

**OTOMOTİV DIŞ AYDINLATMA SİSTEMLERİ  
İÇİN IŞIK TÜPLERİNİN  
OPTİK TASARIMI VE ÖZELLİKLERİ**

**Elif GÜNEY**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV DIŞ AYDINLATMA SİSTEMLERİ İÇİN IŞIK TÜPLERİNİN  
OPTİK TASARIMI VE ÖZELLİKLERİ**

Elif GÜNEY  
0000-0002-9269-2766

Prof. Dr. Mürsel ALPER  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2023  
**Her Hakkı Saklıdır.**

## TEZ ONAYI

Elif GÜNEY tarafından hazırlanan “OTOMOTİV DIŞ AYDINLATMA SİSTEMLERİ İÇİN IŞIK TÜPLERİNİN OPTİK TASARIMI VE ÖZELLİKLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Mürsel ALPER

<b>Başkan</b>	:	Prof. Dr. Mürsel ALPER 0000-0001-8220-6851 Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kathal Fiziği Anabilim Dalı	İmza
<b>Üye</b>	:	Prof. Dr. Ahmet CENGİZ 0000-0001-7173-6638 Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Nükleer Fizik Anabilim Dalı	İmza
<b>Üye</b>	:	Prof. Dr. Basri ÇELİK 0000-0001-7234-8063 Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Geometri Anabilim Dalı	İmza
<b>Üye</b>	:	Prof. Dr. Hilal KURU 0000-0001-6673-9666 Balıkesir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kathal Fiziği Anabilim Dalı	İmza
<b>Üye</b>	:	Prof. Dr. Öznur KARAĞAÇ 0000-0003-0789-3801 Balıkesir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Genel Fizik Anabilim Dalı	İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**

.../.../.....

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.../.../....

**İmza**

**Elif GÜNEY**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Mürsel ALPER  
19.06.2023

Elif GÜNEY  
19.06.2023

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Doktora Tezi

### OTOMOTİV DIŞ AYDINLATMA SİSTEMLERİ İÇİN IŞIK TÜPLERİNİN OPTİK TASARIMI VE ÖZELLİKLERİ

**Elif GÜNEY**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Katıhal Fiziği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Mürsel ALPER

Son yıllara kadar sürücünün görüşünü kolaylaştırmak ve araç görünürlüğünü sağlamak amacıyla kullanılan otomotiv aydınlatma sistemleri, günümüzde gelişen teknolojinin yardımıyla, stil odaklı çalışmalara dönüşmüştür. Estetik görünüme verilen önemin artması; ışık tüpleri gibi istenilen alana uyarlanabilen, farklı şekil ve geometrilerde uygulanabilen ve araç stilini yansıtan optik aydınlatma sistemlerinin ön plana çıkmasına neden olmuştur.

Bu çalışmada, farklı şekil ve geometrilerin etkisini incelemek amacıyla 3 farklı mekanik yapıda ışık tüpü optik tasarımı ve aydınlatma yüzeyi homojenite analizleri gerçekleştirilmiştir. Optik tasarımlar ve simülasyonlar özel bilgisayar yazılımları kullanılarak yürütülmüştür. Işık tüplerinin malzemesi PMMA olarak belirlenmiş ve her bir geometri için farklı ışık çıktısına sahip ışık kaynakları seçilmiştir. Yapılan simülasyonlar ışığında, en uygun optik tasarım parametreleri sabitlenmiş ve ışık tüplerinin uluslararası standartlarda belirtilen ışık değerlerini sağlayarak, hedeflenen yüzey homojenliğine sahip olduğu doğrulanmıştır.

Optik tasarımları tamamlanan ve arzu edilen sonuçları veren ışık tüplerinin prototipleri üretilmiştir. Üretilen prototipler üzerinden fotometri testleri ve yüzey homojenliği analizleri yapılarak tasarım çıktıları ile prototip sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, tasarım ile prototip sonuçları arasında genel olarak % 80' in üzerinde uyum olduğu tespit edilmiştir.

Farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin ışık dağılımı, ışık değerleri ve yüzey aydınlanması üzerine etkilerini incelemek amacıyla, 6 farklı büyüklükte yüzey pürüzlülüğü numunesinin davranışı incelenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, yüzey pürüzlülüğü uygulanmamış ışık tüpünde en dar yayınım açısı ve en yüksek ışık şiddeti görülürken, yüzey pürüzlülüğü arttıkça ışık dağılımının FWHM değerinin daha geniş açılara yayıldığı gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün artması prizmatik yüzeylerin TIR özelliğinin kaybolmasına, dolayısıyla daha çok saçılmaya neden olmuştur ve sonuç olarak sistemin yaydığı ışık şiddeti azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Otomotiv dış aydınlatma sistemleri, ışık tüpü, optik tasarım, homojen ışık dağılımı, yüzey pürüzlülüğü **2023, xii + 111 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### OPTICAL DESIGN OF LIGHTGUIDES FOR AUTOMOTIVE EXTERIOR LIGHTING SYSTEMS AND THEIR PROPERTIES

Elif GÜNEY

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Solid State Physics

**Supervisor:** Prof. Dr. Mürsel ALPER

Until recent years automotive lighting systems were used to facilitate the driver's vision and provide vehicle visibility, today with the help of developing technology they have turned into style-oriented works. Increasing emphasis on aesthetic appearance; optical lighting systems such as light guides, that can be adapted to the desired area, can be applied in different shapes and geometries and that reflect the vehicle style, have become more attractive.

In this study, optical design and illumination surface homogeneity analyzes of light guides were carried out in 3 different mechanical structures in order to examine the effect of different shapes and geometries. Optical designs and simulations were carried out using a special computer software. The material of the light guides was determined as PMMA and for each geometry light sources were selected with different light output. Optimum optical design parameters were determined and according to the simulation results, it was verified that the light guides are fulfilling the light values that specified in international standards by providing good level of surface homogeneity.

After the determination of optimum optical parameters and reaching the desired results in simulation environment, light guide prototypes were produced. Photometry tests and surface homogeneity analyzes were made on the prototypes and the design outputs and prototype results were compared. It is observed that there is a general agreement of over 80 % between the design and prototype results.

In order to examine the effects of different surface roughness on light distribution, the behavior of 6 different surface roughness samples was investigated. It was observed that the narrowest diffusion angle and the highest light intensity were observed in the light guide without surface roughness, while the FWHM value of the light distribution spread over wider angles as the surface roughness increased. The increase in the surface roughness caused the loss of the TIR of the prismatic surfaces, thus more scattering, and as a result, the light intensity emitted by the system is decreased.

**Key words:** Automotive exterior lighting systems, lightguide, optical design, homogen light distribution, surface roughness **2023, xii + 111 pages.**

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımın her aşamasında fikir ve yorumlarıyla beni yönlendirerek desteğini benden esirgemeyen, değerli danıőmanım Prof. Dr. Mürsel ALPER' e, bilgi ve tecrübesini cömertçe paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Mürőide HACIİSMAİLOğLU' na gösterdikleri sabır ve ilgiden dolayı en içten teőekkürlerimi sunarım.

Bu doktora tezinin SAN-TEZ projesi olarak hayata geçmesine olanak sağlayan T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.ő.' ne saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Doktora öğrenimim süresince desteğini ve hoőgörüsünü esirgemeyen yöneticilerime ve bana destek olan iç arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan değerli ailem ve sevgili dostlarıma en içten teőekkürlerimi sunarım.

Elif GÜNEY

19/06/2023



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
TEZ ONAYI.....	iii
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Işık ve Fotometri.....	5
2.2. Otomotiv Aydınlatma Sistemleri .....	7
2.3. Işık Tüpü Optik Tasarımı .....	12
2.3.1. Işık Tüpü Malzemesi ve Işık Kaynağı Seçimi .....	12
2.3.2. Işık Tüpü Geometrisinin Belirlenmesi .....	14
2.3.3. Işık Tüpü Prizmalarının Tasarımı .....	17
2.3.4. Işık Tüpü Yüzeyi Homojenite Çalışmaları.....	20
2.3.5. Işık Tüpü Prototip İmalatı.....	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. Otomotiv Aydınlatmada Kullanılan Işık Tüpleri.....	23
3.2. Işık Tüpü Geometrilerinin Belirlenmesi ve Mekanik Tasarımlarının Yapılması ....	30
3.3. Işık Kaynağı Seçimi .....	30
3.4. Optik Yüzey Tasarımı .....	32
3.4.1. Optik yüzey tasarımı- genel penceresi .....	32
3.4.2. Optik yüzey tasarımı- prizma geometrileri penceresi .....	34
3.5. Yüzey Pürüzlülük Uygulamaları.....	37
3.6. Prototip Testleri ve Fotometri Ölçümleri .....	38
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
4.1. Giriş.....	40
4.2. Bar Şeklindeki Işık Tüpü Geometrisi.....	41
4.2.1. Bar şeklindeki ışık tüpünün optik tasarımı .....	41
4.2.2. Bar şeklindeki ışık tüpünün prototip imalatı .....	53
4.2.3. Bar şeklindeki ışık tüpünün prototip testleri.....	56
4.2.4. Bar şeklindeki ışık tüpünün yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi .....	58
4.3. Çubuk Şeklindeki Işık Tüpü Geometrisi .....	61
4.3.1. Çubuk şeklindeki ışık tüpünün optik tasarımı .....	61
4.3.2. Çubuk şeklindeki ışık tüpünün prototip imalatı.....	73
4.3.3. Çubuk şeklindeki ışık tüpünün prototip testleri .....	76
4.3.4. Çubuk şeklindeki ışık tüpünün yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi .....	78
4.4. Halka Şeklindeki Işık Tüpü Geometrisi .....	82
4.4.1. Halka şeklindeki ışık tüpünün optik tasarımı .....	82
4.4.2. Halka şeklindeki ışık tüpünün prototip imalatı.....	92
4.4.3. Halka şeklindeki ışık tüpünün prototip testleri .....	94
4.4.4. Halka şeklindeki ışık tüpünün yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi .....	97
5. SONUÇ .....	101

KAYNAKLAR.....	105
TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR.....	109
ÖZGEÇMİŞ.....	110

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
cd	Işık şiddeti
d	Prizmanın ışık tüpünün giriş yüzeyine olan mesafesi
E	Aydınlanma şiddeti
h	Işık tüpü çapı
I	Işık şiddeti
lux	Aydınlanma şiddeti
lm	Işık akısı
n	Kırılma indisi
r	Yarıçap
s	Eğrilik sabiti
V	Prizma derinliği
$\alpha$	Prizmatik yüzeyin başlangıç açısı
$\beta$	Prizmatik yüzeyin bitiş açısı
$\theta$	Işınların gelme açısı
$\theta_c$	Kritik açı
$\Phi$	Işık akısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AFS	Adaptive Front Lighting Systems (Ayarlanabilir kısa huzme far)
ASK	Arka Stop Kombinasyonları
CHMSL	Center High Mounted Stop Lamps (3. Fren lambası)
CNC	Computer Numerical Control
DRL	Daytime Running Lamp (Gündüz yanan lamba)
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FWHM	Full Width Half Maximum
HV	Yatay ve dikey eksinin kesiştiği nokta
HID	High Intensity Discharge (Yüksek yoğunluklu deşarj lamba)
LED	Light Emitting Diode (Işık yayan diyot)
OSD	Optical Shape Design (Optik yüzey tasarımı)
OLED	Organic Light Emitting Diode (Organik ışık yayan diyot)
PCB	Printed Circuit Board (Baskı devre kartı)
PMMA	Polymethyl methacrylate
TIR	Total Internal Reflection (Toplam içsel yansıtma)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Alman Mühendisler Derneği)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1.	Görünür ışığın konumunu gösteren elektromanyetik spektrum ..... 5
Şekil 2.2.	ECE Standartlarında belirlenen otomotiv ön aydınlatma fonksiyonları ..... 9
Şekil 2.3.	Tipik LED sistemi ..... 9
Şekil 2.4.	LED ışık kaynakları kullanılan farklı tasarımlar; a) Yüksek verimliliğe sahip Fresnel lens teknolojisi, b) Reflektör teknolojisi, c) Düşük verime sahip Fresnel teknolojisi ve d) Işık tüpü teknolojisini göstermektedir..... 11
Şekil 2.5.	Akrilik bloğunda gerçekleşen TIR olayı ..... 14
Şekil 2.6.	Sırasıyla Snell kırılması, kritik açı ve TIR olayında ışık ışınının izlediği yollar ..... 15
Şekil 2.7.	Dairesel eğime sahip ışık tüpü kesiti..... 16
Şekil 2.8.	Işık kaynağı olarak LED kullanılan ışık tüpü ..... 17
Şekil 2.9.	a) Işık tüpü boyuna bağlı olarak ışık kaynağından çıkan aydınlanma açısının exponansiyel değişimi, b) Aydınlatma açısındaki mesafeye bağlı olan bu azalmanın ışık tüpü içindeki prizmalara etkisinin şematik gösterimi ..... 18
Şekil 2.10.	Tipik V kesimli prizmatik element gösterimi ..... 19
Şekil 2.11.	Işık tüpü başında ve sonunda bulunan prizmalara farklı açılarda gelen ışık ışınları ..... 20
Şekil 2.12.	LED’ den gelen direkt ışık (sol) ve birinci yansımanın gösterimi (sağ) ..... 20
Şekil 2.13.	Aynı geometriye sahip ancak farklı amaçlarla tasarlanmış ışık tüpleri ..... 21
Şekil 2.14.	Kumlama yapılmış yüzeyler üzerine gelen ışık ışınlarının davranışı. a) kumlamanın ışık geçirgenliği olan yüzeye uygulandığı durum, b) yansıtıcı yüzeylere kumlama uygulandığı durum ..... 21
Şekil 3.1.	Farklı geometrilere sahip ışık tüpü örnekleri..... 23
Şekil 3.2.	BMW X1 SDrive farının araç üzerindeki görünümü ..... 24
Şekil 3.3.	BMW X1 SDrive farının araç üzerindeki görünümü ..... 24
Şekil 3.4.	Mercedes Benz C-Serisi 3. Nesil ASK lambası, a) ASK’ nın araç üzerindeki konumu b) ASK’ nın arka pozisyon fonksiyonunun açık olduğu durum..... 28
Şekil 3.5.	Optik tasarımı yapılan 3 farklı ışık tüpü geometrisinin mekanik yapısı a) Bar şeklinde ışık tüpü, b) Çubuk şeklinde ışık tüpü, c) Halka şeklinde ışık tüpü ..... 30
Şekil 3.6.	OSD yazılımı ışık tüpü tasarımı modülüne ait pencere içerikleri: a) Genel, b) Prizma geometrileri, c) Kontrol noktaları. .... 32
Şekil 3.7.	OSD yazılımı ışık tüpü tasarımı modülüne ait genel penceresi..... 33
Şekil 3.8.	Işık tüpü geometrisini oluştururken gerekli olan referans eğri, optik eksen ve ışık yönü gösterimi..... 33
Şekil 3.9.	OSD yazılımı ışık tüpü tasarımı modülüne ait Prizma Geometrileri ve kontrol noktaları pencereleri ..... 35

Şekil 3.10.	Optik yüzey tasarımı- Prizma geometrileri penceresinin alt sekmelerinin ayrıntılı gösterimi .....	36
Şekil 3.11.	Fotometri ölçümlerinde kullanılan IES LM-75-01' e göre Tip-A olan LMT GO-H 1660 model ganyometre.....	38
Şekil 4.1.	Tasarlanan ışık tüplerinin uyarlandığı lambaların ışık tüpü kullanılmadan önceki mevcut fotoğrafları.....	41
Şekil 4.2.	Bar şeklinde yapıya sahip ışık tüpü geometrisi .....	42
Şekil 4.3.	LED' lerin PCB üzerindeki konumları ve aralarındaki mesafe .....	42
Şekil 4.4.	Osram LA G6SP LED' ine ait ışık yayılım karakteristiği.....	43
Şekil 4.5.	Bar şeklinde ışık tüpü ve prizmaların yapısı .....	44
Şekil 4.6.	Başlama açısı 5°, bitiş açısı 5° ve çıkıntı değeri 3,5 mm olan bar şeklindeki ışık tüpünün ışık dağılım haritası .....	45
Şekil 4.7.	Bitiş açısına bağlı olarak değişen ışık dağılımının yatay eksen doğrultusundaki odak konumları .....	46
Şekil 4.8.	Başlama açısı değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılım haritaları .....	47
Şekil 4.9.	Nihai ışık tüpü tasarımının yüzey homojenliği görüntüleri.....	48
Şekil 4.10.	Işık tüpü, gövde, bezel ve maske bir arada bulunduğu komple lambanın 3- boyutlu CAD datasının görüntüleri .....	48
Şekil 4.11.	Nihai ışık tüpünün gövde, bezel, maske ve dış lens ile birlikte verdiği ışık dağılımı .....	49
Şekil 4.12.	LA G6SP LED' ine ait ışık akısı BIN aralığı ve ışık şiddetinin akıma bağlı değişimi.....	50
Şekil 4.13.	Lambanın görünürlük açılarını belirleyen ışık dağılımı.....	51
Şekil 4.14.	Nihai ışık tüpü ve diğer geometrilerin birlikte verdiği yüzey homojenliği görüntüleri.....	52
Şekil 4.15.	HV görüntüsü üzerinden geçen çizgi ve bu çizgiden elde edilen kesit görüntüsü .....	53
Şekil 4.16.	Bar şeklindeki ışık tüpü prototipinin farklı açılardan görüntüleri .....	54
Şekil 4.17.	Bezel ve PCB prototipinin görüntüleri.....	55
Şekil 4.18.	Işık tüpü, bezel ve PCB prototipleri ile birlikte mevcut gövde ve lens alt bileşenlerinin montaj sırasına göre birbirlerinden ayrılmış durumu.....	55
Şekil 4.19.	Işık tüpü, bezel ve PCB prototiplerinin mevcut lamba üzerinde gövde ve lens ile birlikte montajlı durumu .....	55
Şekil 4.20.	Lambanın açık durumdaki görüntüsü.....	56
Şekil 4.21.	Analiz sonucu ile prototip üzerinden yapılan fotometri test sonuçlarının karşılaştırılması .....	58
Şekil 4.22.	Yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri .....	58
Şekil 4.23.	Işık tüpü prizmalarının üzerine farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin uygulanması ile elde edilen ışık dağılım haritaları .....	59
Şekil 4.24.	Yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılım eğrileri .....	60
Şekil 4.25.	Uygulanan yüzey pürüzlülüğü büyüklüğüne bağlı olarak araç ekseninden (HV) yüzey homojenliği görüntüleri .....	61
Şekil 4.26.	Çubuk şeklinde yapıya sahip ışık tüpü geometrileri .....	62
Şekil 4.27.	LED' lerin PCB üzerindeki konumları ve ışığın çıkış yönü.....	63
Şekil 4.28.	Üst ve alt ışık tüpünün x,y,z koordinatlarındaki boyutları .....	64

Şekil 4.29.	PCB üzerine konumlandırılan LED gövdeleri ve ışık tüpü prizmalarının yapısı.....	65
Şekil 4.30.	Başlama açısı 5°, bitiş açısı 10° ve offset değeri 3,5 mm olan üst ve alt ışık tüplerinin ışık dağılım haritaları .....	66
Şekil 4.31.	Üst ışık tüpü için bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği .....	67
Şekil 4.32.	Alt ışık tüpü için bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği .....	67
Şekil 4.33.	Üst ışık tüpü için başlama açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği.....	68
Şekil 4.34.	Alt ışık tüpü için başlama açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği.....	69
Şekil 4.35.	Optik tasarımı yapılan alt ve üst ışık tüplerinin birlikte analiz edilmesi sonucu elde edilen ışık dağılım haritası .....	70
Şekil 4.36.	LA B6SP LED' ine ait ışık akısı BIN aralığı ve ışık şiddetinin akıma bağlı değişimi.....	70
Şekil 4.37.	Lambanın görünürlük açılarını belirleyen ışık dağılımı.....	72
Şekil 4.38.	Lambanın açık olduğu konumdaki alt ve üst ışık tüpünün yüzey homojenliği görüntüleri.....	73
Şekil 4.39.	Alt ve üst ışık tüpü prototiplerinin ön ve arka yüzeylerinden alınan görüntüler.....	74
Şekil 4.40.	Işık tüplerinin oturtulduğu bezel prototipi.....	74
Şekil 4.41.	LED' lerin konumlandırıldığı PCB prototipi.....	75
Şekil 4.42.	Bezel ve ışık tüpü prototiplerinin monte edildiği görünüm.....	75
Şekil 4.43.	Lambanın açık konumdaki görüntüsü .....	76
Şekil 4.44.	Analiz sonucu ile prototip üzerinden yapılan fotometri test sonuçlarının karşılaştırılması .....	78
Şekil 4.45.	Yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri .....	79
Şekil 4.46.	Farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin uygulanması ile elde edilen ışık dağılım haritaları.....	80
Şekil 4.47.	Yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılım eğrileri .....	81
Şekil 4.48.	Uygulanan yüzey pürüzlülüğü büyüklüğüne bağlı olarak araç ekseninden yüzey homojenliği görüntüleri.....	82
Şekil 4.49.	Halka şeklinde yapıya sahip ışık tüpü geometrisi.....	83
Şekil 4.50.	LED' lerin PCB üzerindeki konumları ve ışığın çıkış yönü.....	84
Şekil 4.51.	Halka şeklinde ışık tüpü ve prizmaların yapısı.....	85
Şekil 4.52.	Başlama açısı 5°, bitiş açısı 10° ve offset değeri 3,5 mm olan ışık tüpü için ışık dağılım haritaları .....	86
Şekil 4.53.	Bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-eksenindeki konum değişikliği.....	87
Şekil 4.54.	Başlama açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-eksenindeki konum değişikliği .....	88
Şekil 4.55.	Optik tasarımı yapılan halka şeklindeki ışık tüpünün diğer geometriler ile birlikte analiz edilmesi sonucu elde edilen ışık dağılım haritası.....	88
Şekil 4.56.	LUW H9QP LED' ine ait ışık akısı BIN aralığı ve ışık şiddetinin akıma bağlı değişimi .....	89

Şekil 4.57.	Lambanın görünürlük açılarını belirleyen ışık dağılımı.....	91
Şekil 4.58.	Lambanın açık olduğu konumdaki ışık tüpünün yüzey homojenliği görüntüleri .....	91
Şekil 4.59.	Halka şeklindeki ışık tüpü prototipinin ön ve arka yüzeylerinden alınan görüntüler .....	92
Şekil 4.60.	Işık tüpünün oturtulduğu bezel prototipi .....	93
Şekil 4.61.	LED'lerin konumlandırıldığı PCB prototipleri.....	93
Şekil 4.62.	Bezel ve ışık tüpü prototiplerinin monte edildiği görünüm.....	94
Şekil 4.63.	Lambanın açık konumdaki görüntüsü .....	95
Şekil 4.64.	Analiz sonucu ile prototip üzerinden yapılan fotometri test sonuçlarının karşılaştırılması .....	96
Şekil 4.65.	Yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri .....	97
Şekil 4.66.	Farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin uygulanması ile elde edilen ışık dağılım haritaları.....	98
Şekil 4.67.	Yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılım eğrileri .....	99
Şekil 4.68.	Uygulanan yüzey pürüzlülüğü büyüklüğüne bağlı olarak araç ekseninden (HV) yüzey homojenliği görüntüleri .....	99

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Otomotiv dış aydınlatmadaki yol taşları .....	8
Çizelge 2.2. Halojen, HID ve LED ışık kaynaklarının karşılaştırılması .....	10
Çizelge 2.3. Işık tüpü içindeki LED ışığının verimli bir şekilde yakalanması için verilen farklı çözüm yöntemleri.....	13
Çizelge 3.1. BMW X1 SDrive farı DRL fonksiyonu 1 dk ve 30 dk fotometri ölçüm sonuçları.....	26
Çizelge 3.2. BMW X1 SDrive farı ön pozisyon lambasının 1dk ve 30 dk fotometri ölçüm sonuçları.....	27
Çizelge 3.3. Mercedes Benz C-Serisi ASK lambasına ait arka pozisyon lambasının 1dk ve 30 dk fotometri ölçüm sonuçları.....	29
Çizelge 3.4. Işık tüpü geometrilerinde kullanılan LED' lerin tipleri ve özellikleri	31
Çizelge 4.1. Her biri 4.1 lm ışık yayan 4 adet LED ile birlikte nihai ışık tüpü ve diğer geometrilerin dahil edildiği analiz sonucunda elde edilen ışık değerleri.....	51
Çizelge 4.2. Bar şeklinde ışık tüpü prototipinin fotometri ölçüm sonuçları.....	57
Çizelge 4.3. Her biri 9 lm ışık yayan 2 adet LED ile birlikte alt ve üst ışık tüplerinin dahil edildiği analiz sonucu elde edilen ışık değerlerinin yasal standartlarda belirlenen noktalar üzerindeki gösterimi .....	71
Çizelge 4.4. Çubuk şeklinde ışık tüpü prototiplerinin fotometri testi ölçüm sonuçları .....	77
Çizelge 4.5. Her biri 65 lm ışık yayan 2 adet LED ile birlikte ışık tüpünün dahil edildiği analiz sonucu elde edilen ışık değerlerinin yasal standartlarda belirlenen noktalar üzerindeki gösterimi .....	90
Çizelge 4.6. Halka şeklinde ışık tüpü prototipinin fotometri testi ölçüm sonuçları .....	96



## 1. GİRİŞ

Otomotiv sanayisi sağladığı katma değer, yarattığı istihdam ve diğer sanayi kollarıyla olan yakın ilişkisinden dolayı birçok sanayileşmiş ülkede ekonominin lokomotifi olarak kabul edilir. Otomotiv sanayisi motorlu taşıt aracı üretir. Dünyada toplam motorlu taşıt üretiminin yaklaşık %70' ini otomobil üretimi oluşturmaktadır. Otomobil üretimi, diğer motorlu taşıtlara göre çok daha yüksek adetlerde yapıldığından, güçlü bir yan sanayi oluşturarak diğer taşıtların üretimine de destek olur. Türkiye Otomotiv Sanayi Derneği'nin yayınladığı 2016 yılı küresel değerlendirme raporuna göre, dünya çapında toplam 89 780 034 adet araç üretilirken, Türkiye' de üretilen araç sayısı 1 485 927 dir. Ayrıca 2016 yılında Türkiye' de 950 888 adet otomobil üretildiği ve ülke genelindeki toplam araç üretiminin yaklaşık %65' ini otomobil üretiminin oluşturduğu rapor edilmiştir. 2015 yılına göre dünya otomobil üretim sıralamasında Kanada'yı geride bırakarak 1 basamak öne geçen Türkiye, otomobil üretiminde 17. sıraya yükselerek, %20' lik artış kaydetmiştir (Otomotiv Sanayi Derneği, 2016).

Otomobil, yolcu veya yük taşıma üzere tasarlanmış, motorlu ve tekerlekli kara ulaşım aracıdır. Karayolları trafik yönetmeliğine göre otomobilin tanımı, sürücüsü dâhil en fazla dokuz oturma yeri olan ve insan taşımak için imal edilmiş motorlu taşıt, olarak yapılmıştır. Otomobil tek bir kişi tarafından bulunmamıştır, yaklaşık yüzyıl boyunca dünyanın dört bir yanında ortaya çıkan buluşların bir araya gelmesiyle ortaya çıkmıştır. Modern otomobilin ortaya çıkışının yaklaşık 100 000 patent alımı sonrasında gerçekleştiği tahmin edilmektedir (Otomobilin Tarihi, 2023).

Otomobilin keşfinden günümüze kadar olan süreçte otomotiv aydınlatması her zaman araçlarda önemli bir güvenlik faktörü olmuştur. Günümüzde, gerçekleşen trafik kazalarının etken araç unsurları incelendiğinde yetersiz aydınlatmadan kaynaklanan kazaların sayısının azımsanmayacak oranda olduğu görülür. Örneğin, trafik güvenliği dairesi başkanlığı Haziran 2021 raporuna göre, 2020 yılında gerçekleşen ölümlü ve yaralanmalı trafik kazalarının %2,42' si far, %1,15' i arka stop lambaları ve %0,86' sı dönüş sinyal lambaları aydınlatma kusurlarından kaynaklanmıştır (Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı, 2021). Bu nedenle güvenli ve konforlu bir otomotiv aydınlatması hayati önem taşımaktadır.

Araçların ön kısmında bulunan ve aydınlatmayı sağlayan lambalara far denilmektedir. Farların temel görevi yeterli aydınlatmayı sağlayarak sürücünün görüşünü kolaylaştırmaktır. Araçların arka tarafına monte edilen ve araç görünürlüğü sağlayan lambalara ise arka stop kombinasyonları (ASK) denilmektedir. ASK' ların temel görevi ise aracın görülmesini sağlamaktır. Ayrıca far ve ASK' lar ile bütünleşmiş, genellikle aynı gövde içerisinde içiçe geçmiş şekilde bulunan sinyalizasyon lambaları vardır. Sinyalizasyon lambaları ise aracın yaptığı ya da yapacağı hareketlerden diğer sürücülerin bilgilenmesini sağlar.

Otomotiv dış aydınlatma lambalarından beklenen en temel nitelik, yeterli mesafede gerekli ışık değerlerini yakalayarak uluslararası standartları (regülasyonları) sağlamalarıdır. 1950' lerde otomotiv aydınlatma için yasal standartlar getirildi ve bu sayede her bir sinyalizasyon fonksiyonunun aydınlatma görevine göre ışık değerleri, araç üzerindeki yerleri, fonksiyonların arasındaki mesafeler gibi yasal gereklilikler belirlendi. Avrupa ülkelerinde sürüş yapacak otomobiller için UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) standartları, Amerika' da sürüş yapacak otomobiller için ise FMVSS 108 (American Federal Motor Vehicle Safety Standard 108) standartları geçerlidir (The Refroit Source, 2021; United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], t.y.).

Son yıllara kadar taşıt aydınlatma sistemleri, sürücünün görüşünü kolaylaştırmak ve araç görünürlüğünü sağlamak amacıyla kullanılıyordu. Ancak günümüzde otomotiv sektöründe artan pazar çeşitliliği ile rekabet edebilmek ve bir adım öne çıkabilmek için ana sanayiler araçların dış tasarımına eskisine kıyasla çok daha fazla önem vermeye başladılar. Aracın dış hatlarını belirleyen estetik görünümün öneminin artması, aydınlatma sistemleri tasarımlarının da stil odaklı çalışmaları göz önüne almalarını gerektirmiştir. Işık tüpleri bunun en önemli örneklerinden biridir. Işık tüpünün farklı şekil ve geometrilere uygulanabilir olması ve istenilen alana adapte edilebilmesi, ışık tüplerinin stil açısından klasik aydınlatma sistemlerine (reflektör optik, lens optik) kıyasla ön plana çıkmalarına neden olmuştur.

Işık tüpü absorbe olmayan, ışığı geçirmek için dizayn edilmiş bir sistemdir ve ışık kaynağı olarak, ışık yayan diyot (Light Emitting Diode - LED) tercih edilir. Bu teknoloji, farklı kırılma indislerine sahip iki malzemeden kaynaklanan yansıma mekanizması çerçevesinde elde edilir. Sistemi çevreleyen ortamdaki sınır koşullarında ışığın toplam yansıması kullanılarak, ışık bir yerden başka bir yere taşınır. Bunun için ışık tüpünün optik aydınlatma alanının arka tarafında kalan kısmına, ışığı tüp boyunca taşıyan ve karşı tarafa yönlendiren prizmalar yerleştirilir. Bu prizmaların yükseklikleri, açıları ve birbirleri arasındaki mesafeler değiştirilerek maksimum ışık verimi ve homojen bir ışık dağılımı elde edilir. Işık tüpünün bir tarafına yerleştirilen tek LED ile çıkış yüzeyine kadar verimli ve homojen ışık dağılımı sağlamak zordur. Tüpün başında ışık kaynağına yakın yerlerde ışık çok fazladır ancak bu ışığı homojen bir şekilde ışık tüpünün sonuna kadar taşımak için her bir prizmanın açısı ve yüksekliği tek tek ayarlanmalı, ışık tüpünün en sonundaki prizmaya kadar ışık yönlendirilmelidir. Bu da çok sayıda optimizasyon çalışması demektir. Işık tüpünün stil amaçlı geometrisi değişikçe tasarım daha da zorlaşmaktadır.

Bu çalışmada, farklı geometrilere sahip ışık tüplerinin optik tasarımı ve aydınlanma yüzeyi homojenite analizleri yapılmıştır. Farklı büyüklüklere sahip yüzey pürüzlülüklerinin ışık değerleri ve yüzey aydınlanması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında en uygun prototip yaptırılarak, analiz ortamında elde edilen sonuçlar ile yapılan prototipin ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tezin kapsamı; Giriş, Kuramsal Temeller, Materyal ve Yöntem, Bulgular ve Tartışma ve Sonuç olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, otomotiv tarihi hakkında bilgi verilerek, otomotiv dış aydınlatma sistemlerinin güvenli bir sürüş açısından teşkil ettiği önem üzerinde durulmuş ve tezin bölümleri tanıtılmıştır. Işık ve fotometri, otomotiv aydınlatma sistemleri, ışık tüpü optik tasarımı, ışık tüpü malzemesi ve ışık kaynağı seçimi, ışık tüpü geometrisinin belirlenmesi, ışık tüpü prizmalarının tasarımı, ışık tüpü yüzeyi homojenite çalışmaları ve ışık tüpü prototip imalatı başlıklarından oluşan teorik bilgiler, Bölüm 2' de verilmiştir. Üçüncü bölümde, ilk olarak piyasadaki mevcut otomotiv dış aydınlatmasında kullanılan ışık tüpleri incelenmiştir. Daha sonra bu çalışmada kullanılan ışık tüplerinin geometrileri belirlenmiş ve mekanik

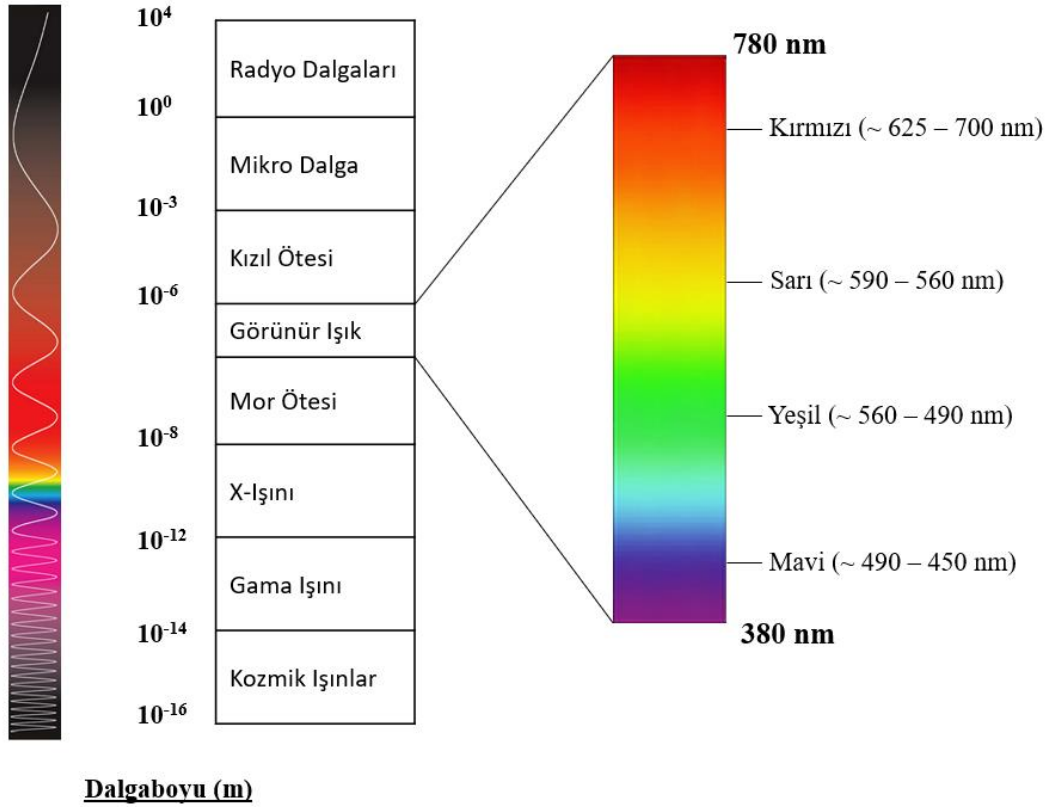
tasarımları yapılarak, geometrilere uygun olan ışık kaynakları seçilmiştir. Optik yüzeylerin tasarımında kullanılan programın optik parametre pencereleri ayrıntılı olarak anlatılarak, yüzey pürüzlülük uygulama metotlarından bahsedilmiş ve prototip fotometri testlerinin yapıldığı ganyometre cihazı tanıtılmıştır. Dördüncü bölüm olan Bulgular ve Tartışma bölümünde, farklı geometrilere sahip ışık tüplerinin tasarımında ve analiz sonuçlarında elde edilen veriler değerlendirilerek farklı yüzey pürüzlülüklerinin etkisi araştırılmıştır. Üretilen prototipler üzerinde ölçümler yapılarak, analiz ve prototip sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç bölümünde ise yapılan çalışma sonucu elde edilen bulgular kısaca özetlenmiştir.

Bu doktora tez çalışması, Uludağ Üniversitesi yürütücülüğünde ve Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.Ş. Ar-Ge Merkezi işbirliği ile 2013 1. dönem 0143.STZ.2013-1 kod numaralı San-Tez projesi olarak T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Işık ve Fotometri

Işık, kozmik ışıklardan radyo dalgalarına uzanan elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır (Şekil 2.1). İnsan gözündeki foto alıcılar, 380 nm – 780 nm dalgaboyu aralığındaki enerjiyi emer ve görme sürecini başlatırlar (Boyce ve Raynham, 2009). Işığın karakteristik özellikleri şiddeti, frekansı, dalga boyu, yayılma yönü, kutuplanması ve hızıdır. Işık hızı vakumda (boşlukta) yaklaşık 300 000 km/s dir. Bütün elektromanyetik dalgalar boşlukta bu hıza sahip olur. Işık saydam maddelerin içinde boşluktaki hızından daha yavaş yayılır ve yayılma hızı maddenin kırıcılık indisine bağlıdır.



Şekil 2.1. Görünür ışığın konumunu gösteren elektromanyetik spektrum

Bir kaynak tarafından birim zamanda ve her doğrultuda yayılan ışık miktarına ışık akısı denir ve birimi lumen (lm) dir. Optik tasarımlarda ışık kaynağından çıkan ışık miktarı lm cinsinden hesaplanır ve tasarım ona göre ilerler.

Işık kaynağının birim zamanda belirli bir doğrultuda yaydığı ışık akısı miktarı ise ışık şiddetini verir ve birimi candela (cd) dir. Optik tasarımı yapılan otomotiv aydınlatma sistemlerinin, uluslararası standartlara uygunluğu kontrol edilirken ışık şiddeti kullanılır ve kontroller cd cinsinden yapılır.

Yarıçapı  $r$  olan bir kürenin iç yüzey alanı  $4\pi r^2$  dir.  $r = 1m$  yarıçaplı bir kürenin merkezindeki 1 cd şiddetindeki ışık kaynağının yayacağı toplam ışık akısı ( $\Phi$ )  $4\pi$  lümen dir. Bu küre için ışık şiddeti ( $I$ ) ile ışık akısı arasındaki ilişki Eşitlik 2.1 ile verilmiştir.

$$\Phi = 4\pi \times I \quad (2.1)$$

Aydınlanan yüzeyin birim alanına, yüzeyi aydınlatan ışık kaynaklarından gelen ışık akılarının toplamı aydınlanma şiddetini verir, birimi lux ( $lm/m^2$ ) dür. Otomotiv aydınlatmasında yer düzlemi üzerine düşen ışık miktarını ölçerken lux kullanılır ve ilgili standartlar buna göre oluşturulmuştur. Aydınlanma şiddeti bir ışık kaynağının insan gözü tarafından bir yüzeyi ne kadar aydınlattığının bir ölçüsüdür. Aydınlanma şiddeti ( $E$ ) ile ışık akısı ( $\Phi$ ) arasındaki Eşitlik 2.2 ile verilir.

$$E = \Phi/A \quad (2.2)$$

$\theta$  gelme açısıyla yüzey üzerine düşen ışın demetlerinin yüzey üzerinde oluşturduğu aydınlanma şiddeti Eşitlik 2.3 ile tanımlanır. Burada,  $d$  ışık kaynağıyla yüzey arasındaki uzaklık,  $\theta$  ışık kaynağından gelen ışınların yüzey normaliyle yaptığı açıdır. Dolayısıyla aydınlanma şiddeti, ışık kaynağından uzaklığa ve ışınların yüzeye düşme açısına bağlıdır. Kaynak yüzeye ne kadar yakınsa aydınlanma şiddeti o kadar büyük olur. Benzer şekilde aydınlanma şiddetinin en yüksek olduğu durum kaynaktan gelen ışınların yüzeye dik olduğu durumdur (SI Units Explained, t.y.).

$$E = \frac{I}{d^2} \times \cos \theta \quad (2.3)$$

Işık kaynaklarının aydınlattığı cisimlerin birim yüzeylerinden göze gelen ışık şiddeti parıltı olarak adlandırılır ve birimi  $cd/m^2$  dir. Otomotiv aydınlatmasında araç stilini öne çıkaran sinyalizasyon ünitelerinde, yüzey homojenliği kontrolleri parıltı ( $cd/m^2$ ) cinsinden hesaplanır (Koshel, 2013).

## 2.2. Otomotiv Aydınlatma Sistemleri

Otomotiv aydınlatmanın tarihi yüz yılı aşkın bir geçmişe sahiptir. İlk otomobillerde gaz yağı lambaları ışık kaynağı olarak kullanılırken 1920' lerde elektrikli lambalar kullanılmaya başlandı. 1930 ve 1940 yıllarında, yansıtma sistemini içeren optik sistemler ilk defa otomotiv aydınlatma için geliştirildi. 1950' lerde ise otomotiv aydınlatma için yasal standartlar getirildi ve bu sayede her bir sinyalizasyon fonksiyonunun aydınlatma görevine göre ışık değerleri, araç üzerindeki yerleri, fonksiyonların arasındaki mesafeler gibi yasal gereklilikler belirlendi. 1960' larda, halojen ışık kaynakları kullanılmaya başlandı ve voltaj değeri 12 V' a kadar yükseldi. 1990' larda, daha fazla ışık ve daha uzun ömür gibi niteliklerinden dolayı Xenon ışık kaynakları hayatımıza girdi. 21. yüzyılın ilk 20 yıllık periyodunda ise, araçların gece görünüş tasarımları geçmiş dönemlere kıyasla çok daha önemli bir yere sahip oldu. Ayrıca yolun eğimini takip eden dinamik farlar geliştirildi (Wördenweber vd., 2007). Otomotiv dış aydınlatma tarihi için önem taşıyan yol taşları Çizelge 2.1' de kısaca özetlenmiştir.

Otomotiv dış aydınlatma sistemlerinin en önemli görevi hareket yönündeki trafik alanını aydınlatmaktır. Farklı aydınlatma fonksiyonları kullanarak görme ve görülme alanını, aydınlatma yönüne doğru gelen diğer sürücülerin gözünü kamaştırmadan, yeteri kadar aydınlattığını garanti etmelidir. Bunun için her bir aydınlatma fonksiyonu yasal standartlarda belirlenen farklı açılardaki farklı ışık değerlerini sağlamalıdır (UNECE, 2004). Şekil 2.2'de UNECE standartlarında otomotiv dış ön aydınlatma için belirlenen aydınlatma fonksiyonlarının araç üzerinde şematik gösterimi verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Otomotiv dış aydınlatmadaki yol taşları

Yıl	Gerçekleşen Olay
1908	Motorlu araçlarda elektrikli ampul kullanımı
1915	Kırmızı arka pozisyon lambaları ve sarı fren lambaları
1919	Göz almayı engelleyen kısa huzme far
1925	Uzun ve kısa huzme farlar için ilk çift filamanlı ampuller
1940	Yanıp sönen sinyal lambası
1945	Farların araç içine montajı
1958	UNECE Regülasyonları
1960	Avrupa' nın ilk halojen lamba ile tanışması
1981	Mercekli kısa huzme farlar
1991	Avrupa' nın ilk Xenon lamba ile tanışması
1993	İlk LED' li arka pozisyon lambası
2003	Ayarlanabilir kısa huzme far (AFS)
2007	İlk ışık tüpü tasarımlı arka pozisyon lambası
2016	İlk kayar sinyal lambası
2018	OLED (Organic light emitting diode) li arka pozisyon lambası

Otomotiv dış aydınlatma sistemlerinde, 1993 yılında ilk olarak 3. Fren lambası (Center High Mounted Stop Lamps - CHMSL) ile başlayan LED kullanımı zaman ilerledikçe çok daha önemli bir yere sahip olmuş ve günümüzde kullanım oranları %95 e ulaşmıştır. İlk olarak 2005 yılında full LED' li arka stop lambası marketlerdeki yerini almıştır (Eichhorn, 2006). Bunun ardından LED' ler ön aydınlatma fonksiyonlarında da kullanılmaya başlandı ve ilk LED' li kısa huzme 2007 yılında Koito firması tarafından Lexus LS600h aracı için tasarlanmıştır (Driving Vision News, 2012). 2008 yılında ise bütün aydınlatma

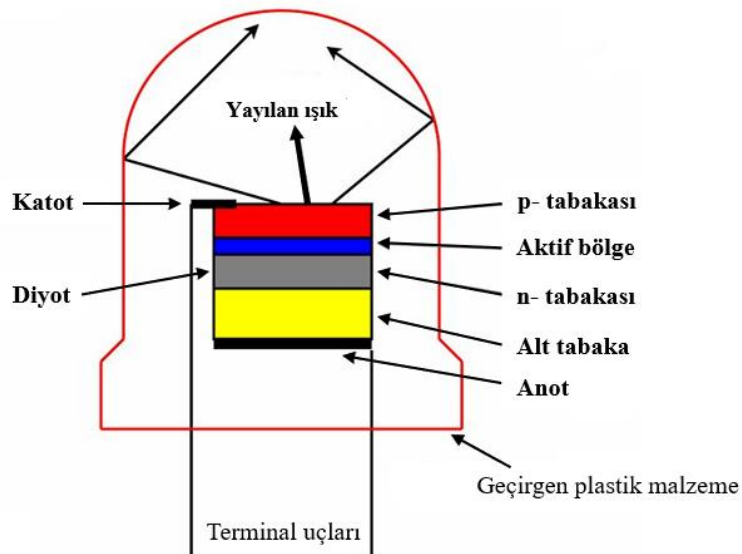


fonksiyonlarında LED ışık kaynağı kullanılan far lambası Audi R8 aracı için tasarlanmıştır (Driving Vision News, 2012).



**Şekil 2.2.** ECE Standartlarında belirlenen otomotiv ön aydınlatma fonksiyonları

LED' ler yarıiletken diyot teknolojisine dayanan elektronik ışık kaynaklarıdır. Devreden akım akmaya başladığında (diyot iletkeni yönde gerilimle beslendiğinde) elektronlar değerlik bandından yasak enerji aralığını atlayarak iletim bandına çıkarlar. Elektron boşlukla karşılaştığı zaman daha düşük bir enerji seviyesine düşer ve açığa çıkan enerji foton olarak yayınlanır (Haitz vd., 1995). Bu etki elektrolüminans olarak adlandırılır ve ışığın rengi yarıiletkenin yasak enerji aralığı ile belirlenir. LED için kullanılan malzemeler elektron ve boşlukların kolayca eşleşebilmeleri için direkt band aralığına sahiptir ((Driving Vision News, 2009). Şekil 2.3' te tipik bir LED sistemi gösterilmiştir.



**Şekil 2.3.** Tipik bir LED sistemi

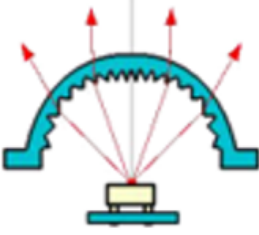
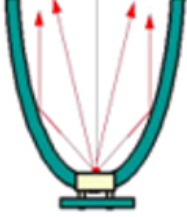
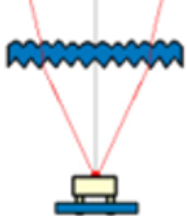
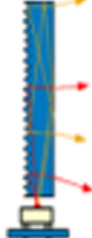
LED'lerin klasik ışık kaynaklarına kıyasla sahip oldukları üstün özellikler, otomotiv aydınlatmada kullanılmalarına neden olmuştur. Örneğin, halojen lambaların ömrünün birkaç yüz saat olmasının yanında, çalışma sıcaklığına ve tanımına bağlı olarak LED ömrünün 10 000 saatten daha fazla olması, lambanın da ömrünü uzatmakta ve güvenilirliği arttırmaktadır. Kompakt tasarım yeteneği ise ayrı bir avantajdır ve bileşenlerin yüksekliğini azaltarak alan kazancı sağlar (National Research Council, 1998). Otomotiv sektöründe LED kullanımının diğer artıları ise yüksek verim, ışık kalitesi, düşük enerji tüketimi, geliştirilmiş dayanıklılık, hızlı tepki süresi olarak sıralanabilir (Eichhorn, 2006). Çizelge 2.2' de halojen, yüksek yoğunluklu deşarj (High Intensity Discharge - HID) ve LED ışık kaynaklarının verim, ışık çıkışı, ömür, renk, optik verim ve aydınlanma özellikleri karşılaştırılmıştır (Driving Vision News, 2012). Bu tablodan da görüldüğü üzere; LED bir çok açıdan diğer ışık kaynaklarına göre daha gelişmiş özelliklere sahiptir.

**Çizelge 2.2.** Halojen, HID ve LED ışık kaynaklarının karşılaştırılması (Driving Vision News, 2012)

	<b>Halojen</b>	<b>HID</b>	<b>LED</b>
<b>Verim</b>	25 lm/W	90 lm/W	65 lm/W
<b>Işık akısı</b>	1500 lm	3000 lm	150 lm – 1500 lm
<b>Ömür</b>	200 – 1000 saat	2000 saat	>10000 saat
<b>Renk</b>	3100 K	4200 K – 5000 K	5000 K
<b>Optik verim</b>	% 40	% 40	% 60

LED ışık kaynaklarının otomotiv aydınlatma sektörüne girmesi ile birlikte yeni nesil stil odaklı tasarımların önü açılmış oldu. Bir çok LED ışık kaynağı tek bir aydınlatma fonksiyonu için kullanılarak, aracın stilistik özelliklerine farklı bir anlam katan, yenilikçi ve özel optik konsept tasarımları başladı. Bu tasarımlara örnek olan sistemler Şekil 2.4' te gösterilmiştir (Driving Vision News, 2009). Şekil 2.4.a' da yüksek verime sahip Fresnel lens teknolojisi gösterilmiştir. Lensin üzerine tasarlanan Fresnel prizmaları ile LED' den çıkan ışık ışınları belirli yönlere doğru yönlendirilmiştir. Sistem, ışık kaynağından çıkan bütün ışınları yönlendirdiği, herhangi bir ışık kaçağına izin vermediği

için verimi çok yüksektir. Şekil 2.4.b’ de reflektör (üst yüzeyi alüminyum kaplanmış plastik parça) teknolojisi gösterilmiştir. Reflektörler ışığı yansıtmak için kullanılırlar. LED’ den çıkan ışık ışınları parabolik reflektör tarafından yansıtılarak hedef alan üzerine gönderilir. Işığı istenilen açılarda yönlendirebilmek için optik yapılar parabolik sistem üzerine uygulanır. Şekil 2.4.c’ de düşük verimli Fresnel teknolojisi gösterilmiştir. Bu sistemde lensin hem iç tarafına hemde dış tarafına uygulanan prizmalar ile gelen ışığın yönü iki defa değiştirilir. Şekil 2.4.d’ de ise ışık tüpleri gösterilmiştir.

<p>(a) Yüksek verimli Fresnel Teknolojisi</p>	
<p>(b) Reflektör Teknolojisi</p>	
<p>(c) Düşük verimli Fresnel Teknolojisi</p>	
<p>(d) Işık Tüpü Teknolojisi</p>	

**Şekil 2.4.** LED ışık kaynakları kullanılan farklı tasarımlar; **a)** Yüksek verimliliğe sahip Fresnel lens teknolojisi, **b)** Reflektör teknolojisi, **c)** Düşük verime sahip Fresnel teknolojisi ve **d)** Işık tüpü teknolojisi

Optik ışık kaynakları alanındaki teknolojinin gelişmesi bir çok uygulamaya yeni bir bakış açısı getirmiştir. Teknolojik gelişmeler ışık verimini arttırmalı, düşük maliyetli olmalı ve ışık kaynaklarının ömrünü uzatmalıdır. Lens ve yansıtıcı yüzeyleri içeren klasik tasarımlar küçük ve ucuz aydınlatma fikri için elverişli değildir. Bu nedenle yenilikçi ışık tüpü tasarımları eşi bulunmayan derecede esnek tasarım yeteneği sağlamasının yanında standart tasarım limitlerini elimine etmiştir (Teijido, 2000).

### **2.3. Işık Tüpü Optik Tasarımı**

Işık tüpleri kaynaktan çıkan ışığı çoklu yansımalar sayesinde belirli bir hedefe taşıyan optik sistemlerdir. Otomotiv aydınlatmada kullanılan ışık tüplerinin temel amacı tüp yüzeyi boyunca tasarlanan optik prizmalar sayesinde homojen bir aydınlanma alanı oluşturmak ve gerekli ışık değerlerini sağlamaktır. Işık tüpü çalışmaları daha çok kesitlerin prensibi üzerine yapılan çalışmalar (Gupta vd., 2001) açıdan alana dönüştürme lineer ışık tüpleri (Davenport, 2004) ve ışık tüpü parametrelerinin karakterizasyonu (Koshel ve Gupta, 2005) alanlarında yoğunlaşmıştır. En önemli ışık tüpü parametreleri; tüp eğiminin yarıçapı, giriş ve çıkış yüzeylerindeki ışık tüpü kalınlığı, izin verilen hacim, dielektrik ortamın ve tüpü çevreleyen ortamın kırılma indisi ve tüp eğim açısıdır (Koshel, 2006). Bu parametrelerin yanında, ışık tüpü kullanılan sistemlerin bir çok farklı performans gereklilikleri vardır. Bu gerekliliklerden en önemlisi homojen bir aydınlanma yüzeyi oluşmasıdır. Çoğu durumda istenilen homojenitenin sabit bir kriteri yoktur ve optik tasarım süresince iyileştirilmeye, en iyi yüzey homojenliği elde edilmeye çalışılır. Bu durum, optik tasarım süresinin diğer klasik optik sistemlere göre çok daha fazla olmasının sebebidir (ASAP Technal, 2008).

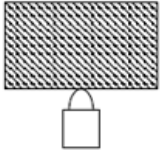
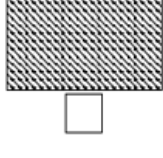
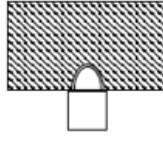
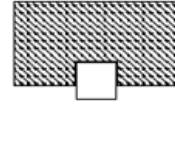
#### **2.3.1. Işık Tüpü Malzemesi ve Işık Kaynağı Seçimi**

Çok uzun olmayan ışık tüplerinde malzeme olarak akrilik (Polymethyl methacrylate – PMMA) yada polikarbonat kullanılabilir. Ancak uzun ışık tüplerinde, geniş dalgaboyu aralığında minimum hacimsel saçılma ile düşük emilim sağladıklarından, genellikle PMMA tercih edilir. Malzeme seçimi çoğu zaman çevresel faktörlerle ve fiyat ile ilişkilidir. Örneğin, yüksek sıcaklık oluşan uygulamalarda cam ya da silikon ışık tüpleri

kullanılırken, otomotiv aydınlatması gibi maliyet odaklı uygulamalarda PMMA tercih edilir (Koshel, 2013).

Otomotiv aydınlatmada kullanılan ışık tüplerinde, düşük ısı yayımlarından ve küçük boyutlarından dolayı ışık kaynağı olarak LED' ler tercih edilir. LED' lerin seçiminde dikkat edilmesi gereken önemli noktalar; LED sayısı, baskı devre kartı (PCB - Printed Circuit Board) üzerindeki konumu, LED' in lensli ya da lenssiz oluşu, LED' in ışınım deseni ve ışınım açısı olarak verilebilir. Ayrıca, LED' in ışık tüpü başlangıcında, tüp içine mi yoksa hemen tüp başlangıç alanının dışında kalan bölgeye mi yerleştirileceği gibi tasarımı doğrudan etkileyen parametrelere karar verilecektir. Bu parametrelerin ışık tüpü tasarımını nasıl etkilediği Çizelge 2.3' te özetlenmiştir. LED' in yerleştirilme şekli ışık tüpünün verimini direkt olarak etkilemektedir. Örneğin; geniş açılı ışınım desenine sahip bir LED kullanıldığında ışığı yönlendirici- odaklayıcı bir kollimator kullanılması gerekirken, dar açılı LED' ler ise hemen tüp önüne yerleştirilebilir (Osram, 2019a).

**Çizelge 2.3.** Işık tüpü içindeki LED ışığının verimli bir şekilde yakalanması için verilen farklı çözüm yöntemleri (Osram, 2019a)

Işık tüpü girişine LED' in yerleştirilmesi		Işık tüpü girişinin içine LED' in yerleştirilmesi	
<u>Lensli LED</u>	<u>Lens olmayan LED</u>	<u>Lensli LED</u>	<u>Lens olmayan LED</u>
			
(-) LED' den ışık tüpüne arayüz	(-) LED' den ışık tüpüne arayüz	(+) LED' den ışık tüpüne arayüz	(+) LED' den ışık tüpüne arayüz
(-) Lensten dolayı geniş aralık	(+) Dar aralık Alan tasarrufu	(-) Işık tüpü giriş yüzünde boşluk (işleme maliyeti)	(-) Işık tüpü giriş yüzünde boşluk (işleme maliyeti)
(-) Dar gelme açısı	(+) Kısa şiddetli ışık	(-) Uzun şiddetli ışık	(+) Kısa şiddetli ışık, kırılma indeksi eşleşmesi, geniş gelme açısı
(-) Uzun şiddetli ışık	(+) Kırılma indeksi eşleşmesi	(-) Montaj derinliği	(-) Montaj derinliği

### 2.3.2. Işık Tüpü Geometrisinin Belirlenmesi

Şeffaf malzemeden yapılmış ışık tüpünün giriş yüzeyinde ışık kaynağından çıkan ışık yakalanır ve tüp boyunca toplam içsel yansıtma (Total Internal Reflection – TIR) kurallarıyla ilerler. Sınır yüzeyi çevreleyen ortamın kırılma indisi tüpün kırılma indisinden daha küçük ve ışınların gelme açısı kritik açıdan daha büyük ise ilerleyen dalga (ışık) kırılarak dış ortama geçemez ve tüpün içinde tamamen geri yansıtılır. Gelen ışığın kritik açıdan daha büyük bir açı ile ortam sınırına çarptığında geri yansıtılmasına TIR denir. Şekil 2.5’ de akrilik bloğu içinde gerçekleşen TIR olayı gösterilirken, Şekil 2.6’ da TIR olayının şematik gösterimi verilmiştir. TIR’ ın meydana geldiği açının üzerindeki açığa kritik açı denir.



Şekil 2.5. Akrilik bloğunda gerçekleşen TIR olayı

Örneğin plastikten havaya geçen bir ışık ışını düşünelim Snell Yasası’ na (Eşitlik 2.4) göre arayüzden yayılan ışık plastiğe doğru eğilir (Şekil 2.6, soldaki durum). Işığın gelme açısı yeteri kadar büyük olursa, havadaki ışık ışınının açısı  $90^\circ$  ye ulaşır ve bu noktada hiçbir ışık ışını havaya geçemez (Şekil 2.6, ortadaki durum). Bu durum Snell Yasası kullanılarak formülize edilip, kritik açı değeri hesaplanabilir. Eşitlik 2.4’ te Snell yasası verilmiştir.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.4)$$

Snell denkleminde ışınların gelme açısı çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

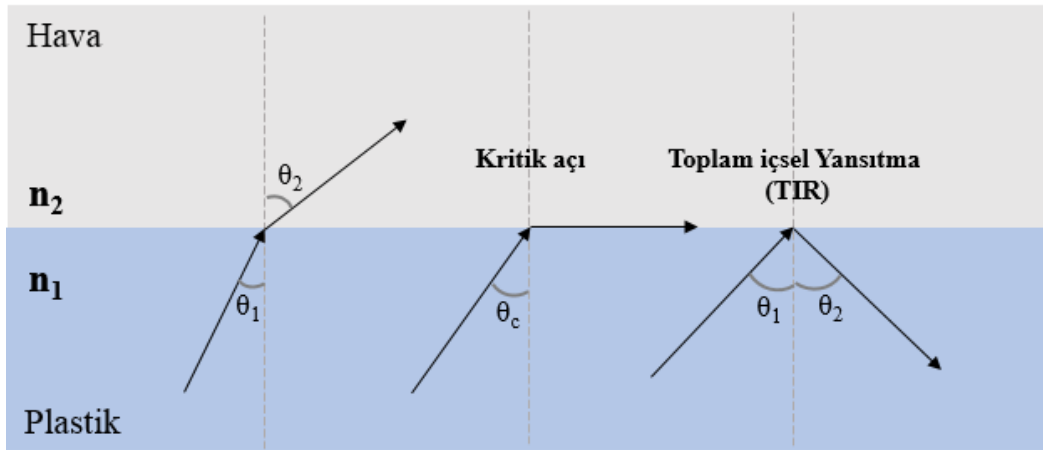
$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2 \quad (2.5)$$

Kritik açıyı bulmak için,  $\theta_2 = 90^\circ$  olduğu durumda  $\theta_1$  hesaplanır ve bulunan  $\theta_1$  değeri kritik açı ( $\theta_c$ ) değerine eşittir.

$$\theta_1 = \theta_c = \sin^{-1}\left[\frac{n_2}{n_1}\right] \quad (2.6)$$

$$\theta_c = \sin^{-1}\left[\frac{1.00}{1.492}\right] = 42,09^\circ \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7' den de görüldüğü üzere kırılma indisi 1,492 olan PMMA için kritik açı değeri  $\theta_c = 42,09^\circ$  olarak bulunmuştur. Işık tüpü, içine  $45^\circ$  açılıya sahip yansıtma prizmalarının tasarlanmasına izin verdiğinden, kritik açının  $45^\circ$  den biraz daha az olması bir çok ışık tüpü malzemesi için uygundur.

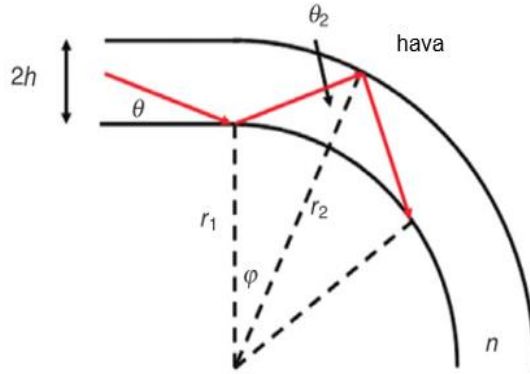


**Şekil 2.6.** Sırasıyla Snell kırılması, kritik açı ve TIR olayında ışık ışınının izlediği yollar

TIR kuralının uygulanması için ışık tüpünü çevreleyen ortamın kırılma indisi tüp malzemesinin kırılma indisinden daha küçük olmalıdır ( $n_2 < n_1$ ). Otomotiv dış aydınlatma uygulamalarında tüpü çevreleyen ortam hava olduğundan bu kural sağlanır (Şekil 2.6, sağdaki durum).

Işık tüpü içerisinde ışığı bir noktadan diğerine taşıırken istenmeyen ışık kaçakları oluşur ve oluşan bu kaçaklar optik sistemin verimini azaltır. Bazı uygulamalarda kaçak olan bölgeler mekanik yapılar ile kapatılırken, bazı uygulamalarda ise ışık tüpü eğimi ayarlanarak kaçak oluşan bölgenin gözlemcinin görüş açısı dışında kalması sağlanır. İyi tasarlanmış bir ışık tüpünde minimum kaçak hedeflenir. Uzun ve az eğime sahip ışık

tüplerinin ışığı taşıması düz ışık tüplerine benzerdir, ışık tüpünün eğimi arttıkça kaçak oluşur.



**Şekil 2.7.** Dairesel eğime sahip ışık tüpü kesiti

90° lik dairesel eğime sahip ışık tüpünün dönüş kesiti Şekil 2.7’ de verilmiştir. Dairesel ışık tüpü için ışık tüpünün dış yarıçapı  $r_2$  ve iç yarıçapı  $r_1$  dir. Eğim yarıçapı olarak adlandırılan  $r_1$ , ışık tüpünün etrafına sarılabileceği bir tamburun yarıçapıdır. Dış eğimin iç eğime oranı Eşitlik 2.8 ile hesaplanır. Burada  $r_2 - r_1 = 2h$ ,  $(r_2 - r_1)/2 = r_0$  dir ve  $r_0$ , merkez çizgisi yarıçapıdır.

$$m = \frac{r_2}{r_1} = \frac{r_0 + h}{r_0 - h} \quad (2.8)$$

Eğim yarıçapının tüp kalınlığına oranı ise Eşitlik 2.9 ile bulunabilir.

$$\frac{r_1}{2h} = \frac{1}{m - 1} \quad (2.9)$$

$m$  ve  $r_1/2h$  her ikisi de eğim oranı olarak adlandırılabilir (Koshel, 2013).

Şekil 2.7’ de gösterildiği gibi ilerleyen ışın demeti açısı  $\theta$ , ışık tüpü içinde ölçülür. Eğer ışık ışını malzemenin eğimine girmeden önceki düz yüzeyde kırılırsa, hava ortamındaki açıyı bulmak için Snell yasası (Eşitlik 2.4) kullanılabilir. Dairesel eğimde ilerleyen ışık ışını için eğrilik sabiti  $s$ , Eşitlik 2.10 ile bulunabilir.



$$r_1 \sin(90 - \theta) = r_1 \cos\theta = r_2 \sin\theta_2 = s \quad (2.10)$$

Burada s, ışık ışınının eksen yada dönüşe yaklaşabildiği en yakın mesafedir. Işık tüpünün dış yüzeyinde TIR oluşumunun sağlanması için Eşitlik 2.11' in sağlanması gerekmektedir.

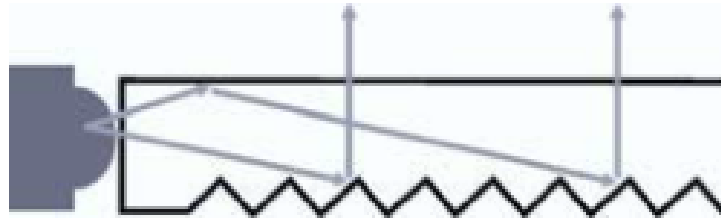
$$\sin\theta_2 > 1/n \quad (2.11)$$

Buradaki  $\theta_2$ , tüpün dış yüzeyine çarpan ışık ışınının açısıdır. TIR kuralını sağlamayan ışık ışınlarının bir kısmı yansır, diğer bir kısmı ise ilerler. İlerleyen ışık ışınları tüp eğiminde ışık kaçağına sebep olurlar ve bu durum eğim kaçağı olarak adlandırılır. Eğim kaçağı, ışık tüpünün eğiminin ışık taşıma veriminin azalmasına sebep olur ve bazı durumlarda istenmeyen ışık parlamalarının sebebidir.  $m > n$  olan keskin dönüşlü ışık tüplerinde dönüş yüzeyinde ışık kaçağı meydana gelir. Geniş açılı kıvrıma sahip olan ışık tüplerinin dönüşünde daha az ışık kaçağı meydana gelir. Işık kaçağını minimum sınırd tutabilmek adına Eşitlik 2.12' de verilen eşitlik göz önünde bulundurulmalıdır.

$$m < \sqrt{n^2 - 1} \quad (2.12)$$

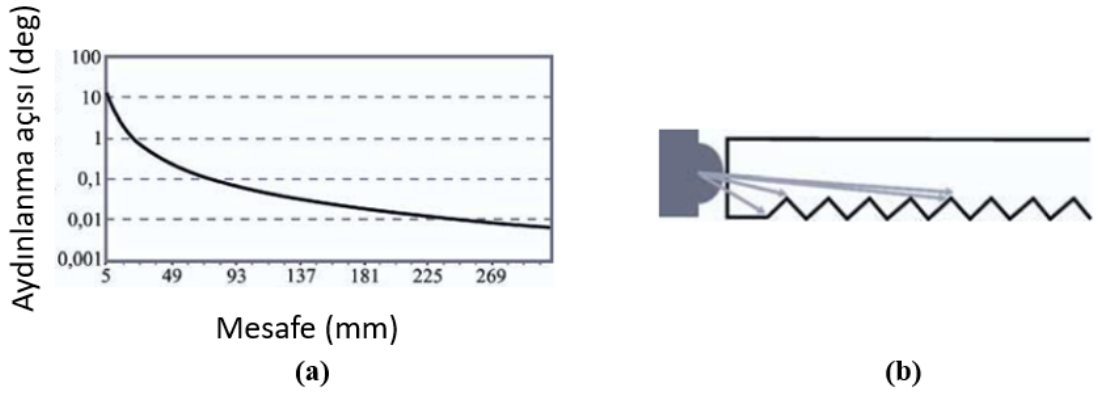
### 2.3.3. Işık Tüpü Prizmalarının Tasarımı

Işık tüpü geometrisi, LED tipi ve LED' in konumu sabitlendikten sonra ışık tüpü yüzeyine optik prizmaların tasarımı yapılır. Işık ışınlarını tüp içinde birbirinden ayırmak ve hepsini farklı alanlara yönlendirmek için tüpün aydınlanma yüzeyinin arkasında kalan yüzeye prizmalar tasarlanır. Prizmatik yüzeye ulaşan ışık ışınları için TIR kuralı bozulur ve bu ışınlar prizmaların yönlendirdiği yönelime bağlı olarak ışık tüpünü terkederler. Bu süreç Şekil 2.8' de gösterilmiştir.



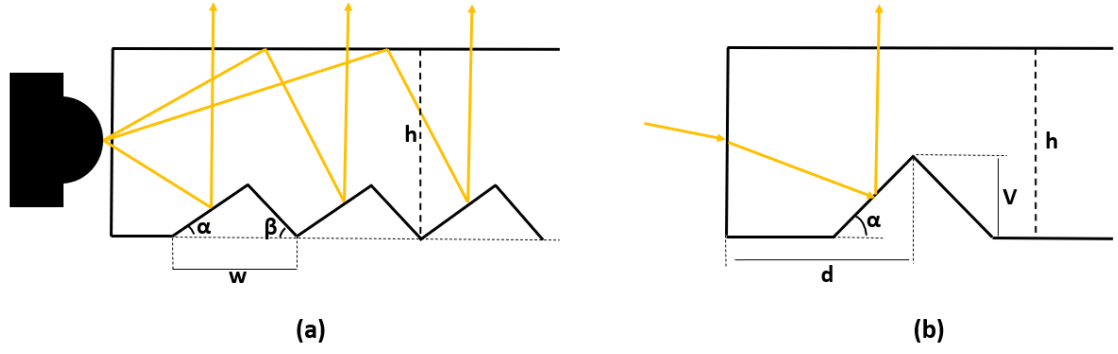
Şekil 2.8. Işık kaynağı olarak LED kullanılan ışık tüpü

Her bir prizmanın açısı o prizmanın ışık kaynağından uzaklığına göre belirlenir. Bu durum, ışık kaynağının ışınım deseni ile birleştirildiğinde ışık tüpü içindeki ışık akısının exponansiyel azalmasına yol açar. Şekil 2.9’ da exponansiyel azalma grafiği ve bu durumun şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2.9.a şıkkındaki grafikten de görüldüğü üzere, ışık kaynağından olan mesafe arttıkça yani tüpün sonlarına doğru tasarlanan prizmalara ışık kaynağından çıkan ışınlar daha dar bir açı ile gelmektedir ve bu dar açının telafi edilmesi için bu prizmaların yönelimleri değiştirilmelidir. Ancak bu değişim her zaman düzgün exponansiyel bir grafik vermez. Geometriye bağlı olarak grafik değişir; düz ışık tüpleri için exponansiyel grafik elde edilirken, 2 boyutta eğimi olan karmaşık geometriler için grafik bazı yerlerde exponansiyel bazı yerlerde lineer devam edebilir.



**Şekil 2.9. a)** Işık tüpü boyuna bağlı olarak ışık kaynağından çıkan aydınlanma açısının exponansiyel değişimi, **b)** Aydınlatma açısındaki mesafeye bağlı olan bu azalmanın ışık tüpü içindeki prizmalara etkisinin şematik gösterimi

Tüp içindeki prizmatik yapılar V kesimli olarak tasarlanmışlardır ve böyle bir ışık tüpünün yapısı Şekil 2.10’ da verilmiştir. Burada,  $\alpha$  ve  $\beta$  prizmatik yüzeylerin açılarıdır ve  $V$  ile  $w$  sırasıyla prizma derinliği ve genişliğidir. Işık kaynağından gelen ışık, ışık tüpünde yayılır ve prizmatik yüzeylerde yansıtıldıktan sonra ışık tüpünden çıkar. Prizmatik yüzeylerin açıları ( $\alpha$  ve  $\beta$ ), ışık ışınlarını kaynaktan istenen yöne doğru yönlendirmek için düzenlenebilir. Bu tür prizmatik yüzeyler, ışık dağılımının ve ışık yoğunluğunun kontrol edilmesini sağladığından, ışık ışınlarını ışık tüpünde istenen yöne yönlendirmek için kullanılan tipik optik elemanlardır (Gebauer ve Hamm, 2007; Yu vd., 2013; Yu vd., 2014).



**Şekil 2.10.** Tipik V kesimli prizmatik element gösterimi

Işık tüpünden ayrıştırılmış ışınların yönü ve her bir prizma üzerindeki yansımının verimliliği, prizmanın giriş yüzeyi ve ışık tüpü duvarı arasında kalan açı  $\alpha$  (rad) ile verilir. Şekil 2.10' da gösterilen  $\alpha$  açısı Eşitlik 2.13' te verilen bağıntı kullanılarak bulunabilir.

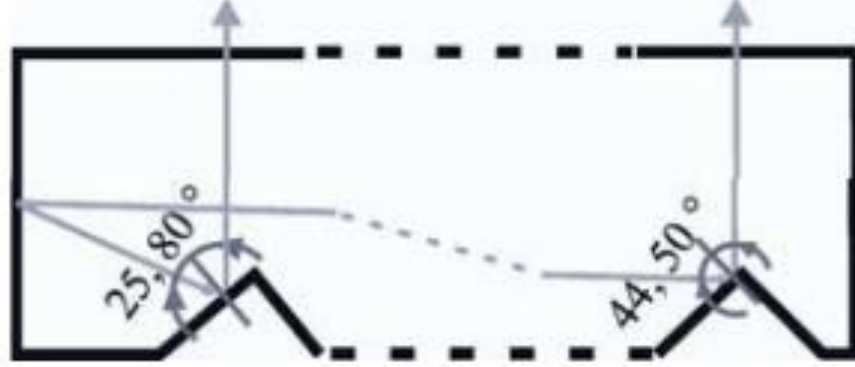
$$\alpha = \frac{\frac{\pi}{2} - \arctg\left[\frac{h-v}{d}\right]}{2} \quad (2.13)$$

Bu eşitlikte  $h$  ışık tüpünün çapı ve  $d$  ise prizmanın ışık tüpünün giriş yüzeyine olan mesafesidir. Eşitlik 2.13, ışık tüpünün başlangıcında ışık kaynağından doğrudan gelen ışığı alan prizmalar için kullanılabilir. Işık tüpünün başlangıcından daha uzakta kalan ve tüp yüzeyinde bir yansıma yapan ışık ışınlarını alan prizmalar için Eşitlik 2.14' ü kullanmak daha doğru olacaktır.

$$\alpha = \frac{\frac{\pi}{2} - \arctg\left[\frac{h-v+h}{d}\right]}{2} \quad (2.14)$$

Prizma parametrelerine bağlı olarak prizma geometrisinden  $\beta$  açısı kolaylıkla bulunabilir. Bir ışık tüpünün parametrelerini ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $V$ ,  $w$  ve  $h$ ) ayarlayarak ışık dağılımı ve ışık şiddeti için optimum değerleri bulmak mümkündür.  $V$  kesimli prizmaların boyutu, ışık tüpünün ışık şiddetini ve yüzey homojenliğini etkilemektedir. Daha büyük bir  $V$ -kesim, daha yüksek ışık şiddeti elde edilmesini sağlar. Işık tüpü boyunca elde edilecek yüzey homojenliği,  $V$  kesimli prizmaların boyut dağılımını ayarlayarak manipüle edilebilir (Güney vd., 2020).

Şekil 2.11’ de tüpün başında ve tüpün sonunda bulunan prizmalara farklı açılarda gelen ışık ışınları ve prizma yönelimleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.11.** Işık tüpü başında ve sonunda bulunan prizmalara farklı açılarda gelen ışık ışınları

Tüp başındaki ilk prizmalar ışık kaynağından daha çok enerji almalarına rağmen ışık tüpü boyunca tek yansıtma yaptıkları hesaplandığı için tüpün ortasındaki prizmalara kıyasla bu prizmaların yansıtma verimi daha azdır (Şekil 2.12). Bu nedenle ışık homojenitesi prizma yapısı şekillendirerek geliştirilebilir.

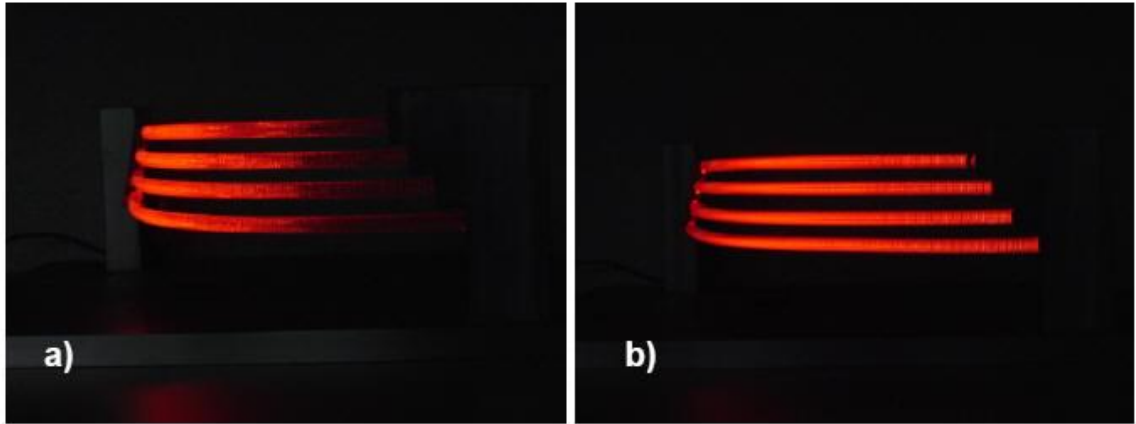


**Şekil 2.12.** LED’ den gelen direkt ışık (sol) ve birinci yansımanın gösterimi (sağ)

#### 2.3.4. Işık Tüpü Yüzeyi Homojenite Çalışmaları

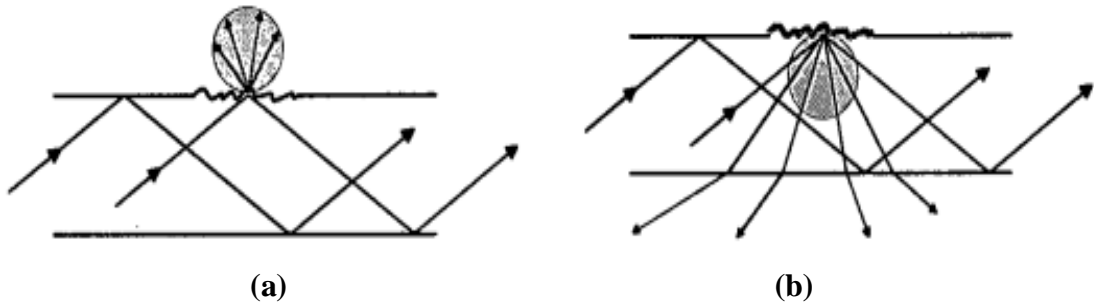
Işık tüpü tasarımında en önemli parametrelerden bir tanesi lambanın açık olduğu durumdaki görünüşüdür yani ışık tüpü yüzeyi homojenitesidir. Bu görünüş araç stili açısından çok önemlidir ve tüp boyunca tamamen homojen bir ışık dağılımı olması beklenir. Şekil 2.13’ te homojenitenin önemini vurgulamak amacıyla aynı geometriye sahip ancak iki farklı amaçla tasarlanmış ışık tüpleri gösterilmiştir: a şıkında, maksimum

ışık verimi elde etmek ve yasal regulasyonlarda belirlenen ışık değerlerini yakalamak amacıyla yapılan bir tasarım gösterilirken, b şıkında, maksimum ışık verimi, yasal regulasyonlarda belirlenen ışık değerleri ve bunların yanında optimum homojenite baz alınarak yapılan tasarım gösterilmiştir.



**Şekil 2.13.** Aynı geometriye sahip ancak farklı amaçlarla tasarlanmış ışık tüpleri

Sadece optik eksenden (x-ekseni - HV) bakıldığında değil,  $7^\circ$  yukarıdan,  $10^\circ$  ve  $20^\circ$  derece araç içi ve araç dışı konumlarından da bakıldığında ışık tüpünün aydınlanma yüzeyi boyunca homojen bir ışık dağılımı olmalıdır. Homojeniteyi arttırmak için ışık tüpü prizmalarına ışığı dağıtan yüzey pürüzlülükleri (yüzey kumlaması) uygulanır. Şekil 2.14.a' da ışık geçirgenliği olan PMMA gibi bir yüzeye kumlama yapıldığında ışığın davranışı gösterilirken, b şıkında geçirgenliği olmayan yansıtıcı yüzeye kumlama yapıldığında ışık ışınlarının nasıl saçıldıkları gösterilmiştir.



**Şekil 2.14.** Kumlama yapılmış yüzeyler üzerine gelen ışık ışınlarının davranışı. **a)** kumlamanın ışık geçirgenliği olan yüzeye uygulandığı durum, **b)** yansıtıcı yüzeylere kumlama uygulandığı durum

Bu yüzey pürüzlülüklerinin optik simülasyon programında analiz edilebilmeleri için, farklı büyüklüklerde yüzey pürüzlülüğüne sahip numunelerden saçılma ölçümleri yaptırılır ve elde edilen veriler simülasyon programına entegre edilir. Kuşlama yapılan yüzeyler ışığı çok fazla dağıtacaklarından tüpün homojenitesi iyileşirken, mevcut ışık değerlerinde önemli miktarda kayıp olacaktır. Aynı anda hem ışık verimi yüksek hem de yüzey homojenliği seviyesi optimum olan ışık tüpü optik tasarımı yapılmaya çalışılır. En küçük bir parametrenin değişimi bütün sistemi etkilemekte ve optimizasyon sayısı çok fazla olduğundan en verimli sistemi bulmak için kapsamlı bir araştırma ve çalışma yapılması gerekmektedir.

### **2.3.5. Işık Tüpü Prototip İmalatı**

Optik tasarımın doğru çalışıp çalışmadığını kontrol edebilmek için yapılan optik analizlerde, simülasyon parametreleri çok önemlidir. Sensörün konumu, gözlemcinin baktığı açı, sensörün piksel sayısı gibi simülasyon sonuçlarını direkt olarak etkileyen birçok önemli parametre vardır.

Yapılan optik tasarımları doğrulamanın en iyi yolu optik prototiplerin yapılmasıdır. Optik prototiplemenin çeşitli metotları vardır. Maliyet ve süre açısından en uygun olanı plastik külçe malzeme üzerine işleme yöntemiyle optik yapıların oluşturulmasıdır. Burada prototip yapılmadan önce imalatçıya optik parametreler ile ilgili bilgi verilmelidir. Yapılan parçanın optik hassasiyetine göre gerekli olan işleme çapı, optik yüzeylerin işleme yöntemi, yüzey üzerine yapılacak parlatma derecesi ve yüzey pürüzlülük bilgileri prototip kalitesi açısından önemlidir.

Yapılan optik prototipler üzerinden fotometri testleri yapılır ve tasarım/simülasyon ortamında elde edilen veriler ile kıyaslanır. Aynı şekilde aydınlanma yüzeyi üzerindeki yüzey homojenliği de prototip üzerinden değerlendirilir. Elde edilen veriler ışığında simülasyon parametrelerinde gerçek hayatı yansıtan sonuçları yakalamak için optimum simülasyon verileri bulunmaya çalışılır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Otomotiv dış aydınlatma sistemlerinden beklenen temel nitelik, yeterli mesafede gerekli ışık değerlerini yakalayıp uluslararası standartları sağlayarak, sürücünün görüşünü kolaylaştırmak ve araç görünürlüğünü sağlamaktır.

Son yıllarda hızlanan teknolojik gelişmeler, otomotiv dış aydınlatma sistemlerine de yansımıştır. Otomobil dış aydınlatma sistemlerinde LED kullanımının yaygınlaşması ile üst sınıf araç üreticileri, klasik reflektör ve lens optik uygulamalarından farklı olan, araç stilini ortaya koyan ve fark yaratan aydınlatma sistemleri arayışına girmişlerdir. Işık tüplerinin farklı şekil ve geometrilere uygulanabilir olması, istenilen alana uyarlanabilmesi, stil açısından klasik aydınlatma sistemlerine kıyasla ön plana çıkmalarına neden olmuştur ve otomotiv aydınlatmasında önemli bir yer edinmiştir.

#### 3.1. Otomotiv Aydınlatmada Kullanılan Işık Tüpleri

Işık tüplerinin ışık verimini ve yüzey homojenliğini etkileyen en önemli parametrelerden birisi ışık tüpünün geometrik yapısıdır (Remillard vd., 1992). Işık tüpü geometrisi ışığın tüp içinde ilerlemesine izin verecek şekilde olmalıdır. Bu nedenle keskin dönüşlere sahip ışık tüpü yapılarının, otomotiv aydınlatması gibi regülatif olarak sağlaması gereken ışık çıktısı olan optik sistemlerde kullanılması tavsiye edilmemektedir. Şekil 3.1’ de farklı geometrilere sahip ışık tüpü örnekleri verilmiştir (Auto 2000 Sports, 2020; Auto Hub, 2022; Ireson, 2012).



**Şekil 3.1.** Farklı geometrilere sahip ışık tüpü örnekleri (Auto 2000 Sports, 2020; Auto Hub, 2022; Ireson, 2012)



Işık tüpü geometrilerinin belirlenmesi ve mevcut teknolojinin incelenmesi amacıyla farklı araç üreticilerine ait far ve ASK (Arka Stop Kombinasyonu) lambaları satın alınarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, BMW X1 SDrive marka otomobilin sol ön farı, Mercedes Benz C-Serisi otomobilin ASK lambası satın alınarak ışık tüpü fonksiyonları optik açıdan değerlendirilmiştir. Şekil 3.2’ de BMW X1 SDrive marka otomobil üzerindeki görünüşü verilen farın, ön pozisyon ve DRL olmak üzere 2 farklı aydınlatma fonksiyonu toplamda 3 ışık tüpü ile sağlanmıştır (The Car Spy, 2011).



**Şekil 3.2.** BMW X1 SDrive farının araç üzerindeki görünümü (The Car Spy, 2011)

Şekil 3.3’ te ise lambanın soğuk görünüşü ve ışık tüpü fonksiyonlarının aydınlanmış halde olan görünüşleri verilmiştir. Ön pozisyon ve DRL fonksiyonları, 2 adet halka şeklinde ve bir adet dairesel kesite sahip eğimli yapıdaki ışık tüpünden oluşmuştur. Bu fonksiyonlara ait fotometrik ölçümler Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.Ş.’ deki fotometri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.3.** BMW X1 SDrive farının araç üzerindeki görünümü



Otomotiv dış aydınlatma fonksiyonlarının fotometrik ölçümleri ortam sıcaklığı ( $23\pm 2$ ) °C olan ortamda gerçekleştirilmelidir. Otomotiv dış aydınlatmada LED' li fonksiyonların fotometrik ölçümleri ise LED ışık vermeye başladıktan sonra 1. dakikada ilk ölçüm ve lamba 30 dakika açık kaldıktan sonra 2. ölçüm olmak üzere iki kez yapılır. Bu iki ölçümün her ikisinde de aydınlatma fonksiyonunun ışık değerleri, ilgili yasal standartlarda belirtilen noktalardaki ışık değerlerinin maksimum ve minimum sınırları arasında olmalıdır (UNECE, 2015). İki ölçüm yapılmasının nedeni, LED yandığı anda verdiği ışık miktarının bir pik göstermesi ve belirli bir süre sonra LED' in ısınmasından kaynaklanan verim düşmesidir. 30 dakikadan sonra LED doyuma ulaşır ve verim düşmesi neredeyse sabitlenir ve buna bağlı olarak LED' in yaydığı ışık miktarı da sabitlenir. LED degradasyonu olarak adlandırılan bu durum, LED' li aydınlatma fonksiyonlarının optik tasarımları yapılırken de hesaba katılmalıdır.

Çizelge 3.1' de DRL fonksiyonuna ait 1 dk ve 30 dk sonraki fotometri ölçüm sonuçları verilmiştir. Fotometrik ölçümler, Avrupa yasal standartları olan UNECE standardının DRL lambasına atıfta bulunan R87 regülasyonuna göre yapılmıştır (UNECE, 2013). Bu regülasyona göre DRL lambası, HV noktasında minimum 400 cd ışık vermelidir. HV noktası referans alınarak diğer noktalarda da belirli ışık değerleri sağlanmalıdır. Örneğin H-5L noktası aydınlatma ekseninin  $5^\circ$  solundaki noktayı temsil ederken, H-5R noktası ise aydınlatma ekseninin  $5^\circ$  sağındaki noktadır ve bu noktalarda minimum 360 cd ışık bulunmalıdır. 5U-V ve 5D-V noktaları ise dikeyde  $5^\circ$  yukarıda ve  $5^\circ$  aşağıdaki noktalardır. Aydınlatma ekseninden uzaklıklarına göre tanımlanan ve her biri farklı bir konumu gösteren bu noktaların bulundurabileceği maksimum ve minimum ışık değerleri yasal standart ile sınırlandırılmıştır. 1 dk ve 30 dk ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında 30 dk beklendikten sonra elde edilen ortalama degradasyon değerinin % 5 olduğu saptanmıştır.

**Çizelge 3.1.** BMW X1 SDrive DRL fonksiyonu 1 dk ve 30 dk fotometri ölçüm sonuçları

<b>Regülasyon Açısı</b>	<b>Minimum Gerekli Değer (cd)</b>	<b>Maksimum Gerekli Değer (cd)</b>	<b>1 dk Ölçüm Sonucu (cd)</b>	<b>30 dk Ölçüm Sonucu (cd)</b>
10U-5L	80	1200	334,8	309,4
10U-H	80	1200	365	355,1
10U-5R	80	1200	295,2	272,8
5U-20L	40	1200	191,4	179,8
5U-10L	80	1200	397,5	383,7
5U-V	280	1200	516	502,8
5U-10R	80	1200	319,7	306,1
5U-20R	40	1200	130	118,2
H-20L	100	1200	201,8	187,4
H-10L	280	1200	481,9	469,8
H-5L	360	1200	547,9	525,2
H-V	400	1200	601,3	578,4
H-5R	360	1200	534,3	511,8
H-10R	280	1200	396,3	371,6
H-20R	100	1200	111,4	102,2
5D-20L	40	1200	145	131,5
5D-10L	80	1200	368,6	356,3
5D-V	280	1200	499,2	475,5
5D-10R	80	1200	265,4	241,7
5D-20R	40	1200	75,4	71,2
Maksimum	0	1200	600,1	593,7

Aynı şekilde ön pozisyon fonksiyonunun da 1 dk ve 30 dk fotometri ölçümleri, ön pozisyon fonksiyonuna atfedilmiş UNECE R7 regülasyonunda belirtilen gereklilikler doğrultusunda yapılmıştır (UNECE, 2020). Elde edilen fotometri ölçüm sonuçları Çizelge 3.2’ de listelenmiştir. Tabloya bakıldığında, ön pozisyon lambası için diğer aydınlatma fonksiyonlarından farklı olarak belirli açılarda görünürlük değerlerinin de kontrol edildiğini görüyoruz. Ön pozisyon ve arka pozisyon gibi aydınlatma fonksiyonlarının yasal standartlar gereği araç içi 45° ve araç dışı 80° de minimum 0,05 cd ışık vermesi yani araç görünürlüğünü sağlaması gereklidir. Yapılan ayrıntılı inceleme

sonucunda BMW X1 SDrive farının DRL ve ön pozisyon fonksiyonlarının UNECE standartlarını sağladığı tespit edilmiştir.

**Çizelge 3.2.** BMW X1 SDrive farı ön pozisyon lambasının 1dk ve 30 dk fotometri ölçüm sonuçları

Regülasyon Açısı	Minimum Değer (cd)	Maksimum Değer (cd)	1 dk Ölçüm Sonucu (cd)	30 dk Ölçüm Sonucu (cd)
10U-5L	0,8	140,00	33,70	33,30
10U-5R	0,8	140,00	29,60	28,90
5U-20R	0,4	140,00	12,90	12,70
5U-10R	0,8	140,00	31,90	31,70
5U-V	2,8	140,00	51,70	50,60
5U-10L	0,8	140,00	40,10	40,00
5U-20L	0,4	140,00	19,30	19,00
H-10L	1,4	140,00	48,50	48,20
H-5L	3,6	140,00	55,00	54,20
H-V	4	140,00	60,10	58,30
H-5R	3,6	140,00	53,30	53,10
H-10R	1,4	140,00	39,40	38,50
5D-20R	0,4	140,00	7,50	7,10
5D-10R	0,8	140,00	26,30	25,80
5D-V	2,8	140,00	49,80	48,60
5D-10L	0,8	140,00	36,90	36,30
5D-20L	0,4	140,00	14,60	14,30
10D-5L	0,8	140,00	26,00	25,80
10D-5R	0,8	140,00	21,40	21,20
15U-45 Araç içi	0,05	140,00	0,70	0,70
10U-45 Araç içi	0,05	140,00	0,70	0,70
5U-45 Araç içi	0,05	140,00	0,70	0,70
H-45 Araç içi	0,05	140,00	0,60	0,60
5D-45 Araç içi	0,05	140,00	7,50	7,50
10D-45 Araç içi	0,05	140,00	5,60	5,60
15D-45 Araç içi	0,05	140,00	3,70	3,70
15U-80 Araç dışı	0,05	140,00	4,40	4,40
10U-80 Araç dışı	0,05	140,00	4,60	4,60
5U-80 Araç dışı	0,05	140,00	4,50	4,50
H-80 Araç dışı	0,05	140,00	4,20	4,20
5D-80 Araç dışı	0,05	140,00	3,80	3,80
10D-80 Araç dışı	0,05	140,00	3,10	3,10
15D-80 Araç dışı	0,05	140,00	2,60	2,60

Arka stop lambası üzerine yapılan ayrıntılı kıyaslama çalışmasında ise Mercedes Benz C-Serisi ASK lambası ışık tüpü tasarımı ile aydınlatılan arka pozisyon fonksiyonu incelenmiştir. ASK lambasının görüntüsü Şekil 3.4’ te verilmiştir (Car.info, t.y.). Şekilde lambanın araç üzerindeki konumu ve fotometri laboratuvarında arka pozisyon lambasının açık olduğu durumu görülmektedir. Arka pozisyon lambalarının en temel özelliği görünürlüğü sağlamasının yanında aracın stilini belirlemek olduğundan, lambanın yüzey homojenliği beklentisi çok yüksektir. Şekilde verilen görüntülerden de görüldüğü gibi, ışık tüplerinde ışık kaynaklarının olduğu araç dışı tarafında fazla ışık oluşurken sona doğru (soldan sağa doğru) gidildikçe ışık miktarı azalmıştır. Bu durumun ideali bakılan farklı açılardan ışık tüpü aydınlanma yüzeyinin her yerinde aynı miktarda ışık çıktısı olmasıdır. Otomotiv dış aydınlatma elemanları aracın stil hatlarını devam ettirdiğinden dolayı sert kıvrımlara sahip olabilirler, bunun yanında aynı zamanda az alan kaplamaları ve uluslararası standartları sağlamaları da gerekmektedir. Bu gibi kısıtlayıcı kriterlerden dolayı otomotiv dış aydınlatma elemanları için homojen bir lamba tasarımı gerçekten uzmanlık isteyen bir alandır.



**Şekil 3.4.** Mercedes Benz C-Serisi 3. Nesil ASK lambası, **a)** ASK’ nin araç üzerindeki konumu (Car.info, t.y.), **b)** ASK’ nin arka pozisyon fonksiyonunun açık olduğu durum

Çizelge 3.3’ te, Mercedes Benz C- Serisi aracına ait ASK lambasının arka pozisyon fonksiyonunun 1 dk ve 30 dk fotometri ölçümleri, arka pozisyon fonksiyonuna atfedilmiş UNECE R7 regülasyonunda belirtilen gereklilikler doğrultusunda yapılmıştır (UNECE,

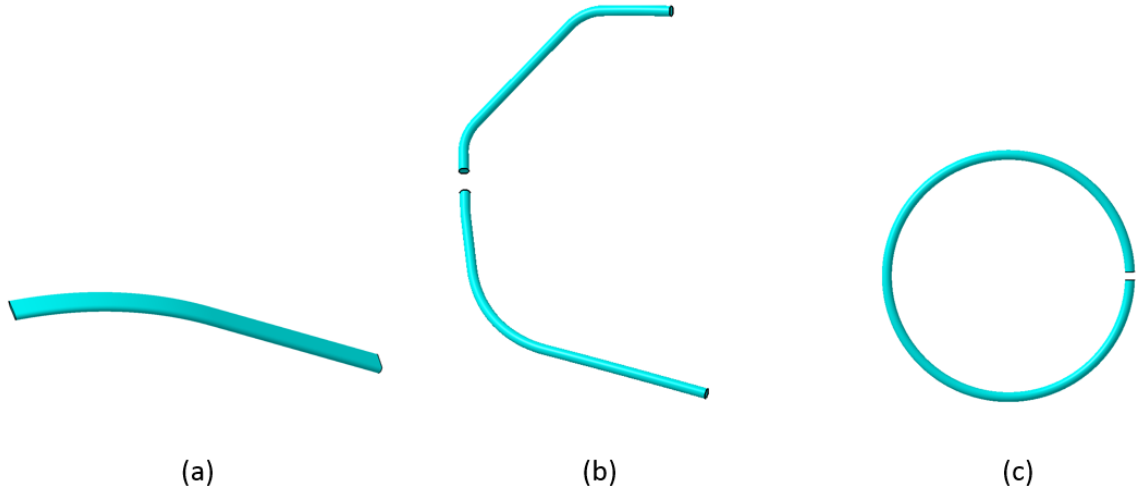
2020). Tablodan da görüldüğü üzere, lamba yasal gereklilikleri sağlamaktadır ve 30 dk sonucunda elde edilen degredasyon değeri % 5.3 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.3.** Mercedes Benz C-Serisi ASK lambasına ait arka pozisyon lambasının 1dk ve 30 dk fotometri ölçüm sonuçları

Regülasyon Açısı	Minimum Değer (cd)	Maksimum Değer (cd)	1 dk Ölçüm Sonucu (cd)	30 dk Ölçüm Sonucu (cd)
10U-5L	0,80	17,00	6,40	5,70
10U-5R	0,80	17,00	5,40	4,90
5U-20R	0,40	17,00	5,60	4,80
5U-10R	0,80	17,00	6,30	5,90
5U-V	2,80	17,00	6,30	5,80
5U-10L	0,80	17,00	4,40	4,10
5U-20L	0,40	17,00	2,40	2,00
H-10L	1,40	17,00	6,30	6,10
H-5L	3,60	17,00	6,50	6,20
H-V	4,00	17,00	6,20	5,90
H-5R	3,60	17,00	5,50	4,90
H-10R	1,40	17,00	4,40	4,00
5D-20R	0,40	17,00	5,40	5,10
5D-10R	0,80	17,00	6,20	5,90
5D-V	2,80	17,00	6,10	5,70
5D-10L	0,80	17,00	4,40	4,10
5D-20L	0,40	17,00	2,30	2,10
10D-5L	0,80	17,00	6,20	5,80
10D-5R	0,80	17,00	5,40	5,10
15U-45 Araç içi	0,05	17,00	1,90	1,80
10U-45 Araç içi	0,05	17,00	2,10	2,10
5U-45 Araç içi	0,05	17,00	2,10	2,00
H-45 Araç içi	0,05	17,00	2,10	2,00
5D-45 Araç içi	0,05	17,00	2,00	2,00
10D-45 Araç içi	0,05	17,00	1,90	1,80
15D-45 Araç içi	0,05	17,00	1,60	1,50
15U-80 Araç dışı	0,05	17,00	0,70	0,70
10U-80 Araç dışı	0,05	17,00	0,70	0,70
5U-80 Araç dışı	0,05	17,00	0,70	0,70
H-80 Araç dışı	0,05	17,00	0,70	0,70
5D-80 Araç dışı	0,05	17,00	0,70	0,70
10D-80 Araç dışı	0,05	17,00	0,70	0,70
15D-80 Araç dışı	0,05	17,00	0,70	0,70

### 3.2. Işık Tüpü Geometrilerinin Belirlenmesi ve Mekanik Tasarımlarının Yapılması

Optik tasarımı yapılacak ışık tüpü geometrilerini belirlemek amacıyla 3- boyutlu tasarım programı Catia V5 kullanılmıştır. Piyasadaki ışık tüpü tasarımları ile aydınlatma sağlayan otomotiv dış aydınlatma lambalarının incelenmesi sonucunda, 3 farklı tüp geometrisi belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen çıktıların ticarileştirilebilme potansiyeli de düşünülerek tüp geometrileri belirlenmiştir. Bunlardan ilki Mercedes Benz C-Serisi arka stop lambasının pozisyon fonksiyonu için kullanılan ışık tüpleri gibi (bkz. Şekil 3.4) bar şeklinde ve hafif bir eğime sahip ışık tüpü geometrisidir. İkinci ışık tüpü geometrisinin iki boyutta sert bir eğime sahip olması ve dikdörtgen kesitli çubuk şekli yerine daireyi süpüren bir yüzey şeklinde olması kararlaştırılmıştır. Son olarak ise Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’ te verilen BMW X1 SDrive aracının DRL ve ön pozisyon fonksiyonlarında kullanılan ışık tüpleri gibi halka şeklinde ışık tüpü tasarımının yapılması planlanmıştır. Tasarlanan ışık tüplerinin mekanik yapısı Şekil 3.5’ te verilmiştir.





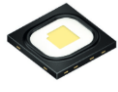
**Şekil 3.5.** Optik tasarımı yapılan 3 farklı ışık tüpü geometrisinin mekanik yapısı **a)** Bar şeklinde ışık tüpü, **b)** Çubuk şeklinde ışık tüpü, **c)** Halka şeklinde ışık tüpü

### 3.3. Işık Kaynağı Seçimi

Işık tüpü tasarımlarında bir diğer önemli parametre ışık kaynağı seçimidir. Otomotiv dış aydınlatma elemanlarında ışık kaynağı olarak LED kullanılır. LED ışık kaynakları; uzun ömürleri, küçük alanlarda tasarım yapabilme imkânı, yüksek verim, düşük enerji

tüketimi, hızlı tepki süresi gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir (Eichhorn, 2006).

**Çizelge 3.4.** Işık tüpü geometrilerinde kullanılan LED' lerin tipleri ve özellikleri

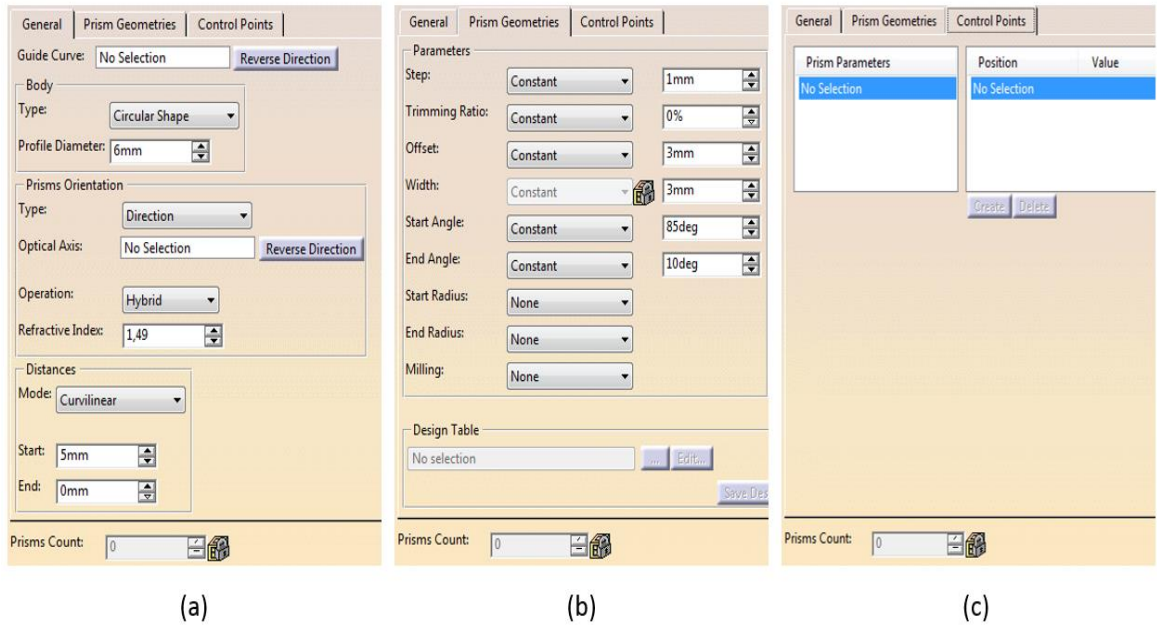
	<b>Bar Şeklinde Işık Tüpü</b>	<b>Çubuk Şeklinde Işık Tüpü</b>	<b>Halka Şeklinde Işık Tüpü</b>
<b>LED Tipi</b>	Osram Advanced Power TopLED	Osram Power SideLED	Osram Oslon Black
<b>Sipariş Kodu</b>	LA G6SP-DAFA	LA B6SP-DBFA	LUW H9QP-5M8M
<b>Işınım Açısı</b>	120°	120°	120°
<b>Nominal Akım</b>	140 mA	140 mA	700 mA
<b>Renk</b>	617 nm	617 nm	Cx: 0.32 Cy: 0.34
<b>Işık Akısı</b>	14.1 lm	17.6 lm	180 lm
<b>Geometrik Gösterim</b>			

Çizelge 3.4' te, tasarlanan ışık tüplerinde ışık kaynağı olarak kullanılan LED' lerin özellikleri ve geometrik gösterimleri verilmiştir. İlk tasarlanan ışık tüpü geometrisi bar şeklinde ışık tüpünde, Osram firmasının geliştirdiği Advanced Power TopLED sınıfından LA G6SP-DAFA LED' i kullanılmıştır. Bu LED' in nominal akımı 140 mA dir ve 617 nm dalgaboyunda pik gösteren kırmızı ışık vermektedir. Çubuk şeklinde ışık tüpü için yine Osram firmasının geliştirdiği Power SideLED isimli LA B6SP-DBFA sipariş kodlu LED kullanılmıştır. Bu LED' in de nominal akımı 140 mA, yaydığı ışığın dalgaboyu 617 nm dir. Ancak bu LED için diğerlerinden farklı olan LED' in montaj şeklidir. Diğer LED' ler PCB üzerine paralel olacak şekilde yerleştirilirken LA B6SP LED' i PCB üzerine dik yerleştirilir. Son ışık tüpü geometrisi halka şeklinde ışık tüpü için Osram Oslon Black sınıfından LUW H9QP-5M8M LED' i tercih edilmiştir. Bu LED beyaz renkte ışık yaymaktadır ve diğer ışık tüpü geometrilerinde kullanılan LED' lerle kıyaslandığında

yaydığı ışık miktarı daha fazladır. 700 mA akımla sürüldüğünde, minimum 180 lm ışık akısına sahiptir.

### 3.4. Optik Yüzey Tasarımı

Işık tüplerinin optik tasarımı, Speos CAA optik analiz programı içerisinde alt tasarım modülü olarak yer alan “Optik yüzey tasarımı (Optical Shape Design – OSD)” modülünün ışık tüpü tasarımına özel olarak ayrılmış tasarım gereci yardımıyla yapılmıştır. Bu ışık tüpü tasarım gereci; genel, prizma geometrisi ve kontrol noktaları olmak üzere 3 ayrı pencereden oluşmaktadır. Bu pencerelerin görüntüsü Şekil 3.6’ da verilmiştir.

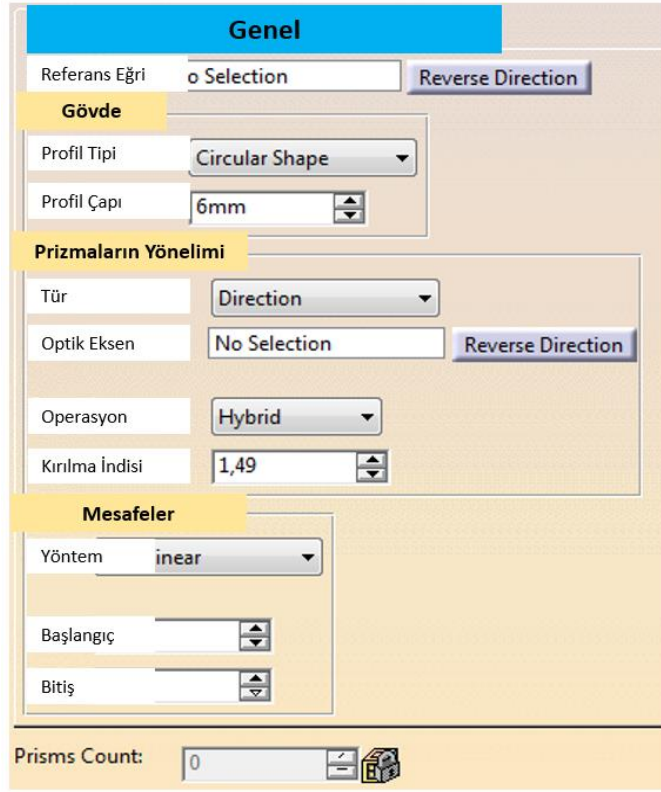


Şekil 3.6. OSD yazılımı ışık tüpü tasarımı modülüne ait pencere içerikleri: a) Genel, b) Prizma geometrileri, c) Kontrol noktaları

#### 3.4.1. Optik yüzey tasarımı- genel penceresi

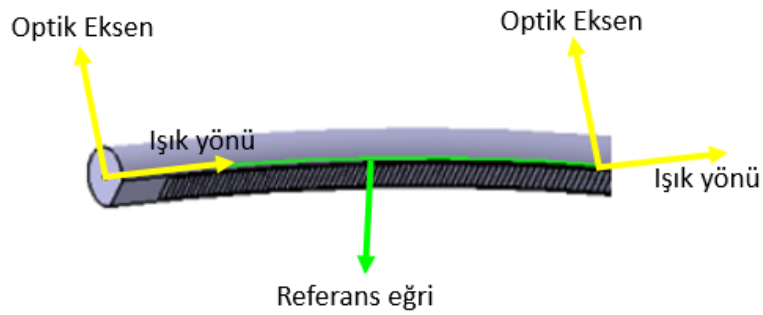
Genel penceresi kendi içerisinde farklı bölümlere ayrılmıştır. Şekil 3.7’ de bu pencerenin ayrıntılı görüntüsü verilmiştir.





**Şekil 3.7.** OSD yazılımı ışık tüpü tasarımı modülüne ait genel penceresi

Burada ilk olarak ışık tüpünün stil eğimini belirleyen referans eğri seçilmelidir. Bu eğri hedeflenen ışık tüpü geometrisi baz alınarak CATIA V5 yazılımı ile oluşturulur ve eğri ışık tüpü profili ile süpürüldüğünde ışık tüpünün mekanik yapısı oluşmalıdır. Eğri seçildiğinde Şekil 3.8’ de gösterildiği gibi optik eksen ve ışık yönü otomatik olarak atanır, bu yönlerin tüp geometrisi ve ışık kaynağı konumu göz önüne alınarak kontrol edilmesi, bir yanlışlık var ise yönlerinin değiştirilmesi gerekmektedir.



**Şekil 3.8.** Işık tüpü geometrisini oluştururken gerekli olan referans eğri, optik eksen ve ışık yönü gösterimi

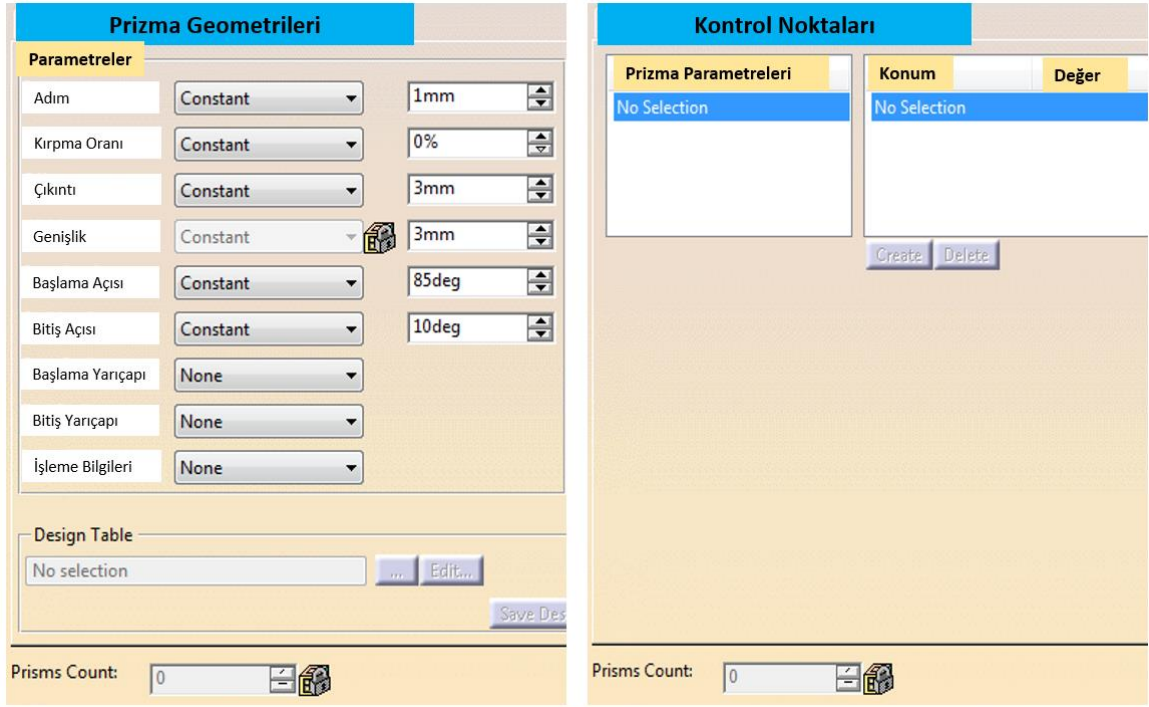
Genel penceresinin bir diğerk alt basamağı Gövde kısımdır. Burada ışık tüpünün sprleceği profil seçilir. Eğer profil standart çember olacak ise profil seçilmeden çap değer giriilerek devam edilebilir.

Prizmaların yönelimi başlığı altında, özel bir optik eksen seçilebilir ya da istenilen yüzey oluşturularak bu yüzeye dik bir şekilde prizma atılması sağlanabilir. Burada operasyon sekmesinde prizmaların ışık tüpünün içine doğru, dışına doğru ya da hem ie hemde dışa doğru karışım olacak şekilde seçim yapılabilir. Ayrıca ışık tüpü malzemesinin kırılma indisi de bu bölümde girilir.

Son olarak mesafeler kısmında ise prizmaların referans eğrisinin başlama ve bitiş noktasından ne kadar uzakta olacağını belirleyen mesafeler girilir.

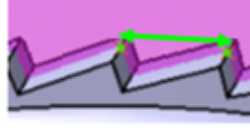

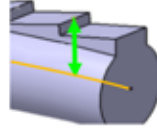

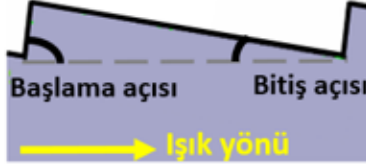
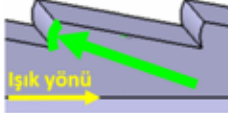


#### **3.4.2. Optik yüzey tasarımı- prizma geometrileri penceresi**

Prizma geometrileri penceresi, optik tasarımın yapıldığı ana penceredir. Bu pencere ile kontrol noktaları penceresi birbirine bağlantılı olarak çalışır. Her iki pencerenin içeriği şekil 3.9' da verilmiştir. Burada verilen her prizma parametresi için sabit, tasarım tablosu, kontrol noktaları ve otomatik seçeneği mevcuttur. Sabit seçeneği seçildiğinde prizma referans eğrisi boyunca o değer sabit bir şekilde devam eder ve her bir prizma için aynıdır. Tasarım tablosu seçeneğinde ise ayrı bir excel tablosu oluşturularak bahsi geçen parametre her bir prizma için ayrı ayrı girilebilir ya da parametreler arasında istenilen formülasyon oluşturulabilir. Kontrol noktaları seçildiğinde, kontrol noktası penceresi içerisinde, referans eğrisi üzerine belirli noktalar atılarak bunlar arasındaki değişim değerleri girilir. Otomatik seçeneğinde ise program, değerleri otomatik belirler ancak bu seçenek belirli ışık değerlerini sağlaması gereken otomotiv aydınlatması için uygun değerdir.



**Şekil 3.9.** OSD yazılımı ışık tüpü tasarımı modülüne ait Prizma Geometrileri ve kontrol noktaları pencereleri

Şekil 3.10' da ise prizma geometrileri penceresi altında bulunan sabitlerin ayrıntılı açıklamaları verilmiştir. Prizma geometrileri penceresi altında ilk olarak adım bölümü ile karşılaşılır. Burada prizmaların referans eğrisi boyunca mesafeleri girilir. Daha sonra kırpma oranı değeri girilmelidir. Bu değer ile prizmaların tüp yüzeyine olan yükseklikleri belirlenir ayrıca ardışık iki prizma arasında ne kadar mesafe olacağını da belirlediği kısımdır. Eğer prizmalar arasında boşluk olmaması arzu ediliyorsa bu değer sıfır olarak girilmelidir. Çıkıntı sekmesinde girilen değer ise prizmanın referans eğrisinden yüksekliğini belirler. Genişlik kısmında girilen değer ile prizmaların sahip olacağı genişlik sabitlenir. Optik tasarımın anahtar noktalarını oluşturan kısımlar başlama açısı ve bitiş açısı değerleridir. Bu değerler ile ışığın istenilen konuma gönderilmesi sağlanır. Başlama açısı, prizmanın ışık kaynağı tarafında olan kenarının açısıyken, bitiş açısı ise ışık kaynağına ters yöndeki kenarın açısıdır. Başlama yarıçapı ve bitiş yarıçapı değerleri optik prizma yüzeylerinin üzerindeki eğriyi belirler. Eğer bu yarıçap değerleri girilmez ise prizmaların bu yüzeyleri düz olur ve ışık dağılımı daha dar olur. Optik tasarımın gerekliliklerine göre bu değerler sonradan güncellenebilir.

Adım	
Kırpma oranı	
Çıkıntı	
Genişlik	
Başlama açısı	
Bitiş açısı	
Başlama yarıçapı	
Bitiş yarıçapı	
İşleme bilgileri	

**Şekil 3.10.** Optik yüzey tasarımı- Prizma geometrileri penceresinin alt sekmelerinin ayrıntılı gösterimi

Prizma geometrileri penceresinde son olarak prizmaların kalıp işleme değerlerinin girileceği yani freze makinasında işlemeden kaynaklı oluşacak takım yarıçap değeri bulunmaktadır. Bu yüzey üzerinde oluşacak yarıçap değeri optik prizmanın yüzeyinden kayıp oluşturacağından, prototipleme ya da üretim öncesi takım yarıçap değeri öğrenilerek bu değer girilmeli ve optik analiz sonuçları değerlendirilmelidir.

### 3.5. Yüzey Pürüzlülük Uygulamaları

Yüzey pürüzlülük uygulaması için otomotiv aydınlatma alanında kullanılan 4 farklı desen uygulama metodu vardır (Fow Mould, t.y.). Bunlardan ilki kumlama yöntemidir. Kumlama yönteminde; desenlenmek istenilen yani pürüzlülük oluşturulması istenilen yüzeye, granül şeklindeki küçük kum taneleri bir tabanca yardımı ile püskürtülerek uygulama yapılan yüzeyin deformasyonu sağlanır ve yüzey pürüzlülüğü oluşturulur. Bu uygulamada desen derinliği mikron mertebesinde ve istenilen desen şiddeti işlem süresine ve granül tanelerinin büyüklüğüne bağlı olarak ayarlanabilir.

İkinci yöntem kimyasal desenleme tekniğidir. Kimyasal desenlemede, yüzey pürüzlülüğü olması arzu edilen yüzeyler açıkta bırakılacak şekilde numune maskelenir. Maskelenen numune (ihtiyaca bağlı olarak bu tek bir parça da olabilir ya da seri üretimde kullanılan kalıpların çeliği de olabilir) kimyasal asit banyosuna batırılır ve asitin yüzeyi deforme etmesiyle pürüzlülük oluşturulur. Numunenin asit banyosunda kalma süresi ve asit içeriği ile istenilen desen derinliği elde edilir.

Üçüncü uygulanan teknik ise erozyon desenlemedir. Bu uygulamada, erozyon makinasına belirli akım değerleri girilerek yüzey pürüzlülüğü olması istenilen bölgeden talaş kaldırmak suretiyle hedeflenen desen derinliği elde edilir. Bu teknik diğerlerinden farklı olarak sadece kalıp çelikleri üzerine uygulanabilir, tekil parça üzerine uygulanamaz.

Dördüncü ve son yüzey pürüzlülük uygulama tekniği ise lazer desendir. Bu teknikte, desenlenmesi istenilen yüzeye lazer ışınları CNC (Computer Numerical Control) makinasıyla gönderilir ve lazer ışınlarına maruz bırakılan alanda hedeflenen desen derinliği elde edilir.

Bu çalışma kapsamında üretilen ışık tüpü prototiplerinin prizma yüzeylerine, kumlama yöntemi ile yüzey pürüzlülüğü uygulanmıştır. Burada kumlama yönteminin kullanılmasının temel nedeni, prizmaların olmadığı diğer ışık tüpü yüzeylerine zarar vermeden yüzey aşındırmasının yapılmasıdır. Ayrıca kumlama yöntemi diğer desenleme yöntemlerine göre maliyet açısından daha avantajlıdır.

### 3.6. Prototip Testleri ve Fotometri Ölçümleri

Optik tasarımı yapılan ve prototipleri üretilen ışık tüplerinin fotometri ölçümleri Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.Ş. bünyesindeki fotometri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için IES LM-75-01' e göre Tip-A olan LMT GO-H 1660 model ganyometre kullanılmıştır. Ganyometre 5 eksende (H, V, X, Y, Z) ayarlanabilme özelliğine sahiptir. Sinyalizasyon fonksiyonlarının ölçümleri için ganyometrenin optik ekseninden 3 m uzaklığa konumlandırılmış sensor kullanılmıştır. Şekil 3.11' de fotometri ölçümlerinde kullanılan ganyometre sisteminin görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 3.11.** Fotometri ölçümlerinde kullanılan IES LM-75-01' e göre Tip-A olan LMT GO-H 1660 model ganyometre

Fotometri ölçümleri için ölçümü yapılacak prototip ganyometre üzerine yerleştirilir. Ganyometrede bulunan lazer ışığı aydınlanma alanının ağırlık merkezine gelecek şekilde optik eksen ayarlanır. Ölçülecek sinyalizasyon fonksiyonu için oluşturulmuş UNECE ölçüm noktalarını ve gereken minimum - maksimum değerleri içeren ölçüm dosyası sistemden çekilerek ölçüm gerçekleştirilir. Ölçüm sonucunda elde edilen veriler değerlendirilir ve parçanın yasal standartlara uygunluğu kontrol edilir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

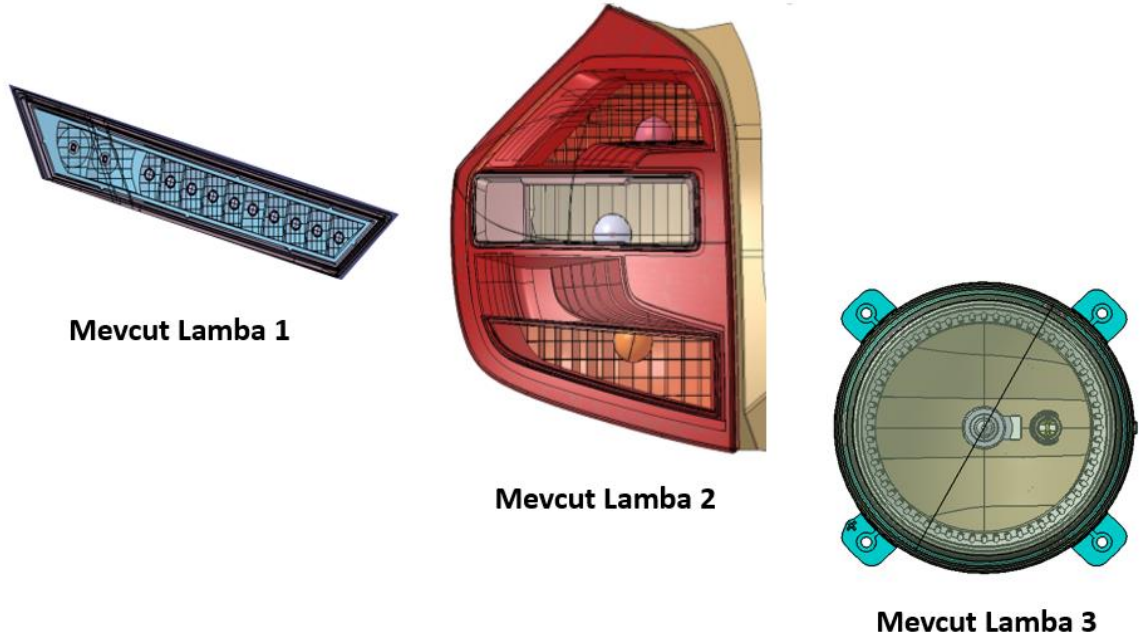
### 4.1. Giriş

Son yıllarda LED alanında yapılan araştırmalar, fiber optik teknolojisinde kullanılan ışık tüplerinin otomotiv aydınlatma alanına uyarlanmasına yol açmıştır. Işık tüpleri bir ya da birkaç LED ile aydınlatma sağladıkları, istenilen geometride şekillendirilebildikleri ve farklı bir estetik görünüm verdikleri için diğer klasik aydınlatma fonksiyonlarına göre ön plana çıkmışlardır.

Bu bölümde, otomotiv dış aydınlatma alanında kullanılan ışık tüplerinin optik tasarım aşamaları; bar şeklinde, çubuk şeklinde ve halka şeklinde olmak üzere 3 farklı temel geometrik yapı altında incelenmiştir. Her bir geometri için ışık tüplerinin uluslararası standartları sağlayarak, homojen bir aydınlanma alanına sahip olmaları amacıyla yürütülen optik tasarımları, yapılan analizler ile doğrulanmıştır. Optik tasarım sonucunda elde edilen en uygun ışık tüpü tasarımı üzerinden her bir geometri için ışık tüpü prototipleri üretilmiştir. Üretilen prototiplerin fotometri sonuçları ve yüzey homojenliği, analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, ışık tüpü prizma yüzeyleri üzerine yüzey pürüzlülüğü uygulanarak, ışık değerleri ve yüzey homojenliği üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Tasarlanan ışık tüpü prototiplerinin daha sonra ticarileştirilebilme potansiyeli olması için Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.Ş. bünyesindeki lambalar incelenmiş ve ışık tüpü teknolojisinin uygulanabileceği en uygun 3 lamba türü belirlenmiştir. Şekil 4.1' de belirlenen lambaların mevcut fotoğrafları verilmiştir.



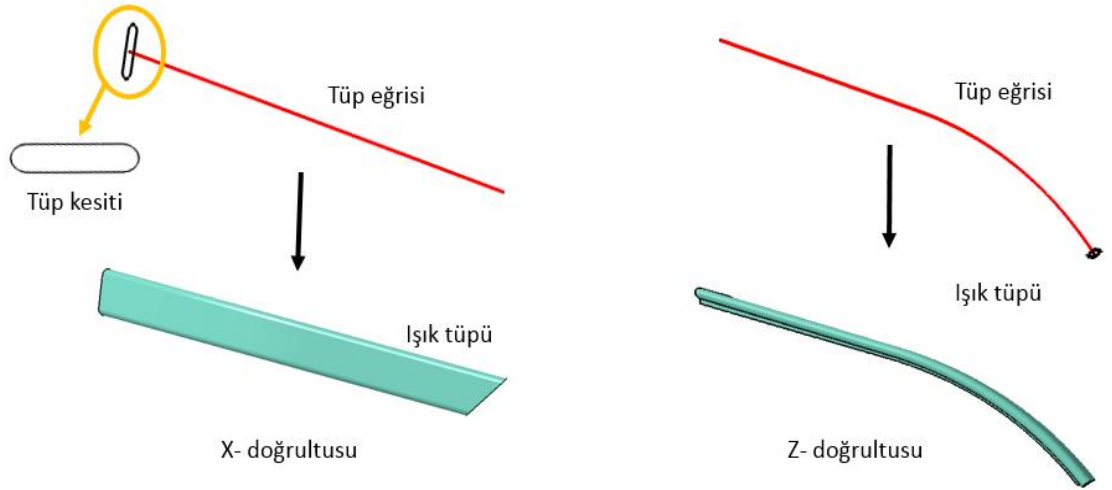


**Şekil 4.1.** Tasarlanan ışık tüplerinin uyarlandığı lambaların ışık tüpü kullanılmadan önceki mevcut fotoğrafları

## 4.2. Bar Şeklindeki Işık Tüpü Geometrisi

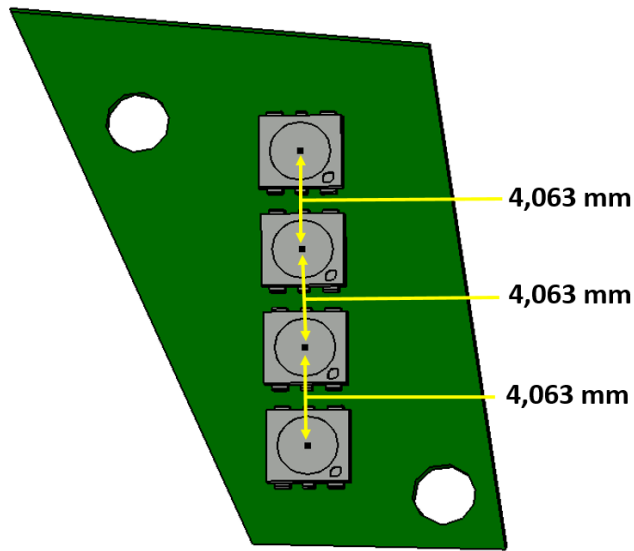
### 4.2.1. Bar şeklindeki ışık tüpünün optik tasarımı

Bar şeklinde ışık tüpü tasarımına en elverişli lamba olarak Şekil 4.1’ de mevcut lamba 1 olarak verilen LED’ li ön Sinyal/Pozisyon lambası seçilmiştir. Mevcut lambanın reflektör bölmeleri çıkartılıp yerine ışık tüpü yerleştirilecek şekilde bar şeklinde ışık tüpü geometrisi belirlenmiştir. Işık tüpü geometrisinin yapısı ayrıntılı olarak Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. Şekilde, tüp kesiti, tüp eğrisi ve kesitin eğri boyunca süpürülmesiyle elde edilen ışık tüpü geometrisi yer almaktadır. X- doğrultusu, 3-boyutlu koordinat sisteminde tüpe tam karşıdan bakarken, Z- doğrultusu ise tüpün üstten bakıldığında elde edilen görünüşüdür.



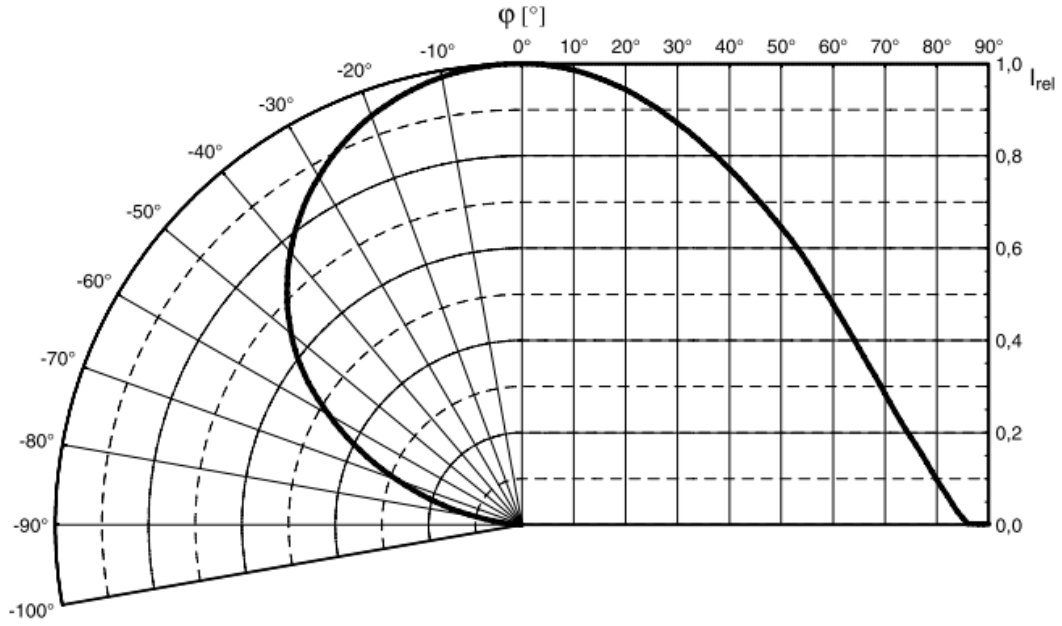
**Şekil 4.2.** Bar şeklinde yapıya sahip ışık tüpü geometrisi

Mevcut lamba üzerindeki reflektörün arkasında kalan ve araca montajı sağlayan parça olan gövdenin yapısı korunmuştur. Reflektör ile aynı bağlantı noktalarına sahip ışık tüpünün üzerine oturtulacağı ve tüpün sabit kalmasına yardımcı olacak ışık tüpü tutucusunun mekanik tasarımı yeniden yapılmıştır. Daha sonra ise bu ışık tüpü tutucusuna monte edilecek ışık tüpü PCB' sinin konumu belirlenmiştir. PCB üzerine LED' ler, merkezleri arasında 4,063 mm olacak şekilde Şekil 4.3' teki gibi konumlandırılmıştır.



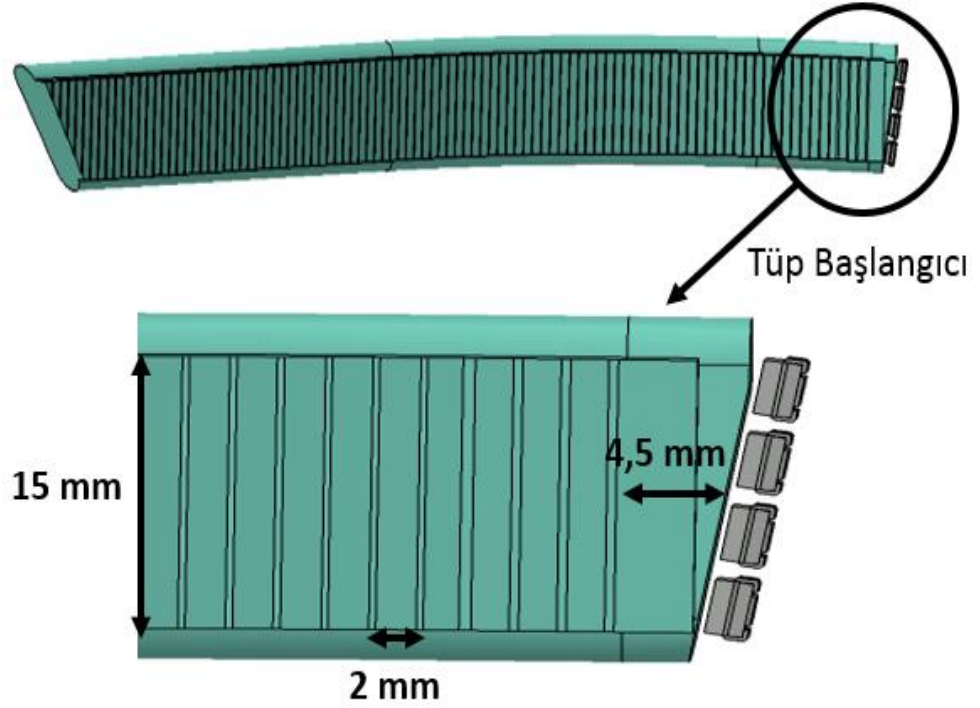
**Şekil 4.3.** LED' lerin PCB üzerindeki konumları ve aralarındaki mesafe

Işık kaynağı olarak, Şekil 4.4' te ışık yayılım karakteristiği verilen ve 120° derece ışık yayılım açısına sahip olan 4 adet Osram Advanced Power TOPLED- LA G6SP kullanılmasına karar verilmiştir (Osram, t.y.). Tasarıma başlama aşamasında her bir LED' in 1 lm ışık yaydığı kabul edilerek analizler koşulmuştur. Uygun başlama açısı, bitiş açısı ve çıkıntı değeri belirlendikten sonra uluslararası standartları sağlayacak ışık akısı ve dolayısıyla LED akım değerine karar verilecektir.



**Şekil 4.4.** Osram LA G6SP LED' ine ait ışık yayılım karakteristiği (Osram, t.y.)

Tüp geometrisi, LED tipi ve PCB konumu belirlendikten sonra, prizmaların optik tasarımına başlanmıştır. Prizmalar tüp başlangıcından yaklaşık 4,5 mm ileride, 2 mm lik adımlarla ve her bir prizmanın genişliği 15 mm olacak şekilde tüpün sonuna kadar devam etmektedir. Prizmaların yapısı tüp geometrisi ile birlikte Şekil 4.5' de gösterilmiştir. Işık tüpü malzemesi olarak 3 mm kalınlıkta % 92 geçirgenliğe sahip Arkema firmasının ürettiği Altuglass V825T kod numaralı PMMA seçilmiştir (Altuglas, t.y.).

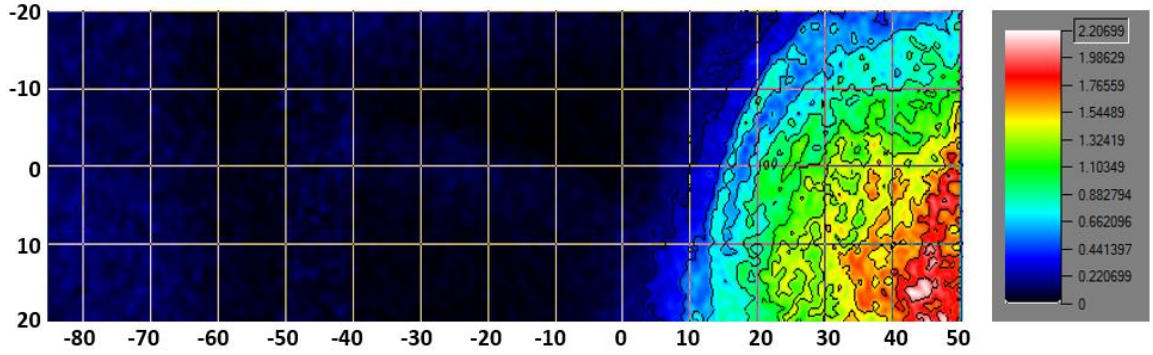


**Şekil 4.5.** Bar şeklinde ışık tüpü ve prizmaların yapısı

Prizmaların tasarımı aşamasında, ışık verimi ve yüzey homojenliğini doğrudan etkileyen başlama - bitiş açısı ve prizmaların tüpün orta eğrisinden uzaklığını belirleyen çıkıntı değerleri sabit alınmıştır. Işık dağılım haritasını ve tüpün yaydığı ışık miktarını görebilmek için sisteme ışık tüpünün tam ortasını odak alacak şekilde şiddet sensörü eklenmiştir. Arka pozisyon lambasının yasal standartlara göre görünür olması gereken alan; araç içi  $45^\circ$  ile araç dışı  $80^\circ$  aralığıdır (UNECE, 2012). Bu nedenle şiddet sensörü bu açıları kapsayacak şekilde, araç içi  $50^\circ$  ve araç dışı  $85^\circ$  aralığında oluşturulmuştur. Yüzey homojenliğini analiz edebilmek amacıyla da ışık tüpünün geometrik merkezinden 3000 mm uzaklıkta, lambanın araç üzerindeki konumunun tam karşısından (HV),  $7^\circ$  yukarisından,  $10^\circ$  ve  $20^\circ$  araç içi ve araç dışından bakacak şekilde toplam 6 adet parlaklık sensörü eklenmiştir. Bütün sensorler görünür dalgaboyu spektrum aralığında 10 nm çözünürlüğe sahiptirler. Işık kaynakları, ışık tüpü ve oluşturulan sensörler aynı analize dahil edilerek simülasyonlar koşulmuştur.

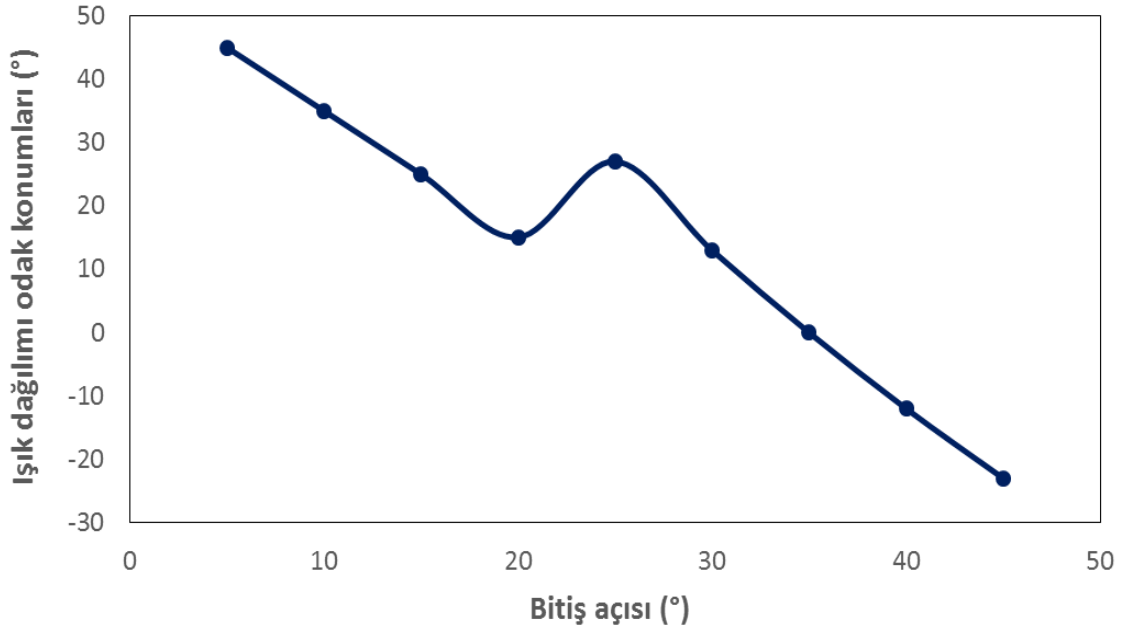
Işık tüpü tasarımına ilk olarak başlama açısı  $5^\circ$ , bitiş açısı  $5^\circ$  ve çıkıntı değeri 3,5 mm olan ışık tüpü ile başlanmıştır. Bu parametrelere göre modellenmiş ışık tüpünün ışık

dağılım haritası Şekil 4.6' da verilmiştir. Işık dağılım haritasına bakıldığında; ışığın 45° sağda (araç içi) ve 15° aşağıda odak yaptığı görülür, oysaki ideal bir optik tasarımda ışığın yatay ve düşey eksenlerindeki sıfır noktalarının kesiştiği konumda yani HV noktasında odaklanması gerekmektedir.



**Şekil 4.6.** Başlama açısı 5°, bitiş açısı 5° ve çıkıntı değeri 3,5 mm olan bar şeklindeki ışık tüpünün ışık dağılım haritası

Işık dağılımının odağını HV noktasına kaydırmak için dağılımın konumunu ve şiddetini etkileyen başlama ve bitiş açısı değerleri değiştirilerek en uygun parametreler bulunana kadar yeni tasarımlar denenmiştir. İlk olarak bitiş açısı değerini belirlemek için, başlama açısı 5° de, çıkıntı değeri 3,5 mm de sabit tutularak bitiş açısı sırası ile 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40° ve 45° olacak şekilde ayarlanmış, analizler koşturulmuş ve ışık dağılımının odak oluşturduğu değerler kaydedilmiştir. Bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının yatay ekseninde yaptığı odak konumları Şekil 4.7' de verilen grafik ile özetlenmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, bitiş açısı değeri azaldıkça ışık dağılımının konumu artı değerlere yani sağ tarafa doğru kaymıştır. Yapılan parlaklık analizleri sonucunda da araç ekseninin tam karşısından (HV) lambaya bakıldığında, en iyi yüzey homojenliği görüntüsü bitiş açısının 35° olduğu durumda elde edilmiştir. Bu sonuç, şiddet analizleri sonucunda bulunan ışık dağılımının konumunun bitiş açısının 35° olduğu durumda HV noktasında çıkması ile uyum içindedir.

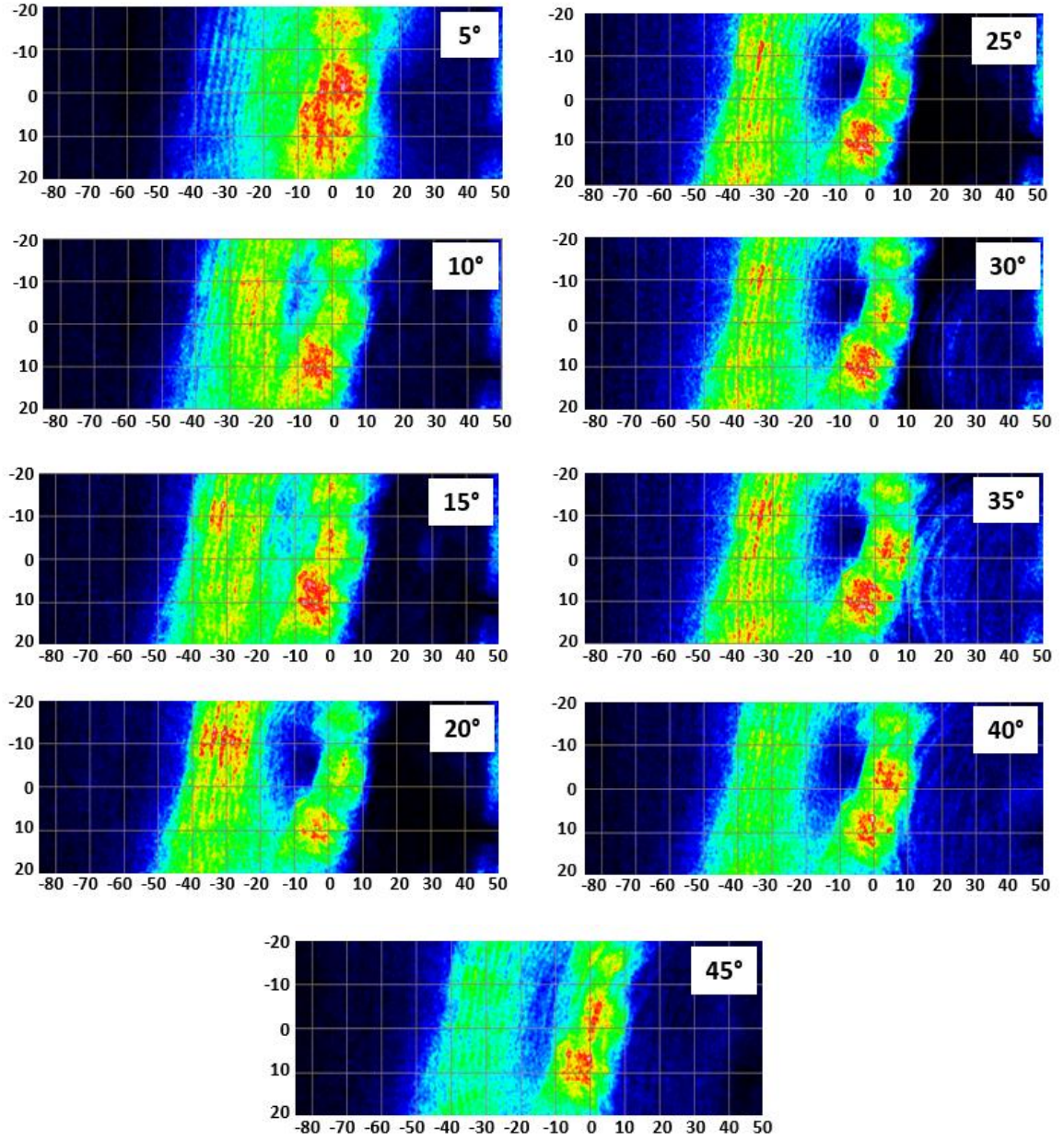


**Şekil 4.7.** Bitiş açısına bağlı olarak değişen ışık dağılımının yatay eksen doğrultusundaki odak konumları

Bitiş açısı için yapılan çalışmanın aynısı başlama açısı için de yapılmıştır. Bitiş açısı  $35^\circ$  de, çıkıntı değeri 3,5 mm de sabit tutularak başlama açıları  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$  ve  $45^\circ$  olacak şekilde analizler yapılmıştır. Şiddet analizleri sonucu elde edilen ışık dağılım haritaları Şekil 4.8’ de verilmiştir ve başlama açısı her dağılımın sağ üst köşesinde belirtilmiştir. Bu görüntülerden de görüldüğü gibi, sadece başlama açısı  $5^\circ$  olan ışık tüpünde ışık dağılımı odaklanmıştır, diğer başlama açılarında ışık dağılımı daha dağınıktır. Bu nedenle başlama açısının  $5^\circ$  civarında ve tüp geometrisine göre belirli yerlerde  $5^\circ$  den daha küçük olmasına karar verilmiştir.

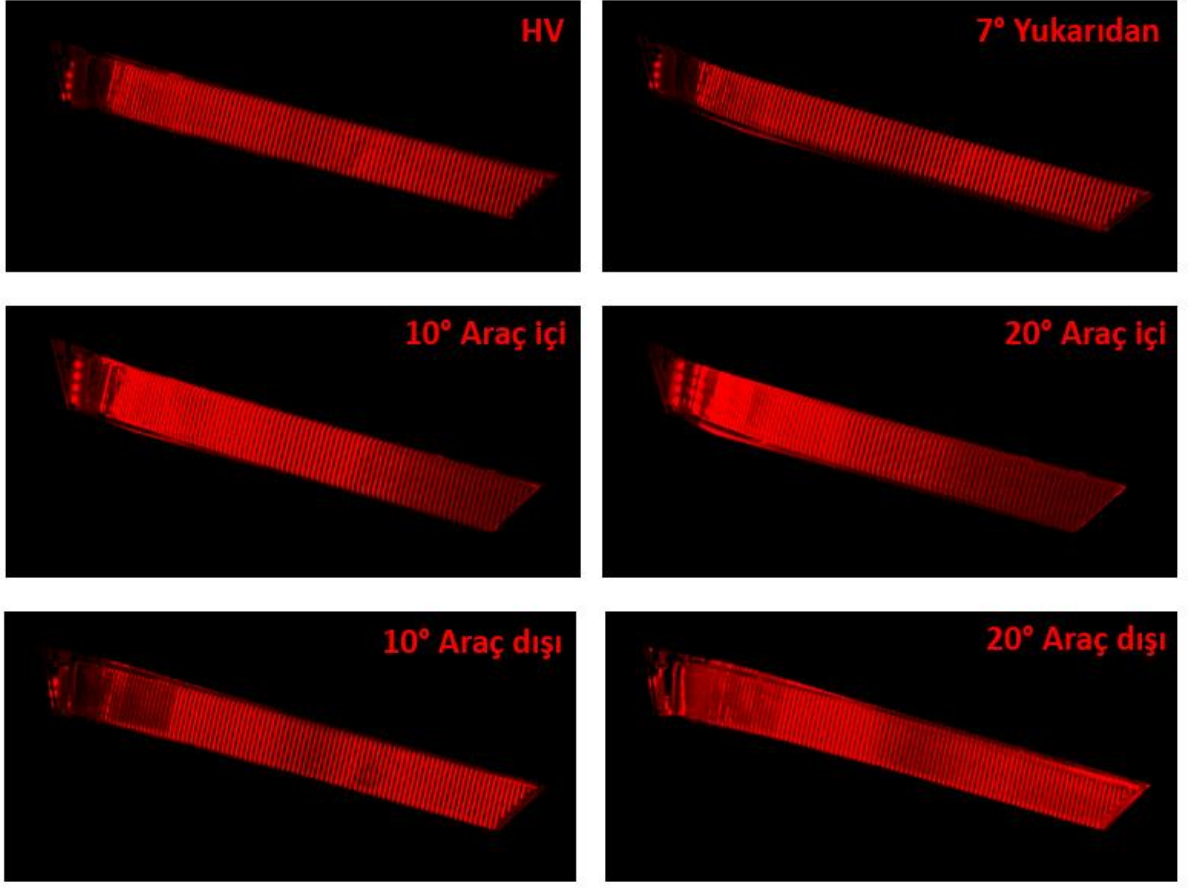
Çıkıntı değeri için yapılan çalışmada ise, çıkıntı değeri tüpün başından sonuna doğru artacak şekilde olduğu durumda en uygun homojenite değerlerine erişilmiştir. Çünkü ışık tüpü başındaki prizmalara direkt olarak LED’ lerden ışık gelmektedir oysa sonlardaki prizmalara direkt ışık yerine birincil- ikincil yansımalarından ışık geldiğinden direkt ışık gelen prizma sayısını arttırmak amacıyla çıkıntı değeri tüp sonuna doğru artırılmıştır.





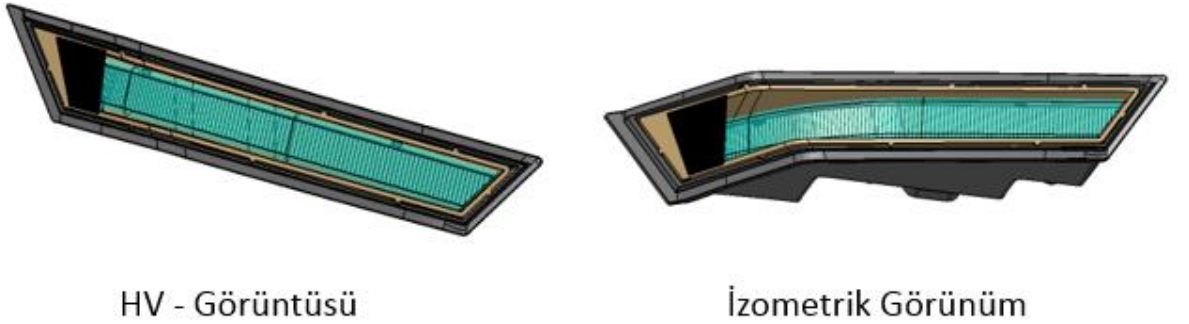
**Şekil 4.8.** Başlama açısı değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılım haritaları

Başlama açısı, bitiş açısı ve çıkıntı değerleri belirlenen nihai ışık tüpünün parlaklık analizi sonuçları Şekil 4.9’ da verilmiştir. Şekilde, HV’ de ışık kaynağına yakın prizmaların aydınlanmadığı görülmektedir. Burada, ışık kaynağından çıkan ışık ışınları tüp eğrisinden dolayı tüp duvarına çarparak toplam içsel yansıtma (TIR) kurallarıyla ilerlediğinden, bu alanda ışık ışınları tüp içerisinden dışarı çıkamaz, bunun sonucunda da aydınlanma gerçekleşmez (Gebauer ve Wiersdorff, 2009). Karanlık alanı kapatmak ve LED’ lerin çıplak gözle görülmesini engellemek amacıyla ışık tüpü tutucusu üzerine oturtulacak bir maske tasarlanmıştır.



**Şekil 4.9.** Nihai ışık tüpü tasarımının yüzey homojenliği görüntüleri

Diğer geometrilere, tasarlanan maskenin datası da dahil edilerek analizler tekrar yapılmıştır. Bu geometrilerin 3-boyutlu CATIA programındaki CAD datalarının resimleri Şekil 4.10' da verilmiştir. Şekilde siyah ile gösterilen tasarlanan maskedir. Gerçek hayatta maske ışık tüpü tutucusu ile aynı renkte olacaktır.



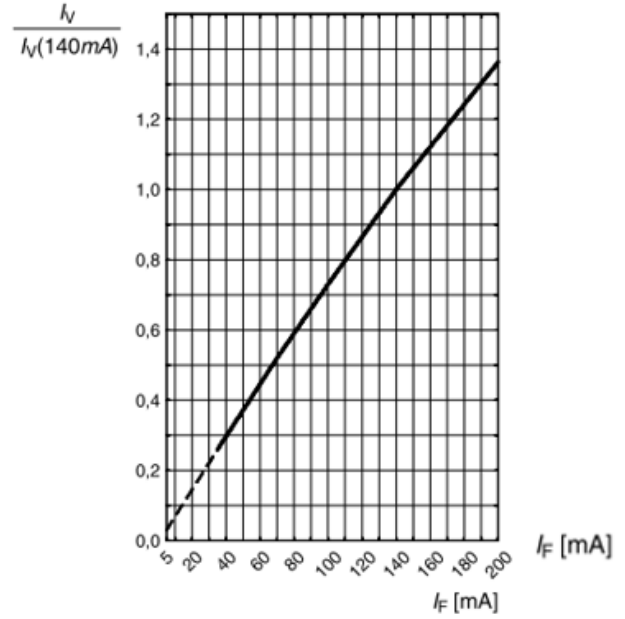
**Şekil 4.10.** Işık tüpü, gövde, bezel ve maske bir arada bulunduğu komple lambanın 3-boyutlu CAD datasının görüntüleri





DA	15,1 lm
DB	19,0 lm
EA	24,2 lm
EB	30,3 lm
FA	37,8 lm

Işık Akısı BIN aralığı



Akıma bağlı ışık şiddeti değişim grafiği

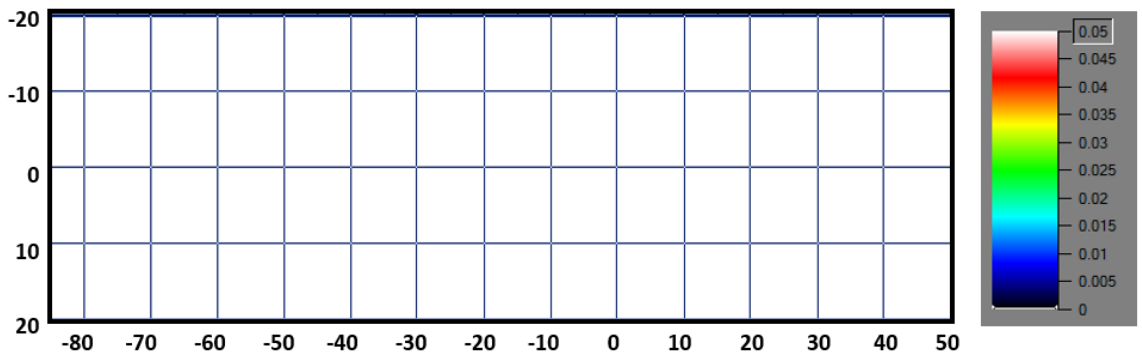
**Şekil 4.12.** LA G6SP LED' ine ait ışık akısı BIN aralığı ve ışık şiddetinin akıma bağlı değişimi (Osram, t.y.)

LED ışık kaynaklarının yaydığı ışık miktarı 4,1 lm olarak güncellenerek, nihai ışık tüpü ile birlikte diğer geometrilerin bir arada olduğu analiz tekrar koşulmuş ve lambanın Avrupa yasal gerekliliklerine göre arka pozisyon fonksiyonu (UNECE R7) için istenen ışık değerlerini sağladığı tespit edilmiştir (UNECE, 2012). Çizelge 4.1' de UNECE R7' ye göre arka pozisyon fonksiyonu için istenen minimum ve maksimum değerler ile birlikte bar şeklinde ışık tüpü optik tasarımı sonucunda elde edilen lambanın ışık şiddeti sonuçları verilmiştir.

Arka pozisyon lambasının UNECE R7 regülasyonunda belirlenen bir diğer yasal gerekliliği ise araç görünürlüğünü sağlamasıdır. Yani araç içi  $45^\circ$  den ve araç dışı  $80^\circ$  den araca bakıldığında, dikeyde  $-15^\circ$  ve  $+15^\circ$  aralığında, minimum 0.05 cd gibi bir ışık değerinin olması istenmektedir (UNECE, 2012). Bu nedenle lambanın bu koşulu da sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Şekil 4.13' te verilen görünürlük alanını gösteren analiz sonucu ışık dağılımına bakıldığında beyaz renkte olan her yerde 0.05 cd' dan daha fazla ışık olduğu görülmektedir. Bu sonuç, lambanın bu açı değerleri aralığında UNECE R7 regülasyonu ile belirlenen görünürlüğü sağladığını göstermektedir.

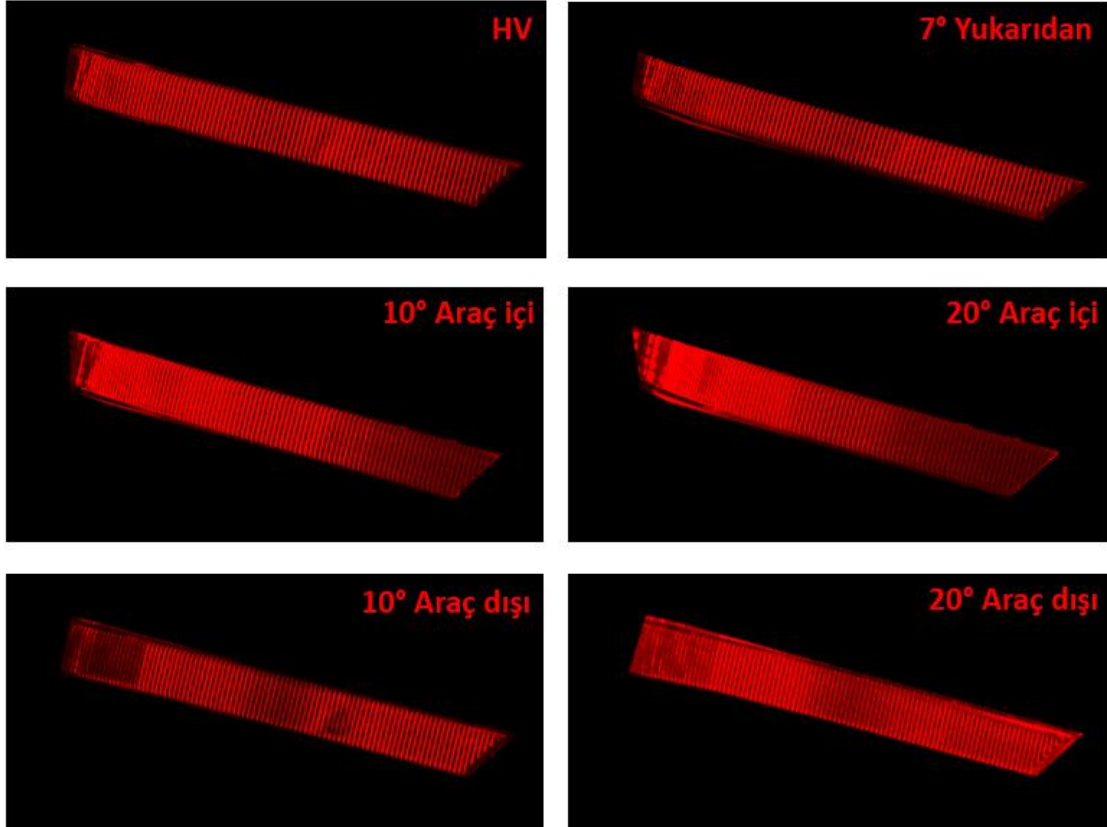
**Çizelge 4.1.** Her biri 4.1 lm ışık yayan 4 adet LED ile birlikte nihai ışık tüpü ve diğer geometrilerin dahil edildiği analiz sonucunda elde edilen ışık değerleri

Ölçüm Noktaları	Regülasyon Açısı	Minimum Gerekli Değer (cd)	Maksimum Gerekli Değer (cd)	Analiz (cd)
1	10U-5L	0,8	17	8,28
2	10U-5R	0,8	17	8,00
3	5U-20L	0,4	17	4,36
4	5U-10L	0,8	17	8,37
5	5U-V	2,8	17	9,98
6	5U-10R	0,8	17	10,01
7	5U-20R	0,4	17	1,42
8	H-10L	1,4	17	7,40
9	H-5L	3,6	17	10,63
10	H-V	4	17	11,15
11	H-5R	3,6	17	12,23
12	H-10R	1,4	17	8,04
13	5D-20L	0,4	17	4,69
14	5D-10L	0,8	17	6,55
15	5D-V	2,8	17	10,65
16	5D-10R	0,8	17	10,92
17	5D-20R	0,4	17	2,33
18	10D-5L	0,8	17	8,13
19	10D-5R	0,8	17	9,63



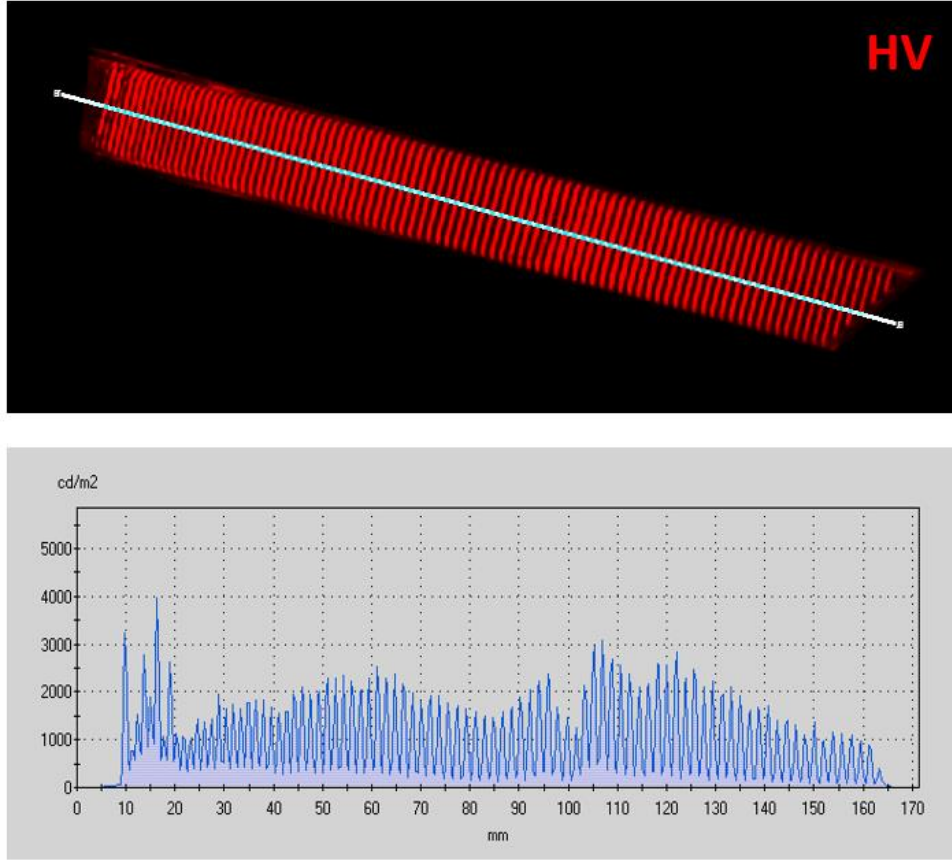
**Şekil 4.13.** Lambanın görünürlük açılarını belirleyen ışık dağılımı

Şekil 4.14' te ise tasarlanan ışık tüpü ile birlikte diğer geometrilerin de eklendiği analiz sonucunda elde edilen yüzey homojenliği görüntüleri verilmiştir. HV' de ışık tüpünün başında ve ortalarında dalgalanmalar söz konusudur ancak diğer bölgelerde homojenite kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca araç dışından bakıldığında tüpün sonlarının, araç içinden bakıldığında ise tüpün baş kısımlarının daha çok aydınlandığı tespit edilmiştir.



**Şekil 4.14.** Nihai ışık tüpü ve diğer geometrilerin birlikte verdiği yüzey homojenliği görüntüleri

Şekil 4.15' de, Şekil 4.14' te verilen HV görüntüsünün üzerinden geçen bir çizgi ile alınan kesit eğrisinin sonucu verilmiştir. Sol tarafta HV görüntüsü ve üzerinden geçirilen çizgi gösterilirken, sağ tarafta kesit görüntüsü gösterilmektedir. Kesit görüntüsüne baktığımızda maksimum 3000 cd/m<sup>2</sup>, minimum 1000 cd/m<sup>2</sup> değerleri okunmaktadır. Yani  $(1000 \text{ cd/m}^2) / (3000 \text{ cd/m}^2) = 0,33$  oranında bir homojenite söz konusudur, bu değer kabul edilebilir bir orandır.

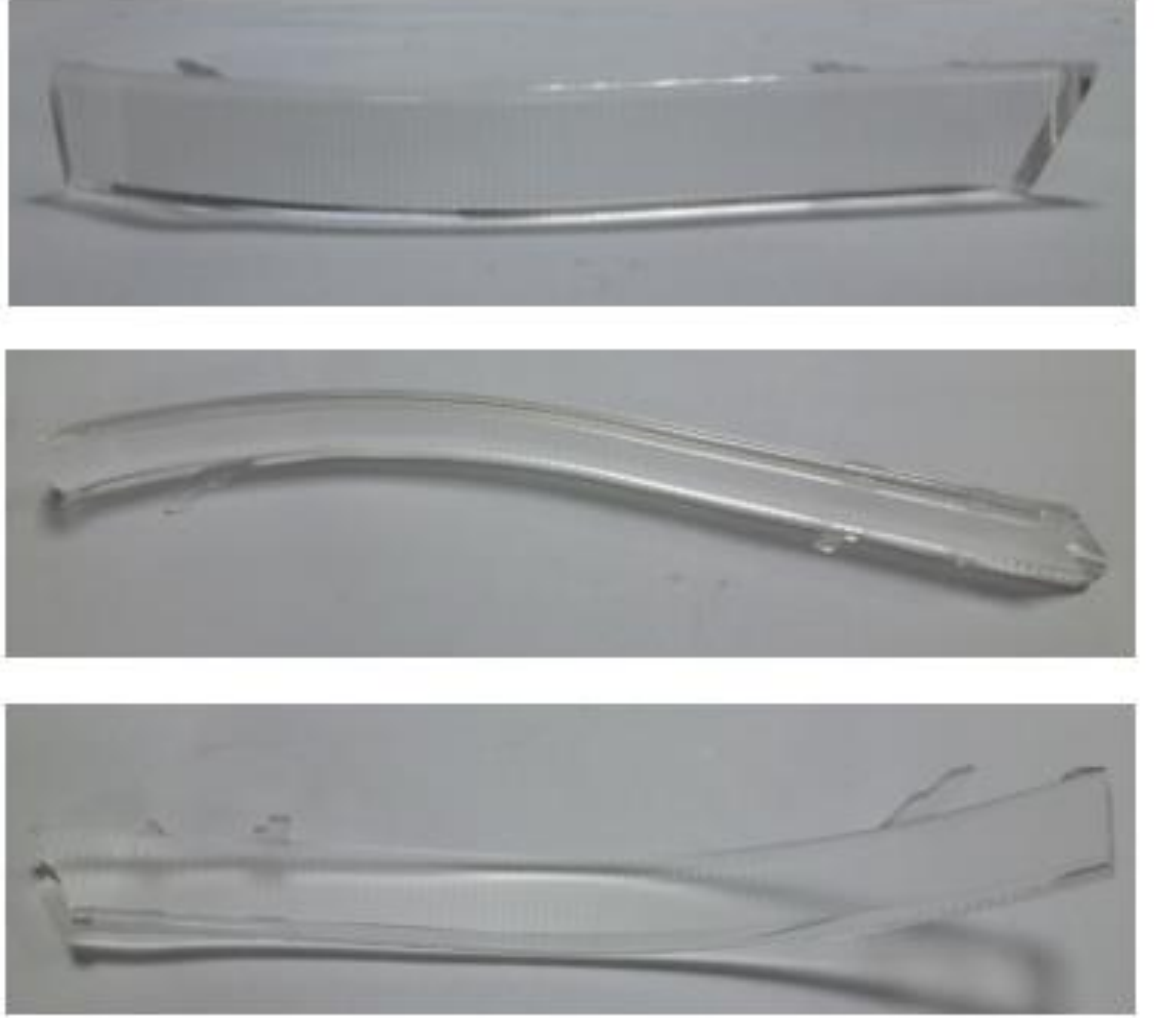


**Şekil 4.15.** HV görüntüsü üzerinden geçen çizgi ve bu çizgiden elde edilen kesit görüntüsü

#### 4.2.2. Bar şeklindeki ışık tüpünün prototip imalatı

Bar şeklinde ışık tüpünün optik tasarımı yapılarak, fotometri ve yüzey homojenliği analizleri tamamlanmıştır. Yapılan tasarım sonunda yasal standartları sağlayan, homojen aydınlanma yüzeyine sahip bar şeklinde ışık tüpü elde edilmiştir. Simülasyon ve gerçek hayat sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla, elde edilen ışık tüpünün PMMA külçeden işlenerek prototipi üretilmiştir. Prototipin iç yüzeyindeki optik prizmalar üzerinde işleme kaynaklı yarıçap değeri 0,1 mm dir. Ayrıca optik prizmaların boyutları çok küçük olduğundan prizma yüzeyleri hariç tutularak diğer yüzeylere yüzey parlatma (polisaj) işlemi uygulanmıştır. Yüzey parlatma işleminin amacı, işleme kaynaklı yüzey bozulmalarının giderilerek tüp sonuna kadar TIR koşullarının sağlanmasıdır.

Işık tüplerinin yanı sıra LED' lerin üzerine oturtulacağı PCB ve ışık tüpünün altına destek olacak yardımcı eleman olan bezel prototipi de imal edilmiştir. Üretilen bar şeklinde ışık tüpü prototipinin farklı açılardan görüntüleri Şekil 4.16' da verilmiştir.



**Şekil 4.16.** Bar şeklindeki ışık tüpü prototipinin farklı açılardan görüntüleri

Şekil 4.17 de ise mevcut lamba ile uyumlu olacak şekilde aynı bağlantı noktalarına sahip bezel prototipinin ve LED' lerin konumlandırıldığı PCB prototipinin görüntüleri verilmiştir. Şekilde, ışık tüpünün giriş yüzeyine bakan 4 adet LED' in PCB üzerindeki konumlandırılması gösterilmiştir.



**Şekil 4.17.** Bezel ve PCB prototipinin görüntüleri

Üretilen ışık tüpü, PCB ve bezel prototipleri ile birlikte mevcut gövde ve lens alt bileşenlerinin montaj sırasına göre birbirlerinden ayrılmış durumdaki görüntüsü Şekil 4.18’ de verilmiştir.



**Şekil 4.18.** Işık tüpü, bezel ve PCB prototipleri ile birlikte mevcut gövde ve lens alt bileşenlerinin montaj sırasına göre birbirlerinden ayrılmış durumu

Şekil 4.19’ da ise Şekil 4.18’ de montaj sırasına göre verilen, ışık tüpü, bezel ve PCB prototiplerinin mevcut lamba üzerinde gövde ve lens ile birlikte montajlı durumu gösterilmiştir.



**Şekil 4.19.** Işık tüpü, bezel ve PCB prototiplerinin mevcut lamba üzerinde gövde ve lens ile birlikte montajlı durumu



### 4.2.3. Bar şeklindeki ışık tüpünün prototip testleri

Bar şeklindeki ışık tüpü prototipinin fotometri testleri ve yüzey homojenliği analizlerini yapabilmek için her bir LED' e 60 mA akım verilerek Şekil 4.19' da montajlı durumu gösterilen lamba açık konuma getirilmiştir. Lambanın açık konumdaki görüntüsü Şekil 4.20' de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, ışık tüpü başlarında LED konumlarına yakın bölgede ışık şiddeti çok daha fazladır ve tüp sonuna doğru azalmaktadır. Bu durum analiz sonuçları ile bire bir örtüşmektedir. Analiz sonuçlarında da, tüp başında maksimum ışık gözlenirken tüp ortalarına doğru ışık şiddeti azalmış ve tüp sonunda tüp eğrisinden kaynaklı tekrar bir artış gözlenmiştir. Işık tüpünün sonlarında oluşan şiddet artışı prototip üzerinde de belirli açılardan bakıldığında gözlenmiştir, özellikle araç konumu ile, yani mevcut lambanın aparatı ile birlikte karşılaştırma yapıldığında analiz sonuçları ile gerçek ürün sonuçlarının uyumlu olduğu gözlenmiştir.



**Şekil 4.20.** Lambanın açık durumdaki görüntüsü

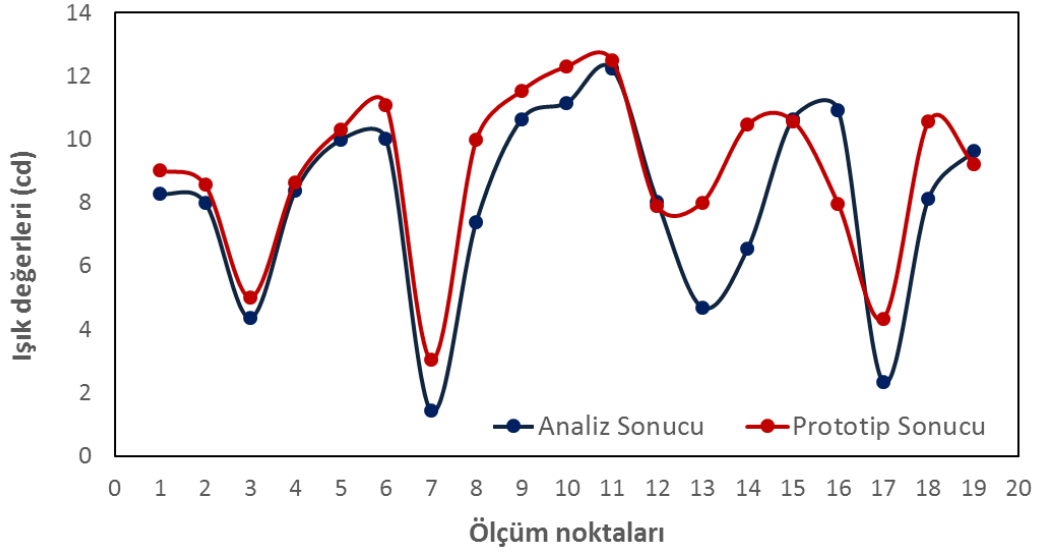
Işık tüpünün arka pozisyon fonksiyonu olarak fotometri testleri Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.Ş. bünyesindeki LMT marka GO-H 1660 serisi gonyometre fotometri ölçüm ünitesi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen prototip ölçüm sonuçları, UNECE R7 regülasyonu arka pozisyon fonksiyonu ölçüm noktalarına göre Çizelge 4.2' de verilmiştir.



**Çizelge 4.2.** Bar şeklinde ışık tüpü prototipinin fotometri ölçüm sonuçları

<b>Ölçüm Noktaları</b>	<b>Regülasyon Açısı</b>	<b>Prototip (cd)</b>
1	10U-5L	9,02
2	10U-5R	8,56
3	5U-20L	5,01
4	5U-10L	8,65
5	5U-V	10,3
6	5U-10R	11,1
7	5U-20R	3,03
8	H-10L	9,99
9	H-5L	11,53
10	H-V	12,3
11	H-5R	12,5
12	H-10R	7,9
13	5D-20L	8,01
14	5D-10L	10,46
15	5D-V	10,58
16	5D-10R	7,96
17	5D-20R	4,34
18	10D-5L	10,56
19	10D-5R	9,22

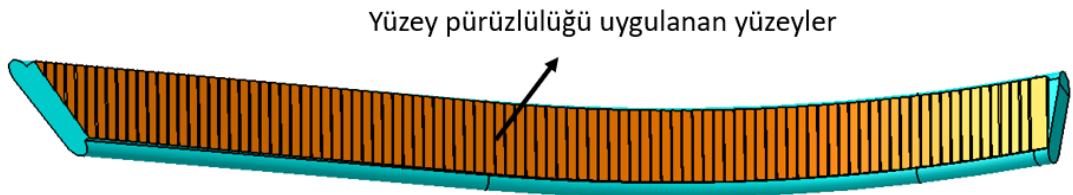
Şekil 4.21' de, Çizelge 4.1' de verilen analiz sonuçları ile Çizelge 4.2' de verilen prototip ölçüm sonuçları grafik üzerinde eğriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, prototip ve analiz arasında % 85' in üzerinde uyuma elde edildiği gözlenmiştir. Aradaki fark, analiz koşulları ile gerçek koşullar arasındaki farklılıklar, prototip kalitesi, ölçüm esnasındaki laboratuvar koşulları, hesaplanan termal düşüş ile gerçek termal düşüş arasında fark olması gibi bir çok nedenden kaynaklanabilir.



**Şekil 4.21.** Analiz sonucu ile prototip üzerinden yapılan fotometri test sonuçlarının karşılaştırılması

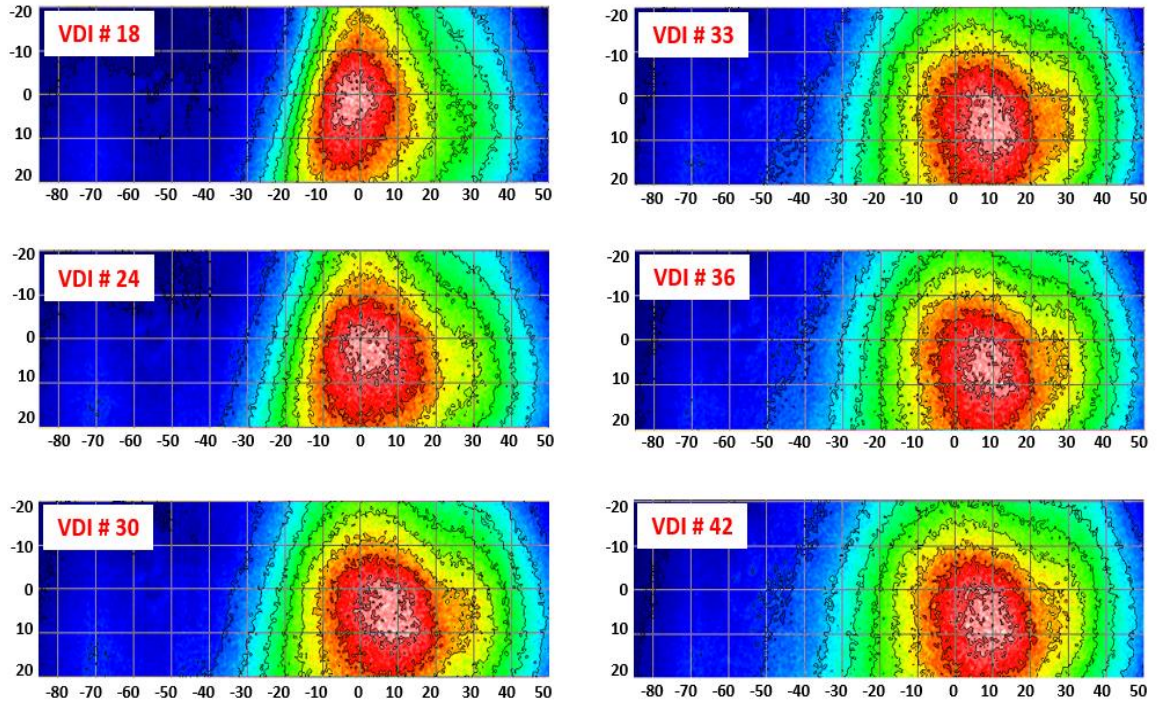
#### 4.2.4. Bar şeklindeki ışık tüpünün yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi

Farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin ışık dağılımı, ışık değerleri ve yüzey aydınlanması üzerine etkilerini incelemek amacıyla, 6 farklı büyüklükte yüzey pürüzlülüğü numunesi akredite laboratuvarında ölçtürülerek analiz ortamında kullanılabilen saçılma dosyaları elde edilmiştir. Bunlar, uluslararası standartlardaki VDI 3400 serisinin VDI 18, VDI 24, VDI 30, VDI 33, VDI 36 ve VDI 42 numaralı yüzey pürüzlülüklerini temsil eden saçılma dosyalarıdır. Bu dosyalar optik simülasyon programında, nihai optik parametreleri belirlenen bar şeklinde ışık tüpünün prizmatik yüzeylerine uygulanmıştır. Şekil 4.22’ de yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri gösterilmiştir. Her bir yüzey pürüzlülüğü için analizler tekrar koşturulmuş ve elde edilen sonuçlar, ışık dağılımının yayınım açısı, sistemin yaydığı maksimum ışık şiddeti ve yüzey homojenliği bakımından incelenmiştir.



**Şekil 4.22.** Yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri

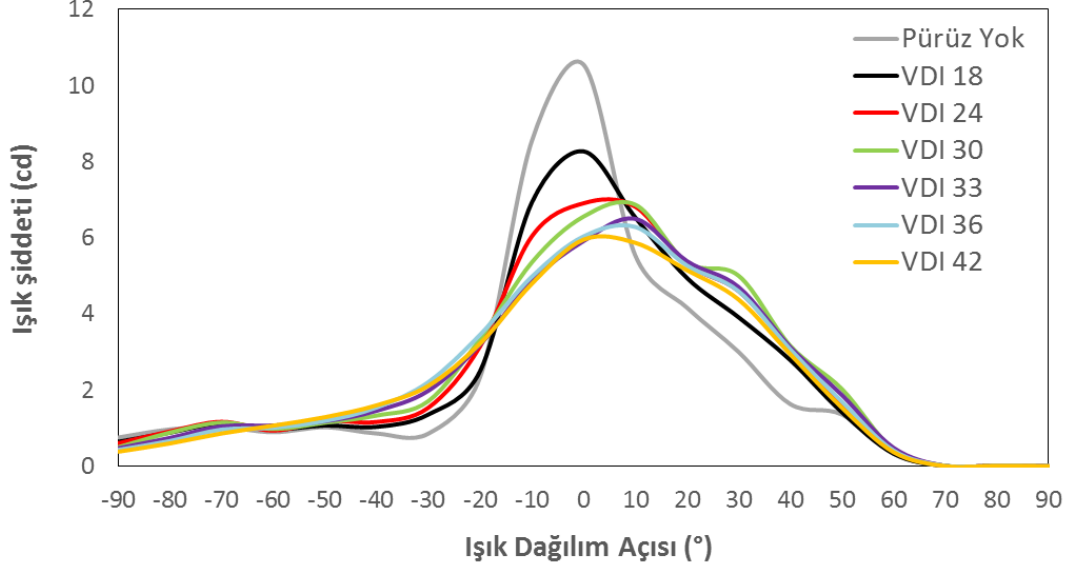
Işık dağılımı yayılım açısının değişimini incelemek amacıyla, yüzey pürüzlülük değişimine göre elde edilen ışık dağılım haritaları Şekil 4.23' te gösterilmiştir. Işık dağılım haritaları incelendiğinde, ışık tüpünün prizmatik yüzeylerine uygulanan yüzey pürüzlülüğü değerinin artması ile ışık dağılımının daha geniş açılara yayıldığı gözlenmiştir. Uygulanan yüzey pürüzlülükleri, büyüklükleri ile doğru orantılı olarak ışığı saçmışlardır. Işık rastgele açılarda saçıldığından ışık dağılımının açısı genişlemiştir.



**Şekil 4.23.** Işık tüpü prizmalarının üzerine farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin uygulanması ile elde edilen ışık dağılım haritaları

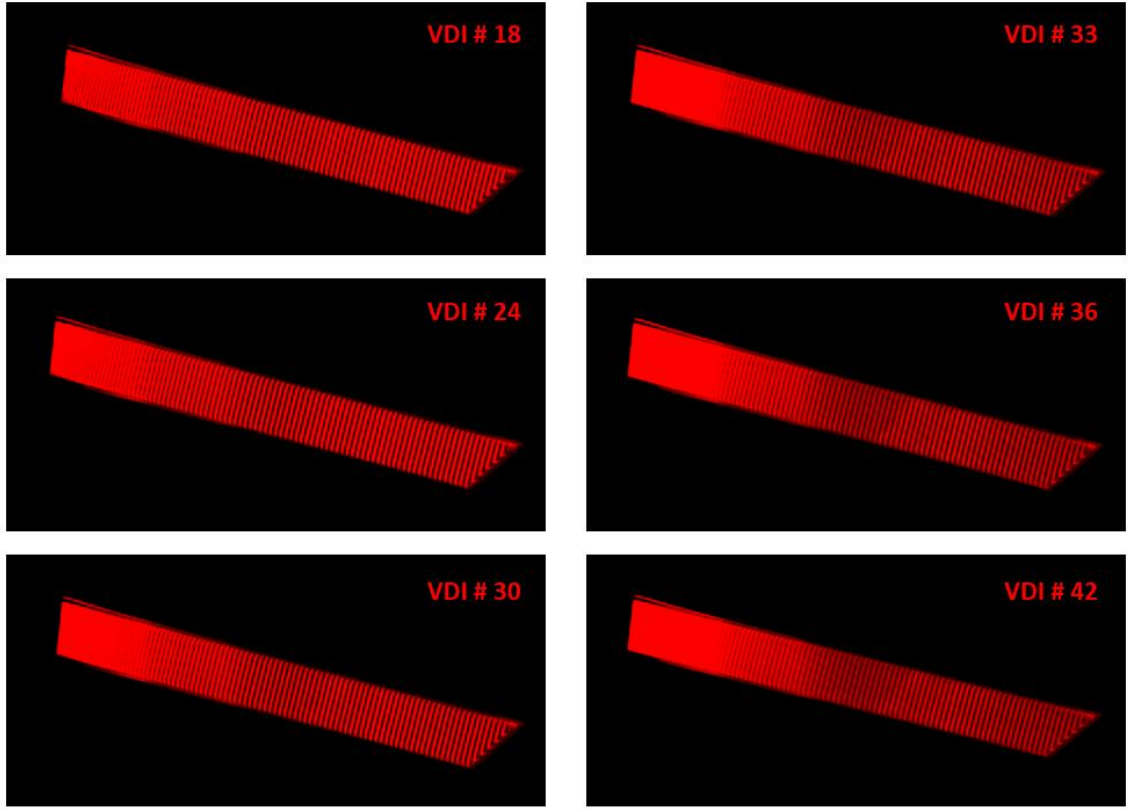
Şekil 4.24' te ise Şekil 4.11' de verilen yüzey pürüzlülüğü uygulanmamış ışık tüpünün ışık dağılım haritası üzerinden ve Şekil 4.23' te verilen farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülükleri uygulanmış ışık tüplerinin ışık dağılım haritaları üzerinden, yatay eksen kesit alınarak elde edilen ışık dağılım eğrileri gösterilmiştir. Işık dağılım eğrileri, yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılımının yayılım açısı ve sistemin maksimum ışık şiddeti değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, yüzey pürüzlülüğü uygulanmamış ışık tüpünde en dar yayılım açısı ve en yüksek ışık şiddeti görülürken, yüzey pürüzlülüğü arttıkça ışık dağılımının FWHM (Full Width Half Maximum) değerinin daha geniş açılara yayıldığı gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün

artması prizmatik yüzeylerin TIR özelliğinin kaybolmasına, dolayısıyla daha çok saçılmaya neden olmuştur ve sonuç olarak sistemin yaydığı ışık şiddeti azalmıştır.



**Şekil 4.24.** Yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılım eğrileri

Şekil 4.25’ de farklı yüzey pürüzlülüklerinin uygulanması sonucu elde edilen araç eksenindeki (HV) yüzey homojenliği görüntülerinin değişimi verilmiştir. En küçük yüzey pürüzlülüğü olan VDI#18 görüntüsünde, ışığın tüp başından sonuna kadar düzgün bir şekilde iletildiği görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça ışık tüpünün başında oluşan ışık şiddetinde artış gözlenirken, tüp sonuna ışık ışınlarının ulaşmadığı ve dolayısıyla ışık şiddetinin tüpün sonuna doğru azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni artan yüzey pürüzlülüğü ile birlikte TIR kuralının bozulması ve ışık tüpü başında çoğu ışık ışınlarının tüpü terk ederek tüp sonuna daha az sayıda ışık ışınlarının ulaşmasıdır (Güney vd., 2020).

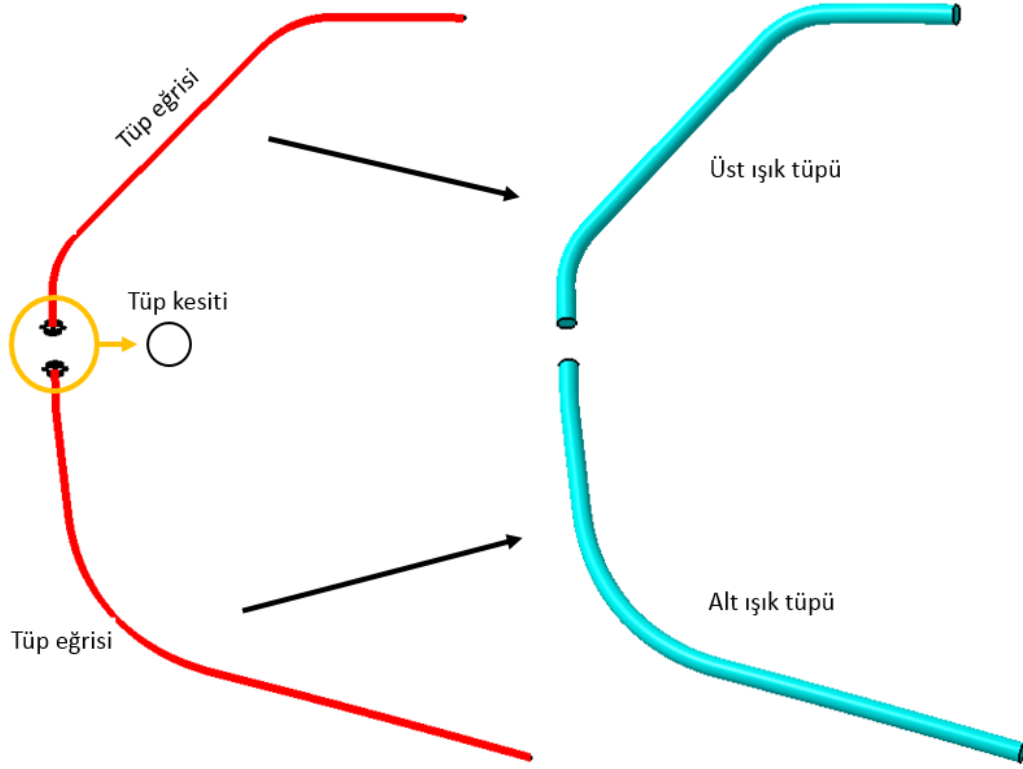


**Şekil 4.25.** Uygulanan yüzey pürüzlülüğü büyüklüğüne bağlı olarak araç ekseninden (HV) yüzey homojenliği görüntüleri

### 4.3. Çubuk Şeklindeki Işık Tüpü Geometrisi

#### 4.3.1. Çubuk şeklindeki ışık tüpünün optik tasarımı

İkinci ışık tüpü geometrisi, Şekil 4.1’ de gösterilen mevcut lamba 2’ ye uygun şekilde tasarlandığından, kesiti çember olan çubuk şeklinde yapıya sahip geometri tercih edilmiştir. Bu yapının ayrıntılı görünümü Şekil 4.26’ da verilmiştir. Şekilde, tüp kesiti, tüp eğrisi ve kesitin eğri boyunca süpürülmesiyle elde edilen ışık tüpü geometrisi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, mevcut lamba 2 için çubuk şeklinde ışık tüpü tasarımı kapsamında birbirinden farklı eğrilere sahip ancak birbirini tamamlayan 2 farklı ışık tüpü optik tasarımı yapılmıştır.

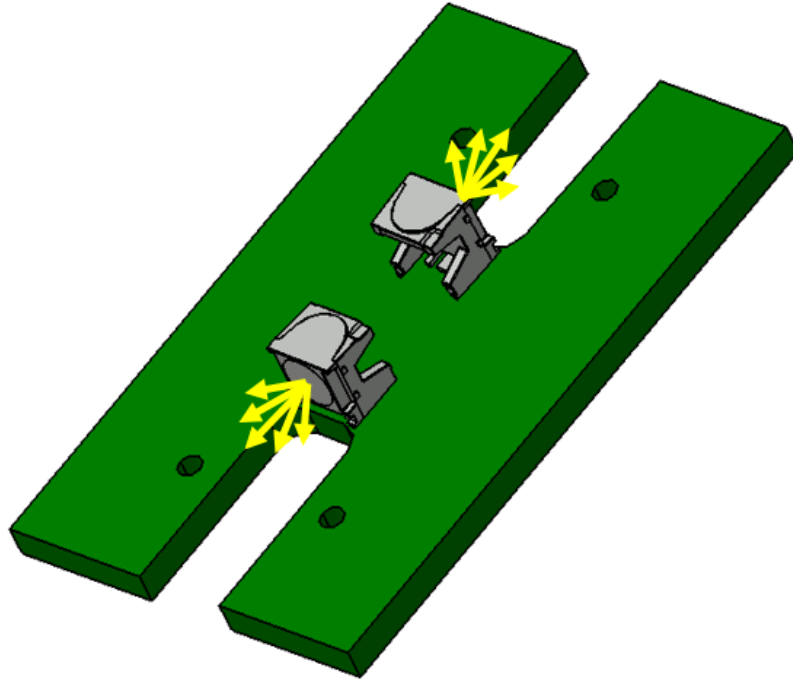


**Şekil 4.26.** Çubuk şeklinde yapıya sahip ışık tüpü geometrileri

Mevcut lamba 2' de, arka pozisyon fonksiyonu olarak tasarlanan ışık tüpü haricinde diğer fonksiyonların hepsi olduğu şekilde bırakılarak, mevcut bezel ile aynı bağlantı noktalarına sahip ve ışık tüpünün üzerine oturtulacağı bir bezel tasarımı yapılmıştır. Bezel üzerinde ışık tüpünün oturacağı alanlar oluşturulduktan sonra PCB konumlandırılmıştır. PCB' nin konumunun belirlenmesinin ardından da LED' lerin tipine karar verilmiştir.

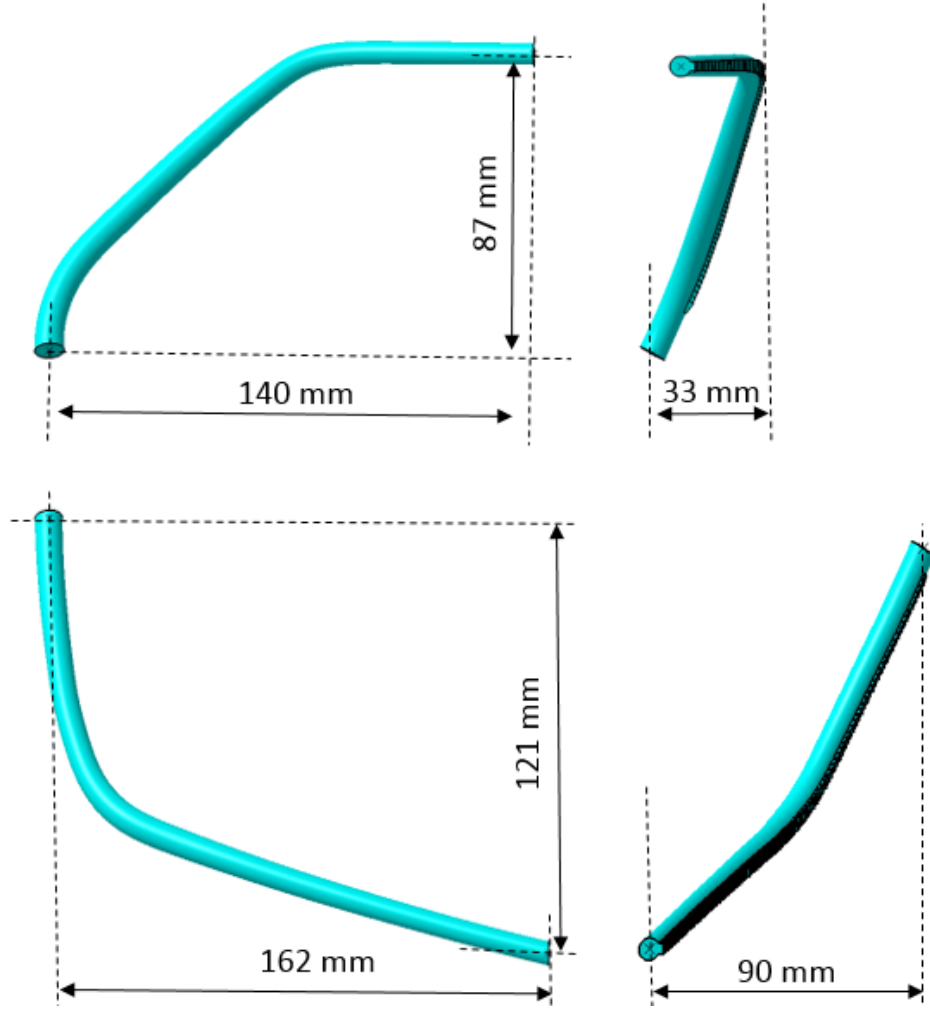
Mevcut lambada, bezel ile gövde arasındaki boşluk çok sınırlı olduğundan ve üst-alt olmak üzere 2 farklı ışık tüpü bulunduğundan, PCB üzerine paralel şekilde yerleştirilen LED yerine dik konumda duran SideLED kullanılmıştır. LED' lerin PCB üzerindeki konumları Şekil 4.27' de gösterilmiştir. Şekilde sarı oklar ile her iki LED için de ışığın çıkış yönü gösterilmiştir. Işık yayılım açısı, yaydığı lümen miktarı gibi parametreler incelendiğinde bu çalışma için en uygun olan LED Osram firmasının geliştirdiği LA B6SP isimli SideLED olarak belirlenmiştir. LA B6SP LED' i 120° derece ışık yayılım açısına sahiptir ve ışık yayılım karakteristiği Şekil 4.4' te verilen LA G6SP LED' inin ışık yayılım karakteristiği ile aynıdır (Osram, 2019b). Bar şeklinde ışık tüpü tasarımında

yapıldığı gibi, tasarıma başlama aşamasında her bir LED' in 1 lm ışık yaydığı kabul edilerek analizler koşulmuştur. Uygun başlama açısı, bitiş açısı ve offset değerleri belirlendikten sonra uluslararası standartları sağlayacak ışık akısı ve akım değerine karar verilmiştir.



**Şekil 4.27.** LED' lerin PCB üzerindeki konumları ve ışığın çıkış yönü

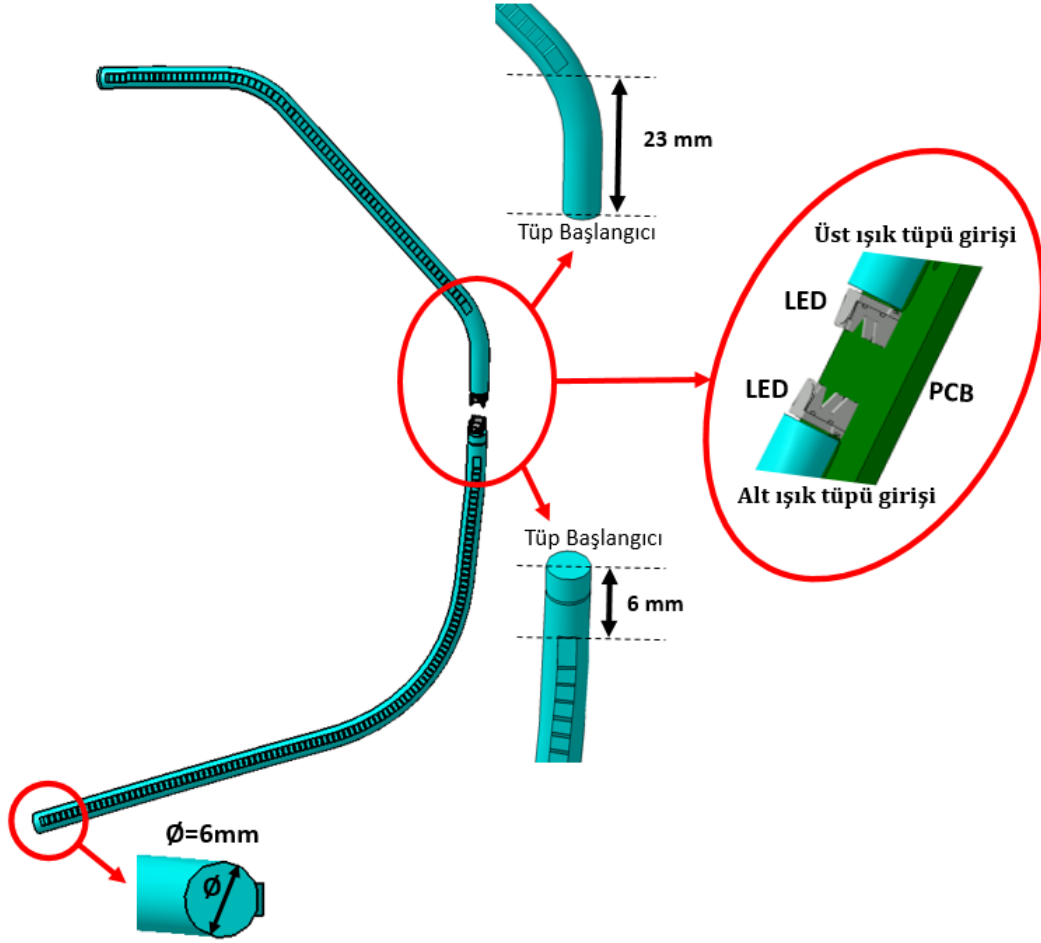
Bezel tasarımı, PCB konumunun belirlenmesi ve LED seçiminin ardından üst ve alt olmak üzere 2 ayrı ışık tüpünün optik tasarımlarına başlanmıştır. Işık tüpü geometrisinin ortasından geçen eğri oluşturulduktan sonra, tüp kesiti ve ışık eksenleri belirlenmiştir. Şekil 4.28' de ışık tüplerinin x,y,z koordinatlarındaki boyutları gösterilmiştir. Üst ışık tüpü 33 mm derinliğe, 140 mm genişliğe ve 87 mm yüksekliğe sahipken, alt ışık tüpü 90 mm derinliğe 162 mm genişliğe ve 121 mm yüksekliğe sahiptir.



**Şekil 4.28.** Üst ve alt ışık tüpünün x,y,z koordinatlarındaki boyutları

Tüp geometrisi belirlendikten sonra, prizmaların optik tasarımına başlanmıştır. Her iki ışık tüpünün de kesiti, çapı 6 mm olan çember şeklindedir. Prizmalar alt ışık tüpü için tüp başlangıcından 6 mm, üst ışık tüpü için ise 23 mm ileride, 2 mm lik adımlarla ve her bir prizmanın genişliği 2,5 mm olacak şekilde tüpün sonuna kadar devam etmektedir. Şekil 4.29’ da PCB üzerine konumlandırılan LED gövdeleri ve ışık tüpü prizmalarının yapısı gösterilmiştir. Prizmaların tüp başlangıcından ileride başlatılmasının nedeni; bu alanın bezel ile kapatılacak olup, ışığın bu mesafede karışmasını sağlamaktır. Işık tüpü malzemesi olarak 3mm kalınlıkta % 92 geçirgenliğe sahip Arkema firmasının ürettiği Altuglass V825T kod numaralı PMMA seçilmiştir.

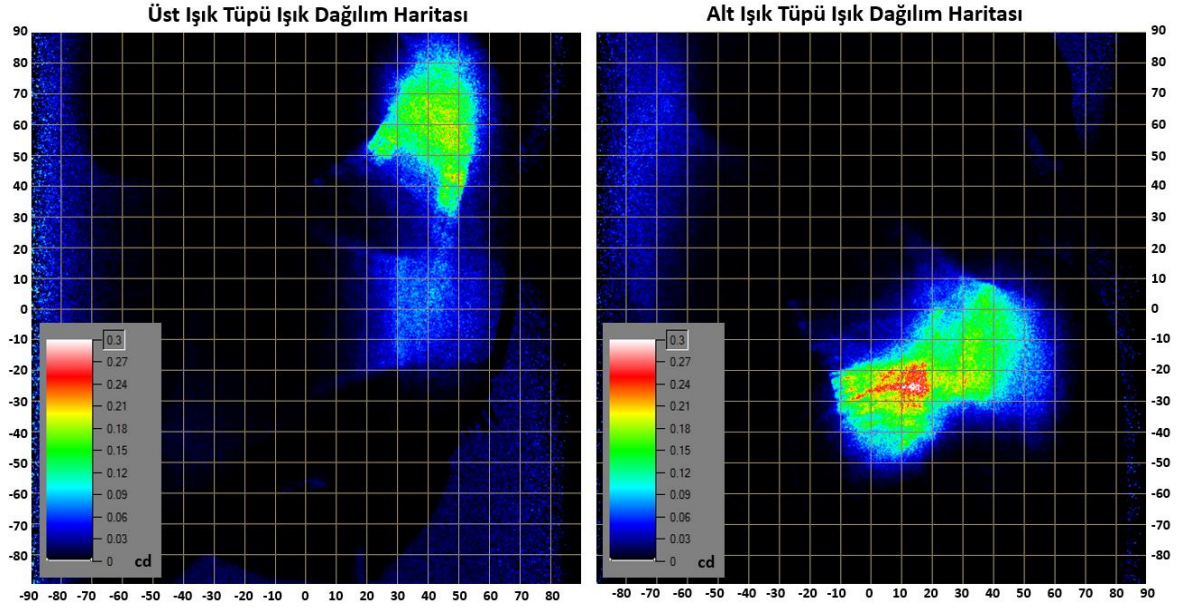




**Şekil 4.29.** PCB üzerine konumlandırılan LED gövdeleri ve ışık tüpü prizmalarının yapısı

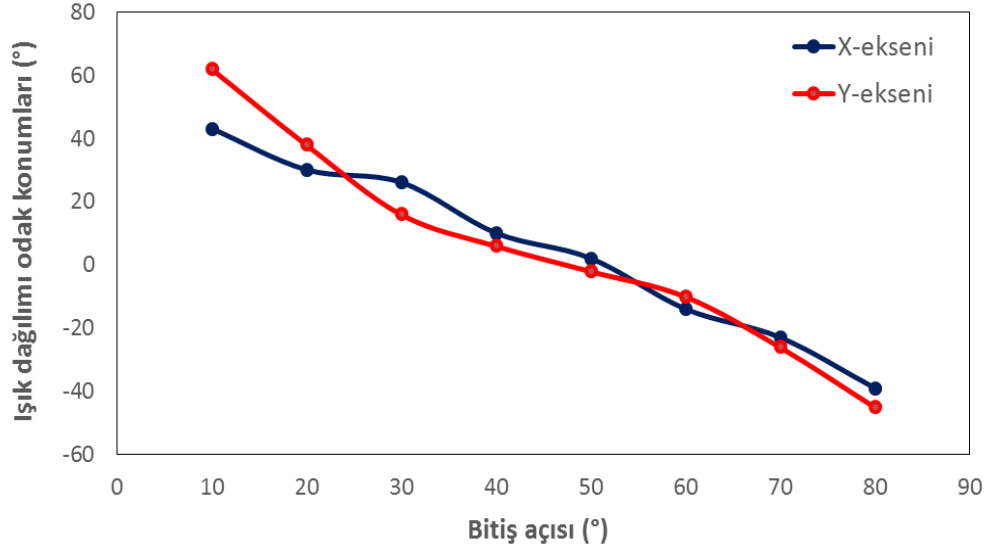
Bar şeklinde tüp geometrisinde olduğu gibi, ışık dağılım haritasını ve ışık değerlerini görmek için ışık tüplerinin geometrik merkezini odak alan ve araç içi  $50^\circ$  ile araç dışı  $85^\circ$  aralığında şiddet sensorü oluşturulmuştur. Yüze homojenliğini analiz edebilmek amacıyla da parlaklık sensorleri ışık tüplerinin geometrik merkezinden 3000 mm uzaklıkta ve lambanın araç üzerindeki konumunun tam karşısından (HV),  $7^\circ$  yukarisından,  $10^\circ$  ve  $20^\circ$  araç içi ve araç dışından bakacak şekilde oluşturulmuştur. Bütün sensorler görünür dalgaboyu spektrum aralığında 10 nm çözünürlüğe sahiptir. Işık kaynakları, ışık tüpü ve oluşturulan sensörler aynı analize dahil edilerek simülasyonlar koşulmuştur. Işık tüpü optik tasarımı başlama aşamasında bir önceki geometride olduğu gibi, ışık verimini ve yüze homojenliğini doğrudan etkileyen başlama - bitiş açısı ve prizmaların tüpün orta eğrisinden uzaklığını belirleyen çıkıntı değerleri sabit alınmıştır. İlk olarak başlama açısı  $5^\circ$ , bitiş açısı  $10^\circ$  ve çıkıntı değeri 3,5 mm alınarak, üst ve alt ışık tüpleri için analizler koşulmuştur. Şekil 4.30' da verilen ışık dağılım haritalarına

bakıldığında, üst ışık tüpü için ışığın 43° sağda (araç içi), 62° yukarıda odak yaptığı görülürken, alt ışık tüpü için ışığın 15° sağda (araç içi), 25° aşağıda odak yaptığı görülür. Başlama ve bitiş açıları değiştirilerek, ışık dağılımının HV noktasına taşındığı açılar belirlenmiştir.



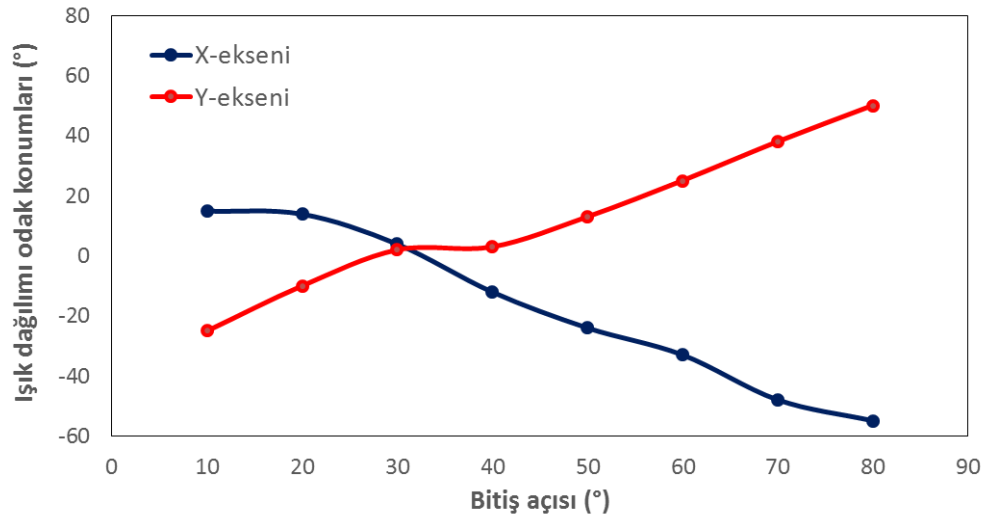
**Şekil 4.30.** Başlama açısı 5°, bitiş açısı 10° ve offset değeri 3,5 mm olan üst ve alt ışık tüplerinin ışık dağılım haritaları

İlk olarak, başlama açısı ve offset değeri sabit tutularak bitiş açısı 10° lik adımlarla 80° ye kadar arttırılmış ve bu durumların analiz sonuçlarından ışık dağılımının odak oluşturduğu noktalar, alt ve üst ışık tüplerinin her ikisi için de kaydedilmiştir. Üst ışık tüpü için bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının yatay ekseninde (X-ekseni) ve dikey eksenindeki (Y-ekseni) konum değişikliği Şekil 4.31' deki grafik ile verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, bitiş açısı değeri arttıkça ışık dağılımının konumu X-ekseninde eksi yönde yani sola doğru kayarken, dikey ekseninde aşağı doğru kaymıştır. Yatay ve dikey eksenler birlikte değerlendirildiğinde, bitiş açısı 30° ile 50° aralığında değişirken, ışık dağılımının sıfır konumuna en yakın olduğu gözlenmiştir.



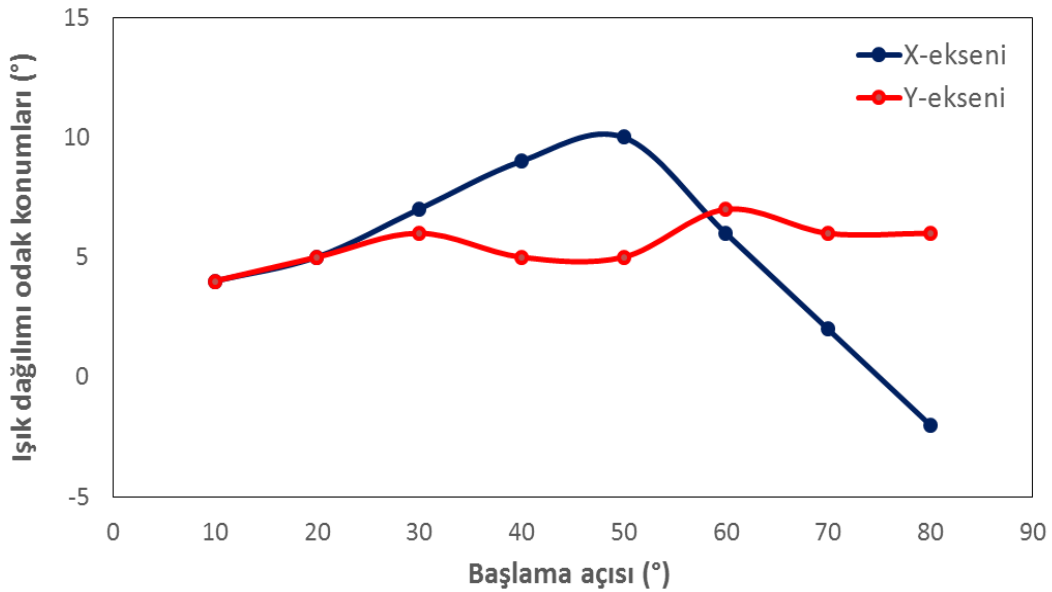
**Şekil 4.31.** Üst ışık tüpü için bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği

Alt ışık tüpü için bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği grafiği ise Şekil 4.32’ de verilmiştir. Şekilde mavi renk ile gösterilen X-eksenindeki ışık dağılımının konumu bitiş açısı değeri arttıkça eksi yönde kaymıştır. Kırmızı renk ile gösterilen dikey eksene bakıldığında ise ışık dağılımı konumunun artan bitiş açısı değeri ile birlikte yukarı doğru kaydığı gözlenmiştir. Yatay ve dikey eksenler birlikte değerlendirildiğinde, alt ışık tüpü için ışık dağılımının sıfır konumuna en yakın olduğu bitiş açısı değerinin  $30^\circ$  olduğu görülür.



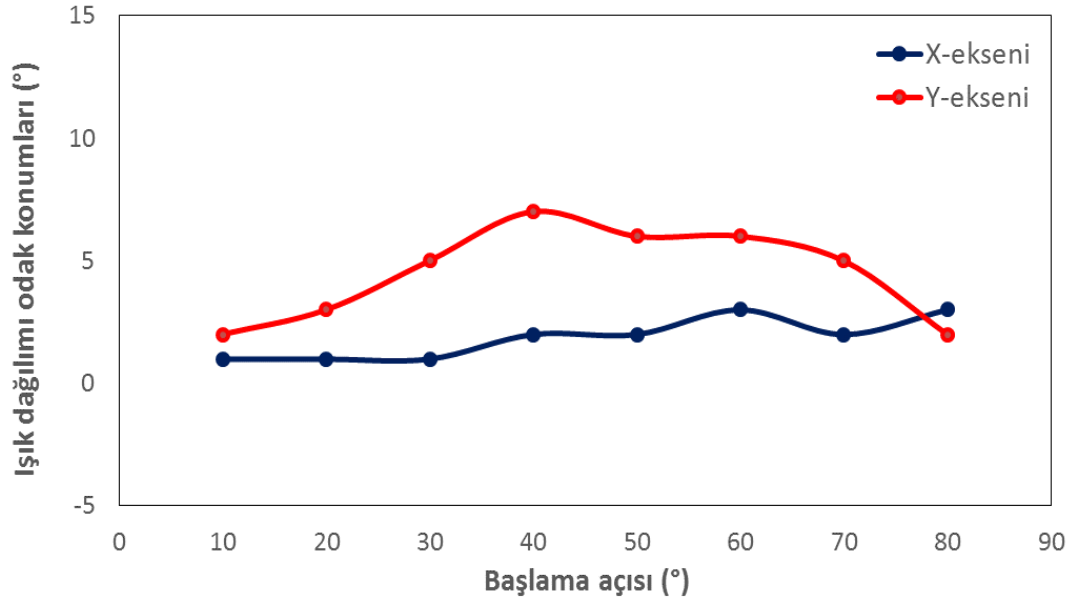
**Şekil 4.32.** Alt ışık tüpü için bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği

Bitiş açısı için yapılan çalışmanın aynısı başlama açısı için de yapılmıştır. Başlama açısının hesaplanabilmesi için sabit bir bitiş açısı değerine ihtiyaç duyulduğundan, bitiş açısı üst ışık tüpü için  $40^\circ$ , alt ışık tüpü için  $30^\circ$  olarak belirlenmiştir. Başlama açısı değerini bulmak için, bitiş açısı  $30^\circ$  de ve offset değeri  $3.5 \text{ mm}$ ' de sabit tutularak başlama açısı  $10^\circ$  lik adımlarla  $80^\circ$  ye kadar arttırılmış ve bu durumların analiz sonuçları üst ve alt ışık tüplerinin her ikisi için de kaydedilmiştir. Üst ışık tüpü için başlama açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği Şekil 4.33' deki grafik ile verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, başlama açısı arttıkça ışık dağılımı X-ekseninde  $50^\circ$  ye kadar artı yönde,  $50^\circ$  den sonra eksi yönde kaymış ve Y-ekseninde de çok az bir değişim göstermiştir. X ve Y eksenleri birlikte değerlendirildiğinde, ışık dağılımının sıfır konumuna en yakın olduğu durumdaki başlama açısı değerinin  $10^\circ$  ile  $20^\circ$  aralığında olduğu gözlenmektedir.



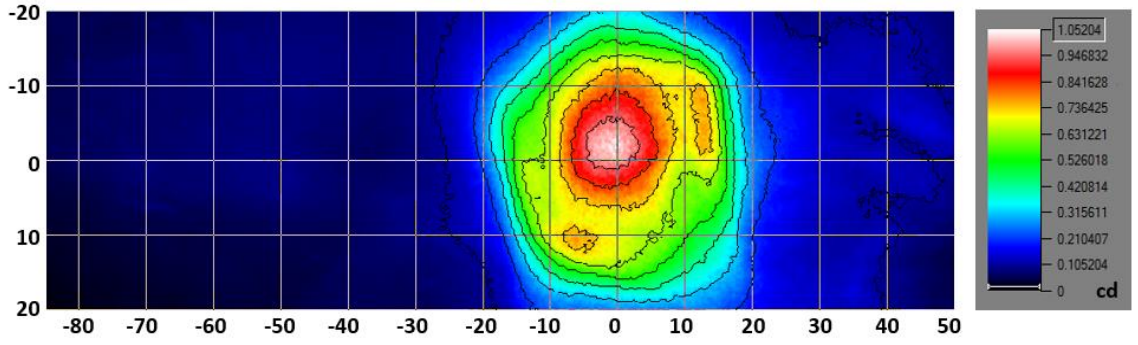
**Şekil 4.33.** Üst ışık tüpü için başlama açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği

Alt ışık tüpü için de ışık dağılımının başlama açısı değişimine bağlı olarak, konum değişikliği grafiği Şekil 4.34' te verilmiştir. Başlama açısı arttıkça mavi renk ile gösterilen X-ekseninde çok büyük bir değişim gözlenmezken, kırmızı renk ile gösterilen Y-ekseninde ise, ışık dağılımının  $40^\circ$  ye kadar artı yönde,  $40^\circ$  den sonra eksi yönde kaydığı gözlenmiştir. Alt ışık tüpü için de başlama açısı  $10^\circ$  ile  $20^\circ$  aralığında iken ışık dağılımı sıfır konumuna en yakın durumdadır.



**Şekil 4.34.** Alt ışık tüpü için başlama açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-ekseninde ve Y-eksenindeki konum değişikliği

Başlama açısı ve bitiş açısı değerleri için elde edilen veriler ışığında ışık tüplerinin optik tasarımı sürdürülmüştür. Alt ve üst ışık tüplerinin ayrı ayrı koşturulan analizleri sonucunda, her iki ışık tüpü için de başlama açısının  $10^\circ$  ile  $20^\circ$  arasında olması gerektiği bulunmuştur. Bitiş açısı değerleri ise üst ışık tüpü için  $30^\circ$  ile  $50^\circ$  aralığında değişirken, alt ışık tüpü için  $30^\circ$  ile  $40^\circ$  arasında değişmektedir. Bu değişimler ışık tüplerinin yüzey aydınlanma homojeniteleri göz önünde bulundurularak, en uygun homojenitenin elde edildiği konumlar doğrultusunda yapılmıştır. Işık tüpü sonundaki prizmalara gelen ışığı arttırmak için, çıkıntı değeri tüpün başından sonuna doğru artacak şekilde ayarlanmıştır. Elde edilen nihai optik veriler ışığında, alt ve üst ışık tüpleri, bezel, gövde ve dış lens birlikte olacak şekilde şiddet analizi koşturulmuş ve bu analiz sonucunda elde edilen ışık dağılım haritası Şekil 4.35’ de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, ışık dağılımı X-ekseninde sıfırda, Y-ekseninde ise  $2^\circ$  de odak yapmıştır.

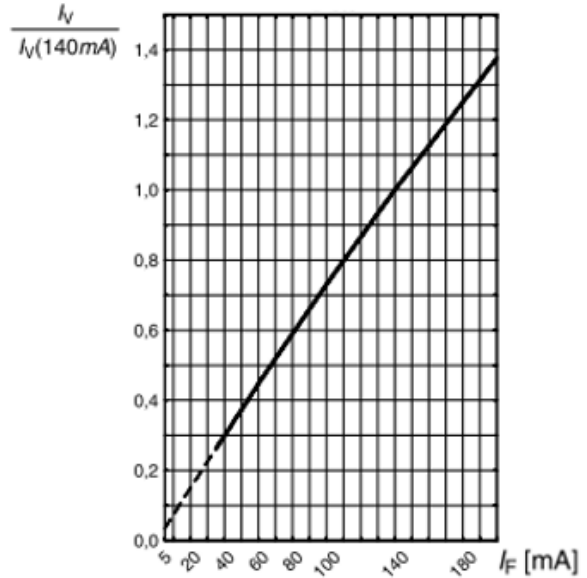


**Şekil 4.35.** Optik tasarımı yapılan alt ve üst ışık tüplerinin birlikte analiz edilmesi sonucu elde edilen ışık dağılım haritası

Her bir LED' in 1 lm ışık yaydığı analiz sonucunda, maksimum 1,05 cd ışık şiddeti elde edilmiştir. Taşıt arka pozisyon lambaları için uluslararası standartlarla belirlenen minimum ve maksimum değer aralığı göz önüne alınarak ölçeklendirme yapılırsa, LED başına 9 lm ışık akısı olması gerektiği hesaplanmıştır. LED' lerin ısınmasından kaynaklı verim düşüşünün % 30 olduğu varsayılırsa, Şekil 4.36' da verilen LA B6SP LED' inin ışık akısı BIN aralıkları ve akıma bağlı ışık şiddeti değişim grafiği göz önünde bulundurulurken, DB sınıfındaki LED 90 mA akım ile sürüldüğünde LED başına 9 lm ışık akısı olacağı tespit edilmiştir.

DB	19,9 lm
EA	25,3 lm
EB	31,7 lm
FA	39,6 lm

Işık Akısı BIN aralığı



Akıma bağlı ışık şiddeti değişim grafiği

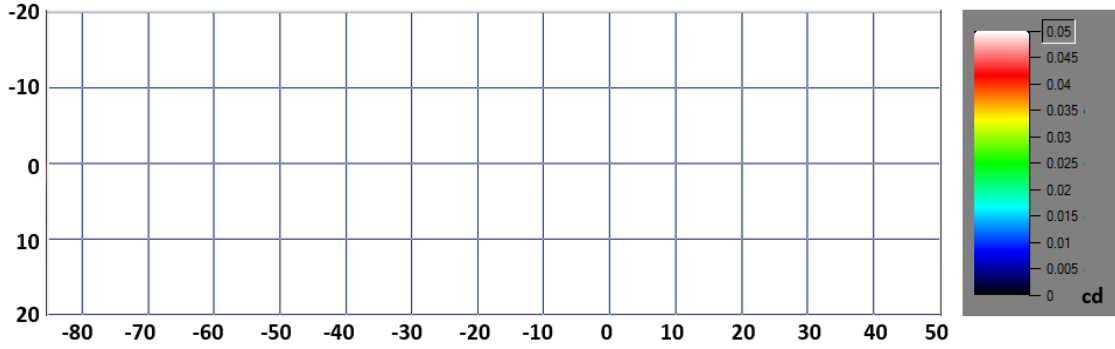
**Şekil 4.36.** LA B6SP LED' ine ait ışık akısı BIN aralığı ve ışık şiddetinin akıma bağlı değişimi (Osram, 2019b)

LED ışık kaynaklarının yaydığı ışık miktarı 9 lm olarak güncellenerek, üst ve alt ışık tüpleri ile birlikte diğer geometrilerin bir arada olduğu analiz tekrar koşulmuş ve lambanın Avrupa yasal gerekliliklerine göre arka pozisyon fonksiyonu (UNECE R7) için istenen ışık değerlerini sağladığı tespit edilmiştir. Çizelge 4.3’ te, 90 mA akımla sürülen ve her biri 9 lm ışık yayan 2 adet LED ile birlikte diğer geometrilerin de dahil edildiği analiz sonucunda elde edilen lambanın ışık şiddeti sonuçları, UNECE R7’ ye göre arka pozisyon fonksiyonu için istenen minimum ve maksimum değerler ile birlikte verilmiştir (Unece, 2012).

**Çizelge 4.3.** Her biri 9 lm ışık yayan 2 adet LED ile birlikte alt ve üst ışık tüplerinin dahil edildiği analiz sonucu elde edilen ışık değerlerinin yasal standartlarda belirlenen noktalar üzerindeki gösterimi

Ölçüm Noktaları	Regülasyon Açısı	Minimum Gerekli Değer (cd)	Maksimum Gerekli Değer (cd)	Analiz (cd)
1	10U-5L	0,8	17	5,55
2	10U-5R	0,8	17	5,88
3	5U-20L	0,4	17	2,17
4	5U-10L	0,8	17	4,95
5	5U-V	2,8	17	6,84
6	5U-10R	0,8	17	5,37
7	5U-20R	0,4	17	2,24
8	H-10L	1,4	17	5,27
9	H-5L	3,6	17	6,15
10	H-V	4	17	6,79
11	H-5R	3,6	17	6,15
12	H-10R	1,4	17	5,37
13	5D-20L	0,4	17	1,51
14	5D-10L	0,8	17	5,35
15	5D-V	2,8	17	5,94
16	5D-10R	0,8	17	5,01
17	5D-20R	0,4	17	2,23
18	10D-5L	0,8	17	5,39
19	10D-5R	0,8	17	4,91

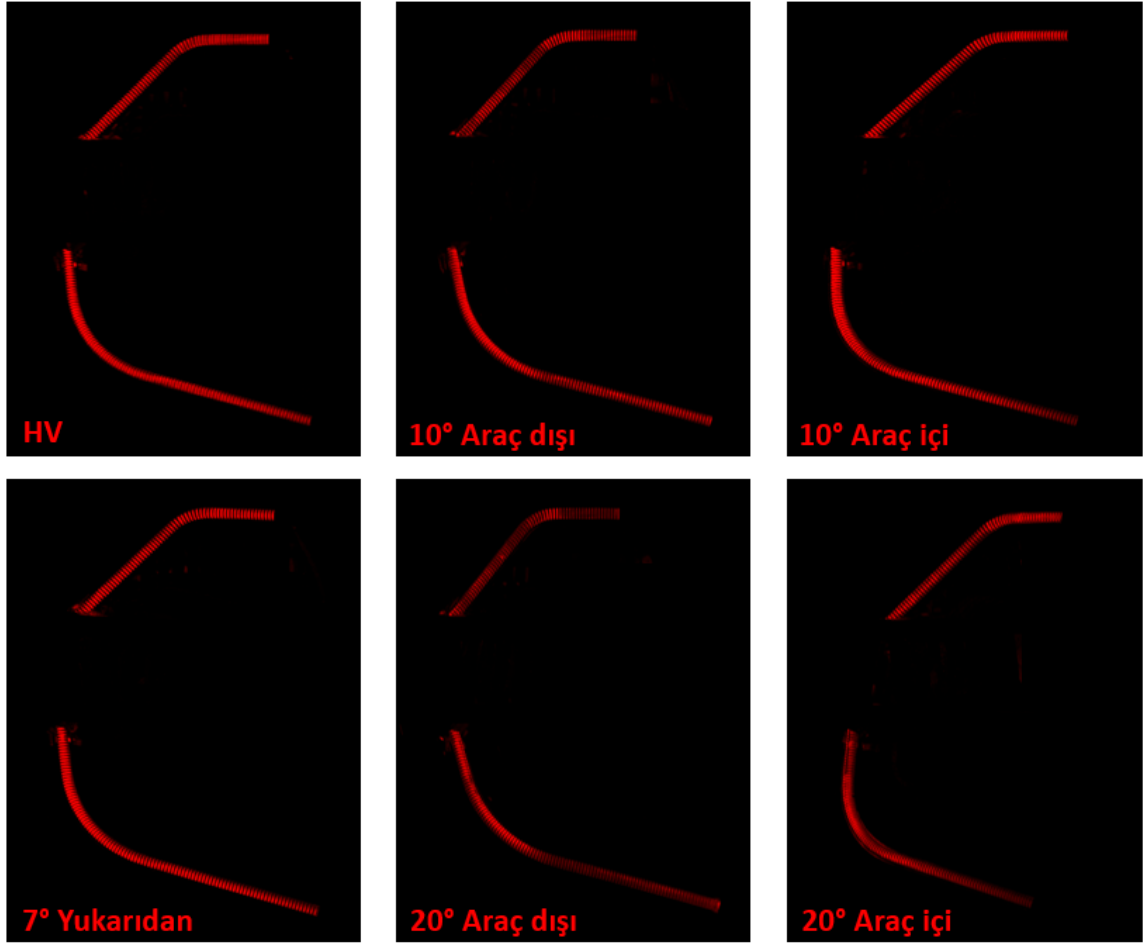
Şekil 4.37’ de verilen görünürlük alanını gösteren ışık dağılımına bakıldığında, beyaz renkte olan her yerde 0.05 cd’ dan daha fazla ışık olduğu görülmektedir. Bu sonuç, lambanın bu açı değerleri aralığında UNECE R7 regülasyonu ile belirlenen araç görünürlüğü gereksinimini de sağladığını göstermektedir.



**Şekil 4.37.** Lambanın görünürlük açılarını belirleyen ışık dağılımı

Şekil 4.38’ de ise üst ve alt ışık tüpünün parlaklık sensorü ile koşturulan analizi sonucu elde edilen yüzey homojenliği görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden de görüldüğü üzere en homojen ışık dağılımı araç ekseninden (HV) bakıldığında elde edilmektedir. Araç içi tarafından bakıldığında üst ışık tüpünün sağ üstte kalan kısımları daha çok aydınlanırken, araç dışı tarafına gidildikçe tüpün aydınlanma yüzeyi homojenliğinin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca üst ışık tüpünün üst kısmında kalan tüp geometrisinden kaynaklanan sert geçiş, yüzey aydınlanma homojenliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Alt ışık tüpünün yüzey homojenliğine bakıldığında ise, araç içi tarafında tüpün orta kısımları daha çok aydınlanırken, araç dışına doğru gidildikçe tüpün LED’ e yakın olan baş kısımlarının aydınlandığı gözlenmiştir. Bu durum ışık tüpü aydınlanma yüzeyi homojenite beklentisi için uyumlu bir sonuçtur.





**Şekil 4.38.** Lambanın açık olduğu konumdaki alt ve üst ışık tüpünün yüzey homojenliği görüntüleri

#### 4.3.2. Çubuk şeklindeki ışık tüpünün prototip imalatı

Çubuk şeklinde üst ve alt ışık tüpünün ideal optik tasarım parametrelerine erişildikten sonra prototipleri üretilmiştir. Işık tüpü prototipleri PMMA külçeden işlenmiştir. Prototiplerin iç yüzeyindeki optik prizmalar üzerinde işleme kaynaklı yarıçap değeri 0.1 mm dir. Ayrıca optik prizmaların boyutları çok küçük olduğundan prizma yüzeyleri hariç tutularak diğer yüzeylere polisaj işlemi uygulanmıştır. Işık tüplerinin yanı sıra LED'lerin üzerine oturtulacağı PCB ve ışık tüpünün altına destek olacak yardımcı eleman olan bezel prototipi de imal edilmiştir. Üretilen üst ve alt ışık tüpü prototiplerinin ön ve arka yüzeylerinden alınan görüntüler Şekil 4.39' da verilmiştir.



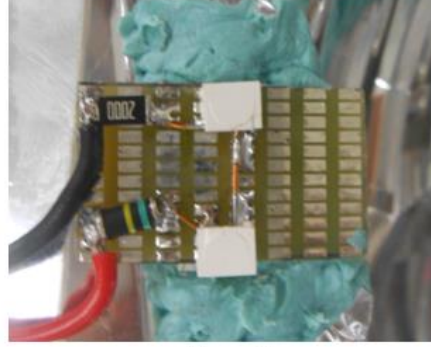
**Şekil 4.39.** Alt ve üst ışık tüpü prototiplerinin ön ve arka yüzeylerinden alınan görüntüler

Şekil 4.40' da ise ışık tüpü prototiplerinin oturtulduğu ve arka tarafa kaçan ışıkları engelleyen bezel prototipinin görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 4.40.** Işık tüplerinin oturtulduğu bezel prototipi

Şekil 4.41’ de LED’ lerin üzerine konumlandırıldığı PCB prototipinin görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi alt ve üst ışık tüplerinin giriş yüzeylerine bakan 2 adet Osram markasında ait SideLED kullanılmıştır.



LED Üst Yüzeyi



LED Ön Yüzeyi

Şekil 4.41. LED’ lerin konumlandırıldığı PCB prototipi

Şekil 4.42’ de ise bezel ve ışık tüpü prototiplerinin monte edildiği durumdaki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.42. Bezel ve ışık tüpü prototiplerinin monte edildiği görünüm

### 4.3.3. Çubuk şeklindeki ışık tüpünün prototip testleri

Çubuk şeklinde ışık tüplerinin fotometri ölçümlerini ve yüzey homojenliği analizlerini yapabilmek amacıyla LED' lere 90 mA akım verilerek lamba açık konuma getirilmiştir. Lambanın araçtaki konumunu temsil eden aparat üzerinde, araç ekseninin tam karşısından bakıldığında ve LED' lerin açık olduğu durumdaki görüntüsü Şekil 4.43' te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, üst ışık tüpünün başlarında LED' e yakın olan bölgede yakalanan ışık şiddeti, tüp ortalarında geometrinin keskin dönüşünden hemen önce azalmıştır. Tüp geometrisinin sağa doğru kıvrımından sonra ise ışık şiddetinde tekrar bir artış gözlenmiştir. Alt ışık tüpünün aydınlanmasına bakıldığında ise ışık tüpünün hemen başında LED' e yakın bölgede maksimum ışık şiddeti elde edilirken, tüpün sonlarına doğru şiddette lineer bir azalma söz konusudur. Bu durum analiz sonuçları ile uyumludur.



Şekil 4.43. Lambanın açık konumdaki görüntüsü

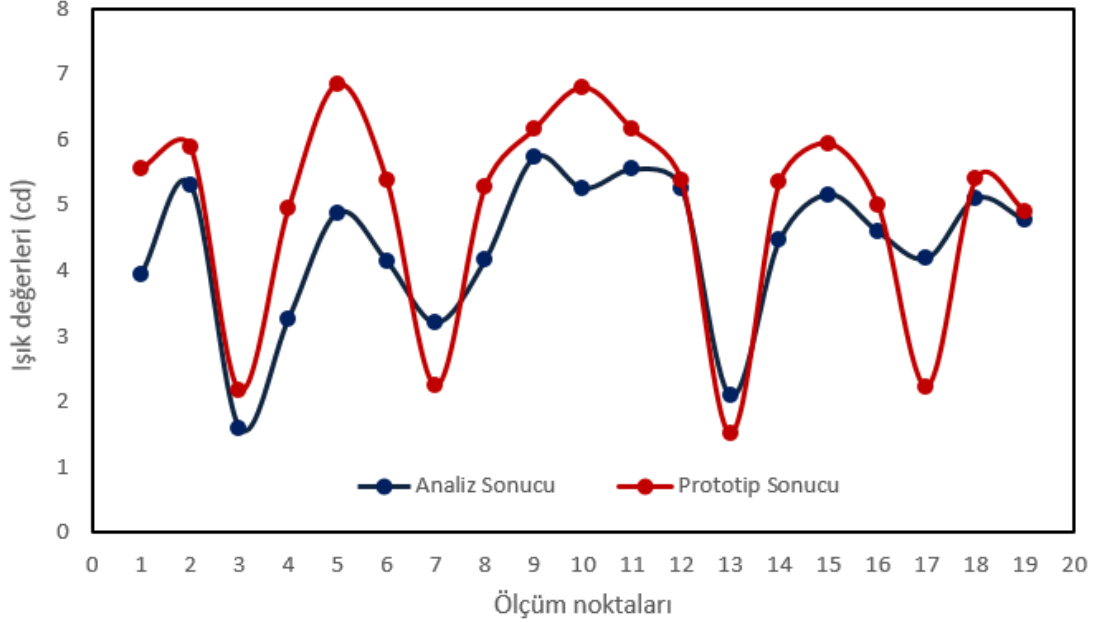
Optik tasarımı yapılan çubuk şeklindeki ışık tüplerinin üretilen prototipleri üzerinden fotometri ölçümleri yapılmıştır. LMT marka gonyometre ile yapılan fotometri ölçüm sonuçları regülasyonda belirtilen açılara göre Çizelge 4.4’ te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Çubuk şeklinde ışık tüpü prototiplerinin fotometri testi ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktaları	Regülasyon Açısı	Prototip (cd)
1	10U-5L	3,94
2	10U-5R	5,31
3	5U-20L	1,59
4	5U-10L	3,26
5	5U-V	4,88
6	5U-10R	4,14
7	5U-20R	3,20
8	H-10L	4,15
9	H-5L	5,72
10	H-V	5,25
11	H-5R	5,54
12	H-10R	5,26
13	5D-20L	2,08
14	5D-10L	4,46
15	5D-V	5,16
16	5D-10R	4,59
17	5D-20R	4,18
18	10D-5L	5,10
19	10D-5R	4,76

Çizelge 4.3’ te verilen analiz sonuçları ile Çizelge 4.4’ te verilen prototip sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla Şekil 4.44’ teki grafik çizilmiştir. Grafığe bakıldığında, prototip sonucu ışık değerlerinin analiz sonucunda elde edilen değerlere kıyasla genel olarak daha fazla olduğu söylenebilir. Bu Durum LED’ lerin hesaplanan degradasyon değeri ile gerçek degradasyon değerinin farklı olmasından kaynaklanabilir. Grafikten de görüldüğü gibi regülasyon açılarını gösteren ölçüm noktalarında, analiz sonucunda elde edilen ışık değerleri ile prototip testleri sonucu elde edilen ışık değerleri arasında %80’ in üzerinde uyum gözlenmiştir. Aradaki fark, analiz koşulları ile gerçek koşullar arasındaki

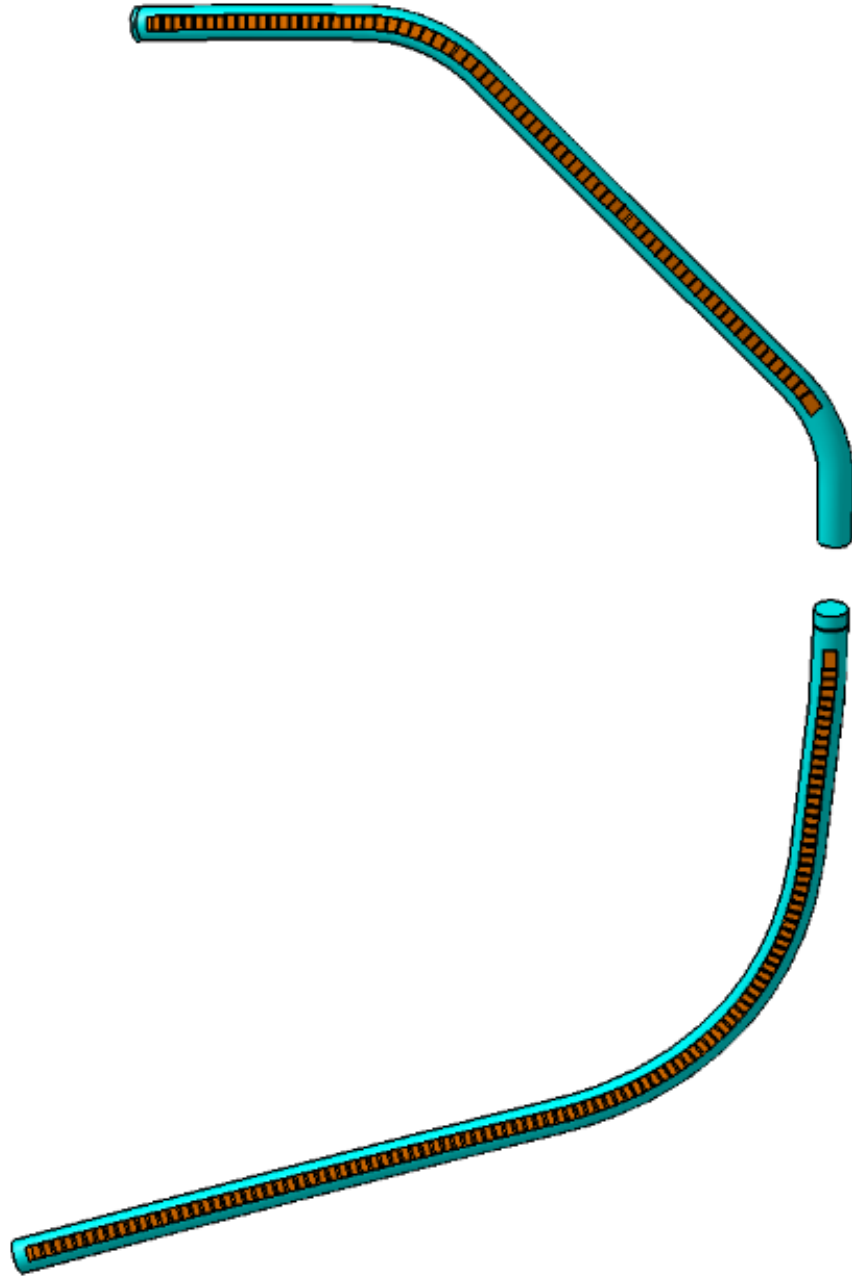
farklılıklar, prototip kalitesi, ölçüm esnasındaki laboratuvar koşulları gibi bir çok nedenden kaynaklanabilir.



**Şekil 4.44.** Analiz sonucu ile prototip üzerinden yapılan fotometri test sonuçlarının karşılaştırılması

#### 4.3.4. Çubuk şeklindeki ışık tüpünün yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmesi

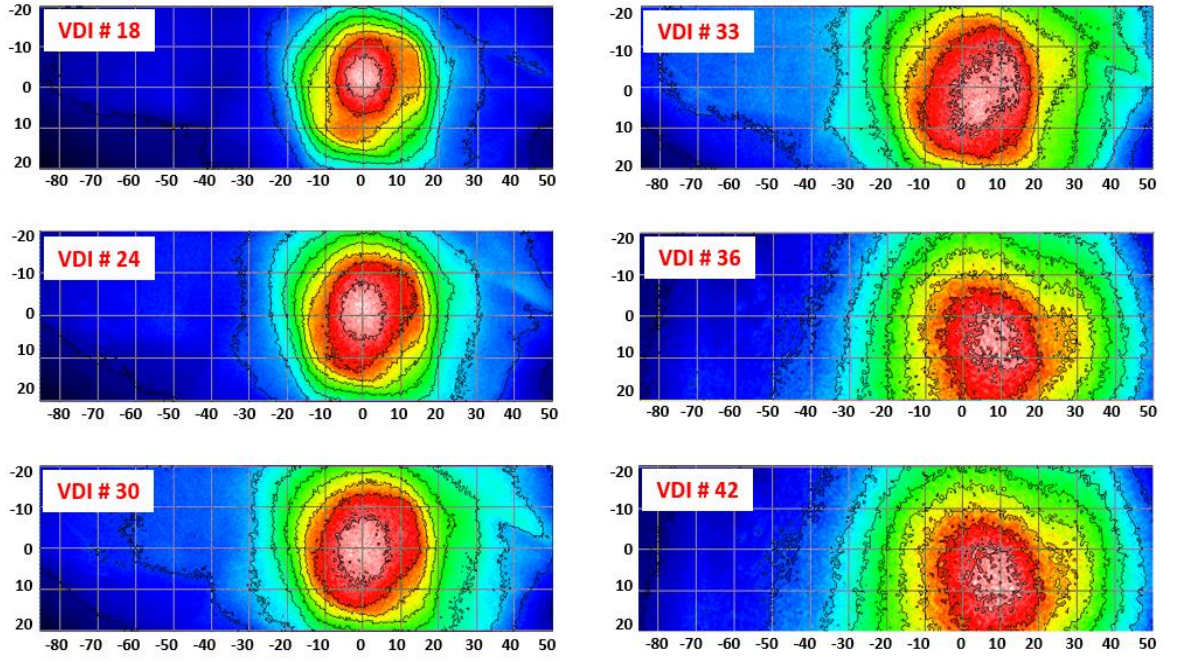
Uluslararası standartlardaki VDI 3400 serisinin VDI 18, VDI 24, VDI 30, VDI 33, VDI 36 ve VDI 42 numaralı yüzey pürüzlülüğü saçılma dosyaları, optik tasarım ve simülasyon programında üst ve alt ışık tüplerinin prizmatik yüzeylerine uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri Şekil 4.45’ de gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü uygulanmış ışık tüpleri için nihai analizler tekrar oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar, ışık dağılımının yayılım açısı, sistemin yaydığı maksimum ışık şiddeti ve yüzey homojenliği bakımından incelenmiştir.



**Şekil 4.45.** Yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri

Işık dağılımı yayılım açısının değişimini incelemek amacıyla, yüzey pürüzlülük değişimine göre elde edilen ışık dağılım haritaları Şekil 4.46' da gösterilmiştir. Işık dağılım haritaları incelendiğinde, ışık tüpünün prizmatik yüzeylerine uygulanan yüzey pürüzlülüğü değerinin artması ile ışık dağılımının daha geniş açılara yayıldığı gözlenmiştir. Uygulanan yüzey pürüzlülükleri, büyüklükleri ile doğru orantılı olarak ışığı saçmışlardır. Işık rastgele açılarda saçıldığından ışık dağılımının açısı genişlemiştir.

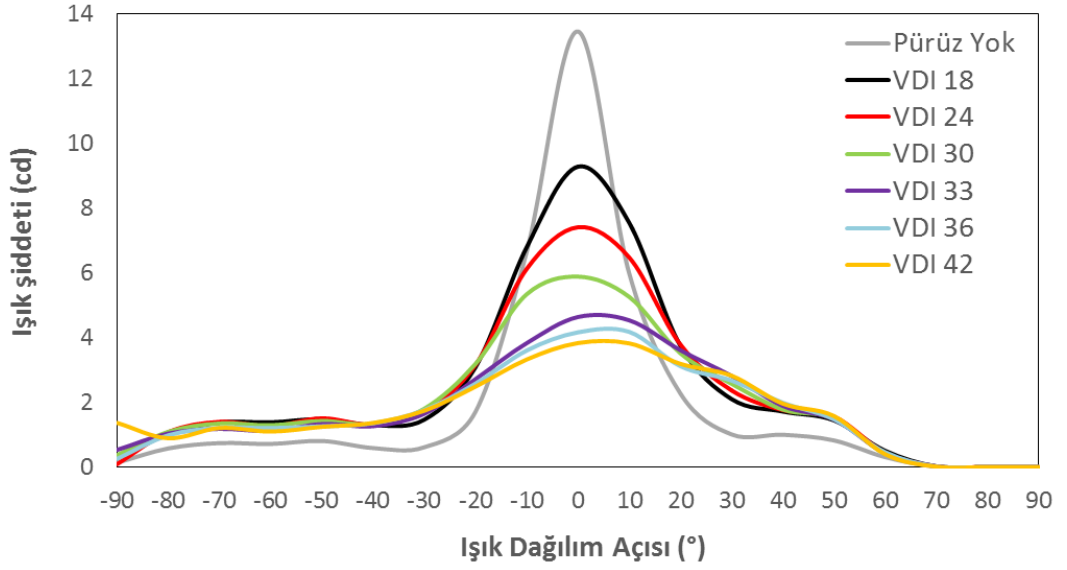




**Şekil 4.46.** Farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin uygulanması ile elde edilen ışık dağılım haritaları

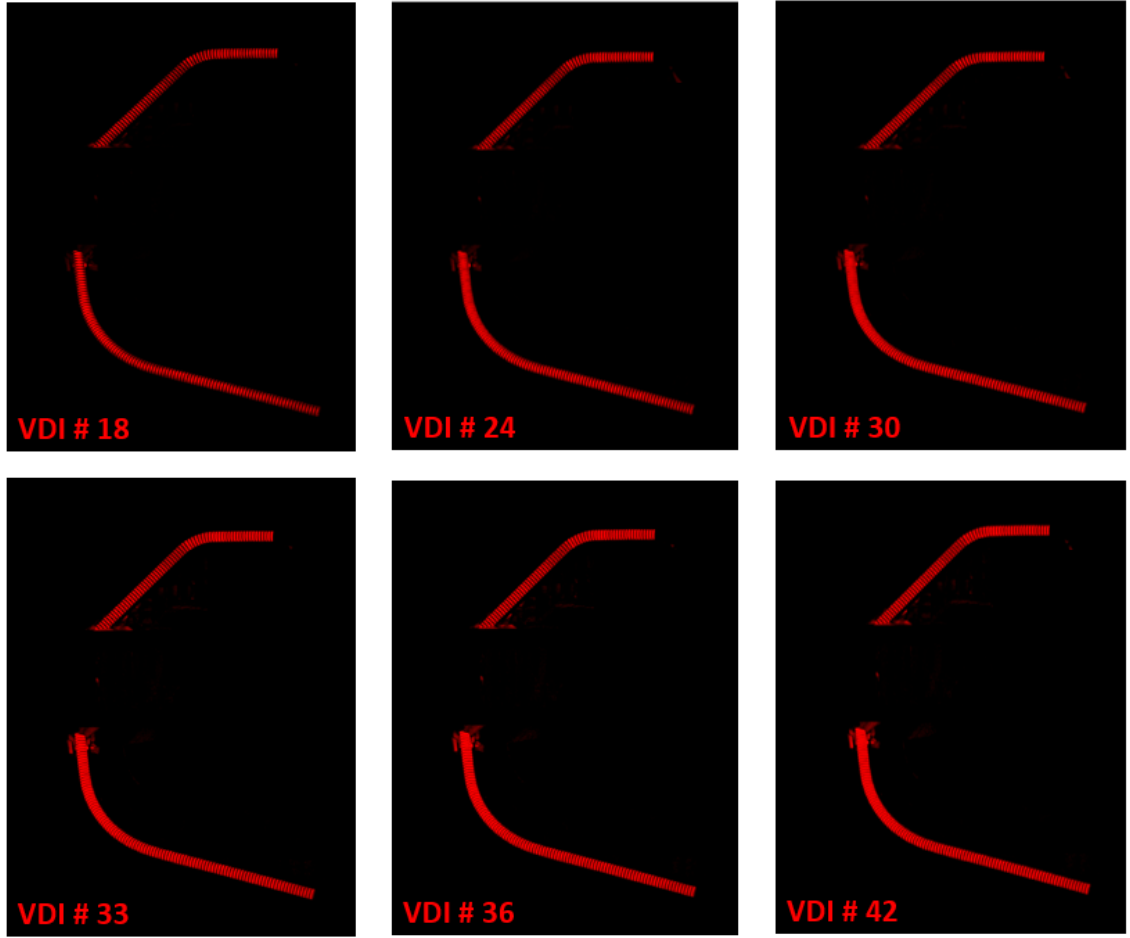
Şekil 4.47' de ise Şekil 4.35' de verilen yüzey pürüzlülüğü uygulanmamış ışık tüpünün ışık dağılım haritası üzerinden ve Şekil 4.46' da verilen farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülükleri uygulanmış ışık tüplerinin ışık dağılım haritaları üzerinden, yatay eksende kesit alınarak elde edilen ışık dağılım eğrileri gösterilmiştir. Işık dağılım eğrileri, yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılımının yayılım açısı ve sistemin maksimum ışık şiddeti değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, yüzey pürüzlülüğü arttıkça ışık dağılımının FWHM değeri daha geniş açılara yayılmış ve yüzey pürüzlülüğü uygulanmamış ışık tüpü numunesinde en dar yayılım açısı ve en yüksek ışık şiddeti gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün artması prizmatik yüzeylerin TIR özelliğinin kaybolmasına, dolayısıyla daha çok saçılmaya neden olmuştur ve sonuç olarak sistemin yaydığı ışık şiddeti azalmıştır (Güney vd., 2020).





**Şekil 4.47.** Yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılım eğrileri

Şekil 4.48’ de farklı yüzey pürüzlülüklerinin kullanılması sonucu elde edilen -araç ekseninden (HV)- yüzey homojenliği görüntülerinin değişimi verilmiştir. Üst ışık tüpü için problem, ışık tüpünün sağa kırımından hemen önce ışığın azalması idi. VDI#18 yani en küçük yüzey pürüzlülüğünde bu problemin yine çok belirgin olduğu gözlenirken pürüzlülük değeri arttıkça bu problemin giderek azaldığı gözlenmiştir. Alt ışık tüpü yüzey homojenliğine bakıldığında ise, genel olarak ışık şiddetinin tüpün sonuna doğru azalması ve tüpün hemen başında ışığın çok olması problem olarak gösterilebilir. Yine üst ışık tüpünde olduğu gibi, VDI#18 pürüzlülüğü için bu durum değişmemiştir. Ancak pürüzlülük değerinin artması ile tüpün başındaki ışık daha çok dağılmış ve tüpün sonu ile arasındaki aydınlanma şiddeti farkı azalmıştır. Artan yüzey pürüzlülüğü ışık tüpü girişinde ışığın daha çok saçılmasına ve bu bölgelerde yüzey homojenliğinin bozulmasına neden olmuştur.



**Şekil 4.48.** Uygulanan yüzey pürüzlülüğü büyüklüğüne bağlı olarak araç ekseninden yüzey homojenliği görüntüleri

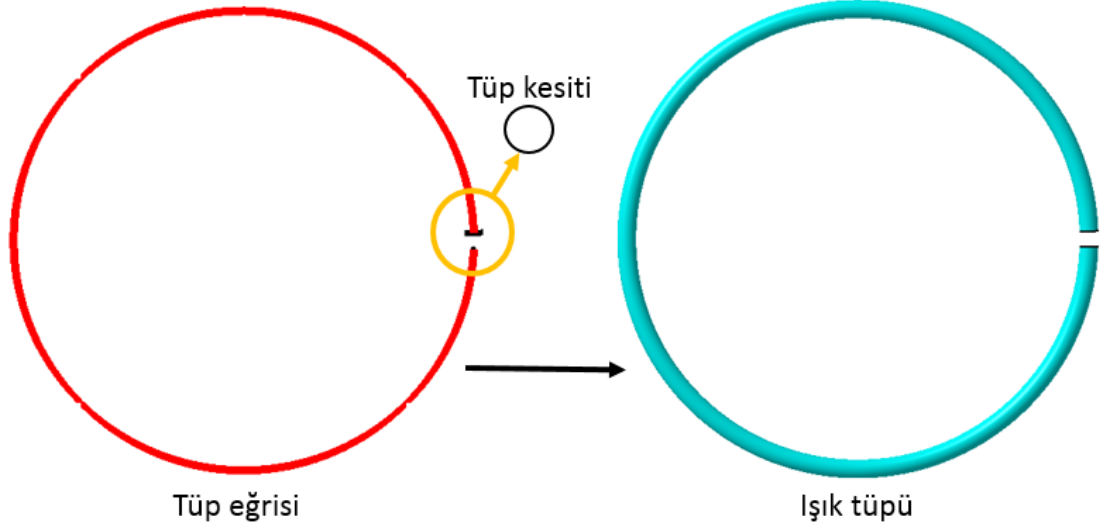
Sonuç olarak, yüzey üzerine uygulanan pürüzlülük miktarı arttırıldıkça sistemin toplam veriminin düştüğü ancak yüzey homojenliğinin daha düzgün hale geldiği gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük yapıları, üzerine düşen ışığı rastgele yönlere dağıttıklarından ışık şiddeti azalır ve yüzey homojenliği artar.

#### **4.4. Halka Şeklindeki Işık Tüpü Geometrisi**

##### **4.4.1. Halka şeklindeki ışık tüpünün optik tasarımı**

Üçüncü ışık tüpü geometrisi, Şekil 4.1’ de gösterilen mevcut lamba 3’ e uyarlanmıştır. Bunun için kesiti çember olan halka şeklinde yapıya sahip ışık tüpü geometrisi tercih edilmiştir. Şekil 4.49’ da bu yapının ayrıntılı görünümü verilmiştir. Şekilde, tüp kesiti,

tüp eğrisi ve kesitin eğri boyunca süpürülmesiyle elde edilen ışık tüpü geometrisi gösterilmiştir.

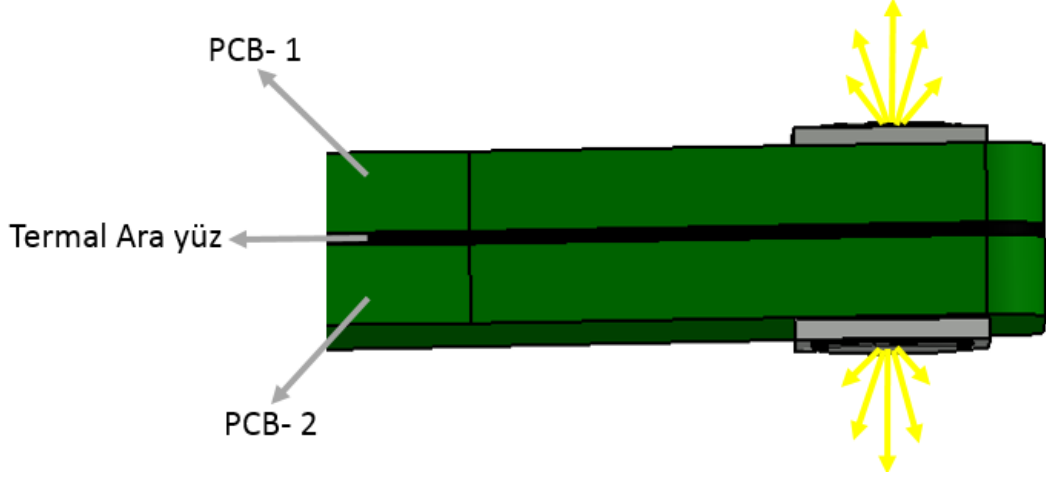


**Şekil 4.49.** Halka şeklinde yapıya sahip ışık tüpü geometrisi

Mevcut farın fonksiyonları aynı şekilde bırakılarak, halka şeklinde ışık tüpü; farın çevresine ön pozisyon ışık değerlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Mevcut bezel yerine ışık tüpünün üzerine oturtulacağı, PCB ile LED'lerin konumlanmasına izin verecek ve mevcut bezel ile aynı bağlantı noktalarını koruyacak bezel geometrisi yeniden tasarlanmıştır. Bezel üzerinde ışık tüpünün oturacağı alanlar oluşturulduktan sonra PCB konumlandırılmıştır. PCB'nin konumunun belirlenmesinin ardından da LED'lerin tipine karar verilmiştir.

Halka şeklinde tasarlanan ışık tüpü için 2 ayrı PCB üzerinde 2 LED bulunmaktadır ve bu PCB'lerin arasında ısı dağılımını sağlayan termal arayüz tabakası vardır. LED ve PCB konumları Şekil 4.50' de gösterilmiştir. Şekilde sarı oklar ile her iki LED için de ışığın çıkış yönü gösterilmiştir. Işık yayılım açısı, yaydığı lümen miktarı gibi parametreler incelendiğinde bu çalışma için en uygun olan LED Osram firmasının geliştirdiği Osram Black LUW H9QP olarak belirlenmiştir. LUW H9QP LED' i 120° derece ışık yayılım açısına sahiptir ve ışık yayılım karakteristiği Şekil 4.4' te verilen LA G6SP LED' inin ışık yayılım karakteristiği ile aynıdır (Osram, 2023). Daha önceki ışık tüpü tasarımlarında yapıldığı gibi, tasarıma başlama aşamasında her bir LED' in 1 lm ışık

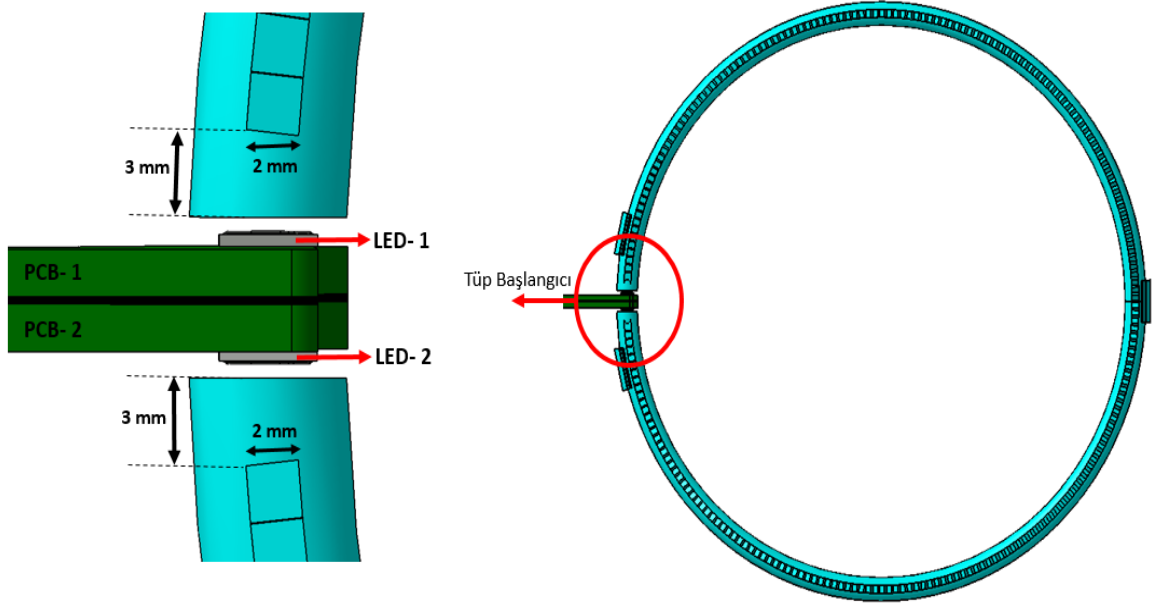
yaydığı kabul edilerek analizler koşulmuştur. Uygun başlama açısı, bitiş açısı ve offset değerleri belirlendikten sonra uluslararası standartları sağlayacak ışık akısı ve akım değerine karar verilmiştir.



**Şekil 4.50.** LED' lerin PCB üzerindeki konumları ve ışığın çıkış yönü

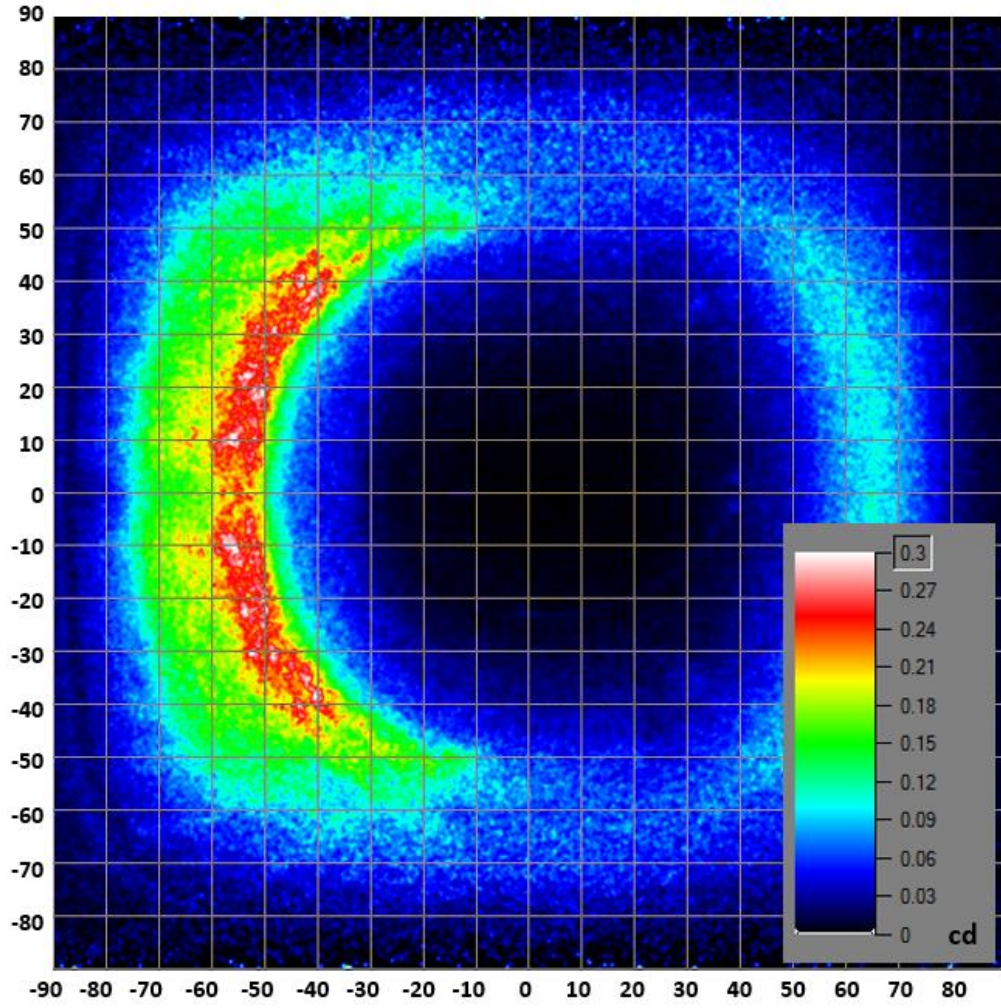
Tüp geometrisi, LED tipi ve PCB konumu belirlendikten sonra, prizmaların optik tasarımına başlanmıştır. Prizmalar tüp başlangıcından yaklaşık 3 mm ileride, 2 mm lik adımlarla ve her bir prizmanın genişliği de 2 mm olacak şekilde tüpün sonuna kadar devam etmektedir. Prizmaların yapısı tüp geometrisi ile birlikte Şekil 4.51' de gösterilmiştir. Işık tüpü malzemesi olarak 3 mm kalınlıkta % 92 geçirgenliğe sahip Arkema firmasının ürettiği Altuglass V825T kod numaralı PMMA seçilmiştir (Altuglas, t.y.).

Daha önceki ışık tüpü geometrilerinde olduğu gibi, ışık dağılım haritasını ve ışık değerlerini görmek için şiddet sensorü, yüzey homojenliğini analiz edebilmek amacıyla da parlaklık sensorleri, ışık tüpünün geometrik merkezinden 3000 mm uzaklıkta oluşturulmuştur. Bütün sensorler görünür dalgaboyu spektrum aralığında 10 nm çözünürlüğe sahiptir. Işık kaynakları, ışık tüpü ve oluşturulan sensörler aynı analize dahil edilerek simülasyonlar koşulmuştur.



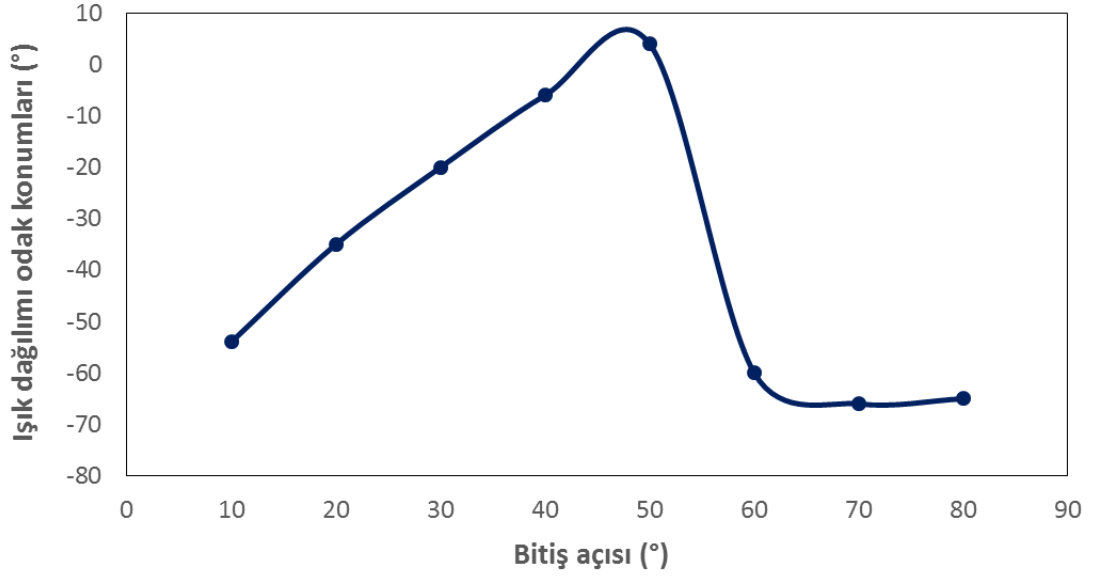
**Şekil 4.51.** Halka şeklinde ışık tüpü ve prizmaların yapısı

Işık tüpü optik tasarımı başlama aşamasında, ışık verimini ve yüzey homojenliğini doğrudan etkileyen başlama - bitiş açısı ve prizmaların tüpün orta eğrisinden uzaklığını belirleyen çıkıntı değerleri sabit alınmıştır. İlk olarak başlama açısı  $5^\circ$ , bitiş açısı  $10^\circ$  ve offset değeri 3,5 mm alınarak elde edilen ışık tüpü için şiddet analizi koşulmuştur. Şekil 4.52' de verilen ışık dağılım haritasına bakıldığında, ışığın yatayda  $55^\circ$  solda, dikeyde ise  $0^\circ$  de odak yaptığı görülür. Başlama ve bitiş açıları değiştirilerek, ışık dağılımının HV noktasına taşındığı açılar belirlenmiştir.



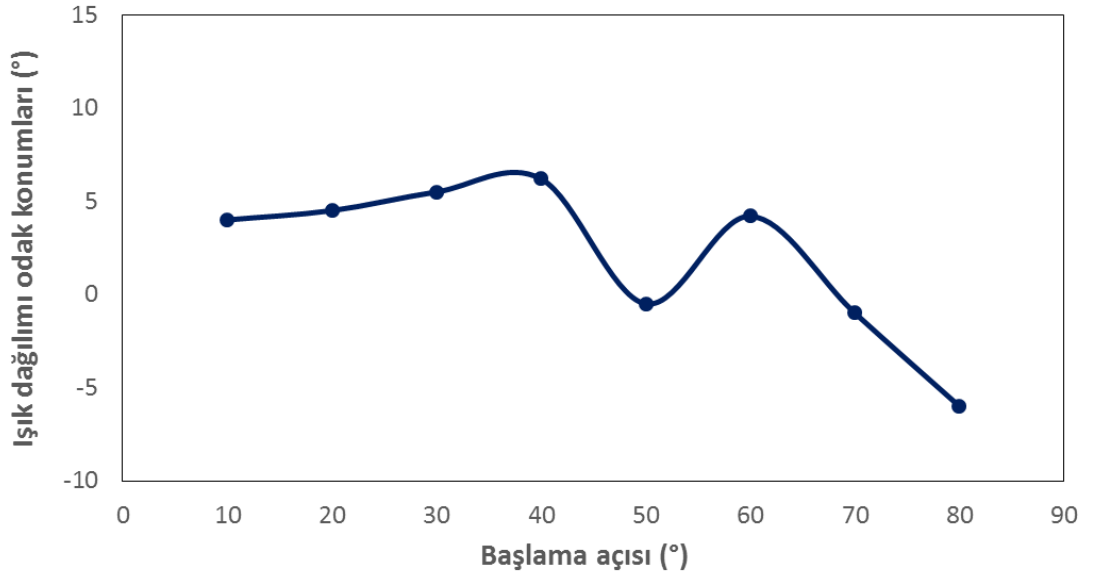
**Şekil 4.52.** Başlama açısı  $5^\circ$ , bitiş açısı  $10^\circ$  ve offset değeri 3,5 mm olan ışık tüpü için ışık dağılım haritası

İlk olarak, başlama açısı ve offset değeri sabit tutularak bitiş açısı  $10^\circ$  lik adımlarla  $80^\circ$  ye kadar arttırılmış ve bu durumların analiz sonuçlarından ışık dağılımının odak oluşturduğu noktalar kaydedilmiştir. Bitiş açısı değişimine bağlı olarak ışık dağılımının yatay eksenindeki konum değişikliği Şekil 4.53' teki grafik ile verilmiştir. Bitiş açısı değeri  $50^\circ$  ye kadar arttıkça ışık dağılımının konumu X-ekseninde artı yönde hareket ederken,  $65^\circ$  den sonra eksi yönde ani bir düşüş gözlenmiş ve bu düşüşün ardından ışık dağılımının konumunun sabitlendiği gözlenmiştir. Işık dağılımının yatay ekseninde sıfır konumuna en yakın olduğu durumda, bitiş açısının  $40^\circ$  ile  $50^\circ$  aralığında değiştiği kaydedilmiştir. Bitiş açısı değişikçe ışık dağılımının dikey eksenindeki konumunda değişiklik gözlenmemiştir.



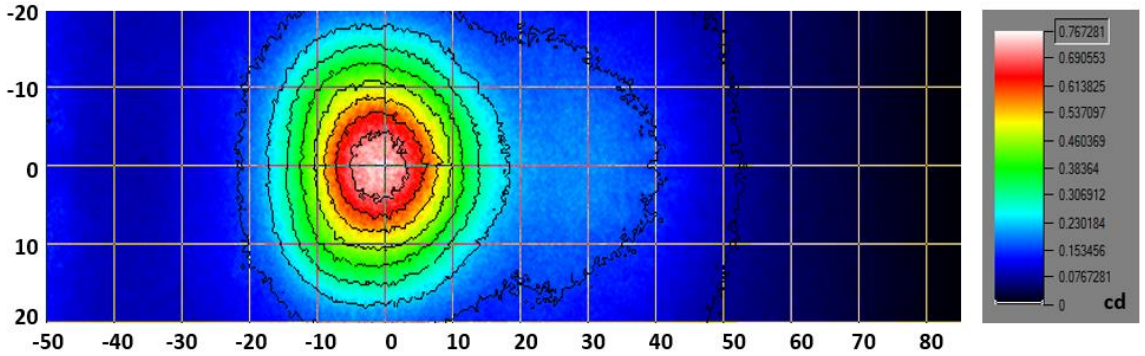
**Şekil 4.53.** Bitiş açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-eksenindeki konum değişikliği

Bitiş açısı için yapılan çalışmanın aynısı başlama açısı için de yapılmıştır. Başlama açısının hesaplanabilmesi için sabit bir bitiş açısı değerine ihtiyaç duyulduğundan, bitiş açısı  $45^\circ$  olarak belirlenmiştir. Başlama açısı değerini bulmak için, bitiş açısı  $45^\circ$  de ve offset değeri 3.5 mm' de sabit tutularak başlama açısı  $10^\circ$  lik adımlarla  $80^\circ$  ye kadar artırılmış ve bu durumların analiz sonuçları kaydedilmiştir. Başlama açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-eksenindeki konum değişikliği Şekil 4.54' teki grafik ile verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, başlama açısı  $10^\circ$  ile  $80^\circ$  arasında değişirken ışık dağılımı X-ekseninde  $-5^\circ$  ve  $5^\circ$  arasında değişmiştir. Başlama açısı  $50^\circ$  olduğu konumda ışık dağılımının sıfır konumunda odak yaptığı gözlenmiştir, ancak diğer açılarda da ışık dağılımı sıfır konumuna çok yakındır. Bu nedenle başlama açısı, bitiş açısı değişimine bağlı olarak ve prizmaların ışık tüpü üzerindeki konumu göz önüne alınarak, tüp boyunca  $10^\circ$  ile  $50^\circ$  arasında değişim gösterecek şekilde ayarlanmıştır. Başlama açısı değiştikçe ışık dağılımının dikey eksenindeki konumunda değişiklik gözlenmemiştir.



**Şekil 4.54.** Başlama açısı değişimine bağlı olarak, ışık dağılımının X-eksenindeki konum değişikliği

Başlama açısı ve bitiş açısı değerleri için elde edilen veriler ışığında halka şeklindeki ışık tüpünün optik tasarımı sürdürülmüştür. Başlama açısı  $10^\circ$  ile  $50^\circ$  arasında değişirken, bitiş açısı değeri ise  $40^\circ$  ile  $50^\circ$  aralığında değişmektedir. Bu değişimler ışık tüplerinin yüzey aydınlanma homojeniteleri göz önünde bulundurularak, en uygun homojenitenin elde edildiği konumlar doğrultusunda yapılmıştır. Elde edilen nihai optik veriler ışığında, halka şeklinde ışık tüpü, bezel, gövde ve dış lens birlikte olacak şekilde şiddet analizi koşulsuz ve bu analiz sonucunda elde edilen ışık dağılım haritası Şekil 4.55’ de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ışık dağılımı X-ekseninde  $-0,5^\circ$  de, Y-ekseninde ise sıfırda odak yapmıştır.



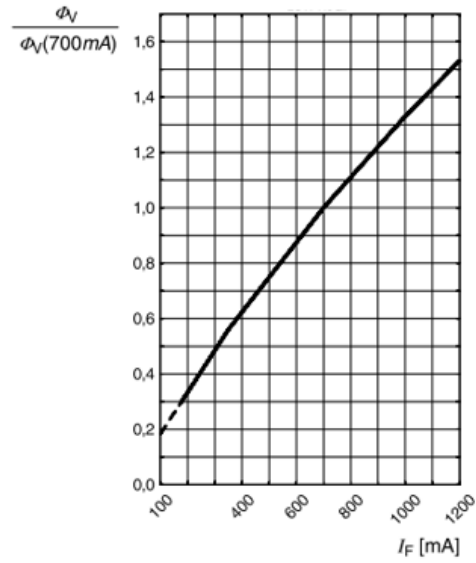
**Şekil 4.55.** Optik tasarımı yapılan halka şeklindeki ışık tüpünün diğer geometriler ile birlikte analiz edilmesi sonucu elde edilen ışık dağılım haritası



Her bir LED' in 1 lm ışık yaydığı analiz sonucunda, maksimum 0,76 cd ışık şiddeti elde edilmiştir. Taşıt ön pozisyon lambaları için uluslararası standartlarla belirlenen minimum ve maksimum değer aralığı göz önüne alınarak ölçeklendirme yapılırsa, LED başına 65 lm ışık akısı olması gerektiği hesaplanmıştır. LED' lerin ısınmasından kaynaklı verim düşüşünün % 10 olduğu varsayılırsa, şekil 4.56' da verilen LUW H9QP LED' inin ışık akısı BIN aralıkları ve akıma bağlı ışık şiddeti değişim grafiği göz önünde bulundurulurken, 5M sınıfındaki LED 250 mA akım ile sürüldüğünde LED başına 65 lm ışık akısı olacağı tespit edilmiştir (Osram, 2023).

5M	180 lm
6M	201 lm
M7	210 lm
7M	224 lm
8M	250 lm

Işık Akısı BIN aralığı



Akıma bağlı ışık şiddeti değişim grafiği

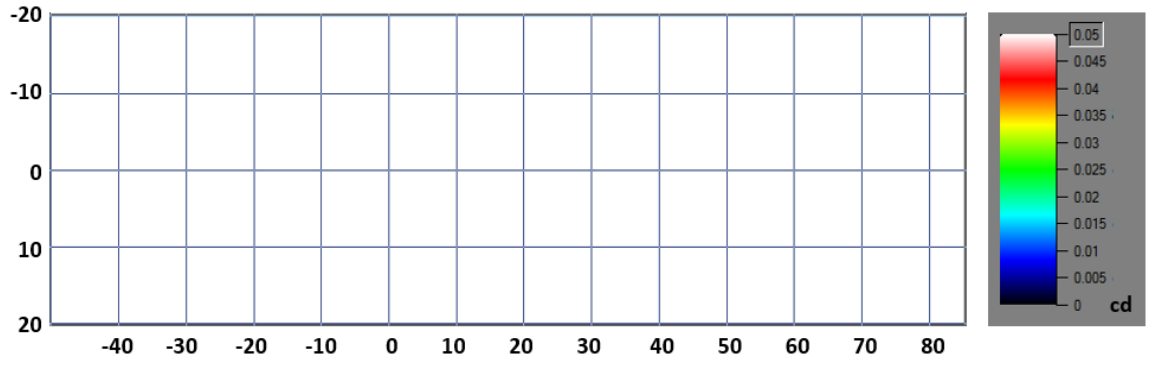
**Şekil 4.56.** LUW H9QP LED' ine ait ışık akısı BIN aralığı ve ışık şiddetinin akıma bağlı değişimi (Osram, 2023).

LED ışık kaynaklarının yaydığı ışık miktarı 65 lm olarak güncellenerek, analiz tekrar koşulmuş ve lambanın Avrupa yasal gerekliliklerine göre ön pozisyon fonksiyonu (UNECE R7) için istenen ışık değerlerini sağladığı tespit edilmiştir (UNECE, 2020). Çizelge 4.5' de UNECE R7' ye göre ön pozisyon fonksiyonu için istenen minimum ve maksimum değerler, 250 mA akımla sürülen ve her biri 65 lm ışık yayan 2 adet LED ile birlikte diğer geometrilerin de dahil edildiği analiz sonucunda elde edilen lambanın ışık şiddeti sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Her biri 65 lm ışık yayan 2 adet LED ile birlikte ışık tüpünün dahil edildiği analiz sonucu elde edilen ışık değerlerinin yasal standartlarda belirlenen noktalar üzerindeki gösterimi

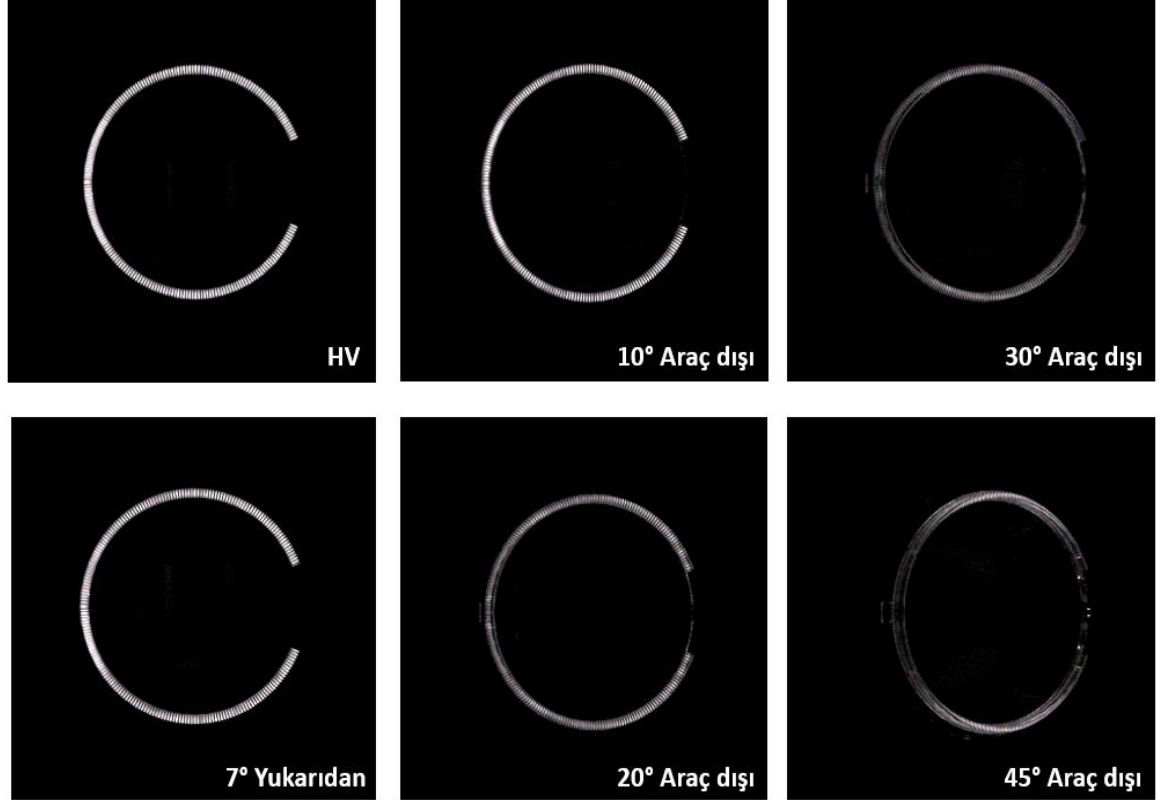
Ölçüm Noktaları	Regülasyon Açısı	Minimum Gerekli Değer (cd)	Maksimum Gerekli Değer (cd)	Analiz (cd)
1	10U-5L	0,8	140	29,9
2	10U-5R	0,8	140	27,3
3	5U-20L	0,4	140	11,1
4	5U-10L	0,8	140	29,5
5	5U-V	2,8	140	43,5
6	5U-10R	0,8	140	26,1
7	5U-20R	0,4	140	13,2
8	H-10L	1,4	140	31,2
9	H-5L	3,6	140	45,5
10	H-V	4	140	48,1
11	H-5R	3,6	140	41,6
12	H-10R	1,4	140	29,3
13	5D-20L	0,4	140	11,2
14	5D-10L	0,8	140	28,6
15	5D-V	2,8	140	42,9
16	5D-10R	0,8	140	26,7
17	5D-20R	0,4	140	13,1
18	10D-5L	0,8	140	30,1
19	10D-5R	0,8	140	27,4

Şekil 4.57' de verilen görünürlük alanını gösteren ışık dağılımına bakıldığında, beyaz renkte olan her yerde 0.05 cd' dan daha fazla ışık olduğu görülmektedir. Bu sonuç, lambanın bu açı değerleri aralığında UNECE R7 regülasyonu ile belirlenen araç görünürlüğü gereksinimini de sağladığını göstermektedir (UNECE, 2020).



**Şekil 4.57.** Lambanın görünürlük açılarını belirleyen ışık dağılımı

Şekil 4.58’ de ise halka şeklindeki ışık tüpünün parlaklık sensorleri ile koşturulan analizi sonucu elde edilen yüzey homojenliği görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden de görüldüğü üzere en homojen ışık dağılımı araç ekseninden (HV) bakıldığında elde edilmektedir. Araç dışı tarafına gidildikçe tüpün aydınlanma yüzeyi homojenliğinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum ışık tüpü aydınlanma yüzeyi homojenite beklentisi için uyumlu bir sonuçtur.



**Şekil 4.58.** Lambanın açık olduğu konumdaki ışık tüpünün yüzey homojenliği görüntüleri

#### 4.4.2. Halka şeklindeki ışık tüpünün prototip imalatı

Halka şeklindeki ışık tüpünün ideal optik tasarım parametrelerine erişildikten sonra prototipi üretilmiştir. Işık tüpü prototipi PMMA külçeden işlenmiştir. Prototipin iç yüzeyindeki optik prizmalar üzerinde işleme kaynaklı yarıçap değeri 0.1 mm dir. Ayrıca optik prizmaların boyutları çok küçük olduğundan prizma yüzeyleri hariç tutularak diğer yüzeylere polisaj (yüzey parlatma) işlemi uygulanmıştır. Işık tüpünün yanı sıra LED'lerin üzerine oturtulacağı PCB ve ışık tüpünün altına destek olacak yardımcı eleman olan bezel prototipi de imal edilmiştir. Üretilen ışık tüpü prototipinin ön ve arka yüzeylerinden alınan görüntüler Şekil 4.59' da verilmiştir.



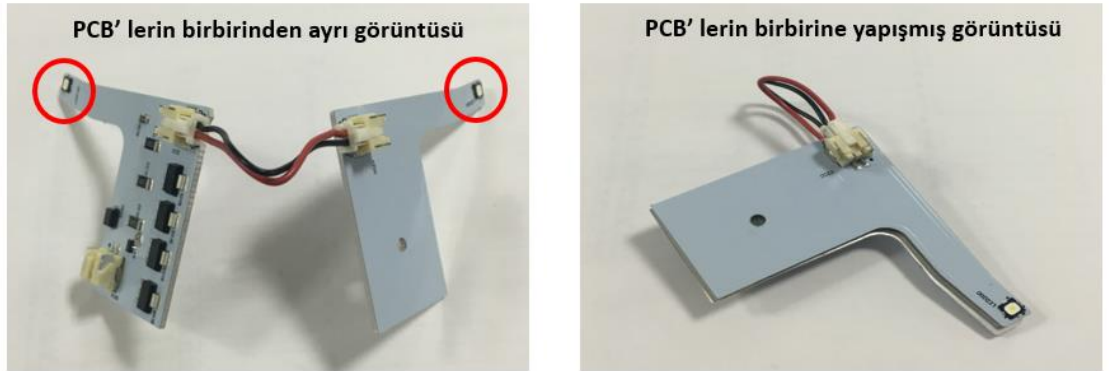
**Şekil 4.59.** Halka şeklindeki ışık tüpü prototipinin ön ve arka yüzeylerinden alınan görüntüler

Şekil 4.60' da ise ışık tüpü prototipinin oturtulduğu ve arka tarafa kaçan ışıkları engelleyen bezel prototipinin görüntüsü verilmiştir.



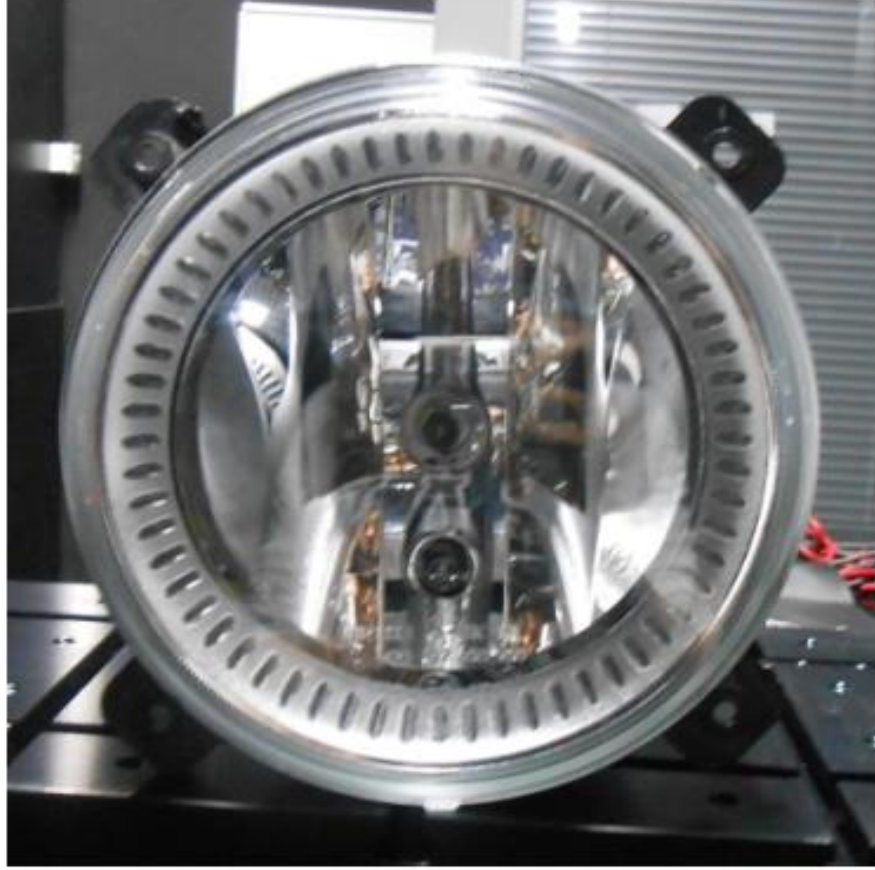
**Şekil 4.60.** Işık tüpünün oturtulduğu bezel prototipi

Şekil 4.61’ de LED’ lerin üzerine konumlandırıldığı PCB prototiplerinin görüntüsü verilmiştir. Şekilde, iki ayrı PCB üzerine konumlandırılan LED’ ler kırmızı daire içinde gösterilmiştir.



**Şekil 4.61.** LED’ lerin konumlandırıldığı PCB prototipleri

Şekil 4.62’ de ise bezel ve ışık tüpü prototipinin monte edildiği durumdaki görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 4.62.** Bezel ve ışık tüpü prototiplerinin monte edildiği görünüm

#### **4.4.3. Halka şeklindeki ışık tüpünün prototip testleri**

Halka şeklinde ışık tüpünün fotometri ölçümlerini ve yüzey homojenliği analizlerini yapabilmek amacıyla LED' lere 250 mA akım verilerek lamba açık konuma getirilmiştir. Lambanın araçtaki konumunu temsil eden aparat üzerinde, araç ekseninin tam karşısından bakıldığında ve LED' lerin açık olduğu durumdaki görüntüsü Şekil 4.63' te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, ışık tüpünün LED' lere yakın olan bölgelerinde yakalanan ışık şiddeti diğer bölgelere göre daha fazladır. Işık tüpünün hemen başında LED' lere yakın bölgede maksimum ışık şiddeti elde edilirken, tüpün sonlarına doğru şiddette lineer bir azalma söz konusudur. Bu durum analiz sonuçları ile uyumludur.



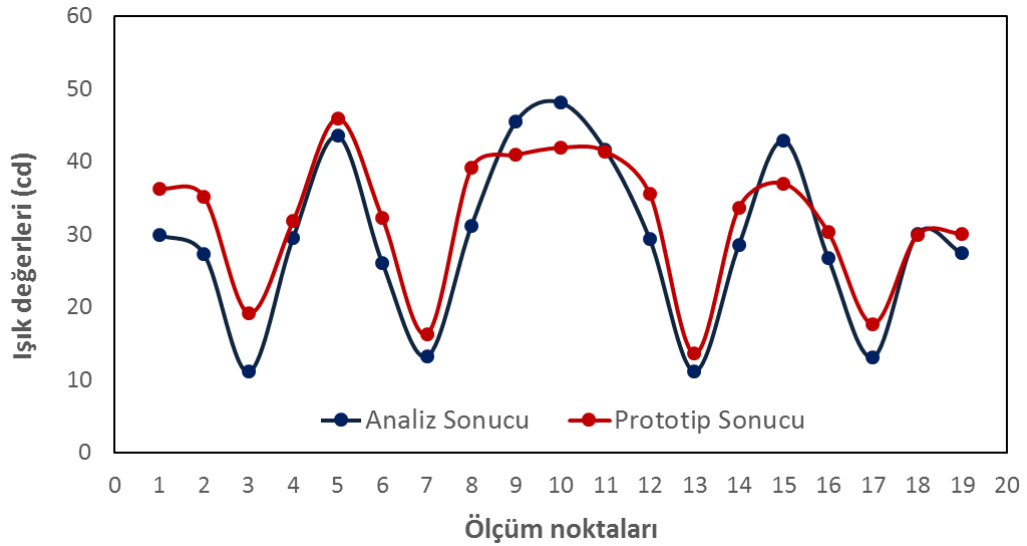
**Şekil 4.63.** Lambanın açık konumdaki görüntüsü

Optik tasarımı yapılan halka şeklindeki ışık tütünün üretilen prototipi üzerinden fotometri ölçümü yapılmıştır. LMT marka gonyometre ile yapılan fotometri ölçüm sonuçları regülasyonda belirtilen açılara göre Çizelge 4.6’ da verilmiştir.

Çizelge 4.5’ de verilen analiz sonuçları ile Çizelge 4.6’ da verilen ve prototip sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla Şekil 4.64’ teki grafik çizilmiştir. Grafiğe bakıldığında, prototip sonucu ışık değerlerinin analiz sonucunda elde edilen değerlere kıyasla genel olarak daha fazla olduğu söylenebilir. Bu Durum LED’ lerin hesaplanan degridasyon değeri ile gerçek degridasyon değerinin farklı olmasından kaynaklanabilir. Grafikten de görüldüğü gibi regülasyon açılarını gösteren ölçüm noktalarında, analiz sonucunda elde edilen ışık değerleri ile prototip testleri sonucu elde edilen ışık değerleri arasında % 80’ in üzerinde uyum gözlenmiştir. Aradaki fark, analiz koşulları ile gerçek koşullar arasındaki farklılıklar, prototip kalitesi, ölçüm esnasındaki laboratuvar koşulları gibi bir çok nedenden kaynaklanabilir.

**Çizelge 4.6.** Halka şeklinde ışık tüpü prototipinin fotometri testi ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktaları	Regülasyon Açısı	Prototip (cd)
1	10U-5L	36,3
2	10U-5R	35,2
3	5U-20L	19,2
4	5U-10L	31,8
5	5U-V	45,9
6	5U-10R	32,3
7	5U-20R	16,3
8	H-10L	39,1
9	H-5L	40,9
10	H-V	41,9
11	H-5R	41,4
12	H-10R	35,5
13	5D-20L	13,6
14	5D-10L	33,7
15	5D-V	37,0
16	5D-10R	30,3
17	5D-20R	17,7
18	10D-5L	29,9
19	10D-5R	30,1

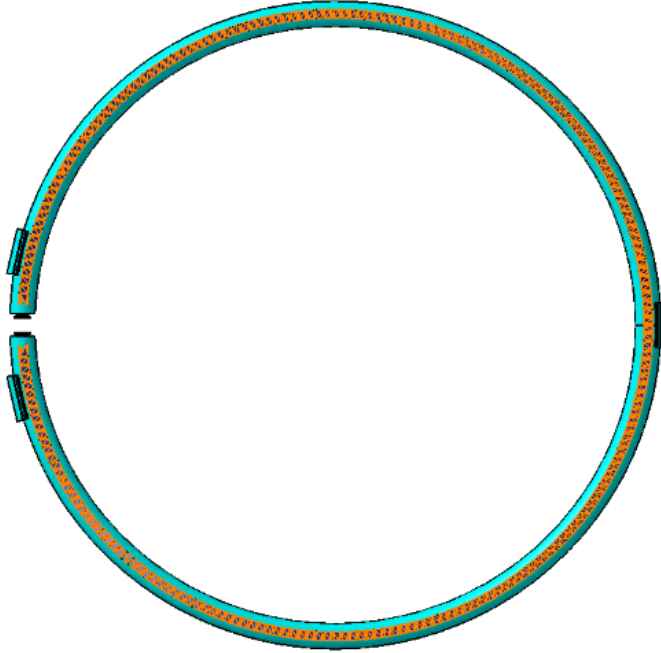


**Şekil 4.64.** Analiz sonucu ile prototip üzerinden yapılan fotometri test sonuçlarının karşılaştırılması



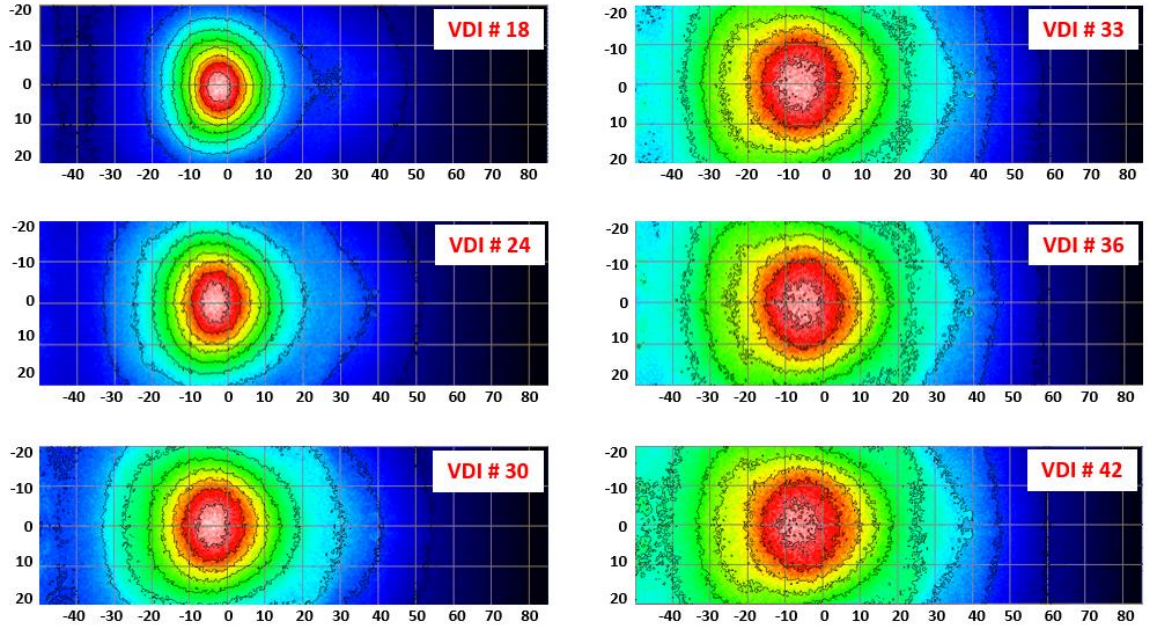
#### 4.4.4. Halka şeklindeki ışık tüpünün yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmesi

Uluslararası standartlardaki VDI 3400 serisinin VDI 18, VDI 24, VDI 30, VDI 33, VDI 36 ve VDI 42 numaralı yüzey pürüzlülüğü saçılma dosyaları, optik tasarım ve simülasyon programında halka şeklindeki ışık tüpünün prizmatik yüzeylerine uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri Şekil 4.65’ de gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü uygulanmış ışık tüpleri için nihai analizler tekrar koşuturulmuş ve elde edilen sonuçlar, ışık dağılımının yayılım açısı, sistemin yaydığı maksimum ışık şiddeti ve yüzey homojenliği bakımından incelenmiştir.



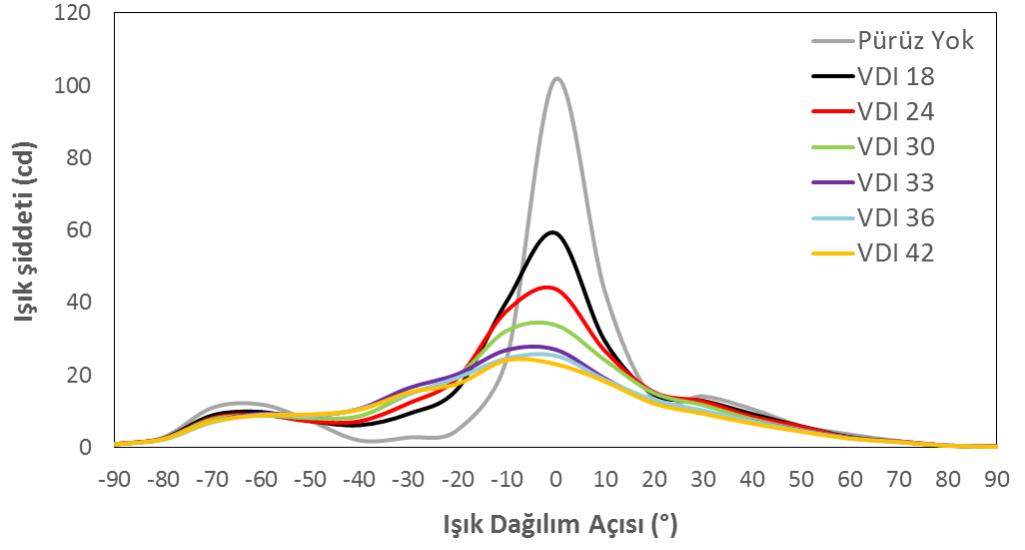
**Şekil 4.65.** Yüzey pürüzlülüğü uygulanan optik prizma yüzeyleri

Işık dağılımı yayılım açısının değişimini incelemek amacıyla, yüzey pürüzlülük değişimine göre elde edilen ışık dağılım haritaları Şekil 4.66’ da gösterilmiştir. Işık dağılım haritaları incelendiğinde, ışık tüpünün prizmatik yüzeylerine uygulanan yüzey pürüzlülüğü değerinin artması ile ışık dağılımının daha geniş açılara yayıldığı gözlenmiştir. Uygulanan yüzey pürüzlülükleri, büyüklükleri ile doğru orantılı olarak ışığı saçmışlardır. Işık rastgele açılarda saçıldığından ışık dağılımının açısı genişlemiştir.



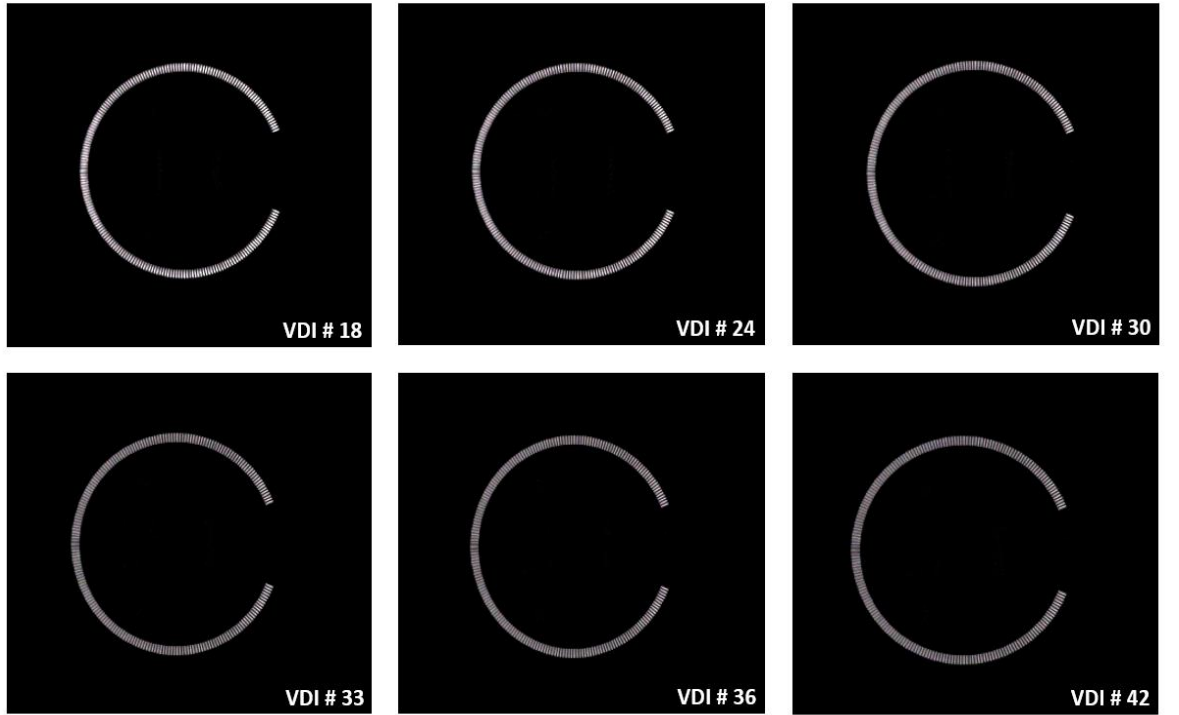
**Şekil 4.66.** Farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin uygulanması ile elde edilen ışık dağılım haritaları

Şekil 4.67' de ise Şekil 4.55' de verilen yüzey pürüzlülüğü uygulanmamış ışık tüpünün ışık dağılım haritası üzerinden ve Şekil 4.66' da verilen farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülükleri uygulanmış ışık tüplerinin ışık dağılım haritaları üzerinden, yatay eksen kesit alınarak elde edilen ışık dağılım eğrileri gösterilmiştir. Işık dağılım eğrileri, yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılımının yayılım açısı ve sistemin maksimum ışık şiddeti değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, yüzey pürüzlülüğü arttıkça ışık dağılımının FWHM değeri daha geniş açılara yayılmış ve yüzey pürüzlülüğü uygulanmamış ışık tüpü numunesinde en dar yayılım açısı ve en yüksek ışık şiddeti gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün artması prizmatik yüzeylerin TIR özelliğinin kaybolmasına, dolayısıyla daha çok saçılmaya neden olmuştur ve sonuç olarak sistemin yaydığı ışık şiddeti azalmıştır.



**Şekil 4.67.** Yüzey pürüzlülüğü değişimine bağlı olarak değişen ışık dağılım eğrileri

Şekil 4.68’ de farklı yüzey pürüzlülüklerinin kullanılması sonucu elde edilen -araç ekseninden (HV)- yüzey homojenliği görüntülerinin değişimi verilmiştir. Artan yüzey pürüzlülüğü ile birlikte ışık daha çok saçılmış, yüzey homojenliği artarken ışık tüpünün yaydığı ışık miktarında azalma gözlenmiştir.



**Şekil 4.68.** Uygulanan yüzey pürüzlülüğü büyüklüğüne bağlı olarak araç ekseninden (HV) yüzey homojenliği görüntüleri

Sonuç olarak, yüzey üzerine uygulanan pürüzlülük miktarı arttırıldıkça sistemin toplam veriminin düştüğü ancak yüzey homojenliğinin daha düzgün hale geldiği gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük yapıları, üzerine düşen ışığı rastgele yönlere dağıttıklarından ışık şiddeti azalır ve yüzey homojenliği artar.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, otomotiv dış aydınlatma alanında kullanılan ışık tüplerinin optik tasarım aşamaları; bar şeklinde, çubuk şeklinde ve halka şeklinde olmak üzere 3 farklı temel geometrik yapı altında incelenmiştir. Işık tüplerinin malzemesi için 3 mm kalınlıkta % 92 geçirgenliğe sahip Arkema firmasının ürettiği Altuglass V825T kod numaralı PMMA seçilmiştir.

Bar şeklinde ışık tüpü ve çubuk şeklinde ışık tüpü geometrilerinin optik tasarımı, arka pozisyon lambasının yasal ışık değeri gerekliliklerini sağlayacak şekilde, halka şeklinde yapıya sahip ışık tüpü geometrisi optik tasarımı ise ön aydınlatma fonksiyonu olan ön pozisyon lambasının yasal gerekliliklerini sağlayacak şekilde yürütülmüştür.

Işık tüplerinin optik tasarımı aşamasında ışığı yönlendiren prizmaların başlama açısı, bitiş açısı ve çıkıntı değerleri belirlenmiştir. Her farklı geometri için yapılan simülasyonlar ışığında ışık dağılımının konumu tespit edilerek, ışık HV noktasına taşınmaya çalışılmıştır. Bar şeklinde ışık tüpü geometrisi için başlama açısının  $35^\circ$ , bitiş açısının  $5^\circ$  olması gerektiği tespit edilmiştir. Çubuk şeklinde ışık tüpü optik tasarımında ise alt ve üst her iki ışık tüpü geometrisi için de başlama açısının  $10^\circ$  ile  $20^\circ$  arasında olması gerektiği bulunmuştur. Bitiş açısı değerleri ise üst ışık tüpü için  $30^\circ$  ile  $50^\circ$  aralığında değişirken, alt ışık tüpü için  $30^\circ$  ile  $40^\circ$  arasında değişmektedir. Halka şeklinde ışık tüpü geometrisinde ise, başlama açısı  $10^\circ$  ile  $50^\circ$  arasında değişirken, bitiş açısı değeri ise  $40^\circ$  ile  $50^\circ$  aralığında değişmektedir. Başlama ve bitiş açılarındaki bu değişimler ışık tüplerinin yüzey aydınlanma homojeniteleri göz önünde bulundurularak, en uygun homojenitenin elde edildiği konumlar doğrultusunda yapılmıştır.

Başlama ve bitiş açıları sabitlendikten sonra yüzey aydınlanma homojenite haritaları göz önünde bulundurularak en uygun yüzey homojenliğinin elde edilmesi için çıkıntı değerleri her bir ışık tüpü geometrisi için tüp başından sonuna doğru artacak şekilde ayarlanmıştır. Işık tüpü başındaki prizmalara direkt olarak LED'lerden ışık gelirken sonlardaki prizmalara direkt ışık yerine birincil- ikincil yansımalarından ışık gelir ve bu nedenle sondaki prizmaların verimi baştaki prizmalara kıyasla daha düşüktür. Bu nedenle

direkt ışık gelen prizma sayısını arttırmak amacıyla çıkıntı değeri tüp sonuna doğru arttırılmıştır.

Optik tasarım parametreleri belirlenen ışık tüplerinin yüzey homojenliği incelendiğinde, ışık kaynağına yakın prizmaların aydınlanmadığı gözlenmiştir. Bu durum, ışık kaynağından çıkan ışık ışınlarının tüp eğrisinden dolayı tüp duvarına çarparak TIR kurallarıyla ilerlemesi ve bu alanda ışık ışınlarının tüp içerisinden dışarı çıkamaması ile açıklanır ve bunun sonucunda da bu bölgede aydınlanma gerçekleşmez. Oluşan bu karanlık alanları kapatmak ve LED'lerin çıplak gözle görülmesini engellemek amacıyla ışık tüpü tutucusu üzerine oturtulacak bir maske tasarlanmıştır veya bu maske mevcut bezel üzerine adapte edilmiştir.

Bar şeklinde ışık tüpü geometrisinin otomotiv dış aydınlatma arka pozisyon lambasının yasal ışık değerlerini sağlaması için 4 adet Osram LA G6SP LED' i kullanılmıştır. 60 mA' de, % 35 verim düşüşü sonrası 4,1 lm ışık yayan bu LED' ler ile birlikte ışık tüpünün UNECE R7' de belirtilen gereklilikleri sağladığı tespit edilmiştir. Yapılan yüzey homojenliği analizleri sonucunda sistemin 0,33 oranında homojeniteye sahip olduğu belirlenmiştir. Çubuk şeklinde ışık tüpü geometrisinin yasal ışık değerlerini sağlaması için her bir ışık tüpüne 1 adet olmak üzere toplam 2 adet Osram LA B6SP LED' i kullanılmıştır. 90 mA' de, % 30 verim düşüşü sonrası 9 lm ışık yayan bu LED' ler ile birlikte sistemin UNECE R7' de belirtilen gereklilikleri sağladığı tespit edilmiştir.

Halka şeklinde ışık tüpü geometrisinde ise otomotiv dış aydınlatma ön pozisyon lambasının yasal ışık değerlerini sağlaması için 2 adet Osram LUW H9QP LED' i kullanılmıştır. 250 mA' de, % 10 verim düşüşü sonrası 65 lm ışık yayan bu LED' ler ile birlikte sistemin UNECE R7' de belirtilen gereklilikleri sağladığı tespit edilmiştir.

Nihai tasarım parametrelerine erişildikten sonra optik tasarımı sonlandırılan ışık tüplerinin PMMA külçeden işlenerek prototipleri üretilmiştir. Prototiplerin fotometri testleri Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.Ş. bünyesindeki LMT marka GO-H 1660 serisi gonyometre fotometri ölçüm ünitesi ile gerçekleştirilmiştir. Optik simülasyon ve prototip fotometri testlerinin sonuçları karşılaştırıldığında, bar şeklindeki ışık tüpü geometrisi için % 85' in üzerinde uyuşma elde edildiği gözlenirken, çubuk şeklinde ve

halka şeklindeki ışık tüplerinde bu oran % 80' in üzerindedir. Gerçek hayat ölçüm sonuçları ile prototip ölçüm sonuçları arasındaki bu fark, analiz koşulları ile gerçek koşullar arasındaki farklılıklar, prototip kalitesi, ölçüm esnasındaki laboratuvar koşulları, hesaplanan termal düşüş ile gerçek termal düşüş arasında fark olması gibi bir çok nedenden kaynaklanmaktadır.

Farklı büyüklüklerdeki yüzey pürüzlülüklerinin ışık dağılımı, ışık değerleri ve yüzey aydınlanması üzerine etkilerini incelemek amacıyla, 6 farklı büyüklükte yüzey pürüzlülüğü numunesi akredite laboratuvarında ölçtürülerek analiz ortamında kullanılabilen saçılma dosyaları elde edilmiştir. Bunlar, uluslararası standartlardaki VDI 3400 serisinin VDI 18, VDI 24, VDI 30, VDI 33, VDI 36 ve VDI 42 numaralı yüzey pürüzlülüklerini temsil eden saçılma dosyalarıdır. Bu dosyalar optik simülasyon programında, nihai optik parametreleri belirlenen ışık tüplerinin prizmatik yüzeylerine uygulanmıştır. Bütün ışık tüpü geometrileri için 6 farklı yüzey pürüzlülüğü saçılma dosyaları optik prizma yüzeylerine uygulanarak analizler tekrar koşturulmuş ve elde edilen sonuçlar, ışık dağılımının yayılım açısı, sistemin yaydığı maksimum ışık şiddeti ve yüzey homojenliği bakımından incelenmiştir. Yeniden koşturulan analizler sonucunda, yüzey pürüzlülüğü uygulanmamış ışık tüplerinde en dar yayılım açısı ve en yüksek ışık şiddeti görülürken, yüzey pürüzlülüğü arttıkça ışık dağılımının FWHM değerinin daha geniş açılara yayıldığı gözlenmiştir. Uygulanan yüzey pürüzlülükleri, büyüklükleri ile doğru orantılı olarak ışığı saçmışlardır. Işık rastgele açılarda saçıldığından ışık dağılımının açısı genişlemiştir. Yüzey pürüzlülüğünün artması prizmatik yüzeylerin TIR özelliğinin kaybolmasına, dolayısıyla daha çok saçılmaya neden olmuştur ve sonuç olarak sistemin yaydığı ışık şiddeti azalmıştır.

Farklı yüzey pürüzlülüklerinin yüzey homojenliği üzerine etkisi incelendiğinde, bar şeklinde ve çubuk şeklinde geometrik yapıya sahip ışık tüplerinde yüzey pürüzlülüğü arttıkça ışık tüplerinin başında oluşan ışık şiddetinde artış gözlenirken, tüp sonuna ışık ışınlarının ulaşmadığı ve dolayısıyla ışık şiddetinin tüpün sonuna doğru azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni artan yüzey pürüzlülüğü ile birlikte TIR kuralının bozulması ve ışık tüpü başında çoğu ışık ışınlarının tüpü terk ederek tüp sonuna daha az sayıda ışık ışınlarının ulaşmasıdır. Halka şeklinde ışık tüpünün yüzey homojenliği haritalarına

bakıldığında ise uygulanan pürüzlülük miktarı arttırıldıkça sistemin toplam veriminin düştüğü ancak yüzey homojenliğinin daha düzgün hale geldiği gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük yapıları, üzerine düşen ışığı rastgele yönlere dağıttıklarından ışık şiddeti azalmıştır ve halka şeklindeki geometrik yapıdan dolayı yüzey pürüzlülüğü arttıkça yüzey homojenliği artmıştır.



## KAYNAKLAR

- Altuglas (t.y.). Altuglas v825t resins. [https://www.altuglas.com/export/sites/altuglas/content/medias/downloads/literature/altuglas\\_v825t\\_resins.pdf](https://www.altuglas.com/export/sites/altuglas/content/medias/downloads/literature/altuglas_v825t_resins.pdf)
- ASAP Techinal (2008). *Modeling light pipes in ASAP*. ASAP Technical Publication.
- Auto 2000 Sports (2020). Mercedes-Benz C-class W204 rear lamps 2007-2014. <https://auto2000sports.com/shop/mercedes-benz-c-class-w204-rear-lamps/>
- Auto Hub (2022, 13 Eylül). Mercedes-Benz C-class W205 - world premiere detroit. <https://autohub.de/en/nachrichten/mercedes-benz-c-klasse-w205-weltpremiere-detroit/>
- Boyce, P. ve Raynham, P. (2009). *The SLL lighting handbook*. The Society of Light and Lighting.
- Car.info (t.y.). Mercedes-Benz-c-class-sedan. <https://www.car.info/en-se/image/mercedes-benz-c-class-sedan-close-up-0-194279>
- Davenport T. L. R., Hough, T. A. ve Cassarly, W. J. (2004). Optimization for efficient angle-to-area conversion in illumination systems. J. M. Sasián, R. J. Koschel, P. K. Manhart ve R. C. Juergens (Ed.), *Novel Optical Systems Design & Optimization VII* içinde (s. 93-101). Proc. SPIE 5524.
- Driving Vision News (2009). *LED Technologies in automotive exterior lighting*. Driving Vision News Report.
- Driving Vision News (2012). *LED Technologies in automotive exterior lighting*. Driving Vision News Report. <https://www.drivingvisionnews.com/>
- Eichhorn, K. (2006). *LEDs in automotive lighting*. Proc. of SPIE 6134, 613405-6.
- Fow Mould (t.y.). 6 Types of mold textures in plastic injection molding. *Immould*. <https://www.immould.com/mold-textures>
- Gebauer M. ve Wiersdorff S. (2009). Lighting mechanism, U.S. Patent 7494257B2.
- Gebauer, M. ve Hamm, M. (2007). Light guide technology in head lamps and rear lamps-challenge for material and simulation tools. *International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstad, Germany.
- Gupta, A., Lee, J. ve Koschel, R. J. (2001). Design of efficient lightpipes for illumination by an analytical approach. *Appl. Opt.*, 40, 3640-3648.
- Güney, E., Alper, M. ve Hacısmailoğlu, M. (2020). Optical design of light guide prisms with surface roughness for automotive tail lights, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(9), 2393-2401. <https://doi.org/10.1177/0954407020907209>

- Haitz, R. H., Craford, M. G. ve Weissman, R. H. (1995). Hewlett-Packard Co., “light emitting diodes”. M.I Bass, E. W. Van Stryland, D. R. Williams ve W. L. Wolfe (Ed.), *Handbook of Optics I-Fundamentals, Techniques&Design* içinde (2. Baskı, s 12). McGraw-Hill Inc.
- Ireson, N. (2012). 2013 BMW X1 U.S. Debut: New York Auto Show Preview. *Motor Authority*. [https://www.motorauthority.com/news/1074820\\_2013-bmw-x1-u-s-debut-new-york-auto-show-preview](https://www.motorauthority.com/news/1074820_2013-bmw-x1-u-s-debut-new-york-auto-show-preview)
- Koshel R. J. ve Gupta, A. (2005). Characterization of lightpipes for efficient transfer of light. R. Winston ve R. J. Koshel (Ed.), *Nonimaging optics and efficient illumination system design II* içinde (s. 39-50). Proc. SPIE 5942, 39-50.
- Koshel, R. J. (2006). “Optimization of parameterized lightpipes”, geometrical optics, optical design, illumination. *Optical Society of America*, 150, 2950.
- Koshel, R. J. (2013). *Illumination engineering, design with nonimaging optics*. John Wiley & Sons New Jersey.
- National Research Council (1998). *Harnessing light: Optical science and engineering for the 21<sup>th</sup> century*. National Academic Press.
- Osram (2019a). *Lightguide application notes*. Opto Semiconductors.
- Osram (2019b). Power SIDELED®, LA B6SP. [https://www.osram.com/os/ecat/Power%20SIDELED%C2%AE%20LA%20B6SP/com/en/class\\_pim\\_web\\_catalog\\_103489/global/prd\\_pim\\_device\\_2190898/](https://www.osram.com/os/ecat/Power%20SIDELED%C2%AE%20LA%20B6SP/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190898/)
- Osram (2023). OSRON® Black Flat, LUW H9QP. [https://www.osram.com/os/ecat/OSRON%C2%AE%20Black%20Flat%20LUW%20H9QP/com/en/class\\_pim\\_web\\_catalog\\_103489/global/prd\\_pim\\_device\\_2190819/](https://www.osram.com/os/ecat/OSRON%C2%AE%20Black%20Flat%20LUW%20H9QP/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190819/)
- Osram (t.y.). OSRAM Advanced Power TOPLED®, LA G6SP. [https://www.osram.com/ecat/Advanced%20Power%20TOPLED%C2%AE%20LA%20G6SP/com/en/class\\_pim\\_web\\_catalog\\_103489/prd\\_pim\\_device\\_2190608/](https://www.osram.com/ecat/Advanced%20Power%20TOPLED%C2%AE%20LA%20G6SP/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2190608/)
- Otomobilin Tarihi (2023). *Vikipedi*. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Otomobilin\\_tarihi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Otomobilin_tarihi)
- Otomotiv Sanayi Derneği (2016). *Automotive industry monthly report*. <https://www.osd.org.tr/saved-files/PDF/2022/02/02/2016%20OSD%20De%C4%9Ferlendirme%20Raporu.pdf>
- Remillard, J. T. Everson, M. P. ve Weber W. H. (1992). Loss mechanisms in optical light pipes.
- SI Units Explained (t.y.). Luminous Intensity <https://www.si-units-explained.info/luminosity/#.ZDk0zc5ByUk>

- Teijido, J. M. (2000). *Conception and design of illumination light pipes* [Yayımlanmamış doktora tezi]. Université de Neuchâtel.
- The Car Spy (2011). 2010 BMW X1 sDrive 2.0d SE. *Wikimedia*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2010\\_BMW\\_X1\\_sDrive\\_2.0d\\_SE\\_-\\_Flickr\\_-\\_The\\_Car\\_Spy\\_%2826%29.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2010_BMW_X1_sDrive_2.0d_SE_-_Flickr_-_The_Car_Spy_%2826%29.jpg)
- The Refrofit Source (2021). The history of automotive headlights. *TRS*. <https://blog.theretrofitsource.com/the-history-of-automotive-headlights-retrofit-source>
- Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı (2021). *Trafik kazaları özeti*. Kara Yolları Genel Müdürlüğü. <https://www.kgm.gov.tr/sitecollectiondocuments/kgmdocuments/trafik/trafikkazalariozeti2020.pdf>
- United Nations Economic Commission for Europe (2004). *Regülasyonları, lighting and light-signalling devices*. United Nations Agreement ECE48.
- United Nations Economic Commission for Europe (2012). Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R007r6e.pdf> ,
- United Nations Economic Commission for Europe (2013). Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R087r3e.pdf>
- United Nations Economic Commission for Europe (2015). Uniform provisions concerning the approval of light emitting diode (LED) light sources for use in approved lamp units on power-driven vehicles and their trailers. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R128e.pdf>
- United Nations Economic Commission for Europe (2020). Concerning the adoption of harmonized technical united nations regulations for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these United Nations Regulations. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2020/R007r7e.pdf>
- United Nations Economic Commission for Europe (2020). <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2020/R007r7e.pdf>
- United Nations Economic Commission for Europe (t.y.). WP.29 introduction. <https://unece.org/wp29-introduction>

- Wördenweber, B., Wallaschek, J., Boyce, P. ve Hoffman, D. (2007). *Automotive Lighting & Human vision*. Springer Berlin Heidelberg.
- Yu, Y. C., Chen, J. H. ve Liu, S. C. (2013). *Design of LED edge-lit light bar for automotive taillight applications*. Proc. SPIE.
- Yu, Y. C., Chen, Z. Y. ve Kao, B. D. (2014). Optical design and optimization of planar curved LED end-lit light bar. *Applied Optics*, 53, 67-75.

## TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

Bu doktora tez çalışması, Uludağ Üniversitesi yürütücülüğünde ve Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.Ş. Ar-Ge Merkezi işbirliği ile 2013 1. dönem 0143.STZ.2013-1 kod numaralı San-Tez projesi olarak T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenmiştir.

Güney, E., Alper, M. ve Hacıismailoğlu, M. (2020). Optical design of light guide prisms with surface roughness for automotive tail lights, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(9), 2393-2401. <https://doi.org/10.1177/0954407020907209>

Güney, E., Alper, M., Hacıismailoğlu, M., Işık, M. ve Turşucular, E. (2013). Otomotiv Dış Aydınlatma Sistemleri İçin Işık Tüpü Optik Tasarımı ve Prototip İmalatı. *Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Günleri*, Bursa, Türkiye.

Güney, E., Alper, M., Hacıismailoğlu, M., Işık, M. ve Turşucular, E. (2014). Taşıt Arka Pozisyon Lambaları İçin Çubuk Şeklindeki Işık Tüplerinin Tasarımı ve İmalatı. *Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Günleri*, Bursa, Türkiye.

Güney, E., Alper, M., Hacıismailoğlu, M. ve Işık, M.(2016). Otomotiv Dış Aydınlatmasında Halka Şeklinde Kesite Sahip Işık Tüplerinin Tasarım ve İmalatı. *Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Günleri*, Bursa, Türkiye.

Güney, E., Alper, M., Hacıismailoğlu, M., Işık, M. ve Turşucular, E. (2015). Otomotiv Dış Aydınlatma Sistemleri İçin Işık Tüplerinin Optik Tasarımı ve Prototip İmalatı. *10. Ulusal Aydınlatma Kongresi*, İstanbul, Türkiye.

Güney, E., Alper, M. ve Hacıismailoğlu, M. ve Işık, M. (2017). Otomotiv Dış Aydınlatma Sistemleri İçin Çubuk Şeklinde Işık Tüplerinin Optik Tasarımı ve Prototip İmalatı. *FOTONİK 2017, 19. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*, İstanbul, Türkiye.

Güney, E., Alper, M. ve Hacıismailoğlu, M. (2017). Optical Design of Planar Curved Light Bar Prisms for Automotive Tail Lights. *International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN)*, Antalya, Türkiye.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Elif GÜNEY  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 13/03/1986  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Nilüfer Milli Piyango Anadolu Lisesi- Bursa  
Fen Bilimleri / (2000-2004)  
Üniversite : Ege Üniversitesi – İzmir  
Fizik / (2004-2009)  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi – Bursa  
Katıhal Fizigi / (2009-2011)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Odelo Otomotiv Aydınlatma Sistemleri A.Ş. / 2011-2022  
Odelo - Bulgaria./ 2022-

İletişim (e-posta) : el\_if\_senturk@hotmail.com

### Yayımları:

San-Tez Projesi: Otomotiv Dış Aydınlatma Sistemleri İçin Farklı Geometrilere ve Homojen Işık Dağılımına Sahip Işık Tüpünün Optik Tasarımı ve Prototip İmalatı, 0143.STZ.2013-1

Güney, E., Alper, M. ve Hacıismailoğlu, M. (2020). Optical design of light guide prisms with surface roughness for automotive tail lights, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(9), 2393-2401. <https://doi.org/10.1177/0954407020907209>

Güney, E., Alper, M., Hacıismailoğlu, M., Işık, M. ve Turşucular, E. (2013). Otomotiv Dış Aydınlatma Sistemleri İçin Işık Tüpü Optik Tasarımı ve Prototip İmalatı. *Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Günleri*, Bursa, Türkiye.

Güney, E., Alper, M., Hacıismailoğlu, M., Işık, M. ve Turşucular, E. (2014). Taşıt Arka Pozisyon Lambaları İçin Çubuk Şeklindeki Işık Tüplerinin Tasarımı ve İmalatı. *Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Günleri*, Bursa, Türkiye.

Güney, E., Alper, M., Hacıismailoğlu, M. ve Işık, M.(2016). Otomotiv Dış Aydınlatmasında Halka Şeklinde Kesite Sahip Işık Tüplerinin Tasarım ve İmalatı. *Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Günleri*, Bursa, Türkiye.

Güney, E., Alper, M., Hacıismailoğlu, M., Işık, M. ve Turşucular, E. (2015). Otomotiv Dış Aydınlatma Sistemleri İçin Işık Tüplerinin Optik Tasarımı ve Prototip İmalatı. *10. Ulusal Aydınlatma Kongresi*, İstanbul, Türkiye.

Güney, E., Alper, M. ve Hacıismailoğlu, M. ve Işık, M. (2017). Otomotiv Dış Aydınlatma Sistemleri İçin ubuk Şeklinde Işık Tüplerinin Optik Tasarımı ve Prototip İmalatı. *FOTONİK 2017, 19. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik alıştayı*, İstanbul, Türkiye.

Güney, E., Alper, M. ve Hacıismailoğlu, M. (2017). Optical Design of Planar Curved Light Bar Prisms for Automotive Tail Lights. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN), Antalya, Türkiye.

Patent: TR2016/17524 ‘‘Optical concept for light guide out coupling area that prevent dark areas and enable homogeneity’’