

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ VERİMLİLİĞİ ODAKLI YAPI YÖNLENDİRMESİ İÇİN BIM
TABANLI BİR MODEL ÖNERİSİ: KENTSEL DÖNÜŞÜM ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müberra DOLDUR

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

EKİM 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ VERİMLİLİĞİ ODAKLI YAPI YÖNLENDİRMESİ İÇİN BIM
TABANLI BİR MODEL ÖNERİSİ: KENTSEL DÖNÜŞÜM ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Müberra DOLDUR
(501191633)**

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Reha Metin ALKAN

EKİM 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501191633 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Müberra DOLDUR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ENERJİ VERİMLİLİĞİ ODAKLI YAPI YÖNLENDİRMESİ İÇİN BIM TABANLI BİR MODEL ÖNERİSİ: KENTSEL DÖNÜŞÜM ÖRNEĞİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Reha Metin ALKAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa YANALAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 09 Eylül 2022
Savunma Tarihi : 06 Ekim 2022





Aileme,



ÖNSÖZ

Büyük emeklerle yazılmış olan bu yüksek lisans tez çalışmasının her aşamasında benimle birlikte çalışan; çalışkanlığını, disiplinini ve hoşgörüsünü kendime örnek aldığım çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Reha Metin ALKAN'a bana ve çalışmamıza verdiği tüm emekler için teşekkürü bir borç bilirim.

Konuya olan bakış açımı genişleterek bana fikir veren ve her ihtiyaç duyduğumda yardımcı olan Prof. Dr. Yusuf ARAYICI'ya ve modelin doğruluğunun test edilmesinde bilgi ve tecrübesinden yararlandığımız Prof. Dr. Sinan ÇALIŞKAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Verilerin temin aşamasında yardımlarından dolayı Gaziosmanpaşa Belediye Başkan Yardımcısı Ahmet BÜLBÜL'e, tüm Gaziosmanpaşa Belediyesi çalışanlarına, İlgin İnşaat'a ve bölüm başkanımız Prof. Dr. Mustafa YANALAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatın her alanında daima beni destekleyerek bugünlere getiren canım anneme ve babama tüm emekleri için minnetlerimi ve sevgilerimi sunuyorum.

Eylül 2022

Müberra DOLDUR
(Şehir Plancısı & Geomatik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	7
1.2 Literatür Araştırması	8
1.3 Çalışmanın Kapsamı	10
2. YAPI BİLGİ MODELLEME (BIM)	13
2.1 Yapı Bilgi Modelleme Kavramı	13
2.2 Yapı Bilgi Modellemenin Tarihçesi	15
2.3 Yapı Bilgi Modellemenin Temelleri	17
2.3.1 nD modelleme	17
2.3.2 Parametrik modelleme	18
2.3.3 Nesne yönelimli modelleme	18
2.3.4 Birlikte çalışabilirlik (interoperability)	20
2.4 Yapı Bilgi Modelleme Olgunluk Seviyeleri	21
2.5 Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Gelişim Seviyeleri (LOD)	24
2.6 Yapı Bilgi Modellemenin (BIM) Faydaları	27
2.7 Yapı Bilgi Modellemenin Uygulanmasındaki Zorluklar ve Engeller	34
2.8 Yapı Bilgi Modellemenin Mevcut Durumu	36
2.8.1 Dünyadaki durum	36
2.8.2 Türkiye’deki durum	39
3. ENERJİ VERİMLİLİĞİ	43
3.1 Enerji Verimliliğine Yönelik Politika ve Stratejiler	43
3.1.1 AB’deki yasal durum	43
3.1.2 Türkiye’de yasal durum	47
3.2 Türkiye’de Mevcut Bina Stoğunun Yapısı ve Binalarda Enerji Verimliliği	52
3.2.1 Türkiye’de mevcut bina stoğunun yapısı	52
3.2.2 Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ve EKB uygulamaları	56
3.2.3 Yeşil binalar ve LEED Sertifikası	59
3.2.4 nSEB ve SEB binalar	61
3.3 Bina Performans Analizi (BPA) ve Bina Enerji Modellemesi (BEM)	62
3.3.1 Binalarda enerji performansını etkileyen faktörler	63
3.3.2 BIM/BEM birlikte çalışabilirliği	64
4. GÜNEŞ IŞINIMI	67

4.1 Güneş Işınımını Etkileyen Faktörler	68
4.1.1 Atmosfer koşulları.....	68
4.1.2 Çevresel koşullar	69
4.1.3 Güneş geometrisi.....	72
4.1.3.1 Güneş sabiti	72
4.1.3.2 Güneş açıları.....	75
4.2 Güneş Işınımı Hesabı	84
4.2.1 Yeryüzüne gelen güneş ışınımı	84
4.2.2 Atmosfer dışında yatay düzleme gelen güneş ışınımı	86
4.2.3 Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı.....	88
4.2.3.1 Yatay düzleme düşen güneş ışınımı	88
4.2.3.2 Eğik düzleme düşen güneş ışınımı	89
5. UYGULAMA	93
5.1 Çalışmanın Amacı	93
5.2 Çalışma Alanı.....	93
5.3 Materyal ve Metod	98
5.3.1 Çalışmanın işlem adımları.....	98
5.4 Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	109
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	121
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR.....	133
ÖZGEÇMİŞ	143

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
AEC	: Architecture, Engineering and Construction (Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat)
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği)
bcXML	: BuildingConstruction XML
BEAM	: Building Environmental Assessment Method (Bina Çevresel Değerlendirme Yöntemi)
BEM	: Building Energy Modeling (Bina Enerji Modelleme)
BEP	: Binalarda Enerji Performansı
BIM	: Building Information Modeling (Yapı Bilgi Modelleme)
BM	: Birleşmiş Milletler
BPA	: Building Performance Analysis (Bina Performans Analizi)
BPM	: Building Product Model (Bina Ürün Modeli)
BREEAM	: Building Research Establishment Environmental Assessment Method (Bina Araştırma Kuruluşu Çevresel Değerlendirme Yöntemi)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CDE	: Common Data Environment (Ortak Veri Ortamı)
CO₂	: Karbondioksit
COP	: Coefficient of Performance (Soğutma Etkinlik Katsayısı)
CORONET	: Construction and Real Estate Network (İnşaat ve Gayrimenkul Açı)
ÇEDBİK	: Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği
DGBN	: Deutsche Gesellschaft Für Nachhaltiges Bauen (Alman Sürdürülebilir Bina Derneği)
EKB	: Enerji Kimlik Belgesi
ENR	: Engineering New Records
EPBD	: Binalarda Enerji Performansı Direktifi
GARM	: General AEC Reference Model (Genel Yapı Sektörü Referans Modeli)
GBEL	: Green Building Evaluation Label (Yeşil Bina Değerlendirme Etiketi)
GBM	: General Building Model (Genel Bina Modeli)

gbXML	: Green Building XML
GLIDE	: Graphic Language for Interactive Design (Etkileşimli Tasarım İçin Grafik Dili)
GSYİH	: Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
HTML	: HyperText Markup Language
HVAC	: Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme)
IDF	: Input Data File
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IFC	: Industry Foundation Class
IFCXML	: Industry Foundation Classes XML
IPD	: Integrated Project Delivery (Entegre Proje Teslimi)
LEED	: Leadership in Energy and Environmental Design (Enerji ve Çevre Tasarımında Liderlik)
LOD	: Level of Development (Gelişim Düzeyi)
MEP	: Mechanical, Electrical, and Plumbing (Mekanik, Elektrik ve Sıhhi Tesisat)
MTEP	: Milyon ton eşdeğer petrol
nD	: n Boyutlu
NSEB	: Neredeyse Sıfır Enerjili Bina
nSEB	: Net Sıfır Enerjili Bina
SBTOOL	: Sustainable Building Tool (Sürdürülebilir Yapı Aracı)
SEEB-TR	: Sürdürülebilir Enerji Etkin Binalar Sertifikası
STK	: Sivil Toplum Kuruluşları
TOKİ	: Toplu Konut İdaresi Başkanlığı
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TÜSİAD	: Türk Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği
UEVEP	: Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı
USGBC	: U.S. Green Building Council (ABD Yeşil Bina Konseyi)
XHTML	: Extensible HyperText Markup Language

SEMBOLLER

α	: Güneş yükseklik açısı (derece)
ρ	: Yerin yansıtma oranı
$1/\alpha_d$	: Dış ortam ısı direnci (m^2K/W)
$1/\alpha_i$	: İç ortam ısı direnci (m^2K/W)
a, b	: Bölgeye bağlı sabitler
BHI	: Direkt Yatay Güneş Işınımı
B_s	: Standart boylam
B_y	: Yerel boylam
d	: Kalınlık (m)
DHI	: Yaygın Güneş Işınımı
DNI	: Direkt Normal Güneş Işınımı
E	: Zaman düzeltme faktörü
GB	: Güneş batış zamanı (derece)
GHI	: Global Güneş Işınımı
G_o	: Herhangi bir anda atmosfer dışında birim yatay yüzeye gelen güneş ışınımı
G_{on}	: Atmosfer dışından yılın herhangi bir gününe ait güneş ışınlarına dik düzlemdeki bütün dalga boylarında gelen güneş ışınımı miktarı
GS	: Güneş saati
G_{sc}	: Güneş Sabiti (W/m^2)
H	: Yatay yüzeye düşen günlük toplam güneş ışınımı
H_o	: Atmosfer dışında yatay düzleme gelen günlük güneş ışınımı
H_b	: Yatay düzleme düşen günlük direkt ışınım
H_{bT}	: Eğik düzleme düşen günlük direkt ışınım
H_d	: Yatay düzleme düşen yaygın ışınım
H_T	: Eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışınım
I	: Yatay yüzeye düşen anlık ışınım
I_o	: Atmosfer dışında birim yatay yüzeye gelen güneş ışınımı
I_b	: Yatay yüzeye düşen anlık direkt güneş ışınımı
I_{bT}	: Eğik yüzeye düşen anlık direkt güneş ışınımı

I_d	: Yatay yüzeye düşen yaygın güneş ışıınımı
I_{dT}	: Eğik yüzeye gelen anlık yaygın güneş ışıınımı
I_{ref}	: Eğik yüzeye yansıyarak gelen güneş ışıınımı
I_T	: Eğik yüzeye düşen toplam güneş ışıınımı
K	: Kelvin
K_T	: Berraklık indeksi
n	: Yılın gün sayısı
n/N	: İzafi güneşlenme süresi
R_b	: Geometrik faktör
SS	: Standart saat
t	: Gün uzunluğu
t_a	: Aylık ortalama gün uzunluğu
U	: Isıl Geçirgenlik Katsayısı (W/m^2K)
Z	: Yükseklik (m)
β	: Eğim açısı (derece)
γ	: Yüzey azimut açısı (derece)
γ_s	: Güneş azimut açısı (derece)
δ	: Deklinasyon açısı (derece)
θ	: Güneş geliş açısı (derece)
θ_z	: Zenit açısı (derece)
λ	: Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)
ϕ	: Enlem açısı (derece)
ω	: Saat açısı (derece)
ω_1	: Küçük olan saat açısı (derece)
ω_2	: Büyük olan saat açısı (derece)
ω_s	: Güneş batış saat açısı (derece)
ω_s'	: Hesaplama yapılan ayın ortalama gününde güneş ışıınlarının eğik düzleme ilk düşüş saat açısı (derece)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: n değerinin belirli bir gün ve ortalama gün için aylara dağılımı	76
Çizelge 5.1: Yapı kabuğu elemanlarının termal özellikleri.	101
Çizelge 5.2: Yapının konumu.	105
Çizelge 5.3: Hafta içi apartmanın doluluk durumu.	106
Çizelge 5.4: Hafta sonu ve resmî tatil günlerinde apartmanın doluluk durumu.	107
Çizelge 5.5: 2020 yılında farklı senaryolara ait yıllık üretilen, tüketilen enerji ve üretimin tüketimi karşılama oranı.	109
Çizelge 5.6: 2020 yılında aylara göre ısıtma ve soğutma yüklerinin toplamı (kWh).	114
Çizelge 5.7: Bina yönüne göre enerji yükleri.	115
Çizelge 5.8: Yapının içerisinde yer alan dairelerin m ³ başına toplam ısıtma ve soğutma yükleri (GGB için).	120



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Tüm dünyada enerji tüketiminin yıllara ve bölgelere göre dağılımı	2
Şekil 1.2: Global ölçekte fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan CO ₂ salınımının yakıt çeşidine göre dağılımı	2
Şekil 1.3: Bina ve inşaat sektörünün nihai enerji tüketiminde ve karbon emisyonlarındaki payı	4
Şekil 1.4: Türkiye’de toplam nihai tüketimin sektörlere dağılımı	5
Şekil 1.5: BIM’in sürdürülebilirlik alanındaki faydaları	7
Şekil 2.1: Yapı sektöründe proje teslim yöntemlerinin gelişimi	15
Şekil 2.2: 1970’lerden günümüze BIM’in evrimi	16
Şekil 2.3: nD Modelleme	18
Şekil 2.4: BIM’i oluşturan farklı sınıflar	19
Şekil 2.5: Nesne tabanlı modelleme	19
Şekil 2.6: 2B Çizimlerde ve BIM Projelerinde Birlikte Çalışabilirlik	21
Şekil 2.7: BIM olgunluk düzeyleri	22
Şekil 2.8: Gelişim seviyeleri	25
Şekil 2.9: LOD gelişim seviyeleri ve anlamları	25
Şekil 2.10: LOD gelişim seviyeleri	26
Şekil 2.11: BIM teknolojisi- erken bilgi paylaşımının faydaları	30
Şekil 2.12: BIM’in benimsenmesinde lider ülkeler	36
Şekil 2.13: Türkiye’de BIM kullanıcılarının kullandığı olgunluk seviyesi	40
Şekil 2.14: Türkiye’de BIM uygulamalarının proje tipine göre dağılımı	41
Şekil 3.1: AB’de yasal durum	44
Şekil 3.2: Global ölçekte sektörel bazda CO ₂ emisyonu	45
Şekil 3.3: Sürdürülebilir kalkınma hedefleri.	46
Şekil 3.4: Gözlemlenen sıcaklıkları ve bilgisayar simülasyonlarını içeren 1850-2020 yılları arası ortalama küresel sıcaklıktaki değişim	48
Şekil 3.5: Türkiye’de Sektörel Sera Gazı Emisyonları, MtCO ₂ e (2018)	48
Şekil 3.6: Enerji verimliliği politikalarının yıllara göre gelişimi	49
Şekil 3.7: Türkiye’de sektörler göre toplam enerji tüketimi	53
Şekil 3.8: Türkiye’de kullanılan enerjinin yakıt çeşidine göre dağılımı.	53
Şekil 3.9: Türkiye enerji sistemine genel bakış	54
Şekil 3.10: IEA ülkelerinde yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı ve yenilenebilir enerji çeşitlerinin oranı -2019	55
Şekil 3.11: Türkiye’de konut sektöründe nihai enerji tüketiminin yakıt çeşidine göre dağılımı.	55
Şekil 3.12: Konut sektöründe enerji tüketiminin kullanıma göre dağılımı -2018	56
Şekil 3.13: Enerji Kimlik Belgesi	58
Şekil 4.1: Güneş ve Dünya’nın mevsimsel konfigürasyonu	68
Şekil 4.2: Doğrudan normal güneş ışınımının dünyadaki dağılımı	69
Şekil 4.3: Fotovoltaik güç potansiyelinin dünyadaki dağılımı	70
Şekil 4.4: Türkiye’de yıllık ortalama güneşlenme süresi (1991-2020)	71

Şekil 4.5: Mevsimlere göre ortalama günlük güneşlenme süresi	71
Şekil 4.6: Türkiye’de aylık ortalama güneşlenme süresi	72
Şekil 4.7: Dünya-Güneş mesafesi, ekinokslar ve gündönümlerindeki değişiklikleri gösteren ekliptik düzlem	73
Şekil 4.8: Mevsimlere göre Güneş – Dünya arasındaki mesafenin değişimi	73
Şekil 4.9: Güneşten dünyaya enerjinin farklılaşması.....	74
Şekil 4.10: Atmosfer dışındaki güneş ışınımının mevsimlere göre değişimi.	74
Şekil 4.11: Güneş açıları	75
Şekil 4.12: Deklinasyon açısının bölgelere göre ve aylara göre değişimi.	77
Şekil 4.13: Enlem, deklinasyon ve saat açısı	78
Şekil 4.14: Güneş zenit açısı ve güneş yükseklik açısı.....	79
Şekil 4.15: Güneş yükseklik açısı	80
Şekil 4.16: Güneş azimut, yüzey azimut, zenit, güneş yükseklik ve eğim açıları.	81
Şekil 4.17: Güneş azimut, zenit ve güneş yükseklik açıları.....	81
Şekil 4.18: Yüzey azimut açısı	83
Şekil 4.19: Güneş geliş açısı	84
Şekil 4.20: Atmosfere gelen güneş ışınımı	85
Şekil 5.1: Gaziosmanpaşa ilçesinin İstanbul’daki ve Türkiye’deki konumu.....	94
Şekil 5.2: Sarıgöl Merkez Mahallesi Kentsel Dönüşüm Bölgesi’nin konumu.	95
Şekil 5.3: Çalışma alanının konumu.	96
Şekil 5.4: Kentsel dönüşüm öncesi Sarıgöl Merkez Mahallesi riskli alanı.	96
Şekil 5.5: Sarıgöl-Merkez Mahallesi Riskli Alanı arazi kullanımı paftası.	97
Şekil 5.6: Yapıların genel durumunu gösteren puantaj analizi.	97
Şekil 5.7: İş akış diyagramı.....	99
Şekil 5.8: Mimari kat planı.	100
Şekil 5.9: Referans binanın cephelere göre saydırlık ve opaklık oranları.....	100
Şekil 5.10: Oluşturulan BIM modelinin ön cephe, arka cephe ve yandan görünümü.	102
Şekil 5.11: Oluşturulan BIM modellerinin farklı açılardan 3D görünümü.....	102
Şekil 5.12: SketchUp yazılımında sadeleştirilen BIM modelinin farklı açılardan görünümü.	103
Şekil 5.13: “New Shading Surface Group” komutu.	104
Şekil 5.14: Binanın yönlendiriliş durumları ile ilgili senaryolar.	105
Şekil 5.15: EnergyPlus IDF Editor ara yüzü.....	108
Şekil 5.16: EnergyPlus kod dosyası.....	108
Şekil 5.17: Fotovoltaikten yıl boyunca enerji üretiminin yönlele göre dağılımı.	110
Şekil 5.18: Yıl boyunca toplam enerji tüketiminin yönlele göre dağılımı.	110
Şekil 5.19: Üretimin tüketimi karşılama oranı.....	112
Şekil 5.20: Tüketilen enerjinin kullanıma göre dağılımı.	112

ENERJİ VERİMLİLİĞİ ODAKLI YAPI YÖNLENDİRMESİ İÇİN BIM TABANLI BİR MODEL ÖNERİSİ: KENTSEL DÖNÜŞÜM ÖRNEĞİ

ÖZET

Tüm dünyada geçmişten günümüze, nüfusun ve şehirleşme oranının hızla artmasıyla beraber fosil yakıtların kullanımına bağlı olarak karbon salınımı da artmıştır. Nüfusun artmasıyla enerjiye olan talep artarken, fosil yakıtlar bu artan enerji talebine cevap vermekte yetersiz kalmaktadır. Zira fosil yakıtlar olarak tabir edilen yenilenemez enerji kaynakları sınırlıdır ve bugünkü kullanım ile yaklaşık yarım yüzyıl içerisinde petrol rezervlerinin; yaklaşık olarak 200 yıl içerisinde de doğalgaz ve kömürün tükeneceği tahmin edilmektedir. Öte yandan, fosil yakıtlar çevreye zararlıdır. Bu durum tüm dünyada artan bir enerji ve iklim krizine sebep olmuş ve dünya çapında tüm devletleri yenilenebilir enerji kullanımına yönlendirmiştir.

Dünyadaki enerji tüketiminin %35'i ve karbon emisyonlarının %38'i binalardan kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde Türkiye'de enerji tüketiminin yaklaşık olarak üçte birinin ticari, kamu ve konut yapılarından kaynaklandığı bildirilmektedir. Bu kapsamda, AB tarafından binalar enerji tasarrufunda öncelikli alan ilan edilmiş ve binalarda enerji verimliliğinin sağlanmasına yönelik olarak NSEB (Neredeyse Sıfır Enerjili Bina), nSEB (Net Sıfır Enerjili Bina), yeşil bina gibi kavramlar önem kazanmıştır. Bu kapsamda dünya genelinde ve Türkiye'de binalarda enerji verimliliği ve yenilenebilir enerjinin kullanımının yaygınlaşması ile ilgili birçok önemli adım atılmış ve yasal çerçeve güçlendirilmiştir. NSEB, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nde yüksek enerji performanslı ve belli bir oranda yenilenebilir enerji kullanan bina olarak tanımlanmaktadır. Bu çerçevede Yapı Bilgi Modelleme (Building Information Modeling- BIM) ve Bina Enerji Modelleme (Building Energy Modeling- BEM) teknolojileri, NSEB hedefinin gerçekleştirilmesinde önemli fırsatlar sunan araçlardır. Zira BIM teknolojisi; sahip olduğu gelişmiş bilgi paylaşımı, gelişmiş üretkenlik, tüm yaşam döngüsü boyunca kullanım, çevresel analizler, artırılmış sürdürülebilirlik, nesne yönelimli modelleme gibi faydalar sebebiyle binalarda enerji verimliliğinin sağlanmasında kilit bir rol oynamaktadır. BIM teknolojisi sayesinde yapının daha tasarım aşamasında yapı bilgi modeli üretilebilmekte ve BEM ile enerji analizleri yapılabilir.

Bir binanın NSEB olabilmesi ancak hem yıllık enerji tüketiminin en az olmasıyla hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından yıllık enerji üretiminin en fazla olmasıyla sağlanabilmektedir. Buradan hareketle bu çalışmada, bir kentsel dönüşüm bölgesinde yer alan referans bir binanın enerji etkin şekilde en iyi yönlendirilmesi amacıyla BIM tabanlı bir model kullanılarak enerji simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Enerji simülasyonu için bina kabuğu bileşenlerinin ısı özellikleri TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları'na uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Üzerinde çalışılan binanın

yönlendiriliş durumu 16 farklı yöne göre (4 ana, 4 ara, 8 ikincil ara yön) değiştirilerek 16 farklı alternatif senaryo üretilmiştir. Projede yer alan mevcut yönlendiriliş durumu da dikkate alınarak 1 adet mevcut durum senaryosu oluşturulmuştur. Ayrıca, NSEB konsepti kapsamında yenilenebilir enerji kullanımının binadaki payını artırmak amacıyla binanın tüm çatı alanına fotovoltaik paneller yerleştirilmiştir. Bu çalışmada yöntem olarak BIM-BEM yarı otomatik entegrasyonu seçilmiştir. BIM yazılımı olarak Autodesk Revit, ara yazılım olarak SketchUp Pro ve BEM yazılımı olarak ise EnergyPlus 9.5 kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında binanın enerji tüketimi hesaplanırken bina cephesine düşen güneş ışıınımı miktarının yanında duvar, pencere, kapı vb yapı elemanlarının malzeme özellikleri ve ısı iletim katsayıları da parametre olarak dikkate alınmıştır. Yapılan enerji hesaplamalarında binada her katta yer alan 5 dairenin her biri birbirinden bağımsız tek bir termal bölge olarak tanımlanmıştır. Ayrıca her dairede 3 kişinin yaşadığı ve bu kişilerin belirli zaman aralıklarında evde oldukları varsayılmıştır. Yukarıdakilere ek olarak binada kullanılan elektrikli ekipmanlardan ve aydınlatmadan yayılan ısı enerjisi de hesaplamalara katılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, en az yıllık enerji ihtiyacı (yıllık enerji tüketimi) GGB (güney-güneybatı) yönü için bulunmuştur. En yüksek yıllık enerji gereksinimi, KKD (kuzey-kuzeydoğu) ve GGB (güney-güneybatı) yönleri için bulunmuştur. Fotovoltaik panellerle enerji üretimine bakıldığında ise en verimli yönün güney yönü, en az verimli yönün ise kuzey yönü olduğu sonucuna varılmıştır. Üretimin tüketimi karşılama oranları karşılaştırılarak enerji etkinliği ölçülmüştür. Buna göre, üretimin tüketimi karşılama oranının yaklaşık %15 olduğu kuzey yönü enerji verimliliği en düşük yön olarak belirlenmiştir. Öte yandan, yaklaşık %20 üretimin ihtiyacı karşılama oranı ile güney yönü optimum enerji verimli yön olarak belirlenmiştir. Genel olarak tüm sonuçlara bakıldığında optimum yönlendiriliş sıralaması şu şekilde elde edilmiştir: G (güney), GGD (güney-güneydoğu), GGB (güney-güneybatı), GB (güneybatı), GD (güneydoğu), GBB (güneybatı-batı), GDD (güneydoğu-doğu), B (batı), D (doğu), KBB (kuzeybatı-batı), KDD (kuzeydoğu-doğu), KB (kuzeybatı), KD (kuzeydoğu), KKB (kuzey-kuzeybatı), KKD (kuzey-kuzeydoğu) ve K (kuzey).

Çalışma sonucunda elde edilen bulgulara göre yapı projelerinde BIM-BEM birlikte çalışabilirliği ile yapıların doğru yönlendirilmesiyle enerji verimliliğinin artırılabilceği ve temiz enerjiden ve güneş ışıınımından daha fazla yararlanılabileceği görülmüştür. Bununla beraber, kentsel ölçekte çalışmalar yapılırken tüm binaların enerji verimliliği ilkesi de göz önünde bulundurularak yönlendirilmesiyle ülkesel bazda ciddi enerji tasarruflarının sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

A BIM-BASED MODEL PROPOSAL FOR ENERGY EFFICIENCY FOCUSED BUILDING ORIENTATION: AN URBAN TRANSFORMATION AREA EXAMPLE

SUMMARY

With the rapid increase in population and urbanization rate all over the world, carbon emissions have increased due to the use of fossil fuels. While the demand for energy increases together with the increase in population, fossil fuels are insufficient to meet this increasing energy demand. Since non-renewable energy resources, called fossil fuels, are limited and it is estimated that with today's use, oil reserves will be depleted in about half a century and natural gas and coal will be depleted in approximately 200 years. On the other hand, fossil fuels are harmful to the environment. This situation has caused an increasing energy and climate crisis all over the world and has led all states around the world to use renewable energy.

35% of the world's energy consumption and 38% of carbon emissions originate from buildings. Similarly, it is reported that approximately one third of the energy consumption in Turkey originates from commercial, public and residential buildings. In this context, buildings have been declared a priority area in energy saving by the EU and concepts such as NZEB (Nearly Zero Energy Building), nZEB (Net Zero Energy Building), green building have gained importance in order to ensure energy efficiency in buildings. In this context, many important steps have been taken and the legal framework has been strengthened in the world and in Turkey regarding energy efficiency in buildings and the widespread use of renewable energy. NZEB is defined in the Building Energy Performance Regulation as a building with high energy performance and using a certain percentage of renewable energy. In this context, BIM (Building Information Modeling) and BEM (Building Energy Modeling) technologies are tools that offer significant opportunities in achieving the NZEB target. Because BIM technology plays a key role in providing energy efficiency in buildings due to its benefits such as enhanced information sharing, enhanced productivity, use throughout the entire life cycle, environmental analysis, increased sustainability, and object-oriented modeling. Thanks to BIM technology, a building information model can be produced at the design stage of the building and energy analyzes can be made with BEM.

A building can be NZEB only if its annual energy consumption is the lowest and the annual energy production from renewable energy sources is the highest. From this point of view, in this study, an energy simulation was carried out using a BIM-based model in order to orient a reference building located in an urban transformation area in an energy efficient way. For energy simulation, the thermal properties of the building envelope components have been determined in accordance with TS 825 Thermal Insulation Rules in Buildings. The orientation of the building was changed according to 16 different directions (4 main, 4 intermediate, 8 secondary intermediate directions) and 16 different alternative scenarios were produced. Considering the current orientation situation in the project, 1 current situation scenario was created. Moreover, within the scope of the NZEB concept, photovoltaic panels were placed on the entire roof area of the building in order to increase the share of renewable energy use in the building. In this study, BIM-BEM semi-automatic integration was chosen as the method. Autodesk Revit was used as BIM software, SketchUp Pro software was used as intermediate software and EnergyPlus 9.5 was used as BEM software.

Within the scope of the study, many parameters (the amount of solar radiation falling on the facade of the building, the material properties and heat transmission coefficients of the building elements such as walls, windows, doors, etc.) were taken into account while calculating the energy consumption of the building. In the energy calculations, each of the 5 apartments in the building is defined as a single thermal zone independent of each other. In addition, it is assumed that 3 people live in each flat and these people are at home at certain time intervals. In addition, the heat energy emitted from the electrical equipment and lighting used in the building was also taken into account in this study.

According to the results obtained, the least annual energy requirement (annual energy consumption) was found for the SSW (south-southwest) direction. The highest annual energy requirement was found for the NNE (north-northeast) and SSW (south-southwest) directions. Considering the energy production with photovoltaic panels, it is concluded that the most efficient direction is the south direction and the least efficient direction is the north direction. Energy efficiency was measured by comparing the ratio of production to meet the needs. Accordingly, the north direction, where the ratio of production to meet the needs is approximately 15%, was determined as the lowest energy efficiency direction. On the other hand, the south direction was determined as the optimum energy efficient direction, with the ratio of production to meet the needs is approximately 20%. In general, when looking at all the results, the most optimum orientation order is as follows: S (south), SSE (south-southeast), SSW (south-southwest), SW (southwest), SE (southeast), SWW (southwest-west), SEE (southeast-east), W (west), E (east), NWW (northwest-west), NEE (northeast-east), NW (northwest), NE (northeast), NNW (north-northwest), NNE (north-northeast), and N (north).

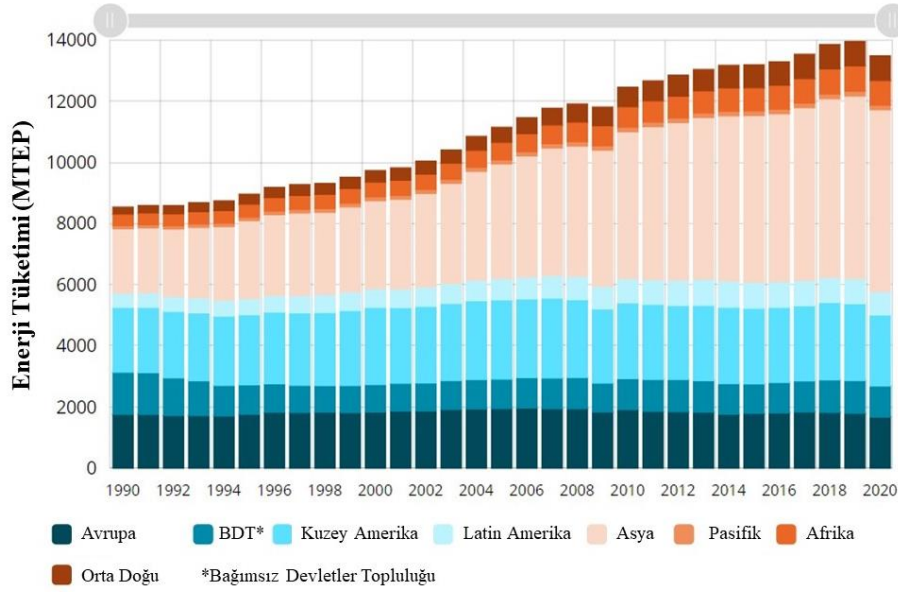
According to the findings obtained as a result of the study, it has been seen that energy efficiency can be increased by orienting the buildings correctly with BIM-BEM interoperability in building projects and more benefits can be made from clean energy and solar radiation. However, it has been concluded that significant energy savings can be achieved on a national basis by orienting all buildings by considering the energy efficiency principle while conducting studies on an urban scale. In this context, various suggestions were made.



1. GİRİŞ

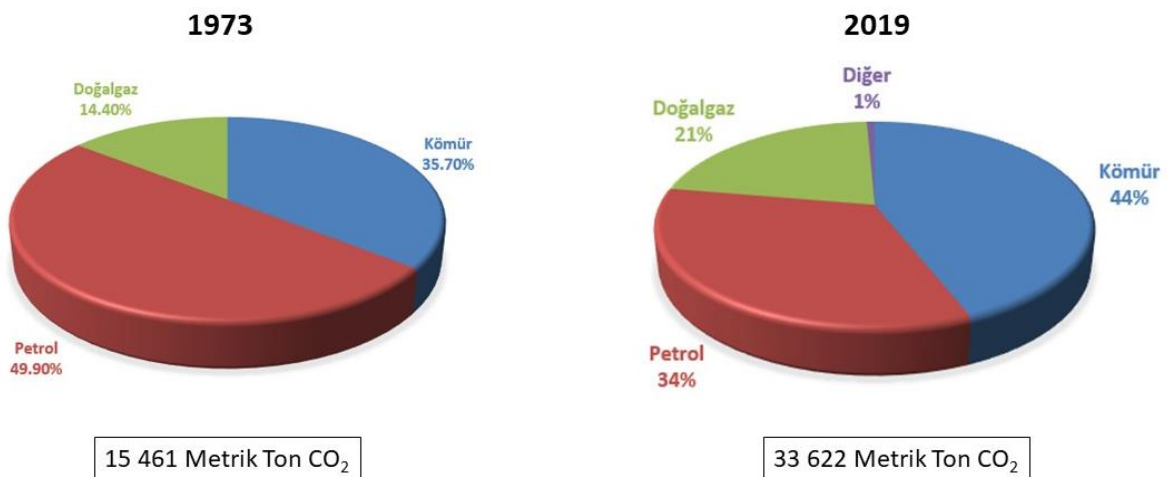
İnsanoğlunun var olduğu ilkçağlardan günümüze dek, dünya nüfusu artış göstermiş ve her geçen yıl da artış hızla devam etmiştir. MÖ 1000 yılında 300 milyon olarak tahmin edilen dünya nüfusunun; 19. yy. başında yaklaşık 900 milyona, 19. yy. sonunda 1.7 milyara, 20. yy sonunda ise hızla artarak yaklaşık 6 milyara ulaştığı görülmüştür. Günümüzde 7.9 milyara ulaşan dünya nüfusunun, BM raporuna göre 2100 yılına kadar yaklaşık 10.9 milyara çıkması öngörülmektedir. Görüldüğü üzere 19 yüzyıl boyunca ulaşılan nüfusun iki katı kadar artış, sadece bir yüzyılda gerçekleşmiştir. Bilindiği gibi ilkçağlarda insanlar genellikle avcılık ve toplayıcılıkla uğraşıp göçebe olarak yaşamaktaydılar. Tarım Devrimi ile birlikte yerleşik hayata geçip ilk şehirleri kuran insanların zamanla enerjiye olan gereksinimleri ortaya çıkmıştır. Başta insan gücüyle yapılan tarımda, Sanayi Devrimi ile birlikte ortaya çıkan makineleşme ile enerjiye olan talep hızla artmaya başlamıştır. Ayrıca tarımda makineleşme ile birlikte kırsal alanlarda istihdam sorunu ortaya çıkmış ve kırsal alanlardan kentsel alanlara doğru hızlı bir göç hareketi başlamıştır. Sonrasında 2. Sanayi Devrimi'nin başlangıcı olarak kabul edilen ilk üretim hatlarının kurulup, elektrik enerjisi ile seri üretime geçildiği 19. yüzyılın sonlarından itibaren ortaya çıkan enerji gereksinimi, insanoğlu için hayati bir önem kazanmaya başlamıştır. Gerçekten de enerji, hayatın her alanında ihtiyaç duyulan önemli bir gereksinim olmuştur. Günümüzde toplumlardaki en önemli sorunlardan biri, toplumların var olabilmesi ve hayatın normal akışında devam edebilmesi için gerekli olan enerjinin yeterli düzeyde ve çevre dostu bir şekilde sağlanması ve kullanılmasıdır.

Tüm dünyada enerji tüketiminin yıllara ve bölgelere göre dağılımı Şekil 1.1'de verilmektedir. Dünya genelinde 1990 yılında 8,556 MTEP (milyon ton eşdeğer petrol) olan enerji tüketimi 2020 yılına gelindiğinde 13,508 MTEP'e ulaşmıştır. COVID-19 kaynaklı olarak getirilen karantina önlemleri ve seyahat kısıtlamaları sebebiyle 2020'de küresel enerji tüketimi (%4) düşmüştür.



Şekil 1.1: Tüm dünyada enerji tüketiminin yıllara ve bölgelere göre dağılımı (Enerdata, 2021).

Global ölçekte kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıtların yakılmasından (kullanılmasından) kaynaklı karbondioksit (CO_2) salınımı ve bunların 1973 ve 2019 yıllarında yakıt çeşidine göre dağılımı Şekil 1.2’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi dünyada yakıtların yakılmasından kaynaklı 1973 yılında 15,461 metrik ton CO_2 salınımı olmuşken, 2019 yılına gelindiğinde artarak 33,622 metrik tona çıkmıştır. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde bu rakamın daha da artacağı öngörülebilmektedir.



Şekil 1.2: Global ölçekte fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan CO_2 salınımının yakıt çeşidine göre dağılımı (Bu grafiklerde turba ve bitümlü şeyl, kömür içine dahil edilmiştir).

Kullanılacak olan enerji, fosil yakıtlar olarak da adlandırılan yenilenemez enerji ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki farklı şekilde sağlanabilmektedir (Çukurçayır & Sağır, 2008). Son iki yüzyılda artan enerji talebinin karşılanması için genellikle daha ucuz olan yenilenemez enerji kaynaklarına doğru bir yönelim olmuştur. Fakat, yenilenemez enerji kaynakları sınırlıdır ve fosil yakıtların yakın zamanda tükenme tehlikesi altında olduğu ifade edilmektedir. Yapılan araştırmalara göre şu anki kullanım ile 48 yıl içerisinde petrol rezervlerinin, yaklaşık 200 yıl içerisinde de kömür ve doğalgaz rezervlerinin tükeneceği tahmin edilmektedir (BP, 2019; U.S. Energy Information Administration, 2019). Ayrıca fosil yakıtların hem ekolojik çevreye ve gezegenimize hem de dünya üzerindeki tüm canlılara sayısız zararı bulunmaktadır. Fosil yakıtlar, karbon salınımını artırarak ozon tabakasının incelmesine neden olmaktadır. Bu şekilde ekolojik dengeyi bozarak küresel ısınma, iklim değişiklikleri ve asit yağmurlarına davetiye çıkarmaktadır. Bununla birlikte, fosil yakıtlardan kaynaklı etrafa salınan gaz ve parçacıkların canlıların sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkileri vardır.

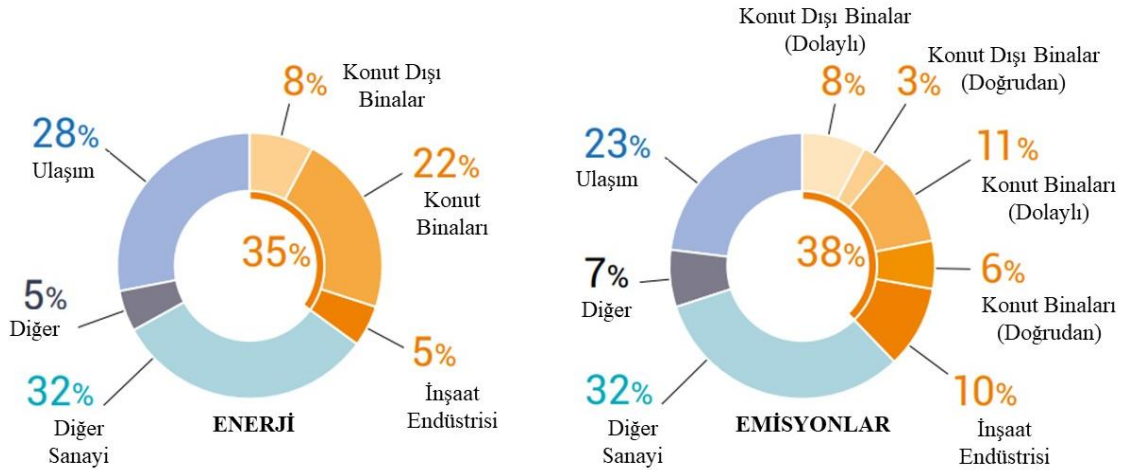
Dünyada 1973 yılında yaşanan petrol krizi ile birlikte dünyada petrole ve fosil yakıtlara karşı bir güvensizlik ortamı oluşmuştur. Bu durum, dünyada yeni ve alternatif enerjilerin aranmaya başlanmasına sebep olmuştur. Zamanla, fosil yakıtların doğal kaynaklar ve çevre üzerindeki yerel, bölgesel ve global seviyedeki direkt olumsuz etkileri, çevre bilincinin gelişmesine neden olmuştur (Büyükmihci, 2003). Böylece, alternatif ve temiz enerji arayışı hızlı bir ivmeyle artış göstermiştir.

Bununla ilgili olarak son yıllarda yapılan global ölçekte önemli girişimlerden biri 191 ülkenin taraf olduğu Paris Anlaşması'dır. 2015 yılında imzalanan anlaşma, temel olarak Sanayi Devrimi öncesi döneme göre küresel ortalama sıcaklık artışının 2°C altında tutulması ve ek olarak bu artışın 1.5°C'nin altında tutulmasına yönelik küresel çabaların sürdürülmesi hedefi üzerine kurulmuş bir sözleşmedir. Bunun yanı sıra, bu hedefi sağlamak için karbon emisyonlarının azaltılması, temel noktayı oluşturmaktadır. Bu hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için birçok farklı yaklaşım ve yöntem geliştirilmiş olmasına rağmen, karbon emisyonlarının azaltılması için gereken en önemli adımlardan birisi fosil yakıtların dışındaki yenilenebilir enerjinin kullanımının yaygınlaştırılmasıdır.

Türkiye, 2015 yılında enerji verimliliği üzerine çalışmalar başlatmış ve 2030 yılına kadar sera gazlarını %21 oranında azaltmayı hedeflemiştir. Bu hedefi

gerçekleştirilmek için ihtiyaç duyulan yasal ve kurumsal çerçeve için 2018’de “Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı” kabul edilmiştir. Ayrıca, Dünya Bankası tarafından yapılan açıklamada, Türkiye’deki kamu binalarının enerji verimliliği açısından ciddi bir potansiyelinin olabileceğinden bahsedilmiştir. Bu bağlamda Dünya Bankası, Türkiye’de enerji verimliliği ve deprem güçlendirme çalışmalarında kullanılmak üzere 265 milyon dolarlık bir krediyi onaylamıştır (Url-1).

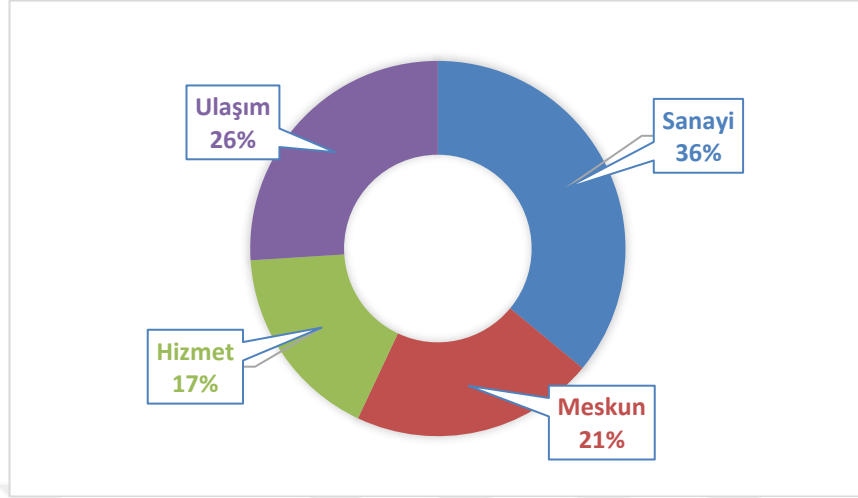
Yukarda ifade edilmeye çalışıldığı üzere, atmosferdeki sera gazlarındaki hızlı ve büyük artış, küresel ısınmaya ve dolayısıyla iklim değişikliğine sebep olmaktadır. Küresel ısınmaya neden olan ana faktörlerden birisi olan karbon salınımının kontrol altına alınamamasının, dünyamız için önemli bir problem kaynağı olacağı aşikardır. Diğer yandan dünyadaki enerji tüketiminin %35’i ve karbon emisyonlarının %38’i binalardan kaynaklanmaktadır (Şekil 1.3) (United Nations Environment Programme, 2020).



Şekil 1.3: Bina ve inşaat sektörünün nihai enerji tüketiminde ve karbon emisyonlarındaki payı (United Nations Environment Programme, 2020).

Benzer şekilde Türkiye’de ise enerji tüketiminin yaklaşık olarak üçte birinin ticari, kamu ve konut yapılarından kaynaklandığı ifade edilmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2018). Türkiye’de toplam nihai tüketimin sektörlere göre dağılımı Şekil 1.4’te verilmektedir. Görüldüğü gibi sadece konut sektörü, toplam nihai tüketimde %21’lik bir paya sahiptir. Binalardaki temel enerji kaynağının fosil yakıtlara (kömür, doğalgaz, petrol vb.) dayalı olduğu göz önüne alındığında, binalarda enerji verimliliğine dönük yapılacak iyileştirmelerin ve bu bakış açısıyla yapılacak olan imalatların karbon emisyonunu önemli ölçüde azaltacağı açıktır. Dolayısıyla, binalarda yenilenebilir enerji kullanılmasının çok önemli bir konu haline geldiği

görülmektedir. Bir başka ifadeyle binalar, artan enerji ve iklim krizinin iyileştirilmesinde önemli bir fırsat sunmaktadır.



Şekil 1.4: Türkiye’de toplam nihai tüketimin sektörlere dağılımı (International Energy Agency, 2021).

Günümüzün oldukça önemli bir konusu olan binalarda enerji verimliliği ile ilgili hem dünyada hem Türkiye’de çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda, yeşil bina, nSEB (Net Sıfır Enerjili Bina), NSEB (Neredeyse Sıfır Enerjili Bina) konsepti gibi çeşitli konseptler geliştirilmiştir. Yeşil bina konsepti, temel olarak binanın tüm yaşam döngüsü boyunca kaynakların korunmasını ve verimli kullanılmasını, çevrenin korunmasını, kirliliğin azaltılmasını ve insanlara olabilecek maksimum düzeyde sağlıklı, konforlu ve verimli alan kullanımı sağlayarak doğayla uyumlu binalar tasarlanılmasına odaklanmaktadır (Ge, 2020). Bir başka ifadeyle, yeşil bina konsepti, doğal çevreyi ve yapıyı çevreyi organik bir bütün olarak ele almaktadır ve temel hedeflerinden biri çevre dostu olarak enerji tüketimini etkin bir şekilde azaltmaktır (Guo ve diğ., 2021; Yongwang ve diğ., 2021). Benzer olarak, nSEB (Net Sıfır Enerjili Bina) ek enerji talebini azaltmaya yöneliktir ve bu, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla gerçekleştirilmektedir (Yamamura ve diğ., 2017).

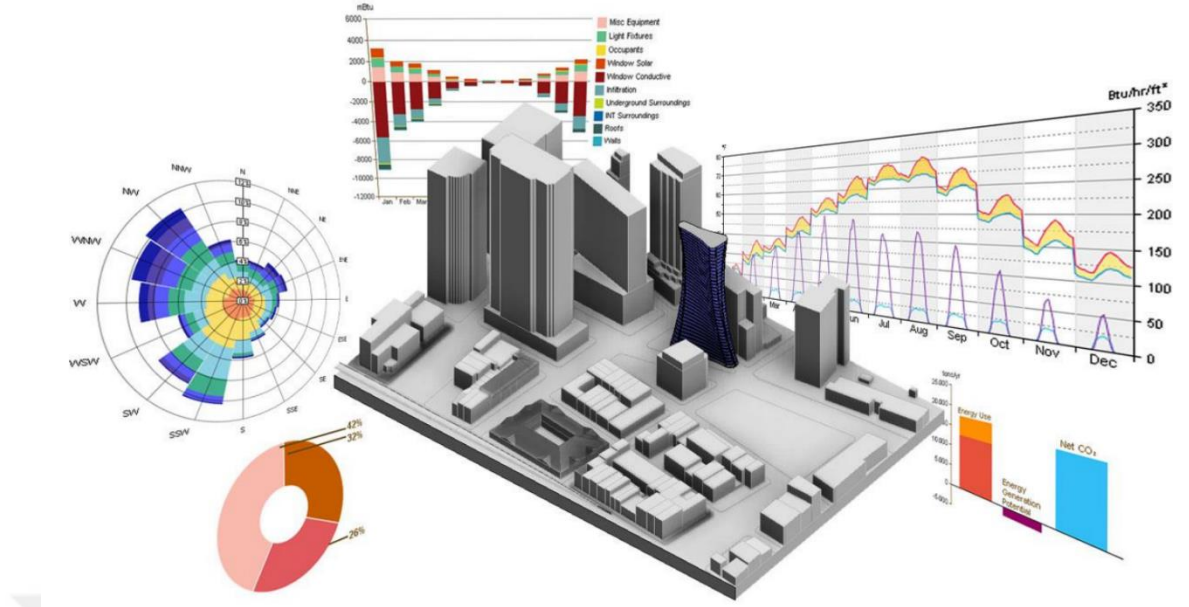
Türkiye’de 2017 yılında Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği’nde değişiklik yapılmıştır. Yapılan değişikliklere göre güneş enerjili yenilenebilir enerji sistemleri kurulması, ısı yalıtım uygulamaları gibi tadilatlar yapı ruhsatına tabii değildir. Fakat bu tadilatların taşıyıcı sistemi etkilememesi, ilgili kurumdan izin alınması ve bina için enerji kimlik belgesinin en az C sınıfı olması gerekmektedir.

2019 yılında yayınlanan On Birinci Kalkınma Planı’nda enerji verimliliği ile ilgili önemli adımlar atılmıştır. Özellikle 492. maddede daha verimli ve kendi enerjisini

üreten binaların yaygınlaştırılmasından bahsedilmiştir. Bunun dışında konut üretiminde dikkate alınacak kriterler arasına enerji verimliliği kriteri de dahil edilmiş ve kentsel dönüşüm ve TOKİ gibi sosyal konutlarda da enerji verimliliğinin sağlanmasının önü açılmıştır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019).

19 Şubat 2022 tarih, 31755 sayılı Resmî Gazete’de “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği’nde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik” yayınlanmıştır. Bu yönetmelikte NSEB (Neredeyse Sıfır Enerjili Bina) kavramından bahsedilmiş ve “yüksek enerji performansına ve aynı zamanda belli oranda yenilenebilir enerji kullanımına sahip olan bina” olarak tanımlanmıştır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022).

Yeşil bina, nSEB ve NSEB konseptlerinin gerçekleştirilmesi için *Building Information Modeling (BIM)* önemli bir araçtır. Son yıllarda oldukça sık gündeme gelen BIM konsepti farklı meslek gruplarının bir yapıyı tek bir 3D model içinde planlamasını, tasarlamasını ve inşa etmesini sağlayan, işbirliğine dayalı bir süreçtir (Lorek, 2022). Geçmişte kullanılan 2 boyutlu CAD çizimleri/planlar yerine, 3 boyutlu modellerin kullanıldığı BIM konsepti, binanın tasarım sürecinden işletimine kadar çok çeşitli aşamalarda tüm bina varlık döngüsü içerisinde kullanılmakta ve birçok faydası olduğu için karar vericilere yol gösterici bir araç olmaktadır. BIM, daha iyi görselleştirme, artırılmış gerçeklik, çakışma tespiti, iş birliği ve iletişim, maliyet tahmini, basitleştirilmiş prefabrikasyon, güvenli şantiyeler, iyileştirilmiş planlama, adım adım süreç, hız, maliyet, sürdürülebilirlik, süreklilik, iyileştirilmiş bina kalitesi gibi faydalar sağlamaktadır (Şekil 1.5) (Tobias, 2021). Ayrıca, BIM ile daha binanın tasarım aşamasında enerji etkin ve sürdürülebilir bina geliştirilebilmektedir. Projedeki değişiklikler hızlıca yapıp projeye adapte edilebilmektedir. Buna ek olarak, yapılacak gerçek binanın 3 boyutlu modeli sayesinde hatalar inşaat öncesinde fark edilebilmektedir. Böylece hem maliyet hem de zaman açısından tasarruf mümkün olmaktadır. Örneğin Sutter Medical Center, Castro Valley (California) projesinde BIM’in kullanılmasıyla, geleneksel yöntemlere göre proje, %30 daha erken tamamlanmıştır. Projeye olan soru, düzeltme ve toplantı çağrısı oranları ise geleneksel yöntemlere göre %70 azalmış ve dolayısıyla projenin işleyiş hızı artmıştır. Projede yeniden yapma/hata düzeltme işlerinde ise %60’lık bir azalma kaydedilmiş ve verimliliğin %8 oranında arttığı gözlemlenmiştir (Akkoyunlu, 2015).



Şekil 1.5: BIM'in sürdürülebilirlik alanındaki faydaları (Url-2).

BIM'in sağladığı faydalarından dolayı; dünyada İngiltere, Amerika Birleşik Devletleri, Norveç, Finlandiya ve Singapur gibi ülkelerde BIM kullanımı zorunlu hale getirilmiştir. Türkiye gibi birçok ülkede ise BIM kullanılmaya başlanmış ve kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Örneğin, İstanbul'daki raylı sistem projelerinde BIM kullanılması zorunlu hale getirilmiştir (Prota Yazılım, 2022).

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı kentsel dönüşüm kapsamına alınan seçilmiş bir bölgedeki yıkılan binaların yerine yapılacak yenilerinin ısıtma-soğutma (enerji) yüklerinin azaltılmasına yönelik olarak yapıların en uygun yönlendirilmesine ilişkin BIM-tabanlı bir model ortaya konulmasıdır. Bu kapsamda yeni yapılacak binaların ısıtma ve soğutma yüklerinin azaltılmasıyla binaların yıllık toplam enerji yüklerinin azaltılması hedeflenmiştir. Buna ek olarak, NSEB konsepti kapsamında binanın tüm çatı alanına fotovoltaik panel yerleştirilerek güneş enerjisinden enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, enerji tüketiminin aksine, enerji üretiminin maksimize edilmesi hedeflenmiştir. Yıllık toplam enerji yükünün minimum olduğu ve güneş enerjisinden enerji üretiminin maksimum olduğu bina yönünün optimum yön olarak belirlenmesiyle NSEB hedefine ulaşılması hedeflenmiştir.

Tüm bu hedefler doğrultusunda, yapı kabuğu elemanları ve malzeme detayları dikkate alınarak kentsel dönüşüm alanına yapılacak binaların 3B modelleri üretilerek BIM-

tabanlı bir sistem oluşturulmuştur. Ardından, oluşturulan BIM-tabanlı model kullanılarak BIM ve Bina Enerji Modelleme (BEM) yazılımları arasında yarı otomatik bir entegrasyon gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, BIM teknolojisinden faydalanılarak Bina Enerji Modeli oluşturulmuş ve bina performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Bina performans analizleri gerçekleştirilirken, bina ile ilgili özellikler, yapı kabuğuna ait ısı özellikler, iklimsel özellikler ve kullanıcı davranışı ile ilgili özellikler çeşitli varsayımlar yapılarak dikkate alınmıştır. Binaların yönlendiriliş durumu 16 farklı yöne göre ele alınmış, 16 farklı alternatif BEM modeli oluşturulmuştur. Binaların enerji performans simülasyonları 16 farklı yön alternatifine göre gerçekleştirilmiştir. Böylece, farklı bina yönlendirmesine sahip alternatifler arasından enerji verimliliği en yüksek olanı belirlenerek, binaların buna göre en iyi şekilde yönlendirilmeleri için öneride bulunulmuştur.

1.2 Literatür Araştırması

Literatürde bu konuda yapılmış çeşitli çalışmalar yer almaktadır. İlk olarak Berköz (1973) güneş ışıının optimizasyonu için binaların yönlendiriliş durumlarının belirlenmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır.

Buldurur (1983) güneş enerjisinden optimum şekilde yararlanmak için kentsel tasarım, yerleşim alanının seçimi, binaların ve kentlerin yönlendirilmesinin vb. nasıl olması gerektiği ile ilgili bir çalışma yapmıştır.

Berköz (1983) yaptığı çalışmada yapı yüzeylerindeki güneş ışıını miktarını hesaplamış ve yapılardaki güneş ışıının etkisini optimize eden pasif ısıtma ve iklimlendirme sistemleri olarak tasarlanması konusunda çıkarımlarda ve önerilerde bulunmuştur.

Krygiel ve Nies (2008) tarafından ilk kez “Yeşil BIM” konsepti önerilmiştir. Yapılan çalışmada BIM’in tasarım yöntemlerinin güncellenmesi ve çeşitli inşaat sektörü katılımcıları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sürdürülebilir tasarımın teşviki için Bina Performans Analizi (BPA) ile birlikte Yapı Bilgi Modelleme’yi kullanmışlardır.

McGraw-Hill Construction (2010) tarafından hazırlanan smart market raporunda, Yeşil BIM’in sürdürülebilir tasarım sonuçlarını önemli ölçüde geliştirebilmesi için BIM teknolojisi ile enerji modellemesinin birlikte kullanılabileceği öne sürülmektedir.

Asl, Zarrinmehar ve Yan (2013) tarafından yapılan çalışmada BIM tabanlı olarak bina enerji performans analizi ve optimizasyonunu incelenmiştir. Yazarlar “Revit2GBSOpt” isimli bir algoritma geliştirerek Autodesk Revit ile Autodesk Green Building Studio yazılımları arasındaki optimizasyonun otomatikleştirilmesini sağlamışlardır.

Yüksel (2020) çalışmasında Türkiye’nin farklı iklim bölgelerinde bulunan 5 il için farklı cephe eğim açısı, yönlendiriliş durumu ve saydamlık oranı kombinasyonları belirleyerek bu faktörlerin binanın ısıtma ve soğutma yükleri üzerine etkisini EnergyPlus enerji simülasyonu ile (BIM kullanmadan) incelemiştir.

Yıldırım (2022) çalışmasında halihazırda var olan bir konutun enerji performansını hesaplamak için BIM tabanlı bir yaklaşım kullanmıştır. İlgili konutun modellemesi Autodesk Revit aracılığıyla yapıldıktan sonra Autodesk Green Building Studio ile enerji performansı hesaplanmıştır.

Açıl (2022) çalışmasında K-Odak isimli bir kütüphanenin Autodesk Revit ile BIM modellemesini yapmış, ardından Autodesk Insight yazılımı ile enerji analizini gerçekleştirmiştir. Farklı senaryolar üzerinden en sürdürülebilir yapı tasarımını geliştirmeye çalışmıştır.

Görüldüğü gibi, literatürde BIM ile BEM ya da Bina Performans Analizi (BPA) teknolojilerinin entegrasyonu ve birlikte çalışabilirliği konusu artan bir ilgi görmektedir. Fakat literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle uyumluluk amacıyla aynı şirket tarafından üretilen BIM ve BEM yazılımlarının birlikte kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, BIM yazılımı olarak Autodesk Revit kullanıldığında, BEM yazılımı olarak Autodesk Green Building Studio, Autodesk Insight gibi yazılımlar kullanılmaktadır. ABD Enerji Bakanlığı tarafından geliştirilen EnergyPlus yazılımı ise çok daha kapsamlı, doğru ve güvenilir bir hesap algoritması sunmaktadır. Fakat, EnergyPlus yazılımının BIM modelleriyle uyumu Autodesk BEM yazılımlarına kıyasla daha kısıtlıdır.

Bu lisansüstü tez çalışması yukarıda bir kısmı verilen çalışmalardan hem konu hem de yöntem açısından farklılıklara sahiptir. Öncelikle bu tez çalışması yapı bilgi modelleme ve bina enerji modelleme teknolojilerini entegre edip bir kentsel dönüşüm projesinde kullanarak bina ölçeği yerine, kentsel ölçeğe ve kentsel enerji sorunlarına odaklanmıştır. İkinci olarak, bu lisansüstü tez çalışmasında yöntem olarak BIM-BEM

arasında yarı otomatikleştirilmiş entegrasyon temelli bir yaklaşım benimsenmiştir. Diğer çalışmalarda olduğu gibi uyumluluğun artırılması için aynı şirket tarafından üretilmiş BIM ve BEM yazılımları kullanılmamıştır. Bunun yerine daha güvenilir ve kapsamlı bilgi sunan EnergyPlus yazılımının kullanılması uygun görülmüştür. Bunun için BIM yazılımı olarak Autodesk Revit kullanılmış, ardından Sketch-up içerisinde yer alan Openstudio plugini ile dosya dönüşümü gerçekleştirilerek ilgili model dosyasının EnergyPlus ile enerji simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

1.3 Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma kapsamında, kentsel dönüşümde yapı bilgi modelleme ve enerji performans analizi araştırılmış ve örnek bir kentsel dönüşüm projesinde yer alan bir binanın optimum olarak nasıl yönlendirilebileceği, tasarım aşamasında enerji simülasyonları yapılarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında BIM ve BEM teknolojilerinin kentsel dönüşüm projelerine nasıl uyarlanabileceği incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde çalışmanın ana hatları, tezin amacı, kapsamı ve literatür araştırması yer almaktadır.

Tezin ikinci bölümünde BIM teknolojisi ele alınmıştır. BIM kavramının tarihçesi, temelleri, olgunluk ve gelişim seviyeleri, faydaları, uygulanmasındaki zorluklar ve dünyadaki ve Türkiye’deki mevcut durumu anlatılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde enerji verimliliğine yönelik politika ve stratejiler araştırılmış, sonrasında Türkiye’de mevcut bina stoğunun yapısı ve binalarda enerji verimliliği ile ilgili kavramlar incelenmiştir. Son olarak bu bölümde enerji etkin bina tasarımı ele alınmıştır. Bu bağlamda, binalarda enerji performans analizi (BPA), Bina Enerji Modelleme (BEM) ve BIM/BEM birlikte çalışabilirliği üzerinde durulmuştur.

Tezin dördüncü bölümünde binalarda enerji performansını etkileyen faktörlerden güneş ışıınımı incelenmiştir. Bu bölümde, güneş geometrisi ve güneş ışıınımı hesabı anlatılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde, BIM ve BEM kullanılarak binalarda enerji verimliliğinin sağlanması için örnek bir kentsel dönüşüm projesinde BIM tabanlı bir enerji simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İstanbul ili, Gaziosmanpaşa ilçe sınırları içerisinde yer alan bir kentsel dönüşüm bölgesi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu kentsel dönüşüm bölgesinde yapılması planlanan bir konut projesi örnek uygulama olarak

seçilmiştir. Bu çalışma kapsamında öncelikle ilgili binanın BIM modeli oluşturulmuş ve mevcut planlanan duruma göre enerji simülasyonları yapılmıştır. Sonrasında bina yönlendiriliş durumu sırayla değiştirilerek ve her durumda tüm çatıya fotovoltaik panel yerleştirilerek farklı senaryolar oluşturulmuş ve her bir senaryonun enerji üretim ve tüketimleri enerji simülasyonu yardımıyla belirlenmiştir. Son olarak, tüm senaryolardaki sonuçlar karşılaştırılmış ve en uygun bina yönlendiriliş durumunun belirlenmesi sağlanmıştır.

Tezin altıncı bölümünde, çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan bahsedilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Son olarak yedinci bölümde çalışmanın tümünde yer alan sonuçlar irdelenmiş ve bazı öneriler sunulmuştur.





2. YAPI BİLGİ MODELLEME (BIM)

AEC (Architecture, Engineering and Construction- Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat) sektörü proje bazlı, çok sayıda meslek grubunun bir arada çalıştığı, dağınık bir yapıya sahip, karmaşık süreçleri içeren bir sektördür (Özorhon, 2018). Bu durum, inşaatlarda kaynakların verimsiz kullanılmasına, harcanan zamanın uzamasına ve maliyette artışlara neden olmakta ve inşaat sektörü bu durumdan olumsuz etkilenmektedir. Özellikle son yıllarda tüm dünyada yaşanan kaynak kıtlığı ve sürdürülebilirlik konusunda yaşanan zorlukların yanında yapılarda geri dönüşüm ve kaynak verimliliği ile ilgili yeni kararlar, AEC sektörünü kaynakları verimli yönetmeye zorlamaktadır (Volk ve diğ., 2014). Öte yandan, bilgi ve iletişim teknolojilerinde yaşanan teknolojik gelişmeler sonucunda diğer sektörlerde olduğu gibi inşaat sektöründe de bazı araçlar ve teknikler ortaya çıkmıştır. Bu araç ve tekniklerden biri de İngilizce karşılığı “Building Information Modeling” olan ve kısaca “BIM” adıyla anılan “Yapı Bilgi Modelleme”dir. Bu lisansüstü tez çalışmasında Yapı Bilgi Modelleme’nin kısaltması olarak BIM kullanılacaktır.

Yapı Bilgi Modelleme geçmişte kullanılan geleneksel yöntemlerden oldukça farklıdır ve inşaat sektöründeki tüm paydaşlara, fizibiliteden yıkıma kadar birçok farklı olanak sunmakta ve birlikte çalışabilirliği desteklemektedir. Geçtiğimiz yıllarda Yapı Bilgi Modelleri’nin sağladığı kaynak tasarrufu ve birçok faydası nedeniyle AEC sektöründe Yapı Bilgi Modelleme’nin kullanımı yaygınlaşmış ve her geçen gün yaygınlık kazanmaya devam etmektedir (Volk ve diğ., 2014).

2.1 Yapı Bilgi Modelleme Kavramı

BIM kavramının literatürde birçok tanımı yapılmıştır. Penttillä (2006), BIM’i “bir yapının yaşam döngüsü boyunca gerekli tasarım ve proje verilerinin sayısal ortamda yönetilmesini sağlayacak yöntemi oluşturan entegre politikalar, süreçler ve teknolojiler bütünü” olarak tanımlamıştır.

Succar (2009)’a göre BIM, bir binanın dijital ortamda nesne yönelimli üç boyutlu bir model ile gösterimi ya da ilgili diğer yazılımlarla birlikte çalışabilen ve veri alışverişinde bulunabilen bir proje enformasyon deposudur.

Eastman ve diğ. (2011) tarafından yapılan tanıma göre BIM, bina modellerinin üretilmesi, iletişiminin sağlanması ve analiz edilmesi için modelleme teknolojisini kullanan ilişkili bir dizi süreç olarak tanımlanmıştır.

Underwood ve Isikdag (2010) Yapı Bilgi Modellemesini “bir binanın yaşam döngüsü boyunca (tasarımdan yıkıma kadar) temel olarak proje akışının ve tesliminin bütünleşik yolunun, proje ve bina yaşam döngüsünün tüm aşamalarında anlamsal olarak zengin 3 boyutlu dijital bina modellerinin işbirlikçi kullanımıyla etkinleştirilmesine ve kolaylaştırılmasına odaklanan bilgi yönetimi süreci olarak tanımlamışlardır. Bu bağlamda Yapı Bilgi Modellerini, “Bina Bilgi Modelleme sürecinin omurgasını oluşturan anlamsal olarak zengin ve paylaşılan 3 boyutlu dijital bina modelleri kümesi” olarak tanımlamışlardır.

Benzer şekilde, Krygiel ve Nies (2008), BIM’in tüm bina hakkında parametrik ve birbirine bağlı bilgiler ve entegre bir veritabanında depolanan eksiksiz bir tasarım belgeleri kümesi olduğunu ve burada model içindeki bir nesnede yapılan herhangi bir değişikliğin projenin geri kalanı boyunca anında yansıtıldığını söylemişlerdir.

Ofluoglu (2014)’ün yaptığı tanıma göre BIM, yapı ile alakalı geometri/biçim gibi grafiksel veriler ile malzeme, maliyet, fiziksel çevre kontrolü gibi alfasayısal verilerden 3B bir model üretilmesi ve bu modelin yapı sektöründeki farklı paydaşlar arasında ortak olarak kullanılmasına olanak tanıyan bir çalışma yaklaşımıdır.

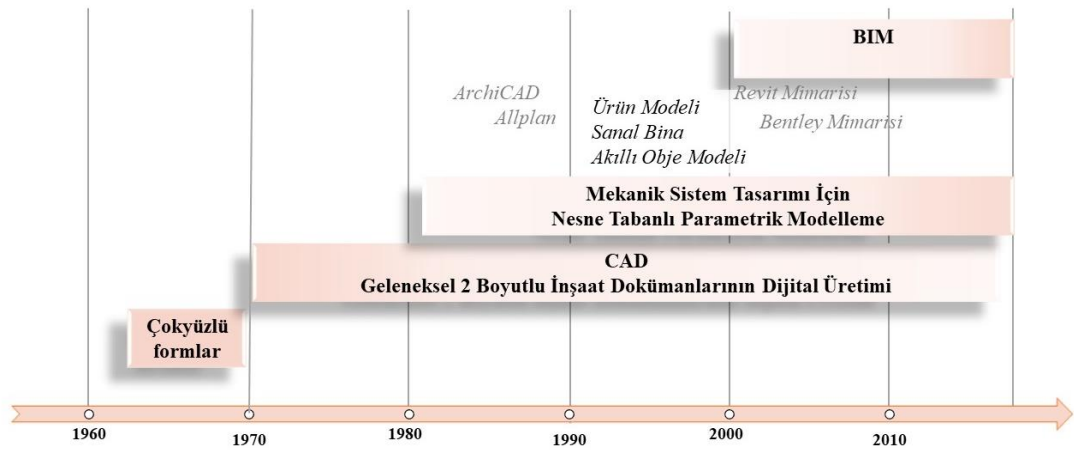
BIM sadece 3 boyutlu bir model olmanın ötesinde bir yönetim sistemidir ve kimi zaman literatürde Yapı Bilgi Modelleme ve Yönetimi şeklinde anıldığı da olmaktadır (Barnes & Davies, 2014).

Azhar (2011)’e göre BIM, "tek bir sanal model içinde bir tesisin tüm yönlerini, disiplinlerini ve sistemlerini kapsayan ve tüm tasarım ekibi üyelerinin (mal sahipleri, mimarlar, mühendisler, müteahhitler, taşeronlar ve tedarikçiler) daha doğru ve verimli bir şekilde işbirliği yapmasına olanak tanıyan sanal bir süreçtir.

Tüm bu tanımlamalardan anlaşılacağı üzere BIM; mimarların, mühendislerin, gayrimenkul geliştiricilerin, müteahhitlerin, üreticilerin ve diğer inşaat profesyonellerinin bir yapıyı tek bir 3D model içinde planlamasını, tasarlamasını ve inşa etmesini sağlayan, işbirliğine dayalı bir yönetim sürecidir.

2.2 Yapı Bilgi Modellemenin Tarihçesi

İnşaat projeleri ağırlıklı olarak kâğıt tabanlıdır ve projeyle ilgili tüm belgelerin fiziksel ortamda yazdırılması veya elle çizilmesi gerekir. Yapı endüstrisinde proje teslim yöntemlerinin gelişimi Şekil 2.1’de gösterilmektedir. 1970’li yıllar öncesinde geleneksel yöntemlerden olan 2 boyutlu elle çizim yöntemleri kullanılmaktaydı. 2 boyutlu çizimlerdeki hataların ancak inşaat aşamasında fark edilebiliyor olması hem anlaşmazlıklarla hem de maliyet açısından kayıplarla sonuçlanıyordu. Teknolojinin gelişmesiyle AEC endüstrisi hem maliyeti düşürmek hem de hızı ve karlılığı artırmak için, bilgisayar destekli tasarımlara yönelmiştir. 1970’lerde ilk kişisel bilgisayarların ortaya çıkmasıyla Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) kavramı ortaya çıkmıştır. CAD’in ortaya çıkmasıyla birlikte inşaat sektörünün aksine birçok sektör tarafından, bugün BIM’in temeli olarak kabul edilen entegre analiz araçları ve nesne tabanlı parametrik modelleme geliştirilmiştir. Bunun aksine inşaat sektörünün, uzun bir zaman geleneksel 2 boyutlu tasarımla sınırlı kaldığı görülmüştür. Öyle ki BIM, ancak 2000’li yıllara gelindiğinde yaygınlık kazanmaya başlamıştır. Üstelik BIM geliştirmekte olan çoğu ülkede her geçen gün yaygınlık kazanmaya devam etmektedir.



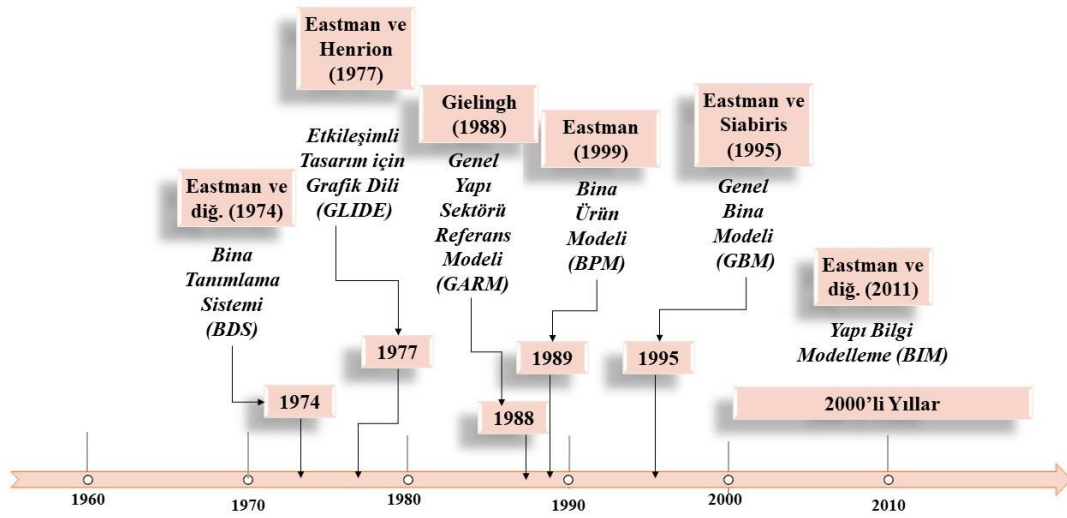
Şekil 2.1: Yapı sektöründe proje teslim yöntemlerinin gelişimi (Osello, 2012).

İnşaat sektöründe dijitalleşme ancak ilk bilgisayarların ve yazılımların ortaya çıktığı 1970’li yıllarda başlamıştır. BIM kavramının temelinin ilk defa 1974 yılında Charles Eastman tarafından atıldığı söylenebilir. Eastman, bugün kullanılan modern BIM’in öncüsü sayılabilecek “Bina Tanımlama Sistemi’ni (Building Description System-

BDS)” önermiştir (Eastman ve diğ., 1974). Bina Tanımlama Sistemi’nin bugünkü modern BIM’in kabiliyetlerine benzer işlevleri şu şekildedir:

- (1) karmaşık eleman şekillerini depolamak ve görüntülemek için bir grafik kullanıcı ara yüzü;
- (2) bir tasarım alanında farklı öğeleri düzenlemek için etkileşimli bir grafik dili;
- (3) perspektif veya ortografik çizimler üretebilir ve;
- (4) veri tabanı, malzeme türü gibi niteliklere göre sıralanabilir (Sinoh ve diğ., 2020).

Daha sonra zamanla, BDS bugünkü modern BIM’e doğru birkaç aşamada evrilmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: 1970’lerden günümüze BIM’in evrimi (Sinoh ve diğ., 2020).

1977 yılında Eastman ve Henrion tarafından BDS’nin özellikleri geliştirilmiş ve daha doğru çizimler yapılmasına olanak tanıyan “Etkileşimli Tasarım için Grafik Dili (GLIDE- Graphical Language for Interactive Design)” tanıtılmıştır (Eastman & Henrion, 1977). 1988 yılında nesne odaklı yapı ürünü modelleme kavramı ilk olarak Wim Gielingh tarafından tanımlanmıştır. Mekanik tasarım ve imalat sektöründe kullanılan STEP dosya formatına dayanarak Wim Gielingh tarafından “Genel Yapı Sektörü Referans Modeli (General AEC Referance Model–GARM)” geliştirilmiştir (Gielingh, 1988). Benzer şekilde, 1989 yılında Charles M. Eastman tarafından tahmin gibi daha fazla özelliği barındıran “Bina Ürün Modeli (Building Product Model-BPM)” tanıtılmıştır (Eastman, 1999). 1995 yılına gelindiğinde ise, modeldeki bina tipini tanımlayan ve daha yüksek dereceli bir inşaat yönetiminin elde edilmesini sağlayan “Genel Bina Modeli (General Building Model -GBM)” ortaya çıkmıştır (Eastman & Siabiris, 1995). 2000’li yılların başlarından itibaren, parametrik 3 boyutlu

modelleme geliştirilmiştir ve bu sayede BIM kavramı AEC endüstrisi arasında ön plana çıkmıştır (Eastman ve diğ., 2011).

2.3 Yapı Bilgi Modellemenin Temelleri

Yapı Bilgi Modelleme kısaca BIM; “nD modelleme”, “nesne yönelimli modelleme”, “parametrik modelleme” ve “birlikte çalışabilirlik” olmak üzere 4 ana temele dayanmaktadır.

2.3.1 nD modelleme

Bilindiği gibi teknolojinin gelişmesiyle birlikte hem akademik hem yapı sektöründe, tek ve bütünleşik bir bina/ürün modelinin geliştirilmesi ve/veya zaman, maliyet vb. gibi diğer tasarım özellikleriyle 3 boyutlu CAD modellerinin entegre edilmesi üzerine artan bir ilgi vardır. Bu durum, n sayıda tasarım perspektifini bir araya getiren ve BIM’in ana öğelerinden biri olan n boyutlu (nD) modelleme kavramının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bir nD modeli, bir yapı tesisinin yaşam döngüsünün her aşamasında gerekli olan tasarım bilgilerinin farklı yönlerini (zamanlama, maliyetlendirme, erişilebilirlik, güvenlik, sürdürülebilirlik, bakım, akustik ve enerji simülasyonu vb.) içeren yapı bilgi modelinin bir uzantısı olarak tanımlanabilir. nD modelleme, yapı sektöründeki tüm paydaşların tek bir model üzerinde uyumlu, kapsamlı ve entegre bir şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, tasarım kararlarının doğru bir şekilde analiz edilip, daha iyi bir tasarım ortaya çıkarmak için müzakere edebilir ve bu şekilde iş birliği desteklenmektedir (Aouad ve diğ., 2005).

nD modelleme yani çok boyutluluk BIM’de sık kullanılan özelliklerden birisidir (Özorhon, 2018). Şekil 2.3’te görüldüğü gibi modelin ilk 3 boyutu tasarımda yer alan mekânsal boyutu göstermektedir. 3D mekânsal boyut kısaca BIM modelinin 3 boyutlu uzayda grafik gösterimidir. 4D, BIM’in zaman boyutunu, 5D maliyet boyutunu ifade etmektedir. Yani 4D, inşaat faaliyetlerinin görselleştirilmesi ve analizi için zaman modelini ifade etmektedir. 5D, planlama, inşaat ve işletme aşamalarında bütçe analizi ve kontrolü için maliyet modelidir. 6D, enerji tüketimlerinin, çevresel etkinin, kirliliğin, risklerin vb. değerlendirilmesi için sürdürülebilirlik modelidir ve kısaca sürdürülebilirlik boyutunu temsil etmektedir. 7D tüm yaşam döngüsü boyunca yönetim ve bakım organizasyonu için tesis yönetim modelidir ve kısaca tesis yönetimi boyutu ya da bakım boyutu olarak belirtilebilmektedir. 8D, operatörlerin kritik

tehlikeli senaryoları önleyen risklerini kontrol etmek için güvenlik modeli olarak açıklanabilir (Bosurgi ve diğ., 2020).



Şekil 2.3: nD Modelleme (Bosurgi ve diğ., 2020).

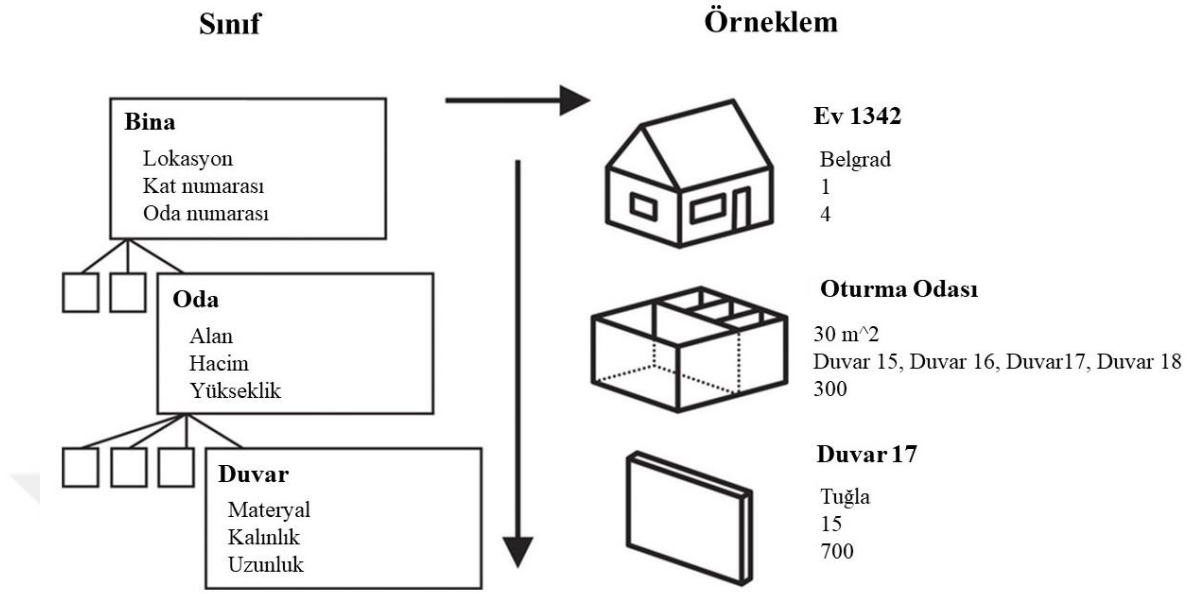
2.3.2 Parametrik modelleme

Yapı Bilgi Modelleme sürecinin ana öğelerinden biri de parametrik modelleme özelliğidir. BIM, elementlerin yapı özellikleri ve diğer yapı elemanlarıyla arasındaki ilişkileri içeren büyük bir veritabanına sahiptir ve bu veritabanını esas alır (Ashcraft, 2008). Parametrik modelleme farklı objeler arasında bağlantılar kurulmasına olanak tanır. Başka bir ifadeyle parametrik modellemede, modeli oluşturan objeler birbirleriyle bağlantılıdır. Parametrik modelleme, 3B bir geometrik model kurulurken, boyutlar veya eğrilikler gibi parametreler değiştirilir değiştirilmez, model geometrisinin şeklinin anında değiştirilebilmesidir. Böylece tasarım bilgilerinde bir değişikliğe ihtiyaç duyulduğunda modelin yeniden çizilmesine olan ihtiyaç ortadan kalkmıştır (Fu, 2018). Dolayısıyla BIM ve parametrik modelleme özelliği sayesinde zamandan büyük ölçüde tasarruf sağlanmaktadır. Geleneksel yöntemlerde ise BIM'in aksine proje tasarımında bir değişikliğe gidildiğinde tüm proje dokümanları, T cetveli ve rapiderler ile yenilenmekteydi.

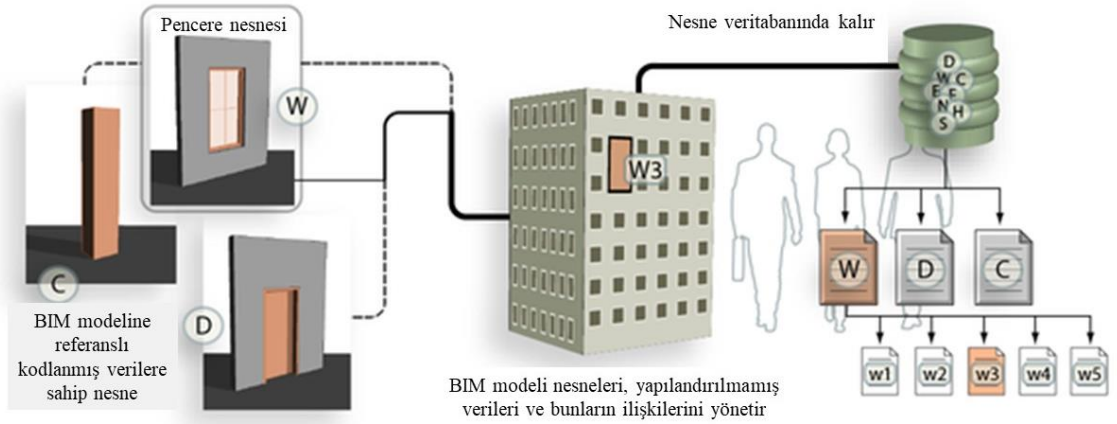
2.3.3 Nesne yönelimli modelleme

Yapı Bilgi Modelleme'nin bir diğer temeli, nesne yönelimli modellemeye dayanmaktadır. Yapı Bilgi Modelleri, çok sayıda farklı sınıftaki nesnelerden oluşmaktadır (Şekil 2.4). Farklı sınıflardaki nesneler (kapı, pencere, duvar vb.) bir veritabanı kullanılarak yapının içine yerleştirilmiştir ve tüm nesneler bir araya gelerek yapı bilgi modelini oluşturmaktadır. Yapı içine yerleştirilen ve yapıyı oluşturan her bir

nesne veritabanında kalıcıdır ve istenildiği zaman sorgulanıp öz nitelikleri değiştirilebilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.4: BIM'i oluşturan farklı sınıflar (Svetel ve diğ., 2011).



Şekil 2.5: Nesne tabanlı modelleme (Succar, 2015).

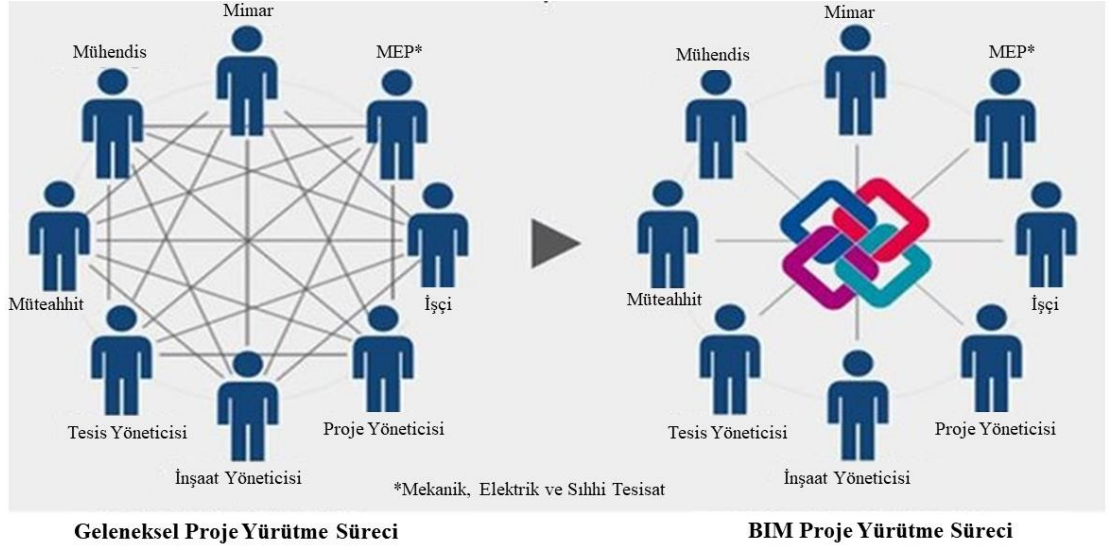
Geleneksel 2 boyutlu çizimlerde duvar, pencere gibi nesneler, nesne sınıfı yerine çizgi olarak CAD'de çizilmektedir. Projelerde yer alan çizgiler bazı insanlar tarafından okunabiliyor olsa da bilgisayar tarafından okunamamaktadır. Bunun aksine, BIM yaklaşımıyla her nesne kendi sınıfının özelliklerine göre çizilebilmekte ve bu şekilde bilgisayar tarafından kendi özelliklerine göre yorumlanabilmektedir. Örneğin, projede yer alan bir duvar, duvar sınıfında çizildiğinde üzerine pencere ya da kapı sınıfında bir nesne yerleştirilebilmektedir. Nesne yönelimli modelleme ile, pencere ya da kapının olabilmesi için duvarın gerekli olduğu bilgisayar tarafından yorumlanabilmektedir.

Benzer şekilde nesne yönelimli modelleme ile, duvar üzerine ikinci bir duvar çizilememektedir. Bu sayede Yapı Bilgi Modelleme ile hem işler kolaylaşmakta ve hızlanmakta hem de hata payı azalmaktadır.

2.3.4 Birlikte çalışabilirlik (interoperability)

Yapı endüstrisi çok fazla meslek grubunu içinde barındıran multidisipliner bir sektördür. İnşaat sektöründe kullanılan yapı bilgi modellerinde yer alan bilgilerin anlamlı ve faydalı olabilmesi için diğer paydaşlarla bilgi alışverişi yapılması gerektiğinden yapı bilgi modellemenin ana öğelerinden birisi de birlikte çalışabilirliktir. Birlikte çalışabilirlik, elektronik ürün ve proje verilerinin iş birliği yapan firmalar arasında ve bireysel şirketlerin tasarım, inşaat, bakım ve iş süreci sistemlerinde yönetilme ve iletilme yeteneğidir (NIST, 2004).

Belirli bir proje aşamasında çalışan tüm paydaşlar (mimarlar, mühendisler, tasarımcılar, müteahhitler vb.), bu aşamada diğer ortak çalışanlar tarafından kullanılan farklı yazılımlar tarafından işlenen bilgileri kullanan ya da sağlayan bilgisayar yazılımlarını kullanmaktadır. Birlikte çalışabilirlik, verilerin yeniden oluşturulmasını veya yeniden girilmesini önlemenin ve bilgilerin verimli kullanımını sağlamanın en önemli adımlarından biridir. BIM'in birlikte çalışabilirlik özelliği ile birlikte binanın tüm yaşam döngüsüne ait bilgiler farklı profesyoneller arasında tek veya iki yönlü olarak erişilebilmekte ve ekleme, çıkarma, güncelleme ya da değiştirme gibi işlemler yapılabilmektedir (Santos, 2010). İki boyutlu çizimlerin kullanıldığı geleneksel yöntemlerde bilgi alışverişi yalnızca iki taraf arasında ve karmaşıktır. Buna karşın, yapı bilgi modellemede bilgi alışverişi birlikte çalışabilirlik özelliği sayesinde kolay ve düzenlidir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: 2B Çizimlerde ve BIM Projelerinde Birlikte Çalışabilirlik (Giucastro, 2017).

2.4 Yapı Bilgi Modelleme Olgunluk Seviyeleri

AEC endüstrisinde proje teslim yöntemleri, farklı düzeyde iş birliklerine dayanmaktadır. Bu iş birliklerine kısaca BIM olgunluk seviyeleri adı verilmektedir. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi Seviye-0, Seviye-1, Seviye-2, Seviye-3 olmak üzere 4 farklı BIM olgunluk seviyesi mevcuttur ve seviyelerde ilerlendikçe paydaşlar arasında iş birliği ve entegrasyon artmaktadır. Ayrıca, olgunluk seviyesi arttıkça üretilen veri miktarı da artmaktadır.

yalnızca ekipteki sınırlı insanla paylaşılmaktadır. Bu nedenle, seviye-0 aşamasında düşük bir iş birliği gözlemlenmektedir. Bunun neticesinde insandan kaynaklı hatalar görülebilmektedir. Zayıf bilgi yönetim süreci projenin yanlış veya eksik anlaşılmasına, işlevsel yetersizliklere, inşaatla yanlış başlanmasına ya da bileşenler arasında uyumsuzluğa sebep olabilmektedir (Khosrowshahi & Arayici, 2012; Koutsogiannis, 2019).

b. Seviye-1 BIM (Düzey-1 BIM) (nesne tabanlı modelleme)

Seviye-1 BIM, genel olarak 2 boyutlu taslaklardan 3 boyutlu nesne tabanlı modelleme ve dokümantasyona geçişi temsil etmektedir (Khosrowshahi & Arayici, 2012). 2B taslaklar Ortak Veri Ortamı'nda (CDE) 3B modellerle birleştirilir. Bu aşamada, BIM modeli hala tek disiplinlidir. Bu nedenle kısmi iş birliği görülür (Koutsogiannis, 2019). Ayrıca, proje çıktıları genellikle CAD vb. belgelerden oluşmaktadır. Bu seviyede, mevcut sözleşme ilişkileri ve sorumluluk sorunları sürmektedir (Khosrowshahi & Arayici, 2012).

c. Seviye-2 BIM (Düzey-2 BIM) (model-tabanlı iş birliği)

Seviye-2 BIM, modellemeden iş birliği ve birlikte çalışabilirliğe geçişe odaklanmaktadır. Proje ekibinin tüm üyeleri arasında iletişim ve ortak çalışma hedefi Seviye-2'nin merkezinde yer almaktadır. Bu hedefin desteklenmesi için proje paydaşları arasında entegre veri iletişimine ve veri paylaşımına ihtiyaç duyulmaktadır (Khosrowshahi & Arayici, 2012). Fakat, projeye dahil olan tüm paydaşların aynı 3B CAD modelleri üzerinde çalışması zorunlu değildir. Bilakis, proje ekibi üyeleri isterlerse farklı bir CAD modeli kullanabilmektedir. Burada önemli olan, tüm tasarım bilgilerini içeren ortak bir dosya formatının (*.ifc dosyası gibi) var olması gerekliliğidir. Başka bir ifadeyle, Seviye-2 BIM'de farklı bilgi modelleri kullanılarak ve Ortak Veri Ortamı'nda (CDE) birleştirilerek tam iş birliği ve kısmi birlikte çalışabilirlik sağlanmaktadır. Ayrıca, Düzey-2 BIM, 4D-zaman yönetimi ve 5D-bütçe hesaplaması gibi yeni boyutlara da olanak tanımaktadır (Koutsogiannis, 2019).

d. Seviye-3 BIM (Düzey-3 BIM) (ağ-tabanlı entegrasyon)

Kısaca ağ tabanlı entegrasyon olarak adlandırılan Düzey-3 BIM iş birliğinden entegrasyona geçişi ifade etmektedir. Seviye-3 BIM, yapı bilgi modellemenin temel felsefesini yansıtmaktadır ve ancak bu aşamada BIM'in faydalarından gerçek anlamda yararlanılabildiği söylenebilir. Bu seviyede proje yaşam döngüsü aşamaları büyük miktarda çözülmekte ve paydaşlar gittikçe artan sanal iş akışlarından eş zamanlı olarak

etkileşime girmektedir (Khosrowshahi & Arayici, 2012). Kısaca, Seviye-3 BIM, bulut tabanlı bir ortamda tam iş birliği ve tam entegrasyonu ifade etmektedir.

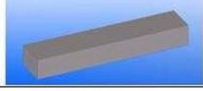
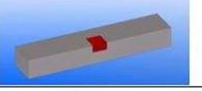
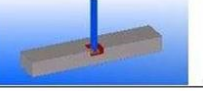
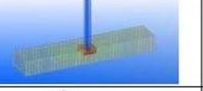
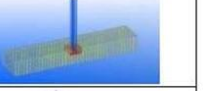
Seviye-3 BIM modelleri, binanın erken mimari tasarımında karmaşık analizlere olanak tanıyan nD modeller haline gelmektedir (Lee ve diğ., 2005). Dolayısıyla bu BIM düzeyi, zaman yönetimini, maliyet hesabını ve varlık yaşam döngüsü yönetimini de içermektedir.

2.5 Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Gelişim Seviyeleri (LOD)

Literatürde “Level of Development (LOD)” olarak tanımlanan BIM gelişim seviyeleri bir model hakkında belirli bir vakitte ne kadar bilginin bilindiğini tanımlamaktadır. LOD kavramı, hem 3 boyutlu modellerin güvenilirliğini artırdığı hem de yüksek düzeyde içerik netliği sunduğu için BIM’de kullanımı yaygınlaşmıştır (American Institute of Architects, 2013).

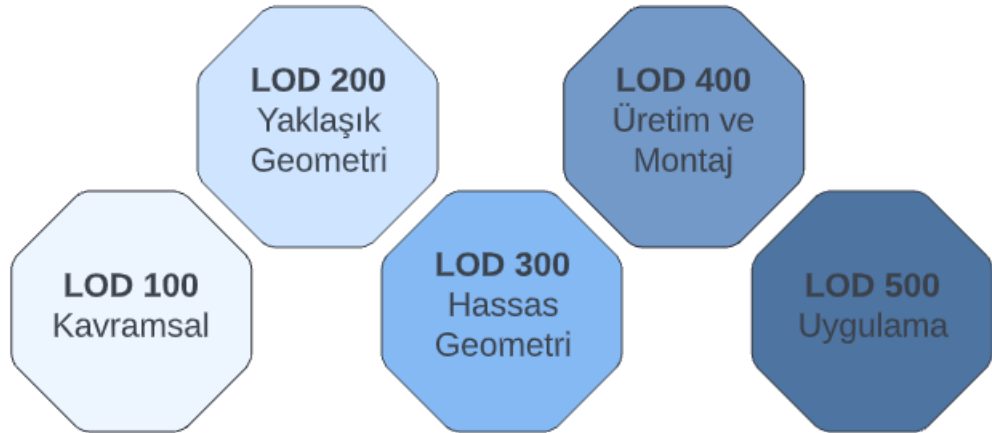
LOD kavramı, detay düzeyi (level of detail) kavramıyla ilişkili olsa da bu kavramlar arasında bazı farklılıklar vardır. Detay düzeyi bina modeli elemanlarına dahil edilen detay miktarı iken; gelişim seviyesi (level of development) bina modelinin yapı aktörleri tarafından kullanırken elemanın geometrisi ve bileşenlere ilişkin ilgili bilgilerin düşünülme derecesi olduğu söylenebilir (Leite ve diğ., 2011; Weygant, 2011; American Institute of Architects, 2013). Başka bir ifadeyle, detay seviyesi elemana bir girdiyi tanımlarken, gelişim seviyesi güvenilir çıktıyı tanımlamaktadır (Özorhon, 2018). Dolayısıyla proje ekibi, modelde yer alan bilgilere güvenebilmekte ve güvenilirlik derecesi LOD tarafından ölçülmektedir.

İnşaat projelerinde LOD kullanımı, projelerdeki bilgi eksikliğinden ya da yetersizliğinden kaynaklanan sorunları büyük ölçüde azaltmaktadır (Latiffi ve diğ., 2015). Ayrıca, LOD sayesinde yapı modeli elemanlarının ihtiyaç duyulan bilgi miktarı farklılaştırılabilir (Şekil 2.8) (Reddy, 2012; American Institute of Architects, 2013). Bunlara ek olarak, LOD kavramı sayesinde inşaat aktörleri yapı modellerinin kullanılabilirliğini ve sınırlamalarını kesin bir şekilde anlayabilmektedir.

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
				
- Sadece kübik model - Alan - Genişlik - Yükseklik	- Genişlik - Yükseklik - Kalınlık - Duvar açıklıkları - Geçitler	- Genişlik - Yükseklik - Kalınlık - Duvar açıklıkları - Geçitler - Materyal - Renk	- Genişlik - Yükseklik - Kalınlık - Duvar açıklıkları - Geçitler - Materyal - Renk - Üretici firma - Ürün kodu - Ürün özellikleri - Kurulum tarihi	- Genişlik - Yükseklik - Kalınlık - Duvar açıklıkları - Geçitler - Materyal - Renk - Üretici firma - Ürün kodu - Ürün özellikleri - Kurulum tarihi - Bakım tarihi

Şekil 2.8: Gelişim seviyeleri (OTS Proje Müşavirlik, t.y.).

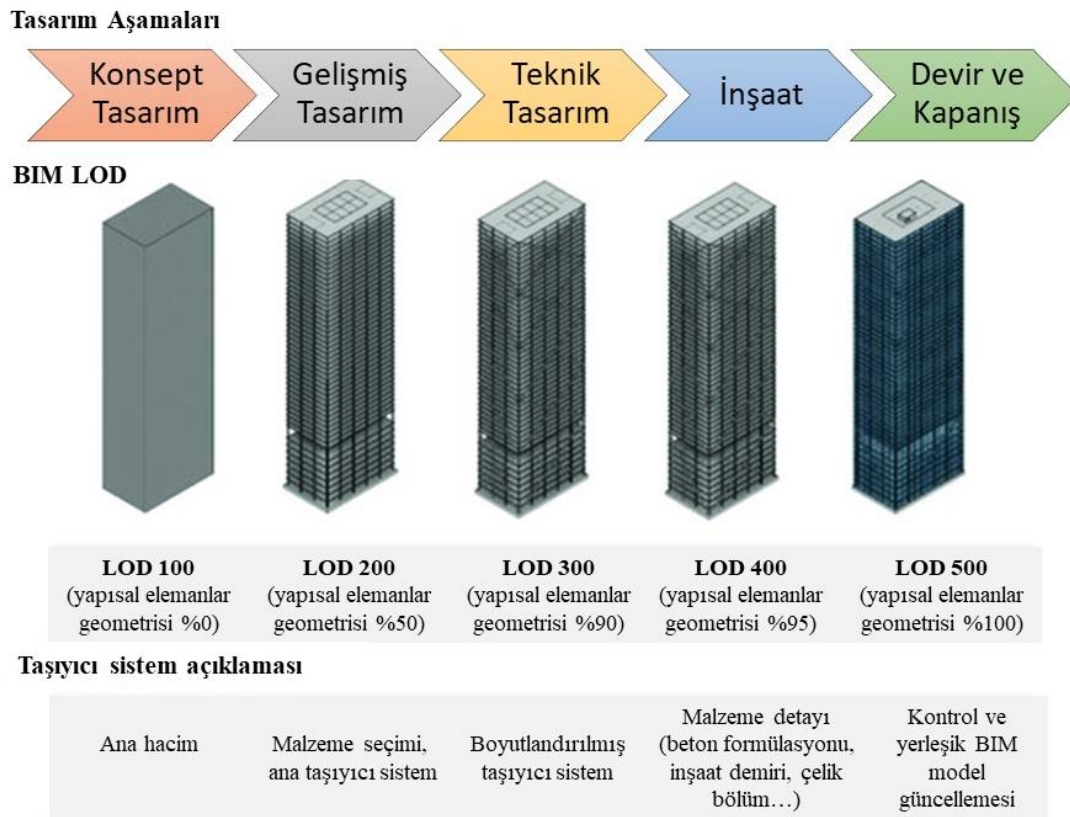
LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 400 ve LOD 500 olmak üzere beş adet LOD seviyesi mevcuttur. Bu seviyeler, kavramsaldan bitmiş uygulama aşamasına doğru gelişmektedir. Şekil 2.9’da görüldüğü gibi LOD 100 seviyesi kavramsal modeli, LOD 200 yaklaşık geometriyi, LOD300 hassas geometriyi, LOD 400 üretim ve montajı ve LOD 500 uygulama aşamasını temsil etmektedir.



Şekil 2.9: LOD gelişim seviyeleri ve anlamları.

LOD 100 seviyesinde yapı bilgi modeli asgari düzeyde bilginin temsilini kavramsal olarak sağlamaktadır. Bu seviye yalnızca kavramsal ya da diğer bir ifadeyle kübik modellerin üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu seviyede alan, genişlik, yükseklik, hacim, yön gibi parametreler tanımlanmakta ve bu parametrelerle ilgili analizler

yapılabilmektedir. LOD 100’de model bilgilerinin fazla olmaması nedeniyle sıklıkla ön proje planlaması, fizibilite çalışmaları ve temel maliyet tahminlerinde kullanılmaktadır (Weygant, 2011). LOD 100’ün geliştirilmesiyle LOD200 üretilmektedir. LOD 200’de model elemanlarının geometrileri ve özellikleri yaklaşık olarak belirlenmektedir. LOD 200, bir modelin gelişmiş tasarımıdır (Şekil 2.10). Bina modeli elemanları; miktar, boyut, konum, yönlendirme gibi parametrelerine göre nesne olarak temsil edilmektedir. LOD200 seviyesinde bina model elemanlarının seçilmesi için genel performans analizi gerçekleştirilebilmektedir (Latiffi ve diğ., 2015).



Şekil 2.10: LOD gelişim seviyeleri (Bertin ve diğ., 2020).

Bir sonraki LOD seviyesi olan LOD 300, model elemanlarının spesifik sistemler, yükseklik, genişlik, miktar, şekil, konum ve yönlendirme olarak açıklandığı LOD seviyesidir. Bu seviye kısaca hassas geometri olarak anılmaktadır. LOD 300, bir modelin teknik tasarımıdır. Bu seviyede, ürünün tahmin ve çizelgeleme gibi grafiksel olmayan bir bilgi içeren dokümantasyonu da yapılmaktadır. LOD 300; miktar, boyut, şekil, konum ve yönelim açısından daha kesin sonuçlara sahiptir (Weygant, 2011).

Şekil 2.10’da görüldüğü gibi LOD 300 seviyesinde yapısal elemanların geometrisi, %90 oranında gerçeği yansıtmaktadır. Bu seviyede özel ayrıntılara dayalı olarak spesifik performans analizleri gerçekleştirilebilmektedir (Latiffi ve diğ., 2015).

Bir diğer LOD seviyesi olan LOD 400, LOD 300 seviyesinin fabrikasyon ve montaja olanak verecek şekilde geliştirilmesiyle üretilen bir gelişim seviyesidir (Özorhon, 2018). LOD 400 seviyesi inşaat seviyesi olduğundan dolayı malzeme detayları ile ilgili bilgiler de içerir ve yapı elemanlarının yapısıyla uyumludur. Bu aşama imalatçılar ve müteahhitler tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu seviye, üretici firma, ürün kodu, ürün özellikleri, kurulum tarihi gibi geometrik olmayan bilgileri içerisinde barındırır. Bu seviyede yapısal elemanlar, gerçek geometrinin %95’ini yansıtmaktadır. Dolayısıyla bu aşamada gerçek performansa dayalı analizler yapılabilir.

Son LOD seviyesi olan LOD 500, tesis yönetiminde kullanılabilecek bilgileri içerisinde barındıran yerleşik bir modeldir (Weygant, 2011; Reddy, 2012). LOD 500 aşamasında artık BIM modeli uygulama aşamasındadır. Bu nedenle yapısal elemanlar gerçeği %100 oranında yansıtmaktadır. Diğer bir deyişle, LOD 500, üretilmiş bir ürünün mutlak doğru bir dijital temsilidir (American Institute of Architects, 2013).

2.6 Yapı Bilgi Modellemenin (BIM) Faydaları

AEC endüstrisinde BIM kullanımında bazı durumlarda zorluklarla karşılaşılrsa da BIM uygulamasının hem proje paydaşları hem de proje süreci üzerinde ciddi faydalar sağladığı bilinmektedir. Genel olarak BIM projelerinin geleneksel yöntemlerle üretilmiş projelere kıyasla daha düşük hata, maliyet ve süreyle birlikte daha yüksek kalitede tamamlandığı bildirilmektedir (Özorhon, 2018).

Literatürde BIM’in faydalarının ele alındığı birçok araştırma bulunmaktadır. CRC for Construction Innovation’a göre bir yapının bölümlerinin entegre bir veri ortamında doğru geometrik temsili, BIM’in en önemli faydası olarak görülmektedir (CRC for Construction Innovation, 2007). Buna ek olarak, BIM kullanımının daha iyi tasarım, kontrollü tüm yaşam ömrü maliyetleri ve çevresel veriler, geliştirilmiş süreçler, daha yüksek üretim kalitesi, iyileştirilmiş müşteri hizmetleri ve yaşam döngüsü verileri gibi diğer kayda değer faydaları bulunmaktadır. Bu faydalar şu şekilde özetlenmiştir:

Otomatikleştirilmiş montaj: Ürünlere ait olan dijital veriler sonraki aşamalarda ve üretimde kullanılabilir.

Daha iyi tasarım: BIM kullanımıyla binaya gelen teklifler detaylıca analiz edilip, hızlıca simülasyonları gerçekleştirilebilir. Bu şekilde performans karşılaştırılması yapılabilir. Bu durum, iyileştirilmiş ve yenilikçi çözümlere fırsat sunmaktadır.

Kontrollü tüm yaşam maliyetleri ve çevresel veriler: Yaşam döngüsü maliyetleri hakkında çıkarımlarda bulunulabilir ve çevresel performans daha iyi görülebilmektedir.

Gelişmiş süreçler: Üretilen bilgiler paydaşlar arasında kolayca paylaşılabilir ve yeniden kullanılabilir. Bu durum; hükümet, endüstri ve üreticilerin ortak bir veri protokolüne sahip olmasına ve böylece daha verimli çalışmalarına olanak tanımaktadır.

Daha yüksek üretim kalitesi: BIM nesnelerinin, BIM’de sadece bir kez modellenmesinden dolayı dokümantasyonda önemli iyileştirmeler olmaktadır. Dokümantasyonun iyileştirilmesi ile birlikte BIM modelinden otomatik olarak türetilen çizimler daha tutarlı ve doğru olmaktadır. Aksi durumda çakışmalar olabilmekte ve bu da modelin doğruluğunu olumsuz etkilemektedir.

Geliştirilmiş müşteri hizmeti: Oluşturulan tekliflerin doğru 3 boyutlu görselleştirme ile anlaşılabilirliği artmaktadır. Bu şekilde, taraflar arasındaki kafa karışıklığı ortadan kalkmaktadır.

Yaşam döngüsü verileri: Gereksinimler, tasarım, inşaat ve işletme bilgileri gibi yaşam döngüsü verileri; planlama ve uygulamanın tesis yönetimi entegrasyonunda kullanılabilir.

McGraw Hill Construction (2009) tarafından yapılan çalışmada da BIM uygulamalarının kullanımıyla benzer faydalar elde edildiği bildirilmiştir. Bu faydalar şu şekildedir:

Daha çok yatırım getirisi: Yatırım getirisini ölçen kullanıcıların %70’i BIM teknolojisinin projelerde kullanılmasıyla olumlu yönde bir fayda gördüklerini bildirmiştir. Üstelik, bu kullanıcıların %20’si, %50’den fazla yatırım getirisi kaydettiklerini dile getirmişlerdir.

Rekabet avantajı: BIM teknolojisi, firmanın pazarlanmasında önemli bir araç olarak görülmektedir. BIM kullanıcılarının %50'si, yeni BIM hizmetleri sunmanın işletmeleri için önemli bir yarar olduğunu düşünmektedir.

Geliştirilmiş üretkenlik: BIM uzmanlarının %80'i, BIM'in bir şirkete yüksek ila çok yüksek değer kattığını, tekrarı ve yeniden çalışmayı azalttığını bildirmişlerdir. Bununla beraber, BIM'in inşaat aşamasındaki projenin verimliliğini artırma, çatışmaları ve değişiklikleri azaltma potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir.

Ekibe yatırım: BIM kullanıcılarının %80'i tarafından çok önemli olarak görülen 3 boyutlu görselleştirme ve çok taraflı iletişim, BIM teknolojisinin kullanımı neticesinde kolaylaşmaktadır. Ayrıca BIM teknolojisi, saha koordinasyon sorunu gibi proje sonucu süreçlerini iyileştirmektedir.

Hızlı benimseme: BIM ve BIM ile ilgili araçlar hızlı benimsenmiş ve uzmanların üçte ikisi tarafından projelerinin %60'ından fazlasında kullanılmaktadır.

Sahip talebi: BIM teknolojisinin kullanılmasıyla daha iyi inşaat sonuçlarının olduğu mal sahiplerinin yarısı tarafından bildirilmektedir.

Benzer şekilde, Allen Consulting Group (2010) tarafından yapılan araştırmada BIM teknolojisinin kullanımıyla birlikte şu ana BIM faydalarından bahsedilmektedir:

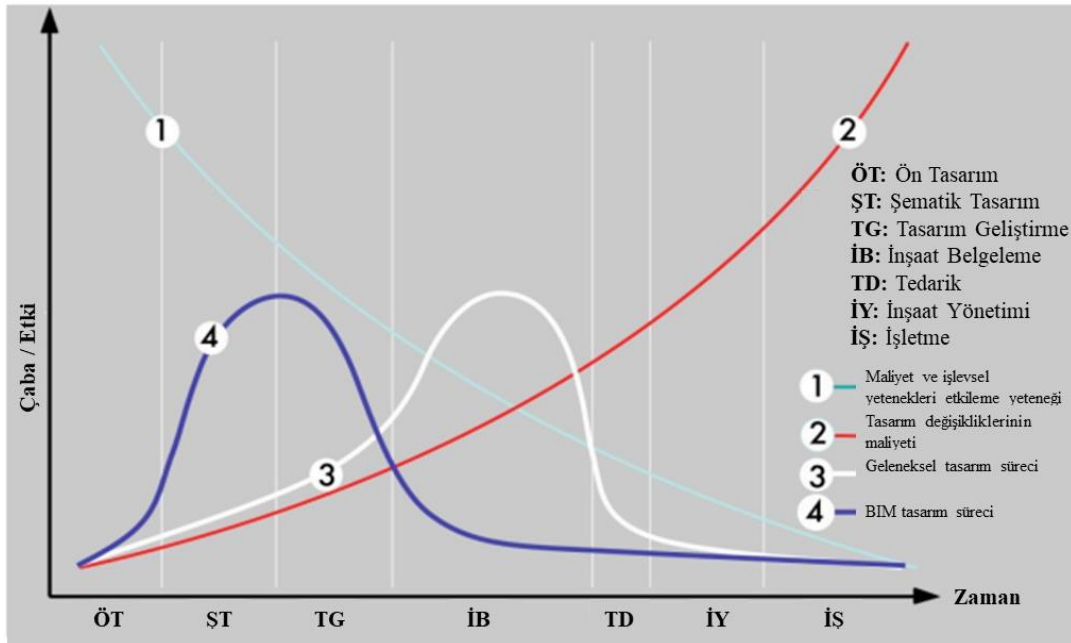
1) Gelişmiş bilgi paylaşımı

BIM uygulamalarından önce kullanılan geleneksel yöntemlerde, yapı tedarik zincirinin her aşaması (tasarım, inşaat, işletme ve hizmet dışı bırakma) gerekli bilgileri önceki aşamalardan almaktaydı. Oysa BIM, bina yaşam ömrünün tüm aşamaları arasında gerçek zamanlı olarak bilgi paylaşımına olanak tanımaktadır. BIM uygulamalarında, tüm paydaşlar tarafından program ve bütçe bilgileri, malzeme kalitesi ve maliyet bilgileri, performans, kullanım ve finansal bilgiler gibi önemli bilgilere anında erişim sağlanabildiğinden, projenin tamamlanma süresinin %7 oranında azalabildiği düşünülmektedir (CRC for Construction Innovation, 2007; Brown, 2008).

Gelişmiş bilgi paylaşımının bir diğer faydası yanlış iletişimden kaynaklı maliyetlerin önüne geçmesidir. McGraw Hill Construction tarafından 2007 yılında yapılan çalışmaya göre yetersiz veya başarısız yazılımların, doğrudan maliyetler üzerinde yaklaşık %3.1'lik maliyet artışına sebep olduğu bildirilmiştir. BIM'in faydaları

arasında yer alan gelişmiş bilgi paylaşımı ve birlikte çalışabilirlik sayesinde farklı sistemler arasında verilerin manuel olarak yeniden girilmesinden kaynaklı insan gücü ve zaman israfından kaynaklı maliyetler azalmaktadır. Ayrıca, yazılımın kopyalanması için harcanan zamandan, belge sürüm kontrolü için harcanan süreden, bilgi işlenmesi için gerekli zamandan ve veri işlemleri için harcanan paradan tasarruf edilmektedir (McGraw Hill Construction, 2007).

BIM teknolojisindeki erken bilgi paylaşımının maliyet üzerine olan etkileri ve bu maliyetlerin geleneksel proje teslim yöntemlerindeki maliyetlerle karşılaştırılması Şekil 2.11’de verilmektedir. Buna göre, bu şekilde 1 numaralı çizgi maliyet ve işlevsel yetenekleri etkileme kabiliyeti olarak ifade edilmiş ve proje ilerledikçe maliyet, zamanlama ve işlevsel yetenek gibi proje değişkenlerini etkileme kabiliyetindeki azalmayı temsil etmektedir. Öte yandan, 2 numaralı çizgi tasarım değişikliklerinin maliyetini temsil etmekte ve proje ilerledikçe değişiklik yapma maliyetinin nasıl önemli ölçüde arttığını görülmektedir. İmalat sanayisinde, tasarım aşamasından tedarik ve imalat aşamasına geçildiğinde maliyetlerin 10 kat arttığı bilinmektedir (CURT, 2004).



Şekil 2.11: BIM teknolojisi- erken bilgi paylaşımının faydaları (BuildingSMART UK, 2010).

3 numaralı çizgi, tasarım bilgilerinin büyük ölçüde İnşaat Belgeleme (İB) aşamasında geliştirildiği geleneksel bina tasarım çabasının dağılımını göstermektedir. Buna karşılık, 4 numaralı çizgi, kısmen tüm paydaşların bilgi alışverişi ve iş birliği sayesinde

tasarım sürecinin daha erken aşamalarında önemli bilgilerin toplandığı, entegre edildiği ve belgelendiği tam bir iş birliği modeli altında tasarım çabasının dağılımını temsil etmektedir (CURT, 2004). Bu nedenle, BIM teknolojisinin kullanıldığı 4. çizgide, iş yükünün fazla olduğu projenin erken aşamalarında maliyet ve işlevsel yetenekleri etkileme kabiliyetinin yüksek ve tasarım değişikliklerinin maliyetinin ise düşük olduğu görülmektedir. Buna karşılık, daha ileri aşamalarda iş yükünün fazla olduğu geleneksel yöntemlerde, maliyet ve işlevsel yetenekleri etkileme kabiliyetinin daha düşük ve tasarım değişikliklerinin maliyetinin daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Sonuç olarak, BIM teknolojisinin sunduğu erken bilgi paylaşımı ile birlikte hem işlevsel yetenekler gelişmekte hem de maliyet azalmaktadır. Ayrıca, daha erken karar verme hem dokümantasyon aşamasının kısalmasına hem de yapı inşaatının daha hızlı yapılmasına sebep olmaktadır.

Bunlara ek olarak, Entegre Proje Teslimi (Integrated Project Delivery- IPD) yaklaşımlarının uygulanması BIM'in gelişmiş bilgi paylaşımı aracılığıyla kolaylaşmaktadır. IPD; proje sonuçlarını optimize etmek, proje sahibi için değeri artırmak, israfı azaltmak ve maksimize etmek amacıyla tüm katılımcıların yetenek ve anlayışlarını iş birliği içinde kullanan bir sürece insanları, sistemleri, iş yapılarını ve uygulamaları entegre eden bir proje teslim yaklaşımıdır (Allen Consulting Group, 2010).

2) Gelişmiş üretkenlik

BIM'in önemli faydalarından biri de gelişmiş üretkenliktir. Yapı bilgi modelleme, karmaşık yapıların sanal ortamda 3 boyutlu modellenmesine ve paydaşların gerçek zamanlı çalışmalarına olanak tanıdığı için özellik optimizasyonu ve yüksek kalitede fiziksel inşaat ve üretim verimliliği sağlamaktadır (McGraw Hill Construction, 2008). Kolaylaştırılmış süreçlerin potansiyel faydaları, daha iyi veri kalitesi, verilerin görselleştirilmesi, gelişmiş hata bulma ve tedarik zinciri aracılığıyla artan iletişim, sektör genelinde üretkenlik ve verimlilik kazanımları sağlamaktadır (Allen Consulting Group, 2010).

Bir diğer üretkenliği artırabilecek etmen ön imalat ve ön montaj çalışmalarının BIM'de daha sık kullanılmasıdır. Ayrıca BIM teknolojisi, etkili performans analizini yapabilme yeteneğine sahip olduğu için üretkenliği ve verimliliği artırmaktadır (McGraw Hill Construction, 2009).

3) İyileştirilmiş kalite

Bilindiği gibi inşaat sektöründe rekabetçi ihale süreçleri ve taşeron düzenlemeleri, maliyet ve zaman konusunda baskılara sebep olmakta ve böylece kaliteyi düşürmektedir. BIM, yapı ürün ve tasarımlarının otomatik olarak performans analizleri yapmasını desteklemektedir. Ayrıca, önceden de ifade edildiği gibi BIM zengin semantik verilerle, kodlanmış ilişkileri içeren nesne tabanlı modellemeyi desteklemektedir. Bu durum, yapının yaşam döngüsü boyunca tüm aşamalarda daha iyi tasarım, uygulama ve yönetimle sonuçlanmaktadır. Buna ek olarak, BIM teknolojisi prefabrikasyon, ön montaj ve saha dışı üretim teknikleri ve süreçlerinin kullanılmasıyla yerinde verimliliği artırıp kaliteyi iyileştirme yeteneğine sahiptir. Başka bir ifadeyle, BIM teknolojisinin kullanımıyla beraber şantiyeler, üretim yeri olmaktan çıkmakta; montaj yeri olmaya başlamaktadır. BIM, hem veri görselleştirmesini ve kalitesini iyileştirmekte hem de inşaat tedarik zincirinin tüm aşamalarında hata tanımlamasını iyileştirmektedir (Brown, 2008).

4) Artırılmış sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik kavramı, tüm yeni gelişmeler için vazgeçilmez bir konudur. Diğer teknolojiler gibi BIM teknolojisi de sürdürülebilir tasarım ve uygulamalarını yapı sektörü tedarik zincirinin tüm aşamalarına dahil edecek bir araç olarak sunmaktadır. BIM, tüm bina yaşam döngüleri boyunca sürdürülebilirlik için enerji performans ölçümlerini kolaylaştıran analizlere fırsat sunmaktadır. Geleneksel yöntemlerle bu analiz ve tasarımların çoğu gerçekleştirilememektedir.

BIM konsepti, gerçeğin temsili ve doğru model verilerine ve hazır çevresel verilere dayandığı için güvenilir bir performans analizi sağlamaktadır. Bu güvenilir performans analizleri inşaat ve işletme yönetiminde sürdürülebilir performansa yol açmaktadır. BIM teknolojisi birçok farklı faydasından dolayı sürdürülebilirliğin artırılmasına sebep olabilmektedir. Örneğin, BIM'in sağladığı daha yüksek veri kalitesi ile birlikte çizimler daha tutarlı ve doğru olup hata miktarı azalmaktadır. Bu şekilde, aksi durumda ortaya çıkabilecek olan çakışmaların (clash detection) önlenmesi sağlanarak kaynak ve malzeme israfının önlenmesine yardımcı olmaktadır.

Ayrıca, BIM, tasarım ve inşaat karmaşıklığından kaynaklı maliyetlerin azaltılmasına sebep olarak sürdürülebilirliğin artırılmasını sağlamaktadır. BIM'in bir başka faydası değişkenlerin ölçme ve test etme yeteneğini artırmasıdır. BIM'in sağladığı enerji

analizleri ve termal analizler ile alternatif tasarımlar inşaat öncesinde karşılaştırılıp en sürdürülebilir olan seçilebilmektedir.

Ek olarak, olarak tanıdığı dijital dokümantasyon ile BIM kullanıcılarına, enerji verimliliği ve sürdürülebilir malzemeler dahil binanın performansını inceleyebilme fırsatı vermektedir. BIM teknolojisinin, enerji verimliliği ve diğer sürdürülebilirlik raporlama gereksinimlerinin izlenmesi ve raporlanmasında da temel bir göreve sahip olduğu söylenebilmektedir. Son olarak BIM, iş süreçlerinde tekrarları ve israfı ortadan kaldırarak sürdürülebilirliğe destek olmaktadır. Yaşam döngüsü maliyetlerinin ve çevresel etkilerin analizi erken bir aşamada gerçekleştirilebildiği için inşaat aşamasının başlarında sürdürülebilirliği artırmak maksadıyla tasarım değişiklikleri yapılabilmektedir.

5) İşgücü piyasası iyileştirmeleri

İşgücü piyasası iyileştirmeleri, BIM teknolojisinin temel yararlarından biridir. Zira BIM kavramı, tüm tasarım ekibi üyelerinin tasarım sürecine daha erken bir aşamasında dahil olduğu daha işbirlikçi çalışma uygulamalarını teşvik etmektedir. Örneğin, mimarlar ve mühendisler, tasarım fırsatlarını geliştirmek ve çizimlerle tasarım arasında sinerji yaratmak için BIM verilerini kullanabilmektedir (McGraw Hill Construction, 2008).

Bunların dışında, BIM uygulamaları üç tür maliyeti ciddi miktarda azaltmaktadır:

Kaçınma Maliyetleri: Geliştirilmiş bilgi ve iletişim süreçlerinin sağladığı faydalarla birlikte kâğıt değişim tabanlı uygulama sistemlerinin bakımı vb. birlikte çalışabilirlik sorunlarının azaltılmasıyla maliyet tasarrufu sağlanmaktadır.

Hafifletme Maliyetleri: BIM teknolojisi aynı anda, aynı 3 boyutlu model üzerinde çalışılabilmesine olanak tanıdığı için verilerin manuel olarak yeniden girilmesi gibi gereksiz faaliyetleri gerçekleştirme ihtiyacını azaltmaktadır.

Gecikme Maliyetleri: Geleneksel yöntemdeki iş akışında yer alan bilgi alışverişi için bekleme süresi, BIM sayesinde azaltılmış ve bundan kaynaklı maliyetler gecikme maliyeti olarak adlandırılmıştır (Hedges, t.y.).

Ayrıca, yanlış malzeme, işçilikle ilgili verimsizlikler ve koordinasyon hataları sebebiyle inşaat maliyetlerinin genel olarak %30'unun boşa gittiği bildirilmektedir (CURT, 2004; Brown, 2008).

Stanford Üniversitesi Entegre Tesis Mühendisliği Merkezi (the Stanford University Centre for Integrated Facility Engineering) BIM kullanan 32 büyük projeyi incelemiş ve bunlara dayanarak şu faydaların sağlandığını bildirmiştir:

- Bütçe dışı değişimlerin %40 oranında ortadan kaldırılması,
- Maliyet tahmini doğruluk sınırının %3 içerisinde kalması,
- Maliyet tahmini oluşturmak için geçen sürede %80 azalma,
- Çakışma tespiti yoluyla sözleşme değerinin %10'u kadar tasarruf,
- Toplam proje süresinde %7 azalma (SUCIFE, 2007).

2.7 Yapı Bilgi Modellemenin Uygulanmasındaki Zorluklar ve Engeller

Yapı Bilgi Modelleme teknolojisinin önceki bölümde ele alındığı gibi birçok faydası olmakla birlikte, BIM uygulanmasında bazı zorluklar ve engeller de hiç şüphesiz mevcuttur.

Öncelikle, Diaz (2016) tarafından yapılan çalışmaya göre BIM uygulanmasındaki zorluklar, 4 ana başlık altında toplanabilmektedir:

- a. Teknik zorluklar,
- b. Beceri ve eğitim zorlukları,
- c. Yasal prosedür zorlukları,
- d. Firmaların mevcut sistemlerini BIM odaklı bir sisteme yükseltmelerini engelleyebilecek ekonomik zorluklar.

a. Teknik Zorluklar

Teknik zorlukların başında veri modeli uyumsuzluğu gelmektedir. Sektördeki çoğu firma kendi yazılımlarını kullanmaktadır. Bir firmadan işbirlikçi başka bir firmaya gönderilen BIM dokümanları işbirlikçi firma tarafından yazılım uyumsuzluğu sebebiyle açılmamakta veya eksik/hatalı veriyle karşılaşılmaktadır. Dolayısıyla yazılımlar arasında ve aktörler arasında birlikte çalışabilirlik konusunda kısmen sorunlar olduğu belirtilmektedir.

Ayrıca, BIM'in büyük boyutlu olmasından dolayı farklı veri paylaşım araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Veritabanına gerçek zamanlı erişim, proje verilerinin güvenliği konusunda soru işaretlerini bünyesinde barındırmaktadır.

b. Beceri ve Eğitim Zorlukları

İşletmeler, çalışanlarının BIM konusunda eğitimi ile ilgili dezavantajlardan bahsetmektedir. Çalışanların eğitimi için hem zaman harcanması hem de eğitim masraflarının karşılanması gerektiği için bazı şirketler tarafından zorluk olarak kabul edilmiştir. Bunun yanında, hala sektörde yeterince BIM konusunda uzmanlaşmış kalifiye eleman bulunmamaktadır. BIM'i bilen kalifiye elemanların bulunması ve işe alınması da belli bir çabayı gerektirmektedir.

c. Yasal Prosedür Zorlukları

BIM kullanımıyla ilgili yasal prosedür zorlukları, yapı paydaşları açısından önemli bir konudur. Modelin sahipliği yasal sorunlardan biridir. Yani BIM modelinde modelin sahibinin kim olacağı, modelden kimin sorumlu olacağı, kimin parayı ödeyeceği net şekilde belirtilmemektedir. Bu sorundan kurtulmak için yasal/sigorta prosedürleri netleştirilmelidir (Özorhon, 2018). Bir başka yasal sorunlardan biri yasal sorumluluğun belirsiz olmasıdır. Projede aktif çalışan paydaşlar, BIM modelinin doğruluğuna ve kalitesine güvenmektedir. Fakat bu verilerin doğruluğu konusunda sorumluluğun kime ait olduğu bilinmemektedir. Ayrıca, BIM yazılımını kullanmanın yasal sonuçları henüz kapsamlı bir şekilde test edilmemiştir (Mineer, 2015).

d. Ekonomik Zorluklar

BIM ile ilgili yazılım ve donanımların satın alınması ve çalışanların eğitimi bir maliyeti gerektirmektedir. Bazı firmalar tasarım ve yapım maliyetlerinin BIM sürecini desteklemeyeceği konusunda endişe duymaktadır.

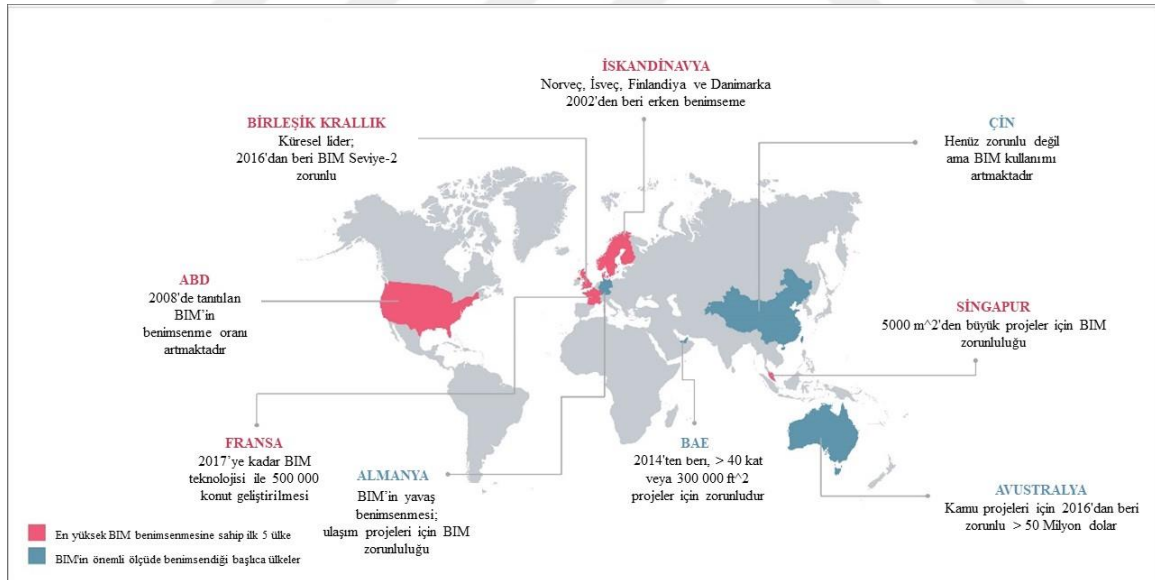
Criminale ve Langar tarafından yapılan çalışmada literatürden alınan BIM'in önündeki 36 farklı engel analiz edilmiş ve bu engellerin %44.4'ünün (16 engel) bir kuruluşla, %27.8'inin (10 engel) bir projeyle ve engellerin %27.8'inin (10 engel) ise hem kuruluşla hem de projeyle ilgili olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmaya göre en yaygın olan 3 engelin "BIM'i kullanacak kişileri işe almak/eğitmek için gereken süre, BIM'i kullanmak için insanları işe alma veya eğitme maliyeti ve BIM kullanımını değerlendirmek için resmi bir standart veya sürecin olmaması" olduğu ifade

edilmektedir. En çok bildirilen ilk iki engel, küçük/ orta ölçekli işletmeler için oldukça önemli olabilmektedir. Ayrıca BIM için ulusal standartların olmaması, veri yönetimi ve birlikte çalışabilirlik ile ilgili zorluklar da önemli engeller içerisinde yer almaktadır (Criminale & Langar, 2017).

2.8 Yapı Bilgi Modellemenin Mevcut Durumu

2.8.1 Dünyadaki durum

Teknolojinin gelişmesiyle öne çıkan akıllı şehirlerle birlikte önceki bölümlerde sözü edilen tüm faydaları neticesinde BIM'in benimsenmesi tüm dünyada önem kazanmıştır. Bu bölümde BIM'in ülke bazında dünyadaki gelişimi incelenecektir. Öncelikle dünya ülkeleri BIM benimsemelerinde ve BIM konusundaki gelişmişliklerine göre sınıflandırıldığında Birleşik Krallık, Amerika Birleşik Devletleri, Singapur, Fransa ve İskandinav ülkelerinin (Norveç, İsveç, Finlandiya ve Danimarka) BIM konusunda en öne çıktıkları görülmektedir (Şekil 2.12). Bunun yanında, Almanya, Birleşik Arap Emirlikleri, Avustralya ve Çin'in de BIM benimsenmesinde önemli yere sahip olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 2.12: BIM'in benimsenmesinde lider ülkeler (URL-3).

a. Birleşik Krallık

BIM, Birleşik Krallık'ta çok önemli bir yere sahiptir. Birleşik Krallık'taki inşaat sektörü, dünyadaki teknolojik olarak en gelişmiş ve dijitalleştirilmiş sektörler arasında yer almaktadır. Hükümet tarafından 2016 yılında yapılan düzenlemeyle birlikte, tüm

kamu projelerinde BIM Seviye-2 kullanılması zorunlu kılınmıştır (Url-3). Bu yasal düzenlemenin ardından Birleşik Krallık'ta halkın BIM'i benimse oranı artmıştır. Örneğin, 2018 Ulusal BIM Raporu verilerine göre, sektörün beşte biri 2016'dan 2018'e kadar BIM'i benimsemiştir. Bu BIM'i benimseyenlerin ise yaklaşık %75'i son 1 yılda %12'lik bir artışla BIM'i kullanmaktadır. 2014 yılından beri olan büyüme oranları incelendiğinde BIM ile ilgili yasal düzenlemeden sonra en fazla benimseme olduğu görülmektedir (Paul, 2018).

b. Amerika Birleşik Devletleri

1970'li yıllardan beri BIM'i kullanan ve uygulayan ABD, uzun zamandır BIM'in kullanımı ve uygulanmasında global lider konumunda yer almaktadır. US General Services Administration (GSA) tarafından 2007 yılında yapılan düzenlemeye göre tüm kamu projelerinde BIM'in kullanımı zorunlu hale getirilmiştir (Khemlani, 2012).

c. Singapur

2015 yılında Singapore Building and Construction Authority tarafından BIM'in kamu projelerinde yaygın olarak kullanılması için bir strateji geliştirilmiştir. 2000 yılında ise inşaat endüstrisinde bilgi teknolojilerinin kullanımını yaygınlaştırılması için Construction and Real Estate Network (CORENET) adıyla bir stratejik girişim programı kurulmuştur (BuildingSmart Australiasia, 2012). 5,000 m²'den tüm projelerde BIM kullanımı zorunlu hale getirilmiştir.

d. Fransa

Fransız hükümeti, altyapı projelerinde BIM standartlarının geliştirilmesi için 2014 yılında "MINnD" adı verilen bir arge projesi başlatmıştır. Ayrıca, hükümet tarafından 2014 yılından 2017 yılına kadar BIM teknolojisi kullanılarak 500,000 konut geliştirilmesine karar verilmiştir. 2015 yılından beri Fransız hükümeti inşaat sektöründe Dijital Geçiş Planı'nın bir parçası olarak inşaat sektörünü dijitalleştirmek için 20 milyon Euro'luk bir bütçe ayırmıştır (Paul, 2018). 2018 yılının sonlarında inşaat paydaşlarının iş akışlarına entegre edilmesinin teşviki amacıyla "BIM Plan 2022" başlatılmıştır (Steers, 2021).

e. İskandinav Ülkeleri

Norveç, İsveç, Danimarka ve Finlandiya gibi İskandinav ülkeleri BIM'i uygulamalı olarak ilk benimseyen ülkelerdendir (Url-3). Norveç'te 2007 yılından beri projelerde BIM kullanılmaktadır (Coll Australasia, 2012). 2009 yılında, tüm projeler için BIM kullanımı zorunlu hale gelmiştir. 2010 yılında ise ortak bir dosya formatı olan IFC tabanlı BIM kullanımını zorunlu hale getirmiştir (Url-3). Norveç, OpenBIM standartlarının geliştirilmesinde önemli rol oynamıştır (Paul, 2018). Benzer şekilde, İsveç hükümeti ise 2015 yılında BIM kullanımını kolaylaştırarak kullanımını zorunlu kılmıştır (Url-3).

Danimarka'da da durum benzerdir. Danimarka BIM'in desteklenmesi konusuna büyük önem vermekte ve BIM ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmalarına ciddi bir bütçe ayırmaktadır (Granholt, 2011). Defence Construction Service, Palaces & Properties Agency ve Danish University Property Agency gibi kamu kurumları, projelerinde BIM kullanımını zorunlu kılmaktadır (BCA, 2012).

Finlandiya'da ise inşaat sektöründe evrensel bir BIM rehberi yayınlanmıştır. Ayrıca, Finlandiya'da kamu kurumlarında 2007 yılından beri IFC uyumlu BIM modellerinin kullanılması zorunlu hale getirilmiştir (BuildingSmart Australasia, 2012).

f. Almanya

Almaya, AEC endüstrisinde BIM tabanlı iş akışlarına geçişe hazırlanmaktadır. 2015 yılında, the German Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2020'de federal altyapı projeleri için BIM'i zorunlu kılmak için kapsamlı bir yol haritası tanımlamıştır (Borrmann ve diğ., 2021). 2016 senesinde ise ulaşım projelerinin dijitalleştirilmesiyle bir BIM pilot projesi başlatılmıştır (Url-3).

g. Avustralya

Avustralya'da BIM'in projelerde kullanılması konusunda bir zorunluluk bulunmamaktadır. Ancak son yıllarda yapılan girişimlerle birlikte Avustralya'da BIM'e olan ilgi sürekli artmaktadır. Avustralya'nın, BuildingSmart BIM'in geliştirilmesine ve uygulanmasına önderlik ettiği bilinmektedir (CIBER, 2012).

h. Birleşik Arap Emirlikleri

Birleşik Arap Emirlikleri (BAE), AEC sektörünün gelişmiş olduğu, hızla büyüyen ve kentleşen bir ülkedir. BAE’de ünlü binaların birçoğu BIM’i projelerinde kullanmaktadır (Url-3). Zira 2013 yılında Dubai Belediyesi belirli projelerde mimari ve MEP çalışmaları için BIM’in kullanılmasını zorunlu tutan bir genelge yayınlamıştır. Sonrasında 2015 yılında bu genelge genişletilerek 20 katın üzerindeki binalar ve 200,000 m²’den büyük binalar, tesisler, siteler, hastaneler, üniversiteler, özel tesisler ve kamu projeleri için BIM kullanımını zorunlu kılacak bir başka genelge yayınlanmıştır. Fakat, Birleşik Arap Emirlikleri’nde AEC endüstrisinde BIM sürecinin standardizasyonu gerçekleştirilmemiştir (Paul, 2018).

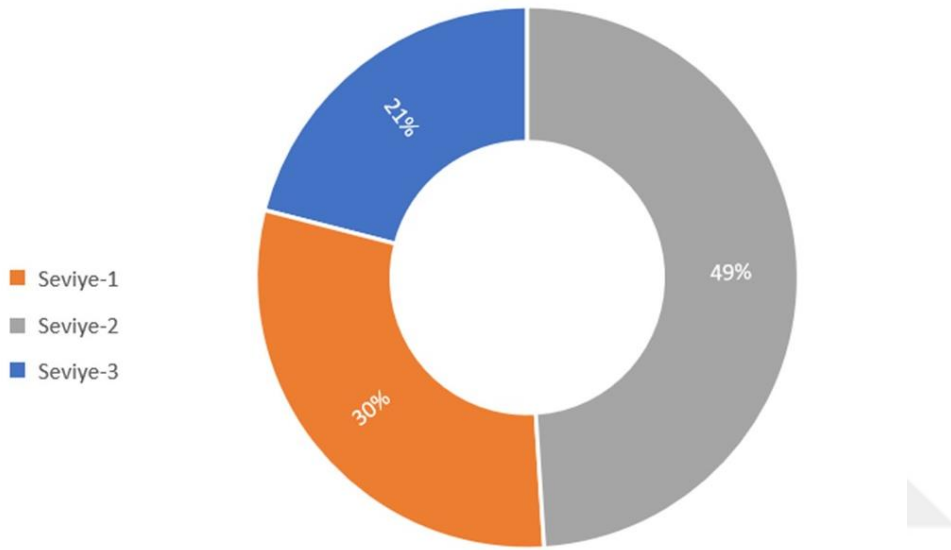
ı. Çin Halk Cumhuriyeti

Çin Halk Cumhuriyeti’nin AEC endüstrisinde BIM benimsenmesi sınırlıdır (Dou & Bo, 2022). Bunun sebebi olarak, geleneksel yöntemlerin değiştirilmesinde zorlukların yaşanması ve Çin kanunlarında tasarım ve inşaat aşamalarının ayrı tutulması gösterilebilmektedir (McGraw Hill Construction, 2014). Fakat yine de son yıllarda, BIM benimseme seviyesi giderek daha yoğun hale gelmektedir (Dou & Bo, 2022).

2.8.2 Türkiye’deki durum

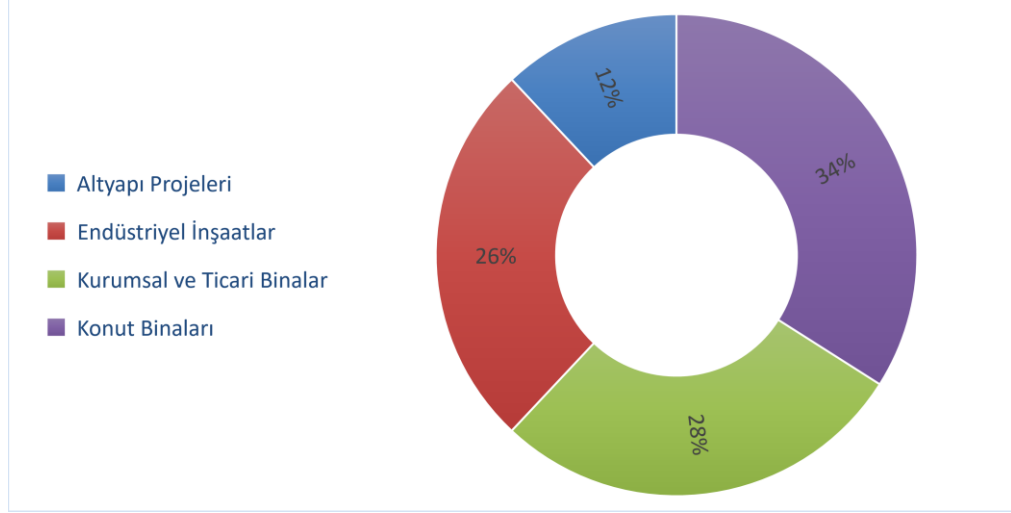
United Nations Statistics Division’a göre Türkiye’nin, gayri safi yurtiçi hasılasına (GSYİH) göre güçlü ve büyüyen bir ekonomi olduğu ifade edilmiştir (United Nations Statistics Division, 2013). Türkiye’deki AEC Endüstrisi’nin, GSYİH açısından ekonomiye yaklaşık %30 olarak önemli bir katkı sağladığı düşünüldüğünde, Türkiye ekonomisinin kısmen inşaat sektörüne bağımlı olduğu söylenebilmektedir (Reina & Tulacz, 2014). Engineering News Record’un (ENR) 2018’deki ‘En Büyük 250 Uluslararası Müteahhit Listesi’ne göre Türkiye, 46 müteahhit firma ile ikinci sırada yer almakta ve en iyi müteahhitlerin yaklaşık %20’sini temsil etmektedir (Engineering News Record, 2018). Türkiye’nin küresel AEC endüstrisine katkıda bulunan ana ülkelerden biri olduğu düşünüldüğünde, Türk AEC endüstrisinin küresel anlamda rekabetçi kalabilmesi için BIM gibi teknolojilerin benimsenmesi ve kullanılması kritik önem taşımaktadır. (Ezcan ve diğ., 2013). Buna karşılık, Türkiye’nin BIM uygulamasında hala erken geçiş aşamasında olduğu bilinmektedir.

Ozorhon & Karahan (2016) tarafından yapılan çalışmaya göre BIM teknolojisini projelerinde kullandıklarını söyleyen katılımcılardan %43'ünün tasarımcı ve %33'ünün işveren olduğu anlaşılmıştır. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi Türkiye'deki BIM kullanıcıları BIM'i en çok %49 oranıyla Seviye-2 olgunluk düzeyinde uygulamaktadır. Bu oranı %30 ile Seviye-1 ve %21 ile Seviye-3 takip etmektedir. Seviye-0 BIM bu çalışmada ele alınmamıştır.



Şekil 2.13: Türkiye’de BIM kullanıcılarının kullandığı olgunluk seviyesi (Ozorhon & Karahan, 2016).

BIM uygulamalarının proje tipine göre dağılımı incelendiğinde (Şekil 2.14) BIM uygulamalarının en çok %34 ile konut binalarında kullanıldığı, sonrasında ise sırasıyla %28 oranıyla kurumsal ve ticari binalarda, %26 oranıyla endüstriyel inşaatlarda ve %12 oranıyla altyapı projelerinde kullanıldığı görülmektedir (Ozorhon & Karahan, 2016).



Şekil 2.14: Türkiye’de BIM uygulamalarının proje tipine göre dağılımı (Özorhon & Karahan, 2016).

Türkiye’de BIM’in 3D’den 7D’ye kadar farklı kapsamlarda ve farklı birçok projede uygulanabildiği görülmektedir. Başta görselleştirme, çakışma tespiti ve planlama olmak üzere birçok farklı alanda BIM’in fonksiyonlarından yararlanılabilmektedir. Türkiye’de BIM uygulamaları ilk olarak raylı sistemler projelerinde gerçekleştirilmiş olup her geçen gün büyük çaplı birçok altyapı projesinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ataköy-İkitelli Metro Hattı, Dudullu-Bostancı Metro Hattı ve Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Hattı, BIM teknolojisi kullanılarak üretilmiş raylı sistemler projelerinden bazılarıdır. BIM teknolojisi kullanılarak üretilen diğer projelerden bazıları şunlardır: Adana Entegre Sağlık Kampüsü, İstanbul Sağlık Yönetim Ofisi, Okmeydanı Eğitim ve Araştırma Hastanesi, İstanbul Yeni Havalimanı, İzmir Adnan Menderes Havalimanı, KKTC Ercan Havalimanı, Sabiha Gökçen Havalimanı-HABOM, Abdullah Gül Müzesi Renovasyon Projesi, İstanbul Emaar Square, Seyrantepe Stadyumu Çelik Çatı Projesi (Özorhon, 2018). Ancak, Türkiye’de henüz BIM uygulaması için oluşturulmuş bir yol haritası bulunmamaktadır. Bu nedenle, gelişmiş ülkeler tarafından oluşturulan standartlar yüklenici firmalar tarafından Türkçe’ye çevrilmektedir (Pekeriçli, Sarı, & Tanyer, 2017). Türkiye’de BIM uygulamalarının önündeki engeller olarak farkındalık eksikliği, eğitim modeli eksikliği, standart eksikliği, kalifiye teknik personel eksikliği, müşteri/mal sahibi talebi eksikliği sayılabilir. Ayrıca, BIM uygulamasının benimsenme hızının artırılmasında devlet desteği de önemli bir rol oynamaktadır (Sakin, 2019). Bu engellerin giderilmesiyle Türkiye’de BIM’in benimsenmesinin hızlı bir ivmeyle artacağı açıktır.



3. ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası olan enerjiye olan gereksinim, hem hayat standartlarındaki gelişmeler hem de nüfus ve sanayileşmedeki artış ile birlikte her geçen gün daha da artmaktadır. Tüm dünyada artan enerji talebi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılmasıyla enerjiden tasarruf edilmesini ve enerji verimliliğini zorunlu kılmaktadır. Enerji verimliliği, enerji kullanımının azaltılarak, konfor şartlarından taviz verilmeksizin mal ve hizmet üretiminin artırılması olarak tanımlanabilmektedir.

3.1 Enerji Verimliliğine Yönelik Politika ve Stratejiler

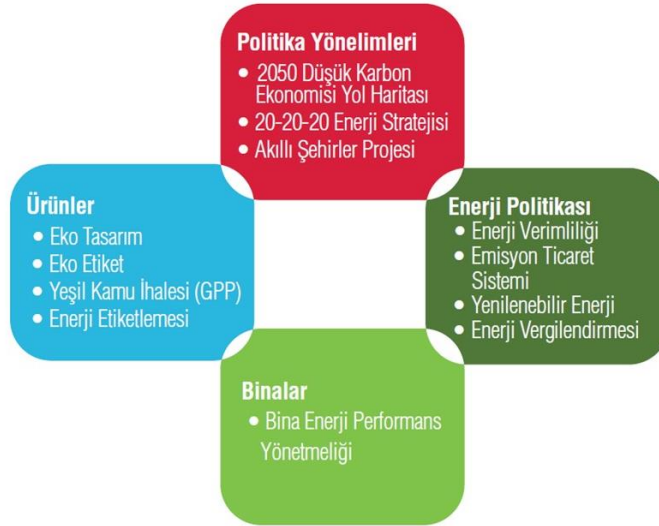
Tüm dünyada enerji verimliliğinin teşviki için birçok adım atılmış ve çeşitli politika ve stratejiler geliştirilmiştir. Avrupa Birliği (AB)'ndeki ve Türkiye'deki bina sektörü ve enerji verimliliği ile ilgili yasal durum izleyen bölümde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

3.1.1 AB'deki yasal durum

Avrupa Birliği'nin mevcut bina stoğu incelendiğinde binaların %75'inin verimsiz olduğu dikkat çekmektedir. AB üyesi ülkeler enerji verimliliğinin sağlanması için enerji tüketiminin azaltılmasını, inşaat sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını ve yaygınlaştırılmasını, enerjide dışa bağımlılığın ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasını teşvik edecek politikalar geliştirmektedir (Şekil 3.1) (Öztürk, 2021). 2009 yılında 2020 yılına yönelik olarak bütünleşik iklim ve enerji hedefleri AB tarafından belirlenmiştir. Bu hedefler kısaca "20-20-20 hedefleri" olarak adlandırılmakta ve şu 3 temel hedefi içermektedir:

- Sera gazı emisyonlarının 2020 yılına kadar 1990 seviyesine göre minimum %20 azaltılması,
- 2020 yılına kadar enerji verimliliğinde minimum %20 iyileştirme,

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji arzındaki toplam payının minimum %20'ye çıkarılması (T.C. Dışışleri Bakanlığı Avrupa Birliğı Başkanlığı, 2022).

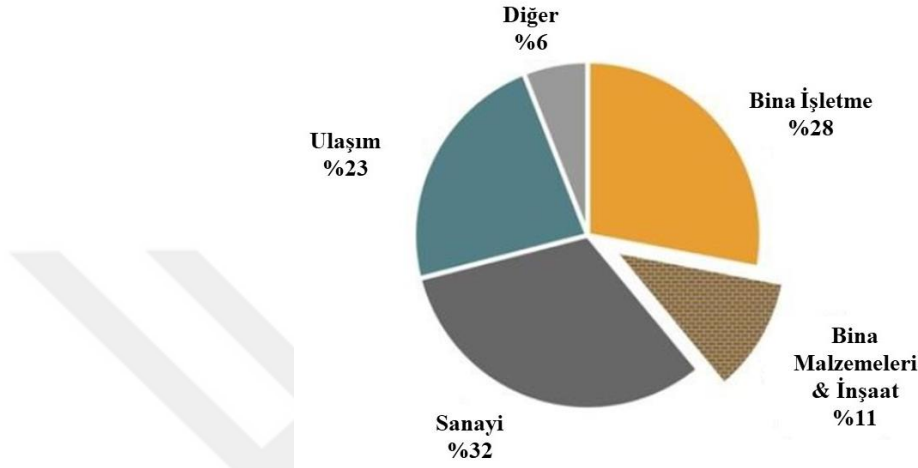


Şekil 3.1: AB'de yasal durum (Türkiye İnşaat Malzemesi Sanayicileri Derneğı (Türkiye İMSAD), 2014).

Avrupa Birliğı'nin enerji ve iklim çerçevesi ise 2014'te onaylanarak yürürlüğe girmiştir. Buna göre AB, 2030 yılına kadar enerji ve iklim çerçevesinde şu hedefleri belirlemiştir:

- 2030 yılına kadar yenileme projelerinin sayısının 2 katına çıkarılması,
- 30 milyondan fazla konut, okul, hastane gibi yapıların daha enerji verimli hale getirilmesi ve bu yapılardan kaynaklı karbon salınımlarının azaltılması,
- İstihdam oluşturma ve yenilenebilir enerji kullanımının desteklenmesi,
- Sera gazı emisyonlarının 1990 seviyelerine kıyasla %40 azaltılması,
- Enerji verimliliğinin minimum %32.5 iyileştirilmesi,
- Yenilenebilir enerjinin toplam payının minimum %32'ye çıkarılması,
- Karbon nötr yapı inşaat malzemelerinin üretimi,
- Yenileme çalışmaları ile düşük karbonlu ve enerji verimli yapıların yaygınlaştırılması (Öztürk, 2021).

Tüm bu hedeflere ulaşılabilmesi için AB, bina ve ulaşım sektörüne öncelik tanımaktadır. Zira Şekil 3.2’de görüldüğü gibi bina işletme (ısıtma, soğutma, ışıklandırma vb.) ve bina malzemeleri ve inşaat sektörleri global ölçekte toplam %39 oranla en fazla CO₂ salınımına sebep olan sektörlerdir. Dolayısıyla bu sektörlerde yapılan enerji verimliliğine yönelik iyileştirmeler, küresel ölçekte karbon salınımının azaltılmasında önemli bir fırsat sunmaktadır.



Şekil 3.2: Global ölçekte sektörel bazda CO₂ emisyonu (Global Alliance for Building and Construction, 2018).

2015 yılında imzalanan Paris Anlaşması da iklim değişikliği ve enerji verimliliğine yönelik atılmış önemli bir adımdır. 191 ülkenin taraf olduğu Paris Anlaşması temelde sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun ortadan kaldırılmasını hedeflemektedir. Paris Anlaşması’nda yer alan sürdürülebilir kalkınma hedefinin temel dayanak noktalarından bazıları erişilebilir ve temiz enerjinin sağlanması ve iklim eylemidir (Şekil 3.3). *Küresel ortalama sıcaklık artışının sanayileşme öncesi döneme göre 2°C altında tutulması; ek olarak bu artışın 1.5°C’nin altında tutulmasına yönelik küresel çabaların sürdürülmesi*, Paris Anlaşması’nın uzun dönemli hedeflerini oluşturmaktadır (Url-4).



Şekil 3.3: Sürdürülebilir kalkınma hedefleri (Url-5).

Paris Anlaşması'ndaki sürdürülebilir hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için ilgili düzenlemeler Avrupa Yeşil Mutabakatı'nda bildirilmiştir. Avrupa Birliği (AB) tarafından 2019 yılında kamuoyuna tanıtılan Avrupa Yeşil Mutabakatı temel olarak 2050 yılına kadar net sera gazı emisyonlarının sıfırlanmasını (2030 yılına kadar %50 oranında azaltılmasını) ve ekonomik büyümenin kaynak kullanımına bağlılığının sona ermesini amaçlamaktadır. Bir başka ifadeyle Avrupa Yeşil Mutabakatı, iklim nötr olmayı teşvik eden ve ülkelerdeki tüm politikaların iklim değişikliği ekseninde yeniden şekilleneceği yeşil bir dönüşümü gerektiren yeni bir büyüme stratejisidir. Bu bağlamda, Avrupa Yeşil Mutabakatı yalnızca bir iklim politikası olmayıp ayrıca ekonomik bir dönüşüm programı olarak kurgulanmıştır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021). Bu çerçevede AB, karbon nötr olma yolunda Avrupa Yeşil Mutabakatı'nda enerji sektörünü karbonsuzlaştırma, binaların enerji tasarruflu olmasını sağlama gibi hedef kategoriler belirlemiştir (Narter & Partners, 2021).

Avrupa Yeşil Mutabakatı'nda yer alan hedeflerin gerçekleştirilmesi için Avrupa Birliği binalarda enerji verimliliği ile ilgili çeşitli yasal düzenlemeler yapılmıştır. Bu yasal düzenlemeler şu şekildedir:

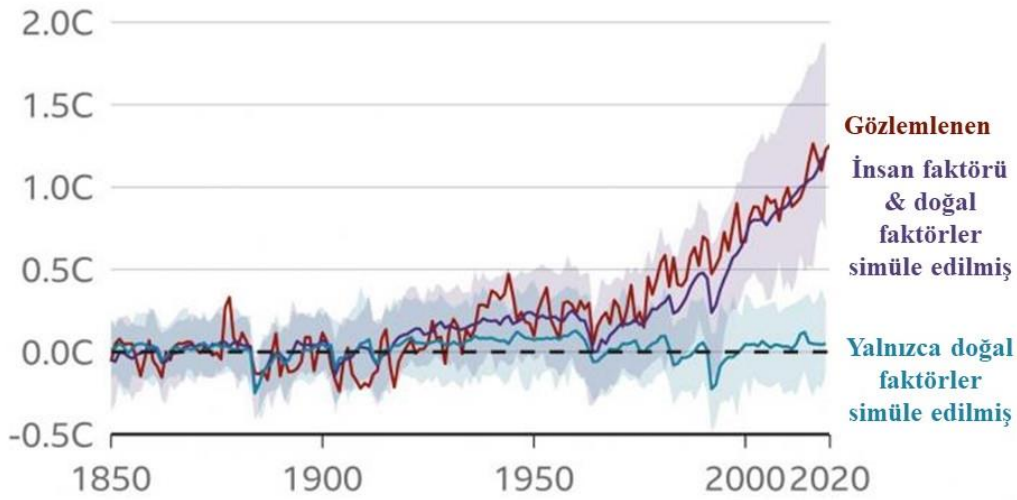
- Enerji Verimliliği Direktifi (Energy Efficiency Directive),
- Enerji Verimliliği Eylem Planı (Energy Efficiency Plan),
- Enerji Verimliliği Finansmanı (Financing Energy Efficiency),
- Akıllı Enerji Avrupa (Intelligent Energy Europe) (2007-2013),
- ELENA (ELENA Facility) (2009),
- Avrupa Enerji Verimliliği Fonu (European Energy Efficiency Fund) (EEEF) (2011),

- Horizon 2020 (2014-2020) (Türkiye İnşaat Malzemesi Sanayicileri Derneği, 2014).

Bunların dışında AB tarafından “Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD)” ilk olarak 2002 yılında yayınlanmış, sonrasında 2010 ve 2018 yıllarında güncellenmiştir. EPBD, dış mekân iklimsel ve yerel koşullarının yanı sıra iç mekân iklim gereksinimleri ve maliyet etkinliğini dikkate alarak Avrupa Birliği içindeki binaların enerji performansının iyileştirilmesini teşvik etmeyi amaçlayan bir direktiftir (EPB Center, t.y). Ayrıca Aralık 2021’de komisyon tarafından EPBD için yeni bir revizyon önerilmiştir. Bu yeni revizyon ile mevcut çerçeve düzenlenmiş, iklim anlamında daha yüksek hedefler belirlenmiş ve Avrupa’da yer alan mevcut bina stoğundaki farklılıkların hesaba katılması için gereken esneklik sağlanmıştır. Bu yeni revizyonla birlikte 2050 yılına kadar sıfır emisyonu sahip ve tamamen karbondan arındırılmış bir bina stoğu hedefine nasıl ulaşılabileceği ortaya konmuştur. Buna ek olarak bu direktif, şehirlerde yer alan en kötü performans gösteren binalar için yenileme oranlarının artırılmasını bildirmektedir. EPBD’nin temel hedeflerinden biri 2030 yılına kadar 2015 yılına oranla en az %60 emisyon azaltılması ve 2050 yılında ise iklim nötr hedefine ulaşılmasıdır. EPBD’ye göre 2019 yılı itibarıyla de tüm kamu binalarının ve yeni binaların Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (NSEB) olması gerekmektedir ve 2021 yılı itibarıyla tüm binaların NSEB olması zorunlu olmaktadır (Url-6).

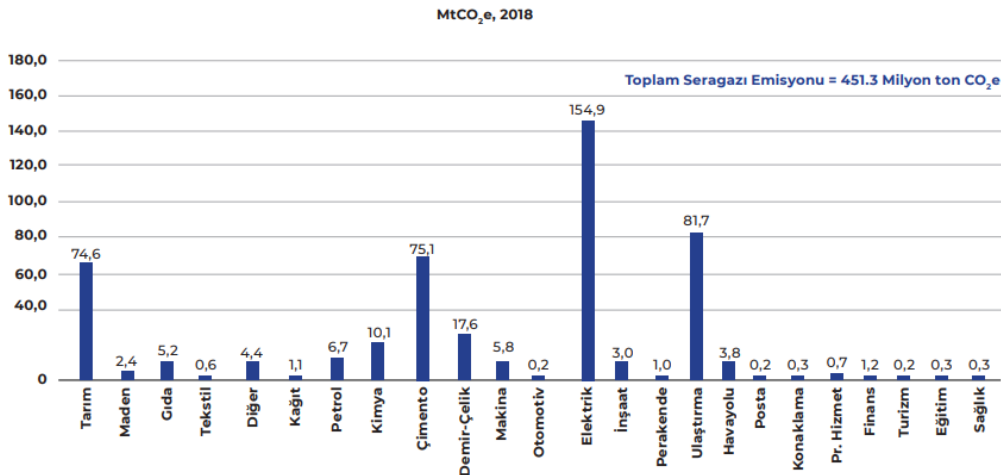
3.1.2 Türkiye’de yasal durum

Tüm dünyada insan kaynaklı sıcaklık artışı görülmektedir. Şekil 3.4’te görüldüğü gibi yalnızca doğal faktörlere göre bilgisayar ortamında yapılmış olan simülasyon sonuçlarına göre 1850-2020 arası sıcaklık genellikle sabit seyretmektedir. Kullanılan doğal faktörlere insan faktörü eklendiğinde ise sıcaklığın arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3.4: Gözlemlenen sıcaklıkları ve bilgisayar simülasyonlarını içeren 1850-2020 yılları arası ortalama küresel sıcaklıktaki değişim (IPCC, 2021).

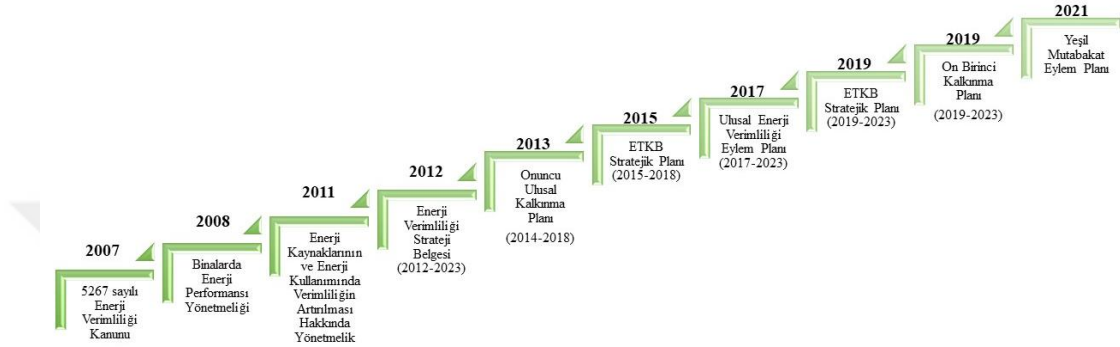
TÜSİAD raporuna göre ise Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Türkiye'de en fazla karbon salınımına sebep olan sektörler ulaştırma ve yapı, çimento sektörüdür (TÜSİAD, 2020). Ayrıca, Türkiye, yapı sektöründe %30, sanayi sektöründe %20 ve ulaşım sektöründe %15 olmak üzere anlamlı düzeyde enerji tasarruf potansiyeline sahiptir (Doğan & Yılankırkan, 2015). Bu nedenle tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de binalarda enerji tasarrufu konusu önem kazanmıştır.



Şekil 3.5: Türkiye'de Sektörel Sera Gazı Emisyonları, MtCO₂e (2018) (TÜSİAD, 2020).

Türkiye'de enerji verimliliği ile ilgili yasal süreç 2007'de "5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu" ile başlamış ve 2008'de "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği" yayınlanmasıyla devam etmiştir. Sonrasında sırasıyla 2011 yılında

“Enerji Kaynaklarının ve Enerji Kullanımında Verimliliğin Artırılması Hakkında Yönetmelik”, 2012 yılında “Enerji Verimliliği Strateji Belgesi (2012-2023)”, 2013 yılında “Onuncu Ulusal Kalkınma Planı (2014-2018)”, 2015 yılında “ETKB Stratejik Planı (2015-2018)”, 2017 yılında “Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP) (2017-2023)”, 2019 yılında “ETKB Stratejik Planı (2019-2023)” ve “On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)”, 2021 yılında ise “Yeşil Mutabakat Eylem Planı” yayınlanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Enerji verimliliği politikalarının yıllara göre gelişimi (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021).

2012’de yayınlanan Enerji Verimliliği Strateji Belgesi’nin temel stratejik amaçlarından biri enerji verimliliği yüksek binaların enerji taleplerinin ve karbon emisyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanan sürdürülebilir çevre dostu binaların yaygınlaştırılmasıdır. Bu stratejik amaç kapsamında iki farklı hedef belirlenmiştir:

- 2023 yılında ilgili binalarda* yürürlükteki standartlara uygun ısı yalıtımı ve enerji verimli ısıtma sistemleri,

(*Kentsel Dönüşüm Kanunu ve Deprem Yönetmeliği kapsamında kullanılabilir niteliği haiz olan binalar arasından; büyükşehir mücavir alanlarındaki yapı grup sınıfı 2. sınıf veya üzeri olan konutlar ile birlikte toplam kullanım alanı 10,000 m²’nin üzerindeki ticari ve hizmet binalarının tamamı.)

- 2023 yılına kadar 2010 yılındaki mevcut yapı stoğunun minimum %25’inin sürdürülebilir yapıya dönüştürülmesi (Resmi Gazete, 2012).

2 Ocak 2018 tarih, 30289 sayılı Resmî Gazete’de yayınlanarak yürürlüğe giren Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP)’nda binalarla ilgili şu önlemler alınmıştır:

- İnşaat sektöründe kullanılan malzemeler ve teknolojilere yönelik en iyi uygulamaların tespit edilmesi,
- Tüm binalarda mevcut enerji kullanım bilgisini içeren bir veritabanı oluşturulması,
- Kamu binalarında enerji tasarrufu ile ilgili amaçların tanımlanması,
- Enerji verimliliğinin belediye hizmetlerinde yaygınlaştırılması,
- Mevcut binaların rehabilite edilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması,
- Merkezi ve bölgesel ısıtma/soğutmanın özendirilmesi,
- Mevcut binalarda enerji kimlik belgesine sahip olma oranının artırılması,
- Sürdürülebilir yeşil binalar ile yerleşimlerin dokümantasyonunun teşviki,
- Yeni binalarda enerji verimliliğinin teşviki,
- Enerji verimliliğinin mevcut kamu binalarında artırılması,
- Yenilenebilir enerji ve kojenerasyon sistemlerinin binalarda kullanımının artırılması,
- Kobi niteliğindeki binalar için enerji verimliliği etüt programları ve etütler için kaynak tahsis edilmesi (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021).

2019 yılında yayınlanan “On Birinci Kalkınma Planı”nda inşaat sektörü ile ilgili alınan önlemler şu şekilde belirlenmiştir:

- Mevcut binalarda enerji verimliliğinin teşviki amacıyla destek sağlanması,
- Daha verimli ve kendi enerjisini üreten binaların yaygınlaştırılması,
- Ulusal Yeşil Bina Sertifika Sistemi’nin kurulması.

Türkiye’de mevcut yasal çerçeve genel olarak AB’nin hazırladığı raporlar temel alınarak oluşturulmuştur. Örneğin, AB tarafından hazırlanan “Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD)” baz alınarak Türkiye’de “Binalarda Enerji Performansı

Yönetmeliği (BEP)” hazırlanmıştır. Ayrıca, Avrupa Yeşil Mutabakatı’nda da durum benzerdir. Avrupa Yeşil Mutabakatı’nda açıklanan yeşil dönüşüm hedeflerinden sonra tüm dünyada iklim değişikliği ile mücadele çalışmaları hız kazanmıştır. Güney Kore, Japonya, Çin gibi ülkeler 2020 yılında yeşil dönüşüme ilişkin hedeflerini açıklamaya başlamışlardır. Ayrıca İsveç, Norveç, Şili, Kanada, Güney Afrika gibi ülkeler net sıfır emisyon hedeflerini kamuoyuna bildirmişlerdir. Türkiye de benzer hedefleri gerçekleştirmek için 2021 yılında Yeşil Mutabakat Eylem Planı’nı yayınlamıştır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı, son zamanlarda küresel dünyada iklim değişikliği ile mücadele ile ilgili politikalara uyum sağlanmasını amaçlamakta ve uluslararası ticarete rekabetçiliğimizi artıracak önlemler içermektedir. Bu kapsamda Yeşil Mutabakat Eylem Planı’nın hedefleri 9 başlık altında toplanabilmektedir:

1. Sınırdaki karbon düzenlemeleri,
2. Yeşil ve dögüsel bir ekonomi,
3. Yeşil finansman,
4. Temiz, ekonomik ve güvenli enerji arzı,
5. Sürdürülebilir tarım,
6. Sürdürülebilir akıllı ulaşım,
7. İklim değişikliği ile mücadele,
8. Diplomasi,
9. Avrupa Yeşil Mutabakatı bilgilendirme ve bilinçlendirme faaliyetleri.

Yeşil Mutabakat Eylem Planı kapsamında bu 9 başlık altında toplam 32 adet hedef ve 81 adet eylem oluşturulmuştur. Özellikle temiz, ekonomik ve güvenli enerji arzı başlığı altında enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması ile ilgili hedeflere yer verilmiştir.

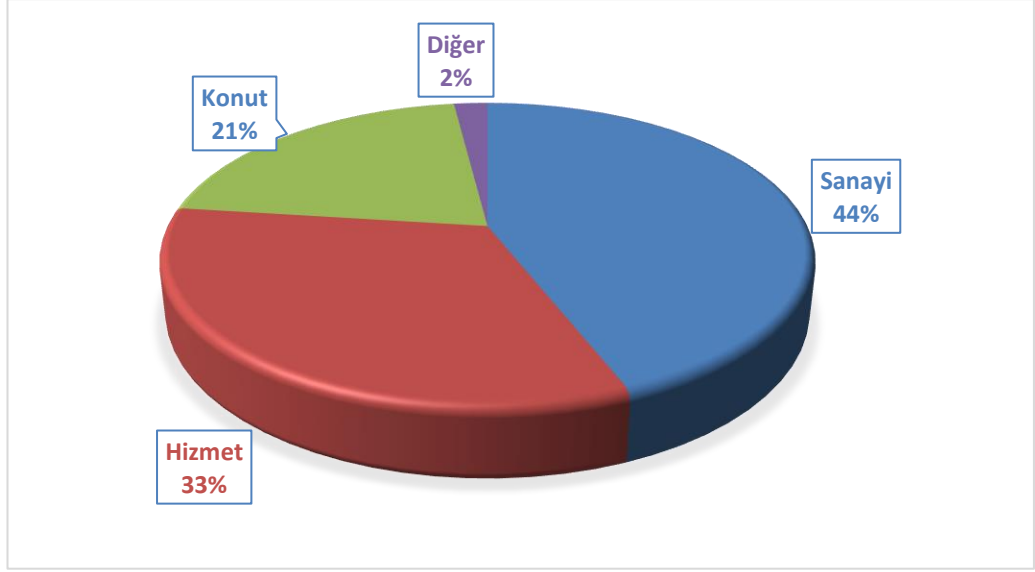
3.2 Türkiye’de Mevcut Bina Stoğunun Yapısı ve Binalarda Enerji Verimliliği

3.2.1 Türkiye’de mevcut bina stoğunun yapısı

Türkiye’de özellikle 1950’lerden itibaren kırdan kente göç hareketleri, kentlerde hızlı nüfus artışı ve maddi yetersizlikler sebebiyle ortaya çıkan bir gecekondulu olgusu vardır. Hızlı ve ucuz konut ihtiyacının neticesi olarak ortaya çıkan gecekondulu olgusu ile birlikte, şehirler büyük bir değişime uğramış ve özellikle sanayinin geliştiği büyükşehirlerde çarpık ve plansız kentleşme baş göstermiştir. Dolayısıyla, kentlerdeki binalar sadece ilk yatırım maliyeti düşünülerek inşa edilmiş, enerji ve bakım maliyetleri dikkate alınmamıştır. Ancak, maliyet konusunda gerçek anlamda tasarruf edilmesi ancak binanın tüm yaşam döngüsü boyunca olan enerji ve bakım maliyetleri de dahil olmak üzere tüm maliyetlerin dikkate alınmasıyla mümkündür.

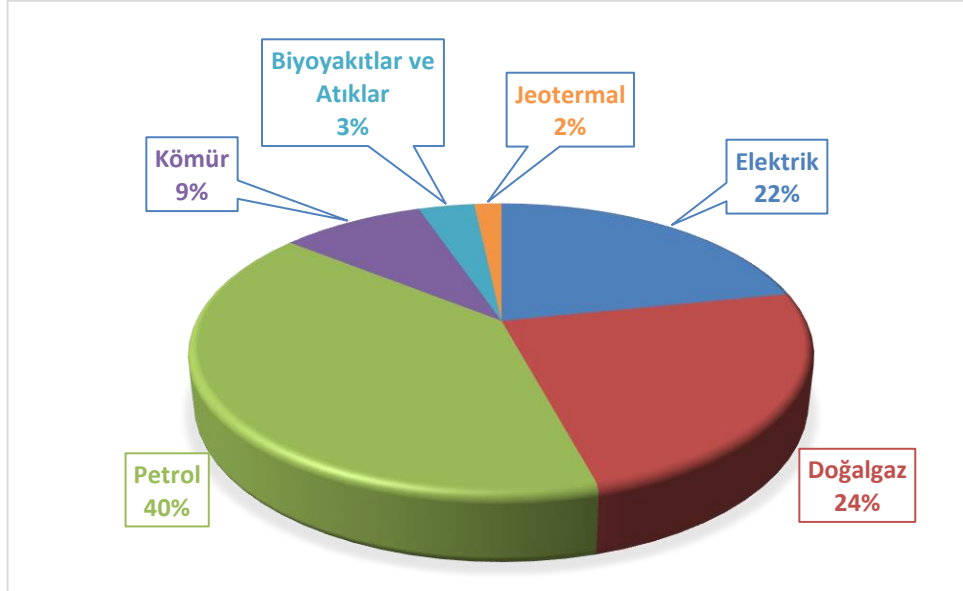
Ülkemizde gecekondulu olgusu ilk defa II. Dünya Savaşı zamanında görülmüştür ve bu tarihlerde ülkemizdeki gecekondulu sayısının 25-30 bin civarı olduğu tahmin edilmektedir. Zamanla, özellikle büyükşehirlerde hızla artan gecekondulu sayısının kısa sayılabilecek bir zaman diliminde yaklaşık 2 milyona ulaştığı bilinmektedir. 2021 TÜİK verilerine göre ülkemizde toplam 11,598,446 bina bulunmaktadır. Bunların yaklaşık %90’ını konut binaları oluşturmaktadır. Dolayısıyla gecekondulu binalarının toplam bina sayısındaki oranı yadsınamayacak kadar fazladır ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması ve enerji verimliliği için dönüştürülmesi gerekmektedir. Bununla beraber Türkiye’nin yapı stoğu sürekli gelişen bir yapıya sahiptir. Ülkemizde her yıl 100,000’den fazla yeni bina, yapı stoğuna eklenmektedir.

Türkiye’de sektörlere göre elektrik enerji tüketimleri incelendiğinde 3 sektörün elektrik tüketiminde öne çıktığı görülmektedir. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, Türkiye’de toplam elektrik tüketiminde öne çıkan sektörler %44 ile sanayi sektörü; %33 ile hizmet sektörü ve %21 ile konut sektörüdür (International Energy Agency, 2021).



Şekil 3.7: Türkiye’de sektörlere göre toplam enerji tüketimi (International Energy Agency, 2021).

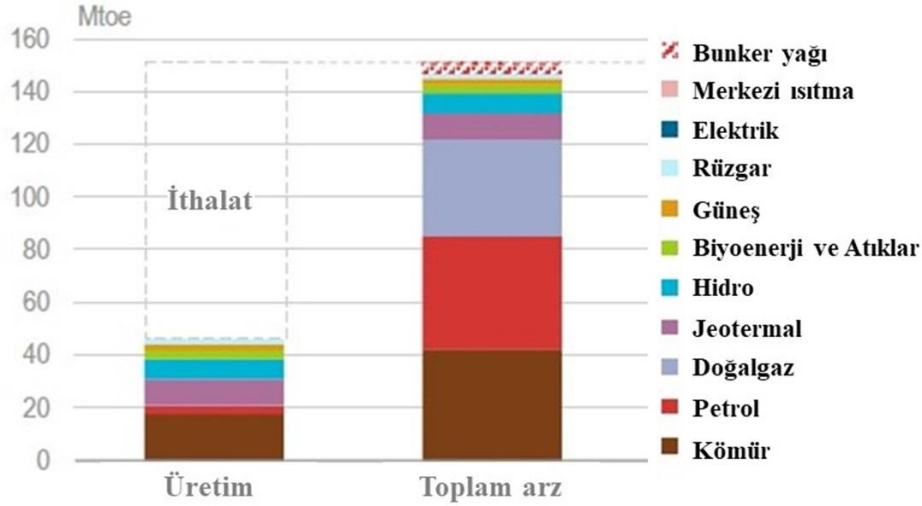
Türkiye’de kullanılan enerjinin yakıt çeşidine göre dağılımı Şekil 3.8’de verilmektedir. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi Türkiye’nin 2018 yılındaki toplam nihai tüketimi incelendiğinde ülkemizdeki toplam nihai tüketimin %73’ünün fosil yakıtlarla karakterize olduğu söylenebilmektedir. Kullanılan toplam enerjinin %40’ı petrolden, %24’ü doğalgazdan, %22’si elektrikten, %9’u kömürden, %3’ü biyoyakıt ve atıklardan ve %2’si jeotermal enerjiden elde edilmektedir.



Şekil 3.8: Türkiye’de kullanılan enerjinin yakıt çeşidine göre dağılımı.

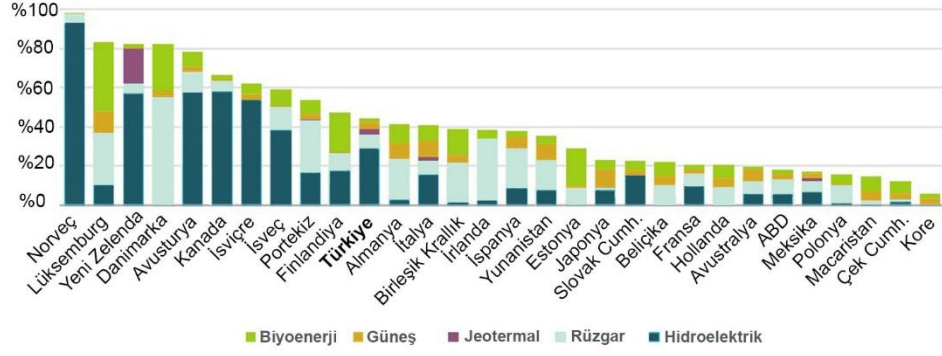
Türkiye’nin enerji sistemine genel bir bakış Şekil 3.9’da verilmiştir. Türkiye’de toplam birincil enerji arzı %83 oranında fosil yakıtlarla karakterizedir. Tüketilen petrol

ve doğalgazın hemen hemen tamamı ithal edilirken, kömürün yaklaşık yarısı ve her çeşit yenilenebilir enerji yerli olarak üretilebilmektedir. Üretilen yerli enerji, 2019 yılında toplam birincil enerji arzının %31'ini karşılamıştır. Jeotermal, hidro, rüzgâr ve güneş enerjisi teknolojilerinde yaşanan hızlı büyüme ile birlikte ülkemizde yenilenebilir enerji üretimi 2009 yılına kıyasla iki kattan fazla artmıştır.



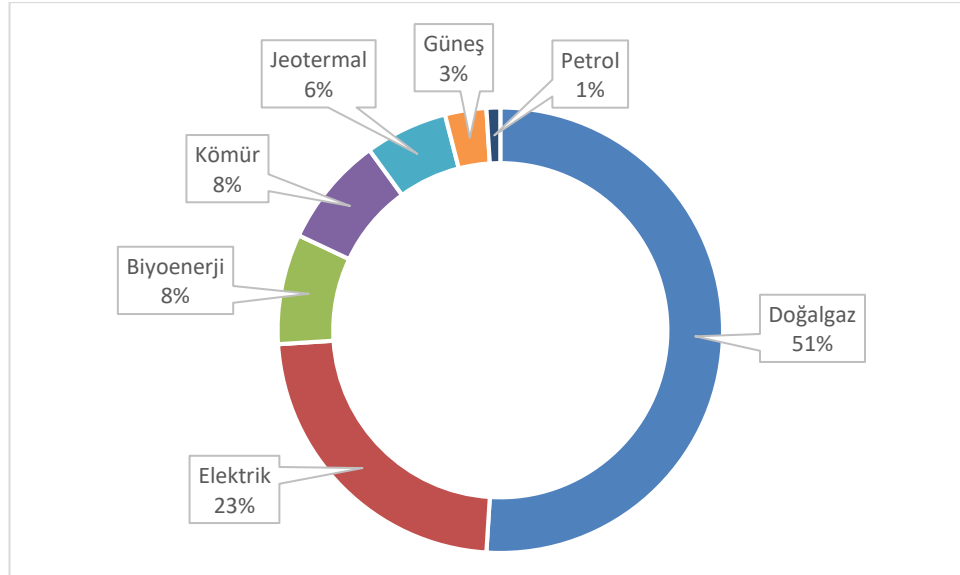
Şekil 3.9: Türkiye enerji sistemine genel bakış (IEA, 2020a).

Dünyada IEA (International Energy Agency) üyesi ülkelerdeki yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimindeki payı Şekil 3.10'da görülmektedir. Görüldüğü gibi yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimindeki payının en fazla olduğu ülkelerin sırasıyla Norveç, Lüksemburg, Yeni Zelanda, Danimarka ve Avusturya olduğu görülmektedir. Türkiye ise yenilenebilir enerji üretiminin toplam enerji üretimindeki payı açısından IEA ülkeleri arasında 11. sıradadır. On Birinci Kalkınma Planı'nda yer alan enerji sektörü hedeflerinden biri de 2023 yılına kadar yenilenebilir kaynakların toplam elektrik üretimindeki payını artırmaktır. Bu bağlamda, Türkiye'de yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin 2023 yılına kadar daha da artacağı öngörülmektedir.



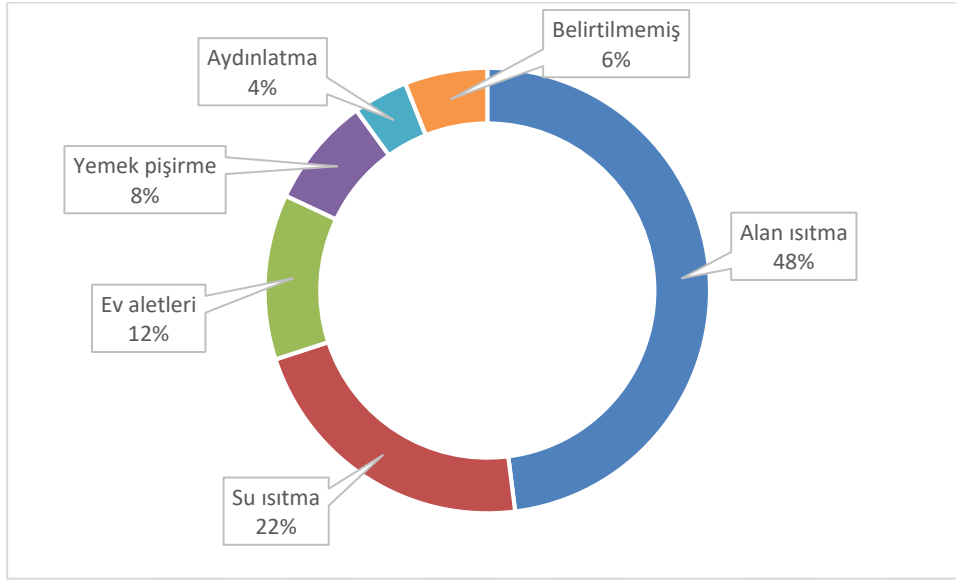
Şekil 3.10: IEA ülkelerinde yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı ve yenilenebilir enerji çeşitlerinin oranı -2019 (International Energy Agency, 2021).

Ülkemizde konut sektörü, 2018 yılında toplam nihai enerji tüketiminin %21'ini oluşturan 20.5 Mtep enerji tüketmiştir. Konut sektörü özelinde nihai enerji tüketiminin yakıt çeşidine göre dağılımı Şekil 3.11'de verilmiştir. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi Türkiye'de konut sektörü çoğunlukla %51 oranla doğalgaz kullanmaktadır. Geri kalan enerji, %23 oranıyla elektrik, %8 oranıyla biyoenerji, %8 oranıyla kömür, %6 oranıyla jeotermal, %3 oranıyla güneş ve %1 oranıyla petrol tarafından karşılanmaktadır. Son yıllarda konutlarda enerji tüketiminde biyoenerji ve petrol kullanımı azalmış, bunlar yerine doğalgaz ve elektriğe doğru bir yönelim olmuştur. Biyoenerji tüketimi 2008 yılına kıyasla %76'lık bir düşüş kaydetmiştir. Bunun aksine doğalgaz tüketimi dört kattan fazla artarken, elektrik tüketimi iki kattan fazla artmıştır.



Şekil 3.11: Türkiye'de konut sektöründe nihai enerji tüketiminin yakıt çeşidine göre dağılımı.

Konut sektöründe ısınmanın temel kaynağı doğalgazken, elektrik çoğunlukla ev aletleri tarafından tüketilmektedir. Konut binalarında enerji tüketiminin neredeyse yarısını (%48) “alan ısıtma” oluşturmaktadır. Geri kalanını sırasıyla “su ısıtma” (%22), “ev aletleri” (%12), “yemek pişirme” (%8), “diğer” (%6) ve “aydınlatma” (%4) oluşturmaktadır (Şekil 3.12). 2000 yılından beri konutlarda su ısıtma ve cihazlarda enerji tüketimi iki kattan fazla artmıştır.



Şekil 3.12: Konut sektöründe enerji tüketiminin kullanıma göre dağılımı -2018 (IEA, 2020b).

Sonuç olarak, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de yapı sektörü genel enerji tüketiminde önemli bir yere sahip olup AB tarafından enerji verimliliğinde öncelikli alan kabul edilmiş ve yaklaşık %30 enerji tasarrufu potansiyeline sahip olduğu öngörülmüştür. Bu nedenle tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de binalarda enerji verimliliğinin sağlanması için yürürlüğe giren çeşitli uygulamalardan ilerleyen bölümde ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

3.2.2 Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ve EKB uygulamaları

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından AB’nin Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD) örnek alınarak hazırlanan ve 5.12.2008 tarih ve 27075 sayılı Resmî Gazete’de yayınlanarak yürürlüğe giren “Binalarda Enerji Performansı (BEP) Yönetmeliği”, temel olarak yapılarda enerjinin etkin ve verimli kullanılmasını, doğal çevrenin korunmasını ve enerji israfının önüne geçilmesini amaçlamakta ve bu amaçlara yönelik usul ve esasları düzenlemektedir.

Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nin ülkemize kazandırdığı önemli bir kavram da Enerji Kimlik Belgesi (EKB)'dir. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ile birlikte Enerji Kimlik Belgesi uygulamaları zorunlu hale getirilerek uygulamaya konulmuştur. Buna göre, sadece yeni yapılarda değil aynı zamanda mevcut yapılarda da Enerji Kimlik Belgesi alınması artık zorunludur. Enerji Kimlik Belgesi, en basit tanımıyla yapıların enerji tüketimlerini ve sera gazı emisyonlarının sınıflandırıldığı ve modellendiği resmi bir belgedir. EKB'nin bir örneği, Şekil 3.13'te verilmektedir. Yeni binalarda zorunlu, mevcut binalarda ise satış ve kiralama işlemlerinde 2020 yılından itibaren bulunması zorunlu kılınmıştır. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nde yer alan esaslara göre 2011'den sonra inşa edilmiş binalar yeni bina olarak adlandırılmakta ve minimum C sınıfı EKB almak zorundadır. 2011'den önceki binalar ise mevcut bina olarak adlandırılmakta olup almaları gereken minimum harf notu bulunmamaktadır. Yani mevcut binalar G sınıfına kadar EKB alabilmektedir. Dolayısıyla kentsel dönüşüm uygulamalarında eski binaların dönüşümü ile yapı ruhsatı alınabilmesi için alınması gereken minimum EKB sınıfı G sınıfından C sınıfına yükseltilerek zorunlu bir enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Bu nedenle, kentsel dönüşüm ulusal enerji verimliliği için büyük potansiyel taşımaktadır. Mevcut Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanı Murat Kurum tarafından yapılan açıklamaya göre Türkiye'de Kentsel Dönüşüm Eylem Planı kapsamında 2023 hedefi olarak 2023 yılına kadar "acil öncelikli" olarak nitelendirilen 1.5 milyon binanın dönüştürülmesinin hedeflendiği bildirilmiştir. Bununla birlikte her yıl 300.000 konutun dönüştürülmesiyle 20 yıl içerisinde toplam 6.5 milyon konutun dönüştürülmesi hedeflenmektedir (Kurum, 2019). Enerji verimliliğini esas alan yukarıda belirtilen yasal çerçevede gerçekleştirilecek olan tüm bu çalışmaların neticesinde, ciddi bir enerji tasarrufunun olacağı da açıktır.

ENERJİ KİMLİK BELGESİ

Bina Genel Bilgileri

Bina Tipi :
İnşaat Yılı :
Kapsak Kullanma Alanı :
Ada, Parseli :
Adresi :
Bina Sahibinin :
Adı Soyadı :
Adresi :
Müşterek Tesisatların Sahibi (varsa) :
Adı Soyadı :
Adresi :

Bina Resmi



Bina Resmi veya Modeli

Enerji Tüketim Sınıfı

CO₂ Salımı Sınıfı

Enerji Performansı

SEG Emisyonu

Yenilenebilir Enerji Kullanım Oranı

Yenilenebilir Enerji Oranı

Sihhi Sıcak Su Enerjisi Tüketim Sınıfı

Havalandırma Enerjisi Tüketim Sınıfı

Enerji Kullanım Alanı	Kullanılan Sistem	Yıllık Enerji Tüketimleri			Sınıfı
		Isıl (kWh/yıl)	Mekân (kWh/yıl)	Kullanım Alanı Başına (kWh/m ² /yıl)	
TOPLAM					ABCEFG
ISITMA					ABCEFG
SIHHİ SICAK SU					ABCEFG
SOĞUTMA					ABCEFG
HAVALANDIRMA					ABCEFG
AYDINLATMA					ABCEFG

Isıtma Enerjisi Tüketim Sınıfı

Soğutma Enerjisi Tüketim Sınıfı

Aydınlatma Enerjisi Tüketim Sınıfı

EKB ve EKB Uzmanı ile İlgili Bilgiler

Belge No :
Belge Tarihi :
Son Geçerlilik Tarihi :

Belgeyi Düzenleyen

Adı Soyadı :
Fırması :
Özel Sicil No :
İmza :

Açıklamalar

Şekil 3.13: Enerji Kimlik Belgesi (GN Yapı, t.y.).

Resmî Gazete’de 19 Şubat 2022 tarihinde “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik” yayınlanarak Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği güncellenmiştir. Yapılan bu değişiklikle yönetmeliğe Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (NSEB)’nin tanımı eklenmiş ve bununla ilgili esas ve usullere yer verilmiştir. Bu yönetmelik değişikliği ile enerji verimliliğinin kademeli olarak gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Buna göre yapılan değişiklikle 1 Ocak 2023 ve 1 Ocak 2025 tarihleri arasında toplam inşaat alanı 5000 m²’den büyük olan tüm binaların NSEB olarak inşa edilmesi ve enerji performans sınıfının en az B sınıfı olması zorunluluğu getirilmiştir. Ayrıca bu tarihler arasında, kullanılacak olan enerjinin en az %5’lik kısmının yenilenebilir kaynaklardan karşılanması zorunlu hale getirilmiştir. Buna karşılık, 1 Ocak 2025’ten sonra ise toplam inşaat alanı 2000 m²’den büyük olan tüm binaların NSEB olarak inşa edilmesi ve enerji performans sınıfının en az B sınıfı olması zorunluluğu getirilmiştir. Ayrıca, 2025 itibariyle kullanılacak olan enerjinin yenilenebilir kaynaklardan karşılanma oranının en az %10’a çıkarılacağı yönetmelikte bildirilmiştir (Resmi Gazete, 2022).

3.2.3 Yeşil binalar ve LEED Sertifikası

Bina yaşam döngüsü boyunca binaların çevresel etkilerinin en aza indirilmesi, son zamanlarda artan bir ilgi görmektedir (Gan ve diğ., 2020). Bu nedenle öne çıkan konseptlerden biri de yeşil bina konseptidir. Yeşil bina, yapı stoğunun çevre, toplum ve ekonomi üzerindeki önemli etkilerini azaltmak için alınan önlemlerden biridir ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için büyük önem teşkil etmektedir. Yeşil bina, literatürde “yüksek performanslı bina”, “sürdürülebilir bina” ya da “enerji etkin bina” olarak da adlandırılmaktadır (Zuo & Zhao, 2014). Yeşil bina ile ilgili literatürde birçok tanımlama mevcuttur. Kibert (2016), yeşil binayı “ekolojik ilkelere dayalı olarak ve kaynakların verimli kullanılmasıyla tasarlanmış sağlıklı tesisler” olarak tanımlamaktadır. Bir başka tanımlamaya göre, yeşil bina, bir binanın yerleşiminden tasarım, inşaat, işletme, bakım ve yenilemeye kadar tüm yaşam döngüsü boyunca kaynakların verimli kullanıldığı yapılar oluşturma ve süreçlerin yönetilmesi ile ilgili bir konsepttir. Yapının tasarım, yapım ve işletme aşamalarında çevresine olan olumsuz etkileri azaltan veya yok eden yeşil binalar doğal kaynakları korumakta ve vatandaşların yaşam kalitesini artırmaktadır (World Green Building Council, t.y.). Robichaud ve Anantatmula (2011)’e göre yeşil binanın, çevre üzerindeki etkilerin en aza indirilmesi, vatandaşların sağlık koşullarının iyileştirilmesi, geliştiricilere ve yerel topluluğa yapılan yatırımın geri dönüşü ve planlama ve geliştirme sürecinde yaşam döngüsü değerlendirmesi olmak üzere dört temel unsuru vardır. Yeşil binaların sahip olduğu özellikler şu şekilde sıralanabilmektedir:

- Enerji, su ve diğer kaynakların verimli kullanımı,
- Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerjilerin kullanımı,
- Kirlilik ve atık azaltma önlemleri,
- Yeniden kullanım ve geri dönüşümün sağlanması,
- İyi iç ortam hava kalitesi,
- Kirlenici olmayan, sürdürülebilir malzemelerin kullanımı,
- Tasarım, inşaat ve işletimde çevrenin dikkate alınması,
- Tasarım, inşaat ve işletmede bina sakinlerinin yaşam kalitesinin dikkate alınması,

- Değişen ortama uyum sağlayan bir tasarım (World Green Building Council, t.y.).

Yeşil binaların çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan birçok faydası vardır. Bu faydalar şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Enerji ve su tasarrufu,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı,
- Azaltılmış karbon salınımı,
- Atıkların yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesiyle azaltılmış atık,
- İyileştirilmiş iç mekân ortam kalitesi,
- Gün ışığından ve hava sirkülasyonundan maksimum fayda sağlanması,
- Gürültü ve ışık kirliliğini azaltıcı yapı malzemelerinin kullanımı,
- Yalıtım malzemeleri ile ısıtma ve soğutma yüklerinin azaltılması,
- Maliyet tasarrufları,
- Daha düşük işletme ve bakım maliyetleri,
- Gelişmiş çalışan üretkenliği ve sağlığı,
- Sürdürülebilir şehirlerin inşası ve arazinin sürdürülebilirliğinin sağlanması.

Yeşil binaların sürdürülebilirlik düzeyinin ve çevresel performansının ölçülmesi için çeşitli sertifika sistemleri geliştirilmiştir. Yeşil bina sertifika sistemleri olarak tanımlanan bu sistemler; yapının enerji ve su tasarrufu, malzeme seçimi, iç mekân kalitesi, çevre üzerindeki etkisi ve doğal kaynakları korumadaki hassasiyetini ölçmede ve karşılaştırmada önemli bir referans niteliği taşıyan bir derecelendirme sistemidir. Dünyada *LEED*, *BREEAM*, *DGBN*, *GREENSTAR*, *CASBEE*, *BEAM*, *GBEL*, *China Three Star*, *SBTOOL*, *ASHRAE*, *Energy Star*, *Green Globes* gibi birçok sertifika sistemi mevcut olup en yaygın kullanılan sertifika sistemi, Amerikan Yeşil Binalar Konseyi (USGBC) tarafından oluşturulan ve ülkemizdeki yeşil binalar için de sıklıkla kullanılan *LEED* (Leadership in Energy and Environmental Design) sertifikasıdır. Ayrıca ülkemizde Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği (ÇEDBİK) tarafından *Ulusal Yeşil Bina Sertifikası* ve pek çok üniversiteden akademisyenler ile STK'ların iş birliği ile *Sürdürülebilir Enerji Etkin Binalar (SEEB-TR) Sertifikası* gibi sertifikalar

oluşturulmuştur. Ayrıca, ulusal sertifika sistemleri kapsamında bakanlık da çeşitli girişimlerde bulunmaya başlamıştır. Örneğin On Birinci Kalkınma Planı'nda (492.2.) *Ulusal Yeşil Bina Sertifikası Sistemi* 'nin kurulması hedefinden bahsedilmektedir.

3.2.4 nSEB ve NSEB binalar

Son yıllarda tüm dünyada sıfır enerjili binalara (ZEB) artan bir ilgi vardır ve sıfır enerjili binalarla ilgili çeşitli kavramlar, tanımlamalar, konseptler ve teknolojiler ortaya çıkmıştır. Bu konseptlerden biri de Neredeyse Sıfır Enerjili Bina ve Net Sıfır Enerjili Bina'dır. Binaların çevresel etkilerini azaltmak veya etkisiz hale getirmek gibi ortak bir amaca hizmet eden Neredeyse Sıfır Enerjili Bina ve Net Sıfır Enerjili Bina'ların literatürde sırasıyla nSEB/NSEB ya da NSEB/nSEB olarak farklı kısaltmaları görülmektedir. Fakat bu lisansüstü tez çalışmasında Avrupa Birliği tarafından yayınlanan Binalarda Enerji Performans Direktifi (EPBD) ve Türkiye'deki Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği baz alınarak Neredeyse Sıfır Enerjili Bina "NSEB", Net Sıfır Enerjili Bina ise "nSEB" olarak kısaltılmıştır.

Net Sıfır Enerjili Bina (nSEB) terimi ile ilgili tüm dünyada yaygın olarak kabul edilen resmi bir tanım bulunmamaktadır. Ancak bu alanda çalışan araştırmacılar ve tasarımcılar nSEB'i, binaların enerji ihtiyaçlarını verimli önlemlerle azaltmak ve kalan enerji talebini karşılamak için yenilenebilir kaynaklar kullanmak olarak tanımlamaktadırlar (Sartori ve diğ., 2012; Resende ve diğ., 2020). Net Sıfır Enerjili Bina (nSEB) tipik olarak çok yüksek enerji performansına sahip şebeke bağlantılı bir binadır (Kurnitski ve diğ., 2011). Buradaki 'Net' ifadesi, belirli bir süre boyunca alınan ve enerji şebekelerine gönderilen enerji arasında net bir denge olduğu gerçeğini vurgulamaktadır. nSEB'te sıfır enerji dengesi hedefinin sağlanması için kurulan sistem yerinde üretilen yenilenebilir enerjiyi ve şebekenin ithal ettiği enerjiyi tüketirken fazlasını da şebekeye vermektedir (Deng ve diğ., 2014; Resende ve diğ., 2020). Yani, koşullar uygun olduğunda bina enerji üretmekte ve kalan zamanlarda bu enerjiyi kullanmaktadır (Kurnitski ve diğ., 2011).

Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (NSEB)'in tanımı ise AB'nin EPBD direktifinde ve Türkiye'de Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nde yapılmıştır. Buna göre, EPBD'de NSEB, "çok yüksek enerji performansına sahip bina" olarak tanımlanmaktadır. NSEB, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nde ise yüksek enerji performanslı ve belli bir oranda yenilenebilir enerji kullanan bina olarak

tanımlanmıştır (Resmi Gazete, 2022). NSEB konsepti, gereken neredeyse sıfır veya çok düşük miktarda enerjinin, yerinde veya yakınında üretilen yenilenebilir kaynaklarla önemli ölçüde karşılanması felsefesine dayanmaktadır (Resende ve diğ., 2020). Neredeyse Sıfır Enerjili Bina hedefi, Net Sıfır Enerjili Bina hedefine göre daha kolay sağlanabilmektedir.

3.3 Bina Performans Analizi (BPA) ve Bina Enerji Modellemesi (BEM)

Bina Performans Analizi (BPA), bir binanın bir veya birkaç performans özelliğinin tahmin edilebilmesi amacıyla yapı içerisindeki çeşitli enerji ve kütle akışlarının bilgisayar yazılımları kullanılarak analiz edilmesi ve modellenmesidir. Modeller, çevresel özelliklerin basitleştirilmiş bir gösterimini sağlayarak performansa dayalı tahminlerle tasarıma yön vermektedir (Oduyemi & Okoroh, 2016). Bina Performans Analizi (BPA), bina tasarımı hakkında geri bildirim sağlamakta ve tasarım optimizasyonunu kolaylaştırmaktadır.

Benzer şekilde Bina Enerji Modellemesi (BEM), çeşitli bilgisayar yazılımlarının kullanımı ile birlikte enerji analizlerine ve yönetimine olanak tanıyan bir simülasyon modelidir. Bina enerji modellemesi, kısaca bina enerji tüketiminin, enerji maliyetinin, yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin ve karbondioksit (CO₂) emisyonlarının tahminini sağlamaktadır. BEM ile hazırlanan enerji simülasyonları; enerji tüketimlerinin saatlik, günlük, aylık ya da yıllık detaylı olarak incelenebilmesine olanak tanımaktadır. Bununla beraber, BEM yazılımları yapılarıdaki ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma gibi enerji yüklerini hesaplayabilmektedir. BEM yazılımları tipik olarak BIM yazılımları ile entegre olabilmektedirler. BEM modelinin tamamen yeniden üretilmesi oldukça zaman almaktadır. Bunun yerine, bina geometrisinin, inşaat malzemelerinin ve alansal özelliklerin BIM modelinden türetilmesiyle birlikte zamandan anlamlı ölçüde tasarruf edilmektedir. Böylece, bir BEM modeli; geometri, inşaat malzemeleri, aydınlatma, HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), soğutma, su ısıtma ve yenilenebilir enerji üretim sistemi özellikleri, bileşen verimlilikleri gibi birçok faktörden oluşan binanın tüm özelliklerini girdi olarak almaktadır. Ayrıca, BEM yazılımlarıyla doluluk oranı, aydınlatma şiddeti, termostat ayarları, açılış-kapanış saatleri gibi binanın kullanım ve işleyişine dair tüm özellikler de dikkate alınmaktadır. BEM yazılımları tüm bu girdileri yerel iklimsel özellikleri ve

hava durumu verileriyle birleştirmekte ve bu şekilde enerji yüklerini hesaplamaktadır (Gigante, 2019; Url-7; Url-8; Url-9).

3.3.1 Binalarda enerji performansını etkileyen faktörler

Binalarda enerji yüklerini etkileyen özellikler, iklimsel faktörler, yapıyla ilgili faktörler, bina sakinleriyle ilgili faktörler, bina hizmetleri ve sistemleriyle ilgili faktörler ve sosyo-ekonomik ve yasal faktörler olmak üzere 5 ana başlık altında toplanabilmektedir.

a. İklİmsel faktörler

Binaların enerji talebi birçok iklim parametresinden etkilenmektedir (Kalamees ve diğ., 2012). Dış ortam kuru hava sıcaklığı, rüzgâr yönü/hızı, havanın nem içeriği ve güneş ışınımı ana hava parametreleri olarak tanımlanmaktadır ve bu parametreler binalarda enerji yüklerini etkilemektedir (Wan ve diğ., 2011). Dış ortam kuru hava sıcaklığı arttıkça, kışın binanın ısıtma yükü azalırken, yazın soğutma yükü artmaktadır. Ayrıca, güneş ışınımı, binalarda enerji yükünü etkileyen önemli bir faktördür ve ayrıntılı olarak 4. bölümde açıklanacaktır.

b. Yapıyla ilgili faktörler

Yapıların tasarım ve kullanımında birçok faktör binaların enerji tüketimini etkilemektedir. Yapının konumu, yönlendirilmesi ve diğer binalara göre durumu gibi faktörler de binaların enerji tüketimini etkilemektedir. Ancak çoğu zaman bu faktörler dikkate alınmamakta ve göz ardı edilmektedir. (Liu & Harris, 2008). Zemin ve çatı alanı, bina yaşı, bina kabuğu ve yapı malzemelerinin ısıl özellikleri, bina şekli ve formu, pencere-duvar oranı, ısıtılan/soğutulan hacmin byklğu binalarda enerji performansını etkileyen yapıyla ilgili karakteristiklerdir (Papadopoulos ve diğ., 2002; Mourshed, 2011; Yu ve diğ., 2011). Bina kabuğunda kullanılan yapı malzemelerinin ısıl geçirgenlik katsayıları arttıkça binaların dış evre koşullarından etkilenme oranı artmakta ve bununla beraber ısıtma-soğutma yükleri artmaktadır. Pencere-duvar oranı, binaların enerji yükünü etkileyen bir diğer faktördür. Pencere-duvar oranı artırılırsa, ısıl geçirgenlik artmakta ve dolayısıyla enerji yükleri artmaktadır. Bina kabuğundaki yapı malzemelerinde iklim bölgesine göre doğru seçim yapılırsa, enerji yüklerinde önemli miktarda iyileştirme yapılabilmekte ve enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

c. Bina sakinleriyle ilgili faktörler

Bina sakinlerinin davranışları/aktiviteleri, iç mekân konforuna ilişkin tercihleri, enerji tüketimine ilişkin farkındalıkları ve binanın doluluk oranı da binaların enerji performansını etkilemektedir. Bu faktörler, bina sakinleriyle ilgili özellikler olarak kategorilenmiştir. Binaların doluluk seviyesi arttıkça HVAC, aydınlatma, asansörler ve diğer elektrikli ev aletlerinin enerji tüketimi artmaktadır. Yapılan bir araştırmaya göre evde kullanılan enerjinin yaklaşık yarısı evin ve donanımının özelliklerine bağlıken, geri kalanı ev sakinlerinin davranış özelliklerine bağlı olmaktadır (Janda, 2011). Bina sakinlerinin davranış özellikleri değiştirilerek ve farkındalıkları artırılarak enerji tüketimi azaltılabilmektedir.

d. Bina hizmetleri ve servisleriyle ilgili faktörler

Bina sistemlerinin enerji verimli yönetimi, genel enerji tüketimini ve maliyetlerini en aza indirmede önemli bir rol oynamaktadır (Oldewurtel ve diğ., 2012). Binanın bakımının yapılması ve merkezi ısıtma/soğutmaya sahip olması gibi özellikler bina performansını etkilemektedir.

e. Sosyo-ekonomik ve yasal faktörler

Bina sakinlerinin eğitim ve kültür düzeyi, maddi gelirleri ve yaşları bina enerji performansını etkileyen sosyo-ekonomik faktörlerdendir. Bununla beraber enerji piyasası fiyatları, enerji yoğunluğuna dair yasal düzenlemeler ve yerel yönetimlerin enerji verimliliği alanındaki teşvikleri bina enerji tüketimini etkileyen yasal faktörler olarak tanımlanabilir.

3.3.2 BIM/BEM birlikte çalışabilirliği

BIM ve BEM arasında birlikte çalışabilirlik, tasarım aşamasında maliyetlerin düşürülmesinde ve modelin yeniden oluşturulma süresinden tasarruf edilmesinde ciddi faydalar sağlamaktadır. BIM modeli ile birlikte binaya ait birçok özellik (yapı malzeme detayları, termal özellikler vb.) ile birlikte bina geometrisi gibi önemli veriler depolanmaktadır. Ayrıca BIM modelleri, birçok farklı tasarım alternatifine olanak tanımakta ve alternatif modeller üretebilmektedir. Bu bağlamda, BIM modelleri BEM enerji modellerinin üretimini oldukça kolaylaştırmaktadır. Bunun yanında, tüm dünyada artan enerji krizinde enerjinin nasıl azaltılacağı ve nasıl iyileştirileceğini anlamada, BEM modelleri önemli bir görev üstlenmektedir. Bina Enerji Modelleri

sayesinde BIM modelleri ile üretilen farklı alternatifler hızlıca analiz edilip en uygun alternatifin seçimi yapılarak tasarım iyileştirmesi yapılabilmektedir. Tüm bu potansiyel faydalardan dolayı BIM-BEM birlikte çalışabilirliği konusu tüm dünyada üzerinde çalışılan konulardan biridir (Bastos Porsani ve diğ., 2021).

BIM-BEM arasında hala tam bir birlikte çalışabilirlik yoktur. BIM ile BEM arasında kimi zaman uyumsuzluklar yaşanmakta ve bu durumda BEM oluşturmak için standartlaştırılmamış öznel süreçlerden ve manuel işlemlerden yararlanılmaktadır. Bir başka ifadeyle, şu anda BIM-BEM arasında yarı otomatikleştirilmiş bir birlikte çalışabilirlik mevcuttur. BIM-BEM birlikte çalışabilirliği, özellikle büyük projelerde meydana gelen bilgi kaybı, ortak bir standart eksikliği, yazılımların tedarikçilerinin belirttiği kadar birlikte çalışabilir olmaması ve veri standartlarının net olarak belirlenmemiş olması sebebiyle henüz beklendiği kadar yaygınlaşmamıştır.

BIM-BEM birlikte çalışabilirlik süreci birkaç aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle BIM verilerinin bir bina enerji performans yazılımına aktarılması için, uygun dosya formatında dışarı aktarılması gerekmektedir. HTML, XHTML, bcXML, IFCXML, IFC, gbXML gibi birçok dosya formatı mevcuttur. Bunlardan IFC ve gbXML açık BIM standardıdır. Açık standartlar, ortak bir temel oluşturarak tüm dünyadaki farklı profesyoneller arasında entegrasyona ve iş birliğine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla BIM-BEM birlikte çalışabilirliğinde genellikle açık standartlar kullanılmaktadır. IFC, bina projesini eksiksiz bir şekilde yeniden üretmektedir. Bu durum veri dosyalarının boyutlarının büyük olmasına ve karmaşık bir veri şemasına sebep olmaktadır. Buna karşılık, gbXML, enerji analizine yönelik direkt ve daha esnek bir yaklaşım sağlamaktadır. Hem IFC standardı hem de gbXML standardı malzeme özelliklerini, HVAC sistemleri ile ilgili bilgileri ve termal bölgeleri aktarmaktadır. Fakat, yalnızca gbXML konum verilerini sağlamaktadır. Enerji analizleri için en uygun olan dışı aktarma standardının gbXML olduğu söylenebilir. EnergyPlus gibi bazı enerji simülasyon yazılımları gbXML dosya formatını desteklemediği için yazılımlar arasında çeşitli yazılımların eklentileri kullanılmaktadır. Bu eklentiler vasıtasıyla yazılımlar arasında farklı formata dosya dönüştürme işlemi yapılmaktadır. Son aşamada ise BEM yazılımında ilgili parametreler değiştirilerek enerji analizi gerçekleştirilmekte ve sonuçlar yorumlanmaktadır.



4. GÜNEŞ IŞINIMI

Yapıların enerji yüklerini etkileyen temel hava ve iklim parametrelerinden birisi de güneş ışıdır. Bu bölümde öncelikle yerkünün temel enerji kaynağı olan güneşten, güneş geometrisinden ve açılarından bahsedilecek; sonrasında ise tanımlanan bu güneş açıları kullanılarak bir bina cephesine düşen toplam güneş ışıdırınım hesabının temel felsefesi anlatılacaktır.

Güneş, yerküre için temel enerji kaynağıdır ve diğer enerji kaynaklarının oluşumunun ana unsurudur. Güneş enerjisinden kaynaklı radyasyon, ısı ve ışık geçmişten günümüze insanlık tarihinde uzun süredir kullanılan enerji kaynaklarındandır. Örneğin, MÖ 212 yılında Archimedes (Arşimet), yansıtıcı aynalar vasıtasıyla güneşi uzaktan açığa çıkararak Roma filosunu yakmıştır. 1888 yılında ise Weston, termokupl adı verilen yöntem ile güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmenin bir yolunu bulmuştur.

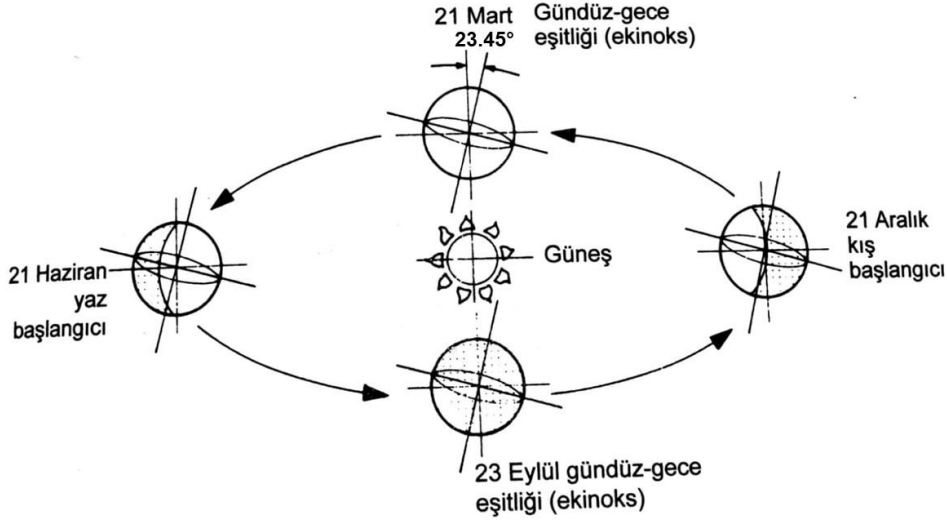
Güneş, hidrojen ve helyum gazlarından oluşan ve merkezine doğru gidildikçe sıcaklığı artan orta büyüklükte bir yıldızdır. Güneşin çapı 1,400,000 km olup, Dünya'nın yaklaşık 109 katıdır. Güneşin yaklaşık olarak 6,000 K sıcaklığında ışıdırınım yaptığı bilinmektedir (Yiğit & Atmaca, 2010; Goswami, 2015).

Güneş ışıdırınımının yaklaşık %55'i atmosferi ısıtmak için harcanan enerji ve yansıyarak uzaya geri dönen enerjinin toplamını oluşturur. Kalan %45'lik kısım ise yeryüzüne düşen enerjiyi oluşturur. Yeryüzüne düşen güneş enerjisi miktarının, diğer tüm enerjilerin toplamından 5000 kat daha fazla olduğu bilinmektedir. Fakat yeryüzüne düşen güneş ışıdırınımı gün boyunca ve yıl boyunca değişiklik göstermektedir. Burada ifade edilen %45 ortalama değerdir (Yiğit & Atmaca, 2010; Goswami, 2015).

Bilindiği gibi Dünya hem kendi ekseni etrafında hem de eliptik bir yörüngede güneşin etrafında dönmektedir. Dünya'nın kendi etrafında dönmesi gece-gündüzü oluşturduğu için güneşten gelen enerji gün boyunca değişmektedir. Örneğin, yeryüzüne gün doğarken düşmeye başlayan güneş ışıdırınımı, öğle saatlerinde maksimum seviyeye ulaşırken gün doğumunda ve gün batımında 0 (sıfır) olmaktadır.

Dünya'nın güneş etrafında eliptik bir yörüngede dönmesiyle ise mevsimler oluşmaktadır. Dünya'nın kendi ekseni etrafındaki dönme ekseni, güneş yörüngesindeki dönme yörüngesi düzlemi ile 23.45°'lik bir açı yapmaktadır. Bu

nedenle, yeryüzüne düşen güneş ışıınımmı miktarı yörünge boyunca değışmekte ve bu şekilde mevsimler oluşmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Güneş ve Dünya'nın mevsimsel konfigürasyonu (Neufert, 2018).

4.1 Güneş Işınımmı Etkileyen Faktörler

Güneş ışıınımmı miktarını etkileyen faktörler atmosfer koşulları, iklim, bitki örtüsü ve şekilleri ve güneşin konumu olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir.

4.1.1 Atmosfer koşulları

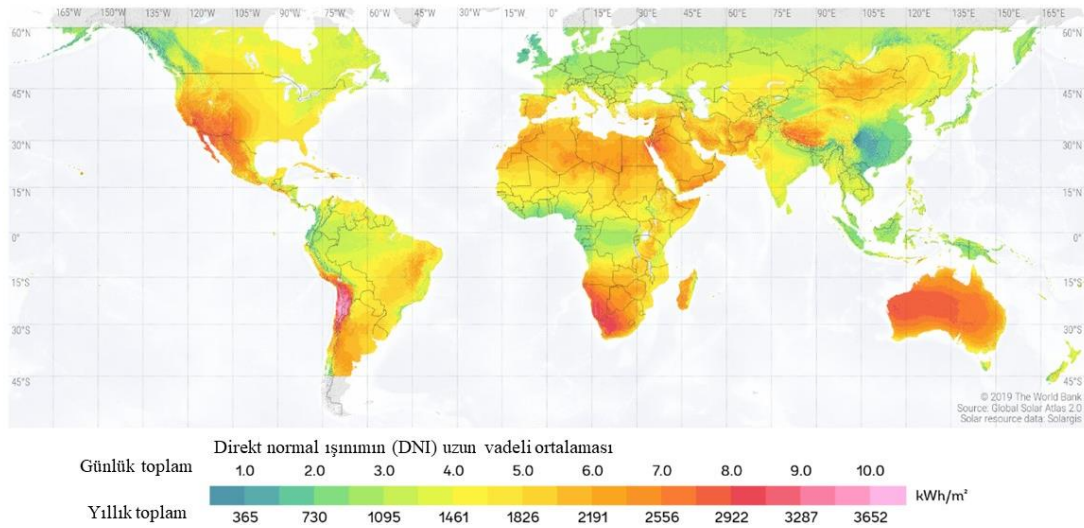
Güneş ışıınımmı etkileyen atmosfer koşullarından biri ozon tabakasıdır. Ozon tabakası, atmosferin önemli bir parçasıdır ve ozon tabakasının kalın olması daha yüksek güneş ışıınımmı emilmesi anlamına gelmektedir. Ozon tabakasının küresel ısınma sebebiyle zamanla incilmesiyle Dünya yüzeyine ulaşan güneş radyasyonu miktarı artmaktadır (Url-10).

Güneş ışıınımmı etkileyen bir diğer faktör bulut örtüsüdür. Gökyüzünde bir bulut örtüsünün olması, yeryüzüne ulaşan güneş radyasyonu miktarını azaltabilmektedir (Url-10). Hava kalitesi de güneş ışıınımmı miktarını etkilemektedir. Havada asılı duran küçük parçacıklar güneş radyasyonunun saçılmasına sebep olabilmektedir (Url-10). Ayrıca hava kirliliğinin direkt ışıınımmı miktarının yaklaşık %50'sini azalttığı bilinmektedir (Aksungur ve diğ., t.y.).

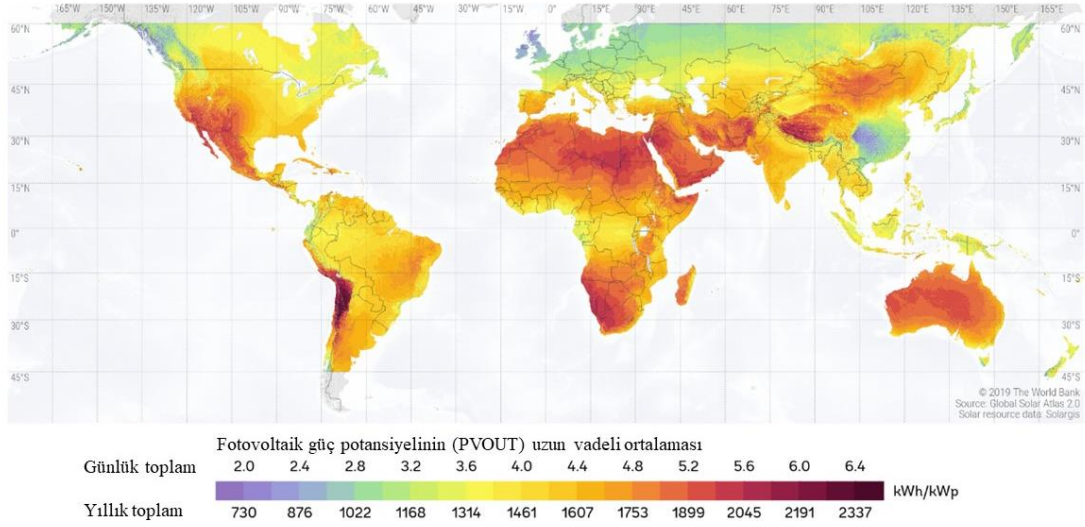
4.1.2 Çevresel koşullar

Güneş ışınımını etkileyen çevresel faktörlerden biri rakımdır. Atmosfere gelen güneş ışınımı daha yüksek rakımlarda daha yüksek yıllık güneş ışınımına sebep olmaktadır. Her 300 m yükseklik artışı güneş ışınımını %4'e kadar artırmaktadır (Rathod ve diğ., 2016; Url-10).

Güneş ışınımını etkileyen faktörlerden biri de enleme bağlı olarak oluşan iklim faktörüdür. Güneş ışınımından en fazla yararlanan bölge “Güneş Kuşağı” olarak adlandırılan ekvatorun 45° kuzey ve güney enlemleri arasında yer alan kısımdır (İBB, 2016). Ekvatordan kutuplara doğru gidildikçe güneş ışınımı şiddeti azalmaktadır. Zira, ekvatorda güneş ışınları Dünya'ya dik olarak, ekvatordan kutuplara doğru gidildikçe de Dünya'ya belli bir açıyla düşmektedir (Rathod ve diğ., 2016). Türkiye ılıman kuşak ile subtropikal kuşak arasında yer aldığından yeryüzüne gelen güneş ışınımı miktarı açısından avantajlı konumdadır. Şekil 4.2’de direkt normal güneş ışınımının dünyadaki dağılımı, Şekil 4.3’te ise dünyadaki fotovoltaik güç potansiyeli görülmektedir. Görüldüğü gibi Türkiye güneş ışınımı açısından avantajlı durumda olduğu için fotovoltaik güç potansiyeli açısından da önemli bir yere sahiptir.



Şekil 4.2: Doğrudan normal güneş ışınımının dünyadaki dağılımı (World Bank Group; ESMAP; Solargis, 2022).



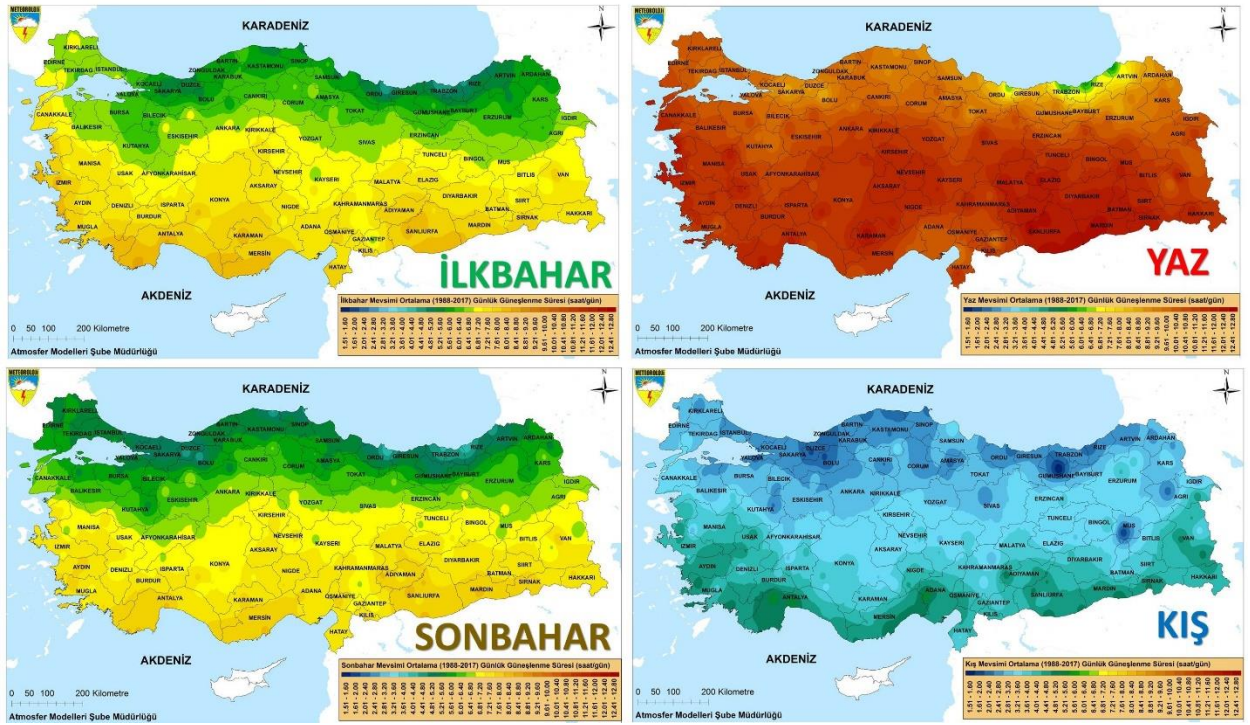
Şekil 4.3: Fotovoltaik güç potansiyelinin dünyadaki dağılımı (World Bank Group; ESMAP; Solargis, 2022).

Bir bölgenin güneşlenme durumu o bölgenin nem ve bitki örtüsü durumuna bağlıdır. Yoğun bitki örtüsüne sahip bölgelerde güneş ışınımı orman örtüsü ile sınırlıdır. Bitki örtüsünden kaynaklı gölge, güneş ışınımının yere ulaşmasını önemli miktarda engellemektedir. Bu nedenle, güneş ışınımı genellikle yayılma ve saçılma biçiminde olup büyük ölçüde doğrudan değildir. Bunun aksine kurak ve yarı kurak bölgelerde güneşlenme süresi uzundur (Rathod ve diğ., 2016).

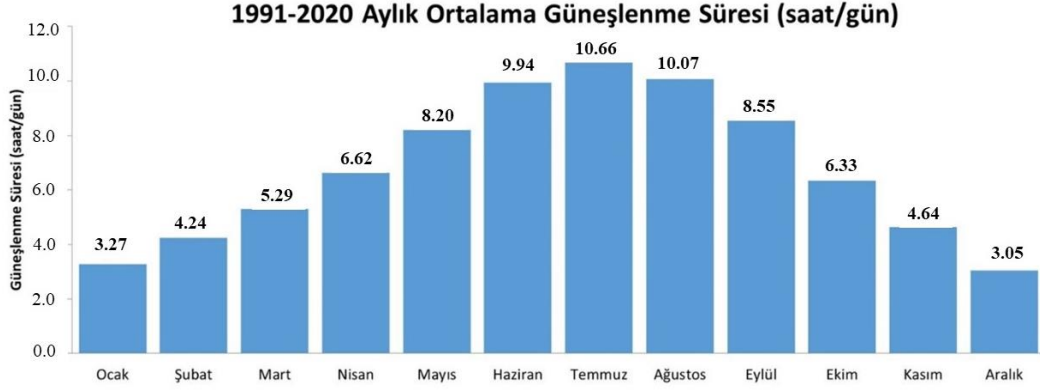
Türkiye güneşlenme süresi açısından çoğu ülkeye göre daha iyi durumdadır. Şekil 4.4'te 1990 ve 2020 yılları arasında Türkiye'nin yıllık ortalama güneşlenme süresi haritası görülmektedir. Görüldüğü gibi Güneydoğu ve Akdeniz Bölgeleri önemli güneş kazanımına sahiptir. Güneşlenme süresinin mevsimlere göre değişimi Şekil 4.5'te, aylara göre değişimi ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Beklenildiği gibi yaz aylarında güneş ışınımının en fazla olduğu, kış aylarında ise en az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4: Türkiye’de yıllık ortalama güneşlenme süresi (1991-2020) (T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022).



Şekil 4.5: Mevsimlere göre ortalama günlük güneşlenme süresi (T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022).



Şekil 4.6: Türkiye’de aylık ortalama güneşlenme süresi (T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022).

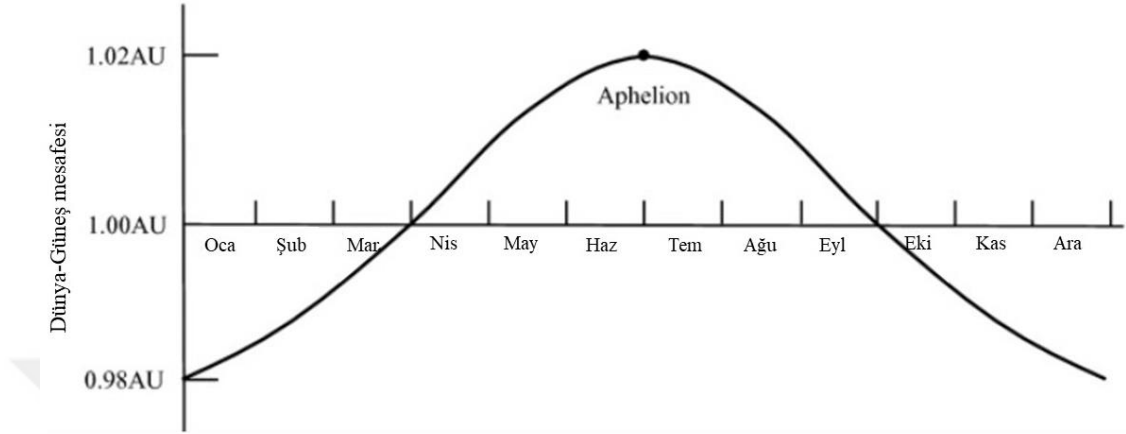
4.1.3 Güneş geometrisi

Güneşin gökyüzündeki konumu, güneş ışıınımını etkileyen ana faktörlerden biridir. Güneşin gökyüzündeki konumu temel olarak atmosferde kat ettiği yol ile ilgilidir. Güneş ufuk çizgisine yakın olduğunda, atmosferde daha fazla yol alması gerektiği için daha düşük güneş ışıınımına sebep olmaktadır. Buna karşılık, güneş ufuk çizgisine dik olacak şekilde yaklaştığında, atmosferde daha az yol aldığından dolayı daha fazla güneş ışıınımı olmaktadır. Bu nedenle, öğlen saatlerinde güneş ışıınımı miktarı maksimum iken gün doğumunda ve gün batımında güneş ışıınımı 0 (sıfır) olmaktadır. Ayrıca güneşin Dünya’ya göre konumu önceden de ifade edildiği gibi mevsim oluşumunu etkilemekte ve bu şekilde güneş ışıınım şiddetini etkilemektedir. Güneş ışıınımını etkileyen Güneş geometrisi ve ilgili güneş açıları ilerleyen bölümde ayrıntılı açıklanacaktır.

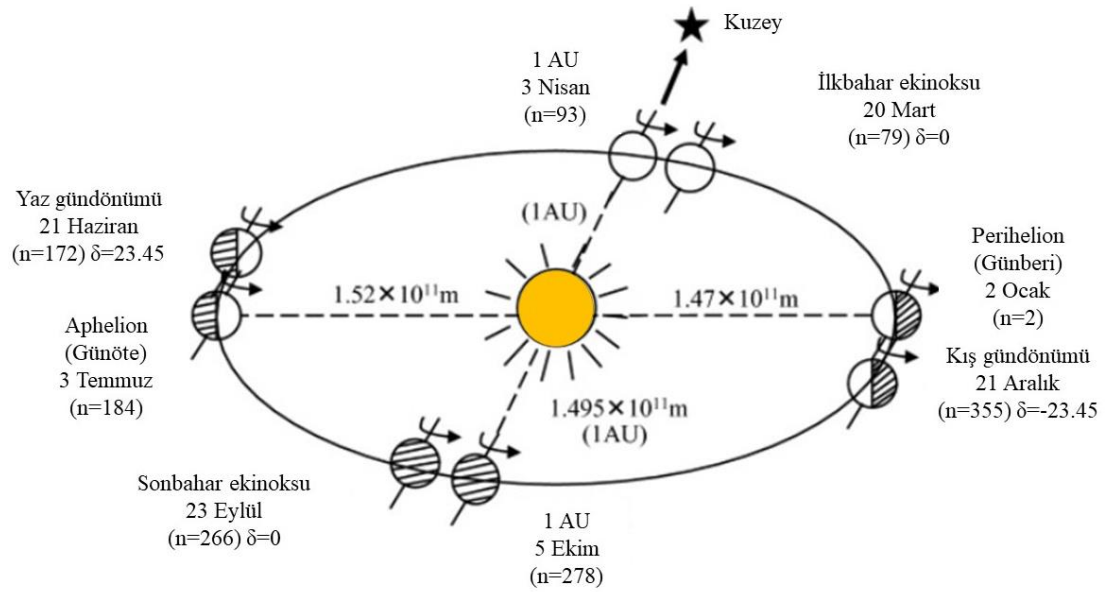
4.1.3.1 Güneş sabiti

Dünya ile Güneş arasındaki mesafe yıl boyunca mevsimlere göre farklılık göstermektedir. Güneş ile Dünya arasındaki mesafenin aylara göre değişimi Şekil 4.7’de görülmektedir. 2 Ocak tarihinde, Güneş ile Dünya arasındaki mesafe 147.1 milyon km ile minimum olurken (perihelion), bu mesafe 152.1 milyon km ile 3 Temmuz’da maksimum (aphelion) seviyeye ulaşmaktadır (Şekil 4.8). Atmosfer dışında güneş ışıınlarına dik birim alana bütün dalga boylarında bir anda gelen güneş ışıınımının değeri, mevsimlere göre Güneş- Dünya arasındaki uzaklık değiştiği için değişmektedir (Şekil 4.9). Dünya ile Güneş arasındaki ortalama mesafede atmosfer dışında güneş ışıınımına dik birim alana bütün dalga boylarında bir anda gelen güneş

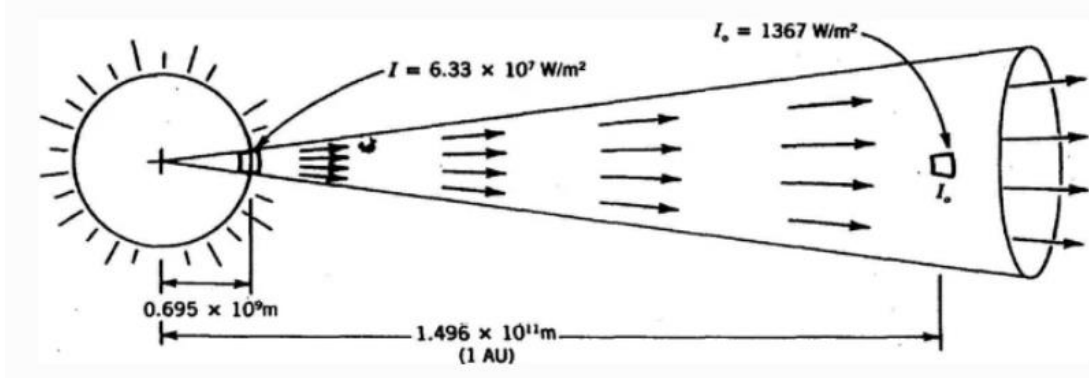
ışınımı değeri literatürde “Güneş sabiti (G_{sc})” olarak tanımlanmakta ve enerji hesaplamalarında kolaylık sağladığı için sıklıkla kullanılmaktadır. G_{sc} değeri 1367 W/m^2 olarak kabul edilmektedir (Qiu & Li, 2019).



Şekil 4.7: Dünya-Güneş mesafesi, ekinokslar ve gündönümlerindeki değişiklikleri gösteren eliptik düzlem (Qiu & Li, 2019).

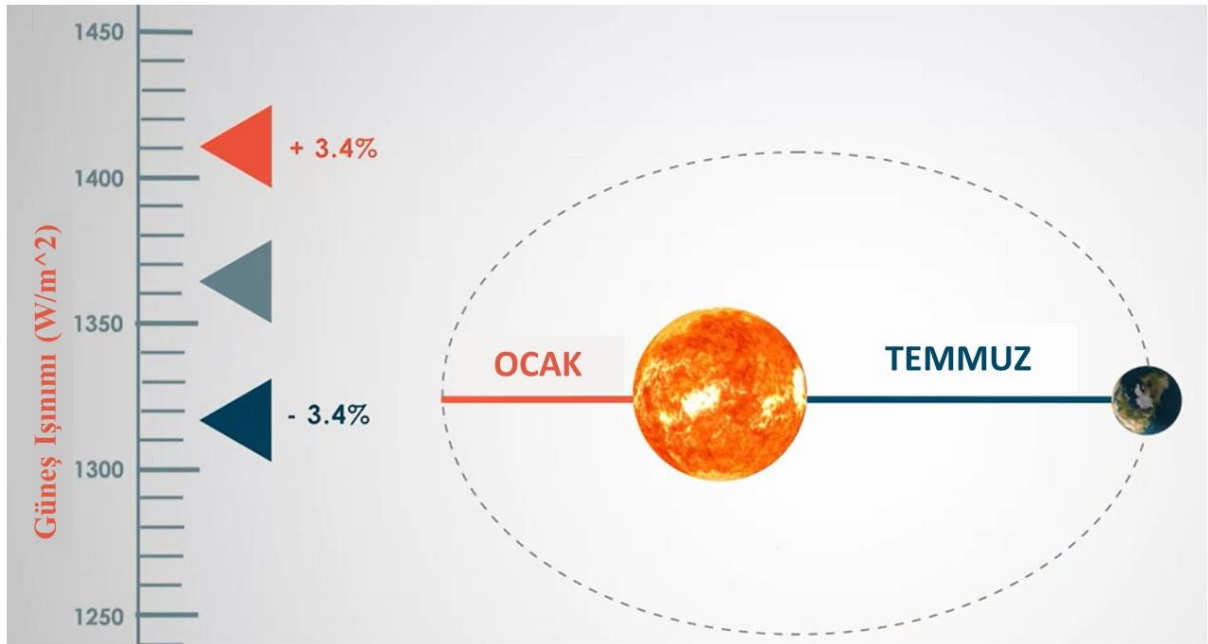


Şekil 4.8: Mevsimlere göre Güneş – Dünya arasındaki mesafenin değişimi (Qiu & Li, 2019).



Şekil 4.9: Güneşten dünyaya enerjinin farklılaşması (Qiu & Li, 2019).

Güneş ile Dünya arasındaki mesafenin değişimi, atmosfer dışındaki güneş ışınlama miktarında $\pm 3.4\%$ 'lük bir değişim olmasına neden olmaktadır. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi atmosfer dışındaki güneş ışınlamında, ocak ayında $+3.4\%$ 'lük bir değişim olurken, temmuz ayında -3.4% 'lük değişim olduğu görülmektedir (Badosa, 2022).



Şekil 4.10: Atmosfer dışındaki güneş ışınlamının mevsimlere göre değişimi (Badosa, 2022).

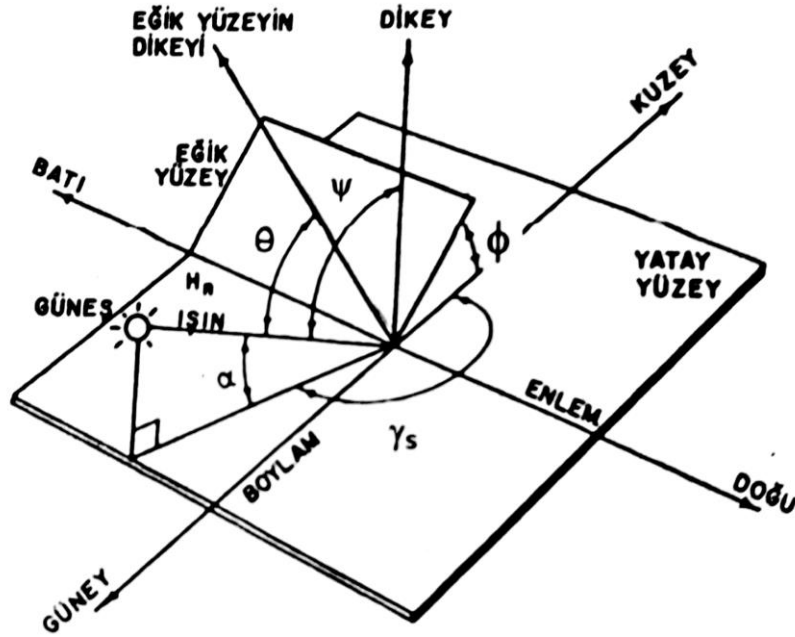
Atmosfer dışından yılın herhangi bir gününe ait güneş ışınlarına dik düzlemdeki bütün dalga boylarında gelen güneş ışınlama miktarı (G_{on}), eşitlik 4.1 ile hesaplanabilmektedir (Yiğit & Atmaca, 2010).

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (4.1)$$

Denkleimde yer alan G_{sc} güneş sabiti (1367 W/m^2), n ise yılın gün sayısıdır.

4.1.3.2 Güneş açıları

Herhangi bir anda yeryüzündeki bir düzlem ile yeryüzüne gelen direkt güneş ışınımı arasındaki geometrik bağlantılar bir dizi açı tanımı ile belirlenebilmektedir. Bu açıların bazıları Şekil 4.11’de görülmektedir.



Şekil 4.11: Güneş açıları (Deriş, 1979).

a. Enlem açısı (ϕ)

Yeryüzündeki herhangi bir noktadan geçen paralel dairesinin ekvator düzlemi ile arasındaki açısal büyüklük enlem açısı (ϕ) olarak tanımlanmaktadır. Enlem açısı, kuzey yarımkürede (+), güney yarımkürede (-) olmak üzere $+90^\circ$ ile -90° arasında değer almaktadır ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$) (Öztürk, 2008).

b. Deklinasyon açısı (δ)

Dünya'nın yörünge düzleminin 23.45° eğik olmasından kaynaklı olarak güneş ışınlarının ekvator düzlemi ile yaptığı açı deklinasyon açısı olarak tanımlanmaktadır. Yörünge düzlemiyle ekvator düzlemi arasındaki deklinasyon açısının 21 Haziran'da 23.45° ile en yüksek değerde iken, 21 Aralık'ta ise -23.45° ile en düşük değerde olduğu bilinmektedir ($-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$). Deklinasyon açısının bölgelere ve aylara göre değişimi, Şekil 4.12'de verilmektedir. Deklinasyon açısının yaklaşık değeri Cooper

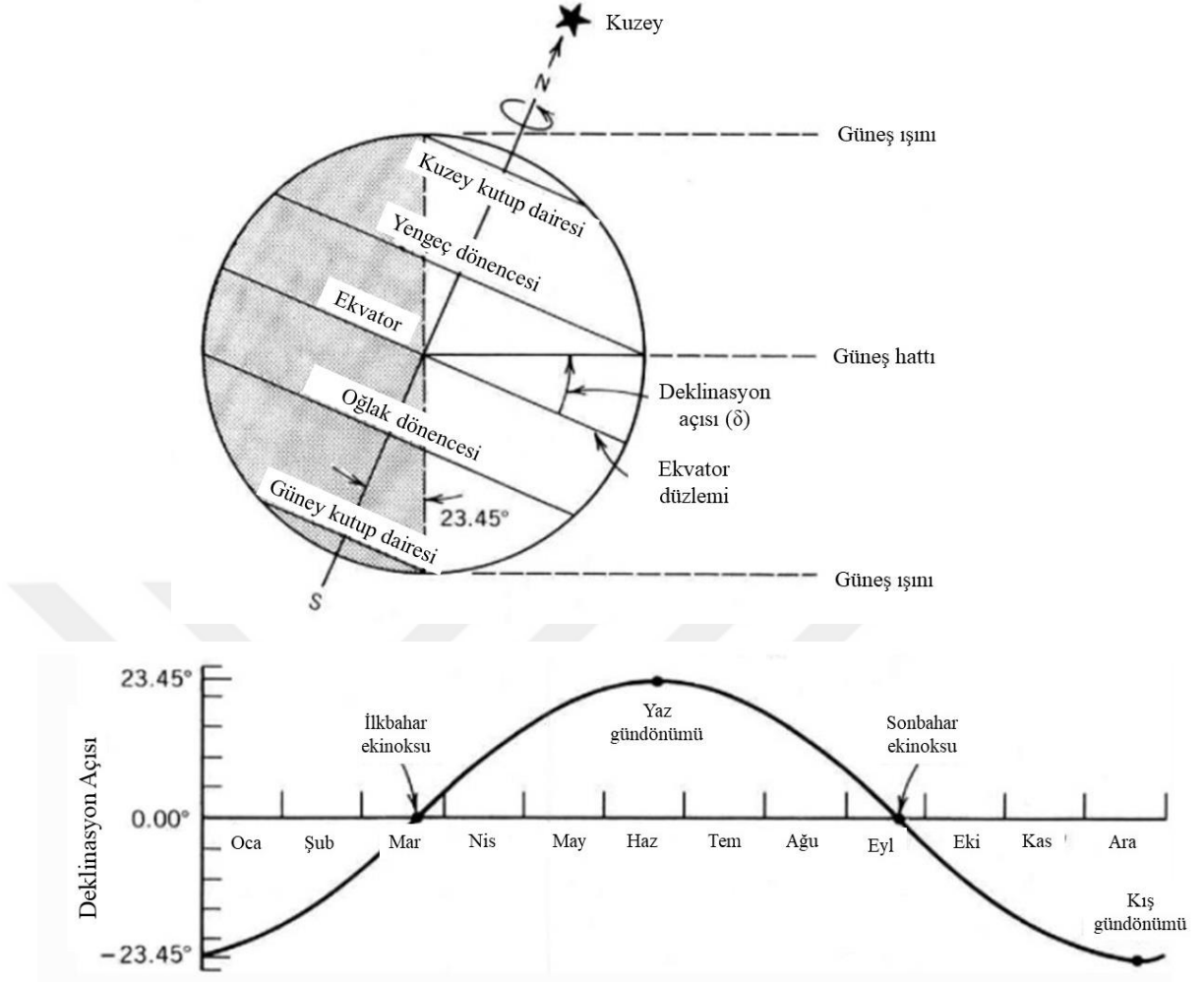
eşitliğinden, eşitlik 4.2 yardımıyla hesaplanabilmektedir (Cooper, 1969; Öztürk, 2008; Yiğit & Atmaca, 2010).

$$\delta = 23.45 \sin(360 * \frac{284+n}{365}) \quad (4.2)$$

Bu denklemde yer alan n yılın gün sayısını ifade etmektedir. Çizelge 4.1’de n değerinin belirli bir gün ve ortalama gün için aylara dağılımı görülmektedir. Çizelgede yer alan i değeri içinde bulunulan ayın kaçınıcı günü olduğunu ifade etmektedir. Örneğin 20 Nisan tarihindeki deklinasyon açısı hesaplanmak isteniyorsa ilgili i değeri 20 alınmakta ve n değeri, 90+20’den 110 olmaktadır. Eşitlik 4.2’de ilgili n değeri yerine yazılarak 20 Nisan’daki deklinasyon açısı hesaplanabilmektedir. Aylık ortalama hesap yapılmak istendiğinde ise Çizelge 4.1’de yer alan ayı temsil eden günden yararlanılmaktadır. Çizelgeye göre örneğin nisan ayı için, ayı temsil eden gün 15 olarak belirlenmiştir. Bu durumda ortalama değer hesabı için n değeri 105 alınarak nisan ayındaki ortalama deklinasyon açısı 9.4° olarak bulunmaktadır.

Çizelge 4.1: n değerinin belirli bir gün ve ortalama gün için aylara dağılımı (Yiğit & Atmaca, 2010).

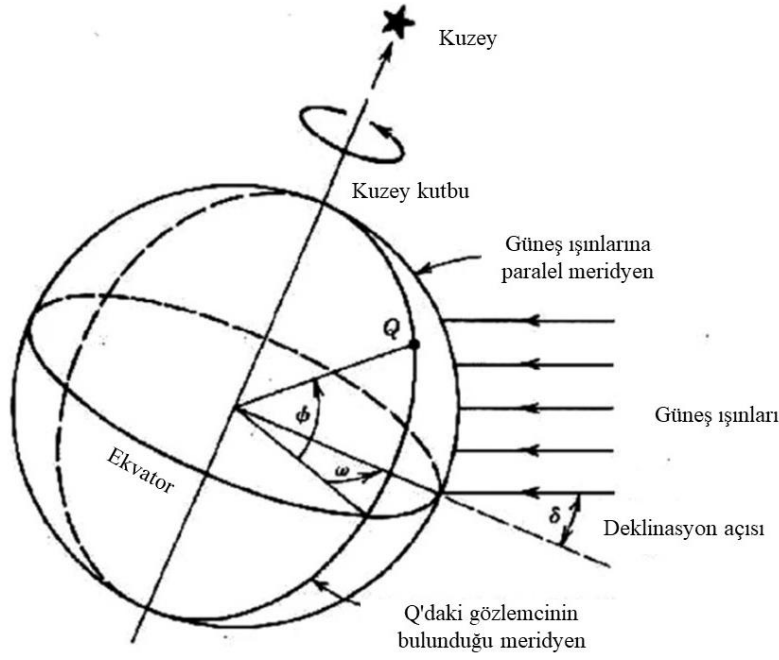
Ay	Belirli Bir Gün İçin n Değeri	Ayı Temsil Eden Gün	Ortalama Gün İçin n Değeri	Deklinasyon Açısı
Ocak	i	17	17	-20.9°
Şubat	$31+i$	16	47	-13.0°
Mart	$59+i$	16	75	-2.4°
Nisan	$90+i$	15	105	9.4°
Mayıs	$120+i$	15	135	18.8°
Haziran	$151+i$	11	162	23.1°
Temmuz	$181+i$	17	198	21.2°
Ağustos	$212+i$	16	228	13.5°
Eylül	$243+i$	15	258	2.2°
Ekim	$273+i$	15	288	-9.6°
Kasım	$304+i$	14	318	-18.9°
Aralık	$334+i$	10	334	-23°



Şekil 4.12: Deklinasyon açısının bölgelere göre ve aylara göre değişimi (Qiu & Li, 2019).

c. Saat açısı (ω)

Dünyanın kutup eksenini etrafındaki dönüşünün tanımlanması için saat açısı (ω) kavramı kullanılmaktadır (Qiu & Li, 2019). Şekil 4.13'te görüldüğü gibi saat açısı, gözlemcinin bulunduğu meridyen ile güneş ışınlarının bulunduğu meridyen arasındaki açısal mesafedir.



Şekil 4.13: Enlem, deklinasyon ve saat açısı (Qiu & Li, 2019).

Güneş ışınlarının bulunduğu meridyen ile gözlemcinin bulunduğu yerin meridyeninin kesiştiği ana “güneş öğlesi” denmekte ve güneş öğlesinde saat açısı 0 (sıfır) olmaktadır. Güneş öğlesinden önce saat açısı negatif değer alırken, güneş öğlesinden sonra saat açısı pozitif değer almaktadır. Ayrıca, saat açıları güneş öğlesine göre simetrik değer almaktadır. Güneş saat açısının hesaplanmasında standart saat yerine yerel saat kullanılmaktadır. Saat açısı eşitlik 4.3 ile hesaplanabilmektedir.

$$\omega = 15 * (GS - 12) \quad (4.3)$$

Bu denklemde yer alan GS , güneş saatini temsil etmektedir (Uyarel & Öz, 1987; Öztürk, 2008). Eşitlik 4.3’te yer alan 15 sabit değeri, güneşin Dünya’nın etrafında bir kere dönüşünden kaynaklı olarak 360° ’nin 24’e bölünmesiyle üretilmiştir. O halde, bir t anındaki saat açısı eşitlik 4.4 yardımıyla ile de belirlenebilmektedir (Öztürk, 2008).

$$\omega = \frac{2\pi t}{24} \quad (4.4)$$

Öğleden sonra güneş batımına kadar olan saat açısı eşitlik 4.5 ile hesaplanmaktadır (Öztürk, 2008).

$$\cos(\omega) = -\tan(\varphi) \tan(\delta) \quad (4.5)$$

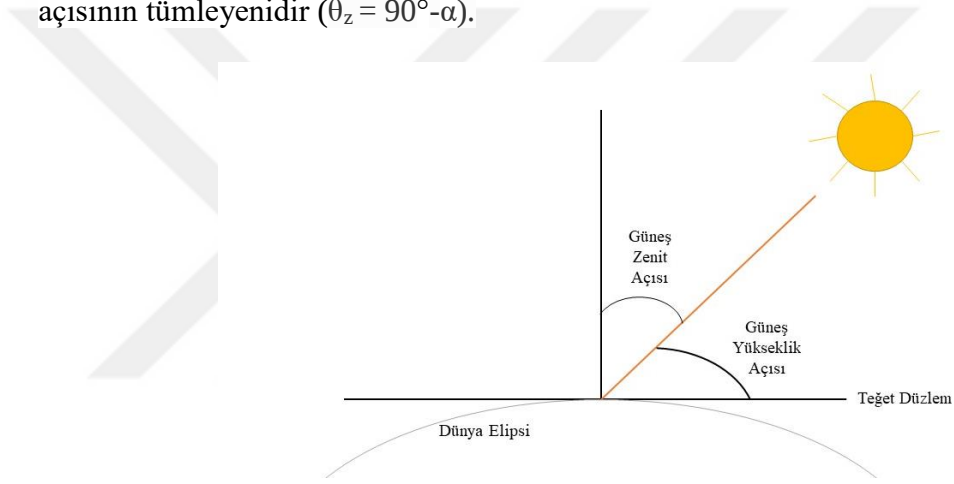
Bu denklemde yer alan ω saat açısını, φ enlem açısını, δ ise deklinasyon açısını ifade etmektedir.

d. Eğim açısı (β)

Eğim açısı (β) ele alınan yüzeyin, yatay düzlemle yaptığı açı olarak tanımlanabilmektedir. Eğim açısı 0° ile 180° arasında değer alabilmektedir ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$) (Yiğit & Atmaca, 2010).

e. Zenit açısı (θ_z)

Doğrudan güneş ışınlarıyla yatay düzlemin normali arasındaki açı zenit açısı (θ_z) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi zenit açısı, güneş yükseklik açısının tümleyenidir ($\theta_z = 90^\circ - \alpha$).



Şekil 4.14: Güneş zenit açısı ve güneş yükseklik açısı.

Zenit açısı; enlem, deklinasyon ve saat açısına bağlı olarak eşitlik 4.6 ile hesaplanabilmektedir (Öztürk, 2008).

$$\cos(\theta_z) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (4.6)$$

Bu denklemde yer alan θ_z zenit açısını, φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını ve ω saat açısını ifade etmektedir.

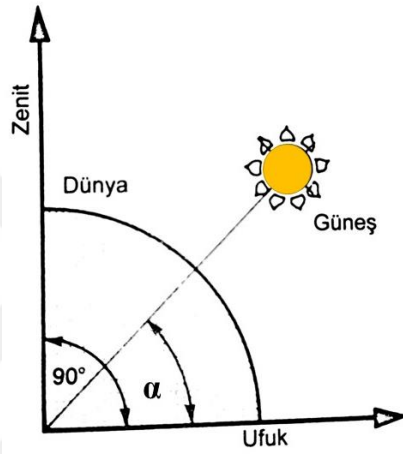
f. Güneş yükseklik açısı (α)

Doğrudan güneş ışınlarıyla yatay düzlem arasındaki açı güneş yükseklik açısı olarak bilinmektedir (Şekil 4.15). Daha önce de bahsedildiği gibi güneş yükseklik açısı ile güneş zenit açısının toplamı 90° 'dir. O halde, $\sin(\alpha) = \cos(\theta_z)$ 'dir.

Güneş yükseklik açısı öğle saatlerinde tüm mevsimlerde maksimum değerini almaktadır. Öte yandan, güneşin doğuş ve batış saatlerinde güneş yükseklik açısının 0° olduğu bilinmektedir. Güneş yükseklik açısının hesabı; deklinasyon, enlem ve saat açılarına bağlı olarak, eşitlik 4.7’de verilmektedir (Öztürk, 2008).

$$\alpha = \sin^{-1}[\cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\omega)] \quad (4.7)$$

Bu denklemde yer alan α güneş yükseklik açısını, φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını ve ω saat açısını ifade etmektedir.



Şekil 4.15: Güneş yükseklik açısı (Neufert, 2018).

Güneş batış zamanı (GB) ise eşitlik 4.8’den hesaplanabilmektedir. Eşitlik (4.8)’den güneşin batış zamanı derece olarak belirlendikten sonra ilgili değer 15’e bölünmekte ve bu şekilde yerel öğle saatinden kaç saat sonra güneş batışının olduğu hesaplanmaktadır. Güneşin öğle vakti ile doğuşu ve batışı arasındaki sürenin aynı olmasından dolayı güneşin doğuş zamanı da güneşin batışından türetilenmektedir (Öztürk, 2008).

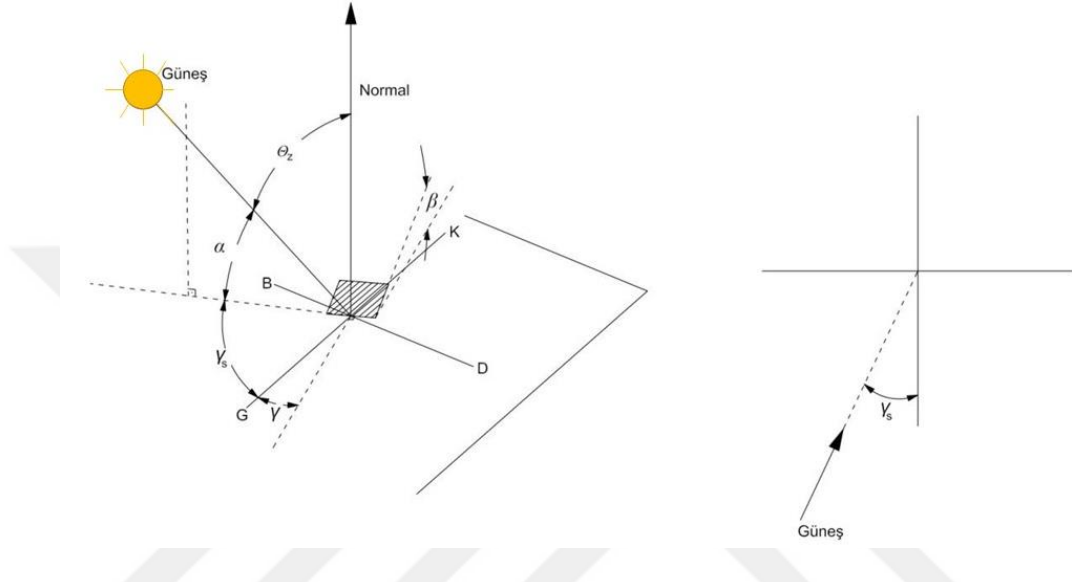
$$GB = \cos^{-1}[-\tan(\delta) \tan(\varphi)] \quad (4.8)$$

Bu denklemde yer φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını ifade etmektedir.

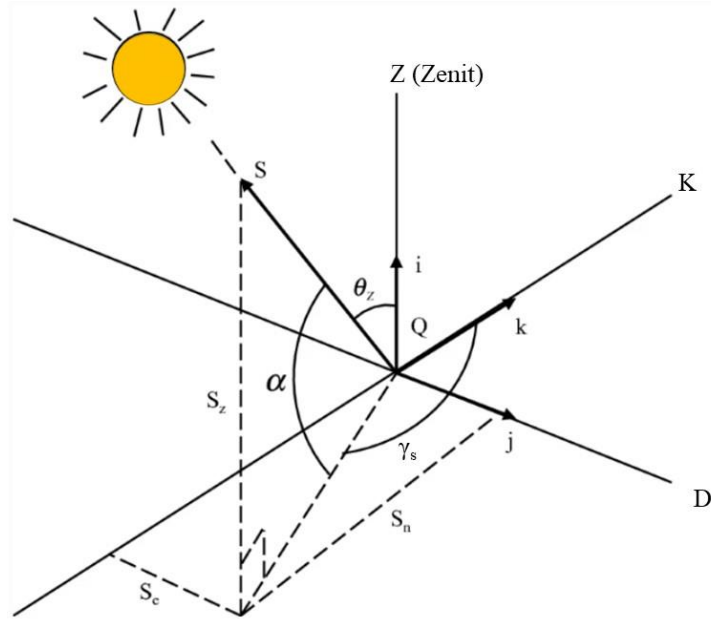
g. Azimut Açısı

i) Güneş Azimut Açısı (γ_s)

Güneşin konumunu belirleyen bir diğer açı güneş azimut açısıdır. Güneş azimut açısı, kuzey-güney doğrultusu ile güneş ışınım doğrultusunun yatay düzlemdeki izdüşümü arasındaki saat yönündeki açıdır (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17).



Şekil 4.16: Güneş azimut, yüzey azimut, zenit, güneş yükseklik ve eğim açıları.



Şekil 4.17: Güneş azimut, zenit ve güneş yükseklik açıları (Qiu & Li, 2019).

Güneş azimut açısı, kısaca güneş ışınlarının kuzeye göre saat dönüş yönünden sapmasını ifade etmektedir. Güneyden batıya doğru pozitif olurken, doğuya doğru negatif olmaktadır. Güneş azimut açısı öğlen saat 12’de 180° olmaktadır. Güneş azimut açısı eşitlik 4.9 kullanılarak belirlenmektedir (Öztürk, 2008).

$$\sin(\gamma_s) = -\cos(\delta) \sin(\omega) / \sin(\theta_z) \quad (4.9)$$

Bu denklemde yer alan γ_s güneş azimut açısını, δ deklinasyon açısını, ω saat açısını ve θ_z zenit açısını ifade etmektedir. Güneş ışınlamı ile ilgili tüm hesaplamalar güneş zamanına göre yapılmaktadır. Güneş ışınlamı açısının 0 derece olduğu zamanın saat 12 olarak kabul edildiği saat sistemi, güneş saati ya da yerel saat olarak adlandırılmaktadır. Ülkelerin kullandıkları güneş saati ve standart saatleri birbirinden farklılık göstermektedir. Bu nedenle, standart saatin güneş saatine dönüştürülmesi gerekmektedir. Standart saat güneş saatine dönüştürülürken yerel boylam ve standart boylam arasındaki boylam farkı ile birlikte günlere göre farklılık gösteren zaman düzeltme faktörünün dikkate alınması gerekmektedir. Eşitlik 4.10 güneş saati (GS) ve standart saat (SS) arasındaki farkı göstermektedir.

$$GS - SS = \pm 4(B_s - B_y) + E \quad (4.10)$$

Bu denklemde B_s standart boylamı, B_y yerel boylamı, E zaman düzeltme faktörünü ifade etmektedir (Öztürk, 2008). Eşitlik 4.10’da yer alan ilgili değerler eşitlik 4.11 ve 4.12 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$E = 229.2[0.000075 + 0.00186 \cos(B) + 0.03207 \sin(B) - 0.00146 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B)] \quad (4.11)$$

$$B = \frac{360}{365}(n - 1) \quad (4.12)$$

Bu denklemlerde E zaman düzeltme faktörünü ve n yılın gün sayısını ifade etmektedir. Güneşin doğuşu ve batışı arasında geçen zaman literatürde gün uzunluğu (t) olarak tanımlanmaktadır. Gün uzunluğu eşitlik 4.13 ile hesaplanabilmektedir.

$$2t = \frac{24\omega}{\pi} = \frac{24}{\pi} \cos^{-1}[\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (4.13)$$

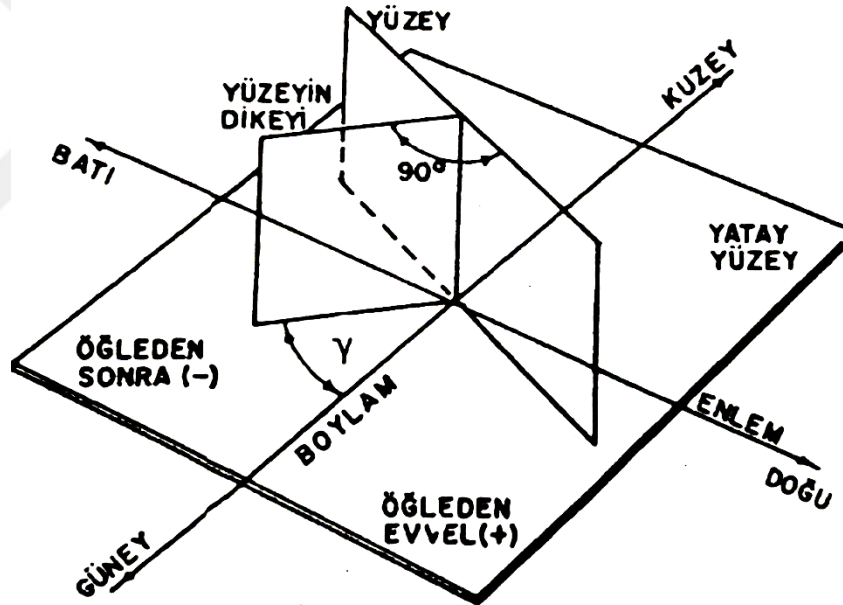
Bu denklemdeki t gün uzunluğunu, φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını ifade etmektedir. Deklinasyon açısının aylık ortalama değerine göre aylık ortalama gün uzunluğu (ta) eşitlik 4.14 kullanılarak belirlenebilmektedir.

$$ta = \frac{2}{15} \cos^{-1} \left[\frac{-\tan(\delta) \tan(\varphi)}{\omega_s} \right] \quad (4.14)$$

Bu denklemde yer alan ω_s , güneş batış saat açısını, φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını ifade etmektedir.

ii) Yüzey azimut açısı (γ)

Yüzeyin normali ile kuzey-güney doğrultusu arasındaki açıya yüzey azimut açısı denmektedir (Şekil 4.18). Yüzey azimut açısı kısaca yüzey normalinin yerel boylama göre sapmasını ifade etmektedir. Güneye bakan yüzeyler için γ 0° olup, doğuya yönelen yüzeylerde pozitif ve batıya yönelen yüzeylerde negatif değer almaktadır.



Şekil 4.18: Yüzey azimut açısı (Deriş, 1979).

h. Güneş geliş açısı (θ)

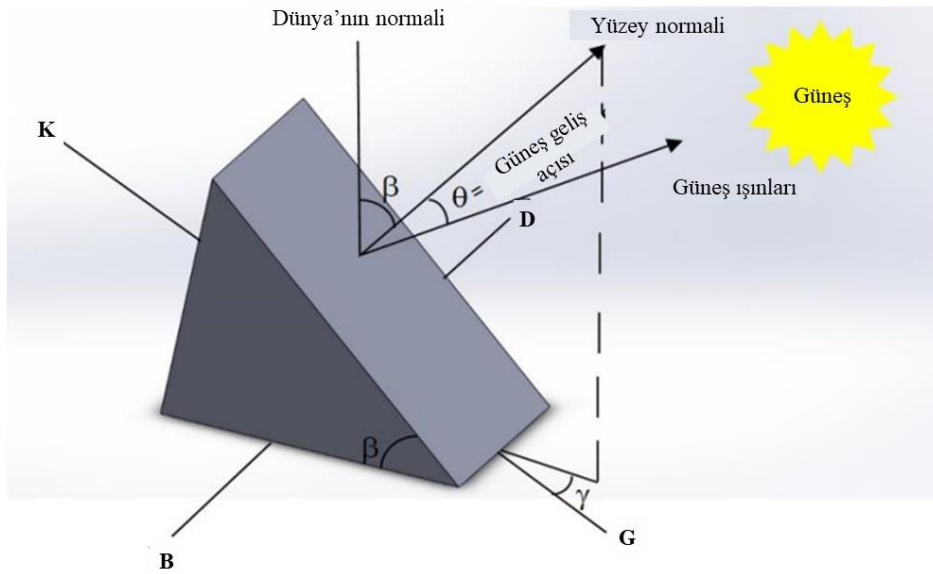
Güneş geliş açısı yüzeyin normali ile güneş ışını arasında kalan açı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4.19). İlgili yüzey güneş ışınlarına dik durumdaysa geliş açısı 0° olmakta, paralel durumdaysa 90° olmaktadır. Güneş geliş açısı eşitlik 4.15 ile hesaplanabilmektedir (Yiğit & Atmaca, 2010).

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & [\sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \\ & \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \\ & \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega)] \end{aligned} \quad (4.15)$$

Bu denklemde yer alan θ güneş geliş açısını, ω saat açısını, φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını, β eğim açısını, γ yüzey azimut açısını ifade etmektedir. Dikey yüzeylerde eşitlik 4.15'te $\beta=90^\circ$ olarak alınırsa güneş geliş açısı hesabı, eşitlik 4.16 halini almaktadır (Yiğit & Atmaca, 2010).

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & [-\sin(\delta) \cos(\varphi) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \sin(\varphi) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \\ & \cos(\delta) \sin(\gamma) \sin(\omega)] \end{aligned} \quad (4.16)$$

Bu denklemde yer alan θ güneş geliş açısını, δ deklinasyon açısını, φ enlem açısını, γ yüzey azimut açısını ve ω saat açısını ifade etmektedir.



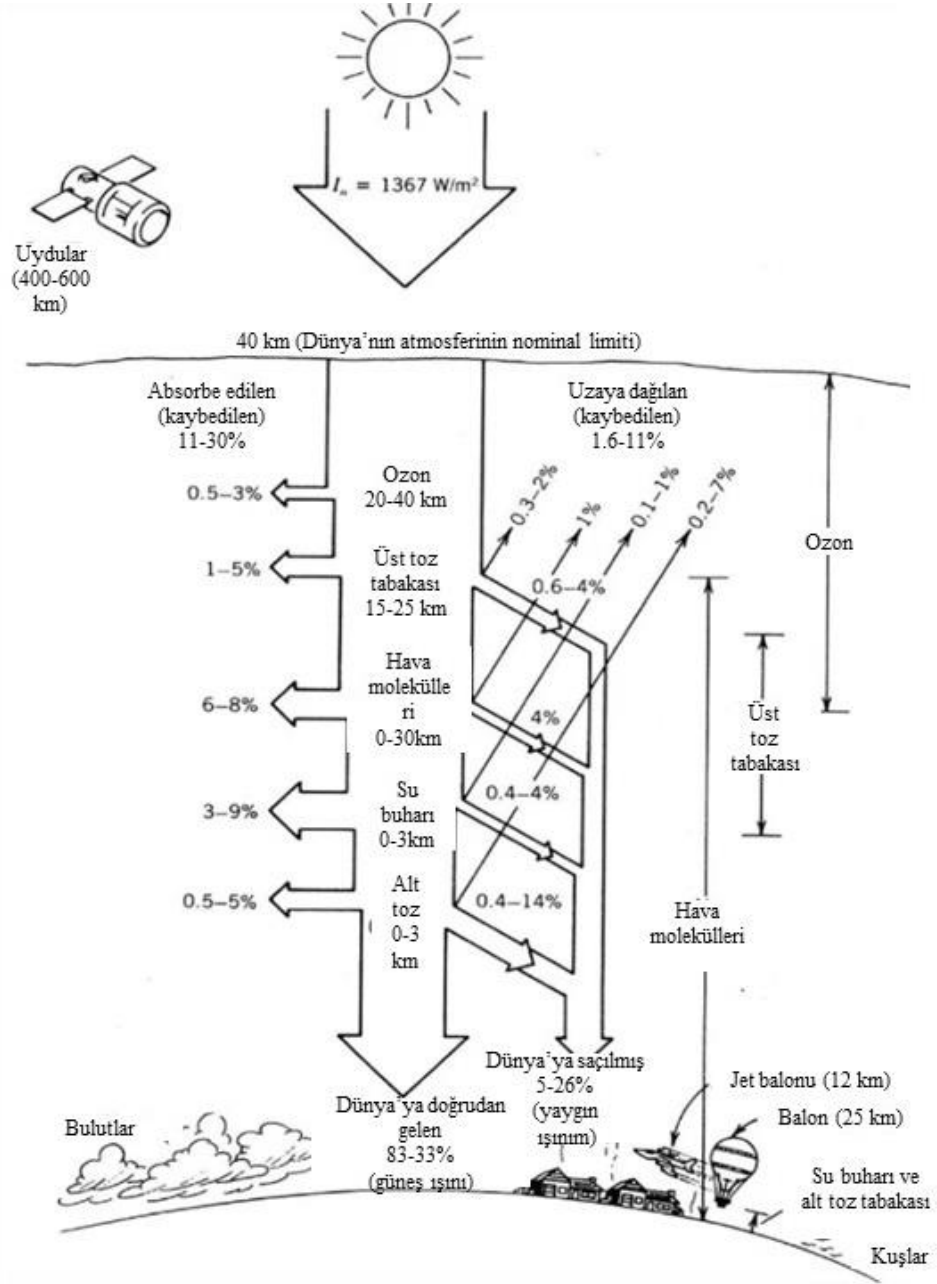
Şekil 4.19: Güneş geliş açısı (Url-11).

4.2 Güneş Işınımı Hesabı

4.2.1 Yeryüzüne gelen güneş ışıınımı

Yeryüzüne gelen güneş ışıınımı atmosferden geçerken, bir kısmı atmosferin üst katmanlarında yer alan ozon tarafından, bir kısmı ise daha alt tabakalarda yer alan toz, hava molekülleri ve su buharı katmanları tarafından emilmektedir. Güneş ışıınımının diğer bir kısmı ise, toz, hava molekülleri ve su buharına çarparak dağılmaktadır. Bu dağılan güneş ışıınımının bir kısmı uzaya geri dönerken bir kısmı ise yayılı güneş

ışınımı olarak yeryüzüne düşmektedir. Tüm bunların dışında kalan kısım ise dalga boyunda herhangi değişime uğramadan direkt güneş ışıını olarak yeryüzüne ulaşmaktadır (Şekil 4.20) (Watt Engineering Ltd., 1978).



Şekil 4.20: Atmosfere gelen güneş ışıını (Watt Engineering Ltd., 1978).

Bir başka ifadeyle, atmosferdeki saçılma ve yutulma olaylarından bağımsız şekilde doğrultusu ve dalga boyunda herhangi bir değişim olmadan atmosferden direkt olarak geçip yeryüzüne ulaşan kısa dalga ışıınına “direkt güneş ışıını” denmektedir. Güneş ışıınlarına dik bir düzlem üzerindeki direkt ışıını “Direkt Normal Güneş ışıını (DNI)” olarak adlandırılırken, yatay bir düzleme gelen direkt ışıını ise “Direkt Yatay

Güneş Işınımı (BHI)” olarak adlandırılmaktadır. Direkt yatay güneş ışıınımlı ile direkt normal güneş ışıınımlı arasındaki bağıntı eşitlik 4.17’de ifade edilmektedir (Badosa, 2022).

$$BHI = DNI * \cos \theta_z \quad (4.17)$$

Bu denklemde yer alan BHI, direkt yatay güneş ışıınımlı, DNI, direkt normal güneş ışıınımlı ve θ_z zenit açısını temsil etmektedir. Atmosfere gelen güneş ışıınımlının saçılma kaynaklı olarak tüm yönlerde doğrultusunu değıştirerek yeryüzüne ulaşan bölümü “Yaygın Güneş Işınımı (DHI)” olarak isimlendirilmektedir. Global güneş ışıınımlı ise yeryüzünde yatay bir düzlemdeki toplam kısa dalga boyu güneş ışıınımlı ifade etmektedir. Global güneş ışıınımlı (GHI), direkt (yatay) ve yaygın gök (yatay) olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır ve bunlar arasındaki ilişki eşitlik 4.18’de ifade edilmektedir (Berköz, 1983; Buldurur, 1983).

$$GHI = DHI + BHI = DHI + DNI * \cos \theta_z \quad (4.18)$$

Bu denklemde yer alan GHI global güneş ışıınımlı, DHI yaygın güneş ışıınımlı, BHI direkt yatay güneş ışıınımlı, DNI direkt normal güneş ışıınımlı ve θ_z zenit açısını ifade etmektedir. Yansımış ışıınımlı ise, direkt ve yaygın ışıınımların yeryüzünde herhangi bir yüzeye çarparak yansımaları sonucu oluşmaktadır. Direkt ışıınımlı geliş açısına eşit olacak şekilde yansımaktadır. Fakat, yaygın ışıınımlı yüzeye dağınık geldiğinden dolayı “yaygın yansımış ışıınımlı”ı oluşturmaktadır. Özetle, yeryüzünde ele alınan bir yapı yüzeyine düşen toplam kısa dalga güneş ışıınımlı; yapı yüzeyindeki direkt güneş ışıınımlı, yapı yüzeyindeki yaygın güneş ışıınımlı ve yapı yüzeyine etrafındaki diğeryüzeylerden yansıyarak gelen kısa dalga güneş ışıınımlının toplamıdır (Berköz, 1983; Buldurur, 1983).

4.2.2 Atmosfer dışında yatay düzleme gelen güneş ışıınımlı

Herhangi bir anda atmosfer dışında birim yatay yüzeye gelen güneş ışıınımlı (G_o) eşitlik 4.19 ve bunun genişletilmesinden oluşan eşitlik 4.20 ile hesaplanabilmektedir (Yiğit & Atmaca, 2010).

$$G_o = G_{on} * \cos \theta_z \quad (4.19)$$

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] (\sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega)) \quad (4.20)$$

Bu denklemlerde G_o atmosfer dışında birim yatay yüzeye gelen güneş ışınlamını, G_{sc} güneş sabitini, G_{on} atmosfer dışından yılın herhangi bir gününe ait güneş ışınlarına dik düzlemdeki bütün dalga boylarında gelen güneş ışınlamı miktarını, n yılın gün sayısını, φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını, ω saat açısını, θ_z zenit açısını temsil etmektedir.

Eşitlik 4.20'nin gün doğuşundan gün batışına kadar integrasyonu ile atmosfer dışında yatay düzleme düşen günlük güneş ışınlamı (H_o) elde edilmektedir. Hesaplamalarda sıklıkla günlük güneş ışınlamı (H_o) kullanılmaktadır. Günlük güneş ışınlamının hesaplanmasında kullanılan formül, eşitlik 4.21'de ifade edilmektedir (Yiğit & Atmaca, 2010).

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] * [\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega s) + \frac{2\pi\omega s}{360} \sin(\varphi) \sin(\delta)] \quad (4.21)$$

Bu denklemlerdeki H_o atmosfer dışında yatay düzleme düşen günlük güneş ışınlamını, G_{sc} güneş sabitini, n yılın gün sayısını, φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını, ωs güneş batış saat açısını ifade etmekte olup ωs güneş batış saat açısı eşitlik 4.22 ile hesaplanabilmektedir.

$$\cos \omega s = -\tan(\varphi) \tan(\delta) \quad (4.22)$$

Bu denklemde yer alan ωs güneş batış saat açısı, φ enlem açısı ve δ deklinasyon açısıdır. Eşitlik (4.20)'nin belirli iki saat açısı için integrasyonu ile belirli iki saat periyodu arasında atmosfer dışında birim yatay yüzeye gelen güneş ışınlamı (I_o) hesaplanabilmektedir. Bu eşitlik 4.23'te yer almaktadır.

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] * [\cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin(\varphi) \sin(\delta)] \quad (4.23)$$

Bu denklemde yer alan I_o atmosfer dışında birim yatay yüzeye gelen güneş ışınlamını, G_{sc} güneş sabitini, n yılın gün sayısını, φ enlem açısını, δ deklinasyon açısını, ω_2 büyük olan saat açısını ve ω_1 küçük olan saat açısını ifade etmektedir (Yiğit & Atmaca, 2010).

4.2.3 Yeryüzüne ulaşan güneş ışıınımı

Yeryüzüne ulaşan güneş ışıınımı miktarı meteorolojik, astronomik, coğrafi faktörlere ve yüzeyin geometrik özelliklerine bağılı olarak değıışmektedir. Bu kısımda sırasıyla yatay ve eğik düzleme düşen güneş ışıınımının hesabı anlatılacaktır.

4.2.3.1 Yatay düzleme düşen güneş ışıınımı

a. Günlük ışıınım hesabı

Havanın açık (bulutsuz) olduğı bir günde, atmosfer dışındaki yatay bir düzleme gelen günlük güneş ışıınımı (H_0) ve izafi güneşlenme süresinden yararlanılarak bir bölgedeki yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışıınımı (H) belirlenebilmektedir. İlgili eşitlik, eşitlik 4.24'te ifade edilmektedir.

$$\frac{H}{H_0} = (a + b \frac{n}{N}) \quad (4.24)$$

Bu denklemde yer alan $\frac{n}{N}$, izafi güneşlenme süresini ifade etmekte ve ilgili çizelgelerden okunabilmektedir. Denklemde yer alan a ve b ise bölgeye bağılı sabitler olup eşitlik 4.25 ve eşitlik 4.26 ile hesaplanabilmektedir.

$$a = 0.103 + 0.000017Z + 0.198 \cos(\varphi - \delta) \quad (4.25)$$

$$b = 0.533 - 0.165 \cos(\varphi - \delta) \quad (4.26)$$

Bu denklemlerde yer alan Z yüksekliğı, φ enlem açısını ve δ deklinasyon açısını ifade etmektedir. Eşitlik 4.24'te yer alan atmosfer dışındaki yatay bir düzleme gelen günlük güneş ışıınımı (H_0), eşitlik 4.21'den hesaplanabilmekte ve eşitlik 4.24'te yerine konularak bir bölgedeki yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışıınımı (H) hesaplanabilmektedir. Ayrıca, $\frac{H}{H_0}$ değeri literatürde berraklık indeksi (K_t) olarak adlandırılmakta ve yatay düzleme düşen yaygın ışıınımın (H_d), berraklık indeksinin bir fonksiyonu olduğı bildirilmektedir. Buna göre TÜBİTAK MAM tarafından üretilen denklemler, eşitlik 4.27 ve 4.28'de verilmektedir. Bu denklemler yardımıyla yatay düzleme düşen yaygın günlük ışıınım hesaplanabilmektedir (Yiğit & Atmaca, 2010).

$$\frac{H_d}{H} = 0.703 - 0.414Kt - 0.428Kt^2 \quad (4.27)$$

$$\frac{H_d}{H} = 0.665 - 0.567 \frac{n}{N} \quad (4.28)$$

Bu denklemlerde yer alan H_d yatay düzleme düşen yaygın ışıını, H yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışıını, K_t berraklık indeksini ve $\frac{n}{N}$, ızafı güneşlenme süresini ifade etmektedir.

b. Anlık ışıınım hesabı

Yatay yüzeye düşen günlük güneş ışıını (H) kullanılarak yatay yüzeye düşen anlık ışıınım hesabı (I) yapılabilmektedir. Collares – Pereira ve Rabl tarafından verilen eşitlik, eşitlik 4.29’da ifade edilmektedir (Collares-Pereira & Rabl, 1979).

$$\frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left(\frac{2\pi\omega_s}{360}\right) \cos \omega_s} \quad (4.29)$$

Bu denklemde yer alan I yatay yüzeye düşen anlık güneş ışıını, H yatay yüzeye düşen günlük güneş ışıını, ω hesaplamanın yapıldığı saat açısını, ω_s güneş batış saat açısını temsil etmektedir. Denklemde yer alan a ve b değerleri ise eşitlik 4.30 ve 4.31 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (4.30)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (4.31)$$

Bu denklemlerde yer alan ω_s güneş batış saat açısıdır. Ayrıca, yatay düzleme düşen toplam güneş ışıının içindeki direkt ve yaygın güneş ışıınları da hesaplanabilmektedir. 1984-1992 yılları arasında Gebze’de yapılan ölçümlere göre çıkarılan eşitlik, eşitlik 4.32’de verilmektedir.

$$\frac{I_d}{I} = 0.788 - 0.802K_t \quad (0.625 < K_t < 0.6) \quad (4.32)$$

Denklemde yer alan K_t daha önce de ifade edildiği gibi berraklık indeksidir. I yatay yüzeye düşen anlık güneş ışıını gösterirken, I_d ise yatay düzleme düşen yaygın güneş ışıını göstermektedir (Yiğit & Atmaca, 2010).

4.2.3.2 Eğik düzleme düşen güneş ışıını

Belirli bir eğime sahip düzlemler hem direkt hem yaygın hem de yansıyan ışıını yutmaktadırlar. Güneş enerjisi sistemlerindeki fotovoltaiklere ve binaların farklı cephelerine düşen güneş ışıını miktarının belirlenmesi için eğik düzleme düşen güneş ışıını hesabının yapılması gerekmektedir. Eğik düzleme düşen güneş

ışınımının hesabında, bir önceki kısımda hesabı anlatılan yatay düzleme düşen anlık ve günlük toplam güneş ışınlamından ve bunların direkt ve yaygın kısımlarından faydalanılmaktadır (Yiğit & Atmaca, 2010).

a. Anlık ışınlam hesabı

Eğik düzleme düşen anlık direkt güneş ışınlamının hesaplanmasında yatay yüzeye düşen direkt ve yaygın güneş ışınlamına gereksinim duyulmaktadır. Eğik yüzeye düşen anlık direkt güneş ışınlamı (I_{bT}) eşitlik 4.33 ile hesaplanabilmektedir. Denklemden yer alan I_b yatay yüzeye düşen anlık direkt güneş ışınlamı olup, I_{bT} 'nin I_b 'ye oranı geometrik faktör (R_b) olarak nitelendirilmektedir.

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (4.33)$$

Denklemden yer alan θ güneş geliş açısı olup θ_z ise zenit açısıdır. Kuzey yarım küre için optimum yüzey azimut açısının (γ) 0° olduğu bilinmektedir. Bu değer güney yarım küre için 180° 'dir. Fakat bu lisansüstü tez çalışmasında kuzey yarım küre için formüller çıkarılacaktır. Eşitlik 4.33'te ilgili değerler yerine yazıldığında eşitlik genişleyerek, eşitlik 4.34 halini almaktadır.

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (4.34)$$

Bu denklemden yer alan φ enlem açısı, δ deklinasyon açısı, β eğim açısı, ω saat açısı ve R_b geometrik faktördür. Eğik yüzeye gelen anlık yaygın güneş ışınlamının (I_{dT}), yatay yüzeye gelen anlık yaygın ışınlamı (I_d) ve eğim açısına (β) bağlı hesabı eşitlik 4.35'te verilmektedir.

$$I_{dT} = I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (4.35)$$

Eğik yüzeye yansıtılarak gelen ışınlamın (I_{ref}) hesabı ise eşitlik 4.36'da verilmektedir. Burada, I_b ve I_d sırasıyla yatay yüzeye düşen anlık direkt ve yaygın ışınlamıdır. ρ yerin yansıtma oranı olup; yerde kar olmaması durumunda 0.2, yerde kar olması durumunda ise 0.7 alınması önerilmektedir.

$$I_{ref} = (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4.36)$$

Eğik yüzeye düşen anlık toplam güneş ışıını (I_T), eğik yüzeye düşen anlık direkt (I_{bT}), anlık yaygın (I_{dT}) ve eğik yüzeye yansıyarak gelen ışıının (I_{ref}) toplamı olmaktadır. Bu durum genişletilerek eşitlik 4.37’de ifade edilmektedir (Yiğit & Atmaca, 2010).

$$IT = Ib * Rb + Id \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + (Ib + Id)\rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (4.37)$$

Bu denklemde ifade edilen I_T eğik yüzeye düşen toplam güneş ışıını, I_b yatay yüzeye düşen anlık direkt güneş ışıını, R_b geometrik faktör, I_d yatay yüzeye gelen anlık yaygın ışıın, β eğim açısı ve ρ yerin yansıtma oranıdır.

b. Günlük ışıınım hesabı

Eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük güneş ışıınına da çeşitli uygulamalarda ihtiyaç duyulmaktadır. Eğik yüzeye gelen aylık ortalama günlük toplam ışıınım (H_T) eşitlik 4.38 kullanılarak hesaplanabilmektedir. Eşitlik (4.38)’de yer alan R_b’; eğik düzleme düşen günlük direkt ışıının (H_{bT}), yatay düzleme düşen günlük direkt ışıına (H_b) oranıdır ve eşitlik 4.39 ile hesaplanmaktadır.

$$HT = H \left(1 - \frac{Hd}{H} \right) Rb' + Hd \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + H\rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (4.38)$$

$$Rb' = \frac{\cos(\varphi-\beta) \cos(\delta) \sin(\omega s') + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega s' \sin(\varphi-\beta) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega s) + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega s \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (4.39)$$

H_T: Eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışıınım

H: Yatay düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışıınım

H_d: Yatay düzleme düşen yaygın ışıınım

H_{bT}: Eğik düzleme düşen günlük direkt ışıınım

H_b: Yatay düzleme düşen günlük direkt ışıınım

β: Eğim açısı

φ: Enlem açısı

δ: Deklinasyon açısı

ω_s : Güneş batış saat açısı

ω_s' : Hesaplama yapılan ayın ortalama gününde güneş ışınlarının eğik düzleme ilk düşüş saat açısı.

ω_s' açısı, hesaplama yapılan ayın ortalama gününde güneş ışınlarının eğik düzleme ilk düşüş saat açısıdır. Bu açının eğik düzlem ve yatay düzlem için bazı farklı yönleri vardır. Örneğin, bu açı yatay düzlemde gün doğuş saat açısı olarak alınırken eğik düzlemde eşitlik 4.40 ile bulunmaktadır. Bu denklemdeki “min”in anlamı bu değerlerden küçük olanın seçilmesi gerektiğidir (Yiğit & Atmaca, 2010).

$$\omega_s' = \min \left[\begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \\ \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan(\delta)) \end{array} \right] \quad (4.40)$$

Bu denklemde yer alan φ enlem açısı, δ deklinasyon açısı ve β eğim açısıdır.

5. UYGULAMA

5.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı yeni yapılacak binalarda ısıtma ve soğutma (enerji) yüklerinin azaltılması amacıyla binaların yönlendiriliş durumlarının değiştirilerek optimum bina yönünün belirlenmesine yönelik BIM-BEM birlikte çalışabilirliği ile bir kentsel dönüşüm bölgesinde bir model geliştirilmesidir. Ayrıca bu çalışmada NSEB konsepti kapsamında binada yıllık tüketilen enerjinin bir kısmının yenilenebilir kaynaklardan sağlanması amacıyla binanın tüm çatı alanına fotovoltaik paneller yerleştirilmiş ve yenilenebilir enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında optimum yönün belirlenebilmesi için yıllık enerji tüketiminin minimum ve yıllık toplam enerji üretiminin maksimum olması arzulanmaktadır. Zira bu şekilde yapının ısıtma ve soğutma gereksinimleri azalmaktadır.

Arazinin eğimi, baktığı yön, arazinin konumu ve yüksekliği, güneş ışınlarını yansıtma özelliği vb. yer ile ilgili parametreler, güneş ışınlarının yapı üzerindeki etkisi açısından önemli tasarım parametreleridir. Bir diğer önemli tasarım parametresi ise yöndür. Farklı yönlere bakan yapı kabuğunun (duvarlar, zemine oturan döşemeler, kapılar, pencereler ve çatı) yüzeyine gelen güneş ışınım şiddeti farklılık göstermektedir. Ayrıca, yaz ve kış güneşi farklı olduğundan, yapı kabuğunu etkileyen güneş ışınımı yıl içerisinde de değişiklik göstermektedir. Bir diğer tasarım parametresi yapı kabuğu elemanları ve ısı özellikleri olup, dış ortam ile iç ortam arasındaki ısı geçişini etkilemektedir. Bu çalışmada bu tasarım parametreleri kullanılarak önce BIM-tabanlı bir model oluşturulmuş, ardından BIM-BEM yazılımları arasında yarı otomatik bir entegrasyonla bina yönlendiriliş durumu 16 farklı yöne göre değiştirilerek 16 farklı senaryo elde edilmiştir. Her bir senaryo için enerji simülasyonu aracılığıyla enerji yükleri hesap edilmiştir. Ayrıca, projedeki mevcut yön için de bir senaryo üretilmiş ve benzer şekilde enerji simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılarak, enerji verimliliği açısından optimum yön belirlenmiştir.

5.2 Çalışma Alanı

Bu tez çalışmasında İstanbul ili, Gaziosmanpaşa ilçesi sınırları içerisinde yer alan bir kentsel dönüşüm bölgesi olan “Sarıgöl Merkez Mahallesi Riskli Alanı (Bölge 2)”,

Çalışma alanı olarak seçilmiştir. Gaziosmanpaşa ilçesinin İstanbul ve Türkiye’deki konumu Şekil 5.1’de, Sarıgöl Merkez Mahallesi Kentsel Dönüşüm Bölgesi’nin ilçedeki konumu ise Şekil 5.2’de görölmektedir. Sarıgöl Merkez Mahallesi, 24.12.2012 tarih ve 2012/4099 sayılı Bakanlar Kurulu Kararına dayanarak ve 6306 sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürölmesi Hakkında Kanun” kapsamında 26 Ocak 2013 tarih ve 28540 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak “Riskli Alan” ilan edilmiştir.



Şekil 5.1: Gaziosmanpaşa ilçesinin İstanbul’daki ve Türkiye’deki konumu.



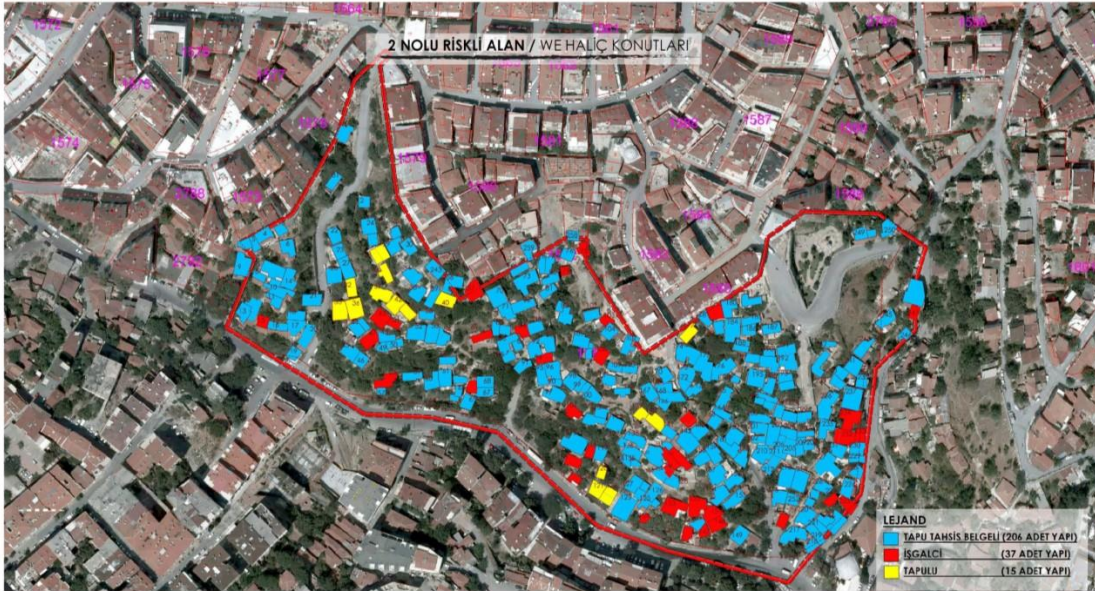
Şekil 5.2: Sarıgöl Merkez Mahallesi Kentsel Dönüşüm Bölgesi'nin konumu.

Sarıgöl Merkez Mahallesi Kentsel Dönüşüm Bölgesi, Şekil 5.2'de görüldüğü gibi ilçenin güneyinde yer almakta ve 5.83 ha alanı kaplamaktadır. Ayrıca, Sarıgöl Merkez Mahallesi Kentsel Dönüşüm Bölgesi'nin Gaziosmanpaşa ilçesinin yüzölçümündeki payı %0.49 iken, ilçede 26/01/2013 tarihinde ilan edilen riskli alanlar içindeki payı ise %1.47'dir. Çalışma alanının uydu görüntüsündeki konumu Şekil 5.3'te verilmektedir.



Şekil 5.3: Çalışma alanının konumu.

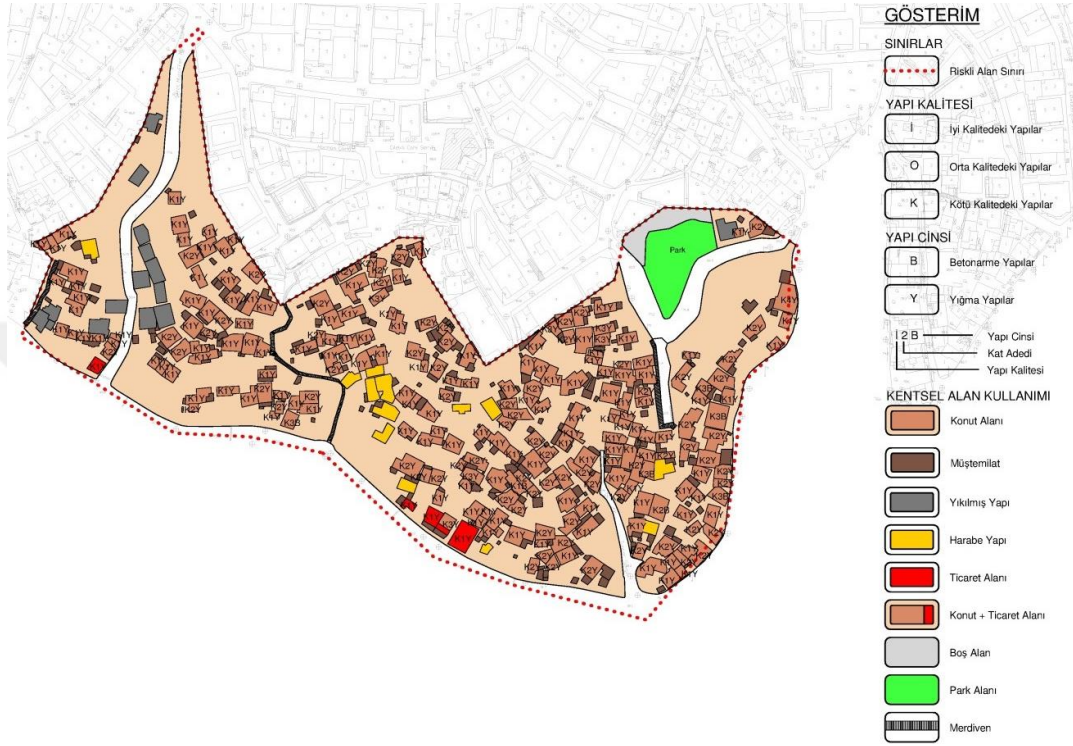
Çalışma sınırı içerisinde yer alan bölgede; 206 tanesi tapu tahsis belgeli, 37 tanesi işgalci ve 15 tanesi tapulu olmak üzere toplam 258 yapı ve 393 bağımsız bölüm bulunmaktadır (Şekil 5.4).



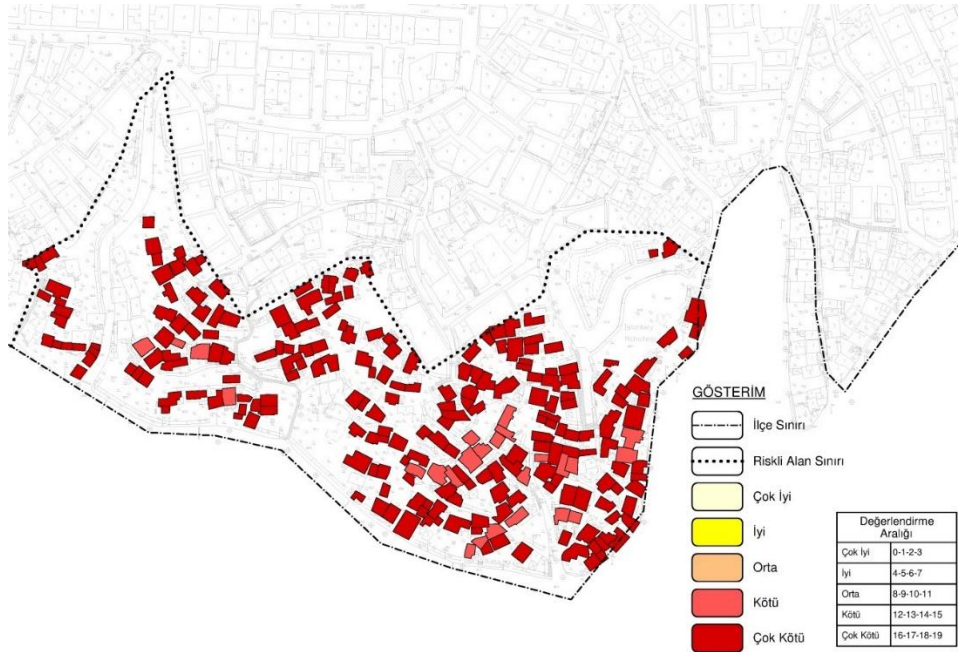
Şekil 5.4: Kentsel dönüşüm öncesi Sarıgöl Merkez Mahallesi riskli alanı.

Sarıgöl-Merkez Mahallesi Riskli Alanı'nda yer alan yapıların büyük çoğunluğu (%88'i) konut yapısıdır (Şekil 5.5). Çalışma alanı sınırları içerisinde yer alan mevcut yapı stoğunun genellikle yeterli mühendislik hizmeti almamış oldukları, sağlıksız,

güvensiz ve ruhsatsız oldukları, ekonomik ömrünü tamamlamış oldukları, kent silüetini bozdukları ve estetik olmadıkları görülmektedir. Ayrıca, bölge içerisinde yer alan binaların Şekil 5.6’da yer alan puanaj analizleri incelendiğinde mevcutta yer alan yapıların tümünün kötü ya da çok kötü durumda olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bu bölgede kentsel dönüşümün yapılması kaçınılmaz olmaktadır.



Şekil 5.5: Sarıgöl-Merkez Mahallesi Riskli Alanı arazi kullanımı paftası.



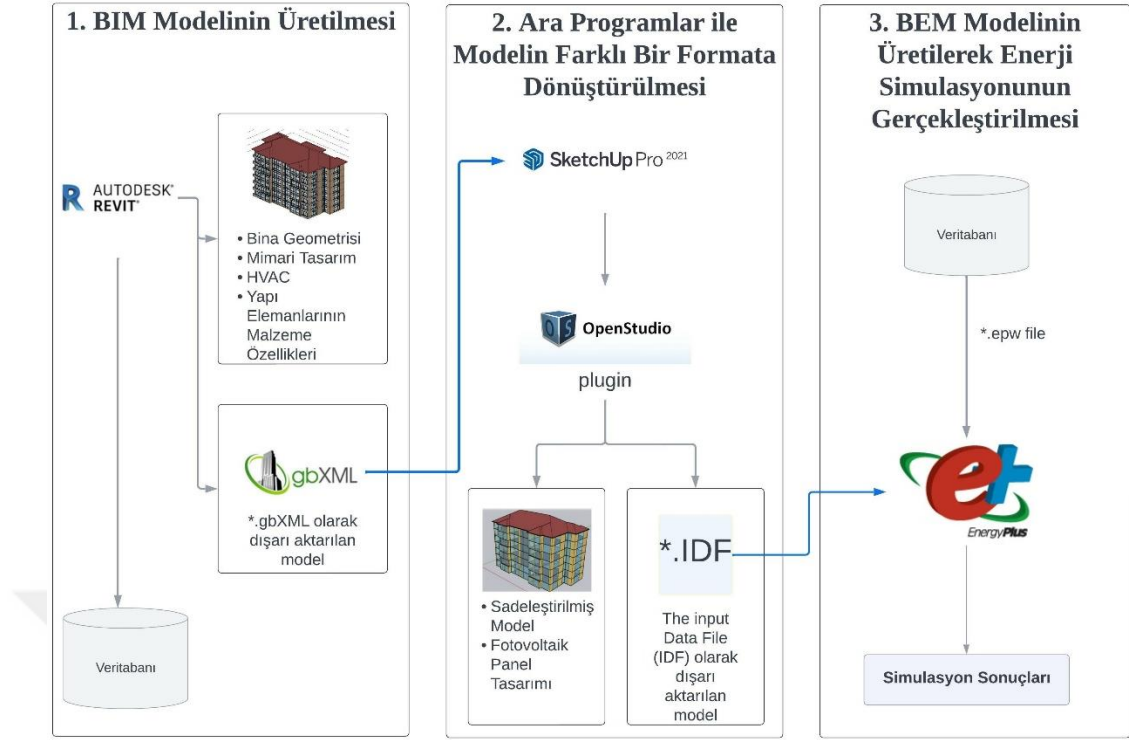
Şekil 5.6: Yapıların genel durumunu gösteren puanaj analizi.

Kentsel dönüşüm projelerinde farklı meslek gruplarından mimar, inşaat mühendisi, geomatik mühendisi, elektrik mühendisi, şehir plancısı, yüklenici, kamu, işçi, mal sahibi gibi birçok paydaş yer almaktadır. Genel olarak ifade edilecek olursa, bunun gibi pek çok paydaşın süreçte yer aldığı çalışmalarda, farklı meslek grupları arasında yaşanan iletişim ve koordinasyon eksikliği sebebiyle iş, bazı durumlarda yanlış yapılmakta, hem zamansal hem de maddi kayıplar yaşanabilmektedir. Ayrıca, kentsel dönüşüm paydaşlarından biri olan mal sahiplerinin özel ve ilginç istekleri olabilmektedir. Bununla beraber, 2 boyutlu çizimler tüm meslek grupları tarafından okunup anlaşılamamaktadır. Eksik ya da yanlış anlaşılan proje, mal sahipleri ile yüklenici arasında gerginliklere sebebiyet vermektedir. Bunlara ek olarak, geleneksel kentsel dönüşüm süreçlerinde mevcut durumda gerçek anlamda bir enerji analizi yapılmadığı durumlara rastlanılabilmektedir. Yapılan projeler enerji anlamında kabullere ve varsayımlara dayalı olarak yapılmakta, bu kabuller çoğu zaman gerçeği yansıtmadığı için hatalı sonuçlara yol açabilmektedir. Bir başka ifadeyle geleneksel kentsel dönüşüm projelerinde genellikle enerji kullanımına göre alternatifler arasından karşılaştırma yapılamamaktadır. Fakat önceki bölümlerde de detaylı şekilde ifade edildiği gibi artık tüm dünyada enerji ve enerji verimliliği konusu çok önemli bir konuma gelmiştir. Tüm bu sorunların çözümü için BIM ve BEM teknolojileri önemli fırsatlar sunmaktadır.

5.3 Materyal ve Metod

5.3.1 Çalışmanın işlem adımları

Bu çalışmada temel olarak 3 işlem adımı belirlenmiştir. Bunlar; BIM modelinin üretilmesi, ara programlar ile modelin farklı bir formata dönüştürülmesi ve BEM modelinin üretilerek enerji simülasyonunun gerçekleştirilmesidir. Çalışmaya ait iş akış diyagramı Şekil 5.7’de verilmiştir. Buna göre öncelikle seçilmiş bir kentsel dönüşüm bölgesinde yer alan bir konut binasının yapı bilgi modeli, Autodesk Revit yazılımı ile üretilmiştir. 2. Adım olarak, üretilen BIM modeli Sketch-up yazılımına aktarılmış ve bu yazılımda Yapı Bilgi Modeli sadeleştirilmiş ve uygun formatta dışarı aktarılmıştır. Son adımda ise model, EnergyPlus yazılımına aktarılmış ve çeşitli varsayımlar ile enerji simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Enerji simülasyonu, 2020 yılına ait meteorolojik verilere göre gerçekleştirilmiştir.

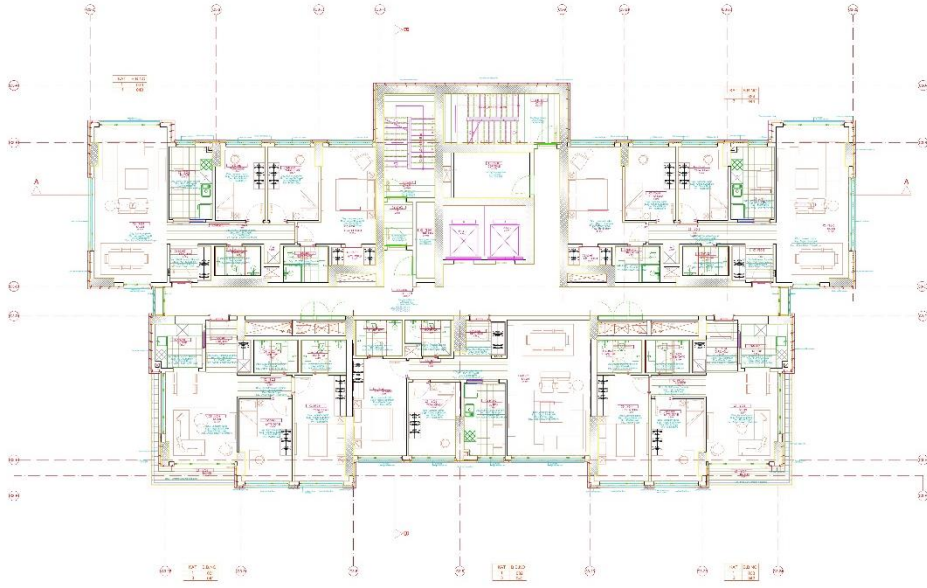


Şekil 5.7: İş akış diyagramı.

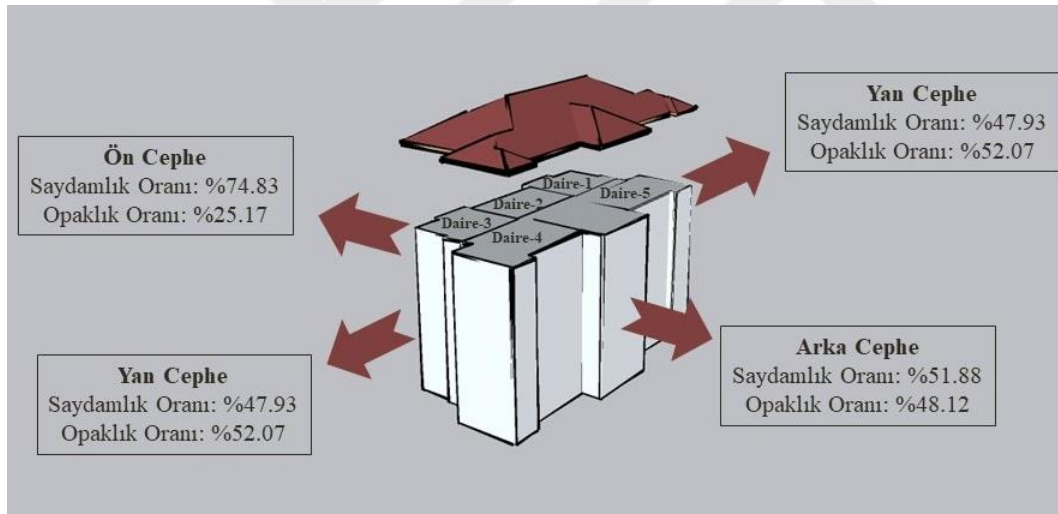
İş akış diyagramında verilen iş adımları, izleyen bölümde detaylıca açıklanmıştır:

i-) Referans binanın BIM modelinin Autodesk Revit ile oluşturulması

Bina enerji modeli yapılacak olan referans binanın mimari kat planları ilgili yüklenici firmadan temin edilmiştir. Mimari kat planları kullanılarak BIM modelinin yapı elemanları Autodesk Revit yazılımında oluşturulmuştur. Referans binaya ait mimari kat planı Şekil 5.8’de verilmiştir. Referans bina 7 kattan oluşmakta ve her bir katta 5 adet daire bulunmaktadır. Bu çalışmada, en olumsuz durumun dikkate alınabilmesi için ve BIM-BEM birlikte çalışabilirliğinin artırılması amacıyla, her bir daire tek bir zone olarak alınmıştır. Referans binada kat yüksekliği 3m olup, yapı taban oturumu yaklaşık olarak 616 m²’dir. 2. ve 5. katların inşaat alanı diğer katlardan farklı olduğundan dolayı yapıdaki toplam inşaat alanı yaklaşık olarak 4302 m²’dir. Dolayısıyla yapıdaki toplam ısıtılan ve soğutulan hacim 12,907 m³’tür. Referans binanın cephelere göre saydamlık ve opaklık oranları Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.8: Mimari kat planı.



Şekil 5.9: Referans binanın cephelere göre saydımlık ve opaklık oranları.

Oluşturulan yapı elemanlarına (duvar, pencere, kapı vb.) ilgili malzeme detayları atanmıştır. Yapı elemanlarının malzeme seçiminde, İstanbul'da yapılarda en yaygın kullanılan yapı malzemeleri dikkate alınmıştır. Duvar, pencere gibi yapı elemanlarına kalınlıklarına göre farklı malzemelerin atanmasıyla katmanlı yapı elemanları oluşturulmuştur. Bu katmanlı yapı elemanları, yapı elemanının gerçek bir kesitini temsil etmektedir ve termal özelliklere sahiptir. Oluşturulan katmanlı yapı elemanlarının malzeme içeriği ve termal özellikleri Çizelge 5.1'de verilmektedir. Çizelge 5.1'de yer alan Isı İletkenlik Katsayısı (λ), malzemelerin fiziksel ve kimyasal

özelliklerine göre ısıyı iletebilme yeteneğidir ve malzemenin ısıyı ne kadar ilettiğini ifade etmektedir. Bunun yanında Isı Geçirgenlik Katsayısı (U), kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarına ve kalınlıklarına göre eşitlik 5.1 ile hesaplanabilmektedir.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_d}\right)} \quad (5.1)$$

Eşitlikte yer alan U ısı geçirgenlik katsayısını, d kalınlığı, λ ısı iletkenlik katsayısını, $\frac{1}{\alpha_i}$ iç ortam ısı direnci, $\frac{1}{\alpha_d}$ dış ortam ısı direncini ifade etmektedir.

Çizelge 5.1: Yapı kabuğu elemanlarının termal özellikleri.

Yapı Elemanı	Malzeme	Isı İletkenlik Katsayısı (λ) (W/mK)	Kalınlık (d) (m)	Isı Geçirgenlik Katsayısı (U) (W/m ² K)
Dış Duvar	Kireç harcı	0.8	0.015	0.529
	XPS	0.034	0.045	
	Alçı Sıva	0.4	0.020	
	Tuğla	0.72	0.200	
	Alçı Sıva	0.4	0.020	
İç Duvar	Alçı Sıva	0.4	0.020	2.290
	Tuğla	0.72	0.120	
	Alçı Sıva	0.4	0.020	
Çatı	Agrega-kum-çakıl	1.3	0.08	0.371
	Şap	0.41	0.03	
	XPS	0.034	0.075	
	Betonarme	1.13	0.15	
	Alçı sıva	0.4	0.02	
Zemine Oturan Döşeme	Laminat Parke Kaplama	0.21	0.025	0.501
	Şap	0.41	0.05	
	XPS	0.034	0.04	
	Tesviye Betonu	1.9	0.10	
	Hafif Beton	1.13	0.40	
İç Döşeme	Laminat Parke Kaplama	0.21	0.025	1.505
	Şap	0.41	0.05	
	Tesviye Betonu	1.9	0.05	
	Hafif Beton	1.13	0.20	
	Alçı Sıva	0.4	0.020	

Oluşturulan BIM modelinin ön cepheden, arka cepheden ve yandan görünümü Şekil 5.10’da, farklı açılardan görünümü ise Şekil 5.11’de verilmektedir.



Şekil 5.10: Oluşturulan BIM modelinin ön cephe, arka cephe ve yandan görünümü.



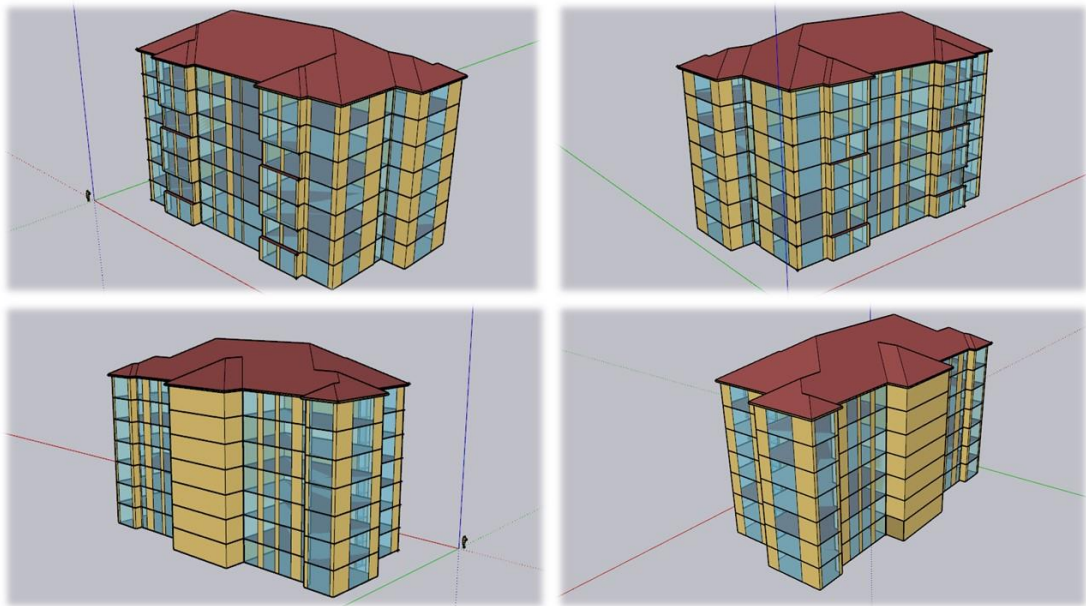
Şekil 5.11: Oluşturulan BIM modellerinin farklı açılardan 3D görünümü.

Bu lisansüstü tez çalışmasında BIM-BEM birlikte çalışabilirliğinin sağlanması için GBS, Insight vb. gibi Autodesk tabanlı BEM yazılımlarının kullanılması yerine daha kapsamlı enerji analizine olanak tanıyan EnergyPlus yazılımının kullanılması tercih edilmiştir. Autodesk Revit yazılımından EnergyPlus yazılımına bilinen direkt bir aktarma yöntemi bulunmamaktadır. Bunun için öncelikle Autodesk Revit yazılımında her bir zone, “Room” komutu ile belirlenmiş ve isimlendirilmiştir. Sonrasında BIM

modeli, enerji analizleri için en uygun format olan gbXML (green building XML) olarak export edilmiştir.

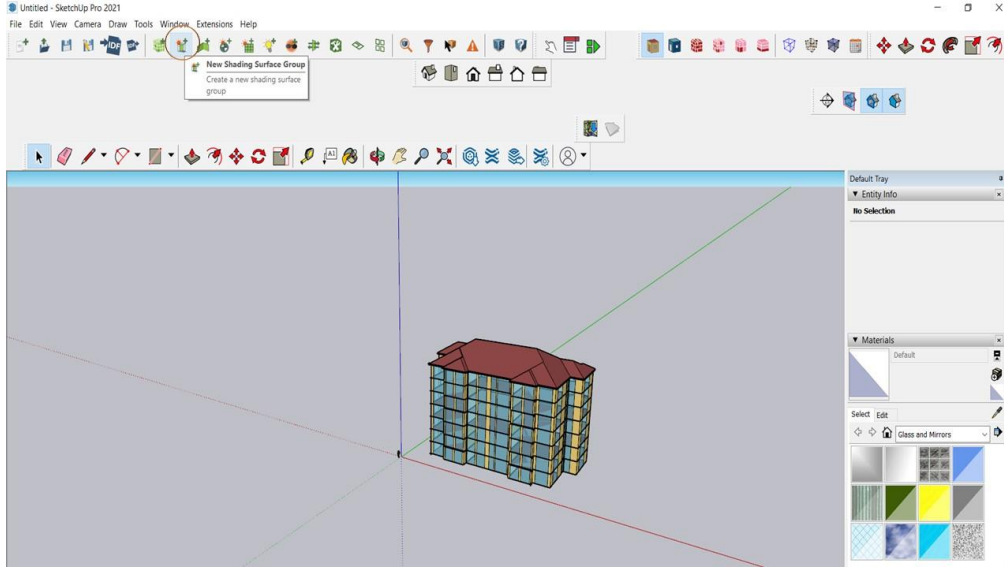
ii-) gbXML modelinin Sketch-up yazılımına aktarılması

EnergyPlus yazılımı input olarak gbXML'i desteklememektedir. Bu nedenle, BIM-BEM birlikte çalışabilirliği süreci SketchUp Pro ve OpenStudio gibi çeşitli yazılımlar ile desteklenmiştir. SketchUp Pro yazılımı içerisine EnergyPlus yazılımı ile birlikte uyumlu olarak çalışmaya yönelik olarak yapılan OpenStudio SketchUp plugini eklenebilmektedir. Bu plugin sayesinde enerji analizlerine yönelik olarak çeşitli düzenlemeler ve modelin basitleştirilmesi yapılabilmektedir. Örneğin, BIM modelinde pencere detayları için camlar, pervazlar ayrı ayrı görünürken; SketchUp Pro'da yer alan modelde pencereler yalnızca cam olarak görünmektedir. Bu işlem adımı öncelikle Autodesk Revit yazılımından export edilen BIM modeli, SketchUp Pro yazılımına import edilerek BIM modeli, SketchUp Pro yazılımında açılmış ve model basitleştirilmiştir. SketchUp Pro yazılımına import edilip basitleştiren BIM modelinin farklı açılardan görünümü Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12: SketchUp yazılımında sadeleştirilen BIM modelinin farklı açılardan görünümü.

Ayrıca SketchUp içerisinde yer alan OpenStudio plugini ile fotovoltaik panel eklenebilmektedir. Bunun için Şekil 5.13'te işaretlenen "New Shading Surface Group" komutu ile fotovoltaik konulmak istenen yüzeye, fotovoltağin boyutlarına uygun olacak şekilde "shading surface" çizilmiştir.



Şekil 5.13: “New Shading Surface Group” komutu.

Bu çalışmada çatının tüm alanına, çatının şekline ve çatının eğim açısına uygun olacak şekilde fotovoltaik paneller yerleştirileceği varsayılmıştır ve buna göre çizim yapılmıştır. Sonrasında, Sketch-up “OpenStudio User Script” içerisinde yer alan “Add Photovoltaics” komutu kullanılarak çizilen yüzeylere fotovoltaik panel eklenmiştir. Eklenen fotovoltaikler için de çeşitli varsayımlar yapılmıştır. Örneğin, fotovoltaiklerin verimliliği (fixed cell efficiency) %20 olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak, EnergyPlus yazılımında verilerin düzenlenmesi oldukça zaman almaktadır. Ayrıca, EnergyPlus yazılımında modelin görüldüğü grafik bir ara yüz bulunmamaktadır. Bu nedenle, BEM modeli enerji analizi ile ilgili bazı düzenlemeler Sketch-up Openstudio plugini vasıtasıyla yapılmıştır. Yapılan düzenlemenin ardından model, *.idf (the input data file) uzantılı olarak dışarı aktarılmıştır.

iii-) Bina enerji simülasyonunun gerçekleştirilmesi

Bina enerji performansını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu bölümde bu faktörlerle ilgili yapılan kabullerden bahsedilecektir.

a. İklimsel faktörlerin belirlenmesi

Bu çalışmada enerji performans simülasyonu için ihtiyaç duyulan dış ortam kuru hava sıcaklığı, rüzgâr hızı/yönü, havanın nem içeriği, güneş ışıınımı gibi iklimsel veriler meteorolojik veri dosyası kullanılarak elde edilmiştir. Bunun için, EnergyPlus yazılımının resmî web sitesinde yar alan İstanbul iline ait *.epw (EnergyPlus

weather) meteorolojik veri dosyası indirilmiş ve simülasyon programında kullanılmıştır. Enerji simülasyonunda 10 dakika aralıklarla iklimsel veri alımı gerçekleştirilmiştir.

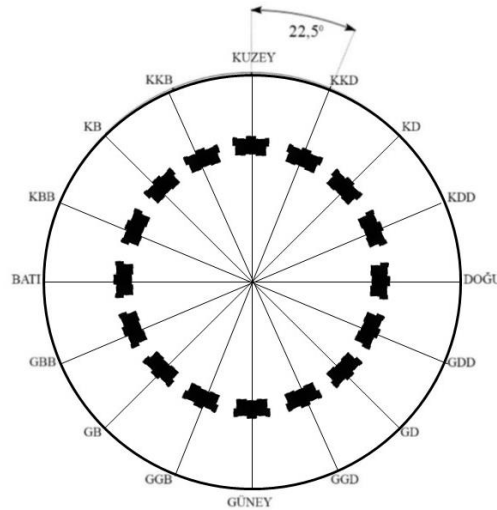
b. Yapıyla ilgili faktörlerin belirlenmesi

Bu çalışmada enerji simülasyonu yapılan binanın, konut binası olarak inşa edilmiş ve 24 saat kullanımda olduğu kabul edilmiştir. Yapının konumuyla ilgili enlem, boylam ve yükseklik değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Yapının konumu.

Enlem (derece)	Boylam (derece)	Yükseklik (m)
41.05	28.92	51.13

Binanın yönlendiriliş durumu enerji performansını etkilemektedir. Bu çalışmada, Şekil 5.14’te görüldüğü gibi K (kuzey), G (güney), D (doğu), B (batı), KD (kuzeydoğu), KB (kuzeybatı), GD (güneydoğu), GB (güneybatı), KKD (kuzey-kuzeydoğu), KDD (kuzeydoğu-doğu), GDD (güneydoğu-doğu), GGD (güney-güneydoğu), GGB (güney-güneybatı), GBB (güneybatı-batı), KBB (kuzeybatı-batı), KKB (kuzey-kuzeybatı) olmak üzere 16 farklı yönlendiriliş durumu için 16 farklı senaryo hazırlanıp enerji performansları değerlendirilmiştir.



Şekil 5.14: Binanın yönlendiriliş durumları ile ilgili senaryolar.

Yapının çevresindeki diğer yapılar gölgelemeleri nedeniyle, mevcut yapının enerji performansını etkilemektedir. Ancak bu çalışmada, yapının çevresindeki binalar hesaba katılmamış ve binanın üzerine herhangi bir gölgenin düşmediği varsayılmıştır. Buna ek olarak yapı kabuğunun önceden Çizelge 5.1’de de verildiği gibi ısııl özellikleri hesaba katılmıştır. Dış çevreye açılan yapı kabuğunda genellikle yalıtım malzemelerinin kullanımına dikkat edilerek yapının ısıtma ve soğutma yüklerinin minimize edilmesine çalışılmıştır.

Yıl boyunca iç hava sıcaklığının konfor değeri, ısıtmanın istendiği dönemde 21.7°C olarak, soğutmanın istendiği dönemde ise 24.4°C olarak belirlenmiştir. İlgili referans binada m² başına aydınlık düzeyinin 8.5 W/m² olmasına karar verilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada havalandırmanın doğal yollarla sağlandığı kabul edilmiş ve ASHRAE Standard 55 ve BEP-TR verileri baz alınarak hacimlerdeki infiltrasyon oranı 0.5 h⁻¹ olarak belirlenmiştir (BEP-TR, 2009; ASHRAE, 2013).

c. Bina sakinleriyle ilgili faktörlerin belirlenmesi

Bina sakinlerinin davranışları ve binanın doluluk oranı da bina enerji performansını etkilemektedir. İlgili referans binada toplam 35 adet daire bulunmaktadır ve her birinde 3’er kişinin yaşadığı kabul edilmiştir. Yani ilgili referans binada toplam 105 bina sakininin yaşadığı kabul edilmiştir. Binanın saat aralıklarına göre doluluk durumları Çizelge 5.3’te ve Çizelge 5.4’te verilmiştir. Çizelge 5.3 hafta içi için doluluk katsayılarını gösterirken, Çizelge 5.4 hafta sonu ve tatil günleri için doluluk katsayılarını göstermektedir. Bu çizelgelerde saat aralıklarında binada kaç kişinin var olduğu bilgisi, doluluk katsayısıyla 105’in çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Binadaki doluluk oranı arttıkça enerji kullanımı da artmaktadır.

Çizelge 5.3: Hafta içi apartmanın doluluk durumu.

Saat Aralığı	Doluluk Katsayısı	Binadaki Kişi Sayısı
00.00-07.00	1.00	105
07.01-08.00	0.85	89
08.01-09.00	0.39	41
09.01-16.00	0.25	26
16.01-17.00	0.30	32
17.01-18.00	0.52	55
18.01-21.00	0.87	91
21.01-24.00	1.00	105

Çizelge 5.4: Hafta sonu ve resmî tatil günlerinde apartmanın doluluk durumu.

Saat Aralığı	Doluluk Katsayısı	Binadaki Kişi Sayısı
00.00-09.00	1.00	105
09.01-15.00	0.50	53
15.01-21.00	0.50	53
21.01-24.00	0.70	74

Ayrıca, hacimlerde kullanılan elektrikli ekipmanın gücü 6.67 W/m^2 olarak belirlenmiştir ve bu elektrikli ekipmanın iç ortama yaydığı ısı da dikkate alınmıştır.

d. Bina hizmetleri ve servisleriyle ilgili faktörlerin belirlenmesi

Binadaki ısıtma ve soğutmanın mekanik sistemlerle sağlandığı varsayılmıştır. Yapının mekanik sistemlerine ait kabul edilen varsayımlar şu şekildedir:

- Hacimlerde ısıtma, doğalgaz yakıtlı sıcak su kazanı ile merkezi olarak sağlanmıştır. Kullanılan doğalgaz yakıtlı su kazanının %90 verimlilikle çalıştığı kabul edilmiştir.
- Hacimlerde soğutma, 1.8 nominal COP (Soğutma Etkinlik Katsayısı) değerine sahip ve elektrik enerjisi kullanan split klimalar vasıtasıyla sağlanmıştır.
- Havalandırmanın doğal yollarla sağlandığı varsayılmış ve saat başına hava değişim hızının 0.5 saat h^{-1} olduğu kabul edilmiştir (BEP-TR, 2009).
- Binadaki mekanik sistemler sürekli çalışmaktadır ve hacimlerdeki konfor değerlerinin termostat aracılığıyla sağlandığı kabul edilmiştir.

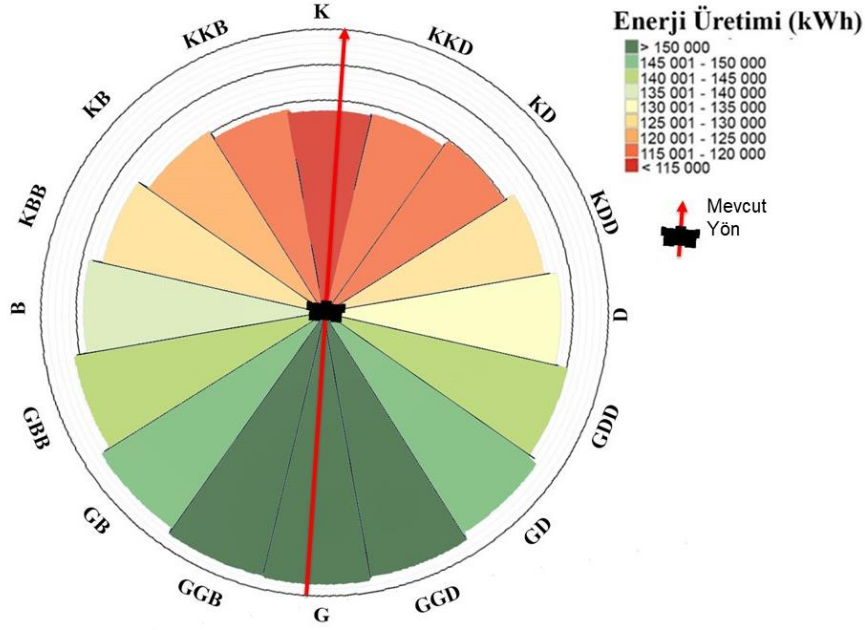
Tüm bu varsayımlar yapıldıktan sonra, SketchUp Pro yazılımından *.idf dosyası olarak çıkarılan BEM modeli, EnergyPlus yazılımında açılmış ve ilgili düzenlemeler “IDF Editor” ile yapılmıştır. EnergyPlus IDF Editor’ün ara yüzü Şekil 5.15’te verilmiştir. IDF Editor ile üretilen ve değiştirilebilen kod dosyasının ekran görüntüsü ise Şekil 5.16’da verilmiştir. Binanın yönlendiriliş durumu 16 farklı yöne (4 ana, 4 ara ve 8 ikincil ara yön) göre değiştirilerek 16 farklı alternatif senaryo üretilmiştir. Ayrıca ilgili binanın mevcut projedeki yönlendiriliş durumu dikkate alınarak mevcut durum senaryosu da üretilmiştir. Böylelikle toplamda 17 farklı senaryo üzerinden bina enerji simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

5.4 Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Oluşturulan 17 farklı senaryoya ait üretilen enerji, tüketilen enerji ve üretimin tüketimi karşılama oranları özet olarak Çizelge 5.5'te verilmiştir. Fotovoltaikten yıl boyunca üretilen toplam enerjinin yönlere göre dağılımı Şekil 5.17'de verilmiştir. Buna göre, fotovoltaikten enerji üretiminin en fazla olduğu yönlendiriliş durumunun Güney, GGB (güney-güneybatı) ve GGD (güney-güneydoğu) yönlerinde olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, K (kuzey) yönünün enerji üretimi açısından en verimsiz olduğu görülmüştür. Ayrıca, mevcut yönlendiriliş durumunda fotovoltaik panel bulunmamaktadır. Fakat, karşılaştırma yapılabilmesi adına mevcut durumda da çatının tüm alanına fotovoltaik panel yerleştirilmiştir ve Çizelge 5.5'te de görüldüğü gibi mevcut durumdaki enerji üretiminin en düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Yani, enerji üretiminde en enerji verimsiz yönün mevcut yön olduğu belirlenmiştir.

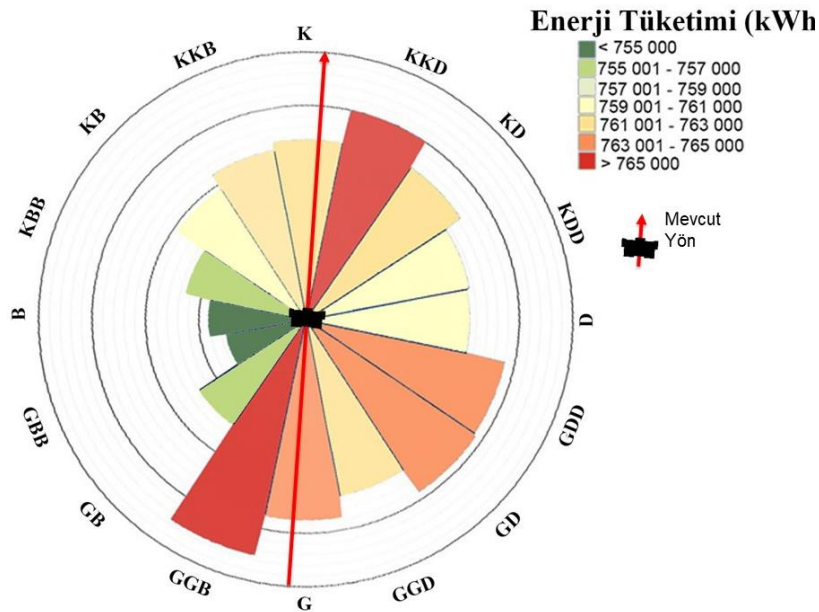
Çizelge 5.5: 2020 yılında farklı senaryolara ait yıllık üretilen, tüketilen enerji ve üretimin tüketimi karşılama oranı.

Yön	Üretilen Enerji (kWh)	Tüketilen Enerji (kWh)	Üretimin Tüketimi Karşılama Oranı (%)
K	114,151.62 (min)	761,798.41	%14.98 (min)
KKD	115,300.40	765,001.54	%15.07
KD	119,468.74	762,307.57	%15.67
KDD	125,849.89	760,589.09	%16.55
D	133,272.77	760,359.60	%17.53
GDD	140,618.79	764,062.88	%18.40
GD	146,941.94	764,313.59	%19.23
GGD	151,462.54	761,770.29	%19.88
G	153,434.00 (max)	763,757.94	%20.09 (max)
GGB	152,525.72	767,557.93 (max)	%19.87
GB	148,898.13	756,932.09	%19.67
GGB	143,138.01	752,624.44 (min)	%19.02
B	135,944.86	754,130.00	%18.03
KBB	128,308.47	756,433.59	%16.96
KB	121,364.14	759,497.32	%15.98
KKB	116,321.76	761,076.22	%15.28
Mevcut Yön	114,116.48	762,962.67	%14.96



Şekil 5.17: Fotovoltaikten yıl boyunca enerji üretiminin yönler göre dağılımı.

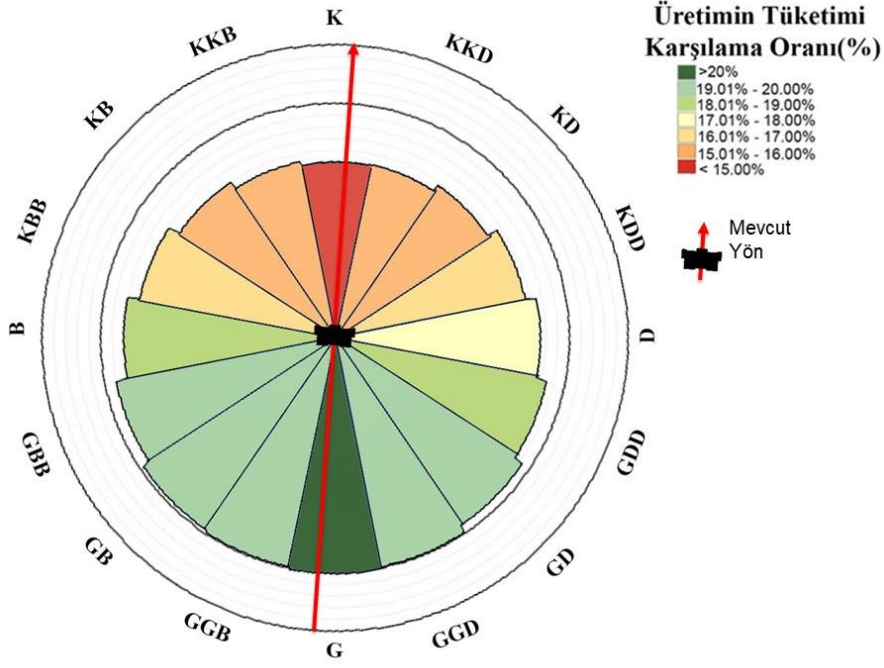
Yıl boyunca tüketilen toplam enerjinin yönler göre dağılımı Şekil 5.18’de verilmektedir. Buna göre, tüketimin en fazla oluşu yönlerin GGB (güney-güneybatı) ve KKD (kuzey-kuzeydoğu) yönleri olduğu görülmektedir. Buna karşılık, yıllık enerji tüketiminin minimum olduğu yani optimum verimli yönlerin sırasıyla GGB (güney-güneybatı) ve B (batı) yönleri olduğu görülmektedir.



Şekil 5.18: Yıl boyunca toplam enerji tüketiminin yönler göre dağılımı.

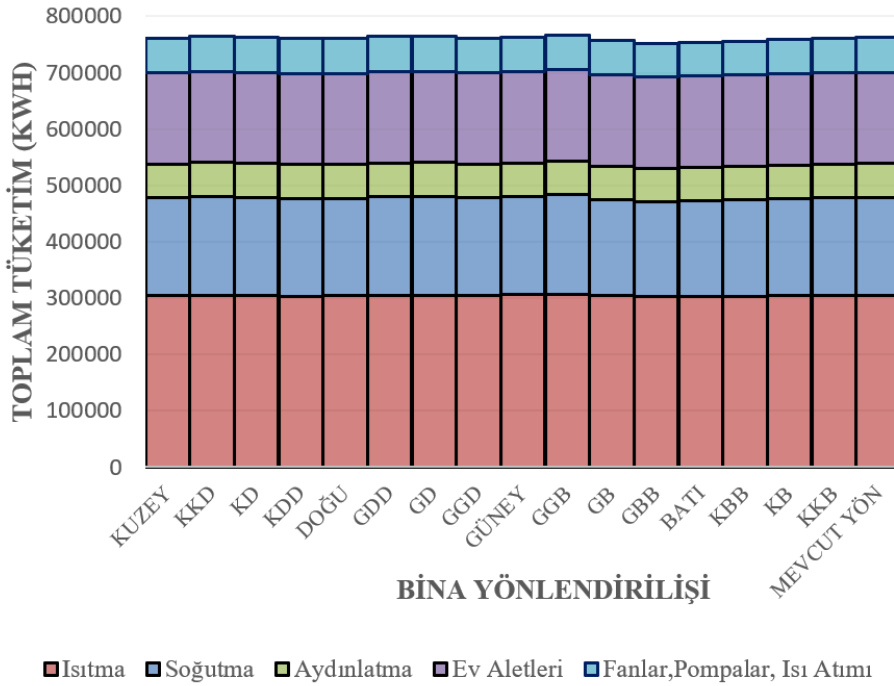
Görüldüğü üzere, üretilen enerji, tüketilen enerjiyi tamamen karşılayamamakta, yalnızca bir kısmını karşılamaktadır. Hatırlanacak olursa, 19 Şubat 2022 tarihinde Resmî Gazete’de yayınlanarak yürürlüğe giren “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik”’e göre 1 Ocak 2023 ile 1 Ocak 2025 tarihleri arasında binalarda kullanılacak enerjinin minimum %5’lik kısmının yenilenebilir kaynaklardan karşılanması zorunlu hale getirilmiştir. 1 Ocak 2025 tarihinden itibaren ise bu oran artırılarak, binalarda kullanılacak enerjinin minimum %10’luk kısmının yenilenebilir kaynaklardan karşılanması zorunluluğu getirilmiştir. Çizelge 5.5’te görüldüğü gibi üretimin tüketimi karşılama oranları en verimsiz yönde bile yaklaşık %15’tir. Bu oran, en verimli yönde yaklaşık %20’lere kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla ülkemizde bu oranları yakalamanın çok da güç olmadığı açıktır.

Bina yönlerinin enerji verimliliğinin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için fotovoltaik panellerden üretilen enerjinin binanın toplam tüketimi içindeki payı her bir yön için yüzde olarak hesaplanmış ve buna “üretimin tüketimi karşılama oranı” denilmiştir. Hesaplanan üretimin tüketimi karşılama oranlarının yönler göre dağılımı Şekil 5.19’da verilmiştir. Buna göre, yaklaşık %15 üretimin tüketimi karşılama oranı ile K (kuzey) yönü, bu ölçüte göre en verimsiz yön olarak belirlenmiştir. Öte yandan, yaklaşık %20 üretimin tüketimi karşılama oranı ile G (güney) yönü en verimli yön olarak belirlenmiştir. Genel olarak tüm sonuçlara bakıldığında en uygun yön sıralaması şu şekilde elde edilmiştir: G (güney) -%20.09, GGD (güney-güneydoğu) -%19.88, GGB (güney-güneybatı) -%19.87, GB (güneybatı) -%19.67, GD (güneydoğu) -%19.23, GBB (güneybatı-batı) -%19.02, GDD (güneydoğu-doğu) -%18.40, B (batı) -%18.03, D (doğu) -%17.53, KBB (kuzeybatı-batı) -%16.96, KDD (kuzeydoğu-doğu) -%16.55, KB (kuzeybatı) -%15.98, KD (kuzeydoğu) -%15.67, KKB (kuzey-kuzeybatı) -%15.28, KKD (kuzey-kuzeydoğu) -%15.07 ve K (kuzey) -%14.98.



Şekil 5.19: Üretimin tüketimi karşılama oranı.

Çizelge 5.5'te verilen toplam tüketilen enerjinin kullanıldığı yere göre (ısıtma, soğutma, aydınlatma vb.) dağılımı Şekil 5.20'de verilmiştir.



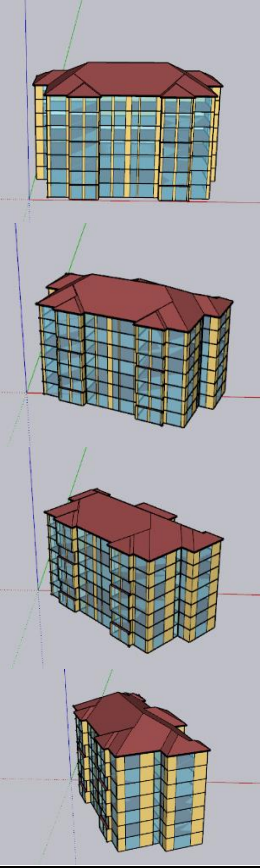
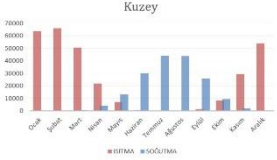
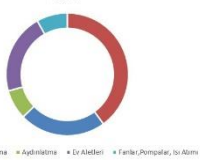
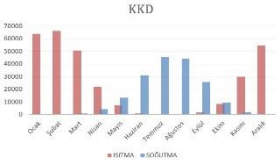
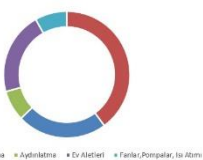
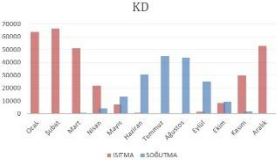
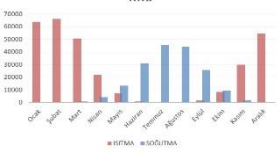
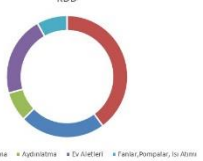
Şekil 5.20: Tüketilen enerjinin kullanıma göre dağılımı.

Hesaplanan ısıtma ve soğutma yüklerinin aylık değerleri Çizelge 5.6’da verilmektedir. Tabloda minimum ve maksimum değerler diğerlerine göre daha koyu olarak gösterilmektedir. Çizelge 5.6’daki değerler ısıtma ve soğutma için harcanan toplam tüketim değerlerini ifade etmektedir. Isıtma yapılan aylarda (kasım, aralık, ocak, şubat ve mart) ısıtma yükü fazlayken, soğutma yapılan aylarda (haziran, temmuz, ağustos) soğutma yükü fazladır. Çizelge 5.6 incelendiğinde genel olarak ısıtma için en çok enerji şubat ayında harcanmıştır. Bunu ocak ve aralık aylarının izlediği söylenebilmektedir. Soğutma için harcanan enerjinin ise genel olarak temmuz ayında maksimum olduğu ve sırasıyla ağustos ve haziran aylarının izlediği belirlenmiştir. Binanın yönlendiriliş durumuna göre aylık tüketimleri incelendiğinde ise binanın yine genel olarak GBB (güneybatı-batı) yönünde en verimli olduğu görülmektedir. GBB yönünde genel olarak tüketimler minimumdur. Isıtma ve soğutma yükü anlamında en verimsiz yönün ise GGB (güney-güneybatı) olduğu söylenebilir. Genel olarak GGB yönünde çoğu ayda maksimum tüketim değerine ulaşılmıştır. Eylül ayı özelinde ise projede yer alan mevcut yönlendiriliş durumu en enerji verimsiz olmaktadır. Tüm bu veriler hakkında özet bir çizelge ise Çizelge 5.7’de verilmektedir.

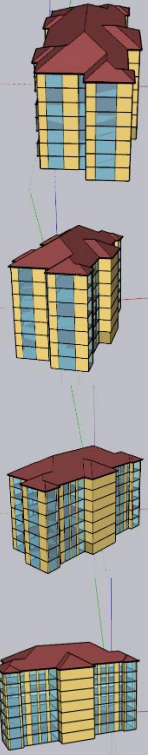
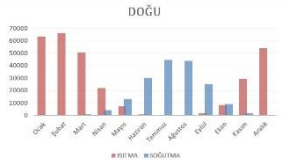
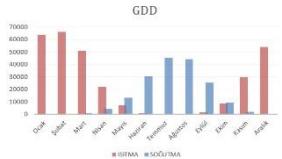
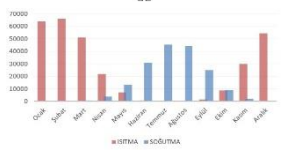
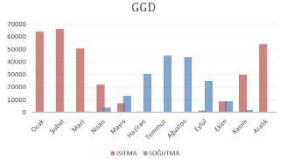
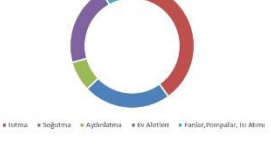
Çizelge 5.6: 2020 yılında aylara göre ısıtma ve soğutma yüklerinin toplamı (kWh).

Yön	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
K	63749.50	66305.44	51307.97	25935.44	20299.19	31125.20	44835.15	44401.02	26896.85	17844.22	31620.73	54190.96
KKD	63909.74	66434.54	51473.58	25984.43	20479.61	31735.57	45704.68	44666.00	26875.72	17893.17	31677.26	54312.69
KD	63961.65	66576.35	51643.87	25988.26	20376.90	31611.90	45562.41	44440.41	26413.72	17729.16	31729.71	52996.71
KDD	63560.83	66130.21	51307.36	25824.63	20265.79	31275.63	45228.72	44348.44	26452.60	17639.79	31518.99	54054.17
D	63567.39	66224.91	51304.02	25892.91	20183.34	31149.37	45076.28	44319.28	26395.56	17674.05	31520.57	54050.24
GDD	63780.73	66379.38	51570.29	25985.18	20434.43	31659.62	45801.00	44693.81	26540.95	17773.28	31678.40	54247.10
GD	63850.91	66475.92	51645.55	25958.63	20448.55	31873.45	45889.06	44493.83	26409.18	17708.40	31773.47	54330.93
GGD	63831.71	66382.72	51505.95	25879.02	20308.35	31589.05	45435.78	44201.46	26163.18	17583.66	31719.83	54247.03
G	64086.96	66531.21	51594.45	26009.48	20419.04	31418.12	45488.52	44429.64	26504.77	17752.68	31852.79	54363.09
GGB	64273.37	66733.26	51856.06	26097.36	20629.93	32036.35	46159.40	44864.61	26621.74	17866.27	31960.95	54529.32
GB	63594.42	66121.35	51363.73	25736.83	20016.84	31214.86	45056.96	43578.47	25397.12	17362.42	31622.75	53933.91
GBB	63273.12	65837.53	51130.30	25606.73	19746.09	30722.33	44399.95	43247.83	25232.05	17200.72	31437.51	53651.01
B	63350.22	65957.02	51128.83	25669.73	19827.86	30676.33	44451.82	43503.90	25507.66	17306.81	31464.36	53690.96
KBB	63505.25	66049.01	51232.72	25714.03	19974.18	31018.81	44744.87	43665.07	25776.77	17387.30	31507.84	53856.99
KB	63662.83	66223.52	51341.64	25819.16	20175.16	31327.87	45137.40	44044.34	25990.21	17542.49	31584.37	54023.68
KKB	63700.61	66245.19	51326.52	25855.82	20267.72	31444.39	45142.47	44297.95	26406.66	17652.32	31583.19	54155.22
Mevcut Yön	63805.99	66325.26	51349.37	25955.69	20370.83	31233.03	45057.37	44622.02	26981.39	17867.86	31652.78	54244.26

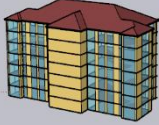
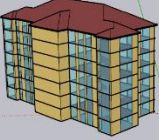
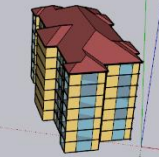
Çizelge 5.7: Bina yönüne göre enerji yükleri.

Bina	Yön	Aylara Göre Isıtma – Soğutma Yüğü	Tüketilen Enerjinin Dağılımı	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Toplam Üretilen Enerji (kWh)	Toplam Net Enerji (kWh)	Üretimin Tüketimi Karşılama Oranı (%)
	Kuzey			761 798.41	114 151.624	647 646.786	%14.98
	KKD			765 001.54	115 300.395	649 701.145	%15.07
	KD			762 307.57	119 468.739	642 838.831	%15.67
	KDD			760 589.09	125 849.89	125 849.89	%16.55

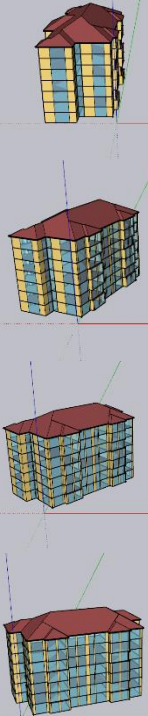
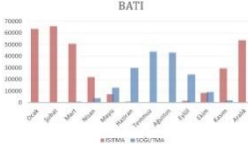
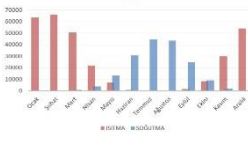
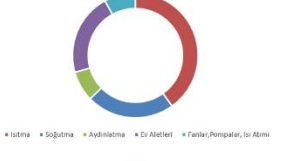
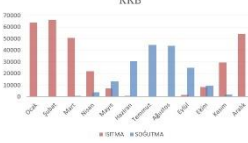
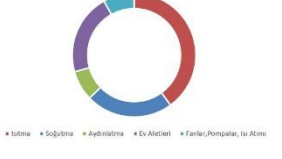
Çizelge 5.7 (devam): Bina yönüne göre enerji yükleri.

Bina	Yön	Aylara Göre Isıtma – Soğutma Yükü	Tüketilen Enerjinin Dağılımı	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Toplam Üretilen Enerji (kWh)	Toplam Net Enerji (kWh)	Üretimin Tüketimi Karşılama Oranı (%)
	Doğü			760 359.6	133 272.774	627 086.826	%17.53
	GDD			764 062.88	140 618.785	623 444.095	%18.40
	GD			764 313.59	146 941.936	617 371.654	%19.23
	GGD			761 770.29	151 462.537	610 307.753	%19.88

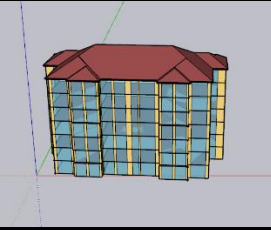
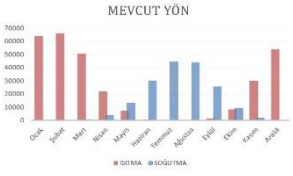
Çizelge 5.7 (devam): Bina yönüne göre enerji yükleri.

Bina	Yön	Aylara Göre Isıtma – Soğutma Yükü	Tüketilen Enerjinin Dağılımı	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Toplam Üretilen Enerji (kWh)	Toplam Net Enerji (kWh)	Üretimin Tüketimi Karşılama Oranı (%)
   	Güney			763 757.94	153 434.003	610 323.937	%20.09
	GGB			767 557.93	152 525.719	615 032.211	%19.87
	GB			756 932.09	148 898.134	608 033.956	%19.67
	GBB			752 624.44	143 138.009	609 486.431	%19.02

Çizelge 5.7 (devam): Bina yönüne göre enerji yükleri.

Bina	Yön	Aylara Göre Isıtma – Soğutma Yüğü	Tüketilen Enerjinin Dağılımı	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Toplam Üretilen Enerji(kWh)	Toplam Net Enerji (kWh)	Üretimin Tüketimi Karşılama Oranı (%)
	Batı			754 130.00	135 944.86	618 185.14	%18.03
	KBB			756 433.59	128 308.468	628 125.122	%16.96
	KB			759 497.32	121 364.137	638 133.183	%15.98
	KKB			761 076.22	116 321.756	644 754.464	%15.28

Çizelge 5.7 (devam): Bina yönüne göre enerji yükleri.

Bina	Yön	Aylara Göre Isıtma – Soğutma Yüğü	Tüketilen Enerjinin Dağılımı	Toplam Tüketilen Enerji (kWh)	Toplam Üretilen Enerji (kWh)	Toplam Net Enerji (kWh)	Üretimin Tüketimi Karşılama Oranı (%)
	Mevcut Yön			762 962.67	114 116.478	648 846.192	%14.96

Bina formunun yapısı da enerji yükleri üzerinde önemli bir değişkendir. Bu çalışmada ilgili referans binanın 2. ve 5. katlarındaki cumbanın derinliği diğer katlardakilere nazaran daha dardır. Bu girintili çıkıntılı bina formu, üst ve alt katlardaki dairelerde dış çevreyle etkileşime giren toplam alanın miktarını artırmaktadır. Dolayısıyla bu durumun enerji yüklerini artırması beklenmektedir. Gerçekten de beklenildiği gibi bu katlardaki enerji tüketimi diğer katlara nazaran daha fazla olmaktadır. Benzer şekilde, yapının orta kısmında yer alan daire dış çevreyle etkileşimi daha az olduğundan dolayı daha düşük enerji tüketimine sahiptir.

Bina içerisinde yer alan dairelerin baktıkları cepheler de birbirinden farklı olduğundan dolayı daire başına birim enerji tüketimleri de farklılık göstermektedir. Örneğin, yapı yönlendirmesi GGB (güney-güneybatı) yönüne göre yapıldığında, yapının içerisinde yer alan dairelerin m³ başına toplam ısıtma ve soğutma yükleri Çizelge 5.8’de verildiği gibi olmaktadır. Çizelgede görüldüğü gibi ısıtma ve soğutma yükleri, ara dairede en düşüktür. Bunun yanında yapının içerisinde dairelerin baktığı cepheye göre ısıtma ve soğutma yükleri farklılık göstermektedir. Örneğin bina yönlendirmesi GGB olduğu zaman genel olarak ön cephedeki dairelerin daha az enerji tükettiği görülmektedir. Benzer şekilde bu bina 180 derece döndürüldüğünde yani KKD bina yönlendirmesine oturtulduğunda bu sefer arka cephedeki daireler daha az enerji tüketecektir.

Çizelge 5.8: Yapının içerisinde yer alan dairelerin m³ başına toplam ısıtma ve soğutma yükleri (GGB için).

Bina İçindeki Konum	Birim Isıtma Yüğü (kWh)	Birim Soğutma Yüğü (kWh)
Sağ-arka	29.76	13.39
Sol-arka	29.73	14.70
Sağ-ön	28.15	15.19
Orta-ön	20.14	12.30
Sol-ön	28.37	15.30

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bilindiği gibi tüm dünyada fosil yakıtların yakılmasından kaynaklı artan bir enerji ihtiyacı ve buna bağlı olarak da ortaya çıkan bir iklim sorunu bulunmaktadır. Hızla gelişen ve dönüşen kentlerdeki enerji ihtiyacı da hızla artmakta ve bunun neticesinde rezervleri tükenmeyen ve doğaya saygılı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Zira tüm dünyada önceki bölümlerde de ayrıntılı şekilde aktarıldığı gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik artan bir ilgi ve çaba mevcuttur. Ayrıca, global ve yerel ölçekte, yasal çerçeve de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını desteklemektedir.

Binalar toplam nihai enerji tüketiminde önemli bir yere sahip olduğundan dolayı yapı sektöründe ciddi bir enerji verimliliği ve tasarrufu potansiyeli vardır. Ülkemizde yer alan toplam 11,598,446 binanın yaklaşık olarak 2 milyonu sağlıklı ve riskli olan yapılardır. Bunun yanında, bakanlık tarafından 20 yıl içerisinde toplam 6.5 milyon binanın dönüştürüleceği bildirilmiştir. Geçmişte yapılan binalar, genellikle yapı üretim maliyetlerine göre inşa edildikleri için enerji verimliliği çok dikkate alınmamış ve bu nedenle enerji tüketimleri oldukça fazladır. Ayrıca yasal çerçeveye göre mevcut binalar G sınıfına kadar enerji kimlik belgesi alabiliyorken, 2011'den sonra inşa edilen yeni binaların en az C sınıfı enerji kimlik belgesi alması zorunlu tutulmuştur. Dolayısıyla kentsel dönüşümle yıkılan ve genellikle düşük EKB sınıfına sahip binaların yıkılıp yeniden yapılmasıyla enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Bu lisansüstü tez çalışmasında kentin yaygın bir gerçeği olan kentsel dönüşüm olgusu üzerinden binalarda enerji verimliliği irdelenmiştir. Kentsel dönüşüm projelerinin ya da herhangi bir yapı projesinin doğaya saygılı ve doğal kaynaklardan optimum olarak yararlanacak şekilde doğayla uyumlu olması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, geleneksel yöntemlerle yapılmış bir kentsel dönüşüm projesinde yer alan bir yapının tüm çatı alanına fotovoltaik panel yerleştirilerek yıllık enerji tüketimi ve yıllık enerji üretimi hesaplanmıştır. Bu referans binanın ana yönler, ara yönler ve ikincil ara yönler olmak üzere 16 farklı yöne göre yönlendirilmesiyle ve tüm çatı alanına fotovoltaik panel yerleştirilmesiyle 16 farklı senaryo oluşturulmuş ve yıllık enerji üretimi ve tüketimi her bir senaryo için hesaplanmıştır. Bu değerler; geleneksel planlama yöntemleriyle yerleştirilen binadaki yıllık üretilen ve tüketilen enerji ile

karşılaştırılarak optimum yön arayışına gidilmiştir. Bu lisansüstü tez çalışması neticesinde elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Fotovoltaikten yıllık üretilen enerjinin maksimumdan minimuma doğru yönler göre dağılımı şu şekildedir: Güney- 153,434.00 kWh; GGB- 152,525.72 kWh; GGD- 151,462.54 kWh; GB- 148,898.13 kWh; GD- 146,941.94 kWh; GBB- 143,138.01 kWh; GDD- 140,618.79 kWh; Batı- 135,944.86 kWh; Doğu- 133,272.77 kWh; KBB- 128,308.47 kWh; KDD- 125,849.89 kWh; KB- 121,364.14 kWh; KD- 119,468.74 kWh; KKB- 116,321.76 kWh; KKD- 115,300.40 kWh; Kuzey- 114,151.62 kWh; Mevcut Yön- 114,116.48 kWh.
- Fotovoltaik vasıtasıyla güneş enerjisinden üretilen yıllık enerji miktarları karşılaştırıldığında, en fazla yıllık enerji tüketiminin beklenildiği gibi güney yönünde olduğu, sonrasında ise GGB ve GGD yönlerinin bunu izlediği görülmüştür. Öte yandan, kuzey yönünde beklenildiği gibi enerji üretiminin minimum değerlerde olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca, mevcut kentsel dönüşüm projelendirmesindeki bina oturumunun çatısına fotovoltaik yerleştirilse dahi bu değerlerin tüm değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Yani, enerji üretiminde en dezavantajlı senaryo mevcut durum senaryosudur.
- Farklı senaryolara ait yıllık enerji tüketimlerinin minimumdan maksimuma doğru sıralanışı ise şu şekildedir: GBB- 752,624.44 kWh; Batı- 754,130.00 kWh; KBB- 756,433.59 kWh; GB- 756,932.09 kWh; KB- 759,497.32 kWh; Doğu- 760,359.60 kWh; KDD- 760,589.09 kWh; KKB- 761,076.22 kWh; GGD- 761,770.29 kWh; Kuzey- 761,798.41 kWh; KD- 762,307.57 kWh; Mevcut Yön- 762,962.67 kWh; Güney- 763,757.94 kWh; GDD- 764,062.88 kWh; GD- 764,313.59 kWh; KKD- 765,001.54 kWh; GGB- 767,557.93 kWh.
- Bu çalışmada yıllık net enerji tüketiminin minimum olacak şekilde bir yapının yönlendirilmesinin yapılması hedeflenmektedir. Bu nedenle, yıllık enerji üretiminin maksimum, yıllık enerji tüketiminin ise minimum olması arzulanmaktadır. Bu kapsamda, yön senaryoları arasında karşılaştırma yapılabilmesi için üretimin tüketimi karşılama oranları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Buna göre, yaklaşık %20 oran ile optimum verimli yön

Güney olarak belirlenmiş, yaklaşık %15 oran ile en enerji verimsiz yön ise Kuzey olarak belirlenmiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde bu çalışma bölgesi özelinde elde edilen yön sıralaması şu şekilde olmaktadır: Güney- %20.98; GGD- %19.88; GGB-%19.87; GB- %19.67; GD- %19.23; GBB- %19.02; GDD- %18.40; Batı- %18.03; Doğu- %17.53; KBB- %16.96; KDD- %16.55; KB- %15.98; KD- %15.67; KKB- %15.28; KKD- %15.07; Kuzey- %14.98.

- Toplam tüketimin kullanıma göre dağılımı incelendiğinde ısıtma en fazla enerji tüketimine sebep olmaktadır. Bunu sırasıyla, soğutma ve elektrikli ekipmanlar izlemektedir. Türkiye’de konutlarda ısıtma için kullanılan temel enerji kaynağının doğalgaz olduğu ve doğalgazda dışa bağımlı olduğumuz göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarıyla bu açığın en azından bir kısmını kapatmamız gerekmektedir. Zira Türkiye coğrafi konumundan dolayı güneş enerjisinden yararlanma potansiyeli yüksek bir ülkedir.
- Mevcut yön ile 16 farklı alternatif senaryonun ısıtma için tükettiği enerjiler incelendiğinde mevcut yönün, ısıtma yönünden en verimli yöne göre yıllık 1,756.75 kWh daha fazla ısıtma enerjisi tükettiği görülmektedir. Benzer şekilde, mevcut yön, soğutma yönünden en verimli yöne göre yıllık 6,223.94 kWh daha fazla soğutma enerjisi tükettiği ve fanlar, pompalar ve ısı atımı açısından ise optimum enerji verimli yöne göre yıllık 2,357.54 kWh daha fazla enerji tükettiği görülmektedir. Dolayısıyla, toplamda mevcut yön enerji tüketimi açısından optimum yöne göre (GBB) yıllık 10,338.23 kWh daha fazla enerji tüketmektedir. Sadece bir binanın pasif enerji sistemleri ile doğayla uyumlu bir şekilde doğru yönlendirilmesiyle bu denli enerji tasarrufu sağlandığı göz önüne alındığında, kentsel dönüşüm kapsamındaki tüm binalarda doğa ile uyumlu pasif enerji sistemlerinin kullanılması ülkesel anlamda önemli enerji tasarrufu fırsatı sunmaktadır.
- Benzer şekilde, enerji üretimi ve tüketimi dikkate alındığında optimum yön olan Güney yönünde, mevcut yöne göre toplam yıllık 38,552.25 kWh daha fazla net enerji kazanımı olmaktadır.
- Dolayısıyla eğer fotovoltaik panel kurulumu için yeterli bütçe varsa Güney yönü optimum yön olurken, fotovoltaik panel kurulumu için yeterli bütçe

yoksa enerji tüketiminin minimum olduğu GBB yönü optimum yön olmaktadır.

- Bu lisansüstü çalışmasında bu bulguların elde edilmesinde BIM teknolojisinin birçok faydası görülmüştür. Örneğin, BIM yazılımında yapıyı oluşturan yapı elemanları katmanlı olarak, gerçek kalınlıklarına ve ısı özelliklerine göre çizilebilmektedir. Katmanlarda yer alan objelerin materyalleri hızlı bir şekilde değiştirilebilmekte ve değişiklikler projeye anında adapte edilebilmektedir. Bu şekilde farklı senaryoların üretilmesi çok kısa zaman almaktadır. Bunlara ek olarak, BIM modelleri sayesinde daha projenin tasarım aşamasında enerji analizleri ve maliyet analizleri yapılabilmektedir. Buna bağlı olarak, kararlar daha hızlı alınabilmekte ve inşaat ve işletme aşamaları daha efektif şekilde hızlı ve bütünlük şeklinde yürütülebilmektedir.
- BIM-BEM birlikte çalışabilirliği çok gerekli olmasına rağmen hala bu konuda gerçek anlamda bir entegrasyon sağlanamamıştır. BIM-BEM entegrasyonu genel olarak bu çalışmada da olduğu gibi kişisel yöntemlerle yarı otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, büyük çaplı projelerde bazen veri kayıpları yaşanmaktadır. Bunun için BIM kullanıcıları genel olarak aynı yazılım firması tarafından üretilmiş yazılımları kullanmaktadır. Fakat EnergyPlus daha ayrıntılı veri analizine olanak tanıdığı için bu çalışmada EnergyPlus kullanılması uygun görülmüştür.
- Binanın formu, yapının enerji tüketimini etkilemektedir. Girintili-çıkıntılı yapılar dış ortam ile daha fazla etkileşime girdiğinden dolayı dış ısı kaybına neden olmakta ve kütle etkisi önem kazanmaktadır. Bu nedenle bina daha fazla enerji tüketmektedir. Bu çalışmada 2. ve 5. katlardaki cumbanın derinliği diğer katlara nazaran farklılık göstermektedir. Beklenildiği gibi, bu katlara komşu katlardaki enerji tüketimi, diğer katlardaki enerji tüketimine nazaran daha fazladır.
- Bina içerisinde yer alan dairelerin kat içerisinde bulundukları konuma göre tükettikleri enerji miktarları farklılık göstermektedir. Bu fark, güneş ışınlamından yapının farklı kazanımlar elde etmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, GGB yönüne doğru binanın yönlendirilmesi senaryosunda, yapı içerisindeki dairelerin birim ısıtma ve soğutma yükleri farklılık göstermektedir.

Binanın içerisinde yer alan dairelerin birim ısıtma yükleri şu şekilde olmaktadır:

- Binanın sağ-arkasında yer alan dairenin birim ısıtma yükü 29.76 kWh;
- Binanın sol-arkasında yer alan dairenin birim ısıtma yükü 29.73 kWh;
- Binanın sağ-önünde yer alan dairenin birim ısıtma yükü 28.15 kWh;
- Binanın orta-önünde yer alan dairenin birim ısıtma yükü 20.40 kWh;
- Binanın sol-önünde yer alan dairenin birim ısıtma yükü 28.37 kWh.

Benzer şekilde, binanın içerisinde yer alan dairelerin birim soğutma yükleri ise şu şekilde olmaktadır:

- Binanın sağ-arkasında yer alan dairenin birim soğutma yükü 13.39 kWh;
- Binanın sol-arkasında yer alan dairenin birim soğutma yükü 14.70 kWh;
- Binanın sağ-önünde yer alan dairenin birim soğutma yükü 15.19 kWh;
- Binanın orta-önünde yer alan dairenin birim soğutma yükü 12.30 kWh;
- Binanın sol-önünde yer alan dairenin birim soğutma yükü 15.30 kWh.

Görüldüğü gibi, yapı içerisinde farklı cephelere bakan dairelerin güneş ışınlamından kazanımları farklı olduğundan dolayı birim ısıtma/soğutma yükleri (1 m^2 alanı ısıtmak/soğutmak için harcanan enerji) farklılık göstermektedir. Yapı GGB yönüne yönlendirildiğinde, yapının orta-önünde yer alan dairenin birim ısıtma – soğutma yükleri minimum olmaktadır.

Sonuç olarak bir yapının enerji tüketimi temel olarak iklimsel özellikler, yapı ile ilgili özellikler, bina sakinleriyle ilgili özellikler ve bina hizmetleri ve servisleriyle ilgili özellikler olmak üzere 4 ana özelliğe bağlıdır. Bu temel özellikler genişletildiğinde bir yapının enerji tüketimi, çalışma bölgesinin enlem, boylam ve yüksekliği, binanın yönlendiriliş durumu, güneş ışınlamı, güneşlenme süresi, iklimsel veriler (sıcaklık, nem, rüzgâr yönü ve hızı vb.), binanın doluluk durumu ve kullanım saatleri, kullanıcı davranışları, binadaki kişi sayısı, kullanılan ısıtma ve soğutma sistemleri, kullanılan yapı malzemesi ve ısıl geçirgenlik özellikleri, yapının içerisinde dairelerin konumu gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan sistemler aracılığıyla tüm parametreler değiştirilerek sonuçlara etkisi kolaylıkla

görülebilmektedir. Bunun sonucunda da, enerji verimliliği konusunda karar vericilere daha planlama aşamasında önemli bilgiler sunulabilecektir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan araştırmalara göre tüm dünyada bugünkü kullanım ile yarım yüzyıl içerisinde petrol rezervlerinin tükeneceği ve yaklaşık olarak 200 yıl içerisinde de doğalgaz ve kömürün tükeneceği tahmin edilmektedir. Teknolojinin ilerlemesi, yükselen yaşam standartları ve artan nüfus neticesinde enerji gereksinimi de her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, yenilenemez enerji kaynaklarına olan bağımlılığın giderilmesi ve daha temiz ve sürdürülebilir olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim tüm dünyada hız kazanmıştır. Bu bağlamda atılan önemli adımlardan biri olan Paris Anlaşması temelde, Sanayi Devrimi öncesi döneme göre küresel ortalama sıcaklık artışının 2°C altında tutulmasını ve ek olarak bu artışın 1.5°C'nin altında tutulmasına yönelik küresel çabaların sürdürülmesini hedeflemektedir. Bu hedefin gerçekleştirilebilmesi ancak karbon emisyonlarının azaltılmasıyla mümkündür. Karbon emisyonlarının azaltılarak karbon nötr olma hedefine yönelik olarak atılabilecek en önemli adımlardan biri hiç şüphesiz yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılmasıdır. Ayrıca karbon nötr olma yolunda atılmış bir diğer önemli adım Avrupa Yeşil Mutabakatı'dır. Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın da benzer şekilde enerji sektörünün karbonsuzlaştırılması, binaların enerji tasarruflu olmasının sağlanması ve yeşil dönüşüm gibi hedefleri bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, AB'nin Enerji ve İklim Çerçevesi'ne göre 2030'a kadar bir dizi hedef belirlenmiştir. Bu hedeflerden bazıları şu şekilde özetlenebilir: yenileme projelerinin sayısının 2 katına çıkarılması, 30 milyondan fazla yapının daha enerji verimli hale getirilmesi ve bu yapılardan kaynaklı karbon salınımlarının azaltılması, enerji verimliliğinin minimum %32.5 iyileştirilmesi, yenilenebilir enerjinin toplam payının minimum %32'ye çıkarılması, yenileme çalışmaları ile düşük karbonlu ve enerji verimli yapıların yaygınlaştırılması.

Hatırlanacak olursa, dünyadaki enerji tüketiminin %35'i ve karbon emisyonlarının %38'i binalardan kaynaklanmaktadır. Bunun sonucunda, tüm dünyada enerji verimliliğine yönelik artan ilgi, yapı sektörüne yönelmiştir. Zira AB tarafından binalar, enerji tasarrufunda öncelikli alan olarak seçilmiştir. Bunun neticesinde binalarda enerji verimliliği konusunda dünya genelinde birçok hedef ve strateji belirlenmiştir. Bu hedef ve stratejilerden biri de Binalarda Enerji Performansı Direktifi'dir. Bu direktif temel olarak, 2050 yılına kadar karbondan arındırılmış bir bina stoğunu ve kentlerdeki en kötü performans gösteren binalar için yenileme oranlarının artırılmasını

hedeflemektedir. Görüldüğü gibi AB'deki tüm yasal çerçeve hemen hemen aynı hedefleri sağlamaya odaklanmaktadır. Tüm kanunlar, yönetmelikler, direktifler vs. genel olarak karbon salınımını azaltmaya, yenilenebilir enerji kullanımını yaygınlaştırmaya ve kentsel yenileme çalışmaları ile enerji verimliliğini artırmaya yönelmektedir. Türkiye'de de durum benzerdir.

Ülkemizde, AB'deki yasal çerçeve örnek alınarak çeşitli yasal düzenlemeler yapılmıştır. Örneğin AB'deki EPBD örnek alınarak Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği hazırlanmıştır. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ile EKB uygulamaları başlamış ve 2011 yılından sonra yapılan binalar yeni bina olarak adlandırılarak minimum C sınıfı EKB alması zorunlu hale getirilmiştir. Ayrıca, 19 Şubat 2022 tarihinde yayınlanan Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik'te NSEB kavramının tanımı yapılmıştır. Bu tanıma ek olarak, 1 Ocak 2023- 1 Ocak 2025 tarihleri arasında yapılacak olan ve toplam inşaat alanı 5000 m²'den büyük olan inşaat projelerinde yapıların NSEB olarak inşa edilmesi ve kaynaklarının minimum %5'inin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması zorunlu hale getirilmiştir. 1 Ocak 2025'ten sonra ise 2000 m²'den büyük olan tüm yapı projelerinin NSEB olarak inşa edilmesi ve kaynaklarının en az %10'unun yenilenebilir enerjiden sağlanması zorunlu kılınmıştır. Ayrıca 19 Şubat 2022 tarihinde Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile gelen değişiklikle NSEB olarak inşa edilen binaların minimum B sınıfı EKB alması zorunlu hale getirilmiştir. Bir başka ifadeyle Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ile en düşük C sınıfına yükseltile EKB sınıfı, NSEB olarak inşa edilen binalarda daha da verimli hale getirilerek en az B sınıfına kadar yükseltilmiştir. Bu kapsamda kentsel dönüşüm bölgelerinde yer alan sağlıklı ve enerji verimsiz olan yapıların dönüştürülmesiyle ve NSEB kapsamına alınmasıyla ciddi bir enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu bağlamda, kentsel ölçekte enerji verimliliğinin sağlanması için kentsel dönüşüm iyi bir fırsattır. Kentsel dönüşüm ile her yıl yaklaşık 300,000, 20 yılda da toplam 6.5 milyon konutun dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Kentsel dönüşüm kapsamına giren yapılar genellikle en düşük enerji performansı gösteren yapılar olduğundan dolayı bu yapıların yıkılıp yeniden yapılmasıyla zorunlu bir enerji tasarrufu sağlanmış olmaktadır. Zira mevcut binalar G sınıfına kadar EKB alabiliyorken, 2011'den itibaren inşa edilmiş olan yeni binaların minimum C sınıfı

EKB alması gerekmekte ve NSEB olarak inşa edilen binaların ise B sınıfı EKB alması gerekmektedir.

Bir binanın NSEB olabilmesi ancak hem yıllık enerji tüketiminin en az olmasıyla hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından yıllık enerji üretiminin en fazla olmasıyla sağlanabilmektedir. Bu kapsamda bu çalışma, NSEB (neredeyse sıfır enerjili bina) hedefinin gerçekleştirilmesinde ve nSEB (net sıfır enerjili bina) hedefine en yakın olan senaryonun seçilmesine yönelik olarak katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, bu lisansüstü çalışmasında NSEB hedefinin sağlanabilmesi amacına yönelik olarak, kentsel dönüşüm bölgesinde yer alan bir binanın hem yıllık enerji tüketimini minimize edilmeye çalışılmış hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilerek fosil yakıtlara olan bağıllık azaltılmaya çalışılmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda birçok faydasından dolayı BIM teknolojisi, araç olarak seçilmiş ve bu kapsamda BIM-BEM yarı otomatik entegrasyonu ile enerji simülasyonları gerçekleştirilerek optimum senaryonun daha projenin tasarım aşamasında belirlenmesi sağlanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş, şehir planlamada ve mimarlıkta diğer enerji kaynaklarına olan üstünlükleri sebebiyle binalarda ısıtma ve soğutma yüklerini azaltabilmekte ve yapma enerji gereksinimini minimum seviyeye indirebilmektedir. Ayrıca, BIM teknolojisinin sahip olduğu gelişmiş bilgi paylaşımı, gelişmiş üretkenlik, tüm yaşam döngüsü boyunca kullanım, çevresel analizler, artırılmış sürdürülebilirlik, nesne yönelimli modelleme gibi faydalar sebebiyle binalarda enerji verimliliğinin sağlanmasında BIM, anahtar bir rol oynamaktadır. BIM teknolojisi sayesinde yapının daha tasarım aşamasında yapı bilgi modeli üretilebilmekte ve enerji analizleri yapılabilmektedir. Yapılarda inşaat sonrasında enerji etkinliğinin artırılması ile ilgili müdahaleler çok fazla maddi kayıplara ve zaman israfına yol açmaktadır. Bunun yerine, doğru tasarım parametreleriyle üretilmiş pasif sistemler, binalarda enerji etkinliğinin artırılmasında önemli rol oynamaktadır.

Yapılarda ısıtma ve soğutma yükü birçok parametreye göre değişmekle beraber, güneş ışıınımı ve iklim koşulları ısıtma ve soğutma yükünü oldukça etkilemektedir. Bu nedenle, bina cephesinin güneş ışıınımından kışın faydalanacak, yazın ise korunacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Kentsel ölçekte enerji verimliliğinin sağlanabilmesi için kentsel planlama disiplini de bazı yöntemler geliştirilebilmektedir. Örneğin, BIM-BEM entegrasyonu ile en

uygun yönlendiriliş aksı belirlendikten sonra kentin ana strüktürünü oluşturan birincil ulaşım aksları bu hat doğrultusunda belirlenmelidir. Ek olarak ikincil ve üçüncül ulaşım akslarının, birincil ulaşım akslarına dik olarak çizilmesiyle bina yönlendiriliş durumuna paralel olan parseller elde edilebilmektedir. Bu sayede kentsel dönüşüm ve imar uygulamalarında parsellerin yeniden dağıtımı yapılırken parsel yönleri enerji verimliliği ilkesine uygun olarak belirlenmektedir. Böylece parsel içerisinde yeterli alan olmamasından kaynaklı sınırlamaların önüne geçilmiş olmakta ve binaların optimum yöne açılmaları kolaylaşmaktadır. Ayrıca, küçük çaplı kentsel dönüşüm projelerinde bina çekme mesafelerinden dolayı bina yönlendiriliş durumu değiştirilemiyorsa bile uygun yalıtım malzeme ve kalınlıklarıyla enerji verimliliği ile ilgili iyileştirmeler yapılabilmektedir.

Kentsel ölçekte çalışma yapılırken her bina için bu analizler kolayca tekrarlanabilmektedir. Fakat, enerji verimliliği açısından optimum yön, olaya bütüncül bakıldığında her zaman optimum yön olmayabilir. Örneğin, topografya ve doğal çevre enerji verimliliği yönünden optimum yöne yerleşmeye müsaade etmeyebilmektedir. Ayrıca binalar farklı açılarda yönlendirildiğinde yapıların birbirlerine göre konumları, çekme mesafelerini sağlayamayabilmekte ve bu şekilde yasal kısıtlamalar olabilmektedir. Bu yasal kısıtlamalar sebebiyle yapı adası içerisine daha az sayıda yapı yerleştirilebilmekte ve parsel alanından verimli şekilde faydalanılamayabilir. Bu durumun önlenmesi için, ada/parsel bazında uygulamaların yerine daha üst ölçekte tüm yapılar için enerji modellemesi yapılmalı ve tüm binalar için çevresine göre en uygun yön belirlenmelidir. Yani, kentsel planlama, kentsel dönüşüm ve imar uygulamalarında enerji planlamasının bir faktör olarak dikkate alınması gerekmektedir. Bunun gerçekleştirilmesi için en başta imar planlarının yapımında enerji konusunun dikkate alınmasında ve şehrin enerji bazlı yönlendirilerek imar planlarının çizilmesinde fayda vardır.

Öte yandan geomatik mühendisliği disiplininde de enerji kavramı artık önemli bir yere gelmelidir. Bu kapsamda, enerji kadastro kavramının bir an önce hayata geçirilmesi için ilgili çalışmalara bir an önce başlanmasında yarar görülmektedir. Enerji kadastro sayesinde yapıların enerji potansiyelleri belirlenip, bu verilerin ayrı bir öznitelik olarak tapu-kadastro veritabanı ile bütünleştirilmesi gerekmektedir. Bu şekilde, parsellerdeki enerji verimliliği potansiyeli ortaya çıkmış olacak ve hem

yenilenebilir enerji konusunda halkın bilinçlendirilmesi sağlanmış olacak hem de kamu yatırımları için yer seçiminin yapılması kolaylaşmış olacaktır.

Bunlara ek olarak taşınmaz değerlendirme ve şerefiyelendirme çalışmaları yapılırken, yapı içerisinde yer alan dairelerin tükettikleri enerji miktarlarının da bir kriter olarak alınmasında fayda vardır.

Ayrıca BIM konseptinin de öncelikle kamu binalarında olmak üzere tüm yapıların planlama-imalat-yönetim döngüsünde önemli bir karar mekanizması, süreç yöneticisi olarak kullanılması için yasal düzenlemeler yapılmalıdır. Bu konularda üniversitelerimizde özellikle lisansüstü düzeyde araştırmalar yapılarak konuya akademik bir bakış açısı kazandırmaya çalışmakta yarar görülmektedir.





KAYNAKLAR

- Açıl, Ş.** (2022). *Yapı Bilgi Modelleme Teknolojisi ile Sürdürülebilir Yapı Tasarımı*. (Yüksek Lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Akkoyunlu, T.** (2015). *Kentsel Dönüşüm Projeleri İçin BIM Uygulama Planı*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aksungur, K. M., Kurban, M., & Başaran Filik, Ü.** (t.y.). *Türkiye'nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi*. Erişim: 31 Ağustos, 2022, https://www.emo.org.tr/ekler/4e2e247969185c8_ek.pdf
- Allen Consulting Group.** (2010). *Productivity in the Buildings Network: Assessing the Impact of Building Information Models*. Sydney: Report to the Built Environment Innovation and Industry Council.
- American Institute of Architects (AIA).** (2013). *Level of Development Specification for Building Information Model*. Erişim adresi: <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2013/08/2013-LOD-Specification.pdf>
- Aouad, G., Lee, A., & Wu, S.** (2005). From 3D to nD modelling. *Journal of Information Technology in Construction*, 10, 15-16. Erişim adresi: <https://www.itcon.org/2005/2>
- Ashcraft, H.** (2008). Building information modeling: A framework for collaboration. *Construction Lawyer*, 28 (3), 1-14.
- ASHRAE Standard 55.** (2013). Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Ins., Atlanta
- Asl, M. R., Zarrinmehr, S., & Yan, W.** (2013). Towards BIM-based Parametric Building Energy Performance Optimization. *The Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)* (s. 24-27). Cambridge, Ontario, Canada: Proceedings of The Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA).
- Azhar, S.** (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252. doi:10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
- Badosa, J.** (t.y.). *Factors affecting solar radiation reaching the ground*. Coursera. Erişim adresi: <https://www.coursera.org/lecture/hydro-wind-solar-power-resources-variability-forecast/factors-affecting-solar-radiation-reaching-the-ground-3ZkXI>
- Barnes, P., & Davies, N.** (2014). *BIM in Principle and in Practice*. London: ICE Publishing.
- Bastos Porsani, G., Del Valle de Lersundi, K., Sánchez-Ostiz Gutiérrez, A., & Fernández Bandera, C.** (2021). Interoperability between Building

- Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM). *Applied Sciences*, 11(5). doi:10.3390/app11052167
- BCA (Building and Construction Authority).** (2012). *Building Smart - The BIM Issue*. Singapore: Building and Construction Authority.
- BEP-TR.** (2009). BEP-TR Teknik Raporu.
- Berköz, E.** (1973). Güneş Radyasyonu Etkisinin Optimizasyonu Açısından Binaların Yönlendiriliş Durumlarının Belirlenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi*. İstanbul: İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi.
- Berköz, E.** (1983). Güneş Işınımı ve Yapı Dizaynı. İstanbul: İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi.
- Bertin, I., Mesnil, R., Jaeger, J. M., Feraille, A., & Le Roy, R.** (2020). A BIM-Based Framework and Databank for Reusing Load-Bearing Structural Elements. *Sustainability*, 12 (8). doi:10.3390/su12083147
- Borrmann, A., Forster, C., Liebich, T., König, M., & Tulke, J.** (2021). Germany's Governmental BIM Initiative – The BIM4INFRA2020 Project Implementing the BIM Roadmap. E. T. Santos, & S. Scheer (Dü) içinde, *Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (s. 452-465). Springer. doi:10.1007/978-3-030-51295-8_31
- Bosurgi, G., Celauro, C., Pellegrino, O., Rustica, N., & Giuseppe, S.** (2020). The BIM (Building Information Modeling)-Based Approach for Road Pavement Maintenance. M. Pasetto, M. Partl, & G. Tebaldi (Dü) içinde, *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)* (s. 480--490). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-29779-4_47
- BP.** (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. Erişim adresi: <https://www.enerjiportali.com/bp-statistical-review-of-world-energy-2019/>
- Brown, K.** (2008). *BIM – Implications for Government*. Australia: CRC Construction Innovation.
- BuildingSMART Australiasia.** (2012). *National Building Information Modelling Initiative. Volume 1: strategy*. Melbourne: BuildingSMART.
- BuildingSMART UK.** (2010). *Constructing the Business Case, Building Information Modelling*. London.
- Buldurur, M.** (1983). *Kentsel Tasarımda Güneş Enerjisinden Optimum Yararlanma Konusunda Bir Araştırma ve İstanbul'da Çeşitli Uygulama Örnekleri*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Büyükmihci, M. K.** (2003). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Avrupa Birliği Ülkelerindeki Uygulamalar ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Tarafından Hazırlanmakta Olan Kanun Tasarısı Taslağı Çerçevesinde Planlanan Önlemler. *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu* (s. 15-22). Kayseri: TMMOB, 3-4 Ekim.
- CIBER (Centre for Interdisciplinary Built Environment Research).** (2012). *Research Report - Building Information Modelling (BIM): An Introduction and International Perspectives*. The University of Newcastle.
- Collares-Pereira, M., & Rabl, A.** (1979). The Average Distribution of Solar Radiation-Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values. *Solar Energy*, 22(2), 155-164. doi:10.1016/0038-092X(79)90100-2
- Construction Users Roundtable (CURT).** (2004). *Collaboration, Integrated Information, and the Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation*. United States.

- Cooper, P. I.** (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12, 333-346.
- CRC for Construction Innovation.** (2007). *Adopting BIM for Facilities Management: Solutions for Managing the Sydney Opera House*. Brisbane, Australia.
- CRC for Construction Innovation.** (2007). *Business Drivers for BIM*. Brisbane, Australia.
- Criminale, A., & Langar, S.** (2017). Challenges with BIM Implementation: A Review of Literature. *53rd ASC Annual International Conference* (s. 329-335). the Associated Schools of Construction.
- Çukurçayır, M. A., & Sağır, H.** (2008). Enerji Sorunu, Çevre ve Alternatif Enerji Kaynakları. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 257-279.
- David, O.** (2019). What is Building Information Modeling. *Building Information Modeling: The future of construction*. LetsBuild. Erişim: 25 Mart, 2022, <https://www.letsbuild.com/blog/bim-maturity-levels>
- Deng, S., Wang, R., & Dai, Y.** (2014). How to evaluate performance of net zero energy building – A literature research. *Energy*, 71, 1-16. doi:10.1016/j.energy.2014.05.007
- Deriş, N.** (1979). *Güneş Enerjisi: Sıcak Su ile Isıtma Tekniği*. İstanbul: Sermet Matbaası.
- Diaz, P.** (2016). Analysis of Benefits, Advantages and Challenges of Building Information Modelling in Construction Industry. *Journal of Advances in Civil Engineering*, 2, 1-11. doi:10.18831/djcivil.org/2016021001
- Doğan, H., & Yılankırkan, N.** (2015). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Projeksiyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji*, 3(1), 375-383.
- Dou, Y., & Bo, Q.** (2022). Characteristics and Dynamics of BIM Adoption in China: Social Network Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(6). doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002276
- Eastman, C.** (1999). *Building Product Models: Computer Environments, Supporting Design and Construction*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc.
- Eastman, C., & Henrion, M.** (1977). GLIDE: A language for design information systems. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 11, 24-33. doi:10.1145/563858.563863
- Eastman, C., & Siabiris, A.** (1995). A generic building product model incorporating building type information. *Automation in Construction*, 3(4), 283-304. doi:10.1016/0926-5805(94)00028-L
- Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., & Yessios, C.** (1974). *An outline of the building description system: Research report no. 50*. Pittsburgh: Carnegie-Mellon University.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K.** (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors* (2nd Edition). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Enerdata.** (2021). *Total Energy Consumption*. Enerdata World Energy & Climate Statistics- Yearbook 2021. Erişim adresi: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>
- Engineering News Record.** (2018). *Top 250 International Contractors*. Engineering News Record. Erişim adresi: <https://www.enr.com/toplists/2018-Top-250-International-Contractors-1>

- EPB Center.** (t.y). *The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. EPB Center. Erişim adresi: <https://epb.center/epb-standards/energy-performance-buildings-directive-epbd/#:~:text=The%20EPBD%20aims%20to%20promote,climate%20requirements%20and%20cost%2Deffectiveness>.
- Ezcan, V., Goulding, J. S., Kuruoglu, M., & Rahimian, F. P.** (2013). Perceptions and reality: revealing the BIM gap between the UK and Turkey. *Int J 3-D Inform Model*, 2(3), 1-15. doi:10.4018/ij3dim.2013070101
- Fu, F.** (2018). Chapter Six - Design and Analysis of Complex Structures. F. Feng içinde, *Design and Analysis of Tall and Complex Structures* (s. 177-211). Butterworth-Heinemann. doi:10.1016/B978-0-08-101018-1.00006-X
- Gan, V. J., Lo, I. M., Ma, J., Tse, K., Cheng, J. C., & Chan, C.** (2020). Simulation optimisation towards energy efficient green buildings: Current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120012. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120012
- Ge, L.** (2020). Green building design based on the concept of energy saving and environmental protection—Comment on “key technology of green building design and operation”. *Concr Cem Prod*, 8, 97.
- Gieling, W.** (1988). General AEC reference model (GARM) an aid for the integration of application specific product definition models. *Proc. CIB W74 + W78 Workshop*.
- Gigante, M.** (2019). *Building Energy Modeling: The Future of Sustainability*. G2. Erişim adresi: <https://www.g2.com/articles/building-energy-modeling-bem-sustainability>
- Giucastro, F.** (2017). Employment of BIM in Italy. Lights and Shadows on New Design Approach. *Organization, Technology and Management in Construction (OTMC) 2017 Conference*. Poreč, Croatia.
- Global Alliance for Building and Construction.** (2018). *2018 Global Status Report*. IEA & UN Environment. Erişim adresi: <https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018%20GlobalABC%20Global%20Status%20Report.pdf>
- GN Yapı.** (t.y.). *Enerji Kimlik Belgesi*. GN Yapı. Erişim adresi: <https://www.gnyapi.com.tr/enerji-kimlik-belgesi-nedir-nasil-alinir-gnyapi/>
- Goswami, D.** (2015). *Principles of Solar Engineering* (3rd ed. b.). CRC Press. doi:10.1201/b18119
- Granholm, L.** (2011). Finland, Norway, Singapore, USA Lead Progress in Construction, Industry Presentation, BIMsight. *Insight of Building Information Modelling*.
- Guo, K., Li, Q., Zhang, L., & Wu, X.** (2021). BIM-based green building evaluation and optimization: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128824. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128824
- Hedges, K. E.** (t.y.). How BIM May Approach the Counterfactual Scenario of Inadequate Interoperability. *University of Wyoming, United States*.
- İBB.** (2016). *CBS Akademi. Solar Enerji Potansiyeli Haritası*. Erişim adresi: <https://cbsakademi.ibb.istanbul/solar-enerji-potansiyeli-haritasi/>
- IEA.** (2020a). *IEA World Energy Statistics and Balances (database)*. IEA. Erişim adresi: www.iea.org/statistics
- IEA.** (2020b). *Energy Efficiency Indicators 2020 (database)*. International Energy Agency. Erişim adresi: www.iea.org/statistics
- International Energy Agency.** (2021). *Turkey 2021 Energy Policy Review*.

- IPCC. (2021). *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis - Summary for Policymakers*. Swiss: IPCC.
- Janda, K. (2011). Buildings don't use energy: People do. *Architectural Science Review*, 54(1), 15-22. doi:10.3763/asre.2009.0050
- Kalamees, T., Jylhä, K., Tietäväinen, T., Jokisalo, J., Ilomets, S., Hyvönen, R., & Saku, S. (2012). Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard. *Energy and Buildings*, 47, 53-60. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.031
- Khemlani, L. (2012). *Around the World With BIM*. AECbytes. Erişim adresi: <https://www.aecbytes.com/feature/2012/Global-BIM.html>
- Khosrowshahi, F., & Arayici, Y. (2012). Roadmap for implementation of BIM in the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19(6), 610 - 635. doi:10.1108/09699981211277531
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*. John Wiley & Sons.
- Koutsogiannis, A. (2019). Building Information Modeling: The future of construction. Erişim adresi: <https://www.letsbuild.com/blog/bim-maturity-levels>
- Krygiel, E., & Nies, B. (2008). Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling. *Wiley Publishing*, 25-52.
- Kurnitski, J., Allard, F., Braham, D., Goeders, G., Heiselberg, P., Jagemar, L., Kosonen, R., Lebrun, J., Mazzarella, L., Railio, J., Seppänen, O., Schmidt, M., Virta, M. (2011). How to define nearly net zero energy buildings nZEB. *REHVA Journal*, 6-12. Erişim adresi: <https://vbn.aau.dk/en/publications/how-to-define-nearly-net-zero-energy-buildings-nzeb-rehva-proposa>
- Kurum, M. (2019). 2023 'e Kadar 1,5 Milyon Konutun Dönüşümü Sağlanacak. Emlak8. Erişim adresi: <https://www.emlak8.net/detay/201-2023-e-kadar-15-milyon-konutun-donusumu-saglanacak>
- Latiffi, A. A., Brahim, J., Mohd, S., & Fathi, M. S. (2015). Building Information Modeling (BIM): Exploring Level of Development (LOD) in Construction Projects. *Applied Mechanics and Materials*, 773-774, 933-937. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.933
- Lee, A., Wu, S., Aouad, G., Cooper, R., & Tah, J. (2005). nD Modelling Roadmap: A Vision for nD-Enabled Construction. *University of Salford*. Erişim adresi: <http://usir.salford.ac.uk/id/eprint/35972/>
- Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B., Atasoy, G., & Kiziltas, S. (2011). Analysis of Modeling Effort and Impact of Different Levels of Detail in Building Information Models. *Automation in Construction*, 20(5), 601-609. doi:10.1016/j.autcon.2010.11.027
- Liu, Y., & Harris, D. (2008). Effects of shelterbelt trees on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland. *Applied Energy*, 85(2-3), 115-127. doi:10.1016/j.apenergy.2007.06.008
- Lorek, S. (2022). Trimble. What is BIM (Building Information Modeling). Erişim adresi: <https://constructible.trimble.com/construction-industry/what-is-bim-building-information-modeling>
- McGraw Hill Construction. (2007). *Interoperability in the Construction Industry*. New York, United States: SmartMarket Report.

- McGraw Hill Construction.** (2008). *Building Information Modelling (BIM): Transforming Design and Construction to Achieve Greater Industry Productivity*. New York, United States.
- McGraw Hill Construction.** (2009). *The Business Value of BIM: Getting Building Information Modeling to the Bottom Line*. United States: SmartMarket Report.
- McGraw Hill Construction.** (2014). *Smart Market Report: The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets: How Contractors Around the World are Driving Innovation with Building Information Modeling*. New York: McGraw Hill.
- McGraw-Hill Construction.** (2010). *Green BIM: How Building Information Modeling is Contributing to Green Design and Construction*. McGraw-Hill Construction Smart Market Report.
- Mineer, D.** (2015). *Pros & Cons of Using a BIM Model for your Next Project*. 04 05, 2022 tarihinde Construction Monitor. Erişim adresi: <https://www.constructionmonitor.com/blog/author/zerys/>
- Mourshed, M.** (2011). The impact of the projected changes in temperature on heating and cooling requirements in buildings in Dhaka, Bangladesh. *Applied Energy*, 88(11), 3737–3746. doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.024
- Narter & Partners.** (2021). *Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Türkiye'ye Etkileri*. Narter & Partners. Erişim adresi: <https://www.narterlaw.com/avrupa-yesil-mutabakatı-ve-türkiyeye-etkileri/#:~:text=AB'nin%202019%20y%C4%B1l%C4%B1nda%20kamuoyuna,karbon%2Dn%C3%B6l%20k%C4%B1ta%20haline%20getirmektedir.>
- Neufert, E.** (2018). *Neufert Yapı Tasarımı*. İstanbul: Beta Basım Yayım Dağıtım.
- NIST (National Institute of Standards and Technology).** (2004). *Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry*. Erişim adresi: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/gcr/2004/nist.gcr.04-867.pdf>
- Oduyemi, O., & Okoroh, M.** (2016). Building performance modelling for sustainable building design. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 461-469. doi:10.1016/j.ijbsbe.2016.05.004
- Ofluoglu, S.** (2014). Yapı Bilgi Modelleme : Gereksinim ve Birlikte Çalışabilirlik. *Mimarist*, 14, 10-12.
- Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., Morari, M.** (2012). Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 45, 15-27. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.022
- Osello, A.** (2012). The Future of Drawing with BIM for Engineers and Architects. *Computer Science*. Erişim adresi: <https://www.semanticscholar.org/paper/Il-futuro-del-disegno-con-il-BIM-per-Ingegneri-e-%2F-Osello/d2fdf357ed7c0cac0eb09c1070d48b9e4865cf5a>
- OTS Proje Müşavirlik.** (t.y.). *BIM (Yapı Bilgisi Modellemesi)*. OTS Proje. Erişim adresi: <https://www.otsproje.com.tr/tr/bim/>
- Ozorhon, B., & Karahan, U.** (2016). Critical Success Factors of Building Information Modeling Implementation. *Journal of Management in Engineering*, 33(3), 04016054. doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000505
- Özorhon, B.** (2018). *BIM (Yapı Bilgi Modellemesi)*. İstanbul: abaküs.
- Öztürk, H.** (2008). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Öztürk, M.** (2021). *AB ülkelerinin enerji verimliliği hedefleri*. Independent Türkçe. Erişim adresi:

<https://www.indyturk.com/node/398856/t%C3%BCrki%C3%87yeden-sesler/ab-%C3%BClkelerinin-enerji-verimlili%C4%9Fi-hedefleri>

- Papadopoulos, A., Theodosiou, T., & Karatzas, K.** (2002). Feasibility of energy saving renovation measures in urban buildings the impact of energy prices and the acceptable pay back time criterion. *Energy and Buildings*, 34(5), 455–466.
- Paul, S.** (2018). *BIM adoption around the world: how good are we?* geospatialworld.net. Erişim adresi: <https://www.geospatialworld.net/article/bim-adoption-around-the-world-how-good-are-we/#:~:text=As%20the%20mandate%20has%20come,on%2Dyear%20growth%20since%202014>.
- Pekeriçli, M., Sarı, R., & Tanyer, A.** (2017). Investigation of building information modeling maturity in Turkish architecture and engineering firms. 11. *Mimarlıkta Sayısal Tasarım Sempozyumu*, (s. 2014-227). Ankara.
- Penttilä, H.** (2006). Describing the changes in architectural information technology to understand design complexity and free-form architectural expression. *J. Inf. Technol. Constr.*, 11, 395-408.
- Prota Yazılım.** (2022). *Prota Yazılım*. BIM Nedir?: Erişim adresi: <https://www.protayazilim.com/bim-nedir>
- Qiu, Z., & Li, P.** (2019). Solar Energy Resource and Its Global Distribution. X. Zhao, & X. Ma içinde, *Advanced Energy Efficiency Technologies for Solar Heating, Cooling and Power Generation* (s. 1-30). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-17283-1_1
- Rathod, A. P., Mittal, P., & Kumar, B.** (2016). Analysis of factors affecting the solar radiation received by any region. *2016 International Conference on Emerging Trends in Communication Technologies (ETCT)*, (s. 1-4). doi:10.1109/ETCT.2016.7882980
- Reddy, K. P.** (2012). *BIM for Building Owners and Developers*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Reina, P., & Tulacz, G.** (2014). *ENR 2014 Top 250 International Contractors*. Engineering News Record (ENR) website. Erişim adresi: <https://www.enr.com/articles/1348-enrs-2014-top-international-contractors?v=preview>
- Resende, J., Monzon-Chavarrias, M., & Corvacho, H.** (2020). The applicability of nearly/net zero energy residential buildings in Brazil – A study of a low standard dwelling in three different Brazilian climate zones. *Indoor and Built Environment*, 30(10), 1693-1713. doi:10.1177/1420326X20961156
- Resmi Gazete.** (2012, 02 25). *Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2012-2023*. Resmi Gazete: Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/02/20120225-7.htm>
- Resmi Gazete.** (2022, 02 19). *Binalarda Enerji Performans Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik*. Resmi Gazete. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/02/20220219-2.htm>
- Robichaud, L. B., & Anantatmula, V. S.** (2011). Greening project management practices for sustainable construction. *Journal of management in engineering*, 27(1), 48-57.
- Sakin, M.** (2019). *Development of BIM Implementation Framework for Digital Construction in Turkey*. (PhD. Thesis). Hasan Kalyoncu University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gaziantep.

- Santos, E.** (2010). Building Information Modeling and Interoperability. *SIGraDi 2009 - Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*, (s. 436-438). Sao Paulo, Brazil.
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K.** (2012). Net zero energy buildings: a consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220-232. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.032
- Sinoh, S., Ibrahim, Z., Othman, F., & Muhammad, N.** (2020). Review of BIM literature and government initiatives to promote BIM in Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 943, 012057. doi:10.1088/1757-899X/943/1/012057
- Steers, S.** (2021). *Which countries are leading the adoption of BIM?* Construction Digital. Erişim adresi: <https://constructiondigital.com/digital-construction/which-countries-are-leading-adoption-bim>
- Succar, B.** (2009). Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders. *Automation in Construction*, 18, 357-375. doi: 10.1016/j.autcon.2008.10.003
- Succar, B.** (2015). *The BIM Framework Channel*. LinkedIn. Erişim adresi: <https://www.linkedin.com/pulse/bim-framework-channel-bilal-succar>
- SUCIFE.** (2007). *GSA; BIM guide for spatial program validation*. Stanford University Centre for Integrated Facility Engineering. Erişim adresi: http://www.gsa.gov/gsa/cm_attachments/GSA_DOCUMENT/BIM_Guide_Series_02_v0.96_R2C-a3-1_0Z5RDZ-i34K-pR.pdf
- Svetel, I., Pejanovic, M., & Ivanisevic, N.** (2011). Using Open Standards Based Building Information Modelling to Simulate Actual Design and Construction Processes. *Respecting Fragile Places: 29th eCAADe Conference Proceedings* (s. 421-429). Ljubljana, Slovenia: University of Ljubljana.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı.** (2019). On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023). Strateji ve Bütçe Başkanlığı.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.** (2021). *Bina Sektörü Enerji Verimliliği Teknoloji Atlası*. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.** (2022). Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. Resmi Gazete.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı.** (2022). *Fasıl 15: Enerji: AVRUPA BİRLİĞİ'NİN ENERJİ POLİTİKASI*. Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı. Erişim adresi: https://www.ab.gov.tr/fasil-15-enerji_80.html
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.** (2018). *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023*. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Erişim adresi: <https://enerji.enerji.gov.tr/Media/Dizin/EVCED/tr/EnerjiVerimlili%C4%9Fi/UlusalEnerjiVerimlili%C4%9FiEylemPlan%C4%B1/Belg>
- T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü.** (2022). *Türkiye Ortalama Güneşlenme Süresi (1991-2020)*. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı - Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Erişim adresi: <https://mgm.gov.tr/kurumci/turkiye-guneslenme-suresi.aspx>
- T.C. Ticaret Bakanlığı.** (2021). *Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021*. T.C. Ticaret Bakanlığı.

- Tobias, M.** (2021). *ny-engineers*. Benefits of Building Information Modeling. Erişim adresi: <https://www.ny-engineers.com/blog/benefits-of-building-information-modeling>
- Türkiye İnşaat Malzemesi Sanayicileri Derneği.** (2014). *Binalarda Enerji Verimliliği ve Finansmanı Raporu*. İstanbul: Türkiye İnşaat Malzemesi Sanayicileri Derneği (Türkiye İMSAD).
- TÜSİAD.** (2020). *Ekonomik Göstergeler Merceğinden Yeni İklim Rejimi*. TÜSİAD.
- Underwood, J., & Isikdag, U.** (2010). *Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies*. IGI Global.
- United Nations Environment Programme.** (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme .
- United Nations Statistics Division.** (2013). *National Accounts. GDP and its breakdown at current prices in National currency*. United Nations Statistics website. Erişim adresi: <http://unstats.un.org/unsd/snaama/dnllist.asp>
- U.S. Energy Information Administration.** (2019). *Natural gas*. U.S. Energy Information Administration. Erişim adresi: <https://www.eia.gov/naturalgas/data.php#exploration>
- Uyarel, Y., & Öz, E.** (1987). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F.** (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109-127. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023
- Wan, K., Li, D., Liu, D., & Lam, J.** (2011). Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates. *Building and Environment*, 46(1), 223-234. doi: 10.1016/j.buildenv.2010.07.016
- Watt Engineering Ltd.** (1978). *On the nature and distribution of solar radiation*. Cedaredge, Colo. (USA): U.S. Department of Energy Report. doi: 10.2172/6882716
- Weygant, R. S.** (2011). *BIM Content Development: Standards, Strategies, and Best Practices*. John Wiley & Sons.
- World Bank Group; ESMAP; Solargis.** (2022). *Global Solar Atlas*. Global Solar Atlas. Erişim adresi: <https://globalsolaratlas.info/download/world>
- World Green Building Council.** (t.y.). *What is green building?* World Green Building Council. Erişim adresi: <https://www.worldgbc.org/what-green-building>
- Yamamura, S., Fan, L., & Suzuki, Y.** (2017). Assessment of Urban Energy Performance through Integration of BIM and GIS for Smart City Planning. *Procedia Engineering*, Volume 180, Pages 1462-1472. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.309.
- Yiğit, A., & Atmaca, İ.** (2010). *Güneş Enerjisi*. Bursa: Alfa Aktüel Yayınları.
- Yıldırım, M.** (2022). *Yapı Bilgi Modelleme Sistemi ile Sürdürülebilir ve Enerji Tasarruflu Konut Tasarımı*. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yongwang, Z., Wanjiang, W., Zhe, W., Meng, G., Litong, Z., & Junkang, S.** (2021). Green building design based on solar energy utilization: Take a kindergarten competition design as an example. *Energy Reports*, 7, 1297-1307. doi:10.1016/j.egyr.2021.09.134.

- Yu, Z., Fung, B., Haghighata, F., Yoshinoc, H., & Morofskyd, E.** (2011). A systematic procedure to study the influence of occupant behaviour on building energy consumption. *Energy and Buildings*, 43(6), 1409-1417. doi:10.1016/j.enbuild.2011.02.002
- Yüksel, E.** (2020). *Binalarda Cephe Eğiminin Enerji Yükleri Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zuo, J., & Zhao, Z.-Y.** (2014). Green Building Research—Current Status and Future Agenda: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271-281. doi:10.1016/j.rser.2013.10.021
- Url-1** Dünya Bankası'ndan Türkiye'ye 400 milyon dolarlık kredi. (2021). *Habertürk*. <<https://www.haberturk.com/dunya-bankasi-ndan-turkiyeye-265-milyon-dolarlik-deprem-ve-enerji-finansmani-3099694-ekonomi>>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-2** CIBSE Republic of Ireland. *Facility Management: Operational Energy Efficiency and BIM Integration*. CIBSE Republic of Ireland. <<https://www.cibseireland.org/facility-management-operational-energy-efficiency-bim-integration/>>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-3** United BIM. *Leading Countries With BIM Adoption*. <<https://www.united-bim.com/leading-countries-with-bim-adoption/>>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-4** Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. *Paris Anlaşması*. <<https://iklim.csb.gov.tr/paris-anlasmasi-i-98587>>, erişim tarihi 10.04.2022.
- Url-5** T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. *Türkiye ve Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları*. Sürdürülebilir Kalkınma <<http://www.surdurulebilirkalkinma.gov.tr/>>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-6** European Comission. *Energy Performance of Buildings Directive*. <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-7** AECO. *Bina Enerji Modellemesi*. <<https://www.aeco.com.tr/hizmetler/enerji-modellemesi/#:~:text=Bina%20enerji%20modellemesi%2C%20%C3%A7e%C5%9Fitli%20bilgisayar,sertifikasyon%20sistemi%20i%C3%A7in%20%C3%B6n%20ko%C5%9Fuldur.>>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-8** IES. *Building Energy Modeling with IESVE*. <<https://www.iesve.com/software/building-energy-modeling>>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-9** Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. *About Building Energy Modeling*. <<http://www.energy.gov/eere/buildings/about-building-energy-modeling>>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-10** MyUV. *Seven factors affecting solar UV radiation*. <<https://www.myuv.com.au/workplaces/outdoor-worker-blog/seven-factors-affecting-solar-uv-radiation/>>, erişim tarihi 03.09.2022.
- Url-11** Master PS. *Master of Solar PV System*. Solar Basic <<https://masterpvsolar.com/solar-pv-system-terms/>>, erişim tarihi 03.09.2022.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Müberra Doldur

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği
- **Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlaması (%100 ing.)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Doldur, M., Alkan, R. M.** 2021. Proposing a BIM Based Model for Building Energy Optimization, *International Symposium on Applied Geoinformatics (ISAG 2021)*, December 2-3, 2021 Riga, Latvia. DOI: 10.15659/isag2021.12491.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Doldur, M., Alkan, R. M.** 2021. Nominal Değerleme Yöntemi ile CBS Destekli Taşınmaz Değer Haritalarının Oluşturulması: Avanos/Nevşehir Örneği, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri*, 21(4), 846-863. DOI: 10.35414/akufemubid.888502.