

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



**YAPI BİLGİ MODELLEME SİSTEMİ İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR
VE ENERJİ TASARRUFLU KONUT TASARIMI**

Muhammed YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi

MİMARLIK ANABİLİM DALI

Mimarlık Bilim Dalı

OCAK 2022

T.C.
Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Mimarlık Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

YAPI BİLGİ MODELLEME SİSTEMİ İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR VE ENERJİ TASARRUFLU KONUT TASARIMI

Tez Yazarı

Muhammed YILDIRIM

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hasan POLAT

OCAK 2022

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mimarlık Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Yapı Bilgi Modelleme Sistemi ile Sürdürülebilir ve Enerji Tasarruflu Konut Tasarımı
Yazarı:	Muhammed YILDIRIM
İlk Teslim	12.12.2021
Savunma	17.01.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Hasan POLAT Fırat Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi	<i>imza</i> Onayladım
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi Murat ŞAHİN Fırat Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Şefika ERGİN Dicle Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

imza

Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Yapı Bilgi Modelleme Sistemi ile Sürdürülebilir ve Enerji Tasarruflu Konut Tasarımı ” başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

17.01.2022

Muhammed YILDIRIM



ÖNSÖZ

Ekonomik kalkınma, hızlı nüfus artışı, şehirleşme ve gelişen teknoloji küresel enerji talebinin önemli bir oranda artmasına sebep olmuştur. Büyük bir kısmı yenilenemez enerji kaynakları tarafından karşılanan bu enerji talebinde binalar büyük bir pay sahibidir. Bina stokunun çoğunluğunu oluşturan mevcut konut yapılarının enerji performansının yenileme çalışmaları ile iyileştirilmesi inşaat sektörünün küresel enerji payının azaltılması doğrultusunda ciddi önem taşımaktadır. Yapı Bilgi Modelleme (BIM) teknolojisi, mevcut binaların enerji analizlerinin yapılmasına, alternatifler önerilmesine ve güçlendirme önlemlerinin enerji performansının tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, BIM'in mevcut binaların yenileme çalışmalarında etkinliğini araştırmak ve uygulanabilir güçlendirme teknikleri hakkında öneriler geliştirmek için literatür araştırması ve örnek bir konut özelinde uygulama çalışması yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen, yaptığım çalışma kapsamında yol gösterici olan ve beni yönlendiren saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Hasan Polat'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca desteklerini hiçbir zaman üzerimden eksik etmeyen babam Halil Yıldırım, annem Kudret Yıldırım ve ağabeyim Ramazan Yıldırım'a, canım ablalarım ve her zaman yanımda olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Muhammed YILDIRIM

Elazığ, 2022

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
EKLER LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR MİMARLIK.....	7
2.1 Enerji Krizi	7
2.2 Türkiye’de Enerji Kullanımı	11
2.3 Yapı Sektöründe Enerji Kullanımı	12
2.4 Sürdürülebilir Mimarlık	15
2.5 Binaların Enerji Performansını Etkileyen Parametreler	18
2.5.1 Bina Yönlendirilmesi	18
2.5.2 BinaKabuğu.....	19
2.5.3 Aydınlatma	24
2.5.4 Fotovoltaik Panel	24
3. YAPI BİLGİ MODELLEME SİSTEMİ - BİM.....	26
3.1 Mimarlıkta Bilgisayar Teknolojileri	26
3.2 BIM Nedir?	27
3.3 BIM / CAD Karşılaştırılması	30
3.4 Dünyada ve Türkiye’de BIM	32
3.5 BIM ve Sürdürülebilir Mimarlık	33
3.5.1 Mevcut Binalarda BIM Kullanımı.....	36
3.6 Bina Performans Analizi	36
3.6.1 BIM Yazılımları.....	38
3.6.2 Simülasyon Araçları.....	40
4. UYGULAMA ÇALIŞMASI.....	42
4.1 Mevcut Konut Bilgileri	42
4.2 Bina Modelinin Geliştirilmesi.....	45
4.3 Mevcut Konut Analiz Sonuçları	46
4.4 Bina Yönelimindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar	50
4.5 Bina Kabuğundaki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar	52
4.5.1 Duvar Malzemesindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar.....	52
4.5.2 Çatı Malzemesindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar.....	54
4.5.3 Isı Yalıtım Malzemesindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar.....	56

4.5.4	Pencere Cam Malzemesindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar	59
4.5.5	Cephe Saydamlık Oranındaki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar	61
4.6	Aydınlatmadaki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar	62
4.7	Fotovoltaik Panel Uygulaması ile Elde Edilen Sonuçlar	65
4.8	Tüm Alternatif Senaryoların Değerlendirilmesi ile Elde Edilen Sonuçlar	66
4.9	Optimum Alternatif Senaryo ile Mevcut Durumun Karşılaştırılması	67
4.10	Yenileme Çalışmalarının Ekonomik Uygulanabilirliklerinin Araştırılması	70
4.11	Geçerlilik Çalışması	72
5.	SONUÇLAR	74
	ÖNERİLER	77
	KAYNAKLAR	78
	EKLER	84
	ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Yapı Bilgi Modelleme Sistemi ile Sürdürülebilir ve Enerji Tasarruflu Konut Tasarımı

Muhammed YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mimarlık Anabilim Dalı

Ocak 2022, Sayfa: xiii + 95

Küresel ölçekte enerji talebi katlanarak artmaktadır ve bu enerji talebinin büyük çoğunluğu yenilenemez enerji kaynakları tarafından karşılanmaktadır. Binalar, dünya genelinde toplam enerji kullanımının %35'ini oluşturmaktadır. Yeni yapılacak binalar mevcut konut stokunun sadece %1'lik kısmını oluşturmaktadır. Dolayısıyla, mevcut binaların enerji performansının güçlendirme stratejileri ile yükseltilmesi küresel enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Yapı Bilgi Modelleme (BIM) teknolojisi, binaların yaşam döngüsünün tüm aşamalarında verimliliği ve etkinliği artırmak için kullanılan bir süreç ve buna karşılık gelen teknoloji olarak kabul edilir. BIM, mevcut binaların modellerini oluşturarak, alternatifler önererek, bu alternatifler için bina performansını analiz ederek ve karşılaştırarak güçlendirme önlemlerinin enerji performansını tahmin etmek için kullanılabilir.

Bu çalışmada, BIM'in mevcut binaların yenileme çalışmalarında etkinliğini araştırmak ve uygulanabilir ve optimize edilmiş güçlendirme teknikleri hakkında öneriler geliştirmek için örnek bir konut özelinde uygulama çalışması yapılmıştır. Hali hazırda kullanılan bir konutun enerji performansı Autodesk Revit ve Green Building Studio (GBS) entegrasyonu ile hesaplandıktan sonra binanın enerji performansını arttırmak için 8 parametre belirlenmiştir: bina yönlendirilmesi, bina kabuğu (duvar, çatı, ısı yalıtımı, pencere ve cephe saydamlık oranı), aydınlatma ve fotovoltaik panel.

Bu parametreler özelinde seçenekler geliştirilmiş, 192 alternatif senaryo oluşturulmuş ve enerji analizleri yapılmıştır. Son olarak, her parametre için belirlenen en uygun uygun senaryonun kullanılmasıyla oluşturulan alternatif bina ile mevcut bina arasında kıyaslama yapılmıştır. Ayrıca, güçlendirme çalışmalarının ilk yatırım maliyetleri ve binada sağladığı tasarruflar göz önüne alınarak yatırımların geri dönüş süreleri hesaplanmıştır. Sonuçlar; enerji tüketimi (yıllık / yaşam boyu) (yakıt ve elektrik), maliyet (yıllık / yaşam boyu), enerji kullanım yoğunluğu ve CO2 salınımı miktarına göre değerlendirilmiştir.

Mevcut durumda 465974 TL olan yaşam döngüsü enerji maliyeti, optimum alternatif senaryo için 186798 TL'dir. Yıllık yakıt tüketiminde %61, elektrik tüketiminde ise %64 tasarruf sağlanmıştır. Güçlendirme yöntemlerinin toplam maliyeti 275050 TL'dir. Güçlendirme çalışmalarının yatırım maliyeti ve sağladığı yıllık tasarruf göz önüne alınarak geri dönüş süresi yaklaşık 12 yıl olarak hesaplanmıştır.

Son olarak, GBS simülasyon aracından elde edilen bina enerji performans sonuçlarının doğruluğunu tespit etmek amacıyla, sonuçlar mevcut binanın gerçek enerji tüketim verileriyle karşılaştırılmıştır. GBS simülasyon sonuçlarının yakıt için gerçek veriler ile arasında %11 fark bulunması güvenilir sonuçlar sağladığını kanıtlarken, elektrik için %296 fark bulunması GBS'nin bu çalışma özelinde elektrik tüketimi / maliyeti hesabı için doğru sonuçlar vermediğinin göstergesidir.

Anahtar Kelimeler: Yapı bilgi modelleme, Sürdürülebilir mimarlık, Bina performans analizi, Enerji analizi, Bina güçlendirme, Revit, Green building studio

ABSTRACT

Sustainable and Energy Efficient Housing Design through Building Information Modelling

Muhammed YILDIRIM

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Architecture

January 2022, Pages: xiii + 95

Global energy demand is increasing exponentially, and the vast majority of this energy demand is met by non-renewable energy sources. Buildings account for 35% of total energy use worldwide. New buildings constitute only 1% of the existing housing stock. Therefore, upgrading the energy performance of existing buildings with retrofit strategies offers significant opportunities to reduce global energy consumption and greenhouse gas emissions.

Building Information Modeling (BIM) technology is considered a process and corresponding technology used to increase efficiency and effectiveness at all stages of the life cycle of buildings. BIM can be used to predict the energy performance of retrofit measures by creating models of existing buildings, suggesting alternatives, analyzing and comparing building performance for these alternatives.

In this study, a case study on a residential building was conducted to investigate the effectiveness of BIM in the renovation of existing buildings and to develop suggestions about applicable and optimized retrofitting techniques. After calculating the energy performance of an existing house with the integration of Autodesk Revit and Green Building Studio (GBS), 8 parameters were determined to increase the energy performance of the building: building orientation, building envelope (wall, roof, thermal insulation, window and facade transparency ratio), lighting and photovoltaic panel.

Options were developed for these parameters, 192 alternative scenarios were created and energy analyzes were made. Finally, a comparison was made between the alternative building, which was created by using the most suitable scenario determined for each parameter, and the existing building. In addition, the initial investment costs of the retrofitting works and the savings in the building were taken into account, and the return on investments were calculated. Results were evaluated according to energy consumption (annual / lifecycle) (fuel and electricity), cost (annual / lifecycle), energy use intensity and CO₂ emissions.

Life cycle energy cost, which is currently 465974 TL, is 186798 TL for the optimum alternative scenario. 61% savings in annual fuel consumption and 64% in electricity consumption were achieved. The total cost of the retrofitting methods is 275050 TL. Considering the investment cost of the retrofit works and the annual savings it provides, the payback period has been calculated as approximately 12 years.

Finally, in order to determine the accuracy of the building energy performance results obtained from the GBS simulation tool, the results are compared with the actual energy consumption data of the existing building. While the 11% difference between the GBS simulation results and the real data for fuel proves to provide reliable results, the 296% difference for electricity is an indication that GBS does not give accurate results for electricity consumption / cost calculation in this study.

Keywords: Building information modelling, Sustainable architecture, Building performance analysis, Energy analysis, Building retrofitting, Revit, Green building studio

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması	7
Şekil 2.2. Dünya enerji tüketimi	8
Şekil 2.3. Küresel birincil enerji payları	9
Şekil 2.4. 1990-2021 yılları arası enerji kaynaklı küresel CO2 emisyonları ve yakıtlara göre dağılımı	10
Şekil 2.5. 2000-2019 yılları arası kaynak dağılımına göre toplam birincil enerji tüketimi	11
Şekil 2.6. 2000-2019 yılları arası kaynak dağılımına göre enerji üretimi.....	12
Şekil 2.7. 2019 yılı binaların ve inşaat sektörünün enerji tüketiminin ve emisyonlarının küresel payı.....	12
Şekil 2.8. 2000-2018 yılları arası konutların enerji tüketiminin ve emisyonlarının küresel payı	13
Şekil 2.9. 2010-2019 yılları arası inşaat sektörünün enerji tüketiminin yakıt türüne göre dağılımı	14
Şekil 2.10. 2010-2019 yılları arası inşaat sektöründe enerji kullanımının bina tipine göre dağılımı.....	14
Şekil 2.11. Allianz Tower.....	17
Şekil 2.12. Bina yöneliminin şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.13. Çok ve tek katlı yapıların ısı kayıp oranları	20
Şekil 2.14. Tuğla vs bims blok	20
Şekil 2.15. Enerji verimli çatı kaplama seçenekleri.....	21
Şekil 2.16. Çift camda Low-e kaplamalı camın ısı yalıtım davranışı	23
Şekil 2.17. Fotovoltaik sistemin görünümü	25
Şekil 3.1. Bilgisayar destekli tasarım araçlarının performans - gelişmişlik güzeylerinin grafiksel gösterimi	27
Şekil 3.2. Bina yaşam döngüsü boyunca BIM uygulaması	28
Şekil 3.3. BIM’de farklı disiplinlerin birlikte çalışabilirliğinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.4. BIM ve 2D CAD ile projelerin gelişim süreçlerinin karşılaştırılmaları	30
Şekil 3.5. BIM ve CAD karşılaştırılması.....	31
Şekil 3.6. BIM ortamında analiz alanları.....	33
Şekil 3.7. BIM solar ışıınım analizi	34
Şekil 3.8. Yeşil binaların BIM destekli yaşam döngüleri	34
Şekil 3.9. Yeşil BIM taksonomisi.....	35
Şekil 3.10. BPA ana yapısı	37
Şekil 3.11. BIM yazılımlarının ve bina simülasyon araçlarının entegrasyonu	38
Şekil 3.12. BPA için BIM yazılımları kullanımı	38
Şekil 3.13. Revit arayüzü.....	39
Şekil 3.14. BPA için simülasyon araçları kullanımı	40
Şekil 3.15. BPA için simülasyon araçlarının değerlendirme puanları	40
Şekil 3.16. GBS arayüzü	41
Şekil 3.17. Revit ve GBS çalışma şeması.....	41
Şekil 4.1. Çalışma akış şeması	42
Şekil 4.2. Mevcut konuta ait görseller	43

Şekil 4.3. Kovancılar / Elazığ aylık sıcaklık verileri	44
Şekil 4.4. Örnek konuta ait kat planları	45
Şekil 4.5. Örnek konuta ait kesit, 3D model ve render görsel	46
Şekil 4.6. Bina enerji analitik modeli	47
Şekil 4.7. Revit enerji ayarları	47
Şekil 4.8. GBS yeni proje oluşturma ayarları	48
Şekil 4.9. Mevcut konut yakıt kullanımı	49
Şekil 4.10. Mevcut konut elektrik kullanımı	49
Şekil 4.11. Bina yönelimlerine göre yıllık yakıt tüketimi	51
Şekil 4.12. Bina yönelimlerine göre yıllık enerji maliyeti	51
Şekil 4.13. Mevcut bina dış ve iç duvar kesiti	52
Şekil 4.14. Duvar malzemelerine göre yıllık yakıt tüketimi	54
Şekil 4.15. Duvar malzemelerine göre yıllık enerji maliyeti	54
Şekil 4.16. Çatı malzemelerine göre yıllık yakıt tüketimi	56
Şekil 4.17. Çatı malzemelerine göre yıllık enerji maliyeti	56
Şekil 4.18. Isı yalıtım malzemelerine göre yıllık yakıt tüketimi	58
Şekil 4.19. Isı yalıtım malzemelerine göre yıllık enerji maliyeti	58
Şekil 4.20. Cam malzemelerine göre yıllık yakıt tüketimi	60
Şekil 4.21. Cam malzemelerine göre yıllık enerji tüketimi	60
Şekil 4.22. Cephe saydamlık oranlarına göre yıllık yakıt tüketimi	61
Şekil 4.23. Cephe saydamlık oranlarına göre yıllık enerji tüketimi	62
Şekil 4.24. Aydınlatma sistemi LPD değerine göre yıllık elektrik tüketimi	64
Şekil 4.25. Aydınlatma sistemi LPD değerine göre yıllık enerji maliyeti	64
Şekil 4.26. Fotovoltaik panel analizi	65
Şekil 4.27. Fotovoltaik panel bulunma durumuna göre yıllık elektrik tüketimi	65
Şekil 4.28. Fotovoltaik panel bulunma durumuna göre yıllık enerji maliyeti	66
Şekil 4.29. Mevcut binanın, tüm parametrelerin ve oluşturulan alternatif senaryonun yıllık yakıt tüketimi	69
Şekil 4.30. Mevcut binanın, tüm parametrelerin ve oluşturulan alternatif senaryonun yıllık elektrik tüketimi	69
Şekil 4.31. Mevcut binanın, tüm parametrelerin ve oluşturulan alternatif senaryonun yıllık enerji maliyeti	70

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. 2019 yılı binaların enerji kullanımının aşamalara göre dağılımı	13
Tablo 2.2. Yeşil binalarda temel tasarım hedefleri ve ilkeleri	16
Tablo 2.3. Bina enerji performansını etkileyen tasarım parametreleri	18
Tablo 4.1. Bina bileşenlerinin ısı geçirgenlik katsayıları	44
Tablo 4.2. Kullanılan ölçü birimleri	49
Tablo 4.3. Mevcut konut enerji analiz verileri	50
Tablo 4.4. Bina yönelimlerine göre enerji analiz sonuçları	50
Tablo 4.5. Duvar malzemelerine göre bina dış ve iç duvarlarına ait U değerleri	53
Tablo 4.6. Duvar malzemelerine göre enerji analiz sonuçları	53
Tablo 4.7. Çatı kaplama malzemelerine göre çatı U değerleri	55
Tablo 4.8. Çatı kaplama malzemelerine göre enerji analiz sonuçları	55
Tablo 4.9. Isı yalıtım malzemelerine göre duvar U değerleri	57
Tablo 4.10. Isı yalıtım malzemelerine göre enerji analiz sonuçları	57
Tablo 4.11. Cam malzemelerine göre pencere U ve SHGC değerleri	59
Tablo 4.12. Cam malzemelerine göre enerji analiz sonuçları	59
Tablo 4.13. Cephe saydamlık oranına göre enerji analiz sonuçları	61
Tablo 4.14. Aydınlatma sistemi LPD değerine göre enerji analiz sonuçları	63
Tablo 4.15. 4 parametre için geliştirilen toplam 17 senaryo	66
Tablo 4.16. Mevcut binanın, tüm parametrelerin ve oluşturulan alternatif senaryonun enerji analiz sonuçları	68
Tablo 4.17. Seçilen yenileme çalışmalarının miktarı, malzeme + işçilik fiyatı ve toplam maliyeti	70
Tablo 4.18. GBS ile gerçek enerji tüketim verilerinin karşılaştırılması	72

EKLER LİSTESİ

	Sayfa
Ek- 1: 192 senaryonun detayları	84
Ek- 2: 192 senaryo için bina enerji performans sonuçları.....	90



SİMGELER VE KISALTMALAR

Kisaltmalar

BIM	: Building Information Modelling – Yapı Bilgi Modelleme
CAD	: Computer Aided Design – Bilgisayar Destekli Tasarım
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
AEC	: Architecture, Engineering and Construction – Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat
BPA	: Building Performance Analysis – Bina Performans Analizi
GBS	: Green Building Studio
U	: Isı Geçirgenlik Katsayısı
SHGC	: Solar Heat Gain Coefficient – Solar Isı Kazanç Katsayısı
Low-E	: Low Emissivity
LPD	: Lighting Power Density – Aydınlatma Gücü Yoğunluğu
HVAC	: Heating, Ventilation and Air Conditioning – Isıtma, Havalandırma ve Klima
XPS	: Extruded Polystyrene - Ekstrüde Polistiren Köpük
EPS	: Expanded Polystyrene - Ekspande Polistiren Köpük
YF	: Yüzde Farkı
gbXML	: Green Building Xtensible Markup Language
CO2	: Carbon dioxide – Karbondioksit
2D	: İki Boyutlu
3D	: Üç Boyutlu
MJ	: Megajoule
kWh	: Kilowatt Saat
Mg	: Miligram

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, dünyadaki enerji kullanımının ve ilgili sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmından sorumludur. Binalar, dünya genelinde enerji kullanımının %35'ini ve enerjiyle ilgili CO2 emisyonlarının %38'ini oluşturmaktadır. Küresel ısınmayı ve etkilerini önlemek için enerji performansı yüksek ve çevre dostu sürdürülebilir yapıların üretimi kaçınılmazdır. Günümüzde, yeni binalar toplam bina stokunun sadece küçük bir kısmını oluşturur. Dolayısıyla, mevcut binaların enerji tüketiminin uygun güçlendirme yöntemleri ile azaltılması inşaat sektörünün küresel enerji payının düşürülmesi için büyük bir potansiyel sunmaktadır.

“Binaların fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinin yaşam döngüsü boyunca dijital gösterimi” olarak tanımlanan BIM teknolojisi, mevcut binaların güçlendirme çalışmaları için bir fırsat sunmaktadır. BIM yazılımlarında oluşturulabilen zengin, nesne yönelimli, akıllı ve parametrik bina modelleri, yardımcı simülasyon araçlarının desteğiyle mevcut binaların modellerinin oluşturulabilmesine, enerji analizlerinin yapılabilmesine, geliştirilen alternatif senaryoların enerji performanslarının test edilebilmesine ve mevcut sonuçlar ile karşılaştırmalar yapılabilmesine olanak tanımaktadır.

Bu tezde, BIM metodolojisinin mevcut binaların yenileme çalışmalarında uygulanabilirliğini ve verimliliğini araştırmak ve uygun güçlendirme önerileri geliştirmek için hali hazırda kullanılan bir konut özelinde uygulama çalışması yapılmıştır. Örnek binanın modellenmesi için Revit kullanılırken, mevcut konutun ve alternatif senaryoların enerji analizleri için GBS kullanılmıştır. Sonuçlar; yıllık yakıt tüketimi, yıllık elektrik tüketimi, maliyet (yıllık / yaşam boyu) , enerji kullanım yoğunluğu ve CO2 salınımı miktarına göre değerlendirilmiştir.

Literatür taraması sonucu belirlenen güçlendirme yöntemleri için 8 parametre özelinde alternatif seçenekler oluşturulmuştur. Bunlar; bina yönlendirilmesi, bina kabuğu (duvar, çatı, ısı yalıtımı, pencere ve cephe saydamlık oranı), aydınlatma ve fotovoltaiik paneldir. Her parametre için tüm seçeneklerin enerji performansı test edilmiş ve en uygun senaryo belirlenmiştir. Ayrıca, optimum alternatif senaryonun doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için 4 parametre özelinde geliştirilen toplam 17 senaryonun farklı kombinasyonları sonucu ortaya çıkan 192 alternatif senaryonun binanın enerji performansına etkisi test edilmiştir. Son olarak, belirlenen en uygun senaryoların uygulanmasıyla oluşturulan alternatif bina ile mevcut binanın enerji performansları belirlenen kategoriler altına karşılaştırılmıştır. Ayrıca, güçlendirme yöntemlerinin ekonomik olarak uygulanabilirliklerini test etmek amacıyla ilk yatırım maliyetleri ve tasarruflar göz önüne alınarak yatırımların geri dönüş süreleri hesaplanmıştır.

Literatürde, binaların hem erken tasarım hem de yenileme aşamalarında BIM teknolojisi kullanımı yoluyla performans iyileştirmesini konu edinmiş birçok çalışma mevcuttur. [1], bina yöneliminin üç katlı bir konutun enerji tüketimi üzerindeki etkisini araştırmıştır ve ayrıca BIM'in

bu süreci kolaylaştırmak için nasıl kullanılabileceğini değerlendirmiştir. BIM aracı olarak Revit, enerji simülasyon yazılımı olarak ise GBS kullanılmıştır. Uygulama çalışması sonucunda iyi yönlendirilmiş bir binanın yaşam döngüsü boyunca önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayabileceği ortaya çıkmıştır (elektrik, yakıt, maliyet).

[2]'de bir villanın performansı enerji kullanım yoğunluğu, yaşam döngüsü enerji kullanımı/maliyeti, yıllık karbon emisyonları, aylık ısıtma ve soğutma yükleri, aylık elektrik ve yakıt tüketimi gibi çeşitli parametreler dahilinde Autodesk Revit kullanılarak analiz edilmiştir. Mevcut binanın duvar, çatı, döşeme ve pencerelerinde yeşil malzemeler kullanılarak alternatif bir yeşil bina oluşturulmuştur ve performansı geleneksel bina ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak binanın enerji performansında ilgili parametreler özelinde kayda değer bir artış olduğu gözlenmiştir. Ayrıca BIM'in daha erken karar alma ve hataların düzeltilmesi ile inşaat sektöründe sürdürülebilirliğin sağlanmasında etkili olduğu kanıtlanmıştır.

[3], BIM kullanarak pasif soğutma tekniklerinin uygulanmasının etkinliğini araştırmakta ve mevcut binalar için uygulanabilir ve optimize edilmiş güçlendirme teknikleri konusunda öneriler geliştirmeye odaklanmaktadır. Ayrıca, enerji yenilemesinin nicel sonuçlarına dayanarak ilk yatırım ile geri dönüşler arasında ekonomik bir karşılaştırma sağlamıştır. Üniversite binasının yıllık enerji tüketimini simüle etmek için Autodesk Ecotect kullanılmıştır. Isı yalıtımı uygulaması, enerji verimli aydınlatma uygulaması, cephe saydamlık oranı değişimi ve tek camlı pencerelerin çift camlı olarak değiştirilmesi değerlendirilen güçlendirme teknikleridir. Sonuçlar, bina 3 yıl 2 aylık hesaplanmış geri ödeme süresi ile pasif soğutma teknikleri içerdiğinde seçilen binanın yıllık enerji tüketiminin %35'e kadar azaltılabileceğini göstermiştir.

[4], bazı parametrelerin (bina yönelimi, cephe saydamlık oranı ve pencere camı tipi) binaların elektrik enerjisi performansı ve elektrik enerjisi maliyeti üzerindeki etkisini, BIM araçlarının su kullanım analizindeki rolünü ve verimliliğini ve BIM araçlarının doğal havalandırmayı iyileştirmek için sağladığı fırsatları araştırmıştır. Bir üniversite binası üzerinde Revit ve GBS kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar, pencere cam tipi modifikasyonu ile en fazla enerji / maliyet tasarrufunun yapılabileceğini göstermiştir. Ayrıca bina yöneliminin elektrik tüketimini azaltmada cephe saydamlık oranından daha etkili bir parametre olduğu gösterilmiştir. GBS'nin binalarda doğal havalandırmayı geliştirmek ve su kullanımını hesaplamak için efektif bir araç olduğu ve armatürlerin verimliliğinin arttırılması ile su kullanımında %17 tasarruf yapılabileceği belirtilmiştir.

[5], pencerelerin boyutunun, konumunun ve yönünün bina enerji yükü üzerindeki etkisini iki katlı bir konut özelinde 65 farklı senaryo oluşturarak analiz etmiştir. Modelleme aracı olarak Revit, simülasyon aracı olarak ise GBS kullanılmıştır. İlk aşama sonuçları, cephe saydamlık oranı arttığında toplam enerji yükünün arttığını ve 20 olduğunda pencerelerin konumunun toplam enerji yükü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. İkinci aşama sonuçları ise, pencerelerin

tüm yönlerde orta yükseklikte yer aldığı binanın en düşük yükü gerektirdiğini ve doğu pencerelerinin konumlandırılmasının toplam enerji yükünü en çok etkilediğini göstermiştir.

[6], Suudi Arabistan'ın doğu eyaletindeki mevcut evlerin yenilenmesinin tekno-ekonomik uygulanabilirliğini incelemektedir. Çalışmada BIM temelli bir güçlendirme çerçevesi kabul edilmiş ve iki vaka çalışması üzerinde incelenmiştir. Çalışmada 8 güçlendirme parametresi üzerinde analizler yapılarak üç seviyeli bir enerji güçlendirme planı önerilmiştir: enerji tasarruflu cihazlar, enerji verimli ışıklar, pencere gölgelendirmesi, cam tipi iyileştirilmesi, hava sızdırmazlığı arttırımı, daha verimli klima sistemi, ve bina kabuğu yalıtımı. Sonuçlar, bir villada yıllık enerji tüketiminin sırasıyla 1., 2. ve 3. seviye güçlendirme ile %13.79, %19.27 ve %56.9, apartmanda ise %22.84, %28.85 ve %58.5 oranında azaldığını göstermektedir. Güçlendirmelerin ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmek için geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Villa için 1., 2. ve 3. seviye güçlendirme yatırımı sırasıyla 0.92, 8.37 ve 25.15 yıl içinde geri ödeme yapacakken, apartman için geri ödeme süresi sırasıyla 0.60, 11.28 ve 24.60 yıldır.

[7], 1999'dan 2016'ya kadar yayınlanan yüzlerce dergi makalesinin ve yaygın olarak kullanılan 12 BIM yazılımının derinlemesine incelenmesinden sonra, sistematik olarak “yeşil BIM üçgeni” olarak adlandırılan BIM ve yeşil binalar arasındaki bağın bütünsel bir anlayışını ve eleştirel yansımaları sunmaktadır. Çalışma, BIM ve yeşil binalar arasındaki bağın proje aşamaları, yeşil nitelikler ve BIM nitelikleri olmak üzere üç boyuta göre anlaşılması gerektiğini ileri sürmektedir. Bu makale 3 bölüme ayrılmıştır: 1) yeşil binaların tasarım, inşaat, işletme ve güçlendirme süreçlerinin desteklenmesinde BIM kullanımı; 2) enerji, emisyon ve havalandırma analizi gibi yeşil bina analizleri için BIM'in çeşitli fonksiyonları; 3) yeşil bina değerlendirme sistemlerini desteklemek için BIM kullanımı. Hem akademik araştırmalardan hem de endüstriyel uygulamalardan elde edilen kanıtlara dayalı olarak BIM ve yeşil binaların eleştirel incelemesi ve sentezi yoluyla bu makale, bina araştırmacıları ve uygulayıcılarına gelecekte BIM gelişimini yeşil bina geliştirme ile daha iyi uyumlu hale getirmek için önemli bir rehberlik sağlamaktadır.

[8], BIM araçlarının enerji tasarruflu binalar elde etmek ve konut dışı binalarda sürdürülebilirlik kriterlerine ulaşmak için yenileme projelerinde kullanılmasını incelemektedir. Sürdürülebilir tasarım alanındaki mevcut literatür ve BIM sürdürülebilirlik karar destek araçlarının bu konudaki ilgili etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu araştırma ayrıca, yenileme projeleri için BREEAM ve LEED gibi yeşil bina sertifikasyonlarının sağlanmasına yardımcı olmak için şu anda kullanılan mevcut sürdürülebilirlik karar destek araçlarının pratikliğini de gözden geçirmektedir.

[9]'da KKTC'deki mevcut konutların enerji performansını optimize etmeye yönelik uygulanabilir güçlendirme stratejileri geliştirilmiş ve test edilmiştir. Çalışma ilk olarak bir binanın güçlendirme aşamalarından önceki ve sonraki enerji performansını incelemektedir. Enerji verimli güçlendirme önlemlerinin simülasyonu için Autodesk Revit ve Green Building Studio

kullanılmıştır. Bu araştırma, sürdürülebilir tasarım optimizasyonu için gerçek piyasa verileri kullanarak belirli araçlar ve güçlendirme stratejilerinin benimsenmesini sağlar ve böylece tasarımcıların, müteahhitlerin, tedarikçilerin, mal sahiplerinin ve araştırmacıların bina verimliliğini artırmak için hem etkili hem de uygulanabilir güçlendirme seçenekleri belirlemesine olanak sağlar.

[10], literatürün eleştirel bir incelemesi yoluyla, BIM ve sürdürülebilirlik kapsamında ele alınan alanları açıklamaktadır. Bu çalışmanın amacı, iki konu arasındaki bağlantıyı ve örtüşmeyi ve BIM'in mevcut binalarda enerji tüketimini azaltmak için sunduğu platformu incelemektir. Son olarak, enerji verimli yenilemelerde BIM'in rolünün artırılmasına ilişkin enerji simülasyonları öncesi modelleme aşaması, simülasyon aşaması ve yenileme aşamalarını kapsayan bir yol haritası önermiştir.

[11], binaların enerji tüketimini azaltmak ve genel performansını iyileştirmek için temel seçeneklerden biri olan çatı yenilemesini araştırmaktadır. Bina enerji güçlendirme çalışmaları için bina kabuğunda yapılan modifikasyonlar yaygındır ancak bu makale mevcut bir binanın çatısı için önerilen bir güçlendirme senaryolarını test etmektedir. Araştırma, bir simülasyon metodolojisi kullanarak, önerilen güçlendirme konseptinin, üretilen elektrik ve dış iletim kazancını değerlendirme ölçütleri olarak kullanarak enerji performansının nasıl geliştirdiğini göstermektedir. Önerilen yeni çatı konsepti (dışarıdan içeriye doğru) oluşan üç katmanlı bir sistemi içerir: bir PV paneli, bir EPDM membranı ve bir yalıtım tabakası. Bu çalışmanın temel amacı, eski bir binayı su geçirmez ve enerji üreten bir sisteme dönüştürmenin uygulanabilirliğini gösteren yenilikçi bir çatı çözümü için bir konsept geliştirmektir.

[12]'nin amacı BIM, enerji analizi ve maliyet tahmini araçlarını yeşil bina sertifikasyon sistemine bağlayan entegre bir yöntem önermektir. Önerilen yöntemin başarılı bir şekilde geliştirilmesi, bina sahiplerinin ve tasarımcıların sürdürülebilirlik kısıtlamalarını göz önünde bulundurarak farklı tasarım alternatiflerini verimli ve zamanında değerlendirmelerine yardımcı olur. Ayrıca, kullanıcılar seçilen sertifika sistemine göre kazanılabilecek potansiyel LEED puanlarını belirleyebilirler. Yazarlar, kullanıcıların kavramsal tasarım sırasında LCA, enerji analizi, LEED ve maliyet tahminini değerlendirebilmeleri için tüm entegrasyon sürecini otomatikleştirmeyi amaçlamışlardır, ancak bazı prosedürler kullanıcıların manuel girdiler yapmasını gerektirdiğinden dolayı yöntem kısmen otomatik hale getirilmiştir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini ve kabiliyetini göstermek için gerçek bir bina projesi özelinde analizler yapılmıştır.

[13]'e göre düşük enerjili binaların üretimi için BIM bünyesinde bina enerji simülasyonlarının uygulanması konusunda artan bir talep vardır. Bununla birlikte, BIM ve simülasyon araçları arasında veri alışverişi ve birlikte çalışabilirlik açısından bazı zorluklar vardır. Bu makale Autodesk Revit ve Design Builder adlı iki yazılımın enerji modeli doğruluğunu incelemiştir. Kahire, İskenderiye ve Asyut dahil olmak üzere üç farklı lokasyondaki üç tipik konut binasının elektrik tüketimi analiz edilmiş ve gerçek ölçülen tüketim verileriyle karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar, simüle edilmiş bina enerji performansı verileri ile ölçülen veriler arasında karşılaştırmalar yapılabileceğini, ancak sonuçların model içindeki insan davranış kalıplarına bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Ayrıca, sonuçlar Design Builder’da simüle edilmiş verilerin elektrik tüketimi özelinde Revit’e göre gerçek verilere daha yakın olduğunu, ancak her iki programın verilerinin de gerçek verilere çok yakın olduğunu göstermiştir.

[14]’ün amaçları (a) yapıları çevrede sürdürülebilir kalkınmaya ilişkin BIM’in durumunu ve gelişimini 44 BIM yönergesine ve standardına dayalı olarak gözden geçirmek (bu çalışma yönergeleri ve standartları yedi sürdürülebilirlik alanına ayırmıştır) ve (b) sürdürülebilir kalkınmada BIM’i destekleyen ve teşvik eden geleceğe bakış çerçevesi geliştirmektir. Bu çalışma, öncelikle proje geliştirme, tasarım ve inşaat gibi belirli sürdürülebilirlik alanlarına odaklanarak BIM’in sürdürülebilir kalkınmada kullanımını incelemektedir. Geliştirilen çerçeve, sürdürülebilir kalkınma amaçlı BIM’in gelecekte benimsenmesi ve kullanılması için birden fazla disiplinle işbirliğine duyulan ihtiyacı açıklamaktadır. Ayrıca, mevcut standartların ve kılavuzların eksikliklerini gidermek için ‘BIM ve yeşil değerlendirme kriterleri’ ile ‘BIM ve yenilenebilir enerji’ arasındaki entegrasyonu da dikkate almaktadır.

[15], işletim aşamasında daha az enerji gerektiren, daha az CO2 yayan ve aynı zamanda kullanıcıları için rahat bir yaşam ortamı sağlayan binaların teslim edilmesinde BIM’in kullanımını araştırmaktadır. Bu kapsamda (1) bina enerji tüketimi, (2) bina enerji performansı ve analizi ve (3) BIM ve enerji değerlendirmesi konularını kapsayan eleştirel ve kapsamlı bir literatür incelemesi yapılmıştır. Literatür araştırması bir enerji analiz aracını bir BIM modeliyle ilişkilendirmenin, proje tasarım ekiplerinin optimize edilmiş enerji tüketimini tahmin etmesine ve oluşturmaya yardımcı olduğunu göstermiştir. Bu bulguyu doğrulamak için Dominik Cumhuriyeti’nde BIM entegre bir şekilde inşa edilen Arboleda Projesi üzerinde derinlemesine bir analiz yapılmıştır. Sonuçlar, BIM tabanlı enerji analizinin tasarım ekibinin dünyanın ilk %103 pozitif enerji binasına ulaşmasına yardımcı olduğunu göstermiştir. Araştırma bulgularına göre makale, bir enerji analiz aracının bir BIM modeliyle birleştirilmesinin enerji analiz sürecini hızlandırmaya, daha ayrıntılı ve doğru sonuçlar sağlamaya ve enerji tasarruflu binalar sağlamaya yardımcı olduğu sonucuna varmıştır. Çalışma ayrıca, satın alma yöntemine (devlet tarafından finanse edilen veya başka bir şekilde) veya büyüklüğüne bakılmaksızın tüm projeler için seviye 2 BIM’in benimsenmesinin ve BIM’in enerji optimizasyon analizine entegrasyonunun zorunlu hale getirilmesini önermektedir.

[16]’nın amacı yeni bir BIM - bina performans modeli - bina çevre modeli çerçevesi önermek ve mevcut eğitim binalarının yenilenmesi için en enerji verimli ve maliyet etkin stratejileri belirlemektir. Temel amaç çevresel etkiyi en aza indirirken neredeyse sıfır enerji hedefine ulaşmaktır. Çerçevenin geçerliliğini göstermek için Maryland Üniversitesi Mimarlık Binası özelinde analizler yapıldı ve yenileme stratejilerini değerlendirmek için enerji performansı, çevresel etkiler ve bina sakinlerinin memnuniyetini içeren bir dizi bina performansı göstergesi

kullanıldı. Ayrıca, bu yeni çerçeve farklı dijital araçlar ve platformlar arasında birlikte çalışabilirliği daha da göstermiştir. Son olarak, ayrıntılı bir analiz ve ölçümlerin ardından, sonuçlar, eğitim binalarının güçlendirme ihtiyaçlarının yanı sıra belirli bir enerji profilini de vurgulamıştır. Nispeten yüksek bir başlangıç maliyetine rağmen %62 enerji tasarrufu, %84 karbon emisyon azaltımı ve %53 uzun vadeli maliyet tasarrufu sağlayan en üst sıradaki paket ile birlikte toplam sekiz farklı yenileme paketi analiz edilmiştir.

[17], BIM tabanlı simülasyonları (Revit ve GBS) kullanan enerji analizlerinin güvenilirliği ve esnekliği ile ilgili sonuçların yanı sıra Energy Plus sonuçları ve ölçümleriyle karşılaştırıldığında bu BIM araçlarının yararları ve zorlukları hakkında sonuçları göstermektedir. Bu araçlar, iyi yalıtılmış bir test hücresinin termal ve enerji performansını incelemek ve her bir aracın avantaj ve dezavantajlarını bulmak için termal kütle ve yalıtım kalınlığındaki bir değişikliğin etkisini incelemek için kullanılmıştır. Bu BIM araçlarının, tasarımcıların nihai tasarım çözümlerini uygulamaya başlamadan önce projenin tüm yaşam döngüsü boyunca farklı tasarım alternatiflerini kolayca denemelerine, zamandan ve paradan tasarruf etmelerine ve aynı zamanda daha enerji verimli binaların elde edilmesine katkıda bulunmalarına olanak sağladığı sonucuna varılmıştır.

[18]'de üç simülasyon programı eQUEST, IESVE ve GBS, bir üniversite yurdunda planlanan güçlendirme işleminin öngörülen enerji tasarrufunu ölçmek için kullanılmıştır. Çalışma, tüm orijinal pencerelerin ve dış yapısal olmayan dolgu tuğla panellerin sökülüp değiştirilmesinin ve yeni tuğla paneller ile iç beton duvar ünitesi duvarları arasına ilave yalıtım malzemelerinin yerleştirilmesinin yarattığı potansiyel enerji tasarrufunun araştırılmasını içermektedir. Güçlendirme, 1965 yılında inşa edilen 7000 m²'den fazla alana sahip yedi katlı dört konutta gerçekleşmiştir. Mevcut durumun simülasyonlarından elde edilen raporlar, üç modelleme programının doğruluğunu tespit etmek için gerçek enerji tüketimi verileriyle karşılaştırılmıştır. Güçlendirme önerisinin analizi, her güçlendirme tasarım alternatifinin sonuçlarını mevcut konutun analiz sonuçlarıyla karşılaştırarak ve önerilen güçlendirme sürecinden kaynaklanan CO₂ emisyon azaltımını değerlendirerek gerçekleştirilir. Son olarak, her simülasyon aracının avantajları ve dezavantajları da tartışılmıştır.

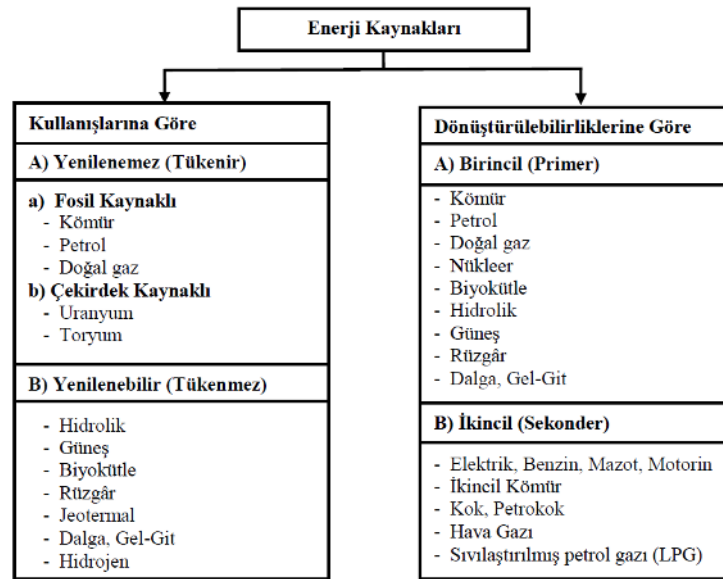
2. ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR MİMARLIK

2.1 Enerji Krizi

Enerji, insanlığın ilk varoluşundan itibaren üzerinde önemle durulan bir konudur. İnsanoğlunun günlük yaşamını devam ettirmesi için yaptığı her faaliyette enerjiye ihtiyaç vardır ve dünya çapındaki sanayi alanındaki büyük gelişmeler, artan şehirleşme, gelişen teknoloji, kontrolsüz nüfus artışı, yeşil alanların azalması, ekonomik kalkınma ve refah artışı enerji talebinin belirgin bir şekilde artmasına sebep olmuştur [19, 20, 21, 22]. Artan enerji talebi sebebiyle iklim değişikliği, çevre kirliliği, küresel ısınma, kuraklık, orman yangınları, deniz seviyesinde artış ve seller gibi pek çok sorun ortaya çıkmıştır.

Enerji kaynakları kullanışlarına göre yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak ikiye ayrılırken dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak incelenmektedir. Yakın gelecekte biteceği düşünülen enerji kaynakları yenilenemez olarak adlandırılırken kendini yenileyebilen enerji kaynakları yenilenebilir olarak adlandırılır. Ayrıca değişmemiş ve dönüşmemiş enerji birincil enerji olarak adlandırılırken birincil enerjinin dönüştürülmesi ile edilen enerji de ikincil enerji olarak adlandırılır (şekil 2.1.) [19, 20, 21, 22].

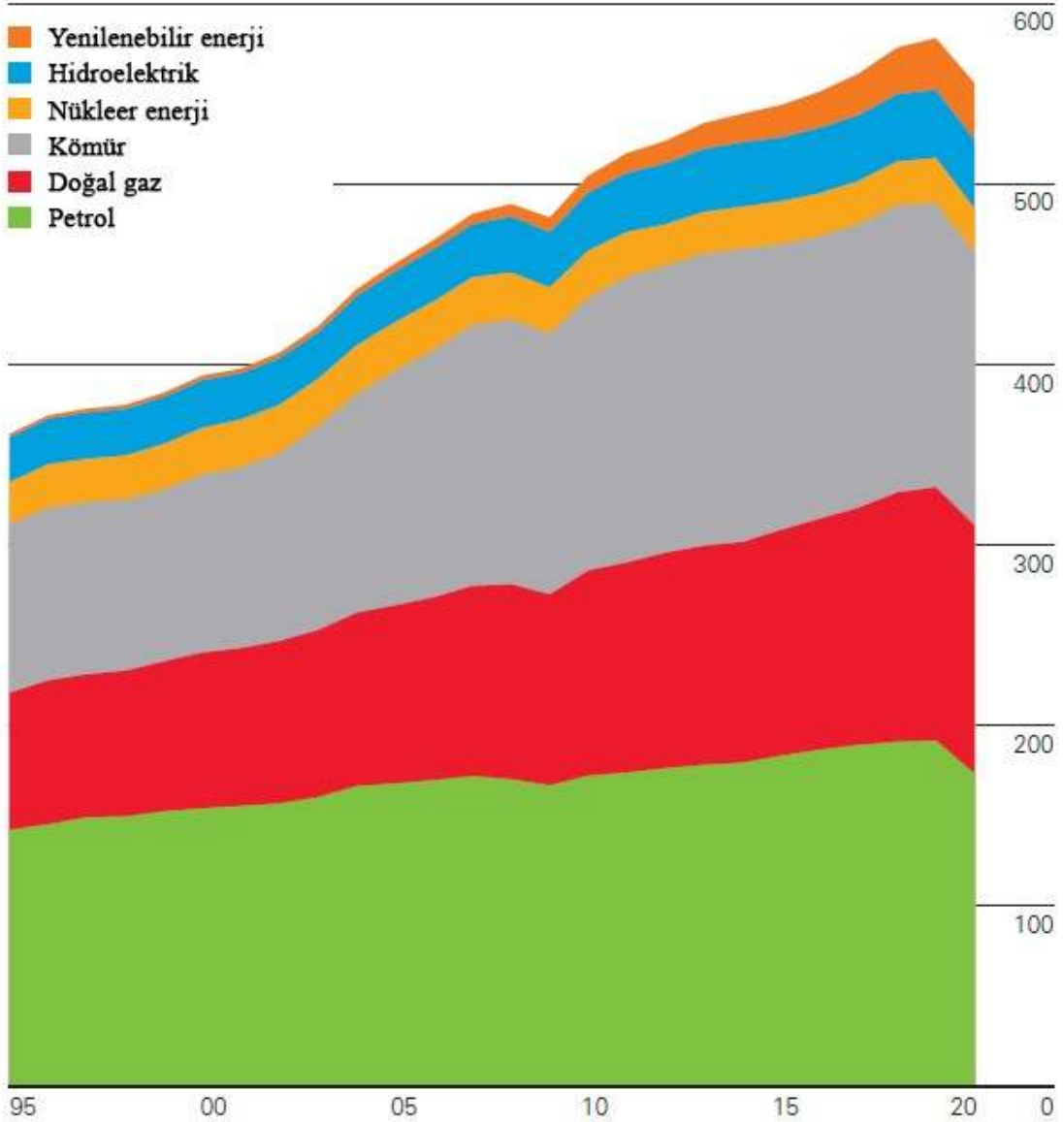
1973 yılında başlayıp günümüze kadar çeşitli aralıklarla dünyanın farklı bölgelerinde yaşanan enerji krizleri, aşırı fosil yakıt tüketimi sonucu atmosfere yayılan karbon emisyonlarının yol açtığı küresel ısınma ve iklim değişikliğinin ciddiyetinin ve alternatif enerji kaynaklarının öneminin anlaşılmasına sebep olmuştur [23]. Dolayısıyla özellikle son 40 yılda bu konu üzerinde önemle durulmuş, birçok araştırma ve inceleme yapılmış ve çözüm önerileri geliştirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması [19]

2021 yılında çok uluslu bir enerji ve petrol şirketi olan BP tarafından yapılan “Statistical Review of World Energy” yani “Dünya Enerjisinin İstatiksel İncelemesi” adlı raporda dünyadaki enerji krizine dikkat çekilmiştir. Dünya genelinde 1995 – 2020 yılları arasındaki enerji tüketimine ait veriler Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Bu rapora göre birincil enerji tüketimi, 2009’dan bu yana ilk kez 2020 yılında azalmıştır (geçen yıla göre %4,5 düşüş). Enerji kullanımından kaynaklanan karbon emisyonları %6,3 oranında azalarak 2011’den bu yana en düşük seviyesine gerilemiştir (İkinci Dünya Savaşı’nın sona ermesinden bu yana en büyük düşüş). Yenilenebilir enerji (+%9,7) ve hidroelektrik (+%1,0) dışında tüm yakıtların tüketimi azalmıştır. Düşüşün büyük kısmı petrol kaynaklı (-9.7%) olmuştur [24].

Dünya enerji tüketimi Exajoules

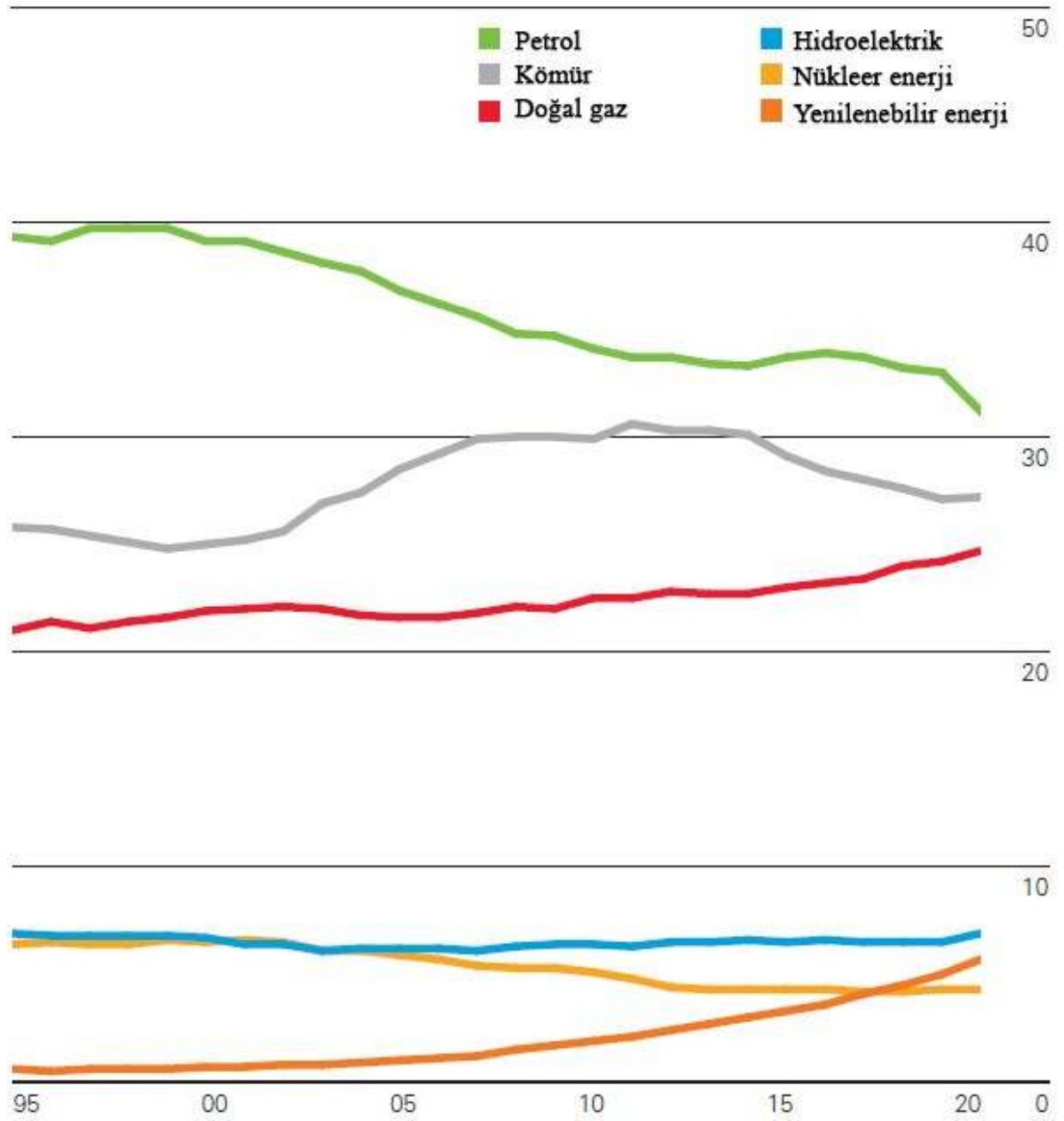


Şekil 2.2. Dünya enerji tüketimi [24]

Yapılan aynı araştırmaya göre petrol en yüksek oranda kullanılan enerji kaynağı olmaya devam etmiştir (%31.2). Kömür en çok tercih edilen ikinci yakıt türüdür ve 2019 yılında göre hafif bir artış göstererek %27.2 seviyesine çıkmıştır. Hem doğal gaz hem de yenilenebilir enerjinin oranı rekor seviyeye yükselmiş ve sırasıyla %24.7 ve %5.7 olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gerisinde kalan nükleer enerji ise enerji karışımının sadece %4.3'ünü oluşturmuştur. Hidroelektriğin payı ise geçen yıla nazaran 0.4 artarak %6.9 oranına yükselmiştir (Şekil 2.3.) [24].

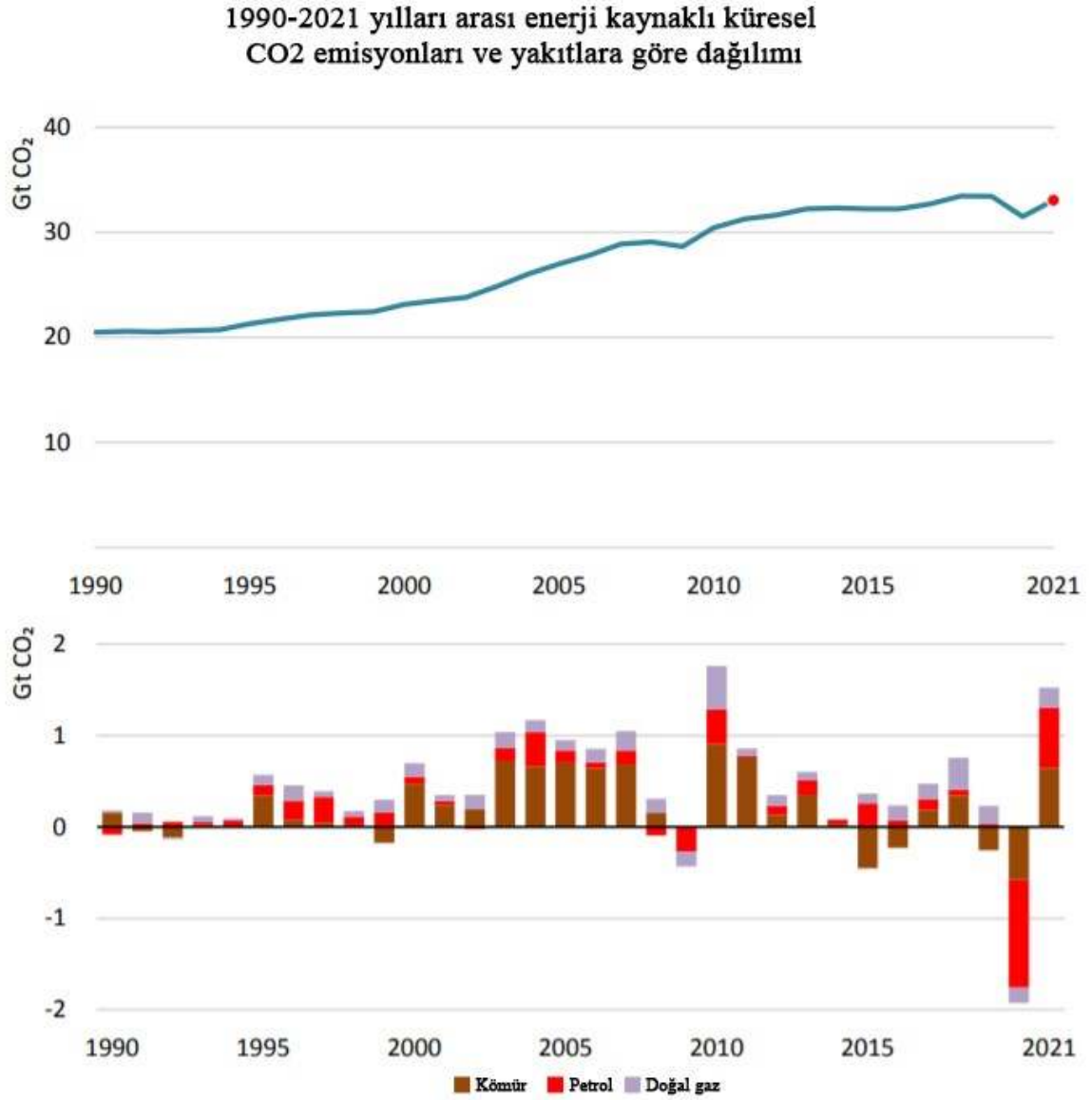
Küresel birincil enerji payları

Yüzde



Şekil 2.3. Küresel birincil enerji payları [24]

Uluslararası Enerji Ajansı'nın yayınladığı “Global Energy Review 2021” yani “ Küresel Enerji İncelemesi 2021” adlı raporda son 40 yılda CO2 emisyonlarının ne derece arttığı gözler önüne serilmektedir (Şekil 2.4.) [25].



Şekil 2.4. 1990-2021 yılları arası enerji kaynaklı küresel CO2 emisyonları ve yakıtlara göre dağılımı [25]

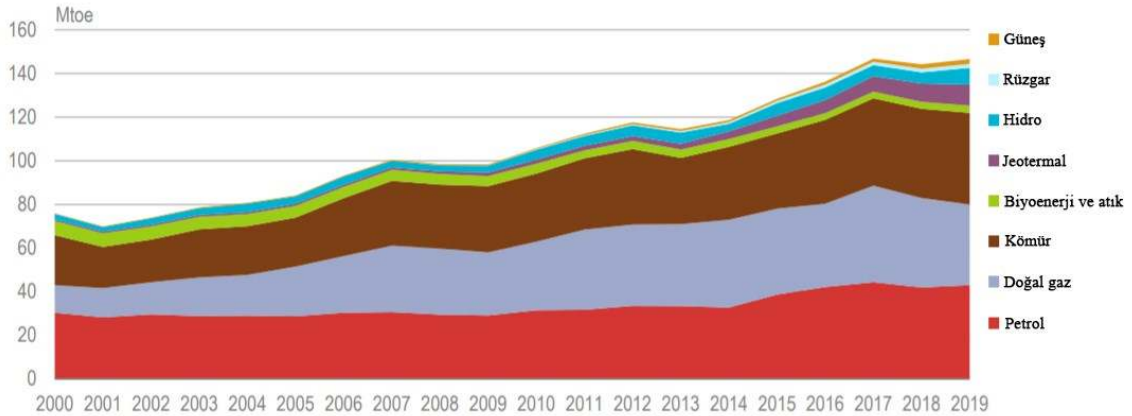
BP tarafından yayınlanan raporun verilerine göre enerji tüketimi 25 yıllık zaman diliminde ciddi bir şekilde artmıştır (yaklaşık 1.5 kat) [23]. Bu süreçte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmasına rağmen, yenilenemez fosil yakıtların (kömür, petrol ve doğalgaz) payı hala %80'in üzerindedir. Dolayısıyla karbon salınımı kaynaklı küresel ısınma ve etkilerinin minimum seviyeye indirilebilmesi için yeni yaklaşımlar geliştirilmeli, enerji talebi azaltılmalı ve çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Örneğin, karbon emisyonları

önümüzdeki 30 yıl boyunca geçen yılkiyle aynı oranda azalırsa, küresel karbon emisyonları 2050 yılına kadar yaklaşık %85 oranında azalacaktır [24].

Kyoto Protokolü'nün (küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası tek çerçeve) 2020 yılında sona ermiş olmasından dolayı, Paris Antlaşması iklim değişikliğinin azaltılması ve adaptasyonu için 2015 yılında yürürlüğe girmiştir [26, 27]. Antlaşmanın hedefi sera gazı emisyonlarının ve küresel sıcaklık artışının azaltılmasıdır. Bu doğrultuda antlaşma kapsamında planlamalar ve düzenlemeler yürürlüğe girecek ve finansman akışı sağlanacaktır [27].

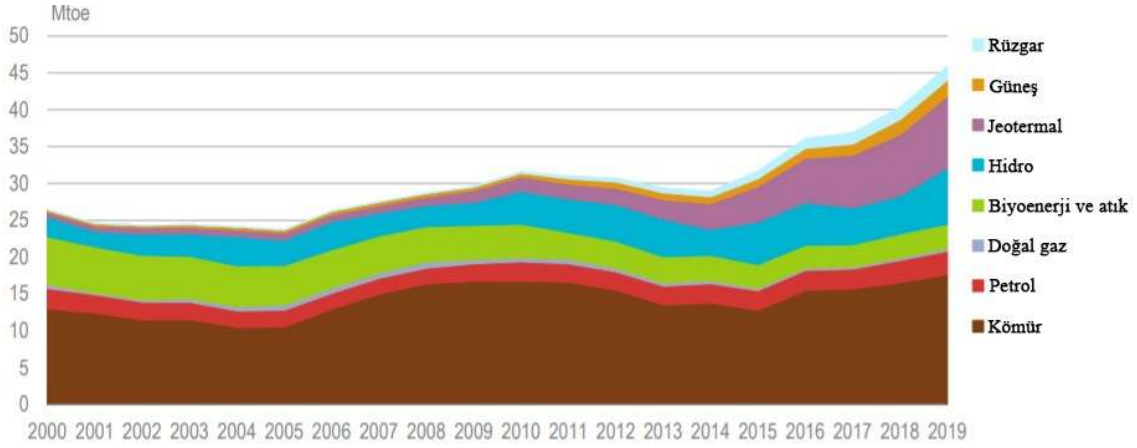
2.2 Türkiye'de Enerji Kullanımı

Türkiye'de son 20 yılda gerçekleşen ekonomik ve sosyal gelişme ve hızlı nüfus artışı enerji talebinde ciddi bir artışa sebep olmuştur. 2000-2019 yılları arasında, 2018'deki ekonomik yavaşlama nedeniyle yaşanan düşüşe rağmen toplam birincil enerji tüketimi %92 oranında büyümüştür. Türkiye'nin enerji sistemi, 2019 yılında toplam birincil enerji tüketiminin %83'ünü ve oluşturan fosil yakıtlar ile karakterize edilmektedir ve Uluslararası Enerji Ajansı üye ülkeleri arasında 9. sırada yer almıştır. Geri kalan enerjinin çoğu jeotermal ve hidro olmak üzere çeşitli yenilenebilir kaynaklardan gelmektedir (Şekil 2.5.) [28].



Şekil 2.5. 2000-2019 yılları arası kaynak dağılımına göre toplam birincil enerji tüketimi [28]

Türkiye'de yerli enerji üretimi 2019 yılında toplam birincil enerji tüketiminin %31'ini oluşturmaktadır. Yerli enerji üretimi 2014'ten 2019'a %59'luk bir büyümeye ile hızla artmıştır. Bu artış çoğunlukla 2019 yılında toplam enerji üretiminin %54'ünü oluşturan yenilenebilir kaynaklardan kaynaklanmıştır. Özellikle jeotermal, 2014'ten bu yana iki kattan fazla artmıştır ve 2019'da toplam enerji üretiminin %21'ini oluşturmuştur. Kömür ise toplam üretimin %39'unu oluşturmuştur (Şekil 2.6.) [28].

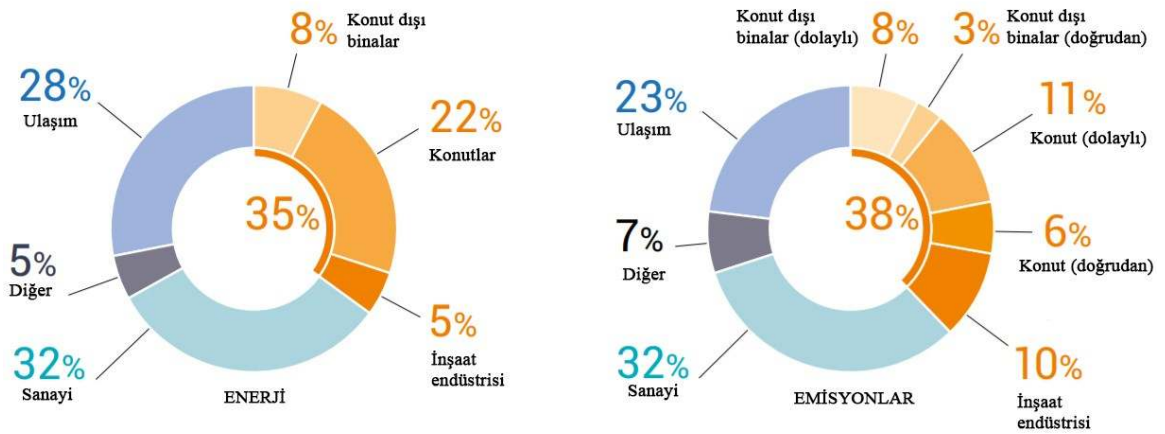


Şekil 2.6. 2000-2019 yılları arası kaynak dağılımına göre enerji üretimi [28]

2.3 Yapı Sektöründe Enerji Kullanımı

Binalar tüm yaşam döngüsü boyunca enerji kullanır, çevreyi kirletir, doğal kaynak tüketir ve aşırı miktarda CO₂ gibi sera gazı salınımına sebep olarak küresel ısınmanın oluşmasında ve artmasında önemli bir rol oynar. “2020 Global Status Report for Buildings and Construction” yani “Binalar ve İnşaat Sektörü için 2020 Küresel Durum Raporu” verilerinde göre inşaat sektörü, dünya genelinde enerji kullanımının %35’ini ve enerjiyle ilgili karbondioksit (CO₂) emisyonlarının %38’ini oluşturmaktadır (Şekil 2.7.) [29].

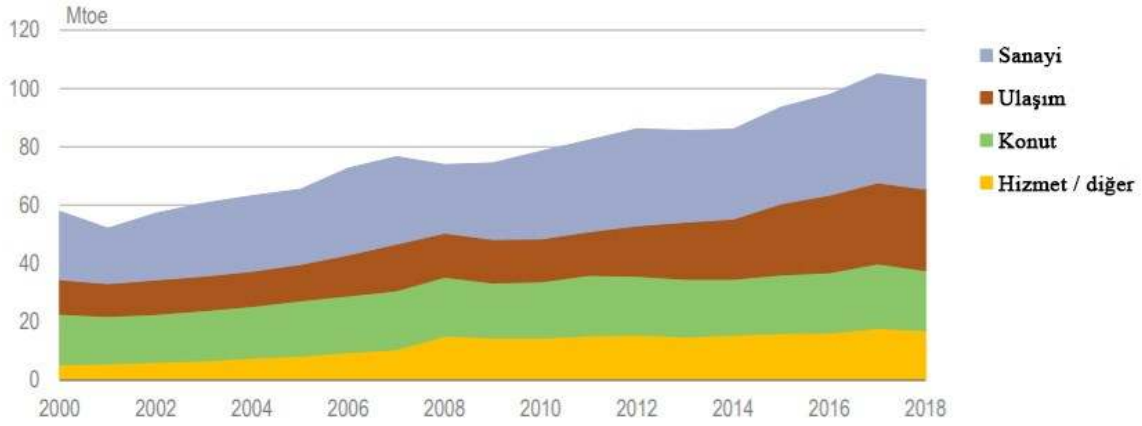
2019 yılı binaların ve inşaat sektörünün enerji tüketiminin ve emisyonlarının küresel payı



Şekil 2.7. 2019 yılı binaların ve inşaat sektörünün enerji tüketiminin ve emisyonlarının küresel payı [29]

Türkiye’de 2018 yılında sanayi sektörü %36’lık payıyla en fazla enerji tüketen sektördür, bunu tarım ve balıkçılık da dahil olmak üzere ulaşım (%27), konut (%20) ve hizmetler (%17) izlemektedir. Türkiye’nin enerji talebi 2001 yılından bu yana tüm sektörlerde artmış, 2018 yılında

sanayi hariç çoğu sektörde hafif bir düşüş yaşanmıştır. 2008'den 2018'e enerji tüketimi sırasıyla ulaşımında %86, sanayide %60, hizmet ve konutlarda %12 ve %2 oranında artmıştır (Şekil 2.8.) [28].



Şekil 2.8. 2000-2018 yılları arası konutların enerji tüketiminin ve emisyonlarının küresel payı [28]

Bir bina inşaatından yıkımına kadar ömrü boyunca enerjiyi kullanır. Binalar en fazla enerjiyi binanın işletim aşamasında ısıtma, soğutma, sıcak su, havalandırma, aydınlatma ve elektrikli cihazlar amaçlı kullanır. Bunun dışında hatırı sayılı miktarda enerji ulaşım, inşaat, bakım, yenileme ve yıkım aşamalarında tüketilir. Ayrıca, binanın inşası için kullanılan malzemelerin maden ocağından çıkarılmasında, işlenmesinde, üretiminde ve nakliyesinde harcanan enerjinin (gömülü enerji(embodied energy)) de bu sınıflandırmaya dahil edilmesi gerekmektedir [30]. [31]'e göre binaların yaşam döngüsü boyunca kullanılan toplam enerjinin %80-85'i bina kullanım aşamasında kullanılır. [29]'a göre 2019 yılında binaların kullandığı toplam enerjinin %73'ü kullanım aşamasında, %25'i malzeme üretimi aşamasında ve sadece %2'lik kısmı inşaat aşamasında harcanmıştır. Ayrıca yapı malzemelerinin üretiminden ve yapımlarından kaynaklanan emisyonlar büyük ölçüde çimento ve çelik üretiminden kaynaklanmaktadır (Tablo 2.1.).

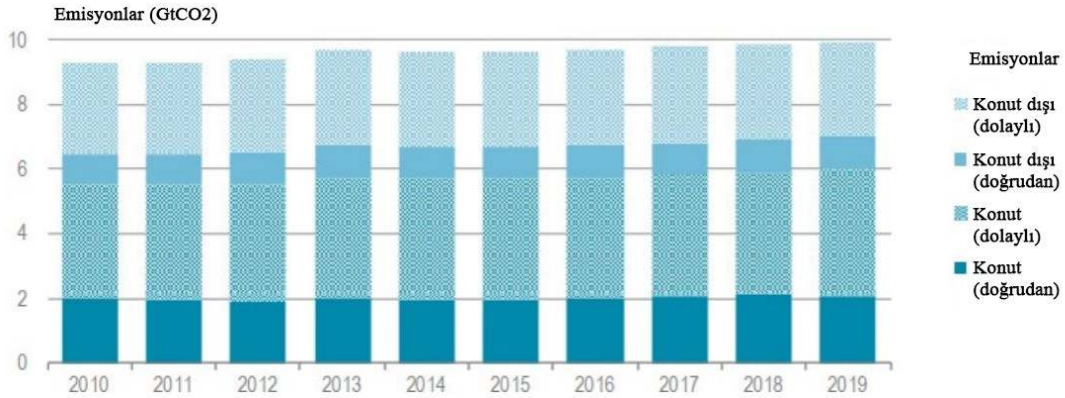
	2019 (MtCO ₂)	Pay
Bina kullanım aşaması	9953	
Kömür	496	%9 doğrudan emisyonlar
Petrol	939	
Doğal gaz	1663	
Elektrik ve ısıtma	6855	%19 dolaylı emisyonlar
Bina inşaat aşaması	130	%10 dolaylı emisyonlar
İnşaat enerji kullanımı	130	
Malzeme üretim aşaması	3430	
Çimento ve çelik	2038	
Diğer	1391	
Toplam	13512	%38 toplam enerji sebepli emisyonlar

Tablo 2.1. 2019 yılı binaların enerji kullanımının aşamalara göre dağılımı [29]

Binalarda enerji kullanımının %60'dan fazlası elektrik ve doğalgaz kaynaklıdır. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kullanımı 2018'den bu yana %6 civarında büyümüşür ve yakıt kaynağı olarak kömürü geride bırakarak sektör içinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimin bir göstergesi olmuştur (Şekil 2.9.). İnşaat sektöründe enerji kullanımı bina tipine göre incelendiğinde ise, konutlar yaklaşık %65'lik oranıyla dominant pozisyonundadır (Şekil 2.10.) [29].



Şekil 2.9. 2010-2019 yılları arası inşaat sektörünün enerji tüketiminin yakıt türüne göre dağılımı [29]



Şekil 2.10. 2010-2019 yılları arası inşaat sektöründe enerji kullanımının bina tipine göre dağılımı [29]

Çalışmanın şu aşamasına kadar aktarılan veriler ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Küresel ölçekte ekonomik ve teknolojik gelişmeler, hızlı nüfus artışı, gelişen teknoloji ve şehirleşme enerji talebinin katlanarak artmasına sebep olmuştur.
- Enerji talebinin büyük bir çoğunluğu yenilenemez enerji kaynaklarından karşılanmaktadır ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı çok düşük seviyelerdedir.
- Enerji kullanımındaki artıştan ve bu artışın çoğunlukla fosil yakıt kaynaklı olmasından dolayı yüksek miktarda CO2 emisyonu sebebiyle küresel ısınma ve iklim değişikliğinin başı çektiği çok ciddi sorunlar ortaya çıkmıştır.
- Türkiye'nin enerji talebi küresel trendden farklılaşmayarak artış eğilimindedir ve bu talebin çok büyük bir kısmı fosil yakıtlar ile karşılanmaktadır.

- Küresel enerji talebi sektörel olarak incelendiğinde yapı sektörü %35'lik payı ile sanayi, ulaşım ve diğer sektörlerin önünde yer almaktadır.
- Binalarda enerji kullanımının çoğunluğu elektrik ve doğalgaz kaynaklıdır
- Yapı sektöründe kullanılan enerjinin ve CO2 emisyonlarının büyük kısmı konut sebeplidir.
- Binalar en fazla enerjiyi kullanım aşamasında harcamaktadır.

Yukarıdaki verilerden de anlaşılacağı üzere aşırı miktarda fosil yakıt kaynaklı enerji kullanımı sebebiyle oluşan küresel ısınma ve iklim değişikliği etkilerinin minimum seviyeye indirilebilmesi için enerji tasarruf potansiyelinin en yüksek olduğu yapı sektöründe yenilikçi çevre dostu yaklaşımların benimsenmesi zaruridir. Enerji performansı yüksek yapıların üretilmesi çevresel tahribatı azaltacak, sağlıklı ve konforlu mekan ve şehirler oluşturacaktır. Ayrıca kullanıcıya sunduğu düşük maliyetler ise bir diğer göz ardı edilemeyecek faydasıdır. Bu noktada yapı sektöründe sürdürülebilir mimari, güneş mimarisi, yeşil mimari, sıfır enerji binalar, düşük enerjili binalar ve enerji etkin tasarım gibi kavramlar ortaya çıkmıştır. Önümüzdeki bölümde performansı yüksek yapıların üretim anlayışının temelini oluşturan sürdürülebilir mimarlık yaklaşımı detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

2.4 Sürdürülebilir Mimarlık

Sürdürülebilirlik kavramı ilk kez 1987 yılında yayınlanan Brundtland raporunda ortaya atılmıştır ve rapora göre [32] sürdürülebilir kalkınma, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden günümüzün ihtiyaçlarını karşılayan anlayış olarak tanımlanmıştır. Bu hedef aynı zamanda Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat (AEC) endüstrisinde bir öncelik olarak tanımlandı, çünkü geleneksel bina üretim anlayışı inşaat, işletme ve yıkım aşamalarında büyük miktarda yenilenemeyen malzeme, enerji ve atık üretmekten sorumludur. Sürdürülebilir Kalkınma hakkındaki ilk iki Birleşmiş Milletler ana konferansı sonrasında (Rio de Janeiro, 1992 ve Johannesburg, 2002) sürdürülebilirlik üç kısma ayrıldı: çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik sürdürülebilirlik ve sosyal sürdürülebilirlik [33].

Sürdürülebilir Mimari'nin ilk tanımı, 1994 yılında Birinci Dünya Sürdürülebilir İnşaat Konferansı (Florida) sırasında Charles Kibert tarafından sağlanmıştır. Kibert sürdürülebilir mimariyi “ekolojik ilkeleri ve kaynakların verimli kullanımını göz önünde bulundurarak sağlıklı bir yapı ortamının oluşturulması ve yönetimi” olarak tanımladı [34]. McLennan'e göre [35] ise sürdürülebilir tasarım “doğal çevreye olan negatif etkileri minimize ederek veya eleyerek, yapıları çevrenin kalitesini maksimize etmeyi araştıran bir tasarım felsefesi” olarak tanımlanmıştır.

Sürdürülebilir mimari, insanlığın çevre üzerindeki olumsuz etkisini sınırlamak için tasarlanmış binalara atıfta bulunan genel bir terimdir. Sürdürülebilir binaların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumlu etkisi yaygın olarak kabul edilmiştir. Sürdürülebilir binaların bir diğer avantajı

ise ekonomik olarak getirisidir. Sürdürülebilir tasarımı desteklemek için peşin maliyetlerde yapılan yaklaşık %2'lik hafif bir artış, ortalama olarak, yaşam döngüsü boyunca toplam inşaat maliyetlerinin yaklaşık %20'sinde tasarrufuna neden olur; bu, ilk yatırımın on katından fazladır [36].

Sürdürülebilir mimarlığın amaçları şunlardır:

- Doğal çevreyi korumak;
- Binaların çevre üzerindeki etkisini azaltmak;
- Kaynak tüketimini en aza indirmek;
- Atık oluşumunu en aza indirmek;
- Kaynakların yeniden kullanımını en üst düzeye çıkarmak;
- Çevre dostu yenilenebilir ve geri dönüştürülebilir kaynaklar ve malzemeler kullanmak;
- Sağlıklı ve toksik olmayan ortamlar yaratmak;
- Yapılı çevreyi yaratmada kaliteyi sürdürmek;
- Enerjiyi etkin kullanmak;
- Tükettikleri kadar enerji üreten binalar tasarlamak;
- Su korunumu gerçekleştirmek;
- Maksimum oranda gün ışığı kullanmak [33].

YEŞİL BİNA TASARIM HEDEFLERİ	YEŞİL BİNA TASARIM İLKELERİ
Kaynak Kullanımının Azaltılması	Enerji etkin yapı tasarımı Enerji etkin yapım süreci Yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi Geri dönüşümlü malzeme seçimi Yeniden kullanım Enerji etkin malzeme seçimi Yağmur sularının değerlendirilmesi Atık suların değerlendirilmesi Arazinin etkin kullanımı
Çevre ve Doğal Ortamın Korunması ve İyileştirilmesi	Doğal çevreye uyum Doğal bitki örtüsünün korunması ve iyileştirilmesi Çevrenin ekosisteminin anlaşılması ve korunması Hür türlü atığın azaltılması, denetlenmesi Geri dönüşümlü malzeme kullanımı Enerji tüketiminin azaltılması Temiz enerji kaynaklarının kullanılması
İnsan Sağlığının ve Konforunun En Üst Düzeyde Sağlanması	Uygun iç iklimsel koşulların oluşturulması Uygun nitelikli havalandırma koşullarının sağlanması Görsel konfor koşullarının sağlanması Gürültü, kirlilik ve kötü kokuların denetlenmesi Uygun akustik koşulların sağlanması Zehirli madde içeren malzemelerin kullanılmaması Sosyal ve kültürel etkinlikler için alanlar oluşturulması Ulaşım koşullarının sağlanması
Sosyo-Ekonomik, Kültürel ve Politik Gerçeklerin Gözetilmesi	Toplumların sosyal ve ekonomik gerçeklerinin anlaşılması Toplumsal çeşitliliğin korunması Kültürel çeşitliliğin korunması ve zenginleştirilmesi Toplumsal gereksinim ve isteklerin anlaşılması Toplumların kendi yaşam ortamlarının oluşturulma sürecine etkin katılımının sağlanması

Tablo 2.2. Yeşil binalarda temel tasarım hedefleri ve ilkeleri [38]

Sürdürülebilir tasarım kriterleri ana hatları ile beşe ayrılır: ekolojik malzeme kullanımı, yenilenebilir enerji kullanımı, iklim, rüzgar ve yön faktörlerine uygunluk, enerji verimliliği ve geri dönüşüm. Tablo 2.2’de yeşil binalarda temel tasarım hedefleri ve ilkeleri detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde yapıların sürdürülebilir mimarlık diğer bir deyişle yeşil bina kriterlerine uygun tasarlanması durumunda, bu kriterler gözetilmeden tasarlanan yapılara

oranla; enerji kullanımında % 24 ile % 50 arasında, CO2 emisyonlarında % 33 ile % 39 arasında, su tüketiminde % 30 ile % 50 arasında, katı atık miktarında % 70 oranında, bakım maliyetlerinde ise % 13 oranında düşüş olacağı gösterilmiştir [37].

İnşaat sektörü, küresel ısınmaya sebep olan sera gazı emisyonlarının en büyük paydaşlarından biri olduğundan dolayı binaların çevre üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, son 20 yılda birçok kuruluş ve organizasyon tarafından inşaat projelerinde sürdürülebilir mimari önlemlerini uygulamak ve yaymak, bina performansını değerlendirmek ve izlemek ve projenin farklı aşamalarında tasarımcının karar vermesini desteklemek amacıyla bilgi toplamak için yeşil bina sertifika sistemleri geliştirilmiştir [33, 39]. Yeşil bina sertifika sistemleri, çevreyi korumak için projelerin çevre üzerindeki etkilerini ortaya koyan ve çeşitli kriterlere göre puanlandırmalar yapan bir tür derecelendirme sistemidir [40].

Bu sistemlerden bazıları tüm dünyada kullanılmak amacıyla geliştirilmiş iken, bazıları ise belirli bir bölgenin çevresel, ekonomik ve sosyo-kültürel özelliklerine uyacak şekilde geliştirilmiş veya uyarlanmıştır [33]. Dünyada popüler olarak kullanılan İngiltere'de ortaya çıkan BREEAM ve Amerika'da ortaya çıkan LEED sürdürülebilir bina sertifikalandırma sistemleri dışında SBTOOL, HK-BEAM, CEPAS, SBAT, GREEN STAR ve CASBEE gibi birçok sürdürülebilir bina sertifikalandırma sistemleri bulunmaktadır [41]. Sertifika sistemleri ortak standartlar oluşturarak ve yöntemler geliştirerek sürdürülebilir yeşil mimariyi tanımlamayı, teşvik etmeyi ve ilgilileri bilinçlendirmeyi amaçlamaktadır [42]. Ülkemizde ise sürdürülebilir mimarlık ilkeleri gözetilmiş yapıların tasarımına ön ayak olabilecek ve değerlendirebilecek "Enerji Verimliliği Kanunu", "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği" gibi bazı yasal düzenlemeler ve "Enerji Kimlik Belgesi" uygulaması mevcuttur, fakat yine de Türkiye'de henüz ulusal bir yeşil bina sertifika sistemi bulunmamaktadır [43].

Günümüzde tüm dünyada sürdürülebilir mimarlık ilkeleri göz önünde tutularak inşa edilen, enerji performansı yüksek, çevre dostu ve sertifika sistemleri tarafından ödüllendirilmiş çok sayıda yapı mevcuttur. Örneğin, İstanbul'da Rönesans Gayrimenkul Yatırım tarafından inşa edilen Allianz Tower Türkiye'nin ilk LEED Platin sertifikalı kulesi olmuştur (Şekil 2.11.).



Şekil 2.11. Allianz Tower [44]

2.5 Binaların Enerji Performansını Etkileyen Parametreler

Sürdürülebilir mimarlık anlayışının temelinde enerji tüketimini azaltmaya yönelik önlemler yer alır. Hem yapı malzemelerinin çıkarılması, işlenmesi, taşınması ve kurulması için gereken enerji hem de işletme enerjisi, yani bir binanın kullanım aşamasında tüketilen enerji (ısıtma, soğutma vs.) en aza indirilerek konforlu ve sağlıklı mekanlar oluşturmak ve çevreyi minimum seviyede etkilemek amaçlanır [45]. Bu doğrultuda inşaat sektöründe enerji performansı yüksek yapılara ihtiyaç duyulmaktadır. Binaların enerji performansını etkileyen birçok faktör vardır ve bunlar çevresel dış etmenler ve binaya ilişkin faktörler olarak ikiye ayrılır. Çevresel faktörlerden topoğrafya ve iklim koşulları (sıcaklık, nem ve rüzgar) binaların enerji performansını etkilemektedir. Binaya ilişkin faktörler ise; binanın konumu, yönlendirilmesi, formu, kabuğu, komşu bina aralıkları ve yüksekliklerinden oluşmaktadır (Tablo 2.3.) [46].

BİNA ENERJİ PERFORMANSINI ETKİLEYEN TASARIM PARAMETRELERİ	
ÇEVRESEL DIŞ ETMENLER	YERLEŞME VE BİNA ÖLÇEĞİNDEKİ ETMENLER
➤ TOPOĞRAFYA ➤ İKLİM KOŞULLARI • HAVA SICAKLIĞI • GÜNEŞ • NEM • RÜZGÂR ➤ DOĞAL ÇEVRE ÖRTÜSÜ	➤ YAKIN ÇEVREDEKİ YAPILAŞMA ➤ BİNANIN YERİ ➤ BİNA ARALIKLARI VE YÜKSEKLİKLERİ ➤ BİNA YÖNLENDİRİLMESİ ➤ BİNANIN FORMU ➤ BİNA KABUĞUNUN ÖZELLİKLERİ ➤ DOĞAL HAVALANDIRMA ➤ GÜNEŞ KONTROL ELEMANLARI ➤ DOĞAL HAVALANDIRMA ➤ MEKANLARIN BAKTIĞI YÖN ➤ PEYZAJ ÇALIŞMALARI

Tablo 2.3. Bina enerji performansını etkileyen tasarım parametreleri [46]

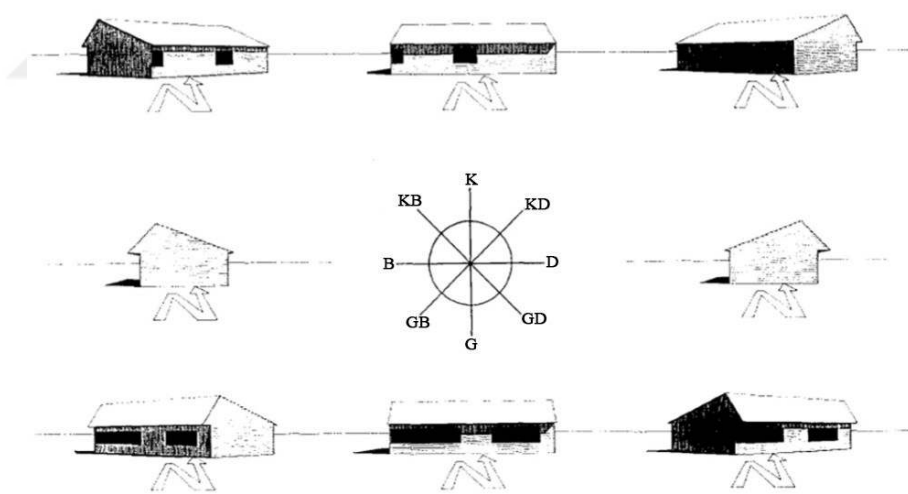
Bu çalışma özelinde bu parametrelerden bina yönlendirilmesi, bina kabuğu (duvar, çatı, ısı yalıtımı, pencere ve cephe saydamlık oranı), aydınlatma ve fotovoltaik panel için analizler yapılmıştır.

2.5.1 Bina Yönlendirilmesi

Tipik bir bina için toplam enerji kullanımının büyük bir kısmı ısıtma ve soğutma açısından iç mekan iklimlendirmesi için kullanılır. Isıtma ve soğutma amaçlı enerji kullanımını en aza indirmek için binaların güneşten optimum seviyede faydalanması gerekir. Bu amaçla bina tasarlarken bina yönlendirilmesi, binanın şekli, cephe cam tasarımı ve çevredeki binalar ile ilişkisi gibi

temel parametreler dikkate alınmalıdır [47]. Bu parametrelerden en önemli ve temel olanı ve enerji verimliliği üzerinde büyük etkisi olanı bina yönelimidir. Bir binanın ısıtma ve aydınlatma için güneş ışığını kullanma yeteneği genellikle bina yönelimi ile belirlenir. Wong ve Fan tarafından önerildiği gibi; bir binayı doğru bir şekilde yönlendirmek özellikle kış aylarında büyük bir güneş katkısı elde edebilmek için çok önemlidir. Aksoy ve İnallı, bina yöneliminin ve şeklinin optimizasyonunun %36'lık enerji tasarrufuna yol açabileceğini öne sürmüştür. Spanos et al. bir binanın optimum yönelimi, saha konumu ve peyzaj değişikliklerinin iç alana giren gün ışığı miktarını artırarak binanın enerji gereksinimlerini %20 oranında azaltabileceğini iddia etmiştir [48].

Tasarımcılar yapıları uygun bir şekilde konumlandırarak ve yönlendirerek yapının enerji ihtiyacını minimuma düşürebilirler. Şekil 2.12'de bina yöneliminin şematik gösterimi verilmiştir. Yapıyı optimum şekilde yönlendirmenin amacı; kış aylarında gün ışığından maksimum seviyede faydalanarak ısıtma için kullanılan enerjiyi ve maliyeti düşürmek, yaz aylarında ise gün ışığında optimum ölçüde faydalanarak soğutma için kullanılan enerji miktarını düşürmektir. Türkiye'de kuzey yarımkürede bulunan bir ülke olarak ısı kayıplarını önlemek ve güneş ışığından maksimum seviyede faydalanmak için güneye yönelme ideal olarak kabul edilir [49].

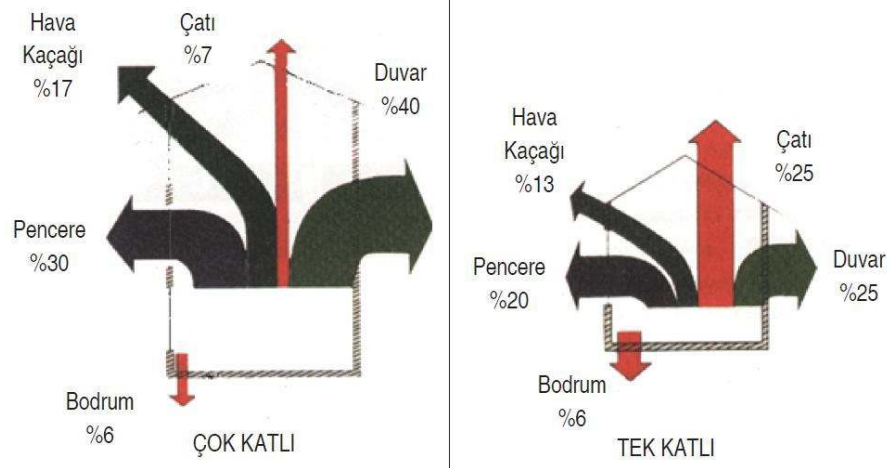


Şekil 2.12. Bina yöneliminin şematik gösterimi [47]

2.5.2 Bina Kabuğu

Bina kabuğu yapının dış çevre ile direkt bağlantı kurmasını sağlar ve ısı kayıp ve kazançlarına neden olarak binanın ısıtma ve soğutma yükünü önemli ölçüde etkiler. Yapılan araştırmalara göre bina kabuğu büyük ısı kayıplarına neden olarak yapının ısıtma yükünün artmasına sebep olmaktadır. Isı kayıplarının çoğu duvar, çatı ve pencere gibi yapı elemanlarından gerçekleşmektedir. Bu sebeple bu yapı elemanlarının malzeme seçimi, boyutlandırılması ve yalıtım

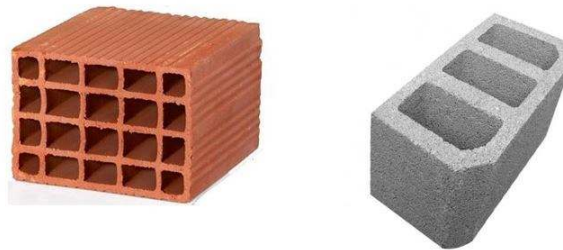
elemanları ile izole edilmesi ciddi önem taşımaktadır. Şekil 2.13'e göre en fazla ısı kaybı dış duvarlardan kaynaklanmaktadır [49].



Şekil 2.13. Çok ve tek katlı yapıların ısı kayıp oranları [49]

2.5.2.1 Duvar

Duvarlar mekanları sınırlayan, iç ve dış ortamı birbirinden ayıran ve taşıma, ısı yalıtımı, ses yalıtımı, su yalıtımı ve yangından koruma gibi görevleri de bulunan yapı elemanıdır. Günümüzde yapım sektöründe tuğla, bims blok, gaz beton, taş, ahşap ve kerpiç gibi birçok çeşit duvar malzemesi bulunmaktadır. Diğer yapı elemanlarında olduğu gibi duvar malzemesi için de çeşitli beklentileri karşılaması beklenir. Bunlar: mekanik dayanım, iyi bir ısıl performans, nemsel performans, yangın emniyeti, gürültüye karşı koruma ve enerjiden tasarruftur [50]. Bu çalışma kapsamında sadece farklı duvar malzemelerinin ısıl performansının binaların ısıtma ve soğutma kaynaklı enerji tüketimine olan etkisi analiz edilmiştir. Örneğin, tuğlanın ısı iletkenlik katsayısı λ (W/m.K): 0.30 iken bu oran bims blok için λ : 0.18 dir (Şekil 2.14.). Yani ısı yalıtımında bims blok tuğlaya oranla 2 kat daha yararlı olacaktır. Sonuç olarak binanın ısı yükü azalacak ve enerjiden tasarruf edilecektir [51].

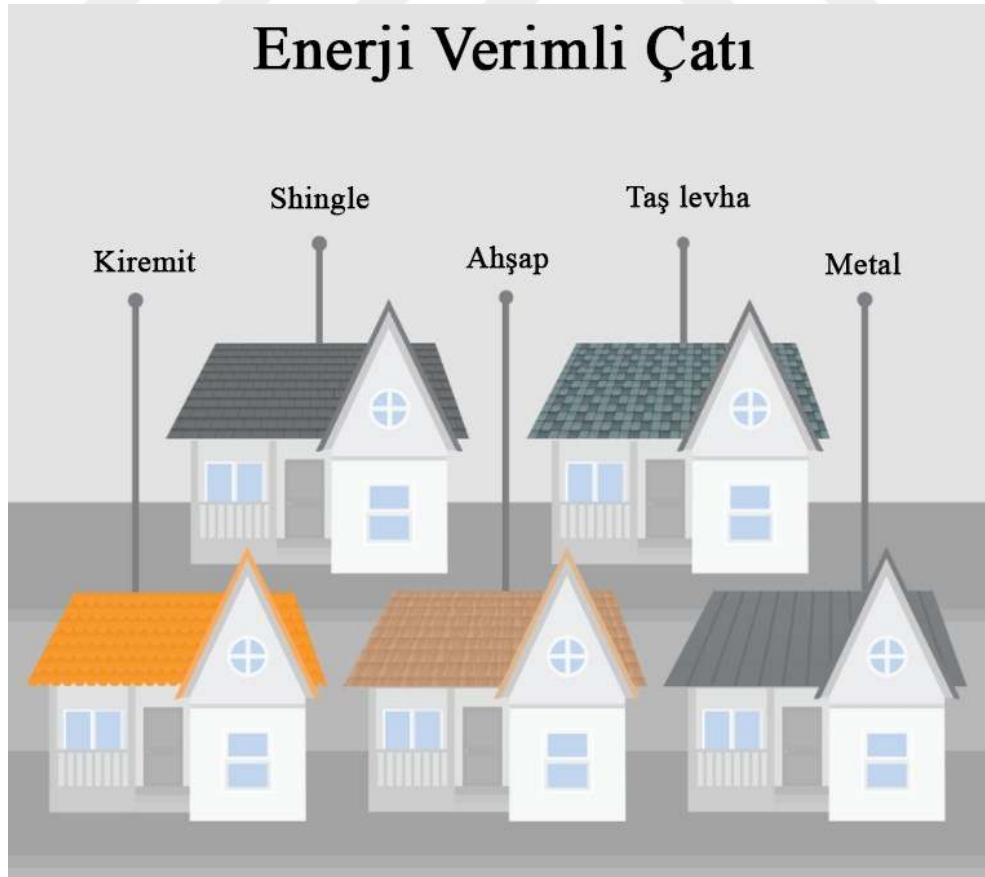


Şekil 2.14. Tuğla vs bims blok [51]

2.5.2.2 Çatı

Çatı, bir binanın üzerini kaplayan, yağmur, kar, güneş ışığı ve rüzgar gibi dış ortam koşullarına karşı koruma sağlayan yapı elemanıdır. Çatının görevleri yapıyı olumsuz hava koşullarına karşı korumak dışında iç ortam için gerekli konfor koşullarını sağlamak ve çeşitli yüklerle karşı taşıyıcılık sağlamak da gösterilebilir [52]. Ayrıca çatılar enerji depolayarak veya kaybederek binanın ısıtma ve soğutma yükünü düşürür ve akustik tasarıma yardımcı olur. Günümüzde birçok çeşit çatı kaplama malzemesi bulunmaktadır ve bunlar genel olarak içerdiği malzemeye göre metal, kil, çimento, bitüm ve plastik esaslı olmak üzere beş gruba ayrılmaktadır (saç, kiremit, shingle, bitümlü levha vs.) [53]. Şekil 2.15'te alternatif enerji verimli çatı kaplama malzemeleri gösterilmiştir.

Çatı malzemesi seçiminde dikkat edilmesi gereken birçok husus vardır. Örneğin; ısı, su, nem, ses, yangın ve taşıyıcılık performansı ve dayanıklılık bunlardan sayılabilir [52]. Bu çalışma özelinde çatı kaplama malzemelerinin ısı performansı üzerinde durulacaktır. Çatılar çok katlı yapılarda %7, tek katlı yapılarda ise %25 oranında ısı kayıplarının yaşandığı dış kabuk elemanıdır. Bu sebeple yapının ısıtma ve soğutma yüklerini düşürebilmek için iyi bir ısı performans sergileyen malzeme seçimi yapmak önem taşır.



Şekil 2.15. Enerji verimli çatı kaplama seçenekleri [54]

2.5.2.3 Isı Yalıtımı

Yapıların ısı kaybı ve kazançlarının sınırlandırılması için yapılan işleme ısı yalıtımı denir. Isı yalıtımının temel amacı iki ortam arasındaki ısı geçişini azaltarak ısıtma ve soğutma için gerekli enerji miktarını minimum seviyeye indirmektir. Binalarda ısı yalıtımı kullanılmadığı takdirde yüksek oranda yakıt kullanımı sebebi ile çevreye zarar veren ve maliyeti artan binalar ortaya çıkacaktır. Isı yalıtımı sayesinde yapının enerji ihtiyacı düşecek ve enerji tasarruflu yapılar üretilecektir [55]. Isı yalıtım malzemelerinden beklenen performans özellikleri şunlardır: fiziksel işlevsellik (ısı tutuculuk, basınç dayanımı), dayanıklılık (suya, neme, sıcaklığa, kimyasal ve biyolojik etkilere dayanıklılık), ekolojik açıdan uygunluk (çevreye ve sağlığa zararsızlık), uygulama kolaylığı ve ekonomiklik [56].

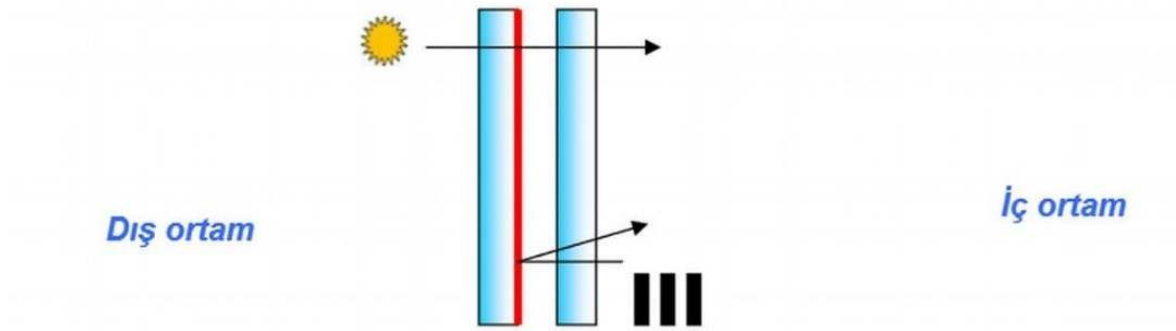
Isı yalıtım malzemeleri genellikle yapıların duvar, çatı, döşeme ve doğramalarına uygulanır. Günümüzde birçok çeşit ısı yalıtım malzemesi bulunmaktadır. Ekstrüde polistiren köpük (XPS), ekspande polistiren köpük (EPS), cam köpüğü, cam yünü, taş yünü ve ahşap yünü örnek olarak gösterilebilir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın 2015 yılında yayınladığı ısı yalıtım uygulama kılavuzunda; ısı yalıtım uygulaması ile yapılarda yüzde 30 ile 60 arasında enerji tasarrufu edileceği belirtilmiştir. [49]'da yapılan uygulama çalışmasında, 8 cm XPS ısı yalıtım uygulaması sonucu bina yakıt kullanımında yıllık yaklaşık 50000 MJ (%40) tasarruf sağlandığı gözlemlenmiştir.

2.5.2.4 Pencere

Binaların enerji performansını etkileyen bir diğer önemli parametre de pencerelerdir. Pencerelerin görevi iç hacimlerin yeterli ölçüde aydınlatılmasını ve iç ortam ile dış ortam arasındaki görsel bağı sağlamaktır [57]. Yapılan araştırmalara göre pencereler, bina enerji yükünün %10'undan fazlasından sorumludur ve bu nedenle toplam enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [58]. Pencereler toplam ısı kaybının yaklaşık %10 - %25'inden sorumludur ve uygun cam üniteleri kullanılmadığı takdirde hem binanın maliyetini arttırmakta hem de fazla enerji kullanımına sebep olarak çevre kirliliğini arttırmaktadır [60]. Bu nedenle binalarda kullanılacak pencere tipi ciddi önem taşımaktadır. Pencereler güneşli kış günlerinde binaya ısı kazancı sağlamasına karşın, güneşsiz ve soğuk kış günlerinde yapının ısı yükünü arttırmaktadır [57]. Yaz aylarında ise ısı iletim değeri yüksek olan bir cam tipi kullanıldığı takdirde yapının soğutma yükünü büyük ölçüde arttırmaktadır.

Pencerelerin ısı geçirgenlik katsayısı (U) ve solar ısı kazanç katsayısı (SHGC) binalarda pencere kaynaklı ısı kaybı ve kazançlarını etkileyen en önemli parametrelerdir. Dolayısıyla pencere seçiminde pencerenin U ve SHGC katsayıları dikkate alınmalıdır [59]. Son yirmi yılda pencere kaynaklı bina ısıtma ve soğutma yük artışını önleyebilmek adına çift cam, üçlü cam, renkli cam, argon cam ve low-e cam tipi gibi birçok cam sistemi geliştirilmiştir. Günümüzde çoğu binada

pencerelerde çift cam sistemi kullanılmaktadır. Fakat çift cam tipinin de tek başına yeterli olmadığı belirtilmekte ve bu doğrultuda Low-e cam tipi, üçlü cam tipi ve argon-çift cam tipi önerilmektedir [49]. Low-e cam tipi standart, tek kaplamalı ve çift kaplamalı olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Örneğin, çift kaplamalı Low-e cam tipi ısı kaçışının % 70’lik büyük bölümünü denetler ve çift cam sistemine göre yalıtım değerini % 36 oranında iyileştirebilmektedir (Şekil 2.16.) [57]. [59]’da yürütülen uygulama çalışmasında Çin’de bulunan tipik bir yüksek katlı konutun enerji tüketimi pencere cam seçiminde yapılan değişiklikler ile %15’e kadar azaltılmıştır. 13 mm hava dolgulu 6 mm low-e çift cam enerji tüketiminin azaltılması açısından en iyi performansı vermiştir.



Şekil 2.16. Çift camda Low-e kaplamalı camın ısı yalıtım davranışı [49]

2.5.2.5 Cephe Saydırlık Oranı

Pencere camının yanı sıra pencere / duvar alanı oranı yani cephe saydırlık oranı da binaların enerji talebini ciddi oranda etkilemektedir. Sıcak havalarda binanın soğutma yükünü azaltmak ve soğuk havalarda binanın ısıtma yükünü azaltmak konusunda cephe saydırlık oranı önemli bir etkiye sahiptir [49]. Dolayısıyla binalarda farklı yönlerde optimum cephe saydırlık oranı belirlenerek ısı kayıp ve kazançları sebepli ısıtma-soğutma amaçlı sera gazı emisyonu en aza indirilebilir. Yapılan bir araştırmaya göre bir binanın enerji gereksinimi pencereleri doğru şekilde konumlandırarak %40 - %30 oranında azaltılabilir [49]. [60]’da yapılan araştırmanın bulgularına dayanarak, ılıman iklim bölgelerinde maksimum cephe saydırlık oranının kuzey, doğu ve güney yönlerinde sırasıyla %40, %35 ve %35 olabileceği, sıcak kuru yerlerde ise %30, %25 ve %25 olması önerildiği belirtilmiştir.

Türkiye’de güneş ışığından maksimum seviyede faydalanılan cephe güney cephesidir. Bu yüzden ısıtma ihtiyacının fazla olduğu mekanlar güney yönüne konumlandırılarak kış aylarında yapının ısıtma yükü düşürülebilir. Fakat güney cephe saydırlık oranında optimum bir oran belirlenmelidir. Eğer cephe saydırlık oranı çok fazla ise bina kış aylarında geceleri fazla soğuyacak ve ısıtma ihtiyacı artacaktır. Ayrıca yaz aylarında yaşama mekanları gün ışığına çok fazla maruz kalacağından dolayı binanın soğutma yükü artacaktır. Güneş ısısından yararlanamayan kuzey cephesinde ise, cephe saydırlık oranı minimum tutularak kış aylarında binanın ısı

kaybetmesinin önüne geçilebilir. Doğu ve batı cephelerindeki saydamlık oranı yapının enerji ihtiyacını önemli ölçüde etkilememektedir. Fakat yine de fazla ısınma veya fazla soğumayı önlemek adına optimum bir oran saptanmalıdır. Bektaş tarafından Elazığ şehrinde bir konut üzerinde yapılan çalışmaya göre, binanın kuzey yönünde % 10, güneyde % 30, doğuda % 30 ve batıda %30 cephe saydamlık oranına sahip olması minimum ısıtma enerjisi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır [57].

2.5.3 Aydınlatma

Aydınlatma günlük yaşamda yaygın olarak kullanılan, yaşam kalitemize, iş gücümüzün üretkenliğine ve verimliliğine katkıda bulunan önemli bir faktördür. Işık kalitesi uyku düzenini ve sağlığı etkiler ve herhangi bir alanın ruh halini şekillendirebilir [61, 62]. Bununla birlikte, aydınlatma ekipmanları üretim aşamasında ve daha da önemlisi, kurulduğunda ve çalıştırıldığında kaynakları tüketir. Son yıllarda ekonomik kalkınma ve hızlı nüfus artışı sebebiyle küresel aydınlatma talebi ciddi miktarda artmıştır [62]. Örneğin, ABD elektrik tüketiminin yaklaşık %18'i ve tüm ABD enerji tüketiminin %6'sı iç ve dış mekan aydınlatması sağlamak için kullanılmaktadır [61].

Aydınlatma kaynaklı elektrik tüketimini en aza indirmek için binalarda enerji verimli aydınlatma armatürlerinin kullanımı önem arz etmektedir. Fakat [62]'ye göre günümüzde 125 yıllık bir teknolojiye dayanan ve enerji verimli ürünler ile değiştirildiğinde güç kullanımında yüzde 80-90 oranında azalışa olanak tanıyan ampul aydınlatma yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve 2016 yılı verilerine göre yaklaşık 7 milyar ampul binalarda aydınlatma amaçlı kullanılmaktadır. Enerji verimli aydınlatma armatürlerinin bir diğer avantajı ise elektrik faturalarında sağlayacağı düşüşler ile ekonomik tasarruf sağlamasıdır.

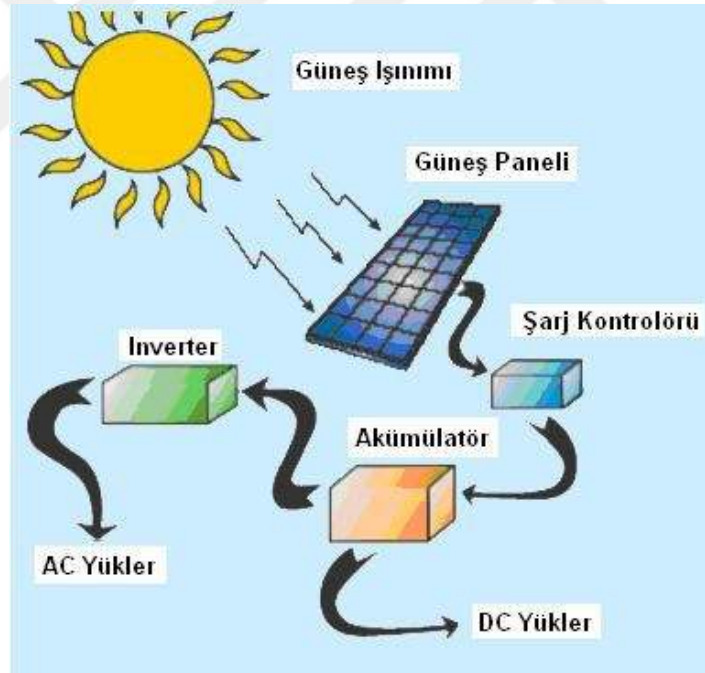
Aydınlatma teknolojileri akkor aydınlatma (klasik ampul), floresan aydınlatma, yüksek yoğunluklu deşarj aydınlatması ve LED aydınlatma olarak sınıflandırılmıştır [62]. [63]'e göre LED lambalar floresan lambalara göre yaklaşık %70 daha az enerji tüketirler ve 10 ile 50 kat arası daha uzun ömürlüdür. [3]'te yapılan çalışmada 40W'lık mevcut floresan lambalar, aynı ışık şiddetine sahip 25W'lık LED lambalarla değiştirildiğinde, termal yüklerde toplam %1,91'lik bir azalma sağlanmıştır.

2.5.4 Fotovoltaik Panel

Dünyada bir yandan yenilenemez enerji kaynakları azalırken, diğer yandan enerji tüketimi önemli ölçüde artmaktadır. Enerji sorunu için en etkili çözüm yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıdır. Güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal, biyokütle, hidrojen ve dalga enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından bazılarıdır. En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri

güneş enerjisidir [64]. Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülür ve binanın enerji tüketiminin belli bir kısmı yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneşten karşılanır. Fotovoltaik paneller; taşınabilir, ergonomik, çok az bakım gerektiren, kullanımı kolay, estetik görünüme sahip yarıiletken teknolojisi ile çalışan cihazlardır [65]. Günümüzde fotovoltaik paneller binaların çatılarında kullanıldığı gibi bina cephesine entegre olarak da kullanılabilirler.

Fotovoltaik panel, akümülatör, inverter, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş paneli sistemi (fotovoltaik sistem) oluştururlar (Şekil 2.17.). Fotovoltaik panellerin ilk yatırım maliyetleri yüksektir ve kendini amorti etme süreleri 3–4 yıl arasındadır [65]. Fotovoltaik panellerinin farklı çeşitleri mevcuttur ve yapıya sağladığı elektrik enerjisi miktarı yapının bulunduğu bölgenin iklim özelliklerine, gün ışığı alım miktarına, konulduğu yüzeyin eğimine, panelin yönlendirilmesine ve kalitesine bağlıdır. Fotovoltaik teknolojilerin yapıyı çevreye entegrasyonu, yenilenebilir enerji üretimi için en uygun ve cazip seçenek olarak giderek daha fazla tanınmaktadır.



Şekil 2.17. Fotovoltaik sistemin görünümü [65]

3. YAPI BİLGİ MODELLEME SİSTEMİ - BİM

Bu bölümde geçmişten günümüze mimarlık ve bilgisayar teknolojilerinin ilişkisi, bu bağlamda modern bir yaklaşım olan BIM teknolojisi, BIM ile mimarlık sektöründe uzun yıllardır kullanılan CAD programlarının karşılaştırılması, Türkiye ve dünya ölçeğinde BIM kullanımı, sürdürülebilir mimarlığın BIM teknolojisi ile ilişkisi, bina performans analizi, BIM yazılımları ve simülasyon araçları incelenecektir.

3.1 Mimarlıkta Bilgisayar Teknolojileri

Günümüzde mimarlık ile bilgisayar teknolojileri arasında sıkı bir ilişki vardır. Tasarım sürecinden inşa sürecine planlama sürecinden kullanım ve yıkım sürecine kadar her aşamada bilgisayar teknolojileri kullanılmaktadır. Mimarlıkta bilgisayar teknolojilerinin kullanımının tarihçesine ve gelişimine değinmek gerekirse, bilgisayar teknolojileri mimarlıktan önce endüstriyel tasarım, uçak, gemi, film ve müzik gibi alan ve sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Mimarlık alanında ise 90'lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır [66].

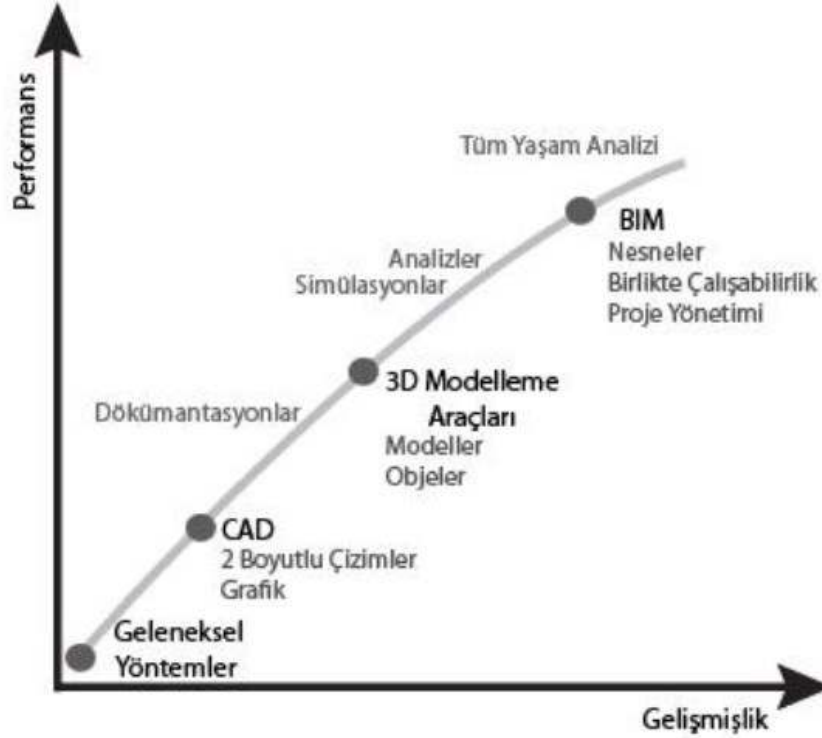
Tasarımda ve mühendislikte bilgisayarların kullanımı ilk bilgisayarların (ENIAC) ortaya çıktığı 1946 yılında başlamıştır. Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) (Computer Aided Design(CAD)) terimi ilk kez 1955-1959 yılları arasında MIT tarafından yapılan çalışmalar sırasında ortaya çıkmıştır. 1963 yılında Ivan E. Sutherland'ın MIT'deki doktora tezinde "Sketchpad-çizim levhası" adı verilen sistem bilgisayar destekli tasarımın başlangıcı olarak kabul edilir. Ardından 80'li yılların başına kadar gerek donanımsal gerekse de yazılımsal olarak birçok gelişme olmuştur. Bu noktada "VersaCAD" ve "CADkey" uygulamalarından sonra 1982 yılında Autodesk tarafından "AutoCAD" adlı sistemin çıkmasıyla BDT tüm sektörlerde yaygınlaşmaya başlamıştır [67].

Sonraki on yıl içerisinde Autocad yazılımının yeni sürümlerinin ortaya çıkması ile birlikte BDT'nin mimar, mühendis ve diğer uzmanlar tarafından ofis, büro ve firmalarda kullanımı yaygınlaşmıştır [67]. Bu noktaya kadar BDT alanında sadece iki boyutlu çizim programlarında ilerleme kaydedilmiştir. Binaların bilgisayar ortamında temsili mimari, statik, elektrik vs. ölçeğinde iki boyutlu geometrik objeler ile yapıliyordu. Ardından süreç içerisinde yaşanan gelişmeler ile birlikte üç boyutla modelleme anlayışı gelişim gösterdi ve inşaat sektöründe yaygınlaşmaya başladı [67]. Örneğin, günümüzde geniş kitleler tarafından kullanılan ve Autodesk tarafından piyasaya sürülen 3D Max adlı program 1990 yılında çıkartıldı. Böylece renk, doku ve yüzey kavramları ile birlikte BDT ile görselleştirme gelişim göstermeye başlamıştır [67].

Bir yandan yeni 2 ve 3 boyutlu programların çıkarılması bir yandan da mevcutların geliştirilmesi ile birlikte inşaat sektöründe yeni bir ihtiyaç ortaya çıkmıştır. Binaların 2D ve 3D

olarak bilgisayar ortamında ifade edilmesinin yanı sıra tasarım, inşa öncesi, sırası ve sonrasında planlanması gerekliliği belirlemiştir. Bu noktada bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde açıklanan Yapı Bilgi Modelleme (BIM) sistemi geliştirilmiştir ve ilk BIM programı Revit 2002 yılında Autodesk tarafından çıkarılmıştır. Artık BDT süreci sadece tasarım odaklı veya yapıların inşa öncesi iki ve üç boyutlu olarak ifade edilmesi olmaktan çıkıp yaşam boyu bir süreç haline dönüşmüştür. Şekil 3.1’de bilgisayar destekli tasarım araçlarının gelişimi grafiksel olarak gösterilmiştir.

Son yirmi yılda gerek BIM yazılımlarının gerekse de 3D modelleme ve görselleştirme araçlarının geliştirilmesi hem binaların yaşam boyu bilgisayar ortamında planlanması ve yönetilmesi hem de animasyonlar, render görseller ve sanal gerçeklik desteğiyle görselleştirme konusunda çok iyi bir noktaya gelinmiştir. BDT endüstrisi hala gelişmeye ve yeni olanaklar sunmaya devam etmektedir ve ilerisi için hayal dahi edilemeyecek gelişmelere açık olduğunu göstermektedir.

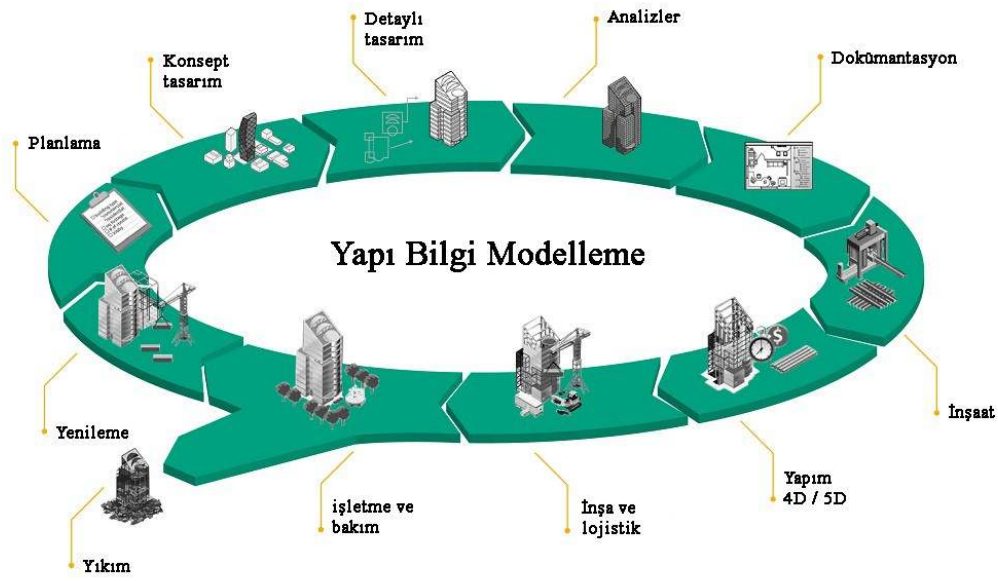


Şekil 3.1. Bilgisayar destekli tasarım araçlarının performans - gelişmişlik güzeylerinin grafiksel gösterimi [23]

3.2 BIM Nedir?

AEC endüstrisi, proje maliyetlerini düşürmek, verimliliği ve kaliteyi artırmak ve proje teslim süresini azaltmak için uzun zamandır teknikler aramıştır. Bu noktada Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ya da Bina Bilgi Modellemesi olarak adlandırılan sistem bu hedeflere ulaşma potansiyelini sunmuştur. BIM teknolojisi ile bir binanın Bina Bilgi Modeli olarak adlandırılan sanal modeli dijital

olarak inşa edilir. Bu bina bilgi modeli, binanın veri açısından zengin, nesne yönelimli, akıllı ve parametrik bir dijital temsildir [68]. Bu sanal model yapının geometrisini, mekansal ilişkilerini, coğrafi bilgilerini, yapı elemanlarının miktarlarını ve özelliklerini, maliyet tahminlerini, malzeme stoklarını ve proje zamanlamasını karakterize eder. Çizimler, tedarik detayları, gönderim süreçleri ve diğer özellikler gibi inşaat belgeleri kolayca birbiriyle ilişkilendirilebilir. Bu model ilk tasarım aşamasından yıkım aşamasına kadar binanın tüm yaşam döngüsü boyunca kullanılabilir (Şekil 3.2.) [69].



Şekil 3.2. Bina yaşam döngüsü boyunca BIM uygulaması [70]

BIM'in sadece bir yazılım olmadığını, bir süreç ve bir yazılım bütünü olduğunu belirtmek önemlidir. BIM, yalnızca üç boyutlu akıllı modeller kullanmak değil, aynı zamanda iş akışı ve proje teslim süreçlerinde önemli değişiklikler yapmak anlamına gelir [69]. BIM, proje yaşam döngüsünün tüm aşamalarında israfı azaltmak ve verimliliği optimize etmek için insanları, sistemleri, iş yapılarını ve uygulamalarını işbirlikçi bir sürece entegre etmek için yeni bir proje teslim yaklaşımı olan entegre proje teslimi kavramını desteklemektedir [71].

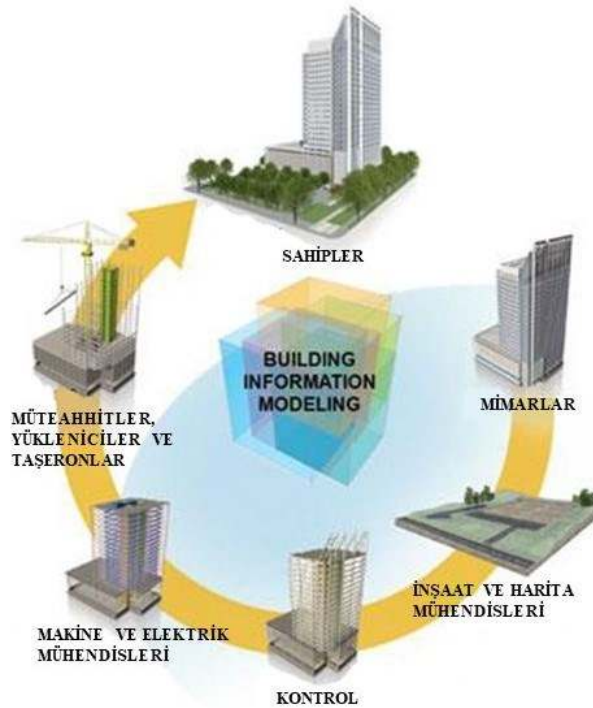
BIM, bir projenin tüm yönlerini, disiplinlerini ve sistemlerini tek bir sanal model içinde kapsayan ve tüm tasarım ekibi üyelerinin (sahipler, mimarlar, mühendisler, yükleniciler, taşeronlar ve tedarikçiler) daha doğru ve verimli bir şekilde işbirliği yapmasına izin veren sanal bir süreç olarak görülebilir (Şekil 3.3.). Model oluşturulurken, ekip üyeleri, yapının inşasından önce modelin mümkün olduğunca doğru olmasını sağlamak için proje özelliklerine ve tasarım değişikliklerine göre kendi görevlerini ve bölümlerini sürekli olarak düzenlerler ve ayarlarlar [72].

Yapı Bilgi Modelleme sisteminin amaçları ve faydaları [68]'e göre şunlardır:

- Proje yönetimi,
- Maliyet yönetimi,
- Zaman yönetimi,
- İnşa öncesinde BIM modeli aracılığıyla binadaki hataların ve kusurların tespit edilmesi,
- Nesne tabanlı bir sistem oluşundan dolayı metraj çalışmalarına katkısı,
- Görselleştirme,
- Analizler ve simülasyonlar (enerji, güneş, rüzgar vs.),
- Enerji performansı yüksek ve çevre dostu sürdürülebilir binaların üretimi,
- Proje paydaşları arasında işbirliği ve entegre proje teslim sistemi,
- Yaşam döngüsü verileri (maliyet, zaman, enerji tüketimi, CO2 emisyonu vs.)
- Daha hızlı, kaliteli ve efektif süreçler,
- Daha iyi üretim kalitesi, dokümantasyon ve müşteri hizmetleri.

Stanford Üniversitesi Entegre Tesisler Mühendisliği Merkezi BIM kullanan 32 büyük proje hakkında veri topladıktan sonra, BIM'in aşağıdaki faydalarını bildirmiştir [68]:

- Maliyet hesaplamasında en fazla %3'lük sapma,
- Maliyet tahmini oluşturmak için harcanan sürede %80'e varan azalma,
- Çakışma tespitleri ile sözleşme bedelinin % 10'una varan tasarruf ve
- Proje süresinde %7'ye varan azalma.



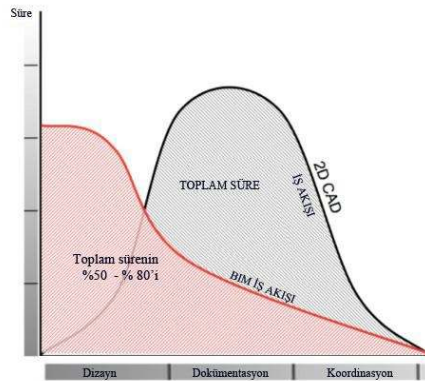
Şekil 3.3. BIM'de farklı disiplinlerin birlikte çalışabilirliğinin şematik gösterimi [73]

3.3 BIM / CAD Karşılaştırılması

BIM, tasarımdan inşaat ve işletmeden yıkıma kadar bir proje hakkında koordineli, güvenilir bilgiler üzerine kurulu entegre bir iş akışıdır. CAD ise tasarıma yardımcı olmak için bilgisayar sistemlerinin kullanılması olarak tanımlanabilir [74]. Revit ve Autocad sırasıyla en popüler olan BIM ve CAD yazılımlarıdır. BIM ve CAD arasında temel olarak üç önemli fark vardır. Bunlar: tasarım metodu, gelişim süreci ve işbirliğidir [23].

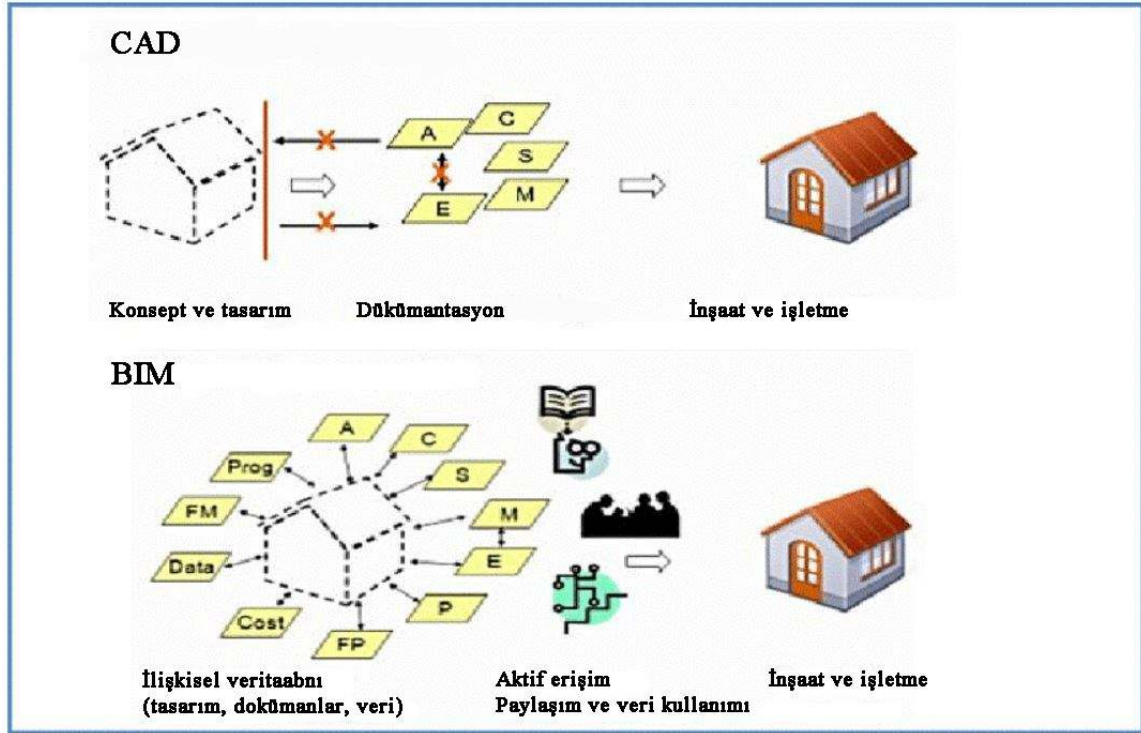
BIM ve geleneksel CAD arasındaki en önemli fark tasarım metodudur. BIM yazılımları nesne tabanlı iken CAD yazılımları vektör tabanlıdır. CAD yazılımlarında çizgi, nokta, kare, daire ve yay gibi geometrik öğeler bir araya gelerek ve çeşitli anlamlar yüklenerek mimari öğeleri temsil eder. BIM’de ise mimari öğeler nesneler ile temsil edilir. Bu nesneler fiziksel ve fonksiyonel özellikler de dahil olmak üzere çok farklı çeşit ve içerikteki bilgileri saklayabilmektedirler [23, 69]. BIM tek bir veri tabanı üzerinde çalışır ve herhangi bir yapı elemanı özelinde yapılan değişiklikler ilgili tüm dokümanlara otomatik yansır (plan, kesit, görünüş, detay, maliyetler, süre ve enerji analizleri, metrajlar vs.). Böylece tasarım ve planlama sürecinde büyük bir vakit kazancı sağlanır ve ayrıca diğer uzmanlık alanlarıyla ortak çalışma avantajı sayesinde kaliteli ve verimli projeler ortaya çıkar. CAD’e geldiğimizde ise eğer tasarımcı proje üzerinde bir düzenleme yapmak istediği takdirde ilgili tüm doküman ve paftalar özelinde manuel olarak düzenleme yapmak zorundadır. Bu da büyük bir vakit kaybına ve takım üyeleri arasında iletişimsizlik ve uyumsuzluğa sebep olmaktadır.

İki sistem arasındaki bir diğer önemli fark da dokümantasyon işlemidir. Geleneksel CAD yazılımları kullanırken proje paftalarının hazırlanması, projenin birçok farklı temsillerinin üretilmesi, gerekli analizler ve tabloların oluşturulması gibi dokümantasyon süreçleri en çok zaman kaybının yaşandığı evreler olmaktadır. BIM sisteminde ise tam tersi bir durum söylenebilir. BIM yazılımlarını kullanırken tasarım sürecinde diğer yazımlara oranla çok daha fazla vakit harcanır, fakat bu durum sonraki işlemler olan dokümantasyon, koordinasyon ve inşaat süreçlerinin hızlanmasına sebep olmaktadır [23]. Şekil 3.4’de BIM ve 2D CAD ile geliştirilen projelerin süreçleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.4. BIM ve 2D CAD ile projelerin gelişim süreçlerinin karşılaştırılmaları [23]

BIM ve CAD arasındaki bir diğer fark ise BIM ortamında tüm disiplinler için sağlanan işbirliği imkanlarıdır. BIM, bir projede yer alan herkesin (mimari, inşaat, elektrik, makine vs.) aynı, tutarlı ve güncel verileri ofiste masa başında, müşterinin bulunduğu yerde veya şantiyede kullanmasına ve paylaşmasına olanak tanır. BIM’de projenin tüm paydaşları ve farklı disiplinler uyumlu ve koordineli bir şekilde işbirliği içerisinde çalışabilir ve böylece daha kaliteli yapılar üretilir [23, 75] (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. BIM ve CAD karşılaştırılması [69]

Martin Pszczolka yayınladığı makalede [76] BIM ve CAD arasındaki temel 10 farka değinmiştir:

- Tasarım metodu,
- Proje verileri / Dosya yapısı,
- Giriş verileri / Mevcut durum,
- Projedeki çakışmalar / hatalar,
- Gerçek ile tutarlı projelendirme,
- İdari konular,
- Baskı stili,
- Projede iletişim,
- Proje kararları / Danışmanlık sistemi ve
- Projedeki değişiklikler / düzenlemeler.

3.4 Dünyada ve Türkiye’de BIM

BIM teknolojisinin inşaat sektöründe kullanılma oranı dünya çapında değişmektedir. Bazı ülkelerde BIM yöntemlerinin tanıtımı zaten oldukça ileri düzeyde iken bazılarında ise hala geleneksel CAD sistemleri yoğun olarak kullanılmaktadır. Örneğin; Singapur, Finlandiya, Güney Kore, ABD, İngiltere ve Avustralya BIM öncüleri arasında yer almaktadır. Tüm bu ülkelerde, hükümet ve yan kuruluşları BIM'in uygulanmasını talep etmekte ve teşvik etmede önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin Finlandiya’da 2007’den bu yana 1 milyon avroyu aşan tahmini maliyetleri olan tüm kamu projeleri için yapı bilgi modelleme sisteminin kullanılması zorunludur [77].

Günümüzde BIM'in en yaygın kullanıldığı ülke ABD’dir. ABD BIM'in geliştirilmesinde önemli bir role sahiptir [78]. Mesela, 2013 yılında ilk kez American Institute of Architects (AIA) tarafından sağlanan şartname, tüm dünyada birçok BIM projesi için temel olarak kullanılmaktadır. Bir diğer dikkat çekici örnek ise 2011 yılında İngiliz Hükümeti tarafından BIM yöntem ve teknolojilerinin kullanımı yoluyla inşaat projelerinin maliyetlerini düşürmek ve karbon ayak izini azaltmak amacıyla başlatılan ulusal stratejidir. İngiltere hükümeti uluslararası pazarda önemli bir rekabet avantajı elde etmek için İngiliz inşaat endüstrisini “yeni bir dijital inşaat çağının öncüsü haline getirmeyi ve İngiltere’yi BIM’de dünya lideri haline getirmeyi” hedeflemektedir [77].

Diğer birçok Avrupa ülkesi kamu inşaat sektöründe BIM'i uygulamak için girişimlere başlamıştır. Bazıları hali hazırda zaten kamu projelerinde BIM kullanımını zorunlu kılarken diğerleri de çok yakında bunu yapmayı planlamaktadır. BIM uygulaması konusunda Avrupa’da en gelişmiş ülkeler arasında Finlandiya, İsveç, Norveç ve Hollanda bulunmaktadır. Fransa, 2014 yılında “Bina için Dijital Geçiş” adlı planı ile inşaat sektöründe dijital teknolojilere geçişi desteklemenin ilk adımını atmıştır. Almanya’da ise Ulaştırma Bakanlığı, 2015 yılında, 2020’den itibaren tüm federal altyapı projeleri için BIM yöntemlerinin zorunlu kullanımını tanımlayan bir BIM Yol Haritası yayınlamıştır [77].

Asya’da, Singapur’un yanı sıra, Güney Kore ve Çin, BIM'in benimsenmesi açısından en gelişmiş ülkelerdir. Singapur 2004 yılında kamu inşaat projelerinde BIM kullanımını zorunlu kılmıştır. Güney Kore, BIM'i kullanma konusunda uzun bir geleneğe sahiptir ve 2010 yılında ilk BIM yol haritasını yayınlamıştır. Güney Kore 2016’ten bu yana 50 milyar Won’un üzerindeki tüm kamu inşaat projeleri için BIM'i zorunlu kılmaktadır. Çin ise 2001 yılında BIM yönergelerini ve standartlarını geliştirmeye başlamıştır. 2011 yılında, Konut ve Kentsel-Kırsal Kalkınma Bakanlığı (MOHURD), BIM'i inşaat endüstrisini desteklemek ve geliştirmek için temel bir teknoloji olarak vurgulayan “İnşaat Endüstrisi Bilişiminin Gelişimi” adlı taslağı yayınlamıştır [77].

Türkiye’de inşaat sektöründe BIM kullanımı ise pek yaygın değildir. Ancak ülkemizde gerek küçük çaplı firmalarda gerekse de uluslararası projelerde görev alan büyük firmalarda BIM kullanımı gittikçe artmaktadır. BIM’in bina üretimine sağladığı sayısız avantajdan dolayı inşaat sektöründe benimsenmesi her geçen gün artsa da BIM’in bazı dezavantajlarından ve firmaların

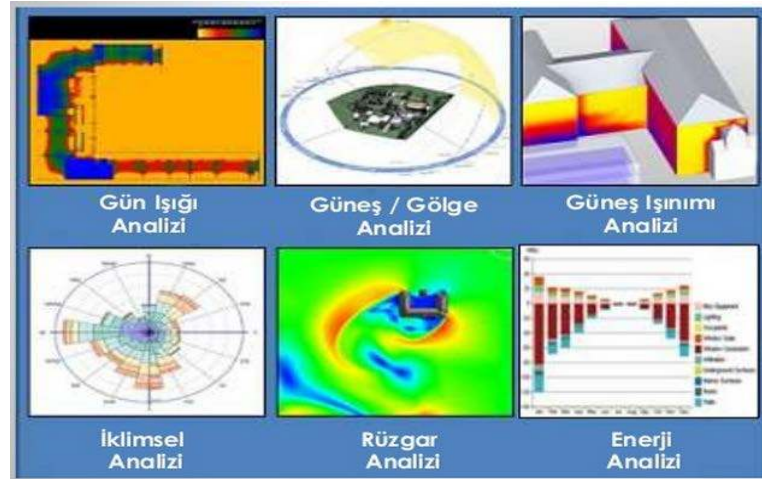
önündeki engellerden dolayı adaptasyon süreci biraz uzamaktadır. BIM kullanımının önündeki engeller BIM konusunda uzman iş gücü eksikliği, BIM'in potansiyel faydalarının firmalar tarafından henüz anlaşılamamış olması, teknik yetersizlik ve firmaların alışkın oldukları CAD sisteminden kopmak istememeleridir. Ayrıca bazı ülkelerde firmaların önünde referans alabilecekleri veya uygulayabilecekleri standartların ve yardımcı kitapların bulunmayışı da önemli bir etkidir.

3.5 BIM ve Sürdürülebilir Mimarlık

Binalar tüm yaşam döngüleri boyunca yüksek oranda enerji tüketmekte ve karbon salınımına neden olmaktadır. Artan enerji maliyetleri ve çevresel kaygılar sebebiyle binaların çevreye verdikleri zararlı etkileri sınırlamak için enerji performansı yüksek, atık miktarı ve karbon salınımı düşük olan sürdürülebilir binalara ihtiyaç vardır [36, 79, 80].

Bir binanın erken tasarım ve ön inşaat aşamaları, sürdürülebilirlik özellikleri hakkında karar vermek için en kritik zamanlardır. CAD sistemi genellikle tasarım geliştirmenin ilk aşamalarında sürdürülebilirlik analizleri yapma kabiliyetinden yoksundur. Bina performans analizleri genellikle mimari tasarım ve dokümantasyon sürecinden sonra yapılır. Tasarım süreci boyunca sürdürülebilirliği analiz etmedeki bu başarısızlık, yüksek performanslı binalar üretebilmek için tasarımda verimsiz bir geriye dönük modifikasyon süreci ile sonuçlanır [36, 80].

Erken tasarım ve ön inşaat aşamalarında bina performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için, binanın geometrisi, ölçüleri, malzemeleri, konumu, bağlamı, iklimsel bilgi ve mekanik – elektrik - sıhhi tesisat (MEP) sistemleri ile ilgili kapsamlı bir veri setine erişim gereklidir. BIM farklı disiplinlere ait bilgilerin tek bir model içerisinde depolanmasına izin verdiğinden, tasarım sürecinde çevresel performans analizlerinin (enerji tüketimi, gün ışığı alımı, rüzgar vs.) (Şekil 3.6.) yapılabilmesi ve sürdürülebilirlik önlemlerinin tam ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için fırsat sunmaktadır [80].



Şekil 3.6. BIM ortamında analiz alanları [79]

BIM ve yeşil binaların birbirine bağlanması “Yeşil BIM (Green BIM)” kavramı olarak adlandırılmaktadır. [81], yeşil BIM'i "proje yaşam döngüsü boyunca bina enerji verimliliği performansını artıran ve belirlenen sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesini kolaylaştıran koordineli ve tutarlı bina verileri üretme ve yönetme model tabanlı bir süreç" olarak tanımlamıştır”. BIM yaşam döngüsü boyunca yeşil binaların çeşitli yönlerini destekleyebilir (Şekil 3.8.). BIM, tasarım aşamasında çeşitli tasarım alternatiflerinin bina performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılabilir ve böylece tasarımcıların çevresel olarak daha rasyonel kararlar alabilmeleri sağlanır (gün ışığı, gölge, enerji tüketimi, CO2 salınımı, aydınlatma, atık vs.) (Şekil 3.7.). BIM teknolojisi inşaat sürecinin çevresel etkilerini azaltmak için çeşitli verimli çözümler sunabilir. Örneğin, BIM sürdürülebilir inşaatın önemli bir yönü olan atıkların azaltılmasına katkıda bulunabilir [82].

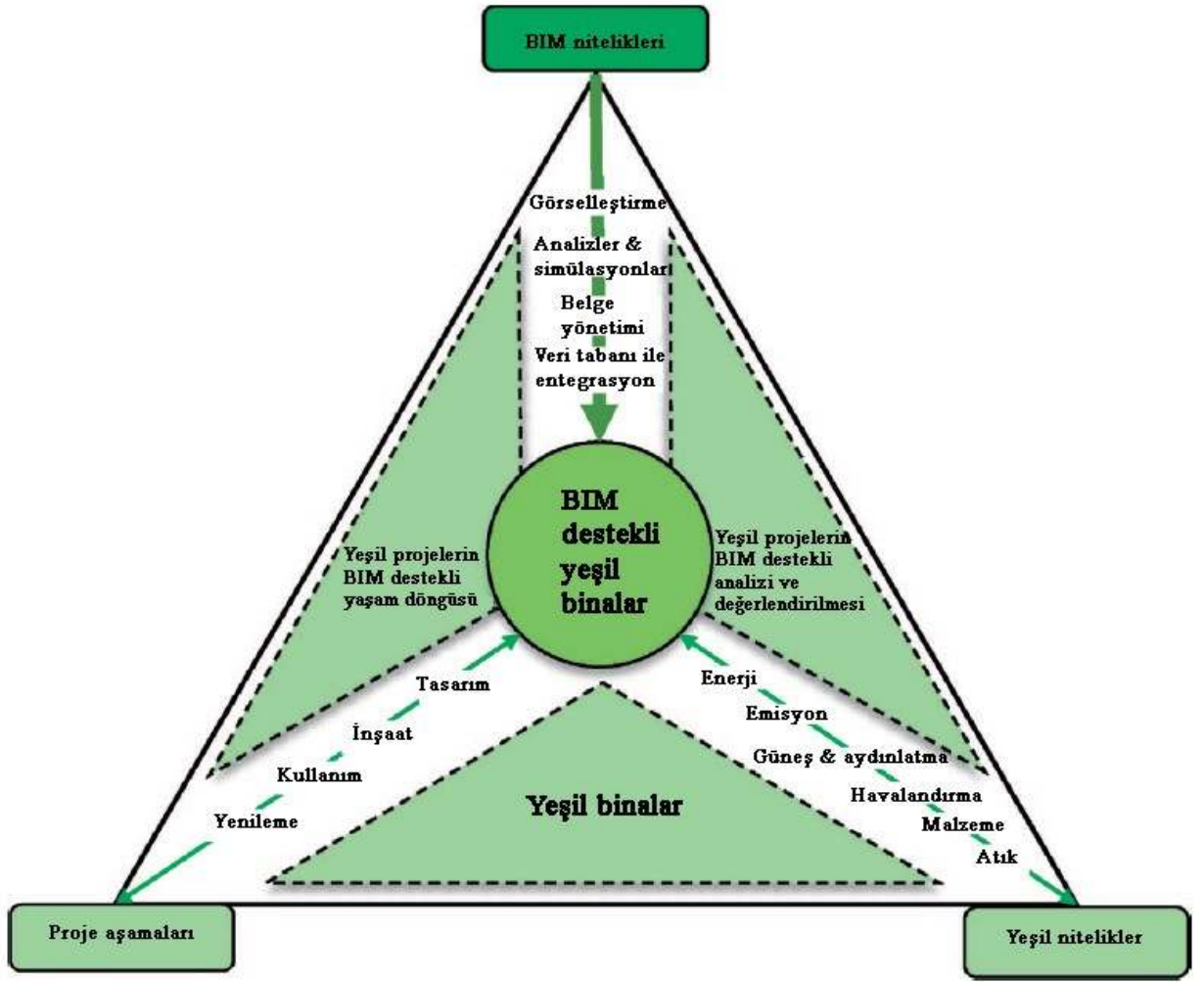


Şekil 3.7. BIM solar ışınım analizi [83]

BIM, binaların işletme aşamasındaki sürdürülebilirlik performansının izlenmesinde de kullanılabilir. Binaların işletme aşamasında sürdürülebilirlik performansının izlenmesi, tasarım aşamasında belirlenen hedeflere kıyasla gerçek performansı doğrulayabildiği için çok önemlidir. Son olarak BIM proje yenilemelerinde ve yıkımında sürdürülebilirlik konularını (atık yönetimi) ele almak amacıyla uygulanabilir çözümler sunmak için kullanılabilir (Şekil 3.9.) [82].



Şekil 3.8. Yeşil binaların BIM destekli yaşam döngüleri [82]



Şekil 3.9. Yeşil BIM taksonomisi [82]

Kriegel ve Nies [84], BIM'in sürdürülebilir tasarımın aşağıdaki yönlerine yardımcı olabileceğini belirtmiştir:

- Bina yönelimi (iyi bir bina yönelimi seçerek enerji maliyetlerini azaltabilir)
- Bina formu (binanın formu ve kabuğu analiz ve optimize edilebilir)
- Gün ışığı analizi
- Su tasarrufu / toplama (binadaki su ihtiyacı azaltılabilir)
- Enerji modellemesi (enerji ihtiyaçlarının azaltmak ve yenilenebilir enerji seçeneklerini analiz etmek düşük enerji maliyetlerine katkıda bulunabilir)
- Sürdürülebilir malzemeler (malzeme ihtiyaçları azaltılabilir ve geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılabilir)
- Saha ve lojistik yönetimi (atık ve karbon ayak izleri azaltılabilir)

3.5.1 Mevcut Binalarda BIM Kullanımı

Dünya geneli yeni yapılacak binalar toplam bina stokunun yaklaşık %1’lik kısmını oluşturur. Dolayısıyla inşaat sektöründe sera gazı emisyonlarını en aza indirmek için mevcut binaların enerji performanslarının artırılması ciddi önem arz etmektedir. Mevcut binaların yenilenmesi, bina enerji verimliliğinin artırılmasına, enerji tüketiminin ve CO2 emisyonlarının azaltılmasına sağladığı katkıdan dolayı küresel ölçekte ilgi çekmektedir [59]. Bunun dışında yenileme çalışmalarının binalara ekonomik olarak sağladığı faydalar da bir diğer önemli etkidir [85]. Yeşil güçlendirme (Green Retrofitting), yıkım ve yeniden inşaya kıyasla yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının azaltılmasına daha fazla yardımcı olmaktadır [86]. Çalışmalar, dünya genelinde ülkelerin enerji verimliliği hedeflerine ulaşmak için güçlendirme projelerine yatırım yaptıklarını ve teşvik eden politikalar geliştirdiklerini göstermektedir [87].

Enerji yenileme binanın enerji tüketimini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen bileşenlerin iyileştirilmesi anlamına gelir. Doğrudan bileşenler işlevlerinin bir parçası olarak aydınlatma, ısıtma, soğutma vb. amaçlı enerji kullanan ekipmanları içerir. Dolaylı bileşenler ise güneş radyasyonu ve hava sızması gibi çevresel faktörleri kontrol ederek binaların enerji tüketimi üzerinde etkisi olan duvar yalıtımı, cam tipi ve diğer bina kabuğu bileşenlerini içerir [87]. Bina kabuğunun güçlendirilmesi, bina enerji performansı üzerinde önemli etki yaratan en iyi stratejilerden biridir. Gelişmiş pencere camları, ısı yalıtımı, gölgeleme araçları, ısı performansı yüksek duvar ve çatı malzemeleri yaygın bina kabuğu yenileme seçenekleridir. Bunun dışında HVAC sisteminin ve aydınlatma armatürlerinin enerji verimli seçenekler ile değiştirilmesi, fotovoltaiik panel kurulumu ve yeşil çatı uygulaması diğer önemli bina performans güçlendirme örnekleridir [88].

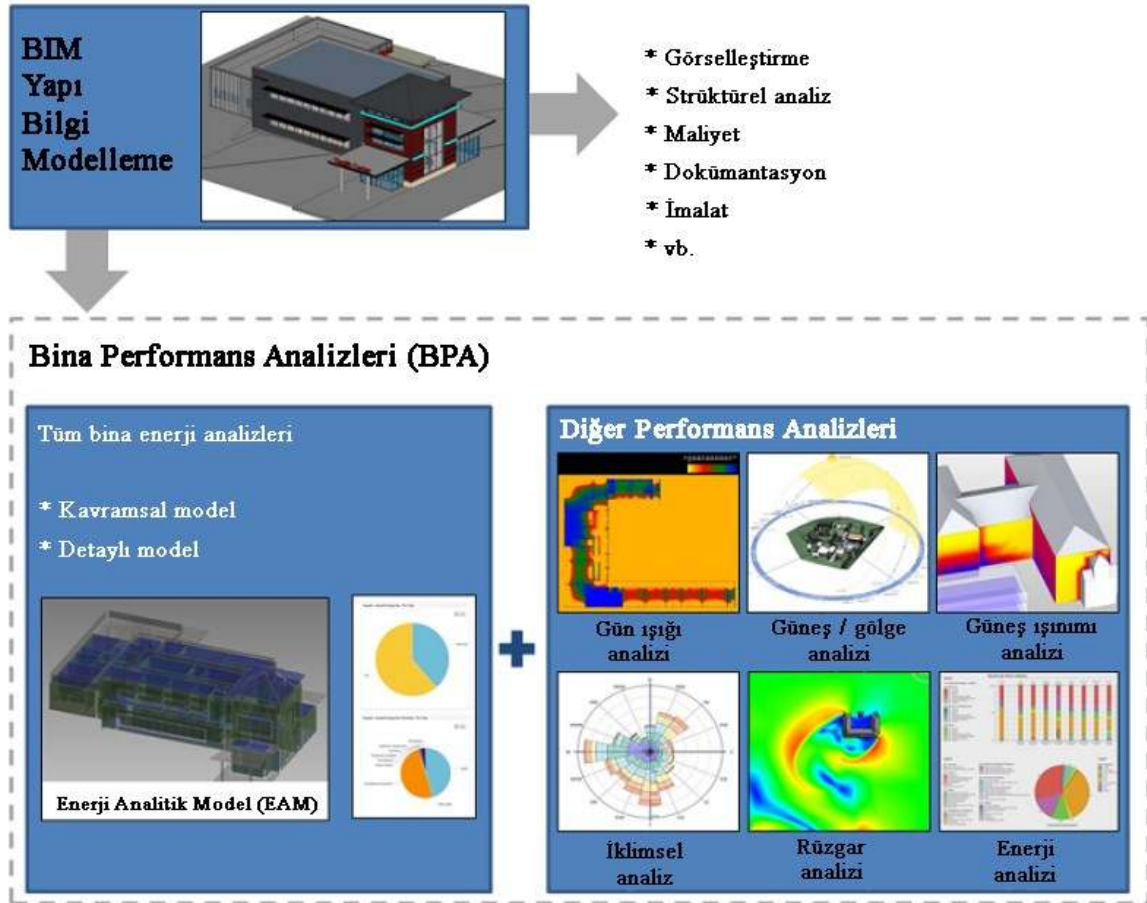
Mevcut binaların yenileme çalışmaları için BIM’in benimsenmesi gelişmekte olan bir araştırma konusudur [87]. BIM yazılımları, veri açısından zengin, nesne yönelimli, akıllı ve parametrik 3D model aracılığıyla mevcut binaların enerji performansının analiz edilmesine olanak tanır ve böylece binaların güçlendirme kapsamı belirlenebilir. Ayrıca farklı güçlendirme seçeneklerinin simüle ve analiz edilmesine fırsat tanıyarak mevcut binalar için en iyi güçlendirme senaryosu oluşturulabilir. Böylece BIM teknolojileri ile mevcut binaların enerji odaklı yenilenmesini gerçekleştirmek, binaların sürdürülebilirlik derecelendirmelerinin ve sertifikasyonlarının daha kısa sürede elde edilmesine yardımcı olacaktır [89].

3.6 Bina Performans Analizi

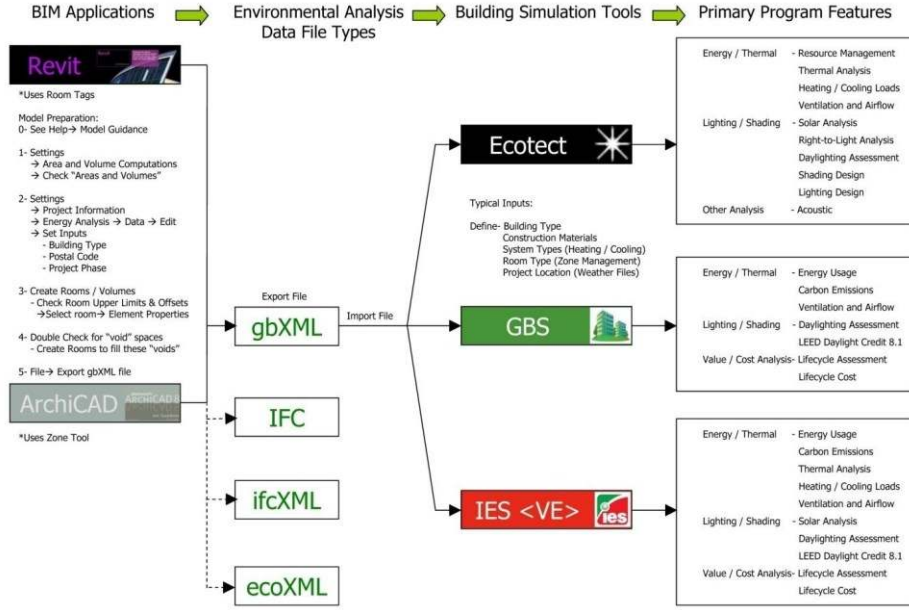
Enerji verimli bir bina tasarlamak, inşa etmek ve yönetmek karmaşık ve göz korkutucu bir süreç olabilir. Bina performans analizleri (BPA), binaların nasıl performans gösterdiğini, bu performansı neyin yönlendirdiğini ve onu etkilemek ve iyileştirmek için neler yapabileceğimizi

sürekli olarak değerlendirebileceğimiz yinelemeli bir sürecin uygulanmasına imkan verir ve böylece tasarımcıların performansı etkin bir şekilde iyileştirecek ve binaların çevresel etkilerini azaltacak daha bilinçli kararlar almasına yardımcı olabilir [90, 91]. BPA sırasında kullanıcının istekleri doğrultusunda birçok çeşit analiz çalışması yapılabilir. Örneğin; enerji tüketimi, gün ışığı, gölge, rüzgar ve su kullanımı analizi bunlardan sayılabilir [91]. Bu tez kapsamında uygulama çalışmasında binaların enerji tüketimi özelinde analizler yapılmıştır.

BPA yapılırken binanın geometrisi, tipi, formu, kabuğu, HVAC, aydınlatma ve iklim gibi kapsamlı bir veri setine ihtiyaç vardır [91]. BIM bünyesinde barındırdığı veri açısından zengin 3D modeli sayesinde BPA için en yaygın olarak kullanılan platformdur. Şekil 3.10'da BPA yöntemi açıklanmaktadır. BIM'de binanın modeli yukarıda belirtilen veriler kullanılarak oluşturulduktan sonra, BPA oluşturulan yapı bilgi modelinin enerji analitik modeli kullanılarak yapılmaktadır [1]. Şekil 3.11'de ise BIM yazılımlarının ve bina simülasyon araçlarının entegrasyonu gösterilmiştir.



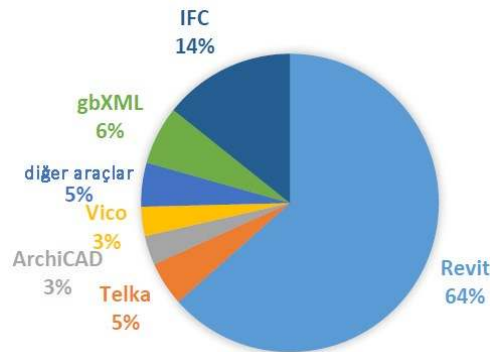
Şekil 3.10. BPA ana yapısı [91]



Şekil 3.11. BIM yazılımlarının ve bina simülasyon araçlarının entegrasyonu [92]

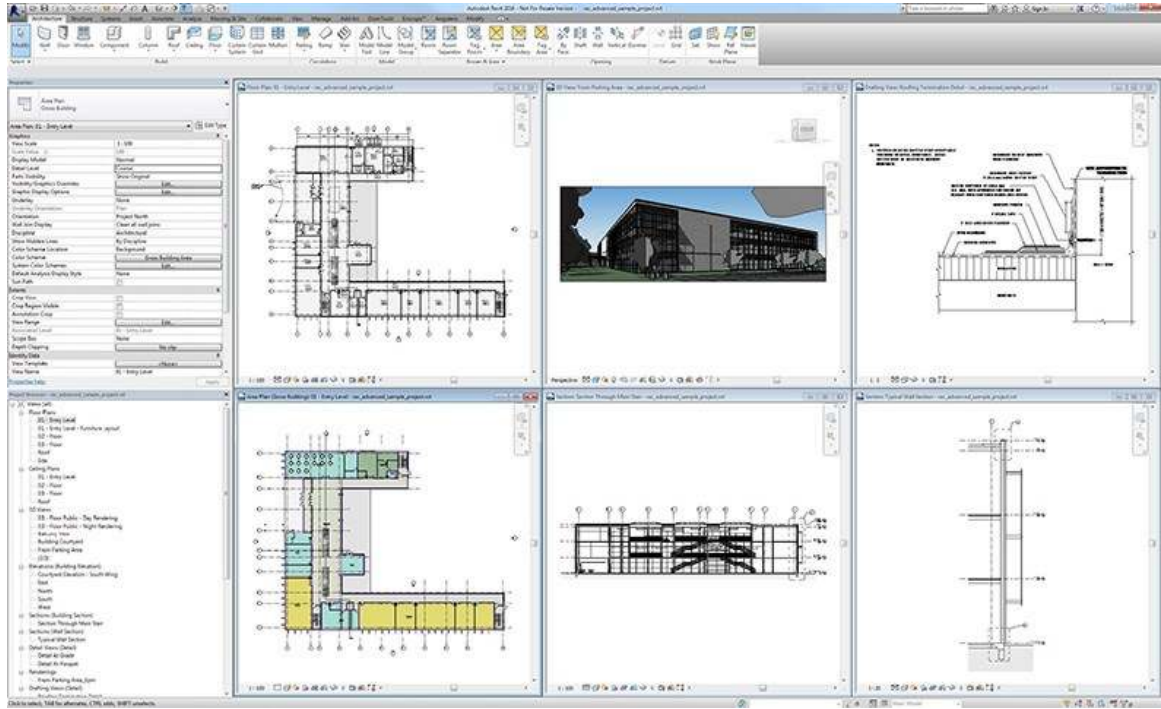
3.6.1 BIM Yazılımları

BPA için binanın 3D modelinin oluşturulduğu ve özelliklerinin atandığı BIM modelleme aracına ihtiyaç duyulur. BIM yazılımlarının temel amacı, bir binanın doğru bir 3D sanal temsilinin geliştirilmesidir. Bu model enerji performansı simülasyonlarının oluşturulabilmesi için gerekli tüm verileri içermektedir. BIM yazılımları ayrıca simülasyon sonuçlarında tanımlanan çözümlerin uygulanmasını kolaylaştırarak modifikasyonların gerçekleştirilmesine de olanak sağlamaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan iki BIM yazılımı vardır: Revit ve Archicad. Autodesk Revit, araştırmacılar arasında en popüler BIM modelleme aracıdır [93]. [93]'te incelenilen 63 makalenin 42'sinde BIM aracı olarak Revit kullanılmıştır. [94]'te ise değerlendirilen makalelerin %64'ünde Revit BIM yazılımı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.12.). Autodesk Revit, 2012'den bu yana İngiltere'de proje teslim süreçlerinin %50'sinden fazlasında tercih edilen en popüler BIM modelleme aracı olmuştur.



Şekil 3.12. BPA için BIM yazılımları kullanımı [94]

Revit, 1997 yılında geliştirilen ve Autodesk tarafından 2002 yılında satın alınan bir BIM yazılımıdır. Revit, tüm proje ekibi (mimari, strüktür, elektrik ve makine) için karmaşık tasarım ve işbirliği araçlarını içerir. Geleneksel CAD yazılımlarının evrimsel bir gelişmesi olarak görülen Revit, bina profesyonellerinin iletişim kurma ve modelleme iş akışını yönetme biçiminde devrim yaratmıştır. Revit programının ara yüzü şekil 3.13'te gösterilmiştir [95].



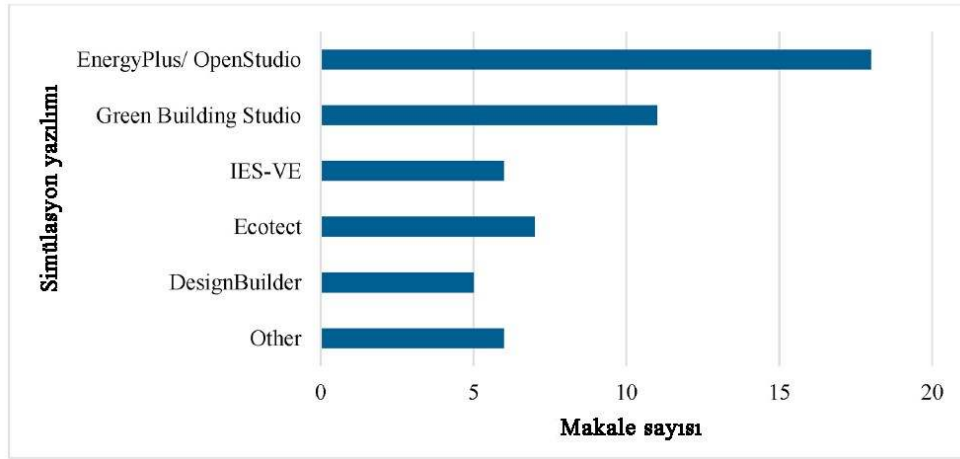
Şekil 3.13. Revit arayüzü [95]

Revit yazılımının genel olarak avantajları şunlardır [1, 95, 96, 97, 98]:

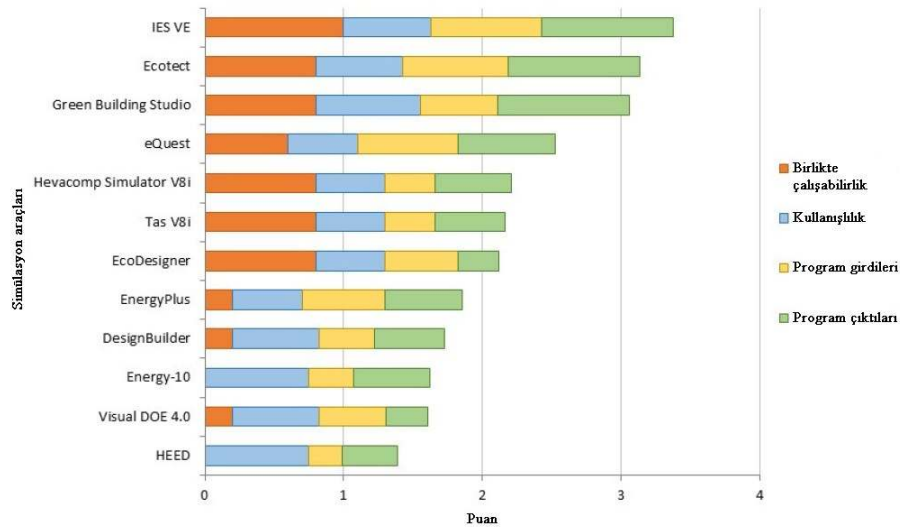
- Parametrik modelleme / bileşenler / veri
- Otomasyon
- İşbirliği kolaylığı
- Diğer yazılımlar ile entegrasyon
- Büyük kütüphane
- Dokümantasyon
- Kullanıcı dostu
- Proje / maliyet / zaman yönetimi
- Hata tespiti
- Analizler ve simülasyonlar (enerji, güneş, rüzgar vs.)
- Metraj çalışmaları
- 2D ve 3D görselleştirme
- Sanal gerçeklik araçları ile tam uyum

3.6.2 Simülasyon Araçları

BPA için BIM yazılımlarının yanı sıra simülasyon araçlarına ihtiyaç vardır. Son yirmi yılda enerji, yaşam döngüsü, CO2 salınımı, yenilenebilir enerji potansiyeli, termal performans, su kullanımı, aydınlatma, HVAC sistemi, gün ışığı, rüzgar, doğal havalandırma ve maliyet analizi özelliklerine sahip olan birçok simülasyon aracı geliştirilmiştir [99]. BPA için simülasyon aracı seçiminde bazı önemli kriterler vardır: arayüz, diğer programlar ile entegrasyon, içerik ve potansiyel, giriş ve çıkış verileri ve erişim. Green Building Studio (GBS), IES, Energy Plus, eQuest, Design Builder ve Ecotect en yaygın olarak kullanılan simülasyon araçlarıdır. [93]'te incelenilen makalelerin çoğunda Energy Plus ve GBS ağırlıklı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.14.). [100]'de simülasyon araçları birlikte çalışabilirlik, kullanışlılık, program girdi ve çıktıları olmak üzere 4 kriter üzerinden değerlendirilmiştir ve IES VE, Ecotect ve GBS en yüksek skor değerinde sahip olan ilk üç simülasyon aracı olmuştur (Şekil 3.15.). Bu tez kapsamında GBS uygulama çalışmasında simülasyon aracı olarak kullanılmıştır.



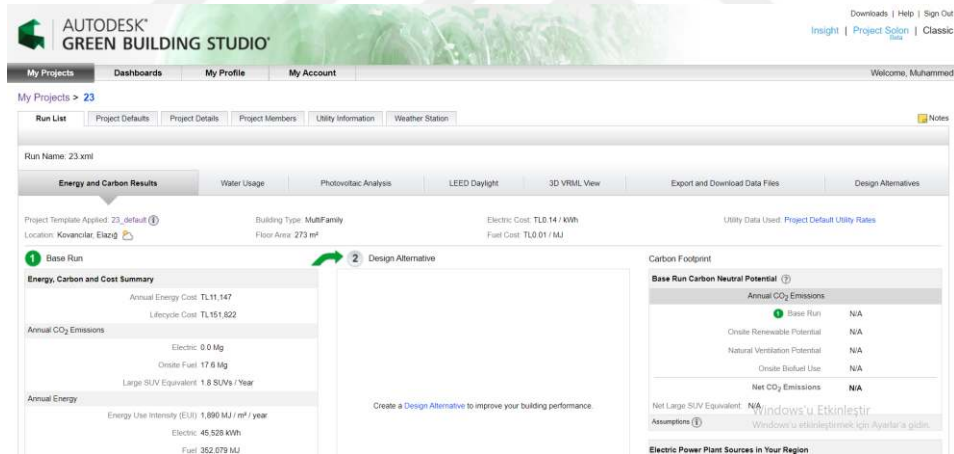
Şekil 3.14. BPA için simülasyon araçları kullanımı [93]



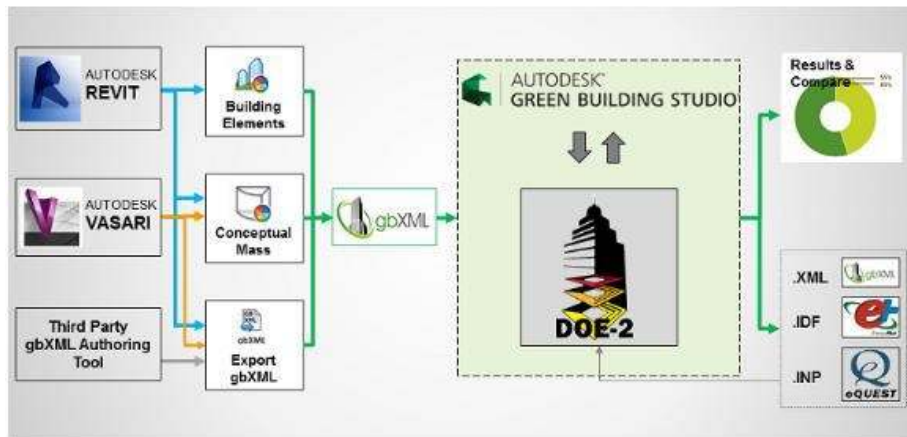
Şekil 3.15. BPA için simülasyon araçlarının değerlendirme puanları [100]

GBS tüm bina enerji analizi için web tabanlı bir simülasyon aracıdır. DOE - 2 simülasyon motoruna dayanır ve hesaplamalarda ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning) standartlarını temel alır. GBS herhangi bir gbXML (Green Building Xtensible Markup Language) dosyası üzerinde analiz çalışması yapabilir, bu nedenle gbXML dışı aktarma yeteneğine sahip herhangi bir yazılım GBS ile entegre çalışabilir. GBS'nin 3D model oluşturma özelliği yoktur ve yalnızca dış kaynaklı verilere bağlıdır. GBS bulut tabanlı bir araç olduğundan, bir ana makineye yüklenemez. En büyük avantajlarından biri simülasyon sonuçlarının internet bağlantısı olan herhangi bir yerde görüntülenebilmesidir [49, 101, 102]. Şekil 3.16'da GBS aracının arayüzü gösterilmiştir.

GBS bünyesinde enerji kullanımı, CO2 emisyonu, su kullanımı, maliyet analizi, fotovoltaik analiz ve güneş ışığı analizlerini kapsayan hesaplamalar yapılabilmektedir [49]. GBS erken tasarım ve yenileme aşamasında binanın performansını arttırmaya yönelik alternatif senaryoların oluşturulmasına olanak tanıyarak çevre dostu sürdürülebilir binaların üretimine katkıda bulunmaktadır. Revit ve GBS bina performans analizleri için entegre olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 3.17'de Revit ve GBS entegre çalışma şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.16. GBS arayüzü

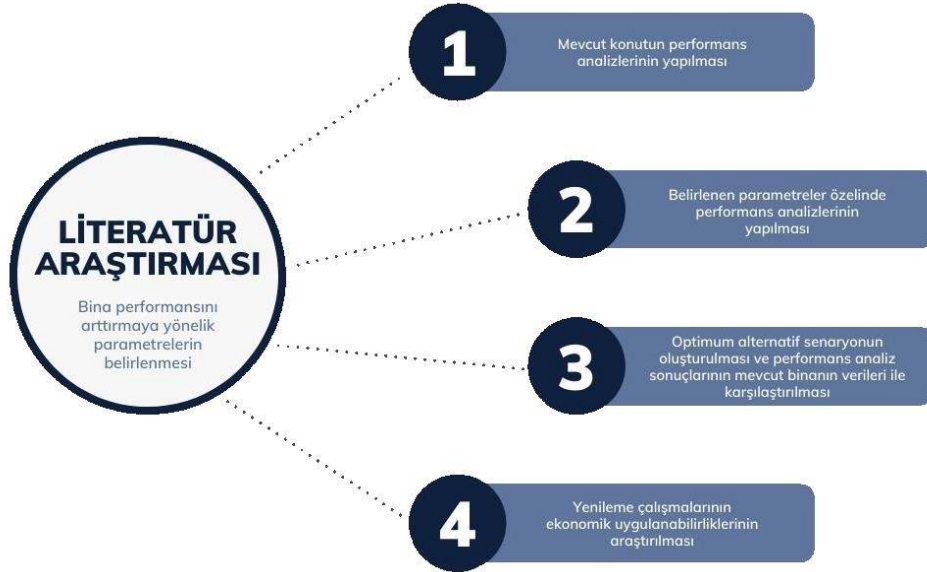


Şekil 3.17. Revit ve GBS çalışma şeması [49]

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Bu tezde BIM teknolojilerinin mevcut binaların enerji performansını değerlendirmeye ve arttırmaya yönelik kullanımını test etmek amacıyla bir uygulama çalışması yapılmıştır. Literatürde yer alan çoğu çalışmanın aksine, BIM araçlarının erken tasarım aşamasında değil de bina güçlendirme / yenileme amaçlı kullanımının değerlendirilmesi çalışmanın özgünlük değerini arttırmıştır. Ayrıca, yenileme çalışmalarının binalar üzerindeki etkilerini enerji tüketimi (yıllık / yaşam boyu) (yakıt ve elektrik), CO2 salınımı ve maliyet (yıllık / yaşam boyu) verileri üzerinden incelenmesi literatürde sıklıkla üzerinde durulan bir konu değildir.

Çalışmanın bir diğer ayırtıcı özelliği ise toplamda 8 parametre özelinde analizler yapılarak kapsamlı sonuçlar elde edilmesidir. Yapılan güçlendirme çalışmalarının ilk maliyetleri ve binada sağlayacağı tasarruflar göz önüne alınarak yatırımların geri dönüş süreleri hesaplanmıştır. Böylece güçlendirme çalışmalarının mevcut konut stokuna sağladığı çevresel etkilerin yanı sıra ekonomik olarak da uygulanabilirlikleri dikkate alınmıştır. Şekil 4.1’de çalışmasının akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışma akış şeması

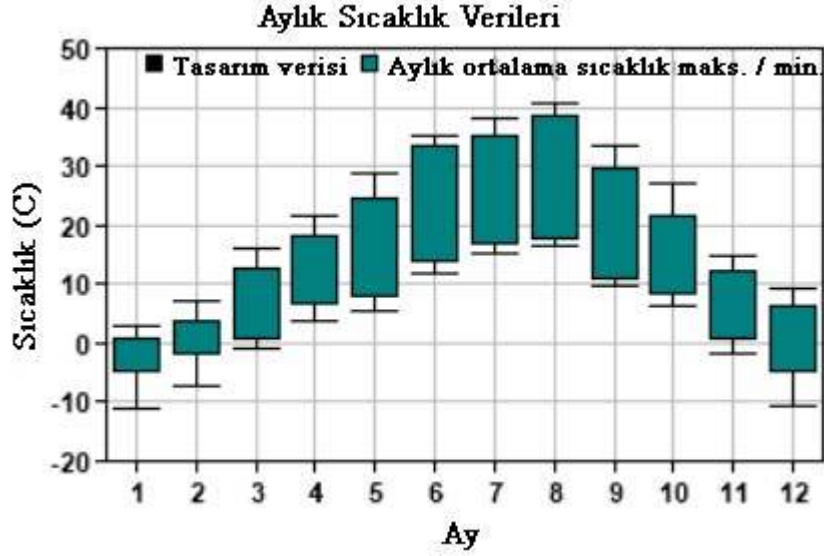
4.1 Mevcut Konut Bilgileri

Örnek konut zemin + 2 kattan oluşmaktadır ve mevcut toplam kullanıcı sayısı 9 kişidir. Her kat kendi içerisinde salon, oturma odası, 2 yatak odası, mutfak, tuvalet ve banyodan oluşmaktadır. Çatı katı yüklük olarak kullanılmaktadır. Bina kullanım alanı 254 m²'dir. Binanın 4 cephesi açıktır ve kuzey-güney doğrultusundadır. Binanın cephe saydamlık oranları güney cephe için %15, kuzey için %11, doğu için %15 ve batı için %25'dir. Şekil 4.2’de mevcut konuta ait görseller verilmiştir.



Şekil 4.2. Mevcut konuta ait görseller

Örnek konut, Türkiye’de kışları soğuk ve sert, yazları sıcak ve kuru olarak geçiren, 38.76 kuzey enlemi ile 39.88 doğu boylamına sahip Elazığ ilinin Kovancılar ilçesinde yer almaktadır. Şekil 4.3’te konutun konumunun aylık sıcaklık verileri gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Kovancılar / Elazığ aylık sıcaklık verileri

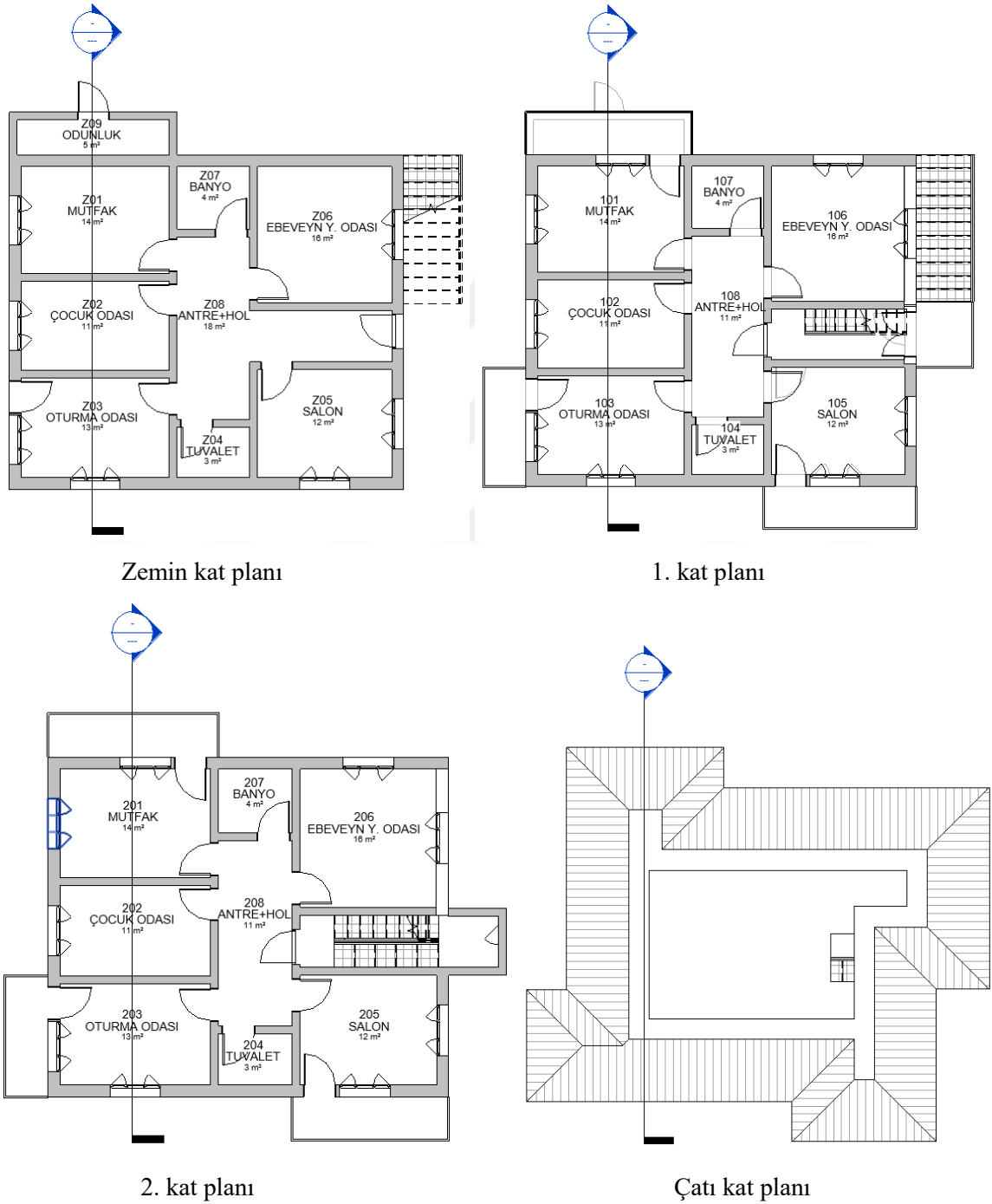
Binanın dış duvarları 30 cm tuğla + 3 cm sıva + boyadan oluşmaktadır ve ısı yalıtımı bulunmamaktadır. Döşemeler 15 cm betonarme + 5 cm tesviye betonu + 3 cm laminat kaplamadan oluşmaktadır. Bina deforme olmuş bir metal çatı kaplama malzemesine sahiptir ve kötü hava koşullarında su geçirmektedir. Pencerelem zemin kat ve merdiven katı hariç çift camlıdır. Bina bileşenlerinin U değerleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Bina bileşeni	Isı geçirgenlik katsayısı (U)
Dış duvar	1.58
İç duvar	2.33
Çatı	0.70
Döşeme	2.48
Pencere	3.13(23 adet), 6.70(8 adet), 2.86(1 adet)

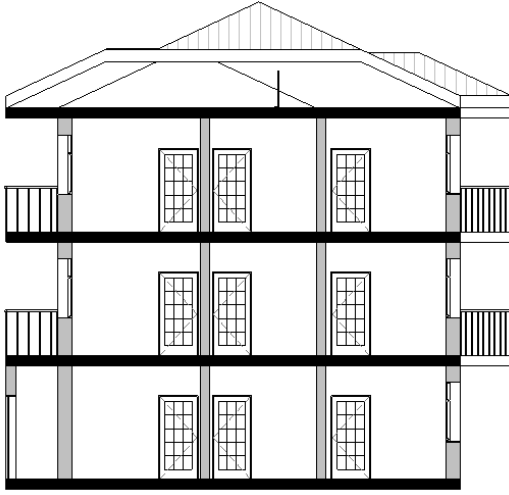
Tablo 4.1. Bina bileşenlerinin ısı geçirgenlik katsayıları

4.2 Bina Modelinin Geliştirilmesi

Autodesk Revit kullanılarak seçilen binanın 3D modeli oluşturulmuştur. Model hazırlanırken binanın verilerinin doğru atanmasına dikkat edilmiştir: bina geometrisi, bina malzeme / bileşenlerinin özellikleri, bina yönlendirilmesi, konum, iklim, iç ve dış ortam verileri. Şekil 4.4'te binanın kat planları, şekil 4.5'te ise kesit, 3D model ve render görsel gösterilmiştir.



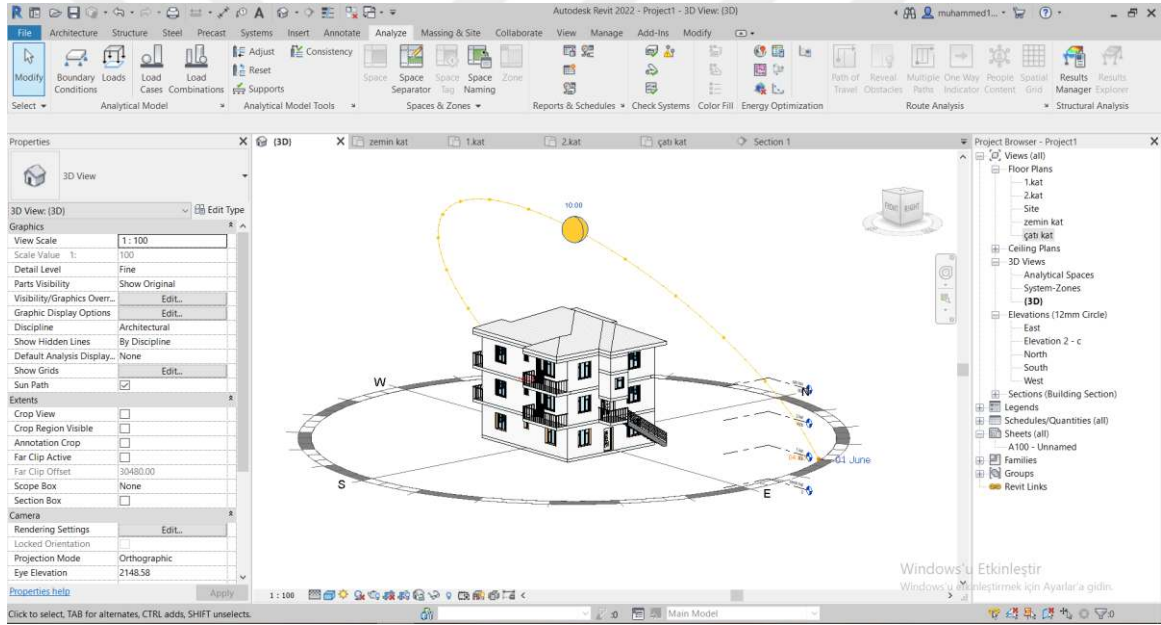
Şekil 4.4. Örnek konuta ait kat planları



Kesit



Render görsel

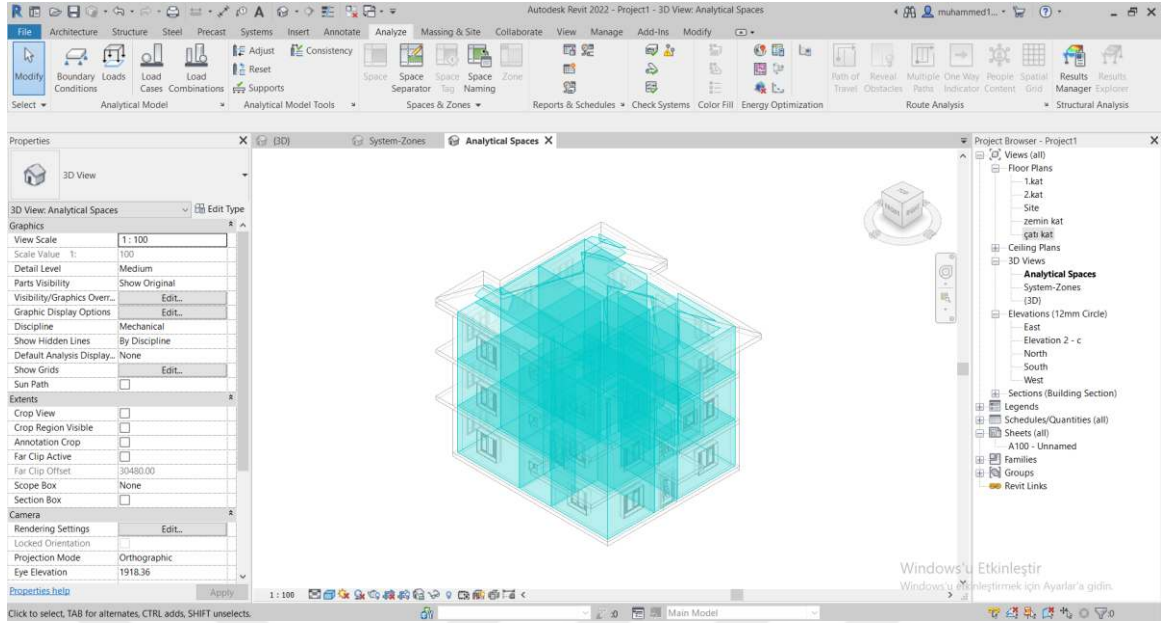


3D model

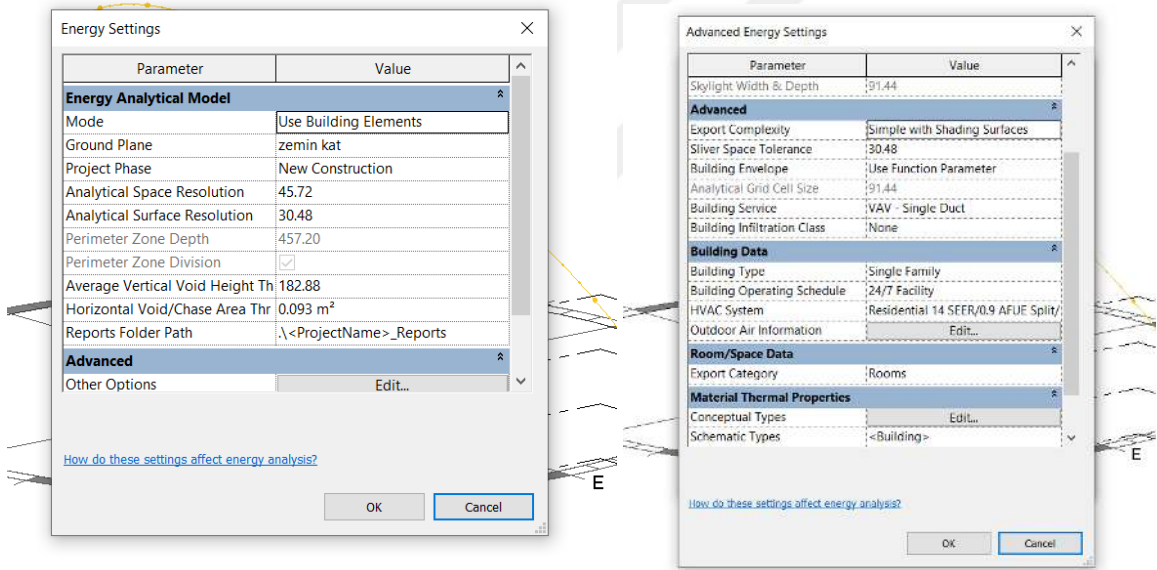
Şekil 4.5. Örnek konuta ait kesit, 3D model ve render görsel

4.3 Mevcut Konut Analiz Sonuçları

Örnek konutun performans analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle Revit'te binanın enerji analitik modelinin oluşturulması gerekmektedir (Şekil 4.6.) Ardından enerji ayarlarının düzenlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada proje aşaması, bina tipi, bina işletim programı ve HVAC sistemi gibi verilerin işlenmesi gerekmektedir (Şekil 4.7.) Son olarak bina gbxml formatında dışa aktarılır ve GBS aracında yapılacak simülasyon çalışmalarına hazır hale getirilir.



Şekil 4.6. Bina enerji analitik modeli



Şekil 4.7. Revit enerji ayarları

Bina gbxml formatında dışa aktarıldıktan sonra, GBS'de yeni bir proje oluşturmak için projenin adı, bina tipi, proje tipi, proje konumu, zaman dilimi ve para birimi gibi çeşitli verilerin girilmesi gerekmektedir (şekil 4.8.). Son olarak gbxml dosya import edilir ve analizler başlatılır.

AUTODESK® GREEN BUILDING STUDIO®

Downloads | Help | Sign Out
Insight | Project Solon | Classic

My Projects | Dashboards | My Profile | My Account | Welcome, Muhammed!

My Projects > Create a New Project – Step 1 of 3

Please enter a name for your project, the type of building, and the project type. Create one project for each building.

* Project Name
Konut Test Çalışması

* Building Type¹
Single Family

Schedule¹
Default

* Project Type¹
☐ Actual Project: A new or existing building project
☒ Test Project: For Learning or demonstration only

Project Notes

Continue

¹ Value cannot be changed once runs are submitted to a project.

AUTODESK® © Copyright 2021 Autodesk, Inc. All rights reserved. Terms of Use | Privacy Settings | Privacy/Cookies | Do not sell my personal information
Portions of this software are copyrighted by James J. Hirsch & Associates, the Regents of the University of California, and others.

Windows'u Etkinleştir
Windows'u etkinleştirmek için Ayarlar'a gidin.
Version 2021.0.33.1 (DOE-2.2-49)

AUTODESK® GREEN BUILDING STUDIO®

Downloads | Help | Sign Out
Insight | Project Solon | Classic

My Projects | Dashboards | My Profile | My Account | Welcome, Muhammed!

My Projects > Create a New Project – Step 2 of 3

Enter your project's address. If address does not exist yet, enter city, state and zip code. You may then drag the building marker to your physical location.

* Project Location
Kovancilar, Elazığ 23850 TR

Go

Project Address¹
Kovancilar, Elazığ 23850

Latitude: 38.7190
Longitude: 39.6665

Time Zone¹
Ankara
Current Time: 3:27 PM
Update Time Zone

Currency¹
TL - Turkish Lira
Update Currency

Weather Station^{1,2}
Green Building Studio Weather Station
GBS_06M12_18_160253
Update Weather Station

Windows'u Etkinleştir
Windows'u etkinleştirmek için Ayarlar'a gidin.

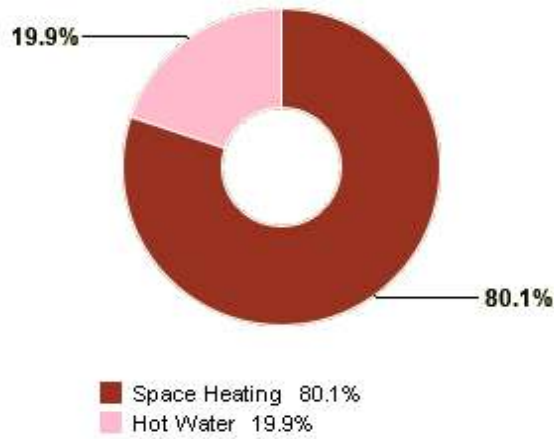
Şekil 4.8. GBS yeni proje oluşturma ayarları

GBS’de elde edilen sonuçlar yakıt ve elektrik tüketimi (yıllık / yaşam boyu), maliyet (yıllık / yaşam boyu), enerji kullanım yoğunluğu ve CO2 salınımı başlıkları altında verilmiştir. Yakıt kullanımı sıcak su ve ısıtma ihtiyacına göre hesaplanırken, elektrik kullanımı ise HVAC, aydınlatma ve diğer kullanımlardan oluşmaktadır. Yaşam döngüsü maliyeti, binanın 30 yıl boyunca %6,1 indirim üzerinden hesaplanan elektrik ve yakıt tüketiminin tahmini maliyetini göstermektedir. Yakıt birim fiyatı 0.04 TL, elektrik birim fiyatı ise 0.91 TL olarak hesaplanmıştır. Enerji kullanım yoğunluğu ise her bir metrekare için elektrik ve yakıt kullanım miktarıdır. Tablo 4.2’de çalışmada kullanılan hesaplamalar için ölçü birimleri verilmiştir.

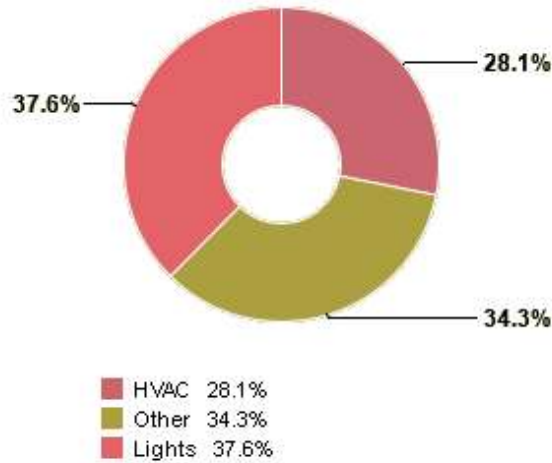
	Ölçü birimi
Yakıt kullanımı (Doğalgaz)	MJ
Elektrik kullanımı	kWh
Maliyet	TL
Enerji kullanım yoğunluğu	MJ/m2/yıl
CO2 emisyonu	Mg

Tablo 4.2. Kullanılan ölçü birimleri

Şekil 4.9’da mevcut konutun yıllık yakıt kullanımının dağılımı gösterilmektedir. Yakıtın %80.1’i ısıtma amaçlı kullanılırken, %19.9’u sıcak su amaçlı kullanılmıştır. Elektrik kullanımına gelindiğinde ise, şekil 4.10’da gösterildiği gibi %37.6 aydınlatma, %28.1 HVAC ve %34.3 diğer amaçlar için kullanılmıştır. Tablo 4.3’te ise mevcut konutun enerji analiz sonuçları verilmiştir. Yıllık enerji maliyetinin yaklaşık %70’inin elektrik kaynaklı olması göze çarpmaktadır.



Şekil 4.9. Mevcut konut yakıt kullanımı



Şekil 4.10. Mevcut konut elektrik kullanımı

Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	241021
Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	26147
Yıllık enerji maliyeti (TL)	34210 (Yakıt: 10417, Elektrik: 23793)
Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	465974
Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	1321
CO2 emisyonu (Mg)	12.0

Tablo 4.3. Mevcut konut enerji analiz verileri

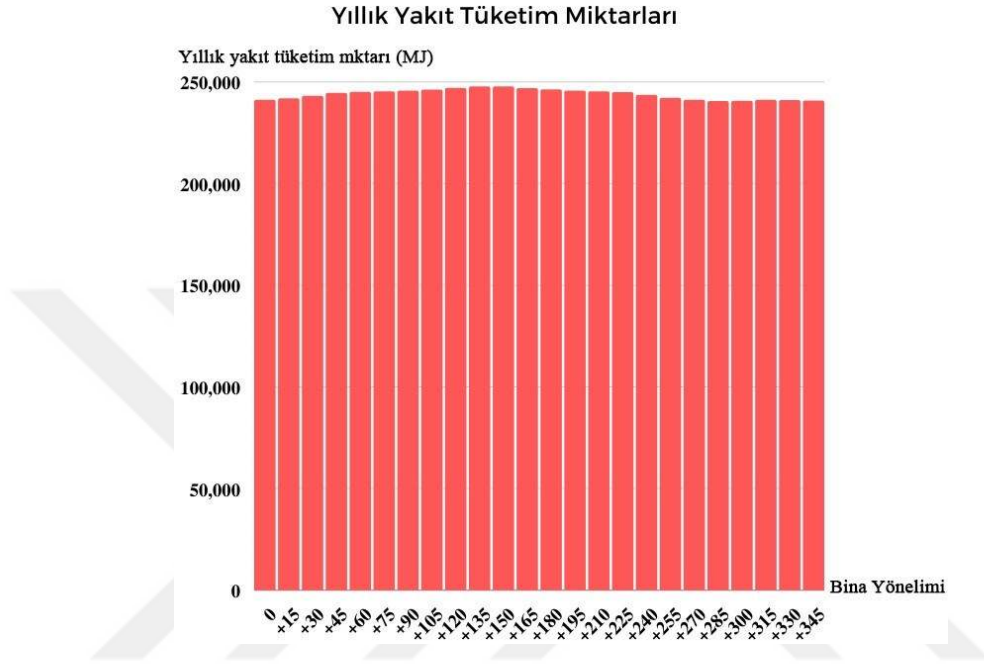
4.4 Bina Yönelimindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar

Isıtma, soğutma ve aydınlatma amaçlı enerji kullanımını en aza indirmek için binaların güneşten optimum seviyede faydalanması gerekir. Bir binanın güneş ışığını kullanma yeteneği ise genellikle bina yönelimi ile belirlenir. Bu çalışmada mevcutta kuzey-güney doğrultusunda konumlandırılmış bina, saat yönünde 15°'lik açılarla döndürülerek optimum yönelim tespit edilmeye çalışılmıştır. Tablo 4.4'te bina yöneliminde uygulanan modifikasyonların bina enerji performansına etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.11. ve şekil 4.12'de ise sırasıyla bina yönelimlerine göre yıllık yakıt tüketim miktarları ve enerji maliyetleri gösterilmiştir.

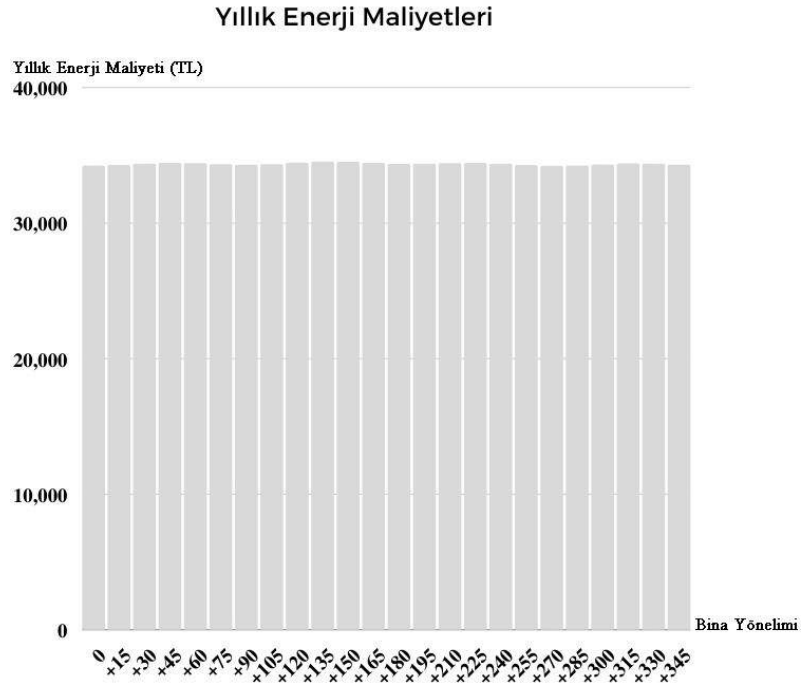
Bina yönelimi	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
0	241021	26147	34210	465974	1320.7	12.0
+15	241751	26162	34256	466591	1323.8	12.1
+30	242960	26197	34340	467746	1329.1	12.1
+45	244337	26202	34404	468612	1334.5	12.2
+60	244845	26150	34378	468263	1335.8	12.2
+75	245062	26066	34312	467354	1335.5	12.2
+90	245518	25997	34268	466764	1336.3	12.2
+105	245937	26029	34315	467405	1338.4	12.2
+120	246804	26102	34420	468829	1342.9	12.3
+135	247593	26149	34496	469871	1346.6	12.3
+150	247491	26136	34480	469648	1346.0	12.3
+165	246757	26085	34402	468592	1342.4	12.3
+180	246114	26040	34334	467655	1339.3	12.3
+195	245479	26077	34340	467739	1337.3	12.2
+210	245137	26146	34388	468394	1336.9	12.2
+225	244702	26192	34411	468709	1335.8	12.2
+240	243458	26183	34349	467861	1330.8	12.1
+255	241970	26144	34249	466500	1324.4	12.1
+270	240995	26121	34186	465637	1320.2	12.0

+285	240387	26175	34209	465953	1318.6	12.0
+300	240526	26262	34294	467114	1320.4	12.0
+315	240928	26313	34358	467987	1322.7	12.0
+330	240873	26293	34337	467701	1322.2	12.0
+345	240615	26220	34259	466644	1320.1	12.0

Tablo 4.4. Bina yönelimlerine göre enerji analiz sonuçları



Şekil 4.11. Bina yönelimlerine göre yıllık yakıt tüketimi



Şekil 4.12. Bina yönelimlerine göre yıllık enerji maliyeti

Bina yöneliminde uygulanan alternatif senaryoların bina enerji performansında kayda değer bir değişiklik sağlamadığı göze çarpmaktadır. Yıllık yakıt tüketimini en fazla düşüren yönelim 240387 MJ ile +285 yönelimidir. Ancak +270 ve +345 arası diğer yönlenmeler de yakın performanslar sergilemiştir. CO₂ emisyonunda da benzer şekilde +270 ve +345 arası yönlenmeler 12.0 Mg ile eşit sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Geriye kalan yönelimler 12.1 Mg ve 12.3 Mg arası değerler almıştır. Yıllık elektrik tüketiminde ise en iyi performansı 25997 kWh ile +90 yönelimi göstermiştir.

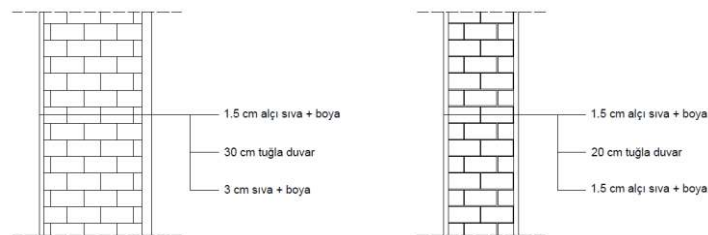
En düşük yıllık ve yaşam boyu enerji maliyeti +270 yöneliminde gerçekleşse de +285 yönelimi yakın sonuçlar vermiştir. Yıllık enerji maliyetleri +270 ve +285 yönelimleri için sırasıyla 34186 TL ve 34209 TL'dir. Yaşam boyu enerji maliyetleri ise sırasıyla 465637 TL ve 465953 TL'dir. Enerji kullanım yoğunluğunun en düşük olduğu değer 1318.6 MJ/m²/yıl ile +285 yönelimidir. Bununla birlikte +270, +300 ve +345 yönelimleri de yakın sonuçlar sergilemiştir. Tablo 4.4'te yer alan tüm parametreler tek bir başlık altında değerlendirildiğinde +270 ve +285 yönelimlerinin çok yakın değerler alarak en iyi performansı gösterdikleri gözlemlenmiştir. Optimum alternatif senaryo için +270 yönelimi enerji verimliliği en yüksek yönelim olarak belirlenmiştir.

4.5 Bina Kabuğundaki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar

Bina kabuğu yapının dış çevre ile direkt bağlantı kurmasını sağlar ve ısı kayıp ve kazançlarına neden olarak binanın ısıtma ve soğutma yükünü önemli ölçüde etkiler. Bu bölümde duvar malzemesi, çatı malzemesi, ısı yalıtımı, pencere camı ve cephe saydamlık oranı özelinde oluşturulan alternatif senaryoların binanın enerji performansına etkisi gözlemlenmiştir.

4.5.1 Duvar Malzemesindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde farklı duvar malzemelerinin bina enerji performansına etkileri incelenmiştir. Mevcut binanın dış ve iç duvar kesitleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Dış duvar katmanları dıştan içe doğru 3 cm sıva + boya, 30 cm tuğla duvar ve 1.5 cm alçı sıva + boyadan oluşmaktadır. İç duvar ise 1.5 cm alçı sıva + boya, 20 cm tuğla duvar ve 1.5 cm alçı sıva + boyadan oluşmaktadır.



Şekil 4.13. Mevcut bina dış ve iç duvar kesiti

Çalışmada duvar malzemesi olarak bims blok ve gazbeton seçilmiştir. Duvar kesitinde değişiklik yapılmadan sadece mevcut tuğla malzeme alternatif malzemeler ile değiştirilerek performans analizleri yapılmıştır. Tablo 4.5'te farklı duvar malzemeleri için duvar ısı geçirgenlik katsayıları (U) verilmiştir.

Duvar malzemesi	Duvar ısı geçirgenlik katsayısı(U)
Tuğla	Dış duvar: 1.58, İç duvar: 2.33
Bims blok	Dış duvar: 0.66, İç duvar: 0.98
Gazbeton	Dış duvar: 0.36, İç duvar: 0.53

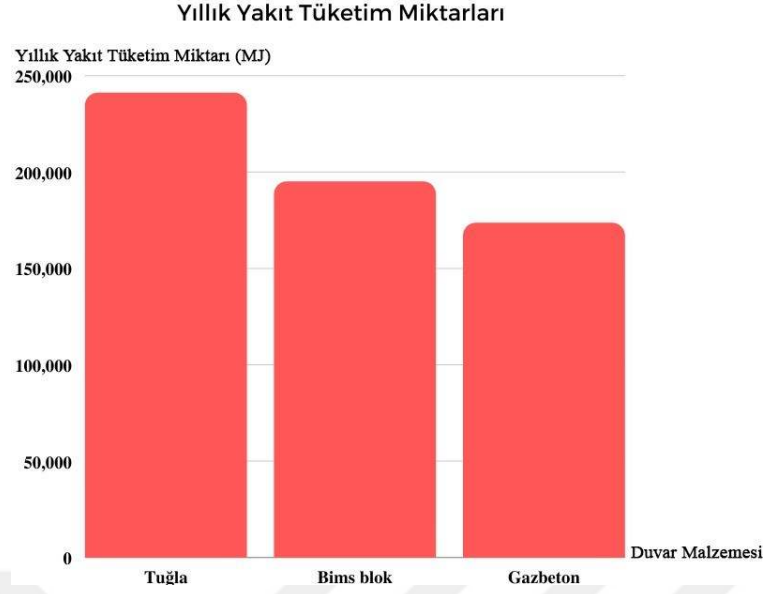
Tablo 4.5. Duvar malzemelerine göre bina dış ve iç duvarlarına ait U değerleri

Tablo 4.6'da tuğla, bims blok ve gazbeton duvar malzemeleri için bina enerji performans sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.14. ve şekil 4.15'te ise duvar malzemelerine göre yıllık yakıt tüketim miktarları ve enerji maliyetleri gösterilmiştir. Duvar malzemesi değişimi kapsamında tüm performans parametreleri paralel olarak artış veya azalış göstermiştir. Duvar malzeme değişiminin bina elektrik tüketimine ciddi bir etkisi olmadığı göze çarparken, yakıt kullanımında ise büyük değişiklikler saptanmıştır. Gazbeton, bims blok ve tuğlayı tüm bölümlerde geride bırakarak en iyi ısı performansına sahip duvar malzemesi olmuştur. Bims blok ise tuğlaya göre bina enerji performansını önemli ölçüde arttırmıştır.

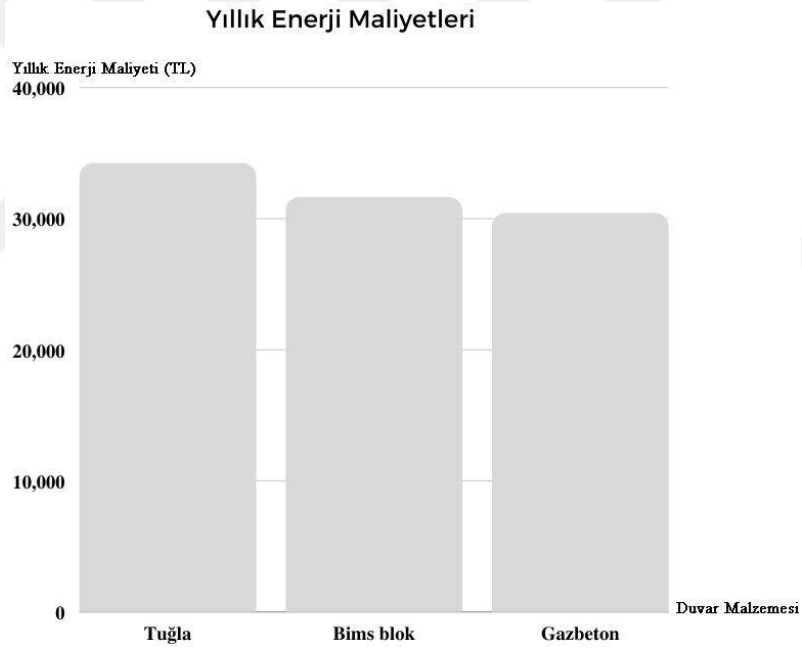
Duvar malzemesi	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
Tuğla	241021	26147	34210	465974	1320.7	12.0
Bims blok	194947	25484	31616	430629	1129.7	9.7
Gazbeton	173529	25184	30417	414307	1041.1	8.7

Tablo 4.6. Duvar malzemelerine göre enerji analiz sonuçları

Yıllık yakıt tüketimi gazbeton için 173529 MJ iken bims blok ve tuğla için sırasıyla 194947 MJ ve 241021 MJ'dur. Yıllık elektrik tüketimi için de gazbeton 25184 kWh'lık değeriyle en düşük değeri almıştır. Duvar malzeme değişiminin etkisi yıllık değil de yaşam boyu enerji maliyetlerinde gözlenmiştir. Gazbeton için bina yaşam döngüsü maliyeti 414307 TL iken bims blok ve tuğla için sırasıyla 430629 TL ve 465974 TL'dir. Yukarıdaki verilerin ışığında optimum alternatif senaryo için gazbeton duvar malzemesi olarak seçilmiştir.



Şekil 4.14. Duvar malzemelerine göre yıllık yakıt tüketimi



Şekil 4.15. Duvar malzemelerine göre yıllık enerji maliyeti

4.5.2 Çatı Malzemesindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar

Çatı kaplama malzemesinin bina enerji performansına etkisini tespit etmek ve optimum malzemeyi belirlemek için farklı çatı malzemeleri incelenmiştir. Çatı malzemesi olarak taş levha (roofing slate), kiremit (roofing tile), shingle (asphalt shingle) ve ahşap (wood shake) seçilmiştir. Tablo 4.7’de farklı çatı kaplama malzemeleri için çatı ısı geçirgenlik katsayıları (U) verilmiştir.

Çatı malzemesi	Çatı ısı geçirgenlik katsayısı (U)
Metal	0.70
Taş levha	0.69
Kiremit	0.67
Shingle	0.65
Ahşap	0.54

Tablo 4.7. Çatı kaplama malzemelerine göre çatı U değerleri

Tablo 4.8’de taş levha, kiremit, shingle ve ahşap çatı kaplama malzemeleri için bina enerji performans sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.16’da ve şekil 4.17’de ise çatı malzemelerine göre yıllık yakıt tüketim miktarları ve enerji maliyetleri gösterilmiştir. Çatı kaplama malzemesinde uygulanan alternatif senaryoların bina enerji performansında kayda değer bir değişiklik sağlamadığı göze çarpmaktadır. Ahşap ve taş levha çatı kaplama malzemeleri sırasıyla en yüksek ve en düşük performans sergileyen seçenekler olmuştur. Shingle 2., kiremit ise 3. sırada yer almıştır. Ancak malzemelerin değerleri birbirine çok yakındır.

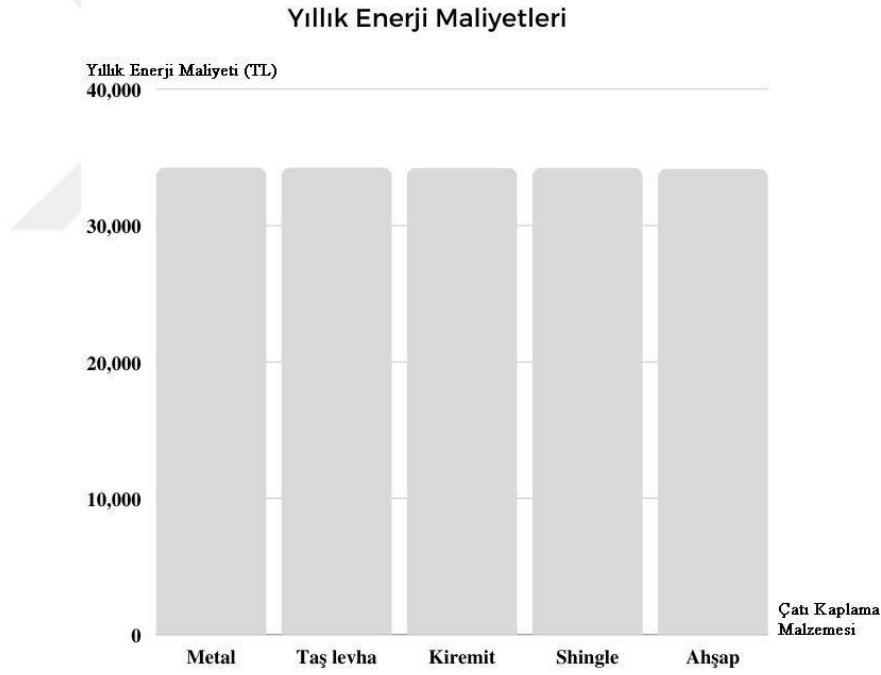
Çatı kaplama malzemesi	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
Metal	241021	26147	34210	465974	1320.7	12.0
Taş levha	240924	26144	34203	465879	1320.3	12.0
Kiremit	240850	26137	34194	465755	1319.9	12.0
Shingle	240674	26136	34186	465638	1319.2	12.0
Ahşap	239693	26110	34120	464739	1314.9	12.0

Tablo 4.8. Çatı kaplama malzemelerine göre enerji analiz sonuçları

Mevcut konutun metal çatı malzemesi için yıllık yakıt tüketimi 241021 MJ iken, bu değer ahşap malzeme için 239693 MJ’dur. Elektrik kullanımı için tüm senaryolar eşit denecek kadar yakın değerler almıştır. Aynı şekilde çatı kaplama malzemelerinin bina yıllık ve yaşam boyu enerji maliyetlerine etkisi göz ardı edilebilir. Enerji kullanım yoğunluğu ve CO2 emisyonu için de benzer durum söz konusudur. Sonuç olarak, küçük bir farkla olsa bile, bina enerji performansını en fazla iyileştiren ahşap çatı kaplama malzemesi optimum alternatif senaryo için seçilmiştir.



Şekil 4.16. Çatı malzemelerine göre yıllık yakıt tüketimi



Şekil 4.17. Çatı malzemelerine göre yıllık enerji maliyeti

4.5.3 Isı Yalıtım Malzemesindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde mevcutta ısı yalıtımı içermeyen dış duvarlara uygulanan farklı tipteki ve kalınlıktaki ısı yalıtım malzemelerinin binanın enerji performansına etkisi incelenmiştir. Isı yalıtım malzemesi olarak taşyünü, camyünü, EPS ve XPS seçilmiştir. Yalıtım kalınlığı olarak ise 6 cm ve

8 cm için enerji analizleri yapılmıştır. Tablo 4.9’da farklı ısı yalıtım malzemeleri için duvar ısı geçirgenlik katsayıları (U) verilmiştir.

Isı yalıtım malzemesinin kalınlığı	Taşıyünü	Camyünü	EPS	XPS
6 cm	0.43	0.41	0.38	0.35
8 cm	0.34	0.33	0.30	0.28

Tablo 4.9. Isı yalıtım malzemelerine göre duvar U değerleri

Tablo 4.10’da taşıyünü, camyünü, EPS ve XPS ısı yalıtım malzemeleri için bina enerji performans sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.18’de ve şekil 4.19’da ise ısı yalıtım malzemelerine göre yıllık yakıt tüketim miktarları ve enerji maliyetleri gösterilmiştir. Binanın dış duvarlarına ısı yalıtım uygulamasının yakıt tüketimini önemli miktarda azalttığı gözlenmiştir. Elektrik kullanımında ise kayda değer bir tasarruf göze çarpmamıştır. Ayrıca yakıt tüketiminin düşmesinden dolayı binanın yaşam boyu enerji maliyetinde ciddi bir azalma söz konusudur. Binanın enerji performansını en fazla arttıran ısı yalıtım malzemeleri sırasıyla XPS, EPS, camyünü ve taşıyünü olmuştur.

Isı yalıtım malzemesi	Isı yalıtım malzemesi kalınlığı	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
Yalıtımsız	X	241021	26147	34210	465974	1320.7	12.0
Taşıyünü	6 cm	184021	25152	30842	420086	1088.2	9.2
	8 cm	178321	25016	30472	415045	1067.5	8.9
Camyünü	6 cm	182877	25139	30780	419251	1083.5	9.1
	8 cm	177287	25005	30416	414294	1063.2	8.8
EPS	6 cm	181051	25118	30683	417921	1075.9	9.0
	8 cm	175654	24987	30330	413111	1056.5	8.8
XPS	6 cm	179000	25097	30579	416502	1067.9	8.9
	8 cm	173911	24968	30237	411850	1049.3	8.7

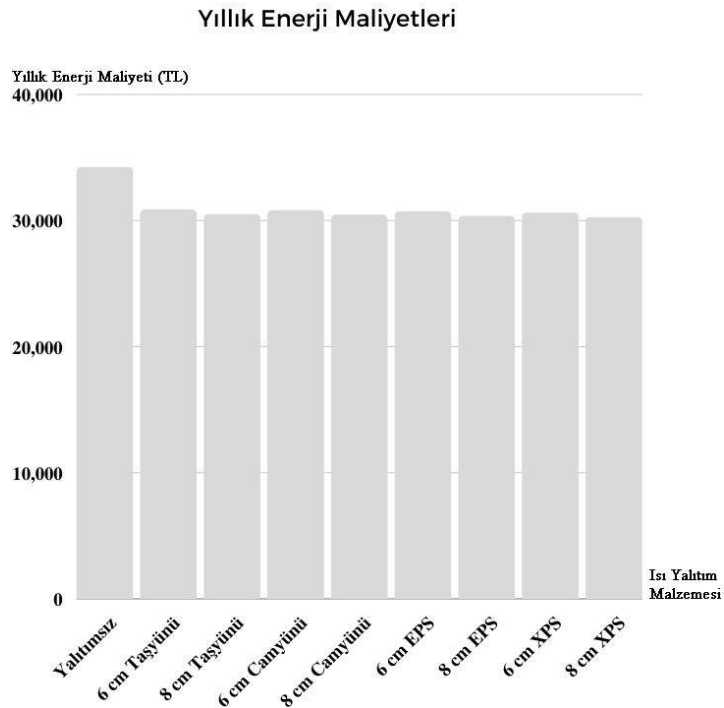
Tablo 4.10. Isı yalıtım malzemelerine göre enerji analiz sonuçları

Isı yalıtım kalınlık artışı binanın enerji tüketimine olumlu şekilde etki etmiştir. Örneğin, ısı yalıtım kalınlığının 6 cm’den 8 cm’ye çıkarılması yakıt tüketiminde XPS için 5089 MJ, EPS için 5397 MJ, camyünü için 5590 MJ ve taşıyünü için 5700 MJ düşüş sağlamıştır. Isı yalıtım malzemelerinin performansları arasındaki fark çok azdır. Özellikle XPS ve EPS malzemeleri için

değerler birbirine çok yakındır. XPS 8 cm için yıllık elektrik tüketimi 24968 kWh iken, EPS 8 cm için 24987 kWh'dir. Aynı şekilde yıllık enerji maliyetleri XPS 8 ve EPS 8 cm için sırasıyla 30237 TL ve 30330 TL'dir. Taşyünü ve camyünü malzemeleri de tüm parametreler özelinde çok yakın değerler göstermiştir. Sonuç olarak, bina enerji performansını en fazla iyileştiren 8 cm kalınlığa sahip XPS ısı yalıtım malzemesi optimum alternatif senaryo için seçilmiştir.



Şekil 4.18. Isı yalıtım malzemelerine göre yıllık yakıt tüketimi



Şekil 4.19. Isı yalıtım malzemelerine göre yıllık enerji maliyet

4.5.4 Pencere Cam Malzemesindeki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde pencere cam tipinin binanın enerji performansına etkisi test edilmiştir. Low E çift cam (low E double glazing), kaplamasız çift cam (uncoated double glazing) ve üçlü cam (triple glazing) seçenekler olarak belirlenmiştir. Tablo 4.11’de farklı cam malzemeleri için pencere ısı geçirgenlik katsayıları (U) ve solar ısı kazanç katsayıları (SHGC) verilmiştir.

Cam malzemesi	Pencere ısı geçirgenlik katsayısı (U)	Pencere solar ısı kazanç katsayısı (SHGC)
Mevcut cam (P1)	3.13, 6.70, 2.86	0.21, 0.19, 0.76
Low E çift cam (P2)	2.10	0.24
Kaplamasız çift cam (P3)	1.99	0.62
Üçlü cam (P4)	1.53	0.68

Tablo 4.11. Cam malzemelerine göre pencere U ve SHGC değerleri

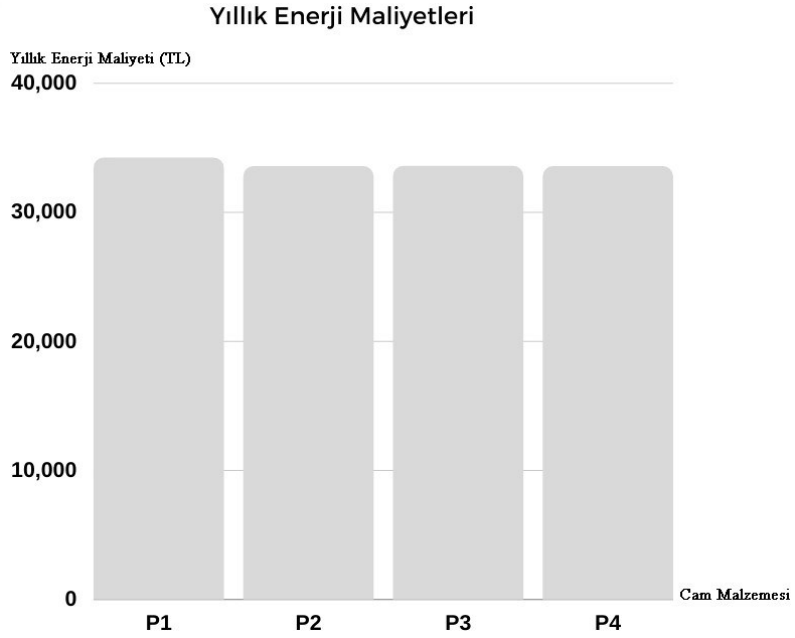
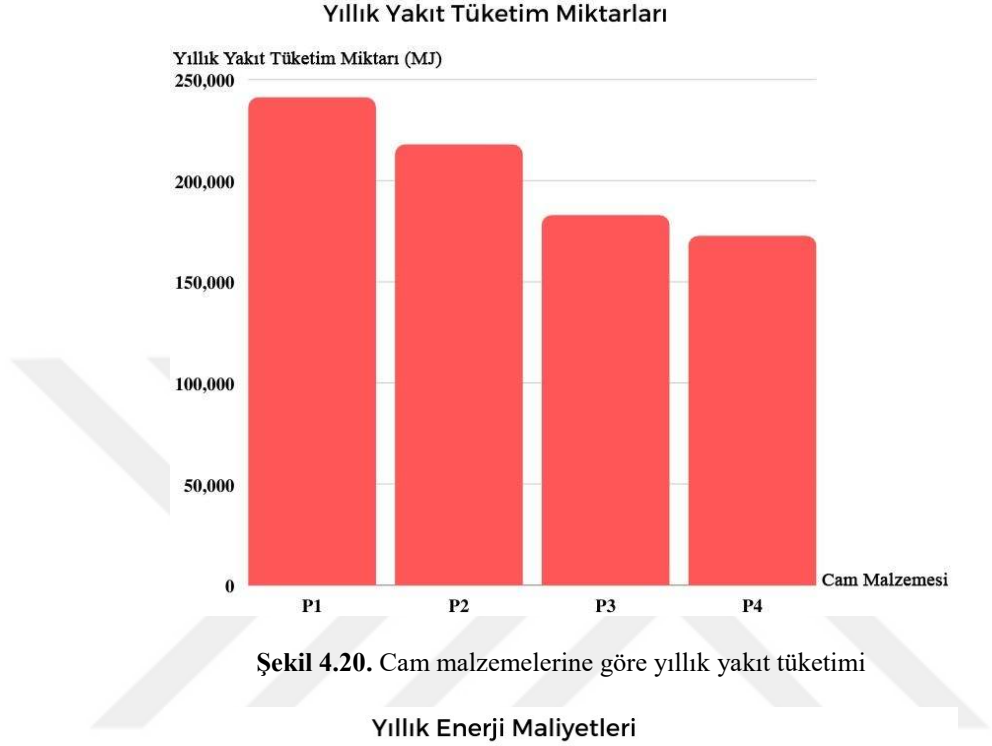
Tablo 4.12’de P1, P2, P3 ve P4 cam malzemeleri için bina enerji performans sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.20. ve şekil 4.21’de ise cam malzemelerine göre yıllık yakıt tüketim miktarları ve enerji maliyetleri gösterilmiştir. Pencere cam tipinin binanın yakıt tüketimini, dolayısıyla enerji kullanım yoğunluğunu ve CO2 salınımını önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Elektrik kullanımı ve maliyetlerde ise kayda değer bir değişiklik gerçekleşmemiştir. Bina enerji performansını en fazla arttıran cam malzemeleri sırasıyla P4, P3, P2 ve P1 olmuştur.

Çatı kaplama malzemesi	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
P1	241021	26147	34210	465974	1320.7	12.0
P2	217711	26309	33551	454266	1231.1	10.9
P3	182694	28212	33568	457225	1120.1	9.1
P4	172557	28674	33551	456991	1086.8	8.6

Tablo 4.12. Cam malzemelerine göre enerji analiz sonuçları

P4 cam malzemesi için yıllık yakıt tüketimi 172557 MJ’dur ve böylece 68464 MJ yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Fakat P4 senaryosu yıllık elektrik tüketimini 2527 kWh arttırarak yıllık ve yaşam boyu enerji maliyetlerinde kayda değer düşüş sağlayamamıştır. Bu durum diğer cam tipleri için de geçerlidir. Mevcut konutun elektrik tüketimini azaltabilen cam tipi bulunmamaktadır. Elektrik tüketimi için en iyi performansı P2 cam tipi göstermiştir. Yıllık ve yaşam boyu enerji

maliyetlerinde ise P2 cam tipi küçük bir farkla ilk sırada yer almıştır. Sonuç olarak, yakıt tüketimini ciddi miktarda düşürerek bina enerji performansını en fazla iyileştiren üçlü cam tipi (P4) optimum alternatif senaryo için seçilmiştir.



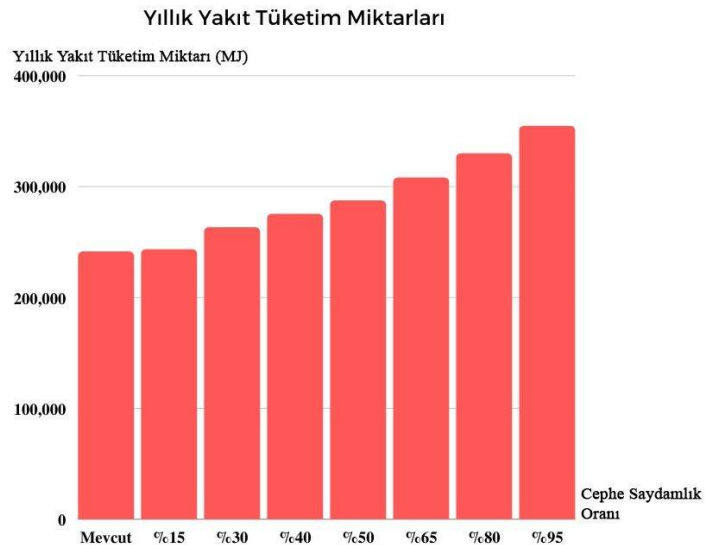
Şekil 4.21. Cam malzemelerine göre yıllık enerji tüketimi

4.5.5 Cephe Saydırlık Oranındaki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar

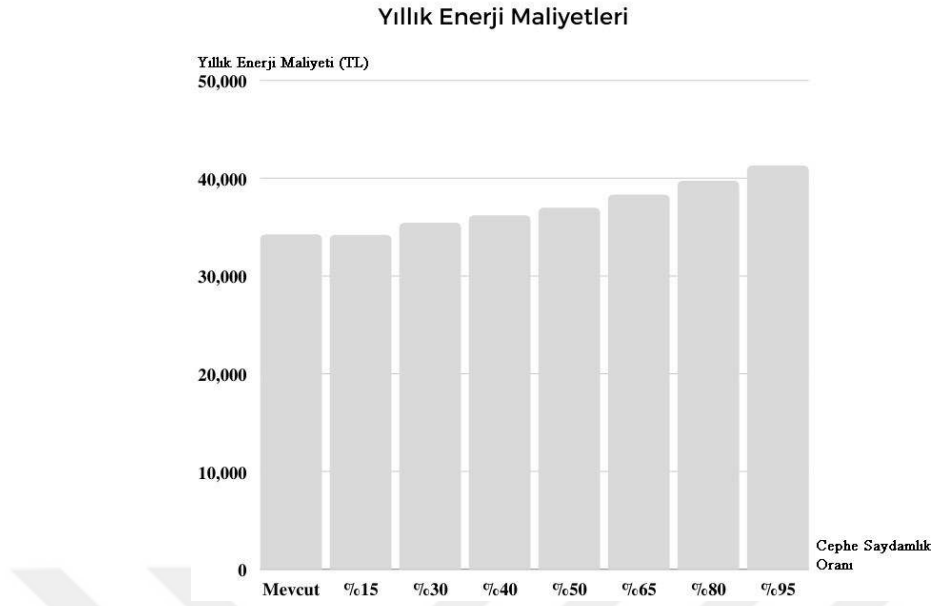
Binada ısı kayıp ve kazançlarının en önemli sebeplerinden biri saydam yüzeylerdir. Bu nedenle enerji etkin bina tasarımında cephe saydırlık oranına dikkat edilmesi ve optimum bir oran belirlenmesi gerekir. Mevcut konutun cephe saydırlık oranları güney cephe için %15, kuzey için %11, doğu için %15 ve batı için %25’dir. Bu alışma kapsamında tüm yönler için %15, 30, 40, 50, 65, 80 ve 95 saydırlık oranlarının binanın enerji performansına etkisi test edilmiştir. Tablo 4.13’te farklı cephe saydırlık oranları için bina enerji performans sonuçları gösterilmiştir. şekil 4.22’de ve şekil 4.23’te ise cephe saydırlık oranlarına göre yıllık yakıt tüketim miktarları ve enerji maliyetleri gösterilmiştir.

Cephe saydırlık oranı	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
Mevcut	241021	26147	34210	465974	1320.7	12.0
%15	243153	26000	34169	465407	1327.0	12.1
%30	263033	26400	35392	482074	1411.0	13.1
%40	274994	26672	36157	492492	1462.0	13.7
%50	287150	26951	36936	503103	1513.9	14.3
%65	307780	27453	38284	521465	1602.3	15.3
%80	329647	27954	39686	540558	1695.6	16.4
%95	354381	28512	41262	562039	1801.0	17.7

Tablo 4.13. Cephe saydırlık oranına göre enerji analiz sonuçları



şekil 4.22. Cephe saydırlık oranlarına göre yıllık yakıt tüketimi



Şekil 4.23. Cephe saydamlık oranlarına göre yıllık enerji tüketimi

Cephe saydamlık oranındaki artış ile birlikte yakıt tüketimi, elektrik kullanımı, maliyetler, enerji kullanım yoğunluğu ve CO₂ salınımı artmıştır. %15 cephe saydamlık oranı en iyi performansı gösteren alternatif olmasına rağmen, mevcut konuttan daha fazla yakıt tüketimine sebep olmuştur. %15 cephe saydamlık oranı yakıt tüketimini 2132 MJ arttırmıştır. Elektrik kullanımı ve maliyetlerde sağladığı küçük tasarruflar ise göz ardı edilebilir. Cephe saydamlık oranı %15’den %95’e doğru arttırıldığında, yakıt tüketimi ciddi oranda artmıştır ve dolayısıyla maliyetler, enerji kullanım yoğunluğu ve CO₂ emisyonu da aynı trendi göstermiştir. Örneğin, yakıt tüketimi %40, %65 ve %95 saydamlık oranları için sırasıyla 274994 MJ, 307780 MJ ve 354381 MJ’dir. Sonuç olarak, test edilen tüm cephe saydamlık oranları bina enerji performansını düşürdüğünden dolayı, optimum alternatif senaryo için mevcut konutun cephe saydamlık oranları baz alınmıştır.

4.6 Aydınlatmadaki Değişim ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde aydınlatma gücü yoğunluğunun (lighting power density) (LPD) binanın enerji performansına etkisi test edilmiştir. LPD “birim alan başına düşen maksimum aydınlatma gücü” olarak tanımlanır ve birimi W / m²’dir. Mevcut konutun LPD değeri 10.76 W / m²’dir. Binanın LPD değeri %20, 40, 60, 80, 100 azaltılarak ve %20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400 arttırılarak toplamda 14 senaryo üzerinden analizler yapılmıştır. Tablo 4.14’de farklı LPD değerleri için bina enerji performans sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.24. ve şekil 4.25’te ise aydınlatma sistemi LPD değerine göre yıllık elektrik tüketim miktarları ve enerji maliyetleri gösterilmiştir.

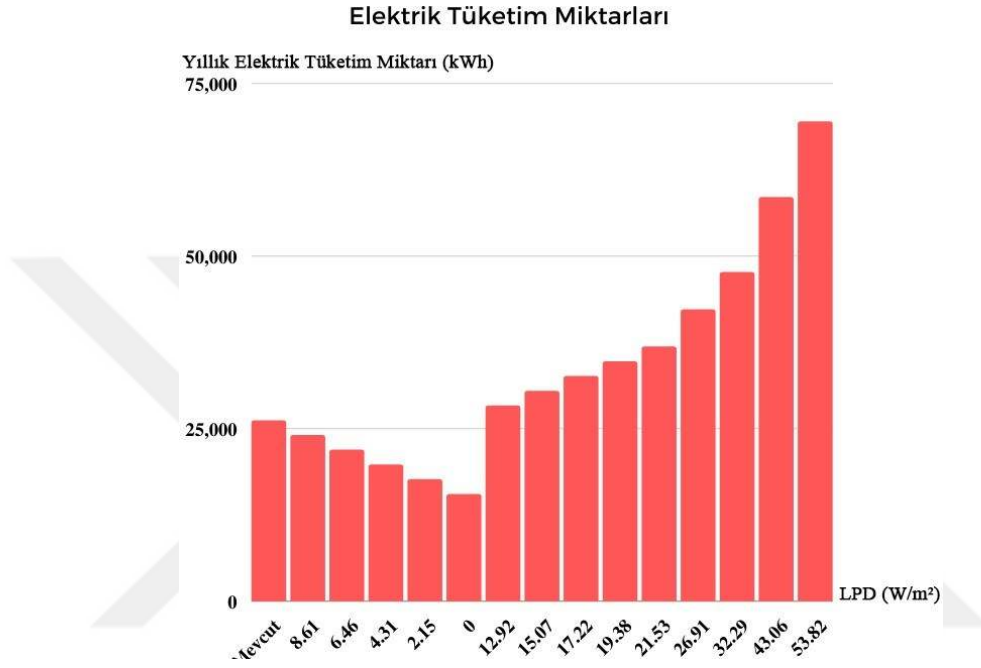
LPD	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m ² /yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
Mevcut	241021	26147	34210	465974	1320.7	12.0
%20 az 8.61 W/m²	246960	24021	32532	443121	1313.9	12.3
%40 az 6.46 W/m²	252968	21897	30860	420341	1307.5	12.6
%60 az 4.31 W/m²	259042	19737	29156	397138	1300.8	12.9
%80 az 2.15 W/m²	265150	17622	27495	374521	1294.8	13.2
%100 az 0 W/m²	271300	15452	25787	351255	1288.3	13.5
%20 fazla 12.92 W/m²	235123	28279	35896	488928	1327.7	11.7
%40 fazla 15.07 W/m²	229301	30413	37586	511952	1335.0	11.4
%60 fazla 17.22 W/m²	223569	32551	39284	535077	1342.8	11.1
%80 fazla 19.38 W/m²	217882	34692	40987	558266	1350.7	10.9
%100 fazla 21.53 W/m²	212238	36838	42695	581533	1358.9	10.6
%150 fazla 26.91 W/m²	198273	42217	46987	639987	1380.2	9.9
%200 fazla 32.29 W/m²	184768	47613	51313	698910	1403.5	9.2
%300 fazla 43.06 W/m²	159498	58457	60089	818437	1457.8	8.0
%400 fazla 53.82 W/m²	136434	69428	69076	940832	1522.6	6.8

Tablo 4.14. Aydınlatma sistemi LPD değerine göre enerji analiz sonuçları

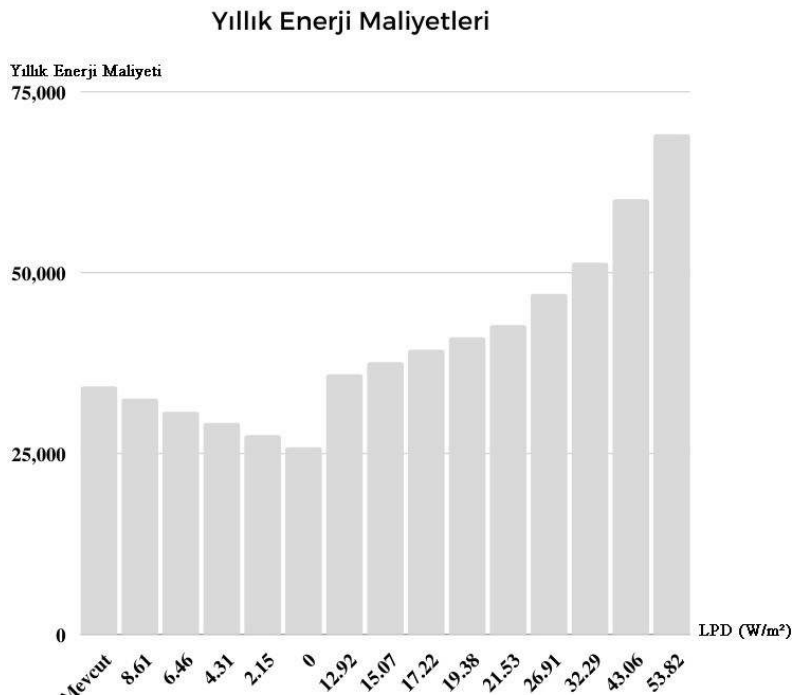
LPD değerinin azaltılmasıyla elektrik tüketiminin, maliyetlerin ve enerji kullanım yoğunluğunun azaldığı, yakıt tüketiminin ve CO2 salınımının arttığı gözlenmiştir. LPD değerinin artmasıyla birlikte ise tam tersi sonuçlar ortaya çıkmıştır. LPD değeri azalırken yakıt tüketimi küçük miktarda artarken, LPD değeri artarken maliyetler, enerji kullanım yoğunluğu ve elektrik tüketimi önemli ölçüde artmıştır. Dolayısıyla, hem yukarıdaki sonuçlardan hem de elektrik tüketiminin azaltılması amaçlandığından dolayı LPD değeri mevcut konutun LPD değerinden düşük olan alternatifler daha iyi performans sergilemiştir.

LPD değeri mevcut değerden %100 az olan alternatif (0 W/m²) en iyi performansı göstermiştir. Yıllık yakıt tüketiminde 30279 MJ artışa sebep olsa da, elektrik kullanımında

sağladığı 10695 kWh tasarruf maliyetlerde ve enerji kullanım yoğunluğunda büyük düşüşlere olarak tanımıştır. 30 yıllık yaşam döngüsü boyunca 114719 TL tasarruf sağlanmıştır. Sonuç olarak, elektrik tüketimini ve enerji kullanım yoğunluğunu ciddi miktarda düşürerek bina enerji performansını en fazla iyileştiren LPD %100 az aydınlatma sistemi optimum alternatif senaryo için seçilmiştir.



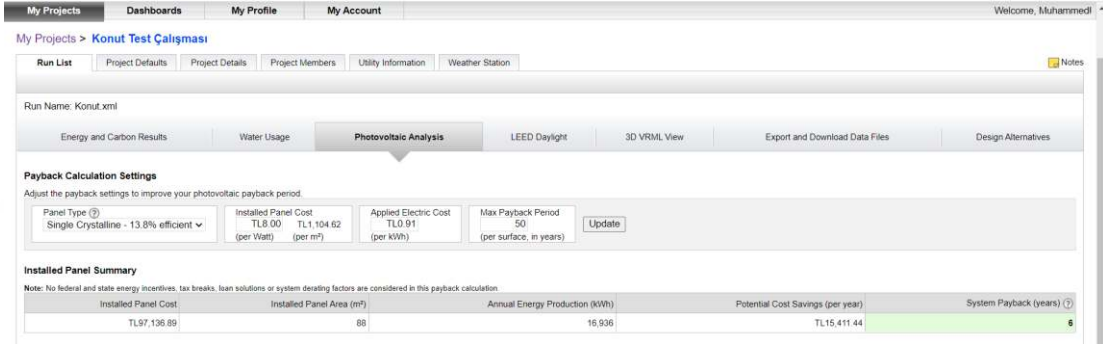
Şekil 4.24. Aydınlatma sistemi LPD değerine göre yıllık elektrik tüketimi



Şekil 4.25. Aydınlatma sistemi LPD değerine göre yıllık enerji maliyeti

4.7 Fotovoltaik Panel Uygulaması ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde mevcut binanın çatısına fotovoltaik paneller yerleştirilmesi durumunda binanın elektrik tüketiminde yapılacak tasarruflar, panellerin maliyeti ve geri ödeme süresi incelenmiştir. GBS aracında yapılan otomatik hesaplamalar veri olarak kullanılmıştır. Şekil 4.26'da GBS ilgili bölümün görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 4.27. ve şekil 4.28'de ise fotovoltaik panel bulunma durumuna göre yıllık elektrik tüketim miktarları ve enerji maliyetleri gösterilmiştir.

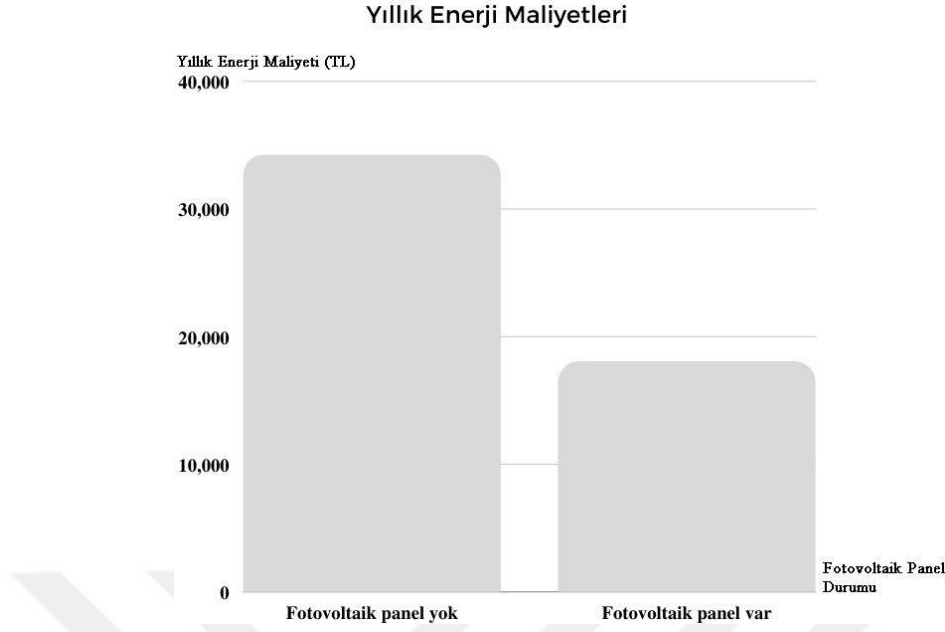


Şekil 4.26. Fotovoltaik panel analizi

Binanın mevcut çatı alanı 153 m² dir. Panel kurulumu yapılacak alan ise 88 m² dir. Panel çeşidi olarak %13.8 verimliliğe sahip monokristal güneş paneli seçilmiştir. Panel ücreti ise yapılan piyasa araştırması sonucu 1 m² = 1104.62 TL / 1 Watt = 8 TL olarak belirlenmiştir. Böylece 88 m² güneş paneli kurulumu 97136.89 TL'ye mal olmuştur. Analizler sonucunda, sistemin yıllık 16936 kWh elektrik üreteceği ve mevcut binanın elektrik tüketimi göz önüne alındığında sistemin kendini 6 yılda amorti edeceği ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, mevcut binanın çatısına %13.8 verimliliğe sahip monokristal güneş paneli kurulumu optimum senaryo için seçilmiştir.



Şekil 4.27. Fotovoltaik panel bulunma durumuna göre yıllık elektrik tüketimi



Şekil 4.28. Fotovoltaik panel bulunma durumuna göre yıllık enerji maliyeti

4.8 Tüm Alternatif Senaryoların Değerlendirilmesi ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde, 4 parametre özelinde geliştirilen toplam 17 senaryonun farklı kombinasyonları sonucu ortaya çıkan 192 alternatif senaryonun binanın enerji performansına etkisi test edilmiştir. Her parametre için en verimli seçeneğin belirlenmesinin yanı sıra farklı parametrelerin tüm bir araya geliş olasılıklarının göz önüne alınmasının amacı oluşturulan optimum alternatif senaryonun doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamaktır. Duvar, çatı, ısı yalıtımı ve pencere cam malzemeleri olası senaryolara dahil edilirken, bina yönelimi, cephe saydamlık oranı, aydınlatma ve fotovoltaik panel hariç tutulmuştur. Bunun sebebi, toplam olasılık sayısının çok fazla olmasından dolayı iş yükünü azaltmak ve bu parametreler arasındaki zayıf ilişkidir.

Duvar	Çatı	Isı yalıtımı	Pencere
Bims blok (D1)	Taş levha (Ç1)	Taşyünü 6 cm (I1)	Low E çift cam (P2)
Gazbeton (D2)	Kiremit (Ç2)	Taşyünü 8 cm (I2)	Kaplamasız çift cam (P3)
	Shingle (Ç3)	Camyünü 6 cm (I3)	Üçlü cam (P4)
	Ahşap (Ç4)	Camyünü 8 cm (I4)	
		EPS 6 cm (I5)	
		EPS 8 cm (I6)	
		XPS 6 cm (I7)	
		XPS 8 cm (I8)	

Tablo 4.15. 4 parametre için geliştirilen toplam 17 senaryo

Tablo 4.15'te 4 parametre için geliştirilen toplam 17 senaryo gösterilmiştir. Mevcut konutun duvar, çatı kaplama ve pencere cam malzemeleri ve ısı yalıtım durumu bu senaryolara dahil edilmemiştir. Ek-1'de 17 senaryonun farklı birleşimleri ile oluşturulan toplam 192 senaryonun detayları yer alırken, Ek-2'de 192 senaryo için bina enerji performans sonuçları gösterilmiştir. Ek-2'de yer alan sonuçlara göre enerji performansı en iyi senaryo 192. senaryo olmuştur. D2, Ç4, I8 ve P4 yani gazbeton duvar, ahşap çatı kaplaması, 8 cm XPS ısı yalıtımı ve üçlü cam seçeneklerinin kombinasyonu ile oluşan bu senaryo tipi binanın yakıt tüketimini en fazla düşüren tip olmuştur (92287 MJ). Ayrıca 767.3 MJ/m²/yıl değeri ile en düşük enerji kullanım yoğunluğuna sahip seçenektir. CO₂ emisyonu için ise 4.6 Mg'lık değeri ile 186., 168. ve 144. senaryo ile birlikte en iyi sonucu vermiştir. Elektrik tüketiminde ve dolayısıyla yıllık ve yaşam boyu enerji maliyetlerinde 190. senaryo tipi ilk sırada yer almaktadır. Bu senaryo D2, Ç4, I8 ve P2 yani gazbeton duvar, ahşap çatı kaplaması, 8 cm XPS ısı yalıtımı ve low E çift cam seçeneklerinin kombinasyonu ile oluşmuştur. 190. Senaryo için elektrik tüketimi, yıllık ve yaşam boyu enerji maliyetleri sırasıyla 24912 kWh, 28229 TL ve 384500 TL değerlerini almıştır.

Tüm olasılıkların dikkate alınmasıyla oluşturulan 192 alternatif senaryonun enerji analiz sonuçları, her parametre özelinde belirlenen en iyi seçeneklerin doğruluğunu kanıtlamıştır. Sonuçlara bakıldığında, aynı kombinasyona sahip senaryolardan duvar tipi gazbeton olan seçenekler bims blok olanlara göre daha iyi performans göstermiştir. Örneğin, 1. senaryo için yıllık yakıt tüketimi 142317 MJ iken 97. senaryo için 133731 MJ'dur. Ahşap çatı kaplama malzemesinin diğer seçeneklere göre daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır. Aynı kombinasyona sahip senaryo tiplerinden 1 (taş), 25 (kiremit), 49 (shingle) ve 73 (ahşap) seçenekleri yıllık yakıt tüketimi için sırasıyla 142317 MJ, 142240 MJ, 142076 MJ ve 141122 MJ değerlerini almıştır.

8 cm XPS ısı yalıtımı diğer ısı yalıtım seçeneklerine göre en iyi performansı sergilemiştir. Örneğin, aynı kombinasyona sahip 102 (8 cm camyünü), 108 (8cm taşıyünü), 114 (8 cm EPS) ve 120 (8 cm XPS) senaryoları yıllık yakıt tüketimi için sırasıyla 94737 MJ, 94404 MJ, 93859 MJ ve 93253 MJ değerlerini almıştır. Aynı durum üçlü cam malzemesi için de geçerlidir. Aynı seçeneklerin birleşiminden oluşan 1. (low E çift cam), 2. (kaplamasız çift cam) ve 3. (üçlü cam) senaryo tipleri yıllık yakıt tüketimi için sırasıyla 142317 MJ, 112186 MJ ve 102863 MJ değerlerini almıştır. Sonuç olarak, gazbeton duvar malzemesi, ahşap çatı kaplama malzemesi, 8 cm XPS ısı yalıtım malzemesi ve üçlü cam malzemesi optimum alternatif senaryo için seçilmiştir.

4.9 Optimum Alternatif Senaryo ile Mevcut Durumun Karşılaştırılması

Çalışmanın bu kısmında analizleri yapılan tüm parametreler için seçilen en iyi seçeneklerin bir arada uygulandığı optimum alternatif senaryo ile mevcut binanın enerji performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Tablo 4.16'da mevcut konutun, tüm parametrelerin ve alternatif senaryonun

enerji analiz sonuçları verilmiştir. Mevcut konutun, tüm parametrelerin ve optimum alternatif senaryonun yıllık yakıt tüketim miktarları, yıllık elektrik tüketim miktarları ve enerji maliyetleri sırasıyla şekil 4.29’da, şekil 4.30’da ve şekil 4.31’de gösterilmiştir.

Parametre	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
Mevcut konut	241021	26147	34210	465974	1320.7	12.0
+270° yönlenme	240995	26121	34186	465637	1320.2	12.0
Gazbeton duvar	173529	25184	30417	414307	1041.1	8.7
Ahşap çatı kaplaması	239693	26110	34120	464739	1314.9	12.0
8 cm XPS ısı yalıtımı	173911	24968	30237	411850	1049.3	8.7
Üçlü cam	172557	28674	33551	456991	1086.8	8.6
Cephe saydamlık oranı	✖	✖	✖	✖	✖	✖
LPD %100 az aydınlatma	271300	15452	25787	351255	1288.3	13.5
Fotovoltaik panel	241021	9211	18022	245459	1079.4	12.0
Optimum alternatif senaryo	92287	11016	13715	186798	519.4	4.6

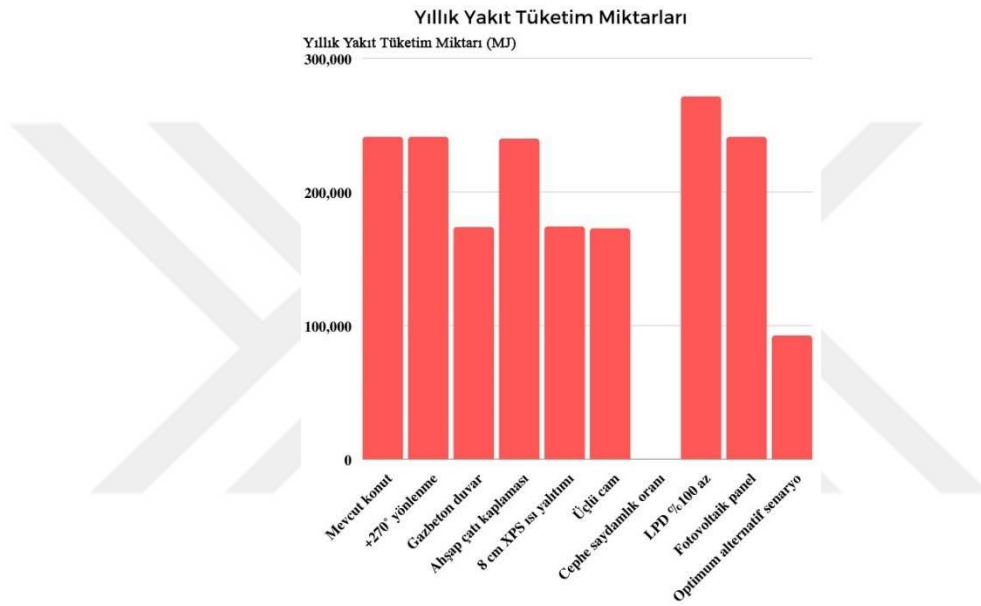
Tablo 4.16. Mevcut binanın, tüm parametrelerin ve oluşturulan alternatif senaryonun enerji analiz sonuçları

Oluşturulan alternatif senaryo ile mevcut konutun enerji performansı önemli ölçüde arttırılmıştır. Yıllık yakıt tüketiminde %61, elektrik tüketiminde ise %64 tasarruf sağlanmıştır. Yakıt tüketimi mevcut konut için 241021 MJ iken, alternatif senaryo için 92287 MJ’dur. Elektrik kullanımı mevcut konut ve alternatif senaryo için sırasıyla 26147 kWh ve 11016 kWh’dir. Yıllık ve yaşam boyu enerji maliyetlerinde ise %59 tasarruf sağlanmıştır. Binanın yaşam boyu enerji maliyeti 279176 TL düşürülmüştür. Enerji kullanım yoğunluğu ve CO2 salınımı için de benzer ciddi düşüşler gözlenmiştir.

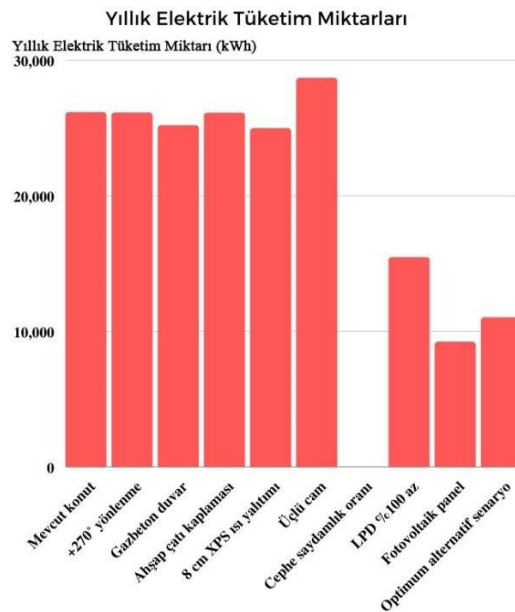
İncelenilen parametrelerden sırasıyla üçlü cam, gazbeton duvar ve 8 cm XPS ısı yalıtımı uygulamaları binanın yakıt tüketimini en fazla düşüren seçeneklerdir. Pencereelerde üçlü cam uygulaması bina yakıt tüketimini 241021 MJ’dan 172557 MJ’a düşürmüştür. Elektrik tüketiminde ise fotovoltaik panel ve aydınlatma sistemi dışındaki parametrelerin bir etkisi olmamıştır. Binanın

çatısına fotovoltaik panel kurulumu ile elektrik tüketiminde yıllık 16936 kWh tasarruf sağlanmıştır. Aydınlatma armatürlerinin LPD değerinin %100 düşürülmesiyle birlikte yıllık elektrik tüketiminde 10695 kWh düşüş sağlanmıştır.

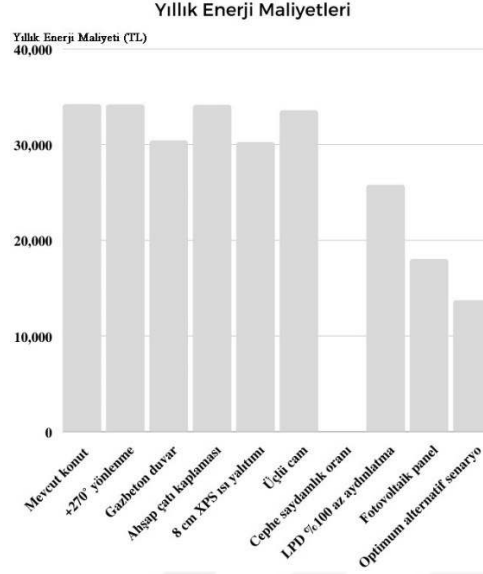
En düşük yıllık ve yaşam boyu enerji maliyetleri, elektrik tüketimini en fazla düşüren fotovoltaik panel ve aydınlatma sistemi parametreleri tarafından sağlanmıştır. Elektrik birim fiyatının yakıttan çok daha fazla olması bu sonucun en önemli sebebidir. Son olarak, fotovoltaik panel özelinde sağlanan düşük enerji maliyetleri, uygulamanın yüksek ilk yatırım maliyetleri sebebiyle kullanıcıya etkisini uzun vadede hissettirecektir.



Şekil 4.29. Mevcut binanın, tüm parametrelerin ve oluşturulan alternatif senaryonun yıllık yakıt tüketimi



Şekil 4.30. Mevcut binanın, tüm parametrelerin ve oluşturulan alternatif senaryonun yıllık elektrik tüketimi



Şekil 4.31. Mevcut binanın, tüm parametrelerin ve oluşturulan alternatif senaryonun yıllık enerji maliyeti

4.10 Yenileme Çalışmalarının Ekonomik Uygulanabilirliklerinin Araştırılması

Bu çalışmada seçilen yenileme çalışmalarının örnek binanın enerji performansına ve maliyetlerine etkisinin yanı sıra ilk yatırım maliyetleri ve binada sağladığı tasarruflar göz önüne alınarak yatırımların geri dönüş süreleri hesaplanmıştır. Böylece bina güçlendirme çalışmalarının ekonomik olarak uygulanabilirlikleri hakkında da ilgili kurum, kuruluş ve kişiler bilgilendirilmiştir. Güçlendirme tekniklerinin maliyetleri için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı güncel birim fiyat listesinden ve üreticilerin online kaynaklarından [103, 104, 105] faydalanılmıştır.

Güçlendirme yöntemi		Miktar	Malzeme + işçilik fiyatı	Toplam maliyet
Duvar	Duvar yıkımı	558 m ²	20 TL	11160 TL
	Duvar örümü	558 m ²	80 TL	44640 TL
	Alçı sıva + boya	690 m ²	26 TL	17940 TL
	Kaba sıva +boya	320 m ²	82 TL	26240 TL
	Toplam			99980 TL
Çatı	Çatı söküm	153 m ²	32 TL	4900 TL
	Çatı kurulum	153 m ²	150 TL	22950 TL
	Toplam			27850 TL
Pencere	Pencere söküm	55 m ²	14.5 TL	800 TL
	Pencere takım	55 m ²	310 TL	17050 TL
	Toplam			17850 TL
Isı yalıtımı		320 m ²	92 TL	29440 TL
Aydınlatma		56 adet	50 TL	2800 TL
Fotovoltaik panel		88 m ²	1104 TL	97130 TL
Toplam				275050 TL

Tablo 4.17. Seçilen yenileme çalışmalarının miktarı, malzeme + işçilik fiyatı ve toplam maliyeti

Tablo 4.17’de seçilen yenileme çalışmalarının miktarı, malzeme + işçilik fiyatı ve toplam maliyeti gösterilmiştir. Seçilen optimum senaryonun bir parçası olan +270° yönlenme uygulamasının ücretini hesaplamak mümkün olmadığından ve binanın enerji performansına etkisinin çok az olmasından dolayı bu bölümde göz ardı edilmiştir. Ayrıca cephe saydamlık oranı özelinde de mevcut binanın değerlerinde bir değişiklik yapılmadığı için listeye dahil edilmemiştir.

Örnek binaya uygulanan güçlendirme yöntemlerinin toplam maliyeti 275050 TL olarak hesaplanmıştır. Mevcut binanın yıllık enerji maliyeti 34210 TL’dir. Oluşturulan alternatif senaryonun yıllık enerji maliyeti ise 11016 TL’dir. Dolayısıyla yıllık 23194 TL tasarruf sağlanmıştır. Sonuç olarak, güçlendirme çalışmalarının yatırım maliyeti ve sağladığı yıllık tasarruf göz önüne alındığında geri dönüş süresi yaklaşık 12 yıl olarak hesaplanmıştır. Yenileme çalışmaları sonucu binanın değerinin artacağı ve 12 yıl sonrasında kazanç sağlanmaya başlanacağı göz önüne alındığında, güçlendirme uygulamaları için yapılan yatırımın bina sahipleri için ekonomik olarak makul bir karar olduğu aşikardır.

İlk yatırım maliyeti en fazla olan güçlendirme çalışması 99980 TL fiyatı ile tuğla duvar malzemesinin gazbeton ile değiştirilmesidir. Bu işlem için mevcut duvarların yıkılması, gazbeton duvarların örülmesi, sıva ve boyaların yapılması gerektiğinden ve malzeme + işçilik ücretleri fazla olduğundan dolayı çok yüksek bir maliyet ortaya çıkmıştır. Yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen yıllık sadece 3793 TL tasarruf sağlayan bu uygulamanın sonraki çalışmalar için bina güçlendirme yöntemlerinin bir parçası olmaması önerilir.

En fazla ilk yatırım maliyetine sahip olan 2. uygulama 97130 TL fiyatıyla binanın çatısına fotovolatik panel kurulumu olmuştur. Ancak bu uygulamanın yıllık elektrik tüketiminde sağladığı %64 tasarruf doğru bir güçlendirme yöntemi olduğunun göstergesidir. Çatı kaplamasının sökülmesi ve ahşap kaplama kurulumu ise binada sağladığı tasarrufa oranla yüksek maliyeti ile dikkat çekmiştir ve ideal bir yenileme yöntemi olmadığı ortaya çıkmıştır.

Üçlü cam uygulaması 17850 TL gibi yüksek olmayan ilk yatırım maliyetiyle birlikte bina yakıt tüketimini önemli ölçüde düşürerek hem ekonomik hem de çevresel olarak doğru bir güçlendirme seçeneği olduğunu kanıtlamıştır. Aynı durum binanın dış duvarlarına uygulanan 8 cm XPS ısı yalıtımı için de geçerlidir. Bu uygulama hem 29940 TL gibi nispeten yüksek olmayan bir ilk yatırım maliyetine sahiptir, hem de bina yakıt kullanımını ciddi oranda düşürerek bina performansını iyileştirmiştir. Son olarak, sadece 2800 TL yatırım maliyeti olmasına rağmen bina elektrik tüketiminde önemli miktarda tasarruf sağlanmasına olanak sağlayan aydınlatma sisteminin değişiminin de doğru bir güçlendirme yöntemi olduğu ortaya çıkmıştır.

4.11 Geçerlilik Çalışması

Bina enerji modellemesi, mimarlara, mühendislere ve yeşil bina danışmanlarına enerji verimli binalar tasarlamada giderek daha fazla yardımcı olmaktadır. Enerji modellemesinin bir tasarım aracı olarak yararlı olduğu kanıtlanmış olsa da, enerji simülasyon araçlarının doğruluğunu kanıtlamaya ihtiyaç vardır [106]. Bu bölümde GBS simülasyon aracından elde edilen bina enerji performans sonuçlarının doğruluğunun tespit etmek amacıyla, sonuçlar mevcut binanın gerçek enerji tüketim verileriyle karşılaştırılmıştır. Mevcut binanın enerji tüketim verileri bina kullanıcılarından ve ilgili kurumlardan temin edilen aylık faturalar tarafından sağlanmıştır.

GBS aracının doğruluğunu test etmek için simülasyon sonuçları dört kategoride ölçülen verilerle karşılaştırılmıştır: yıllık yakıt ve elektrik tüketimi / maliyeti. GBS aracının doğruluğu simüle edilmiş sonuçlar ile ölçülen veriler arasındaki yüzde farkları analiz edilerek değerlendirilmiştir. Formül şu şekildedir:

$$\text{Yüzde farkı (YF)} = [(\text{simüle edilmiş sonuçlar} - \text{ölçülen sonuçlar}) / \text{ölçülen sonuçlar}] \times 100$$

YF'nin pozitif değeri, GBS'nin ölçülen verilere göre sonuçları fazla tahmin ettiği anlamına gelirken, YF'nin negatif değeri yazılımın sonuçları az tahmin ettiği anlamına gelmektedir. [107]'de yapılan araştırmaya göre, simülasyon sonuçları ile ölçülen veriler arasındaki kabul edilebilir YF değeri maksimum %15'tir. Bu nedenle, bu araştırmada, YF'nin mutlak değerinin %15'e eşit veya daha az olması durumunda, GBS tarafından sağlanan simülasyon sonuçlarının doğru olduğu kabul edilmiştir.

	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık yakıt tüketim maliyeti (TL)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık elektrik tüketim maliyeti (TL)
GBS verileri	241021	10417	26147	23793
Gerçek veriler	216496	9360	6593	6000

Tablo 4.18. GBS ile gerçek enerji tüketim verilerinin karşılaştırılması

Tablo 4.18'de GBS ve gerçek enerji tüketim verileri için yıllık yakıt tüketimi, yıllık yakıt tüketim maliyeti, yıllık elektrik tüketimi ve yıllık elektrik tüketim maliyeti gösterilmiştir. Yıllık yakıt ve elektrik tüketimi için YF değeri şöyledir:

$$\text{* Yıllık yakıt tüketimi: YF} = [(241021 - 216496) / 216496] \times 100 = 11$$

$$\text{* Yıllık elektrik tüketimi: YF} = [(26147 - 6593) / 6593] \times 100 = 296$$

Yıllık yakıt tüketimi için YF değeri 11, yıllık elektrik tüketimi için ise 296 olarak hesaplanmıştır. GBS yıllık yakıt tüketimi / maliyeti değerleri gerçek veriler ile arasında %15'ten az bir farka sahiptir ve böylece güvenilir sonuçlar sağladığı kanıtlanmıştır. Yıllık elektrik tüketimi / maliyetine gelindiğinde ise YF değeri 15'ten çok daha büyük bir değer almıştır ve GBS'nin doğru

sonuçlar vermediği ortaya çıkmıştır. GBS'nin elektrik tüketimini / maliyetini yanlış hesaplamasının nedeni yazılımın yetersizliği olabilir, çünkü GBS kullanıcı, aydınlatma ve ekipman kullanımı için doğru verilerin girişi için yetersiz kalmıştır. Örneğin, mevcut binada kullanıcı sayısı 9 iken GBS simülasyonunda bu veri 21 olarak işlenmiştir ve manuel veri girişine olarak tanınmamıştır.

Bu çalışmada elektrik tüketimi / maliyeti ile ilgili verilerin kabul edilebilir aralıktaki bulunmaması güçlendirme çalışmalarının binaya çevresel ve ekonomik etkilerinin yanlış test edilmesine neden olmuş olabilir. GBS elektrik tüketimi / maliyeti sonuçlarının gerçek verilerden çok daha fazla olması, güçlendirme yöntemlerinin verimliliğinin / uygulanabilirliğinin yanlış yorumlanmasına, seçilen güçlendirme çalışmaları için yapılacak yatırımın geri dönüş sresinin hesaplanan değerden düşük olmasına ve binanın enerji performansının artmasına sebep olabilir.



5. SONUÇLAR

İnşaat sektörü küresel enerji tüketiminin en büyük paydaşlarından biridir ve fosil yakıt kullanımını azaltarak küresel ısınmanın olumsuz etkilerinden kurtulmak için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Mevcut binalar bina stokunun çok büyük bir kısmını oluşturduğundan dolayı, inşaat sektöründe sera gazı emisyonlarını en aza indirmek için mevcut binaların enerji performanslarının artırılması ciddi önem arz etmektedir.

BIM teknolojisi, binaların sanal alanda işbirliği içinde tasarlanmasına, inşa edilmesine ve işletilmesine olanak tanıyan bir dizi teknoloji, süreç ve politikadır. BIM, bünyesinde oluşturulabilen veri açısından zengin, nesne yönelimli, akıllı ve parametrik 3D model aracılığıyla mevcut binaların enerji performansının analiz edilmesine, güçlendirme seçeneklerinin simüle ve analiz edilmesine fırsat tanıyarak mevcut binalar için en iyi güçlendirme senaryosu oluşturulabilir.

Bu çalışmada, BIM'in mevcut binaların yenileme çalışmalarında etkinliğini araştırmak ve uygulanabilir ve optimize edilmiş güçlendirme teknikleri hakkında öneriler geliştirmek için örnek bir konut özelinde uygulama çalışması yapılmıştır. Revit yazılımında modellenip gerekli verileri işlenen mevcut konutun enerji performansı GBS simülasyon aracında hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçları; enerji tüketimi (yıllık / yaşam boyu) (yakıt ve elektrik), maliyet (yıllık / yaşam boyu) , enerji kullanım yoğunluğu ve CO2 salınımı miktarına göre değerlendirilmiştir.

Mevcut binanın enerji performansını iyileştirmek için literatürden ve simülasyon sonuçlarından faydalanılarak belirlenen 8 parametre özelinde güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir: bina yönlendirilmesi, bina kabuğu (duvar, çatı, ısı yalıtımı, pencere ve cephe saydamlık oranı), aydınlatma ve fotovoltaiik panel. Her parametre kapsamında farklı seçenekler geliştirilmiş ve enerji analizleri yapılmıştır. Ardından, elde edilen verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için 4 parametre özelinde geliştirilen toplam 17 senaryonun farklı kombinasyonları sonucu ortaya çıkan 192 alternatif senaryonun binanın enerji performansına etkisi test edilmiştir ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Son olarak, her parametre için belirlenen en uygun senaryonun kullanılmasıyla oluşturulan alternatif bina ile mevcut bina arasında kıyaslama yapılmıştır. Ayrıca, güçlendirme çalışmalarının ilk yatırım maliyetleri ve binada sağladığı tasarruflar göz önüne alınarak yatırımların geri dönüş süreleri hesaplanmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Örnek konutun enerji performansı uygulanan güçlendirme teknikleri ile ciddi oranda artmıştır.
- Binanın yıllık yakıt tüketiminde %61, elektrik tüketiminde ise %64 tasarruf sağlanmıştır.
- Mevcut konutun yıllık yakıt tüketimi 241021 MJ iken, alternatif bina için 92287 MJ'dur.
- Elektrik kullanımı mevcut konut ve alternatif senaryo için sırasıyla 26147 kWh ve 11016 kWh'dir.

- Yıllık ve yaşam boyu enerji maliyetlerinde %59 tasarruf sağlanmıştır.
- Mevcut binanın yıllık enerji maliyeti 34210 TL iken, oluşturulan alternatif senaryonun yıllık enerji maliyeti 11016 TL'dir.
- Binanın yaşam döngüsü maliyeti 465974 TL'den 186798 TL'ye düşmüştür.
- Binanın yıllık CO2 emisyonu 12 Mg'den 4.6 Mg'ye düşmüştür.
- Binanın enerji kullanım yoğunluğunda 801.3 MJ/m²/yıl düşüş meydana gelmiştir.
- Binanın enerji performansını en fazla arttıran uygulamalar üçlü cam, gazbeton duvar ve 8 cm XPS ısı yalıtımıdır.
- Binanın yıllık yakıt tüketimi mevcut camların üçlü camlar ile değiştirilmesi sonucu 68464 MJ azalmıştır.
- Fotovoltaik panel kurulumu ve aydınlatma sisteminin değiştirilmesi dışındaki yenileme çalışmalarının bina elektrik tüketimine bir etkisi olmamıştır.
- Binanın çatısına fotovoltaik panel kurulumu ile elektrik tüketiminde yıllık 16936 kWh tasarruf sağlanmıştır.
- Bina yöneliminin ve cephe saydamlık oranlarının değiştirilmesi bina enerji performansını iyileştirmemiştir.
- Elektrik birim fiyatının yakıt birim fiyatından fazla olması nedeniyle elektrik kullanımının azaltılması enerji tüketim maliyetini daha fazla düşürmüştür.
- Güçlendirme yöntemlerinin toplam maliyeti 275050 TL'dir.
- Güçlendirme çalışmaları için yapılan yatırımın geri dönüş süresi yaklaşık 12 yıldır.
- İlk yatırım maliyeti en fazla olan güçlendirme çalışması 99980 TL fiyatı ile tuğla duvar malzemesinin gazbeton ile değiştirilmesidir. Bu uygulama yüksek ilk maliyetine rağmen yıllık sadece 3793 TL tasarruf sağlaması, ideal bir güçlendirme yöntemi olmadığının göstergesidir.
- En fazla ilk yatırım maliyetine sahip olan 2. uygulama 97130 TL fiyatıyla binanın çatısına fotovolatik panel kurulumu olmuştur. Ancak bu uygulamanın yıllık elektrik tüketiminde sağladığı %64 tasarruf doğru bir güçlendirme yöntemi olduğunun göstergesidir.
- Üçlü cam ve 8 cm XPS ısı yalıtımı uygulamaları ise nispeten yüksek olmayan yatırım maliyetlerine rağmen bina yakıt tüketimini önemli miktarda düşürmüştür. Böylece bu uygulamaların hem ekonomik hem de çevresel olarak doğru güçlendirme seçenekleri oldukları kanıtlanmıştır.
- Mevcut binanın metal çatı kaplama malzemesinin ahşap ile değiştirilmesi sağladığı tasarrufa oranla yüksek maliyeti ile dikkat çekmiştir ve ideal bir yenileme yöntemi olmadığı ortaya çıkmıştır.

- Geçerlilik çalışmasında GBS simülasyon sonuçları ve gerçek tüketim verileri arasındaki fark yıllık yakıt tüketimi için %11, yıllık elektrik tüketimi için ise %296 olarak hesaplanmıştır.
- GBS simülasyon sonuçlarının yakıt için gerçek veriler ile arasında %15'ten az bir farka sahip olması güvenilir sonuçlar sağladığını kanıtlarken, elektrik için %296 fark bulunması GBS'nin bu çalışma özelinde elektrik tüketimi / maliyeti hesabı için doğru sonuçlar vermediğinin göstergesidir.

Bu çalışmada BIM teknolojilerinin mevcut binaların güçlendirme çalışmalarında kullanımı ve verimliliği test edilmiştir. BIM tabanlı programların ve yardımcı simülasyon araçlarının mevcut binaların enerji analizlerini yapmak, güçlendirme senaryolarını simüle etmek ve alternatif tasarımları karşılaştırmak için verimli araçlar olduğu saptanmıştır.



ÖNERİLER

- 1) Bu çalışmada, BIM teknolojisinin yenileme çalışmalarında verimliliğini test edebilmek amacıyla örnek bir konut üzerinde uygulama çalışması yapılmıştır. Farklı ölçek ve fonksiyondaki yapı tipleri özelinde yapılacak analiz çalışmaları ile daha doğru ve tutarlı sonuçlar alınabilir.
- 2) Bu çalışmada, bina enerji performansını etkileyebilecek 8 parametre için seçenekler geliştirilerek alternatif bir bina oluşturulmuştur. Gelecek çalışmalar için daha fazla parametre özelinde senaryolar geliştirilerek kapsamlı bir güçlendirme programı oluşturulabilir.
- 3) Bina yönelimi ve cephe saydırlık oranının bina enerji performansı üzerindeki etkisini daha iyi kavrayabilmek için yeni çalışmalar gereklidir.
- 4) Bu çalışmada, enerji analizleri için GBS simülasyon aracı kullanılmıştır. GBS tarafından sağlanan sonuçların doğruluğunu ve farklı simülasyon araçlarının verimliliğini ve güvenilirliğini test edebilmek amacıyla gelecek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.
- 5) GBS aracının yetersizliği ve Revit ve GBS arasındaki uyumsuzluk enerji performans analizleri için çok fazla zaman harcanmasına sebep olmuştur. Revit yazılımında oluşturulan her alternatif senaryo için gbxml dosya formatında export ve GBS’de import işlemine ihtiyaç duyulmuştur. Bina enerji performans analizlerinin daha hızlı yapılabilmesi için modelleme programları ve simülasyon araçları arasında tam ve kesintisiz uyuma ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- [1] Abanda, F. H., & Byers, L. (2016). An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy*, 97, 517-527.
- [2] Abhinaya, K. S., Kumar, V. P., & Krishnaraj, L. (2017). Assessment and remodelling of a conventional building into a green building using BIM. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 7(4), 1675-1681.
- [3] Ahsan, M. M., Zulqernain, M., Ahmad, H., Wajid, B. A., Shahzad, S., & Hussain, M. (2019). Reducing the operational energy consumption in buildings by passive cooling techniques using building information modelling tools. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 9(1), 343-353.
- [4] Taha, F. F., Hatem, W. A., & Jasim, N. A. (2020). Utilizing BIM technology to improve sustainability analyses for Iraqi Construction Projects. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(7), 1205-1215.
- [5] Kim, S., Zadeh, P. A., Staub-French, S., Froese, T., & Cavka, B. T. (2016). Assessment of the impact of window size, position and orientation on building energy load using BIM. *Procedia Engineering*, 145, 1424-1431.
- [6] Lim, Y. W., Chong, H. Y., Ling, P. C., & Tan, C. S. (2021). Greening existing buildings through Building Information Modelling: A review of the recent development. *Building and Environment*, 107924.
- [7] Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., & Li, Y. (2017). Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, 83, 134-148.
- [8] Edwards, R. E., Lou, E., Bataw, A., Kamaruzzaman, S. N., & Johnson, C. (2019). Sustainability-led design: Feasibility of incorporating whole-life cycle energy assessment into BIM for refurbishment projects. *Journal of Building Engineering*, 24, 100697.
- [9] Ozarisoy, B., & Altan, H. (2018). Low-energy design strategies for retrofitting existing residential buildings in Cyprus. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability* (Vol. 172, No. 5, pp. 241-255). Thomas Telford Ltd.
- [10] Khaddaj, M., & Srouf, I. (2016). Using BIM to retrofit existing buildings. *Procedia Engineering*, 145, 1526-1533.
- [11] Habibi, S., Obonyo, E. A., & Memari, A. M. (2020). Design and development of energy efficient re-roofing solutions. *Renewable Energy*, 151, 1209-1219.
- [12] Jalaee, F., & Jraide, A. (2014). Integrating BIM with green building certification system, energy analysis, and cost estimating tools to conceptually design sustainable buildings. In *Construction Research Congress 2014: Construction in a Global Network* (pp. 140-149).
- [13] Elnabawi, M. H., & Hamza, N. (2019, November). Investigating Building Information Model (BIM) to Building Energy Simulation (BES): Interoperability and Simulation Results. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 397, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.
- [14] Chong, H. Y., & Wang, X. (2016). The outlook of building information modeling for sustainable development. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(6), 1877-1887.
- [15] Egwunatum, S., Joseph-Akwara, E., & Akaigwe, R. (2016). Optimizing energy consumption in building designs using building information model (BIM). *Slovak Journal of Civil Engineering*, 24(3), 19-28.

- [16] Hu, M. (2018). Optimal renovation strategies for education buildings—A novel BIM–BPM–BEM framework. *Sustainability*, 10(9), 3287.
- [17] Aljundi, K., Pinto, A., & Rodrigues, F. (2016). Energy analysis using cooperation between bim tools (Revit and Green Building Studio) and Energy Plus. In *Actas del 1º Congresso Português de Building Information Modelling*.
- [18] Mostafavi, N., Farzinmoghdam, M., & Hoque, S. (2015). Envelope retrofit analysis using eQUEST, IESVE Revit Plug-in and Green Building Studio: a university dormitory case study. *International Journal of Sustainable Energy*, 34(9), 594-613.
- [19] Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu-genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 54(639), 32-44.
- [20] Koç, E., & Kaplan, E. (2008). Dünyada ve Türkiye’de Genel Enerji Durumu-I Dünya Değerlendirmesi. *Termodinamik Dergisi*, 187, 70-80.
- [21] Ali, K. O. Ç., Yağlı, H., Yıldız, K. O. Ç., & Uğurlu, İ. (2018). dünyada ve türkiye’de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86-114.
- [22] Erdem, K. O. Ç., & Kadir, K. A. Y. A. (2015). Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.
- [23] Savaşkan, M.O. (2015). Yüksek Enerji Performanslı Konut Yapıları için BIM Tabanlı Bir Açık Kaynak Bilgi Sistemi Modeli, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- [24] BP. (2021). Statistical Review of World Energy, 70th edition
- [25] International Energy Agency. (2021). Global Energy Review 2021
- [26] https://tr.wikipedia.org/wiki/Paris_Anla%C5%9Fmas%C4%B1, Erişim: 18 Ekim 2021
- [27] https://tr.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protokol%C3%BC, Erişim: 18 Ekim 2021
- [28] International Energy Agency. (2021). Turkey Energy Policy Review 2021
- [29] Global Alliance for Buildings and Construction. (2020). Global Status Report for Buildings and Construction
- [30] Feng, H., Liyanage, D. R., Karunathilake, H., Sadiq, R., & Hewage, K. (2020). BIM-based life cycle environmental performance assessment of single-family houses: Renovation and reconstruction strategies for aging building stock in British Columbia. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119543.
- [31] Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871-875.
- [32] Bruntland, G. (1987). The Bruntland Report, HMSO, London, UK
- [33] Carvalho, J. P., Bragança, L., & Mateus, R. (2019). Optimising building sustainability assessment using BIM. *Automation in Construction*, 102, 170-182.
- [34] Kibert, C. J. (1994). Establishing principles and a model for sustainable construction. In *Proceedings of the first international conference on sustainable construction* (pp. 6-9). Tampa Florida.
- [35] McLennan, J.F. (2004). The Philosophy Of Sustainable Design: The future of architecture. Ecotone

publishing

- [36] Azhar, S., Carlton, W. A., Olsen, D., & Ahmad, I. (2011). Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Automation in construction*, 20(2), 217-224.
- [37] Erten, D. (2011). Yeşil Binalar. Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları – V, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Bölgesel Çevre Merkezi. Ankara
- [38] Sakınç, E. (2006). Sürdürülebilirlik Bağlamında Mimaride Güneş Enerjili Etkin Sistemlerin Tasarım Ögesi Olarak Değerlendirilmesine Yönelik Bir Yaklaşım, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 7-9.
- [39] Zimmermann, R. K., Skjelmose, O., Jensen, K. G., Jensen, K. K., & Birgisdottir, H. (2019). Categorizing building certification systems according to the definition of sustainable building. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 471, No. 9, p. 092060). IOP Publishing.
- [40] Çelik, E. (2009). *Yeşil bina sertifika sistemlerinin incelenmesi Türkiye’de uygulanabilirliklerinin değerlendirilmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [41] Erdede, S. B., Erdede, B., & Bektaş, S. (2014). Sürdürülebilir yeşil binalar ve sertifika sistemlerinin değerlendirilmesi. *Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (UZAL-CBS 2014)*, 14-17.
- [42] Şimşek, E. P. (2012). *Sürdürülebilirlik Bağlamında Yeşil Bina Olma Kriterleri “Kağıthane Ofisspark Projesi Örneği”* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [43] Erdede, S. B., & Bektaş, S. (2018). Türkiye için yeşil bina sertifika sistemi gerekliliği. In *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, November* (pp. 138-143).
- [44] <https://ofisraporu.com/kiralik-isyeri/allianz-tower-kiralik-ofis>, Erişim: 23 Ekim 2021
- [45] Shoubi, M. V., Shoubi, M. V., Bagchi, A., & Barough, A. S. (2015). Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1), 41-55.
- [46] Akın, C. T., & Kaplan, S. (2019). Enerji Kimlik Belgelerinin Enerji Etkin Mimari Tasarım Kriterleri Açısından Değerlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(1), 373-384.
- [47] Morrissey, J., Moore, T., & Horne, R. E. (2011). Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy*, 36(2), 568-577.
- [48] Spanos, I., Simons, M., & Holmes, K. L. (2005). Cost savings by application of passive solar heating. *Structural Survey*.
- [49] Armutlu, S.G. (2019). Bina Bilgi Modelleme Uygulamaları ile Binalarda Enerji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi
- [50] Uzun, Ö. (2009). *Bimsblok İle Örülen Dış Duvarların Yapısal Performanslarının Değerlendirilmesi Üzerine Bir Alan Araştırması* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [51] <https://www.sanalsantiye.com/tugla-mi-yoksa-bims-mi/>, Erişim: 1 Kasım 2022
- [52] Coşkun, K. (2006). Çatı Sistemleri İle İlgili Performans Gereksinimleri. *Ulusal Çatı & Cephe kaplamaları Çağdaş Malzeme ve Teknolojiler Sempozyumu, DTÜ, İstanbul*, 17-18.
- [53] Uğur, L. O., Erdal, M., & Üçkardeşler, A. (2018). Çatı Kaplama Malzemesi Seçiminde Vikor Çok Kriterli Karar Verme Yönteminin Uygulanması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(2), 117-130.
- [54] <https://blog.constellation.com/2017/04/07/types-of-energy-efficient-roofs/>, Erişim: 3 Kasım 2021
- [55] Bayraktar, D., & Bayraktar, E. (2016). Mevcut Binalarda Isı Yalıtımı Uygulamalarının Değerlendirilmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 59-66.

- [56] Ülker, S. (2009). *Isı yalıtım malzemelerinin özelliklerinin uygulamaya etkileri* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [57] Bektaş, B., & Aksoy, U. T. (2005). Soğuk iklimlerdeki binalarda pencere sistemlerinin enerji performansı. *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 3, 499-508.
- [58] DOE, U. (2014). Windows and Building Envelope Research and Development: Roadmap for Emerging Technologies. *US Department of Energy, Buildings Technologies Office, Washington, DC*.
- [59] He, Q., Ng, S. T., Hossain, M., & Skitmore, M. (2019). Energy-efficient window retrofit for high-rise residential buildings in different climatic zones of China. *Sustainability*, 11(22), 6473.
- [60] Chi, F. A., Guo, Y., & Liu, Y. (2021). Impact of Window-to-wall Ratio on Building Energy Consumption (International Conference and Workshop: Re-thinking the HIBIKINO Campus 2001-2021: Kitakyushu (Japan))--(Energy and Environment). *JAILCD*, 143-146.
- [61] Orr, F. M. (2015). 2015 Quadrennial Technology Review. In *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*.
- [62] UN Environment – Global Environment Facility. (2017). Accelerating the Global Adoption of Energy-Efficient Lighting
- [63] Lim, S. R., Kang, D., Ogunseitan, O. A., & Schoenung, J. M. (2013). Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs. *Environmental science & technology*, 47(2), 1040-1047.
- [64] Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499-1511.
- [65] Rüstemli, S., Dinçer, F., Çelik, M., & Cengiz, M. S. (2013). Fotovoltaik Paneller: Güneş Takip Sistemleri ve İklimlendirme Sistemleri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 141-147.
- [66] Akipek, F. Ö., & İnceoğlu, N. (2007). Bilgisayar destekli tasarım ve üretim teknolojilerinin mimarlıktaki kullanımları. *MEGARON/Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi E-Dergisi*, 2(4), 237-253.
- [67] Aydoğan, Ü. (2006). *Bilgisayar destekli tasarım yazılımlarının stratejik kullanımının değerlendirilmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [68] Azhar, S., Nadeem, A., Mok, J. Y., & Leung, B. H. (2008). Building Information Modeling (BIM): A new paradigm for visual interactive modeling and simulation for construction projects. In *Proc., First International Conference on Construction in Developing Countries* (Vol. 1, pp. 435-46).
- [69] 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.
- [70] http://yapitrend.com.tr/WiLO-BiNA-YAsAM-DoNGuSu-BOYUNCA-DESTeGEHAZIR_2199.html, Erişim: 5 Kasım 2021
- [71] Glick, S., and Guggemos, A. (2009). "IPD and BIM: Benefits and opportunities for regulatory agencies." *Proc., 45th Associated Schools of Construction National Conference*, Gainesville, FL.
- [72] Carmona, J., and Irwin, K. (2007). "BIM: Who, what, how and why." *Building Operating Management*. (<http://www.facilitiesnet.com/software/article/BIM-Who-What-How-and-Why-7546>) (August 21, 2009).
- [73] Çetiner, O. (2010). Mimarlıkta Yapı Bilgi Modelleme ve Örnekler. *Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Muğla Üniversitesi*, 10-12.

- [74] https://help.autodesk.com/view/BUILDING_PERFORMANCE_ANALYSIS/ENU/?guid=GUID-43DAB177-3A4F-496C-BECB-2591FD04FC10, Erişim: 10 Kasım 2021
- [75] <https://magazine.mosa.com/en-us/cad-vs-bim-whats-the-difference-and-overlap-between-them>, Erişim: 10 Kasım 2021
- [76] <https://bimcorner.com/cad-vs-bim-in-infrastructure/>, Erişim: 11 Kasım 2021
- [77] Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2018). Building information modeling: Why? what? how?. In *Building information modeling* (pp. 1-24). Springer, Cham.
- [78] Çuhadar, F. G. (2017). *Mimarlık hizmeti kapsamında bina bilgi modelleme: " G Villa" konut projesi* (Doctoral dissertation, İstanbul Kültür Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Mimarlık Anabilim Dalı).
- [79] Ofloğlu, S. (2016). BIM ve sürdürülebilirlik. *XVIII. Akademik Bilişim Konferansı*, 1183-1187.
- [80] ÖLÇER, B. (2019). İklim Krizinde BİM'in Üstleneceği Rol. *Yapı Bilgi Modelleme*, 2(1), 19-29.
- [81] Wong, J. K. W., & Zhou, J. (2015). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in construction*, 57, 156-165.
- [82] Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., & Li, Y. (2017). Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, 83, 134-148.
- [83] Hong, P. L. H. Solar Analysis: Calculating Shaded Areas in Revit for Sustainable Design, Autodesk University
- [84] Kriegel, E., & BIM, N. B. G. (2008). Indianapolis.
- [85] Mehndi, S. M., & Chakraborty, I. (2020). Simulation for a cost-effective and energy efficient retrofits of the existing building stock in India using BIM. In *2020 International Conference on Contemporary Computing and Applications (IC3A)* (pp. 237-243). IEEE.
- [86] Alba-Rodríguez, M. D., Martínez-Rocamora, A., González-Vallejo, P., Ferreira-Sánchez, A., & Marrero, M. (2017). Building rehabilitation versus demolition and new construction: Economic and environmental assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 66, 115-126.
- [87] Ahmed, W., & Asif, M. (2020). BIM-based techno-economic assessment of energy retrofitting residential buildings in hot humid climate. *Energy and Buildings*, 227, 110406.
- [88] Hong, W. T., Ibrahim, K., & Loo, S. C. (2019). Urging Green Retrofits of Building Façades in the Tropics: A Review and Research Agenda. *Architecture*, 10(6).
- [89] Scherer, R. J., & Katranuschkov, P. (2018). BIMification: How to create and use BIM for retrofitting. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 54-66.
- [90] <https://support.sefaira.com/hc/en-us/articles/360022441932-Section-1-What-is-building-performance-analysis->, Erişim: 13 Kasım 2021
- [91] https://help.autodesk.com/view/BUILDING_PERFORMANCE_ANALYSIS/ENU/?guid=GUID-43DAB177-3A4F-496C-BECB-2591FD04FC10, Erişim: 13 Kasım 2021
- [92] Azhar, S., Brown, J., & Farooqui, R. (2009). BIM-based sustainability analysis: An evaluation of building performance analysis software. In *Proceedings of the 45th ASC annual conference* (Vol. 1, No. 4, pp. 276-292).

- [93] Lim, Y. W., Chong, H. Y., Ling, P. C., & Tan, C. S. (2021). Greening existing buildings through Building Information Modelling: A review of the recent development. *Building and Environment*, 107924.
- [94] Chang, Y. T., & Hsieh, S. H. (2020). A review of Building Information Modeling research for green building design through building performance analysis. *J. Inf. Technol. Constr.*, 25, 1-40.
- [95] <https://blog.bimsmith.com/Whats-the-Big-Deal-About-Revit-Understanding-the-Role-of-Autodesk-Revit-in-Architecture-Engineering-and-Construction>, Erişim: 14 Kasım 2021
- [96] <https://www.cadcrowd.com/blog/what-is-revit-why-its-essential-for-architectural-design-services/>, Erişim: 14 Kasım 2021
- [97] <https://microsolresources.com/tech-resources/article/10-benefits-of-revit/>, Erişim: 15 Kasım 2021
- [98] <https://cadevangelist.com/design-engineering/insights/top-7-reasons-to-use-revit>, Erişim: 15 Kasım 2021
- [99] Sanhudo, L., Ramos, N. M., Martins, J. P., Almeida, R. M., Barreira, E., Simões, M. L., & Cardoso, V. (2018). Building information modeling for energy retrofitting—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 249-260.
- [100] Reeves, T., Olbina, S., & Issa, R. R. (2015). Guidelines for using building information modeling for energy analysis of buildings. *Buildings*, 5(4), 1361-1388.
- [101] Otuh, N. (2016). BIM Based Energy/Sustainability Analysis for Educational Building—A Case Study: Analysis of HAMK Building Extensions N and S using Autodesk Revit and GBS.
- [102] Le, M. K. (2014). Autodesk® Green Building Studio for an Energy-Efficient, Sustainable Building.
- [103] <https://mimarobot.com/>, Erişim: 17 Kasım 2021
- [104] <https://santiyede.com/2020-yili-insaat-birim-fiyatlari/11/>, Erişim: 19 Kasım 2021
- [105] <https://www.birimfiyat.net/>, Erişim: 19 Kasım 2021
- [106] Reeves, T., Olbina, S., & Issa, R. (2012). Validation of building energy modeling tools: ecotect™, green building studio™ and IES< VE>™. In *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1-12). IEEE.
- [107] Maamari, F., Andersen, M., de Boer, J., Carroll, W. L., Dumortier, D., & Greenup, P. (2006). Experimental validation of simulation methods for bi-directional transmission properties at the daylighting performance level. *Energy and Buildings*, 38(7), 878-889.

EKLER

EK- 1: 192 SENARYONUN DETAYLARI

Senaryo tipi	Duvar	Çatı	Isı yalıtımı	Pencere	Bina yönelimi – Cephe saydamlık oranı – Aydınlatma - fotovoltaik panel
1	D1	Ç1	I1	P2	Mevcut durum
2	D1	Ç1	I1	P3	Mevcut durum
3	D1	Ç1	I1	P4	Mevcut durum
4	D1	Ç1	I2	P2	Mevcut durum
5	D1	Ç1	I2	P3	Mevcut durum
6	D1	Ç1	I2	P4	Mevcut durum
7	D1	Ç1	I3	P2	Mevcut durum
8	D1	Ç1	I3	P3	Mevcut durum
9	D1	Ç1	I3	P4	Mevcut durum
10	D1	Ç1	I4	P2	Mevcut durum
11	D1	Ç1	I4	P3	Mevcut durum
12	D1	Ç1	I4	P4	Mevcut durum
13	D1	Ç1	I5	P2	Mevcut durum
14	D1	Ç1	I5	P3	Mevcut durum
15	D1	Ç1	I5	P4	Mevcut durum
16	D1	Ç1	I6	P2	Mevcut durum
17	D1	Ç1	I6	P3	Mevcut durum
18	D1	Ç1	I6	P4	Mevcut durum
19	D1	Ç1	I7	P2	Mevcut durum
20	D1	Ç1	I7	P3	Mevcut durum
21	D1	Ç1	I7	P4	Mevcut durum
22	D1	Ç1	I8	P2	Mevcut durum
23	D1	Ç1	I8	P3	Mevcut durum
24	D1	Ç1	I8	P4	Mevcut durum
25	D1	Ç2	I1	P2	Mevcut durum
26	D1	Ç2	I1	P3	Mevcut durum
27	D1	Ç2	I1	P4	Mevcut durum
28	D1	Ç2	I2	P2	Mevcut durum
29	D1	Ç2	I2	P3	Mevcut durum

30	D1	Ç2	I2	P4	Mevcut durum
31	D1	Ç2	I3	P2	Mevcut durum
32	D1	Ç2	I3	P3	Mevcut durum
33	D1	Ç2	I3	P4	Mevcut durum
34	D1	Ç2	I4	P2	Mevcut durum
35	D1	Ç2	I4	P3	Mevcut durum
36	D1	Ç2	I4	P4	Mevcut durum
37	D1	Ç2	I5	P2	Mevcut durum
38	D1	Ç2	I5	P3	Mevcut durum
39	D1	Ç2	I5	P4	Mevcut durum
40	D1	Ç2	I6	P2	Mevcut durum
41	D1	Ç2	I6	P3	Mevcut durum
42	D1	Ç2	I6	P4	Mevcut durum
43	D1	Ç2	I7	P2	Mevcut durum
44	D1	Ç2	I7	P3	Mevcut durum
45	D1	Ç2	I7	P4	Mevcut durum
46	D1	Ç2	I8	P2	Mevcut durum
47	D1	Ç2	I8	P3	Mevcut durum
48	D1	Ç2	I8	P4	Mevcut durum
49	D1	Ç3	I1	P2	Mevcut durum
50	D1	Ç3	I1	P3	Mevcut durum
51	D1	Ç3	I1	P4	Mevcut durum
52	D1	Ç3	I2	P2	Mevcut durum
53	D1	Ç3	I2	P3	Mevcut durum
54	D1	Ç3	I2	P4	Mevcut durum
55	D1	Ç3	I3	P2	Mevcut durum
56	D1	Ç3	I3	P3	Mevcut durum
57	D1	Ç3	I3	P4	Mevcut durum
58	D1	Ç3	I4	P2	Mevcut durum
59	D1	Ç3	I4	P3	Mevcut durum
60	D1	Ç3	I4	P4	Mevcut durum
61	D1	Ç3	I5	P2	Mevcut durum
62	D1	Ç3	I5	P3	Mevcut durum
63	D1	Ç3	I5	P4	Mevcut durum
64	D1	Ç3	I6	P2	Mevcut durum

65	D1	Ç3	I6	P3	Mevcut durum
66	D1	Ç3	I6	P4	Mevcut durum
67	D1	Ç3	I7	P2	Mevcut durum
68	D1	Ç3	I7	P3	Mevcut durum
69	D1	Ç3	I7	P4	Mevcut durum
70	D1	Ç3	I8	P2	Mevcut durum
71	D1	Ç3	I8	P3	Mevcut durum
72	D1	Ç3	I8	P4	Mevcut durum
73	D1	Ç4	I1	P2	Mevcut durum
74	D1	Ç4	I1	P3	Mevcut durum
75	D1	Ç4	I1	P4	Mevcut durum
76	D1	Ç4	I2	P2	Mevcut durum
77	D1	Ç4	I2	P3	Mevcut durum
78	D1	Ç4	I2	P4	Mevcut durum
79	D1	Ç4	I3	P2	Mevcut durum
80	D1	Ç4	I3	P3	Mevcut durum
81	D1	Ç4	I3	P4	Mevcut durum
82	D1	Ç4	I4	P2	Mevcut durum
83	D1	Ç4	I4	P3	Mevcut durum
84	D1	Ç4	I4	P4	Mevcut durum
85	D1	Ç4	I5	P2	Mevcut durum
86	D1	Ç4	I5	P3	Mevcut durum
87	D1	Ç4	I5	P4	Mevcut durum
88	D1	Ç4	I6	P2	Mevcut durum
89	D1	Ç4	I6	P3	Mevcut durum
90	D1	Ç4	I6	P4	Mevcut durum
91	D1	Ç4	I7	P2	Mevcut durum
92	D1	Ç4	I7	P3	Mevcut durum
93	D1	Ç4	I7	P4	Mevcut durum
94	D1	Ç4	I8	P2	Mevcut durum
95	D1	Ç4	I8	P3	Mevcut durum
96	D1	Ç4	I8	P4	Mevcut durum
97	D2	Ç1	I1	P2	Mevcut durum
98	D2	Ç1	I1	P3	Mevcut durum
99	D2	Ç1	I1	P4	Mevcut durum

100	D2	Ç1	I2	P2	Mevcut durum
101	D2	Ç1	I2	P3	Mevcut durum
102	D2	Ç1	I2	P4	Mevcut durum
103	D2	Ç1	I3	P2	Mevcut durum
104	D2	Ç1	I3	P3	Mevcut durum
105	D2	Ç1	I3	P4	Mevcut durum
106	D2	Ç1	I4	P2	Mevcut durum
107	D2	Ç1	I4	P3	Mevcut durum
108	D2	Ç1	I4	P4	Mevcut durum
109	D2	Ç1	I5	P2	Mevcut durum
110	D2	Ç1	I5	P3	Mevcut durum
111	D2	Ç1	I5	P4	Mevcut durum
112	D2	Ç1	I6	P2	Mevcut durum
113	D2	Ç1	I6	P3	Mevcut durum
114	D2	Ç1	I6	P4	Mevcut durum
115	D2	Ç1	I7	P2	Mevcut durum
116	D2	Ç1	I7	P3	Mevcut durum
117	D2	Ç1	I7	P4	Mevcut durum
118	D2	Ç1	I8	P2	Mevcut durum
119	D2	Ç1	I8	P3	Mevcut durum
120	D2	Ç1	I8	P4	Mevcut durum
121	D2	Ç2	I1	P2	Mevcut durum
122	D2	Ç2	I1	P3	Mevcut durum
123	D2	Ç2	I1	P4	Mevcut durum
124	D2	Ç2	I2	P2	Mevcut durum
125	D2	Ç2	I2	P3	Mevcut durum
126	D2	Ç2	I2	P4	Mevcut durum
127	D2	Ç2	I3	P2	Mevcut durum
128	D2	Ç2	I3	P3	Mevcut durum
129	D2	Ç2	I3	P4	Mevcut durum
130	D2	Ç2	I4	P2	Mevcut durum
131	D2	Ç2	I4	P3	Mevcut durum
132	D2	Ç2	I4	P4	Mevcut durum
133	D2	Ç2	I5	P2	Mevcut durum
134	D2	Ç2	I5	P3	Mevcut durum

135	D2	Ç2	I5	P4	Mevcut durum
136	D2	Ç2	I6	P2	Mevcut durum
137	D2	Ç2	I6	P3	Mevcut durum
138	D2	Ç2	I6	P4	Mevcut durum
139	D2	Ç2	I7	P2	Mevcut durum
140	D2	Ç2	I7	P3	Mevcut durum
141	D2	Ç2	I7	P4	Mevcut durum
142	D2	Ç2	I8	P2	Mevcut durum
143	D2	Ç2	I8	P3	Mevcut durum
144	D2	Ç2	I8	P4	Mevcut durum
145	D2	Ç3	I1	P2	Mevcut durum
146	D2	Ç3	I1	P3	Mevcut durum
147	D2	Ç3	I1	P4	Mevcut durum
148	D2	Ç3	I2	P2	Mevcut durum
149	D2	Ç3	I2	P3	Mevcut durum
150	D2	Ç3	I2	P4	Mevcut durum
151	D2	Ç3	I3	P2	Mevcut durum
152	D2	Ç3	I3	P3	Mevcut durum
153	D2	Ç3	I3	P4	Mevcut durum
154	D2	Ç3	I4	P2	Mevcut durum
155	D2	Ç3	I4	P3	Mevcut durum
156	D2	Ç3	I4	P4	Mevcut durum
157	D2	Ç3	I5	P2	Mevcut durum
158	D2	Ç3	I5	P3	Mevcut durum
159	D2	Ç3	I5	P4	Mevcut durum
160	D2	Ç3	I6	P2	Mevcut durum
161	D2	Ç3	I6	P3	Mevcut durum
162	D2	Ç3	I6	P4	Mevcut durum
163	D2	Ç3	I7	P2	Mevcut durum
164	D2	Ç3	I7	P3	Mevcut durum
165	D2	Ç3	I7	P4	Mevcut durum
166	D2	Ç3	I8	P2	Mevcut durum
167	D2	Ç3	I8	P3	Mevcut durum
168	D2	Ç3	I8	P4	Mevcut durum
169	D2	Ç4	I1	P2	Mevcut durum

170	D2	Ç4	I1	P3	Mevcut durum
171	D2	Ç4	I1	P4	Mevcut durum
172	D2	Ç4	I2	P2	Mevcut durum
173	D2	Ç4	I2	P3	Mevcut durum
174	D2	Ç4	I2	P4	Mevcut durum
175	D2	Ç4	I3	P2	Mevcut durum
176	D2	Ç4	I3	P3	Mevcut durum
177	D2	Ç4	I3	P4	Mevcut durum
178	D2	Ç4	I4	P2	Mevcut durum
179	D2	Ç4	I4	P3	Mevcut durum
180	D2	Ç4	I4	P4	Mevcut durum
181	D2	Ç4	I5	P2	Mevcut durum
182	D2	Ç4	I5	P3	Mevcut durum
183	D2	Ç4	I5	P4	Mevcut durum
184	D2	Ç4	I6	P2	Mevcut durum
185	D2	Ç4	I6	P3	Mevcut durum
186	D2	Ç4	I6	P4	Mevcut durum
187	D2	Ç4	I7	P2	Mevcut durum
188	D2	Ç4	I7	P3	Mevcut durum
189	D2	Ç4	I7	P4	Mevcut durum
190	D2	Ç4	I8	P2	Mevcut durum
191	D2	Ç4	I8	P3	Mevcut durum
192	D2	Ç4	I8	P4	Mevcut durum

EK- 2: 192 SENARYO İÇİN BİNA ENERJİ PERFORMANS SONUÇLARI

Senaryo tipi	Yıllık yakıt tüketimi (MJ)	Yıllık elektrik tüketimi (kWh)	Yıllık enerji maliyeti (TL)	Yaşam döngüsü enerji maliyeti (TL)	Enerji kullanım yoğunluğu (MJ/m2/yıl)	CO2 emisyonu (Mg)
1	142317	25187	29071	395965	923.4	7.1
2	112186	27469	29845	406508	836.6	5.6
3	102863	28012	29937	407748	807.3	5.1
4	138711	25038	28779	391992	910.3	6.9
5	109488	27412	29677	404208	828.0	5.5
6	100012	27936	29744	405131	797.8	5.0
7	141617	25181	29035	395473	920.5	7.1
8	111524	27468	29816	406105	833.9	5.6
9	102240	28012	29910	407385	804.9	5.1
10	138017	25032	28744	391510	907.4	6.9
11	108800	27413	29648	403820	825.3	5.4
12	99406	27937	29719	404791	795.4	5.0
13	140617	25170	28976	394670	915.8	7.0
14	110456	27466	29768	405459	829.7	5.5
15	101223	28013	29867	406799	800.9	5.0
16	136884	25023	28687	390728	902.8	6.8
17	107735	27412	29601	403186	821.0	5.4
18	98434	27940	29680	404247	791.6	4.9
19	139197	25159	28911	393786	910.7	6.9
20	109285	27465	29717	404754	825.0	5.5
21	100112	28015	29820	406162	796.5	5.0
22	135646	25013	28624	389875	897.7	6.8
23	106586	27412	29551	402504	816.5	5.3
24	97382	27943	29637	403662	787.5	4.9
25	142240	25181	29062	395847	923.0	7.1
26	112104	27464	29837	406395	836.2	5.6
27	102781	28007	29928	407637	807.0	5.1
28	138622	25031	28769	391855	909.8	6.9
29	109365	27407	29667	404082	827.5	5.5

30	99922	27930	29735	405005	797.4	5.0
31	141540	25175	29026	395355	920.2	7.1
32	111440	27463	29807	405990	833.5	5.6
33	102157	28007	29902	407273	804.5	5.1
34	137925	25025	28734	391371	906.9	6.9
35	108708	27407	29638	403690	824.8	5.4
36	99321	27932	29710	404667	795.0	5.0
37	140389	25165	28967	394552	915.5	7.0
38	110371	27461	29760	405345	829.3	5.5
39	101140	28008	29859	406687	800.5	5.0
40	136792	25016	28676	390589	902.3	6.8
41	107640	27406	29592	403054	820.6	5.4
42	98348	27934	29670	404124	791.2	4.9
43	139118	25154	28902	393667	910.3	6.9
44	109204	27460	29708	404642	824.6	5.4
45	100030	28009	29812	406050	796.1	5.0
46	135556	25006	28614	389737	897.2	6.8
47	106490	27406	29542	402372	816.0	5.3
48	97294	27937	29627	403537	787.0	4.9
49	142076	25181	29055	395748	922.4	7.1
50	111945	27464	29831	406310	835.5	5.6
51	102625	28008	29922	407557	806.3	5.1
52	138440	25031	28761	391746	909.1	6.9
53	109192	27408	29661	403994	826.8	5.4
54	99768	27932	29730	404933	796.8	5.0
55	141374	25174	29019	395255	919.5	7.1
56	111283	27463	29801	405906	832.9	5.5
57	102004	28008	29896	407195	803.9	5.1
58	137741	25025	28726	391261	906.2	6.9
59	108535	27408	29632	403601	824.2	5.4
60	99168	27933	29705	404597	794.4	4.9
61	140224	25164	28960	394452	914.8	7.0
62	110212	27462	29754	405259	828.6	5.5
63	100988	28009	29853	406609	799.9	5.0
64	136610	25016	28668	390480	901.6	6.8

65	107872	27410	29605	403237	821.6	5.4
66	98192	27936	29665	404052	790.6	4.9
67	138954	25153	28895	393568	909.6	6.9
68	109048	27461	29702	404559	824.0	5.4
69	99882	28010	29806	405975	795.5	5.0
70	135372	25005	28606	389627	896.5	6.8
71	100604	27814	29659	403972	798.4	5.0
72	97146	27938	29622	403470	786.5	4.8
73	141122	25161	28995	394935	918.3	7.0
74	111001	27450	29777	405572	831.6	5.5
75	101741	27995	29872	406874	802.7	5.1
76	137378	25007	28694	390831	904.5	6.9
77	108161	27392	29602	403189	822.5	5.4
78	98850	27919	29678	404229	793.0	4.9
79	140417	25154	28959	394440	915.4	7.0
80	110350	27449	29748	405175	829.0	5.5
81	101116	27995	29846	406511	800.2	5.0
82	136678	25001	28658	390346	901.6	6.8
83	107501	27392	29753	402797	819.8	5.4
84	98240	27920	29653	403888	790.6	4.9
85	139266	25144	28900	393636	910.7	6.9
86	109277	27447	29700	404528	824.7	5.4
87	100115	27996	29803	405935	796.2	5.0
88	135535	24992	28601	389557	897.0	6.8
89	106445	27392	29527	402172	815.6	5.3
90	97272	27923	29614	403349	786.7	4.9
91	137900	25133	28835	392748	905.5	6.9
92	108106	27446	29648	403825	820.1	5.4
93	99004	27998	29757	405299	791.8	4.9
94	134297	24982	28538	388704	891.9	6.7
95	114098	27563	30014	408802	848.5	5.7
96	96230	27925	29571	402770	782.6	4.8
97	133731	25040	28566	389091	887.3	6.7
98	105138	27449	29522	402107	808.3	5.2
99	96448	28013	29660	403979	781.9	4.8

100	131635	24952	28395	386760	880.9	6.6
101	103315	27393	29393	400346	803.2	5.2
102	94737	27963	29541	402363	777.2	4.7
103	133354	25037	28547	388827	885.7	6.7
104	104801	27448	29507	401903	807.0	5.2
105	96128	28013	29646	403794	780.7	4.8
106	131241	24948	28375	386484	879.3	6.5
107	102962	27393	29377	400133	801.8	5.1
108	94404	27964	29527	402171	775.9	4.7
109	132723	25031	28515	388387	883.2	6.6
110	104241	27448	29483	401567	804.8	5.2
111	95606	28014	29624	403496	778.6	4.8
112	130578	24942	28341	386023	876.5	6.5
113	102364	27392	29351	399775	799.4	5.1
114	93859	27965	29504	401862	773.8	4.7
115	132020	25025	28479	387901	880.3	6.6
116	103610	27447	29455	401192	802.3	5.2
117	95026	28015	29600	403169	776.3	4.7
118	129835	24936	28303	385508	873.5	6.5
119	101701	27392	29322	399380	796.8	5.1
120	93253	27966	29479	401520	771.4	4.7
121	133653	25035	28558	388977	886.9	6.7
122	105063	27444	29515	402004	808.0	5.2
123	96372	28008	29652	403876	781.6	4.8
124	131565	24946	28387	386651	880.5	6.6
125	103240	27388	29385	400243	802.8	5.1
126	94661	27959	29534	402260	776.9	4.7
127	133280	25031	28539	388716	885.4	6.6
128	104726	27443	29500	401800	806.6	5.2
129	96053	28008	29639	403693	780.3	4.8
130	131167	24943	28367	386372	878.9	6.5
131	102886	27388	29370	400030	801.4	5.1
132	94331	27959	29520	402070	775.6	4.7
133	132652	25026	28507	388277	882.8	6.6
134	104165	27443	29475	401463	804.4	5.2

135	95534	28009	29617	403396	778.3	4.8
136	130502	24937	28333	385910	876.2	6.5
137	111164	27570	29893	407160	836.9	5.5
138	93790	27960	29497	401764	773.4	4.7
139	131944	25020	28471	387788	879.9	6.6
140	103534	27443	29448	401088	801.9	5.2
141	94956	28010	29593	403070	776.0	4.7
142	129760	24931	28295	385395	873.1	6.5
143	101629	27387	29315	399279	796.4	5.1
144	93182	27961	29472	401420	771.0	4.6
145	133496	25035	28551	388885	886.3	6.7
146	113804	27629	30061	409442	845.2	5.7
147	96230	28009	29647	403807	781.0	4.8
148	131403	24946	28380	386555	879.9	6.6
149	103093	27389	29380	400167	802.3	5.1
150	94527	27960	29529	402195	776.4	4.7
151	133119	25031	28532	388620	884.7	6.6
152	104579	27444	29494	401724	806.1	5.2
153	95919	28009	29634	403627	779.8	4.8
154	131003	24943	28360	386275	878.2	6.5
155	102736	27389	29364	399953	800.8	5.1
156	94197	27960	29515	402006	775.0	4.7
157	132489	25026	28500	388181	882.2	6.6
158	104018	27144	29469	401387	803.8	5.2
159	95395	28010	29612	403328	777.7	4.8
160	130340	24397	28326	385814	875.5	6.5
161	102503	27391	29356	399836	799.9	5.1
162	93659	27961	29493	401701	772.9	4.7
163	131779	25020	28464	387690	879.3	6.6
164	103387	27444	29442	401013	801.3	5.2
165	94821	28011	29588	403004	775.5	4.7
166	129593	24931	28288	385296	872.4	6.5
167	101478	27388	29309	399201	795.8	5.1
168	93057	27962	29468	401361	770.5	4.6
169	132552	25016	28494	388098	882.3	6.6

170	104045	27432	29460	401261	803.8	5.2
171	95430	27998	29603	403198	777.7	4.8
172	130451	24928	28322	385764	875.8	6.5
173	102209	27377	29331	399495	798.6	5.1
174	93739	27949	29485	401598	773.1	4.7
175	132175	25013	28474	387834	880.7	6.6
176	103707	27432	29445	401057	802.4	5.2
177	95125	27998	29590	403022	776.5	4.7
178	130053	24924	28302	385485	874.2	6.5
179	101859	27377	29315	399284	797.2	5.1
180	93415	27949	29471	401412	771.8	4.7
181	131451	25007	28442	387392	878.1	6.6
182	103141	27431	29420	400718	800.2	5.1
183	94601	27999	29568	402725	774.4	4.7
184	129385	24918	28268	385021	871.4	6.5
185	101267	27376	29289	398931	794.8	5.1
186	92877	27950	29449	401107	769.7	4.6
187	130381	25001	28406	386901	875.2	6.5
188	102503	27431	29393	400340	797.6	5.1
189	94028	28000	29544	402402	772.2	4.7
190	128632	24912	28229	384500	868.4	6.4
191	100606	27376	29260	398538	792.2	5.0
192	92287	27952	29425	400775	767.3	4.6