

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİNA AYDINLATMASINDA KULLANILAN LED VE KOMPAKT
FLORESAN LAMBALARIN GÜÇ KALİTESİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tülay BAYRAKDAR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

SUBAT 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİNA AYDINLATMASINDA KULLANILAN LED VE KOMPAKT
FLORESAN LAMBALARIN GÜÇ KALİTESİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tülay BAYRAKDAR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU

ŞUBAT 2023

Tülay BAYRAKDAR tarafından hazırlanan “Bina Aydınlatmasında Kullanılan LED ve Kompakt Floresan Lambaların Güç Kalitesine Etkileri” adlı tez çalışması 21.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “BİNA AYDINLATMASINDA KULLANILAN LED VE KOMPAKT FLORESAN LAMBALARIN GÜÇ KALİTESİNE ETKİLERİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete ’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(21/02/2023)

Tülay BAYRAKDAR







TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın tamamlanabilmesi, benim için çok değerli birkaç kişinin ilgileri, destek ve katkılarıyla mümkün olabilmektedir. Öncelikle çalışmalarımın tamamlanabilmesi için EAE Aydınlatma Ailesine ve katkılarından dolayı Sinan Şahin'e, yüksek lisans öğrenimim süresince, desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, sınırsız sabrı ve hoşgörüsüyle, sürekli eğiten, öğreten ve yönlendiren danışmanım Sayın Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tülay BAYRAKDAR





İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. BİNALARDA ENERJİ PERFORMANSI İLE İLGİLİ UYGULAMALAR....	5
2.1. Avrupa Birliği' nin Binalarda Enerji Performansı Direktifi	5
2.2. Türkiye'de Bina Enerji Performansı Süreçleri	6
2.2.1. Enerji verimliliği kanunu	6
2.2.2. TS 825 Isı yalıtımı kuralları	7
2.2.3. Binalarda enerji performansı yönetmeliği	7
2.2.4. Aydınlatma enerji performansı	8
2.2.5. Enerji kimlik belgesi	8
2.2.6. Ulusal enerji verimliliği eylem planı 2017-2023	11
2.2.6.1. Eylem planının dayanakları	12
2.2.6.2. Eylem planının dayanakları	14
2.3. Binalarda Elektrik Enerjisi Tüketimi ve Aydınlatma Tesisatları Kriterleri	17
2.3.1. Aydınlik düzeyi	21
2.3.2. Düzgünlük	22
2.3.3. Parıltı dağılımı	23
2.3.4. Kamaşma	24
2.3.5. Renk sıcaklığı	24
2.3.6. Renksel geriverim endeksi	25
2.4. Aydınlatmada Kullanılan Işık Kaynaklarının Tarihsel Gelişimi	26
2.4.1. Tüp flüoresan lamba	27
2.4.2. Kompakt floresan lamba	28
2.4.3. Tungsten halojen lambalar	29
2.4.4. Metal halide lambalar	30
2.4.5. LED lambalar	31
2.5. Aydınlatmada Enerji Verimliliği	36
2.5.1. Aydınlatmada Enerji Kayıpları	38
2.5.1.1. Armatür kayıpları	38
2.5.1.2. Işığın mekan içinde doğru yönlendirilmesi	38
2.5.1.3. Aydınlatma kontrol sistemlerinin etkisi	39

3. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİ KALİTESİ VE HARMONİKLER	41
3.1. Harmonik Kavramı ve Tanımı.....	41
3.2. Harmonik Bileşenlere Ait Kavramlar.....	42
3.2.1. Toplam harmonik distorsiyon (THD)	43
3.2.1. Toplam talep distorsiyon (TTD)	43
3.3. Harmonik Filtreleme Yöntemleri	44
3.3.1. Pasif filtreler.....	44
3.3.1.1. Seri filtreler	45
3.3.1.2. Paralel (şönt) filtreler	46
3.3.2. Aktif filtreler	48
3.4. Harmoniklerin Matematiksel Analizi	50
3.4.1. Fourier analizi	50
3.4.1.1. Fourier katsayılarının analitik yöntemle bulunması.....	51
3.4.1.2. Fourier katsayılarının ölçme yöntemi ile bulunması.....	52
3.5. Nonsinüzoidal Büyüklükleri İçeren Devrelerin İncelenmesi	54
3.5.1. Sinüzoidal gerilim beslemeli lineer olmayan yüklü devreler.....	54
3.5.2. Nonsinüzoidal gerilim beslemeli lineer devreler	54
3.5.3. Nonsinüzoidal gerilim beslemeli lineer olmayan yüklü devreler.....	54
3.6. Harmonik Kaynakları	55
3.6.1. Transformatörler.....	55
3.6.2. Çeviriciler.....	57
3.6.3. Generatörler.....	57
3.6.4. Ark fırınları	58
3.6.5. Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları	58
3.6.6. Statik VAR kompanzatörleri.....	59
3.6.7. Anahtarlama güç kaynakları	59
3.7. Harmoniklerin Etkileri.....	60
3.7.1. İletkenler üzerindeki etkisi	60
3.7.2. Direnç üzerindeki etkisi	61
3.7.3. Reaktanslar üzerindeki etkisi	61
3.7.4. Kondansatörler üzerindeki etkisi.....	61
3.7.5. Motorlar ve generatörler üzerindeki etkisi	62
3.7.6. Transformatörler üzerindeki etkisi	62
3.7.7. Harmoniklerin rezonans etkisi	62
3.7. Harmoniklerin Limit Değerleri ve Uluslararası Standartlar	62
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	67
4.1. Ölçüm Sonuçları	67
4.1.1. KFL	68
4.1.2. A marka sürücülü LED armatür	69
4.1.3. B marka sürücülü LED armatür	70
4.2. Harmonik Filtre Tasarımı	71
4.3. Simülasyon Sonuçları.....	71
4.3.1. KFL	72
4.3.2. LED (A).....	73
4.4. Performans Analizi	73
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	81

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BEP-TR	: Bina Enerji Performans Yazılımı
CIE	: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
EKB	: Enerji Kimlik Belgesi
EMC	: Elektromanyetik uyumluluk
EMI	: Elektromanyetik girişim
EN	: Avrupa standartları
EPBD	: Avrupa Birliği Binaların Enerji Performansı Direktifi
EU	: Avrupa Birliği
GSYİH	: Gayri safi yurt içi hasıla
Hz	: Hertz
IEC	: Uluslararası elektroteknik komisyonu
KFL	: Kompakt floresan lamba
LED	: Işık yayan diyot
LX	: Lüks
MTEP	: Milyon ton eşdeğer petrol
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü
Q	: Kalite faktörü
RA	: Renksel Geriverim İndeksi
SMPS	: Anahtarlama Güç Kaynağı
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyon
TOE	: Ton Eşdeğer Enerji
TTD	: Toplam Talep Distorsiyon
UGR	: Birleştirilmiş Parlama Derecesi



SİMGELER

C	: Kondansatör
L	: Bobin
R	: Direnç
XC	: Kapasitif reaktans
XL	: Endüktif reaktans
Z	: Empedans
ω	: Açısal frekans



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Yıllara göre yatırımların ve öngörülen tasarrufların değişimi	12
Tablo 2.2. Tüketilen elektrik enerjisinin abone gruplarına göre dağılımı	17
Tablo 2.3. Net elektrik tüketiminin sektörlere ve yıllara göre dağılımı (%)	18
Tablo 2.4. Binaların yıllık ortalama elektrik enerjisi tüketimleri	18
Tablo 2.5. Aydınlatma amaçlı tüketilen elektrik enerjisi	19
Tablo 2.6. Aydınlatma enerjisi tüketimi değerlendirme kriterleri	19
Tablo 2.7. Binalardaki ofis hacimleri için gerekli aydınlık düzeyleri	22
Tablo 2.8. Binalardaki ofis hacimleri için ortalama düzgünlük değerleri	23
Tablo 2.9. Binalarda önerilen yüzey yansıtma faktörleri	24
Tablo 2.10. Işık kaynaklarının renk sıcaklıkları ve renk izlenimleri	25
Tablo 2.11. Binalardaki ofislerde bulunan hacimler için aydınlatma tasarım kriterleri	26
Tablo 2.12. Tüp flüresan lambaların teknik özellikleri	28
Tablo 2.13. Kompakt floresan lambaların teknik özellikleri	29
Tablo 2.14. Bina ofislerinde kullanılabilen ışık kaynaklarının etkinlik faktörleri ve ekonomik ömürleri	34
Tablo 2.15. Armatür verimlilik sınıfları	38
Tablo 3.1. Harmonik derecesi-I frekans dönüşümü	42
Tablo 3.2. Mıknatıslanma akımlarının oranı	56
Tablo 3.3. Haddelenmiş yüksek alışımlı saçlardan imal edilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımı harmoniklerinin temel harmoniğe oranları	56
Tablo 3.4. Bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranı	57
Tablo 3.4. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları	63
Tablo 3.5. IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları	63
Tablo 3.6. IEEE'nin genel dağıtım sistemlerine ait akım harmonik distorsiyon sınırları	64
Tablo 3.7. IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyonu sınırları	64
Tablo 3.8. IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyonu sınırları	65
Tablo 3.9. IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyonu sınırları	65
Tablo 3.10. IEC 61000-3-2 standardına göre harmonik akım sınırları	65
Tablo 3.11. EN 50160 standardına göre alçak gerilim harmonik sınırları	65
Tablo 3.12. EN 50160 standardına göre orta gerilim harmonik sınırları	66
Tablo 4.1. Akım harmonikleri için limit THDI değerleri	67
Tablo 4.2. Filtre çeşidine göre L ve C değerleri	71
Tablo 4.3. Filtresiz ve filtreli THD sonuçları	74
Tablo 4.4. KFL ve A ve B markalı sürücüye sahip LED armatürlerin güç ve lümen değerleri	74



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Binalarda enerji performansı hesaplama yöntemi genel yapısı	8
Şekil 2.2. Bina enerji performans yönetmeliğindeki skalalar	10
Şekil 2.3. Enerji kimlik belgesi için enerji sınıfı skalası.....	10
Şekil 2.4. Örnek enerji kimlik belgesi	11
Şekil 2.5. Türkiye'nin yıllara göre birincil enerji tüketimi	13
Şekil 2.6. Dünya birincil enerji talep gelişimi	14
Şekil 2.7. Yıllara göre sektörlerin enerji tüketimindeki değişim.....	16
Şekil 2.8. Yıllara göre bina ve hizmetler sektörü elektrik tüketimindeki değişim	17
Şekil 2.9. Örnek çalışma ofisi aydınlatması	20
Şekil 2.10. Örnek toplantı odası aydınlatması	20
Şekil 2.11. Direkt ve endirekt kamaşma örneği	24
Şekil 2.12. Tüp floresan lamba	28
Şekil 2.13. Kompakt floresan lamba örnekleri	29
Şekil 2.14. Tungsten halojen lamba	30
Şekil 2.15. Metal halide lamba	30
Şekil 2.16. LED'lerin kutuplaştırılması	31
Şekil 2.17. SMD LED örnekleri	32
Şekil 2.18. COB LED örneği	32
Şekil 2.19. POWER LED örneği	33
Şekil 2.20. POWER LED'ler için tasarlanmış alüminyum soğutucu kart.....	34
Şekil 2.21. Arayüz sıcaklığı ile ışık akısı arasındaki ilişki	35
Şekil 2.22. LED ömrünün jonksiyon sıcaklığı ile değişimi	35
Şekil 2.23. LED panel armatür örnekleri	36
Şekil 2.24. LED lineer armatür örnekleri.....	36
Şekil 2.25. Aydınlatma kontrol sistemleriyle elde edilen enerji tasarruf oranları	39
Şekil 3.1. a) Distorsiyon dalga formu b) saf sinüs dalgası c) harmonik bileşen.....	41
Şekil 3.2. Tek ayarlı filtre devresi.....	45
Şekil 3.3. İkinci mertebe sönümlü filtre devresi	45
Şekil 3.4. Devrede seri filtre kullanımı	46
Şekil 3.5. Devrede paralel (şönt) filtre kullanımı	46
Şekil 3.6. Tek ayarlı filtre yapısı.....	47
Şekil 3.7. Çift ayarlı filtre yapısı.....	47
Şekil 3.8. Sönümlü filtre a) birinci derece, b)ikinci derece, c)üçüncü derece, d)C tipi	48
Şekil 3.9. Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi	49
Şekil 3.10. Aktif filtrenin şematik gösterimi a)şönt b)seri.....	50
Şekil 3.11. Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü	53
Şekil 3.12. Dijital harmonik analizörü	53
Şekil 3.13. Floresan lambaların dalga biçimleri ve akım spektrumları	58

Şekil 3.14. Harmonik mertebesi.....	59
Şekil 3.15. Bilgisayarın harmonik spektrumu.....	60
Şekil 3.16. Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi.....	61
Şekil 4.1. KFL (79 W) akım-gerilim grafiği.....	68
Şekil 4.2. KFL (79 W) akım harmonik spektrumu	68
Şekil 4.3. LED Armatür (53 W) akım-gerilim grafiği	69
Şekil 4.4. LED Armatür (53 W) akım harmonik spektrumu	69
Şekil 4.5. LED Armatür (39 W) akım-gerilim grafiği	70
Şekil 4.6. LED Armatür (39 W) akım harmonic spektrumu.....	70
Şekil 4.7. Elektronik balastlı KFL MATLAB/Simulink modeli.....	71
Şekil 4.8. A marka sürücülü LED armatür MATLAB/Simulink modeli.....	72
Şekil 4.9. KFL için filtresiz ve 4 f arklı filtre kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş gerilim ve normalize akım zaman ve frekans uzayı sonuçları.	72
Şekil 4.10. LED(A) için filtresiz ve 4 farklı filtre kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş gerilim ve normalize akım zaman ve frekans uzayı sonuçları	73



BİNA AYDINLATMASINDA KULLANILAN LED VE KOMPAKT FLORESAN LAMBALARIN GÜÇ KALİTESİNE ETKİLERİ

ÖZET

Enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması sırasında elektrik güç sistemlerinde akım ve gerilimin 50 Hz frekansında, dalga şekillerinin ise sinüzoidal olması beklenmektedir. Bu parametreler elektrik enerjisi kalitesi için en önemli faktörlerdir. Fakat elektrik sistemlerinde bulunan doğrusal olmayan yüklerin harmonik oluşumuna neden olması ile akım ve gerilim dalga şekilleri sinüzoidal formdan uzaklaşırlar. Bu yüzden elektrik güç sistemlerinde önemli problemlere yol açarlar. Elektrik enerji sistemlerinde oluşan bu problemlerin en önemli sebeplerinden biri harmoniklerin şebekeye vermiş olduğu olumsuz etkidir ve bu tezde aydınlatma sistemlerinde oluşan harmonikler incelenmiştir. Harmoniklerin oluşumu, bu oluşuma sebep olan kaynaklar, harmoniklerin zararlı etkileri ve harmoniklerin nasıl giderileceği gibi temel konular hakkında bilgi verilmiştir.

Günümüzde, elektrik tüketiminin büyük bir yüzdesi yapay aydınlatmada harcanmaktadır, bu nedenle verimsiz bir aydınlatma, kaynakların boşa harcanmasına neden olmaktadır. Son yıllarda, genel aydınlatma uygulamalarında kullanılan kompakt floresan lambaların (KFL) yerini yüksek verimli, uzun ömürlü ışık kaynağı olarak kullanılan ışık yayan diyotlar (LED) almıştır. Bu lambalarda kullanılan güç elektroniği elemanlarından oluşan sürücü devreleri non-lineer karakteristiğe sahip olduğundan dolayı güç kalitesi problemleri giderek artmaktadır. Doğrusal olmayan bu yüklerin elektrik tesislerinde dalga şekillerinin bozulması ve harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır. Sistemdeki harmonikler ekonomik ve bazı istenmeyen teknik sorunlara yol açabilirler. Bu problemler ile karşılaşmamak için sistem gereksinimleri belirlenmeli ve tasarımlar uluslararası standartlar tarafınca verilen limit değerlerine uygun bir şekilde yapılmalıdır.

Bu tez, bina aydınlatma sistemlerinde bulunan LED ve kompakt floresan lambaların harmonikleri, enerji tüketimi ve güç kalitesinin incelenmesi ve analizi çalışmasıdır. Enerji tasarrufunun ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi için sistemde var olan ya da kullanılan güç elektroniği elemanları sebebiyle oluşan problemleri ele almak için temel konular olduğu dünya çapında kabul edilmektedir. Enerji kalitesini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biri, binalarda enerji tasarrufu ve enerji verimliliğini artırmaktır. LED, birçok uygulama alanında kullanılan en popüler enerji verimli aydınlatma kaynağıdır. Ancak LED ve kompakt floresan lambalarda kullanılan güç elektroniği ekipmanlarının neden olduğu güç kalitesi sorunu da dikkate alınmalıdır. LED ve KFL'ler, harmonikler ve elektromanyetik parazit (EMI) oluşturabilen bir anahtarlama cihazı olan sürücüye sahip olduğundan, binanın elektrik sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek için ses ve gürültü azaltmayı kontrol etmek önemlidir. Bu çerçevede de bu lambaların kullandığı sürücülerin ürettiği harmonikler ölçülecek ve bu harmonikleri sürececek olan filtreler hesaplanacaktır.

Çalışmalar hem pratik olarak hem de bilgisayar ortamında Matlab programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada KFL ve iki farklı markaya ait sürücülerle çalıştırılan LED armatürler incelenmiştir. Farklı aydınlatma sistemlerinin güç kalitesi analizi IEC 61000-4-30 standardına göre A sınıfı olan Fluke 43B Güç Kalitesi Analizörü kullanılarak laboratuvar ortamında KFL ve LED armatürlerin harmonik ölçümleri alınmıştır. Total harmonik distorsiyon açıklamasında belirtildiği gibi akım dalga şekli yüksek bozunumlardan etkilenirken gerilim dalga şekli sinüzoidal formunu korumaktadır. Gerilim total harmonik distorsiyon yük durumuna bağlı değildir. Akım harmonikleri ile çok düşük şebeke eşdeğer empedansı arasındaki etkileşim tarafından üretilen gerilim harmonikleri ihmal edilebilir düzeydedir. Gerilim total harmonik distorsiyonun değerinin küçük olması yalnızca şebekede zaten mevcut olan harmonik kirlilikten kaynaklanmaktadır. Bu deneyde 53 W, 39 W LED armatür ve 79 W floresan lamba kullanılmıştır. Bu armatürler farklı güç değerlerine sahip olmakla beraber yapılan ışık testi sonucuna göre aynı lümen değerlerine sahiptirler. Armatürlerde kullanılan LED sürücüler ve elektromanyetik balast farklı üreticilerden seçilmiştir. Alınan ölçüm sonuçlarına göre MATLAB programı kullanılarak standartlara uygun olmayan harmonik değerleri için pasif filtre tasarımı yapılmıştır. Nominal akımı ≤ 16 A ve aktif giriş gücü > 25 W olan armatürler için IEC 61000 serisine göre akım harmonik limit değerleri kullanılarak harmonik ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Harmonik filtre tasarımı, harmonik ölçüm sonuçları incelendiğinde KFL ve A marka sürücüye sahip LED armatürün akım harmonikleri IEC 61000-3-2 standardının izin verdiği limit değerlerinden yüksek çıktığı için harmonik filtre tasarımı yapılarak akım harmoniklerinin düşürülmesi uygun görülmüştür. Simülasyon sonuçları KFL ve A markalı sürücüye sahip LED armatür MATLAB programında modellenmiştir. KFL ve LED armatür için 4 farklı filtre MATLAB ortamında tasarlanmıştır. Performans analizi yapılarak KFL ve A marka sürücülü LED armatüre eklenen filtreler MATLAB programı ile hızlı Fourier dönüşümü (FFT) analizi yapılarak akım total harmonik distorsiyon değerleri hesaplanmıştır. Filtre devreleri eklendikten sonra en iyi sonucu kesim frekansı 150 Hz olan alçak geçiren filtre göstermiştir. Kullanılan ürünler farklı güç değerlerine sahiptirler. Bu durumda KFL filtresiz durumda toplam akım harmonik distorsiyonu A markalı sürücüye sahip LED armatür türüne göre daha iyi çıkmıştır fakat ürünlerin lümen çıkışları yaklaşık olarak aynı olduğu için en verimsiz armatür KFL olarak gözlemlenmektedir. Filtreli durumlar karşılaştırıldığında ise A marka sürücü LED armatür harmonik akımları daha iyi absorbe etmiştir.

Bu inceleme sonucunda oluşan harmoniklerin giderilmesi için pasif filtre tasarımı yapılmıştır ve harmonik akım değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarlanan filtrelerin içinde kullanılan devre elemanları, harmonik oluşumuna sebep olan en yüksek frekans seçilerek MATLAB ortamında 4 farklı filtre tasarımı yapılarak farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Böylece aydınlatma sistemlerinde kullanılan KFL ve A marka sürücülü LED armatüre ait harmonik bileşenler pasif filtre kullanımı ile giderilmiş ve sinüzoidal formdan uzaklaşan akım dalga şekli sinüzoidal forma yakın hale getirilmiştir ve elektrik enerjisinde kalitesizlik problemi ortadan kaldırılmıştır.

Ayrıca yapılan ışık testleri sonucunda LED armatürlerin daha düşük güç değerlerinde KFL ile aynı lümen çıkışına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

LED armatürler KFL'ye göre daha verimli, ekonomik ve uzun ömürlüdürler. Günümüzde artan enerji maliyetleri göz önüne alındığında LED armatürlerin daha önemli hale geldiği ve yaygın olarak kullanılmaya başladığı bilinmektedir.





EFFECTS OF LED AND COMPACT FLUORESCENT LIGHTS USED IN BUILDING LIGHTING ON POWER QUALITY

SUMMARY

The term power quality has an important place in electrical networks today due to electronic equipment that started in the 1980s and increased with the development of technology day by day. The main reason for the interest in power systems in terms of electricity generation, distribution and end users in electrical systems is the critical economic aspect. Because the systems used are advantageous in terms of electronic equipment, energy efficiency and sensitivity to deviations in source voltage when compared to conventional systems. Other reasons for this interest can be exemplified as new generation power equipment, interconnected structure of networks, efficiency of power systems, awareness of end users against power quality problems, privatization of electricity establishments and increasing energy consumption. Power quality consists of some parameters such as the constancy of voltage and frequency, continuity of energy, balanced phase voltages, power factor close to 1, and the amount of harmonic in the voltage remaining at a certain level.

During the generation, transmission and distribution of energy, current and voltage in electrical power systems are expected to be at 50 Hz frequency and waveforms are expected to be sinusoidal. These parameters are the most important factors for electrical energy quality. However, current and voltage waveforms move away from the sinusoidal form as non-linear loads in electrical systems cause harmonic formation. Therefore, they cause significant problems in electrical power systems. One of the most important causes of these problems in electrical energy systems is the negative effect of harmonics on the grid, and in this thesis, harmonics occurring in lighting systems are examined. Information about the formation of harmonics, the sources that cause this formation, the harmful effects of harmonics and how to eliminate harmonics are given.

Today, a large percentage of electricity consumption is spent on artificial lighting, so an inefficient lighting wastes resources. In recent years, compact fluorescent lamps (KFLs) used in general lighting applications have been replaced by light-emitting diodes (LEDs), which are used as high-efficiency, long-lasting light sources. Since the driver circuits consisting of power electronics elements used in these lamps have non-linear characteristics, power quality problems are increasing. These non-linear loads cause distortion of waveforms and formation of harmonics in electrical installations. Harmonics in the system can cause economic and some undesirable technical problems. In order to avoid these problems, system requirements should be determined and designs should be made in accordance with the limit values given by international standards.

This thesis is the study and analysis of harmonics, energy consumption and power quality of LED and compact fluorescent lamps in building lighting systems. It is recognized worldwide that energy saving and improving energy efficiency are key

issues to address problems caused by existing or used power electronic elements in the system. One of the methods used to improve energy quality is to increase energy saving and energy efficiency in buildings. LED is the most popular energy efficient lighting source used in many application areas. However, the power quality problem caused by the power electronics equipment used in LED and compact fluorescent lamps should also be considered. Because LEDs and CFLs have a driver, a switching device that can generate harmonics and electromagnetic interference (EMI), it is important to control sound and noise reduction to prevent negative effects on the building's electrical system. In this framework, the harmonics produced by the drivers used by these lamps will be measured and the filters that will drive these harmonics will be calculated. The studies were carried out both practically and in computer environment with Matlab program. In this study, LED luminaires operated with CFL and drivers belonging to two different brands were examined. Power quality analysis of different lighting systems Harmonic measurements of CFL and LED luminaires were taken in the laboratory using the Fluke 43B Power Quality Analyzer, which is class A according to IEC 61000-4-30 standard. As stated in the total harmonic distortion description, the current waveform is affected by high distortions, while the voltage waveform maintains its sinusoidal form. The voltage is not dependent on the total harmonic distortion load condition. Voltage harmonics produced by the interaction between current harmonics and very low grid equivalent impedance are negligible. The small value of the voltage total harmonic distortion is only due to the harmonic pollution already present in the network. In this experiment, 53 W, 39 W LED luminaires and 79 W fluorescent lamps were used. Although these luminaires have different power values, they have the same lumen values according to the results of the light test. LED drivers and electromagnetic ballast used in luminaires are selected from different manufacturers. According to the measurement results obtained, passive filter design was made for harmonic values that do not comply with the standards by using the MATLAB program. For luminaires with rated current ≤ 16 A and active input power > 25 W, harmonic measurement results were compared using current harmonic limit values according to IEC 61000 series. When the harmonic filter design and harmonic measurement results are examined, since the current harmonics of the LED luminaire with CFL and A brand driver are higher than the limit values allowed by the IEC 61000-3-2 standard, it was deemed appropriate to reduce the current harmonics by designing a harmonic filter. The simulation results are modeled in the MATLAB program of the LED luminaire with CFL and A brand driver. 4 different filters for CFL and LED luminaire are designed in MATLAB environment. The current total harmonic distortion values were calculated by performing fast Fourier transform (FFT) analysis with the MATLAB program of the filters added to the LED luminaire with CFL and A brand driver by performing performance analysis. After adding the filter circuits, the low-pass filter with a cut-off frequency of 150 Hz showed the best results. The products used have different power values. In this case, the total current harmonic distortion in the CFL unfiltered condition is better than the type of LED luminaire with A brand driver, but since the lumen outputs of the products are approximately the same, the most inefficient luminaire is observed as the CFL. When filtered cases are compared, A brand driver LED luminaire absorbs harmonic currents better.

As a result of this examination, passive filter design was made to eliminate the harmonics formed and the harmonic current values were compared. The circuit

elements used in the designed filters are selected with the highest frequency causing harmonic formation, and different results are obtained by designing 4 different filters in the MATLAB environment.

Thus, the harmonic components of the KFL and A brand driver LED luminaires used in lighting systems were removed by the use of passive filters, and the current waveform moving away from the sinusoidal form was brought closer to the sinusoidal form, and the problem of poor quality in electrical energy was eliminated.

In addition, as a result of the light tests, it was observed that LED luminaires have the same lumen output as KFL at lower power values. LED luminaires are more efficient, economical and long-lasting than KFL.

Considering the increasing energy costs today, it is known that LED luminaires have become more important and are widely used.





1. GİRİŞ VE AMAÇ

Güç kalitesi terimi, 1980'li yıllardan başlayıp, teknolojinin günden güne gelişmesiyle artan elektronik donanımlar sebebiyle günümüzde elektrik şebekelerinde önemli bir yere sahiptir. Elektrik sistemlerinde elektrik üretimi, dağıtımı ve son kullanıcılar bakımından güç sistemlerine olan ilginin en büyük sebebi ekonomik yönünün kritik olmasıdır. Çünkü kullanılan sistemler geleneksel sistemler ile karşılaştırıldığında elektronik donanımı, enerji verimi ve kaynak gerilimindeki sapmalara duyarlılık bakımından avantajlıdır. Bu ilginin diğer sebepleri ise yeni nesil güç donanımları, şebekelerin enterkonnekte yapısı, güç sistemlerinin verimliliği, son kullanıcıların güç kalitesi problemlerine karşı bilinçlenmesi, elektrik kuruluşlarının özelleşmesi ve artan enerji tüketimi olarak örneklendirebilir. Güç kalitesi, gerilim ve frekansın sabitliği, enerjinin sürekliliği, faz gerilimlerinin dengeli olması, güç faktörünün 1'e yakınlığı ve gerilimdeki harmonik miktarlarının belirli bir seviyede kalması gibi bazı parametrelerden oluşmaktadır [1].

Elektrik sistemlerindeki güç kalitesi uluslararası kabul görmüş IEC ve EN standartlarına göre düzenlenir [2,3]. Tesisler, teknik standartlara uymak için belirlenen gerilim seviyelerini kabul edilebilir seviyeye getirmeli ve aynı zamanda tedarik sürekliliğini sağlamalıdır. Standartta verilen değerleri sağlamayan güç kalitesi parametreleri elektrik şebekesindeki güç kayıplarını, gerilim düşümünü ve gerilim bozulmasını önemli ölçüde artırır. Bu sebepten dolayı son kullanıcılar yeterli güç kalitesi için standartlarda yer alan kurallar çerçevesinde güvence altına alınmalıdır.

Elektrik şebekelerinde güç kalitesini önemli derece etkileyen sistemlerden biri de aydınlatma sistemleridir. Aydınlatma sistemleri, günlük yaşamımızda önemli bir yere sahiptir. Verimli bir aydınlatma ile yaşam koşulları iyileşebilir. Bir aydınlatma sistemi, toplam elektrik kullanımının %15-20'sini karşılık gelmektedir [4]. Bu payı azaltmak için aydınlatma kaynakları, akkor ve halojen lambalar enerji verimliliği yüksek aydınlatma sistemleri ile değiştirilmektedir.

Örneğin kompakt floresan lambalar (KFL) uzun ömürleri ve daha az güç tüketimi nedeniyle son on yılda oldukça popüler olmalarına rağmen son yıllarda azalan fiyatlar ve artan verimlilik nedeniyle ışık yayan diyot (LED) armatürler daha iyi bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. LED armatürler, konut, ticari ve endüstriyel aydınlatma sistemlerinde yer almıştır. Bu süreç, LED teknolojisinin geleneksel aydınlatma cihazlarına kıyasla yüksek verimlilik ve daha uzun ömür gibi avantajlarını ortaya çıkarmıştır [5,6].

Hem LED armatürler hem de KFL'ler doğrusal olmayan yüklerdir ve dağıtım şebekesine harmonik akım enjekte ederler. Bu şebekedeki güç faktörünün ve güç kalitesinin azalmasına yol açacaktır. Yetersiz bir güç faktörü seviyesi, dağıtım şebekesindeki güç kayıplarını, gerilim düşümünü ve gerilim bozulmasını önemli ölçüde artırır. Güç faktörünü düzenlemek için kullanılan kapasitörler, doğrusal yüklerin getirdiği reaktif gücü kompanze etmek için uygundur. Doğrultucular, LED, floresan lamba ve ark deşarj cihazları gibi doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu, harmonik akımı önlemek için bazı filtreler ihtiyacı duyulmaktadır. Bu nedenle LED'lerin ve KFL'lerin harmonik üretim karakteristiklerini iyi analiz etmek gerekir. Aydınlatma cihazlarının güç faktörü sorunları ile ilgili birçok çalışma, 90'lardan beri bu sorunları çözmek için ele alınmıştır [7,8].

Günümüzde, elektrik tüketiminin büyük bir yüzdesi yapay aydınlatmada harcanmaktadır, bu nedenle verimsiz bir aydınlatma, kaynakların boşa harcanmasına neden olmaktadır. Son yıllardaki aydınlatma uygulamalarında ışık kaynağı olarak LED kullanımı artmıştır. Cihazın harmonik bozulma ölçümü, dağıtım şebekesi üzerindeki yük etkisinin değerlendirilmesi için ilk adımı temsil eder ve genellikle bazı simülasyonlar kullanılarak yükler ve dağıtım şebekesi arasındaki karşılıklı etki ortaya çıkarılabilir [2,8]. Bu tez, bina aydınlatma sistemlerinde bulunan LED armatürlerin ve kompakt floresan lambaların harmonikleri, enerji tüketimi ve güç kalitelerinin incelenmesini ve analizini gerçekleştirmektedir. Enerji tasarrufunun ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesinin kaliteyi bozan etkenler ile alakalı olduğu dünya çapında kabul edilmektedir. Enerji durumunu iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biri, binalarda enerji tasarrufu ve enerji verimliliğini artırmaktır. LED, birçok uygulama alanında kullanılan en popüler enerji verimliliği yüksek aydınlatma kaynağıdır. Ancak, LED'ler ve kompakt floresan lambalar için kullanılan güç

elektroniği ekipmanlarının neden olduğu güç kalitesi sorunları dikkate alınmalıdır. LED sürücüler, harmonikler ve EMI oluşturabilen bir anahtarlama cihazı olduğundan, binanın elektrik sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek için ses ve gürültü oluşumunu kontrol etmek önemlidir. Bu çerçevede bu lambaların kullandığı sürücülerin ürettiği harmonikler ölçülecek ve bu harmonikleri düzenleyecek olan filtreler tasarlanarak uygulanacaktır. Çalışmalar hem pratik olarak hem de bilgisayar ortamında MATLAB programı ile gerçekleştirilecektir.





2. BİNALARDA ENERJİ PERFORMANSI İLE İLGİLİ UYGULAMALAR

2.1. Avrupa Birliği' nin Binalarda Enerji Performansı Direktifi

Ocak 2003'te Avrupa Birliği, binaların enerji verimliliğini artırmak için binaların enerji performansına ilişkin 2002/91/EC Yönergesini yayımladı. Bu direktifin içeriğinde, binaların genel enerji performansını değerlendirmek için standartlar bulunmaktadır. Ayrıca yeni veya mevcut binaların enerji verimliliğini test etmek ve değerlendirmek için mekanizmalar oluşturmayı da içermektedir [9,10]. Bu direktifte binaların enerji performansı değerlendirilirken hem dış mekân hem de iklim koşulları dikkate alınmaktadır. İzlenen politikada binaların, enerji performansları hesaplanarak sertifikalandırılmaları amaçlanmaktadır. Ek olarak binaların sıcak su ve havalandırma sistemlerinin de belirli bir sırayla kontrol edildiği bir sistem planlanmıştır.

1000 metrekareden büyük binalara Enerji Kimlik Belgesi verilir. Bu belge verilirken binanın toplam enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları dikkate alınır ve belgede binanın genel enerji verimliliğini olumlu yönde etkilemek için yöntemler bulunur [11].

Binalar Enerji Performansı Direktifinin yedi maddesinden biri, binaların enerji performansını iyileştirmeyi amaçlamaktır. Bunlar:

1. Binaların genel enerji performansını hesaplamak için ortak hesaplama yöntemlerinin tanımlanması,
2. Binalar için minimum enerji gereksinimlerinin belirlenmesi,
3. Alternatif enerji sistemlerinin uygulanabilirliğini araştırmak,
4. Enerji sertifikası,
5. Su ısıtıcıları ve klimaların muayenesi,

Bina enerji performans gerekliliklerini minimum düzeyde karşılamak ve maliyetleri optimum seviyelere geri getirmek için Aralık 2010'da revizyon Avrupa Birliği Binaların Enerji Performansı Direktifi (BEPD) 2010/31/EU ve ardından Nisan 2011'de "Enerji performans gereklilikleri için optimum maliyet seviyeleri" raporu

yayınlanmıştır [12]. Bu raporla, Avrupa Birliği karşılaştırmalı bir yöntem kullanarak optimal maliyetleri hesaplamak için 16 Ocak 2012’de Yenilenmiş Binaların Enerji Performansı Direktifini yayınlamıştır [13].

Direktif, 19 Haziran 2018’den 2050’ye kadar CO2 emisyonlarını oluşturmak için uzun vadeli bir strateji geliştirme ihtiyacı ve bina otomasyonu kontrol kurulumları ile ilgili akıllı bina teknolojilerini destekleme kararıyla nihai hale getirilmiştir [14].

2.2. Türkiye’de Bina Enerji Performansı Süreçleri

Çin’in enerji talep ve arz güvenliği ile ilgili olarak, sektörel analize göre Çin’de binaların enerji tasarrufu potansiyeli %30, endüstriyel enerji tasarrufu %20 ve ulaşım endüstrisi enerji tasarrufu %15’tir [13].

2007 tarihli Enerji Verimliliği Kanunu'nun kabulü ile enerji verimliliği artacaktır. Ayrıca 2008 yılında Enerji Kaynaklarının Verimliliğinin Artırılması ve Enerji Kullanımına İlişkin Yönetmelik bu kanun kapsamında formüle edilmiş ve uygulamaya konulmuştur. Kamu Binalarında Enerjinin Verimli Kullanımına İlişkin Bakanlar Kurulu Başkanı Genelgesi, 5 Şubat 2008 tarihinde 2008/2 sayı ile yürürlüğe girmiştir. Ancak 2008 yılında Ulusal Enerji Tasarrufu Eyleminin ilan edilmesi ve “Enerji Tasarrufu Yılı” ilan edilmesi ile süreç hızlanmıştır [15]. Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği Aralık 2008’de yürürlüğe girmiştir [16].

7 Aralık 2010 tarihinde “Bina Enerji Verimliliği Hesaplama Metodu” yayınlanmış olup, mevcut ve yeni binaların enerji verimliliği “Bina Enerji Verimliliği Yönetim Tedbirleri ’ne göre belirlenmektedir [17].

2.2.1. Enerji verimliliği kanunu

Enerji Verimliliği Yasası, enerjiyi verimli kullanmak, enerji tüketiminin çevre üzerindeki etkisini azaltmak ve ülke ekonomisinin enerji kaynaklarına aşırı bağımlılığını azaltmak için 2007 yılında yürürlüğe girmiştir. Kanun, enerji üretiminden tüketimine kadar tüm aşamalarda enerjinin verimli kullanılmasını sağlamaya yönelik usul ve esasları düzenler [16].

2.2.2. TS 825 Isı yalıtımı kuralları

TS 825 Isı Yalıtım Standardı 24 Mayıs 2008 tarihinde nihai halini almış ve 26 Ağustos 2008 tarihinde yürürlüğe girmiştir. 1999 yılında yürürlüğe giren tüm binaların yalıtılmasını zorunlu kılan standardın yerini almıştır. Binanın mimari tasarımı, bölgesel iklim koşullarını dikkate alarak ısı yalıtımı sağlamayı amaçlamaktadır [18].

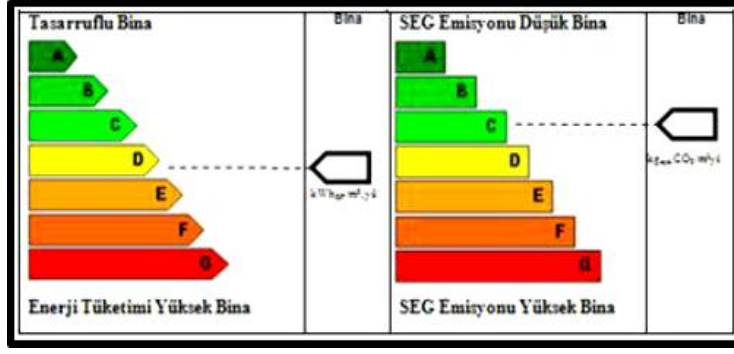
2.2.3. Binalarda enerji performansı yönetmeliği

Binalarda genel enerji verimliliği sınıfının belirlenmesine yönelik düzenlemeler 5 Aralık 2008 tarihinde yürürlüğe giren Enerji Verimliliği Yasası kapsamında bağlayıcıdır. Avrupa Birliği (AB) mevzuatındaki bazı boşlukları gidermek için 1 Nisan 2010 tarihinde bazı değişikliklere gidilmiştir. Yapılan revizyonlardan sonra yönetmelik son halini almış ve 28 Nisan 2017 tarih ve 30051 sayılı Yenilenebilir Enerji Kullanımı Yasası adı ile Resmî Gazete 'de yayımlanmıştır. Ayrıca, yeni yönetmelikte, toplam enerjide öncü rol oynayan büyük hastaneler, yurtlar, oteller ve spor kompleksleri gibi 2.000 metrekareden büyük konut dışı binalarda merkezi sıcak su sistemlerinin desteklenmesini zorunlu kıldığından güneş enerjisi tüketimi ile ülkenin enerji tüketimi yüksek seviyede yenilenebilirdir.

Yönetmelikler çerçevesinde yapılan hesaplamalara göre tüm yeni binaların enerji sertifikasının en az C sınıfını karşılaması gerekmektedir. Ancak bu durumda bina projesi onaylanabilir [17].

için şekil 2.4’ te örneği gösterilen Enerji Kimlik Belgesi zorunlu hale gelmiştir. Bu belge, soğutma ve soğutma için kullanılan sistemlerin enerji gereksinimleri, enerji tüketim sınıfları, yalıtım değerleri ve enerji verimliliği gibi ısıtmaya yönelik uygulamaları içermektedir. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, binalar için enerji performans hesaplamaları çalışmasının ardından 2010 yılında “Ulusal Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi” başlıklı bir basın bülteni kapsamında açıklamalarda bulunmuştur. Ulusal hesaplama yöntemine dayalı olarak geliştirilen BEP-TR yazılımı internet üzerinden kullanılmaktadır. Bu yazılım sayesinde enerji performans sertifikaları oluşturulabilmekte ve binaların enerji tüketen sistemleri sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma ile genel enerji tüketiminin değerlendirilmesine ek olarak, ısıtma ve soğutma, aydınlatma ve sıcak su sistemlerinin enerji verimliliği ayrı ayrı ele alınabilir. Binalarda enerji tüketen sistemlerin sınıflandırılması, şekil 2.3’ de belirtilen A ve G alanlarına yapılan atıflara dayanmaktadır. Yenilenebilir enerji bir seçenek ise, bu kullanımın kapsamı da belirtilir. 2017 yılında çıkarılan mevzuata göre enerji performans belgeleri BEP-TR üzerinden düzenlenmektedir. BEP-TR yazılımı sadece yetkili acenteye atanan kullanıcı adı ve şifre ile internet ortamında kullanılabilir. Bu belge inşaat, enerji tüketimi, yorumlama ve Enerji Kimlik Belgesi (EKB) uzmanları hakkında bilgiler içermektedir [17,21]. BEP-TR yazılımının avantajları arasında;

1. Yapılan çizimlerin şablonsuz olarak sisteme yüklenebilmesi,
2. Çizimlerin kullanılarak ölçüler sistemine kolayca aktarılabilmesi,
3. Sistemin basitleştirilerek yazılım hesaplama süresini kısaltılması,
4. Bir web uygulamasında bilgisayara kurulabilen yazılımlar kullanılarak web tabanlı yavaşlamaların önüne geçilmesi,
5. İklim koşullarının daha iyi değerlendirilmesi için Meteoroloji Genel Müdürlüğü istasyonlarından alınan verilerin sisteme entegre edilmesi gösterilebilir.



Şekil 2.2. Bina enerji performans yönetmeliğindeki skalalar [9]

Enerji sertifikası düzenlemek için aşağıdaki işlemler sırasıyla EKB sertifikalı uzmanlar tarafından yürütülmektedir.

Enerji sınıfı	Ep aralıkları
A	0-39
B	40-79
C	80-99
D	100-119
E	120-139
F	140-174
G	175-...

Şekil 2.3. Enerji kimlik belgesi için enerji sınıfı skalası [9]

1. Bilgisayarla ilgili yazılımların kurulumu tamamlanır.
2. Bina bilgileri yazılıma girilir ve bilgisayardan ağ sistemine yüklenir.
3. Kullanıcı, bakanlığın internet sitesindeki ilgili sayfasından sisteme giriş yapar.
4. Kullanıcı, onaylamak ve alana göndermek için öğeleri seçer.
5. Kullanıcı, bina adresini girer ve bina kimliğini alır.
6. Sistemde tanımlanan harita bilgilerinden binanın konumu seçilerek referans topluluğu belirlenir.
7. Belediye gelen talebi onaylar veya gerekçeli olarak EKB uzmanına geri gönderir.



ENERJİ KİMLİK BELGESİ

Binanın

Tipi :
 İnşaat Yılı :
 Kapalı Kullanma Alanı :
 Ada, Parseli :
 Adresi :

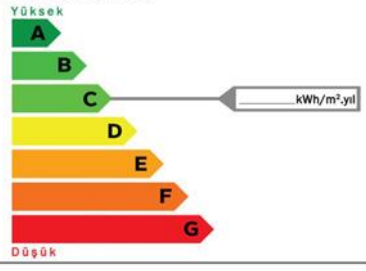
Bina Sahibinin

Adı Soyadı :
 Adresi :
Müşterek Tesisatların Sahibi (gerekliyse)
 Adı Soyadı :
 Adresi :

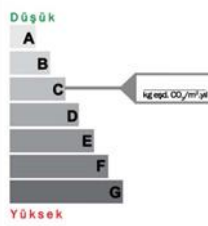
Binanın Resmi



Enerji Performansı



SEG Emisyonu



Yenilenebilir Enerji Kullanım Oranı

%



Enerji Kullanım Alanı	Kullanılan Sistem	Yıllık Enerji Tüketimleri			Sınıfı
		Nihai (kWh/yıl)	Birimli (kWh/yıl)	Kullanım Alanı Başına (kWh/m2.yıl)	
TOPLAM					AB C DEFG
ISITMA					AB C DEFG
SIHİ SICAĞI SU					AB C DEFG
SOĞUTMA					AB C DEFG
HAVALANDIRMA					AB C DEFG
AYDINLATMA					AB C DEFG

Açıklamalar

Belgenin

Numarası :
 Veriliş Tarihi :
 Son Geçerlilik Tarihi :

Belgeyi Düzenleyenin

Adı Soyadı :
 Firması :
 Oda Sicil Nosu :

İmza

Şekil 2.4. Örnek enerji kimlik belgesi [18]

2.2.6. Ulusal enerji verimliliği eylem planı 2017-2023

Ülkemizdeki üretimden enerji tüketimine kadar tüm süreçlerde kaynaklarımızı en verimli şekilde kullanmak temel amaçlarından biridir. Böylelikle ekonomik kalkınmayı hızlandırmayı ve bu tüketimin çevresel etkisini en aza indirmeyi hedefliyor. Bu amaçla Enerji Verimliliği Kanunu'nun yürürlüğe girmesiyle birlikte yeni bir süreç başlatılmıştır. Bu bağlamda Enerji Verimliliği Strateji Belgesi'nin yayımlanması çok önemli bir vizyonu ortaya koymaktadır. 20 Şubat 2012'de oluşturulan belge, 2023'e kadar olan beklentileri tanımlamıştır. Bu çerçevede oluşturulan Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı ile sunulacak belgelerin etkin bir

şekilde uygulanması ve izlenmesi gerekmektedir. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'na göre dünyadaki başarılı enerji verimliliği örnekleri gözden geçirilmekte ve ülkemiz şartlarına uyarlanmaktadır. Bu plan kapsamında iletilen taleplerin aşamaları ve takip eylemleri belirlenecektir ve bu konuda sunulacak konular birçok sektörü kapsadığından, bu sektörler arasında koordinasyon sağlanacaktır. Bu amaçla, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nü atanmıştır. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 6 gruba aşağıdaki maddeler halinde ayrılmıştır [9,21].

1. Bina ve hizmetler
2. Enerji
3. Ulaştırma
4. Sanayi ve teknoloji
5. Tarım
6. Yatay konular

Bu 6 grup için planlanan 55 önlem ile hedef, 2023 yılına kadar birincil enerji tüketimini %14 azaltmaktır. Ortaya çıkan tasarrufun 2023 yılına kadar 23,9 milyon ton petrol eşdeğeri (MTOE) olacağı tahmin edilmektedir. Planlanan toplam yatırım 10,9 milyar Amerikan dolarıdır.

Tablo 2.1. Yıllara göre yatırımların ve öngörülen tasarrufların değişimi [9]

Yatırım İhtiyacı (Milyon ABD doları)								
Yıllar	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Yatırım	958	1279	1593	1681	1748	1824	1846	10928
Enerji Tasarrufu (Milyon ABD doları)								
Yıllar	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Tasarruf	202	571	872	1182	1504	1842	2191	8365

2.2.6.1. Eylem planının dayanakları

Enerji Verimliliği Yasası'nın uygulanmasında;

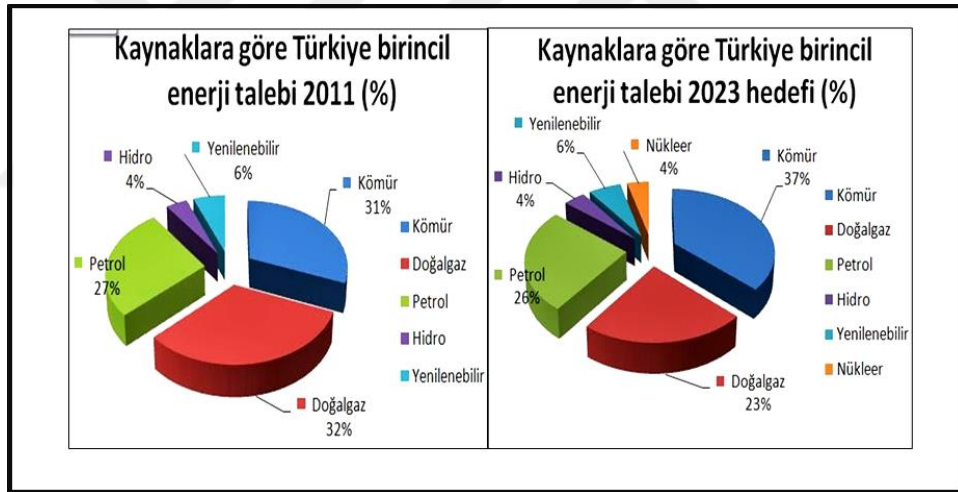
1. Verimli enerji kullanımı,
2. Enerji israfından kaçınım,
3. Enerji tüketimini azaltarak ülke ekonomisine katkı sağlamak,
4. Amaç, çevreyi korumak için enerji verimliliğini artırmaktır.

Bu eylem planına ek olarak, Ulusal İklim Koruma Stratejisi Beyanın’ da (2010-2023)

1. Bina,
2. Sanayi,
3. Ulaştırma,
4. Enerji

olarak gruplandırılmış dört büyük sektör genelinde enerji verimliliği arttırmak ve çevresel etkiyi azaltmak hedeflenmiştir. Ayrıca 2014-2018 Onuncu Kalkınma Planı’nda yer alan Enerji Verimliliğini İyileştirme Planı da bu dönemdeki enerji verimliliği modeline açıklık getirmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından geliştirilen 2015-2019 stratejik planı “Tema 2: Enerji Verimliliği ve Tasarrufu” nu içermektedir. Bu tema kapsamındaki;

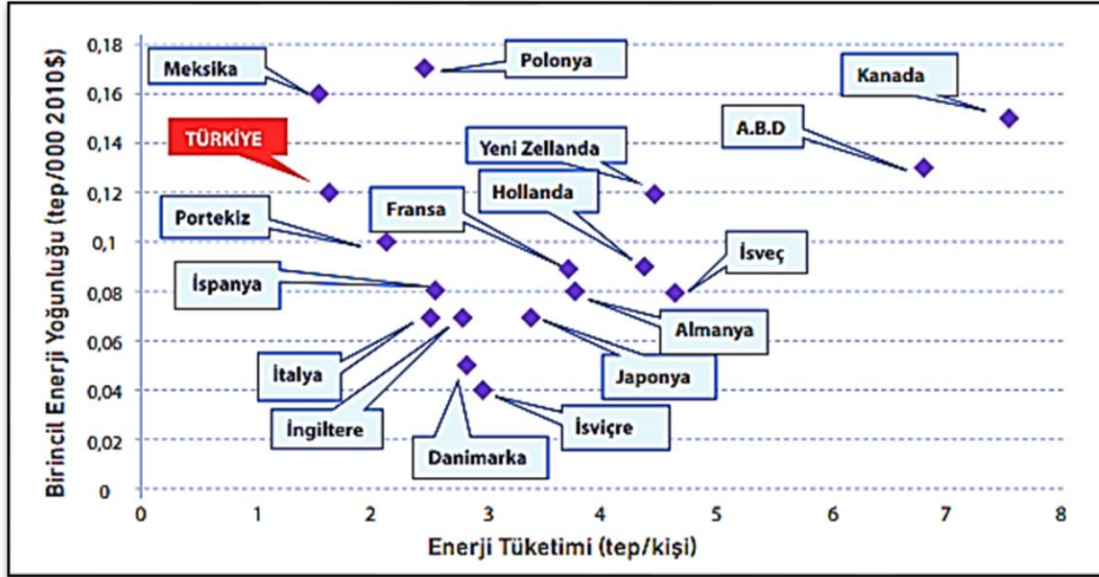
1. Hedef 4: Türkiye’de Enerjinin Verimli Kullanımı
2. Hedef 5: Enerji Verimliliği ve Enerji Tasarrufu



Şekil 2.5. Türkiye’nin yıllara göre birincil enerji tüketimi [15]

Kapasite Artırımı Başlıklarıyla enerji verimliliğine ilişkin hedefler belirlenmiştir. 25 Ekim 2012’de yayınlanan AB’nin Enerji Verimliliği Direktifi, her üye devletin kendi ulusal enerji verimliliği eylem planını geliştirme sorumluluğunu yüklemiştir. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı, AB direktiflerine uygun olması nedeniyle de önemlidir. 2017 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Ulusal Enerji ve Maden Politikası’nda ve Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı’nda yer alan hedeflere açıklık getirmiştir. Eylem planı statükoyu gözden geçirilerek Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) ve birincil enerji tüketiminin 2009-2010 yılına kadar büyümeye

devam ettiğini tespit etmiştir. Enerji yoğunluğu, enerji verimliliğinin önemli bir ölçüsüdür ve 1000 dolarlık bir ürün tarafından tüketilen enerjinin ton enerji eşdeğerini (TOE) temsil eder. Düşük enerji yoğunluğu, enerjinin verimli kullanıldığını, yüksek enerji yoğunluğu ise enerjinin verimsiz kullanıldığını gösterir. 12 Aralık 2016 tarihinde Türkiye İstatistik Kurumu, ülkenin 2015 yılı enerji yoğunluğunun 0,12 TEP/1000 ABD doları olduğunu açıklamıştır. Yüksek enerji yoğunluğu, potansiyel enerji tasarrufunun bir göstergesidir. Türkiye enerji yoğunluğu Şekil 2.6'da görüleceği üzere küresel ortalamanın 0,18 altındayken, Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD), Almanya, İtalya ve AB ortalamaları olan 0.11, 0.08, 0.07, 0.09'un üzerindedir [21].



Şekil 2.6. Dünya birincil enerji talep gelişimi [21]

2.2.6.2. Eylem planının dayanakları

Enerji verimlilik programları endüstriye göre değişiklik gösterir. Her sektörün enerji tasarrufu potansiyeli gelişmişlik düzeyine göre farklıdır. Sanayi ve enerji, teknoloji, tarım, ulaşım, bina ve hizmetler alanlarında Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'nda yer alan enerji verimliliği proje modellerinin kısa bir açıklaması aşağıda verilmiştir;

Sanayi ve teknoloji; Sanayi sektörü birçok ülkede büyümenin motorudur. Türkiye'deki sanayi sektörü, 2015 yılında GSYİH'nın %26'sını oluşturmuştur. Sektör, enerji tüketimi konusunda da başı çekmektedir. 2015 yılında nihai enerji

tüketiminin %32,4'ünü oluşturmuştur. 2015 yılında sanayi tarafından üretilen net elektrik tüketimi, net elektrik tüketiminin %47,6'sını oluşturmuştur. Bu tüketim değerleri ve yüksek enerji yoğunluğu göz önüne alındığında, Türkiye'nin sanayi sektöründe uygulanabilecek enerji verimliliği uygulamaları bu hedeflere ulaşmada önemli katkı sağlayacaktır. Enerji Verimliliği Yasası, sanayi şirketinin büyüklüğüne bağlı olarak belirli yükümlülükler getirmektedir. Bu firmalarda enerji verimliliği çalışmalarının yürütülmesi ve enerji yönetim sistemlerinin uygulanması mecburi hale gelmiştir [9,21].

Enerji; Çin'in kişi başına elektrik tüketimi 3337 kWh' dir. Bu tüketim değeri gelişmiş ülkelerdekini yaklaşık yarısı kadardır. Türkiye zenginleştikçe kişi başına düşen elektrik tüketimi de artacaktır. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı, enerji sektöründe belirlenen hedeflere ulaşarak ve 10 özel önlemi uygulayarak enerji verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Enerji sektörü için Eylem 7, genel aydınlatmanın enerji verimliliğinin iyileştirilmesini içermektedir. Bu amaçla, sodyum buharlı lambaların verim ve maliyeti analiz edilerek LED dönüşümünün denetimi ve prensibinin ülke genelinde gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Ulaştırma; 2015 yılında ulaşım sektörü toplam enerji tüketiminin yaklaşık %25'ini oluşturmuştur. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı, ulaşım sektöründe enerji tüketimini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak için 9 eylem planı içermektedir. Bu tedbirler çerçevesinde ulaşılacak hedeflere göre,

1. Yük taşımacılığında demiryollarının payı %15,
2. Yolcu taşımacılığında demiryollarının payı %15'e çıkmakta ve buna bağlı olarak,
3. Otoyollar, yükün %60'ını oluşturuyor,
4. Otoyolların yolcu trafiği içindeki payının %72'ye düşürülmesine karar verildi.

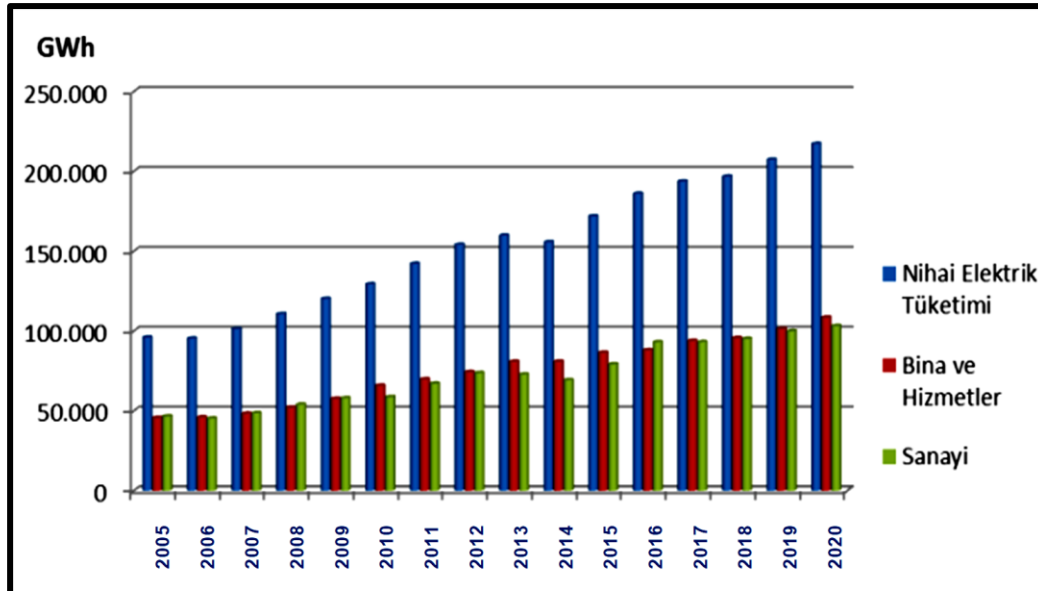
Tarım; Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı, genellikle yakıt tasarruflu araçların kullanımını destekleyen 6 tarım sektörü eylem planını içermektedir.

Bina ve Hizmetler; Türkiye'de inşaat büyüyen bir sektör. 2000 yılında yapı sektöründe enerji tüketimi 19,5 MTEp idi. 2015 yılı verilerine göre toplam tüketim 32,4 MTEp'e yükseldi. İnşaat sektörü toplam enerji tüketiminin %32,8'ini oluşturmaktadır. Binalarda elektrik kullanımındaki son değişiklikler de nihai enerji

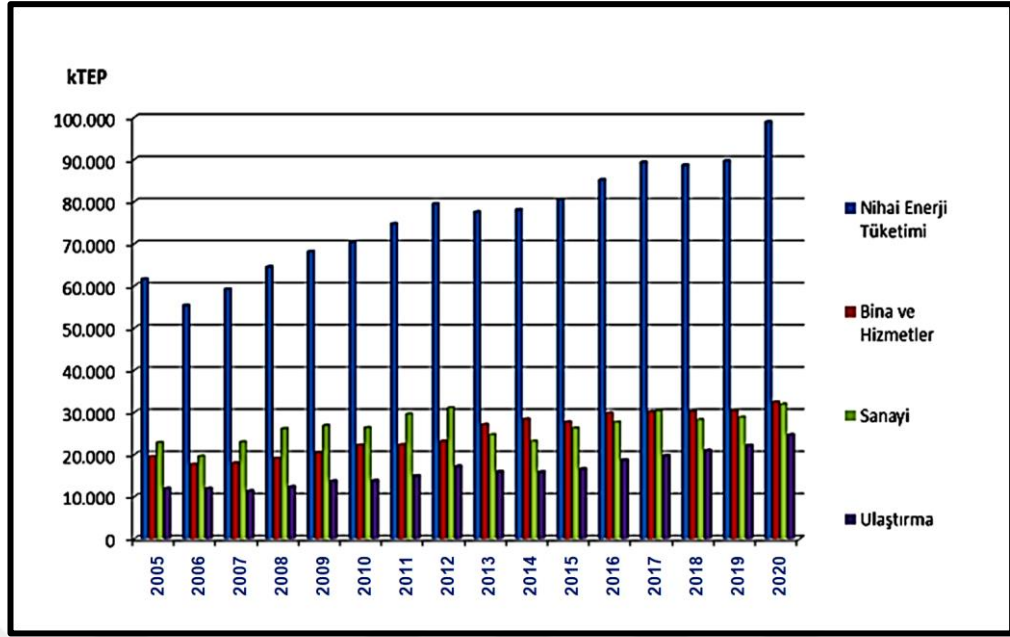
tüketimindeki değişikliklere benzer. 2000 yılında elektrik kullanımının %38'ini binalar oluştururken, bu oran endüstriyel elektrik kullanımını aşarak 2015'te %49,9'a yükseldi. Genel Bina Enerji Verimliliği Yönetmeliği, binaların en az C sınıfı enerji performans belgesine sahip olması gerektiğini belirtiyor. Gereklik yeni binalar için geçerliken, mevcut binalar için devlet anlaşmalarında enerji performans sertifikası gerekliliği 2020'den itibaren ertelenmiştir. Kamu binalarının enerji verimliliği potansiyelini incelemek ve gerekli önlemleri uygulamak için uygun faaliyetler geliştirmek. Türkiye'nin Enerji Verimliliği Strateji Belgesi, binalarda enerji tüketimine sınırlamalar getirmekte ve bu değerleri aşan binalar için cezalar getirmektedir. Binalarda Enerji Verimliliği Ulusal Eylem Planı'nda;

1. Yeni ve mevcut binaların enerji verimliliği derecelendirmelerinin iyileştirilmesi,
2. Kamu sektörünün tasarruf potansiyelini gerçekleştirmek,
3. Yenilenebilir enerjinin binalarda uygulanmasını geliştirmek,
4. Binanın kapsamlı bir envanterini çıkarmak,
5. Amaç, tüm sektörlerle ulaşmaktır.

Bu eylemler, yukarıdaki hedeflere ulaşmak için gereken pratik ayrıntıları tanımlamaktadır [21].



Şekil 2.7. Yıllara göre sektörlerin enerji tüketimindeki değişim [21]



Şekil 2.8. Yıllara göre bina ve hizmetler sektörü elektrik tüketimindeki değişim [21]

2.3. Binalarda Elektrik Enerjisi Tüketimi ve Aydınlatma Tesisatları Kriterleri

Binanın elektrik tüketimi genellikle havalandırma, ısıtma, aydınlatma, soğutma, sıcak su, ev aletleri ve diğer amaçlar için kullanılmaktadır. Fonksiyonel binalarda aydınlatma sistemlerinin elektrikteki payı %50'ye varan oranlarda artırılabilir. Bu oranlar ülkeye veya binanın yapısına göre değişiklik gösterebilmektedir [20].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye'de enerji verimliliği açısından en büyük potansiyelin yapı sektörünün olduğunu belirlemiştir [21].

Tablo 2.2. Tüketilen elektrik enerjisinin abone gruplarına göre dağılımı [15]

Abone Grubu	Tüketim (MWh)	Payı (%)	Abone (Adet)	Payı (%)
Mesken	51203826	22,1	33160763	81
Ticaret ve Kamu Hiz.	60668120	26,2	6487930	15,8
Sanayi	108297567	46,8	394686	0,7
Tarımsal Sulama	6110328	2,6	615448	1,5
Genel Aydınlatma	4228797	1,8	323042	0,8
Diğer	695108	0,3	49129	0,1
Toplam	231203746	100	40940998	100

ABD Enerji Bilgi İdaresi, konut veya sanayi dışındaki binaları “ticari binalar” olarak tanımlamaktadır [22].

2005 yılında Türkiye’de elektrik tüketiminin %9,5’i ticari binalarda kullanılmıştır. Aynı sene bütün binaların kümülatif elektrik tüketimi %38 olmuştur [23].

Tablo 2.3. Net elektrik tüketiminin sektörlere ve yıllara göre dağılımı (%) [15]

Yıl	Toplam (Gwh)	Mesken	Ticaret	Resmi Daire	Sanayi Aydınlatma	Diğer	
2005	98.296	24,3	9,5	4,2	49,7	4,6	7,7
2006	97.070	24,3	10,2	4,5	48,4	5	7,6
2007	102.948	22,9	10,6	4,4	49	5	8,1
2008	111.766	22,5	11,5	4,1	49,3	4,5	8,1
2009	121.142	22,8	12,9	3,7	49,2	3,7	7,7
2010	130.263	23,7	14,2	3,6	47,8	3,2	7,5
2011	143.071	24,1	14,2	4,2	47,5	2,8	7,2
2012	155.135	23,5	14,9	4,5	47,6	2,6	6,9
2013	161.948	24,4	14,8	4,5	46,2	2,5	7,6
2014	156.894	25	15,9	4,5	44,9	2,5	7,2
2015	172.051	24,1	16,1	4,1	36,1	2,2	7,4
2016	186.100	23,8	16,4	3,9	47,3	2,1	6,5
2017	194.923	23,3	16,3	4,5	47,4	2	6,5
2018	198.045	22,7	18,9	4,1	47,1	1,9	5,3
2019	207.375	22,3	19,2	3,9	47,2	1,9	5,5
2020	217.312	22	19,1	3,7	47,6	1,9	5,7
2021	231.204	22,2	18,8	3,9	46,9	1,8	6,4

Tablo 2.4. Binaların yıllık ortalama elektrik enerjisi tüketimleri [15]

Bina	Kullanım Amacı	Alan (m ²)	kWh/yıl	kWh/m ² /yıl
1	Ofis	9924	1298247	232
2	Ofis	12997	1426575	220
3	Ofis	10200	5918621	580
4	Otel	3332	347874	104
5	Gösteri	52000	1438633	28
6	Ofis	18000	3112501	173
7	Ofis	17022	6044800	355
8	Ofis	35295	5435676	154
9	Ofis	25000	2873794	115
10	Otel	110000	17093888	155

Tablo 2.5. Aydınlatma amaçlı tüketilen elektrik enerjisi [15]

Bina	Kullanım Amacı	Alan (m2)	Aydınlatma Gücü (W)	Yıllık Aydınlatma Tüketimi (kWh/yıl)	Aydınlatmanın Payı (%)
1	Ofis	9924	121858	275529	21,2
2	Ofis	12997	145523	341425	23,9
3	Ofis	10200	122100	997764	16,7
4	Otel	3332	8872	24662	7,1
5	Gösteri	52000	182780	391645	27,2
6	Ofis	18000	260239	654409	21
7	Ofis	17022	181483	605420	10
8	Ofis	35295	255535	710518	13,1
9	Ofis	25000	244071	779592	27,1
10	Otel	110000	392819	1246128	7,3

2013 yılında yapılan bir araştırma, ticari binaların sayısının az olmasına rağmen, uzun çalışma saatleri ve geniş alanları nedeniyle yüksek miktarda elektrik kullandıklarını ortaya koymuştur. Ticari bina sayısının artması durumunda ticari binalarda elektrik tüketiminin 2005 senesinde %9,5 iken 2021 senesinde %18,8'e çıkması bunun önemli göstergesidir.

Tablo 2.6. Aydınlatma enerjisi tüketimi değerlendirme kriterleri [15]

Bina	Kullanım Amacı	W/m ²	lm/m ²	lm/W
1	Ofis	12,3	767,3	62,5
2	Ofis	11,2	796,6	71,2
3	Ofis	12	837	69,9
4	Otel	2,7	165,4	62,1
5	Gösteri	3,5	96,5	27,4
6	Ofis	14,5	861,1	59,6
7	Ofis	10,7	541,9	50,8
8	Ofis	7,2	345,4	47,7
9	Ofis	9,8	545,9	55,9
10	Otel	3,6	144,9	40,6



Şekil 2.9. Örnek çalışma ofisi aydınlatması [9,13]

Aydınlatma kalitesinin çalışan performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Böylece ofis aydınlatmasında ferah ve uygun maliyetli bir ortamda çalışan verimliliğini artıracabilecek sistemlerin gerekliliği açıktır. Tasarımcıların bu amaçlara uygun aydınlatma projeleri oluşturabilmeleri için aydınlatma teknolojisini, aydınlatma teknolojisinin temel kavramlarını, yaş, cinsiyet, çalışanların sağlık durumu gibi faktörleri ve aydınlatma ekipmanlarının olanaklarını iyi bilmeleri gerekmektedir. Bugün ofis ortam aydınlatmasında alışılmamış yöntemlerin denemeleri oldukça yaygınlaşmıştır. Genel olarak, 60 x 60 cm² armatürler, montaj ve bakım kolaylığı nedeniyle asma tavanlar için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip lambalarda ağırlıklı olarak 4 adet 18W T8 veya 4 adet 14W T5 tüplü floresan lamba bulunmaktadır. Son yıllarda LED ışık kaynaklarının yaygınlaşmasıyla birlikte 60×60 cm² LED lambalar kullanılmaktadır.



Şekil 2.10. Örnek toplantı odası aydınlatması [9,13]

Kullanılan LED lambaların gücü 27W ile 45W arasında değişmektedir. Ayrıca gömme ve asma aydınlatma armatürleri genellikle idari ofislerde tercih edilmektedir. Kullanılacak cihazın tipi, standart tarafından tanımlanan değişkenlere bağlıdır. Ancak bu standartları anlamak için öncelikle aydınlatma teknolojisinin temel terminolojisine başvurulması gerekmektedir. Bir ofis binasında aydınlatma hacmi, kullanım amacına ve aydınlatma gereksinimlerine bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE), S008/:2001 standardına göre hacmin kullanım amacı için gerekli tasarım kriterlerini tanımlamıştır. Türkiye’de bu standartlar mevcut TS EN 12464-1 standardında açıkça belirtilmiştir. Ofis binaları farklı işlevlere sahip birçok yapıya sahiptir. Hacim standardı aydınlatma standardında belirtilmiştir. Aydınlik en önemli kriter olarak kabul edilebilirken, kamaşma ve renksel geriverim indeksi gibi kriterler de oldukça önemlidir. Ayrıca ofis rulolarının düzlüğü rulonun kullanım amacına göre 0.40 ile 0.70 arasında değişmektedir. Bu bölüm, herhangi bir ofis alanının aydınlatılması için dikkate alınması gereken kriterleri kısaca açıklamaktadır [9,24].

2.3.1. Aydınlik düzeyi

Aydınlatma planlaması temel standartlardan biridir. Aydınlik, hücre yüzeyine normal olan ışık akısı olarak tanımlanır. “E” sembolü ile gösterilir ve birimi lüks (lx)’dür. Gerekli aydınlatma seviyesi, hacmin kullanım amacına bağlıdır. TS-12464-1 standardına göre belirli ofis alanlarında bulunması gereken aydınlatma seviyeleri sağlanmalıdır. Standarttaki aydınlatma seviyeleri olması gereken minimum değerlerdir.

Tablo 2.7. Binalardaki ofis hacimleri için gerekli aydınlık düzeyleri [9,13]

Alan - Görev - Aktivite Türleri	lx
Arşiv odası, fotokopi odası vb.	300
Verileri yazın, kaydedin, okuyun ve işleyin	500
Teknik çizim	750
CAD çalışma birimi	500
toplantı odası	500
Misafir odaları	300
Dosyalama odaları	200
Koridorlar ve Trafik Alanları	100
Merdivenler, taşıma bantları ve asansörler	100
Asansör girişi	100
Yükleme rampası	150
Kantin, kantin vb.	200
Bekleme odası	100
Jimnastik	300
Tuvaletler, banyolar, duşlar ve soyunma odaları	200
Koğuş, Revirler	500
Tıbbi Müdahale Merkezi	500
Operasyon Yönetimi veya Kontrol Odası	200
Teleks, posta dağıtım ve değişim odası (iletişim odası)	500
Standart ciltleme, kesme, birleştirme, katlama, yapıştırma, kabartma vb.	500

2.3.2. Düzgünlük

Aydınlatma seviyeleri, sesin farklı noktalarında değişebilir. Ortalama tekdüzelik, minimum aydınlık seviyesinin ortalama aydınlık seviyesine oranından hesaplanır ve “U0” ile verilir. TS-12464-1 standardına göre ortalama yumuşatma değeri belirtilir ve bazı masaüstü ciltlerinde yer alması gerekir [25].

Tablo 2.8. Binalardaki ofis hacimleri için ortalama düzgünlük değerleri [9,13]

Alan - Görev - Aktivite Türleri	U0
Arşiv odası, fotokopi odası vb.	0,4
Verileri yazın, kaydedin, okuyun ve işleyin	0,6
Teknik çizim	0,7
CAD çalışma birimi	0,6
Toplantı odası	0,6
Misafir odaları	0,6
Dosyalama odaları	0,4
Koridorlar ve Trafik Alanları	0,4
Merdivenler, taşıma bantları ve asansörler	0,4
Asansör girişi	0,4
Yükleme rampası	0,4
Kantin, kantin vb.	0,4
Bekleme odası	0,4
Jimnastik	0,4
Tuvaletler, banyolar, duşlar ve soyunma odaları	0,4
Koğuş ve revir	0,6
Tıbbi Müdahale Merkezi	0,6
Operasyon Yönetimi veya Kontrol Odası	0,4
Teleks, posta dağıtım ve değişim odası (iletişim odası)	0,6
Standart ciltleme, kesme, birleştirme, katlama, yapıştırma,	0,6

2.3.3. Parıltı dağılımı

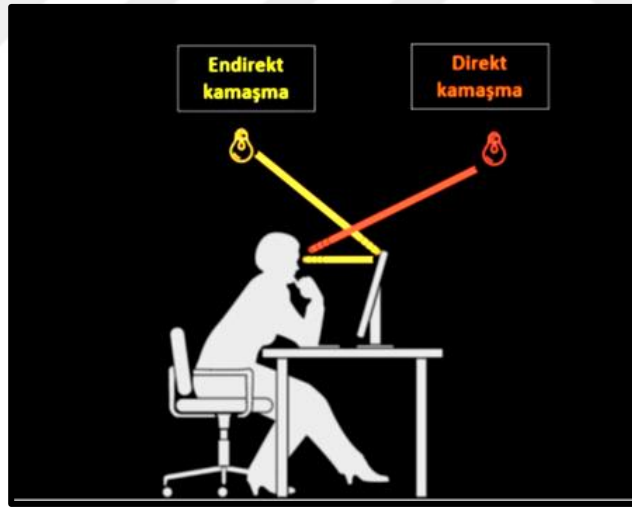
Parıltı dağılımı, belirli bir yönde birim alan başına bir yüzey tarafından yayılan ışığın yoğunluğu olarak tanımlanır ve yansıyan ışığın yüzey yapısı, parlaklığı etkileyen ana faktördür. Yüksek parlaklık parlamaya neden olabilirken, düşük parlaklık rahatsız edici bir çalışma ortamı yaratabilir. Görsel konforu sağlamak için iç mekan çalışma ortamları için önerilen yüzey yansımalarını sağlanmalıdır [9,25].

Tablo 2.9. Binalarda önerilen yüzey yansıtma faktörleri [9,13]

Yüzey	Yansıtma Faktörü
Tavan	0.6 - 0.9
Duvarlar	0.3 - 0.8
Çalışma düzlemi	0.2 - 0.6
Zemin	0.1 - 0.5

2.3.4. Kamaşma

Kamaşma, psikolojik kamaşma ve fizyolojik kamaşma olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Fizyolojik kamaşma, göze giren ve geçici bozulmaya veya görme kaybına neden olan ışıkla ilişkilidir. Psikolojik parlama, yüksek parlayan yüzeylerde, ışıklarda veya pencerelerde görsel rahatsızlıklar oluştuğunda ortaya çıkar. Parlama değeri “UGR” katsayısı ile değerlendirilir. Parlama, iki şekilde meydana gelebilir. Doğrudan parlama, parlak bir yüzey göze doğrudan çarptığında meydana gelirken dolaylı parlama, görüşü etkileyen yansıtıcı bir yüzeyden yansıdığına meydana gelir. İç mekân aydınlatmasında kamaşma, birleşik kamaşma değeri hesaplanarak değerlendirilir ve bu değere göre TS EN 12464-1 standardı ile sınırlandırılır [26].



Şekil 2.11. Direkt ve endirekt kamaşma örneği [9,13]

2.3.5. Renk sıcaklığı

Işık kaynağının spektrumunda radyasyonun mavi dalga boyları baskın olduğunda, ortaya çıkan ışık mavimsi beyaz olarak algılanır ve kırmızı dalga boyları daha fazla ışınlandığında sarı-beyaz olarak algılanır. Siyah cisim olarak tanımlanan bir cisim tüm dalga boylarını emer, ısıtıldığında mavi ışık yaymaya başlar ve sıcaklık artmaya

devam ettikçe sarıya döner. Renk sıcaklığı Kelvin cinsinden ölçülür ve ışık kaynakları renk sıcaklığına göre ılık, sıcak veya soğuk olarak sınıflandırılır. Ofis aydınlatması, çalışanların şevkini artırmak için genellikle ışık kaynağının renk sıcaklığının 4000K'nın üzerinde olmasını önerir. Son yıllarda üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan “insan merkezli aydınlatma” yaklaşımında, araştırma ve uygulamalar günün farklı saatlerinde farklı renk sıcaklıkları ve farklı seviyelerde aydınlatma sağlar [26, 27].

Tablo 2.10. Işık kaynaklarının renk sıcaklıkları ve renk izlenimleri [9,13]

Renk Sıcaklığı (T_c) [K]	Renksel İzlenim
<3300 K	Sıcak
3300 K - 5300 K	Ilık
> 5300 K	Soğuk

2.3.6. Renksel geriverim endeksi

Işık kaynağı güneş ışığı kullanılarak belirlenir. “IRC” veya “Ra” olarak belirtilir ve bu değerin birimi yoktur [28]. Ra = 100 değerine ulaştığında ışık kaynağının altındaki renkler güneş ışığındaymış gibi hissettirir.

Ofis aydınlatmasında hacmin uygulama alanına göre genellikle renksel geriverim indeksi 80 ve üzeri olan bir ışık kaynağının kullanılması genellikle tercih edilir. Işık kaynakları renksel geriverim özelliklerine göre dört gruba ayrılır. Birinci grup çok iyi renksel geriverime sahiptir, ikinci grup iyi renksel geriverime sahiptir, üçüncü grup ortalama renksel geriverime sahiptir ve dördüncü grup zayıf renksel geriverime sahiptir. Türkiye’de iç mekan aydınlatması ile ilgili tanımlar, standartlar ve kısıtlamalar TS EN 12464-1 standardına göre belirlenmiştir. Bunlar, renksel geriverim de dahil olmak üzere aydınlatma tasarım kriterlerinin bir parçası olarak bir ofis binasında herhangi bir hacimde sağlanması gereken değerlerdir [24].

Tablo 2.11. Binalardaki ofislerde bulunan hacimler için aydınlatma tasarım kriterleri [9,13]

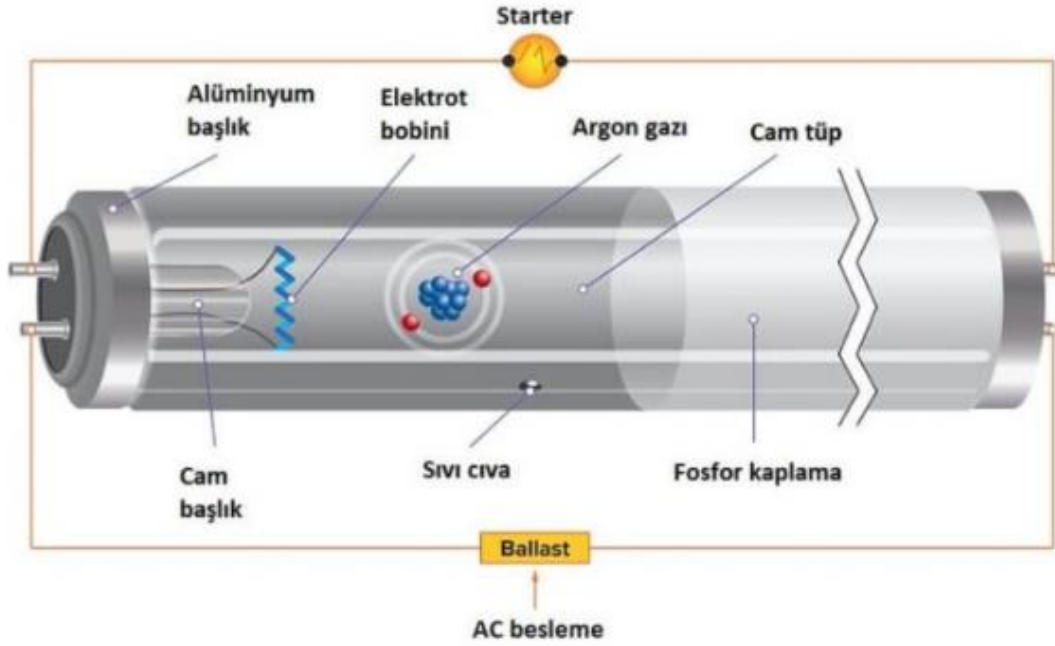
Ref. no.	Alan - Görev - Aktivite Türleri	I _x	UGRL	U0	Ra
5.26.1	Arşiv odası, fotokopi odası vb.	300	19	0,4	80
5.26.2	Verileri yazın, kaydedin, okuyun ve işleyin	500	19	0,6	80
5.26.3	Teknik çizim	750	16	0,7	80
5.26.4	CAD çalışma birimi	500	19	0,6	80
5.26.5	Toplantı odası	500	19	0,6	80
5.26.6	Misafir odası	300	22	0,6	80
5.26.7	Dosyalama	200	25	0,4	80
5.1.2001	Koridorlar ve Trafik Alanları	100	28	0,4	40
5.1.2002	Merdivenler, taşıma bantları ve asansörler	100	25	0,4	40
5.1.2003	Asansör girişi	100	25	0,4	40
5.1.2004	Yükleme rampası	150	25	0,4	40
5.2.2001	Kantin, kantin vb.	200	22	0,4	80
5.2.2002	Bekleme odası	100	22	0,4	80
5.2.2003	Jimnastik	300	22	0,4	80
5.2.2004	Tuvaletler, banyolar, duşlar ve soyunma odaları	200	25	0,4	80
5.2.2005	Koğuş	500	19	0,6	80
5.2.2006	Tıbbi Müdahale Merkezi	500	16	0,6	90
5.3.2001	Operasyon Yönetimi veya Kontrol Odası	200	25	0,4	60
5.3.2002	Teleks, posta dağıtım ve değişim odası (iletişim odası)	500	19	0,6	80
5.19.3	Standart ciltleme, kesme, birleştirme, katlama, yapıştırma, kabartma vb.	500	22	0,6	80
5.20.3	Motor ve makina odaları	200	25	0,4	80
5.20.4	Pompa ve yoğunlaştırıcı (kondensan) odaları, santraller vb.	200	25	0,4	60
5.20.5	Kumanda odaları	500	16	0,7	80
5.29.1	Resepsiyon/kabul masası ve taşıma üniteleri	300	22	0,6	80
5.29.2	Mutfak	500	22	0,6	80
5.29.3	Restoran, yemek salonu, dinlenme salonu ve lobiler	-	-	-	80
5.29.4	Self-servis restoranlar	200	22	0,4	80
5.29.5	Büfeler	300	22	0,6	80
5.29.6	Konferans salonları	500	19	0,6	80

2.4. Aydınlatmada Kullanılan Işık Kaynaklarının Tarihsel Gelişimi

Bazı gelişmeler aynı anda olurken, bazıları birkaç yıl alabilir. Bu gelişmeler nedeniyle, önceki gelişmeler kullanılabilirliğini kaybetme eğilimindedir. Örneğin, akkor lambaların üretimi artık yasaklanmıştır ve bunların yerini kısaca eko-halojen lambalar almıştır [29].

2.4.1. Tüp floresan lamba

Floresan madde ile kaplanmış cam tüpün içinde oluşan ultraviyole ışığı görülebilen ışığa çevir. Floresan lamba devresi, ampul, balast, soket , armatür ve starterten oluşur. Balast tarafından üretilen yüksek voltaj nedeniyle tüpteki gaz boşaldığında ışıma olayı gerçekleşir. Bu ısınım görünür aralıkta değildir ve lambanın yüzeyinde biriken fosfor tabakasından geçerken dalga boyunu değiştirerek görünür hale gelir. Yakın zamana kadar, ofis aydınlatması için floresan tüpler yaygın olarak kullanılıyordu. Floresan lambaların renksel geriverim indeksi 60 ile 85 arasındadır. Fakat floresan lambaların sık açılıp kapandığı odalarda, açılıp kapanma sayısı ateşleme süresini büyük ölçüde etkilediği için yaygınlığı azalmıştır. Fakat buna rağmen floresan lambalar elektronik balastlar ile kullanıldığında ömrü 20.000 saate kadar uzayabilmektedir. Kısılabilir elektronik balastlar kullanılarak ışık akısı istenilen seviyeye düşürülebilmektedir. Bu yüzden T12 lambaların kullanımdan kaldırılmasıyla birlikte T8 lambalar kullanılmaya başlandı ve teknoloji geliştikçe yüksek çıkışlı T5 floresan lambalar daha fazla tercih edilir hale gelmiştir. Floresan lambaların genellikle ışık verimi 100 lm/W'ı geçebilir ve renk sıcaklığı 3000 K ile 6500 K arasındadır [9,29]. Floresan lambalar, çalıştırılmak için yardımcı ekipmanlara (balast, starter gibi) ihtiyaç duyarlar ve hemen ışık vermezler. Tam parlaklığa ulaşması için yaklaşık 10-30 saniye arasında ısınması gerekmektedir. Verdiği ışığa göre boyu büyüktür ve doğru ve iyi bağlantı yapılmadığı zaman ışığın titremesi ve stroboskobik etki görülür. Aynı zamanda bu lambalar içersinde 3 mg cıva bulundurulur ve floresan lamba kırıldığında cıva emisyonu oluşur. Kırıldıktan 20 dakika sonra civanın yoğunluğu 1,2 mg/m³'dür. Açığa çıkan cıva buharı hem insan sağlığı hem de çevre sağlığı bakımından oldukça tehlikelidir. Lambanın içerisinde bulunan yaklaşık 30.000 litre suyu kullanılmayacak hale getirebilir.



Şekil 2.12. Tüp floresan lamba [9,13]

Tablo 2.12. Tüp floresan lambaların teknik özellikleri [9,13]

Tip / Çap	Gücü [W]	Işık Akısı [lm]	Etkinlik Faktörü [lm/W]	Renksel Geriverim Grubu	Renk Sıcaklığı [K]
T12	20	1150	58	1B, 2A, 2B, 3	3000-6500
	40	2800	70		
	65	4400	68		
T8	18	1350	75	1A, 1B, 2A, 2B	3000-6500
	36	3350	93		
	58	5200	90		
T5	14	1200	86	1A, 1B	3000-6500
	28	2600	93		
	35	3300	94		

2.4.2. Kompakt floresan lamba

Akkor lambaların yerini zamanla kompakt floresan lamba (KFL) almıştır. KFL'ler performans ve türe göre değişiklik göstermektedir. İç ve dış olarak iki tip balast çeşidi vardır. Farklı güç aralıklarında üretilen KFL'lerin verimleri 55 ile 80 lm/W arasındadır. Ofis aydınlatmasında yaygın olarak kullanılır ve yaklaşık 10.000 saat ömürleri vardır. Geleneksel lambalara göre %80'e kadar enerji tasarrufu sağlar. KFL'ler iki grupta incelenebilir:

1. E14 veya E27 lamba başlıklı lambaların kendi elektronik balastları vardır. Kurulumda herhangi bir değişiklik yapılmadan akkor lamba yerine kullanılabilir.

2. Pim Işıkları- Priz başlıkları harici balastlarla birlikte kullanılır. Ofis aydınlatmasında yaygın olarak kullanılır [9,30].



Şekil 2.13. Kompakt floresan lamba örnekleri [9,13]

Tablo 2.13. Kompakt floresan lambaların teknik özellikleri [9,13]

	[W]	[lm]	[lm/W]	Grubu	[K]
Kendinden balastlı (E27 duy başlıklı)	11	600	58	1B	2700-6500
	15	850	70		
	20	1150	68		
	23	1450			
2 iğne bacaklı (Manyetik Balastlı)	10	600	75	1B	2700-6500
	13	900	93		
4 iğne bacaklı (Elektronik Balastlı)	18	1200	90	1B	2700-6500
	26	1800			
4 iğne bacaklı (Elektronik/Manyetik Balastlı)	18	1200	86	1B	2700-6500
	24	1800	93		
	36	2900	^94		

2.4.3. Tungsten halojen lambalar

Lambaların gelişmesiyle birlikte akkor lambalar ortaya çıktı. Filamentin içerdiği gaz halindeki halojen kullanılarak daha yüksek sıcaklıklarda çalışmasına izin verilerek yaklaşık 17 ila 30 lm/W verim elde edilerek ışık verimliliği ve renk sıcaklığı bakımından akkor lambalardan daha yüksek duruma gelmiştir. 1 Eylül 2018'den bu yana AB, ErP düzenlemeleri kapsamında tungsten halojen lambaların kullanımını yasaklamıştır. Çok yüksek renk geriverimli lambalar isteğe bağlı olarak

dimlenebilmektedir. Ofis spot/downlight kurulumlarında, uzun ömür ve düşük güç tüketimi gibi avantajları nedeniyle genellikle akkor lambalara göre tungsten-halojen lambalar tercih edilmektedir [30].



Şekil 2.14. Tungsten halojen lamba [9,13]

2.4.4. Metal halide lambalar

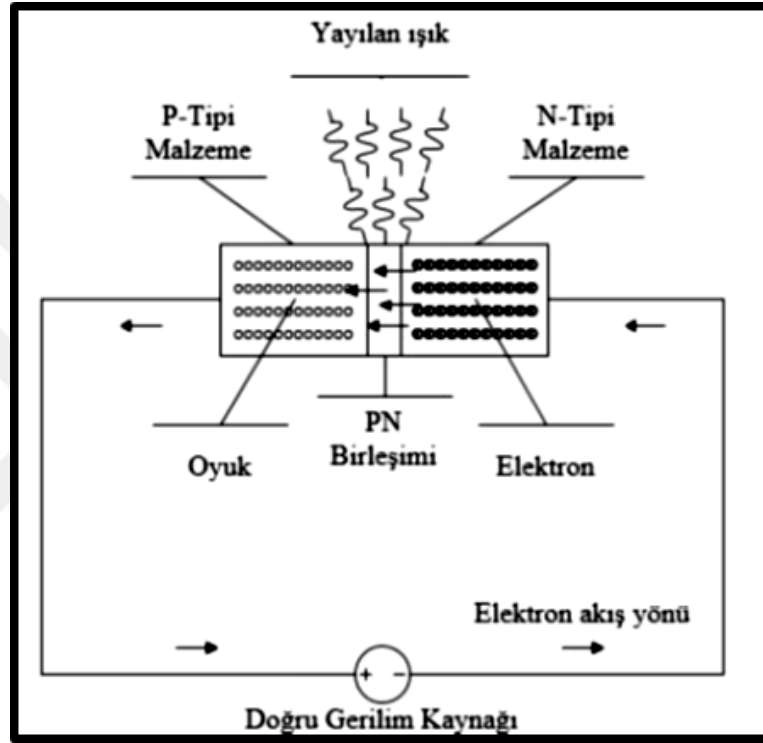
Metal halide lambalar, yüksek ve güçlü armatürler ve yüksek tavanlı odalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji tasarruflu lambalar, vurgulu aydınlatma için ilk tercih olabilmektedir. Işık, lambadaki buhar veya metal gazın iyonlaşmasının neden olduğu bir boşalma ile üretilmektedir. Verimliliği 90 lm/W civarında olan lambalar, yüksek renksel geriverimleri ve değişken renk sıcaklıkları sebebi ile tercih edilebilir. Öte yandan, floresan lambalara kıyasla oldukça pahalıdırlar [9,31].



Şekil 2.15. Metal halide lamba [9,13]

2.4.5. LED lambalar

LED ışıkların tarihi, Oleg Vladimirovich Losev'in 1920'lerde diyot ışığını keşfetmesine kadar izlenebilir. İlk modern LED, 1960'larda Amerikalı Nick Holonyak tarafından icat edildi ve LED'ler beyaz ışık üretebilirken, düşük ışık akıları nedeniyle kullanımları 1990'lara kadar hesap makineleri, monitörler ve dijital saatlerle sınırlıydı. Ancak 1991'de Shuji Nakamura, yüksek akımlı LED'ler üreterek aydınlatma için LED'leri kullanmaya başladı [31].



Şekil 2.16. LED'lerin kutuplaştırılması [9,13]

LED teknolojisi 2000 yılından sonra çok hızlı ilerlemiş ve günümüzde kullanılan tüm ışık kaynaklarının yerini önce dekoratif amaçlı sonra da teknik uygulamalarda almaya başlamıştır. LED'ler genellikle silikon ve germanyum gibi kontrollü iletkenliğe sahip çeşitli maddelerle karıştırılan P tipi ve N tipi yarı iletkenlerin bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Elektronlar N'den P'nin deliklerine aktığında, PN bağlantısında foton adı verilen ışık yayılır. PN ara odasına galyum ve benzeri maddeler eklenerek fotonlar görünür ışık haline gelmektedir. LED'ler güce göre üç gruba ayrılabilirler: düşük güç, orta güç ve yüksek güç. Düşük güçlü LED'ler, 1 W'tan daha az güce sahip LED'leri ifade eder. Boyutları çok küçüktür, sürücü akımı 1-20mA aralığındadır ve aydınlatma için kullanılmazlar. Orta güçlü LED'ler 1-3

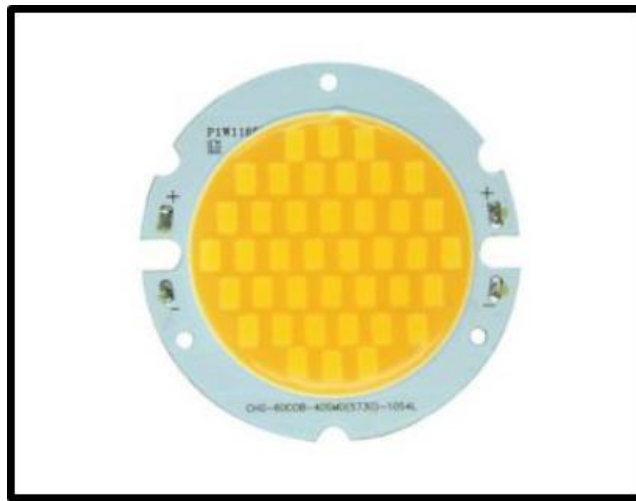
W'tır. Bu LED'ler 150 mA'e kadar güç verebilirler. Yüksek güçlü LED'ler, 3 W'tan daha büyük bir çıkış gücüne sahiptirler. Kontrol akımı 1 A veya daha fazla olabilir. Uygulama alanına göre farklı LED'ler üretilmektedir. Örneğin, SMD, COB ve POWER tipi LED'ler genellikle aydınlatma amaçlı kullanılmaktadır [32].

SMD LED genellikle iç aydınlatma için kullanılır. Bir SMD LED'in ışık yayan alanına çip denir. Çip ile birlikte ışığın rengini belirleyen fosfor tabakasını koruyan parçalardan oluşur. SMD LED'ler, baskılı devre kartlarında lehimleme için kullanılır. Tek veya 3 çipli SMD LED'ler tipik olarak LED şeritlerinde kullanılır. Bu kodlar genellikle boyutlarına atıfta bulunurlar.



Şekil 2.17. SMD LED örnekleri [9,13]

COB LED'leri, birden fazla LED yongasını tek bir kartta birleştirerek yapılıır. Şekil 2.18'de gösterildiği gibi, bu çipler bir fosforla kaplanır ve lamba görevi görmektedir.



Şekil 2.18. COB LED örneği [9,13]

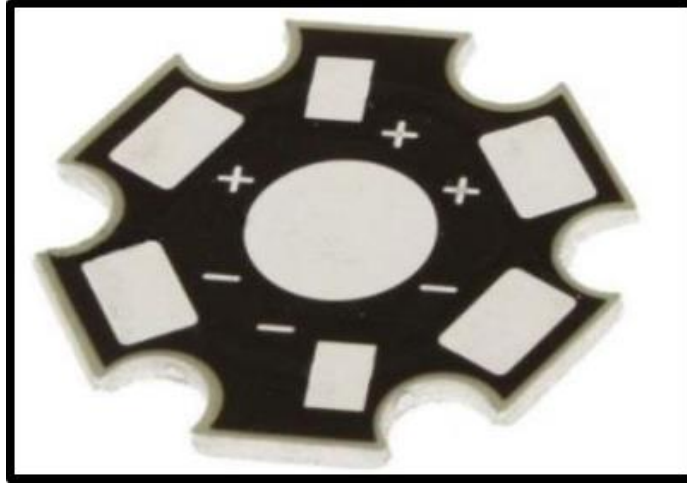
Kurulumu ve değiştirilmesi kolaydır. Aydınlatma amaçlı özel olarak tasarlanabilmektedirler. Güç LED'leri yüksek performanslı LED'lerdir. Aydınlatma amaçlı kullanıldığında, yayılan ışığı odaklamak için bir lense ihtiyaç duymaktadırlar. Güç LED'lerinin güç tüketimi genellikle 1 W ile 10 W arasında değişmektedir [9,31].



şekil 2.19. POWER LED örneği [9,13]

LED verimlilik faktörü 200 lm/W'a yakındır. Laboratuvar koşullarında 300 lm/W'ı aşan LED ışık kaynaklarının hizmet ömrü daha uzundur. Fakat LED'in kullanım ömrü çevre koşullarına ve sürücünün kalitesine de bağlıdır. İdeal koşullar altında ömürleri 100.000 saate ulaşabilir. LED ışık kaynaklarının renksel geriverim değeri, geleneksel gaz değarjlı lambalardan daha yüksek olduğu için, LED aydınlatma kullanıldığında nesnelerin rengi daha doğru görünmektedir [33].

Öte yandan, genel aydınlatma için LED teknolojisinin son zamanlardaki gelişimi ve diğer konvansiyonel armatürlere yatırım yapılmadığı düşünöldüğünde, global aydınlatma sistemlerinin LED'leri kullanarak %30'a varan tasarruf sağlayabileceği iddia edilmektedir [29].



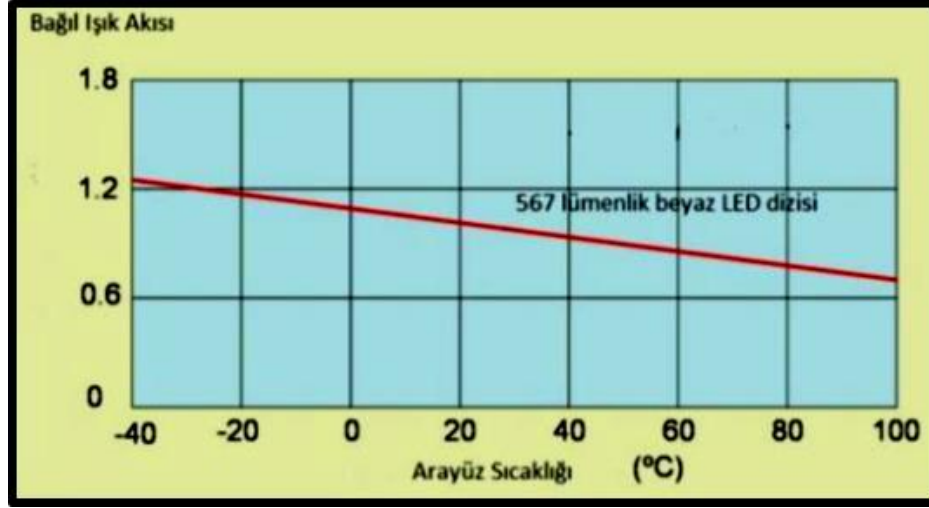
Şekil 2.20. POWER LED’ler için tasarlanmış alüminyum soğutucu kart [9,13]

LED armatürlerde ısı, ışık ve elektrik tasarımı çok önemlidir. Sıcaklık sadece ışık akısını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda LED’in ömrünü de azaltır. LED lambaların verimini ve ömrünü etkileyen önemli faktörlerden biri de sürücünün kalitesi ve verimliliğidir. Enerji tasarruflu bir sürücü kullanımı aşırı ısınmayı önler ve LED ömrü üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.

Tablo 2.14. Bina ofislerinde kullanılabilen ışık kaynaklarının etkinlik faktörleri ve ekonomik ömürleri [9,13]

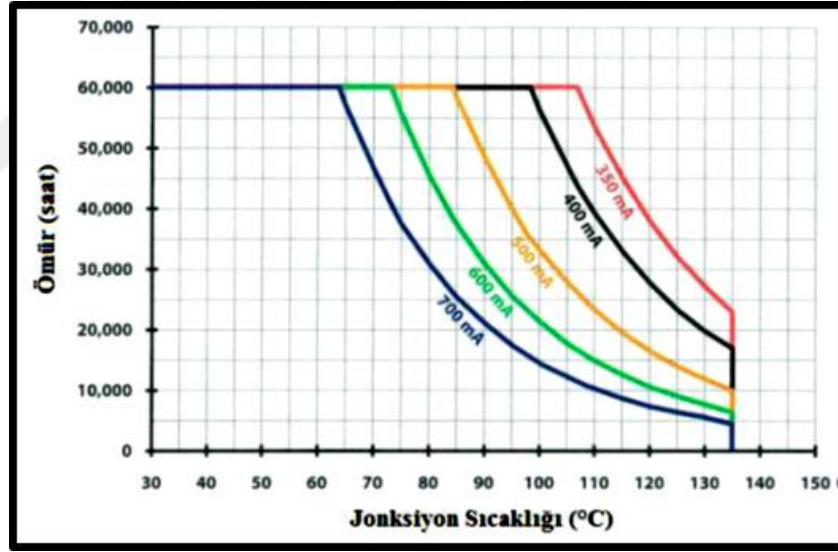
Işık Kaynağı	Etkinlik Faktörü [lm/W]	Ekonomik Ömür [s]
Tungsten halojen lamba	<35	2,000-4,000
Kompakt floresan lamba	40-65	6,000-12,000
Tüp floresan lamba	50-100	10,000-16,000
Metal halide lamba	50-100	6,000-12,000
LED	80-160	25,000-100,000

LED’ ışığını istenilen yöne yönlendirmek için çeşitli optik elemanlar gerekmektedir. Bu optik elemanlar, belirli bir ışık dağılımı elde etmek için veya bir LED tarafından yayılan ışığı kontrol etmek için kullanılan bileşenlerdir. Lensler LED paketlerine yerleştirildiğinde, bunlara birincil optik denir. Birincil optik eleman genellikle doğrudan LED’e bağlanır ve LED paketinin ilk parçasıdır. İkinci ve üçüncü optik LED lambaların ve armatürlerin fotometrik performansını belirlerken farklı uygulamalarda da kullanılabilir.



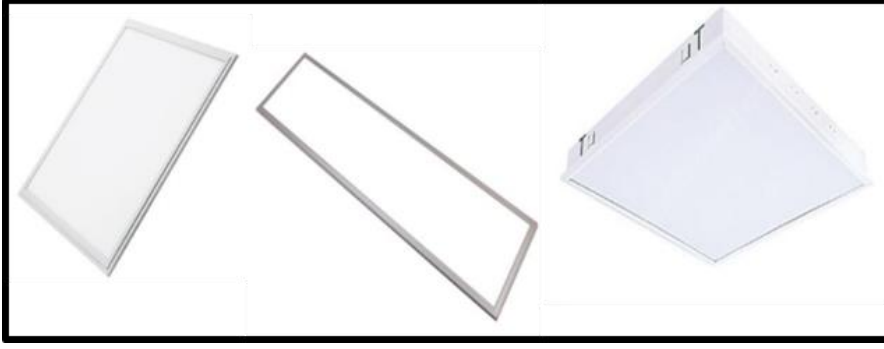
Şekil 2.21. Arayüz sıcaklığı ile ışık akısı arasındaki ilişki [9,13]

LED ışığının aydınlatılacak alana göre belirli bir açıda kayıpsız olarak yayıldığı kamu aydınlatmasında, lambaların ve armatürlerin makul güçte çalışması gerekir, bu da ürünün maliyetini doğrudan etkilemektedir [9,33].



Şekil 2.22. LED ömrünün jonksiyon sıcaklığı ile değişimi [9,13]

LED lambalar ayrıca ofis aydınlatmasında aydınlatma gereksinimleri ve hacim bazlı çözümlerde farklılık gösterir. Kurulan aydınlatma sistemi bina yapısına ve amacına uygun olmalıdır. Bu kapsamda, ofis aydınlatması için panel, lineer ve gömme armatürler yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.23. LED panel armatür örnekleri [9,13]

Panel bağlantı elemanları, ofis aydınlatmasında kullanılan yaygın bir bağlantı elemanıdır. Tavan tipine göre değişiklik gösterebilmektedir. Kenarlarına led çip takılarak yapılan uzatılmış çeşitleri ve gövde üzerine dizilerek yapılan çeşitleri de vardır.



Şekil 2.24. LED lineer armatür örnekleri [9,13]

Lineer armatürler genellikle antreler ve koridorlarda kullanılırken ofis alanlarında da aydınlatma için kullanılmaktadır. Bundan başka gizli aydınlatma amaçları için de kullanılır. Gömme ışıklar genellikle merdiven boşluklarında, koridorlarda ve ıslak alanlarda kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra konferans veya toplantı odalarında, bina giriş alanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır [9,34].

2.5. Aydınlatmada Enerji Verimliliği

Güç tüketiminin önemli bir parçası olarak, enerji verimliliği konusu araştırmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Aydınlatma sisteminin tasarımı, aydınlatma tasarım standartlarına uymalıdır. Belirli tasarım konularına dikkat edilerek aydınlatmanın kullanıcılar üzerindeki olumsuz fizyolojik etkilerinden kaçınmak ve enerjiyi verimli

kullanmak mümkündür. Aydınlatma tasarımında dikkate alınması gereken yöntemlerden bazıları aşağıda listelenmiştir [34]:

1. Verimli, yüksek çıkışlı ışık kaynakları tercih edilmelidir.
2. Armatür bakımının düzenli olarak yapılması sağlanmalıdır.
3. Kullanım ömürlerinin sonunda lambalar yenileri ile değiştirilmelidir.
4. Floresan veya LED lambalı armatürler enerji kaybını minimuma indirir ve uzun süreli iç mekanlarda tercih edilmelidir.
5. Gün ışığından faydalanmak için aydınlatma ve mimari tasarım binanın camlı bölümünde, sürekli iş yapılan ve gün ışığından daha fazla yararlanılabilen alanlara uygun tasarlanmalıdır.
6. Yansıtıcı yüzeyin maksimum ışık yansımaya izin verecek renk ve özelliklere sahip olmasına özen gösterilmelidir.

Aydınlatmada kullanılan enerjinin verimli bir şekilde kullanılması için aşağıdaki faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir, bunlar:

1. Yapay aydınlatma sistemi seçimi,
2. Lambaların/ışık kaynaklarının, armatürlerin ve yardımcı aletlerin seçimi,
3. Montaj yüksekliği,
4. Hesaplamaların doğruluğu, kullanılan yazılım,
5. Bakım faktörü

gibi faktörlerdir [34,35].

Aydınlatma sistemi hacmin kullanım amacına göre tasarlanmalıdır. Tasarım özellikleri, geçerli standartlar tarafından belirtilmiştir. Armatürlerde kullanılan ışık kaynakları/lambalar verim bakımından farklılık gösterir. Enerji verimliliği ve renk özellikleri açısından yaygın olarak kullanılan floresan veya LED ışık kaynaklarına sahip armatürler yüksek enerji tasarrufu oranlarına sahiptirler [36].

Görsel konfordan ödün vermeden ekipmanın yüksekliğinin mümkün olduğunca çalışma yüzeyine yakın olmasına özen gösterilmelidir [35]. Ekipman lokasyon etkisinin yanısıra ekipmanın lokasyona uygun tasarımı kritiktir.

Aydınlatma sistemleri bilgisayar yazılımları kullanılarak kolayca tasarlanabilmektedir. Kullanılacak yazılımda seçilen lambanın değeri yanlış girilirse

sonuç yanlış olur. Bu nedenle yazılım ve donanım seçimi önemli bir detaydır. Uzun süreli aydınlatma için kullanılan lambaların verimi zamanla azalır. Dolayısıyla aynı enerji tüketimi altında ortama yayılan ışık akısı azalır, dolayısıyla sistemin verimi düşer. Arızalanan veya kullanım ömrünü dolduran lambalar, belirli aralıklarla kesintisiz olarak değiştirilmeli ve onarılmalıdır [37,38].

2.5.1. Aydınlatmada enerji kayıpları

Aydınlatmada enerji kaybının belirlenmesi ve en aza indirilmesi önemlidir. Aydınlatma verimliliğini artırmak için, ışık kaynağında üretilen ışık, mümkün olduğunca verimli bir şekilde çalışma yüzeyine yönlendirilmelidir. Bu nedenle iç ve yardımcı elemanların eşit derecede iyi çalışması gereklidir. Sadece belirli bir alanın aşırı aydınlatılması enerji kaybına neden olur [39].

2.5.1.1. Armatür kayıpları

Işık kaynağının armatürden geçen toplam ışık akısı, armatürün belirli kısımları tarafından engellenir. Armatür tarafından yayılan ışık akısının, armatür tarafından engellenen ışık akısına oranına armatürün geri dönüş verimliliği denir. Yaygın olarak kullanılan armatürlerin verimleri 0,45 ile 0,85 arasındadır. Fakat Türkiye'deki üreticiler bu hesaplamaları üretim aşamasında gerekli hassasiyette yapmadığı için armatürde hesaplanandan daha fazla ışık kaybına neden olmaktadır [38].

Tablo 2.15. Armatür verimlilik sınıfları [9,13]

Verim Faktörü	Verimlilik Sınıfı
$\eta > 0,7$	E1 (çok iyi)
$0,7 > \eta > 0,5$	E2 (iyi)
$0,5 > \eta$	E3 (kötü)

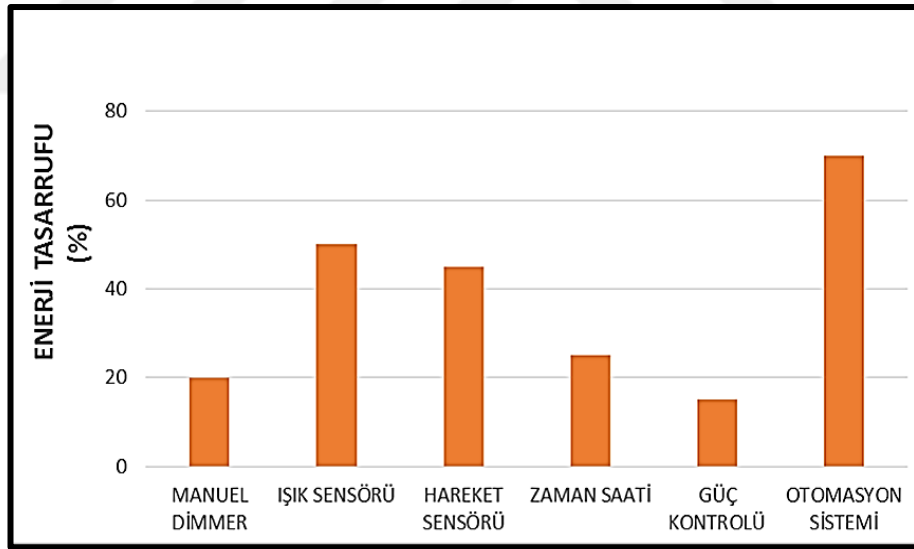
2.5.1.2. Işığın mekan içinde doğru yönlendirilmesi

İyi görmebilmek, gözlenen nesnenin tüm detaylarını veya hareketlerini görmek olarak ifade edilebilir. Aydınlatma elemanları kullanılarak elde edilen aydınlatma kalitesinin iyi bir görüş için uygun olmadığı durumlarda yapılan en yaygın hata, aydınlatma seviyesini yükselterek enerji tüketimini arttırmaktır. Bu uygulama izleme koşullarınızı iyileştirmeyecek ve ayrıca aşırı aydınlatma nedeniyle parlamaya neden olmaktadır. Bu durumda gerekli iyi derecedeki görsel koşullar gerçekleşmediğinden verimsiz aydınlatma elde edilir. Aydınlatma teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, ışık

kaynağının ışık akısı, optik elemanlar aracılığıyla uygulama alanına optimum şekilde dağıtılabilmektedir [36,37].

2.5.1.3. Aydınlatma kontrol sistemlerinin etkisi

Aydınlatmanın enerji verimliliğini artırmanın bir başka yolu da bir aydınlatma kontrol sistemi kullanmaktır. Aydınlatma sistemlerinin basit kontrolü ve verimli aydınlatma için bu uygulamalarda, iyi programlanmış aydınlatma otomasyonu, uzun çalışma saatleri olan işyerlerinde iş gücü ve enerji verimliliğini artırabilir. . Uzaktan kontrol edilebilen hafif otomasyon sistemleri, kontrolü basitleştirdiği için büyük işyerlerinde tercih edilmektedir. Aydınlatma kontrol sistemlerinde kullanılan dim üniteleri enerji tasarrufu konusunda oldukça yardımcıdır. Aynı hacim için ışık seviyesi talebinin zamanla değiştiği durumlarda, bir dimmer ile kontrol etmek, tüm sistemi sürekli olarak kontrol etmekten daha ucuz olabilir. Enerji tasarrufu yapmak ve gün ışığından tam olarak yararlanmak için, kimsenin çalışmadığı/kullanmadığı durumlarda, doluluk sensörleri ve ortam aydınlatma sistemleri için otomasyon sistemlerine astrolojik röleler entegre edilerek tasarruflar artırılabilir [40].

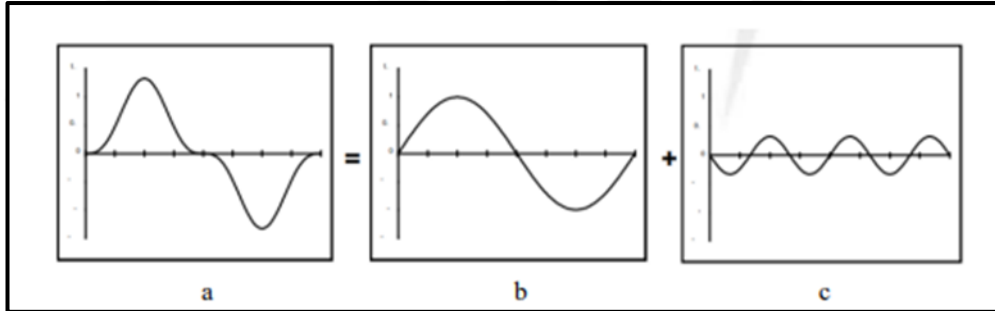


Şekil 2.25. Aydınlatma kontrol sistemleriyle elde edilen enerji tasarruf oranları [9,13]

3. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİ KALİTESİ VE HARMONİKLER

3.1. Harmonik Kavramı ve Tanımı

Bir elektrik sistemindeki gerilim ve akımın temel dalga biçimi bir sinüs dalgasıdır. Ancak eleman şebekeye bağlı olduğundan ve bazı olaylarda akım ve hat gerilimi sinüzoidalden uzaklaşarak başka dalga şekillerini alabilmektedir. Sinüs dalgası olmayan bu dalga formlarına literatürde sinüs olmayan dalgalar denir. Sinüzoidal olmayan bir dalganın oluşabilmesi için elektrik sisteminin sinüzoidal olmayan bir kaynakla çalışması veya sinüzoidal dalga formu ile çalışan sisteme lineer olmayan elemanların dahil edilmesi gerekir. Harmonik kavramın özü bu sinüzoidal olmayan dalga biçimlerinde yatmaktadır. Türkiye'nin 50 Hz frekanslı endüstriyel şebekesinde, birçok sinüs dalgası 50 Hz'in katları şeklinde birleştiğinden, ağırlıklı sinüs dalgası bozuktur ve sinüzoidal olmayan özelliklere sahiptir.



Şekil 3.1. a) Distorsiyon dalga formu b) saf sinüs dalgası c) harmonik bileşen [1]

Distorsiyona uğramış dalga formu Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Bu dalga formu temel bileşen ve distorsiyona uğramış dalga formunun toplamından meydana gelir.

- a) Distorsiyon dalga formu,
- b) Saf sinüs dalgası, temel yani saf sinüs dalgasını temsil eder ve frekansı 50 Hz' dir.
- c) Harmonik bileşen, harmonik bileşen olarak tanımlanır. Bu saf sinüs dalgasının bozulmasına sebep olan dalga şeklidir. Temel bileşen frekansına göre 3 kat frekansa sahip olan bileşendir.

Yani çalışma frekansı 150 Hz olan bozulmuş dalga şeklidir. Burada dikkat edilmesi gereken her bileşenin frekansı bileşen sayısı ile 50 Hz temel frekans değerini çarpıldığı zaman oluşan değerdir.

Tablo 3.1. Harmonik derecesi-I frekans dönüşümü [1]

Sıra	1'inci	2'inci	3'inci	4'üncü	5'inci	6'ıncı
Frekans	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz
Sekans	+	-	0	+	-	0

Sıra	7'inci	8'inci	9'uncu	10'uncu	11'inci	...
Frekans	350 Hz	400 Hz	450 Hz	500 Hz	550 Hz	...
Sekans	+	-	0	+	-	...

Sinüs dalgasının simetrik özelliğinden dolayı güç sistemlerinde 3, 5, 7 ,11 gibi tek harmonik bileşenler bulunur. Çift harmonik bileşenler bulunmaz [1]. Bunun sebebi ise fourier analizinden kaynaklanmaktadır. Bu analizde çift bileşenler 0 değerine oldukça yakın bir değer alır [2]. Tablo 3.1.'de temel frekans ve harmonikleri görülmektedir [3].

Fourier serisi, sinüzoidal olmayan dalga formlarının matematiksel analizi için kullanılır. Fourier serilerini kullanarak, temel sinüzoidal bileşenler ve bunların yükselen harmonik sinyalleri, belirli bir zaman aralığında genliklerinin tamsayı katları cinsinden temsil edilebilir. Fourier serisinin genel ifadesi denklem (3.1)'de verilmiştir. Formül içerisinde x değişkeni elektrikli sistemler söz konusu olur ise W olarak gösterilir. İfade içerisindeki a_0 , a_n ve b_n harmonik değişkenlerdir. (3.1) denkleminin matematiksel ifadesi ve elektriksel bileşenleri, harmonik analizde sırasıyla akım ve gerilim dalga biçimlerine uygulanabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi mühendislikte sıklıkla tercih edilen bu matematiksel ifade, elektriksel analizlerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (3.1)$$

3.2. Harmonik Bileşenlere Ait Kavramlar

Harmonik bileşenleri analiz etmek ve yorumlamak için kullanılan birçok teknik ve matematiksel terim, bu bileşenlerden kaçınmak için kriterler oluşturmaya yardımcı olmaktadır. Özellikle sinüzoidal olmayan ifadelerle uğraşırken ve matematiksel

olarak ifade ederken kullanılan özel matematiksel nicelikler, harmoniklerin anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bölümde, harmonik analizinde kullanılan THD ve TTD gibi özel matematiksel tanımlar tartışılacaktır.

3.2.1. Toplam harmonik distorsiyon (THD)

Toplam Harmonik Distorsiyon, harmonik akım ve gerilim değerlerinin bir sistem üzerindeki genel etkisine bakmak için tasarlanmış matematiksel bir ifadedir. Genel olarak THD, harmonik bileşenlerin toplam rms değerinin temel sinüzoidal bileşenin rms değerine oranı olarak söylenebilir. Gerilim ve akımın THD'si (3.2) ve (3.3) ile ifade edilebilir. Toplam harmonik bozulma ifadesini kullanarak temel sinüzoidal bileşenin orijinal şeklinden ne kadar sapacağı gözlemlenebilmektedir. (3.2) ve (3.3)'ten, harmonik bileşenleri olmayan bir sistemde toplam harmonik bozulmanın herhangi bir değere ulaşmayacağı görülmektedir. Bir elektrik sisteminde izin verilen harmonikler ile harmonik bileşenlerin sisteme zarar vermemesi için sahip olması gereken oranlar, yetkili kurum ve kuruluşlar tarafından THD (Toplam Harmonik Bozulma), TTD (Toplam Talep Bozulma) ifadeleri kullanılarak belirlenmiştir. Harmonik bileşenler simülasyon yoluyla gözlemlense, ilgili simülasyon programının THD alım fonksiyonu aracılığıyla şebeke harmonik akım ve gerilim oranında toplam bozulma görülebilir.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.2)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.3)$$

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

3.2.1. Toplam talep distorsiyon (TTD)

Toplam Talep Distorsiyon harmoniklerde karşılaştığımız bir diğer THD kavramıdır. TTD, güç sisteminden beslenen yüklerin çektiği akım dikkate alınarak hesaplanan

harmonik akım bozulmasıdır. TTD kavramının formülü (3.4) denkleminde verilmiştir.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.5)$$

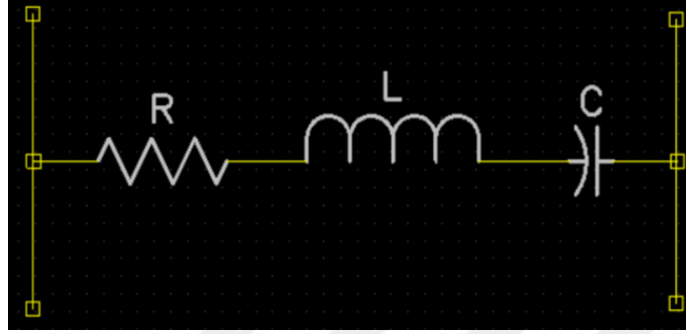
3.3. Harmonik Filtreleme Yöntemleri

Şebekedeki harmonik bileşenleri önlemek için tasarlanan bu devrelerin temel amacı, sistemdeki harmoniklerin neden olduğu teknik ve ekonomik sorunları ortadan kaldırmaktır. Filtre devresi sistem üzerindeki etkisine göre ikiye ayrılır. Birincisi, kapasitörler, indüktörler ve dirençler gibi pasif devre bileşenlerinden oluşan bir pasif filtre devresidir. Pasif filtre devreleri paralel ve seri olarak ikiye ayrılır. Seri filtre devresinin amacı, filtrelenecek harmonik bileşenlere yüksek empedans sunmaktır. Paralel filtre devresinin temel mantığı, filtrelenecek harmonik derecesine göre kapasitans ve endüktans hesaplayıp, ilgili harmonik frekansında düşük empedanslı bir dal oluşturmak ve o harmonik bileşeni azaltmaya çalışmaktır. Pasif filtre devrelerinin yanı sıra güç elektroniğine sahip aktif filtre devreleri de bulunmaktadır. Aktif filtre devreleri pahalıdır ancak pasif filtrelerden daha verimlidir. Filtreler aktif ve pasif olmak üzere iki gruba ayrılır. Pasif filtre, dirençler, indüktörler ve kapasitörler gibi bileşenlerden oluşan bir devredir. Aktif filtreler, sabit akım veya gerilim kaynağına sahip devrelerdir. Bu filtrelerin ve devrelerin bağlantısı ile ilgili olarak, seri veya paralel olmak üzere iki tip devre vardır.

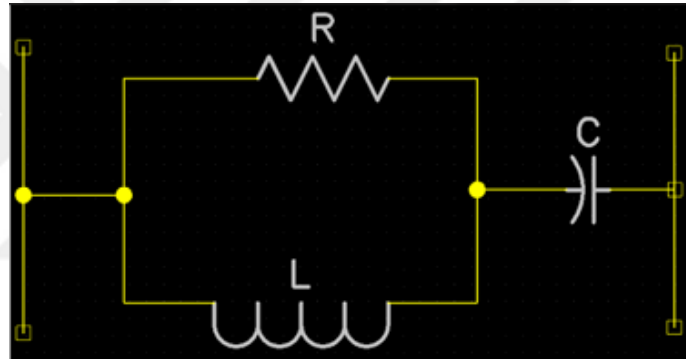
3.3.1. Pasif filtreler

Pasif filtreler, geleneksel olarak en çok tercih edilen güç kalitesi problemlerini çözmek için kaynak ile alıcı arasına bağlanan temel frekans hariç diğer bileşenlerin geçişini engelleyen, yapısında seri ya da paralel bağlı kondansatör (C), bobin (L) ve bazı durumlarda omik direnç (R) bulunan yapılardır. Pasif filtrelerin eleman değerlerini atamada ilk olarak kondansatör elemanından başlanır ve yükün çektiği reaktif güç talebini karşılayacak C değeri belirlenir. Daha sonra belirlenen C değerine göre rezonans frekansına uygun olarak L değeri seçilir. Ancak her harmonik frekans için ayrı bir filtre tasarımına ihtiyaç vardır. Filtrelerde Q kalite faktörüne göre yüksek ve alçak geçiren filtre olarak ikiye ayrılır. Ayar keskinliği bir direnç ile belirlenir. Kalite faktörü 30 ile 60 arasında olanlar yüksek Q tipi, 0.5 ile 5 arasında

olanlar ise düşük Q tipi filtre olarak tanımlanır. Yüksek Q filtresi daha düşük harmonik frekanslardan birine ayarlanırken, düşük Q filtresi daha geniş bir frekans aralığına ayarlanır ve yükselen alt harmonikleri filtrelemek için kullanıldığından yüksek geçiren filtre olarak da bilinir. Düşük ve yüksek Q tipi filtreler Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 de gösterilmiştir [1].



Şekil 3.2. Tek ayarlı filtre devresi [1]



Şekil 3.3. İkinci mertebe sönümlü filtre devresi [1]

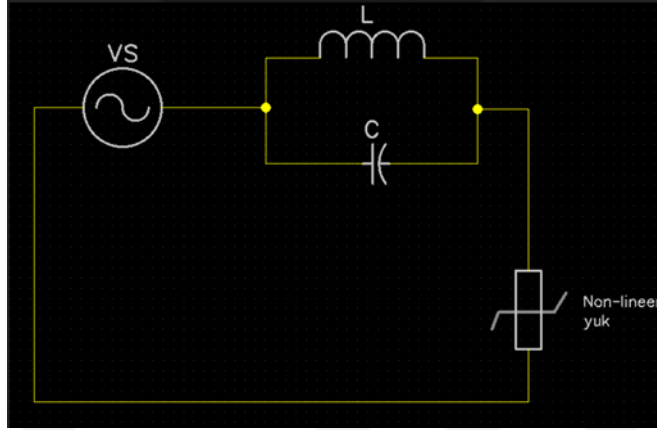
Harmoniklerin sönümlenmesi için pasif filtreler seri ve paralel olarak ikiye ayrılır.

3.3.1.1. Seri filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımlarının geçişini engellemek için yüksek bir seri empedansa sahip seri filtre kullanılarak bu akımların geçişi engellenir. Buradaki amaç sadece özel bir frekanstaki harmonik bileşenlerin sisteme girişini önlemek olduğu için seri filtre kullanımı uygundur. Harmoniklerin kaynağı ile güç kaynağı arasında seri olarak bağlanırlar ve harmoniklere karşı yüksek bir empedansa sahiptirler Şekil (3.4). Seri filtreler belirli bir frekansa ayarlandıklarından, sadece frekanstaki bileşenlere yüksek empedans gösterirler.

Seri filtreler, tek fazlı sistemlerde 3. harmoniğin hakim olduğu yapılarda kullanılır. Genellikle temel frekansta düşük empedansa sahiptirler. Seri filtre kullanmanın en

büyük dezavantajı, devre ile seri oldukları için tam yük akımını ve hat gerilimini iptal etmek zorunda olmalarıdır. Bununla birlikte, seri filtrelerin rezonans sorunları yoktur, bu da paralel filtrelere göre bir avantajdır.

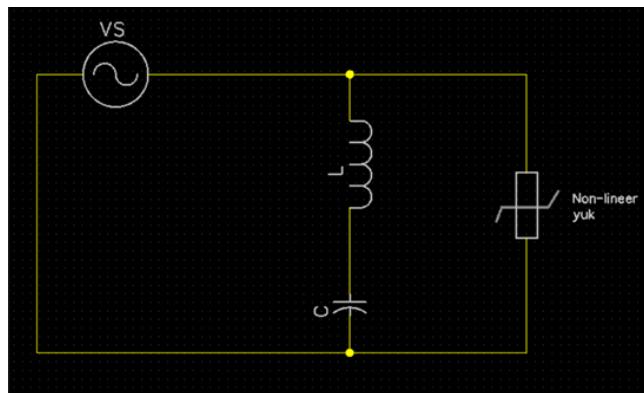


Şekil 3.4. Devrede seri filtre kullanımı [1]

3.3.1.2. Paralel (şönt) filtreler

Şönt filtreler harmonik kaynağı ile şebeke arasına paralel olarak bağlanan ve istenmeyen harmonik bileşenleri düşük empedanslı bir paralel (şönt) yol yardımıyla filtre üzerinden toprak seviyesine geçişini sağlayan filtrelerdir. Bu sebepten dolayı harmonik akımlara çok düşük bir empedans göstermesi için tasarlanırlar.

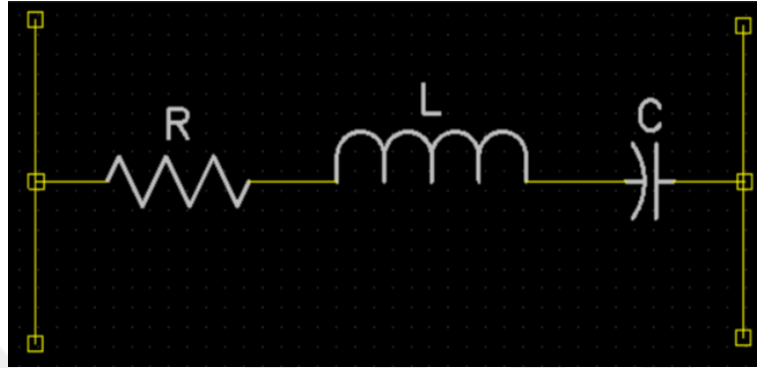
Seri filtrelerin maliyetlerinin yüksek olması ve şönt filtrelerin temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç faktörü düzeltilmesinde kullanıldığından şönt filtrelerin tercih edilmesine neden olur. Dezavantaj olarak güç sistemi ile rezonansa girme problemi vardır. Bunu önlemek için için ise şönt filtrenin tasarımı, sistemde yerleşimi ve güç sistem şebekesinin ayrıntılı bir analizi gerekmektedir.



Şekil 3.5. Devrede paralel (şönt) filtre kullanımı [1]

a) Tek Ayarlı Filtreler

Ayarlanan tek bir frekanstaki harmonikleri bastırmak için düşük empedans ya da kısa devre oluşturarak harmonikleri sınırlandırmayı sağlar. Tek ayarlı filtreler, seri R, L, C elemanlarından oluşur.

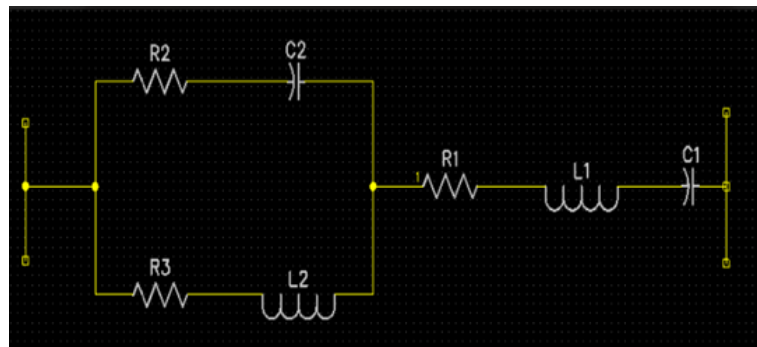


Şekil 3.6. Tek ayarlı filtre yapısı [1]

Bir sistemde birden fazla harmonik akımını elimine etmek istediğimizde sadece tek ayarlı filtre kullanılacaksa elimine edilecek her harmonik için ayrı ayrı tek ayarlı filtre yüke paralel olacak şekilde sisteme eklenmelidir.

b) Çift Ayarlı Filtreler

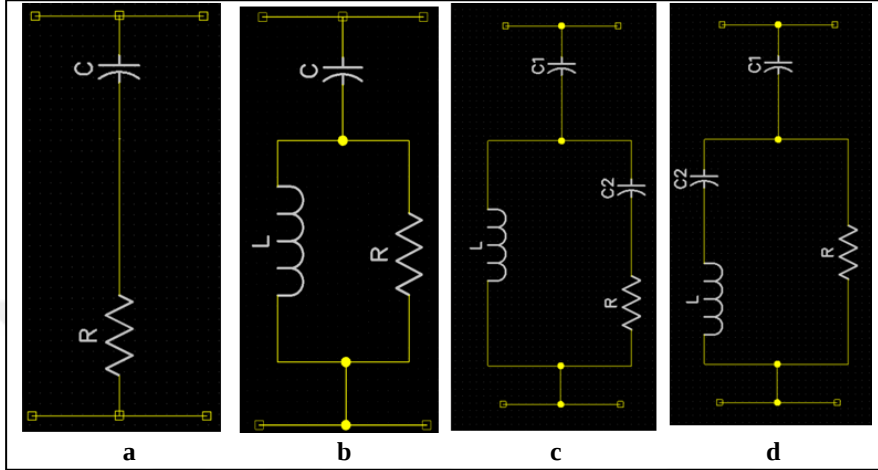
Çift ayarlı filtreler iki farklı frekansa ayarlanarak bu frekansta düşük empedans göstererek ayarlandığı frekanstaki harmonik akımların düşürülmesini sağlarlar. Çift ayarlı filtrenin temel frekanstaki güç kaybının az olması tek ayarlı filtreye göre daha avantajlı olmasını sağlar.



Şekil 3.7. Çift ayarlı filtre yapısı [1]

c) Sönümlü Filtreler

Yüksek dereceli harmonik değerlerinin (17 ve üzeri) filtrelenmesi için kullanılan yüksek geçiren filtre olarak adlandırılırlar. Bu filtre yapısı yüksek frekansa karşı düşük empedans gösterirken düşük frekanslara yüksek empedans gösterirler. Ayarlandıkları frekans genellikle rezonans frekansından düşüktür. Bu filtrelere ait yapılar Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Sönümlü filtre a) birinci derece, b)ikinci derece, c)üçüncü derece, d)C tipi [1]

Her bir filtre yapısı farklı özelliklere sahiptir. Birinci dereceden sönümlü filtreler temel frekansta aşırı derecede kayıp oluşmasına sebep oldukları için büyük bir kapasite gerektirirler ve bu yüzden tercih edilmezler. İkinci dereceden filtreler iyi bir filtreleme performansı sağlamakla beraber üçüncü dereceden filtrelere göre daha yüksek temel frekans kayıpları gösterirler. Üçüncü dereceden filtreler ise diğer filtre yapılarına göre daha avantajlıdır ve temel frekans kayıpları yoktur.

3.3.2. Aktif filtreler

Aktif filtreler, harmonik bileşenlerin yok edilmesi için tasarlanmış elemanlardır. Bu filtreler pasif filtrelere göre daha pahalı olmakla beraber güç elektroniği temellerine dayanarak tasarlanmaktadır. Aktif filtreler birden fazla harmonik frekansı için tasarlanabilir. Aktif filtrelerin çalışma prensibi şebekedeki harmonikleri analiz ederek, bu harmoniklere aynı genlikte ters fazda harmonik üretirler. Bu sayede güç kalitesine olumsuz etki eden harmonikleri yok ederler. Sistemde var olan harmoniklerin ortadan kaldırılmasını sağlayan aktif filtreler aşırı yüklenme olasılığı taşımamaktadır. Doğrusal olmayan yükler şebekeye bağlandığında Iş şebeke akımını

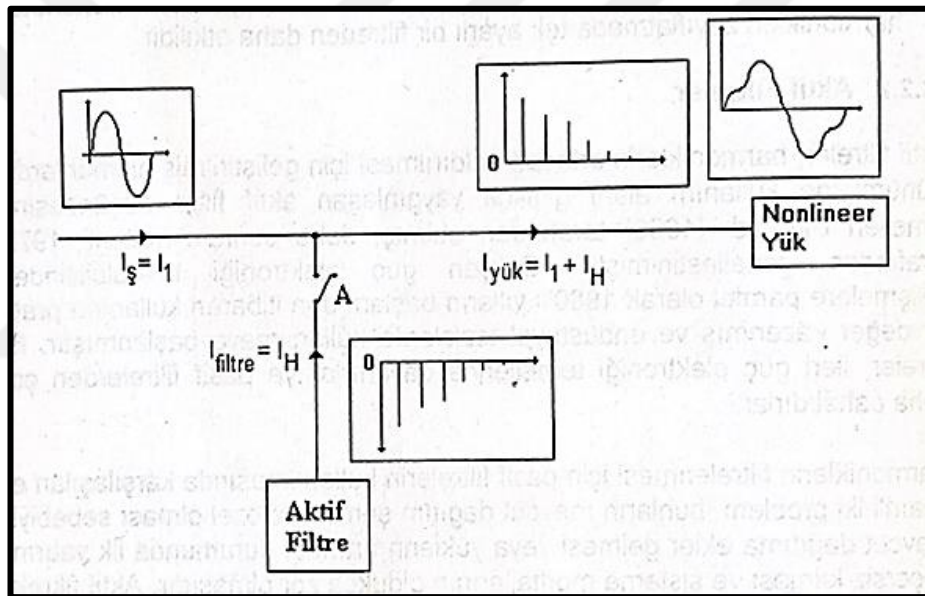
çeker. Doğrusal olmayan bu akımın temel bileşenin yanında harmonik bileşenler de mevcuttur [41]. Deklem (3.5) de gösterilmektedir.

$$I_s = I_1 + \sum_{n=2}^N I_n = I_1 + I_H \quad (3.6)$$

Harmonik bileşen akımlarını sağlayan bir eleman olması durumunda şebekeden sadece temel bileşen akımı çekilir. Aktif filtre akımı için de;

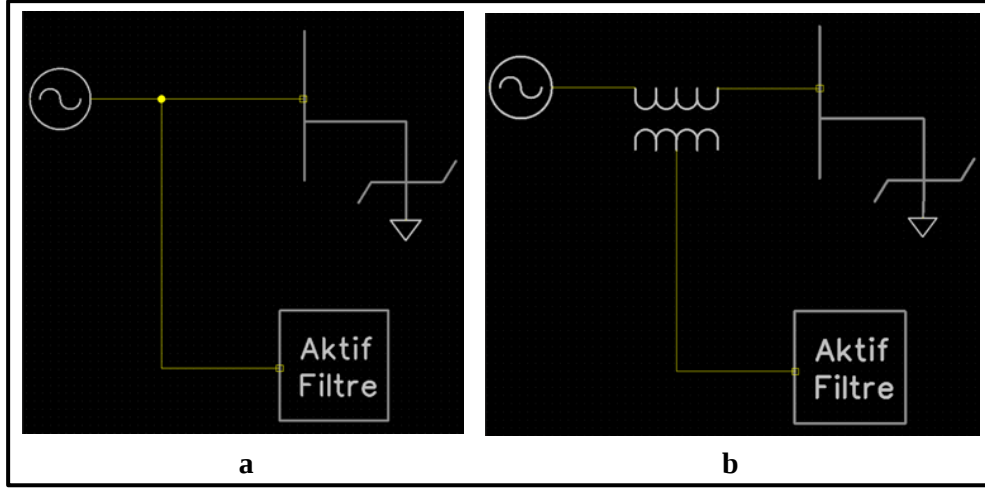
$$I_f = I_H \quad (3.7)$$

Olarak yazılabilir. Aktif filtre bu sayede şebekeden harmonik akımların çekilmesine engel olurlar. Şekil 3.9' da aktif filtreler ile harmoniklerin yok edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi [1]

Aktif filtreler yapıları bakımından 3'e ayrılırlar. Bunlar paralel (şönt), seri ve hibrit güç filtreleridir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan aktif filtre tipi şönttür. Şönt aktif filtre, pasif filtre ile beraber de çalışabilmektedir. Fakat bu durum kompanzasyon konusunda problem çıkarabilir.



Şekil 3.10. Aktif filtrenin şematik gösterimi a)şönt b)seri [1]

3.4. Harmoniklerin Matematiksel Analizi

3.4.1. Fourier analizi

Fransız matematikçi Joseph Fourier, sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların, farklı genlik ve frekanslardaki birçok sinüzoidal dalganın toplamından oluştuğuna dikkat çekmiştir; tüm dalgaların farklı genlik ve frekanslarda sinüzoidal dalgalarına bölünebileceğini gösterir. Bu şekilde elde edilen seriye “Fourier serisi” ve serinin elemanlarına “Fourier bileşenleri” denir. Periyodik bir dalganın Fourier serisi olabilmesi için Dirichlet koşulu adı verilen bir koşulun sağlanması gerekir [2].

$f(t) = f(t + T)$ ifadesiyle verilen herhangi bir döngüsel fonksiyon, şu koşulu karşılırsa bir Fourier serisine genişletilebilir:

1. Eğer fonksiyon süreksiz ise, T periyodunda sonlu olmalıdır. Süreksizliklerin sayısı belirlenmelidir.
2. T periyodunun fonksiyonunun sonlu ortalaması bulunmalıdır.
3. Fonksiyonun sonlu sayıda pozitif ve negatif maksimumları olmalıdır.

Dirichlet koşulları olarak adlandırılan bu koşullar sağlandığında, fonksiyon bir Fourier açılımına sahiptir. Güç sistemindeki dalga biçimleri her zaman bu koşulları sağladığından Fourier bileşenleri elde edilebilir [4].

Fourier serisi verilen bir fonksiyonu sinüs fonksiyonu yapar. Fourier serisi elde etme işlemi, dalga analizi veya harmonik analiz olarak da bilinir. Bir Fourier serisinde periyodik bir fonksiyon genişletildiğinde, ilk terim sabit olarak yazılabilir, diğer

terimler ise sinüs ve değişkenin katlarının kosinüslerinden oluşan seriler olarak yazılabilir [25]. Fourier'e göre, bu tanım, T periyodundaki evrimi bir sinüs dalgasınınkinden farklı olan bir $f(t)$ dalgası üretir;

$$f(t)=A_0+A_1 \cos t+A_2 \cos 2t+A_3 \cos 3t+ \dots +A_n$$

$$\cos nt+B_1 \sin t+B_2 \sin 2t+B_3 \sin 3t+ \dots +B_n \sin nt \quad (3.8)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (3.9)$$

veya;

$$f(t)=C_0+C_1 \sin(t\mu\varphi_1)+C_2 \sin(2t\mu\varphi_2)+C_3 \sin(3t\mu\varphi_3)+ \dots +C_n(n t\mu\varphi_n) \quad (3.10)$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n t\mu\varphi_n) \quad (3.11)$$

3.4.1.1. Fourier katsayılarının analitik yöntemle bulunması

Fourier katsayıları (A_0 , A_n , B_n) aşağıdaki formüllerle analitik olarak elde edilebilir;

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (3.12)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos nwt dt \quad (3.13)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin nwt dt \quad (3.14)$$

Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğrinin şekline bağlı olarak, genişlemede bazı harmonikler olmayabilir ve bazen sadece bazı kosinüs veya sinüs terimleri vardır. Bu şekilde, uzantıda yürütülebilecek bazı kısayollar önceden öngörülebilir. Meydana gelen başlıca durumlar şu şekilde sıralanabilir [27];

- a) $y = f(t)$ fonksiyonunun değişimini işaret eden eğri birbirlerinin aynı fakat ters işaretli iki yarım periyottan meydana geliyor ise $f(n+1) = -f(t)$ şartı sağlanmaktadır. Bu halde $A_0 = 0$ olmalı ve t 'nin çift katları kosinüsleri ve sinüsleri olmamalı, yani katsayıları sıfır (0) olmalıdır [13].

Kısaca;

$A_0 = A_{2n} = B_{2n} = 0$ olarak gösterilir. Açılım daha sade olan

$$f(t)=A_1 \cos wt+A_3 \cos 3wt+ \dots +B_1 \sin wt+B_3 \sin 3wt + \dots \quad (3.15)$$

şeklini alır.

- b) Periyodik fonksiyonun değişimini işaret eden eğri (a)'daki koşulu gerçekleştirmekle birlikte ayrıca yarım periyotluk birim $\frac{1}{4}$ periyoda gelen noktadan geçen bir düşey eksene göre simetriktir. Buradan hareketle $f(\pi - t) = f(t)$ koşulu sağlanır.

Bu halde;

$$A_1 = A_{2n+1} = B_{2n} = 0 \text{ olması gerekir.}$$

Daha önce (a)'da bulunan şartı da ilave ederek t 'nin yalnız tek katlarının kosinüslerinin olacağı görülmektedir. Bu halde açılım;

$$f(t) = B_1 \sin wt + B_3 \sin 3wt + \dots + B_{2n+1} \sin[(2n+1)wt] \quad (3.16)$$

şeklinde olur, yani açılımda sadece tek harmonikler mevcuttur.

- c) Eğri, fonksiyonun sıfır (0) değerine denk gelen noktaya simetrikse $f(-t) = -f(t)$ koşulu görülür. Bu halde;

$$A_0 = A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_n = 0$$

koşulu bulunarak açılım,

$$f(t) = B_1 \sin wt + B_3 \sin 3wt + \dots + B_n \sin nwt \quad (3.17)$$

şeklinde yazılır.

- d) Eğrinin periyoda denk gelen düşey simetri eksenini tespit edilmesi yani; $f(-t) = f(t)$ koşulu gerçekleşmiştir. Bu koşul (c) seçeneğindeki koşula benzerlik gösteren fakat bir işaret değişikliği bulunmaktadır. Bu halde;

$$B_1 = B_2 = B_3 = B_n = 0$$

şartı bulunarak açılım,

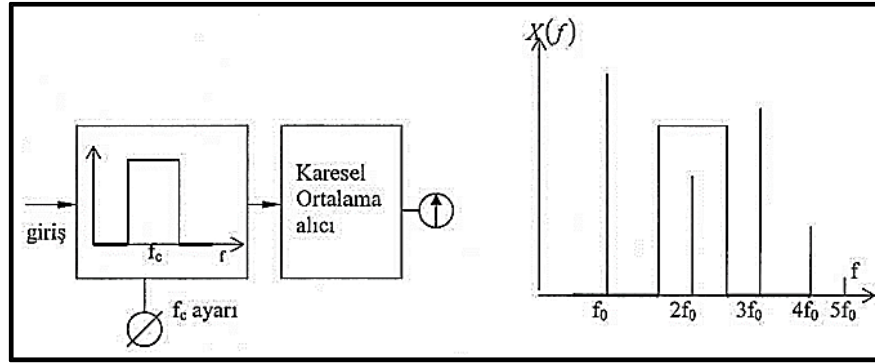
$$f(t) = A_0 + A_1 \cos wt + A_2 \cos 2wt + A_3 \cos 3wt + \dots + A_n \cos nwt \quad (3.18)$$

şeklinde yazılır.

3.4.1.2. Fourier katsayılarının ölçme yöntemi ile bulunması

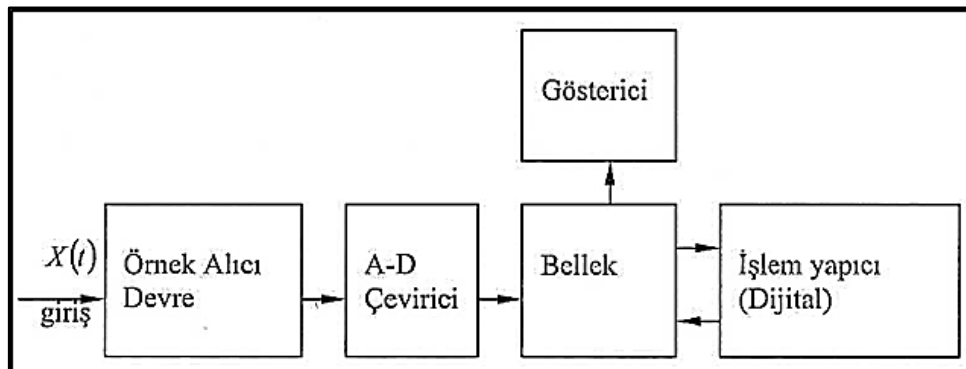
Bir devrede $f(t)$ fonksiyonu devrenin herhangi bir kısmındaki gerilim değişimi olabilir. Zaman içinde periyodik olarak değişen gerilimlerdeki harmonikleri ölçmek için çeşitli ölçüm şemaları geliştirilmiştir. Bu ölçüm düzeneklerinin çoğu tarafından kullanılan yaygın yöntem, çok dar bir frekans bandı ve değişken bir IF filtresi ile

filtrelenmiş bir voltmetre ile harmoniklerin ölçülmesine dayanmaktadır. Bu düzenlemenin basitleştirilmiş bir blok diyagramı şekilde gösterilmiştir [23].



Şekil 3.11. Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü [1]

Bu tür çizelgelere “harmonik genlik analizörleri” veya “dalga biçimi analizörleri” denir. Bunlara harmonik genlik analizörleri demek daha doğru olur. Aslında bu tip bir analizör ile harmoniklerin faz konumu hakkında hiçbir bilgi elde edilemez [24]. Harmonikleri ölçmek için kullanılan bazı aletler dijital harmonik analizörlerdir. Dijital harmonik analizörün basitleştirilmiş blok şeması Şekil 3.12 de gösterilmiştir. Bu analizörün belirgin bir avantajı, incelenen sinyalin yalnızca bir döngüsünün dikkate alınmasıdır. Bu yöntemin başarılı olması için sinyal-gürültü oranının çok yüksek olması gerekir. Önemli husus, bir dönemde alınan örneklerin diğer dönemlerdekilerle aynı olup olmadığı veya örneklemede geçici bir bozulma olup olmadığıdır. Bu durumu çözmek için sadece bir döngü yerine birkaç döngü kontrol edilir ve bir ortalaması alınır. Bu nedenle, sistemin ayrı bir parçasının yazılması ve tekrarlanması gerekmektedir.



Şekil 3.12. Dijital harmonik analizörü [1]

Sayısal örnekleme ve hesaplama ile harmoniklerin ve faz açısının ölçülebildiği görülmektedir. Ayrıca, hassasiyet artırılmış olur. Faz açıları ile harmonikleri ölçebilen analog tip bir ölçüm şeması geliştirilmemiştir. Aslında, elektroniğin birçok alanında olduğu gibi harmonik analizin en yaygın alanlarında bile, harmoniklerin faz açısını bulmak aslında gerekli değildir [7].

3.5. Nonsinüzoidal Büyüklükleri İçeren Devrelerin İncelenmesi

Elektrik şebekelerinde sinüzoidal olmayan sinyallerin üretilmesi, güç kaynağının özellikleri ve devre parametreleri ile yakından ilişkilidir. Bu durumda, lineer ve lineer olmayan yük devrelerinin analizi, besleme geriliminin lineer ve lineer olmayan yüklerden geldiği duruma uygulanabilir şekilde aşağıda özetlenmiştir [24].

3.5.1. Sinüzoidal gerilim beslemeli lineer olmayan yüklü devreler

Pratikte en yaygın durum, bileşenlerinde en az bir lineer olmayan yük bulunan tek fazlı devrelerdir, bu devrelerde

$$e = V_m \sin \omega t = \sqrt{2}V \sin \omega t \quad (3.19)$$

sinüzoidal gerilim uygulanması halinde

$$i = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N l_n \sin (n\omega t + \varphi_n) \quad (3.20)$$

olarak ifade edilebilmektedir.

3.5.2. Nonsinüzoidal gerilim beslemeli lineer devreler

Nonsinüzoidal gerilim beslemeli lineer devreler, yükün empedansı lineer olduğundan, dolaşım akımının harmonikleri yalnızca besleme geriliminin harmoniklerine bağlıdır.

3.5.3. Nonsinüzoidal gerilim beslemeli lineer olmayan yüklü devreler

Harmonik üreticisi olan transformatörler harmoniklerden iki şekilde etkilenir. Birincisi, akım harmonikleri sonucunda, bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarındaki artışlardır. İkincisi ise, gerilim harmonikleri sonucunda, demir kayıplarındaki artıştır. Bu kayıp artışları transformatörde ek ısınma olarak görülecektir. Ayrıca harmonikler, transformatörlerde gürültü artışı da meydana getirirler. Harmonik gerilim ve akımlarının her ikisinin de sebep olduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır.

Frekansın artması ile kayıplar artmaktadır ve bu nedenle yüksek mertebeli harmonik bileşenleri, düşük mertebeli harmonik bileşenlerinden daha etkin olabilmektedirler.

3.6. Harmonik Kaynakları

Harmonik kaynakları örnekleri arasında demir çekirdekli bobinler, yarı iletken bileşenler ve bu bileşenlere sahip elektronik balastlar, transformatörler, anahtarlamalı güç kaynakları, kesintisiz güç kaynakları, frekans dönüştürücüler, pil şarj devreleri, fotovoltaiik sistemler, güç kaynakları dönüştürücüler, elektrik ark ocakları sayılabilir.

3.6.1. Transformatörler

Elektrik sistemlerinde yaygın olarak kullanılan transformatörler, demir çekirdekli bobinin manyetik özelliğinin doğrusal olmaması nedeniyle harmonikler üretir. Sinüzoidal gerilim transformatörleri, lineer manyetizasyon karakteristikleri bölgesinde sinüzoidal çıkış genlikleri sağlamak için tasarlanmıştır. Bir transformatörün değerinin dışında çalıştırılması, artan çekirdek doygunluğuna ve harmonik akımlarında hızlı bir artışa neden olur. Sabahın erken saatlerinde, sistem yükünün düşük olduğu, gerilimin yüksek olduğu ve trafonun aşırı uyarıldığı zaman, üçüncü, beşinci ve yedinci harmonikler, aşırı uyarıldığında ortaya çıkan mevcut harmonikler için aktiftir. Üç fazlı bir sistemde, her fazın üç ve üçün katı olan harmonikleri arasındaki faz farkı, 360 derecenin bir tamsayı katıdır. Bu nedenle, üçüncü harmonik ve nötr iletkenine giren üçüncü harmoniğin toplamı olan harmonik akımlar, transformatörlerin, iletim hatlarının ve generatörlerin primer sargılarının kaçak reaktansında harmonik gerilim düşüşlerine neden olur. Şebekedeki harmoniklerin anahtarlama trafonun bağlantı grubuna göre yıldız bağlantısının primer sargısının nötr noktasının ağırlık sıfır noktasına bağlı olup olmadığı ve trafodaki manyetik devrenin geometrik yapısının müsaitliğine göre değişmektedir [24, 25]. Üç fazlı transformatörler için uyarma akımı, transformatörün bağlantı tipine ve manyetik devre konfigürasyonuna bağlıdır. Farklı kuplaj grupları ile üç ve üçün katı tam harmonikler ortadan kaldırılabilir. Soğuk haddelenmiş ve yönlendirilmiş kristallerin kullanımı 5. ve 7. harmoniklerin etkilerini azaltır. Şebeke trafosunda üçüncül ve üçüncül uyarma akımı harmoniklerinden kaçınmak için yıldız bağlantılı primer transformatörün nötr noktası şebekenin nötr iletkenine bağlanmamalıdır. Daha büyük güç transformatörlerinde olduğu gibi, üçgen bağlantılı bir üçüncül sargı kullanılır.

Transformatörlerde manyetik olarak yönlendirilmiş laminasyonların kullanılması harmoniklerin etkilerini azaltır. Aşağıdaki tablo, çeşitli harmoniklerin rms değeri ile kristalleri 1600 Gauss manyetik yönelimli laminasyonlardan oluşan transformatör çekirdeğindeki toplam alan akımının rms değeri arasındaki oranı vermektedir [26].

Tablo 3.2. Mıknatıslanma akımlarının oranı [1]

Harmonik Bileşenler	1	3	5	7	9
$I_{\mu n}$	0.86	0.40	0.23	0.12	0.07
I_{μ}					

Düşük yüklerde, reaktif güç beslemesi daha yüksek harmonik akımlardan kaynaklanan gerilim düşüşü yüksek bir değere sahiptir. Şebeke üzerinden uyarma akımı;

- transformatör sargılarının bağlanış tarzına (bağlama grubu),
- primeri yıldız bağlı sargılarda, yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmamasına,
- transformatörlerde mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olmasına

bağlıdır [26].

Aşağıdaki mıknatıslanma akımını azaltmak için en uygun önlem manyetik indüksiyonu düşük tutmaktır. Bu, transformatörde soğuk haddelenmiş ve yönlendirilmiş kristaller kullanılarak elde edilir. Bu tabloları kullanarak harmonikler 1/5'i kadar azaltılır. Bu, harmonik riskini büyük ölçüde önler.

Tablo 3.3. Haddelenmiş yüksek alaşımlı saçlardan imal edilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımı harmoniklerinin temel harmoniğe oranları [1]

Çekirdek Endüksiyonu (Gauss)	I_3	I_5	I_7	I_9
	I_1	I_1	I_1	I_1
10000	-0.162	0.05	0.011	0.009
12000	-0.287	0.095	-0.013	0.01
14000	-0.528	0.267	-0.013	0.062
16000	-0.658	0.331	-0.121	0.031
18000	-0.658	0.275	-0.053	-0.018

Manyetik indüksiyonu ortalama 16000 Gauss olan soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranı Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranı [1]

I_3	I_5	I_7	I_9
I_1	I_1	I_1	I_1
0.08	0.44	0.27	0.14

3.6.2. Çeviriciler

Transformatörlerden sonra hat dönüştürücüler günümüzde harmoniklerin ana kaynağıdır. DC iletim sistemleri, piller ve fotovoltaiik sistemler, çevrimiçi anahtarlama dönüştürücüler tarafından desteklenmektedir. Tipik olarak, dönüştürücüdeki darbe sayısı $p = 6, 12, 18$ veya 36 ’dır. Çok sayıda darbeye sahip çekiciler seçilerek, düşük dereceli harmoniklerin oluşumu önlenabilir [27].

3.6.3. Generatörler

Senkron generatörlerin harmonik üretim özellikleri, belirgin kutup alanının şeklinden, oluklarla ilişkili isteksizlikten, ana devrenin doygunluğundan, düzenli, asimetrik aralıklı kaçak akımlardan ve snubber sargılarından kaynaklanmaktadır [27]. Bunu önlemek için, yuva şeklinde, sargı yapısında, alan sargısında ve polaritede vb. uygun tasarım önlemleri alınabilir ve generatörün sönümlleme sargıları ile donatılmasıyla gerilim harmonikleri ortadan kaldırılabilir. Generatör sargılarının bağlantı şekli de harmonik sırasını belirler. Üç ve üçün tam katı harmonikler, yalnızca stator sargıları yıldız bağlı olduğunda faz gerilimlerinde ortaya çıkar. Yıldız bağlantılı bir generatöre dengeli üç fazlı bir şebeke bağlanır ve nötr, generatörün nötrüne bağlı değilse, üçüncü ve üçün tam katı harmonikler görünmez. Nötr, nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden üç ve üç kez harmonik akımlar geçecek ve bu akımların toplamı nötrden geçecektir. Bu akımlar ayrıca gerilim harmoniklerine neden olur. Generatör sargıları üçgen bağlantılı ise, dolaşım akımı bu sargılardan frekansın üç katı olarak akacaktır. Bu akım yükten bağımsızdır ve sargılarda önemli kayıplara neden olur. Bu yüzden generatör sargılarının yıldız bağlanması ve nötr noktaların ayrılması tercih edilir. Generatör dört telli bir ağa bağlı olan nötr tel,

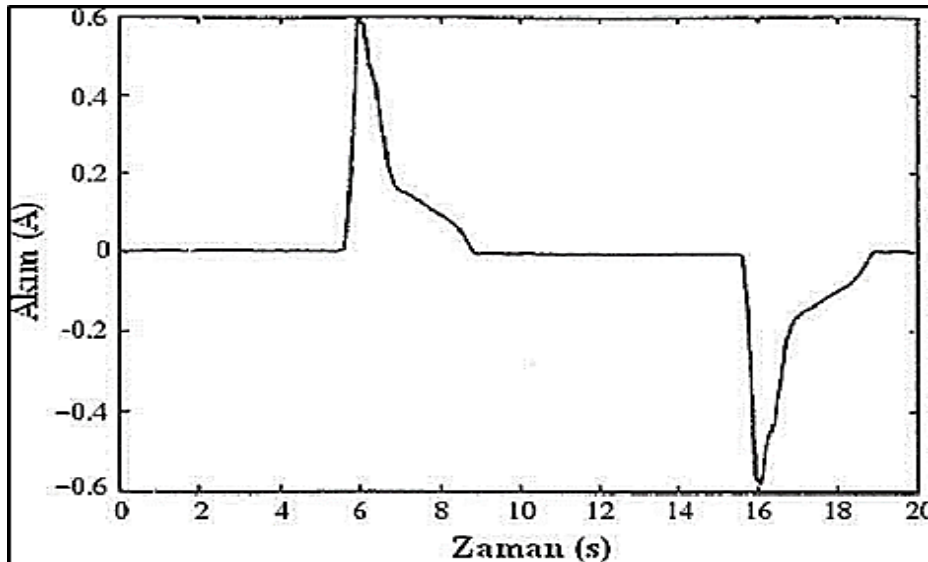
zikzak deseninde bağlanan bobinlerin oluşturduğu yapay bir yıldız noktasına bağlanır. Stator sargılarının kademelerinin doğru seçilmesinden sonra, manyetik alan eğrisinin üçüncü, beşinci ve yedinci harmonikleri, radyasyon yoluyla voltaj eğrisinden tamamen elimine edilebilir. Burada bahsetmeye değer en düşük harmonik üçüncü harmoniktir [24,27].

3.6.4. Ark fırınları

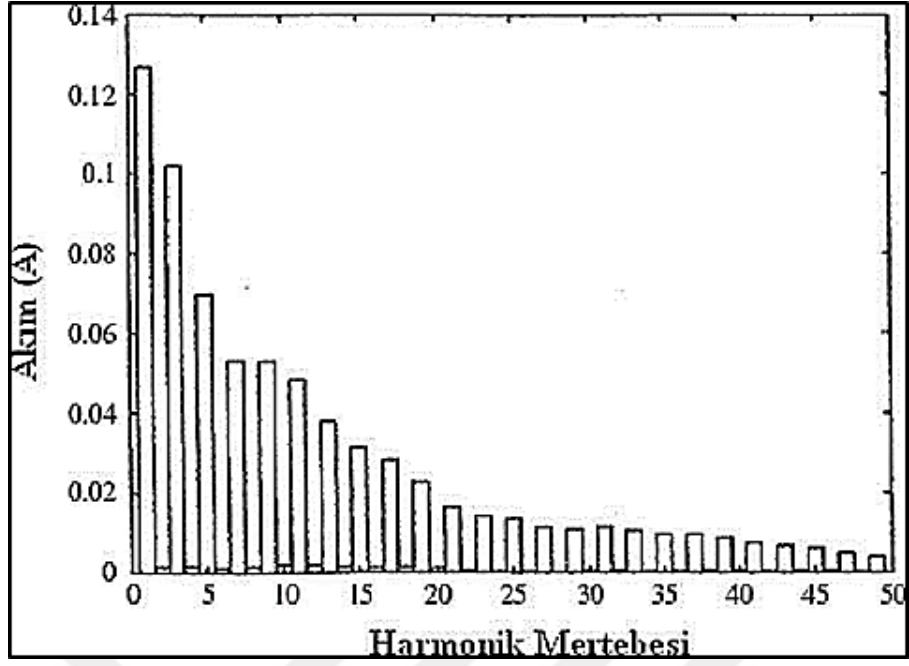
Ark durumunda gerilim arttıkça akım azalır yani negatif direnç gözlenir. Bir elektrik ark ocağının empedansı da zamanla değişir. Bu durumda sistemden geçen harmonikler zamanla değişir. Bu nedenle elektrik ark ocaklarının modellenmesi kolay değildir. Bir ark olsa bile, ark ocağının gücüne ve çalışma aşamasına bağlı olarak akım ve gerilim değişecektir. Dalga formu ile ilgili değişiklikleri kaydettikten sonra, harmonikleri tespit etmek için network analizörü kullanılır. Tipik bir elektrik ark ocağı gerilimi, temel gerilimin maksimum %30'udur [24,27].

3.6.5. Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları

Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları cıva ve sodyum buharı, yüksek basınçta gaz – ksenon'dan oluşmaktadır. Bunun gibi aydınlatma elemanlarının deşarjı, güç kaynağından harmonik akımların emilmesine neden olabilir. Floresan lambaların dalga biçimleri ve akım spektrumları aşağıda gösterilmiştir [24,28].



Şekil 3.13. Floresan lambaların dalga biçimleri ve akım spektrumları [1,9,13]



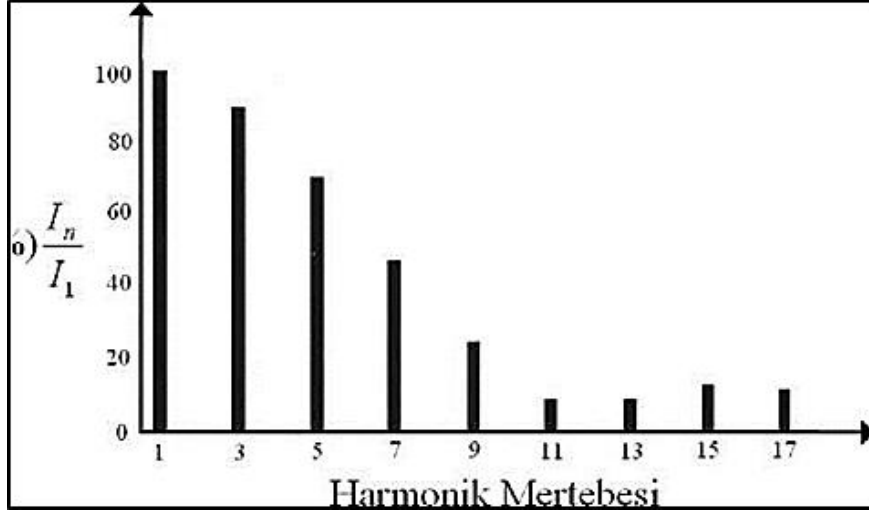
Şekil 3.14. Harmonik mertebesi [1]

3.6.6. Statik VAR kompanzatörleri

Tristör kontrollü endüktanslara sahip statik var kompanzatörler, güç sistemlerinde reaktif güç kontrolü için kullanılır ve içerdikleri bileşenlerin lineer olmayan özelliklerinden dolayı harmonikler üretilir.

3.6.7. Anahtarlama güç kaynakları

Anahtarlama güç kaynakları (SMPS), modern elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel düşürücü transformatörler ve redresörler yerine kapasite pilleri doldurarak istenilen çıkış gerilimine ve akım değerine göre elektrik üreten bir redresördür. Bu sistemlerin dezavantajı, güç kaynağından sürekli akım çekmek yerine çok sayıda yüksek frekanslı, üçüncü ve beşinci harmonik bileşen içeren darbelerde akım çekmesidir. Bilgisayarın güç kaynağından çektiği akım harmoniklerinin temel harmoniğe olan harmonikleri arasındaki oran Şekil 3.15 de verilmiştir.



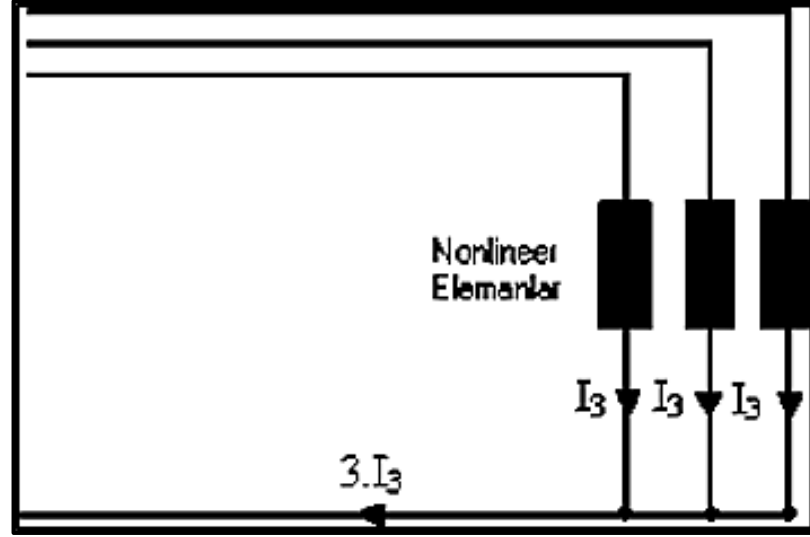
Şekil 3.15. Bilgisayarın harmonik spektrumu [1]

3.7. Harmoniklerin Etkileri

Harmoniklerin etkileri elektrik sistemlerine ve bunlara bağlı bileşenlere zarar verebilir. Generatörler, motorlar, kapasitörler, transformatörler ve yüksek gerilim hatlarında ek kayıplara neden olurlar. Harmonik rezonansın oluşma olasılığı artar. Rezonans nedeniyle oluşan aşırı akımlar ve gerilimler, çalışma sırasında bileşenlere ciddi şekilde zarar verebilir. Aşağıda harmoniklerin belirli elementler üzerindeki etkisi incelenmektedir.

3.7.1. İletkenler üzerindeki etkisi

Harmonik akımlar, iletkenler boyunca gerilimde daha fazla düşüşe neden olarak sıcaklık artışını artırabilir. Yüksek frekanslarda, ısıyı artıran deri etkisi nedeniyle iletkenin direnci artar. Harmoniklerin iletkenler üzerindeki bir başka etkisi, 3 fazlı 4 telli bir sistemdeki nötr iletken aşırı yüklendiğinde ortaya çıkar. Temel frekansta üç fazlı akımların toplamı sıfır olduğundan, nötrde akım akmaz. Bununla birlikte, üç fazlı bir sistemde, nötr iletkenindeki üç ve üç sabit harmonikler birbirini iptal etmez, ancak fazlar arasındaki harmonik sıralarla birbirini güçlendirir. 120° faz farkı üç sabit harmonik için 360° olacaktır. Bu nedenle, nötr iletkenin üçüncü harmonik akım ve üçüncü harmonik akımın toplamı akar. Nötr iletkenin üçüncü harmonik yüklemesi Şekil 3.16'da gösterilmiştir [24].



Şekil 3.16. Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi [1]

3.7.2. Direnç üzerindeki etkisi

Yüksek frekanslarda, iletkenin kesiti derinin etkisi altında azalır, böylece direnci artar. Harmonikler durumunda, iletkenin AC direnci DC direncinden daha büyüktür.

3.7.3. Reaktanslar üzerindeki etkisi

Ana bileşenlerde X_L reaktans değerine endüktif reaktans n . harmonikte

$$X_{Ln} = nX_L \quad (3.21)$$

değerini alır. Benzer şekilde, X_C değerinin kapasitif reaktansı temelde X_C 'ye eşittir ve n . harmoniklerde

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \quad (3.22)$$

olur.

Her iki durumda da reaktansın doğrusal bir eleman olduğu varsayılmaktadır.

3.7.4. Kondansatörler üzerindeki etkisi

Reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan kapasitörlerin reaktansı, harmonik frekansı parametresi n arttıkça azalır. Harmonik kapasitör akımı

$$I_n = n\omega_1 CV_n \quad (3.23)$$

ile hesaplanabilmektedir.

Frekans arttıkça akımdaki harmoniklerin etkisi gerilimle artar. Harmonikler, kapasitörlerde aşırı reaktif yüklere neden olabilir. Harmonik durumda kondansatörün reaktif gücü,

$$Q_n = Q + \sum_{n=2}^N \omega_n C V_n^2 \quad (3.24)$$

olarak yazılabilir. Frekans arttıkça reaktif güç artabilir. Ayrıca dielektrik kayıpları artar ve kondansatör aşırı ısınır. IEEE Std, kondansatör bankının limit durumdaki akım, gerilim ve reaktif gücünü belirlemiştir [29].

3.7.5. Motorlar ve generatörler üzerindeki etkisi

Şebeke harmonikleri nedeniyle artan demir ve bakır kayıpları nedeniyle dönen makinelerin ısınması motor yol verme veya senkronizasyon arızalarına neden olmaktadır [24].

3.7.6. Transformatörler üzerindeki etkisi

Akım nedeniyle trafolardaki harmonikler bakır kayıplarının artmasına ve kaçak akı kayıplarına neden olur. Gerilim harmonikleri demir kayıplarını artırır. Bu kayıplar trafo ısıtma kayıplarına neden olur. Transformatör gerilimi harmonikler nedeniyle frekansa bağlıdır ve IEEE C57.12.26.1992 standardı ile trafo akım harmonik distorsiyonu %5 ile sınırlandırılmıştır.

3.7.7. Harmoniklerin rezonans etkisi

İletim hatlarındaki indüktörler, kompanzasyon trafoları ve kondansatörlü sistemlerde harmonik rezonans oluşabilir. Bu, aşırı gerilime ve akım yükselmelerine neden olabilir. Aşırı akım ve gerilim, sistem arızasına neden olabilir ve ekipmana zarar verebilir.

3.7. Harmoniklerin Limit Değerleri ve Uluslararası Standartlar

Gelişmiş ülkeler, enerji şebekelerinin ve yüklerin harmoniklerden etkilenmemesi için harmonik standartlar oluşturmuştur. IEEE Std 519-1992, IEEE tarafından 1992’de tanıtılan, generatör setlerinin harmonik limitlerini belirtir Güç bus gerilimi bozulma

limiti ve müşteri tarafından oluşturulan harmonik akım, IEEE Std 519-1992 standardı tarafından belirtilen gerilim harmonik bozulma limiti Tablo 3.4 de listelenmiştir. Genel dağıtım şebekesinin akım harmonik bozulma limiti aynı standarda göre belirlenir [14].

Tablo 3.4. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları [5,8,25]

Ülke	Gerilim (kV)	THD _v (%)
A.B.D	Genel	5
	2.4-69 115≤	1,5
	Özel	8
	2.4.1969 115≤	1,5
Almanya	Tüm Gerilimler (15. harmoniğe kadar)	10
Avustralya	Dağıtım 33≤	5
	İletim 22.33.66	3
Fransa	110≤	1,5
	Tüm Gerilimler	1,6
İngiltere	0.415	5
	6.6.2011	4
	33-66	3
	132	1,5
İsveç	0.43/0.25	4
	3.3.2024	3
	84≤	1

Tablo 3.5. IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları [5,8,25]

Bara gerilimi (V _n)	Tekil harmonik büyüklüğü (%)	THD _{v_n} (%)
V _n <69kV	3.0	5.0
69<V _n <161 kV	1.5	2.5
V _n >161kV	1.0	1.5

Tablo 3.6. IEEE'nin genel dağıtım sistemlerine ait akım harmonik distorsiyon sınırları [5,8,25]

$V_n < 69\text{kV}$						
IK/IL	n<11	11<n<17	17 < n<23	23 < n<35	n>35	TTD(%)
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20
$69\text{kV} < V_n < 161\text{kV}$						
<20	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50-100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100-1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10
$V_n > 161\text{kV}$						
<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
>50	3	1.5	1.15	0.5	0.22	4

IEC, farklı yükler için harmonik standartlar belirler. IEC 61000-2-2 [31] düşük gerilimli konut ağları için gerilim sınırlarını belirtir ve IEC 61000-2-4 [32] endüstriyel sınıf 2 bileşen değeri için sınırları belirtir, IEC 61000-2-4 endüstriyel sınıf 3 bileşenleri için sınırları belirtir. IEC, IEC 61000-3-2'de faz başına 16 A'dan düşük giriş akımlarını belirtir [33]. Avrupa standardı EN 50160 D sınıfı ekipman için harmonik akım limitleri, düşük ve orta gerilim harmonikleri için limitleri tanımlar. Bu değerler alçak gerilim için ve orta gerilim için tablolarda verilmiştir [34].

Tablo 3.7. IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyonu sınırları [5,8,25]

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		Üç ve Üçün katı Harmonikler	
n	%V_n	n	%V_n	n	%V_n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	>21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	>12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
>29	k				

Tablo 3.8. IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyonu sınırları [5,8,25]

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		Üç ve Üçün katı Harmonikler	
n	%v _n	N	%v _n	n	%v _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	>21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	>12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
>29	$k = 0,2 + 12,5 / n$				

Tablo 3.9. IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyonu sınırları [5,8,25]

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		Üç ve Üçün katı	
n	%v _n	n	%v _n	n	%v _n
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1.5	9	2.5
11	5	>6	1	15	2
13	4.5			21	1.75
17	4			>27	1
19	4				
23	3.5				
25	3.5				
>29	$m = 5\sqrt{1/n}$				

Tablo 3.10. IEC 61000-3-2 standardına göre harmonik akım sınırları

n	3	5	7	9	11	13	15...39
Max I _n	2,3	1,14	0,77	0,4	0,33	0,21	0,15...15/n

Tablo 3.11. EN 50160 standardına göre alçak gerilim harmonik sınırları [5,8,25]

Alçak Gerilim Şebekesi (< 1kV)					
Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		Üç ve Üçün katı Harmonikler	
n	%v _n	n	%v _n	n	%v _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6...24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Tablo 3.12. EN 50160 standardına göre orta gerilim harmonik sınırları [5,8,25]

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		Üç ve Üçün katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6...24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

20 Şubat 2008 Tarihli Resmi Gazete 26793 sayılı yönetmelik ile değiştirilen elektrik piyasası şebeke şartnameleri, harmonik limitler aşağıdaki gibidir [7].

Akım harmonikleri; Madde 10 - Akım harmonikleri için kabul edilebilir limitler bu yönetmeliğin Ek 9’unda belirtilmiştir. Güç kalitesini belirlemeye yönelik diğer kriterler, elektrik piyasasının şebeke koduna göre uygulanır. Ayrıca Türk Standartları Kurumu tarafından geliştirilen bazı güncel standartlar aşağıda listelenmiştir [35].

- TS EN 61642 - Harmonikleri etkileyen endüstriyel AC şebekeleri - Filtre ve şönt kapasitör uygulaması,
- TS EN 61000-3-12 - Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Bölüm 3-12: Limitler - 16 A faz başlı ve 75 A giriş akımlı alçak gerilim sistemlerine bağlanan ekipmanlardan kaynaklanan harmonik akımların sınırlandırılması,
- TS EN 61000-3-2 - Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Bölüm 3 -2: Limitler - Harmonik akım açma birimlerinin sınırlandırılması,

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tezde farklı aydınlatma sistemlerinin güç kalitesi analizi IEC 61000-4-30 standardına göre A sınıfı olan Fluke 43B Güç Kalitesi Analizörü kullanılarak laboratuvar ortamında KFL ve LED armatürlerin harmonik ölçümleri alınmıştır. Total harmonik distorsiyon açıklamasında belirtildiği gibi akım dalga şekli yüksek bozunumlardan etkilenirken gerilim dalga şekli sinüzoidal formunu korumaktadır. Gerilim total harmonik distorsiyon yük durumuna bağlı değildir. Akım harmonikleri ile çok düşük şebeke eşdeğer empedansı arasındaki etkileşim tarafından üretilen gerilim harmonikleri ihmal edilebilir düzeydedir THDV'nin küçük değeri, yalnızca şebekede zaten mevcut olan harmonik kirlilikten kaynaklanmaktadır [42]. Ölçümler Tablo 4.1.'de verilen limit değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu deneyde 53 W, 39 W LED armatür ve 79 W floresan lamba kullanılmıştır. Bu armatürler farklı güç değerlerine sahip olmakla beraber yapılan ışık testi sonucuna göre aynı lümen değerlerine sahiptirler. Armatürlerde kullanılan LED sürücüler ve elektromanyetik ballast farklı üreticilerden seçilmiştir [43]. Alınan ölçüm sonuçlarına göre MATLAB programı kullanılarak standartlara uygun olmayan harmonik değerleri için pasif filtre tasarımı yapılmıştır. Nominal akımı ≤ 16 A ve aktif giriş gücü > 25 W olan armatürler için IEC 61000 serisine göre akım harmonik değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Akım harmonikleri için limit THDI değerleri

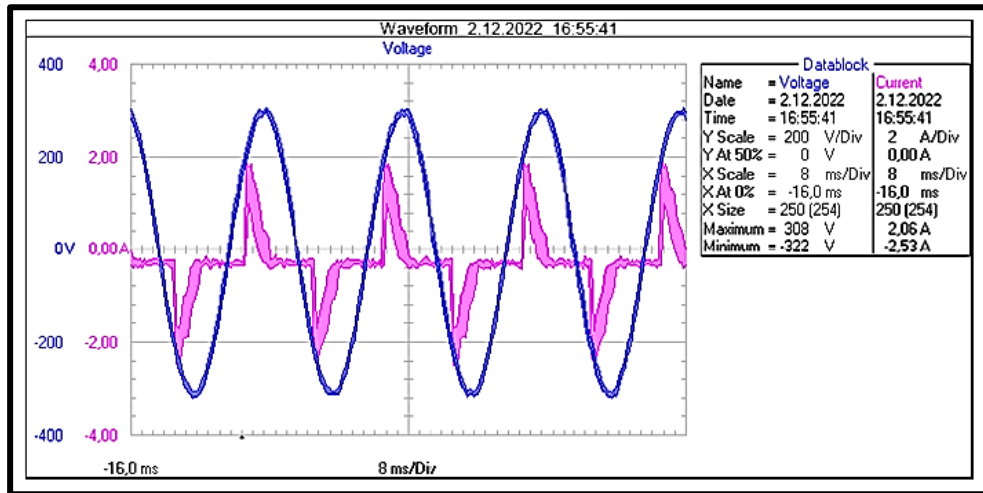
Harmonikler					
2	3	5	7	9	11 - 39
% 2.0	% $30 \times \cos\Phi$	% 10.0	% 7.0	% 5.0	% 3.0

4.1. Ölçüm Sonuçları

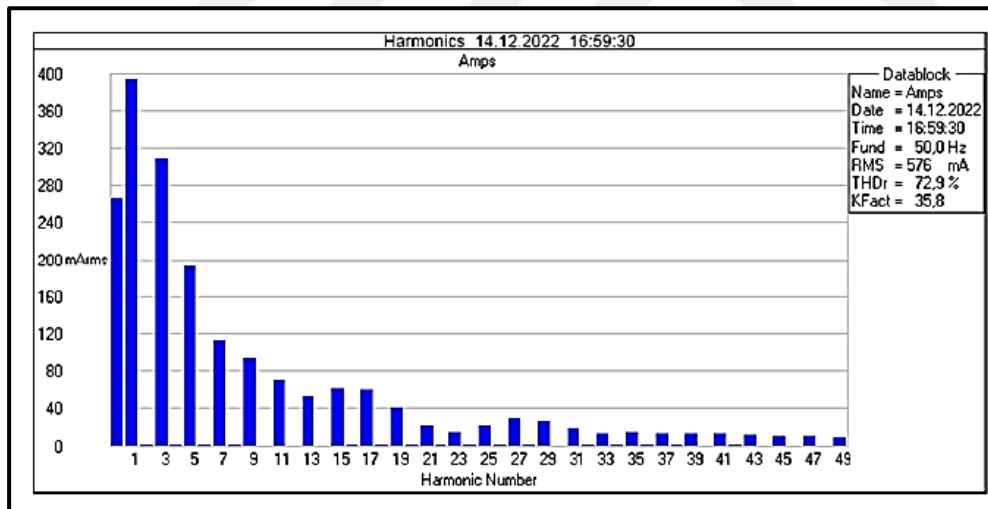
Laboratuvar ortamında armatürlerin akım-gerilim grafikleri, akım, gerilim harmonikleri ve güç değerleri ölçülmüştür.

4.1.1. KFL

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre KFL'ye ait güç değeri 79 W, şebeke gerilimi 219.3 V, şebekeden çekilen akım 0.654 A ve güç faktörü 0.55 olarak gözlemlenmiştir. KFL'ye ait akım-gerilim grafiği Şekil. 4.1'de ve akım harmonikleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. KFL (79 W) akım-gerilim grafiği

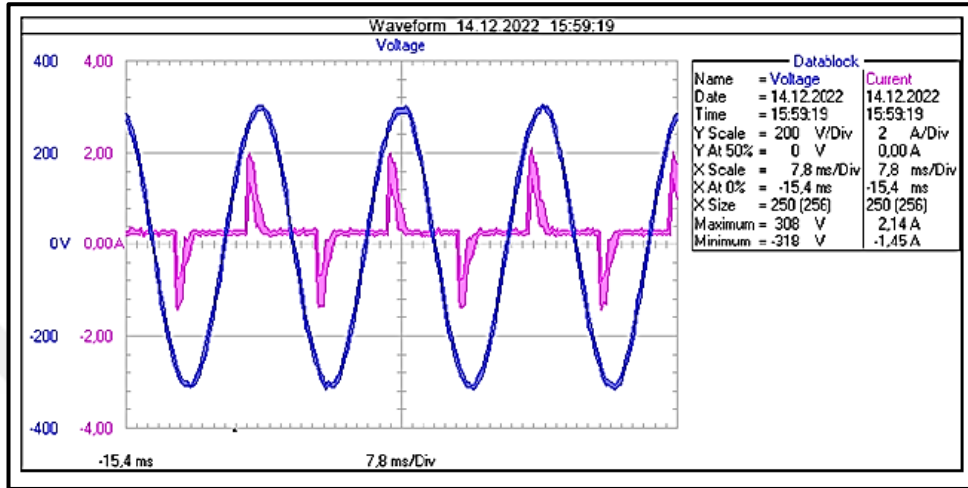


Şekil 4.2. KFL (79 W) akım harmonik spektrumu

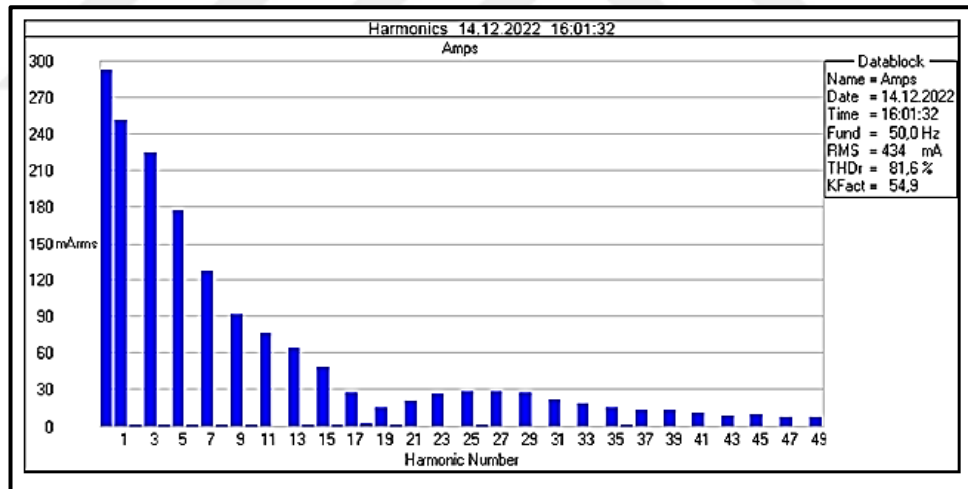
Gerilim dalga şekli grafiği Şekil 4.1. de görüleceği üzere sinüzoidal forma oldukça yakındır fakat akım dalga şekli sinüzoidal formdan oldukça uzaktır. Akım harmonik spektrumu Şekil 4.2. de verilmiştir. THD değeri %72.9 olarak ölçülmüştür. Bu sistemdeki en etkin harmonik bileşen 3. Harmonik olarak gözlemlenmiştir ve harmonik değeri %53.8' dir. Diğer harmonik değerleri ise 5. harmonik için %33.2, 7. harmonik için %20, 9. harmonik için %16.3, 11. harmonik için %12.2, 13. harmonik için %9.3 ve 15. harmonik için %10.7 olarak ölçülmüştür.

4.1.2. A marka sürücülü LED armatür

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre LED armatüre ait güç değeri 53 W, şebeke gerilimi 219.1 V, şebekeden çekilen akım 0.538 A ve güç faktörü 0.45 olarak gözlemlenmiştir. LED armatüre ait akım-gerilim grafiği Şekil 4.3. de ve akım harmonikleri Şekil 4.4. de verilmiştir.



Şekil 4.3. LED Armatür (53 W) akım-gerilim grafiği

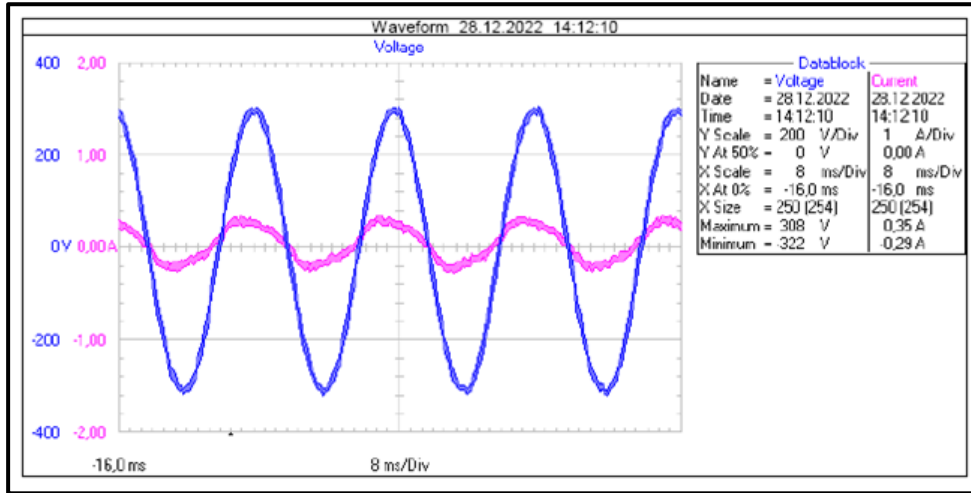


Şekil 4.4. LED Armatür (53 W) akım harmonik spektrumu

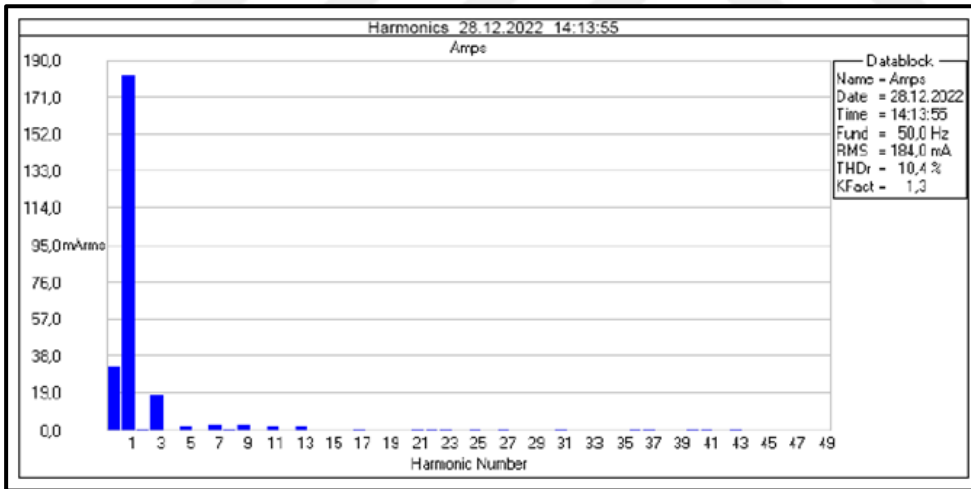
Gerilim dalga şekli grafiği Şekil 4.3. den görüleceği üzere sinüzoidal forma oldukça yakındır fakat akım dalga şekli sinüzoidal formdan oldukça uzaktır. Akım harmonik spektrumu Şekil 4.4. de verilmiştir. THD değeri %81,6 olarak ölçülmüştür. Bu sistemdeki en etkin harmonik bileşen 3. harmonik olarak gözlemlenmiştir ve harmonik değeri %51.8' dir. Diğer harmonik değerleri ise 5. Harmonik için %40.6, 7. Harmonik için %29.7, 9. harmonik için %21.4, 11. harmonik için %17.8, 13. harmonik için %15.1, 15. harmonik %11.7 olarak ölçülmüştür.

4.1.3. B marka sürücülü LED armatür

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre LED Armatüre ait güç değeri 39 W, şebeke gerilimi 219.9 V, şebekeden çekilen akım 0.187 A ve güç faktörü 0.95 olarak gözlemlenmiştir. LED armatüre ait akım-gerilim grafiği Şekil 4.5. de ve akım harmonikleri Şekil 4.6. da verilmiştir.



Şekil 4.5. LED Armatür (39 W) akım-gerilim grafiği



Şekil 4.6. LED Armatür (39 W) akım harmonik spektrumu

Gerilim ve akım dalga şekli şekil.x den görüleceği üzere sinüzoidal forma oldukça yakındır. Akım harmonik spektrumu şekilx.x de verilmiştir. THD değeri %10.4 olarak ölçülmüştür. Bu sistemdeki en etkin harmonik bileşen 3. harmonik olarak gözlemlenmiştir ve harmonik değeri %9.9' dir. Diğer harmonik değerleri ise 5. harmonik için %1.1, 7. harmonik için %1.4, 9. harmonik için %1.6, 11. harmonik için %1.1, 13. harmonik için %0.1, 15. harmonik için %0.1 olarak ölçülmüştür

4.2. Harmonik Filtre Tasarımı

Harmonik ölçüm sonuçları incelendiğinde KFL ve A marka sürücüyü sahip LED armatürün akım harmonikleri IEC 61000-3-2 standardının izin verdiği limit değerlerinden yüksek çıktığı için harmonik filtre tasarımı yapılarak akım harmoniklerinin düşürülmesi uygun görülmüştür.

Bu çalışmada hem KFL hem de A marka sürücülü LED armatür için gözlemlenen en baskın olan 3. harmonik (150 Hz) için rezonans frekansa getirecek denklem 4.1 kullanılarak MATLAB ortamında L ve C değerleri hesaplanıp, 4 farklı filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir.

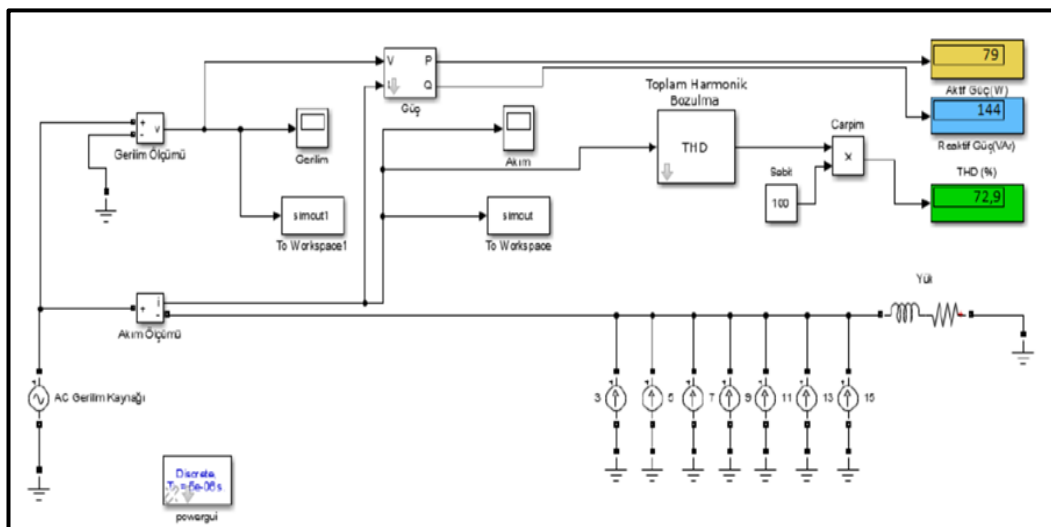
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

Tablo 4.2. Filtre çeşidine göre L ve C değerleri

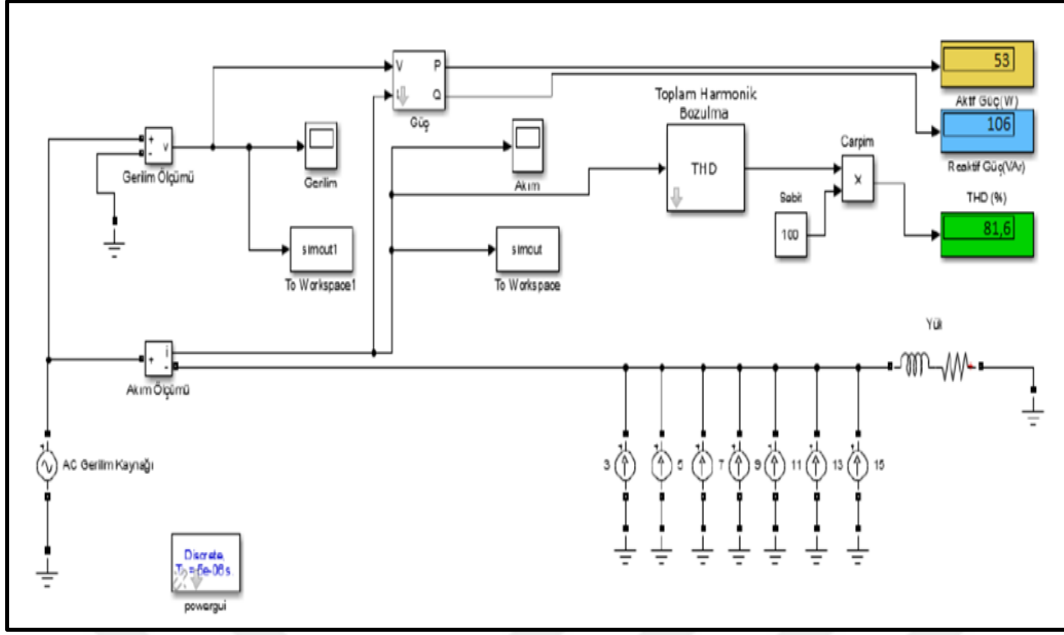
Filtre Çeşidi	C	L
3. Harmonik Filtre (150 Hz)	3.4 μ F	300 mH
2. Harmonik Filtre (100 Hz)	8.0 μ F	300 mH
Özel Harmonik Filtre (75 Hz)	15.0 μ F	300 mH
Alçak Geçiren Filtre	11 μ F	102.44 mH

4.3. Simülasyon Sonuçları

KFL ve A markalı sürücüyeye sahip LED armatür MATLAB programında modellenmiştir.

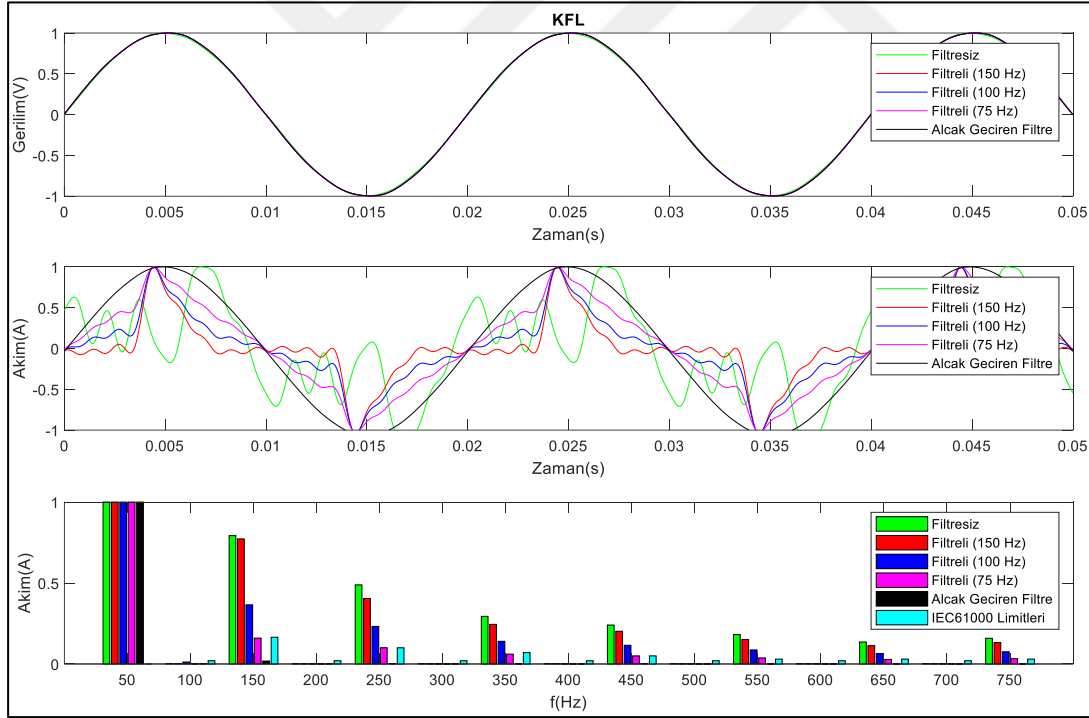


Şekil 4.7. Elektronik balastlı KFL MATLAB/Simulink modeli



Şekil 4.8. A marka sürücülü LED armatür MATLAB/Simulink modeli

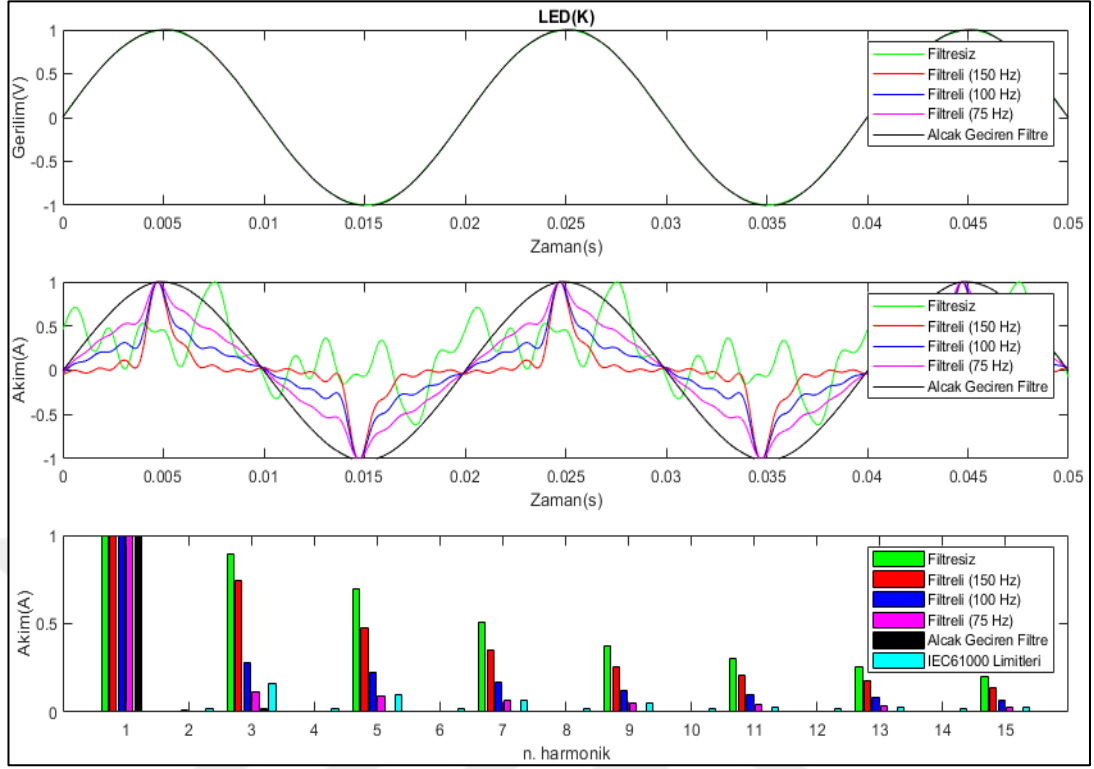
4.3.1. KFL



Şekil 4.9. KFL için filtresiz ve 4 farklı filtre kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş gerilim ve normalize akım zaman ve frekans uzayı sonuçları.

KFL için 4 farklı filtre MATLAB ortamında tasarlanmıştır ve her bir filtreye ait akım-gerilim dalga şekilleri ve harmonik spektrumlar Şekil 4.9.da verilmiştir.

4.3.2. LED (A)



Şekil 4.10. LED(A) için filtresiz ve 4 farklı filtre kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş gerilim ve normalize akım zaman ve frekans uzayı sonuçları

LED armatür için 4 farklı filtre MATLAB ortamında tasarlanmıştır ve her bir filtreye ait akım-gerilim dalga şekilleri ve harmonik spektrumlar Şekil 4.10. da verilmiştir.

4.4. Performans Analizi

KFL ve A marka sürücülü LED armatüre eklenen 4 farklı filtre MATLAB programı FFT analizi ile THDI değerleri hesaplanmıştır. Tasarlanan her bir filtre devre topolojine göre seri ya da paralel bağlanarak denenmiş ve alçak geçiren filtre haricinde kullanılan filtreler devreden yüksek akım çekilmesine sebep olmuştur. En iyi sonucu Tablo 4.3 de verilen değerler incelendiğinde kesim frekansı 150 Hz olan alçak geçiren filtre göstermiştir. Kullanılan ürünler farklı güç değerlerine sahiptirler. Bu durumda KFL filtresiz durumda toplam akım harmonik distorsiyonu A markalı sürücüye sahip LED armatür türüne göre daya iyi çıkmıştır fakat ürünlerin lümen çıkışları yaklaşık olarak aynı olduğu için en verimsiz armatür KFL olarak gözlemlenmektedir. Filtreli durumlar karşılaştırıldığında ise A marka sürücü LED armatür harmonik akımları daha iyi absorbe etmiştir.

Tablo 4.3. Filtresiz ve filtreli THD sonuçları

THDI(%)	KFL	LED(K)	LED(İ)
Filtresiz(Deney)	72.9	81.6	10.4
Filtresiz(Simülasyon)	52.155	68.557	-
Filtreli(150 Hz)	47.795	51.682	-
Filtreli(100 Hz)	24.372	22.149	-
Filtreli(75 Hz)	10.594	9.067	-
Alçak Geçiren Filtre (150 Hz)	0.930	0.884	-

Tablo 4.4. KFL ve A ve B markalı sürücüyeye sahip LED armatürlerin güç ve lümen değerleri

	KFL	LED(A)	LED(B)
Güç (W)	79	53	39
Lümen (lm)	4260	4284	4300

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması sırasında elektrik güç sistemlerinde akım ve gerilimin 50 Hz frekansında, dalga şekillerinin ise sinüzoidal olması beklenmektedir. Bu parametreler elektrik enerjisi kalitesi için en önemli faktörlerdir. Fakat elektrik sistemlerinde bulunan doğrusal olmayan yüklerin harmonik oluşumuna neden olması ile akım ve gerilim dalga şekilleri sinüzoidal formdan uzaklaşırlar. Bu yüzden elektrik güç sistemlerinde önemli problemlere yol açarlar.

Elektrik enerji sistemlerinde oluşan bu problemlerin en önemli sebeplerinden biri harmoniklerin şebekeye vermiş olduğu olumsuz etkidir ve bu tezde aydınlatma sistemlerinde oluşan harmonikler incelenmiştir. Harmoniklerin oluşumu, bu oluşuma sebep olan kaynaklar, harmoniklerin zararlı etkileri ve harmoniklerin nasıl giderileceği gibi temel konular hakkında bilgi verilmiştir.

Bu çalışmada 79 W KFL ve iki farklı markaya ait sürücülerle çalıştırılan 53 W ve 39 W LED armatürler incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda oluşan harmoniklerin giderilmesi için pasif filtre tasarımı yapılmıştır ve harmonik akım değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarlanan filtrelerin içinde kullanılan devre elemanları, harmonik oluşumuna sebep olan en baskın olan 3. harmonik (150 Hz) için rezonans frekansa getirecek L ve C değerleri hesaplanıp MATLAB ortamında 4 farklı filtre tasarımı yapılarak farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Böylece aydınlatma sistemlerinde kullanılan KFL ve A marka sürücülü LED armatüre ait harmonik bileşenler pasif filtre kullanımı ile giderilmiş ve sinüzoidal formdan uzaklaşan akım dalga şekli sinüzoidal forma yakın hale getirilmiştir ve elektrik enerjisinde kalitesizlik problemi ortadan kaldırılmıştır.

Ayrıca yapılan ışık testleri sonucunda LED armatürlerin daha düşük güç değerlerinde KFL ile aynı lümen çıkışına sahip olduğu gözlemlenmiştir. LED armatürler KFL'ye göre daha verimli, ekonomik ve uzun ömürlüdürler.

Günümüzde artan enerji maliyetleri göz önüne alındığında ve floresan lambaların insan ve çevreye olan zararlı etkileri göz önünde bulundurulduğunda LED armatürlerin daha önemli hale geldiği ve yaygın olarak kullanılmaya başladığı bilinmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Kocatepe, C. Uzunoğlu, M. Yumurtacı, R. Karakaş, A. Arıkan, O. (2003). Elektrik Tesislerinde Harmonikler. *Birsen Yayınevi*, 330s, İstanbul, 2003.
- [2] IEC EN 61000-3-2: Electromagnetic Compatibility, Part 3, Section 2, Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A per Phase), ed. 3; *International Electrotechnical Commission* (IEC), Geneva, Switzerland, 2011.
- [3] Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, EN 50160; Cenelec, *Brussels*, Belgium, 1999
- [4] Palacios-Garcia, E.J. Chen, A. Santiago, I. Bellido-Outeiriño, F.J. Flores-Arias, J.M. Moreno-Munoz, A. (2014). Stochastic Model For Lighting's Electricity Consumption In The Residential Sector, *Energy And Buildings*, Publication date: 2015-02, Volume: 89 Pages: 245 – 259, ISSN: 0378-7788, 1872-6178, DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.12.028
- [5] Tsao, J.Y. (2004). Solid-State Lighting: Lamps, Chips, And Materials For Tomorrow, *IEEE Circuits Devices Mag.* 2004, 20, pp. 28–37, Doi: 10.1109/MCD.2004.1304539
- [6] Huang, B.J. Hsu, P.C. Wu, M.S. (2007). Study Of System Dynamics Model And Control Of A High-Power LED Lighting Luminaire, *Energy*, 2006, 32, pp. 2187–2198, doi: 10.1016/j.energy.2007.05.011
- [7] Manzano, E.R. Carlorosi, M. Tapia Garzon, M. (2009). Performance and Measurement of Power Quality Due to Harmonics from Street Lighting Networks. In Proceedings of the Conference on Renewable *Energies and Power Quality* (ICREPQ'09), Valencia, Spain, 15–17 April 2009.
- [8] Verderber, R.R. Morse, O.C. Alling, W.R. (1993). Harmonics from compact fluorescent lamps. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1993, 5, 670–674.
- [9] Aydoğdu, E. (2019). Mevcut Ticari Binaların Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Verimliliği Analizi İçin Örnek Bir Çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, Enerji Bilim ve Teknoloji Programı, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, 595448, 2019
- [10] EP (2003). Directive 2002/91/EC of The European Parliament and Council of the European Union, *Brussels*.
- [11] EP (2010). Directive 2010/31/EU of The European Parliament and Council of the European Union, *Brussels*.

- [12] EPBD (2011). Directive 2010/31/EU of The European Parliament and Council of the European Union, Brussels.
- [13] Erkin, E. (2012). Ofis Binaları İçin Aydınlatma Enerjisi Tasarruf Potansiyelleri Hesaplama Amaçlı Bir Yöntem Önerisi, (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, *Enerji Enstitüsü*, İstanbul
- [14] EPBD (2018). Directive 2018/844 EU of The European Parliament and Council of the European Union, Brussels.
- [15] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022, 4 Mayıs). <http://www.enerji.gov.tr> adresinden 16 Ağustos 2022 tarihinde alınmıştır.
- [16] Enerji Verimliliği Kanunu. (2007). T.C. Resmî Gazete, 26510, 2 Mayıs 2007.
- [17] Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (2008). T.C. Resmî Gazete, 27075, 5 Aralık, 2008
- [18] TS 825 (2008). Binalarda ısı yalıtım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [19] BİB (2010c). BEP-TR: Binalarda Enerji Performansı Hesaplama Yazılımı, *Bayındırlık ve İskân Bakanlığı*, Ankara.
- [20] Kurt, M. (2012). Türkiye ve Almanya Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliklerinin Referans Bina ve Sınır Koşulları Açısından Karşılaştırılması, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [21] Türkiye Enerji Verimliliği Gelişim Raporu (2018). T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.
- [22] TÜİK (2017). 2017 Yılı Sektör Raporu, Ankara.
- [23] Energy Information Administration (1998). A look at Commercial Buildings in 1995: Characteristics, Energy Consumption, and Energy Expenditures, EIA Report No. DOE/EIA-0625(95), DC: US *Department of Energy*. Washington.
- [24] TSE (2013). TS EN 12464-1 Işık ve Aydınlatma- Çalışma Yerlerinin Aydınlatılması- Bölüm 1: Kapalı Çalışma Alanları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [25] CIE (2001). International Standard (S 008/E:2002) Lighting of Work Places - Part 1: Indoor, *International Commission on Illumination*, Vienna, Austria.
- [26] Boyce, P. R. (2003). Human Factors in Lighting, 2nd ed. London and New York: Taylor & Francis
- [27] Boyce, P. R. (2016). Editorial: Exploring Human-Centering Lighting, *Lighting Research and Technology*, 48 (2), 101.
- [28] CIE (1995). Technical Report No: 117 Discomfort Glare in Interior Lighting, *International Commission on Illumination*, Vienna, Austria.
- [29] Ünsalan, H. Perdahçı, C. ve Yüce, D. (2015). Aydınlatmada Geleneksel Işık Kaynaklarından LED'e Kadar Uzanan Tarihçe, İstanbul
- [30] ERP (2009). Directive 2009/125/EC of The European Parliament and Council of the European Union, *Brussels*.

- [31] Yurtseven, M.B. (2017). LED Işıık Kaynaklı Armatür Isıl Modellenmesi ve Isıl Tasarımı Etkileyen Faktörlerin İstatiksel Analizi, Yayınlanmış Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, *Enerji Enstitüsü*, İstanbul,
- [32] Diyot.net (2020, 24 Kasım). Elektronik-Pn Birleşiminin Polarmalanması <http://diyot.net/pn-birlesiminin-polarmalanmasi/> adresinden 19 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır.
- [33] Aman, M.M. Jasmon, G.B. Mokhlis, H. ve Bakar, A.H.A. (2013). Analysis of the performance of domestic lighting lamps. *Energy Policy* 52, 482-500.
- [34] Curbuier, Aalto, A. ve Ando, T. (2003). Gün Işıığı Çalgıcısı İç Mimar, 2. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu, (s.15-22), *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası*, Diyarbakır
- [35] Kazanasmaz, T.Z. Günaydın, M. ve Binol, S. (2009). Bürolarda Günlüğü Aydınlik Değerlerinin Öngörölmesi, IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, *Sempozyum Bildirisi* (s.811-822). İzmir.
- [36] Görgölü, S. Kocabey, S. Yüksek, İ. ve Dursun, B. (2010). Enerji Verimliliği Kapsamında Yapılarda Doğal Aydınlatma Yöntemleri: Kırklareli Örneği, Uluslararası II. *Trakya Bölgesi Kalkınma-Girişimcilik Sempozyumu*, Kırklareli.
- [37] Sirel, Ş. (1999). Aydınlatmada Enerji Kaybı, Yapı Fiziği Uzmanlık Enstitüsü, Kitapçık No 3, İstanbul.
- [38] Perdahçı, C. ve Hanlıl, U. (2009). Verimli Aydınlatma Yöntemleri, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 3. *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli.
- [39] Onaygil, S. (2001). Kent İçi Aydınlatma, *Kaynak Elektrik Dergisi*, 107-112.
- [40] Kocabey, S. (1999). Dahili Ortamlarda Aydınlik Seviyesinin Kontrolü İle Enerji Tasarrufunun Sağlanması, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [41] Rüstemli, S. Tekev, S. (2021). Güç Sistemindeki Harmoniklerin Bilgisayar Destekli Modellenmesi Computer Aided Modelling of Harmonics in the Power System DUJE (*Dicle University Journal of Engineering*) 12:5 (2021) Sayfa 711-718
- [42] Dolara, A. Sonia Leva, S. (2012). Power Quality and Harmonic Analysis of End User Devices, *Energies* 2012, 5, 5453-5466; doi:10.3390/en5125453
- [43] Shaikh, S.M. Bendre, S. Chathe, Y. Deshmukh, K. (2017). Power Quality Comparative Analysis of Luminaries for Optimum Solution for Consumer and Utility, *International Research Journal of Engineering and Technology* (IRJET), Volume: 04 Issue: 05 | May -2017



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Tülay BAYRAKDAR

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/ Elektrik- Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/ Elektrik- Elektronik Mühendisliği	2018
Lise	Tes-İş Adapazarı Anadolu Lisesi	2013

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2020-Halen	EAE Aydınlatma A.Ş.	Teknik Araştırma ve Teknik Satınalma Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce