

**ENERJİ ETKİN KAMPÜS TASARIMININ YAPI BİLGİ
MODELLEMESİ TABANLI MORFOLOJİK ANALİZİ: DÜZCE
ÜNİVERSİTESİ ARAŞTIRMA HASTANESİ BÖLGESİ**

MERYEM BADUR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. AYŞEGÜL TANRIVERDİ KAYA**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ ETKİN KAMPÜS TASARIMININ YAPI BİLGİ
MODELLEMESİ TABANLI MORFOLOJİK ANALİZİ: DÜZCE
ÜNİVERSİTESİ ARAŞTIRMA HASTANESİ BÖLGESİ

Meryem BADUR tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Ayşegül TANRIVERDİ KAYA

Düzce Üniversitesi

Eş Danışman

Prof. Dr. Filiz BAL KOÇYİĞİT

Atılım Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ayşegül TANRIVERDİ KAYA

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Nuray Benli YILDIZ

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Derya ÇAKIR AYDIN

Gebze Teknik Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 17/07/2025

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

17 Temmuz 2025

Meryem BADUR

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde ve tamamlanmasında değerli katkılarını sunan, akademik bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Ayşegül Tanrıverdi Kaya'ya içten teşekkürlerimi sunarım. Araştırma sürecinde yönlendirmeleri ve yapıcı eleştirileriyle katkı sağlayan eş danışmanım Prof. Dr. Filiz Bal Koçyiğit'e şükranlarımı sunarım. Bu süreçte her daim yanımda olan sevgili anneme ve babama müteşekkirim. Ayrıca sabrı, sevgisi ve manevi desteğiyle bana güç veren değerli eşim Muhammet Mesut Badur'a en derin teşekkürlerimi bir borç bilirim. Son olarak, bu tez, varlıklarıyla yüreğimde iz bırakan Arif, Asaf'a ve yeni umudumuz Mahir'e ithaf edilmiştir...

17 Temmuz 2025

Meryem BADUR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
HARİTA LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. ÇALIŞMANIN KAPSAMI VE ÖNEMİ.....	1
1.2. ÇALIŞMANIN AMACI VE PROBLEMİ.....	4
1.3. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ VE YAPISI.....	5
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE.....	7
2.1. KENT MORFOLOJİSİ: TANIMI, TARİHÇESİ VE YÖNTEMSEL YAKLAŞIMLAR.....	7
2.1.1. Kentsel Formun Morfolojik Bileşenleri.....	10
2.1.2. Güncel Kent Morfolojisi Yaklaşımları ve Sürdürülebilirlik.....	11
2.2. ENERJİ ETKİN TASARIM KAVRAMI.....	12
2.2.1. Enerji Etkin ve Pasif Tasarım Prensipleri.....	13
2.3. YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (BIM) KAVRAMI.....	20
2.3.1. BIM'in Temelleri ve Tarihsel Gelişimi.....	22
2.3.2. BIM ve Enerji Performansı Arasındaki İlişki.....	23
3. KENT VE KAMPÜS MORFOLOJİSİNİN ENERJİ ETKİNLİĞİ BAĞLAMINDA ANALİZİ.....	28
3.1. KENT VE KAMPÜS MORFOLOJİSİNİN KURAMSAL ÇERÇEVESİ.....	28
3.1.1. Kent Morfolojisinin Disiplinlerarası Bağlamı.....	28
3.1.2. Temel Morfolojik Parametreler: Yoğunluk, Kompaktlık ve Geçirgenlik.....	29
3.1.3. Morfolojik Yapının Mikroklimatik Etkileri.....	31
3.1.4. Morfoloji, Enerji Kullanımı ve Çevresel Sürdürülebilirlik İlişkisi.....	33
3.2. KAMPÜS MORFOLOJİSİNİN ENERJİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİ.....	35
3.2.1. Kampüs Ölçeğinde Morfolojik Organizasyon ve Enerji Kullanımı.....	35
3.2.2. Kampüs Ölçeğinde Açık Alanlar, Peyzaj Stratejileri ve Mikroklimatik Konfor.....	36
3.2.3. Kampüs Ölçeğinde Pasif Enerji Stratejileri ile Morfolojik Entegrasyon.....	37
3.2.4. Enerji Odaklı Kampüs Planlama Süreçlerinde Sayısal Yaklaşımlar ve BIM Tabanlı Karar Destek Sistemleri.....	39
3.3. DOĞAL ÇEVRESEL GİRDİLERLE ENTEGRE MEKANSAL TASARIM.....	42
3.3.1. Güneş Işınımının Mekansal Tasarıma Etkileri.....	42
3.3.2. Rüzgar Dinamikleri, Doğal Havalandırma ve Kentsel Form.....	43

3.3.3. Gün Işığı, Görsel Konfor ve Biyofilik Tasarım	45
3.4. ENERJİ ETKİN VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KAMPÜS TASARIMI İÇİN MORFOLOJİK PRENSİPLER	48
3.4.1. Morfolojik Kararların Enerji Performansı Üzerindeki Bileşik Etkileri	48
3.4.2. Kampüs Planlamasında Tasarım Stratejilerinin Entegrasyonu.....	50
3.4.3. Dirençli ve Uyarlanabilir Kampüs Tasarımı İçin Mekansal Esneklik ve Gelecek Perspektifleri	51
4. BIM (YAPI BİLGİ MODELLEMESİ) TABANLI MORFOLOJİK ANALİZLERİN METODOLOJİK ÇERÇEVESİ VE UYGULAMA OLANAKLARI	53
4.1. BIM (YAPI BİLGİ MODELLEMESİ) TEKNOLOJİSİNİN MORFOLOJİK ANALİZE ENTEGRASYONU	54
4.1.1. BIM'in Temel Özellikleri ve Mimari Tasarım Sürecindeki Yeri	55
4.1.2. BIM Tabanlı Simülasyon Araçları (Forma, Revit, Rhino-Insight, EnergyPlus, vb.)	56
4.1.3. BIM ile Morfolojik Parametrelerin Ölçülmesi ve Yorumlanması	57
4.2. MORFOLOJİK GÖSTERGELER ÜZERİNDEN PERFORMANS ANALİZİ	57
4.2.1. Kompaktlık, Yoğunluk ve Yüzey/Hacim Oranı	58
4.2.2. Güneşlenme, Gölgeleme ve Gün Işığı Dağılımı	58
4.2.3. Rüzgar Koridorları ve Termal Konfor Analizleri	59
4.2.4. Görsel Konfor ve Işık Kalitesi Değerlendirmeleri	59
4.3. BIM ORTAMINDA MORFOLOJİK SİMÜLASYON SÜRECİ.....	60
4.3.1. Parametrik Tasarım ve Optimizasyon	60
4.3.2. Yapı Geometrisinin Performansa Dayalı Yeniden Kurulumu	61
4.3.3. Geribildirim Döngüleri ile Tasarım Kararlarının Yinelemesi.....	62
4.4. UYGULAMA OLANAKLARI VE UYGULAMALI SENARYO GELİŞTİRME	63
4.4.1. Eğitim Yapıları İçin Morfolojik Modelleme Pratikleri	63
4.4.2. Autodesk Forma ile Senaryo Analizi: Rüzgar, Güneş, Gün Işığı	63
4.4.3. Kampüs Tasarımı İçin Morfoloji-Tabanlı Sürdürülebilirlik Yorumları	66
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	69
5.1. ÇALIŞMA ALANININ TANITIMI	69
5.1.1. Coğrafi Konum ve Topoğrafya	69
5.1.2. İklim Özellikleri	70
5.1.3. Tarihi ve Kentsel Gelişim	71
5.1.4. Demografik Yapı ve Göç Durumu.....	71
5.1.5. Sosyo-Ekonomik Yapı.....	72
5.1.6. Kentsel Açık ve Yeşil Alanlar.....	72
5.1.7. Çevre Sorunları ve Doğal Afet Riskleri	73
5.1.8. Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü Konumu ve Genel Özellikleri..	74
5.1.9. Kampüs Alanının Morfolojik ve Mikroklimatik Özellikleri.....	76
5.2. ÇALIŞMA YAKLAŞIMI VE METODOLOJİK ÇERÇEVE	77
5.2.1. Araştırma Soruları ve Hipotezler	78
5.2.2. Çalışma Akışı ve Yöntemsel Süreç Tasarımı.....	78
5.3. VERİ TOPLAMA SÜRECİ	81
5.3.1. Alan Gözlemleri ve Yerinde Tespitler	82
5.3.2. Sayısal Haritalar ve Uydu Görüntüleri.....	83

5.3.3. BIM Tabanlı Modelleme İçin Teknik Proje Verileri	84
5.4. KULLANILAN YÖNTEM VE ANALİZ TEKNİKLERİ	87
5.4.1. Simülasyon Programının Tercih Gerekçeleri.....	87
5.4.2. BIM Ortamında Modelleme ve Veri Aktarımı Süreci.....	88
5.4.3. Simülasyon ve Çevresel Analiz Yöntemleri	89
5.4.4. Morfolojik ve Mikroklimatik Göstergelere Dayalı Analiz Süreci	91
5.4.5. Autodesk Forma Tabanlı Çevresel Simülasyonların Teknik Özellikleri 91	
6. BULGULAR	95
6.1. RÜZGAR KONFORU ANALİZ BULGULARI VE MORFOLOJİK DEĞERLENDİRME	95
6.2. HAKİM RÜZGAR YÖNLERİNİN MORFOLOJİK ETKİLERİ VE KONFOR DEĞERLENDİRMESİ.....	98
6.3. GÜNEŞLENME SÜRESİ ANALİZ SONUÇLARI VE MORFOLOJİK DEĞERLENDİRMESİ	99
6.4. GÜN IŞIĞI ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELERİ	104
6.5. MİKROKLİMA ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELERİ..	107
6.6. BULGULARA İLİŞKİN GENEL DEĞERLENDİRME.....	109
7. SONUÇ	112
8. KAYNAKLAR.....	119
ÖZGEÇMİŞ	132

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1. 1. Dünya’da, Avrupa’da ve Türkiye’de Kentleşme Oranları	2
Şekil 1. 2. Karşılaştırmalı Kentleşme Oranları	2
Şekil 3. 1. Farklı şehirlerin bir mil karelik sokak ağı görselleştirmesi	32
Şekil 3. 2. Enerji Odaklı Kent ve Kampüs Tasarımı İçin BIM Tabanlı Karar Destek Süreci	41
Şekil 5. 1. Çalışmanın Yöntemsel Akışı	81
Şekil 5. 2. Alan gözlemlerine ait fotoğraf kolajı (kampüsün çeşitli bölgelerini gösteren karelerden oluşan bir görsel set)	82
Şekil 5. 3. Kampüs Çalışma Alanına Ait Sayısal Harita, Google Earth Uydu Haritası, Autodesk Forma Uydu Haritası ve Autodesk Revit 3B Model Planı	83
Şekil 5. 4. Kampüs Çalışma Alanına Ait Sayısal Harita, Google Earth Uydu Haritası, Autodesk Forma Uydu Haritası ve Autodesk Revit 3B Model Planı	85
Şekil 6. 1. Altı Farklı Konfor Ölçeğine Göre Kampüsün Rüzgar Konforu Karşılaştırması	96
Şekil 6. 2. Kuzey ve Doğu Rüzgar Yönlerinin Morfolojik Akış Dinamikleri ve Konfor Performansı	99
Şekil 6. 3. 21 Mart (İlkbahar Ekinoksu) Güneşlenme Analizi	101
Şekil 6. 4. 21 Haziran (Yaz Gündönümü) Güneşlenme Analizi	102
Şekil 6. 5. 23 Eylül (Sonbahar Ekinoksu) Güneşlenme Analizi	103
Şekil 6. 6. 21 Aralık (Kış Gündönümü) Güneşlenme Analizi	104
Şekil 6. 7. Gün Işığı Potansiyeli Analizi	105
Şekil 6. 8. Mikroklima Analizine İlişkin Elde Edilen Bulgular	108

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2. 1. Kentsel Morfolojide Öne Çıkan Kuramsal Yaklaşımların Karşılaştırmalı Değerlendirmesi.....	8
Çizelge 3. 1. Temel Morfolojik Parametrelerin Enerji Performansı Üzerindeki Etkileri.	31
Çizelge 3. 2. Kampüs Tasarımında Morfolojik Stratejilerin Enerji, Mikroklima ve Uyarlanabilirlik Düzeyi Açısından Karşılaştırmalı Değerlendirmesi.....	49
Çizelge 4. 1. BIM Tabanlı Morfolojik Analizlerde Kullanılan Yöntem Türleri, Araçlar, Temel Parametreler, Kaynaklar ve Literatüre Katkı.....	54
Çizelge 5. 1. Çalışma Akışı ve Yöntemsel Süreç Tasarımı	79
Çizelge 5. 2. Autodesk Forma Platformunda Yürütülen Çevresel Analizlerin Parametre, Metrik, Teknoloji, Varsayım ve Veri Kaynağına Göre Sınıflandırılması	92
Çizelge 5. 3. Evrensel Termal İklim İndeksi UTCI.....	93
Çizelge 6. 1. Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü Pilot alanı için morfolojik analiz bulgularının özeti	110

HARİTA LİSTESİ

Sayfa No

Harita 5. 1. Düzce İli Lokasyon Haritası	69
Harita 5. 2. Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü'nün ve Çalışma Alanının Konumu	75



KISALTMALAR

BIM	Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modelling)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Design)
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
EUI	Enerji Kullanım Yoğunluğu (Energy Use Intensity)
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)
LEED	Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik (Leadership in Energy and Environmental Design)
LOD	Detay Seviyesi (Level of Detail/Development)
PV	Fotovoltaik
UBEM	Kentsel Yapı Enerji Modellemesi (Urban Building Energy Modelling)
UB-EİA	Kentsel Yapı Çevresel Etki Değerlendirmesi (Urban-Building Environmental Impact Assessment)
UTCI	Evrensel Termal İklim İndeksi (Universal Thermal Climate Index)

ÖZET

ENERJİ ETKİN KAMPÜS TASARIMININ YAPI BİLGİ MODELLEMESİ TABANLI MORFOLOJİK ANALİZİ: DÜZCE ÜNİVERSİTESİ ARAŞTIRMA HASTANESİ BÖLGESİ

Meryem BADUR

Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Ayşegül TANRIVERDİ KAYA

Temmuz 2025, 131 sayfa

Küresel ölçekte artan kentleşme ile birlikte enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik kavramları kentsel tasarım süreçlerinin önemli bileşenleri olarak kabul edilmektedir. Özellikle karmaşık ve çok fonksiyonlu yapı kümelerinden oluşan üniversite kampüsleri, enerji tüketiminin optimize edilmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik çalışma alanlarından biridir. Bu bağlamda, kampüslerin mekansal organizasyonunu belirleyen kentsel morfolojinin, enerji performansı üzerinde önemli etkiler oluşturduğu öne sürülmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, enerji etkin kampüs tasarımında morfolojik özelliklerin rolünü Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) tabanlı analizlerle bütüncül ve sistematik olarak değerlendirmektir. Çalışmada, öncelikle kent morfolojisi ve enerji etkin tasarım kavramları kapsamlı bir literatür taramasıyla ele alınmış, ardından BIM platformları üzerinden parametrik ve simülasyona dayalı analiz yöntemleri kullanılarak morfolojik parametrelerin kampüs enerji performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çerçevede, BIM tabanlı yazılım araçları kullanılarak gerçekleştirilen analizler kapsamında, kampüs alanlarının güneşlenme, gölgeleme, rüzgar dinamikleri, mikroklima ve gün ışığı dağılımları değerlendirilmiş, enerji verimliliği açısından optimize edilmiş morfolojik düzenlemeler önerilmiştir. Araştırma bulguları, kampüs ölçeğinde morfolojik kararların, enerji etkinliğini belirleyen çevresel koşulları anlamlı biçimde etkilediğini ve BIM tabanlı analiz araçlarının bu etkileri görünür kılarak tasarımcılara yol göstermede etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Spesifik olarak, araştırma bulguları, kampüs ölçeğinde, yapıların yönlenmesi, yoğunluk ve kompaktlık oranları, açık yeşil alan kullanımı, yüzey-hacim ilişkileri gibi morfolojik parametrelerin enerji tüketimini belirgin biçimde etkilediğini ortaya koymaktadır. Araştırma sonuçlarından hareketle, tasarımcılara, planlamacılara ve karar vericilere yönelik bir dizi politika önerisi sunulmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Enerji Etkin Tasarım, Kentsel Morfoloji, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), Sürdürülebilir Kampüs Tasarımı.

ABSTRACT

MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF ENERGY-EFFICIENT CAMPUS DESIGN BASED ON BUILDING INFORMATION MODELING (BIM): THE CASE OF DÜZCE UNIVERSITY RESEARCH HOSPITAL AREA

Meryem BADUR

Düzce University

Graduate School, Department of Architecture

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ayşegül TANRIVERDİ KAYA

July 2025, 131 pages

With the accelerating trend of urbanization on a global scale, energy efficiency and sustainability concepts are recognized as important components of urban design processes. University campuses, which consist of complex and multifunctional building clusters, are one of the critical areas of study in terms of optimizing energy consumption and ensuring environmental sustainability. In this context, it is argued that the urban morphology that determines the spatial organization of campuses has significant effects on energy performance. The primary objective of this study is to comprehensively and systematically evaluate the role of morphological characteristics in energy-efficient campus design using Building Information Modeling (BIM)-based analyses. In this study, the concepts of urban morphology and energy-efficient design were first assessed through a comprehensive literature review, followed by an examination of the effects of morphological parameters on campus energy performance using parametric and simulation-based analysis methods on BIM platforms. Within this framework, analyses conducted using BIM-based software tools evaluated the solar exposure, shading, wind dynamics, microclimate, and daylight distribution of campus areas, and proposed morphologically optimized layouts in terms of energy efficiency. The research findings reveal that morphological decisions at the campus scale significantly influence the environmental conditions that determine energy efficiency, and that BIM-based analysis tools are effective in guiding designers by making these effects visible. Specifically, the research findings reveal that morphological parameters such as building orientation, density, compactness ratios, use of open green spaces, and surface-to-volume ratios significantly affect energy consumption at the campus scale. Based on the research results, a series of policy recommendations are presented for designers, planners, and decision-makers.

Keywords: Energy-Efficient Design, Urban Morphology, Building Information Modeling (BIM), Sustainable Campus Design

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan kentleşme, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve kentsel organizasyon gibi konuları kentsel tasarım ve mimarlık alanlarında daha önce olmadığı kadar önemli hale getirmiştir. Özellikle şehirlerde gözlemlenen hızlı nüfus artışı, hem doğal kaynakların etkin kullanımını hem de çevresel etkilerin azaltılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği yaklaşımlarının, farklı işlevleri bir arada barındıran yerleşim alanlarına entegre edilmesi, bu alanları çevresel stratejilerin mekansal tasarımıyla bütünleştirilebileceği özgün örnekler haline getirmektedir. Üniversite kampüsleri gibi karmaşık işlevlerin bir arada bulunduğu alanlar, enerji verimliliği stratejilerinin kentsel morfoloji ile bütünleştirilebileceği kritik çalışma alanları olarak ön plana çıkmaktadır.

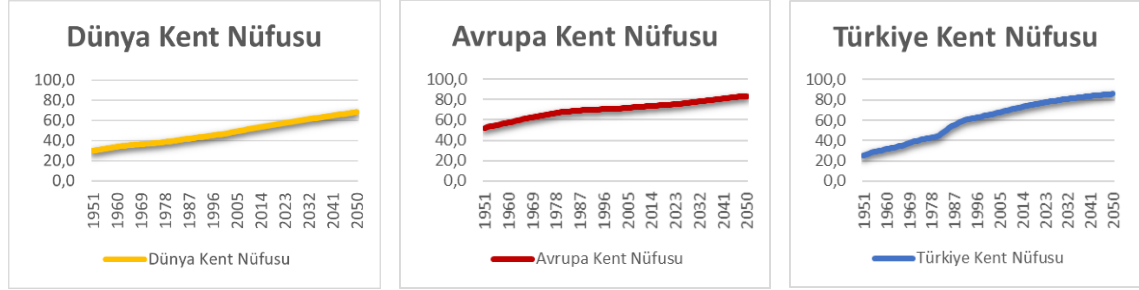
Bu çerçevede, çalışmanın bu giriş bölümünde, öncelikle çalışmanın kapsamı ve önemi ortaya konulmakta, ardından çalışmanın temel amacı ve problemi açıklanmaktadır. Son olarak, çalışmanın yöntemi ve yapısı sunulmaktadır.

1.1. ÇALIŞMANIN KAPSAMI VE ÖNEMİ

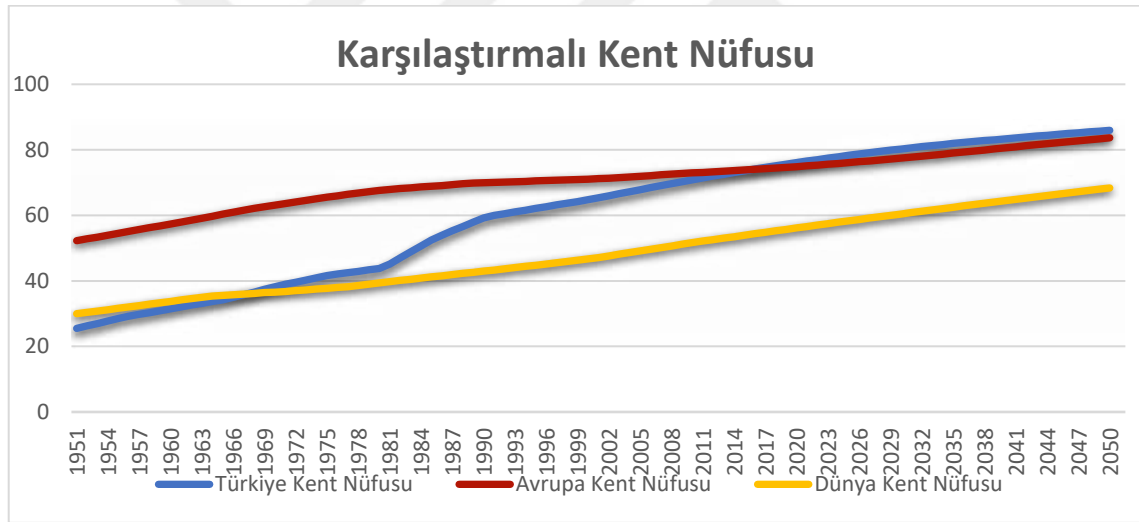
Günümüzde artan kentsel nüfus ve beraberinde gelen hızlı kentleşme dinamikleri, mekansal kaynakların sürdürülebilir şekilde kullanımını kaçınılmaz hale getirmektedir (Achieving Sustainable Urban Growth on a Global Scale, 2024). Bu süreçte mimari ve kentsel planlama disiplinleri, enerji kaynaklarının etkin kullanımına odaklanarak hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Bu bağlamda, enerji verimliliğinin sadece binaların tasarımından değil, aynı zamanda ulaşım sistemlerinden, altyapı projelerinden ve kamusal alanların düzenlenmesinden de kaynaklandığı göz önünde bulundurulmalıdır.

2023 yılında dünya nüfusunun büyük bir kısmının şehirlerde yaşadığı ve bu eğilimin 2050 yılına kadar artarak devam edeceği tahmin edilmektedir (Şekil 1.1 ve Şekil 1.2). Bu nedenle, sürdürülebilir kentleşme hedeflerinin gerçekleştirilmesi için enerji verimliliği ve çevresel duyarlılık gibi konuların merkeze alınması önemlidir.

Bununla birlikte, Avrupa’da kente göre hali hazırda az olan kır nüfusunun daha da azalacağı ve kentlerde yaşayan kişi sayısının toplam nüfus içindeki payının 2050 yılında %83.7’ye yükseleceği düşünülmektedir(“World Urbanization Prospects, United Nations”, 2018) (Şekil 1.1).



Şekil 1. 1. Dünya’da, Avrupa’da ve Türkiye’de Kentleşme Oranları (World Urbanization Prospects, United Nations, 2018)



Şekil 1. 2. Karşılaştırmalı Kentleşme Oranları (World Urbanization Prospects, United Nations, 2018)

Bu yüzyıllık değişim, Şekil 1.1’de görüldüğü gibi en çok Türkiye’yi etkileme eğilimindedir. 1951 yılında 25.5 olan kentleşme oranının 2050 yılında %86’ya çıkabileceği tahmin edilmektedir. Özellikle kırsal kesimlerden ve diğer ülkelerden kentlere yönelen göçler, uygulanan ekonomi politikaları ile birlikte Türkiye’deki 1980 sonrası kentleşme oranındaki hızlı artışın nedenleri olarak gösterilebilir. İstanbul, Ankara, İzmir, Antalya ve Adana gibi önemli şehirlerde belirgin olan kentleşmenin katlanarak büyümesi, ekonomik büyümenin arkasındaki itici güç olmuştur. Sanayileşme, teknolojik

yenilikler ve eğitim alanındaki ilerlemelerle beslenen bu kent merkezleri, üretkenliğin dinamik merkezleri haline gelmiştir. Ancak kentsel nüfustaki bu artış, konut açığına neden olmakla birlikte çevresel bazı problemlere de yol açmıştır. Artan kirlilik ile ifade edilen kentleşmenin çevresel etkileri hem doğal çevre hem de kamu sağlığı için tehdit oluşturmaktadır (Emir, Philip ve Sertoglu, 2022).

Hızlı şehirleşme ile insanların sağlık, eğitim, konaklama ve altyapı hizmetleri gibi temel yaşamsal hizmetlerini kaliteli ve sürdürülebilir biçimde devam ettirebilmesi giderek zorlaşmaktadır. Şehirler, ekonomik ve sosyal faaliyetlerin yoğunlaştığı ve sera gazı emisyonlarına neden olan yerlerdir. Hızlı şehirleşme, artan iktisadi büyümeyi sağlasa da dünyanın farklı bölgelerinde artan ekonomik eşitsizliklerle (Badur ve Sohag, 2023) birlikte enerji tüketiminin yol açabileceği sorunları da beraberinde getirmektedir. Yapılı çevre, küresel enerji ve süreç kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'ından sorumludur. ("The Building System Carbon Framework | GlobalABC", 2020). Buna göre, şehirler ve enerji temel olarak birbiriyle bağlantılıdır. Çünkü tüketim yalnızca dünya yüzeyinin %2'sini kaplayan kentsel yerleşimlerde gerçekleşir (Madlener ve Sunak, 2011).

Bu bağlamda üniversite kampüsleri, farklı işlevlerin bütünleştiği, çevresel ve sosyal dinamiklerin iç içe geçtiği karmaşık kentsel sistemler olarak özel bir yere sahiptir. Kampüslerin tasarımı ve planlanması sırasında enerji performansının optimize edilmesi, sadece yerel ölçekte değil, küresel sürdürülebilirlik hedefleri açısından da büyük önem taşımaktadır (Sugiarto, Lee ve Huruta, 2022).

Enerji etkin kampüs tasarımının gerçekleştirilmesinde kentsel formun rolü kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda kampüs morfolojisinin, doğal kaynaklardan faydalanma (örneğin güneş ışığı, rüzgar ve gün ışığı gibi), enerji verimliliği sağlama ve kullanıcı konforunu artırma gibi çok yönlü hedefleri gerçekleştirme potansiyeline sahip olduğu belirtilmelidir (Q. Liu ve Wang, 2022). Ancak, mevcut literatür incelendiğinde, kampüs morfolojisinin enerji performansı üzerindeki etkisini bütüncül ve sistematik bir yaklaşımla değerlendiren çalışmaların sınırlı kaldığı görülmektedir (Sugiarto ve diğerleri, 2022). Ayrıca geleneksel enerji analizleri, genellikle tekil bina ölçeğiyle sınırlı kalmakta, mekansal ilişkileri göz ardı etmekte ve kampüs ölçeğindeki bütüncül performans analizleri için yeterli kapsam sunmamaktadır.

Bu çalışma, söz konusu boşluğu, bir sonraki bölümde ifade edileceği gibi, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) destekli morfolojik analiz yaklaşımıyla ele alarak, kampüs tasarımı form ve enerji ilişkisini veri temelli biçimde ortaya koymayı hedeflemektedir.

1.2. ÇALIŞMANIN AMACI VE PROBLEMİ

Bu çalışmanın temel amacı; enerji etkin kampüs tasarımı kentsel form ve morfolojik özelliklerin rolünü, BIM tabanlı analiz yöntemleriyle sistematik bir biçimde değerlendirmek ve bu kapsamda morfoloji ile enerji performansını bütüncül biçimde ele alan kapsamlı bir çerçeve sunmaktır. Bu amaca yönelik olarak, çalışma üç alt hedefe sahiptir. *Birincisi*, bu çalışma, enerji etkin kampüs tasarımı konusuna kuramsal, yöntemsel ve uygulamalı düzeylerde literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. *İkincisi*, çalışma, kent ve kampüs morfolojisinin enerji tüketimi üzerindeki etkisini, sürdürülebilirlik, iklim duyarlılığı ve mikroklima gibi çok disiplinli kavramlar üzerinden ele almayı amaçlamaktadır. *Üçüncüsü*, bu tez çalışması, BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) temelli analizlerin morfolojik değerlendirmelere entegre edilmesiyle, bir kampüs yerleşkesini, dijital modelleme ve simülasyonlar aracılığıyla, enerji verimliliği açısından değerlendirmeyi; böylece tasarımcılar ve planlamacılar için somut politika önerileri sunmayı hedeflemektedir.

Bu bağlamda, çalışmanın kapsamı ve önemi bölümünde ifade edildiği gibi, ilgili literatür incelendiğinde konuya ilişkin kapsamlı değerlendirmeler, çalışmanın ana problemini belirlemede önemlidir. İlgili literatürden hareketle belirlenen çalışmanın ana problemi; kampüs ölçeğinde morfolojik parametreler ile enerji performansı arasındaki ilişkiyi kapsamlı, sistematik ve uygulamaya yönelik analiz edecek metodolojik bir çerçevenin eksikliği olarak tanımlanabilir.

Bu problemi çözmek üzere, BIM araçlarının, özellikle Autodesk Forma'nın parametrik ve simülasyona dayalı analiz olanakları, morfolojik kararların enerji performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılacaktır. Böylece çalışma, mevcut literatürdeki boşlukları doldurarak kampüs tasarım süreçlerinde morfoloji tabanlı enerji etkin tasarım yöntemlerine dair yeni bilgi ve stratejiler sunma potansiyeline sahip olacaktır. Çalışmanın bu yönü, hem akademik literatüre katkı sağlama hem de uygulama süreçlerinde tasarımcılar ve karar vericiler için yol gösterici nitelikte olma potansiyeli

taşımaktadır.

1.3. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ VE YAPISI

Çalışma, kentsel ve mimari ölçekte enerji etkin kampüs tasarımının gerçekleştirilmesi için BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) tabanlı morfolojik analiz yöntemlerinin kullanılmasını içeren çok aşamalı, sistematik ve bütünlük bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın metodolojik kurgusu; literatür incelemesi, morfolojik parametrelerin belirlenmesi, BIM ortamında modellemeler, parametrik analizler ve simülasyonların yapılması, analiz bulgularının yorumlanması ve son olarak tüm bu bulguların tasarım stratejilerine dönüştürülmesi biçiminde yapılandırılmıştır.

Araştırmanın ilk aşamasında, mimarlık ve kentsel planlama alanlarında enerji etkin kampüs tasarımı ve morfolojik analiz kavramları üzerine kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu literatür taraması, tez kapsamında yayımlanan kitap bölümüyle de desteklenerek, çalışmanın teorik çerçevesi ve temel kavramları netleştirilmiştir. Kavramsal çerçeve içerisinde; kent morfolojisi, enerji etkin tasarım, pasif enerji stratejileri ve BIM kavramları açıklanarak, araştırmanın kuramsal temelleri detaylandırılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, enerji etkin kampüs tasarımı için kritik öneme sahip morfolojik parametreler tespit edilerek, bu parametrelerin kampüs ölçeğinde enerji performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda; kampüs alanında yoğunluk, kompaktlık, yapıların yönlenmesi, yüzey-hacim oranları ve mekansal geçirgenlik gibi temel morfolojik göstergeler belirlenmiştir. Söz konusu göstergeler, çalışma alanının mevcut durumu ve literatürden elde edilen kuramsal çerçeveye uygun olarak tanımlanmıştır.

Üçüncü aşamada, BIM platformları kullanılarak parametrik tasarım ve performans odaklı optimizasyon süreçleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda Autodesk Revit'in modelleme ve Autodesk Forma yazılımının simülasyon yeteneklerinden faydalanılmıştır. Çalışma alanı için belirlenen morfolojik parametrelerin etkisi, Autodesk Forma üzerinden rüzgar, güneş ve gün ışığı analizleri ile sistematik bir biçimde test edilmiştir. Böylelikle morfolojik kararların enerji performansına etkileri nicel verilerle desteklenerek somutlaştırılmıştır.

Dördüncü aşamada, elde edilen analiz sonuçları yorumlanarak morfolojik parametrelerin kampüs ölçeğindeki enerji performansına olan etkileri değerlendirilmiştir. Analiz bulguları, mevcut literatürdeki diğer çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Bu karşılaştırmalı değerlendirme, sonuçların güvenilirliğini ve akademik tutarlılığını artırmak adına önemli görülmüştür.

Çalışmanın son aşamasında, analiz bulguları ve tartışmalar doğrultusunda, enerji etkin kampüs tasarımına yönelik stratejik öneriler geliştirilmiştir. Bu öneriler, akademik ve profesyonel uygulamalara katkı sağlayabilecek, sürdürülebilir kampüs planlama süreçlerine yön verecek pratik bilgiler içermektedir. Böylece çalışma; teorik, analitik ve pratik aşamaların bütünsel bir şekilde kullanılmasıyla oluşturulan metodolojik yaklaşımın, kentsel ölçekte enerji performansının artırılmasında etkin bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

Spesifik olarak, bu çalışma, giriş bölümünde kapsamı, önemi, amacı, problemi, yöntemi ve yapısını içerecek şekilde yapılandırılmıştır. İkinci bölümde kent morfolojisi, enerji etkin tasarım ve Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) gibi temel kavramlar kuramsal bağlamda ele alınmış, bu kavramlar arasındaki ilişkiler güncel literatür ışığında tartışılmıştır. Üçüncü bölümde, kent ve kampüs ölçeğinde morfolojik yapının enerji performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiş; yoğunluk, kompaktlık ve geçirgenlik gibi temel parametreler incelenmiştir. Dördüncü bölümde, BIM tabanlı dijital modelleme ve enerji simülasyonu araçları tanıtılmış, bu araçların morfolojik analiz süreçlerine entegrasyonu örneklerle açıklanmış, Autodesk Forma platformu kullanılarak yapılan parametrik ve çevresel analizlerin teknik detaylarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde, çalışmanın yürütüldüğü kampüs alanı tanıtılmış; kullanılan yazılımlar, veri toplama araçları ve analiz aşamaları adım adım açıklanmıştır. Altıncı bölümde, rüzgar, güneş, gün ışığı ve iklim mikro klima analizlerine dayanan BIM temelli bulgular sunulmuş; bu bulguların değerlendirilmesi yapılmış ve analiz sonuçları verilmiştir. Yedinci ve son bölümde ise çalışmanın temel sonuçları özetlenmiş ve enerji etkin kampüs tasarımı için gelecek çalışmalara yönelik öneriler geliştirilmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu tez çalışmasının kavramsal çerçevesi; kent morfolojisi, enerji etkin tasarım ve Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) kavramları doğrultusunda şekillenmektedir. Söz konusu çerçeve kapsamında kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda teorik bir altyapı oluşturulmuştur. “Kent Morfolojisi ve Enerji Etkin Tasarım” başlığı altında detaylı literatür incelemesi yapılmış ve ilgili içerik (Badur, Tanrıverdi Kaya ve Bal Koçyiğit, 2024), kitap bölümü olarak yayımlanmıştır. Tezin bu bölümünde yer alan literatür analizi söz konusu yayının bir bölümünü kapsamaktadır ve çalışma bağlamında ele alınan temel kavramların kuramsal arka planını sunmayı amaçlamaktadır.

2.1. KENT MORFOLOJİSİ: TANIMI, TARİHÇESİ VE YÖNTEMSEL YAKLAŞIMLAR

"Morfoloji" terimi, Yunanca "morphē" (biçim) ve "logos" (bilim) kelimelerinden türetilmiş olup, biçimlerin yapısını, organizasyonunu ve bu unsurların birbiriyle ilişkilerini inceleyen bilim dalını ifade eder (Wilkinson, 1951). Bu kavram, ilk olarak 18. yüzyılın sonlarında Johann Wolfgang von Goethe tarafından ortaya atılmış; biyolojik biçimlerin dönüşümünü açıklamak amacıyla kullanılmıştır. Goethe'nin morfolojiye yaklaşımı, yalnızca biçimlerin dışsal görünüşleriyle değil, içsel yapıları ve evrimsel süreçleriyle de ilgilenmektedir. Morfoloji, zamanla biyolojiden sanat ve mimarlığa, özellikle de şehir planlama disiplinine geçiş yaparak kentlerin fiziksel yapısını anlamada temel bir araç haline gelmiştir.

Kent morfolojisi, şehirlerin fiziksel formunu oluşturan yapı blokları, sokak sistemleri, parseller ve açık alanlar gibi bileşenlerin organizasyonunu ve bu bileşenler arasındaki ilişkileri inceleyen disiplinlerarası bir analiz alanıdır. Aynı zamanda, bu fiziksel örüntülerin tarihsel, sosyal, ekonomik ve çevresel bağlamlarla nasıl şekillendiğini ve değiştiğini araştırır (Oliveira, 2022). Morfolojik analiz, kentsel mekanın sadece statik bir yapı değil, sürekli dönüşen bir organizma olduğunu kabul eden dinamik bir bakış açısı

sunar(Moudon, 1997).

Kent morfolojisinin teorik temelleri, farklı dönemlerde farklı coğrafyalarda geliştirilen çeşitli yaklaşımlar etrafında şekillenmiştir. Bu yaklaşımlar, kentsel formun nasıl analiz edilmesi gerektiğine dair birbirinden farklı ancak birbiriyle tamamlayıcı bakış açıları sunar. Çizelge 2.1’de, kent morfolojisi alanında öne çıkan kuramcılar, yaklaşımları, odak noktalarını ve yöntemsel vurgularını karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çizelge 2.1, literatürde öne çıkan farklı morfolojik yaklaşımların temel özelliklerini ortaya koyarak, çalışmanın kavramsal çerçevesini pekiştirmeyi amaçlamaktadır.

Çizelge 2. 1. Kentsel Morfolojide Öne Çıkan Kuramsal Yaklaşımların Karşılaştırmalı Değerlendirmesi.

Kaynak: Kentsel morfoloji alanında öne çıkan kuramcılarının eserlerinden yazar tarafından derlenmiştir (Caniggia ve Maffei, 2001; Conzen, 2004; Hillier ve Hanson, 1984; Kropf, 2017, 1996; Moudon, 1997; Muratori, 1959; Oliveira, 2018).

Kuramcı	Yaklaşım Adı	Odak Noktası	Yöntemsel Vurgu
M. R. G. Conzen	Tarihsel-Coğrafi Yaklaşım / Town-Plan Analysis	Kentsel plan bileşenlerinin tarihsel katmanlarla analizi	Morfolojik bileşenlerin tarihsel süreklilik içinde sistematik analizi
Saverio Muratori	Süreç-Tipomorfoloji Yaklaşım	Tipin tarihsel sürekliliği ve üretim süreçleri	Kentin üretim süreci üzerinden evrimsel morfolojik analiz
Gianfranco Caniggia	Yapı Tipolojisi ve Doku Analizi	Yapıların üretim biçimleriyle mekansal ve tarihsel evrimi	Yapıların tarihsel-mekansal dönüşümünün tipoloji üzerinden incelenmesi
Karl Kropf	Tipomorfolojik Sentez Yaklaşımı	Tipolojik yapı ile morfolojik bileşenler arasındaki ilişkiler	Tipomorfolojik kavramları kuramsal çerçevede birleştirerek analiz araçlarının sistemleştirilmesi
B. Hillier & J. Hanson	Mekansal-Konfigürasyonel Yaklaşım	Mekansal erişilebilirlik, bağlantısallık ve sosyal yapı	Mekansal yapı ile sosyal etkileşim arasındaki ilişkilerin analitik olarak çözümlenmesi
Anne Vernez Moudon	Disiplinlerarası Tipomorfoloji	Morfolojik yaklaşımların sentezi ve kurumsallaşması	Farklı morfolojik geleneklerin (İngiltere, İtalya, Fransa) kuramsal çerçeveye oturtulması
Vítor Oliveira	Morfolojik Bütünleşme Yaklaşımı	Kentsel formun çok katmanlı yapısı ve bileşen etkileşimleri	Kentsel morfolojiyi oluşturan öğelerin karşılıklı ilişkileri üzerinden bütüncül değerlendirme

M. R. G. Conzen'in (1960) geliştirdiği tarihsel-coğrafi yaklaşım, kentsel morfolojik analizde sokak dokusu, parsel yapısı ve yapı biçimlerinin zamansal sürekliliğini esas alan ilk sistematik çerçeveyi sunmuştur. Conzen'in "town-plan analysis" yöntemi, özellikle Avrupa şehirlerinin tarihsel gelişimini anlamada referans bir model haline gelmiştir (Conzen, 2004). Bu yaklaşıma paralel olarak İtalya'da Saverio Muratori ve Gianfranco Caniggia tarafından geliştirilen tipomorfolojik yöntem, yapı tipolojilerinin evrimsel süreçlerle ilişkisini kurarak kentsel formun dönüşümünü anlamaya yönelik önemli katkılar sağlamıştır (Caniggia ve Maffei, 2001).

İngiltere'de ise Hillier ve Hanson'ın (1984) mekansal-konfigürasyonel yaklaşım (Space Syntax) kuramı, kent morfolojisine sosyal teoriyi entegre eden yeni bir bakış açısı sunmuştur. Bu yaklaşım, mekansal yapıların geometrik biçimlenişleri ile sosyal etkileşimler arasındaki ilişkiyi ölçülebilir kılmayı hedeflemektedir. Mekansal erişilebilirlik, bütünleşme ve bağlantısallık gibi kavramlar, kent planlamasında sosyal sürdürülebilirlik perspektifini güçlendirmiştir (Hillier ve Hanson, 1984). Karl Kropf (1996), bu kuramsal gelenekleri sentezleyerek "tipomorfolojik analiz" yöntemini ileri taşımış, kent morfolojisini bileşenler düzeyinde sistemleştiren bir çerçeve önermiştir. Kropf'un yaklaşımı, Conzenyen ve İtalyan gelenekleri arasında teorik bir köprü kurmayı amaçlamaktadır. (Kropf, 1996).

Anne Vernez Moudon'un (1997) çalışmaları ise bu farklı yaklaşımları disiplinlerarası bir bakışla harmanlayarak morfolojik araştırmaların kurumsallaşmasına öncülük etmiştir. ISUF (International Seminar on Urban Form) platformu, bu çabanın uluslararası düzeyde kurumsallaşmasının bir göstergesidir (Moudon, 1997). Vítor Oliveira (2016; 2022) ise morfolojik bileşenler arası etkileşimi merkeze alan çalışmalarıyla güncel yaklaşımları bütüncül biçimde değerlendiren "morphological integration" modelini önermiştir. Oliveira'nın bu katkısı, kent formunun fiziksel bir yapıdan öte sistematik ve ilişkisel bir organizma olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgular (Oliveira, 2022).

Bu yaklaşımlar yalnızca teorik çerçeveler değil, aynı zamanda kent morfolojisinin analiz yöntemlerini de belirleyen temel eksenlerdir. Her biri, morfolojik yapıyı farklı ölçeklerde ve farklı önceliklerle ele alır; tarihsel süreçlere, tipolojik evrimlere ya da mekansal ağlara odaklanarak kentin çok katmanlı doğasını anlamayı kolaylaştırır.

Günümüzde kent morfolojisi, sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve iklim değişikliği ile mücadele gibi güncel konularla daha da ilişkili hale gelmiştir. Kent formunun enerji

tüketimi üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar, yapı yoğunluğu, yüzey-hacim oranı, geçirgenlik ve kompaktlık gibi parametrelerin kentsel enerji performansında belirleyici olduğunu göstermektedir (Ko, 2013; Ratti, Baker ve Steemers, 2005; Steemers, 2003). Bu bağlamda kent morfolojisi, yalnızca analitik bir araç değil; aynı zamanda sürdürülebilir planlama ve tasarım için stratejik bir rehber işlevi görmektedir.

Özetle, kent morfolojisi; hem tarihsel evrimleri hem de çağdaş sürdürülebilirlik hedeflerini dikkate alan, fiziksel mekanın çok katmanlı yapısını çözümlemeye yönelik kapsamlı ve disiplinlerarası bir yaklaşımdır. Farklı ekollerin katkılarıyla zenginleşen bu alan, kentsel dönüşüm süreçlerinin sağlıklı biçimde yönetilmesi ve geleceğe yönelik stratejilerin geliştirilmesi için temel bir referans noktası olarak önemini sürdürmektedir.

2.1.1. Kentsel Formun Morfolojik Bileşenleri

Kent morfolojisinin temel analiz birimleri; sokak sistemleri, yapı blokları, parseller ve açık-kamusal alanlar olmak üzere dört ana başlık altında incelenmektedir (Moudon, 1997; Oliveira, 2022). Bu bileşenlerin bireysel özellikleri kadar aralarındaki ilişkiler, kentsel formun yapısını ve karakterini belirlemede kritik öneme sahiptir.

Sokak sistemleri, kentsel mekanın hem fiziksel hem de sosyal omurgasını oluşturur. Hiyerarşik ağ yapısı, bağlantılılık derecesi ve geçirgenlik düzeyi gibi faktörler, kent içi hareketliliği ve sosyal etkileşimleri doğrudan etkiler (Hillier ve Hanson, 1984). Sokakların topolojik yapısını analiz ederek sosyal yaşamla mekan arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için Space Syntax yöntemi geliştirilmiştir (Hillier, 2007). Literatürde sokak ağı morfolojisinin gösterildiği analiz grafikleri sıklıkla DepthmapX yazılımı üzerinden üretilmektedir.

Bununla birlikte sokak dokusu, yapı bloklarının biçimlenmesinde yönlendirici rol oynar ve enerji tüketimi, erişilebilirlik gibi performans kriterlerini belirler.

Yapı blokları, sokaklarla sınırlandırılmış yapı kümeleridir ve biçimsel özellikleri morfolojik çözümlemelerde önemli ipuçları sunar. Kompakt yapı blokları genellikle daha az dış yüzey alanına sahip oldukları için enerji verimliliği açısından avantajlıdır (Ratti ve diğerleri, 2005). Aynı zamanda yapı bloklarının büyüklüğü ve düzeni, kentsel yoğunluk ve arazi kullanım etkinliğini yansıtır.

Parseller, mülkiyet ve yapılaşma sınırlarını belirleyen mekansal birimlerdir. Parsel morfolojisi, kent formunun tarihsel gelişimini belgeleyen bir izlek sunar. Parsel

büyüklikleri, oranları ve yönlenmeleri, yapılaşma biçimini, bina tipolojisini ve kentsel doku yoğunluğunu etkileyen ana faktörler arasındadır. Özellikle tarihi şehir merkezlerinde, parsel boyutları ve biçimleri, dönüşüm politikaları üzerinde belirleyici olmaktadır (Kropf, 2017).

Açık ve kamusal alanlar ise kentin sosyo-mekansal sürdürülebilirliğini sağlayan temel bileşenlerdir. Yeşil alanlar, meydanlar, parklar ve geçiş alanları gibi boşluklar, sadece estetik değil; aynı zamanda mikroklimatik işlevler açısından da önemlidir (Gehl, 2013). Bu alanların biçimi, boyutu ve kent içindeki konumu, ısı adası etkisinin azaltılması, doğal gün ışığından yararlanma, hava dolaşımı ve sosyal etkileşim düzeyi gibi birçok parametreyi etkiler.

Sonuç olarak, kentsel formun bu bileşenleri arasındaki mekansal düzen ve etkileşim biçimleri, morfolojik analizin temelini oluşturur. Bu ilişkilerin çok boyutlu olarak incelenmesi, sürdürülebilir, enerji verimli ve yaşanabilir kentsel çevrelerin tasarlanması açısından gereklidir.

2.1.2. Güncel Kent Morfolojisi Yaklaşımları ve Sürdürülebilirlik

Küresel iklim krizinin ve enerji kaynaklarındaki kısıtlılığın giderek daha fazla hissedildiği çağdaş kentleşme süreçlerinde, kent morfolojisinin sürdürülebilirlik ile ilişkisi daha görünür hale gelmiştir. Kent formunun çevresel performans üzerindeki etkisi, disiplinlerarası çalışmalarla da desteklenmektedir (Ewing ve Rong, 2008; Steemers, 2003).

Kent formunun enerji performansı, büyük ölçüde morfolojik yapıdan kaynaklanan pasif etkilere bağlıdır. Kompakt kent yapısı, yüzey-hacim oranının azalması yoluyla ısı kayıplarını minimize ederken, geçirgenlik düzeyi doğal havalandırma potansiyelini belirler. Ayrıca, yapı yönlenmeleri ve blok konfigürasyonları, güneş ışığından faydalanma ve gölgelenme durumlarını şekillendirir (Perini ve Magliocco, 2014).

Yeni nesil kent morfolojisi analizlerinde dijital araçların kullanımı artmaktadır. Özellikle BIM (Building Information Modeling) ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) temelli modeller, kent formunun enerji performansı ile doğrudan ilişkisini değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Attia, Hensen, Beltrán ve De Herde, 2012). Bu bağlamda kent morfolojisi, yalnızca mevcut kentsel dokuyu anlamakla sınırlı kalmayıp, geleceğe dönük planlama ve simülasyon stratejileri geliştirmek için de kullanılmaktadır.

Sürdürülebilirlik açısından kent morfolojisinin önemi, sadece enerji ile sınırlı değildir.

Ulaşılabilirlik, sosyal kapsayıcılık, mikroiklim konforu ve biyolojik çeşitlilik gibi birçok hedef, doğrudan kent formu ile ilişkilidir. Bu nedenle kent morfolojisi, kentsel tasarım süreçlerinde ekolojik, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğin kesişim noktası olarak konumlanmaktadır.

Sonuç olarak çağdaş kent morfolojisi, geleneksel kuramsal yaklaşımlar ile veri-temelli analiz yöntemlerini bütünleştiren, sürdürülebilirlik hedeflerini önceleyen çok boyutlu bir araştırma alanı olarak evrilmektedir. Kentlerin enerji, çevre ve sosyal dayanıklılığını artırmak için morfolojik stratejilerin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.2. ENERJİ ETKİN TASARIM KAVRAMI

Enerji etkin tasarım, yapı çevrenin tasarımı sırasında enerji tüketimini en aza indirmeyi, aynı zamanda kullanıcı konforunu ve çevresel sürdürülebilirliği en üst düzeye çıkarmayı hedefleyen bütüncül bir yaklaşımdır. Bu tasarım felsefesi, pasif ve aktif stratejilerin entegre biçimde kullanılmasını esas alır ve hem bina ölçeğinde hem de kentsel ölçekte uygulanabilirliği ile dikkat çeker. Enerji etkin tasarım, küresel ölçekte artan enerji talebi, iklim değişikliği, karbon salınımı ve fosil yakıtlara bağımlılık gibi krizlerin çözümünde kritik bir rol oynamaktadır (Cabeza, Rincón, Vilarino, Pérez ve Castell, 2014; D'Oca ve diğerleri, 2018).

1970'li yıllardaki petrol kriziyle ivme kazanan enerji verimliliği odaklı yaklaşımlar, 2000'li yıllarla birlikte dijital tasarım teknolojilerinin ve sürdürülebilirlik politikalarının gelişmesiyle daha sistematik hale gelmiştir. Günümüzde enerji etkin tasarım yalnızca enerji tüketimini azaltmayı değil, aynı zamanda karbon salınımını düşürmeyi, kaynak kullanımını optimize etmeyi ve kullanıcı sağlığını destekleyen mekanlar üretmeyi de kapsayan çok boyutlu bir paradigmaya dönüşmüştür (Zuo ve Zhao, 2014).

Enerji etkinliğinin temel ilkeleri; yapıların konumlandırılması, yönlendirilmesi, biçimsel kompaktlığı, termal kütle kullanımı, doğal havalandırma stratejileri, gün ışığından yararlanma düzeyi, bina kabuğu performansı ve çevresel mikroklima ile uyumlu tasarım gibi parametreleri içerir (Givoni, 1998; Yeang, 2006). Bu ilkeler, iklime duyarlı ve bağlamsal bir yaklaşımla ele alındığında, bina performansında %30–60 oranında enerji tasarrufu sağlamak mümkündür (Attia ve diğerleri, 2012).

Kentsel ölçekte ise enerji etkin tasarım, morfolojik kararlarla doğrudan ilişkilidir. Kent dokusunun kompaktlığı, yapıların yoğunluk dağılımı, açık alanların konumlandırılması

ve sokak yönlenmeleri, hem mikroklimayı hem de enerji tüketimini etkiler (Ratti ve diğerleri, 2005; Steemers, 2003). Yapı gruplarının yüzey-hacim oranı, gölgeleme potansiyeli ve rüzgar akışına açıklığı, pasif soğutma ve aydınlatma potansiyelini belirleyen başlıca faktörlerdendir (Perini ve Rosasco, 2013).

Son yıllarda enerji etkin tasarım süreçlerinde dijital teknolojilerin rolü büyük ölçüde artmıştır. BIM (Building Information Modeling), parametrik modelleme araçları ve enerji simülasyon yazılımları, tasarımın erken aşamalarında farklı varyasyonların enerji performanslarının karşılaştırılmasını olanaklı hale getirmiştir (Azhar, 2011). Özellikle Autodesk Insight, DesignBuilder, Ladybug/Honeybee (Rhino/Grasshopper tabanlı) gibi araçlar sayesinde, güneşlenme, ısıtma-soğutma yükleri, gün ışığı dağılımı gibi çok sayıda performans kriteri entegre biçimde analiz edilebilmektedir.

Enerji etkin tasarım, ayrıca yerel iklim, topoğrafya, çevresel riskler (örneğin ısı adası etkisi, sel riski) ve doğal kaynakların mekansal dağılımını dikkate alan yerel odaklı çözümler geliştirmeyi gerektirir. Bu bağlamda, bağlamsal enerji stratejileri geliştirmek için CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ve uzaktan algılama teknolojileri de sürece dahil edilmektedir (Shi ve Yang, 2013).

Literatürde enerji etkin tasarım yaklaşımlarının uygulanabilirliğini değerlendiren kapsamlı meta-analizler ve vaka incelemeleri mevcuttur. Örneğin, (D'Oca ve diğerleri, 2018) tarafından yapılan sistematik derleme, tasarım kararlarının kullanıcı davranışı ve enerji tüketimi arasındaki ilişkilerini ortaya koyarken; (Salat, 2009) kent formu ve enerji tüketimi arasındaki istatistiksel bağları modelleyen ölçekler arası bir çerçeve sunar. Bu bağlamda hem teknik hem de sosyal faktörlerin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerektiği açıkça ortaya konulmaktadır.

Sonuç olarak, enerji etkin tasarım, sadece bir teknik çözüm paketi değil, aynı zamanda mimari düşüncenin, mekansal planlamanın ve çevresel sorumluluğun kesişiminde yer alan stratejik bir yaklaşımdır. Gelecekteki kentsel gelişimlerin enerji verimli, düşük karbonlu ve iklime uyumlu şekilde gerçekleştirilmesi açısından enerji etkin tasarım ilke ve yöntemlerinin bütünleşik biçimde ele alınması gerekmektedir.

2.2.1. Enerji Etkin ve Pasif Tasarım Prensipleri

Enerji etkin ve pasif tasarım prensipleri, yapıların ve kentsel çevrenin enerji tüketimini en aza indirerek çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliği destekleyen bütüncül bir yaklaşımdır. Bu prensipler, iklim duyarlılığı, kullanıcı konforu, doğal kaynakların

rasyonel kullanımı ve yapılı çevrenin performans optimizasyonunu esas alır. Özellikle iklim değişikliği, enerji krizleri ve kentleşme baskıları altında bu tasarım anlayışının önemi giderek artmakta; enerji etkinlik hedeflerinin sadece teknik değil, aynı zamanda sosyal ve kültürel boyutları da kapsamı gerektiği vurgulanmaktadır (Cabeza ve diğerleri, 2014; D'Oca ve diğerleri, 2018; Zuo ve Zhao, 2014).

Bu kapsamlı yaklaşım, pasif enerji stratejileri ve aktif enerji teknolojileri ile desteklenmeli, tasarımın erken aşamalarında dikkate alınmalıdır. Pasif tasarım stratejileri, enerji üretmekten çok enerji talebini azaltmayı hedefler ve doğal iklim koşullarıyla uyumlu çözümler geliştirilmesini gerektirir. Bu stratejiler, yapıların yönlenmesinden yapı kabuğu özelliklerine, doğal havalandırmadan gün ışığı kullanımına, mikroklimatik düzenlemelerden termal kütleye kadar uzanan geniş bir yelpazeye sahiptir. Aşağıda bu ilke ve stratejiler, akademik literatür desteğiyle ve bütüncül bir yaklaşımla detaylandırılmıştır.

Bina yönlenmesi ve konumlandırma, enerji etkin ve pasif tasarım stratejilerinde, yapı kabuğunun güneş ışımasını ve hakim rüzgar etkilerine göre optimize edilmesini sağlayarak hem termal konforu hem de enerji performansını doğrudan etkileyen temel bir bileşendir. Kuzey yarımkürede, kış aylarında güneşe yönlendirilmiş cepheler pasif güneş kazançlarını artırırken, doğu-batı eksenli cephelerde özellikle yaz aylarında aşırı ısı kazançlarını kontrol altına almak için etkili gölgeleme stratejileri geliştirilmelidir (Givoni, 1998; Yeang, 2006). Aynı zamanda hakim rüzgar yönüne uygun pencere ve açıklık yerleşimleri, doğal çapraz havalandırmayı etkinleştirerek, özellikle sıcak ve nemli iklimlerde soğutma ihtiyacını azaltır (Attia ve diğerleri, 2012).

Bu bağlamda, Elshafei ve arkadaşları (2021), farklı bina konfigürasyonlarının ve yönlenme stratejilerinin iç mekan termal konforuna etkisini değerlendirmek üzere dört farklı bina formu üzerinde ENVI-met ve CFD destekli simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Çalışma, optimum yönlenme ve biçimsel düzenlemenin hava hızı değerlerini %200'e kadar artırabileceğini, iç mekan sıcaklığını ise %3,2 oranında düşürebileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, yapı yönlenmesinin sadece güneş kazancı değil, aynı zamanda doğal havalandırma potansiyeli üzerindeki etkisini de vurgulamaktadır (Elshafei, Vilcekova, Zelenakova ve Negm, 2021). Bu nedenle, bina yönlenmesi yalnızca mimari kütle kompozisyonu açısından değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve iklimle uyumlu tasarım açısından da temel bir karar süreci olarak ele alınmalıdır. Buna ek olarak, biçimsel kompaktlık ve enerji verimliliği açısından, yapının formu yüzey-hacim oranını belirler ve

bu oran enerji performansı açısından kritik öneme sahiptir. Kompakt formda tasarlanan yapılar, dış yüzey alanını azaltarak ısı kayıplarını sınırlar (Ratti ve diğerleri, 2005; Salat, 2009). Bu ilke, özellikle soğuk ve ılıman iklimlerde etkilidir. Yapı kütesinin biçimlendirilmesi yalnızca mimari estetiği değil, aynı zamanda doğal havalandırma potansiyelini, güneşlenme sürelerini ve rüzgar yönlerine olan tepkiyi de doğrudan etkiler. Özellikle güneş bacası gibi pasif sistemlerde, rüzgarla birlikte çalışan yapı formları iç mekan hava akışını ciddi şekilde artırabilir. Zamora ve Kaiser (2010) tarafından yapılan sayısal çalışmada, güneş bacasına gelen rüzgar etkisinin doğal havalandırma debisini önemli ölçüde artırdığı ve yapının termal davranışını değiştirdiği gösterilmiştir. Bu durum, bina kütesinin parçalanması veya birleştirilmesinin yalnızca yapısal değil, çevresel performans açısından da kritik bir tasarım kararı olduğunu ortaya koymaktadır.

Termal kütle kullanımı, yüksek özgül ısı kapasitesine sahip yapı malzemeleri aracılığıyla iç mekan sıcaklıklarını dengeleme prensibine dayanır. Gündüz saatlerinde ısıyı depolayıp gece boyunca geri salan bu sistem, özellikle gece-gündüz sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde iç mekan konforunu önemli ölçüde artırır. Geleneksel yapılarda bu ilke genellikle taş, toprak ve sıkıştırılmış zemin gibi malzemelerle uygulanmaktadır. Ancak son araştırmalar, termal kütle sağladığı konforun yalnızca malzeme ile değil, aynı zamanda doğal havalandırma ile etkileşim içinde olduğu zaman en yüksek düzeye ulaştığını ortaya koymaktadır. Zhou ve arkadaşları (2008), dış ve iç termal kütle ile doğal havalandırma oranları arasındaki etkileşimi tanımlayan kapsamlı bir ısı dengesi modeli geliştirmiştir. Bu model, yapı kabuğunun termal davranışı ile iç mekan sıcaklığı arasındaki bağıntıyı ortaya koyarak, hafif ve ağır yapı sistemlerinde farklı havalandırma stratejilerinin nasıl sonuçlar doğurabileceğini detaylı biçimde göstermektedir. Çalışma, termal kütle ile doğal havalandırmanın birlikte optimize edilmesinin pasif soğutma stratejilerinde temel bir tasarım aracı olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (J. Zhou, Zhang, Lin ve Li, 2008). Ayrıca, doğal havalandırma ve iç mekan konforu, mekansal planlama, açıklık yerleşimi ve hacim organizasyonu yoluyla doğal hava akışlarının yönlendirilmesiyle binalarda soğutma ihtiyacının azaltılmasına katkı sunar. Baca etkisi, çapraz havalandırma, atrium sistemleri ve gece havalandırması gibi pasif stratejiler, iç ortamın hava kalitesi ve termal konforunu artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu stratejilerin etkin şekilde tasarlanabilmesi için hakim rüzgar yönleri, yerel topoğrafya ve bina çevresi detaylı şekilde analiz edilmelidir (Pérez-Lombard, Ortiz ve Pout, 2008; Santamouris, 2014).

Doğal havalandırmanın enerji tasarrufu ve konfor üzerindeki potansiyel katkısı, açılır pencere kontrolü gibi tasarım stratejileriyle daha da artırılabilir. Schulze ve Eicker (2013), Almanya, İtalya ve Türkiye gibi orta iklim kuşaklarında gerçekleştirdikleri simülasyon çalışmalarında, doğal havalandırma stratejilerinin uygun kontrol edilmesi durumunda hem iç hava kalitesinin sağlanabildiğini hem de yaz aylarında termal konforun büyük ölçüde korunabildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmada PMV, iç mekan hava değişim oranı ve kullanıcı konforu gibi performans göstergeleriyle yapılan analizler, pasif havalandırma sistemlerinin doğru uygulandığında mekanik sistemlere olan bağımlılığı azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca, gün ışığından yararlanma, enerji etkin tasarımda hem görsel konforun artırılması hem de yapay aydınlatma ihtiyacının azaltılması yoluyla enerji tasarrufu sağlanması açısından kritik bir stratejidir. Doğru pencere yerleşimi, ışık rafları, atriumlar ve iç avlular gibi mimari düzenlemeler, doğal ışığın iç mekanlara derinlemesine nüfuz etmesini sağlar. Bu stratejilerin performansı, Spatial Daylight Autonomy (sDA), Annual Sunlight Exposure (ASE) ve Daylight Glare Probability (DGP) gibi göstergelerle değerlendirilir (Kim ve Kim, 2010; Reinhart ve Walkenhorst, 2001).

Son dönem çalışmalardan biri olan Koohsari ve Heidari (2022), bölümlendirilmiş Venedik perdeler ile pencere ve gölgeleme sistemlerinin görsel konfor ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde analiz etmiştir. Çalışmada kullanıcı görüşleri, gün ışığı ölçümleri ve enerji simülasyonları bir araya getirilerek en uygun perde konumlandırmaları belirlenmiştir. %90 pencere-duvar oranına sahip bir ofis mekanında bölümlendirilmiş perde kullanımının kullanıcı memnuniyetini artırırken enerji tüketimini %40 oranında azaltabileceği saptanmıştır (Montaser Koohsari ve Heidari, 2022).

Güneş kontrolü ve gölgeleme sistemleri, aşırı ısınmayı engellemek ve görsel konforu sağlamak amacıyla bina kabuğuna entegre edilen stratejik tasarım öğeleridir. Bu sistemler yalnızca güneş ışıınımını sınırlamakla kalmaz, aynı zamanda iç mekan konforunu artırarak enerji verimliliğine katkı sağlar. Gölgeleme sistemleri sabit (örneğin saçaklar, pergolalar) ya da hareketli (örneğin motorlu panjurlar, otomatik güneş kırıcılar) biçimlerde tasarlanabilir. Bu elemanların biçimi, konumu ve kontrol stratejileri özellikle soğutma ve aydınlatma yüklerinin dengelenmesinde kritik bir rol oynar (Tzempelikos ve Athienitis, 2007). Ayrıca, dinamik gölgeleme sistemleri, gün içinde güneş açısındaki değişimlere uyum sağlayarak güneş ışıınımını etkin bir şekilde yönetebilir ve mekanik soğutma ihtiyacını azaltırken doğal aydınlatma potansiyelini koruyabilir. Tuma ve Ouahrani (2017) tarafından tam cam cephe ofis binalarında yapılan simülasyon çalışmaları, sabit

sistemlere kıyasla açısı ayarlanabilir panjurların enerji tüketimini %26'ya kadar azaltabileceğini ve görsel konforu koruyarak parlama riskini minimuma indirebileceğini göstermektedir. Bu bulgu, dinamik sistemlerin pasif güneş kontrolü açısından etkili bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, cephede kullanılan bitkilendirme sistemleri de güneş ışıınının kontrolünde etkili olabilmektedir. Perini ve arkadaşları (2014), dikey yeşil cephelerin hava akışını iyileştirdiğini ve cephe yüzey sıcaklıklarını düşürerek termal performansı artırdığını ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, gölgelemenin sadece mekanik sistemlerle değil, biyoklimatik stratejilerle de entegre edilebileceğini göstermektedir (Perini, Ottel , Fraaij, Haas ve Raiteri, 2011). Dolayısıyla,  a da  bina tasarımımda güneş kontrolü yalnızca enerji tasarrufu değil, aynı zamanda görsel konfor, iç hava kalitesi ve kullanıcı memnuniyeti gibi çok boyutlu hedefleri destekleyen bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

Yapı kabuğunun performansı ve ısı yalıtımı, enerji etkin bina tasarımımda iç mekan konforunu optimize eden ve ısı kayıplarını sınırlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır. Dış duvarlar, çatılar ve pencere sistemleri, hem iletim hem de ışıınım yoluyla gerçekleşen ısı transferine karşı dirençli olacak biçimde tasarlanmalıdır. Bu çerçevede, düşük U-değerine sahip ısı yalıtım malzemeleri, çift veya üç camlı do ramalar, sızdırmazlık detayları ve güneş kontrolü sağlayan cam kaplamaları önemli rol oynar. Performans göstergeleri arasında U-değeri (ısı iletim katsayısı), SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) ve VT (Visible Transmittance) yer almakta olup yapı kabuğunun enerji verimliliği bu parametreler üzerinden değerlendirilmektedir (D'Oca ve diğerleri, 2018).

Son yıllarda geliştirilen yenilikçi çözümler, yapı kabuğunun performansını daha da artırmaktadır. Gutai ve Kheybari (2020), 13 farklı iklim bölgesinde gerçekleştirdikleri simülasyon çalışmasında, su dolgulu cam (Water-Filled Glass, WFG) teknolojisinin geleneksel çift cam sistemlerine kıyasla %3 ile %84 arasında değişen enerji tasarrufu sa layabilece ini ortaya koymuştur. Bu teknoloji, cam katmanları arasına su entegre ederek hem U-değerini hem de SHGC değerini optimize etmektedir. Ayrıca bu sistem, ışığı geçirirken güneş enerjisini absorbe edebilmekte ve farklı iklimlerde farklı stratejilerle ısı kazancını yeniden kullanma potansiyeli sunmaktadır. Böylece,  effaf cephe sistemlerinde ısı kaybı bir dezavantaj olmaktan çıkarak kontrollü bir enerji yönetimi aracına dönüşmektedir. Bu kapsamda yapı kabuğunun tasarımımda yalnızca malzeme kalınlığı değil, aynı zamanda aktif ve pasif sistemlerin entegrasyonu da göz önünde bulundurularak bütüncül bir yaklaşımda benimsenmelidir. Buna ek olarak, peyzaj

ve mikroklimatik düzenlemeler, kentsel bağlamda yapı çevresindeki mikroklimayı düzenleyerek hem enerji tüketimini azaltır hem de dış mekan termal konforunu artırır. Ağaçlar, bitkisel gölgelikler, geçirgen zeminler ve yeşil çatılar yüzey sıcaklıklarını düşürerek kent içi ısı adası etkisini azaltır ve yapıların yaz aylarındaki soğutma yükünü hafifletir (Bowler, Buyung-Ali, Knight ve Pullin, 2010; Perini ve Magliocco, 2014). Aynı zamanda bu sistemler, yağmur suyu yönetimi, karbon tutumu ve biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi gibi önemli ekosistem hizmetleri de sağlar.

Mikroklimatik düzenlemelerin etkin analizinde ENVI-met gibi yüksek çözünürlüklü üç boyutlu simülasyon araçları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda Ouyang ve arkadaşları (2021), subtropikal bir kentte yeşil altyapı tipolojilerinin (yeşil çatı, yeşil duvar, ağaç grupları) mikroklimatik etkilerini ENVI-met modeliyle değerlendirmiştir. Modelin yeni IVS (Indexed View Sphere) ışıınım modülünün radyasyon tahmin doğruluğunu artırdığı, ayrıca bitkisel gölgeleme ve yüzey-ışıınım etkileşimlerini simüle etmede yüksek performans gösterdiği saptanmıştır. Bu da, peyzaj elemanlarının yerleşimi ve özelliklerinin dış mekan ısı konforunu doğrudan etkileyen belirleyici faktörler olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, doğal peyzaj elemanlarının stratejik kullanımı sürdürülebilir çevre tasarımı açısından yalnızca estetik değil, aynı zamanda performans odaklı bir yaklaşımdır.

Toprakla etkileşimli tasarım, enerji etkin ve pasif tasarım ilkeleri doğrultusunda çevresel kaynaklardan maksimum verim elde etmeyi hedefleyen stratejik bir yaklaşımdır. Bu tür yapılar, toprağın sabit ve nispeten düşük sıcaklık profiline dayanarak yıl boyunca sıcaklık dalgalanmalarını azaltma avantajı sunar. Yaz aylarında doğal serinlik sağlarken, kış aylarında iç mekan sıcaklık stabilitesine katkıda bulunur. Bu nedenle toprakla temas halindeki yapı bileşenleri, termal tampon bölge işlevi görerek mekanik ısıtma-soğutma yükünü azaltır (Mihalakakou ve diğerleri, 2024). Mihalakakou ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan kapsamlı derleme çalışmasında, gömülü ve toprakla çevrili yapıların enerji korunumundaki rolü sistematik olarak incelenmiştir. Termal performansla ilgili matematiksel modeller, toprak sıcaklık profilleri, zemin ısı ile ısı transferi parametreleri ve yapay sinir ağları gibi veri odaklı modelleme yöntemleri değerlendirilmiştir. Bulgular, toprak kütesinin ısı yalıtımı ve gecikmeli ısı iletimi sayesinde hem ısıtma hem de soğutma yüklerinde önemli düşüş sağladığını, ayrıca doğal gün ışığı erişimi ve akustik konfor gibi ikincil tasarım parametrelerine de olumlu katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, toprakla etkileşimli sistemler yalnızca termal konfor değil,

sürdürülebilirlik ve çok işlevli performans açısından da değerli bir pasif tasarım çözümüdür.

Yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, enerji etkin ve pasif tasarım prensipleri doğrultusunda, karbon emisyonlarını azaltmanın yanı sıra enerji bağımsızlığını artırma hedefi taşımaktadır. Fotovoltaik (PV) paneller, güneş kolektörleri ve jeotermal ısıtma-soğutma sistemleri, yapıların enerji gereksinimlerinin büyük kısmını karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Bu sistemlerin etkin biçimde tasarımıyla bütünleşebilmesi için yapı yönelimi, güneşlenme süresi ve panel eğim açısı gibi çevresel ve yapısal parametrelerin optimize edilmesi gereklidir (Zuo ve Zhao, 2014). Elaouzy ve arkadaşları (2024), pasif ve yenilenebilir güneş enerjisi teknolojilerinin 3E (enerji, ekonomi, çevre) performanslarını sistematik biçimde incelemiş ve fotovoltaik-termal (PV/T) teknolojilerin enerji verimliliğinin %58 ile %94 arasında değiştiğini ortaya koymuştur. Çalışma, PV sistemlerinin pasif stratejilerle entegre edildiğinde enerji tüketimini önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte yatırım maliyetleri ve iklimsel değişkenliklerin sistem performansı üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, yapı ölçeğinde optimum sistem seçimi yapılırken iklim verileri, enerji fiyatları ve karbon salımı gibi çoklu kriterler değerlendirilmelidir.

Kullanıcı davranışları ile uyum, enerji etkin ve pasif tasarım ilkelerinin başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi açısından belirleyici bir unsurdur. Pencere, perde, doğal havalandırma ve yapay aydınlatma gibi sistemlerle kullanıcı etkileşimi, enerji tüketimi üzerinde doğrudan etki yaratır. Kullanıcıların davranışları, aynı zamanda bina otomasyon sistemlerinin verimliliğini de belirleyen kritik bir faktördür. Bu bağlamda, kullanıcıya uygun arayüzler, geri bildirim mekanizmaları ve farkındalık artırıcı stratejiler, enerji performansını sürdürülebilir biçimde optimize etmekte önemli rol oynamaktadır (D'Oca ve Hong, 2015; Gunay, O'Brien ve Beausoleil-Morrison, 2016).

Hax ve arkadaşları (2021), üniversite binalarında kullanıcı davranış kalıplarının (proaktif, orta düzeyde farkında, ilgisiz) enerji tüketimi üzerindeki etkilerini simülasyon ortamında incelemiş ve kullanıcı davranışlarının doğal havalandırma, iç gölgeleme ve yapay iklimlendirme gibi sistemlerin performansı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Proaktif kullanıcıların pasif stratejileri daha etkin kullandıkları ve %25'e varan enerji tasarrufu sağladıkları görülürken, pasif kullanıcıların tamamen otomasyona bağlı sistemlere yöneldiği ve bu durumun enerji verimliliğinde düşüşe yol açtığı belirlenmiştir. Ayrıca otomasyon sistemleri ile kullanıcı alışkanlıklarının uyum

düzeyinin, yatırımın geri dönüş süresini doğrudan etkilediği vurgulanmıştır (Hax, Leitzke, Da Silva ve Da Cunha, 2022). Bu nedenle, kullanıcı merkezli tasarım anlayışı enerji etkin yapıların performans sürekliliği açısından temel bir strateji olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak enerji etkin ve pasif tasarım prensipleri, yapı ve kentsel çevrenin iklim duyarlı, kaynak verimli ve kullanıcı odaklı biçimde tasarlanmasını sağlayan bütüncül bir strateji setidir. Bina yönlenmesi, biçimsel kompaktlık, doğal havalandırma, termal kütle, gün ışığı kullanımı, yapı kabuğu performansı ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi ilkelere dayanan bu yaklaşımlar, tasarımın erken aşamalarında çevresel performansı optimize etme potansiyeline sahiptir. Ancak bu stratejilerin etkili olabilmesi, yalnızca fiziksel çözümlere değil, aynı zamanda kullanıcı davranışları ve bağlam duyarlılığına da bağlıdır. Bu nedenle enerji etkin tasarım, teknolojik yeterlilik ile toplumsal etkileşimin kesişiminde değerlendirilerek, sürdürülebilir yapılaşmanın temel dinamiği olarak ele alınmalıdır.

2.3. YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (BIM) KAVRAMI

Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling – BIM), yapıların ve kentsel çevrenin planlama, tasarım, inşa, işletim ve bakım süreçlerini disiplinlerarası bir zeminde bütünleşik olarak yöneten dijital bir modelleme ve bilgi yönetimi sistemidir. BIM, yalnızca üç boyutlu bir tasarım aracından öte; zaman (4D), maliyet (5D), sürdürülebilirlik (6D), işletme ve bakım (7D) gibi çok boyutlu veri kümelerinin entegre biçimde yönetilmesini sağlayan kapsamlı bir platform sunar (Sacks, Eastman, Lee ve Teicholz, 2018).

Bu sistem, tasarımın ilk aşamalarından itibaren bilgi tabanlı karar alma süreçlerini teşvik eder; yapının ömrü boyunca mimar, mühendis, müteahhit, işletmeci ve kullanıcı gibi farklı aktörler arasında senkronize bir veri paylaşım ortamı sağlar. BIM'in en ayırt edici özelliklerinden biri, parametrik modelleme yoluyla geometri, malzeme, maliyet, enerji tüketimi ve zaman çizelgeleri gibi çok çeşitli verileri aynı dijital ortamda ilişkilendirebilmesidir (Azhar, 2011). Böylelikle, kararlar yalnızca görsel forma değil, performansa ve öngörülebilir çıktılara dayandırılabilir.

BIM, özellikle enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleriyle doğrudan ilişkili olarak değerlendirilmektedir. 6D BIM kapsamında enerji tüketimi, karbon ayak izi, gün ışığı

erişimi, iç mekan termal konfor gibi çevresel performans kriterleri simülasyonlarla modellenilebilmekte, tasarımın çevresel etkileri erken safhalarda optimize edilebilmektedir (Attia ve diğerleri, 2012; Chong, Lee ve Wang, 2017). BIM modelleri bu bağlamda "tasarımla enerji performansı arasındaki boşluğu kapatan" bir karar destek sistemi olarak değerlidir.

BIM tabanlı analizler, gbXML, IFC, IDF gibi veri formatları aracılığıyla enerji simülasyon yazılımlarına (EnergyPlus, DesignBuilder, IES VE, Sefaira, Autodesk Insight) entegre edilebilmektedir. Böylece enerji senaryoları karşılaştırmalı biçimde test edilerek, yapının iklim, form, cephe, malzeme ve kullanıcı profili gibi değişkenlerle ilişkili performansı analiz edilebilir (Welle, Haymaker ve Rogers, 2011).

Ayrıca BIM'in dijital ikiz (digital twin), yapay zeka (AI), büyük veri (Big Data), artırılmış gerçeklik (AR) ve nesnelerin interneti (IoT) ile entegrasyonu, veri tabanlı karar alma süreçlerini daha öngörülebilir, gerçek zamanlı ve adaptif hale getirmektedir (Davila Delgado, Oyedele, Demian ve Beach, 2020; Lu, Xie, Heaton, Parlikad ve Schooling, 2020). Dijital ikiz sistemleriyle entegre çalışan BIM modelleri, yapının gerçek zamanlı performansını izleyip gerektiğinde tasarım senaryolarını güncelleyebilir.

BIM'in kent ölçeğindeki uygulamaları, günümüzde Urban Information Modeling (UIM) ve City Information Modeling (CIM) yaklaşımlarıyla genişletilmiştir. Bu entegre modelleme sistemleri, kent formu, altyapı, ulaşım, enerji ağları ve iklimsel etkiler gibi farklı katmanları aynı dijital platformda ele alarak, kentsel ölçekte bütüncül ve sürdürülebilir planlama stratejilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle dijital kent planlama, dijital eşlenik (digital twin) sistemlerine geçişte temel oluşturur. Gil (2020), CIM'in yalnızca teknolojik bir araç değil, aynı zamanda disiplinler arası planlama ve karar alma süreçlerini bir araya getiren stratejik bir çerçeve sunduğunu belirtmektedir. Bu bağlamda BIM, dijital kent ikizlerinin inşasında anahtar bir altyapı teknolojisi olarak değerlendirilmekte; kent verisinin sürekli güncellenebilen, üç boyutlu ve analize açık hale gelmesini sağlamaktadır (Gil, 2020).

BIM'in kamu sektöründe benimsenmesi de küresel ölçekte hız kazanmıştır. Birleşik Krallık, Singapur, Norveç, Finlandiya ve Güney Kore gibi ülkeler kamuya ait projelerde BIM kullanımını yasal olarak zorunlu hale getirmiştir. Örneğin İngiltere, 2016 itibarıyla Level 2 BIM'i tüm kamu projelerinde şart koşturmuştur (Kassem ve Succar, 2017). ISO 19650 standardı ise BIM süreçlerinin uluslararası düzeyde yönetilmesi için bir çerçeve

sunmaktadır.

Sonuç olarak, BIM yalnızca bir modelleme aracı değil; sürdürülebilir ve yüksek performanslı yapı çevrelerin tasarımı, uygulanması ve yönetimi için stratejik bir bilgi altyapısıdır. Tasarım sürecinin erken safhalarından itibaren enerji ve çevre analizleriyle bütünleşik çalışan BIM sistemleri, mimarlık ve şehircilik disiplinlerinde verimlilik, kalite ve çevresel sorumluluğun kurumsallaşmasını sağlamaktadır.

2.3.1. BIM'in Temelleri ve Tarihsel Gelişimi

BIM'in tarihsel gelişimi, 2.3. bölümünde ayrıntılı biçimde açıklandığı üzere, yalnızca yazılım temelli bir inovasyon süreci değil, aynı zamanda inşaat sektöründe disiplinlerarası veri yönetimi, organizasyonel dönüşüm ve sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik sistematik bir paradigma değişimini temsil etmektedir. BIM'in gelişimini kavrayabilmek için öncelikle bilgisayar destekli tasarım (CAD) teknolojilerinin evrimsel tarihçesini dikkate almak gerekir. BIM'in teknik temelleri, 1963 yılında Ivan Sutherland tarafından geliştirilen Sketchpad programına dayanmaktadır. Sketchpad, bilgisayar ortamında etkileşimli çizim yapılabilmesini sağlayan ilk grafik kullanıcı arayüzünü sunarak, bilgisayar destekli mimarlık ve mühendisliğin başlangıç noktasını oluşturmuştur (Sutherland, 2003). 1970'li yıllarda Charles Eastman tarafından geliştirilen Building Description System (BDS) yaklaşımı, yapı elemanlarının hem geometrik hem de bilgisel temsillerle bütünleşik olarak modellenmesini öngörerek, günümüzdeki nesne tabanlı BIM sistemlerinin temel mantığını ortaya koymuştur. Bu sistem, parametrik modelleme ve çok katmanlı veri etkileşiminin erken dönem örneklerinden biri olarak kabul edilir (Bredella, 2019). 1992 yılında van Nederveen ve Tolman, BIM kavramını akademik literatüre kazandırarak yapı üretim sürecinin tüm aktörleri arasında bilgi paylaşımını kolaylaştıracak ortak bir veri modeli fikrini önermişlerdir (van Nederveen ve Tolman, 1992). Bu yaklaşım, günümüzde "Open BIM" olarak adlandırılan veri paylaşım standartlarının öncül tanımı niteliğindedir.

Ticari düzeyde ilk BIM uygulamaları, 1987 yılında Graphisoft'un ArchiCAD yazılımı ile başlamıştır. Bu yazılım, yapıların üç boyutlu dijital modellerini üretmeyi ve belgeleri eş zamanlı olarak güncellemeyi mümkün kılmıştır. 2002 yılında Autodesk'in Revit yazılımını satın almasıyla birlikte "Building Information Modeling" terimi daha geniş kitlelere yayılmış, BIM endüstriyel ölçekte görünürlük kazanmıştır. 2004 yılında Patrick MacLeamy tarafından ortaya konulan "MacLeamy Eğrisi", tasarım kararlarının proje başında alınmasının enerji verimliliği ve maliyet etkinliği üzerindeki etkisini grafiksel

biçimde ifade etmiştir. Bu grafik, BIM'in özellikle erken tasarım aşamalarında kullanılması'nın önemini vurgulamış ve bu anlayış sonraki literatürde sıklıkla referans alınmıştır.

Succar (2009), BIM'i yalnızca bir yazılım aracı değil, aynı zamanda süreç, teknoloji ve politika üçgeninde şekillenen bir paradigma olarak tanımlamış ve bu bağlamda "BIM Maturity Matrix" sistemini geliştirmiştir. Bu matris, projelerin BIM olgunluk düzeylerini analiz etmek için geliştirilen önemli bir değerlendirme aracıdır. 2010'lu yıllarla birlikte BIM, birçok ülkenin ulusal inşaat politikalarının parçası haline gelmiştir. İngiltere'nin Level 2 BIM zorunluluğu, Singapur'un CORENET dijital izin sistemi, Norveç'in Statsbygg BIM kılavuzu ve Finlandiya'nın COBIM standardı, bu dönüşümün kurumsal örneklerindendir. Bu politikaların amacı, BIM'in kamusal altyapı projelerinde şeffaflık, maliyet kontrolü ve sürdürülebilirlik sağlamasını teşvik etmektir (Kassem ve Succar, 2017).

BIM modelleri, sensör verileriyle güncellenen canlı sistemler haline gelmiş, yalnızca tasarım ve yapım aşamalarında değil; aynı zamanda kullanım süresince de sürdürülebilirlik, enerji yönetimi ve bakım stratejileri için dinamik veri kaynaklarına dönüşmüştür (W. Liu, Lv, Wang, Sun ve Han, 2024; Lu ve diğerleri, 2020). Ayrıca, ISO 19650 standardı ile BIM süreçleri uluslararası düzeyde tanımlanmış ve veri paylaşımı, güvenlik, sorumluluk dağılımı gibi alanlarda küresel uyum hedeflenmiştir. Bu sayede BIM, farklı ülkelerdeki aktörlerin ortak bir dijital dil kullanarak yapı üretimini yürütmelerine imkan tanımaktadır.

Sonuç olarak, BIM'in tarihsel gelişimi yalnızca teknolojik evrimi değil; mimarlık ve inşaat sektörünün bilgi temelli, sürdürülebilir ve çok aktörlü üretim modellerine geçişini temsil etmektedir. Bu bağlamda BIM, gelecekte yapı çevrenin, karbon nötr ve iklim dirençli biçimlerde yönetilmesinde temel bir araç olmaya devam etmesi düşünülmektedir.

2.3.2. BIM ve Enerji Performansı Arasındaki İlişki

Günümüzde BIM (Building Information Modeling) teknolojisi, yalnızca yapıların geometrik ve mekansal bileşenlerini modellemekle kalmayıp, enerji performansının ve çevresel etkilerin bütüncül bir biçimde analiz edilmesine de olanak tanıyan güçlü bir araç haline gelmiştir. Bu bağlamda, BIM tabanlı enerji performansı analizleri, sürdürülebilir mimarlık ve çevresel tasarım pratiklerinde karar verme süreçlerini derinleştirerek, projelerin erken aşamalarında çevresel performansın simülasyonlarla öngörülmesini

sağlar (Attia ve diğerleri, 2012; Azhar, 2011).

Bununla birlikte enerji analizlerinin BIM ile entegrasyonu, özellikle tasarımın erken safhalarında bina kabuğu, yapı formu, açıklık yerleşimi, cephe karakteri ve kullanıcı davranışları gibi çok sayıda parametrenin çevresel çıktılarla ilişkilendirilmesini mümkün kılmaktadır. BIM, geleneksel çizim tabanlı tasarım süreçlerinden farklı olarak, performansa dayalı bir karar destek mekanizması sunar. Bu sayede, enerji tüketimi, ısıtma-soğutma yükleri, gün ışığı kullanımı, doğal havalandırma potansiyeli ve karbon emisyonları gibi göstergeler, tasarım sürecinin ayrılmaz bir parçası haline gelir (Dong, Lam ve Huang, 2007; Geyer, 2012).

BIM tabanlı enerji analizleri genellikle üç aşamalı bir süreçte yürütülmektedir. İlk aşama olan veri hazırlama ve modelleme sürecinde, parametrik BIM modelleri enerji simülasyonuna uygun formatlarda (gbXML, IFC, IDF) dışa aktarılır. Bu modeller, yapının geometrik özelliklerini (hacim, alan, yönelme), termal kabuk bileşenlerini (duvar, pencere, çatı), malzeme karakteristiklerini ve kullanım senaryolarını kapsamaktadır (Bazjanac, 2008). Bunu izleyen aşama ise simülasyon ve analizdir. Hazırlanan modeller, EnergyPlus, DesignBuilder ve Autodesk Insight gibi enerji modelleme yazılımlarına entegre edilerek, yıllık enerji tüketimi, ısıtma-soğutma yükleri, gün ışığı erişimi, havalandırma performansı ve termal konfor seviyeleri gibi çok sayıda parametre simüle edilmektedir (Attia ve diğerleri, 2012; O'Donnell ve diğerleri, 2013). Bu analizler, yapının enerji davranışlarını detaylı şekilde değerlendirme imkanı sunmaktadır. Son aşama olan performans değerlendirmesi ve karar desteği kısmında, BIM tabanlı analiz araçları sayesinde tasarımın erken safhalarında parametrik varyasyonlar üzerinden çok sayıda tasarım seçeneği karşılaştırılabilmektedir. Bu yaklaşım, yapı formu, açıklık düzeni, malzeme kombinasyonları ve enerji stratejileri gibi kararların nicel temellere dayalı olarak alınmasına yardımcı olur. Geyer (2012), sistem modelleme ile enerji performansı, çevresel etki ve yatırım kararları arasında etkileşim kurabilen entegre bir karar destek çerçevesi geliştirmiştir. Aynı doğrultuda Zhao ve arkadaşları (2022), parametrik BIM ve çok kriterli optimizasyon algoritmalarını kullanarak bina formu ile enerji tüketimi ve karbon salımı arasında optimum dengeyi sağlayan bir karar destek modeli ortaya koymuştur. Bu tür modeller, sürdürülebilir tasarım kararlarını sayısal verilerle destekleyerek, performansa dayalı mimari sürecin gelişimini teşvik etmektedir (Geyer, 2012; Zhao, Zhang ve Wang, 2022).

Enerji etkin tasarımın iki temel bileşeni olan gün ışığı ve termal konfor analizleri de BIM

ile entegre bir biçimde yürütülebilmektedir. BIM modelleri, Spatial Daylight Autonomy (sDA), Annual Sunlight Exposure (ASE) ve Daylight Glare Probability (DGP) gibi göstergelere göre aydınlatma simülasyonlarının gerçekleştirilmesini sağlar. Kota ve çalışma arkadaşları (2014), Revit, Radiance ve DAYSIM gibi yazılımların BIM ortamına entegre edilmesiyle, gün ışığı performansının doğrudan dijital model üzerinden analiz edilebildiğini ortaya koymuşlardır (Kota, Haberl, Clayton ve Yan, 2014).

Buna ek olarak, doğal havalandırma senaryoları kapsamında hava değişim hızı (ACH), CO₂ konsantrasyonu ve iç ortam sıcaklıkları gibi termal konfor çıktıları da BIM ile entegre biçimde simüle edilebilmektedir. Böylece özellikle tasarımın erken aşamalarında, yapı formu, açıklık yerleşimi ve havalandırma stratejileri termal konfor kriterleri doğrultusunda değerlendirilebilir hale gelir. Hosseini ve diğerleri (2021), BIM tabanlı modellerin dinamik termal simülasyonlarla entegre edilmesi sayesinde, hem veri akışının hızlandığını hem de analiz sonuçlarının bütüncül bir hal aldığını vurgulamaktadır (Hosseini, Shirmohammadi, Kasaeian ve Pourfayaz, 2021). Bu analizlerin BIM ile bütünleşik olarak yürütülmesi, tasarım alternatiflerinin yalnızca estetik ve işlevsel yönleriyle değil, aynı zamanda enerji ve konfor kriterleri açısından da karşılaştırılmasını mümkün kılar. Böylelikle tasarım süreci daha sayısallaştırılmış, rasyonel ve optimize edilebilir bir yapıya ulaşır.

BIM modelleri aynı zamanda karbon ayak izi değerlendirmelerinde de etkili araçlardır. Bu modeller sayesinde yapı elemanlarının malzeme bazlı çevresel etkileri analiz edilebilmektedir. Life Cycle Assessment (LCA – Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi) ve Embodied Carbon (Gömülü Karbon) analizleri ile yapı bileşenlerinin üretim, taşıma, kullanım ve bertaraf süreçlerindeki karbon salımları hesaplanabilir. Xu ve çalışma arkadaşları (2022) tarafından geliştirilen BIM-LCA entegrasyon modeli, farklı bina seviyelerinde (malzeme, bileşen, katman) gömülü karbonu otomatik olarak analiz ederek erken tasarım aşamasında zaman kazandırmakta ve karar sürecine destek sunmaktadır (Xu, Teng, Pan ve Zhang, 2022).

Buna benzer şekilde, Parece ve diğerleri (2024), BIM modellerinin sınıflandırma sistemleriyle eşleştirilerek LCA veri tabanlarıyla entegre edilmesi sayesinde, farklı geliştirme düzeylerine (Level of Development – LoD) göre karbon ayak izi hesaplamalarının etkin biçimde yapılabilirdiğini belirtmişlerdir. Bu analizler, One Click LCA, Tally ve EC3 gibi BIM uyumlu yazılımlar üzerinden gerçekleştirilerek sürdürülebilir malzeme seçimi ve tasarım optimizasyonu sağlanabilmektedir (Parece,

Resende ve Rato, 2024). Sürdürülebilirlik sertifikasyon sistemleriyle BIM entegrasyonu da önemli bir gelişim alanıdır. LEED, BREEAM, WELL ve DGNB gibi sistemler, BIM ile entegre edilerek projelerin ön değerlendirme skorlarının analizini mümkün kılmaktadır. BIM modelleri, bu sistemlerde yer alan enerji, su kullanımı, malzeme seçimi, iç mekan kalitesi ve çevresel etki gibi kriterlere ilişkin verileri dijital ortamda toplayıp yorumlayabilir. Bu bağlamda, Dubljević ve arkadaşları (2023), LEED değerlendirmelerini görsel programlama yoluyla gerçek zamanlı analiz eden bir BIM aracı geliştirmiştir. Böylelikle, tasarım sürecinin her aşamasında hangi LEED kredilerinin karşılandığı doğrudan izlenebilir hale gelmiştir (Dubljević, Tepavčević, Markoski ve Anđelković, 2023).

Benzer bir çalışmada, Jalaei ve diğerleri (2020), BIM modelleriyle entegre edilen bir değerlendirme aracı kullanarak tasarımın erken aşamasında otomatik LEED puan hesaplaması yapılabileceğini ve böylece tasarım kararlarının sürdürülebilirlik hedeflerine göre yönlendirilebileceğini ortaya koymuşlardır (Jalaei, Jalaei ve Mohammadi, 2020). Bu tür entegrasyonlar, belgelendirme sürecinin hem hızlanmasını hem de daha şeffaf ve izlenebilir bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır.

Son olarak, akademik literatürdeki güncel gelişmeler ve gelecek yönelimler incelendiğinde, BIM tabanlı enerji analizlerinin özellikle erken tasarım sürecinde büyük öneme sahip olduğu görülmektedir. Bu analizler, tasarım varyasyonlarının test edilmesini, performansa dayalı kararların alınmasını ve enerji hedeflerinin tasarım kriteri olarak belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Habibi (2017), BIM'in enerji verimliliği ve iç mekan çevre kalitesine katkılarını vurgulayarak, bu teknoloji sayesinde alternatif çözümlerin eş zamanlı olarak değerlendirilebildiğini ifade etmektedir (Habibi, 2017).

Gelecekte ise yapay zeka ile entegre edilen BIM modellerinin yaygınlaşması beklenmektedir. Bu entegrasyon sayesinde enerji simülasyonlarının otomatikleştirilmesi, optimizasyon algoritmalarının parametrik varyasyonlarla eş zamanlı çalıştırılması ve karbon salımı hedeflerinin dinamik olarak izlenmesi mümkün olacaktır. Li ve çalışma arkadaşları (2024), AI-BIM entegrasyonunun sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için çok boyutlu karar destek sistemleri sunduğunu ve akıllı şehirleşme bağlamında önemli fırsatlar yarattığını belirtmektedirler (J. Li, Liu, Han, Demian ve Osmani, 2024). Buna ek olarak, Montiel-Santiago ve diğerleri (2020), BIM 6D metodolojisiyle tasarım sürecinde enerji verimliliği ve aydınlatma senaryolarının erken aşamada değerlendirilmesinin, bina performansında %50'ye varan iyileşmelere olanak sağladığını ortaya koymuşlardır

(Montiel-Santiago, Hermoso-Orzáez ve Terrados-Cepeda, 2020).



3. KENT VE KAMPÜS MORFOLOJİSİNİN ENERJİ ETKİNLİĞİ BAĞLAMINDA ANALİZİ

Kent ve kampüs morfolojisi, enerji etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çok boyutlu yapısıyla önemli bir çalışma alanıdır. Bu bölümde, kentsel formun fiziksel, çevresel ve sosyal boyutları ile enerji tüketimi arasındaki ilişki detaylı biçimde ele alınacaktır. Morfolojik parametrelerin enerji performansı üzerindeki etkileri sistematik bir şekilde değerlendirilerek, kampüs yerleşkelerinin sürdürülebilirlik stratejileri ile nasıl uyumlaştırılabileceği ortaya konulmuştur.

Bu kapsamda bu bölümde, kent ve kampüs morfolojisinin teorik temelleri, kent ve kampüs morfolojisi-enerji performansı ilişkisi, doğal çevresel girdilerle entegrasyon stratejileri ve sürdürülebilir tasarım prensipleri incelenmektedir.

Bu doğrultuda, öncelikle kent ve kampüs morfolojisinin kuramsal çerçevesi ve temel morfolojik parametreler tartışılmaktadır. Ardından kampüs morfolojisinin enerji performansı üzerindeki etkileri incelenerek, doğal çevresel girdilerle (güneş ışıınımı, rüzgar, gün ışığı vb.) entegrasyon yolları değerlendirilmektedir. Son aşamada ise, enerji etkin ve sürdürülebilir kampüs tasarımı için geliştirilebilecek morfolojik prensipler ve tasarım stratejileri sistematik bir biçimde ortaya konulmaktadır.

3.1. KENT VE KAMPÜS MORFOLOJİSİNİN KURAMSAL ÇERÇEVESİ

3.1.1. Kent Morfolojisinin Disiplinlerarası Bağlamı

Daha önce 2.1. bölümünde kapsamlı biçimde tanımlandığı üzere, kent morfolojisi, kentlerin fiziksel ve mekansal yapısını oluşturan bileşenlerin (yapılar, yollar, parseller, açık alanlar vb.) organizasyonunu ve bu bileşenlerin aralarındaki ilişkileri inceleyen bir araştırma alanıdır. Ancak kent morfolojisinin önemi, yalnızca bu fiziksel analizle sınırlı değildir. Çağdaş kent çalışmaları, kent formunun toplumsal dinamikler, çevresel sürdürülebilirlik ve teknolojik dönüşümlerle olan ilişkisini de kapsamaktadır (Marcus ve Colding, 2014; Oliveira, 2018).

Kent morfolojisinin disiplinlerarası boyutu, bu alanın enerji verimliliği, karbon emisyonu,

iklim adaptasyonu ve sosyal bütünleşme gibi çok boyutlu hedeflerle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, morfolojik analizler yalnızca mimarlık ve şehir planlaması bağlamında değil; çevre mühendisliği, iklim bilimleri, dijital simülasyon teknolojileri ve veri bilimi gibi farklı disiplinlerle etkileşim içinde yürütülmektedir. Privitera ve diğerleri (2018), kentsel biçimlenmenin karbon salımı ve iklim değişikliğine uyum üzerindeki etkilerini sistematik biçimde analiz ederek, sürdürülebilir planlamanın temel parametrelerinden biri haline geldiğini ortaya koymuştur.(Privitera, Palermo, Martinico, Fichera ve Rosa, 2018).

Benzer şekilde, Javanroodi ve diğerleri (2023) çalışmasında ise, karmaşık kentsel alanlarda enerji sistemlerinin tasarımında kent morfolojisinin rolü ve disiplinlerarası veri entegrasyonunun önemi vurgulanmıştır.(Javanroodi, Perera, Hong ve Nik, 2023).

Özellikle enerji etkin kent ve kampüs planlamalarında, fiziksel çevrenin şekli ve organizasyonu enerji taleplerini doğrudan belirlemekte; bu durum, morfolojiyi sadece estetik ya da işlevsel değil, aynı zamanda stratejik bir çevresel karar alanı haline getirmektedir (Ratti ve diğerleri, 2005).

3.1.2. Temel Morfolojik Parametreler: Yoğunluk, Kompaktlık ve Geçirgenlik

Kent morfolojisinin enerji tüketimi ve çevresel performans üzerindeki etkisi, özellikle üç temel morfolojik parametre üzerinden analiz edilmektedir: yoğunluk, kompaktlık ve geçirgenlik. Bu parametreler, kentsel formun fiziksel karakteristikleri ile enerji davranışı arasındaki ilişkinin nicel olarak ortaya konmasında kritik rol oynamaktadır (Perini ve Magliocco, 2014; Steemers, 2003).

Yoğunluk, birim alandaki yapılaşma miktarını ve nüfus yoğunluğunu ifade eder. Yüksek yoğunluk, ulaşım mesafelerini azaltarak fosil yakıt tüketimini sınırlayabilir; aynı zamanda merkezi ısıtma/soğutma sistemleri için verimli altyapı kullanımına olanak tanır. Ancak aşırı yoğunluk, hava sirkülasyonunu engelleyerek ısı adası etkisini artırabilir. Li ve diğerleri (2020), yapı yoğunluğu ve morfolojisinin kent içi sıcaklıkları artırarak UHI yoğunluğunu güçlendirdiğini göstermektedir (Yunfei Li, Schubert, Kropp ve Rybski, 2020). Benzer şekilde, Ramírez-Aguilar ve Souza (2019), nüfus yoğunluğunun belirli bir eşik değerin üzerine çıktığında (>14.500 kişi/km²), kent içi hava sıcaklık farklarını anlamlı biçimde artırdığını ve bunun yeşil alan azalması ve gökyüzü görüş oranındaki düşüşle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Ramírez-Aguilar ve Lucas Souza, 2019).

Kompaktlık, yapıların birbirine yakın ve iç içe geçmiş biçimde konumlanmasını ve bunun

sonucunda oluşan düşük dış yüzey alanı/hacim (S/V) oranını ifade eder. Düşük S/V oranı, özellikle soğuk iklimlerde ısı kaybını minimize ederek enerji verimliliği sağlar. Ancak bu durum doğal havalandırma ve gün ışığı erişimi açısından sınırlayıcı olabilir (Oliveira, 2022; Yeang, 2006).

Geçirgenlik, kent dokusunun hava, ışık ve rüzgar gibi doğal faktörlere ne ölçüde izin verdiğini tanımlar. Yüksek geçirgenlik, yaz aylarında doğal havalandırma ve pasif soğutma açısından avantaj sunar; ancak kış aylarında enerji kayıplarını artırabilir. Bu bağlamda geçirgenlik ile kompaktlık arasında iklimsel koşullara göre optimize edilmiş bir denge kurulması gerekmektedir. Trepçi ve diğerleri (2020), kompakt kent formlarında yapıların yönelme, açıklık ve konum parametrelerinin, soğutma yüklerinde %26'ya varan azalma sağlayabildiğini göstermiştir (Trepçi, Maghelal ve Azar, 2021). Benzer şekilde Chen ve diğerleri (2025), bina cephe geçirgenliği ve hacim yoğunluğunun, rüzgar akışı üzerinde belirleyici olduğunu ve iyi optimize edilmiş yerleşimlerin doğal havalandırmayı ciddi ölçüde iyileştirdiğini belirtmiştir (H. Chen, Zhu, Ye ve Miao, 2025).

Kent morfolojisinin enerji performansına etkisi bağlamında yoğunluk, kompaktlık ve geçirgenlik parametreleri üzerine yapılan önceki açıklamalar, bu üç temel bileşenin çevresel işlevsellik açısından nasıl farklı yönlerde etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Her bir parametre, iklimsel bağlama ve kullanım senaryosuna bağlı olarak enerji açısından hem avantajlar hem de sınırlılıklar barındırmaktadır.

Bu doğrultuda sunulan çizelge, ilgili literatürde belirtilen bulgular temelinde, bu üç parametreye ilişkin enerjiyle bağlantılı başlıca etkileri özetleyici ve karşılaştırmalı biçimde ortaya koymaktadır (Çizelge 3.1). Çizelgenin amacı, önceki metinsel açıklamaların görsel bir sentezini sunarak morfolojik kararların çok boyutlu etkilerini daha bütüncül ve kolay karşılaştırılabilir hale getirmektir.

Çizelge 3.1'de özetlenen bu karşılaştırmalı değerlendirme, morfolojik parametrelerin enerji performansı üzerinde hem olumlu hem de sınırlayıcı etkiler oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle iklimsel bağlama duyarlı tasarım kararlarında, bu parametreler arasında denge kurulması gerekmektedir. Örneğin kompakt yerleşimler soğuk iklimlerde ısı kayıplarını azaltma avantajı sunarken; geçirgen yerleşimler sıcak iklimlerde doğal havalandırmayı destekleyerek soğutma yüklerini azaltabilmektedir.

Çizelge 3. 1. Temel Morfolojik Parametrelerin Enerji Performansı Üzerindeki Etkileri.

(Yunfei Li ve diğerleri, 2020; Oliveira, 2022; Trepçi ve diğerleri, 2021)

Parametre	Avantajlar	Dezavantajlar	İlgili Literatür
Yoğunluk	Ulaşım azalır, merkezi sistem avantajı	UHI etkisi, hava sirkülasyonu azalır	Li ve diğerleri, 2020
Kompaktlık	Isı kaybı azalır, yüzey-hacim oranı düşük	Doğal havalandırma ve ışık erişimi azalabilir	Oliveira, 2022
Geçirgenlik	Rüzgar, ışık geçirimi; doğal havalandırma	Kışın ısı kaybı artar	Trepçi ve diğerleri, 2021

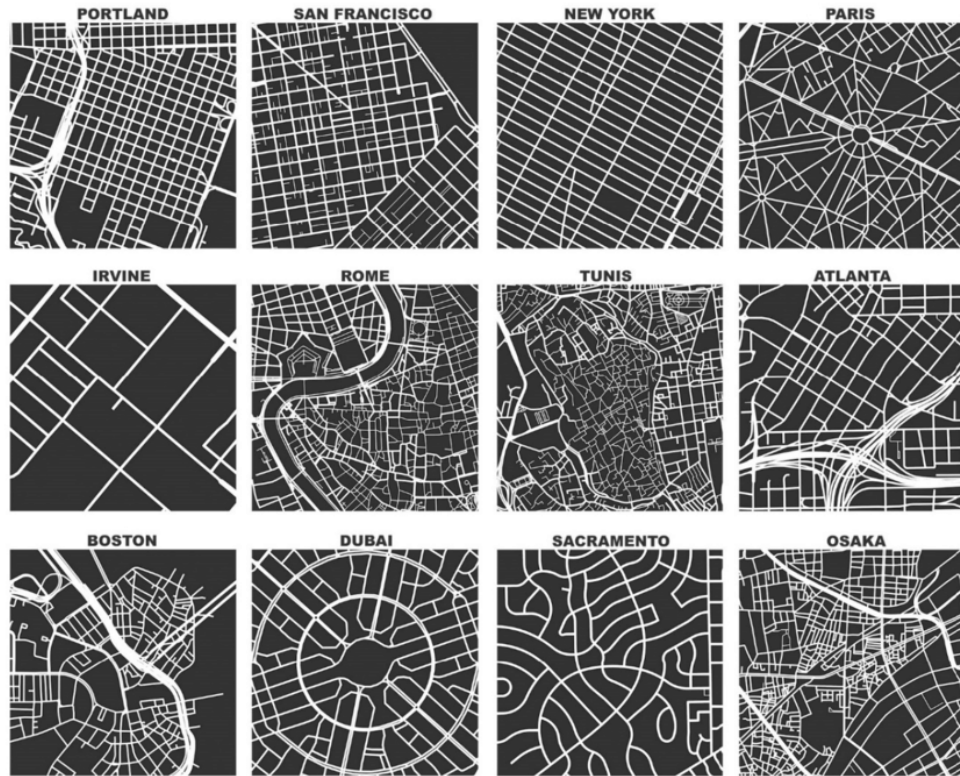
Bu bağlamda bu parametreler, kent morfolojisinin sadece fiziksel görünümünü değil; aynı zamanda binaların enerji performansı, mikroiklim özellikleri ve kullanıcı konforu üzerindeki etkilerini de kapsamlı biçimde belirlemektedir.

3.1.3. Morfolojik Yapının Mikroklimatik Etkileri

Kentsel morfoloji, kent içi mikroklimayı belirleyen temel mekansal etkenlerden biridir. Yapı yoğunluğu, blok yüksekliği, sokak kesitleri ve açık alanların düzenlenişi; güneş ışıınımı, hava akımları, nem dengesi ve ısı adası oluşumu gibi mikroklimatik parametreleri doğrudan etkilemektedir (Li ve diğerleri, 2020). Özellikle yüksek yoğunluklu ve geçirimsiz yüzeylerin baskın olduğu, yeşil alanların ise yetersiz kaldığı kentsel dokularda ısı adası etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum, kent merkezlerinde çevresel sıcaklıkların kırsal çevreye kıyasla birkaç derece daha yüksek olmasına yol açmaktadır (Yunfei Li ve diğerleri, 2020).

Kentsel morfolojinin mikroklimatik etkileri, büyük ölçüde sokak dokusunun biçimlenişi, yol ağı organizasyonu, yapıların yerleşim düzeni ve açık alanlarla olan ilişkisi üzerinden şekillenmektedir. Bu biçimsel düzen, sadece termal konfor ya da gölgeleme kapasitesi üzerinde değil; aynı zamanda rüzgar geçirgenliği, güneş ışıınımı erişimi ve yüzey sıcaklıkları gibi mikroklimatik değişkenler üzerinde de belirleyici rol oynamaktadır. Sokak ağının biçimsel yapısı, birim alan başına erişilebilirlik düzeyi, yönlenme stratejilerinin uygulanabilirliği ve pasif enerji çözümleri açısından da belirleyici olmaktadır.

Boeing (2021) çalışmasında, kent morfolojisini fiziksel biçimlerin ötesinde, bilgi taşıyan bir sistem olarak ele alan kuramsal bir yaklaşım benimsemektedir. Bu yaklaşım, Lynch'in (1960) geliştirdiği "kentsel okunabilirlik" kavramını mekansal bilgi kuramı ve ağ bilimi ile ilişkilendirerek, kentsel formun yapısal karmaşıklık, düzen ve simetri düzeylerine göre nasıl algılandığını ve değerlendirildiğini analiz etmeyi amaçlamaktadır (Lynch, 1960). Figür 1, bu kuramsal çerçevenin görselleştirilmiş bir yansıması olarak, farklı kentlerin bir mil karelik sokak ağlarını karşılaştırmalı biçimde sunmakta; böylece morfolojik çeşitliliğin, yönelme stratejileri, geçirgenlik ve erişilebilirlik gibi enerjiyle ilişkili parametreler üzerindeki etkilerini biçimsel düzeyde ortaya koymaktadır. Bu bağlamda figür, kent formunun okunabilirliğini, enerji etkinliğiyle birlikte mikroklimatik etkileri de tartışmaya açan veri temelli bir görsel araç işlevi görmektedir.



Şekil 3. 1. Farklı şehirlerin bir mil karelik sokak ağı görselleştirmesi
(Boeing, 2021).

Şekil 3.1’de yer alan bu görseller, farklı kent morfolojilerinin yönelme ve boşluk oranı gibi değişkenler üzerinden mikroklimatik performansa zemin hazırlayan mekansal kurgular barındırdığını göstermektedir. Yapıların sıklığı, sokak açıklıkları ve yönelme desenleri, bu görsellerde olduğu gibi her bir kentin iklimsel etkileşime açıklığını ya da

kapalı kalma düzeyini biçimsel olarak ifade etmektedir. Bu yapısal farklılıklar yapı gruplarının birbirine göre konumlanmasıyla ilişkili olarak gölgeleme ve güneşlenme dinamikleri üzerinde de etkili olmaktadır.

Morfolojik bileşenlerin gölgeleme ve güneşlenme ilişkisi üzerindeki etkisi de önemli bir mikroklimatik parametredir. Yapıların yönlenmesi, yükseklikleri ve aralarındaki mesafe gibi faktörler, pasif ısı kazanımı ve soğutma yükleri açısından belirleyicidir. Bu bağlamda, özellikle kampüs yerleşkeleri gibi kontrollü kentsel alanlarda bu tür morfolojik kararların hassas şekilde modellenmesi, hem dış mekan termal konforunu hem de enerji verimliliğini artırma potansiyeli taşır.

Bu doğrultuda Zaki ve diğerleri (2020) tarafından Kuala Lumpur'daki bir üniversite kampüsünde yürütülen çalışma, morfolojik parametrelerin (örneğin gökyüzü görüş faktörü – SVF, yeşil alan oranı ve yükseklik/genişlik oranı – H/W) mikroklima üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Çalışma, SVF değeri 0.61 ile 0.68 arasında olan, iyi gölgelenen bölgelerde dış ortam sıcaklıklarında %1'e varan düşüş gözlemlendiğini ve maksimum gölgelenme süresinin 12 saate kadar uzayabildiğini ortaya koymuştur (Zaki ve diğerleri, 2020). Bu tür çalışmalar, morfolojik kararların mikroklimatik etkiler üzerinden yönlendirilmesinin sürdürülebilir kentsel tasarım açısından kritik olduğunu göstermektedir. Rüzgar geçirgenliği, bina yerleşimlerinin hakim rüzgar yönlerine göre optimize edilmesiyle doğal havalandırma potansiyelini artırabilir. Rüzgar koridorları, özellikle sıcak iklimlerde pasif soğutma stratejilerinde önemli rol oynar (Tsoka, Tsikaloudaki ve Theodosiou, 2018). Buna ek olarak, yüzey malzemeleri ve geçirgenlik, yansıma, ısı tutma ve su emme kapasitesiyle mikroiklimi etkiler. Geçirgen zeminler ve bitkilendirme, yüzey sıcaklıklarını düşürerek enerji gereksinimini azaltabilir (Bowler, Buyung-Ali, Knight ve Pullin, 2010). Dolayısıyla, morfolojik kararlar, yalnızca mekansal kompozisyonu değil, aynı zamanda kent içi yaşam konforunu ve çevresel sürdürülebilirliği doğrudan şekillendirmektedir. Bu bağlamda mikroklima, kent morfolojisinin çevresel işlevlerinin anlaşılması açısından kritik bir analiz eksenidir.

3.1.4. Morfoloji, Enerji Kullanımı ve Çevresel Sürdürülebilirlik İlişkisi

Kentsel morfoloji ile enerji kullanımı arasındaki ilişki, sürdürülebilir kent planlamasının merkezinde yer alır. Morfolojik yapı, yalnızca enerji tüketimini şekillendirmekle kalmaz, aynı zamanda karbon emisyonlarını, altyapı verimliliğini, ekosistem uyumunu ve kullanıcı davranışlarını da etkiler (Neuman, 2005; UN-Habitat, 2020).

Enerji verimliliği, günümüzde yalnızca yapı düzeyinde bir mühendislik problemi olarak değil, aynı zamanda bölgesel ve kentsel ölçekte ele alınması gereken çok katmanlı bir sürdürülebilirlik stratejisi olarak değerlendirilmekte; bu da kentsel morfolojiyi çevresel performansı doğrudan etkileyen yapısal bir değişken konumuna taşımaktadır. Kentin fiziksel organizasyon biçimi—yani yapı yoğunluğu, erişilebilirlik, geçirgenlik ve yeşil alan ağı gibi morfolojik öğeler—artık enerji tüketimi ve karbon salımı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Bu kapsamda, kompakt ve entegre ulaşım sistemlerine sahip kentsel örüntüler, ulaşım kaynaklı enerji tüketimini azaltarak karbon ayak izinin küçülmesine katkı sunmakta; geçirgen kentsel doku ve biyofilik tasarım ilkeleri ise doğal ışık, hava akımı ve pasif soğutma gibi enerji etkin stratejilerin verimliliğini artırmaktadır. Javanroodi ve diğerleri (2023), morfolojinin iklim dayanıklı enerji sistemleri üzerindeki etkisini analiz ettikleri çalışmada, yapı yoğunluğu ve geçirgenlik düzeylerinin mikroklimatik konfor ve enerji sistemlerinin bütüncül verimliliği açısından optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Javanroodi ve diğerleri, 2023). Öte yandan You & Kim (2018), Seul kentinde yürüttükleri çalışmada, kent morfolojisinin yalnızca fiziksel biçim aracılığıyla değil, aynı zamanda arazi kullanımı, mülkiyet yapısı ve sosyo-mekansal dinamikler yoluyla da enerji verimliliği üzerinde dolaylı ancak etkili sonuçlar doğurduğunu vurgulamaktadır. Çalışma, kentsel yeniden yapılanma potansiyelinin düşük olduğu alanlarda enerji performansının da durağanlaştığını ve fiziksel dönüşümün sınırlı kaldığını göstermektedir (You ve Kim, 2018). Ayrıca, dijital araçların (BIM, UBEM, ENVI-met vb.) morfolojik karar alma süreçlerine entegre edilmesiyle, enerji performansı analizleri sadece sezgisel değil, sayısal olarak da doğrulanabilir hale gelmiştir. Bu sayede morfolojik senaryoların, iklim değişikliği bağlamında dayanıklılık, uyarlanabilirlik ve kaynak etkinliği yönlerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi mümkün olmaktadır (Yang Li ve Feng, 2025; Zou ve diğerleri, 2025)

Özetlemek gerekirse, kentsel morfoloji; enerji kullanımı, mikroklima ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerinin kesiştiği stratejik bir planlama bileşenidir. Morfolojik kararlar, yapı bloklarının diziliminden sokak yönlenmelerine, açık alan organizasyonlarından yoğunluk ve geçirgenlik dengesine kadar çok çeşitli parametreleri kapsar. Bu kararlar, yalnızca fiziksel çevrenin biçimlenişini değil; aynı zamanda kentlilerin enerji tüketim alışkanlıklarını, günlük hareketlilik modellerini ve mekansal konfor düzeylerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle kent morfolojisi, sürdürülebilir

kalkınma hedefleriyle uyumlu mekansal stratejilerin geliştirilmesinde temel bir zemin sunar. İklim değişikliğiyle mücadele, kaynak verimliliği, çevresel adalet ve yaşam kalitesi gibi alanlarda etkin çözümler üretebilmek için morfolojinin çevresel göstergelerle bütünleşik bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Geleceğin kentleri ve kampüsleri, yalnızca teknolojik değil; aynı zamanda morfolojik düzeyde de çevresel duyarlılık içeren yapılar olarak inşa edilmelidir. Sürdürülebilir kentlerin ve kampüslerin inşasında, morfolojik zekaya dayalı tasarım ve bilimsel veri destekli karar alma süreçleri belirleyici bir rol oynamaktadır.

3.2. KAMPÜS MORFOLOJİSİNİN ENERJİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİ

3.2.1. Kampüs Ölçeğinde Morfolojik Organizasyon ve Enerji Kullanımı

Üniversite kampüsleri, günümüzde yalnızca eğitim, araştırma ve sosyo-kültürel etkinliklerin gerçekleştiği mekanlar olmanın ötesinde, sürdürülebilir şehircilik ilkelerinin mikro ölçekte test edildiği deneysel ve stratejik planlama alanları olarak değerlendirilmektedir (Aghamolaei ve Fallahpour, 2023). Bu bağlamda kampüslerin morfolojik organizasyonu, yalnızca estetik veya fonksiyonel değil; aynı zamanda enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik, mikroklimatik denge ve kullanıcı konforu gibi çok katmanlı hedeflerle doğrudan ilişkilidir.

Kampüsler, kontrollü sınırları, homojen olmayan yapı dağılımları ve programlanmış gelişim planları sayesinde, enerji verimli kentsel modellerin uygulanabilirliğini test etmek açısından eşsiz fırsatlar sunar. Yapıların mekansal konumlandırılması, yönlmesi, kümelenme biçimi, blok yüksekliği, yapı aralıkları ve ulaşım örüntüleri gibi morfolojik bileşenler, pasif enerji kazanımından doğal havalandırmaya kadar birçok stratejik kararı etkileyen temel etmenlerdir (Givoni, 1998; Rajagopalan, Lim ve Jamei, 2014).

Enerji kullanımı bağlamında kampüs morfolojisi, iki temel düzeyde ele alınmalıdır:

- (1) Yapı ölçeği – binaların formu, yönelimi ve kabuk performansı,
- (2) Yerleşim ölçeği – yapıların aralarındaki mekansal ilişkiler, açıklık-yapı oranları, açık alanların erişilebilirliği ve ulaşım sistemlerinin entegrasyonu.

Bu iki düzeyin uyumlu biçimde planlanması, kampüslerin enerji verimliliğini maksimize etmede belirleyici bir rol oynamaktadır.

Marrone ve diğerleri (2018), kompakt yerleşim örüntülerine sahip kampüslerin sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde (örneğin Green Metric puanlamalarında) daha yüksek performans gösterdiğini vurgulamaktadır. Kompakt kampüsler, yapıların birbirine yakın konumlandırılması sayesinde enerji kayıplarını azaltırken, erişilebilirlik ve ulaşım da avantaj sağlamaktadır (Marrone, Orsini, Asdrubali ve Guattari, 2018).

Buna karşılık, Feng ve diğerleri (2024), yapı yoğunluğu, yönlenme ve ortalama kat sayısının enerji kullanım yoğunluğu (EUI) üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, morfolojik parametrelerin optimize edilmesi durumunda %7'ye varan enerji tasarrufu sağlanabildiğini göstermektedir. Özellikle ılıman ve soğuk iklim koşullarında düşük yüzey/hacim oranı ısı kayıplarını sınırlandırırken; sıcak iklimlerde geçirgen yerleşimler, doğal havalandırma potansiyelini artırmaktadır (W. Feng ve diğerleri, 2024).

Ayrıca, kampüs içinde karma kullanımlı fonksiyonel dağılım ve erişilebilirlik esaslı ulaşım organizasyonu, bireylerin motorlu taşıtlara olan bağımlılığını azaltarak ulaşım kaynaklı enerji tüketimini düşürmektedir. Kütüphaneler, laboratuvarlar, yurtlar ve sosyal alanların birbiriyle ilişkilendirilmiş biçimde planlanması hem enerji verimliliği sağlar hem de kullanıcı deneyimini artırır.

3.2.2. Kampüs Ölçeğinde Açık Alanlar, Peyzaj Stratejileri ve Mikroklimatik Konfor

Açık alanlar, peyzaj öğeleri ve mikroklimatik stratejiler; kampüs morfolojisinin yalnızca tamamlayıcı bileşenleri değil, aynı zamanda enerji verimliliği, termal konfor, çevresel sürdürülebilirlik ve biyofilik bağlamda temel yapıtaşlarıdır (Armson, Stringer ve Ennos, 2012; Berardi, GhaffarianHoseini ve GhaffarianHoseini, 2014). Özellikle yüksek enerji tüketimli kampüs yapılarında, açık alanların doğru planlanması mikroklimatik dengeyi sağlayarak iç ve dış mekanların enerji gereksinimini dengelemekte kritik rol oynamaktadır. Ayrıca, ağaçlar, doğrudan gölgeleme yoluyla yüzey sıcaklıklarını azaltırken; evapotranspirasyon sayesinde çevresel serinlik sağlar. Yapılan ölçümler, asfalt yüzeylerde gölgelenmeyle sıcaklıkların 13–22°C, çim alanlarda ise 6–9°C arasında düştüğünü göstermektedir (Napolì ve diğerleri, 2016).

Kampüs gibi yoğun kullanılan kentsel alanlarda, bu etki sadece yüzey sıcaklıklarını değil, aynı zamanda kullanıcı konforunu da doğrudan etkiler. Zölch ve diğerleri (2016), farklı yeşil altyapı türlerini karşılaştırmalı olarak analiz ettikleri çalışmada, ağaçların mikroklimatik serinletme açısından en etkili strateji olduğunu ortaya koymuştur (Zölch,

Maderspacher, Wamsler ve Pauleit, 2016).

Marrone ve diğerleri (2018), kampüs morfolojisinin sürdürülebilirlik performansı üzerindeki etkilerini değerlendirdiği çalışmada, yeşil altyapının Green Metric gibi değerlendirme sistemlerinde belirleyici bir unsur olduğunu vurgulamaktadır (Marrone ve diğerleri, 2018). Geçirgen yüzey kaplamaları ve su öğeleri (ör. yansıtıcı havuzlar, biyolojik göletler), buharlaşmalı soğutma etkisi ile özellikle sıcak iklim kampüslerinde enerji tüketimini azaltmakta etkili olur. Bu öğelerin yerleşiminde hakim rüzgar yönleri ve kullanıcı hareketliliği dikkate alınarak aktif mikroklimatik kontrol sağlanabilir (Qi ve diğerleri, 2025). Peyzaj stratejileri aynı zamanda ulaşım sistemleriyle de bütünleştirildiğinde, yaya ve bisiklet dostu ulaşım türlerinin teşviki yoluyla dolaylı enerji kazanımları da sağlar. Yeşil omurgalar, gölgelendirilmiş yaya aksları ve doğal koridorlar; hem ısı dengesi sağlar hem de kullanıcı deneyimini iyileştirir (Carmona, 2003).

Kampüs yerleşkelerinde açık alan tasarımı; toprak geçirgenliği, bitki türü çeşitliliği, gölgeleme süresi, yansıma katsayısı ve yüzey sıcaklığı gibi fiziksel-mekansal parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sun ve diğerleri (2022), okul kampüslerinde yürüttükleri çalışmada, farklı peyzaj düzenlemelerinin sıcaklık farkları, rüzgar etkisi ve kullanıcı konforu üzerindeki etkilerini analiz etmiş; yeşil alan organizasyonu ve yüzey malzeme seçimlerinin, açık mekan termal konforunu anlamlı ölçüde iyileştirebildiğini göstermiştir (Sun ve diğerleri, 2022). Benzer şekilde, Dougherty & Jain (2023), mikroklima verilerinin bina enerji modellemelerine entegrasyonu üzerine yaptıkları araştırmada, yerel yüzey sıcaklıkları, albedo ve nem dağılımı gibi mikroklimatik değişkenlerin, özellikle yaz ve bahar aylarında enerji tahmin doğruluğunu %8'e kadar artırabildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, açık alanlardaki çevresel parametrelerin bina enerji performansına olan etkisini sayısal olarak da desteklemektedir (Dougherty ve Jain, 2023).

3.2.3. Kampüs Ölçeğinde Pasif Enerji Stratejileri ile Morfolojik Entegrasyon

Pasif enerji stratejileri, yapının çevresel koşullarla uyum içinde tasarlanmasını esas alarak, mekanik sistemlere olan bağımlılığı azaltan ve kullanıcı konforunu artıran sürdürülebilir tasarım uygulamalarıdır. Kampüs ölçeğinde bu stratejilerin uygulanabilirliği, morfolojik organizasyonla doğrudan ilişkilidir.

Kampüslerdeki yapı yönlenmesi, güneş ışıınımı ve gün ışığı erişimi açısından en kritik parametrelerden biridir. Güney yönelimli cepheler, kış aylarında maksimum güneş

kazanımı sağlarken; doğu ve batı cepheleri ise yaz aylarında gölgeleme ihtiyacını artırır. Kang ve diğerleri (2015), okul yapıları için gerçekleştirdikleri simülasyon analizinde, yönelimin ve cephe kontrolünün pasif stratejiler kapsamında en yüksek enerji tasarrufu sağlayan değişkenler olduğunu göstermektedir (Kang, Ahn, Park ve Schuetze, 2015).

Yapılar arası açıklıklar, avlu organizasyonu ve gölgeleme ilişkileri, mevsimsel ısıtma/soğutma ihtiyacını doğrudan etkiler. Özellikle avlu tipolojileri, hem doğal havalandırmayı hem de iç mekan serinliğini destekleyen mikroklimatik tampon alanlar yaratır. Salameh ve diğerleri (2024), Birleşik Arap Emirlikleri'ndeki kamu okullarında yaptıkları saha araştırmasında, avlu yönelimi ve oranlarının iç sıcaklık üzerinde 1.7–1.8 °C'ye kadar düşüş sağladığını ortaya koymuştur (Salameh, Abu-Hijleh ve Touqan, 2024). Ayrıca, rüzgar yönüyle uyumlu yerleşim desenleri ve yapı kütlelerinin geçirgenliği, doğal havalandırmayı maksimize eden önemli kararlar arasındadır. Bu stratejilerin etkinliği, hem bina içinde hem de açık kampüs alanlarında hava akışlarını yönlendirerek enerji tüketimini azaltma potansiyeli sunar. Zhu ve diğerleri (2023), farklı iklim bölgeleri için avlu oranları, yönelme ve açıklık tasarımlarının mikroklimatik etkilerini karşılaştırmalı biçimde analiz etmiş ve özellikle sıcak iklimlerde Yüksek en-boy oranına sahip kuzey-güney yönelimli avluların en yüksek gölgeleme ve serinlik sağladığını göstermiştir (Zhu ve diğerleri, 2023).

Termal kütle stratejileri, kampüs yapı programlarıyla eşgüdüm içinde kurgulandığında, özellikle gece-gündüz sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde enerji verimliliğini anlamlı düzeyde artırabilir. Yüksek ısıl kütleye sahip yapı bileşenleri (örneğin kalın duvarlar veya yoğun zemin plakaları), gündüz ısıyı depolayarak gece iç mekanlara yayar. Bu özellik, kampüslerdeki ofis, sınıf ve laboratuvar gibi zaman odaklı kullanım alanlarında iç sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak enerji gereksinimini düşürür (Rodrigues, Fernandes, Gaspar, Gomes ve Costa, 2019). Bununla birlikte, kampüs içindeki yapıların zaman-temelli kullanım örüntüleri dikkate alınarak, doğu yönlü sabah yoğun kullanılan alanlar (kütüphane, sınıf) ile batı yönlü akşam yoğun kullanılan sosyal alanlar (yemekhane, spor merkezi) arasında yönelme eşgüdümü kurulmalıdır. Feng ve diğerleri (2022), üniversite sınıflarında mekansal planlama, yönelme ve günlük kullanım yoğunluğu arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak modellemiş ve bu uyumun iç sıcaklık stabilitesi üzerindeki etkisini ortaya koymuştur (J. Feng, Zhou ve Li, 2022). Ayrıca, termal kütlenin enerji esnekliği açısından değerlendirilmesi, kampüs gibi çok işlevli yapılarda giderek daha önemli hale gelmektedir. Özellikle iç ve dış termal kütlenin

birlikte optimize edilmesi, enerji talep profillerinin yönetilmesinde etkin bir rol oynar. Yoon ve Wu (2024), kısa süreli termal dayanıklılık ve enerji esnekliği üzerine yaptıkları çalışmada, dış termal kütlenin, iç mekan sıcaklık stabilitesini sağlarken enerji talep zirvelerini daha etkin biçimde dengelediğini göstermiştir. Ayrıca, Model Predictive Control (MPC) stratejileriyle yapılan simülasyonlar, daha ılıman günlerde ve yüksek iç sıcaklık eşik değerlerinde, soğutma taleplerinin önemli ölçüde azaltılabildiğini ortaya koymuştur (Yoon ve Wu, 2024).

Özetle; pasif enerji stratejilerinin kampüs morfolojisiyle entegre biçimde uygulanması, yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda iç mekan konforunu ve çevresel performansı optimize eden güçlü bir tasarım yaklaşımı sunar. Yapı yönlenmesi, avlu organizasyonu, açıklık yerleşimi ve termal kütle kullanımı gibi morfolojik kararların iklimsel verilerle eşgüdümlü biçimde alınması, kampüs ölçeğinde sürdürülebilirliği destekleyen çok katmanlı faydalar üretmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, pasif stratejilerin yalnızca bina değil, kentsel ölçekte de etkinliğini artırarak, geleceğin dirençli ve düşük karbonlu yerleşkelerinin inşasında temel bir rol oynamaktadır.

3.2.4. Enerji Odaklı Kampüs Planlama Süreçlerinde Sayısal Yaklaşımlar ve BIM Tabanlı Karar Destek Sistemleri

Kampüs planlamasında enerji performansının yalnızca öngörüye dayalı değil, veri temelli biçimde yönetilebilmesi için sayısal modelleme araçlarının ve BIM (Building Information Modelling) tabanlı sistemlerin entegrasyonu kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu tür araçlar, hem mekansal hem de enerji bazlı kararların eşzamanlı değerlendirilmesini sağlayarak, tasarım sürecini bilimsel temele oturtur (Zhuang ve diğerleri, 2021).

BIM, yalnızca yapı bilgisinin modellenmesini değil, aynı zamanda enerji verilerinin, kullanıcı davranışlarının ve çevresel girdilerin bir arada simüle edilmesini mümkün kılar. UBEM (Urban Building Energy Modelling) ile entegre edildiğinde, kampüs düzeyinde enerji profil haritaları oluşturulabilir; UB-EIA sayesinde çevresel etki skorları karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilir (Yang Li ve Feng, 2025).

Kampüs morfolojisinin enerji performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için çeşitli simülasyon araçları kullanılmaktadır. Bu araçlar, hem bina ölçeğinde hem de yerleşim düzeni düzeyinde pasif enerji stratejilerinin uygulanabilirliğini analiz etmeye olanak tanır.

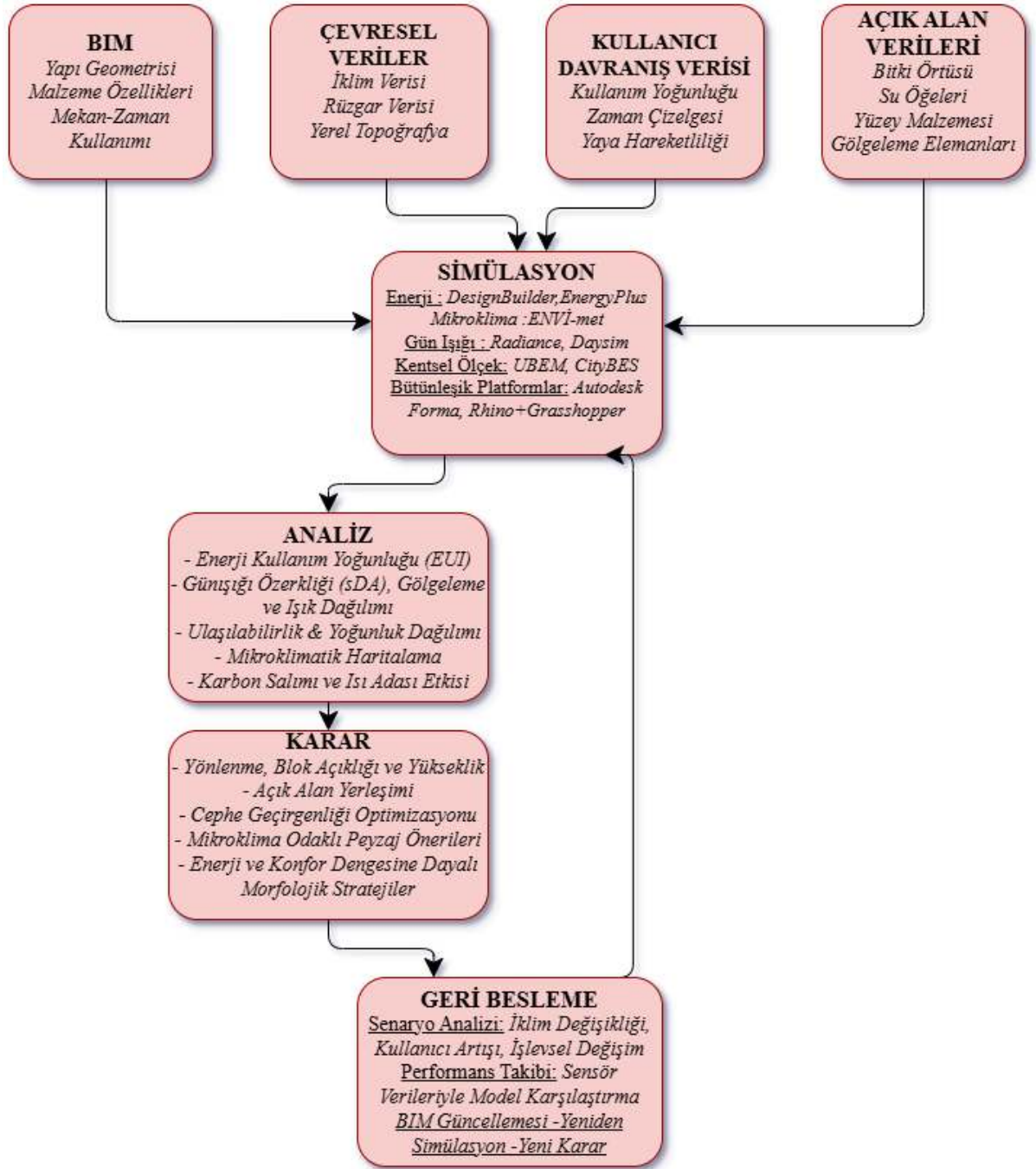
ENVI-met, güneş ışıınımı, rüzgar akımları ve sıcaklık dağılımları gibi mikroklimatik

değişkenleri 3 boyutlu olarak modelleyerek, açık alanların ve yapı kütlelerinin termal çevre üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılır.

Autodesk Forma ve Revit, erken tasarım aşamalarında bina formunun çevresel etkilerini analiz ederek yönlenme, gölgeleme ve ısı kazançları gibi parametreleri değerlendirmeye olanak sağlar. DesignBuilder, güneş kazancı, gölgeleme etkisi, doğal aydınlatma ve havalandırma gibi fiziksel parametrelerin ayrıntılı enerji simülasyonlarını üretir. Bu araçların kullanımıyla kampüslerdeki yapı kümelerinin yönlenme, cephe açıklığı ve açıklık-yapı oranı gibi kararlarının enerji tüketimine etkisi ölçülebilir hale gelir. Zhang ve diğerleri (2017), Kuzey Çin'deki bir okul kampüsü örneğinde ENVI-met ve DesignBuilder modellerini entegre kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, okul yapılarının yönlenmesinde yapılan küçük değişikliklerin bile yıllık soğutma enerjisi talebi üzerinde anlamlı farklar oluşturduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada, ağaçlandırma, açık alan yerleşimi ve cephe tasarımı gibi morfolojik unsurların mikroklimatik konforu ve enerji performansını doğrudan etkilediği ortaya konmuştur (Zhang ve diğerleri, 2017). Sayısal modelleme araçlarının entegrasyonu, veri üretiminin yanında bu verilerin tasarım kararlarına dönüşümünü yöneten bir süreci de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, BIM tabanlı planlama sistemi, pasif bir bilgi deposu değil, aktif bir karar destek altyapısı işlevi görmektedir.

Şekil 3.2'de yer alan diyagram, çok katmanlı karar destek sürecinin görsel bir temsili niteliğindedir. Süreç, yapı geometrisi ve malzeme bilgileri gibi BIM verileri ile başlamakta; çevresel veriler (iklim, rüzgar, topografya), kullanıcı davranışları (yoğunluk, hareketlilik) ve açık alan bileşenleri (bitki örtüsü, gölgeleme unsurları) gibi mekansal girdilerin entegrasyonu ile ilerlemektedir. Bu veriler, enerji (DesignBuilder, EnergyPlus), gün ışığı (Radiance, Daysim), mikroklima (ENVI-met), kentsel ölçekli enerji modelleme (CityBES) ve bütüncül olarak Autodesk Forma, Rhino/Grasshopper gibi platformlarda simülasyona tabi tutulur. Elde edilen sonuçlar, enerji kullanım yoğunluğu, gölgeleme performansı, mikroklima haritaları ve karbon salımı gibi metriklerle analiz edilir ve bu analizler morfolojik kararları (örneğin yönlenme, blok açıklığı, cephe geçirgenliği) yönlendirmek üzere kullanılır. Simülasyon, analiz ve karar üretimiyle başlayan bu süreç, dinamik bir geri besleme mekanizması ile sürekli güncellenir. İklim değişikliği senaryoları, kullanıcı artışı, işlevsel değişimler gibi etkenler doğrultusunda model yeniden çalıştırılır, sonuçlar karşılaştırılır ve BIM sistemi üzerinden yeni simülasyonlara geçilir. Böylece enerji etkinliği yalnızca başlangıçta planlanan bir hedef olarak değil,

sürekli izlenen ve geliştirilen bir performans kriteri olarak ele alınır. Bu döngüsel yapı, kent ve kampüs ölçeğindeki planlamada dirençlilik, esneklik ve sürdürülebilirliğin sayısal ve sistematik bir zemin üzerinden sağlanmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 3. 2. Enerji Odaklı Kent ve Kampüs Tasarımı İçin BIM Tabanlı Karar Destek

Süreci

(Yazar tarafından hazırlanmıştır).

Sonuç olarak, enerji verimliliği hedefleyen kampüs tasarımı, sadece mekansal kurgunun kalitesiyle değil; bu kurguya entegre edilen sayısal değerlendirme süreçleriyle birlikte anlam kazanmaktadır. BIM destekli morfolojik kararlar, kampüs planlamasında çevresel performansın sistematik olarak izlenebilir, karşılaştırılabilir ve iyileştirilebilir bir düzlemde ele alınmasını mümkün kılar. Bu bağlamda, kampüs tasarımında enerji verimliliği yalnızca teknik bir gereklilik değil; aynı zamanda çok boyutlu, veri tabanlı ve iklimle uyumlu bir tasarım felsefesinin parçası olarak görülmelidir. Yapı kümelenme düzeninden açık alan organizasyonuna, yönlenme stratejilerinden rüzgar geçirgenliğine kadar uzanan tüm morfolojik kararlar, bu bütünsel yaklaşım çerçevesinde değerlendirilmelidir. Bu süreçte dijital simülasyonlar, sadece planlama sürecini desteklemekle kalmaz; aynı zamanda tasarımın öngörülebilirliğini ve esnekliğini artırarak sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada güçlü bir karar destek sistemi sunar. Geleceğin kampüsleri, yalnızca enerji verimli değil; aynı zamanda yaşanabilir, dirençli ve çevresel açıdan bütünleşik mekanlar olarak kurgulanmalıdır. bu kurguya entegre edilen sayısal değerlendirme süreçleriyle birlikte anlam kazanmaktadır. BIM destekli morfolojik kararlar, kampüs planlamasında çevresel performansın sistematik olarak izlenebilir, karşılaştırılabilir ve iyileştirilebilir bir düzlemde ele alınmasını mümkün kılar.

3.3. DOĞAL ÇEVRESEL GİRDİLERLE ENTEGRE MEKANSAL TASARIM

3.3.1. Güneş Işınımının Mekansal Tasarıma Etkileri

Güneş ışınımı, sürdürülebilir mekansal tasarımın yalnızca doğal bir enerji kaynağı değil, aynı zamanda yapıyı çevrenin yönelimi, biçimlenişi ve kullanım senaryolarını belirleyen çevresel bir tasarım girdisidir. Güneşin yıl içindeki konumu, günlük hareketleri ve yönsel etkisi; bina yerleşimleri, cephe kurguları, açık alan düzenlemeleri ve enerji üretim sistemlerinin entegrasyonu açısından kritik öneme sahiptir (Givoni, 1998; Yeang, 2006).

Yönlenmenin doğru planlanmasıyla, pasif ısı kazanımı maksimize edilebilir, yapay aydınlatma ihtiyacı düşürülebilir ve fotovoltaik sistemlerin üretim verimliliği artırılabilir. Özellikle kampüs gibi çok işlevli ve yoğun kullanımlı yerleşimlerde, güneşe dayalı tasarım kararları enerji etkinliğin temel belirleyicilerindendir (Zhang ve diğerleri, 2017).

Kütüphane, sınıf ve laboratuvar gibi sürekli kullanılan iç mekanların güney yönlü planlanması, kış aylarında iç ortam konforunu artırırken ısıtma yükünü azaltır. Kang ve

diğerleri (2015), okul binalarının farklı yönelim senaryolarında enerji tüketim varyasyonlarını modelleyerek, pasif stratejilerin etkinliğini vurgulamıştır (Kang ve diğerleri, 2015).

Kentsel morfoloji içinde yapı kütlelerinin birbirine göre konumlandırılması, gölge düşme senaryolarını etkiler. Özellikle aşırı yoğun yapılanma, alt yapılarda pasif stratejilerin işlevsiz hale gelmesine yol açabilir. Bu nedenle yapı bloklarının yükseklikleri, aralarındaki mesafeler ve yönleri, gölgeleme analizleriyle optimize edilmelidir (Tomasi, Nikolopoulou, Giridharan, Löve ve Ratti, 2024). Ayrıca, kampüslerde yer alan meydanlar, avlular, yaya yolları ve sosyal alanların yıl boyunca yeterli güneş alması, dış mekan kullanımını teşvik eder. Yüzey yansıtıcılığı ve malzeme rengi gibi faktörler de mikroklimatik etkiyi şekillendirir (Martinelli, Lin ve Matzarakis, 2015).

Güneş ışınımına dayalı enerji üretimi, kampüslerde çatılar, cephe yüzeyleri, otopark üstü gölgelikler ve pergolalar aracılığıyla yaygınlaştırılabilir. Simülasyon temelli analizlerle panel yerleşimi, yön, eğim ve gölge etkileri optimize edilerek yüksek verim sağlanabilir. Bu kapsamda Zhou ve diğerleri (2021), TU Delft kampüsünde çatı ve cephe PV sistemlerinin 3B haritalanması yoluyla yıllık enerji potansiyelinin %10'a kadar mevcut enerji talebini karşılayabileceğini ortaya koymuştur. Bu tür entegre analizler, kampüslerin güneş enerjisi altyapısını planlamada güçlü bir temel sunmaktadır (Zhou, Verkou, Zeman, Ziar ve Isabella, 2022).

3.3.2. Rüzgar Dinamikleri, Doğal Havalandırma ve Kentsel Form

Rüzgar, mekansal tasarımda doğal havalandırmayı destekleyen, mikroklimayı dengede tutan ve enerji etkinlik hedeflerine katkı sağlayan çevresel bir faktördür. Yapı ve kent ölçeklerinde rüzgar hareketlerinin analiz edilmesi, sadece konfor ve sağlık açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu gibi hedefler açısından da önemlidir (Baş, Andrianne ve Reiter, 2024; Oliveira, 2022; Rajagopalan ve diğerleri, 2014).

Rüzgar etkisinin kentsel tasarımla ilişkisi yalnızca havalandırma ile sınırlı değildir. Rüzgar, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması, dış mekan konforunun artırılması ve yapı kabuğunun maruz kaldığı yüklerin yönetilmesi gibi çok yönlü bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmelidir (Tsichritsis, 2020). Hakim rüzgar yönleri dikkate alınarak yapılan yönlendirme kararları, doğal havalandırma stratejilerinin temelidir. Yazın serinletici rüzgarların iç mekana yönlendirilmesi, klima kullanımını azaltırken; kışın

soğuk rüzgarların kırılması enerji verimliliğini artırır. Rüzgar tüneli etkisinin engellenmesi için yapıların geçirgenlik oranları ve cephe açıklıkları kontrollü biçimde planlanmalıdır (Hong ve Lin, 2015). Ayrıca, rüzgar koridorları, sıcak ve nemli iklimlerde pasif soğutma sağlayan en etkili morfolojik stratejilerden biridir. Üniversite kampüsleri gibi büyük açık alanlara sahip yerleşkelerde, yapı blokları, yeşil alanlar ve açık mekanlar arasında planlanan doğrultulu açıklıklar, iç ve dış mekanlarda hava akışını iyileştirerek termal konfor düzeyini artırabilir. Örneğin, Li ve diğerleri (2024) tarafından Çin'in Wuhan kentinde yürütülen simülasyon çalışmasında, kent merkezinde planlanan kuzey-güney doğrultulu rüzgar koridorlarının, içinde yer alan yeşil dokular ve su yüzeyleriyle birlikte yaz aylarında ortalama 0.3–0.4°C sıcaklık düşüşü ve 0.05–0.1 m/s rüzgar hızı artışı sağladığı gösterilmiştir. (X. Li ve diğerleri, 2024).

Kampüs ölçeğine uyarlandığında, bu bulgular aşağıdaki mekansal stratejileri destekler:

Yapı blokları arasında rüzgar yönüne paralel boşluklar bırakılması (özellikle kuzey-güney doğrultulu), yaya yolları, açık avlular ve yeşil alanların rüzgar geçişini kesintiye uğratmayacak şekilde kurgulanması, kampüs içindeki süs havuzları, göletler veya su yüzeylerinin, hem estetik hem de mikroklimatik serinlik sağlayıcı unsurlar olarak ventilasyon koridorlarına entegre edilmesidir.

Bu tür geçirgen planlama kararları, yalnızca rüzgar akışını desteklemekle kalmaz; aynı zamanda doğal havalandırmaya dayalı enerji tasarrufu, dış mekan kullanım konforu ve ısı adası etkisinin azaltılması gibi sürdürülebilirlik hedeflerine de katkı sunar. Buna ek olarak, üniversite kampüsleri gibi açık ve geçirgen yerleşim alanlarında, yüksek yapılar yaya düzeyindeki rüzgar konforunu doğrudan etkileyen aerodinamik unsurlar haline gelmektedir. Özellikle laboratuvar, kütüphane ve öğrenci yurdu gibi fonksiyonlar için inşa edilen dikey yapı kütleleri, hakim rüzgar akımlarını bozarak bina çevresinde düşey yönlü akışlar (downwash), düşük basınç bölgeleri ve yerel türbülans etkileri oluşturabilmektedir. Bu durum, yaya seviyesinde konforsuz rüzgar hızları, ani yön değişimleri ve mikroklimatik dengesizlikler ile sonuçlanarak açık alan kullanımını olumsuz etkiler. Özellikle bina ayaklarında ve köşe bölgelerinde meydana gelen bu aerodinamik etkiler, tasarım sürecinde CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri ile önceden öngörülmesi; yapı yüksekliği, blok aralıkları, tampon bölgeler ve bitkilendirme stratejileri ile kontrol altına alınmalıdır. Bu tür önlemler, rüzgarın güvenli dağılımını sağlayarak kampüs alanlarında hem termal konforu hem de mekansal kullanım kalitesini artırma potansiyeli taşımaktadır (L. Chen ve Mak, 2021). Ayrıca, yapı içi hava

dolaşımı, rüzgar yönüne uygun şekilde konumlandırılmış açıklıklar (örneğin pencereler, atriumlar, iç avlular) ve iç mekan geçirimsizliği yoluyla sağlanabilir. Çapraz havalandırma, baca etkisi ve doğal akışa izin veren açıklık düzenlemeleri, yalnızca iç mekan hava kalitesini artırmakla kalmaz; aynı zamanda mekanik havalandırma ve soğutma sistemlerinin enerji yükünü önemli ölçüde azaltabilir. Simões ve diğerleri (2025), baca destekli çapraz havalandırma sistemlerinin, klasik mekanik soğutmaya göre enerji kullanımını %31 oranında azaltabildiğini ortaya koyarken; Moosavi ve diğerleri (2015) ise atrium açıklıklarının hava değişim oranı üzerindeki etkilerini deneysel verilerle desteklemiştir. Ayrıca, Cuce ve diğerleri (2019) tarafından yapılan CFD temelli araştırmalar, farklı bina tipolojilerinde doğal havalandırma stratejilerinin tasarımsal etkinliğini ayrıntılı biçimde analiz etmektedir.(Simões, Nunes, Carrilho Da Graça ve Martins, 2025; Moosavi, Mahyuddin ve Ghafar, 2015; Cuce ve diğerleri, 2019).

Özet olarak, rüzgarın mekansal tasarıma entegrasyonu, yalnızca doğal havalandırma açısından değil, aynı zamanda mikroklimatik denge ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri açısından da belirleyici bir rol üstlenmektedir. Rüzgar, sezgisel bir unsur olmaktan çıkmalı; sayısal simülasyonlar ve performans analizleriyle desteklenen bir tasarım girdisine dönüşmelidir.

3.3.3. Gün Işığı, Görsel Konfor ve Biyofilik Tasarım

Gün ışığı, sürdürülebilir mimarlığın yalnızca bir aydınlatma aracı değil; aynı zamanda enerji verimliliği, psikolojik refah, görsel konfor ve biyolojik ritim açısından temel bir çevresel girdidir. Gün ışığı, iç mekanlarda kullanıcıların ruh sağlığını, dikkat düzeyini, performansını ve uyku düzenini olumlu yönde etkileyen doğal bir uyarıcıdır.

Wirz-Justice ve diğerleri (2020), gün ışığının insan vücudu üzerindeki görsel olmayan etkilerini (biyolojik saat, melatonin salgısı, ruh hali, stres tepkisi) kapsamlı bir şekilde ele alırken; Theodorson (2014) ise gün ışığının enerji tasarrufunun ötesinde, kullanıcı odaklı mekansal deneyimi güçlendiren çok yönlü katkılarına dikkat çekmektedir. Bu bağlamda gün ışığı, yalnızca pasif bir enerji stratejisi değil; aynı zamanda sağlıklı, yaşanabilir ve nitelikli mekanlar oluşturma anahtarıdır (Theodorson, 2014; Wirz-Justice, Skene ve Münch, 2021). Ayrıca, kampüs yapılarında mekansal organizasyon, doğal ışığa erişim olanaklarının maksimum düzeyde kullanılması açısından stratejik önemdedir. Bina yerleşimi, derinliği, açıklık yerleşimi ve iç avlu tasarımı gibi morfolojik kararlar, doğal ışığın iç mekanlara ne ölçüde ve hangi sürelerde ulaşabileceğini belirler. Ahmad & Reffat

(2018) tarafından yürütülen simülasyon temelli çalışmada, farklı gün ışığı sistemleri (ışık rafları, ışık tüpleri, açıklık düzenleri) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve özellikle eğitim yapılarında sDA (Spatial Daylight Autonomy), ASE (Annual Sunlight Exposure) ve DGP (Daylight Glare Probability) kriterlerinin enerji ve konfor üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Bu göstergeler ışığında, kampüs yapılarına yönelik bazı tasarım ilkeleri ön plana çıkmaktadır. Buna göre bina derinliklerinin optimize şekilde sınırlandırılması, doğal ışığın her iki cepheden içeri nüfuz edebilmesini sağlar. Ayrıca atriumlar ve iç avlular, merkezî alanlara gün ışığı taşıyarak mekanların homojen aydınlatılmasına katkı sunar. Buna ek olarak, güney yönlü açıklıklar, kış aylarında pasif ısı kazanımı ile birlikte uzun süreli ışık erişimi sağlar; bu alanlarda ışık rafları ile ışık dağılımı dengelenebilir. Son olarak, Gölgeleme elemanlarının simülasyon destekli yerleştirilmesi, aşırı ışık kazancına bağlı kamaşma ve soğutma yüklerini azaltır.

Özellikle üniversite kampüslerinde, doğal ışığın enerji verimliliğiyle birlikte öğrenci başarısı, konsantrasyon ve zihinsel refah üzerinde de doğrudan etkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle gün ışığı performansı, yalnızca estetik veya teknik değil; aynı zamanda psikolojik sürdürülebilirliğin bir parçası olarak da ele alınmalıdır.

Bunlara ek olarak, cephe tasarımı, yalnızca doğal ışığın kontrollü bir şekilde iç mekana aktarılması açısından stratejik öneme sahiptir. Pencere boyutları, yerleşimi ve cephede kullanılan brise-soleil (güneş engelleyici), ışık rafları veya yarı geçirgen yüzeyler; iç mekanda dengeli, yayılmış ve kamaşma olmayan bir gün ışığı ortamı sağlar. Bu sistemler, özellikle tam cephe camlı yapılarda görsel konforu koruyarak enerji tüketimini azaltmakta etkilidir. Touma & Ouahrani (2017), tam cam cepheli ofislerde uygulanan farklı sabit ve hareketli gölgeleme sistemlerinin, hem kamaşma risklerini azalttığını hem de yıllık enerji tüketiminde %20–26 oranında tasarruf sağladığını ortaya koymuştur (Touma ve Ouahrani, 2017).

Radiance, Daysim, Autodesk Forma ve DesignBuilder gibi simülasyon yazılımları, açıklık oranı, pencere konumları, cephe malzemeleri ve gölgeleme sistemlerinin performansını yıl boyunca analiz etmeye olanak tanır. Bu yazılımlar aracılığıyla yapılan iklim bazlı gün ışığı simülasyonları, hem enerji tüketimi hem de estetik açıdan tasarım seçeneklerinin karşılaştırılmasını mümkün kılar. González ve Fiorito (2015), Radiance/Daysim altyapısıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, dış gölgeleme elemanlarının parametrik olarak optimize edilmesiyle hem enerji verimliliğinin hem de kullanıcı konforunun artırılabileceğini ortaya koymuştur. Çalışmada kullanılan genetik

algoritmalar, farklı tasarım varyasyonlarını test ederek optimum açıklık oranı ve gölgeleme stratejisini belirlemiştir. Bu yaklaşım, yüksek çözünürlüklü simülasyonlarla birlikte mimari tasarım sürecine sayısal bir karar destek mekanizması kazandırmaktadır (González ve Fiorito, 2015).

Ayrıca, gün ışığı, sürdürülebilir tasarımda yalnızca enerji tasarrufu değil; aynı zamanda psikolojik sağlık, stres yönetimi ve bilişsel performans üzerinde doğrudan etkili bir çevresel girdidir. Özellikle kampüs gibi günün büyük bölümünün iç mekanlarda geçirildiği ortamlarda, doğal ışık ve manzara erişimi, kullanıcıların duygusal iyilik halini destekleyen kritik bir tasarım unsurudur.

Beute & de Kort (2018) tarafından yürütülen çalışma, farklı düzeyde depresif semptomlar gösteren bireylerin günlük yaşamları boyunca gün ışığına ve doğal unsurlara ne ölçüde maruz kaldıklarını incelemiştir; sonuç olarak, gün ışığına ve doğaya yapılan kısa süreli maruziyetlerin bile pozitif duygulanımı artırdığını ve stresi azalttığını ortaya koymuştur. Bu etkiler, özellikle zihinsel yorgunluğun yoğun olduğu öğrenme ortamlarında daha da belirgin hale gelmektedir (Beute ve De Kort, 2018).

Özetle, gün ışığıyla entegre mekansal tasarım yalnızca enerji tüketimini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kullanıcı refahını ve yapısal çevrenin yaşanabilirliğini artırır. Kampüs gibi yoğun kullanımlı ve öğrenme merkezli yerleşimlerde, doğal ışık planlaması yalnızca aydınlatma değil; pedagojik verimlilik, zihinsel sağlığı destekleme ve mekansal yön bulma açısından da stratejik bir öneme sahiptir. Gün ışığı, yalnızca fiziksel bir aydınlatma faktörü değil; mekansal deneyimin biçimlendirici, biyofilik ve psikolojik etkilerle yüklü bir bileşenidir. Bu doğrultuda, tasarım sürecinde gün ışığı erişimi; görsel konfor, enerji verimliliği, psikolojik sağlık ve sürdürülebilirlik hedeflerini bütüncül biçimde gözetilen bir yaklaşım içinde ele alınmalıdır. Simülasyon temelli karar destek sistemleri, bu süreci hem bilimsel hem de uygulanabilir hale getirerek tasarımın çok boyutlu etkilerini öngörmeye olanak tanır. Geleceğin kampüs yapıları, yalnızca enerji etkin değil; aynı zamanda insan odaklı, doğayla entegre ve bilişsel sağlığı gözetilen ışık temelli tasarım stratejileriyle inşa edilmelidir. Bu nedenle gün ışığı erişimi, sadece teknik bir kriter değil; çevresel, psikolojik ve estetik bir tasarım değeri olarak ele alınmalıdır.

3.4. ENERJİ ETKİN VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KAMPÜS TASARIMI İÇİN MORFOLOJİK PRENSİPLER

3.4.1. Morfolojik Kararların Enerji Performansı Üzerindeki Bileşik Etkileri

Kampüs planlamasında enerji etkinliği, yapıların bireysel performanslarının ötesinde; yapı kümelerinin oluşturduğu mekansal örgü, açık alanlarla kurduğu ilişkiler, yönlenme stratejileri ve işlevsel dağılım gibi birbiriyle etkileşim halindeki morfolojik kararların bütünlüğüyle şekillenir. Bu bağlamda, morfolojik bileşenlerin bir arada değerlendirilmesi, enerji performansı üzerinde anlamlı ve çok katmanlı etkiler yaratmaktadır (W. Feng ve diğerleri, 2024).

Morfolojik kararların enerji verimliliğine katkısı doğrusal değil, sistemiktir. Örneğin, kompakt yapılaşma ısı kayıplarını azaltma açısından avantaj sağlarken; aynı yerleşim düzeni, doğal havalandırmayı kısıtlayarak yaz mevsiminde ısı birikimi riskini artırabilir (Hadavi ve Pasdarshahri, 2021). Benzer şekilde, geçirgen planlar rüzgar dolaşımını destekleyerek serinletici etki yaratabilirken, bu durum soğuk iklimlerde ısı kayıplarını tetikleyebilir (Bonenberg ve diğerleri, 2023). Bu örnekler, enerji verimliliğini artırmak için tasarım sürecinde tekil parametrelerin etkisinden çok, bu parametreler arasındaki denge ve karşılıklı uyumun dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir. Son dönem çalışmalar, bu bütünsel yaklaşımı desteklemek üzere çok hedefli morfolojik optimizasyon yöntemlerini ön plana çıkarmaktadır. Parametrik modelleme ve mikroklimatik simülasyonlar yoluyla, enerji tüketimi, termal konfor ve yatırım maliyetleri arasında denge kuran senaryolar geliştirilebilmektedir (W. Feng ve diğerleri, 2024).

Kampüs ölçeğinde bu morfolojik kararların bileşik etkilerinin analizinde bazı konuların üzerinde durulması önemlidir. Bu çerçevede yüksek yoğunluklu ve işlevsel olarak entegre edilmiş kampüs organizasyonları, yürünebilirlik düzeyini artırarak araç bağımlılığını azaltmakta, dolayısıyla ulaşım kaynaklı enerji tüketimini düşürmektedir. Bu durum, özellikle erişilebilirliğin güçlü olduğu, fonksiyonların dağılımının dengelendiği morfolojik planlarda daha belirgin hale gelir (Faghihi, Hessami ve Ford, 2015). Ayrıca, binaların hakim rüzgar ve güneş yönlerine uygun şekilde yerleştirilmesi, hem iç mekan enerji taleplerini azaltır hem de açık alanlardaki termal konforu iyileştirir. Özellikle güney cepheye yönlendirilmiş açıklıklar, kış güneşinden maksimum ısı kazancı sağlarken, doğu-batı eksenli açıklıklarda gölgeleme stratejileriyle yaz aylarında aşırı ısınmanın önüne geçilir (Song, Liu ve Zhang, 2024). Buna ek olarak, geçirgen yüzeylere sahip, stratejik

biçimde gölgelendirilmiş ve mikroklimatik tampon bölgeler oluşturan açık alanlar; bina kabuğunun maruz kaldığı güneş ışınlamını düşürerek soğutma yüklerini azaltır. Bitkilendirme, ağaç dizilimi ve su yüzeyleri gibi doğal öğeler bu bağlamda çevresel regülasyon işlevi görür (Palme, Privitera ve La Rosa, 2020).

Morfolojik kararların enerji performansı üzerindeki etkileri, önceki bölümlerde yapı yoğunluğu, açıklık-yapı oranı, yönelme stratejileri ve açık alan organizasyonu gibi parametreler üzerinden fiziksel çevreyle kurulan ilişkiler temelinde ele alınmıştır. Bu bileşenler, yapı ölçeğinde olduğu kadar kampüs düzeyinde de enerji tüketim biçimlerini ve çevresel verimliliği yönlendiren temel araçlar arasında yer almaktadır.

Bu çerçevede sunulan Çizelge 3.2, enerji odaklı kampüs tasarımına yönelik temel morfolojik stratejileri; enerji kullanımı, mikroklimatik katkı ve mekansal esneklik potansiyeli açısından karşılaştırmalı olarak sınıflandırmaktadır. Her bir strateji, güncel literatürdeki bulgulara dayalı biçimde değerlendirilmiş ve tasarımın çevresel ve işlevsel koşullara ne ölçüde uyum sağlayabildiği bağlamında uyarlanabilirlik düzeyi belirlenmiştir.

Çizelge 3. 2. Kampüs Tasarımında Morfolojik Stratejilerin Enerji, Mikroklima ve Uyarlanabilirlik Düzeyi Açısından Karşılaştırmalı Değerlendirmesi. (J. Feng ve diğerleri, 2022; Kang ve diğerleri, 2015; Lawrence, Elsayed ve Keime, 2019; Oliveira, 2022; Sun ve diğerleri, 2022; Trepçi ve diğerleri, 2021; Yeang, 2006; Zölch ve diğerleri, 2016)

Morfolojik Strateji	Enerji Etkisi	Mikroklima Katkısı	Uyarlanabilirlik Düzeyi
Kompakt Yerleşim	Isı Kaybı Düşük (Oliveira, 2022; Yeang, 2006)	Hava Dolaşımı Sınırlıdır.	Orta
Geçirgen Plan	Pasif Soğutma Avantajı (Trepçi ve diğerleri, 2021)	Serinletici Etki Sağlar.	Yüksek
Yönlendirilmiş Yapı Grupları	Güneş Kazancı Maksimum (Kang ve diğerleri, 2015)	Gölgeleme Dengesi Önemlidir.	Yüksek
Termal Tampon Açık Alanlar	Soğutma Yüğü Azalır (Sun ve diğerleri, 2022)	Mikroklimayı Dengeler.	Yüksek

Çizelge 3. 2 (devam). Kampüs Tasarımında Morfolojik Stratejilerin Enerji, Mikroklima ve Uyarlanabilirlik Düzeyi Açısından Karşılaştırmalı Değerlendirmesi. (J. Feng ve diğerleri, 2022; Kang ve diğerleri, 2015; Lawrence, Elsayed ve Keime, 2019; Oliveira, 2022; Sun ve diğerleri, 2022; Trepci ve diğerleri, 2021; Yeang, 2006; Zölch ve diğerleri, 2016)

Gölgelendirilmiş Yaya Aksları (Peyzaj Öğeleri)	Yapay Soğutma İhtiyacı Düşer (Zölch ve diğerleri, 2016)	Yüzey Sıcaklıklarını Düşürür.	Yüksek
Zaman-Mekan Uyumlu Yapı Kullanım	Isıtma Soğutma Zamanlaması Optimum (J. Feng ve diğerleri, 2022; Lawrence, Elsayed ve Keime, 2019)	Enerji Gereksinimi Zamanla Dengelenir.	Çok Yüksek

Tabloda yer alan kompaktlık, geçirgenlik, yönlendirme, açık alan tamponları, peyzaj öğeleri ve zaman-mekan uyumlu kullanım gibi tasarım kararları, çevresel performansa katkı sağlayan yapısal nitelikleriyle birlikte değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, morfolojik ilkelerin hem mevcut planlama gereksinimlerine hem de değişken senaryolara karşı duyarlı bir biçimde yapılandırılmasına katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Sonuç olarak, tüm bu faktörlerin bileşik değerlendirilmesi, bireysel yapı performanslarının ötesine geçerek kampüsün genel enerji davranışını belirler. Bu nedenle, kampüs planlamasında morfolojik optimizasyon, sadece sezgisel tasarımla değil; sayısal simülasyon araçlarıyla desteklenen parametrik modelleme süreçleri ile gerçekleştirilmelidir. Autodesk Forma, Grasshopper, ENVI-met ve EnergyPlus gibi araçlar, bu bileşik etkileşimleri modelleme ve karar destek sistemlerine dönüştürmede önemli rol oynar.

3.4.2. Kampüs Planlamasında Tasarım Stratejilerinin Entegrasyonu

Enerji etkin kampüs tasarımı, çok katmanlı stratejilerin bütünsel biçimde uygulanmasını gerektirir. Bu süreç, yalnızca yapı formuna değil; çevresel bağlam, kullanıcı davranışları, zaman-mekan eşleşmeleri, teknolojik çözümler ve sürdürülebilir ulaşım sistemleri gibi çeşitli bileşenlerin eşgüdümüne dayalı bir yaklaşımla ele

alınmalıdır. Mekansal stratejiler ne kadar senkronize ve sistemik biçimde planlarsa, enerji verimliliği de o denli ölçülebilir ve kalıcı hale gelebilmektedir.

Günlük kullanım sıklığı yüksek olan yapılar (örneğin kütüphaneler, laboratuvarlar), güneş ışınlamından etkin şekilde yararlanacak biçimde yönlendirilmelidir. Dönemsel kullanılan sosyal alanlar ise daha az ısı yük alacak bölgelerde konumlandırılmalı; böylece pasif stratejilerle enerji dengesi kurulmalıdır (Lawrence ve diğerleri, 2019). Ayrıca, daha önce de bahsedildiği üzere, ağaç dizileri, biyolojik su yüzeyleri ve geçirgen zemin sistemleri gibi doğa tabanlı çözümler, görsel kaliteyi artırarak mikroklima düzenleme ve ısı adası etkisini azaltma gibi enerjiyle ilişkili çevresel katkılar sağlar (Petschek, Aung, Suwanarit ve Irvine, 2024). Buna ek olarak, pasif güneş kazancı, doğal havalandırma ve ısı kütlesi gibi stratejiler, fotovoltaik paneller, güneş kırıcı sistemler ve yağmur suyu hasadı gibi aktif sistemlerle birlikte düşünülmelidir. Bu hibrit entegrasyon, yapı kabuğu verimliliğini optimize ederken karbon salımını da azaltır (Noaman, Moneer, Megahed ve El-Ghafor, 2022). Diğer taraftan, yaya ve bisiklet öncelikli ulaşım planlamaları, kampüs içi karbon salımını ve enerji tüketimini azaltır. Fonksiyonların mekansal olarak entegre edilmesi, motorlu taşıtlara olan bağımlılığı minimize eder (Faghihi ve diğerleri, 2015).

ENVI-met, UBEM ve Autodesk Forma gibi sayısal analiz platformları, kampüs düzeyindeki tasarım kararlarının enerji ve mikroklima etkilerini erken safhalarda değerlendirmeye olanak tanır. Green BIM yaklaşımı, bu platformların sadece performans tahmini değil, aynı zamanda farklı bina türlerinin enerji profillerini karşılaştırmalı biçimde analiz etmeye ve optimize etmeye imkan verdiğini ortaya koymaktadır. Üniversite kampüslerinde yapılan uygulamalı çalışmalarda, BIM destekli optimizasyon süreçlerinin yıllık enerji yükünü %47'ye varan oranlarda azaltabildiği gösterilmiştir (Q. Liu ve Wang, 2022).

3.4.3. Dirençli ve Uyarlanabilir Kampüs Tasarımı İçin Mekansal Esneklik ve Gelecek Perspektifleri

Sürdürülebilir kampüs tasarımı, mevcut enerji verimliliği hedeflerini karşılarken değişken iklim koşulları, kullanıcı davranışlarındaki dönüşümler ve teknolojik gelişmeler gibi faktörlere karşı uyum sağlayabilen mekansal sistemlerin oluşturulmasına odaklanmalıdır.

Bu yaklaşım, kampüs alanlarının çevresel ve toplumsal değişkenlere tepki verebilecek

biçimde tasarlanmasını, mekansal organizasyonun sabit değil; yeniden yapılandırılabilir ve evrilebilir bir sistem olarak ele alınmasını gerektirir. Marcus ve Colding (2014), kent formunun sabit bir fiziksel yapıdan ziyade, öğrenme, dönüşüm ve yeniden örgütlenme kapasitesine sahip bir sistem olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunur. Bu bakış açısı, uzun vadede değişen koşullara karşı esneklik sağlayan bir tasarım anlayışını destekler (Marcus ve Colding, 2014).

Gelecekteki kampüs ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için yapıların, ulaşım bağlantılarının ve açık alanların çevresel ve işlevsel değişkenler doğrultusunda yeniden kurgulanabilmesi büyük önem taşır. Bu esnekliğin sağlanması, hem konfor ve işlevsellik açısından hem de enerji performansının sürekliliği bakımından stratejik bir tasarım önceliğidir (R. Chen, Samuelson, Zou, Zheng ve Cao, 2024). BIM, sensör ağları ve büyük veri teknolojileriyle geliştirilen dijital ikiz modelleri, kampüslerin enerji kullanımı ve çevresel tepkilerini gerçek zamanlı olarak izleyerek, karar alma süreçlerinin dinamik biçimde yeniden yapılandırılmasına olanak tanır (Petri, Rezgui, Ghoroghi ve Alzahrani, 2023). Ayrıca, iklim değişikliği senaryoları doğrultusunda kampüs morfolojisinin davranışını değerlendiren simülasyon modelleri, uzun vadeli dirençlilik ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda karar desteği sağlar (Hao, Wang ve Chen, 2024). Buna ek olarak, çok kriterli karar destek sistemleri aracılığıyla yönlenme, geçirgenlik, yoğunluk gibi morfolojik değişkenler birlikte analiz edilerek, kampüs formunun performans açısından en uygun hali belirlenebilir (Javanroodi ve diğerleri, 2023). Ayrıca, açık alan tasarımında gölgeleme, geçirgen yüzeyler ve bitkilendirme gibi çözümler, su baskını, sıcak hava dalgaları ve hava kirliliği gibi çevresel risklere karşı mikroklimatik denge sağlar ve yapılı çevrenin dayanıklılığını artırır (Battisti, Laureti, Zinzi ve Volpicelli, 2018).

Sonuç olarak, morfolojik zeka; sürdürülebilir kampüs tasarımının yalnızca bugünü değil, geleceği de kapsayan bir vizyonla şekillendirilmesini sağlayan bütüncül bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, çevresel uyum, esneklik, sistematik düşünme ve uzun vadeli farkındalık geliştirme süreçlerini mekansal tasarım pratiğiyle bütünleştirir.

4. BIM (YAPI BİLGİ MODELLEMESİ) TABANLI MORFOLOJİK ANALİZLERİN METODOLOJİK ÇERÇEVESİ VE UYGULAMA OLANAKLARI

BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) ortamında geliştirilen parametrik ve performansa dayalı modelleme yöntemleri sayesinde, kent ve kampüs ölçeğindeki yapılaşma biçimleri, rasyonel analiz verileriyle optimize edilebilmektedir. Bu bölümde yapı morfolojisinin enerji etkinliği üzerindeki etkisi, sayısal analiz teknikleriyle desteklenen BIM temelli yaklaşımlar üzerinden ele alınmaktadır. Ele alınan BIM tabanlı morfolojik analizler, sadece üç boyutlu geometrik modelleme değil, aynı zamanda veriye dayalı bir tasarım metodolojisi geliştirme amacı taşır. BIM, yapının yaşam döngüsüne entegre edilen bilgi akışları sayesinde, morfolojik kararların enerji performansı, gün ışığı kullanımı, doğal havalandırma ve kullanıcı konforu parametreleriyle birlikte değerlendirilmesine olanak tanır. Bölüm kapsamında, BIM ortamında gerçekleştirilen morfolojik analizlerin kuramsal dayanakları, sayısal yöntemleri, simülasyon süreçleri ve uygulama senaryoları üzerinden disiplinlerarası bir metodolojik çerçeve sunulmaktadır. Bu çerçevede bölüm kapsamında, mimari tasarım kararlarının çevresel ve performans temelli olarak nasıl yönlendirilebileceği ortaya koyularak kuramsal arka plan ve uygulamalı senaryolar üzerinden yönteme ilişkin olanaklar ve sınırlılıklar detaylandırılmaktadır.

Bu bölüm dört alt bölüm içermektedir. İlk olarak, BIM teknolojisinin morfolojik analiz süreçlerine nasıl entegre edildiği ve bu entegrasyonu mümkün kılan araçlar, ölçütler ve parametrik yaklaşımlar ele alınmaktadır. Ardından, yapı formunun performans göstergeleri üzerinden nasıl değerlendirildiği, yüzey-hacim oranı, yönelme, gün ışığı ve rüzgar gibi çoklu morfolojik parametreler bağlamında incelenmektedir. Üçüncü kısımda, BIM ortamında morfolojik simülasyonların nasıl kurgulandığı, parametrik optimizasyon süreçleri ve geri bildirim döngüleri ile açıklanmaktadır. Son olarak, analizlerin uygulama olanakları, özellikle eğitim yapıları ve kampüs tasarımları üzerinden senaryo bazlı örneklerle desteklenerek aktarılmaktadır. Bu yapı sayesinde, BIM tabanlı morfolojik analizlerin hem yöntemsel hem de uygulamalı düzeyde nasıl kullanılabileceği bütüncül bir perspektifle sunulmaktadır.

Bu bütüncül metodolojik çerçevenin ilk adımı, BIM teknolojisinin biçimsel analiz süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini ortaya koymaktır. Bu nedenle bölümün ilk kısmında, BIM'in temel özellikleri, mimari tasarımla kurduğu ilişki ve morfolojik analizlere nasıl zemin hazırladığı açıklanmaktadır. Ardından, bu entegrasyonu destekleyen sayısal araçlar ve morfolojik parametrelerin ölçülebilir hale getirilme yöntemleri detaylandırılmaktadır.

4.1. BIM (YAPI BİLGİ MODELLEMESİ) TEKNOLOJİSİNİN MORFOLOJİK ANALİZE ENTEGRASYONU

BIM tabanlı morfolojik analizlerin yöntemsel çeşitliliği, bu analizlerin bir modelleme aracı olmanın ötesinde çok boyutlu bir araştırma ve karar destek ortamı sunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, ilgili literatürde öne çıkan çalışmalar incelendiğinde, farklı araştırma türlerinin (simülasyon temelli, sayısal veri analizi temelli, literatür taraması temelli vb.) BIM tabanlı analiz sürecine çeşitli yönlerden katkı sunduğu görülmektedir. Çizelge 4.1, bu çeşitliliği yöntemsel düzeyde sınıflandırarak hangi çalışmalarda hangi yaklaşımın benimsendiğini, hangi araç ve parametrelerle çalışıldığını özetlemektedir. Böylece, bölüm boyunca ele alınacak yaklaşımların dayandığı yöntemsel temeller daha açık bir çerçevede anlaşılabilir hale gelmektedir.

Çizelge 4. 1. BIM Tabanlı Morfolojik Analizlerde Kullanılan Yöntem Türleri, Araçlar, Temel Parametreler, Kaynaklar ve Literatüre Katkı. (Kaynaklar çizelgede verilmiştir.)

Yöntem / Yaklaşım Türü	Kullanılan Araçlar / Modeller	Analiz Edilen Temel Parametreler	Temel Kaynaklar	Açıklama / Katkı
Simülasyon Temelli Yaklaşım	EnergyPlus, Radiance, CFD (OpenFOAM), Forma, Revit Insight	Gün ışığı, enerji kullanımı, rüzgar akışı, termal konfor	Wang ve diğerleri, 2022, Wasilewski ve diğerleri, 2022, Guo ve diğerleri, 2015, Nevers ve diğerleri, 2024	Çevresel verilerle desteklenen senaryo analizleri, tasarım varyasyonlarının test edilmesi
Sayısal Veri Analizi Temelli Yaklaşım	BIM modelleri, Rhino- Grasshopper, GENE_ARCH, Dynamo	S/V oranı, kompaktlık, IEQ, LCC, açıklık oranı, yönlenme	Caldas, 2008, Ji ve diğerleri, 2023, Khan ve diğerleri, 2024, Zhuang ve diğerleri, 2021	Morfolojik parametrelerin ölçülmesi, çok kriterli performans karşılaştırması ve optimizasyon

Çizelge 4. 1. (devam). BIM Tabanlı Morfolojik Analizlerde Kullanılan Yöntem Türleri, Araçlar, Temel Parametreler, Kaynaklar ve Literatüre Katkı. (Kaynaklar çizelgede verilmiştir.)

Literatür Taraması	BIM kuramları, tasarım süreç literatürü	Yaşam döngüsü, disiplinler arası etkileşim, tasarım-karar ilişkisi	Shen ve diğerleri, 2012, Jalaei & Jrade, 2014, Berges-Alvarez ve diğerleri, 2024	BIM'in tasarım sürecine entegrasyonu, bilgi akışı, çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımları
Yapay Zeka ve Gerçek Zamanlı Veri Tabanlı Yaklaşım	AI modelleri, IoT sensörler, BIM + VR	Anlık enerji verisi, öğrenen sistemler, veri tabanlı karar destek	Elwy & Hagishima, 2024, Ranjha ve diğerleri, 2023	Yapay zeka destekli optimizasyon ve gerçek zamanlı bina performansı takibi
Senaryo Bazlı Uygulama ve Alan Çalışması Yaklaşımı	BIM modelleri	Kampüs yönlendirilmesi, gün ışığı, açıklık düzeni, morfolojik varyasyonlar	Duarte ve diğerleri, 2021, Liu & Wang, 2022	Eğitim yapıları özelinde senaryo temelli performans testi ve çevresel analiz

4.1.1. BIM'in Temel Özellikleri ve Mimari Tasarım Sürecindeki Yeri

Yapı Bilgi Modelleme (BIM), yapıların geometrik temsilleriyle beraber bu temsillere entegre edilmiş işlevsel, fiziksel, çevresel ve yönetsel bilgileri de içeren çok katmanlı bir veri modelidir (Shen, Shen ve Sun, 2012). BIM yaklaşımı, geleneksel iki boyutlu temsilleri aşarak, bir yapının tüm yaşam döngüsünü kapsayan (tasarım, inşaat, işletme, bakım ve geri dönüşüm) kararları bilgiye dayalı olarak şekillendirme olanağı sunar (Jalaei ve Jrade, 2014).

Mimari tasarım süreçlerinde BIM'in sunduğu en önemli katkılardan biri, disiplinler arası etkileşimi teşvik ederek; tasarım kararlarını erken evrede analiz edilebilir, karşılaştırılabilir ve optimize edilebilir hale getirmesidir. Bu etkileşimli yapı, özellikle kampüs gibi karmaşık işlemlere sahip, çok aktörlü yapılarda tasarımın enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik kriterlerine göre biçimlendirilmesine olanak sağlar (Zhuang ve diğerleri, 2021). Bu çerçevede BIM, biçimsel kararları sadece estetik değil; aynı zamanda yapının performans verileriyle birlikte ele alan bütüncül bir tasarım paradigmasını temsil eder (Berges-Alvarez, Martínez-Rocamora ve Marrero, 2024).

4.1.2. BIM Tabanlı Simülasyon Araçları (Forma, Revit, Rhino-Insight, EnergyPlus, vb.)

BIM ortamında morfolojik analiz süreçlerinin etkinliği, entegre biçimde çalışan ve veriye dayalı karar destek sunan simülasyon araçlarıyla doğrudan ilişkilidir. Autodesk Forma, erken tasarım aşamalarında bina morfolojisinin rüzgar, güneşlenme, gün ışığı ve gölge davranışları gibi parametreler üzerinden analiz edilmesini mümkün kılan bulut tabanlı bir platformdur. Forma, Revit ile çift yönlü veri aktarımı sağlayarak, geometrik biçimlerin enerji performansına göre dinamik olarak yeniden düzenlenmesine olanak tanır.(Autodesk, 2025a)

Rhino-Insight ve Grasshopper gibi parametrik modelleme araçları ile oluşturulan biçimler, EnergyPlus ve Radiance gibi enerji simülasyon motorlarıyla entegre edilerek termal konfor, gün ışığı düzeyi ve enerji tüketimi analizleri gerçekleştirilebilir. Bu tür entegre yaklaşımlar, görsel konfor, aydınlatma kalitesi ve enerji performansı arasında çoklu optimizasyonlar yapılmasına olanak tanır. Örneğin Wang ve diğerleri (2022), Rhino ve Grasshopper platformlarını kullanarak oluşturdukları sınıf modelinde, Radiance ve EnergyPlus ile senkronize edilmiş simülasyonlar sonucunda yıllık enerji kullanım yoğunluğunda %18'e varan azalma ve %37'ye kadar iyileşmiş gün ışığı kalitesi elde ettiklerini göstermiştir (Wang, Yang ve Wang, 2022). Ayrıca GENE_ARCH gibi genetik algoritmalara dayalı sistemler, biçimsel parametrelerin performans ölçütlerine göre evrimsel olarak optimize edilmesini sağlar (Caldas, 2008). Bu yapı, yalnızca analiz eden değil, tasarımı veriyle yönlendiren ve alternatif çözüm senaryoları üreten bir süreç inşa eder.

Bu tür BIM destekli araçların temel avantajı; karar vericiye, farklı tasarım varyasyonlarının çevresel etkileriyle birlikte değerlendirilebildiği, çok kriterli bir karar

ortamı sağlamasıdır.

4.1.3. BIM ile Morfolojik Parametrelerin Ölçülmesi ve Yorumlanması

BIM tabanlı morfolojik analizlerin en büyük avantajlarından biri, yapı biçimini oluşturan mekansal parametrelerin sayısal olarak doğrudan modellenenbilmesidir. Yüzey-hacim oranı (S/V), pencere-duvar oranı (WWR), yapı kompaktlığı, yönlenme açısı ve gölgeleme yüzeyleri gibi metrikler, dijital ortamda tanımlanarak enerji performansına etkileri nicel olarak değerlendirilebilir. Khan ve diğerleri (2024), BIM ve enerji simülasyon yazılımları ile entegre çalışarak bu parametrelerin optimize edilmesinin enerji tasarrufu potansiyelini %30'a kadar artırabildiğini göstermektedir (Khan, Tariq, Alam, Alaloul ve Waqar, 2024).

Ayrıca BIM modelleri, zaman-mekan bağımlı veri setlerini entegre edebildiği için, belirli saatlerdeki güneş ışıınımı, gölgeleme koşulları ve yönlenme açılarının enerji tüketimi üzerindeki etkileri görsel olarak analiz edilebilmektedir. Bu etkileşimler, tasarım sürecine gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak, yalnızca mekansal formun değil, aynı zamanda çevresel performansın da simülasyon destekli biçimde optimize edilmesini mümkün kılar.

Sonuç olarak BIM tabanlı morfolojik analiz, yapı tasarımına sayısal doğruluk, performans odaklılık ve sürdürülebilirlik perspektifi kazandırır. Bu bütünsel yaklaşım, mimarlıkta biçimin yeniden tanımlanmasına olanak verir: biçim artık yalnızca görsel değil, aynı zamanda enerji ve çevre verileriyle konuşan bir karardır.

BIM tabanlı morfolojik analizlerin başarılı olabilmesi, modelleme ve simülasyon araçlarının kullanımıyla sınırlı değildir. Analiz edilen biçimsel özelliklerin enerji ve çevresel performansla ilişkilendirilmesi gerekir. Bu nedenle bir sonraki başlıkta, yapı geometrisinin performans çıktılarıyla nasıl anlam kazandığı tartışılacak; yüzey/hacim oranı, kompaktlık, gün ışığı verimi, yönlenme gibi temel morfolojik göstergeler üzerinden çok ölçütlü değerlendirme yöntemlerine odaklanılacaktır. Böylece biçimsel veriler, sayısal ve karşılaştırılabilir göstergelerle değerlendirilen bir analiz zemini kazanacaktır.

4.2. MORFOLOJİK GÖSTERGELER ÜZERİNDEN PERFORMANS ANALİZİ

Yapı morfolojisinin enerji etkinliği üzerindeki etkisi, ancak nesnel ve sayısal olarak değerlendirilebilecek göstergeler üzerinden anlam kazanabilir. Morfolojik göstergeler, biçimsel tanımlamalarla sınırlı olmayıp; yüzey-hacim ilişkileri, güneşlenme süreleri,

yönlenme karakteristikleri, boşluk-doluluk dengeleri ve yapı çevresindeki mikroklima ile bütünleşik biçimde ele alınmalıdır. BIM tabanlı analiz araçları ve sayısal simülasyon yöntemleri ile bu göstergelerin zamana bağlı olarak modellenmesi ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmesi mümkündür.

4.2.1. Kompaktlık, Yoğunluk ve Yüzey/Hacim Oranı

Kompaktlık, yapının enerji verimliliği açısından en temel morfolojik göstergelerden biridir. Yüzey alanının hacme oranı (S/V), yapı kabuğu boyunca gerçekleşen ısı transferi için belirleyici bir faktördür. Düşük S/V oranına sahip kompakt yapılar, daha az dış yüzeye maruz kaldıkları için ısı kayıplarını ve kazançlarını azaltarak özellikle kış aylarında enerji performansını artırır (Martilli, 2014). BIM ortamında bu oranlar dijital model üzerinden hesaplanarak farklı tasarım varyasyonlarının enerji çıktıları karşılaştırmalı biçimde analiz edilebilir.

Yoğunluk ise, yapı birimlerinin yerleşim biçimi, aralıkları ve arazi kullanım verimliliği ile ilişkilidir. Yüksek yapı yoğunluğu, kentsel ısı adası etkisini tetiklerken; düşük yoğunluk, ulaşım ve altyapı maliyetlerini artırabilir. Bu nedenle, kampüs alanı gibi kontrollü kentsel dokularda optimum yoğunluk-morfoloji dengesi, enerji performansı ve sosyal işlevsellik açısından belirleyicidir.

4.2.2. Güneşlenme, Gölgeleme ve Gün Işığı Dağılımı

Güneş ışınımı, hem pasif ısıl kazanç hem de iç mekanda doğal aydınlatma kaynağı olması nedeniyle yapı morfolojisinin yönelim ve biçimsel kurgusunu doğrudan etkiler. BIM destekli araçlarla, yapıların gün boyunca ve yıl içerisindeki farklı saatlerde maruz kaldıkları güneşlenme süreleri analiz edilebilir. Autodesk Forma gibi platformlar, yapı yüzeylerinin hangi saatlerde ne kadar ışık aldığını 3D olarak görselleştirerek karar vericilere sezgisel geri bildirim sunar (Samaan, Farag ve Khalil, 2018);(Autodesk, 2025a).

Gölgeleme, özellikle soğuk ve sıcak iklimlerde enerji etkinliğin kilit unsurlarındandır. Bitişik yapıların ya da bina üzerindeki çıkmaların oluşturduğu gölgeler, iç mekanda sıcaklık kontrolünü ve ışık konforunu etkiler. Simülasyon ortamlarında gölgeleme senaryoları test edilerek, hem ısı kazancı dengelenebilir hem de göz kamaşması riskleri önlenir.

Gün ışığı dağılımı ise, pencere boyutları, yönlenme, iç yüzey yansıtıcılığı ve açıklık

oranları gibi morfolojik faktörlerin birleşimiyle şekillenir. Radiance ya da Insight gibi araçlarla elde edilen veriler, doğal ışıkla aydınlatılan alan oranını (DA) veya gün ışığı özerkliği gibi göstergeleri ortaya koyarak, yapının görsel ve enerji konforunu değerlendirmeye olanak tanır.

4.2.3. Rüzgar Koridorları ve Termal Konfor Analizleri

Mekansal biçimlenme, çevresel hava akışının yönlendirilmesinde kritik rol oynar. Özellikle kampüs gibi açık alana yayılan yapılarda, bina aralıkları, kütleler arası boşluklar ve yapı yönelimi, doğal havalandırma potansiyelini doğrudan etkiler. Guo ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmada, CFD (Computational Fluid Dynamics) temelli simülasyonlarla farklı yerleşim planlarının rüzgar dağılımı üzerindeki etkisi analiz edilmiş; yerleşim biçimlerinin doğal havalandırmayı optimize edebilmek için belirleyici olduğu ortaya konmuştur (Guo, Liu ve Yuan, 2015).

BIM tabanlı Autodesk Forma, OpenFOAM veya CFD tabanlı eklentiler aracılığıyla geliştirilen modellerde; rüzgar hızları, türbülans dağılımı ve konvektif ısı transferi gibi veriler değerlendirilebilir. Bu sayede, yapı aralıkları ve yönelme gibi morfolojik kararların, iç mekan termal konforuna ve açık alanların mikroklimatik uygunluğuna etkisi modellenilebilir. Nevers ve diğerleri (2024) tarafından geliştirilen geçirgenlik tabanlı yaklaşım, özellikle yapı altı boşluklar veya geçirgen bina kurguları içeren tasarımlarda yaya seviyesindeki hava akışlarını doğru biçimde simüle etmekte kritik öneme sahiptir (Nevers, Kubilay, Carmeliet ve Derome, 2024). Bu tür analizler, kampüs tasarımlarında doğal havalandırmayı artırmak, konvektif soğutmayı desteklemek ve enerji kullanımını azaltmak açısından stratejik katkılar sunar.

4.2.4. Görsel Konfor ve Işık Kalitesi Değerlendirmeleri

Görsel konfor, hem kullanıcı sağlığı hem de yapının enerji tüketimi açısından belirleyici bir göstergedir. Yetersiz doğal aydınlatma, yapay ışık kullanımını artırırken; aşırı gün ışığına maruz kalma, kamaşma, kontrast sorunları ve ısı rahatsızlık doğurabilir. Bu nedenle pencere yerleşimi, cam geçirgenliği, cephe derinliği ve iç yüzey renkleri gibi morfolojik değişkenler dikkatle tasarlanmalıdır.

Radiance, Forma ve raytraverse gibi simülasyon araçları, iç mekan aydınlık düzeyi, gün ışığı özerkliği (sDA), kamaşma olasılığı (DGP) ve dikey aydınlık düzeyi (Ev) gibi göstergeleri modelleyerek, homojen ve konforlu aydınlatma senaryolarının analizine

olanak tanır. Wasilewski ve diğerleri (2022), yıllık gün ışığı ve kamaşma verilerinin hızlı ve doğru biçimde modellenebildiğini, bu sayede görsel konfor analizlerinin tasarım sürecine gerçek zamanlı geri bildirim olarak entegre edilebileceğini ortaya koymuştur.(Wasilewski, Grobe, Wienold ve Andersen, 2022).

Sonuç olarak, BIM ve simülasyon araçlarıyla desteklenen morfolojik performans analizleri, mimari tasarımı, enerji politikalarını, kullanıcı sağlığını ve çevresel sürdürülebilirliği etkileyen kararların somut verilerle yönlendirilmesine olanak tanır. Böylece yapı formu, soyut estetikten çıkarak çok katmanlı bir performans yapısına dönüşür.

Morfolojik göstergeler üzerinden elde edilen verilerin tasarım sürecini yönlendirebilmesi için, bu analizlerin yinelemeli ve etkileşimli bir modelleme sürecine entegre edilmesi gereklidir. Bu noktada BIM ortamındaki parametrik ve optimizasyon odaklı simülasyon süreçleri devreye girer. Takip eden bölümde, bu sürecin nasıl kurgulandığı, veri ile biçim arasındaki ilişkinin nasıl kurulduğu ve tasarımın nasıl evrimsel bir biçimde optimize edilebileceği örneklerle açıklanacaktır. Özellikle parametrik tasarım araçları ve geri bildirim döngülerinin sağladığı esneklik, morfolojinin hem analiz edilen hem de yeniden kurulan bir tasarım ögesi haline gelmesini sağlayacaktır.

4.3. BIM ORTAMINDA MORFOLOJİK SİMÜLASYON SÜRECİ

Sayısal modelleme ortamında geliştirilen parametrik tasarım yaklaşımları, yapı morfolojisinin yalnızca üretim değil aynı zamanda analiz ve optimizasyon sürecinin de parçası haline gelmesini sağlar. BIM tabanlı simülasyon ortamları sayesinde, mimari formlar veri ile şekillenebilir, performans çıktıları üzerinden yeniden düzenlenebilir ve bu sürece geri bildirim döngüleri entegre edilerek tasarım kararları evrimsel bir biçimde optimize edilebilir. Özellikle kampüs ölçeğinde ele alınan mimari yapılarda, rüzgar yönü, güneşlenme süreleri ve gün ışığı verimi gibi morfolojik kriterler, BIM destekli dijital ortamda gerçek zamanlı olarak modellenabilir hale gelmiştir.

4.3.1. Parametrik Tasarım ve Optimizasyon

Parametrik tasarım, yapı geometrisinin önceden tanımlanmış kurallara göre değiştirilebilmesini ve performans kriterleri doğrultusunda optimize edilebilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu süreçte kullanılan araçlar, geometrik girdiler ile enerji

performansı arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak kurarak sayısal senaryolar üretir. GENE_ARCH, bu bağlamda öne çıkan bir genetik algoritma tabanlı sistem olup, DOE2.1E gibi enerji simülasyon motorlarıyla entegre çalışarak bina formunun enerji etkinliğini çoklu kriterlere göre optimize eder (Caldas, 2008).

Benzer biçimde, Grasshopper (Rhino) ve Dynamo (Revit) gibi parametrik tasarım eklentileri, BIM modellerine entegre edilerek tasarımcılara bina formları üzerinde gerçek zamanlı manipülasyon yapma olanağı sağlar. Bu platformlar üzerinden tanımlanan geometrik değişkenler; örneğin bina yüksekliği, cephe eğimi, açıklık oranı ya da kütle rotasyonu gibi faktörler, rüzgar etkisi, gölgeleme kapasitesi, gün ışığına erişim ve termal konfor gibi çok boyutlu performans verileriyle ilişkilendirilerek çoklu tasarım senaryoları oluşturulabilir. Ji ve diğerleri (2023), parametrik modelleme ve çok ölçütlü optimizasyon yoluyla, termal konfor ve enerji kullanımı arasında dengeli çözümlerin tasarım sürecine entegre edilebileceğini ortaya koymuştur (Ji, Xu, Zhang ve He, 2023).

Optimizasyon algoritmaları sayesinde, yalnızca en verimli varyant seçilmekle kalmaz; aynı zamanda her varyasyonun neden-sonuç ilişkisi de görselleştirilebilir hale gelir. Bu sayede tasarımcı, biçim kararlarını performans verisiyle destekleyerek alır.

4.3.2. Yapı Geometrisinin Performansa Dayalı Yeniden Kurulumu

BIM ortamında form, sabit ve tekil bir nesne olmaktan çıkarak; dinamik ve sürekli değiştirilebilir bir veri modeline dönüşür. Yapı geometrisinin performansa dayalı olarak yeniden kurulması, mimari kararların veri ile doğrulandığı bir tasarım yaklaşımını gerektirir. Örneğin, Autodesk Forma üzerinden elde edilen gün ışığı, rüzgar ve termal konfor analizleri, yapı kütesinin yeniden konumlandırılmasını, cephe açıklıklarının oranlarının değiştirilmesini ya da bina yüksekliğinin azaltılıp artırılmasını gerekli kılabilir (Autodesk, 2025a).

Böylece, geleneksel sezgisel tasarım yerine, her morfolojik kararın enerji kullanımı, iç mekan kalitesi ve kullanıcı konforu açısından ölçülebilir karşılıkları olur. (Zhuang ve diğerleri, 2021) geliştirdiği P-BIM (Performance-Integrated BIM) modeli de bu yaklaşımı desteklemekte, her yapı bileşeninin LCC (Yaşam Döngüsü Maliyeti) ve IEQ (İç Mekan Kalitesi) gibi kriterlere göre yeniden modellenmesini olanaklı kılmaktadır.

Bu tür yeniden kurulum senaryoları yalnızca yeni tasarımlarda değil; mevcut yapıların dönüşüm projelerinde de uygulanabilir niteliktedir.

4.3.3. Geribildirim Döngüleri ile Tasarım Kararlarının Yinelemesi

Simülasyon sürecinin yalnızca sonuç veren bir yapıdan, kararları besleyen ve güncelleyen bir yapıya dönüşmesi, tasarımda geri besleme döngülerinin etkin kullanımı ile mümkündür. Geri bildirim döngüsü, BIM modelinden elde edilen performans verilerinin tasarım girdilerini yeniden şekillendirmesi anlamına gelir. Bu yinelemeli süreçte, her simülasyon sonucunda tasarım parametrik olarak güncellenir ve yeni çıktılar elde edilir (Berges-Alvarez ve diğerleri, 2024; Shen ve diğerleri, 2012).

Örneğin, rüzgar analizi sonucunda kullanıcı sirkülasyonuna zarar veren türbülans bölgeleri tespit edildiğinde, bina kütlesi bu veriye göre yeniden yönlendirilebilir. Benzer şekilde, aşırı güneşlenme bölgelerinde gölgeleme elemanları artırılabilir ya da açıklık oranları azaltılabilir. Bu tip karar döngüleri sayesinde, tasarım yalnızca görsel değil; çevresel, ekonomik ve işlevsel verilerle birlikte olgunlaşır.

Bu süreçte, Forma, Revit-Insight, Rhino-Grasshopper gibi yazılımların görsel arayüzleri; tasarımcının performans verisini doğrudan yorumlayabileceği, karşılaştırmalı varyasyonlar üzerinden karar alabileceği bir tasarım zekası ortamı sunar.

Sonuç olarak, BIM ortamındaki morfolojik simülasyon süreci, yalnızca analitik bir araç değil, aynı zamanda tasarımı yönlendiren bir düşünme biçimidir. Parametrik tasarım, performansa dayalı yeniden kurulum ve geri bildirim döngüleri, mimari formu statik bir nesne olmaktan çıkararak dinamik ve entegre bir süreç haline getirir. Bu yaklaşım, sürdürülebilirlik, kullanıcı konforu ve enerji verimliliği gibi hedeflerin tasarım sürecinin merkezine yerleştirilmesini mümkün kılar.

Metodolojik çerçevenin son aşaması, geliştirilen BIM tabanlı analiz ve simülasyon stratejilerinin pratik tasarım ortamlarında nasıl karşılık bulduğunu ortaya koymaktır. Bu bağlamda, takip eden bölümde uygulama olanakları değerlendirilecek; özellikle eğitim yapıları ve kampüs tasarımları üzerinden senaryo bazlı modelleme örnekleri ile teorik yaklaşımların sahadaki karşılıkları açıklanacaktır. Böylece yöntemsel altyapının, çevresel verilerle desteklenen mimari karar üretiminde nasıl etkinleştirilebileceği somut biçimde ortaya konacaktır.

4.4. UYGULAMA OLANAKLARI VE UYGULAMALI SENARYO GELİŞTİRME

BIM tabanlı morfolojik analizlerin gerçek tasarım süreçlerine entegrasyonu, yalnızca teorik kavramlarla sınırlı kalmayan; aynı zamanda karar vericiye uygulama düzeyinde strateji geliştirme fırsatı sunan bütünsel bir yaklaşımdır. Bu bağlamda, eğitim yapıları özelinde yürütülen senaryo bazlı modelleme çalışmaları, BIM destekli analizlerin sahaya yansımaları örneklemektedir. Autodesk Forma ile yapılan rüzgar, güneşlenme ve gün ışığı analizleri sayesinde, farklı morfolojik senaryolar çevresel performans düzeyine göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmektedir. Bu analizler yalnızca mevcut yapıların optimizasyonunu değil, aynı zamanda gelecekteki kampüs planlamalarına yön verebilecek stratejik bilgiler üretmektedir (Q. Liu ve Wang, 2022; Zhuang ve diğerleri, 2021);(Autodesk, 2025a).

4.4.1. Eğitim Yapıları İçin Morfolojik Modelleme Pratikleri

Eğitim yapıları, çok işlevli mekansal organizasyonları, yüksek kullanıcı hareketliliği ve yoğun zaman-mekan etkileşimiyle karakterize edilen dinamik sistemlerdir. Bu tür yapılar için morfolojik modelleme, biçimsel estetiğin yanı sıra enerji performansı, iç mekan konforu ve erişilebilirlik gibi performans kriterlerinin eşgüdümlü biçimde değerlendirilmesini gerektirir.

BIM tabanlı parametrik modelleme araçları, farklı yönelmeler, açıklık oranları, kütle yoğunlukları ve gölgeleme stratejileri üzerinden çoklu senaryolar oluşturma potansiyeline sahiptir. Sınıf, laboratuvar ve kütüphane gibi farklı kullanım türlerinin, güneş ışıını, doğal havalandırma ve akustik performans gibi çevresel parametrelerle birlikte optimize edilmesi, daha işlevsel ve sürdürülebilir tasarımlar elde edilmesini sağlar.

Duarte ve diğerleri (2021), eğitim yapılarında BIM destekli modelleme ile geliştirilen doğal aydınlatma ve havalandırma stratejilerinin, enerji tüketimini %8–12 oranında azaltabildiğini ve kullanıcı konforunu önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu çalışma, eğitim yapılarında işlevsel dağılımın çevresel performansla entegre edilmesinin mekansal verimliliği ve sürdürülebilirliği artırma potansiyelini ortaya koymaktadır (Carriço De Lima Montenegro Duarte, Ramos Zemerio, Dias Barreto De Souza, De Lima Tostes ve Holanda Bezerra, 2021).

4.4.2. Autodesk Forma ile Senaryo Analizi: Rüzgar, Güneş, Gün Işığı

BIM tabanlı performans modelleme araçlarının erken tasarım aşamalarında kullanımı,

yalnızca yapının biçimsel kararlarını değil, aynı zamanda çevresel veriler ışığında optimizasyon sürecini de yönlendirmektedir. Bu bağlamda Autodesk Forma, özellikle kentleşme baskısı altındaki kampüs alanlarında, yapıların doğal kaynaklarla etkileşimini analiz edebilmek için yüksek çözünürlüklü, zamana bağlı ve çok değişkenli simülasyonlar sunan bulut tabanlı bir analiz platformudur (Autodesk, 2025a; Zhuang ve diğerleri, 2021).

Forma'nın öne çıkan özelliği, tasarım varyasyonlarını rüzgar akımı, güneş ışıınımı ve gün ışığı performansı gibi kritik çevresel göstergelere göre değerlendirmesidir. Platform, BIM modelleriyle entegre çalışarak morfolojik senaryoların enerji verimliliği, termal konfor ve doğal aydınlatma kapasitesi açısından karşılaştırmalı analizine olanak tanır (Autodesk, 2025a; Q. Liu ve Wang, 2022) Aşağıda üç ana analiz başlığı detaylı biçimde sunulmaktadır:

Autodesk Forma, Computational Fluid Dynamics (CFD) ilkelerine dayalı analiz altyapısıyla, hakim rüzgar yönleri ve hızları doğrultusunda yapı etrafında oluşan akış desenlerini modelleyebilmektedir. Bu özellik, kampüs içi yaya konforu, hava kalitesi ve pasif soğutma potansiyeli açısından kritik önemdedir. Böylece, örneğin bina girişlerinin yönelimi veya iç avluların yerleşimi gibi mimari kararlar, mikroklimatik konfor hedeflerine göre uyarlanabilmektedir.

Autodesk Forma, erken tasarım aşamasında yapıların güneş ışıınımı ve güneşlenme sürelerini analiz etmek için gelişmiş araçlar sunmaktadır. Bu analizler, yapıların cephe ve çatı yüzeylerine düşen yıllık ve saatlik güneş ışıınımını değerlendirerek, örneğin güneş panellerinin yerleşimi, gölgeleme elemanlarının yerleştirilmesi ve enerji üretim potansiyeli hakkında veri üretmektedir. Ayrıca, çevresel faktörler ve yapı geometrisi dikkate alınarak, güneş ışığının yapı yüzeyleri üzerindeki dağılımı detaylı biçimde simüle edilebilmektedir (Azeez, 2023).

Forma'nın güneş analizi modülü, yüzey ışıınımını yalnızca miktar olarak değil, aynı zamanda zamana bağlı süreklilik ve yönelim farklılıklarına göre değerlendirerek, yapının yönlendirilmesi, biçimsel açıklık yerleşimi ve pasif güneş kazancı potansiyelini optimize etmek amacıyla kullanılır. Bu bağlamda, tasarım sürecine dahil edilen güneşlenme verileri, yıllık enerji yüklerini düşürmeye, doğal aydınlatma sürekliliğini artırmaya ve termal konforu iyileştirmeye yönelik stratejik kararların temelini oluşturur (Autodesk Forma, 2025)

Güneşlenme süresi analizi, yapı ve çevresinin belirli tarih ve saat aralıklarında ne kadar süreyle doğrudan güneş ışınımına maruz kaldığını hesaplayarak pasif ısı kazancı stratejilerinin geliştirilmesinde önemli rol oynar. Autodesk Forma, güneşin konumuna göre yapının farklı yüzeylerine düşen ışınımı zamana bağlı olarak simüle eder; bu da cephe tasarımı ve gölgeleme elemanlarının optimizasyonu açısından önemli girdiler sağlar (Autodesk, 2025b).

Autodesk'in yayınladığı son teknik dokümana göre, Forma'nın güneş enerjisi analiz modülü, mevcut arazi morfolojisi, komşu yapıların gölgeleme etkisi ve coğrafi konum gibi parametreleri bütüncül olarak ele alarak performansa dayalı karar süreçlerini desteklemektedir. Bu sayede tasarımcılar, güneşlenme süresine dayalı çok sayıda morfolojik senaryo üretebilmekte, bu senaryoları enerji ve görsel konfor bağlamında değerlendirebilmektedirler (Autodesk Forma, 2025).

Gün ışığı analizi, yapıların doğal aydınlatma performansını değerlendirerek yetersiz ya da aşırı gün ışığına maruz kalan bölgelerin tespit edilmesini sağlar. Bu analiz, pencere yerleşimi, iç mekan açıklık oranı ve yüzey yansıtıcılığı gibi tasarım değişkenleriyle birlikte değerlendirilerek, aydınlık düzeyi sürekliliği (UDI) ve gün ışığı özerkliği (DA) gibi metrikler ışığında optimizasyon sürecine katkı sunar (Autodesk, 2025b).

Autodesk Forma'nın bu analiz araçları, tasarımcıların çevresel performansı erken aşamada değerlendirerek sürdürülebilir ve veri temelli kararlar almalarına olanak tanımaktadır. Bu sayede enerji verimliliği, görsel konfor ve kullanıcı memnuniyeti açısından optimize edilmiş yapılar tasarlanabilir (Autodesk Forma, 2025).

Forma çıktıları, BIM modeline entegre edildiğinde, tasarımcı farklı senaryoları karşılaştırmalı, görselleştirilmiş ve ölçülebilir biçimde değerlendirme imkanı bulur. Örneğin, aynı yapı formunun farklı yönelimlerle test edilmesi; enerji kazancı, gün ışığı verimi ve termal konfor açısından farklı senaryolar sunar. Bu sayede kararlar yalnızca sezgiye değil; ölçülebilir, geriye dönük izlenebilir ve yinelemeli veriye dayalı biçimde alınabilir.

Sonuç olarak, Autodesk Forma, yalnızca bir analiz aracı değil, veri temelli karar üretiminde etkin bir tasarım ortağıdır. Kampüs yapıları gibi çoklu kullanıcıya hizmet veren ve çevresel etkenlere açık alanlarda, Forma aracılığıyla geliştirilen morfolojik senaryolar; sürdürülebilir, konforlu ve performans odaklı mimari çözümlerin geliştirilmesine olanak tanır.

4.4.3. Kampüs Tasarımı İçin Morfoloji-Tabanlı Sürdürülebilirlik Yorumları

Kampüs ölçeğinde sürdürülebilirlik, yalnızca bireysel yapıların enerji performansı ile değil; yapıların birbirleriyle olan konumlanma biçimi, açık alan ilişkileri ve mikroklimatik etkilerle bütüncül biçimde ele alınmalıdır. Morfoloji-temelli yaklaşımlar, kampüs genelinde kompaktlık, geçirgenlik, gölge kontrolü ve doğal havalandırma gibi kriterlerin planlama kararlarına entegre edilmesini sağlar.

Autodesk Forma ile yapılan senaryo analizleri, kampüs genelinde yapıların nasıl konumlandırılması gerektiği, hangi alanlarda açık boşluk bırakılmasının rüzgar koridoru oluşturacağı ya da hangi yapıların birbirini gölgeleyeceği gibi çok katmanlı verileri ortaya koyar. Bu çıktılar doğrultusunda geliştirilen morfolojik stratejiler belli hedeflere hizmet eder. Bunlar, enerji talebini azaltmak (ısıtma-soğutma), kullanıcı konforunu artırmak (termal, görsel, hava kalitesi), doğal kaynak kullanımını maksimize etmek (güneş, rüzgar, gün ışığı), mekansal kaliteyi ve erişilebilirliği artırmaktır. Böylece kampüs tasarımı, sürdürülebilirlik odaklı, çok ölçütlü ve performansa dayalı bir planlama aracına dönüşür.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında ele alınan BIM tabanlı morfolojik analiz yaklaşımı, enerji etkin kampüs tasarımını sadece biçimsel kararlarla değil; çevresel veriler, performans simülasyonları ve kullanıcı odaklı geri bildirimlerle destekleyen bütüncül bir yönetime dönüştürmektedir. Autodesk Forma gibi ileri düzey analiz araçlarıyla desteklenen bu yöntem, mimarlık disiplinine geleneksel sezgisel tasarımın ötesinde, veriye dayalı ve ölçülebilir bir form üretim pratiği sunmaktadır.

Yöntemsel açıdan değerlendirildiğinde, BIM destekli morfolojik analizler hem akademik hem de uygulamalı tasarım ortamlarında giderek daha fazla karşılık bulmaktadır. Literatürde, biçim-enerji ilişkisini sayısal verilerle açıklamaya yönelik çalışmaların sayısı hızla artmakta; bu çalışmalar aracılığıyla enerji etkinlik, gün ışığı kalitesi, termal konfor ve karbon salımı gibi değişkenlerin tasarım sürecine entegre edilmesi mümkün hale gelmektedir. Uygulama alanında ise, kampüs yapıları gibi işlevsel ve mekansal çeşitliliğe sahip kompleks programlarda, özellikle erken karar aşamalarında henüz literatürde yaygınlaşma aşamasında olan Forma ile gerçekleştirilen senaryo analizleri; bina yönelimi, kütle yoğunluğu ve açıklık yerleşimi gibi kritik tasarım değişkenlerinin mikroklimatik ve enerji verileriyle bütünleştirilmesini sağlamaktadır.

Bununla birlikte, bu tür performans odaklı yaklaşımların entegre edilmesi, bazı yapısal ve teknik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Erken aşama modeller üzerinden

yapılan rüzgar ve gün ışığı analizleri, yüksek çözünürlüklü çıktılar için zaman zaman yetersiz kalabilmekte ve gelişmiş simülasyon motorlarının kullanımını gerekli kılmaktadır. Ayrıca, BIM modellerinin parametrik esneklik kazanması ve analize uygun şekilde yapılandırılması, yüksek düzeyde disiplinler arası bilgi ve teknik donanım gerektirmektedir. Bu bağlamda, simülasyon verilerinin tasarım diline çevrilmesi süreci, hala birçok uygulayıcı açısından gelişmeye açık bir beceri alanı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Geleceğe yönelik olarak, BIM tabanlı morfolojik analizlerin gelişimi üç temel yönelim etrafında şekillenmektedir. Bunlardan ilki, yapay zeka ile desteklenen parametrik tasarım senaryoları ile ilgilidir. Son yıllarda, form-enerji ilişkisini optimize etmeye yönelik tasarım yaklaşımlarında yapay zeka destekli sistemlerin kullanımı hızla artmaktadır. Özellikle geçmiş proje verilerinden öğrenen makine öğrenimi tabanlı modeller, hesaplamalı maliyeti yüksek olan simülasyonların yerini alarak çok sayıda tasarım senaryosunun hızlı biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Elwy ve Hagishima (2024), bu tür yaklaşımların bina enerji performansını iyileştirmede nasıl etkili kullanıldığını sistematik bir derleme ile ortaya koymakta; parametre duyarlılığı, doğruluk oranları ve tasarım değişkenlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde sunmaktadır. Bu bağlamda, yapay zeka destekli optimizasyon stratejileri, özellikle erken tasarım aşamasında form üretiminin çevresel verilerle bütünleşmesini sağlayarak sürdürülebilirlik hedeflerine daha etkin ulaşılmasını mümkün kılar (Elwy ve Hagishima, 2024). İkinci olarak, LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) ile BIM entegrasyonu, sadece tasarım aşamasındaki enerji performansını değil; kullanım, bakım ve yıkım dahil tüm yaşam döngüsü boyunca yapının çevresel etkisini değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Berges-Alvarez ve diğerleri, 2024). Üçüncü olarak, gerçek zamanlı sensör verisi entegrasyonu, simülasyon ile gerçek yapı davranışı arasındaki farkları azaltmakta; yapının “yaşayan bir sistem” olarak modellenmesine olanak sunmaktadır.

Örnek bir çalışma olan Ranjha ve diğerleri (2023), Swinburne Üniversitesi’nin Teknoloji Merkezi’nde gerçekleştirdikleri uygulamada, IoT tabanlı sensör verilerini BIM modeline entegre etmiş ve bu verileri sanal gerçeklik ortamında görselleştirerek bina performansını gerçek zamanlı olarak izlenebilir hale getirmiştir. Bu yaklaşım, enerji tüketiminin optimize edilmesinden güvenlik takibine kadar birçok alanda karar destek mekanizmalarını güçlendirmiştir (Ranjha ve diğerleri, 2023).

Bu tür BIM-sensör entegrasyonu, kampüs gibi kompleks ve çok işlevli yapılar için hem

i hem de dış mekanların çevresel koşullarını eşzamanlı olarak değerlendirme ve optimize etme potansiyeli sunmaktadır. Ayrıca, bu verilerin BIM modeli üzerinden görselleştirilmesi, tasarımcılar ve yöneticiler için sezgisel ve etkileşimli bir izleme arayüzü sağlamaktadır.

Tüm bu gelişmelerin, hem eğitimde hem profesyonel pratikte BIM kullanımını senaryo odaklı bir tasarım ve analiz aracına dnřtrecekęi öngörülmektedir.

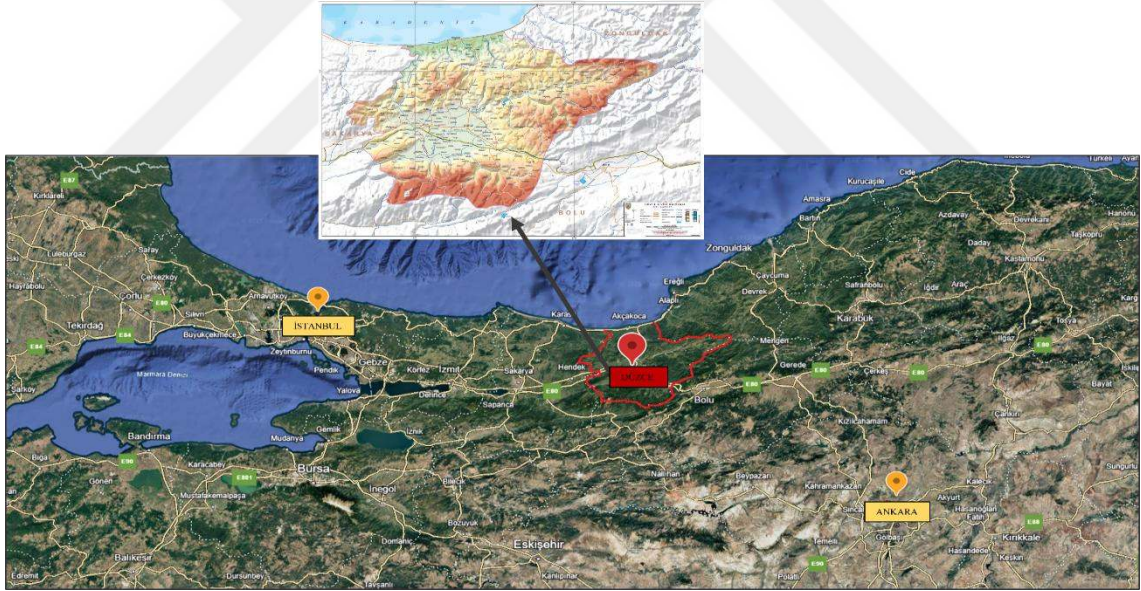
Sonuç olarak, BIM temelli morfolojik analiz yaklaşımları, mimarlık disiplninde biçimin sadece estetik değil, aynı zamanda enerji, konfor ve çevresel sürdürülebilirlik ekseninde yeniden tanımlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu tezde geliştirilen metodoloji, enerji etkin kampüs tasarımı özeline; dijital tasarım araçlarının analitik potansiyelini kullanarak, mimari karar alma süreçlerini daha akılcı, ölçülebilir ve çevresel bağlamla uyumlu hale getirmiştir. Gelecekte, bu yaklaşımın hem kuramsal hem de uygulamalı mimarlık çalışmalarında derinleşerek yaygınlaşması beklenmektedir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. ÇALIŞMA ALANININ TANITIMI

5.1.1. Coğrafi Konum ve Topoğrafya

Düzce İli, Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölümü'nde, 40° 40'- 40° 47' kuzey enlemi ile 31° 21'-31°26' doğu boylamı arasında yer almaktadır. Karadeniz'e kıyısı olan Düzce, doğusunda Bolu, batısında Sakarya, güneyinde Bolu ve kuzeyinde Karadeniz ile sınır komşusudur. Toplam yüzölçümü 2.492 km² olan il, Türkiye'nin yüzölçümü açısından küçük, ancak coğrafi konumu ve doğal kaynakları bakımından oldukça zengin illerinden biridir (Düzce Valiliği, 2025).



Harita 5. 1. Düzce İli Lokasyon Haritası

(Google Earth ve Harita Genel Müdürlüğü web sitesi kaynakları kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır.)

Harita 5.1'de görüldüğü gibi Düzce'nin stratejik konumu, İstanbul-Ankara ana ulaşım aksı üzerinde bulunması nedeniyle önemli bir lojistik ve geçiş bölgesi olmasını sağlamaktadır. TEM ve D-100 Karayolu ile doğrudan bağlantılı olan şehir, aynı zamanda

Batı Karadeniz'in hinterlandında yer alan önemli bir ekonomik ve tarımsal merkezdir. İlin Karadeniz kıyısındaki Akçakoca ilçesi, deniz ticareti ve turizm açısından da potansiyele sahiptir (Düzce Valiliği, 2025).

İlin topoğrafik yapısı oldukça çeşitlidir. Güneyinde Elmacık Dağları, batısında Bolu Dağları, doğusunda ise Küçük Melen ve Büyük Melen çaylarının oluşturduğu alüvyal Düzce Ovası yer alır. Ova alanı, ilin tarımsal üretiminin yoğunlaştığı bir bölge olup, aynı zamanda sanayi ve yerleşim alanlarının da hızla geliştiği sahalardır. Elmacık Dağları ve Bolu Dağları orman varlığını da desteklemektedir (Düzce Valiliği, 2025).

5.1.2. İklim Özellikleri

Düzce ili, Türkiye'nin iklim çeşitliliği açısından bir geçiş kuşağında yer almaktadır. Coğrafi konumu nedeniyle hem Karadeniz İklimi özelliklerini hem de kısmen Akdeniz ve Karasal İklim etkilerini göstermektedir. Bu durum ilin iklim yapısında mevsimsel dalgalanmaların ve mikroklimatik çeşitliliğin oluşmasına yol açmaktadır. Genel olarak Düzce'de yazlar sıcak, kışlar ise ılıman geçerken; yıl boyunca yağış görülse de, en fazla yağış sonbahar ve kış aylarında kaydedilir. Yaz aylarında ise zaman zaman kuraklık etkili olmaktadır (Düzce İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2025a). Yıllık ortalama sıcaklık 13-14°C arasında değişirken, ekstrem kış sıcaklıkları -20,5°C'ye kadar düşebilmekte, yazın ise maksimum sıcaklıklar +42,4°C'ye kadar ulaşabilmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2025).

İlde nem oranı yıl boyunca oldukça yüksektir. Yıllık ortalama nispi nem değeri %75'dir. (Düzce İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2025a). Bu yüksek nem, özellikle yaz aylarında gün içi sıcaklık hissiyatını artırmakta ve konfor koşullarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, kampüs ölçekli morfolojik analizlerde, açık alanlarda gölgeleme tasarımları ve doğal havalandırma stratejileri büyük önem taşır.

Düzce Ovası'nın dağlarla çevrili yapısı, özellikle sonbahar ve kış aylarında yoğun sis oluşumuna neden olmaktadır. Mevsimsel olarak ise kış aylarında lodos, Mayıs ve Haziran'da karayel, Temmuz ile Eylül arasında ise poyraz etkili olmaktadır (Tatar, 2005).

Gün Işığı (Solar Radiation) yönünden ise, Düzce ilinin coğrafi konumu sebebiyle yaz aylarında günlük güneşlenme süresi 9–11 saat arasında değişirken, kış aylarında bu süre 3–5 saate kadar düşmektedir (GEPA, 2025).

5.1.3. Tarihi ve Kentsel Gelişim

Düzce'nin tarihi M.Ö. 1390'lara kadar uzanmakta olup, bölge Frig, Lidya, Pers, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı gibi birçok medeniyetin etkisinde kalmıştır. Osmanlı hakimiyeti, 1323 yılında Orhan Gazi'nin komutanlarından Konuralp Bey'in Bizans kuvvetlerine karşı kazandığı zaferle başlamıştır. Bu süreçte Konuralp Bey'in adı, yöreyle özdeşleşmiş ve günümüze ulaşan yer adlarına yansımıştır. Konuralp beldesinde yer alan antik kent kalıntıları, bölgedeki yerleşimin M.Ö. 3. yüzyıla dayandığını göstermektedir. Roma ve Bizans dönemlerinde, daha önce bataklık olan Düzce Ovası tarıma elverişli hale getirilmiş ve yavaş yavaş iskana açılmıştır.

Osmanlı döneminde Düzce, önce Gümüşabadı ve sonra Üskübü ilçe merkezleri ile gelişimini sürdürmüş, nihayetinde 1871 yılında Düzce ilçe merkezi olmuştur. Bu dönemde ticaret ve arazi kullanımı bakımından bölge önem kazanmıştır. Cumhuriyet döneminde ulaşım altyapısının (D-100 ve TEM otoyolları) katkısıyla hızla gelişen Düzce, 1999 yılında yaşadığı iki büyük depremin ardından yeniden yapılandırılarak, 09 Aralık 1999 tarihli kararname ile Türkiye'nin 81. ili olmuştur (Düzce Belediyesi, 2025).

Günümüzde Düzce, Türkiye'nin en genç illerinden biri olmasının yanı sıra, hızlı bir kentsel gelişim süreci yaşamaktadır. Kentsel gelişimde plansız büyümenin etkileri özellikle merkez ilçede ve çevresinde gözlemlenmekte, yeni sanayi ve konut alanları ova düzlüğünde yoğunlaşmaktadır. Bu durum, arazi kullanımında değişim ve mikroklimatik etkiler oluşturmaktadır.

5.1.4. Demografik Yapı ve Göç Durumu

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2024 yılı itibarıyla Düzce ilinin toplam nüfusu yaklaşık 412.344 kişi olarak kaydedilmiştir. Türkiye genelinde yıllık nüfus artış hızı %3,4 iken, Düzce'de bu oran %6'ya ulaşarak ülke ortalamasının oldukça üzerinde seyretmektedir. Bu artışta, özellikle 1999 Düzce Depremi sonrasında yaşanan yeniden yapılanma süreci ile birlikte son on yılda artan sanayi yatırımlarının etkisiyle ilin iç göç almaya başlaması önemli rol oynamıştır (TÜİK, 2024).

Coğrafi konumu itibarıyla Karadeniz, Marmara ve İç Anadolu bölgeleri arasında bir geçiş noktasında yer alan Düzce, bu özelliği sayesinde hem ekonomik hem de demografik çeşitlilik açısından dikkat çeken bir yapıya sahiptir. Nüfus yoğunluğu bakımından da ülke ortalamasının üzerinde bir görünüme sahiptir. 2024 yılı TÜİK verilerine göre, Türkiye genelinde kilometrekare başına düşen kişi sayısı 111 kişi/km² iken, bu değer Düzce'de

167 kişi/km² olarak hesaplanmıştır. Bu durum, ilin sınırlı yüzölçümüne rağmen yoğun nüfus barındırdığını ortaya koymaktadır (TÜİK, 2024).

Cinsiyete göre nüfus dağılımı incelendiğinde ise, toplam nüfusun 206.008'i erkek, 206.336'sı kadın bireylerden oluşmaktadır. Bu dağılım, Düzce'de cinsiyet bazında dengeli bir nüfus yapısının bulunduğunu göstermektedir (TÜİK, 2024).

5.1.5. Sosyo-Ekonomik Yapı

Düzce'nin ekonomisi tarım, sanayi ve hizmet sektörüne dayanmaktadır. Tarımsal üretimde özellikle fındık olmak üzere (Batur, Arslan ve Altın, 2023); mısır, çeltik, sebze ve meyve üretimi öne çıkmaktadır. Tarımla uğraşan üreticilerin çoğunluğu aynı zamanda başka mesleklerde de çalışmakta, yalnızca tarımsal gelirle geçimini sağlamamaktadır. Son yıllarda tekstil, otomotiv yan sanayi, makine ve mobilya sektörlerinde organize sanayi bölgeleri kurulmuş ve sanayi faaliyetleri hızlı bir artış göstermiştir. Ayrıca, üniversitenin (Düzce Üniversitesi) büyümesi ile birlikte eğitim ve sağık sektörü de şehir ekonomisine önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla birlikte, ilin doğal peyzajı ve ekoturizm potansiyeli; yaylalar, nehirler ve ormanlık alanlar üzerinden doğa turizmini desteklemekte, hizmet sektörüne ekonomik katkı sağlamaktadır (Düzce Valiliğı, 2025).

Ulaşım Altyapısı

Düzce ili ulaşım açısından stratejik bir konumdadır. İstanbul-Ankara TEM Otoyolu ve D-100 Karayolu şehir merkezinden geçmekte, il merkezi İstanbul'a yaklaşık 217 km, Ankara'ya ise yaklaşık 236 km uzaklıktadır. Buna ek olarak, Karadeniz kıyısında yer alan Akçakoca ilçesi üzerinden deniz yolu ile bağlantılar sağlanabilmektedir. İlde havaalanı bulunmamakla birlikte, en yakın havalimanı İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı'dır (yaklaşık 2 saatlik mesafede). Ayrıca şehir içi ve şehirlerarası otobüs taşımacılığı gelişmiştir (Düzce İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2025b);(Düzce TSO, 2025).

5.1.6. Kentsel Açık ve Yeşil Alanlar

Düzce ili, coğrafi olarak ormanlık alanlar, tarım arazileri ve doğal su kaynakları açısından zengin bir potansiyele sahiptir. Ancak son yıllarda artan kentsel yayılma ve sanayileşme baskısı, doğal yeşil alanların daralmasına yol açmıştır. Özellikle Düzce kent merkezi ve çevresinde, kişi başına düşen aktif yeşil alan miktarı, Dünya Sağık Örgütü'nün önerdiği minimum seviye olan 9 m²'nin altında seyretmekte ve ideal kentsel yeşil alan olarak belirlenen 50 m²'nin oldukça altında kalmaktadır. (Pouya ve Aghlmand, 2022).

Şenik (2019) tarafından yapılan çalışmada, Düzce ilinde kişi başına düşen açık yeşil alan miktarı 5,33 m² olarak belirlenmiştir (Şenik, 2019). Buna karşın, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı verilerine göre Türkiye genelinde bu değer yaklaşık 12,63 m² olup bu fark Düzce'nin açık yeşil alan açısından ulusal ortalamanın altında kaldığını göstermektedir. Ayrıca Kaya (2024) tarafından yapılan çalışmada, Düzce'de mevcut yeşil alanların çoğunlukla park, çocuk oyun alanı ve koruluk formunda olduğu; ancak bu alanların hem mekansal dağılım hem de işlevsellik açısından yetersiz olduğu belirtilmiştir (Kaya,2024).

5.1.7. Çevre Sorunları ve Doğal Afet Riskleri

Düzce ili, coğrafi ve jeomorfolojik yapısı gereği zengin doğal kaynaklara sahip olmakla birlikte, son yıllarda hızla artan nüfus, sanayileşme ve kentleşme süreçlerinin etkisiyle ciddi çevre sorunları ile karşı karşıya kalmıştır. Düzce ilinin 1990–2018 yılları arasındaki arazi kullanımı ve kentsel yayılması üzerine yapılan çalışmaya göre, kentte önemli arazi örtüsü ve kullanımı değişiklikleri meydana gelmiştir. Yapılan analizlerde, 1990 yılında orman alanları Düzce'nin toplam yüzölçümünün yaklaşık %60'ını kapsarken, bu oran 2018 yılına gelindiğinde %48'e düşmüştür. Bu süreçte en büyük artış ise tarım alanlarında gerçekleşmiş, tarımsal kullanım yaklaşık %27'den %43'e yükselmiştir. Bu değişim, özellikle orman ve geçişli bitki örtüsü alanlarının tarım arazisine dönüştürülmesinden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda, 1999 depremi sonrası il statüsü kazanan Düzce'de kentsel alanlar genişlemiş; yeni yerleşim yerleri, sanayi bölgeleri ve üniversite yatırımları ile yapay alanlar %1.6'dan %3.7'ye ulaşmıştır. Bu kentsel yayılma süreci, ağırlıklı olarak verimli tarım arazileri üzerinde gerçekleşmiş ve doğal alanları tehdit eder hale gelmiştir. Bu bağlamda, Düzce'de arazi kullanımı değişimleri, hem insan kaynaklı baskıların hem de doğal afetlerin etkisiyle şekillenmiş, sürdürülebilir arazi yönetimi ihtiyacını açıkça ortaya koymuştur (Siyavuş, 2021). Buna ek olarak, Düzce ili genelinde kentsel yapılaşmanın artması ile birlikte doğal arazi örtüsünde azalmalar meydana gelmiştir. Yeşil alanların azalması ile mikroklimatik dengenin olumsuz yönde etkileneceği öngörülmektedir. Ayrıca, Düzce ilinde su kirliliği, özellikle evsel ve endüstriyel atık suların arıtılmadan yüzey sularına deşarj edilmesi, nüfus ve sanayi yoğunluğu, altyapı yetersizlikleri ve düzensiz kentleşme gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, katı atıkların düzensiz depolanması, tarımsal faaliyetlerde kullanılan gübre ve ilaçlar, yer altı sularına sızarak hem ekosistem hem de insan sağlığı açısından ciddi tehdit oluşturmaktadır. Melen Çayı lt Havzası'nda Uğursuyu, Büyük Melen ve Hasanlar Barajı

çevresi gibi noktalar baskı altındadır ve bu alanlar hem noktasal hem de yayılı kirletici kaynaklardan etkilenmektedir (Düzce İli Çevresel Değerlendirme Raporu, 2022). Diğer taraftan, Düzce ili, sanayi ve yerleşim alanlarının ova içinde konumlanması, rüzgar süresinin kısa ve hızının az olması ve coğrafi yapısının hava koridorlarının etkili çalışmasını engellemesi nedeniyle ciddi hava kirliliği sorunlarıyla karşı karşıyadır. Karayolu ulaşımının yoğun olduğu D-100 ve E-80 gibi ana arterler, motorlu taşıt kaynaklı emisyonları artırmakta; sanayi tesislerinden kaynaklanan baca gazı salımları ve nem oranının yüksekliği ise bu kirliliğin yayılmasını zorlaştırarak etkisini artırmaktadır. Ayrıca meteorolojik enverziyon olayları ve yetersiz hava sirkülasyonu da kirleticilerin atmosferde birikmesine neden olmaktadır. Bu durum, insan ve çevre sağlığına olumsuz etkiler yapmakla birlikte ilde sağlık harcamalarının artmasına yol açmaktadır (Düzce İli Çevresel Değerlendirme Raporu, 2022). Ayrıca, Düzce ili, Türkiye'nin 1. derece deprem kuşağında yer almakta olup, geçmişte yaşanan yıkıcı depremlerle bu riskin somut etkilerini yaşamıştır. Bunun yanı sıra, sel ve taşkınlar, özellikle Melen Havzası'ndaki düzensiz arazi kullanımı, orman tahribatı ve dere yataklarının daraltılması gibi insan faaliyetleriyle daha da şiddetlenmektedir. Ayrıca, Düzce'deki bol yağışlı iklim ve topoğrafik yapı, heyelan riskini artırmakta; özellikle Büyük Melen Vadisi, Elmacık Dağı etekleri ve Düzce-Akçakoca karayolu çevresi yüksek riskli bölgeler arasında yer almaktadır. Kuraklık, erozyon, çığ ve kaya düşmesi gibi diğer doğal afet riskleri de ilde yerel ölçekte dikkate alınması gereken çevresel tehditler arasındadır (Düzce İli Çevresel Değerlendirme Raporu, 2022).

5.1.8. Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü Konumu ve Genel Özellikleri

Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü, Düzce ilinin kuzeybatısında konumlanmıştır. Yaklaşık 168 hektarlık bir alana yayılan bu yerleşke, 2006 yılında kurulmuş olup, Türkiye'nin genç üniversite kampüslerinden biridir. Kampüs, şehir merkezine yaklaşık 7 km mesafede olup, Karadeniz ile Marmara Bölgeleri arasında geçiş noktasında stratejik bir konuma sahiptir. Bu coğrafi konum, kampüsün hem doğal çevreyle etkileşimini hem de ulaşım ağlarına erişimini kolaylaştırmaktadır. Kampüs alanı, doğusunda ormanlık alanlar ve kırsal yerleşim dokusu, batı ve güneyinde ise artan kentsel yerleşim ile çevrilidir. Yerleşke, dağınık planlı kent dışı üniversite modeliyle tasarlanmış olup bu planlama modeli, farklı fakülte binaları, laboratuvarlar, sosyal alanlar ve yeşil alanların birbirinden bağımsız olarak konumlanmasına olanak tanımaktadır. Ancak, bu durum aynı zamanda yaya ulaşımı, mekansal bütünlük ve açık alan kullanımı açısından çeşitli

Tıp Fakültesinin bulunduğu alan ise, kampüsün batı bölümünde konumlanmış olup, çevresinde Düzce Üniversitesi Araştırma ve Uygulama Hastanesi, Morfoloji, Nükleer Tıp, Sağlık Bilimleri Fakültesi, cami ve çeşitli sosyal alanlar bulunmaktadır. Bu alan hem akademik hem de sağlık hizmetleri açısından yoğun bir kullanım alanı teşkil etmektedir. Bu bağlamda seçilen bu çalışma alanı, kullanıcı yoğunluğu açısından da uygun bir örneklem birimidir; gün içerisinde akademik ve idari personel, öğrenciler, sağlık personeli, hastalar ve hastane ziyaretçileri dahil olmak üzere farklı kullanıcı gruplarına hizmet vermektedir.



Harita 5.2, Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü'nün Düzce ili içerisindeki konumunu ve kampüs içindeki çalışma alanını göstermektedir. Harita üzerinde, Konuralp Kampüsü'nün Düzce şehir merkezine ve Karadeniz kıyısındaki Akçakoca ilçesine göre konumu vurgulanmıştır. Haritanın sol kısmında yer alan yakınlaştırılmış uydu görüntüsünde ise kampüs ve içerisindeki çalışma alanı sınırlandırılmış, İlahiyat Fakültesi Uygulama Camii, Sağlık Bilimleri Fakültesi ve Araştırma ve Uygulama Hastanesi gibi

Çalışma alanındaki yapılar etiketlenerek belirtilmiştir.

5.1.9. Kampüs Alanının Morfolojik ve Mikroklimatik Özellikleri

Düzce Üniversitesi Konuralp Yerleşkesi; yapı yoğunluğu, bina yönlenmesi, açık alan kullanımı ve bitki örtüsü açısından heterojen bir morfolojik yapıya sahiptir. Yerleşke, kent dışında konumlanan ve dağınık planlı kampüs modeline örnek teşkil eden genç bir üniversite yerleşkesidir (Güneş ve Gökçe, 2022). Bu yerleşkenin mekansal yapısı ve çevresel özellikleri, sadece akademik işlevsellik açısından değil, aynı zamanda mikroklimatik konfor ve sürdürülebilirlik hedefleri açısından da çeşitli avantaj ve sınırlılıklar sunmaktadır.

Yerleşke; kuzey, batı ve doğu yönlerinde tepelerle çevrilidir. Yapısal olarak düşük yoğunluklu, çok çekirdekli ve ayırık yapılaşma karakteri göstermektedir. Bu durum, yapılar arasında geniş tanımsız boşlukların oluşmasına, yaya ve araç sirkülasyonunun uzun mesafelere yayılmasına neden olmaktadır. Kurulduğu 2006 yılından bu yana kampüs girişlerinin yeniden konumlandırılması, yaya-arac ilişkilerinde önemli dönüşümlere yol açmış; sosyal kullanım örüntüleri bu yeniden yapılandırmalarla birlikte farklılaşmıştır (Güneş ve Gökçe, 2022). Kampüs çevresinde yeşil alanların düzensiz dağılımı ve geçirgen yüzey oranlarının sınırlı olması, yüzey sıcaklıklarını lokal olarak artırmakta ve mikroklimatik dengeyi olumsuz etkileyebilmektedir. Kaya (2024), Düzce ili genelinde yaptığı analizde, geçirimsiz yüzeylerin arttığı bölgelerde yaz döneminde yüzey sıcaklıklarının anlamlı düzeyde yükseldiğini ve bu durumun insan termal konforunu olumsuz etkilediğini göstermektedir (Kaya, 2024).

Topografik açıdan, Konuralp Yerleşkesi'nin yaklaşık %15'lik bir kısmı, %0-7 arasında eğimli bir yüzeye sahiptir. Bu nedenle inşaat ekonomisi ve sirkülasyon açısından kullanışlı alanlar sınırlıdır. Arazi eğimi %14'ün üzerine çıktığında yapılaşma uygunluğu azalmaktadır (Güneş ve Gökçe, 2022). Bu durum, yapıların çoğunun nispeten daha az eğimli bölgelere yığılmasına neden olmakta ve kampüs genelinde bir morfolojik dengesizlik oluşturmaktadır.

Düzce Üniversitesi Konuralp Yerleşkesi'nin morfolojik yapısı, parçalı yerleşim dokusu ve eğimli topografyasıyla belirgin bir karakter sergilemektedir. Yapılan çalışmada, mimarlık bölümü öğrencilerinin çizdiği zihinsel haritalarda, özellikle birinci sınıf öğrencilerinin kenti daha çok bölgesel bloklar halinde algıladığı, yol ve sınır elemanlarını ise sınırlı biçimde tanımlayabildikleri görülmüştür. Bu durum, kampüsün çevresindeki

dağınık morfolojik yapı ve okunabilirliği düşük ulaşım ağı ile ilişkilendirilmiştir. Dördüncü sınıf öğrencileri ise zamanla edindikleri deneyim sayesinde, bu parçalı morfolojiyi zihinsel düzlemde daha bütünlüklü bir yapıya dönüştürerek odak noktaları ve bağlantı yollarını daha net biçimde tanımlayabilmişlerdir. Bulgular, kampüs çevresinin fiziksel mekan kurgusunun, mekansal algı ve yön bulma davranışı üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Tanrıverdi Kaya, 2019).

5.2. ÇALIŞMA YAKLAŞIMI VE METODOLOJİK ÇERÇEVE

Bu çalışma, enerji etkin kampüs tasarımı bağlamında kentsel morfoloji ve mikroklimatik parametrelerin yapı bilgi modellemesi (BIM) araçlarıyla birlikte değerlendirilmesini amaçlayan karma yöntemli bir araştırma yaklaşımı benimsemektedir. Çalışma, hem nitel hem de nicel veri kaynaklarını içermektedir.

Düzce Üniversitesi Tıp Fakültesi çevresindeki yaklaşık 0,2 km²'lik kampüs alanı, morfolojik çeşitliliği, kademeli gelişim süreci ve mikroklimatik hassasiyetleri bakımından dijital simülasyon tabanlı enerji modellemelerine olanak sağlayan bir örneklem alanı sunmaktadır. Bu bağlamda çalışma, mevcut fiziksel verilerin yapı bilgi modelleme (BIM) araçları ile elde edilmesi ve analiz edilmesine dayanmaktadır.

Metodolojik çerçeve; kampüs morfolojisinin enerji üzerindeki etkilerinin anlaşılması amacıyla araştırma sürecinde, Düzce Üniversitesi Tıp Fakültesi çevresindeki yaklaşık 0,2 km²'lik örneklem alanı fiziksel yapılaşma, yönelme, yoğunluk, açık alan kullanımı ve yeşil alan varlığı gibi morfolojik parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Ardından, bu parametrelerin gün ışığı alma süresi, gölgeleme etkisi, rüzgar yönelmesi ve yüzey sıcaklığı gibi mikroklimatik değişkenlerle ilişkisi, BIM tabanlı araçlar kullanılarak test edilmiştir. Bu parametrelerin analizinde Autodesk Revit ve Autodesk Forma gibi BIM tabanlı dijital modelleme ve analiz araçlarından yararlanılmıştır. Böylece kampüs formunun enerji ve çevresel performans üzerindeki etkileri hem mekansal hem sayısal düzlemde ele alınmıştır.

Yöntem, alan gözlemleri, uydu görüntüleri, teknik proje verileri ve analiz çıktıları ile desteklenmiştir. Bu yapı, hem yerel ölçekte karar vericilere bilgi üretmeyi hem de enerji etkin tasarım uygulamaları için bir çerçeve sunmayı hedeflemektedir.

5.2.1 Araştırma Soruları ve Hipotezler

İlgili literatürdeki yaklaşımlar üzerine yapılan değerlendirme sonrasında tespit edilen literatür boşluğu çerçevesinde aşağıdaki araştırma soruları ve hipotezler geliştirilmiştir.

Araştırma Sorusu 1: Morfolojik parametrelerin mikroklimatik koşullar üzerindeki etkisi, kampüsün enerji etkinliğini nasıl yönlendirir?

Hipotez 1: Yönlenme, yapı yoğunluğu, açık-yeşil alan oranı gibi morfolojik faktörler, gölgeleme süresi, rüzgar geçirgenliği ve yüzey sıcaklığı gibi mikroklimatik değişkenleri etkileyerek enerji tüketimini dolaylı yoldan şekillendirir. Bu mikroklimatik etkiler, BIM tabanlı analiz araçlarıyla modellenabilir ve özellikle pasif tasarım stratejilerinin etkinliğini artırır.

Araştırma Sorusu 2: BIM tabanlı sayısal analizler, kampüs tasarımında morfolojik varyasyonların enerji performansına etkisini anlamada ne derece işlevseldir?

Hipotez 2: BIM platformları, morfolojik parametrelerin enerji çıktıları ile entegre değerlendirilmesini sağlayarak, tasarım sürecini ölçülebilir hale getirir.

Bu dijital analizler, erken tasarım aşamalarında alternatif yerleşim senaryolarının enerji açısından karşılaştırılmasını mümkün kılar. Böylece, morfolojik kararların çevresel etkileri sezgisel olmaktan çıkıp, veriye dayalı ve optimize edilebilir hale gelir.

5.2.2. Çalışma Akışı ve Yöntemsel Süreç Tasarımı

Bu çalışma; çalışmanın kapsamı, önemi, problemi ve amacının açıklanması ile başlatılmış, literatür taraması yapılmış ve kavramsal çerçevenin oluşturulmasıyla metodolojik iskelet belirlenmiştir. Literatür taramasında; enerji etkinlik, kentsel morfoloji, mikroklima ilişkisi ve BIM tabanlı analiz yöntemlerine dair ulusal ve uluslararası yayınlar incelenmiştir. Bu inceleme, morfolojik göstergelerin çevresel performans üzerindeki etkilerini BIM tabanlı modelleme ve analiz araçlarıyla ölçen önceki çalışmaların yöntemsel eğilimlerine dayalı bir analiz yaklaşımı geliştirilmesini sağlamıştır.

Araştırmanın uygulama süreci; veri temini, BIM tabanlı modelleme, enerji analizleri ve sonuçların morfolojik ve mikroklimatik etkilerinin değerlendirilmesine dayanır. İlk olarak, çalışma alanı olarak belirlenen Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü'nün Tıp Fakültesi çevresine ait 0,2 km²'lik alanın güncel durumu tanımlanmış ve tanıtılmıştır. Bu kapsamda üniversitenin ilgili birimlerinden .dwg formatındaki yapı projeleri temin

edilmiş, kampüs alanına ilişkin uydu görüntüleri ve yer gözlemleri ile mekansal doğrulamalar yapılmıştır.

Toplanan bu veriler Autodesk Revit ortamına aktarılmış ve çalışma alanındaki tüm binaların 3B dijital modeli oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde yapı kütleleri, bina yönelimleri, boşluk alanları, topografya ve açık alanlar ölçekli ve uyumlu biçimde işlenmiştir. Oluşturulan her bir model .obj formatında dışa aktarılmış ve Autodesk Forma platformuna entegre edilerek çevresel analizlerin yapılmasına olanak sağlanmıştır.

Forma ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar arasında doğrudan güneş ışığı alma süresi, yüzeye gelen ışık miktarı, rüzgar yönü ve hızı gibi çevresel göstergeler yer almıştır. Aynı zamanda, kampüs yapılarının oluşturduğu mikroklimatik etkileri ortaya koymak için bu analiz çıktıları ile yönelme, yapı yoğunluğu, açık-yeşil alanlar gibi morfolojik göstergeler değerlendirilmiştir.

Çalışma boyunca izlenen bu akış, kullanılan veri türleri ile analiz adımları arasında doğrudan bir ilişki kurularak planlanmıştır.

Çalışmanın yürütülmesi sırasında izlenen başlıca aşamalar ve her bir adımda gerçekleştirilen görevler Çizelge 5.1'deki gibi özetlenebilir:

Çizelge 5. 1. Çalışma Akışı ve Yöntemsel Süreç Tasarımı

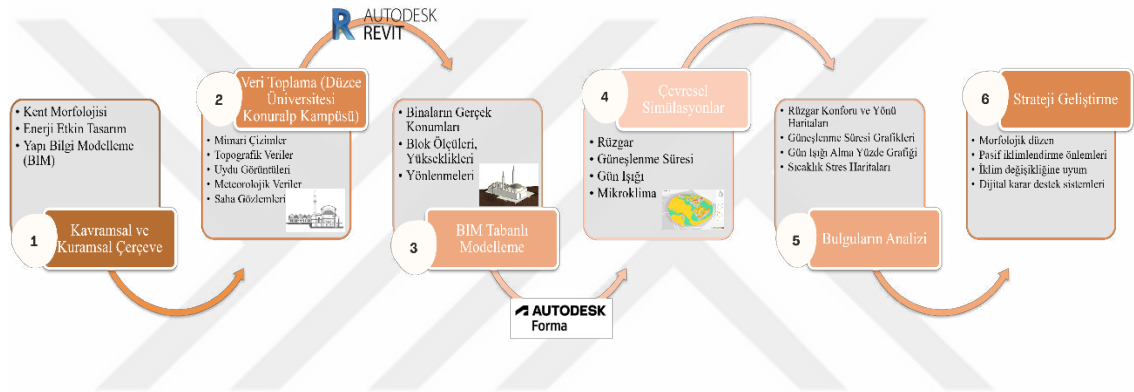
Adım	Süreç ve İçerik
1. Kuramsal Hazırlık	Problemin tanımı ve kavramsal çerçeve oluşturma: Çalışma, araştırma konusu ve hedeflerinin belirlenmesi, kapsam ve öneminin açıklanmasıyla başlatıldı. Enerji etkin tasarım, kent/kampüs morfolojisi ve BIM teknolojilerine dair kapsamlı bir literatür taraması yapılarak kuramsal arka plan oluşturuldu. Bu temel doğrultusunda araştırmanın metodolojik yaklaşımı ve varsayımları şekillendirildi.
2. Veri Toplama	Alan verilerinin derlenmesi: Pilot çalışma alanı olarak seçilen Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü'nün Tıp Fakültesi çevresindeki ~0,2 km ² 'lik bölgeye ait veriler toplandı. Üniversitenin ilgili birimlerinden kampüsteki yapıların dijital mimari çizimleri (.DWG formatında) temin edildi. Ayrıca uydu görüntüleri, sayısal haritalar ve arazi topografya verileri elde edildi. Saha gezileri yapılarak yerinde gözlemler gerçekleştirildi; bina yönelimleri, gölgeleme alanları, açık-yeşil alan kullanımları, yaya sirkülasyonu ve rüzgar akışına dair notlar alındı. Toplanan tüm veriler, mekansal doğruluk ve güncellik açısından kontrol edilerek analiz sürecine hazırlandı.
3. BIM Tabanlı Modelleme	Dijital kampüs modeli oluşturma: Toplanan veriler Autodesk Revit yazılımına aktararak çalışma alanındaki tüm yapıların ve çevresinin 3 boyutlu BIM modeli oluşturuldu. Modelleme sırasında binaların gerçek konumları, blok ölçüleri, yükseklikleri ve yönelimleri bire bir yansıtıldı; kampüs topografyası ve açık alanlar ölçekli şekilde modellendi. Böylece kampüsün gerçeğe uygun üç boyutlu modeli elde edildi. Bu model, enerji analizi için gerekli bilgileri (yapı geometrisi, yüzey alanları, vb.) barındıracak şekilde hazırlandı.

Çizelge 5. 1. (devam) Çalışma Akışı ve Yöntemsel Süreç Tasarımı

4. Çevresel Simülasyonlar	Performans analizlerinin yürütülmesi: Hazırlanan 3B model, BIM tabanlı karar destek platformu Autodesk Forma'ya entegre edildi. Forma ortamında kampüsün çevresel performansını değerlendirmek üzere çeşitli simülasyonlar gerçekleştirildi. Başlıca analizler: hakim rüzgar yönü ve hızı doğrultusunda rüzgar akış simülasyonu, her bir noktada yıllık güneşlenme süresi hesabı, bina cepheleri için doğal günışığı erişimi analizi ve açık alanlar için evrensel termal iklim indeksi (UTCI) bazlı dış mekan konfor analizidir. Simülasyonlar, mevsimsel farklılıkları görmek amacıyla 21 Mart (ilkbahar ekinoksu), 21 Haziran (yaz gündönümü), 23 Eylül (sonbahar ekinoksu) ve 21 Aralık (kış gündönümü) tarihlerinde tekrarlanmıştır. İlgili iklimsel girdiler (Düzce'ye ait yıllık meteoroloji verileri, güneş radyasyonu vb.) Forma veri tabanından otomatik olarak çekilerek modele uygulanmıştır.
5. Bulguların Analizi	Simülasyon çıktılarının değerlendirilmesi: Her bir analiz sonucunda elde edilen harita ve grafik çıktıları, kampüsün morfolojik özellikleriyle birlikte yorumlanmıştır. Örneğin rüzgar simülasyonunun ürettiği rüzgar hızı dağılımı haritaları, bina bloklarının dizilimi ve yükseklikleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Gün ışığı analiz sonuçları, yapıların yönelmesi ve bloklar arası mesafe bağlamında değerlendirilmiştir. Güneşlenme ve ısı stresi haritaları, açık alanların konumuna ve çevrelenme durumlarına göre analiz edilmiştir. Bu sayede sayısal simülasyon verisinden tasarıma yönelik anlamlar çıkarılmış; kampüs morfolojisinin hangi yönlerinin çevresel performansı nasıl etkilediği belirlenmiştir. Bulgular, literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarıyla da karşılaştırmalı olarak tartışılarak analizlerin güvenilirliği teyit edilmiştir.
6. Strateji Geliştirme	Önerilerin oluşturulması: Araştırmanın son aşamasında, analiz bulguları doğrultusunda enerji etkin kampüs tasarımı için öneriler geliştirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında kampüs planlamasında morfolojik düzen, pasif iklimlendirme önlemleri, iklim değişikliğine uyum ve dijital karar destek sistemleri başlıkları altında stratejik tavsiyeler sunulmuştur. Bu öneriler, çalışmanın pratik çıktıları olarak değerlendirilebilir. Böylece araştırma bulguları teorik katkıların yanı sıra uygulamaya dönük yol gösterici sonuçlar da üretmiştir.

Ayrıca, Şekil 5.1, tez kapsamında izlenen yöntemsel süreci görsel olarak özetlemektedir. Bahsedildiği gibi, ilk aşamada, kent morfolojisi, enerji etkin tasarım ve BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) kavramlarını içeren kuramsal çerçeve oluşturulmuştur. Ardından, Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü özelinde mimari çizimler, topografik veriler, meteorolojik bulgular ve saha gözlemleri temelinde veri toplama süreci yürütülmüştür. Üçüncü aşamada, bu veriler BIM ortamına aktarılmış ve yapıların gerçek konumları,

boyutları ve yönlenmeleri dikkate alınarak üç boyutlu dijital modeller oluşturulmuştur. Dördüncü aşamada, Autodesk Forma yazılımı aracılığıyla rüzgar, güneşlenme süresi, gün ışığı ve mikroklima analizleri gerçekleştirilmiş, çevresel simülasyon verileri elde edilmiştir. Beşinci aşamada, bu analizler doğrultusunda rüzgar konforu haritaları, güneşlenme grafikleri ve sıcaklık stres verileri ile morfolojik değerlendirmeler yapılmış; son aşamada ise elde edilen bulgular ışığında morfolojik düzen önerileri, pasif iklimlendirme stratejileri, iklim değişikliğine uyum önerileri ve dijital karar destek sistemlerine yönelik stratejiler geliştirilmiştir.



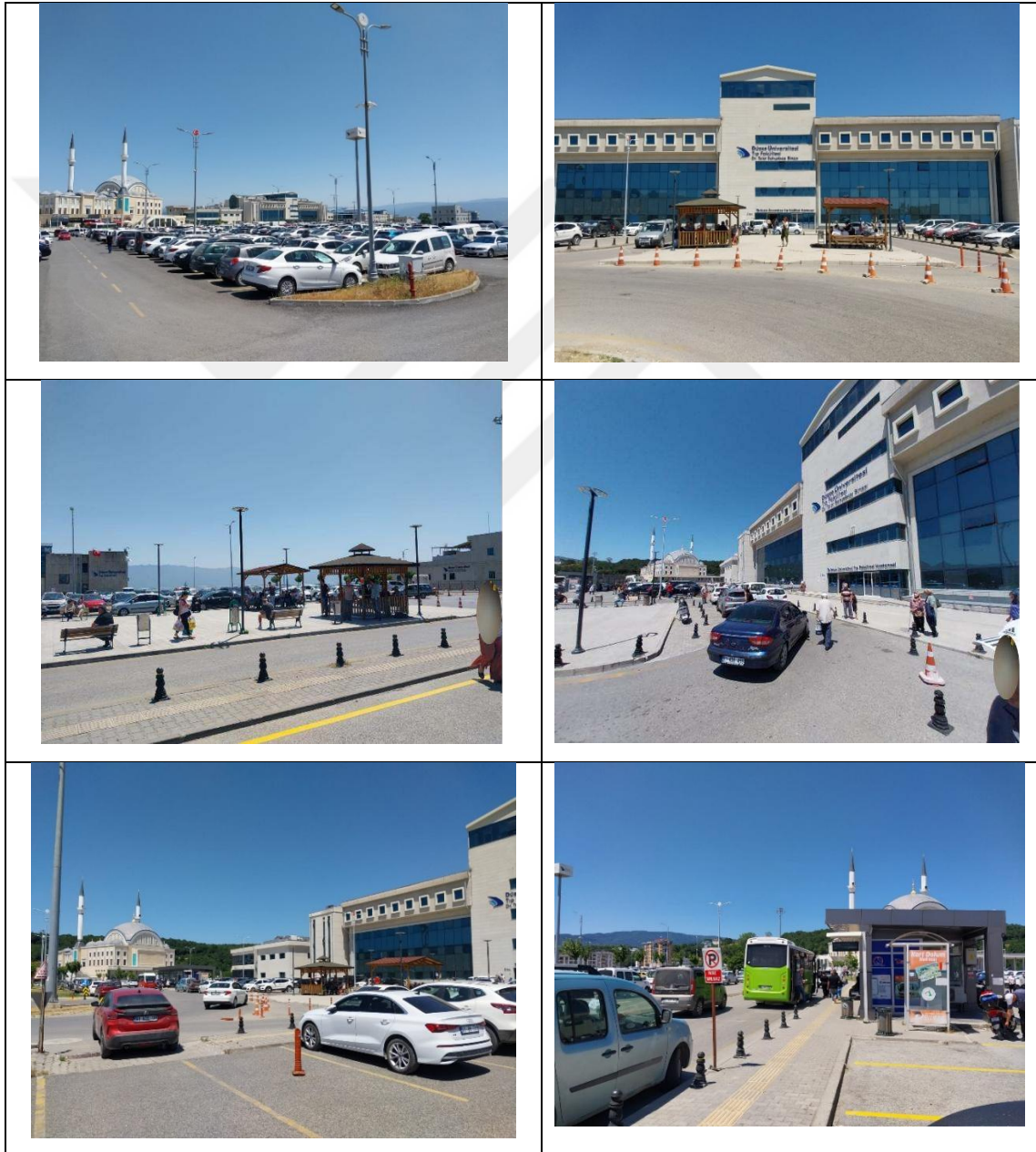
Şekil 5. 1. Çalışmanın Yöntemsel Akışı

5.3. VERİ TOPLAMA SÜRECİ

Bu araştırmada, Düzce Üniversitesi Tıp Fakültesi kampüs alanının morfolojik yapısının çevresel performans üzerindeki etkilerinin analizine yönelik veri toplama süreci, alan gözlemleri, sayısal haritalar ile BIM tabanlı modellemeye uygun teknik mimari projelerin toplanmasıyla yürütülmüştür. Her bir veri tipi, mekansal doğruluk ve analiz derinliği açısından birbirini tamamlayıcı nitelikte seçilmiş; hem fiziksel çevrenin yerinde gözlenmesi hem de dijital ortamlarda ölçülebilir hale getirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen veriler, ilerleyen bölümlerde enerji analizinde kullanılmak üzere BIM modellerine aktarılmış ve analiz için yapılandırılmıştır.

5.3.1. Alan Gözlemleri ve Yerde Tespitler

Yerde yapılan gözlemler, kampüs morfolojisinin mikroklimatik etkileri üzerindeki doğrudan etkilerini değerlendirmek adına bir ön hazırlık niteliği taşımaktadır. Gözlemler, kampüsün farklı zaman dilimlerinde gerçekleştirilmiş; bina yönlenmeleri, gölgeleme alanları, açık-yeşil alan kullanımları, kullanıcı dolaşımı ve rüzgar koridorları gibi nitelikler gözlemlenmiştir. Gözlemler sırasında alan fotoğraflanmış, elde edilen görsel belgeler mekansal analizleri destekleyici nitelikte arşivlenmiştir (Şekil 5.2).



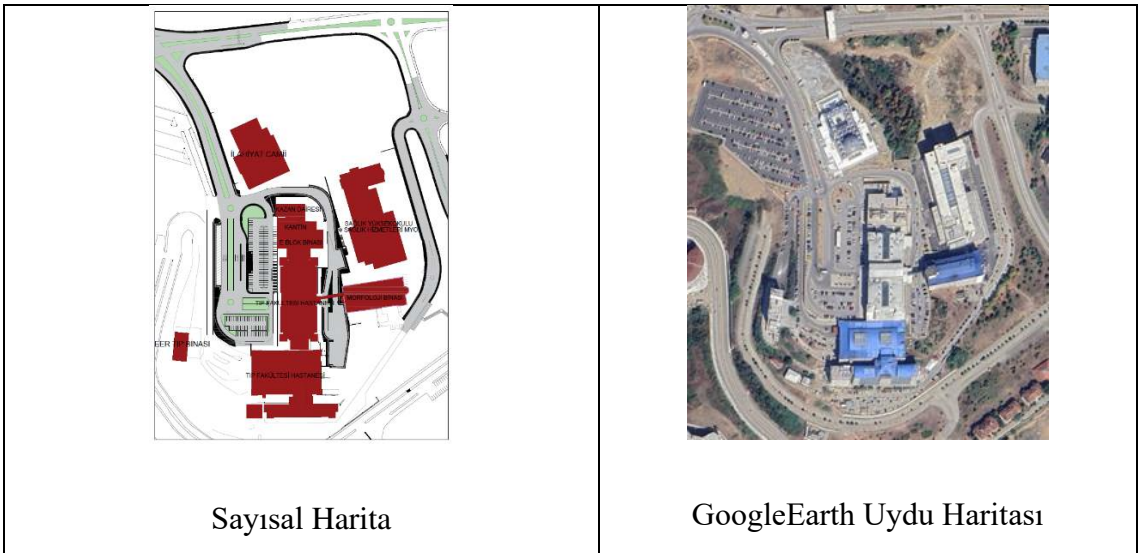
Şekil 5. 2. Alan gözlemlerine ait fotoğraf kolajı (kampüsün çeşitli bölgelerini gösteren karelerden oluşan bir görsel set)



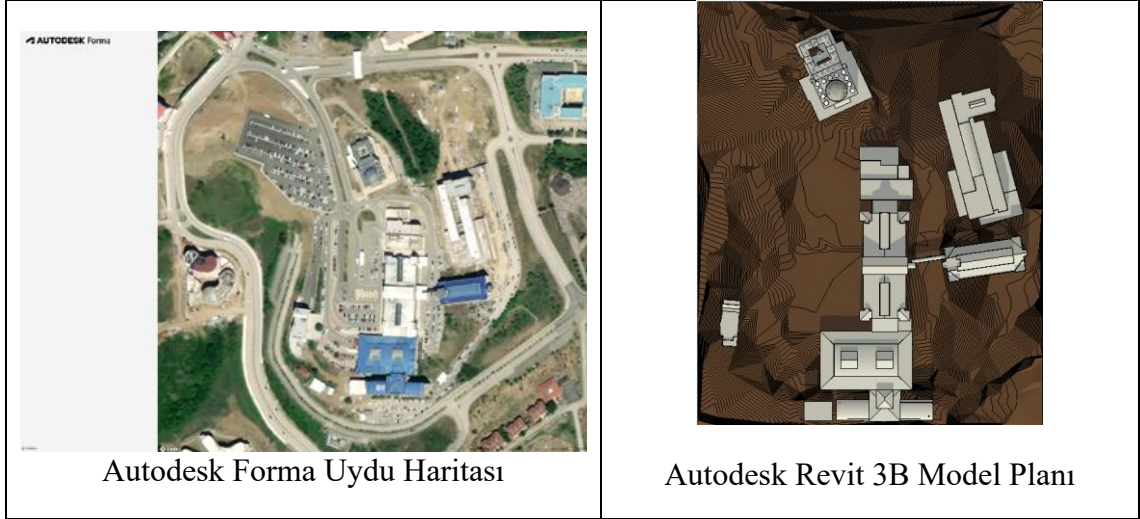
Şekil 5. 2. (devam) Alan gözlemlerine ait fotoğraf kolajı (kampüsün çeşitli bölgelerini gösteren karelerden oluşan bir görsel set)

5.3.2. Sayısal Haritalar ve Uydu Görüntüleri

Düzce Üniversitesi yerleşkesi ve çevresine ait mekansal analizlerin daha hassas biçimde yapılabilmesi için çeşitli sayısal harita katmanları ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri kullanılmıştır. Arazi kullanımı, topoğrafya, yapı konumları ve yönlenmeleri, yol bağlantıları gibi veri katmanları, hem Autodesk Revit hem de Autodesk Forma platformlarındaki modellerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Google Earth gibi açık erişimli platformlardan alınan güncel uydu görüntüleri ve dwg formatındaki sayısal haritalar mevcut fiziksel durumun doğrulanmasında kullanılmıştır.



Şekil 5. 3. Kampüs Çalışma Alanına Ait Sayısal Harita, Google Earth Uydu Haritası, Autodesk Forma Uydu Haritası ve Autodesk Revit 3B Model Planı



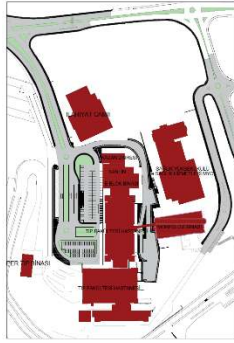
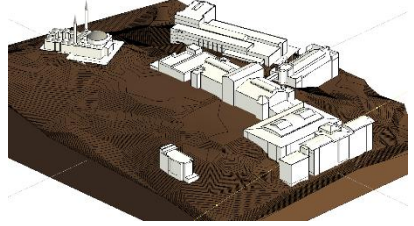
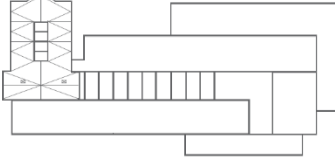
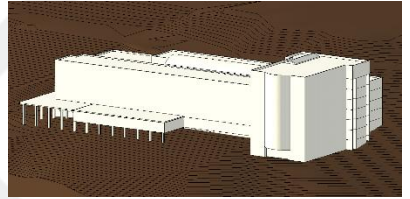
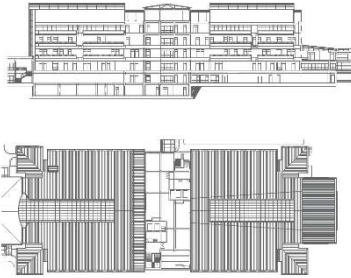
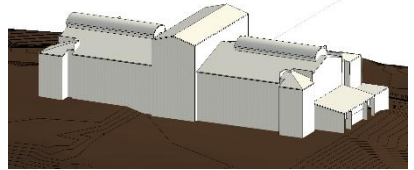
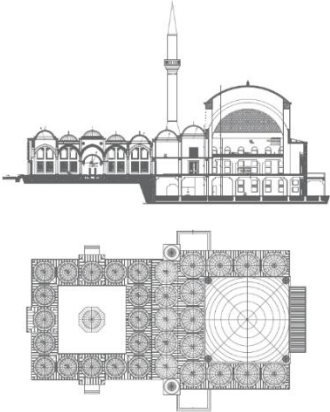
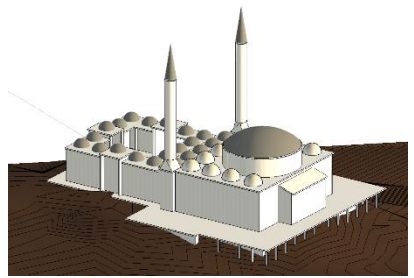
Şekil 5. 3. (devam) Kampüs Çalışma Alanına Ait Sayısal Harita, Google Earth Uydu Haritası, Autodesk Forma Uydu Haritası ve Autodesk Revit 3B Model Planı

Şekil 5.3’te, kampüs alanına ait sayısal harita ve uydu görüntüsü örnekleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

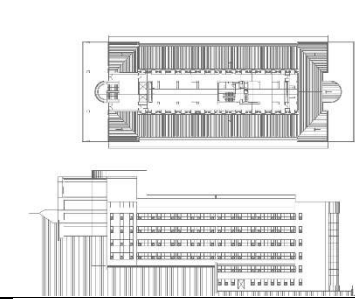
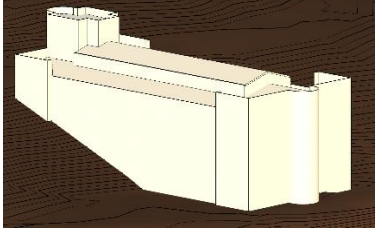
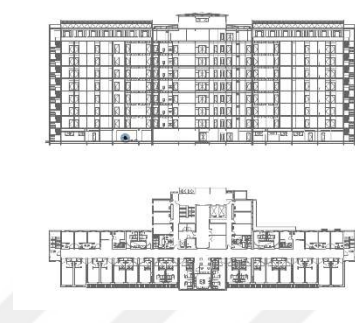
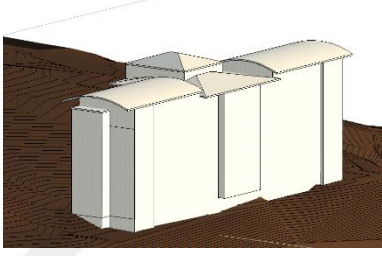
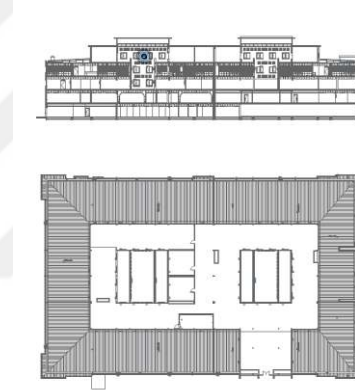
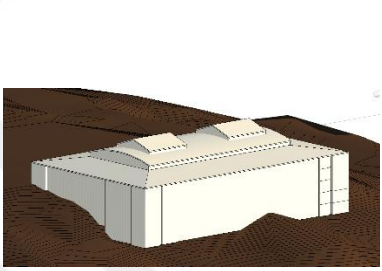
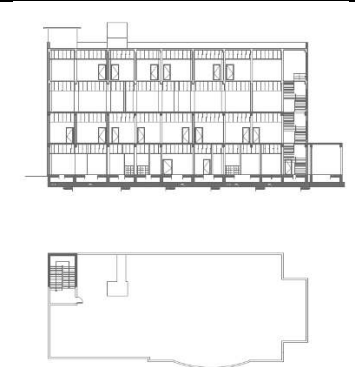
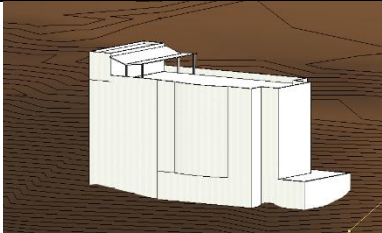
5.3.3. BIM Tabanlı Modelleme İçin Teknik Proje Verileri

Araştırma kapsamında, Düzce Üniversitesi Tıp Fakültesi kampüs alanında yer alan yapıların dijital ortama aktarılması ve çevresel performans analizlerinde kullanılabilecek BIM tabanlı modellerin oluşturulabilmesi amacıyla, üniversitenin ilgili teknik birimlerinden mevcut yapıların mimari uygulama projeleri .DWG formatında temin edilmiştir. Söz konusu teknik çizimler, yapıların zemin oturumlarını, kat yüksekliklerini, cephe düzenlemelerini ve yönlenme bilgilerini içermekte olup, bu bilgiler modellemenin doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Bu veriler doğrultusunda, Autodesk Revit yazılımı kullanılarak yapıların üç boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde, binaların sahadaki fiziksel durumlarını yansıtmak amacıyla elde edilen gerçek fotoğraflardan faydalanılmış; ayrıca, temin edilen 2B teknik çizimler modelleme sırasında referans olarak kullanılmıştır. Üç boyutlu modeller, hem mimari hem de morfolojik özelliklerle oluşturularak, enerji performansı ve çevresel analizlerde kullanılmaya uygun hale getirilmiştir. Bu süreçte dijital ortama aktarılan yapılar arasında, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Araştırma ve Uygulama Hastanesi’nin A, B, C, D ve E blokları, Kantin ve Kazan Dairesi, Morfoloji Binası, İlahiyat Camii ve Nükleer Tıp Binası yer almaktadır. Şekil 5.4’te, çalışma alanı kampüs binalarına ait saha fotoğrafları, DWG formatlı teknik çizimleri ile bu verilerin Revit ortamında oluşturulan BIM modeline

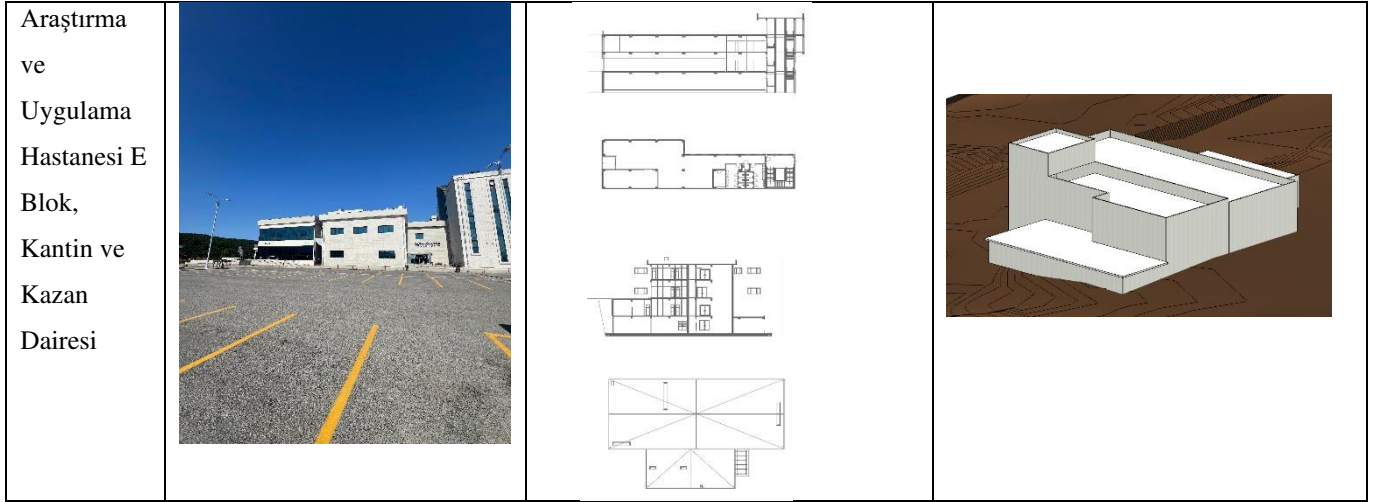
dönüştürülmüş halleri sunulmaktadır.

	Saha Fotoğrafları	Dwg Formatlı 2B Çizimi	Autodesk Revit 3B Modelleri
Tüm Alan			
Sağlık Bilimleri Fakültesi			
Araştırma ve Uygulama Hastanesi C ve D Blok			
İlahiyat Camii			

Şekil 5. 4. Kampüs Çalışma Alanına Ait Sayısal Harita, Google Earth Uydu Haritası, Autodesk Forma Uydu Haritası ve Autodesk Revit 3B Model Planı

Morfoloji Binası			
Araştırma ve Uygulama Hastanesi A Blok			
Araştırma ve Uygulama Hastanesi B Blok			
Nükleer Tıp Binası			

Şekil 5. 4. (devam) Kampüs Çalışma Alanına Ait Sayısal Harita, Google Earth Uydu Haritası, Autodesk Forma Uydu Haritası ve Autodesk Revit 3B Model Planı



Şekil 5. 4. (devam) Kampüs Çalışma Alanına Ait Sayısal Harita, Google Earth Uydu Haritası, Autodesk Forma Uydu Haritası ve Autodesk Revit 3B Model Planı

5.4. KULLANILAN YÖNTEM VE ANALİZ TEKNİKLERİ

Bu bölümde, kampüs alanının enerji etkinliği ve mikroklimatik performans açısından değerlendirilmesine yönelik olarak uygulanan yöntemler ve kullanılan dijital analiz araçları açıklanmaktadır. Süreç; BIM ortamında modelleme ve veri aktarımı, çevresel simülasyonların uygulanması ve BIM tabanlı morfolojik değerlendirmelerin yapılması olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. AutoCAD, Autodesk Revit, Autodesk Forma ve destekleyici yardımcı araçlarla yürütülen bu süreçte, her veri ve çıktı yapısı birbirini tamamlayacak şekilde organize edilmiştir.

5.4.1. Simülasyon Programının Tercih Gerekçeleri

Bu çalışmada çevresel analiz platformu olarak Autodesk Forma'nın tercih edilmesinin üç temel gerekçesi bulunmaktadır. İlk olarak erişilebilirlik açısından Forma, bulut tabanlı bir sistem olması sayesinde herhangi bir fiziksel kurulumla gerek kalmadan doğrudan öğrenci e-posta adresiyle erişim olanağı sağlamaktadır. Bu durum, farklı lokasyonlardan ve cihazlardan çalışmayı mümkün kılarak zaman ve mekan esnekliği sunmuştur. İkinci olarak, detay seviyesi uyumu bakımından, çalışmada üretilen LOD 200 düzeyindeki kütle modelleri Forma'ya doğrudan .OBJ formatı ile aktarılabilmiş; bu sayede bina yüksekliği/genişliği (H/W), yüzey ışıınımı ve gün ışığı alma süresi gibi kampüs-ölçekli metrikler saatlik çözünürlükte analiz edilebilmiştir. Üçüncü olarak, çoklu çevresel çıktı üretimi, Forma'nın güneşlenme, rüzgar ve gün ışığı verilerini tek arayüzde sunarak farklı

çevresel parametrelerin görselleştirilmesini kolaylaştırmış, bu da tasarım kararlarının değerlendirilmesini hızlandırmıştır. Bu nedenlerle, Forma yazılımı yalnızca teknik uygunluk değil, aynı zamanda kolay erişim ve veri bütünlüğü açısından da avantaj sağlamıştır.

5.4.2. BIM Ortamında Modelleme ve Veri Aktarımı Süreci

Bu araştırmada, kampüs alanına ilişkin çevresel analizlerin sayısal ortamda gerçekleştirilebilmesi amacıyla BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) temelli bir modelleme süreci izlenmiştir. Süreç üç temel aşamada gerçekleştirilmiştir: DWG verilerinin Autodesk Revit ortamına entegrasyonunun sağlanması, Revit modelinin .OBJ formatı ile Autodesk Forma'ya aktarılması ve model hassasiyetine dikkat ederek veri temizliği yapıp format uygunluğunun kontrollerinin yapılması. Her bir adım aşağıda detaylandırılmıştır.

Çalışma kapsamında, Düzce Üniversitesi Tıp Fakültesi örneklem alanına ait yapıların mimari proje verileri ve halihazır haritaları üniversitenin Yapı İşleri Daire Başkanlığı ve ilgili birimlerden .DWG formatlarında temin edilmiştir. Bu çizimler, yapıların kat planlarını, mimari kesitlerini ve cephelerini içermekte olup AutoCAD formatlı projeler, Autodesk Revit ortamına aktarılmıştır. Revit yazılımı aracılığıyla bu iki boyutlu veriler, üç boyutlu kütle modellerine dönüştürülmüş; her bir bina, genişlik, yükseklik, cephe yönelmesi ve konumsal veriler göz önünde bulundurularak hacimsel olarak modellenmiştir. Bu süreçte çizim katmanlarında yer alan eksik veya çakışan geometriler temizlenmiş, çizim hataları giderilmiş, coğrafi koordinat sistemine uygun şekilde hizalanmıştır. Böylece, dijital modelleme süreci için bütünlüklü bir BIM veri altyapısı oluşturulmuştur.

Sonrasında, modelleme sürecinin ardından oluşturulan BIM modeli, çevresel enerji analizleri gerçekleştirmek üzere Autodesk Forma platformuna aktarılmıştır. Bu aktarım, Revit yazılımı üzerinden her bir binanın .obj formatında dışa aktarımı yoluyla gerçekleştirilmiştir. .OBJ formatı, yapı geometrisi, yüzey yönelimleri ve temel malzeme tanımlarını desteklemesi bakımından Forma tarafından uyumlu şekilde işlenebilmektedir. Aktarım öncesinde model, gereksiz detaylardan arındırılarak veri hacmi optimize edilmiştir. Ayrıca her bir binanın ayrı ayrı aktarılması, Formanın içe aktarım sınırı olan 100 MB'ın aşılmasını sağlamıştır. Yapıların kuzey yönüyle olan ilişkisi, çevresel analizlerin doğruluğu açısından korunmuş; model, Forma arayüzüne entegre edilmeden

önce yönlenme bilgileri tekrar kontrol edilmiştir.

Buna ek olarak, aktarılan modelin çevresel analizlere uygunluğunu sağlamak amacıyla yüzey bütünlüğü, hacim tanımları ve topolojik doğruluk gibi kriterler doğrultusunda teknik kontroller yapılmıştır. Özellikle yüzeylerin kapalı hacimler oluşturması, veri kaybı olmaması ve kenar hizalarının doğru çalışması sağlanmıştır. Autodesk Forma platformuna aktarılan model üzerinde hem sistemsel hem de görsel düzeyde kontroller gerçekleştirilmiş; eksik ya da analiz dışında kalan öğeler manuel olarak gözden geçirilmiştir. Bu teknik iyileştirmeler sonucunda model, güneşlenme süresi, gölgeleme yoğunluğu, gün ışığı alma süresi ve rüzgar yönelimi gibi çevresel simülasyonların sağlıklı biçimde gerçekleştirilebileceği analiz altyapısına kavuşturulmuştur.

5.4.3. Simülasyon ve Çevresel Analiz Yöntemleri

Autodesk Forma, BIM tabanlı modeller üzerinde çok sayıda çevresel analiz gerçekleştirme kapasitesine sahip, bulut tabanlı bir simülasyon platformudur. Bu çalışma kapsamında Forma üzerinde yürütülen simülasyonlar dört ana başlık altında toplanmıştır: Güneş Analizi, Gün Işığı Analizi, Rüzgar Analizi ve Mikroklima Analizi. Bu analizler aracılığıyla, kampüs morfolojisinin çevresel etkileri zamansal ve mekansal bağlamda sayısallaştırılmış, elde edilen çıktılar yerinde yapılan gözlemler, uydu görüntüleri ve BIM tabanlı morfolojik göstergelerle birlikte değerlendirilmiştir. Spesifik olarak, güneş analizi, kampüs alanındaki yapılaşmanın oluşturduğu gölgeleme etkilerini zaman ve yön ekseninde incelemeyi amaçlamaktadır. Bu analizde, yapıların birbirini ne ölçüde gölgelediği, açık alanların gün içinde ne kadar süreyle doğrudan güneş ışığına maruz kaldığı ve gölgelenme süresi boyunca termal konfor potansiyelinin nasıl değiştiği sayısal olarak değerlendirilmiştir. Simülasyonlar, özellikle yaz (21 Haziran) ve kış (21 Aralık) gündönümleri için saatlik periyotlarda yürütülmüş; farklı saatler ve saat aralıkları ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu analiz, kampüste açık alan düzenlemelerinin gölge potansiyeline göre yapılabilmesi için temel bir veri seti sunmaktadır. Ayrıca, yapılar arası mesafenin ve kütle yönlenmelerinin gölgeleme şiddetine etkisi görselleştirilmiştir.

Diğer taraftan, gün ışığı analizi, yapıların cephe yönlenmeleri ve kütle formlarının gün içindeki doğal ışık kazancı üzerindeki etkisini değerlendirmeye yöneliktir. Forma, her bir yapının dış yüzeyine düşen gün ışığını metrekare başına watt (W/m^2) cinsinden hesaplayarak, yapıların doğal aydınlatma potansiyelini sayısal olarak ortaya koymaktadır. Bu analiz, pasif enerji kazanımı, kullanıcı konforu ve yapay aydınlatma ihtiyacı gibi

performans parametreleriyle doğrudan ilişkilidir. Simülasyon çıktıları, cephe yönelmelerine göre ışık alma farklılıklarını; dar yapı aralıklarının ve çıkıntılı kütle düzenlemelerinin oluşturduğu aydınlık-karanlık bölgeleri net biçimde göstermiştir. Kampüs genelinde, doğal aydınlatma koşullarının iyileştirilmesi için kütle diziliminin yönsel olarak nasıl optimize edilebileceği bu analizle değerlendirilmiştir.

Rüzgar analizi ise, kampüs yerleşkesinin hakim rüzgar yönleriyle etkileşimini ve yapı morfolojisinin hava akışı üzerindeki düzenleyici veya kısıtlayıcı etkisini anlamaya yöneliktir. Autodesk Forma, bu analizde kullandığı veri altyapısını, Global Wind Atlas üzerinden temin ettiği uzun dönemli rüzgar verilerine dayandırır (Global Wind Atlas, 2025). Bu sayede simülasyonlar, bölgesel hakim rüzgar yönleri ve ortalama hız değerleriyle örtüşecek biçimde gerçekçi bir çevresel bağlamda yürütülmüştür. Kampüs morfolojisi üzerinde gerçekleştirilen rüzgar analizi ile, yapı dizilimlerinin oluşturduğu hava geçiş koridorları, türbülans bölgeleri ve hava akışının sıkıştığı noktalar belirlenmiştir. Bu analiz, hem mikroklimatik konfor hem de doğal havalandırma stratejilerinin uygulanabilirliği açısından kritik bulgular sunmaktadır.

Son olarak, mikroklima analizi, kampüs morfolojisinin yerel iklim koşulları üzerindeki etkisini yapı ölçeğinde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Autodesk Forma'nın doğrudan mikroklimatik değişkenleri (örneğin yüzey sıcaklığı veya nem oranı) hesaplama kapasitesi sınırlı olmakla birlikte, bu analizde Forma'dan elde edilen güneşlenme süresi, gölgeleme yoğunluğu ve rüzgar geçişi gibi çıktıların morfolojik göstergelerle ilişkilendirilerek yorumlanması esas alınmıştır. Özellikle geçirimsiz yüzey oranı, H/W (yükseklik/genişlik) oranı ve yeşil alan yoğunluğu gibi değişkenler, Forma'daki ışık-gölge simülasyonlarıyla karşılaştırmalı biçimde analiz edilmiştir. Bu yaklaşımla, kampüsün bazı bölgelerinde lokal ısı adası etkisi yaratma potansiyeli taşıyan morfolojik yapıların tespit edilmesi mümkün olmuştur. Mikroklima analizi ayrıca, açık alanlarda kullanıcı termal konforunun sürdürülebilir kampüs tasarımı bağlamında nasıl iyileştirilebileceği konusunda temel veri sağlamıştır.

Bu dört analiz başlığı birlikte ele alındığında, Autodesk Forma'nın sadece görsel çıktılar üretmekle kalmadığı; aynı zamanda kampüs morfolojisinin çevresel etkilerini mekansal kararlarla ilişkilendirilebilir biçimde ölçülebilir hale getirdiği görülmektedir. Elde edilen çıktılar bir sonraki bölümde, yerinde gözlemler, çeşitli uydu haritaları ve Revit üzerinden elde edilen morfolojik göstergelerle bütünleştirilerek yorumlanacaktır.

5.4.4. Morfolojik ve Mikroklimatik Göstergelere Dayalı Analiz Süreci

Bu çalışmada Autodesk Forma üzerinden elde edilen çevresel simülasyon çıktıları, kampüs alanına ilişkin farklı kaynaklardan sağlanan morfolojik ve mikroklimatik göstergeler aracılığıyla çok boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Bu göstergeler; yerinde gözlemler, uydu görüntüleri ve BIM tabanlı dijital modelleme ortamı (Autodesk Revit) üzerinden elde edilen mekansal verilerle birlikte yorumlama sürecine dahil edilmiştir. Amaç, dijital simülasyon ortamında elde edilen çevresel verilerin, fiziksel bağlamla ilişkisini kurmak ve kampüs morfolojisinin mikroklima üzerindeki etkilerine dair kapsamlı bir değerlendirme yapabilmektir.

Yerinde gözlem verileri, çalışma alanında farklı gün ve saat dilimlerinde yapılan fiziksel incelemelerle elde edilmiştir. Bu kapsamda, kullanıcı hareketliliği, güneşlenme ve gölgelenme süreleri, açık alanların termal konfor durumu ve hakim rüzgar yönüne ilişkin mekansal ipuçları sahada incelenmiştir. Gözlemler, değerlendirme sürecinde bir referans işlevi görmüştür. Ayrıca, Uydu görüntüleri (özellikle Landsat ve GoogleEarth kaynaklı) kampüs çevresindeki arazi örtüsü, yeşil alan dağılımı ve yapılaşma deseni gibi göstergelerin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Bu görüntüler, geçici olmayan ve zaman içinde değişim gösterebilecek fiziksel unsurları tanımlamak açısından morfolojik analizlerde referans niteliği taşımıştır. Buna ek olarak, Autodesk Revit ortamında hesaplanan göstergeler arasında özellikle yükseklik/genişlik oranı (H/W), yapı boşluk oranı, yapı yönelme dizilimi, zemin oturma alanı yoğunluğu ve bina kümelenme desenleri gibi morfolojik parametreler yer almaktadır. Analiz süreci boyunca, bu morfolojik göstergeler Forma platformunda elde edilen güneşlenme süresi, gölgeleme yoğunluğu ve rüzgar yönü gibi çevresel verilerle eşleştirilmiştir.

5.4.5. Autodesk Forma Tabanlı Çevresel Simülasyonların Teknik Özellikleri

Bu çalışma kapsamında dört farklı çevresel analiz türü- güneşlenme, rüzgar, gün ışığı ve mikroklima- Autodesk Forma platformunun entegre altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Güneşlenme analizinde, temel parametre olarak güneş süresi ele alınmış; belirli tarih ve alanda, zemin, bina cepheleri ve çatı yüzeyleri üzerindeki doğrudan güneş saati hesaplanmıştır. Bu analizde, NVIDIA tarafından geliştirilen OptiX™ ışın izleme motoru kullanılmış; bulut etkisi göz önünde bulundurulmamış ve güneş ışınları her 6 dakikada bir örneklenmiştir. Ayrıca, yaz saati uygulaması da modele dahil edilmiştir. Güneş pozisyonları, Breton'un VSOP87 teorisi temelinde

belirlenmiş; yüzey kapsamı, 3B model üzerinden ışın yönü analizi ile değerlendirilmiştir. Rüzgar analizinde, rüzgâr yönü ve hızı parametreleri kullanılmış; 1,75 m yükseklikteki rüzgar akış deseni ve yaya konfor düzeyi ölçülmüştür. Bu bağlamda, OpenFOAM yazılımı üzerinden Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemi uygulanmıştır. Karmaşık detayların 1 metreden küçük olması durumunda modellemede dikkate alınmadığı varsayılmıştır. Veri kaynakları olarak Küresel Rüzgar Atlası (Global Wind Atlas) ve ERA5(Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi tarafından geliştirilen beşinci nesil yeniden analiz) yüzey pürüzlülüğü verisi kullanılmıştır. Gün ışığı analizinde ise Dikey Gökyüzü Bileşeni (Vertical Sky Component – VSC) parametresi temel alınmış; cepheye ulaşan gökyüzü ışığı % cinsinden değerlendirilmiştir. Bu analiz de NVIDIA OptiX™ ışın izleme motoru ile gerçekleştirilmiş olup; pencere boyutları, yapı malzemeleri, oda boyutu ve fonksiyonu gibi değişkenler dikkate alınmamıştır. Gün ışığı analizi, CIE Standard Overcast Sky modeli çerçevesinde yürütülmüştür. Son olarak, mikroklima analizinde hissedilen sıcaklık (UTCI) temel parametre olarak ele alınmış ve güneş, rüzgâr ve gün ışığı verilerinden türetilen değerler doğrultusunda algılanan sıcaklık hesaplanmıştır. Bu analizde, hibrit bir modelleme yaklaşımı benimsenmiş; yüzey ve zemin malzemeleri modellemeye dahil edilmemiştir. Kullanılan veri kaynakları arasında ERA5, Küresel Rüzgar Atlası ve UTCI standardı yer almaktadır. Bu çok katmanlı ve sistematik yapı, çevresel koşulların mimari tasarıma etkilerini sayısal ve karşılaştırılabilir biçimde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, çizelge 5.2, Autodesk Forma üzerinden gerçekleştirilen dört temel çevresel simülasyon türünün, kullanılan parametreler, metrikler, teknolojiler, varsayımlar ve veri kaynakları bakımından bir özetini sunmaktadır. Elde edilen sayısal veriler ve gözlemsel bulguların yorumlanmasına ve karşılaştırmalı analizine bir sonraki bölümde yer verilecektir.

Çizelge 5. 2. Autodesk Forma Platformunda Yürütülen Çevresel Analizlerin Parametre, Metrik, Teknoloji, Varsayım ve Veri Kaynağına Göre Sınıflandırılması

Analiz Türü	Parametre	Kullanılan Metrik	Teknoloji	Varsayımlar	Veri Kaynağı / Model
Güneşlenme	Güneş süresi	Belirli tarih ve alanda doğrudan güneş saati	NVIDIA tarafından OptiX™ Işın İzleme Motoru	Bulut etkisi dikkate alınmaz, her 6 dakikada örnekleme	Güneş pozisyonu: Bretonn'un VSOP87 teorisi
	Yüzey kapsamı	Zemin, bina cepheleri, çatı	3B model üzerinden ışın yönü analizi	Yaz saati uygulaması dikkate alınır	Yazılım arayüzü (örneğin Forma)

Çizelge 5. 2. (devam) Autodesk Forma Platformunda Yürütülen Çevresel Analizlerin Parametre, Metrik, Teknoloji, Varsayım ve Veri Kaynağına Göre Sınıflandırılması

Rüzgar	Rüzgar yönü ve hızı	1,75 m yükseklikte akış deseni ve yaya konforu	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), OpenFOAM aracılığıyla	Karmaşık detaylar 1 m altındaysa modellenmez.	Global Wind Atlas, ERA5
Gün Işığı	Dikey gökyüzü bileşeni (VSC)	% cinsinden cepheye ulaşan gökyüzü ışığı	NVIDIA tarafından OptiX™ Işın İzleme Motoru	Pencere boyutları, yapı malzemeleri dikkate alınmaz.	CIE Standard Overcast Sky modeli
Mikroklima	Hissedilen sıcaklık (UTCI)	Güneş, rüzgâr ve gün ışığı verileriyle türetilmiş sıcaklık	Hibrit model: Güneş + Rüzgar + Gün Işığı	Yüzey ve zemin malzemeleri dikkate alınmaz.	ERA5 (Copernicus), Global Wind Atlas, UTCI standardı

Buna ek olarak, bu çalışmada termal konfor değerlendirmeleri için Evrensel Termal İklim İndeksi (UTCI-Universal Thermal Climate Index) kullanılmıştır. UTCI, dış çevre koşullarının insan vücudu üzerindeki birleşik etkisini dikkate alan ileri düzey bir gösterge olarak kabul edilmektedir. UTCI; hava sıcaklığı, rüzgar hızı, bağıl nem ve güneş ışıınımı gibi çoklu iklim parametrelerini dikkate alarak hesaplanmaktadır ve bu nedenle mikroklima analizlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Çizelge 5. 3. Evrensel Termal İklim İndeksi UTCI.

(Bröde ve diğerleri, 2012)

UTCI (°C)	Termal Konfor Sınıfı
46 üstü	Aşırı sıcak stres
38 ile 46 arası	Çok güçlü sıcak stres
32 ile 38 arası	Güçlü sıcak stres
26 ile 32 arası	Orta derecede sıcak stres
9 ile 26 arası	Termal stres yok
0 ile 9 arası	Hafif soğuk stresi
-13 ile 0 arası	Orta derecede soğuk stresi
-27 ile -13 arası	Güçlü soğuk stresi
-40 ile -27 arası	Çok güçlü soğuk stresi
-40 altı	Aşırı soğuk stresi

UTCI, Çizelge 5.3'te sınıflandırma kriterlerine göre termal konfor aralıklarını belirtir. Bu

sınıflandırma, çalışma alanındaki her bir nokta için Autodesk Forma aracılığıyla elde edilen UTCI verilerinin değerlendirilmesinde temel alınmıştır. Böylece, her mekânsal birimdeki termal stres düzeyi nicel olarak saptanmış; örneğin UTCI değeri +30 °C olan bir nokta “orta derecede sıcak stres”, -15 °C olan bir nokta ise “güçlü soğuk stres” sınıfında değerlendirilmiştir.



6. BULGULAR

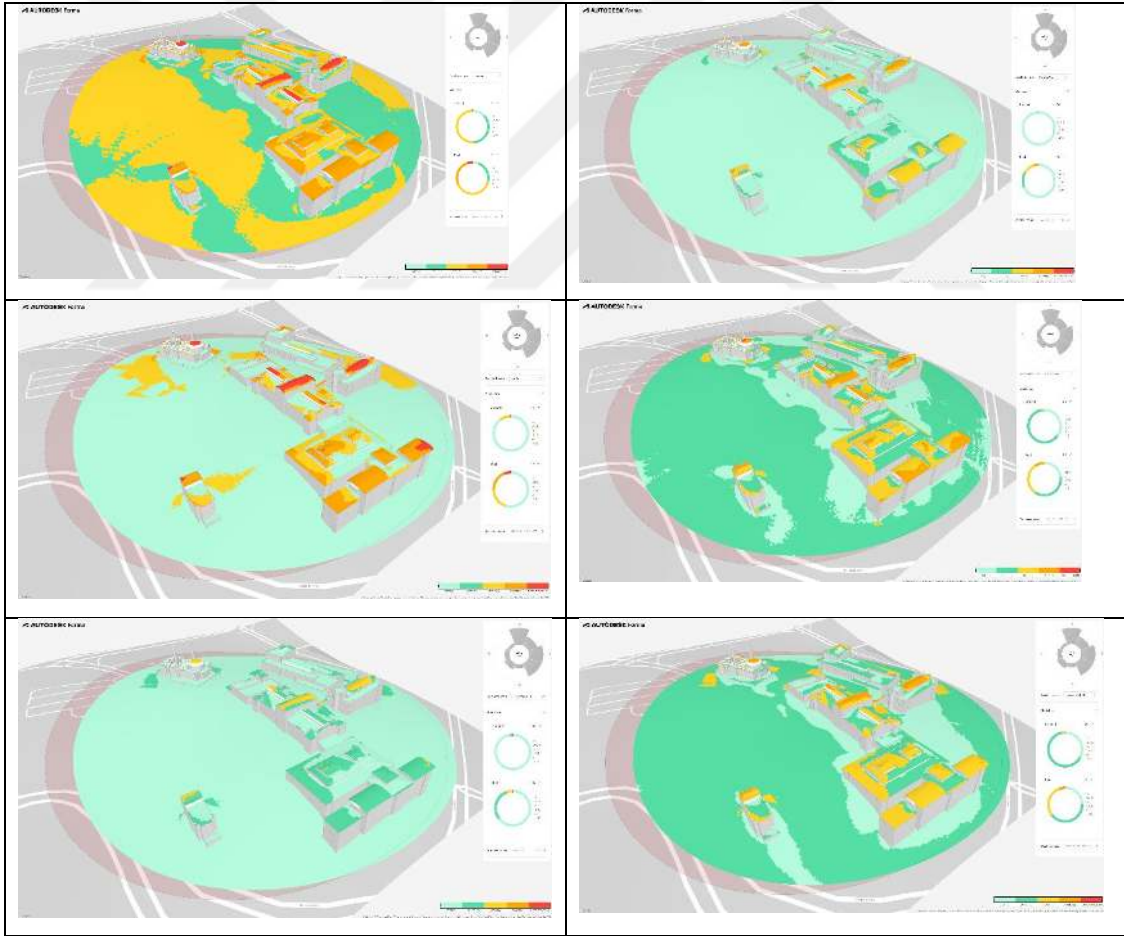
Bu bölümde, enerji etkin kampüs tasarımına yönelik olarak yürütülen BIM tabanlı morfolojik analizlerin bulguları detaylı şekilde sunulmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen sayısal veriler, kampüs ölçeğindeki morfolojik kararların çevresel performans üzerindeki etkilerini ortaya koymakta; rüzgar konforu, güneşlenme süresi, gün ışığı erişimi ve mikroklimatik koşullar gibi parametreler üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Analiz sonuçları, hem mevcut mekansal organizasyonun güçlü ve zayıf yönlerini tanımlamakta hem de gelecekteki tasarım stratejileri için yol gösterici nitelikte çıkarımlar sunmaktadır.

6.1. RÜZGAR KONFORU ANALİZ BULGULARI VE MORFOLOJİK DEĞERLENDİRME

Çalışmanın bu kısmında, Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü Tıp Fakültesi çevresindeki morfolojik düzenin rüzgar konforuna etkisi, altı farklı ulusal ve uluslararası ölçek (CSTB, Davenport, Lawson 2001, Lawson LDDC, Lawson (orijinal), NEN 8100) kullanılarak değerlendirilmiştir. Meteorolojik veriler ve rüzgar gülü analizleri, bölgeye hakim rüzgar yönünün kuzey olduğunu gösterdi; tüm simülasyonlar bu yöndeki yıllık ortalama rüzgar hızları üzerinden gerçekleştirildi. Her ölçek, rüzgar hızını ‘oturma (açık yeşil)’, ‘ayakta kalma (koyu yeşil)’, ‘Gevşek, rahat yürüme (sarı)’, ‘daha hızlı yürüme (turuncu)’ ve ‘yayalar için rahatsız edici (kırmızı)’ gibi konfor sınıflarına ayırarak zeminde ve çatıda farklı konfor haritaları üretilmiştir. Bu çerçevede, CSTB, Davenport 1979, Lawson 2001, Lawson LDDC, Lawson (orijinal) ve NEN 8100 ölçekleri temelinde zemin ve çatı teraslarındaki rüzgar konforu oranlarına odaklanılmıştır (Şekil 6.1). Ayrıca, zemin düzeyi sonuçları, morfolojik boşlukların ve bina kütlesi dizilimlerinin yüksek oranlı konfor bölgeleri oluşturduğunu ortaya koymaktadır. CSTB ölçeğine göre zeminin yüzde 89’u oturma konforunda, yüzde 11’i ayakta kalma eşiğinde kalırken; Davenport’da bu değerler yüzde 99 ve yüzde 1 olarak saptandı. Lawson 2001 ve NEN 8100 standartlarında zemin yüzde 100 oturma bandında yer alırken, Lawson LDDC’de oturma

payı yüzde 97 olarak ölçüldü. Sadece Lawson'un orijinal ölçeği zemini yüzde 49 oturma, yüzde 51 ayakta konforunda gösterdi; bu farklılık, Lawson'un hız eşiklerini daha katı tanımlamasından kaynaklanmaktadır.

Çatı yüzeyleri daha doğrudan rüzgara maruz kaldığından, tüm ölçeklerde zemin düzeyine göre belirgin konfor düşüşü yaşandı. CSTB'ye göre terasların yalnızca yüzde 55'i oturma konforuna sahipken, yüzde 39'u rahat yürüme bandında ve yüzde 6'sı yayalar için rahatsız edici eşiğe ulaşmaktadır. Davenport'da çatı terasları yüzde 60 oturma-ayakta durma, yüzde 40 rahat yürüme konforu sergilemiştir. Lawson 2001 ile NEN 8100 ölçeklerinde çatılar sırasıyla yüzde 94 ve yüzde 83 oturma-ayakta kalma, geri kalanı rahat yürüme bandındadır. Lawson LDDC'de oturma payı yüzde 65'e düşerken, Lawson orijinalinde bu oran yüzde 29'a kadar geriledi ve çatının büyük bölümü rahat veya hızlı yürüme (%66) koşullarına girdi. Bununla birlikte %5 konforsuz alan ölçüldü.



Şekil 6. 1. Altı Farklı Konfor Ölçeğine Göre Kampüsün Rüzgar Konforu Karşılaştırması

Lawson orijinal ölçeği, rüzgar hızına karşı en katı konfor eşiklerini tanımlayan ve

kullanıcı davranışlarını rüzgar koşullarına en hassas şekilde sınıflandıran yaklaşımdır. Bu nedenle, mevcut kampüs yerleşiminde zemin ve çatı teraslarında ölçülen düşük konfor oranlarını iyileştirmek üzere, Lawson'un öngördüğü sınır değerleri hedef alan mimari ve morfolojik müdahale önerileri geliştirilmiştir.

Lawson ölçeğine göre zemin düzeyinde yalnızca yüzde 49 “oturma” konforu ve yüzde 51 “ayakta kalma” koşulu saptanmış, çatı teraslarında ise yüzde 29 “oturma,” yüzde 66 “ayakta kalma” ve yüzde 5 “dolambaçlı yürüme” oranları ölçülmüştür. Bu katı konfor eşikleri, mevcut bina kütlelerinin sabit olduğu koşullarda ancak bina dış cephesine ve çevresine eklenecek pasif ve düşük düzeyde müdahalelerle iyileştirilebilir.

Öncelikle, zemin düzeyindeki açık alanlarda rüzgar hızını düşürecek rüzgar kırıcılar, bina cephelerine monte edilebilir. Bu kırıcılar, özellikle kuzey cephelerinde devamlı rüzgar akımını kırarak “oturma” konfor alanlarını genişletecektir. Cephe diplerinde ve rüzgar koridor akslarında yoğun yapraklı çalı kuşakları ve yer seviyesinde geçirgen taş döşemeleri bir arada kullanmak, zeminde ısı rahatlığı artırırken rüzgar enerjisini de zayıflatacaktır. Akademik/personel, öğrenci, hasta ve ziyaretçi sirkülasyonu yoğun olan bu alanda konumlandırılacak oturma grupları, kafeterya dışı dinlenme-bekleme alanları ve açık hava ders mekanları, yeşil-sarı bandın hüküm sürdüğü kütleler üzerinde planlanabilir. Buna ek olarak, çatı teraslarında ise mevcut geniş düzlemlerin doğrudan rüzgara maruz kalması konforu ciddi biçimde düşürmektedir. Burada, modüler rüzgar kırıcılar, siper elemanlar veya açık alanları kısmen gölgeleyip rüzgarı kırarak hafif çelik veya ahşap pergola eklemeleri yapılabilir. Bu elemanlar, kırılma etkisiyle teras “oturma” oranını Lawson ölçeğinde yükseltme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, mevcut asfalt ve beton meydanlar, yüzey yansıtıcılığını düşürüp rüzgarın ters yönde yansımaları kolaylaştırdığından; alanın bir kısmı açık renkli, geçirgen malzemelerle değiştirilerek hem termal yük hafifletilebilir hem de rüzgar pürüzlülüğü artırılabilir. Böylelikle hem zemin hem de çatı teraslarında, Lawson'un katı hız eşiklerinin üzerindeki düşük konfor koşulları pasif mimari eklentilerle aşılabilecek ve kampüs genelinde sürdürülebilir bir rüzgar konforu sağlanabilecektir.

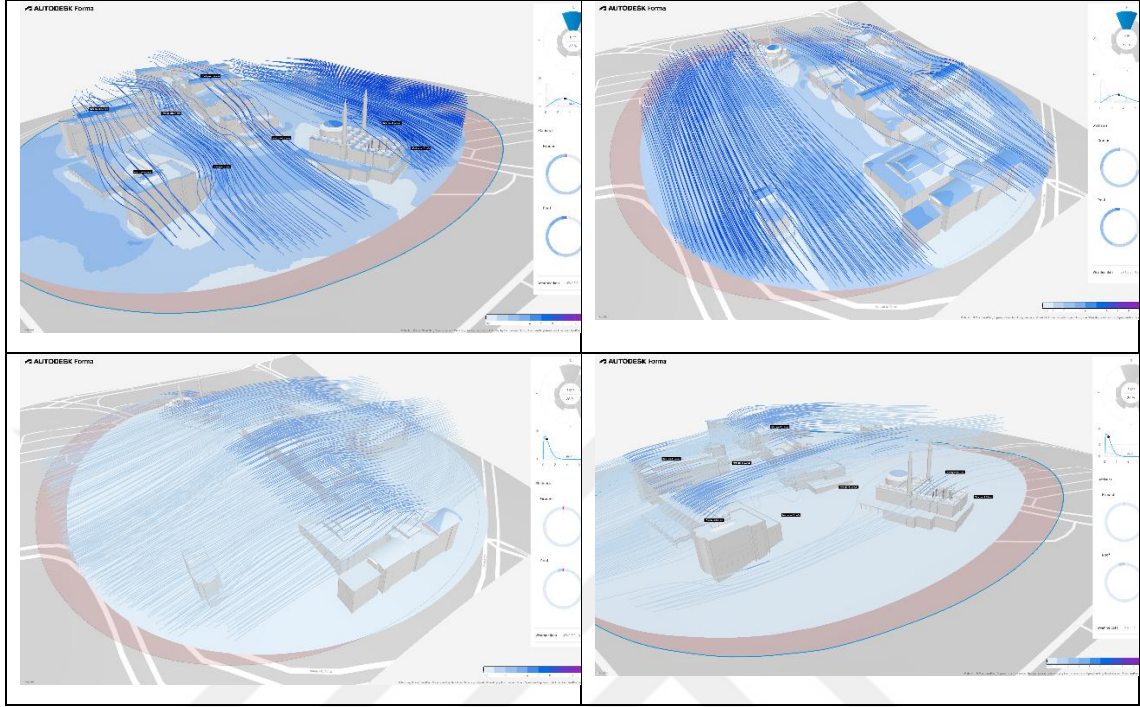
Sonuç olarak, Enerji performansı açısından söz konusu rüzgar analizinin temel çıkarımı, kampüs yerleşiminin zeminde nispeten düşük, çatıda ise yüksek rüzgar hızları oluşturmalarıdır. Zemindeki düşük hızlar, kışın ısıtma yükünü hafifletirken, yazın da pasif havalandırma potansiyelini sınırlamaktadır. Buna karşılık çatılardaki yüksek rüzgar hızları, rüzgar kaynaklı havalandırmayı etkinleştirmek için bir fırsat sunar; uygun

yerleştirilen rüzgar bacaları veya menfezler, mekanik fan ihtiyacını azaltarak havalandırma enerjisinde tasarruf sağlayabilir. Diğer yandan, çatıda oluşan yüksek hızlar kullanıcı konforunu olumsuz etkileyebileceği gibi, çatı izolasyonunda basınç farklılıkları üzerinden ısı kayıplarını artırma riski taşır. Bu nedenle rüzgar analizine dayalı enerji stratejisi, zemin seviyesinde kuzeyden gelen istenmeyen hava geçişini kontrol altına alacak pasif rüzgar kırıcıları korurken, çatı düzlemlerinde kontrollü doğal havalandırma elemanları hem havalandırma hem ısıtma-soğutma yüklerini optimize etmeye odaklanmalıdır.

6.2. HAKİM RÜZGAR YÖNLERİNİN MORFOLOJİK ETKİLERİ VE KONFOR DEĞERLENDİRMESİ

Autodesk Forma'nın Rüzgar Yönü modülü kullanılarak yapılan analiz sonucunda, Kuzey yönünden esen rüzgar yıllık %23 frekansla en baskın yöndür ve modal hızı yaklaşık 3,4 m/s olarak saptanmıştır. Bu akım, Tıp Fakültesi C-D bloklar ile Sağlık Bilimleri Fakültesi ve Morfoloji Binası'nın arasındaki dar koridorlardan geçerken Venturi etkisi oluşturarak hızını çevredeki geniş boşluklara kıyasla artırmakta, yer seviyesinde 3,4 m/s'ye ulaşan hızlarla doğal havalandırma potansiyeli ortaya koymaktadır. Ancak bu hızlanma, dar koridorlarda yüksek ve değişken rüzgar patlamalarına yol açarak kullanıcı konforunu bozabilir; ayrıca cephelerde ve pencerelerde ani basınç farklılıkları oluşturarak hava sızması ve yapı elemanlarında yorgunluk riskini artırabilir. Çatı teraslarındaki 6–7 m/s'lik yüksek rüzgar hızları, kullanıcı konforunun azalması ve güvenlik riskine yol açarak bu alanların etkin kullanımını kısıtlamakla birlikte, rüzgar bacası veya havalandırma elemanları aracılığıyla pasif havalandırma verimliliğini artırma imkanı sunar. Şekil 6.2'de, Kuzey ve Doğu yönlerinden gelen rüzgarların yıllık frekans, modal hız bakımından morfolojik akış dinamiklerini ve performans farklarını kapsamlı bir biçimde özetlemektedir. Doğu yönü ise yıllık %20 frekansla ikinci sırada yer almakta, modal hızı yalnızca 1,2 m/s dolayında kalmakta ve geniş doğu–batı akslı açıklıklardan geçerken mekan içinde nispeten homojen, düşük hızlı bir akış profili oluşturmaktadır. Bu farklılıklar, mevcut morfolojide Kuzey rüzgarının dar boşluklardan hızlanarak hem doğal havalandırma hem de yerleşkenin mikroklima koşulları üzerinde baskın rol oynadığını; Doğu rüzgarının ise düşük hızla konfor dağılımını eşitleyerek tasarımda farklı müdahale gerektirdiğini göstermektedir. Bu bağlamda Kuzey'e bakan cephelerde ve teras kenarlarında rüzgar kırıcılar kullanmak, Venturi ile artan hızları kırarak zemin “oturma”

konforunu genişletebilir. Öte yandan Doğu rüzgarının yumuşak akışını kontrollü sirkülasyona dönüştürmek için yarı geçirgen çalı kuşakları ve modüler pergolalar yer seviyesinde rüzgar hattını yönlendirerek eşit hava yenilemeyi destekleyecektir.



Şekil 6. 2. Kuzey ve Doğu Rüzgar Yönlerinin Morfolojik Akış Dinamikleri ve Konfor Performansı

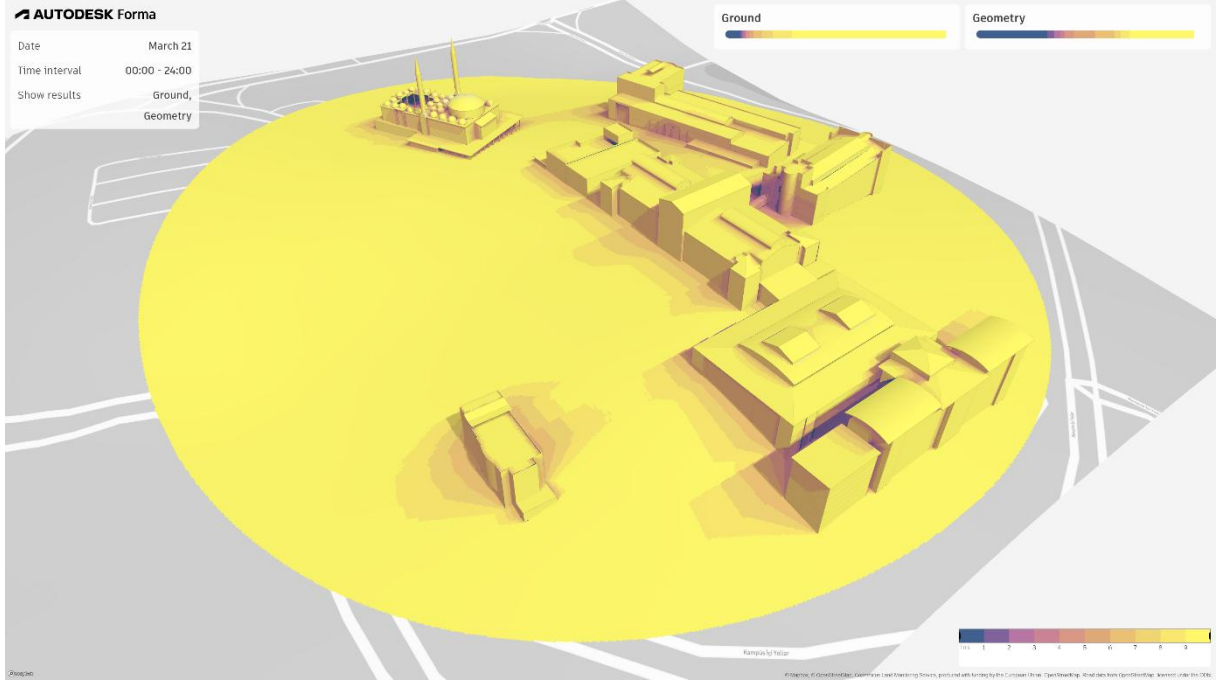
Çatı teraslarında, Kuzey’den gelen yüksek hızlara karşı ventilasyon bacalarının yanında modüler rüzgar kırıcılar ve yer örtücü bitkisel paneller birlikte uygulanarak hem hızı azaltmak hem de ısı yalıtımını güçlendirmek mümkündür. Bu stratejiler, hem pasif havalandırma hem de kullanıcı termal konforu açısından, enerji etkin kampüs tasarımının morfolojik analiz tabanlı yönelimlerine uygun, sürdürülebilir çözümler sunmayı amaçlamaktadır.

6.3. GÜNEŞLENME SÜRESİ ANALİZ SONUÇLARI VE MORFOLOJİK DEĞERLENDİRMESİ

Çalışma kapsamında ayrıca güneşlenme süresi analizi de gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede, çalışma alanı olarak seçilen kampüsün 3B modeli oluşturulmuş ve BIM tabanlı ortamda tüm yapılar ile topografya verileri modele dahil edilmiştir. Ardından, güneşlenme analizi için yılın kritik dönemlerini temsil eden dört tarih belirlenmiştir: 21 Mart (ilkbahar ekinoksu), 21 Haziran (yaz gündönümü), 23 Eylül (sonbahar ekinoksu) ve 21 Aralık (kış gündönümü). Bu tarihler, güneşin mevsimsel konum değişimlerini

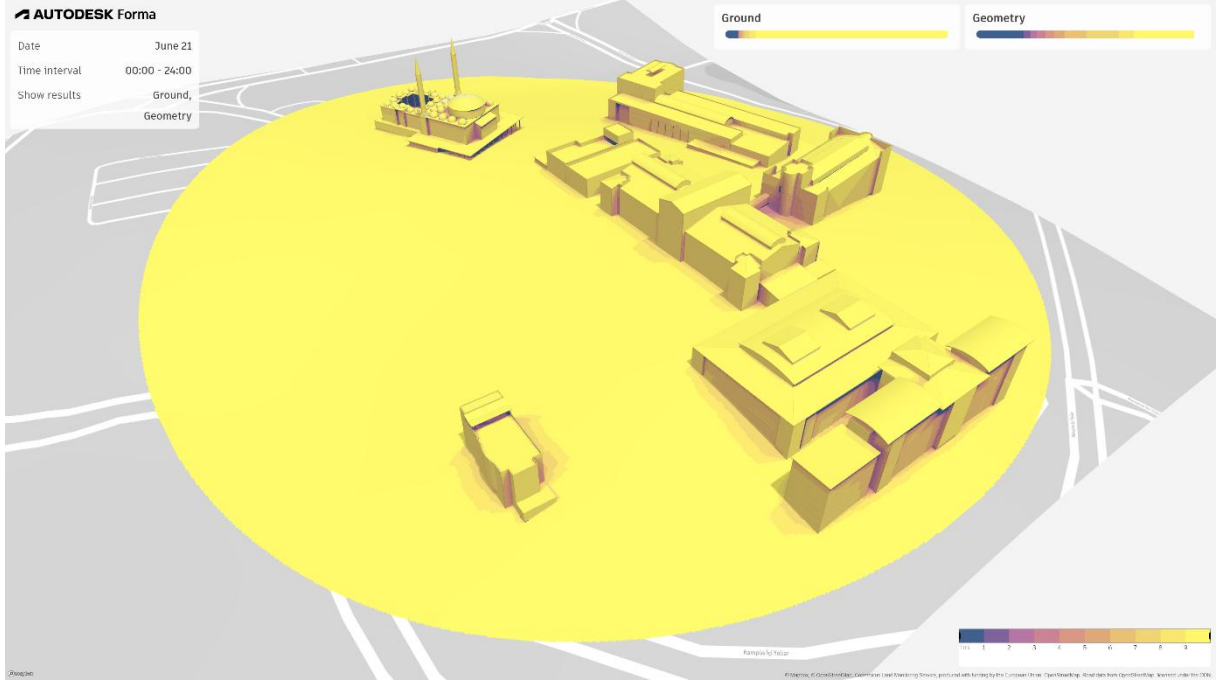
yansıtarak farklı güneş alma senaryolarını karşılaştırmaya olanak tanımaktadır. Autodesk Forma üzerinde 00:00–24:00 zaman aralığında gerçekleştirilen simülasyonlar ile her bir günde kampüsün zemin ve yapı yüzeylerinin toplam güneşlenme süreleri hesaplanmıştır. Veri toplama aşamasında, ilgili coğrafi konum için gereken güneş ışıınımı parametreleri ve meteorolojik veriler Autodesk Forma'nın veri tabanından otomatik olarak sağlanmıştır. Analiz sırasında zemin ve yapı kütleleri sonuç katmanları ayrı ayrı incelenerek hem açık alanların hem de bina cephelerinin ne kadar süreyle güneş aldığı görselleştirilmiştir. Elde edilen sonuç haritaları, her piksel için günlük toplam güneşlenme süresini saat cinsinden farklı renklerle göstermektedir (renk skalasında koyu mavi yaklaşık 1 saat, parlak sarı 9 ve üzeri saat güneş alma şeklinde). Analiz aşamaları sonunda, sayısal bulgular kampüs yerleşim planı üzerinde kritiğe tabi tutulmuş; böylece mevcut morfolojinin güçlü ve zayıf yönleri enerji etkinlik perspektifinden ortaya konmuştur.

Şekil 6.3'te 21 Mart tarihinde güneş ışınlarının geliş açısı orta değerde olduğundan, kampüs genelinde nispeten dengeli bir güneşlenme dağılımı gözlenmiştir. Açık alanlar ve güney cepheli bina yüzeyleri ortalama 6–7 saat civarında güneş alırken, kuzeye bakan cephelerde bu süre daha düşüktür. Ekinoks döneminde gündüz süresi yaklaşık 12 saat olduğundan, binaların kendi gölgeleri gün ortasında çok uzun düşmemekte, özellikle öğle saatlerinde pek çok yapı cephesi doğrudan ışıınıma maruz kalmaktadır. Ancak sabah ve akşam saatlerinde güneş açısı düşük olduğu için uzun gölgeler oluşmakta, bu da yapıların doğu ve batı yönlerindeki komşularını kısmen gölgelemektedir. Mart ayı analizine göre kampüsün merkezi açık alanlarının büyük bölümü günün önemli bir kısmında güneş almakta, bu da ilkbahar mevsiminde açık alan kullanım konforuna olumlu katkı sağlamaktadır.



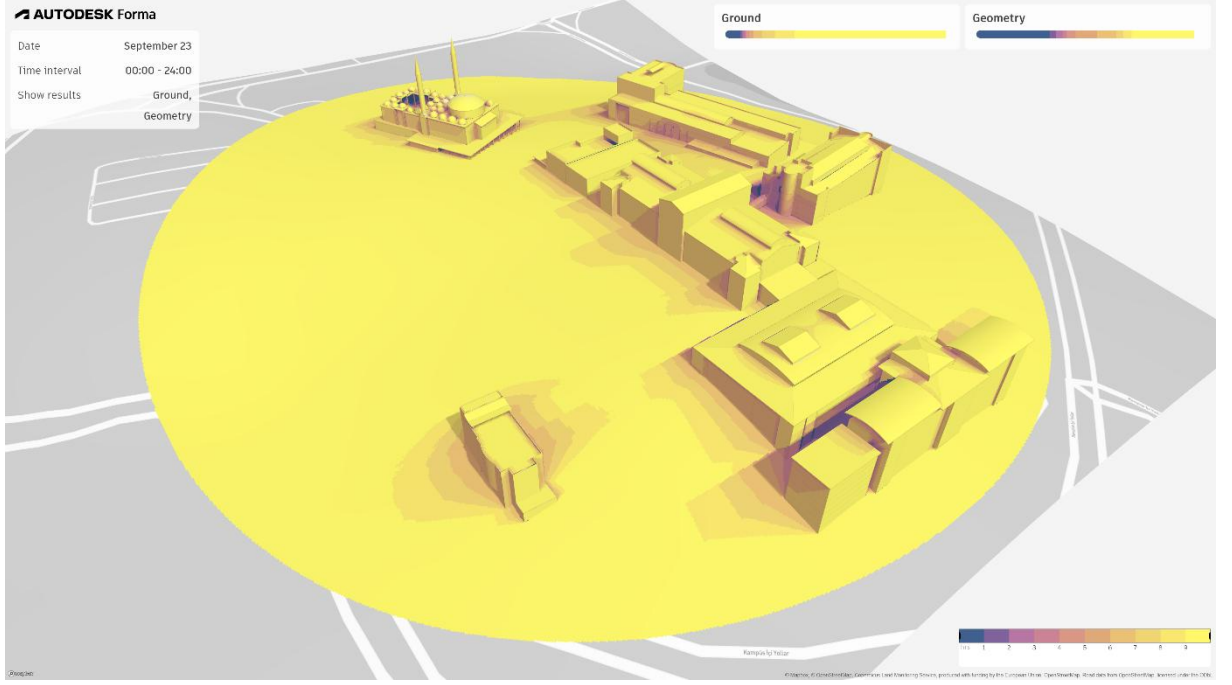
Şekil 6. 3. 21 Mart (İlkbahar Ekinoksu) Güneşlenme Analizi

21 Haziran yılın en uzun gündüz süresine (yaklaşık 15 saat) ve en yüksek güneş yükselim açısına sahip gündür. Şekil 6.4'te görüldüğü gibi bu tarihte yapılan analiz, kampüs genelinde neredeyse tüm yüzeylerin 8 saat ve üzeri doğrudan güneş ışığı aldığı geniş bir alan ortaya koymaktadır. Öğle saatlerinde güneş neredeyse tepede olduğu için binaların gölgesi kendi tabanlarının çok ötesine geçmemekte ve gölgelenen alan minimum düzeyde kalmaktadır. Özellikle geniş açıklıklar ve güney cepheler tüm gün boyunca kesintisiz güneş alırken, sadece bazı dar avlu ve geçit gibi bölgelerde kısa süreli gölgelenmeler görülmüştür. Yaz gündönümünde binaların çatıları ve doğrudan güneş alan cepheleri yoğun güneşlenmeye maruz kaldığından, aşırı ısınma riskinin yüksek olduğu tespit edilmektedir. Bu durum, pasif serinletme ve gölgeleme önlemlerinin yaz mevsiminde ne denli önemli olduğunu vurgulamaktadır. Haziran analizinde kampüs iç yolları ve açık otopark gibi zemin alanlarının da tüm gün güneş altında kaldığı, bu nedenle kentsel ısı adası etkisinin en fazla görülebileceği döneminin yaz mevsimi olduğu anlaşılmaktadır.



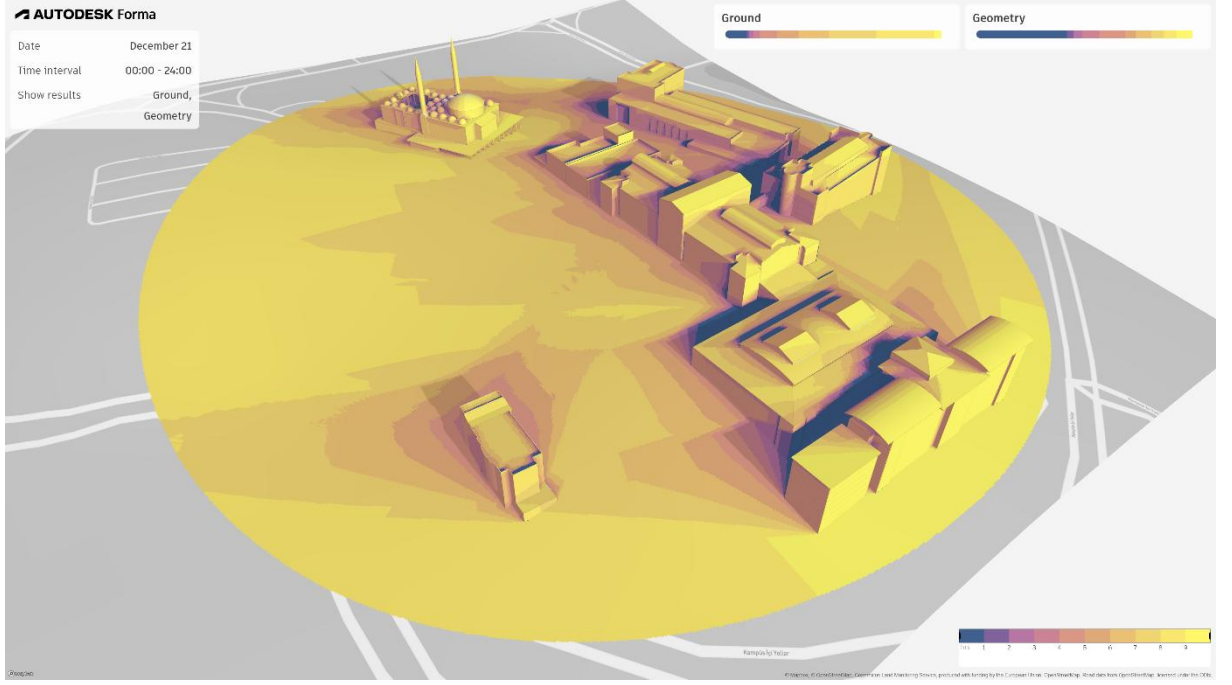
Şekil 6. 4. 21 Haziran (Yaz Gündönümü) Güneşlenme Analizi

Şekil 6.5'te görüldüğü gibi 23 Eylül'de, güneşlenme dağılımı ilkbahar ekinoksuna benzer bir seyir izlemektedir. Gündüz/gece sürelerinin eşit olduğu bu tarihte, binaların güneşe dönük cephelerinde 6–7 saat aralığında güneş alma süreleri görülmüştür. Sonbahar ekinoksunda güneş açısı Mart ayındakiyle yaklaşık aynı olduğundan, oluşan gölgelerin boyu ve yönü ilkbahar analizine oldukça yakındır. Öğle saatlerinde kampüsteki yapıların çoğunluğu tam güneş alırken, sabah erken ve akşam geç saatlerde uzun gölgeler kuzey-doğu veya kuzey-batı yönlerinde uzamaktadır. Eylül ayı bulguları, yazın yüksek güneşlenme süresinden daha düşük olmakla birlikte pek çok açık alanın hala önemli ölçüde güneş alabildiğini gösterir. Bu, sonbaharda açık alanların halen ısınma ve aydınlanma açısından verimli olabildiğini, sıcaklıkların düşmeye başlamasıyla birlikte de bu güneş kazanımının iç mekan ısıtmasına katkı sağlama döneminin yaklaştığını ima etmektedir.



Şekil 6. 5. 23 Eylül (Sonbahar Ekinoksu) Güneşlenme Analizi

21 Aralık tarihinde güneş yıl içerisindeki en düşük yükselim açısında olup gündüz süresi en kısa (yaklaşık 9 saat) düzeydedir. Şekil 6.6'da kış gündönümü analizine göre kampüs yapılarının güney cepheleri dahi en fazla 3–5 saat arası güneş alabilmekte, kuzey cepheler ise neredeyse tüm gün gölgede kalmaktadır. Alçak açıyla gelen kış güneşi, uzun gölgeler oluşturarak binaların kuzeyine düşen alanların büyük bölümünü gölgelemektedir. Özellikle yüksek blokların kuzeyinde yer alan yaya yolları ve rekreasyon alanlarının aralık ayında güneş görme oranı son derece düşüktür. Analizde dikkat çeken bir bulgu, kampüsün merkezindeki büyük açık alanın çevresindeki yapılar tarafından gölgelendiği ve öğle saatlerinde dahi bu alanın ancak kısmen güneş alabildiğidir. Bu durum, kış mevsiminde kampüs açık alanlarının soğuk kalmasına ve kullanıcı konforunun azalmasına yol açabilir. Kış analizinden çıkan önemli bir diğer sonuç ise, mimari biçimlenişin güneş kazanımına etkisidir. Genel olarak Aralık bulguları, mevcut yerleşimde bazı bölgelerin kışın neredeyse hiç güneş almadığını, dolayısıyla ısıtma yüklerinin bu bölgelerdeki yapılarda daha yüksek olacağını göstermektedir.



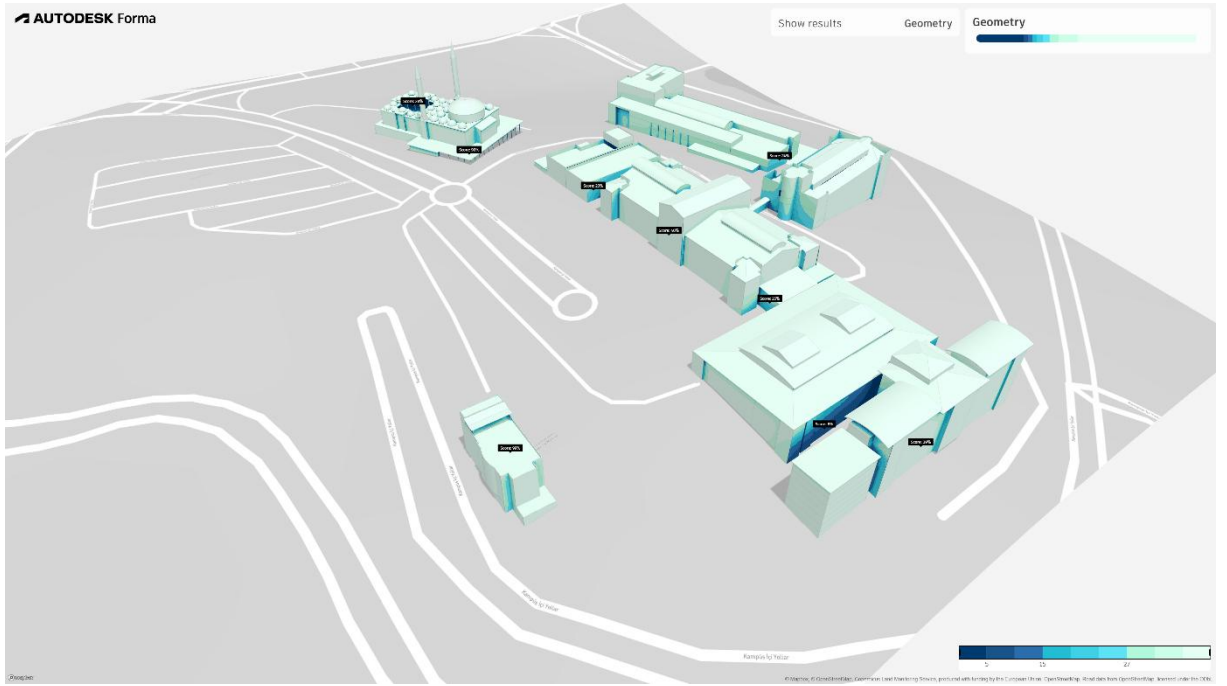
Şekil 6. 6. 21 Aralık (Kış Gündönümü) Güneşlenme Analizi

6.4. GÜN IŞIĞI ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELERİ

Tez kapsamında ayrıca gün ışığı analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamı, kampüs yerleşkesindeki yapıların doğal ışık alma performansını ölçmeyi ve bu performansın artırılmasına yönelik stratejileri içermektedir.

Şekil 6.7, kampüs içindeki yapılar üzerinde günışığı potansiyelini yansıtan yüzde değerler görülmektedir. Bu değerler, ilgili yapının cephe ve üst yüzeylerinin açık gökyüzünden doğrudan günışığı alabilme kapasitesini göstermektedir. İncelenen mevcut durumda kampüsteki yapılar arasında belirgin performans farkları olduğu saptanmıştır. Örneğin analizde nükleer tıp teras çatı yüzeyi , %99 gibi yüksek bir günışığı skoruna sahipken, Araştırma ve Uygulama Fakültesi B bloğun güney bakan cephesi yalnızca %8 civarında bir skor elde etmiştir. Bu fark, nükleer tıp yapısının konumu ve morfolojisi itibarıyla daha açık bir gökyüzü görüşüne sahip olduğunu, dolayısıyla doğal ışıktan daha fazla yararlandığını göstermektedir. B bloğun ise çevresindeki diğer kütlelerden kaynaklanan gölgelenme ya da kendi formunun yarattığı büyük kütle-derin plan gibi etkenler nedeniyle görece sınırlı günışığı aldığı söylenebilir. Nitekim tez bulgularında da benzer biçimde, yapıların birbirlerini gölgeleme durumunun gün ışığı erişimini kısıtlayan temel faktörlerden biri olduğu belirtilmiştir. Genel olarak kampüs yerleşkesinin günışığı analizi, bina yönlenmesi ve kütle yerleşiminin doğal aydınlanma üzerinde önemli etkileri

olduğunu doğrulamaktadır. Analiz sonucunda güney ve güneydoğu yönlerine doğrudan bakan cephelerin büyük oranda yüksek gün ışığı skorlarına ulaştığı, buna karşın kuzey yönelimli veya bitişik düzende konumlanmış cephelerin daha düşük skorlar aldığı görülmüştür. Bu durum, literatürde ifade edilen “güney cephelerin kışın maksimum güneş kazanımı sağladığı, doğu ve batı cephelerinin ise yazın gölgeleme gereksinimini artırdığı” bilgisini doğrudan desteklemektedir. Tez çalışmasında kampüs ölçeğinde yapılan tespitler de bu bulguyla uyumludur: “Kampüslerdeki yapı yönlenmesi, güneş ısınımı ve gün ışığı erişimi açısından en kritik parametrelerden biridir” denilerek, özellikle yönlenmenin doğal aydınlatmaya etkisine dikkat çekilmiştir.



Şekil 6. 7. Gün Işığı Potansiyeli Analizi

Bunun yanı sıra Autodesk Forma analizi, yapı kütleleri arasındaki mesafenin ve yükseklik farklarının da günışığı erişimini etkilediğini ortaya koymuştur. Kampüs içindeki yakın mesafeli ve nispeten yüksek yapı gruplarının bulunduğu bölgelerde, alt yapıların ve iç avlu gibi alanların günışığı skorlarının bariz şekilde düşük olduğu saptanmıştır. Örneğin B bloğun ve E bloğun yakın çevresinde onu çevreleyen diğer bloklar bulunduğu ve bunların bu blokların bazı cephelerine uzun süreli gölge düşürdüğü görülmektedir. Bu bulgu, tezde vurgulanan "yapı bloklarının yükseklikleri, aralarındaki mesafeler ve yönleri, gölgeleme analizleriyle optimize edilmelidir" prensibiyle doğrudan örtüşmektedir. Aksi halde, tezde de belirtildiği gibi "aşırı yoğun yapılanma, alt yapılarda

pasif stratejilerin işlevsiz hale gelmesine yol açabilir" ve gün ışığından yararlanma potansiyeli düşebilir. Dolayısıyla, kampüs planlamasında binalar arası yeterli açıklık bırakmanın ve yüksekliği kademelendirilmiş bir yerleşim kurgusu oluşturmanın doğal aydınlanma performansı için kritik olduğu, hem analizden çıkan nicel verilerle hem de akademik literatürle desteklenmiştir. Analizden elde edilen bir diğer önemli çıktı, kampüsteki bazı alanların aşırı güneşli alması durumudur. Özellikle engellenmemiş şekilde geniş gökyüzü gören cephe ve açık alanlarda gün içinde uzun saatler doğrudan gün ışığı alan bölgeler tespit edilmiştir. Bu durum her ne kadar kış aylarında ısınma ve aydınlatma açısından avantaj sağlasa da, yaz aylarında aşırı ısı kazanımı ve parlama sorunlarını beraberinde getirebilir. Tezde, doğu ve batı cephelerine yönelik gölgeleme önlemlerinin gerekliliği vurgulanmış ve aşırı güneş alan yüzeylerde güneş kırıcılar veya diğer pasif gölgeleme elemanlarının kullanılmasının önemi belirtilmiştir. Söz konusu analiz sonuçları da bu öneriyi desteklemektedir: Örneğin Forma analizinde ilahiyat camisinin yüksek skoruna sahip cephelerinin yaz döneminde aşırı ısınmaya maruz kalabileceği, bu nedenle bu cephelerde uygun gölgeleme panelleri veya cephe elemanları tasarlanmasının gerekebileceği yorumu yapılabilir. Böylelikle, güneşli potansiyeli analizinin sadece aydınlatma yeterliliği değil, aynı zamanda güneş kaynaklı ısı yükleri açısından da yol gösterici olduğu anlaşılmaktadır. Bu bakış açısı, tez çalışmasındaki "güneş kontrolü ve gölgeleme" stratejileriyle de uyumludur; analiz verileri, hangi cephe veya açık alanın ne düzeyde gölgelemeye ihtiyaç duyabileceğini niceliksel olarak ortaya koymuştur. Son olarak, güneşli analizi kampüsteki açık alanların konfor koşullarıyla ilgili ipuçları da sunmaktadır. Düzce ilinin yüksek nem oranı ve mevsimsel sıcaklık dalgalanmaları göz önünde bulundurulduğunda, özellikle yaz aylarında açık alanlarda gölgeleme sağlayan tasarımların önemi tezde belirtilmiştir. Autodesk Forma çıktıları, kampüs içindeki meydan, yaya yolu gibi açık mekanların etrafındaki yapılaşma nedeniyle gölgede kalan kısımları ile tam güneş alan kısımlarını haritalayabilmiştir. Bu sayede, peyzaj tasarımında ağaçlandırma veya saçak gibi elemanlarla nerelerde gölge sağlanması gerektiği daha somut biçimde görülebilir. Nitekim tezdeki bulgular, Düzce gibi nemli bir iklimde açık alan gölgelemesinin ve doğal hava akışının, dış mekan termal konforu için vazgeçilmez olduğunu ortaya koymuştur. Analiz sonucunda kampüsün özellikle öğle saatlerinde tamamen güneş alan açık alanlarına dair veriler, bu alanlara ağaç dikimi ya da gölgelik yapılar eklenerek mikroklimanın iyileştirilebileceğini işaret etmektedir. Bu da gösteriyor ki dijital güneşli analizi bulguları, sadece mevcut yapılar için değil, aynı

zamanda kampüs peyzajının kullanıcı konforunu artıracak şekilde düzenlenmesi için de stratejik girdi sağlayabilir.

6.5. MİKROKLİMA ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELERİ

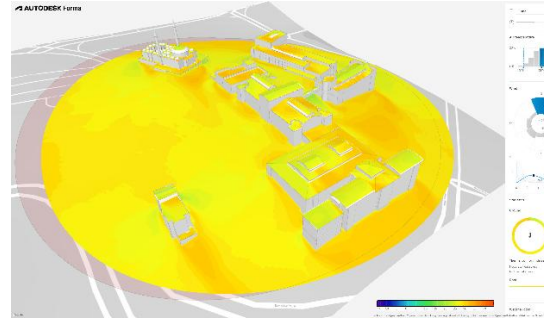
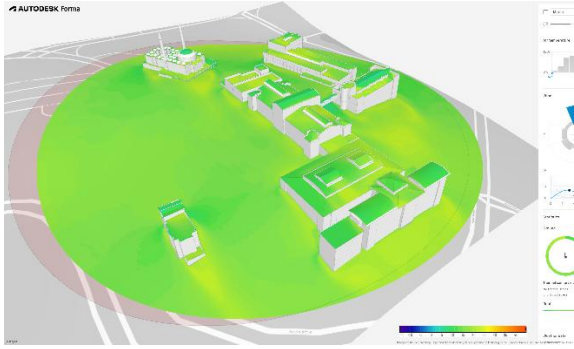
Tez çalışmasının bu kısmı mikroklima analizinden elde edilen bulguları içermektedir. Bu kapsamdaki tüm simülasyonlar Evrensel Termal İklim İndeksi UTCI'ye göre değerlendirilmiş olup yerel saat 14:00'te, hakim rüzgar yönünün Kuzey sabit kaldığı varsayımıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.8'de, Analiz sonucundan elde edilen bulguları içermektedir. Kış gündönümünde (Aralık) yapılan mikroklima analizinde, zemin düzeyindeki termal konfor dağılımı %86 oranında “termal stres yok” (UTCI 9-26 °C; no thermal stress) ve %14 oranında “hafif soğuk stresi” (UTCI 0-9 °C; Slight cold stress) olarak görülmektedir. Rüzgarın neden olduğu soğuk stres lokalize biçimde hissedilmektedir; bu alanlarda bina cephelerinde yoğun yapraklı bitki kuşağı oluşturmak veya ayarlanabilir güneş kırıcı panjurlar yerleştirmek, rüzgar hızını azaltarak termal konforu iyileştirebilir. Çatı yüzeylerinde ise sıcaklık gradyanları -5 °C'ye kadar düşerek soğuk cephe etkisi oluşturduğundan, yüksek yansıtıcılığa sahip kaplamalar kullanılması ve yalıtım uygulamaları önerilebilir.

İlkbahar ekinoksunda (Mart) zemin düzeyinde %99 oranında “termal stres yok” (UTCI 9-26 °C; No thermal stress), %1 oranında “hafif soğuk stresi” (UTCI 0-9 °C; Slight cold stress) gözlenmiştir. Arazi morfolojisi ve bina yerleşimi sayesinde, gün ortası saatlerinde neredeyse tüm açık alanlar termal konfor bandında kalmaktadır. Çatı yüzeylerinde ise ısı farkları 2 °C'yi aşmamakta, bu da geçici sosyal veya dinlenme kullanımları için elverişli bir ortam sunmaktadır.

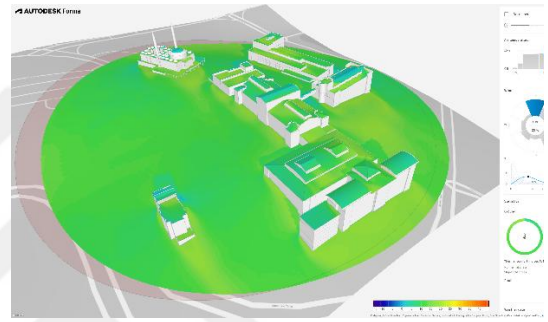
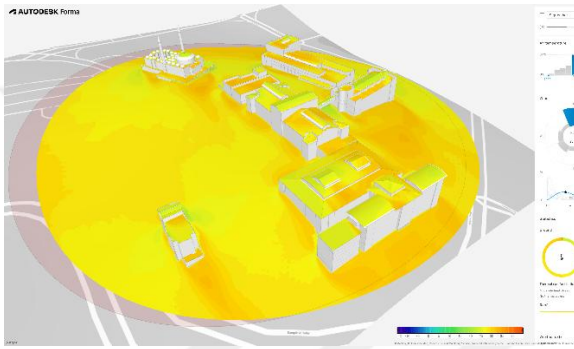
Mart

Haziran



Eylül

Aralık



Şekil 6. 8. Mikroklima Analizine İlişkin Elde Edilen Bulgular

Sonbahar ekinoksunda (Eylül) yapılan mikroklima analizine göre zemin düzeyinde %14 oranında hiç termal stres ve %85 oranında orta düzey sıcak stres tespit edilmiştir. Açık alanların büyük bölümü UTCI 26–32 °C aralığında yer aldığından, yalnızca gölgelendirme ile yetinmek yeterli olmamaktadır. Bu nedenle açık ders veya hasta yakınlarının bekleme alanlarında modüler pergolalar ve hem yatay hem dikey ayarlanabilir panjurlar kullanılarak doğrudan güneş ışını kırılabilir; serinletme sistemleri gibi aktif soğutma yöntemlerine de başvurulabilir. Ayrıca, su serpintili oturma alanları, sığ havuzlar ve yoğun bitkisel örtü gibi yeşil altyapı bileşenleriyle buharlaşma yoluyla zemin sıcaklığı düşürülebilir. Çatı yüzeylerinde ise hakim rüzgar kısmen ısı yükü azaltsa da, yaygın orta düzey sıcak stres etkisini hafifletmek için yüksek yansıtıcı kaplamalar, yalıtımlı çatı örtüleri uygulanabilir.

Yaz gündönümünde (Haziran) yapılan mikroklima analizine göre zemin seviyesinin yalnızca %15'i termal stres yok bandında kalırken, %85'i orta düzey sıcak stres aralığında yer almıştır. Bu koşullar sonbahar ekinoksundaki (Eylül) dağılımla büyük ölçüde benzerlik göstermektedir; her iki dönemde de kampüsün geniş bir kısmı UTCI 26–

32 °C bandında yoğunlaşarak orta düzey sıcak stresine maruz kalmaktadır. Bu durum, yaz öğle ve akşamüstü saatlerinde açık alanlarda kullanıcı konforunun ciddi biçimde düşebileceğini ortaya koyar. Doğrudan güneş ışını, geniş saçaklı çardaklar, modüler pergolalar ve dikey panjurlar gibi yapısal gölgelikler aracılığıyla kırılmalı; ayrıca açık renkli veya geçirgen döşemeler ve yüksek yansıtıcılı yüzeyler tercih edilerek zemin sıcaklığı azaltılabilir. Su serpintili oturma alanları, sığ havuzlar ve yoğun bitkisel örtüden oluşan yeşil altyapı elemanları, buharlaşma yoluyla ek soğutma sağlayabilir. Çatı yüzeylerinde ise yüksek yansıtıcılığa sahip kaplamalar ve pasif soğutma boruları bir arada kullanılarak ısı yük azaltılabilir. Ayrıca yoğun kullanım gerektiren noktalarda serinletme sistemleri aktif soğutma imkanı sunacaktır.

Mevsimler arasındaki karşılaştırma, kampüsün termal konfor dinamiklerinin mevsimsel farklılıklara ne ölçüde duyarlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. İlkbahar ekinoksunda, açık alanların büyük bölümü “termal stres yok” bandında kalarak en yüksek konforu sunarken; yaz ve sonbahar ekinokslarında bu konfor önemli ölçüde azalmış, kış gündönümünde ise soğuk stresi hissedilir hale gelmiştir. Kuzey doğrultusundaki hakim rüzgar koridorları, özellikle yaz ve sonbahar dönemlerinde zemin düzeyinde bir nebze de olsa ısı yükü düşürme potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle, bu rüzgar akslarına paralel şekilde düzenlenen yürüyüş yolları, dinlenme alanları ve açık hava sınıfları, doğal havalandırmayı destekleyerek termal konforu artıracaktır.

Malzeme ve bitkilendirme stratejileri de mevsimsel duyarlılık gerektirmektedir. Yaz ve sonbahar aylarında geçirgen yeşil altyapı oranının artması, açık alan yüzey sıcaklıklarını düşürebilir. Kışın ise cephe güneşlenme alanlarına bitişik olarak yerleştirilen yaprak döken ağaç kuşakları, hem doğrudan güneş ısısından faydalanmayı mümkün kılacak hem de rüzgar kırıcı işlevi görerek soğuk stresi azaltacaktır.

Çatı kullanımında da mevsimsel etkiler söz konusudur. Mart analizinin düşük termal stres seviyeleri, çatıyı mevsime özgü sosyal kullanım alanı olarak işaret ederken; Haziran ve Eylül dönemlerinde bu alanların yüzey yansıtıcılığını artıran kaplamalar ve gerekirse aktif soğutma sistemleri ile desteklenmesi gerekebilir.

6.6. BULGULARA İLİŞKİN GENEL DEĞERLENDİRME

Tez kapsamında elde edilen enerji performansı analiz sonuçları, tasarım parametrelerinin kampüsün çevresel performansını hangi yönde etkilediğini ortaya koyacak şekilde aşağıda özetlenmiştir. Rüzgar konforu, güneşlenme süresi, gün ışığı alma potansiyeli ve

mikroklima (dış ortam konforu) gibi başlıklarda mevcut kampüs morfolojisinin performansı nicel verilerle değerlendirilmiş; farklı koşullar arasındaki yüzdelik farklar ve karşılaştırmalar tespit edilmiştir. Çizelge 6.1, bu bulguların özetini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Çizelge 6. 1. Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü Pilot alanı için morfolojik analiz bulgularının özeti

Analiz Kategorisi	Önemli Bulgular ve Karşılaştırmalar
Rüzgar Konforu	Kampüs zemini genel olarak rüzgara karşı korunaklıdır; rüzgar hızları çatı seviyesinde belirginleşmektedir. Hakim kuzey rüzgarları yapı blokları arasındaki dar koridorlarda hızlanarak doğal havalandırmayı artırabilmektedir ancak bu alanlarda yaya konforu riske girmektedir. <i>Farklar:</i> Zemin alanının >%90'ı belli bir kriter gere (Davenport) konforlu kabul edilirken, daha katı bir kriter gere (Lawson) %50'nin altına düşen konforlu alan oranları görülmüştür. Bu durum, kampüste genel olarak ciddi bir rüzgar problemi olmamakla birlikte, değerlendirme ölçütünün sonuçları değiştirdiğini ve dar koridorlarda rüzgar kaynaklı rahatsızlık potansiyeli bulunduğunu göstermektedir.
Güneşlenme Süresi	Kış aylarında kampüs alanının büyük bir kısmı uzun süre gölgede kalmaktadır. Özellikle Aralık ayında bazı yapılar ve açık alanlar neredeyse hiç güneş almamaktadır (güney cephelerde bile en fazla 5 saat). Yaz aylarında ise açık alanların çoğu gün boyu (9+ saat) güneş alabildiğinden, aşırı ısınma riski ortaya çıkmaktadır. <i>Farklar:</i> Kışın düşük güneşlenme nedeniyle bazı yapıların yüksek ısıtma yükleri olacaktır; yazın ise uzun güneşlenme süreleri dış mekanlarda ısı konfor sorunlarına yol açmaktadır. Bu karşıt durum, kampüs tasarımında mevsimsel dengeyi sağlamanın önemini göstermektedir.
Doğal Aydınlatma (Güneşliği)	Kampüsteki binaların doğal güneşliği alma performansları arasında çok büyük farklar gözlemlenmiştir. <i>Farklar:</i> Bazı müstakil veya güney yönelimli binalar için güneşliği erişim skoru %99 seviyesine çıkarken, sıkışık düzenli konumlanmış veya kendi içinde derinliği olan yapılarda bu skor %8 gibi çok düşük değerlere inebilmektedir. Bu sonuç, bina konumunun ve çevresindeki engellerin (diğer yapılar, ağaçlar, topografya vb.) doğal aydınlatma üzerinde ne kadar etkili olduğunu net biçimde ortaya koymaktadır. Açık düzenlemeye sahip, engellenmemiş cepheler gün ışığını maksimize ederken, sık yapılaşma veya kendi gölgesini yaratan avlu gibi formlar doğal ışığı önemli ölçüde sınırlamaktadır.
Mikroklima (Dış Mekan Konforu)	Kampüsün mikroklimatik konfor durumu, mevsime göre ciddi farklılıklar göstermektedir. <i>Farklar:</i> İlkbahar döneminde (21 Mart) hemen tüm açık alanlar konforlu iken, sonbahar (Eylül) analizinde açık alanların yaklaşık %85'inde orta düzey sıcak stres tespit edilmiştir. Bu, yaz ve erken sonbaharda gölge sağlayıcı tasarım unsurlarının (ağaçlar, pergolalar vb.) kritik önem taşıdığını göstermektedir. Kış mevsiminde ise açık alanların %10-15'inde hafif soğuk stres görülmüştür; bu noktaların çoğu rüzgara açık alanlar olup, kışın rüzgar etkisini kesen tasarım çözümlerinin (rüzgar kırıcılar) gerekli olabileceğini işaret etmektedir. Genel olarak bu bulgular, kampüs tasarım kararlarının mevsimsel mikroklima üzerinde belirleyici olduğunu ve farklı mevsimler için farklı stratejiler geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Görüldüğü üzere her bir performans alanında tasarım kaynaklı belirgin farklılıklar saptanmıştır. Bu farklılıklar, uygun tasarım müdahaleleri ile giderilebilir ya da azaltılabilir niteliktedir. Bulgular genel olarak, kampüs morfolojisinin enerji ve çevresel performansı doğrudan etkilediğini ve tasarım parametrelerinin optimizasyonunun

önemini vurgulamaktadır. Yukarıdaki sonuçlar, mevcut kampüs tasarımının güçlü ve zayıf yönlerini enerji etkinlik perspektifinden görünür kılmaktadır. Örneğin, rüzgar analizi kampüs genelinde havanın büyük oranda durgun olduğunu ancak belirli koridorlarda rüzgarın hızlandığını; güneşlenme analizi yazın aşırı güneş alan açık alanlar karşısında kışın sürekli gölgede kalan bölgeler olduğunu ortaya koymuştur. Bu tür karşılaştırmalar, tasarımcıya hangi alanlarda iyileştirme gerektiğine dair somut veriler sağlamaktadır. Sonuç olarak kampüs ölçeğinde enerji performansı, bina dizilimi, yönelme, yükseklik, boşluk oranı gibi morfolojik kararlar tarafından şekillendirilmektedir. Bulgular, optimum enerji performansı için bu kararların bütüncül bir şekilde ele alınması ve farklı mevsim koşullarına göre dengelenmesi gerektiğini açıkça göstermektedir.

7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, “*Kampüs ölçeğinde morfolojik kararlar enerji etkin tasarımı nasıl şekillendirir ve BIM tabanlı analizler bu süreçte ne kadar etkilidir?*” sorusuna yanıt aranmıştır. Araştırma amacı, Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü örneğinde, yapı çevrenin biçimsel özelliklerini sayısal simülasyonlarla analiz ederek enerji etkin tasarım ilkelerini ortaya koymaktır. Başlangıçta belirlenen hipotezler, yönlenme, yapı yoğunluğu, açık-yeşil alan oranı gibi morfolojik faktörlerin kampüs iklimini ve dolaylı olarak enerji tüketimini etkilediği; BIM tabanlı araçların da bu etkileşimi görünür kılarak tasarım sürecine entegre edilebileceği yönündeydi. Çalışmanın bulguları bu hipotezleri büyük oranda doğrulamıştır. Kampüs morfolojisinin rüzgar akışından güneşlenme sürelerine, gün ışığı dağılımından dış mekan sıcaklıklarına kadar pek çok parametreyi ölçülebilir biçimde yönlendirdiği ortaya konmuştur. Özellikle yönlenme, bina blok yüksekliği ve aralarındaki mesafenin, enerji performansı açısından kritik iklimik etkiler doğurduğu gösterilmiştir. Bu sonuç, kampüs tasarımının sadece estetik ve işlevsel bir düzenleme olmadığına, aynı zamanda bir enerji denklemi içerdiğine işaret etmektedir. Araştırma sorumuzun ikinci kısmı olan BIM tabanlı analizlerin işlevselliği konusunda ise elde edilen deneyim son derece olumludur: Autodesk Forma ve benzeri dijital platformlar kullanılarak, karmaşık çevresel simülasyonlar entegre bir model üzerinden gerçekleştirilmiş; böylece alternatif tasarım senaryolarının nesnel verilerle kıyaslanması mümkün hale gelmiştir. Bu yaklaşım, geleneksel tasarım süreçlerinde eksik kalan “*veriye dayalı karar verme*” kültürünü güçlendirmektedir. Sonuç olarak, tez çalışmamızın araştırma sorusuna verilecek yanıt özetle şudur: Kampüs ölçeğinde morfolojik kararlar, enerji etkinliğini belirleyen çevresel koşulları anlamlı biçimde etkilemektedir ve BIM tabanlı analiz araçları bu etkileri görünür kılarak tasarımcılara yol göstermede son derece etkilidir.

Çalışmada yöntem olarak literatür taraması, sayısal modelleme ve simülasyon analizleri iç içe geçecek şekilde kullanılmıştır. Öncelikle enerji etkin tasarım, kent ve kampüs morfolojisi ile BIM teknolojilerine dair kapsamlı bir kavramsal çerçeve oluşturulmuş; bu doğrultuda bir metodoloji geliştirilmiştir. Uygulama adımlarında Düzce Üniversitesi Konuralp Kampüsü’nden seçilen yaklaşık 0,2 km²’lik pilot alanın (Tıp Fakültesi ve çevresi) mevcut durumu detaylı biçimde belgelenmiştir. Kampüs binalarının dijital modeli oluşturulmak üzere üniversiteden elde edilen mimari projeler, uydu görüntüleri ve

arazi verileri kullanılmıştır. Autodesk Revit yazılımında 3B modelleme yapılarak tüm yapı kütleleri, topografya ve açık alanlar gerçeğe uygun biçimde dijital ortama aktarılmıştır. Daha sonra model, BIM tabanlı bir karar destek platformu olan Autodesk Forma'ya entegre edilmiştir. Bu platform üzerinden kampüsün rüzgar yönü ve hızı, günlük güneşlenme süresi, cephelerin gün ışığı alma kapasitesi ve dış mekan ısı stresine dair simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar için gerekli iklimsel girdiler (Düzce'ye ait yıllık meteorolojik veriler, güneş radyasyonu parametreleri vb.) Forma'nın veri tabanından otomatik çekilmiş ve modelimize uygulanmıştır. Analizler dört kritik tarih (21 Mart, 21 Haziran, 23 Eylül, 21 Aralık) için yinelenerek mevsimsel karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar harita ve grafikler şeklinde değerlendirilmiş; her bir simülasyon çıktısı morfolojik göstergelerle birlikte yorumlanmıştır. Örneğin rüzgar simülasyonu çıktıları, binaların konum ve yükseklikleriyle ilişkilendirilerek analiz edilmiş; gün ışığı çıktıları, yapıların yönlenmesi ve blok aralıkları bağlamında ele alınmıştır. Bu sayede, ham veriden tasarım anlamı çıkarma süreci mümkün olmuştur. Yöntemsel olarak, nicel analiz sonuçlarının nitel gözlemlerle desteklenmesine özen gösterilmiştir. Yerinde yapılan saha gözlemleri, simülasyonların mantık kontrolü açısından faydalı olmuş; örneğin belirli bir avluda gün boyu gölge olduğu simülasyondan görüldüğünde, bunun gerçek hayattaki karşılığı fotoğraflarla doğrulanmıştır. Böylelikle elde edilen veri seti hem dijital doğruluk hem de gerçeklik kontrolü açısından sağlamlaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan yöntem, Türkiye'deki benzer çalışmalar için bir şablon niteliğinde olabilir. Karmaşık bir kampüs yapısını anlamak için BIM destekli, çok katmanlı bir analiz yaklaşımı uygulanmıştır. Veri setimizin bileşenleri (mimari çizimler, iklim verileri, saha notları) bir araya getirilerek enerjiyi merkeze alan kapsamlı bir sorgulama gerçekleştirilmiştir. Bu, geleneksel tek boyutlu bina enerji simülasyonlarından farklı olarak, morfoloji merkezli bir çevresel performans değerlendirmesi olarak nitelendirilebilir. Sonuç olarak izlenen yöntem, araştırma sorularımızı yanıtlamaya uygun ve sağlam bir çerçeve sunmuştur. Hem sayısal hassasiyet hem de uygulama gerçekliği barındıran bir analiz süreci tamamlanmıştır.

Çalışmanın temel bulguları, kampüs ölçeğinde enerji etkinlik perspektifinden önemli boyutlar içermektedir. Nicel çıktılar özetlenecek olursa: (1) *Rüzgar analizi*, zeminde korunaklı fakat çatılarda rüzgara açık bir çevre olduğunu, kuzey rüzgarlarının dar koridorlarda hızlanıp doğal havalandırma potansiyeli getirdiğini ancak bu esnada konfor riskleri oluştuğunu göstermiştir. Zemin alanının %90'ından fazlası bir ölçüte göre

konforlu iken (örn. Davenport), en katı ölçüte göre (Lawson) bu oran %50'nin altına düşebilmektedir. Bu, rüzgar konforunun değerlendirme kriterine duyarlı olduğunu ama genel olarak kampüsün büyük kısmında *rüzgar probleminden ziyade sakin hava sorunu* olabileceğini düşündürmektedir. (2) *Güneşlenme süresi analizleri*, kış mevsiminde pek çok alanın uzun süre gölgede kaldığını (güney cephelerde dahi maksimum 5 saat güneş), yazın ise açık alanların büyük kısmının 9+ saat güneş alabildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, kışın bazı binaların ısıtma ihtiyacının yüksek olacağına, yazın ise kampüs genelinde aşırı ısınma potansiyeline işaret etmektedir. (3) *Gün ışığı performansı*, kampüsteki binalar arasında %99'den %8'ye varan skor farkları belirlemiştir. Bu farklar, binaların konumu ve çevresel engelleriyle doğrudan ilişkilidir; örneğin serbest duran ve güney ağırlıklı cephelere sahip yapılar çok yüksek doğal aydınlatma alırken, sıkışık düzende veya kendi içinde avlulu yapılar düşük doğal ışık seviyelerinde kalmaktadır. (4) *Mikroklima (UTCI) analizi*, Mart ayında neredeyse tüm açık alanların konforlu olduğunu, ancak Haziran ve Eylül'de %85 oranında orta sıcak stres yaşandığını göstermiştir. Bu da yaz ve erken sonbaharda kampüs açık alanlarında gölgeleme/serinletme ihtiyacının şart olduğunu sayısal olarak kanıtlamaktadır. Kışın ise alanların %10-15'inde hafif soğuk stresi görülmüş, bunların çoğunlukla rüzgara maruz kalan noktalar olduğu anlaşılmıştır. Nitel olarak bu bulguların anlamı şudur: Kampüs tasarımında yapılan her tercih (bina yüksekliği, yerleşim deseni, açık alan boyutu vb.), farklı mevsim ve senaryolarda farklı kazanım ve kayıplar yaratmaktadır. Örneğin mevcut durumda kampüsün ortasındaki geniş meydan alanı, bahar ve yazın ferahlatıcı bir açıklık sunsa da kışın soğuk bir boşluk haline gelmektedir; buna karşılık binaların sık yer aldığı kısmı kışın rüzgardan korunaklı iken yazın hava akımının zayıf olduğu bir bölgeye dönüşmektedir. Bu gibi örnekler, enerji etkin kampüs tasarımının dinamik bir optimizasyon problemi olduğunu ortaya koyar. Tek bir “ideal” form yoktur; önemli olan, yılın büyük bölümünde en dengeli performansı verecek formu ve stratejileri bulmaktır.

Bu tez çalışması, tasarım süreçleri için bazı öneriler sunmaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasının bulguları, Türkiye'deki üniversite kampüslerinin planlanması ve mevcut kampüslerin iyileştirilmesi açısından bazı açılardan yararlı olabilecek hususları içermektedir. Türkiye'de son yıllarda birçok üniversite “Yeşil Kampüs” veya “Sürdürülebilir Kampüs” girişimleri başlatmış; enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kullanımı, atık ve su yönetimi gibi alanlarda projeler geliştirmiştir. Ancak, fiziksel planlama ve tasarım aşamasında enerji etkinliğin sağlanması konusu halen gelişmeye

açıktır. Bu çalışma, Düzce Üniversitesi örneğinde, kampüs tasarım kararlarının enerji performans üzerindeki etkilerini somut verilerle ortaya koyarak bu boşluğu doldurmaya katkı sunmaktadır. Sonuçlara bakıldığında, Türkiye’de benzer iklim kuşağındaki kampüsler için birkaç kritik çıkarım yapılabilir. Buna göre, kampüs planlamasında rastgele parselasyon veya tepeden inme yapılaşma yerine, iklim verilerine dayalı morfolojik planlama kullanılmalıdır. Örneğin Düzce’de hakim kuzey rüzgarına göre yapı bloklarının konumlandırılması, kışın soğuk esintileri keserken yazın serinletici esintileri koruyacak şekilde olmalıdır. Akdeniz iklimindeki bir kampüste ise morfoloji, yaz mekemlerini içeri alacak ve gölgeyi maksimize edecek tarzda düzenlenmelidir. Bu tür iklim odaklı planlama, henüz pek çok kampüste yapılmamaktadır; bulgularımız bunun gerekliliğini net biçimde göstermiştir. Diğer taraftan, kampüs ölçeğinde pasif stratejiler (güneş kontrolü, doğal havalandırma, ısı kütlesi kullanımı vb.) entegre edilmelidir. Çalışmamız, uygun morfolojinin kışın ısıtma ve yazın soğutma yüklerini azalttığını ortaya koymuştur. Türkiye’nin ulusal enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda, kamu yapıları ve özellikle üniversiteler örnek teşkil etmelidir. Bu nedenle yeni kampüs projelerinde binaların oryantasyonu, kompaktlık düzeyi ve açıklık oranları pasif kazanımları maksimize edecek şekilde tasarlanmalıdır. Mevcut kampüslerde de, küçük ölçekli müdahalelerle (ör. gölgeleme elemanları, cephe iyileştirmeleri) pasif performans artırılabilir. Ayrıca, bulgular, mevcut iklim koşullarında dahi yaz aylarında açık alan konforunun sorunlu olduğunu göstermiştir. İleride aşırı sıcakların artacağı göz önüne alınırsa, kampüslerin iklim değişikliğine uyumlu hale getirilmesi elzemdir. Türkiye’de yükseköğretim kurulunun son dönem stratejilerinde sürdürülebilir, doğayla uyumlu kampüsler hedeflenmektedir. Bu hedef, somut olarak kampüslerde yeşil alanların artırılması, geçirgen yüzey oranlarının yükseltilmesi, mümkünse binaların uygun cephelerine yeşil duvar/çatı uygulamaları yapılması anlamına gelir. Çalışmamızda önerilen ağaçlandırma ve malzeme değişimi gibi adımlar, tam da bu uyumun parçasıdır. Ayrıca, 7552 sayılı İklim Kanunu (02.07.2025 kabul, 09.07.2025 RG No: 32951) sera gazı emisyonlarının azaltılmasına, emisyon ticaret sisteminin kurulmasına, sınırda karbon düzenleme mekanizmasına ve yeşil finansman araçlarına ilişkin temel ilke ve kuralları belirlemektedir. Kanunun yürürlüğe girmesiyle birlikte, kamu, üniversite ve özel tüm aktörlerin iklim hedeflerine uyum sağlaması hukuki bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışmanın kapsamı içinde, özellikle mikroklima ve pasif iklimlendirme stratejilerinin uygulama alanları açısından İklim Kanunu’nun Madde 1 (amaç ve kapsam) ve Madde 9 (Emisyon Ticaret Sisteminin kurulması ve tahsisatların esasları) hükümleri yol gösterici

olabilir (7552 sayılı İklim Kanunu, 2025). Son olarak, tez boyunca gösterildi ki karar vericiler (üniversite yönetimleri, planlamacılar, mimarlar) doğru araçları kullandıklarında kararlarının sonucunu ölçebilmektedir. Türkiye’de planlama süreçlerinde BIM tabanlı simülasyonların yaygınlaşması, karar alma kültürünü dönüştürecektir. Özellikle üniversite kampüsleri gibi büyük yerleşkelerde, yeni bir fakülte binası inşa edilirken bile tüm yerleşkeye etkisi değerlendirilebilir. Bu çalışma, Düzce Üniversitesi yönetimi için kampüste hangi noktaların problemli olduğunu (rüzgar tüneli, gölge alan, sıcak cephe vs.) açıkça göstermiştir. Bu tür bilgiler ışığında, kaynaklar en verimli şekilde kullanılabilir (örneğin ağaç dikimi için öncelikli noktalar belirlenebilir). Dolayısıyla, kanıta dayalı planlama yaklaşımı, ülkemizdeki kampüs yönetimlerinin benimsemesi gereken bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu araştırmadan elde edilen bilgiler ışığında, hem uygulayıcılar (politikacılar, planlamacılar, kampüs yöneticileri) hem de akademik camia için çeşitli öneriler sunulabilir. Bu öneriler, enerji etkin kampüs tasarımının yaygınlaştırılması ve geliştirilmesine yöneliktir. Çalışmanın bulgularından hareketle, politika yapıcılar ve kampüs yöneticileri için 4 farklı politika önerisi sunulmuştur. (1) Yükseköğretim Kurulu ve ilgili bakanlıklar, yeni üniversite kampüsü gelişimleri için sürdürülebilir tasarım rehberleri hazırlamalıdır. Bu rehberlerde kampüs morfolojisine dair rüzgar koridoru bırakma, güneş yönlenmesi, gölgelendirme oranı, yeşil alan yüzdesi gibi somut kriterler yer almalıdır. Örneğin, “Kuzey yönünde yapı bloklarının kesintisiz dizilimi yapılmamalı, hakim rüzgar geçişine izin verecek %X oranında açıklık bırakılmalı” gibi maddeler standardize edilebilir. Böylece tasarım aşamasında enerji verimliliği hedefleri netleşecektir. (2) Kamu eliyle yapılan kampüs projelerinde BIM tabanlı enerji simülasyonları şart koşulmalıdır. Proje onay süreçlerinde, tasarım ekiplerinden rüzgar, gün ışığı, güneş ve ısıtma-soğutma yüklerine dair simülasyon raporları istenebilir. Bu, uygulamada henüz yaygın olmayan bir yöntemdir; ancak ihale şartnamelerine eklenecek bu gereklilik, tasarım firmalarını da kapasite geliştirmeye teşvik edecektir. Uzun vadede, Türkiye’de tasarım kültürü veriye dayalı hale gelecek ve kampüslerimizin performansı objektif olarak denetlenebilecektir. (3) Halihazırda kullanılan kampüs alanları için enerji verimliliği iyileştirme master planları hazırlanmalıdır. Bu planlar, bizim çalışma alanımızda olduğu gibi problemli noktaları saptayıp (ör. Düzce’deki merkezi meydanın kışın soğuk oluşu, bazı binaların aşırı gölgelenmesi gibi) bunlara yönelik müdahaleleri takvimlendirmelidir. Örneğin, “2025-2030 yılları arasında kampüs içi ağaçlandırma oranı

%20'den %30'a çıkarılacak, X Meydanı'na yarı açık gölgelik yapılacak, Y fakültesinin kuzey cephesine rüzgar kıran paneller eklenecek" gibi somut adımlar belirlenmelidir. Bu sayede, kampüslerimiz kısa vadede daha konforlu ve enerji etkin hale gelecektir. (4) Üniversitelere yönelik performans değerlendirmelerine enerji ve sürdürülebilirlik kriterleri eklenmelidir. Örneğin, YÖK'ün veya TÜBİTAK'ın destek programlarında "yeşil kampüs" başlığı altında fonlar ayrılabilir, başarılı uygulamalar ödüllendirilebilir.

Araştırma kapsamında ortaya çıkan deneyimler doğrultusunda gelecekte yapılacak akademik çalışmalara ilişkin öneriler de geliştirilmiştir: (1) Bu tez, mimarlık, şehircilik, meteoroloji ve bilgisayar destekli tasarım disiplinlerinin kesişiminde bir çalışma üretmiştir. Akademisyenler, büyük ölçekli tasarım problemlerini disiplinler arası ekiplerle ele almalıdır. Örneğin bir üniversite kampüsünün sürdürülebilirliği konusu, mimarlar, iklim bilimciler, enerji mühendisleri ve hatta psikologların (kullanıcı memnuniyeti için) birlikte çalışmasını gerektirir. TÜBİTAK projelerinde bu tür ekipler desteklenmeli; tez çalışmaları da tek bir dala hapsolmadan geniş bir bakış açısıyla planlanmalıdır. (2) Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde kampüs tasarımı konusunda daha fazla ampirik araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu tez Düzce'de odaklanmıştır; benzer şekilde Doğu Anadolu'da kış koşullarına, Akdeniz'de yaz koşullarına, İç Anadolu'da gündüz-gece sıcaklık farklarına vurgu yapan çalışmalar yapılmalıdır. Böylece bölgesel tasarım rehberleri oluşturulabilir. Akademik çevre, özellikle iklim değişikliği projeksiyonlarını da hesaba katarak geleceğin tasarım kriterlerini şimdiden tanımlamalıdır. Örneğin 2050 yılında İzmir'de bir kampüsün karşılaşacağı iklimsel zorluklar neler olacaktır ve bugünden nasıl önlem alınabilir? Bu tip sorular, akademide yeni araştırma konuları olarak şekillenmelidir. (3) BIM'in bir sonraki adımı olarak görülen Dijital İkiz (Digital Twin) teknolojileri, kampüslerin gerçek zamanlı izlenmesi ve optimize edilmesinde büyük potansiyel taşımaktadır. Araştırmacılar, kampüs binalarına sensörler yerleştirerek anlık enerji tüketimi, sıcaklık, nem verilerini BIM modelleriyle entegre edebilir; böylece canlı bir geribildirim sistemi kurulabilir. Bu, sürdürülebilirlik hedeflerini tutturmada devrimsel bir adım olacaktır. (4) Son olarak, enerji etkin tasarım ve BIM entegrasyonu konuları mimarlık ve planlama bölümlerinin müfredatlarında daha fazla yer almalıdır. Genç tasarımcıların mezun olurken bu araçları kullanma yetkinliği kazanması, gelecekte sürdürülebilir tasarım pratiklerinin standart hale gelmesini sağlayacaktır. Üniversiteler içindeki sürdürülebilirlik komisyonları veya öğrenci toplulukları teşvik edilerek, kampüs içinde yaşayan kullanıcıların da bu

dönüşüme katılması sağlanmalıdır. Örneğin, öğrencilerin enerji tasarrufu davranışları (ışık kapatma, iklimlendirme kullanımı vb.) da genel enerji performansını etkiler; bu konuda farkındalık kampanya ve eğitimleri düzenlenebilir. Bu sayede, fiziksel iyileştirmelerin yanı sıra kullanıcı davranışlarıyla da desteklenen bütüncül bir verimlilik kültürü oluşturulabilir.

Bu çalışmanın sınırlılıkları şunlardır: Çalışmada kullanılan yazılımların, özellikle Autodesk Revit ve Autodesk Forma gibi BIM tabanlı simülasyon araçlarının, performans analizi doğruluğu, parametrik kısıtları ve hesaplamalarında kullandıkları varsayımlar nedeniyle belli kısıtları bulunmaktadır. Simülasyonların çıktıları, kullanılan iklim verileri, varsayılan kullanıcı davranışları ve materyal özellikleri gibi standart veri setlerine dayanmakta olup, yerel mikro iklim koşulları ve gerçek kullanıcı davranışlarıyla her zaman tam örtüşmeyebilir. Ayrıca, varyasyon sayısının sınırlı tutulması nedeniyle morfolojik alternatiflerin tüm potansiyel çeşitlilikleri kapsamlı olarak incelenememiştir. Bununla birlikte, çalışmada binaların cephe malzemeleri ile pencere boyutu, oranı ve yerleşimi gibi mimari detaylara yer verilmemiş, modelleme süreci yapı kütleleri ve yönlendirmeleri gibi makro morfolojik faktörlere odaklanmıştır. Oysa cephe malzemelerinin ısı geçirgenliği ve pencere açıklıklarının doğal aydınlatma ve havalandırma üzerindeki etkileri, enerji performansı açısından önemli parametrelerdir. Bu nedenle çalışmanın bulguları, seçilen parametreler ve belirli bir soyutlama düzeyi çerçevesinde değerlendirilmelidir. İleride gerçekleştirilecek çalışmaların daha geniş varyasyonlarla, daha hassas mikro yapı bileşenlerini de kapsayacak biçimde kurgulanması, enerji etkin kampüs tasarımı konusundaki bilgi birikimini derinleştirecektir. Son olarak, çalışmada rüzgar yönü için kullanılan varsayımsal referans ekseninin, gerçek hava akış yönünden farklı olabileceği vurgulanmalıdır. Autodesk Forma platformundan elde edilen meteorolojik verilerde bir sapma söz konusu olabilir. Dolayısıyla rüzgar konforu analizleri ve haritaları, referans alınan eksen ile gerçek yön arasında gerçekleşmiş olabilecek bu farklılığı göz önünde bulundurarak yorumlanmalıdır. Bu durum, simülasyon sonuçlarının genelleştirilebilirliğini bir ölçüde kısıtlayabilir. Gelecek çalışmalarda, yerel meteorolojik istasyon ölçümleri kullanılarak analizlerin güvenilirliği artırılabilir.

8. KAYNAKLAR

- Achieving Sustainable Urban Growth on a Global Scale. (2024, 25 Ocak). Erişim adresi: [https://environment.yale.edu/news/article/achieving-sustainable-urban-growth-global-scale] (Erişim tarihi: 6 Nisan 2025).
- Aghamolaei, R. ve Fallahpour, M. (2023). Strategies towards reducing carbon emission in university campuses: A comprehensive review of both global and local scales. *Journal of Building Engineering*, 76, 107183.
- Armson, D., Stringer, P. ve Ennos, A. R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3), 245-255.
- Attia, S., Hensen, J. L. M., Beltrán, L. ve De Herde, A. (2012). Selection criteria for building performance simulation tools: Contrasting architects' and engineers' needs. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(3), 155-169.
- Autodesk. (2025a). Autodesk Forma. Erişim adresi: [https://www.autodesk.com/products/forma/overview] (Erişim tarihi: 14 Nisan 2025).
- Autodesk. (2025b). Autodesk Forma | *Mimarlar için Çevresel Etki Analizi*. Erişim adresi: [https://www.autodesk.com/tr/products/forma/environmental-impact-analysis] (Erişim tarihi: 14 Nisan 2025).
- Autodesk Forma. (2025). *Autodesk Forma | Forma Login | Software Price & Buy*. Erişim adresi: [https://www.autodesk.com/products/forma/overview] (Erişim tarihi: 14 Nisan 2025).
- Azeez, A. (2023). *Realize the potential of Forma's solar energy analysis. Autodesk Forma*. Erişim adresi: [https://blogs.autodesk.com/forma/2023/10/12/realize-the-potential-of-formas-solar-energy-analysis] (Erişim tarihi: 14 Nisan 2025).
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252.

- Badur, Meryem, Tanrıverdi Kaya, A. ve Bal Koçyiğit, F. (2024). Urban Morphology and Energy-Efficient Design. İçinde Z. Ö. Parlak Biçer (Ed.) Research And Evaluations In The Field Of Architecture, (1. bs. ss. 97-124), Gece Kitaplığı.
- Badur, Mesut. (2023). Does Trade Integration Reorient Income Inequality? Evidence from the Post-Soviet Countries. *Management and Accounting Review*, 22(2).
- Baş, H., Andrianne, T. ve Reiter, S. (2024). City configurations to optimise pedestrian level ventilation and wind comfort. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105745.
- Batur, T., Arslan, Z. F. ve Altın, N. (2023). Düzce İli Fındık Bahçelerinde Tarımsal Uygulamalar ve Üreticilerin Pestisit Kullanım Durumu. *Akademik Ziraat Dergisi*, 12(Özel Sayı), 261-270.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. ve GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-428.
- Berges-Alvarez, I., Martínez-Rocamora, A. ve Marrero, M. (2024). A Systematic Review of BIM-Based Life Cycle Sustainability Assessment for Buildings. *Sustainability*, 16(24), 11070.
- Beute, F. ve De Kort, Y. A. W. (2018). The natural context of wellbeing: Ecological momentary assessment of the influence of nature and daylight on affect and stress for individuals with depression levels varying from none to clinical. *Health & Place*, 49, 7-18.
- Bonenberg, W., Skórzewski, W., Qi, L., Han, Y., Czekala, W. ve Zhou, M. (2023). An Energy-Saving-Oriented Approach to Urban Design—Application in the Local Conditions of Poznań Metropolitan Area (Poland). *Sustainability*, 15(14), 10994.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M. ve Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.
- Bredella, N. (2019). Simulation and Architecture: Mapping Building Information Modeling. *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, 27(4), 419-441.
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. ve Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394-416.

- Caldas, L. (2008). Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system. *Advanced Engineering Informatics*, 22(1), 59-70.
- Caniggia, G. ve Maffei, G. L. (2001). *Architectural Composition and Building Typology: Interpreting Basic Building*. Alinea.
- Carmona, M. (Ed.). (2003). *Public places, urban spaces: The dimensions of urban design*. Oxford ; Boston: Architectural Press.
- Carriço De Lima Montenegro Duarte, J. G., Ramos Zemero, B., Dias Barreto De Souza, A. C., De Lima Tostes, M. E. ve Holanda Bezerra, U. (2021). Building Information Modeling approach to optimize energy efficiency in educational buildings. *Journal of Building Engineering*, 43, 102587.
- Chen, H., Zhu, S., Ye, T. ve Miao, Y. (2025). Optimizing Urban Ventilation in Heritage Settings: A Computational Fluid Dynamics and Field Study in Zhao'an Old Town, Fujian. *Buildings*, 15(3), 483.
- Chen, L. ve Mak, C. M. (2021). Integrated impacts of building height and upstream building on pedestrian comfort around ideal lift-up buildings in a weak wind environment. *Building and Environment*, 200, 107963.
- Chen, R., Samuelson, H., Zou, Y., Zheng, X. ve Cao, Y. (2024). Improving building resilience in the face of future climate uncertainty: A comprehensive framework for enhancing building life cycle performance. *Energy and Buildings*, 302, 113761.
- Chong, H.-Y., Lee, C.-Y. ve Wang, X. (2017). A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4114-4126.
- Conzen, M. R. G. (2004). *Thinking about Urban Form: Papers on Urban Morphology, 1932-1998*. Peter Lang.
- Cuce, E., Sher, F., Sadiq, H., Cuce, P. M., Guclu, T. ve Besir, A. B. (2019). Sustainable ventilation strategies in buildings: CFD research. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100540.
- Davila Delgado, J. M., Oyedele, L., Demian, P. ve Beach, T. (2020). A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101122.

- D'Oca, S., Gralka, A., Ferrante, A., Ferrer, C., Perneti, R., Sebastian, R. ve Op 'T Veld, P. (2018, 14 Eylül). Technical, Financial, Social Barriers and Challenges in Deep Building Renovation: Integration of Lessons Learned from the H2020 Cluster Projects. *Engineering*.
- Dong, B., Lam, K. P. ve Huang, Y. C. (2007). A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. *Building Simulation*.
- Dougherty, T. R. ve Jain, R. K. (2023). TOM.D: Taking advantage of microclimate data for urban building energy modeling. *Advances in Applied Energy*, 10, 100138.
- Düzce Belediyesi. (2025). *Düzce Tarihi*. Erişim adresi:[<https://duzce.bel.tr/10-duzce-tarihi>] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025).
- Düzce İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (2025a). *İklimi ve Bitki Örtüsü*. Erişim adresi:[<https://duzce.ktb.gov.tr/TR-211369/iklimi-ve-bitki-ortusu.html>] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)
- Düzce İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (2025b). *Ulaşım*. Erişim adresi: [<https://duzce.ktb.gov.tr/TR-211332/ulasim.html>] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)
- Düzce TSO. (2025). *Stratejik Planlar*. Erişim adresi: [<https://www.duzcetso.org.tr/detay/949>] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)
- T.C. Düzce Valiliği (2025). Erişim adresi [<http://www.duzce.gov.tr/>] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)
- Elwy, I. ve Hagishima, A. (2024). The artificial intelligence reformation of sustainable building design approach: A systematic review on building design optimization methods using surrogate models. *Energy and Buildings*, 323, 114769.
- Emir, F., Philip, L. D. ve Sertoglu, K. (2022). Assessing the influence of urbanization and energy on carbon emissions of Turkey: Evidence using the new RALS analysis. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(38), 57905-57917.
- Ewing, R. ve Rong, F. (2008). The impact of urban form on U.S. residential energy use. *Housing Policy Debate*, 19(1), 1-30.
- Faghihi, V., Hessami, A. R. ve Ford, D. N. (2015). Sustainable campus improvement program design using energy efficiency and conservation. *Journal of Cleaner Production*, 107, 400-409.

- Feng, J., Zhou, Z. ve Li, W. (2022). Associating indoor air temperature with building spatial design and occupancy features: A statistical analysis on university classrooms. *Building and Environment*, 216, 109009.
- Feng, W., Chen, J., Yang, Y., Gao, W., Zhao, Q., Xing, H. ve Yu, S. (2024). The Impact of Building Morphology on Energy Use Intensity of High-Rise Residential Clusters: A Case Study of Hangzhou, China. *Buildings*, 14(7), 2245.
- Gehl, J. (2013). *Cities for People*. Island Press.
- GEPA. (2025). GEPA. Erişim adresi: [<https://gepa.enerji.gov.tr/>] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)
- Geyer, P. (2012). Systems modelling for sustainable building design. *Advanced Engineering Informatics*, 26(4), 656-668.
- Gil, J. (2020). City Information Modelling: A Conceptual Framework for Research and Practice in Digital Urban Planning. *Built Environment*, 46(4), 501-527.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold.
- González, J. ve Fiorito, F. (2015). Daylight Design of Office Buildings: Optimisation of External Solar Shadings by Using Combined Simulation Methods. *Buildings*, 5(2), 560-580.
- Guo, W., Liu, X. ve Yuan, X. (2015). Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings. *Procedia Engineering*, 121, 573-581.
- Güneş, Z. ve Gökçe, D. (2022). Dağınık Planlı Kent Dışı Genç Üniversite Yerleşkelerinde Büyüme ve Gelişme: Düzce Üniversitesi Konuralp Yerleşkesi Örneği.
- Hadavi, M. ve Pasharshahi, H. (2021). Investigating effects of urban configuration and density on urban climate and building systems energy consumption. *Journal of Building Engineering*, 44, 102710.
- Hillier, B. (2007). *Space is the machine: A configurational theory of architecture*. ResearchGate Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/316236726_Space_is_the_machine_a_configurational_theory_of_architecture] (Erişim tarihi:16 Nisan 2025)

- Hillier, B. ve Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hong, B. ve Lin, B. (2015). Numerical studies of the outdoor wind environment and thermal comfort at pedestrian level in housing blocks with different building layout patterns and trees arrangement. *Renewable Energy*, 73, 18-27.
- Jalaei, F. ve Jrade, A. (2014). Integrating Building Information Modeling (BIM) and Energy Analysis Tools with Green Building Certification System to Conceptually Design Sustainable Buildings. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 19(29), 494-519.
- Javanroodi, K., Perera, A. T. D., Hong, T. ve Nik, V. M. (2023). Designing climate resilient energy systems in complex urban areas considering urban morphology: A technical review. *Advances in Applied Energy*, 12, 100155.
- Ji, Y., Xu, M., Zhang, T. ve He, Y. (2023). Intelligent Parametric Optimization of Building Atrium Design: A Case Study for a Sustainable and Comfortable Environment. *Sustainability*, 15(5), 4362.
- Kang, J., Ahn, K., Park, C. ve Schuetze, T. (2015). Assessment of Passive vs. Active Strategies for a School Building Design. *Sustainability*, 7(11), 15136-15151.
- Kassem, M. ve Succar, B. (2017). Macro BIM adoption: Comparative market analysis. *Automation in Construction*, 81, 286-299.
- Kaya, E. (2024). *Düzce kentsel açık ve yeşil alanların planlamasında kent yönetimi ve katılımçılık* Erişim adresi: [https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=tr&user=EWhUnr4AAAAJ&citation_for_view=EWhUnr4AAAAJ:Zph67rFs4hoC] (Erişim tarihi:30 Nisan 2025)
- Khan, A. M., Tariq, M. A., Alam, Z., Alaloul, W. S. ve Waqar, A. (2024). Optimizing energy efficiency through building orientation and building information modelling (BIM) in diverse terrains: A case study in Pakistan. *Energy*, 311, 133307.
- Ko, Y. (2013). Urban Form and Residential Energy Use. *Journal of Planning Literature*.
- Kropf, K. (1996). Urban tissue and the character of towns. *Urban Design International*, 1(3), 247-263.

- Kropf, K. (2017). *The Handbook Of Urban Morphology* (1. bs.). Wiley.
doi:10.1002/9781118747711
- Lawrence, R., Elsayed, M. ve Keime, C. (2019). Evaluation of environmental design strategies for university buildings. *Building Research & Information*, 47(8), 883-900.
- Lawson, T. V. (2001). *Building aerodynamics*. London : River Edge, NJ: Imperial College Press ; Distributed by World Scientific Pub. Co.
- Li, X., Lin, K., Cheng, D., Zou, H., Shu, Y., Jin, Z. ve Zhu, J. (2024). Meteorological effects of ventilation corridor in central urban areas: A case study of Wuhan. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105752.
- Li, Yang ve Feng, H. (2025). Integrating urban building energy modeling (UBEM) and urban-building environmental impact assessment (UB-EIA) for sustainable urban development: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 213, 115471.
- Li, Yunfei, Schubert, S., Kropp, J. P. ve Rybski, D. (2020). On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. *Nature Communications*, 11(1), 2647.
- Liu, Q. ve Wang, Z. (2022). Green BIM-based study on the green performance of university buildings in northern China. *Energy, Sustainability and Society*, 12(1), 12.
- Liu, W., Lv, Y., Wang, Q., Sun, B. ve Han, D. (2024). A Systematic Review of the Digital Twin Technology in Buildings, Landscape and Urban Environment from 2018 to 2024. *Buildings*, 14(11), 3475.
- Lu, Q., Xie, X., Heaton, J., Parlikad, A. K. ve Schooling, J. (2020). From BIM Towards Digital Twin: Strategy and Future Development for Smart Asset Management. T. Borangiu, D. Trentesaux, P. Leitão, A. Giret Boggino ve V. Botti (Ed.), *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future* içinde , Studies in Computational Intelligence (C. 853, ss. 392-404). Cham: Springer International Publishing.
- Madlener, R. ve Sunak, Y. (2011). Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management? *Sustainable Cities and Society*, 1(1), 45-53.
- Marcus, L. ve Colding, J. (2014). Toward an integrated theory of spatial morphology and resilient urban systems. *Ecology and Society*, 19(4).

<https://www.jstor.org/stable/26269695> adresinden erişildi.

- Marrone, P., Orsini, F., Asdrubali, F. ve Guattari, C. (2018). Environmental performance of universities: Proposal for implementing campus urban morphology as an evaluation parameter in Green Metric. *Sustainable Cities and Society*, 42, 226-239.
- Martilli, A. (2014). An idealized study of city structure, urban climate, energy consumption, and air quality. *Urban Climate*, 10, 430-446.
- Martinelli, L., Lin, T.-P. ve Matzarakis, A. (2015). Assessment of the influence of daily shadings pattern on human thermal comfort and attendance in Rome during summer period. *Building and Environment*, 92, 30-38.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2025). Meteoroloji Genel Müdürlüğü. 29 Nisan 2025 tarihinde <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=DUZCE> adresinden erişildi.
- Moosavi, L., Mahyuddin, N. ve Ghafar, N. (2015). Atrium cooling performance in a low energy office building in the Tropics, a field study. *Building and Environment*, 94, 384-394.
- Moudon, A. V. (1997). Urban Morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology*, 1(1), 3-10.
- Neuman, M. (2005). The Compact City Fallacy. *Journal of Planning Education and Research*.
- Nevers, C., Kubilay, A., Carmeliet, J. ve Derome, D. (2024). CFD simulation of the wind flow under lift-up buildings using a porous approach. *Building and Environment*, 263, 111867.
- Noaman, D. S., Moneer, S. A., Megahed, N. A. ve El-Ghafour, S. A. (2022). Integration of active solar cooling technology into passively designed facade in hot climates. *Journal of Building Engineering*, 56, 104658.
- Oliveira, V. (2018). A Course in Urban Morphology. V. Oliveira (Ed.), *Teaching Urban Morphology* içinde (ss. 317-334). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-76126-8_18
- Oliveira, V. (2022). Morpho: A methodology for assessing urban form. *Urban Morphology*, 17(1), 21-33.

- Palme, M., Privitera, R. ve La Rosa, D. (2020). The shading effects of Green Infrastructure in private residential areas: Building Performance Simulation to support urban planning. *Energy and Buildings*, 229, 110531.
- Perini, K. ve Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 495-506.
- Perini, K. ve Rosasco, P. (2013). Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110-121.
- Petschek, P., Aung, A. P. P., Suwanarit, A. ve Irvine, K. N. (2024). Integration of Building Information Modeling and Stormwater Runoff Modeling: Enhancing Design Tools for Nature-Based Solutions in Sustainable Landscapes. *Sustainability*, 16(9), 3694.
- Pouya, S. ve Aghlmand, M. (2022). Evaluation of urban green space per capita with new remote sensing and geographic information system techniques and the importance of urban green space during the COVID-19 pandemic. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9), 633.
- Privitera, R., Palermo, V., Martinico, F., Fichera, A. ve Rosa, D. L. (2018). Towards lower carbon cities: Urban morphology contribution in climate change adaptation strategies. *European Planning Studies*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09654313.2018.1426735> adresinden erişildi.
- Qi, Y., Chen, L., Xu, J., Liu, C., Gao, W. ve Miao, S. (2025). Influence of university campus spatial morphology on outdoor thermal environment: A case study from Eastern China. *Energy and Built Environment*, 6(1), 43-56.
- Rajagopalan, P., Lim, K. C. ve Jamei, E. (2014). Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. *Solar Energy*, 107, 159-170.
- Ramírez-Aguilar, E. A. ve Lucas Souza, L. C. (2019). Urban form and population density: Influences on Urban Heat Island intensities in Bogotá, Colombia. *Urban Climate*, 29, 100497.
- Ranjha, S., Ekambaram, P., Shi, L., Sarve, O., Bhatt, K., Munirajappa, K. S. ve Kotapati, S. S. (2023). BIM Based Live Sensor Data Integration and Visualization Using VR. 2023 IEEE Engineering Informatics içinde (ss. 1-8). 2023 IEEE Engineering Informatics, sunulmuş bildiri, Melbourne, Australia: IEEE.

- Ratti, C., Baker, N. ve Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), 762-776.
- Rodrigues, E., Fernandes, M. S., Gaspar, A. R., Gomes, Á. ve Costa, J. J. (2019). Thermal transmittance effect on energy consumption of Mediterranean buildings with different thermal mass. *Applied Energy*, 252, 113437.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G. ve Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. John Wiley & Sons.
- Salameh, M., Abu-Hijleh, B. ve Touqan, B. (2024). Impact of courtyard orientation on thermal performance of school buildings' temperature. *Urban Climate*, 54, 101853.
- Salat, S. (2009). Energy loads, CO₂ emissions and building stocks: Morphologies, typologies, energy systems and behaviour. *Building Research & Information*, 37(5-6), 598-609.
- Samaan, M. M., Farag, O. ve Khalil, M. (2018). Using simulation tools for optimizing cooling loads and daylighting levels in Egyptian campus buildings. *HBRC Journal*. doi:10.1016/j.hbrcj.2016.01.001
- Shen, W., Shen, Q. ve Sun, Q. (2012). Building Information Modeling-based user activity simulation and evaluation method for improving designer–user communications. *Automation in Construction*, 21, 148-160.
- Shi, X. ve Yang, W. (2013). Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. *Automation in Construction*, 32, 125-135.
- Simões, J. C., Nunes, H. M., Carrilho Da Graça, G. ve Martins, N. R. (2025). Assessment of cooling capacity of chimney-enhanced cross-ventilation systems for kindergartens in African cities. *Energy and Buildings*, 326, 115048.
- Song, Y., Liu, J. ve Zhang, W. (2024). Design Parameters Affecting Energy Consumption of University Educational Buildings in Hot Summer and Cold Winter Area of China. *Buildings*, 14(6), 1697.
- Steemers, K. (2003). Energy and the city: Density, buildings and transport. *Energy and Buildings*, 35(1), 3-14.
- Sugiarto, A., Lee, C.-W. ve Huruta, A. D. (2022). A Systematic Review of the Sustainable Campus Concept. *Behavioral Sciences*, 12(5), 130.

- Sun, B., Zhang, H., Zhao, L., Qu, K., Liu, W., Zhuang, Z. ve Ye, H. (2022). Microclimate Optimization of School Campus Landscape Based on Comfort Assessment. *Buildings*, 12(9), 1375.
- Sutherland, I. E. (2003). Sketchpad: A man-machine graphical communication system.
- Şenik, B. (2019). *Ulusal Tez Merkezi | Anasayfa*. Erişim adresi: [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=731-kKTVLh53AdOp85XNsA&no=Fpn1VNx3hz9KEje3bSU9rw] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)
- Tanrıverdi Kaya, A. (2019). (PDF) Üniversite Öğrencilerinin Zihinsel Haritalarında Kentin İmajı: Düzce Örneği / The Image of The City in Mental Maps of University Students; Düzce Case. *ResearchGate*. doi:10.14744/tasarimkuram.2019.82787
- Tatar, Y. (2005). (PDF) *Düzce İl Gelişme Planı Çevre ve Mekansal Gelişme Raporu*. *ResearchGate* Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/322962651_Duzce_Il_Gelisme_Plani_Cevre_ve_Mekansal_Gelisme_Raporu] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)
- The Building System Carbon Framework | GlobalABC. (2020). Erişim adresi: [https://globalabc.org/resources/publications/building-system-carbon-framework] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)
- Theodorson, J. (2014). Energy, Daylighting, and a Role for Interiors. *Journal of Interior Design*, 39(2), 37-56.
- Tomasi, M., Nikolopoulou, M., Giridharan, R., Löve, M. ve Ratti, C. (2024). Dynamic analysis of a pedestrian network: The impact of solar radiation exposure on diverse user experiences. *Sustainable Cities and Society*, 112, 105631.
- Touma, A. A. ve Ouahrani, D. (2017). Shading and day-lighting controls energy savings in offices with fully-Glazed façades in hot climates. *Energy and Buildings*, 151, 263-274.
- Trepci, E., Maghelal, P. ve Azar, E. (2021). Urban built context as a passive cooling strategy for buildings in hot climate. *Energy and Buildings*, 231, 110606.
- Tsichritzis, L. (2020). *Assessing the Pedestrian Wind Environment: The Role of Urban Morphology* Erişim adresi: [https://www.semanticscholar.org/paper/Assessing-the-Pedestrian-Wind-Environment%3A-The-Role-Tsichritzis/5815c9758614c37bdcd5514c862d0fdbbb3dff4f?utm_source=consensus

] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)

Tsoka, S., Tsikaloudaki, A. ve Theodosiou, T. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications–A review. *Sustainable Cities and Society*, 43, 55-76.

TÜİK Kurumsal (2024). Erişim adresi:[<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2024-53783>] (Erişim tarihi:29 Nisan 2025)

UN-Habitat (Ed.). (2020). *The value of sustainable urbanization*. World cities report. Nairobi, Kenya: UN-Habitat.

van Nederveen, G. A. ve Tolman, F. P. (1992). Modelling multiple views on buildings. *Automation in Construction*, 1(3), 215-224.

Wang, Y., Yang, W. ve Wang, Q. (2022). Multi-objective parametric optimization of the composite external shading for the classroom based on lighting, energy consumption, and visual comfort. *Energy and Buildings*, 275, 112441.

Wasilewski, S., Grobe, L. O., Wienold, J. ve Andersen, M. (2022). Efficient Simulation for Visual Comfort Evaluations. *Energy and Buildings*, 267, 112141.

Welle, B., Haymaker, J. ve Rogers, Z. (2011). ThermalOpt: A methodology for automated BIM-based multidisciplinary thermal simulation for use in optimization environments. *Building Simulation*, 4(4), 293-313.

Wirz-Justice, A., Skene, D. J. ve Münch, M. (2021). The relevance of daylight for humans. *Biochemical Pharmacology*, 191, 114304.

World Urbanization Prospects, United Nations. (2018). Erişim adresi: [https://population.un.org/wup/?_gl=1*6w6nmq*_ga*MTUwODU2MDg4NC4xNzA5MjMwMDg4*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcwOTIzMDA4OS4xLjEuMTcwOTIzMDA5My4wLjAuMA] (Erişim tarihi:1 Mart 2024)

7552 sayılı İklim Kanunu. (2025, 9 Temmuz). Resmî Gazete, 32951.

Yeang, K. (2006). *Ecodesign: A Manual for Ecological Design*. Wiley-Academy.

Yoon, N. ve Wu, W. (2024). Short-term thermal resilience and building energy flexibility using thermal mass and controlled natural ventilation. *Energy and Buildings*, 320, 114547.

- You, Y. ve Kim, S. (2018). Revealing the mechanism of urban morphology affecting residential energy efficiency in Seoul, Korea. *Sustainable Cities and Society*, 43, 176-190.
- Zaki, S. A., Othman, N. E., Syahidah, S. W., Yakub, F., Muhammad-Sukki, F., Ardila-Rey, J. A., ... Mohd Saudi, A. S. (2020). Effects of Urban Morphology on Microclimate Parameters in an Urban University Campus. *Sustainability*, 12(7), 2962.
- Zhang, A., Bokel, R., Van Den Dobbelsteen, A., Sun, Y., Huang, Q. ve Zhang, Q. (2017). An integrated school and schoolyard design method for summer thermal comfort and energy efficiency in Northern China. *Building and Environment*, 124, 369-387.
- Zhou, Y., Verkou, M., Zeman, M., Ziar, H. ve Isabella, O. (2022). A Comprehensive Workflow for High Resolution 3D Solar Photovoltaic Potential Mapping in Dense Urban Environment: A Case Study on Campus of Delft University of Technology. *Solar RRL*, 6(5), 2100478.
- Zhu, J., Feng, J., Lu, J., Chen, Y., Li, W., Lian, P. ve Zhao, X. (2023). A review of the influence of courtyard geometry and orientation on microclimate. *Building and Environment*, 236, 110269.
- Zhuang, D., Zhang, X., Lu, Y., Wang, C., Jin, X., Zhou, X. ve Shi, X. (2021). A performance data integrated BIM framework for building life-cycle energy efficiency and environmental optimization design. *Automation in Construction*, 127, 103712.
- Zou, J., Wang, L., Yang, S., Lacasse, M., Liangzhu ve Wang. (2025, 25 Şubat). Predicting Long-term Urban Overheating and Their Mitigations from Nature Based Solutions Using Machine Learning and Field Measurements. *arXiv*. doi:10.48550/arXiv.2502.18647
- Zölch, T., Maderspacher, J., Wamsler, C. ve Pauleit, S. (2016). Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 305-316.
- Zuo, J. ve Zhao, Z.-Y. (2014). Green building research—current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271-281.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Meryem Badur

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Mimarlık	Düzce Üniversitesi	2025
Lisans	Mimarlık	Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi	2018
Lise	Sayısal	Düzce AİHL	2013

TEZDEN ÇIKAN YAYIN

Badur, Meryem, Tanrıverdi Kaya, A. ve Bal Koçyiğit, F. (2024). Urban Morphology and Energy-Efficient Design. İçinde Z. Ö. Parlak Biçer (Ed.) *Research And Evaluations In The Field Of Architecture*, (1. bs. ss. 97-124), Gece Kitaplığı.