



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SOKAK AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE AKILLI
KONTROL TEKNİĞİ İLE ENERJİ TASARRUFU SAĞLAMA VE
GÜÇ KALİTESİ İYİLEŞTİRME**

Narin BEDİR MİRKAN

**Ağustos-2024
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SOKAK AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE AKILLI
KONTROL TEKNİĞİ İLE ENERJİ TASARRUFU SAĞLAMA VE
GÜÇ KALİTESİ İYİLEŞTİRME**

Narin BEDİR MİRKAN

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR**

**Ağustos-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Narin BEDİR MİRKAN tarafından hazırlanan “Sokak Aydınlatma Sistemlerinde Akıllı Kontrol Tekniğı ile Enerji Tasarrufu Sağlama ve Güç Kalitesi İyileştirme” adlı tez çalışması 08/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL

.....

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Davut ÖZHAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Narin BEDİR MİRKAN

Tarih:13.08.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SOKAK AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE AKILLI KONTROL TEKNİĞİ İLE ENERJİ TASARRUFU SAĞLAMA VE GÜÇ KALİTESİ İYİLEŞTİRME

Narin BEDİR MİRKAN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik
Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Rıdâ Tür

2024, 71 Sayfa

Jüri

Danışmanın Doç. Dr. Mehmet Rıdâ TÜR
Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL
Dr. Öğr. Üyesi Davut ÖZHAN

Günümüzde kentsel altyapı tasarımının temel unsurlarını enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik oluşturmaktadır. Bu bağlamda, sokak aydınlatma sistemleri, enerji tüketiminin optimizasyonunda önemli bir rol almaktadır. Geleneksel sokak aydınlatma sistemleri, genellikle sabit zaman aralıklarında çalışan ve çevresel koşulları dikkate almayan statik yapılar olarak kabul edilirken, akıllı sokak aydınlatma sistemleri bu alanda önemli bir dönüşümü temsil etmektedir.

Geleneksel sokak aydınlatma sistemlerinin sınırlamaları göz önüne alındığında, akıllı sistemlerin enerji tasarrufu, çevresel etkilerin azaltılması ve şehir yönetiminin iyileştirilmesi gibi birçok avantajı bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Işık yayan diyot lambalar gibi esnek aydınlatma teknolojisinin geniş çapta kullanılabilirliği ve kablosuz iletişim kabiliyetinin bulunmasıyla, hızlı tepki veren, güvenilir şekilde çalışan ve enerji tasarrufu sağlayabilen akıllı sokak aydınlatma sistemlerini geleneksel aydınlatma yöntemlerine göre farklarını ortaya koymuştur. Bununla birlikte farklı teknolojiler ve sensörlerin kullanımını değerlendirmektedir. Önerilen akıllı sokak aydınlatma sistem prototipi tasarlanmış olup gerçek kentsel bir ortamda uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı şebeke, enerji verimliliği, geleneksel sistemler, sensörler, sokak lambaları, uzaktan izleme,

ABSTRACT

MS THESIS

SAVING ENERGY AND IMPROVING POWER QUALITY WITH SMART CONTROL TECHNIQUES IN STREET LIGHTING SYSTEMS

Narin BEDİR MİRKAN

**Batman University Graduate Education Institute
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Advisor: Assoc. Dr. Mehmet Rıda TÜR

2024, 71 Pages

Jury

Advisor Assoc. Dr. Mehmet Rıda TÜR

Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL

Dr. Davut ÖZHAN

Today, energy efficiency and sustainability constitute the basic elements of urban infrastructure design. In this context, street lighting systems play an important role in optimizing energy consumption. While traditional street lighting systems are generally considered static structures that operate at fixed time intervals and do not take into account environmental conditions, smart street lighting systems represent a significant transformation in this field.

Considering the limitations of traditional street lighting systems, smart systems have many advantages such as saving energy, reducing environmental impacts and improving city management.

In this thesis study, the differences of smart street lighting systems, which respond quickly, operate reliably and provide energy saving, compared to conventional lighting methods, have been demonstrated with the wide availability of flexible lighting technology such as light-emitting diode lamps and wireless communication capability. Additionally, it evaluates the use of different technologies and sensors. The proposed smart street lighting system prototype was designed and implemented in a real urban environment.

Keywords: Smart grid, energy efficiency, traditional systems, sensors, street lights, remote monitoring,

ÖNSÖZ

Akademik kariyerimin önemli bir dönüm noktasını temsil eden bu tez çalışmasının fikir aşamasından başlayıp tüm aşamalarında akademik bilgilerin yanında, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli görüşleriyle çalışmamı zenginleştiren danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim-öğretim hayatım ve tüm yaşamım boyunca her zaman yanımda olan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyip her kararında arkamda duran beni daha ileriye taşıyacak yönlendirmeleri ve cesaretlendirmesinden dolayı babama teşekkür ediyorum. Son olarak hayatımın her adımında yanımda ve destekçim olacak olan sevgili eşime teşekkür ediyorum.

Narin BEDİR MİRKAN
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. AYDINLATMA SİSTEMLERİ.....	4
2.1. Işık Kaynakları.....	5
2.1.1. Işık	6
2.1.2. Renk	7
2.1.3. Işık şiddeti	8
2.1.4. Işık akısı	8
2.1.5. Aydınlik düzeyi.....	9
2.1.6. Parıltı.....	10
2.1.7. Renk sıcaklığı	10
2.1.8. Renksel geriverim	11
3. AYDINLATMADA KULLANILAN LAMBA TÜRLERİ	13
3.1. Akkor Flamanlı (Enkandesan) Lambalar	13
3.2. Halojen Lambalar	13
3.3. Floresasn Lambalar (Alçak Basınçlı Cıva Buharlı Lamba).....	13
3.4. Yüksek Basınçlı Cıva Buharlı Lambalar	14
3.5. Metal Halojen Lambalar	16
3.6. Alçak Basınçlı Sodyum Buharlı Lambalar	16
3.7. LED Lambalar	17
3.7.1. LED'lerin karakteristik yapıları	19
3.8. Güç Kalitesi ve Güç Faktörü	21
3.9. Aydınlatma Sistemlerinde Harmonik Bozukluklar.....	22
3.9.1. Harmoniklerin analizi	23
3.10. Etkinlik Faktörü	26
4. LED AYDINLATMANIN KLASİK SOKAK AYDINLATMALARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI	27
4.1. LED Teknolojileri ile Geliştirilen Sokak Lambaları	27
4.2. Akkor Flamanlı Lambalar	29
5. AKILLI SOKAK AYDINLATMA SİSTEMLERİ GENEL YAPISI VE KULLANILAN TEKNOLOJİLER	30
5.1. Akıllı Aydınlatmanın Faydaları ve Önemi	33

5.2. Akıllı Aydınlatmada Kullanılan Kavramlar	33
5.3. Akıllı Sokak Aydınlatma Sisteminde Kullanılan Teknolojiler.....	34
5.3.1. Lamba birimi.....	36
5.3.2. Yerel kontrol birimi	37
5.3.3. Kontrol Birimi.....	38
5.3.4. Uzun menzilli iletişim.....	38
5.3.5. Kısa Menzilli iletişim protokolleri.....	43
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	46
6.1 HPNA Lamba Geleneksel Yöntem ile Yapılan Enerji Ölçümleri	48
6.2 HPNA Lamba Akıllı Yöntem ile Yapılan Enerji Ölçümleri.....	49
6.3. LED Lamba Akıllı Yöntem ile Yapılan Enerji Ölçümler.....	51
6.3.1. LED aydınlatma kaynağı LDR sensör ile PWM (karartma) kontrol devresi tasarımı ve simülasyon sonucu ölçümleri.....	53
6.3.2. Işık yoğunluğu ve tüketilen enerji ölçümleri	55
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	58
7.1. HPNA Aydınlatma Kaynaklarının Şebekede Oluşturduğu Harmoniklerin MATLAB'da İncelenmesi	61
7.2. LASAS Fayda-Maliyet Analizi	63
8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	65
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Işık kaynakları.....	5
Şekil 2.2. Elektromanyetik dalga ve görünür ışık tayfı.....	6
Şekil 2.3. CIE' ye göre spektral göz duyarlılığı eğrisinin renksel gösterimi.....	7
Şekil 2.4. İnsan tarafından algılanan renkler ve dalga boyları.....	7
Şekil 2.5. Işık şiddeti.....	8
Şekil 2.6. Işık akısı.....	9
Şekil 2.7. Aydınlanma düzeyi ve ışık akısı.....	9
Şekil 2.8. Renk sıcaklığı skalası.....	11
Şekil 3.1. Floresan lamba diyagramı.....	13
Şekil 3.2. Yüksek basınçlı cıva buharlı lambanın iç yapısı.....	14
Şekil 3.3. Metal halojen lambanın iç yapısı.....	15
Şekil 3.4. Alçak basınçlı sodyum buharlı lambanın yapısı.....	16
Şekil 3.5. LED PN Bağlantı Diyagramı.....	17
Şekil 3.6. LED'in Akım-Gerilim Karakteristiği.....	18
Şekil 3.7. LED'in verim-zaman karakteristiği.....	18
Şekil 3.8. LED'in akım-ışık karakteristiği.....	19
Şekil 3.9. LED'in sıcaklık ışık akısı değişim grafiği.....	19
Şekil 3.10. Harmonik bileşenler.....	21
Şekil 3.11. Sırasıyla periyodik işaret, temel bileşen, 3. harmonik, 5. harmonik ve 7. harmonik sinyalleri.....	23
Şekil 4.1. 2023 yılı faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (%).....	26
Şekil 5.1. Enerji tasarruf potansiyeli.....	34
Şekil 5.2. Hibrit haberleşme sistemi.....	35
Şekil 5.3. Kablosuz haberleşme teknolojilerine ait genel bir görüntü.....	37
Şekil 5.4. LoRaWAN teknolojisi ağ tasarımı.....	40
Şekil 6.1. LASAS sistem mimarisi.....	46
Şekil 6.2. HPNA lamba, Kasım 2022 aylık tüketimi.....	47
Şekil 6.3. HPNA lamba, 27-30 Kasım 2022 aylık tüketim.....	47
Şekil 6.4. HPNA lamba saha test görüntüsü.....	48
Şekil 6.5. HPNA lamba, Kasım 2023 aylık tüketimi.....	49
Şekil 6.6. HPNA Lamba, 02-04 Kasım aylık 2023 tüketimi.....	49
Şekil 6.7. LED lamba saha test görüntüsü.....	50
Şekil 6.8. LED lamba, Kasım 2023 aylık tüketimi.....	51
Şekil 6.9. LED lamba, 01-03 Kasım 2023 aylık tüketimi.....	51
Şekil 6.10. Işığa duyarlı direnç (LDR).....	51
Şekil 6.11. LASAS prototipi test durumlarına ait görüntüler.....	52
Şekil 6.12. Işık yoğunluk ölçümü.....	53
Şekil 6.13. Ortam aydınlık seviyesi, direnç değişim grafiği.....	54
Şekil 6.14. Ortam aydınlık seviyesi, LED enerji tüketimi değişim grafiği.....	54
Şekil 7.1. HPNA aydınlatma kaynağı geleneksel yöntem, HPNA aydınlatma kaynağı akıllı yöntem ve LED aydınlatma kaynağı akıllı yöntem için 1 günlük enerji tüketim ölçümleri.....	56
Şekil 7.2. HPNA aydınlatma kaynağı geleneksel yöntem, HPNA aydınlatma kaynağı akıllı yöntem ve LED aydınlatma kaynağı LDR sensör ile PWM karartma için 1 günlük enerji ölçümleri.....	57
Şekil 7.3. HPNA aydınlatma kaynağı akım harmonikleri.....	60

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1. Renk sıcaklığı ile ışık rengi arasındaki bağıntı.....	10
Çizelge 2.2. Renksel geriverim çizelgesi.....	11
Çizelge 4.1. Akkor Flamanlı, Flüoresan ve LED lambaların özellikleri.....	28
Çizelge 5.1. Hareket sensörleri karşılaştırması.....	33
Çizelge 7.1. Durum 1 test adımı HPNA aydınlatma kaynağı geleneksel aydınlatma yöntemi ile elde edilen enerji tüketim değerleri.....	57
Çizelge 7.2. Durum 2 test adımı HPNA aydınlatma kaynağı akıllı kontrol yöntemi ile elde edilen enerji tüketim değerleri.....	57
Çizelge 7.3. Durum 3 test adımı LED aydınlatma kaynağı akıllı kontrol yöntemi ile elde edilen enerji tüketim değerleri.....	58
Çizelge 7.4. Durum 4 test adımı LED aydınlatma kaynağı LDR sensör ile PWM karatma yöntemi kullanılarak elde edilen 1 günlük enerji tüketim grafiği.....	59
Çizelge 7.5. Enerji ölçümünde kullanılan yöntemlerin 1 günlük enerji tüketimlerinin karşılaştırılmalı maliyet analizi.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

<i>Ga</i>	:Galyum Nitrit
<i>GaP:</i>	:Galyum Fosfat
<i>GaAs</i>	:Galyum Arsenik

Kısaltmalar

<i>AES</i>	:Advanced Encryption Standard
<i>BLE:</i>	:Bluetooth Low Energy
<i>Cat-M</i>	:Kategori M
<i>GSM</i>	:Global System for Mobile Communications
<i>GPRS</i>	:General Packet Radio Service
<i>HPNA</i>	:Yüksek Basıncılı Sodyum Lamba
<i>IoT</i>	:Internet of Things
<i>ISM</i>	:Industry, Scientific and Medical Radio Band
<i>kWh</i>	:KiloWatt Saat
<i>Kpbs</i>	:Kilobits per second
<i>KM</i>	:Kontrol merkezi
<i>LASAS</i>	:LED ışık kaynaklı akıllı sokak aydınlatma sistemi
<i>LED</i>	:Light Emitting Diode
<i>LB</i>	:Lamba Birimi
<i>YKM</i>	:Yerel Kontrol Birimi
<i>LPWAN</i>	:Low Powered Wide Area Network
<i>LTE</i>	:Long-Term Evolution
<i>LoRaWAN</i>	:Long Range Wide Area Network
<i>LDR</i>	:Light Dependent Resistor
<i>NB-IoT</i>	:Narrowband-IoT
<i>NTP</i>	:Network Time Protocol
<i>PWM</i>	:Pulse-width modulation
<i>Wi-fi</i>	:Wireless Fidelity'
<i>Wimax</i>	:Worldwide Interoperability for Microwave Access
<i>3GPP</i>	:The 3rd Generation Partnership Project
<i>YKB</i>	:Yerel kontrol birimi
<i>THD</i>	:Toplam Harmonik Bozulma

1. GİRİŞ

Günümüzde sokak aydınlatma sistemleri, şehirlerin vazgeçilmez altyapı parçası olarak önemli bir yere sahiptir. Bir şehrin en büyük giderleri arasında aydınlatma sistemlerinin bakımı, kontrolü ve elektriğin üretim fiyatı yer almaktadır. Sokak aydınlatma sistemleri, toplumun güvenliğini, gece konforlu yaşamın sağlanmasını, trafik güvenliğini ve şehrin görünümünü etkilemektedir. Nüfusun artışıyla birlikte enerjinin kaynak verimliliği açısından akıllı ve sürdürülebilir stratejilerin hayata geçirilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Sokak aydınlatmaları, küresel enerji kullanımının %19'unu oluşturmakla birlikte tehlikeli sera gazlarının yol açtığı çevre kirliliğinin yaklaşık %6'sına neden olmaktadır. Bu nedenle, enerjinin kaynak verimliliği açısından akıllı ve sürdürülebilir stratejilere yönelik çalışmaların gerçekleşmesinde önemli bir faktör olarak ortaya çıkmıştır (Maheswari vd., 2009; Shahzad vd., 2016).

Geleneksel aydınlatma sistemleri, aydınlatma kontrolünü standart gereksinimlere göre sağlayamadığımız enerji verimliliği olmayan sistemler olarak bilinmektedir. Sokak aydınlatma sistemlerinin kontrolü, ışık seviyesine göre sensörler aracılığıyla otomatik olarak yapılmaya başlandı. Işık kaynakları ve ilgili kontrol düzenekleri gelişen teknoloji ile birlikte sürekli olarak değişmektedir. Geleneksel aydınlatma sistemlerinin aksine modern sokak aydınlatma sistemleri, güç tüketimini azaltmak, bakım maliyetlerini azaltmak, her cihazın durum bilgisini (lambda durumu, akım ve voltaj ölçümleri vb.) izlemek ve kullanıcılara yeni kontrol yetenekleri sağlamak için akıllı kontrol ağlarına ihtiyaç duyar (Denardin vd., 2011).

Sinyalizasyon sistemi olarak yaygın kullanılmaya başlayan Light Emitting Diode (LED); gelişen son teknoloji ile birlikte enerji verimliliğini ve renk kalitesini kademeli olarak değiştiriyor olmasında dolayı aydınlatma sistemlerinde kullanılmasına olanak sağlıyor. Sokak aydınlatmasında kullanılan lambda çeşitlerine bakıldığında, LED'ler geleneksel aydınlatma sistemlerinin yerine alternatif olmaktadır. LED'lerin sokak aydınlatma sistemlerinde kullanımı son birkaç yıldır rapor edilmeye başlanmış olup, görsel koşullarda daha uzun ömür ve daha yüksek ışık verimliliği nedeniyle geleneksel aydınlatma sistemlerinin yerini almaktadır (Denardin vd., 2011; Mahoor vd., 2017).

Parklar, yollar, otoparklar ve sokak aydınlatması gibi dış mekan aydınlatma uygulamalarında genellikle yüksek yoğunluklu deşarjlı lambalar kullanılır. Yüksek basınçlı sodyum lambalar (HPNA), yüksek basınçlı deşarjlı lambalar arasında en verimli lambda olup, ömrü akkor ve floresan lambalara göre daha uzundur. Bu lambanın

verimliliği 150 lm/W'a, ömrü ise 32.000 saate kadar ulaşabilmektedir. Başlıca dezavantajı düşük renksel geriverim indeksi'dir. Böylece aydınlatılan nesnelerin renkleri gerçek olanlardan farklı görünmektedir (Denardin vd., 2011; Mahoor vd., 2017).

LED; yüksek verimlilik 120 lm/W, yüksek kullanım ömrü 50.000 saat ve HPNA lambalardan daha yüksek renksel geriverim indeksi gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca boyutlarının küçük olması ve kullanım ömrünün uzun olması, aydınlatma üretimi için filaman veya gaz kullanmamasından kaynaklı darbe ve titreşimlere karşı daha dayanıklı olması tercih edilmelerini sağlamaktadır (Denerdin vd., 2011; Mahoor vd., 2017; Sittoni vd., 2015; Wu vd., 2010).

Aydınlatma sistemlerinin kontrolü ve uzaktan erişilebilirliği için elektronik olarak kontrol edilebilen LED'ler kullanılmaktadır. Kontrol sistemleri ile birlikte enerji tasarruflu akıllı sokak aydınlatma sistemleri elde edilebilir. Sokak aydınlatma sistemlerinde, enerji tüketimi üzerinde aktif bir kontrolün olmaması ve sensörler aracılığıyla ortam bilgilerinin alınmaması aydınlatma sistemlerinin enerji tüketim optimizasyonunu olumsuz yönde etkilemektedir. Wi-fi (Wireless Fidelity), GSM/GPRS, kablosuz sensör ağları (WSN) gibi iletişim kanalları akıllı sokak aydınlatma sistemlerinin temel altyapı taşıdır. Kablosuz kontrol sistemlerinin düşük maliyeti, kolay kurulumu, esnek yapısı ve geniş ağ kapasitesi gibi avantajları bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, akıllı şehirler için Nesneleri İnterneti (IoT) uygulamalarıyla entegre LED ışık kaynaklı akıllı sokak aydınlatma sistemi (LASAS) tasarlanmasını ve geliştirilmesini önermektedir. Geleneksel aydınlatma sistemlerinde kullanılan yüksek basınçlı sodyum buharlı lambaların yerini daha düşük güç tüketimi sağlayan LED ışık kaynakları alacaktır. LASAS'ın çalışma alanlarındaki parlaklığı standart gereksinimlere göre kontrol etmek için LED ışık kaynaklarının ışık yoğunluğuna dayalı bir kontrol cihazı ve LDR (Light Dependent Resistor) sensörü ile birlikte kullanılmasıyla tasarlanmıştır. LASAS'da verilerin aktarımı için küresel mobil iletişim sistemi (GSM) ile otonom olarak kontrol sağlamakla birlikte enerji açısından verimli ve düşük maliyetli bir çözüm geliştirmeyi amaçlamaktadır. GSM iletişim tabanlı LASAS'da temel amaç, ihtiyaç olmadığı durumda ışıkları kapatmasını ve aydınlık saatlere ilişkin günlük tüketim yapılan güç miktarı, röle durum bilgisi vb. raporlar hazırlamasını sağlamaktadır. LASAS'ın otonom kontrolü sayesinde enerji tasarrufunun sağlanması, enerji kesintilerinin bildirimi, arızaların anında raporlanması ve çalışma saatlerinin izlenmesi ile bakım maliyetlerinin azaltılması mümkündür.

Çalışmanın ikinci kısmında aydınlatma sistemlerine ait genel bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü kısmında aydınlatmada kullanılan lamba türleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü kısımda LED aydınlatmalarla geleneksel sokak aydınlatmaları karşılaştırılmıştır. Beşinci kısımda akıllı sokak aydınlatma sistemleri genel yapısından bahsedilmiş olup kullanılan teknolojilere yer verilmiştir. Altıncı kısımda kullanılan materyal ve yöntemle değinilmiştir ve yedinci kısımda araştırma sonuçları tartışılmıştır. Çalışmanın sekizinci kısmında sonuç ve öneriler paylaşılmıştır.

2. AYDINLATMA SİSTEMLERİ

Aydınlatma, çeşitli ışık kaynakları kullanılarak sağlanmaktadır. Aydınlatma sistemleri, ışık kaynağından başlayarak elektriksel ekipmanlara, optik tasarımdan modellemeye, kontrol çözümlerinden bakım ve yenileme süreçlerine kadar pek çok farklı konu başlığını kapsayan geniş bir inceleme alanını içermektedir. Bu bağlamda, aydınlatma sistemleri; ışık kaynağının seçimi, elektriksel bileşenlerin entegrasyonu, optik tasarımın optimize edilmesi, sistem modellemeleri, kontrol stratejilerinin belirlenmesi ve bakım ile yenileme çalışmalarının planlanması gibi çeşitli disiplinleri içeren kapsamlı bir alan olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemler, hem iç hem de dış mekanlarda aydınlatma sağlamak, güvenliği artırmak ve görsel amaçlar için kullanılmaktadır. Aydınlatma sistemleri farklı tiplerde lambalar, armatürler, sensörler ve kontrol cihazları gibi bileşenler içermektedir. Aynı zamanda önemli miktarda enerji tüketir ve bu da enerji verimliliğinin artırılmasını gerektirmektedir (Campisi vd., 2018; Chiradeja., 2023).

Geleneksel aydınlatma sistemlerinde, akkor flamanlı lamba, halojen lamba, floresan lamba, yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba, metal halojen lamba tipleri kullanılmaktadır. Aydınlatma sistemlerinde günümüzde LED teknolojisi kullanılarak enerji verimliliğini iyileştirmek ve tasarruf sağlamak mümkündür. LED armatürler düşük enerji tüketimi, daha uzun ömür, düşük yatırım maliyeti, daha az bakım maliyeti, daha az çevresel etki ve ışık seviyelerini kontrol etme olanağı sağlamaktadırlar (Chiradeja vd., 2023; Shahzad vd., 2016).

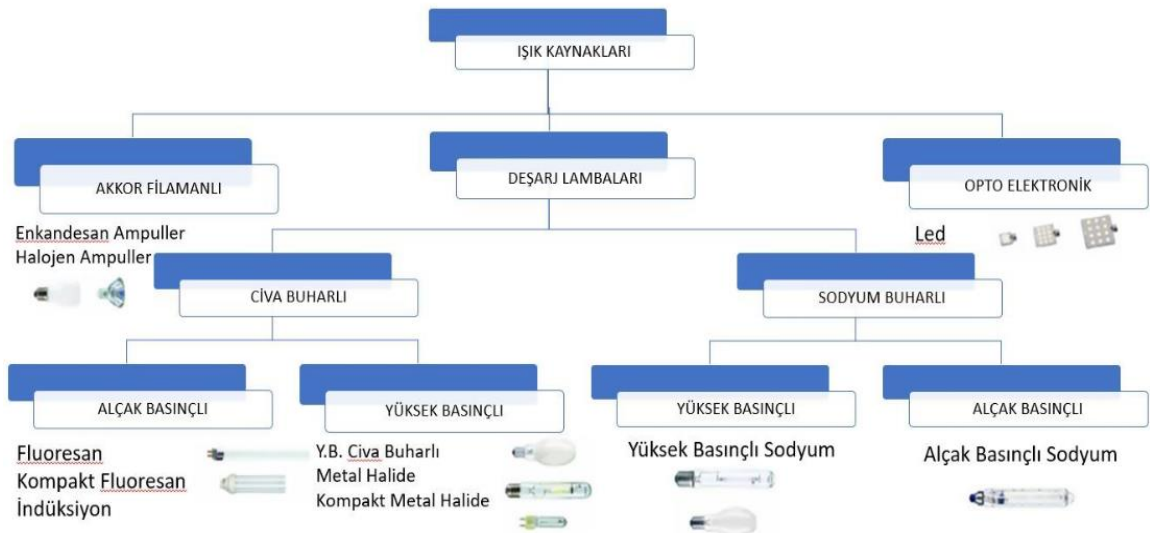
Aydınlatma sistemleri, akıllı teknolojilerle birleştirilerek daha verimli hale getirilebilir. Aydınlatma sistemlerinin kontrolü, uygun alana, etkinliğe ve zamana doğru miktarda ışığın sağlanması gerekmektedir. LED ışık kaynakları, sensörler aracılığıyla ortam aydınlık seviyesine göre otomatik ayarlayabilir, zamanlama programlarına göre çalışabilir ve uzaktan kumanda edilebilmektedir. Bu sayede enerji tüketimini azaltan ve konforu artıran aydınlatma sistemleri, ışığı ortam parlaklığına göre optimize edilmesiyle sağlanması mümkündür. Bu sistemler konutlardan ticari binalara, sokak aydınlatmasından endüstriyel tesislere kadar çeşitli ortamlarda kullanılır ve enerji tasarrufu, çevreye salınan zararlı gazların etkisini azaltma ve kullanıcı konforunu artırma gibi faydalar sağlarlar (Mahoor vd., 2017).

Kentsel alanda güvenlik ve konforun yanı sıra aydınlatma standardı gereklilikleri de dikkate alınırken, sensör bazlı çalışma, dimleme, arıza tespiti gibi durumlar dikkate alındığında aydınlatma sistemlerinin tasarımı ve kontrolü artmaktadır. Yetersiz

aydınlatılmış yollar veya sokaklar araç kazalarına neden olmaktadır. Bu nedenle arızalı sokak lambalarının hızlı bir şekilde tespit edilmesi ve raporlanması önemlidir. Bu yeni sokak aydınlatma sistemleriyle kurulan otomatik kesinti algılama ve uzaktan izleme sayesinde işletme ve bakım maliyetleri önemli ölçüde azalırken geceleri sokakların emniyeti ve güvenliği de önemli ölçüde iyileşecektir. (Göçmen vd., 2015; Özenç, 2007).

2.1. Işık Kaynakları

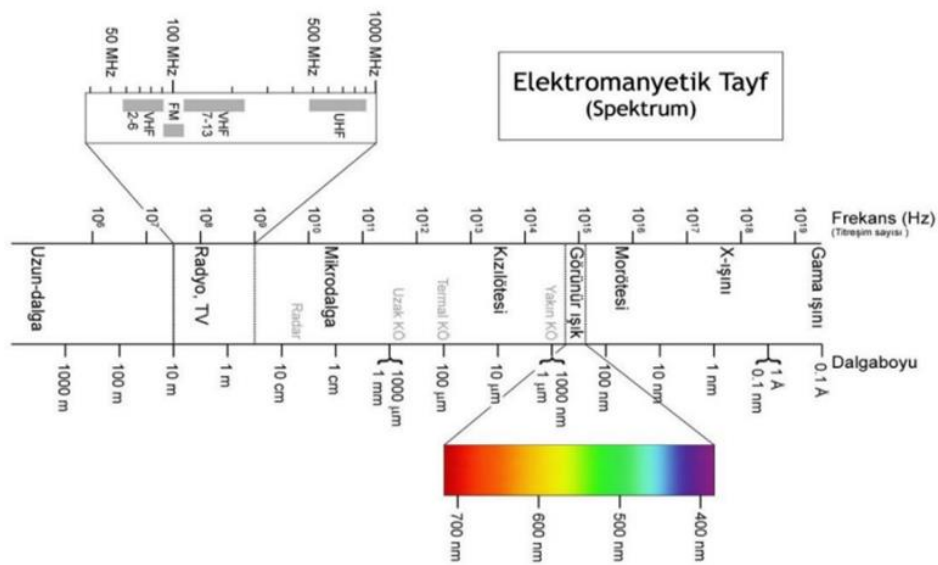
Işık kaynağı, görünür ışınım üretmek amacıyla tasarlanmış bir cihaz olarak tanımlanmaktadır. Uygun bir tasarım oluşturabilmek için öncelikle ortamın ihtiyaçları ve geometrisi dikkatle analiz edilmelidir. Bu analiz sürecinde ışık rengi, renksel geri verim, lamba verimliliği, lamba ömrü, cihaz boyutları, bakım ve kurulum gibi birçok teknik ve ekonomik parametre göz önünde bulundurulmalıdır. Doğru ışık kaynağını seçebilmek için bu parametrelerin titizlikle değerlendirilmesi gerekmektedir. Aydınlatma sistemlerinin temelini oluşturan bu ekipmanların değerlendirilmesi ve kıyaslanabilmesi için bahsi geçen parametrelerin ve bunların kalite ve verimlilik üzerindeki etkilerinin iyi anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Temel aydınlatma tanımları sırasıyla verilmiştir. Şekil 2.1’de ışık kaynakları görülmektedir (Özenç, 2007)



Şekil 2.1. Işık kaynakları.

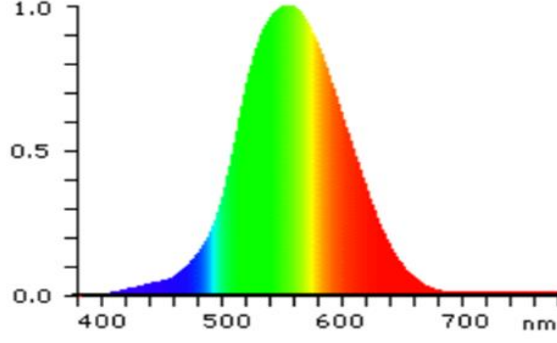
2.1.1. Işık

Işık, ışık kaynağından yayılan bir ışının nesnelere çarpması veya doğrudan yansımaları sonucunda gözün görmesini sağlayan bir enerji formudur. Işık ayrıca doğrusal dalgalar halinde yayılan elektromanyetik dalgalar olarak da tanımlanmaktadır. Ortamdaki cisimleri görmemizi ve renkleri ayırt etmemizi sağlayan bu enerji türü, görünür ışık olarak adlandırılmaktadır. Görünür ışık, dalga boyu 360 nm ile 830 nm arasında değişen elektromanyetik ışınım olup, saniyede 300 bin kilometre hızla hareket etmektedir. Elektromanyetik dalga ve görünür ışık tayfı Şekil 2.2'de gösterilmiştir (Demir, 2020).



Şekil 2.2. Elektromanyetik dalga ve görünür ışık tayfı (Demir, 2020).

Gözün duyarlılığı, ışığın dalga boyuna göre değişiklik göstermektedir. Genel olarak, gözün en yüksek spektral duyarlılığına $\lambda=555$ nm dalga boyunda ulaşmaktadır. Bu dalga boyunda yayılan gücün 1 watt'ı, "ışık-watt" olarak tanımlanmaktadır. CIE'ye göre spektral göz duyarlılığı eğrisinin renkli gösterimi Şekil 2.3'te sunulmuştur (Demir, 2020).

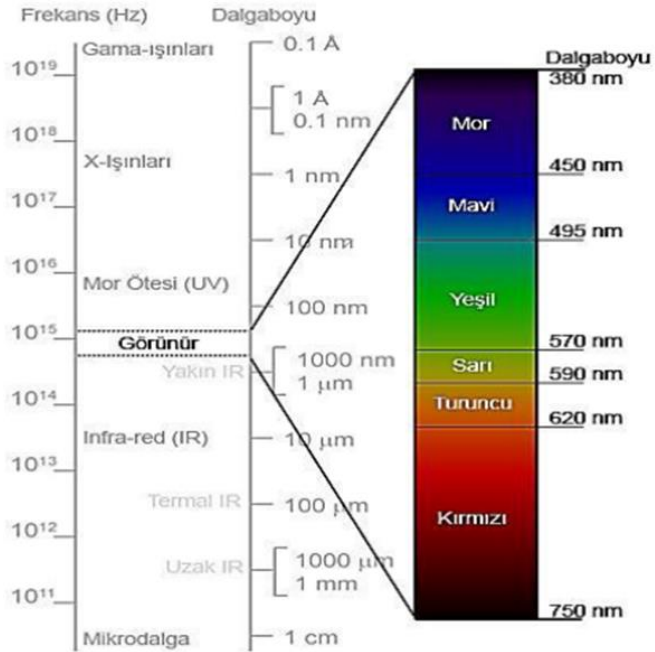


Şekil 2.3. CIE' ye göre spektral göz duyarlılığı eğrisinin renksel gösterimi (Demir, 2020).

Şekil 2.3. 'den anlaşılacağı üzere, genel olarak gözün en büyük spektral duyarlılığına sarı-yeşil renkte ulaştığı görülmektedir.

2.1.2. Renk

Renk, farklı dalga boylarında bulunan ışığın insanlar tarafından algılanma şekli olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.4.' de renkler ve görünür ışık dalga boyları görülmektedir (Kaya, 2018).



Şekil 2.4. İnsan tarafından algılanan renkler ve dalga boyları (Kaya, 2018).

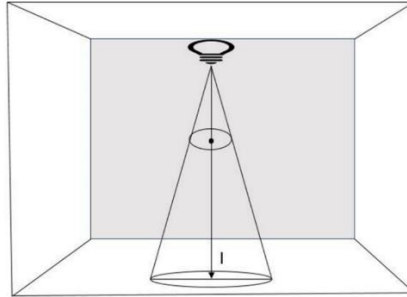
2.1.3. Işık şiddeti

Işık şiddeti, bir ışık kaynağının belirli bir doğrultuda yaydığı ışık miktarını ifade etmektedir. Bu kavram, özellikle noktasal ışık kaynakları için tanımlanmış olup, yön bağımlı bir büyüklük olarak değerlendirilmektedir. Işık şiddeti genellikle I sembolü ile gösterilir ve Kandela (cd) birimi ile ölçülmektedir. Kandela değeri, ışık kaynağının parlaklık derecesini belirlemektedir. Şekil 2.5'te, ışık şiddetinin grafiği sunulmaktadır (Göçmen, 2014; Özenç, 2007; Demir, 2020).

$$I(cd) = \Phi(lm)/W(sr) \quad (2.1)$$

1 steradyanlık uzay açıdan çıkan ışık akısı 1 lümen ise ışık şiddeti 1 candela (cd) olarak ifade edilmektedir (Kaya, 2018).

$$1cd = 1lm/1sr \quad (2.2)$$



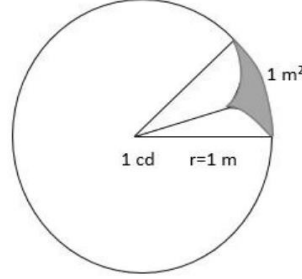
Şekil 2.5. Işık şiddeti.

2.1.4. Işık akısı

Normal gözün aydınlık görmesine ait spektral duyarlık eğrisine göre saniyede yayılan ışık olarak değerlendirilebilen enerji akışını ifade etmektedir. Işık akısı Φ harfi ile gösterilmektedir. Birimi lümen olarak belirtilmektedir. 1 lümen = 1 lm olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.6.'da ışık akısı gösterilmektedir.

$$\Phi = K_o \cdot F \cdot V_Y \quad (2.3)$$

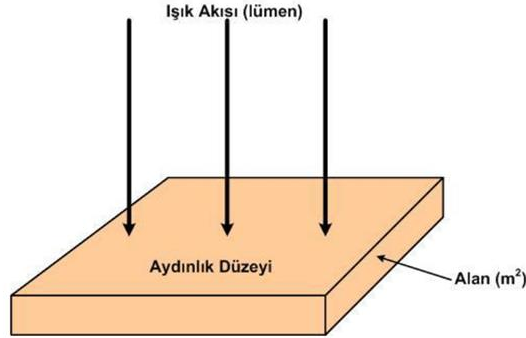
Burada Ko enerji akısının ışık ölçmektedir. F enerji akısı, VY gözün görüntüsel hassasiyeti ifade etmektedir (Göçmen, 2014; Demir, 2020).



Şekil 2.6. Işık akısı.

2.1.5. Aydınlık düzeyi

Bir ışık kaynağı tarafından birim yüzeye düşen ışık akısının dik bileşeni olarak ifade edilmektedir. Aydınlık düzeyi E harfi ile ifade gösterilmektedir. Birimi lüks(lx) olarak ifade edilmektedir. 1lümen değerindeki ışık akısının 1 m^2 yüzeye eşit olarak düşmesi durumunda 1 lüks aydınlık şiddeti değeri elde edilmektedir. Aydınlık düzeyi ve ışık akısı Şekil2.7.' de verilmiştir (Göçmen, 2014; Demir; Kaya, 2018).



Şekil 2.7. Aydınlık düzeyi ve ışık akısı (Göçmen, 2014).

Işığın geliş yönünü 90 derece açıyla kesen düzlemdeki herhangi bir noktanın aydınlanma düzeyi, o noktaya doğru olan ışık şiddetinin, bu nokta ile ışık kaynağı arasındaki mesafenin karesine bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Eğer noktasal ışık kaynağı ile aydınlatılacak yüzey arasındaki mesafe d harfiyle temsil edilirse, ışığın geliş yönüne dik olan düzlemdeki A noktasının aydınlık düzeyi şu şekilde ifade edilir; $E = I/d^2$ bu formül, aydınlatma hesaplamalarında temel bir prensip olarak kullanılır ve ışık

kaynağının parlaklığı ile mesafenin karekökü arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Demir, 2020).

2.1.6. Parıltı

Işık yayan bir kaynaktan veya yansıtıcı bir yüzeyden göze ulaşan ve görsel rahatsızlığa neden olan ışık yoğunluğu olarak ifade edilmektedir. Bir yüzeyin her noktasındaki parıltının eşit olduğu durumu ele alırsak, α doğrultusundaki parıltı, o doğrultudan görülen birim yüzeyden yayılan ışık yoğunluğu olarak bilinmektedir. Parıltı, L sembolü ile ifade edilir ve birimi cd/m^2 (kandela/metrekare) olarak belirlenmiştir (Göçmen, 2014; Kaya, 2018).

2.1.7. Renk sıcaklığı

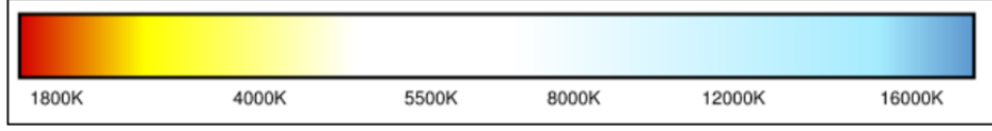
Siyah bir cismin belirli bir renkte ışık yayması için ısıtılması gereken sıcaklığı ifade eder ve Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) birimi ile ölçülmektedir. Bu bağlamda, kırmızı ve sarı renkler düşük renk sıcaklıklarını, mavi tonlar ise yüksek renk sıcaklıklarını temsil etmektedir. Gün ışığının renk sıcaklığı 5000-6500 $^{\circ}\text{K}$ aralığındadır. Çizelge 2.1'de renk sıcaklığı ile ışık rengi arasındaki ilişki gösterilmiştir (Göçmen, 2014; Demir vd., 2020; Kaya, 2018).

Aşağıda renk sıcaklığı değerleri için bazı örnekler verilmiştir;

- 1500-2000 $^{\circ}\text{K}$: Mum ışığı
- 2500-3500 $^{\circ}\text{K}$: Enkandesan lamba
- 2500-3500 $^{\circ}\text{K}$: Gün batımı ve güneşin doğuşu
- 4000-4500 $^{\circ}\text{K}$: Ay ışığı
- 5000-6000 $^{\circ}\text{K}$: Xenon lamba
- 5500-6000 $^{\circ}\text{K}$: Elektronik foto-flaş
- 5000-6000 $^{\circ}\text{K}$: Öğle saatlerinde gün ışığı
- 6000-7500 $^{\circ}\text{K}$: Bulutlu gökyüzü
- 9500-12000 $^{\circ}\text{K}$: Mavi gökyüzü

Çizelge 2.1. Renk sıcaklığı ile ışık rengi arasındaki bağıntı (Göçmen,2014).

Renk Sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)	Işık Rengi
<3300	Sıcak (Kırmızımsı beyaz)
3300-5300	Orta sıcak (beyaz)
>5300	Soğuk (Mavimsi beyaz)



Şekil 2.8. Renk sıcaklığı skalası (Göçmen,2014).

2.1.8. Renksel geriverim

Renksel geri verim, ışığın renkli bir nesne üzerinde yaptığı renksel etki olarak tanımlanmaktadır. Bir ışık kaynağının, bir nesneyi doğal renginde gösterebilme kabiliyeti olarak da nitelendirilmektedir. Renksel geri verimin özellikleri, ışık kaynağının gün ışığı gibi renkleri doğru bir şekilde algılayabilmesi için son derece önem arz etmektedir. Bu özellikler genellikle "genel renksel geri verim endeksi" olarak adlandırılan Ra ile ifade edilmektedir. Ra değeri 0 ile 100 arasında değişmektedir. Renksel geri verim endeksi çizelgesi sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Renksel geriverim çizelgesi (Demir vd., 2020).

Renksel Geri Verim Sınıfı	Renksel Geri Verim Endeksi	Renksel Geri Verim Özelliği	Renk Görünümü	Uygulama Örnekleri	
				Tercih Edilen	Kabul Edilen
1A	Ra>90	Çok iyi	Sıcak Orta Soğuk Soğuk	Renk Karşılaştırması Klinik incelemeler Resim galerileri	
1B	90>Ra>80	Çok iyi	Orta Soğuk Soğuk	Ev, otel, dükkan, baskı, boya, tekstil	Ofisler, Okullar
2	80>Ra>60	iyi	Sıcak Orta Sıcak Soğuk	Endüstri işleri	Endüstri işleri
3	60>Ra>40	orta		Kaba İşler	
4	40>Ra>20	Kötü			Renk ayırımının önemli olmadığı endüstri işleri

Aydınlatma sistemlerinde kullanılacak lambalar, hedeflenen alanın özelliklerine göre seçilmektedir. Bu alanların aydınlatılmasında kullanılan lambaların renksel geri verim değeri kritik öneme sahip olmaktadır. Özellikle renklerin hassas bir şekilde algılandığı ortamlarda, yüksek renksel geri verimine sahip lambalar tercih edilmelidir. Aksi takdirde, aydınlatılan nesneler istenmeyen renk tonlarına bürünebilmektedir (Demir vd., 2020).

3. AYDINLATMADA KULLANILAN LAMBA T RLER 

3.1. Akkor Flamanlı (Enkandesan) Lambalar

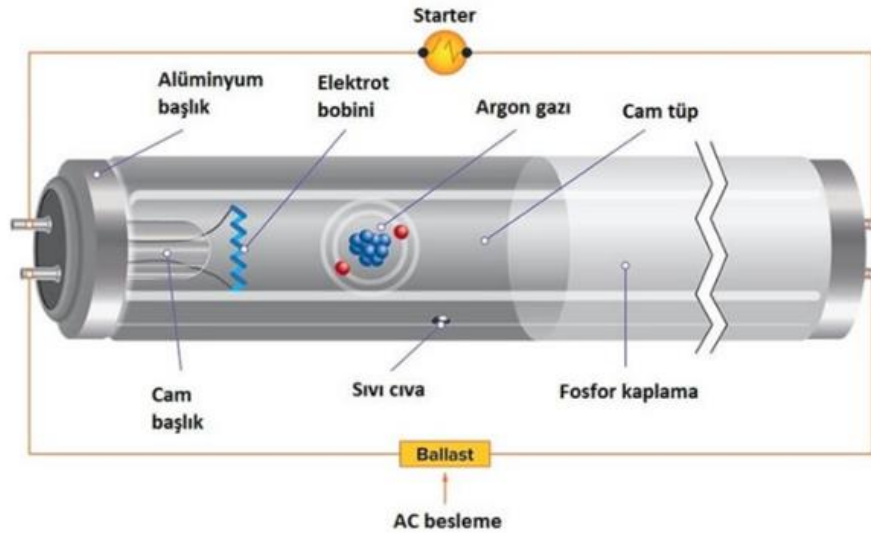
Akkor ampuller, elektrik akımının flaman lamba teline uygulanmasıyla telin ısınarak ışık yaydığı kaynaklardır. Bu lambalar, içindeki havanın boşaltıldığı cam tüp içinde bulunmaktadır. Boşaltılmış bu alanda, tungsten telinin erimesini önlemek için argon ve azot gazlarının karışımı bulunur, bu da yüksek basınç oluşturmaktadır. Akkor ampullerin ömürleri kısa olup, etkinlik faktörleri yaklaşık olarak 15 lümen/watt civarındadır. Bu tip lambalar, tükettikleri enerjinin sadece %10'unu ışık enerjisine dönüştürebilmektedirler. Diğ r lamba türlerine göre ortam sıcaklığından daha az etkilenmektedir (Göçmen, 2014).

3.2. Halojen Lambalar

Halojen lambalar, tungsten flamanlarının cam ile kaplanmış versiyonu olarak ifade edilmektedir. Bu lambalar içinde özel bir halojen gazı bulundurmaktadır. Tungsten telinden ayrılan parçalar, halojen gazının etkisiyle tekrar tele yapışarak yüksek miktarda ısı üretmektedir. Bu süreç, lambanın daha uzun bir çalışma ömrüne sahip olmasını sağlamaktadır. Halojen gazının varlığı, lambanın daha yüksek sıcaklıklara erişebilmesini sağlar ve daha parlak beyaz bir ışık yaymasını mümkün kılmaktadır ( oban, 2010).

3.3. Floresan Lambalar (Alçak Basınçlı Cıva Buharlı Lamba)

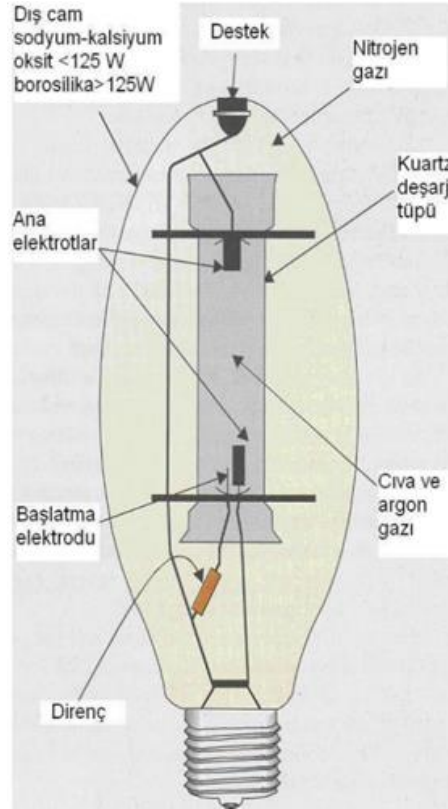
Alçak basınçlı cıva buharlı lambalar, içerdikleri flamanların elektrik akımıyla ısıtılması sonucunda cıva gazının iyonlaşmasını sağlar ve bu süreçte iki flaman elektrodu arasında bir deşarj oluşmaktadır. İyonlaştırılan cıva atomları, normal haline dönerken ultraviyole ışınlar yayılarak ortaya çıkmaktadır. Bu ultraviyole ışınlar, lambanın i  yüzeyinde bulunan fosfor tabakasına geçerek görünür ışık yayılmasını sağlamaktadır. Bu  zelliklerinin yanı sıra, bu lambaların etkinlik faktörü yaklaşık olarak 80 lümen/watt düzeyindedir. Akkor flamanlı lambalara ve halojen lambalara kıyasla daha verimli ve uzun bir çalışma ömrüne sahip olmaktadırlar. şekil 3.1'de floresan lambaya ait bir diyagram bulunmaktadır ( etintaş, vd., 2022).



Şekil 3.1. Floresan lamba diyagramı (Electrical4U, 2020).

3.4. Yüksek Basınçlı Cıva Buharlı Lambalar

Yüksek basınçlı cıva buharlı lambalar, içerisinde gaz deşarjının gerçekleştiği bir deşarj tüpüne sahiptir. Bu tüp, cıva ve argon gazlarını içermektedir. Cıva buharının uyarılmasıyla ışık üretilmektedir. Lambanın içinde 100.000 paskal basınç oluşabilmektedir. Bu tür lambalar, hem iç mekan hem de dış mekan aydınlatmasında kullanılabilirler. Çalışma güç aralığı genellikle 50 ila 1000 watt civarındadır, bu da büyük alanların aydınlatılmasına olanak tanımaktadır. Etkinlik faktörleri yaklaşık olarak 50 lümen/watt civarındadır ve beyaz ışık üretebilme kapasitesine sahip olmaktadır. Çalışma ömürleri genellikle 15.000 ila 25.000 saat arasında değişmektedir. Bu lambaların kullanımında balast gibi yardımcı elemanlar gerekli olmaktadır. Ancak TEDAŞ şartnamelerine göre, düşük etkinlik faktörleri nedeniyle yüksek basınçlı cıva buharlı lambaların kullanımı yasaktır. Bu tür lambaların ışık verme süreleri genellikle 4-5 dakika sonra tam olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca dimmerleme sistemleriyle uyumlu sağlayamamaktadırlar (Electrical4U, 2020; Demir, 2020; Kaya, 2018).



Şekil 3.2. Yüksek basınçlı cıva buharlı lambanın iç yapısı (Demir, 2020).

Avantajları:

- Çalışma ömürleri 15.000-25.000 saat aralığındadır.
- Her ortamda kullanılabilir.
- Ateşleyiciye ihtiyaç duymaz.
- Isı değişimlerine ve gerilim yükselmelerine karşı dirençlidir.
- Verdiği ışık miktarına rağmen lamba boyutu küçüktür.
- Kullanım maliyeti düşüktür.
- Titreşim ve darbelere karşı dayanıklıdır.

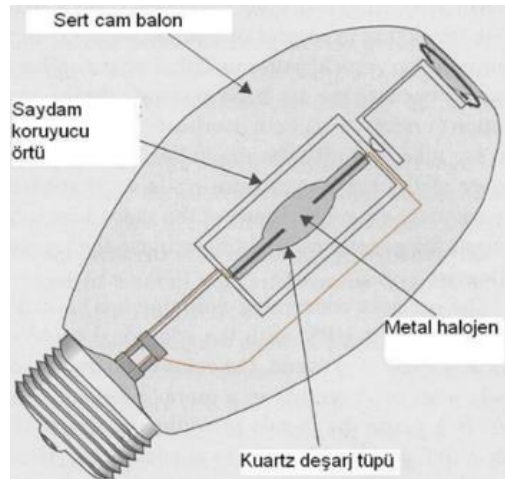
Dezavantajları:

- Etkinlik faktörü düşüktür.
- Balast gibi yardımcı elemanlara gereksinim duyar.
- Kurulum maliyeti yüksektir.
- Kırmızı tonları iyi göstermez.
- Yanma ve soğuma süresi uzundur (tam ışığı yaklaşık 4-5 dakika sonra verir).
- Renksel geri verimi düşüktür.

- İş kaybı potansiyeli yüksektir.

3.5. Metal Halojen Lambalar

Metal halojen lambalar, yapısal olarak yüksek basınçlı cıva buharlı lambalara benzerlik göstermektedir. Ancak ampulün renksel geriverimi, cıva buharlı lambalara metal halojenlerden indiyum, talyum, sodyum gibi tuzlar eklenerek artırılmaktadır. Bu tür lambaların etkinlik faktörü yaklaşık olarak 80 lümen/watt düzeyindedir. Ömürleri genellikle kısadır ve beyaz renk tonlarını vurgulamak istenen yerlerde tercih edilmektedirler. Ancak gerilim dalgalanmalarına karşı hassastırlar ve dimmerleme sistemleriyle uyum sağlayamamaktadırlar (Demir vd., 2020).

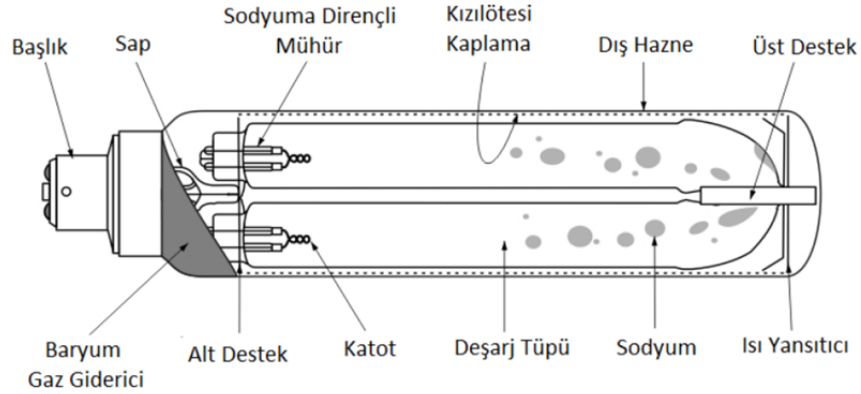


Şekil 3.3. Metal halojen lambanın iç yapısı (Demir, 2020).

3.6. Alçak Basınçlı Sodyum Buharlı Lambalar

Alçak basınçlı sodyum buharlı lambaların yapısında sodyum buharı bulunmaktadır. Alçak basınçlı sodyum buharlı lambalar 0,7-1 Pa basınç altında sodyum buharının deşarjı ile ışık yaymaktadırlar. Sodyumun özelliklerinden dolayı sarı turuncu ışık yaymaktadırlar. Renk seçiminin önemli olmadığı alanlarda kullanılabilir. Etkinlik faktörleri 100-192 lm/W gibi yüksek bir değere sahip olmaktadır. Stroskobik (göz yanılması) etki bu lambalarda görülmektedir. Bu nedenle elektronik balastlarla birlikte kullanılması gerekmektedir. Renksel geriverimi kötü olan bir lamba çeşididir.

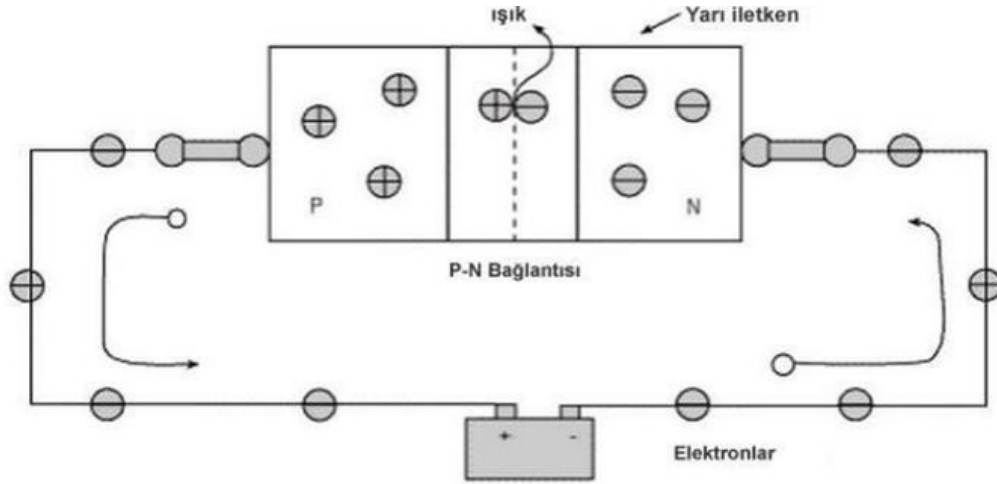
Yapısında balast bulunmakta olup şebekeye indüktif yük etkisi oluşturmaktadır (Kaya, 2018).



Şekil 3.4. Alçak basınçlı sodyum buharlı lambanın yapısı (Kaya, 2018).

3.7. LED Lambalar

LED; elektrik enerjisini doğrudan ışık çıkışına dönüştürebilen yarı iletken bir devre elemanı olarak ifade edilmektedir. LED'in temel yapısında, yarı iletken malzemeden oluşan ve ışık yayarak çalışan bir çip bulunmaktadır. Bu çip, bir kılıf içinde yer alan yansıtıcı elemanlar sayesinde yaydığı ışığı belirli bir yöne yönlendirmektedir. LED'lerin renk özellikleri, içerdikleri p-n bağlantısının malzeme özelliklerinin değiştirilmesi ile belirlenmektedir. LED'ler çeşitli renklerde üretilebilir, bunlar genellikle beyaz, sarı, yeşil, mavi ve kırmızı gibi renklerdir; ancak harici aydınlatma için beyaz renkli LED'ler tercih edilmektedir. LED'ler, aydınlatma teknolojisindeki ilerlemeler ve düşük güç tüketimleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Aydınlatma sistemlerinde kullanılan LED'ler, parlaklık seviyesi, güç tüketimi ve renk sıcaklığı gibi parametrelere göre çeşitlendirilebilirler. Uzun ömürlü, sağlam, küçük boyutlu ve çevreye zarar verici madde veya zehirli gaz içermemeleri, farklı aydınlatma ihtiyaçları için LED lambalarının kullanılabilirliğini artırmaktadır. LED'lerin yaydığı ışık kararlıdır ve titreşim yapmazlar, bu özellikleri de onların tercih edilme sebeplerinden biri olmaktadır (Kaya, 2018; Demir vd., 2020).



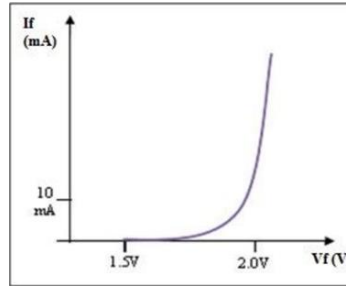
Şekil 3.5. LED pn bağlantı diyagramı (Kaya, 2018).

Tek bir LED'in gücü genellikle yaklaşık olarak 3 watt civarındadır; ancak laboratuvar şartlarında LED'lerin etkinlik faktörü 231 lümen/watt olarak kaydedilmiştir. Ayrıca, laboratuvar ortamında teorik olarak 100.000 saate kadar verimli şekilde çalışabildikleri gözlemlenmiştir. LED'ler, istenilen aydınlık seviyesini elde etmek için seri veya paralel olarak armatürler içine yerleştirilirler ve genellikle yüksek verimlidirler. Diğer ampullere kıyasla daha az enerji tüketerek daha fazla ışık yayabilmektedirler. LED'lerin yapısında doğaya zararlı gazlar bulunmaz; LED'in rengi, aktif katmandaki materyaller tarafından belirlenmektedir. LED'ler genellikle tek bir renkte ışık yayma eğilimindedir; ancak aktif katmana çeşitli kimyasallar (örneğin Galyum Nitrit - GaN, Galyum Fosfat - GaP, Galyum Arsenit - GaAs gibi) eklenerek istenilen dalga boyunda ışığa sağlanabilmektedir. Bu sayede, farklı dalga boylarında çalışan ve farklı renklerde ışık yayabilen 16 farklı LED türü mevcuttur. LED'ler, uygulanan akımın büyüklüğüne bağlı olarak ışık yayma kapasitesine sahiptir; ancak belirli bir akım değerinden sonra ışık çıkışı artmamaktadır. Bu nedenle, akımın daha da artırılması LED'e ve bağlı devrelere zarar verebilmektedir. Parlaklık ayarlanabilirliği için akımın sabit tutulması ve gerilim değerlerinin hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. LED'lerin etkinlik değeri zamanla azalır; %50'nin altına düştüğünde, LED'in ekonomik ömrünün tamamlandığı kabul edilmektedir. LED'ler, yüksek renk geriverme endeksine sahip olmaktadır (örneğin $R_a=80$), bu da nesnelerin kendi doğal renklerinde görülebilmesini sağlamaktadır (Kaya, 2018; Demir, 2020).

3.7.1. LED'lerin karakteristik yapıları

3.7.1.1. Akım-gerilim karakteristiği

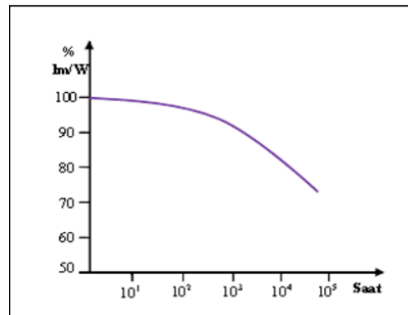
Çeşitli maddelerden üretilen yarı iletken elemanlarının çeşitli akım-gerilim karakteristikleri bulunmaktadır. LED'ler genellikle ortalama olarak 10 mA ve 1.5 V gibi değerlerde ilettime geçerek ışık yaymaya başlamaktadırlar (Akbulut, vd., 2009).



Şekil 3.6. Led'in akım-gerilim karakteristiği (Akbulut, vd., 2009).

3.7.1.2. Verim-zaman karakteristiği

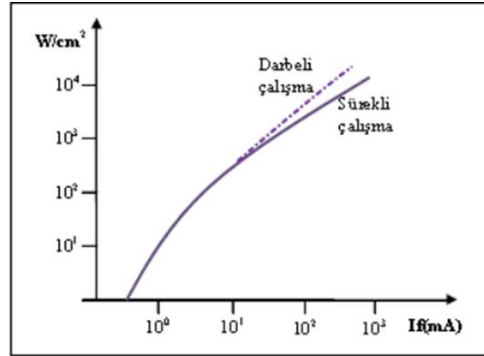
LED'lerin verimliliği genellikle lm/W (lümen/watt) biriminde ifade edilmektedir. LED'lerin verimliliği zamanla azalmaktadır, bu azalma genellikle normal verimin yarısına düştüğünde LED'in ömrünü tamamladığı noktada belirginleşmektedir. Bir LED'in ortalama ömrü yaklaşık 100.000 saat olarak kabul edilmektedir. Şekil 3.7'de, LED'in verimliliğinin zamanla nasıl değiştiği, tipik koşullarda ($I_f = 100$ mA, $T_{\text{çevre}} = 25$ °C) gösterilmiştir. Bu tür değerlendirmelerde, verimlilik düşüşü genellikle normal başlangıç verimine göre oransal olarak ifade edilmektedir (Göçmen, 2014).



Şekil 3.7. Led'in verim-zaman karakteristiği (Göçmen, 2014).

3.7.1.3. Akım-ışık şiddeti karakteristiği

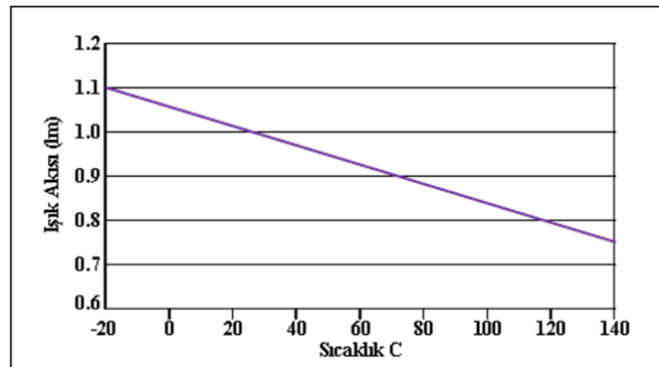
LED'in yaydığı ışık şiddeti, üzerinden geçen akım ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Ancak bu artış, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi belirli bir akım değerine kadar doğrusaldır. Daha sonra ise eğri kırılmaya başlamaktadır. Eğer LED'e uygulanan akım, doğrusallığın bozulduğu eşik değeri aşarsa, LED aşırı ısınarak hasar görebilir veya bozulabilmektedir (Göçmen, 2014).



Şekil 3.8. Led'in akım-ışık karakteristiği (Göçmen, 2014).

3.7.1.4. Sıcaklık-ışık şiddeti karakteristiği

LED'lerin içinden geçen akım sabit olmasına rağmen, diyotların karakteristik özelliklerinden dolayı ortam sıcaklığı arttıkça verimlilik faktörleri azalmaktadır. Bu azalma, LED'lerin yapıldığı malzemenin özelliklerine bağlı olarak her bir derece artışında %0,3 ila %0,7 arasında değişebilmektedir. Şekil 3.9'da, LED'in ışık akısının sıcaklıkla nasıl değiştiği gösterilmektedir (Göçmen, 2014).



Şekil 3.9. Led'in sıcaklık ışık akısı değişim grafiği (Göçmen, 2014).

3.8. Güç Kalitesi ve Güç Faktörü

Güç kalitesi; şebekeden çekilen aktif gücün görünür güce oranıyla elde edilmektedir. Bu parametre güç kalitesini belirtmektedir. Elektrik sistemlerinde güç faktörü değerinin “1” değerine yakın olması beklenmektedir. Güç faktörünün istenen bu seviyeye ulaşması şebekedeki reaktif yüklerin az olması olarak ifade edilebilmektedir. Gereksiz olan bu yüklerin akım çekmemesi hat kayıplarını azaltmaktadır.

Sinüsoidal gerilim işaretli şebekelerde harmonik distorsiyon olmadığında, lineer devre elemanlı yüklerin güç faktörü;

$$PF = \frac{P}{S} = \cos(\theta) \quad (3.1)$$

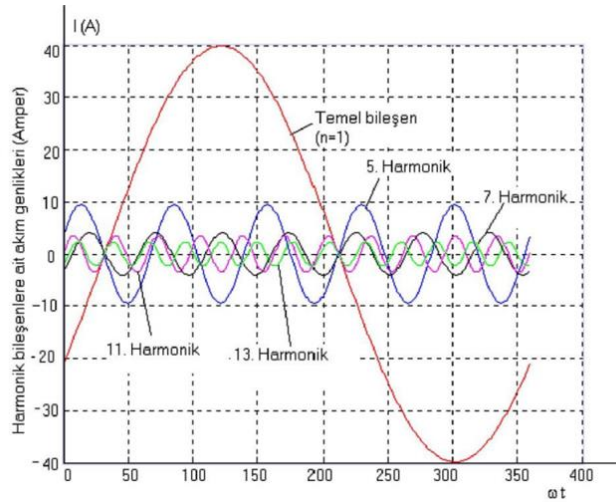
3.1 formülünde belirtilen şekilde ifade edilmektedir. Sinüsoidal bir şebekede harmonik distorsiyon olmayan durumlarda, lineer yüklerin güç faktörü sabit olarak ifade edilmektedir. Ancak şebeke distorsiyonlu olduğunda ve şebekeye bağlı yükler nonlineer olduğunda, aktif, reaktif ve distorsiyon güçleri etkili olabilmektedir. Bu durumda güç faktörü (PF) değişebilmektedir. Bir sinüsoidal şebekeye nonlineer bir yük bağlandığında oluşan harmonik akımlar, güç faktörünü etkileyebilmektedir.

$$PF = \frac{V \cdot I_1 \cos(\theta)}{V \cdot [\sum_{n=1}^N I_n^2]^{0.5}} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \theta \quad (3.2)$$

olarak elde edilmektedir. Buradaki ilk terim daima 1’den küçük olacağından güç faktörü sinüsoidal durumdaki $\cos(\theta)$ değerinden daha küçük bir değer olması beklenmektedir. Görüldüğü üzere harmonik etkilerin güç faktörünü düşürücü etkisi bulunmaktadır. İstenile güç faktörü değerini “1” değerine çıkarmak için reaktif güç kompanzatörleri ve filtreleme işlemleri ile harmonikler azaltılması sağlanabilmektedir (Akyel, 2011).

3.9. Aydınlatma Sistemlerinde Harmonik Bozukluklar

İnsan nüfusundaki ve sanayileşmedeki artış, elektrik enerjisi talebinin sürekli olarak artmasına neden olmaktadır. Bu artan talep, enerjinin kaliteli ve güvenilir olmasını zorunlu kılmaktadır. Elektrik sistemlerinde, enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması sırasında akım ve gerilimin 50 Hz frekansında sinüzoidal bir dalga formunda olması idealdir. Ancak pratikte bu her zaman mümkün olmamaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, artan elektronik cihazlar ve lineer olmayan yükler, güç sistemlerinde harmonikleri oluşturmaktadır. Harmonik terimi, doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu, frekansı değişiklik gösteren akım ve gerilim karakteristiklerini ifade etmektedir (Şahin, 2014; Rustemli, vd., 2022).



Şekil 3.10. Harmonik bileşenler (Şahin, 2014).

Güç sistemlerinde sinüs dalga formunun simetrik olması nedeniyle 3., 5., 7., 11 gibi tek sayılı harmonik bileşenleri bulunmaktadır. Çift harmonik bileşenleri yer almamaktadır. Şekil 3.10.'de bir yarım periyottaki temel sinüs dalga formu ve harmonik bileşenleri yer almaktadır. Harmonikler lineer olmayan yükler tarafından meydana gelmektedirler. Bu yükler sinüs dalgasının bozulmasına neden olmaktadır (Şahin, 2014).

Harmonikleri meydana getiren doğrusal olmayan yükler;

- Çeviriciler
- Demir çekirdekli bobinler

- Ark fırınları
- Yarı iletken malzemeden üretilen elemanlar (diyot, transistör, triyak)
- Senkron makinaların uyarılmasında kullanılan dönüştürücüler
- Generetörler
- Motorlar
- Endüktif ve elektronik balastlar
- Transformatörler
- Statik VAR kompanzatörleri
- TV, Bilgisayar
- Anahtarlama güç kaynakları
- Kesintisiz güç kaynakları
- Gaz deşarj prensipli çalışan aydınlatma armatürleri
- Fotovoltaik sistemler
- Frekans dönüştürücüler
- Kontrollü motor hız ayar devreleri
- Yüksek gerilim ile enerji iletim sistemleri
- Işık dimmerleri

belirtilen şekilde sıralanabilmektedirler (Yılmaz, 2006) .

3.9.1. Harmoniklerin analizi

Periyodik dalga şekillerinin temel bileşenleri olan genlik ve faz açılarının hesaplanması harmonik analizi olarak adlandırılmaktadır. Harmonikler; sinüsoidal dalga formlarını ifade edebilmek için matematiksel ifadeler ve formüller kullanılmaktadır. Harmonikli bir sinüs fonksiyonu Fourier serisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$v(t) = V_0 + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + V_4 \sin(4\omega t) + \dots + V_n \sin(n\omega t) \quad (3.3)$$

V_0 : DC bileşeni

V_n : n. harmoniğin tepe değeri

Temel bileşen frekansı f ise,

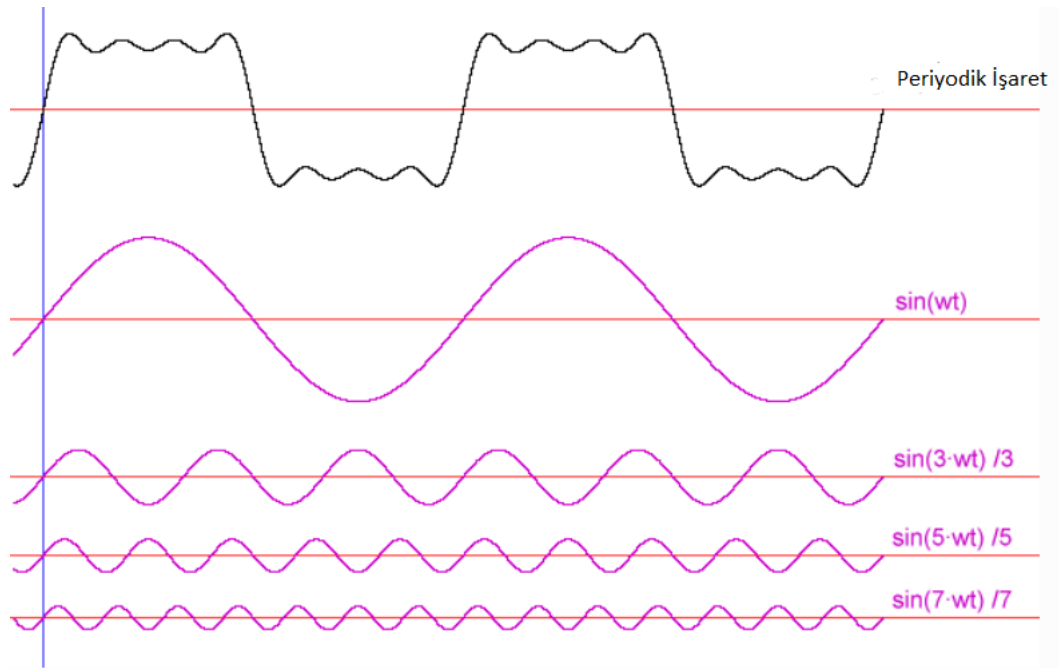
2. harmoniğin frekansı $2f$,

3. harmoniğin frekansı $3f$,

n. harmoniğin frekansı nf 'dir.

Ulusların şebeke temel frekans verileri farklılık göstermektedir. Türkiye'de ve Avrupa ülkelerinde temel frekans 50 Hz iken ABD ve Japonya'da temel frekans verisi 60 Hz olduğu bilinmektedir. Bu farklılıktan dolayı harmoniklerle çalışırken frekansların yerine harmonikler numaralandırılarak sınıflandırılmaktadırlar. Türkiye şebekesinde baz alınan frekans 50 Hz olması durumunda 2. harmonik 100 Hz, 3. harmonik ise 150 Hz frekansta olduğu belirtilmektedir. ABD veya Japonya şebeke temel frekansı olan 60 Hz baz alındığında 2. harmonik 120 Hz 3. harmonik ise 180 Hz olarak hesaplanmaktadır. Bu durum 1 numaralı formülde belirtilmektedir.

Sinüsoidal olmayan temel akım ve gerilim bileşenleri harmonik verilerini incelemek için, her bir harmoniğin tek tek incelenmesi ve sonrasında vektörel olarak toplanması gerekmektedir. Şekil 3.11. 'de belirtildiği gibi sinüsoidal dalga harmonikleri bir araya gelerek sinüsoidal olamayan bir dalga ve bu dalgaya ait bileşenler görülmektedir.



Şekil 3.11. Sırasıyla periyodik işaret, temel bileşen, 3. harmonik, 5. harmonik ve 7. harmonik sinyalleri.

Gerilim ve akım fonksiyonlarının pozitif ve negatif kısımları benzer özelliklerde olduğunda sadece tek sayılı harmonikler oluşabilmektedir. Enerji sistemlerinde olan dalga formları bu özelliği içerdiğinden dolayı dağıtım şebekelerinde çift sayılı

harmonikler bulunmamaktadırlar. Harmonikler tam sayı olarak düşünülse de tamsayı olmayan harmonik akım ve gerilimler yani inter harmonikler olarak tanımlanmaktadır. Bu duruma indüksiyon fırınları, kaynak makinaları, motor hız kontrolünde kullanılan sürücü inverterlar ve ark ocakları örnek olarak verilebilmektedirler. Belirtilen cihazlar yol alma süreleri boyunca ondalıkli harmonikler üretirler ve normal rejime geçtikleri zaman tamsayıli harmonikler üretmeye devam etmektedirler.

Dağıtım şebekelerinde yayılan harmonik akımlar, bu akımların taşınması ile alakalı olmayan şebekelerde gerilim harmonikleri olarak taşınmaktadırlar. Bu sebeple ölçülen akım ve gerilim harmonikleri tanımlanarak tek tek tanımlanması önem arz etmektedir. Bu sayede şebekelerde toplam harmonik bozulmaları hesaplanmaktadır (Şahin, 2014).

Sistemdeki harmoniklerin sınırlandırılmasını amaçlayan standartlarda yaygın olarak kullanılan Toplam Harmonik Bozulma (THD), akım için 1'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.4)$$

I_n : Devreden geçen akımın n' inci mertebedeki harmoniğinin etkin değeri,

I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değeridir.

Alternatif akım enerji sistemlerinde, akım ve gerilim dalga şekillerinin ideal olarak sinüzoidal olması hedeflenir. Ancak, genellikle lineer veya nonlineer bir devreye sinüzoidal gerilim uygulandığında nonsinüzoidal dalga şekilleri de meydana gelmektedir. Bu nonsinüzoidal bileşenlerin analizinde Fourier Analizi yöntemi kullanılmaktadır.

$$I(T) = I_0 + I_2 \sin(2\omega t) + I_3 \sin(3\omega t) + I_4 \sin(4\omega t) + \dots + I_n \sin(n\omega t) + \quad (3.5)$$

Periyodik bir dalga şeklinin temel bileşeni ile daha yüksek dereceli harmoniklerinin genlik ve faz açılarının hesaplanması işlemi harmonik analizi olarak adlandırılmaktadır. Bozulmuş periyodik dalga şeklinin harmonik bileşenleri, Fourier analiz teorisine göre bir Fourier serisi ile ifade edilebilir. Bu analiz yöntemi uygulanarak,

nonsinüzoidal bir dalga şekli, 50 Hz temel bileşen frekansının tam katları olan frekanslara sahip sinüs dalgalarının bir serisine dönüştürülebilir.

3.10. Etkinlik Faktörü

Aydınlatma tekniğinde sıklıkla kullanılan ışıksal verim olarak bilinen bir faktörü ifade etmektedir. Işıksal verim aydınlatma armatürlerinin performansını belirlemektedir. Belirli bir enerji ile çalışan aydınlatma armatürleri tüketim yaptığı güce karşılık ışık çıktısı üretmektedirler.

$$etkinlik\ faktörü = \frac{lm}{W} \quad (3.6)$$

Etkinlik faktörü ışık akısının güce oranı ile ifade edilmektedir (Onaygil, 2016).

4. LED AYDINLATMANIN KLASİK SOKAK AYDINLATMALARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Enerji üretim kaynakları, hem yenilenebilir hem de yenilenemeyen enerji kaynaklarını içermekte olup, ülkemizde ve birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır. Artan enerji talebi ile birlikte, enerji üretim maliyetleri de yükselmektedir. Bu durum, enerjinin tasarruflu kullanımını zorunlu kılmaktadır. Kaliteli bir aydınlatma seviyesi, az enerji tüketimi ile sağlanabilir. Bu şekilde, verimli bir aydınlatma ile hem daha az elektrik enerjisi tüketimi hem de kaliteli aydınlatma elde edilebilmektedir.

Enerji ihtiyacının en etkin biçimde kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ülke ekonomisi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasını amaçlayan 5627 sayılı "Enerji Verimliliği Kanunu," 2 Mayıs 2007 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanmıştır. Bu kanunun amacı, enerjinin etkin kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılması hedeflenmektedir.

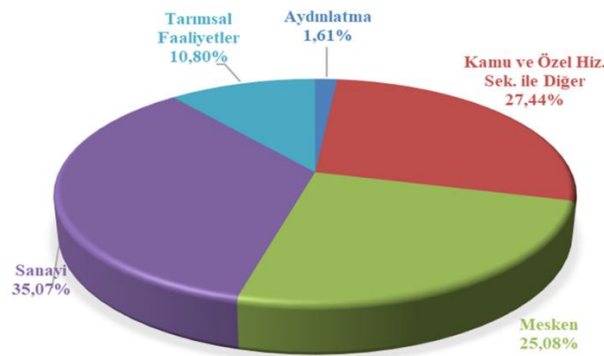
Son yıllarda aydınlatma teknolojisindeki ilerlemeler, düşük güç tüketimine sahip, uzun ömürlü, dayanıklı ve çevre dostu olmaları nedeniyle LED aydınlatma sistemlerinin tercih edilmesini sağlamaktadır. Aydınlatma teknolojileri geliştikçe, daha verimli aydınlatma aygıtları üretilmektedir. Mevcut durumda kullanılan geleneksel aydınlatma sistemlerinin yeni teknolojilerle değiştirilmesi enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu kapsamda, ülkemizde sokak aydınlatmalarında uzun yıllardır kullanılan geleneksel aydınlatma armatürlerinin LED aydınlatma armatürleriyle dönüşümü planlanmaktadır. LED aydınlatma sistemleri, geleneksel aydınlatmalara göre daha verimli ve daha uzun ömre sahip oldukları bilinmektedir. Bu sayede ciddi bir enerji tasarrufu sağlanabilmektedir LED teknolojisi gün geçtikçe ucuzlasa da, milyonlarca sokak lambasının LED dönüşümü için hala büyük bir yatırım yapılması gerekmektedir.

4.1. LED Teknolojileri ile Geliştirilen Sokak Lambaları

LED teknolojisi ile geliştirilen sokak lambaları, yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalara iyi bir alternatif olarak görülmektedir. HPNA; sokak aydınlatmasında uzun yıllardır yüksek ışık çıkışı ve uzun ömürlü olarak kullanılmaktadır. Daha önceki

çalışmalar bu geçişin gereksiz olduğunu bulsa da, günümüzde kullanılan LED teknolojileri daha verimli ve istikrarlı bir aydınlatma türü haline gelmektedir. LED sokak lambalarının faydaları, enerji tüketimi, aydınlatma maliyetleri ve bakım maliyetleri ile sınırlı olmadığı bilinmektedir. LED'ler yönlü ışık kaynakları oldukları için ışık kirliliğinin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır. LED'ler uzun ömürlüdür (50.000, 60.000 veya 90.000 saat), ancak bir sisteme dahil edildiklerinde giriş voltajı, sürücü akımı ve sıcaklık gibi faktörlerden dolayı ömürleri katalog değerlerine oranla kısalmaktadır. Üreticiler, ürünün hizmet ömrünü ve garanti süresini belirlerken bu faktörleri de göz önünde bulundurmaktadırlar. Sokak lambası dönüşümünün üreticisi, daha uzun bir garanti süresi (8, 10, 12 yıl) istemektedir. Bu sayede verimlilik ve maliyet-fayda oranı artmaktadır. Öte yandan, sokak LED lambalarının kullanım ömrünü uzatmak için sektör genelinde standardizasyon çalışmaları yapılması gerekmektedir. LED modülü ve elektronik kontrol cihazı (LED sürücüsü) için standart bir ara yüz (LED dizisinin dağılımı, elektriksel özellikler, boyutlar, vida delikleri vb.) oluşturulursa, aydınlatma kaynaklarının kullanılan bileşenlerinin tam değiştirilebilirliği sağlanabilmektedir. Bu sayede, bir üretici tarafından sağlanan bir lambadaki bir LED modülü veya LED sürücüsü arızalandığında, başka bir üretici tarafından sağlanan parçalar onarım için kullanılabilir. Böylece, LED'i dış etkenlerden koruyan ve çalışması için gerekli koşulları sağlayan lambanın ana gövdesi uzun yıllar kullanılabilirler.

Enerji sistemlerinde, enerji tasarrufunun planlanması ve işletilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Enerji tasarrufu ele alındığında sokak aydınlatmaları Şekil 4.1.'de 2023 yılında faturalanan tüketime göre toplam enerjinin %1,61'i olduğu görülmektedir. Her geçen gün kullanılan enerji miktarının artışı enerji verimliliğine ve tasarrufuna dikkat çekmektedir (EPDK, 2023; Küçükdoğu, 2003; Yılmaz vd., 2020; Yılmaz vd., 2019; Gençoğlu, 2005; Elijošūtė, vd., 2012).



Şekil 4.1. 2023 yılı faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (%) (EPDK,2023).

4.2. Akkor Flamanlı Lambalar

Aydınlatma enerji tüketim oranı göz önünde bulundurulduğunda enerji tasarrufunun önemi anlaşılmaktadır. Akkor flamanlı lambalar, kısa süreli çalışmalar ve genel amaçlı yerlerde kullanılırken halojen lambalar yüksek yoğunluklu ve iyi renk geri verimi olması gereken yerlerde kullanılmaktadır. Deşarj lambalar, tüp flüoresan türündeki lambalar ise sürekli veya kesintili aydınlatmada ve genel amaçlar için, iyi renk geri verimi gereken yerlerde tercih edilmektedir. Kompakt flüoresan lambalar ise iç mekanlarda ve yüksek kaliteli aydınlatma gerektiren yerlerde kullanımı bulunmaktadır. Kompakt flüoresan lambaların en önemli avantajı, çalışmalarında ısı kayıplarının az olduğudur. Kompakt flüoresan lambalar elektrik enerjisinin %45 'ini görünür ışığa çevirebilirken akkor flamanlı lambalarda bu oran %10'dur. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte son yıllarda LED lambalar, cıva içermemesi, düşük güç tüketimlerinin olması ve ışıksal verimlerinin yüksek olması nedeniyle diğer aydınlatmalara oranla daha çok tercih edilmektedirler. LED aydınlatma aygıtlarının ömürleri ortalama 100.000 saat olması diğer armatürlere oranla büyük bir avantajdır. Çizelge 4.1.'de lambaların güç, ışık akısı, renk sıcaklığı ve ışıksal verimleri belirtilmektedir (Kürker, vd., 2016).

Çizelge 4.1. Akkor flamanlı, flüoresan ve LED lambaların özellikleri (Kürker, vd., 2016).

Aydınlatma Tipi	Akkor Flamanlı		Flüoresan		LED
	Normal	Halojen	Tüp	Kompakt	Normal
Güç (Watt)	15-1000	20-2000	6-65	9-25	1-50
Verim (lm/W)	10-20	20-25	50-95	45-80	50-150
Ömür (Saat)	1000	2000-3000	4000-7000	8000-10000	25000-100000
Işığın Rengi	Sıcak	Sıcak	Çeşitli Renkler	Sıcak	Soğuk
Renk Geri Verimi	İyi	Çok iyi	Ortadan iyiye	Çok iyi	Çok iyi
Maliyet	Düşük	Orta	Orta	Orta	Yüksek

5. AKILLI SOKAK AYDINLATMA SİSTEMLERİ GENEL YAPISI VE KULLANILAN TEKNOLOJİLER

Dünya nüfusu sürekli olarak artmaktadır. Kentleşme oranı 2013 yılında %53 iken 2040 yılında bu rakamın %63 seviyelerine yükselmesi beklenmektedir. Kentleşme oranının artmasıyla enerji kullanımının artması da kaçınılmaz olmaktadır. Mevcut enerji politikalarının devam etmesiyle 2040 yılında enerji ihtiyacının 2013 yılına kıyasla %44,9 daha fazla olacağı öngörülmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Aydınlatma otomasyon kavramı, gün ışından maksimum seviyede faydalanmak amacıyla son yıllarda ortaya çıkmıştır. Aydınlatma otomasyon sisteminde, en az aydınlatma şiddetiyle görsel konfordan ödün vermeden enerji tasarrufu amaçlamaktadır. Aydınlatma sistemi otomatik yapıldığında enerji maliyetleri düşmektedir. Gün ışığı seviyesini ölçebilen algılayıcılar sayesinde aydınlatma otomasyonunda ortamın aydınlık seviyesi kısma modülleri ile istenilen seviyeye getirilebilmektedir. Bu sayede görüş konforundan ödün verilmeden enerji tasarrufu sağlanmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Sokak aydınlatma sistemleri şehirlerin temel alt yapı parçasıdır. Yaya ve sürücülerin güvenli sürüş konforunu sağlamak gibi birçok avantaj sunmaktadır. Dünyadaki yıllık elektrik üretiminin yaklaşık olarak %13-%14'ünü oluşturmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerjiye olan ihtiyacın artması enerjinin önemini ortaya koymaktadır. Buda var olan kaynakların hızlı tüketimine sebep olmaktadır. Yol aydınlatmaları dünya genelinde şehirlerin enerji tüketiminin 25-30%'nu oluşturmaktadır. Enerji verimliliğine uygun aydınlatma sistemleriyle aydınlatma maliyetinden 50-70% oranında tasarruf etmek mümkündür (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021; Örs, vd., 2022).

Son yıllarda dünyadaki araştırmacılar ilerleyen teknolojilerden faydalanarak insanların yaşam kalitelerini arttırmak ve enerji tasarrufu sağlamak için akıllı şehirlerin yapı unsurlarını oluşturacak akıllı sistemler üzerine çalışmalar yürütmektedirler. Akıllı şehirler için önemli olan bir konuda şehir hayatını etkilen aydınlatma sistemleridir. Konforlu ve tasarruflu bir akıllı sokak aydınlatma sistemi şehir hayatını kolaylaştırmaktadır. 2027 yılına kadar dünya çapında 363 milyon sokak lambası olması beklenmektedir. Sokak aydınlatma sayısının bu rakamlara ulaşması, çok fazla enerji tüketimine bu durumda enerji tüketimini azaltacak teknolojik çözümler üzerine çalışmayı

zorunlu kılmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021; Örs, vd., 2022; Omar, vd., 2022).

Akıllı şehir, dijital teknolojileri birbirine bağlayan bir kavram olarak kentsel hizmetlerin kalitesini ve performansını arttırmak için kullanılabilecek potansiyel bir çözüm olmaktadır. Akıllı şehir kavramında IoT tanıtılmasıyla, yeni hizmetler geliştirerek ve farklı uygulama alanlarını birbirleriyle entegre etmek için Bilgi ve İletişim Teknolojilerine yeni imkanlar sunmaktadır. Akıllı bir şehirde IoT uygulanarak önemli bir ölçüde geliştirilebilecek temel sektörlerden biri diğer sistemlerden daha fazla enerji tüketimi gerçekleştirdiği için şehirlerin aydınlatma sistemleridir. Akıllı sokak aydınlatma sistemi elde etmek için bir şehirde aydınlatma sistemine gelişmiş sensörler ve iletişim kanalları entegre edilebilmektedir. Bu sayede otonom ve daha verimli bir aydınlatma yönetim sistemi elde edilmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

2050 yılına kadar, küresel nüfusun %70'inden fazlasının kentsel alanlarda yaşayacağı öngörülmektedir. Şehir merkezlerindeki nüfus artışı Bilgi ve İletişim Teknolojileri'ne (BİT) artan bağımlılıkla birlikte altyapının (örneğin enerji, ulaşım, vb.) akıllı ve verimli yönetilmesini gerektirmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Akıllı aydınlatmada olması gereken özellikler şunlardır:

- Konforlu ve rahat bir kullanıcı alanı oluşturmalıdır,
- Enerji etkin tasarıma sahip olmalıdır,
- Çevreye duyarlı olmalıdır,
- Teknolojik sistemlere sahip olmalı ve bu sistemler geliştirilebilen, birbirleriyle haberleşebilen ve gerektiği durumlarda karar verebilen bir yapıya sahip olmalıdır,
- Akıllı malzemeler kullanılmalı,
- Atık üretimi minimum olmalıdır,
- Sürdürülebilir bir yapıda olmalıdır,

Akıllı sokak aydınlatma sisteminin geleneksel sistemlere göre ilk kurulum maliyetleri oldukça yüksektir. Akıllı sistemlerin işletme ömrü boyunca sağladığı tasarruf göz önüne alındığında kendini amorti edip uzun vadede enerji ve maliyetten kazanç

sağlayacaktır. Geleneksel otonom sokak aydınlatma tasarımında zararlı gaz deşarjı yapan aydınlatmalar ile sağlanmaktadır. Bu durumda Karbon Dioksit emisyonu gibi çevresel sorunların önemini ihmal etmiş bir sistem olmaktadır. Dünya iklim değişimi, insan sayısının ve çevresel faktörlerin artmasıyla birlikte zarar görmektedir. LED aydınlatma dönüşümüyle Akıllı Sokak Aydınlatma Sistemleri elde edilecek ve çevreye verilecek zararlı Karbon Dioksit gazının önüne geçilmesi sağlanabilecektir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021; Yusoff, vd., 2013).

Akıllı sokak aydınlatma sistemleri, IoT özellikli akıllı bir şehir ortamında elektrik tasarrufu sağlamak için bir çözüm olarak kullanılabilir. Akıllı sokak aydınlatmanın IoT özellikli üç temel katmana sahiptir. Bu katmanlar algılama veya sensör katmanı, iletişim katmanı ve yönetim katmanından oluşmaktadır. Lamba düğümlerine entegre olan sensörler, ışık yoğunluğuna ışık sensörü kullanarak veya insan varlığına hareket sensörleri kullanarak göre otomatik bir kontrol sağlamaktadır. Bu ışık düğümleri IoT iletişim protokolleri ile sensör verilerini iletebilir ve birbirleriyle iletişim kurabilmektedirler. Elde edilen bu verileri analiz etmek ve verimli yönetim sağlamak için otonom kararlar alabilecek bir yönetim sistemine ihtiyaç olduğu aşikardır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

IoT teknolojisi özelliklerini içeren akıllı şehir ortamındaki, bir aydınlatma sisteminde akıllı terim otonom ve verimli olma vasıflarını ifade etmektedir. Sokak lambasının verimliliği teknolojiye gelişmelerle birlikte önemli ölçüde artmıştır. Bu duruma LED teknolojisi örnek olarak verilebilmektedir. Mevcut olan gelişmelere rağmen aydınlatma sistemlerinde enerji tasarrufu sağlamakta büyük bir potansiyel vardır. Farklı sensörler aracılığıyla (örneğin ışık sensörü, hareket sensörü vb.) ve verimli iletişim kanallarıyla aydınlatma sistemi otonom, verimli aynı zamanda akıllı şehrin diğer bileşenleriyle birlikte daha verimli bir hale getirilebilmektedir. Bir akıllı sokak aydınlatma sistemi enerji tasarrufuyla güç tüketimini azaltmanın yanı sıra lambalardaki arızaları kolayca tespit edip düzeltilebildiği için bakım maliyetlerinde de azalma olmasını sağlayacaktır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021; Örs, vd., 2022; Yusoff, vd., 2013; Omar, vd., 2022).

5.1. Akıllı Aydınlatmanın Faydaları ve Önemi

Akıllı aydınlatma otomasyonunun sağladığı faydalar aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir.

- **Esneklik:** Akıllı aydınlatma sisteminin kontrolü tek bir merkezden yapılabilmektedir. Büyük kullanım alanına sahip otel, fabrika, işyeri gibi yerler için farklı senaryolar oluşturularak aynı merkezden kontrol edilebilme kolaylığı sağlamaktadır. Kullanım alanlarında aydınlatma sisteminde ortaya çıkabilecek sistem değişiklikleri gibi durumlarda otomasyon sistemi sayesinde kolaylıkla değişiklikler yapılabilecektir.
- **Verimlilik:** Aydınlatma otomasyonu sayesinde kullanım alanlarına en uygun aydınlatma sistemi yapılabilmektedir. İç ve dış aydınlatmada kullanılan lambalar için otomasyon sistemine hızlıca geçiş yapıp aydınlatmanın ayarlanmasındaki zaman kaybı engellenmiş olacaktır. Aydınlatma seviyesinin sistem tarafından otomatik olarak değiştirilmesi işgücü verimini arttıracaktır.
- **Estetik:** Mekanlarda vurgulanmak istenen yerler aydınlık seviyesinin değiştirilmesi sayesinde ön plana çıkabilecektir. Dekorasyonun bir parçası olarak otel, müze, restoran, park ve bahçe aydınlatmaları ışık seviyesi ayarlanabilir olmasını sağlamaktadır.
- **Enerji Tasarrufu:** Enerji tasarrufu sağlamak aydınlatma otomasyonunun en büyük faydasıdır. Etkin bir enerji tasarrufu sağlamak için aydınlatma otomasyonundaki kontrol elemanlarının büyük bir katkısı bulunmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

5.2. Akıllı Aydınlatmada Kullanılan Kavramlar

Tasarlanan aydınlatma otomasyon sistemlerin bulunması gereken özel ekipmanlar vardır. Sistem kontrolü ve takibi için bu ekipmanlara ihtiyaç bulunmaktadır.

- **Hareket Sensörü:** Bulundukları ortamda hareketin varlığını algılayan ekipmanlar hareket sensörleridir. Varlıkların sürekli olarak bulunmadığı ortamlarda hareket sensörlerinin kullanılması oldukça faydalıdır. Hareketi algılamak için çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır.

- **PIR Teknolojisi:** İnsanlar var oldukları yerlerde ısı ve kızılötesi ışınlar yayabilmektedirler. Ortamda oluşan farkı algılayan PIR teknolojisine sahip algılayıcılar aydınlatma aygıtlarına sinyal göndermektedirler.
- **Ultrasonik Teknoloji:** Doppler sinyallerini kullanan bu algılayıcılar ortamdaki cisimlere sinyal gönderip geri gelme süresini hesaplamaktadır. Ortamda herhangi bir hareket olduğunda frekans değişeceği için algılayıcılar hareketi algılar ve bağlı olduğu aygıtlara sinyal göndermektedirler.
- **Dual Teknoloji:** Hem ultrasonik hem de PIR teknolojisini bir arada kullanmaktadır. Bağlı olan armatürler iki algılayıcının hareketi algılamasıyla çalışır ve en az birinde hareket devam ediyorsa çalışmaya devam etmektedir. Belirtilen Çizelge 5.1. 'de hareket sensörlerinin karşılaştırılması yapılmıştır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

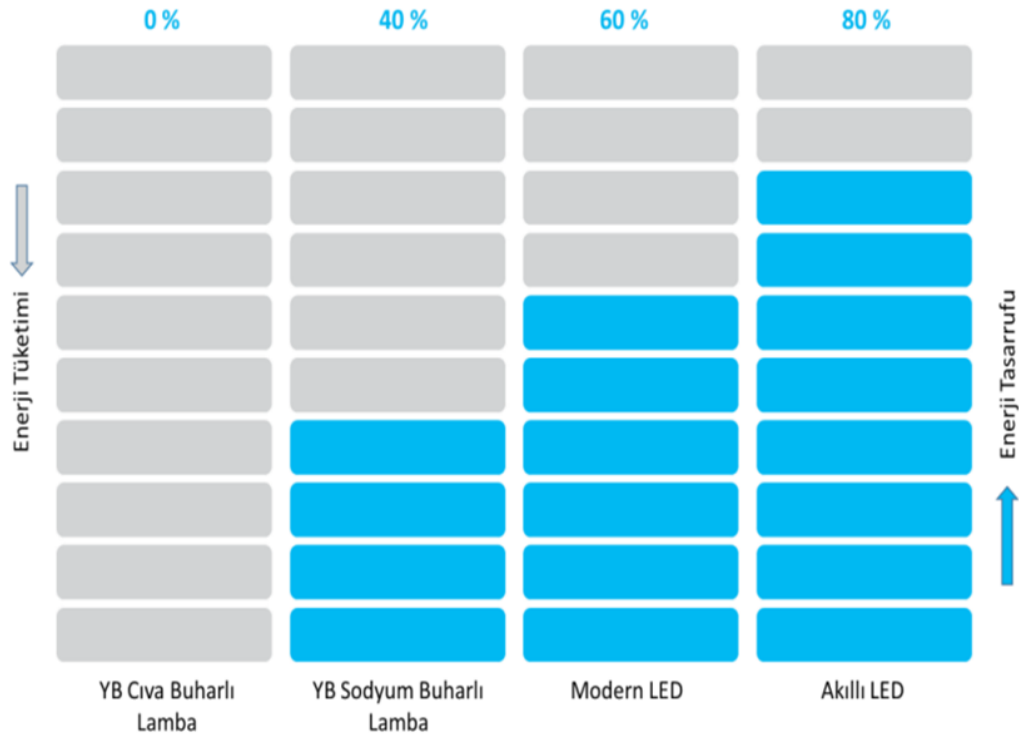
Çizelge 5.1. Hareket sensörleri karşılaştırması (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Özellikler	PIR	Ultrasonik	DUAL
Algılama mesafesi	Orta	İyi	İyi
Hareketi görme	Orta	İyi	İyi
Seçicilik	İyi	İyi	Çok İyi
Maliyet	Çok iyi	İyi	Orta

5.3. Akıllı Sokak Aydınlatma Sisteminde Kullanılan Teknolojiler

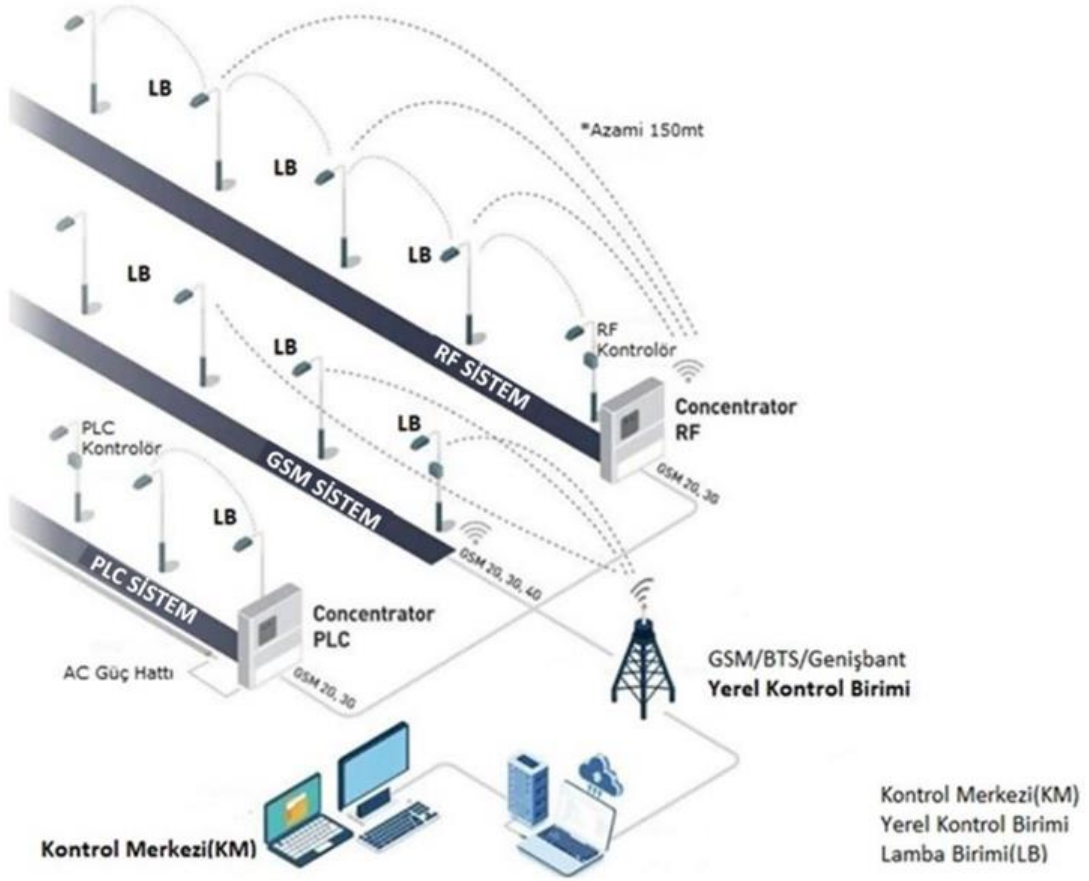
Aydınlatma sistemlerinin kontrolü yeni teknolojiler sayesinde aydınlatma yönetiminin denetlenmesi daha konforlu bir kullanım ile birlikte enerji verimliliği elde edilmesini sağlanacaktır. Gereksiz enerji tüketimi aydınlatma kalitesinden ödün verilmeden ve görüş konforu bozulmadan önüne geçilmelidir. Yol aydınlatmaları mevcut projeleri incelendiğinde büyük oranda enerji tasarrufu sağlanabileceği anlaşılmıştır. Işık akısını sürücü emniyetini ve konforunu azaltmadan kontrol edebilen ve makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak loş ışık elde edebilecek bir yaklaşım olması gerekmektedir. Aydınlatmaların durumunu izlenebilmesi de aydınlatma otomasyon sistemlerinin başka bir fonksiyonudur. Bu hizmet sayesinde enerji maliyetlerinin yanında bakım maliyetlerinin de azaltılması amaçlanmaktadır. Az güç tüketimi yapıp ışık çıktısı

çok olan LED teknolojisi enerji verimliliği için aydınlatma sektöründe kullanılan ve önerilen bir yöntem oluşturmaktadır (Örs, vd., 2022).



Şekil 5.1. Enerji tasarruf potansiyeli (Örs, vd., 2022).

Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi geleneksel aydınlatma yöntemleri yerine LED teknolojili aydınlatma sisteminin kullanımı %80' e varan enerji tasarrufu sağlamaktadır. Akıllı sokak aydınlatma sistemleri haberleşme cihazları ile farklı teknolojiler kullanılarak veri alışverişi gerçekleştirebilmektedir. Sokak aydınlatmaları esnektir ve farklı iletişim teknolojileri kullanılabilir. PLC, RF ve hibrit haberleşme gibi teknolojileri içeren sistemlerde bulunmaktadır. Hibrit haberleşme sistemine ait genel bir akıllı sokak aydınlatma sistem modeli Şekil 5.2. 'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Hibrit haberleşme sistemi.

Şekil 5.2.'de akıllı bir şehir için sokak aydınlatma sisteminin farklı teknolojilerle oluşturulmuş genel bir görünümü verilmiştir.

5.3.1. Lamba birimi

Lamba üretiminde son yıllarda önemli gelişmeler sağlanmaktadır. LED teknolojinin aydınlatma sistemlerinde kullanılması enerji tüketimini büyük ölçüde azaltmaktadır. Üretim sektöründe ışığın kırılma ve yansıtma özelliklerinin kullanılması bir lamba birimi için verimli ışık yoğunluk kontrolü sağlayabilecektir. Bu özelliklere ek olarak, farklı kontrol mekanizmalarının akıllı sokak aydınlatma sistemlerinin diğer bütün bileşenleri ile sorunsuz entegrasyon oluşturmasını sağlamaktadır. Genel bir akıllı sokak aydınlatma sisteminin alt biriminden olan Lamba Birimleri (LB), bir kontrolörden ve ona bağlı birkaç sensörden oluşmaktadır. LB'ler bu verileri toplar ve Kontrol Merkezi (KM) adı verilen bir kontrol birimiyle iletişim kurmayı sağlamaktadır. Veriler ışık ve hareket

sensörlerinden elde edilebilmektedir. Yayaları ve arabaları algılamak için hareket sensörleri kullanılabilir. Gün ışığı yoğunluğunu ve lambanın çalışma durumunu (yoğunluk, açık/kapalı) kontrol etmek için LDR ortam ışığı sensörü kullanımı sağlanabilir. Güç hatlarındaki arızaların tespit edilebilmesi olanağı sağlamaktadır.

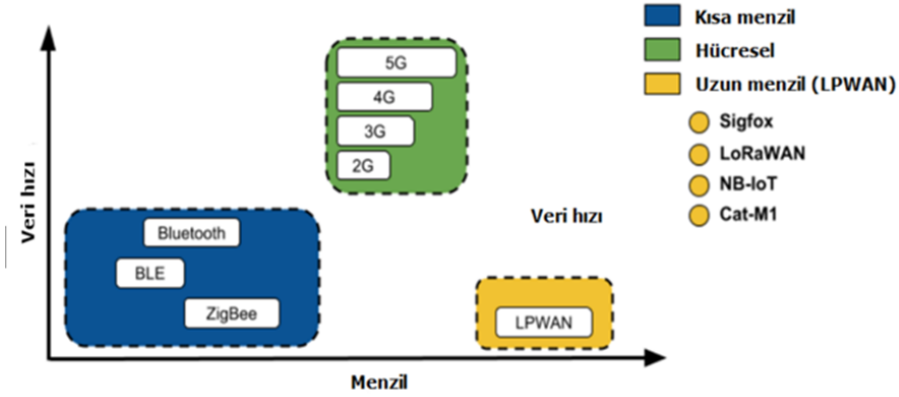
Genel olarak akıllı sokak aydınlatma sistemleri için LB'lerin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir;

- Akıllı sokak aydınlatma sistemlerinde kullanılacak olan lambalar enerji açısından verimli olmalıdır ve bakımını kolay yapılabilmesi sağlanmalıdır.
- LB sisteminin tamamının otomatik kontrol sağlayabilmesi için gerekli ve yeterli sensörlerden oluşması gerekmektedir. Aynı zamanda güç tüketimini azaltmak için akıllı açma-kapamanın yapılması sağlanmalıdır.
- LB 'lerin verimli ve güvenilir bir kontrol sistemine sahip olması gerekmektedir.

5.3.2. Yerel kontrol birimi

Kablosuz haberleşme teknolojileri, Kısa Mesafe Kablosuz Haberleşme Teknolojileri (Bluetooth, Zigbee vb.), Düşük Güç Geniş Alan (LPWA) Haberleşme Teknolojileri (NB-IoT, Lora, Sigfox vb.) ve Hücreli Haberleşme Teknolojileri (3G, 4G, 5G vb.) olarak sınıflandırılabilir. Özellikle düşük güç tüketimi, çift yönlü ve uzun menzilli haberleşme avantajları göz önünde bulundurulduğunda, LPWA (Düşük Güç Geniş Alan) haberleşme protokollerinin kısa vadede hızla yaygınlaşacağını öngörmek yanlış olmayacaktır. Ancak, şehirlerde uygulamalara özgü doğru haberleşme teknolojilerini seçmek, doğru parametreleri analiz ederek, sürecin etkin ve verimli yönetilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Yerel Kontrol Ünitesi, genellikle kısa menzilli bir iletişim protokolüne örnek olarak Zigbee, BLE (Bluetooth Low Energy) vb. aracılığıyla bir dizi Lambda Birimi'nden verileri toplar ve bu verileri Kontrol Merkezine iletir. Bu teknolojilere ait genel bir görünüm Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kablosuz haberleşme teknolojilerine ait genel bir görüntü (Sinha vd., 2017).

5.3.3. Kontrol Birimi

KM'ler YKB'lerden verileri toplar ve sunucu sistemlerde depolanmasını sağlamaktadır. Bilgi teknolojilerindeki son gelişmelerle birlikte bulut bilişim gelişmiş olup veriler sunucu yerine bulutta depolanabilmesi mümkün olacaktır. Büyük kentler için YKB'lerden veri alıp sunucularda depolamak için büyük depolama birimleri gerektirdiğinden bulut sistemleri ile daha uygun maliyetli akıllı sokak aydınlatma sistem modeli mümkündür. Aynı zamanda alınan veriler analiz edilebilir, görselleştirilebilir ve arızalar tespit edilebilir. Akıllı sokak aydınlatma sistemleri, gün ışığı ve insan varlığına bağlı olarak enerji tasarrufu sağlamak için kullanılabilir (Örs, vd., 2022).

5.3.4. Uzun menzilli iletişim

Akıllı sokak aydınlatma sistemlerinde uzun menzilli iletişim genel olarak Yerel Kontrol Merkezi ile Kontrol Merkezi arasındaki iletişimi ifade etmektedir. Büyük kentsel bir alan için akıllı sokak aydınlatma sistemi genellikle birkaç YKB ve bir KM biriminden oluşmaktadır. Lamba birimlerinden veri toplandıktan sonra YKB'ler verileri KM birimlerine iletmektedir. Aynı zamanda YKB 'ler birbirleriyle bu verileri paylaşabilirler. YKB'ler şehrin her yerine orantılı olarak dağıtıldığı için YKB'ler arasındaki ve YKB'ler ile KM arasındaki mesafeler uzun olabilmektedir. Bu nedenle bu birimler arasındaki uzun menzilli iletişim protokollerine ihtiyaç bulunmaktadır. Wi-Fi, Ethernet, GPRS, WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), 3G/4G/5G, LPWAN (Low Power Wide Area Network) gibi protokoller, YKB'ler ile KM arasında iletişim kanalları

kurmak için kullanılabilmektedir. Uzun menzilli iletişim kanalları aşağıda detaylandırılmıştır (Örs, vd., 2022; Göre, vd., 2018).

5.3.4.1. GSM (Global System for Mobile Communications)

Mobil İletişim Sistemi anlamına gelen cep telefonu iletişim protokolü, Avrupa ülkeleri için "ikinci nesil (2G)" olarak adlandırılan ses ve veri hizmetini radyo frekans dalgaları ile sağlayan devre anahtarlamalı bir haberleşme sistemidir. Bu protokolün en önemli avantajı düşük kurulum maliyetidir; ancak operasyonel maliyetlerin yüksek olması, teknik kapasitenin öncelikle bireysel kullanıma ayrılması, afet ve acil durumlarda kapasitenin yetersiz kalması bu teknolojinin dezavantajlarını oluşturmaktadır.

Mobil telefon teknolojileri nesillere ayrılmıştır;

1. Birinci Nesil Teknolojiler (1G): İlk nesil sistemler, analog veri akışı için kullanılmaktadır.
2. İkinci Nesil Teknolojiler (2G): İkinci nesil sistemler, sayısal veri akışı için kullanılmaktadır.
3. İkinci ve Yarım Nesil Teknolojiler (2.5G - 2.75G): Bu nesil sistemlerde sayısal veri iletişimi (GPRS, EDGE) mümkün olmuştur.
4. Üçüncü Nesil Teknolojiler (3G): 3G ile hızlı veri transferi ve bant genişliğinin verimli kullanımı mümkün olmuştur.
5. Dördüncü Nesil Teknolojiler (4G): 4G ile 3G'nin kapsama alanında çözilemeyen sorunların çözülmesi beklenmektedir.

GSM900 bandında 124 frekans kullanılmaktadır. Bir frekansta Time Division Multiplexing yöntemiyle en fazla 7 kişi konuşabilmektedir. Bu durumda tüm frekanslar kullanıldığında, kapsama alanı ülke çapında düşünüldüğünde aynı anda en fazla $7 \times 124 = 868$ kişi konuşabilmektedir. Frekans sayısının sınırlı ve ihtiyacın fazla olması nedeniyle hücre yapısı tasarlanmaktadır. Hücresel sistemde aynı frekans komşu hücrelerde kullanılamaz, ancak farklı hücrelerde defalarca kez kullanılabilmektedir. Hücrelere verilecek frekans sayısı, hücredeki abone yoğunluğuna göre belirlenmektedir. Her hücre belirli bir alanı kapsar ve her hücrede, mobil cihazlarla bağlantı kurulmasını sağlayan bir

ana alıcı-verici istasyonu (BTS) ve anten bulunmaktadır. Bu alan içindeki tüm telefon görüşmeleri bu anten ve istasyon üzerinden gerçekleştirilebilmektedir.

GSM, 900, 1800 veya 1900 MHz frekans bantlarında çalışmaktadır:

-GSM 900: Kırsal alanlarda haberleşmek için geliştirilmiştir. Maksimum hücre yarıçapı 33 km'dir.

-GSM 1800: Abone yoğunluğunun fazla olduğu şehirsel alanlar için tasarlanmıştır. Maksimum hücre yarıçapı 7-8 km'dir.

-GSM 1900: Abone yoğunluğunun fazla olduğu şehirsel alanlar için tasarlanmıştır ve maksimum hücre yarıçapı 6-7 km'dir. Sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılmaktadır.

5.3.4.2. LPWAN teknolojileri

IoT sistemlerine özgü kablosuz veri iletişimini kolaylaştırmak için düşük güç tüketimli geniş alan ağı LPWAN haberleşme protokolleri geliştirilmiştir. Güç tüketimini azaltmak için veri gönderim hızı, bant genişliği ve kapsama alanı arasında bir denge oluşturmak bu protokollerin temel amacıdır. Gecikmenin önemli olmadığı daha düşük veri iletim hızlarında LPWAN kullanımı ile düşük güç tüketimli IoT haberleşmesi sağlanabilmektedir. LPWAN teknolojisine NB-IoT (Narrowband-IoT), Sigfox ve LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) haberleşme protokolleri örnek olarak verilebilmektedir (Gül, vd., 2017; Özdemir, vd., 2022).

Düşük güç geniş alan haberleşme teknolojilerinin temel özellikleri aşağıda verilmiştir;

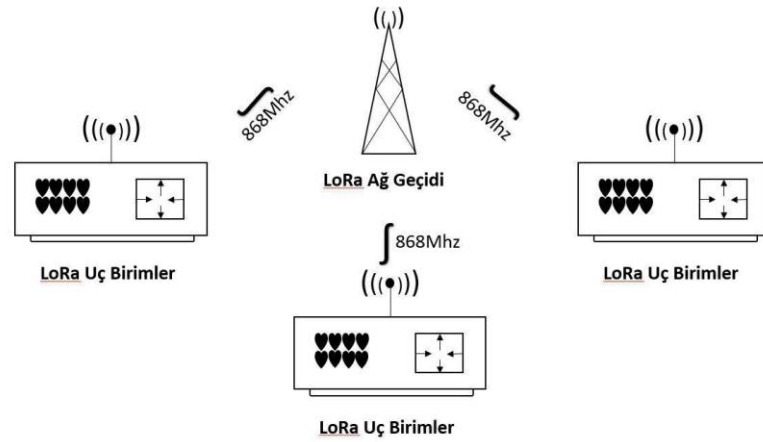
- Uzun Mesafe Kapsama Alanı (Yoğun kentsel alanda 0-5 km, açık alanda 10-65 km)
- Düşük Güç Tüketimi
- Küçük Veri Paketi Boyutu: 12 – 255 Byte

5.3.4.3. LoRAWAN

IoT; çevremizdeki fiziksel durumları kontrol etmemizi ve analiz etmemizi sağlayan donanım ve yazılım tabanlı bir iletişim ağıdır. LoRa uç cihazlarının

haberleşebilmesi için LoRa Alliance tarafından geliştirilmiş bir protokoldür. 2020 yılına gelindiğinde, yirmi beş milyardan fazla cihazın kablosuz iletişim yoluyla birbirleri ile haberleşmesi beklenen IoT'nin hızla büyümesi öngörülmektedir. IoT, nesnelerin bir ağa bağlanması yapısını oluşturmaktadır. Hücresel veri iletişimi, uzak mesafe konusunda bir kısıt oluşturmamakla birlikte, yüksek maliyetli ve güç tüketimi açısından verimsizdir. WiFi teknolojisi ise kısıtlı mesafede etkili olabilir. Hem mesafe hem de güç tüketimi açısından uzun vadeli verimlilik sağlamak amacıyla LoRa ve LoRaWAN geliştirilmiştir.

IoT altyapısal çözümü olarak geliştirilen LoRa, düşük güçlü, uzun menzilli, düşük veri iletim hızında çalışan bir kablosuz modülasyon tekniğidir. LoRa, lisanssız ISM (Industry, Scientific and Medical Radio Band) bandını kullanmaktadır. ISM bandı, bölgelere göre 868-869 MHz ve 902-908 MHz aralığını kapsamaktadır ve 50 Kilobits per second (Kbps) veri iletim hızına sahiptir. Kapsama alanı birkaç kilometreye kadar ulaşabilir ve düşük güç tüketimi ile karakterizedir. Yıldız ağ topolojisini kullanır; bu topoloji, her düğümün merkezi bir bağlantı noktasına bağlı olduğu yerel alan ağları (LAN) için yaygın bir yapılandırmadır. LoRa, simetrik anahtar şifreleme standardı olan AES (Advanced Encryption Standard) 128'i kullanmaktadır. LoRaWAN, kablosuz haberleşme teknolojileri içerisinde önemli bir konuma sahiptir. LoRa haberleşme teknolojisi, düşük veya orta boyutlu veri aktarımlarının gerçekleştirildiği durumlarda etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu teknoloji, radyo frekans dalgalarına dayanarak veri iletimini sağlamaktadır. Radyo frekanslarının kullanılması, mesafe konusundaki avantajını ortaya koymaktadır. Şekil 5.4'te LoRaWAN teknolojisine ait ağ tasarımı gösterilmiştir. (Gül, vd., 2017; Özdemir, vd., 2022; Gören, vd., 2018).



Şekil 5.4. LoRaWAN teknolojisi ağ tasarımı (Gül, vd., 2017).

5.3.4.4. NB-IoT

Hücreli telekomünikasyon bantlarını kullanarak geniş bir yelpazedeki cihaz ve hizmetlerin bağlanmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir kablosuz haberleşme teknolojisidir. NB-IoT teknolojisi, düşük güç tüketimi, geniş kapsama alanı, LTE frekans bantlarında çalışma ve yüksek bağlantı kalitesi sağlamaktadır. 3G standartlarına dayalı olarak geliştirilen bu teknoloji, LTE frekansları üzerinden çalışır ve mevcut LTE şebekesi üzerinde düşük veri hızıyla çok sayıda uç cihazı etkili ve kesintisiz yönetebilmek için tasarlanmıştır. NB-IoT, 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) tarafından standartlaştırılan bir dizi mobil IoT altyapılarından biridir. NB-IoT haberleşme, Cat-M ile benzer bir amacı paylaşmakla birlikte, özellikle modülasyon açısından farklı bir teknoloji kullanmaktadır. NB-IoT, GSM altyapısını kullanır ve özelleştirilmiş bir altyapı olduğundan, maliyet yaklaşımları standart LTE maliyet yaklaşımlarından daha fazla olabilmektedir.

NB-IoT kullanacak hatlar için SIM kartın LTE (4.5G) uyumlu olması gerekmektedir. NB-IoT, stratejik olarak 5G öncesi bir ara çözüm olarak değerlendirildiğinden, şu an için bu teknoloji üzerine büyük yatırımlar yapılmamaktadır. Ancak, NB-IoT'nin mevcut GSM altyapısında geliştirilmesine ihtiyaç duyulacaktır; bu nedenle NB-IoT kullanılması planlanan uygulamalarda, servis sağlayıcıların bu teknolojiyi destekleyip desteklemediklerinin uygulama öncesinde doğrulanması önemli olmaktadır (Sinha vd., 2017).

NB-IoT haberleşme özellikleri şunlardır:

- Küçük veri paketi boyutu
- Düşük güç tüketimi
- Yüksek iletim gücü ve ulaşılması zor alanlarda daha iyi iletim
- Lisanslı bant kullanımı ile girişim riskinin minimize edilmesi ve yüksek güvenlik seviyesi sağlanması

5.3.4.5. Sigfox

Sigfox, 2009 yılında Fransa'da kurulmuş dar bant makineler arası (M2M) haberleşme ağıdır. Sigfox, kendi baz istasyonlarını kurarak dar bant haberleşmenin avantajlarını kullanmakta ve az sayıda baz istasyonu ile geniş bir kapsama alanı sağlayabilmektedir. Şu anda ülkemiz bu kapsama alanında bulunmamakla birlikte, Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sigfox, nispeten daha küçük boyutlu mesajları işlemek üzere tasarlanmış hafif bir protokol olarak değerlendirilmektedir. Daha az veri gönderilmesi, daha düşük enerji tüketimini tetiklemekte ve dolayısıyla daha uzun batarya ömrü sağlamaktadır. Sigfox, lisanssız 200kHz bandında çalışmaktadır. Her mesaj 100Hz genişliğinde olup, bölgeye bağlı olarak saniyede 100 veya 600 bit hızında veri aktarımı sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde gürültüye karşı oldukça dayanıklıdır ve uzun mesafelerde etkili iletim gerçekleştirebilmektedir (Baloğlu, vd., 2019).

5.3.5. Kısa Menzilli iletişim protokolleri

Akıllı Sokak Aydınlatma Sisteminde LB VE Yerel Kontrol Birimi (YKM) arasındaki iletişimi ifade etmektedir. Bu mesafeler 100 metreden az alanlar içindir. Kısa menzilli haberleşmeler hem kablolu hem kablosuz olarak yapılabilmektedir. Kablosuz haberleşmeye Zigbee, Bluetooth, JenNET-IP örnek olarak verilebilecektir. IoT özellikli bir akıllı sokak aydınlatma sistemleri için şehrin her yerinde binlerce LB olabilmektedir. Bu durumda çok sayıdaki LB'leri idare etmek için iletişim protokolünün aşağıdaki belirtilen durumları karşılaması gerekmektedir,

- Çok sayıdaki LB 'yi idare etme veya yönetme yeteneği
- Uzun pil ömrü
- Düşük maliyetle işlem yapma
- Düşük veri hızı ve daha az karmaşıklık

IoT özellikli kısa menzilli iletişimler için hem kablolu hem kablosuz iletişim protokolleri kullanılabilir. Esnek ve temiz bir ortamı kablosuz iletişim seçeneği sunarken, kablolu seçenek için ise mevcut altyapı kullanılarak maliyet düşürülebilecektir. Mevcutta kablosuz iletişim protokolleri dış aydınlatma sistemleri için önerilirken, kablolu iletişim

iç mekan aydınlatmalarında önerilmektedir. IoT özellikli kablosuz protokoller protokolleri, IEEE 802.15.4 (düşük hızlı kablosuz kişisel alan ağı) standardını temel alır. Kısa menzil iletişim protokollerine Zigbee, BLE, Bluetooth örnek olarak verilebilmektedir (Örs, vd., 2022).

5.1.1.1. ZigBee

Düşük güç, düşük veri hızı, düşük maliyet ve kısa gecikme süresi özelliklerine sahip olmaktadır. Geliştirilmesi kolay ve yüksek veri güvenirliliği sağlayan en yaygın kablosuz sensör ağı standartlarından biridir. ZigBee adı, bal arılarının çiçekler arasındaki zikzaklı desenlerinden gelmektedir ve bir örgü ağdaki düğümler arasındaki iletişimi temsil etmektedir. ZigBee, yarı iletken ve yazılım geliştiricilerden orijinal ekipman üreticilerine kadar birçok üye şirketin (Ember, Freescale, Chipcon, Invenys, Mitsubishi, CompXs, AMI Semiconductors, ENQ Semiconductors) bulunduğu ZigBee İttifakı tarafından geliştirilmiştir. ZigBee, IEEE 802.15.4 standartlarına dayanan kablosuz algılayıcı ağlar için geliştirilmiş bir ağ teknolojisidir. Bu protokolün öne çıkan en önemli avantajları düşük maliyet ve düşük güç tüketimidir. ZigBee teknolojisi, Bluetooth ve Wi-Fi ağlarına kıyasla daha düşük veri çevrim kapasitesine sahip olmaktadır. IEEE 802.15.4 standardı, üç adet lisanssız frekans bandını tanımlamaktadır. İlk bant, 2.4 GHz frekans bandını ISM kullanır ve 16 kanala sahiptir. İkinci bant, 902-928 MHz frekans bandında 10 kanala sahip olmaktadır. Üçüncü bant ise 868-870 MHz frekans bandında sadece bir kanala sahiptir. Bu bantlar sırasıyla 20 kbps, 40 kbps ve 250 kbps veri hızlarına kadar çalışır ve 868 MHz Avrupa, 915 MHz Kuzey Amerika ve Avustralya ve 2,4 GHz dünya çapında ISM bandında faaliyet göstermektedir. Bu frekans bantları, mevcut yaygın kablosuz ağların bantlarından farklı olduğu için, Wi-Fi, Bluetooth, Wireless USB vb. diğer kablosuz ağlarla karşılıklı etkileşim meydana gelmez ve bu nedenle diğer kablosuz ağları etkilememektedir. IEEE 802.15.4 standardı, teorik olarak ağ başına 65.000'den fazla düğümü desteklemek için 64 bit ve 16 bit kısa adresler kullanılmaktadır. ZigBee ağı, 65356 adede kadar cihazı destekleyebilmektedir. ZigBee cihazları arasındaki mesafe 50 metreye kadar olabilir ve her düğüm, diğer düğümlere veri aktarabilmektedir (Ramya, vd., 2011; Fen Bilimleri Dergisi: Koç, 2013).

ZigBee kullanılma nedenleri;

- Çok uzun pil ömrü

- Düşük güç tüketimi
- Çok sayıda ağ düğümünü destekler
- Düşük maliyetli
- Açık standart protokolü olması
- Standartlara dayalı güvenlik (AES128)

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Akıllı şehirler kavramı günümüzde kullanım alanları giderek yaygınlaşan ve popüler hale gelen bir teknolojidir. Cihazlara uzaktan erişim enerji verimliliği konusunda avantaj sağlamaktadır. Akıllı sistemler ile aydınlatma yönetimi, enerji verimliliği optimizasyonu yeni teknolojiler ile gerçekleştirilmektedir. Çalışma genel olarak aydınlatma sistemlerinin kontrolü, sürdürülebilirliği ile ekonomik gelişime katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bir şehir için en büyük enerji giderlerinden biri de sokak aydınlatmasıdır. Akıllı sokak aydınlatma sistemi kullanıldığında aydınlatma maliyetleri %50-%70 oranında azaltılabilmektedir. Akıllı sokak aydınlatma sistemi, armatürlerin ışık çıktısını ve doluluk oranı ayarlanabilmektedir. LASAS yönetimi, sokak lambalarının enerji tüketimini uzaktan izlemek ve kontrol yoluyla uygun enerji tüketimi azaltma önlemlerini almak için kablosuz tabanlı sistemler önermektedir. IoT; cihazların içinde bulunan çeşitli yazılım ve donanımlarla çift yönlü iletişim kurmalarını sağlamaktadır.

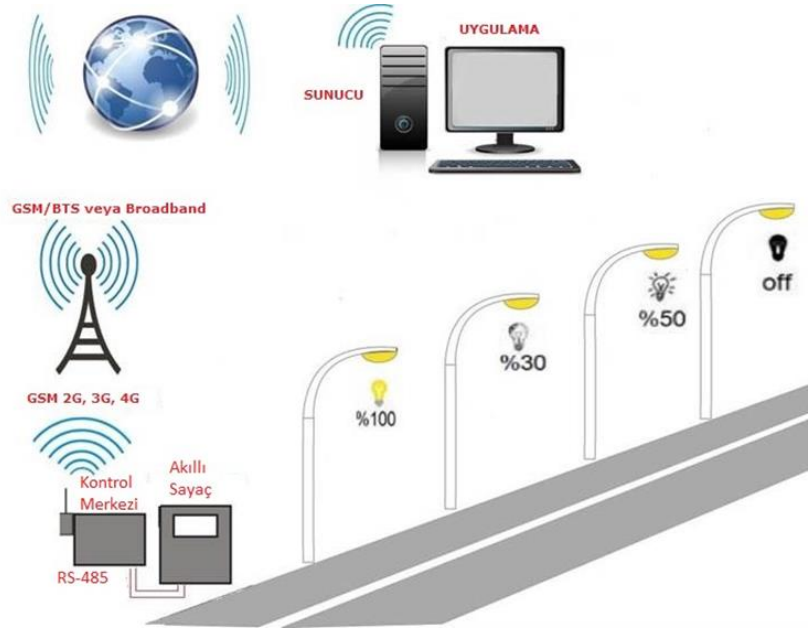
Dağıtım şebekelerinde harmoniklerin bulunması performans ve işletme açısından çeşitli sorunlara yol açmaktadır. Şebekede oluşan sorunları ortadan kaldırmak için; daha yüksek enerji verimliliği, sağlamlığı, uzun ömrü ve ışık kontrolü özellikleri ile sokak aydınlatması için LED'lerin kullanımı tercih edilmektedir. İyi tasarlanmış bir sokak aydınlatması sürücülerin ve yayaların görsel görevlerine yardımcı olduğu gibi pek çok faydası vardır. Birçok ülkede genel aydınlatma için enerji yönetimi eğilimi bulunmaktadır. HPNA lambalar 1980'lerden beri standart olarak kullanılmaktadır, ancak HPNA lambaların kullanımı yüksek enerji tüketimine neden olduğundan dolayı enerji tasarrufu LED sokak aydınlatması hızla yeni bir trend haline gelmektedir. Bu tez çalışması, bir şehirdeki armatürlerin LASAS ile uzaktan yönetilebilmesine imkan sağlayacaktır. LASAS aracılığıyla armatürlerin açma-kapama yapması, gece saatlerinde enerji yoğunluğunu dimleme ile kontrol edilebilmesi, arıza algılaması gibi geri bildirimler sağlayarak enerji verimliliğinin artırılması hedeflenmektedir. Ayrıca aydınlatmaların dağıtım şebekeleri üzerindeki kontrolü sağlanarak, güç kalitesini arttıracak bir çözüm önerisi sunacaktır. Sokak aydınlatma armatürlerinin devreye zamanında girip çıkması sağlanarak şebekeye aşırı yüklenmelerin önüne geçmesi sağlanacaktır. Yapılan araştırmalarda; HPNA ve LED lambaların harmonik etkilerinin şebeke üzerindeki Güç Kalitesi incelemiş olup LED armatürlerin şebekedeki güç kalitesini arttırdığı saptanmıştır. Sokak aydınlatmalarının LASAS ile devreye girme ve devreden çıkma zamanları kontrol altına alınması hedeflenmektedir. Güneşin doğuş ve batış süreleri

referans alınarak şebekede oluşacak yükler kontrol altına alınacaktır. Sokak aydınlatmaları esnek olması nedeniyle farklı iletişim teknolojileri kullanılabilir. Bu projede LASAS için GSM şebeke iletişim alt yapısı kullanılmıştır.

Otomasyon kontrolü olmayan manuel sistem yöntemlerinde gün doğumu ve gün batımı saatlerinin belirlenmesi armatürlerin bulunduğu şehrin adı veya enlem/boylam bilgilerinin kullanıcı tarafından manuel girilmesiyle sağlanmaktadır. Bu yöntemde kullanılan rölelerin uzaktan erişimi bulunmamaktadır. Astronomik zaman rölelerinin arızalanması veya pilinin bitmesi gibi durumlar sokak aydınlatmalarının zamanında açma-kapama yapamamasına ve dağıtım şebekesi üzerinde zamansız yüklenmelere neden olabilmektedir. Ayrıca gece araç sürücülerinin konforunu olumsuz yönde etkileyebilecektir. Bu duruma çözüm olarak LASAS haberleşme cihazı ile sokak aydınlatmalarının uzaktan açma-kapama yapması kontrol edilebilecektir. Böylece LASAS sistemi sayesinde sokak aydınlatmalarının açma-kapama saatleri, akım, gerilim ve güç bilgilerine anlık olarak erişim sağlanabilecektir. Geri bildirimler sayesinde arızalara daha hızlı müdahale edilebilecektir. Sokak aydınlatmalarında dimleme yöntemi ile enerji verimliliği artırılmaktadır. Aynı zamanda LDR'li kontrol devresi sayesinde ışığa ihtiyaç duyulan zamanlarda LASAS devrede olacağından ortam aydınlık seviyesine göre enerji tüketimi sağlanacak olup büyük oranda enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmektedir.

LASAS, GSM tabanlı sokak lambası izleme ve kontrol sistemi temelli sokak lambalarının otomatik olarak zamanlanmış kontrollü anahtarlama yapılmasıyla tasarlanmış verimli bir sistemdir. GSM tabanlı sokak aydınlatma izleme ve kontrol sistemi, zaman gecikmeleri ayarlandığında sokak ışıklarını açık/kapalı duruma getirebilen GSM tabanlı bir haberleşme cihazı ile kontrol edilmektedir. Temel olarak istemci ve sunucu tarafı olmak üzere iki GSM modüle sahiptir. İstemci tarafı ayrıca mikro denetleyiciye bağlanan GSM haberleşme cihazından oluşmaktadır. Kontrol sistemi bir GSM Modem, kontrol devresi ve elektrikli cihazlardan oluşmaktadır.

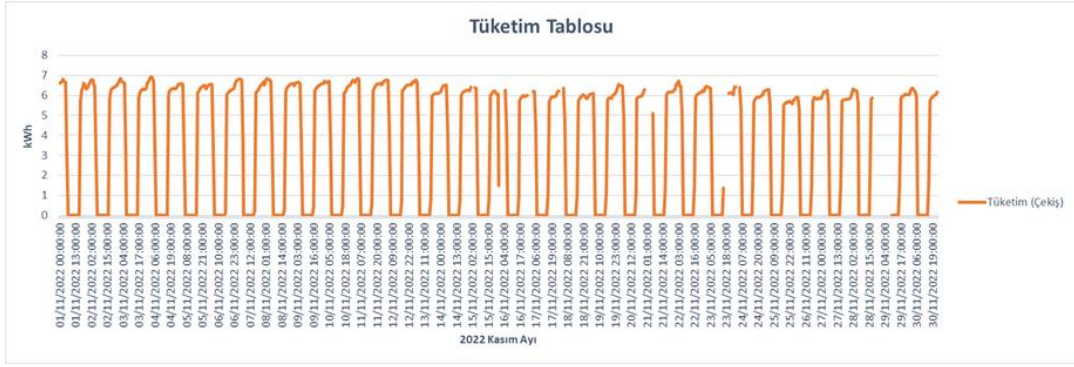
Uygulanacak olan Sistem tasarımı aşağıda gösterildiği gibidir. Haberleşme cihazı ile akıllı sayaç arasında RS-485 tekniği kullanılarak veriler alınıp GSM şebeke üzerinden son kullanıcılara aktarılabilir. Tasarlanan LASAS modeli Şekil 6.1. 'de gösterilmektedir.



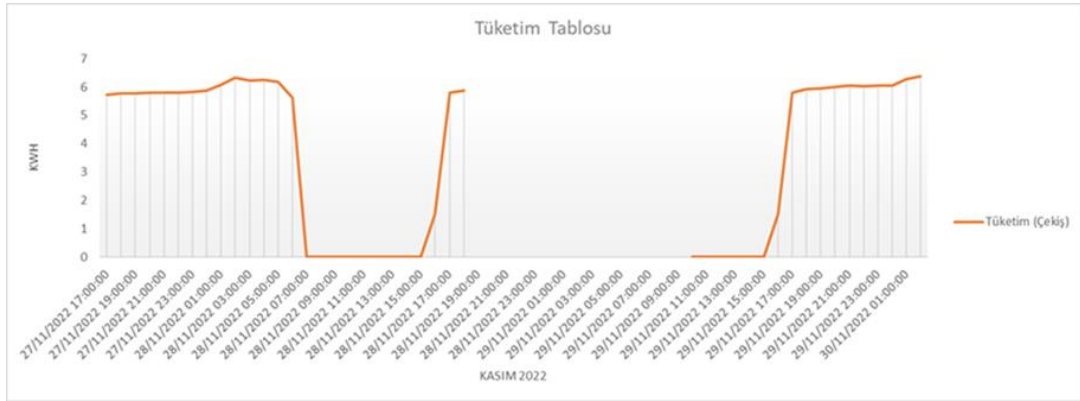
Şekil 6.1. LASAS sistem mimarisi.

6.1 HPNA Lamba Geleneksel Yöntem ile Yapılan Enerji Ölçümleri

Bu çalışmada öncelikli olarak durum1 test adımıyla geleneksel aydınlatma yöntemi kullanılarak Batman ilindeki bir sokak aydınlatma lambasının açılıp-kapanmasını kontrol eden astronomik zaman rölesi kullanılarak test yapılmıştır. Sodyum buharlı HPNA lambalar kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. Yapılan test sonucunda sayaç ölçümlerinden 1 aylık tüketim verileri elde edilmiştir. Sayaç ölçümlerinden saatlik olarak alınan enerji tüketim verileri elde edilmiştir. Bir gün baz alındığında sokak aydınlatmasından 24 adet veri elde edilmiştir. Bir aylık enerji tüketim değerlendirmesi 720 adet veriden oluşmaktadır. Kasım ayı enerji tüketim değerlendirme grafiği kilowatt saat (kWh) cinsinden zamana karşı Şekil 6.2.'de gösterilmiştir. Gündüz saatlerinde enerji ölçümü sıfırdır. Hava kararmaya başladığında astronomik zaman rölesi aydınlatmanın bulunduğu koordinata göre güneşin doğuş-batış saatlerinde devreye girerek çalışmaktadır. Şekil 6.3.'de sokak aydınlatmasının açma-kapamasında zaman kaymaları olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda sayaç enerji ölçümlerini saha koşulları ile kontrolü sağlanmadan açma-kapama doğruluğu tespit edilememektedir. HPNA aydınlatma armatürleri içerisinde bulunan sodyum gazının ısınıp buharlaşması sonucunda aydınlatma sağlanmaktadır. Şekil 6.2'de enerji ölçümlerine baktığımızda enerji ölçümünde dalgalanmalar olduğunu gözlemlemekteyiz.



Şekil 6.2. HPNA lamba, Kasım 2022 aylık tüketimi.



Şekil 6.3. HPNA lamba, 27-30 Kasım 2022 aylık tüketimi.

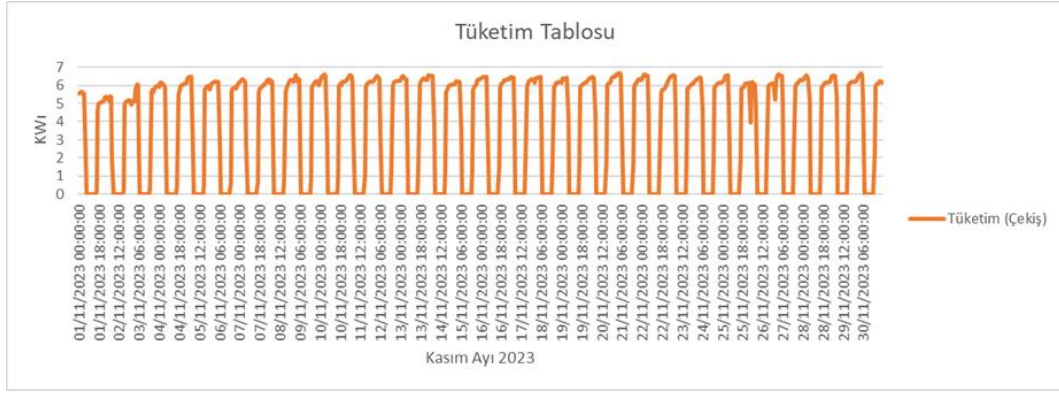
6.2 HPNA Lamba Akıllı Yöntem ile Yapılan Enerji Ölçümleri

Yapılan çalışmanın durum 2 test adımımda akıllı aydınlatma yöntemi kullanılarak Batman ilindeki bir sokak aydınlatma lambasının açılıp-kapanmasının uzaktan kontrolü sağlanmıştır. HPNA lambalar kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4.' de Batman iline ait sokak aydınlatma saha görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 6.4. HPNA lamba saha test görüntüsü.

Bu adımda GSM tabanlı haberleşme yapabilen sokak aydınlatmasının enerji tüketim verileri saatlik olarak uzaktan sayaç ölçüm sistemleri ile elde edilmiştir. GSM tabanlı haberleşme ile sokak aydınlatma izleme ve kontrol sistemi için aydınlatmanın devreye girip çıkma zamanı NTP (Network Time Protocol) sunucular üzerinden kontrol edilmiştir. Ölçüm sonuçları için bir gün baz alındığında sokak aydınlatmasından 24 adet veri elde edilmiştir. Bir aylık enerji tüketim değerlendirmesi 720 adet veriden oluşmaktadır. Kasım ayı enerji tüketim değerlendirme grafiği kWh cinsinden zamana karşı Şekil 6.4.'de gösterilmiştir. Gündüz saatlerinde enerji ölçümü sıfırdır. Havanın kararmasıyla NTP sunucu kontrolü ile sokak aydınlatması saat 17:00'da devreye girmektedir. Şekil 6.5. 'de enerji tüketimi yapmaya başladığı gözlemlenmektedir. Sokak aydınlatmasının devreye girme ve çıkma zamanları uzaktan sayaç ölçüm sistemlerinin anlık bildirimleri sayesinde 4.1'de belirtilen açma –kapama zaman kaymalarına çözüm olabilecektir.



Şekil 6.5. HPNA lamba, Kasım 2023 aylık tüketimi.



Şekil 6.6. HPNA Lamba, 02-04 Kasım aylık 2023 tüketimi.

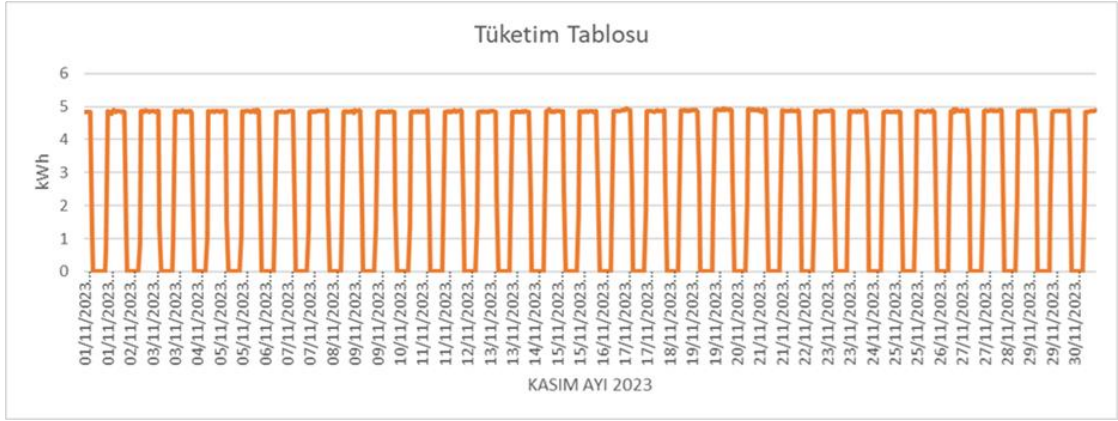
6.3. LED Lamba Akıllı Yöntem ile Yapılan Enerji Ölçümler

Yapılan çalışmanın durum 3 test adımıyla akıllı aydınlatma yöntemi kullanılarak Batman ilindeki bir sokak aydınlatma lambasının açılıp-kapanmasının uzaktan kontrolü sağlanmıştır. Bu LED lambalar kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. Bu adımda GSM tabanlı haberleşme yapabilen sokak aydınlatmasının enerji tüketim verileri saatlik olarak uzaktan sayaç ölçüm sistemleri ile elde edilmiştir. GSM tabanlı haberleşme ile sokak aydınlatma izleme ve kontrol sistemi için aydınlatmanın devreye girip çıkma zamanı NTP sunucular üzerinden kontrol edilmiştir. Şekil 6.7.' de Batman iline ait sokak aydınlatma saha görüntüsü yer almaktadır.

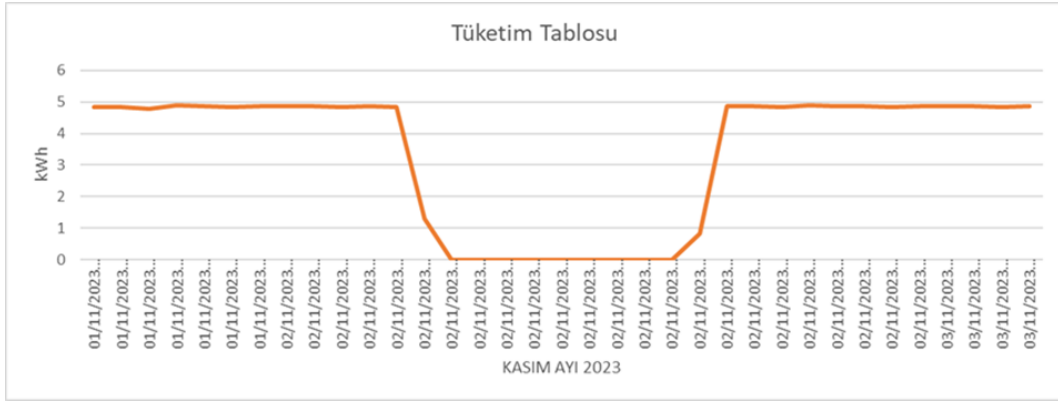


Şekil 6.7. LED lamba saha test görüntüsü.

Ölçüm sonuçları için bir gün baz alındığında sokak aydınlatmasından 24 adet veri elde edilmiştir. Bir aylık enerji tüketim değerlendirmesi 720 adet veriden oluşmaktadır. Kasım ayı enerji tüketim değerlendirme grafiği kWh cinsinden zamana karşı Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Gündüz saatlerinde enerji ölçümü sıfırdır. Havanın kararmasıyla NTP sunucu kontrolü ile sokak aydınlatması saat 17:00’da devreye girmektedir. Şekil 6.9.’de enerji tüketimi yapmaya başladığı gözlemlenmektedir. Sokak aydınlatmasının devreye girme ve çıkma zamanları uzaktan sayaç ölçüm sistemlerinin anlık bildirimleri sayesinde 4.1’de belirtilen açma –kapama zaman kaymalarına çözüm olabilecektir. Ayrıca HPNA lambaların şebekede oluşturduğu dengesiz yüklenmelere LED armatürlerin kullanılarak çözüm sağlanacaktır.



Şekil 6.8. LED Lamba, Kasım 2023 aylık tüketimi.



Şekil 6.9. LED lamba, 01-03 Kasım 2023 aylık tüketimi.

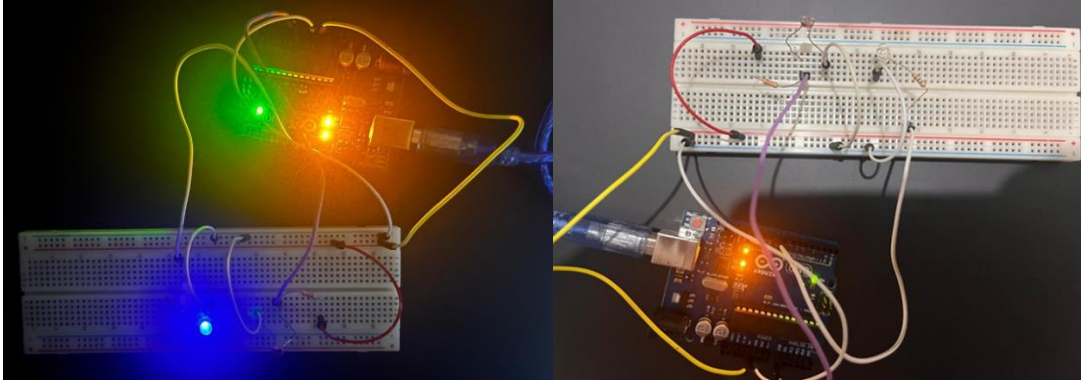
6.3.1. LED aydınlatma kaynağı LDR sensör ile PWM (karartma) kontrol devresi tasarımı ve simülasyon sonucu ölçümleri

Yapılan çalışmanın durum 4 test adımıda kullanılan LDR; ışığa duyarlı bir dirençtir ve ışık yoğunluğuna bağlı olarak direnci değişir. LDR, ışığa duyarlı bir yarıiletken malzeme kullanılarak yapılmış bir bileşendir. LDR elektronik devre elemanı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Işığa duyarlı direnç (LDR).

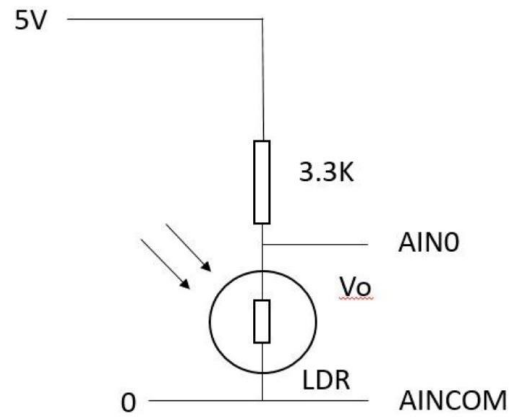
LDR, genellikle bir seramik disk üzerine ince bir tabaka halinde uygulanan ışığa duyarlı bir yarıiletken malzeme ile kaplanmıştır. Bu malzeme, ışığa maruz kaldığında, elektriksel iletkenlik özellikleri değişir. Işık yoğunluğu arttıkça, yarıiletken malzeme içindeki elektronlar daha fazla enerji kazanır ve hareketlenir. Bu, malzemenin daha iyi bir iletken haline gelmesine neden olur, yani direnci azalır. Çünkü, daha fazla elektron taşıyıcısı serbest hale gelir ve elektrik akımının daha kolay geçmesini sağlar. LDR, çeşitli kontrol uygulamalarda kullanılır. Bu çalışmada LDR ışık sensörü olarak kullanılacak olup enerji tasarrufu sağlamak için otomatik kontrol edilebilen LASAS tasarlanmıştır. Sistem, Arduino, breadboard, 1 adet 5mm LDR, 1 adet LED, 1 adet 330 Ω direnç ve 1 adet 10k Ω direnç kullanılarak oluşturulacaktır. LDR üzerinden analog okuma değerleri darbe genişlik modülasyonu yani PWM (Pulse width Modulation) ile LED parlaklığını kontrol edeceğiz. LDR'nin analog okuma kısmında 0V ile 5V arasında bir değer elde etmekteyiz. LDR 'den okuduğumuz (0-1023) arasında toplam 1024 değere karşılık gelmektedir. Örnek verecek olursak, analog olarak aldığımız 700 değeri aslında $5V \cdot 700 / 1024$ 'ten yaklaşık olarak 3.41V giriş gerilimini oluşturmaktadır. PWM Analog yazma işleminde ise 0V ile 5V arasındaki değer 256 (0-255 arası) eşit parçaya bölünmektedir. Değerlerin aralık hesabı için; $5V / 256 = 0.0195$ olur. Örneğin 124 değerini yazarsak $124 \cdot 0.0195$ 'ten yaklaşık olarak 2.42V çıkış gerilimi sağlayacaktır. Arduino üzerinde yer alan analog ve dijital giriş çıkış pinleri kullanılarak LED çıkışında farklı değerleri okuyabileceğiz. Dolayısıyla LED çıkışında farklı gerilim değerleri ve güç değerleri elde edilmiştir. Bu sayede ortamın tam karanlık olduğu durumda LED ışık yaymaktadır. Ortam tam aydınlık olduğunda LED ışık yaymamaktadır. Ortam karanlık seviyesi değiştikçe LDR sensör çıkışı değişmektedir. Şekil 6.14'de 10 adet LDR sensör analog değerine karşılık LED çıkışında 10 farklı güç değeri elde edilmiştir. Şekil 6.11. 'de LASAS prototipi test durumlarına ait görüntüler yer almaktadır.



Şekil 6.11. LASAS prototipi test durumlarına ait görüntüler.

6.3.2. Işık yoğunluğu ve tüketilen enerji ölçümleri

LDR'nin direnci üzerine düşen ışık miktarına göre değişir. Tipik bir LDR için direnç R_L ile ışık yoğunluğu Lux arasındaki ilişki (1)'deki gibidir.



Şekil 6.12. Işık yoğunluk ölçümü.

Voltaj bölücü devre kuralı kullanılarak $3.3k\Omega$ 'lık bir direnç aracılığıyla 5V'ye bağlanırsa LDR'nin çıkış voltajı (1)'deki gibi olacaktır.

$$R_L = 500/lux \quad (6.1)$$

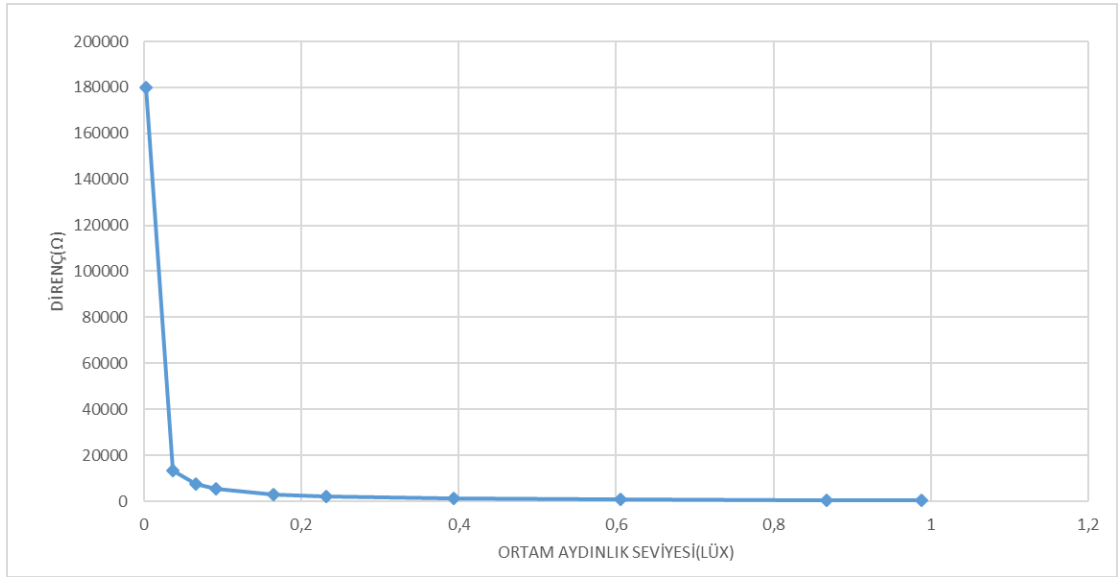
LDR, voltaj bölücü kuralı kullanılarak $3,3K$ 'lık bir direnç aracılığıyla 5V'ye bağlanırsa, LDR'nin çıkış voltajı şöyle olur;

$$V_o = 5x \left[\frac{RL}{RL + 3.3} \right] \quad (6.2)$$

Denklem 1'i denklem 2'ye değiştirerek ışık yoğunluğunu elde edebiliriz;

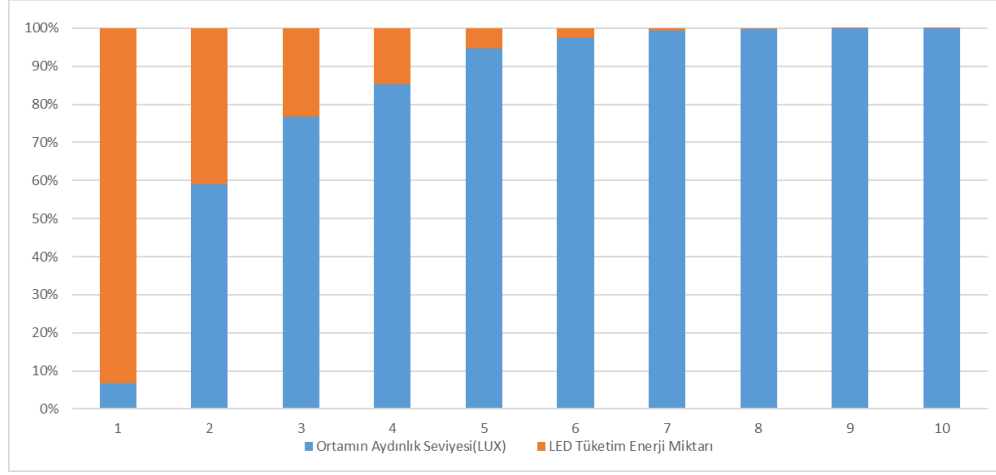
$$Lux = \left(\frac{2500}{V_o} - 500 \right) / 3.3 \quad (6.3)$$

Yapılan lm sonuçları incelendiğinde; ortam aydınlık seviyesi arttıkça direnç değişimi azalma yönünde olduğu şekil 6.13.'da gözlenmektedir.



şekil 6.13. Ortam aydınlık seviyesi, direnç değişim grafiği.

Yapılan lm sonuçları incelendiğinde ortamın aydınlık seviyesi arttıkça LED çıkışında kullanılan güç miktarının azaldığı şekil 6.14.'de gözlenmektedir.



Şekil 6.14. Ortam aydınlık seviyesi, LED enerji tüketimi değişim grafiği.

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu araştırma, akıllı sokak aydınlatma sistemleri ile geleneksel sokak aydınlatma sistemleri arasında bir karşılaştırma yapmayı amaçlamıştır. Çalışma kapsamında, her iki sistem de belirli kriterlere göre değerlendirilmiş ve farklı iki sokak aydınlatma kaynağı ile yapılan saha test ve ölçüm sonuçlarına ait analizler ilgili Çizelge 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 7.6 çizelgelerinde verilmiştir.

Çizelge 7.1. Durum 1 test Adımı HPNA aydınlatma kaynağı geleneksel aydınlatma yöntemi ile elde edilen enerji tüketim değerleri.

Aydınlatma Kaynağı (HPNA)	Tüketilen Enerji Günlük (kWh)	Tüketilen Enerji Aylık (kWh)	Tüketilen Enerji Yıllık (kWh)
1 armatür dizisi	87,8	2.634	31.608
10 armatür dizisi	878	263.40	316.080
100 armatür dizisi	8.780	263.400	3.160.800

Çizelge 7.1 ‘de geleneksel aydınlatma yöntemi kullanılarak 1 dizi HPNA sokak aydınlatma kaynağına ait tüketim ölçümleri yer almaktadır. Elde edilen ölçüm sonuçları sahaya iş gücü oluşturularak tüketim ölçüm cihazından manuel müdahale edilerek alınmıştır.

Çizelge 7.2 Durum 2 test adımı HPNA aydınlatma kaynağı akıllı kontrol yöntemi ile elde edilen enerji tüketim değerleri.

Aydınlatma Kaynağı (HPNA)	Tüketilen Enerji Günlük (kWh)	Tüketilen Enerji Aylık (kWh)	Tüketilen Enerji Yıllık (kWh)
1 armatür dizisi	71,5	2.145	25.740
10 armatür dizisi	715	21.450	257.400
100 armatür dizisi	7.150	214.500	2574.000

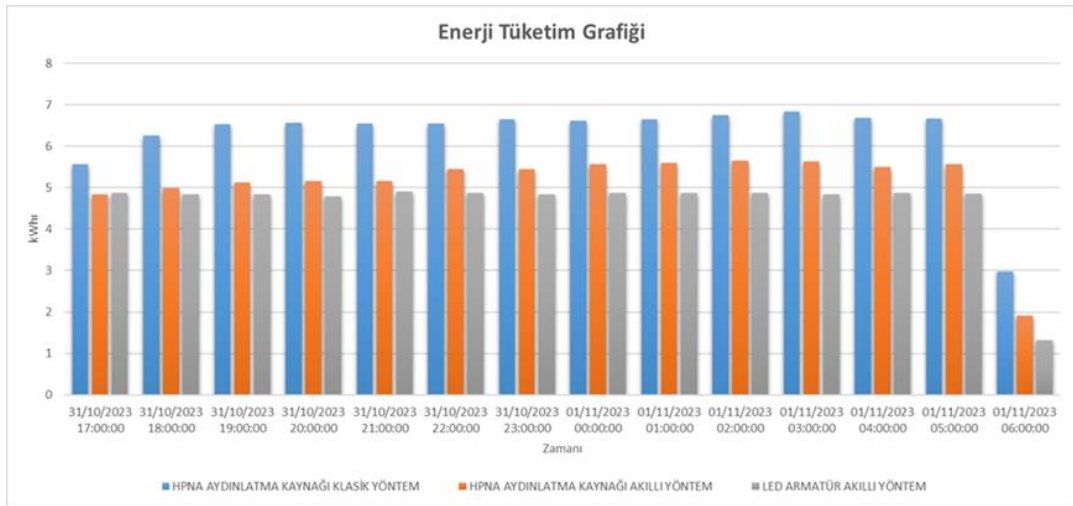
Çizelge 7.2 ‘de akıllı sokak aydınlatma yöntemi kullanılarak 1 dizi HPNA sokak aydınlatma kaynağına ait tüketim ölçümleri yer almaktadır. Elde edilen ölçüm sonuçları manuel müdahale yapılmadan GSM haberleşme kullanılarak tüketim ölçüm cihazında kaydedilen veriler uzaktan alınmıştır. Uzaktan kontrol sayesinde sokak aydınlatmasının açma-kapama zamanları kontrol altında tutulmuş olup 1 dizi HPNA sokak aydınlatma kaynağı için yıllık 5868 kWh enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Batman ili

toplamında 1800 sokak aydınlatma abonesinden yıllık 10562 MWh enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Çizelge 7.3 Durum 3 test adımı LED aydınlatma kaynağı akıllı kontrol yöntemi ile elde edilen enerji tüketim değerleri.

Aydınlatma Kaynağı (LED)	Tüketilen Enerji Günlük (kWh)	Tüketilen Enerji Aylık (kWh)	Tüketilen Enerji Yıllık (kWh)
1 armatür dizisi	64,3	1.929	23.148
10 armatür dizisi	643	19.290	231.480
100 armatür dizisi	6.430	192.900	2.314.800

Çizelge 7.3 ‘de akıllı sokak aydınlatma yöntemi kullanılarak 1 dizi LED sokak aydınlatma kaynağına ait tüketim ölçümleri yer almaktadır. Elde edilen ölçüm sonuçları manuel müdahale yapılmadan GSM haberleşme kullanılarak tüketim ölçüm cihazında kaydedilen veriler uzaktan alınmıştır. Uzaktan kontrol sayesinde sokak aydınlatmasının açma-kapama zamanları kontrol altında tutulmuş olup 1 dizi LED sokak aydınlatma kaynağı için yıllık 2592 kWh enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Batman ili toplamında 1800 sokak aydınlatma abonesinden yıllık 4665 MWh enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

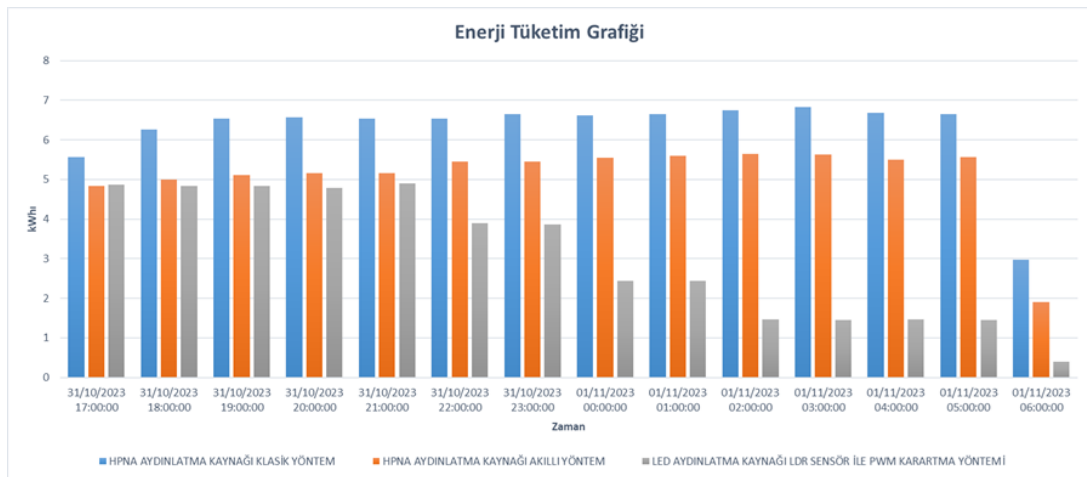


Şekil 7.1. HPNA aydınlatma kaynağı geleneksel yöntem, HPNA aydınlatma kaynağı akıllı yöntem ve LED aydınlatma kaynağı akıllı yöntem için 1 günlük enerji tüketim ölçümleri.

Çizelge 7.4. Durum 4 test adımı LED aydınlatma kaynağı LDR sensör ile PWM karartma yöntemi kullanılarak elde edilen 1 günlük enerji tüketim grafiği.

Zaman	Enerji Kullanımı	Yoğunluk	Tüketilen Enerji (kWh)
Seviyesi (PWM Karartma)			
17:00-21:00	%100		24,2
21:00-23:00	%80		7,7
23:00-01:00	%50		4,8
01:00-06:00	%30		6,2
Toplam Tüketim			43,06

Çizelge 7.4.'de LED aydınlatma kaynağı ile yapılan LDR sensörlü PWM karartma testine ait yapılan gün içerisindeki zaman dilimleri ve toplam enerji ölçümleri verilmiştir. Bu durumda LED sokak aydınlatma kaynağı PWM karartma sonucunda 1 günlük enerji ölçüm değeri 43,06 kWh'tır. PWM karartma yöntemi kullanılmadan 1 günlük enerji ölçümü 64,3 kWh'tır. Bu durumda PWM karartma yöntemi ile bir LED sokak aydınlatma dizinden 21,24 kWh daha az enerji tüketimi yaptığı görülmektedir. Bir LED sokak aydınlatma dizisi PWM karartma ile yılda 7646 kWh daha az enerji tüketimi yapacaktır. Batman ili toplamında 1800 aydınlatma abonesinden yıllık 13762 MWh enerji tasarrufu sağlanacaktır.



Şekil 7.2. HPNA aydınlatma kaynağı geleneksel yöntem, HPNA aydınlatma kaynağı akıllı yöntem ve LED aydınlatma kaynağı LDR sensör ile PWM karartma için 1 günlük enerji ölçümleri.

Şekil 7.2.'de geleneksel aydınlatma yöntemi, akıllı aydınlatma yöntemi ve farklı iki sokak aydınlatma kaynağı ile yapılan ölçüm sonuçlarına ait 1 günlük enerji tüketim değerleri görülmektedir. Bu bağlamda enerji verimliliği için en avantajlı yöntemin LED sokak aydınlatma kaynaklı akıllı yöntemin olduğunu Çizelge 7.3.' deki enerji ölçüm verilerinden elde edilmişti. Ancak havanın aydınlık seviyesine göre sokak aydınlatmalarının parlaklığını kontrol etmek ve dolayısıyla tüketim tasarrufu sağlamak için LASAS sistemine ek olarak PWM karartma tekniğini uyguladık ve enerji ölçümlerini incelediğimizde enerji tasarrufu elde ettiğimiz görülmektedir.

Şekil 7.2.'de üç farklı test durumuna ait enerji ölçüm değerlerini görmekteyiz. LED aydınlatma kaynağı ile yapılan saha ölçümlerine ek olarak PWM karatma simülasyon sonuçlarımızı birleştirdiğimizde havanın aydınlık seviyesine göre enerji tüketim kontrolü sağlayabildik. HPNA aydınlatma kaynağı ile elde ettiğimiz tüketim değerlerine göre sokak aydınlatmasının daha az enerji tüketimi yapmasını sağladık.

7.1. HPNA Aydınlatma Kaynaklarının Şebekede Oluşturduğu Harmoniklerin MATLAB'da İncelenmesi

Elektrik üreten ve dağıtan şirketler, elektrik enerjisinin müşterilere yüksek kalitede sunulmasını amaçlamaktadır. Ancak, bazı yükler yapısal özellikleri, bazıları ise tasarım ve kontrol nitelikleri nedeniyle besleme gerilimini ve akımını bozarak harmonik üretmektedirler. Güç sistemlerinde, akım ve gerilimin dalga şeklinin sinüsoidal olması arzu edilir. Harmonik oluşumunun en belirgin nedeni, uç gerilim ve akım arasındaki ilişkinin lineer olmaması durumudur. Genellikle bu tür yükler; ark prensibine göre çalışan düzenekler, gaz deşarjlı aydınlatma armatürleri, demir çekirdekli sargıya sahip makineler ve elektronik veya yarı iletken teknolojisine dayalı sistemler olarak sınıflandırılabilir.

Harmonik üreten cihazların sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu cihazlara örnek olarak, aydınlatma kaynaklarından civa buharlı lambalar, floresan lambalar ve sodyum buharlı lambalar gösterilebilir. Tüp içindeki gazın deşarjı prensibine dayanan aydınlatma elemanları, nonlinear akım-gerilim karakteristiğine sahip oldukları için harmonik üretmektedirler. Bu tez çalışmasında, saha testlerinde kullanılan HPNA dağıtım şebekelerinde oluşturduğu akım ve gerilim harmonikleri incelenmiştir. HPNA aydınlatma kaynağı, sodyum buharının deşarj edilmesi prensibiyle çalışmaktadır.

Sistemdeki harmoniklerin sınırlandırılmasını amaçlayan standartlarda yaygın olarak kullanılan Toplam Harmonik Bozulma (THD), akım için 1'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (7.1)$$

I_n : Devreden geçen akımın n' inci mertebedeki harmoniğinin etkin değeri,

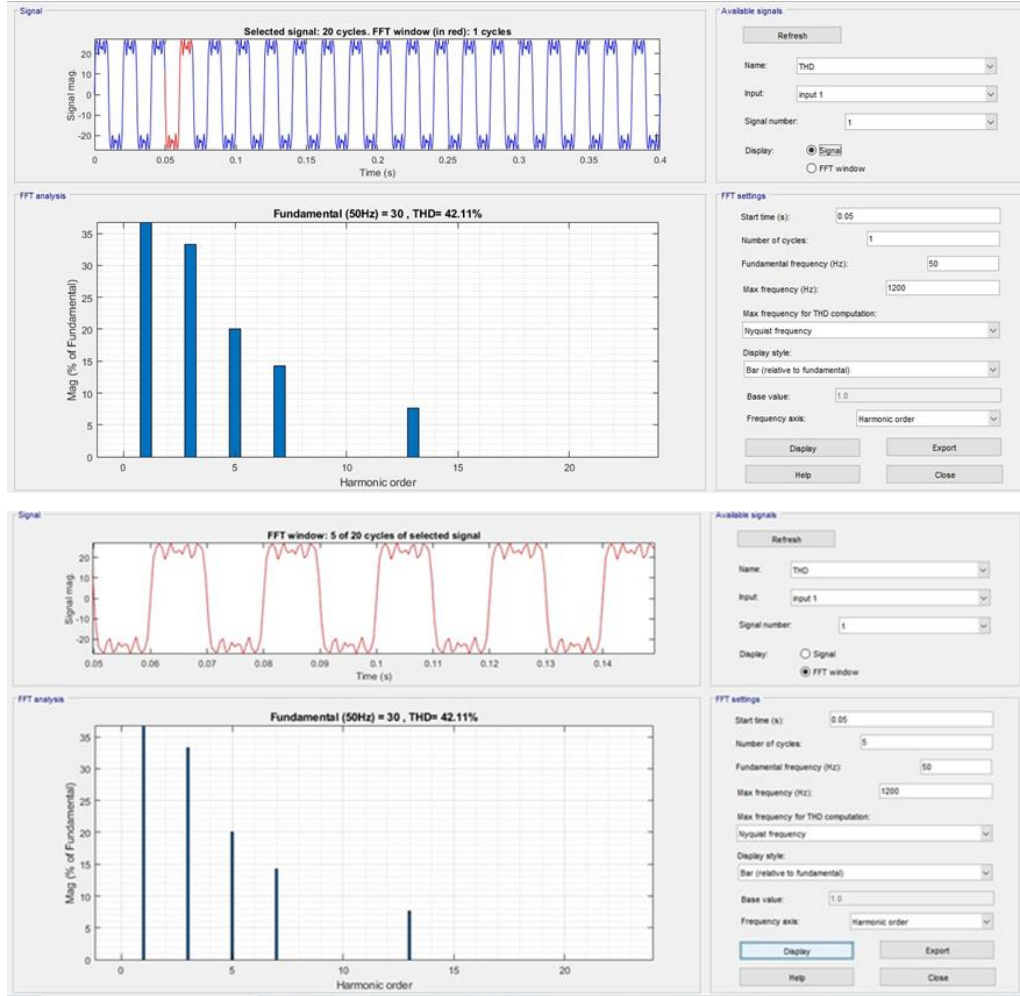
I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değeridir.

Alternatif akım enerji sistemlerinde, akım ve gerilim dalga şekillerinin ideal olarak sinüzoidal olması hedeflenir. Ancak, genellikle lineer veya nonlineer bir devreye sinüzoidal gerilim uygulandığında nonsinüzoidal dalga şekilleri de meydana gelmektedir. Bu nonsinüzoidal bileşenlerin analizinde Fourier Analizi yöntemi kullanılmaktadır.

$$I(T) = I_0 + I_2 \sin(2\omega t) + I_3 \sin(3\omega t) + I_4 \sin(4\omega t) + \dots + I_n \sin(n\omega t) + \quad (7.2)$$

Periyodik bir dalga şeklinin temel bileşeni ile daha yüksek dereceli harmoniklerinin genlik ve faz açılarının hesaplanması işlemi harmonik analizi olarak adlandırılmaktadır. Bozulmuş periyodik dalga şeklinin harmonik bileşenleri, Fourier analiz teorisine göre bir Fourier serisi ile ifade edilebilir. Bu analiz yöntemi uygulanarak, nonsinüzoidal bir dalga şekli, 50 Hz temel bileşen frekansının tam katları olan frekanslara sahip sinüs dalgalarının bir serisine dönüştürülebilir.

Saha testlerinde kullanılan bir dizi HPNA aydınlatma kaynağının şebekeden çektiği akım değeri ortalama 30 amper'dir. Sinüs formundaki bu akım işaretinin şebekede oluşturduğu THD Fourier analizi ile MATLAB ortamında bir dalga formunun bozuklukları incelenmiştir. HPNA aydınlatma kaynağı şebekenin sinüs formundaki dalgasını bozarak 1,3,5,7 ve 11. harmoniklere sebep olarak Şekil 7.3. 'deki dalga formunu oluşturmaktadır. Bu aydınlatma kaynağına ait THD %42.11 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.3. HPNA aydınlatma kaynağı akım harmonikleri.

HPNA aydınlatma kaynaklarının geleneksel yöntemlerle devrede kalma süreleri şebekede harmonik etkilerini arttırmaktadır. Bu nedenle LED aydınlatma kaynağı dönüşümüyle bu durumun önüne geçilebilecektir.

7.2. LASAS Fayda-Maliyet Analizi

Akıllı sokak aydınlatma sistemlerinin enerji tasarrufu, çevresel sürdürülebilirlik, güvenlik artışı, işletme ve bakım maliyetlerinde azalma, aydınlatma kalitesinde iyileşme gibi faydaları mevcuttur. Akıllı sokak aydınlatma sistemlerinin yatırım maliyetleri geleneksel sokak aydınlatma sistemlerine kıyasla çok fazladır.

Enerji ölçümünde kullanılan yöntemlerin bir günlük enerji tüketimlerinin maliyet analizi Çizelge 7.5.'de yer almaktadır. Bu analiz ile LED aydınlatma kaynağı ve LDR sensör kullanımı ile PWM karatma yöntemi kullanımında bir günlük enerjinin

en az olduğu Çizelge 7.5.'de görülmektedir. 2024 yılı aydınlatma kWh başına enerji birim maliyeti 5,911 kWh'tır. Enerji ölçümünde kullanılan yöntemlere göre LED aydınlatma kaynağı ve LDR sensör kullanımı ile PWM karartma yönteminde enerji ölçümü en azdır ve 1 günlük sokak aydınlatma kullanımında 25,527 TL maliyet oluşturmaktadır. Bu yöntem HPNA aydınlatma kaynağı ile kullanılan geleneksel yönteme göre 264,458 TL maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Bu doğrultuda bir sokak aydınlatma dizisinden bir yılda 95.294 TL maliyet tasarrufu sağlanacaktır.

Aynı zamanda GSM şebeke alt yapısı kullanılan LASAS sisteminde; iletişim sağlayan kontrol cihazları için yatırım maliyetlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Ancak geleneksel yöntemlerin kullanıldığı aydınlatma sistemlerinde anahtarlamalı devre elemanları ve astronomik zaman ayarlayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle akıllı sokak aydınlatmaları için oluşan yatırım maliyetlerine uzun vadede enerji tasarrufu sağlaması nedeniyle tercih edilmektedirler.

LED lambalar daha az enerji tüketimi ve daha uzun ömürlü olmasından dolayı yatırım maliyetlerini üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. LED aydınlatma kaynaklarının bakım ve işletme maliyetlerinin ve uzun ömürlü olmaları tercih edilme durumunu arttırmaktadır.

Çizelge 7.5. Enerji ölçümünde kullanılan yöntemlerin 1 günlük enerji tüketimlerinin karşılaştırılmalı maliyet analizi.

Test Durumları	Enerji Ölçümünde Kullanılan Yöntem	2024 Aydınlatma Enerji Birim Fiyatı	Bir Günlük Enerji Tüketimi (kWh)	Bir Günlük Toplam Maliyet(TL)
Durum 1	HPNA Aydınlatma Kaynağı Geleneksel Yöntem	5,911/kWh	87,8	518,985
Durum 2	HPNA Aydınlatma Sistemi Akıllı Yöntem	5,911/kWh	71,5	422,636
Durum 3	LED Aydınlatma Kaynağı Akıllı Yöntem	5,911/kWh	64,3	380,077
Durum 4	LED Aydınlatma Kaynağı ve LDR Sensör Kullanımı ile PWM Karartma Yöntemi	5,911/kWh	43,06	254,527

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında GSM iletişim tabanlı LED aydınlatma kaynaklı sokak aydınlatma sistemlerinin enerji ölçümlerinin geleneksel aydınlatma yöntemleri ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Geleneksel sokak aydınlatma yöntemi HPNA aydınlatma kaynağı, akıllı sokak aydınlatma yöntemi HPNA aydınlatma kaynağı ve akıllı sokak aydınlatma yöntemi LED aydınlatma kaynağı ile saha testleri gerçekleştirilmiştir.

Durum 1, Durum 2, Durum 3 test yöntemlerinde elde edilen günlük enerji ölçümleri ile sırasıyla 87,8, 71,5 ve 64,3 kWh enerji tüketimi olduğu saptanmıştır. Geleneksel yöntemden akıllı yönteme geçişle bir dizi sokak aydınlatma kaynağından günlük 23,5 kWh enerji tasarrufu sağlanacaktır. Bu sayede sadece bir dizi sokak aydınlatmasından yıllık 8.460 kWh enerji tasarrufu sağlanmış olacaktır. Batman ili toplamında 1800 aydınlatma abonesinin toplam enerji tüketiminden bir yılda 15.228 MWh enerji tasarrufu sağlanacaktır.

Akıllı sokak aydınlatma sistemine ek olarak Durum 4 test yönteminde PWM karartma metodu ile simülasyon gerçekleştirildiğinde elde edilen enerji tüketim ölçümlerine göre bir günde bir dizi sokak aydınlatma kaynağının 43,06 kWh enerji tüketimi yaptığı varsayımına vardık. Geleneksel yöntem olan Durum 1 test yöntemine kıyasla bir dizi sokak aydınlatma kaynağından bir günde 44,74 kWh enerji tasarrufu sağlanacaktır. Bu sayede sadece bir dizi sokak aydınlatmasından yıllık 16.106 kWh enerji tasarrufu sağlanmış olacaktır. Batman ili toplamında 1.800 aydınlatma abonesinin toplam enerji tüketiminden bir yılda 28.990 MWh enerji tasarrufu sağlanacaktır.

Akıllı sokak aydınlatma sistemleri, dinamik aydınlatma kontrolü ve sensör tabanlı otomasyon sayesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Geleneksel sistemler ise genellikle sabit zaman aralıklarında çalıştığından enerji verimliliği açısından sınırlıdır. Akıllı sistemler, çevresel değişikliklere duyarlılık göstererek enerji israfını en aza indirir ve çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahiptir. Geleneksel sistemler ise bu konuda daha az esneklik sunar ve çevresel etkileri daha yüksektir.

Akıllı sokak aydınlatma sistemlerinin başlangıç maliyeti genellikle daha yüksektir ancak uzun vadede enerji tasarrufu ve azaltılmış bakım maliyetleriyle geri dönüş sağlar. Geleneksel sistemlerin ise başlangıç maliyeti daha düşüktür ancak uzun vadede yüksek işletme maliyetleri ortaya çıkar. Akıllı sistemler, uzaktan izleme ve otomatik arıza tespiti gibi özelliklerle yönetim ve bakım süreçlerini kolaylaştırır. Geleneksel sistemler ise daha fazla manuel müdahale gerektirebilir ve bakım süreçleri daha karmaşıktır.

Şehir yönetimleri ve kamu kuruluşları, enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik sağlayan akıllı sokak aydınlatma sistemlerine geçişi teşvik etmelidir. Akıllı sokak aydınlatma sistemlerinin uygulanması için gerekli teknoloji ve altyapı yatırımları yapılmalıdır. Endüstri standartlarının oluşturulması ve sürdürülebilirlik yönergelerinin belirlenmesi, akıllı sokak aydınlatma sistemlerinin daha yaygın olarak benimsenmesine yardımcı olabilir. Bu öneriler, akıllı sokak aydınlatma sistemlerinin geleneksel sistemlere kıyasla avantajlarının daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir ve kentsel aydınlatma alanında daha sürdürülebilir çözümlerin benimsenmesine katkıda bulunabilir. Ayrıca yapılan çalışmaya ek olarak hareket sensörü kullanılarak yaya ve sürücülerin algılandığı durumlarda sokak aydınlatmaları devreye girmesi sağlanabilir. Bu durumda çok yoğun olmayan sokak ve caddelerde enerji tasarruf miktarını arttırabilecektir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, M., & Gül, Ö. (2009). LED’li Işık Kaynaklarının Karakteristiklerini Belirlemeye Yönelik Ölçmeler. V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi, 7-8.
- Akyel, A. (2011). *Elektrik enerji sistemlerinde güç kalitesinin incelenmesi* (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baloğlu, A., & Karademiroğlu, O. (2019). Akıllı şehirlerde kablosuz haberleşme teknolojileri ve doğru teknoloji seçimi. İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi, 1(1), 22-29.
- Campisi, D., Gitto, S., & Morea, D. (2018). Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in Rome. *Journal of Cleaner Production*, 175, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.057>
- Chiradeja, P., & Yoomak, S. (2023). Development of public lighting system with smart lighting control systems and internet of things (IoT) technologies for smart city. *Energy Reports*, 10, 3355-3372. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.008>
- Çetintaş, K. F., & Rezafar, A. (2022). Binalarda pasif soğutma yöntemleri ve geleneksel mimarideki uygulamalarının incelenmesi. *KAPU Trakya Mimarlık ve Tasarım Dergisi*, 2(2), 37-56.
- Çoban, K. O. (2010). Aydınlatma elemanlarının verimliliği ve enerji kalitesi üzerine etkisinin incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Demir, H., Çıraçı, G., Reyhan, K., & Ünver, Ü. (2020). Aydınlatmada enerji verimliliği: Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi durum değerlendirmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1637-1652.
- Demir, Y. (2020). Yol aydınlatmasında kullanılan lambaların karşılaştırmalı analizi (Yüksek lisans tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitlis Eren Üniversitesi).
- Denardin, G. W., Barriquello, C. H., Campos, A., Pinto, R. A., Dalla Costa, M. A., & do Prado, R. N. (2011, June). Control network for modern street lighting systems. In *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 1282-1289). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2011.5938762/>
- Electrical4U. (2020). Fluorescent lamp and working principle of fluorescent lamp. <https://www.electrical4u.com/fluorescent-lamp-its-working-principle/>
- Elijošiutė, E., Balciukevičiūtė, J., & Denafas, G. (2012). Life cycle assessment of compact fluorescent and incandescent lamps: Comparative analysis. *Environmental Research, Engineering and Management*, 61(3), 65-72.
- EPDK. (2023). 2023 yılı faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı(%).

- Gençoğlu, M. T. (2005). İç aydınlatmada enerji tasarrufu. III. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi, 23-25. Ankara, Türkiye.
- Göçmen, E. (2014). Aydınlatma aygıtlarının enerji verimliliği ve güç kalitesine etkileri (Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Göçmen, E., & Özdemir, Ş. (2015). Farklı tip aydınlatma aygıtlarının harmonik etkilerinin karşılaştırılması. Kocaeli Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü.
- Gören, H., Alataş, M., & Görgün, O. (2018, May). Radio frequency planning & verification for remote energy monitoring: A LoRaWAN case study. In 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- Gül, A., & Atak Çobanoğlu, Ş. (2017). Avrupa'da akıllı kent uygulamalarının değerlendirilmesi ve Çanakkale'nin akıllı kente dönüşümünün analizi. Suleyman Demirel University Journal of Faculty of Economics & Administrative Sciences, 22, 1-20.
- Kaya, A. (2018). Şanlıurfa sokak aydınlatmalarında LED dönüşümü ve güneş enerjisinden beslenmesinin analizi (Yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Koç, Y. (2013). Akıllı bir takip sistemi için kullanılan Zigbee tabanlı algılayıcı ağıın topolojik performans karşılaştırmaları. Fen Bilimleri Dergisi, 31(4), 165-171.
- Küçükdoğu, M. Ş. (2003). Aydınlatmada etkin enerji kullanımı (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi.
- Kürker, F., & Taştaltın, R. (2016). Elektrik tesislerinde harmoniklerin meydana getirdiği kayıpların analizi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(5), 21-38.
- Maheswari, C. K., & Jeyanthi, R. (2009). Implementation of energy management structure for street lighting systems. Modern Applied Science, 3(4), 1-10.
- Mahoor, M., Salmasi, F. R., & Najafabadi, T. A. (2017). A hierarchical smart street lighting system with brute-force energy optimization. IEEE Sensors Journal, 17(9), 2871-2879.
- Omar, A., AlMaeni, S., Attia, H., Takturi, M., Altunaiji, A., Sanduleanu, M., ... & Al Hebsi, G. (2022). Smart city: Recent advances in intelligent street lighting systems based on IoT. Journal of Sensors, 2022, Article 123456. <https://doi.org/10.1155/2022/123456>
- Onaygil, S. (2016). Aydınlatma tekniği, verimlilik, planlama ve yönetim. Aydınlatmada Planlama ve Yönetimin Önemi Semineri, Gaziantep, Türkiye.

- Örs, Z., Taşkın, T. U., Arhan, İ., Doğan, L., Gezer, C., Karakebelioğlu, A. F., & Kesler, M. (2022). Smart street lighting system. *Orclever Proceedings of Research and Development*, 1(1), 188-197.
- Özdemir, İ. H., & Gökrem, L. (2022). LoRaWAN teknolojisi kullanarak erken uyarı sistemi tasarımı ve uygulaması. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 11(2), 194-207.
- Özenç, S. (2007). Aydınlatma sistemlerinde kalite, enerji verimliliği ve modelleme (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ramya, C. M., Shanmugaraj, M., & Prabakaran, R. (2011, April). Study on ZigBee technology. In *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology* (Vol. 6, pp. 297-301). IEEE.
- Rustemli, S., Kocaman, B., & Tekev, S. (2022). Güç sisteminde oluşan harmonik ile ara harmoniklerin modellenmesi ve simülasyonu. *EMO Bilimsel Dergi*, 12(1), 67-79.
- Shahzad, G., Yang, H., Ahmad, A. W., & Lee, C. (2016). Energy-efficient intelligent street lighting system using traffic-adaptive control. *IEEE Sensors Journal*, 16(13), 5397-5405.
- Sinha, R. S., Wei, Y., & Hwang, S. H. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 3(1), 14-21.
- Sittoni, A., Brunelli, D., Macii, D., Tosato, P., & Petri, D. (2015, October). Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC. In *2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2)* (pp. 1-6). IEEE.
- Şahin, M. (2014). Güç sistemlerinde enerji kalitesini etkileyen harmoniklerin incelenmesi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 7(2), 199-218.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Akıllı aydınlatma teknoloji inceleme raporu.
- Yılmaz, E., Erden, O., & Kocadağ, N. (2019). Sokak aydınlatması dönüşümü fayda maliyet analizi üzerine bir mühendislik ekonomisi çalışması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(3), 280-289.
- Yılmaz, S., & Sungur, C. (2020). Kamu binalarında mevcut aydınlatma elemanlarının LED aydınlatma elemanlarına dönüştürülmesi ile elde edilecek elektrik enerjisi tasarrufunun belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 214-218.
- Yiğit Ünlü, D. (2020). M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için yüksek enerji verimli LED'li yol aydınlatma armatürünün optik tasarımı (Yüksek lisans tezi). [Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi].

- Yılmaz, M. (2006). Elektrik sistem tasarımında harmoniklerin giderilmesi için bir analiz (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yusoff, Y. M., Rosli, R., Karnaluddin, M. U., & Samad, M. (2013, September). Towards smart street lighting system in Malaysia. In 2013 IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA) (pp. 301-305). IEEE.
- Wu, Y., Shi, C., Zhang, X., & Yang, W. (2010, June). Design of new intelligent street light control system. In IEEE ICCA 2010 (pp. 1423-1427). IEEE.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Narin BEDİR MİRKAN
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Üniversite Yüksek Lisans Doktora	Fırat Üniversitesi	2017

İŞ DENEYİMLERİ

Kurum	Görevi	Yıl
Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.	OSOS Mühendisi	2018-2021
Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.	Ölçü Sistemleri Mühendisi	2021-2022
Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.	Kıdemli Abone Hizmetleri Mühendisi	2022-2023
Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.	Sorumlu Müşteri Hizmetleri Mühendisi	2023-2024

UZMANLIK ALANI

Yazılım Test, MySQL, Oracle SQL Developer, AutoCAD, PowerBI, Matlab, Veri Analizi, Microsoft (Word, excel)

YABANCI DİLLER

İngilizce (Orta Seviye)

YAYINLAR

- M. R. Tür, E. Apaydin, N. Obut, R. Nar, R. Temiz and N. Mirkan, "Harmonic Analysis of A Grid-Connected Solar Power Plant in Batman Province and Investigation of Power Quality," 2022 11th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), Istanbul, Turkey, 2022, pp. 508-513, doi: 10.1109/ICRERA55966.2022.992287