

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LED VE KONVANSİYONEL İŞIK KAYNAKLI YOL
AYDINLATMA ARMATÜRLERİNİN İŞIKSAL, ELEKTRİKSEL
VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

RAMAZAN AYAZ

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ADEM ÜNAL**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LED VE KONVANSİYONEL IŞIK KAYNAKLI YOL
AYDINLATMA ARMATÜRLERİNİN IŞIKSAL, ELEKTRİKSEL
VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Ramazan AYZAZ tarafından hazırlanan tez çalışması 28.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Adem ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Adem ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bülent ORAL
Marmara Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İsmail NAKİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Selim AY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nazmi EKREN
Marmara Üniversitesi



Bu çalışma, “2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı” kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’nün 2015-04-02-KAP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Çalışmalarımın her aşamasında desteğini benden esirgemeyen ve kendisiyle çalışmaktan büyük onur duyduğum çok değerli tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Adem ÜNAL'a, çalışmalarımın her aşamasında özverili bir şekilde bana destek olan ve yol gösteren tez izleme komitemdeki kıymetli hocalarım Doç. Dr. Bülent ORAL ve Yrd. Doç. Dr. İsmail NAKİR'e ve bu tez çalışmam boyunca bana yardımlarını esirgemeyen ve destek olan Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma gönülden teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması sırasında “2214-A Doktora Sırası Yurt Dışı Araştırma Bursu” ile tezime destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve 2015-04-02-KAP01 numaralı proje kapsamındaki desteklerinden dolayı Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yurt dışı bursu kapsamında araştırmacı olarak bulunduğum Aalto Üniversitesi Aydınlatma Grubu'ndaki danışman hocam sayın Prof. Dr. Liisa HALONEN'e ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tezimin bir bölümünde yapmış olduğum kullanıcı tercihli çalışmaya gönüllü olarak katılan tüm arkadaşlarıma ayırdıkları kıymetli zamanlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan ve her zaman destekleriyle yanımda olan başta annem ve babam olmak üzere tüm aileme, çalışmalarım sırasında göstermiş olduğu anlayış ile en büyük destekçim olan sevgili eşime ve biricik kızım Hümeyra AYZAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Aralık, 2017

Ramazan AYZAZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xviii
ABSTRACT.....	xxi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	5
1.3 Orijinal Katkı.....	6
BÖLÜM 2	
YOL AYDINLATMASINA GENEL BAKIŞ.....	8
2.1 Radyometrik ve Fotometrik Büyüklükler.....	8
2.1.1 Radyometrik Büyüklükler.....	9
2.1.1.1 Işınım Enerjisi ve Işınım Akısı (Gücü).....	9
2.1.1.2 Işınım Şiddeti.....	9
2.1.1.3 Işınım Düzeyi.....	10
2.1.1.4 Işıma.....	11
2.1.2 Fotometrik Büyüklükler.....	11
2.1.2.1 Işık Akısı.....	12
2.1.2.2 Işık Şiddeti.....	12

2.1.2.3	Aydınlık Düzeyi	13
2.1.2.4	Parıltı.....	13
2.1.3	Diğer Büyüklükler.....	15
2.1.3.1	Işıksal Etkinlik.....	15
2.1.3.2	Renk Sıcaklığı (CCT)	16
2.1.3.3	Renksel Geriverim (CRI).....	17
2.2	Gözün Spektral Hassasiyeti ve Görme Çeşitleri	17
2.3	Yol Yüzeyinin Yansıtma Özellikleri	19
2.4	Yol Aydınlatması Kalite Kriterleri.....	23
2.4.1	Hesap Alanı.....	23
2.4.2	Ortalama Parıltı (L_{ort})	24
2.4.3	Ortalama Parıltı Düzgünlüğü (U_o)	24
2.4.4	Boyuna Parıltı Düzgünlüğü (U_1)	25
2.4.5	Bağıl Eşik Artışı (TI).....	25
2.4.6	Çevreleme Oranı (SR)	26
2.5	Standart ve Önerilere Göre Yol Aydınlatma Sınıfları.....	26
2.6	Yol Aydınlatmasında Kullanılan Işık Kaynakları.....	30
2.6.1	Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Lambalar	30
2.6.2	Metal Halide Lambalar	31
2.6.3	LED Lambalar	31

BÖLÜM 3

FARKLI SPEKTRUMLARIN YOL KAPLAMALARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....	33
3.1 Işık Kaynakları ve Yol Kaplama Numuneleri	33
3.2 Ölçüm Düzeneği.....	36
3.3 Ölçüm Sonuçları.....	38
3.3.1 TMA1 Kaplaması.....	38
3.3.2 TMA2 Kaplaması.....	43
3.3.3 TMA3 Kaplaması.....	47
3.3.4 TMA5 Kaplaması.....	51
3.3.5 TMA7 Kaplaması.....	53
3.3.6 TMA8 Kaplaması.....	54
3.3.7 TMA9 Kaplaması.....	55
3.3.8 TMA13 Kaplaması.....	57
3.3.9 BA14 Kaplaması.....	58

3.3.10 NA15 Kaplaması.....	59
3.3.11 TMA16 Kaplaması.....	60
3.3.12 KA17 Kaplaması.....	62
3.4 Sonuçlar	63
BÖLÜM 4	
YOL AYDINLATMASINDA FARKLI SPEKTRUMLARIN SİS KOŞULLARINDA İNCELENMESİ	65
4.1 Farklı Spektrumların Geçirgenliklerinin Sis Koşullarında İncelenmesi	65
4.1.1 Deneysel Sonuçlar.....	66
4.2 Sisli Farklı Spektrumlar Altında Hedef Görülebilirliği Üzerine Etkisinin İncelenmesi	69
4.2.1 Ölçüm Düzenegi	70
4.2.2 Ölçüm Sonuçları	73
BÖLÜM 5	
LED VE KONVANSİYONEL İŞIK KAYNAKLI YOL AYDINLATMA ARMATÜRLERİNİN ELEKTRİKSEL AÇIDAN İNCELENMESİ	76
5.1 Ölçüm Sistemi ve Numuneler	77
5.2 Ölçüm Sonuçları.....	77
BÖLÜM 6	
LED VE KONVANSİYONEL İŞIK KAYNAKLI YOL AYDINLATMA ARMATÜRLERİNİN EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ.....	85
6.1 LED ve Konvansiyonel İşık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürlerinin Enerji Maliyeti Açısından İncelenmesi	85
6.1.1 Ölçüm Ekipmanı ve Fotometrik Veri.....	85
6.1.2 DIALux Yol Modeli.....	88
6.1.2.1 Durum 1: 150W YBSB Armatür ile 105W LED Armatürün Karşılaştırılması	88
6.1.2.2 Durum 2: 150W MH Armatür ile 80W LED Armatürün Karşılaştırılması	90
6.1.3 Enerji Maliyetleri ve Sonuçlar	91
6.2 Ülkemizde Kullanılan M1 ve M2 Yol Aydınlatma Sınıfı Armatürlerin Ömür Maliyet Analizi.....	93
6.2.1 Yöntem ve Yol Modellerinin Tasarım Hesaplamaları	94
6.2.2 Ölçüm Ekipmanı ve Fotometrik Veri.....	95
6.2.3 DIALux Aydınlatma Tasarım Programı Yardımıyla Tasarım Hesaplamaları	96

6.2.3.1	M2 Aydınlatma Sınıfı için Yol Tasarımı	96	
6.2.3.2	M1 Aydınlatma Sınıfı için Yol Tasarımı	97	
6.2.3.3	Yol Tasarım Hesaplama Sonuçları	98	
6.2.4	Ömür Maliyet Analizi (ÖMA)	100	
6.2.5	Maliyet Analiz Sonuçları.....	104	
6.3	Sonuçlar	105	
BÖLÜM 7			
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER			107
KAYNAKLAR			112
EK-A			
FARKLI YOL KAPLAMALARINA AİT BAĞIL SPEKTRAL YANSIMA GRAFİKLERİ.....			118
EK-B			
ARMATÜRLERİN IŞIK DAĞILIM EĞRİLERİ.....			134
ÖZGEÇMİŞ			136

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
N_p	Armatür fiyatı
P_i	Armatür gücü
N_{mp}	Armatür montaj fiyatı
h	Armatür montaj yüksekliği
H	Armatür montaj yüksekliği
N	Armatür sayısı
t_o	Armatürün günlük çalışma süresi
E_v	Aydınlık düzeyi
S1	Aynasal faktör
S2	Aynasal faktör
S	Aynı sıradaki armatürler arasındaki mesafe
MF	Bakım faktörü
S	Bir saat içinde bakımı yapılan armatür sayısı
E_p	Birim enerji fiyatı
D	Boylamasına yöndeki noktalar arasındaki mesafe
U_1	Boyuna parıltı düzgünlüğü
S_n	Çalışan işçi sayısı
SR	Çevreleme oranı
s	Direk açıklığı
P_p	Direk fiyatı
P_{mp}	Direk montaj fiyatı
P	Direk sayısı
θ	Düzlem açısı
e	Enflasyon oranı

d	Enine yöndeki noktalar arası mesafe
TI	Eşik artışı
i	Faiz oranı
γ	Gelen ışığın yüzey normali ile yaptığı açı
β	Gözlemcinin düşey düzlemi ve gelen ışığın düşey düzlemi arasındaki açı
$V(\lambda)$	Gözün fotopik spektral hassasiyeti
$V'(\lambda)$	Gözün skotopik spektral hassasiyeti
t_d	Günlük çalışma süresi
S_p	Günlük işçi ücreti
F_p	Günlük yakıt ücreti
N	Hesaplama noktalarının sayısı
S_{1w}	Islak durumda aynasal faktör
Q_{ow}	Islak durumda ortalama parıltı faktörü
Φ_v	Işık akısı
I_v	Işık şiddeti
Φ_e	Işınım akısı (gücü)
E_e	Işınım düzeyi
Q	Işınım enerjisi
I_e	Işınım şiddeti
r	İndirgenmiş parıltı katsayısı
J	Joule
C_p	Kablo fiyatı
C_{mp}	Kablo montaj fiyatı
C	Kablo uzunluğu
P	Kaynağın gücü
e	Kaynağın ışıksal etkinliği (etkinlik faktörü)
θ	Kol açısı
oh	Konsol boyu
L_p	Lamba fiyatı
L_{mp}	Lamba montaj fiyatı
L	Lamba sayısı
W_{LED}	LED armatürün tükettiği güç
L_{max}	Maksimum parıltı
L_{min}	Minimum parıltı
L_{ort}	Ortalama parıltı

U_o	Ortalama parıltı düzgünlüğü
Q_o	Ortalama parıltı faktörü
L_v	Örtü parıltısı
L_v	Parıltı
q	Parıltı faktörü
R_a	Renksel geriverim indeksi
T_c	Renk sıcaklığı
W_L	Şerit genişliği
Ω	Uzay açısı
R	Yarıçap
α	Yatay düzlemden gözlemci açısı
s	Yay uzunluğu
Y_{C_p}	Yer altı kablosu fiyatı
$Y_{C_{mp}}$	Yer altı kablosu montaj fiyatı
Y_C	Yer altı kablosu uzunluğu
k	Yıl
δ	Yol eksenine ile gözlemcinin düşey düzlemi arasındaki açı
W_{YBSB}	Yüksek basınçlı sodyum buharlı armatürün tükettiği güç
K_m	1 watt ışıma gücünde meydana gelen ışık akısı

KISALTMA LİSTESİ

ADT	Ağırlık değerlerinin toplamı
BA	Beton asfalt
CCT	Renk sıcaklığı (Correlated color temperature)
CIE	Uluslararası aydınlatma komisyonu
CRI	Renksel geriverim indeksi (Color rendering index)
EC	Enerji maliyeti
HPS	Yüksek basınçlı sodyum (High Pressure Sodium)
IC	Kurulum maliyeti
KA	Kauçuk asfalt
LED	Işık yayan diyot (Light emitting diode)
MC	Bakım maliyeti
MH	Metal halide
MŞD	Maliyetin şimdiki değeri
NA	Normal asfalt
ÖMA	Ömür maliyet analizi (LCCA, Life cycle cost analysis)
RGB	Kırmızı yeşil mavi (Red green blue)
SGD	Spektral güç dağılımı
SPD	Spektral güç dağılımı (Spektral power distribution)
SV	Hurda değeri
TC	Toplam maliyet
THD	Toplam harmonik distorsiyonu
TMA	Taş mastik asfalt
YBCB	Yüksek basınçlı cıva buharlı
YBSB	Yüksek basınçlı sodyum buharlı
YDD	Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA, Life cycle assessment)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Düzlem ve uzay açısı kavramları.....	10
Şekil 2.2 dA alanına sahip bir yüzeye gelen ışınım akısı.....	11
Şekil 2.3 Bir yüzeyden gelen ya da çıkan ışınım.....	11
Şekil 2.4 Fotometrik büyüklüklerin birbiriyle ilişkisi	14
Şekil 2.5 CIE renk diyagramı	17
Şekil 2.6 İnsan gözünün spektral hassasiyet eğrileri	18
Şekil 2.7 Koni ve çubuk hücrelerinin spektral hassasiyet eğrisi	19
Şekil 2.8 Yol geometrisi ve açılar.....	20
Şekil 2.9 Hesap alanı ve hesaplama noktaları	23
Şekil 3.1 YBSB, MH ve LED spektrumları a)Ra: 55 b)Ra: 75 c)Ra: 95.....	34
Şekil 3.2 Asfalt tabakaları	35
Şekil 3.3 Yol kaplama numuneleri	36
Şekil 3.4 a) Ölçüm düzeneği b) Yol geometrisindeki açılar	37
Şekil 3.5 TMA1 kaplama için YBSB ve MH lambanın spektral yansımaları	38
Şekil 3.6 TMA1 için aynı CRI farklı CCT SPD'lerde spektral yansımalar	39
Şekil 3.7 TMA1 için aynı CCT farklı CRI SPD'lerde spektral yansımalar	40
Şekil 3.8 TMA1 için yüksek aydınlık düzeyinde spektrumların bağıl parıltıları	41
Şekil 3.9 TMA1 için düşük aydınlık düzeyinde farklı koşullarda bağıl parıltılar	42
Şekil 3.10 TMA1 için kuru koşullarda farklı aydınlık düzeyleri için bağıl parıltılar	42
Şekil 3.11 TMA1 için ıslak koşullarda farklı aydınlık düzeyleri için bağıl parıltılar	43
Şekil 3.12 TMA2 kaplama için YBSB ve MH lambanın spektral yansımaları	43
Şekil 3.13 TMA2 için aynı CRI farklı CCT SPD'lerde spektral yansımalar	44
Şekil 3.14 TMA2 için aynı CCT farklı CRI SPD'lerde spektral yansımalar	45
Şekil 3.15 TMA2 için yüksek aydınlık düzeyinde spektrumların bağıl parıltıları	46

Şekil 3.16	TMA2 için düşük aydınlık düzeyinde farklı koşullarda bağlı parıltılar	46
Şekil 3.17	TMA2 için kuru koşullarda farklı aydınlık düzeylerinde bağlı parıltılar	47
Şekil 3.18	TMA2 için ıslak koşullarda farklı aydınlık düzeylerinde bağlı parıltılar	47
Şekil 3.19	TMA3 kaplama için YBSB ve MH lambanın spektral yansımalar	48
Şekil 3.20	TMA3 için aynı CRI farklı CCT SPD'lerde spektral yansımalar	48
Şekil 3.21	TMA3 için aynı CCT farklı CRI SPD'lerde spektral yansımalar	49
Şekil 3.22	TMA3 için yüksek aydınlık düzeyinde spektrumların bağlı parıltıları	50
Şekil 3.23	TMA3 için düşük aydınlık düzeyinde farklı koşullarda bağlı parıltılar	50
Şekil 3.24	TMA3 için kuru koşullarda farklı aydınlık düzeylerinde bağlı parıltılar	51
Şekil 3.25	TMA3 için ıslak koşullarda farklı aydınlık düzeyi değerlerinde bağlı parıltılar	51
Şekil 3.26	Farklı yol kaplamalarının aydınlatılması için en uygun spektrumlar	64
Şekil 4.1	YBSB ve MH lambanın yüksek aydınlık düzeyinde geçirgenlikleri	66
Şekil 4.2	Aynı CCT farklı CRI spektrumların yüksek aydınlık düzeyinde geçirgenlikleri	67
Şekil 4.3	Aynı CRI farklı CCT spektrumların yüksek aydınlık düzeyinde geçirgenlikleri	67
Şekil 4.4	Farklı aydınlık düzeylerinde geçirgenlikler a)YBSB, b)MH	68
Şekil 4.5	Farklı aydınlık düzeylerinde geçirgenlikler a)3000K_SPD5, b)6000K_SPD4	69
Şekil 4.6	Işık kaynaklarının spektral güç dağılımı	70
Şekil 4.7	Test ölçüm düzeneği.....	71
Şekil 4.8	Hedeflerin bağlı parıltıları	72
Şekil 4.9	Beyaz renkli hedef için reaksiyon süreleri	73
Şekil 4.10	Kırmızı renkli hedef için reaksiyon süreleri	74
Şekil 4.11	Sarı renkli hedef için reaksiyon süreleri	74
Şekil 5.1	Elektriksel veri ölçüm düzeneği.....	77
Şekil 5.2	150W A YBSB ışık kaynaklı armatürlere ait harmonik bileşenler ve THD.....	80
Şekil 5.3	150W B YBSB ışık kaynaklı armatürlere ait harmonik bileşenler ve THD.....	80
Şekil 5.4	150W YBSB ve MH ışık kaynaklı armatürlerin THD değerleri	82
Şekil 5.5	250W YBSB ve MH ışık kaynaklı armatürlerin THD değerleri	82
Şekil 5.6	LED armatürlerin harmonik bileşenleri	83
Şekil 6.1	(C,Y) düzleminde yol armatürünün koordinatsal olarak gösterimi	86
Şekil 6.2	Gonyofotometre düzeneği	87

Şekil 6.3	Işık dağılım eğrileri, a)150W YBSB b)150W MH c)90W LED d)105W LED	87
Şekil 6.4	Tasarlanan yol modeli	88
Şekil 6.5	150W YBSB armatür için yol yüzeyindeki ışık dağılımı.....	89
Şekil 6.6	105W LED armatür için yol yüzeyindeki ışık dağılımı	90
Şekil 6.7	150W MH armatür için yol yüzeyindeki ışık dağılımı	91
Şekil 6.8	80W LED armatür için yol yüzeyindeki ışık dağılımı	91
Şekil 6.9	Kullanılan yöntemle ait blok diyagramı	94
Şekil 6.10	M2 aydınlatma sınıfı için yol geometrisi.....	97
Şekil 6.11	M1 aydınlatma sınıfı için yol geometrisi.....	98
Şekil 6.12	MŞD yöntem diyagramı	100



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Radyometrik ve fotometrik büyüklükler	15
Çizelge 2.2 Işık kaynaklarının etkinlik ve verimlilik değerleri	16
Çizelge 2.3 Yol yüzey sınıfları için sınıflandırma sistemi	22
Çizelge 2.4 CIE 115-2010'a göre yol tanımları ve aydınlatma sınıfları	27
Çizelge 2.5 CIE 115-2010'a göre M aydınlatma sınıfını belirlemede kullanılan parametreler	28
Çizelge 2.6 Türkiye'deki yolların aydınlatma sınıfları	29
Çizelge 2.7 Türkiye için parıltı değerine bağlı yol aydınlatma kriterleri	29
Çizelge 3.1 SPD'lerin ışıksal değerleri	35
Çizelge 4.1 Sis yoğunluğunun doğruluğunu belirlemek için örnek ölçüm sonuçları ...	66
Çizelge 5.1 Konvansiyonel armatürlerin ölçülen güç ve güç faktörü değerleri	78
Çizelge 5.2 Lamba gücüne göre balast kaybı	79
Çizelge 5.3 LED armatürlerin ölçülen güç ve güç faktörü değerleri	79
Çizelge 5.4 Aydınlatma ekipmanları için maksimum izin verilen harmonik akımlar ..	79
Çizelge 6.1 Kullanılan armatürlerin elektriksel ve fotometrik verileri	88
Çizelge 6.2 Durum 1 için aydınlatma düzeni değerleri ve yol aydınlatma kriterleri	89
Çizelge 6.3 Durum 2 için aydınlatma düzeni değerleri ve yol aydınlatma kriterleri	90
Çizelge 6.4 Km başına harcanan güç ve kullanılan direk sayısı	92
Çizelge 6.5 Durum 1 ve 2 için maliyet analizi.....	93
Çizelge 6.6 Konvansiyonel armatürlerin fotometrik değerleri	95
Çizelge 6.7 LED armatürlerin fotometrik değerleri	96
Çizelge 6.8 M2 aydınlatma sınıfı için tasarım hesabı sonuçları	98
Çizelge 6.9 M1 aydınlatma sınıfı için tasarım hesabı sonuçları	99
Çizelge 6.10 M2 aydınlatma sınıfında ÖMA için kullanılan armatürlerin özellikleri ..	101
Çizelge 6.11 M1 aydınlatma sınıfında ÖMA için kullanılan armatürlerin özellikleri ..	101

Çizelge 6.12 M2 aydınlatma sınıfı için net şimdiki toplam maliyetler	104
Çizelge 6.13 M1 aydınlatma sınıfı için net şimdiki toplam maliyetler	105



LED VE KONVANSİYONEL İŞIK KAYNAKLI YOL AYDINLATMA ARMATÜRLERİNİN İŞIKSAL, ELEKTRİKSEL VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Ramazan AYZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Adem ÜNAL

Günümüzde, artan enerji tüketimine bağlı olarak fosil yakıtlar azalmakta, küresel ısınma ve karbon emisyonları giderek artmaktadır. Bu nedenle enerji verimliliği ve enerji tasarrufu alanında yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır. Aydınlatmanın dünyada elektrik enerjisinin önemli bir tüketim alanı olmasından dolayı, bu alandaki enerji verimliliği iyileştirmeleri toplam enerji tüketiminde belirgin azalmalara neden olabilecek potansiyeldedir. Aydınlatma alanında da gelişen teknolojiye paralel olarak yeni nesil ürünler ortaya çıkmakta ve mevcut sistemlerde iyileştirmeler yapılmaktadır.

Gelişmekte olan bir toplum, ilerleyen teknoloji ve artan enerji tüketimiyle birlikte trafik yükü de giderek artmaktadır. Trafik, gündüz saatlerinin yanı sıra gün ışığından yararlanamadığımız gece saatlerinde de oldukça yoğun bir şekilde devam etmektedir. Gündüzleri gün ışığından yararlandığımız ortamlarda, gece yeterli ve uygun bir aydınlatmanın yapılması oldukça önemlidir. Gece meydana gelen kazaların büyük bir kısmı yetersiz aydınlatmadan kaynaklı görme problemlerinden meydana gelmektedir. Bu nedenle trafik kazalarının azaltılması, sürücü konforunun ve sürüş güvenliğinin sağlanması için optimum yol aydınlatmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Optimum yol aydınlatmasının ekonomik açıdan değerlendirilmesi yanında, görüş performansını etkileyen yol yüzeyi yansıtma özelliklerinin de farklı koşullar altında incelenmesi önemlidir.

Her aydınlatmada olduğu gibi yol aydınlatmasında da kullanılacak ortama en uygun ışık kaynağının ve armatürün seçilmesi oldukça önemlidir. Işık kaynağının nihai ışık çıktısı, ışık dağılım eğrisi, tasarım hesapları, renksel geriverimi, renk sıcaklığı vb. etkenler dikkate alınmadan yapılan aydınlatmalarda sürücünün görüş alanı içerisinde sürüş konforunu ve güvenliğini olumsuz yönde etkileyecek durumların ortaya çıkması kaçınılmaz olmaktadır. Yağmur ve sis gibi hava koşullarında ve ayrıca yüksek ve düşük aydınlık düzeyinde ışık kaynaklarının yol yüzeylerinde oluşturdukları parıltı dağılımı, ortalama parıltı düzgünlüğü ve görülebilirlik gibi değerler değişiklik göstermektedir. Bu nedenle bu koşullar için her bir armatür ve ışık kaynağı ışık kalitesi açısından incelenerek her bir ortam için uygun yol aydınlatma armatürlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, Işık Yayan Diyot (LED) ve konvansiyonel ışık kaynaklı yol aydınlatma armatürleri (Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı (YBSB) ve Metal Halide (MH)) farklı koşullar altında ışıksal, elektriksel ve ekonomik açıdan incelenmiştir.

Işıksal olarak, konvansiyonel ışık kaynakları ve farklı spektrumlara sahip LED ışık kaynaklarının yol kaplamalarının yansıma özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu etkiler yüksek ve düşük aydınlık düzeyinde ve yağmurlu ve sisli hava koşullarında incelenmiş olup her bir kaplama türü için ışıksal açıdan en uygun spektrumlar ortaya konulmuştur. Ayrıca yol aydınlatmasında kullanılan spektrumların değişen sis yoğunluğunda geçirgenlikleri incelenmiş ve bu hava koşullarında farklı spektrumlar altında sisin hedef görülebilirliği üzerine etkisi, kullanıcı tercihli testler neticesinde ortaya konulmuştur. Sonuçlar, agregaların renginin, açıklık ve koyuluğunun kaplamaların yansıtma özellikleri üzerine önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Ölçülen kaplamaların çoğunda spektral bağıl yansıma, kısa dalga boylarına göre uzun dalga boylarında daha yüksek çıkmıştır. Farklı renk sıcaklığı (CCT) ve renksel geriverime (CRI) sahip LED spektrumlarında yansıma özellikleri üzerine etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, değişen hava koşullarında ve aydınlık düzeyi seviyelerinde kaplamalar üzerindeki parıltı değişim oranlarının spektrumlara göre değiştiği görülmüştür. Sisli hava koşullarında da spektrumların geçirgenliklerinin birbirinden farklı olduğu ve kullanıcıların bu koşullarda cisimlere verdiği tepki sürelerinin renk ve spektruma göre değiştiği görülmüştür.

Elektriksel olarak, LED ve konvansiyonel ışık kaynaklı yol aydınlatma armatürlerinin farklı durumlar için güç, güç faktörü ve harmonik ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar yol aydınlatma teknik şartnameleri ve standartlar açısından karşılaştırılarak ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, çeşitli firmalardan temin edilen farklı yol aydınlatma sınıflarına ait konvansiyonel armatürlerde aynı ışık kaynağı kullanılması durumunda, harmonik bileşenleri ve Toplam Harmonik Distorsiyon değerleri (THD) birbirinden farklı değerlere sahip olup standartlarda belirtilen limit değerleri aştığı görülmüştür. Benzer şekilde aynı armatürde aynı teknolojiye sahip farklı ışık kaynaklarının kullanılması harmonik değerlerini değiştirmektedir. LED armatürlerde ise her ne kadar harmonik bileşen değerleri limit değerleri sağlamış olsa da, hiçbir LED armatür THD değeri TEDAŞ şartnamesinde belirtilen limit değeri sağlamadığı görülmüştür.

Ekonomik olarak, ilk önce mevcut bir yol aydınlatmasında YBSB ve MH ışık kaynaklı armatürlerin LED armatürler ile değiştirilmesi durumunda enerji maliyetleri karşılaştırılarak analiz edilmiştir. İkinci olarak, tüm maliyetler (kurulum, enerji ve bakım maliyetleri) ve hurda değerleri dikkate alınarak LED ve konvansiyonel armatürlerin ömür maliyet etkinlikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, M2 yol aydınlatma sınıfında LED armatürlerin YBSB ve MH armatürlerle değiştirilmesi durumunda sırasıyla %36,6 ve %51,1 oranında enerji tasarrufu sağlandığı görülmüştür. Ayrıca geri

dönüşüm sürelerinin de sırasıyla 13,4 ve 9,3 yıl olduğu belirlenmiştir. LED ve konvansiyonel armatürler için yapılan ömür maliyet analizleri göstermiştir ki, M2 yol sınıfı için LED ve YBSB armatürlerin toplam maliyetleri hemen hemen aynı iken MH armatürün toplam maliyeti diğerlerinden daha yüksek olmaktadır. M1 yol sınıfı için ise LED armatürün toplam maliyetinin konvansiyonel armatürlerin her ikisinden de daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yol aydınlatması, LED ve konvansiyel armatür, ömür maliyet analizi, farklı hava koşulları



ABSTRACT

INVESTIGATION OF ROAD LIGHTING LUMINAIRES WITH LED AND CONVENTIONAL LIGHT SOURCE IN TERMS OF LUMINOUS, ELECTRICAL AND ECONOMIC

Ramazan AYZ

Department of Electrical Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Adem ÜNAL

Today, due to increased energy consumption, fossil fuels are decreasing, global warming and carbon emissions are increasing. As a result, the studies related with energy efficiency and energy conservation gain importance. As one of the most important consumption area in the world, lighting has to potential to host significant reduction in total energy consumption by the help of improving energy efficiency. Therefore, new generation products and improvements for the existing systems are of interest of the market.

Participation of the people to the traffic is increasing with a developing society, advancing technology and increasing energy consumption. Traffic jams get very intense especially at night times when the daylight is not available. It is very important to have adequate lighting on the environments where are used in day light. The most of the accidents happen in the night because of the problems arising from restrictive sight. For this reason, optimum road lighting is an important need to reduce traffic accidents, provide driver safety and comfort. In addition to economically assessing the optimum road lighting, it is also important to study road surface reflectance characteristics that affect visibility performance under different conditions.

The choice of the most suitable light source and luminaire has importance for road lighting as it is in every lighting. When lighting designs are made without taking into consideration factors such as the luminous flux of the light source, the light distribution

curve, the design calculations, the color rendering, the color temperature, it is inevitable that the driving comfort within the field of view of the driver and the situations that will affect the safety in a negative way. Parameters such as luminance distribution, average luminance uniformity and visibility vary in different weather conditions such as rain and fog, as well as on different road surfaces of light sources at high and low illuminance levels. For this reason, it is necessary to determine the appropriate road lighting luminaires for each environment by examining the light quality of each luminaire and light source for these conditions.

In this thesis, Light Emitting Diode (LED) and other luminaires with conventional light source (High Pressure Sodium (HPS) and Metal Halide (MH)) have been investigated in terms of luminous, electricity and economics under different conditions.

The effects of the reflection properties of the road coverings of conventional light sources and LED light sources with different spectra have been examined in luminous. These effects were investigated separately considering different illuminance levels and different weather conditions, and the best spectra for each pavement type were presented in terms of luminous. In addition, the different spectra used in road lighting have been examined for their permeability in varying fog densities and the effect of these conditions on fog visibility under different spectra (foggy weather conditions) has been demonstrated in the context of user preference tests. The results showed that the color, lightness and darkness of the aggregates had a significant effect on the reflection properties of the pavements. In the majority of the measured pavements, the long wavelength was higher than the short wavelength of the relative spectral reflection. It has been shown that LED spectrums with different color temperature and color rendering index have an effect on reflection properties. It has also been observed that the change in the luminance of the pavements under varying weather conditions and at the level of illuminance changes under the spectra. In foggy weather conditions, the transmittance of the spectra changed and the response times of the users to these conditions were different according to their colors and spectra.

Electrical power for different situations of LED and conventional light source lighting luminaire are obtained by considering power factor and harmonic measurements, road lighting technical specifications and standards. According to results, when the same light source has been used for the conventional lighting luminaire that belongs to different companies from different classes, harmonic component values and Total Harmonic Distortion (THD) have been very different values and exceeded the limits specified in the standards. Similarly, the use of different light sources with the same technology in the same luminaire greatly changes the harmonic values. Although LED luminaires have provided limit values for harmonic component values, it has been found that no LED luminaires provide the specified limit THD value in TEDAŞ conditions.

Economically, energy costs were first analyzed by comparing HPS and MH light source luminaires with LED luminaires in an existing road lighting. Second, the life-cost effectiveness of LED and conventional luminaires are examined and compared, taking into account all costs (installation, energy and maintenance costs) and salvage values. As a result, it was observed that when the LED luminaires were replaced with YBSB and MH luminaires in the M2 road lighting class, energy savings of 36,6% and 51,1% were achieved, respectively. It was also determined that the recycling times were 13,4 and 9,3 years, respectively.

Life cost analysis for LED and conventional luminaires showed that the total cost of the LED and HPS luminaires for the M2 road class is almost the same while the total cost of

the MH luminaire is higher than the others. For the M1 road class, the total cost of the LED luminaire was found to be higher than that of both conventional luminaires

Key words: Road lighting, LED and conventional luminaire, life cycle cost analysis, different weather conditions,



1.1 Literatür Özeti

Dünya çapında artan enerji tüketimine bağlı olarak çevresel etkiler ve enerji güvenliği ciddi problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Küresel olarak, toplam üretilen elektriğin yaklaşık %19'u aydınlatmada harcanmaktadır [1], [2]. Ayrıca, dünya genelinde üretilen elektriğin yaklaşık %3-4'ünün yol aydınlatması için kullanıldığı tahmin edilmektedir [1], [3]. Ülkemizde de genel aydınlatmaya ve yol aydınlatmasına harcanan elektrik enerjisi dünyayla hemen hemen aynı orandadır [4], [5]. Aydınlatmanın dünyadaki elektriğin önemli bir tüketici olmasından dolayı, bu alandaki enerji verimliliği iyileştirmeleri toplam enerji tüketiminde belirgin azalmalara neden olacaktır [6].

Enerji maliyetlerini ve CO₂ emisyonlarını azaltmak için enerji verimli aydınlatma sistemlerine önemli miktarda yatırımlar yapılmaktadır. Geleneksel aydınlatma ürünlerini enerji tasarruflu LED tabanlı aydınlatma ürünleriyle değiştirmek, sera gazı emisyonlarını yılda 670 MT, enerji maliyetlerini ise %50-70 azaltma potansiyeline sahiptir [7]. Birçok çalışma, aydınlatma uygulamalarında en son teknoloji kullanarak yenilenmiş projelerin enerji maliyetlerini %50'ye kadar düşürebileceğini göstermiştir [8], [9], [10], [11].

Gelişmekte olan bir toplum, ilerleyen teknoloji ve artan enerji tüketimiyle birlikte trafik yükü de giderek artmaktadır. Trafik, gündüz saatlerindeki kadar olmasa da gün ışığından yararlanamadığımız gece saatlerinde de oldukça yoğun bir şekilde devam etmektedir [12]. Ayrıca gece meydana gelen trafik kazaları gündüze oranla daha fazla ve daha şiddetli olmaktadır [13], [14]. Bu kazaların büyük bir kısmı görmeden kaynaklanan problemlerden meydana gelmektedir [15]. Yol aydınlatmasının başarılı bir şekilde uygulanması, gece trafik kazalarını önemli ölçüde azaltmaktadır [14], [15], [16], [17]. Bu nedenle trafik kazalarının ve suç oranlarının azaltılması, sürücü konforunun ve sürüş

güvenliğinin sağlanması için optimum yol aydınlatmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Optimum yol aydınlatmasında elektrik ve bakım giderlerinin azaltılması yanında, ışıksal olarak, yol yüzeyindeki ortalama parlılık, parlılık düzgünlüğü, boyuna parlılık düzgünlüğü, eşik artışı ve çevreleme oranı gibi etkenler önemli parametreler olarak dikkate alınmalıdır [10], [18], [19], [20], [21].

Avrupa'da 2006 yılında yaygın olarak kullanılan dış aydınlatma armatür teknolojileri arasında YBSB (%47), Yüksek Basıncılı Cıva Buharlı (YBCB) (%32), Alçak Basıncılı Sodyum Buharlı (ABSB) (%9), floresan (%8) ve Metal Halide (MH) (%3) bulunmaktadır [22], [23]. Eko-tasarım düzenlemeleri kapsamında 2015'den itibaren düşük ışık etkinliklerinden dolayı cıva buharlı lambalar Avrupa pazarında yasaklamıştır [23]. Günümüzde ise en çok kullanılan yol aydınlatma armatürleri YBSB ve MH ışık kaynaklı konvansiyonel armatürler ile LED armatürlerdir [24], [25].

YBSB ışık kaynakları yüksek etkinliğe sahip ancak renksel geriverimleri oldukça yetersizdir. Buna ek olarak, bir YBSB lambanın ortalama ömrü (20 000 saat), LED ışık kaynaklarından daha düşüktür (50 000-100 000 saat olarak genellikle beyan edilir) ve YBSB'lı aydınlatma cihazları, enerji kesintisi ve normal anahtarlama sonrasında kararlı hale ulaşmak için daha uzun bir zamana ihtiyaç duyarlar [6], [26]. Günümüzde yol aydınlatması için YBSB, MH ve LED ışık kaynaklı armatürler en çok tercih edilen armatürler olduğundan, bu teknolojilere sahip aydınlatma sistemlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır.

MH ve LED'ler, kısmen beyaz ışıklarından dolayı daha fazla dikkat çekmektedir. Beyaz ışığın YBSB ışık kaynaklarının ürettiği sarımtırak renkteki ışığa kıyasla daha fazla avantaja sahip olduğu birçok çalışmada ortaya konulmuştur [27], [28], [29], [30], [31]. Gece sürüş koşullarında ışık kaynaklarının spektral güç dağılımı (SGD) yol kullanıcılarının görsel performansını etkilemektedir. Ancak SGD ile görsel performans arasındaki ilişki birçok çalışmada araştırılmış olsa da açıkça bilinmemektedir [32], [33].

LED'ler renk özellikleri, düzgün ışık dağılımı, geliştirilmiş mezopik görme, kontrol edilebilirlik ve düşük çevresel etkiler nedeniyle yol aydınlatmasında geleneksel kaynaklara iyi bir alternatiftir [34], [35], [36]. Aydınlatma armatürünün ömrünü etkilemeksizin enerji tüketimini azaltmak için, yol yüzeyinin parlaklığı, trafik yoğunluğu ve hava koşulları gibi değişikliklere uyum sağlayacak şekilde aydınlık düzeyi kontrol edilebilmektedir [37], [38]. Ayrıca aydınlatılmış bir yolun kilometresi başına LED

armatürlerin çevresel etkisi (asitleştirme, iklim değişikliği, ötrofikasyon (azot ve fosfat artışı), insan toksisitesi (zehirliliği)) 2020 yılına kadar YBSB armatürlere göre % 41 daha düşük olacağı tahmin edilmektedir [39].

Mezopik görme ile desteklenen bazı laboratuvar ve uygulamalı araştırmalarda YBSB lamba ile MH lambalar tekno-ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar görüş performansı ve parlıtlı açısından yol aydınlatma sınıflarına bağlı olarak değişimler göstermektedir. Düşük aydınlatma seviyelerinde MH lambaların YBSB'ya göre daha avantajlı ve ekonomik olduğu ortaya çıkmıştır [10].

Yapılan yol aydınlatma tasarımlarında yol yüzeyi parlıtları belirli yol tipleri için kuru ortama göre belirlenmektedir [20]. Ancak değişen hava koşullarında yol yüzeyinin yansıma özellikleri farklılık göstermektedir. Örneğin, karlı yollardaki parlıtlı değeri normal kuru yollara göre daha yüksekken bir de yol aydınlatmasına ek olarak araç farları da yolu aydınlattığında bu durum sürücü için kamaşma ve görme azlığı gibi rahatsız edici durumları ortaya çıkarabilmektedir [14]. Aynı şekilde ıslak yol yüzeylerinin parlıtlı dağılımı kuru yollara göre daha değişken olmaktadır. Ayrıca düşük aydınlık düzeyinde ıslak zeminlerin parlıtlı değeri kuru ortama göre çok daha düşük olabilmektedir. Bu da parlıtlı düzgünlüğünü değiştirmekte ve kötü sürüş koşullarının oluşmasına neden olmaktadır [14], [26].

Yol aydınlatmasının uygun renksel geriverime sahip bir ışık kaynağı ile yapılması durumunda, renklerin hedefin (cismin) görülebilirliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bu nedenle MH lambaların YBSB lambalara kıyasla renklerin hedef görülebilirliği üzerinde daha belirgin bir etkisi söz konusudur. RGB (kırmızı, yeşil ve mavi) renkteki cisimlerin MH ve YBSB lambalarla aydınlatılması durumunda bağlı parlıtlı değerlerinin MH lamba ile aydınlatılması durumunda daha yüksek olduğu görülmüştür [31]. Yol kaplamalarında kullanılan agregaların renk ve parlaklıklarının da kaplamanın yansıtma özellikleri ve yol aydınlatma performansı üzerinde önemli bir etkisi mevcuttur. Aynı kaplamanın farklı spektruma sahip ışık kaynakları ile aydınlatılması durumunda kaplamanın yansıma özellikleri farklılık göstermektedir [31].

Cisim ile yol yüzeyi arasındaki parlıtlı farkının düşük olduğu yol aydınlatmalarında renk farklılıkları nesnelere fark edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. LED ile aydınlatılan yolda renkli ve renksiz cisimlerin görülebilirliğinin YBSB lamba ile aydınlatılana göre

daha iyi olduğu görülmüştür. Yani ışık renginin görülebilirlik üzerine önemli bir etkisi olduğu görülmektedir [24].

Ülkemizde, güneşli ve yağmurlu hava koşullarında meydana gelen kaza oranından sonra en yüksek kaza oranı sisli hava koşullarında meydana gelmektedir [40]. Bu nedenle farklı spektrumların sis altında geçirgenlikleri ve görülebilirliğe etkileri incelenmelidir. Sisli koşullarda ışığın havadaki sis üreten su damlacıkları tarafından tutulması ya da etrafa saçılması nedeniyle zayıf görüş koşullarının oluşmasına neden olmaktadır. Böylece ışığın bir kısmı kaybolur bir kısmı da kullanıcıya doğru yansiyarak genellikle beyaz duvar etkisi olarak bilinen kullanıcının yoldaki detayları görmesini engelleyici bir perde oluşturur [16].

Sis içerisinde saçılma miktarı, sis içerisinden gelen ışığın doğrultusu ile saçılımın gerçekleştiği doğrultu arasındaki açığa bağlı olarak değişmektedir. Bu açının 90°'ye yaklaştığı durumlarda saçılma miktarı minimuma düşmektedir [26]. Sisin sık görüldüğü yerlerde göz hizasında daha alçak aydınlatma direklerinin kullanılması göz seviyesinden daha yukarda ışığın sis içerisinden geçerek meydana getireceği saçılımı ve ışığın absorbe olmasını minimuma indirecektir. Bu şekilde sık aralıklarla kullanılacak aydınlatma direkleriyle görsel aydınlatmayı kuvvetlendirerek görülebilirlik artırılabilir [26].

Farklı renklerdeki LED'lerde sis yoğunluğu değiştikçe ışık geçirgenliği üstel olarak değişim göstermektedir. Farklı dalga boyuna sahip LED ışık kaynaklarının sisli bir ortamda meydana getirdikleri aydınlık düzeyi değerleri farklıdır. Düşük dalga boyuna sahip mavi ve yeşil renkli LED'lerin ışık geçirgenliği yüksek dalga boyuna sahip olan kırmızı LED'lere göre daha yüksektir [41]. Direk monte edilen LED lambalar yol kenarında bulunan yansıtıcı çizgilere göre daha fazla görünür olmaktadır. Japonya'da yapılan bir araştırmada [42] sisli hava koşullarında LED'li işaret levhalarının (şerit düzenleyici, şerit ayırıcı, vb.), zayıf görüş koşullarının söz konusu olduğu gece karanlığında özellikle daha etkili olduğu görülmüştür.

Ömür maliyet analiz yöntemi, bir yatırım kararında en uygun seçimi belirlemek için kullanılır. Bu yöntem, alternatif tesisler arasında en düşük maliyeti belirlemek ve planlanan bir yatırımın karlılığını analiz etmek için uygundur. Böylece ulaşım ve yol aydınlatması gibi alanlarda bir yatırımın karlılığını belirlememize olanak sağlar [43], [44].

Birçok çalışmada, konvansiyonel armatürlerin ÖMA'leri farklı yönleriyle incelenmiştir [10], [27], [45], [46], [47]. Düşük ömür maliyeti, düşük enerji tüketimine (yüksek etkinliğe sahip) ve satın alma maliyetine sahip uzun ömürlü ürünler ile elde edilebilir [48]. Tâhkâmö ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada [47] tahmin edilen ortalama elektrik tüketim fiyatına ve LED armatür etkinlik değerlerine göre farklı senaryolar ortaya koyarak önümüzdeki yıllarda LED armatürlerin geri dönüşüm süreleri azaltılabilmektedir. Ülkemizde yapılan çalışmada, M3 yol sınıfı için kullanılan LED armatürlerin yol aydınlatma kriterlerini karşıladığı ve konvansiyonel armatürlerle karşılaştırılabileceği görülmüştür [46]. Buna ek olarak armatür teknolojilerinin ve yol yapımının çevresel etkileri, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesini (YDD, life cycle assessment) içeren bazı çalışmalarda incelenmiştir [49], [50], [51], [39], [52].

1.2 Tezin Amacı

Yol aydınlatmasında yapılan en büyük yanlışların başında rastgele seçilen ışık kaynakları ve yetersiz yol aydınlatma tasarımları gelmektedir. Ayrıca günümüzde aynı yol aydınlatma sınıfına sahip bir yol boyunca farklı ışık kaynakları ve farklı tip armatürlerin bir arada kullanıldığı yol aydınlatmalarına rastlamamız mümkündür. Yapılan bu yanlışlar neticesinde sürücü görüş alanındaki nesnelere ve hareketleri algılayamamakta, sürüş konforu bozulmakta ve sürüş güvenliğini olumsuz yönde etkileyecek durumların ortaya çıkması kaçınılmaz olmaktadır.

Yol aydınlatma kriterleri kuru yüzeyler için standartlara uygunken; yağmur ve sis gibi farklı hava koşulları ve farklı yol yüzeyleri için bu değerlerin değiştiği görülmektedir. Bu nedenle kullanılan armatürler ışıksal ve elektriksel açıdan ele alındığında standartlarda belirtilen minimum kriterleri sağlamalı ve değişen hava koşullarında bu kriterlerin minimum oranda değişim göstermesi gerekmektedir. Ayrıca ekonomik açıdan da en etkin maliyete sahip armatürlerin belirlenmesi oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında, çeşitli yol aydınlatma sınıflarında kullanılan farklı spektrumlara sahip armatürlerin farklı asfalt kaplama yüzeyleri üzerindeki yansıtma özellikleri incelenmiştir. Bu yansıtma özellikleri hem kuru ve ıslak hava koşullarında hem de yüksek ve düşük aydınlık düzeylerinde ayrı ayrı ele alınmıştır. Ayrıca bu spektrumların sisli hava koşulları altında geçirgenlikleri belirlenmiş ve sisli hava koşullarında farklı spektrumlar altında farklı renkteki cisimlerin görülebilirliği üzerine kullanıcı tercihli bir çalışma yapılmıştır. Aynı zamanda ülkemizde kullanılmakta olan farklı armatürlerin elektriksel

ölçümleri yapılarak standartlara uygunluğu incelenmiştir. Mevcut sistemlerde konvansiyonel armatürlerin LED armatürlerle değiştirilmesi durumunda enerji maliyetleri ve geri dönüşüm süreleri, yeni kurulacak sistemlerde LED ve konvansiyonel armatürlerin detaylı ömür maliyet analizleri ortaya konulmuştur.

Farklı yol kaplamaları için farklı ortam koşullarını dikkate alan, standartlara göre minimum aydınlatma kriterlerini sağlayan ve ekonomik açıdan en uygun ışık kaynağı ve armatürün belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu tez çalışması neticesinde, yol aydınlatmasında yapılacak olan bu iyileştirmelerle enerji verimliliğine ve enerji tasarrufuna önemli ölçüde katkı sağlanacaktır. Böylece ülke ekonomisine ciddi oranda katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca meydana gelebilecek kazaların azaltılması ve taşıt sürücüsü için rahat ve konforlu bir sürüş ortamının oluşturulması çalışmanın en önemli amaçları arasında olacaktır.

1.3 Orijinal Katkı

Bu tez çalışması aşağıda belirtilen yönleriyle literatürdeki mevcut çalışmalardan ayrılmaktadır:

- Kaplamaların yansıtma özellikleri 3000K, 4000K, 5000K ve 6500K renk sıcaklığına sahip ve her bir renk sıcaklığında renksel geriverimi $R_a \sim 55, 75$ ve 95 olan toplam 12 LED spektrum altında incelenmiştir.
- Kaplamaların yansıtma özellikleri belirtilen LED spektrumlar altında hem kuru ve ıslak hava koşullarında, hem de yüksek ve düşük aydınlık düzeylerinde incelenmiştir.
- Ülkemizde kullanılan taş mastik, normal ve kauçuk asfalt kaplamalarının yansıtma özellikleri farklı spektrumlar altında incelenmiştir.
- Farklı spektrumların değişen sis yoğunluğunda yüksek ve düşük aydınlık düzeyleri için geçirgenlikleri ölçülmüştür. Ayrıca bu spektrumlar altında farklı renkteki cisimlerin görülebilirliği kullanıcı tercihli yaklaşımla reaksiyon süresi testi yardımıyla belirlenmiştir.
- Farklı tip armatürlerin ömür maliyet analizinde,
 - Ülkemizde kullanılan LED aydınlatma armatürleri ve geleneksel aydınlatma armatürleri ile lambaların (YBSB ve MH) ışık verileri,

tezdeki sonuçların güvenilirliği açısından firma kataloglarından alınmayıp laboratuvar koşullarında ölçölmüştür.

- DIALux yol aydınlatma programında M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfları için tüm armatür numuneleri yol aydınlatma gereksinimlerine uygunluk açısından incelenmiştir.
- Uzun vadeli ekonomik yatırım (30 yıllık proje ömrü) analizi için net bugünkü değer toplam maliyeti hem enflasyon hem de faiz oranı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Ayrıca bu tez çalışması neticesinde elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler Türkçe literatüre katkı sağlayacak ve Karayolları, Belediyeler ve TEDAş gibi karar vericiler için yol aydınlatma uygulamalarında özgün bir kaynak niteliğinde olacaktır.

YOL AYDINLATMASINA GENEL BAKIŞ

İnsanlar ve araçlar için yolların ışıklandırılması, insanların rahatça gezinebileceği, çevresindeki nesnelere hızlı ve doğru bir şekilde tespit edebileceği çevresel bir ortam oluşturur. Bir sürücü yatay düzleme göre düşünüldüğünde üst ve alt yarı görüş alanlarına sahiptir. Gündüz üst yarı görüş alanı olan gökyüzü alt yarı görüş alanına göre daha aydınlıktır. Gece ise bu durumun tam tersi söz konusudur. Yani üst yarı alan gökyüzü karanlık, alt yarı alan yol aydınlıktır. Bu nedenle sürüş alanı içerisindeki taşıtlar, uyarı işaretleri, engeller vb. cisimler daha zayıf bir kontrast ile görünürler. Bu nedenle sürücülerin görüş algılarını artırmak, sürüş güvenliği, konforunu sağlamak ve yayaların can güvenliği için standartlarda belirtilen kriterleri sağlayan yol aydınlatmasının yapılması oldukça önemlidir.

2.1 Radyometrik ve Fotometrik Büyüklükler

İyi bir aydınlatma tasarımı yapabilmek için kullanılacak lamba ve armatürlerin özelliklerinin iyi bilinmesi önemlidir. Bu lamba ve armatürlerin sahip oldukları özelliklerin bilinebilmesi için de aydınlatmada kullanılan fotometrik ve radyometrik bazı terimlerin bilinmesi gerekir. Optik ölçümlerin en önemli sorunlarından biri insan gözü ile doğrudan ilişkili olan ışık kaynakları ve aydınlatma koşullarının miktar olarak sayısallaştırılmasıdır. Radyometrik nicelikler, basitçe çeşitli dalga boylarındaki radyasyon gücünün toplamını ifade eder ve insan gözünün optik radyasyona duyarlılığını dalga boyuna bağlı olması nedeniyle hesaba katmaz. Fotometrik nicelikler, fotopik ya da skotopik spektral ışık verimliliği fonksiyonu tarafından tanımlanan ağırlık faktörü ile toplamı temsil eder. Böylece fotometrik niceliklerin sayısal değeri doğrudan parlaklık etkisiyle ilgilidir. Bu bölümde aydınlatmada sıkça kullanılan radyometrik ve fotometrik büyüklükler aşağıda tanımlanmıştır.

2.1.1 Radyometrik Büyüklükler

2.1.1.1 Işınım Enerjisi ve Işınım Akısı (Gücü)

Işınım enerjisi (Q), bir kaynağın elektromanyetik radyasyon şeklinde yaydığı toplam enerjiyi ifade eder ve Joule (J) cinsinden ölçülür. Elektromanyetik radyasyonun çifte doğasından dolayı hem fotonlar tarafından taşınan toplam enerji hem de titreşen elektrikli ve manyetik alanlarda bir dalganın taşıdığı toplam enerji olarak görülebilir. Eğer bir ışık kaynağı ampul gibi her yöne düzgün bir şekilde ışık yayıyorsa buna izotropik kaynak denir [53]. Bir kaynaktan birim zamanda yayılan ışınım enerjisinin miktarı ışınım akısı (Φ_e) olarak tanımlanır (2.1):

$$\Phi_e = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

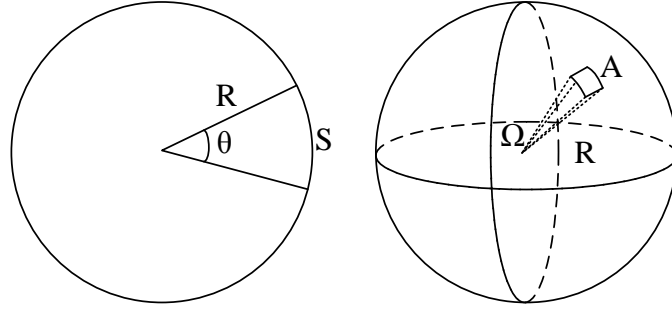
Işınım akısı, ışınım enerjisinin zamana oranı olduğu için birimi J/sn yani Watt'tır. Bu nedenle ışınım akısı ışınım gücü olarak da söylenebilir. Diğer tüm radyometrik ifadeler ışınım gücü ifadesine dayandığı için bu büyüklük önemlidir. Sürekli ve sabit bir ışık çıkışına sahip kaynaklar için ışınım akısı ölçümü yapılırken, bunun aksine yanıp sönen ya da darbeleri kaynaklar için ışınım enerjisi ölçümleri gereklidir [53]. Bir kaynaktan birim dalga boyu aralığında yayılan enerji miktarına spektral ışınım enerjisi, birim dalga boyu aralığındaki ışınım akısına ise spektral ışınım akısı denir. Birimleri sırasıyla J/nm ve W/nm'dir.

2.1.1.2 Işınım Şiddeti

Işınım şiddetini (I_e) tanımlamak için önce düzlem açısı ve uzay açısı ifadelerini bilmemiz gerekir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bir daire düşünürsek, düzlem açısı (θ) bu açının gördüğü yayın uzunluğunun (s) dairenin yarıçapına (R) oranı olarak ifade edilir (2.2).

$$\theta = \frac{s}{R} \quad (2.2)$$

Dairenin çevresi $2\pi R$ olduğundan dolayı tam bir dairenin düzlem açısı 2π 'dir. Düzlem açısı boyutsuzdur ancak birimi radyandır.



Şekil 2.1 Düzlem ve uzay açı kavramları

Daire yerine bir küre olduğunu düşünersek, uzay açısı (Ω) kürenin bir bölümünün alanının (A) o kürenin yarıçapının (R) karesine oranı olarak ifade edilir (2.3). Birimi steradyandır (sr).

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \quad (2.3)$$

Işınım şiddeti, belirli bir yönde birim uzay açıda kaynaktan yayılan ışınım gücü (akısı) olarak tanımlanır (2.4). Birimi W/sr 'dir. Işınım şiddeti kaynağa olan mesafeden bağımsız bir büyüklüktür. Yani iki farklı mesafeye aynı uzay açısı göreceği şekilde iki detektör konulursa her ikisi de aynı ışınım akısını alacağı için ışınım şiddetleri de aynı olacaktır.

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.4)$$

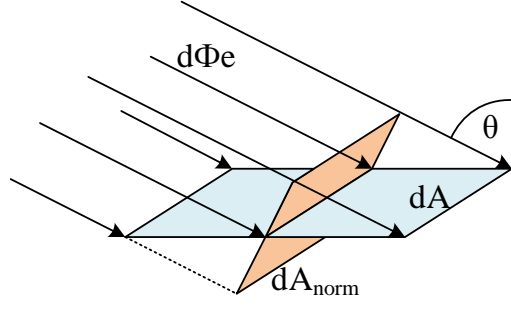
2.1.1.3 Işınım Düzeyi

Işınım düzeyi (E_e), birim alan başına bir yüzeye gelen ışınım akısı olarak ifade edilir (2.5). Birimi W/m^2 'dir.

$$E_e = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2.5)$$

Bu eşitlik ışınım düzeyinin maksimize edildiği ışınım yönüne dik olan dA alanına sahip bir yüzey elemanını ifade eder. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, yüzey genel olarak herhangi bir açıyla ışın yönüne doğru konumlandırılabilir. Bu durumda, (2.5) eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir (2.6).

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \cos\theta = E_e \cos\theta \quad (2.6)$$



Şekil 2.2 dA alanına sahip bir yüzeye gelen ışınım akısı

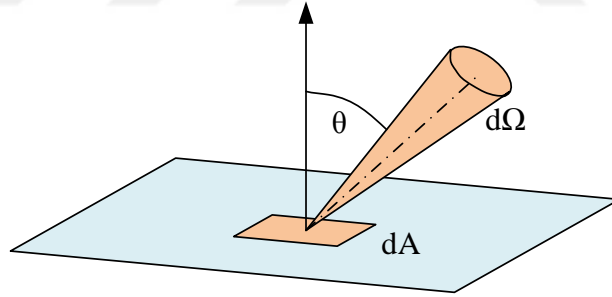
2.1.1.4 Işıma

Bir yüzeyden gelen ya da çıkan koni şeklinde bir ışınımında (Şekil 2.3), ışın yönüne dik birim aydınlatılan alan başına birim uzay açısındaki ışınım akısıdır. Birimi $W/sr.m^2$ dir.

$$L_e = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\theta} \quad 2.7$$

Yüzeyin kendisinin belirtilen yönde dik olduğu özel durumda (2.7) eşitliği aşağıdaki gibi olmaktadır (2.8).

$$L_e = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA} \quad 2.8$$



Şekil 2.3 Bir yüzeyden gelen ya da çıkan ışınım

2.1.2 Fotometrik Büyüklükler

Gözün spektral duyarlılığı dikkate alınarak ışığın yayılımının tanımlanmasıyla ilgilenen optik alanı fotometridir. Işık, gözün spektral hassasiyeti göz önüne alındığında, 380-780 nm'de bir dizi dalga boyuna ait olan elektromanyetik ışımadır. Bu nedenle, ışık için aynı radyometrik büyüklüklerin kullanılması mümkün değildir ve yeni büyüklüklerin tanımlanması gerekir [53].

2.1.2.1 Işık Akısı

Bir ışık kaynağının birim zamanda yaydığı ve gözün spektral hassasiyet eğrisiyle değerlendirilen toplam enerji akısıdır (2.9). Birimi lümen (lm).

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.9)$$

Özel bir ölçü birimi olan bu büyüklük, standart bir havada 555 nm dalga boyuna sahip tek renkli (monokromatik) ışımaya yapan bir kaynağın 1/683 W'lık ışımaya gücüne karşılık gelen lümen olarak adlandırılır. Diğer bir deyişle, 555 nm dalga boyuna sahip monokromatik bir kaynak 1 W'lık ışımaya gücünde 683 lm ışık akısı üretmektedir. Bu tanımdan dolayı, K_m sabiti gözün gündüz görmesine (fotopik görme) ait eğrinin $V(\lambda)$ maksimum noktasına tekabül eden 683 lm/W değerine sahiptir.

Gece görme koşullarında (skotopik görmede), insan gözünün spektral hassasiyetinin $V'(\lambda)$ daha fazla olmasından ve maksimum spektral etkinliğin 555 nm'den 510 nm'ye kaymasından dolayı K'_m sabiti 1700 lm/W değerine sahiptir. İnsan gözünün çok daha az duyarlı olduğu $V(\lambda)=0,107$ (650 nm'de) aynı ışımaya gücünü yayan monokromatik bir ışık kaynağı $0,107 \times 650 = 73,1$ lm'lik ışık akısına sahiptir. Yani kısacası, fotopik görmede 555 nm'den farklı bir dalga boyunda, skotopik görmede ise 510 nm'den farklı bir dalga boyunda 1 W'lık bir ışımaya gücü sırasıyla 683 ve 1700 lm'den daha az ışık akısı meydana getirecektir.

2.1.2.2 Işık Şiddeti

Işık şiddeti belirli bir yönde birim uzay açısı ile yayılan ışık akısı miktarıdır (2.10). Bu nedenle radyometrik büyüklük olan ışınım şiddetinin fotometrik karşılığıdır.

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (2.10)$$

Birimi lm/sr yani kandela (cd)'dır ve fotometrinin temel ölçü birimidir. Işık şiddeti, ışığın bir kaynaktan uzaya nasıl dağıldığını ifade eder. Bu nedenle kaynaktan tüm yönlerde gelen ışık şiddeti değerlerini vektör olarak ortaya koyarsak ilgili kaynağın ışık dağılım eğrisini elde etmiş oluruz. Armatürlerin ışık şiddeti değerleri genel olarak cd/klm cinsinden ifade edilir. Yani bir armatürün belli bir yöndeki ışık şiddeti toplam ışık akısının 1000'e bölümüyle çarpılarak bulunur.

Işık şiddeti ifadesi noktasal kabul edilen ışık kaynakları için geçerli bir tanımdır. Aksi takdirde yani noktasal kabul edilmeyen bir kaynaktan birçok yönde sonsuz sayıda ışık çıkışı söz konusu olacağından ışık şiddeti tanımlanamaz. Noktasal kabul edilmeyen bir ışık kaynağında yani tanımlanan sınır mesafesinden daha yakın mesafeler için ilgili kaynağın ışık akısı tanımlanabilir. Bir kaynağın noktasal kabul edilebilmesi için sınır mesafesinin kaynak boyutunun yaklaşık 10 katı kadar olması gerekir.

2.1.2.3 Aydınlık Düzeyi

Birim yüzeye düşen ışık akısı miktarının dik bileşeni aydınlık düzeyi (E_v) olarak tanımlanır (2.11). Birimi lüks (lm/m^2)'dir. Kaynaktan 1 m uzakta ve dikey olarak 1 m^2 'lik yüzeye düşen ışık akısı 1 lüks olarak adlandırılır. Herhangi bir yüzeydeki bir cismin görülebilirliği bu yüzeyin aydınlık düzeyi ve yansıtma özellikleri ile alakalıdır.

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (2.11)$$

Herhangi bir θ açısındaki aydınlık düzeyini hesaplamak için ise kosinüs teoremi gereği aşağıdaki formül kullanılır.

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \cos\theta \quad (2.12)$$

2.1.2.4 Parlıltı

Parlıltı L_v , belirli bir yönden bakıldığında ışık yayan veya ışığı yansıtan belli bir yüzeyin ölçülebilir fotometrik parlaklığını tanımlar. Yani belirli bir yönde bir yansıtıcı veya yansıtıcı yüzey üzerinde belirli bir konumdan yayılan veya yansıtılan ışık akısını ifade eder. Birimi cd/m^2 'dir.

Bir diferansiyel yüzey elemanı dA tarafından diferansiyel uzay açısı $d\Omega$ elemanı yönünde yayılan ışık akısı,

$$d\Phi_v = L_v \cos\theta dA d\Omega \quad (2.13)$$

Burada $d\Phi_v/d\Omega$ ifadesi yerine ışık şiddeti yazılırsa parlıltı ifadesi,

$$L_v = \frac{dI}{dA \cos\theta} \quad (2.14)$$

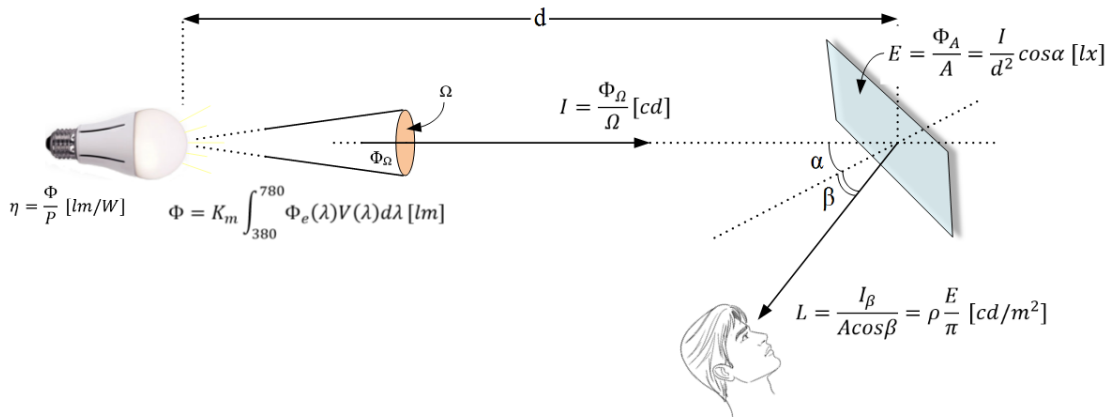
şeklinde ifade edilir. Yani ışık yayan bir yüzeyin bir noktasının yüzeyin normali ile α açısı yapan doğrultudaki parlıltısı, ilgili yüzeyin (dA) o doğrultuda oluşturduğu ışık şiddetinin (dI_α) dA 'nın bu doğrultuya dik düzlemdeki ($dA \cos\theta$) alanına oranının limitidir (2.15).

$$L_{\alpha} = \lim_{dA \cos \theta \rightarrow 0} \frac{dI_{\alpha}}{dA \cos \theta} = \frac{dI_{\alpha}}{dA \cos \theta} \quad (2.15)$$

Parıltıdan söz ederken ilgili yüzeyi, yüzeyin hangi noktasında ve hangi doğrultuya ait olduğunu bilmemiz gerekir. Etrafımızdaki cisimleri görmemiz o cisimlerden gözümüze gelen parıltı sayesinde mümkündür.

Farklı yüzeylere sahip bir ışık kaynağının aynı ışık şiddetine sahip olduğunu düşünürsek küçük yüzeye sahip olanın parıltısı daha büyük olacaktır. Bu parıltı farkı yüzey küçüldükçe insan gözü üzerinde daha güçlü bir his oluşturmaktadır. Bunun en basit örneği, bir ampülü direk gözlemlediğimizde ya da etrafını yarı saydam bir malzemeyle kaplayarak gözlemlediğimiz durumda karşımıza çıkmaktadır. İlk durumda ampulün filamanları çok küçük olduğundan göz kamaştırıcı bir etki meydana getirir ancak ikinci durumda ise bu ampülü doğrudan gözlemek daha uygundur. Bunun nedeni ikinci durumda ampulün etrafını saran yarı saydam malzeme ışık yayan yüzeyi genişlettiği için parıltı değeri sınırlandırılmış olur.

Fotometrik büyüklüklerin birbiriyle olan ilişkisi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Fotometrik büyüklüklerin birbiriyle ilişkisi

Yukarıda anlatılan radyometrik ve fotometrik büyüklükler daha iyi anlaşılabilmesi için birimleri birlikte Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Radyometrik ve fotometrik büyüklükler

Radyometrik Büyüklük	Birimi	Fotometrik Büyüklük	Birimi
Işıma gücü (akısı), Φ_e	W	Işık akısı, Φ_v	lm
Işınım şiddeti, I_e	W/sr	Işık şiddeti, I_e	cd
Işınım düzeyi, E_e	W/m ²	Aydınlık düzeyi, E_v	lüks
Işıma, L_e	W/sr·m ²	Parıltı, L_v	cd/m ²
		Işıksal etkinlik	lm/W

2.1.3 Diğer Büyüklükler

2.1.3.1 Işıksal Etkinlik

İnsan gözü elektromanyetik spektrumun tüm dalga boyunu göremez sadece belirli aralıktaki dalga boylarını görebilmektedir. Aynı zamanda gözün hassasiyeti görünür ışık spektrumunda her bir dalga boyunda farklıdır. Bu durum ilerleyen bölümlerde anlatılacak olan fotopik ve skotopik görme ile alakalı bir durumdur. Bir kaynağın yaydığı ışınımı görülebilir ışığa dönüştürme yeteneğine ışınımın ışıksal etkinliği denir [54]. Matematiksel olarak da, ışık akısının ışınım gücüne oranı olarak ifade edilir. Birimi lm/W'tır.

Bazen, etkinlik faktörü ışık akısının kaynağın tükettiği güce oranı olarak da düşünülebilir. Bu durumda kaynağın ışıksal etkinliği olarak adlandırılır.

$$e = \frac{\Phi}{P} \quad (2.16)$$

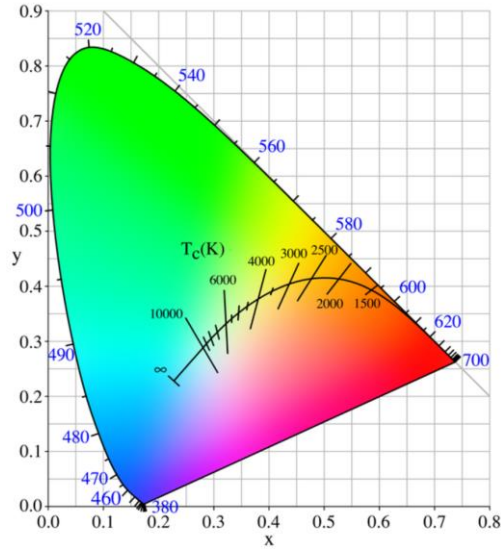
Maksimum ışıksal etkinlik (%100) fotopik görme eğrisinin tepe değerine tekabül eden 683 lm/W, skotopik görmede ise 1700 lm/W değeridir. Farklı ışık kaynaklarının ışıksal etkinlikleri ve verimleri Çizelge 2.2'de verilmiştir [26], [53], [55].

Çizelge 2.2 Işık kaynaklarının etkinlik ve verimlilik değerleri

Işık Kaynağı	Işıksal Etkinlik (lm/W)	Işıksal Verimlilik (%)
Mum	0,3	0,04
100 W tungsten filamanlı lamba	13,8	2
Yüksek basınçlı cıva buharlı lamba	58-78	8,5-11,4
Metal halide	65-115	9,5-17
Yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba	85-150	12-22
Açık basınçlı sodyum buharlı lamba	100-190	15-29
LED	60-260	8,8-38,1
Monokromatik kaynak (555 nm) Teorik olarak max.	683	100

2.1.3.2 Renk Sıcaklığı (CCT)

Siyah bir cisim üzerine gelen tüm radyasyonu emer ve iç ısı dengesinden dolayı absorbe ettiği tüm radyasyonu yayar. Yayılan ışınım sadece siyah cismin sıcaklığına bağlıdır ve bu nedenle sıcaklık arttıkça ışınımın renkliliği kırmızıdan maviye doğru değişir. Gerçekte ideal bir siyah cisim yoktur ancak filamanlı lambalar belirli sıcaklıkta siyah cisme yakın düşünülebilir. CIE'nin renk diyagramında verilen eğri (Şekil 2.5) ışık yayan bir siyah cismin rengini sıcaklığına göre ifade etmek için kullanılır. Bu eğri siyah cisim renk sıcaklığı eğrisi (T_c) olarak bilinir. Yani renk sıcaklığı kavramı siyah cismin rengiyle karşılaştırılarak bir ışık kaynağının Kelvin derece ($^{\circ}K$) olarak renk görünümünü belirtir. Renk sıcaklığı değeri bir ışık kaynağının görünümünün sıcaklık ya da soğukluk ölçüsüdür. Sıcaklık ölçeğinin aksine 3300 K renk sıcaklığının altında olan ışık kaynakları sıcak, 3300 K ile 5300 K arasında olanlar ılık ve 5300 K'nin üzerinde renk sıcaklığına sahip ışık kaynakları soğuk ışık olarak adlandırılır.



Şekil 2.5 CIE renk diyagramı

2.1.3.3 Renksel Geriverim (CRI)

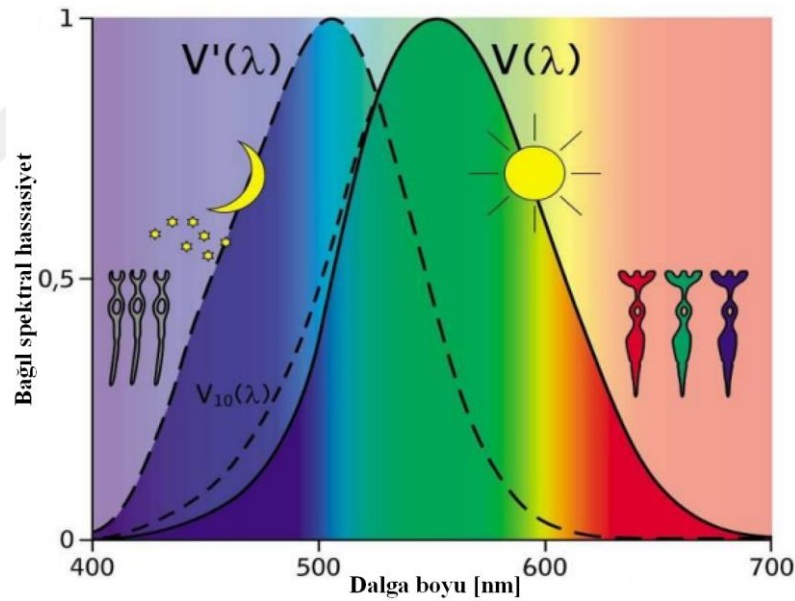
Renksel geriverim (R_a) bir ışık kaynağının çeşitli nesnelerin renklerini ideal veya doğal ışık kaynağına kıyasla doğru bir şekilde ortaya koyabilme kabiliyetinin nicel bir ölçüsüdür. Bir nesnenin rengi, kaynağın nesne üzerine yansıttığı ışığın bir kısmının nesnenin kendisi tarafından yansıtılmasıyla belirlenir. Ancak bazı renkler ya da dalga boyları ışık kaynağı tarafından yayılmayabilir. Örneğin; mavi bir nesne (mavi dalga boyunu yansıtan) sadece sarı dalga boyunda ışımaya yapan alçak basınçlı sodyum buharlı ışık kaynağı tarafından aydınlatılırsa bu nesne koyu gri olarak görünecektir. Yani mavi nesne üzerine mavi dalga boyunda bir ışık gelmeyeceği için hiçbir ışık nesne tarafından yansıtılamayacaktır. Bu nedenle aynı nesne farklı ışık kaynakları ile aydınlatıldığında çok farklı renklerde görülebilmesi mümkündür. Renksel geriverim R_a ile gösterilir. Bu değer azaldıkça ışık kaynağının nesneyi gerçek renginde gösterebilme yeteneği de azalır.

2.2 Gözün Spektral Hassasiyeti ve Görme Çeşitleri

İnsan gözü 380 nm (ultraviyole) ile 780 nm (kızılötesi) arasında meydana gelen ışınları ışığa dönüştürebilir. Hatta bu aralıkta insan gözü doğrusal olmayan bir detektör gibi davranır. Çünkü görünür spektrumun tamamında insan gözü aynı cevabı (tepkiyi) veremez. Ancak bu durum gözlemcinin fizyolojik ve psikolojik durumundan ve çeşitli değişkenlerden dolayı dalga boyu ile değişir [53].

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) 1924 ve 1931 yıllarında kontrollü koşullar altında, yüzlerce gözlemci üzerine bir takım ölçümler yaparak farklı dalga boylarına sahip

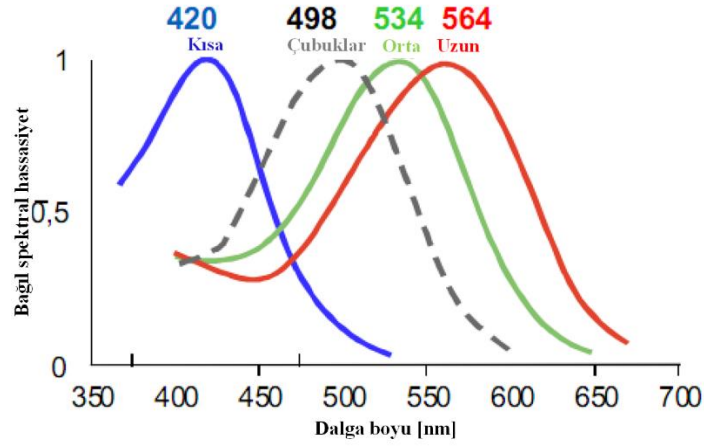
monokromatik ışık kaynaklarının parlaklıklarını görsel olarak eşleştirmelerini isteyerek insan gözünün ışığa duyarlılığını ölçmeyi denemiştir. Bu testlerin istatistiksel sonuçları, dalga boyuyla insan gözü hassasiyetinin değişimini, gündüz görmesinde olduğu gibi yüksek aydınlık düzeyinde (fotopik) ve gece görmesinde olduğu gibi (skotopik) düşük aydınlık düzeyinde iki fonksiyon olarak ifade eder. Bunlar sırasıyla fotopik spektral duyarlılık $V(\lambda)$ ve skotopik spektral duyarlılık $V'(\lambda)$ eğrileridir. Her iki hassasiyet eğrisinin de maksimuma ulaştığı değer 1 ile ifade edilir. Gün ışığı altında, normal gören insan gözü 555 nm'lik dalga boyunda en hassas görmeye sahiptir. Bu nedenle bu dalga boyundaki yeşil ışık diğer dalga boylarındaki ışıklara kıyasla daha yüksek parlaklık etkisi oluşturur. Gece görmesinde ise 510 nm dalga boyunda diğer dalga boylarına göre daha hassas görmeye sahiptir. Bu nedenle gece görmesinde gözün mavi renkte spektral duyarlılığı daha fazladır. Gündüz görmesinden gece görmesine geçildiğinde spektral hassasiyetin bu değişimine Purkinje Etkisi denir. Gündüz ve gece görmesine ait gözün spektral hassasiyet eğrileri Şekil 2.6'da verilmiştir [56].



Şekil 2.6 İnsan gözünün spektral hassasiyet eğrileri

Görme mekanizmasında, gözün retina bölümünde ışığa duyarlı koni ve çubuk foto reseptörler rol oynar. Yüksek aydınlık seviyelerinde (5 cd/m^2 'den büyük) koni hücreleri aktif rol oynar. Fotopik görmeye kırmızı, yeşil ve mavi renge duyarlı koni hücreleri sayesinde renkli görüş mümkündür. Düşük aydınlık seviyelerinde ise ($0,005 \text{ cd/m}^2$ 'den küçük) sadece çubuk hücreleri etkindir. Çubuklar konilere kıyasla ışığa karşı daha yüksek hassasiyete sahiptirler. Bu hücrelerle renk görüşü imkânsızdır. Kısa, orta ve uzun dalga

boyuna duyarlı koni hücrelerinin ve çubuk hücrelerinin hassasiyet eğrileri Şekil 2.7’de verilmiştir [56].



Şekil 2.7 Koni ve çubuk hücrelerinin spektral hassasiyet eğrisi

Yaklaşık 0,005 ile 5 cd/m² arasındaki aydınlık seviyelerinde hem koniler hem de çubuklar etkindir. Bu aydınlık seviyesinde meydana gelen görmeye mesopik görme denir. Mesopik görme aralığında koni ve çubukların retina üzerindeki katkıları değiştiğinden gözün spektral hassasiyeti sabit değildir ve aydınlık seviyesiyle değişmektedir. Mesopik görme aralığında çubukların etkinliği yüksek aydınlık seviyesinden düşük aydınlık seviyesine doğru daha önemli hale gelir. Sonuç olarak, spektral duyarlılık kademeli olarak küçük dalga boyları yönüne yani mavi yönünde kayar.

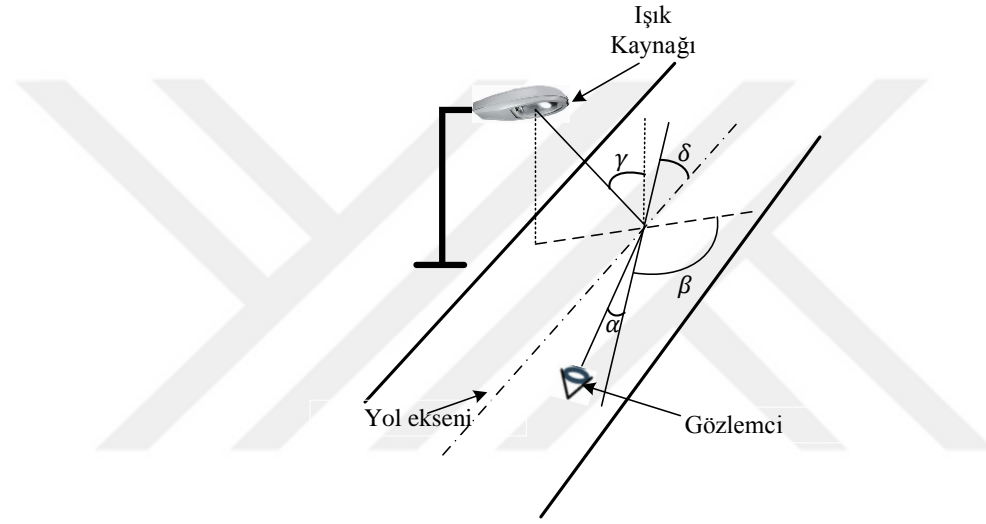
2.3 Yol Yüzeyinin Yansıtma Özellikleri

Yol yüzeyi yansıtma özelliklerinin hesaplanması ve yüzey sınıflandırması için şu anda kullanılan mevcut sistem Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) tarafından tanımlanmıştır. İlk yayın CIE 30 nolu ismiyle 1976 yılında çıkmıştır, daha sonra 1982 yılında “Yol Aydınlatmasında Parıltı ve Aydınlık Düzeyi Hesap ve Ölçümleri” ismiyle revize edilmiştir [57].

Yol yüzeyi yansıtma özellikleri asfaltın fiziksel durumuna ve doğal yapısına bağlıdır [58]. Yol kaplamasının yansıtma karakteristikleri; agreganın tipi, rengi, parlaklığı, yapısı ve yüzeyin inşa yöntemine bağlıdır. Bundan başka yol üzerindeki genel durum da yol yüzeyi yansıtma özelliklerini etkilemektedir. Yol yüzeyi yansıtma özellikleri, aşınma ve farklı hava durumlarına göre değişmektedir. Aşınan yüzeylerde agregalar arasındaki boşluklara değişen hava şartlarında (ör: yağmur yağması durumunda) su dolarak yüzeyin yansıtma

özelliğini değiştirebilmektedir. Özellikle kış mevsiminde, çivili lastiklerin kullanıldığı ülkelerde yol yüzeyindeki aşınma önemli derecede rol oynamaktadır. Yüzey ıslak veya nemli olduğunda aynasal yansımaya (gelen ışığın normalle yaptığı açı ile yansıyan ışığın normalle yaptığı açının aynı olması durumu) artar ve bu durum düzensiz (homojen olmayan) parıltı dağılımının artmasıyla sonuçlanır [59].

Bir yol yüzeyinin yansımaya karakteristikleri parıltı faktörleri kümesi ile belirtilir. Parıltı faktörü q , yüzeyde bir noktadaki parıltının, aynı noktadaki gelen ışık açısı ve görme açılarına bağlı hesaplanan yatay aydınlık düzeyine oranı olarak tanımlanır [16]. Parıltı faktörü Şekil 2.8’de gösterilen dört açıya (α , β , γ ve δ) bağlıdır.



Şekil 2.8 Yol geometrisi ve açılar

Burada β , gözlemcinin düşey düzlemi ve gelen ışığın düşey düzlemi arasındaki açıyı; γ gelen ışığın yüzey normali ile yaptığı açıyı; α yatay düzlemde gözlemcinin açısını; δ ise yol eksenini ile gözlemcinin düşey düzlemi arasındaki açıyı ifade etmektedir [16], [58]. δ açısının etkisi genellikle yol yüzeylerinin neredeyse tamamının izotropik olması nedeniyle ihmal edilebilir. Ayrıca, standartlaştırılmış görüş yüksekliği 1,5 metredir [60] ve sürücünün önündeki 60 ile 160 metre arasındaki yol bölgesi engellerin tanınmasında önemli bölge olarak dikkate alınmaktadır [16], buradan hareketle α açısı sabit ve 1° olarak alınabilir. Böylece parıltı faktörü (2.17) eşitliği ile ifade edilir.

$$q = \frac{L}{E} \quad (2.17)$$

Yansımaya tablosu (r-tablo) bir yol yüzeyinin yansımaya karakteristiklerini tümüyle tanımlar. Yansımaya tablosu (2.18)’de eşitliği verilen indirgenmiş parıltı katsayıları (r) ile ifade edilir.

$$r = q \cos^3 \gamma \quad (2.18)$$

Yansıma tablosunda indirgenmiş parıltı katsayısı, yukarıda özellikleri belirtilen β ve γ açılarının kombinasyonları şeklinde verilir. Yüzeylerin çoğu yansıtıcılık ve parlaklıkları bakımından iyi şekilde tanımlanmış olabilir. Bu özellikleri sayısal olarak ifade ederken parlaklıkları için ortalama parıltı faktörü Q_0 ve yansıtıcılık için aynasal faktörler $S1$ ve $S2$ parametreleri kullanılır. Ortalama parıltı faktörü (2.19) eşitlik ile tanımlanır.

$$Q_0 = \frac{1}{\Omega_0} \int_0^{\Omega_0} q d\Omega \quad (2.19)$$

Burada q parıltı faktörünü ve Ω_0 ise β ve $\tan\gamma$ (yüzeydeki noktadan ölçülen ve ortalama dikkate alınan gelen ışığın tüm yönlerini kapsar) bakımından ifade edilen birleşme bölgesindeki uzay açısını ifade etmektedir [58]. Q_0 hesaplanırken integral limitleri $\beta=0^\circ$ ile $\beta=180^\circ$ ve $\tan\gamma=-4$ ile $\tan\gamma=12$ olarak belirlenmiştir.

$S1$ aynasal faktörü; $\beta=0^\circ$ ve $\tan\gamma=2$ değerleri için indirgenmiş parıltı faktörünün, $\beta=0^\circ$ ve $\tan\gamma=0$ değerlerindeki indirgenmiş parıltı faktörüne oranı olarak ifade edilir (2.20).

$$S1 = \frac{r(0,2)}{r(0,0)} \quad (2.20)$$

Benzer şekilde, $S2$ aynasal faktörü ise ortalama parıltı faktörünün, $\beta=0^\circ$ ve $\tan\gamma=0$ değerlerindeki indirgenmiş parıltı faktörüne oranı olarak ifade edilir (2.21).

$$S2 = \frac{Q_0}{r(0,0)} \quad (2.21)$$

Bir yol yüzeyinin yansıma özellikleri ortalama parıltı faktörü Q_0 ve $S1$, $S2$ aynasal faktörleri kullanılarak tanımlanabilir. Her yol yüzeyi tek bir r tablosuna ve aşınmaya bağlı olarak zamanla değişen Q_0 , $S1$ ve $S2$ değerlerine sahiptir. Bu parametreler gerçek yol üzerine ölçülebilir fakat pratik olarak yol aydınlatma tasarımı aşamasında bunu gerçekleştirmek çok nadir hatta imkânsızdır. CIE tarafından tanımlanan sistemde [58] yol yüzeyleri $S1$ aynasal faktör değerine göre Çizelge 2.3'te verilen sınıflara ayrılmıştır. Kuru yol yüzeyleri R, N, ve C olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. 1976'da CIE yol aydınlatması için R ve N sınıfı sistemler belirlemiştir [61]. N sınıfı, yayınlık yansıma yüzeyini oluşturmak için yapay yüzey parlaklaştırıcıların kullanıldığı yol yüzeyleri için tasarlanmıştır. 1984'te CIE tarafından C sınıfı sistem belirlenmiştir. C sınıfı sistem, ortalama parıltı faktörlerinde çok az değişiklik olan R2, R3 ve R4'ün bir C2 sınıfına birleştirildiği iki sınıflı bir sistemdir [62]. Islak yüzeyler için W sınıfları kullanılmıştır ve

sınıflandırma $S1_w > 1$ durumu için, eşitlik (2.22)'deki gibi değiştirilmiş olan $S1'$ parametresine göre yapılmıştır.

$$\log_{0,147} \frac{S1'}{1} = \frac{\log_{0,147} \frac{S1_w}{1}}{1 - \frac{Q_{0w}}{0,687}} \quad (2.22)$$

Burada, $S1_w$ ve Q_{0w} parametreleri ıslak yüzeylerdeki değerleri ifade etmektedir. $S1_w \leq 1$ $S1' = S1_w$

Çizelge 2.3 Yol yüzey sınıfları için sınıflandırma sistemi

Yol yüzeyi sınıfı	S1 limiti	S1 standart değer	Normalize edilmiş Q_0 değeri
R1	$S1 < 0,42$	0,25	0,10
R2	$0,42 \leq S1 < 0,85$	0,58	0,07
R3	$0,85 \leq S1 < 1,35$	1,11	0,07
R4	$1,35 \leq S1$	1,55	0,08
N1	$S1 < 0,28$	0,18	0,10
N2	$0,28 \leq S1 < 0,60$	0,41	0,07
N3	$0,60 \leq S1 < 1,30$	0,88	0,07
N4	$1,30 \leq S1$	1,61	0,08
C1	$S1 < 0,40$	0,24	0,10
C2	$0,40 \leq S1$	0,97	0,07
W1	$S1' < 9,6$	5,8	0,088
W2	$9,6 \leq S1' < 26,5$	16	0,091
W3	$26,5 \leq S1' < 73$	44	0,097
W4	$73 \leq S1' < 200$	121	0,104

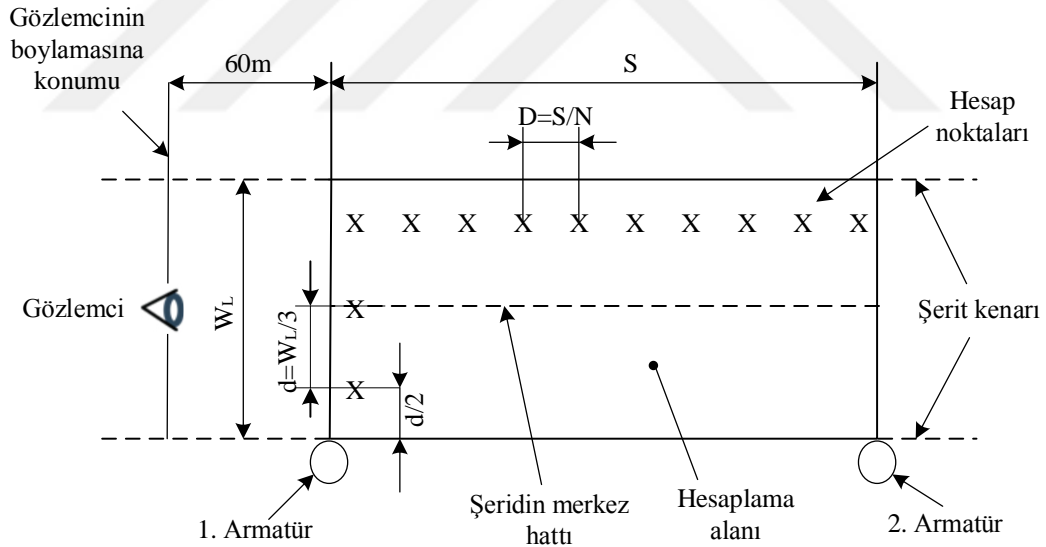
Ortalama parıltı faktörü Q_0 ve aynasal faktör $S1'$ 'in değerleri yol aydınlatma tasarımını etkiler. Q_0 değeri arttıkça, daha uzun direk mesafesine ya da daha düşük lamba gücüne ihtiyaç duyulur. Yüksek $S1$ değerleri armatür yerleştirmelerini güçleştirir. Yol yüzeyi parıltı değerleri ve parıltı düzgünlüğü asfaltın fiziksel değişim durumlarında kolayca değişir [63]. $S1$ ve $S2$ aynasal faktörlerinin değişimleri parıltı dağılımını farklı şekilde etkiler. $S1$ aynasal faktörünün artması, boyuna düzgünlük (U_1) üzerinde az bir etki gösterirken, ortalama düzgünlüğün (U_0) hızlıca azalmasına sebep olur. $S2$ aynasal faktörünün artması durumunda ise hem ortalama düzgünlük hem de boyuna düzgünlük artış göstermektedir [59].

2.4 Yol Aydınlatması Kalite Kriterleri

Yol aydınlatma performansını belirlemek için geçmişten günümüze kadar farklı ölçüm yöntemleri kullanılmıştır. İlk olarak aydınlık düzeyi, yani yol yüzeyine düşen ışık miktarı ölçümlerine dayalı yöntem kullanılmıştır. Daha sonra ise yol aydınlatma tesisatlarının tasarımı, yol yüzeyi parlıtısı ve parlıtı düzgünlüğü gibi görünür büyüklükleri kapsayan yöntemle doğru kaymıştır. Son olarak ise görülebilirlik esaslı hesaplama yöntemi geliştirilerek parlıtı yöntemiyle birlikte bazı ülkelerde kullanılmaktadır.

2.4.1 Hesap Alanı

Parlıtı yöntemine göre hesaplama alanı CIE140 [64] ve EN13201-3 [60] standartlarında tanımlanmıştır. Buna göre, hesap alanı boylamasına yönde bir gözlemcinin 60 m ilerisinde ve aynı sıradaki ilk iki armatürün arasındaki alanı kapsamaktadır. Farklı armatür konumlandırmaları söz konusu ise hesaplama alanı daha büyük veya en büyük aralıklı taraftaki iki armatür arasında seçilmelidir. Hesap alanı ve sürüş şeridindeki hesaplama noktaları Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 Hesap alanı ve hesaplama noktaları

Hesaplama noktaları düzgün olarak yerleştirilmeli ve aralıkları şekilde gösterildiği gibi belirlenmelidir. Burada,

D, boylamasına yöndeki noktalar arasındaki mesafe (m)

S, aynı sıradaki armatürler arasındaki mesafe (m)

N, hesaplama noktalarının sayısı ($S \leq 30$ m için $N=10$; $S > 30$ m için $D \leq 3$ m sağlayan en küçük tam sayı)

d, enine yöndeki noktalar arası mesafe (m)

W_L , şerit genişliği (m)

Gözlemci her şeridin ortasında ve göz seviyesi yol yüzeyinden 1,5 m yukarıda olacak şekilde konumlandırılmalıdır. Yol aydınlatma kriterleri gözlemcinin her konumu için taşıt yolunun tamamı için hesaplanır. Yol aydınlatma kalite kriterleri CIE 140 ve EN 13201 standartlarına göre aşağıda açıklanmıştır.

2.4.2 Ortalama Parıltı (L_{ort})

Belirli bir noktadan gözlemlenen yol yüzeyinin ortalama parıltı değeri, hesaplama noktalarında elde edilen parıltıların aritmetik ortalaması olarak hesaplanır. Hesaplama alanındaki bir noktanın parıltısı eşitlik (2.23)'teki gibi hesaplanır.

$$L = \frac{I \cdot r \cdot \Phi \cdot MF \cdot 10^{-4}}{H^2} \quad (2.23)$$

Burada,

L, parıltı değeri (cd/m^2)

I, C ve γ yönündeki ışık şiddeti (cd/klm)

r, β ve γ ile çakışan bir ışık yolu için indirgenmiş parıltı katsayısı (sr^{-1})

Φ , her bir armatürün başlangıç ışık akısı (klm)

MF, lamba bakım faktörü ile armatür bakım faktörünün çarpımı

H, armatür montaj yüksekliği (m)

Bu hesaplama her bir gözlemci için ayrıca hesaplanır ve bulunan en düşük değer ortalama parıltı değeri olarak belirlenir.

2.4.3 Ortalama Parıltı Düzgünlüğü (U_o)

Yol aydınlatma hesap alanındaki en düşük parıltının hesap alanındaki ortalama parıltıya oranı olarak ifade edilir (2.24).

$$U_o = \frac{L_{min}}{L_{ort}} \quad (2.24)$$

Ortalama parıltı düzgünlüğünde armatürlerin ışık dağılım eğrileri ve direkler arası mesafe oldukça etkilidir. Ayrıca yol aydınlatmasında sürüş konforu açısından bu değer in yüksek olması istenilen bir durumdur.

2.4.4 Boyuna Parıltı Düzgünlüğü (U_l)

Hesap alanı içerisinde, gözlemciye göre şeridin ortasındaki bir hat boyunca sıralanan hesap noktalarındaki en düşük parıltının en yüksek parıltıya oranı olarak ifade edilir (2.25).

$$U_l = \frac{L_{min}}{L_{max}} \quad (2.25)$$

Ortalama parıltı düzgünlüğünde olduğu gibi yine armatürün ışık dağılım eğrisi ve direkler arası mesafe bu büyüklük için etkili olan parametrelerdir. Boyuna parıltı düzgünlüğünün düşük olduğu yollarda sürücü önünde uzanan yolda karanlık ve aydınlık alanlar arka arkaya gelerek Zebra Etkisi dediğimiz durumun ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum gözü yorar ve sürüş konforunu olumsuz yönde etkiler.

2.4.5 Bağlı Eşik Artışı (TI)

Yol aydınlatmasında, armatürlerdeki istenmeyen kamaşmanın neden olduğu görülebilirlik kaybı ölçüsüne eşik artışı denir. Eşik artışı eşitlik (2.26)'daki formül ile hesaplanır.

$$TI(\%) = 65 \cdot \frac{L_v}{(L_{ort})^{0,8}} \quad (2.26)$$

$$L_v = 10 \cdot \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{\theta_k^2} \quad (2.27)$$

Burada,

L_v , örtü parıltısı (cd/m^2)

Hesap alanında herhangi bir noktanın ve ışık kaynağından doğrudan göze gelen ışığın retinada oluşturduğu aydınlık düzeyleri toplamı kontrastı düşürerek görülebilirliği azaltır. Işık kaynağının neden olduğu bu parıltıya örtü parıltısı denir.

E_k , k. armatürün (başlangıç ışık akısının esas alındığı) gözlemci doğrultusunda ve görüş hattı normali düzleminde oluşturduğu aydınlık düzeyi (lüks)

θ_k , görüş hattında gözlemci ile k'inci armatür merkezi arasındaki derece cinsinden açı

Örtü parıltısı ifadesinde toplama işlemi, gözlem doğrultusunda 500 m mesafeye kadar olan armatürler için yapılır. İlgili armatürün istenmeyen parıltı katkısı, kendinden önceki armatürlerin toplam istenmeyen parıltıya katkısının %2'sinden daha az olursa toplama işlemi durdurulur.

2.4.6 Çevreleme Oranı (SR)

Bir taşıt yolunun her iki şeridinin dış tarafındaki yatay ortalama aydınlık düzeyi toplamının, her iki şeridin iç tarafındaki yatay ortalama aydınlık düzeyi toplamına oranı olarak ifade edilir. Yol genişliği 10 m'den büyükse, 5 m genişliğindeki alan hesaba katılır. Yol genişliği 10 m'den küçükse, bu kez toplam yol genişliğinin yarısı hesaba katılır. Refüjlü (orta kaldırım) çift taşıt yolu söz konusu ise, orta kaldırım genişliği 10 m'den büyükse yolun sadece bir tarafı dikkate alınır. Eğer 10 m'den küçük ise yol tek bir yolmuş gibi her iki tarafın iç ve dış şeritlerin aydınlık düzeyleri dikkate alınarak çevreleme oranı hesaplanır. Çevreleme oranı, yayaları, yol ayrımlarını ve yola girebilecek araçları görebilmek açısından önemli bir parametredir.

2.5 Standart ve Önerilere Göre Yol Aydınlatma Sınıfları

Yol aydınlatması önerileri ve standartları ülkeler arasında oldukça değişiklik göstermektedir. Bununla birlikte yolun geometrisi, kullanıcının türü vb. özelliklere bakılarak yol ağının farklı sınıflara ayrılması gibi bazı ortak özellikler de bulunmaktadır. Buna ek olarak, yol aydınlatma önerilerinin birçoğu ışığın yol üzerindeki dağılımı ve miktarı ile yol tarafından üretilen bozucu kamaşma derecesini de içermektedir [62].

Avrupa Standartlar Komitesi (CEN) tarafından onaylanan Avrupa Birliği yol aydınlatma standartları (EN 13201) bir bölümü teknik rapor, diğer üç bölümü ise standartları içeren dört bağımsız bölümden oluşmaktadır. Teknik raporda standartlaştırılmış aydınlatma sınıfları ve bu sınıfların uygulamalardaki ana esasları ele alınmıştır. Bu standart [65] fotometrik şartlara göre yol kullanıcısının görsel ihtiyaçlarını karşılayan aydınlatma sınıflarını tanımlamaktadır. Ayrıca bu standart gündüz ve gece görüşü ile yol aydınlatma konforu gibi çevresel etkileri de içermektedir. Bunlara ilave olarak CEN 13201:3 nolu standart [60], yol aydınlatma kurulumlarının fotometrik performansını hesaplamak için gerekli matematiksel prosedürleri ve yol düzenlerini tanımlayarak ayrıntılarına yer vermiştir. Son standartta ise yol aydınlatma kurulumundaki ölçümler ve fotometrik işlem

aşamaları örnek ölçüm raporları verilerek ifade edilmiştir [66]. Yukarıda bahsedilen bu standartlar CIE 115 ve CIE 140 numaralı yayınları (teknik raporları) referans almaktadır. Farklı yol tiplerinde farklı zamanlarda yapılan birçok test ve deneyler neticesinde sürüş konforu ve sürüş güvenliği açısından en uygun yol aydınlatması kriterlerini ortaya koyan öneri ve standartlar geliştirilmiştir. Ülkemizde CIE 115-2010 numaralı “Motorlu ve Yaya Trafikli Yolların Aydınlatması İçin Öneriler” adlı teknik rapor [67] ile içerik olarak aynı olan TS EN 13201 numaralı standart [65] dikkate alınarak projeler yapılmaktadır. CIE 115-2010 numaralı öneriye göre yollar Çizelge 2.4’te verildiği gibi kullanım amaçları, kullanıcı tipleri, trafik yoğunluğu ve kontrolü gibi çeşitli kriterler temel alınarak sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2.4 CIE 115-2010’a göre yol tanımları ve aydınlatma sınıfları

Yolun Tanımı	Aydınlatma Sınıfı
Bölünmüş yollar, ekspres yollar, otoyollar (Otoyola giriş ve çıkışlar, Bağlantı Yolları, Kavşaklar, Ücret toplama alanları) Trafik yoğunluğu ve yolun karmaşıklık düzeyi ¹ <input type="checkbox"/> Yüksek <input type="checkbox"/> Orta <input type="checkbox"/> Düşük	M1 M2 M3
Devlet yolu ve il yolları, (tek yönlü veya iki yönlü, kavşaklar ve bağlantı noktaları ile şehir geçişleri ve çevre yolları dahil) Trafik kontrolü ² ve yol kullanıcılarının ³ tiplerine göre ayrımı ⁴ <input type="checkbox"/> Zayıf <input type="checkbox"/> İyi	M1 M2
Şehir içi ana güzergahlar (bulvarlar ve caddeler), ring yolları, dağıtıcı yollar, Trafik kontrolü ² ve yol kullanıcılarının ³ tiplerine göre ayrımı ⁴ <input type="checkbox"/> Zayıf <input type="checkbox"/> İyi	M2 M3
Şehir içi yollar (yerleşim alanlarına giriş çıkışın yapıldığı ana yollar ve bağlantı yolları), Trafik kontrolü ² ve yol kullanıcılarının ³ tiplerine göre ayrımı ⁴ <input type="checkbox"/> Zayıf <input type="checkbox"/> İyi	M4 M5
<p>¹ Karmaşıklık, yolun geometrik yapısını, trafik hareketlerini ve görsel çevreyi içerir. Göz önünde bulundurulması gereken faktörler; Şerit sayısı, yolun eğimi, trafik ışık ve işaretleri.</p> <p>² Trafik kontrolü, yatay ve düşey işaretlemeler ve sinyalizasyon ile trafik mevzuatının varlığı anlamında kullanılmıştır. Bunların olmadığı yerlerde trafik kontrolü zayıf olarak adlandırılır.</p> <p>³ Kullanıcılar, motorlu araçlar (kamyon, otobüs, otomobil v.b.) bisiklet, yavaş araçlar ve yayalar.</p> <p>⁴ Ayrım, tahsisli yol (her bir trafik cinsinin kullanacağı şeridin kesin olarak ayrıldığı yerler, otobüs yolu, bisiklet yolu v.b.)</p>	

CIE 115-2010'a göre M aydınlatma sınıfını belirlemek için Çizelge 2.5'te verilen çeşitli parametrelerin ağırlık faktörleri toplanmakta ve (2.28) eşitliği ile aydınlatma sınıfı belirlenmektedir. Sonuç ondalık sayı olması durumunda en yakın tam sayıya yuvarlanmaktadır.

$$\text{Yol Aydınlatma Sınıfı (M)} = 6 - \text{ADT} \quad (2.28)$$

Çizelge 2.5 CIE 115-2010'a göre M aydınlatma sınıfını belirlemede kullanılan parametreler

Parametre	Seçenekler	Ağırlık Değeri	Seçilen
Hız	Yüksek	1	1
	Orta	0	
Trafik Yoğunluğu	Çok Yüksek	1	1
	Yüksek	0.5	
	Orta	0	
	Düşük	-0.5	
	Çok Düşük	-1	
Trafik Düzeni	Yüksek oranda motorlu olmayan	1	1
	Karışık	0.5	
	Yalnızca motorlu araç	0	
Yol Refüj ile Ayrılmış mı?	Hayır	1	0
	Evet	0	
Kesişme Yoğunluğu	Yüksek	1	0
	Orta	0	
Park Etmiş Araç	Var	1	0
	Yok	0	
Çevre Aydınlatması	Çok Yüksek	1	0.5
	Yüksek	0.5	
	Orta	0	
	Düşük	-0.5	
	Çok Düşük	-1	
Görsel Kılavuzlama/ Trafik Kontrolü	Zayıf	0.5	0
	İyi	0	
	Çok iyi	-0.5	
		Ağırlık Değerlerinin Toplamı(ADT)	4
		Yol Sınıfı	M2

Bu çizelgede verilen kriterleri her ülke kendi koşullarına uyarlayabilmektedir. TEDAŞ'ın gerçekleştirdiği çalışmalarda CIE önerileri göz önünde bulundurularak ve Türkiye şartları (yol durumu, coğrafi koşullar ve iklim şartları vb.) dikkate alınarak Türkiye'deki yollar için Çizelge 2.6'daki aydınlatma sınıfları belirlenmiştir [68].

Ayrıca EN 13201 standardında da çeşitli parametreler (arazi durumu, trafik kullanımı ve çevresel etkenler) belirlenerek kullanıcının tipine ve hızına göre farklı yol aydınlatma sınıfları tanımlanmıştır. Bu standartta belirtilen yol aydınlatma kalite büyüklükleri CIE'nin önerdiği kriterlere oldukça yakındır.

Çizelge 2.6 Türkiye'deki yolların aydınlatma sınıfları

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

CIE 115-2010'e göre belirlenen yol sınıflarına göre minimum aydınlatma kriterleri Çizelge 2.7'de verilmiştir [67]. Bu kriterler aynı zamanda Türkiye için de geçerli yol aydınlatma kriterleridir.

Çizelge 2.7 Türkiye için parıltı değerine bağlı yol aydınlatma kriterleri

Aydınlatma Sınıfı	Yol Yüzeyi Parıltısı (cd/m ²)				Bağlı Eşik Artışı TI (%) <	Çevre Aydınlatma Oranı SR >
	Kuru			Islak		
	$L_{ort} \geq$	$U_o \geq$	$U_1 \geq$	$U_o \geq$		
M1	2,0	0,40	0,70	0,15	10	0,5
M2	1,5	0,40	0,70	0,15	10	0,5
M3	1,0	0,40	0,60	0,15	10	0,5
M4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,5
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,5
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	20	0,5

2.6 Yol Aydınlatmasında Kullanılan Işık Kaynakları

Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar ve metal halide lambalar geçmişten günümüze yol aydınlatması çalışmalarında konvansiyonel ışık kaynağı olarak kullanılmışlardır. Son yıllarda ise gelişen teknoloji ile birlikte azalan maliyetler LED ışık kaynaklarının da yol aydınlatmasında kullanılmasına olanak tanımıştır [26], [69]. Bu bölümde, yol aydınlatmasında kullanılan ışık kaynakları ile ilgili olarak temel özelliklerden bahsedilecektir.

2.6.1 Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı Lambalar

Yüksek basınçlı sodyum buharlı (YBSB) lambalar sodyum (Na) buharının yüksek basınç altında deşarj olmasıyla ışık yayarlar. Burada ifade edilen yüksek basınç değeri 5 ile 10 kPa arasında değişen basınç değeridir. ABSB lambaların spektrumlarının çok dar olması, bununla birlikte renksel geriverimlerinin de çok düşük olması nedeniyle yapılan bir takım iyileştirmeler neticesinde YBSB lambalar üretilmiştir. ABSB lambalardan en temel farkı daha iyi bir renksel geriverime sahip olmasıdır. Ancak bunun yanında daha düşük bir etkinlik değerine sahiptirler. YBSB lambalarda, gaz basıncının yükseltilmesi amacıyla lamba boyutu ABSB lambalara göre daha düşük seviyelerdedir. Lamba gücüne göre değişmekle birlikte YBSB lambaların etkinlikleri 45 ile 150 lm/W arasında değişebilmektedir. Renksel geriverimlerinin ABSB lambalara göre daha iyi olması ve ABSB lambalara göre daha küçük boyutlarda üretimlerinin mümkün olması nedeniyle farklı aydınlatma uygulamalarında kullanılabilirler. Bu durum güç seviyelerininin de çok farklı olmasına olanak sağlamıştır. Bu nedenle YBSB güç değerleri 35 W değerinden 2000 W değerine kadar çıkabilmektedir. Ömürleri ise 10000 ile 24000 saat aralığında değişmektedir [70].

YBSB lambaların içerisinde yer alan gazın basıncı yüksek olduğundan dolayı deşarj gerilimleri de ABSB lambalar göre çok yüksek olmaktadır. Bu gerilim seviyeleri 2.5 kV ile 4 kV arasında lamba gücüne bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, lamba beslemesinde kullanılan ateşleyicinin (ignitörün) yüksek gerilim darbeleri üretebilmesi deşarjın daha çabuk gerçekleşebilmesi açısından önemlidir.

YBSB lambaların ABSB lambalara göre renksel geriverimlerinin daha iyi seviyede olması doğal olarak kullanım alanlarının da daha geniş olmasına imkan sağlamıştır. Bu nedenle yol ve tünel aydınlatmalarının yanı sıra, dekoratif amaçlı dış cephe

aydınlatmalarında da kullanılmaktadırlar [26]. Bununla birlikte ABSB lambalardan bir diğerk farkları dimmerlenebilir olmalarıdır. Maksimum dimmerlenebilme seviyesi %60 tır [70]. Bu değerkden sonra lamba rengi belirgin bir şekilde değışmekte ve renksel geriverim çok düşmektedir.

2.6.2 Metal Halide Lambalar

Metal Halide lambalar, yüksek basınçlı cıva buharlı lambalar olarak düşünülebilir. Bu lambalar içerisinde cıva ve argon gazlarının yanında metal halojenürler bulunmaktadır. Halojenürlerden kasit ise genellikle sodyum ve skandiyum iyodürlerinden oluşan karışımlardır. Yani aslında cıva buharının deşarjı, metal halojenürler ile desteklenmiştir. Bununla birlikte, normal cıva buharlı lambalara göre içerisinde yer alan cıva buharının basıncı çok daha yüksektir(1000-1500 kPa) [70]. Ayrıca cıva bazlı olmaları nedeniyle UV ışınım yayarlar. Bu yüzden, MH lambalar özel armatürlerle veya farklı filtre özelliğı olan yapılar ile kullanılırlar.

MH lambalar, lamba gücüne bağılı olarak 75 ile 125 lm/W arasında değışen etkinliğe sahiptirler. Renksel geriverimleri de sodyum buharlı ve cıva buharlı lambalara göre belirgin bir şekilde daha iyidir. Renksel geriverimlerinin yüksek olması nedeniyle çok farklı alanlarda kullanılabilmeleri farklı güç değerklerinde üretilmelerine neden olmuştur. Endüstriyel olarak üretilen MH lambaların güç seviyeleri 35W ile 1000 W arasında değışmektedir [70]. Çalışma ömürleri ise 6000 ile 20000 saat arasında değışebilmektedir. Yine lambanın gücüne bağılı olmakla birlikte tutuşma gerilimleri 3-7 kV seviyelerindedir. Deşarj süreleri ise nispeten düşük olup 1-4 dakika arasında deşarj gerçekleşmektedir. Bu nedenle sadece dış ortam aydınlatmalarında kullanılmazlar.

MH lambalar dış ortam aydınlatmalarında renksel geriverimin önemsendiğı tüm uygulamalarda özellikle projektör olarak kullanılabilirler [26]. Bununla birlikte fiber optik aydınlatma, film ve televizyon uygulamalarında, kamera ve fotoğraf makinelerinde kullanılabilirler. Bu uygulamaların genel özelliğı yüksek renksel geriverim istenilen uygulamalar olmalarıdır.

2.6.3 LED Lambalar

Bir LED yapısı esas itibariyle ışık yayan bir yarı iletken diyottan meydana gelir. Bu diyot kılıf şeklinde bir yansıtıcı eleman içerisine yerleştirilirse ışığın belirli bir yöne doğru

yayılması sağlanır ki buna da literatürde LED çip adı verilmektedir. LED yapısındaki yarı iletkenin özelliğine göre ortama yayılan ışığın dalga boyu da farklı olmaktadır. Örneğin Galyum-Arsenit-Fosfat (GaAsP) karışımından oluşan yarı iletken tabaka 590-660 nm dalga boyunda ışımaya yaparken, Galyum-Fosfat-Nitrit (GaPN) karışımı 570 nm'lik bir dalga boyunda ışımaya yapar [70]. Sonuç olarak, LED'lerin yaydığı ışığın dalga boyu ve buna bağlı olarak da rengi kullanılan yarı iletken maddelerine bağlıdır.

Her bir LED çip, yapısındaki yarı iletken malzemeye bağlı olarak 1.5 V ile 4 V arasında bir gerilimde çalışmakta ve güçleri de 0.6 V ile 1.2 W arasında değişmektedir. LED çiplerin etkinlikleri de farklı renk seçeneklerine göre değişmektedir. Örneğin, kırmızı ve yeşil renk için etkinlik değerleri 13-25 lm/W seviyelerinde iken, mavi renkte bu değer 3-5 lm/W değerindedir [70]. LED çipler, yarı iletken bir yapıdan oluştuklarından ötürü, ısınma ve buna bağlı olarak da jonksiyon sıcaklığının artması LED çiplerde en önemli problem olarak göze çarpmaktadır. Sıcaklığın etkisi daha çok LED çip ömrü üzerindedir. Bu nedenle doğru bir soğutma yöntemi ile LED'lerin çalışma ömürleri maksimum düzeye çıkarılabilir. LED çiplerin ortalama çalışma süreleri, LED çip yarıiletken yapısına ve çipin kullanıldığı armatür tasarımına bağlı olarak 50000-100000 saat arasında değişebilmektedir. Bu değerler, diğer ışık kaynakları ile kıyaslandığında oldukça yüksek değerlerdir.

Yüksek çalışma ömrü, istenilen türde renklerin elde edilebilmesi ve etkinliklerinin diğer ışık kaynaklarına kıyasla daha yüksek olması LED'lerin oldukça farklı alanlarda kullanılmasına olanak tanımıştır [26]. Sadece aydınlatma amacıyla değil, televizyon ekranları, her türlü elektronik cihazın gösterge ekranların, otomobillerin gösterge ve farları gibi çok farklı alanlarda modüler olarak kullanımları mümkündür. Aydınlatma aydınlatmalarında ise, iç aydınlatmada hem konvansiyonel iç aydınlatma elemanları olan akkor filamanlı ve kompakt floresan lambalar yerine hem de farklı uygulamalarda dekoratif amaçlı olarak kullanılmaktadırlar. Dış aydınlatmada farklı renk seçenekleri sayesinde dekoratif amaçlı olarak kullanılmalarının yanı sıra, yüksek etkinlikleri nedeniyle yol ve tünel aydınlatmalarında da kullanımları mümkündür [26]. Hatta yakın gelecekte, LED armatür maliyetlerinin konvansiyonel armatür maliyetleri seviyesine daha da yaklaşacağı düşünülürse, LED'lerin diğer ışık kaynaklarının yerini alması beklenmektedir.

FARKLI SPEKTRUMLARIN YOL KAPLAMALARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yol aydınlatma tasarımlarında, kullanılan ışık kaynağına ve kaplama malzemesinin özelliklerine dikkat edilmeden, farklı yollar için aynı yol yüzey sınıfları ve aynı yansıtma katsayıları kullanılmaktadır. Ancak gerçekte, yol yüzey parlaklık değerleri tasarlanan ya da hesaplanan değerlerden oldukça farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu bölümde, farklı spektrumların (SPD) yol kaplamalarının yansıma özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Bu etkiler farklı aydınlık düzeyi ve farklı hava koşulları da dikkate alınarak ayrı ayrı incelenmiştir.

3.1 Işık Kaynakları ve Yol Kaplama Numuneleri

Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı (YBSB), Metal Halide (MH) ve farklı renk sıcaklığı (CCT) ve renksel geriverime (CRI) sahip LED ışık kaynakları kullanılmıştır. LED ışık kaynakları 3000K, 4000K, 5000K ve 6000K renk sıcaklıklarına sahip ve her renk sıcaklığında düşük (Ra~55, SPD1), orta (Ra~75, SPD3) ve yüksek (Ra~95, SPD5) CRI'da toplam 12 farklı spektrumdan oluşmaktadır. Bundan sonra düşük, orta ve yüksek renksel geriverime sahip spektrumlar sırasıyla SPD1, SPD3 ve SPD5 olarak adlandırılacaktır. Şekil 3.1'de ışık kaynaklarına ait spektral dağılımlar verilmiştir.

YBSB ve MH lambalar Osram marka olup sırasıyla 70W ve 75W gücündedir. YBSB ve MH lambaların renk sıcaklığı (CCT) sırasıyla 1846K ve 4239K, renksel geriverimleri (Ra) ise sırasıyla 21 ve 68'dir. LED spektrumları 12 kanallı LED spektrum simülatörü yardımıyla oluşturulmuştur. LED simülatör LED panel, PC DMX arayüz ve güç kaynağı olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. LED panel farklı tip LED'lerin bulunduğu birbirinden bağımsız 12 sıradan ve her sırada birbirine seri bağlı dokuz LED'den

oluşmaktadır. PC DMX arayüz yardımıyla LED simülatör istenildiği şekilde kontrol edilebilmektedir. Aynı zamanda güç kaynağı ünitesi yardımıyla LED simülatörün aydınlık düzeyi ayarlanabilmektedir. LED panelin önünde pleksiglas bir difüzör kullanılarak ölçümlerin yapıldığı kutu içerisinde homojen bir aydınlatma sağlanmıştır.



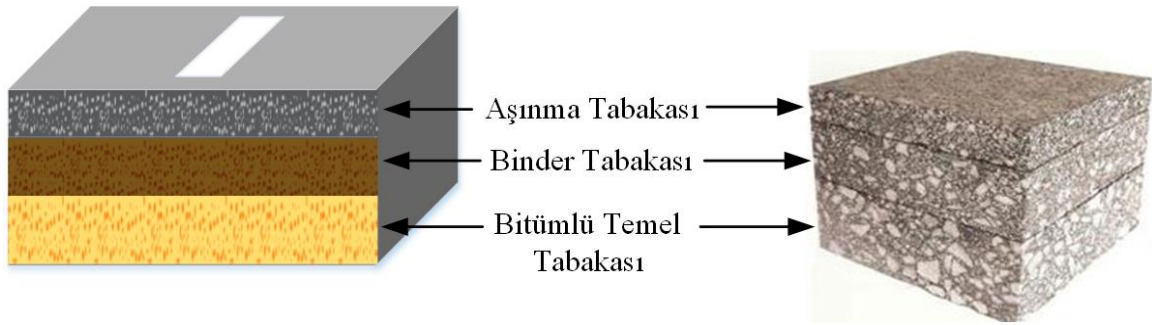
Şekil 3.1 YBSB, MH ve LED spektrumlar a)Ra: 55 b)Ra: 75 c)Ra: 95

Örnek LED SPD'ların parlıltı (L_v), x ve y CIE koordinatları, renk sıcaklığı (CCT), siyah cisim eğrisinden (black body locus eğrisinden) sapma (D_{uv}) ve renksel geriverim (CIE CRI) değeri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 SPD'lerin ışıksal değerleri

LED SPD	L_v (cd/m ²)	x	y	CCT (°T)	Duv	CIE CRI
3000K_spd1	249,96	0,4424	0,4136	2987	0,0031	55
3000K_spd3	246,94	0,4314	0,3907	2979	-0,0046	75
3000K_spd5	245,06	0,4342	0,3954	2972	-0,003	93
4000K_spd1	247,9	0,3846	0,3858	3956	0,0029	55
4000K_spd3	252,52	0,3829	0,3883	4018	0,0046	75
4000K_spd5	246,34	0,3818	0,3807	3992	0,0014	95
5000K_spd1	248,9	0,3469	0,3578	4955	0,0024	56
5000K_spd3	249,47	0,3457	0,3523	4980	0,0001	75
5000K_spd5	242,42	0,3458	0,3588	4999	0,0033	95
6000K_spd1	248,85	0,3221	0,3219	6025	-0,0052	55
6000K_spd3	245,99	0,3218	0,3338	6010	0,0012	75
6000K_spd5	247,08	0,3225	0,3266	5990	-0,0029	95
YBSB	605,62	0,543	0,4077	1846	-	21
MH	259,66	0,3772	0,3759	4239	0,0005	68

Asfalt, karayollarında kullanılmakta olan mineral agrega ve bitümlü bağlayıcının karışımı ile elde edilen yol kaplamasıdır. Bitüm ham petrolün rafine edilmesinden elde edilen ya da doğal asfalt olarak bulunan, ortam sıcaklığında akışkanlığı az olan ya da katıya yakın olan, görünürde buharlaşmayan yapışkan ve su geçirmeyen bir malzemedir [71]. Asfalt kaplaması aşınma tabakası, binder tabakası ve bitümlü temel tabakası olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır. Her bir tabakanın içerisindeki agrega çapları ve bitüm oranları değişiklik göstermektedir. Bu tabakalar Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Asfalt tabakaları

Ölçümlerde farklı renk ve özelliklere sahip 17 farklı yol kaplaması kullanılmıştır. Bazı kaplamalar benzer yapıda olduklarından (4, 6, 10, 11 ve 12 nolu kaplamaların) analizleri ayrıca yapılmamıştır. Kullanılan kaplamaların çoğu taş mastik asfalt (TMA) olup, normal

asfalt (NA), kauçuk asfalt (KA) ve beton asfalt (BA) kaplamalarda kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan yol kaplamaları Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Yol kaplama numuneleri

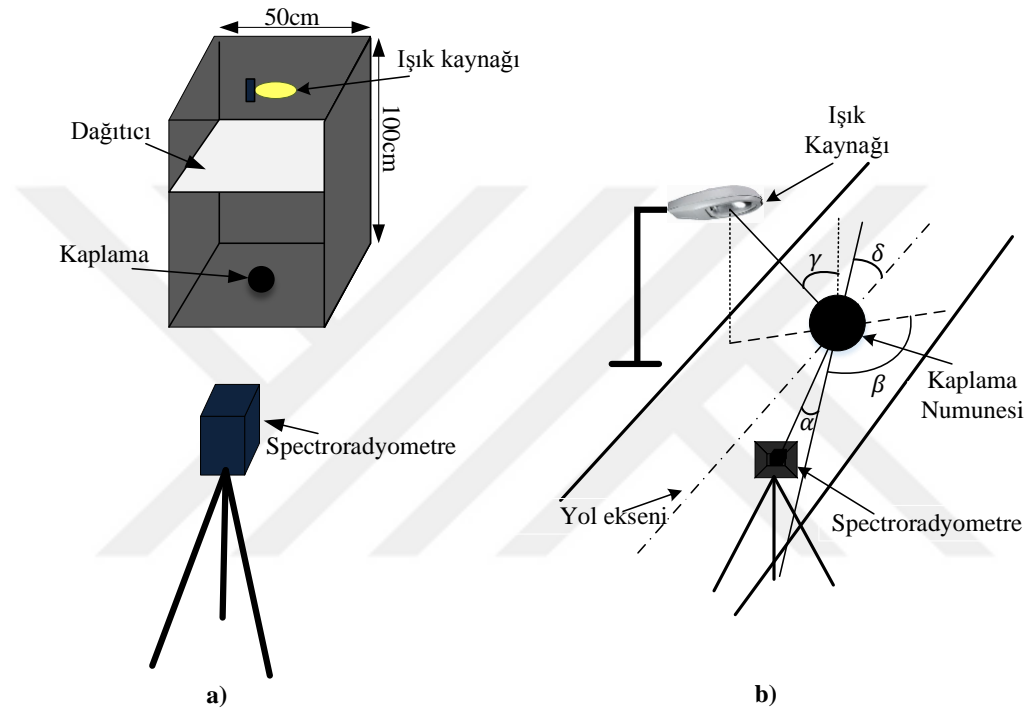
Burada, 1-13 arasındaki ve 16 numaralı kaplamalar taş mastik asfalt, 14 nolu kaplama beton asfalt, 15 nolu kaplama normal asfalt ve 17 nolu kaplama kauçuk asfalt örnekleridir. 1-13 arasındaki kaplama numunelerine EN 12697-16 standardında belirtildiği şekilde aşındırma yapılmıştır [72]. TMA1 beyaz ve geniş agregalı, TMA2 hafif kırmızımsı ve büyük agregalı, TMA3 ve TMA8 koyu gri küçük agregalı, TMA13 küçük kırmızı ve beyaz agregalı, TMA5 koyu bitümlü ve orta büyüklükte agregaya sahiptir. TMA7 kırmızımsı ve gri büyük agregalı, TMA9 mat gri ve küçük agregalı numunelerdir. BA14 büyük ve küçük gri agregalara sahip beton asfalt numunesidir. NA15, TMA16 ve KA17 ise sırasıyla bitüm kaplı normal, taş mastik ve kauçuk kaplamalardır.

3.2 Ölçüm Düzenegi

Ölçümler 50x50x100cm boyutlarında içi mat siyaha boyanmış kabinlerde gerçekleştirilmiştir. İki adet kabinden birinde YBSB ve MH ışık kaynakları diğerinde ise LED simülatör kullanılmıştır. Her iki kabinde de ışık kaynakları önüne pleksiglas GS WHO2 dağıtıcı yerleştirilerek ışık dağılımının aynı olması sağlanmıştır. Işık kaynaklarının spektrumlarını ve yüzeylerin yansıma özelliklerini ölçmek için Konica Minolta CS2000 spektrometre kullanılmıştır. Spektrometre Aalto Üniversitesi Aydınlatma Birimi’nde kalibre edilmiş olup doğruluğu $\pm 2\%$ ’dir [73]. Yatay aydınlık düzeyi ölçümlerinde, LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin tarafından kalibre edilen LMT Pocket Lux-2A lüksmetre kullanılmıştır. Numuneler kabin yüzeylerinin orta noktasına

konularak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümlerde kaplama yüzeyleri aynı seviyede olacak şekilde ayarlanmıştır.

Yüzey parıltısı 20° - 45° arasındaki gözlemci açılarında aynı özelliği gösterdiğinden [74] ölçüm açısı (gözlemci açısı, α) 30° 'ye ayarlanmıştır. Gelen ışının dikey düzlemi ile gözlemci arasındaki açı (β) 90° 'dir. Gelen ışının yüzey normali ile yaptığı açı (γ) ve gözlemcinin dikey düzlemi ile yol eksenini arasındaki açı (δ) 0° 'dir. Tüm ölçümler aynı noktada gerçekleştirilmiştir. Ölçüm düzeneği Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 a) Ölçüm düzeneği b) Yol geometrisindeki açılar

Spektroradyometre 30° ölçüm açısıyla konumlandırılmış ve kutunun merkezine yerleştirilen beyaz baryum sülfat yüzeye (Gigahertz-Optik-BN-R98-SQ2C) odaklanarak spektrumlar ölçülmüştür. Aynı spektrum altında ilk olarak referans malzemenin parıltısı daha sonra farklı kaplamaların parıltıları ölçülmüştür. Böylece tüm kaplamaların bağlı (karşılaştırmalı) yansımaya değerleri elde edilmiştir.

Tezin bu bölümünde, LED'ler 3000K, 4000K, 5000K ve 6000K renk sıcaklığının her biri için 3 farklı renksel geriverim değerinde ve konvansiyonel ışık kaynakları (YBSB ve MH) altında 12 farklı kaplamaların yansımaya özellikleri farklı koşullar altında ölçülmüş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Spektrumların farklı kaplamalar üzerindeki bağlı spektral yansımaya özelliklerini ve bağlı parıltı değerlerini belirlemek için ölçümler yüksek

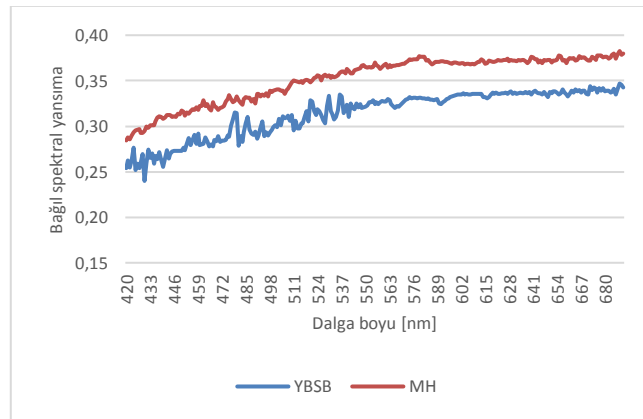
ve düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak hava koşulları için gerçekleştirilmiştir. Düşük aydınlık seviyesinde (%20) YBSB ve MH ile birlikte LED ışık kaynağının her bir renk sıcaklığı için sadece orta seviyede renksel geriverime ($R_a \sim 75$) sahip spektrum altında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Böylece toplam 480 ölçüm yapılmıştır.

3.3 Ölçüm Sonuçları

Farklı SPD'lar altında bağıl spektral yansımada değişimi TMA16 hariç tüm kaplamalar için hemen hemen aynı değişime sahiptir. Bütün SPD'lar ve kaplamalar için bağıl yansımada değeri kısa dalga boylarına göre uzun dalga boylarında daha yüksek olmaktadır. Fakat TMA16'da ise tüm dalga boylarında hemen hemen sabit kalmaktadır. Ayrıca SPD'lerin bağıl yansımada değerleri ve bağıl parıltılar arasında aydınlık düzeyi ve hava koşullarına göre farklılıklar bulunmaktadır. Aşağıda her bir kaplama numunesi için elde edilen sonuçlar detaylı olarak açıklanmıştır. Burada ilk üç kaplama için bağıl spektral yansımada ve parıltı grafikleri örnek olarak verilmiş olup diğer kaplamaların grafikleri Ek A'da verilmiştir.

3.3.1 TMA1 Kaplaması

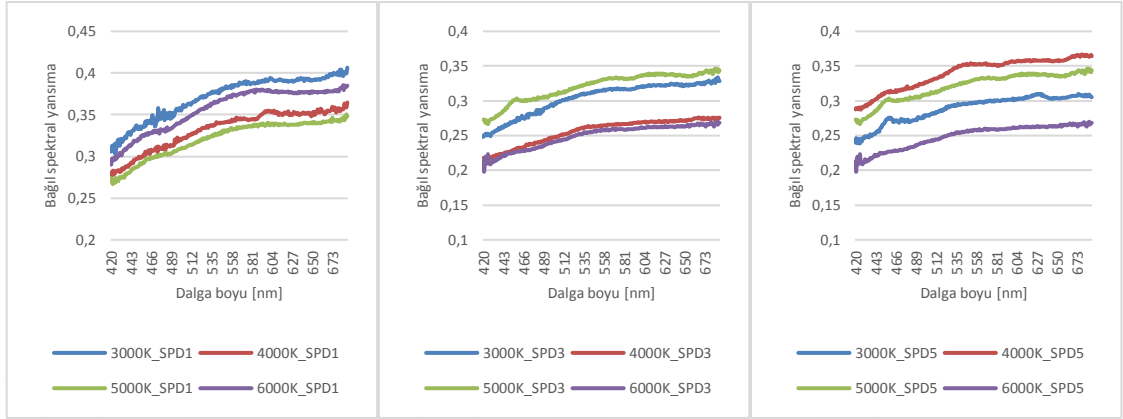
TMA1 kaplamasında, yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda MH lamba altında bağıl spektral yansımada YBSB lambaya göre yaklaşık %10,76 daha yüksektir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 TMA1 kaplama için YBSB ve MH lambanın spektral yansımaları

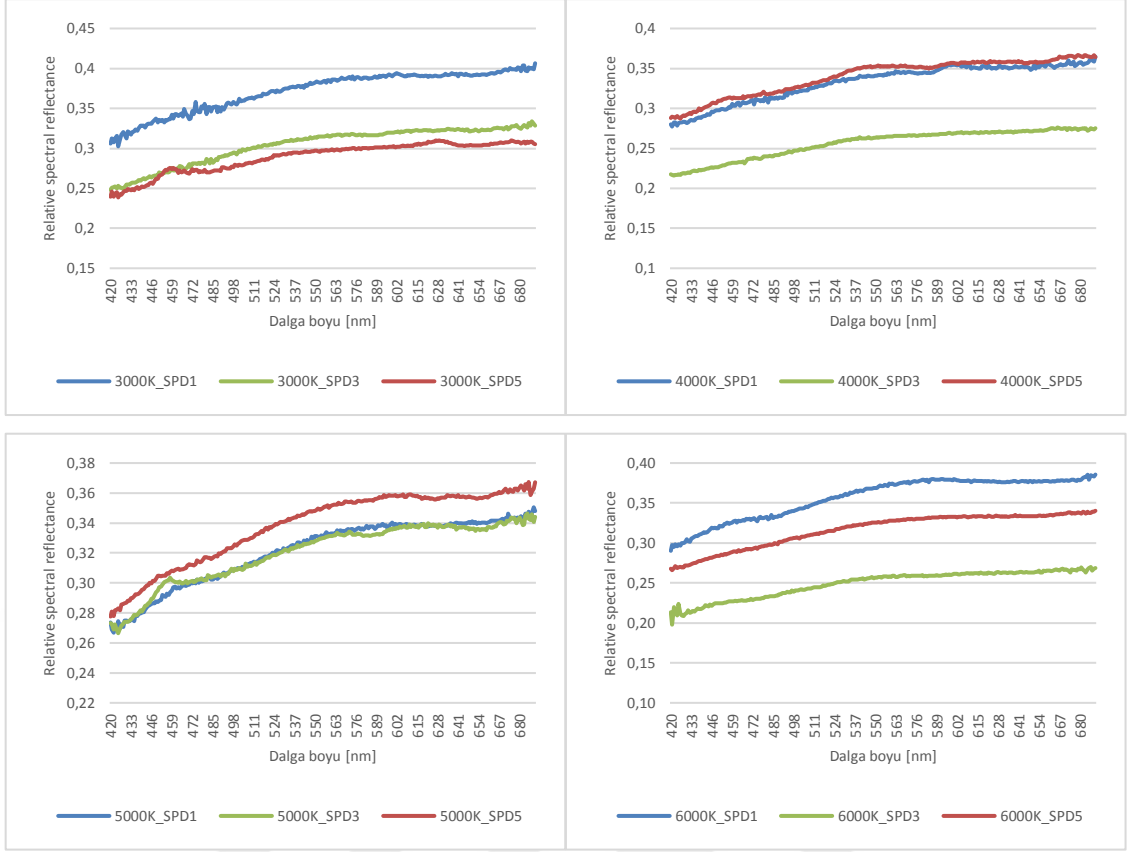
Aynı CRI fakat farklı CCT LED SPD'ler altında elde edilen bağıl spektral yansımaların birbirinden farklı olduğu görülmüştür. SPD1 ($R_a \sim 55$) için 3000K CCT'ye sahip LED spektrum altında bağıl spektral yansımada değeri diğerlerine göre daha yüksektir. 3000K'de yansımada değeri 5000K'e göre yaklaşık %13,5 daha büyüktür. SPD3 ($R_a \sim 75$) için 3000K

ve 5000K SPD’de spektral yansımaya değeri 4000K ve 6000K’ya göre yaklaşık %18 daha büyüktür. SPD5 ($R_a \sim 95$) için ise en yüksek spektral yansımaya değeri 4000K’da, en düşük değeri ise 6000K’da meydana gelmektedir. Aralarında ise yaklaşık %6,9 fark bulunmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 TMA1 için aynı CRI farklı CCT SPD’lerde spektral yansımalar

Aynı CCT fakat farklı CRI LED SPD’leri incelediğimizde, 3000K ve 6000K için SPD1’de spektral yansımaya değeri diğer CRI’lara göre daha yüksektir. 3000K SPD1 altında meydana gelen spektral yansımaya en düşük değere sahip SPD5’ten yaklaşık %22,2 daha büyüktür. 6000K’de ise SPD1 altında meydana gelen bağıl yansımaya SPD3’ten yaklaşık %30,2 daha büyüktür. 4000K’de SPD1 ve SPD5 yaklaşık aynı değere sahip olup SPD3’ten daha yüksektir. Bu spektrumların kaplama üzerinde oluşturduğu bağıl spektral yansımaya değeri ile SPD3’ün yansımaya değeri arasında yaklaşık %24,7 fark vardır. 5000K’de ise tüm SPD’ler altında yaklaşık aynı spektral yansımaya değeri meydana gelmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 TMA1 için aynı CCT farklı CRI SPD'lerde spektral yansımalar

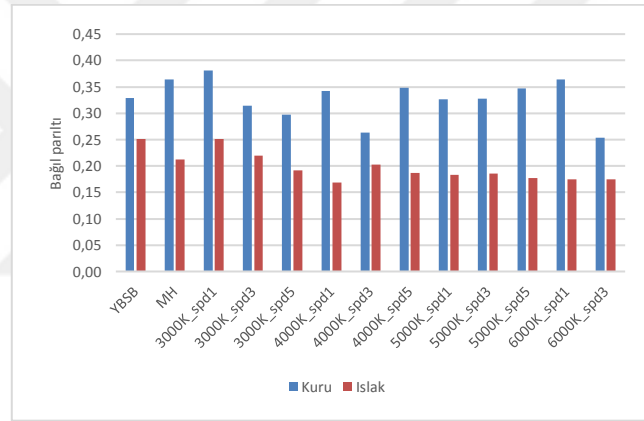
Aynı aydınlık düzeyinde ıslak koşullarda yapılan ölçümlerde spektral yansıma değerleri kuru koşullara göre daha düşüktür. Kuru koşulların aksine, ıslak koşullarda YBSB lamba altında bağıl spektral yansıma değeri MH lambaninkinden yaklaşık %13,7 daha yüksektir. Yani ıslak koşullarda MH lamba altında spektral yansıma değişimi YBSB lambadan daha yüksektir.

Islak koşullarda aynı CRI fakat farklı CCT'lerde, SPD1 ve SPD3 için 3000K'de spektral yansıma değeri diğerlerine göre daha yüksek olurken, SPD5'te ise farklı CCT'ler hemen hemen aynı yansıma değerine sahiptir. Aynı CCT'de farklı CRI'ları incelediğimizde, 5000K ve 6000K CCT'lerde ıslak koşullarda spektral yansıma değerleri hemen hemen aynı olmaktadır. 3000K'de SPD1 en yüksek bağıl spektral yansıma değerine sahipken 4000K'de en düşük değere sahiptir. 4000K'de ise ıslak koşullarda en yüksek spektral yansıma SPD3'te meydana gelmektedir.

Aydınlık düzeyi değeri yaklaşık %80 oranında azaltılarak kaplama üzerindeki spektral yansıma değerleri kuru ve ıslak koşullar için tekrar ölçülmüştür. YBSB, MH lamba ve SPD3 için farklı CCT'lerde ölçümler yapılmıştır. Düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak

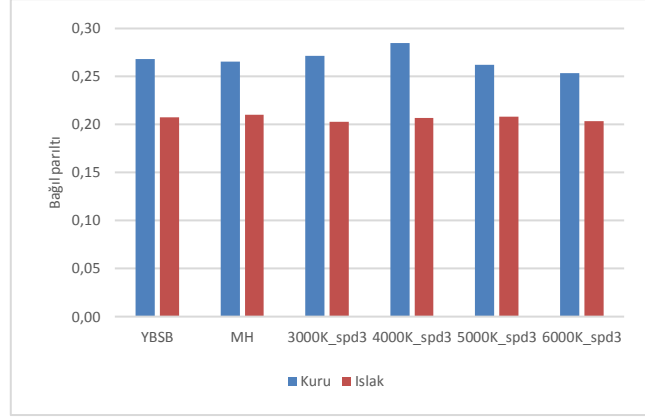
koşullarda tüm spektrumlar yine düşük dalga boylarına göre yüksek dalga boylarında daha yüksek spektral yansımaya sahiptir. YBSB ve MH lamba altında düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda hemen hemen aynı yansımaya değerleri oluşmaktadır. Düşük aydınlık düzeyinde farklı CCT'leri SPD3 için karşılaştırdığımızda 4000K spektrum altında diğerlerinden daha yüksek spektral yansımaya meydana gelmektedir. Aynı durumda ıslak koşullarda ise SPD3 için tüm CCT'lerde bağıl yansımaya değerleri hemen hemen aynıdır.

Her bir spektrumun yüksek aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda TMA1 kaplaması üzerinde oluşturduğu bağıl parıltı değerleri Şekil 3.8'de verilmiştir. En az bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %23) YBSB lamba ve 4000K SPD3'te meydana gelmiştir. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %51) ise 4000K ve 6000K SPD1'de meydana gelmiştir.



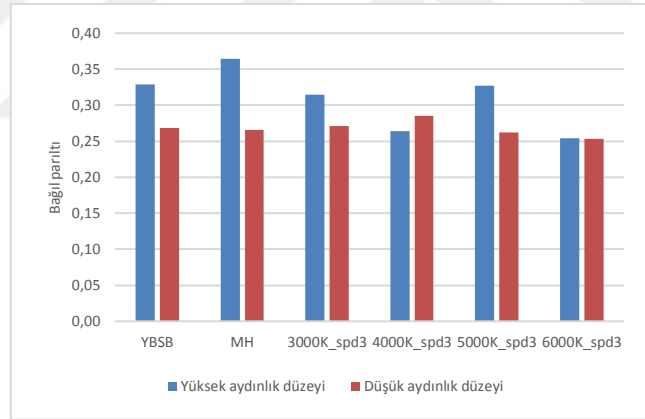
Şekil 3.8 TMA1 için yüksek aydınlık düzeyinde spektrumların bağıl parıltıları

Düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimi Şekil 3.9'de verilmiştir. Düşük aydınlık düzeyinde, yüksek aydınlık düzeyinde olduğu gibi kuru koşullardaki bağıl parıltılar ıslak koşullara göre daha yüksektir. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %27,5) 4000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %19,5) 6000K SPD3'te meydana gelmiştir.



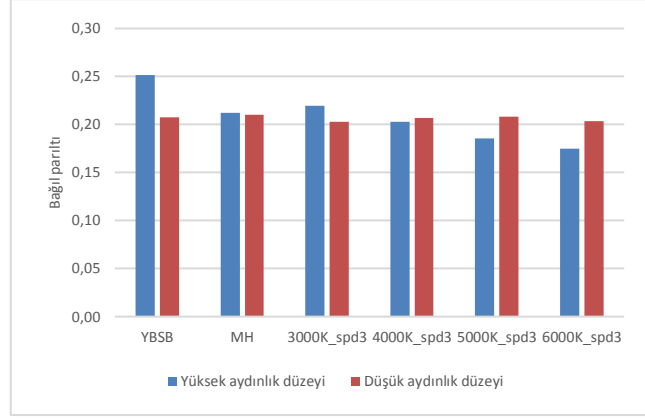
Şekil 3.9 TMA1 için düşük aydınlık düzeyinde farklı koşullarda bağıl parıltılar

Kuru koşullarda yüksek ve düşük aydınlık düzeyleri için bağıl parıltı değerleri Şekil 3.10'da verilmiştir. Bağıl parıltı 4000K SPD3'te düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. Diğer SPD'lerde bağıl parıltı yüksek aydınlık düzeyinde daha yüksektir. Farklı aydınlık düzeylerinde, bağıl parıltı değişimi en çok (yaklaşık %27) MH lambada, en az ise 6000K SPD3'te (yaklaşık %0,2) meydana gelmiştir.



Şekil 3.10 TMA1 için kuru koşullarda farklı aydınlık düzeyleri için bağıl parıltılar

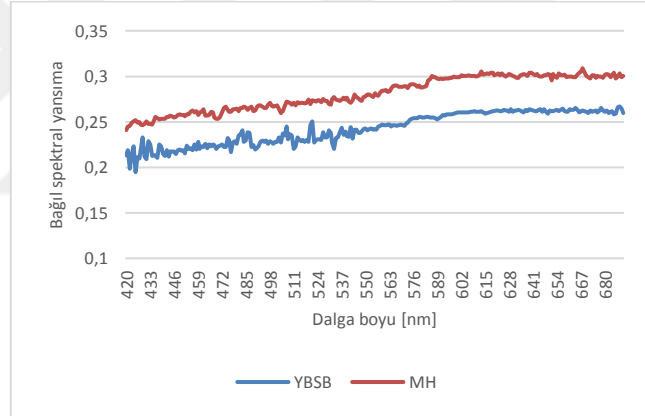
Islak koşullarda yüksek ve düşük aydınlık düzeyi değerleri için bağıl parıltı değerleri Şekil 3.11'da verilmiştir. 4000K, 5000K ve 6000K SPD3'lerde bağıl parıltı düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %17,6) YBSB lamba altında, en az değişim (yaklaşık %1,1) ise MH lamba altında meydana gelmiştir.



Şekil 3.11 TMA1 için ıslak koşullarda farklı aydınlık düzeyleri için bağıl parlaklıklar

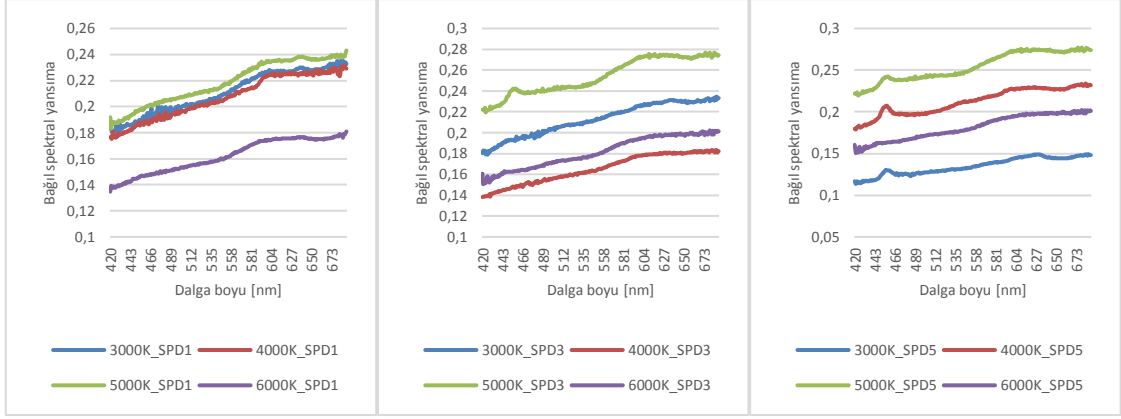
3.3.2 TMA2 Kaplaması

TMA2 kaplamasında, yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda MH lamba altında bağıl spektral yansıtma değeri YBSB lambaya göre yaklaşık %13,6 daha yüksektir (Şekil 3.12)



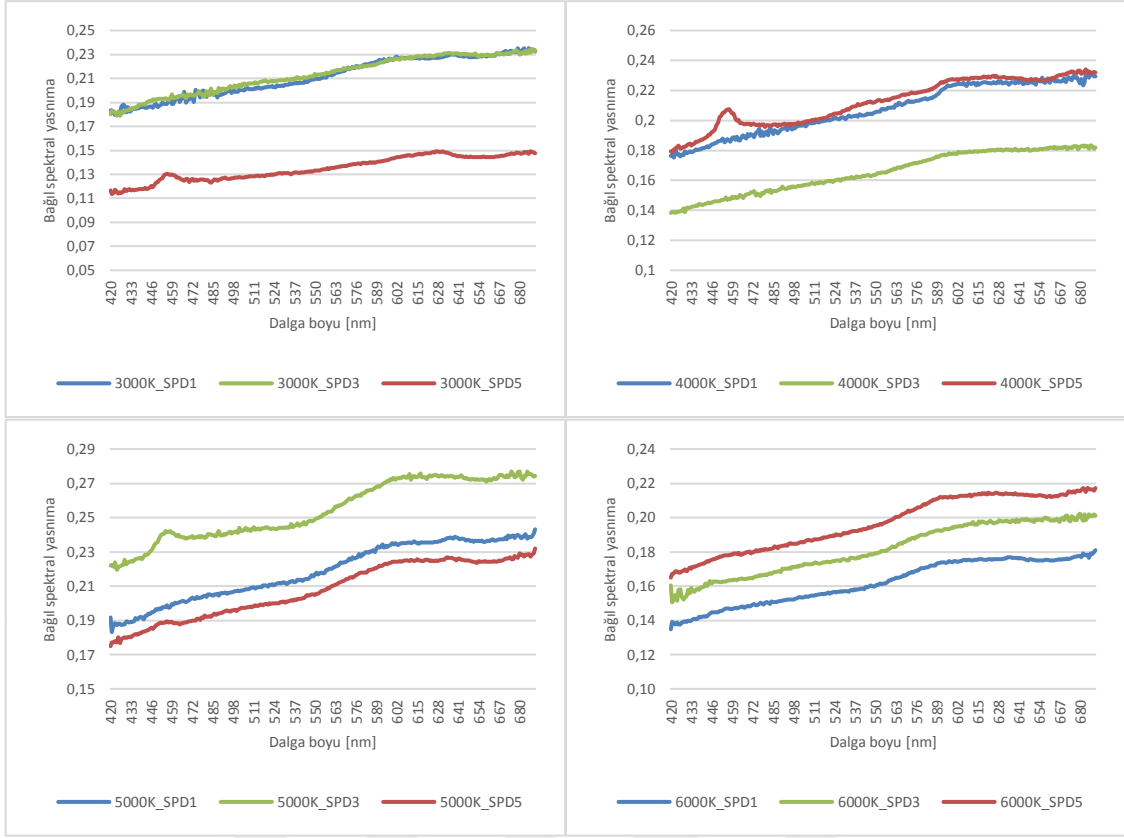
Şekil 3.12 TMA2 kaplama için YBSB ve MH lambanın spektral yansımalar

Aynı CRI fakat farklı CCT'lerde CRI arttıkça spektral yansıtma değerleri arasındaki fark büyümektedir. Farklı SPD'lerin hepsinde (SPD1, SPD3 ve SPD5) 5000K'da bağıl spektral yansıtma değeri diğerlerine göre daha yüksektir. SPD1 için 3000K, 4000K ve 5000K'da yansıtma değeri 6000K'ya göre yaklaşık %25,9 daha büyüktür. SPD3'te en düşük bağıl spektral yansıtma 4000K'da meydana gelmektedir. SPD3'te 5000K ile 4000K arasında, SPD5'te ise 5000K ile 3000K arasında yaklaşık %35 fark vardır. SPD5'te 3000K, 4000K ve 5000K'da 450-465nm arasında yansıtma değerinin artış gösterdiği görülmüştür (Şekil 3.13)



Şekil 3.13 TMA2 için aynı CRI farklı CCT SPD'lerde spektral yansımalar

Aynı CCT fakat farklı SPD'lerde, 3000K'de SPD1 ve SPD3, 4000K'de SPD1 ve SPD5, 5000K'de SPD3 altında meydana gelen bağıl yansıtma değerleri diğerlerinden daha büyüktür. 6000K'de ise tüm SPD'ler birbirinden farklı değerlerde olup SPD5 en yüksek bağıl spektral yansıtma değerlerine sahiptir. 3000K SPD1 ve SPD3'de meydana gelen spektral yansıtma en düşük değere sahip SPD5'ten yaklaşık %36,2 daha büyüktür. 4000K'de SPD1 ve SPD5 altında hemen hemen aynı bağıl yansıtma meydana gelmektedir. Bu yansıtma değeri SPD3'ün değerinden yaklaşık %20,3 daha büyüktür. Ayrıca 4000K SPD5'de bağıl yansıtma değeri 445-465nm arasında orta dalga boylarındaki spektral yansıtma değerlerine ulaştığı görülmüştür. 5000K SPD3'te diğer spektrumlardan yaklaşık %14,1 daha fazla yansıtma meydana gelmektedir. 6000K'da ise SPD5'in kaplama üzerinde oluşturduğu yansıtma SPD3 ve SPD1'den sırasıyla yaklaşık %7,8 ve %17,7 daha büyüktür (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 TMA2 için aynı CCT farklı CRI SPD'lerde spektral yansımalar

TMA2 için aynı aydınlık düzeyinde ıslak koşullarda yapılan ölçümlerde spektral yansınma değerleri kuru koşullara göre daha düşüktür. ıslak koşullarda TMA2 için tüm SPD'lerin bağıl spektral yansınma değerleri yaklaşık 600nm dalga boyuna kadar lineer artış gösterirken, 600nm'den sonraki dalga boylarında yaklaşık sabit kalmıştır.

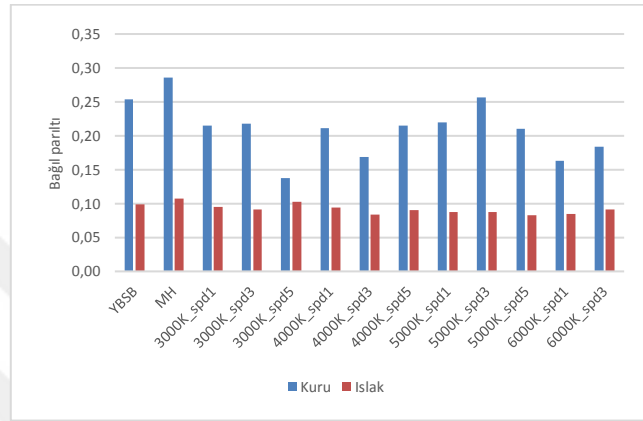
Kuru koşullarda olduğu gibi ıslak koşullarda da MH lamba altında bağıl spektral yansınma değeri YBSB lambaninkinden daha büyüktür ve fark yaklaşık %12,1'dir. Yani ıslak koşullarda bağıl spektral yansınma değerlerindeki değişimler hemen hemen aynıdır.

ıslak koşullarda aynı CRI fakat farklı CCT'lerde, bağıl spektral yansınma değerleri kuru koşulların aksine birbirine daha yakındır. ıslak koşullarda tüm spektrumlarında spektral yansınma değerleri 570-605nm arasında lineer olmayan bir artış göstermiştir. SPD1 ve SPD3'te farklı CCT'lerde yansınma değerleri hemen hemen aynıdır. Ancak SPD5 için 3000K'da bağıl yansınma değeri az da olsa diğerlerinden büyüktür.

Aynı CCT fakat farklı SPD'lerde, 5000K'de tüm SPD'de hemen hemen aynı bağıl spektral yansınma meydana gelmektedir. 3000K, 4000K ve 6000K SPD5'teki yansınma diğerlerine göre daha yüksektir.

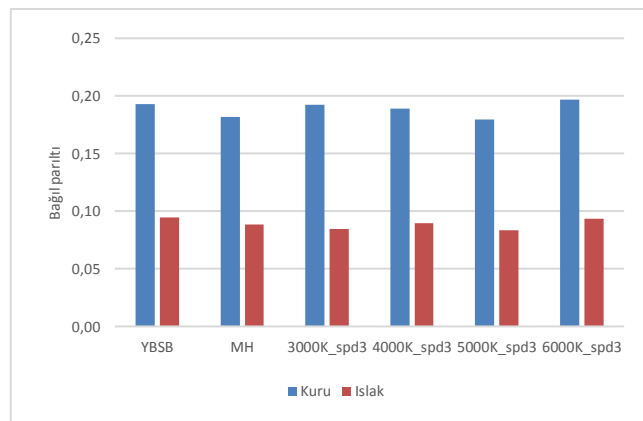
Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullarda YBSB ve MH lamba altında hemen hemen aynı yansıma değerleri meydana gelmektedir. SPD3 için 6000K'da spektral yansıma değeri diğerlerinden daha yüksektir.

Her bir spektrumun yüksek aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda SMA2 kaplaması üzerinde oluşturduğu bağıl parlıltı değerleri Şekil 3.15'te verilmiştir. En az bağıl parlıltı değişimi (yaklaşık %25) 3000K SPD5'te meydana gelmiştir. En fazla bağıl parlıltı değişimi (yaklaşık %66) ise 5000K SPD3'te meydana gelmiştir.



Şekil 3.15 TMA2 için yüksek aydınlık düzeyinde spektrumların bağıl parlıltıları

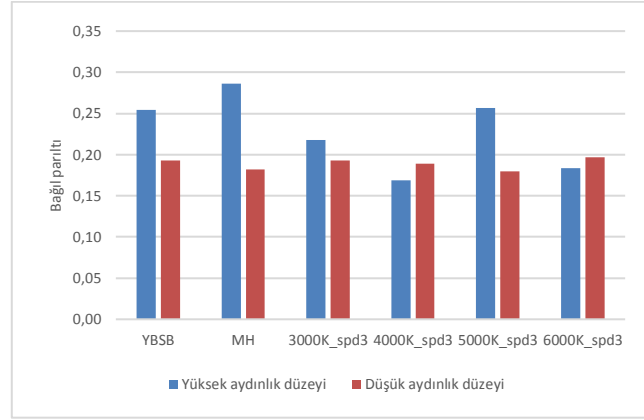
Düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullar için bağıl parlıltı değişimi Şekil 3.16'da verilmiştir. Bağıl parlıltı değişimleri birbirine oldukça yakın olsa da en fazla (yaklaşık %56) 3000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %51) YBSB lambada meydana gelmiştir.



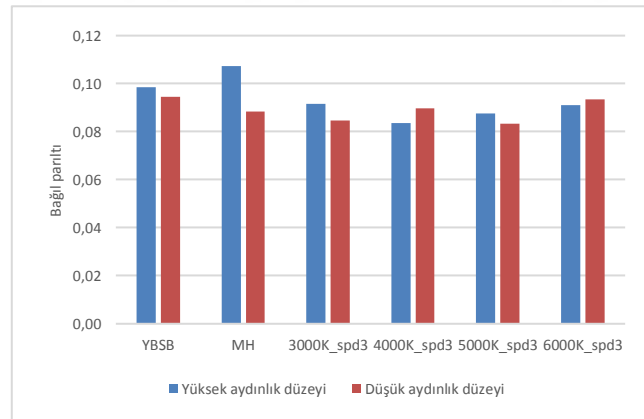
Şekil 3.16 TMA2 için düşük aydınlık düzeyinde farklı koşullarda bağıl parlıltılar

Kuru koşullarda yüksek ve düşük aydınlık düzeyleri için bağıl parlıltı değerleri Şekil 3.17'de verilmiştir. Bağıl parlıltı 4000K ve 6000K SPD3'te düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. Diğer SPD'lerde bağıl parlıltı yüksek

aydınlık düzeyinde daha yüksektir. Farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en çok (yaklaşık %36,4) MH lambada, en az (yaklaşık %6,8) ise 6000K SPD3'te meydana gelmiştir.



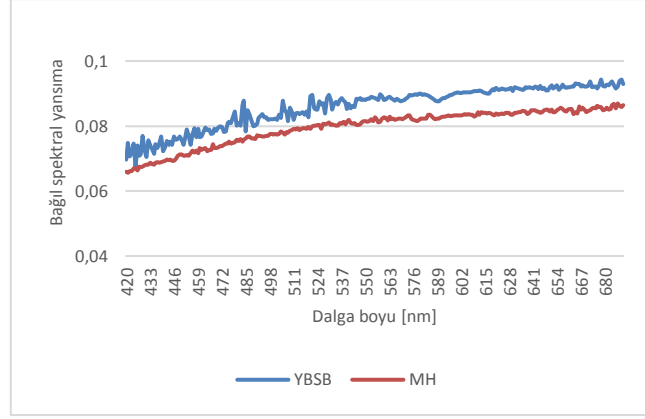
Şekil 3.17 TMA2 için kuru koşullarda farklı aydınlık düzeylerinde bağıl parıltılar
Islak koşullarda yüksek ve düşük aydınlık düzeyi değerleri için bağıl parıltı değerleri Şekil 3.18'de verilmiştir. 4000K ve 6000K SPD3'lerde bağıl parıltı düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %17,7) MH lambada, en az değişim (yaklaşık %2,6) ise 6000K SPD3'te meydana gelmiştir.



Şekil 3.18 TMA2 için ıslak koşullarda farklı aydınlık düzeylerinde bağıl parıltılar

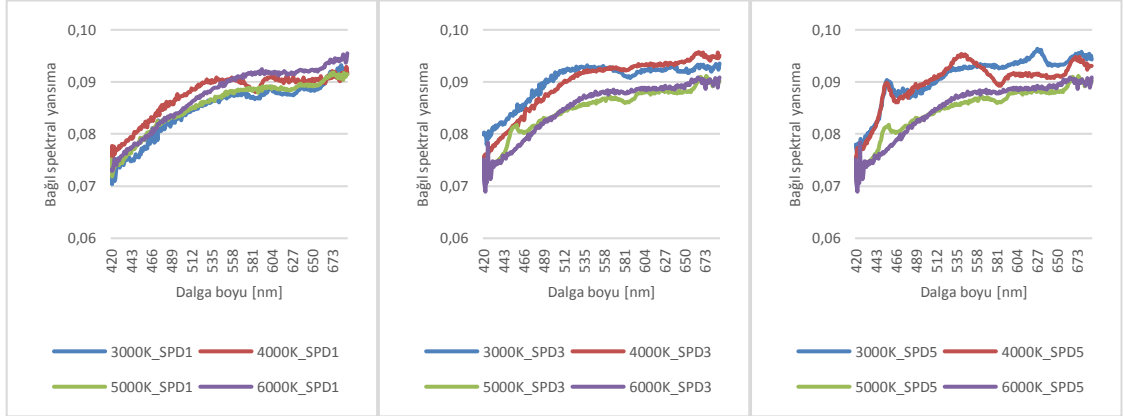
3.3.3 TMA3 Kaplaması

TMA3 kaplamasında, yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda YBSB lamba altında bağıl spektral yansımaya değeri MH lambaya göre yaklaşık %7,4 daha yüksektir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 TMA3 kaplama için YBSB ve MH lambanın spektral yansımalar

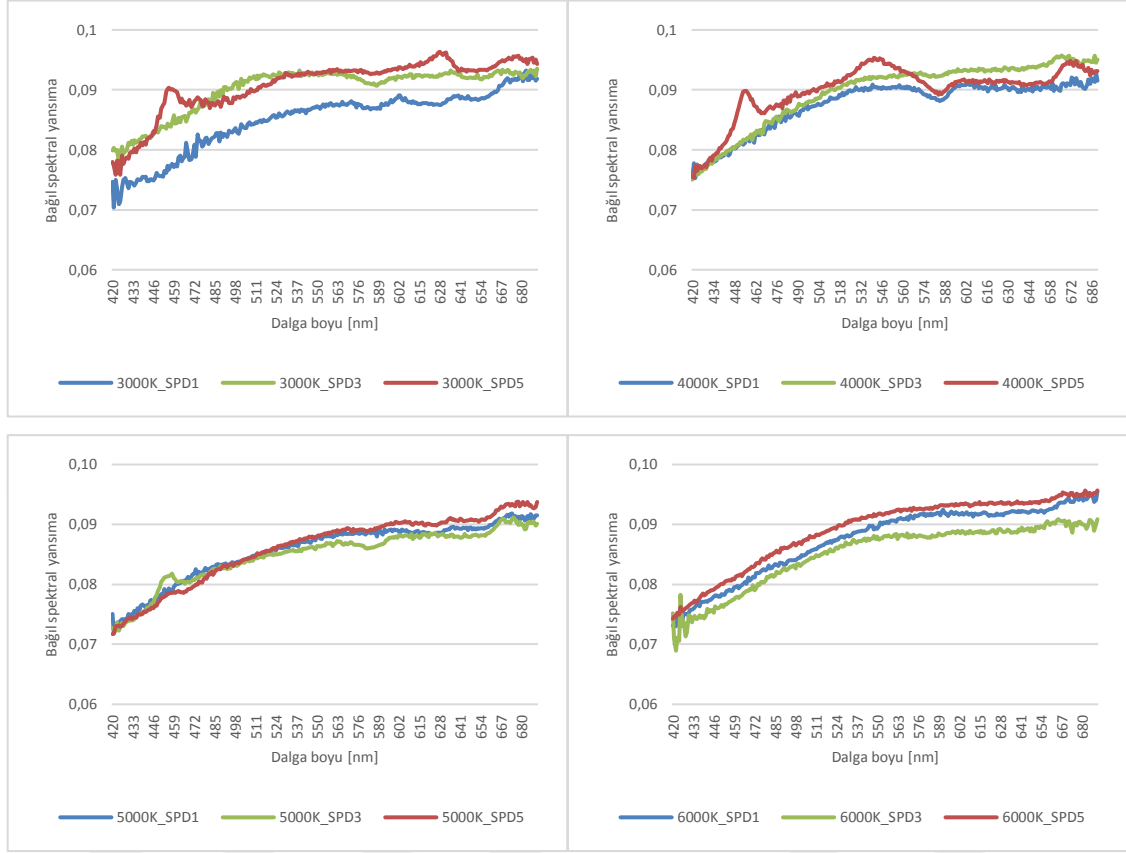
SPD1, SPD3 ve SPD5 için farklı CCT'lerde bağıl yansımaya değerleri hemen hemen aynıdır. Ancak SPD5'te her bir CCT'deki spektrumlarda bağıl yansımaya dalga boyuna göre oldukça değişim göstermektedir. SPD5 için 3000K ve 4000K'da kısa dalga boylarında aynı bağıl yansımaya meydana gelirken uzun dalga boylarında 3000K daha yüksek yansımaya değerine sahiptir. Ayrıca kısa dalga boylarında 5000K ve 6000K'da diğerlerine göre daha düşük yansımaya meydana gelirken uzun dalga boylarında ise bağıl yansımaya değerleri tüm SPD'lerde hemen hemen aynı değerdedir. SPD5 için düşük dalga boylarında 3000K ile 6000K'daki yansımaya değerleri arasında yaklaşık %3,4 fark vardır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 TMA3 için aynı CRI farklı CCT SPD'lerde spektral yansımalar

Aynı CCT fakat farklı SPD'lerde, 4000K, 5000K ve 6000K'da bağıl spektral yansımaya hemen hemen aynı değerdedir. 3000K'da SPD3 ve SPD5'te bağıl yansımaya SPD1'den daha büyüktür ve aralarında yaklaşık %5,8 fark vardır. Ayrıca 4000K SPD5'te bağıl spektral yansımaya düşük dalga boylarında en yüksek değerdeyken, yüksek dalga

boylarında diğer spektrumlara göre en düşük değere sahiptir. Yani SPD5'in yansımaya değeri orta dalga boylarında düşük göstermektedir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 TMA3 için aynı CCT farklı CRI SPD'lerde spektral yansımalar

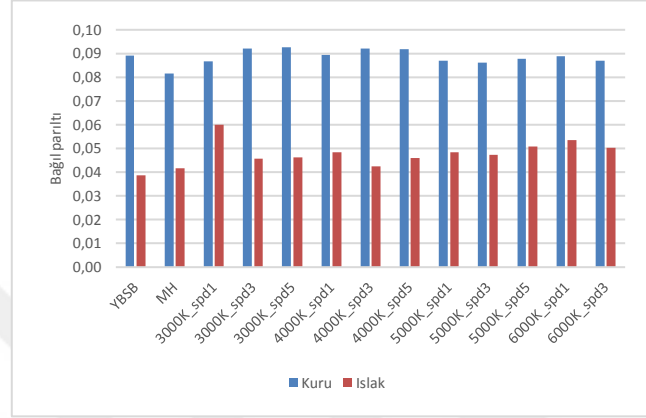
Yüksek aydınlık düzeyinde ıslak koşullarda MH lamba altında bağıl spektral yansımaya değeri YBSB lambaninkinden yaklaşık %6,6 daha büyüktür. Yani ıslak koşullarda MH lamba altında bağıl spektral yansımaya değişimi YBSB lambaya göre daha az olmaktadır.

Islak koşullarda, aynı CRI fakat farklı CCT'lerde, bağıl spektral yansımaya değerleri arasında kuru koşulların aksine daha fazla fark vardır. SPD1, 3 ve 5 için farklı CCT'de yansımaya değerleri artan dalga boyuna göre fazla değişiklik göstermemektedir. Üç farklı SPD'de de en düşük yansımaya 4000K'de meydana gelmiştir. Ancak en yüksek spektral yansımaya ise SPD1, 3 ve 5 için sırasıyla 3000K, 6000K ve 5000K'de meydana gelmiştir. Islak koşullarda CCT'lerin hepsinde SPD1'de bağıl spektral yansımaya değeri diğerlerinden daha yüksektir.

Düşük aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda MH lamba altında bağıl yansımaya değeri YBSB lambadan yaklaşık %6 daha fazladır. Düşük aydınlık düzeyi ve ıslak koşullarda ise her iki lamba altında da hemen hemen aynı spektral yansımaya meydana gelmektedir. SPD3

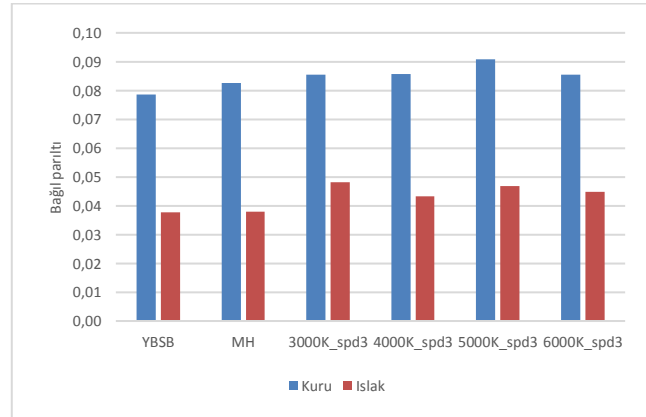
için farklı CCT'lerde düşük aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda 5000K'de, ıslak koşullarda ise 3000K'de bağıl spektral yansıma değeri diğerlerine göre daha yüksektir.

Her bir spektrumun yüksek aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda SMA3 kaplaması üzerinde oluşturduğu bağıl parıltı değerleri Şekil 3.22'de verilmiştir. En az bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %30,8) 3000K SPD1'de meydana gelmiştir. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %56,6) ise YBSB lambada meydana gelmiştir.



Şekil 3.22 TMA3 için yüksek aydınlık düzeyinde spektrumların bağıl parıltıları

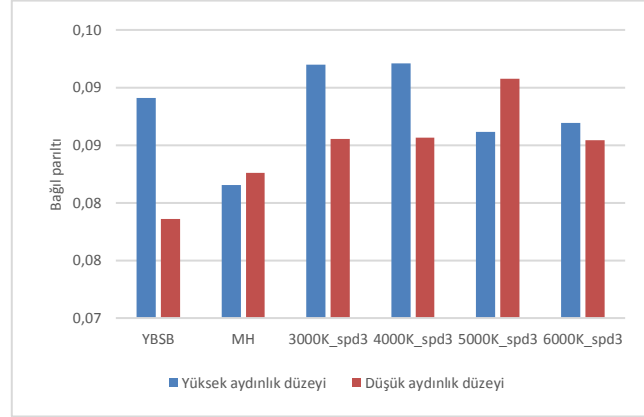
Düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimi Şekil 3.23'de verilmiştir. Bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %54) MH lambada, en az değişim ise (yaklaşık %43,7) 3000K SPD3'te meydana gelmiştir.



Şekil 3.23 TMA3 için düşük aydınlık düzeyinde farklı koşullarda bağıl parıltılar

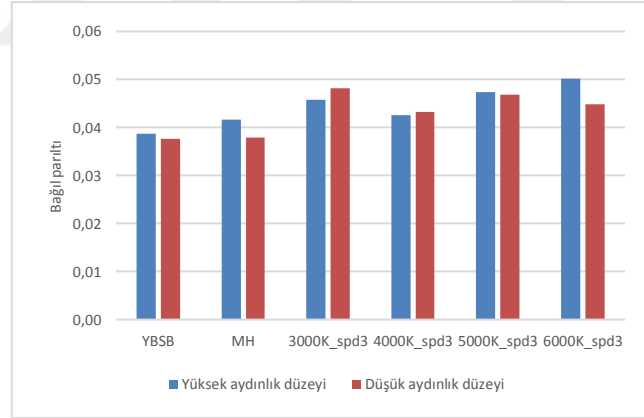
Kuru koşullarda yüksek ve düşük aydınlık düzeyleri için bağıl parıltı değerleri Şekil 3.24'te verilmiştir. Bağıl parıltı MH lamba ve 5000K SPD3'te düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. Diğer SPD'lerde bağıl parıltı yüksek aydınlık düzeyinde daha yüksektir. Kuru koşullarda farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı

değişimi en çok (yaklaşık %11,8) YBSB lambada, en az değişim ise (yaklaşık %1,5) MH lambada ve 6000K SPD3'te meydana gelmiştir.



Şekil 3.24 TMA3 için kuru koşullarda farklı aydınlık düzeylerinde bağlı parıltılar

Islak koşullarda yüksek ve düşük aydınlık düzeyi değerleri için bağlı parıltı değerleri Şekil 3.25'te verilmiştir. 3000K ve 4000K SPD3'lerde bağlı parıltı düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. En fazla bağlı parıltı değişimi (yaklaşık %10,8) 6000K SPD3'te, en az değişim (yaklaşık %1) ise 5000K SPD3'te meydana gelmiştir.



Şekil 3.25 TMA3 için ıslak koşullarda farklı aydınlık düzeyi değerlerinde bağlı parıltılar

3.3.4 TMA5 Kaplaması

TMA5 kaplamasında, yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda YBSB lamba altında bağlı spektral yansımaya değeri MH lambaya göre yaklaşık %3,9 daha yüksektir.

SPD1, SPD3 ve SPD5 için farklı CCT'lerde bağlı yansımaya değeri 5000K'de en yüksektir. SPD3 ve 5'te bağlı spektral yansımaya değerleri birbirine yakınken, SPD1 3000K'de diğerlerine göre yaklaşık %22 daha düşüktür.

3000K CCT fakat farklı SPD'lerde, SPD3 ve 5'te spektral yansımaya değeri SPD1'e göre yaklaşık %21,6 daha büyüktür. 4000K'de bağıl yansımalar birbirine yakın değerdedir. 5000K için SPD1 ve SPD3'te yansımaya değerleri SPD5'ten yaklaşık %31,7 daha büyüktür.

Islak koşullarda tüm spektral yansımaya değişimleri yaklaşık 600nm dalga boyuna kadar artış gösterirken, 600nm'den sonra yaklaşık sabit kalmaktadır. Yüksek aydınlık düzeyinde kuru koşullarda olduğu gibi ıslak koşullarda da YBSB lambada bağıl spektral yansımaya değeri MH lambaninkinden yaklaşık %13,5 daha büyüktür. Yani ıslak koşullarda bağıl spektral yansımaya değişimi MH lambada YBSB lambaya göre daha fazladır.

Islak koşullarda, aynı CRI fakat farklı CCT'lerde, SPD1 ve SPD5 için farklı CCT'lerdeki bağıl yansımaya değişimi kuru koşullarla aynıdır. Yani SPD1 için 3000K'deki, SPD5 için ise 6000K'deki bağıl spektral yansımaya diğer SPD'lere göre daha düşüktür. SPD3 için ise tüm CCT'ler birbirinden farklı değerlerde olup en yüksek ve en düşük yansımaya değerleri sırasıyla 3000K ve 4000K'da meydana gelmektedir.

Düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda yüksek aydınlık düzeyinin aksine MH lambada meydana gelen bağıl yansımaya değeri YBSB lambadan daha büyüktür. Yani aydınlık düzeyi azaldığında YBSB lambada bağıl yansımaya değişimi MH lambaninkinden daha fazladır.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullarda SPD3 için 6000K'de yansımaya değeri diğerlerine göre daha yüksektir.

Yüksek aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullarda SMA5 kaplaması üzerinde en az bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %12,4) YBSB lambada meydana gelmiştir. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %60) ise 4000K SPD3 ve 6000K SPD5'te meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %54) MH lambada, en az değişim ise (yaklaşık %43,7) 3000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, bağıl parıltı YBSB, MH ve 6000K SPD3'te düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en çok (yaklaşık %33) MH lambada, en az ise (yaklaşık %6,7) 5000K ve 6000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Islak kořullarda, baęıl parıltı MH ve 4000K SPD3'te dūřuk aydınlık dūzeyinde yūysek aydınlık dūzeyine gōre daha būyūktūr. En fazla baęıl parıltı deęiřimi (yaklařık %17) 3000K SPD3'te, en az deęiřim (yaklařık %1) ise 6000K SPD3'te meydana gelmiřtir.

3.3.5 TMA7 Kaplaması

TMA7 kaplamasında, yūysek aydınlık dūzeyinde kuru ve ıslak kořullarda MH lamba altında meydana gelen baęıl spektral yansıma deęeri YBSB lambaya gōre sırasıyla yaklařık %6,5 ve %23,9 daha yūysektir. Yani ıslak kořullarda YBSB lambada baęıl spektral yansıma MH lambadan daha fazla deęiřmektedir.

Yūysek aydınlık dūzeyi ve kuru kořullarda, bütūn CRI'larda 3000K'de baęıl spektral yansıma dięer CCT'lerdeki yansımalarından būyūktūr. SPD1 iēin 3000K ve 5000K'da spektral yansıma 4000K ve 6000K'daki spektral yansımadan yaklařık %22,7 daha fazladır. SPD3 iēin 3000K'da baęıl yansıma dięerlerinden yaklařık %36,2 daha būyūktūr. SPD5'te ise baęıl yansımalar hemen hemen aynıdır. Yūysek aydınlık dūzeyi ve ıslak kořullarda ise SPD1 ve SPD3 iēin tūm CCT'lerdeki yansıma deęerleri birbirinden farklı olup en yūysek yansıma sırasıyla 6000K ve 3000K'de meydana gelmiřtir. SPD5'te ise kuru kořullarda olduęu gibi ıslak kořullarda da tūm CCT'lerde yansıma deęerleri hemen hemen aynıdır.

Yūysek aydınlık dūzeyinde kuru ve ıslak kořullarda, 3000K ve 4000K iēin SPD3'te baęıl yansıma deęeri dięer SPD'lerden daha būyūktūr. Kuru kořullarda, SPD3 3000K'de SPD5'ten, 4000K'de ise SPD1'den sırasıyla yaklařık %36 ve %17,4 daha būyūktūr. 5000K'de farklı SPD'lerdeki spektral yansıma deęerleri kuru kořullarda daha yūysektir. Kuru kořullarda 6000K'de SPD5'teki yansıma dięer SPD'lerden yaklařık %29,4 daha būyūktūr. Ancak kuru ve ıslak kořullarda yansıma deęerleri arasında ēok fazla fark yoktur. 6000K'de ise kuru kořullarda SPD5'teki, ıslak kořullarda SPD1'deki baęıl spektral yansıma daha būyūktūr.

Dūřuk aydınlık dūzeyinde kuru kořullarda MH lambada meydana gelen baęıl yansıma YBSB lambaninkinden az miktarda būyūktūr. Dūřuk aydınlık dūzeyinde ıslak kořullarda ise MH ve YBSB lambada yansıma deęerleri hemen hemen aynıdır.

Dūřuk aydınlık dūzeyinde SPD3 iēin farklı CCT'deki baęıl spektral yansımaları inceledięimizde, hem kuru hem de ıslak kořullarda baęıl yansımaları arasında ēok fazla fark olmadığı gōrūlmüřtir.

Yüksek aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullarda SMA7 kaplaması üzerinde en az bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %21,1) 6000K SPD1’de meydana gelmiştir. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %62,2) ise 6000K SPD5’te meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %52) MH lambada ve 4000K SPD3’te, en az değişim ise (yaklaşık %42,7) 6000K SPD3’te meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, bağıl parıltı 3000K ve 5000K SPD3’te yüksek aydınlık düzeyinde düşük aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en çok (yaklaşık %33) 3000K SPD3’te meydana gelirken, en az değişim (yaklaşık %0,8) ise 4000K SPD3’te meydana gelmiştir.

Islak koşullarda, bağıl parıltı değeri YBSB ve 6000K SPD3’te düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %16) 3000K SPD3’te, en az değişim (yaklaşık %8,6) ise 6000K SPD3’te meydana gelmiştir.

3.3.6 TMA8 Kaplaması

TMA8 kaplamasında, yüksek aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda MH lamba altında bağıl spektral yansımaya değeri YBSB lambaya göre sırasıyla yaklaşık %6 ve %9,4 daha yüksektir.

Yüksek aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda, SPD3 için bütün CCT’lerde bağıl spektral yansımaya değeri yaklaşık aynıdır. SPD1 için 3000K ve 4000K’de, SPD5 için ise 4000K’de bağıl yansımaya değerleri diğerlerinden sırasıyla %18,5 ve %9,5 daha büyüktür. Yüksek aydınlık düzeyi ve ıslak koşullarda ise SPD1’de tüm CCT’lerde yansımaya değerleri hemen hemen aynıdır. SPD3’te ıslak koşullarda farklı CCT’lerin bağıl spektral yansımaları birbirinden oldukça farklıdır. SPD3 ve SPD5’te ıslak koşullarda en yüksek yansımaya sırasıyla 3000K ve 4000K’da meydana gelmiştir.

Yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda, 3000K ve 4000K için SPD1’de, 5000K ve 6000K’da ise SPD5’de bağıl yansımaya değeri daha büyüktür. Kuru koşullarda bütün CCT’lerde en düşük yansımaya SPD3 sahiptir. 3000K ve 4000K’da SPD1’in bağıl spektral yansımaya değeri, 5000K ve 6000K’da SPD5’in bağıl yansımaya değeri SPD3’ten yaklaşık %21 daha büyüktür. Yüksek aydınlık düzeyi ve ıslak koşullarda ise 4000K,

5000K ve 6000K'da SPD'lerin bağıl spektral yansımaları birbirine yakındır. 3000K'da ise SPD3 altında meydana gelen bağıl yansıma değeri diğerlerinden daha büyüktür.

Düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda YBSB lambanın meydana getirdiği bağıl spektral yansıma MH lambaninkinden daha büyüktür. Yani MH lambada düşük aydınlık düzeyinde spektral yansıma değişimi daha fazladır.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru koşullarda SPD3 için farklı CCT'lerde yansıma değerleri hemen aynı olurken, ıslak koşullarda 3000K'de bağıl yansıma değeri diğerlerinden daha büyüktür.

Yüksek aydınlık düzeyinde, ıslak koşullarda SMA8 kaplaması üzerindeki bağıl parıltı değerleri kuru koşullara göre oldukça fazla değişmektedir. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %69) YBSB, MH lamba, 5000K ve 6000K SPD5'te meydana gelmiştir. En az bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %35,7) 3000K SPD3'de meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %57,6) 4000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %46,5) 3000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, bağıl parıltı 4000K ve 5000K SPD3'te düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %24,8) MH lambada meydana gelirken, en az değişim (yaklaşık %1,2) ise YBSB lambada meydana gelmiştir.

Islak koşullarda, bağıl parıltı değeri YBSB, MH ve 6000K SPD3'te düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %29,6) YBSB lambada, en az değişim (yaklaşık %1,5) ise 5000K SPD3'te meydana gelmiştir.

3.3.7 TMA9 Kaplaması

TMA9 kaplamasında, yüksek aydınlık düzeyinde kuru koşullarda MH lamba altında bağıl spektral yansıma değeri YBSB lambaninkinden yaklaşık %6,7 daha yüksektir. Ancak ıslak koşullarda ise YBSB lambada meydana gelen spektral yansıma MH lambaninkinden yaklaşık %25,4 daha büyüktür. Yani ıslak koşullarda MH lambadaki spektral yansıma değişimi YBSB lambadan daha büyüktür.

Yüksek aydınlık düzeyinde her bir SPD için farklı CCT'lerde bağıl spektral yansıma değerleri kuru koşullarda hemen hemen aynı olurken, ıslak koşullarda ise bağıl yansıma değerleri birbirinden farklıdır. Islak koşullarda SPD1 için 6000K'de, SPD3 ve SPD5 için ise 4000K'de bağıl yansıma daha büyük olmaktadır.

Yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda, her bir CCT'de tüm SPD'lerde bağıl yansımalar yaklaşık aynıdır. Islak koşullarda ise, 3000K ve 4000K'da SPD5 altında 5000K'da ise SPD3 altında bağıl spektral yansıma değeri daha büyük olmaktadır. 6000K'de ise ıslak koşullarda olduğu gibi SPD'lerin bağıl yansıma değerleri hemen hemen aynıdır.

Düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda, MH lamba altında bağıl spektral yansıması YBSB lambaninkinden çok az büyüktür. Yani YBSB ve MH lamba altında düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullardaki yansıma değişimleri yaklaşık aynıdır.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru koşullarda SPD3 için farklı CCT'lerde yansıma değerleri hemen aynı olurken, ıslak koşullarda 3000K ve 5000K'de bağıl yansıma değeri diğerlerinden daha büyüktür.

Yüksek aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullarda parıltılar karşılaştırıldığında en fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %59,3) 3000K SPD1'de meydana gelmiştir. En az bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %23,8) YBSB lambada meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %52) 4000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %39) MH ve 5000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, bağıl parıltı tüm SPD'lerde yüksek aydınlık düzeyinde düşük aydınlık düzeyine göre göre daha büyüktür. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %9,9) 4000K SPD3'te meydana gelirken, en az değişim (yaklaşık %0,6) ise YBSB lambada meydana gelmiştir.

Islak koşullarda, bağıl parıltı değeri MH ve 5000K SPD3'te düşük aydınlık düzeyinde yüksek aydınlık düzeyine göre daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %31,5) 4000K SPD3'te, en az değişim (yaklaşık %0,7) ise 3000K SPD3'te meydana gelmiştir.

3.3.8 TMA13 Kaplaması

TMA13 kaplamasında kırmızımsı agregaların bulunmasından dolayı bağıl spektral yansıma değerleri uzun dalga boylarında diğer kaplamalara göre daha yüksektir. Yüksek aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda YBSB ve MH lambalarda bağıl spektral yansımalar hemen hemen aynıdır.

Yüksek aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda, her bir SPD için farklı CCT'lerde bağıl spektral yansıma değerleri hemen hemen aynıdır. SPD5 için kısa dalga boyunda 4000K'de bağıl spektral yansıma diğer CCT'lerden büyükken, uzun dalga boyunda ise 6000K'de yansıma değeri daha büyüktür. Islak koşullarda SPD3 için farklı CCT'lerde yansıma değerleri yine hemen hemen aynıdır. SPD1 için 5000K'de ve SPD5 için 4000K'de bağıl spektral yansıma değerleri diğerlerinden sırasıyla %12,4 ve %16,6 daha büyüktür.

Yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda, 3000K ve 4000K'de tüm SPD'lerde bağıl spektral yansımalar hemen hemen aynıdır. 5000K ve 6000K'da ise kısa dalga boyunda bağıl yansımalar aynı olurken, uzun dalga boylarında sırasıyla SPD1 ve SPD3'te yansıma değerleri daha büyük olmaktadır. Islak koşullarda ise, 3000K, 5000K ve 6000K için SPD1'de, 4000K için ise SPD5'te bağıl spektral yansıma değeri diğerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru koşullarda, MH lamba altında bağıl spektral yansıma YBSB lambaninkinden çok az büyük olurken, ıslak koşullarda her ikisinde de yansıma değerleri hemen hemen aynıdır. Yani kuru koşullarda azalan aydınlık düzeyinde MH lambada spektral yansıma değişimi YBSB lambadan daha fazla olmaktadır.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru koşullarda SPD3 için farklı CCT'lerde yansıma değerleri hemen hemen aynı olurken, ıslak koşullarda 6000K'de bağıl yansıma değeri diğerlerinden daha küçüktür.

Yüksek aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullarda parıltılar karşılaştırıldığında en fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %50,6) 6000K SPD3'de meydana gelmiştir. En az bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %37,2) YBSB lambada meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %52,9) 6000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %39) 5000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, aydınlık düzeyi azaldığında tüm SPD'lerde bağıl parıltı değerleri yükselmektedir. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %10) MH lambada meydana gelirken, en az değişim (yaklaşık %4) ise YBSB lambada ve 4000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Islak koşullarda, bağıl parıltı değeri YBSB ve MH lambada düşük aydınlık düzeyi ile karşılaştırıldığında yüksek aydınlık düzeyinde daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %16) 5000K SPD3'te, en az değişim (yaklaşık %3,6) ise MH lambada meydana gelmiştir.

3.3.9 BA14 Kaplaması

BA14 kaplamasında açık ve koyu renkli agregaların bir arada olmasından dolayı özellikle kuru koşullarda bazı bağıl spektral eğrilerin değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Yüksek aydınlık düzeyinde kuru koşullarda YBSB ve MH lambalar altında bağıl spektral yansımalar hemen hemen aynıdır. Islak koşullarda ise YBSB lambada spektral yansıma MH lambaninkinden yaklaşık %18,4 daha fazladır.

Yüksek aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda, SPD1 için 3000K'de bağıl spektral yansıma diğer CCT'lerdeki yansıma değerlerinden yaklaşık %39,6 daha fazladır. SPD3 için kuru koşullarda tüm spektrumlarda bağıl yansıma eğrisi çok değişken bir yapıya sahiptir ve en yüksek yansıma 4000K'de meydana gelmektedir. SPD5'te ise farklı CCT'lerde yansıma değerleri hemen hemen aynıdır. Islak koşullarda, SPD1 için farklı CCT'lerde bağıl yansımalar değişmezken, SPD3 ve SPD5 için 4000K'de bağıl yansıma değeri diğerlerinden daha büyük olmaktadır.

Yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda, 3000K SPD1'de bağıl spektral yansıma diğerlerinden yaklaşık %38,5 daha büyüktür. 4000K ve 5000K'de spektral yansımalar oldukça değişkenlik göstermekte olup SPD3'te yansıma değeri daha büyüktür. 6000K'de ise SPD'lerde yansıma değerli birbirine çok yakındır. Yüksek aydınlık düzeyinde ıslak koşullarda bağıl spektral yansımalar her bir CCT'de birbirine oldukça yakındır. Sadece 3000K SPD3'te bağıl spektral yansıma diğer yansıma değerlerinden daha düşüktür.

Düşük aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda YBSB, MH ve diğer LED SPD'larda bağıl yansımalar yaklaşık aynı değerlere sahiptirler. Düşük aydınlık düzeyinde ıslak koşullarda ise MH lambada yansıma değeri YBSB lambaninkinden çok az büyük olduğu

görülmektedir. Farklı CCT'lerde meydana gelen yansıma değerleri ıslak koşullarda hemen hemen aynıdır.

Beton asfalt kaplaması ıslatıldığında suyu emdiğinden çok fazla renk değişimi meydana gelmektedir. Bu nedenle AB14 kaplamasında kuru ve ıslak koşullar için SPD'lerin bağlı parıltı değişimleri oldukça fazladır. En fazla bağlı parıltı değişimi (yaklaşık %80,7) 3000K SPD3'de meydana gelmiştir. En az bağlı parıltı değişimi ise (yaklaşık %58,3) YBSB lambada meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağlı parıltı değişimleri birbirine oldukça yakın ve büyük değerlerdedir. En fazla (yaklaşık %73) 6000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %70) MH lambada meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, aydınlık düzeyi azaldığında 3000K ve 4000K'da bağlı parıltı değerleri azalmakta diğer SPD'lerde ise yükselmektedir. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağlı parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %7) YBSB ve MH lambada meydana gelirken, en az değişim (yaklaşık %2,2) ise 3000K ve 4000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Islak koşullarda, bağlı parıltı değeri 3000K SPD3'te düşük aydınlık düzeyi ile karşılaştırıldığında yüksek aydınlık düzeyinde daha küçüktür. En fazla bağlı parıltı değişimi (yaklaşık %26,4) YBSB lambada, en az değişim ise (yaklaşık %0,1) ise MH lamba ve 6000K SPD3'te meydana gelmiştir.

3.3.10 NA15 Kaplaması

NA15 kaplamasında, yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda MH lambada bağlı spektral yansıma YBSB'dan yaklaşık %5,6 daha büyüktür. Islak koşullarda ise MH lambada bağlı spektral değişim daha fazla olduğundan YBSB lambada spektral yansımasın MH lambaninkinden yaklaşık %7,1 daha fazladır.

Yüksek aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda, SPD1 ve SPD3 için 3000K'de bağlı spektral yansıma değeri diğer CCT'lerdeki yansıma değerlerinden sırasıyla yaklaşık %12 ve %7,5 daha büyüktür. SPD5 için kuru koşullarda tüm spektrumların bağlı yansıma değerleri birbirine oldukça yakındır. Aynı SPD fakat farklı CCT'lerdeki yansıma değerlerini ıslak koşullarda incelediğimizde, SPD1 için 3000K'de bu kez yansıma değeri diğerlerinden daha düşük olmaktadır. SPD5 için ise 5000K'de bağlı yansıma değeri diğerlerine göre daha fazla azalmıştır.

Yüksek aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda, 3000K için farklı SPD'lerde SPD1 altında bağıl yansıma değerini en yüksek olduğu ancak ıslak koşullarda ise en düşük olduğu görülmektedir. Islak koşullarda 4000K'de yansımalar hemen hemen aynı değişime sahiptir. Diğer CCT'lerde ise SPD3 diğerlerinden daha büyük yansıma sahiptir.

Düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda tüm spektrumların bağıl spektral yansımaları hemen aynı olmaktadır. Ancak düşük aydınlık düzeyinde kuru ve ıslak koşullarda SPD3 için 3000K'de bağıl yansıma değeri 490-560nm dalga boyları arasında diğer SPD'lerden daha büyük olmaktadır.

NA15 kaplamasında kuru ve ıslak koşullarda parıltılar karşılaştırıldığında en fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %36,5) 3000K SPD1'de meydana gelmiştir. En az bağıl parıltı değişimi ise (yaklaşık %15) YBSB lambada ve 6000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimleri birbirine oldukça yakın ve büyük değerlerdedir. En fazla (yaklaşık %26,1) 4000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %20) 6000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, aydınlık düzeyi azaldığında sadece YBSB lamba altında bağıl parıltı değeri artmakta diğer SPD'lerde ise azalmaktadır. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %9,2) 3000K SPD3'te meydana gelirken, en az değişim (yaklaşık %2,8) ise YBSB lambada meydana gelmiştir.

Islak koşullarda, bağıl parıltı değerleri tüm SPD'lerde düşük aydınlık düzeyi ile karşılaştırıldığında yüksek aydınlık düzeyinde daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %12,5) 4000K ve 6000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %3,1) ise MH lambada meydana gelmiştir.

3.3.11 TMA16 Kaplaması

TMA16 kaplamasında, farklı SPD'lerde bağıl spektral yansıma değerleri tüm dalga boylarında hemen hemen sabit kalmaktadır. Ancak yine de bazı SPD'lerin bağıl yansıma eğrileri arasında farklar olmaktadır. Yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda MH lamba altında bağıl spektral yansıma YBSB'dan yaklaşık %6,4 daha büyüktür. Islak koşullarda ise YBSB ve MH lambada bağıl spektral değişim hemen hemen aynıdır.

Yüksek aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda, SPD1 için 3000K'de bağıl spektral yansıma değeri diğer CCT'lerdeki yansıma değerlerinden yaklaşık %10,5 daha küçüktür. SPD3

için 3000K’de bağıl yansımaya değeri diğerlerinden büyük olup 4000K’deki bağıl yansımaya değeri ile arasında yaklaşık %13,8 fark vardır. SPD5 için ise bağıl spektral yansımalar oldukça fazla değişim göstermektedir. SPD’lerin yansımaya değerleri kısa dalga boyunda uzun dalga boyuna göre daha büyüktür. En yüksek bağıl yansımaya 4000K’de meydana gelmektedir. Yüksek aydınlık düzeyi ve ıslak koşullarda ise, SPD1 için bağıl yansımalar birbirine oldukça yakındır. SPD3 için 3000K’de bağıl yansımaya değerinin diğerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. SPD5 için ise 3000K’de bağıl yansımaya en büyük değerdedir.

Yüksek aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullarda, her bir CCT için farklı SPD’larda bağıl yansımaya değerlerini incelediğimizde 5000K’de bağıl spektral yansımalar kısa ve uzun dalga boyunda yüksek olurken orta dalga boylarında daha düşüktür. Kuru koşullarda 3000K SPD3’te meydana gelen bağıl yansımaya diğerlerinden yaklaşık %15 daha büyüktür. Islak koşullarda ise en düşük bağıl yansımaya 3000K SPD3 sahiptir. Yüksek aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda 4000K’de bağıl yansımaya değerleri hemen hemen aynıyken, ıslak koşullarda SPD3 altında daha yüksek yansımaya meydana gelmektedir. Kuru koşullarda 6000K SPD5 diğerlerinden daha yüksek bağıl yansımaya sahipken, ıslak koşullarda bağıl yansımalar hemen hemen aynı değerlerdedir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru koşullarda her bir SPD’de yaklaşık aynı bağıl yansımaya görülmektedir. Düşük aydınlık düzeyi ve ıslak koşullarda ise MH lamba altında bağıl yansımaya YBSB lambadan daha büyüktür. SPD3 için ise 3000K’de bağıl yansımaya diğerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir.

SMA16 kaplamasında kuru ve ıslak koşullarda bağıl parıltılar karşılaştırıldığında en fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %41,4) 3000K SPD3’te meydana gelmiştir. En az bağıl parıltı değişimi ise (yaklaşık %9,9) 4000K SPD3’te meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %26,1) YBSB lamba, en az değişim ise (yaklaşık %20) MH lambada ve 3000K SPD3’te meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, aydınlık düzeyi azaldığında sadece 4000K SPD3’te bağıl parıltı değeri artmakta diğer SPD’lerde ise azalmaktadır. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %13,9) 3000K SPD3’te meydana gelirken, en az değişim (yaklaşık %0,1) ise YBSB lambada ve 6000K SPD3’te meydana gelmiştir.

Islak koşullarda, bağıl parıltı değerleri YBSB, MH ve 3000K SPD3'te yüksek aydınlık düzeyi ile karşılaştırıldığında düşük aydınlık düzeyinde daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %16) MH lambada ve 3000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %4,5) ise YBSB lambada meydana gelmiştir.

3.3.12 KA17 Kaplaması

KA17 kaplamasında, yüksek aydınlık düzeyinde ve kuru koşullarda YBSB ve MH lambalarda bağıl spektral yansım değerleri hemen hemen aynıdır. Ancak ıslak koşullarda ise MH lamba altında bağıl yansım değeri YBSB lambanınkinden yaklaşık %9,3 daha büyüktür. Yani ıslak koşullarda YBSB lamba altında bağıl yansım değişimi MH lambadan daha büyüktür.

Yüksek aydınlık düzeyi ve kuru koşullarda, SPD1 için 4000K'de bağıl spektral yansım değeri diğer CCT'lerdeki yansım değerlerinden yaklaşık %8,8 daha küçüktür. Islak koşullarda ise bağıl yansımalar yaklaşık aynı değerdedir. SPD3 ve SPD5 için farklı CCT'lerdeki bağıl yansımalar kuru ve ıslak koşullarda hemen hemen aynıdır.

Yüksek aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullarda, her bir CCT'de farklı SPD'lar altında bağıl yansım değerlerini incelediğimizde tüm SPD'larda hemen hemen aynı bağıl yansım değerleri olduğu görülmektedir.

KA17 kaplamasında kuru ve ıslak koşullarda bağıl parıltılar karşılaştırıldığında en fazla bağıl parıltı değişimi (yaklaşık %35) 3000K, 5000K ve 6000K'da SPD3'te meydana gelmiştir. En az bağıl parıltı değişimi ise (yaklaşık %25) 4000K SPD1'de meydana gelmiştir.

Düşük aydınlık düzeyinde, kuru ve ıslak koşullar için bağıl parıltı değişimleri birbirine oldukça yakındır. En fazla (yaklaşık %38) 6000K SPD3'te, en az değişim ise (yaklaşık %34,5) YBSB lambada meydana gelmiştir.

Kuru koşullarda, aydınlık düzeyi azaldığında tüm SPD'lerde bağıl parıltı değerleri azalmaktadır. Kuru koşullarda ve farklı aydınlık düzeyinde bağıl parıltı değişimi en fazla (yaklaşık %7,3) 4000K SPD3'te meydana gelirken, en az değişim (yaklaşık %2,6) ise 3000K SPD3'te meydana gelmiştir.

Islak koşullarda, bağıl parıltı değerleri tüm SPD'lerde düşük aydınlık düzeyi ile karşılaştırıldığında yüksek aydınlık düzeyinde daha büyüktür. En fazla bağıl parıltı

değişimi (yaklaşık %20,8) MH lambada, en az değişim ise (yaklaşık %6) ise YBSB lambada meydana gelmiştir.




3.4 Sonuçlar

Bu çalışmada, kaplamalarda kullanılan agregaların renginin ve parlaklığının o kaplamanın yansıtma özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Ayrıca kaplamanın fiziksel özellikleri yol aydınlatma performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Aynı yol kaplamasının farklı spektrumlarla (YBSB, MH ve farklı CCT ve CRI'daki LED spektrumları) aydınlatılması durumunda yol kaplamalarının yansıtma özellikleri değişebilmektedir.

Yüksek ve düşük aydınlık düzeyinde tüm spektrumlar altında her bir kaplama için ıslak koşullarda bağıl yansıma değerleri kuru koşullara göre azalmaktadır. Ancak bağıl spektral yansıma değişimleri kuru ve ıslak koşullarda hemen hemen aynı şekildedir. Kuru koşullarda yüksek aydınlıktan düşük aydınlık düzeyine geçildiğinde ise spektrumlar altında bağıl yansıma değerleri kaplama çeşidine göre farklı özellikler gösterebilmektedir. Örneğin, açık renk agregaya sahip kaplamalarda YBSB, MH ve farklı CCT'deki spektrumlar altında yansıma değerlerinin birbirinden farklı olduğu, koyu agregaya sahip kaplamalarda ise yansıma değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Aynı şekilde ıslak koşullarda da kaplamalarının yansıma değerlerinin spektrumlara göre değişim gösterdiği görülmüştür.

Burada sonuçlar yorumlanırken dikkat edilmesi gereken, yol aydınlatma kriterlerinin değişmesine neden olan durumlardır. Bunlardan biri farklı hava koşullarıdır. Yol aydınlatma tasarımları genellikle kuru koşullar dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu koşullarda standartlarda belirtilen parıltı değerleri yol yüzeyinde sağlanmaktadır. Ancak farklı hava koşullarında yol kaplamalarının yansıma özellikleri değişeceğinden yol aydınlatma kriterleri de değişecektir. Bir diğer durum ise, enerji tasarrufu için ışık akısının belirli saatlerde azaltılmasıdır (dimmerleme). Her iki durumda da farklı spektrumlar altında yol kaplamalarının yansıma özellikleri değişecektir. Bu nedenle sonuçlar, değişen koşullardan en az etkilenen (değişim oranı en az olan) spektrumlara göre belirlenmiştir.

Farklı yol kaplamaları için yukarıda belirtilen her iki koşulu aynı anda sağlayan en uygun spektrumlar Şekil 3.26'da verilmiştir.

		YBSB		MH		3000K		4000K		5000K		6000K	
		Kuru /Islak	Yüksek /Düşük	Kuru /Islak	Yüksek /Düşük	Kuru /Islak	Yüksek /Düşük	Kuru /Islak	Yüksek /Düşük	Kuru /Islak	Yüksek /Düşük	Kuru /Islak	Yüksek /Düşük
TMA1		X						X	X				X
TMA2								X				X	X
TMA3					X							X	X
TMA5		X									X		X
TMA7				X					X	X	X		
TMA8			X			X	X		X		X		
TMA9		X	X								X		
TMA13		X	X						X				
BA14		X					X		X	X	X		
NA15		X	X									X	
TMA16			X					X	X			X	X
KA17			X	X		X	X						X

Şekil 3.26 Farklı yol kaplamalarının aydınlatılması için en uygun spektrumlar

YOL AYDINLATMASINDA FARKLI SPEKTRUMLARIN SİS KOŞULLARINDA İNCELENMESİ

Bu bölümde, yol aydınlatmasında kullanılan farklı spektrumların etkileri sisli hava koşulları için incelenmiştir. İlk olarak, spektrumların değişen sis yoğunluğunda geçirgenlikleri incelenmiştir. İkinci olarak ise, sisin farklı spektrumlar altında cisim görülebilirliği üzerine etkisi yapılan testler neticesinde ortaya konulmuştur.

4.1 Farklı Spektrumların Geçirgenliklerinin Sis Koşullarında İncelenmesi

Bu bölümde, farklı spektrumların sis koşullarında geçirgenlik özellikleri incelenmiştir. Ölçümlerde bir önceki bölümde tanımlanan YBSB, MH ve LED SPD'ler kullanılmıştır. Ölçüm düzeneği ise yine aynı bölümde özellikleri ve detayları verilen kutular kullanılarak oluşturulmuştur. Ancak kutuların her tarafı kapatılarak kapalı bir ortam meydana getirilmiştir. Ayrıca sis üretici belli bir noktada kutuyla birleştirilerek kutunun içerisine sis doldurması sağlanmıştır. Kutuların biri YBSB ve MH lamba için diğeri ise LED SPD'ler için kullanılmıştır. Aydınlik düzeyleri kutuların tam orta noktasından ölçülmüştür. Antari Z800II sis makinası yardımıyla sis üretimi sağlanmıştır. Sis makinası saniyede $1,416\text{m}^3$ sis verebilmektedir [75]. Ölçümlerde orta yoğunlukta sis sıvısı kullanılmıştır.

Her bir ışık kaynağı kararlı hale geldikten sonra ilk olarak kuru ortamda aydınlık düzeyleri ölçülmüştür. Tüm spektrumların aydınlık düzeyleri kuru ortamda aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra sis makinası yardımıyla kutu içerisine sis doldurulmuştur. Her bir ölçümde sis aynı noktadan ve aynı miktarda verilmiştir (3sn yaklaşık $4,25\text{ m}^3$). Böylece aynı sis yoğunluğunda ölçümler yapılmıştır. Ayrıca sis yoğunluğunun doğruluğunu belirlemek için tüm ölçümler en az üç kez tekrarlanmış ve

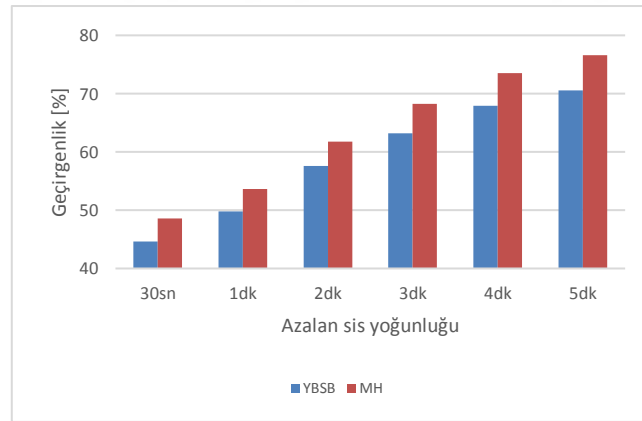
her seferinde hemen hemen aynı değerler elde edilmiştir. Çizelge 4.1’de sis yoğunluğunun doğruluğunu belirlemek için referans bir ışık kaynağı altında elde edilen aydınlık düzeyi değerleri verilmiştir. Kutu içerisi sis ile dolduktan sonra 30 saniye sisin homojen olarak kutu içerisine yayılması beklenmiştir. Aydınlık düzeyi ölçümleri 30.sn, 1, 2, 3, 4 ve 5. dakikalar da olmak üzere toplam altı kez yapılmıştır. Böylece azalan sis yoğunluğunda geçirgenlik değişimi de ortaya konulmuş olmaktadır.

Çizelge 4.1 Sis yoğunluğunun doğruluğunu belirlemek için örnek ölçüm sonuçları

	Aydınlık Düzeyi (lx)						Kuru ortamda
	30.sn	1.dk	2.dk	3.dk	4.dk	5.dk	
1. Ölçüm	480	503	521	539	562	607	703
2. Ölçüm	477	503	522	541	572	604	702
3. Ölçüm	482	500	525	540	576	604	702

4.1.1 Deneysel Sonuçlar

Yapılan analizlerde her bir sis yoğunluğundaki geçirgenlik değerleri dikkate alınmıştır. MH lambanın geçirgenliğinin her sis yoğunluğunda YBSB lambadan ortalama %7,5 daha büyük olduğu görülmüştür (Şekil 4.1).



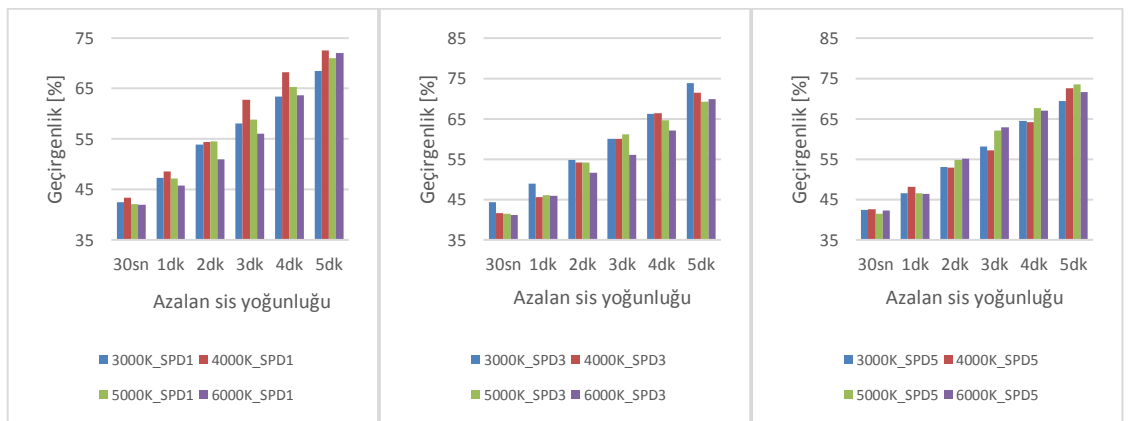
Şekil 4.1 YBSB ve MH lambanın yüksek aydınlık düzeyinde geçirgenlikleri

Farklı CRI fakat aynı CCT’deki spektrumlar incelendiğinde, yüksek sis yoğunluğunda farklı CRI’lara sahip spektrumların geçirgenliklerinin hemen hemen aynı olduğu fakat düşük sis yoğunluğunda ise geçirgenlik değerlerinin çok az miktarda değiştiği görülmüştür (Şekil 4.2).



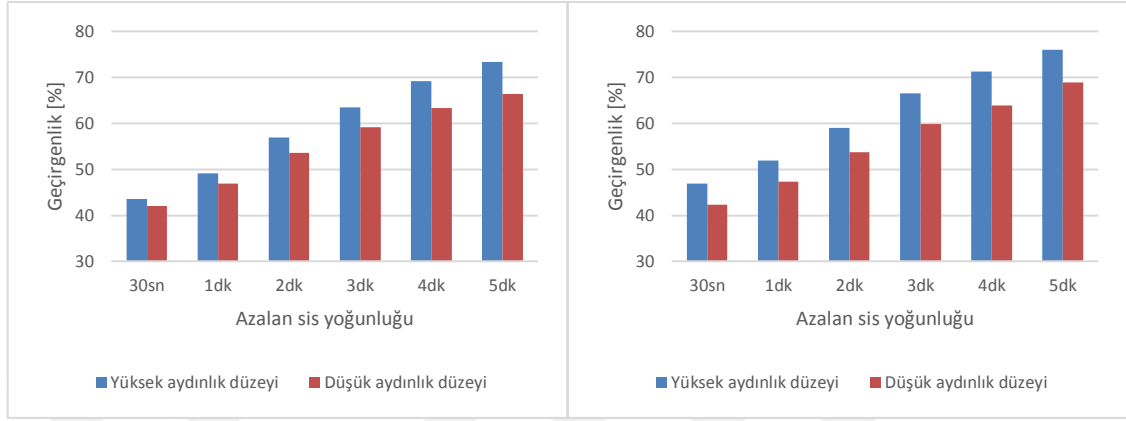
Şekil 4.2 Aynı CCT farklı CRI spektrumlarının yüksek aydınlık düzeyinde geçirgenlikleri. Yüksek sis yoğunluğunda 3000K’de SPD3 diğer spektrumlarda daha yüksek geçirgenliğe sahiptir. 5000K’de ise yoğun siste SPD1, orta ve düşük siste ise SPD5 daha yüksek geçirgenliğe sahiptir. Şekilden de görüldüğü üzere ve diğer ölçüm sonuçlarını da incelediğimizde renksel geriverim değerinin sis altında geçirgenliği çok değiştirmedeği anlaşılmaktadır.

Farklı CCT fakat aynı CRI’deki spektrumları incelediğimizde, farklı CCT’deki spektrumların geçirgenliklerinin sis yoğunluğuna bağlı olarak çok az miktarda değiştiği ve her bir CRI farklı değerler aldığı görülmüştür. Örneğin, yüksek sis yoğunluğunda SPD1 ve SPD3 için her sis yoğunluğunda sırasıyla 4000K ve 3000K’de geçirgenlik en yüksek olmaktadır. SPD5 için ise 4000K’de daha yüksek geçirgenlik elde edilmiştir. Sis yoğunluğu azaldığında ise SPD5 için en yüksek geçirgenlikler 5000K’de meydana gelmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Aynı CRI farklı CCT spektrumlarının yüksek aydınlık düzeyinde geçirgenlikleri. Düşük aydınlık düzeyinin geçirgenlik üzerindeki etkisini incelemek için yatay aydınlık düzeyi değeri yaklaşık %45 oranında azaltılmıştır. Düşük aydınlık düzeyinde YBSB ve

MH lambanın geçirgenlikleri her bir sis yoğunluğunda azaldığı görülmüştür. Ayrıca aradaki geçirgenlik farkının azalan sis yoğunluğuna bağlı olarak arttığı görülmüştür. Aydınlik düzeyi azaltıldığında YBSB ve MH lambanın geçirgenlik değerlerindeki değişim sırasıyla ortalama %6,5 ve %9,5'dir (Şekil 4.4).

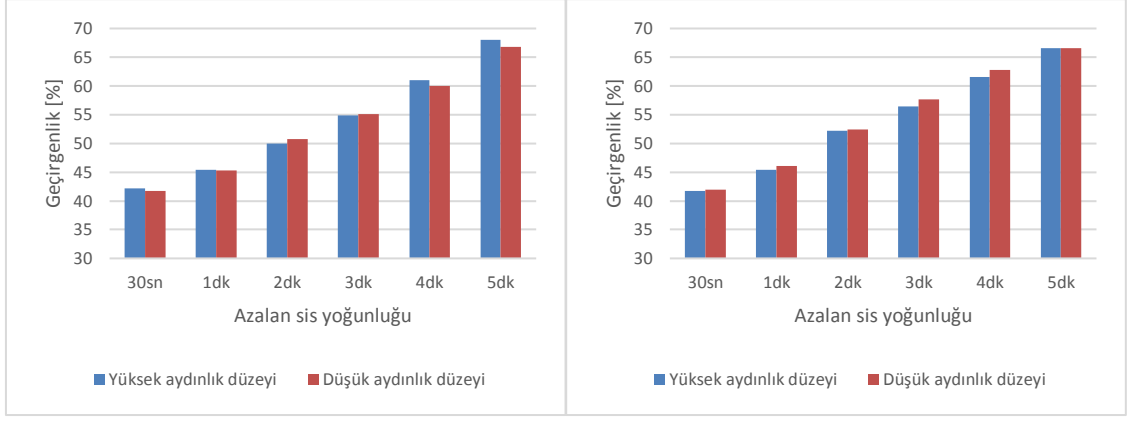


a)

b)

Şekil 4.4 Farklı aydınlık düzeylerinde geçirgenlikler a)YBSB, b)MH

Farklı CCT'de spektrumların geçirgenlik değerleri düşük aydınlık düzeyinde ölçüldüğünde, geçirgenlik değerlerinin yüksek aydınlık düzeyindeki değerlerle hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Ancak 3000K'de düşük aydınlık düzeyinde genellikle azalan sis yoğunluğuyla birlikte geçirgenliğin az da olsa azaldığı ancak 6000K'de ise azalan sis yoğunluğuyla geçirgenliğin arttığı görülmektedir. Burada geçirgenlik CRI'ya bağlı olarak çok fazla değişmediğinden iki farklı CRI için sonuçlar verilmiştir (Şekil 4.5).



a)

b)

Şekil 4.5 Farklı aydınlık düzeylerinde geçirgenlikler a)3000K_SPD5, b)6000K_SPD4

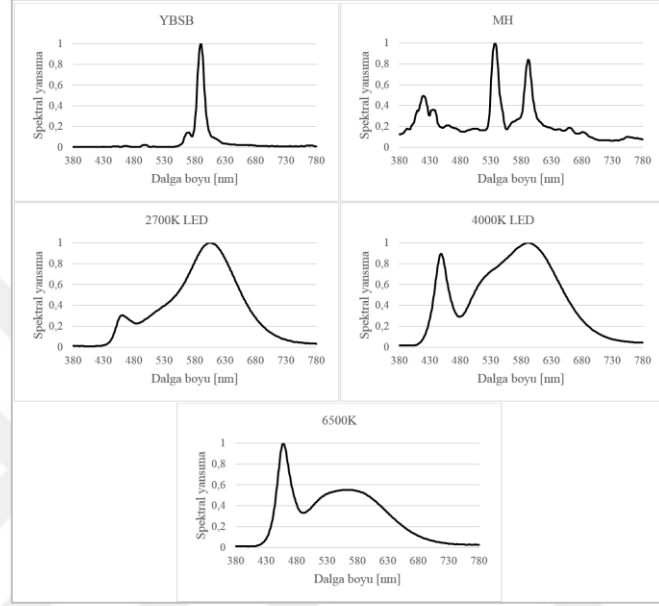
Sonuç olarak, değişen sis ve aydınlık düzeyi koşullarında spektrumların farklı geçirgenlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Yüksek aydınlık düzeyinde MH lambanın geçirgenliğinin diğer spektrumlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak düşük aydınlık düzeyinde ise MH lambanın geçirgenliği YBSB lambaya göre daha fazla değişim göstermektedir. LED spektrumlarında ise aynı CRI fakat farklı CCT'lerde geçirgenlik değerleri çok az da olsa birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Yani her bir CRI'de farklı CCT'deki spektrumlar daha yüksek geçirgenliğe sahip olabilmektedir. Ancak geçirgenlik farkı çok yüksek olmamaktadır. Düşük aydınlık düzeyinde ise, LED SPD'lerin geçirgenliklerinin hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür.

4.2 Sis Farklı Spektrumlar Altında Hedef Görülebilirliği Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Yol aydınlatma kriterlerinin geliştirilmesinde, hedeflerin sürücüler için görünür olabilmesi, hedeflerin ancak arka planları için yeterli bir parlaklık kontrastına sahip olması durumunda gerçekleştiği varsayılmaktadır [15], [16]. Bununla birlikte; renk kontrastı, özellikle iyi renksel geriverim özelliklerine sahip yol aydınlatma tesislerinde, bir hedefin arka planına karşı ortaya çıkmasında etkili olabilir. Ancak değişen hava koşullarında parlaklık ve renk kontrastı özellikleri değişerek hedefin görülebilirliği azalabilmektedir. Tezin bu bölümünde, farklı spektrumlar altında kullanıcıların reaksiyon süreleri ölçülerek sis hedef görülebilirliği üzerine etkisi incelenecektir.

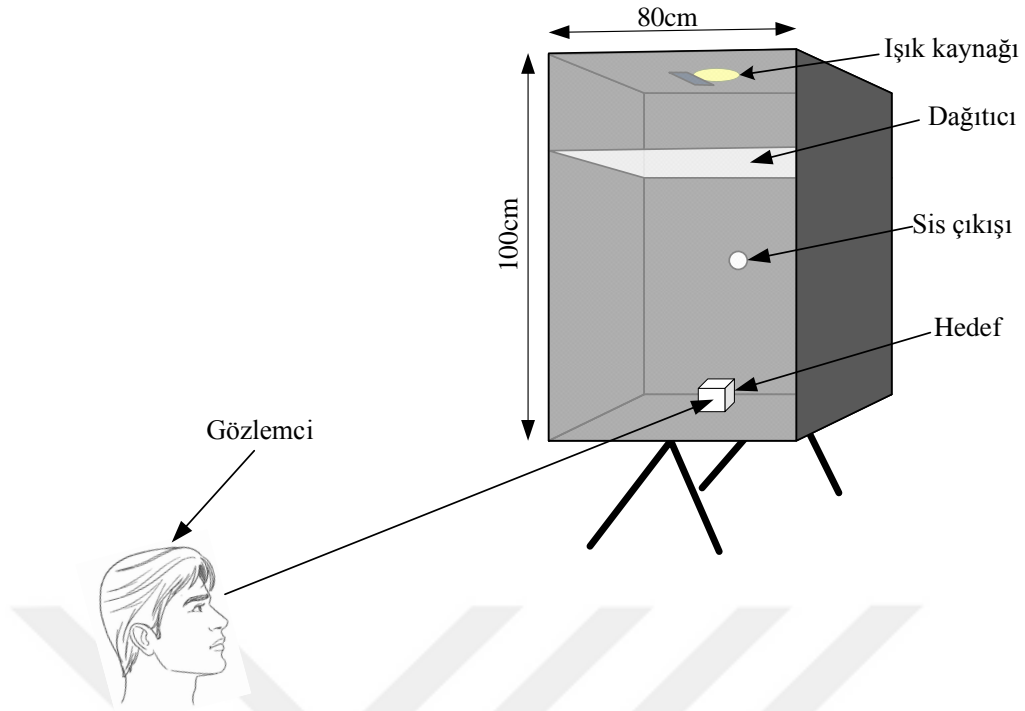
4.2.1 Ölçüm Düzenegi

Ölçümler laboratuvar ortamında (karanlık odada) 100x80 cm boyutlarında içi mat siyah renge boyanmış kutu yardımıyla yapılmıştır. Ölçümlerde YBSB ve MH konvansiyonel ışık kaynakları ile renksel geriverimleri $R_a \sim 80$ olan 2700K, 4000K ve 6500K renk sıcaklıklarına sahip üç adet LED ışık kaynağı kullanılmıştır. Işık kaynaklarına ait spektral güç dağılımları Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 Işık kaynaklarının spektral güç dağılımı

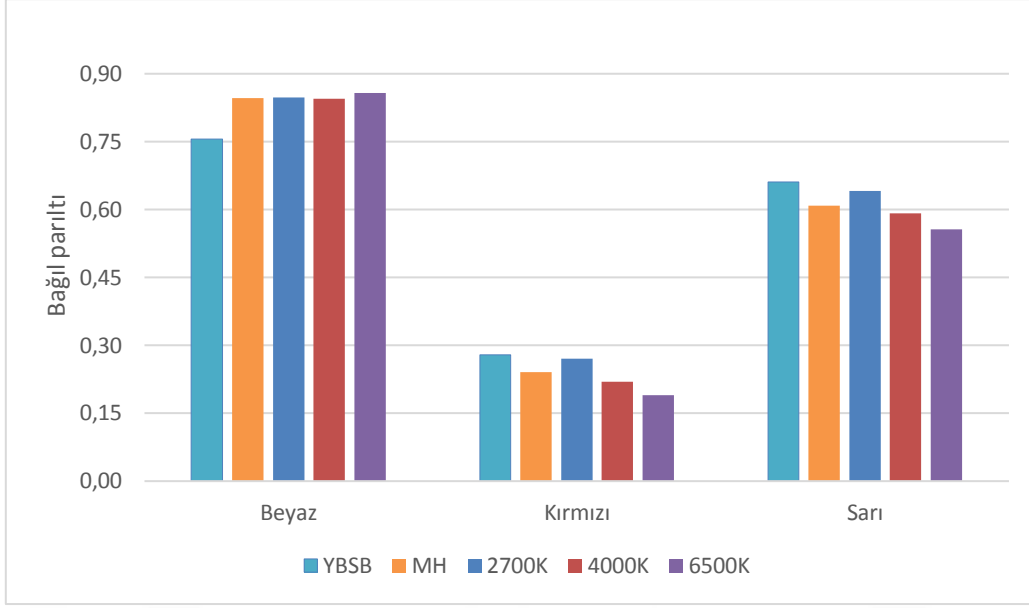
Işık kaynakları kutunun üst yüzeyine monte edilmiştir. Işığın homojen bir şekilde dağıtılması ve yüzeyde düzgün bir ışık dağılımı sağlamak için ışık kaynaklarının önüne difüzör (dağıtıcı) konulmuştur. Sis üretici olarak bölüm başında özellikleri verilen Antari Z800II kullanılmıştır. Sis üretici kutunun arka kısmına monte edilerek sabit bir noktadan kutunun içerisine sis vermesi sağlanmıştır. Kutunun ön tarafının üst kısmı mat siyah renge boyanmış mukavva ile alt kısmı ise cam ile kapatılarak sisin içeride kalması sağlanmıştır. Reaksiyon süresini ölçmek için bir adet sayıcı kullanılmıştır. Ölçüm düzenegi Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Test ölçüm düzeneği

Ölçümde 5x5 cm boyutlarında üç farklı renkte (beyaz, kırmızı ve sarı) hedefler kullanılmıştır. Bu renklerin seçilme nedeni, yol çizgilerinin beyaz ya da sarı ve araç stop lambalarının kırmızı olmasıdır. Her bir spektrum altında önce referans malzemenin parlıtısı daha sonra hedefin parlıtısı ölçülerek hedeflerin farklı spektrumlar altında bağlı parlıtı değerleri hesaplanmıştır. Hedeflerin bağlı parlıtıları Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere her bir hedefin farklı spektrumlar altında bağlı parlıtıları yaklaşık aynı değerdedir.

Kutu yüzeyinde hedeflerin yüksekliği ile aynı seviyede aydınlık düzeyi değerleri ölçülmüştür. Yatay aydınlık düzeyi, her bir spektrum altında aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Hedeflerin yerleştirildiği kutu yüzeyinde aydınlık düzeyi sadece ± 5 lüks değişmektedir.



Şekil 4.8 Hedeflerin bağıl parıltıları

Testler 5 erkek ve 2 bayan olmak üzere toplam 7 gözlemci için yapılmıştır. Gözlemcilerin yaşları 21 ile 30 arasında değişmektedir. Gözlemcilerden hiçbiri yapılan test hakkında önceden bilgi sahibi değildir. Her bir gözlemciye önce Ishihara renk testi uygulanarak renk körlüğü olup olmadığı kontrol edilmiştir. Gözlemcilerin sadece üçü gözlük kullanmakta olup bunun dışında herhangi bir göz rahatsızlıkları bulunmamaktadır. Gözlemci açısı yaklaşık 10° olup, hedefin görüş açısı 1° dir.

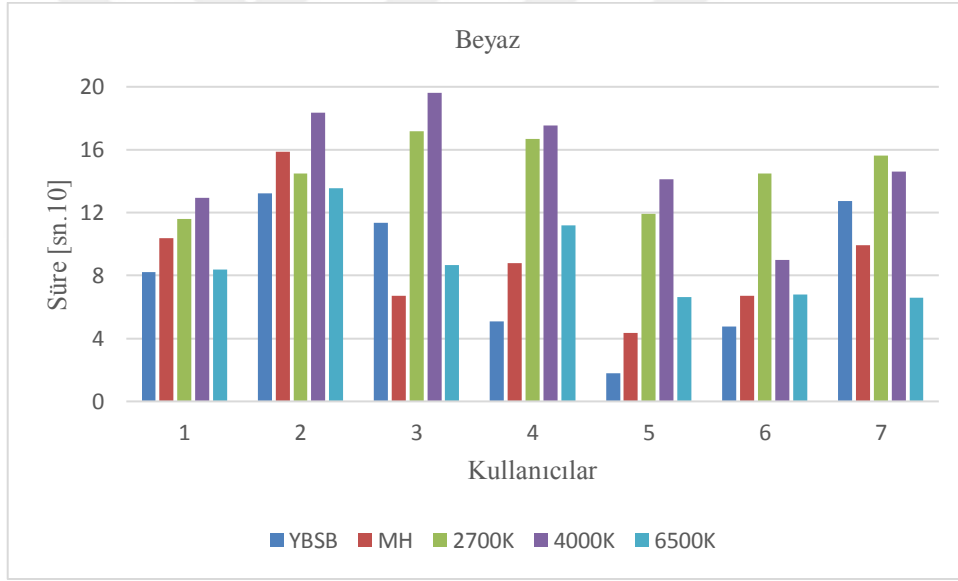
Teste başlamadan önce gözlemcilerin ışık kaynağına adaptasyonlarını sağlamak için yaklaşık 10-15 dakika kutunun içerisine bakmaları istenmiştir. Gözlemci hedefin yerleştirildiği noktayı görmesi durumunda o noktaya odaklanarak hedefi daha hızlı algılayacağından dolayı kutunun belli bir kısmı perdeyle kapatılarak hedef rastgele bir yere yerleştirilmiştir. Bu şekilde gözlemci hedefin nereye yerleştirildiğini görememektedir.

Sis makinası bir sayıcının kontağına bağlanmış olup başlama butonuna basıldığı andan itibaren 9 sn. sis ($12,75 \text{ m}^3$) verip daha sonra kapanacak şekilde ayarlanmıştır. Sayıcı normalde açık ve normalde kapalı kontaklara sahip olup süreye bağlı olarak bu kontaklar kontrol edilebilmektedir. Sayıcı, gözlemci elindeki butona basana kadar saymaya devam etmektedir. Sis kutuya dolduktan sonra 120 sn. sisin kutu içerisine homojen bir şekilde yayılması beklenmektedir. Gözlemcilerden gece sisli bir havada araba kullandıklarını hayal etmeleri istenmiştir. 120 sn. sonra kutu önündeki perde alınarak, gözlemciden hedefi algıladığı anda butona basması istenmiştir. Böylece her bir gözlemcinin farklı

spektrumlar altında hedeflere verdikleri reaksiyon süreleri belirlenmiştir. Ölçümlerin güvenilirliği açısından her bir ölçüm en iki kez tekrarlanmıştır. Tüm bu işlemler her test öncesi tekrar edilerek yatay aydınlık düzeyi tekrar ölçülmüş ve yeni teste geçilmiştir.

4.2.2 Ölçüm Sonuçları

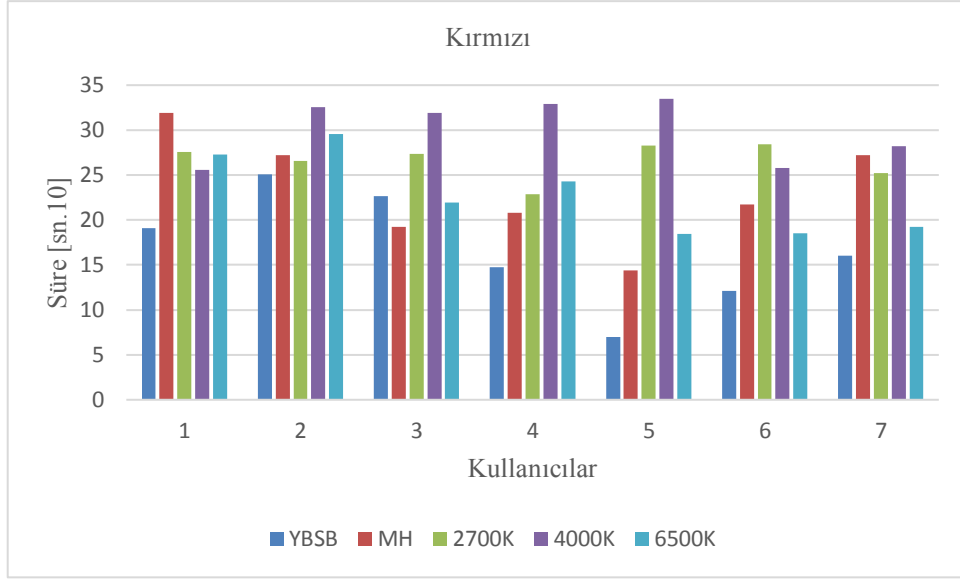
Gözlemcilerin sis altında reaksiyon süreleri kaydedilmiş ve her bir hedef için analizler yapılarak sonuçlar ortaya konulmuştur. Gözlemcilerden her ne kadar hedefi ilk algıladıkları anda süreyi durdurmaları istenmiş olsa da, her bir gözlemcinin göz hassasiyetinin farklı olması ya da hedefi algıladığından emin olmak için biraz daha beklemesi gibi nedenlerden dolayı aynı spektrum altında tepki sürelerinde gözlemciler arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Tepki sürelerinin hedeflerin bağlı parlantısıyla ters orantılı olarak değiştiği yapılan test sonuçlarında görülmüştür. Beyaz renkli hedef için reaksiyon süreleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 Beyaz renkli hedef için reaksiyon süreleri

Beyaz hedefi gözlemcilerin %71,4’ü (5 kişi) YBSB spektrum altında diğer spektrumlara göre daha kısa sürede algılamıştır. Gözlemcilerin diğer ikisinden biri MH diğeri ise 6500K LED spektrum altında beyaz hedefi en kısa sürede algılamıştır. Birinci ve ikinci gözlemciler YBSB ve 6500K LED spektrum altında hedefi neredeyse aynı sürelerde algılamışlardır. Ayrıca, beyaz hedefi gözlemcilerin yine %71,4’ü 4000K LED spektrum altında, geri kalanlar ise 2700K LED spektrum altında en uzun sürede algılamışlardır.

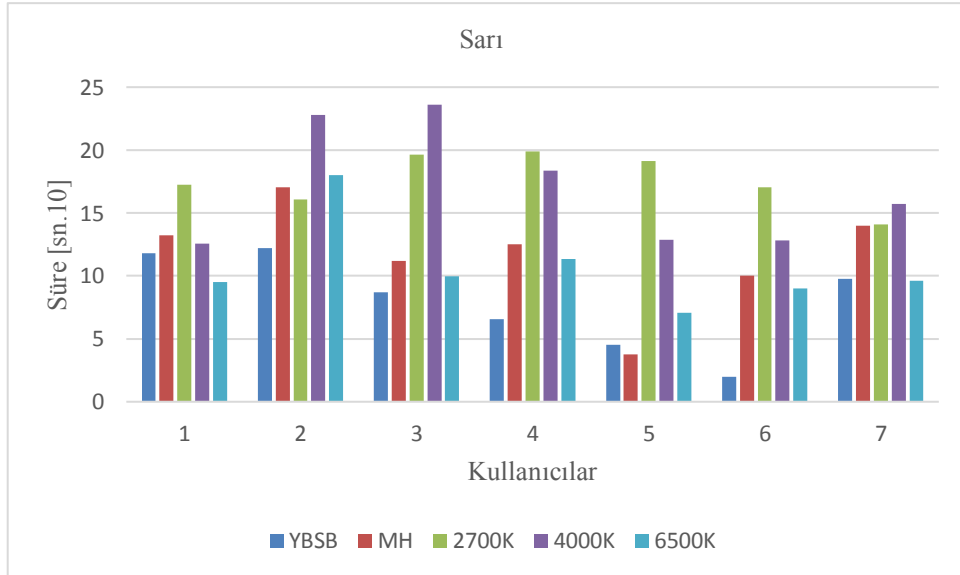
Kırmızı renkli hedef için reaksiyon süreleri Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10 Kırmızı renkli hedef için reaksiyon süreleri

Kırmızı hedefi gözlemcilerin %85,7'si (6 kişi) YBSB spektrum altında, bir gözlemci ise MH spektrum altında diğer spektrumlara göre daha kısa sürede algılamıştır. YBSB spektrumun sis altında kırmızı hedefin algılanmasında da oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca, kırmızı hedefi gözlemcilerin %71,4'ü 4000K LED spektrum altında, diğer gözlemcilerden biri 2700K LED spektrum altında diğeri ise MH spektrum altında en uzun sürede algılamışlardır.

Sarı renkli hedef için reaksiyon süreleri Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 Sarı renkli hedef için reaksiyon süreleri

Sarı hedefi gözlemcilerin %57,1'i (4 kişi) YBSB spektrum altında, %28,6'sı (2 kişi) 6500K LED spektrum altında bir tanesi ise MH spektrum altında diğer spektrumlara göre daha kısa sürede algılamıştır. MH spektrum altında en kısa sürede tepki veren gözlemcinin tepki süresi YBSB spektrum altında verdiği tepki süresine oldukça yakındır. Ayrıca, sarı hedefi gözlemcilerin %57,1'i 2700K LED spektrum altında, diğerleri ise 4000K LED spektrum altında diğerlerinden daha uzun sürede algılamışlardır.

Sonuç olarak, her üç hedefin de sis koşullarında YBSB ışık kaynağı altında diğer spektrumlara göre daha hızlı algılandığı görülmüştür. 2700K ve 4000K LED spektrumların ise sis koşullarında performansının oldukça kötü olduğu görülmektedir. Bir önceki kısımda yapılan geçirgenlik ölçümlerinde her ne kadar MH ışık kaynağı daha başarılı bir performans sergilemiş olsa da insan faktörünün işin içerisine dahil edildiğinde durumun değiştiği ve YBSB ışık kaynağının sis altında daha başarılı bir sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle ülkemizde sisin yoğun olduğu bölgelerde, yol aydınlatmasında YBSB ışık kaynaklarının tercih edilmesi ve ayrıca yol çizgilerinin, uyarı ve işaret levhalarının yüksek parıltıya sahip malzemelerle yapılıp YBSB ışık kaynaklarıyla aydınlatılması sürüş performansını artıracaktır.

LED VE KONVANSİYONEL IŞIK KAYNAKLI YOL AYDINLATMA ARMATÜRLERİNİN ELEKTRİKSEL AÇIDAN İNCELENMESİ

Bu bölümde, LED ve konvansiyonel ışık kaynaklı yol aydınlatma armatürleri için elektriksel ölçümler yapılarak elde edilen sonuçlar yol aydınlatma teknik şartnameleri ve standartlar açısından karşılaştırılarak ortaya konulmuştur.

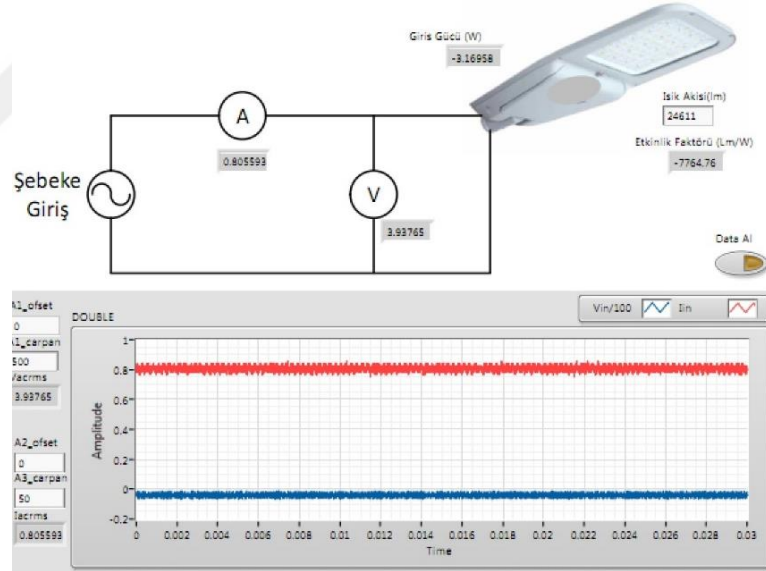
Gerilim ve frekanstaki dalgalanmaların azlığı, güç faktörünün bire yakınlığı, enerjinin devamlılığı ve sistemdeki harmonik bileşenlerin belirli oranlarda olması güç kalitesi açısından oldukça önemli kriterlerdir [76]. Normal şartlarda şebekeden çekilen akımın ve şebeke geriliminin dalga şekli sinüzoidal olması beklenir. Ancak elektrik güç sistemlerinde akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlardan dolayı bu dalga şeklinin sinüzoidal dalga şeklinden saptığı görülmektedir. Akım veya gerilimin, zamana göre periyodik olarak tekrarlanan ve temel frekansın tam katları şeklinde ortaya çıkan harmonik bileşenleri güç sisteminde ve bu sisteme bağlı elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirmektedir.

Yol aydınlatmasında kullanılan konvansiyonel deşarj lambaları da nonlineer akım-gerilim karakteristiğine sahip oldukları için birer harmonik kaynağıdır. Bu tip lambalar deşarj anında negatif direnç özelliği göstermektedirler. Aynı zamanda konvansiyonel lambalarda yardımcı eleman olarak kullanılan manyetik balastlar ve LED armatürlerin sürücü devrelerinde kullanılan yarı iletken elemanlar da harmonik üretirler. Güç sisteminde meydana gelebilecek olumsuz etkilerin en aza indirilmesi ve sistemin güç kalitesinin artırılması açısından yol aydınlatma armatürlerinin neden olduğu harmonik büyüklüklerinin belirlenmesi gereklidir.

5.1 Ölçüm Sistemi ve Numuneler

Güç ve harmonik ölçümleri Şekil 5.1’de verilen ölçüm düzeneği üzerinden laboratuvar ortamında Labview ara yüz kartı yardımıyla yüksek çözünürlükte (1 milyon data/sn) alınmıştır. Alınan verilerin bilgisayar ortamında Matlab programı yardımıyla FFT analizleri yapılarak harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulmaları ortaya konulmuştur.

Beş farklı firmadan 150 W YBSB ve MH, dört farklı firmadan 250W YBSB ve MH olmak üzere toplam 18 adet konvansiyonel armatürün ve beş farklı firmadan 80-170 W arasında değişen güçlerde toplam 6 adet LED armatürün güç ve güç faktörleri ölçülmüştür. Burada 150 W ve 250 W YBSB ve MH A5 armatürleri hariç diğer tüm armatürlerin harmonik analizleri yapılmıştır. Ayrıca 2 farklı firmaya ait (A ve B) 150 W YBSB lamba ilgili armatür numuneleri ile birlikte ayrı ayrı kullanılarak harmonik analizleri yapılmıştır. Tüm armatürler ayarlanabilir güç kaynağı yardımıyla sabit 220V gerilim altında test edilmiştir.



Şekil 5.1 Elektriksel veri ölçüm düzeneği

5.2 Ölçüm Sonuçları

Konvansiyonel yol aydınlatma armatürlerinin çektikleri güçler ve güç faktörü değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Konvansiyonel armatürlerin ölçülen güç ve güç faktörü değerleri

No	Armatür	Ölçülen Güç (W)*	Güç Faktörü
1	150W YBSB A1	166,0	0,939
2	150W YBSB A2	174,9	0,951
3	150W YBSB A3	148,6	0,930
4	150W YBSB A5	159,0	0,95
5	150W YBSB A7	168,3	0,937
6	150W MH A1	163,5	0,939
7	150W MH A2	169,7	0,942
8	150W MH A3	148,8	0,931
9	150W MH A5	152,8	0,95
10	150W MH A7	165,8	0,923
11	250W YBSB A1	278,6	0,772
12	250W YBSB A2	263,7	0,950
13	250W YBSB A3	234,5	0,951
14	250W YBSB A5	249,1	0,96
15	250W MH A1	296,1	0,641
16	250W MH A2	277,6	0,858
17	250W MH A3	263,2	0,844
18	250W MH A5	285,5	0,88

* Balast kaybı dahil.

Lamba gücüne göre maksimum balast güç kayıpları TEDAŞ yol aydınlatma teknik şartnamesinde belirtilmiş olup Çizelge 5.2’de verilmiştir [68]. Çizelge 5.1’de verilen sonuçları incelediğimizde, 150 W konvansiyonel armatürlerden sadece A2 YBSB bu değeri sağlamazken yine aynı firmaya ait MH armatüründe tam sınır değerinde olduğu görülmektedir. 250 W konvansiyonel armatürlerin ise %50’sinin bu sınır değeri aştığı ve teknik şartnamede belirtilen sınır değerleri sağlamadığı görülmüştür. Güç faktörleri incelendiğinde ölçümü yapılan konvansiyonel armatürlerin yaklaşık %61’ini olması gereken 0,95 güç faktörünün altında kaldığı görülmüştür. Ülkemizde kullanılan armatür sayısı göz önüne alındığında sistemden çekilecek olan reaktif gücün bir hayli fazla olması enerji kalitesi ve enerji karalılığı açısından oldukça önem arz etmektedir. Kullanılan armatürlerde reaktif güç kompanzasyonu yapılmış olmasına rağmen güç faktörünün istenilen değerinin altında çıkması, armatürlerin üretim aşamasında yapılan test ve hesaplamalarının doğru ve yeterli yapılmadığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.2 Lamba gücüne göre balast kaybı

Lamba Gücü (W)	Balast Kaybı (W)
70	13
100	15
150	20
250	26
400	32

Beş farklı firmadan 80-170 W arasında değişen 6 adet LED armatürde yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3'te verilmiştir. Tüm LED armatürler yaklaşık olarak etiketinde belirtilen değere yakın bir güç çektiği görülmüştür. Aynı zamanda güç faktörleri de sadece 80 W A4 LED armatür hariç diğer hepsinin 0,95 güç faktörünün üstünde bir değere sahip olduğu görülmüştür. Yani kullanılan LED sürücülerde güç faktörü düzeltilmesinin uygun olarak yapıldığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.3 LED armatürlerin ölçülen güç ve güç faktörü değerleri

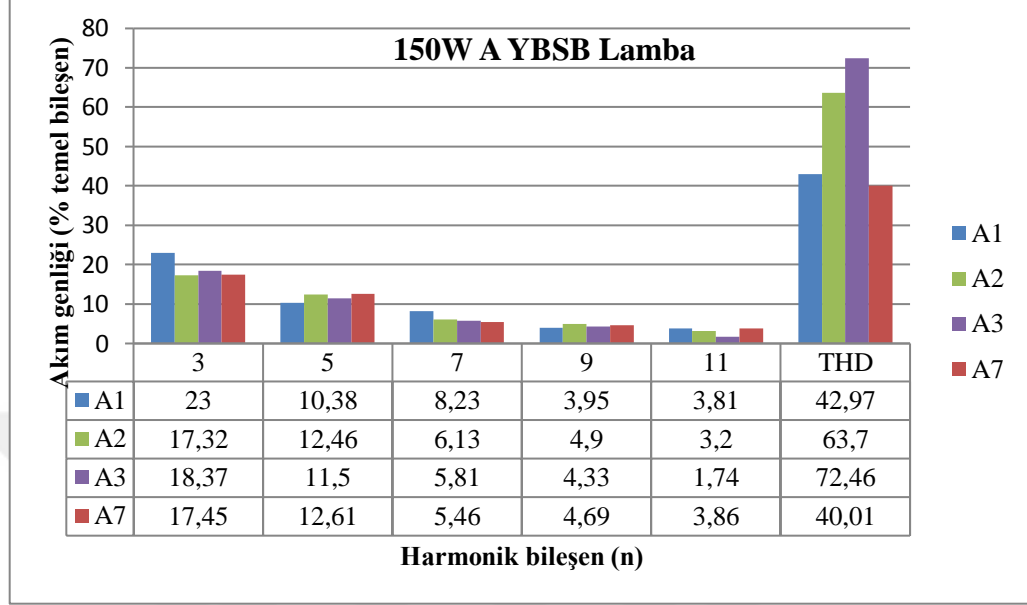
No	Armatür	Ölçülen Güç (W)	Güç Faktörü
1	80W LED A1	79,35	0,984
2	80W LED A4	79,9	0,934
3	105W LED A4	105,3	0,964
4	114W LED A5	112,6	0,980
5	170W LED A3	163,6	0,972
6	153W LED A6	152,5	0,987

Aydınlatma ekipmanları için BS EN 61000-3-2 standardında belirtilen harmonik bileşenlerin limit değerleri ise Çizelge 5.4'te verilmiştir [77].

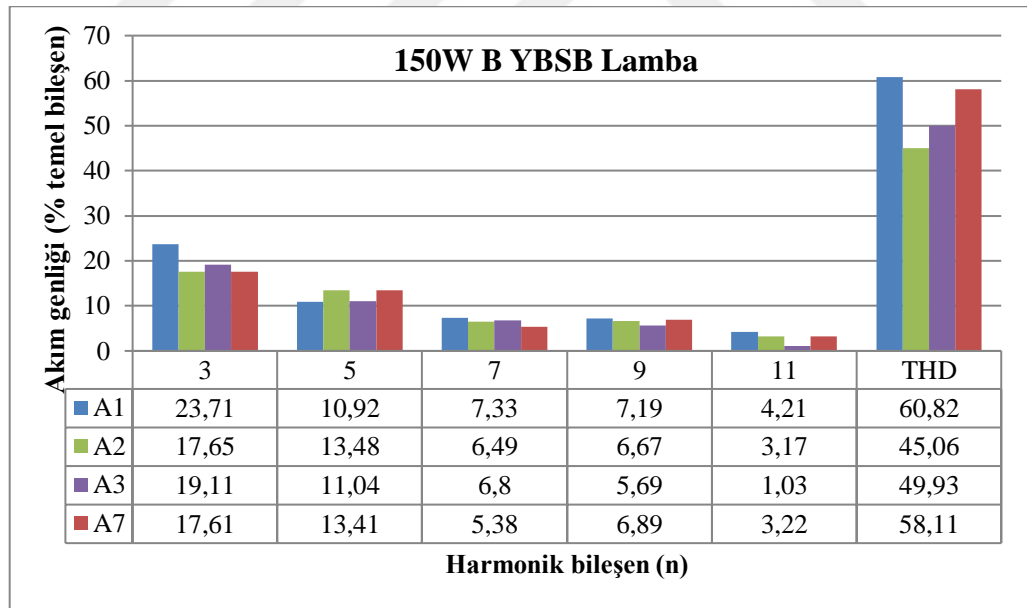
Çizelge 5.4 Aydınlatma ekipmanları için maksimum izin verilen harmonik akımlar

Harmonik Sırası (n)	Maksimum izin verilen harmonik akım (%)
2	2
3	$30 \cdot \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3
λ : Devrenin güç faktörü	

İki farklı 150W YBSB ışık kaynağının ilgili armatürler ile birlikte kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda elde edilen harmonik bozulmalar sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.2 150W A YBSB ışık kaynaklı armatürlere ait harmonik bileşenler ve THD



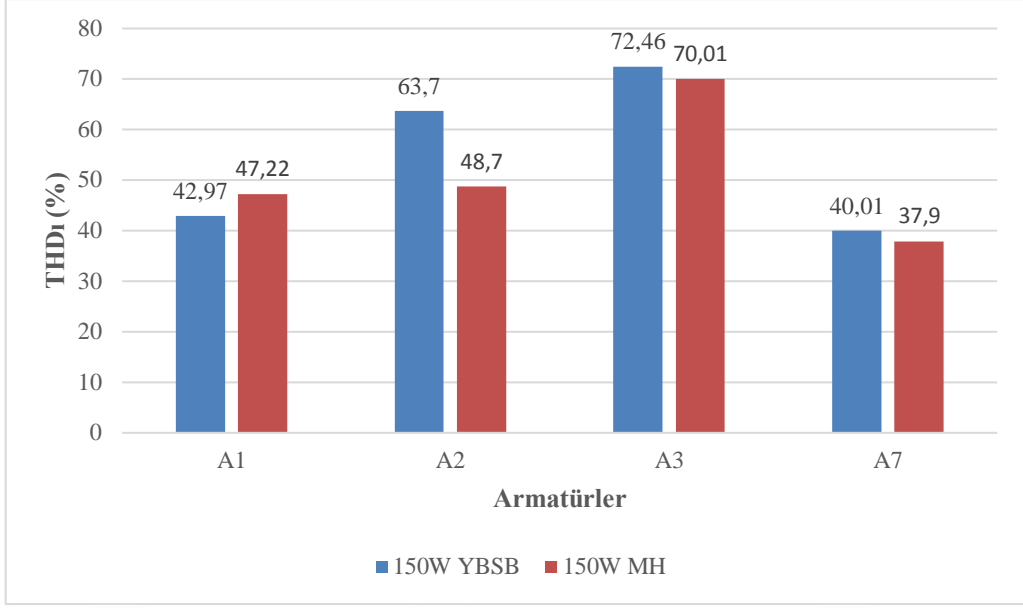
Şekil 5.3 150W B YBSB ışık kaynaklı armatürlere ait harmonik bileşenler ve THD

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’teki harmonik spektrumları incelediğimizde, tüm armatürlerde en yüksek harmonik bileşenin üçüncü harmonikte olduğu ancak kullanılan armatüre göre büyüklüğünün farklı olduğu görülmektedir.

Her bir armatür için harmonik bileşen değerleri incelendiğinde birçok armatürün özellikle 5, 7 ve 9. harmonik sınır değerlerini sağlamadığı görülmüştür. Her iki ışık kaynağının kullanılması durumunda 5. harmonik sınır değeri tüm armatürlerde aşılmaktadır. 7. harmonikte ise A1 armatüründe her iki ışık kaynağında limit değeri sağlanamamaktadır. Benzer şekilde diğer harmonik seviyelerinde de bazı armatürlerin kullanılan ışık kaynağına bağlı olarak limit değerleri sağlamadığı görülmektedir. THD değerlerine baktığımızda ilk durumda (A ışık kaynağında) çok yüksek THD'ye sahip A2 ve A3 armatürleri ikinci durumda (B ışık kaynağında) ise diğer armatürlerden daha düşük THD'ye sahip olabilmektedir. A ışık kaynağında elde edilen harmonik akım değerlerinin her bir armatür için artan harmonik bileşene karşı giderek azaldığı ancak B ışık kaynağı kullanıldığında ise A2 ve A7 armatürlerin 7. harmonikleri 9. harmoniklerden daha küçük olduğu görülmektedir.

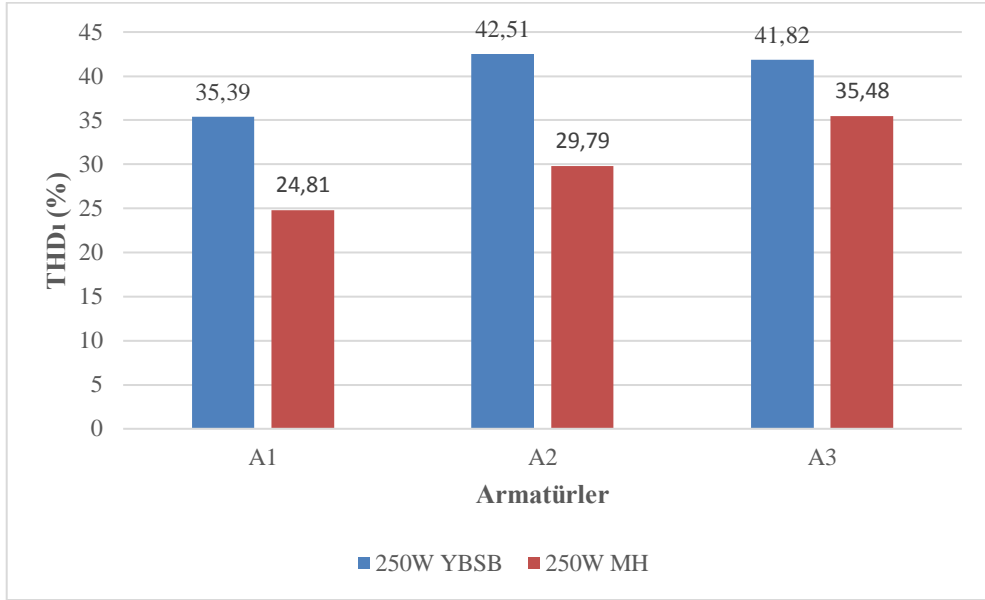
Aynı ışık kaynağı altında her bir armatürde THD değerleri ölçülmüş ve sonuçları Şekil 5.4'te verilmiştir. Burada, her bir armatürde 150W'lık farklı iki konvansiyonel ışık kaynağı kullanılması durumunda oluşacak THD değişimleri görülmektedir. Aynı ışık kaynağı kullanılmasına rağmen farklı firmalara ait armatürlerde THD'lerin birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Örneğin A3 armatüründe THD %72,46 iken A7 armatüründe 40,01 olabilmektedir. Aynı şekilde MH ışık kaynağında da farklı firmalara ait armatürlerde THD değerleri oldukça değişmektedir.

Yol aydınlatma armatürlerinde bir armatür içindeki balast kimi zaman hem YBSB hem de MH ışık kaynakları için kullanılabilir. Yani aynı armatürde farklı iki teknolojiye sahip ışık kaynağı kullanılabilir. Bu durumda da THD değerlerinin armatürler arasında farklılık gösterdiği görülmektedir. A1 armatüre MH lamba takıldığında THD artarken diğer A2, A3 ve A7 armatürlerde ise MH lamba takılması durumunda THD azalmaktadır. Bu durumun tam tersinin de meydana gelmesi söz konusu olabilir.



Şekil 5.4 150W YBSB ve MH ışık kaynaklı armatürlerin THD değerleri

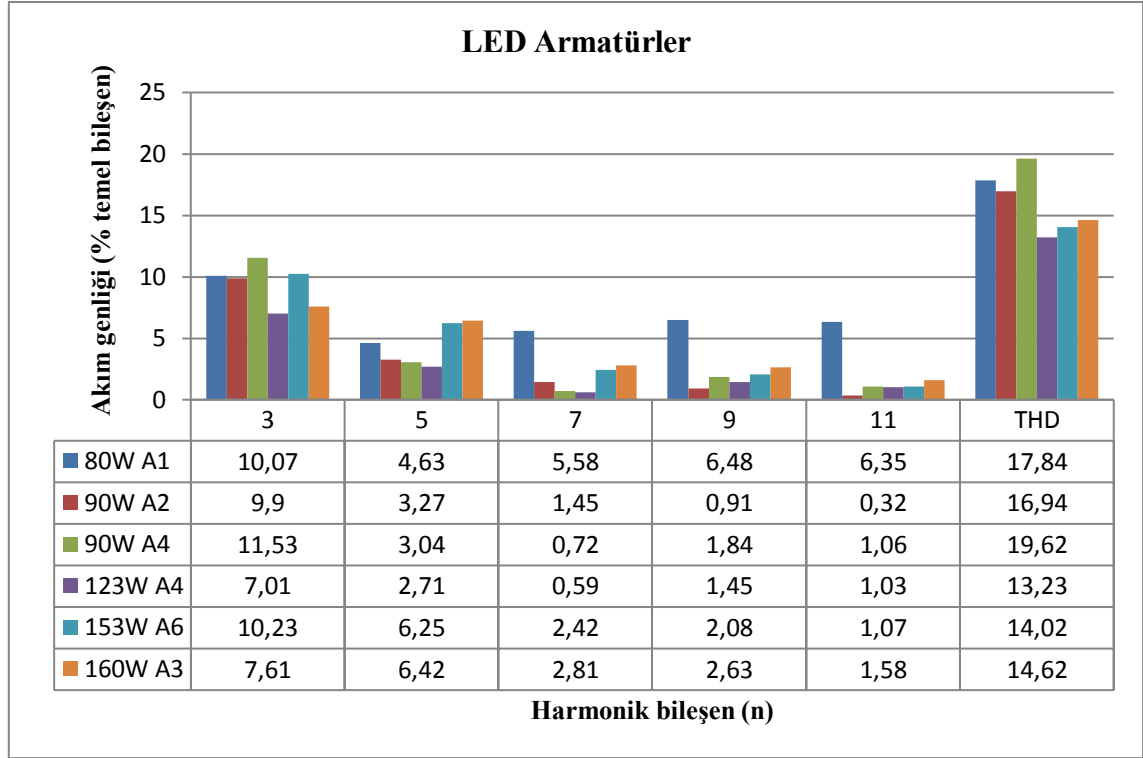
Aynı şekilde Şekil 5.5'te 250W gücünde farklı ışık kaynaklarının farklı armatürlerdeki harmonik bozulmalarını incelediğimizde, 150W armatürlerdeki kadar olmasa da yine de farklı firma armatürlerinde THD değerlerinin değiştiği görülmektedir. Aynı şekilde üç farklı armatürde de MH ışık kaynağının kullanılması durumunda her bir armatürde THD'nin azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.5 250W YBSB ve MH ışık kaynaklı armatürlerin THD değerleri

Son olarak LED armatürlerin harmonik bozulmaları Şekil 5.6'da verilmiştir. Bütün LED armatürlerde üçüncü harmonik bileşenlerin diğerlerinden daha büyük olduğu aynı şekilde

THD'nin de farklı güç ve markalarda değişim gösterdiği görülmektedir. LED'li yol aydınlatma armatürlerinde THD değerinin %10'dan küçük olması istenmektedir [78]. Ancak kullanılan bütün armatürlerin THD değeri bu limit değerin üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6 LED armatürlerin harmonik bileşenleri

Her ne kadar LED sürücü devrelerinde harmonikleri ortadan kaldıracı filtre devreleri olmuş olsa da ortaya çıkan sonuçlardan görüleceği üzere hiçbir LED'li yol aydınlatma armatürünün istenilen THD değerlerini sağlamadığı görülmektedir. A1 armatürü hariç (9. ve 11. bileşenler) diğer armatürlerin harmonik bileşenlerinin limit değerlerini uluslararası standartlara göre sağladığı görülmüştür. Ayrıca A4 firmasına ait 90W gücündeki armatürde THD değeri 19,62 olurken, 123W'lık armatürde bu değer 13,23'e düşmektedir. LED sürücü devrelerinin filtre tasarımı güç değerlerine göre yapıldığı düşünülürse aynı sürücünün farklı güçlerdeki armatürlerde kullanılması THD değerinin değişmesine neden olacaktır.

Sonuç olarak, farklı firmalardan temin edilen 150W ve 250W YBSB ve MH armatürlerin birçoğunda aynı ışık kaynağı kullanılması durumunda THD'nin birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür. Ayrıca birçok armatürde farklı harmonik bileşen değerlerinin standartlarda belirtilen limit değerleri aştığı gözlemlenmiştir. Aynı firma armatüründe iki

farklı ışık kaynağının kullanılması durumunda ise ışık kaynağına bağlı olarak harmonik bozulmaların artıp ya da azalacağı sonucu ortaya çıkmıştır. LED'li yol aydınlatma armatürlerinde ise her ne kadar harmonik bileşen değerleri limit değerleri sağlamış olsa da, hiçbir LED armatür THD değeri TEDAŞ'ın belirlemiş olduğu limit değeri sağlamamaktadır.

Yol aydınlatmasında belirli sebeplerden dolayı (ömrünü tamamlaması, arıza vs.) ışık kaynağının ya da armatürün değiştirilmesi sistemde farklı frekansta birçok bileşenin bulunmasına sebep olacak ya da eski duruma göre bu bileşenlerin artmasına neden olacaktır. Bir önceki harmonik akım bileşenin bir sonraki harmonik bileşenden büyük olması ilgili armatür devresinin bazı frekans aralıklarında rezonansa girme eğiliminde olabileceği yani rezonans frekansına yaklaşabileceğini göstermektedir. Bu şekilde yapılacak olan ışık kaynağı değişimleri ya da armatür değişimleri sonucunda artan harmonik bozulmaları güç sisteminde ve güç sistemine bağlı diğer elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirecektir. Aynı zamanda sistemde rezonans meydana gelme ihtimali artacak ve buna bağlı olarak nötr iletkenin aşırı yüklenerek ısınmasına neden olabilecektir. Tüm bu durumların milyonlarca direkte gerçekleştiği düşünülürse enerji kalitesi açısından istenmeyen durumların ortaya çıkması kaçınılmaz olacaktır.

LED VE KONVANSİYONEL IŞIK KAYNAKLI YOL AYDINLATMA ARMATÜRLERİNİN EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Mevcut konvansiyonel ışık kaynaklı armatürler yerine LED armatürlerin kullanımı ya da yeni yapılacak projelerde LED armatürlerin kullanılması enerji ve bakım maliyetleri açısından olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır. Ancak bunun yanında kurulum maliyetleri göz önüne alındığında konvansiyonel armatürlerin daha ekonomik olduğu görülmektedir. Bu nedenle, yol aydınlatmasında enerjinin ve insan gücünün daha verimli kullanılabilmesi için konvansiyonel aydınlatma armatürleri yeni nesil armatürlerle ekonomik açıdan karşılaştırılarak analiz edilmelidir. Bu bölümde, ilk olarak mevcut bir yol aydınlatmasında yüksek basınçlı sodyum buharlı ve metal halide ışık kaynaklı armatürlerin LED armatürler ile değiştirilmesi durumunda enerji maliyetleri karşılaştırılarak analiz edilmiştir. İkinci olarak ise, tüm maliyetler (kurulum, enerji ve bakım maliyetleri) ve hurda değerleri dikkate alınarak LED ve konvansiyonel armatürlerin ömür maliyet etkinlikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

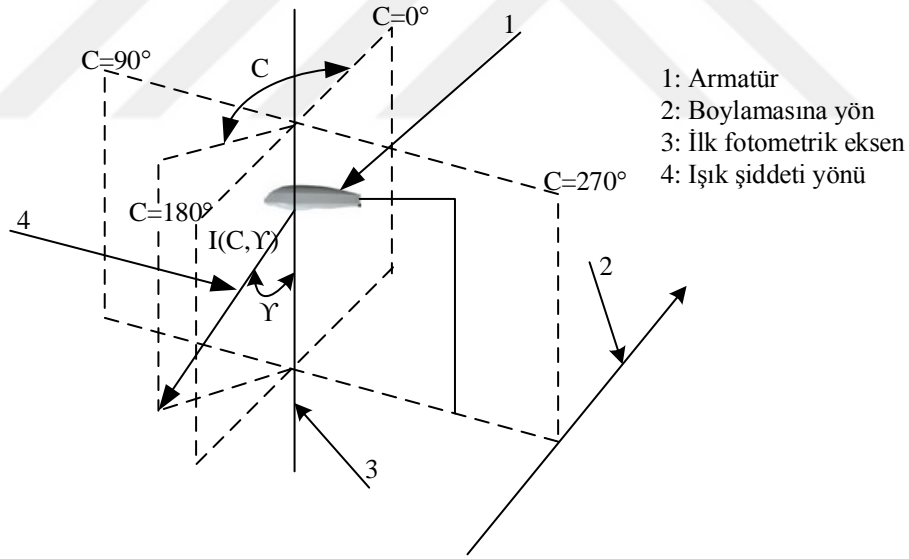
6.1 LED ve Konvansiyonel Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürlerinin Enerji Maliyeti Açısından İncelenmesi

6.1.1 Ölçüm Ekipmanı ve Fotometrik Veri

İncelenecek lamba ve armatürlerin fotometrik değerleri Yıldız Teknik Üniversitesi Aydınlatma Laboratuvarı'nda Işık Toplama Küresi (Everfine Photo-E-Info Co. Ltd) ve GO-2000A Gonyofotometre (Everfine Photo-E-Info Co. Ltd) yardımıyla elde edilmiştir. Konvansiyonel lambalar ışık toplama küresinde test edilmeden önce 100 saat çalıştırılarak yaşlandırılmıştır [79]. Tüm lambalar kendi balast ve ateşleyicisi ile birlikte

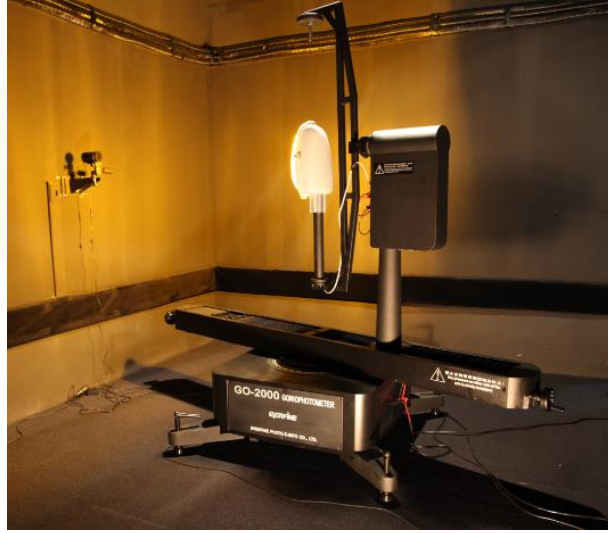
ışık toplama küresinde ölçülmüştür. Lambaların ışık akısı ölçüldükten sonra armatürler gonyofotometrede EN13201-3 nolu yol aydınlatma armatürleri performans hesaplanması standardına uygun olarak ölçülmüştür [60]. Yapılan ölçümler sonucunda armatürlere ait maksimum ışık şiddeti, maksimum ışık şiddetinin bulunduğu C ve Y açıları, ışık şiddeti dağılım eğrisi, etkinlik faktörü, toplam ışık akısı elde edilmiştir. LED ışık kaynakları LED armatür içine entegre olduğu için yani değiştirilemeyen LED modül şeklinde oldukları için LED armatürlerin fotometrik büyüklükleri sadece gonyofotometrede ölçülmüştür. Ayrıca LED armatürler yaşlandırma yapılmadan test edilmiştir çünkü bazı LED'lerin ışık çıkışının, çalışmanın ilk 1000 saatinde hafifçe artabileceği, ancak birçok LED ışık kaynağının benzer davranış göstermeyeceği bilinmelidir [80]. Laboratuvarın sıcaklığı ve nemi klimalar yardımıyla sırasıyla 25 ± 1 °C ve % 65'de tutulmuştur. Ölçüm mesafesi 13,64m'dir.

Gonyofotometrede yol aydınlatma armatürleri için en uygun düzlem olan C düzleminde ölçümler yapılmıştır. Armatürlerin C düzlemindeki ışık dağılım eğrilerinin koordinatsal gösterimi ve gonyofotometre düzeneği sırasıyla Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de verilmiştir.



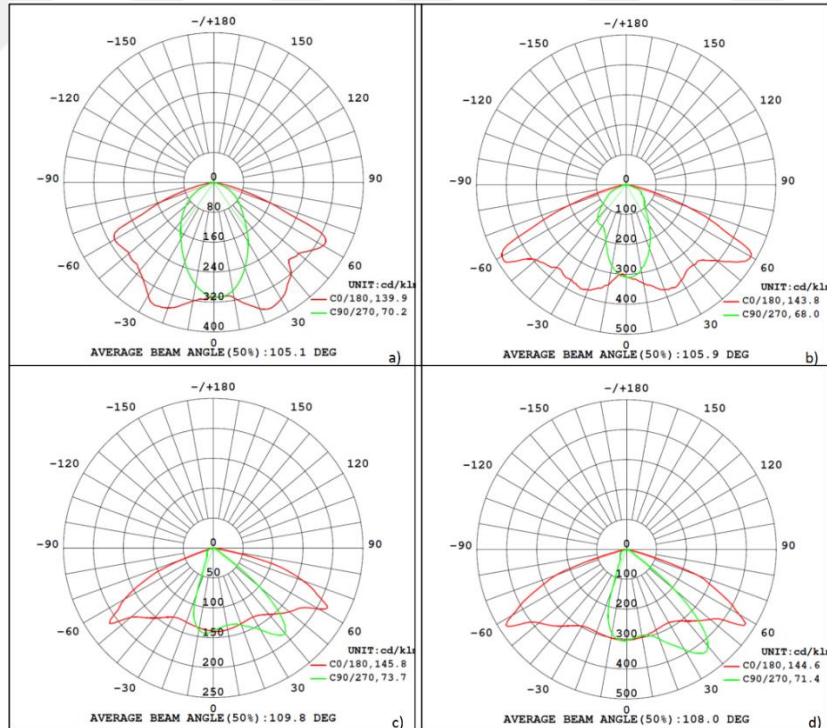
Şekil 6.1 (C, Y) düzleminde yol armatürünün koordinatsal olarak gösterimi

Armatürlerin ışık şiddeti değerleri cd/klm cinsinden olmak üzere, (C, Y) koordinat sisteminde C düzlemleri 5° aralıklarla 0°-355° arasında 72 düzlemde, Y açıları ise her bir C düzlemi için 1° aralıklarla 0°-90° arasında elde edilmiştir.



Şekil 6.2 Gonyofotometre düzeneği

Bu çalışmada dört farklı armatür kullanılmıştır. Bunlardan ikisi 150W YBSB ve 150W MH ışık kaynaklarının kullanıldığı konvansiyel armatür, diğer ikisi ise aynı tasarıma sahip 80W ve 105W LED armatürlerdir. Bu armatürlere ait fotometrik ve elektriksel değerler Çizelge 6.1’de verilmiştir. Her bir armatüre ait ışık dağılım eğrisi Şekil 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.3 Işık dağılım eğrileri, a)150W YBSB b)150W MH c)90W LED d)105W LED

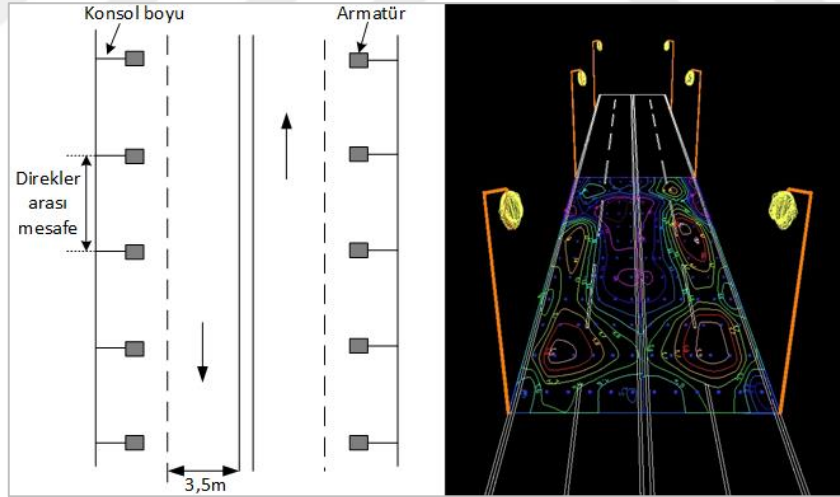
Çizelge 6.1 Kullanılan armatürlerin elektriksel ve fotometrik verileri

Armatür İsmi	Armatür Gücü (W)	Güç Faktörü	Armatür Işık Akısı (lm)	Etkinlik Faktörü (lm/W)	Maksimum Işık Şiddeti (cd/klm)
150W YBSB Armatür	166*	0,9392	13087,44	78,84	370,3
150W MH Armatür	163,5*	0,9392	9554,94	58,44	481,4
105W LED Armatür	105	0,9641	11756,85	111,97	560,2
80W LED Armatür	80	0,9337	8664,8	108,31	395,5

* Balast kayıpları dahil edilmiştir.

6.1.2 DIALux Yol Modeli

Oluşturulan yol modeli M2 yol sınıfına ait olup orta ve yüksek sürüş hızlarına izin veren motorlu trafik taşıtları için tasarlanmıştır [65]. Örnek yol geometrisi çift gidiş çift geliş olmak üzere toplam dört şeritli bölünmüş yoldan oluşmaktadır. Her bir şerit genişliği 3,5m'dir. A1 aydınlatma durum seviyesinde karşılıklı çift taraflı armatür düzeneğiyle aydınlatılmaktadır. Yol yüzeyi R3 sınıfı bir asfalt kaplama olduğu kabul edilmiştir. Armatürlerin koruma sınıfları IP66 olduğundan bakım faktörleri 0,89 alınmıştır [81]. Tasarlanan örnek yol modeli Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4 Tasarlanan yol modeli

6.1.2.1 Durum 1: 150W YBSB Armatür ile 105W LED Armatürün Karşılaştırılması

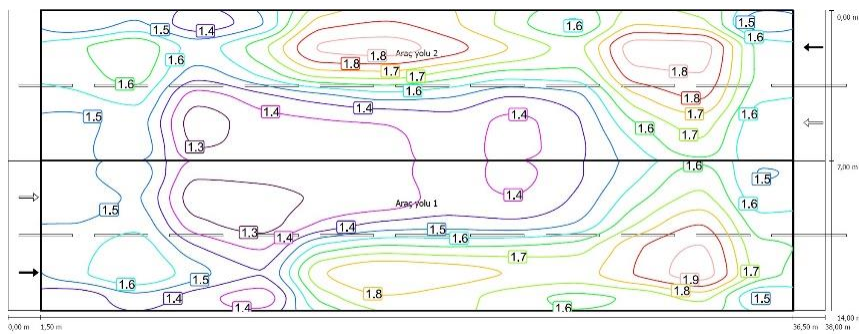
Gonyofotometrede ölçülen her bir armatüre ait fotometrik veriler ELUMDAT formatında kaydedilmiştir. Durum 1'de YBSB armatürler yeni nesil LED armatürlerle değiştirilmesi

durumu incelenmiştir. İlk aşamada 150W YBSB armatür verileri yol modeline eklenmiştir. Maksimum direk açıklığı (s) için minimum yol aydınlatma kriterlerini sağlayan montaj yüksekliği (h), konsol boyu (oh) ve taşıyıcı kol açısı (θ) değerleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise direk açıklığı değiştirilmeden 105W LED armatür aynı yol modeline uygulanmıştır. LED armatür kullanılması durumunda yol aydınlatma kriterlerinin uygun olduğu görülmüştür. Aydınlatma düzenine ait değerler ve yol aydınlatma kriterleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

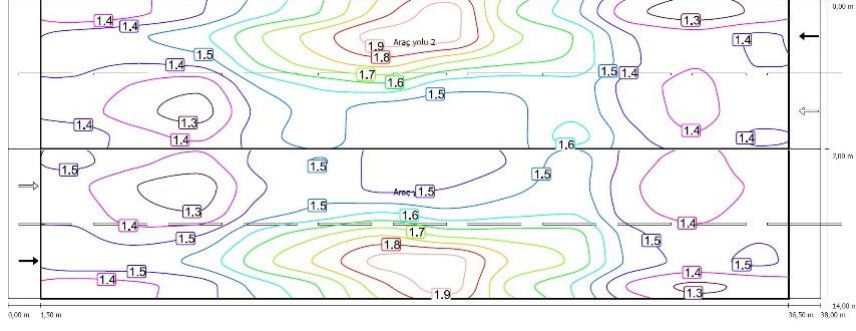
Çizelge 6.2 Durum 1 için aydınlatma düzeni değerleri ve yol aydınlatma kriterleri

Armatür Tipi	Aydınlatma Düzeni Değerleri				Yol Aydınlatma Kriterleri				
	s (m)	mh (m)	oh (m)	θ (°)	$L_o \geq 1,50$	$U_o \geq 0,40$	$U_1 \geq 0,70$	TI(%) ≤ 10	SR $\geq 0,50$
150W YBSB Armatür	35	11	1	10	1,57	0,77	0,76	5	0,84
105W LED Armatür	35	11	1	5	1,52	0,81	0,75	6	0,82

Çizelge 6.2’de görüldüğü üzere aydınlatma düzeni değiştirilmeden sadece taşıyıcı kol açısı 5° değiştirilmiştir. Direkt açıklığı optimize edildiğinde her iki armatüründe minimum aydınlatma kriterlerini maksimum 35m direk açıklığında sağladığı görülmüştür. Her iki armatürde de yol yüzeyinde düzgün bir ışık dağılımının elde edildiği sırasıyla Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’daki izohips eğrilerinde görülmektedir. Yol yüzeyindeki ışık dağılım eğrileri her iki araç yolu için de direk konumuna yakın gözlemciye göre verilmiştir. Gözlemci koordinatları birinci araç yolu için -60m, 1.75m, 1.5m, ikinci araç yolu için ise -60m, 12.25m, 1.5m’dir.



Şekil 6.5 150W YBSB armatür için yol yüzeyindeki ışık dağılımı



Şekil 6.6 105W LED armatür için yol yüzeyindeki ışık dağılımı

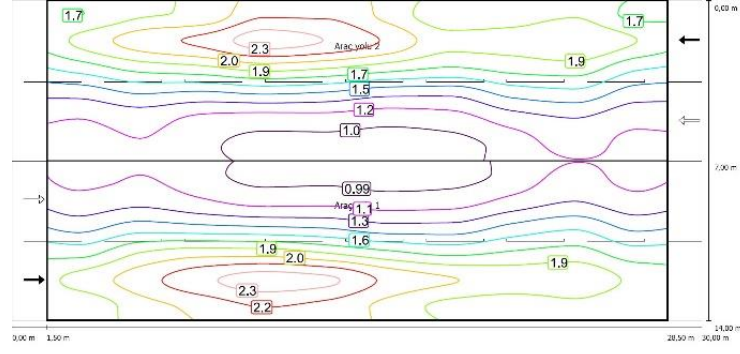
6.1.2.2 Durum 2: 150W MH Armatür ile 80W LED Armatürün Karşılaştırılması

Durum 1’de olduğu gibi ilk olarak 150W MH ışık kaynaklı armatür örnek yol modeli üzerine uygulanmıştır. Asgari yol aydınlatma kriterlerini sağlayan maksimum direk açıklığı belirlenmiştir. Bu direk açıklığında 80W LED armatürler MH armatürlerle değiştirilerek gerekli aydınlatma kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. Durum 2 için elde edilen parametreler Çizelge 6.3’te verilmiştir.

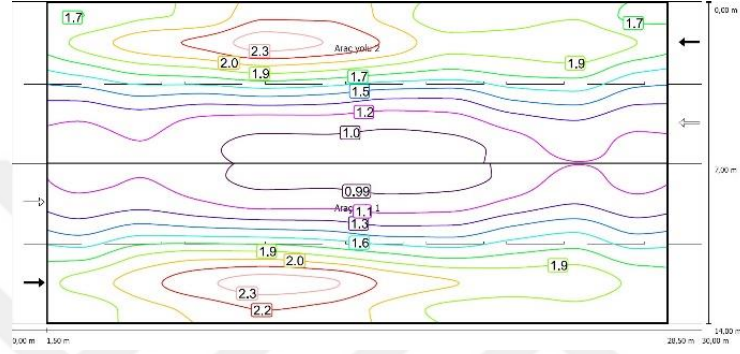
Çizelge 6.3 Durum 2 için aydınlatma düzeni değerleri ve yol aydınlatma kriterleri

Armatür Tipi	Aydınlatma Düzeni Değerleri				Yol Aydınlatma Kriterleri				
	s (m)	mh (m)	oh (m)	θ (°)	$Lo \geq 1,50$	$Uo \geq 0,40$	$U1 \geq 0,70$	$TI(\%) \leq 10$	$SR \geq 0,50$
150W MH Armatür	27	10	1	5	1,57	0,57	0,77	6	0,77
80W LED Armatür	27	10	1	5	1,50	0,80	0,86	5	0,83

Çizelge 6.3’te görüldüğü üzere her iki armatürde de aynı aydınlatma düzeni kullanılmıştır. Direk açıklığı optimize edildiğinde her iki armatürde de minimum aydınlatma kriterleri maksimum 27m direk açıklığında sağlandığı görülmüştür. MH ve LED armatürlerin her ikisinde de yol yüzeyinde düzgün bir ışık dağılımının elde edildiği sırasıyla Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’deki izohips eğrilerinde görülmektedir. Yol yüzeyindeki ışık dağılım eğrileri her iki araç yolu için de direk konumuna yakın gözlemciye göre verilmiştir. Durum 1’de olduğu gibi gözlemci koordinatları birinci araç yolu için -60m, 1.75m, 1.5m, ikinci araç yolu için ise -60m, 12.25m, 1.5m’dir.



Şekil 6.7 150W MH armatür için yol yüzeyindeki ışık dağılımı



Şekil 6.8 80W LED armatür için yol yüzeyindeki ışık dağılımı

6.1.3 Enerji Maliyetleri ve Sonuçlar

Durum 1 ve 2’de armatürlerin km başına tükettikleri toplam güçler hesaplanmıştır. Konvansiyonel armatürler yerine LED armatürlerin kullanılması durumunda elde edilen enerji tasarrufu oranları Eşitlik 6.1’e göre hesaplanmıştır.

$$\%Tasarruf\ oranı = \frac{W_{YBSB} - W_{LED}}{W_{YBSB}} \times 100 \quad (6.1)$$

Hesaplanan güç değerleri, kullanılan direk sayısı ve Durum 1 ve 2 için elde edilen enerji tasarruf oranları Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.4 Km başına harcanan güç ve kullanılan direk sayısı

	Armatür Tipi	Direk Sayısı/km	W/km	Enerji Tasarrufu/km (%)
Durum 1	150W YBSB Armatür	58	9628,0	36,6
	105W LED Armatür	58	6107,4	
Durum 2	150W MH Armatür	74	12099,0	51,1
	80W LED Armatür	74	5912,6	

Çizelge 6.4'te görüldüğü üzere M2 yol aydınlatma sınıfında mevcut 150W YBSB armatür yerine 105W LED armatür kullanılması durumunda %36,6 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır. Aynı şekilde mevcut 150W MH armatür yerine 80W LED armatür kullanılması durumunda ise %51,1 oranında daha az enerji tüketimi meydana gelmiştir.

Enerji tasarrufuna göre iki durum için de geri dönüşüm süresi Eşitlik 6.2'de verildiği şekilde hesaplanmıştır. Bu hesaplamada LED armatür maliyeti ve birim enerji maliyeti dikkate alınmıştır. Diğer maliyetler (kurulum, işçilik, bakım vb. maliyetler) ihmal edilmiştir.

$$Geri\ Dönüşüm\ Süresi(yıl/km) = \frac{Led\ Armatür\ Maliyeti\ (\$/km)}{Enerji\ Tasarrufu\ (\$/yıl.km)} \quad (6.2)$$

Kullanılan 105W ve 80W LED armatür maliyetleri adet başına sırasıyla 200\$ ve 190\$'dir. Armatürlerin günlük ortalama 10 saat olmak üzere yılda 3650 saat çalıştığı kabul edilmiştir. Aydınlatma enerji birim fiyatı 0.067\$/kWh olarak alınmıştır [82]. Yıllık km başına elde edilen enerji tasarrufu Eşitlik 6.3'te verilmiştir.

$$Yıllık\ Enerji\ Tasarruf\ Miktarı\ (\$/yıl) = Tasarruf\ Gücü(kw/km) \times Yıllık\ Kullanım\ Süresi(h) \times Enerji\ Birim\ Fiyatı(\$/kwh) \quad (6.3)$$

Durum 1 ve 2 için mevcut yol aydınlatma armatürlerinin yerine LED armatürlerin takılması durumunda elde edilen tüm maliyetler ve geri dönüşüm süreleri Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.5 Durum 1 ve 2 için maliyet analizi

	LED Birim Fiyatı (\$)	Kullanılan LED Sayısı (Adet/km)	LED Maliyeti (\$/km)	Enerji Birim Maliyeti (\$)	Enerji Tasarruf Gücü (kW/km)	Enerji Tasarruf Miktarı (\$/km.yıl)	Geri Dönüşüm Süresi (yıl)
Durum 1	200,00	58	11600	0,067174	3,5206	863,199	13,4
Durum 2	190,00	74	14060	0,067174	6,1864	1516,813	9,3

Çizelgeden de görüldüğü üzere her iki durumda da YBSB ve MH armatürlerin LED armatürlerle değiştirilmesi durumunda km başına yıllık sağlanan enerji tasarruf miktarları sırasıyla 863,199 \$ ve 1516,813 \$ olarak hesaplanmıştır. Sağlanan bu enerji tasarrufuna göre Durum 1 ve Durum 2 için geri dönüşüm süreleri sırasıyla 13,4 ve 9,3 yıl olmuştur.

MH armatürler yol aydınlatma kriterlerini YBSB armatürlere göre daha küçük direk açıklığında sağladığı için kullanılan armatür sayısı daha fazladır. Aynı zamanda etkinlik değerlerinin de YBSB lambalara göre daha düşük olması nedeniyle km başına tüketilen enerji diğer armatürlere göre daha yüksektir. Bu direk açıklığında daha düşük güçlü ve daha yüksek etkinlik değerine sahip LED armatürlerle aynı yol aydınlatma kriterleri sağlanabildiği için LED armatürlerin geri dönüşüm süresi kısalmıştır.

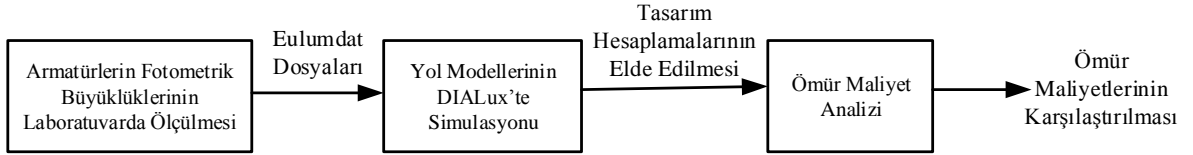
Sonuç olarak, M2 yol aydınlatma sınıfında mevcut konvansiyonel armatürlerin yerine LED armatürlerin kullanılması enerji tasarrufu açısından önemli katkı sağlamaktadır. Geri dönüşüm süresi yüksek olsa da LED armatür maliyetlerinin düşmesiyle bu sürenin daha da azalacağı öngörülmektedir. Ayrıca enerji birim maliyetinin daha yüksek olduğu ülkelerde elde edilecek tasarruf oranı artacağından geri dönüşüm süresi daha da kısalmaktadır.

6.2 Ülkemizde Kullanılan M1 ve M2 Yol Aydınlatma Sınıfı Armatürlerin Ömür Maliyet Analizi

Bir önceki çalışmada konvansiyonel armatürlerin kullanıldığı mevcut sistemlerin LED armatürlerle değiştirilmesi durumu incelenmişti. Burada, yeni kurulacak bir yol aydınlatma sisteminde mevcut konvansiyonel armatürler ve LED armatürlerin ömür maliyet etkinlikleri kurulum, enerji, bakım ve hurda maliyetlerini içeren Ömür Maliyet Analiz (ÖMA) yöntemi ile incelenip karşılaştırılmıştır.

6.2.1 Yöntem ve Yol Modellerinin Tasarım Hesaplamaları

Ülkemizde M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfı için en düşük maliyetle kurulacak ve işletilecek en uygun yol aydınlatma armatürlerinin belirlenmesi üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalara ait blok diyagramı Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.9 Kullanılan yöntemle ait blok diyagramı

İlk olarak, altı farklı tanınmış armatür üretici firmadan (A1, A2, A3, A4, A5, A6) YBSB, MH ve LED yol armatürleri istenmiştir. Konvansiyonel armatürler üç farklı firmadan, LED armatürler ise beş farklı firmadan toplam altışar adet temin edilmiştir. Konvansiyonel armatürler YBSB (150W Philips SON-T and 250W Philips SON-T) ve MH (150W Sylvania CMI and 250W Philips HPI-T) ışık kaynaklarına sahiptir. LED armatürler ise 80W ile 170W arasında değişen farklı güçlerden oluşmaktadır. Bu 12 adet armatürün fotometrik büyüklükleri bir önceki çalışmada olduğu gibi ışık toplama küresi ve gonyofotometre yardımıyla aydınlatma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ölçülen büyüklükler ışık akısı, ışık dağılım eğrisi, maksimum ışık şiddeti, maksimum ışık açısı, armatür etkinliği, güç, güç faktörü, CIE renksel geriverim indeksi (CRI) ve renk sıcaklığı (CCT) gibi değerleri içermektedir.

İkinci olarak, detayları Ek B’de verilen ölçüm sonuçları ELUMDAT formatında kaydedilerek DIALux aydınlatma tasarım programına aktarılmıştır. Yol modellerinin M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfları için simülasyonları gerçekleştirilmiş ve en uygun yol tasarımları (minimum yol aydınlatma kriterlerini sağlayan maksimum direk açıklığı) için optimizasyon yapılmıştır. ÖMA için minimum yol aydınlatma gereksinimlerini sağlayan YBSB, MH ve LED armatürler belirlenmiştir.

Son olarak, tasarım hesaplama sonuçlarına göre ilk olarak YBSB ve MH armatürlerin maliyetleri ÖMA yöntemiyle hesaplanmıştır. Daha sonra en düşük ömür maliyetine sahip YBSB (M2 için 150W A3 ve M1 için 250W A3) ve MH (M2 için 150W A3 ve M1 için 250W A1) armatürler ile tüm LED armatürlerin ömür maliyetlerini karşılaştırmak için 30 yıllık proje ömrü için analiz yapılmıştır. Kurulum, bakım ve enerji maliyetleri Türkiye’deki güncel fiyatlar kullanılarak hesaplanmıştır. YBSB ve MH armatürlerin

ömrü proje ömrünün sonunda olduğu için bu armatürler için hurda değeri dikkate alınmamıştır. Ancak LED armatürlerin kullanılmayan ömürleri için hurda değeri dikkate alınmıştır.

6.2.2 Ölçüm Ekipmanı ve Fotometrik Veri

Bir önceki çalışmada olduğu gibi burada da tüm lamba ve armatürlerin fotometrik büyüklükleri laboratuvarında aynı düzen ve şartlar altında ışık toplama küresi ve gonyofotometre yardımıyla elde edilmiştir. En düşük maliyete sahip YBSB ve MH armatürler ile tüm LED armatürlerin ışık dağılım eğrileri EK B’de verilmiştir. Kullanılan armatürlerin hepsi IP65 koruma sınıfına sahiptir. Armatürlerin fotometrik ve elektriksel ölçüm sonuçları Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.6 Konvansiyonel armatürlerin fotometrik değerleri

No	Armatür İsmi	Ölçülen Güç (W)*	Güç Faktörü	Armatürün Toplam Işık Akısı (lm)	Armatür Etkinliği (lm/W)	Max.Işık Açısı I _{max} (C, γ)	Armatür Tipi
1	150W YBSB A1	166,0	0,939	13087,4	78,84	5;24	Ekranlı
2	150W YBSB A2	174,9	0,951	13824,1	79,04	320;18	Ekransız
3	150W YBSB A3	148,6	0,930	12579,0	84,65	145;19	Yarı Ekranlı
4	150W MH A1	163,5	0,939	9554,9	58,44	180;58	Ekranlı
5	150W MH A2	169,7	0,942	9392,9	55,35	185;67	Ekransız
6	150W MH A3	148,8	0,931	9398,2	63,16	10;64	Yarı Ekranlı
7	250W YBSB A1	278,6	0,772	26227,4	94,14	15;31	Ekranlı
8	250W YBSB A2	263,7	0,950	23224,1	88,07	345;48	Ekranlı
9	250W YBSB A3	234,5	0,951	21524,7	91,79	200;14	Yarı Ekranlı
10	250W MH A1	296,1	0,641	20966,8	70,81	155;25	Yarı Ekranlı
11	250W MH A2	277,6	0,858	18132,8	65,32	355;64	Ekranlı
12	250W MH A3	263,2	0,844	17784,4	67,57	350;66	Ekransız

* Balast kayıpları dahil edilmiştir.

Çizelge 6.6’da görüldüğü üzere tüm armatürlerin %67’si 0,90’dan daha büyük güç faktörü değerine sahiptir. Armatür etkinlik değerleri 55,35 ve 94,14 lm/W arasında değişmektedir. Ölçülen konvansiyonel armatürlerden dört tanesi CIE standartlarına göre yarı ekranlı armatür tipindedir. Kamaşma limit değerini aşan ekranlı konvansiyonel armatürler bu çalışmada maliyet analizinde dikkate alınmamıştır.

Çizelge 6.7 LED armatürlerin fotometrik değerleri

No	Armatür İsmi	Ölçülen Güç (W)*	Güç Faktörü	Armatürün Toplam Işık Akısı (lm)	Armatür Etkinliği (lm/W)	Max.Işık Açısı I _{max} (C, γ)	Armatür Tipi
1	80W LED A1	79,35	0,984	7492,2	93,16	180;63	Ekranlı
2	80W LED A4	79,9	0,934	8654,0	108,31	45;49	Yarı Ekranlı
3	105W LED A4	105,3	0,964	11503,0	109,24	135;50	Yarı Ekranlı
4	114W LED A5	112,6	0,980	8869,5	78,77	160;60	Yarı Ekranlı
5	170W LED A3	163,6	0,972	15331,0	93,71	15;61	Ekranlı
6	153W LED A6	152,5	0,987	18656,85	122,34	155;67	Ekranlı

Çizelge 6.7’de, tüm LED armatürlerin ölçülen güç değerleri hemen hemen nominal değerleri ile aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm LED armatürlerin güç faktörü 0,90’ dan büyük olup konvansiyonel armatürlerin güç faktöründen daha iyi bir değere sahiptir. LED armatür etkinlikleri 78,77 ve 122,34 lm/W arasında değişmektedir.

6.2.3 DIALux Aydınlatma Tasarım Programı Yardımıyla Tasarım Hesaplamaları

Her bir armatür farklı ışık dağılımına sahip olduğundan dolayı yol aydınlatma kriterlerinin sağlanması için yol aydınlatma tasarımları değişebilmektedir [60]. Farklı armatürler kullanıldığında direk açıklığı, montaj yüksekliği, eğim açısı ve kol uzunluğu gibi armatür tasarım hesapları birbirinden farklı olmaktadır. DIALux programı yardımıyla direk açıklığı maksimum olacak şekilde yol tasarım simülasyonları optimize edilmiştir.

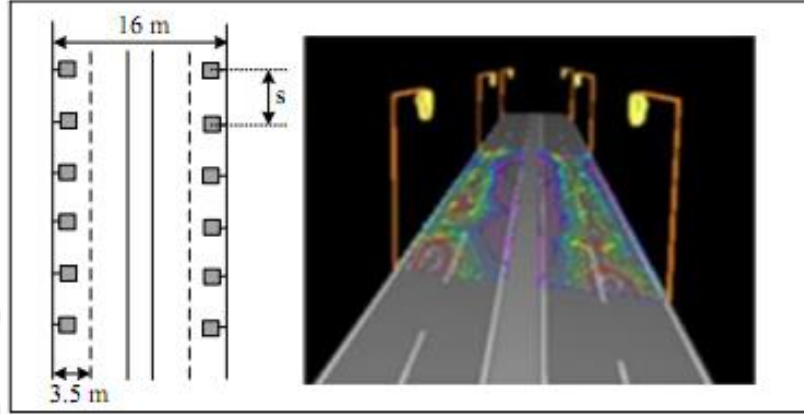
DIALux aydınlatma programı, IP derecesine, kirlilik kategorisine ve temizleme sıklığına bağlı olan bir bakım faktörünü dikkate almaktadır. Bu nedenle DIALux programı yol aydınlatma gereksinimlerini sadece armatürün ilk aydınlatma koşullarına göre değil aynı zamanda bakım faktörüne göre de hesaplamaktadır.

Bu bölümde, armatürlerin fotometrik değerleri ELUMDAT formatında DIALUX programına aktarılmıştır. M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfları için minimum yol aydınlatma kalite kriterlerine göre maksimum direk açıklığı DIALux programı yardımıyla hesaplanmıştır. Montaj yüksekliği, armatür eğim açısı ve kol uzunluğu gibi diğer parametreler performans gereksinimlerine göre belirlenmiştir.

6.2.3.1 M2 Aydınlatma Sınıfı için Yol Tasarımı

Armatürlerin performanslarını belirlemek için TEDAŞ’ın yol aydınlatma teknik şartnamesinde belirtilen yol modelleri oluşturulmuştur [68]. 150W YBSB ve MH

armatürler genellikle M2 ve M3 yol aydınlatma sınıflarında kullanılmaktadır [65]. Bu simülasyonda, üç farklı firmadan (A1, A2 ve A3) 150W YBSB ve MH armatürler ve yine üç farklı firmadan (A1, A4 ve A5) LED armatürler (80W-114W) M2 yol aydınlatma sınıfı için kullanılmıştır. M2 aydınlatma sınıfı için yol geometrisi ve tasarlanan yol modeli Şekil 6.10'da verilmiştir.

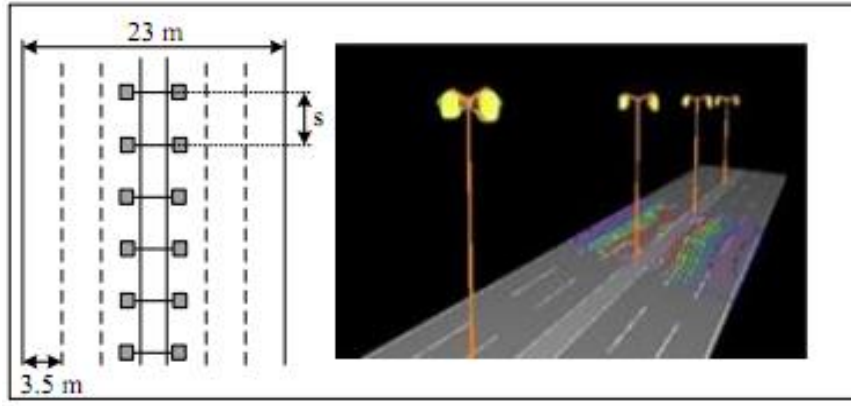


Şekil 6.10 M2 aydınlatma sınıfı için yol geometrisi

Bu yol modeli dört şeritten oluşan bölünmüş bir yoldur. Her bir şerit genişliği 3,5m olup, 2m genişliğinde orta kaldırım (refüj) ile ayrılıp toplam 16m genişliğindedir ve karşılıklı aydınlatma düzeneği ile aydınlatılmıştır. Bu yol modeli için motorlu araç kullanıcısının tipik hızının 60 km/s'ten yüksek olduğu otoyolda aydınlatma durumu A1 olarak değerlendirilmiştir. Yol yüzeyi R3 sınıfı kaplama, armatür bakım faktörü 0,89 kabul edilmiştir [83].

6.2.3.2 M1 Aydınlatma Sınıfı için Yol Tasarımı

250W YBSB ve MH armatürler genel olarak M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfları için kullanılmaktadır. Bu simülasyonda, M1 aydınlatma sınıfı seçilmiş olup 2x3 şeritli ortadan refüj ile ayrılan örnek yol modeli kullanılmıştır. Her bir şeridin genişliği 3,5m olup ortadan çift konsollu direk kullanılarak aydınlatma yapılmıştır. Aydınlatma sınıfı A1, yol kaplaması R3 ve armatür bakım faktörü 0,89 kabul edilmiştir. M1 yol sınıfı için yol geometrisi ve tasarlanan yol modeli Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11 M1 aydınlatma sınıfı için yol geometrisi

Üç farklı firmadan (A1, A2 ve A3) temin edilen 250W YBSB ve MH armatürlerin ve iki farklı LED armatürün (A3 ve A6) M1 yol sınıfı için simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

6.2.3.3 Yol Tasarım Hesaplama Sonuçları

M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfları için DIALux programında elde edilen yol aydınlatma tasarım sonuçları sırasıyla Çizelge 6.8 ve Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.8 M2 aydınlatma sınıfı için tasarım hesabı sonuçları

Armatür	Güç (W)	s (m)	mh (m)	oh (m)	θ (°)	L_o (cd/m ²)	U_o	U_l	TI(%)	SR	W/km
						$\geq 1,50$	$\geq 0,40$	$\geq 0,70$	≤ 10	$\geq 0,5$	
150W YBSB A1	166,0	36	11	2	15	1,51	0,62	0,71	6	0,82	9296
150W YBSB A2	174,9	41	10	2	5	1,55	0,6	0,71	31*	0,8	8174
150W YBSB A3	148,6	35	11	2	5	1,5	0,59	0,73	6	0,83	8619
150W MH A1	163,5	29	9,5	1,5	10	1,51	0,64	0,72	5	0,66	11118
150W MH A2	169,7	25	13	1	10	1,33*	0,59	0,7	23*	0,77	13576
150W MH A3	148,8	28	9	2	0	1,51	0,56	0,77	10	0,71	10714
80W LED A1	79,3	27	14	2	10	1,52	0,66	0,73	9	0,9	5868
80W LED A4	79,9	27	9	2	5	1,54	0,71	0,73	6	0,77	5913
105W LED A4	105,3	31	12	1,5	5	1,52	0,76	0,70	4	0,83	6720
114W LED A5	112,6	31	9	1	0	1,51	0,43	0,73	10	0,66	7206

(s: direk açıklığı; mh: montaj yüksekliği; oh: kol uzunluğu; θ : eğim açısı; L_o : ortalama parıltı; U_o : ortalama parıltı düzgünlüğü; U_l : boyuna parıltı düzgünlüğü; TI: bağıl eşik artışı; SR: çevreleme oranı)

Çizelge 6.8'de görüldüğü üzere, (*) işaretli değerler CIE'in belirttiği minimum yol aydınlatma kriterlerini sağlamadığı görülmektedir [67]. Kamaşmayı ifade eden bağıl eşik artışı 150W A2 armatürlerinde M2 aydınlatma sınıfı için standartta belirtilen değer üzerinde olduğu görülmüştür. A1 YBSB armatür maksimum direk açıklığını 36m

sağlamış ve 1 km’de bu armatürlerin 9296W güç tükettiği hesaplanmıştır. A3 YBSB armatür ise 35m maksimum direk açıklığında 8619W güç tüketmektedir. Bu durumda, A1’in 1 km’deki armatür sayısı A3 armatürlerden daha azdır. Bundan dolayı A1 armatürün kurulum ve bakım maliyetleri ekonomik açıdan daha uygun olacaktır. Diğer yandan, A3 armatürün km başına enerji maliyeti A1 armatürden daha düşük olacaktır. Bu nedenle, maliyet açısından en efektif armatürü bulmak için A1 ve A3 armatürlerinin (hem YBSB hem de MH için) toplam maliyetleri ÖMA analizine göre hesaplanmıştır. ÖMA analizi sonucuna göre A3 armatürlerin toplam maliyet olarak A1 armatürlerden daha ekonomik olduğu görülmüştür.

LED armatürler enerji tüketimi açısından büyük bir avantaja sahiptir. Ancak LED ve konvansiyonel armatürleri karşılaştırmak için LED armatürlerin kurulum ve bakım maliyetleri incelenmelidir. LED ve uygun konvansiyonel armatürler M2 yol aydınlatma sınıfı için ekonomik açıdan bir sonraki bölümde karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.9 M1 aydınlatma sınıfı için tasarım hesabı sonuçları

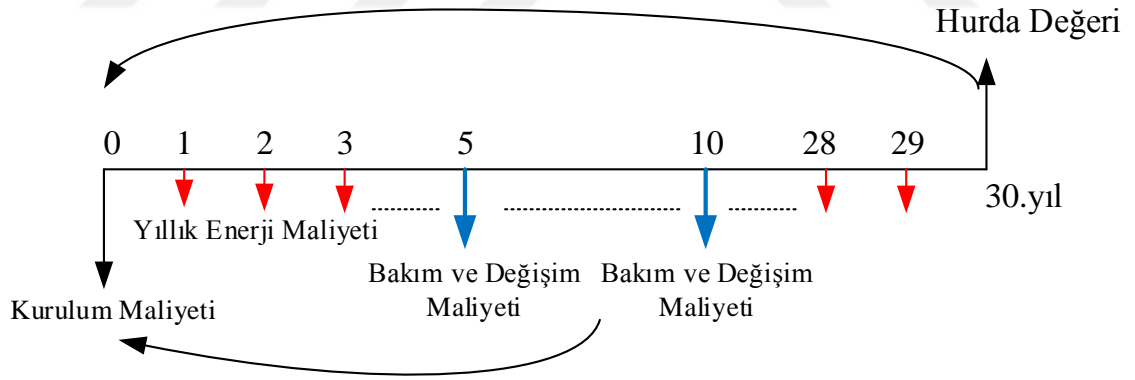
Armatür	Güç (W)	s (m)	mh (m)	oh (m)	θ (°)	L_o (cd/m ²)	U_o	U_1	TI(%)	SR	W/km
						$\geq 2,00$	$\geq 0,40$	$\geq 0,70$	≤ 10	$\geq 0,5$	
250W YBSB A1	278,6	36	15	1,5	5	2,04	0,4	0,79	4	0,82	15602
250W YBSB A2	263,7	32	21	1	0	2,00	0,45	0,79	2	0,86	15959
250W YBSB A3	234,5	31	17	1,5	15	2,04	0,4	0,79	7	0,86	15008
250W MH A1	296,1	29	16	2	5	2,02	0,43	0,78	4	0,74	20135
250W MH A2	277,6	27	22	1	15	2,05	0,43	0,77	4	0,94	20542
250W MH A3	263,2	26	17	2	15	2,01	0,42	0,87	7	0,84	20003
170W LED A3	163,6	26	14	1,5	0	2,01	0,45	0,7	0	0,86	12434
153W LED A6	152,5	29	10	2	0	2,04	0,48	0,84	10	0,81	10370

Bu M1 sınıfı yol geometrisinde, minimum yol aydınlatma kriterleri tüm armatürler tarafından sağlanmaktadır. Çizelge 6.9’da görüldüğü üzere, maksimum direk açıklığına A1 250W YBSB armatür sahip olup km başına 15602W güç tüketmektedir. A1 YBSB armatür için km başına toplam armatür sayısı 56 olarak hesaplanmıştır. Ancak A3 YBSB armatürün km başına güç tüketimi A1 armatürden daha azdır. Bu nedenle, M2 sınıfında olduğu gibi M1 sınıfı için de maliyet açısından en uygun konvansiyonel armatürü belirlemek için tüm armatürler ÖMA yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; A3 250W YBSB armatürün toplam maliyeti diğer YBSB armatürlerden daha düşük olurken, A1 250W MH armatürün toplam maliyeti diğer MH armatürlerden daha düşük olduğu görülmüştür. 153W LED A6 armatür km başına 10370W güç tüketmekte ve bir km’de

68 adet bu armatürden kullanılmaktadır. Eğer LED armatürler YBSB armatürler yerine tercih edilirse; LED'lerin kurulum maliyetleri yüksek olmasına rağmen, enerji tüketimleri ise yaklaşık %33 daha az olmaktadır. Bu nedenden dolayı, M1 sınıfı için de en uygun maliyetli konvansiyonel armatürler ekonomik açıdan LED armatürlerle karşılaştırılmıştır.

6.2.4 Ömür Maliyet Analizi (ÖMA)

Ömür maliyet analizi bir yatırım kararı için en uygun seçeneğin ortaya konulması için kullanılmaktadır. Bu yöntem, karayolları için yapılan önceki çalışmalarda maliyet analizi açısından başarılı sonuçlar ortaya koymuştur [43], [44]. ÖMA olarak adlandırılan bu yöntem belirlenen bir projenin başarıyla tamamlanabilmesi için farklı alternatiflerden en düşük maliyetin belirlenmesini sağlar. Bu yöntemle sadece kurulum maliyetleri değil, aynı zamanda proje ömrü içerisinde işletme, bakım, değişim gibi diğer maliyetler ve hurda değerleri de hesaba katılır. Paranın zamana göre değeri farklı olacağından bütün maliyetlerin gelecekteki değerlerini şimdiki değere indirerek (maliyetin şimdiki değeri, MŞD) ortak bir analiz yapılmıştır. Bu çalışmada, toplam maliyetlerin şimdiki değer eşitliği (6.4) hem faiz (i) hem de enflasyon oranını (e) birlikte içermektedir. MŞD diyagramı Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 MŞD yöntem diyagramı

$$MŞD = \sum_{k=1}^{30} A * \frac{(1+e)^k}{(1+i)^k} \quad (6.4)$$

İlk olarak, konvansiyonel armatürlerin maliyetleri kendi aralarında ÖMA'ne göre karşılaştırılmıştır. Maliyet analizinden sonra, minimum toplam maliyete sahip YBSB ve MH armatürler seçilmiştir. A3 firmasına ait 150W ve 250W YBSB armatürler diğer YBSB armatürlerle karşılaştırıldığında daha düşük toplam maliyete sahip oldukları görülmüştür. Benzer şekilde, A3 firmasına ait 150W MH ve A1 firmasına ait 250W MH

armatürler diğer MH armatürlerle karşılaştırıldığında daha düşük toplam maliyete sahiptir. Tüm LED armatürlerin ve seçilen konvansiyonel armatürlerin maliyetleri ÖMA yöntemiyle analiz edilerek karşılaştırılmıştır. M1 ve M2 aydınlatma sınıfı için analiz edilen armatürlerin özellikleri Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11’de verilmiştir. ÖMA, tüm proje ömrü boyunca (yol aydınlatmasında genelde 30 yıl) aydınlatma tesisatının maliyetlerini göz önüne alır [47], [84]. Bu çalışmada bir yol aydınlatmasının yılda 3650 saat çalışması ile birlikte işletme ömrü (proje ömrü) 30 yıl kabul edilmiştir. Konvansiyonel armatürlerin de ekonomik ömrü 30 yıl kabul edilmiş ve bu süre içerisinde armatür değişimi yapılmamıştır. Değişim sadece lambalar ve balastlar için yapılmıştır. Diğer yardımcı elemanların (ateşleyici vb.) değişimi ihmal edilmiştir.

Çizelge 6.10 M2 aydınlatma sınıfında ÖMA için kullanılan armatürlerin özellikleri

Armatür İsmi	Armatür Gücü (W)	Armatür Sayısı (adet/km)	Direk Sayısı (adet/km)	Lamba Ömrü (h)	Değişim Periyodu (Yıl)*	Armatür Fiyatı (TL)	Lamba Fiyatı (TL)
150W YBSB A3	148,6	58	58	20000	5	140,00	33,00
150W MH A3	148,8	72	72	12000	3	140,00	33,00
80W LED A1	79,3	74	74	50000	13	420,00	-
80W LED A4	79,9	74	74	50000	13	470,00	-
105W LED A4	105,3	64	64	50000	13	530,00	-
114W LED A5	112,6	64	64	50000	13	630,00	-

*Değişim periyodu konvansiyonel armatürler için lamba değişimi, LED’ler için armatür değişimi demektir.

Çizelge 6.11 M1 aydınlatma sınıfında ÖMA için kullanılan armatürlerin özellikleri

Armatür İsmi	Armatür Gücü (W)	Armatür Sayısı (adet/km)	Direk Sayısı (adet/km)	Lamba Ömrü (h)	Değişim Periyodu (Yıl)*	Armatür Fiyatı (TL)	Lamba Fiyatı (TL)
250W YBSB A3	234,5	64	32	20000	5	212,00	45,00
250W MH A1	296,1	68	34	12000	3	212,00	45,00
170W LED A3	163,6	76	38	50000	13	400,00	-
153W LED A6	152,5	68	34	50000	13	550,00	-

Öte yandan, LED sistemler bir bütün olarak kabul edilir (modül, sürücü, lens vb.). Bu nedenle armatürün ömrü LED sisteminin bileşenleri temel alınarak belirlenir. Sürücünün ömrü LED ışık kaynağı ömründen daha azdır. LED sistemlerinin yüzde 90'dan fazlası sürücü nedeniyle başarısız olmaktadır [85]. Şu anda, LED armatürlerin değiştirilebilir parçaları için standart bulunmamaktadır. Armatür üreticileri, aydınlatma endüstrisinin standartlaştırılmış sürücülerin LED aydınlatmada kullanımı için geliştirmesi gerektiğini belirtmektedir [85]. Yol aydınlatmasında armatür arızası tek tek meydana geldiğinde, değiştirme ve bakım daha pahalıdır ve dolayısıyla şehirlerde tek tek değişim çok fazla

uygulanmak istenmez [86]. Daha ekonomik ve uygulanabilir bakım yapmak için, sokak aydınlatma armatürlerinde yer alan lambalar, tek tek değiştirme yerine grup değiştirmeleri ile değiştirilir. Bu çalışmada, LED armatürlerin bileşenleri (sürücü ve LED modülü, ışık kaynağı gibi) zaman periyodu boyunca değiştirilmemiştir. Bu nedenle, LED armatürlerin değişimi, beklenen ömründen sonra tüm LED armatürün değişimi olarak düşünülmüştür.

Ömür maliyet analizine göre toplam maliyet (TC); kurulum maliyeti (IC), bakım maliyeti (MC) ve enerji maliyeti (EC) toplamından hurda değeri (SV) çıkarılarak elde edilmiştir (6.5) [43]. Maliyet hesaplamaları bir km'lik yol aydınlatma yatırımı için yapılmış olup eşitlikler aşağıda verilmiştir. Hurda değeri ekonomik ömür boyunca değişen ürünün sadece kullanılmayan kısmı için hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle, proje ömrü boyunca sadece son değiştirilen LED armatür hurda değerine sahiptir. Armatür ve bileşenlerin çevresel atıkları, ülkemizde belediyeler tarafından ücretsiz olarak geri dönüştürülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada elden çıkarma maliyetleri ÖMA'da dikkate alınmamıştır.

$$TC = IC + MC + EC - SV \quad (6.5)$$

$$IC = N * (N_p + N_{mp}) + L * (L_p + L_{mp}) + P * (P_p + P_{mp}) + C * (C_p + C_{mp}) + YC * (YC_p + YC_{mp}) \quad (6.6)$$

$$MC = L * (L_p + L_{mp}) + (S_n * S_p + F_p) * N / (S * t_d) \quad (6.7)$$

$$EC = N * P_i * 365 * E_p * 10^{-3} * t_o \quad (6.8)$$

Bakım, enerji ve hurda maliyetleri net şimdiki değer yöntemiyle hesaplanmıştır [46]. Bakım maliyeti, her değiştirme periyodu için ayrı olarak hesaplanmış ve daha sonra MŞD metoduna göre toplam bakım maliyeti elde edilmiştir. Elektromanyetik balastın değiştirme maliyeti, 10 yılda bir olmak üzere geleneksel aydınlatma armatürleri için Eşitlik (6.7)'ye eklenmiştir. Proje ömrü içinde toplam enerji maliyetinin net şimdiki değeri Eşitlik (6.9)'da verilen eşitlikle hesaplanmıştır [87], [88].

$$\text{Toplam enerji maliyeti şimdiki değeri} = EC * (1 + e) * \frac{1 - \left(\frac{1+e}{1+i}\right)^{30}}{i - e} \quad (6.9)$$

Avrupa ülkelerinin aksine Türkiye'de yüksek enflasyon ve faiz oranı uygulandığından bu oranlar uzun süreli ekonomik yatırım analizlerinde dikkate alınmalıdır. Hesaplamalarda Türkiye Merkez Bankasının enflasyon ve faiz oranları kullanılmıştır. Bu oranlar sırasıyla

ortalama %8,5 ve %10,5'tir [89], [90]. Armatür fiyatları ait oldukları firmaların güncel katalog bilgilerinden alınmıştır. Diğer işçi ve montaj maliyetleri Türkiye için güncel fiyatlar dikkate alınarak belirlenmiştir.

Konvansiyonel armatürler için bakım maliyeti, lamba ve balast değişimi ile birlikte armatür temizliğini içermektedir. Lamba değişim periyodu lamba türüne göre değişmektedir. YBSB ve MH lambaların ömürleri sırasıyla 20000 ve 12000 saattir. Bundan dolayı YBSB ve MH lambalar sırasıyla her 5. ve 3. yılda değiştirilmektedir. Her lamba değişim periyodunda her bir armatürün bakımı da yapılmaktadır. Konvansiyonel armatürlerin balast değişimi proje ömrü boyunca iki kez gerçekleştirilmektedir. 150W ve 250W'lık elektromanyetik balast fiyatları sırasıyla 32,00 ve 43,00 TL'dir. Konvansiyonel armatürlerin 30 yıllık işletme ömrü boyunca değiştirilmediği varsayılmaktadır. LED armatürler ise bütün olarak (armatür ve ışık kaynağı birlikte) düşünüldüğünden dolayı lamba değişimi LED armatürlerde söz konusu değildir. LED armatürlerin ömürleri katalogda belirtilen yaklaşık 50000 saat olduğundan değişim periyotları 13,7 yıl olarak hesaplanmıştır. 30 yıllık işletme ömründe LED armatürler iki kez değiştirilmektedir. LED armatürlerin değişim yılları 13. ve 27. yıllar olarak belirlenmiştir. Ayrıca LED armatürlerin bakımları her 5 yılda bir yapılmaktadır. Bakım maliyeti (6.7) işçi maliyeti, yakıt ücreti, çalışma süresi ve lamba sayısı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Armatür bakımı için günlük 2 işçi çalışarak bir saatte 10 armatürün lamba değişimini ve bakımını yapacağı kabul edilmiştir. Bir işçinin ücreti 80,00TL/gün ve çalışma saati ise 8 saat/gün olarak kabul edilmiştir. İşçilerin ulaşımı için günlük yakıt ücreti ise 150,00TL olarak alınmıştır. Armatürlerin günlük ortalama çalışma süresi 10 saat kabul edilmiş ve yıllık çalışma süreleri 3650 saat olarak hesaplanmıştır. Türkiye'de aydınlatma için harcanan elektriğin birim fiyatı 0,257 TL/kWh olarak alınmıştır. Enerji maliyeti hesabı Eşitlik (6.8)'te verilmiştir.

Kurulum maliyeti (6.6); lamba, direk, kablo, işçilik ve armatür fiyatları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bir km için kullanılan direk ve armatür sayısı DIALux aydınlatma tasarımına göre hesaplanmıştır. Aksesuarlarıyla birlikte direk fiyatı yaklaşık 750,00TL/adet ve direk montaj fiyatı ise 10TL/m'dir. Armatür ve lambanın montaj fiyatı sırasıyla 75,00TL/adet ve 5,00TL/adettir. Kablo maliyeti havai hat ve yer altı kablo maliyeti olarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yer altı kablosunun uzunluğu direk sayısı ile direk açıklığı çarpılarak hesaplanmıştır. Havai hat kablo uzunluğu ise armatürün montaj yüksekliği ile bir km'deki direk sayısının çarpımıyla hesaplanmıştır. Yer altı kablosunun

ve montajının fiyatı sırasıyla 7,50TL/m ve 35,00TL/m'dir. Havai hat kablosunun ve montajının fiyatı ise sırasıyla 4,50TL/m ve 2,00TL/m'dir.

Hurda değeri son değiştirilen LED armatür için hesaplanmıştır. Örneğin; proje ömrünün 20 yıl ve bir LED armatürün ömrünün ise 15 yıl olduğunu varsayalım. LED armatür 15 yılın sonunda yenisiyle değiştirilecektir. Yeni LED armatür ise ekonomik ömrünün üçte birlik kısmı kadar kullanılacaktır. Bu durumda, bu armatürün hurda değeri armatür ömrünün üçte ikilik kısmı için hesaplanmalıdır. LED armatürün hizmet verebilme zamanından dolayı hurda değeri toplam maliyetten çıkartılmıştır. Bu çalışmada, LED armatürler 13,7 yıllık ömre sahip olduklarından 30 yıllık proje ömrü içerisinde iki kez değiştirilecek olup son armatürün kullanılmayan oranı Eşitlik (6.10)'da hesaplanmıştır [43].

$$\%100 - \frac{30-(2*13.7)}{13.7} = \%81 \quad (6.10)$$

Son LED armatürün %81'lik kısmı proje ömrü içerisinde kullanılmamaktadır. Armatür fiyatının 470,00TL olduğunu düşünürsek, son armatürün hurda değeri $470,00*0,81=370,00$ TL olarak hesaplanır. Bu fiyatın enflasyon ve faiz oranlarından dolayı Eşitlik (6.4) yardımıyla şimdiki değeri hesaplanmıştır.

6.2.5 Maliyet Analiz Sonuçları

Ölçümler ve hesaplamalar sonucunda, belirlenen armatürlerin ömür maliyet analizleri 30 yıllık proje ömrü için hesaplanmıştır. Toplam maliyetin net şimdiki değeri kurulum, enerji, bakım maliyetlerini ve hurda değerini içermektedir. M1 ve M2 aydınlatma sınıfları için armatürlerin km başına toplam maliyetleri Çizelge 6.12 ve Çizelge 6.13'te verilmiştir.

Çizelge 6.12 M2 aydınlatma sınıfı için net şimdiki toplam maliyetler

Armatür	Kurulum Maliyeti (TL/km)	Enerji Maliyeti (TL/km)	Bakım Maliyeti (TL/km)	Hurda Değeri (TL/km)	Toplam Maliyet (TL/km)
150W YBSB A3	154.976,00	173.473,47	8.728,60	0.00	337.178,08
150W MH A3	168.588,00	215.636,21	19.554,79	0.00	403.779,01
80W LED A1	194.139,00	118.111,23	40.489,32	12.670,98	340.068,56
80W LED A4	191.734,00	119.004,88	52.061,09	14.179,43	348.620,53
105W LED A4	183.712,00	135.255,69	49.947,78	13.828,82	355.086,65
114W LED A5	186.944,00	145.045,62	58.151,07	16.438,03	373.702,66

Çizelge 6.12’de görüldüğü üzere, M2 aydınlatma sınıfı için hemen hemen aynı maliyete sahip A3 YBSB ve A1 LED armatürler en etkin maliyete sahip armatürlerdir. A3 YBSB armatürün enerji maliyeti A1 LED armatürünkünden yaklaşık %32 daha fazla iken, kurulum maliyeti ise yaklaşık %20 daha azdır. Bakım maliyeti LED’ler için armatür değişimini ve temizliğini içerirken, konvansiyonel armatürler için ise armatürün temizlenmesi yanında lamba ve balast değişimini kapsamaktadır. Bundan dolayı, LED armatürlerin bakım maliyeti konvansiyonel armatürlerinkinden daha büyüktür. MH armatürler düşük etkinlik değerleri ve kısa ömürlerinden dolayı en yüksek maliyete sahip armatürlerdir.

Çizelge 6.13 M1 aydınlatma sınıfı için net şimdiki toplam maliyetler

Armatür	Kurulum Maliyeti (TL/km)	Enerji Maliyeti (TL/km)	Bakım Maliyeti (TL/km)	Hurda Değeri (TL/km)	Toplam Maliyet (TL/km)
250W YBSB A3	96.704,00	302.071,04	12.391,65	0.00	411.166,69
250W MH A1	99.297,00	405.259,86	23.760,86	0.00	528.317,72
170W LED A3	116.698,00	250.255,23	46.649,16	12.393,76	401.208,63
153W LED A6	115.515,00	208.720,46	54.812,71	15.247,58	363.800,59

Çizelge 6.13’te verilen sonuçlara göre, M1 yol aydınlatma sınıfı için yapılacak yatırımda A6 LED armatürün kullanılmasının diğer armatürlere göre daha karlı olduğu anlaşılmaktadır. A6 LED armatürün km başına düşen armatür sayısının (68 adet/km) konvansiyonel armatürlerden (64 adet/km) fazla olmasına rağmen, A6 LED armatürün yüksek etkinliğe sahip olmasından dolayı enerji maliyeti diğerlerinden daha az olmaktadır. Ayrıca, konvansiyonel armatürlerin balast kayıpları yüksek enerji tüketimine neden olduğu görülmektedir. MH armatürlerin enerji ve toplam maliyetleri ise A6 LED armatürden sırasıyla yaklaşık %48,5 ve %31 daha yüksektir.

6.3 Sonuçlar

Mevcut sistemlerde konvansiyonel armatürlerin LED armatürlerle değiştirilmesi enerji maliyeti açısından yüksek oranda enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür. İlerleyen yıllarda LED armatürlerin etkinlik değerlerinin daha da yükselmesi aynı zamanda enerji birim maliyeti yüksek olan ülkelerde bu tarz retrofit çalışmaların yapılması enerji tasarrufunun daha artmasını ve geri dönüşüm sürelerinin daha da kısalmasına olanak sağlayacaktır. Ancak LED armatürlerin yüksek kurulum ve bakım maliyetlerinden dolayı tüm maliyetler dikkate alınarak herhangi bir yol aydınlatmasında en uygun toplam

maliyete sahip armatürün belirlenmesi için ömür maliyet analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

ÖMA hesaplamaları göstermiştir ki, M2 aydınlatma sınıfı için 30 yıllık proje ömrü olan yeni bir yol aydınlatma uygulamasında 80W LED A3 ve 150W YBSB A1 armatürleri hemen hemen aynı maliyet etkinliğine sahiptir. Ancak; enerji tasarrufu, ışık kalitesi ve uzun ömür açısından LED'lerin kullanımının daha uygun olacağı görülmüştür. MH armatürler ise M1 ve M2 aydınlatma sınıfı için en yüksek maliyete sahip armatürlerdir. Diğer yandan; M1 sınıfı için 153W LED A6 armatür ile yapılacak yol aydınlatma uygulaması diğer YBSB ve MH armatürlerin kullanıldığı uygulamaya göre daha düşük toplam maliyete sahip olmaktadır. Her iki yol sınıfı için de LED armatürlerin kurulum maliyetleri konvansiyonel armatürlere göre daha yüksek iken, enerji maliyetleri daha düşüktür.

Enerji tasarrufu, ışık kalitesi ve uygun maliyet açısından farklı teknolojiye sahip armatürlerin karşılaştırılmasının önemi bu çalışmada görülmektedir. Uygun maliyetli LED armatür sistemlerinin elektrik birim fiyatı ve armatür fiyatı gibi iki önemli parametreye bağlı olduğu yapılan çalışmada görülmüştür. İlerleyen yıllarda, armatür fiyatlarının düşmesine ve etkinliklerinin artmasına bağlı olarak LED armatürler yaygın olarak kullanılmaya başlanacaktır. Fosil yakıtlarının tükenme tehdidi nedeniyle elektrik birim fiyatı arttıkça LED sistemler yol aydınlatmasında ekonomik açıdan daha da avantajlı olacaktır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, LED ve konvansiyonel ışık kaynaklı yol aydınlatma armatürleri ışıksal, elektriksel ve ekonomik açıdan incelenmiştir. Işıksal olarak, spektrumların farklı kaplama yüzeyleri üzerine etkisi yüksek ve düşük aydınlık düzeyinde ve yağmur koşullarında incelenmiştir. Spektrumların sisli hava koşulları altında performansları; geçirgenlikleri ve kullanıcıların hedeflere verdiği reaksiyon süreleri ölçülerek belirlenmiştir. Elektriksel olarak, LED ve konvansiyonel ışık kaynaklarının ve armatürlerinin güç, güç faktörü ve harmonik değerleri ölçülerek standart ve teknik şartnamelere uygunluğu incelenmiştir. Ekonomik olarak, mevcut sistemlerde konvansiyonel armatürlerin LED armatürlerle değiştirilmesi durumunda ortaya çıkan maliyetler ve geri dönüşüm süreleri hesaplanmıştır. Ayrıca yeni tesis edilecek bir yol aydınlatma uygulamasında tüm maliyetler (kurulum, bakım ve enerji maliyetleri) ve hurda değerleri dikkate alınarak net şimdiki değer yöntemiyle armatürlerin ömür maliyet analizleri yapılmıştır.

Yol kaplamalarında kullanılan agregaların renk ve parlaklığı, kaplamanın yansıtma özelliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Literatürde, YBSB ve MH ışık kaynakları altında farklı kaplamalar için yapılan ölçümlerde her bir spektrum altında parıltı değerlerinin değiştiği görülmüştür. Düşük aydınlık düzeyinde MH altında bağıl parıltı değerleri azalırken, YBSB lamba altında ise bu değerlerin birçok kaplamada arttığı yapılan çalışmalarda görülmüştür.

Bu çalışmada ise, farklı CCT ve CRI değerlerine sahip LED spektrumları altında kaplamaların spektral yansıtma özellikleri ölçülmüştür. Aşındırma yapılmış ve içerisinde farklı büyüklük ve renklerde agregaların olduğu kaplamalarda bağıl spektral yansıtma kısa dalga boylarına göre uzun dalga boylarında daha yüksek çıkmaktadır. Aşındırma

yapılmamış koyu renk kaplamada ise bağıl spektral yansıma uzun ve kısa dalga boylarında hemen hemen aynı değeri almaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda renk sıcaklığının ve renksel geriverimin kaplamaların yansıma özelliklerini değiştirdiği görülmüştür.

Yüksek ve düşük aydınlık düzeyinde tüm spektrumlar altında her bir kaplama için ıslak koşullarda bağıl yansıma değerleri kuru koşullara göre azalmaktadır. Ancak bağıl spektral yansıma değişimleri kuru ve ıslak koşullarda hemen hemen aynı şekildedir. Kuru koşullarda yüksek aydınlıktan düşük aydınlık düzeyine geçildiğinde ise spektrumlar altında bağıl yansıma değerleri kaplama çeşidine göre farklı özellikler gösterebilmektedir. Örneğin, açık renk agregaya sahip kaplamalarda farklı CCT ve CRI'daki spektrumlar altında yansıma değerlerinin birbirinden farklı olduğu, koyu agregaya sahip kaplamalarda ise yansıma değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Aynı şekilde ıslak koşullarda da kaplamalarının yansıma değerlerinin spektrumlara göre hem yüksek aydınlık düzeyinde hem de düşük aydınlık düzeyinde değişim gösterdiği görülmüştür.

Burada sonuçlar yorumlanırken dikkat edilmesi gereken, yol aydınlatma kriterlerinin değişmesine neden olan durumlardır. Bunlardan biri farklı hava koşullarıdır. Yol aydınlatma tasarımları genellikle kuru koşullar dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu koşullarda standartlarda belirtilen parıltı değerleri yol yüzeyinde sağlanmaktadır. Ancak farklı hava koşullarında yol kaplamalarının yansıma özellikleri değişeceğinden yol aydınlatma kriterleri de değişecektir. Bir diğer durum ise, enerji tasarrufu için ışık akısının belirli saatlerde azaltılmasıdır (dimmerleme). Her iki durumda da farklı spektrumlar altında yol kaplamalarının yansıma özellikleri değişecektir. Bu nedenle sonuçlar, kuru koşullarda yüksek yansımaya sahip ve değişen koşullardan en az etkilenen (değişim oranı en az olan) spektrumlara göre yapılarak her bir kaplama çeşidi için uygun spektrumlar belirlenmiştir.

Literatürde, sisli koşullar için daha çok sisin kaza istatistiklerine etkisi, sis altında alınan görüntülerin bilgisayar ortamında görüntü işleme yöntemleriyle değerlendirilmesi gibi çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bir çalışmada sis yoğunluğa bağlı olarak farklı renkteki LED'lerin yayılım özellikleri incelenmiştir. Ayrıca artan sis yoğunluğuna bağlı olarak ışığın renk sıcaklığının da arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada, YBSB, MH ve LED spektrumların farklı yoğunluktaki sis altında geçirgenliklerinin farklı olduğu görülmüştür. Düşük aydınlık düzeyinde yapılan

ölçümlerde ise konvansiyonel kaynakların geçirgenliklerinin azaldığı fakat LED spektrumların ise geçirgenliklerinin hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür. LED spektrumlarında renk sıcaklığının ve renksel geriverimin geçirgenlik üzerine çok fazla etkisi olmamaktadır. Yüksek sis yoğunluğunda MH'nin geçirgenliği YBSB'den daha fazladır. Ancak düşük aydınlık düzeyinde ise MH'nin geçirgenliğinin tüm sis yoğunluğunda YBSB'den daha az olduğu görülmüştür. Yani aydınlık düzeyi düştüğünde MH'nin geçirgenlik değişimi daha fazla değişmektedir. Yüksek sis yoğunluğunda aynı CCT fakat farklı CRI değerindeki spektrumların geçirgenliğinin hemen hemen aynı olduğu sadece düşük sis yoğunluğunda az da olsa farklı olduğu görülmüştür. Aynı CRI farklı CCT'lerde geçirgenlik değerleri birbirinden az da olsa farklı olduğu görülmüştür. Yani her bir CRI'de farklı CCT'deki spektrumlar daha yüksek geçirgenliğe sahip olabilmektedir. Tüm spektrumları karşılaştırdığımızda ise MH'nin daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğu görülmüştür.

Sis altında yapılan geçirgenlik ölçümleri esasında bize sadece sayısal bir anlam ifade etmektedir. Daha başarılı bir sonuç elde etmek için insan faktörünün de işin içine dahil edilmesi gerekmektedir. Literatürde, tepki süresi testleri çeşitli çalışmalarda uygulanmıştır. Örneğin, perde üzerine yansıtılan projeksiyon yardımıyla düzgün ve düzgün olmayan arka plan parıltı dağılımı oluşturularak bu ekran üzerine farklı kontrastlara sahip işaretler çıkartılmış ve gözlemcilerin bu işaretlere verdikleri tepki süreleri ölçülmüştür. Benzer şekilde bu çalışmada, sisli hava koşullarında farklı spektrumlar için gözlemcilerin reaksiyon süreleri ölçülmüştür. Yedi gözlemciye yapılan testler neticesinde, gözlemcilerin büyük çoğunluğu beyaz, kırmızı ve sarı hedefleri YBSB kaynak altında daha kısa sürede algılanmıştır. Her ne kadar MH ışık kaynağının geçirgenliği yüksek olsa da insan faktörünü düşündüğümüzde YBSB ışık kaynağının daha başarılı olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, beyaz ışığın sis içerisinde saçılması ve gözlemci yönüne doğru yansımından dolayı beyaz duvar etkisi dediğimiz durum ortaya çıkması ve bu durumun insan gözünde olumsuz bir etki oluşturmasıdır. Bu kapsamda ülkemizde sisin yoğun olduğu bölgelerde sürüş konforu açısından YBSB ışık kaynaklarının kullanılması daha uygun olacaktır.

Elektriksel olarak, ülkemizdeki kullanılan yol aydınlatma armatürlerinin birçoğunun güç ve güç faktörü değerlerinin limit değerler altında kaldığı görülmüştür. Kullanılan armatürlerde reaktif güç kompanzasyonu yapılmış olmasına rağmen güç faktörünün istenilen değer altında çıkması, armatürlerin üretim aşamasında yapılan test ve

hesaplamalarının doğru ve yeterli yapılmadığını ortaya koymaktadır. 150W ve 250W YBSB ve MH armatürlerin birçoğunda aynı ışık kaynağı kullanılması durumunda THD'nin birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür. Ayrıca birçok armatürde farklı harmonik bileşen değerlerinin standartlarda belirtilen limit değerleri aştığı gözlemlenmiştir. Aynı firma armatüründe iki farklı ışık kaynağının kullanılması durumunda ise ışık kaynağına bağlı olarak harmonik bozulmaların artıp ya da azalacağı sonucu ortaya çıkmıştır. LED'li yol aydınlatma armatürlerinde ise her ne kadar harmonik bileşen değerleri limit değerleri sağlamış olsa da, hiçbir LED armatür THD değeri TEDAŞ'ın belirlemiş olduğu limit değeri sağlamamaktadır.

Yol aydınlatmasında belirli sebeplerden dolayı (ömrünü tamamlaması, arıza vs.) ışık kaynağının ya da armatürün değiştirilmesi sistemde farklı frekansta birçok bileşenin bulunmasına sebep olacak ya da eski duruma göre bu bileşenlerin artmasına neden olacaktır. Bir önceki harmonik akım bileşenin bir sonraki bileşenden büyük olması ilgili armatür devresinin bazı frekans aralıklarında rezonansa girme eğiliminde olabileceği yani rezonans frekansına yaklaşabileceğini göstermektedir. Bu şekilde yapılacak olan ışık kaynağı değişimleri ya da armatür değişimleri sonucunda artan harmonik bozulmaları güç sisteminde ve güç sistemine bağlı diğer elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirecektir. Aynı zamanda sistemde rezonans meydana gelme ihtimali artacak ve buna bağlı olarak nötr iletkenin aşırı yüklenerek ısınmasına neden olabilecektir. Tüm bu durumların milyonlarca direktte gerçekleştiği düşünülürse enerji kalitesi açısından istenmeyen durumların ortaya çıkması kaçınılmaz olacaktır.

Ekonomik açıdan, literatürde çeşitli retrofit çalışmalarda LED armatürlerin YBSB ya da MH armatürler yerine kullanılması durumunda ortaya çıkan sonuçlar irdelenmiştir. Benzer şekilde literatürde ömür maliyet analizleri, sadece LED'ler için LED armatürlerin ileriye dönük tahmin edilen etkinlik değerlerine göre, ömürleri üzerine yapılan varsayımlara göre, ışıksal değerler katalogdan alınarak yapılmakta ya da çevresel açıdan ömür maliyet değerlendirmesi gibi çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada yapılan bir retrofit projede, M2 yol aydınlatma sınıfında LED armatürlerin YBSB ve MH armatürlerle değiştirilmesi durumunda sırasıyla %36,6 ve %51,1 oranında enerji tasarrufu sağlandığı görülmüştür. Ayrıca geri dönüşüm sürelerinin de sırasıyla 13,4 ve 9,3 yıl olduğu belirlenmiştir. ÖMA hesaplamaları göstermiştir ki, M2 aydınlatma sınıfı için 30 yıllık proje ömrü olan yeni bir yol aydınlatma uygulamasında, 80W LED A3 ve

150W YBSB A1 armatürleri hemen hemen aynı maliyet etkinliğine sahiptir. Ancak; enerji tasarrufu, ışık kalitesi ve uzun ömür açısından LED'lerin kullanımının daha uygun olacağı görülmüştür. MH armatürler ise M1 ve M2 aydınlatma sınıfı için en yüksek maliyete sahip armatürlerdir. Diğer yandan; M1 sınıfı için 153W LED A6 armatür ile yapılacak yol aydınlatma uygulaması diğer YBSB ve MH armatürlerin kullanıldığı uygulamaya göre daha düşük toplam maliyete sahip olmaktadır. Her iki yol sınıfı için de LED armatürlerin kurulum maliyetleri konvansiyonel armatürlere göre daha yüksek iken, enerji maliyetleri daha düşüktür.

Enerji tasarrufu, ışık kalitesi ve uygun maliyet açısından farklı teknolojiye sahip armatürlerin karşılaştırılmasının önemi bu çalışmada görülmektedir. Uygun maliyetli LED armatür sistemleri elektrik birim fiyatı ve armatür fiyatı gibi iki önemli parametreye bağlı olduğu yapılan çalışmada görülmüştür. İlerleyen yıllarda, armatür fiyatlarının düşmesine ve etkinliklerinin artmasına bağlı olarak LED armatürler yaygın olarak kullanılmaya başlanacaktır. Fosil yakıtlarının tükenme tehdidi nedeniyle elektrik birim fiyatı arttıkça LED sistemler yol aydınlatmasında ekonomik açıdan daha da avantajlı olacaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ışığında tasarlanacak bir dinamik yol aydınlatma armatürü ile değişen tüm yol koşullarında en uygun yol aydınlatması sağlanabilecek ve sürücüler için sürüş konforu ve güvenliği daima yüksek seviyede tutulabilecektir.

Ayrıca elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler Türkçe literatüre katkı sağlayacak ve Karayolları, Belediyeler ve TEDAŞ gibi karar vericiler için yol aydınlatma uygulamalarında özgün bir kaynak niteliğinde olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] IEA (International Energy Agency), (2006). *Light's Labour's Lost: Policies for energy-efficient lighting*, Paris.
- [2] Azevedo, I. L., Morgan, M. G., ve Morgan, F., (2009). "The transition to solid-state lighting", *Proceedings of the IEEE*, 97(3):481–510.
- [3] Li, F., Chen, D., Song, X., ve Chen, Y., (2009). "LEDs: A promising energy-saving light source for road lighting", *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 28-31 Mart 2009, Wuhan.
- [4] Küçükdoğu, M. Ş., (2003). "Aydınlatmada Etkin Enerji Kullanımı", *I. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu*, 8-10 Ekim 2003, Diyarbakır, 9–13.
- [5] Onaygil, S., Erkin, E., ve Güler, Ö., (2009). "Yol Aydınlatmalarında LED Kullanımı", *V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi*, 7-10 Mayıs 2009, İzmir, 1–9.
- [6] Avrenli, K. A., Benekohal, R. R., ve Medina, J., (2012). *LED roadway lighting, Volume 1: Background information, FHWA-ICT-12-012*, Illinois.
- [7] The Climate Group, (2012). *Lighting the Clean Revolution: The rise of LEDs and what it means for cities*, London.
- [8] Dubois M. C ve Blomsterberg A, (2011). "Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review", *Energy and Buildings*, 43(10):2572–2582.
- [9] Juntunen, E., Tetri, E., Tapaninen, O., Yrjänä, S., Kondratyev, V., Sitomaniemi, A., Siirtola, H., Sarjanoja, E., Aikio, J., ve Heikkinen, V., (2015). "A smart LED luminaire for energy savings in pedestrian road lighting", *Lighting Research & Technology*, 47(1):103–115.
- [10] Kostic, M. ve Djokic, L., (2009). "Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting", *Energy*, 34(10):1565–1572.
- [11] Kuhn, L., Johansson, M., Laike, T., ve Govén, T., (2013). "Residents' perceptions following retrofitting of residential area outdoor lighting with LEDs", *Lighting Research & Technology*, 45(5):568–584.
- [12] Wilken, D., Ananthanarayanan, B., Hasson, P., Lutkevich, P. J., Watson, C. P., Burkett, K., Arens, J., Havard, J., ve Unick, J., (2001). *European Road Lighting Technologies*.
- [13] Simons, R. H., (1992). "Road Lighting and Accidents", *Lighting Research and Technology*, 57(4):243–246.

- [14] Ekrias, A., Eloholma, M., ve Halonen, L., (2013). "Analysis of road lighting quantity and quality in varying weather conditions", *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 4(2):89–98.
- [15] Raynham, P., (2004). "An examination of the fundamentals of road lighting for pedestrians and drivers", *Lighting Research and Technology*, 36(4):307–316.
- [16] Van Bommel, W. J. M. ve de Boer, J. B., (1980). *Road Lighting*, 1st, Palgrave Macmillan, London.
- [17] Yao, Q., Sun, Y., ve Lin, Y., (2009). "Research on facial recognition and color identification under CMH and HPS lamps for road lighting", *LEUKOS*, 6(2):169–178.
- [18] Boyce, P., (2003). *Human Factors in Lighting*, 2nd, Taylor & Francis, London.
- [19] The Society of Light & Lighting, (2009). *The SLL Lighting Handbook*, CIBSE, London.
- [20] EN13201-2, (2013). *Standard EN13201-2-Road Lighting-Part 2: Performance Requirments*.
- [21] Wanvik, P. O., (2009). *Road Lighting and Traffic Safety: Do we need Road Lighting?*, Norwegian University of Science and Techonology (NTNU).
- [22] Van Tichelen, P., Geerken, T., Jansen, B., Vanden Bosch, M., Van Hoof, V., Vanhooydonck, L., ve Vercalsteren, A., (2007). *Final Report Lot 9: Public street lighting*.
- [23] VITO, BIO Intellegence Services, Energy Piano, ve Krios, (2009). *Lot 19: Domestic lighting. Final report; preparatory studies for Eco-design requirements of EuPs*.
- [24] Li, F., Chen, Y., Yang, L., ve Chen, D., (2013). "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.
- [25] Rodrigues, C. R. B. S., Almeida, P. S., Soares, G. M., Jorge, J. M., Pinto, D. P., ve Braga, H. A. C., (2011). "An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 27-30 Haziran 2011, Gdansk, 141–146.
- [26] Van Bommel, W., (2015). *Road lighting: Fundamentals, technology and application*, Springer International Publishing, Switzerland.
- [27] Rea, M., Bullough, J., ve Akashi, Y., (2009). "Several views of metal halide and high-pressure sodium lighting for outdoor applications", *Light. Res. Technol.*, 41(4):297–320.
- [28] Kobayashi, S., Okawa, M., ve Okajima, K., (2010). "Study on effect of headlight source spectrum on apparent brightness of visual targets", *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, 94(5):275–282.
- [29] Fotios, S. ve Cheal, C., (2007). "Lighting for subsidiary streets: investigation of lamps of different SPD. Part 2-Brightness", *Lighting Res. Technol.*, 39(3):233–252.
- [30] Ashdown, I., (2007). "Solid-State Lighting: A Systems Engineering Approach",

Optics Photonics News, 18(1):24–30.

- [31] Ekrias, A., Eloholma, M., ve Halonen, L., (2009). "The effects of colour contrast and pavement aggregate type on road lighting performance", *Light and Engineering*, 17(3):76–91.
- [32] Fotios, S., Cheal, C., ve Boyce, P., (2005). "Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review", *Lighting Research & Technology*, 37(4):271–291.
- [33] Rea, M., Radetsky, L., ve Bullough, J., (2011). "Toward a model of outdoor lighting scene brightness", *Lighting Research & Technology*, 43(1):7–30.
- [34] Bullough, J. D., Radetsky, L. C., Besenecker, U. C., ve Rea, M. S., (2014). "Influence of spectral power distribution on scene brightness at different light levels", *LEUKOS*, 10(1):3–9.
- [35] Bullough, J. D., (2015). "Spectral sensitivity modeling and nighttime scene brightness perception", *LEUKOS*, 11(1):11–17.
- [36] DOE (U.S. Department of Energy), (2016). Solid-state lighting program "R&D plan."
- [37] Domenichini, L., La Torre, F., Vangi, D., Virga, A., ve Branzi, V., (2017). "Influence of the lighting system on the driver's behavior in road tunnels: A driving simulator study", *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(2):216–238.
- [38] Guo, S., Gu, H., Wu, L., ve Jiang, S., (2011). "Energy-saving tunnel illumination system based on LED's intelligent control", *Journal of Physics: Conference Series*, 276(1):12164.
- [39] Tähkämö, L. ve Halonen, L., (2015). "Life cycle assessment of road lighting luminaires – Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies", *Journal of Cleaner Production*, 93(1):234–242.
- [40] Emniyet Genel Müdürlüğü, (2013). Trafik Kaza İstatistikleri.
- [41] Otas, K., Pakenas, V. J., Vaskys, A., ve Vaskys, P., (2012). "Investigation of LED light attenuation in fog", *Electronics and Electrical Engineering*, 5(121):47–52.
- [42] Munehiro, K., Tokunaga, R. A., Asano, M., ve Hagiwara, T., (2007). "Required luminous intensity of Led roadway", *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2007.
- [43] Avrenli, K. A., Benekohal, R. R., ve Medina, J., (2012). LED roadway lighting, Volume 2: Field evaluations and software comparisons, FHWA-ICT-12-013, Illinois.
- [44] FHWA U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Asset Management, (2002). Life-cycle cost analysis primer, Washington.
- [45] Lewin, I., Box, P., ve Start, R., (2016). "An economic study of three light sources for roadway lighting", *LEUKOS*, 1(4):73–80.
- [46] Onaygil, S., Guler, O., ve Erkin, E., (2012). "Cost analyses of LED luminaires in road lighting", *Light and Engineering*, 20(2):39–45.
- [47] Tähkämö, L., Ylinen, A., Puolakka, M., ve Halonen, L., (2012). "Life cycle cost analysis of three renewed street lighting installations in Finland", *The International*

Journal of Life Cycle Assessment, 17(2):154–164.

- [48] Jiang, Y., Li, S., Guan, B., ve Zhao, G., (2015). "Cost effectiveness of new roadway lighting systems", *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(3):158–166.
- [49] Principi, P. ve Fioretti, R., (2014). "A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office – compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) – a case study", *Journal of Cleaner Production*, 8396–107.
- [50] Santero, N. J., Masanet, E., ve Horvath, A., (2011). "Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review", *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10):801–809.
- [51] Stripple, H., (2001). Life cycle assessment of road a pilot study for inventory analysis, IVL Swedish Environmental Institute, Sweden.
- [52] Welz, T., Hischier, R., ve Hilty, L. M., (2011). "Environmental impacts of lighting technologies — Life cycle assessment and sensitivity analysis", *Environmental Impact Assessment Review*, 31(3):334–343.
- [53] Sansoni, P., Mercatelli, L., ve Farini, A., (2015). *Sustainable Indoor Lighting*, Springer, London.
- [54] Boyd, R. W., (1983). *Radiometry and the detection of optical radiation*, Wiley.
- [55] Illuminating Engineering Society of North America, (2000). *The IESNA Lighting Handbook Reference and Application*, 9th. Edition.
- [56] Aydınlatma Ders Notları, (2015). *Light and Vision*, Aalto University.
- [57] CIE 30-2, (1982). *Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting*, International Commission on Illumination.
- [58] CIE/PIARC, (1984). *Road surfaces and lighting*.
- [59] Frederiksen, E. ve Sørensen, K., (1976). "Reflection classification of dry and wet road surfaces", *Lighting Research & Technology*, 8(4):175–186.
- [60] EN 13201-3, (2013). *Standard EN 13201-3 Road Lighting-Part 3 Calculation of performance*.
- [61] CIE 30, (1976). *Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting*.
- [62] Boyce, P. R., (2008). *Lighting for driving: Roads, Vehicles, Signs and Signals*, CRC Press.
- [63] Ylinen, A. M., Puolakka, M., Halonen, L., Pellinen, T., ve Valtonen, J., (2011). "Investigation of pavement light reflection characteristics", *Road Materials and Pavement Design*, 12(3):587–614.
- [64] CIE 140, (2000). *Road lighting calculations*, Vienna.
- [65] EN 13201-1, (2004). *Standard EN 13201-1 Road lighting - Part 1: Selection of lighting classes*.
- [66] EN13201-4, (2013). *Standard EN 13201-4 Road Lighting-Part 4 Methods of measuring lighting performance*.
- [67] CIE 115:2010, (2010). *Recommendations for the lighting of roads for motor and*

- pedestrian traffic, Vienna, Austria.
- [68] TEDAŞ, (2008). Yol Aydınlatma teknik şartnamesi.
- [69] Hargroves, R. A., (1983). "Road lighting", IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews), 1983, 420–441.
- [70] Simpson, R., (2003). Lighting Control: Technology and Applications, Taylor & Francis, London.
- [71] Karayolları, (2013). Karayolu teknik şartnamesi.
- [72] EN 12697-16, (2016). Standard EN 12697-16 Bituminous mixtures - Test methods - Part 16: Abrasion by studded tyres.
- [73] Minolta, K., Spectroradiometer CS-2000/2000A.
- [74] Gibbons, R. B. ve Adrian, W. K., (1997). "Influence of Observation Angle on Road Surface Reflection Characteristics", Journal of the Illuminating Engineering Society, 26(2):139–149.
- [75] Antari Z800II, (2014). Antari Z800II Catalog.
- [76] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., ve Arıkan, O., (2003). Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [77] BS EN 61000-3-2:2006+A2:2009, (2009). Electromagnetic compatibility (EMC)Limits. Limits for harmonic current emissions (equipment input current \leq 16 A per phase).
- [78] TEDAŞ, (2015). LED ışık kaynaklı yol aydınlatma armatürleri teknik şartnamesi.
- [79] IES LM-54-99, (1999). Guide to lamp seasoning.
- [80] IES LM-79-08, (2008). The electrical and photometric measurements of solid-state lighting products.
- [81] (2003). CIE Pub. 154 The Maintenance of Outdoor Lighting Systems.
- [82] Turkish Electricity Distribution Company, <http://www.tedas.gov.tr/BilgiBankasi/Sayfalar/ElektrikTarifeleri.aspx>, 12 Eylül 2016.
- [83] CIE 180:2007, (2007). Road transport lighting for developing countries, Vienna.
- [84] Puolakka, M., Ylinen, AM., ve Halonen, L., (2012). Road lighting in transition, Finland.
- [85] DOE (U.S. Department of Energy), (2011). LED Luminaire Lifetime: Recommendations for testing and reporting.
- [86] Tähkämö, L., Räsänen, R. S., ve Halonen, L., (2016). "Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting", The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(2):137–145.
- [87] Teodorescu, R. ve Katsanevakis, M., (2013). "An optimization method for designing large PV plants", Journal of Photovoltaics, 3(2):814–822.
- [88] State of Illinois Capital Development Board, (1991). Life cycle cost analysis manual, Illinois.

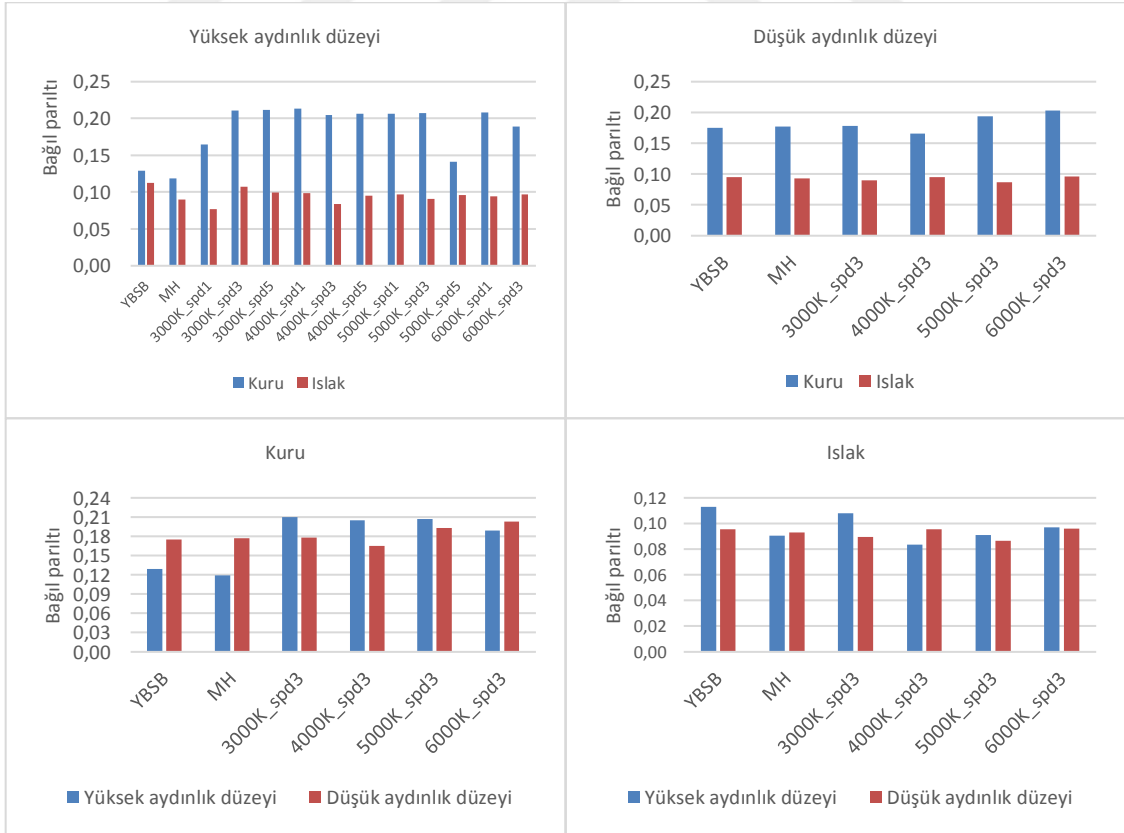
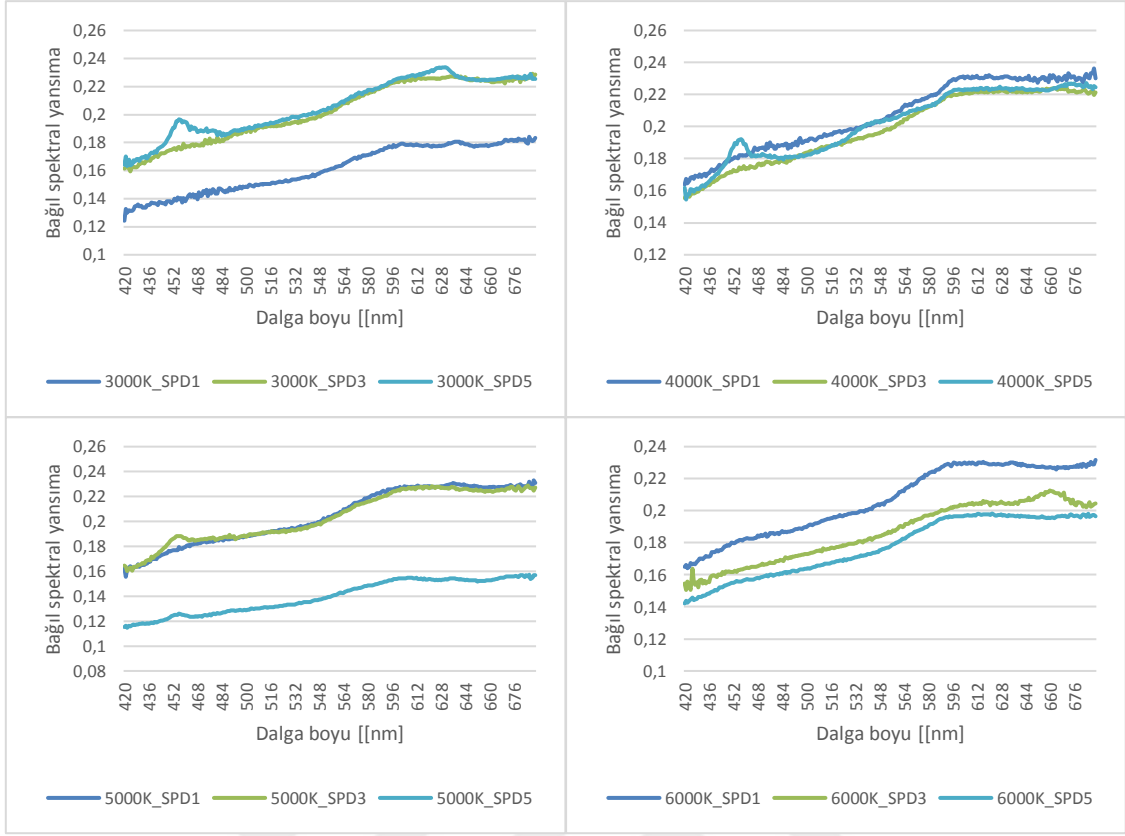
- [89] CBRT, The Central Bank of The Republic of Turkey, <http://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tcmb+en/tcmb+en>, 12 Eylül 2016.
- [90] TSI, Turkish Statistical Institute, <http://www.turkstat.gov.tr/Start.do>, 12 Eylül 2016.



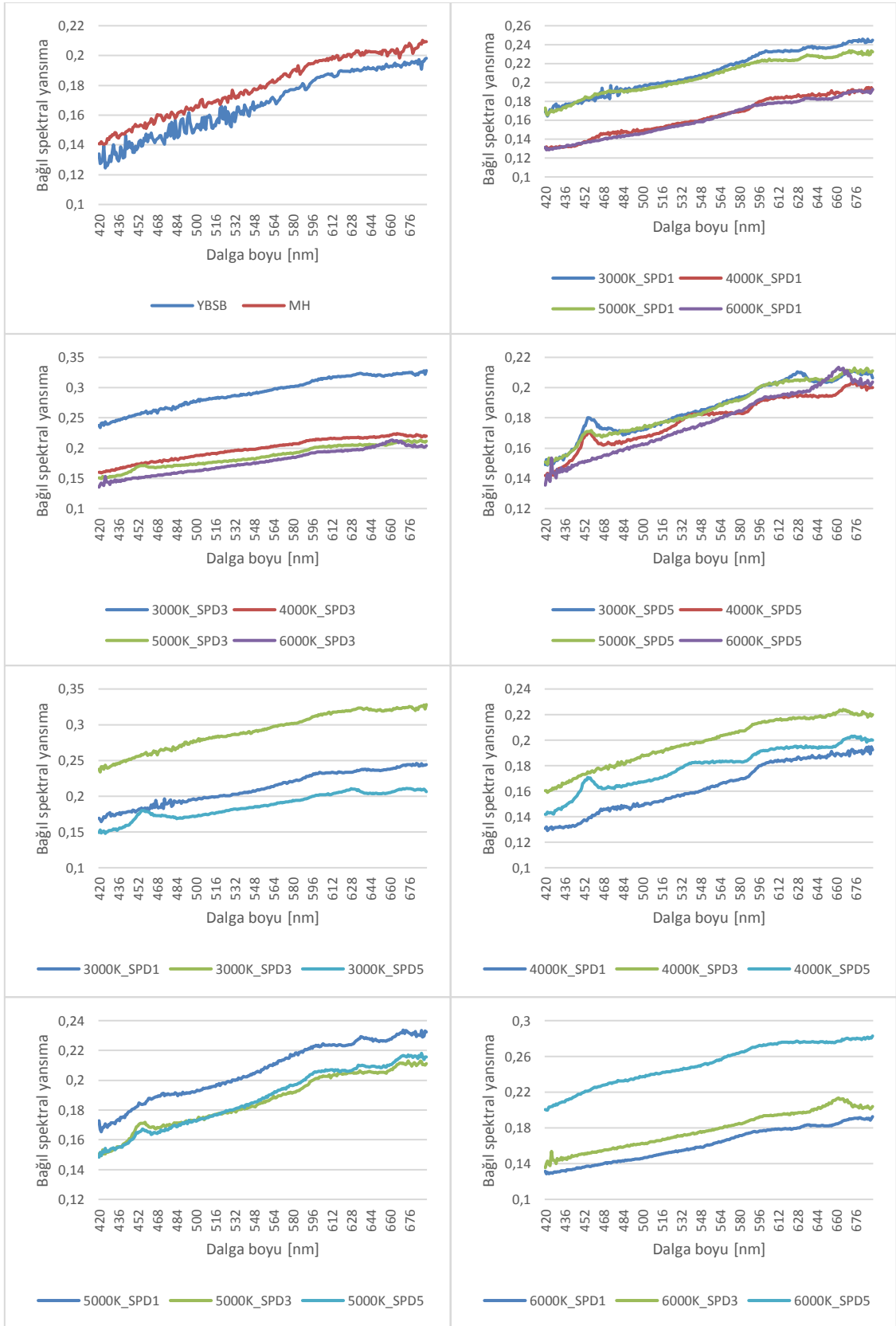
FARKLI YOL KAPLAMALARINA AİT BAĞIL SPEKTRAL YANSIMA GRAFİKLERİ

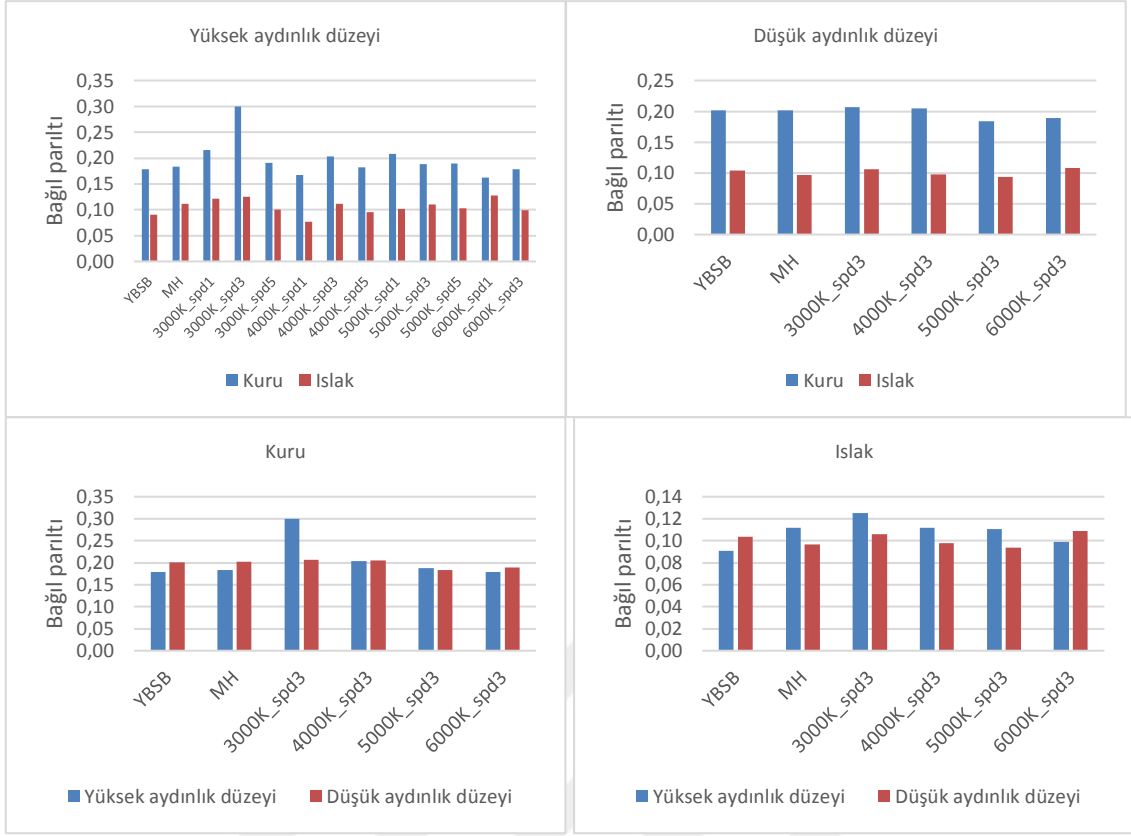
TMA5 kaplaması için,



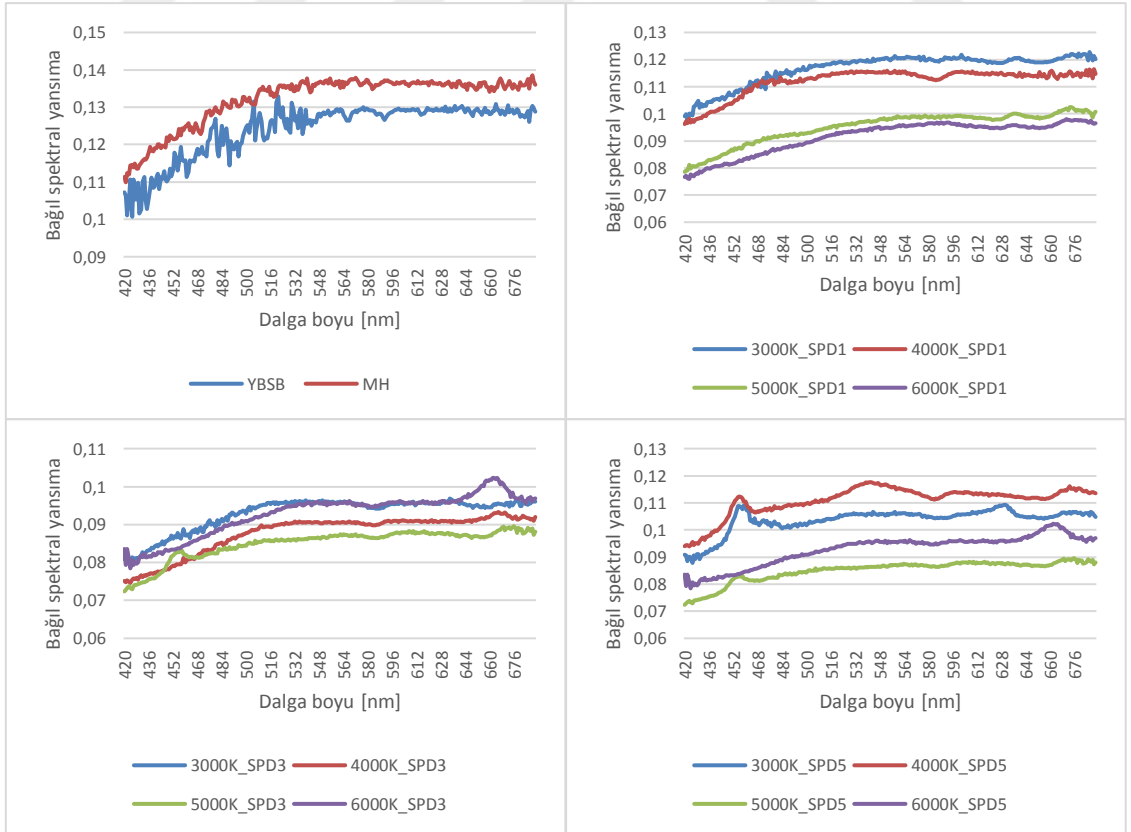


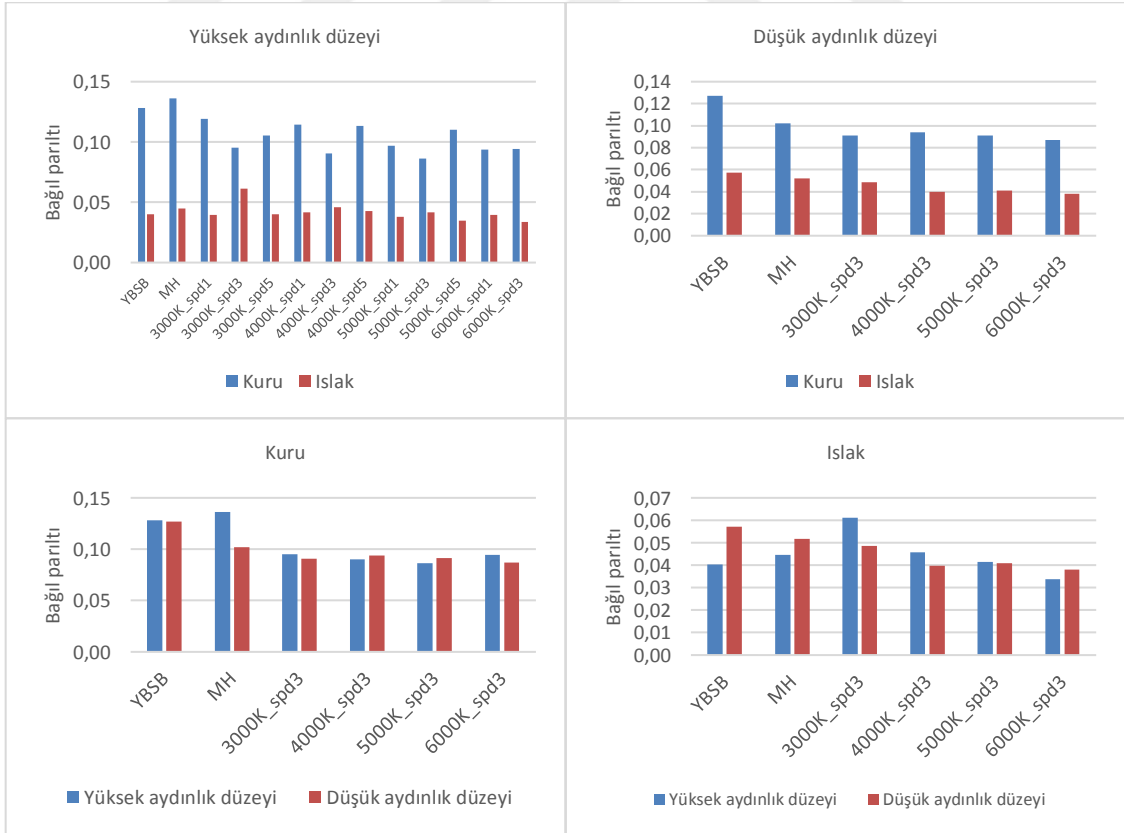
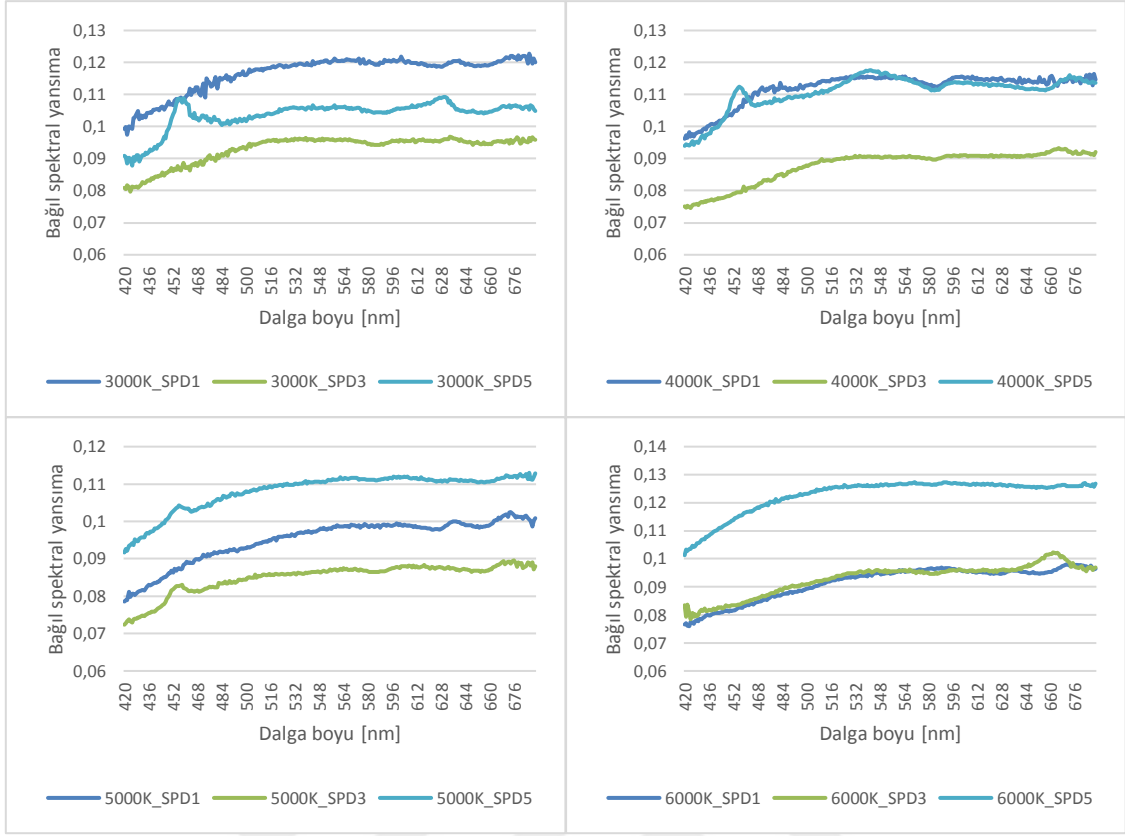
TMA7 kaplaması için,



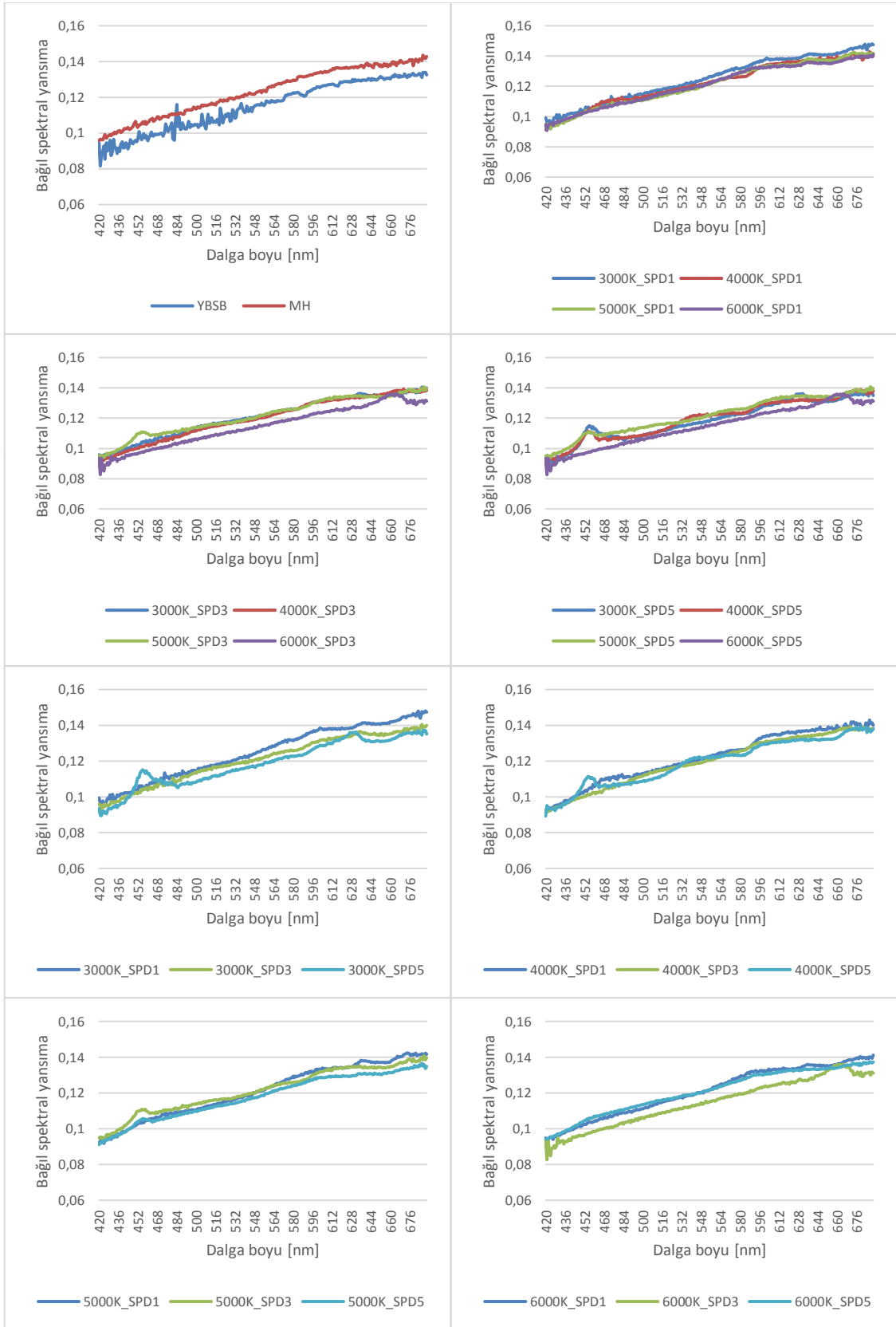


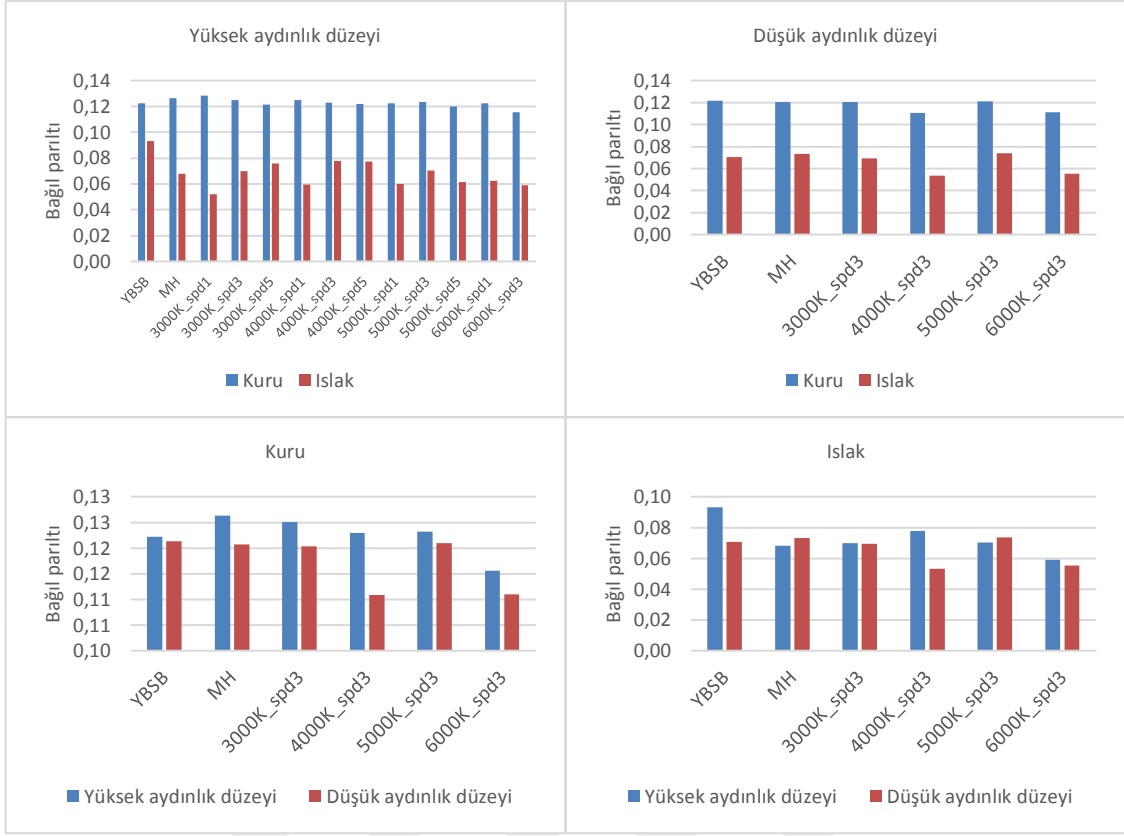
TMA8 kaplaması için,



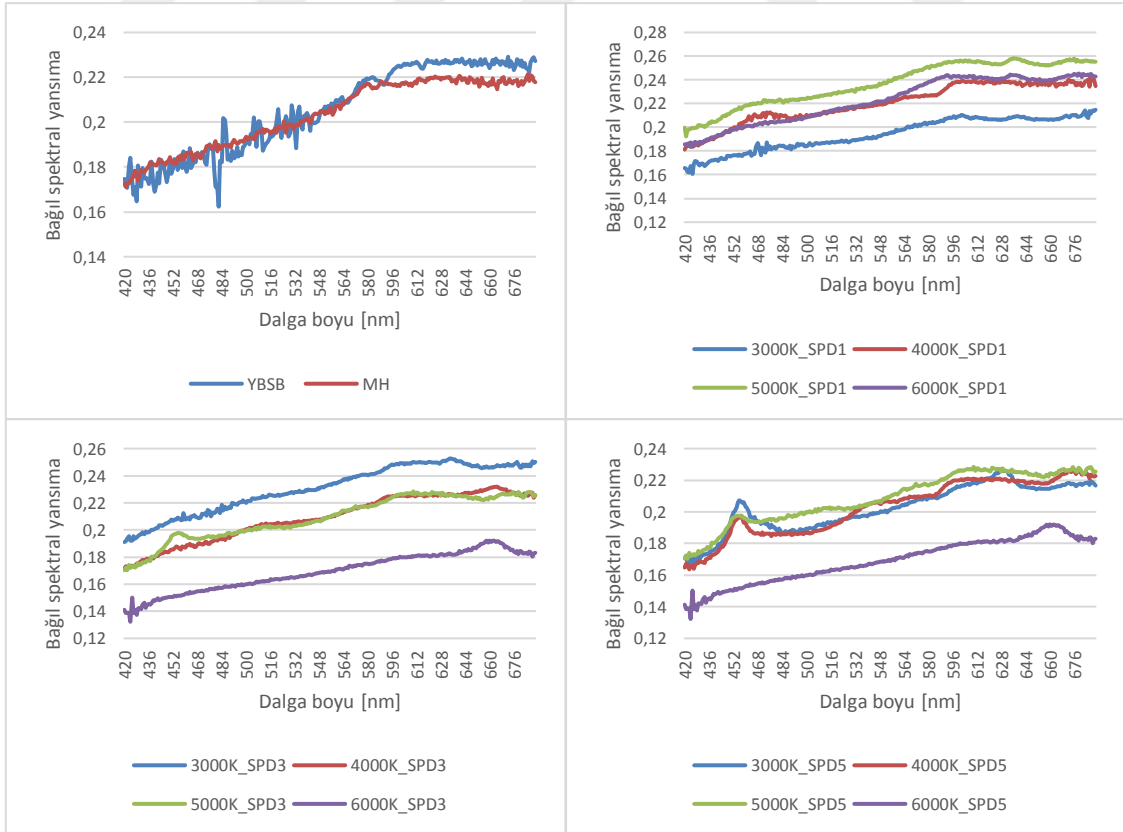


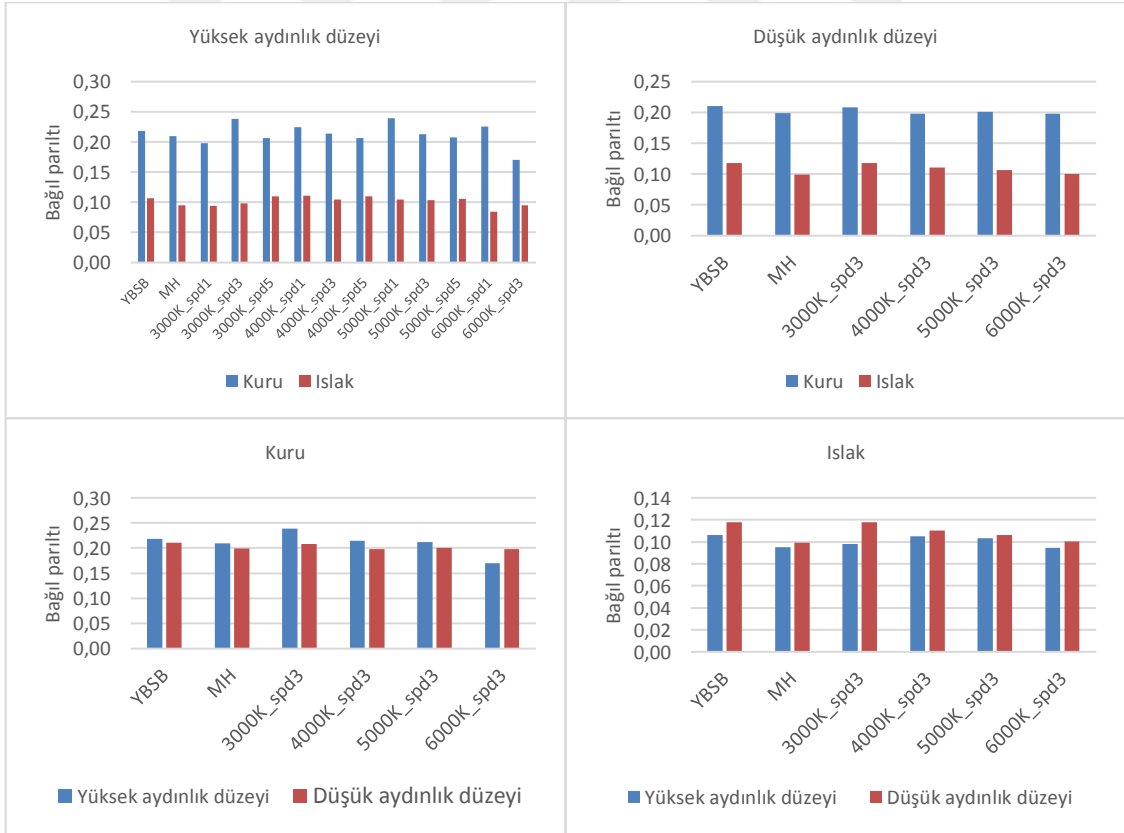
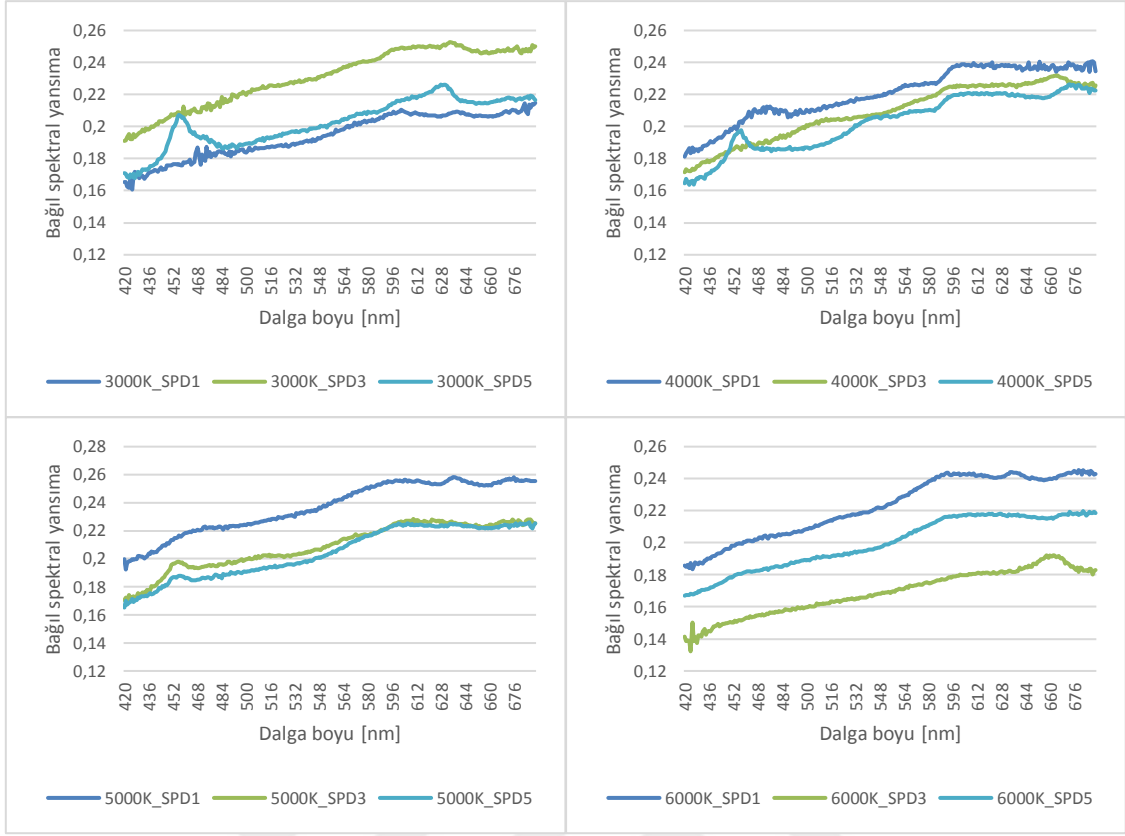
TMA9 kaplaması için,



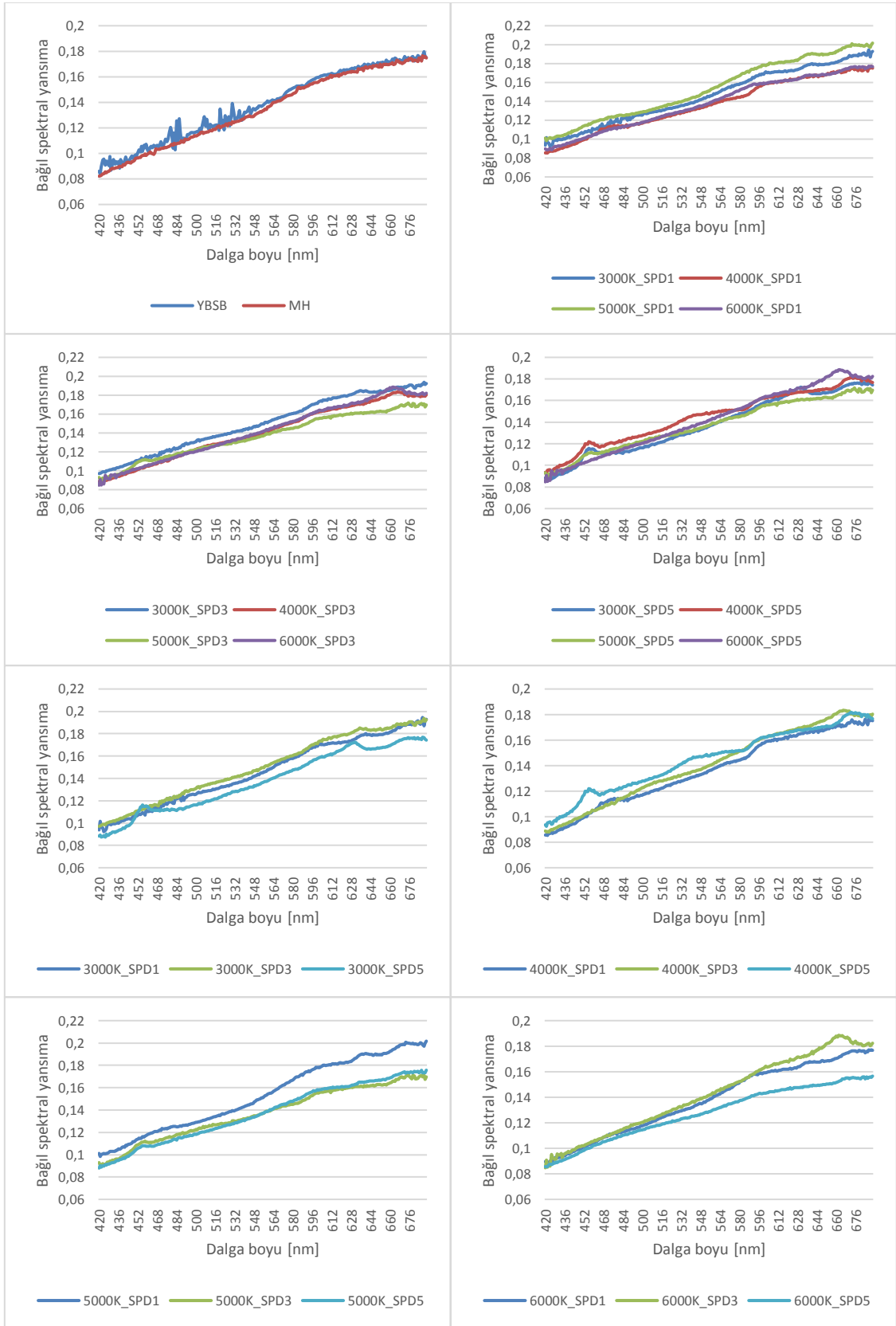


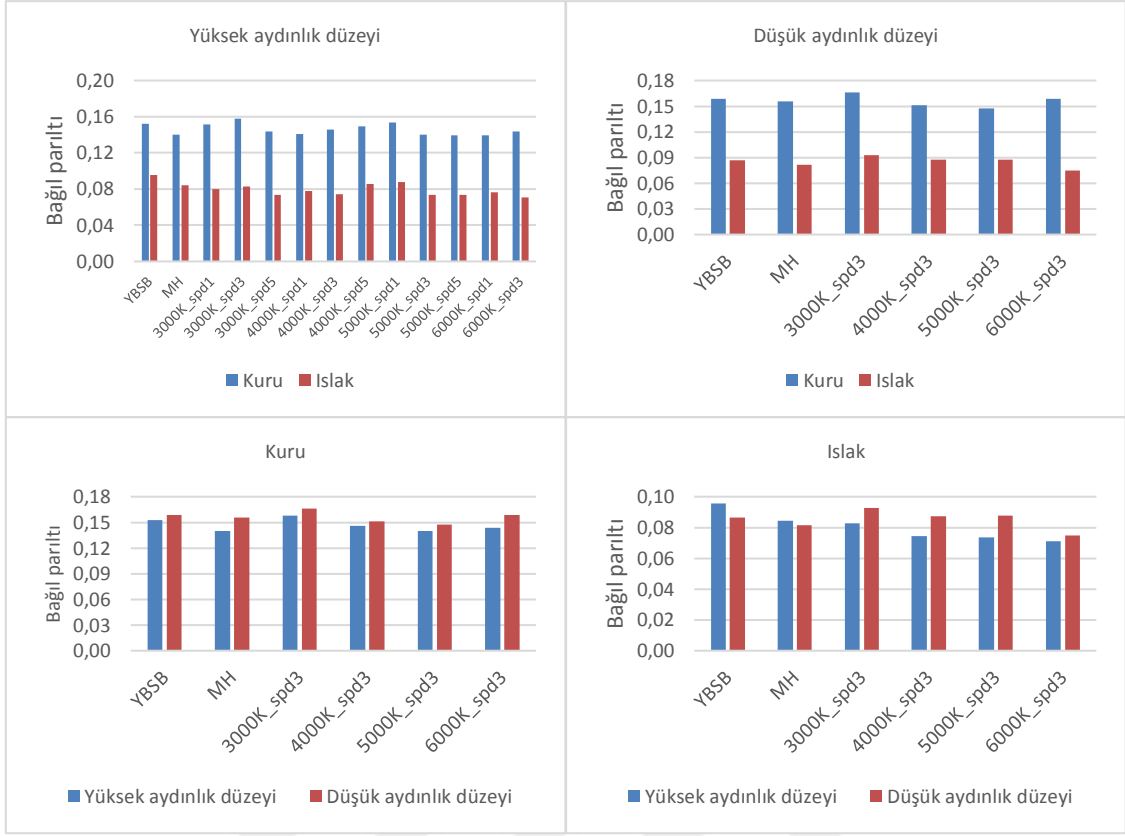
TMA11 kaplaması için,



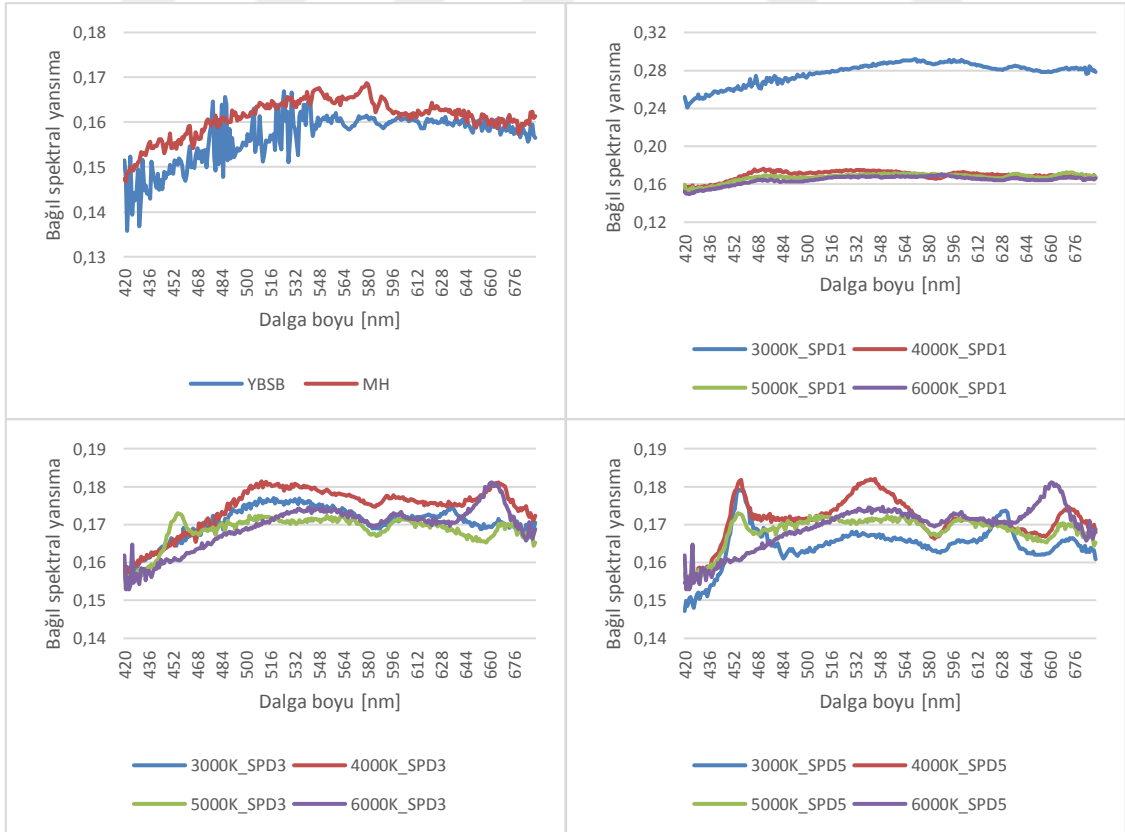


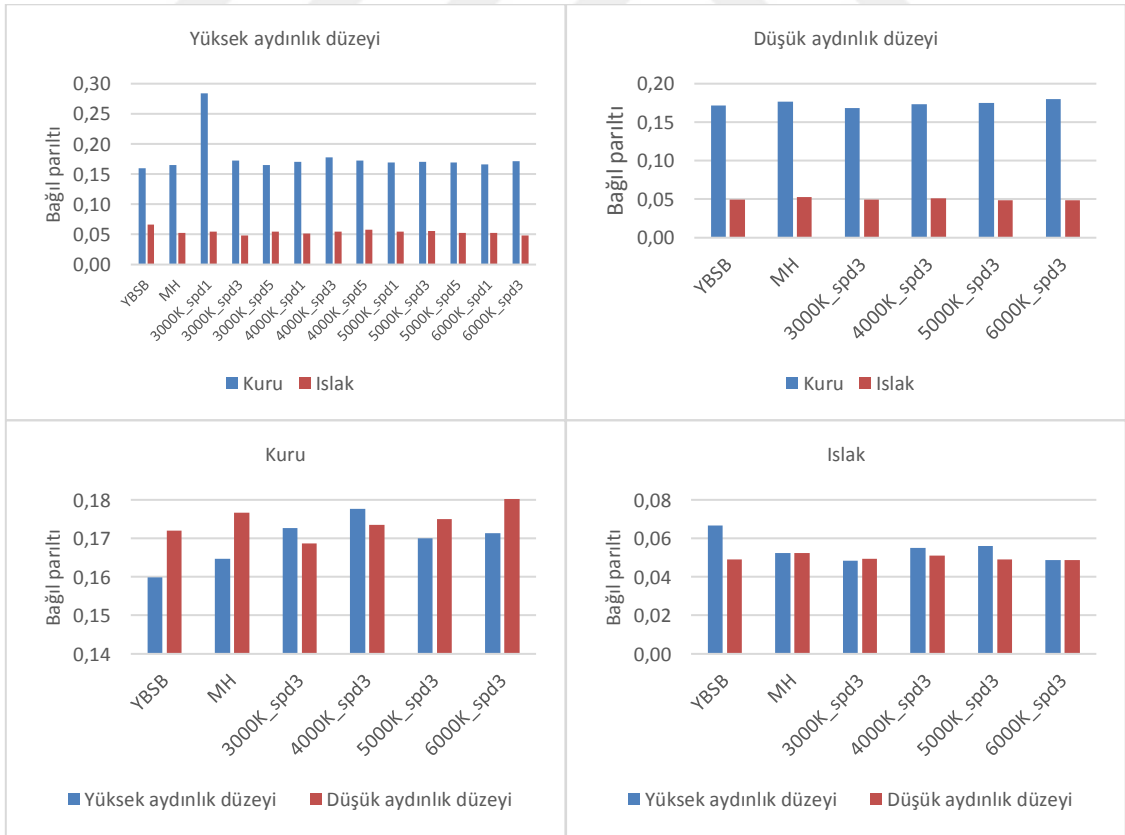
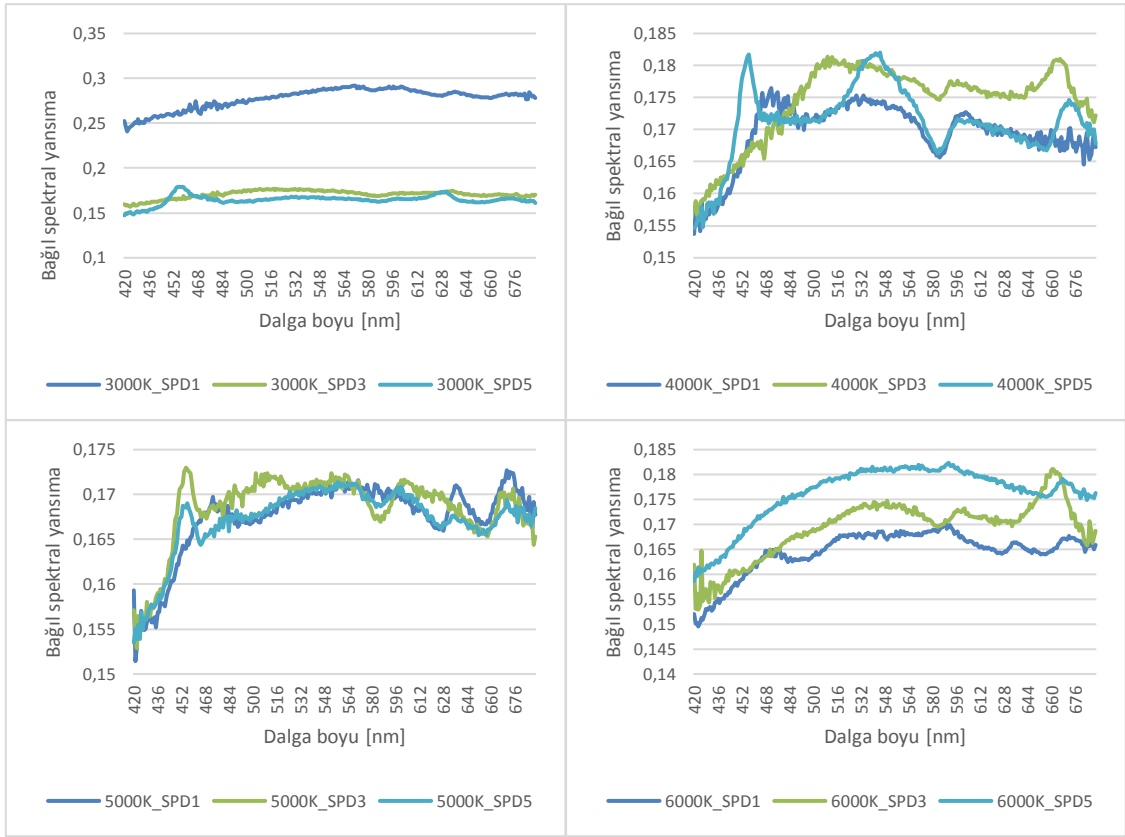
TMA13 kaplaması için,



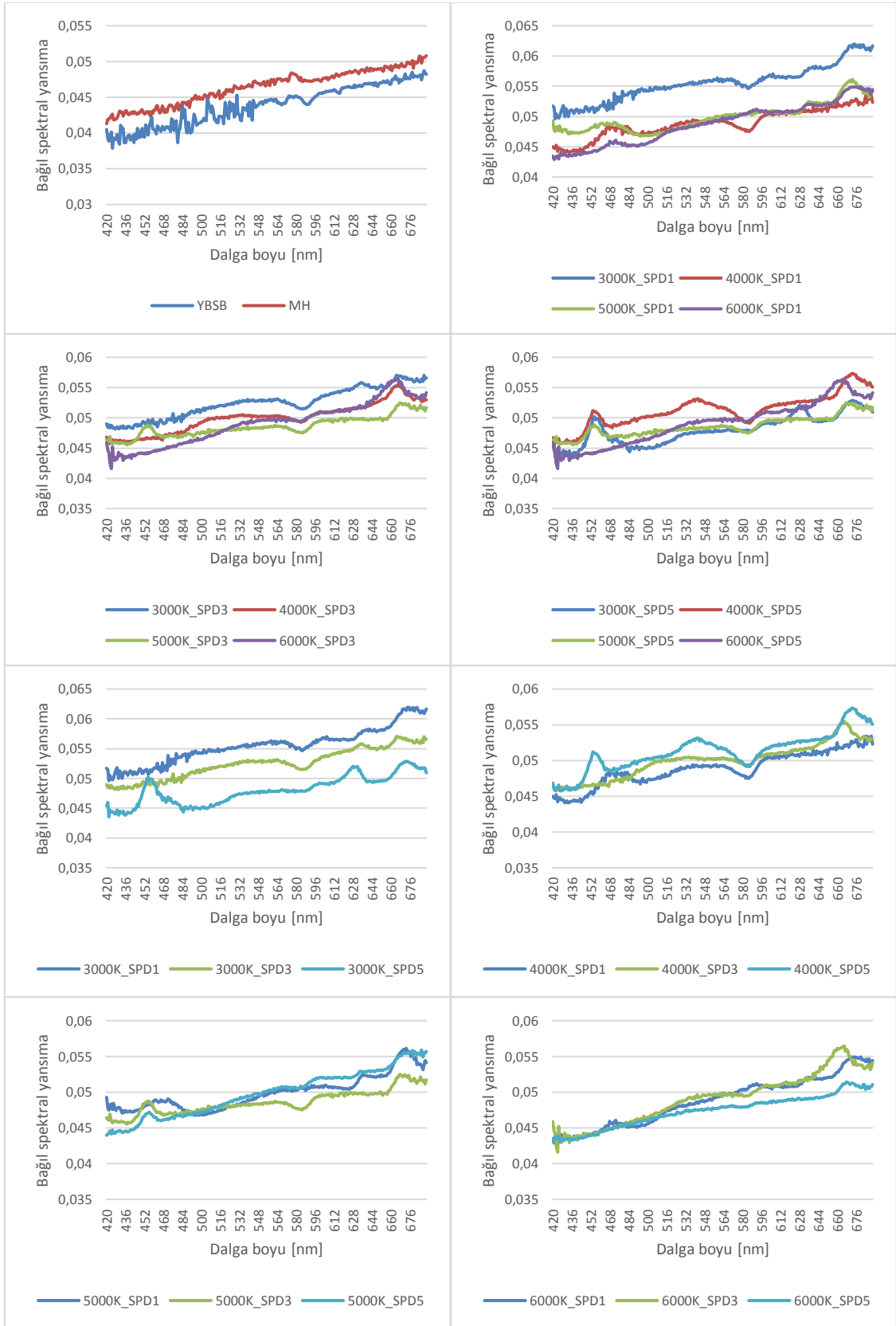


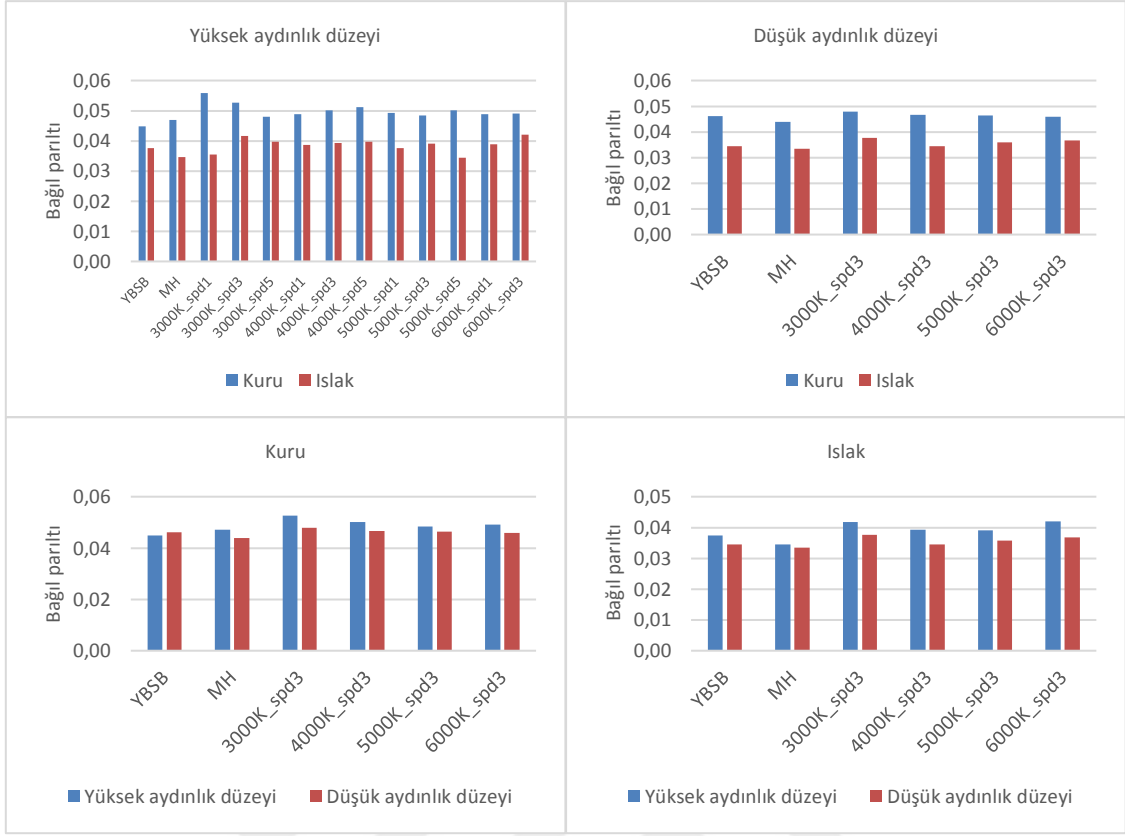
BA14 kaplaması için,



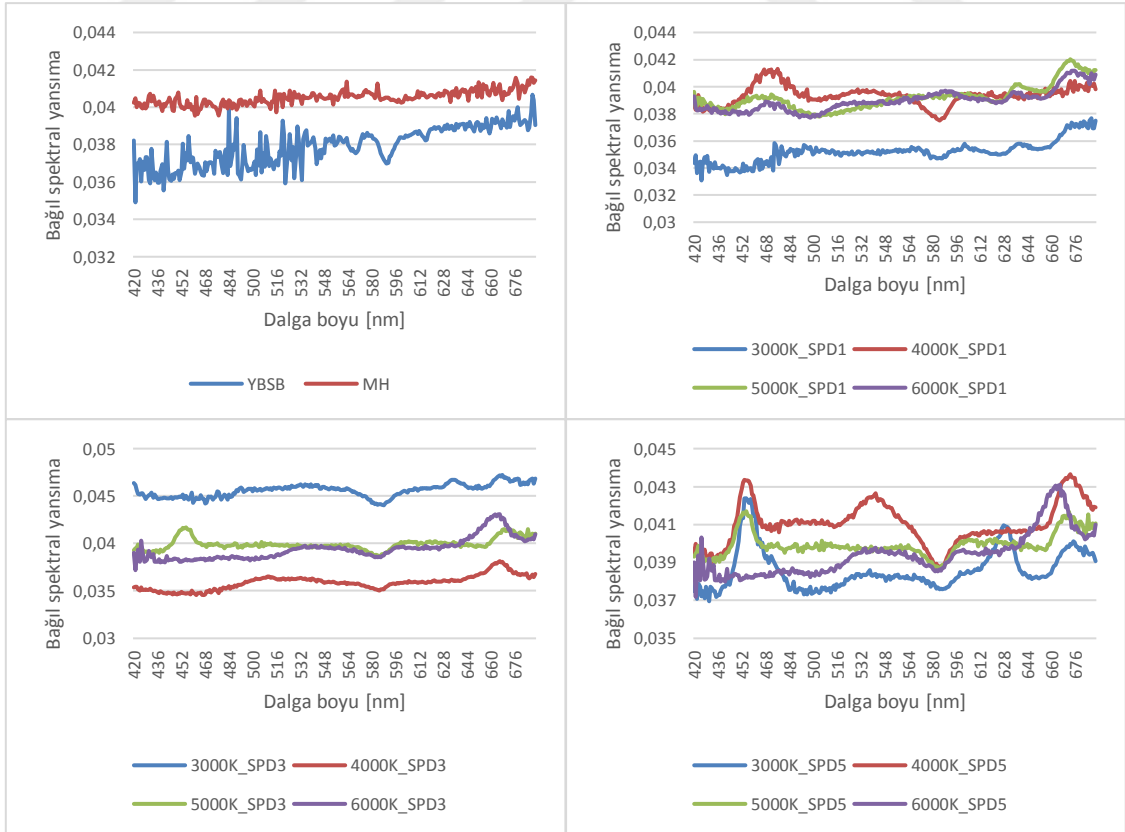


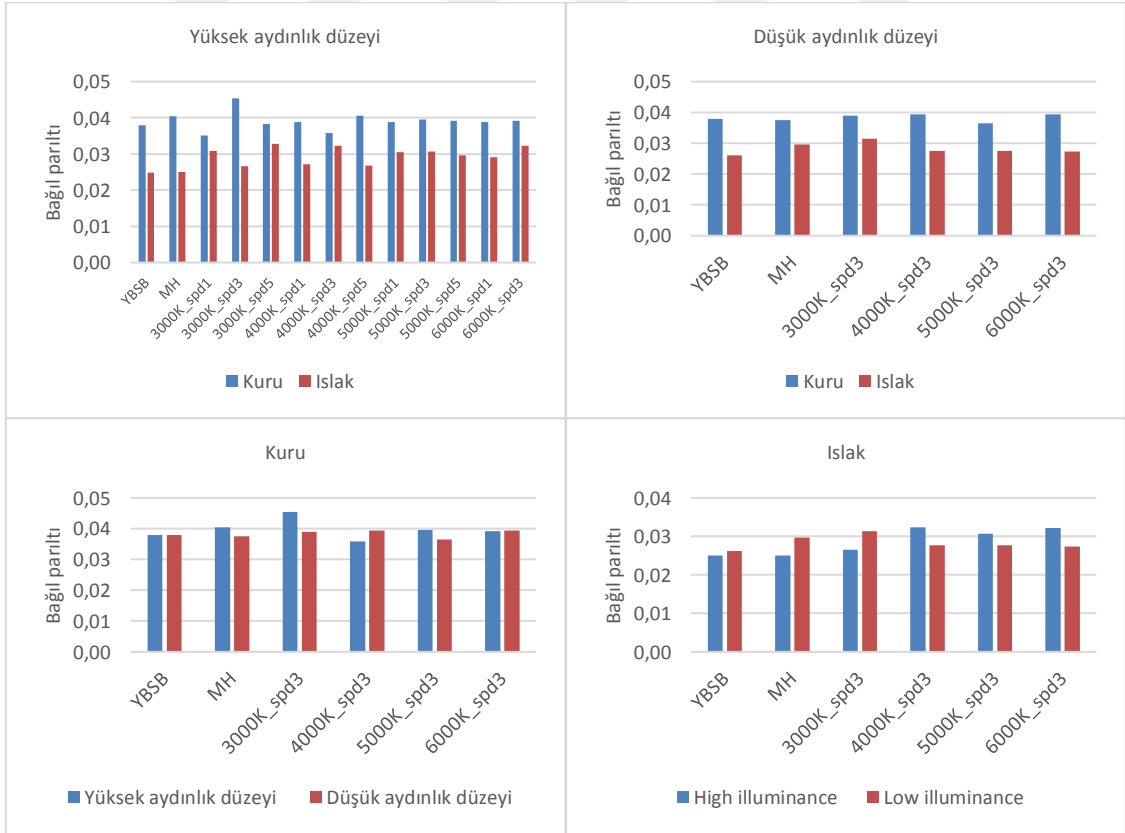
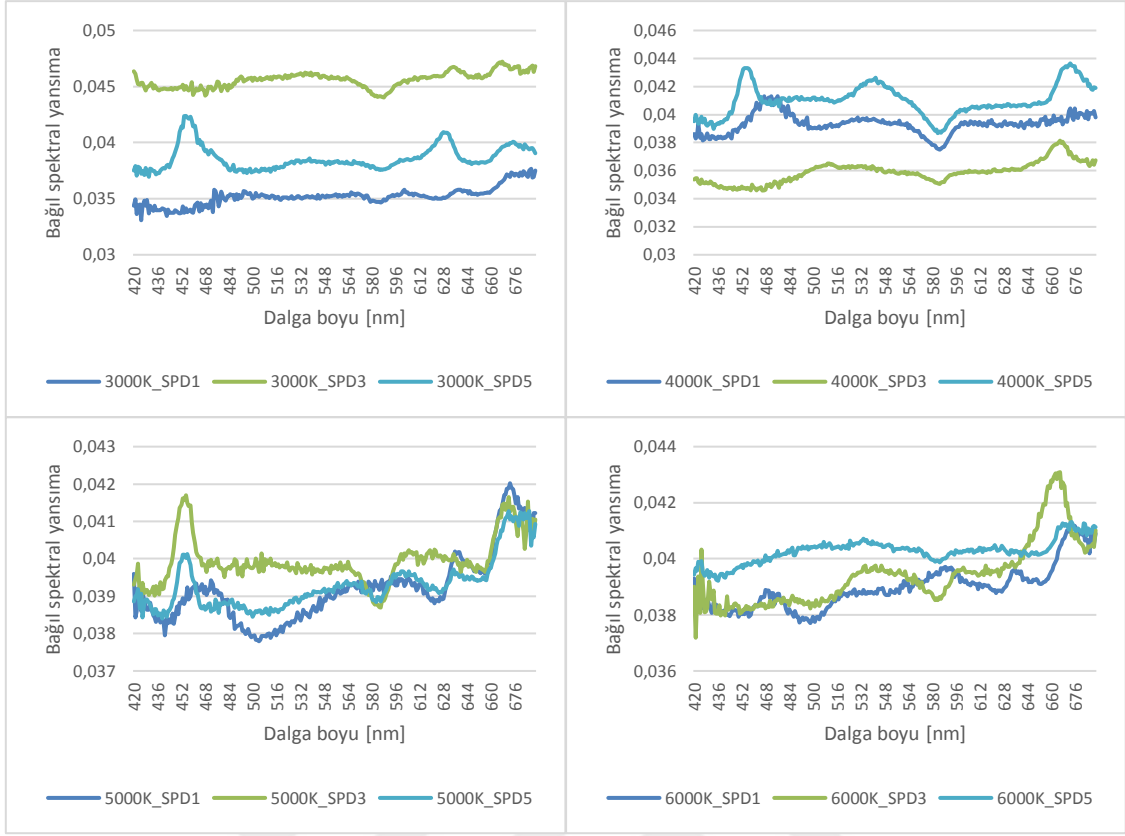
NA15 kaplaması için,



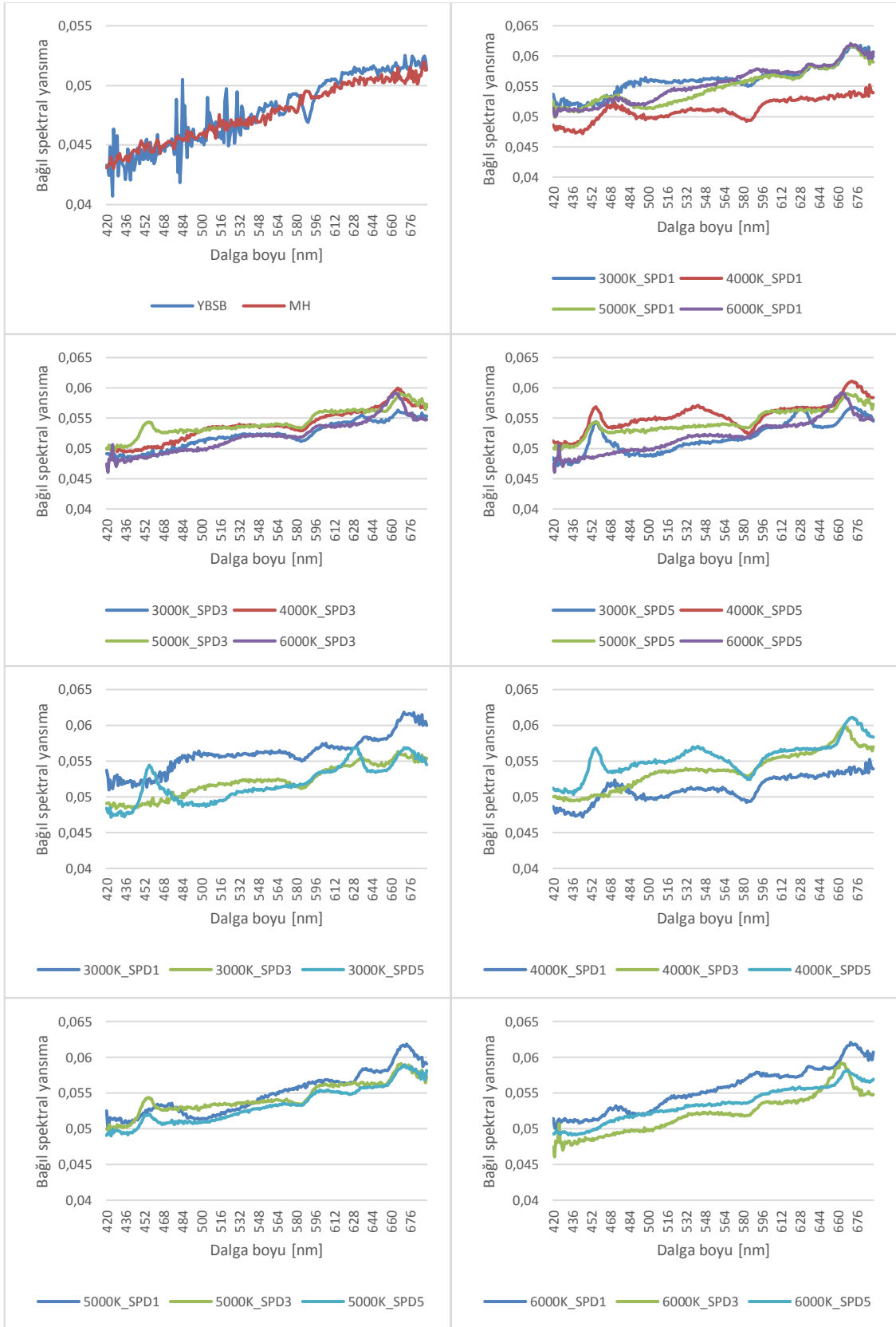


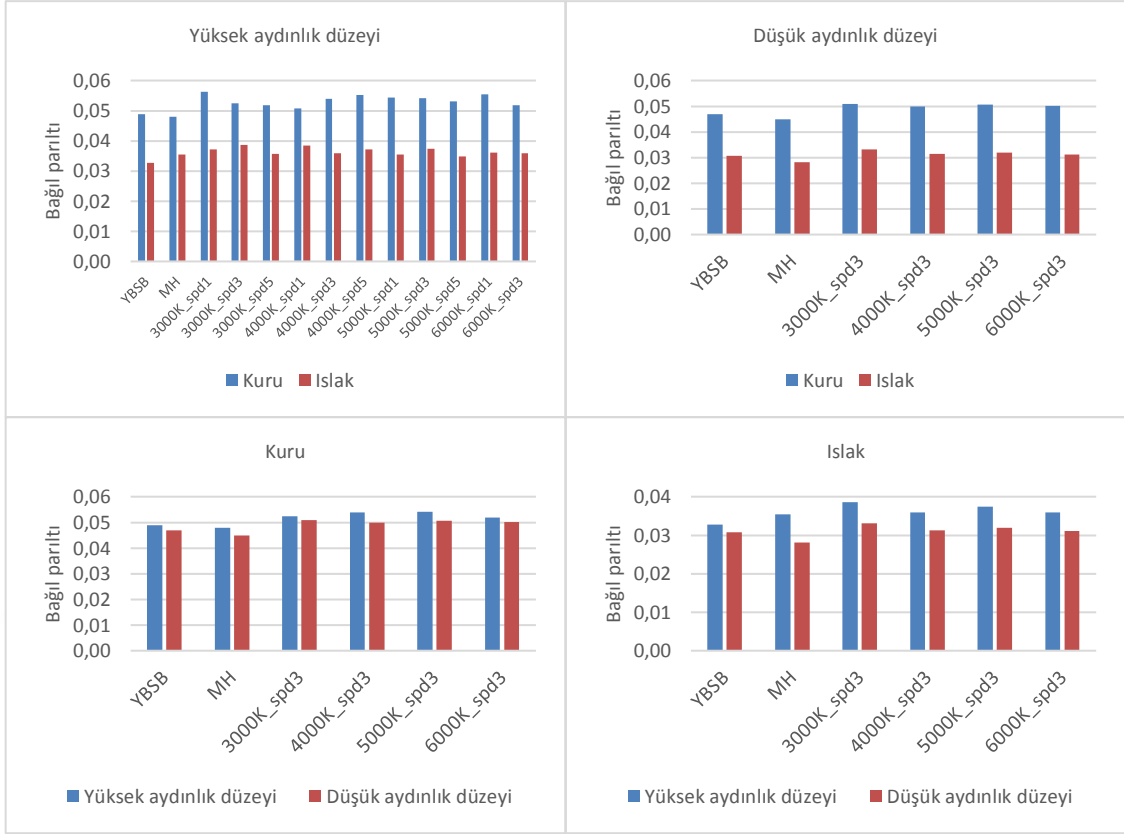
TMA16 kaplaması için,





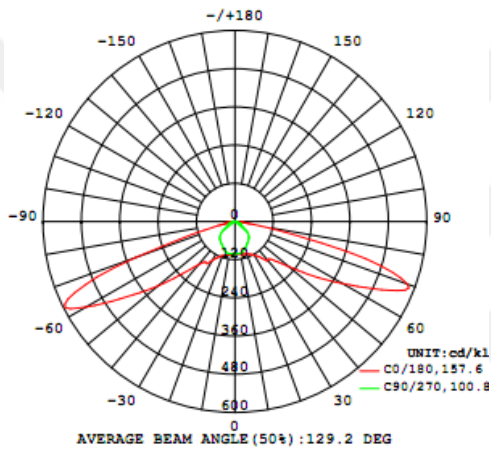
KA17 kaplaması için,



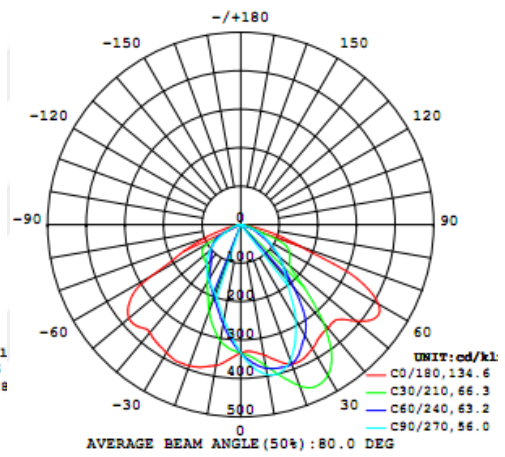


ARMATÜRLERİN IŞIK DAĞILIM EĞRİLERİ

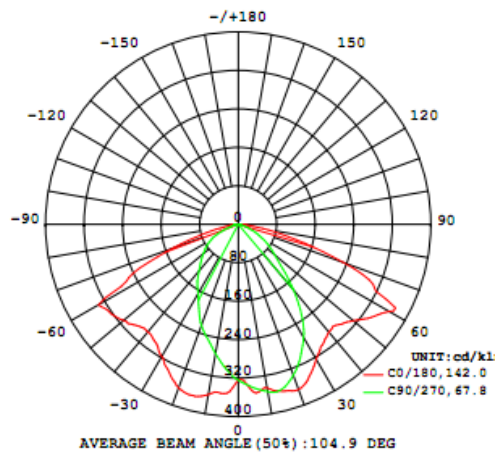
80W LED A1



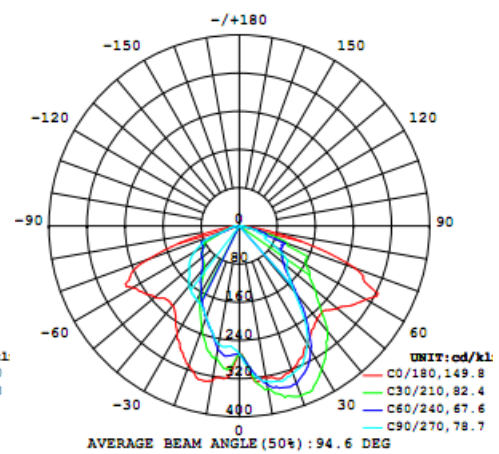
250W MH A1



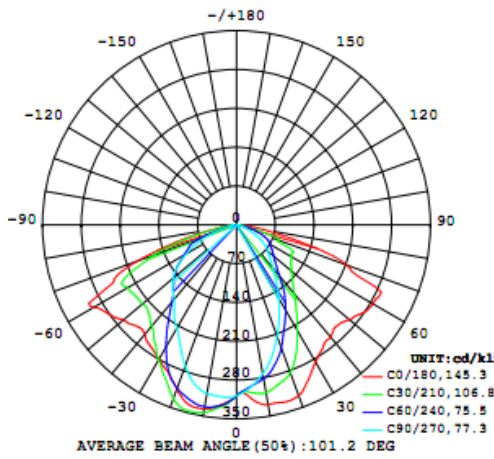
150W HPS A3



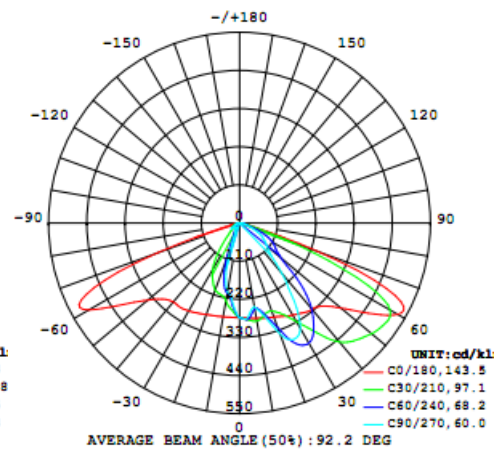
150W MH A3



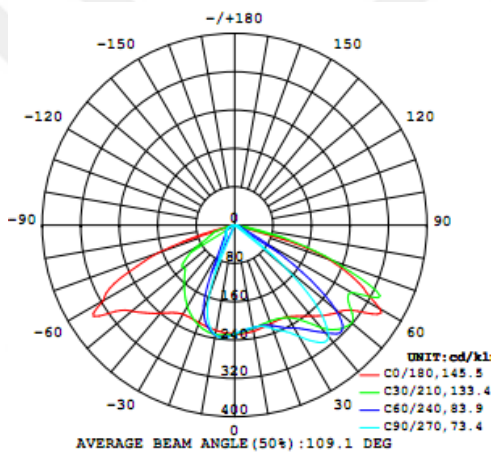
250W HPS A3



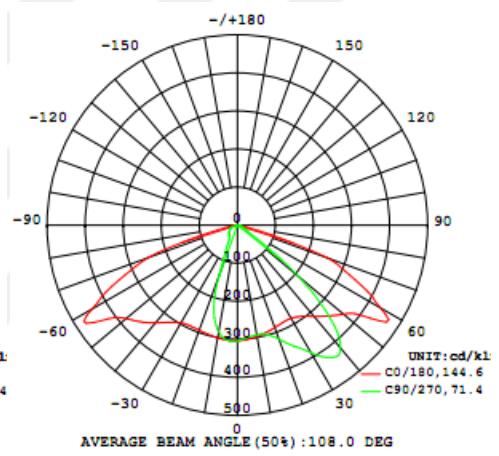
170W LED A3



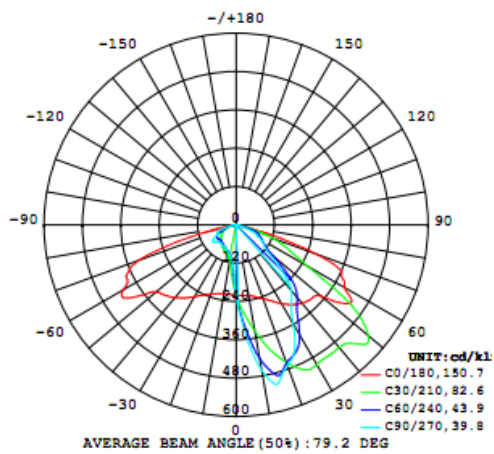
80W LED A4



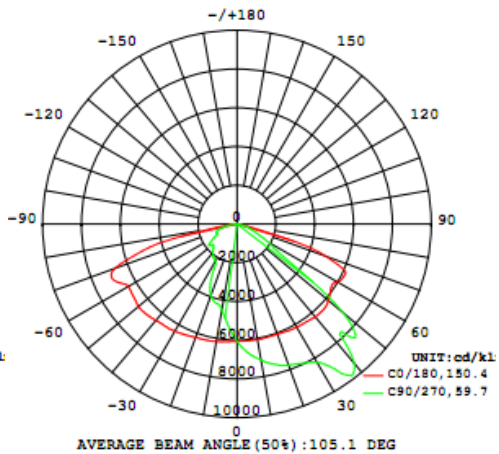
105W LED A4



114W LED A5



153W LED A6



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ramazan AYZ
Doğum Tarihi ve Yeri : 04/06/1985 Çayeli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ayaz@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2017
Y. Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010- ...	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Ayaz, R., Ozcanli, A. K., Nakir, I., Bhusal, P. ve Unal, A., "Life Cycle Cost Analysis on M1 and M2 Road Class Luminaires Installed In Turkey", Light&Engineering. (İnceleme aşamasında)
2. Akca, H., Ayaz, R. ve Durusu, A., (2017). "Lifetime Analysis of Semiconductor Switch of MPPT for Different Photovoltaic Technologies Considering Ambient Conditions", Electrical Engineering, <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0669-1>
3. Ayaz, R., Durusu, A. ve Akca, H., (2017). "Determination of Optimum Tilt Angle for Different PV Technologies Considering Ambient Conditions: A Case Study for Burdur, Turkey", Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The ASME, 139(4):1–6. <https://doi.org/10.1115/1.4036412>
4. Nakir, I., Durusu, A., Akca, H., Ajder A., Ayaz, R., Ugur, E., et al., (2015). "A New MPPT Algorithm for Vehicle Integrated Solar Energy System", Journal of Energy Resources Technology-Transactions of The ASME, 138(2):1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4031943>
5. Durusu, A., Nakir, I., Ajder, A., Ayaz, R., Akca, H. ve Tanrioven, M., (2014). "Performance Comparison of Widely-Used Maximum Power Point Tracker Algorithms under Real Environmental Conditions", Advances in Electrical and Computer Engineering, 14(3):89–94. <https://doi.org/10.4316/AECE.2014.03011>
6. Ayaz R., Nakir İ., Tanriöven M., (2014)."An Improved Matlab-Simulink Model of PV Module considering Ambient Conditions", International Journal of Photoenergy, 2014:1-6. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/315893>
7. Ayaz, R., Kaymaz, A., Akca, H., Ajder, A., Unal, A. ve Tanrioven, M., (2016). "Comparison of Road Lighting Luminaires for M2 Road Lighting Class Considering Energy Efficiency", International Journal of Advances in Electronics Engineering, 6(1):103–107.
8. Ajder, A., Akca, H., Akdemir, H., Ayaz, R., Nakir, I. ve Tanrioven, M., (2016). "Sizing of PV Based LED Lighting System Considering Minimum Solar Radiation Level", International Journal of Advancements in Mechanical and Aeronautical Engineering, 3(1):27–31.
9. Akca, H., Akdemir, H., Ayaz, R., Ajder, A., Nakir, I. ve Tanrioven, M., (2015). "The Effect of LED Chip Connection Type on Lighting and Thermal Performance of A Luminaire", International Journal of Advances in Electronics Engineering– IJAE, 6(1):175–179.
10. Toros H., Ayaz R., Ajder A., Durusu A., Yıldırım H., (2014). "Online Load Shifting of Electricity Production-Consumption for Reducing Environmental Hazard", European Journal of Science and Technology, vol.1, pp.39-42.

Bildiri

1. Ayaz, R., Nakir, I., Akca, H., Ajder, A. ve Tanrioven, M., (2014). "A new approach for relationship between daylight and indoor illumination level", 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), October 2014, Milwaukee, 833–836.

2. Akca, H., Yasa, Y., Ayaz, R., Durusu, A., Ajder, A., Nakir, İ., et al., (2014). "Thermal management of power LED system", 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), October 2014, Milwaukee, 760–764.
3. Kocatepe, C., Kumru, C. F., Ayaz, R., Arikan, O. ve Akca, H., (2013). "The influence of voltage and frequency variations on insulation quality of a high voltage cable", Eurocon 2013, July 2013, Zagreb, 964–968.
4. Akca, H., Arikan, O., Kocatepe, C., Kumru, C. F. ve Ayaz, R., (2013). "Breakdown Strength Analysis Of The Transformer Insulation Oil Due To Different Standards", 18th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH2013), November 2013, Seoul.
5. Ayaz, R., Nakir, İ., Akca, H. ve Tanrıöven, M., (2011). "A Comparison of Metrobus System and Trolleybus System", Sustainable Energy Technologies, 2011, İstanbul, 1–7.
6. Develi M.K., Çalimli E., Durusu A., Ayaz R., Tanrıöven M., "Mono-Kristal PV Panelin Matlab/Simulink'te Modellenmesi ve Deneysel Verilerle Doğrulanması", Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Kasım 2014, Bursa, 62-65.

Proje

1. "LED, Metal Halide ve Sodyum Buharlı Işık Kaynaklı M1, M2 ve M3 Tipi Yol Aydınlatma Armatürlerinin Elektriksel, Işıksal ve Ekonomik Analizleri", BAP Araştırma Projesi, No:2015-04-02-KAP01, Araştırmacı, 2015, Devam Ediyor.
2. "Binalarda Enerji Performansı Yazılımı Ulusal Hesaplama Metodolojisinin İyileştirilmesi", T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Araştırmacı, 2014.
3. "Farklı PV Teknolojilerinin Gerçek Ortam Verileri Kullanılarak Modellenmesi ve İstanbul Şartlarında Optimum Eğim Açılarının Belirlenmesi", BAP Yüksek Lisans, No: 2012-04-02-YL01, Araştırmacı, 2014.

ÖDÜLLERİ

1. Yayın Teşvik Ödülü, TÜBİTAK, 2017