İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ VERİMLİLİĞİ, İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLEŞİMİ ÇERÇEVESİNDE YOL AYDINLATMASINDA LED DÖNÜŞÜM YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ezgi BERBEROĞLU

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ VERİMLİLİĞİ, İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLEŞİMİ ÇERÇEVESİNDE YOL AYDINLATMASINDA LED DÖNÜŞÜM YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ezgi BERBEROĞLU
(301171013)

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sermin ONAYGİL

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 301171013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ezgi BERBEROĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ENERJİ VERİMLİLİĞİ, İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLEŞİMİ ÇERÇEVESİNDE YOL AYDINLATMASINDA LED DÖNÜŞÜM YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Sermin ONAYGİL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Nurettin Umurkan** Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Ebru Acuner Türet İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 3 Haziran 2022
Savunma Tarihi : 22 Haziran 2022

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi benim için renkli bir yolculuktu. Bu süreçte bana güvenini esirgemeyerek gerek bilgi ve tecrübeleri ile gerekse manevi desteği ile her zaman yanımda olan Sayın Hocam Prof. Dr. Sermin Onaygil'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda, değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşan Sayın Hocam Dr. Berker Yurtseven'e çok teşekkür ederim. Son olarak, eğitim hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ve destekleri için aileme teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Haziran 2022

Ezgi BERBEROĞLU
(Çevre Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 4
1.2 Tezin Aşamaları 4
2. ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ÇEVRE VE EKONOMİ AÇISINDAN ÖNEMİ **5**
2.1 Enerji, Enerji Verimliliği, İklim Değişikliği ve Ekonomi Etkileşimi 5
2.1.1 Enerji ve enerji verimliliği 5
2.1.1.1 Dünya'da enerji ve enerji verimliliği 6
2.1.1.2 Türkiye'de enerji ve enerji verimliliği 8
2.1.2 Çevre ve İklim Değişikliği 10
2.1.3 Ekonomi 19
2.2 Enerji Verimliliğinin Çevre Ve Ekonomi Açısından Önemi 23
2.3 Enerji Verimliliği Çalışmalarında Aydınlatma 33
3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ ESASLARI **37**
3.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile İlgili Standartlar 38
3.2 Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi 39
3.3 Yaşam Döngüsü Maliyeti 41
3.4 Aydınlatmada Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi 42
4. YOL AYDINLATMASI TEMELLERİ VE MEVZUATI **47**
4.1 Yol Aydınlatma Sınıfı Seçimi 49
4.1.1 Motorlu araç trafiği aydınlatma sınıfı (M sınıfı) 49
4.1.2 Yayalar ve düşük hızlı alanlar aydınlatma sınıfı (P sınıfı) 49
4.1.3 Karmaşık alanlar aydınlatma sınıfı (C sınıfı) 52
4.2 Yol Aydınlatması Kalite Kriterleri 53
4.3 Yol Aydınlatmasında LED Dönüşüm Literatür Araştırması 58
4.4 Literatür Araştırması Değerlendirmesi 64
4.5 Yol Aydınlatması Uygulama Örneği 64
5. ALTERNATİF TESİSATLARIN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ **69**
5.1. Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi 69
5.1.1 Hedef tanımlama ve kapsam belirleme 69
5.1.2 Envanter analizi 72
5.1.2 Etki değerlendirmesi 84
5.1.4 Yorum 86
5.2 Yaşam Döngüsü Maliyeti 86

5.2.1 Net bugünkü değer yöntemi 86
5.2.2 Yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi (YDMD) 89
5.3 Sosyal Etki Değerlendirmesi 93
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 95
KAYNAKLAR 99
EKLER 111
ÖZGEÇMİŞ 115

KISALTMALAR

AB : Avrupa Birliği

ABD : Amerika Birleşik Devletleri

BM : Birleşmiş Milletler

BMİDÇS : Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

CEN : Comité Européen de Normalisation (European Committee for Standardization)

CIE : Commission Internationale de l´Eclairage (International Commission on Illumination)

SDMH : Seramik Deşarj Metal Halide

COP26 : 2021 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı

ÇŞİDB : Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

EN : European Norm

EIA : U.S. Energy Information Administration (ABD Enerji Enformasyon İdaresi)

EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu

ETKB : Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

GWP : Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)

IMF : International Monetary Fund (Uluslararası Para Fonu)

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli)

İTÜ : İstanbul Teknik Üniversitesi

NBD : Net Bugünkü Değer (Net Present Value)

NCFT : t Yılında Net Nakit Akışı

OECD : Organisation for Economic Co-operation and Development (İktisadi İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı)

PMR : Partnership for Market Readiness (Karbon Piyasalarına Hazırlık Ortaklığı)

SMY : Sürdürülebilir Malzeme Yönetimi

TBMM : Türkiye Büyük Millet Meclisi

TEDAŞ : Türkiye Elektirik Dağıtım A.Ş.

TEİAŞ : Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

TEP : Ton Eşdeğer Petrol

TSE : Türk Standartları Enstitüsü

TÜFE : Tüketici Fiyat Endeksi

TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu

UEA : Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency -IEA)

UEVEP : Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı

UNEP : United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)

YBSBL : Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı Lamba (HPSV)

YDD : Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

YDE : Yaşam Döngüsü Envanteri

YDED : Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

YDM : Yaşam Döngüsü Maliyeti

YDMD : Yaşam Döngüsü Maliyet Değerlendirmedi

YDSD : Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

YEKA : Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı

YEKDEM : Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

SEMBOLLER

CH_4 **:** Metan

CO_2 : Karbondioksit

CO_2e **:** Karbondioksit eşdeğeri

E **:** Aydınlık düzeyi

E_{ort} **:** Ortalama aydınlık düzeyi

E_{min} **:** Minimum aydınlık düzeyi

$E_{v,min}$ **:** Minimum düşey aydınlık düzeyi

$E_{sc,min}$ **:** Minimum yarı silindirik aydınlık düzeyi

f_{TI} **:** Bağıl eşik artışı

f_M **:** Bakım faktörü

GHP **:** Yönetilen motor devrinde brüt motor beygir gücü

GW **:** Gigawatt

H_k **:** Armatürün montaj yüksekliği

K **:** Fren hp/saat başına kullanılan yakıt miktarı

KPL **:** Yakıt ağırlığı

L **:** Parıltı düzeyi

L_{ort} **:** Ortalama yol yüzeyi parıltısı

LP **:** Yük faktörü

LMPH **:** Makine saatte kullanılan litre

M **:** Parıltısı hesaplanan nokta

MN **:** P noktasının nominali

N **:** Hesap nokta sayısı

N **:** Yıl

N_2O : Nitröz oksit

n_{LU} **:** Armatür sayısı

O_h **:** Geometrik projeksiyon

r **:** İskonto Oranı

R_{EI} **:** Çevreleme oranı

ST **:** Yolun boyuna doğrultusu

t **:** İşletme periyot süresi (saat)

U_l **:** Boyuna parıltı düzgünlüğü

U_o **:** Ortalama parıltı düzgünlüğü

U_{ow} **:** Islak koşullarda ortalama parıltı düzgünlüğü

VW **:** Ağırlıklandırma değeri

VWS **:** Ağırlıklandırma değerlerinin toplamı

Q **:** Armatürün fotometrik merkezi

QT **:** Armatürün fotometrik merkezinden geçen dikme (eksen)

β **:** Düşey düzlem arasındaki açı

φ **:** Azimuth açısı

α **:** Gözlem açısı

ε **:** Normalle yapılan açı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: TSE CEN/TR 13201-1'e göre M yol aydınlatma sınıfı seçim parametreleri. **50**
Çizelge 4.2: TSE CEN/TR 13201-1'e göre P yol aydınlatma sınıfı seçim parametreleri. **51**
Çizelge 4.3: TSE CEN/TR 13201-1'e göre C yol aydınlatma sınıfı seçim parametreleri. **52**
Çizelge 4.4: TSE CEN/TR 13201-2'e göre M yol aydınlatma sınıfları için sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri [91] [136]..... **53**
Çizelge 4.5: TSE CEN/TR 13201-2'ye göre P yol aydınlatma sınıfları için sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri. **54**
Çizelge 4.6: TSE CEN/TR 13201-2'ye göre C yol aydınlatma sınıfları için sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri. **54**
Çizelge 5.1: Elektrik, doğal gaz ve motorin CO_2 salım faktörleri. **73**
Çizelge 5.2 : Doğal gaz ve motorin için CH_4 ve N_2O salım faktörleri. **73**
Çizelge 5.3: Sera Gazı Salımlarının küresel ısınma potansiyelleri. **74**
Çizelge 5.4 : YBSBL'lı armatür üretim aşaması yakmadan kaynaklı sera gazı salım metrikleri ve miktarı. **75**
Çizelge 5.5 : LED'li armatür üretim aşaması yakmadan kaynaklı sera gazı salım metrikleri ve miktarı. **75**
Çizelge 5.6 : YBSBL'lı armatür hammadde içeriği, hammadde temin yolu ve mesafesi. **77**
Çizelge 5.7 : LED'li armatür hammadde içeriği, hammadde temin yolu ve mesafesi. **77**
Çizelge 5.8 : YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin hammadde temini süresinde araçlardan kaynaklı sera gazı alım miktarları. **79**
Çizelge 5.9 :YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin hammadde temini, tesis içi taşıma ve teslim noktasına taşıma aşamalarında oluşan sera gazı salımları. **80**
Çizelge 5.10 : YBSBL'lı armatür üretim aşamaları ve bu aşamalarda tüketilen elektrik enerjisi miktarları. **81**
Çizelge 5.11 : LED'li armatür üretim aşamaları ve bu aşamalarda tüketilen elektrik enerjisi miktarları. **82**
Çizelge 5.12 : YBSBL'lı ve LED'li armatürler için elektrik enerjisi tüketim kaynaklı sera gazı salım metrikleri ve miktarları. **83**
Çizelge 5.13 : YBSB'lı ve LED'li armatürler için hesaplanan salım değerleri..... **83**
Çizelge 5.14 : YBSBL'lı ve LED'li armatürler için montaj, demontaj, ihzarat nakliyesi fiyatları ($). **88**
Çizelge 5.15 : YBSBL'lı ve LED'li armatürler için hurda, atık ve demontaj cinsinden toplam hurda maliyetleri ($). **88**
Çizelge 5.16: Uygulama örneği için gelir ve giderler. ($) **89**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Yerli ve ithal kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin toplam Türkiye üretimindeki payları (2002-2020). **9**
Şekil 5.1: YBSBL'lı armatür üretimi iş akış şeması. **71**
Şekil 5.2 : LED'li armatür üretimi iş akış şeması **71**
Şekil 5.3 : LED'li ve YBSBL'lı armatür için salım değerleri dağılımı. **84**
Şekil 5.4 : LED'li armatürün kaynaklarına göre doğrudan sera gazı salımı. **84**
Şekil 5.5 : LED'li armatürünün kaynaklarına göre sera gazı salımı. **85**
Şekil 5.6 : YBSBL'lı armatürün kaynaklarına göre doğrudan sera gazı salımı. **85**
Şekil 5.7 : YBSBL'lı armatürünün kaynaklarına göre sera gazı salımı. **86**
Şekil 5.8 : YBSBL'lı armatürün $ bazında nakit akış şeması. **89**
Şekil 5.9: LED'li armatürün $ bazında nakit akış şeması. **89**
Şekil 5.10 : YBSBL'lı ve LED'li armatür için YDMD sonuçları ($). **90**
Şekil 5.11 : YBSBL'lı armatürün yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi sonuçları. **90**
Şekil 5.12 : YBSBL'lı armatürün yatırım, hurda, bakım ve onarım maliyetleri oranları. **91**
Şekil 5.13 : LED'li armatürün yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi sonuçları. **91**
Şekil 5.14 : LED'li armatürün yatırım, hurda, bakım ve onarım maliyetleri oranları. **92**
Şekil 5.15 : YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin yatırım, hurda ve bakım-onarım maliyetleri karşılaştırması. **92**
Şekil A.1: LED armatür teknik çizimi ve ışık şiddeti dağılım eğrisi. **112**
Şekil A.2: LED armatür DIALux uygulama sonuçları. **112**
Şekil A.3: YBSBL teknik çizimi ve ışık şiddeti dağılım eğrisi. **113**
Şekil A.4: YBSBL DIALux uygulama sonuçları. **113**

ENERJİ VERİMLİLİĞİ, İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLEŞİMİ ÇERÇEVESİNDE YOL AYDINLATMASINDA LED DÖNÜŞÜM YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

ÖZET

Çevre, enerji ve ekonomi birbirinden ayrı düşünülmemesi gereken, birbirlerini etkileyen ve birbirlerinden etkilenen geçmişten günümüze önemini yitirmeyen üç kritik konudur. Ekonomik krizlerin yaşandığı dönemlerde çeşitli uygulama değişiklikleriyle çevresel kirlilikte artış olduğu tarihsel gelişmelerde görülmektedir. Artan refah seviyesi, hızlı nüfus artışı ve gelişen teknoloji ile enerji ihtiyacı yükselmekte ve temini de zorlaşmaktadır. Bu nedenle, salım azaltımında etkisi yüksek olan enerji verimliliği uygulamaları daha da önem kazanmaktadır. Günümüzde çevresel sorunların başında iklim değişikliği etkileri gelmektedir. İklim değişikliğinin insan kaynaklı sebeplerinden başlıcası, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan sera gazı salımlarıdır. Bu etkinin azalması için enerji üretimi ve kullanımında köklü değişiklikler gerekmektedir. Ancak uzun vadeli bir çözümün, teknolojik gelişmenin iklim dostu bir şekilde ilerlemesini sağlamak için uygun fiyatlı maliyet-etkin de olması gerekmektedir. Enerji verimliliği çalışmalarında aydınlatma tesisatları kısa sürede yüksek elektrik enerjisi tasarrufu sağlanabilen maliyet-etkin tesisatlar olarak önemli bir konumdadır.

Türkiye gelişmekte olan bir ülkedir ve bu doğrultuda enerji talebi hızla artmaktadır. Taraf olunan uluslararası anlaşmalar da dikkate alındığında güvenilir, olumsuz çevresel etkileri en aza indirilerek ekonomik olarak enerji ihtiyacının sağlanması gerekmektedir. Enerji maliyeti yükünün ekonomi üzerindeki etkisinin hafifletilmesi ve çevresel fayda için verimliliğin geliştirilmesi amacı ile 2017 yılında "Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP)" yayınlanarak enerji verimliliği konusunda 2023 yılı için hedefler oluşturulmuştur. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planında genel aydınlatmada kullanılan armatürlerin verimlileri ile değiştirilmesi amacıyla "E7. Genel Aydınlatmada Enerji Verimliliğinin Artırılması" eylemi yer almaktadır. İlgili eylem kapsamında; sodyum buharlı armatürlerden LED'lere geçişin verimlilik, süre ve fayda/maliyet açısından değerlendirilmesi ve planlanmasına yönelik çalışmalar yapılması, yenilikçi teknolojilerin mevzuata entegrasyonunun sağlanması, yerli üretim ve tasarımın verimli aydınlatma alanında geliştirilmesi gibi faaliyetler yer almaktadır.

Tez çalışmasında, bu faaliyetlere yol gösterici kılavuz olabilecek bir örnek uygulama ve değerlendirmenin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, LED dönüşüm projesi uygulanan mevcut bir M2 aydınlatma sınıfı yol için hesap ve değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Türkiye'de geçerli olan TS EN 13201 yol aydınlatma standartlarının gerekleri, enerji tasarrufu kapsamında minimum ölçüde yerine getirilerek yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı (YBSBL) ve LED'li armatürlerle yol aydınlatması tasarım hesapları yapılmış ve tesisat bilgileri oluşturulmuştur. Uygulamada mevcut tesisatta aydınlatma direkleri değiştirilmeden sadece armatür değişimi ile LED'e dönüşüm esas alınmıştır. Örnek uygulamada mevzuat gereği yerli

imalat aydınlatma armatürleri kullanılmıştır. Hem YBSBL'lı ve hem de LED'li armatürlü yol aydınlatması tesisatları çevresel, ekonomik ve sosyal yönleri ile incelenerek Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (YDSD) gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmelerde armatür üretim aşamalarındaki tüm hammadde, malzeme temin ve üretim proses bilgileri yerli üretici firmadan temin edilerek, sahadaki işletme koşulları ile birlikte ele alınıp enerji verimliliği ve sera gazı salımları açısından incelenmiştir.

Yol aydınlatması enerji verimliliği çalışmalarının ekonomik etkilerinin de dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yol aydınlatmasında YBSBL'lı ve LED'li armatür kullanımının maliyet analizi yapılmıştır. Ayrıca, armatürlerin ömür boyu maliyetini inceleyebilmek amacıyla yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. LED'li armatürlerin ilk tesisat satın alma maliyetinin YBSBL'lı armatürlerden daha yüksek olduğu, ancak işletme süresince daha az enerji harcamaları nedeniyle ürünlerin tüm yaşam döngüsü adımları dikkate alındığında, LED kullanımının maliyet açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür. Ek olarak, yönetmelik ve standartlara uygun olarak yapılan yol aydınlatması tasarımları ile trafik kaza sayısının ve ölüm oranının azaltılabileceği; gece dış ortamlarda olası suç oranlarının düşürülebileceği, güvenlik koşulları iyileştirilerek şehirlerin gece yaşam olanaklarının arttırılabileceği dikkate alınarak, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesinin sosyoekonomik katkıları tanımlanabilmektedir. Enerji verimliliği çalışmaları ile kısıtlı kaynakların kontrollü bir şekilde kullanılması ve sera gazı salımlarının azaltılmasının çevresel kazançlarının yanı sıra toplumların yaşam kalitesini arttırıcı etkileri de vardır.

ENERGY EFFICIENCY, CLIMATE CHANGE INTERACTION, LED TRANSFORMATION LIFECYCLE ASSESSMENT IN ROAD LIGHTING

SUMMARY

The environment, energy and economies are three essential topics that cannot be thought of separately, and they affect each other and influenced by one other, have never ceased to be important from the past until now. Historical developments show that the rate of pollution in the environment increases whenever there is an economic crisis. Together with increasing levels of welfare, rapid population growth and developing technology, the energy demand is also increasing and getting harder to meet. With this in mind, energy efficiency applications that have a high impact on emission reduction, become more important. Today, the effects of climate change have led to the most critical environmental problems. The main anthropogenic cause of climate change is greenhouse gas emissions from the combustion of fossil fuels. To reduce this effect, radical changes are required regarding energy production and consumption. On the other hand, a long-term solution also should be affordable and cost-effective to enable technological development to proceed in a climate-friendly manner. In energy efficiency studies, lighting installations are seen as a highly significant topic because of their efficiency in saving a high amount of electric energy in a short period of time, while being cost-effective.

Turkey is a developing country and energy demand is increasing rapidly in this respect. Considering the international agreements of which Turkey is a party, it is necessary to meet the energy need reliably and economically by minimizing its negative environmental effects. In order to alleviate the impact of the energy cost burden on the economy, and to improve efficiency for environmental benefit, the "National Energy Efficiency Action Plan (NEEAP)" was published in 2017, and targets were set for 2023, regarding energy efficiency. In the National Energy Efficiency Action Plan, "E7: Improve Energy Efficiency Public Lighting" action was also defined. Within the scope of the relevant action, activities such as evaluating and planning the transition from sodium vapor fixtures to LEDs, in terms of efficiency, time and benefit/cost, ensured the integration of innovative technologies into the legislation, and the development of domestic production and design in the field of efficient lighting were carried out.

In this study, the aim is to perform a sample application and evaluation that could guide these activities. For this purpose, calculations and evaluations have been carried out on an existing M2 lighting class road for which the LED conversion project was done. The requirements of the TS EN 13201 road lighting standards valid in Turkey have been fulfilled to a minimum extent within the scope of energy saving, and road lighting design calculations have been made with high pressure sodium vapor lamp (HPSVL) and LED luminaires and installation information has been recorded. In that application, the conversion to LED was taken as a basis only by changing the luminaire, without changing the lighting poles in the existing installation. In the sample

application, domestically manufactured lighting fixtures were used in accordance with the legislation. A life cycle assessment has been carried out in terms of energy efficiency and greenhouse gas emissions for both HPSV and LED luminaire road lighting installations. In the life cycle assesment, all raw material, material supply and production process information in the armature production stages were retreived from the domestic manufacturer and were evaluated together considering the operation conditions in the field.

In this study carried out in Denizli, the road chosen as an example is defined as an M2 class according to its usage. The road has 2 lanes; one of the lanes is 3.5 meters in one direction and the other one, in the opposite direction, is also 3.5 meters and the width of the median is 1.5 meters. The area where the application was done consists of 22 lighting poles. Calculations were made by only changing the armature without changing the pole. The lighting installation includes 12 meter high poles positioned in the middle median with 30 meter intervals. The poles, which are 2 meters in length with double consoles in both directions, have a console length of 2 meters and a console angle of 15°. Luminaires were mounted on the consoles at a 15° angle so that they were parallel to the road's surface. Based on this installation geometry, the road's pavement was accepted as an R3 class and the lighting designs were realized. In this case, the road lighting installation was equipped with HPSV and LED fixtures. The installation was aimed to get all possible data during the production and usage phase and to make a life cycle evaluation. For the possibility of data access, the luminaire data of a domestic lighting luminaire manufacturer was used in the designs. The ballast loss was accepted as 18 W in the lighting design calculations made with a 150 W luminaire with HPSV. The luminous flux of the luminaire is 12261 lm. The luminous flux of the 93 W LED luminaire is 13759 lm and the color temperature is 4000 K.

The M2 lighting class road has been designed in accordance with the lighting quality dimensions that must be followed in accordance with TS EN 13201 and TEDAŞ principles. The calculations' results indicated the average road luminance level was calculated as 1.62 cd/m^2 for the luminaire with HPSV and 1.76 cd/m^2 for the LED luminaire. In accordance with TS EN 13201 standards, the condition of providing lighting quality quantities without exceeding 1.2 times the average luminance level was followed. Moreover, quality criteria such as containment ratio, relative threshold increase and average luminance uniformity were provided. Road lighting design calculations were made using the DIALux program.

After the road lighting designs, greenhouse gas emissions and global warming potential were determined using the life cycle assessment approach. The evaluation was made so that the application sample period was 15 years. In the emission calculations for the 2 armatures, emissions caused by energy consumption, vehicle-related emissions during transportation (including processes such as raw material supply, product delivery to the final point, transportation for the factory) and emissions arising from combustion and electrical energy during their production were taken into account. Emission calculations were calculated in accordance with the "Rescript on Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emissions", IPCC "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" and ISO standards. The calculation data was obtained from the domestic manufacturer. In the production of HPSV and LED, a total of 2.1 kWh and 4 kWh of electrical energy was consumed, respectively. In the console production process of HPSV, 0.097 m3 natural gas was consumed during the painting phase. However, 1.687 m3 of natural gas was consumed in the production of the body and console parts of the LED luminaire, including the injection process. For this

reason, the amount of emission due to combustion was higher during the painting phase of the LED luminaire. The distance of 560.5 km from the factory to the Denizli road, which is the sample application area of the luminaires, was also taken into account in the calculations. From the calculations made according to the IPCC Tier approach, it was concluded that HPSV 7,528 tons CO_2, LED 4,180 tons CO_2 emissions. During the 15-year operation phase, the use of HPSV created 7,316 tons of CO_2, while the use of LEDs created 4,050 tons of CO_2. It was observed that the emission amount of the LED production stage was higher than that of HPSV, but at the end of 15 years of use, it produced less emissions in total due to energy efficiency.

In the last stage of the thesis, the use of HPSV and LED luminaires was carried out with 2 different cost analyses. First of all, the first cost analysis was carried out using the net present value method. With this method, which application is better in terms of cost, was evaluated. Secondly, a life cycle cost assessment was made, in which the stages of the 1st analysis was compared to it. Calculations were made over a 15-year period of redemption and an annual usage of 4000 hours. Also, calculations were made with the project-based TEDAŞ sales prices. At the end of the 15-year period, when the expenses and interest rate were included in the calculation, it was concluded that $ 379038 was spent in the use of HPSV, while $ 209969 was spent in the use of LED. When the costs are evaluated with the net present value method, it is seen that the use of LED will be more beneficial. Besides, the rates of non-operational costs of the luminaire with HPSV are 5% salvage value cost, 19% maintenance cost and 76% investment cost. In addition, the rates of non-operational costs of LED luminaires are 4% salvage value cost, 12% maintenance cost and 84% investment cost. As a result, in the case of using both armatures, the biggest contribution to the cost comes from the operating cost. However, it is significant that the initial investment cost of LED luminaires is high.

In addition to environmental and economic analyses, it is possible to reduce the accident and crime rates with the help of road lighting designs which are made in accordance with the regulations and standards, and on the other hand, socio-economic contributions can be achieved by increasing road safety. Through the energy efficiency studies it has been noted that the controlled consumption of resources and the reduction of the greenhouse gas emissions will further develop the quality of life of societies as well as provide environmental benefits. Sustainability is based on the cooperative realization of economic, social, and environmental developments and life cycle evaluations should be made with a holistic approach. The Life Cycle Sustainability Analysis (LCSA) was carried out within the framework of environmental life cycle and life cycle cost assessments in the road lighting conversion to a LED project, which is also taken as an example in this study.

1. GİRİŞ

İklim değişikliği günümüzün en önemli konularından biridir ve etkileri son yıllarda açıkça görülmektedir. 2021 yılı ortalama sıcaklık değeri, 1880 yılından günümüze görülen en yüksek altıncı sıcaklık değeri olarak kaydedilmiştir. 2013-2021 yılları arasındaki dokuz yıllık periyot, kaydedilen en sıcak on yıl arasında yer almaktadır. Bu ölçümlerden küresel ısınma etkilerinin günden güne arttığı görülmektedir [1]. Paris Anlaşması taahhütlerinin yetersizliği nedeniyle sıcaklığı $1,5^0$C ile sınırlandırma hedefine ulaşabilmek için hızlı bir şekilde dönüştürücü ilave eylemlere ihtiyaç duyulmaktadır. İklim değişikliğinin insan kaynaklı nedenlerinin başında fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan sera gazı salımları gelmektedir. Atmosferde bulunan sera gazları dünya yüzey sıcaklığının düşmesine yol açmaktadır. Bu etkinin azalması için enerji üretimi ve kullanımında köklü değişiklikler gerekmektedir [2].

1972 yılında yayınlanan "İktisadi Büyümenin Sınırları Raporu"nda kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların sınırlı kaynaklar olduğu, zamanla tükeneceği ve evrenin geleceğinin doğal kaynak ve enerji kullanımına bağlı olduğu vurgulanarak ilk kez çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerin bağımlılıkları incelenmiştir. Gezegenin korunması hedefine ancak mevcut enerji politikalarının değiştirilmesi ile ulaşılabileceği vurgulanmıştır [3]. Ekonomi, çevre ve enerji birbirinden ayrı düşünülmemesi gereken, birbirlerini etkileyen ve birbirlerinden etkilenen geçmişten günümüze önemini yitirmeyen üç kritik konudur. Tarihsel gelişimler, ekonomik krizler yaşandığında uygulama değişiklikleri sebebiyle çevresel kirlilikte ve sera gazı salım miktarlarında artışlar olduğu görülmektedir. Diğer yandan, hızlı nüfus artışı, artan refah seviyesinin etkisiyle enerji ihtiyacı yükselmekte ve ülkelerin uluslararası anlaşmalara uyum taahhütleri ile belirledikleri amaçlar doğrultusunda 2050 yılında net sıfır salıma ulaşma hedeflerine ulaşabilmeleri mümkün görünmemektedir. Bu nedenle, günümüzde salım azaltımında etkisi yüksek olan enerji verimliliği uygulamaları daha da önem kazanmıştır. Çeşitli enerji verimliliği uygulamaları ile uzun vadede ekonomik kazanç sağlanacak ve aynı zamanda da çevresel etkiler iyileştirilebilecektir.

Son yıllarda ekonomik büyümenin temelini iklim değişikliği mücadelesi ve enerji oluşturmaktadır. Avrupa Birliği (AB) tarafından 11 Aralık 2019 tarihinde ekonomik dönüşüm rejimi olan Avrupa Yeşil Mutabakatı açıklanmıştır ve dönüşümler tüm dünyada hızla yayılmaya başlamıştır. Türkiye de kamu ve özel sektör iş birliği ile hazırlanan Yeşil Mutabakat Eylem Planını yayınlamıştır. Düşük karbonlu ekonomiye geçiş, temiz, güvenli, yeterli ve ekonomik enerji arzı için oluşturulan eylemlerde enerji verimliliği çalışmaları dikkat çekicidir.

Enerji verimliliği çalışmalarında aydınlatma tesisatları kısa sürede yüksek elektrik enerjisi tasarrufu sağlanabilen tesisatlar olarak önemli bir konumdadır. Önemli miktarda elektrik enerjisi tüketen aydınlatma alanında AB tarafından belirlenen kalite standartları çerçevesinde, yol aydınlatmasında LED kullanımı gibi çeşitli uygulamalara geçilmesi ile enerji verimliliği sağlanmasının, küresel ölçekte CO_2 salımlarının azaltılmasında ciddi bir potansiyele sahip olduğu açıklanmaktadır [4]. Türkiye'de ise 2018 yılında yayınlanan Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planında (UEVEP), enerji verimliliği konusunda 2023 yılı adreslenerek hedefler oluşturulmuştur. UEVEP; enerji, ulaştırma, bina ve hizmetler, sanayi, tarım ve yatay konular kategorilerinde 55 eylemden oluşmaktadır. Bu planlamalardan enerji verimliliği çalışmalarında kamusal alanlarda yapılan uygulamaların etkilerinin yüksek olacağı düşünülmektedir. UEVEP'de enerji konulu eylemlerin içerisinde, genel aydınlatmada kullanılan armatürlerin verimlileri ile değiştirilmesi amacıyla "E7. Genel Aydınlatmada Enerji Verimliliğinin Artırılması" eylemi yer almaktadır. İlgili eylem kapsamında; sodyum buharlı armatürlerden LED'lere geçişin verimlilik, süre ve fayda/maliyet açısından değerlendirilmesi ve planlanmasına yönelik çalışmalar yapılması, LED aydınlatmaya dair usul ve esaslarda gerekli revizyonların gerçekleştirilmesi, yenilikçi teknolojilerin mevzuata entegrasyonun sağlanması, enerji tasarruf doğrulamalarının takibi, yerli üretim ve tasarımın verimli aydınlatma alanında geliştirilmesi, izleme ve kontrol faaliyetleri ile enerji tasarruf potansiyelinden yararlanılması, Türkiye Elektirik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ), Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Dağıtım Şirketleri, Belediyeler, Karayolları Genel Müdürlüğü, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) gibi kurumların detay dönüşüm programlarını oluşturması gibi faaliyetler yer almaktadır [5].

Günümüzde, yol ve sokak aydınlatmaları için tüketilen enerjinin önemli miktarda olduğu ve ekolojik, küresel iklim değişikliği gibi etkiler yoluyla sürdürülebilir kalkınmayı etkilediği bilinmektedir. Sürdürülebilir kalkınma, enerji verimliliği ve dış aydınlatma arasında bir sinerji mevcuttur. Enerji performansı ve sürdürülebilir kalkınma etkileşimi, daha verimli politikalar ile dış aydınlatma konusunda karar verme süreçlerine entegre edilebilir. Enerji verimliliğini arttıracak politikalara öncelik verilmesi sürdürülebilir kalkınmaya ulaşılması açısından oldukça önem taşımaktadır [6]. Yol aydınlatmalarında enerji verimliliğine geçiş, küresel iklim değişikliği etkilerinin, ekonomik dalgalanmaların yarattığı olumsuzlukların ortadan kaldırılması için uygun bir çözümdür [7]. Aydınlatmada enerji verimliliği ve LED dönüşümü açısından 2021 yılında ilerleme kaydedilmiştir. Küresel aydınlatma satışlarında LED, 2013 yılında %5'lik pazar payına sahip iken 2020 yılında %50'nin üzerinde bir orana ulaşmıştır. LED'ler ekonomik açıdan uygulanabilir diğer alternatiflerden daha verimli hale gelmiştir [8]. Mevcut sistemlerde YBSBL'dan LED'lere geçilmesi ile yaklaşık %69 enerji tüketiminde azalma olabileceği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Diğer yandan, LED armatürlere geçişin geri ödeme süresinin uzun olması, buna karşılık bakım maliyetlerinin daha düşük olması nedeniyle bu dönüşümlerde maliyetlerin, birim satın alma maliyeti açısından değil, yaşam boyu maliyeti açısından değerlendirilmesinin doğru olacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca LED'lerin ticarileşmesine yapılan ciddi yatırımlar ve LED pazarının hızlı büyümesi ile alış fiyatlarının düşeceği de ön görülmektedir [9]. LED teknolojisi sürekli geliştikçe enerji tasarrufu da artacaktır ve dolayısıyla yatırımın geri dönüş süresi giderek azalacaktır [10].

Sürdürülebilirlik değerlendirme sonuçlarının güvenilirliliği ve sağlamlığı için kapsamlılık ve yaşam döngüsü perspektifleri ilkelerinin uygulanması kaçınılmazdır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi, ürünlerin bütüncül olarak ele alınıp ekonomik, sosyal ve çevresel etkilerinin değerlendirildiği standartlaşmış bir yöntemdir [11]. Ayrıca, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), farklı sera gazı uzaklaştırma teknolojileri potansiyelini de bütünsel olarak değerlendirmek için etkili bir metodolojidir. İklim değişikliği etkileri ile mücadele çalışmalarında yaşam döngüsü değerlendirmesine duyulan ihtiyaç değerlerle ortaya konulmuş ve bu konudaki çalışmalar artmıştır [12]. Ancak aydınlatma alanında gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının sayısı oldukça azdır. Aydınlatma tesisatlarında gerçekleştirilecek enerji verimliliği çalışmalarını esas alan yaşam döngüsü

değerlendirmesi hakkında yapılacak çalışmalara, akademik incelemelere ihtiyaç vardır. Bu araştırmaların amaçlanan enerji verimliliği çalışmalarının uygulanabilirliklerini arttıracağı açıktır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, enerji verimliliği çalışmaları içinde yer alan LED'li yol aydınlatmalarına dönüşüm çalışmalarına katkı sağlayacak şekilde gerçek yol aydınlatması tesisat bilgileri ve olası tasarım hesap verileri kullanılarak enerji verimliliği ve karbon salımları açısından yaşam döngüsü değerlendirmesi ile yaşam boyu maliyet değerlendirmesi yapılması amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Aşamaları

Tez çalışma konusu ve gerekliliği hakkında genel bilgiler giriş bölümünde açıklanmıştır. İkinci bölümde enerji verimliliği, çevre ve ekonomi alanlarında Dünya'da ve Türkiye'de yapılan çalışmalar incelenerek mevcut durum ve gelecek uygulamalar değerlendirilmiştir. İklim değişikliği ile mücadele konusunda uluslararası anlaşmalar ve Türkiye'nin konumu ortaya konmuştur. Enerji verimliliğinin çevre ve ekonomi açısından önemi belirtilerek yol aydınlatmasında enerji verimliliği yaklaşımları anlatılmıştır. Üçüncü bölümde yaşam döngüsü değerlendirmesi ve yaşam döngüsü maliyeti tanımlanmış ve aydınlatma alanında yapılan uygulama örnekleri incelenmiştir. Dördüncü bölümde, yol aydınlatmasının esasları ve mevzuatı, LED'e dönüşüm konusunda yapılan literatür çalışmaları incelenmiştir. Ardından gerçek tesisat bilgileri kullanılarak bir örnek yol aydınlatması tasarımı yapılmıştır. Beşinci bölümde, örnek inceleme üzerinden yol aydınlatmalarında mevcut yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı (YBSBL) armatürlerden LED'e dönüşümün, sera gazı salımları açısından yaşam döngüsü değerlendirmesi, yaşam boyu maliyet analizi ve sosyal etki değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Altıncı ve son bölümde çalışmanın sonuçları hakkında bilgiler verilmiş ve yol aydınlatmasında LED'e dönüşüm çalışmalarına katkı sağlayabilecek yaşam döngüsü değerlendirmesi ve yaşam döngüsü maliyeti hakkında öneriler sunulmuştur.

2. ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ÇEVRE VE EKONOMİ AÇISINDAN ÖNEMİ

Uluslararası Enerji Ajansı tarafından 2020 yılında yayınlanan enerji verimliliği raporunda, son beş yılda, birincil enerji yoğunluğu ve ölçülen enerji verimliliği küresel gelişmelerinin azaldığı belirtilmiştir. Raporda koronavirüs salgınının eklediği stres ile birlikte devam eden düşük enerji fiyatlarının sonucunda, enerji yoğunluğunun önceki yıllara göre küresel sürdürülebilirlik ve iklim hedeflerine ulaşılması için gerekli olan seviyenin oldukça altında kalan yaklaşık %50 oranında iyileşmesi beklendiği ifade edilmektedir. Ekonomik büyümede tahmini yaşanacak düşüşler ve gelir belirsizliğinin tüketici ve iş karar verme sürecini etkilemesi gibi nedenlerle enerji verimli yeni ürünlere yapılan yatırımların da azalması beklenmektedir. Mevcut durumda, enerji yoğun endüstrilerde daha yüksek üretim talepleri olması nedeniyle sanayi sektörü, daha fazla enerji yoğun hale gelecektir. Bu olumsuzlukların engellenmesi için verimliliğin arttırılması amaçlı ortak çabalar gerekmektedir. Enerji verimliliği iyileştirmelerinin hızlanabilmesi için acil eylem ihtiyacı olduğu açıkça görülmektedir [13].

2.1 Enerji, Enerji Verimliliği, İklim Değişikliği ve Ekonomi Etkileşimi

Enerji, çevre ve ekonomi birbirinden ayrı düşünülemeyen üç temel unsurdur. Çevrenin korunması ve iklim değişikliği etkilerinin azaltılmasında oldukça büyük bir payı olan enerji verimliliğinin ve çevresel uygulamaların ekonomi ile direkt ilişkili olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda ülkeler yerel ve uluslararası düzeyde enerji, çevre ve ekonomi temelinde politikalar oluşturmaktadır.

2.1.1 Enerji ve enerji verimliliği

Bu bölümde, Dünya'da ve Türkiye'de enerji ve enerji verimliliği alanlarındaki mevcut durum ayrı ayrı analiz edilmiştir. Enerji tüketim eğilimleri, enerji kaynakları, enerji verimliliği konusunda gerçekleşen uygulamalar ve enerji politikaları konusunda inceleme yapılmıştır.

2.1.1.1 Dünya’da enerji ve enerji verimliliği

Küresel enerji talebi 2020 yılında, 2. Dünya Savaşı'ndan itibaren görülen en büyük mutlak düşüş olan %4 oranında azalmıştır. Enerji talebindeki toplam düşüşün yaklaşık %75’ine, koronavirüs salgını nedeniyle dünya çapında uygulanan karantina uygulamaları ve ulaşım talebinin azalması sonucu petrol talebinde görülen çöküş sebep olmuştur. Doğal gazın talep düşüşüne direnç gösterebilme nedenlerinin başında Çin'de devam eden güçlü büyüme gelmektedir. Dönemin getirdiği belirsizliklere rağmen rüzgar ve güneş enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji büyümeye devam etmiştir. Rüzgar enerjisi maliyetleri son beş yılda yaklaşık %40 ve güneş enerjisi maliyetleri %55 oranında düşmüştür [14]. Petrol talebinde tahmini %8,8 oranında düşüş görülmüştür. 2020 yılında nükleer reaktörlerde elektrik üretiminde ortalama %4 azalmaya karşın, 2019 ve 2020 yıllarında devreye alınan yeni ünitelerle Çin’de %5 ve Rusya'da %3 nükleer enerji artış oranı gerçekleşmiştir. Birleşik Arap Emirlikleri ve Belarus’da ise ilk nükleer enerji üniteleri ticari faaliyete sokulmuş olup, yeni ünite yapımları devam etmektedir. Gelişmiş ekonomilerde, nükleer enerji 2021'de biraz artış göstermekteve düşük karbonlu üretimin bir kaynağı olmaya devam etmektedir. 2020 yılında, küresel elektrik enerjisi talebi yaklaşık %1 düşmüştür. 2019 yılının benzer koşulları olan aynı dönemleriyle karşılaştırıldığında, hava değişimleri etkileri çıkarıldıktan sonra, Şubat ayında, en büyük küresel elektrik enerji tüketicisi olan Çin'in talebinin %10'dan fazla düştüğü ve Amerika Birleşik Devletleri’nde de yaklaşık aynı büyüklükte düşüş yaşandığı görülmektedir. Mart ayından Nisan ayına kadar İspanya ve İtalya'da %25'ten fazla, Fransa, Almanya ve Birleşik Krallık haftalık talebinde de %15'ten fazla düşüş görülmüştür. Koronavirüs vakalarının Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'ne oranla daha az görüldüğü Kore ve Japonya’da talep yaklaşık %8 azalmıştır. 2020 yılında rüzgar ve güneş enerjisi artışı, küresel elektrik enerjisi talebindeki düşüşle beraber yenilenebilir enerjinin rekor düzeyde büyümesine neden olmuş ve bu durum fosil yakıtla çalışan nükleer enerji santrallerini olumsuz etkilemiştir. Yenilenemeyen kaynaklardan gelen elektrik enerjisi miktarı %3'ten fazla azalmıştır. 2020 yılında elektrik enerjisi kaynakları arasında kömür üretiminde %4,4 oranında, son elli yılda görülen en büyük düşüş gerçekleşmiştir. Doğal gaz ile çalışan elektrik santrallerinde, 2020'de sadece %1,6 düşüş yaşanmıştır. Petrol, %4,4 oranında azalarak 2012 yılından günümüze kesintisiz süren küresel düşüşüne devam etmiştir [15].

Birincil enerji tüketimi tüm dünyada 2020 yılında %4,5 azalmıştır ve 2009 yılından günümüze ilk kez enerji tüketiminde düşüş olmuştur. Enerji tüketiminin arttığı tek ülke %2,1 ile Çin olmuştur. Buna karşılık en büyük düşüş %8 ile Kuzey Amerika'da ardından %7,8 ile Avrupa'da görülmüştür. Türkiye'de ise %3,6 düşüş gerçekleşmiştir [14]. Diğer yandan, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynaklardan fosil yakıtlar, halen dünya genelinde en çok kullanılan enerji kaynaklarıdır ve elektriğe olan talep her geçen gün artmaya devam etmektedir [16].

Avrupa Komisyonu yasal bağlayıcılık ve devletin beklentilerinin bilinmesinin, hedeflere ulaşılmasında en etkili yol olduğu düşüncesindedir. Fosil yakıtlara yüksek bağımlılık olması, enerji fiyatlarının yükselmesi ve değişkenliği, iklim değişikliğinin yansıyan sonuçları Avrupa Komisyonu'nu, kapsamlı bir enerji politikası ile eylemlerin birleştirilmesine yönlendirmiştir. Bu enerji politikası çerçevesinde, sera gazı salımlarının ve kirliliğinin azaltılması, yenilenebilir enerji ve yüksek teknoloji endüstrileri teşvik edilmektedir. Yüksek oranda yerli olan yenilenebilir enerji kaynakları, geleneksel kaynakların gelecekteki kullanılırlığına olan güven eksikliği ve merkezi yapıya sahip olunmaması gibi nedenler ekonomileri, enerji arzı değişkenliğine karşı daha az savunmasız konuma getirmektedir. Dolayısıyla, sürdürülebilir enerji geleceğin kilit faktörü olmaktadır. İki temel hedef olan sera gazı salımlarının azaltılması ve arz güvenliğinin arttırılmasında, devletlerin yenilenebilir enerjinin enerji karışımındaki payını arttırmak amaçlı önlemler almaları önemlidir [17].

UEA, hükümetlerin teşvik paketlerinde yer alan 2020 yılı Ekim ayı sonuna kadar açıklanan enerji verimliliği önlemleri için 66 milyar ABD doları tutarında finansmanın ayrıldığını belirtmektedir. Enerji verimli binalara yapılan yatırımlarda her 1 milyon ABD Doları harcamasına karşılık, yaklaşık 15 iş gücü yaratılacağı tahmin edildiği için bina sektörüne tahsis edilen pay büyüktür. Elektrikli araçlara geçişin hızlanması amacıyla yeni araç şarj altyapısı da dahil olmak üzere ulaşım sektöründe yaklaşık 20 milyar ABD doları yatırım açıklanırken, karayolu taşıtlarının verimliliği konusunda yapılan harcamalar asgari düzeyde kalmaktadır. Mevcut uygulama örnekleri sektörler ve ilkeler arası bir dengesizlik olduğunu, daha pek çok fırsatın değerlendirilmediğini göstermektedir. Avrupa ülkelerinin bu konuda ayırdıkları bütçe ile dünyanın diğer bölgelerinde yapılan harcamalar arasında büyük fark vardır. Verimlilik için açıklanan

kamu teşvik fonlarının %86'sı Avrupa'ya aitken, kalan %14'ü Asya-Pasifik bölgesi ve Kuzey Amerika arasında bölünmüş durumdadır. Enerji verimliliği teşvik harcamalarının artması aynı zamanda milyonlarca iş olanağı da yaratabilecektir ve ekonomi üzerinde etkisi yüksek olabilecektir. Günümüzde açıklanan verimlilik teşvik harcamalarının, 2021 ve 2023 yılları arasında yaklaşık %34'ünün bina dolayısıyla inşaat sektöründe, %16'sının sanayide ve %20'sinin ulaştırma sektöründe kullanılacağı ve 1,8 milyon tam zamanlı iş eşdeğeri yaratabileceği tahmin edilmektedir [13].

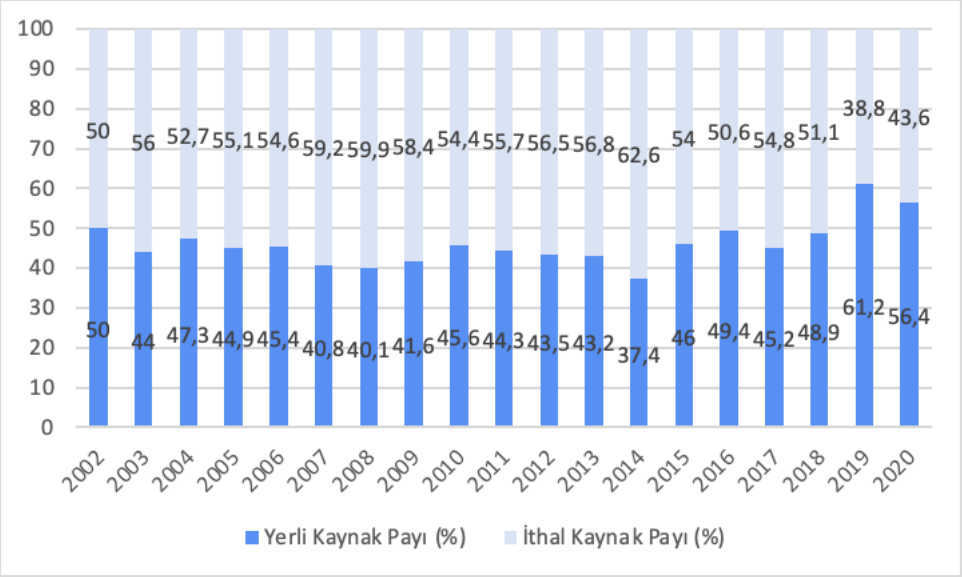
2.1.1.2 Türkiye'de enerji ve enerji verimliliği

Türkiye gelişmekte olan bir ülkedir ve bu doğrultuda enerji talebi hızla artmaktadır. Taraf olunan uluslararası anlaşmalar da dikkate alındığında güvenilir, olumsuz çevresel etkileri en aza indirilerek ekonomik olarak enerji ihtiyacının sağlanması gerekmektedir [18]. 15.11.2021 tarihinde yayınlanan 2020 yılı ulusal enerji denge tablosunda; 83,61 milyon nüfusu olan Türkiye'nin kişi başına enerji tüketimi 1,760 TEP/k ve kişi başına elektrik tüketimi net 3.124 kWh/k, brüt ise 3.661 kWh/k olarak açıklanmıştır [19]. Türkiye elektrik enerjisi talep projeksiyonu raporunda 20 yıllık dönem için, enerji tüketiminin ortalama %2,9-3,7 yıllık artış oranı ile 545-636 TWh değerine ulaşacağı, kişi başı elektrik enerji tüketiminin de 5.430-6.336 kWh değerine yükseleceği öngörülmektedir [20].

Türkiye'de enerji verimliliği konusundaki mevzuat gelişmeleri 2000'li yıllarda başlamıştır. 5627 sayılı "Enerji Verimliliği Kanunu" 2007 yılında yürürlüğe girmiştir. Enerji Verimliliği Kanunu'nun ardından 15 Şubat 2008 tarihinde 26788 sayılı resmi gazetede yayınlanan Başbakanlık genelgesinde, elektrik enerjisi öncelikli olacak şekilde, enerjinin etkin ve verimli kullanımı, israfının önlenmesi için kamu, sivil toplum kuruluşları ve özel sektörün katılımı ile "Ulusal Enerji Verimliliği Hareketi" başlamıştır. 2008 yılı, Enerji Verimliliği Yılı olarak duyurulmuştur [21]. Enerji maliyeti yükünün ekonomi üzerindeki etkisinin hafifletilmesi ve çevresel fayda için verimliliğin geliştirilmesi amacı ile 2012 yılında "Enerji Verimliliği Strateji Belgesi", 2018 yılında "Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP)" yayınlanarak enerji verimliliği konusunda 2023 yılı için hedefler oluşturulmuştur [5].

2019 yılında On Birinci Kalkınma Planı yayınlanmıştır. Planda, enerjide dışa bağımlılığın ve cari açığın azaltılması için enerji verimliliği konusunda belirlenen hedefler ile birlikte enerji arzının sürdürülebilir, kaliteli, güvenli ve uygun maliyetlerle

elde edilmesi amaçlanmıştır. Planda imalat sanayisinde enerji verimliliğinin arttırılması, beyaz eşya ve elektrikli makineler sektöründe verimlilik artırıcı faaliyetlerle yerli üretimin arttırılması, enerji verimliliği kazanımlarıyla karbon salımının azaltılması gibi hedeflere yer verilmiştir [22]. 11. Kalkınma Planında belirtilen hedeflerde ise 2023 yılında elektrik enerjisi toplam kurulu gücünün 109,5 GW'a erişeceği tahmin edilmektedir [23]. 2020 yılında Türkiye nüfusu 83,6 milyon kişi iken kurulu gücü 95.890,6 MW'dır. Kişi başı elektrik enerjisi kurulu gücü 1.147 Watt değerindeyken kişi başı net tüketim 3.124 kWh değerindedir. Yerli kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin toplam Türkiye üretimi içindeki payı 2020 yılında %56,4 oranında 306.703,1 GWh olarak gerçekleşmiştir [24]. Toplam Türkiye elektrik enerji üretimindeki yerli ve ithal kaynaklı üretim payları Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1: Yerli ve ithal kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin toplam Türkiye üretimindeki payları (2002-2020).

Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminde yenilebilir enerji kaynakları payının arttırılması, elektrik arz ve güvenliğinin sağlanabilmesi için belirlenen hedeflerin gerçekleştirilmesi amacıyla hem yenilenebilir kaynaklar hem de kısmen fosil yakıtlar için teşvik mekanizmaları oluşturulmuştur. YEKDEM ve YEKA mekanizmaları yenilenebilir enerji ve kapasite gelişmelerini amaçlamıştır. YEKA'nın asıl amacı yerli ekipman üretimini arttırmaktır. Elektrik enerjisi üretimine uygun olacak hazine ve kamu arazilerinde yenilenebilir enerji kaynak alanlarında çalışılmasına ilişkin bir sistemdir. YEKDEM ise jeotermal, dalga akıntısı, biyokütle, güneş, rüzgar, gel-git ile nehir, kanal, rezervuar alanı on beş kilometre altında kalan hidroelektrik santralleri

için satın alım garantisidir [25]. Türkiye enerji politikalarının ve 2023 yılı ulusal strateji hedeflerinin temelinde enerji verimliliği ve tasarrufu, dışa bağımlılık risklerinin azaltılması, arz güvenliği sağlanması, iklim değişikliği mücadelesi ve çevrenin korunması, düşük karbonlu ekonomiye geçiş bulunmaktadır. Enerji verimliliği alanında verimlilik arttırıcı proje destekleri kapsamında, 31 Aralık 2020 tarihi itibariyle destek verilen 308 proje, devam eden 107 proje ile toplamda 417 proje yürütülmektedir. Toplamda 74,73 milyon TL destek tutarı ile 87.826 TEP/yıl enerji tasarrufu elde edilmesi planlanmıştır [26]. 2023 yılına kadar Türkiye, yenilenebilir enerji payının toplam elektrik enerjisi üretiminde en az %30 oranına ulaşmasını hedeflemektedir [27]. Rüzgar, güneş, hidroelektrik, jeotermal ve kömür başta olmak üzere yerli enerji kaynaklarından, iklim değişikliği hedefleri ve enerji arz güvenliği ile uyumlu olacak şekilde olası en yüksek seviyede faydalanılması gerektiği için enerji kaynakları temelli stratejiler belirlenmiştir. İşletme bakım giderinin düşüklüğü, yerli doğal kaynak kullanımı, teknik uygulanabilirlik, uzun fiziki ömre sahip olması, kırsal kesim sosyal ve ekonomik yapısına katkıda bulunması gibi sebeplerin de etkisiyle hidroelektrik enerjinin payının arttırılması son dönemlerde önem kazanmıştır. Jeotermal enerji kullanımı konusunda ise jeotermal ısı pompasının yaygın kullanımının sağlanması ve bölgesel ısıtma uygulamaları önemli adımlar olarak belirtilmiştir [28]. Ek olarak, 2023 yılı için doğal gazın elektrik üretimindeki payının %30 oranının altına düşürülmesi, 600 MW değerinde olan Türkiye jeotermal potansiyelinin işletmeye girmesi ve 20.000 MW'a ulaşan rüzgar enerjisi kurulu gücü hedeflenmektedir [29].

Düşük karbonlu ekonomiye geçiş, temiz, güvenli, yeterli ve ekonomik enerji arzı için oluşturulan eylemlerde enerji verimliliği çalışmaları dikkat çekicidir. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'nda enerji verimliliği konusunda 2023 yılı adreslenerek hedefler oluşturulmuştur. UEVEP'nda belirtilen ve geri ödeme süresi 7 yıl olacak eylemlerin, Türkiye birincil enerji tüketiminde %14 azalma, 10.928 milyar ABD doları yatırım ile 23,9 MTEP kümülatif tasarruf hedeflenmektedir. Bu tasarrufların etkisinin 2040 yılına kadar devam edeceği öngörülmektedir [5].

2.1.2 Çevre ve İklim Değişikliği

Küresel ısınma, küresel yüzey sıcaklığında, uygulamaya bağlı olarak bir taban çizgisine göre olan değişimdir. Coğrafi kapsamda güvenilir gözlemler olarak en erken dönem olarak ifade edilen 1850-1900 yılları temel alınmaktadır ve küresel yüzey

sıcaklığındaki değişiklikler, 1,5°C, 2°C, 3°C veya 4°C gibi belirli küresel ısınma seviyeleri olarak tanımlanmaktadır [30].

Küresel ısınmanın iklim değişikliğine sebep olduğu ve beraberinde enerji, su ve gıda gibi kaynaklarda kıtlık sebepli çatışmalara neden olacağı bilinmektedir. Küresel ısınma, deniz seviyesinde yükselme ile kutup buzullarındaki erimenin ana sebebidir. Ek olarak, hava modellerinde değişiklik ve doğal afetlerde öngörülememezlik ile şiddetlerindeki artışa neden olduğu da iddia edilmektedir. İklim değişikliği ve küresel ısınma sonuçları, belirli bölgesel ve yerel konumlarda yoğunlaşmasına karşın, ulusal sınırları aşan etkileri de mevcuttur [31]. Yaklaşık 1750 yılından günümüze, insan faaliyetleri kaynaklı sera gazı salımlarında artış görülmüştür. Sürekli artış gösteren atmosferdeki salımlar 2019 yılında yıllık ortalama CO_2 410 ppm, N_2O 332 ppb ve CH_4 1866 ppb değerlerine ulaşmıştır. 1850 yılından günümüze son kırk yılın her biri, bir önceki on yıldan daha sıcak olmuştur. Küresel yüzey sıcaklığı 2001-2020 yılları arasında ortalama olarak önceki yıllara oranla 0,99 °C daha yüksektir. 1901 ve 2018 yılları arasında küresel ölçekte deniz seviyesi ortalama 0,20 m yükselmiştir. Bu yükselme hızı 1901 ve 1971 yılları arasında yılda ortalama 1,3 mm iken daha sonra yıllık 1,9 mm'ye çıkmış ve daha da yükselmeye devam etmektedir. 1900 yılından günümüze ortalama deniz seviyesinde, herhangi bir yüzyılda görüldüğünden daha çok yükseliş gözlemlenmiştir. Arktik deniz buzu alanı 1850'den itibaren yıllık ortalama en düşük seviyesine 2011–2020 yılları arasında ulaşmıştır. Tüm dünya buzullarının eşzamanlı geri çekilmesi, 1950'lerden günümüze son 2000 yılda benzeri görülmemiş şekilde gerçekleşmiştir. Atmosferik CO_2 salımları da 2 milyon yıl içindeki herhangi bir zaman ile karşılaştırıldığında, 2019 yılında en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Yukarıda belirtilenler küresel ısınma etkilerinden sadece bazılarıdır ve etkiler artmaya devam etmektedir. 1970'lerden günümüze gözlemlenen bu artışların ana itici gücünün insan kaynaklı olması muhtemeldir [30], Küresel ısınma evrensel bir sorundur ve iş birliği yapılarak mücadele edilmesi gerekmektedir. Küresel iş birliği ile iklim değişikliği etkilerine karşı dönemin gerekliliklerinden beslenilerek çeşitli sözleşme ve protokoller oluşturulmuştur. İklim değişikliği alanında yayınlanan başlıca sözleşmeler ve kapsamları aşağıda açıklanmıştır.

Viyana Sözleşmesi

Viyana Sözleşmesi 1985 yılında kabul edilmiş ve 1988 yılında yürürlüğe girmiştir. İnsan faaliyetlerinin sebep olduğu olumsuz etkilere karşı bilimsel ve hukuki

değişimleri belirlerken, zararlı kimyasalları azaltarak ozon tabakasının korunmasını amaçlamıştır. Sözleşmenin ardından, sözleşme amaçlarına ulaşılması için oluşturulan uygulama aracı Montreal protokolü 1989'da yürürlüğe girmiştir. Türkiye bu sözleşmelere 1991 yılında taraf olmuştur. Sözleşme ve protokol yükümlülükleri kapsamında 1999 yılında "Ozon Tabakasını İncelten Maddelerin Azaltılmasına İlişkin Yönetmelik" yayınlanmış ve "Ozon Tabakasını İncelten Maddelere İlişkin Yönetmelik" başlığıyla 2017 yılında yenilenmiştir [32].

Montreal Protokolü

Ozon tabakasını incelten maddelerin, küresel olarak üretim ve tüketimini azaltmayı amaçlayan "Ozon Tabakasını İncelten Maddelere İlişkin Montreal Protokolü" 1987 yılında imzalanmıştır. Kyoto Protokolü'nün ilk taahhüt dönemindeki azaltma hedefleri ile kıyaslandığında Montreal Protokolü'nün iklim koruma hedefleri daha yüksektir. Ek olarak, daha düşük küresel ısınma potansiyeline sahip alternatif gazlar uygulaması ya da ikame florokarbon gazlarının salımı yönetimi ile ilave iklim faydaları da elde edilebilmektedir [33]. Montreal Protokolü Viyana Sözleşmesini ozon tabakası için zararlı olan maddelerin salımlarına açık sınırlar koyarak genişletmiş ve bu uygulama 1 Ocak 1989 tarihinde yürürlüğe girmiştir. İçeriğinde sera gazlarından olan kloroflorokarbonların yıllık üretim ve tüketim miktarlarına sınırlamalar ve kademeli olarak bu maddelerin ihracatının yasaklanması yer almaktadır. Montreal Protokolü'nü onaylayan ülkeler, Viyana Sözleşmesi'ne direkt taraf olarak kabul edilmiştir. 1990 yılında, kuzey kutbu üzerinde büyük bir delik açıldığı ve ozon tabakasının incelmesinin arttığı bilimsel kanıtlar sonucunda belirlenmiştir [34]. Bunun üzerine 29 Haziran 1990 tarihinde, Montreal Protokolü kapsamında gerekli finansal mekanizmaların oluşturulabilmesi, teknolojik transfer sağlanması ve kontrol önlemlerinin güçlendirilmesi amacıyla bir dizi değişiklik yapılmıştır [35]. Türkiye, 1991 yılında Ozon Tabakasının Korunmasına Dair Viyana Sözleşmesi ve Ozon Tabakasını İncelten Maddelere Dair Montreal Protokolüne taraf olarak günümüze kadar protokolde gerçekleşen tüm değişiklikleri kabul etmiştir. Bu tarihten itibaren de Ozon Tabakasını İncelten Maddelerden Hidrokloroflorokarbon grubu gazların ulusal ve uluslararası kullanımı, ithalat ve ihracatına dair ulusal strateji ve eylem planı, Hidrokloroflorokarbon Sonlandırma Yönetim Planı Projesi (HPMP) gibi çalışmalarla ulusal stratejisini geliştirmektedir [36].

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

İklim değişikliği rejiminin kurucu anlaşması Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS)'dir. 9 Mayıs 1992'de kabul edilmiş ve bir ay sonra Brezilya, Rio de Janeiro'daki BM Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda imzaya açılmıştır. 21 Mart 1994 tarihinde hızlıca yürürlüğe girmiş ve günümüzde neredeyse evrensel üyeliğe sahip olmuştur. BMİDÇS, Viyana Sözleşmesinin genel hükümleri öncelikli olarak genel maddelerini kapsayacak şekilde, Montreal Protokolü ve sonraki değişikliklerin ve ayarlamaların benimsenmesi için platform sağlamıştır. BMİDÇS yıllar boyunca uluslararası eylemlere iklim değişikliği perspektifi ile rehberlik edecek parametreleri tanımlamıştır [37]. 1992 yılında yapılan Rio Konferansı'nda, Çölleşmeyle Mücadele ve Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmeleri ve ardından Sulak Alanlara İlişkin Ramsar Sözleşmesi de eklenerek kabul edilmiş ve uygulanmalarının hızlandırılması amaçlanmıştır [38].

Kyoto Protokolü

BMİDÇS, tehlikeli insan müdahalesinin iklim sistemi üzerine etkilerini önlemeyi amaçlamaktadır. Akabinde "Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne İlişkin Kyoto Protokolü" hazırlanmış ve 1997 yılında imzalanmıştır. Türkiye için BMİDÇS, Paris Anlaşması, Kyoto Protokolü, Viyana Sözleşmesi ve Montreal Protokolü iklim değişimi çalışmalarının temelini oluşturmaktadır [38].

Protokolde baz yılı olarak 1990 kabul edilmiştir ve içeriğinde sanayileşmiş ülkelerin (Ek-I ülkeleri) iklim politikalarının düzenli raporlanması, sera gazı salımlarının baz yılı seviyelerine ulaştırılması, sera gazı yıllık envanterlerinin oluşturulup paylaşılması ve Montreal Protokolü tarafından kontrol edilmeyen sera gazı salımlarını sınırlayan veya azaltan önlemlerin ve politikaların teşvik edilmesini amaçlayan reformların yapılması yer almaktadır. Gelişmekte olan ülkeler (Ek-I dışı ülkeler) için ise daha genel ve daha az düzenli raporlama şartı bulunmaktadır. Ekonomik kalkınmanın önemi sebebiyle sera gazı salımlarının gelişmekte olan ülkelerde artacağı kabul edilmektedir. Bu nedenle, protokol salımlarının belli değerlerde sınırlandırılması amaçlanmıştır [39]. Kyoto Protokolü ile sera gazı salımlarının azaltılması amacıyla uluslararası bağlayıcı hedefler belirlenmiştir. 1990 yılı toplam CO_2 salımlarında en az %55'lik paya sahip Ek-I ülkelerinin protokolü onaylaması şartıyla yürürlüğe girebilecek olan protokol, 2004 yılında Rusya Federasyonu'nun onaylamasının ardından 16 Şubat 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir [40] ve 2010 yılı Mayıs ayı itibariyle 191 ülke ve AB

protokole taraftır. Kyoto Protokolü Türkiye'de, 2009 yılında Bakanlar Kurulu kararı ile onaylanmasının ardından 13 Mayıs 2009 tarihinde resmi gazetede yayınlanmıştır.

Bir OECD ülkesi olan Türkiye, 1992 yılında BMİDÇS kabul edilirken gelişmiş ülkelerle birlikte değerlendirilerek Ek-I ve Ek-II listesinde yer almıştır. Ek-I listesinde bulunan ülkeler sera gazı salımlarını sınırlama ve konu ile bağlantılı ülke bilgilerini bildirme yükümlülüğü olan ülkelerdir. Ek-II'de ise Ek-I listesi yükümlülüklerinin yanında, eklerin dışında kalan ülkelere teknoloji ve finansal açıdan destek olunması amacıyla maddi yükümlülükler de mevcuttur. Türkiye 2001 yılında 7. Taraflar Konferansı'nda (COP7) Ek-II listesinden çıkartılmış, sadece Ek-I listesinde yer almış ve 2004 yılında BMİDÇS' ye 189. taraf olarak kabul edilmiştir. Ardından da 2009 yılında Kyoto Protokolü'ne taraf olmuştur. Protokol kabul edildiğinde BMİDÇS tarafı olmadığı için Türkiye'nin, 2008-2012 döneminde bir yükümlülüğü bulunmamaktadır [41].

Paris Anlaşması

2015 yılında BMİDÇS'nin 196 tarafı, insan kaynaklı iklim değişikliğini durdurmak amacıyla küresel eylemi belirleyici Paris Anlaşması'nı kabul etmiştir. Paris Anlaşması, 2020'de sona erecek olan 1997 Kyoto Protokolü'nün yerini alacak ve taraflara Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkıları uygulamak için aşağıdan yukarıya gönüllü taahhütlerine dayanarak yasal olarak bağlayıcı yükümlülükler getirmektedir. İklim değişikliği rejiminin bilinmesi iyi bir ilerleme göstergesidir, ancak bunun uygulanması halen belirsizliğini korumaktadır [38]. 2016 yılında imzaya açılan anlaşma aynı yıl içerisinde yürürlüğe girmiştir ve BM tarihinde en hızlı imzalanan anlaşma olmuştur. Küresel sıcaklık artışının 1,5-2°C ile sınırlanması şartı kabul edilmiş ve iklim risklerinden arındırılarak düşük karbonlu bir gelecek hedeflenmiştir. Paris anlaşması ile iklim değişikliğinin kilit taşı olan enerji politikalarında temiz ve yenilenebilir enerjiye geçiş başlamıştır. Türkiye Paris Anlaşması'nı ilk günü imzalamış olmasına rağmen "Paris Anlaşmasının Onaylanmasının Uygun Bulunduğuna Dair Kanun" ancak 7 Ekim 2021 tarihinde resmi gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. Türkiye iklim değişikliği mücadelesi kapsamında enerji verimliliği öncelikli olmakla beraber her çeşit kaynakta verimlilik, yenilenebilir enerjinin yaygınlaştırılması, karbon ticareti mekanizması oluşturulması gibi çalışmalar yürütmektedir. 2015 yılı Eylül ayında sunulan ulusal katkı beyanında 2030 yılı hedeflenerek sera gazı salımı artışlarında %21'e kadar azalma öngörülmüştür [32].

26. BM İklim Değişikliği Konferansı İskoçya'nın Glasgow şehrinde gerçekleştirilmiştir. Konferansta salım azaltım planları, gelişmekte olan ülkelere finansal desteğin arttırılması gibi önemli kararlar alınmıştır. Mevcut iklim finansmanının, gelişmekte olan ülkelerde, iklim değişikliği etkilerinin kötüleşmesi ile yetersiz kaldığı vurgulanmıştır. Bu amaçla, gelişmiş ülkelere küresel çabanın bir parçası olarak, gelişmekte olan ülkelere teknoloji transferi, iklim finansmanı ve kapasite geliştirmeleri çalışmalarına desteklerini arttırmalarına yönelik çağrı yapılmıştır. Çok taraflı kalkınma bankalarına, özel sektöre ve diğer finans kuruluşlarına da iklim planlarına ulaşılabilmesi için ihtiyaç duyulan kaynağın sağlanması amacıyla finansman seferberliğini arttırma çağrısında bulunulmuştur. Ayrıca, kömürün kademeli olarak azaltılması taahhüdü ile Konferans, kömür kullanımını azaltmayı hedefleyen ilk anlaşma olarak tarihe geçmiştir. İklim Zirvesi'nde 1,5°C ile küresel ısınmayı sınırlaması ve küresel CO_2 salımlarının 2030 yılına kadar 2010 düzeyine oranla %45 ve yüzyılın ortalarında net sıfıra indirilmesi çağrıları yapılarak, sera gazı salımlarında hızlı, derin ve sürekli azalmaların gerektiği ifade edilerek, taraflar 2030 yılına kadar metan dahil karbondioksit dışı sera gazı salımlarını azaltmak amacıyla farklı eylemler gerçekleştirmeye davet edilmiştir. Enerji verimliliğinin yaygınlaştırılması ve temiz enerji üretiminin arttırılması amacıyla teknolojilerin geliştirilmesi, yaygınlaştırılması ve politikaların oluşturulup özümsenmesi; düşük salımlı enerji sistemlerine geçişe, verimsiz fosil yakıt sübvansiyonlarının aşamalı olarak kaldırılmasına ve kömür enerjisinin aşamalı olarak azaltılmasına yönelik çalışmaların hızlandırılmasına destek sağlayacaktır. Ek olarak, uzun vadeli küresel hedeflere ulaşmak için ekosistemlerin ve biyoçeşitliliğin korunmasının önemi de vurgulanmıştır [42].

İklim Eylem Takipçisi (Climate Action Tracker) 2009 yılında Paris taahhütlerinin ve ülkelerin salım hedeflerinin küresel ısınma üzerine etkilerini analiz etmeye başlamıştır. Çalışmaların sonucunda, 2100 yılı için toplamda 3,5°C sıcaklık artışı ön görülmüştür. 2020 yılı Aralık ayında yayınlanan raporda, mevcut durum güncellemeleri ile tahminin son beş yılda sadece 0,7°C düştüğü açıklanmıştır. Tüm kabul edilen ulusal politikalara ve gerçek dünya eylemlerine dayanan sıcaklık tahminlerinin; yenilenebilir enerji kullanımının artmış olması, yeni politikaların uygulanması, kömürün kullanımındaki azalma ve hem pandemi öncesi hem de pandemi sonrası düşük ekonomik büyüme varsayımları ile sadece 0,7°C değerine

gerileyerek 2,9°C olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Isınma tahminlerinde yüzyıl sonu için yeni net sıfır hedefler açıklanarak, 0,5°C ve Paris taahhütleri etkisi ile de toplamda 1,4°C düşüş ifade edilmektedir. Mevcut sıcaklık artış tahmini 2020 yılı Kasım ayı itibariyle 2,6°C olarak belirtilmiştir. Varsayım çalışmalarının sonuçları mevcut eylemler ile Paris Anlaşması'nın ısınmayı 1,5°C ile sınırlamaya yönelik uzun vadeli hedefine ulaşılmasının mümkün olmadığını göstermektedir [43].

2015 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'ndan günümüze ülkelerin karbondan arındırma isteklerinde önemli bir artış görülmektedir. Dünyada karbon salımlarının yaklaşık %70'i artık net sıfır hedef ve taahhütler kapsamına alınmıştır. Ancak bu hedefler henüz net bir azalmaya dönüşmemiştir [14].

Ülkemizde sera gazı salımlarının raporlanması, doğrulanması ve izlenmesi konusunda bir dizi yönetmelik ve tebliğ hazırlanarak mevzuat altyapısı oluşturulmuştur. Çalışmalar 29003 sayılı ve 17 Mayıs 2014 tarihli Resmi Gazete'de Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik yayınlanması ile başlamıştır. Ardından, 29068 sayılı ve 22 Temmuz 2014 tarihli Resmî Gazete'de yayınlanan Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ ile yönetmelik kapsamı detaylandırılmıştır. Devamında, 29314 sayılı ve 02 Nisan 2015 tarihli Resmî Gazete'de Sera Gazı Emisyonlarının Doğrulanması ve Doğrulayıcı Kuruluşların Yetkilendirilmesi Tebliği yayınlanmıştır. Sera gazı salım takibi T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından "sera gazı salım takibine ilişkin online sistem" kurularak takip edilmeye başlamıştır. İzleme ve raporlama tebliği yıllık salım raporlama kılavuzu, yönetmelik ve tebliğin asli dokümanı olarak, işletmelerin sera gazı salımlarını doğru raporlaması ve mevzuata uyumlu olacak şekilde Çevre Bilgi Sistemindeki Sera Gazı Emisyonu Takip Uygulamasına uygun çalışılabilmesi amacıyla hazırlanmıştır [44]. 2014 yılında, doğrulanabilir ve şeffaf izleme yöntemi hazırlanmasına yardımcı olunması amacıyla da İzleme ve Raporlama Tebliği İzleme Planı Kılavuzu yayınlamıştır [45]. 2016 yılında ise doğrulayıcı kuruluşlar ve işletmeler için doğrulama süreci, süreçte sektör ile bağlantılı konular ve doğrulama kuruluşları ile ilgili bilgiler içeren Doğrulama ve Yetkilendirme Tebliği Doğrulama Kılavuzu yayınlanmıştır [46].

Türkiye'de toplam sera gazı salımı 1990 yılında kişi başı 4 ton CO_2 eşdeğeri iken 2019 yılında 6,1 ton CO_2 eşd. olmuştur. Toplam sera gazı salımı 2019 yılında 506,1 milyon ton (Mt) CO_2 eşd. olarak hesaplanmış ve bir önceki yıla oranla yaklaşık %3,1

azalmıştır. Bazı küçük istisnalar dışında sera gazı salımları 1960 yılından günümüze sürekli artmaktadır ve bu artışın ivmesi 2000'li yıllardan sonra yükselen bir eğilimdedir. Sektör bazlı salım miktarları değerlendirildiğinde ise en yüksek oranın enerji sektöründe olduğu görülmektedir. 2019 yılında enerji kaynaklı salımlar toplam değerin %72'sini oluşturmuş ve geri kalan miktar tarım, endüstriyel işlemler ve diğer kullanılan ürünlerin salımlarından gelmiştir. 29 yıllık periyot değerlendirildiğinde enerji sektörü salımları %161 artmıştır, ancak son yılda bu değer %2,3 azalma göstermiş ve 364,4 Mt CO_2 eşdeğeri olmuştur [47]. 2000 yılından bu yana, küresel atmosferik karbondioksit miktarı %12'lik bir artışla 43,5 ppm olmuştur [48]. Bağımsız bir izleme aracı olan iklim değişikliği performans endeksi ile 2022 yılı için küresel sera gazı salımlarının %92'sini oluşturan 60 ülke ve AB'nin iklim koruma performansı değerlendirilmiştir. İklim koruma performansı; sera gazı salımları, yenilenebilir enerji, enerji kullanımı ve iklim politikası olmak üzere dört ayrı kategoride değerlendirilmektedir. AB geçen yıla göre 6 sıra gerileyerek 22. sıraya geçtiğinden, artık yüksek performans gösterenler arasında yer almamaktadır. Sırasıyla en iyi performans gösteren AB ülkeleri Danimarka ve İsveç olmuştur. Son yılda performansını en çok yükselten ülke Hollanda'dır. Slovenya, Çek Cumhuriyeti, Polonya ve Macaristan çok düşük puan alan kötü performanslı ülkeler arasındadır. 2021 yılında 43,47 puan ile 42. sırada olan Türkiye bu yeni değerlendirmede toplamda 50,53 puan alarak bir sıra üste 41. sıraya çıkmıştır [49].

Son yıllarda sera gazı salımlarındaki sürekli artış, küresel ısınma ve iklim değişikliği etkilerinin günden güne artması nedeniyle hızlı ve kapsamlı aksiyona geçilmesi ihtiyacı doğmuştur. Ancak aksiyonların sürekliliği açısından hedeflenen aksiyonların ekonomiden bağımsız ele alınmaması gerektiği bir gerçektir. Bu sebeple, AB 11 Aralık 2019 tarihinde bir ekonomik dönüşüm programı olan Avrupa Yeşil Mutabakatı'nı açıklamıştır. Yeşil Mutabakat Eylem Planı ile ilgili ayrıntılı bilgi devam eden bölümde verilmiştir.

Yeşil Mutabakat Eylem Planı

Öncü olan yeşil mutabakatın ardından pek çok ülke hedeflerini belirleyerek kendi eylem planlarını yayınlamaya başlamıştır. Yeşil mutabakat eylem planı karbon düzenlemeleri kapsamında ulusal karbon fiyatlandırma mekanizması oluşturulması amacıyla çalışmaların sürdürülmesini hedeflemektedir. Döngüsel ekonomi ve sanayide yeşil dönüşüm amacıyla çalışmaların yapılması, ulusal döngüsel ekonomi

planı hazırlanması ve AB döngüsel ekonomi planına uyum çalışmalarının gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Türkiye'de son yıllarda yapılan çalışmalarla ulusal yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) için veri tabanı geliştirilmesi, bu veri tabanının sürdürülebilirliğinin ve yönetiminin sağlanması, Türkiye'de yapılan YDD çalışmalarının yaygın ve sürekli kılınması amacıyla Ulusal YDD platformu kurulması hedeflenmektedir. Yeşil Finansman alanında ise, AB teşvik sisteminden de yararlanılarak ulusal teşvik sisteminin yeşil dönüşümlü teşvik amaçlı gözden geçirilmesi, yeşil tahvil rehberi hazırlanması, sürdürülebilir bankacılık için yol haritası oluşturulması gibi hedefler yer almaktadır. Bunlara ek olarak enerji verimliliği finans mekanizması raporu ve Enerji Performans Sözleşmelerine İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Cumhurbaşkanlığı kararı kapsamında Tebliğ hazırlanarak ulusal enerji verimliliği finansman mekanizmasının geliştirilmesi hedefi de tanımlanmıştır. Temiz, ekonomik ve güvenli enerji arzı için enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji politikalarının AB Yeşil Mutabakatı Çerçevesinde gözden geçirilmesi, enerji verimliliği çalışmaları değerlendirilerek açıklık analizi yapılması ve analizde belirlenen gelişim alanlarının değerlendirilmesi gibi amaçlar belirlenmiştir [50]. Yeşil Mutabakat Eylem Planı'ndan iklim değişikliği mücadelesinde enerji verimliliği ile ilgili iyileştirmelerin önemli olduğu ve çok çeşitli paydaşların iş birliği içerinde çalışması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu amaçla, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, çevre konusunda yapılan pek çok çalışmada aktif yer almaktadır. ETKB tarafından AB Çevre Mevzuatının Türkiye'ye uyarlanması, "Enerjinin Çevreye Etkisi" konusunda yapılan çalışmaların desteklenmesi, enerji yatırımlarına ilişkin yapılan toplantılara katılım, İnceleme Değerlendirme Komisyonu'nda yer alınması, çevresel etki değerlendirmesi sürecinde aktif rol alınarak Enerji Yatırımı Projeleri incelenip görüş oluşturularak "Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği" kapsamında rol alınması, Çevre Şehircilik İl Müdürlükleri'nden gelen ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı koordinasyonunda yürütülen "İl Çevre Düzeni Planı" kapsamındaki projelere Bakanlık sorumluluğunda bulunan kamu yatırımları adına görüş verilmesi; enerji verimliliğinin arttırılması, geliştirilmesi, kaynakların değerlendirilmesi, korunması gibi çeşitli çalışmalar yürütülmektedir [40].

İklim değişikliği etkileri yalnızca çevreyi değil aynı zamanda küresel ölçekte sağlık, ekonomik ve sosyal kalkınmayı da olumsuz etkilemektedir. Afetlerin Epidemiyolojisine İlişkin Araştırma Merkezi Acil Durum Olayları Veri Tabanı'na

dayanan analizde son 50 yılda kaydedilen tüm afetlerin %50'sinin, ekonomik kayıpların %74'ünün ve ölümlerin %45'inin hava, iklim ve su tehlikeleri kaynaklı olduğu görülmektedir. Dünya çapında, afetlerin %44'ü taşkınlarla ilişkilendirilmiştir. Genelde gelişmekte olan ülkelerde hava, iklim ve aşırı su aşırılıklarından kaynaklanan ölümlerin, gelişmiş ekonomilere sahip ülkelerde ise ekonomik kayıpların meydana geldiği rapor edilmektedir. Birleşmiş Milletler ülke sınıflandırmasına göre de kaydedilen ölümlerin %91'i gelişmekte olan ekonomilerde, ekonomik kayıpların %59'u gelişmiş ekonomilerde gerçekleşmiştir. Son 50 yılda, fırtınalardan sonra sırasıyla en ölümcül ve en maliyetli afet olayları kuraklık ve seldir [51]. Dünya çapında, afetlerin %44'ü ve ekonomik kayıpların %31'i sel ile ilişkilendirilmiş olup, sel ile ilgili kayıpların çoğunluğu Asya kıtasındadır [52]. 2020 yılında ülkemizi etkileyen meteorolojik karakterli afetlerin dağılımı %30'u şiddetli yağış/sel, %27'si fırtına ve %23'ü dolu afeti şeklindedir [53].

2.1.3 Ekonomi

2020 yılında koronavirüs salgını etkisiyle küresel petrol talebinde çöküş yaşanması ve depolama kapasitesi endişeleri nedeniyle, Şubat ve Nisan ayları arasında petrol fiyatları %60 düşmüştür. Petrol fiyatlarının uzun süreli düşüşü, sondaj faaliyetlerinin keskin bir şekilde azalmasına sebep olmuştur. Arz kesintilerinden dolayı, petrol fiyatlarının düşüşü ile pek çok petrol şirketi, yatırımlarını ve fiyatlarını yeniden değerlendirilirken işten çıkarmalar ve büyük kayıplar görülmüştür. Koronavirüs salgını nedeniyle yaşanan pandemi koşullarının etkisiyle tüm ülkelerin ihracatında ve ithalatında önemli bir düşüş beklenmektedir. Türkiye, İzlanda, Yunanistan gibi ülkelerde mevcut veriler turizm ve seyahat üzerinden elde edilen net gelirde, uluslararası seyahat kısıtlamalarının etkisiyle büyük bir düşüş olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, Türkiye ekonomisinde turizm bağlantılı net gelirde azalma olacağı ve buna bağlı olarak ülke ekonomisinin olumsuz etkileneceği tahmin edilmektedir. Pandemi koşulları başlıca para birimlerine de etki etmiştir. İyileşen küresel risk duyarlılığı ve artan koronavirüs vakalarının ABD'de endişeye sebep olması nedenleriyle ABD doları %4,5 üzerinde değer kaybederken, Euro ekonomik beklentilerde iyileşme yaşanması ve daha yavaş vaka artışları nedeniyle yaklaşık %4 değer kazanmıştır. Ek olarak, piyasa hareketliliği sırasındaki şiddetli baskılardan sonra gelişmekte olan piyasa para birimlerinin birçoğu toparlanmıştır. Fakat kırılgan dış veya mali konuma sahip Brezilya, Türkiye gibi ülkelerin ve pandemiden ciddi şekilde

etkilenen ülkelerin para birimlerinin zayıfladığı görülmektedir [54]. Küresel salgın aynı zamanda büyük ekonomik kayıplara da neden olmuştur. Küresel Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'nın (GSYH) 2020 yılında %3,5'in üzerinde düştüğü öngörülmektedir. 2020 yılında, Dünya enerji talebinin %4,5 ve enerji kullanımından kaynaklanan küresel karbon salımlarının %6,3 düştüğü tahmin edilmektedir. 2,1 Gt CO_2 düşüşü ile en son 2011 yılında görülen karbon salım seviyelerine geri dönülmüştür [14]. Gelişmiş ekonomilerde görülen hızlı ekonomik toparlanma sonucunda 2021 yılı Şubat ve Ağustos ayları arasında petrol fiyatlarında %13,9 artış olmuştur. Ek olarak, aynı tarih aralığında sıvılaştırılmış doğal gaz fiyatları Asya'da %132,2 artmış ve bu yükselme AB ve ABD fiyatlarına da yansımıştır [55]. Uluslararası Para Fonu (IMF) tarafından 2022 yılı Ocak ayında yayınlanan raporda, koronavirüsün yeni varyantı Omicron nedeniyle yeniden yolculuk kısıtlamalarına dönülmesi, artan enerji fiyatları, arz kesintileri nedeniyle özellikle ABD ve birçok gelişmekte olan ekonomide tahmin edilenden daha yüksek enflasyon oranları ile karşılaşıldığı ifade edilmiştir. Enerji fiyatlarının yükselmesi ve tedarik zinciri aksamalarının devam etmesinden kaynaklı yüksek enflasyonun uzun süre devam edeceği öngörülmektedir. 2021 yılında fosil yakıt fiyatlarının yaklaşık 2 katına ulaşması ile enerji maliyetleri artmış ve bu durum özellikle Avrupa'da daha yüksek enflasyona neden olmuştur [56].

Son yirmi yılda, çevre politikaları ile temiz enerji teknolojilerinde artış gözlemlenmektedir. 1990'lardan itibaren salım sınırlamaları yaygın olarak kullanılmaktadır ve zamanla daha katı bir hal almıştır. 2000'li yılların başlarında tarife garantisi ve ticaret programları gibi piyasa araçlarının kullanımı hız kazanmıştır, ancak çoğu ülkede karbon vergileri henüz bağlayıcı kısıtlamalar haline gelmemiştir. Aynı dönemde, Ar-Ge kapsamında toplam enerji inovasyonunun payı, temiz enerji inovasyonu sayesinde ikiye katlanmıştır. Ayrıca, elektrik üretimindeki yenilenebilir enerjiye geçiş hızlanmaktadır. Ekonometrik analiz göstermektedir ki, daha katı çevre politikalarına geçiş, birçok ülkede enerji inovasyonu ve düşük karbonlu faaliyetlere yönelik yatırımlarda kilit rol oynamaktadır. Genel olarak çevre politikalarının elektrik inovasyonuna katkısı olmuştur. Elektrik sektöründe, çevre politikaları temiz ve kirli teknolojilerin kirliliğini azaltan "gri" elektrik teknolojilerinde inovasyonun payını artırmıştır [54].

Günümüzde iklim değişikliği açık bir tehdit olmaya devam etmektedir ve maalesef mücadeleye yönelik eylemler yetersiz kalmaktadır. Diğer yandan iklim kriziyle

mücadele için alınan önlemler, ekonomileri daha dirençli hale getirecektir. IMF, analizler yaparak ve iklim değişikliği konusunda ülke katılımını artırarak küresel çabalara katkıda bulunmakta ve iklim değişikliğinin hafifletilmesi için fosil yakıt sübvansiyon reformu ve karbon fiyatlandırması gibi azaltma stratejileri ile mali ve diğer politikalar konusunda ülkelere özgü rehberlikler sağlamaktadır. IMF ve Dünya Bankası, küçük, hassas ve kapasitesi kısıtlı ülkeler için hazırlık, makroekonomik etki, azaltma, uyum ve finansman stratejilerine ilişkin kapsamlı değerlendirmeler yaparak iklim değişikliğine uyum sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Düşük karbonlu bir ekonomiye geçiş olması ülkelerin bir dizi riski yönetmesi gerektiği anlamına da gelmektedir. IMF tarafından, ülkelerin salım üretmesini caydırmak ve iklim değişikliğinin önlenmesine destek olmak için karbon vergisi getirmek, küresel ısınmayı sınırlama amaçlı uygulanabilir bir strateji olarak görülmektedir. IMF, karbon fiyat tabanı düzenlemesi önererek etkin ve adil bir şekilde küresel azaltım eylemini büyütmeyi amaçlamaktadır. Fosil yakıtlara ilişkin finansal düzenlemeler veya fosil yakıt ihracatına bağlı ekonomilerde çeşitlilik ihtiyacına yönelik tedbirlere de odaklanılmaktadır [57].

IMF 2020 Dünya Ekonomik Raporu'nda, salgın etkilerine ve salgın öncesi riskleri olan ticaret ve teknoloji gerilimleri, jeopolitik zorluklar ve iklim değişikliğinden kaynaklanan risklere dikkat çekilmektedir. Raporda daha güçlü ve dayanıklı bir büyüme sağlanabilmesi için etkili ve kararlı politika desteklerinin gerekliliği vurgulanmıştır. Mevcut krizin, karbon fiyatının kademeli olarak artırılması ve yeşil yatırımlar gibi çeşitli iklim araçları kullanılarak yeniliklere teşvik, daha düşük karbon salımlarına geçiş ve dijital altyapıyı geliştirmek için fırsat olarak görüldüğü belirtilmiştir. Pandemi kontrol altına alındığında, işsizlik ve yoksulluk artışı, kamu borç seviyeleri gibi krizin etkilerinin hükümetler tarafından ele alınmasının gerektiği vurgulanmıştır. Bu amaçla pandemiden sonraki toparlanma aşamasında, kamu yatırımlarının kritik önemde olduğu belirtilmiştir. Küresel ekonomik kriz mücadelesinde ve iklim değişikliğini hafifletme politikalarında uluslararası iş birliğinin göz ardı edilmemesi gerektiği de ifade edilmiştir [54].

2008 yılında küresel düzeyde görülen finansal krizden Türkiye nispeten daha az etkilenmiştir ve 2010 yılı ile sonrasında toparlanma sürecine girmiştir. 2014-2018 yılları arasında %4,9 yıllık ortalama büyüme gerçekleşmiştir, sanayi ve hizmet sektörlerinin GSYH içindeki oranları artış göstermiştir. Küresel piyasaların mevcut

siyasi ve ekonomik belirsizlikleri, 2016-2017 yıllarındaki jeopolitik gelişmelerdeki olumsuzluklar gibi oluşumların yurt içi ekonomisine etkilerini azaltmak amacıyla 2014-2015 yıllarında sıkılaştırılan maliye politikası kullanılmıştır. 2016 yılında uygulanan aktif maliye politikası ile primlerde erteleme, vergilerde ödeme kolaylıkları, finansmana erişimin kolaylaştırılması ile ekonominin hareketlenmesi sağlanmıştır. Türkiye ekonomisi dengelenme sürecine 2018 yılı ortasında girmeye başlamış ve bu dönemde orta-yüksek ve yüksek teknoloji sektörlerinin, imalat sanayi ihracatı içindeki payı %39,6 olmuştur. Bu oran dünya ticareti sektörlerinde yaklaşık %60 değerindedir [23]. Küresel büyümenin orta vadede %3,3 oranında olacağı tahmin edilmektedir. Ancak Türkiye özelinde enflasyon beklentilerinin istikrara ulaşamaması durumunda muhtemelen daha fazla ölçülü para politikasına ihtiyaç duyulacaktır [58].

2020 yılında, ABD GSYH %3,4 düşüş göstermiştir. ABD'nin tüketici fiyat endeksi (TÜFE) enflasyon oranı %1,4 artarken enerji enflasyonu %7 azalmıştır. Aynı yıl 77 milyar ABD dolar değerinde ham petrol ithal edilmiştir. 2020 yılında Avrupa'da GSYH %6,4 ve TÜFE %0,3 azalmış; Japonya'da ise GYSH'de %4,5, TÜFE'de de %1,2 düşüş görülmüştür [59]. 2020 yılında Türkiye ekonomisi %1,8 büyüme göstermiştir. Son 17 yıllık dönemde ise yıllık ortalama %5,2 büyüme gerçekleşmiştir. 2021 yılı Aralık ayında bir önceki yıl aynı aya göre yurt içi üretici fiyat endeksi (Yİ-ÜFE) değeri %79,89 oranında, TÜFE değeri de %36,08 oranında artmıştır [60]. Türkiye'nin döviz varlıkları rezervi 2021 yılı Ekim ayı itibariyle 84.247 milyon ABD dolardır. 2021 yılı Kasım ayında ham petrol ithalat miktarı 2.980.000 ton olmuş ve bir önceki yıla oranla %15,7 artmıştır. İthalatın mali değeri 1.801 milyon ABD dolara eşdeğer iken bir önceki yıla oranla %125,6 arttığı görülmektedir [59].

Hazine ve Maliye Bakanlığı tarafından yayınlanan 2019-2023 dönemi stratejik planında; kamu yatırım, teşvik ve harcamaların arttırılacağı, bu yatırımlarda imalat sanayi sektörleri ve Ar-Ge, enerji gibi sektörlere öncelik verileceği belirtilmiştir. Büyüme ve istihdam amacıyla madencilik, petrokimya ve enerji üretiminde yerli kaynağa dönük olan alanlarda özel sektör ile iş birliği içerisinde sabit sermaye yatırımları yapılacağı belirtilmiştir. Ayrıca, fiyat istikrarı konusunda verimlilik eylem planları ve sektörel rekabet planları hazırlanarak üretim maliyetinin düşürülmesinin yanında bazı ithal ürünlerde yerlileşme ve alım garantili enerji kontratlarının Türk lirası bazlı olması ve yerlilik oranının da dikkate alınması gibi hedefler belirtilmiştir [61]. Hazine ve Maliye Bakanlığı tarafından açıklanan "Orta Vadeli Mali Plan"da ise

2020-2022 yılları arasında fiyat ve finansal istikrar, verimlilik ve üretim odaklı, adaletli paylaşım ve büyümenin sürdürülebilirliği temelli ekonomik dönüşüm gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu dönemde, sanayileşme hızlandırılacak, yurt içi tasarrufu ve üretken yatırım düzeyi yükseltilecek, verimlilik her alanda arttırılacak, ithalat bağımlılığı azaltılarak yenilikçi yapıya ulaşılması sağlanacaktır. Bunlara ilaveten aynı dönemde yenilenebilir enerji alanında Dünya Bankası'ndan yaklaşık 325 milyon ABD doları tutarında finansman sağlanmıştır [62].

2021 yılının birinci çeyreğinde talep ve maliyet unsurları, arz kısıtları, uluslararası gıda ve emtia fiyatlarındaki artış enflasyon üzerinde etkili olmuştur. Uluslararası gıda ve emtia fiyatlarında yılın ikinci çeyreğinde görülen yükseliş, enflasyon beklentilerindeki seyir ve döviz kuru gelişmeleri, enflasyonu olumsuz etkilemiştir. Üçüncü çeyrek tüketici enflasyonu, arz yönlü unsurlar, yönetilen/yönlendirilen fiyat artışları ve açılmaya bağlı olarak gelişen taleplerin etkisiyle yükselmiştir. Üretici yıllık enflasyonu 2021 yılında da yükselmeye devam etmiştir. Bu gelişmede, döviz kurunda gözlenen gelişmeler ile birlikte başta enerji olmak üzere arz kısıtları ve emtia fiyatlarındaki artışlar etkili olmuştur. 2021 dördüncü çeyreğinde de ithalat fiyatları artışları ve tedarik aşaması aksaklıkları, talep gelişmeleri, yönlendirilen/yönetilen fiyat artışları, talep gelişmeleri ve döviz kurlarındaki gelişmelerin etkisi ile yine enflasyon yükselmiştir [63].

Finansmana erişim, enerji sektörü kalkınma hedeflerine ulaşılabilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Kamu ve özel sektörün aynı hedefler doğrultusunda projelerini gerçekleştirebilmeleri, yabancı ve yerli fonlar ile sağlanan kaynakların yönetimine bağlıdır. Sermaye temini sıkıntısının, kalkınma planlarında yarattığı sorunların çözülebilmesi için farklı tedbirler düşünülmüştür ancak bu tedbirlerden biri olan "Risk Sermayesi" uygulaması henüz gerçekleştirilememiştir. Önceliklerin tanımlanmasının, olanak, koşul ve kısıtların belirlenmesinin ve bilgilendirme yapılmasının enerji sektörüne aktarılan fonların kullanımını etkinleştirmek ve sermaye sorununu çözmek için faydalı olacağı düşünülmektedir [23].

2.2 Enerji Verimliliğinin Çevre Ve Ekonomi Açısından Önemi

İklim değişikliği etkileri, günümüzde dünyanın karşı karşıya olduğu en önemli çevresel sorunlardan biridir. İklim değişikliğinin insan kaynaklı nedenlerinden başlıcası, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan sera gazı salımlarıdır. Bu etkinin

azalması için enerji üretimi ve kullanımında köklü değişiklikler gerekmektedir. Kısa vadede, "yüksek karbon içerikli yakıtlardan düşük karbon içerikli yakıtlara" geçiş gibi bir dizi salım azaltma stratejisi mevcuttur. Ancak uzun vadeli sürdürülebilir bir çözüm, iklim dostu teknolojik gelişmeler uygun fiyatlı olduğunda mümkündür [2]. 2017 yılında, enerji sektörü kaynaklı sera gazı salımı değeri yaklaşık 367 Mt CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır ve toplam sera gazı içerisinde %72 oran ile en yüksek paya sahiptir. Ayrıca, bu salım değeri 1990 yılındaki 37 Mt CO_2 eşdeğeri ile karşılaştırıldığında %177 oranında arttığı görülmektedir. Bu nedenle, sera gazı salımlarında önemli bir paya sahip olan enerjinin her sektör için kullanımının değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca enerji sektörüne ek olarak ekonomik büyüme ve nüfus artışı da sera gazı salımlarının artmasına neden olmaktadır [64].

1,5°C'lik küresel ısınmanın etkilerine ilişkin Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Özel Raporu'nda, yapılabileceklere örnek olarak akıllı şehir planlaması ile enerji verimliliğini artırmak gibi eylemler verilmiştir. Raporda, ısınmayı sınırlamak için gerekli geçişlerin büyük ölçekli ve hızlı olması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu hızlı değişimin yeni ürün ya da pazardan doğabileceği de LED aydınlatmaya dönüşüm örneği üzerinden gösterilmiştir. LED aydınlatmaya yönelik yüksek talep, hızlı endüstri inovasyonunu teşvik eden politika eylem desteği, daha yoğun enerji tüketen akkor telli aydınlatmadan vazgeçilmesine neden olmuştur. Geçiş değişiklikleri birçok sistemde devam etmektedir, ancak ısınmayı 1,5°C ile sınırlamak için, özellikle önümüzdeki 10-20 yıl içinde çok daha hızlı geçiş faaliyetlerini, halkın desteğini, kamu sektörü müdahalelerini ve özel sektör iş birliğini gerektirmektedir. Finans olanaklarının, yenilik ve davranış değişikliği gibi teşvik mekanizmaları seçeneklerinin önündeki engelleri azaltacağı ve ısınmayı sınırlamak için her bir sistemin çevresel, teknolojik, ekonomik, sosyal/kültürel, kurumsal ve jeofizik fizibiliteleri olmak üzere farklı boyutlarda ele alınarak değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [65].

Türkiye, toplumsal refahı arttırma, kalkınma hedeflerine ulaşma ve uluslararası alanda sanayide rekabet edebilir seviyeye ulaşma çabasındadır. Türkiye'nin BMİDÇS'nde tanımlandığı gruptaki OECD ülkeleri ile enerji, ekonomi gibi göstergeler açısından yakın seviyeye ulaşabilmesi için "ortak fakat farklılaşmış sorumluluklar" ilkesi ile ilerlemesi gerekmektedir ve bu yaklaşım, hızlı bir enerji talebi artışına da sebep olmaktadır. Yeterli, güvenilir, zamanında, rekabet edilebilir fiyatlı ve çevresel etkiler dikkate alınarak, enerjinin sosyal gelişme ve ekonomik büyüme hareketlerine katkıda

bulunması, Türkiye enerji sektörü hedefinin temelini oluşturmaktadır. Bu hedef doğrultusunda arz güvenliği ve güvenilirliğini sağlamak adına ana enerji politikaları oluşturularak bu politikalar etkisiyle yerli kaynak payı arttırılarak dışa bağımlılığın azaldığı, enerjide verimliliğin sağlandığı, enerji ve kaynak ithal edilen ülke profilinin arttırıldığı, dünya enerji sistemi ile entegre ve çevre ile uyumlu bir enerji sistemi kurulması nihai hedeftir. Diğer yandan petrol ve doğal gaz fiyatlarının artması, sera gazı salım sınırlandırmaları ve ithal kaynak bağımlılığının aşırı risklerinden korunulması gibi sebeplerin etkisiyle yeniden nükleer enerjiye yönelim de görülmektedir. Ancak, enerji talebi artışını karşılamak amacıyla en az maliyetli kaynak olarak enerji verimliliğinin arttırılması gösterilmektedir. ETKB ilgili birimleri tarafından etkin enerji kaynak kullanımı, çevre korunması ve enerji maliyetinin ekonomi üzerine etkisinin azaltılması amaçlarıyla verimlilik arttırma çalışmaları sürdürülmektedir. Nihai tüketime ek olarak, elektrik üretim, iletim, dağıtım sistemlerinde iyileştirmelerle verimliliğin arttırılmasına da önem verilmektedir. Ayrıca, enerji güvenliğinin sağlanması amacıyla yerli kaynak payının arttırılması için üretimden tüketime her aşamada kaynak ve enerji kullanımında verimliliğin artırılması [20], hidrojen enerjisi gibi yeni teknolojilerin ar-ge faaliyetleri ile desteklenmesi Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın önem verdiği diğer konulardır [18].

ABD, en geç 2050 yılında net sıfır sera gazı salımına ulaşılmasını; enerji verimliliği, temiz enerji üretimi ve temiz ulaşım gibi yatırımlarla karbon salımlarını azaltarak iklim değişikliği etkilerinden korunmayı ve bunlara ek olarak enerji santrallerinden kaynaklanan karbon kirliliğini 2035 yılına kadar ortadan kaldırmayı taahhüt etmektedir [66]. Kanada, özel olarak tasarladığı federal karbon kirliliği fiyatlandırma sistemi ile finansal teşvik yaratarak tesis salımlarının azaltılmasını amaçlamaktadır. Federal Çıktıya Dayalı Fiyatlandırma Sistemi, sanayi için uyum yükümlülüğünü yoğun salıma sahip ve ticarete maruz olan endüstrilerden kaynaklanan salımların yalnızca bir bölümüne getirerek uygulamaktadır. Her sektör için performans standardının belirlendiği sistemde standartta belirtilenden daha az verimli olan tesislerin ödeme yapması zorunluğu (ceza) vardır. Standartta belirtilenden daha iyi performansa sahip olanlar ise satabilecekleri ya da biriktirerek ileride kullanabilecekleri krediler kazanmaktadır [67]. 2020 yılında, Çin'in ardından kömür enerjisi merkezi olarak kabul edilen Güney ve Güneydoğu Asya'da; Filipinler, Vietnam, Endonezya ve Bangladeş hükümet yetkilileri 62 gigawatt'a (GW) kadar

planlanan kömür santrallerini sonlandırma planlarını açıklamışlardır [68]. Enerji verimliliğindeki artışların kesin olarak ölçülmesi karmaşıktır ve sektör bazında bir yaklaşım gerektirmektedir. Mevcut tüm ülkelerde karşılaştırılabilir veri kaynakları bulunmadığından, bu kategorideki gelişmeleri ölçmek için bir ülkenin kişi başına enerji kullanımını değerlendiren İklim Değişikliği Performans endeksinde Türkiye, 64 ülke arasında 53. sırada yer almaktadır. AB performansı incelendiğinde ise daha önceki yıllarda da olduğu gibi, enerji kullanımı kategorisindeki performansına göre ülkemiz orta seviye olarak derecelendirilmektedir. Malta ve Yunanistan üst sıralarda yer alan iki AB ülkesidir; Belçika, Lüksemburg ve Finlandiya bu kategoride düşük performans göstermektedir [69].

Enerji güvenliği, ekonomik verimlilik ve çevresel konular Tokyo, Japonya enerji politikasının da temelini oluşturmaktadır. Japonya, elektrik ihtiyacının %30'unu nükleer enerjiden karşılayan üçüncü en büyük nükleer enerji kullanıcısı konumundadır. Doğu Japonya depremi ve nükleer felaketler Japonya'nın bu doğrultudaki gelişmelerini engellemiştir. Tüm nükleer santrallerin, güvenlik denetimleri sebebiyle operasyonları askıya alınmış veya kapatılmıştır. Yenilenebilir kaynaklar için ise sabit fiyatlı satış belirleyen tarife garantisi programı 2012 yılında başlatılmış ve program yürürlüğe girdiğinden itibaren yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesi 3 katından fazlasına çıkarılmıştır. 2016 yılında hükümet enerji eylem planını ve küresel ısınmaya karşı önlemler planını, 2018 yılında da yeni stratejik enerji planını onaylamıştır. Planlamalar, büyük güç kaynağı olarak yenilenebilir enerjiyi belirleyen ilk belgedir. 2030 yılı planında %26 kömür, %27 sıvılaştırılmış doğalgaz, %3 petrol olmak üzere %56 fosil yakıtlardan, %22-24 yenilenebilir kaynaklardan ve %20-22 nükleer enerjiden oluşan enerji karışımı ön görülmektedir [70].

AB iklim değişikliği ve enerji politikası; 2020 İklim ve Enerji Paketi, 2030 İklim ve Enerji Çerçevesi ve 2050 Düşük Karbonlu Yol Haritası olmak üzere uzun vadeli üç aşamadan meydana gelen stratejiye sahiptir. 2020 paketi ile sera gazı salımlarının 1990 seviyesi itibariyle %20 azaltılması, enerji verimliliğinin %20 iyileştirilmesi ve AB'nin yenilenebilir kaynaklardan elde ettiği elektrik enerjisinin %20 oranına ulaşması hedeflenmiştir. 2030 için yenilenen planlarda salımlarda azalışın %40 oranına ulaşması, enerji verimliliğinde %32,5 iyileşme ve yenilenebilir payının ise %32'ye çıkarılması hedeflenmiştir. AB uzun dönem stratejisinde ise Avrupa Yeşil Mutabakatı

ve Paris Anlaşması ile uyumlu olacak şekilde 2050 yılı için net sıfır salımlı ekonomiye sahip, iklim nötr olmayı hedeflemiştir [71].

Türkiye'de ekonomik krizler enerji yoğunluğunu artırabilmektedir. Krizi takip eden senelerdeki enerji verimliliği ilerlemesinin, enerji yoğunluğu verileri ve tarihsel ekonomik verilerle tahminlemesi yapılabilmektedir. Enerji yoğunluğu ve GSYH verileri, 2020 yılında da olan GSYH'deki büyük düşüşlerin ardından gelecekte enerji yoğunluğu iyileştirmelerinin düşme eğiliminde olacağını göstermektedir. GSYH'deki düşüşler ile enerji yoğunluğundaki değişiklikler arasında gecikme yaşanması, ekonomik gerilemenin ve durgunlukların enerji yoğunluğu iyileştirmelerini aşağı çekebileceğini göstermektedir. Mevcut durumdan daha zayıf bir ekonomiye geçmiş olmak, hükümetin vergi gelirlerini de düşürmektedir. Bu doğrultuda, hükümetlerin harcama önceliklerinin değişmesiyle enerji verimliliği programları için mevcut kamu finansmanları azalmaktadır [13]. 2010 yılından günümüze dünya ekonomisi yıllık büyümesi sabit durumda iken toplam sera gazı salımlarındaki yıllık büyümenin 2015-2016 yıllarında belirgin bir şekilde %0,3'e düştüğü görülmektedir. 2008-2009 yılları arasında küresel ekonomik kriz sonrası dönemde 2011 yılında küresel sera gazı salımlarında %3,1 oranında yıllık büyüme görülmektedir ve 2011 yılından itibaren bütün yıllar için bu değerin ortalama %3,3 büyümesine karşın GSYH büyüme oranı %2,8 olmuştur. Hidroelektrik üretiminin en iyi olduğu 2013, 2016 gibi yıllarda CO_2 salım seviyelerinde genelde daha küçük artışlar olduğu görülmektedir. Kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil yakıtların yakılmasından doğan toplam CO_2 salımları içindeki küresel paylar 2019 yılı için değerlendirildiğinde, kömürün %44, petrolün %35 ve doğal gazın ise %22 paya sahip olduğu görülmektedir. Bu fosil kaynakların tüketimleri ise sırasıyla %32, %29 ve %39 olarak gerçekleşmiştir. Birim enerji Joule başına kömürün, doğal gaza oranla yaklaşık iki kat daha fazla CO_2 salması ve ikisi arasında bir değere sahip olan petrol kullanımı nedeniyle, CO_2 salımları ile nihai enerji tüketim oranları arasında fark görülmektedir. Bu nedenle, toplam birincil enerji arzı, CO_2 salımlarındaki eğilimin temel göstergesi olarak alınmaktadır [72]. Elde edilen gerçek oranlar değerlendirildiğinde ekonomi, çevre ve enerji üçlüsünün birbirlerinden hem etkilendikleri hem de birbirlerini etkiledikleri açıkça görülmektedir.

Uzun vadeli Paris Anlaşması stratejisi 2019 yılı Haziran ayında Japonya parlamentosunda kabul edilmiştir. Ardından, Japonya ve AB arasında yeşil ittifak kurulduğu açıklanarak çevre koruma, yeşil finans, düşük karbonlu teknolojilere enerji

geçişi alanları öncelikli olarak tanımlanmıştır. 2020 yılında Japonya, sera gazı salımları açısından 2050 yılına kadar net sıfır, karbon nötr olmayı hedeflediğini açıklamıştır. Bu doğrultuda, çevrenin korunması ve verimli ekonomik büyüme döngüsü oluşumunun amaçlandığı bir sanayi politikası olan yeşil büyüme stratejisi kabul edilmiştir. Japonya'nın enerji karışımının 2050 yılına kadar, %50-60 yenilenebilir, %30-40 nükleer ve termik santraller, %10 hidrojen ve amonyak olacağı belirtilmektedir. Ek olarak bir karbon vergisi düşünülmektedir [70].

G20 ekonomilerinde sera gazı salım öngörüleri ile mevcut iklim politikalarında hedeflenen miktarların karşılaştırılmasının yapıldığı bir çalışmada, Türkiye, Japonya, Çin, Rusya, Endonezya, Hindistan olmak üzere altı ülke için mevcut politikalarla ve belirlenen katkılarla 2030 hedeflerine ulaşılması veya bu hedeflerin ötesine geçilmesinin mümkün olduğu açıklanmaktadır. Aynı çalışmada AB, Kanada, Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Arjantin, Güney Afrika ve Kore Cumhuriyetinden oluşan 8 üye için hedeflere ulaşmak açısından daha fazla eyleme ihtiyaç duyulduğu, yeni enerji ve iklim politikalarının benimsenmesi gerektiği görülmüştür. Meksika ve Brezilya için tahminlenen salımlarda büyük bir belirsizlik olduğu ve Suudi Arabistan için yetersiz bilgi olması sebebiyle değerlendirme yapılamadığı da açıklanmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre, G20 ekonomileri için sera gazı salımlarının azaltılmasındaki ilerlemelerde farklılıklar görülmektedir. Paris Anlaşması iklim hedeflerine ulaşılabilmesi için, G20 ekonomilerinin mevcut hedeflerinin ötesine geçen enerji arzının karbondan arındırılması için, cihazlarda ve ulaşımda verimlilik standartları, yenilenebilir enerji, ağaçlandırma gibi gelişmiş ve yeni politikaları benimsemeleri gerekmektedir [73]. Ek olarak, ülkelerin CO_2 ve sera gazı salımı için ulusal net sıfır hedeflerinin, mevcutta uygulanan politikalara ve Paris Anlaşması taahhütlerine kıyasla daha ilerici olduğu açık bir gerçektir. Ulusal hedefler gerçekleştirilebildiğinde, 2100 yılına kadar küresel ortalama sıcaklık artışı 2,1–2,4°C'ye düşerek Paris Anlaşması koşulları yerine getirilebilecektir [74].

Küresel ekonomiye destek sağlamak için yayınlanan "UEA Sürdürülebilir İyileştirme Planı"nda, enerji verimliliğini hedefleyen ek ekonomik kurtarma eylemlerinin ulaşım, bina, sanayi, özel sektör ve kamu yatırımları aracılığıyla küresel olarak yaklaşık 4 milyon ek iş, istihdam yaratılabileceği belirtilmiştir. IMF tarafından tahmin edilen sürdürülebilir toparlanma planında 2023 yılına kadar 1 trilyon ABD doları değerinde yıllık harcama ile sürdürülebilir toparlanma planının, reel küresel GSYH'de %3,5'lik

bir artışa yol açacağı ve GSYH'deki yıllık değişiklikler açısından, her yıl küresel ekonomik büyümenin ortalama olarak %1,1 daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Büyüme döneminin sona ermesinden sonra, destekleyici mali duruş azalmasına rağmen, küresel ekonomi seviyesinin yükselişi korunmaktadır. Çünkü enerji sektöründeki kamu ve özel harcamaların yanı sıra, GSYH'deki artışı artırmaya yardımcı olan bir dizi başka faydalar da vardır. Enerji verimliliği ve elektrik şebekeleri gibi yeni altyapıya yapılan yatırımlar hem işçilerin hem de sermayenin genel verimliliğini artırmaktadır ve böylece yeniden yatırım yapılabilmesi için tasarruf sağlanabilmektedir. Ayrıca, enerjiye erişim seviyesindeki artışlar ve hava kirliliğindeki azalmalar sonucu kamu sağlığındaki iyileşmeler de düşük gelirli ülkelerde orta ve uzun vadeli ekonomik büyümeye yol açmaktadır [75].

İklim değişikliği politikaları ile kalkınma politikalarının entegrasyonunun sağlanması, yenilenebilir ve temiz enerji kaynak kullanımının artması, enerji verimliliğinin yaygınlaştırılması, yaşam kalitesi ve refah düzeyinin arttırılması ile tüm vatandaşlarına düşük karbon yoğunluğu sunan bir ülke olmak Türkiye'nin iklim değişikliği konusundaki ulusal vizyonunu oluşturmaktadır. Türkiye iklim değişikliği konusunda uluslararası iş birliğinin öneminin farkındadır. İklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına yönelik "Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi" hazırlanmış ve ulusal azaltım, teknoloji, uyum, kapasite oluşturma ve finansman politikaları belirlenmiştir. Strateji içeriğinde, iklim değişikliği ve Türkiye, ulusal vizyon, stratejiler, hedefler, uluslararası iklim değişikliği müzakereleri kapsamında ulusal tutum, sera gazı salım kontrolü (enerji, ulaştırma, sanayi, atık, arazi kullanımı, tarım ve ormancılık alt başlıkları ile belirtilmiştir), iklim değişikliğine uyum, teknoloji geliştirme/teknoloji transferi, finansman, eğitim, kapasite artırımı ve kurumsal altyapı, izleme ve değerlendirme bölümleri yer almaktadır [76]. İklim değişikliği gelecek için ciddi bir tehdittir ancak beraberinde bazı fırsatlar da getirebilecektir. Türkiye'nin iklim değişikliği uyum stratejisi ve planında tanımlanan hedeflerden 1.3. numaralı hedef, stratejinin uygulamaya geçmesi amacıyla yapılacak finansal düzenlemeleri içermektedir. Finans mekanizmalarında yenilikçi adımlar ve net finansman politikaları geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Türkiye'nin uluslararası örgütlere uyum amacıyla kapasitesini geliştirmesi, teknoloji transferi fonlarından yararlanması ve bunlara ek olarak sosyoekonomik açıdan yakın ülkelerle ortaklık kurmasının önemli olduğu belirtilmiştir. Sistematik bir yaklaşımla uluslararası kaynaklara erişim ve farklı

özendirici finansman mekanizmalarıyla teknoloji transferinin sağlanacağı taahhüt edilmiştir. Bölgesel düzeyde de faaliyetlerin desteklenmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Bu amaçla iklim değişikliği uyum projelerine finansman sağlanması için, yerel ihtiyaçların gerektirdiği uyum çalışmalarına cevap verecek şekilde bölge kalkınma ajanslarının kapasitelerinin güçlendirileceği ifade edilmiştir. Enerji, tarım, sanayi, su, turizm, balıkçılık sektörleri başta olmak üzere, iklim bağımlı sektörlerde azaltım ve uyum ilişkisi göz önünde bulundurularak bütünleşik ele alınan fayda maliyet analizlerinin yapılmasının önemi vurgulanmıştır. İklim değişikliği adaptasyonu için devlet desteklerinin ve yardımlarının sektörel bazlı uygulanacağı ve geliştirileceği de belirtilmiştir [28].

31 Mart 2021 tarihinde "Türkiye Cumhuriyeti Yeni Kentsel Gündemin Uygulanmasına İlişkin Ulusal Rapor" yayınlanmıştır. Raporda Türkiye'de belediyeler tarafından aydınlatma, ulaşım, yol, kamusal inşaat gibi pek çok alanda yüksek enerji kullanıldığı ve enerji talebinin her yıl arttığı vurgulanarak kentsel taahhütlerin içerisinde yenilebilir enerjide sürdürülebilirlik ve enerji verimliliğine teşvik maddeleri yer almıştır. Yerel yönetimlere İLBANK aracılığıyla enerji fizibilite (etüt), proje yapım gibi çalışmalar kapsamında finansal destek sağlandığı, uluslararası krediler kapsamında da pilot çalışmalar yapıldığı açıklanmıştır. LED aydınlatma dönüşümü, enerji verimliliği ve jeotermal enerji konularında 12 proje yürütülerek 15 Milyon Avro finansman sağlanması amacıyla anlaşmaların imzalandığı ve bu anlaşmaların devam edeceği belirtilmiştir [77]. Küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda yapılan bu yerel çalışmalara ek olarak uluslararası alanda da pek çok çalışma gerçekleştirilmektedir. Küresel ısınmada etkin bir rol oynayan sera gazlarının azaltımı amacıyla piyasa bazlı mekanizmaların kullanılması için 2011 yılında Dünya Bankası tarafından "Karbon Piyasalarına Hazırlık Ortaklığı (PMR-Partnership for Market Readiness) Projesi"ne başlanmıştır.

Türkiye'de karbon piyasaları

Dünya Bankası ile hibe anlaşmasını imzalayan ilk ülke Türkiye'dir ve karbon fiyatlandırma mekanizmaları izleme, raporlama ve doğrulama mevzuatı uygulaması çalışmaları ile 2013 yılından itibaren öncü pozisyondadır. 28910 sayılı Resmi Gazete'de 11 Şubat 2014 tarihinde yayımlanan Karbon Piyasalarına Hazırlık Ortaklığı Projesi kapsamında çalışmalara başlanmıştır. Karbon fiyatlandırma ve genişletilmiş kredilendirme mekanizmaları, sonuç odaklı finansman, yeşil ve beyaz enerji

sertifikaları gibi çeşitli mekanizmalar ile bunların uygulanması sonucunda sektörel ve ekonomik etkileri belirlenerek karbon fiyatlandırma politikalarının uygunluğu hakkında bir rapor oluşturulması amaçlanmıştır. Proje süresince tüm paydaşlar ile birlikte mekanizmalar konusunda eğitim, farkındalık, kapasite geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. Projenin birinci uygulama fazında ve ekonomik modeller doğrultusunda, Emisyon Ticareti Sistemi Türkiye için en uygun karbon fiyatlandırma mekanizması olarak önerilmiştir. Projenin ilk fazı 2018 yılında ikinci fazı da 2021 yılında tamamlanmıştır. Dünya Bankası, yükselen ekonomilerin ve gelişmekte olan ülkelerin yeni piyasa temelli mekanizmalar oluştururak iklim değişikliği konusunda kapasite geliştirmesi ve reformlar gerçekleştirmesi amacıyla "PMR" programını uygulamaya koymuştur. Finansmanı gelişmiş ülkeler tarafından karşılanacak programda karbon piyasalarına yönelik kapasite artırımı için ülkelere hibe sağlanacaktır. Türkiye, Ortaklık Kurulu'na üye olarak girmiş ve böylece uygulayıcı ülkelere PMR kaynaklarının tahsisinden sorumlu olmuştur. 2011 yılı Mayıs ayında yapılan ilk Ortaklık Kurulu toplantısında PMR teknik destek programı kaynaklarına Türkiye'nin de erişimi onaylanmıştır. 2011 yılı Ekim ayında ikinci toplantı İstanbul'da gerçekleştirilmiş ve Türkiye, programdaki gelişmekte olan ülkeleri temsilen eş başkan olarak seçilmiştir. Dünya Bankası, Türkiye'ye projenin uygulanması amacıyla 3 Milyon ABD doları hibe verilmesini onaylamıştır [78]. Gönüllü Karbon Piyasası'na yönelik projeler, Türkiye'de, sosyal ve çevresel sorumluluk temelinde 2005 yılından günümüze geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Piyasa, Dünya karbon piyasasında küçük bir oranı temsil etmesine rağmen gelişen karbon piyasalarına katılım fırsatı sunmaktadır. Ayrıca, 9 Ekim 2013 Tarihli ve 28790 Sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak Gönüllü Karbon Piyasası Proje Kayıt Tebliği yürürlüğe girmiştir. Tebliğ gönüllü karbon piyasası projelerinin ve projelerden kazanılan karbon sertifikalarının takibini amaçlamaktadır [79]. Bu konuda Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2014 yılından itibaren yürütülen projelerin ilk fazı 2018 Aralık ayında tamamlanmıştır [80]. 27 Ocak 2021 tarihinde gerçekleştirilen çevrimiçi konferans ile 2. fazının da tamamlandığı açıklanmış ve Türkiye'de salım ticaret sistemi için yasal alt yapının oluşturulduğu belirtilmiştir [81].

Enerji verimliliği yatırımları ülkelere göre farklılık göstermesine rağmen, ekonomik büyümeyle birlikte yatırım beklentileri önemli ölçüde iyileşmiştir. Türkiye'de enerji verimliliği harcamaları 2020 yılında inşaat faaliyetinde gerileme görülmesinden

kaynaklı olarak azalmış başka bir deyişle büyümesi yavaşlamıştır. Sanayi alanında tahmini yatırımlar sabit kalırken ulaştırma ile ilgili verimlilik yatırımları düşmüştür. Enerji verimliliği yatırımlarında sermaye akışlarında daha temiz teknolojilere yönelik yapısal bir değişimin olması gerekmektedir. Diğer yandan mevcut durumdaki yavaşlamalar, enerji mevcut durumunda kullanılmaya devam ettiği için küresel karbondioksit salımlarını da yeniden artırmaktadır [82]. Düşük karbon salımına sahip elektrik kaynaklarına geçiş yoluyla elektrik sektöründe, küresel enerji arzını ve talebini yeniden şekillendirme potansiyeli mevcuttur. UEA tahminine göre, elektrik enerjisi talebinde istikrarlı bir artış olacağı öngörülmektedir. Ülkelerin açıkladıkları taahhütlerinin tamamının gerçekleşmesi ile 2050 yılına kadar elektrik talebinde ek %40 oranında artış olacağı ve üretim karışımının kömürden uzaklaşması ile yenilenebilir enerji payının 2030 yılında yaklaşık %45'e yükseleceği düşünülmektedir. Koronavirüs salgınının, küresel enerji sistemi üzerinde dramatik etkileri olmasına rağmen, elektrik enerjisi diğer enerji kaynaklarından daha dayanıklı olduğunu kanıtlamıştır. 2020 yılında Dünya genelinde, küresel elektrik enerjisi talebi yalnızca %1 oranında düşmüştür. Önümüzdeki yıllarda, ülkelerin mevcut ve hedef olarak duyurdukları politikaları doğrultusunda elektrik enerjisi talebinin bugünkü seviyenin neredeyse %80 üzerinde olması beklenmektedir. Enerji kullanımında elektrik payının ve ekonomik aktivitelerin artması nedeniyle elektrik kullanımında verimliliğin arttırılması ciddi bir öneme sahiptir. Verimlilik ile maliyet düşürülmekte, toplam kapasite ihtiyacı azaltılmakta ve daha düşük karbonlu üretime geçiş kolaylaşmaktadır [83].

Türkiye'de iklim değişikliği ile mücadele konusunda belediyeler daha çok enerji sektörüne odaklanmış durumdadır. Sürdürülebilir enerji eylem planları oluşturulmaktadır. AB Belediye Başkanları Sözleşmesi'ne imzacı belediyelerin bazıları sera gazı azaltım hedefleri de belirlemişlerdir. Enerji sektörünün neden olduğu salımların azaltılması için şehirlerde hizmet verilen her alanda enerji verimliliğinin sağlanması uygulanabilecek önemli çözümlerden biri olarak gösterilmektedir. Bu girişimler hem iklim değişikliği ile mücadele hem de enerji maliyetlerinin düşürülmesi için gereklidir [84].

Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı kapsamında Genel Aydınlatma Tesislerinde LED Armatür Kullanımına İlişkin Usul ve Esaslar hazırlanmış ve 31.01.2020 tarihinde yayımlanmıştır [85]. 2020 yılı yaşanan pandemi süreci ve ekonomi üzerine etkileri

sebebiyle maalesef küresel ölçekte enerji verimliliği projelerinde ertelenme gözlemlenmektedir. Bu nedenlerle 2020 yılı için Eylem Planının %53 oranında gerçekleşebildiği açıklanmaktadır. Genel olarak yapılan değerlendirmeye göre de, UEVEP 2017-2020 hedefleri kümülatif olarak %97 oranında gerçekleşmiş; 4 yıllık süreçte toplam 4.783 milyon ABD doları yatırım ile 1.117 milyon ABD doları karşılığı 3.190 kTEP enerji tasarrufu yine kümülatif olarak sağlanmıştır [86].

2.3 Enerji Verimliliği Çalışmalarında Aydınlatma

Mevcut ve gelecek çevre politikaları ve artan çevresel tüketici bilinci nedeniyle düşük çevresel etkiye sahip ürünlere yönelik talep artmaktadır [87]. Yaşamımızı devam ettirebilmek için ihtiyacımız olan ışığı doğal aydınlatma yetersiz olduğunda sağlayan aydınlatma ürünleri, olumlu fonksiyonlarının yanında enerji ve malzeme tüketimi, zararlı salımlar ve atıklar gibi olumsuz çevresel etkilere de neden olmaktadır. Aydınlatma ürünleri evsel ve kamusal alanlarda geniş bir uygulama alanına sahiptir [88]. Örneğin bir belediyede genel elektrik enerjisi tüketiminde önemli bir paya sahip uygulamalardan biri dış aydınlatma tesisatlarıdır. Bu oranın %60'lar civarında olabildiği açıklanmaktadır [89]. Ayrıca, GSYH gibi ekonomik faaliyetler ile gece aydınlatma kullanımı arasında bir ilişki mevcuttur ve dış aydınlatma yatırımları ekonomik büyüme ile paralel artmaktadır [90]. Zaman içinde önemli gelişmeler gerçekleşen dış aydınlatma tesisatlarında yapılacak verimlilik çalışmalarının etkileri de önemli olmaktadır. Verimsiz aydınlatma tesisatlarında önemli elektrik enerjisi israfı olmaktadır. Türkiye'de dünya geneline benzer şekilde, aydınlatma amaçlı elektrik enerjisi tüketimi, toplam elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. 2009 yılında topluma öncülük etmek ve kamu giderlerinden tasarruf etmek amacıyla "kamuda verimli aydınlatmaya geçiş" adlı program gerçekleştirilmiştir. Program kapsamında enerji ve ekonomik kazanç sağlanmasının yanında aydınlatma kalitesinin de %23 oranında iyileştirildiği açıklanmaktadır. Uygulamada toplam 1.828.742 adet akkor telli lamba, toplam 11.549.139 Türk Lirası değerinde 1.758.954 adet enerji verimli (kompakt flüoresan) lamba ile değiştirilmiştir. Ortalama 75 Watt ve 940 lümen değerindeki enkandesen lambalar yerine 20 Watt ve 1200 lümen ışık akısı değerli kompakt flüoresan lambalar kullanılmıştır. Sonuç raporunda kamu kuruluşları elektrik enerjisi tüketimlerinde 102 MW azalma ve 41 milyon lira yıllık kazanç sağlandığı ifade edilmektedir [21].

Yol aydınlatmalarında enerji verimliliği uygulamaları yapılırken gerekli aydınlatma koşullarına uyulması ve trafik açısından güvenli koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple tasarım aşamasında uluslararası ve ulusal standartlar dikkate alınarak tasarım yapılmalıdır. Yol aydınlatmalarında sağlanması gereken kalite büyüklükleri farklı yol aydınlatma sınıfları için ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) önerileri ve Avrupa Birliği Standartları (EN) esas alınarak yol aydınlatması tasarım kriterleri belirlenmektedir. Türkiye'de, bir kılavuz olarak sunulan TSE CEN/TR 13201-1 teknik raporu baz alınarak, yol aydınlatması sınıflarının seçimi LED'li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar'a uygun olacak şekilde yapılmalıdır [91]. Teknolojik gelişmeler ile LED ışık kaynaklarının aydınlatmada kullanımının artması sonucunda TEDAŞ Ar-Ge Planlama ve Dış İlişkiler Dairesi Başkanlığı tarafından "LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi" 2010 yılında yayınlanmış, zaman içinde düzeltmeler yapılmış ve 2020 yılı son revizyon tarihi olmuştur. Şartnamede, genel, mekanik, elektriksel özellikler ve opsiyonel seçenekler belirtilmiştir [92]. Ayrıca yol aydınlatması tesisatlarında kullanılacak LED armatürlerin Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından 29118 sayılı resmi gazetede yayınlanan Yerli Malı Tebliği'ne göre yerli malı belgesine sahip olmaları ve tesisatın yol aydınlatma sınıfında yer alan TEDAŞ onaylı en az üç armatür arasından seçilmeleri şartı vardır [93].

AB, ışık kaynakları ve diğer aydınlatma ekipmanlarının enerji verimliliği etiketlerini daha katı ölçek ile yenileme kararını açıklamıştır. Bu uygulama ile AB tüketicilerinin hem enerji faturalarının düşürülmesi hem de karbon ayak izlerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Böylelikle 2050 yılı nötr karbon hedefi de desteklenmiş olacaktır. Etiket revizyonu aydınlatma ürünlerinde gerçekleştirildikten sonra beyaz eşya ve televizyon etiketlerindeki revizyon ile devam edecektir. 2020 yılında AB'de yaklaşık 1.500 milyon ışık kaynağı satışı gerçekleşmiştir. 2005-2015 yıllarında LED ışık kaynakları küresel pazarda yer almaya başlamış ve günümüzde kullanımı önemli ölçüde artmıştır. 2010 ve 2017 yılları arasında 7 yıllık dönemde konut aydınlatmasına uygun LED lambaların satış fiyatında %75, ofise uygun LED armatürlerinkinde de %60 düşüş gerçekleşmiştir. LED teknolojisinde verimliliğin artması ve yeni geliştirmelerin yapılması ile elde edilen fiyat düşüşüne ek olarak ileriki yıllarda uzun ömürleri nedeniyle LED lamba satış miktarının da azalacağı öngörülmektedir [94]. Diğer yandan 2019 yılında 10 milyardan fazla satış ile rekor kıran LED'lerin fiyat

rekabeti, çevreye faydaları ve tedarik bolluğu gibi nedenlerle kullanımlarının artacağı ve fiyatlarının da daha düşeceği öngörülmektedir. AB ülkeleri, LED lambalar ve armatürler ile ilgili 2018 yılında kalite ve performans standartları getirmiş ve 2021 yılında konut, endüstri ve sokak aydınlatması gibi alanlarda kompakt flüoresan ve halojen lambaların kademeli olarak kullanımının sonlandırılması için oy kullandırmıştır [95]. 2021 yılında LED'ler, neredeyse tüm diğer aydınlatma türlerinden daha uygun maliyetlidir ve bu durum %100 LED'lere geçişin tüketicilere fayda sağlayacağını göstermektedir. Daha verimli cihazlar ve ekipmanlar için enerji verimliliği politikalarının oluşturulmasını ve uygulanmasını hızlandırmak amacıyla 2020'de Süper Verimli Ekipman ve Cihaz Dağıtımı girişimi ve COP26 Ürün Verimliliği Eylem Çağrısı ile 2030 yılına kadar satılan temel ürünlerde verimliliğin iki katına çıkarılması hedeflenmiştir [83]. AB uygulamalarına paralel olarak, "Enerji ile İlgili Ürünlerin Çevreye Duyarlı Tasarımına İlişkin Yönetmelik" [96] ve daha verimli ürünlerin kullanılması amacıyla da "Ürünlerin Enerji ve Diğer Kaynak Tüketimlerinin Etiketleme ve Standart Ürün Bilgileri Yoluyla Gösterilmesi Hakkında Yönetmelik" Türkiye'de yürürlüğe girmiştir [97].

Günden güne artan talepler doğrultusunda toplulukların ve hükümetlerin belirlediği enerji tasarruf hedeflerinin karşılanması zorlaşacak ve farklı yöntemlere ihtiyaç doğacaktır. Birçok çalışmada, geleneksel yol aydınlatma tesisatlarının LED'e dönüşümü hedeflere ulaşılmasında önemli faydalar sağlayacak uygulamalar olarak değerlendirilmektedir [98]. Bugünkü teknoloji koşullarında yol aydınlatmalarında LED'li armatürlerin kullanımı ile enerji verimli çözümler elde edileceği genel olarak kabul edilmiş olmasına rağmen, iyi tasarım ve uygulamalar gerektiren konu hala araştırmalara açıktır. Yeni teknoloji ve verimli sokak ve tünel aydınlatma sistemlerinin kullanımı, günümüzde en önemli hedeflerden olan enerji verimliliğinin sağlanmasına katkı sağlayacak uygulamalardır. Tünel ve sokak aydınlatmalarında farklı teknolojileri tartışan bir çalışmada LED ve YBSBL'lı armatürlerin verimli teknolojiler olduğu açıklanmaktadır [99]. Bir başka çalışmada ışık akıları ayarlanabilir armatür kullanımının yani yol aydınlatması otomasyonunun enerji verimliliğini arttırdığı değerlendirilmektedir [100]. İklim değişikliğinin azaltılması amaçlı örnek şehir çalışmaları incelendiğinde; örneğin Mexico City'de, karbondioksit salımlarını azaltmak için enerji, su, ulaşım ve atık alanlarındaki uygulamalar ile CO_2 salımlarını azaltmak için çeşitli önlemler alındığı görülmektedir. Enerji tüketimini düşürme

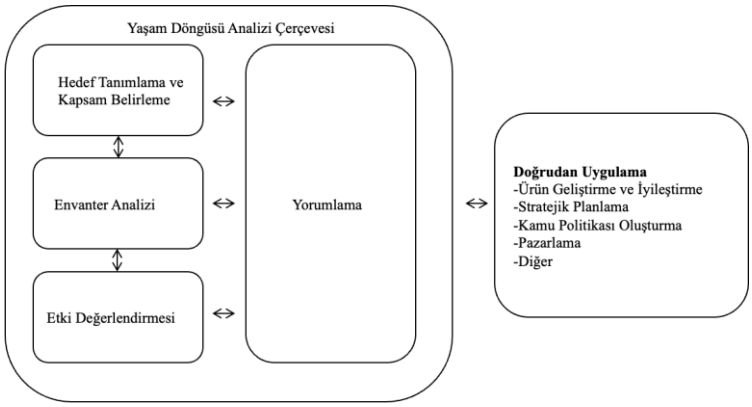
amaçlı binalarda verimli aydınlatma, verimli sokak aydınlatması gibi çeşitli enerji verimliliği programları da uygulanmaktadır [101]. Hindistan'da sokak aydınlatmasının şehirlerdeki enerji verimliliği potansiyeline etkisini göstermek amaçlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Belediyenin aydınlatma tesisatlarında verimli flüoresan lamba ve LED dönüşümlü projeler yaptığı 2005-2006 ve 2010-2011 dönemleri için yapılan analizlerin sonucunda enerji verimliliği sağlandığı açıklanmaktadır. Yıllar ilerledikçe hızlı, ekonomik ve kamusal altyapı büyümesi ile sokak aydınlatmasında tüketilen elektrik enerji miktarı 33,04 GWh'den 43,02 GWh'ye yükselmiştir [102].

Tezde gerçekleştirilecek örnek uygulamanın konusu olacak yol aydınlatması ve LED'e dönüşüm çalışmaları hakkında ayrıntılı bilgiler 4. bölümde verilmiştir.

3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ ESASLARI

Bir ürünün ömrünün tüm aşamalarındaki, hammaddenin temininden başlayarak nihai bertarafı da dahil olmak üzere üretimi, kullanımı, bakımı gibi tüm ana faaliyetlerine yaşam döngüsü denilmektedir. Ürünün oluşturulması için gerekli enerjinin temininden başlayarak tüm süreçlerin "beşikten mezara" yaklaşımı ile değerlendirilmesi ve çevresel etkilerin tahmini yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ile sağlanmaktadır. YDD, bir ürün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca potansiyel çevresel etkilerini sistematik olarak değerlendirmek için bir araçtır. Analiz edilen sistemin girdilerini, çıktılarını ve potansiyel çevresel etkilerini derlemektedir. YDD, karar vericiler tarafından, performans ve maliyet gibi faktörlerden de yararlanılarak çevreye en az etkisi olan ürünün seçilmesine yardımcı olmaktadır. Çevresel analizler için 1960'lı yıllardan itibaren yaşam döngüsü değerlendirmesi kullanılmaktadır. 1988 yılında katı atıkların tüm dünyada sorun haline gelmesiyle çevre kirletici kaynaklara olan ilginin artması sonucunda YDD geliştirilmiş ve etki değerlendirmesi boyutuna gelmiştir. 1997 yılında YDD metodolojisi ISO tarafından standart haline getirilmiştir. YDD yöntemi, ISO 14040 [103] ve ISO 14044 [104] standartlarında tanımlanmıştır. Ek olarak, belirli ürünlerin YDD sürecini yürütmek için ürün kategorisi kuralları gibi daha ayrıntılı yönergeler de mevcuttur.

YDD süreci, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi dört aşamadan oluşan sistematik bir yaklaşımdır.



Şekil 3.1: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Aşamaları [103].

Hedef Tanımlama ve Kapsam Belirleme

Ürün, süreç ve faaliyetin tanımlandığı, değerlendirmenin sınırlarının, bağlamının, işlevsel birim ve çevresel etkilerinin belirlendiği aşamadır. Sistem sınırları, YDD'ye dahil edilen girdileri ve çıktıları belirlemektedir.

Envanter Analizi

Tanımlanan çalışmanın amacına ulaşabilmesi için gerekli olan girdi/çıktı verilerinin envanteridir. Enerji, çevresel salımlar, su ve malzeme kullanımının ölçüldüğü ve tanımlandığı aşamadır.

Etki Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü etki değerlendirme aşaması (YDED), envanter analizinde belirtilen maddelerin ekoloji ve insan üzerine etkilerinin değerlendirildiği aşamadır.

Yorum

Yaşam döngüsü yorumlaması, sonuçların değerlendirildiği, amaca uygun olacak şekilde sonuç, tavsiye ve karar vermenin tartışıldığı ve ürün-süreç tercihinin yapıldığı YDD işleminin son aşamasıdır [105].

Sadece envanter analizi ve yorumlama amacıyla yapılan YDD çalışmalarına, yaşam döngüsü envanter çalışmaları (YDE) denilmektedir. YDE çalışmaları, etki değerlendirme (YDED) aşamasını içermemektedir. Diğer yandan, YDE çalışmaları, bir YDD çalışmasının envanter analizi (YDE) aşaması ile karıştırılmamalıdır. YDD, neyin çalışıldığını tanımlayan işlevsel bir birim etrafında yapılandırılmış göreceli bir yaklaşımdır. YDE' deki tüm girdiler ve çıktılar ve dolayısıyla YDED profili, işlevsel birim ile ilgili olduğu için devamındaki tüm analizler o işlevsel birime göre yapılmaktadır. İşlevsel birim, özellikle karşılaştırma yapılan YDD'lerde önemli bir parametredir ve çalışma kapsamı ile tutarlı, ölçülebilir ve açıkça tanımlanmış olmalıdır.

3.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile İlgili Standartlar

Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO) 14000 serisi, çevre etiketleri ve beyanları (ISO 14020 ve ISO 14025) ve çevre yönetim sistemi (ISO 14040 ve ISO 14044) gibi bir dizi standardı içermektedir. ISO, 2006 yılında "ISO 14040 Çevre yönetimi- Yaşam döngüsü değerlendirmesi- İlkeler ve çerçeve" ve "ISO 14044 Çevre

yönetimi- Yaşam döngüsü değerlendirmesi- Gereksinimler ve yönergeler" standardını yayınlamıştır. Bu standartlarda YDD'nin yürütülmesine ilişkin prosedür ve karşılaştırma yapılan ürünlerin eşdeğer bir hizmet düzeyi ya da işlev sağlamasına yardımcı bir karşılaştırma birimi olan işlevsel birim gibi temel terimler tanımlanmaktadır [105].

Yol gösterici ve kılavuz nitelikli bu yayınlar dışında YDD işlemi için sınırsız olanaklar mevcuttur ve önemli olacak etken parametrelerin belirlenmesinde sabit kurallar bulunmamaktadır. YDD'de kapsamlı hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi, veritabanlarına erişim sağlanabilmesi, hassasiyet ve belirsizlik analizi yapılabilmesi gibi nedenlerle malzeme ve süreçlerin çevresel etkilerini analiz etmek için SimaPro, GaBi, Quantis, Umberto, Athena gibi yazılımlar geliştirilmiştir [106].

Günümüzde elektronik ürünlerde YDD çalışmaları önem kazanmıştır. ABD Çevre Koruma Ajansı'nın Sürdürülebilir Malzeme Yönetimi (SMY) programı, sürdürülebilir ve verimli kaynak kullanımını geliştirip yaşam döngüleri boyunca çevresel etkileri en aza indirerek kişilerin ihtiyaçlarının karşılanmasına yönelik bir yaklaşımdır. SMY programı strateji planında çevresel etkilerin azaltılması, sosyo-ekonomik yarar sağlanması ve bertaraf oranının düşürülmesi temelli hedefler yer almaktadır. Planlamada sürdürülebilir elektronik yönetimi ek vurgu alanı olarak belirtilmiş ve bu alanda çalışmalar yapılacağı, YDD çalışmalarını kolaylaştıran uygulanabilir veriler, veritabanları ve modellerden oluşan bir ağ geliştirme çalışmasını içeren projenin devam ettiği bilgisi verilmiştir [107].

3.2 Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

Sürdürülebilirlik son yıllarda önemle üzerinde durulan bir kavramdır. Sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma küresel dünyada günden güne önem kazanan kavramlar olmuştur. 17 sürdürülebilirlik kalkınma hedefi ile 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi, 2015 yılında Eylül ayında düzenlenen BM Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi'nde kabul edilmiştir. 17 hedef 169 alt kalem ve hedeflere yönelik ilerlemenin takibi için 232 göstergeden oluşan sürdürülebilirlik kalkınma hedeflerinin kabul edilmesiyle tüm dünyada sürdürülebilirlik çalışmaları hızlanmış ve önemi artmıştır [108]. Sürdürülebilirlik ekonomik, sosyal ve çevresel kalkınmanın eş zamanlı olarak gerçekleşmesi temeline dayanmaktadır. Bütüncül bir yaklaşım elde edebilmek amacıyla YDD'nin sürdürülebilirliğin bu 3 temel (ekonomik, sosyal, çevresel)

unsurunu kapsayacak şekilde yapılması önemlidir. Bu noktada, Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (YDSD) entegre karar vermeye olanak sağlamaktadır [11]. Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (YDSD), çevresel yaşam döngüsü değerlendirmesi, yaşam döngüsü maliyeti ve sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesini içermektedir [109].

Sürdürülebilirliği değerlendirmek için Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (YDSD) başlığı altında yöntemler geliştirilmiştir. Ürün sürdürülebilirlik değerlendirmelerinin bir parçası olarak Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği tarafından çevresel yaşam döngüsü maliyeti (YDM) için bir uygulama kodu yayınlanmıştır ve uygulama kuralları; sürdürülebilirlik, çevre, ekonomi ve sosyal eşitliğin her biri için farklı analizler kullanan ürünlerin YDSD analizi için kavramsal bir çerçeveye dayandırılmıştır. YDSD denklem 3.1'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$YDSD = YDD + YDM + SYDD \text{ [109]} \quad (3.1)$$

YDSD = Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

YDD= Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

YDM= YDA tipi Yaşam Döngüsü Maliyeti

SYDD = Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliği değerlendirme için tutarlı ve özdeş sistem sınırlarının kullanılması YDSD'nin koşuludur. İlgili teknik disiplinler farklı terminolojiye sahip oldukları için terimlerin tutarlı bir şekilde tanımlanması gerekmektedir [110]. YDSD, YDD' den farklı olarak, modellerin bir disiplinler arası entegrasyon çerçevesidir. Çok sayıda disiplin modeli ile çalışılarak belirli bir sürdürülebilirlik konusunda uygun olanın seçilmesine yardımcı olmaktadır [111].

Günümüzde, kurumsal stratejiler ve kamu politikalarının oluşturulması için sürdürülebilirlik yol gösterici ilke olarak kabul edilmektedir. Ancak sürdürülebilirlik performansının nasıl ölçüleceğinin net olmaması sebebiyle uygulanmasında zorluklar yaşanmaktadır. Üç sürdürülebilirlik boyutu için de yöntem ve araçların olgunluğu farklılık göstermektedir. Mevcut durumda çevresel boyut geliştirilmiştir ve kapsamlı bir şekilde ele alınabilmektedir. Ancak sosyal ve ekonomik boyut değerlendirmeleri için günümüzde hala temel bilimsel gelişmelere, tutarlı ve sağlam göstergelere ve yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır [112]. Literatür ve mevzuat çalışmalarındaki YDD analizlerinden edinilen bilgiler doğrultusunda yaşam döngüsü düşüncesini destekleyen

stratejiler geliştirildiği anlaşılmaktadır. AB, bir ürünün yaşam döngüsü aşamaları değerlendirilerek çevresel performansının iyileştirilmesini amaçlayan "entegre ürün politikası"nı yayınlamıştır [113]. Ek olarak, son yıllarda eko-etiket kullanımı ve çevresel ürün beyanlarının geliştirilmesinde artış görülmektedir [11].

SYDD, sosyal etki değerlendirme tekniğidir. Yaşam döngüleri boyunca ürünlerin kullanıcılar üzerindeki potansiyel etkilerini, sosyal ve sosyo-ekonomik yönlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ürünün hammadde eldesi, işlenmesi, üretimi, dağıtımı, kullanımı ve nihai bertarafına kadar geçirdiği tüm süreçleri, paydaşları doğrudan (kapsama bağlı olarak dolaylı etkiler de dahil edilebilir) etkileyebilecek sosyal ve sosyo-ekonomik performansı analiz etmektedir ve çevresel YDD ile ya da tek başına uygulanabilmektedir. Ancak sadece SYDD analizi ile verilen kararlar genelde yetersiz olmaktadır. Bu analizler üründen elde edilebilecek faydaları belgeleyebilmekte ama ürünün üretilip üretilmemesi hakkında bilgi vermemektedir. Yarı nicel ve nitel veriler kullanıldığı için SYDD analizi ile işlevsel birime ilişkin etkilerin ifade edilmesi zorlaşmaktadır. SYDD analizi uygulanırken, yaşam döngüsü aşamalarındaki iyileşmenin en önemli olduğu ve potansiyeli yüksek olan aşamaya odaklanılması önerilmektedir [114].

3.3 Yaşam Döngüsü Maliyeti

YDM, finansal maliyet muhasebesi perspektifinden geliştirilmiştir ve üç yaşam döngüsü aşamasından en eskisidir. YDM temelde, yalnızca yatırım maliyetini değil, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca doğrudan ilgili olduğu tüm maliyetlerinin toplamını dikkate almaktadır [11]. Maliyet kategori tanımı, maliyet ölçüm prosedürü, varsa iskonto oranı ve sistem sınırlarının belirlenmesi YDM için kritik öneme sahiptir [114]. Yaşam döngüsü maliyet yaklaşımı, yatırım kararlarından önce ya da proje yaşam döngüsünün herhangi bir aşamasında uygulanabilen ekonomik değerlendirme aracıdır [115].

Çevresel YDD ve YDM analizleri benzer yapıdadır. YDM süreci, amaç ve kapsam tanımı, ekonomik yaşam döngüsü envanteri, yorumlama, raporlama ve gözden geçirme olmak üzere 4 temel bölümden oluşmaktadır. YDM çalışmaları, yaşam döngüsü çevresel boyutlarının finansal maliyetlerinin ve sonuçta kaynağın etkilerinin hesaba katılmasını sağlamaktadır. Yorumlama ve inceleme prosedürleri YDD ile benzerdir ancak YDM'nde, envanter verileri para birimi olarak tek bir ölçü biriminde

ifade edildiğinden, değerlendirmelerin karşılaştırılabilmesi amacıyla ayrıca karakterizasyon ve ağırlıklandırma çalışmalarının yapılması gerekmemektedir [109]. Yaşam döngüsünün sadece belirli bir aşaması için yapılabilen ya da çevresel maliyet ile sınırlı olabilen YDM analizi; geleneksel üretim, kullanım ve ömür sonu maliyetlerini, ayrıca geri dönüşüm maliyetleri ve salım ücretleri gibi çevresel maliyetleri ve sosyal maliyetleri de dikkate alabilmektedir. Seçilen kapsamın kar ve maliyeti hesaplanırken eğer hesaplama zamanı iki yılın üzerinde kabul ediliyorsa paranın zamanla değişiminin dikkate alınması önerilmektedir. Örneğin sokak aydınlatmaları için zaman ölçeği yaklaşık 30 yıl olarak kabul edilebildiğinden paranın zaman değeri dikkate alınmaktadır [116].

3.4 Aydınlatmada Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Bu tez çalışmasında, yol aydınlatmalarında LED dönüşüm enerji verimliliği çalışmalarına örnek olabilmesi amacıyla, YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin tüm aşamaları sistem sınırlarına dahil edilerek fabrikadaki üretim aşamasından nihai bertaraf aşamasına kadar olan süreçler dikkate alınarak yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılması hedeflendiği için, aydınlatma alanında bu konuda mevcut literatür incelenmiştir.

Literatürde aydınlatma konusunda yaşam döngüsü değerlendirmesi kapsamında; armatürlerin üretim ve kullanım aşamalarının ve eko tasarım ürünler ile geleneksel ürünlerin karşılaştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde literatürden bazı örneklere yer verilmiştir.

Principi ve arkadaşları (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ofis genel aydınlatması için kompakt flüoresan lambalı (CFL) ve LED'li armatürlerin karşılaştırılması amaçlı YDD analizi yapılmıştır. LED ışık kaynaklı armatürün kullanım aşamasında yüksek enerji verimliliğine sahip olması sebebiyle kümülatif enerji talebinin ve sera gazı salımlarının %41-%50 oranında az olduğu açıklanmıştır [117]. Tähkämö ve arkadaşlarının (2012) ışık kaynaklarının YDD'lerinin analiz edildiği çalışmasında, ışık kaynaklarının verimli, uzun kullanım ömürlü, onarılabilir, kolay sökülebilir, geri dönüştürülebilir, tehlikeli maddelerden arındırılmış, olası en düşük miktarda kirletici içermeleri koşuluyla çevre dostu olabilecekleri belirtilmiştir. Geleneksel ışık kaynakları ve LED'ler karşılaştırıldığında, LED'lerin üretim ve hammadde alımında çevresel etkilerinin daha yüksek olduğu, ancak ömürlerinin uzun,

enerji tüketimlerinin düşük olması sebebiyle kullanım aşamasındaki etkilerinin az ve sonuç olarak toplam yaşam döngüsü etkilerinin daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada ayrıca, LED ve geleneksel ışık kaynaklarının karşılaştırılabilir olması için YDD kapsamının dikkatli seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır [118]. Bazzana ve arkadaşları (2012) çalışmalarında LED armatürlerin süreç etkilerini değerlendirmişler, LED armatürlerin kullanım aşamasında çevresel etkilerinin, imalat aşamasında ise tehlikeli/tehlikesiz atık etkilerinin baskın olduğu sonucuna varmışlardır. LED dizisi, sürücü ve alüminyum parçalardan kaynaklı çevresel etkilerin imalat aşamasında görüldüğü, kurulum, nakliye ve kullanım ömrünün ise YDD üzerinde oldukça az etkiye sahip olduğu saptanmıştır. 50.000 saatlik kullanım ömrünün çevresel etkilerinin, 36.000 saatlik kullanım ömrüne oranla ortalama %17 daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Etki kategorisine bağlı olarak soğutucu gibi alüminyum parçaların %11-%42, sürücünün %19-%66 ve LED dizisinin %4-%50 oranında çevresel etkiye sahip olduğu görülmüştür [119]. Yu ve ark. (2016) çalışmalarında farklı kullanım koşulları altında bir dizi YDD çalışması gerçekleştirmiş, CFL'ler ve LED'ler için çevresel etkilerin karşılaştırılabilir ancak geleneksel akkor telli lambalardan önemli ölçüde daha az olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca çalışmada yapılan hassasiyet analizi sonucunda, lamba parametrelerinin kullanıma etkisinin az ancak yaşam döngüsü etkisi üzerine etkisinin oldukça fazla olduğu görülmüştür. Çevresel etki üzerinde en önemli parametrenin ışık kaynağı verimi olduğu açıklanmaktadır. Çalışma prensipleri farklı olduğu için CFL ve LED'lerin ve beraberlerindeki elemanların toksisite etkilerinde farklılıklar olduğu açıklanmaktadır. Üretim aşamasında, LED'in insan toksisite etkisi %5,9 iken CFL'nin %12,4 olduğu görülmüştür [120]. Dillon ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen LED teknolojisinin zamanla gelişimini inceleyen bir çalışmada, o yıl üretilen üç LED ile muadili olan 2011 yılında üretilen A19 LED karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma sonucunda yeni LED'lerin özellikle metal kullanımının azalması sebebiyle çevresel etkilerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Küresel ısınma potansiyelinde (GWP) de yaklaşık %17-37 arasında azalma görülmüştür [121].

Richter ve ark. (2019) çalışmalarında 2012-2017 yılları arasında LED'ler için gerçekleştirdikleri kapsamlı YDD incelemesini açıklamaktadır. LED'lerin kullanım ömürleri bir duyarlılık analizi olarak değerlendirilmiştir. Çevresel açıdan, uzun kullanım ömürlü ürünlere karşın, mevcut ürünün kendi kategorisinde yeni ürünler ile

değiştirilmesinin daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. LED teknolojisinin olgunlaşması ile bu etkinin azalacağı da belirtilmiştir [122].

Armatür karşılaştırma çalışmalarına ek olarak literatürde eko tasarımlı ürünler kapsamında yapılan YDD çalışmaları da mevcuttur. Wang ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada beş aydınlatma ürünü için YDD gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalara dayanarak sürdürülebilir bir aydınlatma ürünü tasarlanmıştır. Mevcut aydınlatma ürünlerine oranla eko tasarımlı ürünün çevresel etkilerinde %27-58 oranında azalma olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [123]. Casamayor ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında ise mevcut bir LED armatür ve yeni bir eko tasarım LED armatür YDD'si gerçekleştirilmiştir. Araştırmada 1.000, 15.000 ve 40.000 saat olmak üzere üç olası kullanım ömrü, geri dönüşüm merkezi ve atık olmak üzere iki bertaraf şekli üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Tüm senaryolar için eko tasarımlı ürünün %60 daha az çevresel etkisi olduğu görülmüştür. Etkinin en yüksek kullanım aşamasında olduğu, ardından imalat, kullanım ömrünün sonu ve nakliye aşamalarında da devam ettiği belirlenmiştir [124].

Literatürde yol aydınlatması tesisatlarının YDD analizleri ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. İtalya'da çift tüplü karayolu tünelinde uygulanacak iki farklı aydınlatma sistemi ve iki çeşit yol kaplaması üzerinden YDD analizi yapılan bir çalışmada, LED ve yüksek basınçlı sodyum buharlı lambanın 20 yıl süresince etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma, yüksek performanslı aydınlatma sistemi ve daha iyi yansıtıcı yüzey kullanımının yol yapım, bakım ve kullanım aşamalarında zararlı etkileri azaltacağını ortaya koymuştur. LED'lerin YBSBL'lere oranla bakım aşamasındaki etkilerinin az olduğu, ancak üretim ve montaj aşamalarında ise durumun tersine yüksek etkinin ortaya çıktığı sonucuna ulaşılmıştır [125]. Hadi ve arkadaşları (2013) tarafından, Birleşik Arap Emirlikleri Abu Dhabi'de Seramik Deşarj Metal Halide (SDMH) ve LED'li sokak aydınlatması için beşikten mezara yaklaşımı ile hammadde eldesi, armatür üretimi, kullanım ömrü ve kullanım aşamalarını kapsayacak şekilde YDD'nin yapıldığı çalışmada, LED'lerin üretim aşamasında yüksek olan çevresel etkilerinin kullanım boyunca az enerji tüketmeleri sebebiyle dengelendiği belirtilmiştir. Analizler fotovoltaik panellerle kullanılan yol aydınlatma armatürleri için yapıldığında pil üretimi, enerji amaçlı fosil yakıt kullanımı ve taşıma aşamalarının çevresel etki üzerinde baskın olduğu görülmüştür. Pil geri dönüşümü

olan ve olmayan fotovoltaik panellerle çalıştırılan senaryoların tümünde LED'lerin SDMH'lerden daha düşük etkileri olduğu sonucuna varılmıştır [126].

Tannous ve arkadaşlarının (2018) Lübnan'daki iki sokak aydınlatmasını beşikten mezara yaklaşımı ile karşılaştırdıkları çalışmalarında, 70 Watt'lık bir LED'li güneş enerjili sokak armatürlerinin kullanımının, 150 Watt'lık bir YBSBL'lı geleneksel sisteme oranla çevresel açıdan daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sistemlerin kullanım ömürlerinin dolmasından sonra geri dönüşüm uygulanmasının LED için daha da olumlu olduğu belirtilmiştir. Kısa ömürlü ve eski tasarımlı YBSBL'lı armatürlerin montaj aşaması, önemli miktarda alüminyum ve metal gerektirdiği için çevresel etkilerinde bu durum baskın bir aşama olmaktadır [127]. Tähkämö ve arkadaşlarının (2015), YBSBL ve LED karşılaştırması temelli yaptıkları bir başka çalışmalarında da YBSBL ve LED armatürlerin kullanıldığı yol aydınlatma teknolojisinin YDD analizinde çevresel etkilerin çoğunlukla kullanım aşamasından kaynaklandığı doğrulanmıştır. LED'lerin armatür başına %26, ışık miktarı (lümensaat) başına ise %17 daha düşük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Diğer yandan lümensaat ve armatür miktarının armatürün gerçek işlevini tanımlamaması sebebiyle, 1 kilometre yol için karşılaştırılan armatürlerin farkının ortalama sadece %3 olduğu görülmüştür. Ayrıca, ürünlerin toplam sürdürülebilirlik perspektifinin değerlendirilmesini sağlamak amacıyla uygun bir işlevsel üniteye sahip yol aydınlatma armatürlerinin çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerinin değerlendirildiği çalışmaların yapılması gerektiği de vurgulanmıştır [128].

Askola ve ark. (2021) tarafından, dokuz saat kullanılıp üç saat kapatıldığı ve yoğun yaşlandırma altında eskitildiği koşullarda iki farklı tip LED sokak armatürü ile yapılan bir başka çalışmada, 32.000 saat test süresince armatür ömrünün yoğun uyarmalı kontrol nedeniyle, gerçek trafik koşullarına oranla %10 oranında azaldığı görülmüştür. Gerçekçi dimleme döngüsünde aydınlatma tesisatının yaşam döngüsü maliyetinin %0–0,7 oranında artacağı ve armatür ömrünün %0–2 oranında azalacağı tahmin edilmiştir. Trafiğe duyarlı ve %50 enerji tasarruflu bir sistemin kullanım ömrü maliyetinin, trafiğe duyarlı olmayan benzer LED armatür tesisatına göre %25 düşük olacağı sonucuna varılmıştır. Yol aydınlatması tesisatının tüm ömür maliyetini, ömür boyu dimleme etkisinin %0 iskonto oranında %0,7; %3 iskonto oranında ise %0,6 etkilediği; aynı zamanda enerji tasarruf potansiyelini de %25'ten %24'e düşürdüğü belirlenmiştir. Kullanım ömründeki %0-2 oranında azalmanın toplam maliyeti %0-0,7

oranında artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca çalışmada, armatürlerin trafiğe duyarlı kontrolünün yapıldığı tesisatlarda, LED'lerde ek strese neden olduğu için erken arızalandıkları da ifade edilmektedir. Akıllı ya da uyarlanabilir kontrolün, mevcut ve gelecekteki enerji tasarrufu hedeflerine ulaşılmasını desteklediği için trafiğin sürekli olmadığı yollarda uygulanabileceği belirtilmiştir [98].

Dzombak ve arkadaşlarının (2020) maliyet değerlendirmesi konusunda sokak aydınlatmalarının hem çevresel etkileri hem de maliyetini optimize etme amacıyla döngüsel ekonomi modelini analiz eden çalışmasında ise uygun maliyetli yöntemin çevresel açıdan en uygun olmadığı ifade edilerek, maliyet tasarrufları ile yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerektiği belirtilmiş ve kapsamlı araştırmalara ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır. Uzun ömürlü ürün kullanımının maliyet açısından uygun olduğu; yeniden kullanım uygulanabiliyorsa verimlilik kazanımı açısından yeni teknolojik ürün kullanımının da avantajlı olduğu belirtilmiştir [129]. Tähkämö ve arkadaşlarının (2016), gerçekleştirdikleri LED'li sokak aydınlatması YDM analizi konulu çalışmalarında, 30 yıl kullanım ömrü boyunca toplam yaşam döngüsü maliyetlerinin %29-45'inin enerji maliyetlerinden kaynaklandığı tahmin edilmiştir [130]

4. YOL AYDINLATMASI TEMELLERİ VE MEVZUATI

Bu bölümde yol aydınlatması esasları, LED'e dönüşüm konusunda literatür incelemesi, yol aydınlatması tasarımı ve mevzuatı incelenmiştir. Ardından bir uygulama örneği üzerinden yol aydınlatması tasarımı yapılmıştır.

Yollar güvenli ve konforlu trafik için gerekli görüş koşulları, trafik oluşumları ve fiziki özelliklerine göre sınıflara ayrılmıştır ve ilgili sınıflar için gerekli aydınlatma kalite büyüklükleri uluslararası öneriler ve standartlarda belirtilmiştir. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) önerileri ve Avrupa Birliği Standartları (EN), genel olarak yol aydınlatması tasarım kriterlerinin belirlenmesinde esas alınmaktadır. Yol aydınlatması tasarımında kullanım fonksiyonlarının belirli bir amaca yönelik olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda, Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun CIE 115:2010 "Yaya ve Motorlu Trafik için Yol Aydınlatması" teknik raporunda yol aydınlatması tasarımının üç ana amacı aşağıdaki şekilde belirtilmektedir [131].

a. Sürücüler için iyi görme koşulları oluşturularak güvenli seyahat edilmesinin sağlanması
b. Çevrede bulunan nesnelerin görünürlüğünün arttırılması
c. Yayalar için güvenli alanların oluşturulması ve tehlikelerin görünmesinin sağlanması

Kaliteli bir yol aydınlatması için belirtilen bu üç unsurun dikkate alınması gerekmektedir.

Avrupa Birliğinin (EN) CEN (European Committee for Standardization) – CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) uluslararası regülasyonları gereği, Türkiye'nin ulusal standart kuruluşlarının Avrupa Standartları'nı uygulaması gerekliliği nedeniyle Türk Standartları Enstitüsü (TSE) mevcut durumda yol aydınlatması konusunda Avrupa Birliğinin 2015 tarihli EN 13201 kodlu yayınlarını standart olarak kabul ederek uygulamaya koymuştur.

Türkiye'de "Genel Aydınlatma Yönetmeliği" 27.07.2013 tarihinde 28720 numaralı Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. İlgili yönetmelikte aydınlatma komisyonları tanımlanmış, genel aydınlatma yükümlülüğü, tasarımı, inceleme ve denetim, aydınlatma ölçümleri, çeşitli ve son hükümler belirtilmiştir. Ayrıca, genel aydınlatmalardaki aydınlatma sınıflarının seçiminin, yol aydınlatması özellikleri, hesapları ve ölçme işlemlerinin ilgili mevzuat ve standartlara uygun olarak yapılma gerekliliği ifade edilmiştir [132]. 2006 yılında Türkiye'de yüksek basınçlı civa buharlı lamba kullanımı yasaklanarak şeffaf tüplü yüksek basınçlı sodyum buharlı lambaların şehir içi yol aydınlatmalarında kullanılması zorunluluğu getirilmiştir [133]. Teknolojisindeki gelişmeler sonucunda LED ışık kaynaklarının genel aydınlatma uygulamalarında kullanılabilir hale gelmesi ile "LED'li Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi" yayınlanmıştır. Teknik Şartnamede LED'li yol aydınlatma armatürlerinin üretim, montaj ve güvenlik özelliklerini belirleyen fiziki koşullar ile, genel, mekanik, elektriksel ve fotometrik başlıkları altında gerekli kalite büyüklükleri tanımlanmıştır [92]. LED'li armatürlerin yola paralel olacak şekilde monte edilecekleri; LED modül, sürücü, bağlantı iletkenleri gibi bütün elemanlarıyla birlikte işletme koşullarında minimum 60.000 saat çalışacakları belirtilmiştir. Türkiye'de yürütülen enerji verimliliği çalışmaları çerçevesinde "Genel Aydınlatma Kapsamında LED Armatürlerin Kullanımına İlişkin Usul ve Esaslar" hazırlanarak 20/04/2018 tarih ve 30397 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanmıştır. Bu usul ve esaslarda, tesislerde kullanılacak armatürlerin en az üç marka yerli üretim belgeli TEDAŞ onaylı armatürün yer aldığı grup içinden seçileceği genel hükmü yer almaktadır [93]. Ek olarak, 2019 yılı Mart ayında, aydınlatma tesislerinde kullanılacak armatürlerin belirlenmesi amacıyla "LED'li Armatürlerin Onaylanmasına İlişkin Usul ve Esaslar" yayınlanmış ve bu yayının 2020 yılı Ekim ayında revizyonu gerçekleşmiştir. Yayında ayrıca, LED'li yol aydınlatma armatürü "Şartnameye Uygunluk Onayı Sertifikası'' verilmesine dair esaslar da belirtilmiştir [134]. Yine 2020 Ekim ayında revizyonu gerçekleştirilen "LED'li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar"da yol aydınlatması tasarım kriterlerine dair bilgiler verilmektedir [91].

İlgili yönetmelik ve standartlar doğrultusunda yol aydınlatması tasarımı konusunda belirlenen kriterler ve uygulamalar aşağıda açıklanmıştır.

4.1 Yol Aydınlatma Sınıfı Seçimi

Yol aydınlatmasında aydınlatma gerekliliklerinin sağlanabilmesi amacıyla çeşitli parametreler tanımlanmıştır. Yol aydınlatma sınıfı seçimi, bu parametrelerden biridir ve TSE CEN/TR 13201-1 teknik raporunda sınıf seçimine dair bilgiler bulunmaktadır [135]. Sınıflandırmada, trafik hacmi, yolun tasarım hızı, motorlu araç veya motorsuz araç için kullanımı ya da yayalar ile beraber kullanılıyor olması, park edilmiş araç, ortam parıltı düzeyi gibi pek çok etken göz önünde bulundurulmaktadır. Tüm bunların sonucunda "M sınıfı - motorlu trafik araçları, C sınıfı – karmaşık alanlar ve P sınıfı – yaya ve düşük hızlı alanlar" olmak üzere üç aydınlatma sınıfı belirlenmiştir.

4.1.1 Motorlu araç trafiği aydınlatma sınıfı (M sınıfı)

Motorlu araç trafiği olan yollar EN standartları ve CIE önerilerinde M harfi ile ifade edilmektedir. M aydınlatma sınıfları, orta seviyeden yüksek seviyeye Çizelge 4.1'de verilen hız sınırı veya tasarım hızı, trafik oluşumu, ortam parıltısı, trafik oluşumu, taşıt yolu ayrımı, park etmiş araç durumu, kavşak yoğunluğu, görsel kılavuzlama gibi parametreler dikkate alınarak belirlenmektedir.

Yolun mevcut durumu dikkate alınarak Çizelge 4.1'deki parametrelere karşılık düşen ağırlıklandırma değeri (VW) seçilmekte, seçilen değerlerin toplamının (VWS) altı (6) sayısından farkı M aydınlatma sınıfı numarasını ifade etmektedir. Aydınlatma sınıfı numarası denklem 4.1' deki gibi belirlenmektedir. M yol aydınlatma sınıf değeri 1 ve 6 arasında olmaktadır. Toplam değerin (VWS)<0 olduğu durumlarda değer 0 kabul edilmekte, toplamda M<0 elde edildiğinde ise, yol aydınlatma sınıfı M1 olarak seçilmektedir.

$$\text{Aydınlatma sınıf numarası M} : 6 - \text{VWS} \tag{4.1}$$

4.1.2 Yayalar ve düşük hızlı alanlar aydınlatma sınıfı (P sınıfı)

Düşük hızlı motor taşıt kullanımı olan mesken mahallelerde, bisiklet yollarında ve yaya yollarında P aydınlatma sınıfı kullanılmaktadır. Diğer yol aydınlatma sınıflarına göre hızın düşük ve güvenle durma fren mesafesinin kısa olması nedeniyle, esas alınan yakın cisimlerin görünürlüğü daha kolay olduğundan, motorlu araç trafikli yollardan farklı kriterler göz önünde bulundurulmaktadır [135].

M ve P yol aydınlatma sınıfı seçimi parametreleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 0.1: TSE CEN/TR 13201-1'e göre M yol aydınlatma sınıfı seçim parametreleri.

Parametre	Seçenekler	Açıklama		Ağırlıklandırma Değeri (VW)
Hız sınırı veya tasarım hızı	Çok Yüksek	v ≥ 100 km/saat		2
	Yüksek	70 < v < 100 km/saat		1
	Orta	40 < v ≤ 70 km/saat		-1
	Düşük	v ≤ 40 km/saat		-2
Trafik oluşumu	Yüksek oranda motorlu Olmayan trafik ile karışık			2
	Karışık			1
	Yalnızca motorlu araç			0
Trafik hacmi		Otoyollar, çok şeritli yollar	İki şeritli yollar	
	Yüksek	Azami kapasitesinin %65'inden büyük	Azami kapasitesinin %45'inden büyük	1
	Orta	Azami kapasitesinin %35'i ile %65'i arasında	Azami kapasitesinin %15'i ile 45'i arasında	0
	Düşük	Azami kapasitesinin %35'inden küçük	Azami kapasitesinin %15'inden küçük	-1
Taşıt yolu ayrımı	Yok			1
	Var			0
Park etmiş araç	Var			1
	Yok			0
Kavşak yoğunluğu		Hemzemin kavşak / km	Köprülü kavşaklar, köprüler arası mesafe, km	
	Yüksek	> 3	<3	1
	Orta	≤ 3	≥ 3	0
Ortam parıltısı	Yüksek	Mağaza vitrinleri, reklam afişleri, spor sahaları, istasyon alanları, depo alanları		1
	Orta	Normal durum		0
	Düşük			-1
Görsel Kılavuzlama	Çok zor			2
	Zor			1
	Kolay			0

Çizelge 0.2: TSE CEN/TR 13201-1'e göre P yol aydınlatma sınıfı seçim parametreleri.

Parametre	Seçenekler	Açıklama	Ağırlıklandırma Değeri (VW)
Seyahat hızı	Düşük	v ≤ 40 km/saat	1
	Çok düşük (yürüme hızı)	Çok düşük (yürüme hızı)	0
Trafik hacmi	Yoğun		1
	Normal		0
	Sakin		-1
Trafik oluşumu	Yayalar, bisikletli ve motorlu trafik yolu		2
	Yayalar ve motorlu trafik		1
	Yayalar ve bisikletliler		1
	Sadece yayalar		0
	Sadece bisikletliler		0
Yüz tanıma	Gerekli		Ek gereksinimler
	Gerekli değil		Ek gereksinim yok
Ortam parıltısı	Yüksek	Mağaza vitrinleri, reklam afişleri, spor sahaları, istasyon alanları, depo alanları	1
	Orta	Normal durum	0
	Düşük		-1
Park etmiş araç	Var		1
	Yok		0

Çizelge 4.2'den yolların mevcut durumuna göre uygun ağırlıklandırma değerleri (VW) seçilip, seçilen değerlerin toplamı (VWS) alınmaktadır. Bu toplam değerin 6 sayısından farkı ile P aydınlatma sınıfının numarası belirlenmektedir. P sınıf değerleri 1 ve 6 arasında olabilmektedir. Aydınlatma sınıf numarası denklem 4.2'deki gibi bulunmaktadır. Toplam değerin (VWS)<0 olduğu durumlarda değer 0 kabul edilmekte, P<0 elde edildiğinde ise P1 aydınlatma sınıfı seçilmektedir.

$$\text{Aydınlatma sınıf numarası P} : 6 - \text{VWS} \tag{4.2}$$

4.1.3 Karmaşık alanlar aydınlatma sınıfı (C sınıfı)

Kavşak, bisiklet yolu, yaya yolu, üst geçit, park alanı gibi farklı yol geometrilerinin olduğu alanlarda C aydınlatma sınıfı kullanılmaktadır [135].

Çizelge 0.3: TSE CEN/TR 13201-1'e göre C yol aydınlatma sınıfı seçim parametreleri.

Parametre	Seçenekler	Açıklama	Ağırlıklandırma Değeri VW
Hız sınırı veya tasarım hızı	Çok Yüksek	$v \geq 100$ km/saat	3
	Yüksek	$70 < v < 100$ km/saat	2
	Orta	$40 < v \leq 70$ km/saat	0
	Düşük	$v \leq 40$ km/saat	-1
Trafik hacmi	Yüksek		1
	Orta		0
	Düşük		-1
Trafik oluşumu	Yüksek oranda motorlu olmayan trafik ile karışık		2
	Karışık		1
	Yalnızca motorlu araç		0
Park etmiş araç	Var		1
	Yok		0
Taşıt yolu ayrımı	Yok		1
	Var		0
Ortam parıltısı	Yüksek	Mağaza vitrinleri, reklam afişleri, spor sahaları, istasyon alanları, depo alanları	1
	Orta	Normal durum	0
	Düşük		-1
Görsel Kılavuzlama	Çok zor		2
	Zor		1
	Kolay		0

M sınıfı ile benzer özellikler gösteren C sınıfı parametreleri kavşak yoğunluğu parametresinde farklılaşmaktadır. Çizelge 4.3'te belirtilen şekilde uygun ağırlıklandırma değeri (VW) seçilerek, seçilen değerlerin toplamının (VWS) altıdan farkı bulunarak C aydınlatma sınıfı numarası elde edilmektedir. Aydınlatma sınıfı numarası da denklem 4.3' deki gibi bulunmaktadır. 1 ve 5 arasında C aydınlatma sınıf değeri belirlenmektedir. Toplam değerin (VWS)<0 olduğu durumlarda değer 0 kabul

edilmekte, toplamda C<0 elde edildiğinde ise C0 aydınlatma sınıfı seçilmektedir. C sınıfı yol aydınlatmalarında minimum aydınlık düzeyi esasına göre tasarım yapılmaktadır.

Aydınlatma sınıf numarası C: 6 – VWS (4.3)

4.2 Yol Aydınlatması Kalite Kriterleri

Yol sınıfı ve özelliklerine göre belirlenen kalite büyüklükleri TSE CEN/TR 13201-1 "Yol aydınlatması – Bölüm 2: Performans Gereklilikleri"nde verilmektedir. Çizelge 4.4'te M sınıfı yol aydınlatması için tanımlanan kriterler gösterilmektedir [135]. Ortalama parıltı düzeyi, parıltı düzgünlüğü, kamaşma bağıl eşik artışı ve çevreleme oranı değerleri M sınıfı yollar için değerlendirilen büyüklüklerdir.

Çizelge 0.4: TSE CEN/TR 13201-2'e göre M yol aydınlatma sınıfları için sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri [91] [136].

Aydınlatma Sınıfı	Yol yüzey parıltısı				Kamaşma sınırlandırılması	Çevrenin aydınlatılması
	Kuru koşullar			Islak	Kuru koşullar	
	$Lort$ (cd/m^2) [sağlanan minimum]	U_o [minimum]	U_l [minimum]	Uow [minimum]	f_{TI} (%) [maksimum]	R_{EI} [minimum]
M1	2	0,4	0,7	0,15	10	0,35
M2	1,5	0,4	0,7	0,15	10	0,35
M3	1	0,4	0,6	0,15	15	0,3
M4	0,75	0,4	0,6	0,15	15	0,3
M5	0,5	0,35	0,4	0,15	15	0,3
M6	0,3	0,35	0,4	0,15	20	0,3

Çizelge 4.5'te P sınıfı için kalite kriterleri gösterilmektedir. P sınıfındaki yollarda ortalama ve minimum yatay aydınlık düzeyi, yarı silindirik aydınlık düzeyi ve minimum düşey aydınlık düzeyi kalite kriterleri olarak dikkate alınmaktadır. Düzgünlüğün sağlanması için, ortalama aydınlık düzeyi değeri o sınıf için belirtilen minimum aydınlık düzeyi değerinin 1,5 katını geçmemelidir.

Çizelge 0.5: TSE CEN/TR 13201-2'ye göre P yol aydınlatma sınıfları için sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri.

Sınıf	E_{ort} (lx)* [sağlanan minimum]	E_{min} (lx) [sağlanan]	$E_{v,min}$ (lx) [sağlanan]	$E_{sc,min}$ (lx) [sağlanan]
P1	15	3	5	5
P2	10	2	3	2
P3	7,5	1,5	2,5	1,5
P4	5	1	1,5	1
P5	3	0,6	1	0,6
P6	2	0,4	0,6	0,2
P7	Tanımlanmamış	Tanımlanmamış		

Çizelge 4.6'da C sınıfı için kalite kriterleri verilmektedir. C sınıfındaki yollarda aydınlık düzeyi ve ortalama aydınlık düzeyi düzgünlüğü kalite kriterleri olarak dikkate alınmaktadır.

Çizelge 0.6: TSE CEN/TR 13201-2'ye göre C yol aydınlatma sınıfları için sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri.

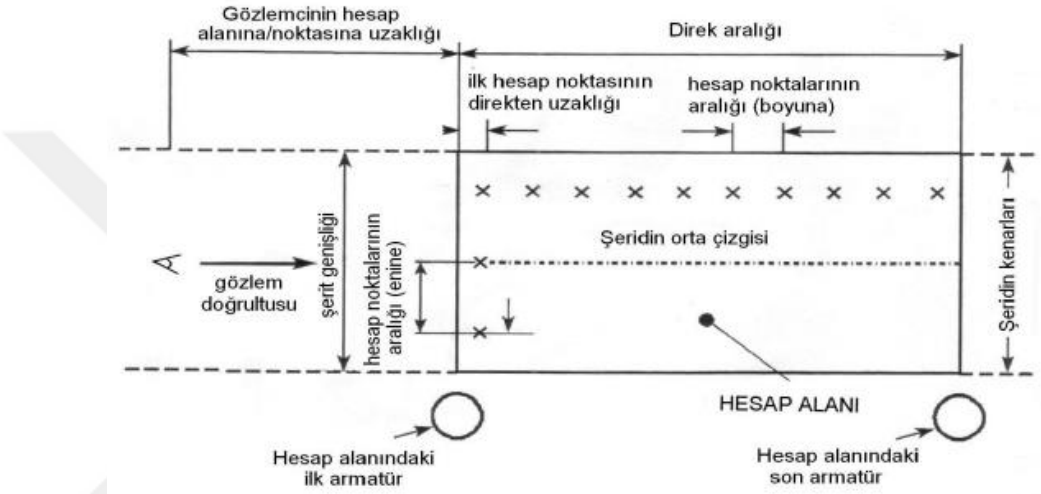
Sınıf	E_{ort} (lx) [sağlanan minimum]	U_o [minimum]
C0	50	0,4
C1	30	0,4
C2	20	0,4
C3	15	0,4
C4	10	0,4
C5	7,5	0,4

Çizelgelerde görüldüğü gibi, yol aydınlatması kalite kriterlerinin belirlenmesinde M sınıfı yollar için parıltı düzeyi (L-cd/m^2) esas alınırken, C ve P sınıfı yollarda ise aydınlık düzeyi (E-lux) dikkate alınmaktadır. EN 13201'in "Performans Hesapları" başlıklı bölümünde yol aydınlatma tasarımında kullanılan aydınlatma kalite büyüklüklerinin hesap yöntemleri ve hesap yapılırken göz önünde bulundurulması gereken parametreler aşağıdaki gibi verilmektedir [136] [137].

Hesaplama alanı:

Hesaplar, simetri koşulları dikkate alınarak yolun bütününü temsil edecek en küçük alanda yapılmaktadır. Şekil 4.1'de gösterilmiş olan iki armatür arası kalan alan parıltı

düzeyi için hesap alanı olarak tanımlanmaktadır. Bu hesap alanında iki direk arası mesafe S ile gösterilmektedir. Boyuna doğrultudaki hesap noktaları sayısı N ile, iki hesap noktası arasındaki mesafe de D ile ifade edilmiştir. S<30 m olduğu durumda N=10, S>30 m olduğu durumda ise D≤3m olacak şekilde grid noktaları belirlenmektedir. EN 13201-3 ve EN 13201-4 standartlarında yol aydınlatması hesap ölçümlerinde gözlemcinin 60 ila 160 metre önündeki 100 metrelik görüş alanı esas alınmaktadır. Bu alan simetri koşullarına göre iki direk arası da olabilmektedir. Şekil 4.1'de hesap noktaları ve hesap alanı belirtilmektedir [136] [137].



Şekil 4.1 : Hesap alanı ve hesap noktalarının konumu.

Ortalama parıltı düzeyi (L_{ort}) :

Hesap alanında yer alan grid noktalarında, gözlemci konumuna göre hesaplanmış parıltıların aritmetik ortalaması ortalama parıltı düzeyi olarak tanımlanmaktadır. Gözlem doğrultusunda armatür montaj yüksekliğinin (H) oniki katı, gözlem noktasının gerisinde ve diğer doğrultularda ise beş katı mesafe içinde kalan armatürlerin hesaba katılması yeterlidir. Yol aydınlatması armatürlerinin, yolun belli bir noktasında oluşturacağı parıltı düzeyi denklem 4.4'te ifade edilmiştir [137].

$$L = \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C,\gamma) \cdot f_M \cdot r_k(tan\varepsilon,\beta)}{H_k^2} \tag{4.4}$$

Burada;

L parıltı düzeyi (cd/m^2)

H_k yol yüzeyinden armatür montaj yüksekliği (m)

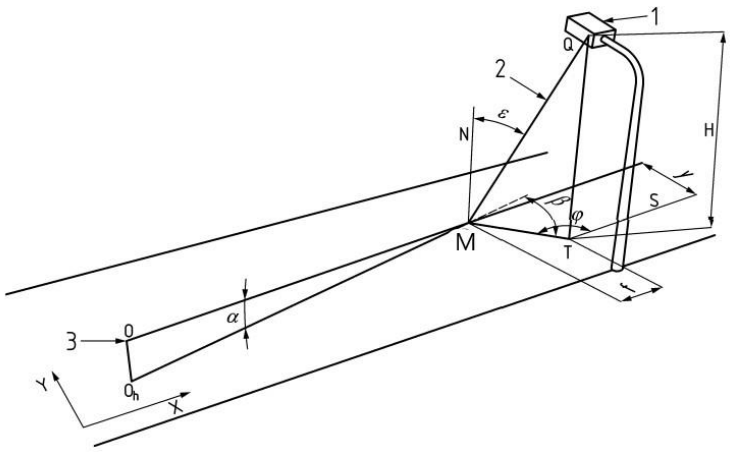
$I_k(C,\gamma)$ C düzlemi ve γ açısındaki k. armatürün ışık şiddeti (cd)

f_M armatürün bakım faktörü ile bağlantılı tesisat bakım faktörü

n_{LU} katkısı bulunan armatür sayısı

$r_k(tan\varepsilon, \beta)$ armatürden noktaya ulaşan ışık şiddetinin açısal koordinatlarına bağlı indirgenmiş parıltı faktörü

EN 13201-3'de belirtilen bir noktanın parıltı düzeyi hesaplaması için kullanılan yol geometrisi ve açıları şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Parıltı hesabı için yol geometrisi ve ilgili açılar [137].

M parıltısı hesaplanan nokta

MN M noktasının yol yüzeyi üzerindeki normali

H armatür montaj yüksekliği

ST yolun boyuna doğrultusu

QT armatür fotometrik merkezinden geçen dikme (eksen)

Q armatürün fotometrik merkezi (ışık yayan yüzeyinin merkezi)

O_h yol yüzeyi üzerindeki gözlemci noktasının geometrik projeksiyonu

f ve y TP vektörünün skaler bileşenleri

β yatay yol düzleminde, M noktasını gözlemci ve armatür ile birleştiren doğruların içinde yer aldığı düşey düzlemler arasındaki açı

φ ışık şiddeti düzleminin yataydaki azimuth açısı

α gözlem açısı

ε M noktasına ulaşan armatür ışık şiddetinin normalle yaptığı açı

1 armatür

2 ışık şiddeti

3 gözlemci (sürücü göz yüksekliğindeki nokta) [137]

Boyuna parıltı düzeyi düzgünlüğü (U_l)

Yolun her şeridinin orta çizgisi boyunca hesaplanan minumum yol parıltısının, maksimum yol parıltısına oranlanması ile elde edilir. Her bir şerit için ayrı ayrı hesaplanır ve hesaplanan en düşük değer kabul edilir.

Ortalama parıltı düzgünlüğü (U_o)

Hesap alanında bulunan grid noktalarındaki en düşük parıltının ortalama parıltı düzeyine oranıdır.

Aydınlık düzeyi (lx)

Bir yüzeyin birim alanına birim zamanda düşen ışık akısıdır.

Yatay aydınlık düzeyi (E_h)

Aydınlık düzeyi hesaplanan alanın zemin seviyesinde bulunan yüzeyinin aydınlık düzeyidir.

Düşey aydınlık düzeyi (E_v)

Yatay aydınlık düzeyi için geçerli sistemin 90^o döndürülmesi sonucunda oluşan düzlemin, yer seviyesinden 1,5 m yükseklikte bulunan yüzey elemanının üstündeki aydınlık düzeyidir.

Yarı-silindirik aydınlık düzeyi (E_{SC})

Düşey bir yarı-silindirin yüzeyinden 1,5 m yükseklikte bulunan yüzey elemanının üzerindeki aydınlık düzeyidir.

Bağıl eşik artışı (f_{TI})

Yol aydınlatmasında, armatürlerden kaynaklanan istenmeyen kamaşma ile oluşan görünürlük kaybı ölçüsüdür.

Çevreleme oranı (R_{EI})

Taşıt yolunun, kaldırım yönündeki 5 metrelik alanının ortalama aydınlık düzeyinin yolun iç tarafındaki 5 metrelik alanının ortalama aydınlık düzeyine oranıdır.

4.3 Yol Aydınlatmasında LED Dönüşüm Literatür Araştırması

Enerji verimliliğini arttırmak amacıyla mevcut yol aydınlatma tesisatlarında modernizasyon çalışmaları yapılmaktadır [138]. Rangari ve arkadaşları (2021) çalışmalarında LED'lerin enerji tasarrufu sağlamalarının yanında yol aydınlatmasında görüş kalitesini de arttırmaları nedeniyle geleneksel ışık kaynaklarının yerini aldıklarını ifade etmektedir. Çalışmada LED'li yol aydınlatmaları karbon salımlarını azaltmak için uygun maliyetli, yüksek etkili ve uygulaması kolay çözümler olarak tanımlanmakta, şehirleri karbondan arındırmak, kapsayıcı ve sürdürülebilir büyümeyi gerçekleştirebilmek, daha güvenli ulaşım sağlayabilmek için aydınlatmada enerji verimliliğinin önemli bir uygulama olduğu vurgulanmaktadır [139]. Literatürde geleneksel aydınlatmadan LED'e geçiş konusunda birçok çalışma mevcuttur. Tez çalışması kapsamında, LED özelinde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Rahman ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışmada Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, West Bethesda ve MD bölgelerindeki yol aydınlatmalarında mevcut YBSBL'lı armatürlerin yerine LED armatürlerin kullanılması durumu analiz edilmiştir. Çevre Güvenliği Teknolojisi Sertifikasyon Programı kapsamında ABD Savunma Bakanlığı tarafından desteklenen projede, dış mekan sokak aydınlatma uygulamaları için akıllı, kullanıcı tercihlerine uygun bir LED aydınlatma sisteminin işletim performansı geliştirilmiştir. Mevcut 8 adet YBSBL'lı armatür, renksel geriverim indeksi, aydınlık düzeyi, elektrik enerjisi tüketimi ve işletim performansı açısından bir yıl boyunca izlenmiştir. YBSBL'lı armatürlerin, LED armatürler ile değişimi sonucunda enerji kullanımında yaklaşık %74' lük tasarruf edildiği görülmüştür [140]. Halapee'nin (2014), Tayland Metropolitan Electricity Authority tarafından desteklenen yol aydınlatmalarında LED armatür uygulanmasıyla ilgili yaptığı çalışmasında, YBSBL'lı 250W'lık armatürler 140W'lık LED armatürler ile değiştirilmiştir. Değişim durumunda güç tüketiminin %56,5'luk bir azalma ile 169W'a düşürebileceği belirtilmiştir. 740,22 kWh/armatür/yıl enerji tasarrufu elde edileceği, bu değerin 0,444 ton/armatür/yıl CO_2'nin azaltılmasına eşdeğer olduğu açıklanmıştır. Bununla beraber, 125W' lık Yüksek Basınçlı Civa Buharlı Lambalı (YBCBL) armatürün 55W'lık LED ışık kaynaklı armatür ile değiştirilmesi ile de güç tüketiminde %64,4'lük bir azalma olacağı ve 92,7 W/armatür değerine düşebileceği ifade edilmiştir. Bu uygulama sonucunda 406,03 kWh/armatür/yıl enerji tasarrufu elde

edilebileceği ve bu değerin 0,243 ton/armatür/yıl CO_2 azaltılmasına karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır [141].

Bamisile ve arkadaşları (2016), Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti' nde sokak aydınlatma tesisatlarında kullanılan YBSBL'lı ve YBCBL'lı armatürlerin yerine LED armatürlerin kullanılması durumunda enerji denetim programının fizibilitesinin incelendiği çalışmalarında, KKTC'de ara ve ana yolların aydınlatmasında toplam 60.000 sokak aydınlatma armatürü kullanıldığını açıklamışlardır. 90 ay süresince mevcut sokak aydınlatma armatürleri yerine LED ışık kaynaklı armatürler kullanıldığı durumda faiz oranı dikkate alınmadan hesaplanan toplam basit tasarruf değeri 120.545.981 TL olarak bulunmuştur. Bu proje ile 36.880.410 kWh'lik yıllık enerji tasarrufu sağlanacağı belirtilmiştir [142].

Kim ve Hwang (2017) tarafından yapılan çalışmada Güney Kore ve Seul büyükşehir hükümetlerinin, "LED Plan 2060" doğrultusunda sokak aydınlatması için mevcut YBSBL'lı armatürleri LED armatürlere dönüştürmek zorunda kaldıkları belirtilmektedir. Test projesi olarak Wooi Stream'de dimleme kontrolü ile aydınlatma enerji tüketimi karşılaştırması yapılmış ve LED armatürlerin yaşam döngüsü maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. LED armatür değişimi ile enerji tüketiminin %69 azaltılabileceği ve ek olarak, yaya hareketleri ile loşlaştırma kontrol sistemi kullanıldığında bu oranın %77'ye yükseleceği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, LED değişiminin 11,5 yıl gibi uzun bir geri ödeme süresi olduğu vurgulanmıştır [9].

Campisi ve diğ. (2017) Roma Belediyesi'nin kamusal aydınlatmasının iyileştirilmesi ile ilgili bir yatırım projesini değerlendirdikleri çalışmalarında geleneksel sokak aydınlatma armatürlerinin, LED armatürler ile değiştirilmesi öngörülmüştür. Çalışmanın sonuçlarında, enerji tüketiminin ve bakım maliyetlerinin düşürüldüğü, daha düşük CO_2 salımının gerçekleştiği, yol güvenliği üzerinde olumlu etkiler yaratıldığı ve ışık kirliliğinin azaltıldığı açıklanmaktadır. Genel aydınlatma sistemindeki geleneksel armatürlerin eşdeğer LED armatürler ile değiştirilmesi durumunda yıllık enerji tüketiminde 134.767.360 kWh (geleneksel lambalarla yıllık enerji tüketimi 192.797.740 kWh, önerilen LED armatürlerle de yıllık enerji tüketimi 58.030.380 kWh) tasarruf olacağı ve bunun enerji maliyetlerinde yıllık 29.073.538 Avro azalma sağlayacağı hesaplanmıştır. Ayrıca, İtalya'da üretilen her kWh elektrik enerjisi için CO_2 salımının yaklaşık olarak 531 gram olduğu ve bu durumda LED teknolojisi kullanılmaya başlandığında elde edilecek yıllık 134.767.360 kWh'lik

tasarrufun 71.561 ton CO_2 salımını azaltacağı ifade edilmiştir [143]. Yfandi ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada Hersonissos Belediyesi, Sürdürülebilir Enerji Forumu Eylem Planı'nı değerlendirerek uluslararası araştırmalara göre bir belediyenin elektrik enerjisi tüketiminde sokak aydınlatmasının %40 oranında olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple, sokak aydınlatmaları için baz olarak 2010 yılı alınarak 2020 yılına kadar CO_2 salımlarını azaltacak eylemler belirlenmiştir. Bu amaçla, belediyenin 2020 yılına kadar kirletici CO_2 salımlarını %72,97 azaltmak için yol aydınlatmalarında enerji tasarrufu projeleri programladığı belirtilmektedir. Gerçekleştirilen projeler ile CO_2 salımının ve enerji tüketiminin azaltılmasının yanı sıra suç oranlarının azalmasına ve güvenlik duygusunun artmasına katkıda bulunulduğu da belirtilmiştir. Çalışmada, enerji verimliliği sürecinin planlama, uygulama ve izleme aşamalarında önemli enerji tasarruf potansiyellerinin olduğu ifade edilmiştir. Ekonomik kriz ve fon eksikliklerinin görüldüğü bu dönemde sürdürülebilir kalkınma perspektifi ile artan ihtiyaçlar doğrultusunda gereksinimlerin karşılanabilmesi için yerel yönetimlerin odaklı ve sürekli bir çalışmaya yönelmeleri gerektiği de vurgulanmaktadır [7].

Yoomak ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, enerji tasarrufu, aydınlatma ve güç kalitesi için YBSBL'lı armatürlerin fotovoltaik sistem entegrasyonlu LED armatürlerle değiştirilmesi durumu için fizibilite işlemi gerçekleştirilmiştir. Tayland standardını değerlendirmek ve karşılaştırmak amacıyla, yol aydınlatma kalitesinin simülasyonu DIALux programı kullanılarak, güneş enerjisi olan ve olmayan durumlarda enerji tasarrufu ve güç kalitesini değerlendirmek için deneysel bir kurulum gerçekleştirilerek, yatırım senaryolarını değerlendirmek amacıyla da geri ödeme süreleri ve iç karlılık oranları hesaplanarak üç bileşen üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Aydınlatma kalitesi simülasyon programı ile sonuçlar değerlendirildiğinde, LED armatürlü yol aydınlatma tesisatında minimum aydınlık düzeyinin korunduğu, ortalama aydınlık düzeyinin azaldığı ve aydınlatma düzgünlüğünün iyileştiği görülmüştür. YBSBL'lı armatüre göre LED armatürlerin kullanılması durumunda, enerji verimliliği indeks değerinde yaklaşık %40 azalım elde edilmiş ve LED armatür kullanımının faydalı olduğu belirtilmiştir. Güneş enerjisi olan ve olmayan durumlarda iki tür aydınlatma armatürünün (LED ve YBSBL) performansları bir deney düzeneği ile elektriksel parametreler ve güç kalitesi ölçülerek değerlendirilmiştir. Her iki durumda da LED armatürün güç kalitesi ve enerji tasarrufu açısından YBSBL'lı armatüre göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

YBSBL'lı armatürlere kıyasla LED armatürlerin kurulum maliyetlerinin oldukça yüksek olduğu, ancak sağlanan tasarruf ile LED armatürlerle 3,5 yıllık bir geri ödeme süresi elde edildiği, iç karlılık oranının 10 yıllık bir proje ömrü için %30 olduğu belirlenmiştir [144]. Sudarmono ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada 2014 yılında, DKI Jakarta Eyalet Hükümeti'nde 179.305 adet sokak armatürü bulunduğunu, bu armatürlerin %92'si veya 166.441 adetinin YBSBL'lı verimi düşük armatürler olduğunu belirtmişlerdir. YBSBL'lı armatürlerin enerji tasarruflu olduğu bilinen LED armatürlerle değiştirilmesine 2016 yılında başlandığı ve yılsonuna kadar 89.417 adet yenilenen armatür olduğu açıklanmaktadır. 2.162 armatürün değiştirilmesi üzerine yapılan araştırma sonuçlarında, armatür değişimi yoluyla enerji tüketiminde 330.414 kWh'den 71.278 kWh'e düşüş olduğu ve böylelikle %78,43 oranında tasarruf sağlanabileceği belirtilmiştir. Ek olarak, geri ödeme süresinin ise 2,66 yıl olduğu ifade edilmiştir [145].

Mahmoud (2018) LED armatürlerin, YBSBL'lı armatürlerin yerine kullanılabileceğini göstermek amacıyla yaptığı çalışmada, gerçek projeye dayanan kapsamlı bir ekonomik inceleme yapmış ve 1.131 adet 400W YBSBL'lı armatürlerin, 100W gücündeki LED aydınlatma armatürleri ile değiştirilmesinin mali faydalarını analiz etmiştir. Aydınlatma armatürlerinin değiştirilmesinin ilk maliyeti, bakım maliyeti, enerji tasarrufu, kirlilik maliyeti, doğal gaz satış fırsatı parametreleri açısından yapılan ekonomik değerlendirme sonucunda, tipik yıllık tasarruf göstergesi 433,36 $/kW hesaplanmıştır. Mevcut YBSBL'lı aydınlatma tesisatlarının gelecekte LED aydınlatma tesisatlarına dönüştürülmesi durumunda bu tasarruf göstergesinin, ekonomik değerlendirme açısından oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır [146].

Djuretic ve Kostic (2018) yaptıkları çalışmada, sokak aydınlatmasında YBSBL'lı armatürlerin LED armatürlerle değiştirilmesi sonucunda elde edilecek gerçek enerji tasarrufunu belirlemeye çalışan birçok bağımsız saha araştırması çalışmasında ciddi eksiklikler olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle çalışmada, sokak aydınlatma tesisatları karşılaştırmasında eşit fotopik veya mezopik parıltı seviyeleri esas alınmıştır. Kaliteli YBSBL'lı armatürlerin, kaliteli LED armatürler ile değiştirilmesinde, çok aşamalı dimleme senaryoları uygulanırken %31-60 arasında enerji tasarrufu olabileceği görülmüştür. Ayrıca, dimlemelerde LED armatür ışık akısı düşürülürken, güç faktörünün önemli ölçüde azalabileceği de vurgulanmıştır [147]. Beccali ve diğ. (2018) çalışmalarında sokak aydınlatması yenileme tasarımlarının

enerji, aydınlatma ve ekonomik analizi için bir metodoloji geliştirmişler ve İtalya'nın Pontedera kasabasını örnek uygulama olarak değerlendirmişlerdir. Pontedera'nın aydınlatma sistemlerinin %90'ının enerji açısından verimsiz göründüğü belirtilmiştir. Yatırım maliyetleri ve elektrik enerjisi fiyatları değişimleri dikkate alınarak duyarlılık analizi ile ekonomik fizibilite değerlendirmesinin yapıldığı çalışmada, yıllık olarak her bir yol için en az %33 oranında mevcut maliyetlerin azalabileceği ve ortalama 13 yıl geri ödeme süresi olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Elektrik enerji maliyeti değişikliğine oranla geri ödeme değerlerinin daha yüksek hassasiyete sahip olduğu da belirtilmiştir. Ek olarak, yapılacak değişimlerin tesisatların aydınlatma kalitesini, enerji ve çevresel sürdürülebilirliğini iyileştirme fırsatı da olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmada kabul edilen metodoloji ile Dünya atmosferinde yaklaşık 4,41 ton/km CO_2 salımının önlenmesinin mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mevcut tesisatların dönüşümü ile elektrik enerji faturalarının ve bakım maliyetlerinin azalmasıyla maddi tasarruf sağlanabileceği ifade edilmektedir [148]. Anthopoulou ve Doulos (2019) çalışmalarında, Yunanistan'ın Egnatia Odos yolu üzerinde 2019 yılında en son LED teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen aydınlatma tasarımını, 2017 yılında yapılan tasarım ile karşılaştırmaktadır. Mevcut aydınlatma altyapısının 17 yıl önce kurulduğu belirtilerek karşılaştırmalar mevcut direk kurulumlarının kullanılması, aydınlatma direkleri için yeni konumların kullanılması, adaptif aydınlatma için mevcut direk kurulumları ve yine adaptif aydınlatmada yeni konumlandırma senaryoları üzerinden yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, 2 yıl içerisinde LED teknolojisinin gelişmesi ile %1,33 ile %2,77 oranında enerji tasarrufu sağlandığı, mevcut durumda veya yeni direk kurulumu durumunda adaptif aydınlatma uygulaması ile %13,5 ek enerji tasarrufu sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır [10].

Spahiu ve diğ. (2018) Tiran Belediyesi'ndeki sokak aydınlatma sisteminin mevcut durumunu ölçümler ve saha ziyaretleri ile detaylı olarak analiz ettikleri çalışmalarında sokak aydınlatmasında LED teknolojilerinin geliştirilmesi ve kurulumuna yönelik fırsatlar ve önerileri değerlendirmişlerdir. Yol aydınlatma sisteminden sorumlu kişilerle yapılan görüşmeler ve belediyeden alınan bilgiler sonucunda, DIALux yazılımı kullanılarak detaylı analizler yapılmış ve LED tesisat önerileri gerçekleştirilmiştir. Tiran belediyesinde direk değişimi yapılmadan mevcut sokak aydınlatma armatürlerinin birebir LED ışık kaynaklı armatürler ile değiştirilmesi sonucunda yılda %33 oranında ya da 4,6 milyon kWh elektrik enerjisi tasarrufu elde

etme potansiyeli olduğu ve böylelikle CO_2 salımında 1,85 milyon kg azalma olacağı sonucuna ulaşılmıştır [149]. Mohammed (2020) 400W'lık 100 adet YBSBL'lı armatürlerin yerine 150W gücünde LED ışık kaynaklı armatür kullanılması durumunda sistemin ekonomik analizini gerçekleştirdiği çalışmasında, LED armatürlerin tükettiği elektrik enerjisinin YBSBL'lı armatürlerin tükettiği değerlere göre küresel maliyetini hesaplayarak çevresel etkilerini belirlemiştir. %40 ila %80' oranında enerji verimliliği olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [150]. Janter ve diğ. (2021), Kuzey Sumatera Eyaleti'nde 2.632,22 km'lik ulusal yolda LED-Dimmer Dönüştürücü kullanılarak yaptıkları çalışmalarında, 48.897 GWh enerji tasarrufu elde edildiğini belirtmişlerdir. Enerji tasarrufuna ek olarak karbon salımı azalışının ve karbon ticaret değerinin hesaplandığı çalışmada, 55.742 kton CO_2 karbon salımı azaltımı ile 102.013,35 ABD Doları karbon ticaret değeri elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada LED'li yol aydınlatma tesisatlarında dönüştürücü teknolojisinin kullanımının enerji tasarrufu sağlayacağı da vurgulanmaktadır [151]. Pagden ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, Birleşik Krallık'ta belediyelerin toplam elektrik tüketiminde sokak aydınlatma payının yaklaşık %40 olduğu ve enerji verimliliği teşviki için, elektrik tüketiminin en aza indirilmesini sağlayan tüketim, üretim modelleri ve program maliyetlerine, kamu güvenliğine ve kaliteli aydınlatılmış çevreye odaklanılması gerektiği vurgulanmaktadır. Çalışmada, enerji verimliliği sağlanmasına ek olarak, aydınlatmaların güvenli bisiklet sürmeyi teşvik etmesi ve suçla mücadeleye yardımcı olması amacıyla mevcut sokak aydınlatma armatürlerinin soğuk beyaz ışık renkli LED armatürler ile değiştirildiği ifade edilmektedir. Leicestershire Belediyesi'nin 68.000, Kent County Belediyesi'nin 118.000, Gloucestershire Belediyesi'nin 55.000 ve Manchester Belediyesi'nin 56.000 LED armatür değişimi planladığı belirtilmektedir. Coventry Şehir Meclisi 29.701 adet mevcut YBSBL'lı armatürleri LED armatürler ile değiştirmiştir. Yatırımın amortisman süresi 20 yıl kabul edilerek, LED armatürler ve yarı gece aydınlatmaları kullanılması durumlarında iki sokak aydınlatma sisteminin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla 2010-2030 yılları arasındaki periyot için ekonomik analizler yapılmıştır. Yarı gece aydınlatma stratejisi dört aşamada önerilmektedir: hava karardıktan sonra %100 ışık akısında çalışan sokak aydınlatma armatürleri saat 20:00'den gece yarısına kadar %20 kısılacak (%80 ışık akısı), gece yarısından sonra sabah 05:00'e kadar %100 kısılacak (kapatılacak) ve sabah günışığı yeterli olana kadar da %80 ışık akısında çalışacaktır. Çalışmanın sonuçlarına göre, mevcut elektrik

enerjisi kullanımlarına göre, LED armatürler ve yarı gece aydınlatma sistemleri kullanıldığında enerji tüketiminin ve enerji maliyetinin sırasıyla %44 ve %21 oranlarında azalabileceği ifade edilmektedir [152].

4.4 Literatür Araştırması Değerlendirmesi

Mevcut YBCBL ve YBSBL'lı yol aydınlatması tesisatlarında LED dönüşümü amaçlı gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirildiğinde; LED'e dönüşümle enerji verimliliğinin sağlandığı, enerji tüketim maliyetlerinde düşüş olduğu, CO_2 salımlarının önemli ölçüde azaldığı ve bu uygulamaların çevresel sürdürülebilirliğe katkısı olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Elektrik enerjisi tüketiminde minimum %31, maksimum %78,43 oranında tasarruflar olacağı ifade edilmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda CO_2 salımı, elektrik enerjisi tüketimi ve bakım maliyetlerindeki düşüşlerin yanı sıra LED aydınlatmaya geçişin tesisatların aydınlatma kalitesinde de iyileşmeler sağladığı ve yol güvenliğine katkısı olduğu belirtilmektedir. Ek olarak, LED kullanımının başlangıç tesisat maliyetlerinin yüksek, buna bağlı olarak geri ödeme sürelerinin de uzun olduğu vurgulanmaktadır. LED teknolojisindeki gelişmeler sonucunda satın alma maliyetlerinde beklenen düşüşlerin, enerji verimliği çalışmalarına önemli katkı sağlayacağı açıktır.

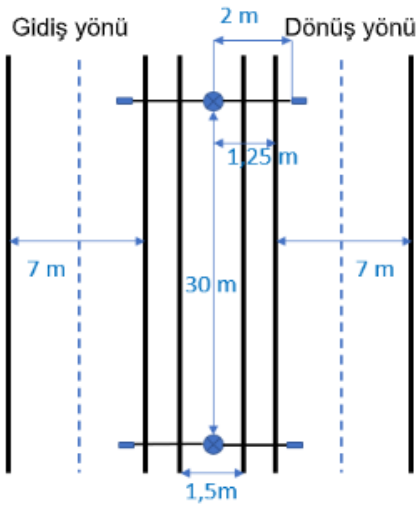
4.5 Yol Aydınlatması Uygulama Örneği

Günümüzde LED teknolojisinin gelişmesi ile birlikte yol aydınlatmalarında LED'e geçiş çalışmaları artmıştır. Hem enerji verimliliği hem de maliyet açısından fayda sağlanırken, ulusal ve uluslararası taahhüt ve uygulamalar ile çevresel etkilerin önem kazanmasıyla da aydınlatmada LED kullanımı yayınlaşmaktadır. Daha önce de ifade edildiği gibi, 2017 yılında yayınlanan Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'nın "E7. Genel Aydınlatmada Enerji Verimliliğinin Artırılması" eylemi kapsamında sodyum buharlı armatürlerden LED'lere geçişin verimlilik, süre ve fayda/maliyet açısından değerlendirilmesi ve planlanmasına yönelik çalışmalar yapılması, yenilikçi teknolojilerin mevzuata entegrasyonunun sağlanması, yerli üretim ve tasarımın verimli aydınlatma alanında geliştirilmesi faaliyetleri yer almaktadır. Tez çalışmasında, bu faaliyetlere yol gösterici kılavuz olabilecek bir örnek uygulama ve değerlendirmenin yapılması amaçlanmıştır. Enerji verimliliği çalışmalarından beklenilen yüksek tasarruf

oranlarının, mevcut tesisatlardaki verimsiz sistemlerin maliyet-etkin bir şekilde yenileri ile değiştirilmesi sonucu elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle mevcut yol aydınlatmalarındaki LED dönüşümlerinin de tesisat değişikliği yapılmadan sadece armatür değişimi ile gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu amaçla, LED dönüşüm projesi uygulanan mevcut bir M2 aydınlatma sınıfı yol için hesap ve değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Türkiye'nin Denizli ilinde aydınlatma sınıfı M2 olarak tanımlanmış bir yol örnek olarak seçilmiş ve tamamen gerçek veriler üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

M2 yol aydınlatma sınıflı Denizli yolunda direk değişimi yapılmadan sadece armatür değişikliği yapılarak, TS EN 13201 standartları gereği aydınlatma kalite büyüklüklerinin ortalama parıltı düzeyinin 1,2 katı aşılmadan sağlanması koşulu ile hem YBSBL'lı hem de LED'li tesisat tasarımları DIALux aydınlatma tasarımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Örnek olarak seçilen Denizli ilindeki kullanım koşullarına göre M2 sınıfı olarak tanımlanan yol ortadan refüjlü gidiş ve dönüş yönünde 3,5 metre genişliğinde 2 şeritli olup orta refüj genişliği 1,5 metredir. Yol krokisi Şekil 4.3'de verilen yolun gidiş ve dönüş her iki yönünde refüje bitişik 0,5 metre genişliğinde boş alanlar yer almaktadır. Aydınlatma tesisatı 30 metre ara ile orta refüjde bulunan 12 metre yüksekliğindeki direklerden oluşmaktadır. 12 metre yüksekliğinde her iki yönde çift konsollu olan direklerin konsol boyları 2 metre, konsol açıları da 15°'dir. Armatürler konsollara yol yüzeyine paralel olacak şekilde monte edilmişlerdir.



Şekil 4.3: Denizli Yolu Krokisi.

Bu tesisat geometrisi esas alınarak, yol kaplaması R3 sınıfı ve bakım-işletme faktörü de yine TEDAŞ mevzuatına uygun 0,80 kabul edilip aydınlatma tasarımları gerçekleştirilmiştir. Örnek yoldaki mevcut tesisatın yenisi ile değiştirilmesinde YBSBL'lı ya da LED'li armatürlerin kullanılması durumu irdelenmiştir. Mevcut durumda aydınlatma kalitesi düşük ve verimsiz olan eski YBSBL'lı armatürlerin, standartlara uygun aydınlatma kriterlerinin sağlandığı yeni YBSBL'lı armatürler ya da yine aynı yol aydınlatma kalitesini sağlayan LED'li armatürlerle değiştirilmesi olasılığı irdelenmektedir. Gerekli aydınlatma kalite değerlerini optimum olarak sağlayan yol aydınlatma tesisatının YBSBL'lı ve LED'li armatürlü olması durumu için üretim ve kullanım aşamasında olası tüm verilere ulaşılarak yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılması amaçlanmaktadır. Mevzuat gereği yerli imalat aydınlatma armatürleri tercih edilmiştir. Gerekli verilere ulaşım olasılığı dikkate alınarak, tasarımlarda aynı yerli aydınlatma armatürü üreticisinin armatür verileri kullanılmıştır. Tez çalışmasında gerçekleştirilen karşılaştırmalı YBSBL'lı ve LED'li yol aydınlatma tesisatlarının tasarımlarında kullanılan armatürlerin elektriksel ve fotometrik özellikleri Çizelge 4.7'de gösterilmektedir. Çizelge 4.8'de de tasarımlarda kullanılan armatürlerin fiziksel özellikleri verilmektedir.

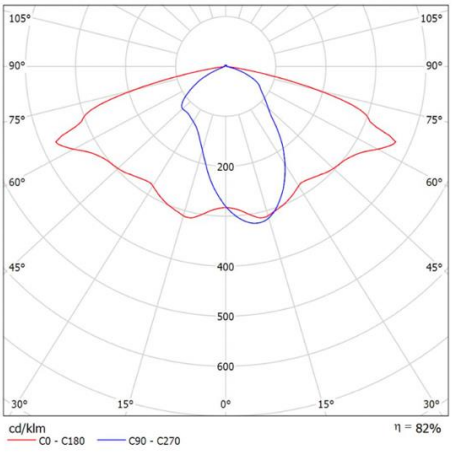
Çizelge 0.7: Tasarımlarda kullanılan YBSBL'lı ve LED'li armatür verileri.

Armatür	Işık kaynağı gücü (W)	Balast kaybı (W)	Armatür Işık akısı (lm)	Etkinlik faktörü (lm/W)	Renk sıcaklığı (K)	Renksel geriverim
YBSBL	150	18	12261	72,98	2000	~20
LED	93	-	13759	147,95	4000	>70

Çizelge 0.8: YBSBL ve LED armatürlerin fiziksel özellikleri.

Armatür	Boyutlar (mm)	Ağırlık (kg)	Hacim (m3)	Balast /Sürücü tipi
YBSB'lı	750*360*200	7,2	0,054	Manyetik
LED'li	660*330*150	6,7	0,032	Elektronik

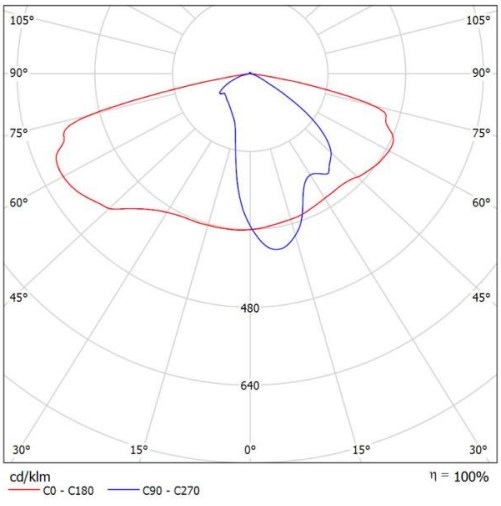
Işık dağılım eğrileri Şekil 4.4'te gösterilen 150 W gücünde ve balast kaybı 18 W olan YBSBL'lı armatür ile yapılan aydınlatma tasarım hesapları sonucunda yol kaplaması üzerinde ortalama 1,62 cd/m^2 parıltı düzeyinin, diğer aydınlatma kalite koşulları da yerine getirilerek sağlandığı belirlenmiştir.



Şekil 4.4: 150W YBSBL'lı armatürün ışık şiddeti dağılım eğrileri.

Aynı tasarım hesapları LED'li armatür kullanımı için de tekrarlanmıştır. LED dönüşüm tasarımı aynı yerli armatür üreticisinin 93 W gücündeki LED'li yol aydınlatması armatür verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda ortalama yol yüzey parıltısı 1,76 cd/m^2 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.5'te 93W LED armatürün ışık şiddeti dağılım eğrileri verilmektedir. M2 aydınlatma sınıflı yolda TS EN 13201 ve TEDAŞ esaslarına göre sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri ve YBSBL'lı ve LED'li armatürler ile gerçekleştirilen aydınlatma tasarım hesapları sonuçları Çizelge 4.9'da gösterilmektedir.

DIALux programı kullanılarak yapılan aydınlatma tasarım hesaplarının çıktıları Ek-A'da, LED'Lİ ve YBSBL'lıarmatürlerin teknik çizimleri ve ışık dağılım eğrileri sırasıyla Şekil A.1 ve A.3'te, uygulama sonuçları ise A.2 ve A.4'te verilmektedir.



Şekil 4.5: 93W LED armatürün ışık şiddeti dağılım eğrileri.

Çizelge 0.9: M2 sınıfı yol aydınlatma kalite kriterleri ve uygulama örneği hesap sonuçları.

	M2 sınıfı yol aydınlatma kalite kriterleri [131]	150 W YBSBL armatür kullanımı sonucu elde edilen değerler	93 W LED armatür kullanımı sonucu elde edilen değerler
L_{ort} (cd/m^2)	≥ 1,5	1,62	1,76
U_o	≥ 0,40	0,49	0,6
U_l	≥ 0,70	0,84	0,94
f_{TI} (%)	<10	7	8
R_{EI}	> 0,35	0,87	0,86

Çizelge 4.9'daki verilerden görüldüğü gibi, örnek yolda YBSBL'lı ve LED'li armatürler kullanılması durumunda TS EN 13201-2 standartı ve TEDAŞ mevzuatı gereği sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri gerçekleştirilebilmektedir. İlgili standartta yol yüzeyi ortalama parıltısı için minimum değer verilmekte, ancak üst değer konusunda bir kısıtlama getirilmemektedir. Enerji tasarrufu amaçlı gerçekleştirilen bu çalışmalarda gereğinden fazla aydınlatmanın da önlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla TEDAŞ mevzuatında ortalama yol yüzey parıltı düzeyinin en fazla önerilen değerin 1,2 katı olabileceği koşulu yer almaktadır. Örnek yol için bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen aydınlatma tasarım hesaplarında da bu koşul dikkate alınmıştır. LED'li tesisatta sağlanan ortalama parıltı düzeyi değerinin YBSBL'lı tesisata göre yüksek olması da kullanıcılar tarafından bu yeni teknolojinin kabulünü kolaylaştırıcı bir etken olabilecektir.

5. ALTERNATİF TESİSATLARIN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde, örnek yol için tasarlanmış YBSBL'lı ve LED'li aydınlatma tesisat alternatiflerinin yaşam döngüsü değerlendirmesinin yapılması amaçlanmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi örnek yol aydınlatma tesisatları için enerji verimliliği irdelemesi, sera gazı salımı hesaplaması ve ardından yaşam döngüsü maliyet hesaplaması yapılarak gerçekleştirilecektir. Son yıllarda bu analizlerin, Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (YDSD) adı altında çevresel yaşam döngüsü değerlendirmesi, yaşam döngüsü maliyeti ve sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesini içerecek şekilde yapılması amaçlanmaktadır. Tez çalışmasında da bu yaklaşım çerçevesinde sera gazı salım değerlendirmeleri ile çevre, maliyet hesapları ile ekonomi boyutu analiz edilmektedir. Ancak üçüncü boyut olan sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesinde, uzun süreli çok parametreli saha çalışmalarına dayanan etki analizleri gerektiği için, sadece gelecek araştırmalara yön gösterebilecek şekilde olası geri dönüşümler tanımlanabilmiştir.

5.1. Çevresel Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Bu bölümde, yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımı ile örnek yolda tasarlanan toplam güçleri sırasıyla 168 W ve 93 W olan YBSBL'lı ve LED'li armatür kullanımının, enerji verimliliği ve sera gazı salımı azaltımı ile küresel ısınma potansiyeli açısından çevresel etki değerlendirmesi yapılmıştır. Değerlendirmeler her iki alternatif çözümdeki armatürlerin gerçek üretim ve kullanım verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmelerde literatürde tanımlanan hedef tanımlama, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorum aşamaları uygulanmıştır.

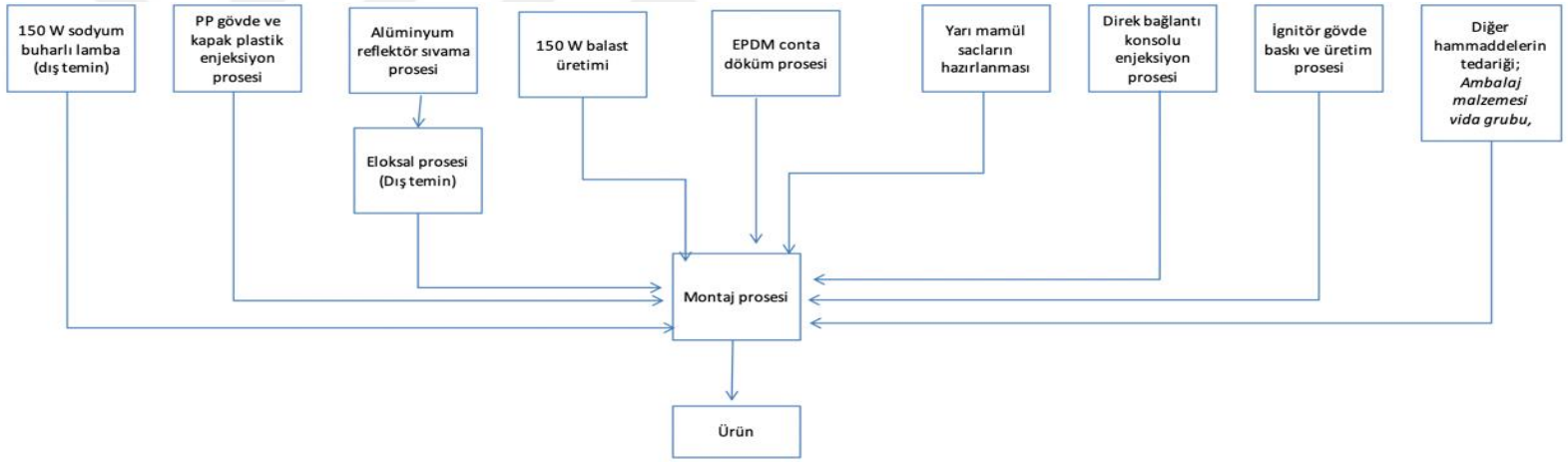
5.1.1 Hedef tanımlama ve kapsam belirleme

Örnek uygulama doğrultusunda tasarımlarda kullanılan armatürlerin yerli üretim firmasından temin edilen veriler ile sera gazı salımı hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmeler tek armatür özelinde yapılmıştır. İşlevsel birim enerji verimliliği

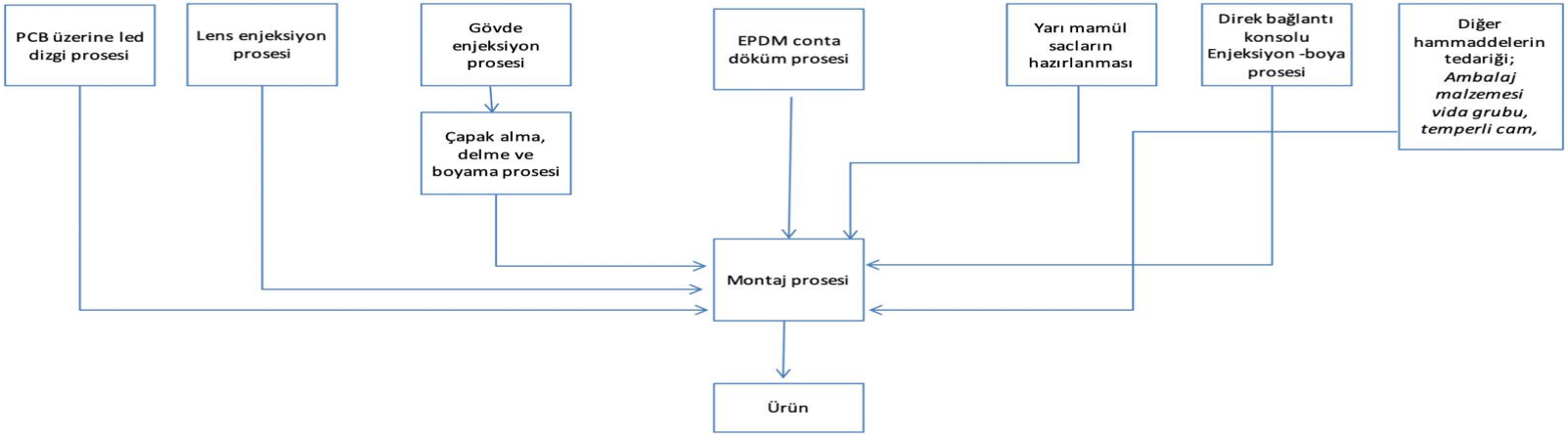
kapsamında tasarruf edilen kWh cinsinden elektrik enerjisi miktarı olarak belirlenmiştir.

Çevresel etki açısından, enerji tasarrufu, sera gazı salımları ve küresel ısınma potansiyeli değerlendirilmiştir. Kullanılacak armatürlerin ve içlerindeki ışık kaynaklarının ekonomik ömürleri dikkate alınarak, değerlendirmeler 15 yıl bazında yapılmıştır. Her iki alternatif armatür için yapılan salım hesaplamalarında, enerji tüketimlerinden kaynaklanan salımlar, üretim öncesi, üretim ve sonrası aşamalarda taşıma amaçlı gerçekleşen araç kaynaklı salımlar (hammadde/komponent temini, fabrika içi taşımalar, ürünün nihai kullanım noktasına teslimi gibi süreçler) ve üretim proseslerinde kullanılan yakma ve elektrik enerjisinden kaynaklanan salımlar dikkate alınmıştır.

Yaşam değerlendirmesi döngüsü yapılan YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin üretim süreci iş akış şemaları Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir



Şekil 5.1: YBSBL'lı armatür üretimi iş akış şeması.



Şekil 5.2 : LED'li armatür üretimi iş akış şeması

5.1.2 Envanter analizi

Salım hesaplamaları, Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ [153], "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" [154] kılavuzu ve ISO 14064-1:2018 /EN ISO 14064-1:2019 Sera Gazları – Bölüm 1: Sera gazı salımlarının ve uzaklaştırmalarının kuruluş seviyesinde hesaplanmasına ve raporlanmasına dair kılavuz ve özellikler [155], Bölüm 2: Sera gazı salım azaltımlarının veya uzaklaştırma iyileştirmelerinin proje düzeyinde hesaplanması, izlenmesi ve raporlanmasına dair kılavuz ve özellikler [156] ve ISO 14067:2018 Sera gazları - Ürünlerin karbon ayak izi - Hesaplama için gerekler ve kılavuz standartları esas alınarak gerçekleştirilmiştir [157].

Hesaplamalarda kullanılan metodoloji, baz alınan standartlar, salım faktörleri ve yapılan kabuller aşağıda açıklanmaktadır. CO_2, N_20 ve CH_4 salımları hesaplamaya dahil edilmiştir.

Enerji kaynaklarının alt ısıl değerleri: Doğalgaz ve motorin alt ısıl değeri için "Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Arttırılmasına Dair Yönetmelik", Ek-2: Enerji Kaynaklarının Alt Isıl Değerleri ve Petrol Eşdeğerine Çevrim Katsayıları tablosundan yararlanılmıştır [158].

Yakma kaynaklı salım faktörleri: "IPCC Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories Chapter 2: Stationary Combustion - Volume 2: Energy, Intergovernmental Panel On Climate Change 2006", Tablo 2.2. Default Emission Factors for Stationary Combustion in the Energy Industries ve Tablo 2.3. Default Emission Factors for Stationary Combustion in Manufacturing Industries tablolarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Doğal gaz CO_2 salım faktörü 56,1 ton/TJ, CH_4 1 kg/TJ ve N_20 0,1 kg/TJ olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır.

Elektrik enerjisi kullanımı salım faktörü: "Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Bilgi Formu" salım faktörü referans alınarak hesaplanmıştır. Formda belirtilen elektrik şebekesi salım faktörü değeri 0,7258 tCO_2/mWh olarak kabul edilmiştir [159]. Bu referansta CH_4 ve N_2O değerleri verilmemiştir. Bu değerlerin ihmal edilebilir olduğunun belirlenmesi için ise "American Petroleum Institute – Compendium Of Greenhouse Gas Emissions Methodologies For The Oil And Natural Gas Industry, Ağustos 2009, tablo D-3 OECD Member Country International Electric Grid Emission

Factors, Average of 2000-2002 Data" da yer alan Türkiye verisi kullanılmıştır ve bu yaklaşımla CH_4 ve N_2O değerleri hesaplamalarda ihmal edilmiştir [160].

Araç kaynaklı salım faktörleri: "IPCC Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories Chapter 3: Mobile Combustion – Volume 2 :Energy, Intergovernmental Panel On Climate Change 2006"; denklem 3.2.1 CO_2 from road transport ve Denklem 3.2.3 Emissions of CH_4 and N_2O, tablo 3.2.1. Road transport default CO_2 emission factors and uncertainty ranges, tablo 3.2.2 road transport N_2O and CH_4 default emission factors and uncertainty ranges ve Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ kullanılarak belirlenmiştir. Motorin CO_2 salım faktörü 74,1 ton/TJ, CH_4 3,9 kg/TJ ve N_20 3,9 kg/TJ kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamada kullanılan elektrik, doğal gaz ve motorin CO_2 salım faktörleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.2'de ise doğal gaz ve motorin için CH_4 ve N_2O salım faktörleri verilmiştir.

Çizelge 0.1: Elektrik, doğal gaz ve motorin CO_2 salım faktörleri.

	CO_2 Salım Faktörü	Birim
Elektrik (kWh)	0,7258	kg/kWh
Doğal gaz (m3)	56,1	ton/TJ
Motorin (kg)	74,1	ton/TJ

Çizelge 0.2 : Doğal gaz ve motorin için CH_4 ve N_2O salım faktörleri.

	CH_4 Salım Faktörü	N_20 Salım Faktörü	Birim
Doğal gaz (m^3)	1	0,1	kg/TJ
Motorin (kg)	3,9	3,9	kg/TJ

Yakma kaynaklı ve araç kaynaklı sera gazı salımları hesaplamaları "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"de belirtilen, kaynak kategorisi ve yakıt için yakıt miktarı ve varsayılan bir salım faktörü üzerinden yapılan Tier 1 yöntemi baz alınarak yapılmıştır. Ton cinsinden yakma kaynaklı sera gazı salım miktarı denklem 5.1 ile hesaplanmıştır.

Yakma kaynaklı salım miktarı (ton) = Yakıt tüketimi (kg) * Çevrim katsayısı (TJ/kg) * Salım faktörü (ton/TJ) (5.1)

"Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ", Ek-5 Hesaplama Faktörleri İçin Referans Değerler'de bulunan Tablo 5.6: Küresel Isınma

Potansiyelleri kullanılarak CH_4 ve N_20 için CO_2 eşdeğeri hesaplaması yapılmıştır. CO_2 için küresel ısınma potansiyel 1 kabul edilmiştir. Gazların küresel ısınma potansiyelleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 0.3: Sera Gazı Salımlarının küresel ısınma potansiyelleri.

Gaz	Küresel Isınma Potansiyeli
CH_4	21 $tCO_{2(eşd)}$ / t CH_4
N_2O	298 t $CO_{2(eşd)}$ / t N_2O

Enerji dolaylı sera gazı salımları hesaplamaları "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"de belirtilen, kaynak kategorisinde yakılan yakıt miktarı ile her yakıt için ülkeye özgü bir salım faktörünün kullanıldığı Tier 2 yöntemi baz alınarak yapılmıştır. Ülkeye özgü salım faktörleri; kullanılan yakıtların karbon içerikleri, karbon oksidasyon faktörleri, yakıt kalitesi ve teknolojik gelişim gibi ülkeye özgü veriler dikkate alınarak belirlenmektedir. Elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı sera gazı salım miktarı denklem 5.2 ile belirlenmiştir. "Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Bilgi Formu" salım faktörü referans alınarak hesaplanmıştır.

Elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı salım miktarı (ton) =

Elektrik enerjisi tüketimi (kWh) * Salım faktörü (ton/kWh) (5.2)

Yukarıda belirtilen denklemler ve yöntemler ışığında, yerli üretici firmadan temin edilen bilgiler yardımıyla uygulama örneği için değerlendirmeler yapılmıştır.

Doğal gaz kaynaklarının alt ısıl değerleri, Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik, Ek-2 Enerji Kaynaklarının Alt Isıl Değerleri ve Petrol Eşdeğerine Çevrim Katsayıları tablosunda belirtilen 8.250 kcal ve öz kütlesi de 0,67 kg/m^3'tür. Salım hesaplamaları TJ cinsinden yapıldığı için doğal gaz ısıl değeri TJ'e dönüştürülmekte ve 0,000035 değeri elde edilerek yakıt çevrim katsayısı bulunmaktadır.

Polikarbon gövdeli YBSBL'lı armatürün üretim sürecinde sadece metal konsol parçalarının boyama işlemlerinde 0,097 m^3 doğalgaz harcanmaktadır. Hesaplamalar CO_2, CH_4 ve N_20 için yapılmıştır. CH_4 ve N_20 salım değerleri yönetmelikte belirtilen küresel ısınma potansiyelleri ile çarpılarak CO_2 eşdeğeri salım miktarları elde edilmiştir. YBSBL'lı armatür üretimi için yakmadan kaynaklanan sera gazı salım hesaplama metrikleri ve salım miktarı Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 0.4 : YBSBL'lı armatür üretim aşaması yakmadan kaynaklı sera gazı salım metrikleri ve miktarı.

	Toplam tüketim (birim)	Çevrim katsayısı (TJ/birim)	Tüketim (TJ)	Salım faktörü (ton/TJ)	Küresel ısınma potansiyeli	Salım miktarı CO_2 (ton)
CO_2	0,097	0,000035	0,00000335	56,1	1	0,0001879264
CH_4	0,097	0,000035	0,00000335	0,001	21	0,0000000703
N_2O	0,097	0,000035	0,00000335	0,0001	298	0,0000000998
Toplam						0,00018810

Denklem 5.1'e göre yapılan hesaplama sonucunda YBSBL'lı armatürün üretim aşamasında doğal gaz yanmasından kaynaklanan salım miktarı 0,00018810 ton CO_2 olarak hesaplanmıştır.

LED'li armatürde ise gövde ve konsol kısımlarının üretiminde enjeksiyon prosesi de dahil olmak üzere 1,687 m^3 doğalgaz harcanmaktadır. Hesaplamalar CO_2, CH_4 ve N_20 için yapılmıştır. CH_4 ve N_20 salım değerleri yönetmelikte belirtilen küresel ısınma potansiyelleri ile çarpılarak CO_2 eşdeğeri salım miktarları elde edilmiştir. LED'li armatür üretimi için yakmadan kaynaklanan sera gazı salım hesaplama metrikleri ve salım miktarı Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 0.5 : LED'li armatür üretim aşaması yakmadan kaynaklı sera gazı salım metrikleri ve miktarı.

	Toplam tüketim (birim)	Çevrim katsayısı (TJ/birim)	Tüketim (TJ)	Salım faktörü (ton/TJ)	Küresel ısınma potansiyeli	Salım miktarı CO_2 (ton)
CO_2	1,687	0,000035	0,000058	56,1	1	0,003268369
CH_4	1,687	0,000035	0,000058	0,001	21	0,00000122345
N_2O	1,687	0,000035	0,000058	0,0001	298	0,00000173614
Toplam						0,00327132885

Çizelge 5.4 ve 5.5' de görüldüğü gibi üretim aşamasında yakmadan kaynaklanan sera gazı salım miktarı LED'li armatür için daha yüksektir.

Araç kaynaklı sera gazı salım hesaplaması da yine denklem 5.1'de belirtildiği şekilde yapılmıştır.

Yakma kaynaklı salım miktarı (ton) = Yakıt tüketimi (kg)*Çevrim katsayısı (TJ/kg)* Salım faktörü (ton/TJ)

Araç kaynaklı salım hesaplamalarında hammadde temini aşamasında kullanılan geminin konteyner yük gemisi olduğu ve toplamda 45.500 m^3 yük taşıdığı kabulü ile taşıma sırasında hesaplanan salım miktarı 1 adet armatürün ağırlığı ile oranlanarak

elde edilmiştir [161], LED'li armatürün hammadde temini aşamasında kullanılan tır hacminin 110 m^3 olduğu ve 0,52 lt/km yakıt tüketimi olduğu kabul edilmiştir ve 1 adet LED'li armatür hacminin tır hacmine oranlanması ile salım miktarı hesaplanmıştır. Taşıma sırasında kullanılan kamyonların hacimlerinin ise 100 m^3 olduğu ve yakıt tüketiminin 0,40 lt/km olduğu kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır. Fabrikada üretilen ürünlerin teslimat noktasına taşınmasının da standart tenteli kamyon ile yapıldığı ve yük taşıma kapasitesinin 90 m^3 olduğu kabulü ile hesaplama yapılmıştır.

Gemi yakıt tüketimi denklem 5.3 ile hesaplanmıştır.

$$LMPH = \frac{K*GHP*LP}{KPL} \quad (5.3)$$

LMPH makine saatte kullanılan litre

K fren hp/saat başına kullanılan kg yakıt

GHP yönetilen motor devrinde brüt motor beygir gücü

LP yüzde olarak yük faktörü

KPL kg/L olarak yakıt ağırlığı

Dizel gemiler için yakıt ağırlığı 0,84 kg/lt, yakıt tüketimi 0,17 kg/hp*saat, orta yük faktörü 0,54'tür [162].

Toplu gemi için ortalama hız 26 km/sa [163] ve kurulu güç 15.500 hp'dir [164]. Bu veriler ile gemilerin yakıt tüketimi 2.801,49725 MJ/km olarak hesaplanmıştır.

YBSBL'li armatür ve LED'li armatür için tüm taşıma aşamalarında salım hesaplamaları yapılarak her bir araç için salım değerlerinin belirlenmesinin ardından bu değerler toplanarak araç kaynaklı sera gazı salım miktarları elde edilmiştir.

YBSBL'lı armatür için hammadde, maddelerin temin edildiği araçlar ve kat ettikleri mesafeler Çizelge 5.6'da verilmiştir.

LED'li armatür için de hammadde, maddelerin temin edildiği araçlar ve kat ettikleri mesafeler Çizelge 5.7'de verilmiştir. YBSBL'lı armatür ve LED'li armatür için sırasıyla verilen Çizelge 5.6 ve 5.7'de görüldüğü üzere her iki armatür için de en uzun mesafeli taşıma gemi ile gerçekleşmektedir. Farklı olarak LED'li armatürün taşınması sırasında tır kullanılmaktadır

Çizelge 0.6 : YBSBL'lı armatür hammadde içeriği, hammadde temin yolu ve mesafesi.

Malzeme	Araç	Mesafe (km)
PP ham madde	Kamyon	450
Bakır tel	Kamyon	60
Plastik karkas	Kamyon	120
İgnitör (ateşleyici) kutusu hammadde	Kamyon	30
İgnitör (ateşleyici)	Gemi	9.800
komponentleri	Kamyon	400
Galvaniz sac	Kamyon	60
DKP sac	Kamyon	1
Silisli sac	Kamyon	60
Temperli cam	Kamyon	400
Ambalaj malzemesi	Kamyon	98
Vida-cıvata grubu	Kamyonet	60
E-40 duy	Gemi	9.500
	Kamyon	400
EPDM conta	Kamyon	70
Reflektör (yansıtıcı)	Kamyon	245
Silikon kablo	Kamyon	235
Çubuk lehim	Kamyon	70

Çizelge 0.7 : LED'li armatür hammadde içeriği, hammadde temin yolu ve mesafesi.

Malzeme	Araç	Mesafe (km)
Gövde	Kamyon	70
Konsol	Kamyon	70
PCB	Gemi	9.500
	Tır	400
LED	Tır	3400
Driver (sürücü)	Gemi	9.500
	Kamyon	400
Galvaniz sac	Kamyon	70
Kablolar	Kamyon	235
Temperli cam	Kamyon	400
Lens	Kamyon	70
Elektrostatik toz boya	Kamyon	70
Klemensler	Kamyon	70
Ambalaj malzemesi	Kamyon	98
Krem lehim	Kamyon	70

Yine Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'de görüldüğü gibi her iki armatürün hammaddde teminlerinde taşımalar dizel yakıtlı araçlar ile yapılmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda, hesaplamalar yapılarak toplam tüketilen motorin miktarları elde

edilmiştir. IPCC 2006 Kılavuzuna göre motorinin net kalorifik değeri 43 TJ/Gg ve salım faktörü de 74,1 t CO_2/TJ'dür.

YBSBL'lı armatürün hammadde temini gemi ile 19.300 km, kamyon ile 2.745 km mesafeden gerçekleşmektedir.

YBSBL'lı armatürün kamyon ile taşınması sırasında;

Yakma kaynaklı CO_2 salım miktarı = 915,988 kg* 0,000043* 74,1

= 2,9186126 ton CO_2

Yakma kaynaklı CH_4 salım miktarı = 915,988 kg * 0,000043* 0,0039*21

= 0,0032258 ton CO_2

Yakma kaynaklı N20 salım miktarı = 915,988 kg *0,000043* 0,0039*298

= 0,0457761 ton CO_2

salımı gerçekleşmektedir. CO_2, CH_4 ve N_20 salım miktarlarının toplamının 1 adet YBSBL'lı armatürün hacmine oranlanması ile 1 adet YBSBL'lı armatürün kamyon ile taşınması sırasında oluşan salım miktarı 0,00160251 ton CO_2 olarak elde edilmiştir.

Yukarıda verilen işlem aynı şekilde gemi ile taşınması için de yapılmıştır ve CO_2, CH_4 ve N_20 salım miktarlarının toplamının gemi hacmi ile 1 adet YBSBL'lı armatürün hacmine oranlanması sonucunda 1 adet YBSBL'lı armatürün gemi ile taşınması sırasında oluşan salım miktarı 0,20789669 ton CO_2 olarak elde edilmiştir.

LED'li armatürün hammadde temini gemi ile 19.000 km, kamyon ile 21.623 km ve tır ile 3.800 km mesafeden gerçekleşmektedir.

LED'li armatürün kamyon ile taşınması sırasında;

Yakma kaynaklı CO_2 salım miktarı = 538,836 kg * 0,000043 * 74,1

= 1,716893ton CO_2

Yakma kaynaklı CH_4 salım miktarı = 538,836 kg * 0,000043 * 0,0039 * 21

= 0,0018976 ton CO_2

Yakma kaynaklı N_20 salım miktarı = 538,836 kg * 0,000043 * 0,0039 * 298

= 0,0269281 ton CO_2

salımı gerçekleşmektedir. CO_2, CH_4 ve N_20 salım miktarlarının toplamının 1 adet LED'li armatürün hacmine oranlanması ile 1 adet LED'li armatürün kamyon ile taşınması sırasında oluşan salım miktarı 0,00055863 ton CO_2 olarak elde edilmiştir.

Yukarıda verilen işlem aynı şekilde gemi ile taşınması için de yapılmıştır ve CO_2, CH_4 ve N_20 salım miktarlarının toplamının gemi hacmi ile 1 adet LED'li armatürün hacmine oranlanması sonucunda 1 adet LED'li armatürün gemi ile taşınması sırasında oluşan salım miktarı 0,121283044 ton CO_2 olarak elde edilmiştir.

Aynı hesaplama işlemi tırda taşınması için de yapılmış, CO_2, CH_4 ve N_20 salım miktarlarının toplamı tır hacmi ile 1 adet LED'li armatür hacmi oranlanarak 1 adet LED'li armatürün tır ile taşınması sırasında oluşan salım miktarı 0,001545753 ton CO_2 olarak elde edilmiştir.

Veriler denklem 5.1'de yerlerine konularak hammadde temini amaçlı gerçekleşen taşıma kaynaklı toplam salım değeri YBSBL'lı armatür için 0,2094992 ton CO_2, LED'li armatür için ise 0,123387427 ton CO_2 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.8'de YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin hammadde temini süresinde araçlardan kaynaklı sera gazı salım miktarları konsolide olarak verilmiştir.

Çizelge 0.8 : YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin hammadde temini süresinde araçlardan kaynaklı sera gazı alım miktarları.

	YBSBL'lı Armatür Sera Gazı Salımı (ton CO_2e)	LED'li Armatür Sera Gazı Salımı (ton CO_2e)
Kamyon	0,0016025	0,000558630
Gemi	0,2078966	0,121283044
Tır	-	0,001545753
		0,123387427
Toplam	0,2094991	

Örnek uygulama olarak seçilen Denizli ilindeki pilot yol ile armatür üretim tesisi arasındaki mesafe 560,5 km'dir. Firma tarafından verilen ürünlerin montaj sahasına kamyonet ile teslim edileceği bilgisi ile ürün teslimi sebebiyle araçlardan kaynaklı sera gazı salım değeri de hesaplanmıştır. Bu armatür taşıma işlemi boyunca 186,086 kg motorin tüketileceği kabulü ile sera gazı salım hesaplaması aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

Yakma kaynaklı CO_2 salım miktarı = 186,086 kg* 0,000043*74,1 = 0,592925 ton CO_2

Yakma kaynaklı CH_4 salım miktarı = 186,086 kg* 0,000043*0,0039 * 21

= 0,00065533907 ton CO_2

Yakma kaynaklı N_20 salım miktarı = 186,086 kg* 0,000043*0,0039 * 298

= 0,00929957342 ton CO_2

CO_2, CH_4 VE N_20 salım miktarları toplandığında ürünlerin montaj sahasına kamyonet ile teslimi sırasında yakma kaynaklı salım miktarı 0,60288073 ton CO_2 olarak elde edilmektedir. Bu miktar kamyonun ilgili mesafeyi tam dolu olarak kat ettiği süreçte oluşan salım değeridir. Bu değer, YBSBL'lı armatürün hacmine oranlanarak 0,000361728 ton CO_2 salım oluşacağı sonucuna ulaşılmıştır. Aynı salım değeri LED'li armatürün hacmine oranlandığında ise 0,00021436 ton CO_2 salım oluşacağı hesaplanmıştır.

Fabrika içerisinde ürünlerin taşınmasında genellikle elektrikli araçlar kullanılmaktadır. Taşımalar elektrikli forklift veya elektrikli reach-rucklar yardımı ile yapılmaktadır. Dış alanda kullanılan dizel yakıtlı forkilftler için de ürün başına 0,0009 lt/ürün yakıt kullanılmaktadır. Aşağıda verilen işlemler yapıldığında her iki armatür için bu tesis içi taşımalar kapsamında 0,000002420 ton CO_2 oluşacağı sonucuna varılmıştır.

Yakma kaynaklı CO_2 salım miktarı = 0,000747 kg* 0,000043* 74,1 = 0,00000238 ton CO_2

Yakma kaynaklı CH_4 salım miktarı = 0,000747 kg* 0,000043* 0,0039 * 21 =

0,00000000263 ton CO_2

Yakma kaynaklı N20 salım miktarı = 0,000747 kg* 0,000043* 0,0039 * 298 = 0,00000003733 ton CO_2

Çizelge 0.9 :YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin hammadde temini, tesis içi taşıma ve teslim noktasına taşıma aşamalarında oluşan sera gazı salımları.

	YBSBL'lı Armatür Sera Gazı Salımı (ton CO_2e)	LED'li Armatür Sera Gazı Salımı (ton CO_2e)
Hammadde temini	0,20949920	0,12338742
Tesis içi taşıma	0,00000242	0,00000242
Kullanım noktasına taşıma	0,00036173	0,00021436
Toplam	0,20986335	0,12360420

YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin hammadde temini, tesis içi taşıma ve teslim noktasına taşıma aşamalarında oluşan sera gazı salımları Çizelge 5.9'da konsolide olarak verilmiştir.

Enerji kaynaklı sera gazı salımları "Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Bilgi Formu" salım faktörü referans alınarak hesaplanmıştır. Hesaplama IPCC Kılavuzunda belirtilen Tier 2 yöntemi ile yapılmıştır. Elektrik kaynaklı sera gazı salım miktarı denklem 5.2 ile belirlenmiştir.

YBSBL'lı armatürün üretim aşaması için, Çizelge 5.10'da verilen üretim sürecinde tüketilen toplam enerji miktarı olan 2,1 kWh ile salım faktörü 0,7258 çarpılarak üretim aşamasında tüketilen elektrik enerjisi kaynaklı salım miktarı hesaplanmıştır. Bu değere ek olarak, balast kaybı dahil toplam 168 W güç çeken YBSBL'lı armatürün yılda 4.000 saat olmak üzere 15 yıllık değerlendirme süresi boyunca tükettiği elektrik enerjisi miktarı da hesaplanmıştır. Yıllık 672 kWh olmak üzere 15 yıl boyunca toplam 10.080 kWh elektrik enerjisi tüketimi 0,7258 salım faktörü ile çarpılarak kullanım aşamasından kaynaklanan CO_2 salım miktarı hesaplanmıştır. Elektrik enerjisi kullanımından kaynaklanan salım miktarı, üretim aşaması ve kullanım aşaması salımlarının toplamı ile elde edilmiştir.

Çizelge 0.10 : YBSBL'lı armatür üretim aşamaları ve bu aşamalarda tüketilen elektrik enerjisi miktarları.

Üretim süreci	Enerji tüketimi (kWh)
Gövde	0,5
Reflektör (yansıtıcı)	0,1
Sac parça işleri	0,8
Montaj	0,7

Üretim aşamasındaki elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı salım miktarı (ton) = 2,1 kWh*0,7258 kg/kWh= 0,00152418 ton CO_2

YBSBL'lı armatürün kullanım aşamasında tükettiği enerji miktarı öncelikle armatürün 1 yıl kullanımı için hesaplanmıştır.

Elektrik enerjisi tüketim kaynaklı salım miktarı (ton) = 672 kWh*0,7258 kg/kWh

= 0,4877376 ton CO_2

15 yıl kullanım olacağı kabulü, ile elde edilen salım miktarı 15 ile çarpılarak kullanım süresi sonuna kadar oluşan salım miktarı bulunmuştur.

Elektrik eberjisi tüketim kaynaklı salım miktarı (ton) = 0,4877376 ton CO_2*15

= 7,316064 ton CO_2

LED'li armatürün üretim aşaması için Çizelge 5.11'de verilen üretim sürecinde tüketilen toplam elektrik enerjisi miktarı olan 4 kWh ile salım faktörü 0,7258 çarpılarak üretim aşamasında tüketilen elektrik enerjisi miktarı hesaplanmıştır. Ardından, 93 W LED'li armatürün yıllık 4.000 saat kullanım ile 15 yıl sonunda tükettiği elektrik enerjisi miktarı hesaplanmıştır. Bu tüketim miktarı 0,7258 salım faktörü ile çarpılarak kullanım aşamasında elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı CO_2 salım miktarı hesaplanmıştır. Elektrik enerjisi kullanımından kaynaklanan salım miktarı, üretim aşaması ve kullanım aşaması salımlarının toplamı ile elde edilmiştir. Aşağıda yapılan hesaplamalar verilmiştir.

Çizelge 0.11 : LED'li armatür üretim aşamaları ve bu aşamalarda tüketilen elektrik enerjisi miktarları.

Üretim süreci	Enerji tüketimi (kWh)
Gövde	1,6
Lens	0,3
Sac parçalar	0,9
Montaj	1,2

Üretim aşamasındaki elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı salım miktarı = 4 kWh * 0,7258 kg/kWh = 0,0029032 ton CO_2

LED'li armatürün kullanım aşamasında tükettiği enerji miktarı öncelikle armatürün 1 yıl kullanımı için hesaplanmıştır.

Elektrik enerjisi kaynaklı salım miktarı = 372 kWh* 0,7258 kg/kWh

= 0,2699976 ton CO_2

15 yıl kullanım ömrü boyunca, elektrik enerjisi tüketim kaynaklı salım değeri de aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Elektrik enerjisi kaynaklı salım miktarı = 0,2699976 kg/kWh * 15

= 4,049964 ton CO_2

YBSBL için elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı toplam salım miktarı= 0,00152418 +7,316064 = 7,31758818 ton CO_2

LED için elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı toplam salım miktarı = 0,0029032 +4,049964 = 4,0528672 ton CO_2

olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen elektrik enerjisi tüketim kaynaklı salım değer metrikleri ve toplam salım değerleri Çizelge 5.12'de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 0.12 : YBSBL'lı ve LED'li armatürler için elektrik enerjisi tüketim kaynaklı sera gazı salım metrikleri ve miktarları.

	Tüketim (kWh)	Salım Faktörü (t/mWh)	Yıl	Salım Miktarı (ton)	Toplam Salım Miktarı (ton)
YBSBL'lı armatür üretim aşaması	2,1	0,7258	-	0,0015	7,3176
YBSBL'lı armatür kullanım aşaması	672	0,7258	15	7,3161	
LED'li armatür üretim aşaması	4	0,7258	-	0,0029	4,0529
LED'li armatür kullanım aşaması	372	0,7258	15	4,0500	

Çizelge 5.12'den YBSBL'lı armatür için elektrik enerjisi tüketim kaynaklı salım miktarının LED'li armatüre göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Denklem 5.4'e göre toplam sera gazı salımı hesaplanmaktadır.

$$\sum \text{Toplam Salım} = \sum \text{Yakma ve Araç Kaynaklı Salım} + \sum \text{Elektrik Enerjisi Tüketimi Kaynaklı Salım} \quad (5.4)$$

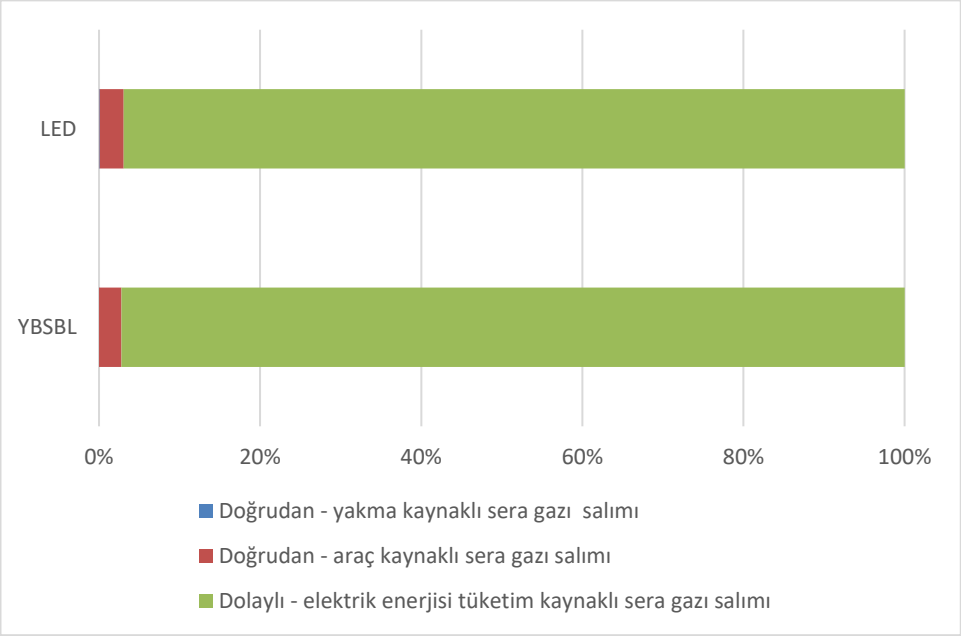
Salım hesaplamaları sonucunda elde edilen değerler ton CO_2 olarak Çizelge 5.13'te verilmiştir. 15 yıl süren işletme aşamasında YBSBL kullanımı 7,31758818 ton CO_2 oluştururken LED kullanımı 4,0528672 ton CO_2 oluşturmaktadır.

Çizelge 0.13 : YBSB'lı ve LED'li armatürler için hesaplanan salım değerleri.

	YBSBL	LED
Doğrudan - yakma kaynaklı sera gazı salımı (ton CO_2e)	0,0001880966	0,0032713288
Doğrudan - araç kaynaklı sera gazı salımı (ton CO_2e)	0,2098633520	0,1236042046
Toplam doğrudan sera gazı salımı (ton CO_2e)	0,2100514486	0,1268755334
Dolaylı - elektrik enerjisi tüketim kaynaklı sera gazı salımı (ton CO_2e)	7,3175881800	4,0528672000
Toplam sera gazı salımı (ton CO_2e)	7,5276396286	4,1797427334

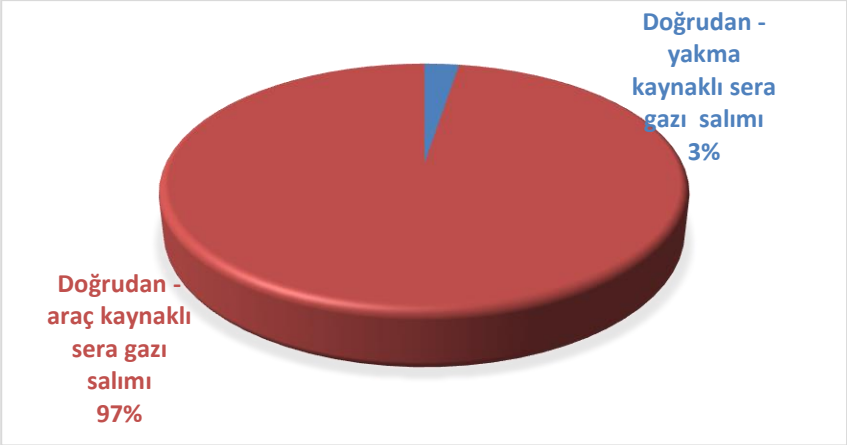
5.1.2 Etki değerlendirmesi

Üretim ve teslimat aşamaları için hesaplanan çevresel etkiler göz önünde bulundurularak CO_2 küresel ısınma potansiyeli 1 kabul edilip YBSBL'lı armatürün küresel ısınma potansiyeli 7,528 CO_2e; LED'li armatürünkü ise 4,18 CO_2e olarak belirlenmiştir. Şekil 5.3'te LED'li ve YBSBL'lı armatürler için kaynaklarına göre salım değerleri grafik olarak gösterilmektedir.



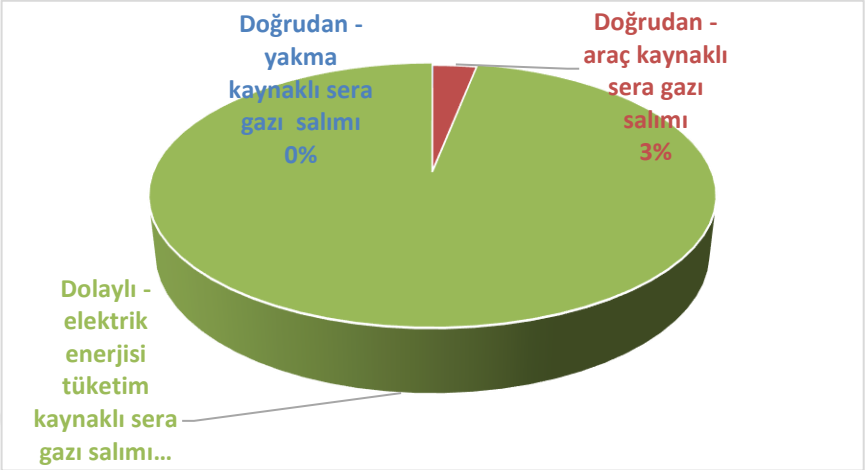
Şekil 5.3 : LED'li ve YBSBL'lı armatür için salım değerleri dağılımı.

Şekil 5.4'te LED'li armatürün doğrudan sera gazı salım oranları verilmiştir. Doğrudan sera gazı salımının, araç kaynaklı sera gazı salımı %97'sini oluştururken üretim aşamasında yakma kaynaklı oluşan salım miktarı %3'ünü oluşturmaktadır.



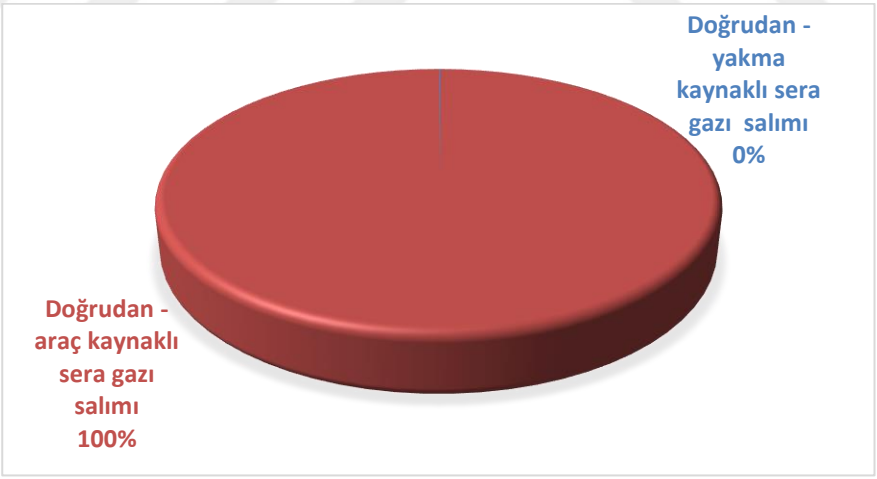
Şekil 5.4 : LED'li armatürün kaynaklarına göre doğrudan sera gazı salımı.

Şekil 5.5'te LED'li armatürün kaynaklarına göre sera gazı salımı verilmiştir. 15 yıl işletme süresinde elektrik enerjisi tüketiminden oluşan sera gazı salımı üretim aşamasında oluşan salım miktarından oldukça yüksek gerçekleşmektedir.



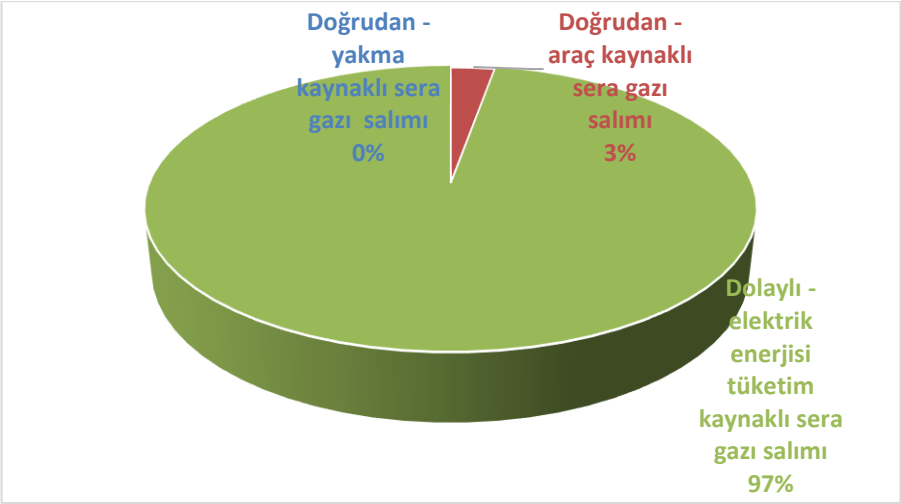
Şekil 5.5 : LED'li armatürünün kaynaklarına göre sera gazı salımı.

Şekil 5.6'da da YBSBL'lı armatürün doğrudan sera gazı salım oranları verilmiştir. Doğrudan sera gazı salımının, araç kaynaklı sera gazı salımı neredeyse tamamını oluşturmaktadır.



Şekil 5.6 : YBSBL'lı armatürün kaynaklarına göre doğrudan sera gazı salımı.

Şekil 5.7'de YBSBL'lı armatürün kaynaklarına göre sera gazı salımı gösterilmiştir. 15 yıl işletme süresinde elektrik enerji tüketiminden oluşan sera gazı salımı üretim aşamasında oluşan salım miktarından oldukça yüksek olmuştur.



Şekil 5.7 : YBSBL'lı armatürünün kaynaklarına göre sera gazı salımı.

5.1.4 Yorum

Mevcut pilot yolda gerçekleştirilen alternatif tasarımlardaki YBSBL'lı ve LED'li armatürler için hammadde temininden, üretim, tesis montaj ve 15 yıllık kullanım süresi sonuna kadar olan süreç için çevresel etki doğrudan karbon salımı açısından değerlendirildiğinde, aralarında az fark olmakla beraber LED'li armatürün bu açıdan daha iyi olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Diğer yandan sadece kullanım sürecindeki dolaylı elektrik enerjisi tüketim kaynaklı salımlar dikkate alındığında, daha az elektrik enerjisi tüketen LED'li armatürün daha az salım miktarı ile üstün konuma geçtiği görülmektedir.

5.2 Yaşam Döngüsü Maliyeti

Bu bölümde, 150 W YBSBL'lı armatür ve 93 W LED'li armatürlerin kullanıldığı örnek yol aydınlatmasının yaşam döngüsü maliyeti değerlendirilmiştir. Armatür bazlı yapılan maliyet analizleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, net bugünkü değer yöntemi ile maliyet analizi yapılarak hangi uygulamanın maliyet açısından daha iyi olduğu değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise toplam maliyet içindeki farklı giderler karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

5.2.1 Net bugünkü değer yöntemi

Yatırım ve inovasyon projelerinin değerlendirilme aşamalarında ekonomik performansın değerlendirilmesi önemlidir. Projenin ekonomik getirisini hesaplamak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Ekonomik değerlendirme teknikleri arasında sıklıkla

kullanılan ve en karmaşık olarak adlandırılan yöntem net bugünkü değer (NBD) yöntemidir. Belirli bir iskonto oranı yardımıyla yatırımın gelecekteki nakit akışlarının tamamının iskonto edilmesi ve indirgenmiş gelir ve gider değerlerinin toplanması ile hesaplanmaktadır.

$$NBD = \sum_{t=o}^{n} \frac{NCFT}{(1+r)^t} \quad (5.5)$$

NBD = net bugünkü değer

NCFT= t yılında net nakit akışı;

r = iskonto oranı.

n: yıl [165]

Yatırımın yapılabilmesi için NBD >0 olmalıdır. Eğer NBD=0 ise yıllık yatırım maliyetlerinin işletme maliyetlerine eşit olduğu sonucu elde edilir. Birden fazla seçenek içinden karşılaştırma yapılan durumlarda NBD değeri yüksek olan seçilmektedir. Hesaplamada kullanılan iskonto oranları, kurumsal projelerde %10-15 arasında bir değerdir ancak riskli görülen ileri teknoloji yatırımlarında %25-30 oranlarına varan iskontolar kullanılabilmektedir.

Tez kapsamında Merkez Bankası'nın 20.05.2022 tarihli faiz verisi dikkate alınarak faiz oranı belirlenmiştir. TL üzerinden açılan ticari krediler (tüzel kişi kredili mevduat hesabı ve kurumsal kredi kartları hariç) için geçerli olan 23,27 değeri, faiz oranı olarak kabul edilmiştir [166]. 1 ABD $'ının 16,4 TL olduğu kabulü ile işlemler yapılmıştır. Armatürlerin fiyatları yerli üretici firmadan temin edilmiştir. LED armatür 120 $, YBSBL armatür ise 52 $ değerindedir. YBSBL fiyatı 1 Ocak tarihi itibari ile geçerli birim fiyatları içeren TEDAŞ birim fiyat kitabı baz alınarak 3 $ kabul edilmiştir [167]. 15 yıl amortisman süresi için değerlendirme yapılmıştır. Yaz ve kış farklı olsa da, Türkiye'de yol aydınlatması tesisatlarının günde 10-12 saat kullanıldığı varsayımı ile, yıllık 4.000 saat kullanım üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. TEDAŞ şartnamesine göre LED'li armatürlerin tüm komponentleri ile 60.000 saat kullanım ömrü taahhüt koşulu olduğu için, 15 yıllık değerlendirme sürecinde LED'li armatür ve/veya komponenti değişimi olmayacaktır. Bu süre sonunda LED'li armatür hurda maliyeti oluşacaktır. YBSBL'lı armatür için de 15 yıllık kullanım süresi geçerlidir, ancak armatür içindeki şeffaf tüp yüksek basınçlı sodyum buharlı lambanın ekonomik ömrü

24.000 saattir. 15 yıllık amortisman süresinde altı yıllık periyotlarda iki kez lamba değişimi olacak, süre bitiminde yine YBSBL'lı armatür hurda maliyeti oluşacaktır.

1 Ocak 2022 tarihi itibari ile geçerli birim fiyatları içeren TEDAŞ birim fiyat kitabından Denizli ili için geçerli olan birim montaj, demontaj, ihzarat nakliyesi fiyatları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır ve Çizelge 5.14'de gösterilmiştir [167].

Çizelge 0.14 : YBSBL'lı ve LED'li armatürler için montaj, demontaj, ihzarat nakliyesi fiyatları ($).

	Montaj	İhzarat nakliyesi	Demontaj	Toplam
YBSBL	21,5	2,8	5,4	29,7
LED	23,6	3,1	5,9	32,6

Bakım ve onarım maliyeti 21 $ olarak kabul edilmiştir ve her yıl yapılacağı kabulü ile hesaplamalarda dikkate alınmıştır. Birim elektrik enerjisi tüketim fiyatı, EPDK tarafından 31.05.2022 tarihinde yayınlanan ve 1.06.2022 tarihinden itibaren geçerli olan faaliyet bazlı elektrik tarifeleri tablosundan "aydınlatma" başlığı altındaki değer olan 0,1371 $/kWh olarak alınmıştır [168]. Armatürlerin yıllık çalışma süreleri 4.000 saat olarak kabul edilerek harcanan güç ve çalışma süresi üzerinden yıllık tüketilen toplam elektrik enerjisi tüketimi ve işletme maliyeti hesaplanmıştır.

Yerli üretici firmadan elde edilen bilgilere göre YBSBL'lı armatürün hurda ve atık fiyatı 0,48 $, LED'li armatürün hurda ve atık fiyatı ise 1,16 $'dır. Armatürlerin hurda aşamasında demontaj işlemi de yapılacağı için bu değer toplam hurda maliyetine dahil edilmiştir (Çizelge 5.15).

Çizelge 0.15 : YBSBL'lı ve LED'li armatürler için hurda, atık ve demontaj cinsinden toplam hurda maliyetleri ($).

	Hurda ve atık	Demontaj	Toplam hurda maliyeti
YBSBL	0,48	5,4	5,88
LED	1,16	5,9	7,06

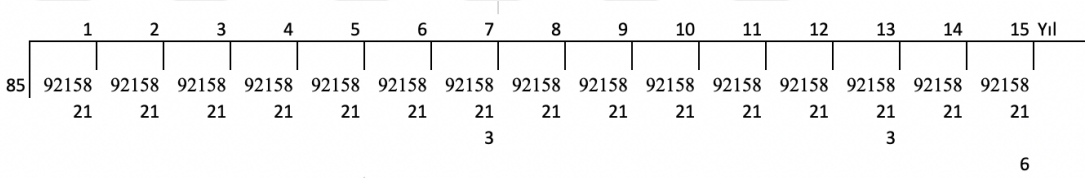
Yapılan hesaplamada yatırım maliyeti, yerli üretici firmadan alınan armatür fiyatlarına ek olarak YBSBL'lı armatür için 3 $ lamba fiyatı ve TEDAŞ birim fiyat kitabından elde edilen montaj, demontaj, ihzarat nakliyesi maliyeti olan 29,7 $; LED'li armatür için ise 32,6 $ eklenerek elde edilmiştir.

Maliyet analizi yapılan iki armatürün $ cinsinden gelir ve giderleri çizelge 5.16'da verilmiştir.

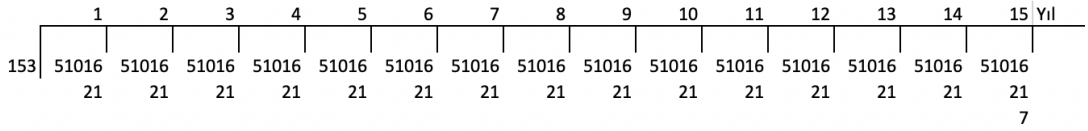
Çizelge 0.16: Uygulama örneği için gelir ve giderler. ($)

	YBSBL	LED
Yatırım maliyeti	85	153
İşletme maliyeti	92.158	51.016
Hurda maliyeti	6	7
Bakım ve onarım maliyeti	21	21
Faiz oranı	23,27	23,27

Şekil 5.8'de YBSBL'lı armatürün 15 yıl için nakit akış şeması ve Şekil 5.9'da LED'li armatürün 15 yıl için nakit akış şeması verilmektedir. Akış şemasında belirtilen şekilde NBD yöntemi ile maliyet hesaplaması yapılmıştır.



Şekil 5.8 : YBSBL'lı armatürün $ bazında nakit akış şeması.



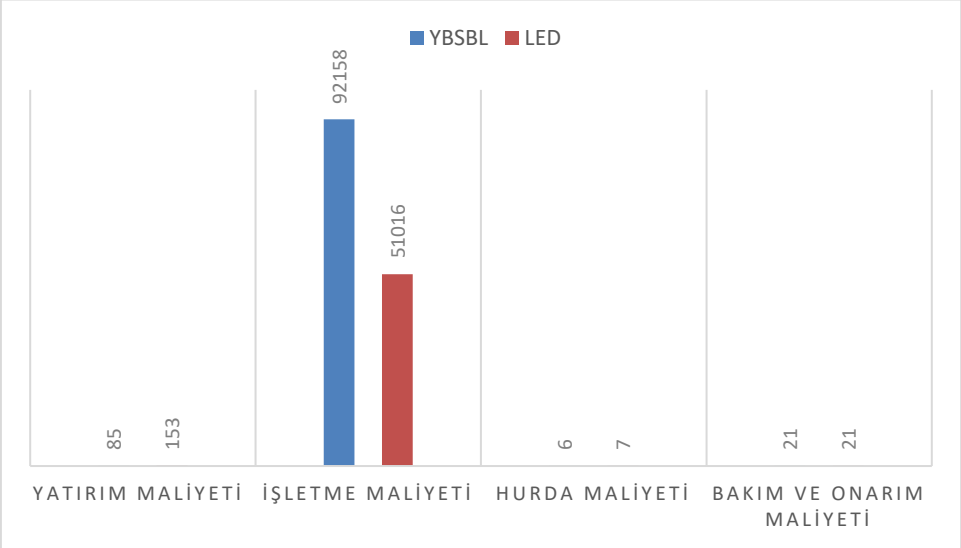
Şekil 5.9: LED'li armatürün $ bazında nakit akış şeması.

Veriler ve kabuller doğrultusunda NBD yöntemi ile hesaplama yapılmıştır. 15 yıllık sürenin sonunda belirtilen giderler belirlenen faiz oranı ile hesaplamaya katıldığında YBSBL kullanımında işletme giderleri 378.865 $, LED kullanımında ise 209.729 $ olarak hesaplanmıştır. Toplam maliyetlerin ise sırasıyla YBSBL'lı için 379.038 $ ve LED'li için 209.969 $ olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Net bugünkü değer yöntemiyle maliyetler değerlendirildiğinde LED'li armatür uygulaması kullanımının daha tercih edilir olduğu görülmektedir.

5.2.2 Yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi (YDMD)

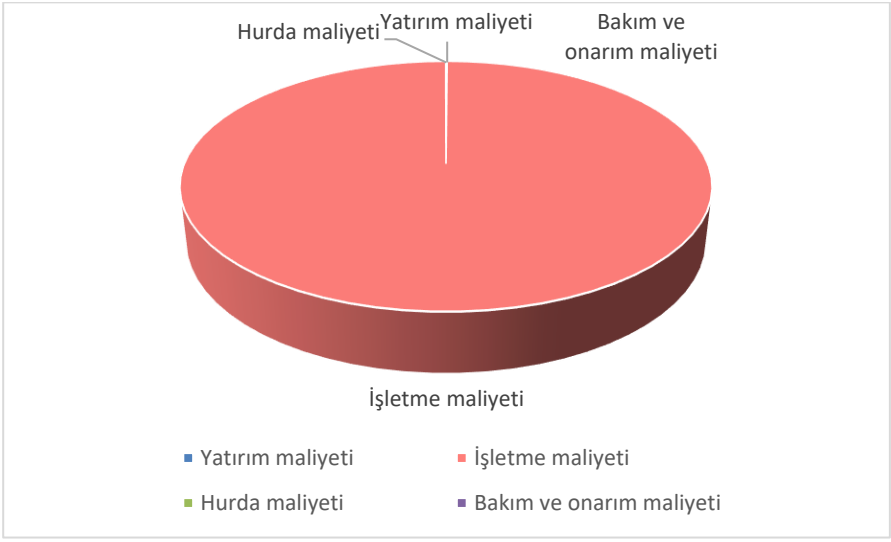
YDMD, karar verme aşamalarında en iyi kararı elde edebilmek için tasarım ve projelerin farklı aşamalarının maliyet açısından değerlendirildiği bir yöntemdir. $ türünden YBSBL'lı ve LED'li armatürler için YDMD sonucu şekil 5.10'da verilmiştir.

Her iki armatür için de işletme maliyetinin, bakım ve onarım, yatırım ve hurda maliyetlerinin çok üzerinde olduğu görülmektedir.



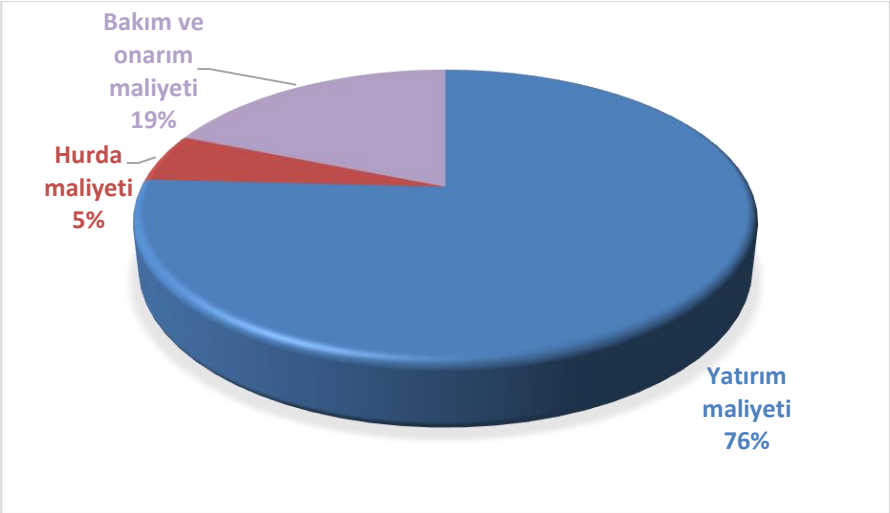
Şekil 5.10 : YBSBL'lı ve LED'li armatür için YDMD sonuçları ($).

YBSBL'lı armatürün yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi sonucunda tüm aşamalarının maliyetinin grafiği şekil 5.11'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi YBSBL'lı armatürün işletme maliyeti, yatırım, hurda ve bakım onarım maliyetlerine oranla oldukça yüksektir.



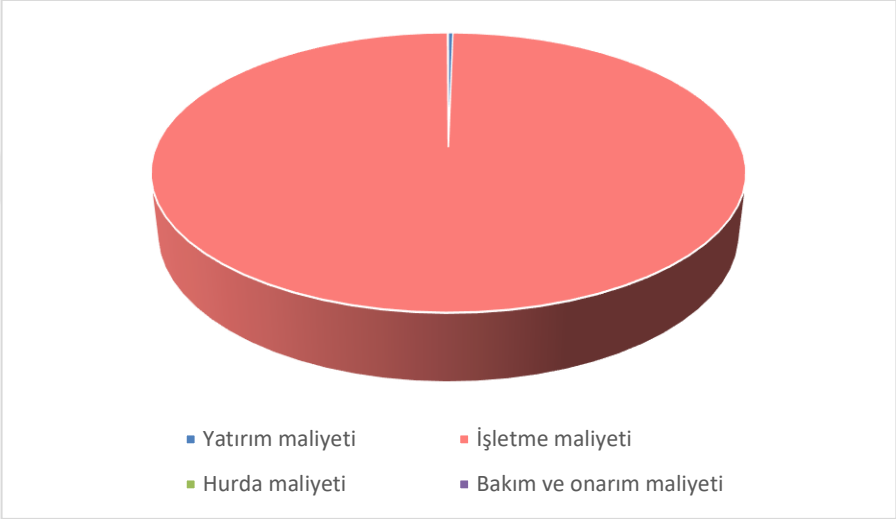
Şekil 5.11 : YBSBL'lı armatürün yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi sonuçları.

Şekil 5.12'de ise yine YBSBL'lı armatürün yatırım, hurda, bakım ve onarım maliyet oranları verilmektedir. Bu karşılaştırmada işletme maliyeti hariç tutularak diğer maliyetlerin etki oranları gösterilmektedir.



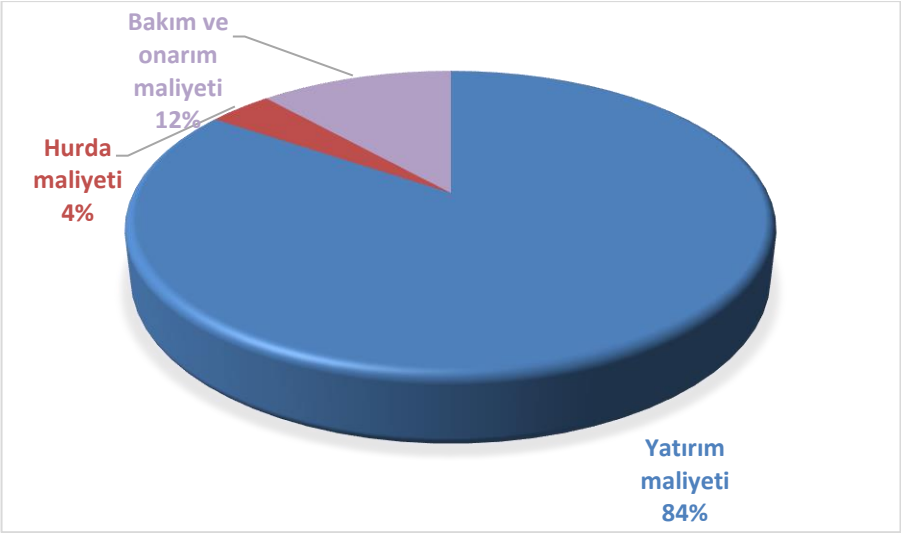
Şekil 5.12 : YBSBL'lı armatürün yatırım, hurda, bakım ve onarım maliyetleri oranları.

LED'li armatürün yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi sonucunda tüm aşamalarının maliyet grafiği şekil 5.13'te verilmektedir.



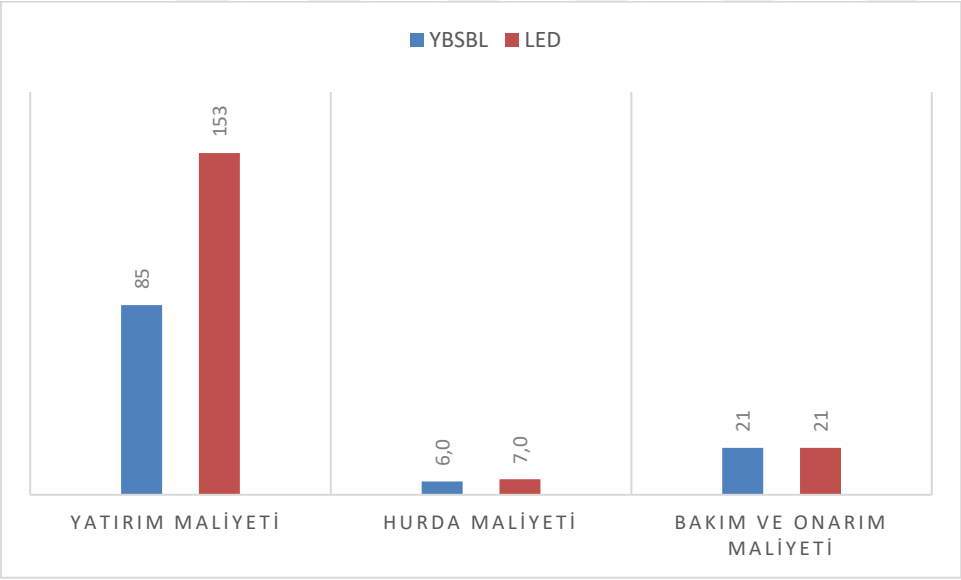
Şekil 5.13 : LED'li armatürün yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi sonuçları.

Şekil 5.14'te ise LED'li armatürün yatırım, hurda, bakım ve onarım maliyetleri oranları verilmektedir. Bu karşılaştırmada işletme maliyeti hariç tutularak diğer maliyetlerin etki oranları gösterilmektedir.



Şekil 5.14 : LED'li armatürün yatırım, hurda, bakım ve onarım maliyetleri oranları.

YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin yatırım, hurda ve bakım-onarım maliyetleri karşılaştırması şekil 5.15'te verilmiştir. Her iki armatür türü için de en az giderin hurda maliyeti, ardından bakım ve onarım maliyeti ve en yüksek değerin ise yatırım maliyeti olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5.15 : YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin yatırım, hurda ve bakım-onarım maliyetleri karşılaştırması.

Her iki armatür kullanılması durumunda da maliyete en çok katkı işletme giderlerinden gelmektedir. Şekil 5.15'de verilen YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin karşılaştırmasından da görüldüğü gibi LED armatürlerin ilk yatırım maliyeti günümüz koşullarında hala YBSBL'lı armatürlere göre yüksektir.

5.3 Sosyal Etki Değerlendirmesi

Sosyal etki değerlendirmesi, yaşam döngüleri boyunca ürünlerin kullanıcılar üzerindeki potansiyel etkilerini, sosyal ve sosyo-ekonomik yönlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ürünün hammadde eldesi, işlenmesi, üretimi, dağıtımı, kullanımı ve nihai bertarafına kadar geçirdiği tüm süreçlerdeki paydaşları etkileyebilecek sosyal ve sosyo-ekonomik performansı analiz etmektedir. Çevresel yaşam döngüsü değerlendirmesi ile ya da tek başına uygulanabilmektedir. Ancak, sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesi (SYDD) kapsamında verilen kararlar genelde yetersiz olmaktadır. Bu analizler üründen elde edilebilecek faydaları belgeleyebilmekte ama ürünün üretilip üretilmemesi hakkında net bir bilgi verememektedir. Şu anda yapılan değerlendirmelerde çevresel boyut geliştirilmiştir ve kapsamlı bir şekilde ele alınabilmektedir. Ama sosyal boyut değerlendirmesi için hala temel bilimsel gelişmelere, tutarlı ve sağlam göstergelere ve yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Yarı nicel ve nitel veriler kullanıldığı için SYDD analizi ile işlevsel birime ilişkin etkilerin ifade edilmesi zorlaşmaktadır. SYDD analizi uygulanırken, yaşam döngüsü aşamalarındaki iyileşmenin en önemli olduğu ve potansiyeli yüksek olan aşamaya odaklanılması önerilmektedir [114].

Değerlendirmelerde hedef ve kapsamın ilk aşamada belirlenmesi, tüm analizlerin aynı kapsam çerçevesinde yapılması da önemlidir. Tez çalışmasında enerji verimliliği çalışmaları çerçevesinde kurgulanan analizlerde işlevsel birim tasarruf edilen kWh cinsinden elektrik enerjisi miktarı olarak belirlenmiştir. Sosyo-ekonomik etki olarak verimli yol aydınlatması tesisatları ile ülke genelinde elde edilebilecek enerji tasarruf değerinin, Türkiye'nin toplam enerji tüketimini ve enerjide dışa bağımlılığını azaltıcı etkisi en önemli fayda olarak açıklanabilmektedir. Diğer yandan, yönetmelik ve standartlara uygun olarak yapılan yol aydınlatması tasarımları ile trafik kaza sayısının ve ölüm oranın azaltılabileceği; gece dış ortamlarda olası suç oranlarının düşürülebileceği, güvenlik koşulları iyileştirilerek şehirlerin gece yaşam olanaklarının arttırılabileceği dikkate alınarak, çalışma kapsamında gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesinin diğer sosyoekonomik katkıları da tanımlanabilmektedir. Enerji verimliliği çalışmaları ile kısıtlı kaynakların kontrollü bir şekilde kullanılması ve sera gazı salımlarının azaltılmasının çevresel kazançlarının yanı sıra toplumların yaşam kalitesini arttırıcı etkileri de vardır.

Ancak, bu etkilerin sayısal değerlerle somut olarak ortaya konulabilmesi için uzun süreli çok değişkenli saha çalışmalarına ya da farklı kaynaklardan elde edilebilecek sağlıklı ve kapsamlı verilere ihtiyaç olduğundan, bu tez çalışmasında sadece ilerideki araştırmalara yol gösterici olabilecek olası geri dönüşümler tanımlanabilmiştir

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji, çevre ve ekonomi birbirini besleyen, bağımsız olarak ele alınamayacak üç önemli konudur. Günümüzde küresel ısınma etkileri günden güne artmaktadır. Ulusal ve uluslararası düzeyde çevre, ekonomi ve enerji bağlamında sürdürülebilirlik konusunda çalışmalar hız kazanmıştır. Ekonomik belirsizlikler nedeniyle ve teknolojik gelişmelerin de etkisiyle çevre ve enerji alanında özellikle enerji verimliliği konusu ön plana çıkmaktadır. Kamu alanlarında enerji verimliliği çalışmaları hem kapsamlı hem de yol gösterici çalışmalar olmaktadır. Tez çalışmasında bu çalışmalara bir örnek olabilmesi amacıyla mevcut bir yol aydınlatma tesisatının yenilenmesi aşamalarında sağlanması gereken kriterler dikkate alınarak YBSB'lı ve LED'li armatürler ile iki alternatif uygulama tasarımı gerçekleştirilmiştir. Her iki uygulamanın armatür türleri bazında yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi yapılmıştır. Yerli üretici firmadan alınan bilgiler ile armatürlerin hammadde teminini de kapsayacak şekilde fabrikadaki üretim aşamaları ve kullanım aşamasına kadar geçen tüm süreçler için sera gazı salımları IPCC 2006 kılavuzuna uygun olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalara dolaylı elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı sera gazı salımları, dolaysız yakma ve araç kaynaklı sera gazı salımları dahil edilmiştir. Üretim aşamasında fabrika içi taşımalardan kaynaklı ve ürünlerin kullanım yerlerine nakli aşamasındaki salım değerleri de dikkate alınmıştır.

150 W YBSBL'lı ve 93 W LED'li armatürlerin yıllık 4.000 saat kullanım ile 15 yıl sonunda tüketecekleri elektrik enerjisi miktarı ve üretim aşamalarında harcanan elektrik enerjisi miktarları üzerinden salım miktarları hesaplanmıştır. YBSBL'lı ve LED'li armatürlerin kullanım aşaması sera gazı salım miktarları karşılaştırdığında YBSBL'lı armatürden kaynaklanan 7,3161 ton CO_2 salım miktarının, 4,05 ton CO_2 salımı oluşturan LED'li armatüre göre %44,46 oranında yüksek olduğu görülmektedir.

Toplam salım miktarı, toplam yakma kaynaklı salım, toplam araç kaynaklı salım ve toplam elektrik enerjisi tüketimi kaynaklı salım değerlerinin toplanması ile elde edilmektedir. Yapılan işlemler sonucunda YBSBL'li armatür için sera gazı salımı

7,5276 CO_2e; LED'li armatür için ise 4,1803 CO_2e olarak belirlenmiştir. Hammaddelerin uzak mesefelerden temin edilmesi salım miktarını etkilemektedir.

YBSBL'lı armatür üretiminde sadece konsol üretim sürecinde boyama aşamasında doğalgaz kullanılmaktadır. LED'li armatürde ise konsol ve gövde üretiminde doğalgaz kullanıldığı için LED'li armatür üretiminde YBSBL'lı armatüre oranla daha fazla doğalgaz tüketilmektedir ve bu tüketim sera gazı salım miktarını da arttırmaktadır.

Yol aydınlatması tesisatları yerel yönetim ve ulusal harcamalarda önemli bir gider olmaktadır. Bu nedenle, yol aydınlatmasında enerji verimliliği çalışmaları yapılırken ekonomik etkilerin de dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

LED'li armatürlerin ilk tesisat satın alma maliyetinin YBSBL'lı armatürlerden daha yüksek olduğu, ancak işletme süresince daha az enerji harcamaları nedeniyle ürünlerin tüm yaşam döngüsü adımları dikkate alındığında, LED'e dönüşümün maliyet açısından daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi entegre karar verilmesine olanak sağlamaktadır. Günümüzde, sürdürülebilirlik yol gösterici ilke olarak kabul edilmektedir. Diğer yandan sürdürülebilirlik performansının ölçüm yöntemlerinin net olmaması sebebiyle zorluklar mevcuttur. Çevre, ekonomi ve sosyal sürdürülebilirlik boyutları için yöntem ve araçların olgunluğu farklılık göstermektedir. En gelişmiş yöntemler çevresel etkileri değerlendirme için oluşturulmuştur. Sosyal etki değerlendirmesi yaşam döngüleri boyunca ürünlerin kullanıcılar üzerindeki potansiyel etkilerini, sosyal ve sosyo-ekonomik yönlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ancak bu alanda, uzun süreli çok parametreli saha çalışmalarına dayanan etki analizleri gerekmektedir. Yapılan tez çalışmasında, sadece gelecek araştırmalara yön gösterebilecek olası geri dönüşümler tanımlanabilmiştir. Belirtilen geri dönüşlerde sosyo-ekonomik etki olarak verimli yol aydınlatması tesisatları ile ülke genelinde elde edilebilecek enerji tasarruf değerinin Türkiye'nin toplam enerji tüketimini ve enerjide dışa bağımlılığını azaltıcı etkisi en önemli fayda olarak açıklanabilmektedir.

Sera gazı salımlarının azaltılması çevresel kazançlarının yanı sıra toplumların yaşam kalitesini de arttırmaktadır. Ek olarak, yönetmelik ve standartlara uygun olarak yapılan yol aydınlatması tasarımları ile kazaların önüne geçilip, yaya ve sürücülerin yol güvenliği arttırılarak sosyal alanda da fayda sağlanmış olacaktır. Ayrıca enerji verimliliği çalışmaları ile kaynakların kontrollü bir şekilde kullanılmasına da katkı

yapılacaktır. Gelecek nesillerin daha sağlıklı, mutlu bireyler olmaları ve yaşanabilir bir dünya yaratılabilmesi için sürdürülebilirlik çalışmaları ciddi önem taşımaktadır.

Günümüzde yol aydınlatmalarında YBSBL'lı armatürler hala kullanımdadır. LED teknolojisinde görülen ilerleme ile yol aydınlatmalarında LED'e geçiş kapsamında yapılan tez çalışmasında, LED'li armatür kullanımının sürdürülebilirlik temelinde çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan değerlendirilmesi sonucunda LED'li armatür kullanımının üç açıdan da YBSBL'lı armatür kullanımından daha olumlu etkilere sahip olduğu görülmüştür. Yol aydınlatmalarında önerilen LED dönüşüm uygulamalarının sosyo-ekonomik etkilerinin değerlendirilmesi amaçlı gereken çok değişkenli saha çalışmaları ve kapsamlı veri analizleri bundan sonrası için önemli bir araştırma konusudur. Bu etkileri somut değerlerle analiz edebilen yaşam döngüsü değerlendirmeleri, önemli enerji tasarruf potansiyelleri olan LED'li yol aydınlatması tesisatlarının uygulanabilirliklerine önemli katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

[1] **URL-1** <https://www.climate.gov/news-features/features/2021-global-climate-summary-6th-warmest-year-record.> Erişim Tarihi 19.01.2022.

[2] **Owen, A. D.,** Hanley, N., & Owen, A. D. (Editör). (2004). *The economics of climate change* (Baskı 3). New York: Routledge.

[3] **Keeble, B. R.** (1988). The Brundtland report:'Our common future'. *Medicine and war*, *4*(1), 17-25.

[4] **Di Stefano, J.** (2000). Energy efficiency and the environment: the potential for energy efficient lighting to save energy and reduce carbon dioxide emissions at Melbourne University, Australia. *Energy*, *25*(9), 823-839.

[5] **Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023.** (2017). *Ankara, ETKB Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı.*

[6] **Jägerbrand, A. K.** (2020). Synergies and trade-offs between sustainable development and energy performance of exterior lighting. *Energies*, *13*(9), 2245.

[7] **Yfanti, S., Sakkas, N., & Nistikaki, A.** (2017). Energy savings in municipal road lighting: The case of the Municipality of Hersonissos. *Journal of Physical Science and Application*, *7*(3), 59-65.

[8] **IEA** (2021), *Lighting*, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/lighting .

[9] **Kim, J. T., & Hwang, T.** (2017). Feasibility study on LED street lighting with smart dimming systems in Wooi Stream, Seoul. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *16*(2), 425-430.

[10] **Anthopoulou, E., & Doulos, L.** (2019). The effect of the continuous energy efficient upgrading of LED street lighting technology: The case study of Egnatia Odos. In *2019 Second Balkan Junior Conference on Lighting (Balkan Light Junior)* (pp. 1-2). IEEE.

[11] **UNEP** (2011), Towards a Life Cycle Sustainability Assessment Making Informed Choices on Products, UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Towards%20LCSA.pdf.

[12] **Goglio, P., Williams, A. G., Balta-Ozkan, N., Harris, N. R., Williamson, P., Huisingh, D., ... & Tavoni, M.** (2020). Advances and challenges of life cycle assessment (LCA) of greenhouse gas removal technologies to fight climate changes. *Journal of Cleaner Production*, *244*, 118896.

[13] **IEA** (2020), *Energy Efficiency 2020*, IEA, Paris https:// www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020.

[14] **BP** (2021), *Statistical Review of World Energy 2021*, BP, London https://www.bp.com/content/dam/bp/business-

sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf.

[15] **IEA** (2021), Global Energy Review 2021, IEA, Paris https:// www.iea.org/reports/global-energy-review-2021.

[16] **Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü Stratejik Planı 2019-2023.** *TEİAŞ.* Erişim Adresi: https://webapi.teias.gov.tr/file/080af670-d5cb-4e53-b188-11a187da2037.

[17] **de Quinto Romero, J., & Milla, J. L.** (2010). EU policies for Renewable Energies. In *Global Warming and Climate Change* (pp. 267-286). Palgrave Macmillan, London.

[18] **Enerji Sektöründe Sera Gazı Azaltımı Çalışma Grubu Raporu**. (2006). *Ankara, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Müdürlüğü.*

[19] **URL-2** < https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari> Erişim Tarihi: 05.01.2022.

[20] **Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu (2020-2040 Dönemi).** *ETKB***.** Erişim Adresi: https://enerji.enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/ENTAP/114176-turkiye_elektrik_enerjisi_talep_projeksiyonu_raporu.pdf Erişim Tarihi: 04.01.2022.

[21] **Kamuda Verimli Aydınlatmaya Geçiş.** (2009). *Ankara, ETKB* .

[22] **On Birinci Kalkınma Planı 2019-2023.** (2019). *Ankara, T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı.*

[23] **On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023) Enerji Arz Güvenliği ve Verimliliği, Özel İhtisas Komisyonu Raporu.** (2019). *Ankara, T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı.*

[24] **Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2020 yılı istatikleri***.TEİAŞ.* Erişim Adresi: https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri Erişim Tarihi: 02.01.2022 .

[25] **Enerji Görünümü 2020.** (2020). İstanbul, *Türkiye Sınai Kalkınma Bankası.*

[26] **URL-3** <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-verimliligi-destekleri >Erişim Tarihi:31.12.2021.

[27] **Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi.** (2009). *T.C. Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Yüksek Planlama Kurulu Sekretaryası.* Erişim Adresi: https://enerji.enerji.gov.tr//Media/Dizin/SGB/tr/Belgeler/813444-6arz_guvenligi_strateji_belgesi.pdf .

[28] **Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı.** (2012). *Ankara, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.* Erişim Adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/file/eylem%20planlari/uyum_stratejisi_eylem_plani_TR.pdf Erişim Tarihi: 27.12.2021.

[29] **URL-4** <https://enerji.enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/Enerji_Modellemesi /128647-6-leap_stratejibelgesi.pdf> Erişim Tarihi: 28.12.2021.

[30] **IPCC**. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.*

[31] **Hernández, C. G.** (2010). Global Warming and Climate Change: Prospects for Forced Migration in Southeast Asia. In *Global Warming and Climate Change* (pp. 208-223). Palgrave Macmillan, London.

[32] **Talu N. & Kocaman H.** Türkiye'de İklim Değişikliği ile Mücadelede Politikalar, Yasal ve Kurumsal Yapı. (2019). Ankara, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.

[33] **Velders, G. J., Andersen, S. O., Daniel, J. S., Fahey, D. W., & McFarland, M**. (2007). The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(12), 4814-4819.

[34] **Murdoch, J. C., & Sandler, T.** (1997). The voluntary provision of a pure public good: The case of reduced CFC emissions and the Montreal Protocol. *Journal of Public Economics*, *63*(3), 331-349.

[35] **UNEP.** (1991). *Multilateraly treaties in the field of the environment. GROTIUS PUBLICATIONS LIMITED.*

[36] **URL-5** <https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/file/brosurler/HPMP%20Brosuru.pdf > Erişim Tarihi:08.01.2022.

[37] **Depledge, J.** (2017). Foundations for the Paris Agreement. *The Paris Agreement on Climate Change: Analysis and Commentary*, 27-42.

[38] **Popovski, V.** (Ed.). (2018). *The Implementation of the Paris Agreement on Climate Change*. Routledge.

[39] **UN.** (1998). *Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change.*

[40] **URL-6** < https://enerji.enerji.gov.tr//Media/Dizin/EVCED/tr/Belgeler/843595-enerji__c%CC%A7evre_ve_i%CC%87klim_deg%CC%86is%CC%A7iklig%CC%86i_gu%CC%88ncel_2017.pdf> Erişim Tarihi: 06.01.2022.

[41] **URL-7** < https://iklim.csb.gov.tr/kyoto-protokolu-i-4363> Erişim Tarihi: 06.01.2022.

[42] **UNFCCC.** (2021). ***Glasgow Climate Pact: Decision*.** Erişim Adresi: < https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf> Erişim Tarihi: 07.01.2022.

[43] **Climate Action Tracker.** (2020). *Paris Agreement turning point Wave of net zero targets reduces warming estimate to 2.1℃ in 2100 All eyes on 2030 targets.*

[44] **İzleme ve Raporlama Tebliği Yıllık Emisyon Raporlama Kılavuzu.** (2015). *T.C. ÇSB Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü İklim Değişikliği Dairesi*.

[45] **İzleme ve Raporlama Tebliği İzleme Planı Kılavuzu.** (2015). *T.C. ÇSB Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü İklim Değişikliği Dairesi.*

[46] **Doğrulama ve Yetkilendirme Tebliği Doğrulama Kılavuzu.** (2016). *T.C. ÇSB Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü İklim Değişikliği Dairesi*.

[47] **TÜİK.** (2021). *Sera gazı emisyon istatikleri 1990-2019.*

[48] **URL-8** <https://www.climate.gov/media/13611> Erişim Tarihi: 07.01.2022.

[49] **Burck, J., Hagen U., Nascimento L., Bals, C., & Höhne, N.** (2020). Climate change performance index. *Bonn: Germanwatch, NewClimate Institute and Climate Action Network.*

[50] **Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021.** (2021). *T.C. Ticaret Bakanlığı.*

[51] **WMO. (**2021). *Switzerland, Wmo Atlas Of Mortalıty and Economıc Losses From Weather, Clımate And Water Extremes (1970–2019).*

[52] **WMO. (**2021). *Switzerland, State of Climate Services 2021.*

[53] **2020 yılı meteorolojik afetler değerlendirmesi.** (2021). *Ankara, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü.*

[54] **IMF.** (2020). *Washington, World Economic Outlook:A Long and Difficult Ascent.*

[55] **IMF.** (2021). *World Economic Outlook: Recovery During a Pandemic Health Concerns, Supply Disruptions, and Price Pressures.*

[56] **IMF.** (2022). *World Economic Outlook: Update* Rising Caseloads, a Disrupted Recovery, and Higher Inflation .

[57] **IMF.** (2020). *IMF Annual Report 2020, A Year Like No Other.*

[58] **IMF.** (2021). *Washington, World Economic Outlook: Managing Divergent Recoveries.*

[59] **Ekonomik Göstergeler.** (2022). *Ankara, T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı.*

[60] **URL-9** <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=45789> Erişim Tarihi: 02.01.2022.

[61] **Hazine ve Maliye Bakanlığı 2019-2023 Stratejik Plan.** *Ankara, T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı.*

[62] **T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı.** (2021). *Hazine ve Maliye Bakanlığı 2020 yılı Faaliyet Raporu.* T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı.

[63] **TCMB**. (2021). *2022 Yılı Para ve Kur Politikası. Türkiye Cumhuriyeti* .

[64] **Keskin M. T.** Enerji Politikalarının İklim Değişikliği ile Mücadeledeki Yeri (2019). Ankara, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.

[65] **IPCC. (**2018): *Global warming of 1.5° C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

[66] **Force, U. T**. (2020). Biden-Sanders Unity Task Force recommendations: Combating the climate crisis and pursuing environmental justice.

[67] **Canada's Fourth Biennial Report on climate change**. (2019). *Government of Canada.*

[68] **Global Energy Monitor.** (2020). *South And Southeast Asia's Last Coal Plants : As financing tightens, the regions are closing the door on new coal Project.*

[69] **Burck J., Uhlich T., Bals C.,Höhne N., Nascimento L., Tamblyn A., Reuther J.** (2021). *Bonn, CCPI Climate Change Performance Index 2022.*

[70] **Japan's 2050 goal: A carbon-neutral society.** Erişim Adresi: <

https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/698023/EPRS_BRI(2021)698023_EN.pdf> Erişim Tarihi: 09.01.2022.

[71] **URL-10** https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets_en > Erişim Tarihi: 08.01.2022.

[72] **Olivier, J. G. J., & Peters, J. A. H. W**. (2020). *Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions: 2020 report*. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

[73] **Den Elzen, M., Kuramochi, T., Höhne, N., Cantzler, J., Esmeijer, K., Fekete, H., ... & Vandyck, T.** (2019). Are the G20 economies making enough progress to meet their NDC targets?. *Energy policy*, *126*, 238-250.

[74] **Höhne, N., Gidden, M., Elzen, M., Hans, F., Fyson, C., Geiges, A., ... & Rogelj, J.** (2021). Wave of net zero greenhouse gas emission targets opens window on meeting the Paris Agreement.

[75] **IEA.** (2020). *Sustainable Recovery* Plan, France. France: International Energy Agency.

[76] **Türkiye İklim Değişikliği Stratejisi 2010-2023.** *T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.* Erişim Adresi: < https://www.gmka.gov.tr/dokumanlar/yayinlar/Turkiye-Iklim-Degisikligi-Stratejisi.pdf > Erişim Tarihi : 22.12.2021.

[77] **Türkiye Cumhuriyeti Yeni Kentsel Gündemin Uygulanmasına ilişkin Ulusal Rapor.** (2021). *Ankara, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mekansal Planlama Genel Müdrülüğü.*

[78] **URL-11** < https://iklim.csb.gov.tr/karbon-piyasasina-hazirlik-ortakligi-pmr-i-4403> Erişim Tarihi: 11.01.2022.

[79] **URL-12** < https://iklim.csb.gov.tr/gonullu-karbon-piyasalari-i-4391 > Erişim Tarihi: 11.01.2022.

[80] **URL-13** < http://csb.gov.tr/bakan-yardimcisi-birpinar-iklim-degisikligini-firsata-ceviren-ulkeler-zenginlesir-bakanlik-faaliyetleri-25394 > Erişim Tarihi:5.03.2022.

[81] **URL-14** < https://www.iklimhaber.org/karbon-piyasalarina-hazirlik-ortakligi-projesi-pmr-ikinci-fazi-tamamlandi/> Erişim Tarihi: 03.03.2022.

[82] **IEA.** (2020). *World Energy Investment 2021*, France. France: International Energy Agency.

[83] **IEA.** (2020). *World Energy Outlook 2021*, France. France: International Energy Agency.

[84] **Talu N.** Yerel İklim Eylem Planlaması ve Türkiye Pratikleri**.** (2019). Ankara.

[85] **Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2019 Yılı Gelişim Raporu.** (2020). *Ankara, ETKB Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı.*

[86] **Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2020 Gelişim Raporu.** (2021). *Ankara, ETKB Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı.*

[87] **Casamayor, J. L., & Su, D. Z.** (2011). Environmental impact assessment of lighting products. In *Key Engineering Materials* (Vol. 486, pp. 171-174). Trans Tech Publications Ltd.

[88] **Casamayor, J. L., & Su, D.** (2013). Integration of eco-design tools into the development of eco-lighting products. *Journal of Cleaner Production*, *47*, 32-42.

[89] **Elejoste, P., Angulo, I., Perallos, A., Chertudi, A., Zuazola, I. J. G., Moreno, A., ... & Villadangos, J.** (2013). An easy to deploy street light control system based on wireless communication and LED technology. *Sensors*, *13*(5), 6492-6523.

[90] **Gallaway, T., Olsen, R. N., & Mitchell, D. M.** (2010). The economics of global light pollution. *Ecological economics*, *69*(3), 658-665.

[91] **TEDAŞ**, LED'li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar, Rev. Ekim 2020.

[92] **TEDAŞ,** "LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi", Rev. Ekim 2020.

[93] **ETKB,** ''Genel Aydınlatma Kapsamında LED Armatürlerin Kullanımına İlişkin Usul ve Esaslar", 20/4/2018 – 30397.

[94] **URL-15** < https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_4484> Erişim Tarihi: 04.01.2022.

[95] **IEA.** (2020). *Tracking Lighting 2020*, France. France: International Energy Agency.

[96] **Enerji ile İlgili Ürünlerin Çevreye Duyarlı Tasarımına İlişkin Yönetmelik** (2010). T. C. Resmi Gazete, 27722, 7 Ekim 2010.

[97] **Ürünlerin Enerji ve Diğer Kaynak Tüketimlerinin Etiketleme ve Standart Ürün Bilgileri Yoluyla Gösterilmesi Hakkında Yönetmelik** (2012). T. C. Resmi Gazete, 28130, 2 Aralık 2012.

[98] **Askola, J., Kärhä, P., Baumgartner, H., Porrasmaa, S., & Ikonen, E.** (2021). Effect of adaptive control on the LED street luminaire lifetime and on the lifecycle costs of a lighting installation. *Lighting Research & Technology*, 14771535211008179.

[99] **Iqteit, N., & Yahya, K.** (2020). Improvement the Efficiency of Distribution Network Using an Efficient Lighting System of Streets. *Energy Efficiency and Sustainable Lighting*, 181,192,193.

[100] **Sikora, R., & Markiewicz, P.** (2020). Energy Efficiency of the Road Lighting: The Impact of Active Power Losses on Energy Performance Indicators and Electricity Costs. *Energy Efficiency and Sustainable Lighting*, 195,209,213,214.

[101] **Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Hammer, S. A., & Mehrotra, S.** (Eds.). (2011). *Climate change and cities: First assessment report of the urban climate change research network*. Cambridge University Press, 253.

[102] **Carbon Inventory of Pune City- Final Report.** (2012). *Hindistan, Pune Municipal Corporation.*

[103] **International Organization for Standardization**. (2006). *Environmental management:Life cycle assessment; Principles and Framework*. ISO.

[104] **International Organization for Standardization.** (2006). *Environmental management:Life cycle assessment: Requirements and guidelines.* ISO.

[105] **Scientific Applications International Corporation (SAIC), & Curran, M. A.** (2006). Life-cycle assessment: principles and practice.

[106] **Klöpffer, W., & Grahl, B.** (2014). *Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice*. John Wiley & Sons. pp 131.

[107] **U.S. EPA Sustainable Materials Management Program Strategic Plan 2017-2022**. (2015). *Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı.*

[108] **URL- 16** < https://sdg-tracker.org > Erişim Tarihi: 02.03.2022.

[109] **Swarr, T. E., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H. L., Ciroth, A., Brent, A. C., & Pagan, R.** (2011). Environmental life-cycle costing: a code of practice. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *16*(5), 389-391.

[110] **Klöpffer, W.** (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *13*(2), 89-95.

[111] **Curran, M. A.** (Ed.). (2012). *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products*. John Wiley & Sons.

[112] **Finkbeiner, M., Schau, E. M., Lehmann, A., & Traverso, M.** (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, *2*(10), 3309-3322.

[113] **URL-17** <https://ec.europa.eu/environment/ipp/ > Erişim Tarihi: 04.03.2022.

[114] **UNEP**, (2009).*Guidelines For Social Life Cycle Assessment Of Products*, Birleşmiş Milletler Çevre Programı.

[115] **Reddy, V. R.** (2015). *Life-cycle Cost Approach for Management of Environmental Resources A Primer*. Springer.

[116] **Tähkämö L.** (2013). *Life cycle assessment of light sources - Case studies and review of the analyses* (Doktora Tezi). Aalto University, School of Electrical Engineering Department of Electronics Lighting Unit, Finland .

[117] **Principi, P., & Fioretti, R.** (2014). A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office–compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED)–a case study. *Journal of Cleaner Production*, *83*, 96-107.

[118] **Tähkämö, L., Puolakka, M., Halonen, L., & Zissis, G.** (2012). Comparison of life cycle assessments of LED light sources. *Journal of Light & Visual Environment*, *36*(2), 44-54.

[119] **Bazzana, M., Ravel, P., Grannec, F., & Martinsons, C**. Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire-a case study.

[120] **Yu, Z. Y., Soo, V. K., & Doolan, M.** (2016). The effect of consumer behaviour on the Life Cycle Assessment of energy efficient lighting technologies. *Procedia CIRP*, *40*, 185-190.

[121] **Dillon, H. E., Ross, C., & Dzombak, R**. (2020). Environmental and energy improvements of LED lamps over time: a comparative life cycle assessment. *Leukos*, *16*(3), 229-237.

[122] **Richter, J. L., Tähkämö, L., & Dalhammar, C.** (2019). Trade-offs with longer lifetimes? The case of LED lamps considering product development and energy contexts. *Journal of cleaner production*, *226*, 195-209.

[123] **Wang, S., Su, D., Wu, Y., & Chai, Z**. (2020). Application of life-cycle assessment to the eco-design of LED lighting products. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, *5*(2), 1-10.

[124] **Casamayor, J. L., Su, D., & Ren, Z.** (2018). Comparative life cycle assessment of LED lighting products. *Lighting Research & Technology*, *50*(6), 801-826.

[125] **Cantisani, G., Di Mascio, P., & Moretti, L.** (2018). Comparative life cycle assessment of lighting systems and road pavements in an Italian twin-tube road tunnel. *Sustainability*, *10*(11), 4165.

[126] **Hadi, S. A., Al Kaabi, M. R., Al Ali, M. O., & Arafat, H. A**. (2013). Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in United Arab Emirates. *Energy for Sustainable Development*, *17*(5), 438-450.

[127] **Tannous, S., Manneh, R., Harajli, H., & El Zakhem, H.** (2018). Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of traditional grid-connected and solar stand-alone street light systems: A case study for rural areas in Lebanon. *Journal of Cleaner Production*, *186*, 963-977.

[128] **Tähkämö, L., & Halonen, L.** (2015). Life cycle assessment of road lighting luminaires–comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies. *Journal of Cleaner Production*, *93*, 234-242.

[129] **Dzombak, R., Kasikaralar, E., & Dillon, H. E.** (2020). Exploring cost and environmental implications of optimal technology management strategies in the street lighting industry. *Resources, Conservation & Recycling: X*, *6*, 100022.

[130] **Tähkämö, L., Räsänen, R. S., & Halonen, L.** (2016). Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(2), 137-145.

[131] **Technical Report CIE 115:2010** "Lighting of roads for motor and pedestrian traffic", 2nd edition, Vienna.

[132] **ETKB,** "Genel Aydınlatma Yönetmeliği", Erişim Adresi: https:// www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/07/20130727-20.htm, Erişim Tarihi: 02.03.2022 .

[133] **Onaygil, S., Güler, Ö., & Erkin, E.** (2009). Yol aydınlatmalarında LED kullanımı. V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi.

[134] **TEDAŞ,** LED'li Armatürlerin Onaylanmasına İlişkin Usul ve Esaslar, Rev. Ekim 2020.

[135] **CEN**, (2014). PD CEN/TR 13201-1: 2014-Road lighting- Part 1: Selection of lighting classes, Brussels.

[136] **CEN**, (2014). EN 13201-2: 2015-Road lighting- Part 2: Performance requirements, Brussels.

[137] **CEN,** (2014). EN 13201-3:2015-Road lighting- Part 3: Calculation of performance, Brussels.

[138] **Sikora, R., & Markiewicz, P**. (2021). A new approach to calculating energy performance indicators of road lighting. *Sustainable Cities and Society*, *75*, 103232.

[139] **Rangari, V., Kadam, A. R., & Dhoble, S. J.** (2021). LEDs Benefits and Challenges in Road Lighting.

[140] **Rahman, S., Pipattanasomporn, M., & Flory, I.** (2013). *Bi-Level Demand-Sensitive LED Street Lighting Systems*. VIRGINIA POLYTECHNIC INST AND STATE UNIV ARLINGTON ADVANCED RESEARCH INST.

[141] **Halapee, J.** (2014). Implementation on LED Road Lighting in Bangkok. *GMSARN international Journal*, *8*, 53-60.

[142] **Bamisile, O. O., Dagbasi, M., & Abbasoglu, S.** (2016). Economic feasibility of replacing sodium vapor and high pressure mercury vapor bulbs with LEDs for street lighting. *Energy and Policy Research*, *3*(1), 27-31.

[143] **Campisi, D., Gitto, S., & Morea, D.** (2017). Light emitting diodes technology in public light system of the municipality of Rome: An economic and financial analysis. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *7*(1), 200-208.

[144] **Yoomak, S., Jettanasen, C., Ngaopitakkul, A., Bunjongjit, S., & Leelajindakrairerk, M.** (2018). Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system. *Energy and Buildings*, *159*, 542-557.

[145] **Sudarmono, P., & Widyaparaga, A**. (2018, May). Energy efficiency effect on the public street lighting by using LED light replacement and kwh-meter installation at DKI Jakarta Province, Indonesia. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1022, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.

[146] **Mahmoud, M. M.** (2018, May). Typical economic model for calculating the saving norm of replacement HPS street lighting by LED fixtures in access road of gas production company at GCC. In *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)* (pp. 189-192). IEEE.

[147] **Djuretic, A., & Kostic, M.** (2018). Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting. *Energy*, *157*, 367-378.

[148] **Beccali, M., Bonomolo, M., Leccese, F., Lista, D., & Salvadori, G.** (2018). On the impact of safety requirements, energy prices and investment costs in street lighting refurbishment design. *Energy*, *165*, 739-759.

[149] **Spahiu, A., Dhamo, L., & Zavalani, O.** (2018). LED Street Lighting Application in Municipality of Tirana. In *2018 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)* (pp. 000211-000216). IEEE.

[150] **Mohammed, J. K.** (2020). Reduction cost and energy consumption for led smart lighting street technology in Iraq. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *20*(2), 662-669.

[151] **Janter, H. M., Ba'afai, U., & Nasruddin, M. N.** (2021). A Model of Carbon Emission Reduction based on the Efficacy of National Public Road Lighting in North Sumatera Province.

[152] **Pagden, M., Ngahane, K., & Amin, M. S. R.** (2020). Changing the colour of night on urban streets-LED vs. part-night lighting system. *Socio-Economic Planning Sciences*, *69*, 100692.

[153] **ÇŞİDB** , "Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ", Erişim Adresi: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/07/ 20140722-5.htm, Erişim Tarihi: 29.05.2022

[154] **IPCC**. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

[155] **International Organization for Standardization.** (2018). *Sera Gazları – Bölüm 1: Sera gazı salımlarının ve uzaklaştırmalarının kuruluş seviyesinde hesaplanmasına ve raporlanmasına dair kılavuz ve özellikler*. ISO.

[156] **International Organization for Standardization.** (2019). *Bölüm 2: Sera gazı salım azaltımlarının veya uzaklaştırma iyileştirmelerinin proje düzeyinde hesaplanması, izlenmesi ve raporlanmasına dair kılavuz ve özellikler*. ISO.

[157] **International Organization for Standardization.** (2018). *Sera gazları-Ürünlerin karbon ayak izi- Hesaplama için gerekler ve kılavuz*. ISO.

[158] **ETKB,** "Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik", Erişim Adresi: https:// www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/10/20111027-5.htm, Erişim Tarihi: 13.06.2022.

[159] **Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Bilgi Formu**, *ETKB*. Erişim Adresi: https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru Erişim Tarihi: 29.05.2022.

[160] **API,** (2009). *Compendium Of Greenhouse Gas Emissions Methodologies For The Oil And Natural Gas Industry*, American Petroleum Institute. Erişim Adresi: https://www.api.org/~/media/files/ehs/climate-change/2009_ghg_compendium.ashx.

[161] **URL- 18** <http://kashti.ir/files/ENBOOKS/Specification%20of%202200%20TEU%20container%20vessel.pdf > Erişim Tarihi: 15.06.2022.

[162] **Soleymani, A., Sharifi, S. M. H., Edalat, P., Sharifi, S. M. M., & Zadeh, S. K.** (2018). Linear Modeling of Marine Vessels Fuel Consumption for Ration of Subsidized Fuel. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MARITIME TECHNOLOGY, 10*, 7-13.

[163] **Trozzi, C.** (2010). Emission estimate methodology for maritime navigation. Erişim Adresi:<https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf.

[164] **European Commission**. (n.d.). European Union Ship Emissions to Air Study Appendix 5. Erişim Adresi: https://ec.europa.eu/environment/enveco/economics_policy/pdf/studies/app5final.pdf.

[165] **Žižlavský, O.** (2014). Net present value approach: method for economic assessment of innovation projects. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 156*, 506-512.

[166] **URL-19** <https://evds2.tcmb.gov.tr/index.php?/evds/portlet/0QRrRj0ew0Y%3D/tr> Erişim Tarihi: 29.05.2022.

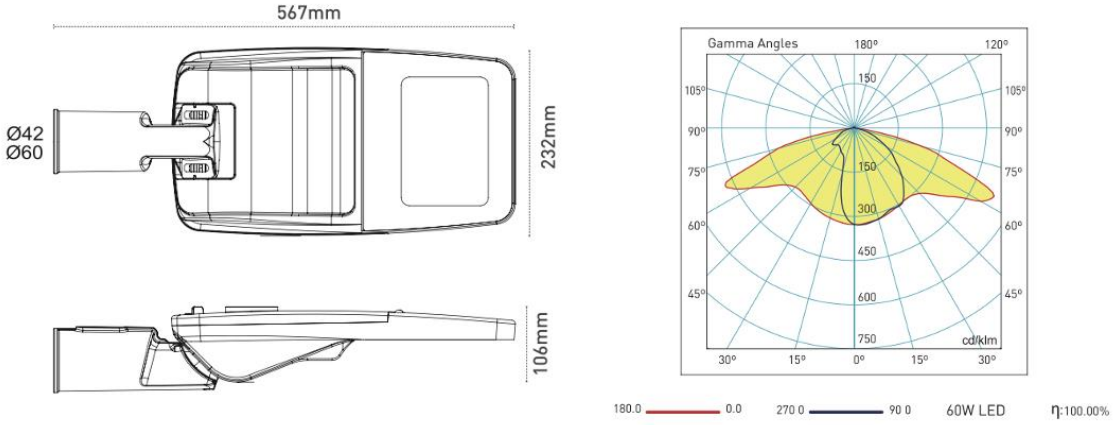
[167] **TEDAŞ,** Birim Fiyat Kitabı, 2022. Erişim Adresi: <https://birimfiyat.tedas.gov.tr/Anasayfa/Fiyatlandirma>.

[168] **URL-20** https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari Erişim Tarihi: 09.06.2022.

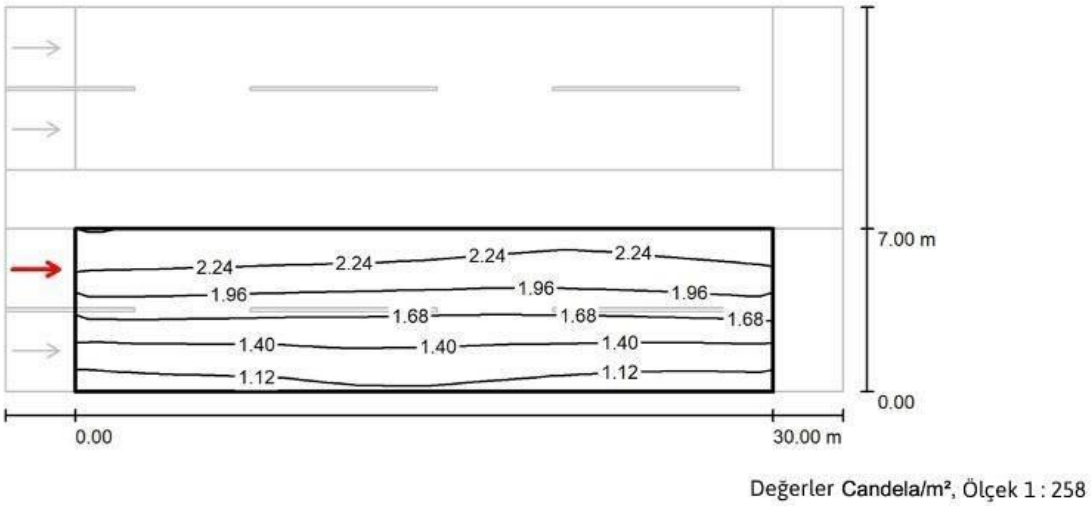
EKLER

EK A: DIALux programı üzerinden elde edilen sonuçlar

EK-A



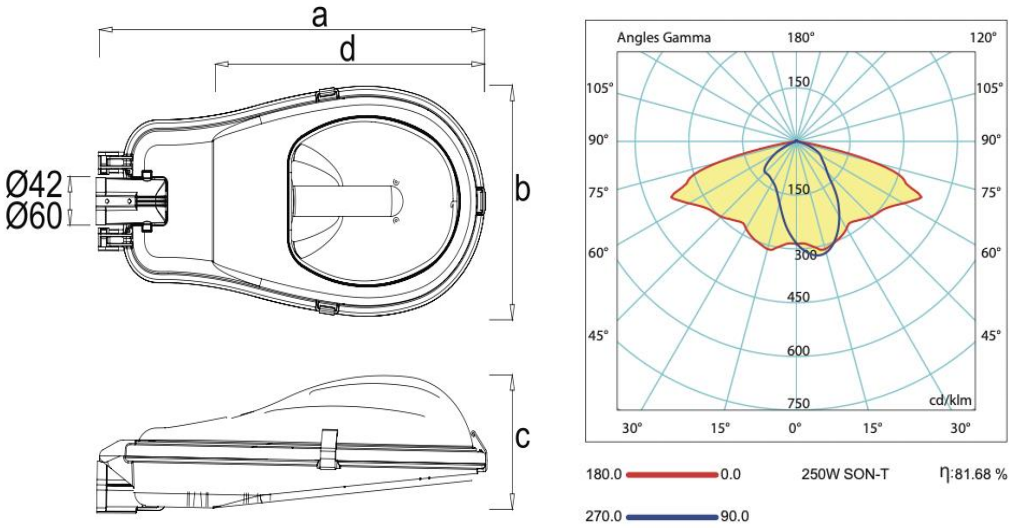
Şekil A.1: LED armatür teknik çizimi ve ışık şiddeti dağılım eğrisi.



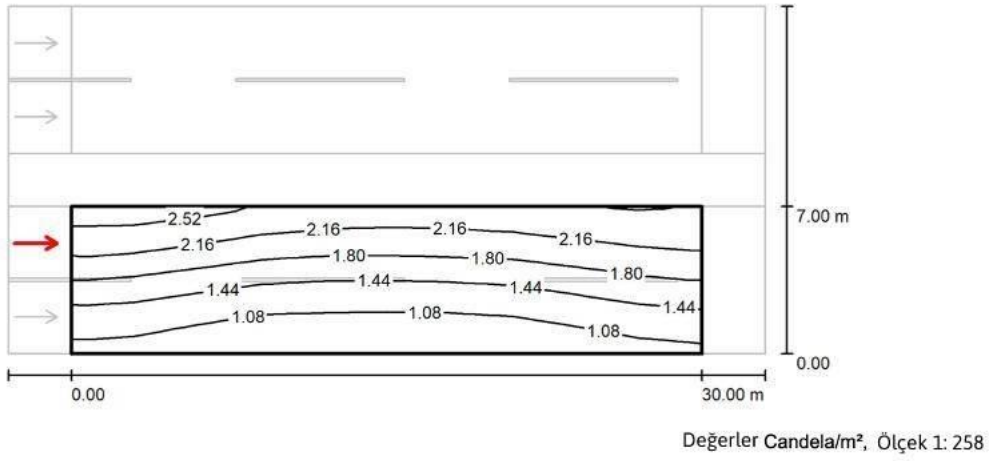
Grid: 10 x 6
Gözlemci Pozisyonu: (-60.000 m, 5.250 m, 1.500 m)
tarmac: R3, q0: 0.070

	L ort [cd/m²]	U0	Ul	TI [%]
Hesaplamalar :	1.76	0.60	0.94	8
ME2'ye göre gerekli değerler :	≥ 1.50	≥ 0.40	≥ 0.70	≤ 10
Başarılı/ Başarılı Değil :	✓	✓	✓	✓

Şekil A.2: LED armatür DIALux uygulama sonuçları.



Şekil A.3: YBSBL teknik çizimi ve ışık şiddeti dağılım eğrisi.



Değerler Candela/m², Ölçek 1: 258

Grid: 10 x 6
Gözlemci Pozisyonu :(-60.000 m, 5.250 m, 1.500 m)
tarmac: R3, q0: 0.070

	L_{ort} [cd/m²]	U0	UI	TI [%]
Hesaplamalar :	1.62	0.49	0.84	7
ME2'ye göre gerekli değerler :	≥ 1.50	≥ 0.40	≥ 0.70	≤ 10
Başarılı/ Başarılı Değil :	✓	✓	✓	✓

Şekil A.4: YBSBL DIALux uygulama sonuçları.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Ezgi BERBEROĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisi Bölümü, Çevre Mühendisi

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2020 yılından itibaren Yapı Kredi Bankasında, Operasyonel ve İtibar Risk Stratejileri Yetkilisi olarak görev almaktadır.