



The optical design of a COB LED road lighting fixture model developed for M1 and M2 lighting class roads

Duygu Yiğit Ünlü^{1*}, Necmettin Şahin²

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Aksaray University, 68100, Aksaray, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty Engineering, Aksaray University, 68100, Aksaray, Türkiye

Highlights:

- LED lighting fixture for M1 and M2 class roads
- Optical design of COB LED road lighting fixture
- Development of COB LED+lens module in accordance with international road lighting standards

Keywords:

- Road lighting
- COB LED
- Optical Design
- LightTools
- DIALux.

Article Info:

Research Article

Received: 01.04.2021

Accepted: 24.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.907731

Acknowledgement:

This project is supported by the Scientific and Technological Research Council of TURKEY (TÜBİTAK) in TEYDEB1501 program with the grant number 5160068

Correspondence:

Author: Duygu Yiğit Ünlü
e-mail: dyunlu68@gmail.com
phone: +90 555 289 7230

Graphical/Tabular Abstract

Figure A shows how the extension of the ray emitted from an LED light source and parallel to the principal axis of a concave lens passes through the focal point (f) and then follows. This phenomenon is known as diffraction of light.

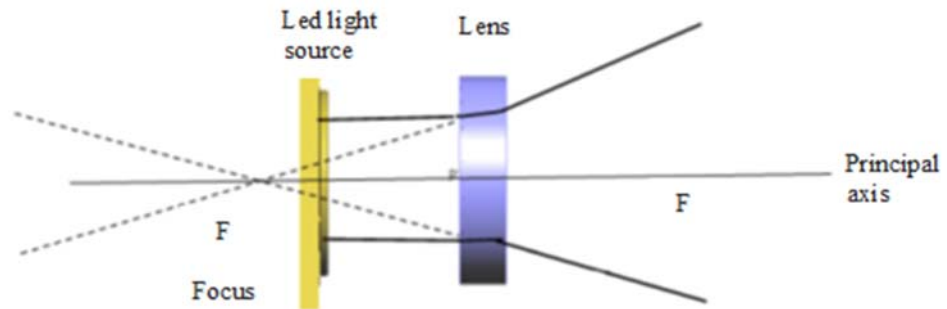


Figure A. Diffraction of light in a concave lens

Purpose: The purpose of this study; optical design and analysis of a COB LED road lighting fixture model suitable for M1 and M2 lighting class roads.

Theory and Methods:

One of the most important and critical parts of luminaire design is the optical design process. With a well-designed optical design, the rays emanating from the light source can be fine controlled. Optical systems are arranged in multiple layers to ensure sufficient brightness and luminous integrity in the event of a possible LED failure. In this study, a spherical concave-convex lens compatible with COB LED was designed to transmit the rays emitted from the light source to the desired area without loss and to keep the efficiency of the rays at the maximum level. In the LightTools program, the lens and the LED were combined at three different distances and three different luminaire models were developed. It was carried out the simulation studies on these models and light distribution curves were obtained. The light distribution curves which were obtained transferred to the lighting calculation program. Design verification studies have been carried out in the lighting calculation program.

Results:

In the study, the light distribution curves belonging to three different luminaire models were transferred to the DIALux lighting calculation program. Lighting parameters of light distribution curves were simulated according to M1 and M2 road conditions in the DIALux lighting calculator program and design verification studies were carried out. During the optimization phase, COB LED and lens distance of the luminaire model optimized which was developed considering compliance with M1 and M2 road lighting criteria. When the DIALux results of the study were examined, it was seen that the developed luminaire model within the scope of this study met the M1 and M2 road lighting criteria. As a result, with this study, the optical design and design verification of a completely original COB LED road lighting fixture model for the solution of a lighting problem needed in our country have been successfully completed.

Conclusion:

The luminaire designed by using a concave-convex spherical lens and a COB LED suitable for the lens, ensures that the rays emanating from the light source are transmitted to the desired area with minimal loss. In this way high energy efficient and original model has been developed that can better meet the lighting needs.



M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için geliştirilen bir COB LED'li yol aydınlatma armatür modelinin optik tasarımı

Duygu Yiğit Ünlü^{1*}, Necmettin Şahin²

¹Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, 68100, Aksaray, Türkiye

²Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- M1 ve M2 sınıfı yollar için LED'li aydınlatma araçları
- COB LED'li yol aydınlatma armatürünün optik tasarımı
- Uluslararası yol aydınlatma standartlarına uygun COB LED+lens modülünün geliştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.04.2021

Kabul: 27.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.907731

Anahtar Kelimeler:

Yol aydınlatması,

COB LED,

optik tasarım,

lighttools,

DIALux

ÖZ

Bu çalışmada M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için uygun bir COB LED (Chip on Board)'li yol aydınlatma armatür modelinin optik tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında, ışık kaynağı olarak Cree-XLamp-CXA1830 LED tercih edilmiştir. Seçilen COB LED ile uyumlu konkav-konveks küresel lensin 3D katı modeli, Zemax optik tasarım yazılımı vasıtasıyla modellenerek simüle edilmiş ve SolidWorks 3D tasarım yazılımında oluşturulmuştur. COB LED ve lens mesafesi Monte Carlo ışın izleme yöntemi (Monte Carlo Ray-Tracing Method) ile LightTools aydınlatma tasarımı yazılımı kullanılarak optimize edilmiştir. LightTools yazılımı vasıtasıyla, COB LED modülleri ve 20 modüllü COB LED'li armatür modelleri için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilerek, ışık dağılım eğrileri ve fotometrik veri dosyaları (IES, LDT) elde edilmiştir. Elde edilen fotometrik veri dosyaları kullanılarak, DIALux aydınlatma hesap ve simülasyon yazılımı vasıtasıyla, M1 ve M2 sınıfı yol şartları için aydınlatma analizi gerçekleştirilmiştir. DIALux analizinden elde edilen yol aydınlatma parametreleri Uluslar Arası Aydınlatma Örgütü'nün (CIE) kabul ettiği yol aydınlatma kriterleri ile karşılaştırılarak armatür modellerinin uygunluğu değerlendirilmiştir. Bu çalışmada tasarımı yapılan COB LED'li armatür modelinin CIE tarafından tanımlanan M1 ve M2 sınıfı yol aydınlatma kriterlerini sağladığı görülmüştür. Çalışmada ayrıca, M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfı kriterlerine uygun COB LED'li, özgün ve yüksek verimli bir armatür modelinin optik tasarım aşaması başarıyla tamamlanmıştır.

The optical design of a COB LED road lighting fixture model developed for M1 and M2 lighting class roads

H I G H L I G H T S

- LED lighting fixture for M1 and M2 class roads
- Optical design of COB LED road lighting fixture
- Development of COB LED+lens module in accordance with international road lighting standards

Article Info

Research Article

Received: 01.04.2021

Accepted: 24.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.907731

Keywords:

Road lighting,

COB LED,

optical design,

lighttools,

DIALux

ABSTRACT

In this study, the optical design and analysis of a road lighting fixture model with COB LED suitable for M1 and M2 lighting class roads was carried out. In the design phase, Cree-XLamp-CXA1830 LED was preferred as the light source. The 3D solid model of the concave-convex spherical lens compatible with the selected COB LED was modeled and simulated by Zemax optical design software and created in SolidWorks 3D design software. The COB LED and lens distance are optimized in LightTools lighting design software using the Monte Carlo ray tracing method (Monte Carlo Ray-Tracing Method). Light distribution curves and photometric data files (IES, LDT) were obtained by performing simulation studies for COB LED modules and fixture models with 20-module COB LEDs through LightTools software. Using the obtained photometric data files, lighting analysis was performed for M1 and M2 class road conditions by means of DIALux lighting calculation and simulation software. The suitability of the luminaire models was evaluated by comparing the road lighting parameters obtained from the DIALux analysis with the road lighting criteria accepted by the International Lighting Organization (CIE). In this study, it has been observed that the designed COB LED luminaire model meets the M1 and M2 class road lighting criteria defined by CIE. In the study, the optical design phase of a original and highly efficient luminaire model with COB LED in accordance with M1 and M2 road lighting class criteria has been successfully completed.

1. Giriş (Introduction)

Yol aydınlatmasının amacı hiç kimsenin konforunu bozmadan yol üzerindeki insanları, araçları ve nesnelere görünür kılmaktır [1]. Yol aydınlatması görsel performans ve görsel rahatlık sağlamalı ve sürücüyü uyanık tutmaya yardımcı olmalıdır. Yol aydınlatması, yol kullanıcılarının engelleri gözlemlemesi, ileriyi öngörmesi ve kazalardan kaçınması için son derecede önemlidir [2]. Yol aydınlatmasının kalitesi kaza sayısının azalmasını da beraberinde getirmektedir [3, 4]. Günümüzde yol aydınlatması; metal halojen lambalar (MH), yüksek basınçlı sodyum lambalar (YBS) ve LED lambalar gibi yüksek yoğunluklu deşarj lambalara dayalı olarak gerçekleştirilmektedir [5]. Bununla birlikte dayanıklılığı ve uzun ömürlü yapısı nedeniyle müzelerin, hastanelerin, konutların, ofis binalarının ve tunellerin fonksiyonel aydınlatmasında fiber optik aydınlatma teknolojileri de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [6]. Ancak, aydınlatma gereksinimlerini karşılama için yeterli parlaklığa sahip olmaması [7] ve yüksek maliyetleri nedeniyle genellikle dekoratif aydınlatma alanında kendini göstermiştir [8]. Bu yönüyle fiber optik aydınlatma araçlarının yol aydınlatmasında tercih edilen bir yöntem olmadığı görülmektedir.

Son yıllarda LED teknolojiyi yol aydınlatmasında önemli gelişmeler yaşanmış ve yol aydınlatma teknolojilerinde yeni özelliklere sahip LED'li armatürlere geçiş yapılmaktadır [9-11]. LED'li yol aydınlatma çözümleri konvansiyonel aydınlatmada mümkün olmayan; yüksek enerji verimliliği, aydınlatma kalitesi, dayanıklılık, estetik olma, düşük kullanım maliyeti, çevresel duyarlılık, güvenlik ve yaşanabilir şehirler oluşturmada önemli avantajlar sağlamaktadır [12, 13]. Bu özellikler LED'li tasarımların geleneksel aydınlatma ekipmanlarına göre daha kabul edilebilir olmasını sağlamıştır [14]. LED armatürler, sensörler ve kontrol algoritmalarıyla akıllı aydınlatma çözümleri sağlamaktadırlar [15]. Bu sayede hava, yol ve trafik koşullarına göre sürücülerin görüşünü olumsuz etkilemeden ışık çıkışı ayarlanabilmekte, ekonomik enerji tüketimi sağlanabilmekte ve yol aydınlatma maliyetleri de önemli ölçüde azaltılabilmektedir [16].

Yol aydınlatmalarında kullanılacak LED'lerin tasarım kriterlerinin belirlenmesinde Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE)'nin önerileri ve Avrupa Birliği Standartları (CEN) esas alınmaktadır [17]. LED'li yol aydınlatma araçlarının, aydınlatma sınıflarının belirlendiği EN 13201-1, performans özelliklerini içeren EN 13201-2, performans hesaplamalarını içeren EN 13201-3 ve aydınlatma performansını ölçme metodlarını içeren EN 13201-4 standart özelliklerini sağlaması gerekmektedir [14]. Bu standartlar yoldan geçen araç sayısı, kavşak-yonca benzeri yol ayırıcı sıklıkları, suç oranları, park etmiş araçlar ve yol sınıfı gibi parametreler dikkate alınarak belirlenmektedir [18]. Güvenli ve konforlu bir yol aydınlatması için yollar M1 ve M6 arasında değişen altı farklı aydınlatma sınıfında ele alınmaktadır. Her bir aydınlatma sınıfının da sağlaması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri bulunmaktadır. Bu sınıfların belirlenmesinde yolun bulunduğu mahal, yolun geometrisi, farklı seviyelerdeki sürüş hızları, trafik yoğunluğu, şerit sayısı, çevresel şartlar, hava koşulları, yol yüzeyi türü gibi bir dizi tanımlayıcı özellik dikkate alınmaktadır [19]. M1 ve M2 aydınlatma sınıfları, M sınıfı yollar içerisinde en yüksek önem derecesine sahip olan yollardır. Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ) tarafından en son yayınlanan "LED'li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar" da M aydınlatma sınıflarına ait aydınlatma kriterleri belirtilmiştir [20]. Yol aydınlatma amaçlı kullanılacak olan armatürlerin bu "Usul ve Esaslar" ile birlikte "LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesine "TEDAŞ-MLZ/2010-057.D" uygunluğu da önem arz etmektedir [21]. LED'li yol aydınlatma araçlarının tasarımında aydınlatma parametresi olarak; yolun ortalama parlaklığı (L_o), ortalama parlaklık düzgünlüğü (U_o), boyuna parlaklık düzgünlüğü (U_l), bağlı ışık artışı (F_{TI})

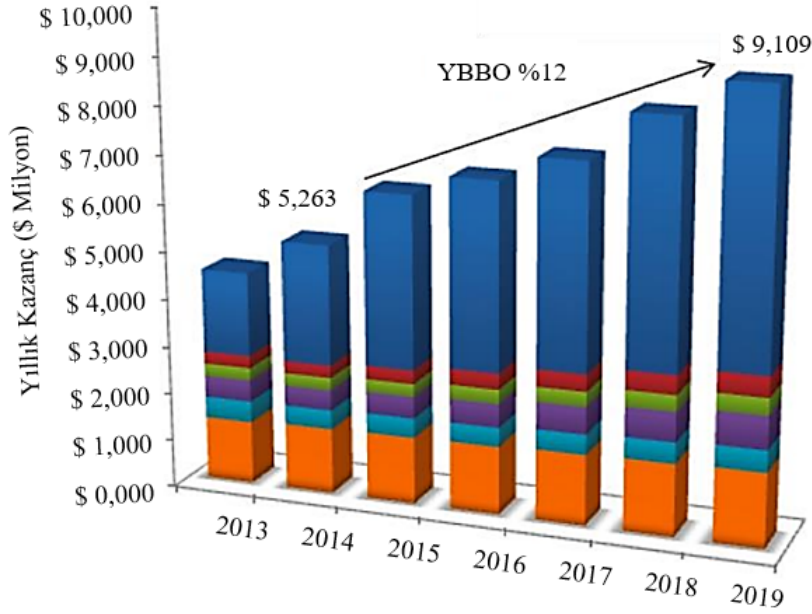
ve kenar aydınlık düzeyi oranı-çevreleme oranı (R_{EI}) kullanılmaktadır [22]. LED'lerin yol aydınlatmalarında yaygın ve sorunsuz olarak kullanılabilmesi için, daha yüksek etkinlik faktörlerine sahip olmaları ve gerekli aydınlatma kriterlerini sağlamaları gerekmektedir. TEDAŞ tarafından yayınlanan "LED'li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar" da, M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfları için, bu parametrelere ilişkin sağlanması gereken yol aydınlatma kriterleri [17]; M1 sınıfı yollar için; $L_o \geq 2.0$, $U_o \geq 0.4$, $U_l \geq 0.7$, $F_{TI} (\%) \leq 10$, $R_{EI} \geq 0.3$; M2 sınıfı yollar için; $L_o \geq 1.5$, $U_o \geq 0.4$, $U_l \geq 0.7$, $F_{TI} (\%) \leq 10$, $R_{EI} \geq 0.35$ olarak belirtilmiştir.

LED'li yol aydınlatma araçlarının giderek yaygınlaşması M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için enerji verimli ve CIE'nin aydınlatma gereksinimlerini karşılayabilen LED armatürleri tasarlamayı da acil ve önemli kılmıştır [23,24]. LED'ler ancak iyi tasarlandığında verimli birer ışık kaynağıdır, kötü tasarım veya kalitesiz malzeme ile üretildiğinde LED'lerden beklenen olumlu etkileri görmek neredeyse imkansız olmaktadır [25, 26]. LED'li yol aydınlatma armatürleri ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle termal [27] ve optik tasarım problemlerinin ön plana çıktığı belirtilmiştir [28, 29].

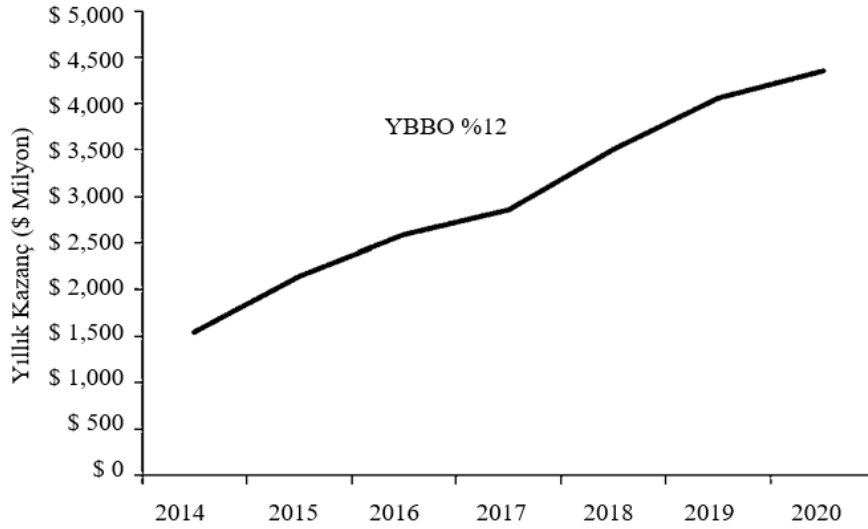
LED'lerden gelen ışık, farklı optik yöntemlerle şekillendirilebilir ve yola yansıtılabilir [30]. LED ışık kaynağı, amaca uygun ideal bir ışık dağılımı elde edebilmek için ekstra bir optik yapıya ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle LED'li armatür tasarımında optik analizler, aydınlatma kalite kriterlerini sağlama bakımından tasarımın en önemli bölümünü oluşturmaktadır. Optik yapının uygun ve elverişli tasarımı sayesinde maliyet etkin, enerji tasarruflu ve kaliteli aydınlatma sağlayan LED'li armatürlerin elde edilmesi mümkün olacaktır [28, 31]. Ancak, LED'lerin tek çipli diyotlarının düşük gücü ve buna bağlı olarak ışık akısının düşük değere sahip olması LED'lerin uygulamalarda kullanımıyla ilgili sınırlılıklar oluşturmaktadır. Bu soruna çözüm olarak yeni bir teknoloji olan COB LED'lerin (Chip on Board) tasarımı dikkat çekmektedir. COB LED'lerin çok çipli yapıları sayesinde küçük bir yüzey üzerine birden çok LED çipi yerleştirmek mümkündür. COB teknolojisine dayalı çözümler ile 10.000 lm'in üzerinde ışık çıkışı elde etmek mümkün olmuştur [32].

LED'li aydınlatma araçlarının optik tasarımında power LED'ler yerine her geçen gün artan ışık verimi, mekanik tasarım basitliği ve maliyet avantajı açısından COB LED esaslı armatürler ön plana çıkmaktadır [30]. Literatürde power LED'li yol aydınlatma armatürlerine ilişkin lens tasarımı ve analizine yönelik oldukça fazla çalışma bulunmaktadır [33-36]. Ancak COB LED'li yol aydınlatma armatürlerinin optik tasarımına yönelik çalışmaların ise literatürde son yıllarda yer almaya başladığı görülmektedir [37-39]. Ayrıca konu ile ilgili yapılan literatür taramasında M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için COB LED'li yol aydınlatma armatürlerinin optik tasarımına yönelik çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada tasarımı yapılan yol aydınlatma armatüründe ışık kaynağı olarak, literatürdeki ve piyasadaki mevcut benzerlerinden farklı şekilde, yüksek güçlerinden faydalanmak amacıyla COB LED tercih edilmiştir. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak, özellikle yüksek güç gerektiren yol aydınlatması, hava alanı aydınlatması ve spor sahalarının aydınlatılması gibi alanlarda, COB LED'in daha fazla tercih edileceği öngörülmektedir. Dünya LED aydınlatma pazar durumuna ilişkin yapılan bir çalışmada "Bileşik Yıllık Büyüme Oranının - YBBO" (CAGR: Compound Annual Growth Rate) genel LED pazarı için %12, COB LED pazarı için %15 olarak gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 1, Şekil 2). Bu araştırma COB LED üretimini ve kullanımının diğer LED'lere oranla daha hızlı arttığını göstermektedir [40].

Yol aydınlatma armatüründe COB LED tercihi, diğer LED'li yol aydınlatma armatürlerinin optik yapılarından farklı şekilde, özgün



Şekil 1. Dünya genel LED pazarındaki değişim (The change in the global LED market) [40]



Şekil 2. Dünya COB LED pazarındaki değişim (The change in the global COB LED market) [40]

optik yapıların tasarımını zorunlu kılmaktadır. Yapılan çalışmada üretim maliyeti asgari boyutlarda tutularak yüksek enerji verimli bir armatür elde edebilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada imalat kolaylığı ve ekonomikliği sebebiyle tamamen özgün küresel (sferik) bir lensin optik tasarımı ve analizi yapılmıştır. Bu sebepten dolayı hali hazırda var olan COB LED'ler tercih edilmiştir. Çalışmanın özgünlüğü yeni bir COB LED'in tasarlanmasında ziyade buna uygun lens tasarımı ile sağlanmıştır. Bir başka ifade ile çalışmada Lens tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tasarlanan Lens'in COB LED'e uygunluğunun hesaplanması da çalışmanın bir başka özgün yanını oluşturmuştur. Optik tasarım çalışmaları günümüzde bilgisayar destekli yazılımlar ile gerçekleştirilmektedir. Optik tasarım ve analiz çalışmalarında, Monte Carlo ışın izleme yöntemi (Monte Carlo Ray Tracing Method) kullanan; Zemax, LightTools, SPEOS, ASAP, Lucidshape, TracePro, Photopia ve Optisworks gibi modelleme

yazılımları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, optik tasarım ve analiz için Zemax yazılımı ve fotometrik analiz için ise LightTools yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen COB LED uyumlu özgün lens ile M1-M2 aydınlatma sınıfı yollar için CIE ve TEDAŞ aydınlatma standartlarının sağlanabildiği doğrulanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

LED'li yol aydınlatma armatürü tasarımının ilk adımı ihtiyaç duyulan ışığı en verimli şekilde sağlayacak ışık kaynağının seçimidir. Bu çalışmada ışık kaynağı olarak Cree-XLamp-CXA1830 COB LED tercih edilmiştir. Seçilen COB LED ile uyumlu lensin tasarımı, tasarım aşamasının en önemli adımıdır. LED'li aydınlatma armatürlerinde lensin görevi, LED ışık kaynağından belirli açı ile gelen ışınların aydınlatılmak istenen bölgeye homojen ve kayıpsız bir

şekilde iletilmesini sağlamaktır. Bu durumda, armatür verimliliğini etkileyen en önemli faktörün bölge dışına saçılan ışıkların engellenerek aydınlatılmak istenilen bölgeye homojen bir şekilde yönlendirilmesi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla LED ışık kaynağından çıkan ışınların yüksek bir verimle aydınlatılacak bölgeye homojen bir şekilde iletilmesini sağlayacak lensin optik tasarımı faaliyeti armatür etkinlik faktörünü önemli derecede etkilemektedir. Lensin optik tasarımı faaliyetinin, yüksek enerji verimli armatür tasarımında, enerji tüketim maliyetini etkileyecek en önemli faktör olduğuna söylemek mümkündür.

Çalışmada, M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için uygun yüksek enerji verimli COB LED'li yol aydınlatma armatürünün optik tasarımı ve analizi yapılmıştır. Ayrıca, çalışmada ışık kaynağından çıkan ve istenilen bölgeye kayıpsız bir şekilde iletilmek istenen ışınların etkinliğini maksimum düzeyde tutabilmek için COB LED ile uyumlu küresel bir lens tasarlanmıştır. Seçilen COB LED ile uyumlu konkav-konveks küresel lensin 3D katı modeli, Zemax optik tasarım yazılımı vasıtasıyla modellenerek simüle edilmiş olup, SolidWorks 3D tasarım yazılımında oluşturulmuştur. LightTools aydınlatma tasarımı yazılımında 20 COB LED ve 20 lens, üç farklı mesafede (10-12-14 mm) birleştirilerek üç farklı 20'li COB LED modülü oluşturulmuştur. LED-lens arası uzaklık üç farklı konuma göre ayarlanmış ve bu mesafelerde modellerin verimi ölçülmüştür. Bu üç model her ne kadar birbirinin aynısı gibi görünsün de ışık dağılım sonuçlarına bakıldığında, LED ile mercek arası uzaklığın armatürün etkinliğinde önemli bir paya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Nitekim çalışma hazırlanırken yapılan analizlerde LED-mercek arası mesafe 9,7 mm'ye (10 mm'den küçük) ya da 14,2 mm'ye (14 mm'den büyük) ayarlandığında M1-M2 yolları için kriterlerin sağlanmadığı görülmüştür. Bu sebepten dolayı bu çalışmada LED-lens arasındaki mesafe kriter olarak alınmıştır. Sonuç olarak her biri 20 modülden oluşan üç farklı armatür modeli (Model-1, Model-2, Model-3) geliştirilmiştir. LightTools aydınlatma tasarımı yazılımında üç farklı model için gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile modül ve armatüre ait ışık dağılım eğrileri ve fotometrik dosyalar (IES, LDT) elde edilmiştir.

Elde edilen fotometrik veri dosyaları kullanılarak, DIALux aydınlatma hesap ve simülasyon yazılımı vasıtasıyla, M1 ve M2 sınıfı yol şartları için aydınlatma analizi gerçekleştirilerek tasarım doğrulama çalışmaları yapılmıştır. DIALux ücretsiz bir aydınlatma hesap programıdır ve bu çalışmada armatür sınıfı parametrelerinin (aydınlatma düzeneği, şerit sayısı, şerit genişliği, sarkma, direk boyu, direk açıklığı vb.) ve M1-M2 yol aydınlatma sınıfı kriterlerinin (L_0 ,

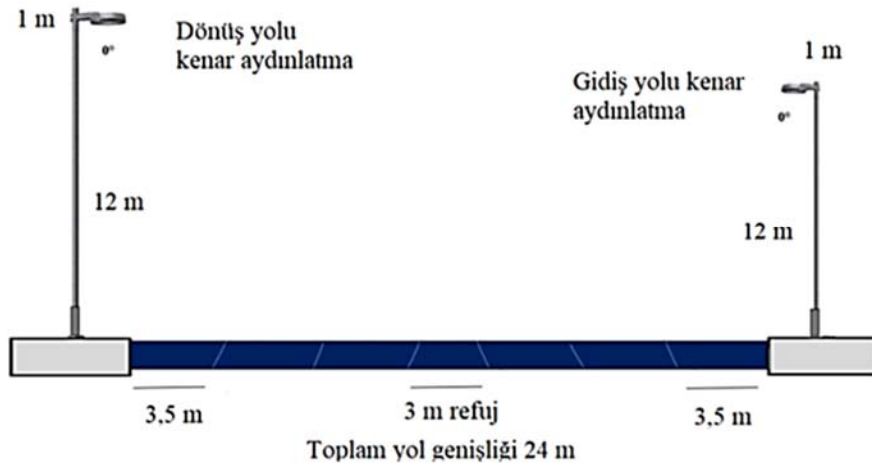
U_0 , U_1 , F_{T1} , R_{E1}) optimize edilerek tasarımın doğrulanması için kullanılmıştır. DIALux simülasyonlarında, TEDAŞ tarafından yayınlanan "LED'li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar" [20]'da tanımlanmış olan armatür sınıflarına (M1 için Sınıf-2, M2 için Sınıf-5) ait parametreler dikkate alınarak araştırmacılar tarafından Şekil 3'te gösterilen yol aydınlatma düzeneği çizilmiştir.

Şekil 3'teki düzeneğe göre M1 yol aydınlatma sınıfı için; 3 adet gidiş, 3 adet dönüş yolu olmak üzere 6 şeritli yol üzerinde simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Şerit genişliği 3,5 m, gidiş-dönüş yolları arasında 3 m genişliğinde refüj yapı ve yol kenarlarından karşılıklı kaydırılmış düzenek dikkate alınmıştır. Direkler arası mesafe 40 m, direk yükseklikleri 14 m, direk konsol boyu 1 m ve direk konsol açısı 0° seçilmiştir.

M2 yol aydınlatma sınıfı için; 3 adet gidiş, 3 adet dönüş yolu olmak üzere 6 şeritli yol üzerinde simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Şerit genişliği 3,5 m, gidiş-dönüş yolları arasında 3 m genişliğinde refüj yapı ve yol kenarlarından karşılıklı kaydırılmış düzenek dikkate alınmıştır. Direkler arası mesafe 40 m, direk yükseklikleri 12 m, direk konsol boyu 1 m ve direk konsol açısı 0° seçilmiştir.

2.1. Işık Kaynağının Seçimi (Choice of Light Source)

Enerji verimli armatür tasarımı çalışmasında armatür maliyeti, enerji verimliliği ve armatür etkinliği gibi faktörler dikkate alınmıştır. Işık kaynağı seçiminde temel kriter M1 ve M2 kategorisinde tanımlanan yol aydınlatma sınıflarına uygunluk olmakla birlikte, ışık kaynağının etkinlik faktörü en önemli unsurdur. Ayrıca seçilecek ışık kaynağı armatür maliyetini de en çok etkileyecek unsurlardan biridir. Bu sebeplerle bu çalışmada, son yıllarda kalite ve verimlilik açısından oldukça ilerleme kaydedilen COB LED tercih edilmiştir. COB LED'ler yüksek çip sayısı sebebiyle diğer LED'lere göre daha yüksek güçlere sahiptirler ve aynı zamanda maliyetleri yaklaşık olarak %30 daha düşüktür [41]. Bu çalışmada ışık kaynağı olarak Cree-XLamp-CXA1830 COB LED tercih edilmiştir. Hesaplama ve simülasyonlarda, TEDAŞ Teknik Şartnamesine uygunluk dikkate alınarak ($CCT=4.000\text{ K}$, $CRI \geq 70$, $Etkinlik > 125\text{ lm/W}$), seçilen COB LED'in U4 modeline ait verileri kullanılmıştır. Seçilen COB LED'in veri sayfası ve Tablo 1 incelendiğinde COB LED'in etkinlik faktörünün 135 lm/W üzerinde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda COB LED tercihi, yüksek güçlerinden dolayı daha az çevre elemanı (lens, holder vb.) gerektirmesi sebebiyle, armatür maliyeti üzerinde önemli avantaj sağlayacaktır. Cree-XLamp-CXA1830 COB LED'in veri sayfasında paylaşılan değerler incelendiğinde; 800 mA sürme



Şekil 3. M1-M2 yol aydınlatma sınıfları için dikkate alınan yol aydınlatma düzeneği
(The road lighting system considered for M1-M2 road lighting classes accordance with the standards) [20].

Tablo 1. COB LED'in teknik özellikleri (Technical parameters of LED) [42].

Özellikler	Birim	Minimum	Tipik	Maksimum
Görüş açısı	Derece		115	
Dayanım gerilimi	V			8000
DC sürme akımı	mA			1400*
Ters akım	mA			0,1
Sürme voltajı (800 mA, 85 °C)	V		36,4	
Sürme voltaj (800 mA, 25 °C)	V			42

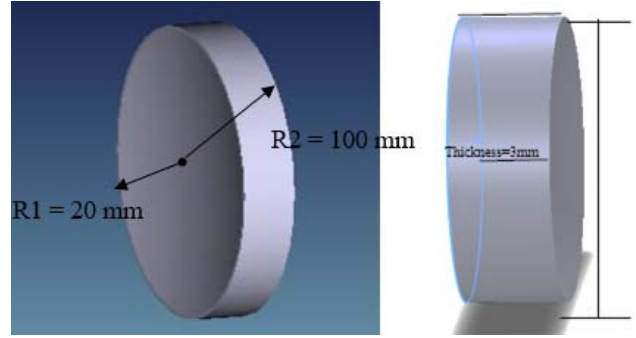
akımı, 85°C eklem sıcaklığında minimum 3.955 lm, maksimum 4.230 lm ışık akısı ve yaklaşık 135-145 lm/W etkinlik faktörü ile beklentileri karşılayacak düzeyde olduğu görülmüştür. COB LED'in maksimum sürme akımı 1.400 mA olup etkinlik faktörü hesabı 800 mA için yapılmıştır. Ayrıca lens tasarımında, bu COB LED'in 115°'lik görüş açısı dikkate alınmıştır. Tablo 1'de tasarımda kullanılan COB LED'e ait teknik özelliklere yer verilmiştir.

2.2. Lens Tasarımı (Lens Design)

LED'lerden gelen ışık, farklı optik yöntemlerle şekillendirilip yola yansıtılmaktadır. LED aydınlatma armatürleri üzerine yapılan son araştırmalar, yansıtıcı ve kırıcı görüntüleme dışı optiklere odaklanmıştır; bunlar serbest biçimli reflektörler, serbest biçimli lensler veya yansıtıcı-kırıcı kombinasyonları olabilmektedir [30].Yol aydınlatma kriterlerinin sağlanabilmesi için aydınlatma araçlarındaki optik malzemeler değiştirilebilmektedir. Bu çalışmada da sırasıyla reflektör+LED, lens+LED ve daha sonra freeform lens+LED modülü tasarlanarak M1 ve M2 sınıfı yolların aydınlatma kriterlerinin sağlanıp sağlanmadığına bakılmıştır. Ancak, tasarlanan bu modüllerin M1-M2 yol aydınlatma kriterlerini kısmen sağladığı ya da hiç sağlanmadığı görülmüştür. Son olarak çalışmada; yol aydınlatma kriterleri sağlamak amacıyla ekonomikliğı sebebiyle küresel konkav-konveks bir lens tasarımı yapılmıştır.

Lens tasarımında, ışık kaynağından belirli açılarda yayılan ışınların yol yüzeyine homojen ve kayıpsız bir şekilde yönlendirilmesi esas alınmıştır. Lens seçiminde yüksek güçlü ve verimli lenslerin tercih edilmesi son derece önemlidir. Aydınlatma uygulamalarında lens seçimi tamamen proje ihtiyaçlarına göre belirlenmektedir. Bu amaçla ilk olarak, seçilen COB LED'in ışın açısı ve armatür sınıfı parametreleri dikkate alınarak lensten beklenen amaç tespit edilmiştir. Bu amaca uygun olarak, seçilen COB LED için ışın açısı 115° ve Sınıf-2/Sınıf-5 armatür sınıfı parametreleri (şerit sayısı 2x3, şerit genişliği 3,5 m, sarkma 1 m, direk boyu 12-14 m, refüj genişliği 3 m, ve direk açıklığı 40 m) dikkate alınarak, SolidWorks yazılımında manuel olarak gerçekleştirilen ışın izleme yöntemiyle yaklaşık +45°'lik görüş açısı sağlayan küresel konveks lens çiftinin istenilen görevi yerine getirebileceği görülmüştür. Armatürün gücünü ve verimini artırabilmek için iki özdeş küresel konveks lens birleştirilmiştir. Bu yolla ilk olarak (radyus) $R_1 = 65$ mm, $R_2 = 100$ mm, ikinci olarak $R_1 = 40$ mm, $R_2 = 100$ mm, ve daha sonra $R_1 = 30$ mm, $R_2 = 100$ mm boyutlarında çalışma yapılmıştır. Son olarak $R_1 = 20$ mm, $R_2 = 100$ mm radyusları ile daha iyi sonuç elde edilmiş ve $R_1 = 20$ mm, $R_2 = 100$ mm olan konveks-konkav-konveks lens tasarlanmıştır. Yapılan bu son tasarım ile en ideal sonuca ulaşılmıştır. Sonuç olarak R_1 azaltılarak (65, 40, 30, 20) güç artırılmıştır. Işık kaynağından gelen ışınları +45° görüş açısı ile yol yüzeyine yönlendirecek lensin boyutları, Zemax optik tasarım yazılımı kullanılarak, odak uzaklığı 300 mm, birinci radyus $R_1 = 20$ mm, ikinci radyus $R_2 = 100$ mm, kalınlık 3-4 mm, çapı 18 mm olacak şekilde doğrulanmıştır. SolidWorks 3D tasarım yazılımı kullanılarak; 300 mm odak uzaklığında, radyusları yaklaşık $R_1 = 20$ mm ve $R_2 = 100$ mm olan, 3-4 mm kalınlığında, çapı 18 mm olan, PC malzemeden oluşan ve 160°'lik görüş açısı sağlayan "konkav-konveks" küresel bir lense ait 3D katı model çizilmiştir (Şekil 4).

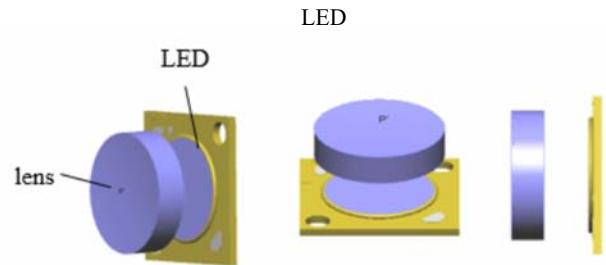
1606



Şekil 4. SolidWorks yazılımında oluşturulan lensin katı modeli (Solid model of the lens created in SolidWorks software).

2.3. Aydınlatma Tasarımı ve Analizi (Illumination Design and Analysis)

Aydınlatma tasarım ve analiz çalışmalarında LightTools aydınlatma tasarımı yazılımı kullanılmıştır. LightTools aydınlatma tasarımı yazılımında, COB LED ile lens üç farklı mesafede birleştirilerek, COB LED+lens modülleri ve 20 adet COB LED+lens modülü birleştirilerek yol aydınlatma armatürü modeli oluşturulmuştur. COB LED ve lens mesafesi Monte Carlo ışın izleme yöntemi (Monte Carlo Ray-Tracing Method) ile LightTools aydınlatma tasarımı yazılımı kullanılarak optimize edilmiştir. LightTools aydınlatma tasarımı yazılımında COB LED ile lens arası mesafeler değiştirilerek gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile modül ve armatür modellerine ait ışık dağılım eğrileri ve fotometrik veri dosyaları (IES, LDT) elde edilmiştir. Elde edilen fotometrik veri dosyaları DIALux aydınlatma hesap programına aktarılarak tasarım doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Koordinattaki küçük bir kayma ışınların istenmeyen ortama gitmesine sebep olmakta ve bu durum armatür verimliliğinde azalmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle COB LED modülü LightTools programı üzerine aktarıldığında uygun koordinatlarla yerleştirilerek simüle edilmiştir. Şekil 5'te bir adet COB LED+lens modülüne ait görüntülere yer verilmiştir.



Şekil 5. COB LED modülüne ait yan yüzey görüntüleri (Side view of the COB LED module).

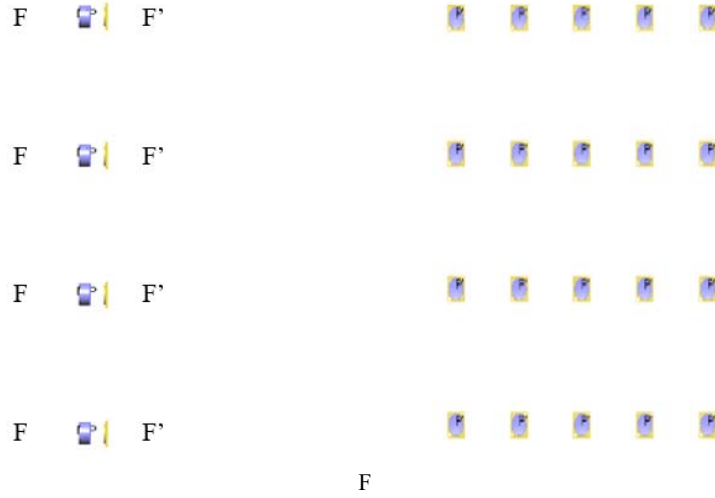
LightTools yazılım programının sağladığı kolaylıklardan birisi de lens, LED ve diğer optik elemanları istenen boyutlarda büyütme, küçültme, taşıma, çoğaltma gibi işlemlere olanak tanınmasıdır.

Çoğaltma işlemi yardımıyla bir adet COB LED+lens modülü kopyalanarak çoğaltılmış ve 20 adet COB LED+lens modülü uygun koordinatlara yerleştirilerek armatür simüle edilmiştir (Şekil 6). Simülasyon çalışmalarında, aydınlatılmak istenilen bölge içerisinde, daha yüksek ışık akısı, homojen, verimli ve yüksek kalitede aydınlatma elde edilmesi amaçlanmıştır.

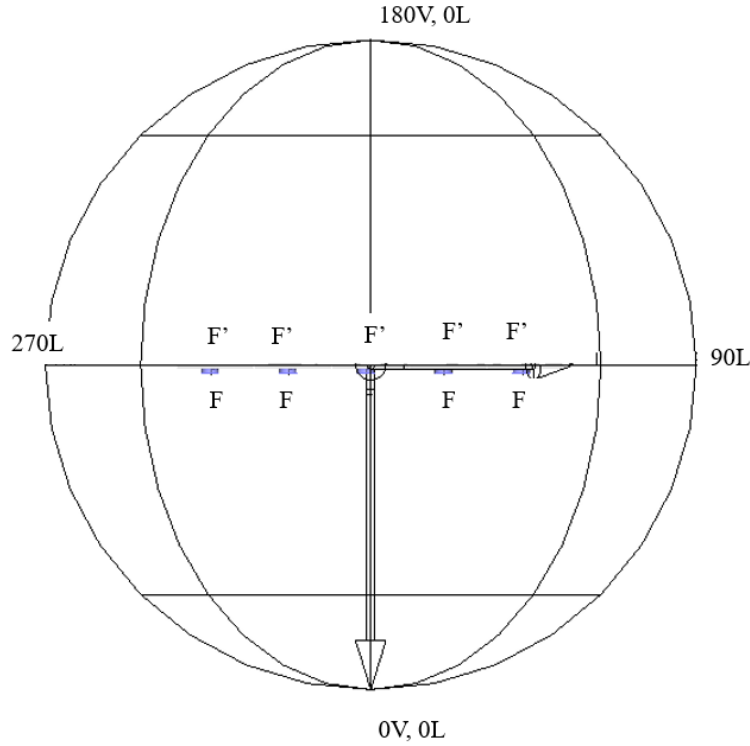
Armatürden sonsuz uzaya yayılan ışık ışınlarını toplamak için 'farfield receiver' (uzak alan alıcısı) kullanılmıştır. Farfield receiver'ın yönü 0V,0L düzlemi -y yönünde ve 90V,0L düzlemi +z yönünde olacak şekilde koordine edilmiştir (Şekil 7). Bir LED ışık kaynağından yayılan ve konkav bir lensin asal eksenine paralel gelen ışının uzantısının odak (f) noktasından geçişi ve sonrasında nasıl bir

yol izlediği Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu olay ışığın kırınımı olarak bilinmektedir.

Şekil 9'da armatür ile yaklaşık 2.500.000 ışınla gerçekleştirilen ışığın kırınım olayına ilişkin önizleme gösterilmiştir. Armatürden yayılan ışıkların yol üzerinde oluşturduğu ışık dağılımına ait aydınlatma sınıfı, aydınlatma düzeyi, parlıltı, kamaşma, ışık şiddeti, ışık akısı gibi aydınlatma parametre değerlerinin ölçülmesi için DIALux aydınlatma hesap programı kullanılmıştır. Geliştirilen armatür modelinin M1 ve M2 aydınlatma sınıflarına uygunluğunu inceleyebilmek amacıyla LightTools yazılımı ile elde edilen fotometrik veri dosyaları (LDT) DIALux yazılımına aktarılmış ve M1-M2 yol şartlarında simüle edilmiştir.



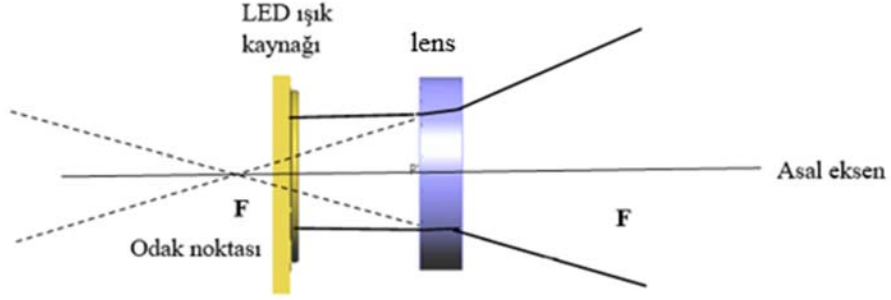
Şekil 6. 20 adet COB LED modüllü armatür tasarımı (Fixture design with 20 COB LED modules).



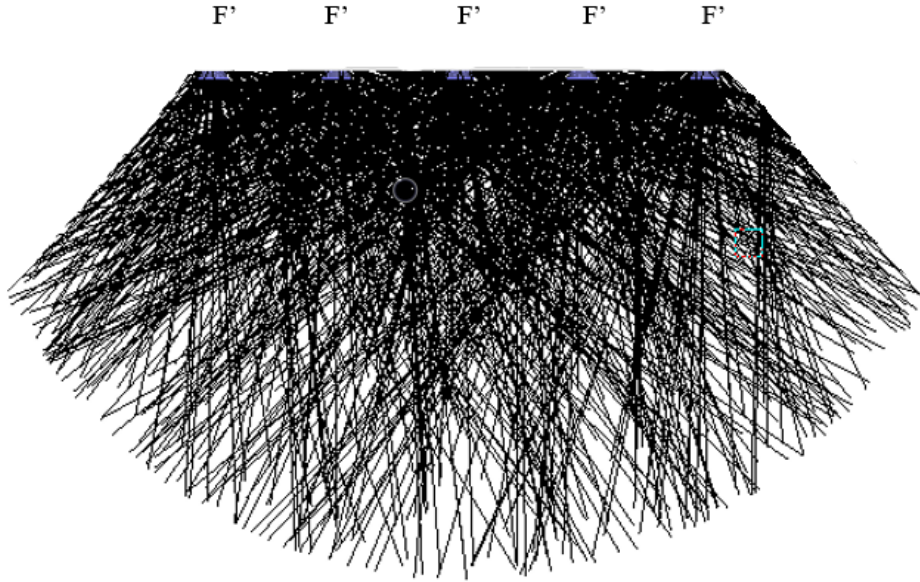
Şekil 7. Armatür+uzak alan alıcısı (Fixture+Farfield Receiver).

Şekilde 10'da yol yüzeyinden 12 m yüksekliğe yerleştirilmiş olan ışık kaynağı ve ışık kaynağının yansıtıldığı hedef düzlemin LightTools'da model ön izlemesi verilmiştir.

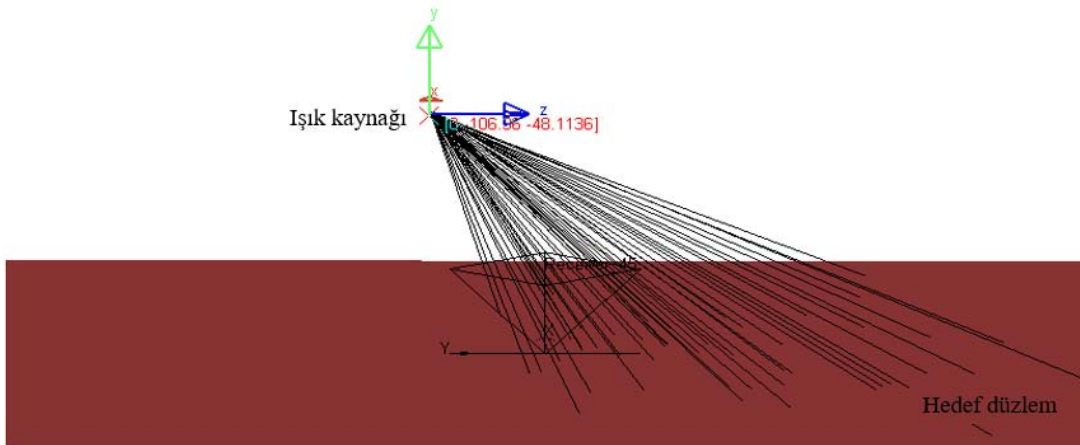
Şekil 11'de araç yolu 1 (sol) ve araç yolu 2 (sağ) için yatay aydınlık düzeyi verilmiştir. Aydınlık düzeyi renkler ve numaralarla belirtilmiştir. Kırmızı renk ile çizilmiş alan ışığın en yoğun yansıdığı



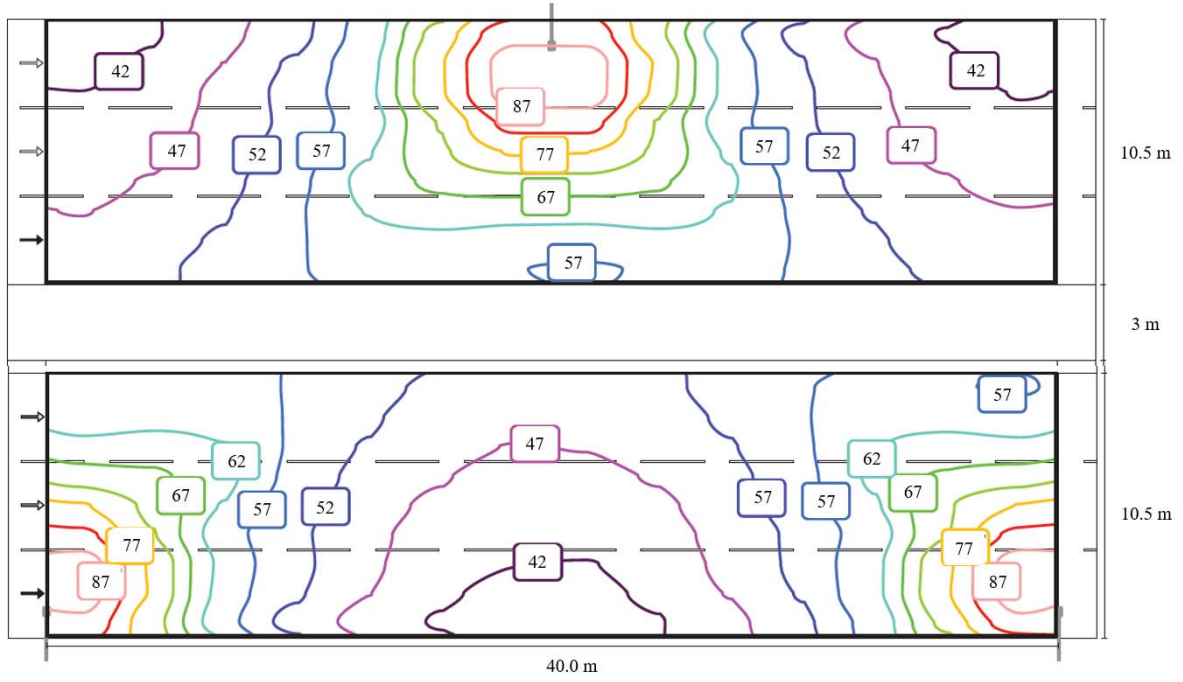
Şekil 8. Konkav lenste ışığın kırınımı (Diffraction of light in a concave lens).



Şekil 9. Kırınım olayı önizleme (Diffraction event preview).



Şekil 10. Işığın yansıtıldığı hedef düzlem-LightTools model önizleme (Target plane where the light is projected - LightTools model preview).



Şekil 11. Araç yolu 1 (sol) ve araç yolu 2 (sağ) için yatay aydınlık düzeyi
(Horizontal illuminance level for path 1 (left) and path 2 (right) [43].

bölgedir. Kırmızı renkten mor renge gidildikçe aydınlık düzeyinin azaldığı ölçülmüştür.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

3.1. Simülasyon ve Deney Çalışması Sonuçları (Simulation Study Results)

LightTools programı üzerinde LED ile lens arası mesafeler sırayla 10 mm (Model-1), 12 mm (Model-2) ve 14 mm'ye (Model-3) ayarlanarak gerçekleştirilen fotometrik simülasyon çalışmaları ile ışık dağılım eğrileri ve fotometrik veri dosyaları elde edilmiştir. Elde edilen fotometrik veri dosyaları kullanılarak, DIALux aydınlatma hesap ve simülasyon yazılımı vasıtasıyla, M1 ve M2 sınıfı yol şartları için aydınlatma analizi gerçekleştirilmiştir. DIALux yazılımında, M1 ve M2 yol şartları simüle edilerek, armatür modellerine ait yol aydınlatma parametreleri elde edilmiştir. Armatür modellerine ait yol aydınlatma parametreleri, TEDAŞ tarafından yayınlanan "LED'li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar" ile tanımlanan M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfı kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Hesaplamalarda bu çalışmada kullanılan "Cree-XLamp-CXA1830 LED" ışık kaynağı için ışık akısı değeri 4.000 lm ve 20 adet COB LED modüllü armatür için 80.000 lm değeri dikkate alınmıştır.

Şekil 12'de Model-1 için, LightTools yazılımı simülasyon sonucuna ilişkin, ışık dağılım eğrisi görülmektedir.

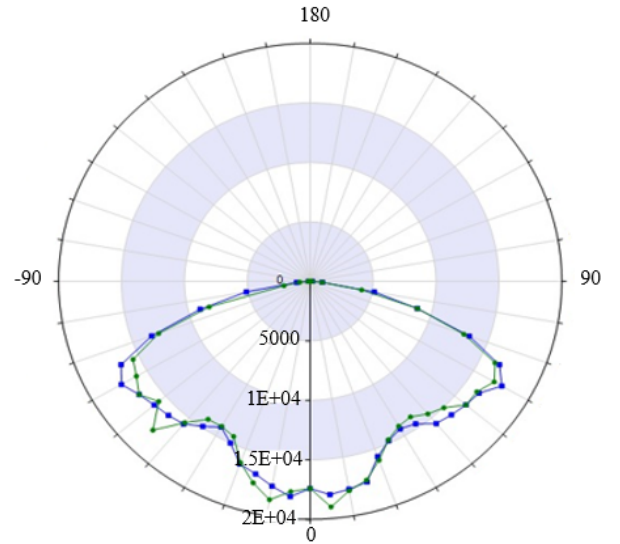
Şekil 12'de verilen Model-1'e ait simülasyon sonucuna ilişkin ışık dağılım eğrisi incelendiğinde elde edilen toplam ışık akısı değerinin 78.500 lm, optik verimliliğin %98.205 olduğu görülmektedir.

Tablo 2'de Model-1 için, DIALux yazılımı simülasyon sonucuna ilişkin, yol aydınlatma parametreleri görülmektedir.

U_o	: Ortalama düzgünlük ($U_o=L_{min}/L_{ort}$),
U_l	: Boyuna düzgünlük ($U_l=L_{min}/L_{maks}$),
T_l	: Bağlı eşik artış ($F_{TI} = \{\Delta L_k - \Delta L_c\} / \Delta L_c$),
E_{IR}	: Kenar aydınlık düzeyi oranı-çevreleme oranı ($R_{EF}=E_2/E_1$),

$Bakım\ Çarpanı = Lamba\ lümen\ bakım\ faktörü\ (0.90) \times Lamba\ canlılık\ faktörü\ (1.00) \times Armatür\ bakım\ faktör\ (0.89) = 0.80$

DIALux sonuçlarına göre; Model-1 ile M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yol şartlarında CIE ve TEDAŞ'ın kabul ettiği aydınlatma kriterlerinin tamamının sağlandığı görülmektedir. Şekil 13'de Model-2 için, LightTools yazılımı simülasyon sonucuna ilişkin, ışık dağılım eğrisi görülmektedir.



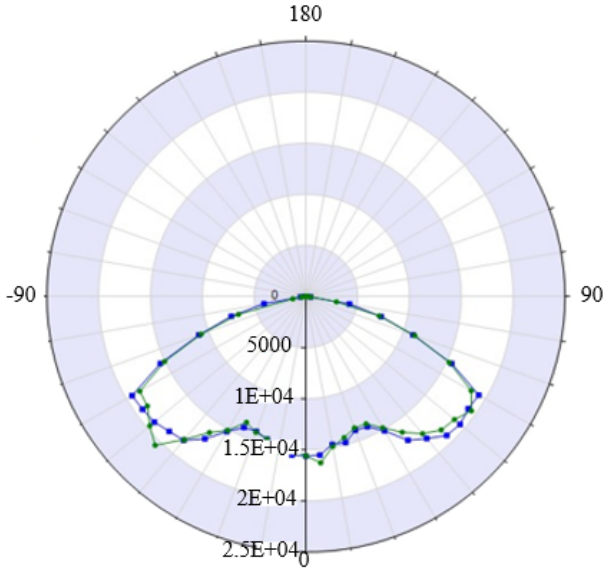
Şekil 12. Model-1 için polar diyagram (Polar diagram for Model-1).

DIALux sonuçlarına göre; Model-2 ile M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yol şartlarında CIE ve TEDAŞ'ın kabul ettiği aydınlatma kriterlerinin tamamının sağlandığı görülmektedir. Şekil 14'te Model-3 için, LightTools yazılımı simülasyon sonucuna ilişkin, ışık dağılım eğrisi görülmektedir.

Tablo 2. M1-M2 aydınlatma sınıfı yol şartlarında Model-1 için DIALux sonuçları
(DIALux results for Model-1 under M1-M2 lighting class road conditions) [43].

Değerlendirme hataları için sonuçlar Bakım çarpanı: 0,80				
Araç Yolu 1 (M1)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U _i ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,31	☑ 0,74	☑ 0,89	☑ 9	☑ 0,93
Araç Yolu 1 (M2)				
Lm [cd/m ²]≥1,50	U _o ≥0,40	U _i ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 4,08	☑ 0,63	☑ 0,71	-	☑ 0,84
Araç Yolu 2 (M1)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U _i ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,31	☑ 0,74	☑ 0,89	☑ 9	☑ 0,93
Araç Yolu 2 (M2)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U _i ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 4,09	☑ 0,63	☑ 0,71	-	☑ 0,84

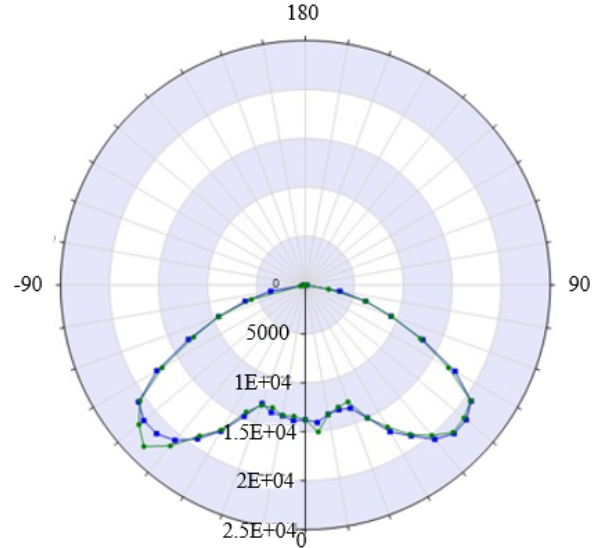
Şekil 13'de verilen Model-2'ye ait simülasyon sonucuna ilişkin ışık dağılım eğrisi incelendiğinde elde edilen toplam ışık akısı değerinin 79.252 lm optik verimliliğin %99,078 olduğu görülmektedir. Tablo 3'de Model-2 için, DIALux yazılımı simülasyon sonucuna ilişkin, yol aydınlatma parametreleri görülmektedir.

**Şekil 13.** Model-2 için polar diyagram (Polar diagram for Model-2).

Şekil 14'de verilen Model-3'e ait simülasyon sonucuna ilişkin ışık dağılım eğrisi incelendiğinde elde edilen toplam ışık akısı değerinin 79.518 lm, optik verimliliğin %99,389 olduğu görülmektedir. Tablo 4'de Model-3 için, DIALux yazılımı simülasyon sonucuna ilişkin, yol aydınlatma parametreleri görülmektedir.

DIALux sonuçlarına göre; Model-3 ile M1 aydınlatma sınıfı yol şartlarında CIE ve TEDAŞ'ın kabul ettiği aydınlatma kriterlerinin tamamı sağlanmış, ancak M2 yolunda sadece boyuna parıltı düzgünlüğü olan U₁ değeri sağlanamamıştır.

Sonuç olarak; özgün tasarım sonucunda geliştirilen armatür modeli için elde edilen ışık dağılım eğrilerinin uygun olduğu ve bu modellerin tamamının M1 aydınlatma sınıfı yollar için gerekli kriterleri sağladığı ancak sadece Model-3'ün M2 aydınlatma sınıfı yol kriterlerinden birisini sağlamadığı DIALux sonuçlarından anlaşılmıştır. Bu çalışmada, M1 ve M2 yol aydınlatma sınıfı kriterlerine uygun COB LED'li, özgün, yüksek verimli ve yerli armatür modeli geliştirilmesine yönelik optik tasarım aşaması başarıyla tamamlanmıştır.

**Şekil 14.** Model-3 için polar diyagram (Polar diagram for Model-3).

3.2. Optimizasyon Çalışması Sonuçları (Optimisation Study Results)

DIALux yazılımı simülasyonları sonucunda bütün modeller için M1 ve M2 yol şartlarında elde edilen aydınlatma parametrelerine ait ortalama değerler aşağıdaki tablolarda değerlendirilerek COB LED-Lens mesafesiyle ilgili optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. M1-M2 aydınlatma sınıfı yol şartlarında Model-2 için DIALux sonuçları
(DIALux results for Model-2 under M1-M2 lighting class road conditions).

Değerlendirme hataları için sonuçlar Bakım çarpanı: 0,80				
Araç Yolu 1 (M1)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U ₁ ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,30	☑ 0,78	☑ 0,83	☑ 7	☑ 0,91
Araç Yolu 1 (M2)				
Lm [cd/m ²]≥1,50	U _o ≥0,40	U ₁ ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,49	☑ 0,71	☑ 0,74	☑ 8	☑ 0,91
Araç Yolu 2 (M1)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U ₁ ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,29	☑ 0,78	☑ 0,83	☑ 7	☑ 0,91
Araç Yolu 2 (M2)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U ₁ ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,49	☑ 0,71	☑ 0,74	☑ 8	☑ 0,91

Tablo 4. M1-M2 aydınlatma sınıfı yol şartlarında Model-3 için DIALux sonuçları
(DIALux results for Model-3 under M1-M2 lighting class road conditions).

Değerlendirme hataları için sonuçlar Bakım çarpanı: 0,80				
Araç Yolu 1 (M1)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U ₁ ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,24	☑ 0,77	☑ 0,70	☑ 5	☑ 0,90
Araç Yolu 1 (M2)				
Lm [cd/m ²]≥1,50	U _o ≥0,40	U ₁ ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,42	☑ 0,73	☑ 0,62	☑ 6	☑ 0,91
Araç Yolu 2 (M1)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U ₁ ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,24	☑ 0,73	☑ 0,71	☑ 5	☑ 0,90
Araç Yolu 2 (M2)				
Lm [cd/m ²]≥2,00	U _o ≥0,40	U ₁ ≥0,70	TI [%]≤10	EIR≤0,35
☑ 3,42	☑ 0,72	☑ 0,63	☑ 6	☑ 0,91

Tablo 5. M1 yol şartlarında (Sınıf-2) elde edilen aydınlatma parametreleri
(Lighting parameters obtained under M1 road conditions (Class-2)).

Optimum	Lm (≥2)	U _o (≥0.4)	U ₁ (≥0.70)	TI (≤10)	EIR (≥0.35)
Model-1	3,31	0,74	0,89	9	0,93
Model-2	3,3	0,78	0,83	7	0,91
Model-3	3,24	0,77	0,7	5	0,9

Optimizasyon çalışmasında aydınlatma parametreleriyle ilgili aşağıda belirtilen kriterler dikkate alınmıştır.

- Yol üzerindeki aydınlık etkisi açısından parlıltı seviyesinin (Lm) yüksek olması istenen bir durumdur.
- Görme konforu bakımından parlıltının seviyesinin yanısıra parlıltı dağılımının düzgünlüğü de oldukça önemlidir. U_o toplam düzgünlüğü, U₁ ise boyuna düzgünlüğü göstermektedir. U₁ değeri

minimum parlıltı seviyesinin maksimum parlıltı seviyesine oranı ile hesaplanır. Dolayısıyla bu değerlerin 1'e yaklaşması homojen aydınlatmaya işaret eder.

- Sürüş güvenliği açısından önemli bir faktör olan kamaşma faktörünün (TI) düşük olması oldukça önemlidir.
- Kenar aydınlık düzeyi oranının (EIR) 0,35 değerinden küçük olmaması gereklidir, ancak bu değerden çok yüksek olması da enerji verimliliği açısından olumsuz bir durumdur.

Tablo 6. M2 yol şartlarında (Sınıf-5) elde edilen aydınlatma parametreleri
(Lighting parameters obtained in M2 road conditions (Class-5)).

Optimum	Lm (≥ 1.5)	U ₀ (≥ 0.4)	U ₁ (≥ 0.70)	TI (≤ 10)	EIR (≥ 0.35)
Model-1	4,08	0,63	0,71	-	0,84
Model-2	3,49	0,71	0,74	8	0,91
Model-3	3,42	0,73	0,62	6	0,91

En iyi iki sonucun seçimi ile basitçe yapılan bir değerlendirme sonucunda, M1 aydınlatma sınıfı yol şartlarında, en uygun değerlerin Model-2 ile elde edildiği görülmektedir.

En iyi iki sonucun seçimi ile basitçe yapılan bir değerlendirme sonucunda, M2 aydınlatma sınıfı yol şartlarında, en uygun değerlerin Model-2 ile elde edildiği görülmektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollarda standartlara uygun aydınlatma ihtiyacını karşılayacak yüksek enerji verimli ve özgün COB LED'li yol aydınlatma armatür modeline ait optik tasarım, modelleme, simülasyon ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optik tasarım aşamasında Zemax optik tasarım yazılımından yararlanılarak seçilmiş olan yüksek verimli bir COB LED'e uygun şekilde boyutlandırılan konkav-konveks küresel bir lens için SolidWorks tasarım yazılımı kullanılarak 3D katı model oluşturulmuştur. Optik modelleme aşamasında LightTools aydınlatma tasarımı yazılımı vasıtasıyla COB LED ile lens farklı mesafelerde birleştirilerek COB LED+lens modülü ve modüller birleştirilerek 20 modüllü yol aydınlatma armatürü modeli oluşturulmuştur. Simülasyon aşamasında LightTools yazılımı vasıtasıyla COB LED ile lens arası mesafeler değiştirilerek gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile modül ve armatür modellerine ait ışık dağılım eğrileri ve fotometrik veri dosyaları elde edilmiştir. Elde edilen fotometrik veri dosyaları kullanılarak DIALux aydınlatma hesap programında M1 ve M2 yol şartları simüle edilerek tasarım doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon aşamasında ise M1 ve M2 yol aydınlatma kriterlerine uygunluk dikkate alınarak geliştirilen armatür modeline ilişkin COB LED ve lens mesafesi optimize edilmiştir. Yapılan çalışmalara ilişkin DIALux sonuçları incelendiğinde bu çalışma kapsamında geliştirilen armatür modeli ile M1 ve M2 yol aydınlatma kriterlerinin sağlandığı görülmüştür. Sonuç olarak bu çalışma ile ülkemizde de ihtiyaç duyulan bir aydınlatma probleminin çözümüne yönelik tamamen özgün COB LED'li bir yol aydınlatma armatür modelinin optik tasarımı ve tasarımın doğrulanması aşamaları başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçları aşağıdaki şekilde değerlendirmek mümkündür;

- Model-1 için; ışık akısı değeri 78.500 lm, optik verimlilik %98,205 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Model-1 için; 20 adet COB LED, 800 mA, 36,4 V sürme değerleri için armatür etkinliği 134.79 lm/W olarak hesaplanmıştır. TEDAŞ Teknik Şartnamesine göre bu değerler yol aydınlatması için uygundur.
- Model-2 için; ışık akısı değeri 79.252 lm, optik verimlilik %99,078 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Model-2 için; 20 adet COB LED, 800 mA, 36,4 V sürme değerleri için armatür etkinliği 136 lm/W olarak hesaplanmıştır. TEDAŞ Teknik Şartnamesine göre bu değerler yol aydınlatması için uygundur.
- Model-3 için; ışık akısı değeri 79.518 lm, optik verimlilik %99,389 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Model-3 için; 20 adet COB LED, 800 mA, 36,4 V sürme değerleri için armatür etkinliği 135 lm/W olarak

hesaplanmıştır. TEDAŞ Teknik Şartnamesine göre bu değerler yol aydınlatması için uygundur.

- Bütün modeller için M1 ve M2 yol şartlarında ışık akısı değeri ($L_m > 2$) oldukça iyidir. Yol üzerindeki aydınlık etkisi açısından bu durum olumlu olarak değerlendirilebilir.
- Görme konforu bakımından parıltının seviyesinin yanısıra parıltı dağılımının düzgünlüğü de oldukça önemlidir. Sonuçlar incelendiğinde U₀ ve U₁ düzgünlük faktörlerinin 1 değerine yaklaşmış olması homojen dağılıma işaret etmektedir. Bu durum parıltı dağılımının düzgünlüğü açısından olumlu olarak değerlendirilebilir. Parıltı dağılımının düzgünlüğü açısından Model-3'ün M1 sınıfı için kritik eşiğe yakın olduğu ve M2 sınıfı için kriteri sağlamadığı görülmektedir. Parıltı dağılımının düzgünlüğü açısından Model-1 ve Model-2 daha uygundur.
- Sürüş güvenliği açısından önemli bir faktör olan kamaşma faktörünün (TI<10) düşük olması oldukça önemlidir. Sonuçlar incelendiğinde LED-lens mesafesi arttıkça kamaşma faktörünün azaldığı görülmektedir. Ancak Model-3'ün parıltı dağılımı açısından kritik olması Model-2'yi öne çıkarmaktadır.
- Kenar aydınlık düzeyi oranının (EIR) 0.35 değerinden küçük olmaması gereklidir, ancak bu değerden çok yüksek olması da enerji verimliliği açısından istenmeyen bir durumdur. Bütün modellerde bu oran oldukça yüksektir bu durumun küresel lensin tercih edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yol aydınlatma armatürlerinde yol yapısına daha uygun freeform lensler tercih edilmektedir. Ancak bu çalışmada düşük maliyet ve kolay üretilebilirlik gibi kriterler dikkate alındığından küresel lens tercih edilmiştir. COB LED ile uyumlu, akrilik (PMMA) freeform lensin optik tasarımı ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmasının önemli olduğu değerlendirilmektedir.
- Bu sonuçlar dikkate alındığında Model-2'nin optimum ve en uygun çözüm olduğunu söylemek mümkündür.

Teşekkür (Acknowledgement)

TEYDEB-1505 TÜBİTAK Üniversite-Sanayi İşbirliği Destek Programı kapsamında yürütülen 5160068 nolu "M1 ve M2 Aydınlatma Sınıfı Yollar İçin Yüksek Enerji Verimli, LED'li Yol Aydınlatma Armatür Tasarımı ve Özgün Prototip Modeller Geliştirilmesi" projesi ile desteklenmiştir. TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Yawale P.R., Wagh V.G., Shaligram A.D., Optimization of Pole Spacing of Road Illumination System using DIALux, In National Conference on Innovative Trends in Science and Engineering, 4, (7), 192-195, 2016.
2. Bommel W.V., Road lighting: fundamentals, technology and application. Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015.
3. Cai X., Quan L., Wu J., He Y., Night-time disability glare of constant-light LED traffic monitoring fill light, Lighting Research & Technology, 1477153520982269, 2021.
4. Mohandas P., Dhanaraj J.S.A., Gao X.Z., Artificial neural network based smart and energy efficient street lighting system: A case study for residential area in Hosur, Sustainable Cities and Society, 48, 101499, 2019.

5. Fryc I., Czyżewski D., Fan, J., Gălăţanu C.D., The Drive towards Optimization of Road Lighting Energy Consumption Based on Mesopic Vision-A Suburban Street Case Study, *Energies*, 14 (4), 1175, 2021.
6. Ullah I., Shin, S., Highly concentrated optical fiber-based daylighting systems for multi-floor office buildings, *Energy and buildings*, 72, 246-261, 2014.
7. Shi, K.J., Application of new materials in contemporary landscape design, *Advanced Materials Science and Technology*, 1 (1), 26-26, 2019.
8. Khan, N., Abas, N., Comparative study of energy saving light sources, *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(1), 296-309, 2011.
9. Valetti, L., Floris, F., Pellegrino, A., Renovation of Public Lighting Systems in Cultural Landscapes: Lighting and Energy Performance and Their Impact on Nightscapes, *Energies* 2021, 14, 509, 2021
10. Jägerbrand A.K., Development of an Indicator System for Local Governments to Plan and Evaluate Sustainable Outdoor Lighting, *Sustainability*, 13, 1506, 2021.
11. Park S., Jun S., Technology analysis of global smart light emitting diode (LED) development using patent data, *Sustainability*, 9 (8), 1363, 2017.
12. Czyżewski, D., Fryc, I., The Influence of Luminaire Photometric Intensity Curve Measurements Quality on Road Lighting Design Parameters, *Energies*, 13 (13), 3301, 2020.
13. Duman A.C., Güler Ö., Techno-economic analysis of off-grid photovoltaic LED road lighting systems: A case study for northern, central and southern regions of Turkey, *Building and environment*, 156, 89-98, 2019.
14. Yılmaz E., Erden O., Kocadağ N.Y., Sokak Aydınlatması Dönüşümü Fayda Maliyet Analizi Üzerine Bir Mühendislik Ekonomisi Çalışması, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 5 (3), 280-289, 2019.
15. Juntunen E., Tetri E., Tapaninen O., Yrjänä S., Kondratyev V., Sitomaniemi A., ... Heikkinen V., A smart LED luminaire for energy savings in pedestrian road lighting, *Lighting Research & Technology*, 47 (1), 103-115, 2015.
16. Chenani S.B, Räsänen R.S., Tetri, E., Advancement in Road Lighting, *Light & Engineering* 26:99–109, 2018.
17. CIE, Commission Internationale de l'Éclairage, Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic, Vienna (Austria), CIE-115, 1995.
18. CIE, Commission Internationale de l'Éclairage. The Selection of Lighting Classes for Road Lighting, CR 13201-1, 2002.
19. CIE, Commission Internationale de l'Éclairage. Lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Vienna (Austria): CIE. Publication No., 115, 2010.
20. TEDAŞ, LED'li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar. https://www.tedas.gov.tr/uploads/LEDli_Yol_Aydinlatma_Tasariminailiskin_UsulveEsaslar.pdf, Yayınlanma tarihi 2010a, Revize tarihi Ekim-2020. Erişim tarihi: 23 Şubat 2021.
21. TEDAŞ, Led Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi, 2010b (Revize, Revize Ekim-2020). https://www.tedas.gov.tr/uploads/TEDAS_MLZ_2020_057_D_LED_Isik_Kaynakli_Yol_Aydinlatma_Armatuerleri_Tek_Sartname.pdf, Yayınlanma tarihi 2010b, Erişim tarihi: 23 Şubat 2021.
22. Fotios S., Gibbons R., Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations. *Lighting Research & Technology*, 50 (1), 154-186, 2018.
23. Ayaz R., Ozcanli A.K., Nakir I., Bhusal P., Unal A., Life Cycle Cost Analysis on M1 and M2 Road Class Luminaires Installed in Turkey. *Light & Engineering*, 27 (1), 61-70, 2019.
24. Gursoy M.E., Dindar B., Gul, O. A Novel Strategy for Transformation of Conventional Road Lighting to Smart Road Lighting. *Light & Engineering*, 28(5), 97-105, 2020.
25. Menéndez A., Martínez A., Santos A., Ruiz B., Moritz K., Klein I., ... & Gómez, D., A multifunctional ETFE module for sustainable façade lighting: Design, manufacturing and monitoring. *Energy and Buildings*, 161, 10-21, 2018.
26. Kıryak İ., Boyekin T., COB LED'lerde Yaşlandırma ve Ömür Tahmini Uygulamalı Analizi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4 (2), 153-162, 2018.
27. Çiçek B., Sahin N., Alkan M., Thermal Analysis of Chip on Board Packaging of High Power Led's with Heat Pipe Using Cfd for Street Lights. *Gazi University Journal of Science*, 31 (4), 1229-1244, 2018.
28. Pan D., Zhang Y.C., Xie X.F., Fan M.J., Chen Y.A., Yan S.H., Yang S.J. Optical design of LED high mast lamp based on TIR freeform lens for annular lighting. *Lighting Research & Technology*, 0, 1-11, 2020.
29. Toy Ö.F., Led Tabanlı Yol Aydınlatma Armatürleri İçin Optik Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
30. Ge A., Shu H., Chen D., Cai J., Chen J., Zhu, L., Optical design of a road lighting luminaire using a chip-on-board LED array. *Lighting Research & Technology*, 49 (5), 651-657, 2017.
31. Yurtseven, M.B., Led Işık Kaynaklı Armatür Isıl Modellenmesi ve Isıl Tasarımı Etkileyen Faktörlerin İstatistiksel Analizi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, 2017.
32. Hao R., Ge A., Tao X., Liu Y., Zhao B., Yang E., Optical design of a high-mast luminaire based on four COB LED light source modules. *Lighting Research & Technology*, 51 (3), 447-456, 2019.
33. Ateş S., Yurtseven M. B., Onaygil S., Design of A Chip on Board (Cob) Led Based Industrial Luminaire with Thermal Simulations. *Light & Engineering*, 27 (2), 78-87, 2019.
34. Sun X., Kong L., Qi L., Xu M., Design and Analysis of a Total-Internal-Reflection (TIR) Structure Based on Ray-Mapping Method for Tailored Illumination, *IEEE Access*, 8, 45887-45894, 2020.
35. Zhu Z., Peng B., Yuan J., Xu X. Design of a combined lens for rectangular illumination, *Lighting Research & Technology*, 52 (1), 131-140, 2020.
36. Wei S.L., Zhu Z.B., Fan Z.C., Yan Y.M., Ma D.L., Multi-surface catadioptric freeform lens design for ultra-efficient off-axis road illumination, *Optics express*, 27 (12), A779-A789, 2019.
37. Czyżewski D., Research on luminance distributions of chip-on-board light-emitting diodes, *Crystals*, 9(12), 645, 2019.
38. Liao H.Y., Chen S.Y., Gao W.L., Chang F.C., Wen C.C., Fang Y. C., Le H.T., Design and Prototyping of Efficient LED Counter Beam Light with Free-Formed Surface for Meeting International Tunnel Lighting Standards, *Energies*, 14, 488, 2021.
39. Lai M.F., Chen Y.C., Anh N.D.Q., Chen T.Y., Ma H.Y., Lee H.Y., Design of asymmetric freeform lens for low glared LED street light with total internal reflection, *Optics express*, 24 (2), 1409-1415, 2016.
40. Zıssıs G., Bertoldi P., Status of LED-Lighting world market in 2017, JRC Technical Reports, Ispra, European Commission, 2018.
41. URL-1, Lighting Portal, What Are the Differences Between SMD and COB LEDs? <https://www.aydinlatma.org/en/what-are-the-differences-between-smd-and-cob-leds.html>, Erişim tarihi: 23 Şubat 2021.
42. URL-2 Cree. Cree XLamp CXA1830 LED, <https://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-CXA1830.pdf>, Erişim tarihi: 29.08.2020.
43. URL-3 Download DIALux and product catalogues, <https://www.dialux.com/en-GB/download>, Erişim tarihi: 15.05.2019.

