KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LAZERLE SÜRÜLEN FOSFOR TABAKASINDAN OTOMOTİV UYGULAMALARI İÇİN BEYAZ IŞIK ÜRETİMİ VE RENK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

TAYLAN TOPALOĞLU

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LAZERLE SÜRÜLEN FOSFOR TABAKASINDAN OTOMOTİV UYGULAMALARI İÇİN BEYAZ IŞIK ÜRETİMİ VE RENK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

TAYLAN TOPALOĞLU

Prof. Dr. Arif DEMİR
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. F. Necati ECEVİT
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi

Doç Dr. Erhan AKMAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 08.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Otomotiv aydınlatma alanında yeni bir teknoloji olarak kendine yer bulan lazer temelli beyaz ışık konusunda yaptığım bu çalışma boyunca, kısmi olarak organize edebildiğimiz görüşmelerimize rağmen, rehberliğini, desteğini ve sabrını benden esirgemeyen, lazerler üzerine çalışma konusunda bana ilham kaynağı olmuş hocam, Sayın Prof. Dr. Arif Demir'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Yapılan çalışmanın büyük bir kısmında, şirket olanaklarından faydalanmam konusunda bana destek olan Feka Otomotiv A.Ş. Ar-Ge Müdürü Sayın İrfan Kamaş'a ve otomotiv aydınlatma konusundaki tecrübesini paylaşmaktan imtina etmeyen müdür yardımcım Sayın Erol Kocabıyık'a şükranlarımı sunuyorum.

Çalışmam esnasında, elektronik ve devreler konusunda desteğe ihtiyaç duyduğumda yardımını esirgemeyen Sayın Özgür Çevik'e ve spektrum ölçümleri için kıymetli vaktini bana ayıran Sayın Kaan Turan'a çok teşekkür ediyorum.

Ayrıca bu süreç boyunca beni sabırla destekleyen sevgili aileme sonsuz minnetlerimi sunuyorum.

Haziran – 2019 Taylan TOPALOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Otomotiv Aydınlatma Teknolojisinin Gelişimi 3
1.2. Otomotiv Aydınlatmada Yasal Gereklilikler 4
1.3. Işık 6
1.3.1. Radyometri 8
1.3.1.1. Katı açı 8
1.3.1.2. Radyant enerji 9
1.3.1.3. Radyant akı (radyant güç) 9
1.3.1.4. İrradyans 9
1.3.1.5. Radyant çıkış 10
1.3.1.6. Radyans 10
1.3.1.7. Radyant şiddet 11
1.3.1.8. Spektrum ile radyometri ilişkisi 11
1.3.2. Fotometri 12
1.4. Renk İle İlgili Kavramlar 13
1.4.1. Fotopik görüş ve skotopik görüş 14
1.4.2. CIE renk diyagramı 15
1.4.3. Otomotiv aydınlatmada beyaz ışığın tarifi 17
1.4.4. Korelasyonlu renk sıcaklığı (CCT) 19
1.5. Otomotiv Aydınlatmada Kullanılan Işık Kaynakları 20
1.5.1. Ampuller 20
1.5.1.1. Akkor ampuller 20
1.5.1.2. Halojen ampuller 21
1.5.1.3. HID ampuller 21
1.5.2. Işık yayan diyotlar (LED) 23
1.5.3. Organik LED'ler 25
1.5.4. Lazer lambalar 26
1.6. Literatür Özeti 29
1.6.1. Lazer ile sürülen fosfordan beyaz ışık üretimi 29
1.6.2. Otomotiv aydınlatmada bilgisayar destekli optik tasarım 34
2. MALZEME VE YÖNTEM 38
2.1. Kullanılan Materyaller, Ölçüm Aletleri Ve Özellikleri 38
2.2. Lazer Işık Kaynağının Renk Ölçümü 46
2.3. Lazer Işık Kaynağının Fotometri Ölçümü 49
2.4. LED'in Fotometri Ölçümü 52

2.5. Bilgisayar Destekli Optik Tasarım 52
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 57
3.1. Renk Özelliklerinin Değerlendirmesi 57
3.2. Işık Şiddeti Performans Değerlendirmesi 68
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 78
KAYNAKLAR 81
EKLER 88
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 91
ÖZGEÇMİŞ 92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Elektromanyetik dalga 6
Şekil 1. 2. Elektromanyetik spektrum 7
Şekil 1. 3. (a) İrradyans (b) Radyant çıkış 10
Şekil 1. 4. Radyans 11
Şekil 1. 5. CIE fotopik ışık verimliliği fonksiyonu 12
Şekil 1. 6. Helmholtz tarafından hazırlanmış ilk modern renk diyagramı 14
Şekil 1. 7. Fotopik ve skotopik görüş için gözün duyarlılığı 15
Şekil 1. 8. CIE 1931 renk eşleştirme fonksiyonları 16
Şekil 1. 9. CIE 1931 renk diyagramı 17
Şekil 1. 10. CIE 1931 üzerinde ECE-R48 beyaz renk bölgesi 18
Şekil 1. 11. Korelasyonlu renk sıcaklığı örnekleri 19
Şekil 1. 12. CIE 1931 üzerinde beyaz renk ve Planck bölgesi 19
Şekil 1. 13. a) Halojen ampul ışık Dağılımı b) HID ampul ışık dağılımı 22
Şekil 1. 14. Bir LED'in yapısı 24
Şekil 1. 15. OLED'in yapısı 25
Şekil 1. 16. OLED lambalar: a) Audi, b) BMW c) Mercedes-Benz 26
Şekil 1. 17. a) Kendiliğinden ışıma b) Uyarılmış ışıma 27
Şekil 1. 18. a) BMW lazer far b) Audi lazer far 28
Şekil 2. 1. Lazer ışık kaynağı 38
Şekil 2. 2. Lensin iki boyutlu teknik çizimi 40
Şekil 2. 3. a) Lazer diyot b) Lens c) Gövde d) Soğutucu 40
Şekil 2. 4. Fosfor tabakaları a) CL-840 ve b) CL-750 41
Şekil 2. 5. Sabitleme aparatının tasarım ve ürün aşamaları 41
Şekil 2. 6. Osram LED 42
Şekil 2. 7. LED'in teknik özellikleri 42
Şekil 2. 8. a) Görüntüleme ünitesi b) Fotodedektör ünitesi c) Gonyometre ünitesi 43
Şekil 2. 9. Spektrum ölçümünde kullanılan gereçler 43
Şekil 2. 10. CIE A tipi gonyofotometrenin çalışma prensibi 44
Şekil 2. 11. Everfine GO-HD5 a) Gonyometre ünitesi b) Kontrol ünitesi c) Fotodedektör ünitesi 44
Şekil 2. 12. Fotometri ölçümünün betimsel gösterimi 45
Şekil 2. 13. CL-750 fosfor ile üretilen ışığın CIE 1931 diyagramındaki konumu 47
Şekil 2. 14. Lazer ışık kaynağının çalışır haldeki resmi 48
Şekil 2. 15. Ölçüm ekseni ile ışıma ekseni arasında a) Sapma olan b) Sapma olmayan izokandela görüntüleri 49
Şekil 2. 16. Fotometri ölçümü için gonyometrenin ayarlanması 50
Şekil 2. 17. Lazer ışık kaynağına ait ölçümün izokandela görüntüsü 51
Şekil 2. 18. Lazer ışık kaynağı a) Soğutucu b) Fosfor tabakası termal kamera görüntüleri 51
Şekil 2. 19. LED ölçümünün izokandela görüntüsü 52
Şekil 2. 20. SPEOS programı optik yüzey tasarımı menüsü 54

Şekil 2. 21. a) Tasarım başlangıcı b) Lazer ışık kaynağı reflektörü c) LED reflektörü 55
Şekil 2. 22. SPEOS simülasyon menüsü 56
Şekil 3. 1. Yatay eksen ölçümlerinin CIE 1931 diyagramındaki konumları 58
Şekil 3. 2. Lazer ışık kaynağının CIE x ve CIE y renk koordinat değerlerinin yatay açıya göre değişimi 59
Şekil 3. 3. Dikey eksen ölçümlerinin CIE 1931 diyagramındaki konumları 62
Şekil 3. 4. Lazer ışık kaynağının CIE x ve CIE y renk koordinat değerlerinin dikey açıya göre değişimi 63
Şekil 3. 5. 1 A akımda lazer ışık kaynağının spektral güç dağılımı 64
Şekil 3. 6. CIE 1931 renk koordinatlarının akıma göre değişimi 65
Şekil 3. 7. Farklı akımlarda lazer ışık kaynağının spektral güç dağılımı 66
Şekil 3. 8. 450 nm – 750 nm arası spektral güç dağılımının akımla değişimi 67
Şekil 3. 9. Lazer ışık kaynağının fotometrik polar (kutup) diyagramı 68
Şekil 3. 10. LED'in jonksiyon sıcaklıklığı - ışık akısı grafiği 69
Şekil 3. 11. LED'in fotometrik polar (kutup) diyagramı 70
Şekil 3. 12. Lazer ışık kaynağı - reflektör çifti simülasyon sonucu ışık dağılımı 71
Şekil 3. 13. Lazer ışık kaynağı - reflektör çifti simülasyon sonucu ışık şiddeti değerleri 72
Şekil 3. 14. LED - reflektör çifti simülasyon sonucu ışık dağılımı 73
Şekil 3. 15. LED - reflektör çifti simülasyon sonucu ışık şiddeti değerleri 74
Şekil 3. 16. Lazer lambanın yol üzerindeki izolüks dağılımı 75
Şekil 3. 17. LED lambanın yol üzerindeki izolüks dağılımı 76
Şekil 3. 18. Sürücü görüşü resimleri a) Lazer lamba b) LED lamba 77
Şekil A. 1. ECE-R19 ön sis lambası regülasyonu ölçüm noktaları 89
Şekil B. 1. ECE-R19 ön sis lambası regülasyonu ışık şiddeti değerleri 90

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. 1. Spektral bölgeler için CIE sınıflandırması 8
Tablo 1. 2. Fotometrik nicelikler 13
Tablo 1. 3. LED malzemeleri ve ışıdıkları renkler 24
Tablo 2. 1. Lazer diyotun teknik özellikleri 39
Tablo 3. 1. Lazer ışık kaynağının yatay eksende ölçülen renk koordinatları 57
Tablo 3. 2. Lazer ışık kaynağının dikey eksende ölçülen renk koordinatları 61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	:	Işık hızı, (m/s)
E	:	Enerji, (J)
E	:	İrradyans, (W m^{-2})
h	:	Planck sabiti, (J · s)
I	:	Radyant şiddet, (W sr^{-1})
k_B	:	Boltzmann sabiti, (m^2 kg s^{-2} K^{-1})
K_m	:	Işık verimi, (lm/W)
L	:	Radyans, (W $sr^{-1}m^{-2}$)
M	:	Radyant çıkış, (W m^{-2})
Q	:	Enerji, (J)
r	:	Yarıçap, (m)
T	:	Sıcaklık, (K)
θ	:	Açı, (rad)
λ	:	Dalgaboyu, (nm)
ν	:	Işığın frekansı, (Hz)
ϕ	:	Açı, (rad)
Φ	:	Radyant akı, (W)
Φ_v	:	Işık akısı, (lm)
Ω	:	Katı açı, (sr)

Kısaltmalar

ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
CCT	:	Correlated Color Temperature (Korelasyonlu Renk Sıcaklığı)
CES	:	Consumer Electronics Show (Tüketici Elektroniği Fuarı)
CIE	:	Commission internationale de l'éclairage (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)
DRL	:	Daytime running lamp (Gündüz Sürüş Farı)
FMVSS	:	Federal Motor Vehicle Safety Standards (Federal Motorlu Taşıt Güvenliği Standartları)
HID	:	High Intensity Discharge (Yüksek Yoğunluklu Deşarj)
IES	:	Illuminating Engineering Society (Aydınlatma Mühendisliği Topluluğu)
LD	:	Laser Diode (Lazer Diyot)
LED	:	Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
OLED	:	Organic Light Emitting Diode (Organik Işık Yayan Diyot)
PC	:	Polycarbonate (Polikarbonat)
PMMA	:	Polymethyl methacrylate (Polimetil metakrilat)

LAZERLE SÜRÜLEN FOSFOR TABAKASINDAN OTOMOTİV UYGULAMALARI İÇİN BEYAZ IŞIK ÜRETİMİ VE RENK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Kerosen lambalarla başlayan otomotiv aydınlatma serüveni, halojen lambaların üretilmesi ve sonrasında LED'lerin yaygınlaşması ile gelişimini sürdürmüştür. 2014 yılına gelindiğinde, lazer diyotlar ilk kez ön aydınlatma bileşeni olarak, otomotiv aydınlatma endüstrisinde kendine yer bulmuştur. BMW i8 ve Audi R8 LMX, seri üretime geçen lazer farlı ilk otomobiller olmuştur.

Bu lazer farlarda kullanılan yöntem, lazerle sürülen fosfor veya lazerle aktive edilen uzak fosfor olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemin çalışma prensibi, lazer diyottan elde edilen yüksek yoğunluklu tek renk ışığın, uzaktaki bir fosfor tabakası üzerine düşürülmesiyle beyaz renkte ışık üretilmesine dayanmaktadır. Sistemi beslemek için yakın morötesi bölgede ışıma yapan lazer diyot seçildiğinde, kırmızı, yeşil ve mavi ışık yayan fosfor kullanılmaktadır. Uyarıcı ışık kaynağı olarak mavi lazer diyot kullanıldığında ise fosfor tabakası olarak sarı ışık yayan fosfor kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, mavi ışık yayan lazer diyot ve YAG fosfor tabakası kullanılarak otomotiv aydınlatmada kullanılabilecek özelliklere sahip beyaz ışık üretilmiştir. Üretilen ışığın renk özellikleri incelenmiş ve ECE R-48'de belirtilen beyaz ışık şartlarına uygunluğu değerlendirilmiştir.

Bunun yanında, elde edilen ışığın şiddetinin dağılımı incelenmiş ve fotometrik özellikleri, otomotiv onaylı bir LED'in özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Her iki ışık kaynağı için de, SPEOS optik tasarım programı ile ön sis lambası reflektörü tasarımı yapılmıştır. Her iki ışık kaynağı – reflektör çiftinin de ECE R-19 ön sis lambası regülasyonuna uygunluğu Monte Carlo ışın izleme metodu ile yapılan simülasyonlarla kontrol edilmiştir. İki tasarımın da yol aydınlatma performansları LucidShape programı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bilgisayar Destekli Optik Tasarım, Lazer Far, Lazerle Sürülen Fosfor, Otomotiv Aydınlatma, Renk Analizi.

WHITE LIGHT GENERATION WITH LASER DRIVEN PHOSPHOR PLATE FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS AND INVESTIGATION OF COLOR CHARACTERISTICS

ABSTRACT

The automotive lighting adventure, which started with kerosene lamps, continued its development with the production of halogen lamps and the widespread use of LEDs. When it was the year 2014, laser diodes have found their place in the automotive lighting industry for the first time as a component for front lighting. The BMW i8 and Audi R8 LMX were the first cars with laser headlamps to go into mass production.

The method used in these laser headlamps is called laser driven phosphor or laser activated remote phosphor. The working principle of this system is based on the generation of white light by directing the high intensity monochromatic light obtained from the laser diode onto a distant phosphor layer. When the laser diode to feed the system is selected in the near ultraviolet region, red, green and blue light emitting phosphor is used. When a blue laser diode is used as the excitation light source, yellow light emitting phosphor is used.

In this study, white light, suitable to be used in automotive lighting is generated by using blue light emitting laser diode and YAG phosphor plate. The color characteristics of the produced light were examined and their compatibility to the white light conditions specified in ECE R-48 was evaluated.

In addition, the distribution of the intensity of the light obtained was examined and its photometric properties were compared with those of an automotive approved LED. For both light sources, a front fog lamp reflector was designed with the SPEOS optical design program. Conformity of both light source - reflector pairs to ECE R-19 front fog lamp regulation was checked by Monte Carlo ray trace simulation method. Road lighting performances of both designs were evaluated using LucidShape program.

Keywords: Computer Aided Optical Design, Laser Headlight, Laser Driven Phosphor, Automotive Lighting, Color Analysis.

GİRİŞ

Günümüz ulaşımında karayolu taşımacılığı önemli bir yer tutmaktadır. Sürücü, yolcu ve yaya güvenliği için taşıtlarda doğru aydınlatmanın yapılması en hayati faktörlerden biridir. Aydınlatma ürünleri sürücünün uygun bir şekilde görmesini sağlamakla beraber diğer sürücüler ve yayalar tarafından rahatça algılanmasını sağlamalıdır.

Gelişen teknoloji ile birlikte otomotiv aydınlatmada kullanılan sistemler de değişmektedir. Otomobilin insan hayatına girdiği ilk yıllardan bu yana, gaz lambaları ile başlayan otomotiv aydınlatma serüveni, yüksek performanslı ampullerin üretilmesi ve sonrasında LED (Light Emitting Diode, Işık Yayan Diyot)'lerin yaygınlaşması ile gelişimini sürdürmüştür. Son dönemde OLED (Organic Light Emitting Diode, Organik Işık Yayan Diyot)'in otomotiv aydınlatmada kullanılmaya başlamasının ardından lazer de ilk kez otomobillerde ön aydınlatma gereci olarak kendine yer bulmuştur. Önümüzdeki yıllarda, lazer diyotların performanslarının da gelişmesiyle, lazer farların ve lambaların, otomotiv aydınlatmada LED'lerin yerini alması pek de zor değildir. Zira fosfor tabanlı beyaz LED'lerde gözlenen "verim zayıflaması" olarak adlandırılan olgu, yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanımlarını sınırlamaktadır.

Yaklaşık olarak son on yıldır, katı hal aydınlatmada yeni bir alternatif olması çabasıyla, lazerler de değerlendirilmektedir. Beyaz ışık elde etmek için mor veya mavi ışıklı lazerlerin kullanıldığı yöntemde, lazerden bir miktar uzağa fosfor tabakası yerleştirilerek, üzerine lazer ışığı düşürülmektedir. Lazerle aktive edilen fosfor yada lazerle sürülen fosfor olarak isimlendirilen bu yöntemle, lazerden çıkan ışık ve fosfordan yayılan ışık birleşerek beyaz ışık oluşturmaktadır. Yakın zamana kadar pratik uygulaması olmayan bu yöntem, BMW ve AUDI firmalarının konsept araçlarında ön far olarak kullanılmasıyla otomotiv aydınlatma sektöründe kendisine yer bulmuştur. Literatürde konuyla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, lazerle sürülen fosfor konusunda çalışmaların fosfor malzemenin içeriği üzerine odaklandığı görülmektedir. Üretilen ışığın renk özellikleri entegre kürede ölçülerek verilmiştir.

Işığın yönlendirildiği doğrultudaki gözlem açısına bağlı olarak renkte oluşan değişikliğin dikkate alındığı yalnız üç çalışmaya rastlanmıştır. Ayrıca, çalışmaların genelinde elde edilen ışığın açısal karakteristiği ve bu dağılımın ışık şiddeti yerine, ışığın toplam akısı üzerinde durulmuştur. Oysa otomotiv sektöründe kullanılacak aydınlatma ürünleri için kullanılan ışığın akısının yanı sıra, dağılım karakteristiği de önem taşımaktadır. Ayrıca renk özelliklerinin de ışığın yöneltildiği bölgede istikrarlı olması, sürüş güvenliği için önemli bir etkendir.

Bu tez çalışmasında, lazerle sürülen fosfor tabakası ile beyaz ışık üretilmiş, hem renk özellikleri hem de dağılım karakteristiği incelenmiştir. Oluşan beyaz rengin, otomotiv aydınlatma regülasyonlarına uygunluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca sayısal veriye dönüştürülen ışık dağılımı için SPEOS ve LucidShape optik tasarım programları kullanılarak reflektör tasarımı yapılmıştır. Oluşturulan tasarımın optik performansı, LED'li bir başka reflektör tasarımıyla kıyaslanmıştır. Bu yöntemle, lazerle sürülen fosfor tabakasından elde edilen beyaz ışığın, otomotiv aydınlatmada daha yaygın kullanılmasına katkı sağlayabilecek yönlerinin ve muhtelif eksiklerinin kıyaslamalı tespitinin yapılması amaçlanmıştır.

Buna ek olarak, en büyük ihracat kalemi otomotiv yan sanayi ürünleri olan Türkiye'de, otomotiv aydınlatma konusunda yok denecek kadar az sayıda Türkçe teknik bilgi olması sebebiyle, tezin bu konuda da bir kaynak olması amaçlanmaktadır. Bu sebeple, konu olabildiğince sade fakat tarihsel ve teknik bir perspektifle ele alınmaya çalışılmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Otomotiv Aydınlatma Teknolojisinin Gelişimi

Atlı arabalar, otomobilin ortaya çıkmasından önce birincil ulaşım şekliydi. Bu arabalarda mumlar ve yağ yakıcı fenerler kullanılmaktaydı. Otomobil, 1880'lerin sonlarına kadar görünmemiştir [1]. Buhar arabalarının keşfinden sonra, "benzinli motorla çalışan araç" adıyla, 1886 yılında Karl Friedrich Benz tarafından yapılan patent başvurusu, aslında modern otomobilin doğum sertifikası olmuştur [2]. Elektrikli ampul 1879'da Thomas Edison tarafından icat edilmiş olsa da, otomobillerde kullanılan ilk aydınlatma gereçleri elektrikli farlar değildi. İnsanlar gece araba kullanmaya başladığında, ilk araç aydınlatma cihazları gazyağı yakan fenerlerdi [1]. Mumlar ve gazyağı lambaları, aracın ön kısmına yerleştirilmiş ve öncelikle aracı diğer yol kullanıcıları tarafından görülebilir kılmak için tasarlanmıştır. Arkada ise lamba bulunmamaktaydı [3].

Avrupa'da 1900 yılına kadar gazyağı farlarının kullanıldığı, daha sonra karpit (asetilen) farların 1900'den 1910'a kadar kullanıldığını tahmin edilmektedir. Araçlar için elektrik aydınlatması ise 1901 yılında ve sınırlı miktarlarda, motor volanı tarafından sürülen küçük bir dinamo kullanılmasıyla başlamıştır ve üretilen elektrik farlar için kullanılmıştır [1].

1908'de, ABD (Amerika Birleşik Devletleri)'deki ilk otomotiv far ampullerinde, vakum içerisinde karbon filaman kullanılmıştır. Kısa süreliğine tantal filamanlı ışık kaynakları kullanılmış olsa da avantajlarının farkına varılmasının ardından hızlı bir şekilde tungstene geçilmiştir. Karbon filamanlar, osmiyum filamanlar, tantal filamanlar, tungsten filamanlar, vakum ampulleri ve son olarak gazla doldurulmuş ampuller gibi tüm teknolojik adımlarının her biri, önce elektrikli ev aydınlatması için yapılmış ve birkaç yıl sonra da otomotiv araçlarında kullanılmak üzere değiştirilmiştir [1].

1912'ye gelindiğinde elektrikli farların kullanımı yaygınlaşmıştı. Bunu, geri aydınlatma için kullanılan elektrikli lambalar izledi. 1915'de kırmızı kuyruk lambaları ve sarı fren lambaları otomobillerde kullanılmaya başladı. 1919'da parlamaya karşı kısa huzmeli farlar kullanıma sokuldu. 1925'de uzun ve kısa farlar için ilk çift filamanlı ampuller kullanıma sokuldu. 1936'da, parabolik reflektör ve flaman lamba içeren, cam lensin gövdeye kalıcı olarak birleştirildiği "sealed beam" farlar kullanıma sunuldu ve 1940'da ABD'de kabul edilen tek standart ön far halini aldı. Yine 1940'da kendi kendine kapanabilen ön ve arka istikamet göstergeleri (sinyal lambaları) üretildi. 1945'e gelindiğinde, ön far ve sinyal lambası tek gövdede entegre şekilde kullanılmaya başladı.1960'da Avrupa'da ilk halojen lambalar ortaya çıktı. 1979'da ABD'de ilk halojen "sealed beam" lambalar kullanılmaya başladı. 1983'de ABD'de ilk kompozit değiştirilebilir ampullü lamba takdim edildi. 1991'den itibaren HID (High-intensity Discharge, Yüksek Yoğunluklu Deşarj) bir diğer deyişle Ksenon lambalar, Avrupa'da kullanılmaya başladı. 1993'de ilk LED'li arka lambaların üretilmesinden sonra, günümüzde hem ön hem de arka aydınlatmada LED'ler yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Gelişmekte olan teknolojiler olarak, 2013'de organik LED'ler (OLED) arka aydınlatmada, 2015'de ilk lazer farlar ön aydınlatmada kullanılmaya başladı[1-5].

1.2. Otomotiv Aydınlatmada Yasal Gereklilikler

Gece sürüşlerinin yaygınlaşması ve araçlardaki aydınlatma gereçlerinin çoğalması, bu konuda düzenleme yapılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Otomobil üretiminin Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde şekillenmeye başlaması, doğal olarak ilk düzenleme ihtiyaçlarının da burada ortaya çıkmasını beraberinde getirmiştir. Otomotiv aydınlatma konusunda ilk düzenleme, ön lambanın yolu ne kadar bir mesafe aydınlatması gerektiğinin belirtildiği bir düzenlemedir ve Massachusetts eyaletinde 27 Ekim 1915'te kabul edilmiştir [1]. 1905 yılında kurulan ABD menşeli SAE (Society of Automotive Engineers, Otomotiv Mühendisleri Topluluğu) içinde, 1910'lardan itibaren otomotiv aydınlatmayla ilgilenen bir komite bulunmaktaydı [1, 6]. Aydınlatma Mühendisliği Topluluğu (IES, Illuminating Engineering Society) ise 1906'da, SAE'den bir yıl sonra kurulmuştur [7]. İki kuruluş da otomotiv aydınlatmada belirli standartların oluşturması için kapsamlı çalışmalar yapmıştır. Daha sonraları SAE Aydınlatma Komitesi adını alacak olan, SAE ve IES ortaklığıyla oluşturulan bir

çalışma grubu, 1918'de ABD'de ilk otomotiv aydınlatma standardının yayınlanmasında görev almıştır. Bu dönemde sadece tek huzmeli farlara odaklanmış olan bu standart 1922'de revize edilmiştir. Plakanın aydınlatılması, kuyruk lambasının görülebileceği mesafe gibi standartlar da ilk olarak 1922'de getirilmiştir. Sonraları fren lambası ve diğer aydınlatma fonksiyonlarının ortaya çıkışı ile standartların güncellenmesine devam edilmiştir [1, 3].

1920'lerde Avrupa'da da otomotiv aydınlatma konusunda, ulusal düzeyde belirli standartlar uygulanmaktaydı. İkinci Dünya Savaşı sonrasında Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UN/ECE, United Nations Economic Commission for Europe) çatısı altında bazı tek tip uluslararası aydınlatma düzenlemeleri oluşturuldu. 1952'de Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu, Sürdürülebilir Ulaştırma Bölümü'nün altında kurulan Çalışma Grubu 29 (WP.29, Working Party 29) taşıt tasarımlarında belirli kıstasların sağlanabilmesi amacıyla, tek tip bir düzenleme sistemi oluşturmakla görevlendirilmiştir [8- 11]. Günümüzde güncellenerek kullanılmaya devam eden ve Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu tarafından belirlenen şartnameler, 1958 Anlaşması olarak bilinen "Tekerlekli Araçların, Araçlara Takılan ve/veya Araçlarda Kullanılan Aksam ve Parçaların Müşterek Teknik Talimatlarının Kabulü ve Bu Talimatlar Temelinde Verilen Onayların Karşılıklı Tanınması Koşullarına Dair Anlaşma" başlıklı anlaşma ile yürürlüğe girmiştir. Anlaşmayı ilk imzalayan ülkeler; Almanya, Belçika, Fransa, Hollanda, İtalya, İsveç ve Macaristan'dır. 1995 yılında anlaşmanın tadil edilmesiyle, Avrupa Ekonomik Komisyonu'na üye olmayan ülkelerin de katılımı mümkün kılınmıştır. Böylelikle anlaşma, küresel bir nitelik kazanmıştır [12, 13].

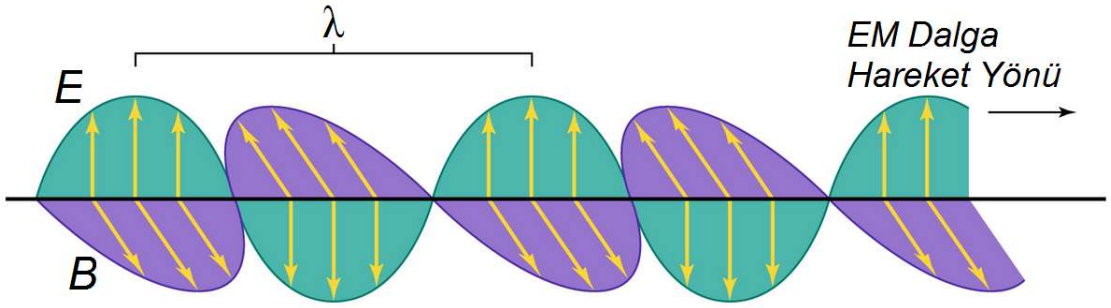
ABD'de,1966 yılında Motorlu Taşıt Güvenliği Yasası, federal hükümet tarafından kabul edilinceye kadar, otomotiv aydınlatma düzenlemeleri eyaletler düzeyinde devam etmiştir [3]. 1968 yılında ABD Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA, National Traffic Safety Agency) kurulmuştur. Kurum, Federal Motorlu Taşıt Güvenliği Standartları (FMVSS, Federal Motor Vehicle Safety Standards) adı verilen standartları oluşturmuştur. FMVSS 108, tüm otomotiv aydınlatma ekipmanlarını düzenleyen standarttır ve çoğunlukla, mevcut SAE aydınlatma standartlarını kullanmaktadır [14, 15].

ECE 48 numaralı regülasyon, (Aydınlatma ve ışıklı işaretleme cihazlarının montajı ile ilgili araçların onayına ilişkin tek tip hükümler) otomotiv dış aydınlatmada kullanılacak beyaz ışığın tarifini yapmaktadır [16]. ABD için ise SAE J578 numaralı şartname otomotiv aydınlatmada kullanılacak ışığın rengine ilişkin kıstasları belirlemektedir ve 2012 yılında yapılan revizyonla ECE R-48 ile uyumlu hale getirilmiştir. Günümüzde hala Amerika ve Avrupa'da kullanılan şartnameler farklılık göstermekte ve harmonizasyon çalışmaları devam etmektedir.

1.3. Işık

Işık, femtometre düzeyinde dalga boylarına sahip kozmik ışınlardan, kilometre cinsinden dalga boylarına sahip radyo dalgalarına uzanan elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır. Elektromanyetik spektrumun geri kalanından 380 ile 780 nm arasındaki dalga boyu bölgesini ayıran, insan görsel sisteminin bu bölgedeki elektromanyetik dalgalara olan duyarlılığıdır. İnsan gözündeki fotoreseptörler bu dalga boyu aralığında enerjiyi emer ve böylece görme işlemini başlatır. Diğer canlılar elektromanyetik spektrumun farklı bölümlerine duyarlıdır ancak ışık, insanların görsel tepkisi ile tanımlanır [17].

Işığın hem parçacık hem de dalga özellikleri gösteren yapısı, ışığın birleşik teorisi ile açıklanmıştır. Buna göre ışık; foton adı verilen kesikli dalga paketçiklerinden oluşmaktadır ve kendisine eşlik eden bir elektromanyetik dalga ile uzayda yayılmaktadır [19]. Bu dalga elektrik (E) ve manyetik (B) alanlardan oluşur. Alanlar dalga hareket yönüne ve birbirlerine dik olarak salınırlar. Şekil 1.1'de EM dalga gösterilmiştir.



Şekil 1. 1. Elektromanyetik dalga [22]

Bir fotonun enerjisi Denklem (1.1) ile verilir.

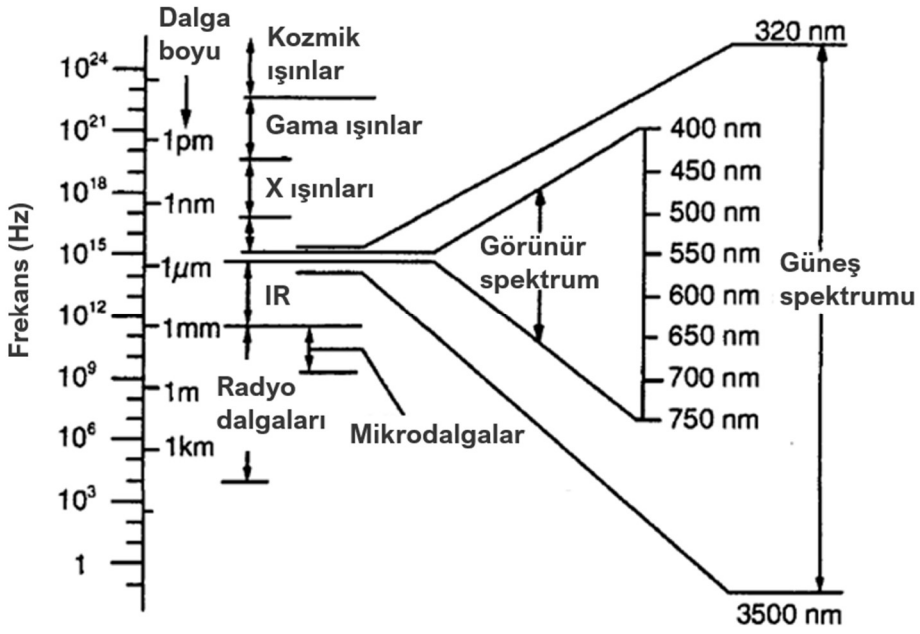
$$E = h\,\nu \tag{1.1}$$

Burada h, Planck sabiti 6.626×10^{-34} J · s'dir. ν foton titreşiminin Hz cinsinden frekansı ve E ise Joule cinsinden enerjidir [20].

Tek dalgaboyuna sahip ve dolayısıyla tek frekansla yayılan monokromatik bir elektromanyetik dalga düşünüldüğünde, λ ışığın dalgaboyu, ν bu ışığın frekansı olmak üzere birbiriyle olan ilişki Denklem (1.2) ile gösterilir.

$$c = \lambda\,\nu \tag{1.2}$$

Burada c ışık hızını ifade etmektedir ve boşlukta 299792458 m/s'dir. Elektromanyetik spektrumun, dalgaboyu ve frekansa göre detaylandırılmış grafiği Şekil 1.2'de verilmiştir. Tablo 1.1 ise Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE)'nin görünür bölgeye yakın aralıktaki sınıflandırmasını göstermektedir [20].



Şekil 1. 2. Elektromanyetik spektrum

Tablo 1. 1. Spektral bölgeler için CIE sınıflandırması

İsim	Dalgaboyu Aralığı
UV-C	100 nm ile 280 nm
UV-B	280 nm ile 315 nm
UV-A	315 nm ile 400 nm
Görünür Bölge	360-400 nm aralığında başlayıp 760-800 nm'ye kadar
IR-A (Yakın IR)	780 ile 1400 nm
IR-B	1,4 μm ile 3 μm
IR-C (Uzak IR)	3 μm ile 1 mm

Işık olarak bildiğimiz doğal olgunun, bütün faaliyetlerimizi büyük ölçüde etkilemesi sebebiyle; insan, en eski zamanlardan beri yapay ışık üretmeye gayret etmektedir. Bu ışık kaynakları, zaman içinde, ilkel odun ateşinden muma, çeşitli türlerdeki gaz lambalarından elektrikli ışık kaynaklarına, filamanlı ampullerden ışık yayan diyotlara (LED) kadar evrilmiştir [18].

Işığın insan için bu denli önemli olması ve yapay ışık kaynaklarının hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelmesi, ışığı tanımlama ve ölçme ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Bu durumda, radyometri ve özellikle fotometri kavramları önem kazanmaktadır.

1.3.1. Radyometri

Radyometri, elektromanyetik radyasyonun enerji içeriğinin ölçümü ve bu enerjinin madde ile etkileşimi tanımlamak için tasarlanan kavramlar, terminoloji, matematiksel ilişkiler, ölçü aletleri ve ölçü birimlerinden oluşan bir teknikler bütünüdür [19, 21]. Elektromanyetik spektrumun tümüyle ilgili ölçüm ve tespitleri kapsar.

Radyometriye ilişkin temel nicelikler aşağıda verilmiştir. Fakat bunlardan önce, katı açı kavramın tanımlanması, bu birimlerin anlaşılması için gereklidir.

1.3.1.1. Katı açı

Katı açı, iki boyutlu bir düzlemde çember tanımına benzer şekilde tanımlanmış bir üç boyutlu açısal hacimdir. Ω sembolü ile gösterilir. Birimi steradyan (sr)'dır. Denklem (1.3) ile verilir.

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{(r \sin\theta \, d\phi)(r \, d\theta)}{r^2} = \sin\theta \, d\theta \, d\phi \tag{1.3}$$

Burada, diferansiyel yüzey alanı (dA), birim küresel yüzey olmak üzere, r yarıçaplı bir tam küreye karşılık gelen katı açı 4π steradyandır. Denklem (1.4) ile bulunur.

$$\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \sin\theta \, d\theta \, d\phi = 2\pi \int_{\theta=0}^{\pi} \sin\theta \, d\theta = 4\pi \tag{1.4}$$

Denklemde θ ($0 \leq \theta \leq \pi$) kutup açısı ve ϕ ($0 \leq \phi \leq 2\pi$) azimut açısıdır.

1.3.1.2. Radyant enerji

Radyant enerji, elektromanyetik radyasyon şeklinde yayılan, aktarılan veya alınan enerjidir. Q sembolü ile gösterilir ve birimi joule (J)'dür.

1.3.1.3. Radyant akı (radyant güç)

Radyant akı veya radyant güç, elektromanyetik radyasyon şeklinde yayılan, aktarılan veya alınan, birim zaman başına enerji yani güçtür. Φ sembolü ile gösterilir ve birimi watt (W)'dır. Denklem (1.5) ile verilir.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \tag{1.5}$$

1.3.1.4. İrradyans

İrradyans, bir yüzey üzerinde, birim alana düşen radyant akı miktarıdır. E sembolü ile gösterilir. Birimi watt/metrekare ($W\ m^{-2}$)'dir. Φ yüzeye gelen radyant akı ve dA alan olmak üzere irradyans Denklem (1.6) ile verilir.

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \tag{1.6}$$

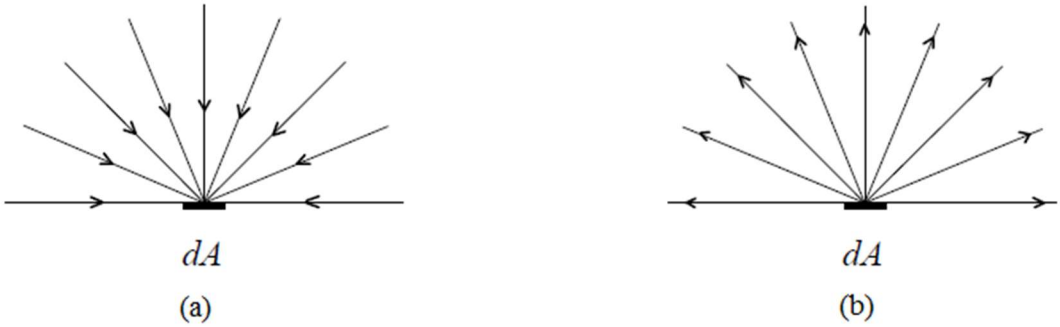
İrradyans değeri, akının yönü hakkında bir bilgi içermez. Burada tek dikkat edilmesi gereken nokta, elektromanyetik radyasyonun, bir alanın üzerine düşüyor olmasıdır.

1.3.1.5. Radyant çıkış

Akının, emisyon veya yansıma nedeniyle yüzeyden ayrılmasını açıklayan ifade radyant çıkıştır. M sembolü ile gösterilir. Birimi irradyans ile aynı şekilde watt/metrekare (W m^{-2})'dir. Denklem (1.7) ile verilir.

$$M=\frac{d\Phi}{dA} \tag{1.7}$$

Şekil 1.3'de irradyans ve radyant çıkış arasındaki fark tasvir edilmiştir.



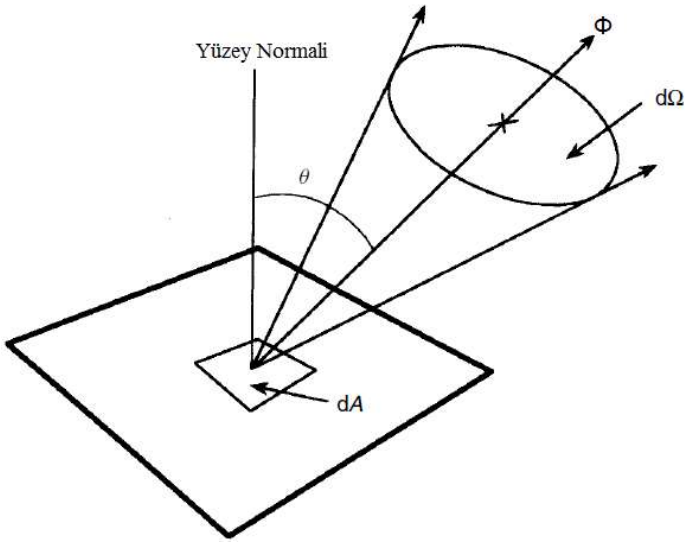
Şekil 1. 3. (a) İrradyans (b) Radyant çıkış

1.3.1.6. Radyans

Bir yüzeyden yayılan, belirli bir yönde yansıtılan, iletilen veya alınan, birim katı açı başına radyant akıdır. L sembolü ile gösterilir. Birimi watt/steradyan metrekare (W $sr^{-1}m^{-2}$)'dir. Denklem (1.8) ile verilir. Şekil 1.4'de radyans betimlenmiştir.

$$L=\frac{d\Phi}{\cos\theta\, dA\, d\Omega} \tag{1.8}$$

Burada önem teşkil eden husus, radyans tanımının içinde yön bilgisinin de bulunuyor olmasıdır. Özellikle, bir yüzeyden yayılan ışınım göz önünde bulundurulduğunda, sözü edilen yüzey alanının, gerçek yüzeyi değil, sanal bir yüzeyi temsil ettiğini varsaymak bu kavramın anlaşılmasını kolaylaştırabilir. Yani yüzey alanını, yüzey normalinden θ açısı kadar farka sahip bir yerden yüzeye bakan biri tarafından görüldüğü şekliyle değerlendirilmektedir. Buradan hareketle, aynı kaynak için farklı açılarda farklı radyans değerlerinin ölçülebileceği görülebilmektedir.



Şekil 1. 4. Radyans

1.3.1.7. Radyant şiddet

Radyant şiddet; bir kaynağı terk eden radyant akının, belirli bir istikamette, bir katı açı birimine oranıdır. I sembolü ile gösterilir. Birimi watt/steradyan (W sr^{-1}) 'dır. Denklem (1.9) ile verilir.

$$I=\frac{d\Phi}{d\Omega} \tag{1.9}$$

1.3.1.8. Spektrum ile radyometri ilişkisi

Radyometrik nicelikler, tüm dalga boylarının toplam ışınımını ifade eder. Tek bir dalgaboyuna veya bir dalgaboyu aralığına bağlı radyometrik nicelikler λ alt indisi ile gösterilir. Örneğin, dalga boyu λ_1 ve dalga boyu λ_2 aralığındaki, Φ olan toplam radyant akıyı bulmak istersek, Denklem (1.10) ile elde edebiliriz.

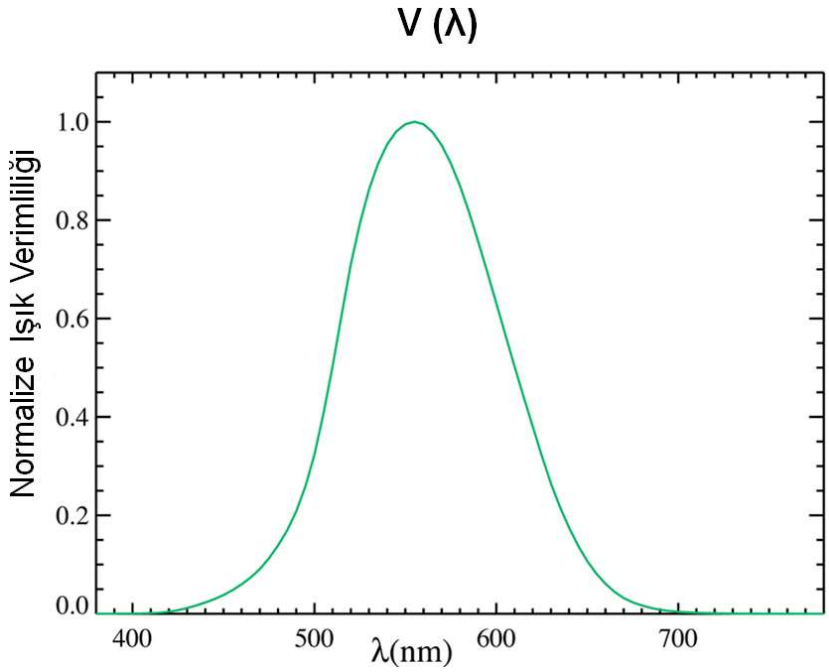
$$\Phi(\lambda_1,\lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda 2} \Phi_\lambda(\lambda)\, d\lambda \tag{1.10}$$

Dalgaboyuna bağlı diğer radyometrik nicelikler de aynı yöntemle elde edilebilir [19, 23-25].

1.3.2. Fotometri

Fotometri, spektrumun görülebilir bölgesindeki elektromanyetik dalgaların ölçümü ile ilgilenir. Fotometrik niceliklerin geometrik prensipleri radyometri ile aynıdır. Aradaki tek fark, fotometrik kavramların, insan gözünün ışığa verdiği tepki temel alarak oluşturulmasıdır. Bu durumda, insan gözünü dalgaboyuna bağlı radyometrik bir sensör olarak düşünebiliriz. Bu yönüyle fotometri, radyometrinin bir alt dalı olarak görülebilir [21, 23-26]. Radyometrik ve fotometrik sembolleri birbirinden ayırmak için sırasıyla e ve v harfleri alt indis olarak kullanılır [26]. Örneğin, radyant akı Φ_e ile gösterilirken, ışık akısı Φ_v sembolü ile gösterilir.

Her ne kadar insan gözünün ışığa tepkisi, kişinin fizyolojisi, yaşı ve hatta psikolojisine bağlı olarak küçük farklılıklar gösterse de bunlar ihmal edilebilir farklılıklardır. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE), Gibson ve Tyndell (1923)'in yaptığı çalışmaları temel alarak, V (λ) ile gösterilen, "Standart Gözlemci Tepki Eğrisi"ni (Fotopik Işık Verimliliği Fonksiyonu olarak da bilinir) oluşturmuştur [17, 21]. CIE Işık Verimliliği Fonksiyonu, λ= 555 nm dolayında maksimum noktasına ulaşmaktadır. Şekil 1.5'de CIE fotopik ışık verimliliği fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 1. 5. CIE fotopik ışık verimliliği fonksiyonu

Fotometride, radyant akıya karşılık gelen ışık akısının birimi lümendir (lm) ve Φ_v sembolü ile gösterilir. Dalgaboyuna bağlı radyant akının hesaplanmasında kullanılan yöntemin bir benzeriyle elde edilir. Denklem (1.11)'da gösterilmiştir.

$$\Phi_v = K_m \int \Phi_\lambda(\lambda)\, V(\lambda)\, d\lambda \qquad (1.11)$$

Burada V (λ) Fotopik Işık Verimliliği Fonksiyonu, K_m ise fotopik görüş için ışık verimidir (luminous efficacy). Fotopik ışık verimi (K_m), dalgaboyu λ= 555 nm noktasında yaklaşık 683 lm/W'a eşittir [21].

Fotometrik nicelikler, radyometri konusunda takip edilen sırayla, Tablo 1.2.'de verilmiştir. Otomotiv aydınlatmada özellikle ışık akısı, ışık şiddeti ve aydınlanma yoğun olarak kullanılmaktadır.

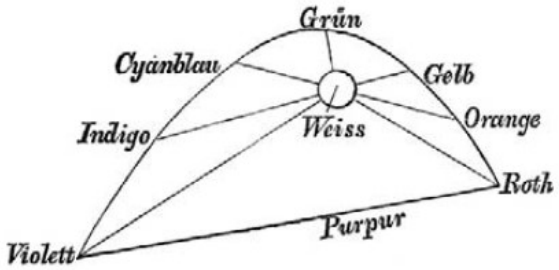
Tablo 1. 2. Fotometrik nicelikler

Tanım	Sembol	Denklem	Birim
Işık Enerjisi	Q_v		Talbot (T) = (lm.s)
Işık Akısı	Φ_v	$\Phi = dQ_v/dt$	Lümen (lm) = (cd.sr)
Aydınlanma (Illuminance)	E_v	$E_v = d\Phi_v/dA_{hedef}$	Lüks (lx) = (lm/m^2)
Işık Çıkışı (Luminous Exitance)	M_v	$M_v = d\Phi_v/dA_{kaynak}$	Lüks (lx) = (lm/m^2)
Parıltı (Luminance)	L_v	$L_v = d\Phi_v/(\cos\theta\, dA\, d\Omega)$	Nit (nt) = (cd/m^2)
Işık Şiddeti	I_v	$I_v = d\Phi_v/d\Omega$	Kandela (cd) = (lm/sr)

1.4. Renk İle İlgili Kavramlar

Modern bilim tarihinde renk ile ilgili bilinen ilk çalışma Newton tarafından gerçekleştirilmiştir. Newton, güneş ışığını bir üçgen prizmadan geçirdiğinde, beyaz ışığın farklı renklere ayrıldığını görmüştür [27, 28]. Newton'un deneyinden sonraki önemli katkı Mariotte (1717) tarafından yapılmıştır. Herhangi bir rengi üretmek için üç rengin doğru kombinasyonlarını kullanmanın yeterli olduğunu söylemiştir.

Sonrasında Young (1802), trikromatik renk teorisini geliştirmiş ve doğadaki tüm renklerin, ana renkler olarak adlandırdığı üç farklı renkle yakalanabileceğini ve insan gözünün her ana renk için bir tane olmak üzere, üç tür reseptöre sahip olduğunu belirtmiştir. Fakat bu teori ile ilgili sorun, hangi renklerin ana renkler olduğunun belirlenememesidir. Yaklaşık elli yıl sonra, von Helmholtz (1852, 1866), deneylere dayanarak ve daha fazla ayrıntı ekleyerek Young'ın fikirlerini geliştirmiştir. Bu nedenle trikromatik ışık teorisi Young-Helmholtz teorisi olarak bilinir [28]. Şekil 1.6'da Helmholtz'un renk diyagramı verilmiştir.



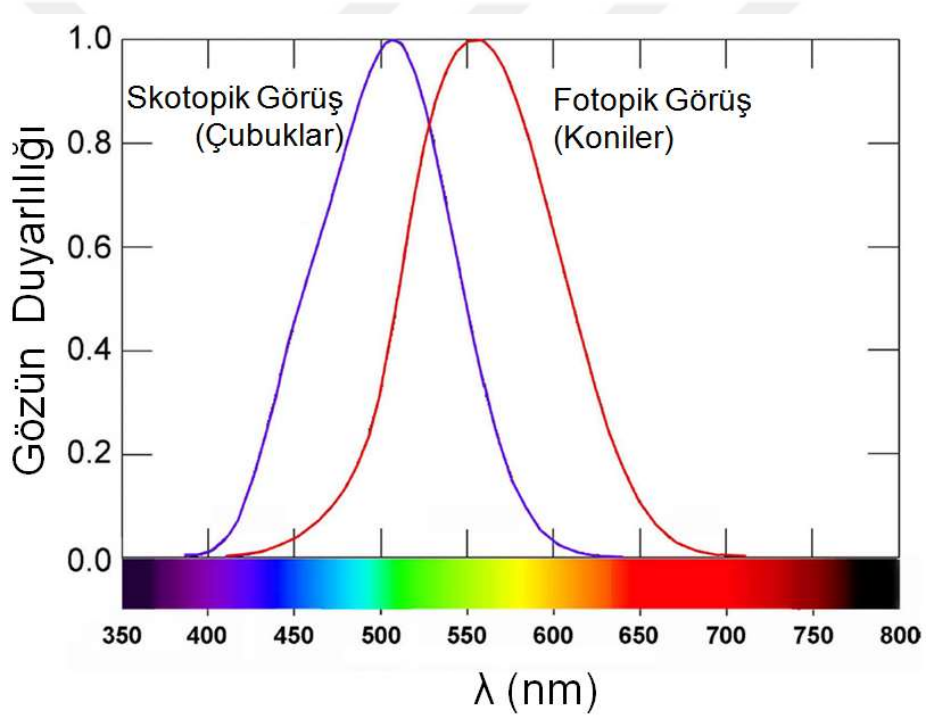
Şekil 1. 6. Helmholtz tarafından hazırlanmış ilk modern renk diyagramı [29]

1920'lerde renk eşleştirme fonksiyonları ile ilgili yeni çalışmalar Guilt tarafından bir filtreleme sistemi kullanılarak ve Wright tarafından monokromatik uyarıcılar kullanılarak yapılmıştır. İki çalışmanın birbiriyle uyumlu sonuçlar ortaya koyduğunun görülmesi neticesinde, Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE)'nun 1931'de kabul edilen standart renk diyagramı için temel alınmıştır. CIE 1931 renk diyagramı olarak bilinen bu sistem, ardından CIE tarafından kabul edilen yeni renk sistemlerine rağmen, renklerin belirlenmesinde temel yöntem olarak kalmıştır [29]. Otomotiv aydınlatmada kullanılan renkler için tüm açıklamalar ECE R-48'de 1931 renk diyagramı üzerinden yapılmıştır.

1.4.1. Fotopik görüş ve skotopik görüş

İnsan gözünde görmemizi sağlayan iki tip fotoreseptör bulunur. Bunlar çubuk (rod) ve koni (cone) hücreleridir. Koni hücreleri, gün ışığı altında yada normal aydınlatılmış bir ortamda renkleri ayırt etmemizi sağlayacak şekilde özelleşmişlerdir. Üç ayrı tipte koni hücresi bulunur. Bunlardan biri kısa dalgaboylarına karşı hassastır ve mavi rengi algılamamızı sağlar, diğeri orta dalga boylarına tepki verir ve yeşil rengi görmemizi

sağlar. Üçüncü tip koni hücresi ise uzun dalga boylarını, yani kırmızı rengi algılamamızı sağlar [27-30]. Koni fotoreseptörlerinde en yüksek hassasiyet yeşil kısımdadır. Bu nedenle, yeşil rengi en parlak görürüz. Koni hücrelerinin daha aktif olduğu bu normal aydınlatılmış ışık koşullarındaki görüş şekline, fotopik görüş adı verilir. Çubuk hücreleri ise daha hassastır ve ay ışığı gibi düşük ışık koşulları altında görmemizi sağlarlar. Düşük ışık koşullarında, çubuk hücrelerinin daha aktif olduğu görüş şekline skotopik görüş denilmektedir [28]. Fotopik görüşte insan gözü λ= 555 nm dalgaboyunda en hassastır, skotopik görüşte ise bu maviye doğru kayarak maksimum noktasına λ= 510 nm dolayında ulaşır [27]. Şekil 1.7'de fotopik ve skotopik görüş için gözün duyarlılığı gösterilmiştir.

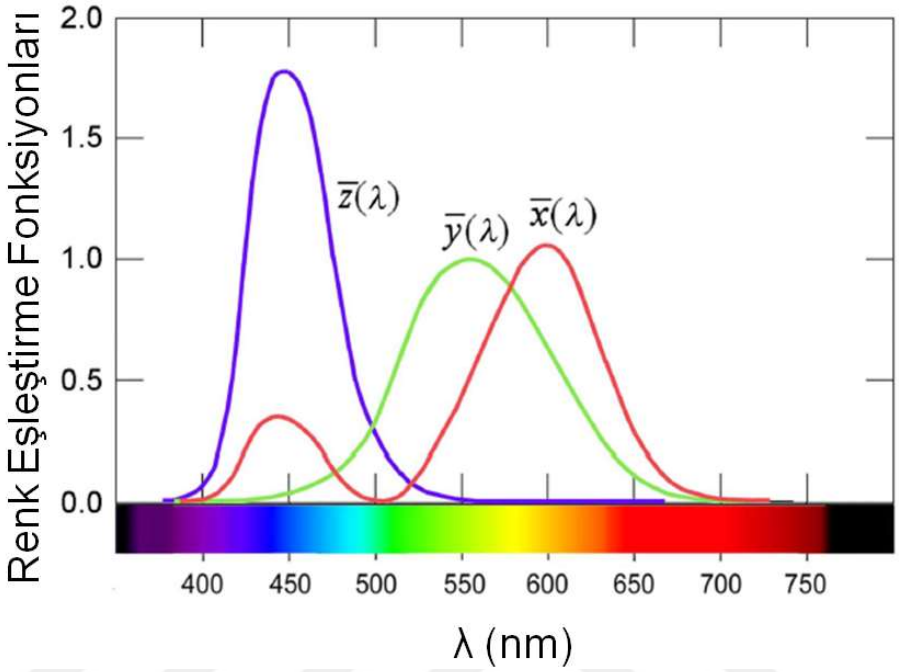


Şekil 1. 7. Fotopik ve skotopik görüş için gözün duyarlılığı [28]

1.4.2. CIE renk diyagramı

CIE renk diyagramının temelini renk eşleştirme fonksiyonları oluşturmaktadır. CIE renk eşleştirme fonksiyonları, renkleri normal şekliyle görebilen bir gözlemcinin, spektral duyarlılığını yansıtan matematiksel yapılardır. İnsanın sahip olduğu renk algısını benzer şekilde ölçebilecek aletler yapılmasında temel teşkil etmişlerdir. Bu fonksiyonlar, aynı renk olarak görülen tüm dalgaboyu kombinasyonlarının CIE renk ölçüm sisteminde aynı pozisyonda olmasını ve farklı renkler olarak algılananların da

farklı pozisyonlarda kalmasını sağlarlar. Renk eşleştirme fonksiyonlarının farklı dalga boylarına karşılık gelen değerleri, spektral tristimulus değerleri olarak bilinir [31]. Şekil 1.8'de CIE 1931 renk eşleştirme fonksiyonları verilmiştir.



Şekil 1. 8. CIE 1931 Renk eşleştirme fonksiyonları [28]

Bir ışık kaynağının rengi, ışık kaynağının spektral güç dağılımını, içerdiği her bir dalgaboyu için $\overline{x}(\lambda)$, $\overline{y}(\lambda)$ ve $\overline{z}(\lambda)$ renk eşleştirme fonksiyonlarının her biri ile çarparak matematiksel olarak gösterilebilir [31]. Spektral gücü $\Phi_\lambda(\lambda)$ ile verilen monokromatik (tek renkli) olmayan bir ışık kaynağı için, X, Y ve Z tristimulus değerleri Denklem (1.11), (1.12) ve (1.13) ile bulunabilir [27, 28].

$$X = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda)\overline{x}(\lambda)\, d\lambda \tag{1.12}$$

$$Y = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda)\overline{y}(\lambda)\, d\lambda \tag{1.13}$$

$$Z = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda)\overline{z}(\lambda)\, d\lambda \tag{1.14}$$

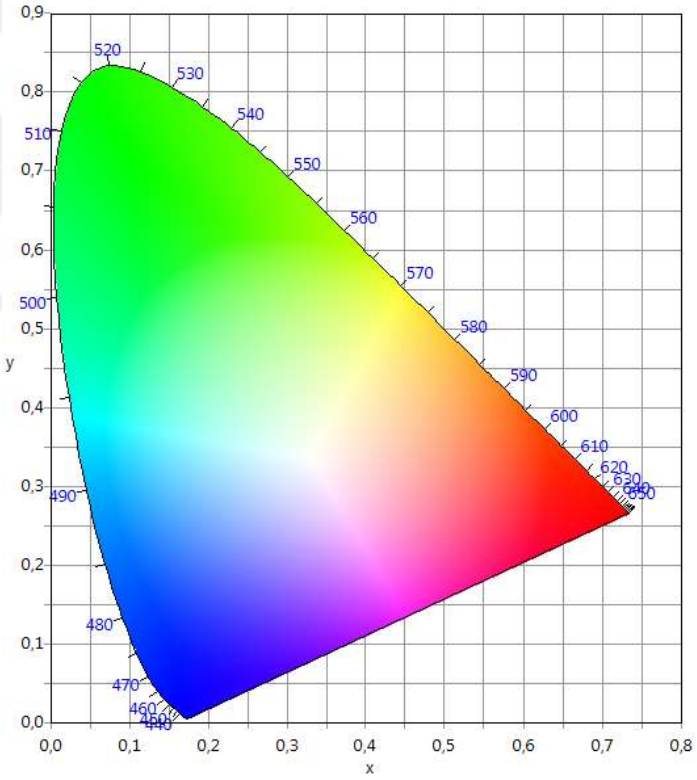
X, Y ve Z değerlerini elde ettikten sonra CIE renk koordinatları aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \tag{1.15}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \tag{1.16}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \tag{1.17}$$

x, y ve z değerleri CIE renk koordinatları (kromatiklik koordinatları) olarak bilinir. Bu büyüklüklerin toplamı, x+ y + z = 1 olduğundan, bir rengin kromatikliğini tanımlamak için yalnızca iki koordinat gerekir. Genel kabul olarak x ve y koordinatları kullanılır [31]. Şekil 1.9'da CIE 1931 renk diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. 9. CIE 1931 renk diyagramı

1.4.3. Otomotiv aydınlatmada beyaz ışığın tarifi

Bölüm 1.2'de belirtildiği gibi, otomotiv dış aydınlatma ürünleri için kullanılacak beyaz ışığın rengi ECE R-48, paragraf 2.29.1'de verilmiştir. CIE 1931 renk diyagramı üzerinde beyaz rengin aralığı şu şekilde tarif edilmiştir:

W_{12} yeşil sınırı: y = 0,150 + 0,640 x

W_{23} sarımsı yeşil sınırı: y = 0.440

W_{34} sarı sınırı: x = 0.500

W_{45} kırmızımsı mor sınırı: y = 0.382

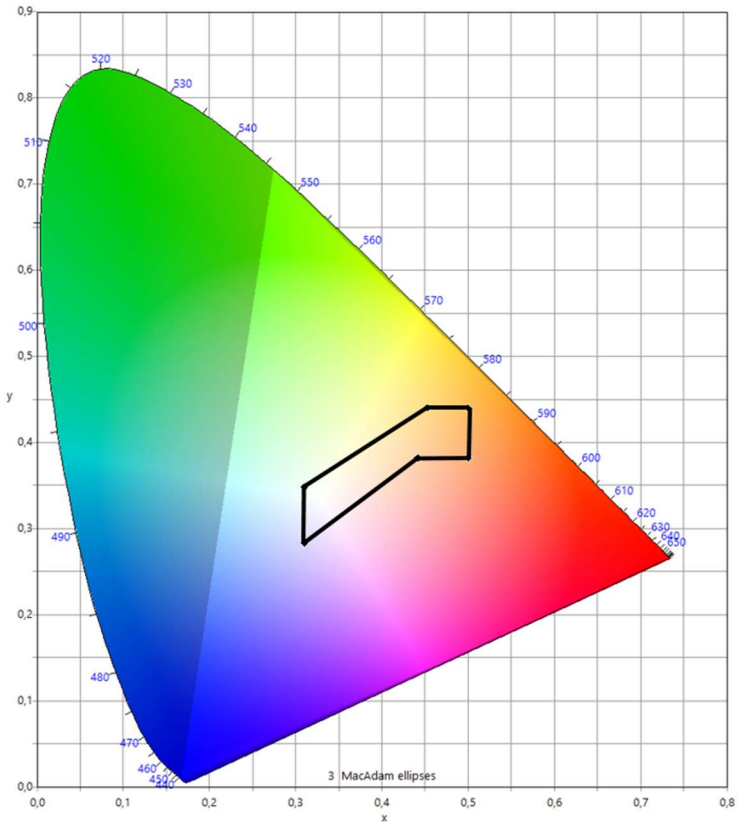
W_{56} mor sınırı: y = 0,050 + 0,750 x

W_{61} mavi sınırı: x = 0.310

Kesişim noktaları:

	x	y
W_1	0.310	0.348
W_2	0.453	0.440
W_3	0.500	0.440
W_4	0.500	0.382
W_5	0.443	0.382
W_6	0.310	0.283

Olarak belirlenmiştir [32]. Bu sınırlar arasında kalan bölge Şekil 1.10.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 10. CIE 1931 üzerinde ECE-R48 beyaz renk bölgesi

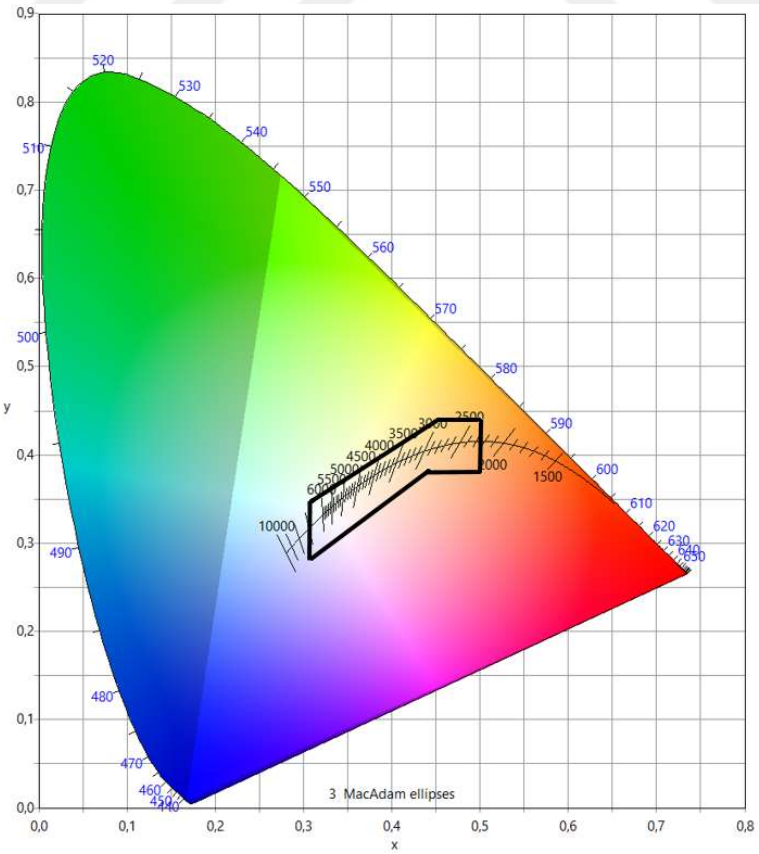
1.4.4. Korelasyonlu renk sıcaklığı (CCT)

Rengi tanımlamak için kullanılan bir başka özelliktir. “Renk sıcaklığı” olarak da isimlendirilir. Eldeki ışık kaynağının rengi, kara cisim ışımasının Kelvin (K) cinsinden sıcaklığı temel alınarak, bir akkor lambanın oluşturacağı ışığa kıyasla betimlenir [27]. Şekil 1.11’de korelasyonlu renk sıcaklığı örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 1. 11. Korelasyonlu renk sıcaklığı örnekleri

Kırmızıya yakın, yani aslında düşük Kelvin değerine sahip olan renkler sıcak (warm) renk, yüksek Kelvin değerine sahip olanlar ise soğuk (cool) renkler olarak tabir edilir. CIE 1931 renk diyagramında, Planck bölgesi (Planckian locus) Şekil 1.12’deki gibidir [27-29].



Şekil 1. 12. CIE 1931 üzerinde beyaz renk ve Planck bölgesi

1.5. Otomotiv Aydınlatmada Kullanılan Işık Kaynakları

Bu bölümde otomotiv aydınlatmada kullanılan ışık kaynakları incelenmiştir.

1.5.1. Ampuller

Otomotiv aydınlatmada kullanılan ampuller, kullanım amacına göre farklı özelliklere sahip modellerden oluşmaktadır. Fakat çalışma mekanizması olarak, bunları temel üç türde incelemek mümkündür.

1.5.1.1. Akkor ampuller

Otomotiv aydınlatmada kullanılan akkor ampuller, sıradan akkor ampuller gibi, cam bir kılıfın içerisine yerleştirilmiş bir filamandan oluşur. İlk ampullerde karbon, demir, osmiyum filamanlar kullanılmıştır. Zamanla, düşük buhar basıncı, yüksek erime noktası (3655 K) ve dayanıklılığı nedeniyle tungsten, bu malzemelerin yerini almıştır. Ampulün cam kılıfının içi vakumlanmış olabileceği gibi, modern tungsten filamanlı akkor ampullerin çoğunda, filamanın ömrünü uzatmak için, cam kılıfın içi gazla doldurulur. Doldurulan bu gaz genellikle argon – azot karışımıdır [33].

Tungsten filamanlı akkor ampullerin ışık üretme prensibi, kara cisim ışımasına benzetilebilir. Ampul üzerinden geçen akım sayesinde, ampul filamanı yüksek sıcaklıklara ulaşıp akkor hale gelir. Ulaştığı sıcaklığa bağlı olarak da ışıma yapar. Işınımın spektrumunun pik noktası, ampulün ısıtıldığı sıcaklığa bağlı olarak farklılık gösterir. Örneğin ampulden geçen akım yükseltilip filaman sıcaklığı arttırıldığında, yayılan ışığın renk spektrumu daha kısa dalgaboylarına doğru kayar.

Prensip itibarı ile aynı olsa da, uygulamada, ısıtılan birçok malzeme, Planck tarafından öngörülenden farklı oranlarda görünür bölgede enerji yaymaktadır. Örneğin, tungsten, Planck'ın formülü ile öngörülebilen enerjinin, üçte bir oranında daha fazlasını ışık olarak yayar [31, 34]. Akkor ampullerden elde edilen ışığın korelasyonlu renk sıcaklığı değeri yaklaşık olarak 2700 K civarındadır [21, 35]. Otomotiv aydınlatmada sıkça kullanılan akkor ampullerden örnek olarak W5W, W16W, W21W, P21W gösterilebilir [36].

Akkor ampuller, basit elektrik devreleri ile kullanılmaları ve nispeten kolay üretim teknikleri gerektirmelerinin yarattığı avantajlara sahiptir. Fakat bunun yanında; filamandan aşınan moleküllerin bir süre sonra ampul camına yapışarak kararma oluşturması, akkor ampullerin yüksek güç tüketmeleri ve yaptıkları ışımanın büyük kısmının görünür olmayan bölgede yer alması, gibi dezavantajlar taşımaktadır.

1.5.1.2. Halojen ampuller

Halojen ampuller sıradan akkor ampullerin geliştirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Akkor ampullerde olduğu gibi tungsten filaman içerirler. Temel farklılık, ampulün iç kısmında iyot, brom veya klor gibi halojen gaz bulunmasıdır. Ampul yanarken, filaman buharlaşma ile tungsten kaybetmeye başlar. Bu akkor lambalarda ampul ömrünün hızlı bir şekilde tükenmesine ve kararmaya sebep olurken halojen ampullerde, buharlaşan tungsten, halojen gaz ile birleşir. Ampul soğuduğunda, tungsten tekrar filaman üzerine yapışır. Bu geri dönüşüm, "halojen döngüsü" olarak bilinir ve ampulün ömrünü önemli ölçüde uzatır. Halojen ampuller, halojen döngüsünün devam edebilmesi için daha yüksek sıcaklıklarda çalışırlar ve daha küçük hacimli bir kılıf kısmına sahiptirler. Bu yüzden kılıf kısmı kuvars camdan imal edilmektedir. Filamanın daha yüksek sıcaklığa çıkması sayesinde, ampulden daha fazla miktarda ve daha beyaz ışık alınmaktadır [31, 33, 34, 37].

Halojen ampullerin renk sıcaklığı 2800 K – 3200K aralığına kadar ulaşabilmektedir. Otomotiv aydınlatmada kullanılan halojen ampullerden bazıları H1, H3, H7, H9, H11'dir. [21, 36, 38].

1.5.1.3. HID ampuller

HID (Yüksek Yoğunluklu Deşarj – High Intensity Discharge) ampuller, gaz deşarj lambalarının bir türüdür. Otomotiv aydınlatmada ilk olarak 1991 yılında kullanılmaya başlamıştır. Bu ampullerin çalışma prensibi, filamanlı ampullerde olduğu gibi bir cismin ışıyacak kadar ısınması değil, daha ziyade şimşek veya yıldırım oluşumuna benzetilebilir. HID ampuller, ampul içindeki küçük bir ark tüpünde, iki elektrot arasında, bir plazma veya iyonize gaz yoluyla elektriksel deşarj oluşmasıyla ışık üretir. Bu ark tüpü kuvars camdan oluşur ve içinde metalik tuzlardan ve ksenon (xenon)

gazından oluşan bir karışım içerir. Bu nedenle tüketiciler tarafından “ksenon lamba” olarak da adlandırılırlar. [31, 33, 39]

HID ampullerde ark oluşumunu sağlamak için başlangıçta 23kV’a varan yükseklikte bir ateşleme voltajı gerekir. Bu ilk ateşlemenin ardından metal tozları ve ksenon karışımı ısınır ve bir plazma oluşturur. Normal çalışma durumuna geldiğinde ampul 80V’da çalışacak şekilde dengelenir ve sonucunda doğal gün ışığına, akkor veya halojen ampullerden çok daha yakın, parlak beyaz bir ışık elde edilir. Ayrıca, akkor lambalarda veya halojen lambalarda ışımanın yalnızca %8 gibi bir oranı görünür bölge ışıması olarak yapılırken, HID ampullerde bu oran %28’e çıkmaktadır. Böylece daha yoğun bir ışık elde edilir. Elde edilen ışığın renk sıcaklığı 4150 K – 4300 K civarındadır. Şekil 1.13’de halojen bir ampulden elde edilen ışık ile HID ampulden elde edilen ışığın, yol üzerindeki ışık dağılımlarına ait fotoğraflar görülmektedir [33, 38, 39].



Şekil 1. 13. a) Halojen ampul ışık dağılımı b) HID ampul ışık dağılımı [38]

Otomotiv aydınlatmada kullanılan HID ampullere D1S, D2S, D1R ve D2R örnek olarak verilebilir [40].

HID ampuller, teknik üstünlüklerinin yanı sıra bir takım dezavantajlara da sahiptir. Örneğin, HID ampuller diğer ampullere kıyasla pahalıdır. Ayrıca, gerilim ve akımın çalışma aralığına uygun şekilde kontrol edilebilmesi için balast kullanılması şarttır. Bunun yanında kullanım ömrü bittiğinde kontrollü bir şekilde imhası gereklidir [21].

1.5.2. Işık yayan diyotlar (LED)

LED'ler, p-n eklemli diyotlardır. Elektrotlara uygun bir gerilim uygulandığında, yarı iletken içindeki elektronlar, elektron boşluklarıyla yeniden birleşerek, enerjiyi fotonlar şeklinde serbest bırakırlar. Bu olaya elektrolüminesans adı verilir.

Yarı iletken elektrolüminesans ile bir diyodun ışık yaydığı ilk kez 1907 yılında H.J. Round tarafından bildirilmiştir. İlk ışık yayan diyot (LED) ise Rus mucit O.V. Losev tarafından 1927'de keşfedilmiştir. 1940'larda ve 1950'lerde yarı iletken fiziğinin doğuşuna kadar, LED'ler konusunda önemli bir gelişme görülmemiştir. 1962'de N. Holonyak tarafından kırmızı ışık üretilmesi ve 1993 yılında S. Nakamura tarafından mavi LED'in keşfinin ardından, aydınlatmada yeni bir dönem başlamıştır [41].

Elektron ve elektron boşluklarının birleşmesi ile ortaya çıkan enerji, iletim bandı ve valans bandı arasındaki enerji farkına bağlıdır ve yarı iletken malzemenin türüne bağlı olarak değişiklik gösterir. Denklem 1. 18.'de gösterilen Planck–Einstein bağıntısı ile hesaplanabilir.

$$E= h \nu = E_g + k_B T \tag{1.18}$$

Burada E_g iletim bandı ve valans bandı arasındaki enerji farkı, k_B Boltzmann sabiti ve T, Kelvin cinsinden ortam sıcaklığıdır.

$$\nu = c/\lambda \tag{1.19}$$

Denklem 1.19 ifadesi Denklem 1.18'de yerine konularak, LED'in ürettiği ışığın rengi Denklem 1.20 ifadesi ile bulunabilir [42].

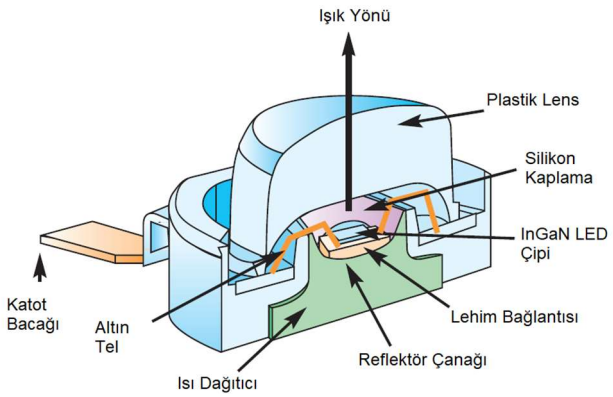
$$\lambda = h\, c \,/\, E_g + k_B T \tag{1.20}$$

Günümüzde farklı aydınlatma ihtiyaçlarına karşılık bulabilmek için farklı renkte üretilmiş LED'lere ihtiyaç vardır. Örneğin otomotiv aydınlatmada fren lambası, pozisyon lambası gibi fonksiyonlarda kırmızı, istikamet göstergesinde sarı renk LED'ler kullanılmaktadır. Tablo 1.3'de LED'lerde kullanılan bazı malzemeler ve ürettikleri ışığın renkleri verilmiştir.

Tablo 1. 3. LED malzemeleri ve ışıdıkları renkler [31]

MALZEMELER	**IŞIMA RENGİ**
Alüminyum galyum arsenit (AlGaAs)	Kırmızı ve kızılötesi
Alüminyum galyum fosfit (AlGaP)	Yeşil
Alüminyum galyum indiyum fosfit (AlGaInP)	Turuncu-kırmızı, turuncu, sarı ve yeşil
Galyum arsenit fosfat (GaAsP)	Kırmızı, turuncu-kırmızı, turuncu ve sarı
Galyum fosfit (GaP)	Kırmızı, sarı ve yeşil
Galyum nitrat (GaN)	Yeşil ve mavi
İndiyum galyum nitrat (InGaN)	Yakın ultraviyole, mavimsi-yeşil ve mavi
Çinko selenit (ZnSe)	Mavi
Alüminyum galyum nitrat (AlGaN)	Uzak morötesi
Pırlanta (C)	Morötesi

Beyaz ışık yayan LED'ler ise, birkaç yöntemle oluşturulabilmektir. Bunlardan birisi, kırmızı, yeşil ve mavi çiplerin birleştirilmesi ile oluşturulabilir. Bunun yanında, morötesi ışıma yapan LED çipinin, kırmızı, yeşil ve mavi yayan bir fosfor tabakasıyla kaplanmasıyla beyaz ışık elde edilebilir. Kolay üretilebilir ve ucuz bir yöntem olması sebebi ile LED'lerde beyaz ışık üretimi genellikle yüksek parlaklığa sahip InGaN mavi LED'lerin, YAG tabanlı bir fosfor tabakasıyla kaplanmasıyla oluşturulur. Burada, yüksek enerjili fotonlar, fosfor içindeki atomlar tarafından soğurulur ve daha düşük frekansta yeni fotonlar yayılır. Bu olaya floresans adı verilir. Tüm görünür spektrumu kapsayan dalgaboylarında foton açığa çıkaran bu mekanizmadan çıkan ışık ile mavi LED ışığının birleşmesi sonucu beyaz ışık oluşur [31]. Şekil 1.14'de bir LED'in yapısını gösteren çizim verilmiştir.

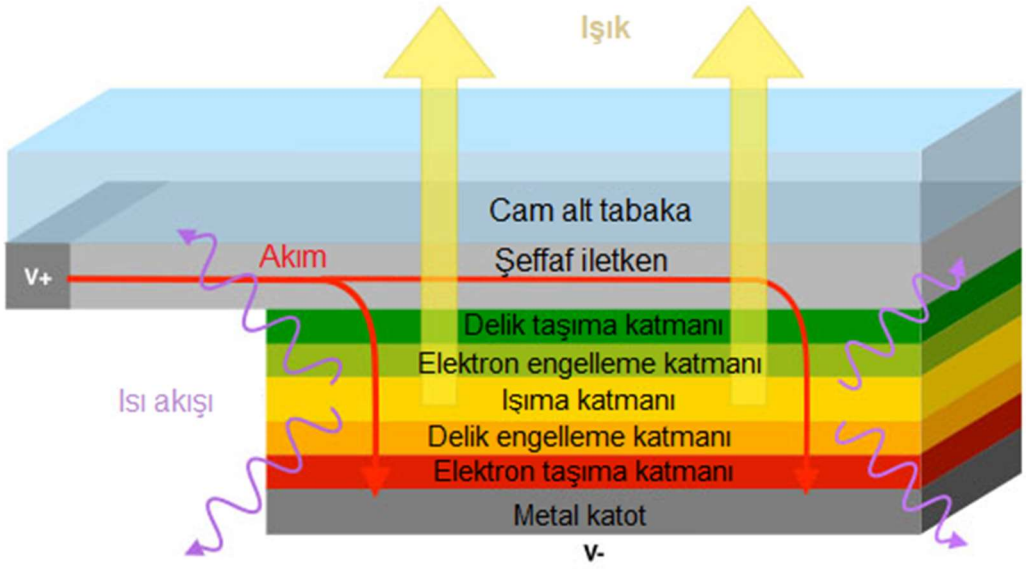


Şekil 1. 14. Bir LED'in yapısı [31]

LED’ler, 90’ların ikinci yarısından beridir otomotiv aydınlatmada kullanılmaktadır. Geçen her yıl, bu sektör içindeki ağırlığı da artmaktadır. LED teknolojisinin 2000’lerde yaşanan hızlı gelişimine paralel olarak, günümüzde hem yol aydınlatma hem de sinyalizasyon fonksiyonları (stop lambası, pozisyon lambası, istikamet göstergeleri, geri sis lambaları, v.b.) için ışık kaynağı olarak LED’ler kullanılabilmektedir. Günümüzde sadece LED’ler kullanılarak, bir araç için gerekli tüm aydınlatma fonksiyonları regülasyonlara uygun bir şekilde sağlanabilmektedir.

1.5.3. Organik LED’ler

OLED'ler, ışık yayan katmanın iki elektrot arasına sıkıştırılmış organik bileşenlerden oluştuğu LED'lerdir. Elektrik akımını organik bir ışıyıcı yoluyla ışığa dönüştürerek çalışırlar [43]. OLED cihazlarda, organik tabakalar, Şekil 1.15'de gösterildiği gibi, iki elektrot, bir anot ve bir katot arasına sıkıştırılmıştır. Organik katmanlar genellikle her katmanın kendine özgü bir rol oynadığı çoklu katmanlardan oluşur. OLED’e voltaj uygulandığında, elektrotlardan organik tabakalara yük taşıyıcılar hareket etmeye başlar. Anottan delikler (pozitif yük) ve katottan elektronlar (negatif yük) ışıma katmanına taşınır ve yeniden birleştirilir. Işıma alanındaki organik malzemeler, delik ve elektronların tekrar birleşmesiyle uyarılır. Organik malzeme, uyarılmış durumdan temel duruma geri dönerken ışıma meydana gelir [44].



Şekil 1. 15. OLED’in yapısı [43]

Organik maddelerden elde edilen ışıma ilk olarak 1953 yılında Bernanose ve arkadaşları tarafından akridin turuncusu katkılanmış bir selüloz filmde keşfedilmiştir. Bundan on yıl sonra, 1963'te Pope ve arkadaşları, organik antrasen kristalinin, yüksek elektrik alan altında, taşıyıcı enjeksiyonu sebebiyle ışıma yaptığını bildirmiştir. Fakat erken dönem çalışmalarında, OLED'lerden elde edilen ışığın parlaklığının ve veriminin düşük olması sebebiyle, bu alandaki çalışmaların genelde teorik alanda kalmasına ve pratik uygulamalara dönüşememesine neden olmuştur. 1987'de Eastman Kodak'tan C. W. Tang ve S.A. VanSlyke tarafından anot ve katot arasında sıkışmış iki ince organik tabaka ile yüksek parlaklıkta ışık elde edilmesi, OLED'lere yalnız bilim camiasından değil, endüstriden de büyük bir ilgi başlamasına yol açmıştır [44]. Otomotiv aydınlatmada OLED kullanımı 2013'den itibaren önce konsept araçlarda kendini göstermiştir. 2016 yılında AUDI TT RS ile seri üretimdeki araçlarda da kullanılmaya başlayan OLED'ler, günümüzde araç üreticilerinin yüksek sınıf araçlarında kullanmayı tercih ettikleri bir teknoloji konumundadır. Şekil 1.16'da bazı otomobil üreticilerinin OLED teknolojisini kullandıkları arka lambaları gösterilmiştir.



Şekil 1. 16. OLED lambalar: a) Audi, b) BMW c) Mercedes-Benz

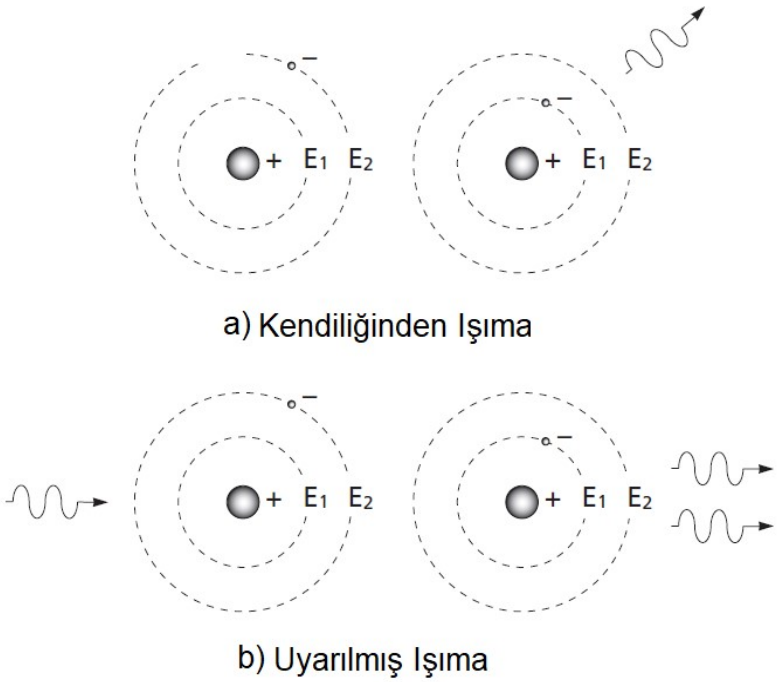
Şuan için, otomotiv aydınlatmada OLED'ler yalnızca pozisyon lambası olarak kullanılabilmektedir. Sinyal lambası, stop lambası gibi daha yüksek ışık şiddeti gerektiren fonksiyonlar için duyurulan çalışmalar olmakla birlikte henüz bir ürün tanıtılmamıştır.

1.5.4. Lazer lambalar

Lazer, günümüzde herkesçe bilinen ve sıklıkla kullanılan bir kelime haline gelmiştir. İngilizce "uyarılmış radyasyon ışıması ile ışık güçlendirme (light amplification by stimulated emission of radiation)" tanımının baş harfleri alınarak oluşturulan bu kısaltma aslında, mikrodalgalar için kullanılan öncülü ile benzer prensiplerle çalışan,

tek renkli, koherent ışık kaynaklarını tanımlamaktadır [45]. 1959 yılında Gordon Gould, çalışmasında ilk kez "lazer" kısaltmasını kullanmıştır [80].

Lazeri, ışık kaynakları içinde eşsiz yapan, uyarılmış ışıma adı verilen çalışma mekanizmasıdır. Genel olarak, bir elektron uyarılmış bir enerji durumundaysa, foton ışıması yaparak, daha düşük bir seviyeye bozunur. Bu olaya "kendiliğinden ışıma" adı verilir. Buradan çıkan foton, rastgele bir yönde ve rastgele bir fazda yayılır. Fakat E_2 uyarılmış enerji durumundaki bir elektron, bozunup E_1 enerji seviyesine düşmeden önce, enerjisi yaklaşık olarak E_2-E_1 olan bir foton ile uyarılması durumunda, elektronun, bu fotonla aynı dalgaboyunda, aynı yönde ve aynı fazda bir foton daha yayarak E_1 enerji seviyesine düşme olasılığı bulunmaktadır. Bu olaya "uyarılmış ışıma" denir [42, 81]. Lazer ışığının eşsiz görünümünün ardında yatan süreç budur. Şekil 1.17'de kendiliğinden ışıma ve uyarılmış ışıma betimlenmiştir.



Şekil 1. 17. a) Kendiliğinden ışıma b) Uyarılmış ışıma [81]

Günümüzde, birbirinden çok farklı amaçlar için kullanılan, pek çok farklı lazer türü bulunmaktadır. Bunlar içinde ticari olarak en kolay ulaşılanı ve en yaygın olanı lazer diyotlardır. Barkod okuyucudan, CD yazıcıya kadar, hemen her yerde lazer diyotlarla karşılaşılması mümkündür.

Lazer diyotlar yapısal olarak p-n eklemli diyotlardır. Uygun gerilim altında yük taşıyıcı elektronlar ve boşluklar, yayılım bölgesine (depletion region) doğru hareket ederler. Diğer lazerlerde olduğu gibi, kazanç bölgesi bir lazer oluşturmak için kavite ile çevrilidir. Kristal yüzeyi üzerinde, ışığın dar bir çizgiye sınırlandırılması için bir optik dalga kılavuzu oluşturulur. Kristalin iki ucu birbirine paralel şekilde kesilerek rezonatör oluşturulur. Dalga kılavuzundaki fotonlar bu kenarlardan ileri ve geri yansıyarak lazer ışığını oluşturur. Kazanç, eşik değeri aştığında lazer ışımaya başlar [34, 42, 82, 83].

Lazer diyotların, beyaz ışık elde etmek için fosfor uyarıcı kaynak olarak kullanımı görece yeni bir uygulamadır. Fakat ilerleyen dönemde sıklıkla başvurulacak bir çözüm olacağı izlenimi yaratmaktadır. Zira LED'lerin tüm avantajlarına rağmen, yüksek sürme akımlarında gözlenen "verim düşüşü (efficiency droop)", önümüzdeki yıllarda LED performanslarındaki gelişimin, yavaşlayarak bir tür platoya gireceğinin sinyallerini vermektedir. Bu etkiye lazer diyotlarda rastlanmaması sebebiyle, fosfor sürme kaynağı olarak, gelecek vadeden bir adaydır [83]. Lazer ile sürülen fosfordan beyaz ışık üretimi, LED'lerde beyaz ışık üretimiyle aynı prensiplere dayanan, fakat lazer diyot ve fosforun birbirinden ayrı konumlandırılması sebebiyle, ısıl açıdan da avantaj sağlayan bir yöntemdir. Otomotiv aydınlatmada ilk uygulamaları 2014 ve 2015 yıllarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.20'de otomotiv aydınlatmada kullanılan ilk lazer-fosfor dönüşümlü lambalar verilmiştir.



Şekil 1. 18. a) BMW lazer far b) Audi lazer far

1.6. Literatür Özeti

1.6.1. Lazer ile sürülen fosfordan beyaz ışık üretimi

Literatür incelendiğinde, lazerle sürülen fosfor ile beyaz ışık üretimi konusundaki çalışmaların, 2000'lerin başında ortaya çıktığı, zamanla bu konudaki çalışmaların arttığı ve farklı uygulama alanlarında da denemelerin yapıldığı görülmektedir.

LD (lazer diyot) kullanarak ilk fosfor dönüşümlü beyaz ışık, Nichia firmasından Y. Narukawa ve arkadaşları tarafından 2002 yılında oluşturulmuştur. Küçük bir aydınlatma yüzeyine sahip olması sebebiyle "Micro White" olarak isimlendirilmiştir [46, 49].

2008 yılında Y.Xu ve ark., yakın UV (n-UV) LD ile birlikte sarı ve mavi yayan fosfor kullanarak 80 mA akımda, 5,7 lm ışık akısı, 5225 K renk sıcaklığı ve 13 lm/W ışık verimliliği ile beyaz ışık elde etmişlerdir. 2009 yılında yine aynı grup, n-UV lazer diyot ve RGB fosfor kullanarak 3,6 lm ışık akısı, 5393 K renk sıcaklığı, 8,3 lm/W ışık verimliliği değerlerini yakaladıklarını rapor etmişlerdir [47, 48].

2010 yılında H.Y. Ryu ve ark., 445 nm dalgaboyuna sahip InGaN mavi LD ve mavi ışık ile uyarıldığında sarı ışık yayan fosfor kombinasyonu ile, LD'yi 100 mA'de sürerek 5 lm ışık akısı, 10 lm/W ışık verimliliğine sahip beyaz ışık elde etmişlerdir. Ayrıca, sürme akımı 40 mA ile 80 mA aralığındayken CIE (x,y) renk koordinatlarının 0.35 - 0.36 aralığında, renk sıcaklığı değerinin 4200 K – 4300 K aralığında olduğunu tespit etmişlerdir [49].

2013 yılında K. A. Denault ve ark., RGB fosfor ve 450 mA ile sürdükleri n-UV (402 nm) LD ile 47 lm ışık akısı, 3600 K renk sıcaklığı, 16 lm/W ışık verimliliği ve 47 renk oluşturma endeksine sahip beyaz ışık elde etmişlerdir. Aynı grup, 750 mA akım ile çalıştırdıkları mavi (442 nm) LD ve YAG:Ce sarı yayan fosfor kombinasyonu ile 252 lm ışık akısı, 4400 K renk sıcaklığı, 76 lm/W ışık verimliliği ve 57 renk oluşturma endeksi rapor etmişlerdir [50].

2014 yılında G. Ledru ve ark., farklı fosfor türlerini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 1,6 mm kalınlığında, kendi ürettikleri iki tür fosfordan birincisini Yeşil YAG + %10 Nitrat, ikincisini %3 YAG olarak rapor etmişlerdir. 900

mA akım ile sürdükleri 450 nm mavi LD ile uyardıkları birinci fosfor tabakasından, CIE 1931 (x,y) renk koordinatları (0.387, 0.383) ve renk sıcaklığı 3887 K olan, 88 renk oluşturma endeksine sahip beyaz ışık elde etmişlerdir. İkinci fosfor tabakasından elde ettikleri ışığın renk koordinatları (0.230, 0.157), renk sıcaklığı 2700 K ve renk oluşturma endeksi 45'dir. Bunun yanında, PhosphorTech firmasından temin ettikleri 0,4 mm kalınlığındaki fosfor tabakasını, termal etkileri düşürmek için iki kuvars tabaka arasına yerleştirmişlerdir. Aynı LD parametrelerini kullanarak, renk koordinatları (0.387, 0.383) ve renk sıcaklığı 4113 K olan, 94 renk oluşturma endeksine sahip ışık elde etmişlerdir. Yine, ticari olarak ulaşılabilir, kubbe şeklinde, 3 mm kalınlığında Intematix fosfor ile renk koordinatları (0.440, 0.403) ve renk sıcaklığı 2930 K olan, 89 renk oluşturma endeksine sahip ışık elde ettiklerini bildirmişlerdir. Fosfor tabakasının doygunluğa ulaşmadan, yüksek güçlü LD ile sürülebilmesi için, en az 1 mm kalınlıkta olması gerektiğini öngörmüşlerdir [46].

2015 yılında M. Cantore ve ark., yüksek güçlü, mavi (442 nm) LD ile Marketech International firmasından tedarik ettikleri 2 mm kalınlıktaki seryum katkılı itriyum alüminyum garnet (YAG:Ce) fosfor tabakasını uyararak, 1,4 A sürme akımında, 515,4 lm ışık akısı, 86,7 lm/W ışık verimliliği; 3 A sürme akımında 75,6 lm/W ışık verimliliği ve 7300 K renk sıcaklığında, 1100 lm gibi, oldukça yüksek bir ışık akısı elde etmişlerdir [51].

Yine 2015 yılında, D. H. Lee ve ark., lazerle sürülen fosfor tabakası ile beyaz ışık üretiminde, fosfor parçacıklarının boyutunu ve fosforun yüzey topografyasını dikkate alan bir bilgisayar modellemesi üzerine çalışmışlardır. İlk olarak, mavi bir lazer diyot ve kolimatör lens, lazer diyotun özellikleri dikkate alınarak modellenmiştir. Ardından, profilometre ile ölçülen gerçek bir YAG fosfor yüzeyi de, bir yakınsama ile LightTools programına aktarılmıştır. LightTools programında Monte Carlo metodu ile yapılan simülasyon sonucu elde edilen ortalama renk koordinatları CIE (x,y): (0.299, 0.302) ve gerçek ölçüm değerleri (0.306, 0.318) şeklinde bildirilmiştir. Ek olarak, simülasyon ve ölçümün renk sıcaklığı değerlerini 7729 K ve 7373 K, renk oluşturma endekslerini de sırasıyla 58,76 ve 61,46 olarak rapor etmişlerdir [52].

2016 yılında Y.H. Song ve ark., otomotiv uygulamaları için seramik malzeme ile karıştırılmış $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ (YAG:Ce) nano parçacıklardan fosfor tabakası

sentezlemişlerdir. Bunun yanında yine YAG:Ce malzemeden, kalıp halinde bir fosfor tabakası örneği üretmişlerdir. Bu iki tabakayı da 445 nm dalga boyunda mavi lazer diyot ile uyardıkları bir çalışma gerçekleştirmişleridir. Özellikle, nano parçacıklardan oluşturulan fosfor tabakasının hem termal açıdan hem de ışık verimliliği açısından daha üstün bir performans sergilediğini rapor etmişlerdir. Çalışmada, Ce^{3+} oranını %0.1 mol, %0.5 mol ve %1 mol olarak farklı oranlarda denemişler ve %0.5 mol oranına sahip fosfor tabakasından 1424 lm ışık akısı, 218 lm/W ışık verimliliği, 5994 K renk sıcaklığı ve 62 renk oluşturma endeksine sahip beyaz ışık elde ettiklerini açıklamışlardır [53].

2016 yılında, George A. F. ve ark., mor lazer diyottan elde edilen ışıkla sürülen, evropiyum içeren nadir toprak fosfor karışımından yapılan trikromatik (kırmızı, yeşil ve mavi yayan) bir fosfor kullanarak, ev/ofis tipi armatürün tasarımını ve yapımını açıklayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada MR40 tipi tungsten halojen lambanın ebatları ve fiziksel formu baz alınmıştır. Lamba için parabolik reflektör önce 2B'lu taslak olarak tasarlanmış, ardından SolidEdge programı ile üç boyutlu hale getirilmiştir. Ardından bu tasarım 3B yazıcı ile sert polimer malzemeden üretilmiş, iç yüzeyi gümüş kaplanarak yansıtıcı hale getirilmiştir. 404 nm pik dalgaboyuna sahip mor lazer, tasarlanan reflektörün dar ucuna oturtulmuştur. Reflektörün geniş ucuna ise, 25 mm çapında, 2 mm kalınlığında borosilikat levha üzerine kaplanmış fosfor tabakası yerleştirilmiştir. Lamba 320 mW'da çalıştırılıyorken ürettikleri beyaz ışığın CIE 1931 renk koordinatlarını (0.3305, 0.3359) olarak, renk sıcaklığını da 5586 K olarak rapor etmişleridir. Ayrıca, lazerin çıkış gücünün azaltılmasıyla, tabaka içinde yer alan kırmızı yayan fosforun yeteri kadar uyarılmaması sebebiyle, elde edilen ışığın yeşil bölgeye doğru kaydığını ve güç arttırıldığında tekrar x=0.333, y=0.333 bölgesi civarına geri döndüğünü rapor etmişlerdir [54].

2017 yılında O.R. Abdullaev ve ark., 445 nm dalgaboyunda mavi lazer ve üç farklı üreticilerden tedarik ettikleri ticari YAG:Ce^{+3} fosfor maddelerini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişleridir. Çalışmada FLZh-7-560, SDL-4000 ve SDL-3500 kodlu fosforlar, her biri için sırasıyla 0,6 mm, 1 mm ve 1,4 mm kalınlıklarında tabakalar halinde, kubbe şeklinde şeffaf bir cam üzerine kaplanmıştır. Mavi lazerden elde edilen ışık, fiber optik kablo aracılığıyla cam kubbenin iç kısmına iletilmiştir. Camın dış kısmında bulunan fosforu uyaran mavi ışık ve fosfordan elde edilen ışığın CIE 1931

renk koordinatları ve renk sıcaklığı değerleri MK-350 spektrometre ile ölçülmüş ve elde edilen değerler, yukarıda verilen fosfor tipi ve kalınlıklara göre sırasıyla şu şekilde verilmiştir: Örnek 1; (0.2801, 0.2773), 7732 K, örnek 2; (0.3115, 0.3302), 7000 K, örnek 3; (0.4254, 0.5105), 3572 K, örnek 4; (0.2899, 0.2812), 7352 K, örnek 5; (0.3303, 0.3487), 5595 K, örnek 6; (0.4075, 0.4751), 3950 K, örnek 7; (0.2925, 0.2875), 7202 K, örnek 8; (0.3415, 0.3575), 4172 K ve örnek 9; (0.3954 0.4495), 3874 K. Çalışmada verilen bu renk değerleri incelendiğinde, örnek 2, 5 ve 8 haricindeki örneklerin, beyaz bölgenin dışında kaldığı görülmektedir. Çalışmada TKA-KK1 entegre küre ile yapılan ölçümler sonucu tespit edilen en uygun ışık verimliliği 165 lm/W'dir. Bu koşulda ölçülen CIE renk koordinatları x=0.3303, y=0.3487 olarak, renk sıcaklığı 5595 K ve renk oluşturma endeksi ise 66 olarak verilmiştir [55].

Yang, Y. ve ark., 2017 yılında fosfor tabakasının uzakta konumlandırarak değil, LD üzerine kaplanarak kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, LD ile sürülen fosfor ile "etendue" sınırlı uygulamalarda kullanılmaya uygun bir ışık kaynağı oluşturulması amaçlanmıştır. 455 nm dominant dalgaboyuna sahip mavi lazerin çipi, TO-9 paketinden ayrılarak, bakır bir çubuğun yan yüzeyine yapıştırılmıştır. Bakır çubuğun üst kısmına, safir üstüne kaplanmış YAG:Ce fosfor tabakası, gümüş tutkalla lazer yayıcı yüzeyi kapsayacak şekilde yapıştırılmıştır. Böylece fosfor kaplamadan üretilen ısı, safir baz ve gümüş yapıştırıcıdan aktarılıp bakır çubuk üzerinden dağıtılarak ısıl kararlılık sağlanmıştır. Kırılma indisleri farkı yüksek ince filmler üst üste konumlandırılarak fosforun üst yüzeyine kaplanmıştır. Bu sayede, fosfordan izotropik olarak yayılan ışığın, bu filtre mekanizması sayesinde lazer ışığı ile birleşip, mümkün olduğunca yukarı yayılması sağlanmıştır. Everfine marka entegre küre ve Maya 2000 Pro spektrometre ile alınan ölçümlere göre, çalışmada 3 A sürme akımı ile 850 lm ışık akısına sahip 6990 K renk sıcaklığında ışık elde edilmiştir. Işığın farklı ölçüm açılarındaki CIE 1931 renk koordinatları ise şu şekilde verilmiştir: 0° için (0.312, 0.343), 10° için (0.313, 0.347), 20° için (0.313, 0.349), 30° için (0.314, 0.352), 40° için (0.316, 0.354), 50° için (0.317, 0.354), 60° için (0.319, 0.355), 70° için (0.320, 0.357). Çalışma sonuçlarına göre, LD ile sürülen fosfor uygulamasının yalnızca "uzak fosfor (remote phosphor)" için değil, günümüz pc-LED (fosfor dönüşümlü LED)'lerde uygulandığı gibi, çip üzerinin fosfor ile kaplanmasıyla da kullanılabileceği ve bunun

küçük çıkış açısına sahip ışık kaynaklarına ihtiyaç duyan uygulamalar için kullanılabilir bir çözüm olabileceği ortaya konulmuştur [56].

2017 yılında N. Trivellin ve ark., makalelerinde, lazer aydınlatma için kendi hazırladıkları YAG:Ce^{+3} fosfor tabakaları ile yaptıkları çalışmayı aktarmışlardır. Makalede, lazer aydınlatma için üç farklı yaklaşım arasında bir karşılaştırma sunmuşlardır. Kullandıkları birinci yöntem, geçirgen (transmissive) yöntem olarak adlandırılmıştır. 450 nm dalgaboyunda ışık yayan LD'den elde edilen ışın, toplayıcı lens ile fosfor tabakası üzerine direkt olarak düşürülmüş ve üretilen beyaz ışık ikinci bir lens yardımıyla hedefe yönlendirilmiştir. Bu yöntem ile LD 500 mA sürme akımında çalıştırılarak, 8429 K renk sıcaklığında, CIE 1931 renk koordinatları (0.3023, 0.2711) olan, 75 renk oluşturma endeksinde, 6 lm/W ışık verimliliğine sahip beyaz ışık elde etmişlerdir. İkinci yöntemi, yansıtıcı 1 (reflective 1) olarak adlandırmışlardır. Yine LD 500 mA sürme akımında çalıştırılmıştır. Fakat bu yöntemde fosfor, gelen lazer ışığının eksenine eğimli bir şekilde konumlandırılan bir ayna üzerine yerleştirilmiştir. Lazer ışını fosfor tabakasını hem geliş yüzeyinden hem de aynadan yansıyarak arka yüzeyinden uyarmaktadır. Oluşan beyaz ışık da ayna yüzeyine dik doğrultuda yansıyarak, iki mercek ve bir difüzör yardımıyla hedefe yönlendirilmektedir. Elde edilen ışığın renk özellikleri şu şekilde verilmiştir: CIE 1931 renk koordinatları, x=0.376, y=0.463, renk sıcaklığı ise 4553 K'dir. Bu yöntemin ışık verimliliği ise 12 lm/W olarak rapor edilmiştir. Üçüncü yöntem, yansıtıcı 2 (reflective 2) olarak adlandırılmıştır. 500 mA sürme akımında LD'den elde edilen ışık, ortası kesilmiş bir parabolik reflektörün odak noktasında bulunan ve gelen ışığın eksenine dik konumlandırılmış bir ayna üzerindeki fosfor tabakasını uyararak beyaz ışık üretmektedir. Aynadan yansıyan beyaz ışık, parabolik reflektörden ikincil yansımaya uğrayarak hedefe yönlendirilmektedir. Işığın CIE 1931 renk koordinatları, x=0.379, y=0.466, renk sıcaklığı ise 4495 K'dir. Bu yöntemin ışık verimliliği ise 18,7 lm/W olarak rapor edilmiştir. Ölçümler Labsphere LMS-650 entegre küre ve ona bağlı USB4000 CCD spektrometre ile yapılmıştır. Çalışmada değerlendirilen üç yöntem içinde, parabolik reflektör ile tasarlanan düzeneğin, en verimli yöntem olduğu görülebilmektedir [57].

Otomotiv sektöründe, lazer-fosfor temelli lambalar ilk kez 2013 - 2014 yıllarında konsept arabalarda kullanılmasına rağmen, literatürde bu konuya dair oldukça kısıtlı

bilgiye ulaşılabilmiştir. Yeni gelişmekte olan bu teknolojinin, ticari sır niteliği taşıdığı düşünüldüğünde, otomotiv firmalarının yaptıkları çalışmaların detaylarını açıklamamaları son derece anlaşılır bulunmaktadır.

Ürüne dönüştürülen LD – fosfor temelli lambalarının ilklerinden biri BMW i8 konsept aracında kullanılmıştır. Bu lambada kullanılan LD, 440 nm ile 460 nm aralığında ışık yaymaktadır. Bu mavi ışık YAG:Ce^{+3} fosfor üzerine düşürülerek elde edilen sarı ağırlıklı ışık ile birleşip beyaz ışığı oluşturmaktadır. Hanafi ve ark. BMW i8 konsept aracında kullandıkları lazer temelli farın, 741 lm ışık akısına sahip olduğunu ve yolu 344 lx değerinde, 600 m mesafeye kadar aydınlatabildiğini açıklamışlardır [58 – 61].

Audi firması da 2014 yılında "Consumer Electronics Show" (CES) etkinliğinde, konsept aracında uyguladığı ilk lazer farları tanıtmıştır. R8 modelinde de kullandığı lazer farlar 450 nm dalgaboyunda ışık yayan mavi LD ile uyarılan fosfor ile elde edilen 5500 K renk sıcaklığında beyaz ışık üretmektedir [62, 63].

Mercedes-Benz firması da 2013 yılında "Shanghai Auto Show" etkinliğinde, farlarında lazer kullandığı konsept aracı "GLA compact" modelini tanıtmıştır. Rakiplerinden farklı olarak, kullanılan lazer far ev veya ofislerde kullanılan projektör sistemlerindeki yapıya benzemektedir. Bu özelliğiyle, aracın sistemine yüklenen fotoğraf ve videolar, aracın farları vasıtasıyla yere veya bir duvara yansıtılarak, bir sinema gibi kullanılabilmektedir [64, 65].

İncelenen çalışmalarda, n-UV yada mavi lazer diyot ve birbirinden farklı içeriklere sahip fosfor tabakaları kullanıldığı ve ölçümlerin genellikle entegre küre ile yapıldığı görülmüştür. Entegre küreler, ışığı küre içinde saçılmaya uğratarak ölçtüğü için, ışık şiddetinin uzaydaki dağılımı ve ışık renginin açıya bağlı değişimi konusunda kısıtlı bilgi sağlamaktadır. Bu tez çalışmasının, lazer ile sürülen fosfor tabakasından elde edilen beyaz ışığın, renk özelliklerinin ve ışık şiddetinin açıya bağlı değişimi konusunda literatürdeki mevcut boşluğu da doldurması hedeflenmektedir.

1.6.2. Otomotiv aydınlatmada bilgisayar destekli optik tasarım

Yüz yıldan daha uzun bir süre önce, otomotiv gelişiminin başlangıcında, motorlu araçların mucitleri, tasarımlarını küçük bir uzmanlar grubu desteğiyle, basit

atölyelerde inşa etmekteydiler. Geliştirme süreçleri temel olarak, oluşturdukları donanımları test ettikleri işlemlere dayanmaktaydı. 1980'lerin ortalarına kadar otomotiv geliştirme süreçleri büyük ölçüde, prototip bazlı optimizasyon döngüleri ile yürütülmekteydi. Bilgisayar destekli hesaplama yöntemleri sadece belirli alanlarda uygulanmaktaydı. Örneğin, 1970'lerin sonunda bilgisayar destekli ilk çalışmalar, iki boyutlu çizim sistemlerinde uygulanmaya başlamıştı. 1980'lerin ortasında, bilgisayar destekli tasarım ve simülasyon yöntemleri, daha önce donanım tabanlı geliştirme yoluyla yapılan mühendislik görevlerini devralmaya başlamıştır [66].

Optik tasarım çalışmalarında önceleri elektromekanik hesaplayıcılar yardımıyla yapılan hesaplar, dijital bilgisayarların ortaya çıkışıyla daha karmaşık tasarımların ve daha isabetli analizlerin yapılmasına imkan sağlamıştır. Örneğin 1944 model Harvard Mark 1 bilgisayarı, bir ışık ışınının herhangi bir yüzey ile etkileşimini 120 saniyede hesap etmekteydi. 1952'de Harvard Mark 4'de bu süre, her bir ışın için yüzey başına 1 saniyeye düşmüştür. Bu yıllarda, bilgisayar destekli optik tasarım, günümüzdeki gibi ışın izleme prensibine dayanmaktaydı. Uygulama alanı ise genel olarak lens tasarımıydı. 1960'larda bu yazılımlar FORTRAN'da oluşturulmaya başlamıştır. 1970'lerde, ACCOS V ve CODE V gibi mevcut tasarım programlarının ilk sürümleri geliştirilmiştir [67, 68]. Günümüzden on beş, yirmi yıl önce optik tasarım programlarıyla yüzey başına saniyede 2000 – 3000 arasında ışın izlenebilirken, günümüzde standart bir bilgisayar ile yüzey başına saniyede 93 milyon ışın izlenebilmektedir [69]. Bu gelişmeler sayesinde karmaşık otomotiv aydınlatma gereçlerinin tasarımı, günümüzde kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Aşağıda, konuyla ilgili yapılmış çalışmalardan örnekler derlenmiştir.

1996 yılında D.R. Jenkins ve ark., HID ışık kaynağından elde edilen ışığı, fiber optik aracılığı ile dağıtıcı optik bileşenlere taşıyan bir far tasarımı çalışması gerçekleştirmişlerdir. Fiber optik boru ile gelen ışığı, projektör tipi lens aracılığıyla yasal gerekliliklere uygun şekilde yönlendirmişlerdir. Bu tasarımı bilgisayar desteğiyle gerçekleştirmişler ve prototip ile doğrulamışlardır. Çalışmada, hem tasarlanan farın hem de karşılaştırma yapmak amacıyla tungsten-halojen kompozit bir farın, yol aydınlatma simülasyonları bilgisayar ile elde edilmiştir [70].

2005 yılında V. P. Kumar ve ark., bilgisayar desteğiyle otomobil farında kullanılabilecek bir reflektör tasarladıkları çalışmalarını yayınlamışlardır. Çalışmada, otomobil farları için regülasyonlarla belirlenen ışık şiddeti dağılımı hedef olarak belirlenmiştir. Noktasal ışık kaynağından gelen ışınları hedefe uygun dağıtacak biçimde MATLAB ile paraboloidal bir reflektör yapısı oluşturulmuştur. MATLAB'da oluşturulan nokta bulutu, CATIA tasarım programına aktarılarak reflektörün üç boyutlu formu, bu nokta bulutuna oturtularak oluşturulmuştur [71].

2006 yılında Cvetkovic ve ark., LED'lerin üst yüzeyine yapıştırılarak Fresnel yansımalarını minimize eden ve farklı LED'lerden gelen ışığı serbest-biçimli tek bir lens aracılığıyla birleştirip, yine serbest-biçimli bir reflektör ile hedefe gönderen far tasarımını bilgisayar yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları tasarımın, kısa huzmeli far ve uzun huzmeli far için ECE regülasyon gerekliliklerine uygunluğunu, yine bilgisayar simülasyonuyla test etmişlerdir [72].

2006 yılında, J.B. Jiang ve ark., bilgisayar yazılımı kullanarak, yasal gerekliliklere uygun otomobil farı tasarımı gerçekleştirdikleri çalışmalarını yayınlamışlardır. Çalışmada ışık kaynağı olarak D2S tipi HID ampul kullanılmıştır. "C" ile programlanan bir yazılım vasıtasıyla, çoklu segmentlerden oluşan serbest-biçimli reflektör tasarımı yapılmıştır. Reflektörün üç boyutlu modellemesi CATIA programı ile gerçekleştirilmiştir. Ardından LightTools programına aktarılan reflektör modelinin simülasyonu, program kütüphanesinde bulunan D2S ampul eklenerek yapılmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen ışık dağılımı görüntüsü çalışmada paylaşılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, tasarlanan reflektör için CNC (Computer Numerical Control) makinası ile bir prototip üretilmiştir [73].

Fei Chen ve ark., 2010 yılında LED ışık kaynaklı araç farları için, LED'den elde edilen ışığın kullanım verimliliğini arttıran serbest biçimli lens tasarımı çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bilgisayar destekli olarak kısa huzmeli far ve uzun huzmeli far için farklı yapılarda tasarladıkları lenslerin PMMA (Polimetil metakrilat) malzemeden üretilmesini öngörmüşlerdir. Monte Carlo ışın izleme metodu ile gerçekleştirdikleri bilgisayar simülasyonu ile elde ettikleri ışık dağılımı verilerine göre, uzun huzmeli far için üç adet LED ve lens çifti, kısa huzmeli far için iki adet LED ve lens çifti ile ECE regülasyon gereklilikleri sağlanabilmektedir [74].

Mercedes-Benz Teknoloji Merkezi'nden Alexis Bony ve ark., Avrupa Ekonomik Komisyonu (ECE) tarafından yeni üretilecek araçlar için zorunlu hale getirilen gündüz sürüş farı (DRL) tasarımını bilgisayar yazılımı desteği ile gerçekleştirmişler ve 2011 yılında çalışmaya dair bir yayın paylaşmışlardır. LED'den çıkan ışığın, çift reflektör yüzeyinden yansıyarak yola yönlendirildiği bir yapıyla, mümkün olan en düşük güç tüketiminde, ECE regülasyon gerekliliklerini sağlayan bir lamba oluşturmayı hedeflemişlerdir. Bu reflektör sistemi için, bilgisayar yazılımı yardımıyla Monte Carlo ışın izleme metodu ile yapılan simülasyon sonuçları çalışmada paylaşılmıştır. Tasarlanan gündüz sürüş farı 5 W güce sahiptir ve Mercedes-Benz SLK model araçlarda kullanılmıştır [75].

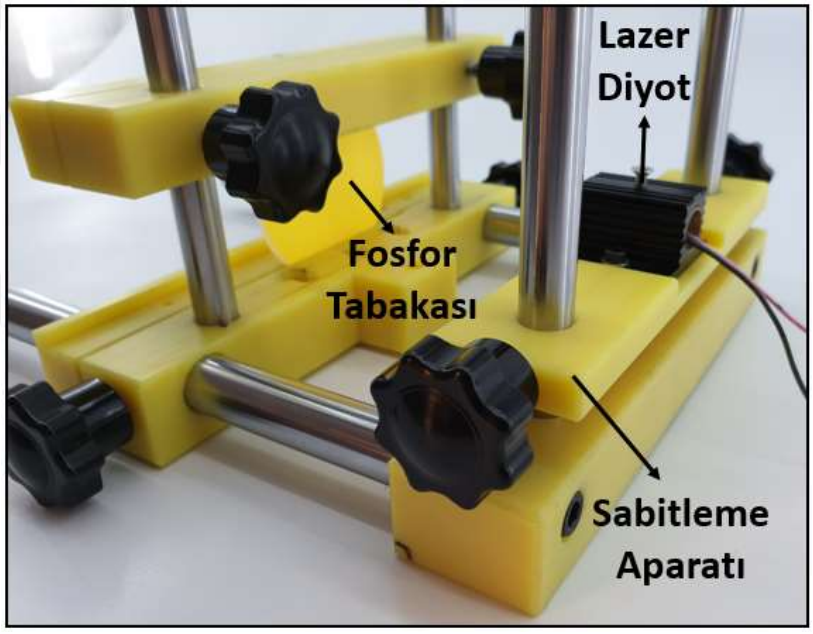
Topaloğlu T, Gürsoy C, Bakcan M. R. ve Yılmaz G. tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, ECE geri sis regülasyonu gerekliliklerini üç LED ile sağlayabilen, farklı araçlarda özel tasarım ihtiyacı yaratmadan standart ürün olarak kullanılabilecek, elektromanyetik uyumluluk şartlarını (EMC) sağlayan bir LED modülü tasarlanmıştır. Modülün optik tasarımı SPEOS programı ile yapılmıştır. Her bir LED için birer toplayıcı kolimatör lens ve bu lensin dış yüzeyinde bulunan yönlendirici prizmalar tek bir gövde içinde bütünleşik olarak tasarlanmıştır. LucidShape programında, Monte Carlo ışın izleme metodu kullanılan simülasyon çalışmaları ile tasarım doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Prototip üretimi aşamasında olan çalışma TEYDEB kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir [76].

Literatürde, otomotiv uygulamaları için bilgisayar destekli optik tasarım konusunda birbirinden farklı amaçlara yönelik yöntemler kullanılarak yapılmış çalışmalar tespit edilmiştir. Fakat otomotiv uygulamaları için lazer temelli ışık kaynaklarının kullanıldığı bilgisayar destekli tasarımların, bunların ışık dağılımlarının ve yol aydınlatma performanslarının bilgisayar simülasyonları ile değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tezin, literatürde görülen bu boşluğun doldurulmasına da katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan Materyaller, Ölçüm Aletleri Ve Özellikleri

Bu tez çalışmasında, lazer ışık kaynağı olarak çok parçalı yapıya sahip bir mekanizma kullanılmıştır. Bu mekanizma temel olarak bir lazer diyot, diyottan uzakta konumlanmış bir fosfor tabakası ve sabitleme aparatından oluşmaktadır. Şekil 2.1'de bu mekanizmanın resmi görülmektedir.



Şekil 2. 1. Lazer ışık kaynağı

Tez çalışmasında kullanılan lazer diyot, NICHIA firması tarafından üretilmiştir ve ticari yolla tedarik edilmiştir. Lazer diyot, 9 mm çapında, TO-Ø9 kılıf içinde bulunmaktadır. Mavi bölgede 435 nm – 455 nm dalgaboyu aralığında ışıma yapmaktadır. 80 mA minimum eşik akımı ve 1,7 A maksimum sürme akımı değerlerine sahiptir. Çalışma voltajı 3,7 V ile 5,5 V aralığındadır. Şekil 2.2'de lazer diyotun tedarikçiden temin edilen teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. 1. Lazer diyotun teknik özellikleri

Absolute Maximum Ratings

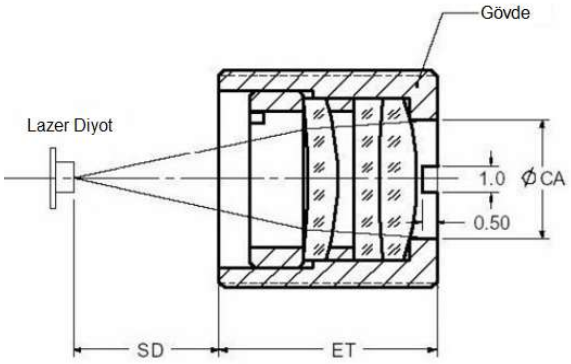
Item	Symbol	Absolute Maximum Ratings	Unit
Forward Current (Tc=25°C)	If	1.7	A
Allowable Reverse Current (Tc=25°C)	Ir (LD)	85	mA
Storage Temperature	Tstg	-40 ~ 85	°C
Operating Case Temperature	Tc	0 ~ 50	°C

Initial Electrical/Optical Characteristics (Tc=25°C)

Item	Condition	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Optical Output Power	If=1.2A	Po	1.1	1.6	-	W
Dominant Wavelength	If=1.2A	λd	435	-	455	nm
Threshold Current	CW	Ith	80	-	220	mA
Slope Efficiency	CW	η	1.0	-	2.0	W/A
Operating Voltage	If=1.2A	Vop	3.7	-	5.5	V
Beam Divergence Full Angle ($1/e^2$)	If=1.2A	θ//	5	14	25	deg.
		θ⊥	30	44	50	deg.
Emission Point Accuracy	If=1.2A	Δθ⊥	-5.0	-	5.0	deg.

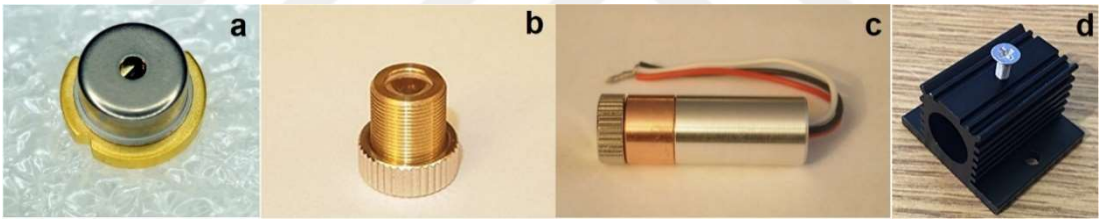
Lazer diyotun çalışma esnasında yüksek akım çekmesini engellemek için, devreye bir adet zener diyot eklenmiştir. Zener diyot, devrenin çalışmasını 2 A'in altındaki akımlara sınırlamaktadır.

Lazer diyottan çıkan ışığı toplayarak fosfor tabakası üzerine düşürmek için kolimatör lens kullanılmıştır. PMMA malzemenin 100°C dolayında ve PC (Polikarbonat) malzemelerin 125°C dolayında şekilsel kararlılıklarını kaybedip deforme olmaya başlayacağı bilindiğinden, 450°C üzerine kadar sağlamlığını koruyabilecek cam malzemeden üretilmiş bir lens tercih edilmiştir. Lens, yüksek güçte lazer diyot uygulamaları için imalat yapan bir firmadan tedarik edilmiştir ve üç mercek ihtiva etmektedir. Lense ait teknik çizim Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2. 2. Lensin iki boyutlu teknik çizimi

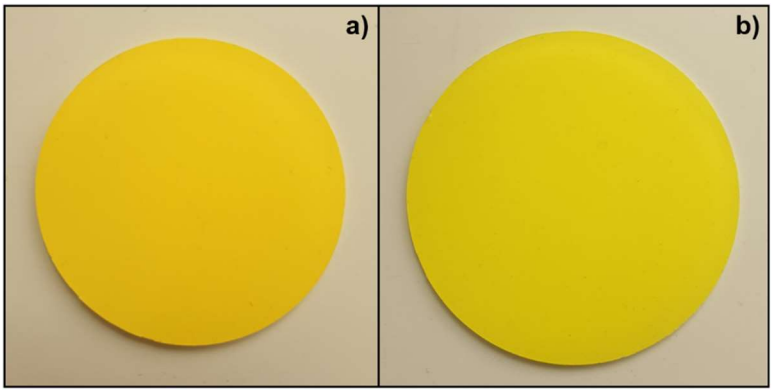
TO- Ø9 kılıflı lazer diyot, bu kılıf boyutlarına uygun 12 mm çaplı silindirik bir bakır gövde içine yerleştirilmiştir. Bakır, iyi bir ısıl iletken olması sebebiyle LD üzerinde oluşan ısının dışarı iletimini kolaylaştırmaktadır. Lazer diyotun kararlı bir şekilde çalışmasını temin etmek amacıyla, bakır gövde de alüminyum soğutucu içine monte edilmiştir. Bakır gövde ve alüminyum soğutucu direk temas halindedir. Şekil 2.4'de lazer diyot, lens, gövde ve soğutucuya ait resimler görülmektedir.



Şekil 2. 3. a) Lazer diyot b) Lens c) Gövde d) Soğutucu

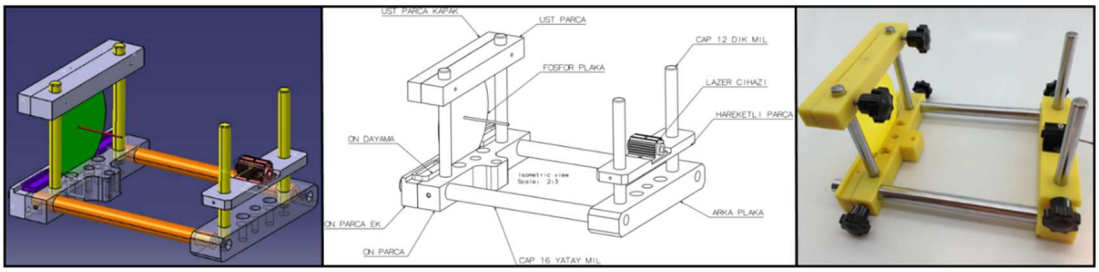
Literatür araştırması sırasında, silikon üzerine sentezlenmiş fosfor tabakalarının, yüksek güçte lazer ışığı ile uyarıldıktan bir süre sonra ısıl kararlılıklarını yitirdikleri ve fosfordan üretilen ışığın miktarının ve renk özelliklerinin değişmeye başladığı görülmüştür. Bu yüzden bu tez çalışmasında, ısıl kararlılığı korumak için ısıl dayanımı silikon alt tabakalı fosforlara göre daha yüksek olan, cam alt tabaka üstüne sentezlenmiş YAG fosfor kullanılmıştır. Fosfor katmanı ile camın toplam kalınlığı 2,4 mm'dir. Intematix firmasından tedarik edilen fosfor tabakaları mavi ışık altında uyarılarak beyaz ışık üretilecek uygulamalar için tasarlanmıştır. Fakat fosfor bileşenlerindeki kısmi farklılıklara, kullanılacak mavi ışığın ortalama dalgaboyuna ve ışık yoğunluğuna göre, üretilen ışığın renk özelliklerinin farklılık gösterebileceği tedarikçi tarafından bildirilmiştir. Bu durum göz önünde bulundurularak, çalışmada

kullanılmak üzere CL-750 ve CL-840 kodlu iki farklı tür fosfor tabakası tedarik edilmiştir. Şekil 2.5'de bu iki fosfor türüne ait resimler verilmiştir.



Şekil 2. 4. Fosfor tabakaları a) CL-840 ve b) CL-750

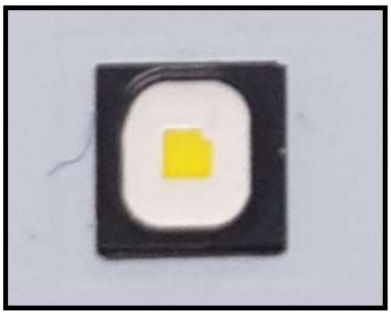
Çalışmada kullanılan optik bileşenleri, arzu edilen konumlarda pozisyonlandırabilmek ve gonyofotometre tablasına sabitlemek amacıyla, mekanik ve ısıl mukavemeti yüksek kestamid (döküm polyamid) malzemeden sabitleme aparatı tasarlanmış ve üretilmiştir. Aparat, fosfor tabakasının yerleştirildiği iki parçalı ön kısım, lazerin monte edildiği ve yüksekliği ayarlanabilir bir arka kısım ve bu iki bölümü birbirine bağlayan hareketli iki milden oluşmaktadır. Bu sayede lazer ve fosfor tabaka, istenilen mesafede ve istenilen yükseklikte hizalanabilmektedir. Sabitleme aparatının tasarımı CATIA tasarım programıyla yapılmıştır. Şekil 2.6'da sabitleme aparatının bilgisayarda tasarım aşaması, üretim öncesi teknik resminin oluşturulması ve üretim sonrası aşamalarını gösteren resimler verilmiştir.



Şekil 2. 5. Sabitleme aparatının tasarım ve ürün aşamaları

Lazer ışık kaynağının fotometri performansını otomotivde kullanılan konvansiyonel LED'lerin performansıyla kıyaslamak amacıyla, OSRAM firmasının ürettiği otomotiv onaylı Black Flat model, 5N parlaklık grubunda, tek çipli LED'in ışık dağılımı da bu

tez çalışmasında incelenmiştir. Aşağıdaki Şekil 2.7'de LED'in resmi, Şekil 2.8'de ise LED'e ait, tedarikçiden edinilen teknik özellikler verilmiştir.



Şekil 2. 6. Osram LED

Characteristics

I_F = 1000 mA; T_S = 25 °C

Parameter	Symbol		Values
Chromaticity Coordinate [3]	Cx	typ.	0.33
	Cy	typ.	0.34
Viewing angle at 50 % I_V	2φ	typ.	120 °
Forward Voltage [4]	V_F	min.	2.75 V
I_F = 1000 mA		typ.	3.05 V
		max.	3.75 V

Brightness Groups

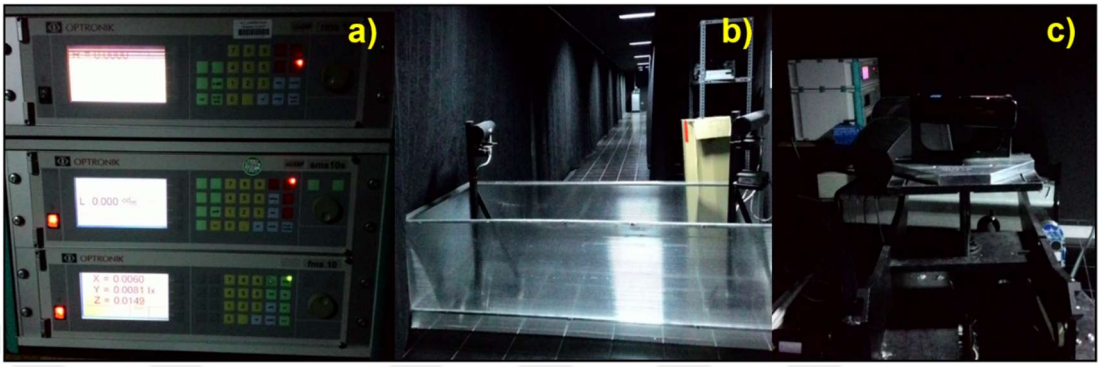
Group	Luminous Flux [1] I_F = 1000 mA min. Φ_V	Luminous Flux [1] I_F = 1000 mA max. Φ_V	Luminous Intensity [6] I_F = 1000 mA typ. I_v
5N	280 lm	315 lm	98 cd

Şekil 2. 7. LED'in teknik özellikleri

Bu tez çalışmasında, lazerle sürülen fosfor tabakası ile üretilen ışığın CIE 1931 renk koordinat değerlerinin ölçümü, lazer ışık kaynağının ve LED'in fotometri ölçümleri FEKA Otomotiv A.Ş. Fotometri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Lazer ışık kaynağının spektrum ölçümleri ise Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir.

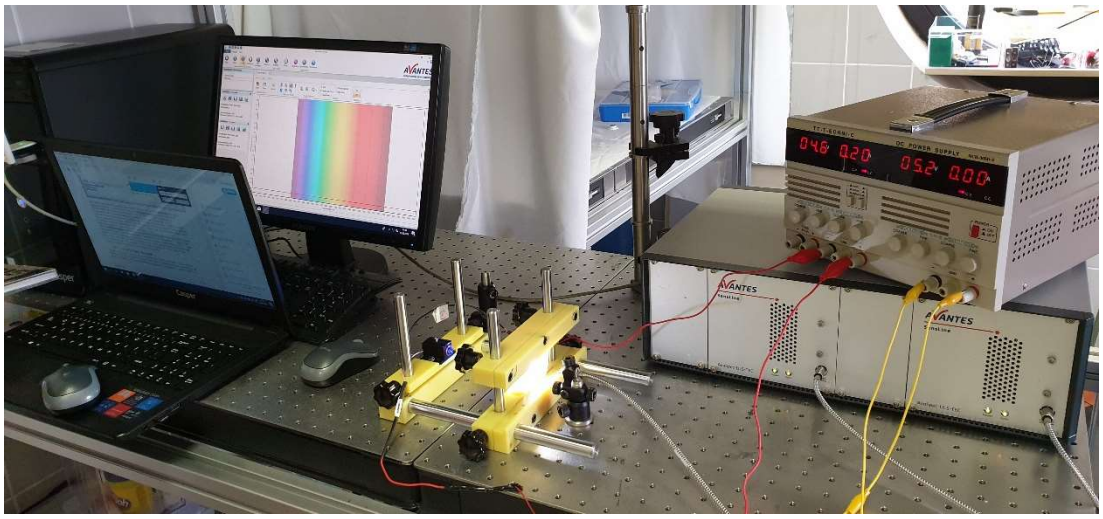
CIE 1931 renk koordinatlarının ölçümleri, Optronik FMS 10 renk ölçüm cihazı (Kolorimetre) ile yapılmıştır. FMS 10'un çalışma prensibi, doğrudan renk eşleştirme fonksiyonları $\bar{x}$ (λ), $\bar{y}$ (λ) ve $\bar{z}$ (λ)'nın optik olarak filtrelenmiş foto-elektronik algılayıcılar tarafından tespit edilerek X, Y ve Z tristimulus değerlerinin belirlenmesi şeklindedir [77]. Kolorimetre üç birimden oluşmaktadır. Bunlar fotodedektör ünitesi,

değerlendirme/görüntüleme ünitesi ve ölçümü yapılacak ışık kaynağının monte edildiği hareketli gonyometre ünitesidir. Şekil 2.9.'da Optronik FMS 10'a ait görüntüleme ünitesi, fotodedektör ünitesi ve gonyometre ünitelerinin resimleri verilmiştir.



Şekil 2. 8. a) Görüntüleme ünitesi b) Fotodedektör ünitesi c) Gonyometre ünitesi

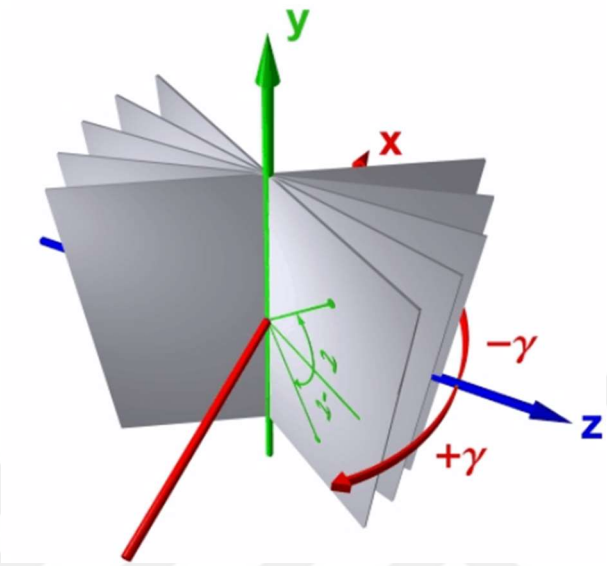
Lazerle sürülen fosfor tabakası ile elde edilen ışığın spektrum ölçümü, Avantes Sensline spektrometre ile yapılmıştır. Şekil 2.10'da ölçümün yapıldığı spektrometre, spektrometreye bağlı fiber optik alıcı ve sonuçların yazılım aracılığıyla görüntülendiği bilgisayar, lazer ışık kaynağı ve lazer ışık kaynağının beslendiği güç kaynağı gösterilmiştir.



Şekil 2. 9. Spektrum ölçümünde kullanılan gereçler

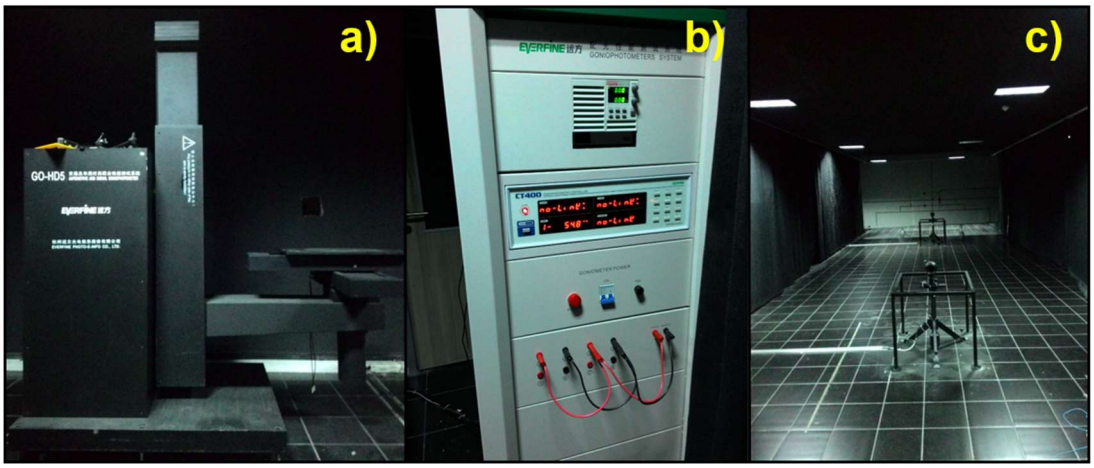
Fotometri ölçümleri için Everfine GO-HD5 marka, CIE A tipi gonyofotometre kullanılmıştır. CIE A tipi gonyofotometrede, kartezyen koordinat sisteminin xy düzlemi, y ekseni etrafında ±180° dönebilmektedir. Bu açı, γ simgesi ile gösterilir ve

sistemin azimut açısıdır. Kutup açısı τ ise bu düzlemin, kartezyen xz düzlemi ile yaptığı açıyı ifade eder ve ±90° arasında değişmektedir [78]. Şekil 2.11'da CIE A tipi gonyofotometrenin çalışma prensibi gösterilmiştir.



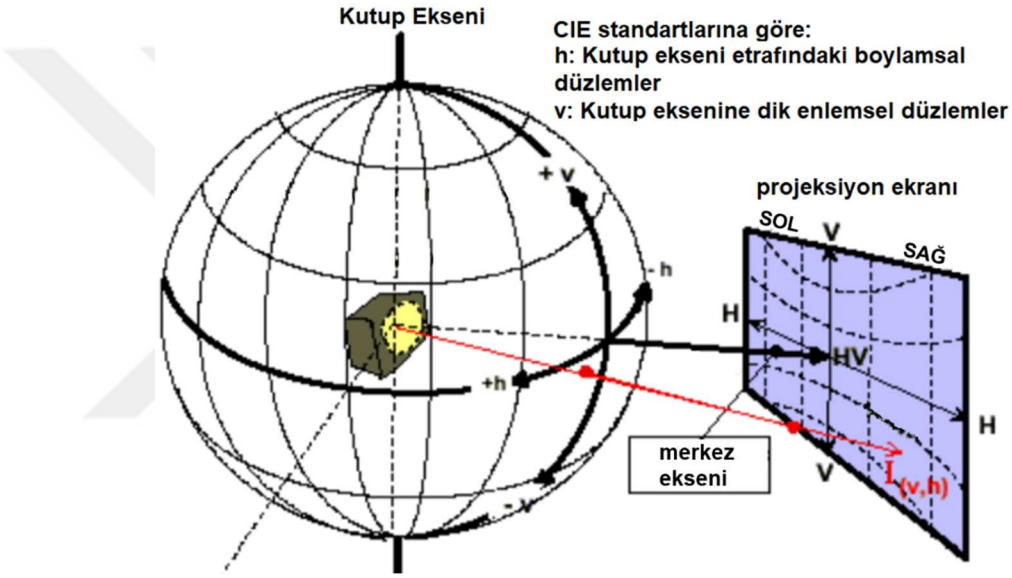
Şekil 2. 10. CIE A tipi gonyofotometrenin çalışma prensibi [78]

Everfine GO-HD5 gonyofotometre, ölçülecek gerecin monte edildiği hareketli gonyometre ünitesi, Keithley 2260B model programlanabilir güç kaynağının bulunduğu kontrol ünitesi, fotodedektör ünitesi olmak üzere temelde üç ana ünite ve tüm bunların bağlı olduğu bir bilgisayar arayüzünden oluşmaktadır. Şekil 2.12'de Everfine GO-HD5 gonyofotometrenin üniteleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 11. Everfine GO-HD5 a) Gonyometre ünitesi b) Kontrol ünitesi c) Fotodedektör ünitesi

Gonyofotometrenin bilgisayar arayüzü aracılığıyla, bir ışık kaynağından herhangi bir açıya giden ışığın şiddeti, noktasal olarak ölçülebileceği gibi, ışık kaynağının etrafını saran 4π steradyanlık bir tam küre içinde kalan herhangi büyüklükteki bir yüzeye yaydığı ışığı tarayarak, ışık dağılımının haritasını çıkarmak da mümkündür. Tarama sonuçları, her bir ışık kaynağı için ".ies" (Fotometrik Verilerin Elektronik Aktarımı için IES Tavsiyeli Standart Dosya Formatı. - IES Recommended Standard File Format for Electronic Transfer of Photometric Data) formatında sayısal veriye dönüştürülerek saklanabilmektedir. Şekil 2.13'de fotometri ölçümünün betimsel görünümü verilmiştir.



Şekil 2. 12. Fotometri ölçümünün betimsel gösterimi

Çalışmada, alınan renk ölçümlerinin CIE 1931 renk diyagramında bulundukları yeri tespit etmek için OSRAM Sylvania, Inc. tarafından dağıtımı ücretsiz olarak yapılan "Color Calculator" programı kullanılmıştır. ECE R-48'de beyaz bölgesi olarak tanımlanan alan, özel renk gamı olarak programa girilmiş ve sınır çizgileri görünür hale getirilmiştir.

Çalışmada Everfine GO-HD5 ile tarama yöntemiyle alınan ve ".ies" dosya biçiminde sayısal veriye dönüştürülen lazer ışık kaynağının ve LED'in fotometri ölçümlerinden sonra, ışık dağılım karakteristikleri LucidShape ve IES Viewer programları ile incelenmiştir.

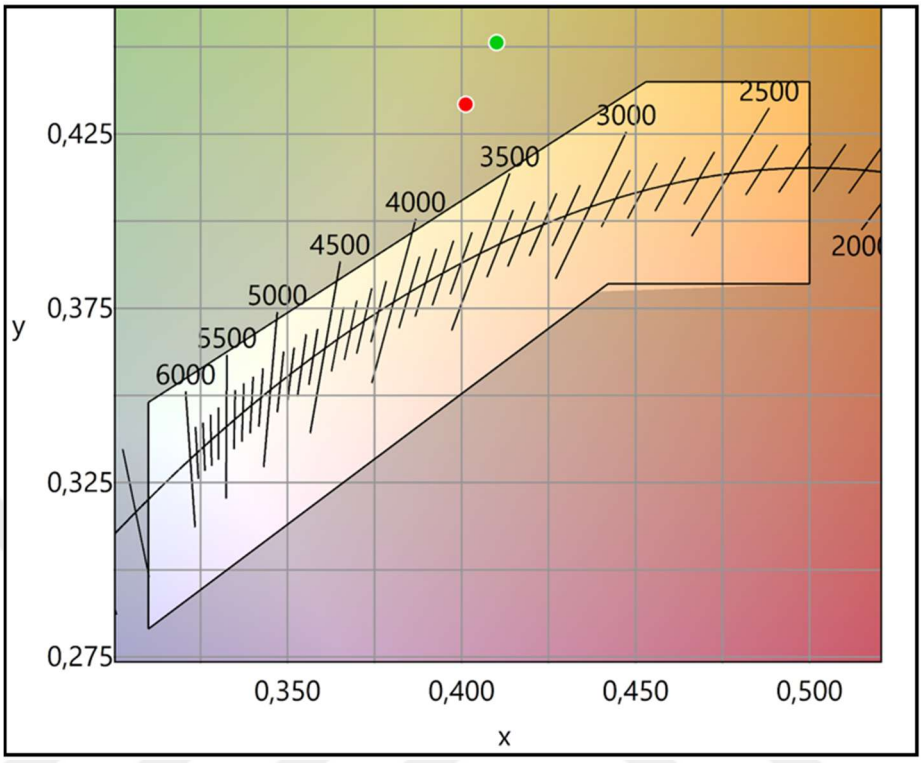
Lazer ve LED ışık kaynaklarına ait ".ies" dosyaları SPEOS optik tasarım programına aktarılarak, her birinin ışık dağılımına uygun reflektör tasarımları, yine bu program ile yapılmıştır. Her bir ışık kaynağı - reflektör çiftinin Monte Carlo ışın izleme metoduyla yapılan simülasyonları da SPEOS programıyla gerçekleştirilmiştir.

Monte Carlo simülasyon sonuçlarına göre, her bir ışık kaynağı - reflektör çiftinin, ECE R-19 ön sis lambası regülasyon gerekliliklerine uygunluğu LucidShape optik tasarım ve analiz programı ile test edilmiştir. Yine, iki ışık kaynağının da yol aydınlatma performansları bu program kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca aydınlatılan yolun kuşbakışı görünüşü ve sürücü tarafından görünüşünün çıktıları da bu programla edinilmiştir.

2.2. Lazer Işık Kaynağının Renk Ölçümü

Lazer ışık kaynağı, detayları Bölüm 2.1'de verildiği gibi mavi lazer diyot, fosfor tabakası ve sabitleme aparatından oluşmaktadır. Renk ölçümü için, önce Intematix firmasından tedarik edilen CL-750 fosfor tabakası, sabitleme aparatına lazer ile hizalanarak yerleştirilmiştir. Lazer aparatı ölçümün yapılacağı Optronik FMS 10'un gonyometre tablasına, vida boşlukları hizalanarak vidalanmıştır. Bu konumda, lazer ile fosfor tabakası arasındaki uzaklık 11,8 cm olarak ölçülmüştür. Fosfor tabakasının merkezi ile Optronik FMS 10'un fotodedektörü aynı yükseklikte olacak şekilde gonyometrenin yüksekliği ayarlanmıştır. Kontrol ünitesinde bulunan güç kaynağı çalıştırılarak akım ve voltaj değerleri sıfırlanmıştır. Ardından gonyometrenin arkasında bulunan güç bağlantı kabloları, lazer diyotu besleyen kablolara bağlanarak lazer diyot çalıştırılmıştır. Lazer diyotun çektiği akım 1 A olana kadar gerilim değeri arttırılmıştır. Akım 1 A değerindeyken kolorimetrede okunan x=0.4101, y=0.4512 CIE 1931 (x,y) renk koordinatı değerleri Color Calculator programına girilerek, elde edilen ışığın ECE-R48'de belirtilen beyaz ışık bölgesine göre konumu kontrol edilmiştir. Üretilen ışığın, beyaz bölgede bulunmaması sebebiyle akım, lazer diyotun eşik akımının üzerinde 300 mA'e kadar düşürülmüştür. 300 mA'de elde edilen CIE renk koordinatları x=0.4012, y=0.4335'dir. Bu değerler de Color Calculator programına girilmiş ve beyaz renk bölgesinin oldukça dışında bulunmasından dolayı, bu fosfor tabakasıyla yapılan çalışmaya son verilmiştir. Şekil 2.14'de CL-750 fosfor tabakasından üretilen ışığın CIE renk diyagramındaki konumları gösterilmiştir. Yeşil

ile belirtilen konum, 1 A sürme akımındaki değeri, kırmızı ile belirtilen konum da 350 mA sürme akımındaki değeri göstermektedir.



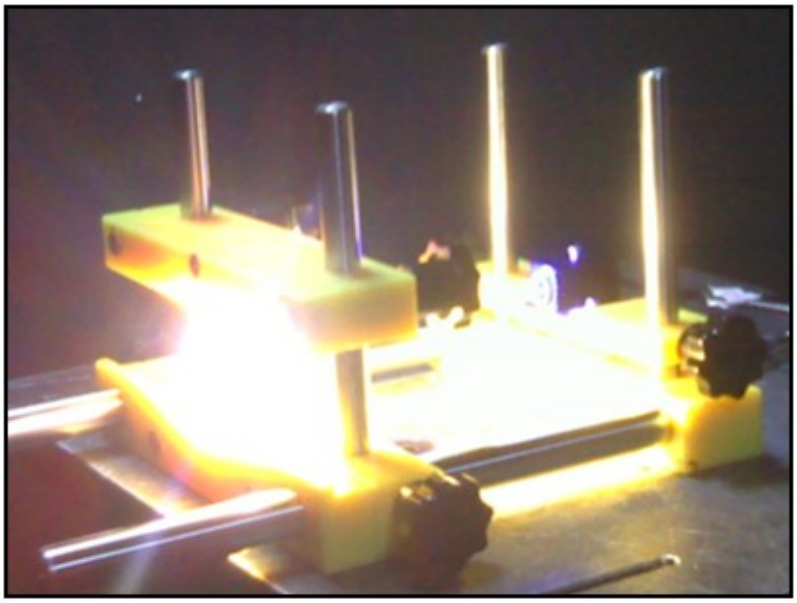
Şekil 2. 13. CL-750 fosfor ile üretilen ışığın CIE 1931 diyagramındaki konumu

CL-750 ile yapılan çalışmanın başarısız olmasının ardından, aynı adımlar CL-840 fosfor tabakası için tekrarlanmıştır. 1 A sürme akımında elde edilen renk koordinatları x=0.3228, y=0.3059'dur. Bu değerler Color Calculator programına girilmiş ve beyaz renk bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın sonraki aşamalarına CL-840 fosfor tabakası ile devam edilmiştir.

Lazer ışık kaynağının renk özelliklerinin açısal değişimini incelemek için önce yatay bir çizgide ±75°'lik bölgede, sonra dikey bir çizgide ±75°'lik bölgede 5° arayla ölçüm alınması öngörülmüştür. Bu bölge, lazer ışık kaynağından yayımlanan ışığın özelliklerini yeterli oranda temsil edecektir. Zira otomotiv uygulamalarında kullanılan LED'lerin pek çoğu 180° ışık çıkış açısına sahip oldukları halde, görüş açısı (viewing angle) olarak adlandırılan etkin bölgeleri 120°'dir.

Gonyometre ünitesinin programlanabilir sürücüsü, ±75° aralığında 5°'de bir defa duracak şekilde ayarlanmıştır. Ardından, önce yatayda sonra da dikeyde CIE 1931

koordinat değerleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarının yer aldığı tablo, ölçüm sonuçlarının CIE renk diyagramındaki konumları ve değişim grafikleri Bölüm 3'de verilmiştir. Şekil 2.15'de lazer ışık kaynağının çalışır haldeki resmi verilmiştir.



Şekil 2. 14. Lazer ışık kaynağının çalışır haldeki resmi

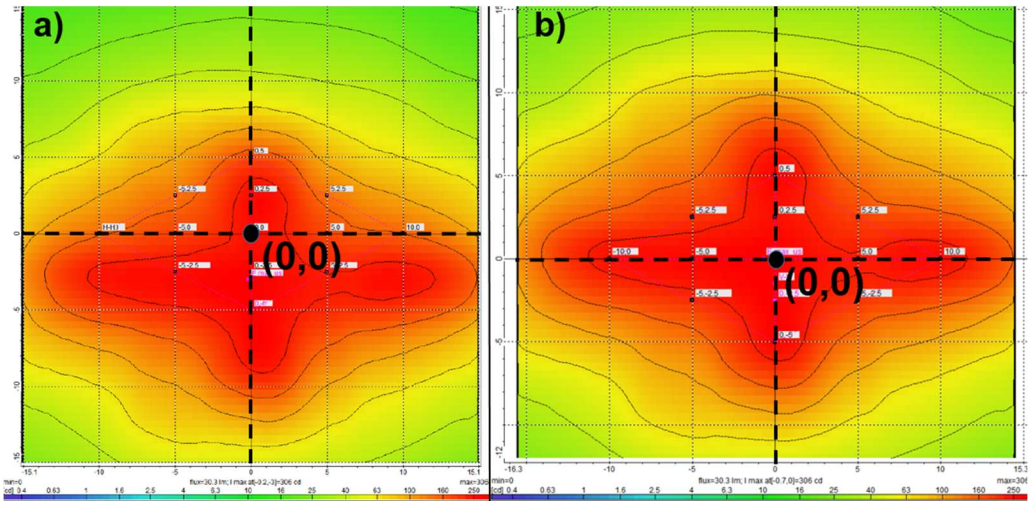
Lazer diyotun sürme akımının, lazer ışık kaynağından elde edilen beyaz ışığın CIE 1931 renk koordinatlarına etkisini incelemek üzere, açının 0°'de sabit tutulduğu ve akımın değiştirildiği bir ölçüm daha alınmıştır. 0,2 A, 0,4 A, 0,6 A, 1 A, 1,2 A, 1,4 A ve 1,6 A akım değerlerine karşılık gelen CIE renk koordinatları ve diyagramdaki konumları Bölüm 3'de sunulmuştur.

Lazerle sürülen fosfor ile elde edilen ışığın spektrumunun ölçümü, Bölüm 2.1'de belirtildiği gibi Avantes Sensline spektrometre ile yapılmıştır. Spektrum ölçümü için, spektrometrenin fiber optik alıcısı fosfor tabakasının 2,4 cm uzağına, çıkan ışığın merkezine konumlandırılmıştır. Spektrum ölçümü yapılmadan önce, spektrometrenin kendi içerisinde referans noktaları alması sağlanmıştır. Bu sayede renk ölçümü sırasında gürültü oluşmasının önüne geçilmektedir. Bunun için önce fiber optik alıcıya ışık ulaşmasını engelleyerek "karanlık" referansı alınmıştır. Ardından, lazer ışık kaynağı çalıştırılmadan, spektrometrenin ortam ışığını kaydettiği "aydınlık" referansı alınmıştır. Böylelikle spektrometrenin, lazer ışık kaynağının spektrumunu doğru şekilde tespit etmesi sağlanmaktadır.

Spektrometreyle önce lazer diyot 1 A akım ile çalıştırılırken spektrumu kaydedilmiştir. Sonrasında, LD sürme akımının, ışığın spektrumuna etkisini incelemek için, lazer diyot 0,2 A, 0,4 A, 0,6 A, 0,8 A, 1 A, 1,2 A, 1,4 A ve 1,6 A akım ile çalışırken üretilen ışık spektrometre ile ölçülerek kaydedilmiştir. Spektrometre ile alınan ölçüm sonuçları yatayda dalgaboyuna karşılık dikeyde güç yüzdesi olacak şekilde grafiğe dökülmüştür. Elde edilen grafikler Bölüm 3'de verilmiştir.

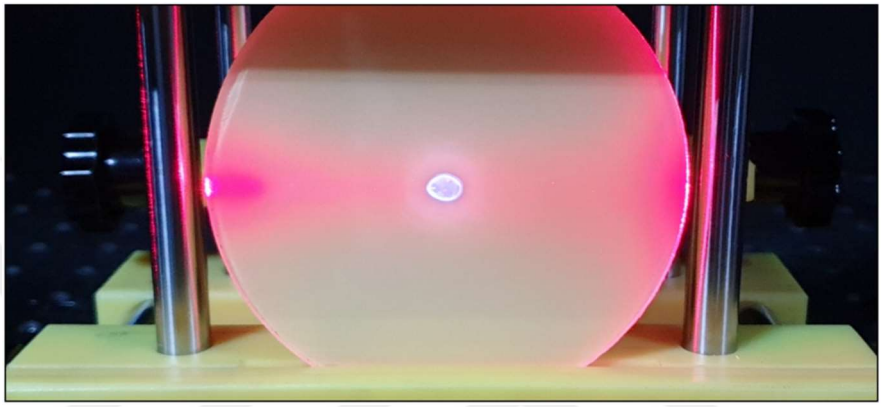
2.3. Lazer Işık Kaynağının Fotometri Ölçümü

Lazer ışık kaynağının ışık dağılımı özelliklerini tespit etmek ve fotometrik özelliklerini sayısal veriye dönüştürmek için yapılan fotometri ölçümünde, Everfine GO-HD5'nin tarama modu kullanılmıştır. Taramadan elde edilen sonucun, ışık kaynağının ışıma karakteristiğini gerçeğe en yakın şekilde temsil edebilmesi için, ışık kaynağının merkezi ile fotodedektörün merkezlerinin doğru şekilde hizalanmış olması gerekmektedir. Aksi halde, ışık dağılımı sayısal veriye dönüştürüldüğünde ölçüm ekseni ile ışımanın merkez ekseni arasında bir sapma meydana gelecektir. Bu da yapılacak bilgisayar destekli tasarımı hem zorlaştıracak, hem de gerçeklikten uzaklaşmasına sebep olacaktır. Bu tip basit hatalar, otomotiv aydınlatma endüstrisinde, binlerce dolarlık kalite maliyetlerine yol açabilmektedir. Şekil 2. 16'da bir ışık kaynağının ışık dağılımına ait izokandela (isocandela) görüntüsü verilmiştir. Ölçüm ekseni ile ışıma ekseni arasında sapma olduğundaki durum ile olmadığındaki durum arasındaki fark açık şekilde görülmektedir.



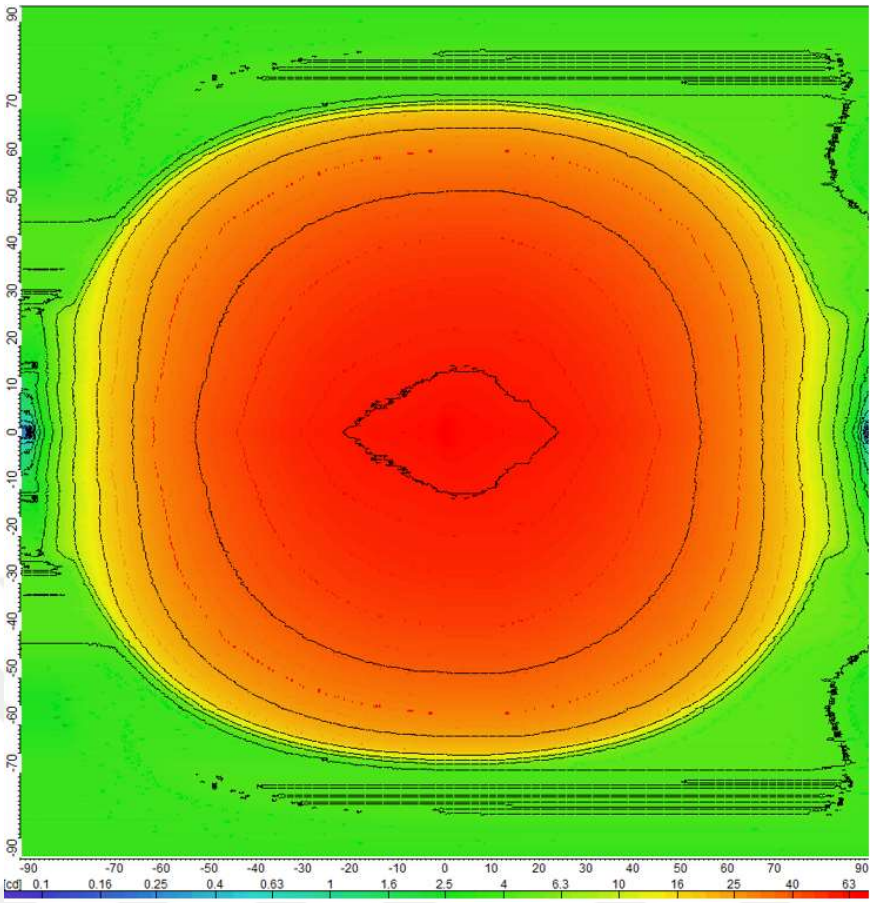
Şekil 2. 15. Ölçüm ekseni ile ışıma ekseni arasında a) Sapma olan b) Sapma olmayan izokandela görüntüleri

Lazer ışık kaynağının merkezi ile fotodedektör merkezini doğru şekilde hizalamak için, Everfine GO-HD5'nin gonyometre ünitesinde bulunan lazer işaretleyici kullanılmıştır. Mavi lazer diyottan çıkan ışık, fosfor tabakası üzerinde büyük eksen uzunluğu 10 mm, küçük eksen uzunluğu 7 mm olan eliptik bir spot oluşturmaktadır. Bu spot ile gonyometrenin lazer işaretleyicisi, yatay, dikey ve doğrusal yönlerde çakışacak şekilde, gonyometre tablası ayarlanmıştır. Şekil 2.17'de fotometri ölçümü için gonyometrenin işaretleyicisiyle ayarlanmış resmi verilmiştir.



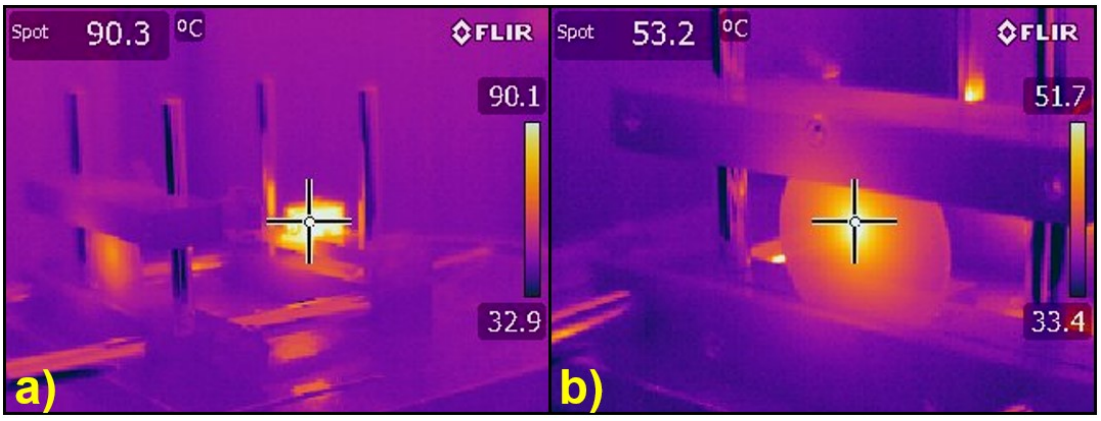
Şekil 2. 16. Fotometri ölçümü için gonyometrenin ayarlanması

Hizalama hassas bir şekilde yapıldıktan sonra, Everfine GO-HD5 gonyofotometrenin, kontrol ünitesinde bulunan Keithley 2260B programlanabilir güç kaynağı, sabit akım moduna ayarlanarak 1 A akım verecek şekilde çalıştırılmıştır. Ardından, Everfine GO-HD5'nin bilgisayar arayüzü çalıştırılmıştır. Arayüz üzerinde, ölçümü yapacak olan fotodedektör seçilmiş, ölçüm türü tarama olacak şekilde ölçüm açıları girilmiştir. Bu tez çalışmasında, fosfor tabakasından geri doğru yansıyan ışık, gerçek koşullarda kullanışsız olacağı gerekçesiyle ölçüme dahil edilmemiştir. Bu yüzden, tarama aralığı yatayda ve dikeyde ±90° olarak girilmiştir. Tarama hassasiyeti, yatayda 0.1°, dikeyde 0.5° olarak ayarlanmıştır. Parametreler girildikten sonra tarama başlatılmıştır. Yaklaşık iki saatin sonunda, tarama tamamlanmıştır. Ölçüm sonucu elde edilen ışık dağılımı bilgisayar arayüzünde görüntülenmiş ve ışıma ekseni ile ölçüm ekseni arasındaki sapma kontrol edilmiştir. Eksenlerin uygun olduğunun gözlenmesi üzerine, Everfine GO-HD5'nin bilgisayar arayüzü kullanılarak, ölçüm sonuçları ".ies" dosya formatında sayısal veriye dönüştürülüp kaydedilmiştir. Şekil 2.18.'de lazer ışık kaynağına ait ".ies" dosyasının LucidShape programındaki izokandela görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2. 17. Lazer ışık kaynağına ait ölçümün izokandela görüntüsü

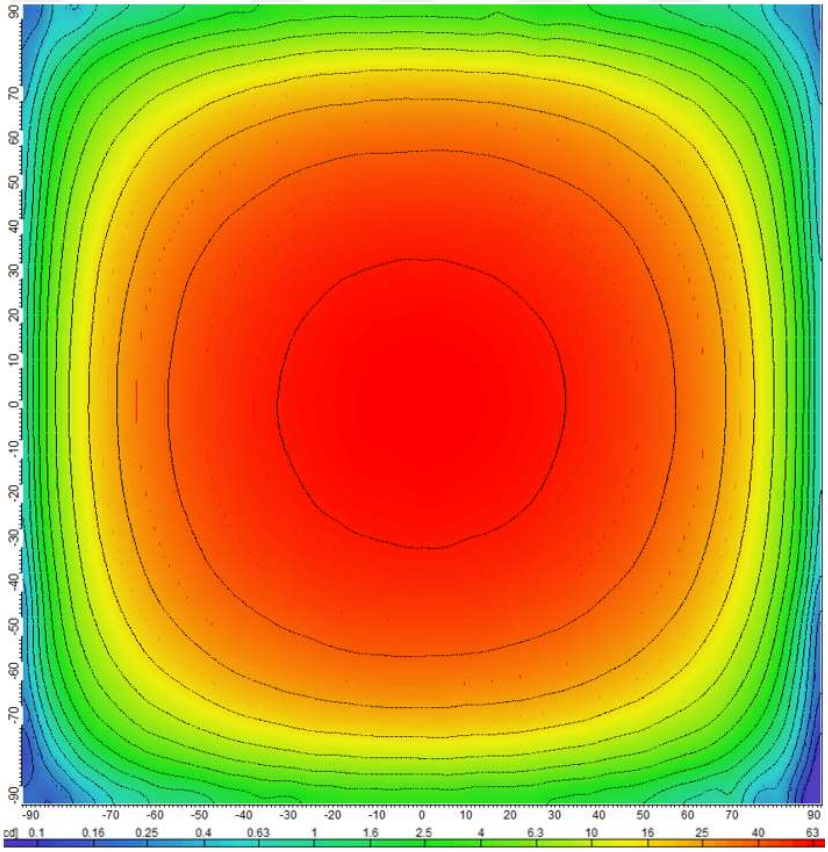
Ölçüm tamamlandıktan sonra lazer ışık kaynağının ısıl durumu FLIR E50 termal kamera kullanılarak kontrol edilmiştir. İki saate yakın çalışma süresinin sonunda lazer ışık kaynağının soğutucu bölümünde ölçülen sıcaklık 90,3°C ve fosfor tabakası üzerinde ölçülen sıcaklık 53,2°C'dir. Şekil 2.19.'da termal kamera görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2. 18. Lazer ışık kaynağı a) Soğutucu b) Fosfor tabakası termal kamera görüntüleri

2.4. LED'in Fotometri Ölçümü

Bölüm 2.1'de teknik detayları verilen LED, tedarikçiden temin edilen "demo board" üzerinde bulunmaktadır. Bu yüzden harici bir devre tasarımı yapılmasına gereksinim duymadan çalıştırılabilmektedir. Fakat güç kaynağından kontrollü bir şekilde beslenebilmesi için bataryası çıkarılıp kablo eklenmiştir. Ayrıca anahtarlaması baypas edilerek akım verildiğinde sürekli çalışacak hale getirilmiştir ve ölçüm boyunca 1 A akım ile sürülmüştür. LED'e ait fotometri ölçümü de lazer ışık kaynağında olduğu gibi Everfine GO-HD5'de tarama şeklinde alınmıştır. Ölçüm sonucu da ".ies" dosyası olarak kaydedilmiştir. Aşağıdaki Şekil 2.20'de LED ölçümüne ait ".ies" dosyasının LucidShape programındaki izokandela görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2. 19. LED ölçümünün izokandela görüntüsü

2.5. Bilgisayar Destekli Optik Tasarım

Tez çalışmasının bu aşamasında, ölçüm sonuçlarından elde edilen ".ies" dosyaları SPEOS programında ışık kaynağı olarak tanımlanarak, her bir ışık kaynağı için reflektör tasarımı yapılmıştır. Çalışmanın bu kısmının amacı, oluşturulan lazer ışık

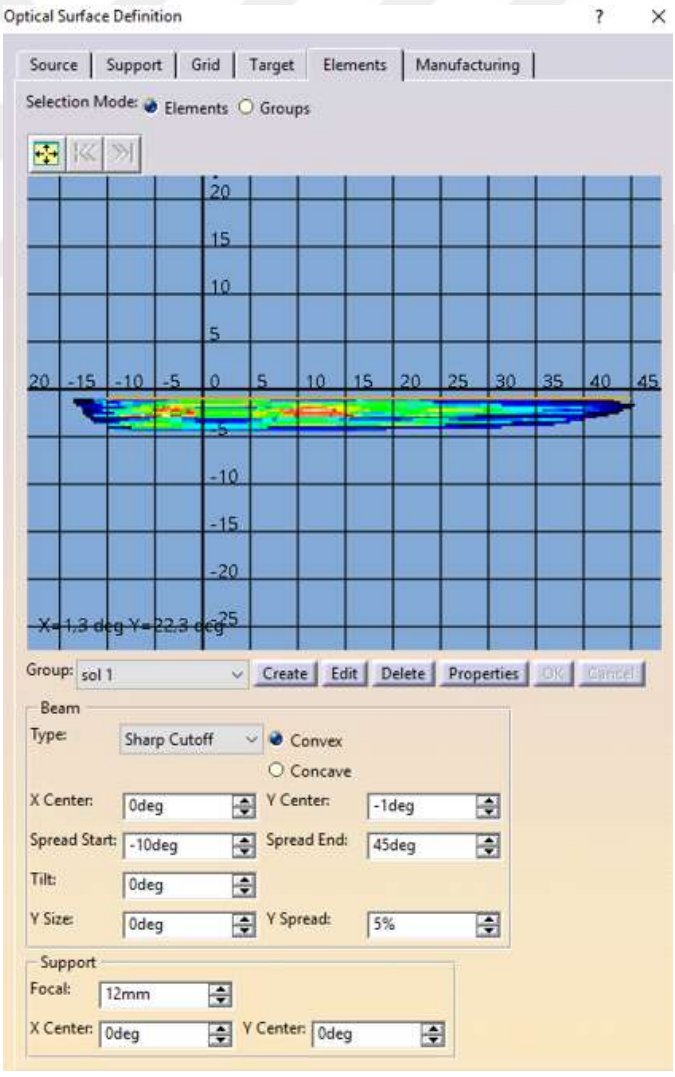
kaynağının, gerçek bir otomotiv aydınlatma gereci olarak göstereceği performansın incelenmesi ve halihazırda otomotiv aydınlatmada kullanılan bir LED ile aynı aydınlatma fonksiyonunda denenerek kıyaslanabilmesidir. Bu kıyaslamayı yapmak amacıyla ECE-R19 ön sis lambası regülasyon gerekliliklerini karşılayabilecek reflektör tasarımı yapılması, hedef olarak belirlenmiştir. Her bir ışık kaynağı için, ışık dağılım karakteristiğine uygun şekilde ayrı birer reflektör tasarlanmıştır. Fakat her iki reflektör de tasarım yaklaşımı ve boyut açısından birbirinin aynısıdır. Aradaki tek fark her birinin, ilgili ışık kaynağının ışık dağılım özelliği ve ECE-R19 gereklilikleri göz önünde bulundurularak optimize edilmiş olmasıdır.

Otomotiv aydınlatmada sis lambasının amacı, gece görüş kalitesinin düştüğü hava koşullarında, sürücünün yolu daha iyi görmesini sağlayarak sürüş güvenliğini arttırmaktır. Uzun huzmeli farların aksine, sis lambaları koşullar gerektirdiğinde sürekli yanık olmalıdır. Bu yüzden, karşıdan gelen sürücülerin gözünü almaması ilk önceliktir. Bu sebeple, ışık yoğunluğu, ufuk çizgisinin altındaki bölgede kalmalıdır. ECE-R19'da bunun için, ufuk çizgisinin 1° altındaki yatay bir çizgi belirlenmiştir. Bu hatta, kesim hattı (cut-off line) adı verilir ve bu hattın üzerinde bulunmasına izin verilen ışık şiddeti oldukça sınırlandırılmıştır [79]. Bunun yanında, hattın altında kalan bölgede de sürücünün görüşünü arttırmak için belirli ışık şiddeti değerlerine ulaşılması zorunluluğu, yine aynı regülasyon ile belirlenmiştir. Tasarım, bu kıstaslar doğrultusunda yapılmıştır. Regülasyonda belirtilen ışık dağılımı Ek-A'da ve kabul edilebilir ışık değerleri Ek-B'de verilmiştir.

SPEOS programı, CATIA üç boyutlu tasarım programına entegre bir optik tasarım programıdır. İşleyiş mekanizması, üç boyutlu mekanik tasarım programlarıyla benzerlik göstermektedir. Tasarımı yapılacak olan optik elemanın boyutları, tasarımcı tarafından önceden belirlenmeli ve sonraki aşamalar buna göre şekillendirilmelidir. Lazer ışık kaynağı ve LED için reflektör tasarımına başlamadan önce, her ikisinin de ışık dağılım karakterine uyan, aynı zamanda ön sis lambası gerekliliklerini de sağlamak için kullanılabilecek çoklu segmentlerden oluşan bir reflektör yapısı öngörülmüştür. Her bir segmente ait yüzey, diğerlerinden bağımsız şekilde istenilen bölgeye ışık gönderebileceği için, regülasyonla belirlenen ışık dağılımına ulaşmak, geleneksel parabolik, hiperbolik yada elipsoit reflektörlere kıyasla çok daha kolay

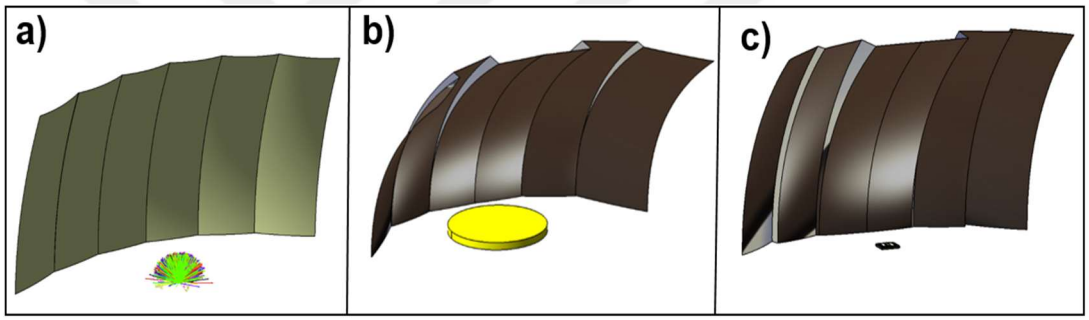
olacaktır. Zira çoklu segmentlere ait her bir yüzeyden gelen ışınlar, üst üste binerek istenen ışık dağılımı desenini oluşturmayı sağlayacaktır.

Işık kaynaklarının ölçümünden elde edilen ışık dağılımları incelenerek, ikisi için de altı yüzeyden oluşan bir reflektörün yeterli olacağı kanaatine varılmıştır. Her bir yüzey 10 mm genişliğinde ve 40 mm uzunluğunda olacak şekilde, ışık kaynağının merkezi olarak atanan eksenin orijini, odak noktası olacak şekilde tasarıma başlanmıştır. SPEOS programının optik yüzey tasarım modülünde, belirlenen büyüklükler girerek reflektörün ham hali oluşturulmuştur. Ardından her bir yüzeyin ışığı yönlendireceği aralıklar girilmiştir. Şekil 2.21'de programın optik yüzey tasarım menüsünde, parametrelerin girildiği bölümlerden birinin görüntüsü verilmiştir. Küçük ekranda, ışın izleme metoduyla, ilgili yüzeyin ışık dağılımına ilişkin ön izleme yapılabilmektedir.



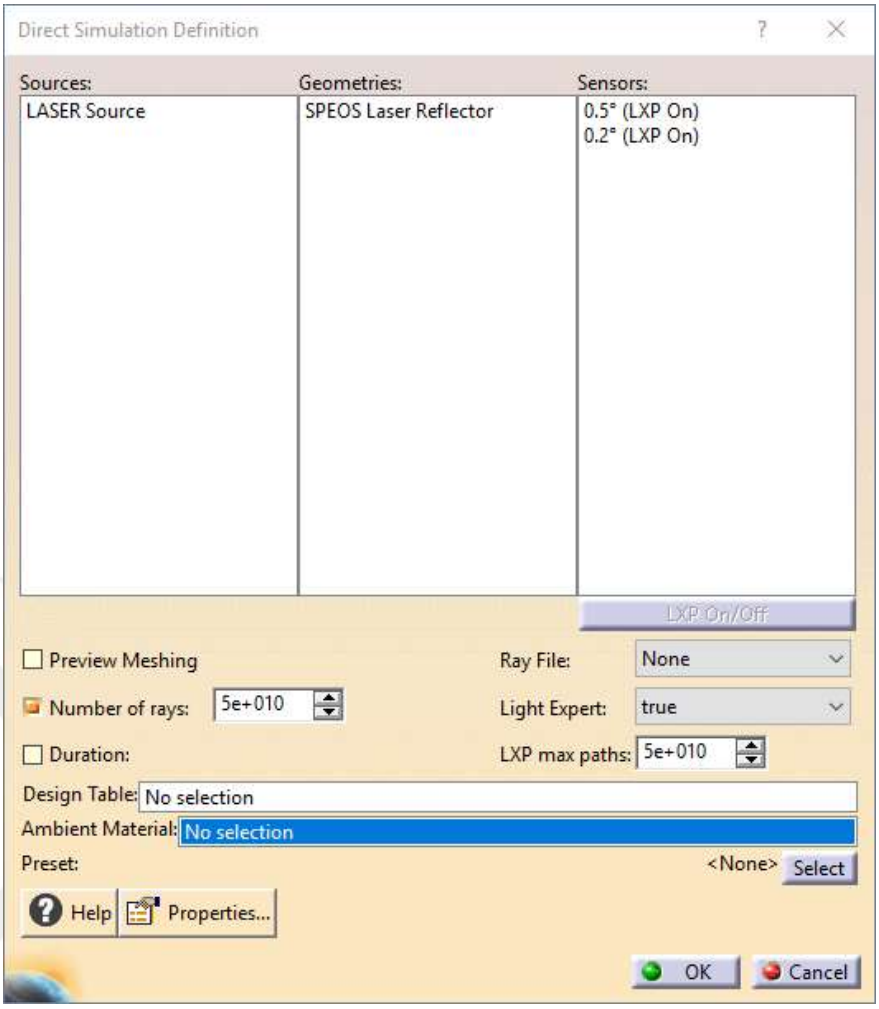
Şekil 2. 20. SPEOS programı optik yüzey tasarımı menüsü

Tasarım yapılırken reflektör yüzeyleri alüminyum malzeme olarak tanımlanmış ve reflektörün yansıtıcılık değeri %70 olarak programa girilmiştir. Işık kaynaklarının ölçümlerinden elde edilen ".ies" dosyaları, SPEOS içinde ışık kaynağı bölümüne tanımlanmıştır. Sensörler menüsünden "intensity sensor" seçilip parametreleri belirlenerek, ışık şiddetini ölçecek sensörler de oluşturulmuştur. Sonrasında, simülasyon menüsünde ışık kaynağı ve sensörler ilgili bölümlere tanımlanmıştır. Reflektör yüzeylerinde yapılan değişiklikler ve iterasyonlarla ışığın istenen bölgeye gönderilmesi sağlanmıştır. Sonrasında ışın izleme metoduyla, tüm reflektörün ışık dağılımı kontrol edilerek gerekli düzeltmeler yapılmıştır. İstenen ışık dağılımı elde edilene kadar bu işlemler tekrarlanarak reflektör tasarımları tamamlanmıştır. Şekil 2.22'de reflektörün tasarım başlangıcındaki durumu, lazer ışık kaynağı için ve LED için tasarım bittikten sonraki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2. 21. a) Tasarım başlangıcı b) Lazer ışık kaynağı reflektörü c) LED reflektörü

Reflektör tasarımlarının tamamlanmasının ardından, sonuçların gerçeğe yakınlığını arttırmak için yüksek sayıda ışın ile Monte Carlo simülasyonları tekrarlanmıştır. Monte Carlo simülasyonunda, program kendisine tanımlanan ışık kaynağının dağılım karakterini, istatistiksel girdi olarak kabul ederek, rastlantısal ışın demetleri oluşturur. Işın demetlerinin reflektörden yansıma oranı, yansıyanların izleyeceği yol, sensöre geliş açıları ve sensördeki yoğunlukları, fizik kurallarına uygun olarak program tarafından hesaplanır. Bu yüzden ışın sayısı arttırıldıkça hata oranı azalmaktadır. Oluşturulan son simülasyonda her bir ışık kaynağı için 5×10^{10} ışın kullanılmıştır. Bu sayı gerçeğe yakın bir sonuç elde etmek için oldukça yeterlidir. Şekil 2.23'de programın simülasyon menüsünün görüntüsü verilmiştir. Buradan elde edilen ışık dağılımı sonuçları, LucidShape programına aktarılarak ECE R-19 ön sis lambası regülasyonuna uygunlukları kontrol edilmiştir. Ayrıca yol aydınlatma görüntüleri oluşturulmuştur.



Şekil 2. 22. SPEOS simülasyon menüsü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Lazer ışık kaynağı için yapılan renk ölçümleri, hem lazer ışık kaynağı hem de LED için yapılan fotometri ölçümleri ve her ikisi için tasarlanan reflektörlerle yapılan Monte Carlo simülasyonlarının sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır.

3.1. Renk Özelliklerinin Değerlendirmesi

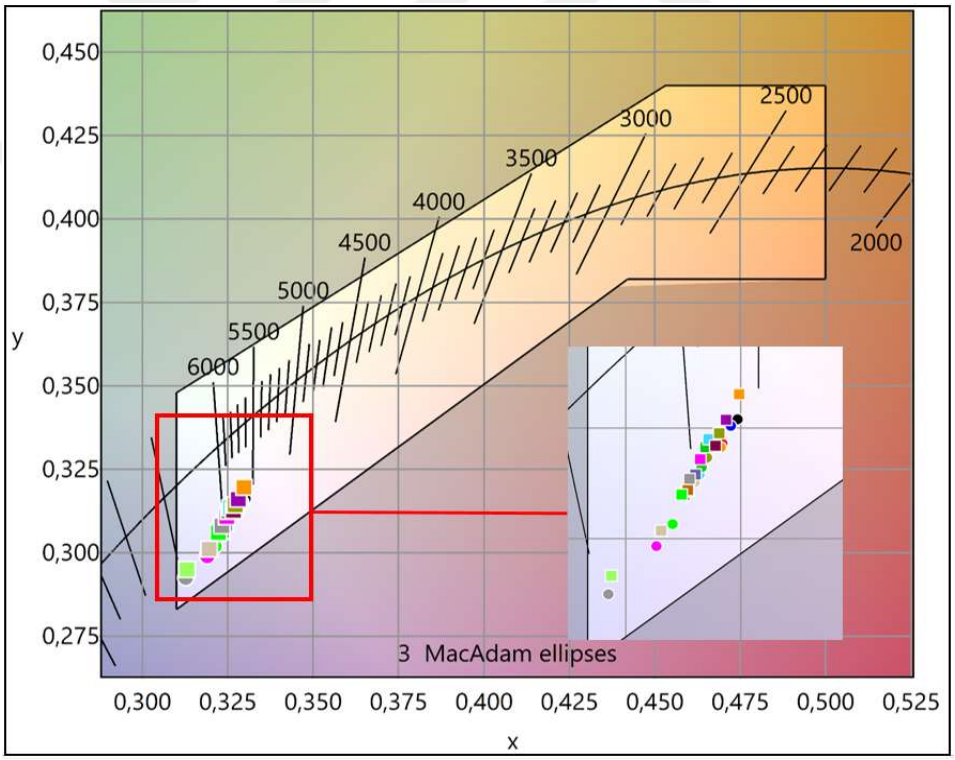
Lazer ışık kaynağının, lazer diyot 1 A ile sürülürken yatay eksende alınan CIE 1931 renk koordinatı ölçümlerinin sonuçları aşağıdaki Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3. 1. Lazer ışık kaynağının yatay eksende ölçülen renk koordinatları

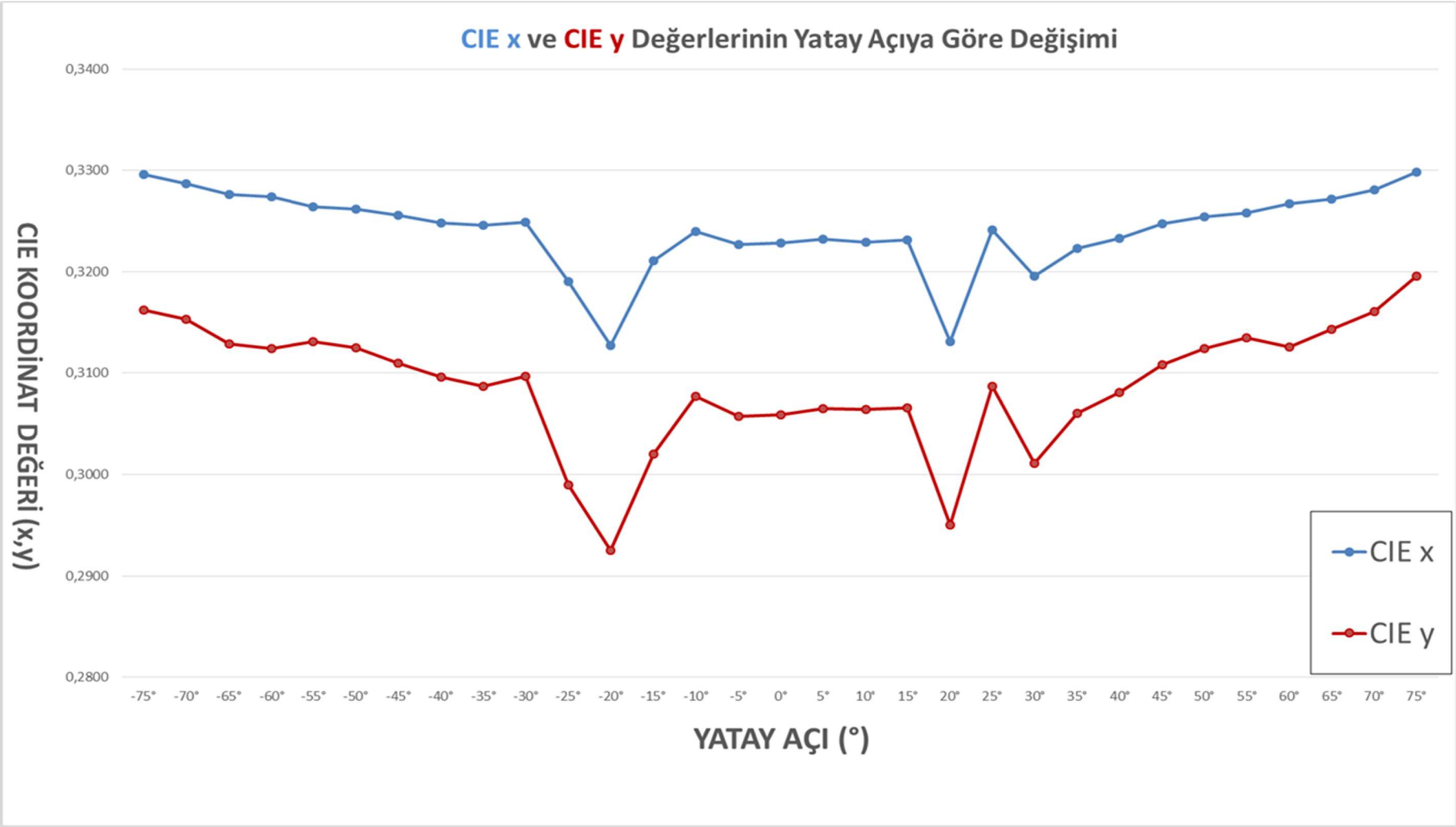
YATAY AÇI	CIE x	CIE y	Sembol
-75°	0,3296	0,3162	
-70°	0,3287	0,3153	
-65°	0,3276	0,3129	
-60°	0,3274	0,3124	
-55°	0,3264	0,3131	
-50°	0,3262	0,3125	
-45°	0,3256	0,3110	
-40°	0,3248	0,3096	
-35°	0,3246	0,3087	
-30°	0,3249	0,3097	
-25°	0,3190	0,2990	
-20°	0,3127	0,2925	
-15°	0,3211	0,3020	
-10°	0,3240	0,3077	
-5°	0,3227	0,3057	
0°	0,3228	0,3059	
5°	0,3232	0,3065	
10°	0,3229	0,3064	
15°	0,3231	0,3066	
20°	0,3131	0,2950	
25°	0,3241	0,3087	
30°	0,3196	0,3011	
35°	0,3223	0,3060	
40°	0,3233	0,3081	
45°	0,3247	0,3108	
50°	0,3254	0,3124	
55°	0,3258	0,3135	
60°	0,3267	0,3126	
65°	0,3272	0,3143	
70°	0,3281	0,3161	
75°	0,3298	0,3196	

Sol kolon, ölçümün alındığı açı değerini vermektedir. Eksi (-) ifadesi ışığın yayılma doğrultusuna göre solda kalan açıları tarif etmektedir. İkinci kolon ölçülen CIE 1931 renk koordinatının x bileşenine, üçüncü kolon ise y bileşenine karşılık gelmektedir. Sembol başlığı altında verilen semboller ise, Color Calculator programından alınan görüntüde, ölçüm noktasının temsil edildiği şekli göstermektedir.

Yatay eksendeki ölçüm sonuçları, ışığın CIE x koordinatının ağırlıkla 0.32 noktası etrafında, CIE y koordinatının da 0.30 etrafında konumlandığını göstermektedir. Lazer ışığının daha yoğun olduğu merkez açılardan uzaklaştıkça renk koordinatı değerlerinin, CIE 1931 diyagramında "eşit enerji noktası" veya "beyaz nokta" olarak anılan x=0.33, y=0.33 koordinatına yakınsadığı görülmektedir. Bunun yanında, koordinat değerlerinin, -30°'ile 30° aralığında değişimdeki trendin bozulduğu tespit edilmiştir. Bunun, fosfor tabakasının belirli bölgelerinde kısmi olarak doygunluğa ulaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3. 1. Yatay eksen ölçümlerinin CIE 1931 diyagramındaki konumları



Şekil 3. 2. Lazer ışık kaynağının CIE x ve CIE y renk koordinat değerlerinin yatay açıya göre değişimi

Yukarıda, Şekil 3.1'de lazer ışık kaynağının, yatay eksende açıya değişimine bağlı olarak elde edilen ölçüm sonuçlarının CIE 1931 diyagramında karşılık geldiği noktalar verilmiştir. Burada açık renkli kısım, ECE-R48'de belirtilen beyaz renk bölgesini göstermektedir.

Yatay eksendeki ölçüm sonuçlarının CIE 1931 diyagramındaki konumları incelendiğinde, tümünün ECE R-48'de belirtilen beyaz renk bölgesinin içinde yer aldığı görülmektedir. -20° ve +20°'de ölçülen değerler, beyaz renk bölgesinin mavi sınırına en yakın noktalardır. Bu açılarda yayılan ışığın mavi bileşeninin diğer açılardakinden daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Yatay eksende alınan ölçümlerin CIE 1931 x ve y değerlerinin açıya göre değişim grafiği oluşturulduğunda, bu açılardaki sapma daha kolay görülmektedir. Grafik, yukarıdaki Şekil 3.2'de verilmiştir.

Lazer ışık kaynağının, lazer diyot 1 A ile sürülürken dikey eksende alınan ölçüm sonuçları aşağıdaki Tablo 3.2'de verilmiştir. Eksi (-) ifadesi ışığın yayılma doğrultusuna göre aşağıda kalan açıları tarif etmektedir.

Dikey eksende alınan ölçüm sonuçları incelendiğinde, ışığın yatay eksende ölçülen değerlerde olduğu gibi CIE 1931 (x,y) koordinatlarının (0.32, 0,30) değeri civarında konumlandığı görülmektedir. Merkez açılardan uzaklaştıkça x=0.33, y=0.33 eşit enerji noktasına doğru kayma, dikey eksende kolayca fark edilmektedir.

Ölçüm sonuçlarının CIE 1931 diyagramında bulundukları konumlar ECE R-48'de belirtilen beyaz renk alanının içinde kalmaktadır. Hem yatay eksende hem de dikey eksende alınan sonuçlar, elde edilen ışığın "soğuk beyaz" kategorisinde olduğunu göstermektedir. Lazer ışık kaynağının, otomotiv aydınlatmada kullanılan LED'lerin rengine yakın bir renkte ışık verdiği görülmektedir. Yatay eksende alınan ölçüm sonuçlarının CIE 1931 diyagramında karşılık geldiği noktalar Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

Lazer ışık kaynağının dikey eksende alınan ölçümlerine göre, x ve y değerlerinin açıya göre değişim grafiği Şekil 3.4'de verilmiştir.

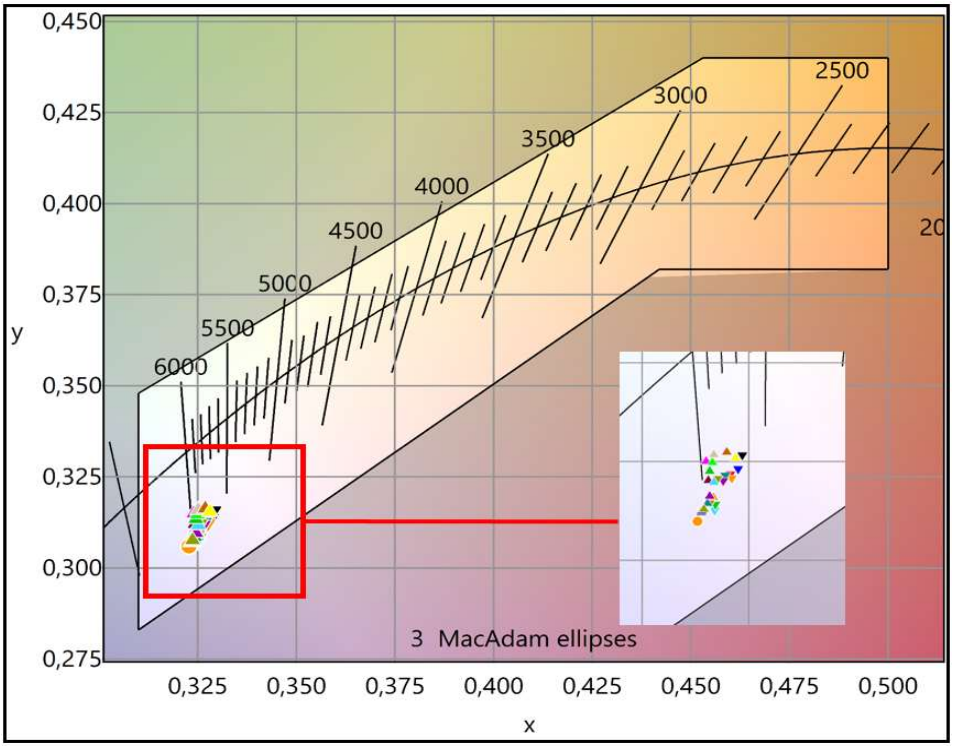
Tablo 3. 2. Lazer ışık kaynağının dikey eksende ölçülen renk koordinatları

DİKEY AÇI	CIE x	CIE y	Sembol
-75°	0,3291	0,3161	
-70°	0,3285	0,3140	
-65°	0,3274	0,3132	
-60°	0,3276	0,3126	
-55°	0,3267	0,3130	
-50°	0,3264	0,3122	
-45°	0,3256	0,3125	
-40°	0,3248	0,3096	
-35°	0,3252	0,3077	
-30°	0,3253	0,3086	
-25°	0,3245	0,3088	
-20°	0,3244	0,3092	
-15°	0,3246	0,3089	
-10°	0,3248	0,3093	
-5°	0,3235	0,3076	
0°	0,3228	0,3059	
5°	0,3233	0,3073	
10°	0,3234	0,3075	
15°	0,3247	0,3096	
20°	0,3250	0,3096	
25°	0,3242	0,3087	
30°	0,3245	0,3098	
35°	0,3237	0,3078	
40°	0,3243	0,3122	
45°	0,3251	0,3119	
50°	0,3245	0,3136	
55°	0,3240	0,3151	
60°	0,3249	0,3149	
65°	0,3251	0,3161	
70°	0,3269	0,3165	
75°	0,3281	0,3156	

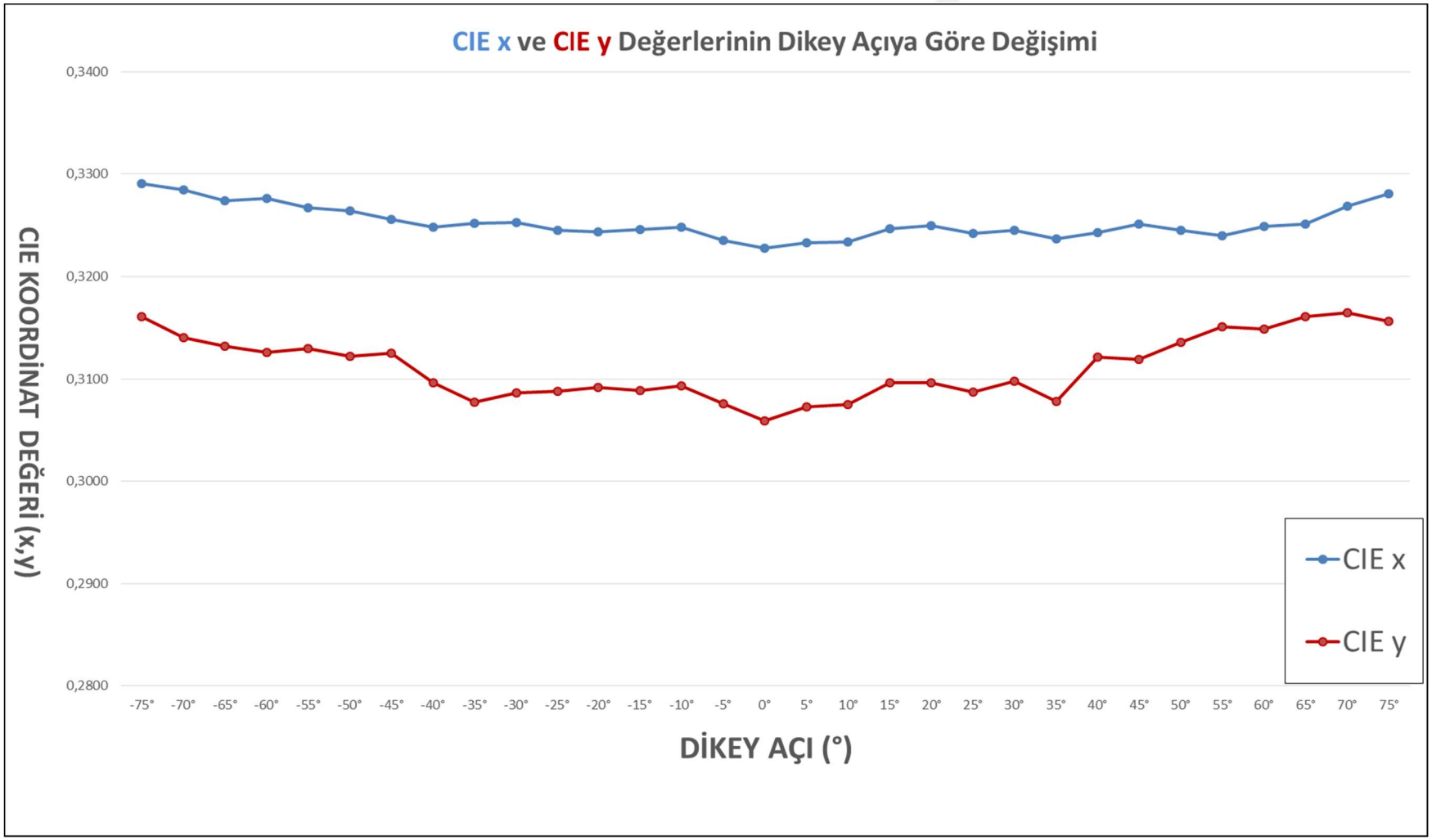
Spektrometre ile yapılan ölçüme göre lazer diyot 1 A akımla sürülürken, lazer ışık kaynağından elde edilen ışığın, spektral güç dağılımı grafiği aşağıda Şekil 3.5'de verilmiştir. Dar bir dalgaboyu aralığında, LD'un mavi ışığının oldukça yüksek bir pik yaptığı görülmektedir. Bunun yanında, fosfordan çıkan ışık, tüm görünür bölgeyi kapsayacak genişliktedir. Buna göre, lazer ışık kaynağıyla aydınlatılan cisimlerin, gözlemci tarafından gerçek renkleriyle algılanabilecek spektral genişliğe sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Burada elde edilen verilerin Trivellin ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmadan [57] elde ettikleri sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Lazer diyotun sürme akımının, değişen değerlerine göre ölçülen CIE 1931 renk koordinatları Şekil 3.6'da verilmiştir. Ölçüm alınırken açı 0°'de sabit tutulmuştur.

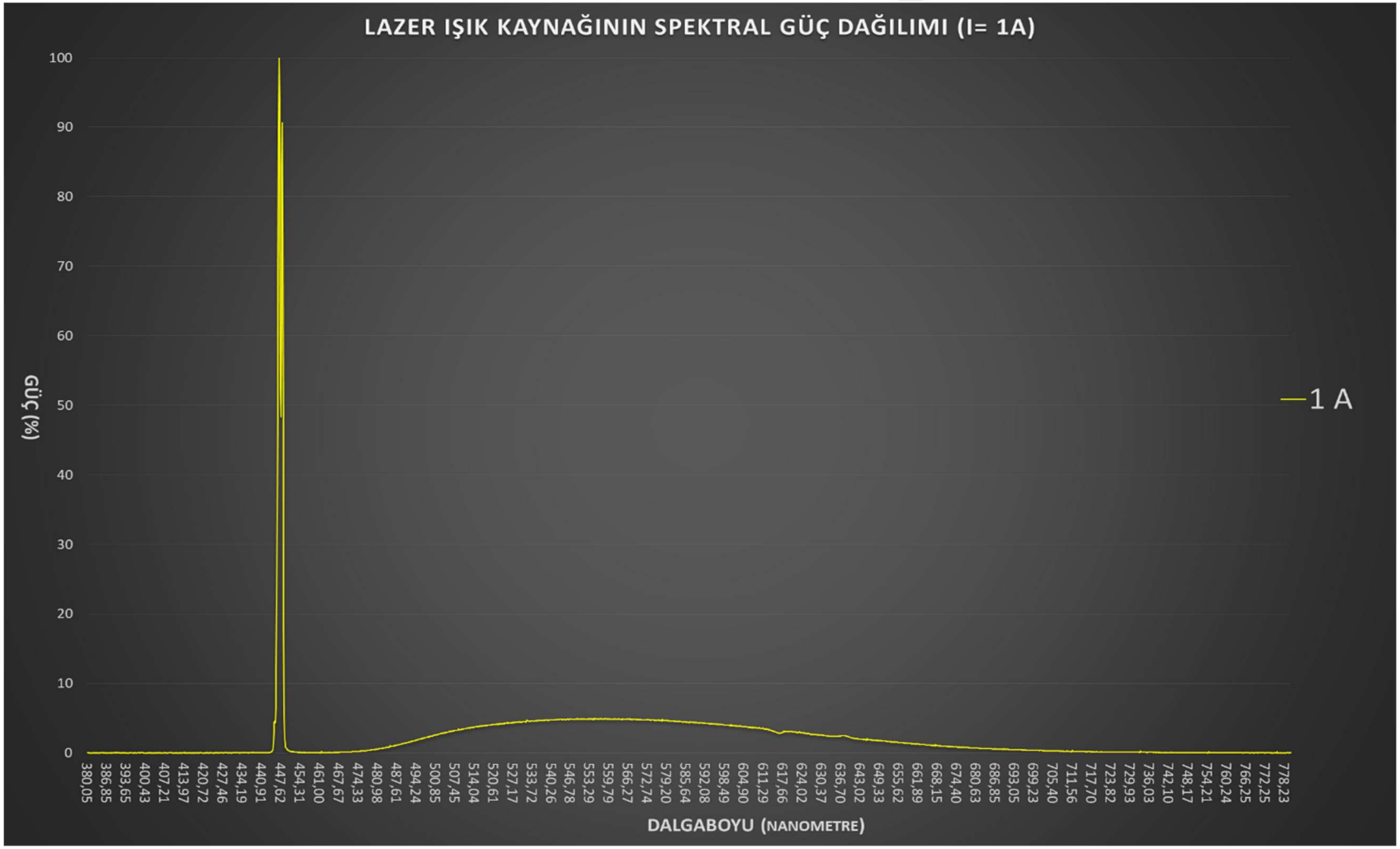
Lazer diyot 0,2 A, 0,4 A, 0,6 A, 1 A, 1,2 A, 1,4 A ve 1,6 A akım değerleri ile sürülmüştür. Grafik incelendiğinde, eşik değerinin üzerine çıkıldıktan hemen sonra, renk koordinatlarının kararlı bir durum sergilediği görülmektedir. Sürme akımı maksimum değere yaklaştığında dahi, renkte kayda değer bir kayma görülmemektedir. Bunun sebebinin, fosfor tabaka üzerindek ısının düzgün bir şekilde dağılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı akım değerleri için spektral güç dağılımını gösteren grafik Şekil 3.7.'de verilmiştir. Akımdaki değişime göre spektrumun yapısı incelendiğinde, akım arttıkça mavi bölgede gözlenen pik değerinin 440 nm'den 450 nm'ye doğru kaydığı görülmektedir. Bu kayma, LD'un akımı arttırıldıkça baskın dalgaboyunun da yüksek dalgaboylarına kaymasından kaynaklanmaktadır. Fakat, ışıma spektrumunun geri kalanında, akım değişimine rağmen spektral dağılımın stabil olduğu gözlemlenmiştir. Işıma spektrumdan lazer diyotun ışıma aralığı çıkarılarak, 456 nm ile 780 nm dalgaboyu aralığında elde edilen grafik Şekil 3.8'de verilmiştir. Bu aralıktaki ışımanın, sürme akımıyla doğrudan bir bağıntısı olmadığı görülmüştür. Buradan hareketle, kullanılan fosfor tabakasının, bu çalışmada üzerine uygulanan güçten daha yüksek güçlerde satürasyona ulaşacağı sonucuna varılmıştır. Fakat, lazer diyotun maksimum sürme akımına ulaşıldığı için, fasfor tabakası daha yüksek güçlerde test edilememiştir.



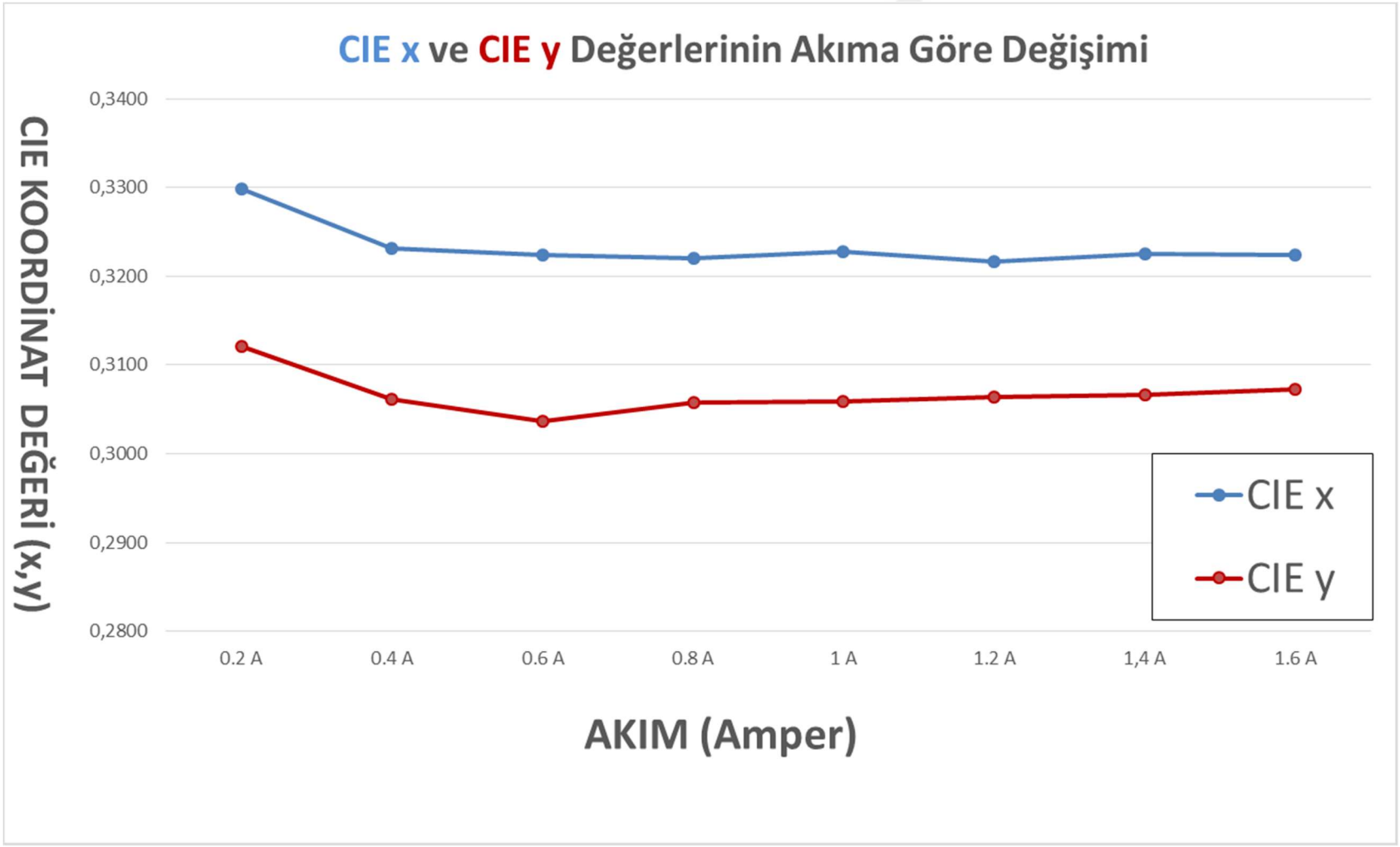
Şekil 3. 3. Dikey eksen ölçümlerinin CIE 1931 diyagramındaki konumları



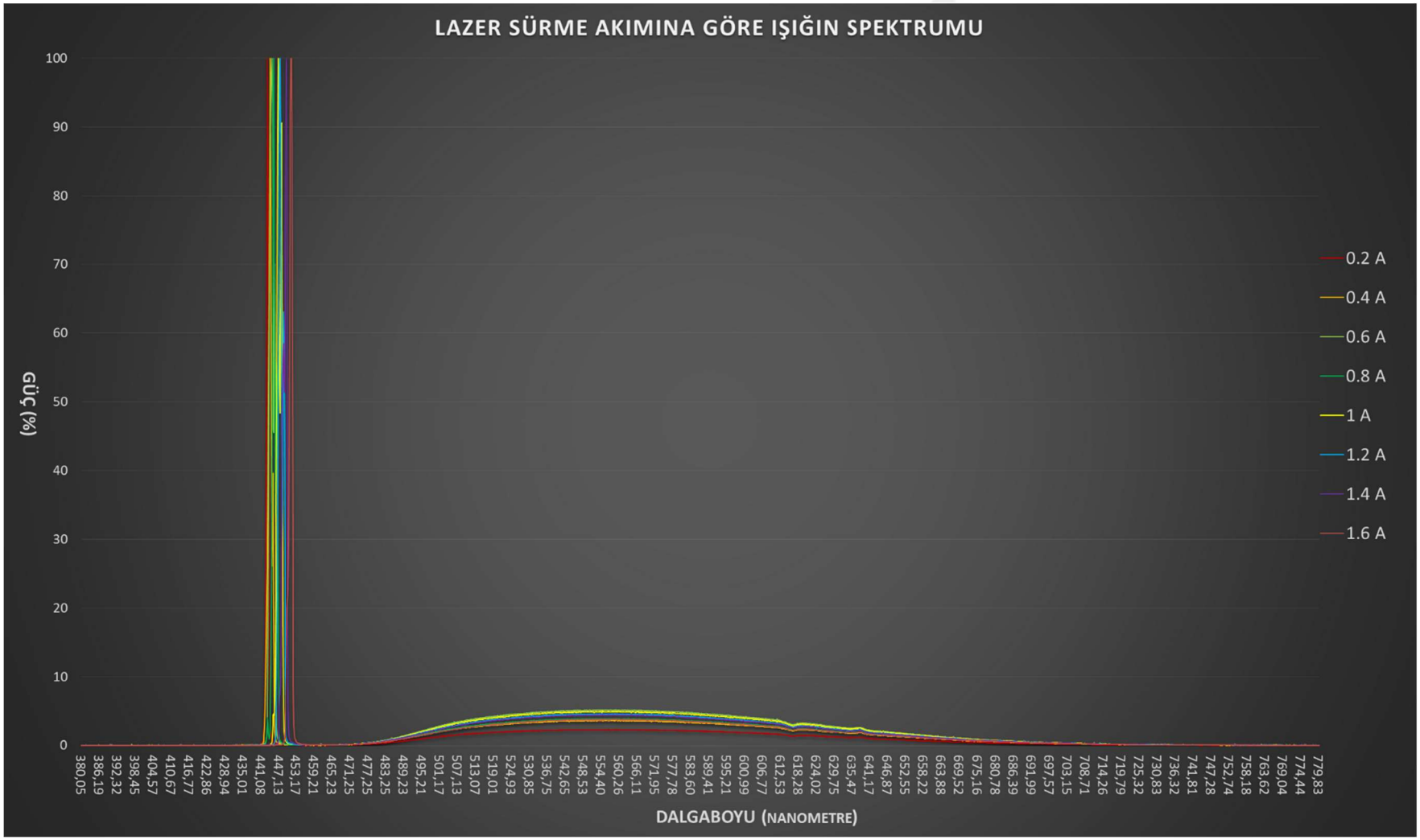
Şekil 3. 4. Lazer ışık kaynağının CIE x ve CIE y renk koordinat değerlerinin dikey açıya göre değişimi



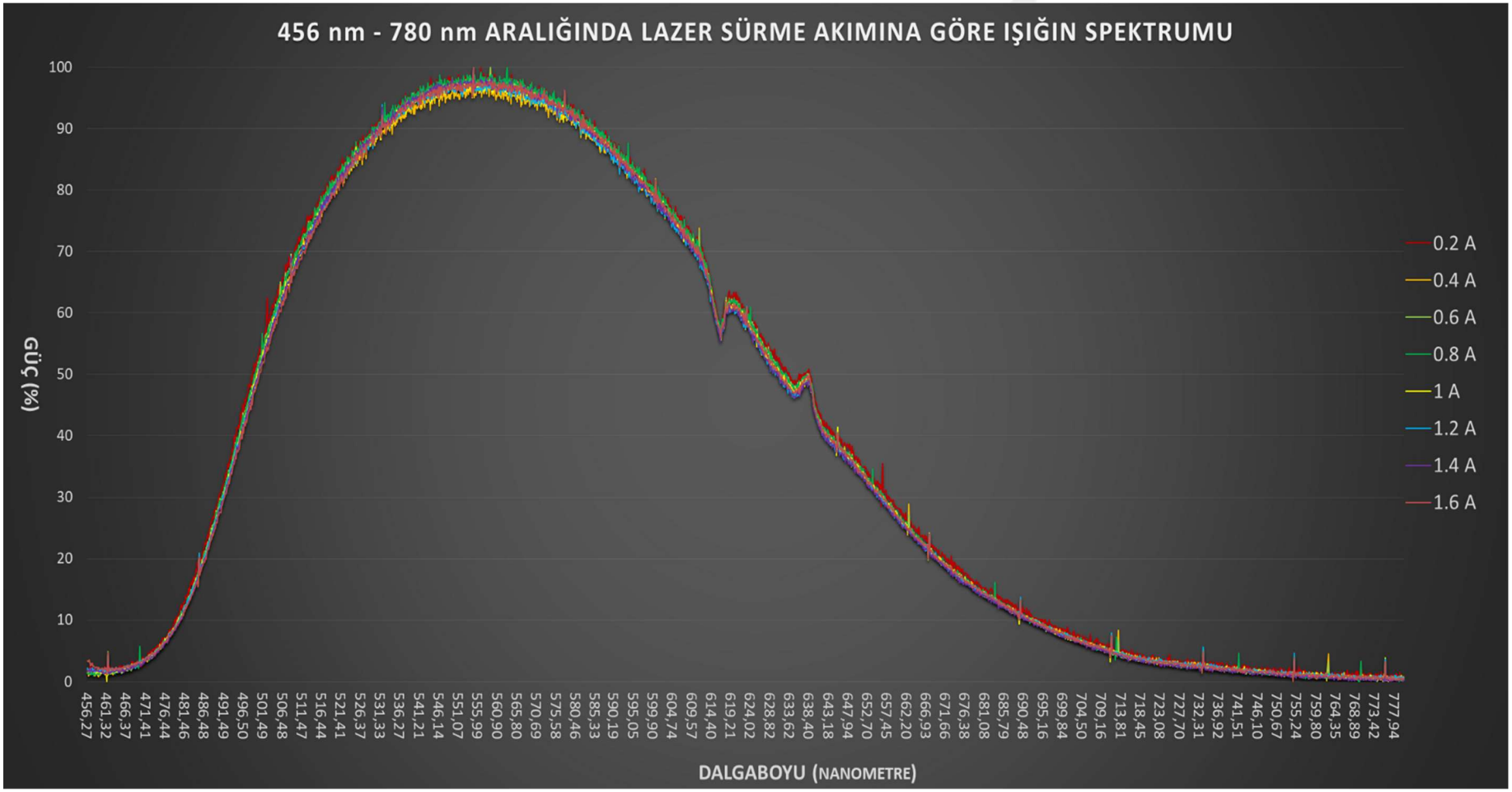
Şekil 3. 5. 1 A akımda lazer ışık kaynağının spektral güç dağılımı



Şekil 3. 6. CIE 1931 renk koordinatlarının akıma göre değişimi



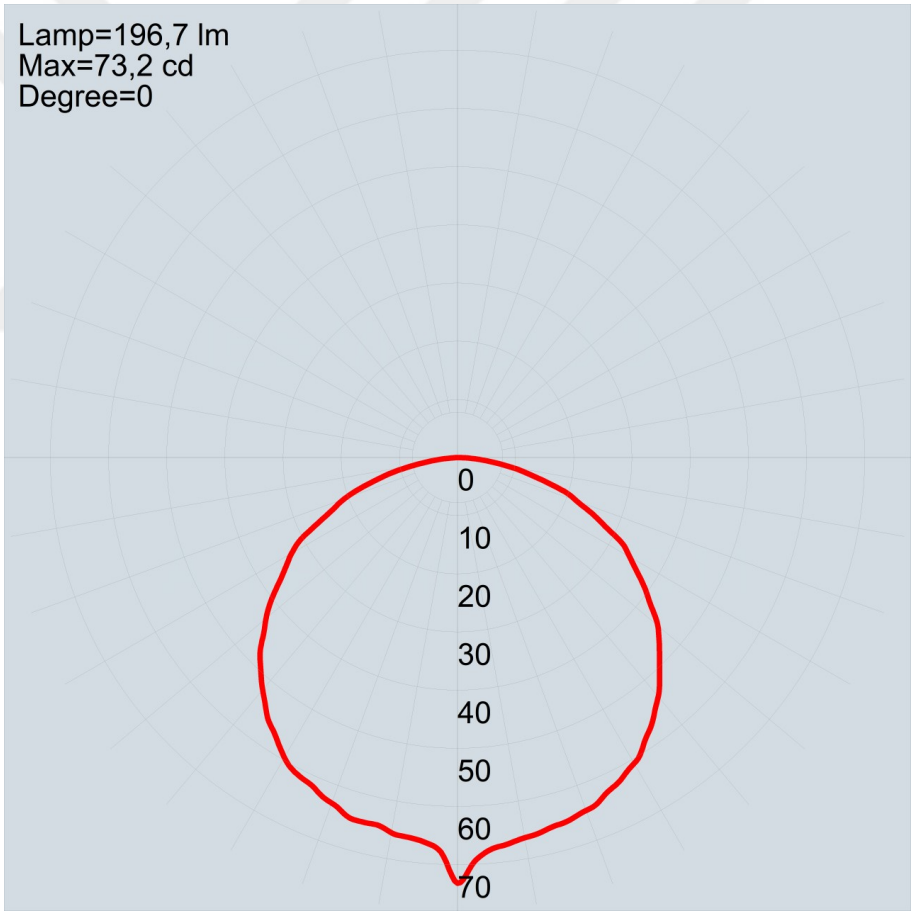
Şekil 3. 7. Farklı akımlarda lazer ışık kaynağının spektral güç dağılımı



Şekil 3. 8. 450 nm – 750 nm arası spektral güç dağılımının akımla değişimi

3.2. Işık Şiddeti Performans Değerlendirmesi

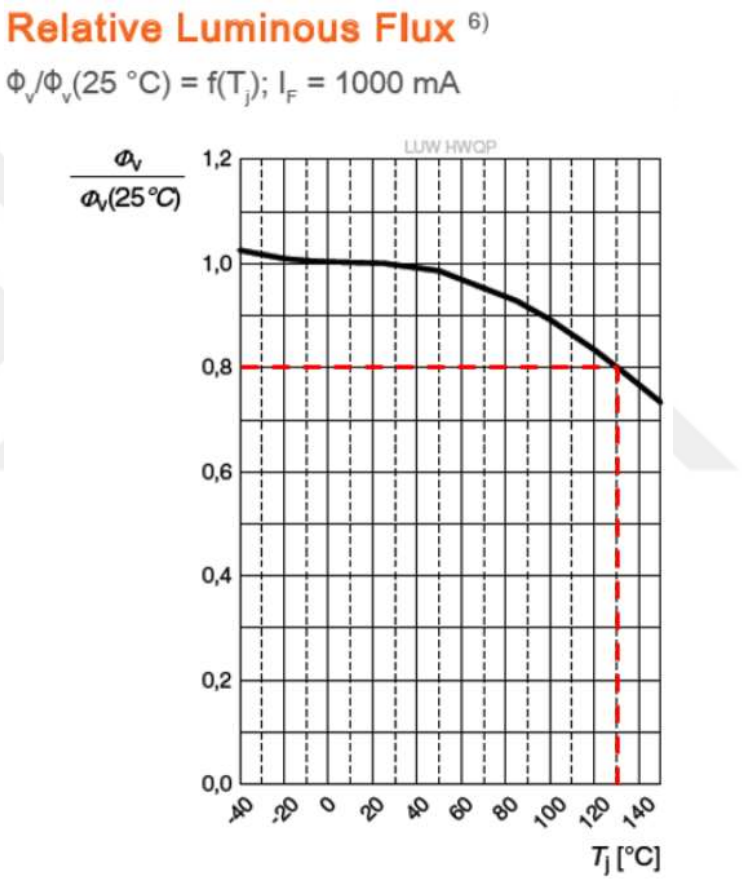
Lazer ışık kaynağının fotometri ölçümünden oluşturulan ".ies" dosya biçimindeki sayısal veriye göre toplam ışık akısı 196,7 lm'dir. Maksimum ışık şiddeti 73,2 cd'dır. Lambert ışıyıcı olarak tabir edilen ışık kaynağı türüne uyan bir ışık dağılım karakteristiğine sahiptir. Buna ek olarak, lazer spotunun oluşturduğu dar huzmenin, genel ışık dağılımından daha yoğun küçük bir bölge oluşturduğu tespit edilmiştir. Ölçüm esnasında, fosfor tabakasından geri yansıyan ışık, kontrol edilemeyeceği için ihmal edilmiş ve fotometrik veriye dahil edilmemiştir. Buna rağmen, elde edilen ışık akısı, literatürde rastlanan akı değerleriyle uyumludur. Lazer ışık kaynağının, fotometrik polar (kutupsal) diyagramı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3. 9. Lazer ışık kaynağının fotometrik polar (kutup) diyagramı

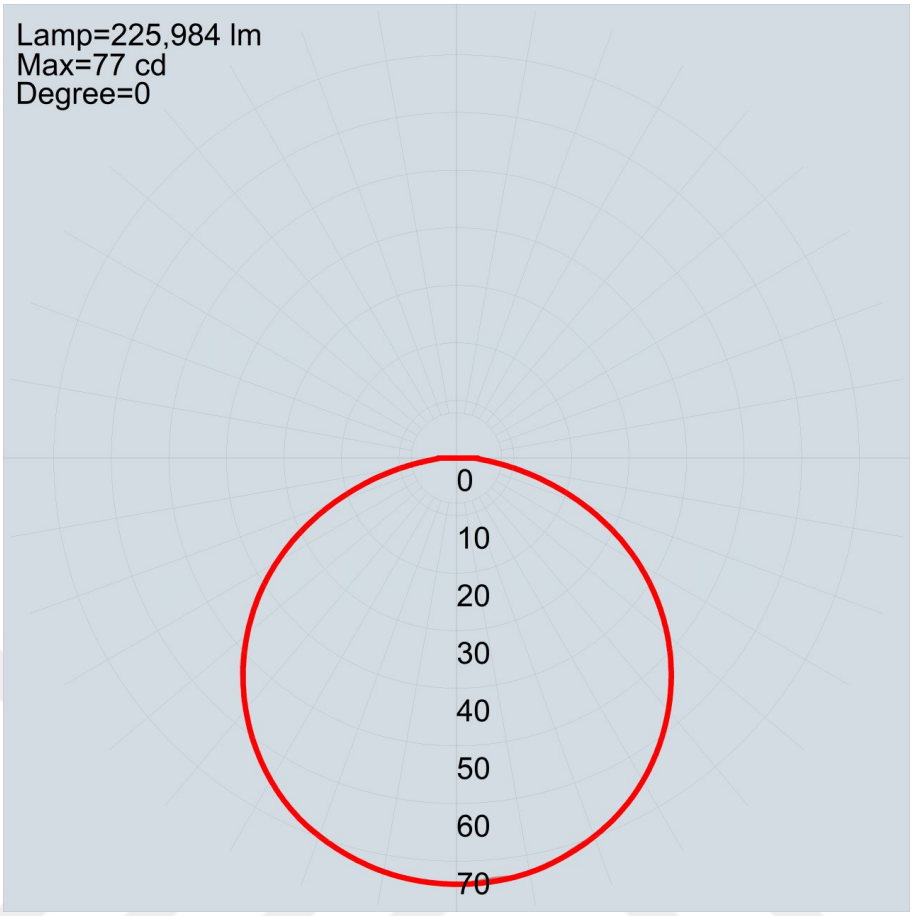
LED'in fotometri ölçümünden oluşturulan ".ies" verisine göre, LED'in toplam ışık akısı 225,98 lm'dir. Maksimum ışık şiddeti 77 cd'dir. İdeal bir Lambert ışık kaynağı karakteristiğine sahiptir. Elde edilen ışık akısı değeri, LED'in teknik dökümanında belirtilen 280 lm minimum akı değerinin altında kalmaktadır. LED tedarikçileri,

akredite ölçüm cihazlarıyla ölçümlerini gerçekleştirmektedirler ve oldukça isabetli veriler temin etmektedirler. Ölçüm değeri ile teknik dokümandaki akı değeri arasındaki farkın sebebinin, fotometri ölçümü esnasında, LED'in üzerindeki ısıyı atacak herhangi bir soğutucu yapı kullanılmaması olduğu tahmin edilmektedir. Zira LED'in teknik dokümanında sıcaklığa bağlı ışık akısı değişimi grafiği incelendiğinde, 130°C jonksiyon sıcaklığında, ölçüm ile teknik dokümandaki akı değeri oranı kadar bir düşüş öngörüldüğü tespit edilmiştir. Şekil 3.10'da LED'in jonksiyon sıcaklığına bağlı ışık akısı değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3. 10. LED'in jonksiyon sıcaklığı-ışık akısı grafiği

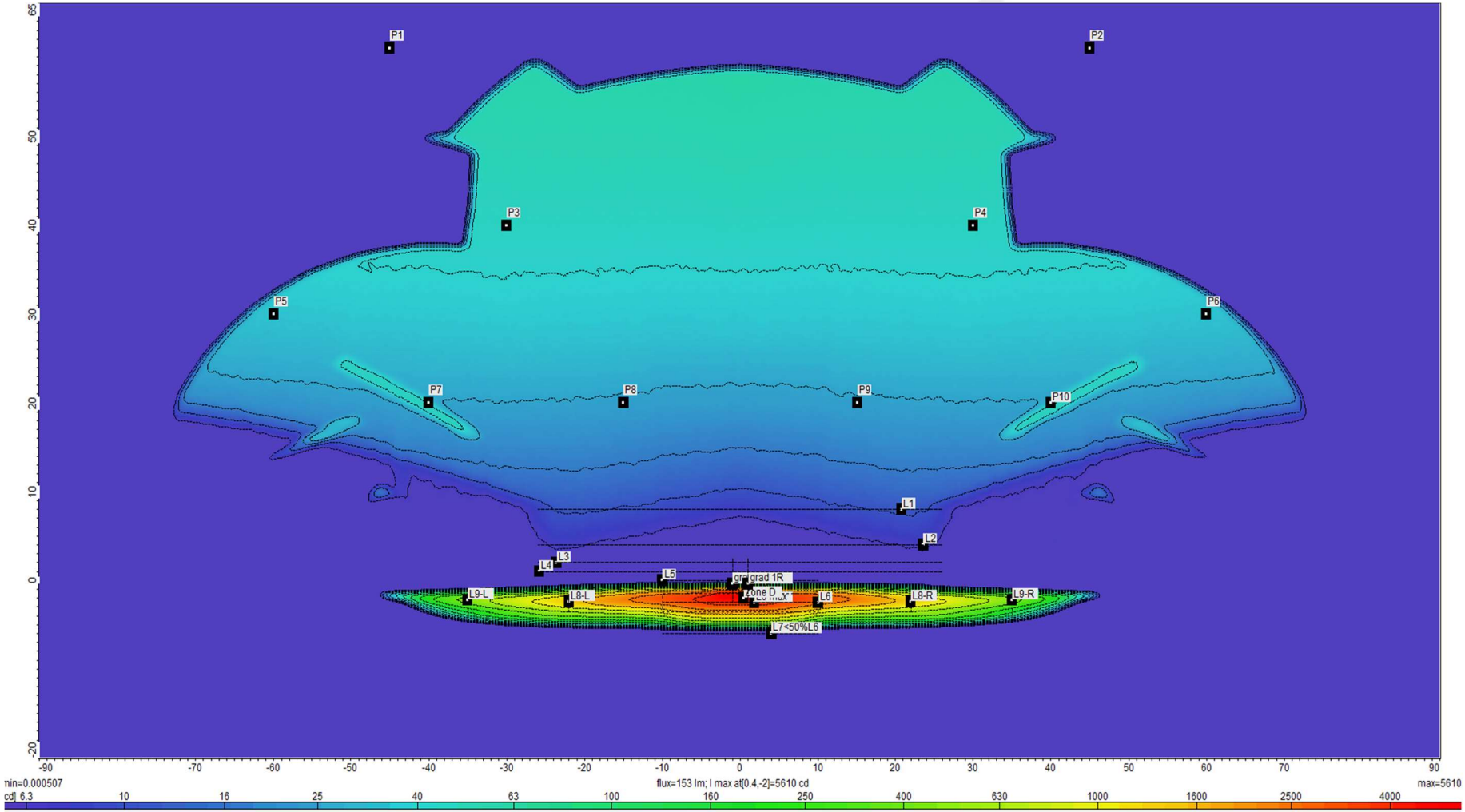
Ölçümden elde edilen, LED'in fotometrik polar (kutupsal) diyagramı Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3. 11. LED'in fotometrik polar (kutup) diyagramı

Lazer ışık kaynağı ve LED için bilgisayar destekli reflektör tasarımları tamamlandıktan sonra, 5 x 10^{10} ışın ile gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonlarından elde edilen sonuçlar aracılığıyla, her iki ışık kaynağı – reflektör çiftinin, LucidShape programında ECE R-19 ön sis lambası regülasyonuna uygunluğu kontrol edilmiştir. Simülasyon sonucuna göre, tasarlanan reflektör ve lazer ışık kaynağı, regülasyon gerekliliklerini sağlamaktadır.

Lazer ışık kaynağı - reflektör çiftinin simülasyon sonucu elde edilen ışık dağılımı ve ECE R-19 regülasyonuna göre test noktaları aşağıdaki Şekil 3.12'de verilmiştir. ECE R-19 test noktalarına göre istenen minimum ve maksimum değerlerle birlikte, simülasyon sonucunda elde edilen ışık şiddeti değerleri Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3. 12. Lazer ışık kaynağı - reflektör çifti simülasyon sonucu ışık dağılımı

Regulation: ECE R19 Class F3 13.2V

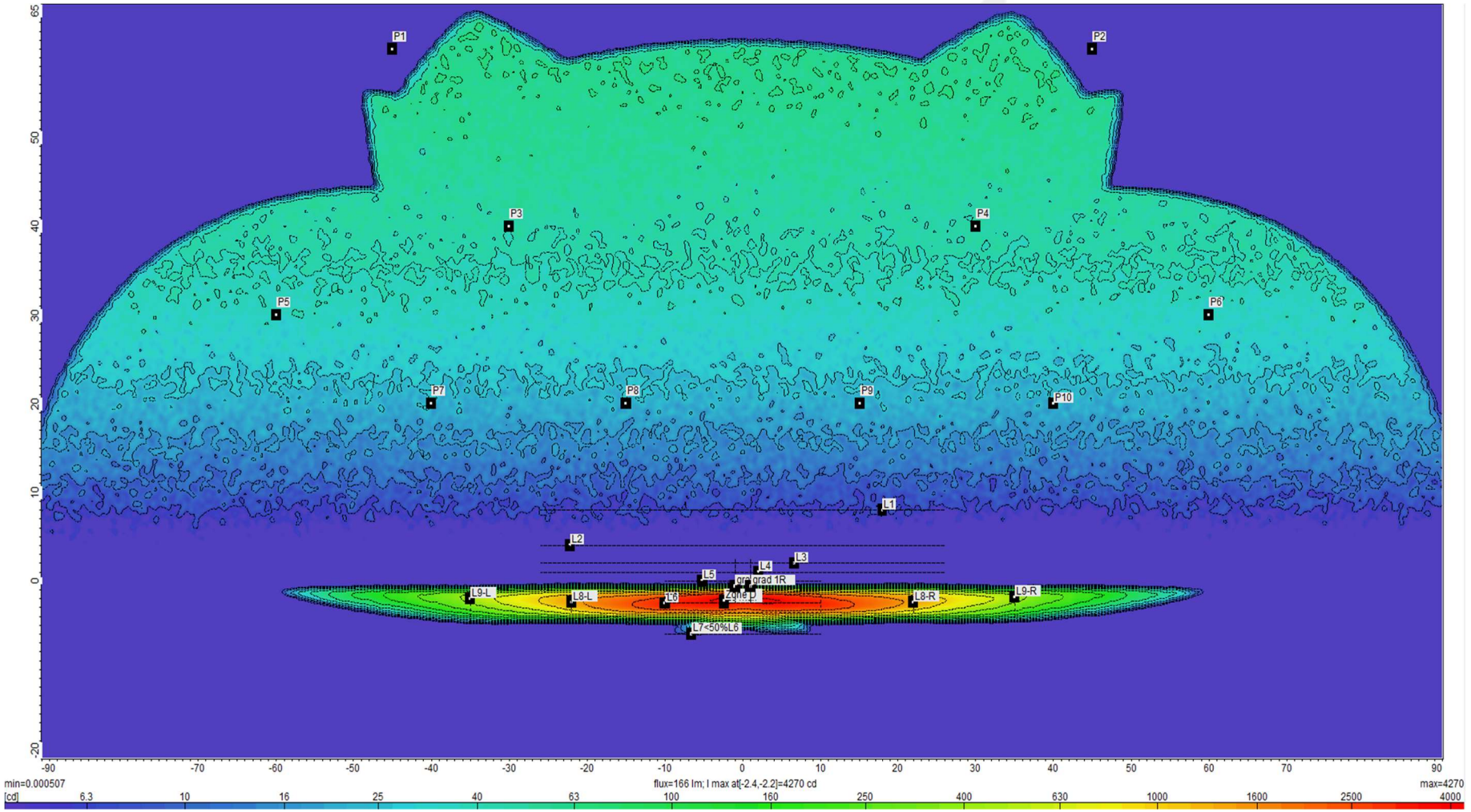
Ölçüm Noktası	Simülasyon Değeri	Regülasyon Min.	Regülasyon Max.	Test Pozisyonu
P1	0.12 OK	--	85.00	-45.0, 60.0
P2	0.11 OK	--	85.00	45.0, 60.0
P3	44.91 OK	--	85.00	-30.0, 40.0
P4	44.83 OK	--	85.00	30.0, 40.0
P5	33.84 OK	--	85.00	-60.0, 30.0
P6	34.05 OK	--	85.00	60.0, 30.0
P7	37.09 OK	--	85.00	-40.0, 20.0
P8	23.89 OK	--	85.00	-15.0, 20.0
P9	23.75 OK	--	85.00	15.0, 20.0
P10	34.64 OK	--	85.00	40.0, 20.0
L1	10.69 OK	--	130.0	-26.0,26.0 / 8.0
L2	6.80 OK	--	150.0	-26.0,26.0 / 4.0
L3	5.39 OK	--	245.0	-26.0,26.0 / 2.0
L4	4.96 OK	--	360.0	-26.0,26.0 / 1.0
L5	1.26 OK	--	485.0	-10.0,10.0 / 0.0
L6	2867.2 OK	2700.0	--	-10.0,10.0 / -2.5
L6 max	4643.1 OK	--	--	-10.0,10.0 / -2.5
L7<50%L6	0.32 OK	--	2321.5	-10.0,10.0 / -6.0
L8-L	1402.6 OK	1100.0	--	-22.0 / -3.5,-1.5
L8-R	1388.6 OK	1100.0	--	22.0 / -3.5,-1.5
L9-L	473.2 OK	450.0	--	-35.0 / -4.5,-1.5
L9-R	465.4 OK	450.0	--	35.0 / -4.5,-1.5
Zone D	5607.7 OK	--	12000	-10.0, 10.0 ; -3.5,-1.5
grad 1L	0.52 OK	0.08	--	-1.0,-1.0 ; -2.5, 2.5
grad 1R	0.53 OK	0.08	--	1.0, 1.0 ; -2.5, 2.5

The light distribution is OK

Şekil 3. 13. Lazer ışık kaynağı - reflektör çifti simülasyon sonucu ışık şiddeti değerleri

LED – reflektör çifti için 5 x 10^{10} ışın ile gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonundan elde edilen sonuçlar LucidShape programında ECE R-19 ön sis lambası regülasyonuna göre kontrol edilmiştir. Bu tasarımın da regülasyon gerekliliklerini sağladığı görülmüştür. LED – reflektör çiftinin ışık dağılımı Şekil 3.14'te verilmiştir. Şekil 3.15'de ise ışık şiddeti değerleri verilmiştir.

Simülasyon sonuçlarına, göre her iki tasarım da P1'den P10'e kadar olan regülasyon test noktalarında öngörülen maksimum ışık şiddeti değerlerini aşmamaktadır. Line 1 (L1)'den Line 5 (L5)'e kadar olan çizgilerde de, ışık şiddetinin regülasyonda öngörülen üst sınırın oldukça altında olduğu tespit edilmiştir. Bu özellikleriyle, iki tasarımın da karşıdan gelen sürücülerin görüş konforunu bozmadan kullanılabilecek yapıya sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 3. 14. LED – reflektör çifti simülasyon sonucu ışık dağılımı

Regulation: ECE R19 Class F3 13.2V

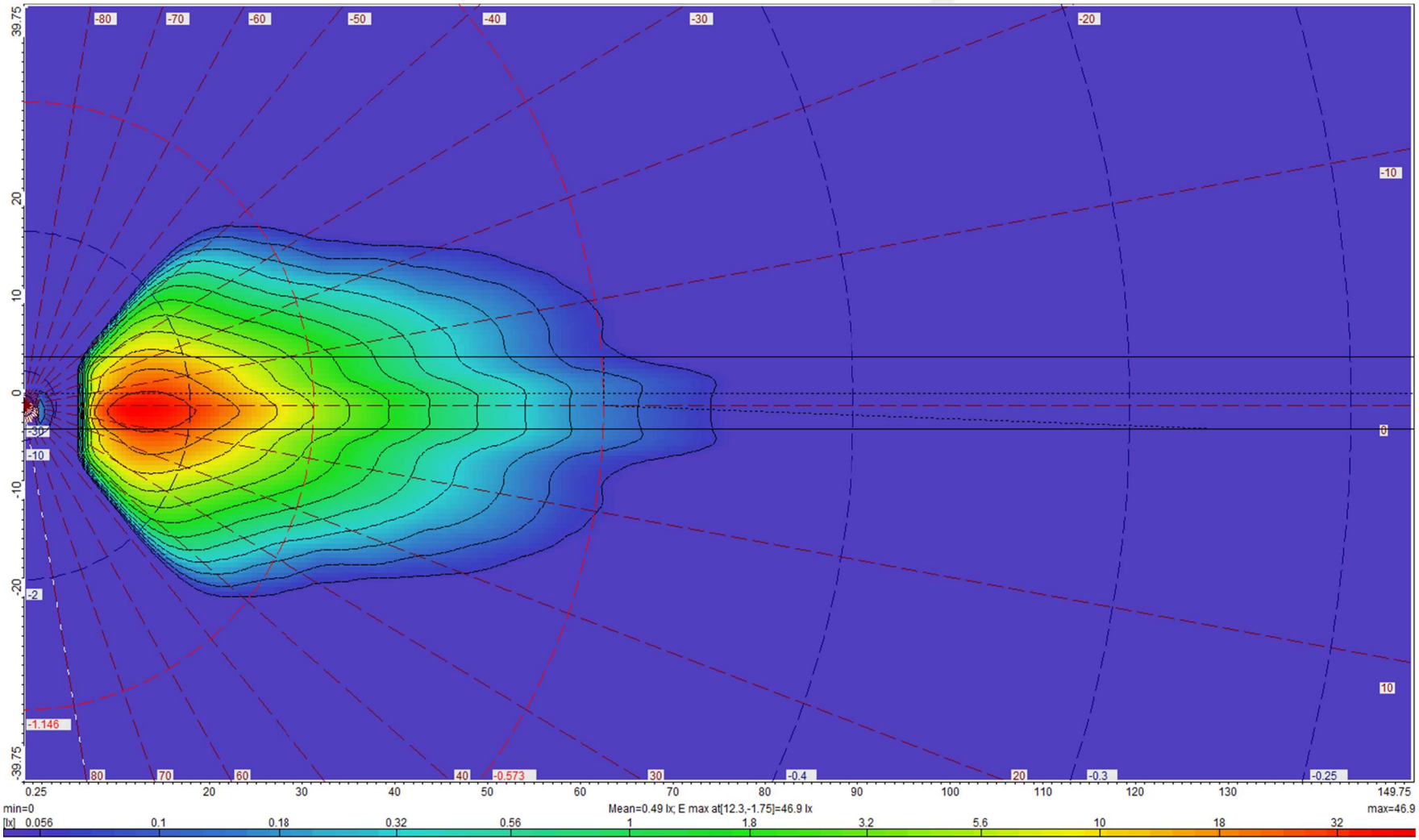
Ölçüm Noktası	Simülasyon Değeri	Regülasyon Min.	Regülasyon Max.	Test Pozisyonu
P1	0.00 OK	--	85.00	-45.0, 60.0
P2	0.00 OK	--	85.00	45.0, 60.0
P3	46.13 OK	--	85.00	-30.0, 40.0
P4	51.13 OK	--	85.00	30.0, 40.0
P5	39.17 OK	--	85.00	-60.0, 30.0
P6	29.92 OK	--	85.00	60.0, 30.0
P7	21.86 OK	--	85.00	-40.0, 20.0
P8	22.45 OK	--	85.00	-15.0, 20.0
P9	22.78 OK	--	85.00	15.0, 20.0
P10	21.28 OK	--	85.00	40.0, 20.0
L1	9.56 OK	--	130.0	-26.0,26.0 / 8.0
L2	3.38 OK	--	150.0	-26.0,26.0 / 4.0
L3	1.78 OK	--	245.0	-26.0,26.0 / 2.0
L4	1.04 OK	--	360.0	-26.0,26.0 / 1.0
L5	3.16 OK	--	485.0	-10.0,10.0 / 0.0
L6	3280.4 OK	2700.0	--	-10.0,10.0 / -2.5
L6 max	4077.6 OK	--	--	-10.0,10.0 / -2.5
L7<50%L6	11.09 OK	--	2038.8	-10.0,10.0 / -6.0
L8-L	1423.1 OK	1100.0	--	-22.0 / -3.5,-1.5
L8-R	1448.1 OK	1100.0	--	22.0 / -3.5,-1.5
L9-L	475.6 OK	450.0	--	-35.0 / -4.5,-1.5
L9-R	463.0 OK	450.0	--	35.0 / -4.5,-1.5
Zone D	4269.2 OK	--	12000	-10.0, 10.0 ; -3.5,-1.5
grad lL	0.37 OK	0.08	--	-1.0,-1.0 ; -2.5, 2.5
grad lR	0.39 OK	0.08	--	1.0, 1.0 ; -2.5, 2.5

The light distribution is OK

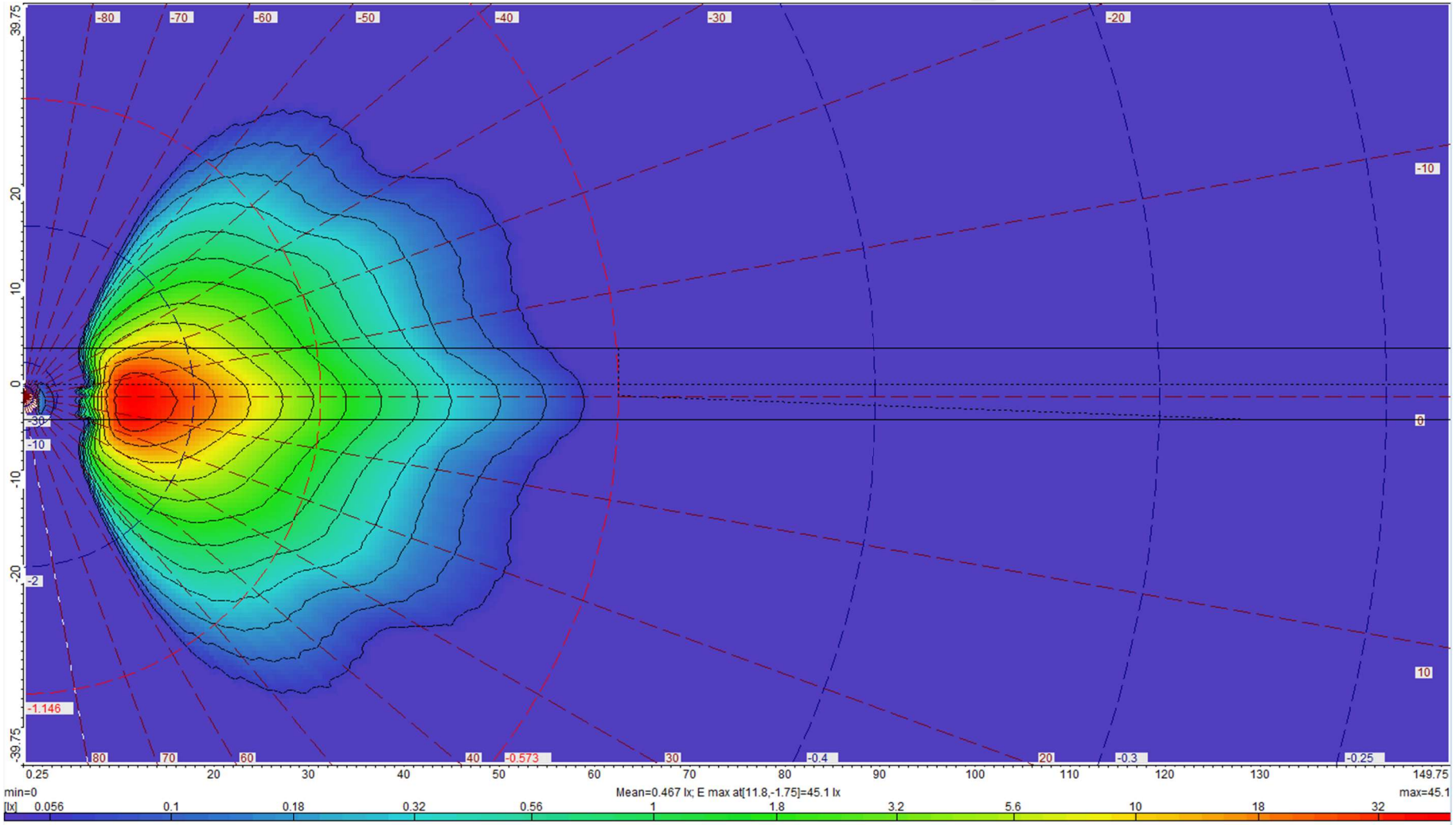
Şekil 3. 15. LED - reflektör çifti simülasyon sonucu ışık şiddeti değerleri

Ön sis lambası olarak kullanılabileceğini test ettiğimiz tasarımların, bir araçtaki yol aydınlatma performansları LucidShape programı kullanılarak incelenmiştir. Her araçta iki adet ön sis lambası bulunmaktadır. Bu lambalar aracın orta noktasına göre simetrik olarak montajlanmıştır. Bu yüzden yol aydınlatma görüntüleri alınırken, yolun birbirine simetrik iki lamba ile aydınlatıldığı varsayılmıştır. Aşağıda verilen şekiller, tasarlanan reflektör ve ışık kaynağı çiftlerinin birer lamba olduğu kabul edilerek, iki şeritli bir yol üzerinde oluşturdukları izolüks (iso-lux) dağılımının, 25 m yüksekten alınmış görüntüleridir. Yatay ve dikey eksenler metre cinsinden uzaklığı, şekil üzerindeki yaylar ise, sıfır noktasına göre açıları ifade etmektedir.

Lazer lambanın yol üzerindeki izolüks dağılımına bakıldığında yolu 74 m uzaklığa kadar aydınlattığı görülmektedir. Maksimum aydınlatma miktarı 46,9 lx'dür. Şekil 3.16'da lazer lambanın yol üzerindeki aydınlatmasının izolüks dağılımı görülmektedir.



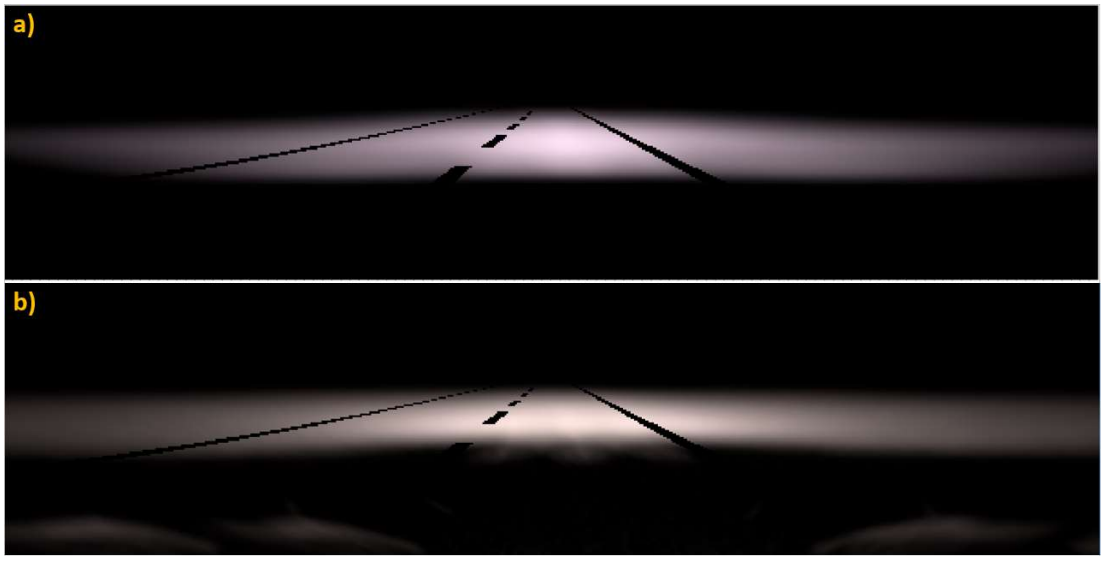
Şekil 3. 16. Lazer lambanın yol üzerindeki izolüks dağılımı



Şekil 3. 17. LED lambanın yol üzerindeki izolüks dağılımı

LED lambanın yol üzerindeki izolüks dağılımına göre yolu 58 m uzaklığa kadar aydınlatabilmektedir. Maksimum aydınlatma miktarı 45,1 lx'dür. Şekil 3.17'de LED lambanın yol üzerindeki aydınlatmasının izolüks dağılımı verilmiştir.

Lazer ve LED lambaların yol üstündeki izolüks dağılımlarına göre, lazer lamba, toplam ışık akısı LED lambadan daha az olmasına rağmen yolu daha uzak mesafeye kadar aydınlatabilmektedir. Bu bulgu, Hanafi ve ark., [60, 61] tespitleriyle uyuşmaktadır. Bunun sebebinin lazer spotunun yarattığı ışık yoğunluğu olduğu görülmektedir. Ancak, LucidShape programında oluşturulan "sürücü görüşü" resimlerine göre, yol üzerinde aydınlatılan ekstra uzunluk, dikeyde -1°'de kesim hattına (cut-off line) sahip ön sis fonksiyonu için, sürücünün bakış açısına göre fark edilir bir iyileştirme sağlamamaktadır. Fakat uzun huzme, kısa huzme ve hatta geri vites lambası gibi, uzun mesafede aydınlatma amacı taşıyan fonksiyonlar için, bu özelliğin oldukça olumlu sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Şekil 3.18'de LucidShape programında lazer lamba (a) ve LED lamba (b) için, CIE renk koordinatları girilerek oluşturulmuş "sürücü görüşü" resimleri verilmiştir.



Şekil 3. 18. Sürücü görüşü resimleri a) Lazer lamba b) LED lamba

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında otomotiv aydınlatmada yeni gelişen bir teknoloji olarak lazer ile sürülen fosfor tabakasından, beyaz ışık üretimi gerçekleştirilmiştir. 435 nm – 455 nm dalgaboyu aralığında ışıma yapan bir lazer diyot ile YAG fosfor tabakası uyarılmış ve ortaya çıkan beyaz ışığın renk özellikleri incelenmiştir. Renk özelliklerinin değerlendirilmesinde, üretilen ışığın CIE 1931 renk diyagramı üzerinde, ECE R-48 ile belirlenen beyaz ışık bölgesinde bulunması kıstas olarak alınmıştır. Otomotiv aydınlatma standartlarına göre kalibre edilmiş bir kolorimetre aracılığıyla, üretilen ışığın yatay ve dikey eksenlerde CIE 1931 renk koordinatları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Intematix firmasından tedarik edilen CL-840 kodlu fosfor tabakasından üretilen ışık ECE R-48 beyaz ışık bölgesinin içinde yer almaktadır ve otomotiv uygulamaları için uygundur. Ayrıca ışığın renk koordinatlarının x= 0.32, y= 0,30 noktası dolayında bulunduğu, lazer spotunun daha yoğun olduğu merkez açılardan uzaklaştıkça renk koordinatlarının "eşit enerji" noktasına yakınsayacak şekilde değiştiği tespit edilmiştir. Intematix firmasından tedarik edilen CL-750 kodlu fosfor tabakasından üretilen ışığın CIE 1931 renk koordinatları x=0.4101, y=0.4512 olarak ölçülmüştür. Bu yüzden otomotiv aydınlatma için uygun olmadığı tespit edilmiştir. Buradan hareketle, lazer lamba tasarımlarında, doğru fosfor tabakasının seçilmesinin birincil öncelik olduğu sonucuna varılmıştır.

Kolorimetri ölçümüne ek olarak, ışığın spektral güç dağılımı, spektrometre ölçümüyle tayin edilmiştir. Işığın spektrumunda lazer diyottan gelen ışığın yüksek bir pik yaptığı tespit edilmiştir. Fakat üretilen ışığın, görünür bölge spektrumunun tamamını kapsadığı görülmüştür.

Lazer diyotun sürme akımına göre, ışığın renk koordinatlarında ve spektrumundaki değişim incelenmiştir. Lazer diyotun eşik akımı aşıldıktan sonra, akım arttırıldığında üretilen ışığın renk koordinatlarında önemli bir değişim olmadığı ve sabit kaldığı tespit edilmiştir. Spektrumda ise, lazer diyottan kaynaklanan mavi bölgedeki pikin lazer

diyotun akımı arttırıldıkça daha büyük dalgaboylarına doğru kaydığı, fakat spektrumun geri kalanında doğrudan bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.

Gonyofotometre kullanılarak, lazerle sürülen fosfor mekanizması ile elde edilen ışığın fotometri ölçümü yapılmıştır. Ölçülen ışık şiddeti dağılımı, sayısal veriye çevrilerek analiz programı ile incelenmiştir. Buna göre, lazer ışık kaynağının Lambert tipi bir ışıma yaptığı, istisna olarak lazer spotunun oluşturduğu yüksek ışık şiddetine sahip bir bölge içerdiği tespit edilmiştir.

Lazer ışık kaynağının yaklaşık iki saatlik çalışma süresinin ardından, fosfor tabaka üzerindeki sıcaklık 53,2°C ölçülmüştür. Buna göre, uzakta konumlandırılan fosfor, LED'lerde görülenden daha az ısısal kayba yol açacaktır.

Lazer ışık kaynağıyla kıyaslamak amacıyla, gonyofotometre ile otomotiv onaylı bir beyaz LED'in de fotometri ölçümü yapılarak ışık şiddeti dağılımı sayısal veriye çevrilmiş ve analiz programında incelenmiştir. İdeal bir Lambert tipi ışıma yaptığı görülmüştür. Lazer ışık kaynağını besleyen lazer diyot ile LED aynı sürme akımında çalıştırılmalarına ve LED'in soğutucu bir sisteme sahip olmaması sebebiyle ısıya bağlı verim kaybetmesine rağmen, LED'in ürettiği ışığın akısının lazer ışık kaynağının ürettiği ışık akısından %15'in üzerinde fazla olduğu tespit edilmiştir.

Lazer ışık kaynağı ve LED'in sayısal veriye çevrilmiş ışık şiddeti dağılımları, optik tasarım programına aktarılarak, bilgisayar destekli optik tasarım gerçekleştirilmiştir. Her bir ışık kaynağına uygun yapıda ön sis lambası reflektörü tasarlanmıştır. Tasarlanan reflektörler ve ışık kaynaklarının ECE R-19 ön sis lambası regülasyonuna uygunluğu Monte Carlo simülasyonu ile tescil edilmiştir. Her iki ışık kaynağı reflektör çifti için, yol aydınlatma analizi gerçekleştirilmiştir. Lazer ışık kaynağı ile yapılan tasarımın, LED ile yapılandan %27 daha uzağı aydınlattığı, bunun lazer spotundan kaynaklı yoğun kısımdan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Böylece literatürde daha önce yapılmamış, lazer ışık kaynaklı bir ön sis lambası tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu sonuçlar ışığında, LED'lerin hala elektrikten optiğe dönüşüm verimi olarak lazerle sürülen fosfordan daha iyi performans sergiledikleri belirlenmiştir. Lazer ışık kaynaklarının ise otomotiv aydınlatmada, uzun menzilli ışıklandırma gerektiren fonksiyonlar için LED'lerden daha iyi performans gösterecekleri sonucuna varılmıştır.

Hızlı gelişmekte olan lazer diyot teknolojisinin, dengeyi kısa zamanda lazer temelli ışık kaynakları yönünde değiştireceği tahmin edilmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara dayanarak, sonraki aşamalarda yapılabilecek bazı çalışmalar, şu şekilde öngörülmüştür:

Otomotiv aydınlatmada kullanılan “light guide” içeren lambalar için, lazer ışık kaynakları, kuplaj kaybını düşürecek bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada kullanılan fosfor tabakasına alternatif olarak, seramik karışımlı fosfor tabakası ve daha fazla sayıda lazer diyot kullanılarak, elektrikten optiğe dönüşüm verimi daha yüksek bir sistem tasarlanabilir.

Otomotiv aydınlatmada, son dönemde geri vites lambalarında istenen kamera aydınlatma fonksiyonu için, LED’lerle lazer ışık kaynağının (LD-fosfor) performansları kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

[1] Moore D. W. Headlamp History And Harmonization, *The University of Michigan Transportation Research Institute Ann Arbor, Michigan 48109-2150 U.S.A.,* 1998.

[2] Benz Patent Motor Car: The first automobile (1885–1886), https://www.daimler.com/company/tradition/company-history/1885-1886.html (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2018).

[3] Moore D. W., Rumar K. Historical Development And Current Effectiveness Of Rear Lighting Systems, *Michigan Transportation Research Institute Ann Arbor, Michigan 48109-2150 U.S.A.,* 1999.

[4] Wördenweber, Burkard, et al., *Automotive lighting and human vision,* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

[5] PopaB. "History of Automotive Headlamps - From Acetylene to LEDs". https://www.autoevolution.com/news/history-of-automotive-headlamps-from-acetylene-to-leds-4485.html (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2018).

[6] Society of Automotive Engineers, History, https://www.sae.org/about/history (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2018).

[7] Illuminating Engineering Society, History, https://www.ies.org/about-us/history (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2018).

[8] General Questions Related To Wp.29 And Its Subsidiary Bodies, http://www.unece.org/trans/main/wp29/faq.html (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[9] World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29) – How It Works, How to Join It, http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29pub.html (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[10] Text of the 1958 Agreement, https://www.unece.org/ar/trans/main/wp29/wp29regs.html (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[11] Working Party 29 – Introduction, http://www.unece.org/trans/main/wp29/introduction.html (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[12] Wikipedia – United Nations Economic Commission for Europe, http://www.wikizeroo.net/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEaW3JnL3dpa2kvVW5pdGVkX05hdGlvbnNfRWNvbm9taWNfQ29tbWlzc2lvlv9mb3JfRXVyb3Bl (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[13] Wikipedia – World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, http://www.wikizeroo.net/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEaW3JnL3dpa2kvV29ybGRfRm9ydW1fZm9yX0hhcm1vbml6YXRpb25fb2ZfZfZfVmVoaW9SZWd1bGF0aW9ucw (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[14] Wikipedia – Federal Motor Vehicle Safety Standards, http://www.wikizeroo.net/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEaW3JnL3dpa2kvRk1WU1M (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[15] §571.108 Standard No. 108; Lamps, reflective devices, and associated equipment, https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=se49.6.571_1108 (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[16] Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices, https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R040r9e.pdf (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2018).

[17] Boyce P., Peter R., *Lighting for driving: roads, vehicles, signs, and signals*, CRC Press, 2008.

[18] Herman Adolf Emil., *Light calculations and measurements: an introduction to the system of quantities and units in light-technology and to photometry,* Macmillan International Higher Education, 1971.

[19] McCluney, William Ross. *Introduction to radiometry and photometry*, Artech House, 2014.

[20] Mark Stanley, Illuminating Engineering Society of North America. *Lighting handbook: Reference & application*, Illuminating Engineering Society of North America, 2000.

[21] Bass, Michael, et al. *Handbook of optics, Volume II: Design, fabrication and testing, sources and detectors, radiometry and photometry,* McGraw-Hill, Inc., 2009.

[22] Encyclopaedia Britannica, Electromagnetic Radiation, https://www.britannica.com/science/electromagnetic-radiation/media/183228/1368 (Ziyaret tarihi: 22 Aralık 2018).

[23] Arecchi, Angelo V., R. John Koshel and Tahar Messadi. *Field guide to illumination,* SPIE, Bellingham, Washington, USA, 2007.

[24] Koshel, R. John, *Illumination engineering: Design with Nonimaging Optics,* John Wiley & Sons, New York, NY, 2012.

[25] Grum, France and Richard J. Becherer, *Optical radiation measurements, Volume 1-Radiometry,* Academic Press, Inc., New York, 1979.

[26] Gåsvik, Kjell J. *Optical metrology*., John Wiley & Sons, 2003.

[27] Hunt, Robert William Gainer, and Michael R. Pointer. *Measuring colour,* 4th ed., John Wiley & Sons, 2011.

[28] Malacara, Daniel. *Color vision and colorimetry: Theory and Applications,* Bellingham, WA., SPIE, 2011.

[29] Shevell, Steven K., 2nd ed. *The science of color*, Elsevier, 2003.

[30] Ohta, Noboru and Alan Robertson, *Colorimetry: Fundamentals and Applications,* John Wiley & Sons, 2006.

[31] Boyce P. and Raynham P., *The SLL Lighting Handbook*, The Society of Light & Lighting, London, 2009.

[32] CE Regulation No. 48, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices, https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R048r9e.pdf (Ziyaret tarihi: 23 Şubat 2019).

[33] Silfvast, William T., *Fundamentals of Photonics*, SPIE, 2003.

[34] Karlicek, R. et al., *Handbook of Advanced Lighting Technology,* Springer, 2017.

[35] Denton, T., *Automobile electrical and electronic systems*, Routledge, 2017.

[36] ECE Regulation No. 37, Uniform provisions concerning the approval of filament lamps for use in approved lamp units of power-driven vehicles and of their trailers, https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R037r7e.pdf (Ziyaret tarihi: 23 Şubat 2019).

[37] Shur M. S., Zukauskas A., Solid-state lighting: Toward superior illumination, *Proceedings of the IEEE*, 2005, **93**(10), 1691 – 1703.

[38] HELLA Bulb Catalog http://www.myhellalights.com/links/HELLA-BulbCatalog-2013.pdf (Ziyaret tarihi: 23 Şubat 2019).

[39] Light Bulb Types, HID (High Intensity Discharge), https://www.bulbs.com/learning/hid.aspx (Ziyaret tarihi: 23 Şubat 2019).

[40] ECE Regulation No. 99, Uniform provisions concerning the approval of gas-discharge light sources for use in approved gas-discharge lamp units of power-driven vehicles,

https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R099r2am3e.pdf (Ziyaret tarihi: 23 Şubat 2019).

[41] Crawford, M. H., et al. *Solid-State Lighting: Toward Smart and Ultra-Efficient Materials, Devices, Lamps and Systems*, Photonics: Photonics Technology and Instrumentation, 2015.

[42] Khanna, Vinod Kumar, *Fundamentals of solid-state lighting: LEDs, OLEDs, and their applications in illumination and displays*, CRC press, 2014.

[43] Gaspar, Daniel J., and Evgueni Polikarpov, *OLED fundamentals: materials, devices, and processing of organic light-emitting diodes,* CRC press, 2015.

[44] Koden, Mitsuhiro, *OLED displays and lighting*, John Wiley & Sons, 2016.

[45] Meschede, Dieter. *Optics, light and lasers: the practical approach to modern aspects of photonics and laser physics*, John Wiley & Sons, 2017.

[46] Ledru, G., Catalano, C., Dupuis, P., & Zissis, G., Efficiency and stability of a phosphor-conversion white light source using a blue laser diode, *AIP Advances,* 2014, **4**(10), DOI:10.1063/1.4899187

[47] Xu, Y., Chen, L., Li, Y., Song, G., Wang, Y., Zhuang, W., & Long, Z., Phosphor-conversion white light using InGaN ultraviolet laser diode, *Applied Physics Letters,* 2008, **92**(2), DOI:10.1063/1.2835703

[48] Xu, Y., Hu, H., Zhuang, W., Song, G., Li, Y., & Chen, L., White light emission from ultraviolet laser diode, *Laser Physics,* 2009, **19**(3)*, 403–406,* DOI:10.1134/s1054660x09030086

[49] Han-Youl Ryu and Dae-Hwan Kim, High-brightness Phosphor-conversion White Light Source Using InGaN Blue Laser Diode, *J. Opt. Soc. Korea,* 2010, **14***, 415-419.*

[50] Denault, K. A., Cantore, M., Nakamura, S., DenBaars, S. P., & Seshadri, R., Efficient and stable laser-driven white lighting. *AIP Advances,* 2013, **3**(7), DOI:10.1063/1.4813837

[51] Cantore, M., Pfaff, N., Farrell, R. M., Speck, J. S., Nakamura, S., & DenBaars, S. P., High luminous flux from single crystal phosphor-converted laser-based white lighting system, *Optics Express,* 2015, **24**(2)*,* DOI:10.1364/oe.24.00a215

[52] Lee, D.-H., Joo, J.-Y., & Lee, S.-K., Modeling of reflection-type laser-driven white lighting considering phosphor particles and surface topography, *Optics Express,* 2015, **23**(15), DOI:10.1364/oe.23.018872

[53] Song, Y. H., Ji, E. K., Jeong, B. W., Jung, M. K., Kim, E. Y., & Yoon, D. H., High power laser-driven ceramic phosphor plate for outstanding efficient white

light conversion in application of automotive lighting, *Scientific Reports,* 2016, **6**(1), DOI:10.1038/srep31206

[54] George, A. F., Al-waisawy Sara, Wright, J. T., Jadwisienczak, W. M., & Rahman, F., Laser-driven phosphor-converted white light source for solid-state illumination, *Applied Optics,* 2016, **55**(8), DOI:10.1364/ao.55.001899

[55] Abdullaev, O. R., Aluev, A. V., Akhmerov, Y. L., Kourova, N. V., Mezhennyi, M. V., & Chelny, A. A., White light source with laser-excited phosphor, *Quantum Electronics,* 2017, **47**(10), *927–931*, DOI:10.1070/qel16396

[56] Yang, Y., Zhuang, S., & Kai, B., High brightness laser-driven white emitter for Etendue-limited applications, *Applied Optics,* 2017, **56**(30), DOI:10.1364/ao.56.008321

[57] Trivellin, N., Yushchenko, M., Buffolo, M., De Santi, C., Meneghini, M., Meneghesso, G., & Zanoni, E., Laser-Based Lighting: Experimental Analysis and Perspectives. *Materials,* 2017, **10**(10), DOI:10.3390/ma10101166

[58] Ulrich, L., Whiter brights with lasers, *IEEE Spectrum,* 2013, **50**(11), *36–56*, DOI:10.1109/mspec.2013.6655838

[59] Weber, S., Buck, A. & Amann, C. *ATZ Worldw,* 2014, **116**(44), DOI:10.1007/s38311-014-0217-9

[60] Hanafi A., Erdl H., Weber S., *New Efficient, Compact Vehicular Lighting System Using High-Power Semiconductor Laser Diode*, DOE SSL R&D Workshop, Tampa, ABD, 28 Ocak 2014.

[61] Hanafi A., Erdl H., Lasers light the road ahead, *Compound Semiconductor* 2015, **21**(5), 36 – 42.

[62] Audi MediaCenter - World premiere at CES 2014 in Las Vegas: The Audi Sport quattro laserlight concept, https://www.audi-mediacenter.com/de/pressemitteilungen/weltpremiere-auf-der-ces-2014-in-las-vegas-der-audi-sport-quattro-laserlight-concept-1257 (Ziyaret tarihi: 13 Nisan 2019).

[63] Audi MediaCenter - Audi R8 V10 plus – LED headlights with Audi laser light, https://www.audi-technology-portal.de/en/electrics-electronics/lighting-technology/audi-r8-v10-plus-led-headlights-with-audi-laser-light (Ziyaret tarihi: 13 Nisan 2019).

[64] Engadget - Mercedes-Benz GLA concept puts laser projectors in headlights, redefines SUV, https://www.engadget.com/2013/04/18/mercedes-benz-gla-concept-puts-laser-projectors-in-headlights (Ziyaret tarihi: 13 Nisan 2019).

[65] Photonics - Mercedes-Benz Concept Car Has Laser Headlights, https://www.photonics.com/Articles/Mercedes-

Benz_Concept_Car_Has_Laser_Headlights/a53725 (Ziyaret tarihi: 13 Nisan 2019).

[66] Mario, Hirz, et al., *Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development: Development Processes, Geometric Fundamentals, Methods of CAD, Knowledge-Based Engineering Data Management*, Springer Science & Business Media, 2013.

[67] J. Hecht, "Optical design enters the computer age", *Comput. Phys.,* 1987, **1**(1)*, 34–41*, DOI: 10.1063/1.4903431

[68] Laser Focus World - Photonic Frontiers: Optical Design Software: Looking Back/Looking Forward: The growing power of software drives photonic innovation, https://www.laserfocusworld.com/software-accessories/software/article/16551567/photonic-frontiers-optical-design-software-looking-backlooking-forward-the-growing-power-of-software-drives-photonic-innovation (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2019).

[69] Savage, N., Optical design software, *Nature Photonics,* 2007, **1**(10), *598–599,* DOI:10.1038/nphoton.2007.190

[70] Jenkins, D. R., Wang, B., Banerjee, S., & Jiao, J., Low Beam Head Lamp Design Using Distributive Lighting System, *SAE Technical Paper Series,* 1996, DOI:10.4271/960489

[71] Kumar, V. P., Lakkumanan, R., & Prakasan, K., Computer aided optical design of reflectors in automotive headlights*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering,* 2006, **220**(4), *415–424*, DOI:10.1243/09544070jauto86

[72] Cvetkovic, A., Dross, O., Chaves, J., Benitez, P., Miñano, J. C., & Mohedano, R., Etendue-preserving mixing and projection optics for high-luminance LEDs, applied to automotive headlamps, *Optics Express,* 2006, **14**(26), DOI:10.1364/oe.14.013014

[73] Jiang, J. B., Cheung, C. ., To, S., Cheng, K. W., Wang, H., & Lee, W. B., Design and fabrication of freeform reflector for automotive headlamp, *2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, DOI:10.1109/pesa.2006.343102

[74] Chen, F., Wang, K., Qin, Z., Wu, D., Luo, X., & Liu, S., Design method of high-efficient LED headlamp lens, *Optics Express,* 2010, **18**(20), DOI:10.1364/oe.18.020926

[75] Bony, A., Hamami, K., Tebbe, F., & Mertens, J., Energy saving through LED in signaling functions for automotive exterior lighting, *SPIE Eco-Photonics 2011: Sustainable Design, Manufacturing, and Engineering Workforce Education for a Green Future*, DOI:10.1117/12.884472

[76] Topaloğlu T., Gürsoy C., Bakcan M. R., Yılmaz G., Elektromanyetik Uyumlu LED'li Geri Sis Modülü Tasarımı, *Irditech 2018 Uluslararası Ar-Ge, İnovasyon Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 18 Mayıs 2018.

[77] Optronik FMS 10 Technical Reference Manual, 1-2, 2001.

[78] Synopsys Inc., *LucidShape Technical Reference*, Version 2.1, 5-6, 2016.

[79] ECE Regulation No. 19, Uniform provisions concerning the approval of power-driven vehicle front fog lamps, https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R019r7e.pdf (Ziyaret tarihi: 12 Mayıs 2019).

[80] Rose M., Hogan H.., A History of the Laser: 1960 - 2019, https://www.photonics.com/Articles/A_History_of_the_Laser_1960_-_2019/a42279 (Ziyaret tarihi: 26 Mayıs 2019).

[81] Laser Guide - *CVI Melles Griot, Technical Guide*, Vol 2, Issue 1, 3-4, 2009.

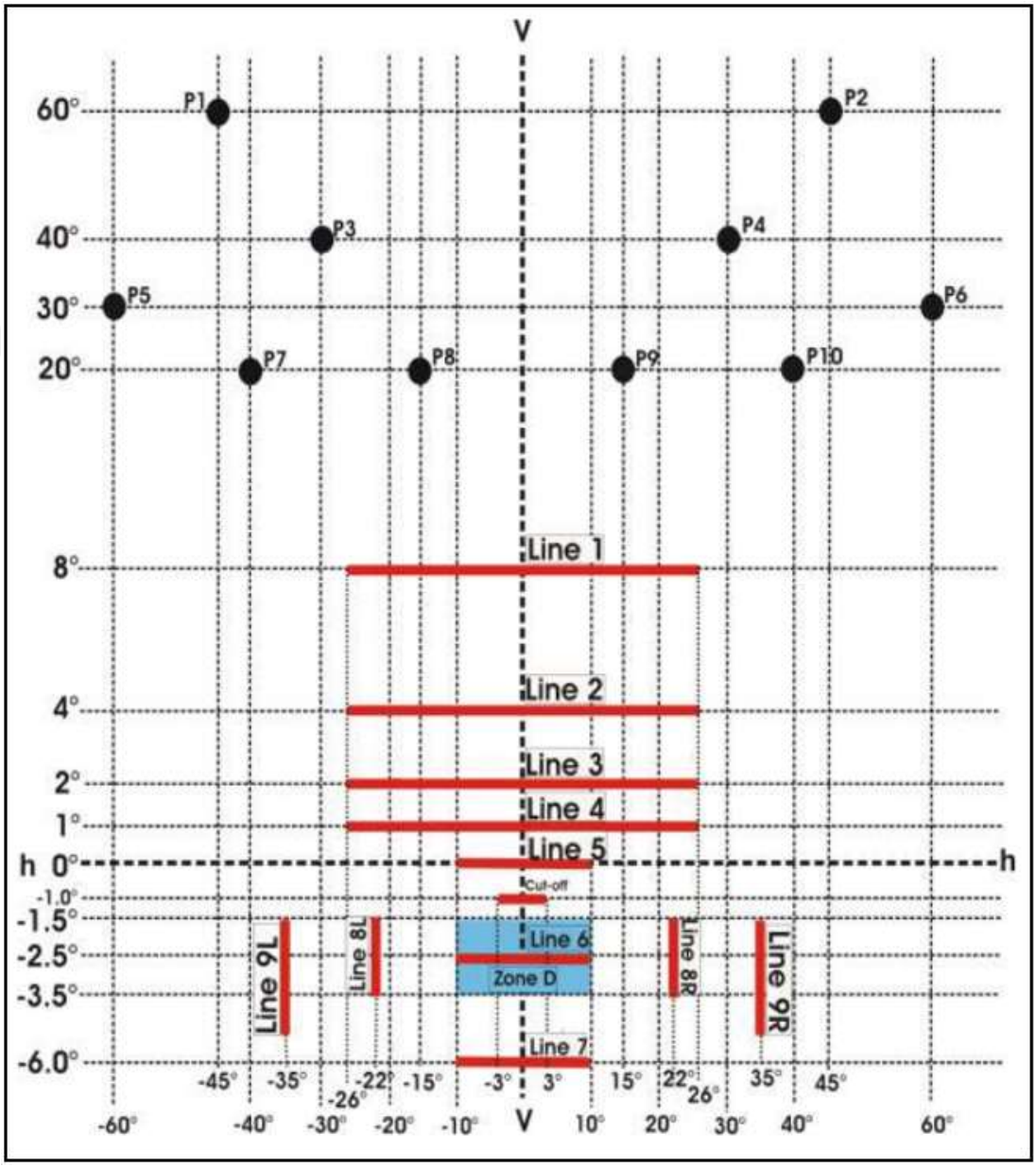
[82] Diehl, Renee D., and Roland L. Diehl., *High-power diode lasers: fundamentals, technology, applications. Vol. 78*, Springer Science & Business Media, 2000.

[83] Feng, Z. C., Handbook of Solid-State Lighting and LEDs, CRC Press, 2017.

EKLER

Ek-A

ECE-R19 ön sis lambası regülasyonunda öngörülen ışık dağılımı için ölçüm noktaları aşağıdaki Şekil A.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil A. 1. ECE-R19 ön sis lambası regülasyonu ölçüm noktaları

Ek-B

ECE-R19 ön sis lambası regülasyonunda Ek-A'da gösterilen ölçüm noktalarının her biri için öngörülen ışık şiddeti değerleri Şekil B.1'de verilmiştir.

Designated lines or zones	*Vertical position** *above h +* *below h -*	*Horizontal position** *left of v: -* *right of v: +*	*Luminous intensity* *(in cd)*	*To comply*
Point 1, 2**	+60°	±45°	85 max	All points
Point 3, 4**	+40°	±30°		
Point 5, 6**	+30°	±60°		
Point 7, 10**	+20°	±40°		
Point 8, 9**	+20°	±15°		
Line 1**	+8°	-26° to +26°	130 max	All line
Line 2**	+4°	-26° to +26°	150 max	All line
Line 3	+2°	-26° to +26°	245 max	All line
Line 4	+1°	-26° to +26°	360 max	All line
Line 5	0°	-10° to +10°	485 max	All line
Line 6***	-2.5°	from 5° inwards to 10° outwards	2,700 min	All line
Line 7***	-6.0°	from 5° inwards to 10° outwards	< 50 per cent of max. on line 6	All line
Line 8L and R***	-1.5° to -3.5°	-22° and +22°	1,100 min	One or more points
Line 9L and R***	-1.5° to -4.5°	-35° and +35°	450 min	One or more points
Zone D***	-1.5° to -3.5°	-10° to +10°	12,000 max	Whole zone
* The co-ordinates are specified in degrees for an angular web with a vertical polar axis. ** See paragraph 6.4.3.4. *** See paragraph 6.4.3.2.				

Şekil B. 1. ECE-R19 ön sis lambası regülasyonu ışık şiddeti değerleri

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Topaloğlu T.**, Çevik Ö., Yılmaz G., Demir A., Investigation of the Effects of Laser Based, LED and Halogen Bulb Lighting Products on Electric Vehicle Performance, *Irditech 2019 Uluslararası Ar-Ge, İnovasyon Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 3 Mayıs 2019.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Aşkale'de doğdu. Orta öğrenimini Edirne, Keşan Anadolu Lisesi'nde, Lise öğrenimini Tekirdağ Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden 2012 yılında mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektro-Optik Sistem Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Bursa'da Feka Otomotiv A.Ş. Ar-Ge Departmanı'nda, Optik Tasarım ve Analiz Uzmanı olarak çalışmaktadır.