

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ CAMİLERİN MODERN TEKNOLOJİLERLE ENERJİ ETKİN
AYDINLATILMASI**

DOKTORA TEZİ

Lale ERDEM ATILGAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

EKİM 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ CAMİLERİN MODERN TEKNOLOJİLERLE ENERJİ ETKİN
AYDINLATILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Lale ERDEM ATILGAN
(504062005)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Dilek ENARUN

EKİM 2014

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504062005 numaralı Doktora Öğrencisi **Lale ERDEM ATILGAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Tarihi Camilerin Modern Teknolojilerle Enerji Etkin Aydınlatılması**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Dilek ENARUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Rengin ÜNVER**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Deniz YILDIRIM
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Banu MANAV
T.C. İstanbul Kültür Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Ağustos 2014**
Savunma Tarihi : **16 Ekim 2014**

Okuyucuya,

ÖNSÖZ

Lisans bitirme ödevimden beri tüm akademik çalışmalarında bana her türlü desteği veren değerli danışmanım Doç. Dr. Dilek Enarun'a, bana tüm öğrettikleri, doktora tez çalışmamda katkıları ve bu uzun süreçte benim tüm sıkıntılara gösterdiği sabır ve anlayış için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Doktora çalışmam ve İTÜ'deki tüm öğrenim hayatımda en az danışman hocam kadar emeği olan, benimle gece yarılara kadar laboratuvarında çalışan sevgili abim Yük. Müh. Hikmet Durmaz'a da sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca beni sabırla dinleyip, olumlu eleştirileri ve yönlendirici fikirleriyle besleyen yürütme jürisi hocalarım Prof. Dr. Rengin Ünver ve Y. Doç. Dr. Deniz Yıldırım'a ayrıca çok teşekkür ederim.

Isıl simülasyonlar ve LED ölçümleri konusunda tüm olanaklarını bana açan Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü, Aydınlatma Teknolojileri Enstitüsü öğretim elemanları Prof. Dr. Cornelius Neumann, Dr. Klaus Trampert ve Yük. Müh. Christian Herbold'a çok teşekkür ederim. Almanya'da başladığım çalışmaları Türkiye'de devam ettirmeme yardımcı olan sevgili arkadaşım Yük. Müh. Berker Yurtseven'in destekleri olmadan çalışmamı tamamlamam mümkün olamazdı, kendisine ayrıca teşekkür ederim. Aydınlatma ve İç Tesisat Laboratuvarı'ndaki ölçümlemlerimde bana yardımcı olan tüm öğrenci asistan arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Tüm doktora sürecinde güler yüzleri ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili iş arkadaşlarım Dr. Suna Bolat, Yük. Müh. Sezen Yıldırım Ünnü ve Yük. Müh. Duygu Bayram'a çok teşekkür ederim.

Bu çalışmayı ailemin desteği olmadan tamamlamam mümkün olamazdı. Şemsi Ahmet Paşa Camii'ndeki ölçümlerde benimle beraber yerlerde sürünüp, merdiven tepelerinde düşme tehlikeleri atlatan, yazdıklarımı sabırla dinleyip, çevirilerime yardımcı olan ve tüm bu süreçte bana sabır gösteren sevgili eşim Anıl'a, ve son olarak beni Atatürk ilkeleriyle, modern Türkiye Cumhuriyeti'nin açık görüşlü bir bireyi olarak, eğitimim için her türlü fedakarlığı yaparak yetiştiren annem, babam ve teyzeme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 2014

Lale Erdem Atılğan
(Elektrik Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. TARİHİ CAMİLERDE AYDINLATMA.....	7
2.1 Tarihi Camilerde Aydınlatma	7
2.1.1 Tarihi camilerde doğal aydınlatma	9
2.1.2 Tarihi camilerde yapma aydınlatma	10
2.2 Doktora Tez Çalışması için Seçilen Cami - Şemsi Ahmet Paşa Camii.....	12
2.2.1 Yapma aydınlatma	13
2.2.2 Doğal aydınlatma	15
2.2.3 Cami içi aydınlık düzeyleri	15
2.2.4 Cami yüzeyleri ışık yansıtma katsayıları	17
2.3 Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin Dialux ile Modellenmesi	20
2.3.1 Modelin doğrulanması	21
2.3.1.1 Akkor telli lambalı cami kandili için ışık dağılım eğrisi	21
2.3.1.2 Cami zemininde aydınlık düzeyi değerleri	23
2.3.1.3 Cami duvarlarında aydınlık düzeyi değerleri	24
2.3.2 Cami içi mevcut durum için simülasyon sonuçları	26
2.3.2.1 Minberde aydınlık düzeyi	26
2.3.2.2 Kubbelerde aydınlık düzeyi	26
2.4 Zeytinyağı Kandili ile Çalışmalar	27
3. AYDINLATMA TASARIMI.....	31
3.1 LEDler	32
3.1.1 Beyaz ışık üretimi.....	33
3.1.2 Etkinlik faktörü	35
3.1.3 Ömür	37
3.1.4 Renksel geriverim endeksi (Ra)	40
3.1.5 İlişkili renk sıcaklığı	41
3.1.6 Isıl problemler	41
3.2 LEDli Kandil Tasarımı	43
3.2.1 Fotometrik yaklaşım	43
3.2.2 LED seçimi	44
3.2.3 Soğutucu Tasarımı.....	48
3.2.4 Isıl simülasyonlar	51
3.2.5 Sürücü devre seçimi	59
3.3 Fotometrik Sonuçlar	60

3.4 Dialux Simülasyonları.....	66
3.4.1 İlk işletme durumu için simülasyon sonuçları.....	68
3.4.1.1 Bakım katsayısı hesabı	69
3.4.1.2 Bakım katsayısı hesaba katılarak elde edilen simülasyon sonuçları ..	73
3.5 Kamaşma	75
3.6 LEDler ve Kamaşma	78
3.6.1 Birleşik kamaşma endeksi	78
3.6.2 Pozisyon endeksi.....	79
3.6.3 Görünen alan ve parıltı tahmini	81
4. TARİHİ CAMİ AYDINLATMASININ FOTOVOLTAİK PANELLERLE BESLENMESİ.....	87
4.1 Türkiye’de Fotovoltaik Enerji	89
4.2 Fotovoltaik Sistemler	93
4.2.1 Fotovoltaik hücreler	94
4.2.2 Fotovoltaik modül, dizi ve dizeler	94
4.2.3 PV sistem elektriksel özellikleri	96
4.2.4 PV sistem performansı	98
4.3 Fotovoltaik Sistem Çeşitleri	100
4.3.1 Şebeke bağlantısız fotovoltaik sistemler	100
4.3.2 Şebeke bağlantılı PV sistemler	101
4.3.3 Binaya entegre fotovoltaik sistemler.....	102
4.3.4 Fotovoltaik sistem bileşenleri	102
4.4 Şemsi Ahmet Paşa Camii İçin Fotovoltaik Sistem Seçimi.....	104
4.4.1 Cami iç aydınlatma enerji talebi	104
4.4.2 Üsküdar ilçesi için güneşlenme verileri	105
4.4.3 PVsyst ile gerçekleştirilen hesaplamalar	108
5. EKONOMİK ANALİZ.....	117
5.1 Referans Senaryo	118
5.2 Senaryo 1	118
5.3 Senaryo 2	121
5.4 Senaryo 3	124
6. SONUÇLAR	129
KAYNAKLAR.....	135
EKLER	143
ÖZGEÇMİŞ.....	165

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
AMPM	: Ante Meridiem Post Meridiem
BCD	: Borderline between Comfort and Discomfort
BiPV	: Building Integrated Photovoltaics
CCT	: Correlated Color Temperature
CIE	: Commission Internationale de l'Eclairage
CM-SAF	: The Sattellite Application Facility on Climate Monitoring
CRI	: Color Rendering Index
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel M¼d¼rl¼đ¼
EİE	: Elektrik İşleri Et¼t İdaresi
EPDK	: Enerji Piyasaları Denetleme Kurulu
EUMETSAT	: European Organisation for the Exploitation of Meteorological Sattellites
GEPA	: G¼neř Enerjisi Potansiyel Atlası
HEW	: High Efficiency White
IEA	: International Energy Agency
IES	: Illuminating Engineering Society
JRC	: Joint Research Center
LED	: Light Emitting Diode
LLMF	: Lamp Lumen Maintenance Factor
LMF	: Luminaire Maintenance Factor
LSF	: Lamp Survival Factor
MCPCB	: Metal Core Printed Circuit Board
MF	: Maintenance Factor
MPPT	: Maximum Power Point Tracker
OLED	: Organic Light Emitting Diode
PC	: Phosphor Converted
PLED	: Polymer Light Emitting Diode
PV	: Photovoltaic
PVGIS	: Photovoltaic Geographical Information System
PVPS	: Photovoltaic Power Systems Programme
RGB	: Red-Green-Blue
RSMF	: Room Surfaces Maintenance Factor
SSL	: Solid State Lighting
STK	: Standart Test Koşulları
TCMB	: T¼rkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası
TEDAş	: T¼rkiye Elektrik Dağıtım Anonim şirketi
UGR	: Unified Glare Rating
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel M¼d¼rl¼đ¼

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Cami iç aydınlatmasının kalite ve miktarı.....	7
Çizelge 2.2 : İbadet yerleri için gerekli aydınlatma koşulları.....	7
Çizelge 2.3 : Cami içi parıltı, aydınlık düzeyi ve yansıtma katsayısı değerleri.....	18
Çizelge 2.4 : Cami duvarları için aydınlık düzeyi değerleri.....	26
Çizelge 2.5 : Mevcut durum için kubbelerde ortalama aydınlık düzeyleri.....	27
Çizelge 3.1 : Işık kaynaklarının 2013 yılı etkinlik faktörü değerleri.....	36
Çizelge 3.2 : Işık kaynaklarının 2013 L ₇₀ değerleri.....	39
Çizelge 3.3 : Cree XP-E-HEW LEDlerin özellikleri.....	44
Çizelge 3.4 : Cree XP-E-HEW LEDler için uzun dönem test sonuçları.....	45
Çizelge 3.5 : Cree XP-E-HEW gerilimin sıcaklıkla değişimi.....	46
Çizelge 3.6 : Cree XP-E-HEW ışık akısının sıcaklıkla değişimi.....	46
Çizelge 3.7 : Cree XP-E-HEW etkinlik faktörünün sıcaklıkla değişimi.....	46
Çizelge 3.8 : Cree XP-E-HEW ışıksal verimin sıcaklıkla değişimi.....	46
Çizelge 3.9 : Isıl modelde kullanılan malzeme özellikleri.....	53
Çizelge 3.10 : Cami kubbelerinde ortalama aydınlık düzeyi değerleri.....	69
Çizelge 3.11 : CIE 97:2005'e göre armatür sınıflandırmaları.....	71
Çizelge 3.12 : CIE 97:2005'e göre alan sınıflandırmaları.....	71
Çizelge 3.13 : Temizleme sıklığına göre armatür bakım katsayıları.....	71
Çizelge 3.14 : Cami içi ortalama aydınlık düzeyleri.....	73
Çizelge 3.15 : Cami içi birleşik kamaşma endeksi değerleri.....	73
Çizelge 3.16 : Cami içi mevcut durum maksimum UGR değerleri.....	77
Çizelge 3.17 : Yeni cami kandiliyle cami içi maksimum UGR değerleri.....	78
Çizelge 3.18 : LEDli retrofit için görüş açısına göre maksimum ve ortalama parıltı değerleri.....	83
Çizelge 3.19 : Farklı görünen alanlar için UGR ve UGR _{küçük} değerleri.....	85
Çizelge 4.1 : Türkiye aylık toplam güneş enerjisi ve güneşlenme süreleri.....	90
Çizelge 4.2 : Fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinde yerel ürünlerin kullanılması durumundaki ek teşvikler.....	93
Çizelge 4.3 : Güneş hücresi teknolojilerinin karşılaştırılması.....	94
Çizelge 4.4 : Şemsi Ahmet Paşa Camii LEDli enerji talebi.....	104
Çizelge 4.5 : Şemsi Ahmet Paşa Camii için PVGIS verileri.....	107
Çizelge 4.6 : PVsyst Meteonorm Üsküdar güneşlenme verileri.....	109
Çizelge 4.7 : PV sistem özellikleri.....	111
Çizelge 4.8 : PVsyst simülasyon sonuçları – güneş ışınmına dair değerler.....	112
Çizelge 4.9 : Seçilen fotovoltaik sistemlerle enerji üretimi.....	113
Çizelge 5.1 : LEDli aydınlatma sistemi prototip maliyet hesabı.....	119
Çizelge 5.2 : LEDli aydınlatma sistemi seri üretim yaklaşık maliyet hesabı.....	119
Çizelge 5.3 : 1. senaryo – kullanılan büyüklükler.....	119
Çizelge 5.4 : 1. senaryo – geri ödeme hesabı.....	120
Çizelge 5.5 : Yıllık PV sistem için maliyet çizelgesi.....	122
Çizelge 5.6 : PV sistem yıllık üretim – masraf çizelgesi.....	122

Çizelge 5.7 : Senaryo 2 – kullanılan büyüklükler.....	123
Çizelge 5.8 : Senaryo 2 - yabancı sistem kullanımında geri ödeme süresi hesabı. .	124
Çizelge 5.9 : Senaryo 2 - yerli sistem kullanımında geri ödeme süresi hesabı.	124
Çizelge 5.10 : PV sistem için maliyet çizelgesi.....	125
Çizelge 5.11 : 3. senaryo için yıllık üretim kazançları.....	125
Çizelge 5.12 : Senaryo 3 – kullanılan büyüklükler.....	126
Çizelge 5.13 : Senaryo 3 - yabancı sistem kullanımında geri ödeme süresi hesabı.	126
Çizelge 5.14 : Senaryo 3 - yerli sistem kullanımında geri ödeme süresi hesabı.	127
Çizelge 5.15 : Tüm senaryoların karşılaştırılması.	127
Çizelge C.1: Sürücü katalog değerleri.	150
Çizelge C.2 : S1 sürücüsü için karakteristik değerler.	151
Çizelge C.3 : S2 sürücüsü için karakteristik değerler.	152
Çizelge C.4: S3 sürücüsü için karakteristik değerler.	153

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Süleymaniye Camii iç aydınlatması	8
Şekil 2.2 : Sultan Ahmet Camii'ndeki İznik çinileri.	9
Şekil 2.3 : Akkor telli lambalı yağ kandilleri.	10
Şekil 2.4 : Şemsi Ahmet Paşa Camii ve Medresesi.	12
Şekil 2.5 : Cami ana bölümü üzerindeki kandiller.	13
Şekil 2.6 : Türbe üzerindeki kandiller.	14
Şekil 2.7 : Örnek pencere: (a) Birinci seviye ahşap çerçeveli. (b) Vitraylı.	15
Şekil 2.8 : Cami ana bölümü planı.	16
Şekil 2.9 : Cami ana bölümü zemininde ölçülen aydınlık düzeyi dağılımı.	16
Şekil 2.10 : Cami kubbesi ve yarı kubbelerdeki desenler.	19
Şekil 2.11 : Şemsi Ahmet Paşa Camii Dialux modeli alttan görünüm.	20
Şekil 2.12 : Akkor telli lambalı kandil 220 V ışık dağılım eğrisi	23
Şekil 2.13 : Akkor telli lambalı kandil 230 V ışık dağılım eğrisi	23
Şekil 2.14 : Dialux ile cami zemininde eş aydınlık düzeyi eğrileri.	24
Şekil 2.15 : Mihrap duvarı üzerinde ölçüm yüzeyi.	25
Şekil 2.16 : Ara duvar üzerinde ölçüm yüzeyleri.	25
Şekil 2.17 : Zeytinyağı kandilinin boyutları.	28
Şekil 2.18 : Yağ kandili: (a) Üstten görünüm. (b) Yandan görünüm.	28
Şekil 2.19 : Yağ kandili ışık dağılım eğrisi	29
Şekil 3.1 : LED'de ışık üretimi	32
Şekil 3.2 : Cree yüksek güçlü LED paketi.	33
Şekil 3.3 : Fosfor kaplı LED paketi.	34
Şekil 3.4 : Uzaktan fosfor teknolojisi.	34
Şekil 3.5 : LEDlerle beyaz ışık üretimi	34
Şekil 3.6 : Halojen, floresan ve LED kaynakların spektral güç dağılım eğrileri	35
Şekil 3.7 : A19 akkor telli lamba ve A19 LEDli retrofit.	36
Şekil 3.8 : PAR 38 halojen lamba ve PAR 38 retrofit.	36
Şekil 3.9 : Işık kaynakları için yaklaşık etkinlik faktörü değerleri	37
Şekil 3.10 : Beyaz LEDlerin farklı çalışma sıcaklıklarında kullanışlı ömür süreleri.	42
Şekil 3.11 : Yüksek güçlü LED sistemi modeli	42
Şekil 3.12 : Cree XP-E-HEW Işık akısı-sıcaklık ilişkisi.	47
Şekil 3.13 : Cree XP-E-HEW etkinlik faktörü - sıcaklık ilişkisi.	47
Şekil 3.14 : Çeşitli soğutucular ve LEDlerle üretilen prototiplerden örnekler.	49
Şekil 3.15 : Çeşitli soğutucular ve LEDlerle üretilen prototiplerden örnekler.	49
Şekil 3.16 : Soğutucu üstten görünüm.	50
Şekil 3.17 : Soğutucu yandan görünüm.	50
Şekil 3.18 : Soğutucu dimetrik görünüm.	50
Şekil 3.19 : Tasarlanan LEDli kandil parçalı görünüm.	51
Şekil 3.20 : Cree XP-E-HEW LEDler için bağıl ışık akısının jonksiyon sıcaklığıyla değişimi.	52
Şekil 3.21 : Yeni kandil sıcaklık dağılımı.	54

Şekil 3.22 : Yeni kesik kandil sıcaklık dağılımı.	55
Şekil 3.23 : Yeni kandil hava akışı.	56
Şekil 3.24 : Yeni kesik kandil hava akışı.	56
Şekil 3.25 : Yeni kesik kandil camsız prototip sıcaklık dağılımı.	57
Şekil 3.26 : Prototip: (a) Yandan görünüm. (b) Üstten görünüm.	58
Şekil 3.27 : Yeni kesik cami kandili.	58
Şekil 3.28 : Aynalı gonyofotometre	61
Şekil 3.29 : Aynalı gonyofotometre çalışma prensibi.....	61
Şekil 3.30 : C0°-180° düzeneği karşıdan görünüm.....	62
Şekil 3.31 : C45°-225° ve C135°-315° düzeneği karşıdan görünüm.....	62
Şekil 3.32 : C90°-270° düzeneği karşıdan görünüm.....	62
Şekil 3.33 : Son prototip C0°-180° eğrisi.....	63
Şekil 3.34 : Son prototip C45°-225° ve C135°-315° eğrisi.....	63
Şekil 3.35 : Son prototip C90°-270° eğrisi.....	64
Şekil 3.36 : Son prototip C eğrileri.	64
Şekil 3.37 : Yeni cami kandili C0°-180° eğrisi	65
Şekil 3.38 : Yeni cami kandili C45°-225° ve C135°-315° eğrisi	65
Şekil 3.39 : Yeni cami kandili C90°-270° eğrisi	66
Şekil 3.40 : Yeni cami kandili C eğrileri.....	66
Şekil 3.41 : İlk işletme durumu için Cami zemininde aydınlık düzeyi dağılımı 68	
Şekil 3.42 : $MF = 0,82$ için cami zemininde eş aydınlık düzeyi eğrileri.	74
Şekil 3.43 : $MF = 0,75$ için cami zemininde eş aydınlık düzeyi eğrileri.	74
Şekil 3.44 : Çeşitli LED retrofit örnekleri.	81
Şekil 3.45 : LED retrofitlerinden örnek parıltı dağılımları.	82
Şekil 3.46 : Hesaplamalarda kullanılan Verbatim retrofit önden ve yandan görünüm.	82
Şekil 3.47 : Retrofitin karşıdan, 45 dereceden ve yandan görünümde parıltı dağılımları.....	83
Şekil 3.48 : 200 W'lık akkor telli lambanın karşıdan, 45 dereceden ve yandan görünümde parıltı dağılımları 84	
Şekil 3.49 : Hesaplamada kullanılan alanlar.	85
Şekil 4.1 : Türkiye toplam güneş ışıınımı 91	
Şekil 4.2 : Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli..... 91	
Şekil 4.3 : Avrupa ülkelerinin güneş enerjisi potansiyeli..... 92	
Şekil 4.4 : Fotovoltaik hücre, modül, dizi ve dize 95	
Şekil 4.5 : İdealde ve uygulamada PV hücresi için eşdeğer devre 96	
Şekil 4.6 : PV hücre için tipik I-V eğrisi. 97	
Şekil 4.7 : PV hücre için I-V eğrisi ve P-V eğrisi..... 98	
Şekil 4.8 : Şebeke bağlantısız tipik bir fotovoltaik sistem 101	
Şekil 4.9 : Şebeke bağlantılı tipik bir fotovoltaik sistem 101	
Şekil 4.10 : Şebeke bağlantılı bir PV sisteminin bileşenleri 102	
Şekil 4.11 : Üsküdar kWh/m ² -gün cinsinden global ışıınım değerleri 105	
Şekil 4.12 : Üsküdar saat cinsinden güneşlenme süreleri 106	
Şekil 4.13 : Üsküdar PV tipi – alan – üretilebilecek enerji 106	
Şekil 4.14 : Fotovoltaik yerleşimine uygun alanlar. 110	
Şekil 4.15 : Kurulu kWp başına yıllık üretimin aylara dağılımı – 1. senaryo. 114	
Şekil 4.16 : Kurulu kWp başına yıllık üretimin aylara dağılımı – 2. senaryo. 114	
Şekil 4.17 : PV Sistem kayıp tablosu – 1. senaryo. 115	
Şekil 4.18 : PV Sistem kayıp tablosu – 2. senaryo. 115	
Şekil B.1 : Şemsi Ahmet Paşa Camii zemin planı. 146	

Şekil B.2 : Şemsi Ahmet Paşa Camii A-A kesiti..	146
Şekil B.3 : Şemsi Ahmet Paşa Camii B-B kesiti.....	147
Şekil B.4 : Şemsi Ahmet Paşa Camii C-C kesiti.....	148
Şekil B.5 : Şemsi Ahmet Paşa Camii D-D kesiti	149
Şekil C.1 : S1 sürücüsü.....	150
Şekil C.2 : S2 sürücüsü.....	150
Şekil C.3 : S3 sürücüsü.....	150
Şekil C.4 : LED akım-zaman eğrisi.	154
Şekil C.5 : LED gerilim-zaman eğrisi.	154
Şekil C.6 : LED güç-zaman eğrisi.....	155
Şekil C.7 : Şebekeden çekilen güç-zaman eğrisi.	155
Şekil C.8 : Sürücü kaybı-zaman eğrisi.	156
Şekil C.9 : Şebekeden çekilen akım-zaman eğrisi.	156
Şekil C.10 : Güç faktörü-zaman eğrisi.	157
Şekil D.1 : LED modül son prototip: (a) İTÜ ölçümleri. (b) Gonyofotometre ölçümleri	158
Şekil D.2 : LEDli cami kandili: (a) İTÜ ölçümleri. (b) Gonyofotometre ölçümleri	159
Şekil E.1 : 1. senaryo için seçilen PV panellerin karakteristik özellikleri.	160
Şekil E.2 : 1. senaryo için seçilen eviricinin karakteristik özellikleri.	161
Şekil E.3 : 2. senaryo için seçilen PV panellerin karakteristik özellikleri.	162
Şekil E.4 : 2. senaryo için seçilen eviricinin karakteristik özellikleri.	163

TARİHİ CAMİLERİN MODERN TEKNOLOJİLERLE ENERJİ ETKİN AYDINLATILMASI

ÖZET

Bu doktora çalışmasında, aydınlatma alanındaki en güncel teknolojilerden biri olan LEDler kullanılarak, tarihi camilerin iç aydınlatmasında gerekli aydınlık düzeyleri ve konfor koşullarından feragat etmeden enerji tasarrufu sağlayacak ve tarihi yapıya sadık kalacak bir aydınlatma elemanının tasarlanması hedeflenmiştir. Buna ek olarak tarihi cami iç aydınlatmasının enerji tüketiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisiyle karşılanabilmesi için gerekli fotovoltaiik sistemin seçilmesi ve bu sayede kendi enerjisini üretebilen ve aydınlatma konusunda yeşil-enerji özelliklerine sahip bir tarihi cami kavramı oluşturulması hedeflenmiştir. Doktora tez çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için İstanbul tarihi camilerinden Mimar Sinan'ın Şemsi Ahmet Paşa Camii seçilmiş ve Cami içinde çeşitli ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Cami daha sonra Dialux aydınlatma simülasyon programıyla modellenerek iç aydınlatma koşulları bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Tarihi cami aydınlatması için gerekli koşullar göz önünde bulundurularak doktora tez çalışmasının odağını oluşturan LEDli cami kandilinin tasarımı gerçekleştirilmiş, ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Dialux modeline yerleştirilerek Cami içinde elde edilen fotometrik sonuçlar incelenmiştir. Aydınlatma tasarımının tamamlanmasıyla, talep edilen enerji miktarı elde edilmiş ve bu güç miktarına göre de Cami avlusuna veya Cami etrafındaki boş alanlara yerleştirilebilecek bir fotovoltaiik sistem seçimi yapılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin fotometrik koşulları ve buna bağlı olarak görsel konfor koşulları iyileştirilirken, iç aydınlatma yükü azaltılmış ve bu yükü karşılayacak fotovoltaiik sistemin tasarımı ile Cami'nin iç aydınlatması için gerekli enerjiyi kendisinin üretebileceği bir model sunulmuştur.

Tezin giriş bölümünde çalışmanın yapılma sebeplerine dair gerekli bilgiler verildikten sonra ikinci bölümde tarihi camilerde aydınlatma konusu ele alınmış, doktora tez çalışması için seçilen tarihi Şemsi Ahmet Paşa Camii'nde yapılan fotometrik incelemelere yer verilmiştir. Cami içindeki yapma ve doğal aydınlatma koşulları incelenmiş, aydınlık düzeyi ve iç yüzeylerin yansıtma katsayısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mimari çizimlerden faydalanılarak, Cami'nin 3 boyutlu modeli Dialux aydınlatma simülasyon programı ile hazırlanmıştır. Cami içindeki mevcut aydınlatma sisteminin ışık dağılım eğrisi çıkartılarak Dialux programına tanıtılmış ve hazırlanan modelin doğrulanması için Cami içindeki mevcut koşullar simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, gerçek sonuçlarla örtüşmüştür. Son olarak Cami içinde kullanılan kandilin tarihte kullanıldığı şeklini inceleyebilmek için kandil zeytinyağı ile doldurulup bir fitil yardımıyla yakılmış ve ışık dağılım eğrisi çıkarılmıştır. Çalışmanın bir sonraki adımı olan aydınlatma tasarımında bu ışık dağılım eğrisinin formundan faydalanılmıştır.

Üçüncü bölümde çalışmanın aydınlatma tasarımı kısmına yoğunlaşmıştır. Bu amaçla öncelikle kullanılacak yeni teknoloji olan LEDlerle ilgili araştırmalar yapılmıştır. Bundan sonra LEDli kandil tasarımında izlenen adımlar sırasıyla

açıklanmıştır. Kullanılan fotometrik yaklaşım, cami içindeki gerekli aydınlık düzeylerini ve görsel konfor koşullarını sağlayabilmek için hem mevcut sistemin olumlu özelliklerini, hem de tarihi kandilin yapısal özelliklerini bir arada barındıran yeni bir ışık dağılımı elde edilmesidir. Buna göre tasarlanan kandilin tüm uzaya ışık göndermesi hedeflenmiştir. Hedeflenen tasarım için uygun LEDler seçilmiş, çeşitli prototipler hazırlanıp, bu prototiplerin ışık dağılım eğrileri çıkarılmıştır. Bu eğriler yardımıyla Dialux simülasyonları gerçekleştirilerek gerekli koşulları sağlayabilmek için uygun olan LED sayı ve konumu belirlenmiştir. Bundan sonraki adım hedeflenen ışık dağılımı için uygun soğutucu sistemin tasarlanması olmuştur. Solidworks paket programı ile tasarlanan soğutucunun LEDler ve içine yerleştirileceği kandil ile birlikte ısı simülasyonu gerçekleştirilmiş ve LED paket sıcaklığı uygun bulunarak yapılan tasarımın üretimine geçilmesine karar verilmiştir. Üretilen prototip soğutucu, ısı testlere tabi tutularak simülasyon sonuçları doğrulanmış ve gerçek koşullardaki jonksiyon sıcaklığı elde edilmiştir. Isıl tasarım tamamlandıktan sonra sürücü devre seçimi gerçekleştirilmiştir. Tüm sistem elemanlarının hazırlanmasından sonra, tasarlanan aydınlatma sisteminin ışık dağılım eğrileri çıkarılmıştır. Eğriler Dialux modeline tanıtılarak ilk işletme durumu, 6000 saat ve 25000 saatlik süreler sonucunda Cami içinde elde edilecek fotometrik koşullar incelenmiştir. Sonuçlar standartlarla belirlenen cami içi aydınlık düzeylerine erişildiğini ve mevcut akkor telli lambalı sisteme göre çok daha kaliteli bir aydınlatma elde edildiğini göstermektedir. Bunlara ek olarak, fotometrik sonuçların görsel konfor açısından değerlendirilmesi için tasarlanan sistemin kamaşma açısından incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalar LEDler ve kamaşma konusunun henüz yeterince araştırılmamış bir konu olduğunu göstermektedirler. Bu sebeple mevcut hesap ve inceleme yöntemlerinin doğurduğu sonuçlar tartışmalıdır. Bununla beraber, standartlara uygunluğun onaylanması için hesaplar yapılmış ve en azından mevcut hesap yöntemlerine göre görsel konfor koşullarının sağlandığı tespit edilmiştir.

Dördüncü bölümde, bir önceki bölümde tasarlanan aydınlatma sisteminin enerji tüketimini karşılamak için gerekli olan fotovoltaiik sistemin seçimi ve hesapları üzerine yoğunlaşmıştır. Türkiye’de fotovoltaiik enerjiyle ilgili bir literatür taramasından sonra fotovoltaiik sistemler ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve Şemsi Ahmet Paşa Camii için fotovoltaiik sistem seçimi açıklanmıştır. Bunun için Cami iç aydınlatma enerji talebi hesaplanmış, Cami’nin konumlanmış olduğu Üsküdar ilçesi için güneşlenme verileri üzerinde çalışılmış ve sonuç olarak PVsyst paket programının deneme sürümü kullanılarak iki farklı fotovoltaiik sistem seçimi yapılmıştır. Bu sistemlerden daha küçük olan ilki Cami’nin sadece iç aydınlatma ihtiyacına denk bir üretim sağlarken, ikinci büyük sistemle iç aydınlatma ihtiyacının yanı sıra Cami’nin diğer elektrik tüketimlerine de denk düşecek bir üretim elde edilmesi hedeflenmiştir.

Beşinci bölümde, önerilen modern sistemlerin ekonomik incelemesi gerçekleştirilmiş, elde edilen enerji tasarrufu ve sistemlerin ilk yatırım masraflarını geri ödeme süreleri 10 yıllık bir dönem için incelenmiştir. Buna göre tasarlanan LEDli sistem, armatür başına 10,5 W’lık enerji tüketimiyle, mevcut 40 W’lık sisteme göre % 74’lük enerji tasarrufu sağlamaktadır. Buna ek olarak Cami’ye kurulması hedeflenen fotovoltaiik sistem devreye girdiğinde, Cami’nin mevcut durumdaki yıllık 5840 kWh’lık tüketimine eşit miktarda bir üretim elde edilmekte ve Cami iç aydınlatma elektrik yükünü kendi ürettiği enerjiyle karşılayabilir hale gelmektedir. Önerilen ikinci fotovoltaiik sistemle ise daha yüksek miktarda enerji üretilerek

Cami'nin iç aydınlatma dışındaki enerji ihtiyaçlarının önemli bir kısmını da karşılamak mümkün olmaktadır. LEDli sistem enerji tasarrufu sayesinde kendi masrafını 1,5 yıl içerisinde çıkarmış, LEDli sisteme fotovoltaik sistemin de eklenmesiyle farklı senaryolar için geri ödeme sürelerinin 7,25 yıl ile 8,50 yıl arasında değiştikleri görülmüştür. 10 yıllık süre içinde önerilen tüm sistemler ilk yatırım masraflarını çıkarmış ve ek kazanımların elde edilmesini sağlamışlardır.

Sonuç olarak bu doktora tez çalışmasında tasarlanan, seçilen ve önerilen modern teknolojilerle Cami aydınlatma ve enerji tüketimine dair sistemlerin ömür süreleri ve sürdürülebilirlikleri yükseltilmiş, Cami içi fotometrik değerler iyileştirilmiş, önemli miktarlarda enerji tasarrufu ve buna bağlı olarak ekonomik kazanımlar elde edilmiş ve tarihi yapılarda modern teknolojilerin kullanımı teşvik edilmiştir. Önerilen enerji etkin sistemler ile oluşturulan, modern teknolojileri ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan “yeşil” kavramlı cami modelinin sadece tarihi camilerde değil, tüm tarihi ibadethaneler ve ek olarak yeni inşa edilen ibadethanelerde de kullanılmasıyla Türkiye’de ciddi anlamda enerji tasarrufları elde edilecektir. Bu şekilde hem ülke ekonomisine hem de Türkiye’nin takip ettiği uluslararası enerji politikalarına katkıda bulunulmuş olacaktır.

ENERGY EFFICIENT ILLUMINATION OF HISTORICAL MOSQUES USING MODERN TECHNOLOGIES

SUMMARY

This study aims at creating a “Green” Historical Mosque Concept, capable of producing its own electricity while using energy-efficient lighting technologies for its interior illumination. In order to do this, the cutting edge technology in the field of lighting, LEDs are used to design a luminaire which maintains the necessary illuminance levels and comfort conditions in the interior lighting of historical mosques while achieving substantial energy savings and preserving the historical texture of the mosque. In addition to this, the energy consumption of the mosque is met by solar power, a renewable energy source, through the correct choice of solar panels and necessary equipment for the system.

For the application of the proposed system, Şemsi Ahmet Paşa Mosque, one of Istanbul’s historical mosques designed by the famous Ottoman architect Mimar Sinan was chosen, and measurements were carried out in the Mosque. Consequently, the Mosque was 3D modeled using the lighting calculation program Dialux. The LED mosque lantern, which is the main focus of this study, was designed taking into consideration the necessary conditions for the lighting of historical mosques. The photometric measurements of the lantern were carried out and the luminous intensity distributions were turned into digital files, which can be introduced to Dialux. Using these measurement results, Dialux simulations of the mosque were carried out and the photometric results in the Mosque interior were obtained and analyzed.

With the finalization of the lighting design, the power consumption was determined and the photovoltaic system that meets this power consumption was chosen. Thus, a model in which the photometric conditions along with the comfort conditions inside Şemsi Ahmet Paşa Mosque was ameliorated, the interior lighting consumption was reduced and a system enabling the Mosque to produce its own interior lighting energy was proposed.

With the completion of the lighting design, the energy demand was determined. According to the energy demand, the design of a photovoltaic system was performed. The photovoltaic system was planned to be installed in the yard of the mosque or the unoccupied spaces around the mosque. Thus the study does not only ameliorate the photometric and comfort conditions of the mosque but at the same time provides a new model in which the energy demand of the interior lighting of the mosque is produced by the mosque itself through the installed photovoltaic system.

The introduction chapter provides the motivation of the study which is followed by Chapter 2, in which the lighting of historical mosques is handled. The photometric measurements made in Şemsi Ahmet Pasha Mosque are discussed. The artificial and natural illumination conditions inside the mosque are analyzed; illuminance levels and coefficients of reflection which were measured and calculated according to the luminance measurements made on the Mosque interior surfaces are given. The

architectural drawings of the Mosque were obtained from the Turkish Directorate General of Foundations. Using these drawings, a 3D model of the Mosque was drawn with the lighting simulation program Dialux. The model was then equipped with the results of the coefficient of reflection measurement in order to simulate the real conditions within the Mosque. To verify the prepared model, the polar photometric curves of the current lighting system within the Mosque were prepared. In order to do this, a special measurement setup was prepared in the Lighting and Installation Laboratory of Istanbul Technical University, in which the luminous intensity distribution of the current mosque lantern with incandescent lamp was deducted. The distribution was then introduced to Dialux and the current situation in the Mosque was simulated. The results of the simulation are very similar to the real life measurements, proving that the model was intrinsically prepared. In addition to the current lighting system in the Mosque, the historical lighting system of the Mosque is also an important parameter in designing a novel lighting system while trying to preserve the historical characteristics. Therefore, the historical system was revived through filling the lantern with olive oil and lighting it up with a wick. The luminous intensity measurements of the historical lantern were also performed and the luminous intensity distribution was prepared. The input obtained from the form of the historical luminous intensity distribution was also taken into consideration in the design of the novel system.

Chapter 3 focuses on the lighting design phase of the study. In order to master the topic of LEDs which were used in the design of the new lantern, a comprehensive research on the regarding topic was carried out. After sharing a summary of the research, the steps taken in designing the new lantern are described. The photometric approach in designing the new system is to incorporate all positive characteristics of the actual and the historical systems, while containing the original texture of the lantern in itself. The historical system sends most of the light to the dome of the mosque while the current system sends most of the light to the mosque floor. For a more uniform illuminance level in the mosque, it is necessary to illuminate all the surfaces of the mosque. Therefore, the new design aims at sending the light to all directions.

With the determination of the photometric approach, the LEDs which will be used in the system were chosen. Measurements were carried out with the chosen LEDs at the Energy Institute of Istanbul Technical University, Energy Efficiency and Illumination Technique Laboratory using an Ulbricht sphere to determine the effect of junction temperature on LED voltage, luminous flux, efficacy and luminous efficiency. With the results of the measurements, equations on the relationship between junction temperature and luminous flux and luminous efficacy were deducted. Consequently, the design process of the heatsink for the new lantern was started. As LEDs require thermal management systems for their efficient functioning, numerous heat sinks that are readily available in the market were obtained. Using these heat sinks, different designs and configurations were obtained with the LEDs, resulting in different prototype systems. All prototypes were then measured to prepare their luminous intensity distributions. The results were introduced to Dialux and simulations were performed to see which configurations create the most suitable lighting conditions within the mosque. Through comparing the results of the simulations, the best number and configuration of LEDs, along with the general shape of the lighting system were chosen.

As the heat sinks used for the prototypes are not specific to this application, their utilization for a novel system has proved to be inefficient. Therefore, using Solidworks, a new heat sink was designed to obtain the proposed luminous distribution. Thermal simulations of the heat sink including the LEDs and the glass lantern in which the heat sink will be positioned were carried out. The results of the simulations show that the solder point and package temperatures obtained with the designed heat sink are convenient for the operation of LEDs.

While the heat sink provided suitable conditions for the operation of the LEDs, a lower junction temperature would provide longer lifetimes along with a higher maintenance of luminous output. Therefore, ways to improve the junction temperature were elaborated. The final decision was to make an opening on the bottom part of the glass lantern to enable more efficient air circulation therefore a more efficient cooling process. Simulations were repeated to see the effect of the opening on the base of the lantern and the results were satisfactory. Thus, a prototype of the designed heatsink was manufactured. The LEDs were positioned on the heatsink and the necessary electrical connections were established. The original glass lantern was cut from the bottom as well to obtain the new glass lantern with extra air circulation. The prototype lighting system was then thermally tested to confirm the results of the simulation. The experimental results validated the Solidworks model with very similar values to the simulation. As a result of this study, the junction temperatures of the LEDs in the new lighting system were obtained. The temperatures were then used to calculate the actual luminous flux of the LEDs, using the formulas that were deducted from the Ulbricht sphere measurements.

Following the thermal design of the system, the driver for the LEDs providing 350 mA constant current was chosen through experimentally examining several drivers in the market. Finally, all the system elements were made ready and the new lighting system was completed. Then the luminous intensity distributions of the new lighting system were measured and turned into digital files to introduce to Dialux. Dialux simulations were carried out for the initial operation, as well as the results of operation after periods of 6000 hours and 25000 hours using the corresponding maintenance factor values. The obtained photometric values show that with the designed LED mosque lantern, it is possible to meet the illuminance levels specified for the interior lighting of mosques. The new lighting design proves to be highly superior compared to the current lighting system with incandescent lamps inside the Mosque. In addition to the illuminance levels, unified glare rating calculations were also performed to analyze the visual comfort conditions inside the mosque. The research on the field of discomfort glare of LED lighting systems proves to be insufficient, with very little research on the area. Therefore, whether the results obtained from current calculations and analysis methods created for traditional lighting systems apply to LEDs or not is a question mark. In order to emphasize the inadequacy of the current analysis methods, luminance measurements were made with several LED lighting systems at the Lighting Technology Institute of the Karlsruhe Institute of Technology. Comparisons of the LED systems to the traditional systems, which form the bases of the current calculation methods, were made. Calculations were carried out using the results of the luminance measurements of the LED systems and the importance of further research on the field of discomfort glare from LEDs was strongly emphasized. Having mentioned the problems of unified glare rating and LEDs, the calculations using the UGR were nevertheless made, as this is the only evaluation system in the literature for the time being. The

results show that the designed system satisfies the necessary visual comfort conditions inside the Mosque.

Chapter 4 focuses on the selection and the calculations of the photovoltaic system which will generate the necessary energy to meet the energy demand of the designed lighting system. A literature survey on the status of solar energy in Turkey is provided, followed by information on photovoltaic systems. Consequently the process of choosing the necessary photovoltaic system for Şemsi Ahmet Pasha Mosque was explained. The process includes the calculation of the mosque's interior lighting energy demand, analysis of the solar data for Üsküdar District where the mosque is located and the simulation of the chosen system using the trial version of PVsyst photovoltaic simulation program. Two different grid-connected photovoltaic systems are proposed in the study. The first system only meets the interior lighting demand of the Mosque and the second system is capable of providing more energy to account for other energy demands of the Mosque.

The fifth and the final chapter provides an economic analysis of the proposed modern systems. Energy savings as well as payback periods for the systems have been analyzed for a duration of 10 years. The results show that the designed LED system provides an energy saving of 74 % with its 10.5 W energy consumption, compared to the 40 W current lighting system. In addition to this, through the first proposed photovoltaic system, it is possible to reset the current 5840 kWh energy consumption of the Mosque and meet the interior lighting energy demand with solely the energy produced by the Mosque itself. The second proposed system can produce more energy and meet other energy demands of the mosque.

The calculations were carried out for four separate scenarios differentiating from each other by means of energy production and the amount of government incentives. The results of the calculations demonstrate that the energy savings obtained by the LED system translate into economic savings and ensure a payback period of 1.5 years. With the addition of the photovoltaic system to the LED lighting system, the payback period remains between 7.25 years and 8.50 years for the four different scenarios. To sum up, all the proposed systems can repay their investment costs and even provide extra savings in 10 years.

To conclude, using the modern technologies designed, chosen and proposed in this study, the lifetime and the sustainability of the systems used in the interior lighting of mosques are increased, the photometric conditions are ameliorated, important amounts of energy and economic savings are obtained and at the same time the utilization of modern technologies in historical buildings are encouraged. With the implementation of the proposed energy efficient systems not only in historical mosques but in all historical places of worship as well as newly constructed ones, the energy consumption of Turkey will be substantially reduced. Thus, if the proposed “Green Historical Mosque Concept” can penetrate to all places of worship, important contributions will be made to Turkish economy and to national and international energy policies.

1. GİRİŞ

Camiler ibadet için kullanılan dini binalardır. Tarihin akışında dini yapılar, inananlarla inanç sistemleri arasındaki bağı temsil etmişlerdir. Bu sebeple dini yapılar çok önemli mimari özellikler taşırlar ve büyük özenle inşa edilmişlerdir. Türkiye Cumhuriyeti, topraklarında süregelen Türk-İslam uygarlıklarından önemli kültürel miraslar edinmiştir ve bu mirasın mihenk taşlarından biri de tarihi camilerdir. Son yıllarda Türkiye'deki tarihi camilerin dış aydınlatmaları özel bir hassasiyetle tasarlanırken, camilerin iç aydınlatmasında önemli bir gelişme olmadığı görülmektedir. Bu durum cami kullanıcılarının aydınlatma ihtiyaçlarının karşılanması konusunda bir engel teşkil ettiği gibi, turistik ziyaretler sırasında da hem görsel, hem estetik anlamda problemler yaratmaktadır. Buna ek olarak cami iç aydınlatmasında yaygın olarak tercih edilen eski teknoloji aydınlatma elemanları yüksek enerji tüketimleriyle, enerji tasarrufu konusunda olumsuz sonuçlara sebep olan ışık kaynaklarıdır. Bu doktora çalışmasında, aydınlatma alanındaki en modern teknoloji olan Işık Yayan Diyot – Light Emitting Diode (LED) kullanılarak, tarihi camilerin iç aydınlatmasında gerekli aydınlık düzeyleri ve konfor koşullarından feragat etmeden enerji tasarrufu sağlayacak ve tarihi yapıya sadık kalacak bir aydınlatma elemanının tasarlanması hedeflenmiştir. Buna ek olarak tarihi cami iç aydınlatmasının enerji tüketiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisiyle karşılanabilmesi için gerekli fotovoltaiik tasarımın yapılması ve bu sayede kendi enerjisini üretebilen ve aydınlatma konusunda yeşil-enerji özelliklerine sahip bir tarihi cami kavramı oluşturulması hedeflenmiştir.

Diyanet İşleri Başkanlığı'nın 31 Aralık 2012 rakamlarına göre Türkiye'de 84684 adet cami bulunmaktadır [1]. Diyanet İşleri Başkanlığı'nın 2004 yılında yaptığı başka bir araştırma sonucunda bir caminin aylık elektrik masrafının ortalama 43 TL civarında olduğu görülmüştür [2]. 2004 senesi Boğaziçi Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi İbadethaneler elektrik birim fiyatına göre 43 TL'lik fatura aylık yaklaşık 390 kWh'lik enerji tüketimine denk düşmektedir [3]. Bu verilerden yola çıkarak, 84684 caminin aylık ortalama elektrik tüketimi yaklaşık $390 \text{ kWh} \times 84684 \simeq 33 \text{ GWh}$

olarak hesaplanmaktadır. Bu miktarda bir elektrik tüketimi, Kızılırmak üzerine kurulu olan Hirfanlı Hidroelektrik Santrali'nin aylık enerji üretimine eşit büyüklüktedir [4]. Ünver ve Enarun tarafından yapılan bir çalışmada, İstanbul tarihi camilerinden 1617 senesinde inşa edilmiş olan Sultan Ahmet Camii, 1580 senesinde inşa edilmiş olan Kılıç Ali Paşa Camii ve 1769 senesinde inşa edilmiş olan Zeynep Sultan Camii incelenmiştir [5]. Üç camide de 60 W, 2700 K akkor telli lambalar tarihi zeytinyağı kandillerine yerleştirilip düzgün bir şekilde cami içine yayılmıştır. Çalışma yaz ve kış mevsimlerindeki doğal ışık oranlarının çok büyük farklılıklar gösterdiğini ve yapay aydınlatmanın iç aydınlatma için önerilen ölçütlere çoğu zaman uygun olmadığını göstermektedir. Fakat bu çalışmadan çıkan en önemli sonuç enerji tüketimi üzerinedir. Sultan Ahmet Camii'nde 1300 adet 60 W akkor telli lamba kullanıldığı ve caminin sadece iç aydınlatma kurulu gücünün 78 kW'lık bir enerji tüketimine sebep olduğu görülmektedir. Cami sadece dini nedenlerle değil, turistik amaçlarla da ziyaret edildiği ve bu nedenle ışıkların gün içinde uzun saatler boyunca açık bırakıldığı için lambaların yanık olduğu süre yaklaşık olarak günde 8-10 saat kabul edilebilir. Basit bir hesaplama ile caminin iç aydınlatması için günlük tüketiminin yaklaşık olarak 624 - 780 kWh/gün olduğu görülmektedir.

Enerji tüketimine ek olarak, akkor telli lambalar kısa ömürleri nedeniyle bakım açısından da problemlere yol açmaktadırlar. Türkiye'deki tarihi camilerin yakından incelenmesi sonucunda, bozuk lambaların bakım eksikliği nedeniyle kandiller içinde bırakıldıklarını veya enerji tasarrufu için bazı lambaların yakılmadıkları görülmüştür. Bu durum hedeflenenden daha düşük aydınlık düzeylerine, aydınlatmanın düzgün olmamasına ve estetik bozukluklara sebep olmaktadır. Akkor telli lambaların kullanılmasındaki problemler sadece enerji tüketimi ve bakımla kısıtlı değildir. Lamba taşıyıcılar alçak pozisyonlara yerleştirildiklerinden lambalar cami kullanıcıları için birer kamaşma kaynağı halini alırlar. Seviyeleri aynı zamanda mekânın bütünlüğünü bozmakta ve lambaların yerleştirildiği kandillerin malzemesi cam olduğu için, camın optik özellikleri nedeniyle kandillerin tam altında zeminde ışık lekeleri oluşmasına sebep olmaktadır. Camilerin heybetli mimarileri nedeniyle mesafeler çok büyüktür ve caminin ana kısmının büyük bir kubbe altında olması ve elektriksel kabloları saklamak için duvarlar veya bina parçaları olmaması da estetik açıdan problemlere yol açmaktadır.

Bu çalışmada tarihi camilerin aydınlatmasındaki mevcut problemler göz önünde bulundurularak, tarihi camilerin iç aydınlatması için önerilen yöntem, aydınlatma alanındaki en modern teknoloji olan LEDlerin kullanımıdır.

LEDli ışık kaynaklarının enerji tüketimi, geleneksel ışık kaynaklarına kıyasla oldukça düşüktür. Camilerde yapılan hesaplamalar akkor telli lambaların kullanımıyla güç tüketiminin çok yüksek değerlerde olduğunu göstermektedir. LEDlerin kullanımıyla benzer seviyede aydınlık düzeyleri, çok daha düşük güç tüketimleriyle elde edilebilir. Buna ek olarak LEDlerin ekonomik ömür süreleri, geleneksel ışık kaynakları, özellikle de akkor telli lambanın ömür değerleriyle karşılaştırınca çok uzundur. Tipik bir akkor telli lambanın ömür süresi 750-2000 saat arasında değişirken, bir LEDin kullanışlı ömür süresi (ışık akısının genel aydınlatma için ilk çalışmadaki ışık akısının % 70'ine, dekoratif aydınlatma içinse % 50'sine düştüğü süre) 35000-50000 saat arasında kabul edilmektedir [6]. Bu demektir ki, tek bir LEDin öngörülen kullanışlı ömrü sürecinde, örneğin 35000 saatte, bir akkor telli lambanın 17,5 kez değiştirilmesi gerekmektedir.

Mevcut teknoloji, akkor telli lambalara yakın renk sıcaklığına sahip LEDlerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Buna ek olarak LEDlerin etkinlik faktörleri akkor telli lambalara göre daha yüksek değerlerdedirler ve renksel geri verim özellikleri de yüksek geriverim gerektiren uygulamalar için uygundur. İslam dininin kuralları cami içinde heykel, insan ve hayvan resimlerinin bulunmasını engellemiş olmakla beraber, cami içinde antik seramikler, halılar, hat sanatı örnekleri, vitraylar ve mozaikler gibi ışınımlara duyarlı ve önemli eserler sergilenmektedirler. Bu hassas eserlerin zarar görmesini engellemek için cami içinde kullanılan ışık kaynaklarının kızılötesi ve morötesi bileşenler açısından dikkatli seçilmesi gerektiği açıktır. Doğru LEDlerin seçimiyle kızıl veya mor ötesi bileşen içermeyen ışık üretmek mümkündür. Camilerde tercih edilen 60 Wlık akkor telli lambalar için kızılötesi bileşen toplam ışık çıktısının % 73'ünü oluşturmaktadır, bu lambaların morötesi bileşeni bulunmamaktadır. Akkor telli lambalar tarafından yapılan kızılötesi ışınımın ısı olarak kendini göstermesi sonucu, özellikle yaz aylarında ibadet edenlerin ısı konfor açısından rahatsızlık duyması kaçınılmazdır. Bu tez çalışmasında önerilen kaynak olan LEDlerin ise % 0'a yakın kızılötesi bileşen ve % 0 morötesi bileşen içeren çeşitleri mevcuttur, dolayısıyla hassas tarihi eserler için akkor telli lambalardan daha üstün özellikli bir ışık üretimi sağlamaktadırlar.

LEDler aynı zamanda küçük boyutları sayesinde armatür tasarımında esnek çözümler sağlarlar. Bu boyutsal avantaj, hedeflenen çalışmada LEDleri yağ kandillerine yerleştirmek veya yağ kandillerine benzer LEDli armatürler tasarlayarak yeni tasarımı antik mimariyle bütünleştirmeyi mümkün kılacaktır.

Doktora çalışmasının ikinci hedefi, aydınlatmadaki en modern teknolojiye ek olarak, enerji konusunda da modern yenilenebilir enerji teknolojilerinden fotovoltaik panellerin kullanımıyla, enerji tüketimi oldukça azaltılmış olan tarihi camilerin, kendi enerjilerini de üretmeleriyle yeşil kavramlı yeni bir tarihi cami algısı oluşturmaktır. Solar sistemler veya fotovoltaik (Photovoltaic – PV) sistemler en temiz yenilenebilir enerji sistemlerindendir. Bu sistemler hava kirliliğine yol açmaz, gürültü yaratmaz ve taşınabilir yakıtlara gerek duymazlar. Türkiye Avrupa ülkeleri içinde güneş ışınımı yeğliliği açısından üstün coğrafi koşullara sahip bir ülkedir. Türkiye’deki güneş ışığı potansiyeli göz önüne alınarak, elektriğin üretimi için PV sistemlerin kullanılması çok uygun, fakat ne yazık ki günümüze kadar yeterince etkin olarak uygulamaya geçirilmemiş bir yaklaşımdır.

Bu çalışmada önerilen yaklaşım PV panelleri cami mimari yapısına zarar vermeyecek şekilde cami avlusu veya cami etrafındaki boş alanlara yerleştirilerek caminin iç aydınlatma için ihtiyaç duyduğu elektriği karşılamaktır. Eğer paneller tarafından üretilen enerji yeterince yüksekse, dış aydınlatma da üretilen enerjiden beslenebilir. PV paneller caminin mimarisi nedeniyle üzerlerine düşebilecek gölgelerin engellenmesi için avluya veya cami çevresindeki uygun alanlara yüksek direkler üzerinde yerleştirilebilir ve bu sayede caminin mimari bütünlüğünü bozmaktan da kaçınılabilir. Eğer sistem uygun bir şekilde seçilebilirse, yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlanacak, PV panellerin kullanımı teşvik edilecek, çevreye zarar vermeden elektrik üretilecek ve ekonomiye katkıda bulunulacaktır.

Doktora tez çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için İstanbul tarihi camilerinden Mimar Sinan’ın en küçük eseri olmasıyla ünlenmiş Şemsi Ahmet Paşa Camii seçilmiş ve Cami içinde çeşitli ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Cami daha sonra Dialux paket programıyla modellenerek iç aydınlatma koşulları bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Tarihi cami aydınlatması için gerekli koşullar göz önünde bulundurularak doktora tez çalışmasının odağını oluşturan LEDli modern cami kandilinin tasarımı gerçekleştirilmiş, ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Dialux modeline yerleştirilerek Cami içinde elde edilen fotometrik sonuçlar

incelenmiştir. Aydınlatma tasarımının tamamlanmasıyla, talep edilen güç miktarı elde edilmiş ve bu güç miktarına göre de Cami avlusuna yerleştirilebilecek bir fotovoltaik sistem tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin fotometrik koşulları ve buna bağlı olarak konfor koşulları iyileştirilirken, iç aydınlatma yükü azaltılmış ve bu yükü karşılayacak fotovoltaik sistemin tasarımı ile Cami'nin iç aydınlatması için gerekli enerjiyi kendisinin üretebileceği bir model sunulmuştur. Oluşturulan modelin sadece tarihi camilerde değil, tüm tarihi ibadethaneler ve ek olarak yeni inşa edilen camilerde de kullanılmasıyla oluşturulan, modern teknolojileri ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan “yeşil” kavramlı cami modeli tüm ibadethanelere yayıldığı takdirde Türkiye enerji tüketiminde ciddi miktarda bir azalma elde edilecek ve bu şekilde hem ülke ekonomisine hem de takip edilen uluslararası enerji politikalarına katkıda bulunulmuş olacaktır.

2. TARİHİ CAMİLERDE AYDINLATMA

2.1 Tarihi Camilerde Aydınlatma

Camiler, ibadet edenlerin tek başlarına veya bir cemaatle birlikte namaz kılmaları, rahle'ye yerleştirilmiş olan Kur'an-ı Kerim'in okunması ve dinlenmesi, Hz. Muhammed'in hayatını anlatan mistik şiir Mevlid'in okunması ve dinlenmesi, ilahilerin söylenmesi ve hutbenin dinlenmesi için ziyaret edilen mimari yapılardır. Camilerin iç aydınlatmasının, dini eylemlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılması, ibadet edenler için görsel konfor koşullarını sağlaması ve mimari yapıyı vurgulaması gerekir. Cami içinde gerçekleştirilen eylemler için gerekli olan aydınlık düzeyleri (E), konum, dağılım, ışık rengi, yön ve gölge değerleri Çizelge 2.1'de, Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE– Commission Internationale de l'Eclairage) tarafından kiliseler, camiler ve sinagoglar için önerilen ortalama aydınlık düzeyi (E_m), birleşik kamaşma endeksi (Unified Glare Rating - UGR) ve renksel geriverim endeksi (R_a) değerleri ise Çizelge 2.2'de verilmektedir [5, 7].

Çizelge 2.1 : Cami iç aydınlatmasının kalite ve miktarı.

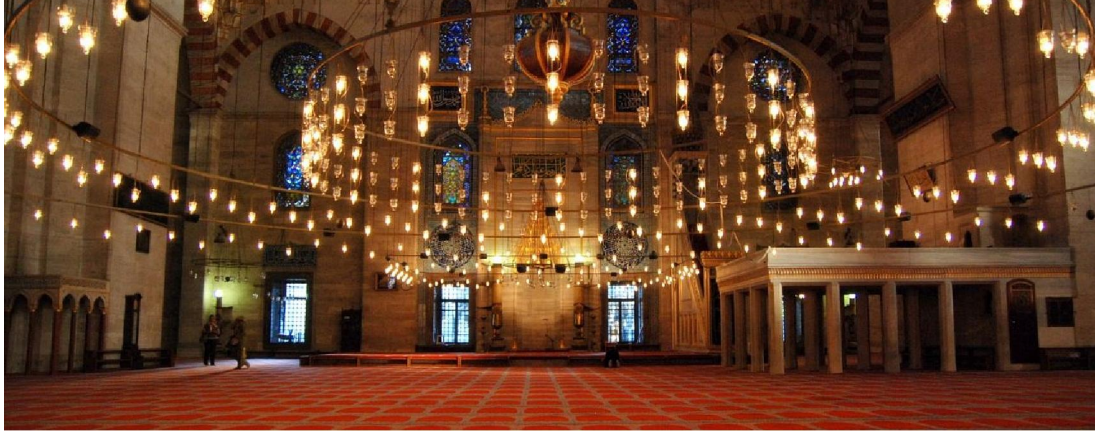
	Miktar			Kalite	
	E [lx]	Konum	Dağılım	Işık rengi	Yön/Gölge
Okuma-Rahle	300	Yatay	Genel/ Yerel	Sıcak beyaz	Yayınık/Gölgesiz
Namaz-Mihrap	300	Düşey	Genel/ Yerel	Sıcak beyaz	Yayınık/Gölgesiz
Namaz–Dua Etme	100	Yatay	Genel	Sıcak beyaz	Yayınık/Gölgesiz
Minber	100	Yatay	Genel	Sıcak beyaz	Yayınık/Gölgesiz

Çizelge 2.2 : İbadet yerleri için gerekli aydınlatma koşulları.

	E_m [lx]	UGR _L	R_a
Genel ibadet alanı	100	25	80
Sandalye, mihrap, minber	300	22	80

Camilerde iç aydınlatmanın büyük kısmı, genel aydınlatma armatürleri ile sağlanmaktadır; cami zemininde ihtiyaç duyulan düzgün dağılımlı genel aydınlatma genellikle bu şekilde elde edilmektedir [5, 8-10]. Camide ibadet edenlerin ibadeti aynı anda yapabilmeleri için birbirlerini ve imamı görebilmeleri gerekmektedir. İmanın hareketlerini takip etmek için düşey aydınlık düzeyi önemlidir [5, 8, 10].

Şekil 2.1’de klasik Osmanlı mimarisinin örneklerinden Süleymaniye Camii’nin aydınlatması görülmektedir.



Şekil 2.1 : Süleymaniye Camii iç aydınlatması [11].

Cami içinde ibadetin yanı sıra aydınlatmanın önem kazandığı bir nokta da temizliktir. İbadet edenler çoğu zaman yerde oturmaktadır. Dolayısıyla aydınlık düzeyinin düzgünlüğünün yanı sıra, zemin temizliğinin de net olarak seçilebilmesi büyük önem taşır. Namaz kılınırken ibadet edenlerin başlarını yere koydukları göz önünde bulundurulduğunda, cami iç temizliği yapılırken gösterilmesi gereken özen tartışılmazdır. Kullanılan aydınlatma sisteminin zeminin temizliğini net olarak gösterecek özellikte olması gereklidir.

İslam dininin kuralları cami içinde heykel, insan ve hayvan resimlerinin bulunmasını engellemiş olmakla beraber, cami içinde antik seramikler, halılar, hat sanatı örnekleri, vitraylar ve mozaikler gibi ışınımlara duyarlı ve önemli eserler sergilenmektedir. Sultan Ahmet Camii içinde yer alan İznik çinilerinden iki örnek Şekil 2.2’de görülebilir.

Bu hassas eserlerin zarar görmesini engellemek için cami içinde kullanılan ışık kaynaklarının kızılötesi ve morötesi bileşenler açısından dikkatlice seçilmesi gerektiği açıktır. Oysaki camilerde tercih edilen akkor telli lambaların mor ötesi bileşeni bulunmasa da, kızılötesi bileşenleri toplam ışık çıktısının % 73’ünü oluşturmaktadır [12]. Buna ek olarak, akkor telli lambalar tarafından yapılan kızılötesi ışınının ısı olarak kendini göstermesi, özellikle yaz aylarında ibadet edenlerin ısı konforu açısından rahatsızlık duymasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.2 : Sultan Ahmet Camii’ndeki İznik çinileri.

Genel olarak, bir caminin iç aydınlatması, cami içindeki mistik atmosferi bozmamalı, doğal aydınlatmayla uyumlu olmalı, gerekli aydınlık düzeylerini sağlamalı, kamaşmaya sebep olmamalı, renksel geriverimi yüksek ışık kaynaklarıyla gerçekleştirilmeli, cami içindeki tarihi eserlere zarar vermemeli, cami içindeki mimari özellikleri vurgulamalı ve ilgi çekici olmalıdır.

2.1.1 Tarihi camilerde doğal aydınlatma

Doğal aydınlatmadan yoğun biçimde faydalanılan tarihi camilerde gün ışığı yan duvarlarda ve kubbede bulunan çok sayıdaki küçük pencere aracılığıyla hacim içine alınır. Osmanlı Camileri’nde tercih edilen kubbe formu, ışığı toplayarak yansıtma ve dağıtma özelliğine sahiptir. Bu sayede ana kubbeden gelen ışık cami içinde bir genel aydınlatma sağlar, kubbenin ihtişamını vurgular ve inananların kubbe altında toplanmasına yardımcı olur [13]. Yan duvarlardaki pencerelerden gelen ışık ise genel aydınlatmaya katkıda bulunur. Bu sayede, büyük camilerde yaygın bir ışık sağlanırken, aynı zamanda da duvar kenarlarında Kur’an-ı Kerim’in okunması için aydınlatılmış alanlar yaratılır. Mihrap bölgesindeki yan duvar ve kubbedeki pencerelerden gelen ışık yardımıyla, ibadet edenlerin dikkati bu bölgeye çevrilir ve imam için gerekli yerel aydınlatma sağlanır [5, 8-10]. Pencere camları genel olarak vitraylıdır ve dışarıdan korunma amacıyla alçı veya demir gibi malzemelerle bezenmiştir. Bu durum cami içinde mistik bir atmosfer oluşmasını ve camlardan gelen gün ışığının renklenmesini sağlar. Diğer taraftan, dış koruma elemanları ve renkli camlar nedeniyle gün ışığının azalması kaçınılmaz bir durumdur [8, 14]. Buna ek olarak duvarların taşıyıcı görev yaptığı yapılarda, duvar kalınlıkları da fazla olduğundan, pencere boyutlarının küçük olması ve duvar kalınlığının

engellemesinden dolayı, doğal ışığın oluşturduğu aydınlık düzeyi çok yüksek değildir.

2.1.2 Tarihi camilerde yapma aydınlatma

Camilerde doğal ışığın yetersiz kaldığı durumlarda ve geceleri yapma aydınlatma elemanları kullanılmaktadır. Osmanlı Camileri'nde genellikle kubbeden sarkıtılan avizeler veya eş merkezli demir dairesel elemanlar üzerine yerleştirilmiş cam kandiller kullanılmaktadır. Bugün en sık rastlanan yaklaşım 60 W, 2700 K akkor telli lambaların yağ kandilleri içine yerleştirilerek kullanılmasıdır. Bu yağ kandilleri ortalama insan boyundan yaklaşık olarak 50-60 cm, zeminden ise yaklaşık 2,20 m yüksekliğe, zemine paralel olarak ve mümkün olduğunca homojen şekilde cami içine dağıtılmaktadırlar. Şekil 2.3'te bu lamba taşıyıcıların örnekleri görülmektedir [5, 8, 10].



Şekil 2.3 : Akkor telli lambalı yağ kandilleri.

Tarihi camilerde kullanılan yağ kandilleri içinde ilk olarak kullanılan ışık kaynakları yağ ve mum olmuştur. Müslümanlar tarafından kandil ışığı, Allah'ın nuru ile eş tutulmuştur. Kur'an-ı Kerim'de "Allah göklerin ve yerin Nur'udur. O'nun Nur'u içinde ışık bulunan bir kandile benzer" anlatımı, cami içindeki uygulamasını ışık kaynağı şeklinde bulmuştur. Elde taşınması kolay olan kandilin Milattan Önce 5 yy.'dan başlayarak Mısır, Fenike, Yunan, Dor, İbrani, Roma, Bizans ve Türk uygarlıklarında kullanıldığı bilinmektedir [15]. Kandil, tarih boyunca dini bir araç olarak kullanılmış ve bu nedenle mezarlarda ve tapınaklarda sürekli kandil yakılmıştır. Günümüzde yapılan arkeolojik mezar kazılarında taş, pişmiş toprak ve metalden yapılmış çok sayıda kandile ulaşılmıştır [16]. İnananların ibadet, dua veya meditasyon için biraraya geldikleri katedraller, camiler, sinagoglar, kiliseler, şapeller, tapınaklar ve başka dini binalarda yağ kandillerinin kullanımı günümüze kadar devam etmiştir. Kandil, en basit şekliyle içine zeytinyağı ve bir fitil konarak yakılan, ışık vermeye yarayan kaptır. Bu eski aydınlatma aracı yandığı zaman uzun saatler ve

hatta bazen günler boyunca ışık vermeye devam eder. Kandil tarafından üretilen ışık ruhani aydınlanmayı, kutsallığı ve hayatın devam edişini sembolize etmektedir. Musevi yazıtlarında yağ kandili Tanrı'nın inananların yollarını aydınlatmasını sembolize etmektedir. Yazıtlar çoğu zaman insan ruhunu yağ kandiline benzetirler. Ortodoks ve Doğu Katolik Kiliseleri'nde ise mihrapta günümüzde de yağ kandili kullanılmaktadır. Ortodoks kiliselerinde yağ kandili kilisenin kutsanmasıyla beraber yakılır ve asla söndürülmez. Mabet lambası veya Mihrap lambası olarak isimlendirilen bu lamba kilise içinde Tanrı'nın varlığını sembolize etmektedir. Hinduizm'de ise yağ kandilleri Hindu tapınakları ve evlerindeki kutsal ışık mabetlerinde kullanılırlar. Hinduların şeytanı evlerinden uzaklaştırmak, ışığı içeri davet etmek ve bu sayede Tanrı'yı eve davet etmek için her gün bir lamba yakmaları gerekmektedir [17].

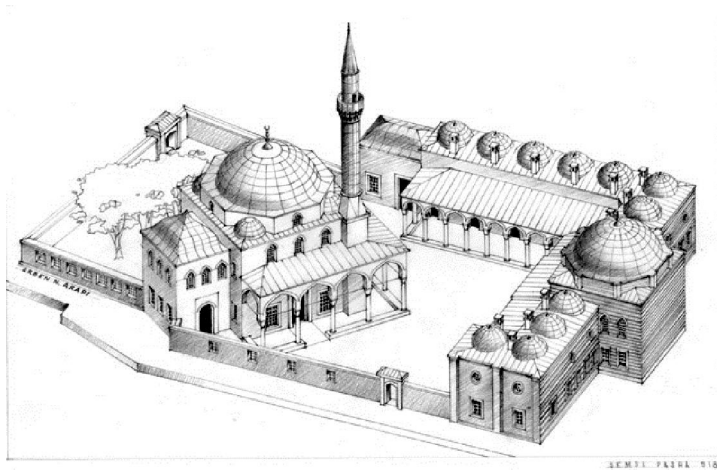
Musevi ve Hristiyan inanışlarına çok benzer şekilde, Müslümanlık'ta da yağ kandilinin – ya da cami kandilinin – kullanımı ibadethanede tanrının varlığını sembolize etmektedir. Yağ kandilleri elektriğin bulunuşundan önce camilerde yaygın olarak kullanılmıştır. Camilerde kullanılan kandiller, içlerine su ve suyun üzerine yağ konarak yakılmıştır. İmparatorluk döneminde zeytinyağı, camilerin aydınlatılmasında kullanılan çok önemli bir malzeme olmuştur. Camilerin aydınlatılması için her camide özel bir kandilci bulundurulmuştur. Ufak mahalle mescitlerinin kandilcilik görevini müezzinler üstlenirken, külliye ve padişah camileri başta olmak üzere, vezir ve paşalara ait camilerde ve selatin camilerinde çok sayıda kandilci görev yapmıştır. Zeytinyağı ve mumla aydınlatma yapıldığından, camilere teberrukat eşyası (cami ve mescitlerde mevcut olan ve hayırsever kişi veya kuruluşlar tarafından bağışlanmış bulunan her türlü eşya) olarak kandillikler ve mumluklar, şamdanlar, kandil kutuları, mahyacılık levazımatı ve yağ küpleri ile aydınlatma araç gereci, demirbaş olarak defterlere kaydedilerek verilmiş ve dağıtılmıştır [18]. Bu dönemlerde, kandillerde kullanılan zeytinyağı, cami mahzenlerindeki büyük küplerde biriktirilmiş ve tenekeden yapılmış yağdanlıklar ile kandillere dağıtılmıştır. Kandil içine fitili tutuşturmak için koyulan zeytinyağının altına su koyulurdu. Kandil fitilinin üst katmanda kalan yağ tabakası üzerinde durarak, yağa veya suya dokunmaması için yağ üzerine şamandıra adı verilen ve mantardan yapılan bir eleman yerleştirilmiştir. Bu şamandıra yağın yüzünde durarak yağ azaldıkça onunla beraber alçalır ve yağ bitince mantarın suya dokunması ile fitil

ıslanır, alev söner ve bu şekilde kandil şişesinin sıcaklık sebebiyle çatlaması engellenmiştir. Cami ve kiliselerin aydınlatması için kullanılan çember şeklindeki avizelere kandillik adı verilirken, ana kubbe veya tavanın ortasına asılan kandile asma kandil, bu kandilin büyüğüne ise top kandil adı verilmiştir [16, 18].

2.2 Doktora Tez Çalışması için Seçilen Cami - Şemsi Ahmet Paşa Camii

Doktora tez çalışmasının ilk adımı olarak simülasyon çalışmasının gerçekleştirileceği tarihi cami seçilmiştir. Bu amaçla, İstanbul'da yer alan tarihi camilerle ilgili bir araştırma yapıp çeşitli tarihi camiler belirlenmiş ve bu camiler ziyaret edilerek, yapılacak çalışma için uygunlukları incelenmiştir. Cami avlusu ve çevresinin fotovoltaiik panellerin yerleştirilmesi için uygun olması ve cami içinde kandil tipi aydınlatma elemanlarının kullanılması konularına dikkat edilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda tez çalışması için Şemsi Ahmet Paşa Camii seçilmiştir. İncelenen camilerle ilgili detaylı bilgi Ek A'da verilmiştir.

II. Selim'in İsfendiyaroğlu Şemsi Ahmet Paşa için Mimar Sinan'a Üsküdar sahilinde yaptırdığı cami-türbe-medrese topluluğu, Sinan'ın en kayda değer eserlerinden biridir. Şemsi Ahmet Paşa Külliyesi, bir cami, bir medrese ve aralarındaki avludan oluşmaktadır. Medrese, L harfi biçiminde iki kolu bir yapıdır. Kollardan biri Boğaza dik, öbürü kıyıya paraleldir ve bu iki kol Külliye'nin batı ve güney sınırlarını belirler. Kible doğrultusunda yerleştirilen cami ise medresenin Boğaz'a dik koluna göre 37 derece doğuya döndüğünden iki bina arasında serbest biçimli bir avlu oluşmuştur [19]. Şekil 2.4'te cami ve medresenin Arben. N. Arapi tarafından yapılmış bir çizimi verilmiştir. Cami'nin mimari plan ve kesitleri Ek B'de verilmektedir.



Şekil 2.4 : Şemsi Ahmet Paşa Camii ve Medresesi.

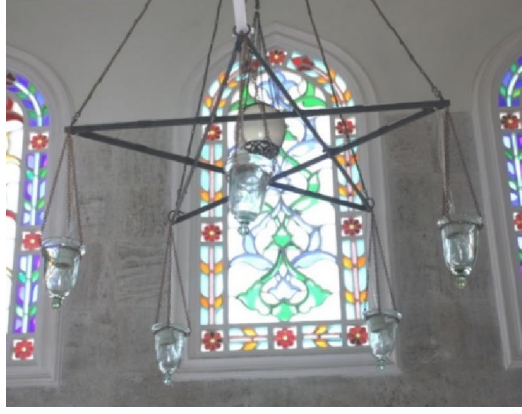
Cami yanındaki sahil şeridi kuzeye bakarken, cami giriş kapısı kuzey batıya, minarenin bulunduğu cephe güney batıya, minberin bulunduğu arka duvar güney doğuya ve deniz gören türbe duvarı ise kuzey doğuya bakmaktadır. Cami namaz, dua okuma, vaaz verme ve benzeri dini eylemlerin gerçekleştiği ana hacim ve Cami'ye bitişik yapılmış kuzey doğu yönüne bakan türbe olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Türbe alanı günümüzde aynı zamanda kadınların ibadet alanı olarak da hizmet vermektedir. Kare planlı olan Cami ana bölümü 8,02 m x 7,99 m boyutlarında olup kubbe yüksekliği ise 12,37 m'dir. Türbe ise 4,48 m x 4,56 m boyutlarında ve kubbe yüksekliği 7,52 m'dir. Cami duvarları açık renk küfeki taşı, tavanı beyaz üzerine kalem işi bezemelidir. Cami zemini kırmızı renkte çerçevelenmiş krem rengi halı ile kaplanmıştır. Cami içinde ahşap bir minber ve yine ahşaptan yapılmış raflı dolaplar bulunmaktadır. Mihrap ve pencere dış çerçeveleri mermer, giriş seviyesindeki pencerelerin ana çerçeveleri ise ahşaptır. Cami içinde çeşitli boyut ve özelliklerde, farklı seviyelere yerleştirilmiş toplam 39 pencere bulunmaktadır.

2.2.1 Yapma aydınlatma

Cami içinde, iki ayrı yapma aydınlatma sistemi bulunmaktadır; bunlardan ilki Cami'nin ana bölümünde, kubbenin tam ortasına asılmış dairesel demir eleman üzerinden sarkan 35 yağ kandilinden oluşmaktadır. İkinci sistem ise Cami'nin ana bölümünün kuzey doğusuna bitişik yer alan türbenin merkezinden, yıldız şeklindeki demir eleman üzerinden sarkıtılmış 5 adet yağ kandilidir. Kandillerin içinde Philips Classicstone 40W/230V, 415 lm'lik akkor telli lambalar bulunmaktadır. Bu lambaların ömür süresi 1000 saat, ürettikleri ışığın rengi sıcak beyaz, renksel geri verim endeksleri ise 100'dür. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da Cami ana bölümünde ve türbede bulunan ışık kaynakları görülmektedir.



Şekil 2.5 : Cami ana bölümü üzerindeki kandiller.



Şekil 2.6 : Türbe üzerindeki kandiller.

Cami ana bölümündeki kandiller dairesel demir elemanlar üzerine 3 ayrı seviyede yerleştirilmişlerdir. 20 adet kandil zeminden 2,90 m yükseklikte, 1,80 m çapındaki demir daireye düzgün dağılacak şekilde; 10 adet kandil zeminden 2,80 m yükseklikte, büyük dairenin içine yerleştirilmiş yıldız şeklindeki demir elemanın köşe noktalarında; son 5 kandil ise zeminden 3,10 m yükseklikte, demir çemberin ortasından sarkıtılan ayrı bir yıldız demir elemanın köşelerine yerleştirilmiştir. Ana hacim toplamda 35 kandillik bir sistemle aydınlatılmaktadır.

Türbe tarafındaki 5 kandil ise yıldız şekilli tek bir demir eleman üzerine zeminden yaklaşık 2,4 m yüksekliğe asılmıştır ve tüm kandiller aynı seviyededir. Yıldızı oluşturan demir çubukların her biri 70 cm uzunluğundadır. Kandillerin rengi, kullanılan camın kalınlığı nedeniyle renksizden yeşile doğru kaymaktadır.

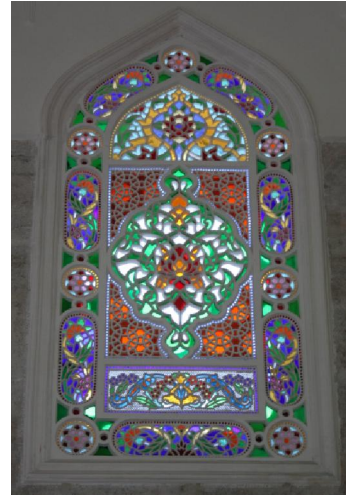
Cami içinde kullanılan 40 akkor telli lamba toplamda 1600 W kurulu iç aydınlatma gücü oluşturmaktadır. Cami'nin sadece dini nedenlerle değil, turistik amaçlarla da ziyaret edildiği ve bu nedenle aydınlatmanın gün içinde uzun saatler boyunca açık bırakıldığı göz önünde bulundurularak lambaların yanık olduğu süre bir günde yaklaşık olarak 8-10 saat kabul edilebilir. Bu durumda caminin iç aydınlatması için günlük elektrik tüketiminin yaklaşık olarak 12,8-16 kWh, aylık tüketiminin ise yaklaşık 384-480 kWh arasında olduğu görülmektedir. Sadece iç aydınlatma için ortaya çıkan bu tüketim değeri, doktora çalışmasının giriş bölümünde Türkiye genelindeki camilerin elektrik tüketimi için verilen aylık 390 kWh'lik ortalama değer de üzerinde bir tüketimdir.

2.2.2 Doğal aydınlatma

Şemsi Ahmet Paşa Camii'nde doğal aydınlatma Cami cephelerinde üç farklı seviyede bulunan çeşitli boyutlardaki pencerelerle sağlanmaktadır. Kuzeybatıya bakan giriş cephesinde caminin ana bölümüne ait giriş kapısı ve türbeye ait giriş kapısına ek olarak toplamda 9 pencere, kuzeydoğu cephesinde 11 pencere, güneybatı cephesinde 7 pencere ve güneydoğu cephesinde 12 pencere olmak üzere, Cami doğal ışığı toplamda 39 adet pencereden almaktadır. Cami ana bölümünü aydınlatan birinci seviye pencereler şeffaf camlı, ahşap çerçeveli ve camiye dışarıya karşı korumak için demir parmaklıklıdır. İlk seviye pencerelerin üzerinde kalan diğer pencereler ise farklı yüksekliklerde konumlandırılmış, değişik boyut ve geometrik şekillere sahip, çeşitli renk ve desenlerde vitraylarla bezenmiş pencerelerdir. Şekil 2.7 (a) ve (b)'de sırasıyla birinci seviye pencerelerden ve vitraylı pencerelerden birer örnek verilmektedir.



(a)

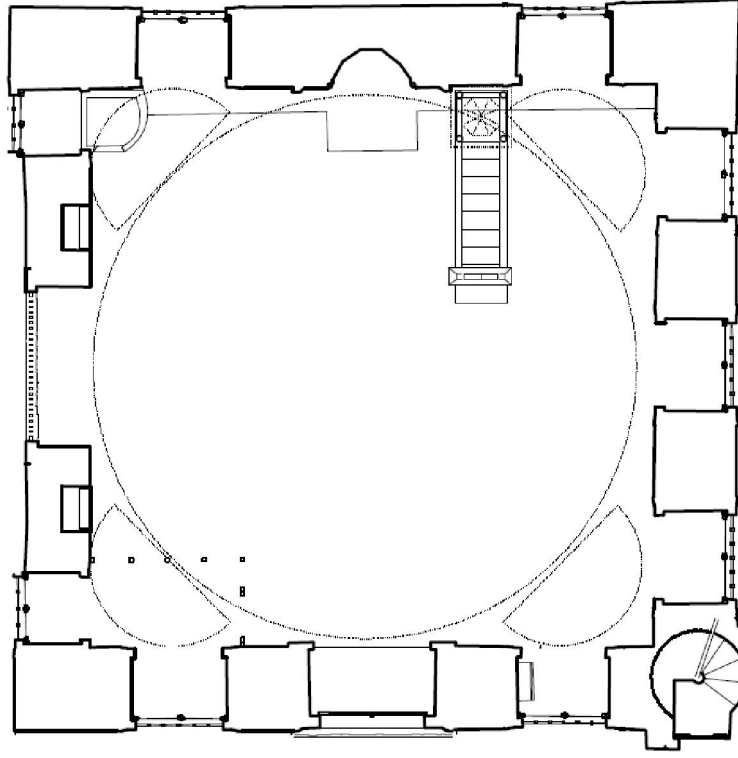


(b)

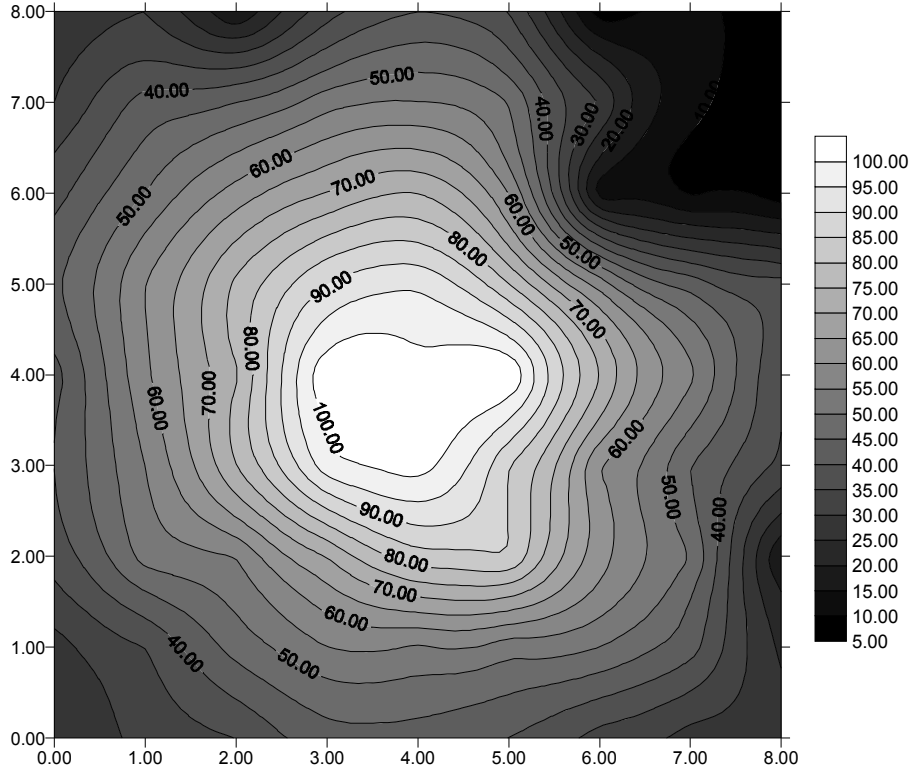
Şekil 2.7 : Örnek pencere: (a) Birinci seviye ahşap çerçeveli. (b) Vitraylı.

2.2.3 Cami içi aydınlık düzeyleri

Cami ana bölümü içindeki fotometrik koşulları incelemek için öncelikle zemin üzerinde 64 noktada yatay aydınlık düzeyi değerleri ölçülerek bir eş aydınlık düzeyi eğrisi çıkarılmıştır. Doğal ışığın etkisini ortadan kaldırmak ve sadece yapma aydınlatmayı dikkate almak için ölçümler gece saatlerinde yapılmıştır. Ölçümlerin alındığı Cami ana bölümünün planı Şekil 2.8'de, elde edilen eş aydınlık düzeyi eğrisi Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.8 : Cami ana bölümü planı.



Şekil 2.9 : Cami ana bölümü zemininde ölçülen aydınlık düzeyi dağılımı.

Kandillerin cami ana bölümünün ortasına dairesel demir elemanlarla asılmış olması, en yüksek aydınlık düzeylerinin cami ortasında bir daire şeklinde oluşmasına sebep olmaktadır. Karesel hacmin köşe noktalarına doğru ilerledikçe aydınlık düzeyleri

düşmektedir. 20 lx ve altındaki değerler ağırlıklı olarak dolap kenarlarına denk düşen noktalarda ve caminin arka duvarına yaslanmış olan minber ile duvar arasındaki bölgededir. Minberde çalışma düzlemi aydınlık düzeyi 50 lx, minber üzerinde ayakta duran bir kişinin yüz hizasında düşey aydınlık düzeyi 85 lx'tür. Türbe içine yerleştirilmiş sandukanın büyük yer kaplaması nedeniyle burada fazla noktada ölçüm almak mümkün olmamıştır. Sanduka üstünde yatay aydınlık düzeyi 90 lx, sanduka tepe noktasında ise 50 lx'tür. Türbe'nin köşe noktalarında zeminde ölçülen aydınlık düzeyi değeri 15 lx'tür. Türbe bilgisini veren yazı üzerindeki düşey aydınlık düzeyi ise 30 lx'tür.

Sonuç olarak, Şekil 2.9'da verilen aydınlık düzeyi dağılımından da açıkça görüldüğü üzere, caminin 64 m²'lik ana bölümünde, Çizelge 2.1'de verilmiş olan gerekli aydınlık düzeyi değeri 100 lx'e erişebilen sadece 4 m²'lik bir alan bulunmaktadır. Bu bölge dışındaki alanlarda yapma aydınlatmayla elde edilen aydınlık düzeyleri cami içinde gerçekleştirilmesi gereken eylemler için yetersizdir.

2.2.4 Cami yüzeyleri ışık yansıtma katsayıları

Cami içindeki farklı yüzeylerin ışık yansıtma katsayılarının hesabı için yansıtma katsayısı 1'e çok yakın kabul edilen bir standart yansıtıcı ve Konica Minolta marka parıltı ölçerden faydalanılmıştır. Kullanılan parıltı ölçerin 1,0 cd/m²'nin üzerindeki değerlerde hata oranı $\pm$ % 2'dir. Sabit yansıtıcı plaka, yansıtma katsayısı hesaplanacak yüzeyler üzerine yerleştirilerek parıltısı ölçülmüş, daha sonra aynı nokta üzerinde ikinci bir parıltı ölçümü alınarak bu iki parıltı değeri birbirine oranlanmış ve yüzeylerin yansıtma katsayıları hesaplanmıştır. Ek olarak, parıltısı ölçülen noktalar üzerinde aydınlık düzeyi ölçümleri alınarak Lambert yasasına uygun yansıma yapan yüzeyler için kullanılan (2.1) bağıntısından faydalanılarak yapılan ölçümler kontrol edilmiştir.

$$\pi \cdot L = \rho \cdot E \quad (2.1)$$

Burada,

L : Parıltı [cd/m²],

ρ : Yansıtma katsayısı,

E : Aydınlık düzeyidir [lx].

Yapılan ölçümler ve hesaplanan yansıtma katsayısı değerleri Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3 : Cami içi parıltı, aydınlık düzeyi ve yansıtma katsayısı değerleri.

Yüzey	$L_1[\text{cd/m}^2]$	$L_2[\text{cd/m}^2]$	$E [\text{lx}]$	ρ_1	ρ_2	Fark (%)
Halı – bej	20,30	5,63	63,50	0,28	0,28	-0,43
Halı – bordo	11,13	0,82	35,30	0,07	0,07	0,95
Küfeki 1	16,55	10,69	51,77	0,65	0,65	-0,43
Küfeki 2	15,33	7,10	47,85	0,46	0,47	-0,65
Küfeki 3	14,90	11,86	43,05	0,80	0,87	-8,73
Mermer	17,03	11,29	52,70	0,66	0,67	-1,52
Mihrap	15,11	9,14	45,50	0,60	0,63	-4,33
Minber	12,71	0,70	45,10	0,06	0,05	11,46
Parmaklık	14,68	13,03	44,05	0,89	0,93	-4,70
Kitaplar	12,90	3,11	37,55	0,24	0,26	-7,93
Ahşap eşya	14,33	1,42	41,90	0,10	0,11	-7,44
Yeşil kadife	18,14	0,90	77,00	0,05	0,04	25,99

Burada,

L_1 : standart yansıtıcı üzerinde ölçülen parıltı değeri,

L_2 : yansıtma katsayısı hesaplanmak istenen yüzeyin parıltı değeri,

E : yansıtma katsayısı hesaplanmak istenen yüzey üzerindeki yatay aydınlık düzeyi,

ρ_1 : Parıltı ölçümlerinin oranlanmasıyla hesaplanan yansıtma katsayısı,

ρ_2 : Aydınlık düzeyi ve parıltı ölçümlerinin denklem (2.1)'e yerleştirilmesiyle hesaplanan yansıtma katsayısıdır.

Çizelgede görüldüğü üzere küfeki taşı için üç farklı yansıtma katsayısı hesaplanmıştır. Bunun sebebi, taşın harelî olmasıdır. Taşın açık, orta ve koyu renkteki bölgelerinde 3 ayrı ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak küfeki taşı için ortalama yansıtma katsayısı 0,64 olarak hesaplanmıştır.

Cami kubbесinin yüksekliğı nedeniyle kubbeye ulaşmak mümkün olmamıştır. Bu sebeple kubbe üzerindeki desenlerin ve küfeki taşının bitip beyaz yağlı boyanın başladığı bölgenin yansıtma katsayısı küfeki taşının yansıtma katsayısına oranlanarak yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Küfeki taşının bitip, beyaz yağlı boyanın başladığı noktalarda alınan parıltı ölçümleri, ilki için $7,88 \text{ cd/m}^2$, ikincisi için ise $10,80 \text{ cd/m}^2$ olarak ölçülmüştür. Bu bölgelerin birbirlerine yakınlığı nedeniyle aydınlık düzeyleri arasında önemli farklar olmadığı kabul edilmiştir. Küfeki taşının ortalama yansıtma

katsayısı 0,64 kabul edilerek yapılan hesaba göre beyaz yüzeyin yansıtma katsayısı 0,87 olarak hesaplanmıştır. Cami kubbesi ve yarı kubbeler Şekil 2.10'da görüldüğü üzere kırmızı, mavi, yeşil, altın, siyah ve beyaz renkte desenlerle bezenmiştir. Parıltı ölçümleri uzun bir mesafeden yapıldığı için tek bir rengin üzerine odaklanmak mümkün olmamıştır. Kubbe üzerinde çeşitli renklerdeki bölgelerde parıltı ölçümleri alınmış, bu değerlerin ortalaması alınarak beyaz bölgenin parıltısıyla oranlanmış ve hesaplanan değer kubbenin ortalama yansıtma katsayısı olarak kabul edilmiştir. Işık kaynaklarının kubbenin tam altında simetrik bir şekilde yerleştirilmiş olması ve kubbenin formu nedeniyle kubbe üzerindeki aydınlık düzeyi dağılımı düzgündür. Buna göre kubbenin beyaz bölgesinin parıltısı $5,70 \text{ cd/m}^2$, renkli bölgelerin çeşitli yerlerinde alınan parıltılar 1,98, 2,60, 2,95, 3,00 ve $3,98 \text{ cd/m}^2$ 'dir. Bu parıltıların ortalaması $2,90 \text{ cd/m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Beyaz bölgenin yansıtma katsayısı 0,87 olarak kabul edilirse, renkli bölgelerin yansıtma katsayısı 0,44 olarak hesaplanmaktadır.



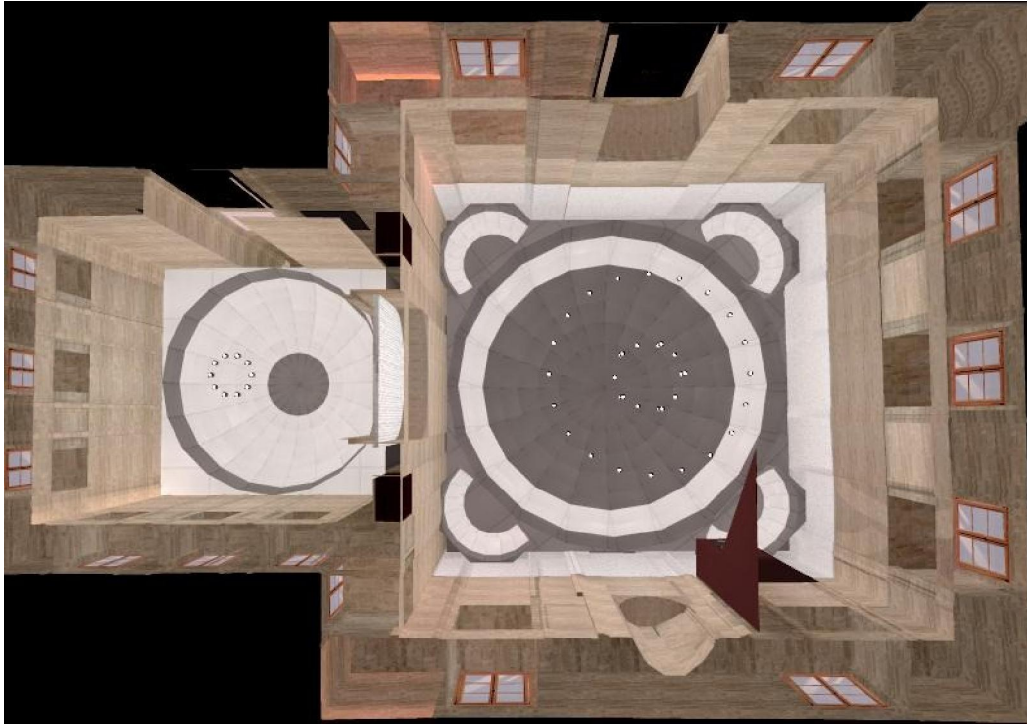
Şekil 2.10 : Cami kubbesi ve yarı kubbelerdeki desenler.

Yarı kubbelerin deseni ana kubbeye göre daha az bir bölge kaplamakta ve desenli bölgeler kırmızı, mavi ve sarı renkten oluşmaktadır. Alınan parıltı ölçümleri yarı kubbenin beyaz bölümünde parıltıyı $8,6 \text{ cd/m}^2$, renkli bölümlerde ise $4,6 \text{ cd/m}^2$ olarak göstermektedir. Bu iki değer kullanılarak yarı kubbenin renkli bölümlerinin yansıtma katsayısı 0,47 olarak hesaplanmıştır.

2.3 Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin Dialux ile Modellenmesi

Cami içindeki aydınlık düzeyi dağılımının değişik aydınlatma sistemleri kullanılarak incelenebilmesi için Dialux aydınlatma programı kullanılarak Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin üç boyutlu bir modeli oluşturulmuştur. Bunun için üç boyutlu model, Cami'nin orijinal rölövesi üzerine oturtularak cami mimari çizimine birebir uygun olarak modellenmiştir. Hazırlanan modelin tavanının bir görüntüsü Şekil 2.11'de verilmiştir.

Cami içindeki yüzeylerin yansıtma katsayıları cami içinde yapılan ölçümlere uygun olarak belirlenmiştir. Öncelikle, yapılan modelin ve seçilen yansıtma katsayılarının doğruluğunu test etmek ve cami içindeki mevcut durumda ölçüm yapılamayan noktalarda oluşan aydınlık düzeylerini belirleyebilmek için mevcut akkor telli lambalı durumun simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Akkor telli lambalı cami kandili için yapılan ölçümlerden elde edilen ışık dağılım eğrisi, Dialux programının tanıdığı formatlardan CIE tarafından belirlenmiş olan .ies uzantılı armatür dosyası haline getirilerek, programa eklenmiş ve cami içindeki aydınlık düzeyi dağılımları incelenmiştir.



Şekil 2.11 : Şemsi Ahmet Paşa Camii Dialux modeli alttan görünüm.

2.3.1 Modelin doğrulanması

Şemsi Ahmet Paşa Camii için Dialux Paket Programı ile hazırlanan üç boyutlu modelin gerçeğe uygunluğunu test etmek için öncelikle cami içindeki mevcut aydınlatma sistemi ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen modelin doğrulanması için öncelikle zeminde alınan aydınlık düzeylerinin karşılaştırılması yapılmıştır. İkincil doğrulama yöntemi olarak cami duvarlarında erişilebilen en yüksek noktalarda aydınlık düzeyi ölçümleri alınmıştır. Bu noktalar için Dialux modelinde ölçüm yüzeyleri oluşturulmuş ve elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Bunun için öncelikle cami içinde kullanılan cami kandilinin ışık dağılım eğrisi çıkartılmıştır.

2.3.1.1 Akkor telli lambalı cami kandili için ışık dağılım eğrisi

Daha önce de belirtildiği gibi, Cami içinde kullanılan kandillerde Philips Classicitone 40W/230V, 415 lm'lik akkor telli lambalar bulunmaktadır. Mevcut aydınlatma sisteminin ürettiği ışık dağılım eğrisinin görülebilmesi için kullanılan lamba kandil içine yerleştirilerek laboratuvar ortamında ışık dağılım eğrisi çıkarılmıştır. Ölçümler PRC Krochmann 110 Model ölçme gözü çapı 8 mm olan lüksmetre ile kaydedilmiştir. Elde edilen aydınlık düzeyi değerlerinden,

$$E = \frac{I_{\alpha}}{r^2} \cos \alpha \quad (2.2)$$

denklemleri ile ışık şiddeti değerleri hesaplanmıştır.

Burada,

E : Aydınlık düzeyi [lx],

I_{α} : Işık kaynağının α doğrultusundaki ışık şiddeti [cd],

r : Işık kaynağı ile aydınlık düzeyinin olduğu nokta arasındaki mesafe [m],

α : Ölçüm alınan yüzeyin normali ile ışık demeti arasındaki açıdır [°].

Bir ışık kaynağının noktasal kabul edilebilmesi için kaynağa sınır uzaklık adı verilen bir mesafeden bakılması gerekmektedir. Sınır uzaklık, kaynağın en büyük boyutunun 10 katı mesafesindeyse hata % 1'den küçük, 5 katı mesafesindeyse % 1 ila % 2 arasında kabul edilebilir. Burada ölçüm yapılan mesafe, $r = 1$ m, cami kandilinin en uzun boyutu 14,5 cm'dir. Bu durumda alınan ölçümlerin hata payı %1 ila % 2

arasındadır. Işık kaynağından gelen ışık demeti ile lüksmetrenin yerleştirildiği düzlemin normali arasında açılan α açısı, ölçme gözü tam kaynağın karşısında konumlandırıldığı için 0° 'dir. Bu durumda ölçülen aydınlık düzeyleri, (2.2) denkleminde göre hesaplanan ışık şiddeti değerlerine eşittir. Şebeke geriliminin 220 V olarak kullanılması durumunda akkor telli lambalar için şebeke geriliminin ışık akısı üzerindeki etkisini tanımlayan (2.3) numaralı denklemden yararlanarak [20]:

$$\Phi = \Phi_n (U/U_n)^{3,6} \quad (2.3)$$

ışık akısı değeri 353,4 lm olarak hesaplanmaktadır.

Burada,

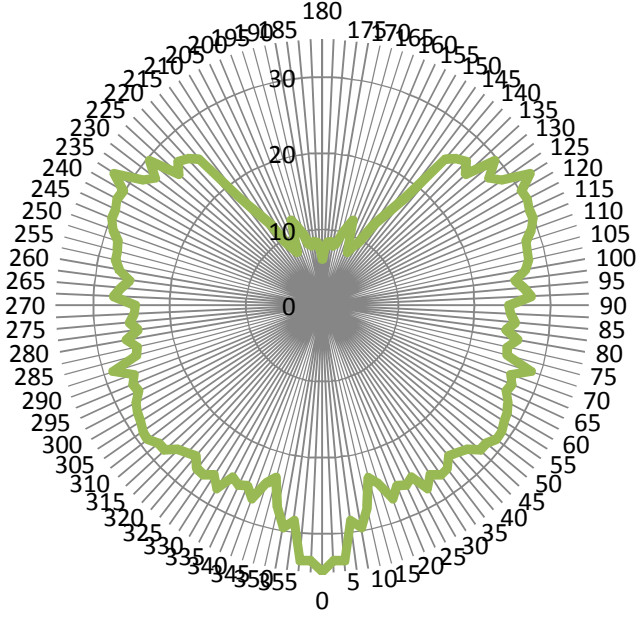
Φ : Hesaplanmak istenen ışık akısı [lm],

Φ_n : Kaynağın anma ışık akısı [lm],

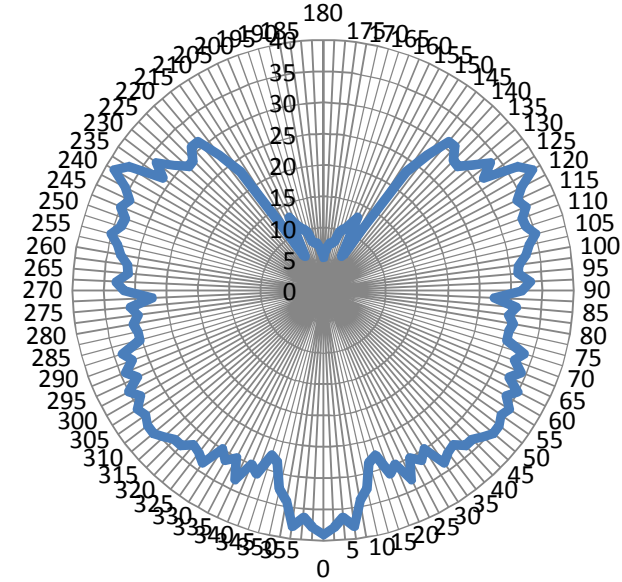
U : Işık akısı hesaplanmak istenen durumdaki gerilim değeri [V],

U_n : Anma gerilim değeridir [V].

Akkor telli lamba için ışık dağılım eğrileri C0-180 ve C90-270 düzlemlerinde 220 V ve 230 V için çıkarılmış ve eğrilerin birbirine yakın olması nedeniyle ışık dağılımı tüm düzlemlerde simetrik kabul edilmiş, ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak ışık dağılım eğrileri çizdirilmiştir. Buna göre akkor telli lamba için kullanılan (2.3) denkleminde ışık akısı değerleri 0,85 katsayısı ile çarpılmakta, 220 V ile 230 V'luk ölçümlerin arasındaki oran ise 0,88 olarak hesaplanmaktadır. Olası ölçüm hataları göz önünde bulundurularak, ışık akısı (2.3) denkleminde göre hesaplanmış ve 353,4 lm kabul edilmiştir. Şekil 2.12'de 220 V, Şekil 2.13'te 230 V için ışık dağılım eğrileri verilmektedir.



Şekil 2.12 : Akkor telli lambalı kandil 220 V ışık dağılım eğrisi [cd].

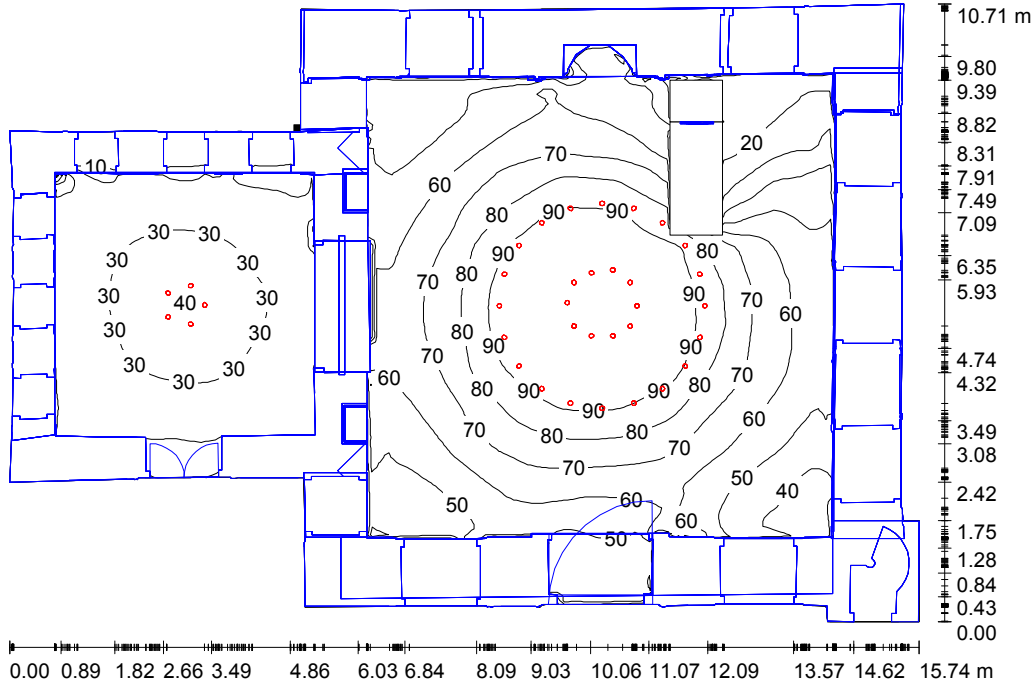


Şekil 2.13 : Akkor telli lambalı kandil 230 V ışık dağılım eğrisi [cd].

2.3.1.2 Cami zemininde aydınlık düzeyi değerleri

Cami içinde yapılan ölçümlerden elde edilen ve Şekil 2.9’da verilen aydınlık düzeyi dağılımı, Dialux simülasyonlarıyla elde edilen ışık dağılımı ile karşılaştırılarak simülasyonun gerçeğe yakınlığı belirlenmiştir. Cami içindeki ölçümler caminin restorasyonu esnasında, cami kullanıma açılmadan yapılmış olduğu için, Dialux simülasyonunda bakım işletme katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Şekil 2.14’te

Dialux simülasyonlarıyla Cami zemininde elde edilen eş aydınlık düzeyi eğrileri verilmiştir. Elde edilen değerler Şekil 2.10'da verilmiş olan cami zemini gerçek ölçüm sonuçları ile örtüşmektedir. Zeminde elde edilen maksimum aydınlık düzeyi 111 lx, ortalama aydınlık düzeyi 54 lx'tür.



Şekil 2.14 : Dialux ile cami zemininde eş aydınlık düzeyi eğrileri.

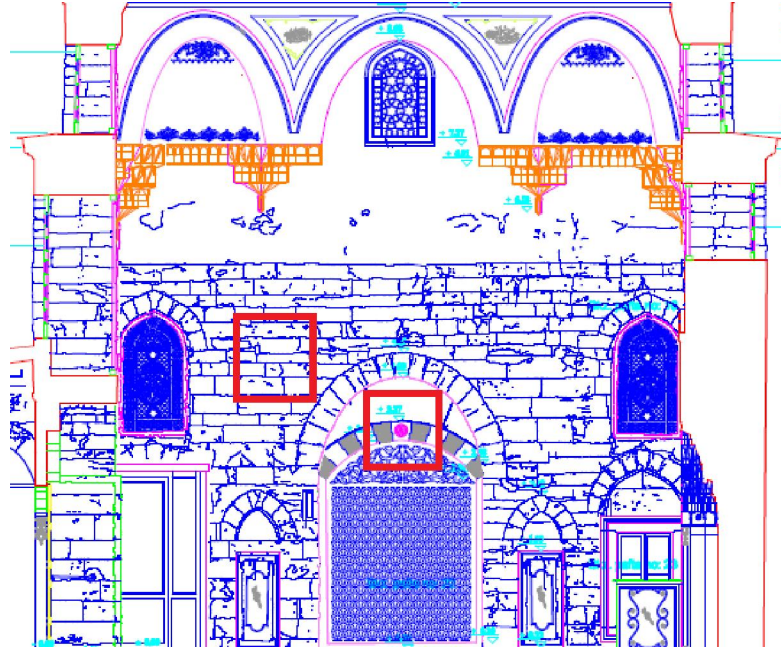
2.3.1.3 Cami duvarlarında aydınlık düzeyi değerleri

Zemindeki aydınlık düzeylerinin örtüşmesi Dialux simülasyonunun doğruluğu konusunda olumlu bir fikir vermekle beraber, kubbe ve duvarlarda oluşan aydınlık düzeyleri de dikkat edilmesi gereken önemli bir kriterdir. Cami kubbesinin yüksekliği nedeniyle herhangi bir ölçüm için kubbeye ulaşmak mümkün olmamıştır. Bu sebeple, Dialux simülasyonlarıyla karşılaştırmak için cami içinde ulaşılabilinen en yüksek noktada aydınlık düzeyi ölçümü alınmıştır. Buna göre, mihrap duvarında, mihrap ve solunda kalan pencere arasında 3,91 m yükseklikte 61 lx, cami ana bölümü ile türbenin bulunduğu bölüm arasında kalan duvar üzerinde 3,13 m yükseklikteki gül motifi üzerinde 57 lx ve ara duvarın sol tarafında 4,15 m yükseklikte küfeki taşı üzerinde 64 lx değerinde aydınlık düzeyi ölçümleri yapılmıştır. Dialux modelinin doğrulanması için, ölçüm alınan noktalara hesap yüzeyleri yerleştirilerek bu yüzeylerdeki aydınlık düzeyleri özel olarak hesaplanmıştır. Kullanılan hesap yüzeyleri Şekil 2.15 ve 2.16'da kırmızı çerçevelerle gösterilmektedir. Ölçümler esnasında cami içinde kullanılan akkor telli lambalardan

ikisinin çalışmadığı ve değiştirilmediği, bozuk olarak kandiller içinde bırakıldığı gözlemlenmiştir. Cami duvarları üzerinde alınan ölçümler modelin doğrulanması için kullanılırken, ölçümler alınırken bozuk olduğu tespit edilen iki adet akkor telli lamba aydınlatma sisteminden çıkarılmıştır. Caminin kullanımda olması sebebiyle bakım işletme katsayısı 0,80 kabul edilmiştir.



Şekil 2.15 : Mihrap duvarı üzerinde ölçüm yüzeyi.



Şekil 2.16 : Ara duvar üzerinde ölçüm yüzeyleri.

Çizelge 2.4'te cami duvarlarında alınan ölçüm değerleri ile Dialux'ten elde edilen simülasyon değerleri verilmektedir. Ölçülen aydınlık düzeyi değerleri ile

simülasyondan elde edilen ortalama değerler karşılaştırıldığında mihrap duvarı için % 1,6, ara duvardaki motif için % 3,5 ve ara duvardaki küfeki taşı için % 3,1 değerinde, oldukça düşük seviyelerde farklılıklar tespit edilmektedir. Dolayısıyla simülasyondan elde edilen aydınlık düzeyi değerleri ile cami içinde ölçülen gerçek değerlerin örtüşmesi hazırlanan modelin kabul edilebilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Çizelge 2.4 : Cami duvarları için aydınlık düzeyi değerleri.

Ölçüm Yüzeyi	Ölçülen Değer [lx]	Simülasyon Değerleri [lx]		
		Ortalama	Minimum	Maksimum
Mihrap Duvarı	61	60	58	64
Ara Duvarı Motif	57	55	53	58
Ara Duvarı Küfeki	64	62	58	65

2.3.2 Cami içi mevcut durum için simülasyon sonuçları

Şemsi Ahmet Paşa Camii için hazırlanan üç boyutlu modelin ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmasından sonra, cami içindeki önemli yüzeylerin aydınlık düzeyleri simülasyon programından faydalanarak incelenmiştir.

2.3.2.1 Minberde aydınlık düzeyi

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun ibadet hacimleri için belirlediği ve Çizelge 2.2'de verilen cami içi ortalama aydınlık düzeyi değeri 100 lux, okuma yapılacak rahlede ortalama yatay ve imamın vaaz verdiği minberde ortalama düşey aydınlık düzeyi 300 lux olarak belirlenmiştir. Cami içindeki mevcut durumda minberde oluşan düşey aydınlık düzeyini belirlemek için minberde ayakta duracak bir kişi için 2 m x 1 m boyutlarında bir hesap yüzeyi oluşturulmuş ve bu yüzey üzerindeki düşey aydınlık düzeyi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar hesap yüzeyindeki düşey ortalama aydınlık düzeyi değerinin 65 lx olduğunu göstermektedir. Bu değer standartta belirlenen 300 lx'lük değer çok altında kalmaktadır.

2.3.2.2 Kubbelerde aydınlık düzeyi

Dialux programı Cami ana kubbesini ve türbe kubbesini ikiyüzer parçadan oluşan birer tavan elemanı olarak incelemektedir. Kubbeler orta noktalarından başlayarak dışa doğru 10 sıraya bölünmüş ve her sıraya 20 eleman yerleştirilmiştir. Programın yaptığı hesap doğrultusunda bu parçalardan her biri üzerinde oluşan aydınlık düzeyini görmek mümkündür. Benzer şekilde yarı kubbeler de 10 parçadan oluşan

toplam 6 sıra şeklinde, toplam 60 parça olarak oluşturulmuştur. İnceleme kolaylığı için tavan parçaları üzerinde oluşan aydınlık düzeyleri Dialux'ten çıkartılarak ana kubbe, yarı kubbeler ve türbe kubbesi olarak ayrı ayrı ortalama aydınlık düzeyleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 2.5'te verilmektedir.

Çizelge 2.5 : Mevcut durum için kubbelerde ortalama aydınlık düzeyleri.

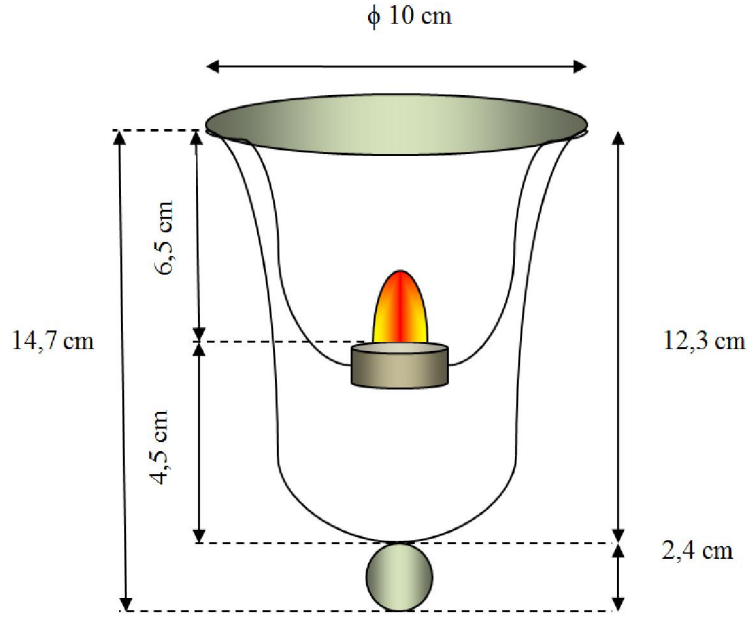
	E _{ort} [lx]		
	Direkt	Endirekt	Toplam
Ana Kubbe	1,51	15,96	17,49
Yarı Kubbe 1	4,64	19,07	23,77
Yarı Kubbe 2	4,11	18,52	22,66
Yarı Kubbe 3	4,42	18,85	23,33
Yarı Kubbe 4	4,29	18,08	22,40
Türbe Kubbesi	0,48	9,82	10,23

Çizelge 2.5'ten görüldüğü üzere kubbelerde oluşan aydınlık düzeyi değerleri, akkor telli lambanın yerleştirildiği kandilin üst yarı uzaya neredeyse hiç ışık göndermemesi sebebiyle çok düşüktür. Kubbe gerek inananların biraraya gelişini sembolize etmesi, gerek tarihi işlemleri, gerekse ışığı yansıtarak cami içine dağıtması açısından Cami'nin en önemli elemanıdır. Bu sebeple kubbe üzerindeki aydınlık düzeylerini yükseltmek önemlidir.

2.4 Zeytinyağı Kandili ile Çalışmalar

Tarihi camiler için modern bir kandil tasarımına başlamadan önce son adım olarak, zeytinyağı kandilinin tarihteki kullanım şekli incelenmiştir. Bunun için, bir cami kandili temin edilmiş, kandil tarihteki kullanımına uygun olarak zeytinyağı ile doldurularak yakılmış ve ışık dağılım eğrisi çıkarılmıştır. Deney için kullanılan yağ kandilinin en uzun boyutu 14,7 cm'dir. Kandil içindeki alevin kandil dışına çıkmadan yanması için çeşitli yağ yükseklikleri denenerek en uygun yükseklik 4,5 cm olarak belirlenmiş ve deney bu yükseklikteki zeytinyağı ile yapılmıştır. Kandil içinde eskiye uygun olarak fitilin yerleştirildiği bir mantar hazırlanmış ve bu mantar parçası ışığın alt yarı uzaya ulaşmasını minimum seviyede engelleyecek şekilde, parçalanmadan kullanılabilen en küçük çap olan 3 cm çapında kesilerek kandil içinde yerleştirilmiştir. Mantar parçası, yağ içinde hareket etmemesi için karşılıklı uçlarından bakır telle kandil üzerine sabitlenmiştir. Kandil boyutları ve mantarla fitilin yerleşimi Şekil 2.17'de, hazırlanan zeytinyağı kandili ise Şekil 2.18 (a) ve

(b)'de görülebilir. Ölçümlerin yapıldığı karanlık odada deney esnasındaki sıcaklık 23 ° C, bağıl nem ise % 54'tür.



Şekil 2.17 : Zeytinyağı kandilinin boyutları.

Ölçümlerin alınması sırasında içindeki yağ sebebiyle kandil hareket ettirilemediğinden, sınır uzaklık % 2'den küçük hata ile 1 m kabul edilmiş ve bu yarıçapta bir çember oluşturulmuştur. Kandil çember merkezine yerleştirilmiş, çember merkezinden 2,5 derecelik açılar açılarak, çember üzerinde bu açılara denk düşen noktalarda aydınlık düzeyi ölçümleri alınmıştır.



(a)

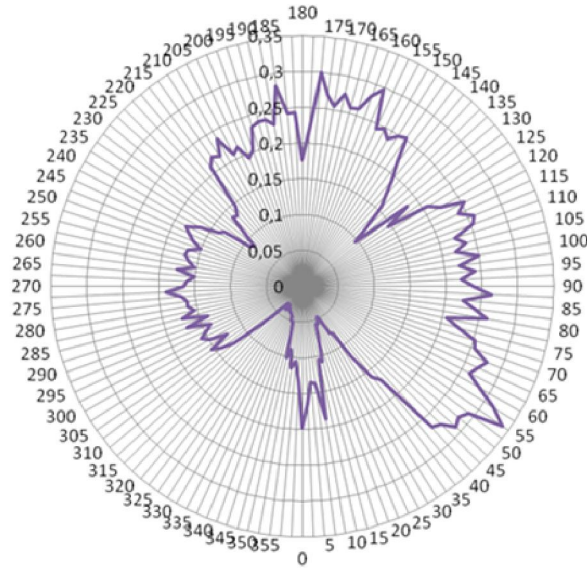


(b)

Şekil 2.18 : Yağ kandili: (a) Üstten görünüm. (b) Yandan görünüm.

Ölçümler PRC Krochmann 110 model ölçme gözü çapı 8 mm olan lüksmetre ile kaydedilmiştir. Elde edilen aydınlık düzeyi değerlerinden, (2.1) denklemi ile ışık şiddeti değerleri hesaplanmıştır. Burada ölçüm yapılan mesafe, $r = 1$ m ve ışık kaynağından gelen ışık demeti ile lüksmetrenin yerleştirildiği düzlemin normali arasında açılan α açısı, göz bir çember üzerinde, tam kaynağın karşısında olacak şekilde hareket ettirildiği için 0° 'dir. Dolayısıyla ölçülen aydınlık düzeyleri, hesaplanan ışık şiddeti değerlerine eşittir. Kandil ışığı, elektrikle elde edilen ışık gibi sabit bir ışık şiddeti oluşturmamaktadır. Buna ek olarak, hava akımı nedeniyle, kandil içindeki alev sürekli hareket halindedir. Bu sebeple, ölçüm esnasında lüksmetreden okunan aydınlık düzeyi değerleri büyük değişkenlik göstermektedir. Bununla beraber, elde edilen değerler, aydınlık düzeyinin farklı noktalarda belli aralıklar arasında hareket ettiğini göstermektedir. Bu sebeple, 2,5 derece aralıklarla lüksmetreden görülen değerlerin en düşük ve en yüksek olanları not edilerek, ışık dağılım eğrisi bu değerlerin ortalamaları için çizdirilmiştir. Elde edilen eğri Şekil 2.19'da görülebilir.

Şekil 2.19'dan görülebileceği üzere, laboratuvar içindeki hava akımı nedeniyle kandil alevi sağ tarafa yönelmektedir, bu sebeple elde edilen ışık dağılım eğrilerinde de 0-180 dereceler arasındaki değerler daha yüksek ışık şiddetine sahiptir.



Şekil 2.19 : Yağ kandili ışık dağılım eğrisi [cd].

Şekil 2.13'te verilmiş olan akkor telli lamba ile elde edilen ışık dağılım eğrisinin Şekil 2.19'daki zeytinyağlı kandil eğrisinden çok farklı olduğu net olarak görülmektedir. Zeytinyağı kandili ışığının büyük kısmını üst yarı uzaya gönderirken,

kandil içine sarkıtılan akkor telli lambada durum tam tersidir. Duy nedeniyle kandilin üst kısmına çıkan ışık miktarı düşüktür. Buna ek olarak, zeytinyağı kandilinde en yüksek ışık şiddetleri 0,4 cd civarındayken, bu değerler akkor telli lamba için 40 cd değerine çıkmaktadır. Bununla beraber, akkor telli lambalı sistemle elde edilen aydınlatmanın bile cami ana bölümünün merkezinden uzaklaştıkça yetersiz kaldığı saptanmıştır.

3. AYDINLATMA TASARIMI

Şemsi Ahmet Paşa Camii içindeki incelemeler tamamlandıktan ve Cami'nin Dialux Paket Programı'ndaki modeli hazırlanıp, doğrulandıktan sonra, doktora tez çalışmasının temelini oluşturan LEDli kandil tasarımına başlanmıştır.

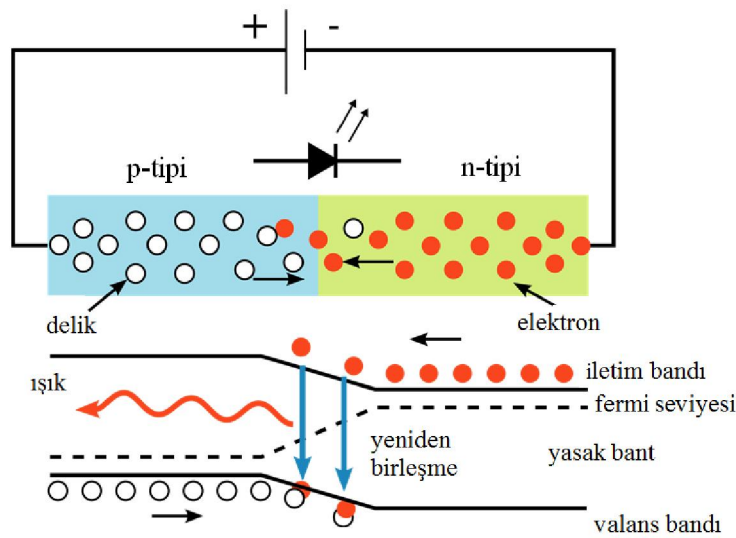
Işık üretim teorilerinden en yeni teknolojiye sahip olan Katı Hal Aydınlatması – Solid State Lighting (SSL), ışık yayan diyotlar - LEDler, organik ışık yayan diyotlar - OLEDler ve polimer ışık yayan diyotlar - PLEDlerle aydınlatmayı içermektedir. Bu kaynaklar arasından LEDli ışık kaynakları doğru tasarlandıklarında yüksek etkinlik faktörü değerleriyle genel aydınlatmadan kaynaklanan enerji tüketimini 2030 senesine kadar % 50 oranında azaltma potansiyeline sahiptir. Enerjide sağlanan tasarruf hem ekonomik anlamda, hem de sera gazlarının salınımını azaltması sebebiyle çevresel anlamda büyük bir kazanımdır [21].

LEDler geleneksel ışık kaynaklarında bir arada bulunmayan kompaktlık, uzun ömür süreleri, bakım avantajları, kırılma ve titreşime karşı direnç gösterme, düşük sıcaklıklarda artan performans, anında ışık verme özelliği, yüksek etkinlikli loşlaştırma, dijital kontrol olasılıkları ve çok düşük seviyede kızıl ötesi ve mor ötesi yayılım gibi önemli özelliklere sahiptirler. Kolay loşlaştırılmaları ve renk kontrolünü mümkün kılmaları LEDleri her tür mimari aydınlatma için tercih edilir hale getirmektedir. LEDlerin yönlü ışık yaymaları ise reflektör ve difüzörlerin kullanımını minimuma indirerek aydınlatma sistemlerinin verimini yükseltmektedir. Akkor telli ve floresan lamba gibi geleneksel ışık kaynakları ise çok yönlü ışık yayımları sebebiyle armatür içi kullanımlarda ışığın yeniden yutulması veya saçılması gibi sorunlara sebep olmaktadır [22, 23]. SSL ışık kaynakları, yüksek etkinlik faktörleri, üstün renk özellikleri ve kontrol edilebilirlikleri ile geleneksel aydınlatma yöntemlerinin önüne geçmektedirler. Buna rağmen, dünyada kullanılmakta olan aydınlatma sistemlerinin % 66'sı LEDler'den çok daha eski ve enerji tasarrufu açısından zayıf kalan teknolojilerdir [24].

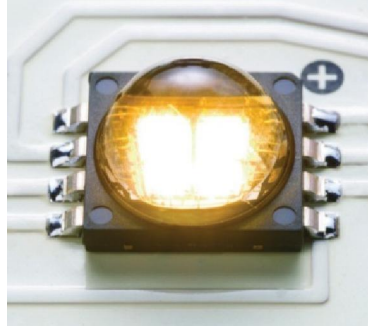
3.1 LEDler

LED ya da Işık Yayan Diyot, mor ötesi, görünür ve kızıl ötesi spektrumda ışık yayan yarı iletken elemanlara verilen isimdir. LED, yarı iletken diyotun özel bir çeşididir. Diyot, akımın sadece tek yönde akmasına müsaade eden özel bir elektronik elemandır. Diyot üzerindeki akım, üzerine uygulanan gerilime bağlıdır. LEDlerin gelişimindeki temel teknoloji, 1960larda bilim adamları yarı iletken bir çip üzerinde çalışmaya başladıklarında ortaya çıkmıştır. İlk kullanılabilir LED buluşu, 1962 senesinde, transistörün mucidi John Bardeen'in ilk öğrencisi olan Nick Holonyak tarafından yapılmıştır.

LEDlerle ışık üretiminin temeli yarı iletken malzemede yatmaktadır. LED üretimi için ilk adım yarıiletken malzemeyi katkılamaaktır. Katkılama sayesinde, malzeme içinde serbest elektronlar ve elektron delikleri üretilir ve bir p-n jonksiyonu oluşturulur. P-n jonksiyonu serbest elektronları barındıran n-tipi bir yarı iletkenle, elektron deliklerini barındıran p-tipi yarı iletkenin bir araya gelmesiyle oluşur. Şekil 3.1'de bir LED'de yarı iletkene ileri yönde bir akım uygulandığında serbest elektronların iletim bandından valans bandına geçip elektron delikleriyle yeniden birleşerek bir alt enerji seviyesine inmesiyle enerji açığa çıkması şematik olarak gösterilmektedir. Bu enerji foton olarak açığa çıkmakta ve bu şekilde ışık üretilmektedir [25]. Şekil 3.2'de ise dünyada ileri gelen LED paketi üreticilerden Cree'nin yüksek güçlü bir LED paketi gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : LED'de ışık üretimi [26].



Şekil 3.2 : Cree yüksek güçlü LED paketi.

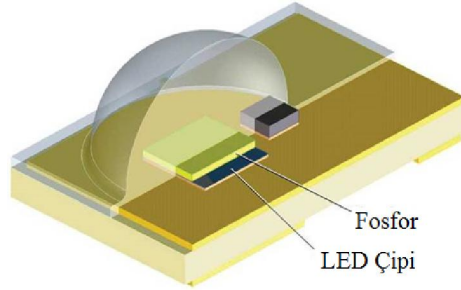
30 yılı aşkın süre boyunca sadece elektrikli aletlerde gösterge ışığı olarak kullanılan LEDler, teknolojik gelişmelerin sonucunda aydınlatma alanına hızlı bir giriş yapmış ve enerji tasarrufu konusundaki üstün özellikler sayesinde sera gazlarının salınımı ve küresel ısınmaya karşı verilen savaşta önemli bir yer edinmiştir [27]. LEDlerin en büyük avantajı, tartışmasız yüksek etkinlik faktörleri ile sağladıkları enerji tasarrufu potansiyelidir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'nın "Katı Hal Aydınlatmanın Genel Aydınlatma Uygulamaları'nda Sağladığı Enerji Tasarrufu Potansiyeli" başlıklı raporunda, mevcut ışık kaynaklarının LEDlerle değiştirilmesi sonucunda gelecek 20 yıl içinde ABD'nin enerji masraflarında 250 milyar dolar tasarruf edilebileceği, aydınlatma kaynaklı enerji tüketiminin % 50 oranında, CO₂ salınımının ise 1800 milyon metrik ton mertebesinde azaltılabileceği belirtilmektedir [21].

3.1.1 Beyaz ışık üretimi

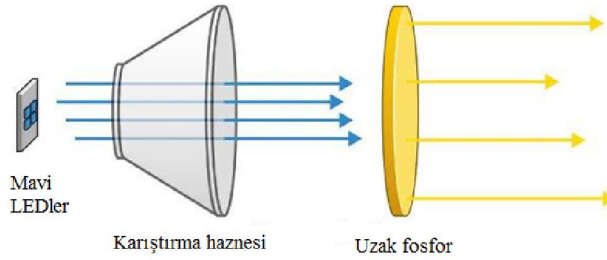
LEDler spektrumda çok dar bir dalgaboyu aralığında, hemen hemen monokromatik ışık üretirler. Bu sebeple LEDlerin trafik ışıkları ve renk gerektiren mimari tasarımlar gibi renkli uygulamalarda kullanımı oldukça avantajlıdır. Genel aydınlatma uygulamalarında ise görünür spektrumdaki farklı dalgaboylarının biraraya gelmesiyle elde edilen beyaz ışığa ihtiyaç vardır.

LEDli ışık kaynakları direkt olarak veya fosfor dönüşümü ile üretilen spektral bileşenleri biraraya getirerek beyaz ışık üretmektedir. Bu durum, LEDli kaynakların geleneksel kaynaklardan farklı spektral dağılımlara sahip olmasına sebep olmaktadır. Akkor telli lambalar çok geniş bir dalgaboyu aralığında ışık yayarken, floresan lambaların, lamba iç çeperinde kullanılan fosforlara bağlı olarak daha kısıtlı bir dalgaboyu dağılımı vardır. LEDlerde en çok kullanılan beyaz ışık üretim teknikleri ise fosfor çevrimi ve kırmızı-yeşil-mavi LEDlerle renk karıştırma (Red-Green-Blue –

RGB) yöntemleridir. PC (Phosphor Converted) LED’de, LED paketi üzerine kaplanan fosfor tabaka düşük dalga boyunda üretilen enerjiyi yutup, daha yüksek bir dalga boyunda yaymaktadır. Bu amaçla mavi veya morötesine yakın renkte bir LED sarı fosfor ile kaplanmakta veya uzak fosfor teknolojisi kullanılarak, fosfor kaplı malzeme LED’e belirli bir mesafede yerleştirilmektedir. Şekil 3.3’te fosfor kaplı LED paketi ve Şekil 3.4’te uzaktan fosfor teknolojinin çalışma şekli gösterilmektedir [28].

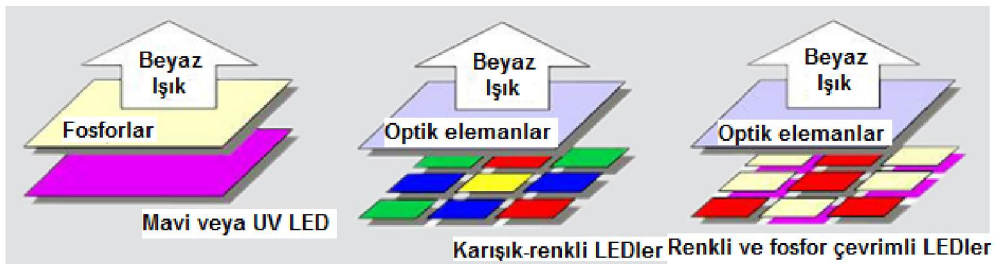


Şekil 3.3 : Fosfor kaplı LED paketi.



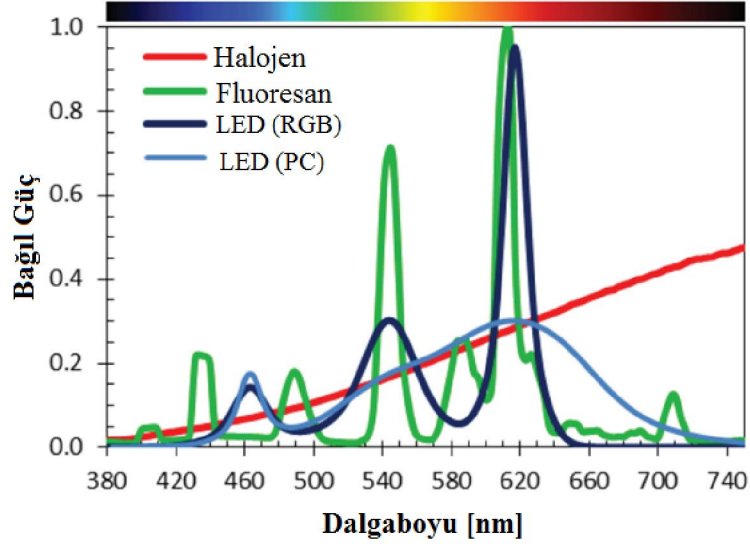
Şekil 3.4 : Uzaktan fosfor teknolojisi.

Renk karıştırma yöntemiyle beyaz ışık üretiminde ise kırmızı, yeşil ve mavi LEDlerin ışığı bir arada kullanılarak beyaz ışık üretilmektedir. Spektrumun sarı bölgesini iyileştirmek için bu karışıma kehribar rengi bir LED de eklenebilmektedir. Farklı spektral dağılımlar için monokromatik LEDlerle beraber fosfor çevrimli LEDler de kullanılmaktadır. Şekil 3.5’te gösterilen bu yöntemlerle beyaz ışık üretimi anlatılmaktadır.



Şekil 3.5 : LEDlerle beyaz ışık üretimi [22]

Şekil 3.6’da halojen ve floresan lambalar ve fosfor dönüştümlü ve RGB LEDler için spektral güç dağılım eğrileri verilmiştir. Tüm kaynakların ışık akıları birbirine eşittir ve hepsinin renksel geriverim katsayısı 80, renk sıcaklıkları 2700 K’dir. Bu şekil, insan gözüne aynı kalitede beyaz ışık gibi gözüken kaynakların aslında ne kadar farklı spektral dağılımlara sahip olduğunu önemli bir göstergesidir.



Şekil 3.6 : Halojen, floresan ve LED kaynakların spektral güç dağılım eğrileri [29].

3.1.2 Etkinlik faktörü

Bir ışık kaynağının şebekeden çektiği birim güç başına ürettiği ışık akısı miktarına etkinlik faktörü adı verilir. Birimi lm/W’tır, *e* harfiyle gösterilir. Bir LED paketinin etkinlik faktöründen bahsedildiğinde, verilen değerin sürücü, optik ve ısı kayıplar hesaba katılmadan, sadece LED paketine uygulanan güce göre elde edilen ışık akısı değeri olduğuna dikkat edilmelidir. Çizelge 3.1’de Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı’nın LEDler ve geleneksel ışık kaynakları arasındaki farkları ortaya çıkarmak için hazırlamış olduğu 2013 yılı ışık kaynakları genel etkinlik faktörü değerleri verilmektedir. Çizelgede referans alınan ışık kaynaklarına ilişkin bilgiler çizelgenin alt kısmında dip olarak verilmektedir.

Çizelge 3.1’e bakarak, LED paketlerinin farklı ısı, optik ve elektronik çözümlerle biraraya geldiklerinde etkinlik faktörlerinin değişiklik gösterdiği görülmektedir. Burada en yüksek etkinlik faktörü değeri endüstriyel yüksek tavan modülünde yakalanmıştır; bu değer, benzer uygulamalarda tercih edilen yüksek güçlü deşarj lambalarının etkinlik faktörü değerinin üzerine çıkmayı başarmıştır.

Çizelge 3.1 : Işık kaynaklarının 2013 yılı etkinlik faktörü değerleri [30].

Işık Kaynağı	e [lm/W]
LED A19 sıcak beyaz lamba ¹	94
LED PAR38 sıcak beyaz lamba ²	78
LEDli sıva altı modülü ³	118
LEDli endüstriyel yüksek tavan modülü ⁴	119
OLED Modül ⁵	52
Yüksek güçlü deşarj lambası ⁶	115
Lineer floresan ⁶	108
Düşük güçlü deşarj lambası ⁶	104
Kompakt floresan lamba	73
Halojen lamba	20
Akkor telli lamba	15

1. Philips L Ödülünü kazanan A19 lambası değerleri
2. Cree LRP38-10L-30K lambası değerleri
3. Cree CS14-40LHE-35K modülü değerleri
4. Cree CS18-80LHE-35K modülü değerleri
5. Acuity Brands modülü değerleri
6. Balast kayıpları dahil olarak elde edilen değerler

Günümüzde LED pazarının büyük kısmı, mevcut armatürlerin elektriksel bağlantılarına ve formlarına uyum sağlayabilmek için, eskiye uygun anlamına gelen “Retrofit” ismiyle geleneksel ışık kaynaklarının yerini alacak ışık kaynaklarından oluşmaktadır. Çizelgede verilen LED A19 veya LED PAR 38 gibi kaynaklar, LEDler kullanılarak geleneksel tiplerde tasarlanmış ışık kaynaklarıdır. Şekil 3.7 ve 3.8’de A19 akkor telli lamba ve PAR 38 halojen spotların yerini almak üzere tasarlanmış LEDli retrofitlerden örnekler görülmektedir [45].



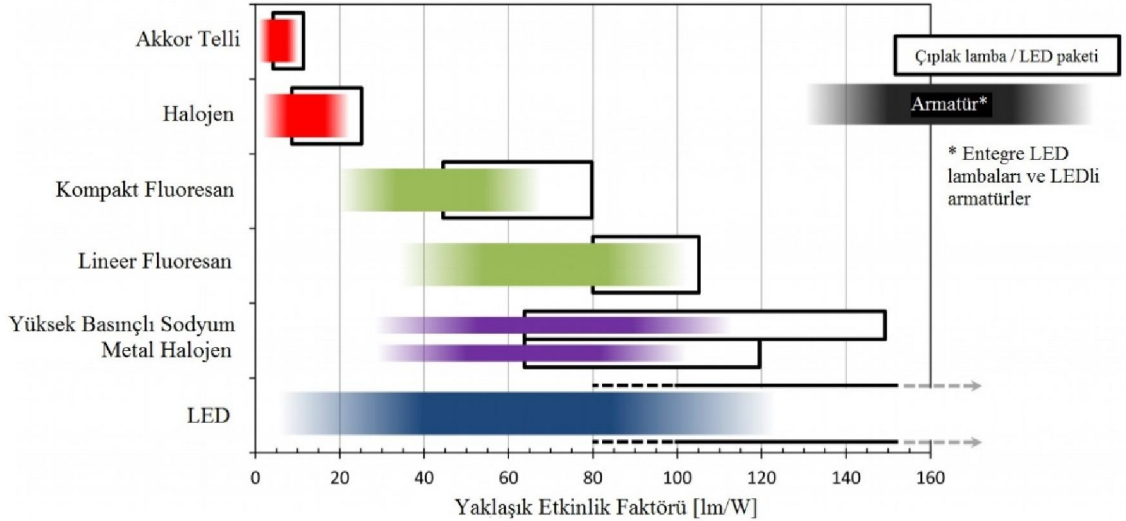
Şekil 3.7 : A19 akkor telli lamba ve A19 LEDli retrofit.



Şekil 3.8 : PAR 38 halojen lamba ve PAR 38 retrofit.

Retrofitlerin tasarımı geleneksel kaynakların ışık akısı değerlerine ulaşmak, bu kaynaklara benzer ışık dağılımları elde etmek, bu kaynaklara görsel olarak benzeyebilmek, mevcut elektriksel bağlantılardan maksimum derecede faydalanabilmek ve bu özellikleri sağlarken ısı tasarımı da etkin bir şekilde gerçekleştirmek hedeflenmektedir.

Şekil 3.9'da ışık kaynaklarının etkinlik faktörleri bir grafik haline getirilerek sunulmuştur [31]. Burada siyah çerçeveli kutular çıplak lamba veya LED paketinin etkinlik faktörü değerlerini gösterirken, renklerle taranmış alanlar ise bu kaynakların armatür içine yerleştirildiği durumda elde edilen etkinlik faktörü değerlerini göstermektedir. Şekilden açıkça görüldüğü üzere kaynakların tek başına olan etkinlik faktörü değerlerinin alt limitleri, hesaplara ısı, optik ve sürücü kayıplarının da girmesiyle daha düşük seviyelere inmektedir. Bu durum özellikle LEDli kaynaklar için büyük problem teşkil etmektedir. Ocak 2013 değerlerine göre doğru tasarımlarla üretilen LEDli kaynaklar için etkinlik faktörü değerleri 120 lm/W seviyelerine çıkarken, hatalı tasarımlar ve yanlış kullanımlar sonucunda bu değerin 10 lm/W'a kadar düşebildiği görülmektedir.



Şekil 3.9 : Işık kaynakları için yaklaşık etkinlik faktörü değerleri (Ocak 2013).

3.1.3 Ömür

Akkor telli lamba, floresan lamba ve deşarj lambaları gibi geleneksel ışık kaynakları ele alındığında, lambanın eskimesi veya lamba içi parçaların herhangi bir sebeple zarar görmesine bağlı olarak lamba ömrü sona ermektedir. Bu tür ışık kaynaklarında lamba balastı veya armatür kasası gibi, aydınlatma sisteminin diğer

parçalarının ömür süreleri lambadan bağımsızdır. Buna ek olarak lambaların değişimi oldukça kolay ve düşük maliyetlidir. Dolayısıyla bu tür ışık kaynaklarında ömür süresi aydınlatma sistemindeki diğer parçalardan bağımsız olarak tanımlanır. Söz konusu ışık kaynaklarının ömür süreleri ölçümler veya öngörü modelleri üzerinden, yüksek sayıda bir lamba örnekleminin % 50sinin arızalanması için geçen süre olarak belirlenir. Bu medyan zaman süresi “faydalı ömür” olarak tanımlanır ve B_{50} şeklinde gösterilir [32].

LEDli sistemlerde ise durum geleneksel ışık kaynaklarından oldukça farklıdır. Piyasadaki LEDli ürünler ağırlıklı olarak bütünleşik armatürler, bütünleşik sürücülü lambalar, ayrı sürücülü lambalar ve modüller halinde yer almaktadır. LED sistem performansı, sistem elemanları arasındaki etkileşimlere göre belirlenmektedir. Örneğin LED paketinin ömür süresi büyük ölçüde ısı tasarımı bağlıdır; LEDli lambanın performansı ise monte edilmiş olduğu armatüre göre değişkenlik göstermektedir. Komple bir LEDli kaynak için anma ömür süresi belirlemek ise hem masraflı olması, hem de ömür süresinin belirleneceği zaman içinde, teknolojiye hızlı ilerlemeler nedeniyle eldeki kaynağın eski bir teknoloji haline gelmesi sebebiyle anlamsızdır. Dolayısıyla, geleneksel ışık kaynaklarının ömür sürelerini karakterize etmek için kullanılan yöntemler, LEDli sistemler için geçersizdir.

LED paketine ek olarak, ısı yönetim, optik tasarım, kablolar, bağlantı elemanları, mühürler, dış ortamdan koruyucu elemanlar gibi herhangi bir LEDli sistem bileşeninin bozulması ürünün direkt veya endirekt olarak tamamen bozulmasına yol açabilir. LEDli ürünlerde, iki çeşit arızayla karşılaşılmaktadır. Bunlardan ilki, katastrofik arıza (yıkımsal işgörmezlik veya ciddi arıza) gerçekleştiğinde, kaynak bir daha çalışmamak üzere bozulur. Parametrik arıza adı verilen ikinci arıza çeşidinde ise üretilen ışığın kalitesi veya miktarı kabul edilebilir seviyelerin altına düşer. Dolayısıyla bir LED ürününün faydalı ömrü belirlenirken, sistem bileşenlerinin her biri için tüm katastrofik ve parametrik arıza ihtimalleri dikkate alınmalıdır.

LEDli aydınlatma sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biri LED paketidir. LED paketlerinin katastrofik arızası çok seyrek görülmekle beraber, ışık akısında, ışık şiddeti dağılımında, renk sıcaklığında, renksel geriverimde ve etkinlik faktöründeki gerilemeler gibi parametrik arızalara sık sık rastlanmaktadır. Bu gerilemelerden en önemlisi ışık akısındaki azalmadır. Işık akısı arızası için temel kriter, ışık çıktısının ilk çalışma anındaki değerine düşmesidir. Bu ömür süresi L_{70} olarak

belirtilmektedir. Bir ürün örnekleminin %50'sinin L_{70} seviyesine ulaştığı süre, ışık akısının korunduğu anma değeri olarak kabul edilir ve bu değer L_{70} - B_{50} olarak gösterilir. Işık akısı koruma performansını ölçmek için kullanılan başka bir yöntem ise sabit bir zaman aralığında (örneğin 25000 saat) öngörülen ışık akısını belirlemektir. Bu yöntem ürünleri karşılaştırmayı kolaylaştırmakta ve özellikle L_{70} süresi ürünün hedeflenen kullanım ömrünü veya sistemde yer alan başka bir bileşenin ömür süresini aştığında faydalı olmaktadır. Çizelge 3.2'de çeşitli kaynaklar için yine Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'nın LEDlerle ilgili hazırladığı rapor doğrultusunda 2013 senesi değerlerine göre L_{70} değerleri verilmektedir.

Çizelge 3.2 : Işık kaynaklarının 2013 L_{70} değerleri [30].

Işık Kaynağı	L_{70} [saat]
LED A19 sıcak beyaz lamba ¹	30000
LED PAR38 sıcak beyaz lamba ²	50000
LEDli sıva altı modülü ³	75000
LEDli endüstriyel yüksek tavan modülü ⁴	75000
OLED Modül ⁵	15000
Yüksek güçlü deşarj lambası ⁶	15000
Lineer floresan ⁶	25000
Düşük güçlü deşarj lambası ⁶	15000
Kompakt floresan lamba	12000
Halojen lamba	8400
Akkor telli lamba	1000

1. Philips L Ödülünü kazanan A19 lambası değerleri
2. Cree LRP38-10L-30K lambası değerleri
3. Cree CS14-40LHE-35K modülü değerleri
4. Cree CS18-80LHE-35K modülü değerleri
5. Acuity Brands modülü değerleri
6. Balast kayıpları dahil olarak elde edilen değerler

LED paketlerinde karşılaşılan diğer önemli parametrik arıza ışık rengindeki değişiktir. Bazı uygulamalarda ışık rengindeki bir değişiklik, ışık akısındaki bir azalmadan çok daha önemli olabilir. Fakat renk kaymalarının öngörülmesi oldukça zordur ve ortaya koydukları problem güvenlikten ziyade estetiği etkilemektedir. Bu sebeple, renk kaymaları, ışık akısındaki azalmalara kıyasla daha az önemsenmektedir. Başka bir parametrik arıza ise, ışık şiddeti dağılımındaki belirgin değişikliklerdir, fakat bu değişiklikler de ışık akısındaki azalmalarla ilişkilendirilmektedirler. Örneğin, bir armatürdeki LEDlerin yarısı çalışmaz duruma gelirlirse, hem ışık dağılımı hem de ışık akısında bozulmalar olacaktır.

LED paketinin yanı sıra, diğer sistem bileşenleri de LEDli ürünün arızalanmasına sebep olabilirler. Örneğin sürücü devresi, her elektronik araç gibi, kendi iç

bileşenlerine bağlı bir faydalı ömür süresine sahiptir ve bu süre LED paketinin öngörülen ömür süresinden oldukça kısa bir süredir. Sürücüye ek olarak, özellikle yüksek sıcaklıklarda, soğutucular ve fanlar gibi ısı tasarımı bileşenleri kir ve yağ birikimi sebebiyle etkinliğini yitirebilir, optik malzemelerin renklerinde değişiklikler ve bozulmalar gerçekleşebilir. Bağlantı elemanları bir araya getirilen bileşenler arasındaki uyumsuzluklar sebebiyle zamanından önce eskiyebilirler. Çoğu zaman, bu dış bileşenlerin arızaları ancak ürünler belli bir süre boyunca çalıştıktan sonra ortaya çıkmaktadırlar ve önceden tahmin edilmeleri oldukça güçtür. Bununla beraber, LED aydınlatma sistemlerini oluşturan malzemeler ve ürünlerle ilgili bilgi zamanla artmakta ve paylaşılarak iletilmekte, bu sayede ortaya çıkabilecek problemleri tanımak ve önlemek kolaylaşmaktadır.

3.1.4 Renksel geriverim endeksi (Ra)

Genel aydınlatmada, bir ışık kaynağının en belirgin özelliklerinden biri renksel geriverim endeksidir. CIE renksel geriverimi “bir aydınlatma elemanının ışığı altında objelerin renksel görünümünün referans bir aydınlatma elemanının ışığı altındaki renksel görünümüyle bilinçli veya bilinçaltı ile karşılaştırması sonucu ortaya çıkan etki” olarak tanımlar [33]. Daha basitçe açıklamak gerekirse, renksel geriverim bir ışık kaynağının ürettiği ışık altında objelerin renklerinin ne kadar doğal gözüktüğünü belirtir [34]. Işık kaynağının renksel geriverim özelliği, kaynağın genel aydınlatmadaki kullanım alanını belirler; örneğin bir mağaza aydınlatmasında düşük geriverim endeksli ışık kaynaklarının kullanımı söz konusu değildir. CIE tarafından tanımlanan renksel geriverim endeksi CRI (Color Rendering Index), uluslararası kabul gören bir ölçüdür [35], fakat konu LEDlerin CRI değerine geldiğinde, problemlerle karşılaşmaktadır. LEDlerde beyaz ışık fosfor çevrimi veya renk karıştırma yöntemleriyle elde edildiği için bu kaynakların spektral performansları geleneksel ışık kaynaklarından farklıdır. RGB LEDlerin görsel değerlendirmesi ve renksel geriverim endeksi arasındaki ilişkinin zayıf olması, dar aralıklı spektruma sahip kaynaklar için CRI ölçütünün yeterli olmadığını ortaya koymaktadır [36]. Bu sebeple LEDlerin renksel geriverimini ölçebilmek için Renk Kalite Skalası gibi yeni teknikler ortaya atılmıştır [37]. Fakat bu konuda daha titiz çalışmalar ve standardizasyon ihtiyacı mevcuttur.

3.1.5 İlişkili renk sıcaklığı

Işınım tayfı Planck eğrisinden çok farklı olan kaynaklar için ‘İlişkili Renk Sıcaklığı’ (CCT – Correlated Color Temperature) ifadesi kullanılır. Bir ışık kaynağının ilişkili renk sıcaklığı değeri, aynı parlaklık ve gözlem şartlarında, kendisinininkine en yakın rengi veren siyah cisim ışımasının sıcaklığı olarak kabul edilir [38]. Daha basit açıklamak gerekirse, CCT beyaz ışığın Kelvin skalasında sıcaktan soğuğa doğru bağlı renk görünümünü tanımlar. CCT aydınlatılan objelerin değil, yayılan ışığın renginin ölçütüdür. Siyah cisim ısındıkça rengi kırmızı, turuncu, sarı, beyaz ve son olarak maviye döner. Bir ışık kaynağının CCT değeri de ısıtılmış siyah cismin renginin ışık kaynağı tarafından yayılan ışığa en çok benzediği sıcaklık değeridir [29]. Dolayısıyla daha düşük renk sıcaklıkları kırmızı ve turuncuya yakın olan ve “sıcak” olarak adlandırılan renklerdeyken, daha yüksek renk sıcaklığı değerleri “soğuk” olarak adlandırılan, beyaz ve maviye yakın renklerdir.

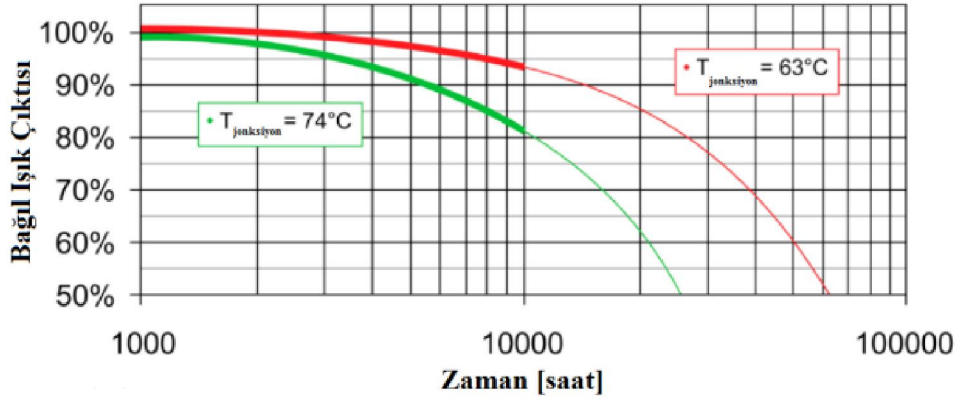
LEDlerle, genel aydınlatmada kullanılan geleneksel ışık kaynaklarına yakın renklerde ışık elde etmek mümkündür. Fakat kuantum etkinliklerindeki farklılıklar LEDler için farklı etkinlik faktörü değerleri oluşturmaktadır; daha yüksek ilişkili renk sıcaklığına sahip LEDlerin etkinlik faktörleri, daha düşük ilişkili renk sıcaklıklı LEDlere göre daha yüksektir [29].

3.1.6 Isıl problemler

Elektronik elemanlardan akım akitildiğinde ısı üretimi gerçekleşmektedir. Üretilen ısı, elemanın sıcaklığının artmasına sebep olur ve ortaya çıkan sıcaklık farkı elemanlar üzerinde oluşan ısının en düşük ısı direnç üzerinden uzaklaşmasını sağlar. Elemanların sıcaklığı, üretilen ısı yayılan ısıya eşitlendiği zaman dengeye ulaşır. Elemanlar üzerindeki sıcaklığı minimum seviyede tutmak için, elemanla nihai soğutucu hava arasında etkin ısı geçiş yolları sağlamak gerekmektedir [39]. Isı geçişi, sıcaklık farkı sonucunda gerçekleşen enerji aktarımıdır [40].

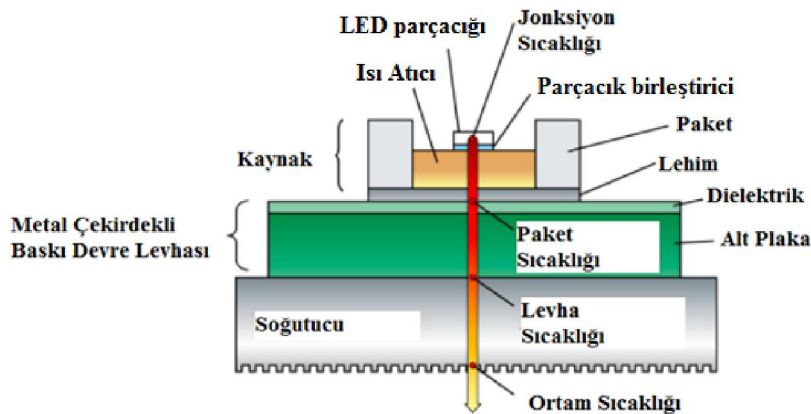
Tüm ışık kaynakları elektriksel gücü farklı oranlarda ısı ve ışığa çevirirler. Yüksek güçlü LED çiplerinde giriş gücünün yaklaşık % 80’i LED’den uzaklaştırılması gereken ısıya dönüşürken, sadece kalan %20’lik kısım görünebilir ışığa dönüşmektedir. LEDlerin çalışma sıcaklığı, LED güvenilirliği ve dayanıklılığının en önemli belirleyicilerindendir [41].

LEDlerde yüksek sıcaklıklarda sürekli çalışma ışık akısındaki azalmayı ciddi şekilde hızlandırarak kullanışlı ömür süresini kısaltmaktadır. Şekil 3.10'da iki benzer LED'in jonksiyon sıcaklıkları arasında 11°C fark varken 10000 saat çalışmaları sonucundaki bağıl ışık akıları verilmektedir. Kullanışlı ömür süresi daha yüksek sıcaklıkta çalışan LED için 37000 saatten 16000 saate inmektedir; bu durum sıcaklıkta 11° 'lik bir artışın kullanışlı ömür süresinde % 57'lik bir düşüşe sebep olduğunu göstermektedir [42].



Şekil 3.10 : Beyaz LEDlerin farklı çalışma sıcaklıklarında kullanışlı ömür süreleri.

LEDlerin jonksiyon sıcaklığını etkileyen üç temel büyüklük sürülme akımı, ısı yal ve çevre sıcaklığıdır. Genellikle, sürülme akımı yükseldikçe, jonksiyonda oluşan ısı da yükselmektedir. Öngörülen ışık çıktısı, ömür süresi ve ışık rengi değerlerinin elde edilebilmesi için üretilen ısınn LED'den uzaklaştırılması gerekmektedir. LED'den uzaklaştırılabilecek ısı miktarı çevre sıcaklığına ve jonksiyonla çevre arasındaki ısı yalına bağılıdır. Yüksek güçlü bir LED sistemi genel olarak ışık kaynağı, baskı levha devre ve bir çeşit dış soğutucudan oluşmaktadır. Şekil 3.11'de tipik bir yüksek güçlü LED sisteminin modeli görölmektedir.



Şekil 3.11 : Yüksek güçlü LED sistemi modeli [42].

Işık kaynağı LED parçacığını, optik elemanları, çevreleyen paketi ve parçacıktan ısıyı uzaklaştırmak için kullanılan ve baskı levha devreye lehimlenen ısı atıcısı içerir. Yüksek güçlü LED uygulamalarında en çok tercih edilen baskı levha devre tiplerinden biri metal çekirdekli baskı devre levhadır (Metal core printed circuit board - MCPCB). MCPCB genellikle alüminyumdan yapılan metal bir alt katmana bağlanan dielektrik bir katman içeren özel bir devre levhasıdır. MCPCB mekanik olarak dış soğutucuya bağlanır.

Soğutucunun boyutları atılması gereken ısıya, kullanılan malzemenin ısı özelliklerine ve ortam koşullarına göre belirlenmelidir. Özel uygulamalar için piyasada mevcut olan soğutucuları kullanmak mümkün olmayabilir. Bu durumda yeni bir soğutucu tasarımına başvurulmalıdır. Tasarlanan soğutucunun istenen ısı sonuçları verip vermediği basit sistemlerde kolaylıkla hesaplanabilirken, sistemin karmaşıklığı arttıkça, analitik çözüm ile istenen değerlere ulaşmak zorlaşmaktadır. Tasarlanan soğutucunun LED’i yeterince soğutacağından emin olmadan üretimini gerçekleştirmek, uygulamada ciddi problemler doğuracaktır.

3.2 LEDli Kandil Tasarımı

Tez çalışmasında yapılan ölçümler doğrultusunda gerekli aydınlık düzeylerini ve hedeflenen koşulları karşılamak için uygun olan LEDlerin seçimi yapılarak, mevcut kandillerin içine LEDlerin yerleştirilmesi için uygun bir yöntemin bulunması üzerine çalışılmıştır.

3.2.1 Fotometrik yaklaşım

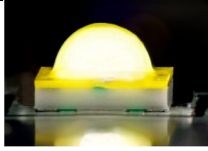
Kandil içine yerleştirilecek LEDli sistemin, tarihi zeytinyağı kandilinin ışığı üst yarı uzaya gönderen özelliğini, mevcut akkor telli lambalı sistemin zemini aydınlatan işlevsel özelliği ile birleştirerek, hem zemini, hem kubbeyi, tüm uzaya ışık göndererek aydınlatması hedeflenmiştir.

Yüksek güçlü LEDlerin ısı problemleri nedeniyle soğutucular ile kullanılmaları zorunludur. Bu sebeple zeytinyağı kandilinin cam haznesine LEDli sistemin sığdırılması için özel bir tasarım yapılması gerekmektedir. En fazla sayıda LED’i en uygun şekilde cam hazneye sığdırabilmek için çalışılmış ve silindirik bir sistemin en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

3.2.2 LED seçimi

Tasarlanacak sistem için, yüksek etkinlik faktörü, geniş ürün yelpazesi ve üstün fotometrik özellikleriyle ön plana çıkan Cree marka LEDlerden XP-E-HEW (High Efficiency White – Yüksek Verimli Beyaz) tercih edilmiştir. Seçilen LEDlerin özellikleri Çizelge 3.3’te verilmektedir.

Çizelge 3.3 : Cree XP-E-HEW LEDlerin özellikleri [43].

Özellikler	XP-E-HEW
	
Işık Akısı	93,9 lm
Maksimum Akım	1000 mA
Isıl Direnç	6° C/W
Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı	150°
Işık Yayma Açısı	120°
Renk Sıcaklığı	2600 – 3700 K
Renksel Geriverim	80

XP-E-HEW sıcak beyaz yüksek güçlü LEDler 1 W, 350 mA ile sürülmektedir. 350 mA akım değerinde, jonksiyon sıcaklığının 25 °C olduğu durum için minimum ışık akısı değeri Cree tarafından 93,9 lm olarak verilmektedir. LED ışık yayma açısı 120 derecedir.

Cree XP-E-HEW LEDlerinin IES LM80-08 LED Işık Kaynaklarının Zamana Bağlı Işık Akısı Ölçümü için Onaylanmış Yöntem’e (Illuminating Engineering Society Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources) uygun olarak gerçekleştirilmiş testlerinin sonuçları ve bu sonuçlardan yola çıkarak IES TM-21-11 LED Işık Kaynakları için Işık Akısında Düşüşe bağlı Ömür Süresi Tahmin Yöntemi (Lumen Depreciation Lifetime Estimation Method for LED Light Sources) teknik raporuna göre elde edilmiş ömür süresi bilgileri Çizelge 3.4’te verilmektedir. Bu sürelerin elde edilmesi için IES LM80-08’e göre LED lehim noktasının sıcaklığı 55 °C, 85 °C ve üreticinin seçtiği herhangi bir sıcaklık değerine getirilerek, çeşitli akım değerleri ile ömür süreleri için testler yapılmaktadır. Cree firması XP-E-HEW LEDler için 350 mA’deki ölçüm sonuçlarını 85 °C ve 105 °C için ilan etmiştir. Verilen ömür süreleri 10000 saatlik ölçümler sonucunda ileriye yönelik tahmin edilmektedir. Burada L90(10³) LED ilk ışık akısının %90’ına ineceği sürenin 10000

saatlik ölçüme göre tahmini, $L80(10^3)$ ve $L70(10^3)$ ise aynı tahminin ışık akısının %80 ve %70 seviyelerine ineceği durumlardır.

Çizelge 3.4 : Cree XP-E-HEW LEDler için uzun dönem test sonuçları [44].

Lehim Noktası Sıcaklığı [°C]	Çevre Sıcaklığı [°C]	Sürme Akımı [mA]	6000 saat sonunda ortalama bağıl ışık akısı [%]	TM-21'e göre ömür süreleri [saat]
85	85	350	% 99,8	$L90(10^3)=32800$ $L80(10^3)>60500$ $L70(10^3)>60500$
105	105	350	% 95,7	$L90(10^3)=15600$ $L80(10^3)=34100$ $L70(10^3)>36300$

Buna göre LEDlerin lehim noktası sıcaklığı 85 °C'ta tutulduğu takdirde ilk 6000 saat sonunda ışık akısında sadece % 0,2'lik bir düşüş gerçekleşirken, 10000 saatlik ölçüm sonuçlarına göre L90 ömür süresi 32800 saate eşit, L80 ve L70 ömür süreleri ise 60500 saatten daha uzun öngörülmektedir. Lehim noktası sıcaklığının 105 °C'a çıkması durumunda ise ilk 6000 saat sonunda ışık akısındaki düşüş % 4,3'e yükselirken, 10000 saatlik ölçüm sonuçlarına göre L90 ömür süresi 15600, L80 ömür süresi 34100 saate eşit, L70 ömür süresi ise 36300 saatten daha uzun öngörülmektedir. Ömür süreleri açısından ele alındığında lehim noktası sıcaklığında 20 °C'lık bir artış, LED'in faydalı ışık ürettiği süreler açısından yaklaşık yarı yarıya bir azalmaya sebep olmaktadır. LED lehim noktası sıcaklığı, LED'in ısıl direncine bağlı olarak LED jonksiyon sıcaklığının bir göstergesidir. Bu bulgu lehim noktası sıcaklığının 85 °C ve altında tutulmasının faydalı olacağını göstermektedir.

Kullanılacak LEDlerin karakteristik değerlerinin deneysel olarak gözlemlenmesi için, İTÜ Enerji Enstitüsü, Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği Laboratuvarı'nda bulunan Labsphere firmasının TOCS LED Karakterizasyon sistemlerinden 1 m yarıçaplı Ulbricht küresi kullanılarak sıcaklığın LED gerilimi, ışık akısı, etkinlik faktörü ve ışıksal verim üzerindeki etkilerini görmek için çeşitli ölçümler yapılmıştır. Bu amaçla kandil tasarımında kullanılan yuvarlak MCPCB üzerine monte edilmiş 3 adet Cree XP-E-HEW LED örneği sırayla termoelektrik bir plaka üzerine yerleştirilmiştir. LED 350 mA akımla sürülürken, termoelektrik plaka yardımıyla MCPCB alt yüzeyindeki sıcaklık değeri 10 derecelik aralıklarla 25 °C'tan 85 °C'a kadar yükseltilmiş ve kürenin 2π konfigürasyonu için farklı sıcaklıklardaki

karakteristik değerler ölçölmüştür. LED gerilimi, ışık akısı, etkinlik faktörü ve ışıksal verim için alınan ölçömler sırasıyla Çizelge 3.5 - 3.8'te verilmektedir.

Çizelge 3.5 : Cree XP-E-HEW gerilimin sıcaklıkla değişimi.

T [°C]	Gerilim [V]			
	LED1	LED2	LED3	Ortalama
25	2,97	3,04	2,99	3,00
35	2,94	3,00	2,96	2,97
45	2,91	2,97	2,92	2,93
55	2,88	2,94	2,89	2,90
65	2,86	2,92	2,87	2,88
75	2,83	2,89	2,84	2,85
85	2,81	2,86	2,82	2,83

Çizelge 3.6 : Cree XP-E-HEW ışık akısının sıcaklıkla değişimi.

T [°C]	Işıık akısı [lm]			
	LED1	LED2	LED3	Ortalama
25	92,24	93,81	92,75	92,93
35	89,61	91,82	89,90	90,44
45	87,12	89,80	87,38	88,10
55	84,70	87,59	84,96	85,75
65	82,27	85,44	82,61	83,44
75	79,95	83,32	80,34	81,20
85	77,73	81,12	78,04	78,96

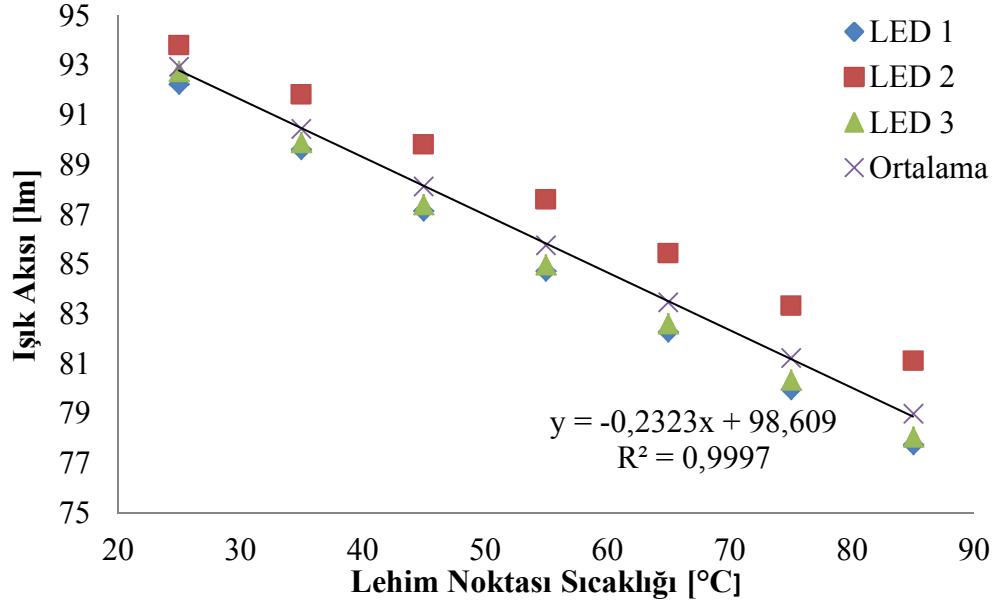
Çizelge 3.7 : Cree XP-E-HEW etkinlik faktörünün sıcaklıkla değişimi.

T [°C]	Etkinlik Faktörü [lm/W]			
	LED1	LED2	LED3	Ortalama
25	88,79	88,22	88,54	88,52
35	87,23	87,33	86,93	87,16
45	85,66	86,32	85,46	85,81
55	84,04	85,04	83,96	84,34
65	82,31	83,75	82,38	82,81
75	80,61	82,39	80,81	81,27
85	78,94	80,96	79,11	79,67

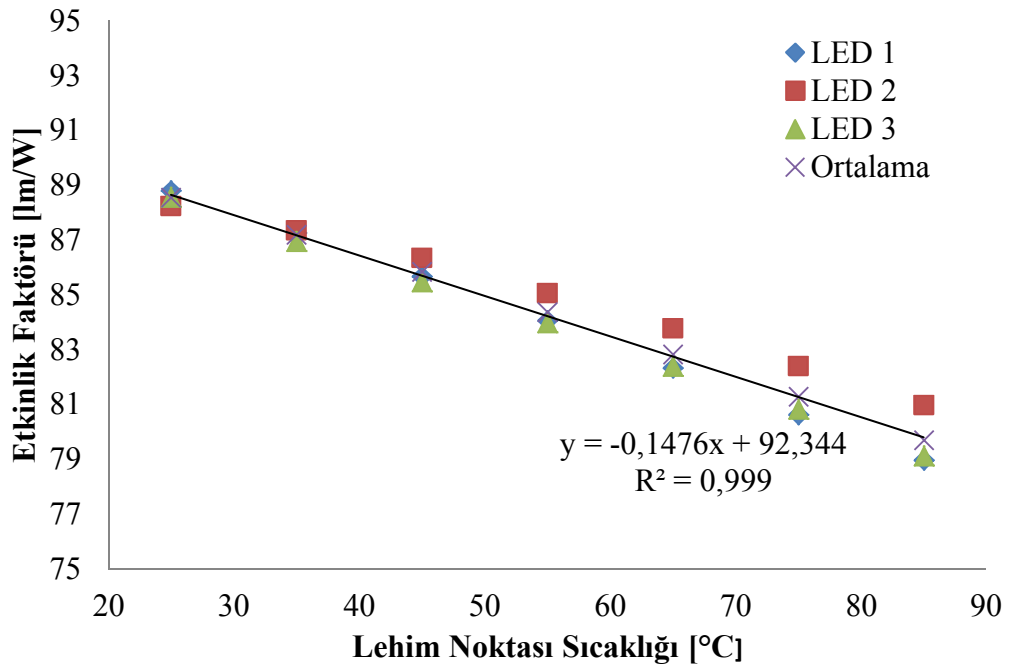
Çizelge 3.8 : Cree XP-E-HEW ışıksal verimin sıcaklıkla değişimi.

T [°C]	Işııksal verim [%]			
	LED1	LED2	LED3	Ortalama
25	28,25	28,33	28,55	28,38
35	27,85	28,22	28,18	28,09
45	27,44	28,00	27,84	27,76
55	27,05	27,67	27,52	27,41
65	26,62	27,39	27,04	27,02
75	26,19	27,04	26,64	26,62
85	25,71	26,66	26,08	26,15

Tez çalışması için en önemli büyüklüklerden olan ışık akısı ve etkinlik faktöründeki değişimler Şekil 3.12 ve 3.13'te ayrıca grafik halinde verilmektedir. Lehim noktası sıcaklığındaki değişimin tasarlanan sistemin ışık akısı ve etkinlik faktörü üzerindeki etkisini görebilmek için, hazırlanan grafiklere doğrusal eğriler uydurulmuş ve bu eğrilerin denklemleri çıkarılmıştır. Grafikte verilen R^2 değeri, ölçüm verilerinin uydurulan eğriye ne kadar uyumluluk sağladığını göstermektedir.



Şekil 3.12 : Cree XP-E-HEW Işık akısı-sıcaklık ilişkisi.



Şekil 3.13 : Cree XP-E-HEW etkinlik faktörü - sıcaklık ilişkisi.

Grafiklere göre, denklem (3.1) ışık akısı ve lehim noktası sıcaklığı arasındaki ilişkiyi, denklem (3.2) ise etkinlik faktörü ile lehim noktası sıcaklığı arasındaki ilişkiyi vermektedir:

$$\phi = -0,2323 \cdot T + 98,609 \quad (3.1)$$

$$e = -0,1476 \cdot T + 92,344 \quad (3.2)$$

Ölçüm sonuçlarından elde edilen denklemler, tasarlanan sistemin LED jonksiyon sıcaklığına bağlı ışık akısı ve etkinlik faktörü hesaplarında kullanılacaktır.

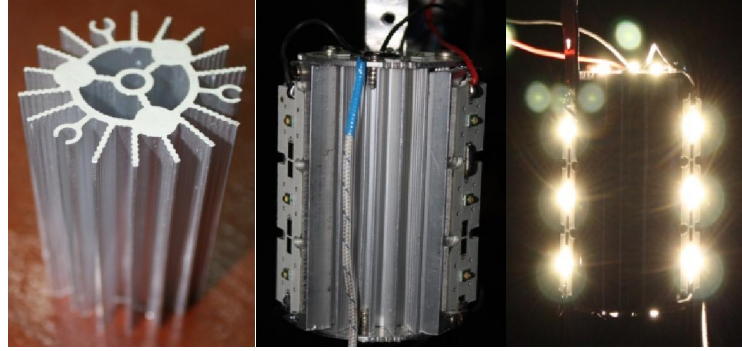
3.2.3 Soğutucu Tasarımı

LEDli cami kandilinin tasarım sürecine, kandil içine yerleştirilebilecek en uygun şekildeki soğutucu formunun belirlenmesiyle başlanmıştır. Hedeflenen ilk form, tüm uzaya simetrik şekilde ışık gönderebilecek, küresel veya küp şeklinde bir formdur. Fakat yapılan çalışmalar bu formda tasarlanacak bir soğutucunun hedeflenen ışık akısı değerlerindeki LEDler için etkin bir soğutma gerçekleştirmesinin mümkün olmadığını ve kablolama açısından problemlerle karşılaşılacağını göstermiştir. İkinci yaklaşım, kandilin ağız kısmının uç kısmına göre daha geniş olması nedeniyle soğutucu formunun kesik bir koni şeklinde belirlenmesi olmuştur. Fakat üretici firmalardan alınan geri besleme ve üretim teknikleri göz önünde bulundurulduğunda kesik koni modelinin üretiminin sorunlu ve masraflı olacağı belirlenmiştir.

Formun belirlenmesinde üçüncü adım olarak piyasadaki mevcut soğutucu elemanlar ile çalışılmıştır. Piyasada LEDli kaynakların soğutulması için kullanılan çeşitli form ve malzemelerden pek çok soğutucu mevcuttur. Çeşitli şekil ve boyutta soğutucular temin edilerek, cami kandilinin içine sığacak şekilde, ağırlıklı olarak silindirik formda farklı modeller oluşturulmuş ve bu modeller, LEDlerin de eklenmesiyle prototipler haline getirilmişlerdir. Çalışma sürecinde farklı LED sayıları, farklı konumlandırmalar ve farklı soğutucular kullanılarak, cam kandil içine sığabilecek ve tüm uzaya ışık gönderebilecek formda 8 farklı prototip oluşturulmuştur. Kullanılan soğutucu elemanlardan ve oluşturulan prototiplerden örnekler Şekil 3.14 ve 3.15'te verilmektedir.



Şekil 3.14 : Çeşitli soğutucular ve LEDlerle üretilen prototiplerden örnekler.

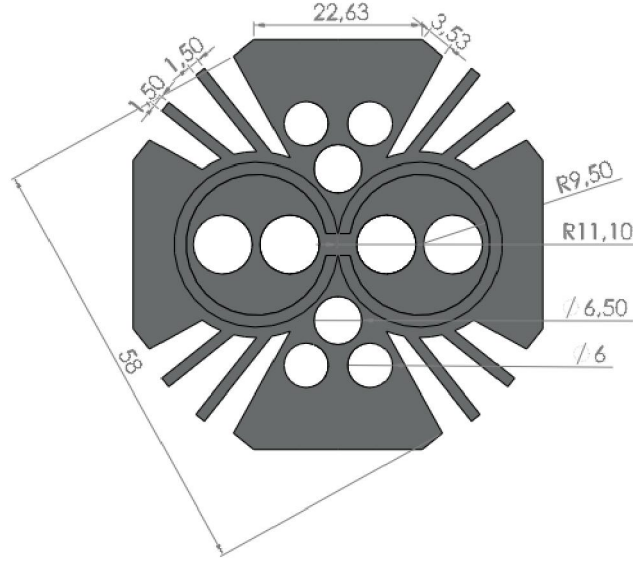


Şekil 3.15 : Çeşitli soğutucular ve LEDlerle üretilen prototiplerden örnekler.

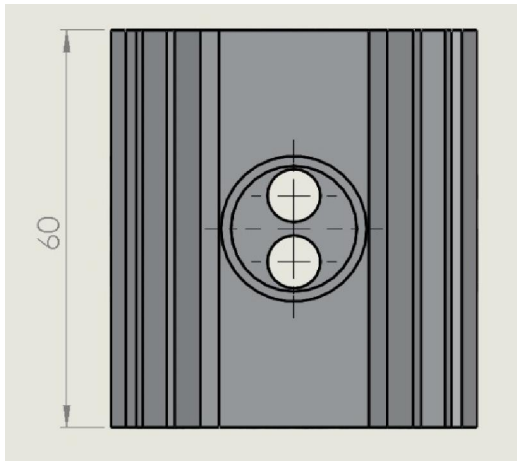
Prototiplerin oluşturulmasından bir sonraki adım, bu kaynaklar için ışık dağılım eğrilerinin çıkarılması ve ies dosyalarının hazırlanması olmuştur. Bu dosyalar Dialux'te hazırlanan cami modelinin içine yerleştirilerek, farklı aydınlatma koşulları altında cami içindeki aydınlık düzeyi dağılımları ve birleşik kamaşma endeksi değerleri incelenmiştir. Karşılaştırmalı çalışmanın sonucunda, yanal yüzeylerde 1x4 LED kullanarak, üst ve alt yüzeylerdeyse 2x1 LED kullanarak toplam 8 yüksek güçlü LED'le cami içinde hedeflenen aydınlık düzeyi değerlerine ulaşılabildiği tespit edilmiştir.

Cam kandil içine yerleştirilecek LEDli sistemin soğutucusunun piyasadaki mevcut soğutuculardan oluşturulabilmesi için farklı soğutucuları birbirlerine monte etme zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Elde edilen soğutucuların montaj noktalarının ısı transfer için zayıf noktalar oluşturmaları ve estetik olarak kötü bir görüntü oluşturmaları nedeniyle, uygun yöntemin yeni bir soğutucunun tasarlanması olduğuna karar verilmiştir. Yapılan fotometrik ölçümler ve aydınlatma simülasyonları sonucunda cami içindeki en uygun aydınlatma koşullarının 8 adet LED kullanılarak elde edildiği görülmüştür. Hazırlanacak sistemin tüm uzaya ışık göndermesi hedeflenmekte ve aynı zamanda cam kandil içine yerleştirilebilecek şekil ve boyutlarda olması gerekmektedir. Solidworks paket programıyla kandil içine

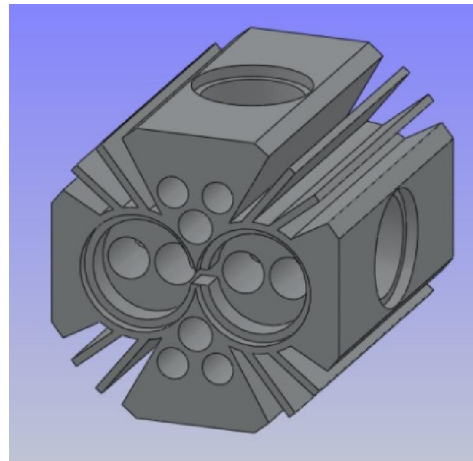
rahatlıkla yerleştirilebilecek çeşitli 3 boyutlu tasarımlar yapılmış ve bu tasarımlar yine Solidworks simülasyonlarıyla ısıl özellikleri açısından incelenmiş ve üretim için çeşitli firmalarla bilgi alışverişi yapılmıştır. Tasarlanan parçanın üretimini hem etkin hem de ekonomik tutabilmek için tasarımda pek çok değişiklik yapılmıştır. Hazırlanan son tasarımın boyutlarıyla birlikte üstten, yandan ve dimetrik görünümü, boyutlar mm olmak üzere Şekil 3.16, 3.17 ve 3.18’de verilmektedir.



Şekil 3.16 : Soğutucu üstten görünüm [mm].



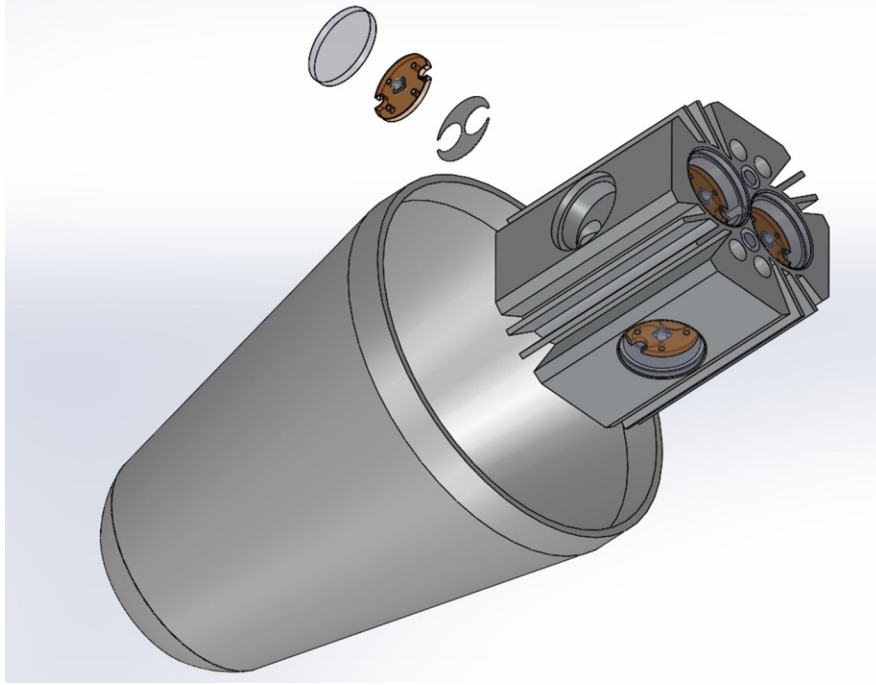
Şekil 3.17 : Soğutucu yandan görünüm [mm]



Şekil 3.18 : Soğutucu dimetrik görünüm.

Soğutucunun yüzey alanını arttırmak için tasarıma dişler eklenmiş, üretim esnasında dişlerin kırılmadan oluşturulabilmesi için diş kalınlıkları 1,5 mm tutulmuştur. Buna ek olarak, soğutucu üzerine yerleştirilecek 8 adet LED'in soğutucu ile en iyi şekilde temasını sağlayabilmek için piyasada Cree LEDler için kullanılan tekli metal çekirdekli baskı levha devrelerden temin edilmiş ve soğutucu üzerinde bu baskı

devrelerin boyutlarında yüzeyler oluşturulmuştur. Ayrıca, LEDlere enerji vermek amacıyla kullanılacak kablolar için soğutucu üzerinde çeşitli bölgelere delikler açılmıştır. Kullanılan LEDlerin üzerinde toz ve kir birikimini engellemek için LEDlerin gömüldüğü yuvarlak deliklerin üzerinin cam malzemeyle kaplanması planlanmıştır. Şekil 3.19’da tasarlanan sistemin parçalı görüntüsü, kandil, soğutucu, yapıştırıcı, MCPCB üzerinde LED ve son olarak koruyucu camdan oluşmak üzere verilmektedir.

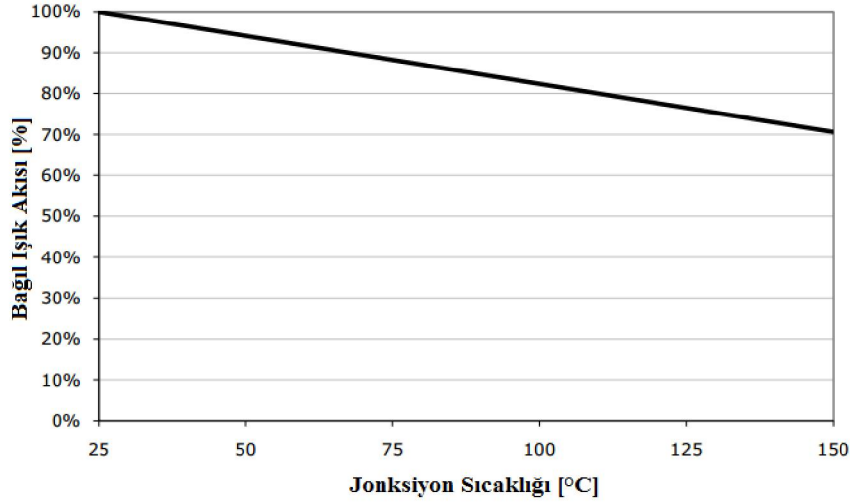


Şekil 3.19 : Tasarlanan LEDli kandil parçalı görünüm.

3.2.4 Isıl simülasyonlar

LED karakteristik özelliklerinde belirtildiği gibi, Cree XP-E-HEW Sıcak Beyaz LEDlerin katalog değeri 25 °C jonksiyon sıcaklığında 93,9 lm ışık akısı verdiklerini göstermektedir. Fakat jonksiyon sıcaklığının artmasıyla beraber, LED ışık akısında düşüşler gerçekleşmektedir. LEDlerin ışık akısı ve renk değerleri 25 ms’lik güç darbeleriyle, 25 °C’lık sabit jonksiyon sıcaklığında test edilmektedir. Oysaki sabit akımlı çalışmada, oda koşullarında ısı uzaklaştırma mekanizmaları kullanılsa da jonksiyon sıcaklığı 60 °C ve daha üzeri değerlere oturmaktadır. Dolayısıyla beyaz LEDler üreticinin verdiği değerden en azından %10 daha az ışık üretmektedirler [42]. Cree XP-E-HEW LEDlerin 350 mA sabit akımla sürüldükleri durumda jonksiyon sıcaklığına göre bağlı ışık akısı eğrisi Şekil 3.20’de verilmektedir. Tüm bilgilerin ışığında, prototipte kullanılan LEDlerin çalışma anındaki gerçek ışık akısı

değerlerini tespit edebilmek için sistemin ısı simülasyonlarının gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple tasarlanan soğutucunun üretimine geçilmeden önce, Solidworks programı yardımıyla ısı simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve hedeflenen sıcaklık değerlerinin sağlanıp sağlanmayacağı test edilmiştir. Bu amaçla kullanılan Cree XP-E-HEW LED, üzerine yerleştirildiği MCPCB ile birlikte modellenerek tasarlanan soğutucunun üzerine yerleştirilmiş ve çeşitli simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.



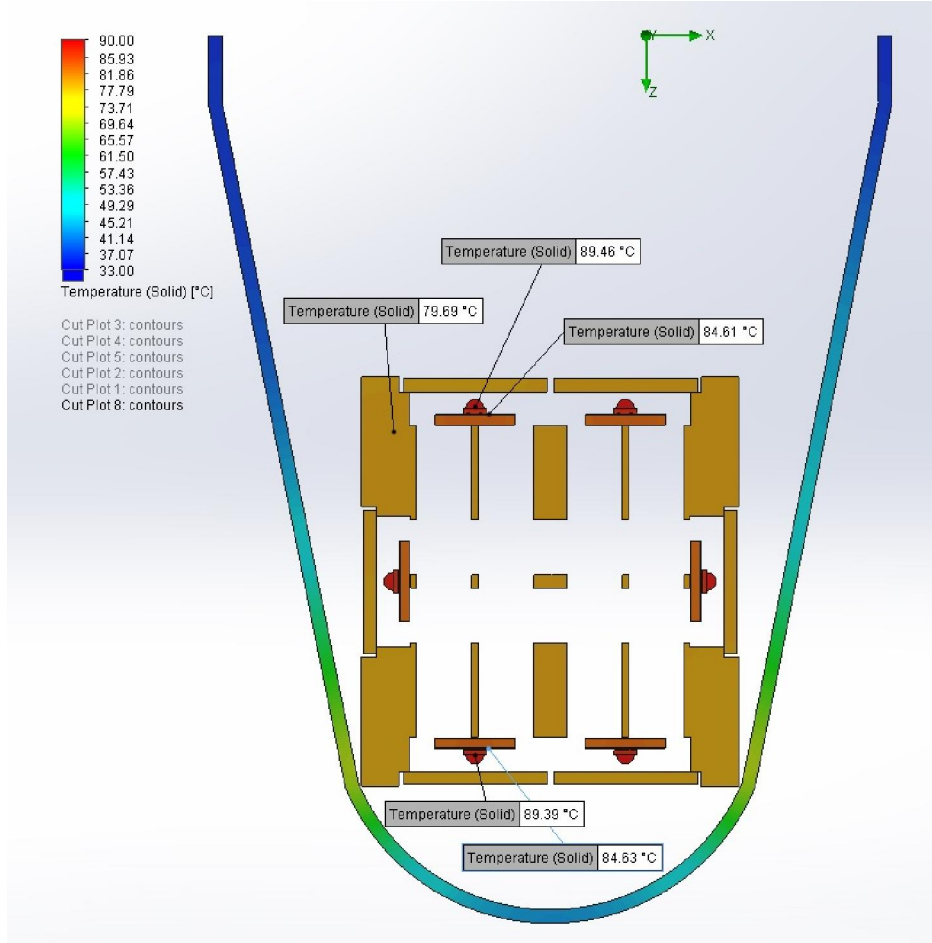
Şekil 3.20 : Cree XP-E-HEW LEDler için bağıl ışık akısının jonksiyon sıcaklığıyla değişimi [43].

Cree XP-E-HEW LED katalog değerlerinde jonksiyon-lehim noktası arası ısı direnç 6 °C/W'lık tek bir değer olarak verilmiştir. Bu sebeple, LED tek bir parça olarak modellenmiştir. MCPCB katalog değerlerinin geniş bir yelpazede verilmiş olması sebebiyle, bu elemanın katmanları bakır, dielektrik ve alüminyum olarak ayrı ayrı modellenmiş ve tüm katmanlar için ayrı ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. İletim katsayılarının belirlenmesinde literatürdeki örneklerden faydalanılmıştır. LEDli ışık kaynakları için en çok tercih edilen Alüminyum Alaşımlar 6061 ve 6063'tür. Simülasyonlar, daha sonra üretimde de kullanılacak olan soğutucu malzemesi 6063 kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. LEDli sistemin yüzeyleri arasında oluşabilecek temas direnci simülasyonda ihmal edilmiştir. Modellemede kullanılan malzemelerin kalınlıkları ve ısı iletim katsayıları Çizelge 3.9'da verilmektedir.

Çizelge 3.9 : Isıl modelde kullanılan malzeme özellikleri.

Malzeme	Kalınlık [mm]	Isıl İletkenlik [W/m ² K]
LED	0,65	11,62
Lehim	0,075	58
Bakır	0,07	390
Dielektrik	0,10	2,2
Alüminyum	1,43	170
Yapıştırıcı Malzeme	0,13	0,17
Soğutucu (Alüminyum Alaşım)	58	218

Simülasyonda LEDlerin ısı güçlerinin belirlenmesi için, yapılan ışıksal verim ölçümlerinden faydalanılmıştır. Çizelge 3.9’da verilmiş olan değerler LED gücünün ne kadarının ışık olarak açığa çıktığını göstermektedir. Bu durumda gücün kalan kısmı ısıya dönüşmektedir. Alınan ölçümler ve hedeflenen sıcaklıklar doğrultusunda, LED başına ısı güç ortalama 0,735 W olarak belirlenmiştir. Simülasyonlar için kandil çevresinde hava hareketine izin verecek kadar boş alan bırakılmıştır. İTÜ Aydınlatma ve İç Tesisat Laboratuvarı’nın çalışmaların yapıldığı süreçteki ortam sıcaklığı yaklaşık 21 °C seviyesindedir. Simülasyonları yapılan sistem üretildiğinde ölçümünün bu sıcaklık değerinde gerçekleştirileceği için simülasyonda ortam sıcaklığı 21 °C kabul edilmiştir. Solidworks paket programı, Flow Simulation alt paketiyle yapılan simülasyonda 227 iterasyon sonunda, 1.499.402 hücre ile oluşturulmuş ağın ulaştığı sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Yapılan simülasyonlarda elde edilen sıcaklık değerlerini görmek için modellenen kandilin tam ortasından geçen düzlemdeki sıcaklık değerleri Şekil 3.21’de verilmektedir. Buna göre, paket halinde modellenmiş olan LED içindeki maksimum sıcaklık değeri 89,46 °C değerine yükselmektedir. LED’in MCPCB üzerine lehimlendiği noktada sıcaklık 84,61 °C, soğutucunun üzerinde ise 79,69 °C olarak hesaplanmıştır.



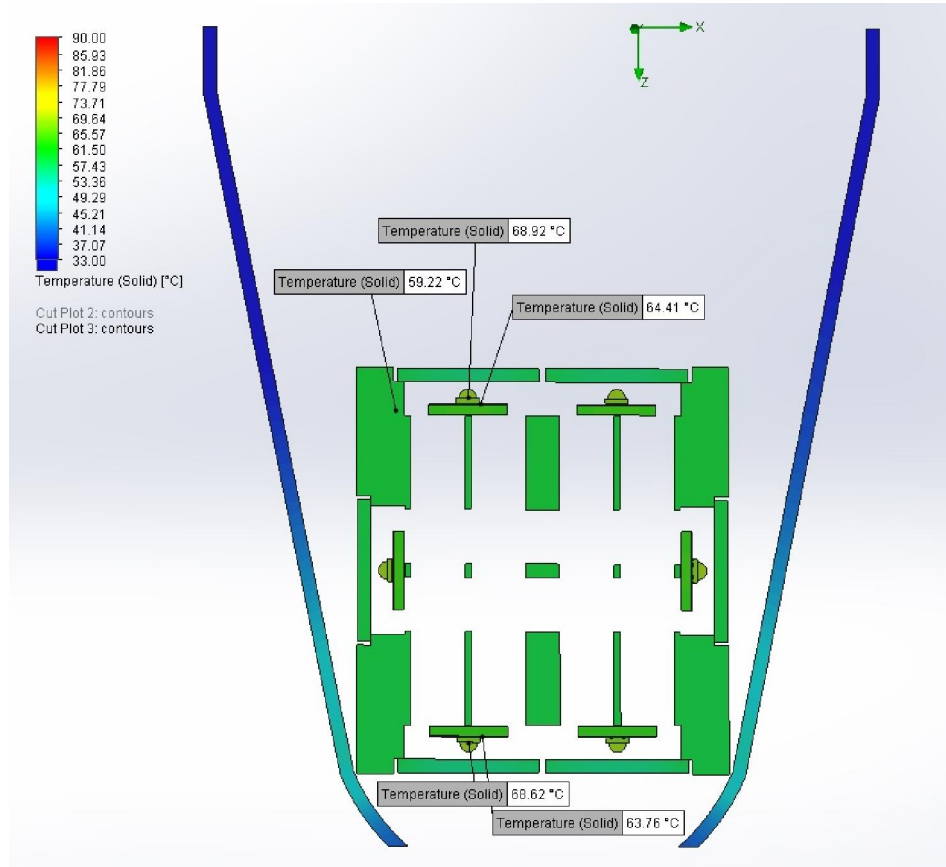
Şekil 3.21 : Yeni kandil sıcaklık dağılımı.

Çalışmada kullanılan Cree XP-E-HEW LEDlerin maksimum jonksiyon sıcaklığı değeri 150 °C'tır. Çizelge 3.4'te 85 °C ve 105 °C için verilen uzun dönem test sonuçları, bu iki sıcaklık değeri arasında 6000 saatlik süre için ışık akısı korunumunun ve ömür sürelerinin verimli sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Bununla beraber lehim noktasında hesaplanan 84,61 °C sıcaklık, denklem (3.1)'e göre 1 adet LED'in ışık akısında 92,93 lm'den 78,95 lm'e % 15'lik bir düşüşe sebep olacaktır. Denklem (3.2)'ye göre ise, etkinlik faktöründe de 88,52 lm/W'tan, 79,86 lm/W'a %10'luk bir düşüş gerçekleşecektir.

LEDlerin ışık akısı ve etkinlik faktörlerindeki düşüşleri azaltabilmek için LEDlerden daha fazla ısı uzaklaştırmak gerekmektedir. Bunun için bir seçenek soğutucunun boyutlarının büyütülmesidir. Fakat bu seçenek estetik problemlere yol açabileceği gibi, cam kandilin boyutları da soğutucu boyutları için bir kısıt yaratmaktadır. Buna ek olarak soğutucunun boyutları büyüdükçe ağırlığı da artmakta, kandillik üzerindeki yük ağırlaşmaktadır. Bu da uzun vadede kandilliğin zarar görmesi, zincirlerin kandilliği taşıyamaması ve can güvenliğini tehdit edecek durumlarla karşılaşılması

gibi problemler doğurabilir. LEDlerden daha çok ısı uzaklaştırabilmek için bir diğer seçenek, sistemin yerleştirildiği cam kandilin çeşitli yerlerinde delikler açmaktır. Fakat üreticilerle yapılan görüşmeler, camda açılan deliklerin sistemin mukavemetini azaltacağı ve camda çatlak ve kırıklara sebep olacağını ortaya koymuştur. Bu sebeple, farklı bir yaklaşım olarak, mevcut cami kandilinin altındaki çıkıntılı kısım, bir diğer deyişle meme kısmı kesilerek kandilin altında dairesel bir delik oluşturulmuştur. Bu şekilde havalandırmanın artırılması hedeflenmiştir.

Kandilin alt kısmının kesilmesiyle elde edilecek iyileştirmeyi test edebilmek için ısı simülasyonu yeni kesik kandil ile tekrarlanmıştır. Simülasyon 229 iterasyonla, 1.554.814 hücre ile oluşturulan ağdaki sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Kandil orta kesitindeki sıcaklık dağılımı, Şekil 3.22’de verilmektedir.

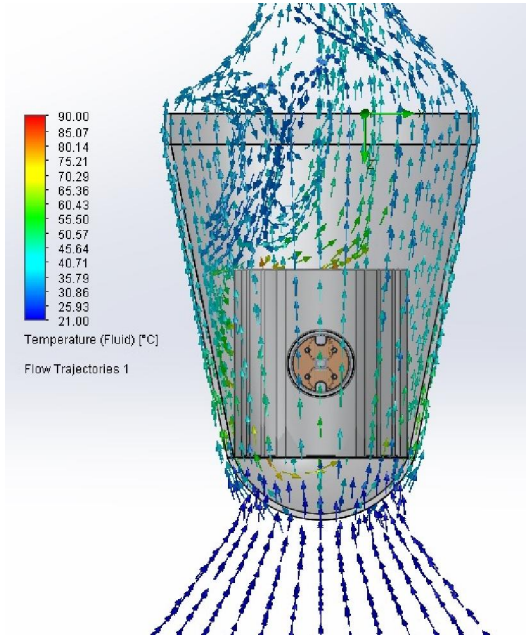


Şekil 3.22 : Yeni kesik kandil sıcaklık dağılımı.

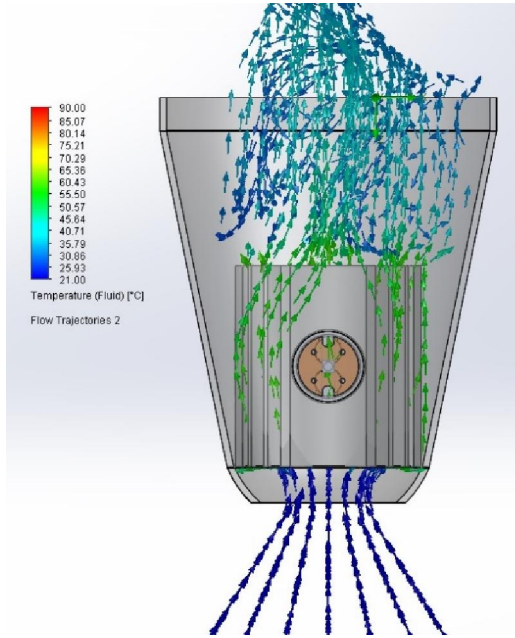
Bir önceki sıcaklık dağılımıyla objektif bir karşılaştırma yapılabilmesi için yeni simülasyonun renk skalası bir öncekiyle aynı tutulmuştur. Buna göre bir önceki simülasyonda yeni kandil içindeki maksimum paket sıcaklığı 89,46 °C'a otururken, kandilin alt kısmında açılan delik ve buradan elde edilen hava akımı sayesinde yeni simülasyondaki maksimum paket sıcaklığı 89,46 °C'den 68,92 °C'a inmiştir. LED

lehim noktasında elde edilen sıcaklık değeri ise 64,41 °C'tır. Elde edilen 64,41 °C'lık lehim noktası sıcaklığı değeri denklem 3.1 ve 3.2'ye yerleştirildiğinde, 1 LED'in ışık akısı değeri 83,65 lm, etkinlik faktörü ise 82,84 lm/W olarak hesaplanmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre kandilin alt kısmında açılan delik ile LED başına 4,7 lm'lik, armatür başına 37,6 lm'lik ve toplam 40 armatür için 1504 lm'lik bir iyileştirme sağlanmıştır. Buna ek olarak TM 21-11 ölçümlerine göre 85 °C'ta öngörülen 32800 saatlik L90 ve 60500 saatlik L80 ve L70 ömür süreleri, çok daha düşük bir jonksiyon sıcaklığı elde edilerek garantilenmiştir.

İki sistem arasındaki hava akışı farkını görebilmek için, iki farklı kandilin Şekil 3.23 ve 3.24'teki hava akış görsellerinden faydalanılabilir. Şekil 3.23'te görüldüğü üzere kandilin alt kısmı kapalıyken dışardaki soğuk hava cam kandilin yüzeyini yalayarak yoluna devam etmekte ve kandilin içindeki hava sirkülasyonu sadece kandilin üst kısmından içeri giren hava akımı ile gerçekleşmektedir. Kandilin altında delik açıldığı durumda ise Şekil 3.24'te görüldüğü üzere soğuk hava direk olarak soğutucunun kanatları arasından geçmekte ve çok daha etkin bir soğutma elde edilmektedir.



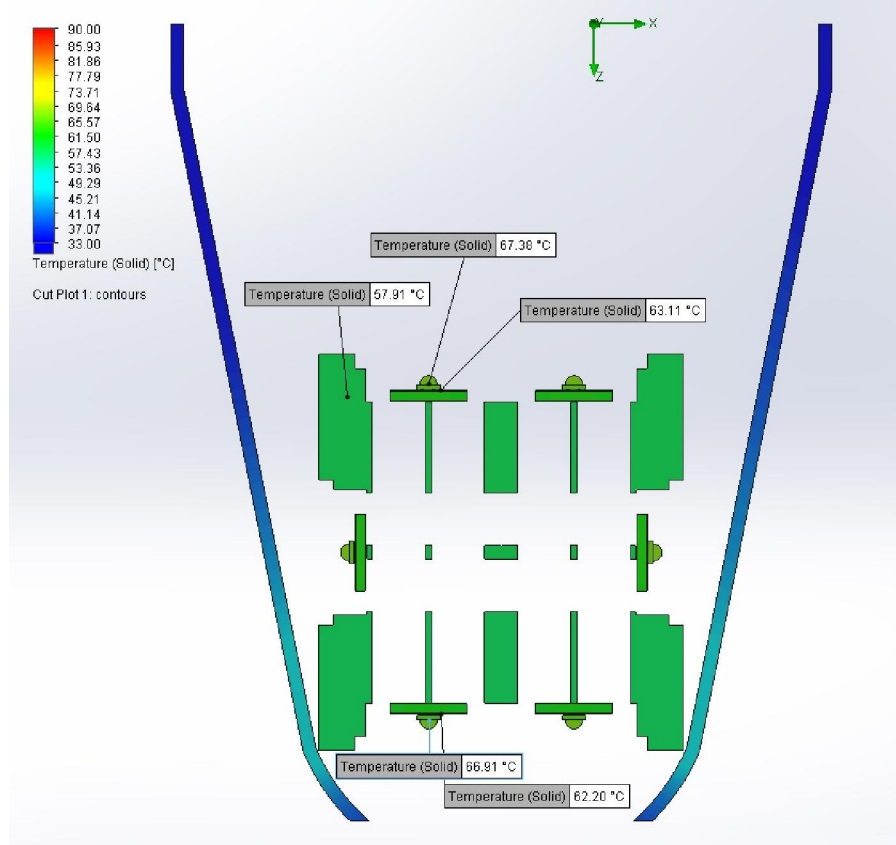
Şekil 3.23 : Yeni kandil hava akışı.



Şekil 3.24 : Yeni kesik kandil hava akışı.

Isıl simülasyon sonuçlarının hedeflenen jonksiyon sıcaklıklarını rahatlıkla sağlaması üzerine, tasarlanan sistemin oluşturacağı gerçek sonuçları görmek üzere bir prototip üretimine karar verilmiştir. Fakat, prototip üretildikten sonra LEDlerin üzerine gelecek koruyucu camlar sebebiyle LED lehim noktasında ölçüm almak mümkün

olmayacaktır. Bu sebeple LED lehim noktasındaki sıcaklığın ölçülebilmesi için prototipin ilk halinde koruyucu camlar kullanılmamıştır. Prototipin simülasyon modeline uygunluğunu test edebilmek içinse, ısı simülasyonlar son olarak koruyucu camların mevcut olmadığı durum için tekrarlanmıştır. Simülasyon 225 iterasyonla, 1.455.288 hücre ile oluşturulan ağdaki sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Elde edilen sıcaklık dağılımı objektif karşılaştırma için ilk simülasyonun renk skalasına uygun olarak Şekil 3.25'te verilmektedir.

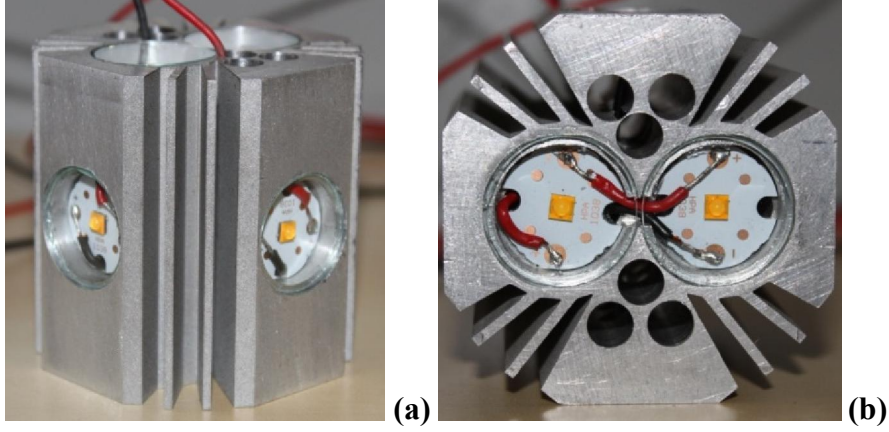


Şekil 3.25 : Yeni kesik kandil camsız prototip sıcaklık dağılımı.

Buna göre LED paket sıcaklığı maksimum 67,38 °C olarak elde edilmiş, lehim noktası ve soğutucu sıcaklıkları ise sırasıyla 63,11 °C ve 57,91 °C olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Şekil 3.22 ile karşılaştırıldığında LEDlerin üstünün koruyucu camlarla kapatılmasının paket sıcaklığında sadece 1,54 °C'lık bir artışa sebep olduğunu göstermektedir.

Tüm simülasyonların tamamlanmasından sonra, mevcut cami kandilinin alt kısmı kesilerek yeni bir kesik kandil hazırlanmış ve prototip son haliyle üretilmiştir. Elde edilen prototip, LED ve camları yerleştirilmiş olarak Şekil 3.26'da verilmektedir.

Şekil 3.27’de ise altı kesilmiş yeni cami kandilinin içine yerleştirilmiş prototipi görmek mümkündür.



Şekil 3.26 : Prototip: (a) Yandan görünüm. (b) Üstten görünüm.



Şekil 3.27 : Yeni kesik cami kandili.

Hazırlanan prototipin ısı özelliklerini test etmek için, prototip cami içinde kullanılacak yeni kesik kandil içine yerleştirilerek 6 saat boyunca çalıştırılmış ve kullanılan LED’in baskı levha devreye monte edildiği noktada, lehim üzerindeki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Önemli olan sıcaklık değeri LED’in jonksiyonundaki sıcaklık değeridir, fakat bu noktada ölçüm almak mümkün olmadığı için önerilen yöntem LED’in MCPCB’ye temas ettiği lehim noktasında ölçüm alınarak, jonksiyon sıcaklığının bu değerden hesaplanmasıdır [45]. Lehim noktasında ölçüm alınabilmesi için, normalde LEDleri toz ve kirden korumak için kullanılacak cam parçalar ilk adımda sisteme monte edilmemiş ve ölçüm kandilin üst kısmındaki LEDlerden birinin lehim noktasında yapılmıştır. Yapılan ölçüm 21,7 °C ortam sıcaklığında

gerçekleştirilmiştir. Lehim üzerinde alınan sıcaklık değeri 66,3 °C'a oturmaktadır. 21 °C ortam sıcaklığı için yapılan simülasyonda elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 3.25'te verilmektedir. Buna göre lehim sıcaklığı 63,11 °C'tır. Ortam sıcaklığının sisteme etkisi doğrusal kabul edilirse, 21,7 °C ortam sıcaklığı için simülasyon sonucunu 63,81 °C kabul etmek mümkündür. Bu durumda ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında sadece 2,49 °C'lık bir fark vardır; bu değer % 3,8'lik bir farka karşılık gelmektedir. Sonuçların birbirlerine yakınlığı simülasyon modelinin % 5'ten az hatayla gerçeğe uygunluğunu doğrulamıştır.

LED ışık akısının hesaplanması için lehim noktasında alınan ölçüm değerlerinden faydalanılmıştır. LEDlerin katalog değerleri içinde verilen lehim noktası ile LED jonksiyonu arasındaki ısı direnç değeri 6 °C/W'tır. Bu değer lehim noktasında ölçülen 66,3 °C'lık sıcaklığa karşılık gelen 0,735 W'lık ısı yük ile çarpılarak lehim sıcaklığına eklenirse, delik kandildeki LEDlerin jonksiyon sıcaklıklarının 21,7 °C ortam sıcaklığında 70,71 °C olarak hesaplanmaktadır. Ölçüm sonuçlarına LEDlerin üzerine gelen cam elemanların etkisini eklemek için 1,54 °C eklenmelidir. Bu durumda ölçüm sonuçlarından yola çıkarak kandilde kullanılan LEDlerin jonksiyon sıcaklıklarını 21,7 °C ortam sıcaklığında 72,25 °C, 25 °C standart test koşullarındaki sıcaklıklarını da doğrusal bir artışla 75,55 °C kabul etmek mümkündür. LED ışık akısı ve etkinlik faktörü hesabı içinse lehim noktasında elde edilen sıcaklık değeri olan 66,3 °C'a yine koruyucu camlar sebebiyle 1,54 °C eklenecektir. 25 °C standart test koşullarında lehim noktası sıcaklığı doğrusal bir farkla 71,1 °C olarak hesaplanmaktadır. Buna göre denklem (3.1) ve (3.2)'den bir LED için hesaplanan ışık akısı değeri 82,1 lm, etkinlik faktörü değeri ise 81,84 lm/W'tır. Bu da kayıplar hesaba katılmadan armatür başına 8 LED'den 656,8 lm ışık akısı anlamına gelmektedir.

3.2.5 Sürücü devre seçimi

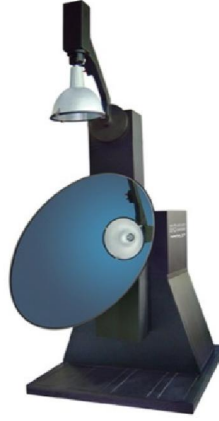
Yapılan çalışmalar sonucunda oluşturulan LEDli tarihi cami aydınlatma sisteminde kullanılan LEDlerin anma ışık akısı değerlerini sağlayabilmek ve ömür süresini en etkin şekilde kullanmak için sabit 350 mA'lık akımla sürülmeleri uygundur. Kullanılan sürücülerin aynı zamanda cami içindeki kandilliklere yerleştirildiklerinde sistemin ışık dağılımını etkilemeyecek ve estetik görüntüyü bozmayacak şekil ve

boyutlarda olmaları gerekmektedir. Bu bilgilerin ışığında gerçekleştirilen sürücü deneyleri ve seçilen sürücü ile ilgili bilgiler Ek C’de verilmektedir.

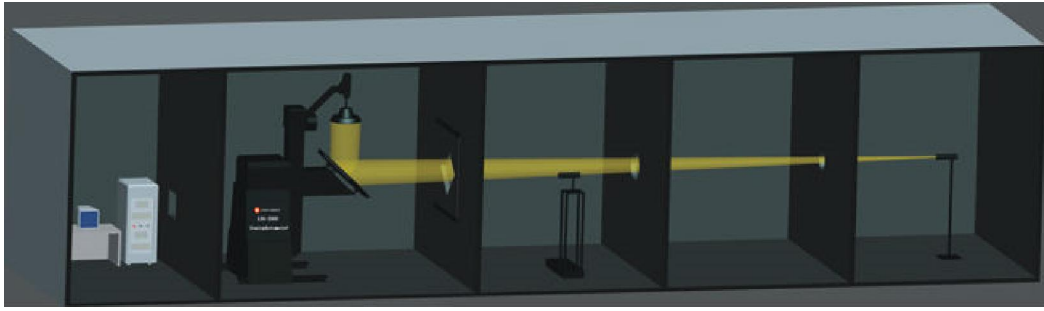
3.3 Fotometrik Sonuçlar

Üretilen soğutucu prototipin üzerine LEDler yerleştirildikten sonra toz ve yabancı maddelerden korumak için LEDlerin üzerine camlar yerleştirilerek cami kandilinin son prototipi tamamlanmış ve ışık dağılım eğrileri hazırlanmıştır. Prototip soğutucu üzerinde ve kandil yapısında buzlu ve şeffaf cam kullanılarak 4 farklı şekilde denenmiş, tüm sistemlerin ışık dağılım eğrileri çıkarılmış, fakat Cami içindeki mevcut sisteme en yakın görüntü şeffaf cam kullanılarak elde edildiği ve buzlu camla ışık şiddeti değerlerindeki düşüşler daha yüksek olduğu için çalışmada sadece şeffaf cam kullanılmasına karar verilmiştir. Işık dağılım eğrileri, İTÜ Aydınlatma ve İç Tesisat Laboratuvarı’nda tez çalışması için özel hazırlanan düzeneklerden faydalanarak, el ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen prototip çeşitlerde LEDlerin konumsal yerleşimi dikkate alınarak kutupsal fotometrik eğriler $C0^{\circ}$ - 180° , 90° - 270° , 45° - 225° ve 135° - 215° düzlemlerinde, ölçümler 2,5 derecede bir alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, Almanya Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü, Aydınlatma Teknolojileri Enstitüsü’nde araştırma yapılan süreçte, LMT marka 2000 model aynalı gonyofotometre kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu ölçümlerde C düzlemleri 0° - 360° arasında ve γ açıları $C0^{\circ}$ - 180° arasında 2,5 derecelik aralıklarla ölçülmüştür.

Aynalı gonyofotometrede ölçümü yapılacak ışık kaynağı sabit bir pozisyonda monte edilir ve ölçüm boyunca bir ayna ile bağlantılı olarak, pozisyonu değiştirilmeden hareket ettirilir. Böylece hem ayna hem ışık kaynağının birbirlerine bağlı şekilde hareket etmeleriyle ışık kaynağının farklı açılardan görüntüsü, sabit bir konumda bulunan fotosel üzerine düşürülür. Gerekli durumlarda fotoselin ışık kaynağına olan uzaklığı değiştirilebilir. Aynalı gonyofotometreler çok büyük laboratuvar alanları ve çok kaliteli ve temiz bir ayna gerektirir. Şekil 3.28’de aynalı gonyofotometre, Şekil 3.29’da ise gonyofotometre’nin çalışma prensibini gösteren bir şema verilmiştir.

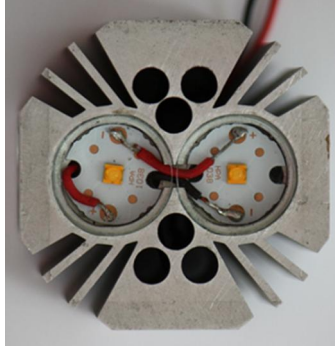


Şekil 3.28 : Aynalı gonyofotometre [46].

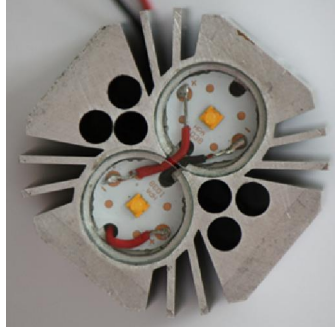


Şekil 3.29 : Aynalı gonyofotometre çalışma prensibi [47].

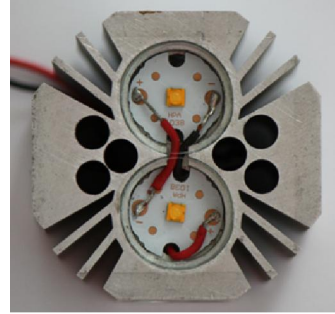
Cami kandilinin normal şartlarda bir zincir ile sabitleniyor olması, ölçüm esnasında sürekli hareket eden aynalı gonyofotometre ölçümü için ciddi bir problem teşkil etmiş, kandil ölçü aletinin hareketi ile salınıma girdiği için, kandili sabitlemeden ölçüm yapmak mümkün olmamıştır. Bu sebeple, kandil ışık şiddetleri gamma açısı 80° - 100° arasına denk gelecek şekilde önce üst yarı uzay, sonra alt yarı uzay için ölçüm yapılmış, daha sonra bu ölçüm değerleri üstüste getirilerek kandilin tüm uzaya yaydığı ışık şiddetlerinin eğrisi oluşturulmuştur. Elle yapılan ölçümlerde ise, kandil ile ölçü aleti arasında herhangi bir engel olmayacak şekilde bir deneysel düzenek kurmak mümkün olmuştur. Bu bilgiler ışığında, eğriler arasındaki şekilsel benzerlik ve sayısal yakınlık dikkate alınarak, Dialux simülasyonlarında el ile yapılan ölçüm sonuçlarının kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür. Aynalı gonyofotometre ile yapılan ölçümlerden elde edilen ışık dağılım eğrileri Ek D’de verilmektedir. Işık dağılım eğrileri hazırlanırken kullanılan yerleşimler Şekil 3.30-3.32’de verilmektedir.



Şekil 3.30 : $C0^{\circ}$ - 180° düzeneği karşıdan görünüm.

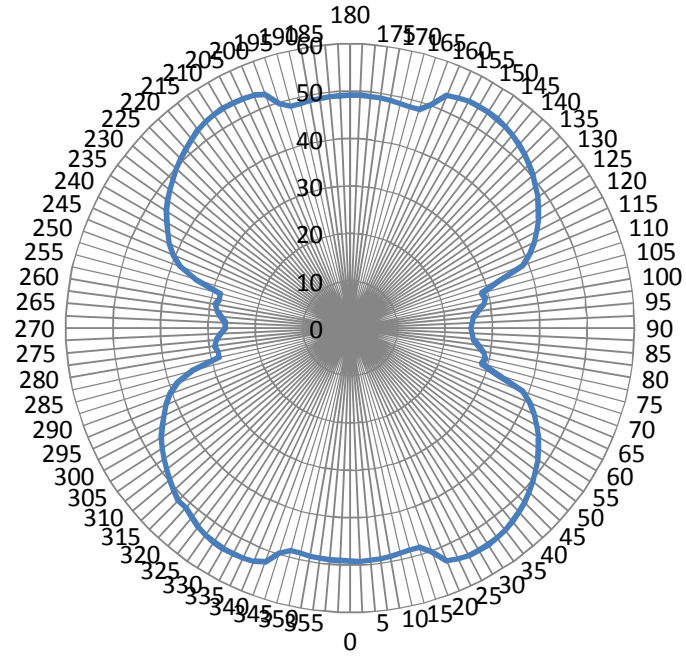


Şekil 3.31 : $C45^{\circ}$ - 225° ve $C135^{\circ}$ - 315° düzeneği karşıdan görünüm.

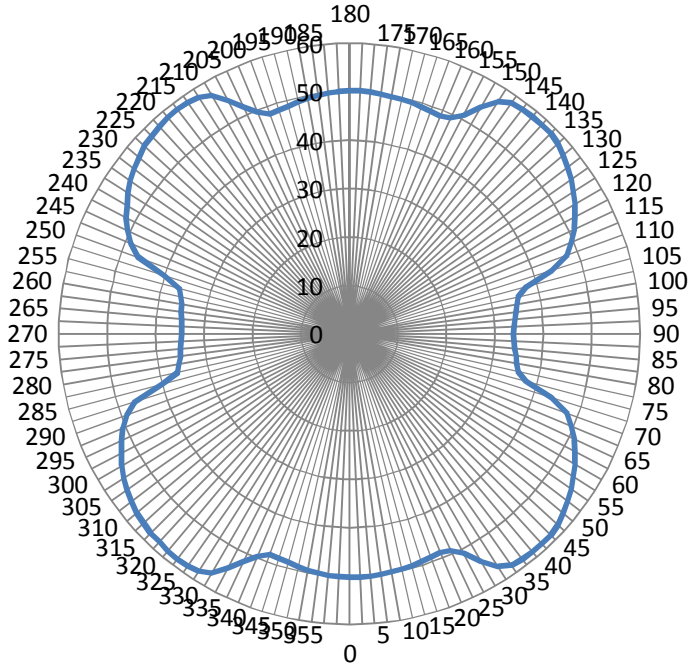


Şekil 3.32 : $C90^{\circ}$ - 270° düzeneği karşıdan görünüm.

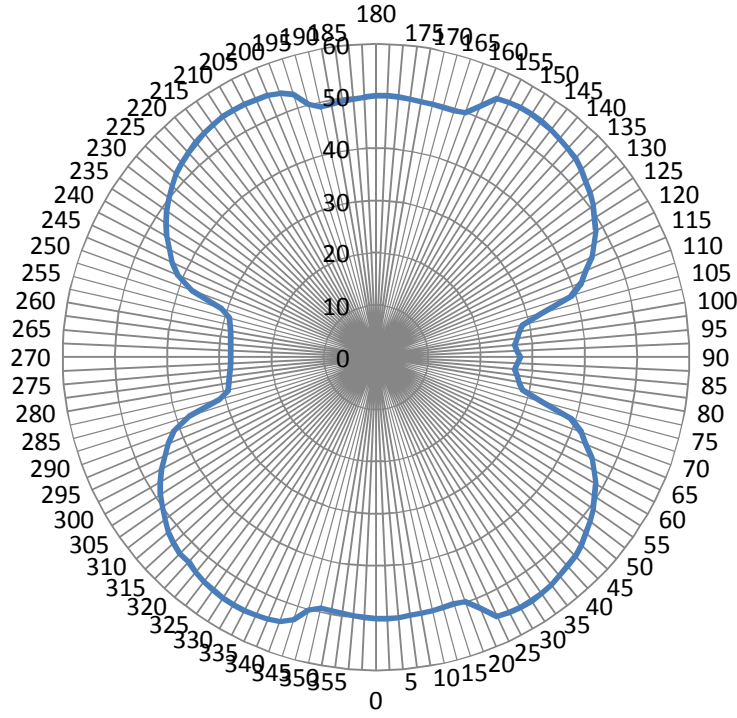
Şekil 3.33-3.36 sırasıyla LEDlerin üzerine şeffaf cam yerleştirilerek oluşturulan prototipin $C0^{\circ}$ - 180° , $C45^{\circ}$ - 225° ve $C135^{\circ}$ - 315° , $C90^{\circ}$ - 270° ve tüm düzlemler bir arada olmak üzere ışık dağılım eğrileri verilmektedir.



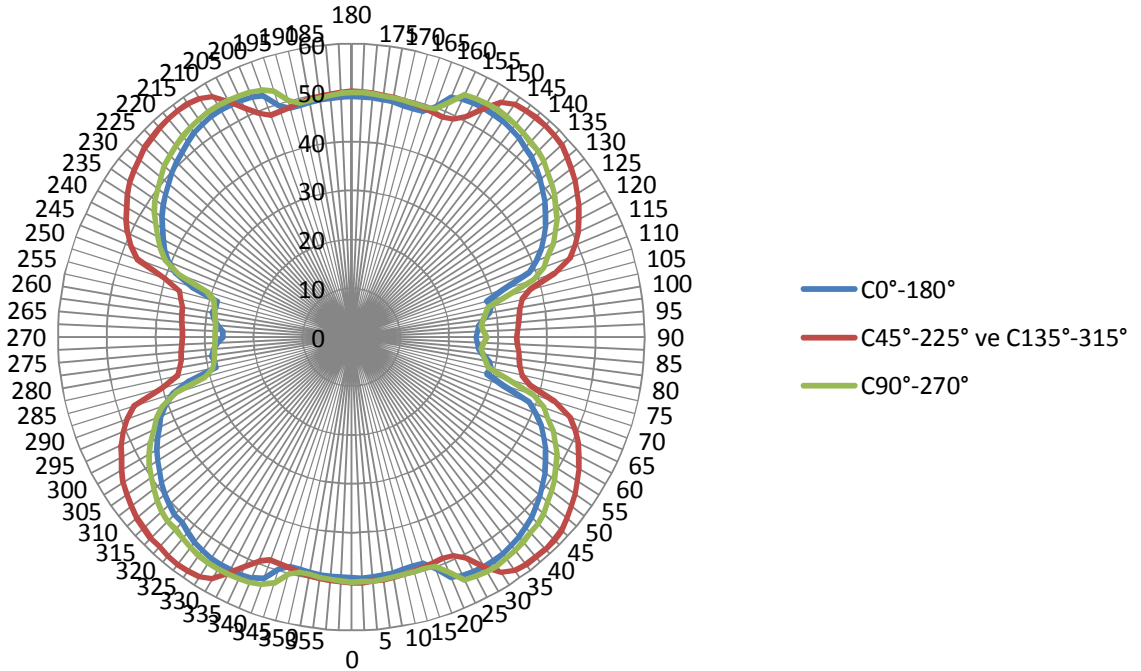
Şekil 3.33 : Son prototip C0°-180° eğrisi.



Şekil 3.34 : Son prototip C45°-225° ve C135°-315° eğrisi.



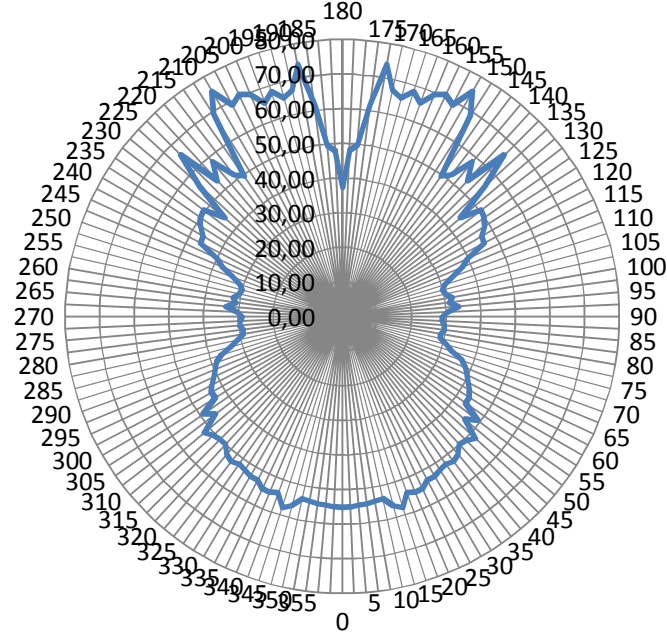
Şekil 3.35 : Son prototip C90°-270° eğrisi.



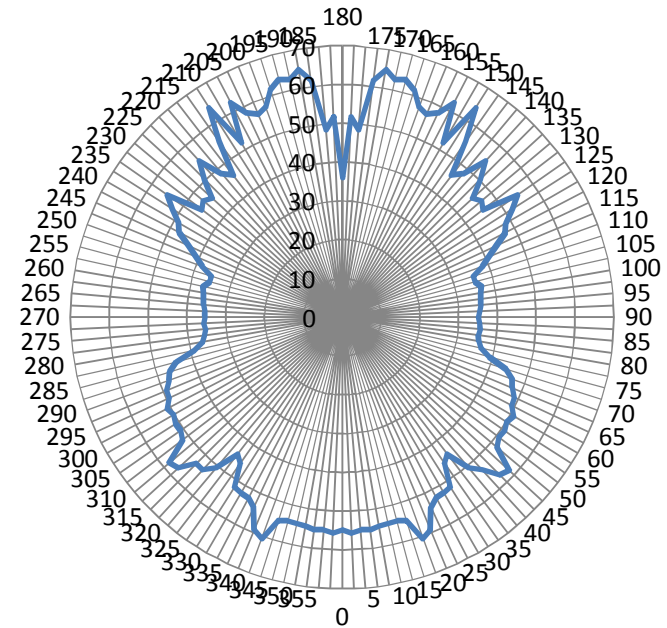
Şekil 3.36 : Son prototip C eğrileri.

Şekil 3.37-3.40'da ise sırasıyla son prototipin delik kandil içine yerleştirilmesiyle elde edilen yeni cami kandilinin C0°-180°, C45°-225° ve C135°-315°, C90°-270° ve tüm düzlemler bir arada olmak üzere ışık dağılım eğrileri verilmektedir. Cam kandilden kaynaklanan yapısal farklılıklar ışık dağılım eğrisini etkilemektedir.

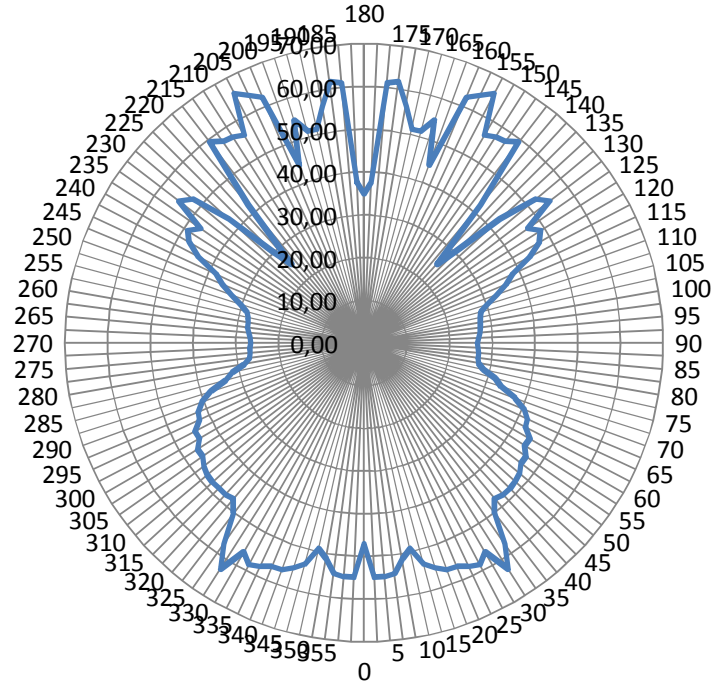
Prototipin simetrik olması nedeniyle, kandil camındaki yapısal farklılıklar ihmal edilmiş, ışık şiddeti ölçümlerinin ortalaması alınarak ışık dağılımı karşılıklı düzlemlerde simetrik kabul edilmiştir. Prototipin yerleştirilmiş olduğu cam kandilin iç yüzeylerinde gerçekleşen yansımalar sonucunda, çeşitli bölgelerde ışık şiddetinde prototipin yalın haline göre değişiklikler olduğu gözlemlenmektedir.



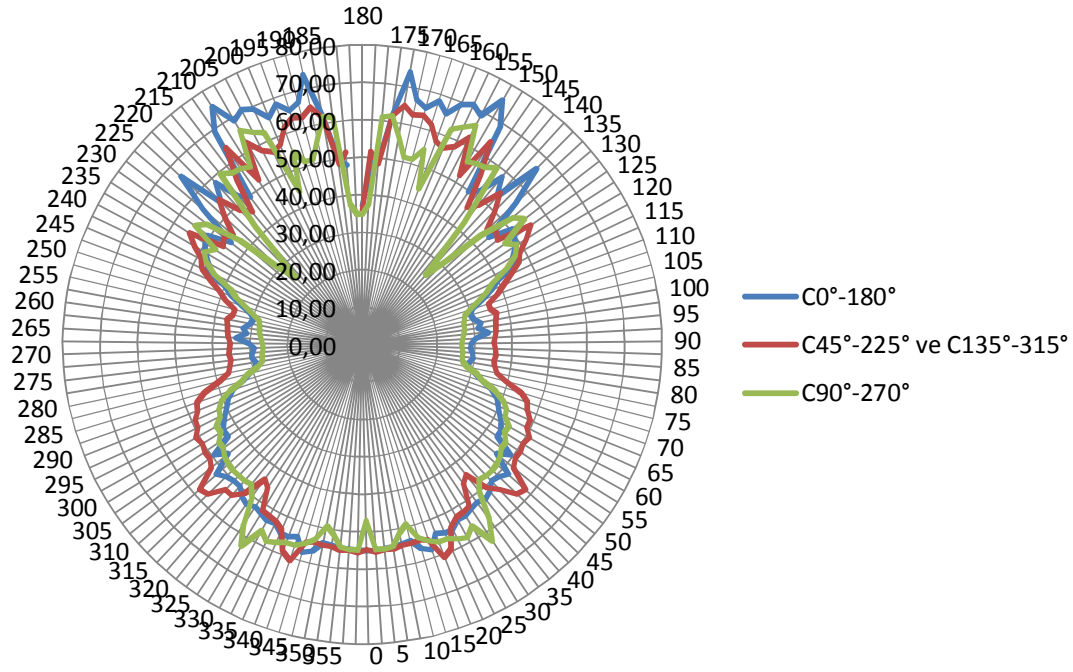
Şekil 3.37 : Yeni cami kandili C0°-180° eğrisi [cd].



Şekil 3.38 : Yeni cami kandili C45°-225° ve C135°-315° eğrisi [cd].



Şekil 3.39 : Yeni cami kandili C90°-270° eğrisi [cd].



Şekil 3.40 : Yeni cami kandili C eğrileri [cd].

3.4 Dialux Simülasyonları

Elde edilen ışık dağılım eğrileri, Şemsi Paşa Camii'nin mevcut kaynaklara göre doğrulanmış üç boyutlu Dialux modeline yerleştirilerek cami içi aydınlatma

simülasyonları yapılmıştır. İçinde prototipin yer aldığı kandille elde edilen ışık dağılım eğrileri Dialux'e tanıtılmak üzere .ies dosyaları haline getirilmiştir. Isıl analizler sonucunda kullanılan LEDlerin jonksiyon sıcaklığı ölçüm ve hesaplarla 75,55 °C olarak hesaplanmıştır. Buna denk düşen ışık akısı değeri ise 82,1 lm olarak hesaplanmıştır. Fotometrik ölçümlerden elde edilen ışık şiddeti değerleri Dialux'e girildiğinde, soğutucu üzerine LEDlerin yerleştirilmesiyle elde edilen çıplak prototip için verim % 94 olarak hesaplanmaktadır. Bu değerden, LEDlerin ışık çıkışını etkileyen ve hesaba katılmayan etkiler olduğu gözlemlenmektedir. Bu etkiler arasında, ölçüm esnasında ortaya çıkan hatalar, hesap hataları, LEDlerin sürülmesi için kullanılan kabloların ışık çıkışına engel olması ve LEDlerin katalog değerlerinden farklı ışık akısı değerlerine sahip olması sayılabilir. Sonuç olarak Dialux hesapları prototipin çıplak halde % 94 verimle 617 lm, LEDlerin üzerine şeffaf camlar yerleştirilmesiyle % 87 verimle 571 lm, şeffaf camlı prototipin yeni kesik kandil içine yerleştirilmesiyle % 85 verimle 558 lm ışık akısı verdiğini göstermektedir. Prototip kesik kandil içine girdiğinde ışık akısındaki azalma çok düşük seviyededir. Bunun sebebi kandilin hem üst, hem alt kısmının açık olması sonucunda alt ve üst yüzeylerden çıkan ışığın hiçbir engele takılmaması, sadece yan yüzeylerdeki LEDlerin cam kandilden etkilenmesidir. Elde edilen ışık akısı değeri 10,50 W'lık armatür toplam gücüne oranlandığında, tasarlanan yeni cami kandilinin etkinlik faktörü değerinin 53,17 lm/W olduğu görülmektedir.

IES LM 79-08 Katı Hal Aydınlatma Ürünlerinin Elektriksel ve Fotometrik Ölçümleri ölçüm yönteminde LEDli armatürler için ışık dağılım eğrilerinin normal kaynaklarda tercih edilen bağıl fotometri yönteminden ziyade mutlak fotometri yöntemiyle hazırlanması gerektiğini belirtmektedir [48]. Sonuç olarak Dialux'un hazırlanan LEDli cami kandili için mutlak fotometri değerlerinden belirlediği ışık akısı değeri 560 lm'dir.

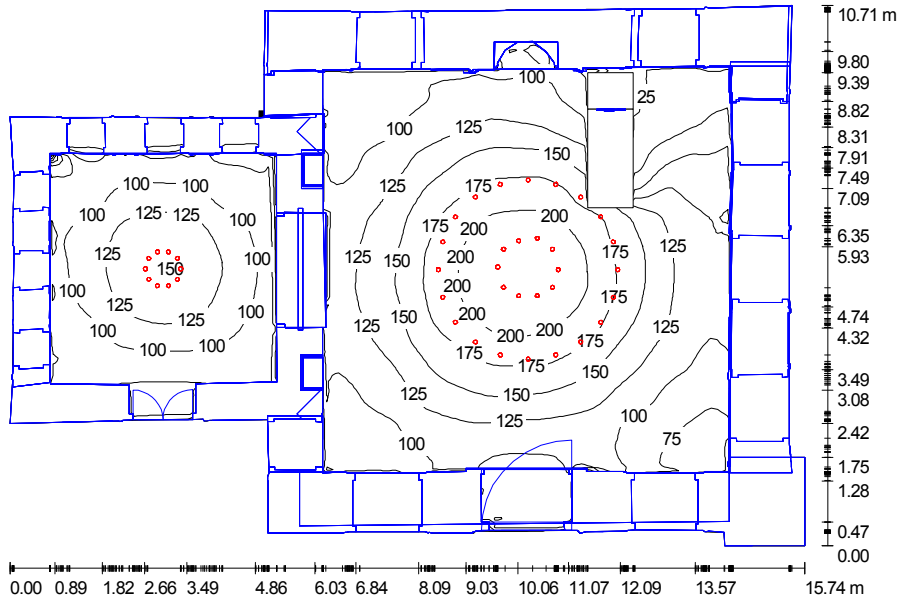
Dialux'e akkor telli cami kandilinin ışık şiddeti değerleri verildiğinde, armatür verimi % 91 olarak hesaplanmıştır. Kandil içine yerleştirilen akkor telli lambanın ışık akısı 220 V şebeke gerilimi için 353,4 lm olarak hesaplandığında, akkor telli cami kandilinin uzaya yaydığı ışık akısı yaklaşık 322 lm olarak hesaplanmaktadır. Bu değer 40 W'lık armatür toplam gücüne bölündüğünde elde edilen etkinlik faktörü değeri 8,05 lm/W'tır. Hesaplar doğrultusunda kandil içindeki akkor telli lambanın hazırlanan LEDli prototiple değiştirilmesi sonucunda toplam ışık akısı 322 lm'den

558 lm'e, etkinlik faktörü ise 8,05 lm/W'tan 53,17 lm/W'a yükseltilmiştir. Bu kazanımlar gerek cami içi aydınlık düzeyleri, gerekse tüketilen enerji açısından çok önemlidir. Hazırlanan prototipin ışık dağılım eğrisi Dialux modeline yerleştirilerek cami içinde ilk işletme durumu ve bakım katsayısı hesaba katılarak armatürün ve oda yüzeylerinin eskime ve kirlenmeleri sonucunda elde edilecek fotometrik sonuçlar incelenmiştir.

3.4.1 İlk işletme durumu için simülasyon sonuçları

Yapılan Dialux simülasyonlarında bakım katsayısı 1 kabul edilerek Caminin ilk işletme durumu için zemindeki yatay aydınlık düzeyi dağılımı, mihraptaki silindirik ve düşey aydınlık düzeyleri, kubbelerdeki aydınlık düzeyleri ve birleşik kamaşma endeksi değerleri hesaplanmıştır.

Cami zemininde simülasyonlarla elde edilen aydınlık düzeyleri Şekil 3.41'de eş aydınlık düzeyi eğrileri halinde verilmektedir. Cami zemininde elde edilen ortalama aydınlık düzeyi değeri 119 lx'tür. Yapılan ortalama aydınlık düzeyi hesabında cami ana bölümü ile türbede elde edilen aydınlık düzeyleri bir arada hesaplanmaktadır. Bu iki bölgenin aydınlık düzeyi değerleri tek tek incelendiğinde, cami ana bölümünde elde edilen ortalama aydınlık düzeyinin 131 lx, türbede elde edilen ortalama değerin ise 106 lx olduğu görülmektedir. Elde edilen aydınlık düzeyi değerleri hedeflenen 100 lx değerinin üzerinde ve dolayısıyla uygundur.



Şekil 3.41 : İlk işletme durumu için Cami zemininde aydınlık düzeyi dağılımı [lx].

Minberde elde edilen yarı silindirik aydınlık düzeyi 67 lx'tür. Bu değer hedeflenen 300 lx'lük aydınlık düzeyinin oldukça altında kalmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda 300 lx'lük aydınlık düzeyinin ancak bölgesel bir aydınlatma elemanı ile elde edilebileceği belirlenmiştir. Buna ek olarak aydınlatılması hedeflenen Şemsi Ahmet Paşa Camii'nde minber, kitapların depolanması amacıyla kullanılmaktadır ve burada vaaz eylemi gerçekleşmemektedir.

Cami ana kubbesi, yarı kubbeler ve türbe kubbesinde elde edilen ortalama aydınlık düzeyi değerleri Çizelge 3.10'da verilmektedir. Burada AK ana kubbe, YK1, YK2, YK3 ve YK4 sırasıyla tüm yarı kubbeleri göstermektedir. Elde edilen aydınlık düzeyi değerleri kubbenin ve kubbe üzerindeki bezemelerin görünürlüğü açısından önemlidir. Hesap sonuçları akkor telli lambalı sisteme göre kubbe aydınlık düzeyleri üzerinde ciddi artışlar sağlandığını göstermektedir. Burada kullanılan sistemin ışık akısının yükseltilmesine ek olarak, tüm uzaya ışık gönderecek şekilde bir prototip tasarlanmasının da önemi büyüktür. Akkor telli veya herhangi bir duyla kullanılan ışık kaynaklarında, duya üst yarı uzaya giden ışık akısının önünde bir engel oluşturmakta ve kubbeye ulaşacak ışığı azaltmaktadır.

Çizelge 3.10 : Cami kubbelerinde ortalama aydınlık düzeyi değerleri [lx].

	Direkt	Endirekt	Toplam
AK	23,01	50,29	73,40
YK1	23,89	55,25	79,20
YK2	25,35	57,32	82,58
YK3	23,69	57,03	80,75
YK4	25,72	56,42	82,08
Türbe	22,02	58,90	80,90

3.4.1.1 Bakım katsayısı hesabı

CIE Lighting of Indoor Places standartının belirttiği 100 lx'lük ortalama aydınlık düzeyi, yapılan tasarımda elde edilen ilk aydınlık düzeyi değerinin bakım katsayısıyla çarpılması sonucu elde edilir. Burada bakım katsayısı bir aydınlatma tesisatının belirli bir kullanım süresinden sonra çalışma düzleminde sağladığı ortalama aydınlık düzeyinin yeni tesisatın sağladığı ortalama aydınlık düzeyine oranıdır. Mevcut standartlar LEDli armatürlerin bakım katsayılarının hesabı konusunda kesin bir bilgi vermemektedirler. Buna ek olarak LEDlerin ışık akısındaki değişiklikler farklı çeşitler arasında büyük değişiklikler göstermektedirler. Bu

sebeple kullanılan LEDlerin üretici firmalar tarafından yapılan testlerinin sonuçlarından faydalanmak gerekmektedir. Cree XP-E LEDler için uzun dönem test sonuçları Bölüm 3.2.2, Çizelge 3.4’te verilmiştir. Bakım katsayısı, CIE 97:2005 Bina İçi Elektrik Aydınlatma Sistemlerinin Bakım Rehberi’ne göre (Guide on the Maintenance of Indoor Electric Lighting Systems) göre,

$$MF = LLMF \times LSF \times LMF \times RSMF \quad (3.3)$$

denklemiyle hesaplanmaktadır. Burada,

MF: Bakım katsayısı (Maintenance Factor)

LLMF: Lamba ışık akısı bakım katsayısı (Lamp Lumen Maintenance Factor)

LSF: Lamba dayanım katsayısı (Lamp Survival Factor)

LMF: Armatür bakım katsayısı (Luminaire Maintenance Factor)

RSMF: Oda yüzeyleri bakım katsayısı (Room Surfaces Maintenance Factor)’dür [49].

Çizelge 3.4, 350 mA sabit akım, 85 °C jonksiyon sıcaklığında kullanılan LEDlerin ışık akısı değerlerinin 6000 saat sonunda %0,2 kadar bir düşüş gösterdiğini belirtmektedir. Jonksiyon sıcaklığının 85 °C’tan düşük olması ve ışık akısındaki düşüşün çok az olması sebebiyle *LLMF* katsayısını 1 kabul etmek mümkündür. LED ışık akısının 6000 saatteki değerinin %70’ine ineceği L70 ömür süresi ise 60500 saatten uzun olarak belirlenmiştir. Sürenin uzunluğu ve LEDlerin bozulma sıklıklarının çok düşük olması sebebiyle, *LSF* katsayısı da 1 kabul edilebilir.

Çizelge 3.11’de CIE 97:2005’te yapılan armatür sınıflandırmaları verilmektedir. Bu çizelgeye göre, kullanılan armatürün üst ve alt kısmının tamamen açık olması sebebiyle A sınıfı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.12’de ise armatürlerin kullanıldığı hacimlerin sınıflandırması verilmektedir. Tasarım bir cami için yapıldığı ve cami içinin çok sayıda insan tarafından ziyaret edilmesine rağmen, ibadet için kullanılması nedeniyle temiz tutulması gerektiği için camiyi “temiz” sınıfına koymak uygun olacaktır.

Armatür bakım katsayısı *LMF* hesaplanırken, armatürün tipi, kullanıldığı hacmin tipi ve armatürlerin temizlenme sıklıkları dikkate alınmaktadır. A sınıfı floresan lambalı bir armatürün, temiz bir ortamda kullanılması durumunda, çeşitli temizleme

sıklıklarına göre armatür bakım katsayısı değerleri Çizelge 3.13'te verilmektedir. LEDli sistemler için armatür bakım katsayısı hesabına dair bir bilgi standartta yer almamaktadır.

Çizelge 3.11 : CIE 97:2005'e göre armatür sınıflandırmaları.

Tip	Armatür tipi	Armatür Tanımı
A	Çıplak Bant	Çıplak bant armatürler
B	Üstü Açık (Doğal havalandırmaya sahip olan ve kendi kendini temizleyen armatürler)	Üstü açık olan direkt-endirekt armatürler Endirekt yansıtıcısı ve kapalı optik araçları bulunan direkt-endirekt armatürler Duvaryıkayıcı armatürler (dik açıklıklı) Altı ve üstü açık, duvara monte armatürler Üstü açık tavana monte armatürler
C	Üstü kapalı (Havalandırması olmayan armatürler)	Gömülü ve yüzeye monte armatürler (örneğin petekli) Tavana monte armatürler, spotlar
D	Kapalı IP2X	Üstü kapalı, optikleri kapalı genel amaçlı armatürler
E	Toz korumalı IP5X	Toz korumalı IP5X (korumalı, steril oda armatürleri)
F	Endirekt aydınlatma	Müstakil, sarkıtlı, duvara asılı endirekt armatürler, altları kapalı, gizli aydınlatma
G	Hava kontrollü ve zorlanmış havalandırma	Hava kontrol elemanı ve optik klima veya havalandırma sistemleriyle

Çizelge 3.12 : CIE 97:2005'e göre alan sınıflandırmaları.

Alan	Aktivite veya iş alanı
Çok Temiz	Steril odalar, yarı-iletken üretim yerleri, hastanelerin klinik bölgeleri, bilgisayar merkezleri
Temiz	Ofisler, okullar, hastane koridorları
Normal	Dükkanlar, laboratuvarlar, restoranlar, depolar, montaj odaları, atölyeler
Kirli	Demir çelik, kimyasal işlerin yapıldığı atölyeler, lehimleme, cilalama, ahşap işlerinin yapıldığı alanlar

Çizelge 3.13 : Temizleme sıklığına göre armatür bakım katsayıları.

Temizleme sıklığı	6 ay	1 yıl	1,5 yıl	2 yıl	2,5 yıl	3 yıl
LMF	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85

CIE standardı oda yüzeyleri bakım katsayısını hesaplarken pek çok etkeni dikkate almaktadır. Bunlar arasında oda duvar, tavan ve zemin yansıtma katsayıları, odaların

temizlenme sıklığı, armatür tipi, aydınlatma sistemi ve armatür içinde kullanılan ışık kaynakları yer almaktadır. Standartta LEDli sistemler için herhangi bir bilgi verilmemektedir. Tavan, duvar ve zemin yansıtma katsayıları ortalama olarak sırasıyla %50, %70 ve %20 olarak kabul edilirse, temiz olarak değerlendirilen ortamlarda kullanılan direkt-endirekt aydınlatma sistemleri için *RSMF* değerleri 6 ay için 0,93, 1 yıl için 0,91 ve 1 yıldan sonrası için 0,90 olarak verilmektedir.

LEDlerin 6000 saat boyunca ışık akısı değerlerini sabit tuttukları göz önünde bulundurulursa, bu süre için yapılacak bir bakım katsayısı hesabı, Cami'nin sene içinde her gün kullanılması ve günde yaklaşık 10 saat boyunca kullanıldığı varsayımıyla yaklaşık 1,6 seneye denk düşmektedir. Armatürlerin temizleme sıklığı 1,5 yıl kabul edilirse, tüm katsayıları denkleme yerleştirerek,

$$MF = 1.0 \times 1.0 \times 0,91 \times 0,90 = 0,82$$

olarak hesaplanmaktadır. LEDlerin L70 ömür sürelerinin sonundaki bakım katsayısı hesabı içinse, 60500 saatlik hesaplar yapmak gerekmektedir. Bu süre yaklaşık olarak 16,6 yıla denk düşmektedir. Bu süre LEDler için uygun bir süre olarak ortaya çıksa da, sistemde kullanılan güç elektroniği elemanları, ısı ve optik malzemeler açısından fazlasıyla uzun bir süredir. Özellikle LEDli sistemlerin en zayıf halkasını oluşturan güç elektroniği elemanlarının 60500 saatlik zaman zarfında katastrofik bir arıza yaşayacağı kesindir. Bu sebeple aydınlatma sistemi bir bütün olarak kabul edilmiş ve hesaplar 25000 saatlik bir çalışma süresi için gerçekleştirilmiştir. Bu süre yaklaşık olarak 6,8 yıla denk düşmektedir. Çizelge 3.4'te ışık akısının ilk değerinin %90'ına inmesi için gereken süre 32800 saat olarak verilmiştir. LED ışık akısındaki azalma doğrusal kabul edilirse, 32800 saatte ışık akısında % 10'luk bir azalma olduğuna göre, 25000 saatlik sürede bu azalma yaklaşık % 8 olacaktır. Çizelgelerdeki değerlerden faydalanarak, 6,8 yıl sonunda elde edilen bakım katsayısı,

$$MF = 0,92 \times 1,0 \times 0,91 \times 0,90 = 0,75$$

olarak hesaplanmaktadır.

Tüm hesaplarda, standardın LEDli kaynaklar için herhangi bir bilgi vermemesi nedeniyle, varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımların LEDli sistemler için doğru sonuçlar doğurup doğurmayacağı belirsizdir. Siteco firması kendi LEDli armatürleri için hazırladığı katalogda, mevcut standartlardaki eksiklikler nedeniyle iç

aydınlatmada kullanılan LEDli armatürlerin hesaplarında bakım katsayısının 0,8 alınmasını önermektedir [50].

3.4.1.2 Bakım katsayısı hesaba katılarak elde edilen simülasyon sonuçları

Yapılan hesaplar doğrultusunda, 6000 saatlik ve 25000 saatlik işletme sonrası değerlere ulaşmak için, bakım katsayısı sırasıyla 0,82 ve 0,75 kabul edilerek, simülasyonlar tekrarlanmıştır. Elde edilen ortalama aydınlık düzeyi değerleri, ilk işletme durumu değerleriyle beraber Çizelge 3.14'te, kamaşma değerleri Çizelge 3.15'te verilmektedir. Burada MF bakım katsayısını göstermektedir.

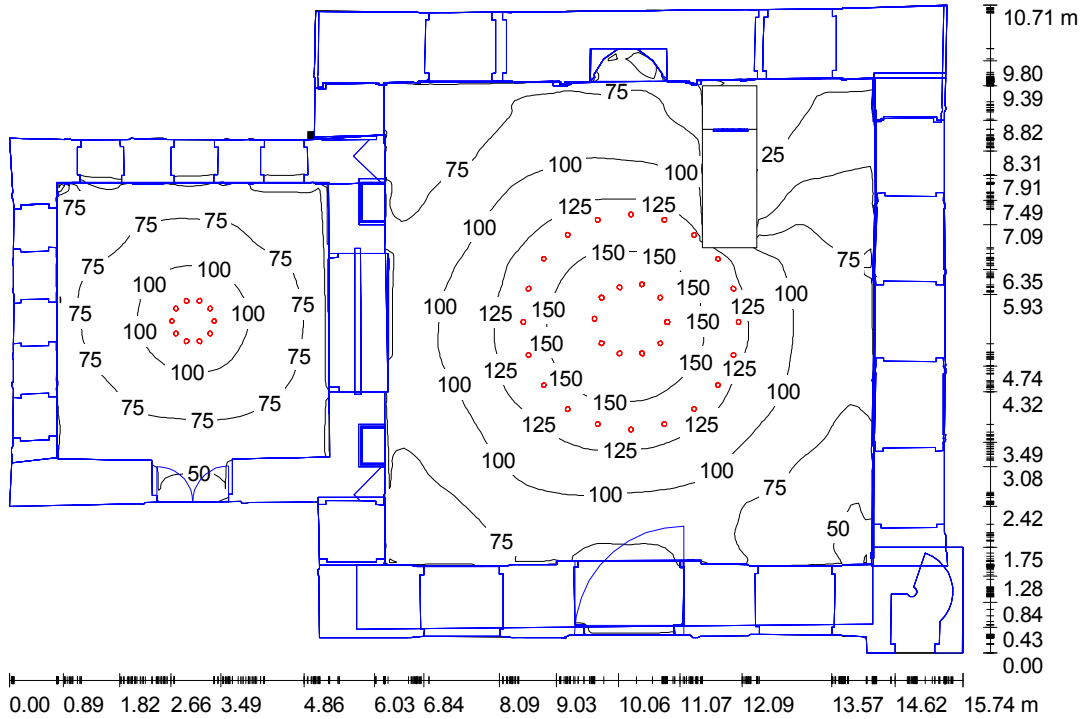
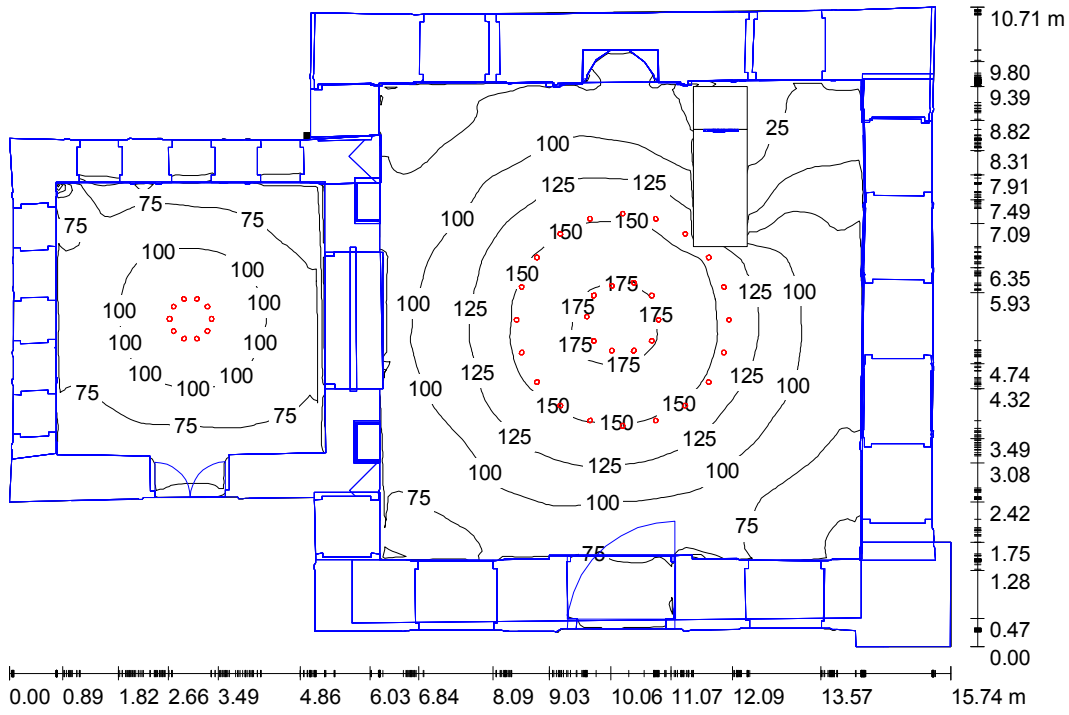
Çizelge 3.14 : Cami içi ortalama aydınlık düzeyleri.

Hesap Yüzeyleri	Ortalama Aydınlık Düzeyi [lx]		
	$MF=1$	$MF=0,82$	$MF=0,75$
Zeminde Yatay	119	97	88
Ana Bölüm Zeminde Yatay	131	107	98
Türbe Zeminde Yatay	106	87	80
Minberde Silindirik	67	55	50
Ana Kubbe	73,40	60,17	55,05
Yarı Kubbe 1	79,20	64,98	59,40
Yarı Kubbe 2	82,58	67,85	61,94
Yarı Kubbe 3	80,75	66,25	60,56
Yarı Kubbe 4	82,08	67,28	61,56
Türbe Kubbesi	80,90	66,35	60,68

Çizelge 3.15 : Cami içi birleşik kamaşma endeksi değerleri.

Hesap Yüzeyleri	UGRmax		
	$MF=1$	$MF=0,82$	$MF=0,75$
Ana Bölüm Otururken	21	21	21
Ana Bölüm Ayakta	25	25	25
Türbe Otururken	18	18	18
Türbe Ayakta	25	25	25

Şekil 3.42'de bakım işletme katsayısının 0,82, Şekil 3.43'te ise 0,75 kabul edildiği durumlar için cami zeminindeki eş aydınlık düzeyi eğrileri görülmektedir.



Bakım katsayısının 0,82 kabul edildiği 6000 saatlik sürenin sonunda cami ana bölümü ve türbe bir arada değerlendirildiğinde zeminde elde edilen ortalama aydınlık düzeyi değeri 97 lx'tür. Cami ana bölümünde elde edilen ortalama aydınlık düzeyi 107 lx, türbede elde edilen ortalama değer ise 87 lx'tür. Cami ana bölümündeki

aydınlık düzeyi hedeflenen 100 lx değerinin üzerinde kalmakta fakat türbedeki aydınlık düzeyi istenen değeri yakalayamamaktadır. Türbedeki aydınlık düzeylerini arttırmak hedefiyle mevcut sistemdeki 5 adet kandilin sayısının 10'a çıkartılması önerisi daha önceki çalışmalarda yapılmış ve hesaplar da 10 adet kandil kullanılacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Fakat eskime ve kirlenme etkileri sonucunda Türbe aydınlık düzeyi değerlerinin hedeflenen korunmuş aydınlık düzeyi değerinin altında kalacağı görülmektedir. Kandillerin hacmin tam ortasından asılmış olmaları, kubbe altındaki aydınlık düzeylerini yüksek tutmakta, fakat köşelerdeki aydınlık düzeylerinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Daha önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi bu durumun önüne ancak bölgesel aydınlatma elemanlarıyla geçmek mümkün olabilir.

Bakım katsayısının 0,75 kabul edildiği 25000 saatlik sürenin sonunda ise oldukça benzer sonuçlar elde edilmektedir. 25000 saat, günde 10 saatlik açık kalma süresi ile, yaklaşık 6,8 yıla denk düşmektedir. Bu süre sonucunda Cami zemininde elde edilen ortalama aydınlık düzeyi 88 lx'tür. Cami ana bölümünde elde edilen ortalama aydınlık düzeyi 98 lx, türbede elde edilen ortalama değeri ise 80 lx'tür. Buna göre cami ana bölümünde hedeflenen korunmuş aydınlık düzeyi değerinin sadece 2 lx altında kalınmaktadır. Bu, standartlarla belirlenen aydınlık düzeyi değerlerinin 6,8 yıl sonra da cami içinde korunacağını önemli bir göstergesidir. Türbe tarafındaki aydınlık düzeyi değerleri de daha önce belirtilen sebeplerden ötürü yine hedeflenen değerin altındadır, fakat cami içindeki mevcut aydınlatma sisteminin bakım katsayısı 1'e eşitken bile zeminde sağlayabildiği ortalama aydınlık düzeyi değeri, tasarlanan yeni cami kandilinin 6,8 yıl sonra sağlayacağı değerlerin ciddi şekilde altında kalmaktadır.

3.5 Kamaşma

Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin Dialux programı ile modellenmesi ve aydınlatma simülasyonlarının gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen fotometrik bilgilerin içinde, kullanıcıların aydınlatma tasarımı konusunda en belirgin şekilde maruz kalacağı konforsuzluk kamaşmasının ölçütü de bulunmaktadır. Kamaşma, IESNA el kitabında "görüş alanının içinde, gözün adapte olduğu yüzey parıltısından daha yüksek değerdeki yüzey parıltısı nedeniyle oluşan, rahatsızlık verici, konforsuzluk yaratıcı veya görsel performans ve görünürlükte kayıplara neden olan duyu" şeklinde

tanımlanmıştır. Kamaşma ışık kaynaklarının parıltısına, çevre parıltısına, kamaşmayı yapan kaynağın büyüklüğüne ve görüş alanındaki pozisyonuna bağlıdır [12, 20]. Kamaşmayı iki ayrı şekilde incelemek mümkündür.

Yetersizlik kamaşması, göz üzerine saçılan fazla ışığın etkisiyle, görünürlüğü ve görsel performansı düşüren kamaşma şeklidir. Alman normunda yetersizlik kamaşması yerine fizyolojik kamaşma terimi kullanılmaktadır. Fizyolojik kamaşma mevcut olduğunda, kullanıcılar görsel işleri gerçekleştirirken görme yeteneklerinde veya iş performanslarında ani bir düşüşle karşılaşır. Buna karşı pozisyonlarını değiştirerek veya ulaşabildikleri perdeleri veya storları kapatarak tepki gösterebilirler [51].

Konforsuzluk kamaşması ise konforsuzluğa neden olan kamaşmadır. Konforsuzluk kamaşması, görsel konforun en önemli bileşenlerinden biridir. CIE 117:1995 konforsuzluk kamaşmasını “cisimlerin görüntüsüne zarar vermese bile konforsuzluğa sebep olan kamaşma” olarak tanımlamaktadır. Bu tür kamaşma, görsel performans veya görünürlüğü direkt olarak etkilemez. Alman normunda konforsuzluk kamaşması yerine psikolojik kamaşma terimi kullanılmaktadır. Psikolojik kamaşma mevcut olduğunda, çalışanlar iş performanslarında herhangi negatif bir etkiyle karşılaşmayabilirler. Fakat daha sonra, yaşadıkları kamaşmaya bağlı olarak baş ağrısı gibi fizyolojik semptomlarla karşı karşıya kalırlar [7].

Dialux kamaşmayı CIE tarafından önerilen kamaşma hesaplama yöntemini kullanarak bir katsayı olarak hesaplamaktadır. Bu katsayıya Birleşik Kamaşma Endeksi (Unified Glare Rating – UGR) ismi verilmektedir. UGR denklem (3.4) ile tanımlanmaktadır.

$$UGR = 8 \log \left[\frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right] \quad (3.4)$$

Burada,

L_b : Arkaplan parıltısı [cd/m^2],

L : Gözlemcinin bakış doğrultusuna giren ışık kaynaklarının ışık yayan tüm parçalarının parıltısı [cd/m^2],

ω : Işık kaynaklarının her birinin gözlemcinin gözünde açtığı uzay açısı [sr],

p : Her ışık kaynağı için Guth pozisyon endeksi (bakış doğrultusuyla arasındaki mesafe)dir.

UGR değeri için çoğu aydınlatma sistemindeki genel aralık 10-30 arasındır. Yüksek bir UGR değeri belirgin bir konforsuzluk kamaşmasını gösterirken, düşük bir değer konforsuzluk kamaşması olasılığının düşük olduğunu belirtmektedir. 10'dan daha küçük UGR değerlerine sahip aydınlatma sistemlerinin rahatsızlık yaratmadığı varsayılır ve genel olarak $UGR < 10$ şeklinde karakterize edilirler.

Camide ibadet edenlerin yaşayacağı kamaşma probleminin önüne geçmek için hazırlanacak armatürün UGR değeri hesaplanmıştır. Bu amaçla, cami içinde çeşitli noktalara UGR hesap noktaları yerleştirilerek kamaşma hesapları yapılmış ve en yüksek kamaşmanın cami içine girerken gerçekleştiği görülmüştür. Mevcut aydınlatma koşulları için cami merkezinde namaz kılan bir kullanıcının oturduğu durumda (göz yüksekliği 0,7 m, bakış doğrultusu minber duvarı kabul edilmiştir) UGR değeri 10'dan küçük, ayakta durduğu durumda ise 16'dır. Cami girişinde ayakta duran bir kişi için (göz yüksekliği 1.60 m, bakış doğrultusu minber duvarı kabul edilmiştir) ise bu değer 24'e yükselmektedir. Söz konusu hacim ve pozisyonlarda elde edilen maksimum UGR değerleri Çizelge 3.16'da verilmiştir. Buna göre mevcut aydınlatma koşulları için elde edilen UGR değerleri Çizelge 2.2'de verilen değerlere göre uygundur.

Çizelge 3.16 : Cami içi mevcut durum maksimum UGR değerleri.

Hesap Yüzeyleri	UGRmax
Ana Bölüm Otururken	21
Ana Bölüm Ayakta	25
Türbe Otururken	18
Türbe Ayakta	25

Cami içinde ana bölüm ve türbeye yerleştirilen kamaşma hesap yüzeyleri ile UGR değerlerinin hesabı tasarlanan yeni cami kandili ile farklı bakım işletme katsayılarına göre yeniden hesaplanmıştır. Elde edilen maksimum değerler Çizelge 3.17'de verilmektedir. İki alanda da en yüksek UGR değerlerine kapı girişlerinde rastlanmıştır. Cami içindeki hesaplamalar, tasarlanan yeni kandil için de UGR değerlerinin eski akkor telli lambalı kandille aynı sonuç verdiğini ve standartla belirlenen limitlerin içinde kaldığını göstermektedir.

Çizelge 3.17 : Yeni cami kandiliyle cami içi maksimum UGR değerleri.

Hesap Yüzeyleri	UGRmax		
	MF=1	MF=0,82	MF=0,75
Ana Bölüm Otururken	21	21	21
Ana Bölüm Ayakta	25	25	25
Türbe Otururken	18	18	18
Türbe Ayakta	25	25	25

3.6 LEDler ve Kamaşma

Cami içindeki mevcut durum için UGR değerleri hesaplanmıştır, fakat hesaplanan değerlerin kullanılabilirliği büyük bir soru işaretidir. Kamaşma konusundaki literatür, aydınlatma alanına yeni ışık kaynaklarının girmesiyle birlikte sürekli yenilenmiş ve ortaya pek çok farklı denklem ve kamaşma sınıflandırma yöntemleri çıkmıştır. Kamaşma sınıflandırma sistemlerinden en geniş kullanım bulan sistem uluslararası aydınlatma komisyonu CIE tarafından geliştirilmiş olan Birleşik Kamaşma Endeksi – UGR sistemidir. Bu sistem, kamaşma üzerine çeşitli çalışmalar yapmış olan Einhorn ve Hopkinson’un kamaşma denklemlerini ve aynı zamanda Guth pozisyon endeksini biraraya getirir [52]. UGR sistemi, 2002 senesinde CIE 147:2002 ile geliştirilerek küçük, büyük ve karmaşık kaynaklar için hesaplamaları içerecek şekilde güncellenmiştir. Fakat kamaşma endeksi konusundaki son gelişmenin bu tarihte olması ve LEDli kaynakların özellikle iç aydınlatma sistemleri içinde gelişimini içermemesi sebebiyle, LEDli kaynaklar için kamaşma hesaplarının yapılmasında ciddi sorunlar ortaya çıkmaktadır. CIE teknik komitelerinden TC 3-50 “LED Aydınlatma Sistemli İç Aydınlatma için Aydınlatma Kalite Ölçütleri” tarafından yapılan çalışmalar, LED yerleşiminin açık olarak görüldüğü armatürler için, armatür içindeki küçük LED kaynakların, geleneksel ışık kaynaklarına göre daha fazla kamaşma yarattığını ve bu sebeple mevcut UGR denklemlerinin kullanımının uygun olmadığını belirtmektedir [53].

3.6.1 Birleşik kamaşma endeksi

CIE Birleşik Kamaşma Endeksi (3.4) denklemiyle tanımlanmıştır. Küçük kaynaklar için tanımlanmış olan UGR denklemi ise (3.5)’te verilmektedir [54].

$$UGR_{k\ddot{u}c\ddot{u}k} = 8 \log \left[\frac{0,25}{L_b} \sum 200 \frac{I^2}{r^2 p^2} \right] \quad (3.5)$$

Burada,

L_b : Arkaplan parıltısı [cd/m^2],

L : Gözlemcinin bakış doğrultusuna giren ışık kaynaklarının ışık yayan tüm parçalarının parıltısı [cd/m^2],

ω : Işık kaynaklarının her birinin gözlemcinin gözünde açtığı uzay açısı [sr],

p : Her ışık kaynağı için Guth pozisyon endeksi (bakış doğrultusuyla arasındaki mesafe),

I : Göze ulaşan ışık şiddetini [cd],

r : Gözlemcinin gözü ile armatür arasındaki mesafeyi [m] göstermektedir.

İç aydınlatmada kullanılan LEDli ışık kaynaklarının büyük çoğunluğu küçük kaynaklar için tanımlanan UGR denkleminin kapsamına girmektedir. CIE 147:2002 Raporu “Küçük, büyük ve karmaşık kaynaklardan kaynaklanan kamaşma”, görünen alanı $0,005 \text{ m}^2$ ’den küçük olan (örn. 80 mm çaplı bir disk) ışık kaynakları için alan değerini $0,005 \text{ m}^2$ kabul etmekte ve kaynağın parıltısını denklem (3.6) ile hesaplamaktadır [54]:

$$L = \frac{I}{A_p} = 200 \cdot I \quad (3.6)$$

Burada

L : Parıltı [cd/m^2],

I : Işık şiddeti [cd],

A_p : Görünen alandır [m^2].

LEDli ışık kaynakları dikkate alındığında, kaynakların boyutları nedeniyle UGR denkleminin yapılan bu iyileştirmenin faydalı olabileceği fikrine varılmaktadır. Bununla beraber, söz konusu denklem, Paul ve diğ. tarafından, kamaşma kaynağı olarak 200 W’lık bir akkor telli lambanın kullanıldığı bir deneyden üretilmiştir [55]. Dolayısıyla bu denklemin LEDli kaynaklara uygulanıp uygulanamayacağı belirsizdir.

3.6.2 Pozisyon endeksi

Pozisyon endeksi kamaşma kaynağının gözlemcinin bakış doğrultusundan olan açısal uzaklığına bağlı olarak konforsuzluk kamaşmasındaki değişimi verir [56]. 1925

yılında Luckiesh ve Holladay tarafından yapılan deneysel çalışma, kamaşma hissinin ışık kaynağının görsel alandaki konumuna göre değiştiğini göstermiştir [57]. Luckiesh ve Guth bu çalışmayı ilerleterek 1949 yılında konforla konforsuzluk arasındaki sınır (borderline between comfort and discomfort – BCD) adını verdikleri kriteri oluşturdular. Bu kriteri oluşturmak için parıltı dağılımı düzgün olan bir görsel alanda, yine parıltı dağılımı düzgün, dairesel ve sabit spektrumlu kaynaklar kullanarak bir deney gerçekleştirdiler. Deneye katılan gözlemcilerden öncelikle görsel alanlarının tam ortasına yerleştirilmiş olan bir kaynağın parıltısını konfor ile konforsuzluk arasındaki sınır değere ayarlamaları istendi ve bu parıltı değerlerinin ortalaması BCD parıltısı olarak belirlendi. Bu parıltı değerinden yola çıkarak, kamaşma kaynağı görüş çizgisinden farklı açısız uzaklıklardayken elde edilen BCD parıltıları hesaplandı. Elde edilen tüm BCD değerleri arasındaki ilişki, Guth pozisyon endeksi olarak tanımlandı [58].

Bu çalışma 2007 yılında Kim ve diğ. tarafından benzer koşullara alt görsel alanın da eklenmesiyle tekrarlandı. Çalışma BCD değeri için benzer bir sonuç üretirken, pozisyon endeksi için elde edilen değerlerin Guth pozisyon endeksi değerlerine göre daha düşük olduğu tespit edildi [59]. Özetlenen iki çalışmada da, BCD parıltısı ve pozisyon endeksi değerleri, parıltı dağılımı düzgün olan, sabit geometrili ve sabit spektrumlu ışık kaynakları için gerçekleştirilmiştir. LEDli ışık kaynaklarına bakıldığında ise bu üç durumun da geçerli olmadığı görülmektedir. Bölüm 3.1.2’de belirtildiği gibi LEDli retrofitlerin tasarımında geleneksel kaynakların ışık akısı değerlerine ulaşmak, bu kaynaklara benzer ışık dağılımları elde etmek, bu kaynaklara görsel olarak benzeyebilmek, mevcut elektriksel bağlantılardan maksimum derecede faydalanabilmek ve bu özellikleri sağlarken ısı tasarımı da etkin bir şekilde gerçekleştirmek hedeflenmektedir. Bu amaçla, çok küçük boyutlara sahip yüksek güçlü ve yüksek parıltılı Power LEDler değişik dağılımlarda dizilmekte ve sonuç olarak düzgün olmayan parıltı dağılımları oluşmaktadır. Şekil 3.44’te Philips, Verbatim ve Sylvania firmaları tarafından üretilen LEDli retrofitlerden örnekler görülmektedir.

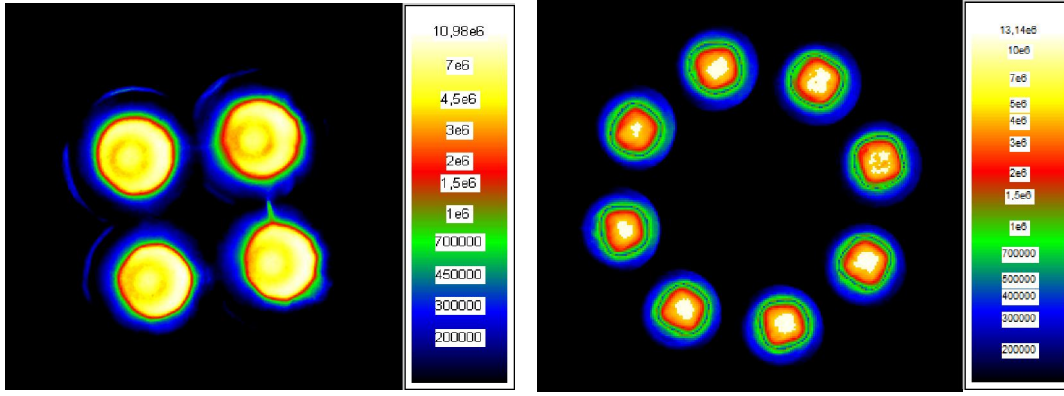


Şekil 3.44 : Çeşitli LED retrofit örnekleri.

Takahashi ve diğ.'nin parıltı dağılımı düzgün olmayan bir ışık kaynağı için pozisyon endeksini araştırdıkları çalışmada, kaynak görüş hizasında bulunduğunda, düzgün parıltı dağılımlı bir kaynağa göre daha çok kamaşma yarattığı; görüş hizasından uzaklaştıkça kamaşma hissinin iki kaynak için de benzer olduğu görülmüştür [60]. Waters ve diğ.'nin parıltı dağılımı düzgün olmayan kaynakları inceledikleri çalışmada ise görüş hizasında Takahashi ile benzer sonuçlar elde edilirken, düzgün olmayan dağılımda görüş hizasından uzaklaştıkça kamaşma hissinin azaldığı tespit edilmiştir [61]. Bu sonuçlar, doktora tez çalışmasında tasarlanan ve parıltı dağılımı düzgün olmayan LEDli kandilin, ibadet esnasında cami kullanıcılarının görüş hizasının dışında olacağı göz önünde bulundurulursa, olumlu sonuçlardır. Bununla birlikte, kesin yorumlar için pozisyon endeksi ile ilgili daha geniş çalışmaların sonuçları üzerinden çalışmak gerekmektedir.

3.6.3 Görünen alan ve parıltı tahmini

UGR denkleminde yer alan büyüklükler arka plan parıltısı, kaynak parıltısı, uzay açısı ve pozisyon endeksidir. Armatür parıltısı L , genel olarak armatürün gözlemci yönündeki ışık şiddeti I değerinin, armatürün görünen alanı A_p 'ye bölünmesi ile elde edilir. Bu şekilde yapılan bir hesapta, UGR değeri için ortalama bir parıltı değeri dikkate alınmaktadır. LEDli ışık kaynaklarında ise, LED çiplerinin çok yüksek parıltı değerlerine sahip olmaları, ortalama parıltı yaklaşımında bir sorun halini almaktadır. Dağıtıcı bir kapakla donatılmış, opal akkor telli lamba görünümündeki LEDli retrofitlerde, LEDler kapak arkasında saklanarak düzgün bir parıltı dağılımı elde edilebilir. Fakat LED çiplerinin ve optik elemanların görünür halde olduğu sistemlerde düzgün parıltı dağılımı söz konusu değildir. Şekil 3.45'te düzgün olmayan parıltı dağılımına örnek iki retrofitin Techno Team LMK 98-3 parıltı kamerası kullanılarak çekilmiş parıltı dağılımı fotoğrafları verilmektedir.



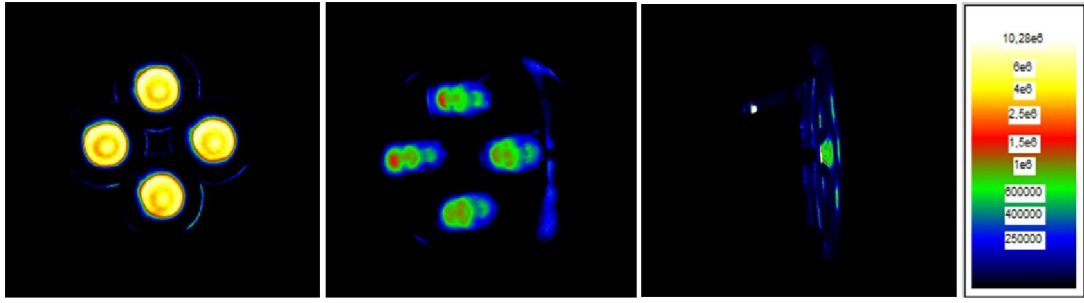
Şekil 3.45 : LED retrofitlerinden örnek parlıtlı dağılımları.

Şekildeki parlıtlı dağılımlarına bakıldığında, soldaki kaynak için maksimum parlıtlı değerinin her bir LED çipinin kalbinde $11,0 \times 10^6$ cd/m², sağdaki kaynaktaki da yine her bir LED çipinin kalbinde $13,2 \times 10^6$ cd/m² mertebelerine ulaştığı görülmektedir. Bu kaynaklar için ortalama parlıtlı kullanılarak bir kamaşma hesabı yapmanın doğruluğu şüphelidir. Literatürde herhangi bir örneği bulunmamakla beraber, bir yöntem, her LED çipini ayrı bir kamaşma kaynağı olarak kabul ederek, buna göre hesap yapmak olabilir.

UGR ve LEDli ışık kaynakları ile ilgili problemleri daha iyi gösterebilmek için, Şekil 3.46’da önden görünümü verilen LEDli retrofitle çeşitli hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 3.47’de, retrofitin karşıdan, 45 dereceden ve yandan, Techno Team LMK 98-3 parlıtlı kamerası kullanılarak çekilmiş olan parlıtlı fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 3.46 : Hesaplamalarda kullanılan Verbatim retrofit önden ve yandan görünüm.



Şekil 3.47 : Retrofitin karşıdan, 45 dereceden ve yandan görünümde parlıtlı dağılımları [cd/m²].

Karşıdan görünümde tüm LEDler tam parlıtlı değerlerinde gözlemlenirken, açı değıştikçe, parlıtlılarda da ciddi değışiklikler olmaktadır. LEDlerin açısıl ışık yayım özelliğinin yanı sıra, kullanılan optik elemanlar ve ısıl tasarım, retrofitin farklı açılardaki parlıtlı değerlerini ciddi şekilde etkilemektedir. Görülen bu 3 pozisyon için parlıtlı kamerasından elde edilen maksimum ve ortalama parlıtlı değerleri Çizelge 3.18’de cd/m² cinsinden verilmektedir. Ortalama parlıtlı, 4 LEDi içeren toplam alan hesaba katılarak hesaplanmış ve bu alan kapsayıcı alan olarak adlandırılmıştır. Buna göre maksimum parlıtlı değeri retrofite tam karşıdan bakıldığında 10,28x10⁶ cd/m² iken bu değeri 45 derece açı için 1,97x10⁶ cd/m² ve yandan görüş için 0,23x10⁶ cd/m² seviyelerine düşmektedir. Ortalama parlıtlı değerleri ise karşıdan, 45 dereceden ve yandan sırasıyla 0,99x10⁶ cd/m², 0,10x10⁶ cd/m² ve 0,008x10⁶ cd/m² olarak hesaplanmıştır.

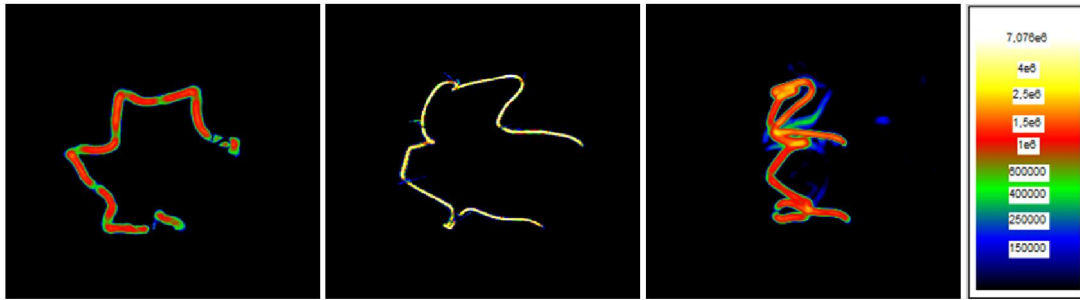
Çizelge 3.18 : LEDli retrofit için görüş açısına göre maksimum ve ortalama parlıtlı değerleri.

		Önden	45 dereceden	Yandan
Retrofit	$L_{maks} / 10^6 \text{ cd/m}^2$	10.28	1.97	0.23
	$L_{ort} / 10^6 \text{ cd/m}^2$	0.99	0.10	0.008

Bu değerler doğrultusunda, üç soru ortaya çıkmaktadır:

- UGR hesabında ortalama parlıtlı değerlerini kullanmak doğru bir yöntem midir?
- Parlıtlı dağılımına bakıldığında, parlıtlı hesabı için hangi görünen alanı dikkate almak gereklidir?
- Retrofitlerin yüzey alanları göz önüne alındığında, hangi UGR denklemini kullanmak daha doğru sonuçlar verecektir?

Dile getirilen sonuncu soruya yoğunlaşmak gerekirse, retrofit boyutları “küçük” kaynak sınıflandırmasına girdiği için uygun olan yaklaşım görünen alanı $0,005 \text{ m}^2$ kabul ederek, küçük kaynaklar için hazırlanan denklemi kullanmak gerekmektedir. Bununla beraber, küçük kaynaklar denklemi 200 W’lık bir akkor telli lamba ile yapılan bir deneye göre hazırlanmıştır. Akkor telli lambada, tungsten tel her bakış açısında görüşe açıktır. Oysaki LED retrofitlerin çoğu farklı açılardan gözlemlendiğinde parıltı dağılımı büyük değişiklik göstermektedir. Şekil 3.48’de bir 200 W’lık akkor telli lambanın karşıdan (altından), 45 dereceden ve yandan bakıldığında parıltı dağılımları verilmektedir.

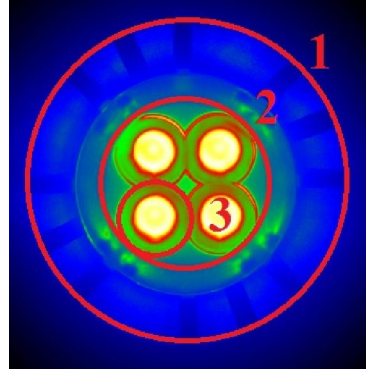


Şekil 3.48 : 200 W’lık akkor telli lambanın karşıdan, 45 dereceden ve yandan görünümde parıltı dağılımları [cd/m^2].

Parıltı fotoğraflarından tüm açılardaki maksimum parıltı değerinin, tungsten telin her açıda görünür olması sebebiyle 10^6 mertebelerinde olduğu görülmektedir. Oysa ki LEDli ışık kaynağına farklı açılardan bakıldığında, çok farklı parıltı değerleriyle karşılaşilmektedir. Bu durumda Paul ve diğ. tarafından 200 W’lık bir akkor telli lamba kullanılarak yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ile LEDli retrofitlerin kamaşma hesabını yapmak kuvvetli ihtimalle doğru olmayan sonuçlar verecektir.

Konuyu daha iyi anlayabilmek için, üzerinde çalışılan retrofit ve CIE 147:2002’de küçük ışık kaynakları için verilen örnek üzerinden bir hesaplama yapılmıştır. Rapordaki sayısal örnekte 15 W’lık çıplak bir akkor telli lamba, gözlemciden 2 m yükseğe ve 4 m uzağa yerleştirilmiştir. Örnekte arkaplan parıltısı 30 cd/m^2 , gözlemci yönündeki ışık şiddeti 160 cd , filaman parıltısı $4 \times 10^6 \text{ cd/m}^2$, ve görünen alan $4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ’dir. Bu örnekte, orjinal UGR denkleminin sonucu 39 değerini verirken, küçük kaynaklar için denklem, 22 sonucunu vermektedir. Bu tür bir örnekte sonuçlar arasında çok ciddi bir fark görülmektedir. UGR denklemi ve LEDlerle ilgili ortaya atılan soruların önemini vurgulamak amacıyla, aynı sayısal örnek, bu sefer incelemeye alınan LED retrofit için tekrarlanmıştır. Orjinal UGR denklemi ile

hesaplama için, retrofit üzerinde 3 farklı alan seçilmiş, bunlar sırasıyla tüm retrofit, optiklerle LEDleri kapsayan “çevreleyen alan” ve tek bir LED’in optikle birlikte kalbi için “ışık yayan alan” olarak belirlenmiştir. Hesaplama kullanılan alanlar Şekil 3.49’da kırmızı renk ile işaretlenmiştir. Burada 1 numaralı alan tüm retrofitin görünen yüzey alanı, 2 numaralı alan LEDleri çevreleyen yüzey alanı ve 3 numaralı alan ise 1 LED için ışık yayan alandır.



Şekil 3.49 : Hesaplama kullanılan alanlar.

Örnek hesaptaki pozisyon 26,5 derecedeki ışık şiddeti değeri olan 110 cd’ya denk düşmektedir. Yapılan hesaplamaların sonuçları Çizelge 3.19’da verilmektedir.

Çizelge 3.19 : Farklı görünen alanlar için UGR ve UGR_{küçük} değerleri.

Seçilen Alan	Tüm Retrofit	Çevreleyen Alan	Işık Yayan Alan
Çap [mm]	60	27.9	4 x 12.5
Alan [m ²]	28,2 x 10 ⁻⁴	6,11 x 10 ⁻⁴	4,91 x 10 ⁻⁴
I ₀ [cd]	833	833	833
L ₀ hesaplanan [cd/m ²]	0,30 x 10 ⁶	1,36 x 10 ⁶	1,70 x 10 ⁶
L ₀ ölçülen [cd/m ²]	0,29 x 10 ⁶	1,13 x 10 ⁶	1,46 x 10 ⁶
I _{26°} [cd]	110	110	110
L _{26°} [cd/m ²]	0,04 x 10 ⁶	0,18 x 10 ⁶	0,23 x 10 ⁶
UGR	17	23	25
UGR _{küçük}	17	17	21

Çizelgedeki UGR değerleri görünen alanın kosinüs yasasıyla değiştiği varsayımıyla hesaplanmıştır. Çizelgeden görülebildiği üzere UGR değerleri görünen alan büyüklüğü değiştikçe büyük farklar göstermektedir. Buna ek olarak orjinal UGR denklemi ile UGR küçük denklemi arasında da ciddi sayısal farklar gözlemlenmektedir. LEDli ışık kaynakları için hangi denklemin veya hangi alanın kullanılacağı yönünde herhangi bir deneysel çalışma veya üretilmiş bir denklem bulunmamaktadır. Bu bilgilerin ışığında, mevcut sistemler kullanılarak, doktora

tezinde üretilen prototip gibi LED dağılımının açıkça gözlemlenebildiği sistemler için bir kamaşma hesabı yapmak hatalı sonuçlara yol açabilir. Bununla beraber, tez çalışmasında tasarlanan kaynağın tüm uzaya ışık yayacak şekilde tasarlanmış olması nedeniyle, farklı bakış açılarında farklı yüzeylere konumlanmış LEDlerin görünür olması, parıltı dağılımının retrofitlerden ziyade 200 W'lık akkor telli lambaya yakın olacağını düşündürmektedir. Sonuç olarak doktora tez çalışmasında Dialux simülasyonları ile Şemsi Ahmet Paşa Camii'ndeki mevcut aydınlatma sistemi ve tasarlanan sistem için hesaplanan birleşik kamaşma endeksi hesaplarının doğruluğu LEDli kaynaklar için hazırlanmış bir standart olmaması ve aynı zamanda literatürde bu yönde herhangi bir örnek olmaması nedeniyle belirsizdir. Bu noktada, LEDli ışık kaynakları için mevcut standartların güncellenmesi ve yeni standartların oluşturulmasının önemini yeniden vurgulamak gerekmektedir. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun, LEDli ışık kaynaklarının yarattığı kamaşma üzerine yeni bir komite kurmak üzere çalışmalarını başlatmış olması bu doğrultuda ümit vericidir.

4. TARİHİ CAMİ AYDINLATMASININ FOTOVOLTAİK PANELLERLE BESLENMESİ

Tarihi Camilerin Modern Teknolojilerle Enerji Etkin Aydınlatması konu başlıklı doktora tez çalışmasında tarihi camilerin aydınlatmasındaki mevcut problemler göz önünde bulundurularak, iç aydınlatma için önerilen yöntem, aydınlatma alanındaki en modern teknoloji olan LEDlerin kullanımı olmuştur. Çalışmanın bir diğer önemli hedefi, enerji konusunda da modern yenilenebilir enerji teknolojilerinden fotovoltaik panellerin kullanımıyla, kendi enerjisini kendi üreten, “yeşil” kavramlı yeni bir tarihi cami algısı oluşturmaktır.

Kendi kendini yenileyen ve zaman içinde azalmayan kaynaklardan elde edilen enerjiye yenilenebilir enerji adı verilir [62]. Yenilenebilir enerji kullanımını arttırarak, temini ve tüketimi ekolojik ve ekonomik anlamda ciddi sorunlar teşkil eden fosil kaynakların kullanımını azaltmak tüm dünya ülkeleri için önemli bir hedef haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin en çok gelecek vaad edenlerinden biri fotovoltaik sistemlerden faydalanarak güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmektir. Mousazadeh ve diğ. tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada yeryüzünün % 0,16 sını % 10 verimli güneş dönüşüm sistemleriyle kaplamanın 20 TWlık enerji üretimi sağlayacağı ve bu üretimin, tüm dünyanın fosil enerji tüketiminin yaklaşık iki katına denk düştüğü belirtilmiştir [63].

Dünya ülkelerinin sürdürülebilir gelişimi için sera gazları ve toksik gazların salınımına sebep verilmemesi, elektrik şebekelerinde dağıtım hatlarının azaltılması, bölgesel ve ulusal enerji bağımsızlığının artması, enerji kaynaklarının ve enerji güvenliğinin çeşitlendirilmesi, gelişmekte olan ülkelerde kırsal alanlara elektrik ulaştırılması ve elektrik talebindeki tepe yükün azaltılması gibi konularda güneşten elde edilen elektrik enerjisi büyük avantajlar sağlamaktadır [64, 65].

Fotovoltaik sistemlerin en büyük dezavantajları ise yüksek satın alma ve kurulum maliyetleridir. Bir fotovoltaik sistemin geri ödeme süresi PV modülünün yalıtımı ve verimine bağlı olarak 10 ila 15 yıl arasında değişmektedir [65]. Fakat yenilenebilir kaynakların önem kazanmasıyla pek çok ülkede kanun değişikliklerine gidilmiş ve

PV sistemlerin daha geniş kullanımı için devlet teşvikleri verilmeye başlanmıştır. Türkiye Cumhuriyeti de ilki 10 Mayıs 2005 tarihinde 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun olmak üzere çeşitli yönetmelikler ve yasal düzenlemelerle PV sistemlerin kullanımına ve verilecek teşviklere dair düzenlemeler getirmiştir.

Türkiye'nin 2005 Ekim ayından beri tam üyelik için müzakere halinde olduğu Avrupa Birliği (AB) iddialı enerji ve iklim değişikliği politikalarıyla pek çok ülke için bir rol model halini almıştır. AB 2008 senesinde Enerji ve İklim Değişikliği Paketi'ni kabul etmiştir. Bu paketle, AB'nin 2020 enerji hedefleri, sera gazı salınımlarını 1990 yılı seviyelerinin % 20 altına indirmek, enerji üretimi içinde yenilenebilir kaynakların payını % 20'ye çıkarmak ve enerji etkinliğini % 20 oranında arttırmak olarak belirlenmiştir [66]. Aralık 2010'da Avrupa Komisyonu'nun yürürlüğe koyduğu "2050 Enerji Yol Haritası" ise dünyadaki tüm gelişmiş ülkelerin desteğiyle sera gazı salınımını 1990 seviyelerinin % 80-95 altına indirmeyi hedeflemektedir [67].

Türkiye güneş ışınımı yeğlinliği açısından üstün coğrafi koşullara sahip Avrupa ülkelerinden biridir. Türkiye'deki güneş ışığı potansiyeli göz önüne alınarak, elektrik üretimi için PV sistemlerin kullanılması çok uygun olmakla beraber günümüze kadar yeterince etkin olarak uygulamaya geçirilmemiş bir yaklaşımdır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2010-2014 strateji planında, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji arzı içindeki payını arttırmak önemli bir hedef olarak belirtilmiştir. Bu konudaki ana hedef yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi içindeki payının 2023 yılına kadar minimum % 30 seviyesine çıkmasıdır [65]. Bununla beraber, stratejik plan içinde güneş enerjisine dair herhangi bir bilgi verilmemiş, güneş enerjisi santralleri adına herhangi bir spesifik hedef konulmamıştır.

6446 sayılı Elektrik Piyasaları Kanunu'na göre toplumun ibadetine açılmış ve ücretsiz girilen ibadethanelere ilişkin aydınlatma giderleri Diyanet İşleri Başkanlığı bütçesine konulacak ödenekten karşılanmaktadır [68]. Türkiye Büyük Millet Meclisi'nde dönemin Başbakan Yardımcısı Bekir Bozdağ'ın Sözlü Soru Önergeleri'ne cevap vermek üzere 8 Mayıs 2012 tarihinde yaptığı konuşmada, yıllık bütçede ibadethanelerin aydınlatma gideri için ayrılan bütçe ile, tüm masrafın ancak cüzi bir kısmının karşılandığı dile getirilmiştir. 27 Aralık 2013 tarihli, 28864 sayılı

Resmi Gazete’de yayınlanan 2014 Yılı Merkezi Yönetim Bütçe Kanunu’nda ise Diyanet İşleri’ne 2014 senesinde ibadethanelerin aydınlatma masrafları için ayrılan ödenek 45 milyon TL olarak belirlenmiştir [69, 70]. Söz konusu bütçenin cami aydınlatmalarının ancak ufak bir kısmını karşılayacak olması, Türkiye’de cami aydınlatması için tüketilen enerji ve doğru bir tasarımla elde edilebilecek enerji tasarrufu konusunda önemli bir bilgi vermektedir.

Bu çalışmada önerilen yaklaşım PV panelleri cami mimarisine zarar vermeyecek şekilde cami avlularına veya cami çevresindeki boş alanlara yerleştirilerek caminin iç aydınlatma için ihtiyaç duyduğu elektriği karşılamaktır. Eğer paneller tarafından üretilen enerji yeterince yüksekse, fazla enerji caminin iç aydınlatma dışındaki tüketimleri için kullanılabilir veya enerji şebekeye satılarak elde edilen kazanımla caminin çeşitli masrafları karşılanabilir. Bu sayede ülke ekonomisine ciddi şekilde katkıda bulunulabilir. PV paneller caminin mimarisi nedeniyle üzerlerine düşebilecek gölgelerin engellenmesi için avlu duvarlarına veya avlu içine/dışına dikilecek yüksek direkler üzerine yerleştirilebilir ve bu sayede caminin mimari bütünlüğünü bozmaktan kaçınılabilir. Eğer sistem uygun bir şekilde seçilebilirse, yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlanacak, PV panellerin kullanımı teşvik edilecek, çevreye zarar vermeden elektrik üretilecek, karbon salınımı azaltılacak ve ekonomiye katkıda bulunulacaktır.

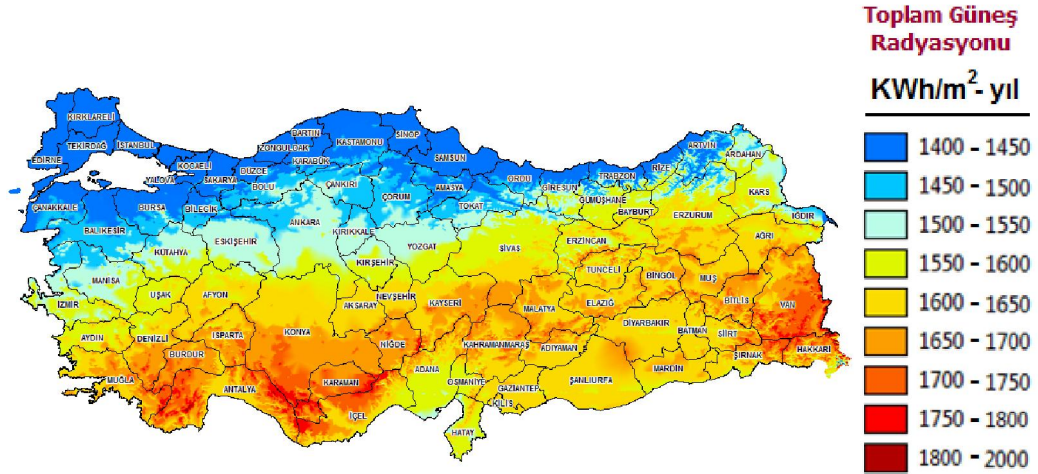
4.1 Türkiye’de Fotovoltaik Enerji

Türkiye 36°- 42° Kuzey enlemleri arasında güneşli bir kemerde yer almaktadır ve coğrafi olarak güneş enerjisi potansiyeli açısından uygun konumlanmıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMI) tarafından 1966-1982 yılları arasında yapılan ölçümlerden faydalanarak Türkiye’nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresini 2640 saat, ortalama toplam ışıyım şiddetini ise 1311 kWh/m²-yıl olarak hesaplamıştır. Çizelge 4.1’de Türkiye’nin aylık toplam güneş enerjisi ve güneşlenme süresi değerleri verilmektedir.

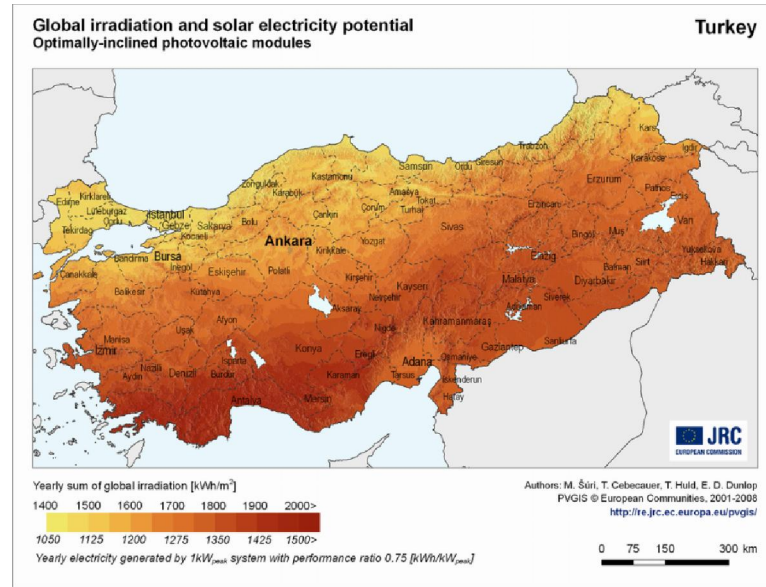
Çizelge 4.1 : Türkiye aylık toplam güneş enerjisi ve güneşlenme süreleri [71].

Aylar	Aylık Toplam Güneş Enerjisi [kWh/m ² -ay]	Güneşlenme Süresi [Saat/ay]
Ocak	51,75	103,0
Şubat	63,27	115,0
Mart	96,65	165,0
Nisan	122,23	197,0
Mayıs	153,86	273,0
Haziran	168,75	325,0
Temmuz	175,38	365,0
Ağustos	158,40	343,0
Eylül	123,28	280,0
Ekim	89,90	214,0
Kasım	60,82	157,0
Aralık	46,87	103,0
Toplam	1311	2640
Ortalama	3,6 kWh/m ² -gün	7,2 saat/gün

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı olan Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM), DMI'nin verilerine ek olarak, Türkiye için Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası'nı (GEPA) hazırlamıştır. GEPA'nın temelinde Amerika'da kurulmuş olan Environmental Systems Research Institute (ESRI)'nin hazırlamış olduğu güneş ışıınım modeli kullanılmıştır. Şekil 4.1'de GEPA ile hazırlanmış olan Türkiye toplam güneş ışıınımı haritası verilmektedir. Burada Türkiye'nin farklı bölgelerinin yıllık olarak kWh/m² cinsinden aldıkları toplam güneş ışıınımını gözlemlemek mümkündür. Şekil 4.2'de ise Avrupa Komisyonu Joint Research Center'ın (JRC) Türkiye için hazırladığı optimum eğimli PV paneller için elektrik üretimi potansiyeli haritası verilmektedir [72]. Burada skalanın üst kısmı Şekil 4.1'e benzer olarak yıllık toplam global ışıınım bilgisini kWh/m² cinsinden gösterirken, skalanın alt kısmı optimum eğimli güneş panelleriyle performans oranı 0,75 kWh/kWp olan, 1 kWp'lik bir sistemin üretebileceği yıllık elektrik enerjisi gösterilmektedir. Burada verilen Wp, bir modülün tepe güç değerini sembolize etmektedir. Tepe güç bir modülün standart test koşulları (STK) altında, 1000 W/m² ışıınım, 1,5 değerinde atmosfer güneş ışıığını geçirme oranı ve 25 °C'ta ölçülen en yüksek gücünü göstermektedir. Performans oranı ise sistemin gerçek kazancının, teoride elde edilebilecek en yüksek sistem kazancına oranıdır.



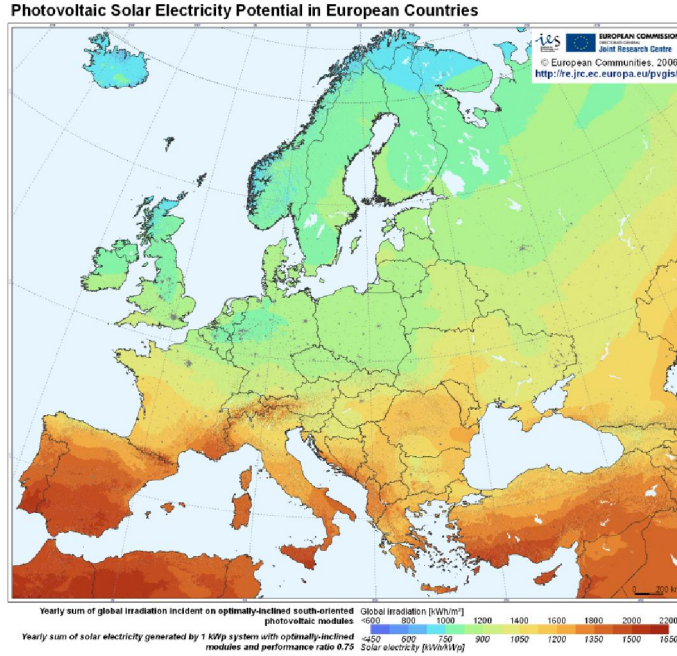
Şekil 4.1 : Türkiye toplam güneş ışınlımı [73].



Şekil 4.2 : Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli [72].

Son olarak Şekil 4.3'te Avrupa ülkelerinin fotovoltaik elektrik üretimi potansiyeli görülmektedir. Burada skalanın üst kısmından güneşe yönlendirilmiş, optimal açılı fotovoltaik paneller üzerindeki yıllık toplam güneş ışınlımı kWh/m^2 cinsinden okunurken, skalanın alt kısmından optimum eğimli güneş panelleriyle performans oranı değeri 0,75 olan, 1 kWp'lik bir sistemin üretebileceği yıllık elektrik enerjisi gösterilmektedir. Haritadan görüldüğü üzere, Türkiye Avrupa ülkeleri içinde güneş ışınlımı yeğlinliği açısından üstün coğrafi koşullara sahip ülkelerden biridir. Türkiye'deki güneş ışığı potansiyeli göz önüne alınarak, elektriğin üretimi için PV sistemlerin kullanılması çok uygun, fakat ne yazık ki günümüze kadar yeterince etkin olarak uygulamaya geçirilmemiş bir yaklaşımdır. Haritadaki ülkelerden Almanya'nın yıllık toplam güneş ışınlımı $1000\text{-}1200 \text{ kWh/m}^2$ ler mertebesinde olduğu halde, ülke

güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi konusunda bir dünya lideri haline gelmiştir. Türkiye'nin yıllık toplam güneş ışınımı ise 1400-2200 kWh/m² mertebelerinde olup, bölgesel olarak belli yerlerde Almanya'nın iki katına kadar çıkmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin mevcut potansiyelini kullanmasının ne kadar önemli olduğunu açıkça vurgulamaktadır.



Şekil 4.3 : Avrupa ülkelerinin güneş enerjisi potansiyeli [72].

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli 1,3 milyar ton yakıta eş değerdir. Fakat Türkiye'deki fotovoltaik enerji uygulamaları çoğunlukla devlet kuruluşlarının uzak bölgelerdeki elektrik talebini karşılamak için kurduğu sistemlerle sınırlı kalmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin ana uygulama alanları telekomünikasyon istasyonları, sinyalizasyon, orman takip istasyonları, yangın gözlem istasyonları, deniz fenerleri ve otoyol acil durum sistemleridir [71].

8 Ocak 2011 tarihli 27809 sayılı Resmi Gazete'de çıkan 6094 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun'da güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinde 10 yıl boyunca kWh başına 0,133 Amerikan doları teşvik verileceği belirtilmiştir. Buna ek olarak fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinde yerel firmaların ürünleri kullanılması durumunda Çizelge 4.2'deki artı teşviklerin 5 yıl boyunca üretim teşviğine ekleneceği belirtilmiştir [74]. Çizelgeden görülebileceği gibi, tüm ürünlerin yerel firmalardan seçilmesi durumunda, 5 yıllık üretim teşviği kWh başına toplam 0,2 Amerikan dolarına yükselmektedir.

Çizelge 4.2 : Fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinde yerel ürünlerin kullanılması durumundaki ek teşvikler.

PV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	0,008 USD/kWh
PV modülleri	0,013 USD/kWh
PV modülünü oluşturan hücreler	0,035 USD/kWh
Evirici	0,006 USD/kWh
PV modülü üzerine güneş ışınını odaklayan malzeme	0,005 USD/kWh

Türkiye’de şebeke bağlantılı PV sistemlerin oranı gün geçtikte artmaktadır. 1 MW’ın altında kalan projelerin kanunen üretim lisansı almasına gerek olmaması, küçük ölçekli PV pazarında olumlu gelişmeler sağlamaktadır. Buna ek olarak 2013 Haziran ayında gerçekleşen 1 MW’tan büyük PV projelerinin ilk lisanslama başvuru turunda Enerji Piyasaları Denetleme Kurulu’na (EPDK) 496 başvuru yapılarak, önerilen 600 MWlık kapasitenin 15 katı büyüklüğünde toplam 8,9 GWlık bir kapasiteye ulaşılmıştır. Bu bilgiler Türkiye’de hızla büyüyen bir PV pazarının habercisidir [75].

4.2 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik enerji sistemlerinin ana elemanları fotovoltaik hücrelerin birleştirilmesiyle elde edilen fotovoltaik modüller, modül veya dizilerin yerleştirilmesi için kullanılan montaj sistemleri, şebekeye bağlı sistemler için gerekli olduğu kadar çoğu şebekeye bağlı olmayan sistemde de kullanılan evirici ve şebekeye bağlı olmayan sistemlerde kullanılan akü ve iki sistemde de kullanılabilen yük kontrolöründen oluşmaktadır [75].

PV sistemden elde edilen enerji, sisteme bağlı akü birimlerinde depolanabilir, yüke direk olarak aktarılabilir veya uygun güç elektroniği devrelerinin kullanımıyla güç şebekesine geri verilebilir. Fotovoltaik bir sistemin tasarım sürecinde, enerji üretiminin gerçekleştirileceği yapının aldığı güneş ışınımı, mevsimsel sıcaklıklar, hava koşulları, yapıyı çevreleyen binalar, yapının mimari özellikleri, söz konusu mimari elemanların oluşturabileceği gölgeler, fotovoltaik panelin konumunu ve açısını etkileyen yapının enlemi, fotovoltaik panellerin boyutlarını ve sayılarını etkileyen yapının enerji talebi ve sistemin çalışmaya ve bakıma yönelik ihtiyaçları çok büyük önem taşımaktadır.

4.2.1 Fotovoltaik hücreler

Fotovoltaik hücreler, üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren yarı-iletken diyotlardır [76]. Fotovoltaik hücreler fotovoltaik enerji üreten bir sistemin en küçük parçalarıdır. PV sistemlerinin temelini oluşturan güneş hücreleri belirli optik ve elektriksel özelliklere sahip yarı iletken malzemelerden üretilmişlerdir. Bu malzemeler güneş ışığını emdikleri zaman, alınan enerji yarı iletken malzemede yer alan serbest elektronları harekete geçirerek, güneş hücresi içindeki elektriksel devrede akım akmasını sağlarlar. Güneş hücrelerinin performansı güneş ışığını elektrik enerjisine çevirmedeki verimleriyle ölçülür [77].

Fotovoltaik güneş hücreleri isimlerini monokristalin silisyum, polikristalin silisyum, ince film, amorf silisyum, kadmiyum tellür ince film, bakır indiyum diselenid gibi üretimde kullanılan malzemelerden alırlar. Bunlardan monokristalin silisyum malzeme ile üretilen güneş hücrelerinde güneş-elektrik dönüşümü yüksek verimlilikte gerçekleşmektedir. Silisyumun elektriksel, optik ve yapısal özelliklerinin uzun süre değişmemesi ve silisyum üretim teknolojisinde elde edilen büyük başarılar bu malzemenin en popüler malzeme olarak öne çıkmasını sağlamıştır [78]. Çizelge 4.3'te güneş hücresi teknolojilerinin bir karşılaştırılması verilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme – IEA PVPS) üyesi ülkelerin PV hücre üretiminin % 80'ini kristalin silikon teknolojisi oluşturmaktadır [75].

Çizelge 4.3 : Güneş hücresi teknolojilerinin karşılaştırılması [78].

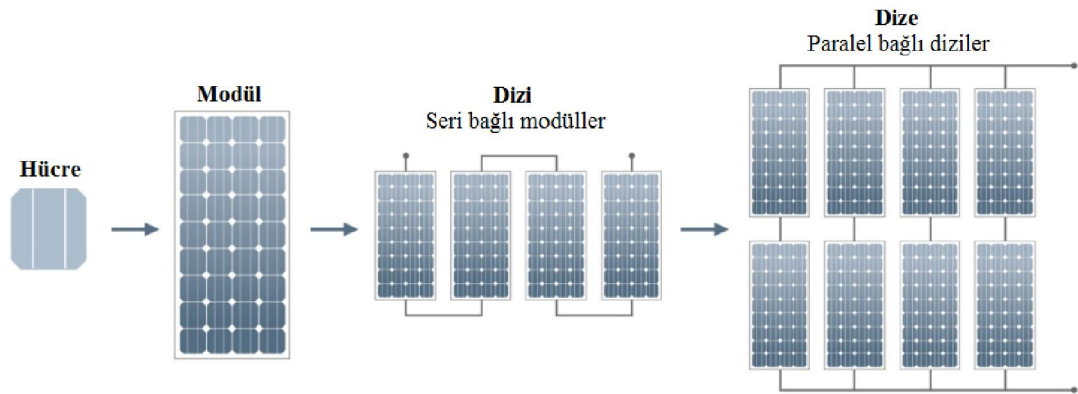
Hücre malzemesi	Modül verimi [%]	1 kWp için gerekli alan [m ²]
Monokristalin silikon	14-20	5-7
Polikristalin silikon	13-15	6.5-8.5
Amorf silikon ince film	6-9	11-16.5
Kadmiyum Tellurid (CdTe) ince film	9-11	9-11
Bakır İndiyum (Galyum) Diselenid (CIS veya CIGS) ince film	10-12	8.5-10

4.2.2 Fotovoltaik modül, dizi ve dizeler

PV hücrelerinin seri olarak bağlanmasıyla PV modülleri oluşturulur. Hücreler seri bağlandıkları için modül gerilimi tüm hücrelerin gerilimlerinin toplamına, modül akımı ise tek bir hücrenin akımına eşittir [78]. PV modüllerinin enerji performansı sınıflandırmaları tepe güç, normal çalışma hücre sıcaklığı ve tüm günü gösteren

AMPM (Ante Meridiem Post Meridiem) standardı ile yapılır. Tepe güç daha önce belirtildiği üzere (W_p) bir modülün standart test koşulları altında, 1000 W/m^2 ışınlım, 1,5 değerinde atmosfer güneş ışığını geçirme oranı ve $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ta ölçülen en yüksek gücünü göstermektedir. Normal çalışma durumu hücre sıcaklığı ise bir modülün belirli bir dış sıcaklık ile aynı sıcaklık seviyesine eriştiği zamanki nominal çalışma durumu hücre sıcaklığını gösterir. Bu durumda tepe gücünden daha düşük seviyede bir enerji üretimi gerçekleşir, fakat bu değer gerçeğe daha yakındır. Tüm gün (AMPM) standardı ise modülün daha gerçekçi çalışma koşulları altındaki performansını ölçer. Tepe güneşlenme saatlerinden ziyade tüm günü dikkate alan bu değer, güneş ışığı seviyeleri, dış sıcaklık ve atmosfer güneş ışığını geçirme oranı üzerinden bir ortalama gün tanımı yapar ve bu tanımı kullanır [77].

Fotovoltaik diziler, PV modüllerinin seri bağlanmasıyla elde edilir. Modüller ve hücreler arasındaki ilişki gibi, dizilerde de gerilim modüllerin toplam çıkış gerilimine eşitken, akım herhangi bir modülün en düşük akım değerine eşittir [78]. Fotovoltaik dize ise, hedeflenen çıkış gücünü elde edebilmek için birden fazla sayıdaki modülün seri halde bağlanıp bir dizi oluşturulduktan sonra, bu dizilerin paralel şekilde biraraya getirilmesiyle ortaya çıkar [75]. Şekil 4.4'te fotovoltaik hücre, modül, dizi ve dize gösterilmektedirler.



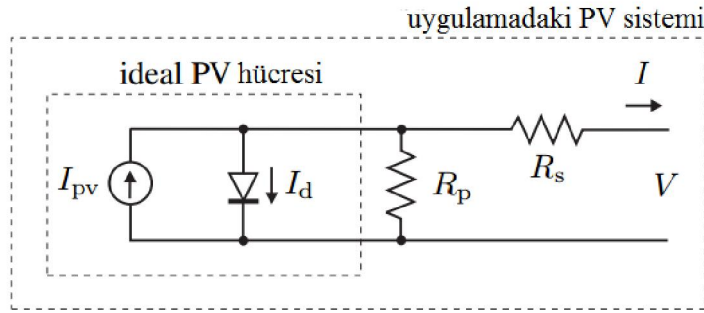
Şekil 4.4 : Fotovoltaik hücre, modül, dizi ve dize [79].

Fotovoltaik dizelerde en çok rastlanan kullanım düz tabaka PV panel veya modülleridir. Bu paneller sabit yerleştirilebildikleri gibi güneşin hareketini takip edecek şekilde de yerleştirilebilirler. Paneller, üzerlerine gelen direkt güneş ışığı ve yayıncı gün ışığından faydalanırlar. Sabit konumlandırılmış PV panellerinin hareket eden parçaları olmaması, ekstra ekipman kullanımı gereğini ortadan kaldırdığı gibi, panellerin hafif olmasını da sağlayarak, kullanımlarını kolaylaştırır. Fakat sabit açılı

panellerin dezavantajı, güneşin konumu değişikçe, eğim açısının optimal açıdan uzaklaşmasıdır. Güneşi takip eden sistemler ise, güneşin konumuna göre pozisyon değiştirerek ışıınımdan maksimum seviyede yararlanır ve bu sayede daha yüksek seviyelerde elektrik enerjisi üretirler. Fakat güneşi takip eden panellerin ilk kurulum ve işletme masraflarının yüksekliği, hareketli parçalar içermesi ve mekanik bir sistem olması sebepleriyle tercih çoğunlukla sabit konumlu panellerden yana yapılmaktadır.

4.2.3 PV sistem elektriksel özellikleri

PV sistemlerin elektriksel özellikleri I-V eğrileri ile tanımlanır. Şekil 4.5'te ideal fotovoltaiik hücrenin eşdeğer devresi verilmektedir.



Şekil 4.5 : İdealde ve uygulamada PV hücresi için eşdeğer devre [80].

İdeal fotovoltaiik hücrenin akım gerilim karakteristiğini tanımlayan temel yarı-iletken bağıntısı, denklem (4.1)'de verilmektedir.

$$I = I_{pv} - \underbrace{I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right]}_{I_d} \quad (4.1)$$

Burada

I_{pv} : Hücre üzerine düşen ışııkla üretilen akım değeri [A],

I_d : Schockley diyot denklemi,

I_0 : Diyotun ters doyma akımı [A],

q : Elektron yükü ($1.60217647 \times 10^{-19}$ C),

V : Diyot gerilimi [V],

k : Boltzmann sabiti ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K),

T : p-n jonksiyonu sıcaklığı [K]

n : diyot idealite sabitini vermektedir.

İdeal fotovoltaiik hücre denklemi, pratikteki fotovoltaiik dizelerin I-V karakteristiklerini tam olarak sembolize etmez. Pratikteki dizeler birden fazla hücrenin biraraya getirilmesi ile oluşturulmuşlardır ve dize uçlarındaki akım ve gerilim değerlerinin modellenenbilmesi için denkleme ek bileşenler getirmek gerekmektedir. Pratikteki PV dizesi karakteristik denklemi tek diyot modeliyle (4.2)'de verilmektedir.

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t n} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (4.2)$$

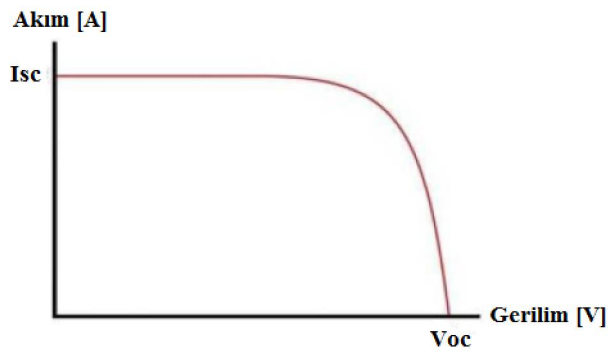
Burada,

V_t : n sayıda seri bağlı hücreye sahip dizenin ısı gerilimi,

R_s : Dizenin eşdeğer seri direnci,

R_p : Dizenin eşdeğer paralel direncini göstermektedir.

Bu denklem ile tipik I-V eğrisini elde etmek mümkündür [80]. I-V eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan standart test koşulları 25° C hücre sıcaklığı, 1000 W/m² seviyesinde güneş ışınımı ve 1,5 büyüklüğünde atmosfer güneş ışığını geçirme oranıdır [81]. Bu koşullarda sisteme bağlı yük değiştirilerek üretilen akım değerleri ölçülür. I-V eğrilerinde düşey eksen akımı, yatay eksen gerilimi gösterir. Şekil 4.6'da tipik bir I-V eğrisi verilmektedir [78]. I-V eğrisinin y eksenini kestiği nokta kısa devre akımı I_{SC} 'yi, x eksenini kestiği nokta ise açık devre gerilimi V_{OC} 'yi vermektedir.

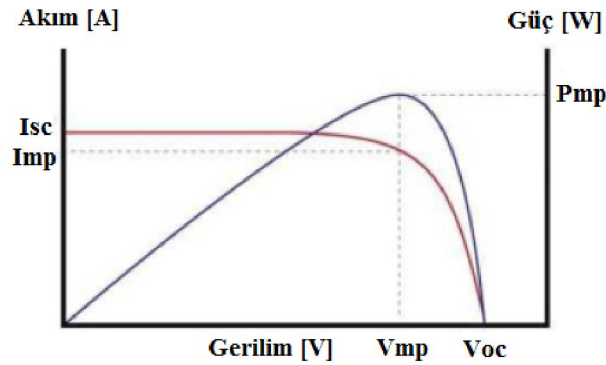


Şekil 4.6 : PV hücre için tipik I-V eğrisi.

Kısa devre akımı I_{SC} , hücrenin artı ve eksi terminalleri kısa devre edildiğinde ve terminaller arasındaki gerilim sıfır olduğunda, yani yük direncinin sıfıra eşit olduğu durumda üretilen akım değeridir. Açık devre gerilimi V_{OC} ise açık devre koşullarında

akım sıfır ve buna denk düşen direnç sonsuz kabul edildiğinde hücrenin artı ve eksi terminalleri arasındaki gerilim değeridir [82].

Hücre çeşitli akım ve gerilim değerleri altında çalıştırılabilir. Yük direncini sıfırdan sonsuza değiştirerek hücrenin en yüksek gücü ürettiği, yani en verimli olduğu noktayı bulmak mümkündür. I-V eğrisinde maksimum güç noktası olarak adlandırılan ve P_{mp} ile gösterilen nokta, akım ve gerilimin çarpımının en yüksek olduğu noktadır. Maksimum güç, güç eğrisi üzerinde sadece bir noktada elde edilmektedir ve bu nokta da eğrinin dirsek bölgesine denk düşmektedir. Bu nokta, güneş panelinin güneş ışığını elektrik enerjisine çevirirken gösterdiği en yüksek verimi vermektedir. Şekil 4.7’de I-V eğrisi üzerine eklenmiş bir P-V, yani güç-gerilim eğrisi gösterilmektedir. Güç eğrisinin en yüksek noktasında P_{mp} değeri görülmektedir. P_{mp} noktasının x eksenindeki izdüşümü V_{mp} değerini verir. V_{mp} değeri aynı zamanda I-V eğrisinde de bulunduğu için, bu değere karşılık gelen I_{mp} akım değerini de tespit etmek mümkündür [78, 83].



Şekil 4.7 : PV hücre için I-V eğrisi ve P-V eğrisi.

4.2.4 PV sistem performansı

PV hücrelerinin üreteceği gücü tahmin edebilmek için PV sistemlerinin performansını ölçmek gereklidir. Bir PV dizesinin enerji performansı incelenirken, güneş hücrelerinin elektriksel karakteristiği, dize tasarım ve montajına bağlı bozulma katsayıları, çevresel faktörlerin güneş hücresi çalışma sıcaklığına çevrilmesi ve dize güç çıkışı kapasitesinin hesabı dikkate alınmaktadır. İhtiyaç duyulan elektrik enerjisi, çıkış gücü (tepe güç veya bir gün içinde üretilen ortalama güç olarak tanımlanabilir), belli bir süre içinde elde edilen enerji miktarı ve çevrim verimi ile belirlenir. Enerji çıkışını etkileyen parametreler enerji çıktısının birim PV dizesi alanına, birim dize

ağırlığına ve birim dize fiyatına oranıdır ve sırasıyla $[Wh/m^2]$, $[Wh/kg]$ ve $[Wh/TL]$ olarak birimlendirilir. Çevrim verimi ise dize enerji çıkışının, güneş enerjisi girişine oranıdır [77].

PV sistemi enerji büyüklüklerini tanımlayan parametreler, IEA Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı tarafından belirlenmiş ve 61724 sayılı IEC standardında tanımlanmıştır [84, 85]. Bu standartla tanımlanan performans parametrelerinden üç tanesi, genel sistem performansını enerji üretimi, güneş enerjisi kaynağı ve sistem kayıplarının toplam etkisi açısından belirlemek için kullanılabilirler. Bu parametreler son PV sistem kazancı, referans kazanç ve performans oranıdır.

Son PV sistem kazancı Y_f , net enerji çıkışının kurulu PV dizisinin plaka DC güç değerine bölünerek elde edilir. Bu değer, PV dizisinin günlük net üretimdeki enerji payını sağlayabilmesi için anma değerinde çalıştırılması gereken süreyi göstermektedir. Birimi saat veya kWh/kW olarak verilir. Y_f üretilen enerjiyi sistem büyüklüğüne göre normalize ettiği için farklı boyutlardaki PV sistemlerinin ürettikleri enerjiyi karşılaştırmak açısından uygun bir parametredir.

Referans kazanç Y_r ise düzlem üzerine gelen toplam ışınımın PV sistemin referans ışınımına bölümüyle elde edilir. Bu büyüklük de referans ışınımına denk düşen saatlik süreyi vermektedir. Eğer referans ışınım $1 kW/m^2$ değerinde ise, Y_r tepe güneş saatlerinin sayısını veya kWh/m^2 cinsinden güneş ışınımını verir. Başka bir deyişle, Y_r , PV sisteminin güneş enerjisi kaynağını tanımlamaktadır. Referans kazanç, PV sistemin konumunun, dizinin yönlendirilmesinin, aydan aya ve yıldan yıla hava değişiminin bir fonksiyonudur.

Son parametre performans oranı ise son sistem kazancının referans sistem kazancına oranıdır. Işınımına göre normalize edildiğinde, sistem kayıplarının anma çıkış değeri üzerindeki etkisini sayısal hale getirir. Bu kayıplar arasında evirici verimine bağlı kayıplar, kablolama, uyumsuzluk, DC AC dönüşümü esnasında gerçekleşen kayıplar, PV modül sıcaklığı, modül yüzeyindeki yansımalar sebebiyle güneş ışınımının tam olarak kullanılamaması, kirlenme ve kar, sistemin bozuk olduğu süreler ve bileşen arızalarından kaynaklanan kayıplar sayılabilir. Performans oranı değerleri aylık veya yıllık olarak verilirler. Haftalık veya günlük gibi daha kısa zaman aralıkları için hesaplanan değerler bileşenlerde gerçekleşen arızaların tanınması için faydalı bulgular sağlarlar. PV modül sıcaklığından kaynaklanan kayıplar sebebiyle

performans oranı değerleri kışın, yazın olduğundan daha yüksektir ve 0,6 ila 0,8 arasında değişirler. Bunlara ek olarak, sistemin yıllık performans oranında düşüşler, performansta kalıcı kayıplar olduğunun göstergesi olabilir [84].

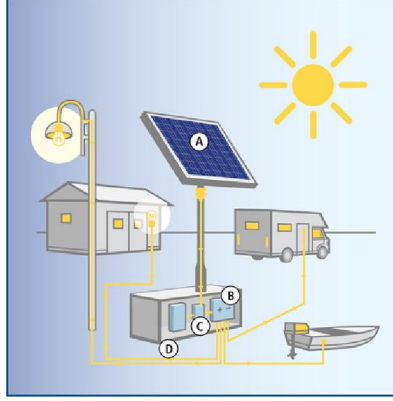
4.3 Fotovoltaik Sistem Çeşitleri

Fotovoltaik sistemler genel olarak şebeke bağlantısız, şebeke bağlantılı ve binaya entegre olmak üzere 3 farklı kategoride yer alırlar.

4.3.1 Şebeke bağlantısız fotovoltaik sistemler

Şebeke bağlantısız sistemler ağırlıklı olarak elektrik ağının ulaştırılmadığı kırsal kesimlerde aydınlatma, telekomünikasyon, sulama için ve şebeke bağlantısının mümkün olmadığı veya zor olduğu yerleşim alanlarında tüm elektriksel ihtiyaçlar için tercih edilmektedir. Şebeke bağlantısız sistemler için, güneş ışığının düşük seviyelerde olduğu durumlarda enerji sağlamak amacıyla bir aküye ihtiyaç vardır. Akülerin pili çalışma rejimi ve koşullarına bağlı olmakla beraber tipik olarak 5-10 yıl arasındadır. Bu da ömür süresi genellikle 25 yıl olarak tanımlanan PV sistemler için zayıf bir nokta teşkil etmelerine sebep olmaktadır.

Aküye ek olarak, bir regülatör veya şarj kontrolörü yardımıyla akü mümkün olan en yüksek şarj durumunda tutulur ve böylece kullanıcının ihtiyacı olan enerji sağlanırken akünün tam deşarjı veya aşırı şarjı engellenmiş olur. Bazı regülatörler PVden elde edilen elektriği maksimum seviyede tutmak için aynı zamanda entegre maksimum güç noktası takip elemanlarına (maximum power point tracker – MPTT) da sahiptirler. Eğer alternatif akıma ihtiyaç duyulursa, bağımsız bir evirici yardımıyla alternatif akımla çalışan ev aletlerine enerji vermek mümkündür [75]. Şekil 4.8’de şebeke bağlantısız bir PV sistem ve sistemin bileşenleri gösterilmektedir.

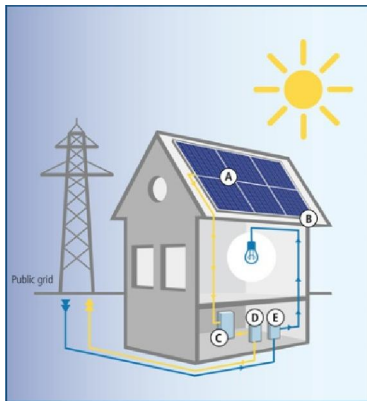


- A: PV modüller
- B: Güneş enerjisini işleyen evirici (opsiyonel)
- C: Regülatör, akünün şarj durumunu düzenlemek için
- D: Akü, üretilen doğru akımı depolamak için

Şekil 4.8 : Şebeke bağlantısız tipik bir fotovoltaik sistem [86].

4.3.2 Şebeke bağlantılı PV sistemler

Şebeke bağlantılı sistemler, PV sistem tarafından üretilen elektrik enerjisini pillerde saklamak yerine şebekeye geri vererek, şebekeyi bir çeşit depolama ortamı olarak kullanmakta ve güce ihtiyaç duyulduğunda şebekeden geri almaktadırlar. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, sistemin bağlı olduğu yükün elektrik ihtiyacının tümünü karşılamak mecburiyetinde kalmamasıdır. Yük PV sistemi tarafından, şebekeden veya ikisinin bileşkesinden beslenebilir. PV sistemi tarafından üretilen fazla enerji de şebekeye verilerek, sistemin sahibinin de kar etmesi sağlanabilir. Şebeke bağlantılı bir PV sisteminin temel bileşenleri PV dizisi, evirici ve sayaç sistemidir. Buna ek olarak gerekli kablolar, birleştirme kutuları, koruma elemanları, anahtarlar, yıldırımdan koruma ve işaretleme elemanları da sistemi tamamlamak için gereklidir [78]. Şekil 4.9’da şebeke bağlantılı bir PV sistemi ve bileşenleri gösterilmektedir.



- A: PV modüller
- B: Montaj sistemi
- C: Güneş enerjisini işleyen evirici
- D: Şebekeye verilen gücü ölçen üretim sayacı
- E: Şebekeden çekilen gücü ölçen tüketim sayacı

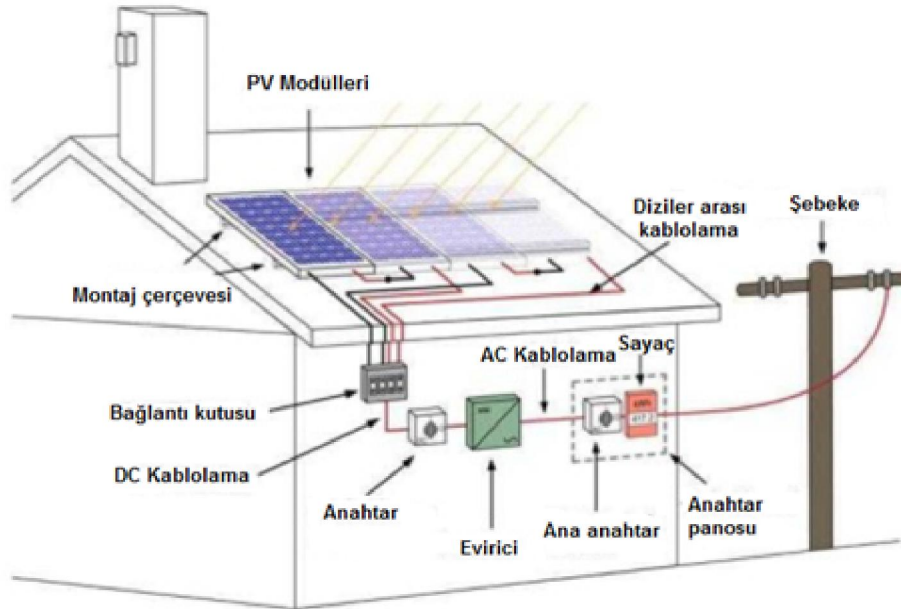
Şekil 4.9 : Şebeke bağlantılı tipik bir fotovoltaik sistem [86].

4.3.3 Binaya entegre fotovoltaik sistemler

Binaya entegre fotovoltaik sistemler (BiPV – Building Integrated Photovoltaics), sürdürülebilir bina tasarımı hedefiyle yola çıkarak, bina konstrüksiyon teknolojileriyle fotovoltaik teknolojisini biraraya getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasından, cam, metal ve plastik gibi konvansiyonel bina malzemelerine entegrasyonu mümkün olan tek teknoloji fotovoltaik enerji teknolojisidir. BiPV sistemler dikey ve eğimli cephelerde perde ve duvar sistemleri olarak, yağmurdan koruyucu cephe kaplamalarında, sabit ve motorlu güneş kırıcı panjur sistemlerinde, entegre çatı kaplama sistemlerinde, eğimli ve düz çatıya monte sistemlerde ve yarı-transparan çatı ışıklığı sistemlerinde kullanılmaktadırlar [87].

4.3.4 Fotovoltaik sistem bileşenleri

Fotovoltaik sistemler, modüllerin yanı sıra pek çok elektriksel ve mekanik bileşenden oluşurlar. Bunların en temelleri evirici, koruma ve anahtarlama sistemleri, sayaç, doğru akım ve alternatif akım için kablolar ve bağlantı kutularıdır. Şekil 4.10’da şebeke bağlantılı bir PV sisteminin bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 4.10 : Şebeke bağlantılı bir PV sisteminin bileşenleri [78]

Şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız sistemler için üretilen enerjinin düzenlenmesi mecburidir. Enerjinin düzenlenmesi için doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi, frekansın şebeke frekansına eşitlenmesi, gerilim dalgalanmalarının sınırlandırılması ve alternatif akım dalga şeklinin kalitesinin yüksek tutulması

gerekmektedir. Eviriciler elektriğin bağlanacağı yükün ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde düzenlenmesini sağlarlar. Eviricilerin tipik verim değerleri % 95-97 arasındadır. PV dizisine direkt olarak bağlı olan eviricilerin içinde aynı zamanda bir MPPT bulunur. MPPT ile güç elektroniği elemanlarından faydalanılarak yük empedansı sürekli ayarlanır ve bu sayede PV dizisinden en yüksek miktarda güç elde edimi sağlanır. Alternatif akım modülü adı verilen ve entegre eviricileri bulunan PV modülleri, şebeke kontrolörlerinin uygun bulunduğu koşullarda şebekeye direk bağlanabilirler ve bu özellikleriyle piyasalarda önemli bir yer teşkil etmektedirler [75, 88].

Fotovoltaik sistemin uygun şekilde çalışabilmesi için PV modüllere ek olarak pek çok farklı elemana ihtiyaç duyulur. PV dizesi ve eviriciyi bağlamak ve korumak amacıyla kullanılan bu elemanlara denge bileşenleri adı verilir. Denge bileşenlerinin seçimi genellikle yerel veya ulusal kanun ve yönetmeliklere göre yapılır. Bu elemanlar içinde kablolar, ayırıcılar, izolatörler, koruma elemanları ve izleme elemanları yer almaktadır [78].

PV dizisini oluşturmak için tüm modüllerin birleştirilmesinde kullanılan kablolar, PV dizisinden bağlantı kutusuna gelen kablolar ve PV bağlantı kutusundan eviriciye giden kabloların tümü doğru akım kablo sistemini oluştururlar. Eviriciyi sayaca ve sayacı şebekeye bağlayan alternatif akım kabloları ve modüller için topraklama kabloları, sistemde yer alan diğer kablolardır. Birden fazla paralel şeridi olan PV dizileri için PV bağlantı kutusu kullanılması gerekir. Bu kutu, PV dizisi ile evirici arasına yerleştirilir. Çoğu modülün arkasında kabloları biraraya getirmek için kendi bağlantı kutuları bulunmaktadır. Denge bileşenlerinin önemli bir parçası koruma elemanlarıdır. Bu elemanlar fotovoltaik sistemlerin yıldırım, güç darbeleri veya hata durumlarına karşı korunmalarını sağlarlar. Otomatik ve manuel güvenlik anahtarları yenilenebilir enerji sisteminin kablolarını ve elemanlarını güç darbelerinden ve hata durumlarından korurken aynı zamanda da bakım ve onarım için sistemin devreden çıkarılmasını sağlarlar. Şebeke bağlantılı sistemlerde güvenlik anahtarları enerji üreten elemanların şebekeden izolasyonunu sağlayarak şebeke iletim ve dağıtım sistemlerinde çalışan insanların can güvenliğini koruma altına alırlar. Topraklama elemanları ile birlikte sistemden toprağa düşük dirençli bir yol sağlanarak yıldırım çarpmasına veya sistem hatalarına karşı PV sistemini korurlar. Darbe koruması elemanları ise sisteme yakın bölgelerde gerçekleşen diğer yıldırım çarpmalarına karşı

koruma sağlarlar. Son olarak sayaç ve ölçü aletleri ile akülü sistemlerde akünün gerilim değerini, tüketilen enerjiyi ve akünün şarj miktarını takip etmek mümkündür. Şebeke bağlantılı sistemlerde ise sayaçlar ile kurulu sistemin ne kadar enerji ürettiği ve şebekeden ne kadar enerji çekildiği takip edilmektedir [88].

4.4 Şemsi Ahmet Paşa Camii İçin Fotovoltaik Sistem Seçimi

Doktora tez çalışmasında, tasarlanan LEDli iç aydınlatmanın elektrik enerjisinin cami dışına yerleştirilecek fotovoltaik panellerle karşılanması hedeflenmiştir. Bunun için cami iç aydınlatmasının elektriksel yükü belirlenerek, uygun fotovoltaik paneller ve eviricinin seçimi gerçekleştirilmiş, seçilen sistem PVsyst paket programının deneme sürümü ile modellenerek simülasyonları gerçekleştirilmiş ve Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin kendi enerjisini üretebilmesi için gerekli öneriler yapılmıştır.

4.4.1 Cami iç aydınlatma enerji talebi

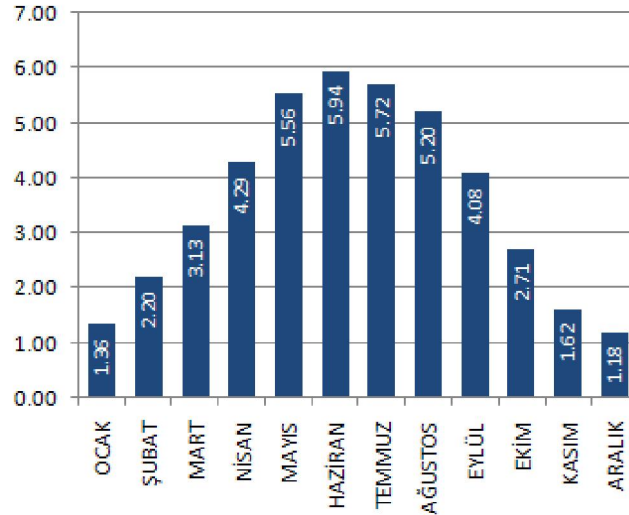
Şemsi Ahmet Paşa Camii için tasarlanan aydınlatma sisteminin her bir elemanı, sürücüsüyle birlikte toplam 10,50 W güç çekmektedir. Cami içinde 40 adet aydınlatma elemanı kullanılmaktadır. Bu durumda Cami iç aydınlatmasının toplam kurulu gücü 420 W'tır. Çizelge 4.4'te aydınlatma sisteminin günde 10 saat çalıştığı varsayımıyla günlük, aylık ve senelik elektrik enerjisi tüketimleri hesaplanmıştır. Cami dışına yerleştirilecek fotovoltaik panellerle üretilen elektrik enerjisinin, cami iç aydınlatmasının tüm enerji tüketimini karşılaması hedeflenmektedir. Söz konusu tüketimi fotovoltaik panellerle karşılayabilmek için Avrupa Komisyonu Joint Research Center tarafından geliştirilmiş olan PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System – Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi) ve İsviçre'de geliştirilmiş PVsyst yazılımının deneme sürümü ile çeşitli hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 4.4 : Şemsi Ahmet Paşa Camii LEDli enerji talebi.

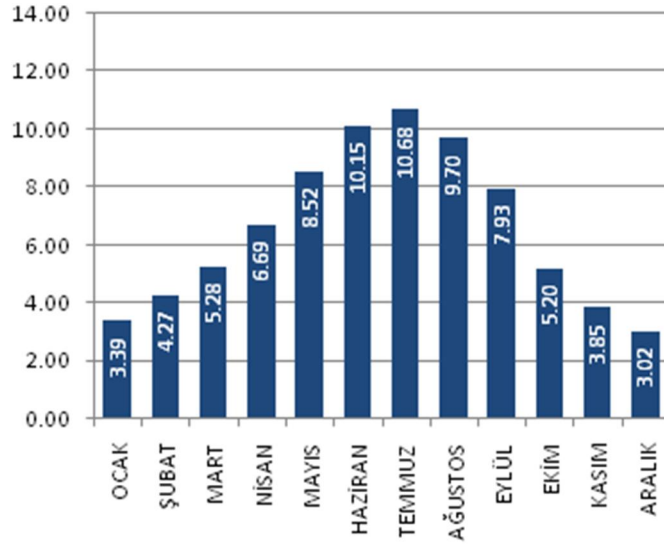
Zaman dilimi	Enerji talebi
Günlük tüketim	4,20 kWh
Aylık tüketim (28 gün – Şubat ayı)	117,6 kWh
Aylık tüketim (30 gün – Muhtelif aylar)	126,0 kWh
Aylık tüketim (31 gün – Muhtelif aylar)	130,2 kWh
Yıllık tüketim (365 gün)	1533 kWh

4.4.2 Üsküdar ilçesi için güneşlenme verileri

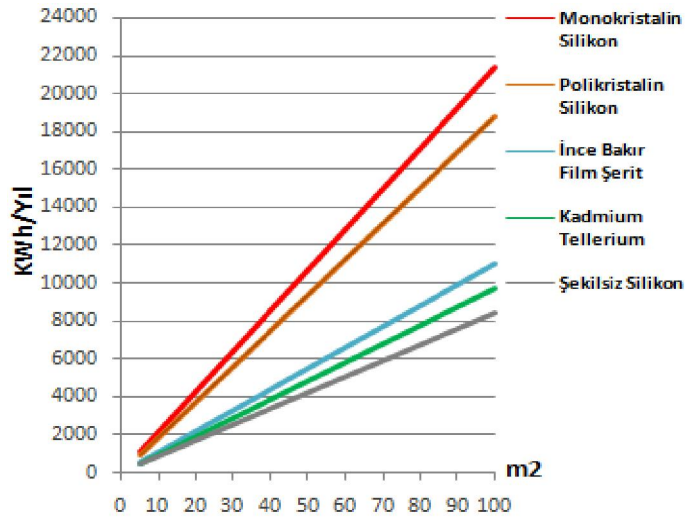
Gerekli fotovoltaik sistemin seçimi için önemli bir bulgu Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin bulunduğu bölgeye dair güneşlenme verileridir. Cami 41,03° Kuzey, 29,01° Doğu koordinatlarında, Üsküdar ilçesinde yer almaktadır. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nce hazırlanan, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası'ndan (GEPA) Üsküdar ilçesi için elde edilen global ışıınım değerleri Şekil 4.11'de verilmektedir. Buna göre en yüksek global ışıınım Haziran ayında günlük olarak 5,94 kWh/m², en düşük değer ise Aralık ayında günlük 1,18 kWh/m² değerindedir. Şekil 4.12'de ise güneşin gökyüzünde görülebildiği toplam süreyi gösteren güneşlenme süreleri verilmektedir. Grafiğe göre en uzun güneşlenme süresi 10,68 saat ile Temmuz ayında, en kısa güneşlenme süresi ise 3,02 saat ile Aralık ayında görülmektedir. Şekil 4.13'te ise monokristalin silikon, polikristalin silikon, ince bakır film şerit, kadmium tellerium ve şekilsiz silikon fotovoltaik paneller için m² bazında yıllık üretililecek enerji değerleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere m² bazında en yüksek enerji üretimi, piyasadaki en yüksek verimli teknoloji olan monokristalin silikon panellerle elde edilmektedir. Grafiğe göre hedeflenen 1533 kWh'lık yıllık enerji üretimi için kurulması gereken monokristalin silikon panelli sistemin yüzey alanı 10 m²'den düşük olacaktır.



Şekil 4.11 : Üsküdar kWh/m²-gün cinsinden global ışıınım değerleri [89].



Şekil 4.12 : Üsküdar saat cinsinden güneşlenme süreleri [89].



Şekil 4.13 : Üsküdar PV tipi – alan – üretilebilecek enerji [89].

Coğrafi konum üzerinden güneş enerjisine dair büyüklüklerin incelenebildiği başka bir platform ise Avrupa Komisyonu Joint Research Center tarafından geliştirilmiş olan PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System – Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi)’dir. PVGIS CM-SAF (The Sattelite Application Facility on Climate Monitoring) tarafından üretilen uydu fotoğrafları üzerinden yapılan hesaplamalardan elde edilen verilerle oluşturulmuş bir veritabanına sahiptir. CM-SAF EUMETSAT (Euopean Organisation for the Exploitation of Meteorological Sattelites) Uydu uygulama ağının bir parçasıdır ve Almanya Meteoroloji Servisi tarafından yönetilen 6 farklı Ulusal Meteoroloji ve Hidroloji Servisi’nin birleşik çalışmasının ürünüdür [90, 91].

PVGIS veritabanına Üsküdar Şemsi Paşa Camii için uygun koordinatlar girildiğinde yatay, optimal açılı ve 90° açılı düzlemlerde elde edilen ışıınım yeğınlıkleri, direkt nominal ışıınım, optimal panel açısı, ortalama gündüz sıcaklığı ve ortalama 24 saatlik sıcaklık değeri Çizelge 4.5'te verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Şemsi Ahmet Paşa Camii için PVGIS verileri.

Ay	I_{yd}	I_{opt}	I_{90}	I_d	θ_{opt}	T_o	T_{24}
Ocak	1520	2270	2250	1820	60	6,3	5,8
Şubat	2180	2910	2540	2180	52	6,7	6,3
Mart	3400	4140	3060	3230	41	8,7	8,2
Nisan	4810	5210	3020	4190	27	13,1	12,4
Mayıs	6490	6460	2870	6120	16	18,4	17,5
Haziran	7200	6830	2570	6990	8	23,0	22,0
Temmuz	7360	7190	2850	7380	12	25,8	24,8
Ağustos	6350	6720	3410	6670	23	25,6	24,8
Eylül	4590	5460	3730	4820	38	21,6	20,6
Ekim	2890	3890	3290	3310	50	17,1	16,2
Kasım	1920	2910	2860	2470	60	12,2	11,4
Aralık	1550	2240	2200	1530	59	8,3	7,7
Yıllık	4200	4700	2890	4240	31	15,6	14,8

Burada;

I_{yd} : Yatay düzlemde ışıınım [kWh/m²]

I_{opt} : Optimal açılı (31°) düzlemde ışıınım [kWh/m²]

I_{90} : 90 derece açılı düzlemde ışıınım [kWh/m²]

I_d : Direkt nominal ışıınım [kWh/m²]

θ_{opt} : Optimal aç [°]

T_o : Ortalama gündüz sıcaklığı [°C]

T_{24} : Ortalama 24 saatlik sıcaklık bilgisidir [°C].

PVGIS üzerinden elde edilen önemli bir bilgi panellerin optimal eğim açısıdır. PV sistemin yönlendirilmesi için azimut açısı, yani kuzey yönünden saat yönünde ölçülen aç ve eğim açısı, yani yatay düzlemle yapılan aç, kullanıcılar tarafından belirlenebilir. Eğer yerel hava durumu koşulları dikkate alınmazsa, PV modüllerin optimal sabit eğim açısı sadece coğrafi enleme bağılıdır. Sadece direkt güneş ışıını dikkate alındığında, optimal eğim açısı yıl boyunca coğrafi enlemden güneşin deklinasyon açısı, başka bir deyişle güneşin ekvator düzlemiyle yaptığı aç çıkarılarak hesaplanabilir [92].

Direkt ışıma ek olarak, yayınlık ışıma da dikkate alındığında ise, yapılan hesaplarla elde edilen eğim açılarında değışiklik yapmak mecburiyeti doğmaktadır. Duffie ve Beckman tarafından önerilen “yıllık optimum” yönteminde, eğim açısı kış aylarında enlem değerinden 10° – 15° daha fazla, yaz aylarında ise 10° – 15° daha düşük kabul edilmektedir [93]. Farklı çalışmalarda ise optimal eğimin enlem değerinden $\pm 8^{\circ}$ ve $\pm 15^{\circ}$ ’lik sapmalarla bulunduğunu gösteren bulgular içermektedir [92]. Kacira ve diğ. tarafından 2004 yılında Şanlıurfa için yapılan bir çalışmada optimal eğim açısının yaz ve kış mevsimleri arasında 13° ile 61° arasında değıştiğini göstermektedir [94].

Çalışmada önerilen fotovoltaiik sistem 41° Kuzey enlemi, 26° Doğu boylamında bulunan bir bölge için tasarlanacaktır. Sistemde kullanılacak olan fotovoltaiik panellerin eğiminin farklı mevsimler için değıştirilmesi iş gücü ve buna bağı olarak ekonomik anlamda ciddi bir problem teşkil etmektedir. Eğimi otomatik olarak değıştirecek bir sistem ise kurulum ve işletme masraflarını oldukça yükseltecektir. Bu sebeple, panellerin sabit bir açıyla yerleştirilmesi daha uygundur. Bu sebeple PVGIS’in Şemsi Ahmet Paşa Camii’nin koordinatları için hesaplamış olduğı optimum eğim değerini kullanmak en uygun yaklaşım olacaktır. PVGIS verilerine göre optimum panel eğimi farklı aylarda 8° ila 60° arasında değışmektedir ve sene içindeki optimum eğim değeri 31° ’dir. Simölasyonlar için gerekli model tasarlanırken optimum eğim bu değerde belirlenmiştir.

PVGIS verilerinden elde edilen önemli bir diğeri bilgi, hedeflenen enerji üretimi için gerekli yaklaşık panel boyutlandırması olmuştur. Veritabanı, 1,0 kWp’lik bir PV sistemi ile Üsküdar koşullarında, 31° eğimli panellerle elde edilecek yıllık enerji üretimini 1290 kWh olarak hesaplamaktadır. Burada kullanılan panellerin kristalin silikon olduğı, Üsküdar koşullarında düşük ışıma ve sıcaklığa bağı olarak % 9,6’lık bir kayıp gerçekleşeceği, açısal yansıma bağı kayıpların % 2,7 olduğı ve kablo, evirici, vb. elemanlardan kaynaklanan kayıpların da % 14,0 olduğı varsayımı yapılmıştır. Buna göre, basit bir orantı hesabı ile hedeflenen 1533 kWh’lık yıllık üretim için kurulması gereken PV sistemin minimum 1,2 kWp değerinde olması gerektiğı görölmektedir.

4.4.3 PVsyst ile gerçekleştirilen hesaplamalar

İsviçre’de geliştirilen fotovoltaiik hesaplama yazılımı PVsyst, çeşitli meteorolojik verilerden faydalanarak PV sistemlerin projelendirilmesi için detaylı hesaplar

yapılmasına yardımcı olmaktadır. Doktora tez çalışması için PVsyst programının deneme sürümünden faydalanılmıştır. Kullanılan meteorolojik veriler Meteonorm veritabanından elde edilmiştir. Meteonorm, 1960-1991 ve 1981-2000 yılları arasında 1200 istasyondan toplanan yıllık ışıınım verilerinden oluşan bir veritabanına sahiptir. Meteonorm üzerinden tüm Avrupa ülkelerinin güneş ışıınımı verilerine ulaşmak mümkündür [95]. PVsyst'in Meteonorm üzerinden elde ettiği ve simülasyon için kullandığı güneşlenme verileri Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6 : PVsyst Meteonorm Üsküdar güneşlenme verileri [kWh/m²].

	I_{yk}	I_{yd}	I_{pk}	I_{pd}	I_{pa}
Ocak	51,30	26,83	81,50	31,59	0,733
Şubat	59,80	29,62	82,80	33,15	0,854
Mart	104,20	52,78	126,60	56,02	1,488
Nisan	139,00	70,48	149,80	71,50	1,984
Mayıs	200,90	74,32	198,30	73,87	2,845
Haziran	218,20	64,17	206,60	63,31	3,073
Temmuz	215,80	78,09	210,20	77,78	3,050
Ağustos	192,70	67,74	202,80	70,37	2,742
Eylül	115,90	62,89	132,60	65,74	1,656
Ekim	84,80	44,26	110,80	48,39	1,211
Kasım	49,70	27,55	72,20	30,73	0,710
Aralık	43,20	25,01	67,70	29,06	0,616
Yıllık	1475,30	623,73	1641,90	651,51	20,963

Burada,

I_{yk} : Yatay global ışıınım,

I_{yd} : Yatay difüz ışıınım,

I_{pk} : 31° eğimli panel üzerinde global ışıınım,

I_{pd} : 31° eğimli panel üzerinde difüz ışıınım,

I_{pa} : 31° eğimli panel üzerinde yansılardan kaynaklanan albedo ışıınımdır.

Simülasyon 41° kuzey, 29° doğu koordinatları için 31 derecelik sabit eğimli paneller için yapılmıştır. Albedo olarak adlandırılan ve yeryüzünün güneş ışığını yansıtma kapasitesini gösteren katsayı, şehir içlerinde 0,14 ila 0,22 arasında kabul edilmekte, karla kaplı bölgelerde 0,80'e kadar çıkmaktadır. Albedo hesaplamalarda genel olarak 0,2 kabul edilmektedir ve PVsyst de simülasyonları bu değer üzerinden yapmaktadır [96]. Fotovoltaik paneller direkler üzerine yerleştirileceği için, panellerin istenilen

her şekilde yönlendirilmesi mümkündür, bu sebeple simülasyonda azimut açısı 0° kabul edilmiştir. Fotovoltaik panellerin Cami bahçesinin yanında kalan boş alana yerleştirilmesi durumunda, bu alanda bina, ağaç vb. engeller bulunmadığından, panellerin üzerine düşecek gölge de ihmal edilmiştir. Şekil 4.14'te Cami avlusu yanında, trafiğe kapalı ve fotovoltaik yerleşimine uygun bölgenin görünümü verilmektedir. Fotovoltaik sistem direkler üzerinde yerleştirildiğinde istenilen geometrik formda tasarlanabileceği gibi, Cami'nin tarihi yapısını ve estetik görünümünü bozmamak kaydıyla avluda namaz kılanlar için gölgeleme elemanı teşkil edecek bir formda da tasarlanabilir.



Şekil 4.14 : Fotovoltaik yerleşimine uygun alanlar.

Toplam 420 W'lık yük ile hedeflenen yıllık 1533 kWh'lik elektrik enerjisi üretimi için PVsyst ile iki farklı senaryo üzerinden simülasyon yapılmıştır. Senaryolardan ilkinde aylık enerji üretimine bakılmaksızın, enerjinin yeterli olduğu zamanlarda Cami iç aydınlatmasını beslemesi, yeterli olmadığı zamanlarda da şebekeden enerji satın alınması; enerjinin fazla olduğu zamanlarda ise şebekeye satılması düşünülerek, yıllık üretimin 1533 kWh'lik toplam tüketime denk olması hedeflenmiştir. İkinci senaryoda ise fotovoltaik sistemin aylık üretimi yükseltilerek, enerjinin yeterli olduğu zamanlarda iç aydınlatmaya ek olarak Cami'nin diğer enerji ihtiyaçlarının karşılanabilmesi ve aynı zamanda şebekeye satılacak enerji arttırılarak, sistemden daha fazla kazanç elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu sebeplerle seçilen fotovoltaik paneller ve panellerle birlikte kullanılacak olan eviricilere dair bilgiler Çizelge 4.7'de verilmektedir. Burada U_{mpp} , maksimum güç noktası gerilimini, I_{mpp} ise maksimum güç noktası akımını vermektedir. Üretilmesi hedeflenen enerji miktarı, simülasyonu yapılan iki senaryoda birbirinden farklı olduğu için seçilen fotovoltaik panellerin ve panellerle kullanılacak olan eviricilerin uygun boyutlandırılabilmesi ancak farklı

üreticilerin ürünlerini kullanarak mümkün olabilmiştir. Bu sebeple sistem bileşenlerinin özellikleri birbirinden farklıdır.

PVSyst paket programı içinde piyasadaki mevcut panel ve evirici üreticilerinin ürünlerinin yer aldığı büyük bir veritabanı yer almaktadır. Programa kurulması hedeflenen PV sistem gücü veya m^2 olarak boyutu girilebilmektedir. Buna ek olarak veritabanından hedeflenen gücü sağlayabilecek PV panelleri ve bu paneller için uygun gerilim değerlerindeki eviricileri seçmek mümkündür. Panel seçimi yapılırken piyasanın önde gelen panel üreticilerinden tercihler yapılmıştır. 1. senaryo için Sharp'ın 250 Wp nominal gücündeki panellerinden 5 adet seçilmiştir. 2. senaryo için hedef her ay için talep edilen elektrik enerjisine denk bir üretim elde etmek olduğundan, sistemi büyütmek ve bu doğrultuda paneller ve eviriciyi değiştirmek zorunluluğu ortaya çıkmıştır. 2. senaryo için Bosch firmasının 260 Wp nominal gücündeki panellerinden 9 adet seçilmiştir.

Çizelge 4.7 : PV sistem özellikleri.

Özellik	1. Senaryo	2. Senaryo
Seri bağlı modül sayısı	5	9
Paralel bağlı modül sayısı	1	1
Modül nominal gücü	250 W _p	260 W _p
Dize nominal gücü (STK)	1250 W _p	2340 W _p
Dize çalışma gücü (50°C)	1106 W _p	1849 W _p
U _{mpp} (50°C)	137 V	220 V
I _{mpp} (50°C)	8.1 A	8.4 A
Modül alanı	8.2 m ²	13.1 m ²
Evirici çalışma gerilimi	100-320 V	224-480 V
Evirici Nominal Gücü	1.2 kW AC	2.3 kW AC

Seri bağlı modüller ve bunlarla çalışacak eviricilerin seçiminde, bazı elektriksel koşulların sağlanması gerekmektedir. Buna göre, modülün maksimum çalışma sıcaklığında görülen minimum çalışma gerilimi, eviricinin minimum çalışma geriliminden yüksek, modülün minimum çalışma sıcaklığında görülen maksimum çalışma gerilimi ise, eviricinin maksimum çalışma geriliminden düşük olmalıdır. Buna ek olarak, seçilen modüllerden oluşan dizinin mutlak gerilimi, yani minimum sıcaklık değerindeki açık devre gerilimi, eviricinin maksimum giriş geriliminden

düşük olmalı, dizenin mutlak gerilimi PV modülü için belirlenen maksimum sistem geriliminin üzerine çıkmamalıdır. Seçilen PV paneller ve eviricinin bu elektriksel özellikler açısından uyumlu olmaması durumunda, PVsyst programı kullanıcıyı uyarmaktadır [97]. Bu bilgilerin ışığında 1. senaryo için piyasanın önde gelen firmalarından SMA'nın 1,2 kW nominal gücündeki eviricisi, 2. senaryo içinse yine aynı firmanın 2,0 kW nominal gücündeki eviricisi tercih edilmiştir. Seçilen panellerin ve eviricilerin karakteristik özellikleri Ek E'de verilmektedir. Simülasyon sonuçlarından güneş ışıınımına dair değerler ise Çizelge 4.8'de verilmektedir.

Burada,

I_{yg} : Yatay global ışıınım,

T_o : Ortam sıcaklığı,

I_{pg} : Panel üzerine düşen global ışıınım,

I_{pge} : Gölge ve düşüş açısının etkisi hesaba katıldıktan sonra elde edilen panel üzerine düşen etkin ışıınımdır.

Çizelge 4.8 : PVsyst simülasyon sonuçları – güneş ışıınımına dair değerler.

	I_{yg} [kWh/m ²]	T_o [°C]	I_{pg} [kWh/m ²]	I_{pge} [kWh/m ²]
Ocak	51,3	6,22	81,5	79,1
Şubat	59,8	6,15	82,8	80,5
Mart	104,2	7,88	126,6	122,8
Nisan	139,0	12,19	149,8	145,1
Mayıs	200,9	17,49	198,3	192,3
Haziran	218,2	22,18	206,6	200,4
Temmuz	215,8	25,36	210,2	203,8
Ağustos	192,7	24,94	202,8	196,8
Eylül	115,9	20,83	132,6	128,5
Ekim	84,8	16,51	110,8	107,6
Kasım	49,7	12,10	72,2	70,1
Aralık	43,2	8,30	67,7	65,7
Yıllık	1475,3	15,06	1641,9	1592,6

Son olarak Çizelge 4.9'da iki senaryo için de seçilen fotovoltaik sistemle üretilen enerjiye dair bilgiler verilmektedir.

Burada,

E_e : Dizi çıkışındaki etkin enerji,

E_s : Şebekeye verilen enerji,

η_d : Dizi çıkışı / alan verimliliği

η_s : Sistem çıkışı / takribi alan verimliliğidir.

Çizelge 4.9 : Seçilen fotovoltaik sistemlerle enerji üretimi.

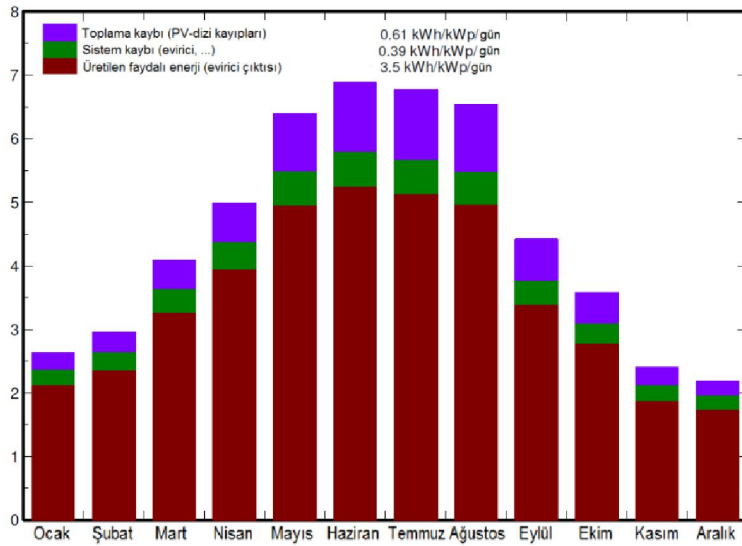
	1. Senaryo				2. Senaryo			
	E_e [kWh]	E_s [kWh]	η_d [%]	η_s [%]	E_e [kWh]	E_s [kWh]	η_d [%]	η_s [%]
Ocak	94,2	85,3	14,08	12,75	176,7	164,4	14,67	13,64
Şubat	94,5	85,4	13,91	12,57	177,5	164,8	14,50	13,46
Mart	143,1	129,7	13,76	12,48	268,6	250,5	14,34	13,38
Nisan	164,9	149,8	13,41	12,18	309,8	289,3	13,98	13,06
Mayıs	210,7	191,7	12,94	11,77	396,3	370,8	13,51	12,64
Haziran	212,7	193,6	12,54	11,42	400,7	374,9	13,11	12,27
Temmuz	214,1	195,1	12,41	11,31	403,4	377,5	12,98	12,15
Ağustos	207,0	188,6	12,43	11,32	389,9	364,8	13,00	12,16
Eylül	140,3	127,5	12,89	11,71	263,9	246,3	13,46	12,56
Ekim	120,3	109,2	13,22	12,00	226,2	210,8	13,80	12,86
Kasım	80,7	72,7	13,62	12,27	151,7	140,4	14,21	13,15
Aralık	78,0	70,5	14,04	12,68	146,4	135,9	14,62	13,57
Yıllık	1760,7	1599,2	13,06	11,86	3311,2	3090,4	13,63	12,73

Simülasyon sonuçları, 1. senaryo için enerji üretiminin 1599,2 kWh olup, yıllık 1533 kWh'lik enerji tüketimine yaklaşık olarak denk düşen bir enerji üretiminin elde edildiğini göstermektedir. 2. senaryoda kurulan sistemle ise her ay fotovoltaik sistem üzerinden elde edilen üretim, Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin iç aydınlatma elektrik tüketimi daha yüksek seviyededir. Bu sayede, üretilen fazla enerji şebekeye satılabilir ve önemli kazanımlar edilebilir.

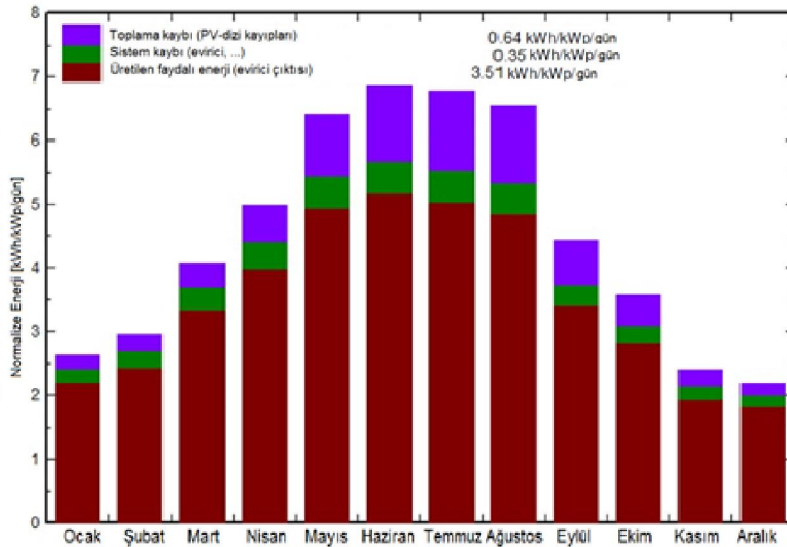
Kurulması önerilen sistemlerle elde edilecek enerji üretimi kurulu kWp başına aylık olarak 1. senaryo için Şekil 4.15'te, 2. senaryo için Şekil 4.16'da çizdirilmiştir. Burada mor renkle gösterilenler PV dizi kayıpları ve buna bağlı toplama kayıpları, yeşil renkle gösterilenler evirici ve benzeri sistem elemanlarının kayıpları, kırmızıyla gösterilenler ise üretilen faydalı enerji, yani evirici çıktısıdır. Bu büyüklüklerin

günlük ortalama değerleri 1. senaryo için sırasıyla 0,61 kWh/kWp, 0,39 kWh/kWp ve 3,5 kWh/kWp, 2. senaryo için sırasıyla 0,64 kWh/kWp, 0,35 kWh/kWp ve 3,51 kWh/kWp olarak hesaplanmıştır.

Simülasyonlardan elde edilen önemli bir bilgi, fotovoltaik sistemin performans göstergelerinden performans oranıdır. 1. senaryo için üretilen yıllık enerji 1599 kWh/yıl, yıllık üretimin kurulu kWp başına değeri 1279 kWh/kWp ve performans oranı % 77,9'dur. 2. senaryo'da ise üretilen yıllık enerji 3090 kWh/yıl, yıllık üretimin kurulu kWp başına değeri 1321 kWh/kWp ve performans oranı % 80,4'tür.

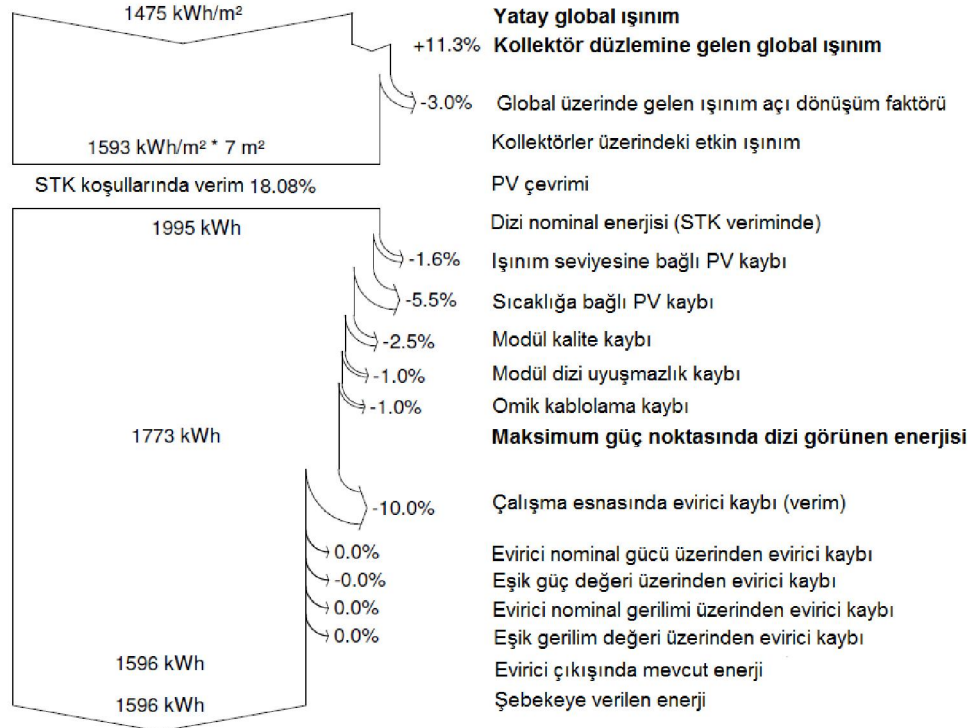


Şekil 4.15 : Kurulu kWp başına yıllık üretimin aylara dağılımı – 1. senaryo.

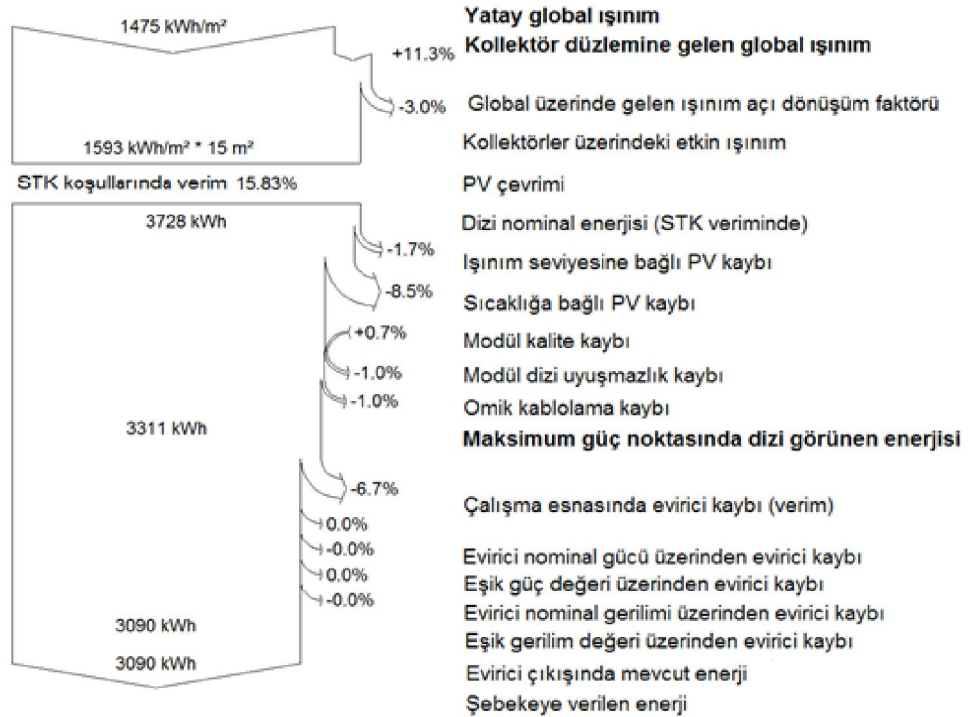


Şekil 4.16 : Kurulu kWp başına yıllık üretimin aylara dağılımı – 2. senaryo.

Şekil 4.17 ve 4.18’de sırasıyla 1. ve 2. senaryolar için sistem üzerine düşen yatay global ışıının geçtiği adımlar, sistem üzerindeki kayıplar ve sonuç olarak şebekeye verilen yıllık elektrik enerjisi değerleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.17 : PV Sistem kayıp tablosu – 1. senaryo.



Şekil 4.18 : PV Sistem kayıp tablosu – 2. senaryo.

Şemsi Paşa Camii'nin iç aydınlatma sisteminin devrede olduğu süre yıl içinde farklı mevsimlere ve Cami içindeki gün ışığı miktarına göre değişiklik göstermektedir. Benzer şekilde, farklı aylar için güneşlenme süreleri ve fotovoltaik sistemlerle üretilen elektrik enerjisinin gün içinde hangi saatlere denk düştüğü her ay için değişiklik göstermektedir. Bunlara ek olarak Cami güneş doğmadan önceki imsak ve güneşin batışından sonraki akşam ve yatsı vakitlerinde kullanımdadır. Fakat bu saatlerde fotovoltaik panellerden enerji üretimi mümkün değildir. Fotovoltaik sistemde verimsizliği sebebiyle akü kullanımından kaçınılmıştır, bu sebeple gün içinde üretilen enerjinin saklanarak güneş ışığının olmadığı saatlerde kullanılması mümkün değildir. Dolayısıyla önerilen sistemde iç aydınlatma yükü güneşsiz saatlerde şebekeden karşılanacak, güneşli saatlerde üretilen fazla enerji ise şebekeye satılacaktır. Şebeke bağlantısında kullanılan çift yönlü sayaç ile şebekeden alınan ve şebekeye satılan enerjiyi takip etmek mümkündür. 2011 Temmuz tarihli Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik'e göre üretim ve tüketim tesislerinin, tez çalışmasındaki gibi aynı yerde bulunması durumunda çift yönlü sayaçtan faydalanılarak saatlik olarak ihtiyaç fazlası elektrik enerjisi miktarı tespit edilmektedir. Daha sonra saatlik veriler birleştirilerek her fatura dönemi için dağıtım sistemine verilen ihtiyaç fazlası elektrik enerjisi miktarı belirlenmektedir [98]. 5. Bölüm'de ele alınan ekonomik analiz bu bilgilerin ışığında gerçekleştirilmiştir.

5. EKONOMİK ANALİZ

Doktora tez çalışmasının son adımı olarak hedeflenen aydınlatma ve fotovoltaik sistemlerinin ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için 4 farklı senaryo üzerinden hesaplamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Referans senaryo, cami içindeki mevcut durumu, birinci senaryo sadece cami iç aydınlatmasının LEDlerle değiştirildiği durumu, ikinci senaryo 1250 Wp'lik fotovoltaik panelli durumu, üçüncü ve son senaryo ise 2080 Wp'lik fotovoltaik panelli durumu temsil etmektedir.

28.12.2012 tarih ve 28511 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan Dağıtım Lisansı Sahibi Tüzel Kişiler ve Görevli Perakende Satış Şirketlerinin Tarife Uygulamalarına İlişkin Usul ve Esaslar'da ibadethanelerin Aydınlatma Yönetmeliği kapsamında yer almayan tüketimlerinin mesken abone grubu kapsamında değerlendirileceği belirlenmiştir [99]. Camilerin iç aydınlatmasına dair masraflar Diyanet bütçesinden karşılandığı için, iç aydınlatmaya dair enerji tüketimiyle ilgili bir fiyat bilgisi verilmemektedir. Bu sebeple, enerji tüketimini kWh'ten TL'ye çevirebilmek amacıyla 2014 Temmuz ayında meskenler için elektriğin birim fiyatı olarak belirlenen 28,486 kr/kWh değeri referans alınmıştır. Elektriğin birim fiyatının ve Amerikan Doları – Türk Lirası paritesinin yıllık ortalama artışını yapılan hesaplamalara ekleyebilmek için 2009-2014 yılları arasındaki değerler Türk Cumhuriyeti Merkez Bankası (TCMB) ve Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (TEDAŞ) verilerinden incelenmiştir. Buna göre son 5 yılda meskenler için elektriğin birim fiyatı yıllık ortalama % 8,1'lik, Amerikan Doları – Türk Lirası paritesi ise yıllık ortalama % 6,8'lik bir artış göstermiştir. Amerikan Doları başlangıç değeri Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası 10 Temmuz 2014 verilerine göre 2,1271 TL kabul edilmiştir.

Geri ödeme süresi analizleri için, paranın zaman içinde kaybettiği değeri dikkate almak gerekmektedir. Bu amaçla önerilen sistemlerden elde edilen tasarrufların yıllık mevduat faiz oranları hesaba katılarak yeni değerlere indirgenmesi gerekmektedir. Bu hesap için indirgeme oranı, devlet bankalarından Türkiye

Cumhuriyeti Ziraat Bankası'nın 2014 Temmuz ayı vadeli Türk Lirası yıllık mevduat faiz oranı değeri olan % 8 kabul edilmiştir.

5.1 Referans Senaryo

Referans senaryo, Şemsi Ahmet Paşa Camii içindeki mevcut sistemdir. Cami'de 40 adet kandil içinde 1x40 W akkor telli lamba bulunmaktadır. Bu durumda Cami'nin kurulu iç aydınlatma yükü $40 \times 40 = 1600$ W'tır. Aydınlatma sisteminin günde ortalama 10 saat ve senenin her günü devrede olduğu varsayımıyla, iç aydınlatma sisteminin yıllık enerji tüketimi 5840 kWh, buna denk düşen yıllık masraf 1663,58 TL'dir. Bir akkor telli lambanın ömür süresi 1000 saat, birim fiyatı 0,50 TL'dir. Lambaların 3650 saatlik yıllık işletmede 3,65 kere değiştirilmesi gerektiği ve her değişim için 50 TL işçilik alınacağı göz önünde bulundurulursa, yıllık bakım masrafı 255,50 TL tutmaktadır. Buna göre mevcut senaryoda yıllık toplam masraf 1919,08 TL'ye eşittir.

5.2 Senaryo 1

1. senaryo, Cami içine LEDli aydınlatmalı sisteminin kurulduğu, fakat fotovoltaik panellerin yerleştirilmediği durumdur. LEDli sistemin kurulu iç aydınlatma yükü $40 \times 10,5 = 420$ W'tır. İç aydınlatma sisteminin yıllık enerji tüketimi 1533 kWh, buna denk düşen yıllık masraf 436,70 TL'dir. Bu tüketim, mevcut akkor telli lambalı tesisatın tüketiminin sadece % 26'sı kadardır. Bu durumda tasarlanan LEDli sistem ile elektrik enerjisinden yıl bazında 4307 kWh ve 1226,89 TL kar edilmektedir.

Tasarlanan prototip sistemin maliyet hesabı Çizelge 5.1'de verilmektedir. Sistem çeşitli komponentlerden oluşmaktadır ve AR-GE sırasında elemanların düşük sayılarda temin edilmiş olması sebebiyle, sistem üretim maliyetleri oldukça yüksektir. Bu fiyatlar sistemin seri üretime geçmesiyle çok daha düşük seviyelere inecektir. Çizelge 5.2'de toplu alımlarda ve seri üretimde yapılacak indirimler göz önünde bulundurularak öngörülen seri üretim maliyet hesabı verilmiş ve takip eden hesaplar bu fiyat üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tasarım soğutucu için üretilmesi gereken kalıbın fiyatı, kalıp üretimi AR-GE kalemi sayılacağı için hesaba katılmamıştır.

Çizelge 5.1 : LEDli aydınlatma sistemi prototip maliyet hesabı.

Sistem komponenti	Adet	Birim fiyatı [TL]	Toplam fiyat [TL]
Yuvarlak PCB üzerinde LED	8	10	80
Tasarım soğutucu	1	150	150
1,5 mm ² kesitli aydınlatma kablosu	50 cm	1	0,50
Çift taraflı kablo Konnektörü	4	1	4
350 mA sabit akım sürücü	1	15	15
Kesik cam kandil	1	5	5
Toplam		254,50 TL	

Çizelge 5.2 : LEDli aydınlatma sistemi seri üretim yaklaşık maliyet hesabı.

Sistem komponenti	Adet	Birim fiyatı [TL]	Toplam fiyat [TL]
Yuvarlak PCB üzerinde LED	8	3	24
Tasarım soğutucu	1	10	10
1,5 mm ² kesitli aydınlatma kablosu	50 cm	1	0,50
Çift taraflı kablo konnektörü	4	0,25	1
350 mA sabit akım sürücü	1	5	5
Kesik cam kandil	1	1	1
Toplam		41,50 TL	

Çizelge 5.2’den elde edilen değerlere göre 40 adet armatür için ilk montaj masrafı olarak 500 TL eklendiğinde toplam masraf 2160 TL’dir. Aydınlatma sisteminin ömür süresi 25000 saattir. Yıllık bakım masrafı temizlik için 100 TL kabul edilmiştir, sistemin yeniden değiştirilmesi için 25000 saate denk düşen 6,8 senelik sürenin geçmesi gerekmektedir. Buna göre ömür süresi boyunca LEDli sistemin elektrik enerjisi tüketimiyle birlikte yıllık toplam masrafı 2475 TL’dir.

Çizelge 5.3’te, sistemin geri ödeme süresi hesabı için kullanılan büyüklükler verilmektedir.

Çizelge 5.3 : 1. senaryo – kullanılan büyüklükler.

Bileşen	Miktar
Yatırım Tutarı	2.160,00 TL
Yıllık bakım masrafı	100,00 TL
Yıllık elektrik enerjisi tasarrufu	4307 kWh
Yıllık ekonomik tasarruf	1226,89 TL
Yıllık bakım tasarrufu	255,50 TL
Elektrik yıllık fiyat artışı	0,081
Dolar yıllık fiyat artışı	0,068
İndirgeme oranı	0,08

Yapılan kabuller doğrultusunda, LEDli sistemden elde edilen ekonomik tasarruf, mevduat faiz oranına göre indirgenerek, Çizelge 5.4'te verilen geri ödeme süresi değerleri hesaplanmıştır. Burada ana gider LEDli sistemin ilk yatırım fiyatıdır. Gelirler ise yıllık elektrik enerjisinden edilen tasarruf miktarından, sistemin yıllık bakım masrafının çıkarılması ile elde edilir. Gelir miktarının yıllar içinde kaybolan parasal değerine göre hesabı, indirgenmiş gelir değerini vermektedir. Bu hesap için denklem (5.1) kullanılır.

$$\text{İndirgenmiş Gelir} = \frac{\text{Gelir}}{(1+\text{İndirgeme Oranı})^i} \quad (5.1)$$

Burada i yıl olarak geçen süreyi, indirgeme oranı ise bu çalışmada % 8 olarak seçilen faiz oranını göstermektedir. İndirgenmiş gelirler kümülatif olarak ilk yatırım masrafından çıkarılarak, sistemin kendi masrafını ne kadar sürede geri ödeyeceğini bulmak mümkündür. Buna göre LEDli sistem devreye alındıktan sonra 1 yıl 6 ay içinde elde edilen elektrik enerjisi tasarrufu sayesinde kendi geri ödemesini gerçekleştirmektedir. Çalışmadaki tüm analizler 10 yıllık zaman zarfı için gerçekleştirilmiştir. Bu süre içinde LEDli sistemin ömür süresi 6.8 yılda dolacağı için, 6. yılın içinde sistemin yenilenmesi gerekmektedir. Çizelgeden de görülebileceği gibi sistem enerji tasarrufu sayesinde elde edilen kazançla LEDli sistemi herhangi bir maddi külfet olmadan yenileyebilmekte ve 10 yılın sonunda referans senaryoya göre 9230,68 TL tasarruf edilmektedir.

Çizelge 5.4 : 1. senaryo – geri ödeme hesabı.

Yıllar	Yatırım [TL]	Net Gelir [TL]	İndirgenmiş Gelir [TL]	Geri Ödeme [TL]
1	-2160,00	1482,89	1482,89	-677,11
2		1482,27	1372,47	695,36
3		1589,70	1362,91	2058,27
4		1705,83	1354,14	3412,42
5		1831,36	1346,11	4758,52
6	-2160,00	1967,07	1338,75	3937,28
7		2113,76	1332,03	5269,31
8		2272,34	1325,89	6595,20
9		2443,77	1320,29	7915,49
10		2629,08	1315,19	9230,68

5.3 Senaryo 2

Senaryo 2’de cami iç aydınlatma yükü senaryo 1 ile aynıdır, buna ek olarak fotovoltaiik panellerden faydalanılarak Cami’nin enerji tüketimine karşılık gelecek miktarda yıllık enerji üretilmektedir. Yıl içinde güneş enerjisinin yeterli olmadığı zamanlarda şebekeden enerji satın alınırken, enerjinin fazla olduğu zamanlarda da şebekeye enerji satılmaktadır. Fakat Cami’nin kullanım saatleri namaz saatlerinin mevsimsel değişimi sebebiyle farklılık göstermektedir. Buna ek olarak Cami’nin turistik amaçlı ziyaretlerinin hangi saat aralıklarında gerçekleşeceğini tahmin etmek güçtür. Ayrıca Cami içindeki güneş ışığı dağılımı güneş açılarına bağlı olarak değişmekte ve mevsimler arasında kullanım saatleri için farklılıklar yaratmaktadır. Bu sebeple hesaplar en kötü ihtimaller dikkate alınarak Cami’nin enerji tüketimi ile enerji üretiminin farklı saatlerde gerçekleştiği varsayımıyla gerçekleştirilmiştir. Buna göre Cami ihtiyaç duyduğu tüm elektrik enerjisini şebekeden satın almakta, ürettiği enerjiyi ise tümüyle şebekeye satmaktadır. Çift yönlü sayaç kullanımında saatlik bazda üretim ve tüketim bilgileri takip edilmekte ve fiyatlandırma aylık olarak yapılmaktadır, bu sebeple ekonomik analiz de aylık üretim ve tüketim verileri üzerinden yapılmıştır.

Seçilen fotovoltaiik sistemde yıllık ortalama üretim 1599,2 kWh olarak belirlenmiştir. Bu durumda aydınlatma sisteminin yıllık tüketimi olan 1533 kWh’lik değerin üzerine çıkılmıştır. Hesaplamalarda iki farklı alt senaryo düşünülmüştür; ilk alt senaryoda kullanılan sistemlerin yabancı üretimli olması sebebiyle devletten sadece enerji üretimine dair teşvik alındığı varsayılmıştır. İkinci alt senaryoda ise kullanılan tüm malzemelerin ve alınan tüm hizmetlerin yerel olduğu kabul edilerek devletten alınabilecek tüm teşviklerden faydalandığı varsayılmıştır. Teşvik miktarları Bölüm 4, Çizelge 4.2’de verilmiştir. PV sistemlerin temizlik ve küçük tamirler dışında ciddi bir bakım gerektirmemesi sebebiyle, bakım masrafları orjinal kurulum masrafının % 1,5’u olarak kabul edilebilir. Hesap yapılırken eviricinin yaklaşık 10 yılda bir değiştirilmesi gerektiğini dikkate almak gerekmektedir [100]. PV sistemin toplam masrafı Çizelge 5.5’te, Cami içine kurulan sistemin aylık bazda enerji üretim ve tüketim bilgileri Çizelge 5.6’da verilmektedir.

Çizelge 5.5 : Yıllık PV sistem için maliyet çizelgesi.

Bileşen	
Sistem boyutu [Wp]	1250
Üretilen enerji [kWh/yıl]	1599,2
Modül sayısı	5
Modül birim fiyatı [TL]	905
PV modül toplam fiyatı [TL]	4525
Şebeke bağlantılı evirici fiyatı [TL]	2830
Kurulum, kablolama, vs. [TL]	2000
Net yatırım [TL]	9355
Bakım masrafları [TL/yıl]	140
Ömür süresi [yıl]	25
25 yıl için bakım + evirici masrafı [TL]	10575
25 yıllık toplam masraf [TL]	19930

Çizelge 5.6 : PV sistem yıllık üretim – masraf çizelgesi.

	Talep [kWh]	Arz [kWh]	Fark [kWh]	Tüketim [TL]	Kazanç 1 [TL]	Kazanç 2 [TL]
Ocak	130,2	85,3	-44,9	-12,79	0,00	0,00
Şubat	117,6	85,4	-32,2	-9,17	0,00	0,00
Mart	130,2	129,7	-0,5	-0,14	0,00	0,00
Nisan	126	149,8	23,8	0,00	6,73	10,12
Mayıs	130,2	191,7	61,5	0,00	17,40	26,16
Haziran	126	193,6	67,6	0,00	19,12	28,76
Temmuz	130,2	195,1	64,9	0,00	18,36	27,61
Ağustos	130,2	188,6	58,4	0,00	16,52	24,84
Eylül	126	127,5	1,5	0,00	0,42	0,64
Ekim	130,2	109,2	-21	-5,98	0,00	0,00
Kasım	126	72,7	-53,3	-15,18	0,00	0,00
Aralık	130,2	70,5	-59,7	-17,01	0,00	0,00
Yıllık	1533	1599,2	66,2	-60,28	78,56	118,14

Çizelge 5.6’da görüldüğü üzere kurulu PV sistemi ile Ekim-Mart ayları arasında üretilen enerji, tüketilen enerjiden daha fazladır. Üretim ve tüketimin aylık olarak karşılaştırılması sonucunda şebekeden toplam 211,6 kWh enerji satın alınması ve bunun için 60,28 TL’lik bir ödeme yapılması gerektiği görülmüştür. Nisan-Eylül ayları arasında ise PV sistem, aydınlatma sisteminin elektrik ihtiyacına denk düşen miktarda bir üretim sağlamakta ve 277,7 kWh fazla enerji üretmektedir. Şebekeye satılabilecek bu fazla enerji ile PV sistem bileşenlerinin yabancı üretim olması durumunda 0,133 Amerikan doları, yerli üretim olması durumunda ise toplam 0,20

Amerikan doları üzerinden hesaplanan teşviklerle yıllık üretim kazanımları sırasıyla 78,56 TL ve 118,14 TL'dir. Bu durumda PV sistemi, aydınlatma sisteminin yıllık enerjisini karşılamakta ve ödenen elektrik faturaları elde edilen kazanımdan çıkarıldığında, yabancı sistem kullanımı için 18,28 TL, yerli sistem kullanımı için 57,86 TL'lik bir kazanıma denk gelmektedir. Sistemin esas hedefinin iç aydınlatma tüketimini karşılamak olması ve ekstra bir elektrik enerjisi üretimi için tasarım yapılmamış olması sebebiyle, elde edilen tasarruflar oldukça düşük seviyelerdedir.

Sistemin geri ödemesi hesapları için yeniden indirgenmiş gelir hesabına başvurulmuştur. Çizelge 5.7'de hesapta kullanılan büyüklükler, Çizelge 5.8'de sistemin alt senaryo 1'e göre, Çizelge 5.9'da ise alt senaryo 2'ye göre 10 yıllık geri ödeme hesapları verilmektedir. Süreleri çizelgelerde geri ödeme sütunundaki büyüklüğün işaretinin eksiden artıya geçtiği satıra denk düşen yıl olarak görmek mümkündür. Buna göre, fotovoltaiik sistemin yabancı üreticilerden seçilmesi durumunda geri ödeme süresi 8 yıl 5 ay sürecektir. Fotovoltaiik sistemin yerli üreticilerden seçilmesi durumunda ise geri ödeme süresi 8 yıl 3 aydır. Sistem, ürettiği enerji ile sadece iç aydınlatma tüketimini karşılayacak şekilde tasarlandığı için, geri ödemeyi sağlayan temel büyüklük yapılan enerji tasarrufu ve buna bağlı olan ekonomik tasarruftur. Sonuç olarak Senaryo 2'de 10 yıllık süre sonunda referans senaryoya göre yabancı sistemle 2491,29 TL, yerli sistemle 2867,85 TL tasarruf edilmektedir.

Çizelge 5.7 : Senaryo 2 – kullanılan büyüklükler.

Bileşen	Miktar
Yatırım Tutarı	11.515,00 TL
Yıllık bakım masrafı	272,73 TL
Yıllık elektrik enerjisi tasarrufu	5628,4 kWh
Yıllık ekonomik tasarruf	1603,30 TL
Yıllık bakım tasarrufu	255,50 TL
Elektrik yıllık fiyat artışı	0,081
Dolar yıllık fiyat artışı	0,068
İndirgeme oranı	0,08

Çizelge 5.8 : Senaryo 2 - yabancı sistem kullanımında geri ödeme süresi hesabı.

Yıllar	İlk Yatırım [TL]	Net Gelir [TL]	İndirgenmiş Gelir [TL]	Geri Ödeme [TL]
1	-11515,00	1621,58	1621,58	-9893,42
2		1735,47	1606,91	-8286,51
3		1877,18	1609,38	-6677,13
4		2030,36	1611,76	-5065,37
5		2195,92	1614,07	-3451,30
6	-2160,00	2374,88	1616,30	-3995,00
7		2568,31	1618,47	-2376,53
8		2777,38	1620,57	-755,96
9		3003,37	1622,63	866,67
10		3247,63	1624,62	2491,29

Çizelge 5.9 : Senaryo 2 - yerli sistem kullanımında geri ödeme süresi hesabı.

Yıllar	İlk Yatırım [TL]	Net Gelir [TL]	İndirgenmiş Gelir [TL]	Geri Ödeme [TL]
1	-11515,00	1661,16	1661,16	-9853,84
2		1777,73	1646,05	-8207,79
3		1922,32	1648,08	-6559,71
4		2078,57	1650,03	-4909,68
5		2247,41	1651,91	-3257,77
6	-2160,00	2429,87	1653,73	-3764,04
7		2627,04	1655,48	-2108,56
8		2840,11	1657,17	-451,39
9		3070,36	1658,82	1207,43
10		3319,18	1660,42	2867,85

5.4 Senaryo 3

Üçüncü ve son senaryoda önerilen fotovoltaik panellerle caminin enerji tüketimine denk düşecek kadar üretim elde edilmekte, buna ek olarak üretilen fazla enerjinin de tümünün şebeyeke satıldığı varsayılmaktadır. Bu durumda cami tarafından tüketilen yıllık enerji her ay bazında ele alındığında yapılan üretim ile birebir karşılanmakta ve ayrıca iç aydınlatmanın dışında kullanılabilecek ekstra bir enerji üretimi sağlanmaktadır. Seçilen fotovoltaik sistem ile yıllık ortalama üretim 3090 kWh olarak belirlenmiştir. Bu durumda aydınlatma sisteminin yıllık tüketimi olan 1533 kWh'lık değer neredeyse iki katı enerji üretilmiştir. Çizelge 5.10'da PV sistem için maliyet değerleri, Çizelge 5.11'de ise sistem arz ve talebi üzerinden şebeyeke satılan enerji miktarı ve buna denk düşen fiyatlar verilmektedir. Şebekeden normal şartlarda

alınacak enerjinin toplam fiyatı 315 TL’dir. Üretilen enerjinin kullanılması ve şebekeye satılmasıyla bu masraf sıfırlanmakta ve Çizelge 5.10’da görüldüğü gibi ilk yıl içinde sadece enerji teşviği ile 441 TL kazanç, yerli malzemelerin kullanımıyla gelen ek teşvik ile de 663 TL kazanç sağlanmaktadır.

Çizelge 5.10 : PV sistem için maliyet çizelgesi.

	Büyüklik
Sistem boyutu [Wp]	2080
Üretilen enerji [kWh/yıl]	3090,40
Modül sayısı	9
Modül birim fiyatı [TL]	825
PV modül toplam fiyatı [TL]	7425
Şebeke bağlantılı evirici fiyatı [TL]	3030
Kurulum, kablolama, vs. [TL]	3000
Net yatırım [TL]	13455
Bakım masrafları [TL/yıl]	210
Ömür süresi [yıl]	25
25 yıl için bakım + evirici masrafı [TL]	12825
25 yıllık toplam masraf [TL]	26780

Çizelge 5.11 : 3. senaryo için yıllık üretim kazançları.

	Talep [kWh]	Arz [kWh]	Fark [kWh]	Kazanç I [TL]	Kazanç II [TL]
Ocak	130,2	164,40	34,20	9,68	14,55
Şubat	117,6	164,80	47,20	13,35	20,08
Mart	130,2	250,50	120,30	34,03	51,18
Nisan	126	289,30	163,30	46,20	69,47
Mayıs	130,2	370,80	240,60	68,07	102,36
Haziran	126	374,90	248,90	70,41	105,89
Temmuz	130,2	377,50	247,30	69,96	105,21
Ağustos	130,2	364,80	234,60	66,37	99,80
Eylül	126	246,30	120,30	34,03	51,18
Ekim	130,2	210,80	80,60	22,80	34,29
Kasım	126	140,40	14,40	4,07	6,13
Aralık	130,2	135,90	5,70	1,61	2,42
Yıllık	1533	3090,40	1557,40	440,60	662,55

Çizelge 5.12’de sistemin geri ödemesi hesapları için kullanılan büyüklükler, Çizelge 5.3’te sistemin alt senaryo 1’e göre, Çizelge 5.14’te ise alt senaryo 2’ye göre 10 yıllık geri ödeme hesapları verilmektedir. Buna göre, fotovoltaik sistemin yabancı üretilerden seçilmesi durumunda geri ödeme süresi 8 yıl 6 ay sürecektir. Fotovoltaik

sistemin yerli üreticilerden seçilmesi durumunda ise geri ödeme süresi 7 yıl 3 aydır. Senaryo 3'teki PV sisteminin Senaryo 2'den daha büyük olması, yatırım masraflarını yükseltirken, şebekeye satılan enerji üzerinden elde edilen kazanç sayesinde sistemin geri ödemesi daha hızlı gerçekleşmiştir. Sonuç olarak Senaryo 3'te 10 yıllık süre sonunda Referans Senaryo'ya göre yabancı sistemle 3092,33 TL, yerli sistemle de 6836,33 TL tasarruf edilmiştir.

Çizelge 5.12 : Senaryo 3 – kullanılan büyüklükler.

Bileşen	Miktar
Yatırım Tutarı	15.615,00 TL
Yıllık bakım masrafı	301,83 TL
Yıllık elektrik enerjisi tasarrufu	5840 kWh
Yıllık ekonomik tasarruf	1663,58 TL
Yıllık bakım tasarrufu	255,50 TL
Elektrik yıllık fiyat artışı	0,081
Dolar yıllık fiyat artışı	0,068
İndirgeme oranı	0,08

Çizelge 5.13 : Senaryo 3 - yabancı sistem kullanımında geri ödeme süresi hesabı.

Yıllar	İlk Yatırım [TL]	Net Gelir [TL]	İndirgenmiş Gelir [TL]	Geri Ödeme [TL]
1	-15615,00	2360,08	2360,08	-13254,92
2		2223,00	2058,33	-11196,59
3		2400,69	2058,20	-9138,39
4		2592,36	2057,90	-7080,49
5		2799,11	2057,43	-5023,06
6	-2160,00	3022,13	2056,81	-5126,25
7		3262,71	2056,06	-3070,20
8		3522,23	2055,19	-1015,01
9		3802,20	2054,21	1039,20
10		4104,22	2053,13	3092,33

Çizelge 5.14 : Senaryo 3 - yerli sistem kullanımında geri ödeme süresi hesabı.

Yıllar	İlk Yatırım [TL]	Net Gelir [TL]	İndirgenmiş Gelir [TL]	Geri Ödeme [TL]
1	-15615,00	2582,08	2582,08	-13032,92
2		2460,09	2460,09	-10572,83
3		2653,90	2457,32	-8115,51
4		2862,79	2454,38	-5661,13
5		3087,93	2451,30	-3209,83
6	-2160,00	3330,59	2448,08	-2921,75
7		3592,14	2444,75	-477,00
8		3874,07	2441,32	1964,33
9		4177,96	2437,80	4402,13
10		4505,54	2434,20	6836,33

Çizelge 5.15'te tüm senaryoların yıllık bazda ekonomik analizi bir arada verilmektedir. Burada referans senaryodaki akkor telli lambalı sistem Cami içinde yerleşik bulunduğundan yatırım masrafı 0 TL kabul edilmiştir. Çizelgeden görülebileceği gibi önerilen LEDli sistem kendi masrafını 1,50 yıl içinde çıkartırken, 10 yıllık süreçte 43070 kWh enerji tasarrufu ve 9230,68 TL maddi tasarruf sağlanmaktadır. LEDli sisteme ek olarak önerilen küçük ve büyük boyutlu fotovoltaik sistemlerle ise enerji tasarrufu 10 yılda sırasıyla 56284 ve 58400 kWh seviyelerine çıkmaktadır.

Çizelge 5.15 : Tüm senaryoların karşılaştırılması.

	Tüketim [kWh]	Üretim [kWh]	Yatırım masrafı [TL]	Geri ödeme süresi [yıl]	10 yıllık tasarruf [TL]	10 yıllık enerji tasarrufu [kWh]
Ref. Senaryo	5840	0	0	0	0	0
Senaryo 1	1533	0	2160	1,50	9230,68	43070
Senaryo 2.1	1533	1596	11515	8,42	2491,29	56284
Senaryo 2.2	1533	1596	11515	8,25	2867,85	56284
Senaryo 3.1	1533	3090	15615	8,50	3092,33	58400
Senaryo 3.2	1533	3090	15615	7,25	6836,33	58400

6. SONUÇLAR

Fosil enerji kaynaklarının giderek azaldığı ve enerji talebinin sürekli arttığı günümüz dünyasında enerji tasarrufu sağlanırken kullanıcının konfor koşullarından da ödün vermeyen sürdürülebilir sistemlerin tasarımı büyük önem teşkil etmektedir. Aydınlatmada geleneksel teknolojilerden modern teknolojilere geçiş, doğru seçim ve tasarımlarla enerji tasarrufu ve kullanıcı konforu açısından büyük getiriler sağlamaktadır. Bu teknolojilerin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesi enerji tasarrufunu arttırarak, sürdürülebilirlik açısından büyük gelişmeler elde edilmesini sağlayacaktır.

Köklü geçmişle, pek çok tarihi camiye ev sahipliği yapan Türkiye’de, cami dış aydınlatmaları için gösterilen özel hassasiyet, iç aydınlatma için çoğu zaman gösterilmemektedir. Bunun sonucunda cami kullanıcılarının aydınlatma ihtiyaçları karşılanmazken, tarihi camilerdeki turistik ziyaretler sırasında da hem görsel, hem estetik anlamda problemlerle karşılaşmaktadır. Buna ek olarak cami iç aydınlatmasında yaygın olarak tercih edilen eski teknoloji aydınlatma elemanları yüksek enerji tüketimleriyle, hem enerji tasarrufu hem ekonomik tasarruf konusunda olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. Sonuç olarak tarihi camiler, iç aydınlatmaları standartlarla belirlenen fotometrik koşulları sağlamayan, yüksek enerji tüketimleriyle de ülke ekonomisini olumsuz yönde etkileyen yapılar halini almışlardır.

Bu doktora çalışmasında, aydınlatma alanındaki en modern teknoloji olan LEDler kullanılarak, tarihi camilerin iç aydınlatmasında gerekli aydınlık düzeyleri ve konfor koşullarından feragat etmeden enerji tasarrufu sağlayacak ve tarihi yapıya sadık kalacak bir aydınlatma elemanının tasarlanması hedeflenmiştir. Buna ek olarak tarihi cami iç aydınlatmasının enerji tüketiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisiyle karşılanabilmesi için gerekli fotovoltaiik sistemin belirlenmesi ve bu sayede kendi enerjisini üretebilen ve aydınlatma konusunda yeşil-enerji özelliklerine sahip bir tarihi cami kavramı oluşturulması amaçlanmıştır. Doktora tez çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için İstanbul tarihi camilerinden Mimar Sinan’ın en küçük eseri olmasıyla ünlenmiş Şemsi Ahmet Paşa Camii seçilmiş ve Cami içinde çeşitli

ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Cami daha sonra Dialux aydınlatma programıyla modellenerek iç aydınlatma koşulları bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Tarihi cami aydınlatması için gerekli koşullar göz önünde bulundurularak doktora tez çalışmasının odağını oluşturan LEDli modern cami kandilinin tasarımı gerçekleştirilmiş, ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Dialux modeline yerleştirilerek Cami içinde elde edilen fotometrik sonuçlar incelenmiştir. Aydınlatma tasarımının tamamlanmasıyla, talep edilen güç miktarı elde edilmiş ve bu güç miktarına göre de Cami avlusuna yerleştirilebilecek bir fotovoltaiik sistem tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin fotometrik koşulları ve buna bağlı olarak konfor koşulları iyileştirilirken, iç aydınlatma yükü azaltılmış ve bu yükü karşılayacak fotovoltaiik sistemin tasarımı ile Cami'nin iç aydınlatması için gerekli enerjiyi kendisinin üretebileceği bir model sunulmuştur.

Çalışmada elde edilen birinci kazanım, tasarlanan modern kandil ile Cami içindeki fotometrik değerlerin standartlarla belirlenen aydınlatma koşullarına yükseltilmesi olmuştur. Mevcut halde akkor telli lambalı sistemin ve gelecekte bu sistemin yerini alacak olan kompakt floresan veya LEDli retrofit sistemlerin hepsinin ortak zayıf noktası, duylu sistemler olmalarıdır. Tasarlanan LEDli armatürle duy ortadan kaldırılmış, sürücü devre kandillik üzerine saklanarak ışık kaynağının tüm uzaya kesintisiz ışık göndermesi sağlanmıştır. Aynı zamanda toplam ışık akısı değeri belirgin şekilde arttırılarak cami zemininde standartlarla belirlenen aydınlık düzeyi değerleri elde edilmiş, cami kubbesi ana hedeflerinden olan ışığı yansıtmak konusunda etkin olarak kullanılmıştır. Işık akısı ve aydınlık düzeyi değerleri yükseltilirken, kullanıcı konforundan feragat etmemek için kamaşma hesapları gerçekleştirilmiş, Cami içinde literatürdeki mevcut hesap yöntemlerine göre konfor koşullarını sağlayan bir aydınlatma elde edilmiştir. Tasarımın tümünde tarihi yapıya sadık kalmaya özen gösterilmiş ve Cami'ye zarar verebilecek herhangi bir bileşenden kaçınılmıştır. Bunlara ek olarak tasarlanan sistemin elektriksel altyapıda önemli bir değişiklik gerektirmemesi ve montaj kolaylığı sistemin kullanımını teşvik edici yöndedir.

Çalışmanın en önemli kazanımları kuşkusuz enerji ve ekonomi yönünde elde edilen tasarruflardır. Tasarlanan sistem fotometrik değerleri gerekli seviyelere yükseltirken, armatür başına 10,5 W'lık enerji tüketimiyle, mevcut 40 W'lık sisteme göre % 74'lük enerji tasarrufu sağlamaktadır. Tasarrufun yanı sıra tasarlanan sistemin ömür

süresi, mevcut akkor telli sisteme göre çok daha uzun olduğu için değişim ve bakım masrafları ciddi şekilde azalmaktadır. Buna ek olarak Cami'ye kurulması hedeflenen fotovoltaiik sistem devreye girdiğinde, enerji tüketimine denk düşecek bir üretim sağlanarak Cami'nin mevcut durumdaki yıllık 5840 kWh'lik tüketimi ortadan kaldırılmakta ve Cami iç aydınlatma elektrik yükünü kendi ürettiği enerjiyle karşılayabilen bir hal almaktadır. Önerilen ikinci fotovoltaiik sistemle ise daha yüksek miktarda enerji üretilerek Cami'nin iç aydınlatma dışındaki enerji ihtiyaçlarının önemli bir kısmını da karşılamak mümkün olmaktadır. Yapılan hesaplamalar LEDli sistemin enerji tasarrufu sayesinde kendi masrafını 1,5 yıl içerisinde çıkardığını, LEDli sisteme fotovoltaiik sistemin de eklenmesiyle farklı senaryolar için geri ödeme sürelerinin 7,25 yıl ile 8,50 yıl arasında değiştiğini göstermektedir. 10 yıllık süre içinde önerilen tüm sistemler ilk yatırım masraflarını çıkarmış ve ek kazanımların elde edilmesini sağlamışlardır.

Çalışmanın bir diğer önemli kazanımı günümüzün en modern aydınlatma teknolojisi olan LEDlerin ve yenilenebilir enerji kaynakları içinde en çok gelecek vaadeden teknolojilerden fotovoltaiiklerin teşvik edilmesidir. Günümüzde LEDlerin genel aydınlatma amaçlı kullanımı gittikçe artmaktadır. Fakat armatür formları geleneksel aydınlatma elemanları ile kullanılan formlara benzer tasarlanarak masraflar en düşük seviyede tutulmaya çalışılmakta ve bu sebeple LEDlerin fotometrik üstünlüklerinden yeterli olarak yararlanılamamaktadır. Akkor telli lambanın formuna sadık kalarak tasarlanan bir LED retrofit enerji tasarrufu açısından büyük bir avantaj sağlamakla beraber, fotometri ve tasarım anlamında bir yenilik getirmemektedir. Bu çalışmada tasarlanan sistem ile tarihi yapıya sadık kalınmış ve aynı zamanda fotometrik ihtiyaçların karşılanabilmesi için tüm uzaya ışık yayabilecek bir armatür oluşturulmuştur. LEDlerin sadece enerji tasarrufu için değil, tüm fotometrik ihtiyaçları karşılamak üzere de kullanımını teşvik etmek bu noktada önem kazanmaktadır. Buna ek olarak literatürdeki araştırmalar, Türkiye coğrafyasında oldukça avantajlı olan fotovoltaiik panellerin kullanımının teşvik edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Tarihi bir değeri olmayan bir Cami için fotovoltaiik paneller istenilen konumlara yerleştirilebilirken, tarihi yapılarda durum farklı bir boyut almaktadır. Tez çalışmasında önerildiği gibi yapının tarihi özelliklerine ve estetik görünümüne zarar vermeyecek şekilde cami avlusu veya cami etrafındaki boş alanların kullanımı ile hem yüksek miktarda enerji tasarrufu elde etmek, hem de

Cami'yi ibadet ve turistik amaçlarla ziyaret eden kişilerin bu konudaki duyarlılığını arttırmak ve tüm tarihi yapılar için bir örnek teşkil etmek mümkün olacaktır.

Kazanımların yanı sıra doktora tez çalışmasında karşılaşılan zorluklara dikkat çekmek de elde edilen sonuçların önemli bir parçasıdır. LED ışık kaynakları ve LEDli sistemlerin standardizasyonu giderek gelişmekte olan fakat tam olarak olgunlaşmamış bir konudur. Teknolojinin geleneksel aydınlatma teknolojilerine göre oldukça yeni olması ve sürekli bir gelişim ve değişim içinde bulunması ciddi bilgi eksikliklerine yol açmaktadır. Aydınlatma konusunda geleneksel hesap yöntemlerinin LEDli sistemlere uygulanabilirliği üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Karşılaşılan en büyük sorunlardan biri LEDli sistemlerin oluşturduğu kamaşmaya dair literatürde yeterli çalışma bulunmamasıdır. Tez sürecinde yapılan araştırmalar mevcut değerlendirme yöntemlerinin LEDli sistemler için uygun olmadığını göstermiştir. Gelecek çalışmalar için bu konu üzerine yoğunlaşmak büyük önem teşkil etmektedir.

Bilimsel araştırmalardaki eksikliklere ek olarak, piyasada yer alan LEDli kaynakların katalog bilgilerindeki eksiklikler de büyük problemlere yol açmaktadır. Bu eksiklikler sadece LEDler için değil, LEDli armatür üretiminde kullanılan optik, ısı ve elektriksel pek çok eleman için geçerlidir. Tasarım sürecinde kullanılan çoğu malzemenin katalog bilgilerine erişmek mümkün olmamıştır. Burada vurgulanması gereken nokta, çoğu üreticinin, kullandıkları malzemelerin özelliklerine hakim olmadıkları halde malzeme seçimi yapıp sistemlerini oluşturmalarıdır. Bu durum verimlilik, sürdürülebilirlik ve güvenilirlik açısından olumsuzluklar doğurmaktadır. Bu noktada piyasadaki ürünlerin standartlar ile belirlenmiş kanun ve yönetmeliklere tabi tutulması, belirli testlerden geçirilmesi ve tasarımcı ve üreticilerin bu konuda hassasiyet göstermesi önem kazanmaktadır. Bu konu standardizasyonun önemini tekrar vurgulamaktadır.

Özetlemek gerekirse, bu doktora tez çalışmasında tasarlanan, seçilen ve önerilen modern teknolojilerle tarihi cami aydınlatma ve enerji tüketimine dair sistemlerin ömür süreleri ve sürdürülebilirlikleri yükseltilmiş, cami içi fotometrik değerler iyileştirilmiş, önemli miktarlarda enerji tasarrufu ve buna bağlı olarak ekonomik kazanımlar elde edilmiş ve tarihi yapılarda modern teknolojilerin kullanımı teşvik edilmiştir. Önerilen enerji etkin sistemlerin sadece tarihi camilerde değil, tüm tarihi ibadethaneler ve ek olarak yeni inşa edilen camilerde de kullanılmasıyla

oluşturulabilecek, modern teknolojileri ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan “yeşil” kavramlı cami modeli tüm ibadethanelere yayıldığı takdirde Türkiye enerji tüketiminde ciddi miktarda bir azalma elde edilecek ve bu şekilde hem ÷lke ekonomisine hem de takip edilen uluslararası enerji politikalarına katkıda bulunulmuş olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Diyanet İşleri Başkanlığı** (2012). İstatistiksel Tablolar. Alındığı tarih: 31.12.2013, adres: <http://www.diyamet.gov.tr/tr/kategori/istatistikler/136>
- [2] **Radikal Gazetesi** (2008). Türkiye'de 79 bin 96 cami ayda 42 milyon YTL'lik elektrik tüketiyor, Hürriyet Gazetecilik ve Matbaacılık A.Ş.: Türkiye.
- [3] **Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi** (2004). Elektrik Tarifeleri. 2004 Yılı Boğaziçi EDAŞ Sistem Kullanım Bedeli. Alındığı tarih: 14.04.2014, adres: <http://www.tedas.gov.tr/BilgiBankasi/Sayfalar/ElektrikTarifeleri.aspx>
- [4] **Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü** (t.y.). Hirfanlı Barajı. Alındığı tarih: 14.04.2014, adres: <http://www2.dsi.gov.tr/baraj/detay.cfm?BarajID=9>
- [5] **Ünver, R. ve Enarun, D.** (1999). A Comparative Investigation of Lighting of Mosques and Churches in Istanbul. *CIE 24th Session Proceedings*, Sf. 288-292, 24-30 Haziran, Varşova, Polonya.
- [6] **United States Department of Energy** (2009). Lifetime of White LEDs, Building Technologies Program. Alındığı tarih: 12.11.2012, adres: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds.pdf
- [7] **ISO/CIE** (2002). *Lighting of Indoor Work Places*. ISO 8995:2002(E) CIE S 008/E-2001, İsviçre.
- [8] **Ünver, R. ve Enarun, D.** (1998). Lighting of Mosques, a Historical Overview. *CIBSE National Conference Proceedings*, Sf. 3-11, 5-8 Nisan, Lancaster, İngiltere.
- [9] **Direk, Y.S. ve Oğuz, G.P.** (2005). Diyarbakır Ulu Cami, Şafiiler Bölümünün Doğal Aydınlatma Açısından İrdelenmesi. *EMO III. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu*, Sf. 227-231, 23-25 Kasım, Ankara.
- [10] **Bolak, O.** (1967). *Camilerin Aydınlatılması Üzerine Bir Araştırma* (123. baskı). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları.
- [11] **Wikipedia** (t.y.). *Süleymaniye Camii*. Alındığı tarih: 22.05.2010, adres: http://tr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCleymaniye_Camii.
- [12] **Rea, M.S (Editör)** (2000). *The Iesna Lighting Handbook: Reference & Application* (9. Baskı). Illuminating Engineering Society of North America, New York, ABD.
- [13] **Duysak, N.** (2000). *20. Yüzyıl Türkiye'sinde Cami Tasarımı ve Geleneksel Cami*, (yüksek lisans tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü. İTÜ: İstanbul.

- [14] **Halifeoğlu, F. M., Dalkılıç, N. ve Murt, Ö.** (2005). Tarihi Diyarbakır Camilerinde Aydınlatma. *III. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu*, Sf. 219-226, 23-25 Kasım, Ankara.
- [15] **Oktaç, D.** (1992). *Anadolu Türk Mimarisinde Aydınlatma Detayları ve Aydınlatma Araçları*, (yüksek lisans tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü. Selçuk Üniversitesi: Konya.
- [16] **Taştemür, E.** (t.y.). *Antik Camlar*. Alındığı tarih: 10.10.2009, adres: <http://www.antikcamlar.net/pages/kan2.htm>
- [17] **Foster, B.** (t.y.). *Why are oil lamps used in religion?* Alındığı tarih: 10.10.2009, adres: http://www.ehow.com/about_5373547_oil-lamps-used-religion.html
- [18] **Arseven, C. E.** (1983). *Sanat Ansiklopedisi* (5. Baskı). Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı.
- [19] **Kuran, A.** (1986). *Mimar Sinan*. İstanbul: Hürriyet Vakfı Yayınları.
- [20] **Özkaya, M.** (2000). *Aydınlatma Tekniği* (8. Baskı). İstanbul: Birsan Yayınevi.
- [21] **Navigant Consulting Inc.** (2012). *Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications*. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Program, Washington, DC.
- [22] **US Department of Energy** (t.y.). *LED Basics*. Solid State Lighting. Alındığı tarih: 23.08.2013, adres: http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/sslbasics_ledbasics.html#are_costeffective
- [23] **Optimat, NPL, InGaN Research, CIP ve TWI** (2011). *Photonics Technologies and Markets for a Low Carbon Economy, Annex 2: Energy Efficient Lighting and Displays Technologies and Applications*. European Commission.
- [24] **Philips Lighting** (2008). *Energy Efficient Lighting - A summary of "Green Switch" facts* - Koninklijke Philips Electronics N.V.
- [25] **Held, G.** (2009). *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- [26] **Schematic diagrams of Light Emitting Diodes (LED)** (2011). *Wikipedia*. Alındığı tarih: 22.04.2011, adres: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:PnJunction-LED-E.svg>
- [27] **European Commission** (2011). *Energy 2020: A Strategy for competitive, sustainable and secure energy*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [28] **Martin, S.** (2012). *Remote-phosphor technology can deliver a more uniform and attractive light output from LED lamps*. LEDs Magazine. Alındığı tarih: 01.10.2012, adres: <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-9/issue-9/features/remote-phosphor-technology-can-deliver-a-more-uniform-and-attractive-light-output-from-led-lamps-mag.html>

- [29] **United States Department of Energy** (2012). *LED Color Characteristics*, Building Technologies Program. Alındığı tarih: 01.03.2012, adres: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led-color-characteristics-factsheet.pdf>
- [30] **United States Department of Energy** (2013). *Solid-State Lighting Research and Development Multi-Year Program Plan*. Alındığı tarih: 12.05.2013, adres: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp_2013_web.pdf
- [31] **United States Department of Energy** (2013). *Energy Efficiency of LEDs*. Solid State Lighting Technology Fact Sheet, Building Technologies Program. Alındığı tarih: 05.05.2013, adres: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led_energy_efficiency.pdf
- [32] **United States Department of Energy** (2013). *Lifetime and Reliability*. Solid State Lighting Technology Fact Sheet, Building Technologies Program. Alındığı tarih: 05.09.2013, adres: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/life-reliability_fact-sheet.pdf
- [33] **CIE** (1987). *International Lighting Vocabulary*. CIE 17.4:1987, Viyana, Avusturya: International Commission on Illumination.
- [34] **Ohno, Y.** (2005). Spectral design considerations for white LED color rendering. *Optical Engineering*. **44(11)**: 111302-111302.
- [35] **CIE** (1974). *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources* (2. Baskı). CIE 13.2: 1974, Paris, Fransa: International Commission on Illumination.
- [36] **Narendran, N. ve Deng, L.** (2002). Color rendering properties of LED light sources. *SPIE Solid State Lighting II Proceedings*, 4776: Sf. 61-67, 7 Temmuz, Seattle, WA, ABD.
- [37] **Davis, W. ve Ohno, Y.** (2010). Color quality scale. *Optical Engineering*. **49(3)**: Sf. 033602-033602-16.
- [38] **Türkoğlu, A. K. ve Çalkın, Y.** Siyahcisim Renk Sıcaklığı. *V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu Bildiriler Kitapçığı*, Sf. 44-47, 7-8 Mayıs, İzmir.
- [39] **Çengel, Y. A.** (1997). *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer* (International Edition). New York: McGraw-Hill.
- [40] **Incorpera, F. P. ve DeWitt, D. P.** (2001). *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*. İstanbul: Literatür.
- [41] **Fengze, H., Daoguo, Y. ve Guoqi, Z.** (2011). Thermal analysis of LED lighting system with different fin heat sinks. *Journal of Semiconductors*. **32(1)**: 014006.
- [42] **United States Department of Energy** (2009). *Thermal Management of White LEDs*. Energy Efficiency and Renewable Energy; Alındığı tarih: 06.06.2009, adres:

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_mgt_white_leds.pdf

- [43] **Cree** (t.y.). *Cree XLamp XP-E High-Efficiency White LEDs*. Cree, Inc.: Durham, NC.
- [44] **Cree, Inc.** (2014). Cree LED Components IES LM-80-2008 Testing Results.
- [45] **Cree** (t.y.). Optimizing PCB Thermal Performance for Cree XLamp LEDs. Alındığı tarih: 20.06.2012, adres: http://www.cree.com/products/pdf/XLamp_PCB_Thermal.pdf
- [46] **Everfine** (t.y.). GO-CS Centric Moving Mirror Goniophotometer. Alındığı tarih: 24.05.2013, adres: <http://www.everfine.net/productinfo.php?pid=70&clid=8>.
- [47] **Asmetec GmbH**, (t.y.). Goniophotometer LSG-2000. Alındığı tarih: 24.05.2013, adres: <http://www.asmetec-shop.de/Light-Metrology/Goniophotometer/LSG-1900-2553.html>
- [48] **IES** (2008). *LM-79-08 Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products*. New York, ABD: Illuminating Engineering Society of North America.
- [49] **CIE** (2005). *CIE 097:2005 Guide on the Maintenance of Indoor Electric Lighting Systems*. Viyana, Avusturya: International Commission on Illumination.
- [50] **Siteco** (t.y.). Lunis 2 Online Catalog. Alındığı tarih: 17.06.2011, adres: www.siteco.ru/uploads/tx_usersitecodownloads/Lunis_2_en.pdf
- [51] **Osterhaus, W. K. E.** (2005). Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar Energy*. **79(2)**: 140-158.
- [52] **CIE** (1995). *CIE 117-1995 Discomfort Glare in Interior Lighting*. Viyana, Avusturya: International Commission on Illumination.
- [53] **Knoop, M.** (2011). Lighting Quality Measures for Interior Lighting with Led Lighting Systems. *27th Session of the CIE*, Vol. 1, Sf. 219-225, 9-16 Temmuz, Sun City, Güney Afrika.
- [54] **CIE** (2002). *CIE 146:2002 & CIE 147:2002 CIE Collection on Glare: 2002*. Viyana, Avusturya: International Commission on Illumination.
- [55] **Paul, B.M. ve Einhorn, H.D.** (1999). Discomfort glare from small light sources. *Lighting Research and Technology*. **31(4)**: 139-144.
- [56] **Wienold, J. ve Christoffersen, J.** (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*. **38(7)**: 743-757.
- [57] **Luckiesh, M. ve Guth, S. K.** (1925). Glare and Visibility. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. **20(3)**: 221-252.
- [58] **Luckiesh, M. ve Guth, S. K.** (1949). Brightness in Visual Field at Borderline Between Comfort and Discomfort (BCD). *Journal of Illuminating Engineering Society*. **44**: 650-670.

- [59] **Kim, W., Han, H. ve Kim, J. T.** (2009). The position index of a glare source at the borderline between comfort and discomfort (BCD) in the whole visual field. *Building and Environment*. **44(5)**:1017-1023.
- [60] **Takahashi, H., Kobayashi, Y., Onda, S. ve Irikura, T.** (2007). Position Index for the Matrix Light Source. *Journal of Light & Visual Environment*. **31(3)**: 128-133.
- [61] **Waters, C.E., Mistrick, R.G. ve Bernecker, C.A.** (1995). Discomfort glare from sources of non-uniform luminance. *Journal of Illuminating Engineering Society*. **24(2)(73)**.
- [62] **Kumar, A. , Kumar, K., Kaushik, N., Sharma, S. ve Mishra, S.** (2010). Renewable energy in India: Current status and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **14(8)**: 2434-2442.
- [63] **Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K. ve Sharifi, A.** (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **13(8)**: 1800-1818.
- [64] **Wang, Q.ve Qiu, H.N.** (2009). Situation and outlook of solar energy utilization in Tibet, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **13(8)**: 2181-2186.
- [65] **Dinçer, F.** (2011). Overview of the photovoltaic technology status and perspective in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **15(8)**: 3768-3779.
- [66] **da Graça Carvalho, M.** (2012). EU energy and climate change strategy. *Energy*. **40(1)**: 19-22.
- [67] **European Commission** (2010). Energy Roadmap 2050. European Union: Brussels.
- [68] **Türkiye Cumhuriyeti** (2013). 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu. 30.03.2013 tarihli, 28603 sayılı Resmi Gazete.
- [69] **Türkiye Cumhuriyeti** (2013). 6512 sayılı 2014 Yılı Merkezi Yönetim Bütçe Kanunu. 27.12.2013 tarihli 28864 mükerrer sayılı Resmi Gazete.
- [70] **Türkiye Cumhuriyeti** (2013). 6512 sayılı 2014 Yılı Merkezi Yönetim Bütçe Kanunu - Diyanet İşleri Başkanlığı Bütçe Eki. 27.12.2013 tarihli 28864 mükerrer sayılı Resmi Gazete.
- [71] **Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü** (t.y.). Türkiye'de Güneş Enerjisi. Enerji Verimliliği - Yenilenebilir Enerji Kaynakları; Alındığı tarih: 2014 Haziran, adres: <http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/gunes/tgues.html>
- [72] **European Commission Joint Research Center Institute for Energy and Transport** (t.y.). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Alındığı tarih: 06.06.2013, adres: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>
- [73] **Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü** (t.y.). Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA). Alındığı tarih: 10.06.2014 adres: <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>

- [74] **Türkiye Cumhuriyeti** (2011). *6094 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun*. 08.01.2011 tarihli, 27809 sayılı Resmi Gazete.
- [75] **IEA** (2013). *Trends 2013 in Photovoltaic Applications*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme Report, IEA-PVPS T1-23:2013.
- [76] **Oktik, Ş.** (2001). *Güneş-Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri*. Ankara: Temiz Enerji Vakfı.
- [77] **United States Department of Energy** (2012). *Small Solar Electric Systems*. Alındığı tarih: 07.06.2014, adres: <http://energy.gov/energysaver/articles/small-solar-electric-systems>
- [78] **Susan, N. ve Geoff, S.** (2012). *Grid-connected Solar Electric Systems*. Abingdon, Oxon, New York: Earthscan.
- [79] **Australian Government** (t.y.). *Australia's guide to environmentally sustainable homes*. Alındığı tarih: 12.02.2014, adres: http://www.yourhome.gov.au/sites/default/files/files/images/E-PVsystems-SolarPVProductsConfigs-01_fmt.png
- [80] **Villalva, M. G. ve Gazoli, J. R.** (2009). Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Power Electronics Conference, COBEP'09*. 27.09-01.10, Brazil.
- [81] **Beşli, N., Aktacir, M. A., Yeşilata, B.** (2010). Fotovoltaik Panellerin Gerçek Arazi Koşullarında Test ve Karakterizasyonu. *Mühendis ve Makina*, **51(601)**.
- [82] **US Department of Energy** (2013). *Photovoltaic Cell Conversion Efficiency Basics*. Alındığı tarih: 2014 Haziran, adres: <http://energy.gov/eere/energybasics/articles/photovoltaic-cell-conversion-efficiency-basics>
- [83] **EMSD** (t.y.). I-V Curve of a PV Module. Alındığı tarih: 21.04.2014, adres: http://re.emsd.gov.hk/english/solar/solar_ph/solar_ph_to.html
- [84] **Marion, B., Adelstein, J., Boyle, K., Hayden, H., Hammond, B., Fletcher, T., Canada, B., Narang, D., Shugar, D., Wenger, H., Kimber, A., Mitchell, L., Rich, G., Townsend, T.** (2005). Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. *31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition Proceedings*, Lake Buena Vista, Florida.
- [85] **IEA** (1998). *Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines for Measurement, Data Exchange, and Analysis*. Geneva, Switzerland: International Energy Agency.
- [86] **Sharp** (t.y.). *Technology / Principle*. Alındığı tarih: 03.06.2014, adres: <http://www.sharp.eu/cps/rde/xchg/eu/hs.xsl/-/html/technikprinzip.htm>
- [87] **Prasad, D. ve Snow, M.** (2014). *Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics (BiPV)*. Routledge.

- [88] **United States Department of Energy** (2012). *Balance-of-System Equipment Required for Renewable Energy Systems*. 2 Temmuz 2012, adres: <http://energy.gov/energysaver/articles/balance-system-equipment-required-renewable-energy-systems>
- [89] **Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü** (t.y.). *Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) - İstanbul İli, Üsküdar İlçesi*. Alındığı tarih: 05.06.2014, adres: <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/pages/34.aspx>
- [90] **PVGIS** (t.y.). *PVGIS Radiation Databases*. Alındığı tarih: 05.06.2014, adres: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/databasehelp_en.html
- [91] **Deutscher Wetterdienst** (t.y.). *The Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF)*. Alındığı tarih: 05.06.2014, adres: <http://www.cmsaf.eu/bvbw/appmanager/bvbw/cmsafInternet>
- [92] **Rakovec, J., Zakšek, K., Brecl, K., Kastelec, D. ve Topič, M.** (2011). *Orientation and Tilt Dependence of a Fixed PV Array Energy Yield Based on Measurements of Solar Energy and Ground Albedo – a Case Study of Slovenia*. Kini, P.G. (Editör), Energy Management Systems.
- [93] **Duffie, J.A. ve Beckman, W.A.** (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: Wiley.
- [94] **Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y. ve Demirkol, S.** (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable Energy*, **29(8)**: 1265-1275.
- [95] **PVSyst** (t.y.). *Sources of Meteo data in hourly values*. PVSyst Photovoltaic Software. Alındığı tarih: 06.06.2014, adres: <http://www.pvsyst.com/en/publications/meteo-data-sources>
- [96] **PVSyst** (t.y.). *PVsyst 6 Help - Albedo Coefficient*. Alındığı tarih: 06.06.2014, adres: http://files.pvsyst.com/help/index.html?meteo_synthetique.htm
- [97] **PVsyst** (t.y.). *PVsyst 6 Help - Array Voltage Sizing*. Alındığı tarih: 06.06.2014, adres: <http://files.pvsyst.com/help/index.html?systemgrid?vocond.htm>
- [98] **Türkiye Cumhuriyeti** (2011). *Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik*. 21.07.2011 tarihli 28001 sayılı Resmi Gazete.
- [99] **Türkiye Cumhuriyeti** (2012). *Dağıtım Lisansı Sahibi Tüzel Kişiler ve Görevli Perakende Satış Şirketlerinin Tarife Uygulamalarına İlişkin Usul ve Esaslar*. 28.12.2012 tarihli 28511 sayılı Resmi Gazete.
- [100] **Sharp** (t.y.). *Costs and Income*. Alındığı tarih: 15.06.2014, adres: <http://www.sharp.eu/cps/rde/xchg/eu/hs.xsl/-/html/kosten-und-foerderung.htm>
- [101] **Beyoğlu Müftülüğü** (t.y.). Fındıklı Molla Çelebi Camii. Alındığı tarih: 08.09.2009, adres: <http://www.beyoglumuftulugu.gov.tr/index.php?modul=camii&id=58>
- [102] **Molla Çelebi Camii** (t.y.). *Vikipedi*. Alındığı tarih: 08.09.2009, adres: http://tr.wikipedia.org/wiki/Molla_%C3%87elebi_Camii
- [103] **Şehzade Cihangir Camii** (t.y.). *Vikipedi*. Alındığı tarih: 08.09.2009, adres: http://tr.wikipedia.org/wiki/Sehzade_Cihangir_Camii

EKLER

EK A: Tez Çalışması için İncelenen Camiler

EK B: Şemsi Ahmet Paşa Camii Mimari Plan ve Kesitleri

EK C: Sürücü Seçimi

EK D: LEDli Modül için Işık Dağılım Eğrileri

EK E: PVsyst Simülasyonunda kullanılan PV paneller ve eviricilerin karakteristik özellikleri

EK A: Tez Çalışması için İncelenen Camiler

Doktora tez çalışmasının ilk adımı olarak simülasyon çalışmasının gerçekleştirileceği tarihi cami seçilmiştir. Bu amaçla, İstanbul'da yer alan tarihi camilerle ilgili bir araştırma yapıp çeşitli tarihi camiler belirlenmiş ve bu camiler ziyaret edilerek, yapılacak çalışma için uygunlukları incelenmiştir. Cami avlusu ve çevresinin fotovoltaiik panellerin yerleştirilmesi için uygun olması ve cami içinde kandil tipi aydınlatma elemanlarının kullanılması konularına dikkat edilmiştir. Bu bilgiler kapsamında Zeynep Sultan, Molla Çelebi, Şehzade Cihangir ve Şemsi Ahmet Paşa Camiileri ziyaret edilmiştir.

EK A1: Zeynep Sultan Camii, Gülhane

Zeynep Sultan Camii, 1769 yılında III. Ahmet'in kızı Zeynep Asime Sultan tarafından Mehmed Tahir Ağa'ya yaptırılmış barok tarzındaki camidir. Kare şekilli, küçük ve basit bir binadır ve tek kubbelidir. İç alanın boyutları yaklaşık olarak 220 m², yüksekliği 18 m'dir. Yapma aydınlatma sistemi iç içe geçmiş demir daireler üzerine yerleştirilmiş ve ana kubbe, yarı kubbeler ve kemerlerin merkezlerinden sarkan 150 lambadan oluşmaktadır [8]. Caminin boyutları tez çalışması için uygun, kullanılan aydınlatma elemanları da istenen şekilde içine akkor telli lambalar yerleştirilmiş cam kandillerdir. Fakat caminin binalarla ve ağaçlarla çevrenmesi ve avlusunun oldukça küçük olması önerilen fotovoltaiik sistem için uygun olmadığından, Zeynep Sultan Camii'nin tez çalışması için uygun olmadığına karar verilmiştir.

EK A2: Molla Çelebi Camii, Fındıklı

Molla Çelebi Camii Fındıklı'da, Meclis-i Mebusan Caddesi'nin deniz tarafındadır. 1589 yılında inşa edilen cami, Mimar Sinan'ın altıgen şemalı camileri arasında yer alır. 2500 m² toplam arsa üzerine inşa edilen cami bahçe ve avlusu ile 440m² alan üzerine kuruludur [101, 102]. Cami, boyutları ve Fındıklı Parkı'nın hemen yanında olması nedeniyle önerilen fotovoltaiik sisteme uygun bir konumda olması nedeniyle incelemeye alınmıştır. Fakat camiye yapılan ziyarette, cami içinde kullanılan aydınlatma elemanlarının yağ kandili içermeyen avizeler olduğu görülmüş ve bu sebeple tez çalışması için uygun olmadığına karar verilmiştir.

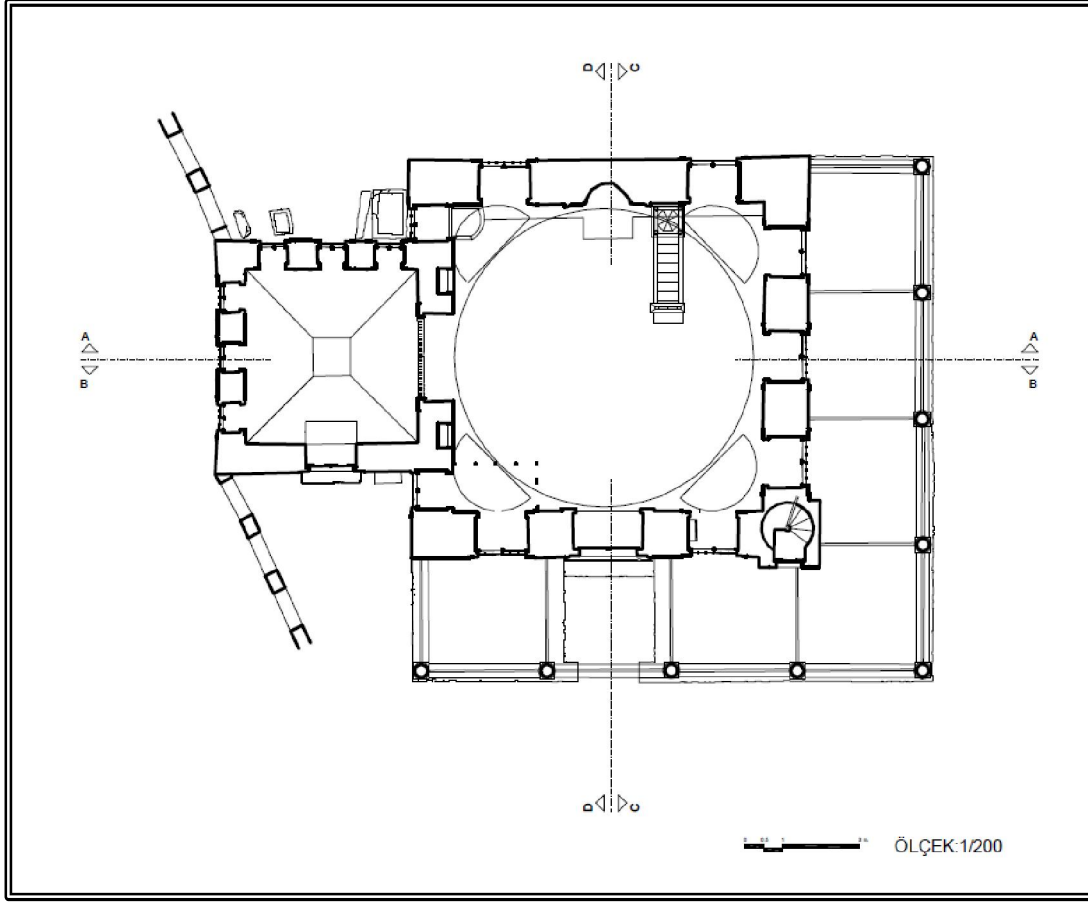
EK A3: Şehzade Cihangir Camii, Cihangir

Pürtelaş Mahallesi'nde, Cihangir yokuşundaki Cami ilk olarak 1559 yılında, Kanuni Sultan Süleyman tarafından Şehzade Cihangir için Mimar Sinan'a yaptırılmıştır. Yapılan ilk cami deprem ve yangınlarda defalarca yıkılıp yeniden yapılmış, en son 1889'da II. Abdülhamid tarafından yenilenmiştir. 2000 m² toplam arsa üzeri inşa edilen caminin alanı 500 m²'dir [103]. Şehzade Cihangir Camii, iki cephesinde yer alan sokakların ve avlusunun önerilen fotovoltaiik sistem için uygun olması ve cami içindeki ışık kaynaklarının yağ kandillerine yerleştirilmiş olması sebebiyle çalışma için uygun bulunmuştur. Bununla beraber, kullanılan demir elemanlar oldukça büyük ve bu sebeple de kullanılan kandil sayısı fazladır. Aşağıda bilgileri verilmiş Şemsi Ahmet Paşa Camii'nin boyutlarının küçüklüğü ve kullanılan kandil sayısının daha düşük olması sebepleriyle, Cihangir Camii tez çalışmasında yedek cami olarak seçilmiştir.

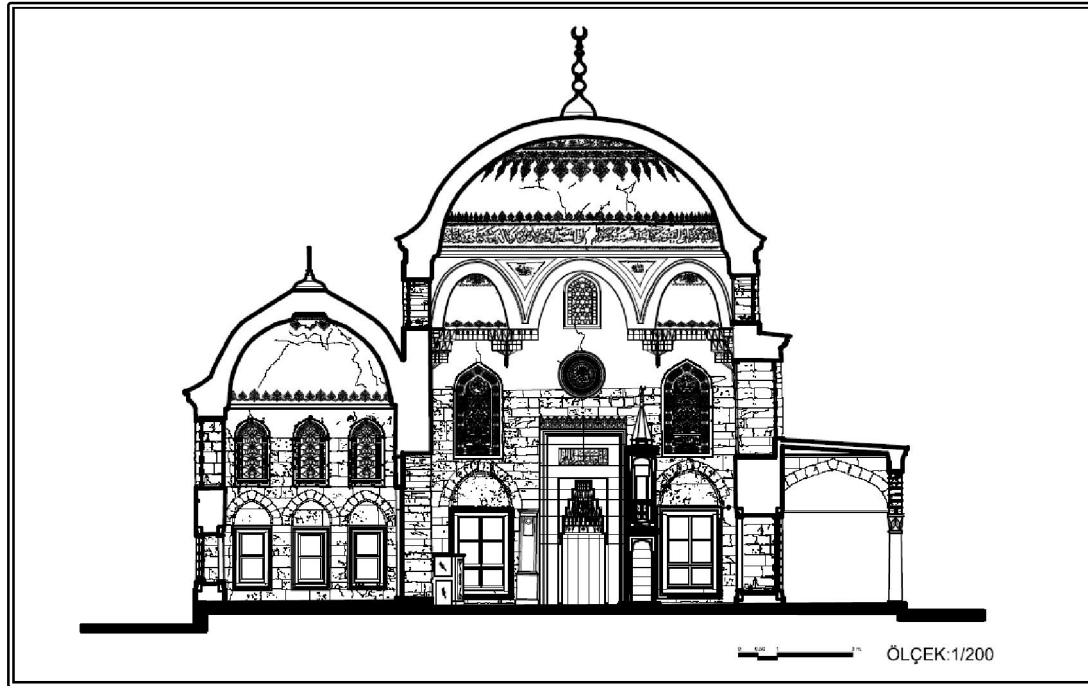
EK A4: Şemsi Ahmet Paşa Camii, Üsküdar

Üsküdar sahil şeridinde yer alan Şemsi Ahmet Paşa Camii, Mimar Sinan'ın en küçük eseri olma özelliğini taşımaktadır. Cami, kompakt boyutları, kullanılan aydınlatma elemanlarının yağ kandilleri içine yerleştirilmiş olması ve deniz kenarında önerilen fotovoltaiik sistem için çok uygun bir konumda bulunmasıyla incelenen camiler arasında tez çalışması için en uygun koşullara sahip olan camidir ve bu sebeple tezin simülasyon kısmının bu cami içinde gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

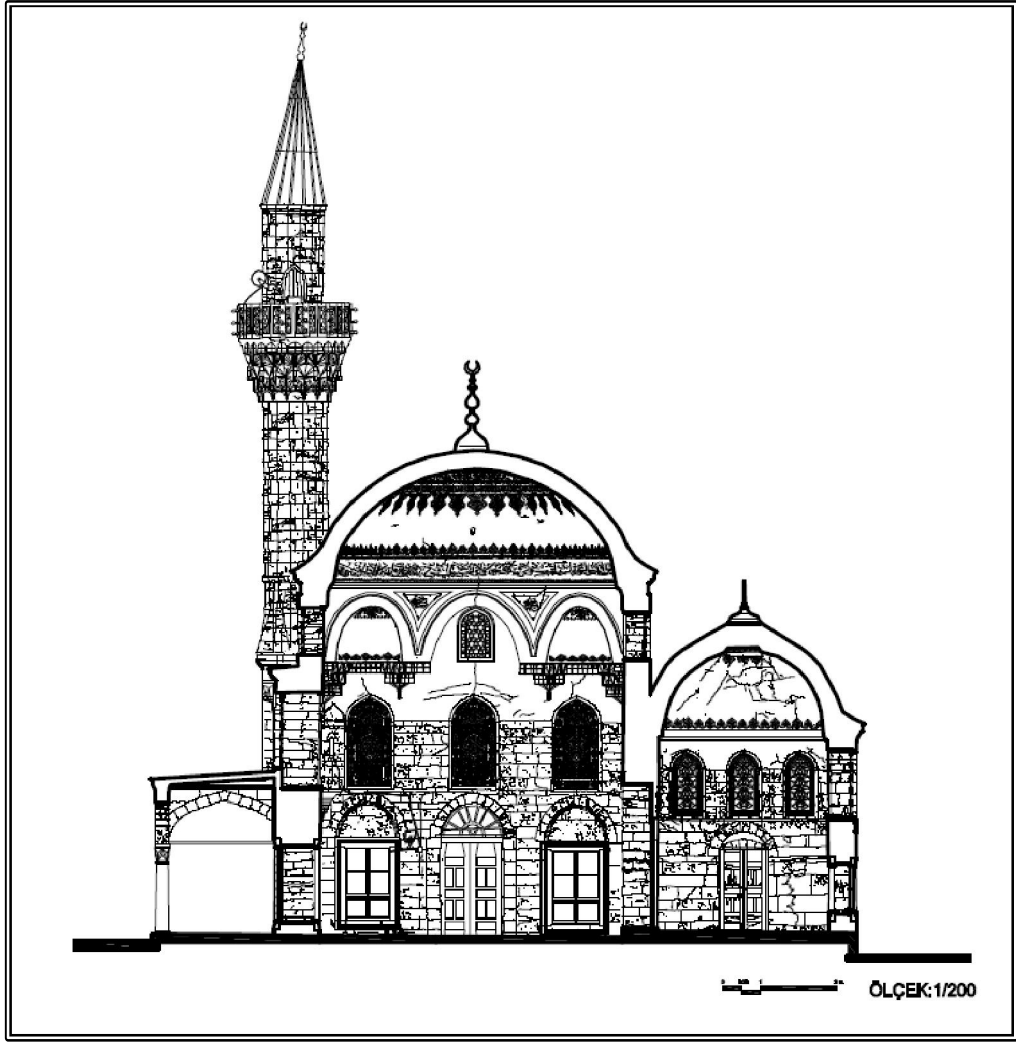
EK B: Şemsi Ahmet Paşa Camii Mimari Plan ve Kesitleri



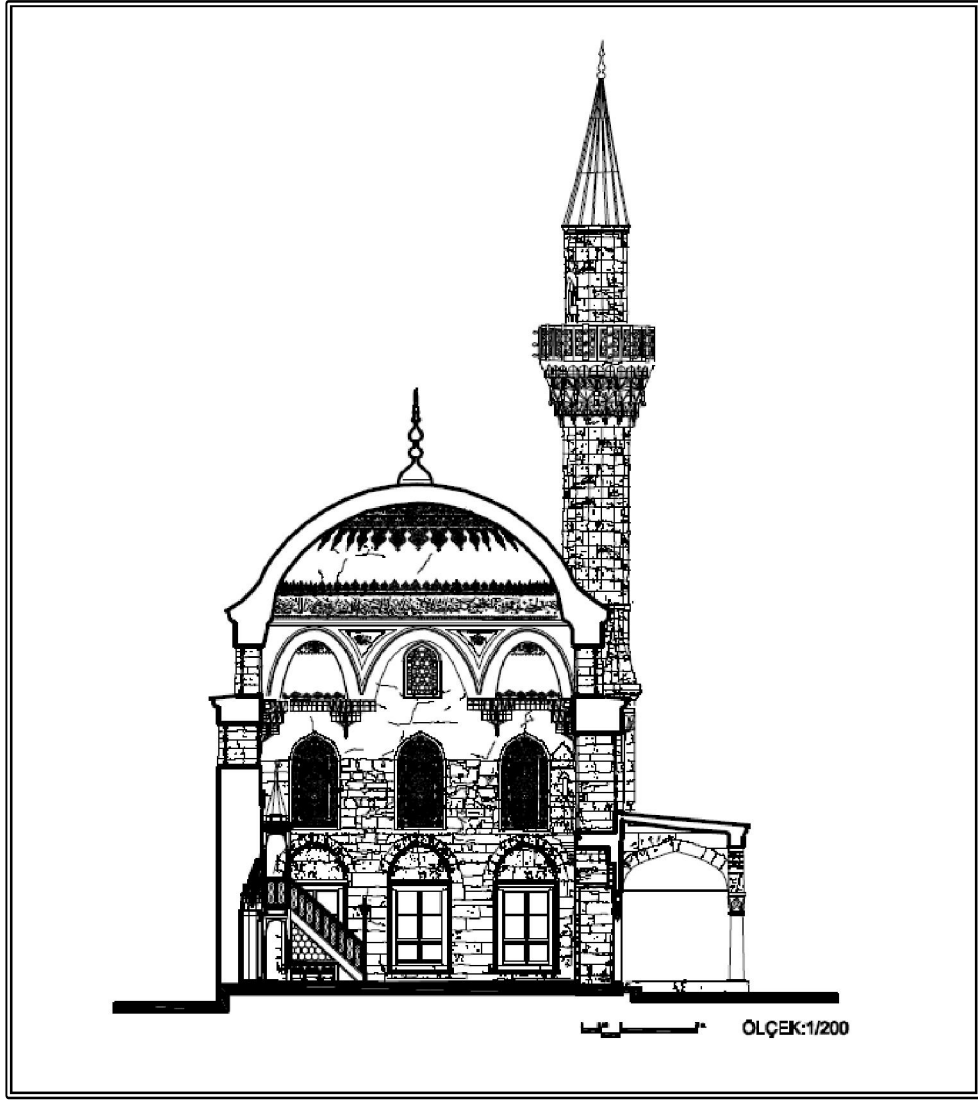
Şekil B.1 : Şemsi Ahmet Paşa Camii zemin planı.



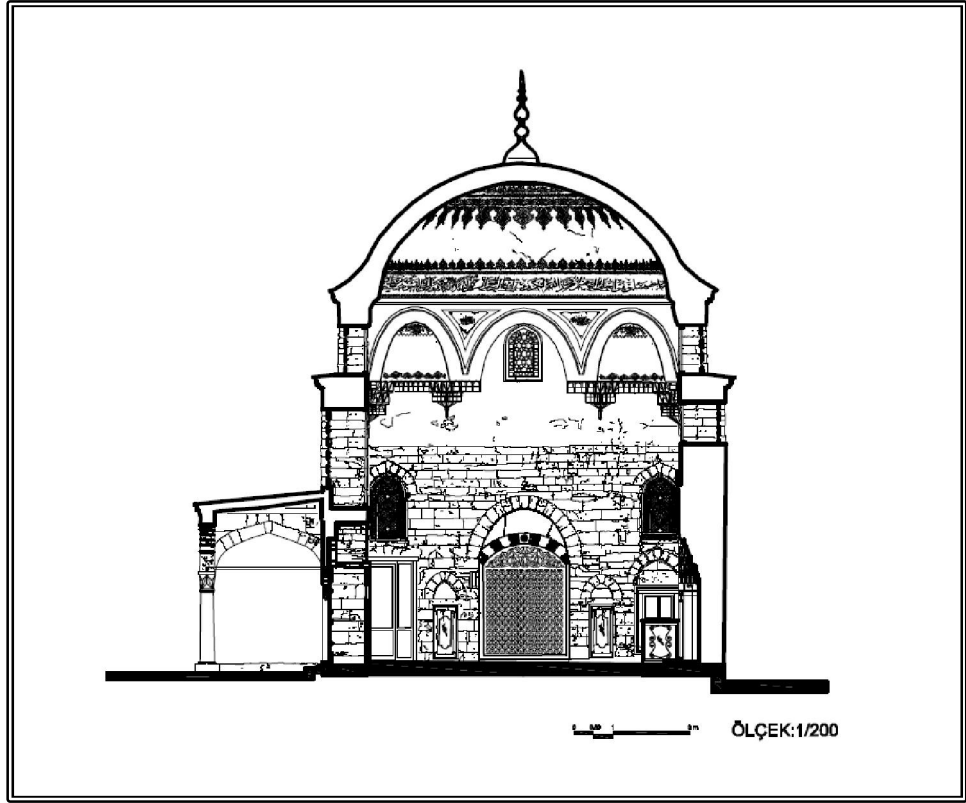
Şekil B.2 : Şemsi Ahmet Paşa Camii A-A kesiti.



Şekil B.3 : Şemsi Ahmet Paşa Camii B-B kesiti.



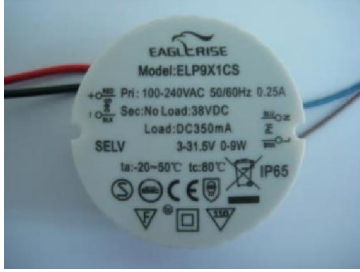
Şekil B.4 : Şemsi Ahmet Paşa Camii C-C kesiti.



Şekil B.5 : Şemsi Ahmet Paşa Camii D-D Kesiti

EK C: Sürücü Seçimi

Tasarlanan prototip için 8 adet LED'i sürebilecek özelliklerde ve piyasadaki en küçük boyutlara sahip 3 adet 350 mA sabit akımlı sürücü temin edilmiştir. S1, S2 ve S3 sürücüleri sırasıyla tasarlanan LEDli sisteme bağlanarak 220 V şebeke geriliminde 6 saat çalıştırılmış ve her sürücü için LEDlerin çektiği akım ve gerilim, şebekeden çekilen akım, güç ve güç faktörü ölçülmüş, elde edilen ölçüm değerlerinden LED gücü, sürücü üzerindeki kayıp güç ve sürücü verimi hesaplanmıştır. Sürücüler Şekil C.1-C.3'te, sürücü katalog değerleri Çizelge C.1'de verilmiştir. Deneyler sırasında sıcaklık ve bağıl nem S1, S2 ve S3 için sırasıyla 21,1 °C, % 62,7; 21,4 °C, % 62,0; 20,4 °C, % 58,7 olarak ölçülmüştür. LED akım ve gerilimi $\pm$ % 1,2 hata payıyla Brymen BM907, şebekeden çekilen güç ve güç faktörü $\pm$ % 0,2 hata payıyla, akım $\pm$ % 0,1 hata payıyla GW Instek GPM-8212 ölçü aletleri ile ölçülmüştür. Elde edilen tüm değerler S1, S2 ve S3 sürücüleri için sırasıyla Çizelge C.2, C.3 ve C.4'te verilmiştir.



Şekil C.1 : S1 sürücüsü



Şekil C.2 : S2 sürücüsü.



Şekil C.3 : S3 sürücüsü.

Çizelge C.1: Sürücü katalog değerleri.

	S1	S2	S3
Giriş Gerilimi [V]	100-240	170-250	100-240
Çıkış Gerilimi [V]	3-31,5	12-30	3-24
Çıkış Akımı [mA]	350	350 $\pm$ %10	350 $\pm$ 15
Çıkış Gücü [W]	0-9	Maks. 11	Maks. 8.4
Çalışma Sıcaklığı [°C]	20-50	-	-
Koruma Sınıfı	IP65	IP65	IP67
Boyutlar [mm]	R52x22	49x33x21	52x32x24

Çizelge C.2: S1 sürücüsü için karakteristik değerler.

t [dk]	I_L[A]	U_L [V]	P_L[W]	I[mA]	cosφ	P_s[W]	P_s[W]	η
0	0,328	23,79	7,80	79,5	0,577	10,01	2,21	0,78
1	0,328	23,58	7,73	79,6	0,57	9,95	2,22	0,78
2	0,328	23,52	7,71	80,0	0,564	9,88	2,17	0,78
3	0,327	23,47	7,67	77,2	0,572	9,82	2,15	0,78
4	0,327	23,42	7,66	77,8	0,562	9,77	2,11	0,78
5	0,326	23,38	7,62	79,0	0,573	9,72	2,10	0,78
10	0,324	23,21	7,52	77,6	0,568	9,58	2,06	0,78
15	0,323	23,08	7,45	76,5	0,555	9,47	2,02	0,79
20	0,323	22,98	7,42	75,9	0,560	9,38	1,96	0,79
25	0,322	22,91	7,38	77,5	0,547	9,34	1,96	0,79
30	0,321	22,85	7,33	76,2	0,556	9,30	1,97	0,79
45	0,320	22,76	7,28	75,4	0,557	9,23	1,95	0,79
60	0,320	22,72	7,27	75,3	0,554	9,20	1,93	0,79
75	0,320	22,70	7,26	76,6	0,546	9,19	1,93	0,79
90	0,320	22,69	7,26	76,3	0,543	9,18	1,92	0,79
105	0,320	22,69	7,26	76,5	0,543	9,18	1,92	0,79
120	0,320	22,68	7,26	75,3	0,551	9,18	1,92	0,79
150	0,320	22,68	7,26	75,4	0,549	9,17	1,91	0,79
180	0,320	22,68	7,26	75,0	0,552	9,17	1,91	0,79
210	0,320	22,68	7,26	77,1	0,539	9,16	1,90	0,79
240	0,320	22,67	7,25	80,4	0,518	9,18	1,93	0,79
270	0,320	22,67	7,25	78,9	0,526	9,17	1,92	0,79
300	0,320	22,67	7,25	80,8	0,515	9,17	1,92	0,79
330	0,320	22,67	7,25	79,2	0,526	9,16	1,91	0,79
360	0,320	22,67	7,25	75,0	0,554	9,16	1,91	0,79

Çizelge C.3: S2 sürücüsü için karakteristik değerler.

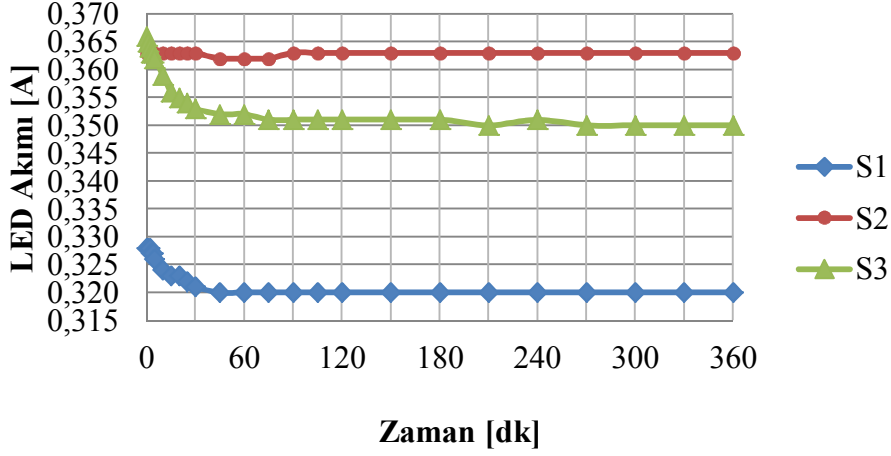
t [dk]	I_L[A]	U_L [V]	P_L[W]	I[mA]	cosφ	P_s[W]	P_s[W]	η
0	0,363	23,85	8,66	88,3	0,568	11,15	2,49	0,78
1	0,363	23,66	8,59	88,4	0,570	11,05	2,46	0,78
2	0,363	23,6	8,57	88,8	0,562	11,00	2,43	0,78
3	0,363	23,54	8,55	89,8	0,554	10,96	2,41	0,78
4	0,363	23,50	8,53	89,1	0,555	10,92	2,39	0,78
5	0,363	23,46	8,52	89,0	0,556	10,90	2,38	0,78
10	0,363	23,27	8,45	89,3	0,548	10,79	2,34	0,78
15	0,363	23,14	8,40	89,1	0,546	10,70	2,30	0,79
20	0,363	23,05	8,37	89,5	0,546	10,65	2,28	0,79
25	0,363	22,98	8,34	89,7	0,536	10,62	2,28	0,79
30	0,363	22,93	8,32	90,1	0,533	10,59	2,27	0,79
45	0,362	22,83	8,26	89,4	0,534	10,54	2,28	0,78
60	0,362	22,80	8,25	89,3	0,537	10,52	2,27	0,78
75	0,362	22,78	8,25	89,8	0,535	10,51	2,26	0,78
90	0,363	22,76	8,26	89,4	0,533	10,51	2,25	0,79
105	0,363	22,76	8,26	89,9	0,530	10,51	2,25	0,79
120	0,363	22,76	8,26	89,7	0,528	10,51	2,25	0,79
150	0,363	22,75	8,26	89,7	0,531	10,50	2,24	0,79
180	0,363	22,76	8,26	89,5	0,530	10,49	2,23	0,79
210	0,363	22,76	8,26	89,6	0,533	10,50	2,24	0,79
240	0,363	22,76	8,26	89,2	0,533	10,50	2,24	0,79
270	0,363	22,77	8,27	89,4	0,533	10,51	2,24	0,79
300	0,363	22,78	8,27	89,4	0,533	10,52	2,25	0,79
330	0,363	22,77	8,27	89,3	0,533	10,51	2,24	0,79
360	0,363	22,76	8,26	89,7	0,531	10,51	2,25	0,79

Çizelge C.4: S3 sürücüsü için karakteristik değerler.

t [dk]	I_L[A]	U_L [V]	P_L[W]	I[mA]	cosφ	P_s[W]	P_s[W]	η
0	0,366	23,80	8,71	102,6	0,495	11,1	2,39	0,78
1	0,365	23,62	8,62	101,9	0,495	11,0	2,38	0,78
2	0,364	23,56	8,58	101,4	0,493	11,0	2,42	0,78
3	0,363	23,51	8,53	100,3	0,494	10,9	2,37	0,78
4	0,363	23,45	8,51	101,2	0,491	10,9	2,39	0,78
5	0,362	23,41	8,47	100,2	0,492	10,8	2,33	0,78
10	0,359	23,24	8,34	98,5	0,492	10,6	2,26	0,79
15	0,356	23,11	8,23	99,2	0,482	10,5	2,27	0,78
20	0,355	23,02	8,17	99,8	0,477	10,4	2,23	0,79
25	0,354	22,96	8,13	97,2	0,482	10,4	2,27	0,78
30	0,353	22,90	8,08	97,1	0,484	10,3	2,22	0,78
45	0,352	22,83	8,04	99,2	0,468	10,2	2,16	0,79
60	0,352	22,77	8,02	99,8	0,464	10,2	2,18	0,79
75	0,351	22,75	7,99	97,0	0,477	10,2	2,21	0,78
90	0,351	22,73	7,98	97,6	0,474	10,2	2,22	0,78
105	0,351	22,72	7,97	98,0	0,472	10,1	2,13	0,79
120	0,351	22,72	7,97	93,6	0,494	10,1	2,13	0,79
150	0,351	22,72	7,97	97,3	0,475	10,1	2,13	0,79
180	0,351	22,71	7,97	94,9	0,488	10,1	2,13	0,79
210	0,350	22,72	7,95	98,9	0,468	10,1	2,15	0,79
240	0,351	22,72	7,97	98,4	0,468	10,1	2,13	0,79
270	0,350	22,73	7,96	98,0	0,469	10,1	2,14	0,79
300	0,350	22,72	7,95	99,3	0,467	10,1	2,15	0,79
330	0,350	22,72	7,95	97,6	0,473	10,1	2,15	0,79
360	0,350	22,72	7,95	99,0	0,472	10,1	2,15	0,79

EK C.1 LED akımı

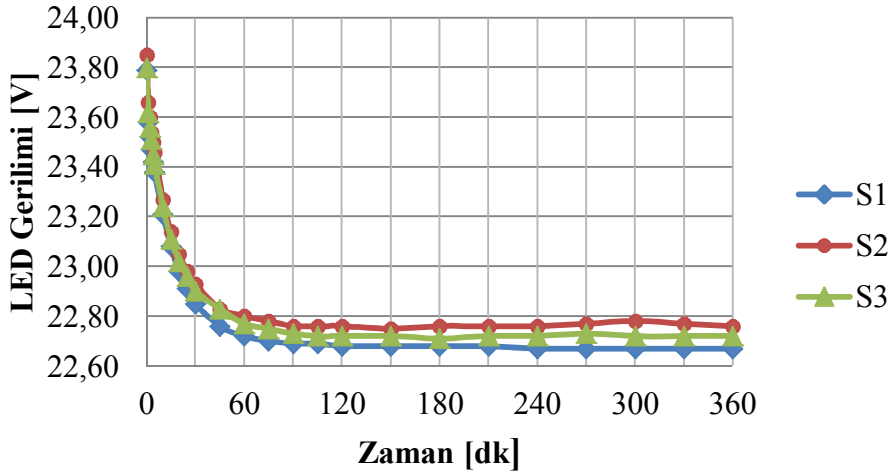
Şekil C.4'te 3 sürücü için LED Akımı-Zaman eğrileri verilmiştir. Ölçüm sonuçları hedeflenen 350 mA'lık sürme akımına en yakın değerleri S3 sürücüsünün verdiğini göstermektedir. S1 sürücüsünün akımı hedeflenen akım değerinin yaklaşık % 9 altında kalmakta, S2 sürücüsünün akımı ise % 4 üzerine çıkmaktadır. Fakat S1 ve S3 sürücülerinin sabit akım değerlerine oturmaları yaklaşık 1 saat sürmektedir. S2 sürücüsü ise çalışma süresi boyunca sabit bir akım değeri sağlamaktadır.



Şekil C.4 : LED akım-zaman eğrisi.

EK C.2 LED gerilimi

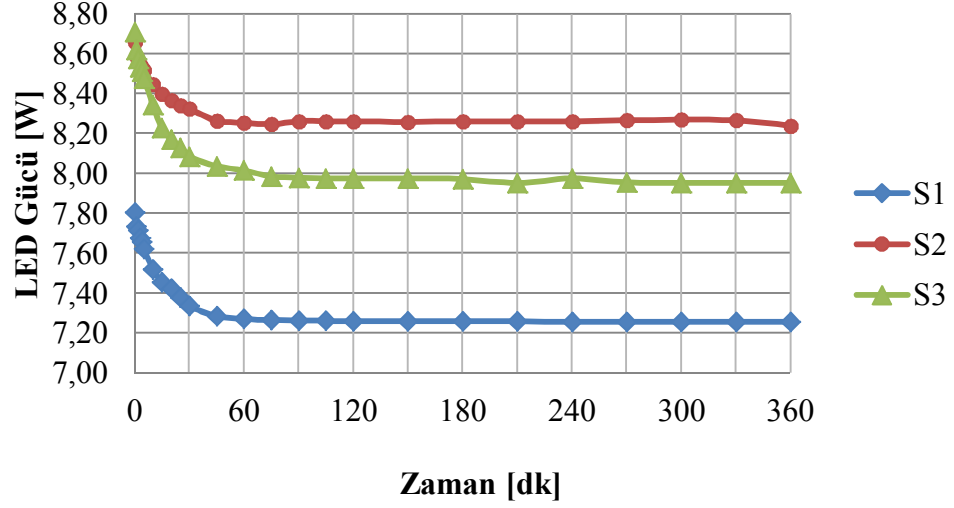
Şekil C.5'te 3 sürücü için LED Gerilimi-Zaman eğrileri verilmektedir. 3 sürücü için de gerilim eğrilerinin birbirlerine yakın değerler göstererek yaklaşık 120 dakika içinde sabit bir değere oturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil C.5 : LED gerilim-zaman eğrisi.

EK C.3 LED gücü

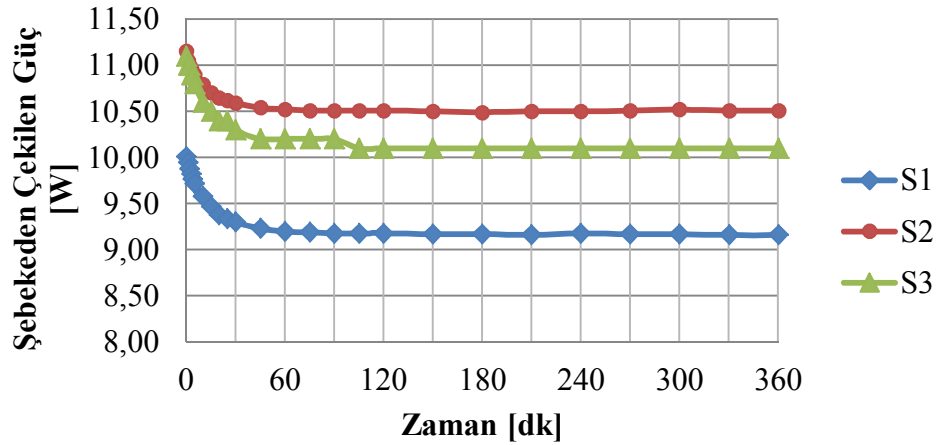
Şekil C.6'da LED güç-zaman eğrisi verilmektedir. LEDli sistemin çektiği güç ölçülen akım ve gerilim değerlerinden hesaplanmıştır. İdeal koşullarda, 350 mA'lık sabit akım ile sürülen 3 V'luk 8 adet LED'in çekmesi gereken toplam güç değeri 8,4 W'tır. Çekilen güç değerinin LED akım ve gerilimine bağlı olması nedeniyle diğer sürücülerden daha yüksek akım sağlayan S2 sürücüsü ile çalıştırılan sistem en yüksek gücü çekmektedir.



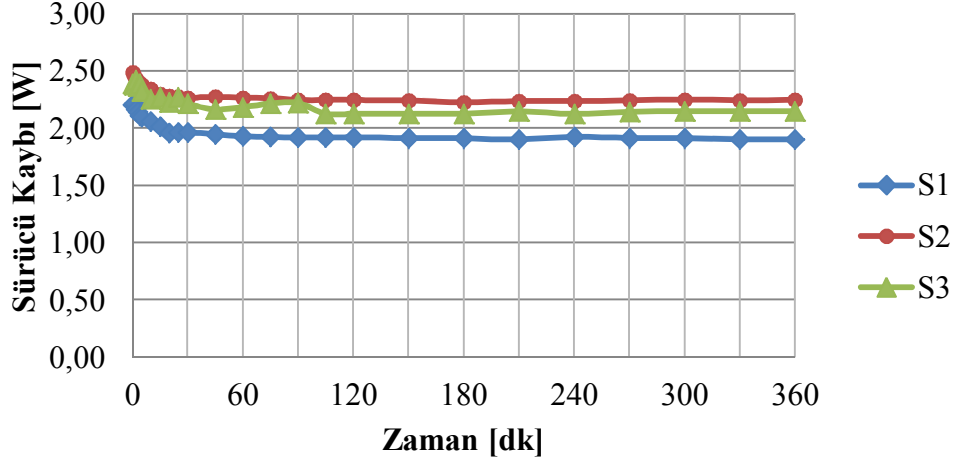
Şekil C.6 : LED güç-zaman eğrisi.

EK C.4 Şebekeden çekilen güç

Şekil C.7’de 3 sürücü için şebekeden çekilen güç – zaman eğrileri verilmektedir. Şebekeden çekilen güç, LEDlerin çektiği güçle birlikte sürücü üzerindeki kayıp gücü de içermektedir. Sürücü devrelerin akım değerlerinin farklı olmaları sebebiyle bu büyüklük de 3 sürücü için farklı değerlerdedir fakat karakteristik eğrilerin şekli benzerdir. Şebekeden çekilen güç ile LEDlerin çektiği güç arasındaki oran hesaplandığında, 3 sürücü için de verim değerinin % 79 olduğu görülmüştür. Şekil C.8’de bu iki güç değeri arasındaki fark alınarak hesaplanan sürücü kayıpları verilmiştir.



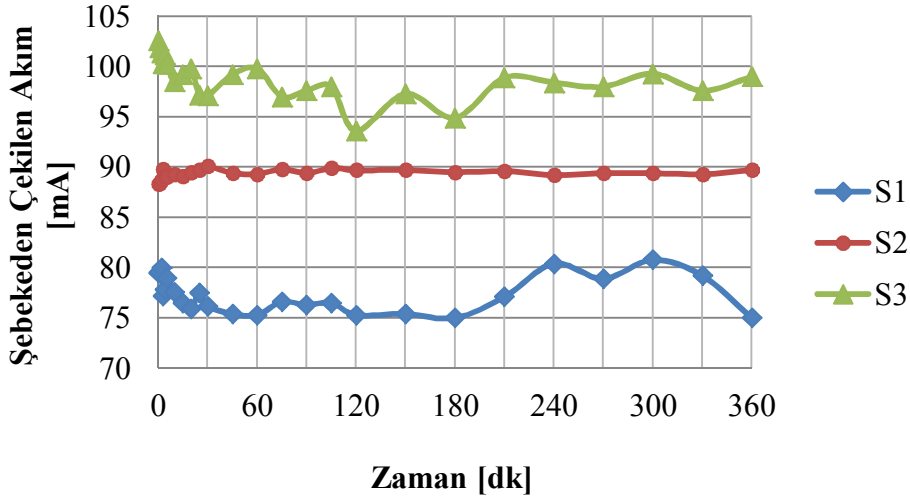
Şekil C.7 : Şebekeden çekilen güç-zaman eğrisi.



Şekil C.8 : Sürücü kaybı-zaman eğrisi

EK C.5 Şebekeden çekilen akım

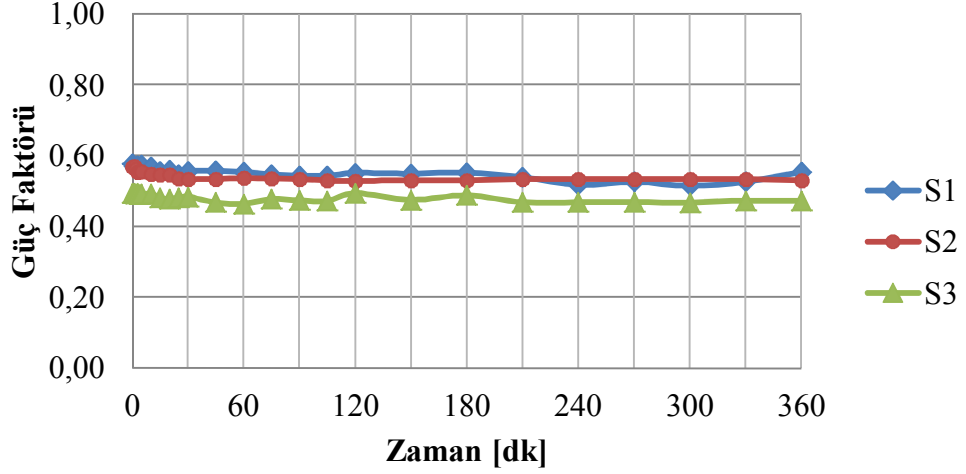
Şekil C.9’da şebekeden çekilen akım - zaman eğrisi verilmektedir. Şebekeden çekilen akım değeri ölçülen tüm büyüklükler içinde sürücüler arasında en büyük farkları gösteren büyüklüktür. S1 ve S3 sürücülerinin çektikleri akım belirli aralıklar içinde değişkenlik göstermekte, S2 sürücüsününki ise 90 mA civarında hemen hemen sabit kalmaktadır.



Şekil C.9 : Şebekeden çekilen akım-zaman eğrisi

EK C.6 Güç faktörü

Şekil C.10’da tüm sürücüler için güç faktörü – zaman eğrisi verilmiştir. S1 ve S2 sürücülerinin güç faktörleri çalışma süresi boyunca 0,5’in üzerindeyken, S3 sürücüsü için güç faktörü 0,5 ve altına düşmektedir.



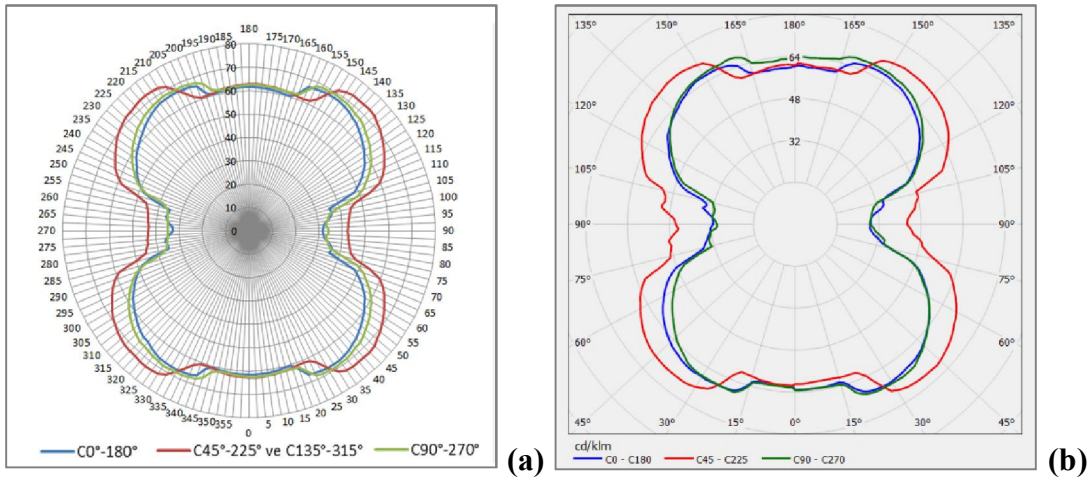
Şekil C.10 : Güç faktörü-zaman eğrisi.

EK C.7 Seçilen sürücü

İncelenen sürücü devrelerin karakteristik eğrileri birbirlerinden çok büyük farklar göstermemektedir. Üç sürücünün de verim değerleri yaklaşık % 79 olarak hesaplanmıştır. Hedeflenen 350 mA'lık sabit akım değerini tüm çalışma süresi boyunca sağlayan hiçbir sürücüye rastlanmamıştır; S3 sürücüsü rejime girdiğinde 350 mA'lık akım değerine erişse de, bu akım değerine erişmesi yaklaşık 90 dakika almaktadır. S1 sürücüsü de benzer şekilde yaklaşık 90 dakikada sabit akım değerine ulaşmaktadır, fakat ürettiği akım değeri 350 mA'in yaklaşık % 9 altındadır. Bu da kullanılan LEDler için 350 mA akımla sürüldüğünde ürettiği 100 lm'lik ışık akısının altında bir ışık akısı değeri elde edileceğini göstermektedir. Üç sürücü içinden sabit akım değerini koruyan tek sürücü S2'dir. S2 hedeflenen akım değerinin yaklaşık % 4 üzerinde bir akım üretmekte, fakat bu akım değerini çalışma süresi boyunca sabit tutmaktadır. Buna ek olarak S2 sürücüsü diğer sürücülerden küçük boyutlara sahip olması nedeniyle öne çıkmaktadır. Yapılan tüm ölçümlerin sonuçları incelendiğinde, belirtilen sebepler doğrultusunda piyasadan temin edilen sabit akımlı 3 sürücü içinden S2 sürücüsü yapılan çalışma için en uygun sürücü olarak belirlenmiştir.

EK D LEDli Modül için Işık Dağılım Eğrileri

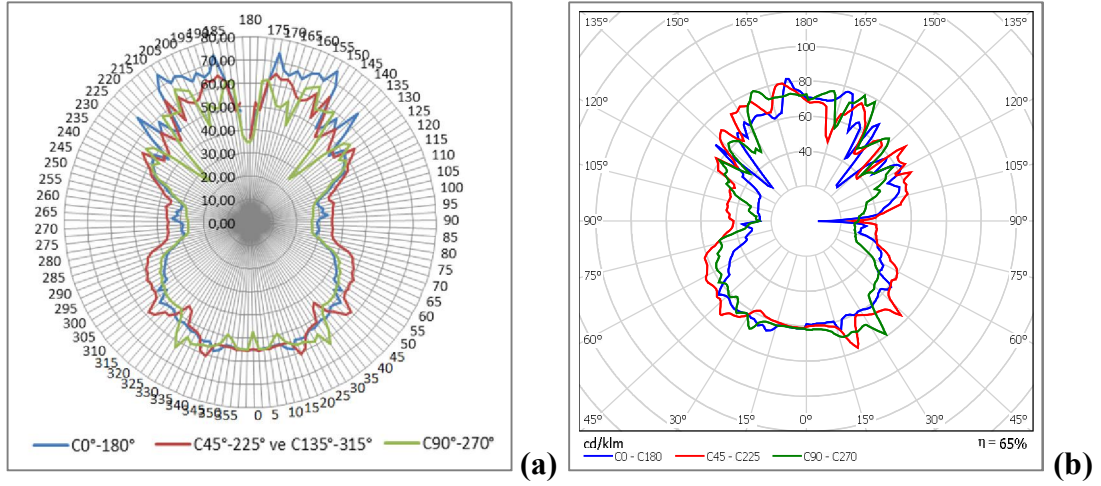
Şekil D.1 (a)'da doktora tez çalışmasında tasarlanan LEDli modülün İTÜ Aydınlatma ve İç Tesisat Laboratuvarı'nda hazırlanan C0°-180°, 90°-270°, 45°-225° ve 135°-215° eğrileri, Şekil D.1 (b)'de ise aynı prototip için Aynalı Gonyofotometre ölçümlerinden aynı C düzlemleri için üretilen ışık dağılım eğrileri verilmektedir. Kullanılan gonyofotometreden elde edilen değerler bir yazılım üzerinden ies ve ldt uzantılı armatür dosyaları haline getirilebilmektedir. Eğrilerden görüldüğü üzere, elle ölçüm yöntemi ile gonyofotometre yöntemi biçim olarak birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Bu durum, elle yapılan ölçümler açısından sevindirici bir sonuçtur.



Şekil D.1 : LED modül son prototip: (a) İTÜ ölçümleri. (b) Gonyofotometre ölçümleri.

Eğriler incelendiğinde, ölçümler arasındaki farkın gamma açısının 0°-80° ve 100°-180° değerleri arasında oldukça küçük olduğu, 80° -100° arasında ise bağıl farkların % 15lere kadar çıktığı görülmektedir. Bu fark, kuvvetli ihtimalle gonyofotometre ile yapılan ölçümlerde cami kandilinin konumlandırmasıyla ilgili yaşanan problemden ileri gelmektedir.

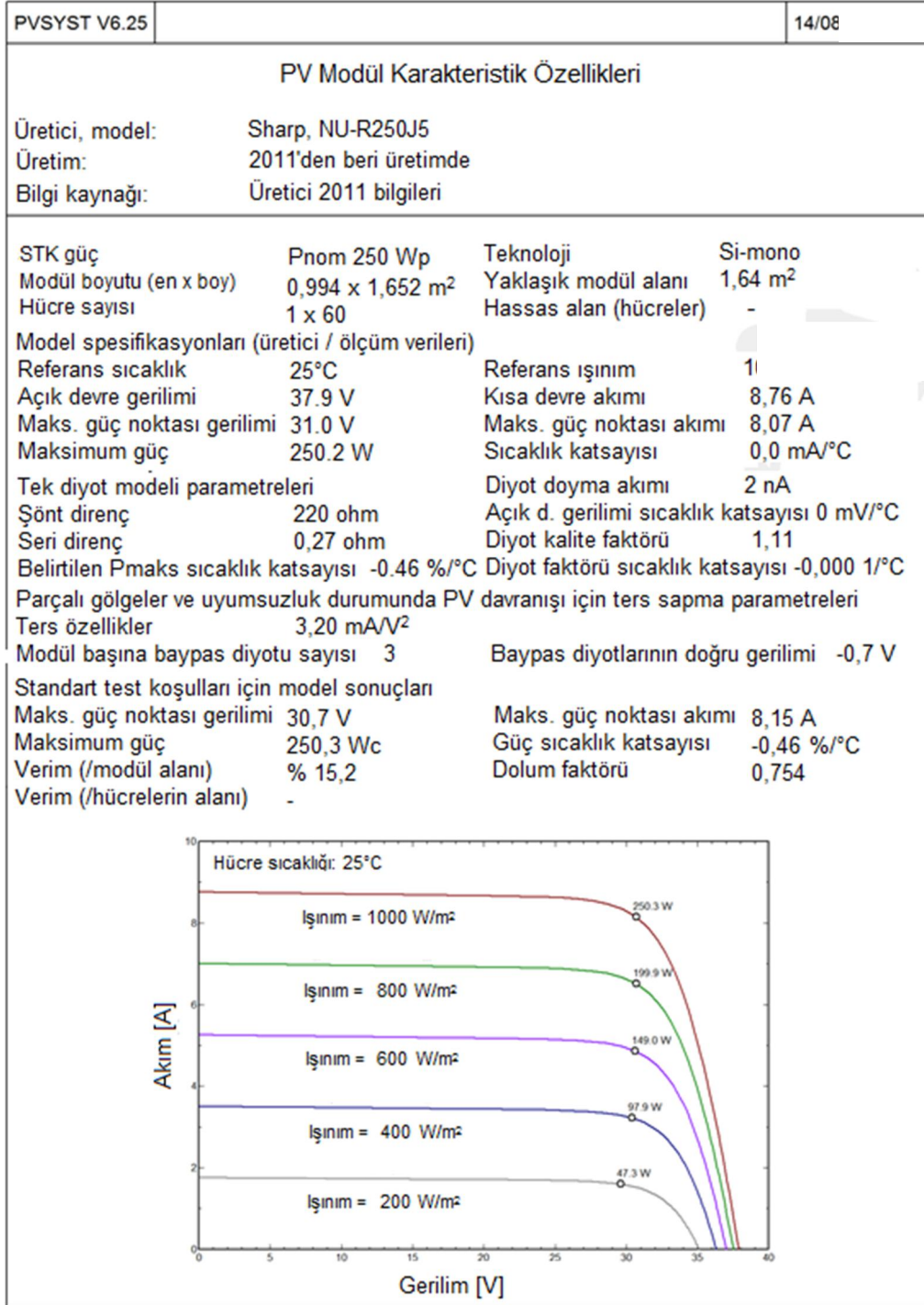
Şekil D.2 (a) ve (b)'de ise LED modülün delik cam kandile yerleştirilmesi ile elde edilen prototip için oluşturulan ışık dağılım eğrileri görülmektedir.



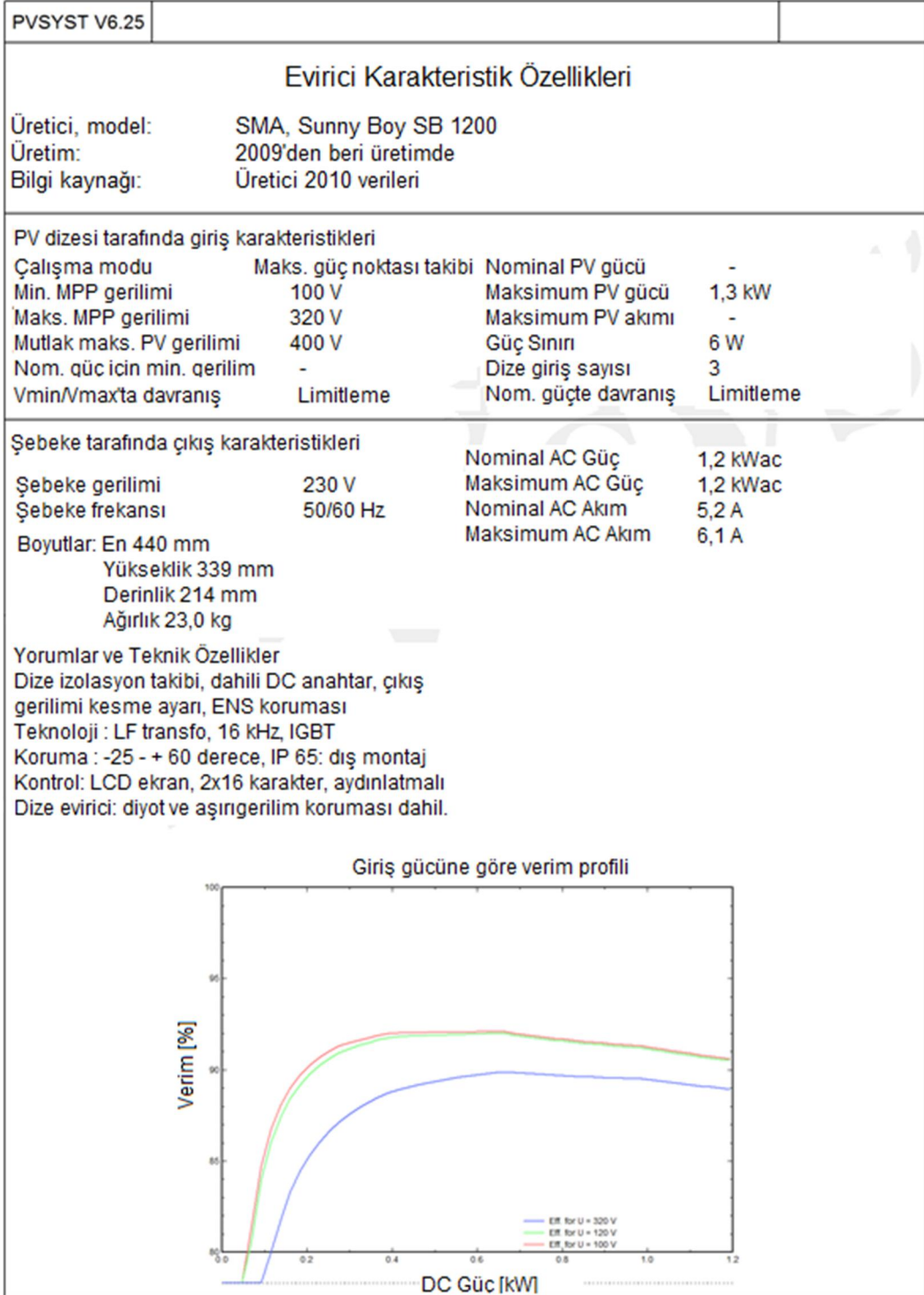
Şekil D.2 : LEDli Cami kandili (a) İTÜ ölçümleri. (b) Gonyofotometre ölçümleri.

Kandil içindeki eğriler incelendiğinde, eğriler arasındaki farkların modüle göre çok daha büyük farklar gösterdiği gözlemlenmektedir. Cami kandili için de modül için dile getirilen ölçüm zorluğu yaşanmış, eğriler üst yarı uzay ve alt yarı uzay için ayrı ayrı çıkarılarak birleştirilmiştir. Buna ek olarak, tez çalışması boyunca sık sık geri dönülen problem cami kandilinin üretiminde kullanılan camın yapısından gelen farklılıklar bu ölçümde de büyük farklılıklar olmasına sebep olmuştur. Kandil camında en ufak bir konum değişikliğinin, ışığın kırılma ve yansımadaki değişiklikler nedeniyle ışık dağılım eğrisinde büyük farklara yol açmasının yanı sıra, gonyofotometrenin hareketi nedeniyle LEDli modül cam kandil içinde sabitlenememiş ve ölçüm sırasında hareket etmiştir. Tüm bu bilgiler, sadece bu çalışma için tasarlanmış olan deneysel düzenek kullanılarak elde alınan ölçümlerin daha doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir.

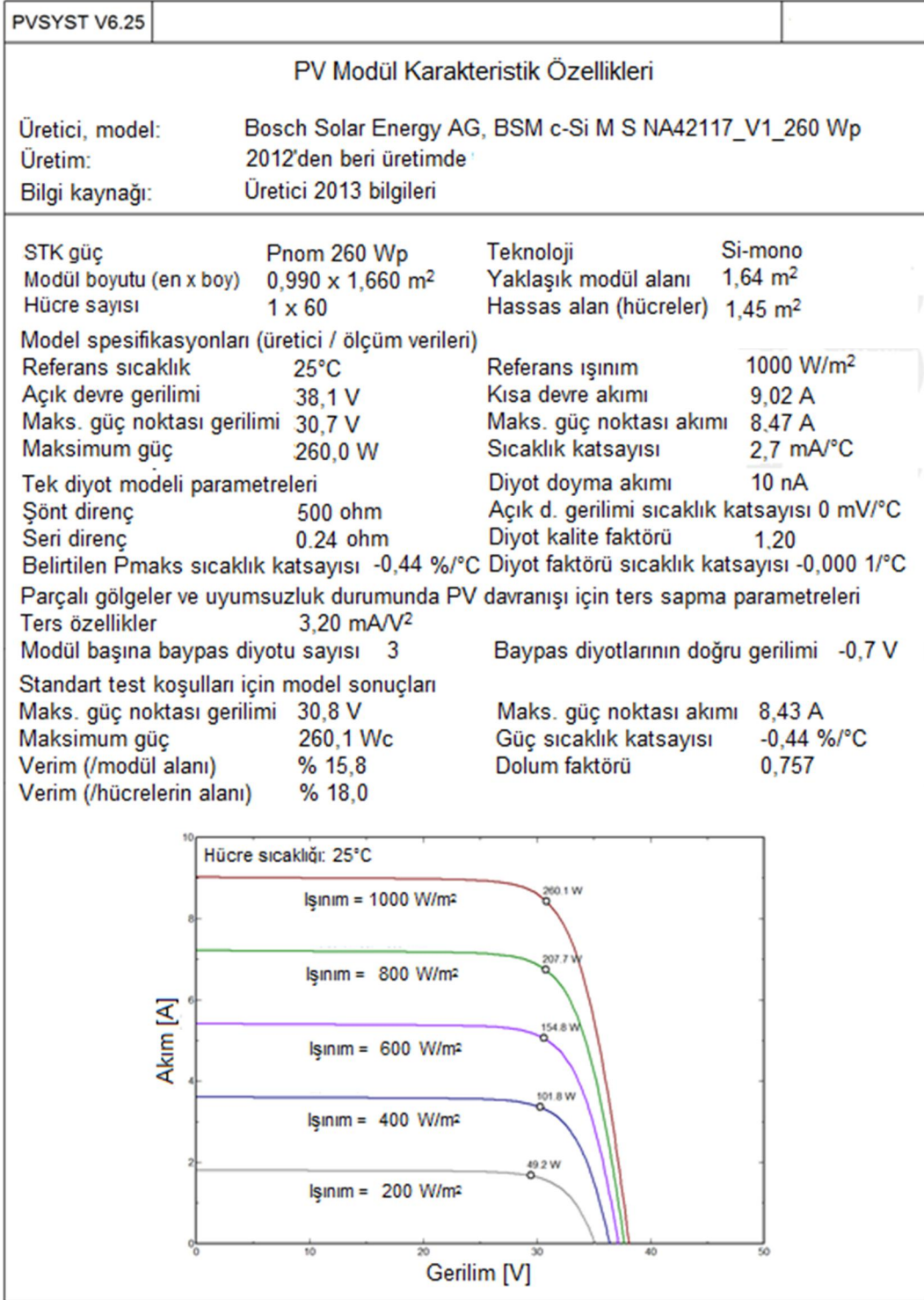
EK E. PVsyst Simülasyonunda kullanılan PV paneller ve eviricilerin karakteristik özellikleri



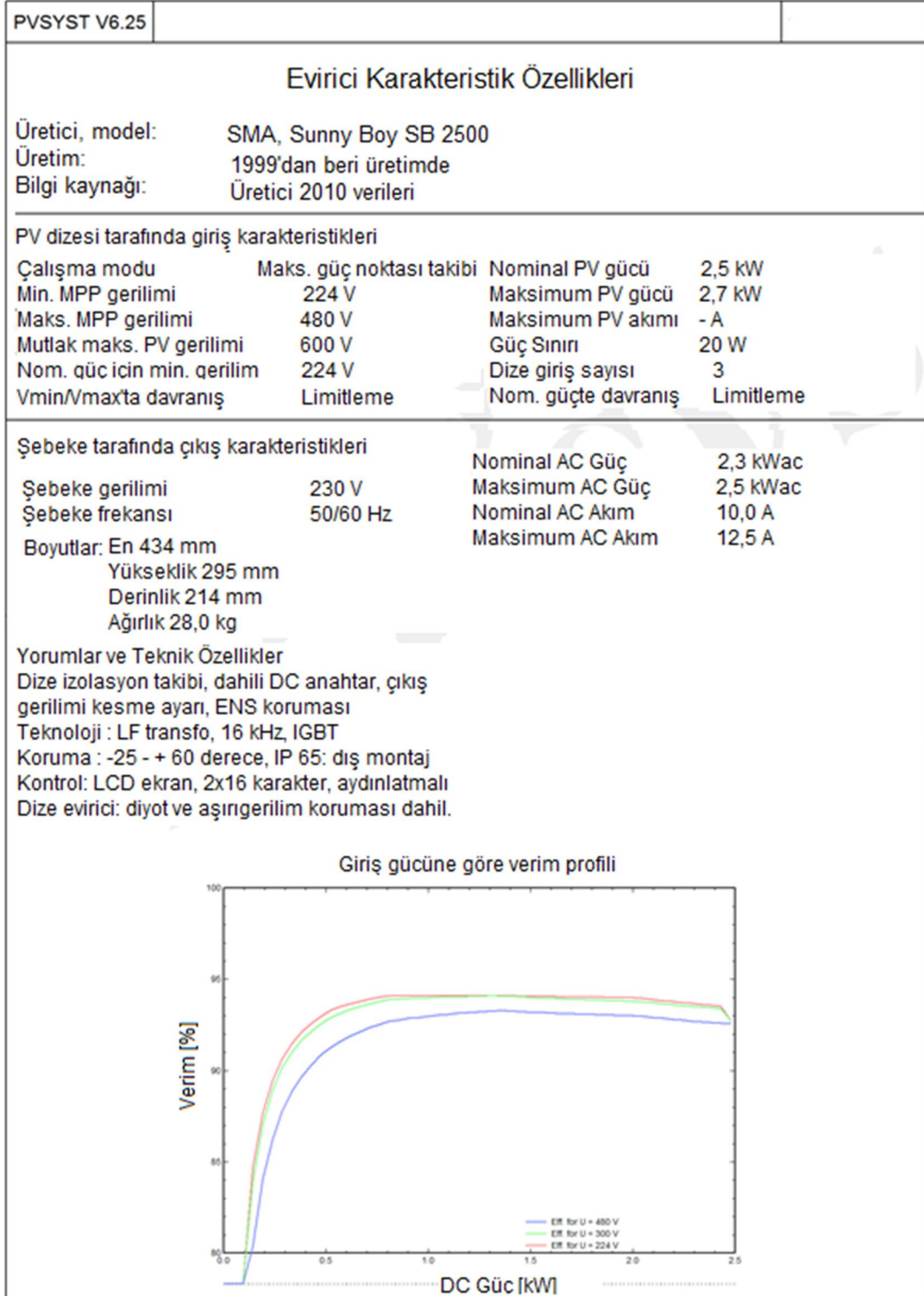
Şekil E.1 : 1. senaryo için seçilen PV panellerin karakteristik özellikleri



Şekil E.2 : 1. senaryo için seçilen eviricinin karakteristik özellikleri.



Şekil E.3 : 2. senaryo için seçilen PV panellerin karakteristik özellikleri



Şekil E.4 : 2. senaryo için seçilen eviricinin karakteristik özellikleri.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Lale Erdem Atılgan
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 28.10.1982
Adres: İTÜ Ayazağa Kampüsü Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü 34469 Maslak/İstanbul
E-Posta: lale.erdem@itu.edu.tr
Lisans: 2004, İTÜ, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik
Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans: 2007, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik
Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği
Programı

Mesleki Deneyim:

Mühendis

Ocak 2013– ...

İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Misafir Araştırmacı

Karlsruhe Institute of Technology
Light Technology Institute
Karlsruhe, Almanya

Ocak. 2012- Ocak. 2013
Mart 2013 – Mayıs 2013

Araştırma Görevlisi

İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Şubat 2005 – Ocak 2013

Ödüller:

Jean Monnet Avrupa Birliği Araştırma Bursu
2011-2012 Akademik Yılı

ABB Araştırma Görevlisi Bursu
2008 Akademik Yılı

Siemens Mükemmellik Ödülü
2007 – Yüksek Lisans Tezi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR:

Hakemli Dergi Yayınları:

- **Erdem, L.**, Trampert, K., Neumann, C. (2012). Evaluation of Discomfort Glare from LED Lighting Systems, *Ingineria Iluminatului, Journal of Lighting Engineering*, Volume 14, Number 2, December 2012.

Uluslararası Konferans Bildirileri:

- **Erdem, L.**, Trampert, K., Neumann, C. (2012). Evaluation of Discomfort Glare from LED Lighting Systems, *Balkan Light 2012*, October 3-6 Belgrade, Serbia.
- **Erdem, L.**, Enarun, D. (2011). Enhancing the Interior Lighting of Mosques with LEDs, *CIE 2011*, July 10-15, Sun City, South Africa.

Ulusal Konferans Bildirileri:

- **Erdem, L.**, Enarun, D. (2011). Evaluation of Traditional and LED Lighting Systems in Historical Mosques through Simulations, *VI. National Lighting Symposium and Exhibition*, November 24-25, İzmir, Türkiye.

DİĞER YAYINLAR:

Uluslararası Konferans Bildirileri:

- Ünnü, S. Y., **Erdem, L.** (2012). Impacts of Lighting Systems on Students: A Case Study, *Balkan Light 2012*, October 3-6, Belgrade, Serbia.
- **Erdem, L.**, Enarun, D. (2010). A Survey on the Subjective Assesment of a Hybrid and a Traditional Lighting System, *CIE 2010*, March 14-17, Vienna, Austria.
- **Erdem, L.**, Enarun, D. (2009). Energy Savings Potential Through Using LEDs in Refrigerators and Freezers: Applications in the Turkish Market, *Proceedings of Lux Europa 2009*, September 9-11, Istanbul, Turkey.
- **Erdem, L.**, Enarun, D., Çetegen, D., Aydınli, S. (2007). The Importance of Automatic Control Using Occupancy Sensors For Electric Lighting Concerning Energy Issues, *CIE 2007 Proceedings*, June 4-11 Beijing, PRC.
- **Erdem, L.**, Enarun, D. (2006). A Study of Subjective Assessment: Hybrid Lighting with Automatic Control or Traditional Lighting with Manual Control? *Proceedings of EPIC 2006 AIVC*, Lyon, France, November 20-22, pp. 485-490.

Ulusal Konferans Bildirileri:

- **Erdem, L.**, Enarun, D. (2009). Survey Methods Used in the Subjective Evaluation of Lighting Systems, *5. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi Bildirileri*, 7-10 Mayıs, İzmir.
- Yıldırım, S., Jazayeri, M., **Erdem, L.**, Enarun, D. (2008). Acil Durum Aydınlatmasında Aydınlik Düzeyinin Önemi Üzerine bir Çalışma, *7. Ulusal Aydınlatma Kongresi Bildirileri*, Istanbul, Kasım 27-28, s. 161-168.
- **Erdem, L.**, Enarun, D. (2007). Kullanıcıların Aydınlik Düzeyi Tercihlerinin Değişkenliği Üzerine bir Çalışma. *4. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi Bildirileri*, 13-15 Aralık, İzmir.

- Çetegen, D., **Erdem, L.**, Enarun, D. (2005). Işık Kirliliğini Önlemek Amacıyla Tercih Edilmesi Gereken Armatür Tipleri, III. Ulusal Aydınlatma Kongresi, 23-25 Kasım, Ankara.
- Bayraktaroglu, E., Altıncaba, E., Arı, S., Candan, İ., **Erdem, L.**, Gürpınar, A., Haner, Y., Kırar, F.E., Kozan, D., Kutlu, A.C., Ulutaş, M.A., Enarun, D. (2004). Müze ve Sergi Mahalleri Aydınlatması Beş Durum Değerlendirmesi, 5. Ulusal Aydınlatma Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, 7-8 Ekim, s. 305-314.

Proje Raporları:

- Enarun, D., **Erdem, L.**, Çetegen, D., Batman, A., Yener, A. (2006). Işık Rafı Sistemi ile Günışığı-Yapay Işık Entegrasyonunun İklim Koşullarına Bağlı Optimizasyonu. TÜBİTAK 105E194 No'lu Proje Raporu, Kasım 2006.

