

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KENTSEL BİNA ENERJİ MODELLEME (UBEM)
ÇERÇEVESİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YENİ BİR İŞ AKIŞI VE
TÜRKİYE’DE BİR VAKA ANALİZİ

Sinem ESEN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Melik Ziya YAKUT

ISPARTA - 2023



© 2023 [Sinem ESEN]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. UBEM (Urban Building Energy Modeling)	7
1.1.1. Yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımı	13
1.1.2. Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımı	18
1.2. UBEM Araçları	20
1.2.1. Fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu	32
1.2.2. Reduced-order metodu	38
1.2.3. Veriye dayalı metod	41
2. KAYNAK ÖZETLERİ	48
3. MATERYAL VE YÖNTEM	61
3.1. City Energy Analyst (CEA)	70
3.2. Spacemaker-Revit	77
3.3. UBEM.IO	87
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	92
4.1. City Energy Analyst (CEA)	94
4.2. Spacemaker-Revit	102
4.3. UBEM.IO	115
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	117
KAYNAKLAR	121
ÖZGEÇMİŞ	133

ÖZET

Doktora Tezi

KENTSEL BİNA ENERJİ MODELLEME (UBEM) ÇERÇEVESİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YENİ BİR İŞ AKIŞI VE TÜRKİYE’DE BİR VAKA ANALİZİ

Sinem ESEN

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Melik Ziya YAKUT

Kentsel alanlar, atmosfere CO₂ ve diğer sera gazlarının salınımını yaparak ve ısı adası oluşturup çevre sıcaklığını artırarak küresel ısınmayı hızlandıran önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, kentsel alanlarda enerji verimliliğini arttırabilecek Kentsel Bina Enerji Modellemesi (UBEM) gibi uygulamalar, daha sağlıklı ve sürdürülebilir bir kentsel çevre oluşturmak için önemli adımlardır.

Bu çalışmada, kentsel alanları modellemek ve kentsel ölçekte enerji talebini tahmin etmek üzere uygulanabilir ve pratik bir model çerçevesi oluşturulması amaçlanmıştır. Oluşturulan model çerçevesinin; bina stok sistemi ve veri setlerinin eksikliği, ekstra algoritma oluşturma gereksinimi, gerçek enerji tüketim verilerinin elde edilmesinde zorluk yaşama vb.leri gibi durumları yaşayan ülkelerdeki kentsel alanlar için uygulanabilir olması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda; City Energy Analyst (CEA), Spacemaker-Revit, UBEM.IO araçları ile üç ayrı UBEM çerçevesi oluşturulmuştur. Bu UBEM çerçeveleri, Ankara’nın Mamak ilçesinde konumlu 13 bloktan oluşan bir TOKİ sitesinin enerji talebinin analiz edilmesi açısından incelenmiştir. Uygulama alanı için oluşturulan UBEM çerçeveleri dahilinde yapılan enerji talep analizleri, alanın yıllık enerji tüketim verisiyle karşılaştırılıp belirtilen durumlar için en uygulanabilir UBEM çerçevesi belirlenmiştir. Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu 232.78 kWh/m².yıl olup buna en yakın sonucun 214 kWh/m².yıl ile Spacemaker-Revit ile oluşturulan model çerçevesinden elde edildiği görülmüştür. Veri girişleri konusunda nispeten daha esnek olması, kentsel mikro iklim koşullarının değerlendirilmesine olanak sağlaması, çeşitli analiz araçları arasında kolayca dışa aktarım yapılarak bağlantı sağlanmasına müsaade etmesi gibi sebeplerle bu UBEM çerçevesinin incelenenler arasında en etkin model çerçevesi olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda UBEM oluşturmada belirtilen nedenlerle sıkıntı yaşayan ülkelerdeki kentsel alanlar için en uygulanabilir model çerçevesinin Spacemaker-Revit ile oluşturulan UBEM çerçevesi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kentsel bina enerji modelleme, UBEM, UBEM yaklaşımları, Aşağıdan-yukarıya yaklaşımlar, Karbon emisyonlarının azaltılması, Enerji politikası

2023, 134 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Dissertation

A NEW WORKFLOW FOR THE DETERMINATION OF THE URBAN BUILDING ENERGY MODELING (UBEM) FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN TURKEY

Sinem ESEN

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Energy Systems Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Melik Ziya YAKUT

Urban areas have an important role in accelerating global warming by releasing CO₂ and other greenhouse gases into the atmosphere and increasing the environmental temperature by creating a heat island. Therefore, practices such as Urban Building Energy Modeling (UBEM), which can improve energy efficiency in urban areas, are important steps to create a healthier and more sustainable urban environment.

This study aims to create a feasible and practical model framework to model urban areas and estimate energy demand at the urban scale. The model framework created is intended to be applicable to urban areas in countries experiencing situations such as a lack of building stock systems and datasets, the need to create extra algorithms, difficulties in obtaining actual energy consumption data, etc. In this direction, three separate UBEM frameworks were created with the City Energy Analyst (CEA), Spacemaker-Revit, and UBEM.IO tools. These UBEM frameworks were examined in terms of analyzing the energy demand of a TOKİ site consisting of 13 blocks located in Ankara's Mamak district. The energy demand analyses made within the UBEM frameworks created for the case study were compared with the annual energy consumption data of the area and the most applicable UBEM framework was determined for the specified situations. The energy usage intensity of the case study is 232.78 kWh/m².year and it was seen that the closest result was obtained from the model framework created with the Spacemaker-Revit with 214 kWh/m².year. It was determined that this UBEM framework was the most effective model framework among those examined due to it is relatively more flexible in terms of data entry, allows the evaluation of urban microclimate conditions, and allows connections between various analysis tools by easily exporting. In this respect, it was determined that the most applicable model framework for urban areas in countries experiencing difficulties for the reasons stated in the creation of UBEM was the UBEM framework created with Spacemaker-Revit.

Key Words: Urban building energy modeling, UBEM, UBEM approaches, Bottom-up approaches, Carbon emissions reduction, Energy policy

2023, 134 pages

TEŞEKKÜR

Tezimin yürütülmesinde desteğini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Melik Ziya YAKUT'a, çalışma süresince bana desteklerinden dolayı sayın hocam Prof. Dr. Reşat SELBAŞ'a ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt ERSOY'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Tez Savunma Sınavımda yer alan, sayın Doç. Dr. Erkan DİKMEN ile sayın Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL'e değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesine, YÖK 100/2000 Doktora Projesi ile maddi destek sağlayan YÖK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında bana çok büyük desteği olan değerli arkadaşım Dr. Aslı ÖZCAN'a ve bana moral ve motivasyon sağlayan diğer dostlarıma en içten samimiyetimle teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında beni destekleyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Sinem ESEN
ISPARTA, 2023

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Yakıt türüne göre birincil enerji kaynaklarının tüketimindeki değişim	1
Şekil 1.2. Fosil yakıt rezervlerinin ömürleri	2
Şekil 1.3. Yakıt türüne göre birincil enerji kaynaklarının tüketimi	2
Şekil 1.4. Dünyanın kentsel ve kırsal nüfusu (1950-2030).....	4
Şekil 1.5. Sektörlere göre toplam enerji tüketimi	5
Şekil 1.6. Kentsel bina enerji modelleme yaklaşımının hiyerarşisi	13
Şekil 1.7. Kentsel bina enerji modelleme yaklaşımları.....	15
Şekil 1.8. Yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımının güçlü yönleri ve sınırlamaları	17
Şekil 1.9. Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımının güçlü yönleri ve sınırlamaları	19
Şekil 1.10. CityGML tarafından tanımlanan beş detay seviyesi (LOD).....	27
Şekil 1.11. Arketip oluşturma yaklaşımı.....	31
Şekil 1.12. Fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu için güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler	35
Şekil 1.13. Reduced-order metodunun güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri	40
Şekil 1.14. Veriye dayalı metodun güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri	43
Şekil 1.15. Veriye dayalı metoda dair teknikler.....	44
Şekil 3.1. Çalışmanın akış şeması	61
Şekil 3.2. Spacemaker-Revit UBEM akış şeması	62
Şekil 3.3. UBEM.IO akış şeması	63
Şekil 3.4. Uydu konumu	64
Şekil 3.5. Uygulama alanındaki konutlar	64
Şekil 3.6. Uygulama alanındaki konutlar	65
Şekil 3.7. Bloğun site içindeki konumu	66
Şekil 3.8. Dairenin konumlu olduğu bloğun site içindeki konumu.....	68
Şekil 3.9. CEA'nın ana bileşenlerinin genel görünümü	71
Şekil 3.10. Komut dosyası veri akışı-Enerji talebi.....	71
Şekil 3.11. Komut dosyası veri akışı-Fotovoltaik.....	72
Şekil 3.12. Komut dosyası veri akışı-Güneş kolektörü.....	72
Şekil 3.13. Komut dosyası veri akışı-Fotovoltaik termal.....	72
Şekil 3.14. Basitleştirilmiş ısıtma tedarik zinciri	73
Şekil 3.15. Direnç-Kapasitans modeli.....	74
Şekil 3.16. Uygulama alanının CEA'daki 2B görüntüsü	75
Şekil 3.17. Uygulama alanının CEA'daki 3B görüntüsü	75
Şekil 3.18. Uygulama alanının CEA'daki 3B görüntüsü	76
Şekil 3.19. CEA veri giriş arayüzü.....	76
Şekil 3.20. CEA Dashboard	77
Şekil 3.21. Spacemaker 3B uydu görüntüsü	80
Şekil 3.22. Uygulama alanı sınırı.....	80
Şekil 3.23. Spacemaker izohips eğrileri.....	80
Şekil 3.24. Spacemaker'den çağırılan uygulama alanının 3B görüntüsü.....	85
Şekil 3.25. Uygulama alanı için Sun Path analizi	85
Şekil 3.26. Uygulama alanının 3B görüntüsü	86

Şekil 3.27. Uygulama alanının enerji analitik modeli.....	87
Şekil 3.28. 1.) Giriş geometrisi; 2.) Güneşe maruz kalma analizi mesh [yüksek (kırmızı), düşük (mavi)]; 3.) Kümeleme; 4.) Soldan sağa kademe olarak düşük-güneşe maruz kalma-yüksek; 5.) Shoebox kümeleri.....	88
Şekil 3.29. OpenStreetMap alan seçimi	89
Şekil 3.30. QGIS bina footprints.....	89
Şekil 3.31. Uygulama alanı için bina çokgenlerinin oluşturulması	90
Şekil 3.32. Seçili alan için UBEM.IO arayüzünde verilerin atanması.....	90
Şekil 3.33. Uygulama alanının Rhino'ya aktarılması	91
Şekil 4.1. Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu ile UBEM çerçeveleri üzerinden elde edilen enerji kullanım yoğunluklarının karşılaştırılması.....	93
Şekil 4.2. Enerji nihai kullanım yoğunluğu	95
Şekil 4.3. Enerji nihai kullanımı	96
Şekil 4.4. Bina için konfor grafiği.....	97
Şekil 4.5. Uygulama alanı için aylık yük eğrisi	98
Şekil 4.6. Uygulama alanı için aylık fotovoltaik panel potansiyeli	99
Şekil 4.7. Uygulama alanı için aylık vakum tüplü güneş kolektörü potansiyeli.....	100
Şekil 4.8. Uygulama alanı için aylık fotovoltaik-termal panel potansiyeli.....	101
Şekil 4.9. 21 Aralık ve 21 Haziran için güneş analizi	102
Şekil 4.10. Gün ışığı potansiyeli analizi.....	103
Şekil 4.11. Konfor açısından rüzgar analizi	103
Şekil 4.12. Yön açısından rüzgar analizi.....	104
Şekil 4.13. Aralık ayı için mikro iklim analizi.....	105
Şekil 4.14. Haziran ayı için mikro iklim analizi	105
Şekil 4.15. Güneş, gün ışığı, rüzgar ve mikro iklim analizlerinin karşılaştırmalı görüntüsü	106
Şekil 4.16. Solar analiz.....	106
Şekil 4.17. Uygulama alanının harita görüntüsü	107
Şekil 4.18. Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu	107
Şekil 4.19. Uygulama alanının enerji talebiyle alakalı çeşitli yönleri.....	109
Şekil 4.20. Uygulama alanının PV potansiyeli	110
Şekil 4.21. Uygulama alanının iklim koşulları	111
Şekil 4.22. Uygulama alanının iklim koşulları	112
Şekil 4.23. Enerji kullanım verileri ve enerji tasarrufu alternatifleri	114
Şekil 4.24. Uygulama alanının toplam enerji kullanımı	115
Şekil 4.25. Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Aşağıdan-yukarıya yaklaşıma dair metodlarda kullanılan çeşitli UBEM araçları	22
Çizelge 1.2. Aşağıdan-yukarıya yaklaşıma dair metodları kullanan UBEM araçlarından en yaygın kullanılanlarının ana karakteristikleri	24
Çizelge 1.3. CityGML dosyaları için detay seviyeleri.....	29
Çizelge 3.1. Bloğun ısıtma dönemi yakıt tüketimi.....	66
Çizelge 3.2. Bloğun metrekare başına düşen ısıtma dönemi yakıt tüketimi	67
Çizelge 3.3. Dairenin elektrik tüketimi	68
Çizelge 3.4. Dairenin metrekare başına düşen yıllık elektrik tüketimi	69
Çizelge 3.5. Uygulama alanının metrekare başına yıllık enerji tüketim verileri	69
Çizelge 3.6. Gün ışığı potansiyeli	78
Çizelge 3.7. Ortalama rüzgar hızı ve meydana gelme olasılığının bir fonksiyonu olarak her faaliyet kategorisinin üst sınırı	79
Çizelge 4.1. Uygulama alanının metrekare başına yıllık enerji tüketim verileri	92
Çizelge 4.2. UBEM çerçeveleri üzerinden yapılan enerji talep analizi sonuçları	92
Çizelge 4.3. Enerji nihai kullanım yoğunluğu	95
Çizelge 4.4. Enerji nihai kullanımı	96
Çizelge 4.5. Uygulama alanı için aylık fotovoltaik panel potansiyeli	99
Çizelge 4.6. Uygulama alanı için aylık vakum tüplü güneş kolektörü potansiyeli	100
Çizelge 4.7. Uygulama alanı için aylık fotovoltaik-termal panel potansiyeli.....	101

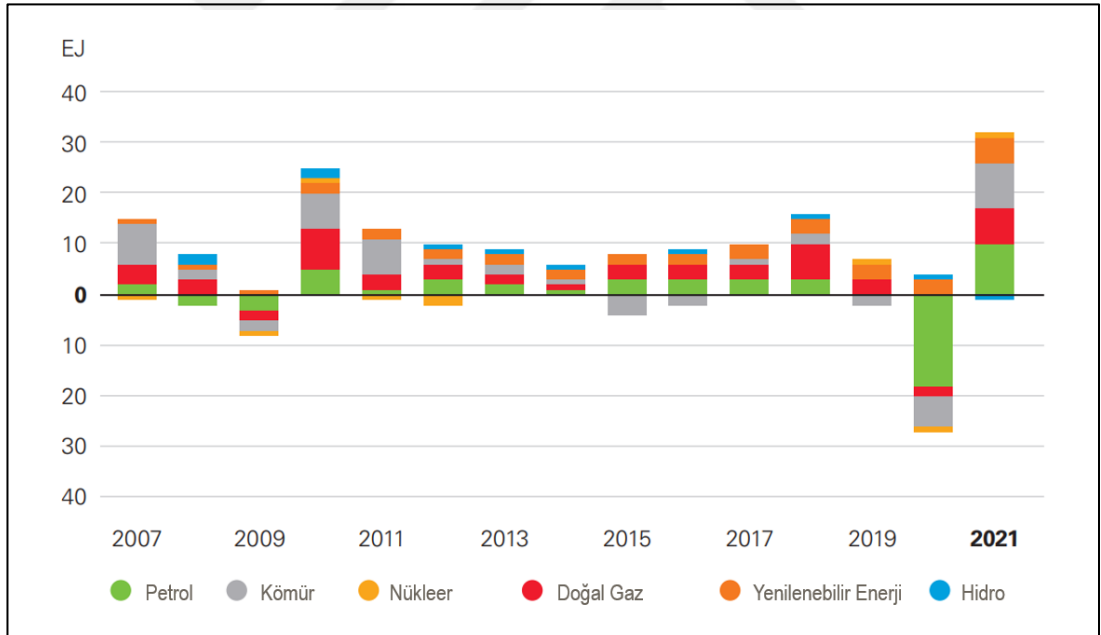
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Yüzey alanı
AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BCL	Building Component Library
BEM	Building Energy Modeling
BIM	Building Information Modeling
Bin TEP	Bin Ton Eşdeğer Petrol
BPS	Building Performance Simulation
CAD	Computer-aided Design
CBD	Convention on Biological Diversity
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
CDA	Conditional Demand Analysis
CEA	City Energy Analyst
CEN	European Committee for Standardization
CFD	Computational Fluid Dynamics
CityBES	City Buildings, Energy, Sustainability
CityGML	City Geography Markup Language
CLI	Command Line Interface
CO ₂	Karbondioksit
CoBAM	Commercial Building Agent-based Model
COP24	24th Conference of the Parties
CRECM	REC Calculation Model
CTS	Conduction Time Factors
DSM	Demand-Side Management
DUE-S	Data-Driven Urban Energy Simulation
ECM	Energy Conservation Measure
EJ	Exajoule
EPB	The Electric Power Board
EUI	Energy Use Intensity
GBS	Green Building Studio
GHG	Greenhouse Gas
GIS	Geographic Information System
GUI	Graphical User Interface
h	Konveksiyonla ısı transferi katsayısı
HVAC	Heating, ventilation, and air conditioning
IFC	Industry Foundation Classes
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
q	Isı transfer hızı
LCA	Life Cycle Assessment
LOD	Level of Detail
MATSim-T	Multi-Agent Transport Simulation toolkit
ML	Machine Learning
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
NN	Neural Network
NREL	National Renewable Energy Laboratory

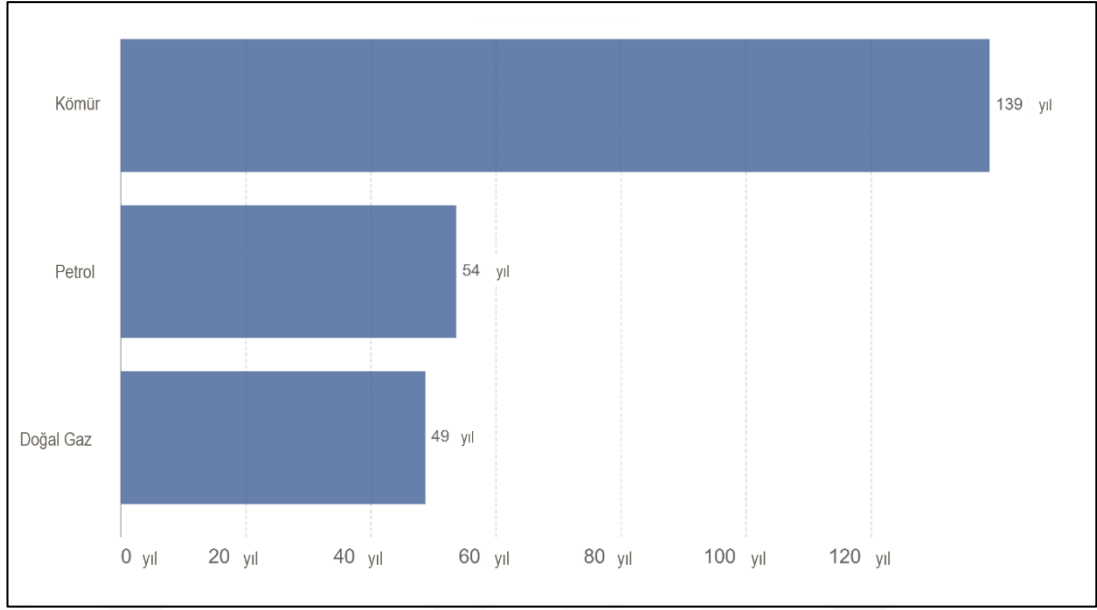
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
OSM	OpenStreetMap
PV	Fotovoltaik
R-C	Resistance-Capacitance
REC	Residential Energy Consumption
ROM	Reduced-Order Model
RSTM	Residential Stock Turnover Model
SEMANCO	Semantic Tools for Carbon Reduction in Urban Planning
T	Sıcaklık
TB	Terabayt
TEASER	Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit
TMY	Typical Meteorological Year
TOKİ	Toplu Konut İdaresi Başkanlığı
TSV	Tab-separated values
U	Toplam ısı transfer katsayısı
UBEM	Urban Building Energy Modeling
UHI	Urban Heat Island
UMI	Urban Modeling Interface
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UrbanOPT	Urban Renewable Building and Neighborhood Optimization
UTCI	Universal Thermal Climate Index
UWG	Urban Weather Generator
VSC	Vertical Sky Component
WMO	World Meteorological Organization
3B	3 Boyutlu
α	Yüzey emilimi
ε	Yüzey yayılımı
Δ	Fark

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlar yüzyıllardır enerji tüketiminde temel enerji kaynağı olmuştur. Dünya nüfusunun artmasıyla ve Sanayi Devrimi'nden bu yana kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlara olan talep de giderek artmıştır. Birincil enerji kaynaklarının tüketim miktarı, 2021 yılında 31 EJ büyüyerek tarihteki en büyük artış miktarını görmüştür (BP, 2022) (Şekil 1.1). Bununla birlikte fosil yakıtlar sınırlı kaynaklardır ve giderek daha az bulunabilir hale geldikçe çıkarılmaları daha zor ve pahalı olacaktır. Fosil yakıtlardan kömür, petrol ve doğal gaz gibi organik maddeler milyonlarca yıl süren jeolojik süreçler sonucu meydana gelirler. Bu kaynaklar derin yer altı kaynaklarından çıkarılırlar ve erişimleri için karmaşık çıkarma yöntemleri gerektirirler. Bu yüzyılda fosil yakıtların tükeneceği ve rezerv olarak petrolün 54 yıl, doğal gazın 49 yıl, kömürün ise 139 yıl kadar dayanabileceği tahmin edilmektedir (Ritchie vd., 2022; Smithsonian Ocean, 2023) (Şekil 1.2).

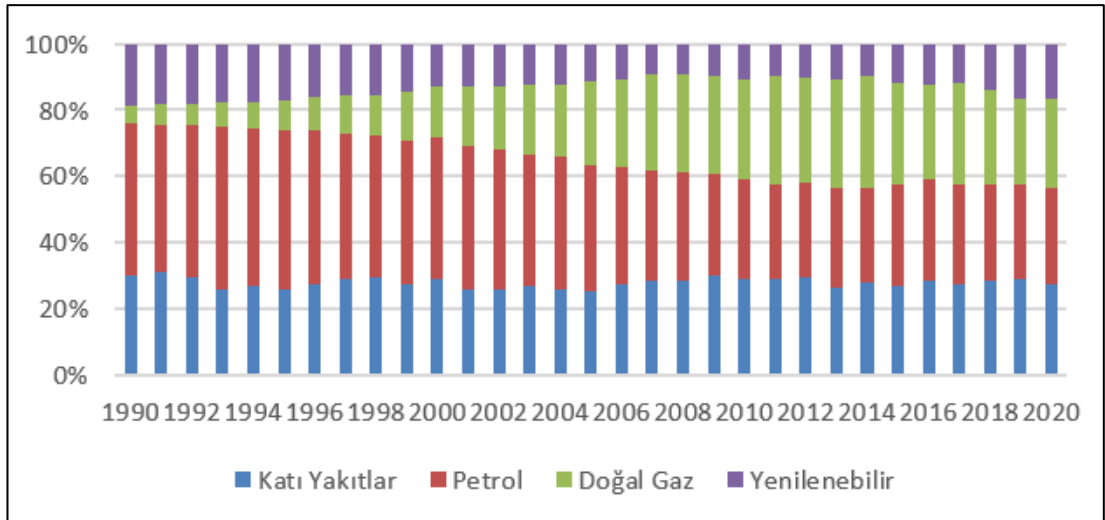


Şekil 1.1. Yakıt türüne göre birincil enerji kaynaklarının tüketimindeki değişim (BP, 2022)



Şekil 1.2. Fosil yakıt rezervlerinin ömürleri (Ritchie vd., 2022)

Türkiye için birincil enerji kaynaklarının tüketimi incelendiğinde, 1990 yılında 52 465 MTEP olan tüketim miktarının 2020 yılında 147.2 MTEP'e yükseldiği görülmüştür. 2020 yılında Türkiye'nin birincil enerji kaynakları tüketiminin, %27.6'sı katı yakıtlardan karşılanmış olup petrol ve petrol ürünlerinin payı %28.7'ye düşerken, doğalgazın payı %27'ye yükselmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanan pay ise %16.7 seviyesindedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022) (Şekil 1.3).

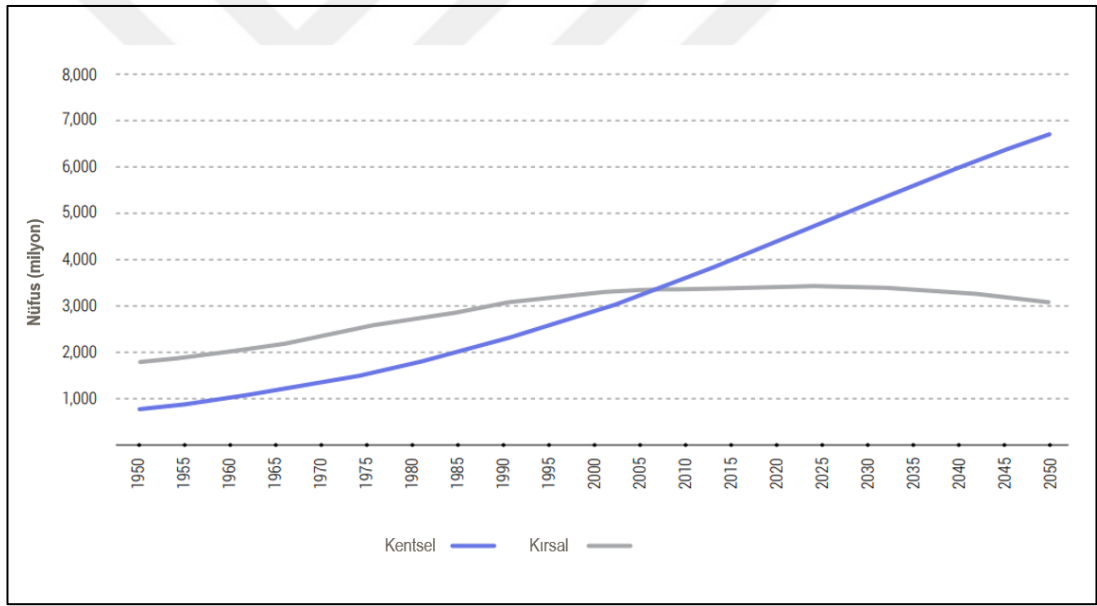


Şekil 1.3. Yakıt türüne göre birincil enerji kaynaklarının tüketimi (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022)

Fosil yakıtların kullanımının artması, hava kirliliği, sera gazı (GHG-Greenhouse Gas) emisyonları ve iklim değişikliği gibi önemli çevresel sonuçlar doğurmaktadır. Şu anda, küresel enerjinin yaklaşık %80'i ve elektrik üretiminin %66'sı, iklim değişikliğinden sorumlu sera gazı emisyonlarının yaklaşık %60'ına katkıda bulunan fosil yakıtlardan sağlanmaktadır (UNEP, 2023a). Enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ise %13'tür (BP, 2022). Bu nedenle, sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesi ve uygulanması, güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapılması, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak açısından önem arz etmektedir. Bu durumlara yönelik önlemler alıp çözümler üretebilmek için birçok küresel çalışma yapılmış ve girişimlerde bulunulmuştur. Bu çalışmalardan olan Montreal Protokolü 1987 yılında imzalanmıştır. İmzalanan bu protokol ile ozon tabakasının korunması ve ozon tabakasını incelten ve zarar veren maddelerin üretiminin ve kullanımının azaltılması hedeflenmiştir. İklim Değişikliği Araştırma Paneli (IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change) ise, 1988 yılında Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO-World Meteorological Organization) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP-United Nations Environment Programme) tarafından oluşturulmuştur. Amacı, hükümetlere iklim politikaları geliştirmek için kullanabilecekleri bilimsel bilgileri sağlamaktır. 1992 yılında gerçekleştirilen Rio Zirvesi'nde, Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda (UNCED-United Nations Conference on Environment and Development) kabul edilen üç uluslararası çevre sözleşmesi kabul edilmiştir. Bunlar Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC-United Nations Framework Convention on Climate Change), Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi (CBD-Convention on Biological Diversity) ve Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi'dir (UNCCD-United Nations Convention to Combat Desertification). Bu üç sözleşme, çevre sorunlarına karşı uluslararası işbirliği ve eylem için bir çerçeve sağlar. Genel olarak küresel çevre yönetişiminin temeli olarak kabul edilirler. Kyoto Protokolü ise küresel sera gazı emisyonlarının azaltılması hedefiyle 1997 yılında imzalanmıştır. Protokolü imzalayan sanayileşmiş ülkeler, emisyonlarını belirli bir seviyenin altına düşürmeyi taahhüt etmişlerdir. Paris Anlaşması da, 2015 yılında imzalanarak iklim değişikliği ile mücadele etmek üzere küresel çapta bir araya gelinmesini hedeflemiştir. Anlaşmada ayrıca küresel sıcaklık artışının, 2°C'nin altında tutularak 1.5°C'ye kadar düşürülmesi hedeflenmiştir. İklim değişikliği ile mücadele etme konusunda girişilen son eylemlerden olan Birleşmiş Milletler İklim Zirvesi ise, 24. Taraflar Konferansı (COP24-24th Conference of the

Parties) olarak da bilinen 2018 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'dır (2018 United Nations Climate Change Conference). Bu konferansta Paris Anlaşması'nın uygulanması için gerekli ayrıntıların belirlenmesine odaklanılmıştır. (IPCC, 2023; UNEP, 2023b; UNFCCC, 2023). Bu çalışmalara ilaveten birçok ülke, eyalet, şehir vd.leri iklim değişikliğine yönelik çözümler üretebilmek için kendi politikalarını oluşturup eylemlerde bulunarak karbon emisyonlarını azaltmayı amaçlamaktadır.

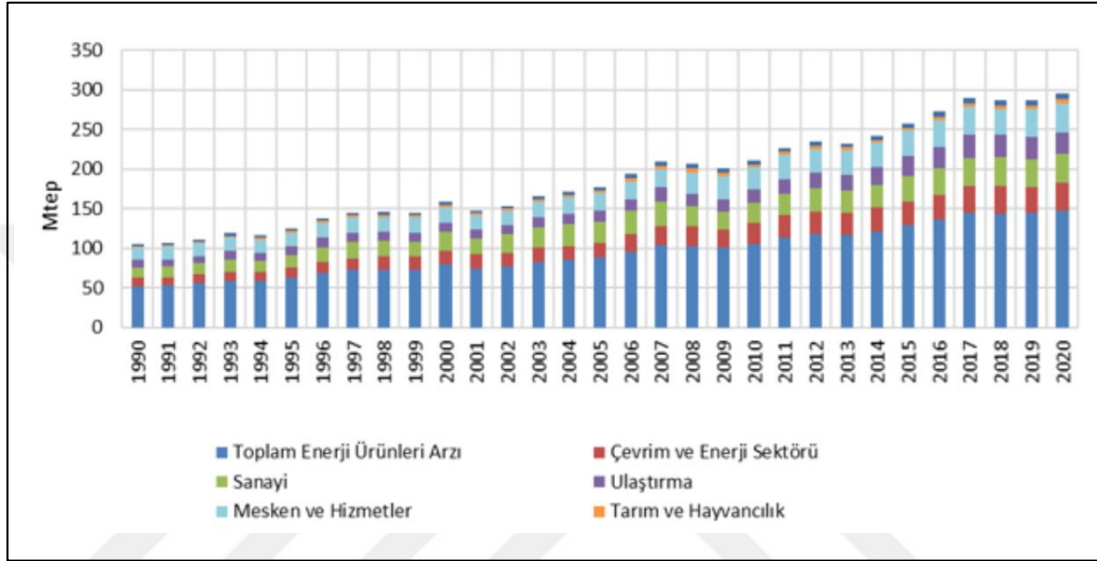
Enerji tüketiminde oldukça büyük bir paya sahip olan şehirler son yıllarda artan bir hızla genişlemektedir. Günümüzde dünya nüfusunun yarısından fazlası (%57) kentsel alanlarda yaşamaktadır ve kentsel alanlarda yaşayan insanların oranının 2050'de %68'e ulaşması öngörülmektedir (Demographia, 2022; UN-Habitat, 2022) (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Dünyanın kentsel ve kırsal nüfusu (1950-2030) (UNDESA, 2019)

Özellikle büyük şehirlerde, nüfusun artmasıyla birlikte enerji talebi de hızla artmaktadır. Bu alanlarda enerji talebi; ısıtma, soğutma, aydınlatma, ulaşım ve sanayi gibi çeşitli sektörlerde kullanılan enerjinin toplamına karşılık gelmektedir. Küresel açıdan 2021 yılında toplam nihai enerji tüketiminin %30'u, toplam enerji sektörü emisyonlarının da %27'si binalar ve bina inşaatı sektörlerinden kaynaklanmaktadır (IEA, 2022). Dolayısıyla bu alanlardaki enerji tüketimi, dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Türkiye’de, 2020 yılı için toplam enerji tüketiminin dağılımı incelendiğinde, en yüksek tüketim miktarı 37.23 Bin TEP ile konut ve hizmetler sektöründe gerçekleşmiştir. Ardından da 36.26 Bin TEP ile sanayi sektörü gelmiştir. Bunları 35.47 Bin TEP ile çevrim ve enerji sektörü, 26.97 Bin TEP ile ulaştırma sektörü, 7.58 Bin TEP ile enerji dışı tüketim ve 4.98 Bin TEP ile de tarım ve hayvancılık sektörü takip etmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022) (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Sektörlere göre toplam enerji tüketimi (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022)

Kentsel alanlardaki enerji talebi arttıkça, çevre üzerindeki etkileri de artırmaktadır. Küresel açıdan kentsel alanlar, %60 ile %80 arası bir enerji tüketim oranına sahip olmakla birlikte sera gazı emisyonlarının da %75'inin kaynağıdır (UNEP, 2023c). Fosil yakıtların kullanımının, atmosfere karbondioksit ve diğer sera gazlarının salınımına neden olması bu durumun da hava kirliliği ve küresel iklim değişikliğine yol açması, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin ve kentsel alanlarda enerji verimli stratejiler geliştirmenin önemini göstermektedir. Bu amaçla kentsel alanlarda, enerji verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli adımlar atılması gerekmektedir.

Kentsel alanlar, enerjinin etkin kullanılması yönünde atılacak adımlarla küresel iklim değişikliğinin azaltılması açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu potansiyeli değerlendirme yöntemlerinden olan Kentsel Bina Enerji Modellemesi (UBEM-Urban Building Energy Modeling), kullanıcılara bina stokunun enerji talebini, tepe yüklerini, senaryo değerlendirmesini ve diğer faydalı analizleri sağladığı için bu zorlukların

üstesinden gelebilecek değerli bir metodolojidir (Maccarini vd., 2021). Kentsel alanların UBEM gibi yaklaşımlarla ele alınması, kentlerin çevre üzerindeki negatif etkilerini ve küresel ısınmaya katkılarını azaltma yolunda atılabilecek etkili çözüm yolları arasındadır.

Bu çalışmada, kentsel alanları modellemek ve kentsel ölçekte enerji talebini tahmin etmek üzere uygulanabilir ve pratik bir model çerçevesi oluşturulması amaçlanmıştır. Oluşturulan model çerçevesinin; bina stok sistemi ve veri setlerinin eksikliği, ekstra algoritma oluşturma gereksinimi, gerçek enerji tüketim verilerinin elde edilmesinde zorluk yaşama vb.leri gibi durumları yaşayan ülkelerdeki kentsel alanlar için uygulanabilir olması amaçlanmıştır.

Tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm olan Giriş başlığı altında, Dünya ve Türkiye'deki genel enerji görünümü, enerji kullanımı ve küresel iklim değişikliği ilişkisi, küresel iklim değişikliğine çözüm üretme üzerine yapılan çalışmalar ve kentsel alanların enerji kullanımı ve çevre üzerindeki etkilerine değinilmiştir. Tezin amacına da bu bölümün sonunda yer verilmiştir. Birinci bölümün alt başlıklarında da; UBEM kavramı ve yaklaşımları, UBEM'de kullanılan araçlar, veri gereksinimleri vb.leri hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

İkinci bölüm olan Kaynak Özetleri başlığı altında, UBEM alanında yapılmış çeşitli çalışmaların incelemeleri sıralanmış ve yapılan araştırmalar hakkında bilgi verilmiş olup bu tez çalışmasının literatürde doldurduğu boşluk belirtilmiştir.

Üçüncü bölüm olan Materyal ve Yöntem başlığı altında, UBEM çerçevelerinin oluşturulması, seçilen kentsel alan ve kullanılan araçlar hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölüm olan Bulgular ve Tartışma başlığı altında, oluşturulan UBEM çerçeveleri ve bu modeller doğrultusunda yapılan analiz çıktıları verilmiş, analiz sonuçlarıyla uygulama alanının enerji tüketim verileri karşılaştırılmış ve alınan çıktılar üzerine gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

Son olarak beşinci bölüm olan Sonuç ve Öneriler başlığı altında, çalışmadan elde edilen sonuçlardan bahsedilmiş ve konuyla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

1.1. UDEM (Urban Building Energy Modeling)

Kentler, karmaşık sistemler olduğundan büyük ölçüde tahmin edilemezdir. Daha çok milyonlarca kolektif karardan oluşan organizmalar gibidirler. Gelişimleri planlı olmaktan çok kendi kendini organize edecek şekilde gerçekleşmeye eğilimlidir. Günümüzde de kentsel sistemler artık denge yapıları olarak görülmemektedir. Kentsel sistemlerin dengesiz, hatta dengeden uzak olma olasılığı daha yüksek görülmektedir. Bu nedenle, kent kavramının statik dengeden, aslında orijinal sistem teorisinde çok daha merkezi olan dinamik dengesizliğe doğru değiştirilerek ele alınması gerekmektedir. Çünkü kentler karmaşık ama düzenli, birçok ölçekte kendine benzer, ancak aşağıdan-yukarıya organik olarak büyümektedir. Bu karmaşık yapılar, sistemin sürekli gelişmesini sağlayan etkileşimler yoluyla birbirine bağlanan unsurlardan, araçlardan oluşur (Yamagata vd., 2020).

Kentleşme, iklim değişikliği ve enerji ile diğer doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımını geliştirme ihtiyacıyla bağlantılı olarak, bu yüzyılın en büyük zorluklarından biridir (Hong vd., 2020). Son yıllarda, çeşitli kentsel değişim ve müdahale senaryolarının değerlendirilebilmesi için kentsel yapı stokunun enerji ve emisyon modellerinin geliştirilmesine yönelik çabalar gösterilmiş olup bunlar giderek yaygınlaşmaktadır (Ghiassi vd., 2017). Bu çabalardan olan kentsel enerji kullanımının modellenmesi, kentlerin karmaşık doğası ve gerçek dünyadaki kentsel enerji sistemlerinin doğru bir temsilini sağlamak için çok çeşitli faktörlere bağlı olması nedeniyle zorlu bir görevdir. Bu sistemlerin gerçeğe yakın temsilini elde etmek, birçok faktörle karmaşık ilişkiler içinde olduğu için zaman alıcı ve hesaplama açısından maliyetlidir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019). Dolayısıyla kentler; manuel modelleme, veri toplama ve kentsel enerji modeli üretimi için çok çaba gerektirir (Schiefelbein vd., 2019).

Kentsel modelleme, bilgisayar biliminin kentsel alanlar bağlamında ulaşım, inşaat mühendisliği, enerji arz ve talep analizi,  evre bilimi, ekonomi, ekoloji ve sosyoloji gibi kentle ilgili alanlarla buluştuğu disiplinler arası bir alandır. Kentsel enerji kullanımının modellenmesi ise, kentlerde üretilen verileri enerji simülasyon araçlarıyla birleştirerek sorunları ele alma fırsatlarını keşfetmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda kentsel enerjinin analizi karmaşık, çok ölçekli ve çok sektörlü bir  ğraşıdır.

Bununla birlikte kentlerin, mevcut enerji kullanımlarını değerlendirebilmeleri ve enerji kullanımını ve çevresel etkileri azaltmak için stratejileri nasıl tahmin edeceklerini, sıralayacaklarını ve karşılaştıracaklarını keşfetmeleri gerekmektedir. Kentlerin ayrıca yerel yapı stoğu için iyileştirme fırsatlarını; her bir bölgenin enerji kullanımını, ekonomik ömrünü tamamlamasını, büyüklüğünü, tipini, mülkiyetini ve sosyo-ekonomik kapasitelerini göz önünde bulundurarak değerlendirmesi gerekir. Örneğin bölgesel ısıtma ve soğutma sistemleri gibi gelişmiş paylaşılan enerji altyapıları, çeşitli yükleri birleştirerek çok daha yüksek enerji verimliliği sağlayabilir ve bir grup binanın entegre enerji kullanımını tek tek binaların basit toplamından daha az hale getirebilir (Hong vd., 2020). Aynı zamanda kentsel enerji kullanımının modellenmesi, kentlerdeki mevcut enerji kullanım profilleri hakkında fikir verip gelecekteki kentsel enerji talebini ve arzını tahmin etmeye yardımcı olarak enerji kullanımı etkileri açısından alternatif kentsel gelişim senaryolarını karşılaştırabilir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019). Bütün bunlar, enerji tüketiminde azalma ve tepe elektrik yüklerinin ayarlanmasının ancak uygun politikalar ve teknolojilerle desteklendiğinde mümkün olacağı gerçeğiyle ilgilidir. Bu doğrultuda, birden fazla paydaşın bakış açısını bütünleştiren sürdürülebilir ve enerji verimli senaryoları nicelleştirmeye yönelik potansiyel yaklaşım, kentsel ölçekte enerji taleplerinin hesaplanabilmesini sağlayan UBEM'dir (Malhotra vd., 2022).

Kentsel bina enerji modellemesi (UBEM) son yıllarda, kentsel binaların enerji talebinin ve yenilenebilir enerji kullanım potansiyelinin mekansal ve zamansal hesaplamalarını sağlayarak enerji verimli kentsel tasarım, kentsel enerji planlaması ve kentsel yenileme için teknik destek sağlamak amacıyla ortaya çıkmıştır (Wang vd., 2021). Bu doğrultuda kentsel bina enerji modelleri, bina stoğu hakkında kapsamlı bilgiler kullanarak birden fazla binanın simülasyonuna izin veren yeni sayılabilecek bir gelişmedir (Buckley vd., 2021). Büyük kentsel veri setlerini bireysel bina enerji modelleri ile birleştiren bir modelleme yaklaşımı olan bu terim 2016 yılında ortaya çıkmıştır ve konuyla ilgili araştırmalar son yıllarda hızla artmaktadır (UBEM.IO, 2020). UBEM'ler, belirli bir kentsel alanın enerji taleplerini karşılamak için enerji edinme ve kullanma süreçlerini temsil eden biçimsel sistemler olup kentsel alanların enerji taleplerinin tahminini destekleyebilen bina yapısı ısı akışlarının fiziksel simülasyon modelleridir (Keirstead vd., 2012; Davila vd., 2016). UBEM, bir kentin bina enerji hedeflerini desteklemek için kentsel ölçekte bina enerji kullanımını

optimize etmeye yönelik stratejileri değerlendirmeyi amaçlamaktadır (Carnieletto vd., 2021).

Yeni inşa edilmiş veya halihazırdaki kentsel alanların termal performansını simüle eden bir yöntem olan UBEM, enerji modellemesini tek bir binadan birçok binaya doğrusal bir şekilde ölçeklendirmekle ilgili değildir. Bu kavram daha çok, kentsel binalar ve kentsel çevre arasındaki dinamik ve karmaşık karşılıklı bağlantı ve karşılıklı bağımlılıkları yakalayabilmekle ilgilidir (Ang vd., 2020; Hong vd., 2020). Kullanıcı durumlarına bağlı olarak, UBEM farklı mekansal ve zamansal ölçeklere sahip olabilir. UBEM, bir şehir bloğundaki onlarca binadan bir mahalledeki yüzlerce veya binlerce binaya ve tüm kentteki on veya yüzbinlerce binaya kadar mekansal ölçekleri kapsayabilir (Hong vd., 2020). Buna göre, ölçekteki enerji modellemesi, yani kentsel bölge, mahalleden sokak bloğu seviyesine kadar, kentsel bina enerji modellemesi (UBEM) olarak kabul edilir (Reinhart ve Davila, 2016; Yang ve Jiang, 2019).

UBEM, şehir ölçeğinde analiz için farklı sistem tasarım seçeneklerini ve enerji tasarrufu önlemlerini (ECM'ler-Energy Conservation Measures) değerlendirip önceliklendirerek bölge planlama ve güçlendirmeye yönelik ortak bir yaklaşım sunar. Genel olarak, kullanıcıların bina enerji kullanımıyla ilişkili küresel sera gazı emisyonlarını azaltmak açısından çok çeşitli kullanımlara sahip geniş bir bina portföyünü güçlendirmenin, genel potansiyel maliyetlerini ve faydalarını anlamalarına yardımcı olur (Hong vd., 2020). Her şeyden önce, kentsel yapı stoğu için enerji politikalarının oluşturulması, sıklıkla kentsel bölgelerin genel bina enerji performansının değerlendirilmesini gerektirir (Tardioli vd., 2018). Kentsel bina enerji modellemesi, yalnızca bireysel binaların dinamiklerini değil, daha da önemlisi binalar arası etkileri hesaba katmak için kentsel bağlamda bir grup binanın performansının hesaplamalı modellenmesi ve simülasyonunu ifade eder. Buradaki amaç, kentsel bina tasarımı ve işletiminin yanı sıra enerji politikası oluşturma konusunda bilgi sunabilmek için nicel bilgiler (örneğin, yıllık veya mevsimsel enerji kullanımı) sağlamaktır. Ayrıca UBEM, çatılarda bulunan veya bina cephelerine entegre edilen fotovoltaik (PV) veya rüzgar türbini sistemlerinden yenilenebilir enerji üretiminin potansiyelini de tahmin edebilir (Hong vd., 2020). Bu doğrultuda UBEM, uygun eylemlerin yürürlüğe girmesi durumunda karar vericileri ne kadar enerji tasarrufu yapılabileceği konusunda bilgilendirmek için önemli bir potansiyele sahiptir. Buna

ilaveten, büyük binalarda enerji kullanımının dağılımını ve belirleyicilerini incelemek için, enerji kıyaslaması yoluyla eş düzeyde karşılaştırmalar, enerji verimliliği pazarlarında şeffaflığı teşvik eder ve bölge ve şehir ölçeklerinde bina enerji kullanımının öngörücü modelleri, daha genelleştirilmiş enerji tüketim davranışlarının yakalanmasına yardımcı olur (Pérez-Lombard vd., 2009; Kontokosta ve Tull, 2017; Hong vd., 2020). Bütün bunlarla birlikte, yakın gelecekte UBEM'in şehirlerdeki düşük enerjili binaların ve toplulukların tasarımına ve işletilmesine benzeri görülmemiş bir değer sağlayacağı düşünülmektedir. Bu vizyon altında UBEM'ler; kentsel binalar, kentsel bilgi modellemesi, hesaplamalı simülasyon ve sanal gerçeklik (virtual reality-vr) teknolojileri kullanılarak sanal olarak tasarlanan ve test edilen akıllı şehirlerin dijital ikizlerinin önemli bir bileşeni olacaktır (Hong vd., 2020).

Doğru bir kentsel bina enerji modeli (UBEM), enerji verimli toplulukların tasarımını desteklemenin temelidir (Hu vd., 2022). Dolayısıyla UBEM, üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmesi ve bu konu hakkındaki bilgi birikiminin artırılması gereken önemli bir alandır. Çünkü, sonlu enerji kaynakları ve bunların doğaya olumsuz etkileri gibi nedenlerle, enerji kullanımında büyük bir orana sahip kentsel alanlar üzerinde bu durumlara yönelik önlemlerin alınması gerekmektedir.

UBEM'in kullanıcıları ve paydaşları arasında şehir plancıları, tasarımcılar, mimarlar, mühendisler, enerji modelleyiciler, şehir yöneticileri, araştırmacılar, teknoloji satıcıları, hükümetler ve politika yapıcılar yer alır (Hong vd., 2020). Çünkü UBEM, tüketim modellerinin zamanla değişmeyen bir anlık görüntüsünü geliştirmeye ek olarak, güvenilir enerji kullanımı tahminleri ve politika senaryosu modellemesi için bilgi sağlayabilir. Enerji yönetimi açısından bakıldığında, binaya özgü, şehir çapında bir enerji profili, yeni programların izlenmesi, kıyaslanması ve etki değerlendirmesi yoluyla verimlilik için fırsatlar sunar. Plancılar açısından, gelecekteki enerji talebini anlama yeteneği ve arazi kullanım değişiklikleri, kentsel gelişim ve gelecekteki enerji kullanım modellerini değiştirebilecek diğer teknolojik, mimari ve davranışsal faktörler için beklentiler göz önüne alındığında politika alternatiflerini değerlendirmek, hedefler belirlemek ve ilerlemeyi ölçmek için önemli bir ölçüt sağlar (Kontokosta ve Tull, 2017). Dolayısıyla daha geniş bir tanım kullanarak UBEM, sadece enerji kullanımını değil, aynı zamanda enerji arzını da içerir ve tüm şehir boyunca hem talep hem de arz

olmak üzere enerji akışlarının zaman-mekansal modellerinin bir tahminini sağlar (Johari, 2021).

Kentsel enerji kullanımının modellenmesi, kentlerdeki enerji performansını anlamak ve yönetmek için önemlidir. Fakat, halihazırdaki yaklaşımlar gerçekçi bir UBEM'i temsil etmede ve kentsel ölçekler için enerji kullanımını değerlendirmede birtakım sınırlamalara sahiptir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019). Bu sınırlamalara rağmen, farklı enerji verimliliği önlemlerini analiz etmek ve değerlendirmek için sıklıkla kullanılsalar da, modelleme sürecini zorlaştıran iki ana konu şunlardır (Schiefelbein vd., 2019):

- Veri eksikliği/düşük veri kalitesi,
- Şehir karmaşıklığı/modelleme çalışması.

Güvenilir bir UBEM, veri girişlerinin miktarına ve doğruluğuna bağlıdır. Bununla birlikte, mevcut verilerin eksikliği ve stokastik verilerin belirlenmesindeki zorluk, UBEM'in geliştirilmesindeki engellerdendir (Wang vd., 2022). Çünkü, güçlendirme önlemlerini değerlendirmek için genellikle yüksek uzaysal ve zamansal çözünürlüğe sahip talep verilerinin simülasyonu gerekli olmakla birlikte, şehrin karmaşık yapısı ve veri eksikliği çoğu zaman bu tür yöntemlerin güvenilir bir şekilde uygulanmasını engellemektedir. Gerekli veri kümelerinin toplanması ve değerlendirilmesi genellikle zorlu süreçler olduğu için ayrıntılı bina geometrisi verileri mevcut olsa bile; bina tipi, yapım yılı veya fiziksel özellikler hakkındaki bilgiler hala eksik olabilir. Bu veri boşluğu da, kentsel enerji sistemlerinin analizini zorlaştırmaktadır (Schiefelbein vd., 2019).

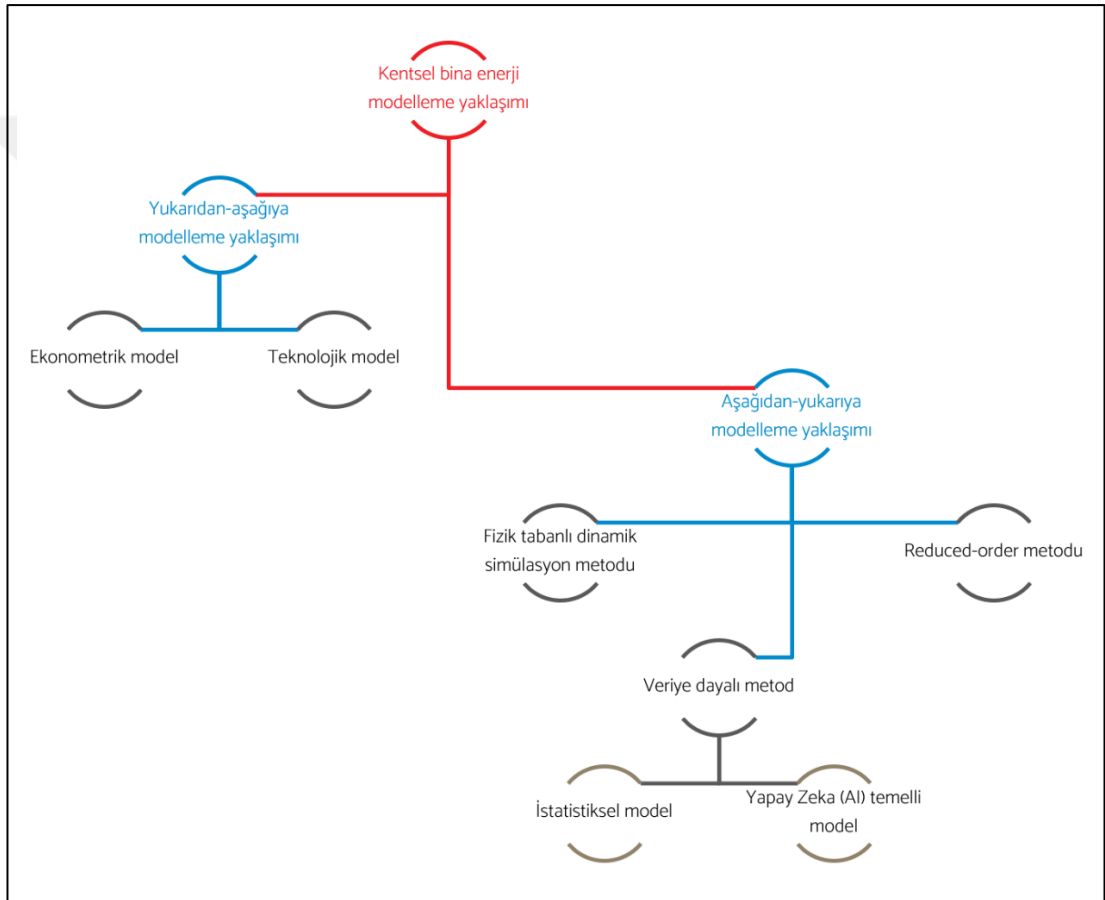
UBEM için gerekli olan verilerin temini ve kentin karmaşıklığının yanı sıra UBEM oluşturmadaki sorunlar arasında, büyük modellerin hızlı bir şekilde oluşturulmasını engelleyen karma veritabanlarının kullanımı ve araçlar arasında karşılaştırmayı engelleyen bir araçtan diğerine farklı bir terminolojinin kullanılması da vardır (Ferrando vd., 2020). Veri kümelerini toplayıp birlikte çalışabilirlik için standartlaştırılmış bir formata entegre etmek büyük bir çaba gerektirir. Çünkü, meta verilerin sunumunu düzene sokmak için veri modellerine ve standartlarına ihtiyaç duyulmakta olup UBEM'in daha fazla benimsenmesini sağlamak için çok miktarda kentsel veri seti gerekmektedir. Veri kalitesi, gizlilik, erişim ve güvenlik hala ele

alınması gereken konulardır ve ayrıntılı bina özellikleri ve gerçek enerji kullanım verilerine özellikle UBEM için ihtiyaç duyulur (Hong vd., 2020). Veri kümeleri içinde entegrasyonu teşvik etmek ve uygun bir mekansal dağılımı garanti etmek için veri toplamanın yapılandırılmış bir yolu kullanılmalıdır. Mevcut durumda, doğrulama süreci de bu veri eksikliğinden muzdariptir (Ferrando vd., 2020). Dolayısıyla, kentsel enerji kullanımının farklı bileşenlerini modellemek ve analiz etmek için entegre bir yaklaşım eksikliği vardır (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019).

Enerji ile ilgili kentsel altyapıların modifikasyonu için önemli bir gereklilik de, binaların enerji arzının sağlanmasıdır. Bu doğrultuda, enerji üretim ve dağıtım altyapısının mevcut ve gelecekteki tüketimler ve pik yükler için tasarlanması gerektiğinden, önlemlerin planlanması aşamasında tüm binaların spesifik enerji talepleri hakkındaki bilgi büyük stratejik öneme sahiptir. Gerçek tüketim değerleri farklı enerji şirketlerinde mevcut olsa da, gizlilik düzenlemeleri ve ekonomik çıkarlar nedeniyle bu veriler genellikle paylaşımına açık değildir. Ancak, talebe göre optimize edilmiş önlemlerin planlanmasını kolaylaştırmak için, bu verilere ihtiyaç halen devam etmektedir (Kaden ve Kolbe, 2013). Dolayısıyla geniş alanların karmaşık temsili ile ilgilenen UBEM için tam detaylı bir simülasyon henüz mümkün değildir (Swan ve Ugursal, 2009). Hazır kamu bina bilgi veri kümeleri, UBEM için iyi bir başlangıç noktası oluşturur ancak, birçok şehir bu tür ayrıntılı bina bilgilerini sağlamamaktadır (Deng vd., 2021).

Karmaşık sistemler olan kentlerdeki tüm binaları simüle etmek aynı zamanda önemli bilgi işlem kaynakları da gerektirir. Çok sayıda binanın yıllık enerji performansının makul bir sürede modellenmesi, yeni nesil süper bilgisayarlar gerektiren büyük ölçekli bir hesaplama sorununu ortaya çıkarmaktadır (Hong vd., 2020). Bununla birlikte, birçok durumda, lisanslama maliyetleri, şeffaflık eksikliği, seçilen hesaplama yöntemlerinin azaltılmış yetenekleri ve gelişmiş bilgi işlem becerilerine duyulan ihtiyaç, özellikle Küresel Güney bölgelerinde ve daha özel olarak Güney Amerika, Güney Asya'da ve düşük ve orta gelirli ülkelerde çeşitli gelişmiş programların daha geniş çapta benimsenmesini ve kullanılmasını kısıtlamıştır (Amrith vd., 2022). Genel olarak UBEM araçlarının kullanımı; birden fazla alanda eğitim almış, bulunması zor bireyler, standartlaştırılmış bina enerji kullanımı verileri ve inşaat veritabanlarının eksikliği nedeniyle fazla ölçüde süre gerektirir (Ang vd., 2022).

Yapıların enerji tüketimini modellemek için kullanılan UBEM'ler genel olarak “yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımı” ve “aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımı” olmak üzere iki kategoride gruplandırılabilir (Swan ve Ugursal, 2009) (Şekil 1.6). Yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımı, ekonometrik model ve teknolojik model olmak üzere ikiye ayrılır. Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımı ise, fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu, reduced-order metodu ve veriye dayalı metod olmak üzere üçe ayrılır. Bunlardan veriye dayalı metod, istatistiksel model ve yapay zeka (AI) temelli model olarak ikiye ayrılır.



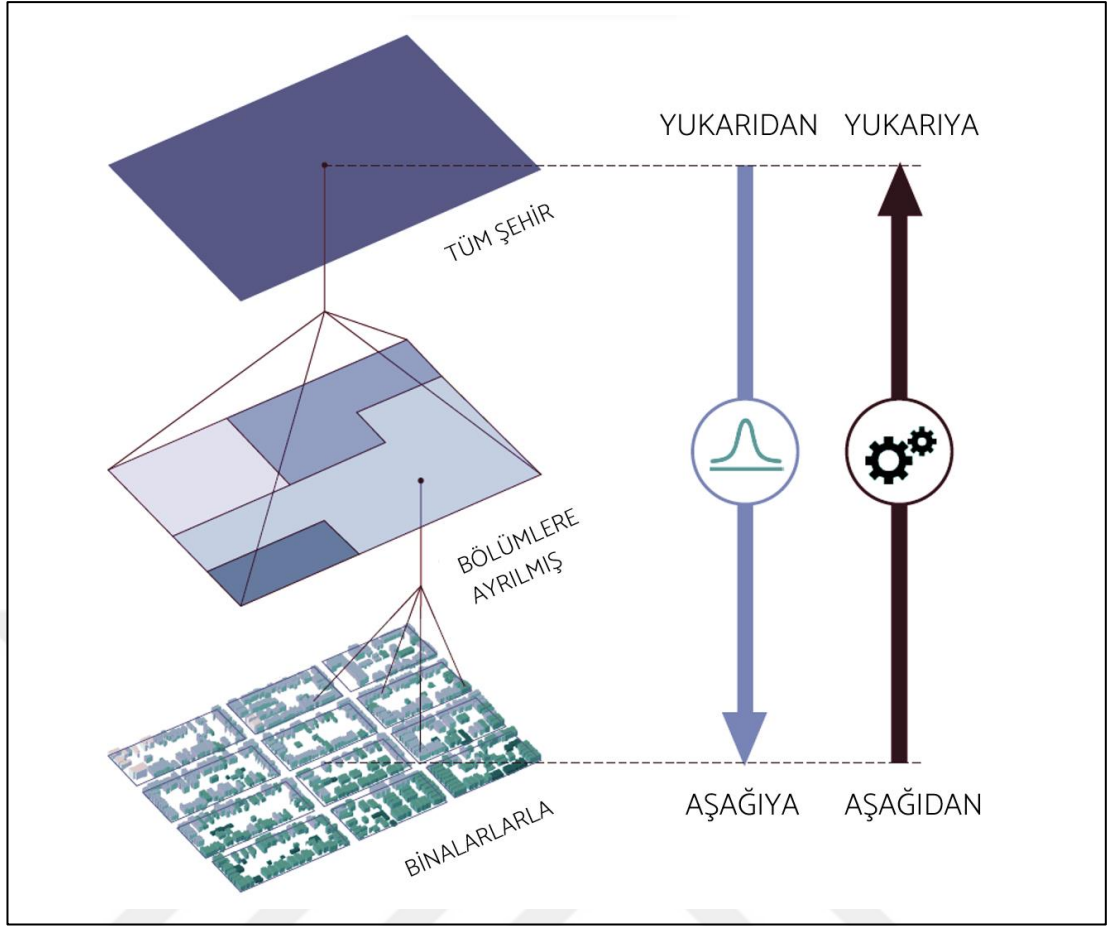
Şekil 1.6. Kentsel bina enerji modelleme yaklaşımının hiyerarşisi (Swan ve Ugursal, 2009; Abbasabadi ve Ashayeri, 2019; Ali vd., 2021)

1.1.1. Yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımı

Yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımının kullanımı ve gelişimi, 1970'lerin sonlarındaki enerji krizine dayanmaktadır. Yukarıdan-aşağıya modeller, enerji tüketimini tüm yapı sektörünün özellikleriyle ilişkilendirmek için toplam yapı sektörü enerji tüketimi tahminini ve diğer ilgili değişkenleri kullanır. Tarihsel toplam enerji

değerlerini kullanarak; makroekonomik göstergeler (örneğin gayrisafi yurtiçi hasıla, işsizlik ve enflasyon), enerji fiyatı ve genel iklim gibi üst düzey değişkenlerin bir fonksiyonu olarak yapı stokunun enerji tüketimini ortaya koyar. Öncelikle istatistiksel enerji kullanımına, tarihsel verilere ve nüfus gibi sosyo-ekonomik faktörlere odaklanır (Swan ve Ugursal, 2009). Bu modelleme yaklaşımı, enerji talebinin uzun vadeli tahminleri için ulusal ölçekte yaygın olarak kullanılmaktadır (Ali vd., 2021). Tipik olarak bu tür modeller, enerji tüketimi veya karbondioksit emisyonlarının tarihsel zaman serisi veri setlerine uyacak şekilde enerji sektörü ile ekonomik çıktılar arasındaki karşılıklı ilişkileri araştırmak ve enerjiyi ulusal düzeyde değerlendirmek için uygundur (Swan ve Ugursal, 2009; Kavgic vd., 2010; Lim ve Zhai, 2017).

Yukarıdan-aşağıya modeller, bir grup binayı tek bir enerji varlığı olarak ele alır. Burada binaların enerji tüketimi genellikle, tek tek binalar veya son kullanımlar arasındaki farklılıklar dikkate alınmadan sektörel düzeyde tahmin edilir (Li vd., 2017) (Şekil 1.7). Bu yaklaşım, tedarik tahminlerini mantık dahilinde yerleştiren tarihsel enerji tüketimi tarafından ağırlıklandırıldığı için, tedarik değerlendirmelerinde açık ara en yaygın kullanılan modelleme yaklaşımıdır (Swan ve Ugursal, 2009).

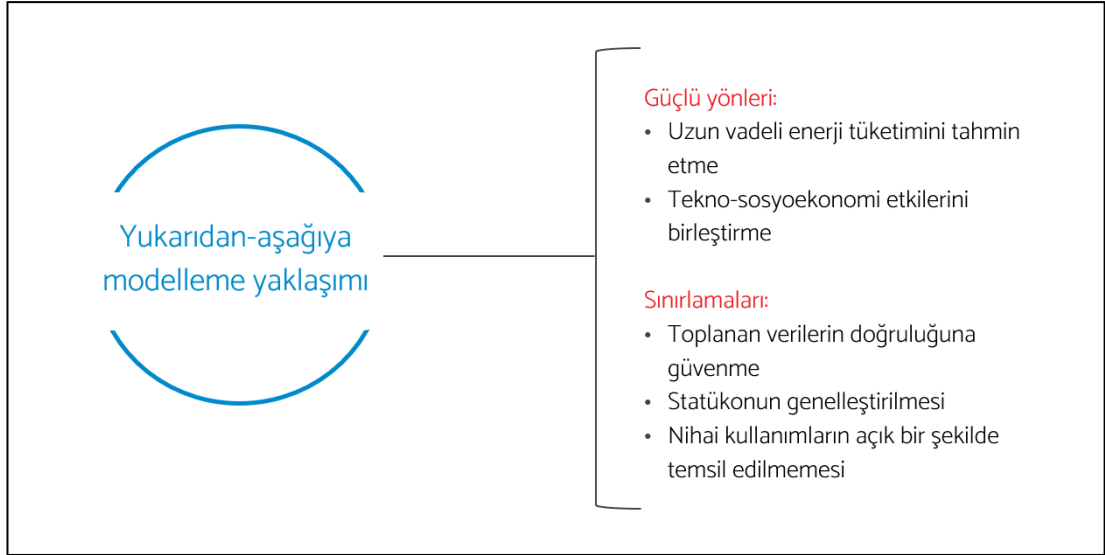


Şekil 1.7. Kentsel bina enerji modelleme yaklaşımları (Davila, 2016)

Yukarıdan-aşağıya modeller, tarihsel enerji tüketimini girdi değişkenlerine dayalı olarak tahmin edilenle dengeleyen bir çerçeve üzerinde çalışır. Bu yaklaşımın güçlü yönleri; yalnızca yaygın olarak bulunan toplu verilere duyulan ihtiyaç, basitlik ve modele "atalet" sağlayan tarihi yapı sektörü enerji değerlerine güvenmesidir. Yapı sektörü nadiren paradigma değişimlerine (örneğin elektrifikasyon ve enerji şokları) maruz kaldığından, ağırlıklı bir model statükodan küçük sapmalar için iyi bir tahmin yeteneği sağlar. Örneğin, yapı inşaatı birim sayısını %2 artırdıysa, yeni yapılar muhtemelen daha enerji verimli olacağından, yukarıdan-aşağıya model tarafından toplam yapı enerji tüketiminde %1.5'luk bir artış tahmin edilebilir. Bu yapı, birimlerin %10'una çıkarılırsa, yukarıdan-aşağıya model, konut stokunun eski dağılımı önemli ölçüde değişeceğinden, uygun bir tahmin üretmekte zorluk çekebilir. Buna ilaveten tarihsel verilere güvenmek de bir dezavantajdır, çünkü yukarıdan-aşağıya modellerin teknolojiye sürekli ilerlemeleri modellemek için doğal bir yeteneği yoktur (Swan ve Ugursal, 2009).

Yukarıdan-aşağıya modeller, belirli bir türden daha fazla bina inşa edilecekse, enerji analizine ilişkin tahminler sağlar. Bununla birlikte bu tür modellerin, bir kentsel bağlamda bir grup binanın performansını araştırırken tahmin etme yetenekleri sınırlıdır (Hong vd., 2020). Bu modelleme yaklaşımının, sosyo-ekonomik politikaların etkisini yansıtabilmesi için enerji sektörleri ile diğer ekonomik göstergeler arasındaki etkileşimi kullanması tarihsel verilere bağlı olduğundan, belirli teknolojik gelişmelerin ve politikaların sonuçlarını incelemek zordur. Ayrıca, model oluşturulurken her bir bina tipine özgü münferit fiziksel faktörler açıkça dikkate alınmaz ve oluşturulan modelin teknik detayları sağlanmaz. Bu modeller, münferit enerji son kullanımları hakkında kaba bir analiz verirler ve enerji tüketimine ilişkin ayrıntı eksikliği bulunur. Bu doğrultuda yukarıdan-aşağıya yapı stok modelleri; yapı enerji kullanımını, yapı fiziksel tasarımını ve operasyonel spesifikasyonlardaki iyileştirme alanlarını analiz etmek için uygun değildir. Çünkü bu modelleme yaklaşımının, enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik iyileştirmeler için kilit alanları belirleyebilme yeteneği yoktur (Swan ve Ugursal, 2009; Lim ve Zhai, 2017; Ferrando ve Causone, 2020).

Veri kullanılabilirliği, esas olarak ilgili gizlilik endişeleri ve temininin sınırlı olması nedeniyle, bu modelleri uygulamak için önemli bir zorluk yaratmaktadır. Bu yaklaşımın önemli bir avantajı, modelleme sürecini kolaylaştırmaya yönelik ayrıntılı uzun vadeli analizler için ulusal tarihsel veri tabanına kolay erişim sağlamaktır (Lim ve Zhai, 2017). Şekil 1.8’de yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımının güçlü yönleri ve sınırlamalarına dair genel bir görünüm gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımının güçlü yönleri ve sınırlamaları (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019)

Yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımı, ekonometrik model ve teknolojik model olmak üzere ikiye ayrılır. Değişen arz ve fiyatlandırma ile tüketici davranışlarını anlamak amacıyla, ulusal enerji planlaması için geniş ekonometrik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, gerçek tüketim süreçleri hakkında çok az ayrıntı gerektirir. Ekonometrik model, yapı sektörünü bir enerji havuzu olarak ele alır ve eğilimleri belirlemek için tüketimi etkileyen faktörleri indirger. Bununla birlikte çoğu bölgedeki yapı stoğu sürekli olarak iyileştirme ve artış gösterdiğinden, enerji tüketimini yalnızca ekonomik değişkenlerin bir fonksiyonu olarak modellemek kısa vadelidir (Swan ve Ugursal, 2009).

Ekonometrik modeller, enerji sektörü ile ekonomik çıktı arasındaki bağlantıyı ifade etmek için öncelikle; gelir, yakıt fiyatları ve gayrisafi yurtiçi hasıla gibi değişkenlerle ilişkili olarak enerji kullanımına dayanmaktadır. Teknolojik modeller ise, doyumluk, teknolojik büyüme ve enerji kullanımını etkileyen yapısal reformlar gibi faktörleri göz önünde bulundurur (Swan ve Ugursal, 2009; Kavgić vd., 2010).

Teknolojik model, sermaye maliyetinin bir fonksiyonu olarak cihazların enerji yoğunluğunu artırır veya azaltır. Ekonometrik model ise, beklenen davranış değişikliklerine ve teknoloji bileşeninde yapılan verimlilik yükseltmelerine dayalı olarak tüketimdeki değişiklikleri değerlendirir. Ekonometrik modeller öncelikle fiyata (örneğin enerji ve ev aletleri) ve gelire dayalıdır. Teknolojik modeller ise enerji

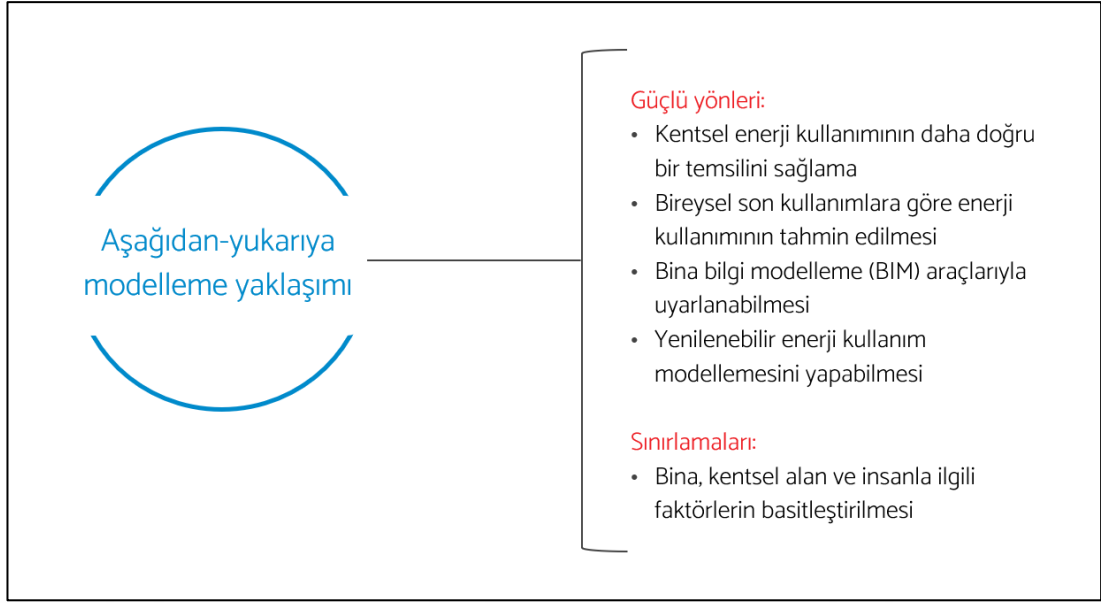
tüketimini, cihaz sahipliği eğilimleri gibi tüm yapı stokunun geniş özelliklerine bağlar. Ayrıca her iki grubun tekniklerini kullanan modeller de bulunmaktadır (Swan ve Ugursal, 2009).

1.1.2. Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımı

Aşağıdan-yukarıya modeller, tek tek yapıların veya yapı gruplarının enerji tüketimini dikkate alır ve daha sonra modellenen örneğin temsili ağırlığına dayalı olarak bu sonuçları entegre bir çerçevede değerlendirip kentsel, bölgesel veya ulusal ölçekte temsil edecek şekilde tahmin eder (Swan ve Ugursal, 2009; Li vd., 2017; Ferrando ve Causone, 2020). Bu modelleme yaklaşımı ayrıntılı, granüler düzeyde bir bina enerji talebine odaklanır (Ali vd., 2021).

Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımı, bireysel binaların enerji hesaplamasına dayandığından, yukarıdan-aşağıya modelleme yaklaşımına göre daha kararlı ve doğru olup daha yaygın olarak kullanılırlar (Li vd., 2020). Belirli son kullanımların enerji yoğunluğunu gösterirken, bölgesel veya ulusal ekonomik değişikliklerin de etkilerini kapsama yeteneğine sahiptirler (Swan ve Ugursal, 2009).

Yerel sıcaklık, radyasyon ve rüzgar hızı bina ortamının termal fizikini doğrudan etkileyebileceğinden, aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımı, farklı iklim koşulları açısından kentsel binaların enerji modelinin oluşturulması için daha uygundur (Ma ve Cheng, 2016). Düzgün performans gösterebilmeleri için, kullanılabilirliği gizlilik ve diğer sorunlar nedeniyle engellenebilecek büyük miktarda veriye ihtiyaçları vardır (Ferrando ve Causone, 2020). Bununla birlikte, bu modellerin hesaplama verimliliği ve belirsizlikleri örtme eğilimi gibi konularda dezavantajları vardır (Lim ve Zhai, 2017). Şekil 1.9’da aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımının güçlü yönleri ve sınırlamalarına dair genel bir görünüm gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımının güçlü yönleri ve sınırlamaları (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019)

Aşağıdan-yukarıya modellerde ortak girdi verileri; geometri, bina kabuğu yapısı, ekipman ve cihazlar, iklim özelliklerinin yanı sıra iç mekan sıcaklıkları, doluluk programları ve ekipman kullanımı gibi yapı özelliklerini içerir. Bu yüksek ayrıntı düzeyi, aşağıdan-yukarıya modellemenin gücüdür ve ona teknolojik seçenekleri modelleme yeteneği verir. Aşağıdan-yukarıya modeller, her son kullanımın enerji tüketimini belirleme yeteneğine sahiptir ve bunu yaparken iyileştirme alanlarını belirleyebilir. Enerji tüketimi hesaplanırken, tarihsel verilere dayanmadan yapı sektörünün toplam enerji tüketimini belirleyebilir. Bununla birlikte, gereken ayrıntı düzeyinin neden olduğu birincil dezavantaj, girdi verisi gereksiniminin yukarıdan-aşağıya modellerden daha fazla olması ve aşağıdan-yukarıya modellerin hesaplama veya simülasyon tekniklerinin karmaşık olabilmesidir. Her durumda, yapı sektörünü temsil etmek için aşağıdan-yukarıya modellerin tahmin edilmesi gerekir (Swan ve Ugursal, 2009).

Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımı ayrıştırılmış bir düzeyde çalışır ve fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu, reduced-order metodu ve veriye dayalı metod olmak üzere üçe ayrılır (Hong vd., 2020). Bunlardan veriye dayalı metod, istatistiksel model ve yapay zeka (AI) temelli model olarak ikiye ayrılır. Bu metodlara dair incelemelere, UBEM araçları ana başlığı altında değinilmiş ve ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

1.2. UBEM Araçları

Karar vericiler için kentleri daha iyi yönetmek, tasarlamak ve enerji tüketimini azaltmak konusunda en iyi seçenekleri belirleyebilmek için değerlendirme kriterlerine ve olası senaryolara ihtiyaç vardır. Aynı zamanda kentlerden kaynaklanan emisyon değerlerinin azaltılması hedefi doğrultusunda karar vericiler için, bir kentsel alandaki mekansal ve zamansal bina enerji tüketimini tahmin etme yeteneğine sahip karar verme araçları gerekmektedir (Rashidfarokhi, 2021). Zengin kentsel veri kümeleriyle güçlendirilmiş Kentsel Bina Enerji Modelleme (UBEM) araçları, kentsel enerji planlamasını ve kentsel binaların verimliliğini, sürdürülebilirliğini ve esnekliğini elde etmede paydaşlara nicel içgörüler sağlayabilir (Hong vd., 2020). Bu doğrultuda son yıllarda, UBEM için çok sayıda metodoloji ve araç geliştirilmiştir (Ferrando ve Causone, 2020). UBEM araçları, büyük ölçekli kentsel alanların enerjiye dair içerdiği çok sayıdaki ilişkiler ağını temsil etmekle birlikte uygun bir UBEM aracı seçmek konusu; karmaşıklık, doğruluk, kullanılabilirlik ve bilgi işlem ihtiyaçlarını dengelemek gibi durumlar açısından kullanıcılar için zorluk teşkil etmektedir (Ferrando vd., 2020).

UBEM araçlarındaki temel sınırlamalar; enerji kullanım tahminlerinin ortaya konulmasında toplu verilerin kullanılması, bina sisteminin ve kentsel bağlamın aşırı basitleştirilmesi ve binalar içi ve binalar arası koşulların hesaba katılmamasıdır. Bunlara ilaveten, genellikle her araç birtakım konuları ayrıntılı olarak analiz edebilirken diğerlerini yüzeysel olarak değerlendirir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019; Ferrando ve Causone, 2020). Potansiyel kullanıcılar, hem araçların kendine özgü özelliklerini (girdiler, çıktılar, simülasyon motoru, vb.) hem de pratik sınırlamalarını (CBS ile entegrasyon, sonuçların görselleştirilmesi, vb.) dikkate almalıdır (Ferrando vd., 2020).

UBEM araçları, hem amaçları hem de simülasyon yaklaşımı açısından (EnergyPlus gibi dinamik karmaşık motorlardan yarı-statik yaklaşımlara) büyük bir heterojenlik göstermektedir. Araçlar arasındaki içsel farklılıklar, binaların modellenmesi (ve basitleştirilmesi) ve genelleme açısından karakterizasyon için farklı yöntemler kullanıldığında, büyük ölçekli analizler (bölgeden şehir ölçeğine) için daha da artar (Ferrando ve Causone, 2020).

UBEM oluşturulurken en yaygın kullanılan modelleme yaklaşımı olan aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımı için geliştirilen metodlardan fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu (beyaz kutu), reduced-order metodu (gri kutu) ve veriye dayalı metod'a (kara kutu) dair bir ayrıştırma yapılarak oluşturulmuş UBEM araçlarının bir sınıflandırması Çizelge 1.1'de gösterilmektedir.



Çizelge 1.1. Aşağıdan-yukarıya yaklaşıma dair metodlarda kullanılan çeşitli UBEM araçları (Hong vd., 2020)

	Araç	Geliştirici	Hesaplama Metodu	Hedef Kullanıcılar
Fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu	CityBES	LBNL	EnergyPlus	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	MIT UBEM Tool	MIT	EnergyPlus	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	UMI (Urban Modeling Interface)	MIT	EnergyPlus	Bölge enerji yöneticileri
	Virtual EPB	ORNL	EnergyPlus	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	Tool by Columbia University	Columbia University	EnergyPlus	Bölge enerji yöneticileri
	Tool by Cambridge University	Cambridge University	EnergyPlus	Bölge enerji yöneticileri
	UrbanOPT	NREL	EnergyPlus ve OpenStudio	Bölge enerji yöneticileri
	COFFEE	NREL	EnergyPlus ve OpenStudio	Destek programı
	CitySim	EPFL	CitySim Solver	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
Reduced-order hesaplama metodu	SEMANCO	FUNITEC	Araca özel simülasyon motoru	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	SimStadt	Hochschule für Technik Stuttgart	ROM (Reduced-Order Model) temelli ISO/CEN standartları	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	Energy Atlas	Technische Universität München	ROM temelli ISO/CEN standartları	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler

Çizelge 1.1. Aşağıdan-yukarıya yaklaşıma dair metodlarda kullanılan çeşitli UBEM araçları (Hong vd., 2020) (Devam)

	LakeSIM	ANL	ROM temelli ISO/CEN standartları	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	Tool by Georgia Institute of Technology	Georgia Institute of Technology	ROM temelli ISO/CEN standartları	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	OpenIDEAS	KU Leuven	ROM temelli Modelica	Bölge enerji yöneticileri
	TEASER (Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit)	RWTH Aachen University	ROM temelli Modelica	Bölge enerji yöneticileri
	City Energy Analyst	ETH Zurich	Spesifik hesaplama modülleri	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
Veriye dayalı metod	UrbanFootprint	Calthorpe Analytics	Özel veriye dayalı çözümler	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	Tool by New York University	New York University	Veriye dayalı regresyon modeli	Şehir plancıları, Politika belirleyiciler
	CoBAM	ANL	Veriye dayalı regresyon modeli, ROM temelli ISO/CEN standartları	Politika belirleyiciler

Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımına dair metodları kullanan UBEM araçlarından, en yaygın kullanılanlarının ana karakteristikleri Çizelge 1.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 1.2. Aşağıdan-yukarıya yaklaşıma dair metodları kullanan UBEM araçlarından en yaygın kullanılanlarının ana karakteristikleri (Ferrando vd., 2020)

	Kullanım	Bilgi işlem platformu	Kullanım örnekleri	Ana yapı
CitySim	Ücretsiz	Kişisel bilgisayar	EPFL University campus (Mauree vd., 2017; Walter ve Kämpf, 2015), La Jonction” district (Geneva) (Coccolo vd., 2018), Nablus (Perera vd., 2018)	Dört çekirdek model: (i) termal model, (ii) radyasyon modeli, (iii) davranışsal model, (iv) tesis, ekipman modeli+ Multi-Agent Transport Simulation Toolkit ile olası entegrasyon (MATSim-T)
SimStadt	Kullanıma açık değil	Kişisel bilgisayar	Grünbühl (Ludwigsburg), Rintheim (Karlsruhe), Bospolder (Rotterdam) (Nouvel vd., 2015)	ISO 13.790’dan yararlanan enerji analizi ve çevrimiçi veri tabanı (yani PVGIS (JRC, 2012)) veya hava durumu veri dosyaları (yani Meteoronorm (Meteorotest, 2019)) aracılığıyla güneş enerjisi potansiyeli tahmini
umi	Ücretsiz fakat 6 adet Rhino lisansına ihtiyaç var	Kişisel bilgisayar	Boston (Davila vd., 2016), Kuwaiti city neighborhood (Cerezo Davila vd., 2017) MIT University campus (Nagpal ve Reinhart, 2018)	Altı modül: (i) gün ışığı modülü, (ii) enerji modülü, (iii) yaşam döngüsü modülü, (iv) mobilite, (v) saha modülü, (vi) gıda üretimi için hasat modülü
CityBES	Geliştirici desteği ile ücretsiz	Kişisel bilgisayar	Different districts of San Francisco (Chen ve Hong, 2018; Chen vd., 2017a; Chen vd., 2017b)	Üç ana bölüm (Bölge Binası, Modelleme ve Analiz, Kentsel İklim). Modelleme ve Analiz bölümü beş alt araç içerir (kıyaslama, güçlendirme senaryoları, yenilenebilir enerji, Yaşam Döngüsü GHG ve simülasyon)

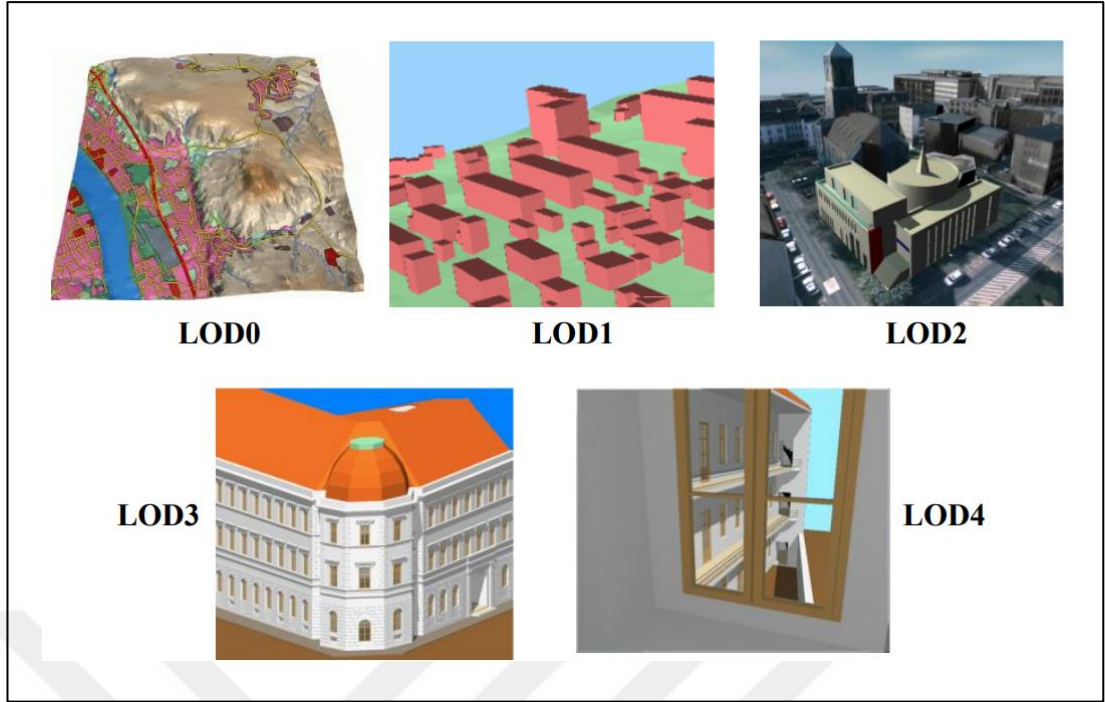
Çizelge 1.2. Aşağıdan-yukarıya yaklaşıma dair metodları kullanan UBEM araçlarından en yaygın kullanılanlarının ana karakteristikleri (Ferrando vd., 2020) (Devam)

Open IDEAS	Ücretsiz	Kişisel bilgisayar	Belgian city block (Baetens vd., 2015), Belgian residential zero-energy neighborhood (Baetens vd., 2012)	Üç bileşen: (i) sistemler (Modelica IDEAS kitaplığı), (ii) stokastik konut doluluk davranışı (Python StROBe), (iii) bina modelleme (Modelica FastBuildings kitaplığı GreyBox)
CEA	Ücretsiz	Kişisel bilgisayar	One central area in Zurich (Mosteiro-Romero vd., 2017), City block in Zug (Happle vd., 2017)	Yedi veritabanı (hava durumu, kentsel çevre, enerji hizmetleri, dönüşüm, dağıtım, sistemler ve hedefler) ve altı modül (talep, kaynak potansiyeli, sistem teknolojisi, tedarik sistemi, karar, analiz)
URBAN opt	Kullanıma açık değil	Kişisel bilgisayar	National Western Center and Sun Valley district (Polly vd., 2016)	Üç ana bileşen: (i) harita görüntülerinden ve faturalandırma verilerinden 3B bina enerjisi modelleri, (ii) COFFEE olarak simülasyon platformu ve (iii) enerji koruma önlemleri ve güçlendirme analizi için Bina Bileşen Kitaplığı (BCL)
TEASER	Ücretsiz	Kişisel bilgisayar	Research campus in Germany, Godesberg (Bonn) (Remmen vd., 2018)	Üç ana paket: (i) veri paketi (veri girişine ve çıktıların okunmasına izin verir), (ii) mantık paketi (verilerin işlenmesine yardımcı olur) ve (iii) GUI paketi

Çoğu UBEM aracı kentsel ölçekte modelleme için, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS-GIS) tabanlı veri kümelerini entegre eder veya CityGML tabanlı sanal kent modellerini kullanır (Hong vd., 2020). CityGML (City Geography Markup Language), enerji analizleri için de kullanılan sanal 3B kent modellerinin depolanması ve değişimi için açık bir veri modeli ve XML tabanlı bir formattır. Farklı modellerde kullanılabilir

nesne tiplerini ve niteliklerini tanımlayan evrensel bir topografik bilgi modelidir (Groger vd., 2008; Schiefelbein vd., 2019). Hemen hemen tüm araçlar CBS formatındaki dosyalarla doğrudan entegredir. CBS formatları, belediyeler tarafından bina bilgilerini depolamak için kullanılan en yaygın ve standart yöntemdir. Ayrıca, CityGML formatı, 3B bina geometrisinin ayarlanmasına ve kentsel çevrenin tanımı da dahil olmak üzere özelliklerinin değerlendirilmesine izin verir (örneğin, arazi özellikleri, su kütleleri, bitki örtüsü, ulaşım ağı, kentsel mobilyalar, vb.). Ancak, CityGML dosyaları halihazırdaki kentsel alanlar ve yeni yerleşim yerleri için her zaman mevcut değildir. Bu nedenle, manuel olarak oluşturulan GIS dosyaları, geometri için her zaman girdi dosyaları olarak kullanılabilir (Ferrando vd., 2020). İki düzeyli olan yapıli çevrenin planlanmasında, bir diğeri düzey de bina ölçeğidir. Bina ölçeği için BIM (Building Information Modeling) oluşturma süreci geçerlidir ve IFC (Industry Foundation Classes) formatı, açık kaynaklı dosya formatıdır (Jusuf vd., 2017). IFC genel anlamda tek boyutlu bir yüzeydeki 3B formattır ve coğrafi bilgi sağlamaz. Kentsel ölçek ve bina ölçeği olmak üzere her iki düzeyde de farklı veri formatları ve veri alışverişi gerçekleşir (Jusuf vd., 2017).

UBEM araçlarının kullanımı açısından, çok sayıda binanın hesaplama süresinin uzunluğu zorluk oluşturmaktadır. Bu sürenin azaltılabilmesi için geometrinin basitleştirilmesi gerekir (Ferrando vd., 2020). Çünkü büyük bölgeler için 3B kent modellerinin oluşturulması ve gösterimi zordur. Verilerin artması, veriler üzerinde düzenleme yapmayı ve gösteriminin hızlı olmasını engellemektedir. Günümüzde bu sorun, modellemenin amaca yönelik olarak farklı detay seviyelerinde (LOD: Level of Detail) oluşturulması ile giderilmektedir. Detay seviyesi (LOD) 3B binalar için ölçek kavramını ifade etmektedir. Detay seviyeleri ile, karmaşık yapıli ve büyük kapasiteli olan 3B kent modelleri arasında iletişim, paylaşım ve gösterim daha hızlı yapılabilmektedir. Her bir LOD belirli bir genelleştirme düzeyini gösterir (Yücel ve Selçuk, 2009). Bir UBEM'de, bir bina modelinin detay seviyesi, 3B bir kent modelinden ve kentsel bağlamı belirlemeye yönelik temel yöntemlerden türetilir (Johari vd., 2022). CityGML de nesnelerin hem geometrileri hem de tematik farklılaşmaları açısından artan LOD ile daha ayrıntılı hale geldiği ardışık beş detay seviyesini içerir (Groger vd., 2008) (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. CityGML tarafından tanımlanan beş detay seviyesi (LOD) (Gröger vd., 2008)

CityGML, farklı Detay Seviyelerini (LOD) destekleyebilir ve veri setinde, aynı nesne aynı anda farklı LOD'da temsil edilebilir. Bu da aynı nesnenin farklı çözünürlük derecelerine göre analizini ve görselleştirilmesini sağlar. Beş detay seviyesi açısından LOD'lar aşağıda sıralanmıştır (Gröger vd., 2008);

- En kaba seviye LOD0, esasen üzerine bir hava görüntüsünün veya bir haritanın örtülebileceği iki buçuk boyutlu bir dijital arazi modelidir.
- LOD1, düz çatılı prizmatik binalardan oluşan bir blok modelidir.
- LOD2'deki bir bina, farklılaştırılmış çatı yapılarına ve tematik olarak farklılaştırılmış yüzeylere sahiptir. Bitki örtüsü nesneleri de temsil edilebilir.
- LOD3, detaylı duvar ve çatı yapıları, balkonlar, bölmeler ve çıkıntılar içeren mimari modelleri ifade eder. Yüksek çözünürlüklü dokular bu yapılara eşlenebilir. Ek olarak, ayrıntılı bitki örtüsü ve ulaşım nesneleri bir LOD3 modelinin bileşenleridir.
- LOD4, 3B nesneler için iç yapılar ekleyerek bir LOD3 modelini tamamlar. Örneğin; odalar, iç kapılar, merdivenler ve mobilyalar gibi.

Bir LOD3 bina modelinin kullanılması, tam pencere alanı sayısının hesaplanmasının yanı sıra, tahmini pencere iletimi ısı kaybının ve güneş ısı kazancının güvenilirliğini artıran pencerelerin yönünün hesaplanmasını kolaylaştıracaktır. Bir LOD4 bina modelinin kullanılması ise, bir bina içindeki ısıtılan alan ve hacmin tam olarak hesaplanmasına izin verecek ve elektrik enerjisi talebinin tahmini için daireler hakkında bilgi içerecektir. Dolayısıyla, kullanılan 3B bina modelinin artan LOD'u, bina seviyesindeki enerji talebi tahminlerinin güvenilirliğini artırır (Kaden ve Kolbe, 2013). Çizelge 1.3'te doğruluk gereksinimleriyle birlikte CityGML'nin beş detay seviyesi belirtilmiştir.



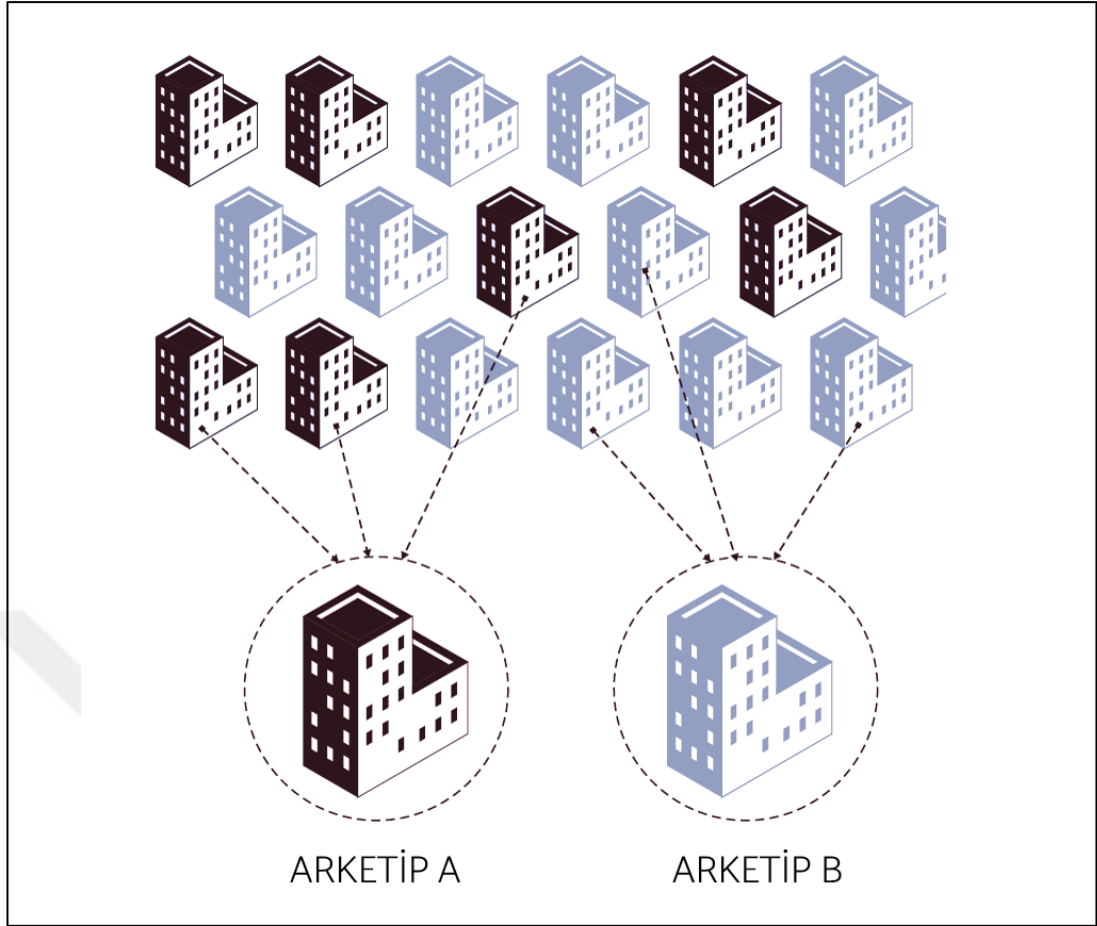
Çizelge 1.3. CityGML dosyaları için detay seviyeleri (Jusuf vd., 2017)

	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Model ölçeği açıklaması	Bölgesel, manzara	Şehir, bölge	Şehir bölgeleri, projeler	Mimari modeller (dış görünüş), nirengi noktası	Mimari modeller (iç mekan)
Doğruluk sınıfı	En düşük	Düşük	Orta	Yüksek	Çok yüksek
Mutlak 3B nokta doğruluğu (konum/yükseklik)	LOD1'den daha düşük	5/5 m	2/2 m	0.5/0.5 m	0.2/0.2 m
Genelleme	Maksimum genelleme (arazi kullanımının sınıflandırılması)	Genelleştirilmiş özellikler olarak nesne blokları; >6×6 m/3 m	Genelleştirilmiş özellikler olarak nesne blokları; >4×4 m/2 m	Gerçek özellikler olarak nesne blokları; >2×2 m/1 m	Yapı elemanları ve açıklıklar temsil edilir
Bina tesisatları	-	-	-	Temsili dış etkiler	Gerçek nesne formu
Çatı formu/yapısı	Yok	Düz	Çatı tipi ve yönü	Gerçek nesne formu	Gerçek nesne formu
Çatı sarkan parçalar	-	-	-	-	Var
Şehir mobilyası	-	Önemli nesneler	Prototipler	Gerçek nesne formu	Gerçek nesne formu
Katı peyzaj öğeleri	-	Önemli nesneler	Prototipler, 6 m'den daha yüksek	Prototipler, 2 m'den daha yüksek	Prototipler, gerçek nesne formu
Bitki örtüsü	-	>50 × 50 m	>5 × 5 m	<LOD2	<LOD2

UBEM araçlarında gereken simülasyon girdilerini azaltmak için, bina grupları tipik olarak benzer işlevlere sahip çok sayıda binayı temsil edebilen prototip bina modelleri (veya temsili arketipler) olarak sınıflandırılır (Li vd., 2016; Cerezo vd., 2017; Risch vd., 2021).

Arketipler, tamamen karakterize edilmiş prototip binalardır ve binaları geometrik olarak hızlı bir şekilde tanımlamak ve bina modelleme sürecini basitleştirmek için kullanılır (Schiefelbein vd., 2019; Ferrando vd., 2020). Genellikle, bu prototip binaları üretmek için büyük miktarda veri gerekir, bu nedenle neredeyse tüm araçlar halihazırda uygulanmış varsayılan arketipleri önerir. Arketipler; inşaat yılı, kullanım amacı (örn. konut, ofis, ticari) ve bina tipolojisi (kule, müstakil ev, sıralı bina vb.) gibi temel ve genellikle mevcut veriler aracılığıyla atanır (Ferrando vd., 2020). Arketip çözümüne ihtiyaç duyulmasındaki temel sebep de, bina stokunu temsili tipolojide kümelemektir. Bir tipolojiye karşılık gelen her model, net zemin alanı ya da kat sayısı gibi minimum bir dizi parametre ile oluşturulabilir (Artiges vd., 2021). Bina arketipleri aynı zamanda, belirli bölgeler ve inşaat dönemleri için temsili bina bilgilerini tutan bina modelleridir (Schiefelbein vd., 2019).

Her ana bina sınıfı için arketip tanımları geliştirmek ve bu tanımları enerji modellemesi için girdi verileri olarak kullanmak mümkündür. Modellenen arketiplerin enerji tüketimi tahminleri, sonuçları her arketipin tanımına uyan bina sayısı ile çarpılarak bölgesel veya ulusal yapı stokunu temsil edecek şekilde ölçeklendirilebilir (Swan ve Ugursal, 2009). Aynı zamanda, bina dokusu ve teknik sistemlerle ilgili daha ayrıntılı arketipler, şehrin alt ölçeklerindeki mekansal çeşitliliklerle bütünleştirilebilir (Ferrando vd., 2020). Şekil 1.11’de arketip oluşturma yaklaşımı gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Arketip oluşturma yaklaşımı (Davila, 2016)

Tek bir arketip modeli, arketip kullanan aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımında aynı tipteki tüm bina sektörünü makul bir şekilde temsil edemez. Bu eksiklikten kaçınmak için genellikle arketip modellerinin daha ayrıntılı sınıflandırılmasına ihtiyaç duyulur, ancak bu, simülasyon sürecinde çok büyük bir hesaplama yükü oluşmasına neden olabilir (Lim ve Zhai, 2017).

Yaygın olarak bulunan arketip şablonlarının ve ölçülü enerji verilerinin eksiklikleri, mevcut iş akışlarında kentlerin enerji politikasını yönlendirebilmek için UBEM'in etkili bir şekilde uygulanmasını engelleyebilecek temel engellerdendir (Davila vd., 2016). Bununla birlikte, bir bina stokunu doğruluk seviyesi yüksek bir şekilde temsil eden arketiplerin tanımı ve detayıyla ilişkili konular UBEM için en büyük belirsizlik alanlarındandır (Reinhart ve Davila, 2016). Buna yönelik bir çözüm olarak belirsizlik analizi, karar vericilerin referans tüketim değerlerinden yoksun olması durumunda avantajlı olabilecek yapı taşı ölçeğinde olası talep değerlerinin dağılımını sağlayabilir (Schiefelbein vd., 2019). Bu doğrultuda kullanılacak yöntemlerden olan Bayes

kalibrasyon yöntemi, tüm belirsizlik kaynaklarını göz önünde bulundurabilir. Aynı zamanda, model tahminleri ile ölçülen veriler arasındaki tutarsızlığın ortaya çıkardığı modelin yetersizliğini düzeltmeye çalışır (Lim ve Zhai, 2017).

Bayes kalibrasyon yöntemi, belirsizlik dağılımlarını değiştirerek çıktıyı doğru verilere daha iyi uydurmak için girdiler üzerinde yinelemeli bir süreç uygular. Bunun için de bu yöntem, belirsizlikleri azaltmak için tipik olarak her bina için birkaç bin simülasyon gerektirir (Ferrando vd., 2020). Bununla birlikte, arketip çözümlerindeki tahmini parametre değerlerindeki belirsizliği azaltmak için ek veriler ve Bayes kalibrasyonu kullanılabilir (Risch vd., 2021).

1.2.1. Fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu

Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımına dair bir UBEM metodu olan fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu (veya mühendislik metodu), diğer metodlara kıyasla yeni bir yöntem olmakla birlikte altyapısını BEM (Building Energy Modeling-Bina Enerji Modellemesi) tarafından türetilen ayrıntılı modelleme ve simülasyon tekniklerinden almaktadır (Ferrando vd., 2020; Ferrando ve Causone, 2020).

BEM'in çıkış noktası olan binalardaki ısı transferinin bilgisayar simülasyonları, 1960'lardaki Küba füze krizi sırasında, sıcak yaz günlerinde yoğun olarak kullanılan ve kötü havalandırılan yeraltı barınaklarındaki sıcaklık ve nemi tahmin etmek için hiçbir analitik çözümün bulunmadığı zamanlarda ortaya çıkmıştır (Kusuda, 1999; Happle, 2020). BEM'ler, bu tarihlerden beri elektrik, gaz kullanımı gibi bina enerji taleplerini tahmin etmek için kullanılmaktadır (Lim ve Zhai, 2017). BEM'de, bir binanın geometrik ve geometrik olmayan bilgilere dayalı termal modeli, geçerli hava koşulları altında simüle edilir (Johari, 2021). Fizik tabanlı UBEM metodundaki temel yaklaşım da, binaları BEM'deki gibi modellemek ve simüle etmektir. Ancak, bir kentin ölçeği göz önüne alındığında, simülasyonun yüzlerce hatta binlerce binaya genişletilmesi gerekmektedir (Johari, 2021).

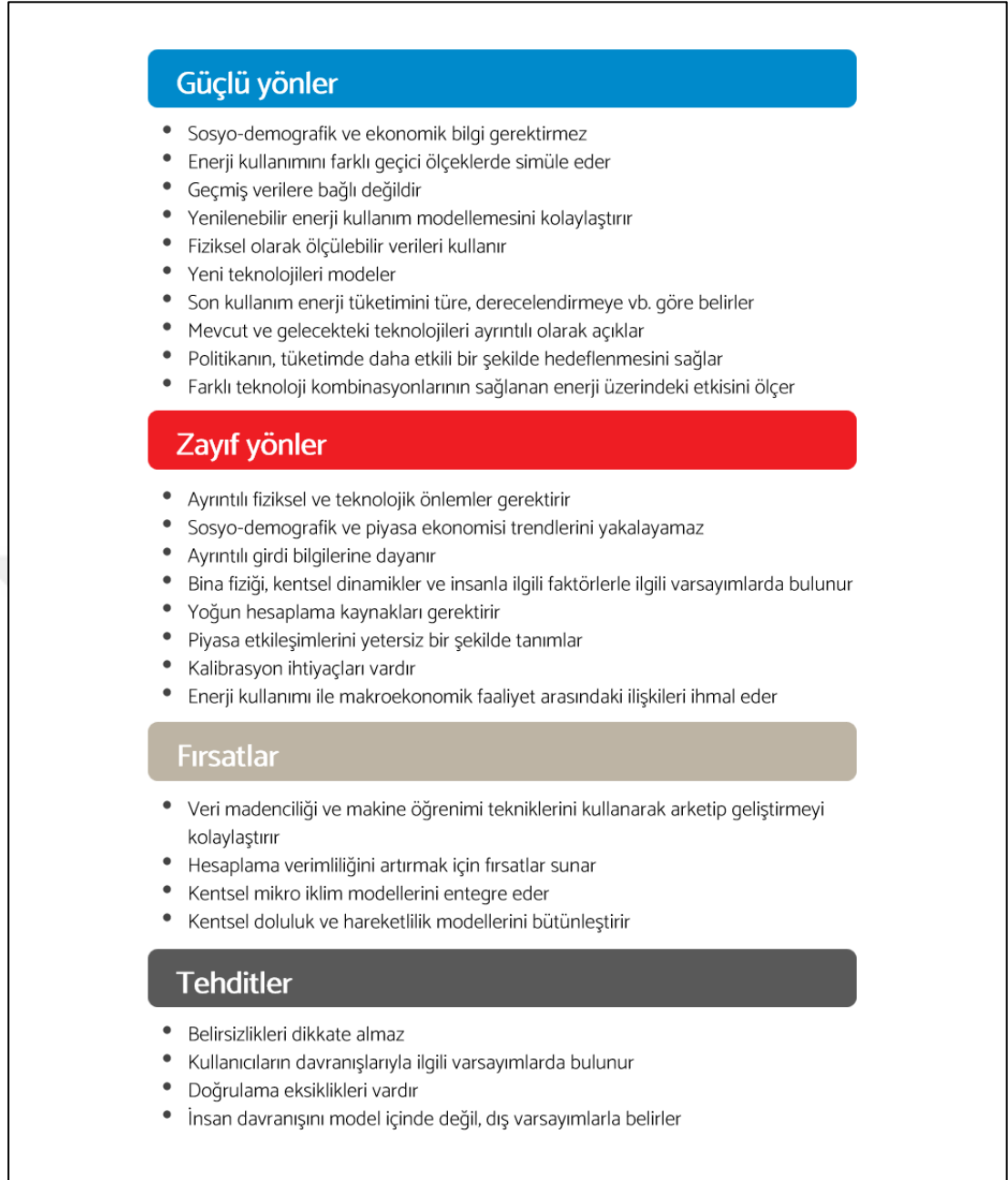
Fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu, yapılarda ve yapılardaki sistemlerin birbiriyle olan ilişkilerinde ısı transferini dikkate alır. Enerji tüketimini tahmin etmek için; termodinamik prensipleri ve inşaat, iklim ve sistem verilerini kullanır. Yapılar ve

etrafındaki çevre ile olan ilişkilerin sayısal temsili ile ilgilenen aşağıdan-yukarıya fizik tabanlı UBEM araçları, yapıların enerji tüketimini detaylı uzaysal-zamansal netlikle analiz edebilir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019; Ferrando vd., 2020). Bununla birlikte, kentsel ölçekte enerji modellemesi oldukça karmaşık ve zaman alan bir süreçtir bu yüzden zaman ve hesaplama verimliliği elde etmek için modelleme, bir alan basitleştirmesine dayanmaktadır (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019; Ali vd., 2021).

Fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu, yüksek çözünürlüklü bina performansının tam dinamiğini yakalamak için bir simülasyon motoru kullanır (Hong vd., 2020). En yaygın kullanılan simülasyon motoru EnergyPlus'tır, çünkü bu motor karmaşık kentsel bina sistemlerinin derinlemesine analizine izin verir (Ali vd., 2019).

Enerji kullanımına yönelik değişkenleri ve birbirleriyle olan karşılıklı ilişkilerini diğer UBEM metodlarından daha iyi açıklayabilen fizik tabanlı UBEM'ler kullanıcıların, güçlendirme stratejilerini ve enerji tedarik seçeneklerini nicel olarak değerlendirmelerine olanak tanıyarak daha etkili politikalar belirlenmesine ve enerji yönetimine katkıda bulunurlar (Sokol vd., 2017; Abbasabadi ve Ashayeri, 2019). Bu metod, kentsel bina enerji modellemesinde çok yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, enerji tüketimini hesaplamak için önemli miktarda teknik veri ve çeşitli varsayımlar gerektirir (Ali vd., 2021). Çünkü bu metodu kullanan modeller binaların pratik temsilleri olsa da, bina modellerinin enerji tüketimini önemli ölçüde etkileyebilecek kullanıcı davranışları gibi belirsiz değişkenleri tam olarak yansıtamazlar (Swan ve Ugursal, 2009; Johari, 2021). Aynı zamanda modelleme hızını artırmak ve kentsel ölçekli modelleme için gereken hesaplama çabasını azaltmak için genellikle sınırlı sayıda arketipe dayanırlar; bu da kentsel enerji kullanımının, bina stoklarının, kentsel ortamların ve bir şehirdeki insanla ilgili faktörlerin doğru bir şekilde temsil edilmesini etkiler (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019). Buna rağmen bu metod, geçmiş tüketim verileri olmayan modeller açısından en yüksek derecede esnekliğe ve yeteneğe sahiptir (Swan ve Ugursal, 2009). Dolayısıyla, binaların kentsel ölçekli enerji analizi ile ilişkili doğal belirsizlikleri nedeniyle, mekansal-zamansal insan faaliyet kalıplarının ve sosyo-teknik faktörlerin entegrasyonu, bu metoda dair modelleme sonuçlarını iyileştirecektir (Ali vd., 2021).

Fizik tabanlı UBEM modelleri; iklim, bina geometrisi gibi çeşitli veri girdileri gerektirir (Reinhart ve Davila, 2016; Li vd., 2020). İklim verisi açısından, termal simülasyonlar oluşturmak için hava durumu veri setlerine ihtiyaç vardır. Buna ihtiyaca yönelik olarak genellikle, Tipik Meteorolojik Yıl veri kümeleri (TMY) olarak adlandırılan birkaç yıl boyunca toplanan saatlik iklim veri kümeleri kullanılır. Bununla birlikte, mevcut hava durumu veri setleri; iklim değişikliği senaryolarını, belirsizlikleri, gelecekteki hava durumu dosyalarını veya aşırı koşulları dikkate almayan güncel olmayan verilere dayanmaktadır (Ali vd., 2018). Modelleme için gerekli veri girdilerinden bir başkası olan geometrik bina verileri, tipik olarak çeşitli biçimlerde bulunur ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kent modeli veri tabanı aracılığıyla toplanır. En yaygın veri modeli formatları Shapefile, KML, GeoJSON ve CityGML'dir (Johari vd., 2020). Diğer taraftan modellerin daha geniş kullanımına yönelik bir engel, enerji modelleyicilerinin tipik olarak CBS veri setine aşına olmaması veya daha büyük kentsel veri kümelerini manipüle edememesidir (UBEM.IO, 2020). Aynı zamanda fizik tabanlı metod kullanılarak simüle edilmiş enerji kullanım verileri, doğrulama için ölçülen verileri gerektirir. Bununla birlikte, ölçülen veriler genellikle tek tek binalar için mevcut değildir (Ali vd., 2021). Şekil 1.12'de fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu için güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler genel olarak belirtilmiştir.



Şekil 1.12. Fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu için güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler (Ali vd., 2021)

Fizik tabanlı dinamik simülasyon metodunu kullanan UBEM araçlarından en bilinenleri arasında CityBES, MIT UBEM Tool, UMI, Virtual EPB, UrbanOPT, COFFEE, CitySim ve SEMANCO bulunmaktadır. Bu araçlardan UMI hakkında ayrıntılı bilgi Materyal ve Yöntem başlığı altında verilmiştir.

- CityBES (City Buildings, Energy, Sustainability), fizik tabanlı dinamik simülasyon metodunda en çok kullanılan araçlardandır. Binaların enerji performansını değerlendirmek için web tabanlı bir veri ve bilgi işlem

platformudur (Hong vd., 2020). Bu araç, ilçe veya kent ölçeğinde verimlilik ve dekarbonizasyon programlarını desteklemek için bir kentin bina stokunun enerji ve dayanıklılık modellemesine ve analizine odaklanır. 3B kent modellerini temsil etmek ve değiş tokuş etmek için uluslararası bir açık veri standardı olan CityGML'yi kullanır. Bina enerji kullanımını ve enerji verimli iyileştirmelerden elde edilen tasarrufları simüle etmek için de EnergyPlus simülasyon motorunu kullanır (Best Directory, 2022). Veri katmanı, Algoritmalar ve Yazılım katmanı ve Kullanım Örnekleri katmanı CityBES'in yazılım mimarisinin üç katmanıdır. Veri katmanı, hava durumu verilerini ve CityGML 3B kent modelini içerir. Yazılım katmanı EnergyPlus, OpenStudio SDK, CBES API ve CityBES'i içerir. Kullanım Örnekleri katmanı ise, enerji kıyaslaması, PV (yenilenebilir enerji üretimi), su tasarrufu, büyük ölçekli enerji güçlendirme analizi, bölgesel enerji (geliştirme aşamasında) ve bina performansı görselleştirmesi gibi uygulamalara örnekler sağlar (Berkeley Lab, 2023). CityBES, çeşitli güçlendirme senaryoları ile kent ölçeğinde bina enerji modellemesini ve analizini sunarken; Boston, Chicago, Los Angeles, San Francisco, Washington D.C., San Jose ve New York City dahil olmak üzere ABD şehirlerindeki yüz binlerce bina için performans ve maliyet verilerine sahip 100 bina teknolojisinin bir koleksiyonunu göz önünde bulundurmaktadır (Hong vd., 2018).

- Virtual EPB, yüksek performanslı bilgi işlem kullanan makine öğrenimi analiziyle otomatik olarak binaların enerji kullanımlarının modellenmesidir (Hong vd., 2020). Chattanooga'nın Elektrik Güç Kurulu (EPB-The Electric Power Board), güneydoğu Tennessee için hem elektrik hem de internet sağlayan kamuya ait bir yardımcı programdır. Bu programda ORNL (Oak Ridge National Laboratory), EPB'nin hizmet bölgesindeki 178 000 binanın her birinin bir "dijital ikizini", yani kalibre edilmiş bir bina enerji modelini oluşturmak için EPB'nin 15 dakikalık elektrik tüketim verilerini CBS verileriyle birlikte kullanır. Oluşturulan bina enerji modelleri, verimliliği ve talep yanıt ölçüsünü değerlendirmek ve EPB programlarını bilgilendirmek için kullanılır. Bu modeller, fiyat yapısı tasarımı, enerji verimliliği programı tasarımı, talep yanıt programı tasarımı, esneklik tasarımı ve müşteri iletişimi dahil olmak üzere beş yardımcı programa tanımlı kullanım durumları için

analizlerin desteklenmesini amaçlamaktadır. Proje, büyük veri oluşturma özelliğiyle veri kümelerini ölçeklenebilir bir şekilde analiz etmek, EnergyPlus modelleri oluşturmak, 3 milyondan fazla simülasyon çalıştırmak ve 13 TB'tan fazla sonucu analiz etmek için DOE'nin yüksek performanslı bilgi işleme yaptığı yatırımlardan yararlanmaktadır (Energy Efficiency&Renewable Energy, 2023).

- UrbanOPT (Urban Renewable Building and Neighborhood Optimization), ilçe ölçeğinde enerji yüklerini hesaplamaya ve yenilenebilir enerjiyi entegre etmeye yönelik modelleme platformudur (Hong vd., 2020). Bu araç, bir kent içindeki coğrafi olarak uyumlu bir alanda (örneğin, bir kent bloğu veya bölge) yüksek performanslı binalar ve enerji sistemleri için gelişmiş bir analiz sunar. NREL tarafından şunları araştırmak için geliştirilmiştir; bina konumları ve geometri arasındaki ayrıntılı enerji değiş tokuşlarını, bina enerji verimliliği özelliklerini, bina ve bölge enerji depolama stratejilerini ve teknolojilerini, dinamik ve duyarlı yükler gibi toplu şebeke hizmetlerini, bölge enerji sistemi konumlarını, saha genelinde enerji hedeflerine ulaşmak için en iyi yaklaşımları belirlemek üzere bölgesel enerji sistemi performans özelliklerini. Bu doğrultuda URBANopt modelleme aracı, ABD Enerji Bakanlığı'nın OpenStudio ve EnergyPlus olmak üzere açık kaynaklı bina enerji modelleme ekosistemlerinden yararlanır (NREL, 2023).
- CitySim yazılımı, yenilenemeyen enerji kaynaklarının net kullanımını ve bununla ilişkili sera gazı emisyonlarını en aza indirmek için kentsel enerji plancılarına ve paydaşlarına bir karar desteği sağlamayı amaçlamaktadır. Bu yazılımın geliştirilmesinde çeşitli amaçlar bulunmaktadır. Bunlardan biri yazılım kullanıcılarının, 3B geometrik binaların bir kentsel bölge ölçeğinde (yüzlerce binadan oluşan) uygun bir şekilde tanımlanmasını ve bu binaların termo-fiziksel özelliklerini özel bir XML dosya formatı kullanarak verimli bir şekilde atfetmelerini desteklemektir. Aynı zamanda, kullanıcıların varlığının ve davranışlarının stokastik doğasını göz önünde bulundurarak ve yaygın olarak kullanılan bir dizi ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemini (HVAC sistemleri) hesaba katarak binaların enerji talebini simüle etmek amaçlanmıştır. CitySim yazılımı, yaygın olarak kullanılan bir dizi enerji

dönüşüm sistemi tarafından üretilen ve kentsel çevre tarafından yönlendirilen radyasyon değişimi de dahil olmak üzere, binaların yenilenebilir kaynaklardan sağlanan enerji arzını belirleyebilmektedir. Yazılım aracılığıyla, kullanıcılarının yaygın olarak kullandıkları grafik araçlarını kullanarak binaların performansını iyileştirme kapsamlarını belirlemek amacıyla, enerji performansı verilerinin analizinin desteklenmesine olanak sağlayabilen standart metin dosyaları (TSV) dışa aktarılabilir. CitySim yazılımı bunlara yönelik, bina girdilerinin (CitySim XML dosya formatı) ve iklim dosyalarının (Meteonorm CLI dosya formatı) özellikleri ile birlikte, alan koşullandırma için binaların enerji talebini ve arzını simüle edebilen bir komut satırı olan CitySim Solver'ı içerir (EPFL, 2023).

- SEMANCO (Semantic Tools for Carbon Reduction in Urban Planning), şehir planlamasında karbonu en aza indirmek amacıyla kullanılabilen semantik bir araçtır (Hong vd., 2020). SEMANCO entegre platformu birçok farklı kuruluş tarafından depolanan, şehirler hakkındaki geniş çapta dağılmış enerji ile ilgili verilere erişim sağlar. Bu şekilde proje platformu, tahminlerden ziyade mevcut verilerin değerlendirilmesine dayanan gelişmiş enerji analizini destekleyerek binaların, mahallelerin, ilçelerin ve bölgelerin enerji performansını analiz etmek için kullanılır. Bunu; farklı formatlarda ve farklı yerlerde depolanan bilgilerin, kentsel bir alanın çok seviyeli bir enerji modelini oluşturmak için kullanılmasını sağlayan semantik veri modellemesini kullanarak yapar (SEMANCO, 2023). Platform; Manresa, İspanya, Newcastle, Birleşik Krallık ve Kopenhag, Danimarka dahil olmak üzere üç vaka çalışması için geliştirilmiştir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019).

1.2.2. Reduced-order metodu

Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımına dair bir UBEM metodu olan reduced-order metodu; normatif olarak yapılandırılmış model parametre değerleri ile uyumlu basit girdiler gerektiren, kentsel bina enerji performansının değerlendirilmesini sağlayan bir metoddur (Hong vd., 2020). Bu metodla ilişkili olarak binaları direnç-kapasitans (R-C) benzetmesi yoluyla tanımlamak, binaların ilk enerji modellerinin ortaya çıktığı 1970'lerin başlarından beri devam etmektedir (Johari, 2021). Bu

doğrultuda R-C modelinin ortak bir model formu olduğu çeşitli reduced-order modelleri vardır. Bu form ile yaygın kullanılan bir reduced-order modeli olarak normatif yöntem, yarı-kararlı durum ısı dengesi denklemlerine dayanan birinci dereceden bir enerji modelidir (Hong vd., 2016).

Reduced-order metoduna özgü süreçlerden biri, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN-European Committee for Standardization) ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO-International Organization for Standardization) tarafından geliştirilen çeşitli hesaplama standartları kullanılarak tahmin edilebilen model parametre değerlerinin belirlenmesidir. Bu standart prosedürler, farklı bina türleri için fiziksel bina parametrelerini ve ilgili sistemleri içeren bir dizi normatif ifade aracılığıyla hesaplama yöntemini tanımlar. Bu hesaplama yöntemleri, AB'deki enerji performans derecelendirmesini hesaplamak için uygulanmıştır (Lee vd., 2013). ASHRAE'nin standart termal ağ modeli, bina zarfı boyunca ısı transferini ve termal dinamikleri ve bunun iç ortam sıcaklığı üzerindeki etkisini açıklamaktadır (ASHRAE, 2017).

Reduced-order metodu, kentsel bina enerji modelleme alanında pek popüler olmasa da, bu metod her iki yaklaşımın (fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu ve veriye dayalı metod) avantajlarını bir araya getirdiği için tercih edilebilirliği gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin, fiziksel bir yapının kullanılması problemin yorumlanabilirliğini arttırır. Ayrıca, bina özellikleri genetik algoritmalar gibi optimizasyon teknikleri ile belirlenebilir olduğu için ayrıntılı bina verilerine ihtiyaç duyulma sıklığı azalır (Ali vd., 2021). Şekil 1.13'te reduced-order metodunun güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri genel olarak belirtilmiştir.



Şekil 1.13. Reduced-order metodunun güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri (Ali vd., 2021)

Reduced-order metodunu kullanan UDEM araçlarından en bilinenleri arasında SimStadt, Energy Atlas, LakeSIM, TEASER ve CEA bulunmaktadır. Bu araçlardan CEA hakkında ayrıntılı bilgi Materyal ve Yöntem başlığı altında verilmiştir.

- SimStadt, kent ölçeğinde enerji tüketimi analizi için kullanılan bir kentsel enerji modelleme aracıdır (Hong vd., 2020). Bu araç; uygulama senaryolarını, bina ısıtma gereksinimlerinin yüksek çözünürlüklü simülasyonlarını, fotovoltaik için potansiyel çalışmalarını ve bina yenileme ve yenilenebilir enerji tedarik senaryolarını üretir (SimStadt, 2023). Bunları yaparken CBS tabanlı 3B kent modellerini, sabit veya dinamik bina modelleri ve enerji üretim teknolojileri ile birleştirerek kullanıcı dostu, web tabanlı bir platforma entegre eder. Belirli bir coğrafyada, artan bina enerji verimliliğinin, yenilenebilir enerji üretimi için potansiyellerin ve ilgili maliyet parametrelerinin değerlendirilmesine olanak tanır (Mittelstädt vd., 2019).

- Energy Atlas; Berlin, Almanya'daki 550 000 bağımsız binanın 3B geometrisinin enerji modellerinden ısıtma talebi tahminini mümkün kılar. Energy Atlas Berlin, CityGML'nin semantik bilgi modeline dayalıdır ve farklı temaların enerji ile ilgili bilgilerini içeren kent yapısının ortak uzamsal-anlamsal temsili için bütünleştirici bir veri omurgası sağlar (Kaden ve Kolbe, 2013; Hong vd., 2020).
- LakeSIM, tasarımcıların kentsel çevrenin estetiğini 3B bir modelleme platformunda görselleştirmelerine izin verirken, çeşitli büyük altyapı sistemleri arasındaki son derece karmaşık karşılıklı bağımlılıkları modelleyerek profesyonellerin çeşitli tasarım yönlerinin kısa ve uzun vadeli etkilerini anlamalarına yardımcı olacak bir araç olarak geliştirilmiştir. Aynı zamanda, New York, Manhattan'daki 50 000 bina için çeşitli politika senaryoları ve kentsel morfoloji için kentsel ölçekte bina enerji analizi sağlar (Bergerson vd., 2015; Hong vd., 2020).
- TEASER (Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit), çoklu bina enerji performans değerlendirmesi aracıdır (Hong vd., 2020). TEASER için girdi veri setleri, yapı fiziği ve farklı kullanımlarla imar dahil olmak üzere yapısal tasarımı kapsar. Bu modelleme aracının amacı, birden fazla bina için bireysel, dinamik BPS (Building Performance Simulation) modelleri sağlamaktır. Odak noktası, tasarım odaklı reduced-order modelleri (ROM'lar) üzerindedir. Bu tür bir modelleme, uygun şekilde parametreleştirilmesi için binanın tam bir tanımını gerektirir. Bu doğrultuda veri seti; bina geometrisini (dış ve iç tasarım), bina fiziğini (örn. duvar konstrüksiyonları) ve sınır koşullarını (örn. kullanıcı davranışı) içerir (Remmen vd., 2018).

1.2.3. Veriye dayalı metod

Aşağıdan-yukarıya modelleme yaklaşımına dair bir UBEM metodu olan veriye dayalı metod, basit kıyaslama veya daha karmaşık regresyon modellemesi kullanarak bina enerji tüketimini tahmin etmek, bina tasarımı ve operasyonel parametreleri enerji tüketimi ile ilişkilendirmek için kullanılır. Bu metod, modelleme için saatlik elektrik

verileri ve enerji kullanım yoğunluğu veritabanları gibi ölçülen verileri kullanır (Hong vd., 2016).

Veriye dayalı metod, detaylı enerji tüketiminin modelleme karmaşıklığı nedeniyle çok fazla zaman ve efor gerektirse de modellemede hıza ve hesaplama verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu metod, bina arketipleri oluşturabilmenin yanı sıra doluluk ve sosyoekonomik faktörleri de modele entegre ederek kentsel enerji tüketimi üzerindeki etkilerini ölçme olanağına sahiptir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019; Hu vd., 2022).

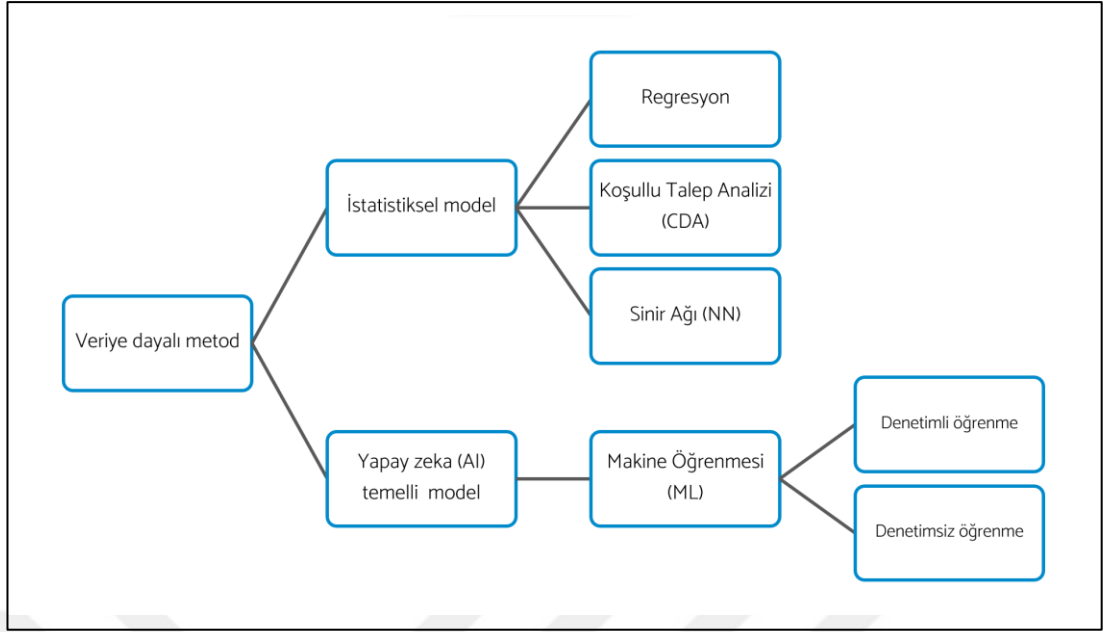
Veriye dayalı metodu kullanan araçlar, değişkenler arasındaki karmaşık ilişkilerle başa çıkmada iyidir ve bu araçların doğrulukları veri setinin kalitesine bağlıdır. Veri kümesi ne kadar büyük olursa, kalite de o kadar yüksek olur ve veriye dayalı model o kadar doğru sonuç verir (Li vd., 2020). Dolayısıyla, diğer metodları kullanan UBEM araçları için olduğu gibi veriye dayalı metodu kullanan araçlar için de, mevcut bina stokunun kentsel ölçekte bir veri setinin geliştirilmesi, kentsel bina enerji modelini oluştururken kritik bir adımdır. Çoğu şehir modellemeyi desteklemek için yeterli kamu verisine sahip olmakla birlikte bu verilerin temin edilebilmesi her zaman mümkün değildir. Dolayısıyla, kamu verisinin temin edilemediği durumlarda veri eksikliği sorunu ortaya çıkar ve kullanıcıların mahremiyet sorunları nedeniyle kentsel ölçekte yapı stoğu verilerinin toplanması zordur (Reinhart ve Davila, 2016; Chen vd., 2019).

Veriye dayalı metodlar farklı durumlarda farklı performans sunarlar (Ali vd., 2021). Aynı zamanda enerji kullanımı tahminleri için toplu verilerin kullanılması ve statükonun genelleştirilmesi bu metodun temel sınırlamalarındandır (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019). Kentsel bina enerji modellemesinde yaygın olarak kullanılsalarda bu araçlardaki fizik tabanlı bir simülasyon motorunun eksikliği, tasarım veya güçlendirme senaryolarını göz önüne alırken bir takım sınırlamalara neden olmaktadır (Nutkiewicz ve Jain, 2019). Şekil 1.14'te veriye dayalı metodun güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri genel olarak belirtilmiştir.



Şekil 1.14. Veriye dayalı metodun güçlü yönleri, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri (Ali vd., 2021)

Veriye dayalı metod; devlet, kamu hizmeti veya yerel olarak sağlanan operasyonel enerji veri setlerinin büyük örneklem boyutlarını kullanır ve son kullanımların özelliklerini enerji kullanımıyla matematiksel olarak ilişkilendirmek için istatistiksel model ve yapay zeka (AI) temelli model tekniklerini uygular. Matematiksel ilişki tanımlandıktan sonra model, bireysel son kullanımların enerji kullanımını tahmin edebilir. Yeterli değişkenler dahil edilirse, veri odaklı modeller, kentsel ölçekli simülasyon tabanlı yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, kentsel bina enerji kullanımının daha doğru bir temsili sunabilir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019). Şekil 1.15'te veriye dayalı metoda dair tekniklerin genel hiyerarşisi gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Veriye dayalı metoda dair teknikler (Swan ve Ugursal, 2009; Ali vd., 2021).

İstatistiksel modeller, son kullanım bilgilerine göre zaman serilerinin veya kesitsel gerçek enerji kullanım verilerinin analizine dayanır ve enerji talebinin bir tahminini verir. Bu, yukarıdan-aşağıya modellere benzer şekilde, istatistiksel modellerin de son kullanımla ilgili değişkenlere dayalı tüketim kalıplarını yakalayabildiği anlamına gelir (Johari, 2021).

Dünya çapındaki büyük enerji tedarikçilerinde depolanan çok sayıdaki müşteri enerji faturalandırma bilgisi, temin edilebildiği takdirde istatistiksel model için büyük bir veri kaynağı oluşturmaktadır. Araştırmacılar, bina özelliklerinin bir fonksiyonu olarak enerji tüketimini ölçmek için bu ve diğer verileri kullanmada çeşitli istatistiksel model teknikleri uygulamaktadırlar. Bunlar; regresyon tekniği, Koşullu Talep Analizi (CDA-Conditional Demand Analysis) tekniği ve Sinir Ağı tekniğidir (NN-Neural Network) (Swan ve Ugursal, 2009):

- Regresyon tekniği, modelin girdi parametrelerine karşılık gelen katsayılarını belirlemek için regresyon analizini kullanır. Bu modeller, toplam bina enerji tüketimini, enerji tüketimini etkilemesi beklenen parametrelere veya parametre kombinasyonlarına indirger. Model uyum başarısına göre değerlendirilir. İhmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu belirlenen giriş değişkenleri basitlik

için kaldırılır. Girdilerin kombinasyonlarına dayanarak, modelin katsayıları fiziksel öneme sahip olabilir veya olmayabilir (Swan ve Ugursal, 2009).

- Koşullu talep analizi (CDA) tekniği, son kullanım araçlarının varlığına dayalı olarak regresyon gerçekleştirir. Toplam bina enerji tüketimini, ikili veya sayım değişkeni olarak belirtilen sahip olunan cihazlar listesine indirger. Belirlenen katsayılar kullanım seviyesini ve derecelendirmesini temsil eder. Bu tekniğin başlıca gücü, gerekli girdi bilgilerinin elde edilmesindeki kolaylıktır. Çünkü gerekli girdi verileri, kullanıcılar üzerinden yapılan basit bir cihaz araştırması ve enerji tedarikçisinden gelen enerji faturalandırma verileri üzerinden sağlanır. Ancak, model genelinde çeşitli cihaz sahipliklerine dair bir veri kümesi gerektirir. Bu teknik, her bir cihazın toplam bina enerji tüketimindeki etkisini belirlemek için mülkiyetteki farklılıklardan yararlanır. Koşullu talep analizi tekniğinin güvenilir sonuçlar üretebilmesi için kullanılan değişken sayısına bağlı olarak yüzlerce hatta binlerce binadan elde edilen verilere ihtiyaç duyulmaktadır (Swan ve Ugursal, 2009).
- Sinir ağı (NN) tekniği, biyolojik sinir ağlarının yoğun bir şekilde birbirine bağlı paralel yapısına dayanan basitleştirilmiş bir matematiksel model kullanır. Teknik, tüm son kullanımların bir dizi paralel "nöron" aracılığıyla birbirlerini etkilemesine izin verir. Her nöronun bir varyans terimi ve önceki katmanın nöronlarının değeri ile çarpılan katsayılar dizisi vardır. Regresyon modellerine benzer şekilde, hatayı en aza indirmeye çalışır ve doğrusal olmayanlığı hesaba katmak için ölçeklendirme ve etkinleştirme işlevleri uygulayabilir. Paralel bir model olduğu için katsayıların fiziksel bir önemi yoktur (Swan ve Ugursal, 2009).

İstatistiksel modelin yanı sıra yapay zeka (AI) temelli model de veriye dayalı metodu kullanan modellerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir yapay zeka temelli model esasen, veri modellerini otomatik olarak öğrenerek kentsel binaların enerji kullanımını modelleyen Makine Öğrenmesi (ML) tekniklerine dayanmaktadır. Model, bina enerji kullanımı ile bina özellikleri, kentsel özellikler ve doluluk özellikleri gibi etkili faktörler arasındaki matematiksel ilişkiyi bulmak için tarihsel veri setini öğrenir ve eğitir (Abbasabadi ve Ashayeri, 2019). Genel olarak, makine öğrenmesi teknikleri

denetimli öğrenme ve denetimsiz öğrenme olmak üzere iki kategoriye ayrılır (Ali vd., 2021):

- Denetimli öğrenme, çoklu özellikler arasındaki karmaşık bir ilişkinin formülasyonu yoluyla çıktıyı tahmin eder. Bu yaklaşım ayrıca regresyon ve sınıflandırma algoritmalarını da içerir (Zhao vd., 2020; Ali vd., 2021).
- Denetimsiz öğrenme ise verilerin içsel yapılarını, ilişkilerini ve birbirine bağlılığını keşfetmede iyidir. Bina enerji sistemlerinin çalışma modellerini işletme verilerinden keşfetme yeteneğine sahiptir (Zhao vd., 2020).

Veriye dayalı metodu kullanan UBEM araçlarından en bilinenleri arasında UrbanFootprint ve CoBAM bulunmaktadır:

- UrbanFootprint birden fazla sektörde; arazi kullanımını, politikayı ve kaynak planlamasını ve katılımı kolaylaştırmak için geliştirilmiş web tabanlı bir yazılım platformudur. Bu platformun kolaylaştırılmış işlevleri senaryoların; mali, halk sağlığı, ulaşım, su, enerji ve emisyon etkilerini tahmin edebilmesini sağlar. Bu senaryolar, arazi kullanımlarındaki değişikliklerin yanı sıra mevcut veya gelecekteki koşullar üzerinde uygulanan politika veya teknolojideki değişiklikleri modellemek için kullanılabilir (DiStefano vd., 2016). UrbanFootprint, şu an için sadece Amerika Birleşik Devletleri'ndeki planlama projeleri için kullanılabilir. Aracın enerji kullanım modülü, ABD'deki 50 eyaletin tümündeki 120 milyondan fazla parselin referans verilerine ilişkin jeo-uzamsal verileri kullanarak koşulların değerlendirilebilmesine olanak tanır (UrbanFootprint, 2023)
- CoBAM (Commercial Building Agent-based Model), temsilci tabanlı sistem bir sistemdir. Enerji verimli teknolojilerin benimsenmesini göz önünde bulundurarak bina sahiplerinin davranışlarını, etkileşimlerini ve karar mantığını modeller. CoBAM, farklı teknolojilerin enerji ve maliyet tasarruflarını anlamak için kentsel bina enerji modellerini kullanır ve bunu karar sürecindeki veri girdilerinin bir parçası olarak değerlendirir. Aynı

zamanda bu veriler, binaların enerji kullanımını büyük ölçüde incelemek için kullanılabilir (ANL, 2023).

Verilen bilgiler ışığında bu çalışmada, kentsel alanları modellemek ve kentsel ölçekte enerji talebini tahmin etmek üzere uygulanabilir ve pratik bir model çerçevesi oluşturulması amacı doğrultusunda; City Energy Analyst (CEA), Spacemaker-Revit, UBEM.IO araçları ile üç ayrı UBEM çerçevesi oluşturulmuştur. Bu UBEM çerçeveleri, Ankara'nın Mamak ilçesinde konumlu 13 bloktan oluşan bir TOKİ sitesinin enerji talebinin analiz edilmesi açısından incelenmiştir. Uygulama alanı için oluşturulan UBEM çerçeveleri dahilinde yapılan enerji talep analizleri, alanın yıllık enerji tüketim verisiyle karşılaştırılarak oluşturulan UBEM çerçevelerinden en uygulanabilir olan tespit edilip değerlendirmeler yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kaden ve Kolbe (2013) çalışmalarında, anlamsal 3 Boyutlu şehir modelleri ve istatistiksel veriler kullanarak, binaların şehir çapında toplam enerji talebi tahminine yönelik yöntemler sunmuştur. Aynı zamanda Energy Atlas Berlin projesi kapsamındaki gelişmeler de sunulmaktadır. Energy Atlas Berlin, CityGML'nin semantik bilgi modeline dayalıdır ve farklı temaların enerji ile ilgili bilgilerini içeren şehir yapısının ortak uzamsal-anlamsal temsili için bütünleştirici bir veri omurgası sağlar. Berlin'in sanal 3 Boyutlu şehir modeli (çoğunlukla LOD2 bina modelleri) veri tabanı olarak kullanılmış ve farklı paydaşların ve disiplinlerin bilgileriyle zenginleştirilmiştir. Berlin kentindeki ısıtma, elektrik ve sıcak su enerjisi de dahil olmak üzere binaların enerji taleplerinin mevcut resmi jeolojik temeli ve Berlin Enerji Atlası'na entegre edilmiş istatistiksel veriler kullanılarak şehir genelindeki enerji talebinin tahminine odaklanılmıştır. Çalışmanın sonucunda semantik 3 Boyutlu şehir modellerinin, şehir çapında bir enerji talebi hesaplaması için temel olarak uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca kullanılan 3 Boyutlu bina modelinin artan LOD'unun, bina seviyesindeki enerji talep tahminlerinin güvenilirliğini arttıracakı belirtilmiştir.

Reinhart vd. (2013) çalışmalarında, kullanıcıların tüm mahallelerin operasyonel enerji, güneşliği ve yürünebilirlik değerlendirmelerini yapmalarına olanak tanıyan Umi adlı yeni bir Rhinoceros-tabanlı kentsel modelleme tasarım aracı sunmaktadırlar. Temel simülasyon için EnergyPlus, Radiance/Daysim'in yanı sıra Grasshopper ve Python programları kullanılmıştır. Umi'nin teknik ayrıntıları ve Boston'daki bir karma kullanım geliştirme vaka çalışması detaylandırılmıştır. Veriler, şehir planlamacılarının ve mimarların tasarımlarının bina ve sokak ölçeğindeki performansını iyileştirmelerine yardımcı olmak için eyleme geçirilebilir bilgiler sağlamaktadır.

Vermeulen vd. (2013) çalışmalarında, CitySim kentsel enerji simülatörünü hibrit evrimsel algoritma ile birlikte kullanmıştır. Vaka incelemesi olarak alınan bölge Paris'teki Bercy park cephesidir. Binalar, park tarafındaki (güneybatı) açıklıkları olan avluları çevreleyen birkaç blokta yer almaktadır. Optimizasyon, öncelikle temel binaların yüksekliklerine, ardından farklı blok cephe yönelimlerinin cam oranları ile birlikte binaların yüksekliklerine odaklanmıştır. CitySim üzerinden yapılan değerlendirme aracılığıyla, orijinal konfigürasyon ile optimal durum arasında ısıtma

ihtiyaçlarının %12.1 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Optimizasyon süreci sonucunda ortaya çıkan kentsel yerleşimler analiz edilmiş ve tartışılmıştır. Çalışmada sadece, Paris'teki konut binalarının enerji tüketiminin en önemli parçası olan ısıtma ihtiyacına odaklanılmıştır. Dolayısıyla gün ışığının görsel kazancı da dahil olmak üzere konfor kavramları dikkate alınmamıştır.

Baetens vd. (2015) çalışmalarında, multidisipliner bina enerji alanında yükselen yeni araştırma sorularını yanıtlamak için IDEAS, StROBe, FastBuildings ve GreyBox'tan oluşan entegre bölge enerji simülasyonları için geliştirilmiş açık bir çerçeve olan OpenIDEAS çerçevesinin gelişimini gözden geçirmiştir. Modelica IDEAS Kütüphanesi, termik, kontrol ve elektrik sistemlerinin besleyici seviyesinde (bina ve seviyesinde) eşzamanlı geçici simülasyonuna izin vermektedir. Python StROBe Modülü, mesken priz yüklerinin, dahili ısı kazançlarının, alan ısıtma ayar noktası sıcaklıklarının ve sıcak su yeniden çizimlerinin stokastik modellemesini gösteren IDEAS için sınır koşulları sağlamaktadır. Modelica FastBuildings Kitaplığı, IDEAS ile uyumlu düşük dereceli bina modellerini uygulamaktadır. Python GreyBox Modülü ise IDEAS için bir model öngörücü denetleyici çerçevesinde, denetleyici modeli olarak hizmet edebilecek gri kutu modelleri elde etmek için yarı otomatik bir parametre tahmin aracı uygulamaktadır. Çalışmanın sonucunda incelenen yaklaşımın, karşılıklı bağımlılıkların araştırılmasında elektrik ve termal (bina ve) bölgesel enerji modellerini tek bir simülasyon modelinde entegre etmeye izin verdiği tespit edilmiştir.

Fonseca ve Schlueter (2015) çalışmalarında, mahallelerde ve şehir bölgelerinde mekansal-zamansal bina enerji tüketim kalıplarının karakterizasyonu için entegre bir model sunmaktadır. Model, kentsel dönüşüm bağlamında bina enerji tüketiminin mevcut ve potansiyel durumlarını belirlemek için kapsamlı bir yöntem ihtiyacını ele almaktadır. Odak noktası olarak konut, ticari ve endüstriyel sektörlerdeki hem ayakta hem de gelecekteki binalarda enerji hizmetlerinin mekansal-zamansal değişkenliğini belirlemektedir. Model, ölçülen verilere ve İsviçre'deki bir şehir bölgesi için bir ekran modeline göre doğrulanmıştır. Entegre model, ölçülen ve simüle edilmiş verilere karşı doğrulanmıştır. Bu bağlamda, bina bazında enerji hizmetlerinin öngörülmesi için modelin hata yüzdesi %4 ile %66 arasında değişmektedir. Çalışmanın sonucunda modelin, mahallelerde enerji verimli stratejilerin çok ölçekli ve çok boyutlu analizi

için uygun, düşük karmaşıklık, yüksek güvenilirlik ve sezgisel arayüze sahip bir araç olduğu belirtilmiştir.

Li vd. (2015) çalışmalarında, Manhattan ve New York City için azaltılmış sıralı bir enerji modelini coğrafi bilgi sistemi (CBS) ile bütünleştiren kentsel ölçekli bir bina enerji modelleme metodolojisi göstermişlerdir. CBS, doğrudan model girdileri olarak hizmet veren veya daha ayrıntılı bina ve sistem özellikleri için belirli prototip bina modellerine bağlantılar sağlayan genel bina bilgileri sağlamaktadır. Çalışmada aynı zamanda, örnek olay çalışmasında kentsel ısı adası (UHI) etkisi ve karşılıklı gölgeleme ile kentsel çevreyi mikro iklimle ilgili nicelleştirerek kentsel bağlamın bina enerji tüketimi üzerindeki etkisini de dikkate almıştır. Çalışmanın sonucunda metodolojinin, belirli iklim koşulları altında belirli bir şehir için genel olarak kentsel ölçekte bina enerji kullanımını tahmin etme kabiliyetinin olduğu tespit edilmiştir.

Nouvel vd. (2015) çalışmalarında, kentsel ölçekte enerji geçişinin planlanmasında kamu otoritelerini ve mühendislik şirketlerini desteklemek için geliştirilen kentsel enerji simülasyon platformu SimStadt'ı tanıtmışlardır. SimStadt tasarımı iki özel özellikle işaretlenmiştir. Bunlardan ilki CityGML açık 3 Boyutlu şehir modeline dayanmaktadır. İkincisi ise, platformun iş akışına dayalı yapısı oldukça modüler ve genişletilebilirdir. Bu özellikler platformun, büyük coğrafi veri olanaklarından yararlanarak, potansiyel olarak sınırsız çeşitlilikte kentsel analiz yapmasına izin vermektedir. Platformun ilk sürümü, PV potansiyel analizi, enerji talebi ve CO₂ emisyonu hesaplaması ve yenileme senaryoları oluşturma ve simülasyon iş akışlarını içermektedir. Çalışmada, bu özellikler ve iş akışları detaylandırmış olup 34 belediyeye yayılmış yarım milyon nüfuslu bir vaka çalışması olan Ludwigsburg idari bölgesi üzerine bir uygulama sunulmuştur. Çalışmanın sonucunda SimStadt'ın, modellerin ve coğrafi verilerin en iyi şekilde kullanılmasını sağladığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda, genişletilebilir modüler yapısına ve sanal şehir modellerinin tam potansiyeline dayalı olarak, SimStadt platformunun mahalleler, şehirler veya tüm bölgeler ölçeğinde enerji geçişini planlamak ve koordine etmek için yeterli ve güçlü bir çözüm sağlayabileceği görülmüştür.

Davila vd. (2016) çalışmalarında, resmi CBS veri kümelerine ve özel bir bina arketip kitaplığına dayalı şehir çapında bir UBEM geliştirmek için Boston Yeniden Geliştirme

Kurumu ile iş birliği yapmıştır. 83 541 bina için enerji modelleri oluşturulup CAD modelleme ortamı Rhinoceros 3D içinde 52 kullanım/yaş arketipinden birine atanmıştır. Binalar daha sonra ABD DOE EnergyPlus simülasyon programı kullanılarak simüle edilerek aynı arketipteki binaların sonuçları ABD ulusal enerji tüketimi araştırmalarından elde edilen verilerle çapraz bir şekilde kontrol edilmiştir. Çalışma sonucunda, modelin zamansal ve mekansal olarak çözümlenmiş çıktılarının yerel planlama ve enerji politikası kararlarını büyük ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir.

Fonseca vd. (2016) çalışmalarında, mahallelerdeki ve şehir bölgelerindeki enerji sistemlerinin analizi ve optimizasyonu için bir hesaplama çerçevesi olan City Energy Analyst'i (CEA) açıklamaktadır. Çerçeve, çoklu kentsel tasarım senaryolarının enerji, karbon ve finansal faydalarının, dağıtılmış üretimin optimal şemalarıyla bağlantılı olarak analiz edilmesini sağlar. Bunun için çerçeve, bina enerji performans simülasyonu, dönüştürme ve depolama teknolojileri simülasyonu, yerel enerji potansiyellerinin değerlendirilmesi, iki seviyeli enerji sistemleri optimizasyonu ve çok kriterli analiz için zamana bağlı yöntemleri bütünleştirir.

Hong vd. (2016) çalışmalarında, ilçe veya şehir ölçeğinde verimlilik programlarını desteklemek için bir şehrin bina stokunun enerji modellemesine ve analizine odaklanan web tabanlı bir veri ve bilgi işlem platformu olan City Building Energy Saver'ı (CityBES) tanıtmaktadır. CityBES, 3 Boyutlu şehir modellerini temsil etmek ve değiştirmek için uluslararası bir açık veri standardı olan CityGML'yi kullanmaktadır. CityBES, bina enerji kullanımını simüle etmek için EnergyPlus'ı ve enerji verimli iyileştirmelerden tasarruf sağlamakta ve şehir plancıları, şehir enerji yöneticileri, bina sahipleri, kamu hizmetleri, enerji danışmanları ve araştırmacılar için bir dizi özellik sunmaktadır.

Ma ve Cheng (2016) çalışmalarında, ön işleme, özellik seçimi ve algoritma optimizasyonu dahil olmak üzere kentsel ölçekte bina EUI (Energy Use Intensity)'sini tahmin etmek için bir coğrafi bilgi sistemi entegre veri madenciliği metodolojisi çerçevesi önermiştir. Önerilen metodoloji çerçevesinin etkinliğini test etmek için New York City 'deki 3640 çok aileli konut binasının enerji kullanım yoğunluğunu tahmin

etmeye yönelik bir vaka çalışması yapılmıştır. Sonuçlar, çerçevenin önceki araştırmalara göre daha düşük tahmin hatası üretmeye yardımcı olduğunu göstermiştir.

Cerezo vd. (2017), çalışmalarında arketip tabanlı modellemenin sınırlamalarını daha iyi anlamak için, Kuveyt Şehri'ndeki bir bölgede 336 konut binasının ölçülen Enerji Kullanım Yoğunluğu (EUI) dağılımlarıyla simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak, karmaşıklığı artıran dört karakterizasyon yöntemini değerlendirmiştir. İlk iki yöntem, binaları sırasıyla bir ve dört arketip halinde organize eden tipik bir deterministik yaklaşımı takip ederken, üçüncü yöntem, kullanıcılarla ilgili parametreler için olasılıksal belirsizlik modellemesini sunmuştur. Dördüncü yöntem, arketip parametreleri için yeni bir "Bayes" kalibrasyon tekniği sunmuş olup bunu üçüncü yöntemdeki kullanıcı parametrelerine uygulamıştır. Simüle edilmiş EUI dağılımları ölçülen verilerle karşılaştırıldığında, önerilen olasılıklı Bayes kalibrasyonunun, diğer üç yönteme göre önemli ölçüde daha yakın tahminlere yol açtığı tespit edilmiştir.

Heidarinejad vd. (2017) çalışmalarında, bina dış ve termal bölgelerinin temsili için gerekli sadeleştirmelerin sistematik bir özetini kullanarak, kentsel ölçekte azaltılmış sıralı bina enerji modellerini hızla oluşturmak için gelişmiş bir çerçeve göstermektedir. Bu kentsel ölçekli azaltılmış sıralı modeller, etkili değişkenlerin dahili, harici ve sistem termal yüklere katkısına dayanır. OpenStudio Uygulama Programlama Arayüzü (API), model oluşturma sürecini otomatikleştirmek ve geliştirilen çerçeveyi göstermek için bir araç olarak hizmet eder. Çalışmanın sonuçları, geliştirilen indirgenmiş dereceli bina enerji modellerinin doğruluğunun, farklı termal bölgelerin seçimi ile sadece %10'a kadar değiştiğini göstermektedir.

Muehleisen ve Bergerson (2017) çalışmalarında, büyük bir kentsel bölge için enerji kullanımını ve sera gazı emisyonlarını tahmin etmede bir gayrimenkul/kentsel planlama simülasyon modeli olan UrbanSim'in, azaltılmış sıralı bir bina enerji modeli olan ISO modeliyle birleştirilmesinin, bina enerji kullanımını ve ilgili maliyetlerin hesaplanmasını sağladığını belirtmişlerdir. Bu doğrultuda; bina tipi, konumu, boyutu ve kullanıcıların sayısı dahil olmak üzere UrbanSim'den öngörülen gayrimenkul bilgileri UrbanSim'den çıkarılır ve azaltılmış sıralı bina enerji modeline girdi üretmek için kullanılır. Daha sonra ISO modeli, birkaç son kullanım kategorisinde aylık gaz ve

elektrik bina enerji kullanımını ve ilgili karbon ayak izlerini tahmin etmek için kullanılır.

Nageler vd. (2017) çalışmalarında, halka açık verilere dayalı olarak kentsel bölgelerdeki bina modellemesi için doğrulanmış bir metodoloji sunmaktadır. Dinamik bina modelleri IDA ICE simülasyon ortamında oluşturulmuştur. Coğrafi bilgi sisteminde veri toplama, işleme ve sonuç görselleştirme yöntemi için PostgreSQL veri tabanı kullanılmıştır. Bina simülasyon modeli, Gleisdorf (Avusturya) kasabasındaki 69 binadan elde edilen tüketim verileriyle doğrulanmıştır. Yıllık ısıtma ve sıcak su kullanım talebinin sonuçları, ortalama -%98 sapma ile ölçüm verilerine önemli oranda yaklaşıklık göstermektedir.

Alhamwi vd. (2018) çalışmalarında, kentsel enerji gereksinimlerini, yani yerel elektrik tüketimini ve yerinde yenilenebilir enerji üretimini, yalnızca açık kaynaklı veri ve modeller kullanarak modellemiştir. Burada, kentsel elektrik arz ve talebinin aşağıdan yukarıya simülasyonu için bina birimi seviyesine kadar sistematik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Metodoloji, kentsel geometrilerin ve yerleşim yerlerinin mekansal parametrelerini birleştirir ve bunları Coğrafi Bilgi Sistemlerini kullanarak gerçek dünya verilerine bağlar. Geliştirilen model, Oldenburg (Almanya) şehri için sergilenip doğrulanmıştır. Model çıktılarını ölçülen verilere karşı doğrulamak için bir regresyon analizi yapılmıştır. Buna göre, simüle edilmiş kentsel elektrik talebi ve arzının varyansının %94'üne kadarı, ölçülen veri kümelerinden tahmin edilebilir.

Ali vd. (2018) çalışmalarında, bölge ölçeğinde CBS tabanlı konut bina enerji modellemesi için hiyerarşik yaklaşıma dayalı bir metodoloji geliştirmektedir. Metodoloji Dublin'deki bölgelere uygulanmıştır. Uygun girdi parametreleriyle geliştirilen bina arketipleri, yüksek performanslı bir bilgi işlem sunucusu kullanılarak EnergyPlus simülasyon motorunda simüle edilmektedir. Tüm enerji çıktıları ve simülasyonlar, nüfus sayımı araştırma verileri kullanılarak CBS'ye eşlenmektedir. Sonuçları doğrudan bölgelerle eşleştirmek yerine, ayrıntılı analiz için küçük alanlar kavramı kullanılmıştır. Modelleme sonuçları, bölgedeki verimsiz kullanılan enerji verimli alanların belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Chen vd. (2019), çalışmalarında UBEM için kent veri kümeleri geliştirmek üzere veri ihtiyaçlarını, veri standartlarını ve veri kaynaklarını tanıtmaktadır. Çalışma sonucunda, San Francisco için çoğu şehrin UBEM'i desteklemede yeterli kamuya açık veriye sahip olduğunu tespit etmiş olup verilerin standartlaştırılmadan farklı formatlarda temsil edildiği ve veri haritalamayı kolaylaştıracak ortak anahtarların olmadığı vurgulanmıştır. Bu duruma yönelik veri eşleme sürecini basitleştirmek için veri kaynaklarında, ortak anahtarlar olarak benzersiz bina tanımlayıcılarının kullanılmasını önermişlerdir.

Papadopoulos ve Kontokosta (2019) çalışmalarında, makine öğrenimi ile şehre özgü enerji kullanımı ve bina verilerini kullanarak bir bina enerji performansı derecelendirme metodolojisi geliştirmiştir. Metodoloji New York City'deki yaklaşık 7500 konut mülküne uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda metodolojinin; tasarım, doluluk, kullanım ve sistemlerin enerji performansı üzerindeki farklı etkilerini hesaba katarak kentsel ölçekte etkili bir yöntem olduğu tespit edilmiştir.

Pasichnyi vd. (2019) çalışmalarında, bina enerji güçlendirmesinin stratejik planlamasına yönelik yeni bir veriye dayalı yaklaşım sunmaktadır. Yaklaşım, gerçek bina ısı enerjisi tüketimi, enerji performans sertifikaları ve referans veri tabanları hakkındaki verileri kullanan kentsel bina enerji modeline dayanmaktadır. Çalışmanın sonucunda önerilen yöntemin, büyük ölçekli güçlendirmeden kaynaklanan toplam enerji talebindeki değişikliğin değerlendirilmesine izin verdiği tespit edilmiştir.

Schiefelbein vd. (2019) çalışmalarında, girdi veri belirsizliğini azaltmak ve şehir bölgesi modellemesini basitleştirmek için açık kaynaklı coğrafi bilgi sistemi veri kümelerine dayalı bir kentsel enerji modelleme yaklaşımı sunmaktadır. Yaklaşım, OSM (OpenStreetMap) veri çıkarma ve zenginleştirme ile bir referans şehir bölge modelinin oluşturulduğu Almanya'daki bir kullanım durumu için gösterilmiştir. Referans şehir bölge modeli, bir alan ısıtma net enerji talebi belirsizlik analizi gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Referans model ile simüle edilen talep değerleri, ölçülen tüketim değerleri ile yeterli bir uyum göstermektedir.

Gabriel (2020), çalışmasında veriye dayalı kentsel kullanıcı varlığı modellerini geliştirmiş olup Singapur'daki bir UBEM vaka çalışmasına uygulamıştır. Çalışmada

model seçiminin, bölgesel soğutma sistemi tasarımıyla ilgili UBEM simülasyon sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Farklı şehirler için doluluk profilleri farklı olduğu için bağlam özgüllüğünün önemli olduğu gösterilmiştir. Benzer şekilde, aynı kullanım türündeki binaların doluluk profillerinde gözlenen farklılıkların UBEM tarafından tahmin edilen kentsel enerji talebini önemli ölçüde etkilediği için çeşitliliğin önemli olduğu bulunmuştur.

Kristensen vd. (2020) çalışmalarında, bölgesel ısıtma ile sağlanan binaların genel olarak uygulanabilir fizik tabanlı aşağıdan yukarı tahmin modellerini oluşturmak için yeni önerilen bir stokastik arketip bina modelleme ve kalibrasyon çerçevesinin uygulamasını ve performansını göstermişlerdir. Her biri tek aileli konutların yapı stokunun belirli bir bölümünü tanımlayan 11 fizik tabanlı arketip modeli kurmak ve kalibre etmek için Aarhus, Danimarka'daki 927 tek aileli evden saatlik tüketim verileri, halka açık bina stok verileriyle birlikte kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda modelleme çerçevesinin, doğrulama periyodu sırasında pratik olarak var olmayan bir genel ısı yükü önyargısı ile ve saatlik yük tahminlerinde yalnızca orta dereceli yanlışlıklar ile, toplu şehir çapında tahminler için çok iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Li (2020) çalışmasında, iki popüler modelleme platformunu, Urban Weather Generator (UWG) ve UBEM'i entegre edip yerel mikro iklimi göz önünde bulundurarak NYC'de Manhattan'ın bina enerji kullanımını nicelleştirmiştir. UWG, referans alınan saatlik hava durumu verilerine ve yerel fiziksel parametrelere dayalı olarak yerleştirilmiş saatlik hava durumu verileri üretebilmektedir. Çalışmanın sonucunda, en büyük bina enerji kullanımının çok sayıda ticari binadan oluşan Manhattan'ın merkezinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca benzer bir mevsimsel elektrik kullanım modelinin ve önemli ölçüde farklı mevsimsel gaz kullanım modellerinin, değişen mevsimsel soğutma ve ısıtma talebi nedeniyle Manhattan, NYC'de bulunabileceği görülmüştür. Saatlik enerji kullanım profillerinden ise yazın yalnızca elektrik kullanımında tepe noktanın gördüğü, kışın ise gaz kullanımının tepe noktası olduğu görülmüştür.

Wang vd. (2020) çalışmalarında, şehir düzeyinde CRECM (REC Calculation Model) bir REC (Residential Energy Consumption) hesaplama modeli ve Guangdong-Hong

Kong-Makao Greater Bay Area (GBA) şehirlerinin REC ve konut stokunu hesaplamak için iyileştirilmiş bir konut stok devir modeli (RSTM- Residential Stock Turnover Model) geliştirmiştir. Bu iki göstergeye dayanarak, konut enerji verimliliğini ölçmek için REC yoğunluğu ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda 11 GBA şehrinin son 16 yılda REC'de çarpıcı bir artış gördüğü ve çoğu şehrin REC yoğunluğunun düz bir seyir izlediği tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu çalışmada önerilen hem CRECM hem de RSTM'nin, ülke genelindeki diğer şehirlerin yanı sıra GBA şehirleri için bina enerji verimliliği politikaları geliştirmek için sağlam veri desteği sağlayabileceği tespit edilmiştir.

Zarrella vd. (2020) çalışmalarında, kentsel düzeyde ısıtma ve soğutma talebinin değerlendirilmesinde toplu kapasitans modelinin güvenilirliğini göstermeyi amaçlamaktadır. Vaka çalışması bölgesi EnergyPlus ile ayrıntılı tek bina simülasyonları referans alınarak Padua'daki (İtalya) 13 bina analiz edilmiştir. Alan ısıtma ve soğutma için yıllık bölgesel enerji ihtiyaçları sırasıyla -%4 ve %7 hata ile tahmin edilmiştir. Çalışmanın, modelin hem alan ısıtma hem de soğutma için bölgesel enerji talebinin değerlendirilmesinde iyi bir doğruluk sağladığını göstermektedir.

Lu vd. (2021) çalışmalarında, bir enerji-ekonomi modelinin ölçeği küçültülmüş simülasyonunu mekansal olarak açık topluluk düzeyinde kentsel bina enerji modeline entegre etmek için yeni bir metodoloji sunmuştur. Bu metodoloji, çapraz ölçekli olasılık politikası müdahalelerini yinelemeli olarak test etmeye olanak tanır. Ek olarak, bir Markov zincirinden türetilen olasılık modeli kullanılarak, bu çalışma, bir mahalledeki tek tek binaların (örneğin, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemi ve bina kabuğu) evrimini modellemiştir. Bu, bina enerjisi ve emisyonlarının azaltılması üzerindeki etkilerini anlamak için bina teknolojisi politikaları ile farklı kentsel büyüme yönetimi stratejileri arasındaki etkileşimlerin araştırılmasına olanak tanır. Vancouver için vaka çalışmasından elde edilen bulgular, bu metodolojinin basit ama etkili bir yol olduğunu, teknoloji paylarını mekânsal olmayan bir ekonomik modelden bireysel binalara indirgemenin, birleşik mekânsal kentsel büyüme yönetimi stratejileri ile enerji ve emisyon sonuçlarını değerlendirmenin bir yolu olduğunu göstermektedir.

Mohammadizazi vd. (2021) çalışmalarında, Pittsburgh, Pennsylvania'da bulunan ticari binalar kullanılarak bir yapı önerilmiştir. Kentsel Bina Enerji Modellemesi için sekiz ticari kullanım türünden oluşan yirmi arketip belirlenerek farklı kullanım türleri için ortalama yıllık enerji kullanım yoğunluğu 74 ile 1302 kWh/m² arasında tahmin edilmiştir. Gerçek verileri kullanarak sonuçları doğrulamak, genel olarak %7'lik bir hata ortaya çıkarmıştır.

Maccarini vd. (2021) çalışmalarında, kentsel enerji simülasyonları için 3B bina modellerini çalışmaya hazır Modelica modellerine otomatik olarak dönüştürmek için açık kaynaklı bir araç sunmaktadır. Yazılım Python ile yazılmıştır ve 3B oluşturma uygulaması Blender için bir eklenti olarak geliştirilmiştir. Isıtma ve soğutma talebini hesaplamak için Danimarka'da yeni bir kentsel alanın 3 boyutlu zenginleştirilmiş bir modeli geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda oluşturulan Modelica modellerinin sistemin verimliliğini ve karlılığını tahmin etmeye izin verdiği tespit edilmiştir.

Nutkiewicz vd. (2021) çalışmalarında, çeşitli bina enerji güçlendirmelerinin etkisini birden fazla uzay-zamansal ölçekte tahmin ederek bina enerji simülasyonlarından ve derin öğrenme modellerinden yararlanan önceden geliştirilmiş bir hibrit veri güdümlü kentsel enerji simülasyonu (DUE-S) modeli geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımı, ABD, California, Sacramento şehir merkezindeki yoğun bir şekilde ortak konumlu 29 binaya ilişkin bir vaka çalışması üzerinde değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, kentsel bağlamın hesaba katılmasının, çevrelerindeki elektrik kullanımını da etkilediğinden, güçlendirmelerin bireysel binalar üzerindeki etkisini %7.4'e kadar artırabileceğini göstermektedir.

Prataviera vd. (2021) çalışmalarında, şehir ölçeğinde simülasyonlar için yeni bir açık kaynaklı araç sunmaktadırlar. Platform, direnç-kapasitans ağları aracılığıyla binaların termal davranışını modellemek için elektrik analojisini uygular, böylece kentsel alanların enerji talebini aşağıdan yukarıya bir yaklaşım ve düşük hesaplama kaynakları ile tahmin eder. Çalışmanın sonucu, mevsimsel enerji talebinin değerlendirilmesinde tek bina detaylı simülasyonlara göre basitleştirilmiş modellerin uygunluğunu göstermektedir.

Abolhassani vd. (2022) çalışmalarında, özneteliklerin uzamsal birleşimini ve ayrıntılı arketip seçimini kullanarak UBEM'i zenginleştirmek için açık kaynaklı verilerden enerji ile ilgili parametreleri otomatik olarak çıkarmak, toplamak ve önceden işlemek için bir iş akışı öne sürmektedir. Kentsel bina enerji simülasyonu için kullanılmak üzere iki farklı 3B kentsel model (düşük ve yüksek çözünürlüklü) önerilmiştir. Yüksek çözünürlüklü modeli kullanan iş akışı, Kanada'da bir örnek olay incelemesi olarak şehir merkezindeki Montreal binalarına uygulanarak gösterilmiştir. Kentsel bina enerji talebi hesaplaması için arketip tarafından seçilen veriler ve diğer gerekli bilgiler, hiyerarşik bir konsept oluşturularak EnergyPlus ile beslenmektedir. Çalışma, UBEM'in farklı kaynaklardan gelen kentsel verileri kullanarak geometri ve girdi bilgileri açısından doğruluk açısından daha da geliştirilme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Guo vd. (2022) çalışmalarında, azaltılmış sıralı bina modellemesine ve deneyime dayalı arketiplere ilişkin bazı iyileştirmeler ve optimizasyonlar yapmakta ve aşağıdan-yukarıya ve yukarıdan-aşağıya yöntemlerini birleştiren iki aşamalı yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Makul bir simülasyon süresi ile tatmin edici simülasyon sonuçları üretmek için düşük seviyeli bir veri kümesine ve özel yapım bir arketip kitaplığına dayanan bir CBS entegre çerçevesi önerilmiştir. Bu iş akışı otomasyon araçlarını göstermek için örnek bir test vakası olarak, Almanya'nın bir banliyö bölgesinde bir vaka çalışması seçilmiştir. Bu vaka çalışmasında, iş akışının her adımı (veri toplama, model oluşturma ve sonuç analizi) ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Bu vaka çalışmasının sonuçları olarak, banliyö araştırma bölgesindeki binaların saatlik enerji talep profilleri oluşturulmuş ve bir sonraki iş paketinde talep tarafı yönetimi (DSM) oluşturulması sağlanmıştır. Ayrıca, paydaşların sürdürülebilir enerji politikası kararlarını iyileştirmelerine yardımcı olmak için araştırma alanı için bir enerji güçlendirme tahmini ve ısı haritası oluşturulmuştur. Sonuçlar, belirli girdi verilerinin olmamasına rağmen, sunulan iş akışının azaltılmış hesaplama süresi ile doğru sonuçlar elde edebildiğini göstermektedir.

Katal vd. (2022) çalışmalarında, halka açık veri kümelerini (OpenStreetMap ve Microsoft ayak izleri) ve ücretsiz bir programı (Google Earth) entegre ederek 3B şehir üretimi için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Bu veri kümeleri 2B bina ayak izleri sağlarken, Google Earth arazilerin ve binaların dijital yüzey modellerini sağlar.

Geometrik olmayan özelliklerin bina arketip kütüphanesi, QGIS aracılığıyla 3B şehir verileriyle birleştirilen şekil dosyaları biçiminde bina türleri ve yılların inşaatları temel alınarak oluşturulmuştur. Çalışma, kamuya açık veri setleri ve araçlarıyla dinamik kentsel bina enerjisinin modellenmesine bir çözüm sunmaktadır.

Oraipoulos ve Howard (2022), çalışmalarında bir modelin doğruluğunu etkileyebilecek temel niteliklere dayalı tekil bir sınıflandırma kullanarak ölçülen verilere karşı doğrulanmış kentsel bina enerji modellerinin sistematik bir analizini sunmuştur. Bunlar; uygulama, ölçek, girdi verileri, hesaplama yöntemi, kalibrasyon ve doğrulama yöntemleridir. Analiz, kentsel bina enerji modellerinin doğruluğunun çok boyutlu olduğunu, çeşitli zamansal çözünürlüklerde, mekansal çözünürlüklerde ve hata ölçülerinde dikkate alındığını ve sonuçlar onu yöneten tek bir anahtar özelliğın olmadığını göstermiştir. Kalibre edilmemiş fizik tabanlı hesaplama yöntemlerini kullanan modellerin aşırı büyük hatalar bildirme olasılığının daha yüksekken, Bayes kalibrasyonu kullananların, saatlik zamansal çözünürlükte tutarlı bir şekilde daha düşük hatalar rapor ettiğı ve kalibrasyonun ve özellikle Bayes yaklaşımının modeller üzerindeki kesinlik açısından olumlu etki gösterdiğı tespit edilmiştir.

Perwez vd. (2022) çalışmalarında, birden fazla bina yönelimli unsurun aynı anda ele alınmasını kolaylaştırmak için mekansal ve sentetik modelleme yaklaşımlarını entegre ederek yeni bir hibrit model sunmaktadır. Model, CBS'nin enerji modellemesi için çok ölçekli ve uzun vadeli çerçeveyi göstermek için Japon bina stoku üzerinde daha fazla uygulanmaktadır. Çalışmanın sonucunda modelin, CBS için uzun vadeli enerji verimliliğı izleme stratejileri geliştirmek için mekansal zeka bina stoğı yaklaşımını kullanan çok katmanlı bir çerçeve sağladığı tespit edilmiştir.

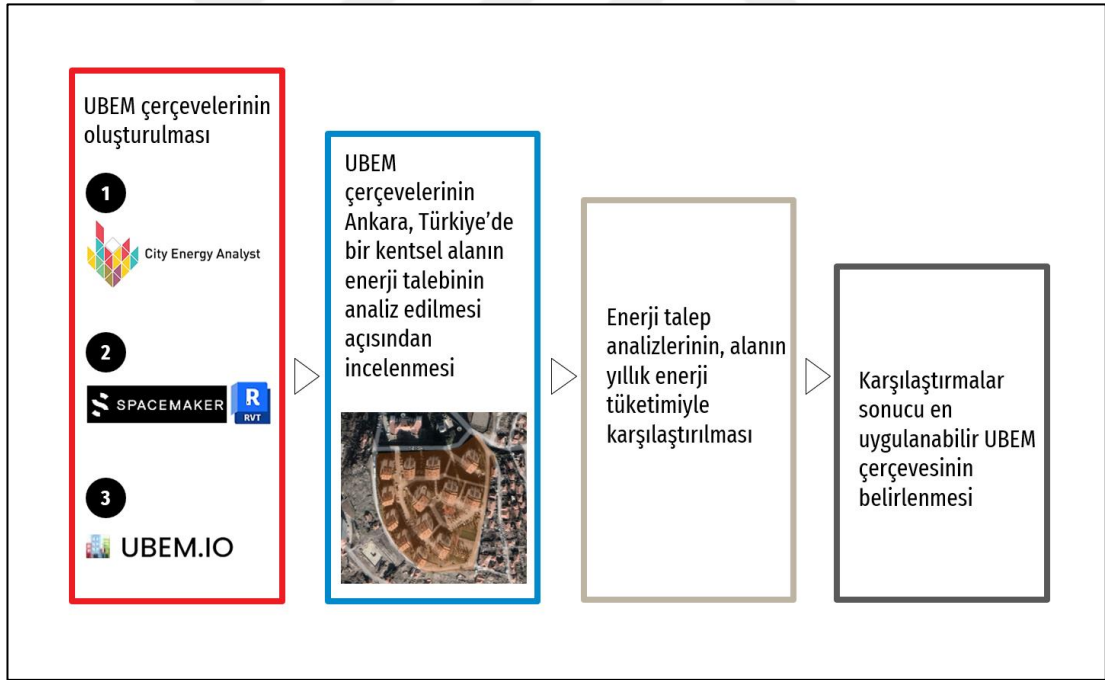
Yukarıda belirtilen UBEM alanında yapılmış çeşitli çalışmaların incelenmesi doğrultusunda bu alandaki çalışmalar genellikle, aşağıdan-yukarıya UBEM yaklaşımları ve bunun alt alanları olan fizik tabanlı dinamik simülasyon metodu, reduced-order metodu ve veriye dayalı metod üzerinedir. Buna ek olarak belirtilen metodlar özelinde, gereksinim duyulan verilerin temini ve standardizasyonu, model doğruluğı gibi sorunlara yönelik çözümler üretmek üzere yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Bununla birlikte, yapılan çalışmalar ve oluşturulan UBEM'lerin belirli alanlar için geçerliliğı bulunmaktadır. Bunun dışında kalan alanlarda ise bina stok

sistemi ve veri setlerinin eksikliği, ekstra algoritma oluşturma gereksinimi, gerçek enerji tüketim verilerinin elde edilmesinde zorluk yaşama vb.leri gibi sorunlar mevcuttur. Bu sorunları yaşayan alanlarda, uygulanabilir ve geçerliliği olan bir model çerçevesi henüz yapılmamıştır. Bu çalışma, bu durumları yaşayan kentsel alanlar için de uygulanabilirliği bulunan, geçerliliği olan bir UBEM çerçevesinin oluşturulabilmesi ve model üzerinden kentsel alanların enerji talebinin analiz edilebilmesiyle literatüre katkı sağlamaktadır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

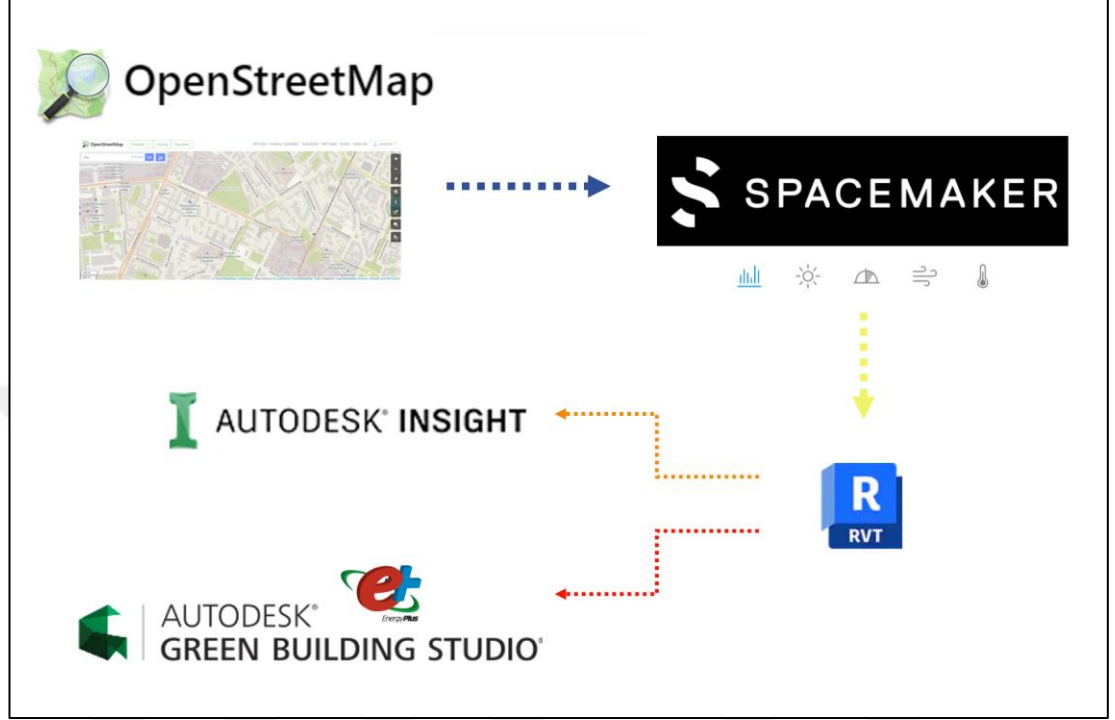
Bu çalışmada, kentsel alanları modellemek ve kentsel ölçekte enerji talebini tahmin etmek üzere uygulanabilir ve pratik bir model çerçevesi oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çeşitli UBEM yaklaşımları ve araçları incelenmiştir. İncelenmek üzere; bina stok sistemi ve veri setlerinin eksikliği, ekstra algoritma oluşturma gereksinimi, gerçek enerji tüketim verilerinin elde edilmesinde zorluk yaşama vb.leri gibi durumları yaşayan ülkelerdeki kentsel alanlar için uygulanabilirliği daha yüksek olan UBEM araçları tespit edilip seçilmiştir. Belirtilen alanlar için uygulanabilir bir UBEM çerçevesinin oluşturulması amaçlanmıştır. İncelenen araçlar: City Energy Analyst (CEA), Spacemaker-Revit, UBEM.IO'dur. Bu araçlarla oluşturulan UBEM çerçeveleri, Türkiye'de bir kentsel alanın enerji talebinin analiz edilmesi açısından incelenmiştir. Çalışmanın akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



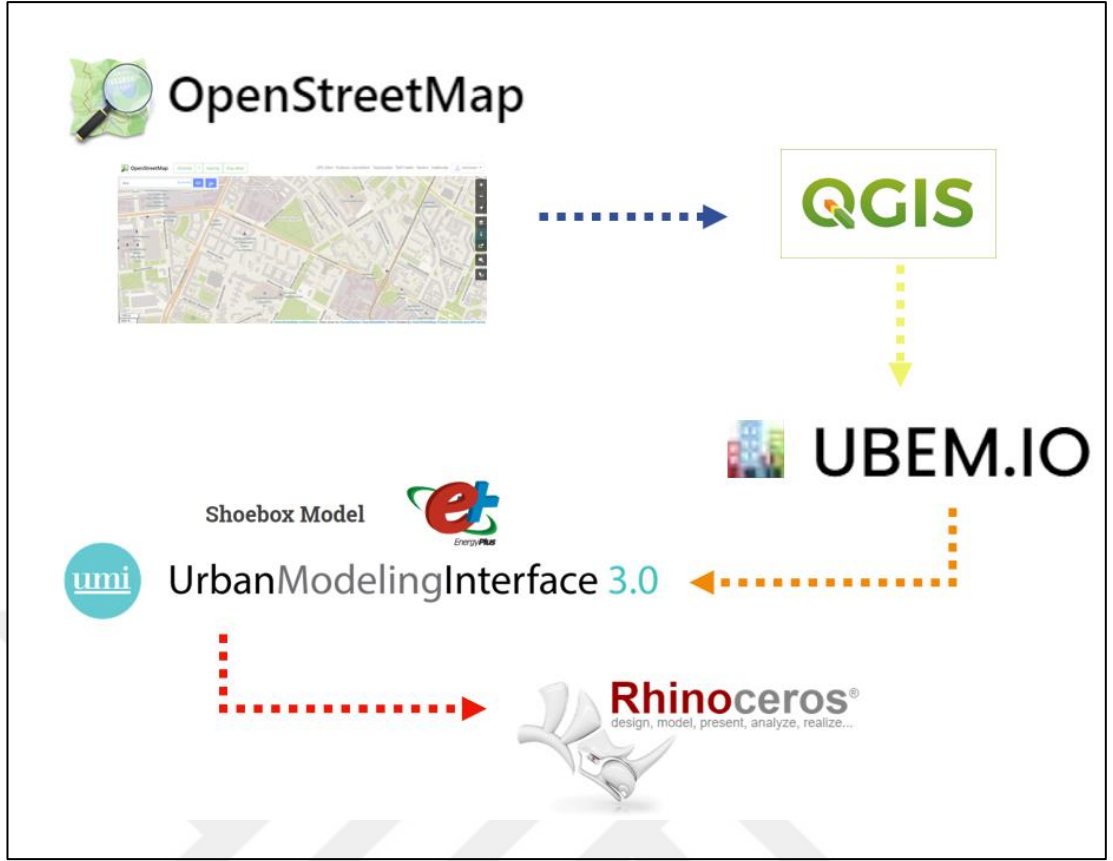
Şekil 3.1. Çalışmanın akış şeması

Çalışmada incelenmek üzere seçilen CEA başlı başına, belirlenen kentsel uygulama alanı için enerji talep analizini kendi bünyesinde sağlayabilen bir programdır. Bunun dışında kalan incelenmek üzere seçilen diğer iki araç için enerji analizi yardımcı araçlarla birlikte gerçekleştirilebilmektedir. Spacemaker-Revit, UBEM.IO ve yardımcı araçlarından oluşturulan UBEM çerçevelerinin akış şemaları sırasıyla Şekil

3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir. İncelenmek üzere seçilen üç UBEM aracı da Ankara'da bir kentsel alan için enerji modelinin oluşturulmasında sırasıyla incelenmiş ve belirlenen uygulama alanı için enerji talebinin analiz edilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Spacemaker-Revit UBEM akış şeması



Şekil 3.3. UBEM.IO akış şeması

Belirlenen UBEM çerçevelerinin oluşturulması için, Ankara'nın Mamak ilçesinde konumlu 13 bloktan oluşan bir TOKİ sitesi uygulama alanı olarak seçilmiş olup enerji analizleri bu alan için gerçekleştirilmiştir. Uygulama alanına ait uydu konumu ve alandaki konutlar sırasıyla Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Uydu konumu (Google Earth, 2023)



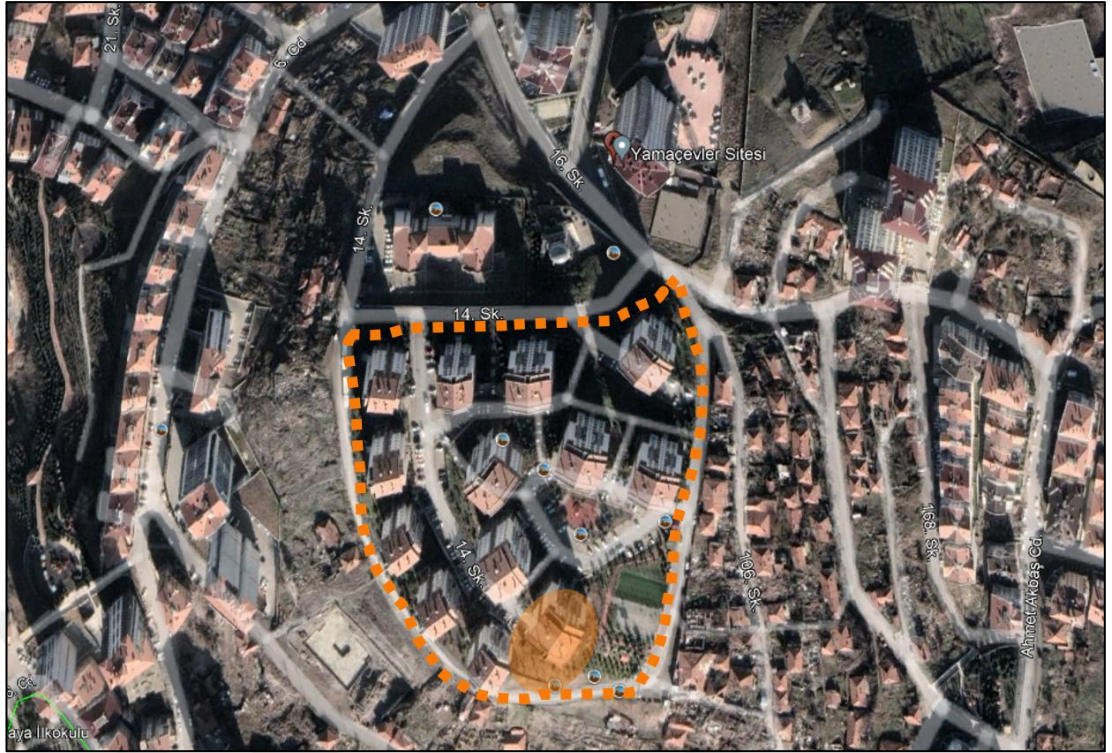
Şekil 3.5. Uygulama alanındaki konutlar



Şekil 3.6. Uygulama alanındaki konutlar

Seçilen alanda yer alan bloklardan 4 tanesi 8 katlı, 9 tanesi ise 10 katlıdır. Uygulama alanı için oluşturulan UBEM çerçeveleri dahilinde yapılan enerji talep analizleri, alanın yıllık enerji tüketim verisiyle (yakıt, elektrik) karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda yukarıda belirtilen durumları yaşayan ülkeler için oluşturulan UBEM çerçevelerinin kullanılabilirliğinin incelenmesi yapılmıştır.

Belirlenen uygulama alanındaki yakıt tüketim verilerinin belirlenmesi açısından, sitedeki bir blok için tüketim verileri temin edilebilmiştir. Bu bloğun site içindeki konumu Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Bloğun kat sayısı 10 olup toplam daire sayısı 43 adettir. Isıtılan alanların toplamı ise 5160 m²’dir. Çizelge 3.1’de verileri temin edilen bloğun 6 aylık ısıtma dönemi için yakıt tüketim verileri gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Bloğun site içindeki konumu

Çizelge 3.1. Bloğun ısıtma dönemi yakıt tüketimi

Ay	Yakıt tüketimi (m ³)	Yakıt tüketimi (kWh)
Ekim-2022	3 538	34 455.813
Kasım-2022	4 713	47 059.372
Aralık-2022	5 645	57 602.544
Ocak-2023	7 988	82 819.075
Şubat-2023	8 715	90 549.623
Mart-2023	5 153	52 223.372
Toplam	35 752	364 709.799

Çizelge 3.1'e göre bloğun yıllık yakıt tüketimi 364 709.799 kWh'dır (35 752 m³). Isıtma dönemi için yakıt tüketimin en yoğun olduğu ay 90 549.623 kWh tüketim miktarı ile Şubat ayı olmakla birlikte, yakıt tüketiminin en düşük olduğu ay 34 455.813 kWh ile Ekim ayıdır. Çizelge 3.2'de ise belirtilen bloğun 6 aylık ısıtma dönemi için metrekare başına düşen yakıt tüketim verileri gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Bloğun metrekare başına düşen ısıtma dönemi yakıt tüketimi

Ay	Yakıt tüketimi (kWh/m ²)
Ekim-2022	6.68
Kasım-2022	9.12
Aralık-2022	11.60
Ocak-2023	16.05
Şubat-2023	17.55
Mart-2023	10.12
Toplam	71.12

Çizelge 3.2'ye göre bloğun yıllık metrekare başına düşen yakıt tüketimi 71.12 kWh/m²'dir. Bununla birlikte uygulama alanının enerji tüketimine dair temin edilen verilerin, veri gizliliği gibi çeşitli sebeplerle sınırlı olması ve genel tüketim eğiliminden doğan farklılıklar (gelir durumuna göre enerji tüketim eğiliminde ortaya çıkabilecek farklılıklar) gibi sebeplerle uygulama alanının enerji tüketim eğilimini tam olarak yansıtamadığı düşünülmektedir. Bu nedenle uygulama alanının yakıt tüketiminin temsil edilmesinde esas alınmak üzere, Başkent Doğalgaz Dağıtım GYO A.Ş. (2023)'den Ankara'da ortalama bir konutun yıllık yakıt tüketimine dair beyan alınmıştır. Bu beyana göre ortalama bir konut kış döneminde günlük 10 m³ doğalgaz, yaz döneminde ise aylık 30 m³ doğalgaz tüketmektedir. Bu da yıllık metrekare başına 210.67 kWh/m²'ye karşılık gelmektedir.

Belirlenen uygulama alanındaki elektrik tüketim verilerinin belirlenmesi açısından, sitedeki bir daire için tüketim verileri temin edilebilmiştir. Bu dairenin konumlu olduğu bloğun site içindeki konumu Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Bloğun kat sayısı 10 olup toplam daire sayısı 43 adettir. Belirtilen dairenin alanı ise 120 m²'dir. Çizelge 3.3'te verileri temin edilen dairenin 12 aylık elektrik tüketim verileri gösterilmektedir.

ortalama elektrik tüketimi verisine yakın olması nedeniyle, gerçek elektrik tüketim eğilimini yansıttığı görülmüştür. Bu nedenle uygulama alanının yıllık elektrik tüketim verisi için, uygulama alanındaki belirtilen dairenin yıllık elektrik tüketim verisi esas alınmıştır. Çizelge 3.4'te ise uygulama alanındaki belirtilen dairenin metrekare başına düşen 12 aylık elektrik tüketim verileri gösterilmektedir.

Çizelge 3.4. Dairenin metrekare başına düşen yıllık elektrik tüketimi

Ay	Elektrik tüketimi (kWh/m ²)
Nisan-2022	2.50
Mayıs-2022	1.81
Haziran-2022	1.82
Temmuz-2022	2.02
Ağustos-2022	1.52
Eylül-2022	1.68
Ekim-2022	1.67
Kasım-2022	1.66
Aralık-2022	1.36
Ocak-2023	1.58
Şubat-2023	2.49
Mart-2023	2.01
Toplam	22.11

Çizelge 3.4'e göre dairenin yıllık metrekare başına elektrik tüketimi, 22.11 kWh/m²dir. Çizelge 3.5'te uygulama alanının metrekare başına yıllık enerji tüketim verileri gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Uygulama alanının metrekare başına yıllık enerji tüketim verileri

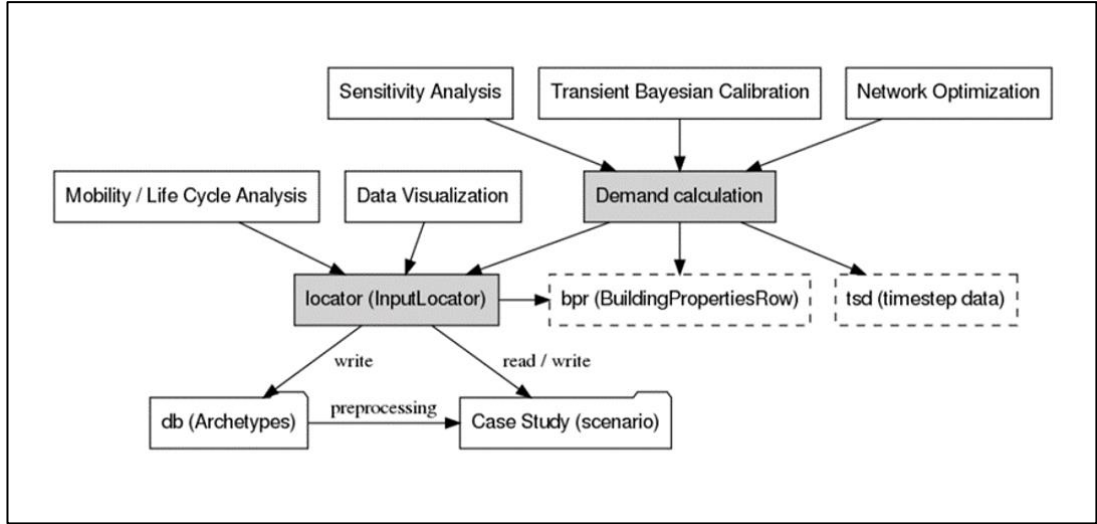
	kWh/m ² .yıl
Yakıt tüketimi	210.67
Elektrik tüketimi	22.11
Enerji Kullanım Yoğunluğu	232.78

Enerji Kullanım Yoğunluğu (EUI-Energy Use Intensity) belirli bir yapının yıllık metrekare başına düşen elektrik ve yakıt tüketimlerinin toplamını ifade etmektedir. Belirtilen durumlar ve kabuller neticesinde, Çizelge 3.5'e göre uygulama alanının yıllık metrekare başına düşen enerji tüketimi yani enerji kullanım yoğunluğu 232.78 kWh/m²dir.

3.1. City Energy Analyst (CEA)

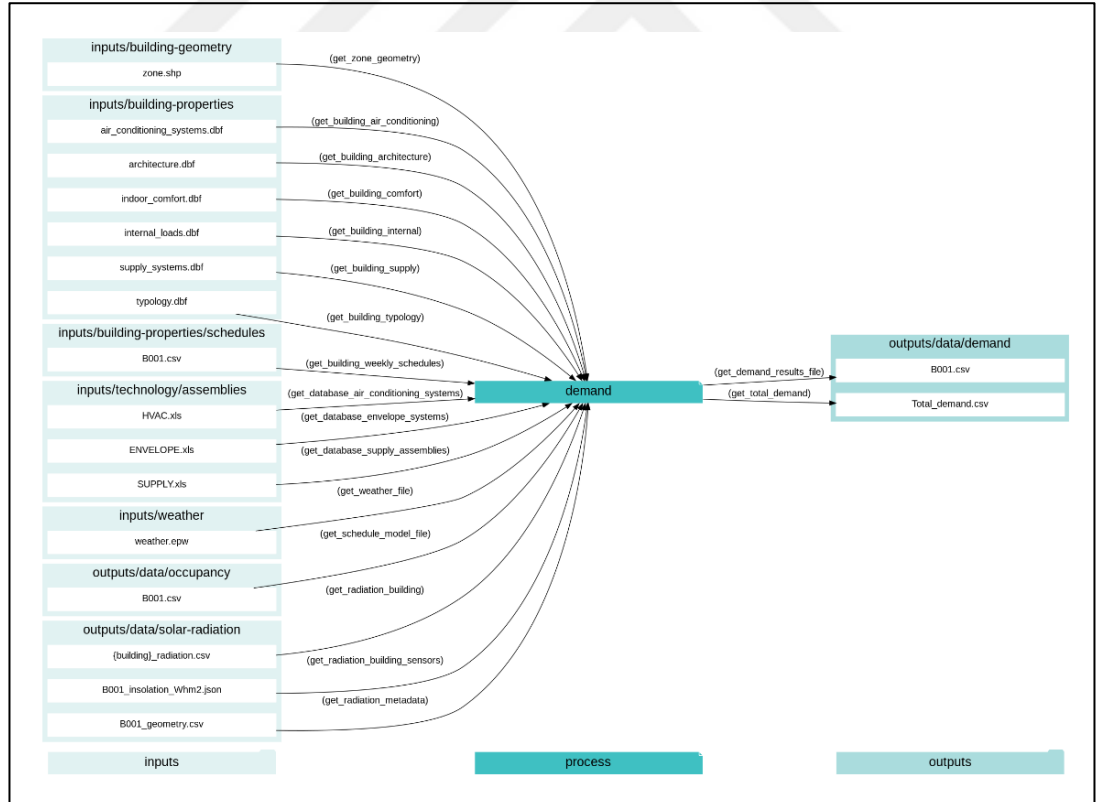
CEA (City Energy Analyst) binalar, kullanıcılar ve çevre arasındaki saatlik enerji akışlarının hesaplanması için simülasyon motoru içeren bir yazılımdır. Mahallelerde ve kent ölçeklerinde enerji sistemlerini analiz etmek ve optimize etmek için bir hesaplama çerçevesine sahiptir. Bu hesaplama çerçevesi, kentsel enerji sistemlerinin analizi için bir dizi araçtan oluşur. Bu araçlar, standart dinamik simülasyon modelleri ve disiplinlerarası bir bilgi birikimi üzerine inşa edilmiştir. CEA, bağımsız bir açık kaynak aracı olarak veya farklı kullanıcılar için ArcGIS’de kullanımı mümkün kılan bir eklenti olarak sağlanır (Hong vd., 2020; The CEA team, 2022).

CEA'nın özünde talep hesaplaması yer almaktadır. Talep Tahmini aracı EN 15241:2007 ve EN 15316:2007 Avrupa standartlarına göre binaların ısıtma ve soğutma sistemlerindeki sistem kayıplarına ilişkin hesaplamalar yapar. Isıtma, soğutma, evsel sıcak su ve elektrik için kullanım programları, İsviçre standardı SIA 2024 ve ASHRAE 90.1'e dayanmaktadır. Talep hesaplaması, senaryo klasöründen girdileri alır ve çıktıları senaryo klasörüne geri depolar. Belirli parametrelerin ilk tahmini olarak bir senaryoya arketip verileri eklemek için bir ön işleme adımı kullanılabilir. Talep hesaplaması, her bina için termal yüklerin hesaplanması sırasında zaman adımı verileri hakkında bilgi depolamak için “tsd” adı verilen özel bir değişken kullanır. Kullanılan veri yapısı, NumPy dizilerinin basit bir python sözlüğüdür. Bu dizilerin her biri, yılın toplam saat sayısına göre 8760 uzunluğa sahiptir. “tsd” sözlüğünün anahtarları, simülasyonun durum değişkenlerinin adlarıdır. Talep hesaplaması, tek bir binanın bina özelliklerini depolamak için “bpr” değişkenini de kullanır. CEA'nın mimarisi hala biraz değişim halindedir, gün geçtikçe güncellenmektedir. Ancak bazı ana bileşenler halihazırda geliştirilmiştir (The CEA team, 2022). Şekil 3.9’da, CEA'ya ait ana bileşenlerin genel bir görünümü gösterilmiştir.

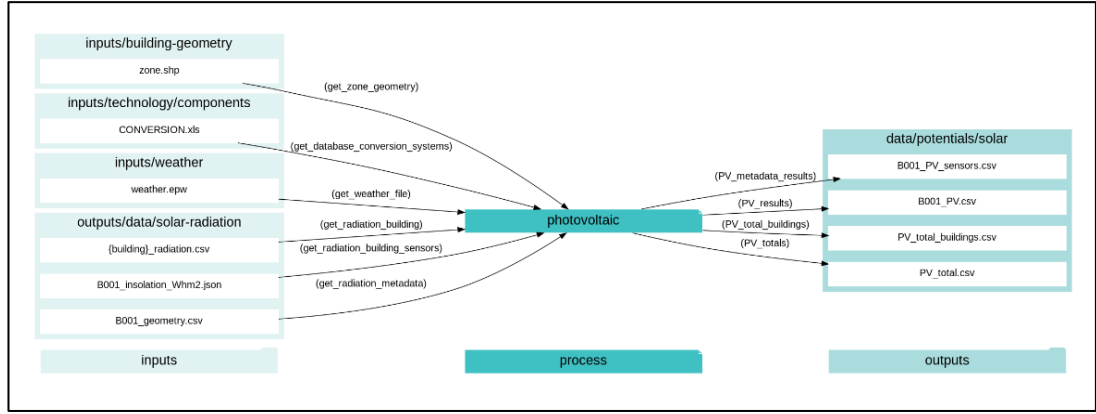


Şekil 3.9. CEA'nın ana bileşenlerinin genel görünümü (The CEA team, 2022)

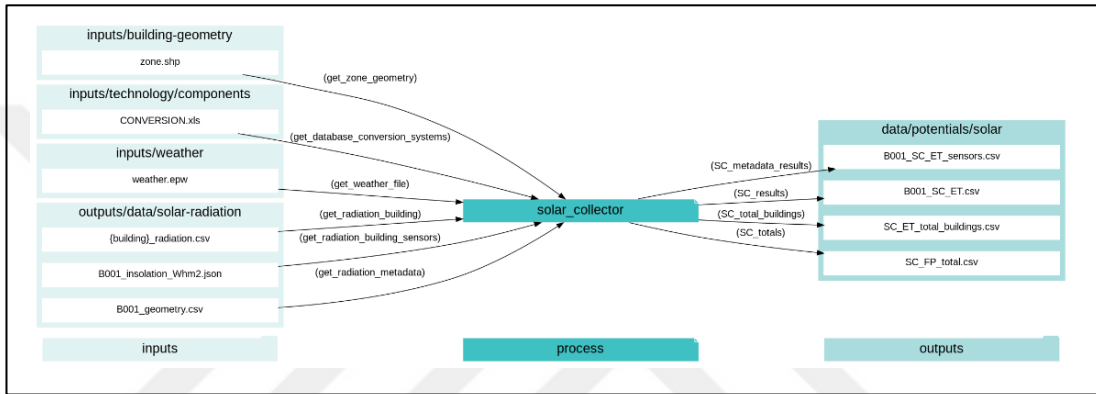
Sırasıyla Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de enerji talebi, fotovoltaik, güneş kolektörü ve fotovoltaik termal için kullanılan girdi ve oluşturulan çıktılar için komut dosyası veri akışları gösterilmiştir.



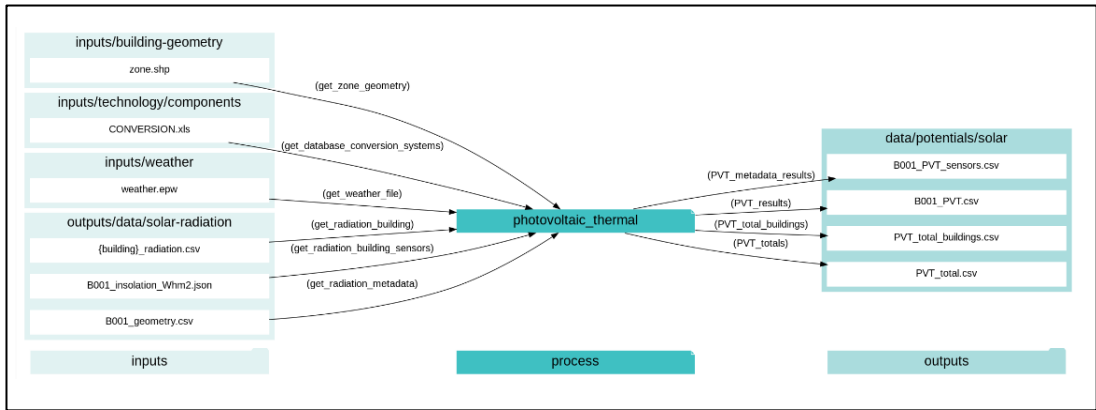
Şekil 3.10. Komut dosyası veri akışı-Enerji talebi (The CEA team, 2022)



Şekil 3.11. Komut dosyası veri akışı-Fotovoltaik (The CEA team, 2022)



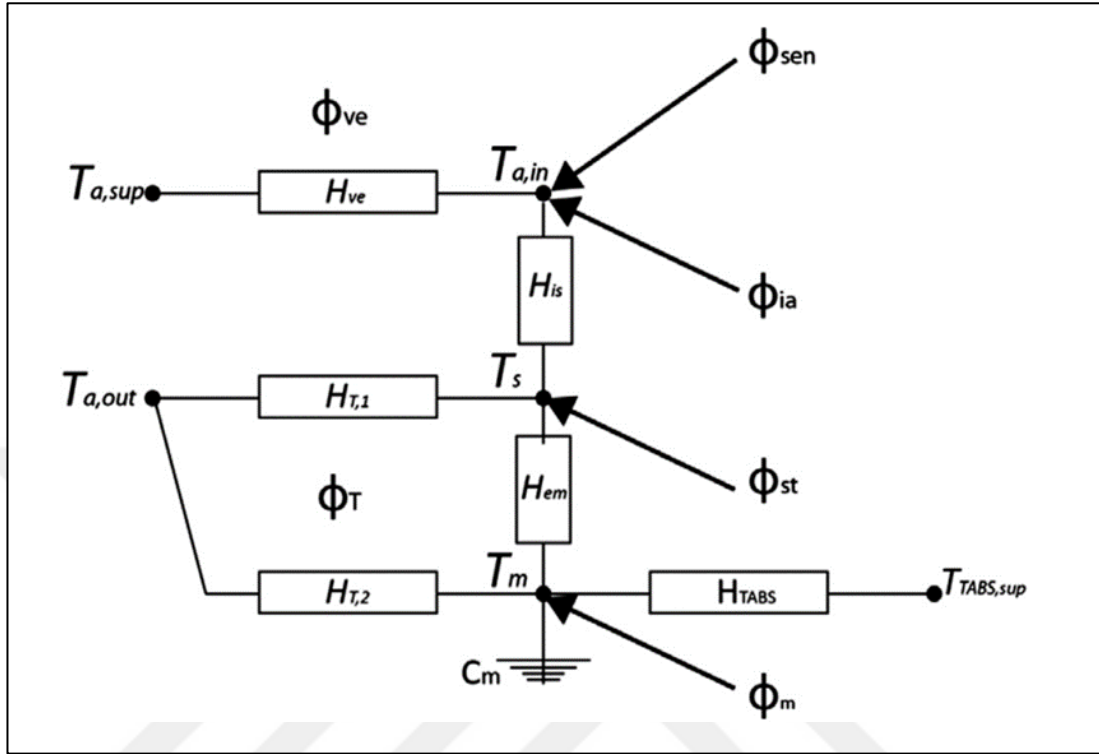
Şekil 3.12. Komut dosyası veri akışı-Güneş kolektörü (The CEA team, 2022)



Şekil 3.13. Komut dosyası veri akışı-Fotovoltaik termal (The CEA team, 2022)

Bu yazılımdaki dinamik talep tahmini özelliği, kullanıcıların bir kentsel bölgedeki her bina için saatlik ve yıllık enerji talebini (örn. ısıtma, soğutma ve elektrik) değerlendirmesine olanak tanır. CEA araç kutusu içerisinde, bu özellik aynı zamanda daha fazla analiz yapmak için bir ön koşul olarak hizmet eder (örn. LCA-Life Cycle Assessment, retrofit analizi). Daha geniş bir kapsamda bu özellik binaların enerji tüketimini kıyaslamak, iyileştirme stratejilerini incelemek ve kentsel bir ortamda

alışverişini ele alır (The CEA team, 2022). Şekil 3.15'te CEA direnç-kapasitans modeli gösterilmektedir.

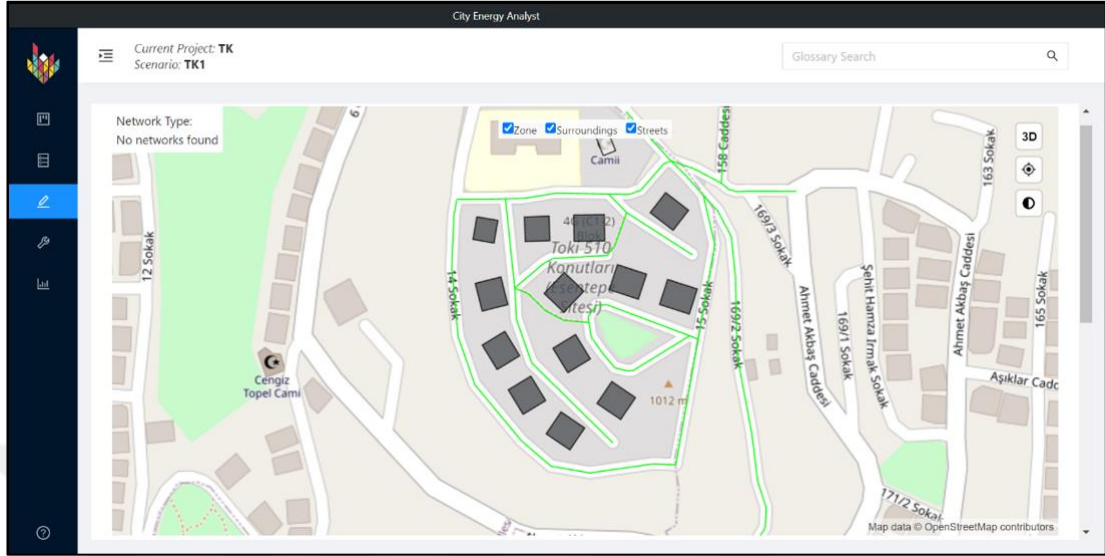


Şekil 3.15. Direnç-Kapasitans modeli (The CEA team, 2022)

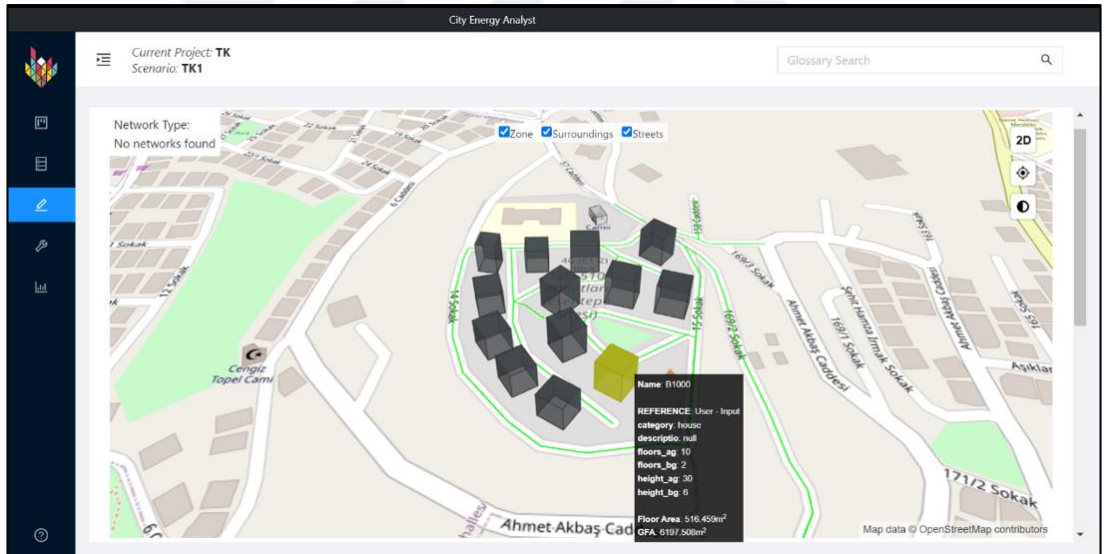
Şekil 3.15'teki termal model ağının üç düğümü ise, sırasıyla $T_{a,in}$, T_s ve T_m şunları temsil eder: iç hava sıcaklığı, iç hava sıcaklığı ile ortalama radyant sıcaklık arasındaki bir "karışım" ve eşdeğer bina termal kütle sıcaklığı. Dahili ısı kazançlarından ve güneş enerjisi kaynaklarından gelen ısı akışları, üç düğüm arasında bölünür ve Φ_{ia} , Φ_{st} ve Φ_m ısı akışları ile temsil edilir. Bu dağılım, iç ısı kapasitesi C_m 'ye göre binanın termal kütlesi tarafından emilen veya salınan enerji miktarını açıklar. $H_{T,1}$ ve $H_{T,2}$ terimleri, sırasıyla T_s ve T_m düğümlerindeki geçirgenliğe bağlı olarak eşdeğer ısı transfer katsayısıdır. H_{TABS} ve $T_{TABS,sup}$ terimleri, ısıyla aktive olan yüzeylerde ısı transfer katsayısını ve besleme sıcaklığını temsil eder. Bu bağlamda TABS, yerden ısıtma veya tavan soğutma sistemleri (mevcut olduğunda) gibi levhaya gömülü HVAC sistemlerini ifade eder (The CEA team, 2022).

CEA'da UBEM geometrisi hazırlanmak üzere Ankara ili için belirlenen kentsel alanda öncelikle konum bilgileri, hava durumu dosyasının yüklenmesi vb. temel bilgiler için veri girişleri yapılmıştır. Temel veri girişleri tamamlandıktan sonra programın

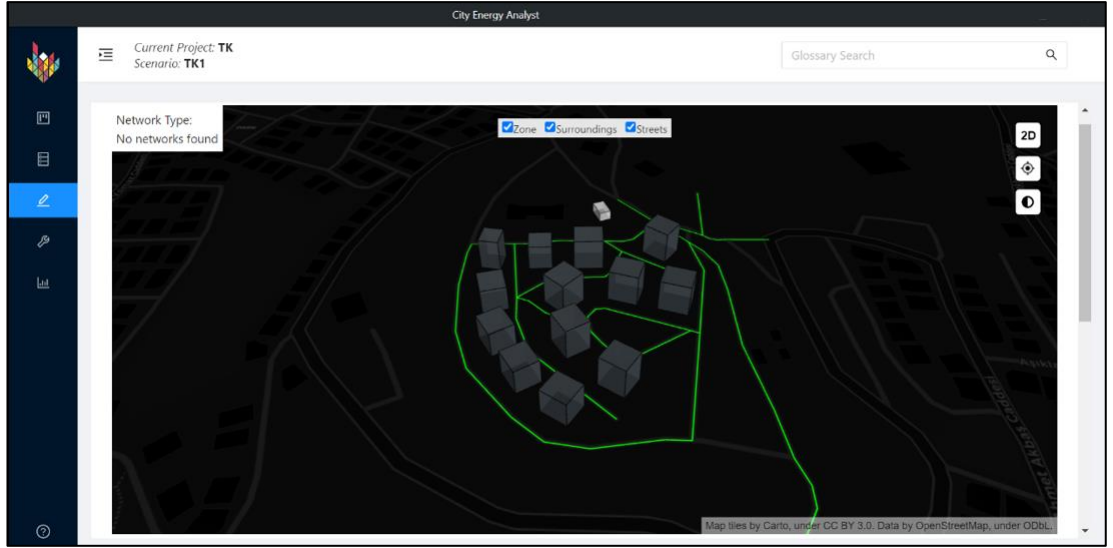
uygulama alanı için oluşturduğu 2B görseli Şekil 3.16’da, 3B görselleri ise Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Uygulama alanının CEA’deki 2B görüntüsü



Şekil 3.17. Uygulama alanının CEA’deki 3B görüntüsü



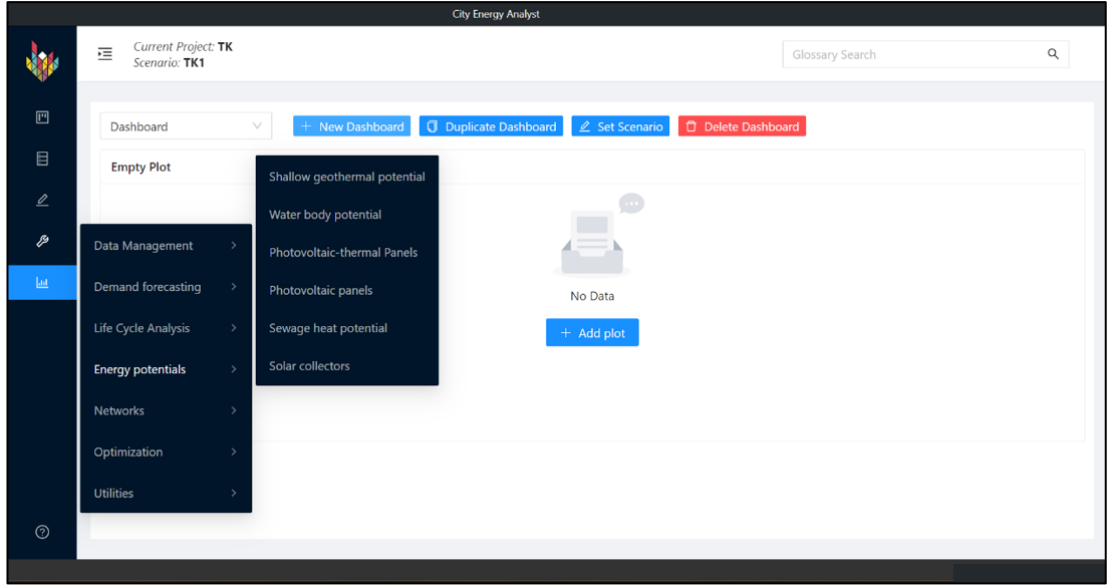
Şekil 3.18. Uygulama alanının CEA'daki 3B görüntüsü

Temel veri girişleriyle birlikte UBEM geometrisinin hazırlanmasının ardından bina alanı, tipolojisi, mimarisi, kullanım tipi gibi bir çok veri girişi program aracılığıyla yapılmıştır. Bu verilerin bir kısmını içeren bir görsel Şekil 3.19'da gösterilmektedir.

Name	YEAR	STANDARD	1ST_USE	1ST_USE_R	2ND_USE	2ND_USE_R	3RD_USE
B1000	2008	STANDARD7	MULTI_RES	1	NONE	0	NONE
B1001	2008	STANDARD7	MULTI_RES	1	NONE	0	NONE
B1002	2008	STANDARD7	MULTI_RES	1	NONE	0	NONE
B1003	2008	STANDARD7	MULTI_RES	1	NONE	0	NONE
B1004	2008	STANDARD7	MULTI_RES	1	NONE	0	NONE
B1005	2008	STANDARD7	MULTI_RES	1	NONE	0	NONE
B1006	2008	STANDARD7	MULTI_RES	1	NONE	0	NONE
B1007	2008	STANDARD7	MULTI_RES	1	NONE	0	NONE

Şekil 3.19. CEA veri giriş arayüzü

Gerekli tüm veri girişleri tamamlandıktan sonra programın oluşturduğu kentsel bina enerji modeli üzerinden enerji talep analizi yapılmıştır. CEA Dashboard aracılığıyla, enerji talep analizinin çıktıları alınabilmekte ve program aracılığıyla yapılabilen diğer analizler görselleştirilebilmektedir. Şekil 3.20'de CEA Dashboard gösterilmektedir.



Şekil 3.20. CEA Dashboard

3.2. Spacemaker-Revit

Spacemaker, kentsel alanların analiz edilmelerini ve tasarlanmalarını sağlayan bulut tabanlı bir yapay zeka yazılımıdır. Otomatik veri kümelerini kullanarak kentsel alanın ve çevresinin 3B toplu modellerini oluşturup gün ışığı, güneş, rüzgar ve mikro iklim gibi kriterler için analizlerini sağlar (Loftus ve Bassøe-Eriksen, 2022).

Spacemaker platformu alan metrikleri, gün ışığı potansiyeli, güneş analizi, rüzgar analizi (yön ve konfor analizleri) ve mikro iklim analizi olmak üzere seçili kentsel alan için analiz yapmaya olanak sağlayan beş ana modüle sahiptir.

Gün ışığı potansiyeli analizi, yapı kalitesini artırmak için düzeltilmek istenebilecek uygun olmayan ışık seviyelerine sahip cephe alanlarını vurgulayarak, binaların gün ışığı performansı hakkında etkili bilgiler sağlar. Analiz sonuçları, değerlendirme için bir derecelendirme kriteri olan VSC (Vertical Sky Component-Dikey Gökyüzü Bileşeni) puanı sağlar. VSC eşikleri ve bunların ifade ettikleri durumlar Çizelge 3.6'da belirtilmektedir. VSC analizi, binanın dış cephelerindeki aydınlatmayı değerlendirir ve yalnızca cephelere gökyüzünden gelen doğrudan ışığı ölçmektedir (Spacemaker, 2020).

Çizelge 3.6. Gün ışığı potansiyeli (Spacemaker, 2020)

VSC varsayılan eşikleri	Gün ışığı koşulları
$VSC \geq \%27$	Geleneksel pencere tasarımı genellikle tatmin edicidir
$\% 15 < VSC < \%27$	Genellikle daha büyük pencerelere/düzendeki değişikliklere ihtiyaç duyulur
$\% 5 < VSC < \%15$	Yeterli gün ışığı sağlamak zordur
$VSC < \%5$	Makul gün ışığına ulaşmak genellikle imkansızdır

Spacemaker'daki güneş analizi, bir projedeki zemini ve binaları kapsayan noktalar için belirli bir tarihte güneş ışığında geçen süreyi ölçer. Güneş analizi, ışın izleme teknolojisini kullanır. Bir yapının ortalama güneşlenme saati, yapının cephesi içerisine düşen ölçüm noktalarının ortalama güneşlenme saati hesaplanarak belirlenir. Kentsel ortamlarda, mikro iklim ve kişisel konfor, rüzgar koşullarından büyük ölçüde etkilenirler. Şehirlerdeki bina hacimlerinin üç boyutlu yapısı ve düzeni sayesinde, yüksek rüzgar hızları ve türbülanslı rüzgar alanlarını deneyimlemek mümkündür. Spacemaker'daki ayrıntılı rüzgar analizi, proje için rüzgar koşullarının nasıl olacağına dair detaylı sonuçlar verebilmektedir. Analiz çıktısı, dokümantasyonda ve farklı tasarım seçimlerinin, farklı rüzgar yönleri ve rüzgar hızları için kentsel alanın rüzgar koşullarını nasıl etkilediğini anlamak için kullanılabilir. Rüzgarın neden olduğu çeşitli etkiler için projenin erken aşamada değerlendirilmesi için de güçlü bir araç teşkil etmektedir. Bu analiz, açık kaynaklı hesaplama aracı OpenFOAM aracılığıyla 3 boyutlu CFD (Computational Fluid Dynamics) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Rüzgar analizi, rüzgar tünellerini, girdapları ve binaların ve arazinin neden olduğu aşağı akıntıyı bulmak için gelişmiş akışkanlar mekaniğini kullanmaktadır. Konfor analizi ise sokakların insanlar için ne kadar rahat olduğunu değerlendirmek amacıyla bu sonuçları kullanır. Konfor ölçeklerinin çoğu mekanik etkilere dayalıdır. Yaya konforu analizi, zaman içinde rahatsız edici rüzgar hızlarına sahip alanların nerede olacağını tahmin etmek için rüzgar akış modellerini rüzgar gülünde tanımlanan olasılıklarla birleştirir. Olası yaya rahatsızlıklarını azaltmak için bazı tasarım değişiklikleri ya da önlemler alınmasında yol göstericidir. Kullanılan konfor ölçeği, varsayılan olarak Lawson LDDC ölçeğidir. Bununla birlikte rahatsızlığa neden olan rüzgarların tek bir tanımı yoktur. Birkaç konfor ölçeği bulunmaktadır (Çizelge 3.7). Spacemaker'da ise birçok farklı konfor ölçeği birleştirilmiştir. Aşağıdaki

tablo, ortalama rüzgar hızı ve meydana gelme olasılığının bir fonksiyonu olarak her faaliyet kategorisinin üst sınırlarını göstermektedir (Spacemaker, 2020).

Çizelge 3.7. Ortalama rüzgar hızı ve meydana gelme olasılığının bir fonksiyonu olarak her faaliyet kategorisinin üst sınırı (Spacemaker, 2020)

	Oturma	Ayakta durma	Gezinme	Yürüme
Lawson	1.8 m/s, %2	3.6 m/s, %2	5.3 m/s, %2	7.6 m/s, %2
Lawson 2001	4.0 m/s, %5	6.0 m/s, %5	8.0 m/s, %5	10 m/s, %5
Lawson LDDC	2.5 m/s, %5	4.0 m/s, %5	6.0 m/s, %5	8.0 m/s, %5
Davenport	3.6 m/s, %1.5	5.3 m/s, %1.5	7.6 m/s, %1.5	9.8 m/s, %1.5
NEN 8100	5 m/s, %2.5	5 m/s, %5.0	5 m/s, %10	5 m/s, %15
CSTB	3.6 m/s, %5	3.6 m/s, %5	3.6 m/s, %10	3.6 m/s, %20

Mikro iklim analizi, kentsel alanda hissedilen sıcaklığı hesaplamak için güneş, gün ışığı ve rüzgar analizlerinin sonuçlarını yerel hava koşullarıyla birleştirir. Bu içgörüler, yerel iklim koşullarının tasarımın yarattığı gölge ve rüzgar durumuna nasıl tepki verebileceğini anlamaya yardımcı olur. Spacemaker’da en sık kullanılan ve yaygın olarak benimsenen standart olduğu için hissedilen sıcaklığı ölçmek için Evrensel Termal İklim İndeksi (UTCI-Universal Thermal Climate Index) seçilmiştir. Yeterli istatistiksel doğruluğu sağlamak için sekiz yıllık (2013-2020) yerel hava durumu verileri kullanılmaktadır. Hava durumu verilerinin tümü (güneş radyasyonu, bulut kapsamı ve rüzgarlar vb.) Copernicus İklim Değişikliği Hizmeti tarafından sağlanan ERA5 veri kümesinden temin edilmektedir (Spacemaker, 2020).

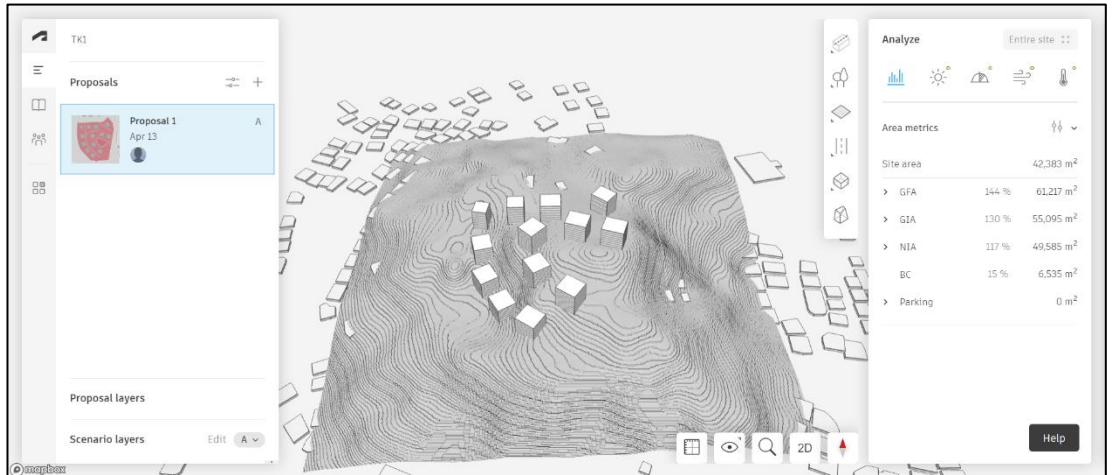
Spacemaker’de UBEM geometrisi hazırlanmak üzere öncelikle OpenStreetMap (OSM) aracılığıyla seçili kentsel alanın bina ayak izleri (footprints) temin edilmiştir. OpenStreetMap açık kaynaklı, harita verisi sağlayan bir web platformudur (OpenStreetMap, 2023). Daha sonra bu alan Spacemaker web arayüzüne yüklenmiştir. Uygulama alanının 3B uydu görüntüsü, seçili alan sınırı ve izohips eğrileri sırasıyla Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’te gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Spacemaker 3B uydu görüntüsü



Şekil 3.22. Uygulama alanı sınırı



Şekil 3.23. Spacemaker izohips eğrileri

Spacemaker'ın web arayüzü aracılığıyla uygulama alanı için temel veri girişleri yapılmıştır. Temel veri girişlerinin tamamlanmasının ardından alan metrikleri, gün ışığı potansiyeli, güneş analizi, rüzgar analizi ve mikro iklim analizleri yapılmıştır.

Yapılan analizlerden sonra, kentsel enerji talebinin ölçülmesi aşamasında Spacemaker web arayüzünden Revit'e aktarım yapmak mümkündür. Bu doğrultuda enerji analitik modeli oluşturmak üzere Revit için oluşturulmuş eklenti aracılığıyla Spacemaker'dan Revit'e geçiş yapılmıştır.

Revit, mimari ve mühendislik alanlarında disiplinler arası araçlar içeren bir BIM (Building Information Modeling) yazılımıdır. Enerji talebinin ölçülmesinde kullanılmak üzere Revit için Spacemaker Eklentisi aracılığıyla Spacemaker'dan Revite aktarım sağlanır. Bu eklenti Spacemaker ve Revit arasındaki birlikte çalışabilirliği kolaylaştırır.

Revit'de simülasyon motoru enerji talebinin analizi için hesaplama yaparken dış opak yüzeylerden ısı kazancı, pencere alanları için olanla aynı güneş radyasyonu ve termal gradyan unsurlarından elde edilir. Esas olarak duvar veya çatı konstrüksiyonunun kütlelerine ve doğasına göre farklılık gösterir, çünkü bu elemanlar iletken ısı oranını etkiler. Güneş-hava sıcaklığı, tüm radyasyon değişikliklerinin yokluğunda, gelen güneş radyasyonu, gökyüzü ve diğer dış ortamlarla radyant enerji değişimi ve dış hava ile konvektif ısı değişiminin kombinasyonu ile aynı oranda yüzeye ısı girişi sağlayan dış hava sıcaklığıdır. Güneş ışığı alan bir yüzeydeki ısı dengesi, Q/A yüzeyine ısı akışını şu şekilde verir (Autodesk, 2023) (Denklem 3.1):

$$\frac{Q}{A} = \alpha E_t + h_0(t_0 + t_s) - \varepsilon \Delta R \quad (3.1)$$

Burada α güneş radyasyonu için yüzey emilimi, E_t yüzeydeki toplam güneş radyasyonu olayı (W/m^2), h_0 dış yüzeyde uzun dalga radyasyonu ve konveksiyon ile ısı transferi katsayısı (W/m^2K), t_0 dış hava sıcaklığı (K), t_s yüzey sıcaklığı (K), ε yüzeyin yarımküre yayılımı, ΔR gökyüzünden ve çevreden yüzeye gelen uzun dalga radyasyonu ile dış hava sıcaklığında kara cisim tarafından yayılan radyasyon arasındaki farktır (W/m^2). Isı transfer hızının güneş-hava sıcaklığı t_e cinsinden ifade edilebileceğini varsayarsak (Denklem 3.2),

$$\frac{Q}{A} = h_0(t_e + t_s) \quad (3.2)$$

Ve (3.1) ve (3.2) no'lu denklemlerden aşağıdaki Denklem (3.3)'e dönüşür.

$$t_e = t_0 + \frac{\alpha E_t}{h_0} - \frac{\alpha \Delta R}{h_0} \quad (3.3)$$

Dış duvarlardan ve çatılardan iletim, iletim zaman serileri (Conduction Time Series-CTS) kullanılarak hesaplanır. Dış cephedeki duvar ve çatı iletken ısı girişi, bilinen iletim denklemi ile şöyle tanımlanır (Denklem 3.4):

$$Q_{i,q-n} = UA(t_{e,q-n} - t_{rc}) \quad (3.4)$$

Burada $Q_{i,q-n}$ n saat önce yüzey için iletken ısı girişi (W), U yüzey için toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K), A yüzey alanı (m^2), $t_{e,q-n}$ güneş sıcaklığı n saat önce (K), t_{rc} varsayılan sabit oda sıcaklığıdır (K). Duvarlardan veya çatılardan geçen iletken ısı kazancı, mevcut saatler ve son 23 saat için iletken ısı girdileri ve iletim süresi serileri kullanılarak hesaplanabilir (Denklem 3.5):

$$Q_q = c_0 Q_{i,q} + c_1 Q_{i,q-1} + c_2 Q_{i,q-2} + c_3 Q_{i,q-3} + \dots + c_{23} Q_{i,q-23} \quad (3.5)$$

Burada Q_q yüzey için saatlik iletken ısı kazancı (W), $Q_{i,q}$ geçerli saat için ısı girişi, $Q_{i,q-n}$ ısı girişi n saat önce, c_0 , c_1 vd.leri iletim süresi faktörleridir. İletim süresi faktörleri, Denklem (3.5)'te kullanılabilir ve farklı duvar ve çatı konstrüksiyonları arasındaki zaman gecikmesi özelliklerinin karşılaştırılması için bir araç sağlar. Periyodik tepki faktörleri (ve dolayısıyla Conduction Time Factors- CTS) kullanılarak duvarlar veya çatılar için hesaplanan inşaat ısı kazançları, tasarım soğutma yükü hesaplamalarında varsayılan sabit periyodik koşullar için iletim transfer fonksiyonları kullanılarak hesaplananlarla aynıdır. Şartlandırılmış bir mahal, farklı sıcaklıktaki bir mahalin bitişiğinde olduğunda (yani farklı bir bölgede), ayırıcı fiziksel bölüm boyunca ısı transferi göz önünde bulundurulmalıdır. Isı transfer hızı şu şekilde verilir (Denklem 3.6):

$$Q = UA(t_b - t_i) \quad (3.6)$$

Burada Q ısı transfer hızı (W), U bitişik ve koşullu alan arasındaki toplam ısı transferi katsayısı (W/m^2K), A ilgili ayırma bölümünün alanı (m^2), t_b bitişik alandaki ortalama hava sıcaklığı (K), t_i şartlandırılmış mahaldeki hava sıcaklığıdır (K). Pencereler ve tavan pencereleri için, ısı kazancının hesaplanması için ise aşağıdaki denklemler kullanılır. Doğrudan ışıın güneş ısı kazancı Q_b (Denklem 3.7):

$$Q_b = AE_D SHGC(\theta) \quad (3.7)$$

Burada A pencere alanı (m^2), E_D direkt ışıınım (W/m^2), $SHGC(\theta)$ geliş açısı Q 'nun bir fonksiyonu olarak doğrudan güneş ısı kazancı katsayısıdır ve değerler arasında interpolate edilebilir. Dağılık güneş ısı kazancı Q_d (Denklem 3.8):

$$Q_d = A(E_d + E_r)(SHGC)_D \quad (3.8)$$

Burada E_d dağılık ışıınım (W/m^2), E_r yerden yansıyan ışıınım (W/m^2), $(SHGC)_D$ dağılık güneş ısı kazancı katsayısıdır (aynı zamanda yarım küre/hemispherical $SHGC$ olarak da adlandırılır). İletken ısı kazancı Q_c (Denklem 3.9):

$$Q_c = UA(t_{out} - t_{in}) \quad (3.9)$$

Burada t_{in} iç sıcaklık (K), t_{out} dış ortam sıcaklığı (K), U çerçeve ve montaj dahil olmak üzere genel U -faktörüdür. Toplam pencere ısı kazancı aşağıdaki gibidir, Q_T (Denklem 3.10):

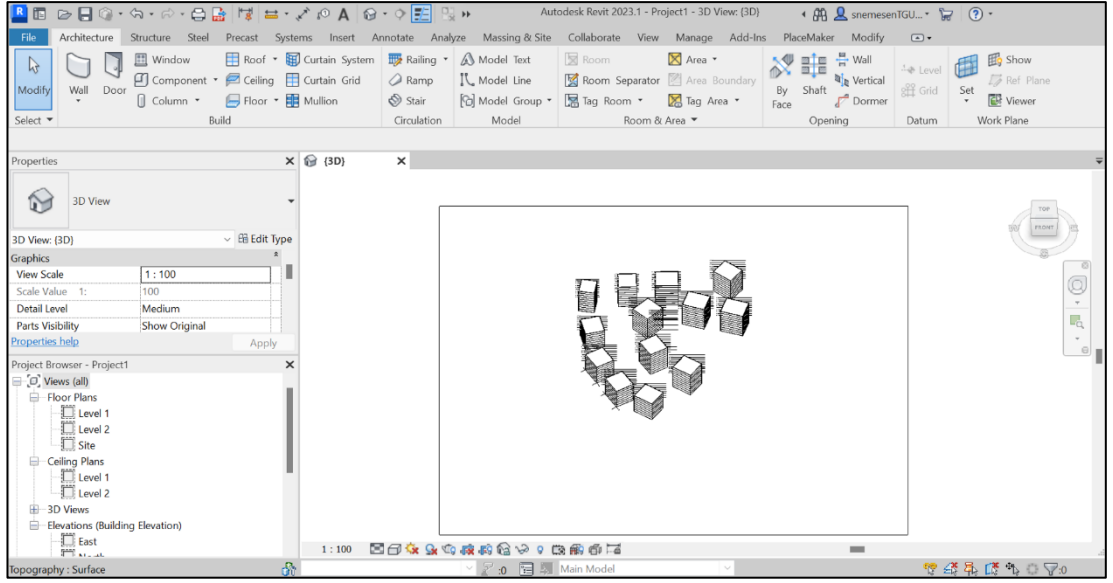
$$Q_T = (Q_b + Q_d + Q_c) \quad (3.10)$$

Enerji talep analizi yapıldıktan sonra proje, üzerinde hızlı incelemeler yapılmak üzere Insight'a aktarılır. Insight, enerji talep analizi üzerinden tasarımı iyileştirmek amacıyla yapılabilecek geliştirmeleri pratik bir şekilde sunan web tabanlı bir Revit eklentisidir. Analiz incelemeleri Insight panosu üzerinden gerçekleştirilir. Tasarım faktörleri ayarlanarak ve farklı senaryolar karşılaştırarak tasarım performansının optimize edilebilmesini ve tasarımdaki değişikliklerin enerji performansını nasıl etkilediğini

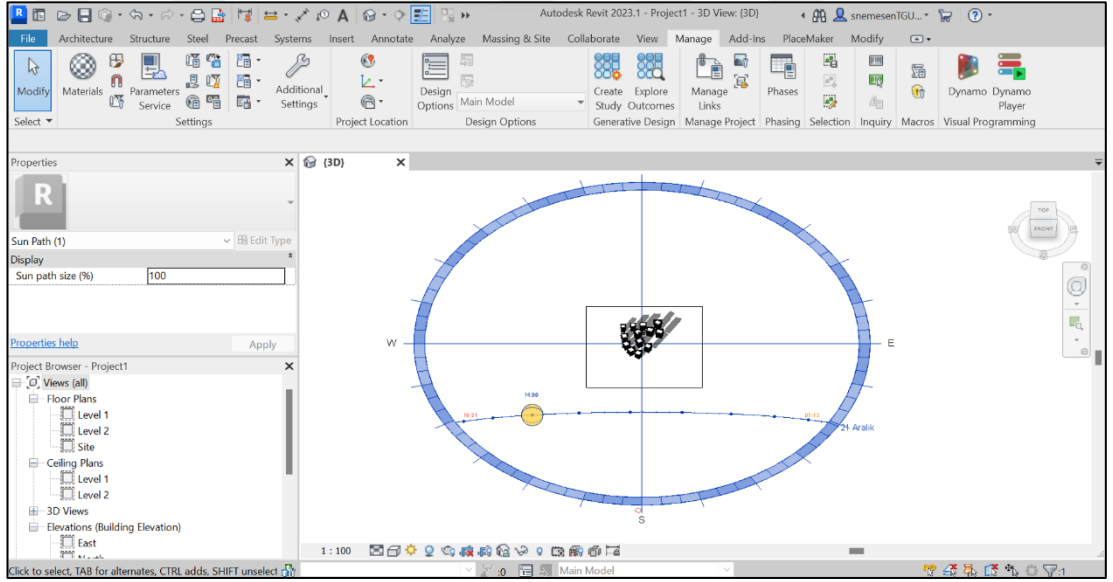
anlayabilmeyi sağlar. Tasarımın birçok yönünün ayarları değiştirilerek, yapı genelinde tasarım değişikliklerinin yapıyı nasıl daha enerji verimli hale getirebileceği görülebilmektedir (Autodesk, 2023).

Web tabanlı bir yazılım olan GBS (Green Building Studio) enerji talebinin hesaplanmasında, güvenilirliği kabul görmüş EnergyPlus simülasyon motorunu kullanmaktadır. Revit projesi üzerinden enerji talep hesaplaması yapabilmesinin yanı sıra çeşitli tasarım alternatifleri oluşturulmasını da sağlamaktadır. Revit'ten gbXML uzantısı oluşturularak dışa aktarım sağlanabilmektedir. Dışa aktarılan veriler, analiz için doğru bir enerji modeli sağlar bu enerji analitik modeli, Revit için enerji optimizasyonunu destekler. Bu model, bir binanın genel biçiminin ve düzeninin bir hesaplama ağına soyutlanmasıdır. Bu ağ, bina genelinde ısı transferinin tüm önemli yollarını ve süreçlerini yakalar. Enerji analitik modeli, enerji ayarları iletişim kutusunda tanımlanan parametrelere dayalı olarak oluşturulan analitik alanlardan ve analitik yüzeylerden oluşur. Bu model, DOE 2.2 ve EnergyPlus gibi enerji simülasyon motorları için kullanılan özel bir geometri şeklindedir. gbXML olarak dışa aktarmadan önce, enerji ayarları iletişim kutusundaki parametreler tanımlanır ve bir enerji analitik modeli oluşturulur. Ortaya çıkan gbXML dosyası, bir gbXML şemasına dayanan gbXML dosya yapısına göre model için enerji bilgilerini içerir. gbXML dosyası, bir proje için alanlar ve bölgeler dahil olmak üzere tüm ısıtma ve soğutma bilgilerini içerir. gbXML açık şeması, bina tasarımcılarının bina projelerinin enerji tüketim özellikleri hakkında bilgi almasına yardımcı olmak için oluşturulmuştur (Autodesk, 2023).

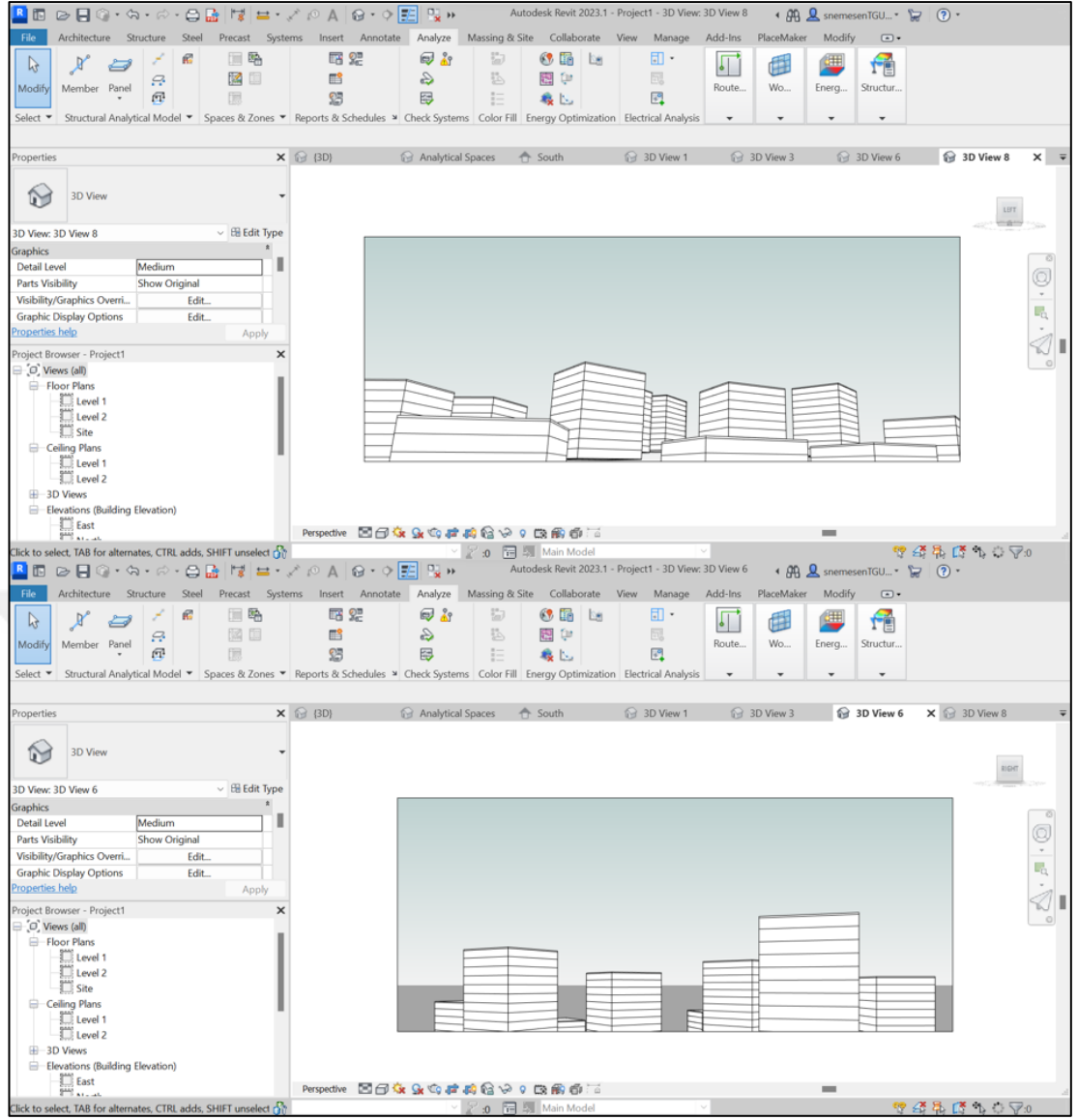
Çalışmada, Spacemaker'dan eklenti aracılığıyla Revit'e aktarılan proje üzerinden enerji talep analizi yapmak için uygulama alanının enerji analitik modeli oluşturulmuştur. Bu doğrultuda konum ve hava durumu verileri seçilmiş olup yapı ve kütle elemanlarıyla ilgili veri girişleri sağlanmıştır. Sırasıyla Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da Spacemaker'den çağırılan proje alanının 3B uydu görüntüsü, Sun Path analizi ve seçili alanın 3B görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Spacemaker’den çağırılan uygulama alanının 3B görüntüsü

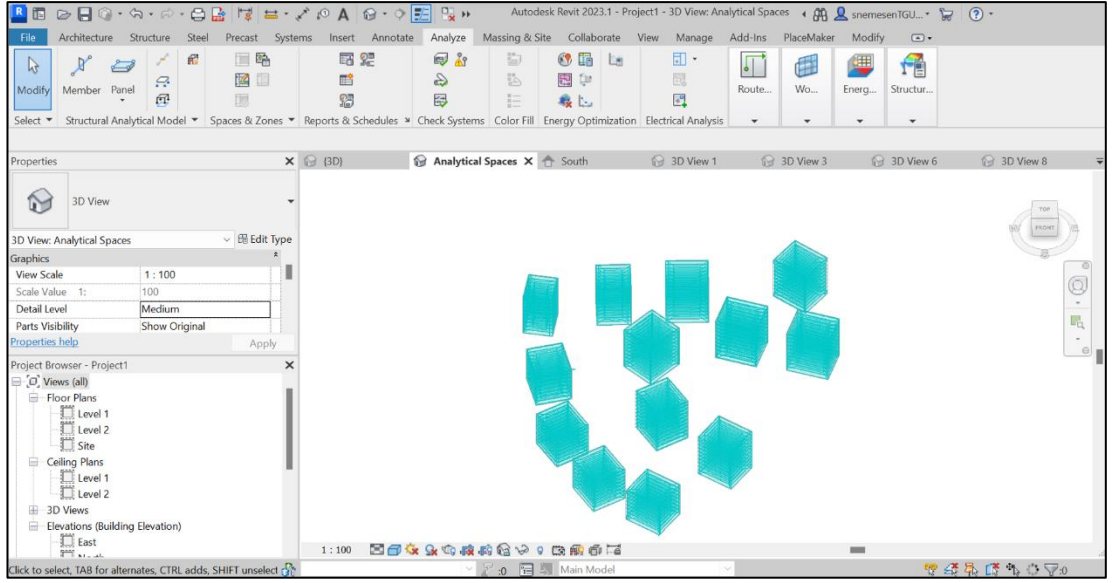


Şekil 3.25. Uygulama alanı için Sun Path analizi



Şekil 3.26. Uygulama alanının 3B görüntüsü

Veri girişleri tamamlandıktan sonra uygulama alanı için oluşturulan enerji analitik modeli Şekil 3.27’de gösterilmektedir. Oluşturulan enerji analitik modeli, Revit üzerinden eklenti kullanılarak web tabanlı Insight yazılımına ve gbXML uzantılı dosya oluşturularak web tabanlı GBS yazılımına aktarılmıştır. Bu doğrultuda enerji talebi için çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir.



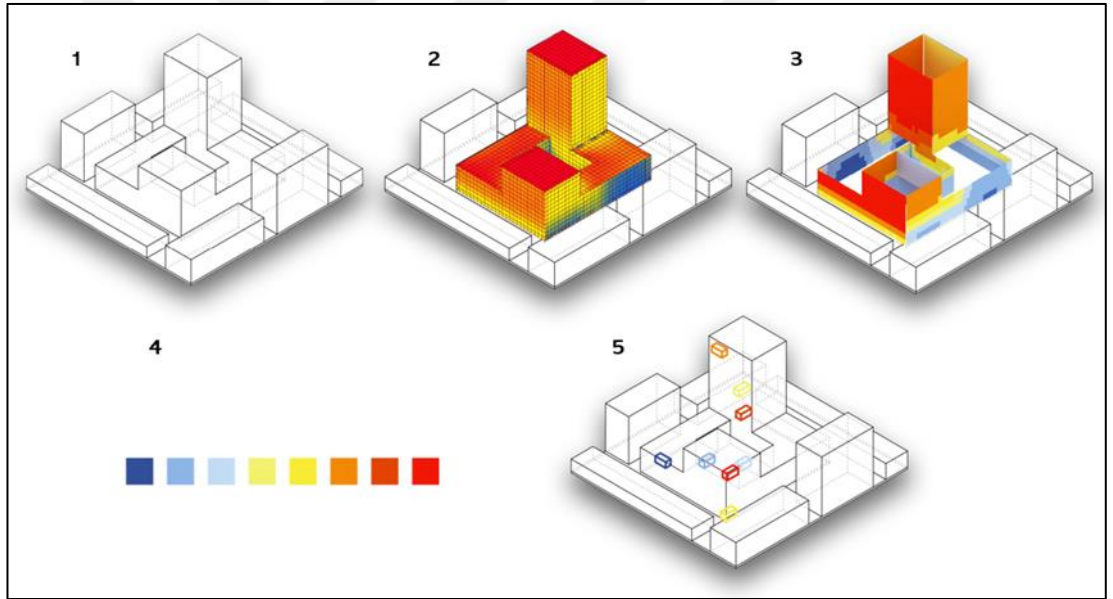
Şekil 3.27. Uygulama alanının enerji analitik modeli

3.3. UBEM.IO

UBEM.IO, açık kaynaklı bir web aracıdır ve enerji modelleyicinin komşuluk düzeyinde operasyonel bina enerji simülasyonlarını çalıştırmak için kullanacağı UMI dosyasını oluşturur (UBEM.IO, 2020). UMI (Urban Modeling Interface), mahalle ölçeğinde enerji tüketimini analiz etmek için bir kentsel modelleme arayüzüdür (Hong vd., 2020). Sustainable Design Lab tarafından geliştirilmiştir ve Rhinoceros 3D (Rhino) için bir tasarım ortamıdır. Ek performans modülleri ve metrikleri eklemek isteyen araştırmacılar ve danışmanlar için bir uygulama programlama arayüzü (API- Application Programming Interface) içerir. Odak kullanıcıları; kentsel tasarımcılar ve planlamacılar, belediyeler, kamu çalışanları, sürdürülebilirlik danışmanları ve diğer kentsel paydaşlardır. UMI dosyaları, Rhino'da veya UBEM.IO web uygulaması aracılığıyla sıfırdan oluşturulabilir. UBEM.IO ayrıca birden fazla UMI dosyasının sonuç karşılaştırmasını da destekler (MIT Sustainable Design Lab, 2023).

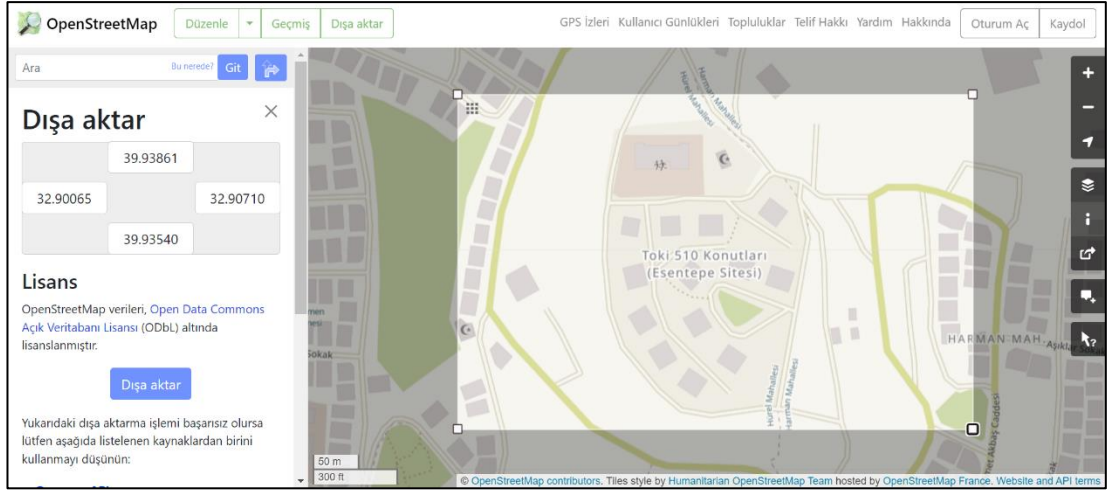
UMI dosyasını çalıştırmak için, Rhinoceros 3D programı ve UMI eklentisine ihtiyaç vardır. Rhino, UMI'deki tüm çevresel analizlerin CAD omurgasını oluşturur. UMI ise operasyonel ve somutlaştırılmış enerji kullanımı, mahallede yürünebilirlik, gün ışığına erişim, kentsel gıda üretimi ve ilçe düzeyinde enerji tedarik analizi açısından mahallelerin ve şehirlerin çevresel performansını değerlendirmek üzere Rhino için ücretsiz bir eklentidir. UMI, Rhino aracılığıyla enerji modeli simülasyonu yaparken

Shoebox modelini ve EnergyPlus simülasyon motorunu kullanır. İlk olarak bina kabuğu, bina şablonundaki kattan kata yükseklik ayarlarına göre kat hacimlerine bölünür. Her kat hacminin cepheleri boyunca, Radiance kullanılarak bir güneş ışığına maruz kalma analizi gerçekleştirilir. Bu radyasyon verileri ve temel cephe yüzey oryantasyonu daha sonra her binanın cephe bölgelerini güneş mikro iklim benzerliğine göre kümelemek için kullanılır. Her renk bir kümeyi temsil eder. Küme sayısı bir kullanıcı ayarıdır ve her yön için belirtilebilir (cephe başına tipik küme sayısı ikidir). Shoeboxer daha sonra her küme merkezine bir alan ağırlığı atar. Bu merkez, daha sonra kümeyi temsil eden bir Shoebox modelinin yeridir. Her Shoebox veya Cluster, IDF dosyası olarak yazılır ve EnergyPlus ile simüle edilir. Simülasyonun son adımında da tüm Shoebox verileri toplanır ve bina sonucu kümelenir (Şekil 3.28) (UBEM.IO, 2020).



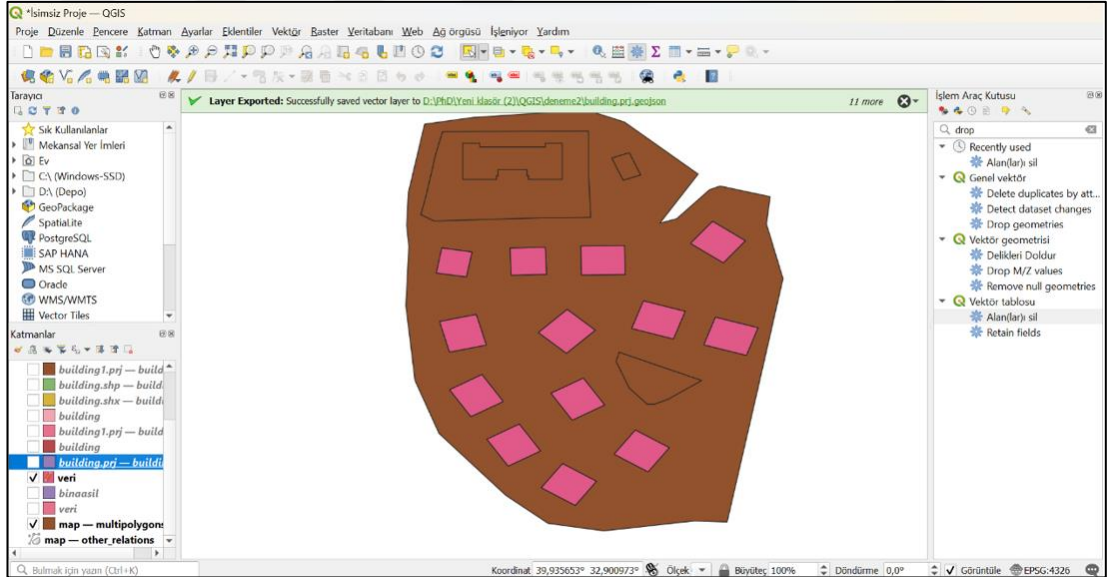
Şekil 3.28. 1.) Giriş geometrisi; 2.) Güneşe maruz kalma analizi mesh [yüksek (kırmızı), düşük (mavi)]; 3.) Kümeleme; 4.) Soldan sağa kademe olarak düşük-güneşe maruz kalma-yüksek; 5.) Shoebox kümeleri (UBEM.IO, 2020)

Çalışmada, UBEM geometrisi hazırlanmak üzere OpenStreetMap aracılığıyla uygulama alanının bina ayak izleri (footprints) temin edilmiştir. Seçili alanın OpenStreetMap üzerinden seçimi ve dışa aktarımı Şekil 3.29’da gösterilmektedir.

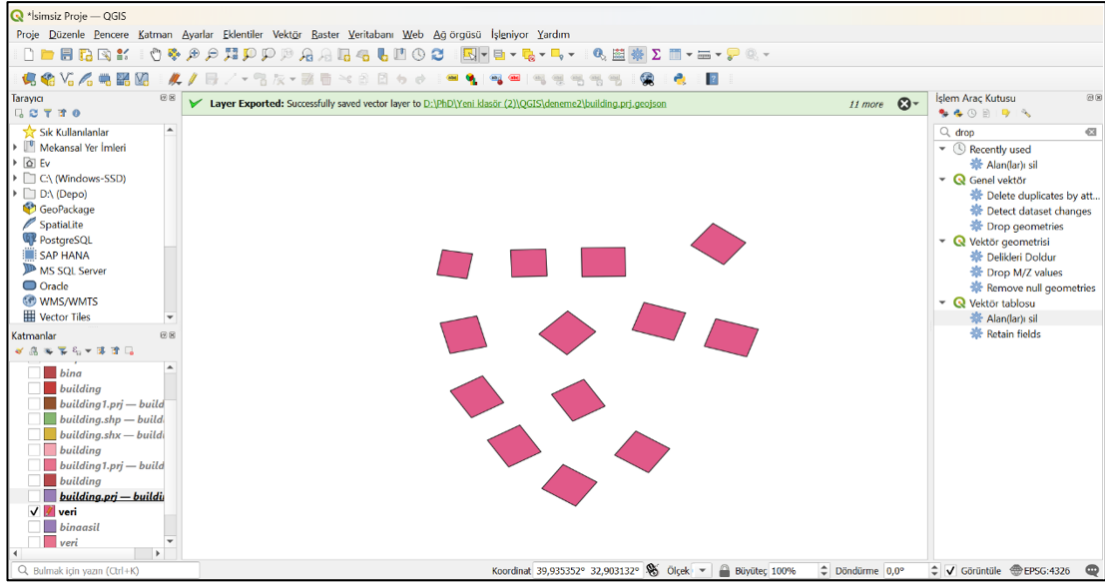


Şekil 3.29. OpenStreetMap alan seçimi

Seçili alan için öncelikle bina footprints için çokgenler oluşturulmuştur. Daha sonra bina footprints yükseklikleri, bina yaşları ve bina kullanım türleri gibi temel verileri içeren CBS dosyası oluşturulmuştur. CBS veri setinin bulunduğu dosyanın oluşturulmasında QGIS programı kullanılmıştır. Seçili alanın QGIS programındaki bina footprints görüntüsü ve oluşturulan bina çokgenlerinin görüntüsü sırasıyla Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de gösterilmektedir.

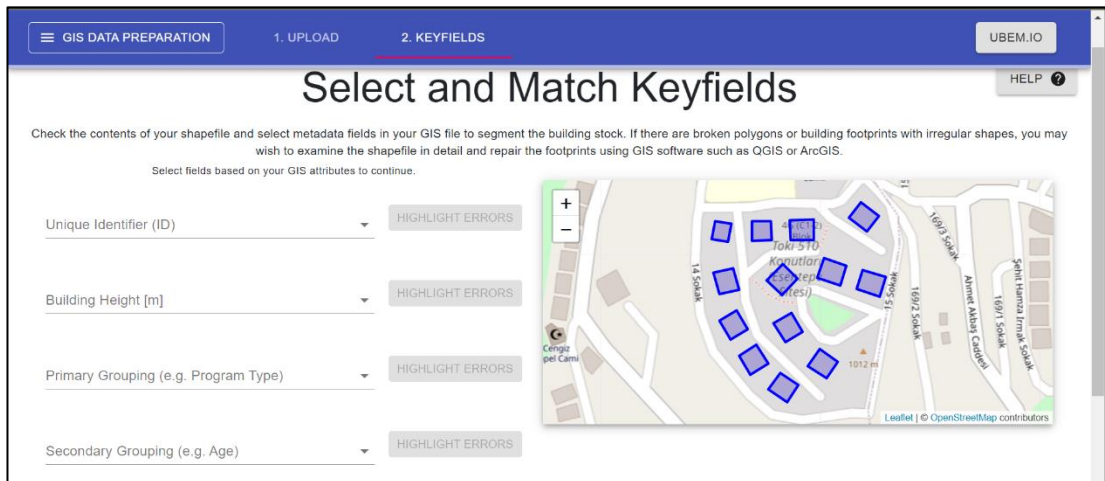


Şekil 3.30. QGIS bina footprints



Şekil 3.31. Uygulama alanı için bina çokgenlerinin oluşturulması

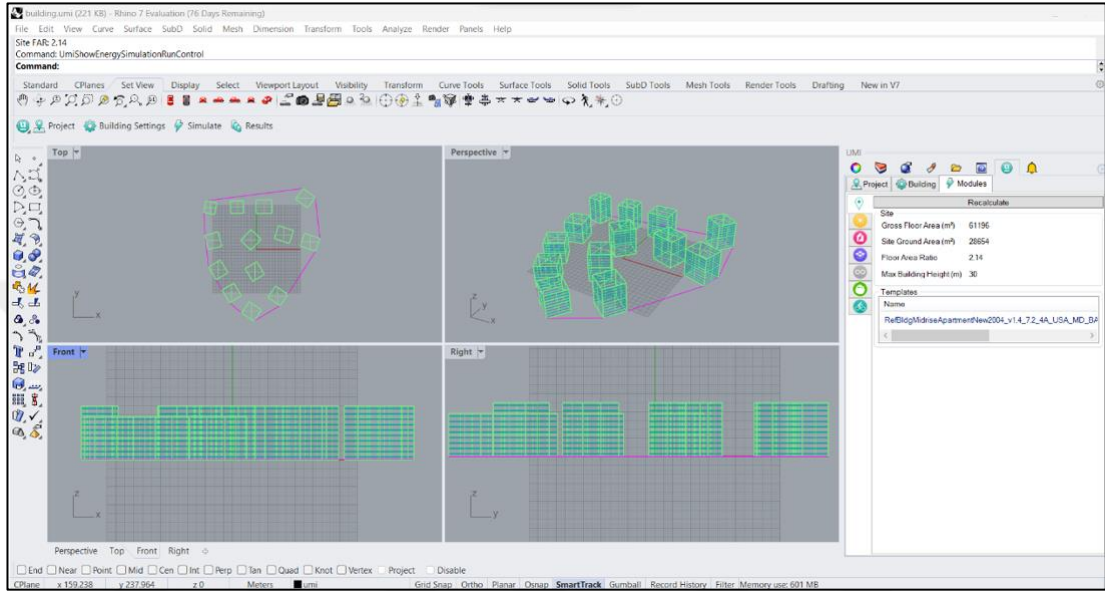
QGIS programında uygulama alanı için, geometrilerin oluşturulması ve veri giriş işlemlerinin tamamlanmasının ardından alanın bir şekil dosyası (shapefile) hazırlanmıştır. Shapefile .shp, .dbf, .cpg, .prj ve .shx dosyalarının bulunduğu bir .zip klasörü olarak hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan shapefile, web platformu üzerinden UBEM.IO'ya yüklenmiştir. Yükleme işleminin ardından bina kimliği, yükseklik gibi veriler uygun shapefile kısımlarına atanmıştır. Şekil 3.32'de UBEM.IO platformu üzerinden uygulama alanı için shapefile'a verilerin atandığı aşama gösterilmektedir.



Şekil 3.32. Seçili alan için UBEM.IO arayüzünde verilerin atanması

UBEM.IO platformu üzerinden gerekli veri girişleri sağlandıktan sonra ortaya çıkan .uio uzantılı değişim dosyası indirilmiştir. İndirilen bu dosya bina tipolojisi, hava

durumu gibi verilerin işlenmesi için UBEM.IO platformunun ilgili kısmına yüklenmiştir. Yapılan işlemlerden sonra hazırlanan temel UBEM dosyası, .umi uzantılı olarak UBEM.IO'dan indirilerek UMI eklentisiyle birlikte kurulumu tamamlanan Rhino programına enerji talep analizlerinin yapılması için aktarılmıştır. UBEM'in Rhino programına aktarılmış görseli Şekil 3.33'te gösterilmektedir.



Şekil 3.33. Uygulama alanının Rhino'ya aktarılması

Çalışmada, belirlenen uygulama alanı için oluşturulan üç ayrı UBEM çerçevesi olan CEA, Spacemaker-Revit ve UBEM.IO'nun her biri için enerji talep analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler doğrultusunda elde edilen analiz çıktıları, Bulgular başlığı altında gösterilip değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, belirlenen uygulama alanı için oluşturulan üç ayrı UBEM çerçevesinden enerji talep analizleri elde edilmiştir. Elde edilen analiz çıktıları incelenmiş ve uygulama alanının enerji tüketim verileriyle karşılaştırılmıştır. Oluşturulan UBEM'lerin, çalışmada belirtilen nedenlerle (bina stok sistemi ve veri setlerinin eksikliği, ekstra algoritma oluşturma gereksinimi, gerçek enerji tüketim verilerinin elde edilmesinde zorluk yaşama vb.) UBEM oluşturma sıkıntısı yaşayan ülkeler için uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda belirtilen durumlar için uygulanabilirlik açısından en makul UBEM çerçevesi belirlenmiştir. Bu doğrultuda uygulama alanı için elde edilen metrekare başına yıllık elektrik tüketimi, metrekare başına yıllık yakıt tüketimi ve enerji kullanım yoğunluğu Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

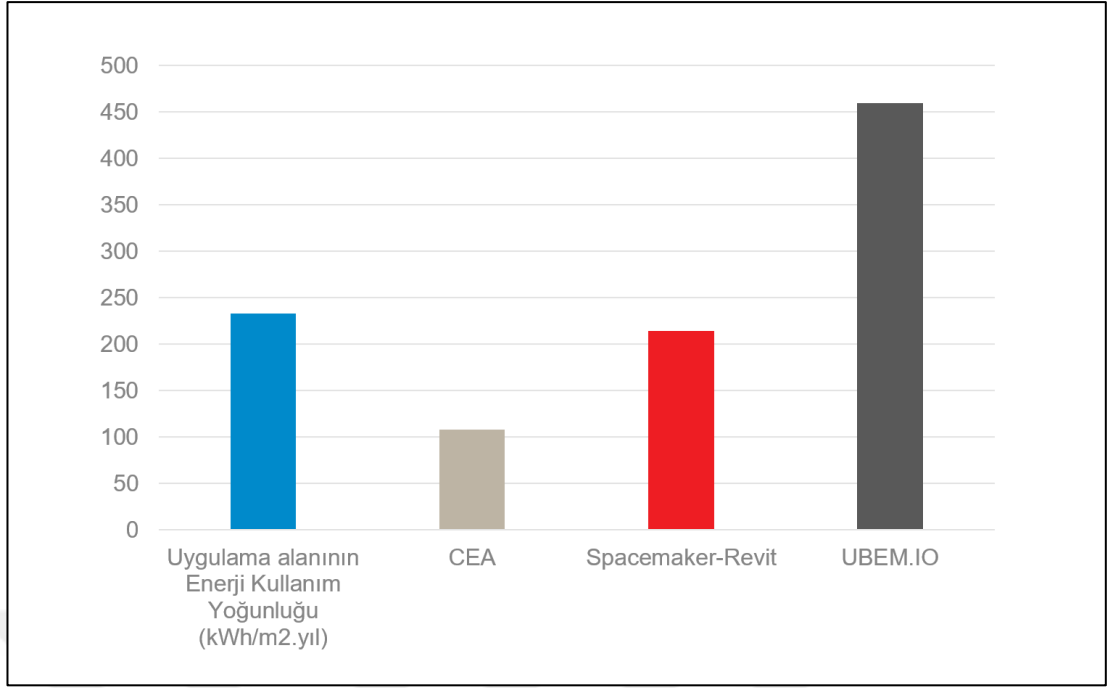
Çizelge 4.1. Uygulama alanının metrekare başına yıllık enerji tüketim verileri

	kWh/m ² .yıl
Yakıt tüketimi	210.67
Elektrik tüketimi	22.11
Enerji Kullanım Yoğunluğu	232.78

Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu 232.78 kWh/m².yıl'dır. Alan için oluşturulan UBEM çerçeveleri üzerinden yapılan enerji talep analizi sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiş olup bu sonuçların alanın enerji kullanım yoğunluğu ile karşılaştırmalı garifiği Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Her UBEM çerçevesi için elde edilmiş ayrıntılı bulgular sırasıyla 4.1. City Energy Analyst (CEA), 4.2. Spacemaker-Revit ve 4.3. UBEM.IO başlıkları altında açıklanıp incelenmiştir.

Çizelge 4.2. UBEM çerçeveleri üzerinden yapılan enerji talep analizi sonuçları

UBEM Çerçevesi	Enerji Kullanım Yoğunluğu (kWh/m ² .yıl)
CEA	108
Spacemaker-Revit	214
UBEM.IO	460



Şekil 4.1 Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu ile UBEM çerçeveleri üzerinden elde edilen enerji kullanım yoğunluklarının karşılaştırılması

Çizelge 4.2’de gösterilen enerj kullanım yoğunluğu verileriyle, alanın enerji kullanım yoğunluğu olan 232.78 kWh/m².yıl verisi karşılaştırılacak olursa en yakın sonucun Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi 214 kWh/m².yıl ile Spacemaker-Revit ile oluşturulan model çerçevesinden elde edildiği görülmüştür. Onun ardından CEA ile oluşturulan model 108 kWh/m².yıl ile onu takip etmekle birlikte en uzak sonucu veren 460 kWh/m².yıl ile UBEM.IO model çerçevesidir.

CEA model çerçevesinin, İsviçre standartları üzerine oluşturulmuş bir analiz yapısına sahip olması sebebiyle programın ürettiği enerji talep analizi sonuçları, belirli kentsel alanlar dışında yüzeysel kalmakta ve veri girişlerinde esneklik sağlama konusunda geliştirilme aşaması devam eden bir program olmasıyla birlikte yetersiz kalmaktadır.

UBEM.IO model çerçevesinin, veri girişlerinde esneklik sağlama düzeyinin düşük olması ve Amerika dışındaki bir ülke için oluşturulan UBEM’den elde edilen enerji talebi analiz verilerinin uygulama alanının enerji tüketim verilerine yaklaşmaması nedenleriyle, çalışmada incelenen model çerçeveleri arasında en az uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir.

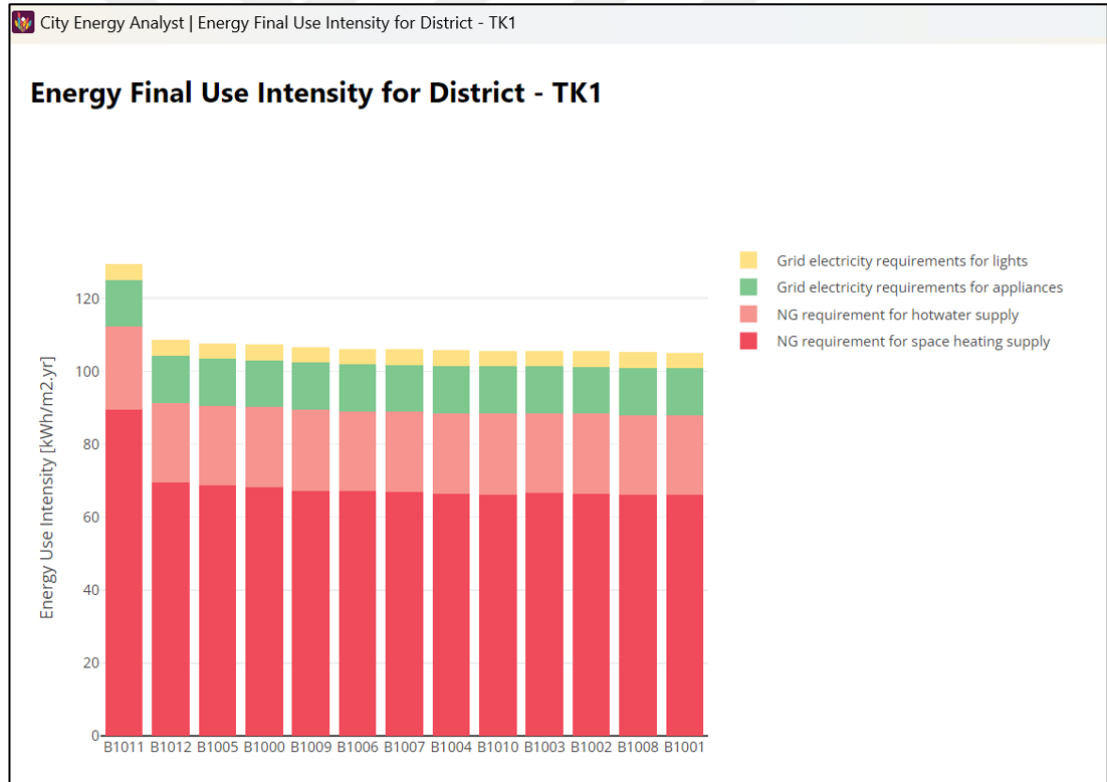
Çalışmada, uygulama alanı için oluşturulan Revit-Spacemaker UBEM çerçevesi aracılığıyla elde edilen enerji talep analizinin; uygulama alanının enerji tüketimine en yakın sonucu verdiği görülmüştür. Bu model çerçevesinde yapılan analizlerin detay seviyesi arttırıldığında, alanın enerji tüketim verisine daha yakın sonuçlar vereceği tespit edilmiş olup Revit, veri girişleri konusunda diğer incelenen araçlara göre daha fazla esneklik sağlamaktadır. Programda kullanılan standartların spesifik bir alanda geçerli olmasından ziyade daha yaygın olması ve çeşitli analiz araçları arasında kolayca dışa aktarım yapılarak bağlantı sağlanmasına müsaade etmesi, bu model çerçevesini diğer iki model çerçevesinden öne çıkarmaktadır. Buna ilaveten, Spacemaker platformunun çalışma alanı için gün ışığı potansiyeli, güneş analizi, rüzgar analizi (yön ve konfor analizleri) ve mikro iklim analizi gibi etkili analizlere olanak sağlaması bu UBEM çerçevesinin incelenenler arasında en etkin model çerçevesi olduğunu göstermektedir. Bütün bunlar doğrultusunda; UBEM oluşturmada çalışmada belirtilen nedenlerle sıkıntı yaşayan ülkelerdeki kentsel alanlar için en uygulanabilir model çerçevesinin Spacemaker-Revit ile oluşturulan UBEM çerçevesi olduğu tespit edilmiştir.

4.1. City Energy Analyst (CEA)

CEA ile oluşturulan model üzerinden yapılan enerji talep analizi sonucunda, uygulama alanının enerji kullanımı üzerine çeşitli analiz çıktıları alınmıştır. CEA’da yapılan analiz sonucunda alanın enerji nihai kullanım yoğunluğu çizelgesi ve grafiği sırasıyla Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Enerji nihai kullanım yoğunluğu

Bina Kodu	Enerji nihai kullanım yoğunluğu (kWh/m ² .yıl)
B1000	107
B1001	105
B1002	106
B1003	106
B1004	106
B1005	108
B1006	106
B1007	106
B1008	105
B1009	107
B1010	106
B1011	129
B1012	109
Ortalama enerji nihai kullanım yoğunluğu (kWh/m ² .yıl)	108



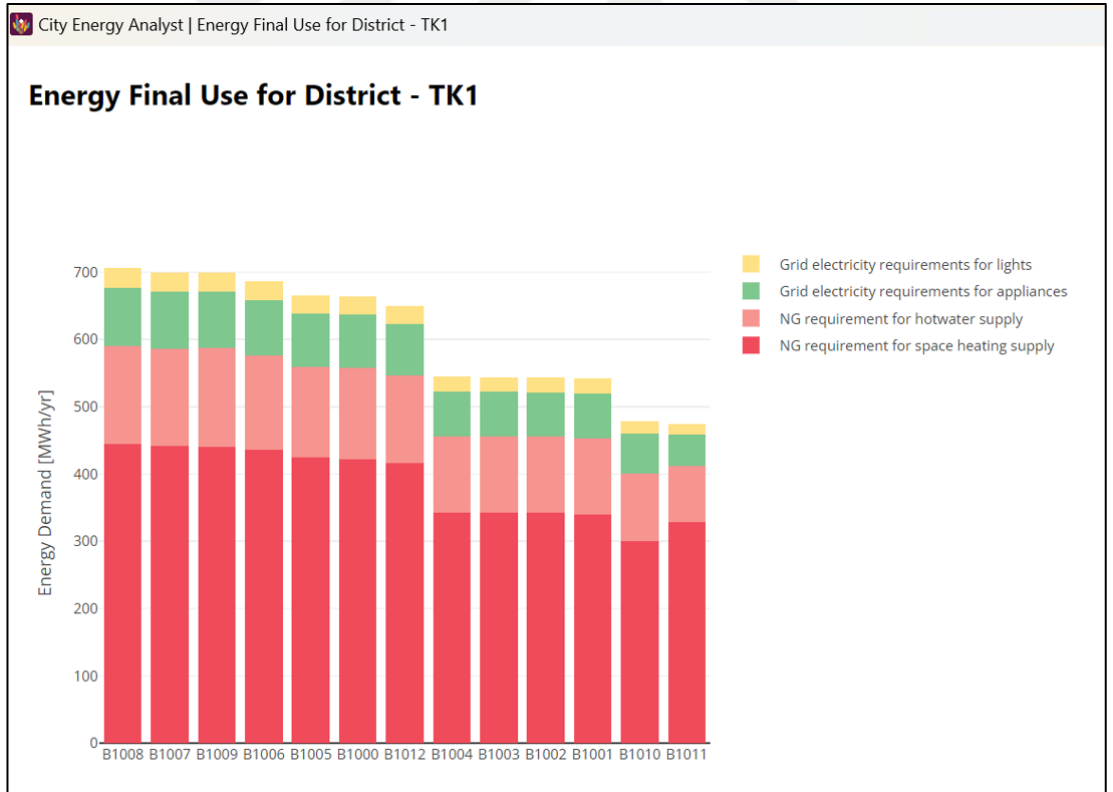
Şekil 4.2. Enerji nihai kullanım yoğunluğu

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2’de gösterilen veriler doğrultusunda, uygulama alanındaki binalardan enerji nihai kullanım yoğunluğu en yüksek olanın değeri 129 kWh/m².yıl olup en düşük olanın değeri ise 105 kWh/m².yıl’dır. Uygulama alanının ortalama

enerji kullanım yoğunluğu ise 108 kWh/m².yıl'dır. Alanın enerji nihai kullanım çizelgesi ve grafiği sırasıyla Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. Enerji nihai kullanımı

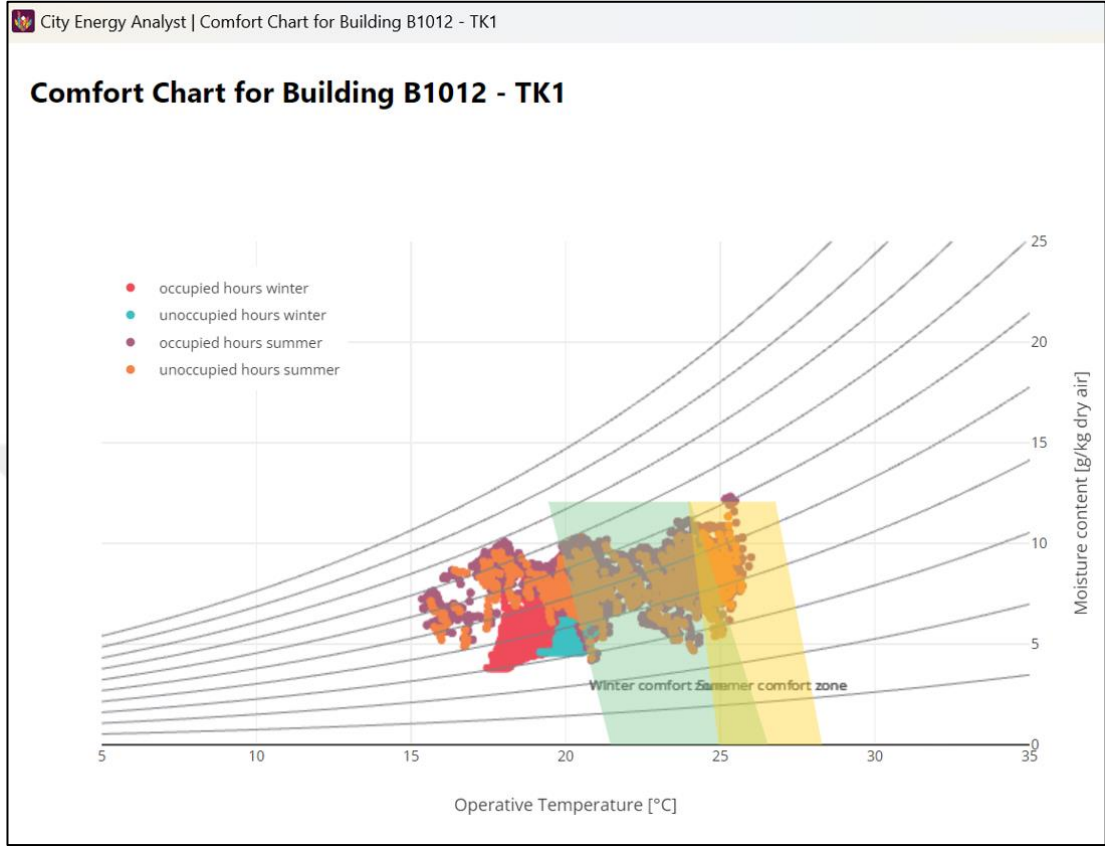
Bina Kodu	Enerji nihai kullanımı (MWh/yıl)
B1000	664
B1001	542
B1002	544
B1003	544
B1004	545
B1005	666
B1006	687
B1007	700
B1008	706
B1009	700
B1010	479
B1011	474
B1012	650



Şekil 4.3. Enerji nihai kullanımı

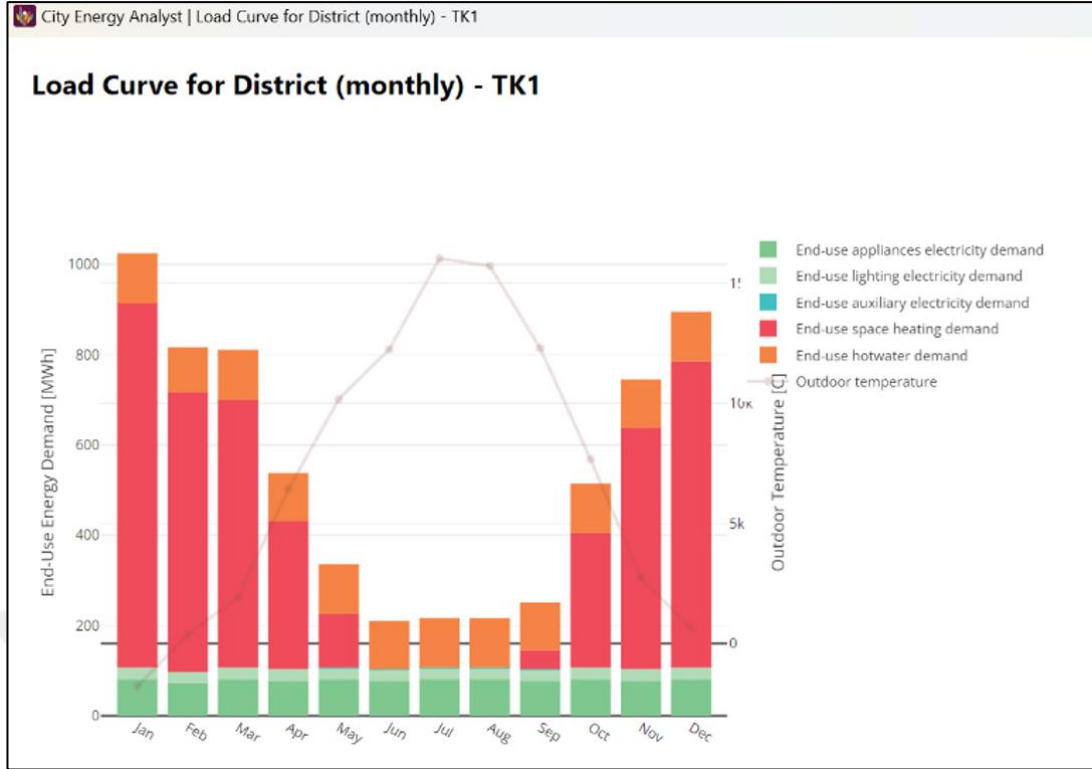
Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3'te gösterilen veriler doğrultusunda, uygulama alanındaki binalardan enerji nihai kullanımı en yüksek olanın değeri 706 MWh/yıl olup en düşük olanın değeri ise 474 MWh/yıl'dır. Uygulama alanının ortalama nihai enerji kullanımı

ise 608 MWh/yıl'dır. Enerji talep analizi doğrultusunda enerji kullanımına dair yapılan analiz çıktılarından bina için konfor grafiği Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Bina için konfor grafiği

Şekil 4.4'te gösterilen bina için konfor grafiği, uygulama alanındaki bir binanın nem içeriği ve çalışma sıcaklığına göre yaz ve kış için konfor alanlarını göstermektedir. Uygulama alanı için aylık yük eğrisi Şekil 4.5'te gösterilmektedir.

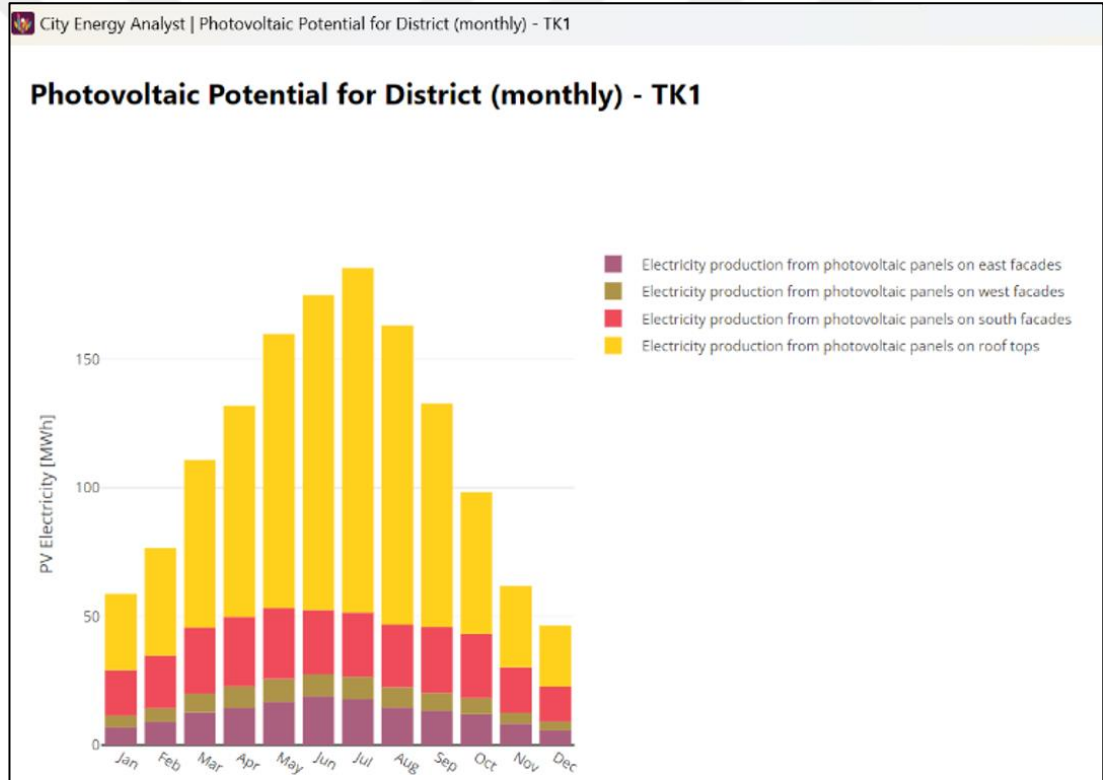


Şekil 4.5. Uygulama alanı için aylık yük eğrisi

Şekil 4.5'te gösterilen uygulama alanı için aylık yük eğrisi grafiğine göre, son kullanım enerji talebinin en yüksek olduğu ay Ocak ayı olup en düşük olduğu ay ise Haziran ayıdır. Program üzerinden bina yüzeylerindeki güneş radyasyonu ve binaların enerji talebi hesaplandıktan sonra uygulama alanının enerji potansiyelleri hesaplanmıştır. Yapılan yenilenebilir enerji potansiyeli hesabına göre uygulama alanı için fotovoltaik panel potansiyelinin aylık çizelgesi ve grafiği sırasıyla Çizelge 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.5. Uygulama alanı için aylık fotovoltaik panel potansiyeli

Ay	PV elektrik üretimi (MWh)
Ocak	58.80
Şubat	76.52
Mart	110.85
Nisan	131.88
Mayıs	159.77
Haziran	174.90
Temmuz	185.37
Ağustos	163.09
Eylül	132.67
Ekim	98.27
Kasım	61.86
Aralık	46.39

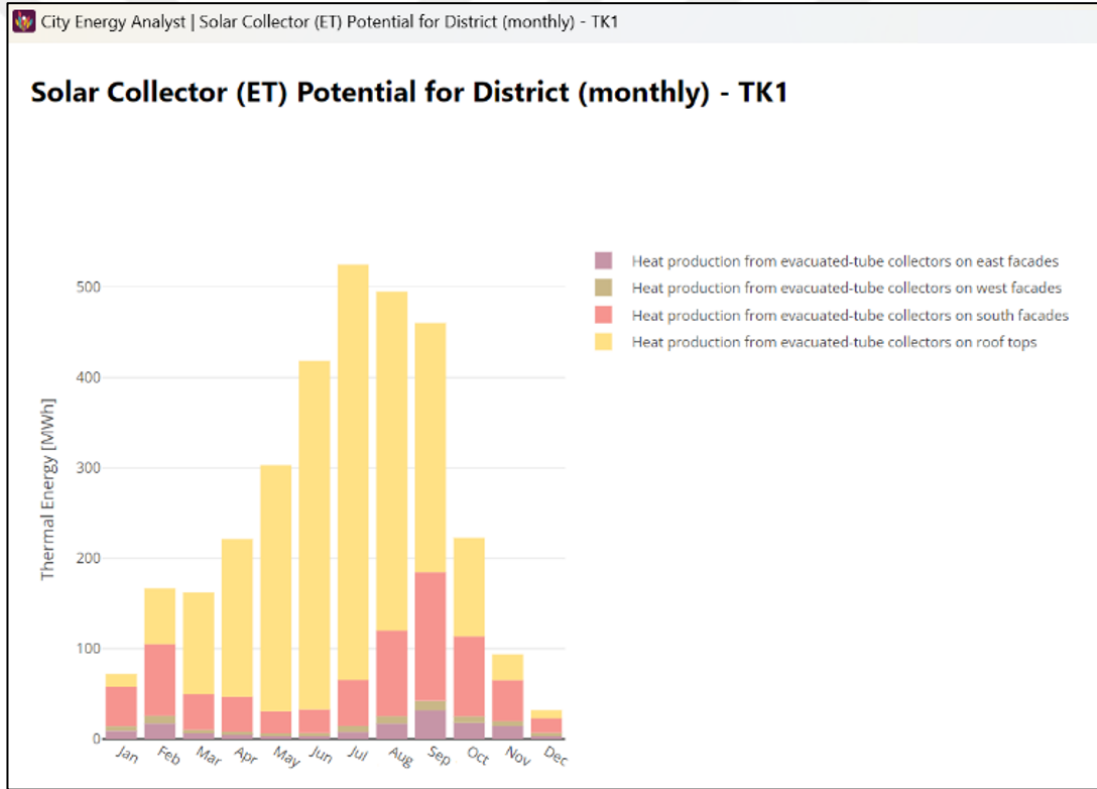


Şekil 4.6. Uygulama alanı için aylık fotovoltaik panel potansiyeli

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilen veriler doğrultusunda uygulama alanı için en yüksek fotovoltaik panel potansiyeline sahip ayın 185.37 MWh üretimle Temmuz ayı olduğu, en düşük fotovoltaik panel potansiyeline sahip ayın ise 46.39 MWh üretimle Aralık ayı olduğu görülmüştür. Uygulama alanı için vakum tüplü güneş kolektörü potansiyelinin aylık çizelgesi ve grafiği sırasıyla Çizelge 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. Uygulama alanı için aylık vakum tüplü güneş kolektörü potansiyeli

Ay	Termal ısı üretimi (MWh)
Ocak	72.14
Şubat	166.77
Mart	157.04
Nisan	221.34
Mayıs	302.91
Haziran	418.20
Temmuz	524.67
Ağustos	494.86
Eylül	460.17
Ekim	222.51
Kasım	93.83
Aralık	32.04

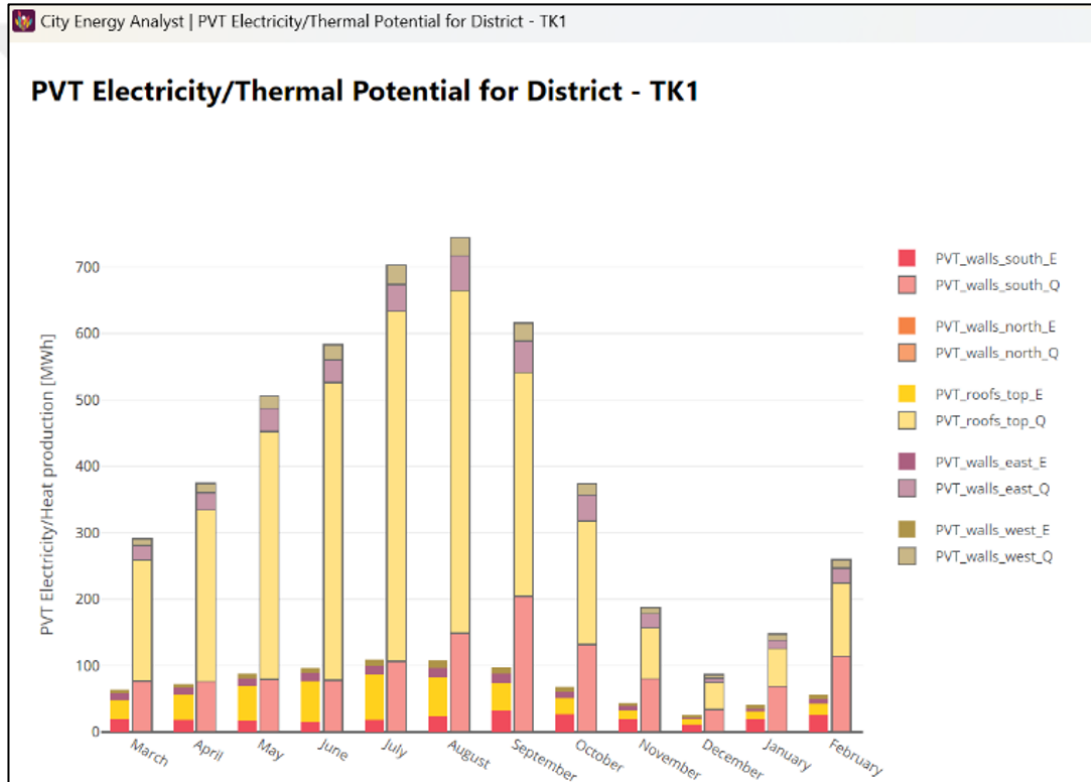


Şekil 4.7. Uygulama alanı için aylık vakum tüplü güneş kolektörü potansiyeli

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilen veriler doğrultusunda uygulama alanı için ısı üretiminde en yüksek vakum tüplü güneş kolektörü potansiyeline sahip ayın 524.67 MWh üretimle Temmuz ayı olduğu, en düşük vakum tüplü güneş kolektörü potansiyeline sahip ayın ise 32.04 MWh üretimle Aralık ayı olduğu görülmüştür. Uygulama alanı için fotovoltaiik-termal panel potansiyelinin aylık çizelgesi ve grafiği sırasıyla Çizelge 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7. Uygulama alanı için aylık fotovoltaik-thermal panel potansiyeli

Ay	PVT elektrik üretimi (MWh)	PVT ısı üretimi (MWh)
Ocak	40.92	147.87
Şubat	57.42	259.81
Mart	63.96	291.24
Nisan	72.83	374.94
Mayıs	87.40	506.22
Haziran	96.93	583.36
Temmuz	108.88	702.96
Ağustos	107.62	744.79
Eylül	98.54	615.88
Ekim	68.02	374.13
Kasım	44.08	187.56
Aralık	26.05	86.86

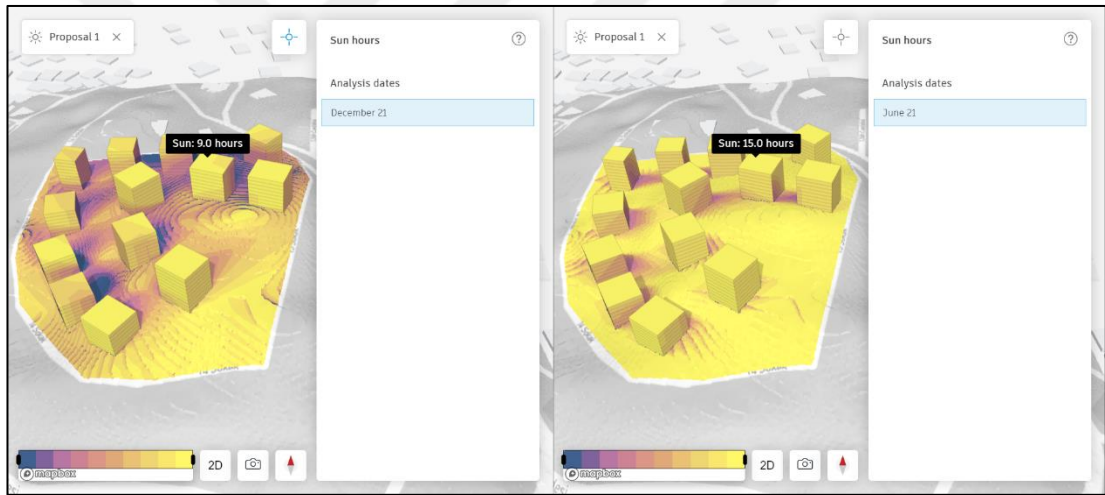


Şekil 4.8. Uygulama alanı için aylık fotovoltaik-thermal panel potansiyeli

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilen veriler doğrultusunda uygulama alanında elektrik üretimi için en yüksek fotovoltaik-thermal panel potansiyeline sahip ayın 108.88 MWh üretim ile Temmuz ayı olduğu görülmüştür. Isı üretimi için ise en yüksek fotovoltaik-thermal panel potansiyeline sahip ay 744.79 MWh üretim ile Ağustos ayıdır. Sırasıyla elektrik ve ısı üretim potansiyeli 26.05 MWh ve 86.86 MWh olan Aralık ayı ise en düşük fotovoltaik-thermal panel potansiyeline sahip aydır.

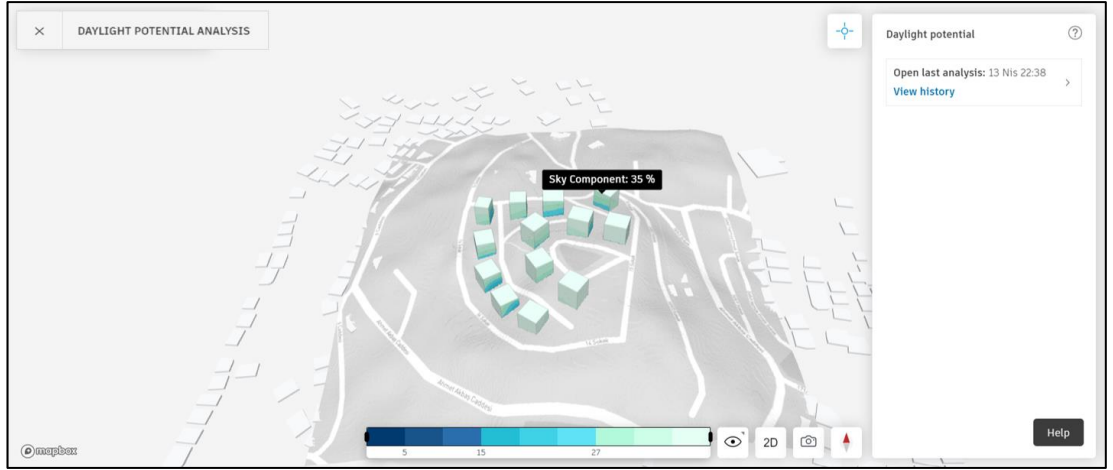
4.2. Spacemaker-Revit

Spacemaker-Revit ile oluşturulan model üzerinden yapılan enerji talep analizi sonucunda, uygulama alanının enerji kullanımı üzerine çeşitli analiz çıktıları alınmıştır. Oluşturulan model çerçevesinin Spacemaker adımıyla öncelikle, uygulama alanı için seçilen site sınırındaki binaların güneş ışığından faydalanma süreleri hesaplanmıştır. Bu hesaplama, güneş analizi kullanılarak yapılmıştır. Güneş analizi, site ve binalardaki güneş ışığı saatlerini hesaplamada konum ve seçilen tarih için gün boyunca güneş konumlarını izleme ve ışın izleme tekniklerini kullanmaktadır. Uygulama alanı için yapılan bu hesaplamada 21 Aralık ve 21 Haziran tarihleri seçilmiştir. Yapılan analiz sonucunda uygulama alanındaki binaların güneş ışığından faydalanma süreleri Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



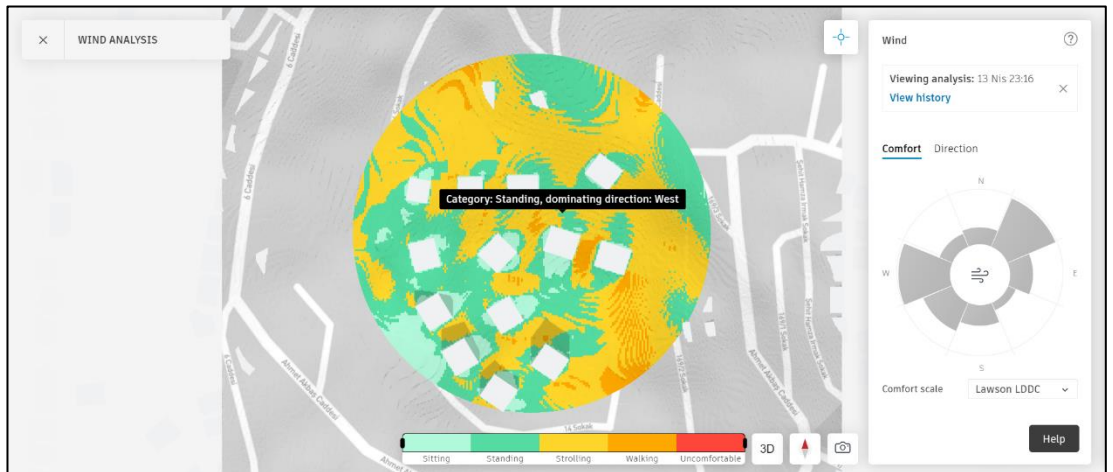
Şekil 4.9. 21 Aralık ve 21 Haziran için güneş analizi

Şekil 4.9'da gösterilen güneş analizi üzerinden cephelerdeki veya zemindeki belirli noktaların sonuçları inceleme aracı ile görülebilmektedir. Şekilde seçilen bina çatışı güneş ışığından 21 Aralık tarihinde 9 saat, 21 Haziran tarihinde ise 15 saat faydalanabilmektedir. Uygulama alanı için seçilen site sınırındaki binalar için yapılan gün ışığı alma potansiyeli analizi, binaların gün ışığı alma performansı hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu analiz, bina cephelerinin hangi bölümlerinin gün ışığına daha az erişim sağladığını VSC (Vertical Sky Component) skoru yardımıyla değerlendirir. Yüzde olarak ifade edilen bu bileşen yatay bir yüzeyi gün ışığının ne kadar aydınlattığını gösterir. Yapılan analiz sonucunda, uygulama alanındaki binaların gün ışığı potansiyeli Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Gün ışığı potansiyeli analizi

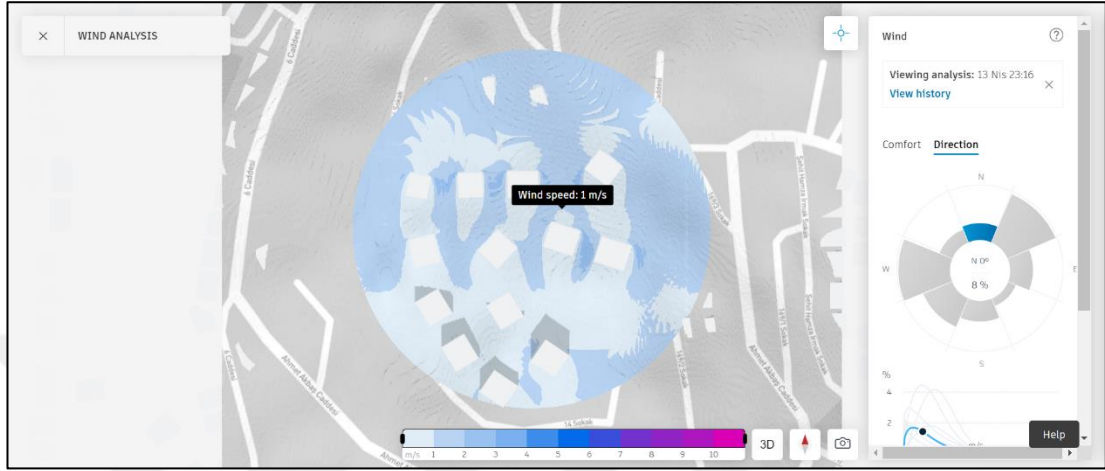
Şekil 4.10’da gösterilen gün ışığı potansiyeli analizi üzerinden, bina cephelerindeki belirli noktaların sonuçları inceleme aracı ile görülebilmektedir. Şekildeki bina cephesinin seçilen noktası gün ışığından %35 oranında faydalanmaktadır. Bu da, VSC eşiklerine göre bu kısım için geleneksel pencere tasarımının genellikle yeterli olduğunu göstermektedir. Uygulama alanı için rüzgar analizi yapılarak gerçek zamanlı olarak farklı rüzgar yönleri ve hızları olmak üzere rüzgar koşullarının tasarımı nasıl etkilendiği incelenmiştir. Rüzgar analizi üzerinden konfor ve yön olmak üzere iki farklı analiz çıktısı alınır. Şekil 4.11’de uygulama alanı için konfor açısından rüzgar analizi gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Konfor açısından rüzgar analizi

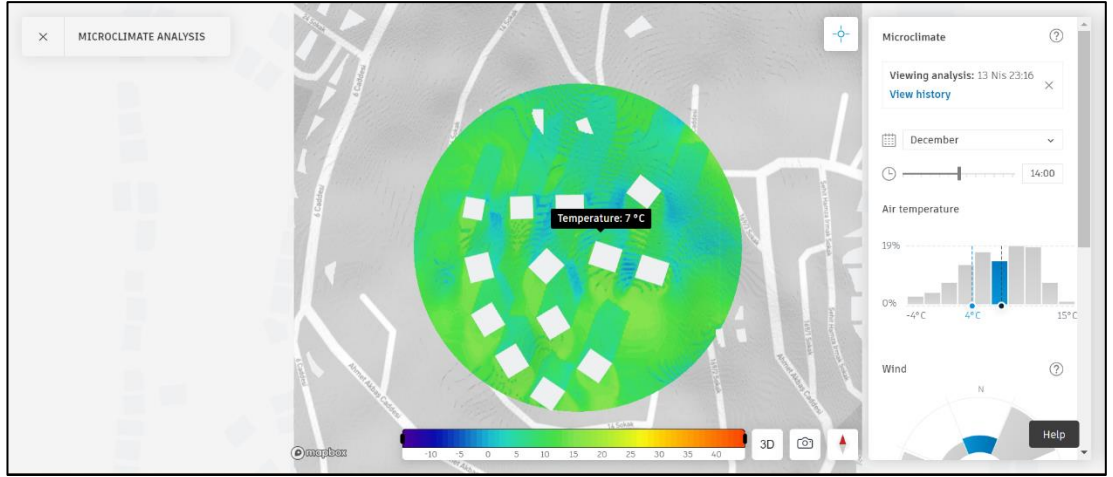
Şekil 4.11’de gösterilen konfor açısından rüzgar analizi, uygulama alanındaki rüzgar koşullarının yayalar tarafından zemin seviyesinde nasıl deneyimleneceğini göstermektedir. Analiz üzerinden, seçilen noktaların sonuçları inceleme aracı ile

görülebilmektedir. Şekilde seçili nokta için hakim rüzgar yönü batı olmakla birlikte ayakta durma faaliyeti için rahatsız edici rüzgar hızlarının olmadığı rüzgar koşulları geçerlidir. Şekil 4.12’de uygulama alanı için yön açısından rüzgar analizi gösterilmektedir.



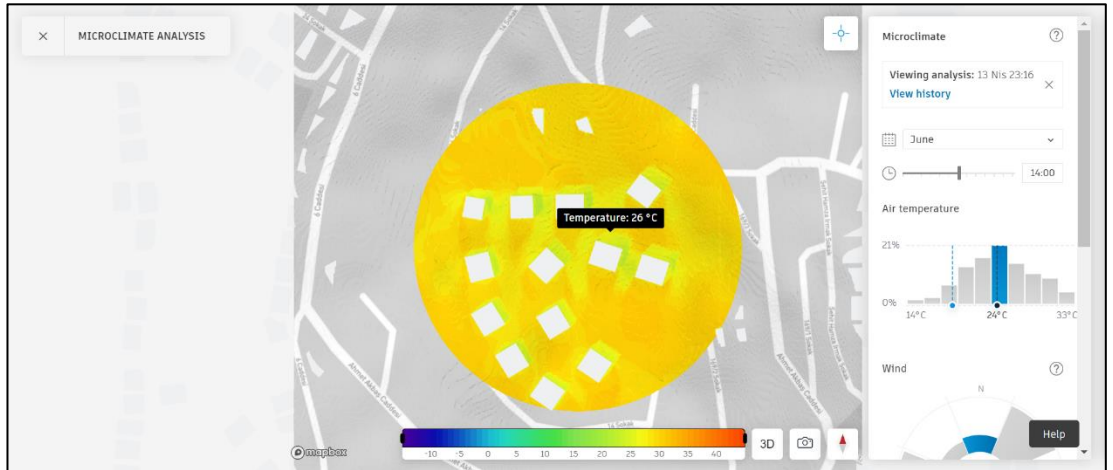
Şekil 4.12. Yön açısından rüzgar analizi

Şekil 4.12’de gösterilen yön açısından rüzgar analizi, uygulama alanındaki rüzgar koşullarını yön ve hız açısından göstermektedir. Analiz üzerinden, seçilen noktaların sonuçları inceleme aracı ile görülebilmektedir. Analizde yer alan rüzgar gülü, rüzgarın belirli bir yönden gelme olasılığını göstermektedir ve yerel hava istasyonları ile Global Wind Atlas'a (GWA, 2023) dayanmaktadır. Şekilde seçili nokta için kuzeyden esen rüzgar hızı 1 m/s’dir. Uygulama alanındaki algılanan sıcaklığın hesaplanması için; güneş, rüzgar ve gün ışığı koşulları dikkate alınarak mikro iklim analizi yapılmıştır. Mikro iklim analizi, seçili kentsel alandaki yerel mikro iklim koşullarını belirlemek için; güneş, gün ışığı ve rüzgar analizlerini yerel hava koşullarıyla değerlendirir. Şekil 4.13’te uygulama alanında Aralık ayı için yapılan mikro iklim analizi gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Aralık ayı için mikro iklim analizi

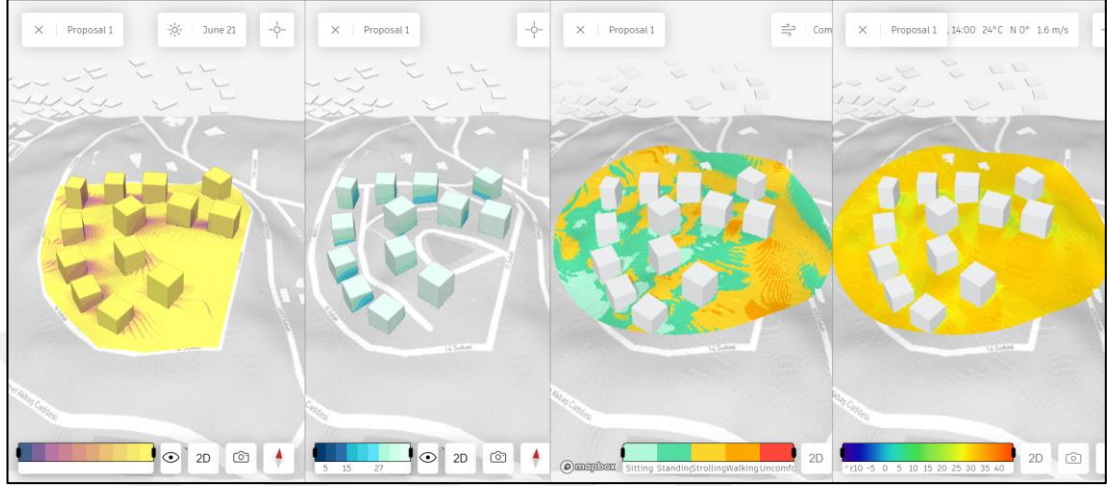
Şekil 4.13'te gösterilen Aralık ayı için mikro iklim analizi, uygulama alanındaki algılanan sıcaklığı göstermektedir. Analiz üzerinden, seçilen noktaların sonuçları inceleme aracı ile görülebilmektedir. Şekildeki seçili noktada Aralık ayı, saat 14:00'te 6 °C için algılanan sıcaklık 7 °C'dir. Uygulama alanı için Aralık ayı, saat 14:00'teki hava durumu verileri ise şöyledir: %57 nem, %72 bulut örtüsü, 456 W/m² direkt güneş radyasyonu, 102 W/m² dağınık güneş radyasyonu ve 292 W/m² kızılötesi atmosferik radyasyondur. Şekil 4.14'te uygulama alanında Haziran ayı için yapılan mikro iklim analizi gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Haziran ayı için mikro iklim analizi

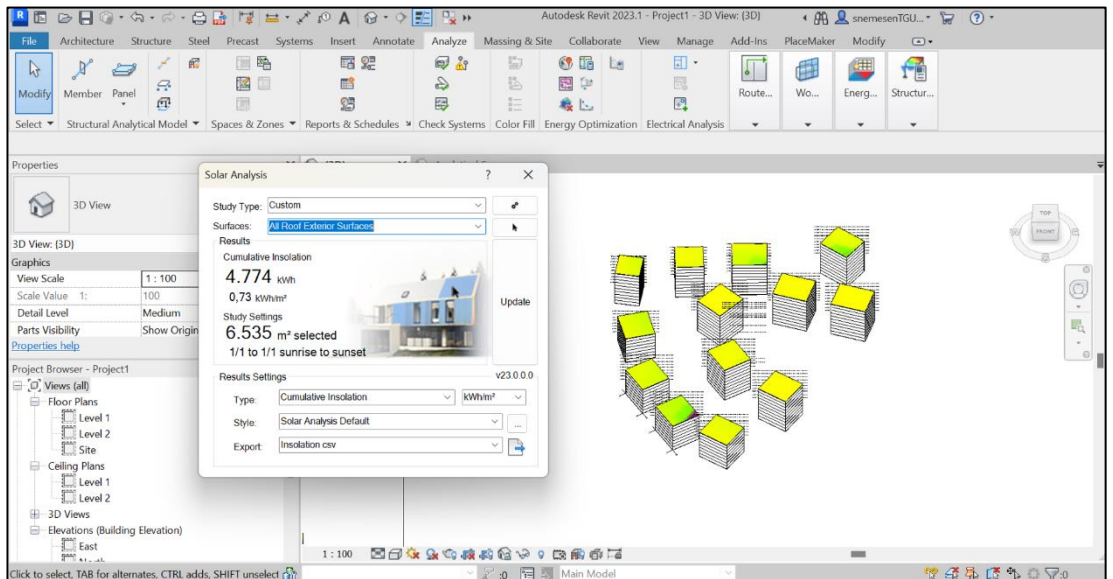
Şekil 4.14'te gösterilen Haziran ayı için mikro iklim analizi, uygulama alanındaki algılanan sıcaklığı göstermektedir. Analiz üzerinden, seçilen noktaların sonuçları inceleme aracı ile görülebilmektedir. Şekildeki seçili noktada Haziran ayı, saat 14:00'te 24 °C için algılanan sıcaklık 26 °C'dir. Uygulama alanı için Haziran ayı, saat

14:00'teki hava durumu verileri ise şöyledir: %35 nem, %38 bulut örtüsü, 629 W/m² direkt güneş radyasyonu, 196 W/m² dağınık güneş radyasyonu ve 380 W/m² kızılötesi atmosferik radyasyondur. Şekil 4.15'te uygulama alanı için yapılan güneş, gün ışığı, rüzgar ve mikro iklim analizleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



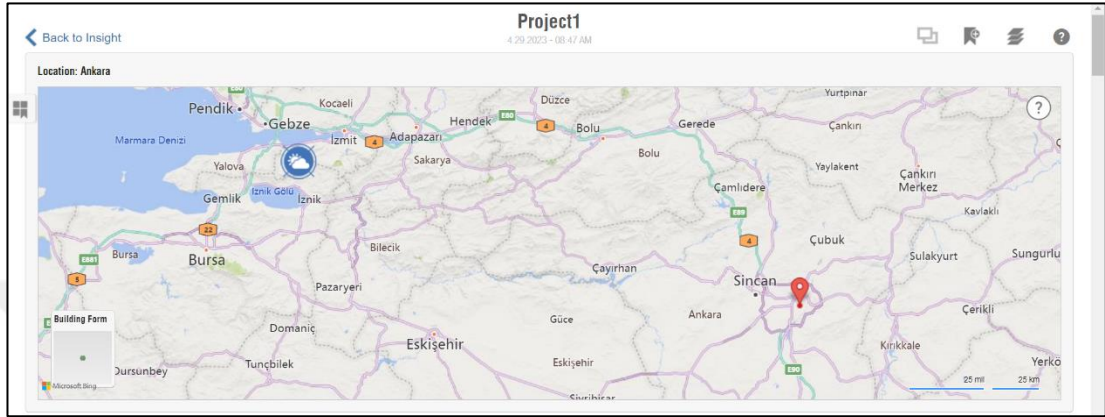
Şekil 4.15. Güneş, gün ışığı, rüzgar ve mikro iklim analizlerinin karşılaştırmalı görüntüsü

Spacemaker'de yapılan analizler doğrultusunda Revit'e aktarımı sağlanan modelin enerji analitik modeli oluşturulmuştur. Bu aşamada, doğal ışık ve gölgelerin uygulama alanındaki binalar üzerindeki etkisini değerlendirebilmek için solar analiz gerçekleştirilmiştir. Uygulama alanı için yapılan solar analiz Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Solar analiz

Şekil 4.16’da gösterilen solar analize göre, alandaki bina çatılarının maruz kaldığı kümülatif güneş radyasyonu 4774 kWh, mektrekare başına güneş radyasyonu ise 0.73 kWh/m²dir. Revit’te oluşturulan enerji analitik modeli üzerinden Insight eklentisine aktarılan model için enerji kullanımına dair çeşitli analiz çıktıları alınmıştır. Şekil 4.17’de uygulama alanının harita görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Uygulama alanının harita görüntüsü

Yapılan enerji talep analizi sonucunda uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu Şekil 4.18’de gösterilmektedir.

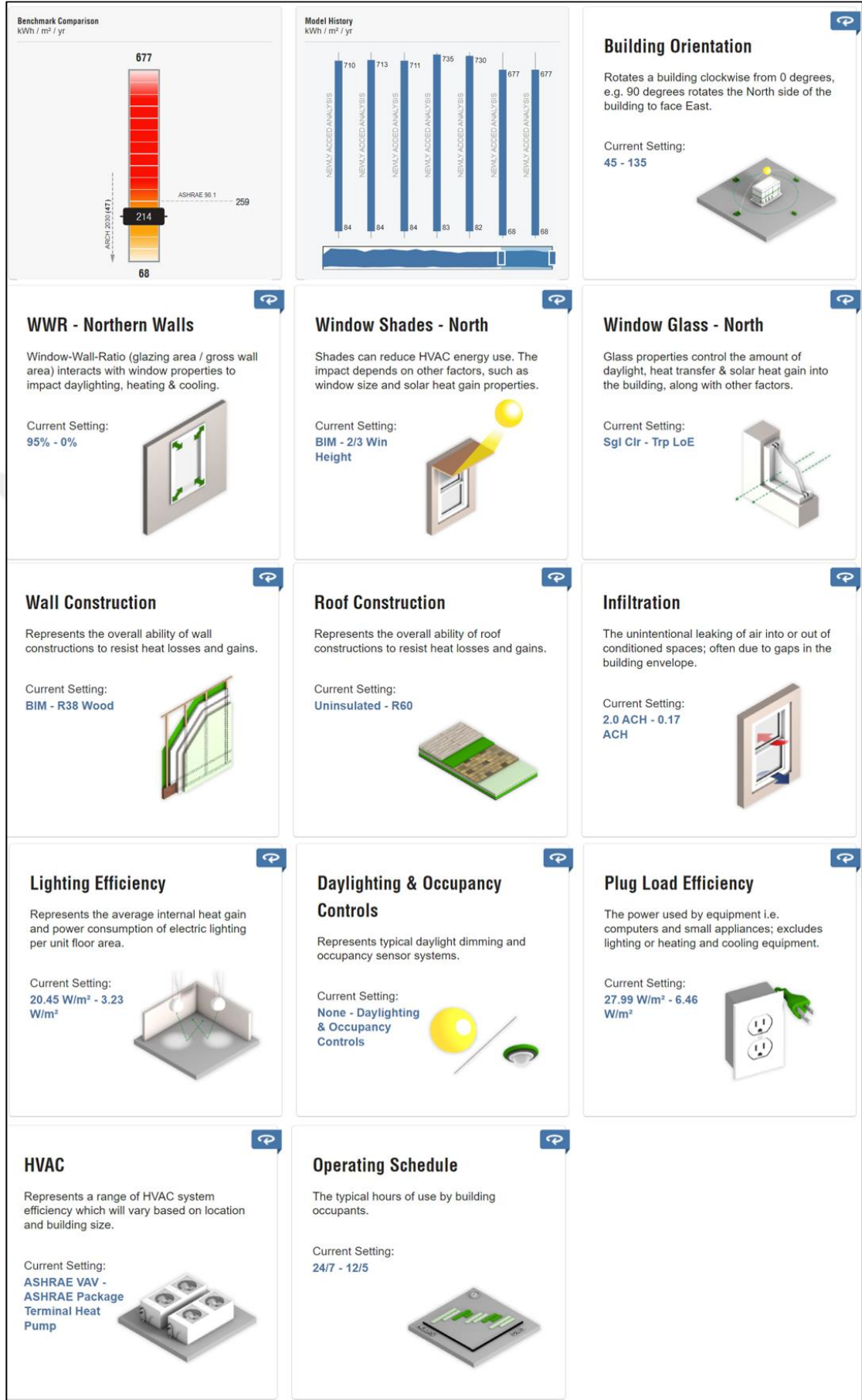


Şekil 4.18. Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu

Şekil 4.18’de gösterilen veri doğrultusunda, uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu yıllık 214 kWh/m²dir. Model için yapılan analiz doğrultusunda, projenin enerji talebiyle alakalı çeşitli yönleri Insight panosunda sıralanmaktadır. Projenin sunulan bu yönlerden incelenmesi, alınan kararların enerji kullanımını nasıl etkileyeceğini anlamaya yardımcı olmakta ve performans iyileştirmeleri için

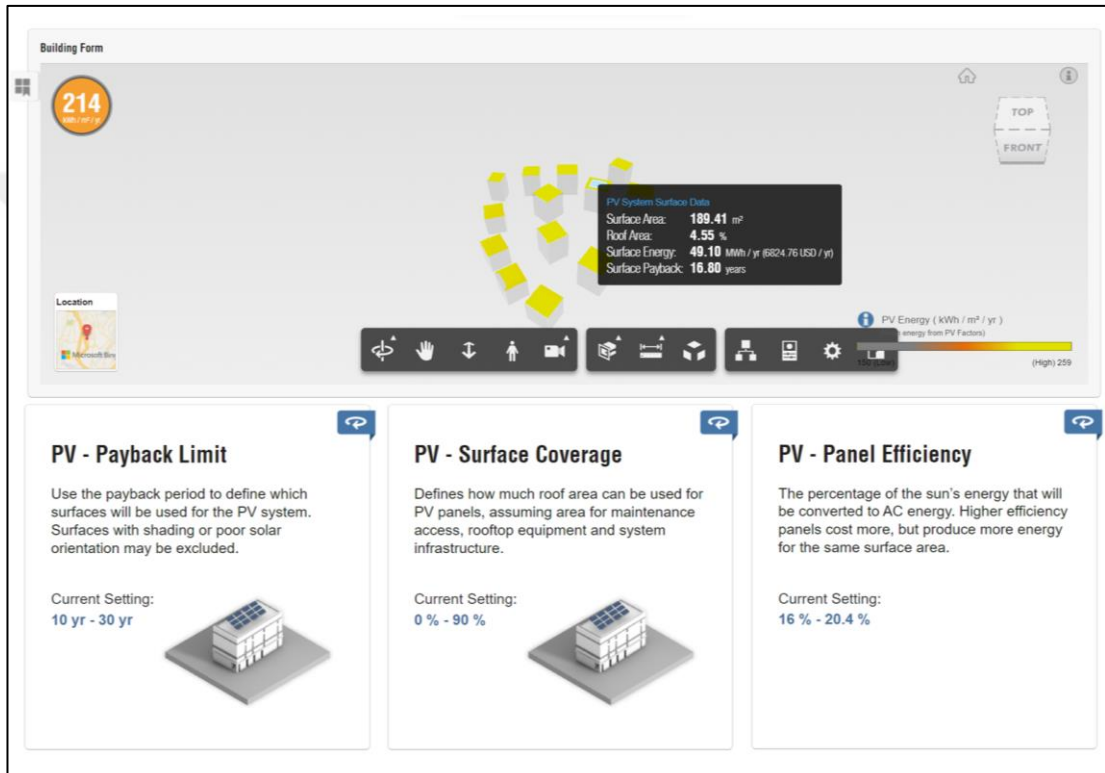
yapılabilecek alternatifleri göstermektedir. Şekil 4.19’da uygulama alanının enerji talebiyle alakalı çeşitli yönleri gösterilmektedir.





Şekil 4.19. Uygulama alanının enerji talebiyle alakalı çeşitli yönleri

Şekil 4.19’da gösterilen panoda, uygulama alanının enerji kullanımına dair sıralanan her bir seçenek üzerinden incelemeler yapılabilmekte ve bunun sonucunda enerji performansının nasıl değişeceği görülebilmektedir. Sunulan bina yönelimi, çatı, duvar ve pencere konstrüksiyonu, gölgelik kullanımı gibi çeşitli parametre seçeneklerinin ısı kayıplarına ve kazançlarına karşı genel yetenekleri, ısıtma ve soğutma, aydınlatma gibi enerji tüketim türleri üzerindeki göreceli etkileri görülebilmektedir. Şekil 4.20’de uygulama alanının PV potansiyeli gösterilmektedir.



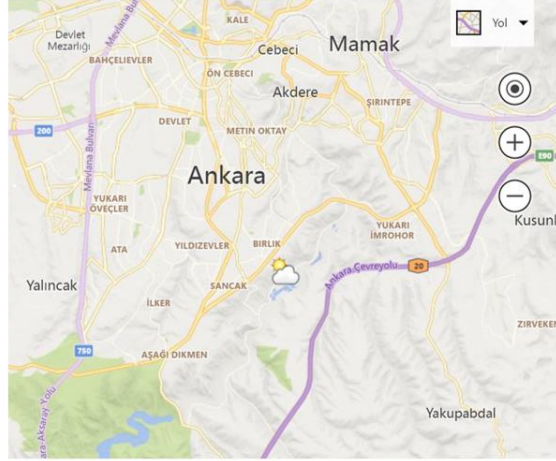
Şekil 4.20. Uygulama alanının PV potansiyeli

Şekil 4.20’de gösterilen panoda, uygulama alanının PV potansiyeli ve seçilen bina için PV sistemi yüzey verileri görülebilmektedir. Uygulama alanındaki seçilen bina için çatı yüzeyinin enerji potansiyeli 49.10 MWh/yıl, geri ödemesi ise 16.8 yıldır. Revit aracılığıyla oluşturulan enerji analitik modelinin gbXML uzantısı ile GBS’ye aktarımı sağlanarak enerji kullanımına dair çeşitli analiz çıktıları alınmıştır. Aktarılan uygulama alanının, iklim koşullarına dair veriler Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmektedir.

TK Entire Weather Station Location

Station	Distance	Zone
GBS_06M12_18_111265	2.4 mi (3.8 km)	4A

Energy Code Climate Zone
Zone 4A



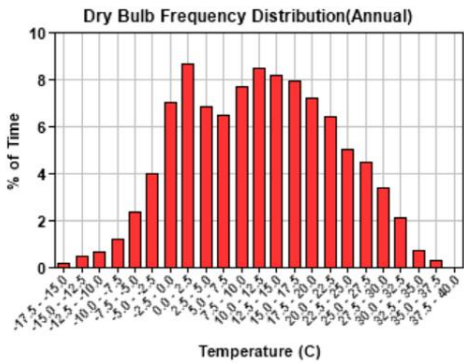
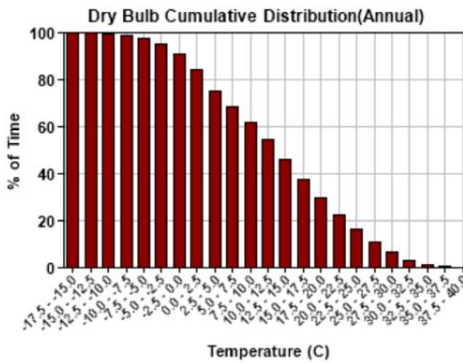
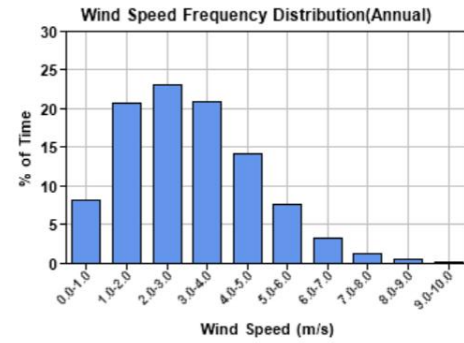
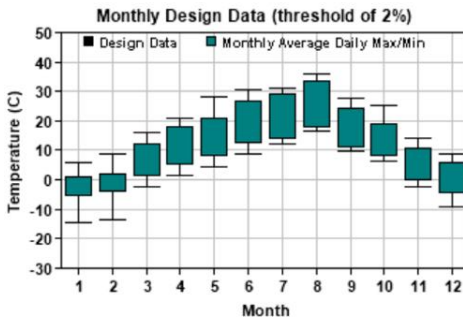
Weather Station: [GBS_06M12_18_111265](#)

Distance to your project 2.4 mi (3.8 km)

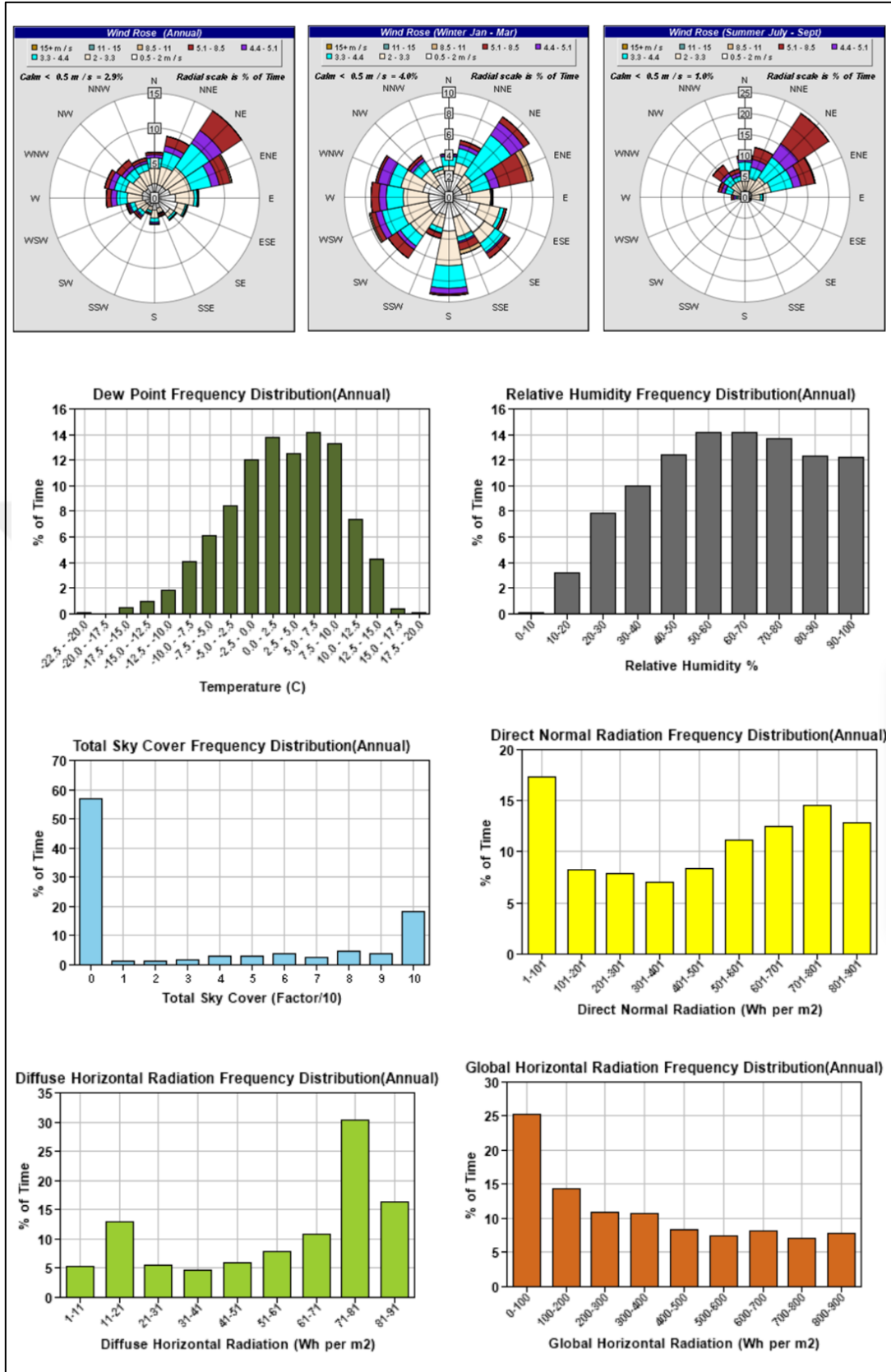
Latitude = 39.8667 , Longitude = 32.8833

Cooling Degree Day		Heating Degree Day	
Threshold	Value	Threshold	Value
18.3 °C	431	18.3 °C	2993
21.1 °C	199	15.6 °C	2308
23.9 °C	63	12.8 °C	1725
26.7 °C	11	10 °C	1234

Annual Design Conditions				
Threshold	Cooling		Heating	
	Dry Bulb(°C)	MCWB(°C)	Dry Bulb(°C)	MCWB(°C)
0.1 %	36.3	17.5	-15.4	-15.5
0.2 %	35.7	17.3	-14.9	-15.0
0.4 %	34.4	17.6	-13.5	-13.9
0.5 %	33.9	17.3	-13.1	-13.5
1 %	32.5	17.0	-10.6	-10.9
2 %	31.1	16.3	-8.2	-8.8
2.5 %	30.6	16.4	-7.6	-8.2
5 %	28.5	16.2	-5.0	-6.0



Şekil 4.21. Uygulama alanının iklim koşulları



Şekil 4.22. Uygulama alanının iklim koşulları

GBS, aktarılan proje için web ara yüzünde enerji kullanımına çeşitli veriler ve enerji tasarrufu alternatifleri sunmaktadır. Şekil 4.23'te uygulama alanının enerji kullanım verileri ve enerji tasarrufu alternatiflerinden bazıları gösterilmektedir.



AUTODESK®

GREEN BUILDING STUDIO™

Insight | Project Solon

Beta

Classic

My Projects

Dashboards

My Profile

My Account

Welcome, Sinen!

My Projects > TK Entire

Run List

Project Defaults

Project Details

Project Members

Utility Information

Weather Station

Actions

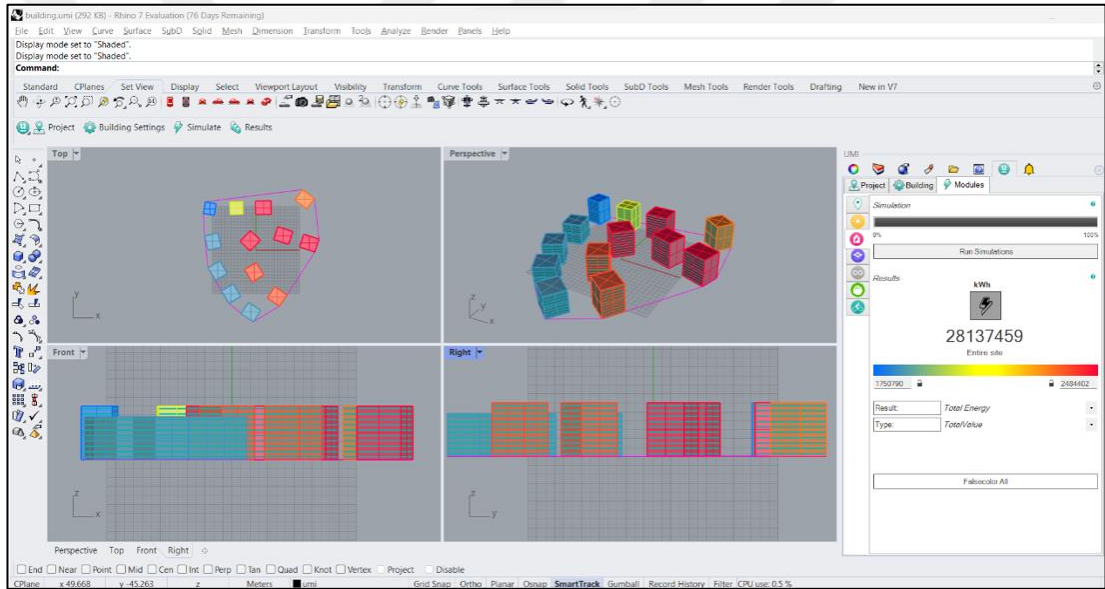
Display Options

Name	Date	User Name	Floor Area (m²)	Energy Use Intensity (MJ/m²/year)	Electric Cost (\$/kWh)	Fuel Cost (\$/MJ)	Total Annual Cost ¹			Total Annual Energy ¹			Carbon Emissions (Mg)	Potential Energy Savings
							Electric	Fuel	Energy	Electric (kWh)	Fuel (MJ)		Compare	
Project Default Utility Rates														
Project Default Utility Rates														
Base Run														
☐ Project1	4/18/2023 2:33 AM	snemesenTGU3U	46,360	890.2	\$0.14	\$0.01	\$743,931	\$301,082	\$1,045,014	5,352,025	22,003,660	--		
Alternate Run(s) of Project1														
☐ Project1_ASHRAE 90.1-2010	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	849.1	\$0.14	\$0.01	\$735,263	\$278,068	\$1,013,332	5,289,663	20,321,750	--		
☐ WWR - Northern Walls_95% -- Window Shades - North_No change -- Window Glass Types - North_No change	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	996.4	\$0.14	\$0.01	\$814,473	\$343,429	\$1,157,902	5,859,515	25,098,450	--		
☐ WWR - Northern Walls_95% -- Window Shades - North_No change -- Window Glass Types - North_Sgl Clr	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,123.1	\$0.14	\$0.01	\$862,931	\$406,624	\$1,269,556	6,208,139	29,716,860	--		
☐ WWR - Northern Walls_95% -- Window Shades - North_No change -- Window Glass Types - North_Dbl Clr	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,087.1	\$0.14	\$0.01	\$863,116	\$383,721	\$1,246,837	6,209,468	28,043,070	--		
☐ WWR - Northern Walls_95% -- Window Shades - North_No change -- Window Glass Types - North_Dbl LoE	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,087.3	\$0.14	\$0.01	\$879,084	\$378,205	\$1,257,288	6,324,342	27,639,910	--		
☐ WWR - Northern Walls_95% -- Window Shades - North_No change -- Window Glass Types - North_Trip LoE	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	977.7	\$0.14	\$0.01	\$818,087	\$330,301	\$1,148,388	5,885,517	24,139,010	--		
☐ WWR - Northern Walls_95% -- Window Shades - North_1/3 Win Height -- Window Glass Types - North_No ch	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	971.2	\$0.14	\$0.01	\$789,952	\$336,164	\$1,126,116	5,683,109	24,567,500	--		
☐ WWR - Northern Walls_95% -- Window Shades - North_1/3 Win Height -- Window Glass Types - North_Sgl C	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,092.0	\$0.14	\$0.01	\$840,311	\$394,909	\$1,235,220	6,045,403	28,860,670	--		
☐ WWR - Northern Walls_95% -- Window Shades - North_1/3 Win Height -- Window Glass Types - North_Dbl C	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,045.8	\$0.14	\$0.01	\$832,492	\$368,367	\$1,200,859	5,989,150	26,920,970	--		
☐ Building Orientation (Degrees)_0	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	890.1	\$0.14	\$0.01	\$743,753	\$301,081	\$1,044,835	5,350,744	22,003,590	--		
☐ Building Orientation (Degrees)_45	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	891.2	\$0.14	\$0.01	\$744,490	\$301,482	\$1,045,972	5,356,045	22,032,880	--		
☐ Building Orientation (Degrees)_90	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	890.7	\$0.14	\$0.01	\$743,179	\$301,671	\$1,044,850	5,346,615	22,046,670	--		
☐ Building Orientation (Degrees)_135	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	891.5	\$0.14	\$0.01	\$744,573	\$301,639	\$1,046,212	5,356,639	22,044,320	--		
☐ Building Orientation (Degrees)_180	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	889.5	\$0.14	\$0.01	\$742,170	\$301,231	\$1,043,401	5,339,353	22,014,500	--		
☐ Building Orientation (Degrees)_225	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	888.3	\$0.14	\$0.01	\$741,296	\$300,806	\$1,042,102	5,333,063	21,983,460	--		
☐ Building Orientation (Degrees)_270	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	888.2	\$0.14	\$0.01	\$741,580	\$300,609	\$1,042,189	5,335,106	21,969,060	--		
☐ Building Orientation (Degrees)_315	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	888.9	\$0.14	\$0.01	\$742,641	\$300,706	\$1,043,347	5,342,743	21,976,160	--		
☐ Wall Construction_Uninsulated	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,034.2	\$0.14	\$0.01	\$786,149	\$377,468	\$1,163,617	5,655,745	27,586,060	--		
☐ Wall Construction_R13 Metal	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	954.5	\$0.14	\$0.01	\$759,047	\$336,521	\$1,095,568	5,460,773	24,593,570	--		
☐ Wall Construction_R13 Wood	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	924.2	\$0.14	\$0.01	\$754,402	\$318,921	\$1,073,324	5,427,355	23,307,370	--		
☐ Wall Construction_R13+R10 Metal	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	879.4	\$0.14	\$0.01	\$743,508	\$294,376	\$1,037,883	5,348,975	21,513,540	--		
☐ Wall Construction_14-inch ICF	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	872.8	\$0.14	\$0.01	\$740,482	\$291,249	\$1,031,731	5,327,207	21,285,030	--		
☐ Wall Construction_R38 Wood	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	872.0	\$0.14	\$0.01	\$745,641	\$288,897	\$1,034,538	5,364,326	21,113,130	--		
☐ Wall Construction_R2 CMU	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	976.4	\$0.14	\$0.01	\$763,194	\$348,889	\$1,112,083	5,490,602	25,497,460	--		
☐ Wall Construction_12.25-inch SIP	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	874.5	\$0.14	\$0.01	\$744,129	\$291,018	\$1,035,147	5,353,444	21,268,160	--		
☐ Roof Construction_Uninsulated	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	952.5	\$0.14	\$0.01	\$780,648	\$327,545	\$1,108,193	5,616,175	23,937,570	--		
☐ Roof Construction_R10	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	895.8	\$0.14	\$0.01	\$745,057	\$304,201	\$1,049,257	5,360,119	22,231,560	--		
☐ Infiltration (ACH)_0.17 ACH	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	887.8	\$0.14	\$0.01	\$744,216	\$299,453	\$1,043,669	5,354,074	21,884,570	--		
☐ Infiltration (ACH)_0.4 ACH	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	890.1	\$0.14	\$0.01	\$743,780	\$301,081	\$1,044,861	5,350,933	22,003,590	--		
☐ Infiltration (ACH)_0.8 ACH	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	894.3	\$0.14	\$0.01	\$743,185	\$303,952	\$1,047,137	5,346,652	22,213,380	--		
☐ Infiltration (ACH)_1.2 ACH	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	898.9	\$0.14	\$0.01	\$743,340	\$306,773	\$1,050,113	5,347,773	22,419,520	--		
☐ Infiltration (ACH)_1.6 ACH	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	903.6	\$0.14	\$0.01	\$743,361	\$309,734	\$1,053,095	5,347,923	22,635,930	--		
☐ Infiltration (ACH)_2.0 ACH	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	908.5	\$0.14	\$0.01	\$743,740	\$312,744	\$1,056,484	5,350,644	22,855,920	--		
☐ Lighting Efficiency_0.3 W/sf	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	831.8	\$0.14	\$0.01	\$596,496	\$316,288	\$912,784	4,291,338	23,114,920	--		
☐ Lighting Efficiency_0.7 W/sf	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	891.9	\$0.14	\$0.01	\$747,509	\$300,896	\$1,048,405	5,377,761	21,990,060	--		
☐ Lighting Efficiency_1.1 W/sf	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	963.6	\$0.14	\$0.01	\$899,878	\$292,321	\$1,192,298	6,474,660	21,363,340	--		
☐ Lighting Efficiency_1.5 W/sf	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,041.4	\$0.14	\$0.01	\$1,052,136	\$287,730	\$1,339,866	7,569,325	21,027,810	--		
☐ Lighting Efficiency_1.9 W/sf	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,120.7	\$0.14	\$0.01	\$1,203,502	\$284,406	\$1,487,908	8,658,291	20,784,890	--		
☐ Daylighting & Occupancy Control_None	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	890.1	\$0.14	\$0.01	\$743,780	\$301,081	\$1,044,861	5,350,933	22,003,590	--		
☐ Daylighting & Occupancy Control_Daylighting Controls	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	890.1	\$0.14	\$0.01	\$743,780	\$301,081	\$1,044,861	5,350,933	22,003,590	--		
☐ Daylighting & Occupancy Control_Occupancy Controls	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	873.7	\$0.14	\$0.01	\$704,318	\$304,634	\$1,008,952	5,067,036	22,263,180	--		
☐ Daylighting & Occupancy Control_Daylighting & Occupancy Control	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	873.7	\$0.14	\$0.01	\$704,318	\$304,634	\$1,008,952	5,067,036	22,263,180	--		
☐ Plug Load Efficiency_0.6 W/sf	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	842.7	\$0.14	\$0.01	\$618,321	\$315,441	\$933,762	4,448,354	23,053,010	--		
☐ Operating Schedule_24/7	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	931.1	\$0.14	\$0.01	\$919,771	\$264,719	\$1,184,489	6,617,054	19,346,120	--		
☐ Operating Schedule_12/7	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	745.6	\$0.14	\$0.01	\$829,066	\$179,167	\$1,008,233	5,964,507	13,093,840	--		
☐ Operating Schedule_12/6	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	703.4	\$0.14	\$0.01	\$790,406	\$166,081	\$956,487	5,686,372	12,137,510	--		
☐ Operating Schedule_12/5	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	661.2	\$0.14	\$0.01	\$675,417	\$180,083	\$855,500	4,850,118	13,160,790	--		
☐ Min / Max Internal Loads_Max Internal Loads	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,377.4	\$0.14	\$0.01	\$1,693,743	\$273,551	\$1,967,294	12,185,200	19,991,600	--		
☐ Min / Max Internal Loads_Min Internal Loads	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	784.1	\$0.14	\$0.01	\$450,903	\$337,611	\$788,514	3,243,904	24,673,270	--		
☐ Min / Max Envelope_Max Envelope	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	1,081.2	\$0.14	\$0.01	\$808,919	\$399,193	\$1,208,111	5,819,559	29,173,740	--		
☐ Min / Max Envelope_Min Envelope	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	872.9	\$0.14	\$0.01	\$745,949	\$289,399	\$1,035,347	5,366,538	21,149,780	--		
☐ Min / Max Form_Max Form	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	2,091.2	\$0.14	\$0.01	\$1,480,572	\$801,894	\$2,282,456	10,651,600	58,803,140	--		
☐ Min / Max Form_Min Form	4/18/2023 2:36 AM	snemesenTGU3U	46,360	890.1	\$0.14	\$0.01	\$743,780	\$301,081	\$1,044,861	5,350,933	22,003,590	--		

Şekil 4.23'te gösterilen listede, uygulama alanının enerji kullanımına yönelik sıralanan her bir alternatif üzerinden incelemeler yapılabilmekte ve enerji etkin proje kombinasyonları oluşturulabilmektedir. Üzerinde değişiklikler yapılan proje Revit'e tekrar aktarıldığında, proje değişikliklerle birlikte otomatik olarak güncellenebilmektedir.

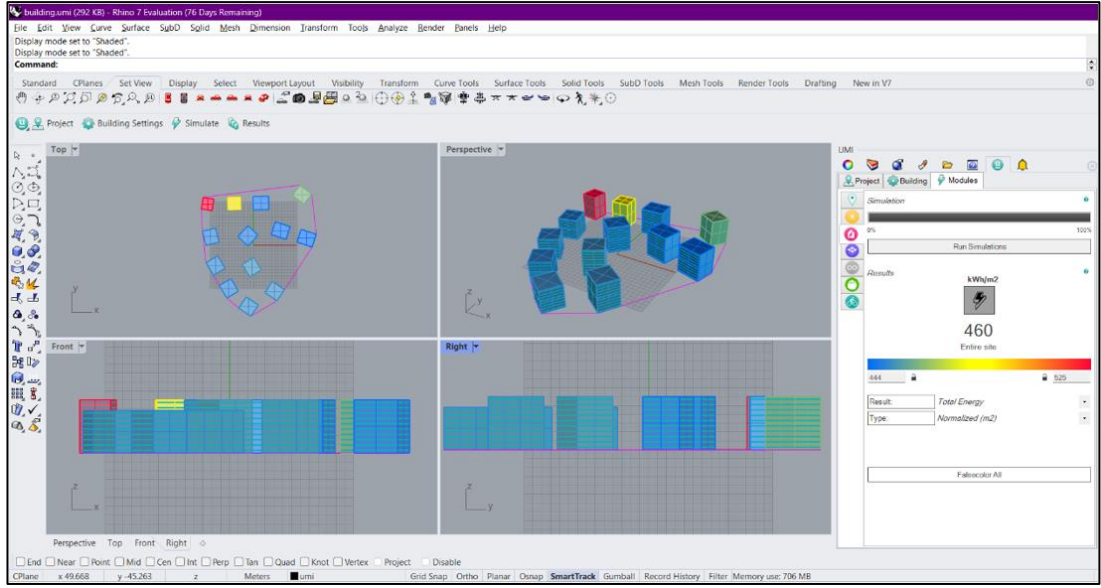
4.3. UBEM.IO

Uygulama alanı için UBEM.IO ile oluşturulan modelin, UMI eklentisi üzerinden Rhino'ya aktarılarak enerji talep analizi yapılmıştır. Yapılan enerji talep analizi sonucunda, uygulama alanının toplam enerji kullanımı Şekil 4.24'te gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Uygulama alanının toplam enerji kullanımı

Şekil 4.24'te gösterilen veri doğrultusunda, uygulama alanının yıllık toplam enerji kullanımı 28 137 459 kWh'tir. Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu ise Şekil 4.25'te gösterilmektedir.



Şekil 4.25. Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu

Şekil 4.25'te gösterilen veri doğrultusunda, uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu yıllık 460 kWh/m²'dir. Oluşturulan model çerçeveleri üzerinden yapılan enerji talep analizleri sonucunda, uygulama alanının enerji tüketim verisinden en uzak olan enerji talep analizi sonucunun UBEM.IO ile oluşturulan model çerçevesi'ne ait olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji tedariginde fosil yakıtların negatif çevresel etkisi, enerji temininin ulusal güvenlik ve dışa bağımlılık boyutu gibi küresel ve yerel etkenler, enerji tasarrufuna yönelik politikalar oluşturulmasını ve bu konularda eyleme geçilmesini gerekli kılmaktadır. Bu sebeple bütün ülkelerin enerjide kendine yeterliliklerinin sağlanması açısından enerjinin etkin kullanımı konularına çözümler sunması ve teknolojik gelişmelerde çağı yakalayabilmek adına bu durumlarda inovasyon ve bilgi birikimlerini arttırması gerekmektedir. Enerji tüketiminde büyük bir katkıya sahip kentsel alanların modellenmesi ve kentsel ölçekte enerji talebinin simüle edilmesi, enerjinin etkin kullanılması adına önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Çünkü kentsel alanların çevre üzerinde; ısı adası oluşturarak çevre sıcaklığını arttırması, yoğun nüfus, enerji kullanımı, araç trafiği ve endüstri faaliyetleri gibi etkenler ile kentsel alanlardaki sera gazı emisyonlarını artırarak küresel ısınmayı hızlandırması gibi negatif etkileri bulunmaktadır. Kentsel bina enerji modelleme yaklaşımları bu durumlara yönelik çözüm oluşturma açısından sahip olduğu potansiyel dolayısıyla ülkelerin kullanımı açısından git gide daha yaygın hale gelmektedir. UBEM bu alanda, geleceğe yönelik planlamaların ve stratejilerin belirlenmesi açısından kentsel alandaki enerji tüketim trendlerinin ortaya konulabilmesini sağlayacaktır. Bununla birlikte Avrupa ve Amerika dışındaki çoğu şehir için UBEM oluşturmada, verilerin toplanması, bu verilerin standardizasyonu vb.leri gibi konularda sıkıntı yaşanmaktadır. Dolayısıyla halihazırdaki UBEM'ler her bölgeye uygun bir çerçeve sunamamaktadır. Aynı zamanda kentsel alanlar için mikroiklim etkilerinin de, bu yaklaşıma entegre edilerek ele alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada, kentsel alanları modellemek ve kentsel ölçekte enerji talebini tahmin etmek üzere uygulanabilir ve pratik bir model çerçevesi oluşturulması amaçlanmıştır. Oluşturulan model çerçevesinin; bina stok sistemi ve veri setlerinin eksikliği, ekstra algoritma oluşturma gereksinimi, gerçek enerji tüketim verilerinin elde edilmesinde zorluk yaşama vb.leri gibi durumları yaşayan ülkelerdeki kentsel alanlar için uygulanabilir olması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda; City Energy Analyst (CEA), Spacemaker-Revit, UBEM.IO araçları ile üç ayrı UBEM çerçevesi oluşturulmuştur. Bu UBEM çerçeveleri, Ankara'nın Mamak ilçesinde konumlu 13 bloktan oluşan bir TOKİ sitesinin enerji talebinin analiz edilmesi açısından incelenmiştir. Uygulama

alanı için oluşturulan UBEM çerçeveleri dahilinde yapılan enerji talep analizleri, alanın yıllık enerji tüketim verisiyle karşılaştırılıp belirtilen durumlar için en uygulanabilir UBEM çerçevesi belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda;

- Uygulama alanının enerji kullanım yoğunluğu $232.78 \text{ kWh/m}^2.\text{yıl}$ olup buna en yakın sonucun $214 \text{ kWh/m}^2.\text{yıl}$ ile Spacemaker-Revit ile oluşturulan model çerçevesinden elde edildiği görülmüştür.
- Onun ardından CEA ile oluşturulan model $108 \text{ kWh/m}^2.\text{yıl}$ ile onu takip etmekle birlikte en uzak sonucu veren $460 \text{ kWh/m}^2.\text{yıl}$ ile UBEM.IO model çerçevesidir.
- CEA model çerçevesinin İsviçre standartları üzerine oluşturulmuş bir analiz yapısına sahip olması sebebiyle programın ürettiği enerji talep analizi sonuçları, belirli kentsel alanlar dışında yüzeysel kalmakta ve veri girişlerinde esneklik sağlama konusunda yetersiz kalmaktadır.
- UBEM.IO model çerçevesinin veri girişlerinde esneklik sağlama düzeyinin düşük olması ve Amerika dışındaki ülkeler için oluşturulan UBEM'den elde edilen enerji talep analiz verilerinin gerçek tüketim verilerine yaklaşamaması nedenleriyle incelenen model çerçeveleri arasında en az uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir.
- Spacemaker-Revit UBEM çerçevesi aracılığıyla elde edilen enerji talep analizinin ise, uygulama alanının enerji tüketimine en yakın sonucu verdiği görülmüştür.
- Spacemaker-Revit model çerçevesinde yapılan analizlerin detay seviyesi arttırıldığında, alanın enerji tüketimine daha yakın sonuçlar vereceği tespit edilmiş olup Revit, veri girişleri konusunda diğer incelenen araçlara göre daha fazla esneklik sağlamaktadır.
- Revit'te kullanılan standartların spesifik bir alanda geçerli olmasından ziyade daha yaygın olması ve çeşitli analiz araçları arasında kolayca dışa aktarım yapılarak bağlantı sağlanmasına müsaade etmesi, bu model çerçevesini diğer iki model çerçevesinden öne çıkarmaktadır.
- Buna ilaveten, Spacemaker platformunun çalışma alanı için gün ışığı potansiyeli, güneş analizi, rüzgar analizi (yön ve konfor analizleri) ve mikro iklim analizi gibi etkili analizlere olanak sağlaması bu UBEM çerçevesinin incelenenler arasında en etkin model çerçevesi olduğunu göstermektedir.

- Bütün bunlar doğrultusunda; UBEM oluşturmada çalışmada belirtilen nedenlerle sıkıntı yaşayan ülkelerdeki kentsel alanlar için en uygulanabilir model çerçevesinin Spacemaker-Revit ile oluşturulan UBEM çerçevesi olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmanın sonucunda oluşturulan UBEM çerçevesi, gelecekte yaygın olarak kullanılacak UBEM alanındaki bilgi birikimine katkı sağlayarak UBEM oluşturmada çeşitli sorunlar yaşayan ülkeler için çözümler sunabilmektedir. Aynı zamanda oluşturulan model çerçevesi; politikaların belirlenmesinde ve yatırımlar öncesi karar alınması konularında, belirli bir kentsel alandaki enerji tüketim eğilimlerini somut bir şekilde ortaya koyarak katkı sağlayabilmektedir. Oluşturulan model çerçevesi üzerinden yapılan enerji talep analizi çıktıları ile seçili kentsel alanın enerji performansı çeşitli yönlerden incelenebilmekte, alandaki mikro iklim koşulları ve projenin fiziksel çevre üzerindeki etkileri değerlendirilebilmekte, henüz tasarım aşamasındaki projeler için mali zarar söz konusu değilken tasarımı iyileştirici kararların alınabilmesini sağlayabilmektedir. Bütün bunlar, enerji verimli bir geleceğe doğru atılması gereken adımlar ve Paris antlaşması gereği kentsel alanlardaki emisyon azaltma hedefleri düşünüldüğünde, kentsel alanların yerel sorunlarına çözüm oluşturmak için etkili bir yöntem olan UBEM yaklaşımlarından faydalanılması gerekliliğini doğrulamaktadır. Bu doğrultuda kentlerde fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve küresel ısınmayı engelleyebilmek açısından UBEM yaklaşımlarından faydalanmak büyük öneme sahiptir. Enerji tüketiminin ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azalması, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayarak kentlerin daha temiz ve sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlemesine katkı sağlayacaktır.

Çalışmada; UBEM alanında yapılmış çalışmaların ve çeşitli ülkelerdeki gelişmelerin incelenmesi doğrultusunda küresel açıdan genel görünüm, Türkiye'deki durum ve buna yönelik öneriler aşağıda sıralanmıştır;

- ABD ve Avrupa Birliği ülkeleri gibi ülkelerde; halihazırda ulusal bina stok sistemi, arketip oluşturma, EPC gibi sertifikalandırma sistemi ve kamu veri tabanlarına ulaşma konularında ve bu alanda web tabanlı platformlar geliştirme gibi konularda devlet destekli çeşitli projeler yürütülmüş olup bu konularda geliştirme çalışmaları aktif bir şekilde devam etmektedir.

- Bununla birlikte, bu ülkelerinde dışında kalan çoğu ülke gibi Türkiye de, UBEM oluşturmada yaşanan en büyük zorluklardan olan veri eksikliği konusundan muzdariptir.
- Bina bilgileri konusunda, özellikle akademik çalışmalarda kullanılmak üzere veri temin edilebilmesi ciddi bir problem kaynağıdır.
- Bu konuda; binaların elektrik ve doğalgaz tüketim verileri, Enerji Kimlik Belgesi gibi mevcut kamu verileri gizlilik düzenlemeleri gibi konularda sorun teşkil etmeyecek şekilde geliştirme çalışmaları için kullanıma açık bir hale getirilebilir.
- Aynı zamanda, ulusal bina tipolojisine dair çalışmaların eksikliği UBEM alanında ilerleme kaydedilmesini zorlaştırmaktadır. Bu konuda; devlet destekli olarak kamu kullanımına açık bir şekilde, UBEM araçları için terminoloji açısından standartlaştırılmış ulusal bina stok sistemi veri tabanlarının ve arketip kitaplığının oluşturulması, bu alanda yapılacak çalışmaların geliştirilmesi konusunda büyük fayda sağlayacaktır.

UBEM alanında yapılacak gelecekteki araştırmalar için; modelleme sürecini daha verimli hale getirebilmek açısından veri madenciliği, makine öğrenmesi ve yapay zeka gibi modelleme tekniklerinden faydalanmak, kullanıcıların enerji tüketim eğilimlerinin modellemeye dahil edilmesi ve hesaplama yoğunluğu nedeniyle web tabanlı yazılımlar geliştirmek ileride yapılacak çalışmalar için değinilmesi gereken konulardandır. Aynı zamanda belirli bir kentsel alandaki mikroiklim koşullarının belirlenmesi açısından daha doğru sonuçlar elde etmek için güncel hava durumu veri setlerinin oluşturulması yapılacak değerlendirmelerin güvenilirliğini arttırıp performans iyileştirmeleri açısından daha doğru kararların alınmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abbasabadi, N., & Ashayeri, M. (2019). Urban energy use modeling methods and tools: A review and an outlook. *Building and Environment*, 161, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106270>
- Abolhassani, S. S., Amayri, M., Bouguila, N., & Eicker, U. (2022). A new workflow for detailed urban scale building energy modeling using spatial joining of attributes for archetype selection. *Journal of Building Engineering*, 46, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103661>
- Alhamwi, A., Medjroubi, W., Vogt, T., & Agert, C. (2018). Modelling urban energy requirements using open source data and models. *Applied Energy*, 231, 1100-1108. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.164>
- Ali, U., Shamsi, M. H., Hoare, C., & O'Donnell, J. (2018). GIS-based residential building energy modeling at district scale. *4th IBPSA-England Conference on Building Simulation and Optimization*, September 11-12, Cambridge, 153-160.
- Ali, U., Shamsi, M. H., Hoare, C., Mangina, E., & O'Donnell, J. (2019). A data-driven approach for multi-scale building archetypes development. *Energy and buildings*, 202, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109364>
- Ali, U., Shamsi, M. H., Hoare, C., Mangina, E., & O'Donnell, J. (2021). Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy and Buildings*, 246, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111073>
- Amrith, S., Oraiopoulos, A., Korolija, I., & Fennell, P. (2022). Developing an Open Access Plugin for Urban Building Energy Modelling in QGIS. *BSO-VI 2022 Sixth Building Simulation and Optimisation Virtual Conference*, December 13-14, Bath, 1-8.
- Ang, Y. Q., Berzolla, Z. M., & Reinhart, C. F. (2020). From concept to application: A review of use cases in urban building energy modeling. *Applied Energy*, 279, 115738. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115738>
- Ang, Y. Q., Berzolla, Z. M., Letellier-Duchesne, S., Jusiega, V., & Reinhart, C. (2022). UBEM. io: A web-based framework to rapidly generate urban building energy models for carbon reduction technology pathways. *Sustainable Cities and Society*, 77, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103534>
- ANL (2023). Commercial Building Agent-based Model. Argonne National Laboratory. <https://www.anl.gov/esia/commercial-building-agentbased-model>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Artiges, N., Rouchier, S., Delinchant, B., & Wurtz, F. (2021). Bayesian Inference of Dwellings Energy Signature at National Scale: Case of the French Residential Stock. *Energies*, 14(18), 1-26. <https://doi.org/10.3390/en14185651>

- ASHRAE (2017). ASHRAE Handbook-Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Georgia.
- Autodesk (2023). Autodesk Revit 2021. Autodesk Inc. <https://help.autodesk.com/view/RVT/2021/ENU/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Baetens, R., De Coninck, R., Van Roy, J., Verbruggen, B., Driesen, J., Helsen, L., & Saelens, D. (2012). Assessing electrical bottlenecks at feeder level for residential net zero-energy buildings by integrated system simulation. *Applied Energy*, 96, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.098>
- Baetens, R., De Coninck, R., Jorissen, F., Picard, D., Helsen, L., & Saelens, D. (2015). Openideas-an open framework for integrated district energy simulations. *14th Conference of the International Building Performance Simulation Association*. December 7-9, Hyderabad, 1-8.
- Başkent Doğalgaz Dağıtım GYO A.Ş. (2023). Bilgi edinme. Başkent Doğalgaz Dağıtım GYO A.Ş. bilgiedinme@baskentdogalgaz.com.tr. (Son erişim tarihi: 11 Nisan 2023)
- Bergerson, J., Muehleisen, R. T., Rodda, W. B., Auld, J. A., Guzowski, L. B., Ozik, J., & Collier, N. (2015). Designing future cities: LakeSIM integrated design tool for assessing short and long term impacts of urban scale conceptual designs. *ISOCARP Review*, 11, 48-63.
- Berkeley Lab (2023). Urban Science. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://buildings.lbl.gov/urban-science/tools>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Best Directory (2022). CityBES: City Buildings, Energy, Sustainability. US Department of Energy. <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/citybes-city-buildings-energy-sustainability>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- BP (2022). bp Statistical Review of World Energy 2022. BP, London.
- Buckley, N., Mills, G., Letellier-Duchesne, S., & Benis, K. (2021). Designing an energy-resilient neighbourhood using an urban building energy model. *Energies*, 14(15), 1-17. <https://doi.org/10.3390/en14154445>
- Carnieletto, L., Ferrando, M., Teso, L., Sun, K., Zhang, W., Causone, F., Romagnoni, P., Zarrella, A., & Hong, T. (2021). Italian prototype building models for urban scale building performance simulation. *Building and Environment*, 192, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107590>
- Cerezo, C., Sokol, J., AlKhaled, S., Reinhart, C., Al-Mumin, A., & Hajiah, A. (2017). Comparison of four building archetype characterization methods in urban building energy modeling (UBEM): A residential case study in Kuwait City. *Energy and Buildings*, 154, 321-334.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.029>

- Cerezo Davila, C., Jones, N., Al-Mumin, A., Hajiah, A., & Reinhart, C. (2017). Implementation of a calibrated Urban Building Energy Model (UBEM) for the evaluation of energy efficiency scenarios in a Kuwaiti residential neighborhood. *15th Conference of IBPSA*. August 7-9, San Francisco, 745-754.
- Chen, Y., Hong, T., & Piette, M. A. (2017a). City-scale building retrofit analysis: a case study using CityBES. *15th Conference of IBPSA*. August 7-9, San Francisco, 259-266.
- Chen, Y., Hong, T., & Piette, M. A. (2017b). Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis. *Applied Energy*, 205, 323-335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.128>
- Chen, Y., & Hong, T. (2018). Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models. *Applied Energy*, 215, 717-735. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.073>
- Chen, Y., Hong, T., Luo, X., & Hooper, B. (2019). Development of city buildings dataset for urban building energy modeling. *Energy and Buildings*, 183, 252-265. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.008>
- Coccolo, S., Kämpf, J., Mauree, D., & Scartezzini, J. L. (2018). Cooling potential of greening in the urban environment, a step further towards practice. *Sustainable cities and society*, 38, 543-559. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.019>
- Davila, C. C. (2016). Improving Urban Building Energy Models (UBEM) through building archetype calibration. *ASHRAE Annual Conference*. June 28, Saint Louis MI, 1-45.
- Davila, C. C., Reinhart, C. F., & Bemis, J. L. (2016). Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. *Energy*, 117, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>
- Demographia (2022). Demographia World Urban Areas. Wendell Cox Consultancy, Belleville.
- Deng, Z., Chen, Y., Pan, X., Peng, Z., & Yang, J. (2021). Integrating GIS-based point of interest and community boundary datasets for urban building energy modeling. *Energies*, 14(4), 1-17. <https://doi.org/10.3390/en14041049>
- DiStefano, J., Lew, E., & Analytics, C. (2016). Web-Based Energy Modeling for California. *2016 ACEEE Summer Study On Energy Efficiency in Buildings*. August 21-26, Pacific Grove, 1-11.

- Energy Efficiency&Renewable Energy (2023). Virtual EPB. Oak Ridge National Laboratory. <https://www.energy.gov/eere/buildings/virtual-epb>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Enerjisa (2023). Enerjisa Sürdürülebilirlik Çerçevesi. Enerjisa Enerji A.Ş. <https://www.enerjisa.com.tr/>. (Son erişim tarihi: 11 Nisan 2023)
- EPFL (2023). CitySim Software. EPFL Solar Energy and Building Physics Laboratory. <https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2022). Yakıta Göre Birincil Enerji Tüketimi. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Ferrando, M., & Causone, F. (2020). An overview of urban building energy modelling (UBEM) tools. *16th IBPSA Conference*, September 2-4, Rome, 3452-3459.
- Ferrando, M., Causone, F., Hong, T., & Chen, Y. (2020). Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society*, 62, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408>
- Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2015). Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Applied Energy*, 142, 247-265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.068>
- Fonseca, J. A., Nguyen, T. A., Schlueter, A., & Marechal, F. (2016). City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings*, 113, 202-226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.055>
- Ghiassi, N., Tahmasebi, F., & Mahdavi, A. (2017). Harnessing buildings' operational diversity in a computational framework for high-resolution urban energy modeling. *Building Simulation*, 10, 1005-1021. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0356-1>
- Google Earth (2023). Google Earth Pro. Google Labs https://earth.google.com/web/@39.93718885,32.90467961,1425.36385096a,585.7231994d,35y,0.0002h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=tr. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Groger, G., Kolbe, T. H., Czerwinski, A., & Nagel, C. (2008). OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Version 1.0. 0. Open Geospatial Consortium, Berlin.
- GWA (2023). Global Wind Atlas. DTU Wind Energy <https://globalwindatlas.info/en>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)

- Guo, T., Bachmann, M., Kersten, M., & Kriegel, M. (2022). Alternative: A workflow to generate building energy demand profiles at urban scales from low-level city datasets. *SSRN Electronic Journal*, 1-38. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4241705>
- Happle, G., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2018). A review on occupant behavior in urban building energy models. *Energy and Buildings*, 174, 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.030>
- Happle, G. (2020). *Data-driven occupant presence models for urban building energy simulation*. (Ph.D. Dissertation, ETH Zurich)
- Heidarinejad, M., Mattise, N., Dahlhausen, M., Sharma, K., Benne, K., Macumber, D., Brackney, L., & Srebric, J. (2017). Demonstration of reduced-order urban scale building energy models. *Energy and Buildings*, 156, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.086>
- Hong, T., Chen, Y., Lee, S. H., & Piette, M. A. (2016). CityBES: A web-based platform to support city-scale building energy efficiency. *Urban Computing*, 14, 1-9. <https://doi.org/10.1145/12345.67890>
- Hong, T., Langevin, J., & Sun, K. (2018). Building simulation: Ten challenges. *Building Simulation*, 11, 871-898. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0444-x>
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., & Lee, S. H. (2020). Ten questions on urban building energy modeling. *Building and Environment*, 168, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106508>
- Hu, Y., Cheng, X., Wang, S., Chen, J., Zhao, T., & Dai, E. (2022). Times series forecasting for urban building energy consumption based on graph convolutional network. *Applied Energy*, 307, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118231>
- IEA (2022). Buildings, IEA, Paris. CC BY 4.0. <https://www.iea.org/reports/buildings>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- IPCC (2023). About the IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/about/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Johari, F., Peronato, G., Sadeghian, P., Zhao, X., & Widén, J. (2020). Urban building energy modeling: State of the art and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109902>
- Johari, F. (2021). *Urban building energy modeling: A systematic evaluation of modeling and simulation approaches*. (Ph.D. Dissertation, Uppsala University)
- Johari, F., Munkhammar, J., Shadram, F., & Widén, J. (2022). Evaluation of simplified building energy models for urban-scale energy analysis of buildings. *Building and Environment*, 211, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108684>

- JRC (2012). Photovoltaic geographical information system (PVGIS). European Commission. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Jusuf, S. K., Mousseau, B., Godfroid, G., & Soh, J. H. V. (2017). Path to an integrated modelling between IFC and CityGML for neighborhood scale modelling. *Urban Science*, 1(3), 1-20. <https://doi.org/10.3390/urbansci1030025>
- Kaden, R., & Kolbe, T. H. (2013). City-wide total energy demand estimation of buildings using semantic 3D city models and statistical data. *8th International 3D GeoInfo Conference*. November 27-29, Istanbul, 163-171.
- Katal, A., Mortezaazadeh, M., Wang, L. L., & Yu, H. (2022). Urban building energy and microclimate modeling–From 3D city generation to dynamic simulations. *Energy*, 251, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123817>
- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., & Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and environment*, 45(7), 1683-1697. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>
- Keirstead, J., Jennings, M., & Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3847-3866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>
- Kontokosta, C. E., & Tull, C. (2017). A data-driven predictive model of city-scale energy use in buildings. *Applied energy*, 197, 303-317. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.005>
- Kristensen, M. H., Hedegaard, R. E., & Petersen, S. (2020). Long-term forecasting of hourly district heating loads in urban areas using hierarchical archetype modeling. *Energy*, 201, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117687>
- Kusuda, T. (1999). Early history and future prospects of building system simulation. *Proceedings of Building Simulation-IBPSA*, June, Kyoto, 3-15.
- Lee, S. H., Zhao, F., & Augenbroe, G. (2013). The use of normative energy calculation beyond building performance rating. *Journal of Building performance simulation*, 6(4), 282-292. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.720712>
- Li, Q., Quan, S. J., Augenbroe, G., Yang, P. P. J., & Brown, J. (2015). Building energy modelling at urban scale: Integration of reduced order energy model with geographical information. *14th Conference of International Building Performance Simulation Association*, December 7-9, Hyderabad, 190-198.
- Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., & Zhang, X. (2017). Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy*, 141, 2445-2457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071>

- Li, W. (2020). Quantifying the Building Energy Dynamics of Manhattan, New York City, Using an Urban Building Energy Model and Localized Weather Data. *Energies*, 13(12), 1-20. <https://doi.org/10.3390/en13123244>
- Li, Z., Lin, B., Zheng, S., Liu, Y., Wang, Z., & Dai, J. (2020). A review of operational energy consumption calculation method for urban buildings. *Building Simulation*, 13, 739-751. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0619-0>
- Lim, H., & Zhai, Z. J. (2017). Review on stochastic modeling methods for building stock energy prediction. *Building Simulation*, 10(5), 607-624. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0383-y>
- Loftus, C., & Bassøe-Eriksen, A. (2022). Iterative concept design with Spacemaker & Revit. Autodesk Inc. <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Iterative-concept-design-Spacemaker-Revit-2022#handout>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Lu, Y., Scott, A., Kim, J., Curi, C. B., McCarty, J., Pardy, A., Rysanek, A., Girling, C., & Kellett, R. (2021). Integration of an energy-economy model with an urban energy model. *Buildings and Cities*, 2(1), 115-133. <https://doi.org/10.5334/bc.71>
- Ma, J., & Cheng, J. C. (2016). Estimation of the building energy use intensity in the urban scale by integrating GIS and big data technology. *Applied Energy*, 183, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.079>
- Maccarini, A., Mans, M., Sørensen, C. G., & Afshari, A. (2021). Towards an automated generator of urban building energy loads from 3D building models. *14th International Modelica Conference*, September 20-24, Linköping, 659-664.
- Malhotra, A., Bischof, J., Nichersu, A., Häfele, K. H., Exenberger, J., Sood, D., Allan, J., Frisch, J., Treeck, C., O'Donnell, J., & Schweiger, G. (2022). Information modelling for urban building energy simulation-A taxonomic review. *Building and Environment*, 208, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108552>
- Mauree, D., Coccolo, S., Kaempf, J., & Scartezzini, J. L. (2017). Multi-scale modelling to evaluate building energy consumption at the neighbourhood scale. *PloS one*, 12(9), 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183437>
- Meteotest (2019). Meteonorm Intro. Meteotest AG. <https://meteonorm.com/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- MIT Sustainable Design Lab (2023). Urban Modeling Interface 3.0. Massachusetts Institute of Technology. <https://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Mittelstädt, A., Köhler, S., Sihombing, R., Duminil, E., Coors, V., Eicker, U., & Schröter, B. (2019). A Multi-Scale, Web-Based Interface for Strategic

Planning of Low-Carbon City Quarters. *Proceedings of the Second International Conference on Urban Informatics*, June 24-26, Hong Kong, 24-26.

Mohammadizazi, R., Copeland, S., & Bilec, M. M. (2021). Urban building energy model: Database development, validation, and application for commercial building stock. *Energy and Buildings*, 248, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111175>

Mosteiro-Romero, M., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2017). Seasonal effects of input parameters in urban-scale building energy simulation. *Energy Procedia*, 122, 433-438. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.459>

Muehleisen, R., & Bergerson, J. (2017). Coupling a Reduced Order Building Energy Model to UrbanSim. *15th IBPSA Conference*, August 7-9, San Francisco, 521-527.

Nageler, P., Zahrer, G., Heimrath, R., Mach, T., Mauthner, F., Leusbrock, I., Schranzhofer, H., & Hochenauer, C. (2017). Novel validated method for GIS based automated dynamic urban building energy simulations. *Energy*, 139, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.151>

Nagpal, S., & Reinhart, C. F. (2018). A comparison of two modeling approaches for establishing and implementing energy use reduction targets for a university campus. *Energy and buildings*, 173, 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.035>

Nouvel, R., Brassel, K. H., Bruse, M., Duminil, E., Coors, V., Eicker, U., & Robinson, D. (2015). SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. *CISBAT 2015*, September 9-11, Lausanne, 889-894.

NREL (2023). URBANopt Advanced Analytics Platform. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/buildings/urbanopt.html>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)

Nutkiewicz, A., & Jain, R. K. (2019). Exploring the integration of simulation and deep learning models for urban building energy modelling and retrofit analysis. *16th IBPSA Conference*, September 2-4, Rome, 3209-3216.

Nutkiewicz, A., Choi, B., & Jain, R. K. (2021). Exploring the influence of urban context on building energy retrofit performance: A hybrid simulation and data-driven approach. *Advances in Applied Energy*, 3, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100038>

OpenStreetMap (2023). OpenStreetMap About. OpenStreetMap Vakfı (OSMF). <https://www.openstreetmap.org/about>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)

Oraiopoulos, A., & Howard, B. (2022). On the accuracy of urban building energy modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111976>

- Papadopoulos, S., & Kontokosta, C. E. (2019). Grading buildings on energy performance using city benchmarking data. *Applied Energy*, 233, 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.053>
- Pasichnyi, O., Levihn, F., Shahrokni, H., Wallin, J., & Kordas, O. (2019). Data-driven strategic planning of building energy retrofiting: The case of Stockholm. *Journal of cleaner production*, 233, 546-560. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.373>
- Perera, A. T. D., Coccolo, S., Scartezzini, J. L., & Mauree, D. (2018). Quantifying the impact of urban climate by extending the boundaries of urban energy system modeling. *Applied Energy*, 222, 847-860. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.004>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., González, R., & Maestre, I. R. (2009). A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings*, 41(3), 272-278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.004>
- Perwez, U., Yamaguchi, Y., Ma, T., Dai, Y., & Shimoda, Y. (2022). Multi-scale GIS-synthetic hybrid approach for the development of commercial building stock energy model. *Applied Energy*, 323, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119536>
- Polly, B., Kutscher, C., Macumber, D., Schott, M., Pless, S., Livingood, B., & Van Geet, O. (2016). From zero energy buildings to zero energy districts. *2016 ACEEE Summer Study On Energy Efficiency in Buildings*. August 21-26, Pacific Grove, 1-16.
- Prataviera, E., Romano, P., Carnieletto, L., Pirotti, F., Vivian, J., & Zarrella, A. (2021). EURECA: An open-source urban building energy modelling tool for the efficient evaluation of cities energy demand. *Renewable Energy*, 173, 544-560. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.144>
- Rashidfarokhi, N. (2021). Calibration in Urban Building Energy Modeling. (Master's Thesis, Uppsala University Department of Information Technology)
- Reinhart, C., Dogan, T., Jakubiec, J. A., Rakha, T., & Sang, A. (2013). Umi-an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, August 26-28, Chambery, 476-483.
- Reinhart, C. F., & Davila, C. C. (2016). Urban building energy modeling-A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Remmen, P., Lauster, M., Mans, M., Fuchs, M., Osterhage, T., & Müller, D. (2018). TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 11(1), 84-98. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1283539>

- Risch, S., Remmen, P., & Müller, D. (2021). Influence of data acquisition on the Bayesian calibration of urban building energy models. *Energy and Buildings*, 230, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110512>
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2022). Energy. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Schiefelbein, J., Rudnick, J., Scholl, A., Remmen, P., Fuchs, M., & Müller, D. (2019). Automated urban energy system modeling and thermal building simulation based on OpenStreetMap data sets. *Building and environment*, 149, 630-639. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.025>
- SEMANCO (2023). Semantic Tools for Carbon Reduction in Urban Planning. The SEMANCO integrated platform. <https://simstadt.hft-stuttgart.de/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- SimStadt (2023). SimStadt. HFT Stuttgart. <https://simstadt.hft-stuttgart.de/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Smithsonian Ocean (2023). What Are Fossil Fuels?. Smithsonian Institution. <https://ocean.si.edu/conservation/gulf-oil-spill/what-are-fossil-fuels#>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Sokol, J., Davila, C. C., & Reinhart, C. F. (2017). Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models. *Energy and Buildings*, 134, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.050>
- Spacemaker (2020). Advice and answers from the Spacemaker Team. Autodesk Inc. <https://help.spacemaker.ai/en/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(8), 1819-1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>
- Tardioli, G., Kerrigan, R., Oates, M., O'Donnell, J., & Finn, D. P. (2018). Identification of representative buildings and building groups in urban datasets using a novel pre-processing, classification, clustering and predictive modelling approach. *Building and Environment*, 140, 90-106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.035>
- The CEA team (2022). The City Energy Analyst (Version 3.32.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.598221>
- UBEM.IO (2020). Technology Pathways for Building Decarbonization. MIT Sustainable Design Lab (SDL). <https://www.ubem.io/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- UNDESA (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. United Nations,

New York.

- UNEP (2023a). Renewable energy. UN Environment Programme. <https://www.unep.org/explore-topics/energy/what-we-do/renewable-energy>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- UNEP (2023b). About Montreal Protocol. UN Environment Programme. <https://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- UNEP (2023c). Why do the Sustainable Development Goals matter?. UN Environment Programme. <https://www.unep.org/explore-topics/sustainable-development-goals/why-do-sustainable-development-goals-matter/goal-11>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- UNFCCC (2023). Process and meetings. UN Climate Change. <https://unfccc.int/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- UN-Habitat (2022). World Cities Report 2022. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi.
- UrbanFootprint (2023). Energy Transformation. Urban Intelligence. <https://urbanfootprint.com/solutions/energy/>. (Son erişim tarihi: 06 Nisan 2023)
- Vermeulen, T., Kämpf, J. H., & Beckers, B. (2013). Urban form optimization for the energy performance of buildings using Citysim. *CISBAT 2013*, September 4-6, Lausanne, 915-920.
- Walter, E., & Kämpf, J. H. (2015). A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values. *Proceedings of the 2nd Building Simulation Applications conference*, February 4-6, Bozen-Bolzano, 215-222.
- Wang, Y., Wu, T., Li, H., Skitmore, M., & Su, B. (2020). A statistics-based method to quantify residential energy consumption and stock at the city level in China: The case of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area cities. *Journal of Cleaner Production*, 251, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119637>
- Wang, W., Liu, K., Zhang, M., Shen, Y., Jing, R., & Xu, X. (2021). From simulation to data-driven approach: A framework of integrating urban morphology to low-energy urban design. *Renewable Energy*, 179, 2016-2035. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.024>
- Wang, C., Ferrando, M., Causone, F., Jin, X., Zhou, X., & Shi, X. (2022). Data acquisition for urban building energy modeling: A review. *Building and Environment*, 217, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109056>
- Yamagata, Y., Yang, P. P., Chang, S., Tobey, M. B., Binder, R. B., Fourie, P. J.,

- Jittrapirom, P., Kobashi, T., Yoshida, T., & Aleksejeva, J. (2020). Urban systems and the role of big data. In *Urban Systems Design*. (pp.23-58)
- Yang, F., & Jiang, Z. (2019). Urban building energy modelling and urban design for sustainable neighbourhood development-A China perspective. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, September 24-25, Cardiff, 1-8.
- Yücel, M. A., & Selçuk, M. (2009). Üç Boyutlu Kent Modellerinde Ayrıntı Düzeyi LoD Kavramı. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (101), 3-9.
- Zarrella, A., Prataiviera, E., Romano, P., Carnieletto, L., & Vivian, J. (2020). Analysis and application of a lumped-capacitance model for urban building energy modelling. *Sustainable Cities and Society*, 63, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102450>
- Zhao, Y., Zhang, C., Zhang, Y., Wang, Z., & Li, J. (2020). A review of data mining technologies in building energy systems: Load prediction, pattern identification, fault detection and diagnosis. *Energy and Built Environment*, 1(2), 149-164. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2019.11.003>