
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YAPAY ZEKA DESTEKLİ PARAMETRİK MODELLEME İLE DOĞADAN İLHAM ALAN KİNETİK CEPHE TASARIMI: GÜNIŞIĞI PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Hatice Tuğçe BAKIREL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hatice Tuğçe BAKIREL

07/04/2025

YAPAY ZEKA DESTEKLİ PARAMETRİK MODELLEME İLE DOĞADAN İLHAM ALAN KİNETİK CEPHE TASARIMI: GÜNIŞIĞI PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hatice Tuğçe BAKIREL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

İklim değişikliği, artan enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik ihtiyacı, yapı kabuklarının çevresel performansını artırmaya yönelik adaptif ve yenilikçi tasarımları zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, çevresel verilere tepki verebilen kinetik cephe sistemleri, mimaride hem estetik hem de enerji verimliliği odaklı çözümler sunmaktadır. Biyomimetik tasarım yaklaşımları, özellikle bitkilerin çevresel uyaranlara verdiği hareket temelli tepkilerden ilham alarak, yapı kabuklarının esnekliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu tezde, *Mimosa Pudica* bitkisinin anlık tepki hareketleri ve *Hornbeam* yaprağının doğal katlanma davranışları örnek alınarak doğadan ilham alan bir kinetik cephe tasarımı geliştirilmiştir. Rhino–Grasshopper ortamında parametrik olarak modellenen sistem, yapay zekâ destekli bir tasarım yaklaşımıyla desteklenmiştir. Python dili ile yazılmış algoritmalar aracılığıyla, cephe modüllerinin güneş ışığı yönü ve şiddetine göre otomatik olarak tepki vermesini sağlayan bir kontrol mekanizması oluşturulmuş; bu algoritma sistemin çevresel veriye bağlı davranışını simüle etmiştir. Yapay zekâ, varyasyon üretimi ve karar verme süreçlerinde bir araç olarak kullanılmıştır. Gün ışığı performansı Ladybug ve Honeybee eklentileriyle simüle edilerek farklı açıklık senaryoları altında değerlendirilmiştir. Bulgular, veri odaklı tasarım yaklaşımlarının mimari cephe sistemlerine entegre edilmesinin mekânsal konfor ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Çalışma, dijital araçlarla desteklenmiş biyomimetik temelli adaptif sistemlerin mimari tasarıma nasıl entegre edilebileceğine dair kavramsal ve uygulamalı bir çerçeve sunmaktadır.

Bilim Kodu : 80126
Anahtar Kelimeler : Biyomimetik, kinetik cephe, parametrik modelleme, yapay zekâ destekli mimarlık, gün ışığı performansı, adaptif bina kabuğu, simulasyon
Sayfa Adedi : 93
Danışman : Prof. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK
İkinci Danışman : Doç. Dr. Güneş MUTLU AVİNÇ

NATURE-INSPIRED KINETIC FACADE DESIGN WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE ASSISTED PARAMETRIC MODELLING: EVALUATION OF DAYLIGHT PERFORMANCE

(M. Sc. Thesis)

Hatice Tuğçe BAKIREL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

Climate change, increasing energy consumption, and the growing need for sustainability necessitate adaptive and innovative designs to enhance the environmental performance of building envelopes. In this context, kinetic façade systems that can respond to environmental data offer solutions in architecture that are both aesthetically appealing and energy-efficient. Biomimetic design approaches—particularly those inspired by the motion-based responses of plants to environmental stimuli—have the potential to enhance the adaptability of building skins. This thesis presents the development of a nature-inspired kinetic façade design based on the rapid movement behaviour of the *Mimosa Pudica* plant and the natural folding mechanism of hornbeam leaves. The system is parametrically modelled within the Rhino–Grasshopper environment and supported by an artificial intelligence-assisted design strategy. Algorithms written in Python were used to create a control mechanism that allows façade modules to respond autonomously to the direction and intensity of sunlight, simulating environmentally driven behaviour. Artificial intelligence was employed to generate design variations and assist decision-making processes. Daylight performance was evaluated under various aperture scenarios using the Ladybug and Honeybee plugins simulations. The findings demonstrate that integrating data-driven design strategies into architectural façade systems provides significant benefits for spatial comfort and energy efficiency. This study offers a conceptual and practical framework for incorporating biomimetic-based adaptive systems supported by digital tools into architectural design.

Science Code : 80126
Key Words : Biomimetic, kinetic façade, parametric modelling, aı-assisted architecture, daylight performance, adaptive building envelope, simulation
Page Number : 93
Supervisor : Prof. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK
Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Güneş MUTLU AVİNÇ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında, lisans eğitimimden itibaren her zaman yanımda olan, değerli bilgileriyle beni destekleyen, sabırla rehberlik eden ve bana güvenen çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Semra ARSLAN SELÇUK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yalnızca akademik başarıyı değil, aynı zamanda kişisel hayallerimi de önemsediğiniz ve desteklediğiniz için bana kattığı her şey için bir kez daha teşekkür ederim.

Yüksek lisans hayatımda tanıştığım ve hoşgörüsü ve yardımseverliği ile bana rehberlik eden kıymetli eş danışman hocam Sayın Doç. Dr. Güneş MUTLU AVİNÇ'e de teşekkürlerimi sunarım. Hayatıma güçlü birer rehber olan, karakterleriyle ve inandıkları değerlerle bana her zaman yol gösteren, sevgileriyle sarıp sarmalayan, her adımımda yanımda olan ve bugün beni ben yapan tüm güzel değerlere, onların sayesinde ulaştığım güzel kalpli annem ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Her zaman güvende hissettiren, sevgi dolu kalbinizle bana güç veren sizleri çok seviyorum. Şanslı bir ailede, dört kardeş olarak büyüdüm. Onların enerjisi, sevgisi, birlikteliği ve desteği sayesinde attığım her adımda daha güçlüyüm. Oyun arkadaşlarım, sevgili kardeşlerim ablam Buğçe ve abim Buğra'ya, ve biricik ikizim Tuğba'ya da ayrıca teşekkür ederim. İyi ki varsınız. İçimdeki duyguların yeşermesini sağlayan, fikirleri ve farklı düşünce yapısıyla beni büyüleyen, hayatıma eşlik eden Berkay'a sevgisi, güveni ve birlikteliği için teşekkür ederim.

Üniversitenin ilk gününden bu yana yanımda olan ve bu uzun yolda birlikte yürüdüğüm sevgili dostlarım StandArt Ekibi'ne; fedakârlığı ve gezi arkadaşlığı için Aysıla'ya, yaklaşık 10 senedir her günümün birlikte geçtiği dert ortağım Aslı'ya, konuşunca sakinleştiğim, akıl aldığım ve her sürecimde yanımda olan, desteğini esirgemeyen Ece'ye ve güzel kalpli Evrim'e, lise arkadaşlarım Hazal, Selin ve Belkıs'a da ayrıca gelişimimde yanımda oldukları için çok teşekkür ederim. İş hayatına herkese nasip olmayan şekilde inanılmaz güzel bir tasarımcı mimarla başladım. Şimdi ise mentörüm, arkadaşım ve akıl alacağım bir liman oldu. Hayranlık duyduğum, çok sevdiğim Burcu AVANOĞLU'na, iş yerinde bana güvenen, destek olan, ilerlememi sağlayan kıymetli müdürüm Cihan KAYHAN'a ve iş arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Uzun teşekkür yazısından sonra tezimi, bu sene yaşadığı zorlukların üstesinden gelerek, sabrı ve duruşuyla gücüne hayran olduğum abim Buğra BAKIREL'e armağan ediyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI VE KURAMSAL ÇERÇEVE 7

2.1. Mimari Teorilerde Hareket Terminolojisi 8

2.1.1. Kinetik mimari 9

2.1.2. Uyarlanabilir mimari 13

2.1.3. Dönüşebilen mimari 15

2.1.4. Yanıt veren mimari 18

2.2. Mimarlıkta Kinetik Cephe ve Gün Işığı 20

2.2.1. Geçmişten günümüze cephenin gelişimi 21

2.2.2. Gün ışığının yapı performansındaki rolü 23

2.2.3. Kinetik cephelerin günışığı ve enerji verimliliği üzerine etkisi 24

2.3. Mimarlıkta Biyomimetik Tasarım 28

2.3.1. Doğadan ilham alarak tasarlama 29

2.3.2. Bitkiler üzerinden doğadaki kinetik hareketi anlamak 33

2.3.3. Bitki esinli “biyomimetik yaklaşım ile tasarlanan günışığı ve enerji verimli kinetik cephe örnekleri 37

3. YÖNTEM 49

Sayfa

3.1. Araştırmanın Tasarımı ve Yöntemi 49

3.2. Referans Bina Oluşumu ve Kullanılan Simulasyon Programları 52

4. HAREKETİN FORMA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ: ENERJİ PERFORMANSINI ARTIRMAK İÇİN BİYOMİMETİK KİNETİK CEPHE 57

4.1. Seçilen Doğal Fenomenin Tasarımsal Gelişimi Ve Yapay Zeka Kullanımı 57

4.2. Seçilen Program ile Gün Işığı Simülasyonu 69

4.3. Araştırma Bulguları 71

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 77

KAYNAKLAR 83

ÖZGEÇMİŞ 93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Tez kapsamında incelenen altı yapıya ait yazar tarafından oluşturulan değerlendirme tablosu 46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Tez akış diyagramı 5

Şekil 2.1. Michael Fox'un "*Ephemeralization*" başlıklı makalesinde (2001) sunduğu İleri Kinetik Mimari Sistemler kavramı şeması 12

Şekil 2.2. Lelieveld, Voorbij ve Poelman (2007) tarafından tanıtılan, karmaşıklık düzeyine göre sıralanmış uyarlanabilirlik seviyeleri şeması 14

Şekil 2.3 Fonksiyonel ihtiyaçlara göre fiziksel olarak yeniden yapılandırılabilen mimari mekân organizasyonunu temsil eden şematik diyagram 16

Şekil 2.4. Literatür taraması sonucunda oluşturulan hareket terminolojileri diyagramı (yazar tarafından oluşturulmuştur) 19

Şekil 2.5. Straube ve Frederick, (1998); Cucuzzella ve diğerleri, (2023)'nden yararlanılarak geçmişten günümüze cephenin tarihsel gelişimini gösteren diyagram 23

Şekil 2.6. Hafizi (2022)'nin makalesinde belirtilen biyomimetik ilkeleri ifade eden şema 31

Şekil 2.7. Biyomimetik yaklaşım düzeyleri ile mimari cephe tipolojileri arasındaki kavramsal ilişkileri gösteren şema 32

Şekil 2.8. Sommese ve diğerleri (2022) tarafından yapılan biyomimetik bina zarfları çalışmasından uyarlanarak oluşturulan bitki hareket inceleme tablosu 36

Şekil 2.9. Yunitsyna ve Sulaj (2025)'ın litaratürde yer alan bitki esinli günışığı verimli kinetik cephe örneklerini içeren tablosu 48

Şekil 3.1. Araştırmanın yöntemi 50

Şekil 3.2. Uygulama şeması 52

Şekil 3.3. Referans bina görseli 53

Şekil 3.4. Ladybug uzantısının yapabildiği analizler 54

Şekil 3.5. Honeybee üzerinden yapılabilen simülasyonlar 55

Şekil 4.1. (a) *Mimosa Pudica* hareket görseli (b) Bitkide turgor basıncı nedeniyle nastik hareketler 58

Şekil 4.2. Carrasco ve González (2015) çalışmasından uyarlanarak yazar tarafından oluşturulan katlanma modülü 58

Şekil 4.3. *Hornbeam* yaprakları ve oluklu yaprak modeline dayalı temel birim 59

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.4. Biyolojik referanslar doğrultusunda yazar tarafından oluşturulan modülasyon 60

Şekil 4.5. Yazar tarafından betimleme yoluyla oluşturulan ChatGPT destekli Python kodu ile (Model 1) 62

Şekil 4.6. Yazar tarafından betimleme yoluyla oluşturulan ChatGPT destekli Python kodu ile (Model 2) 63

Şekil 4.7. Yazar tarafından betimleme yoluyla oluşturulan ChatGPT destekli Python kodu ile (Model 3) 64

Şekil 4.8. Grassopher yazılımına entegre edilen Python tabanlı kod 65

Şekil 4.9. Geliştirilen kinetik cephe sistemine ait katlanma ve hareket şemaları. Üstte, panel ızgara dizilimi ve yönlü katlanma hatları; altta ise bir modülün farklı açıklık oranlarındaki açılma senaryoları gösterilmektedir 66

Şekil 4.10. Kinetik cephe modülü ve referans cepheye üzerinde şematik gösterimi 68

Şekil 4.11. Üretilen Python tabanlı kod-Grassopher Lady Bug-Honeybee uzantıları ile oluşturulan parametreler 71

Şekil 4.12. Analiz sonuçları (a) Cephe modülü tamamen açıkken (b) Cephe modülü %50 açıkken (c) Cephe modülü %30 açıkken gün ışığı özerkliği 72

Şekil 4.13. Paneller %30 açıkken faydalı gün ışığı aydınlatması analizi 73

Şekil 4.14. Paneller %50 açıkken faydalı gün ışığı aydınlatması analizi 74

Şekil 4.15. Paneller %90 açıkken faydalı gün ışığı aydınlatması analizi 75

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Açık hava koşullarında, Pantheon'un iç mekânındaki ışığın görünümü 21

Resim 2.2. Brisbane havaalanının kinetik cephesi..... 26

Resim 2.3. Parametric Schueco cephe modülü..... 26

Resim 2.4. Foster and Heatherwick Fosun Sanat Merkezi, Şangay 27

Resim 2.5. Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesinin cephe sistemi 27

Resim 2.6. The Media-TIC Binası cephe ve modül detayları..... 40

Resim 2.7. Biyomimetik cephe görünümü ve ilham aldığı eleman..... 41

Resim 2.8. FlectoFold Stuttgart Doğa Tarihi Müzesi içerisine tasarlanan kinetik cephe modülü 42

Resim 2.9. Stuttgart Üniversitesi Hesaplamalı Tasarım Enstitüsü (ICD) tarafından geliştirilen HygroSkin açıklıklarının hava koşullarına göre uyum sağlama sürecini gösteren yakın plan fotoğraf: düşük bağıl nemde açık konumda (sol) ve yüksek bağıl nemde kapalı konumda (sağ)..... 43

Resim 2.10. Abu Dabi'deki Al Bahr Kuleleri..... 44

Resim 2.11. Flectoline Stuttgart Üniversitesi Yapı Yapıları ve Yapısal Tasarım Enstitüsü (ITKE) tarafından geliştirilen cephe tasarımı..... 45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
CO_2	Karbondioksit
db	Desibel
hz	Hertz
m	Metre
m^2	Metrekare

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
BREEAM	Bina Araştırma Kurumu Çevresel Değerlendirme Yöntemi
DA	Günışığı Özerkliği (Daylight Autonomy)
DGP	Günışığı Parıltı Olasılığı (Daylight Glare Probability)
EPW	EnergyPlus Hava Durumu
ETFE	Etilen Tetrafloroetilen
LEED	Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik
PTFE	Politetrafloroetilen
UDI	Kullanışlı Günışığı Aydınlatması (Useful Daylight Illuminance)

1. GİRİŞ

Mimarlık disiplini, tarih boyunca doğadan ilham alarak gelişmiş ve çevresel sürdürülebilirliği hedefleyen çözümler üretme amacıyla sürekli evrilmiştir (Knippers, Speck ve Nickel, 2016). Bu bağlamda doğadan ilham alma yaklaşımı; doğadaki sistemlerin, süreçlerin ve biçimlerin insan yapımı çevreye entegrasyonu yoluyla disiplinler arası bir tasarım metodolojisi sunmaktadır. Söz konusu yaklaşım, enerji verimliliği, kaynak yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik gibi çağdaş sorunlara yenilikçi çözümler getirme potansiyeli taşıyarak mimarlık ve mühendislik alanlarında etkili bir paradigma oluşturmuştur.

Günümüzde mimarlık pratiğinde, çevresel verimlilik, enerji tasarrufu ve kullanıcı konforu gibi kriterlerin ön plana çıkmasıyla birlikte, doğadan esinlenen tasarım yaklaşımları tasarım süreçlerinde daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Bu çerçevede, biyomimetik yaklaşım; doğadaki organizmaların biçimlerini, süreçlerini ve ekosistemlerini model alarak sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler üretmeyi amaçlayan disiplinler arası bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (Benyus, 1997). Biyomimetik, mühendislikte hızla gelişen bir tasarım disiplini olarak öne çıkmakta, mimarlıkta ise henüz gelişmekte olan bir araştırma alanı olarak dikkat çekmektedir. Doğadan türetilen stratejiler, mekanizmalar ve ilkeler aracılığıyla çözümler üretmeyi amaçlayan bu yaklaşım, yaratıcılığı teşvik etmenin yanı sıra, çevresel olarak duyarlı yapıların geliştirilmesinde umut verici bir yöntem olarak görülmektedir (Benyus, 2002; Badarnah, 2012; Gamage ve Hyde, 2012; Mazzoleni, 2013; Pawlyn, 2011; Pedersen Zari, 2010). Son on yılda pek çok biyomimetik tasarım stratejisi geliştirilmiş olmakla birlikte (Bogatyreva, Pahl ve Vincent, 2006), bu stratejilerin mimarlıkta uygulanması hâlen birtakım zorluklar barındırmaktadır.

Gün ışığı mimarisi, doğal ışığın iç mekânlara verimli biçimde yönlendirilmesini sağlayarak yapay aydınlatma ihtiyacını azaltan ve mekânsal konforu artıran tasarım stratejilerini kapsamaktadır (Reinhart ve Andersen, 2006). Bu noktada, biyomimetik tasarım ile gün ışığı mimarisi bir araya geldiğinde, doğal ışığın optimizasyonunu sağlayan ve iç mekân konforunu iyileştiren dinamik cephe sistemlerinin geliştirilmesi mümkün hâle gelmektedir (Sommese, 2024). Söz konusu kinetik cephe sistemleri; çevresel değişkenlere yanıt verebilen, hareket edebilen ve biçim değiştirebilen yapı bileşenleri olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, gün ışığını kontrol altına alarak enerji verimliliğine katkı sağlamakta ve iç mekân koşullarını optimize etmektedir (Tabadkani ve diğerleri, 2021).

Doğadaki canlıların çevresel uyaranlara verdikleri hareket temelli tepkiler, bu tür kinetik sistemlerin tasarımında önemli bir ilham kaynağı oluşturmaktadır. Literatürde bu konuya ilişkin yapılan birçok çalışma, özellikle bitkilerin morfolojik ve davranışsal adaptasyonlarının mimari sistemlere aktarılabilirliğini araştırmaktadır. Örneğin López, Rubio, Martín ve Croxford (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; bitkilerin heliotropik yönelimleri, yaprak hareketleri ve gölgeleme stratejileri analiz edilerek, bu biyolojik özelliklerin mimari cephe tasarımlarında nasıl uyarlanabileceği tartışılmıştır. Benzer şekilde, Avinç, Koç ve Selçuk (2024) sıcak iklim bölgelerinde termal konforu artırmayı hedefleyen biyomimetik cephe önerileri sunmuş; Bijari, Aflaki ve Esfandiari (2025) ise biyomimetik mimaride form, işlev ve enerji performansı üzerine odaklanan bir derleme sunmuştur.

Literatürde, özellikle bitkilerin morfolojik ve davranışsal adaptasyonlarının mimari sistemlere aktarılabilirliği üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bu adaptasyonlar, kinetik cephe tasarımlarında esnek, enerji etkin ve çevreyle uyumlu çözümler sunmaktadır. Bitkilerin ışık, sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlere verdiği tepkiler, mimari tasarımda dinamik ve adaptif sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, bitkilerin yapraklarının güneşe yönelmesi (*heliotropizm*) veya stomalarının açılıp kapanması gibi hareketler, kinetik cephe sistemlerinde benzer mekanizmaların uygulanmasına ilham vermektedir. Bu tür biyomimetik yaklaşımlar, bina kabuklarının çevresel koşullara göre şekil değiştirmesini ve iç mekan konforunu artırmasını sağlamaktadır. Kuru ve diğerleri (2018), doğadaki dinamik ve statik mekanizmaları inceleyerek çok işlevli biyomimetik adaptif cephe tasarımlarının geliştirilmesini ele almışlardır. Özellikle, *Echinocactus grusonii* (altın fıçı kaktüsü) bitkisinin morfolojik ve fizyolojik adaptasyonları, bina cephe tasarımına entegre edilerek enerji verimliliği ve iç mekan konforu artırılmıştır. Bijari ve diğerleri (2025), bitkilerden ilham alan biyomimetik teknolojilerin modern binalarda nasıl uygulandığını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Bu çalışma, biyomimetik mimarinin karbon emisyonlarını azaltma ve çevreyle uyumlu yapılar oluşturma potansiyelini vurgulamaktadır. Gruber (2009), bitkilerin yapısal ve işlevsel özelliklerinden ilham alarak mimari tasarımda biyomimetik yaklaşımları ele almıştır. Bitkilerin çevresel koşullara adaptasyon mekanizmaları, bina tasarımlarında sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği sağlamak için örnek olarak sunulmuştur. Mei ve diğerleri (2024), bitkilerden ilham alan yeşil biyonik yapıların işlevsel, yapısal ve malzeme tasarımı konularındaki araştırma

ilerlemelerini incelemişlerdir. Bu çalışma, biyomimetik tasarımın malzeme seçiminden yapı formuna kadar geniş bir yelpazede nasıl uygulanabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bitkilerin çevresel uyaranlara verdikleri hareket temelli tepkiler ve morfolojik adaptasyonları, kinetik cephe tasarımlarında sürdürülebilir, enerji verimli ve çevreyle uyumlu çözümler geliştirmek için zengin bir ilham kaynağı sunmaktadır. Bu biyomimetik yaklaşımlar, mimari tasarımda doğayla bütünleşmiş ve adaptif yapıların oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

Bitki temelli adaptasyon stratejileri, yalnızca formal ilham vermekle kalmayıp aynı zamanda kinetik hareketlere dayalı, çevresel verilere duyarlı tasarım çözümlerine de olanak tanımaktadır (Gruber, 2009; Mei ve diğerleri 2024). Bu noktada, tez kapsamında incelenen *Mimosa pudica* (küstüm otu) bitkisinin dokunmaya verdiği ani tepkiler ile *Hornbeam* (gürgen) yaprağının düzenli katlanma davranışı, çevresel verilerle entegre çalışabilen kinetik sistemlerin gelişimine temel teşkil etmektedir. Bu biyolojik hareket mekanizmalarının mimariye entegrasyonu ile geleneksel pasif cephe sistemlerinden farklı olarak aktif, veri odaklı ve adaptif sistemler oluşturulabilmektedir.

Bu tez çalışması, bitkisel hareketlerden türetilen biyomimetik stratejilerin mimari cephe tasarımına aktarılması yoluyla enerji verimli ve çevresel verilere duyarlı sistemler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Literatürde ağırlıklı olarak estetik ve yapısal mekanizmalar üzerinden ele alınan kinetik sistemler, bu çalışmada biyomimetik ilkerler ile performans odaklı gün ışığı kriterleriyle değerlendirilmiş; kod tabanlı varyasyon üretimi ile parametrik tasarım sürecine yapay zekâ desteği entegre edilmiştir. Bu sayede, biyomimetik ilkelerle şekillenen, çevresel verilere duyarlı dinamik bir cephe sistemi geliştirilmiştir. Tezin akış şeması Şekil 1.1'de gösterildiği üzere, ilk bölümünde, mimarlık literatüründe sıklıkla birbirine karıştırılan ancak kavramsal olarak farklılıklar taşıyan kinetik mimarlık (kinetic architecture), uyarlanabilir mimarlık (*adaptable architecture*), dönüştürülebilir mimarlık (*transformable architecture*) ve cevap veren mimarlık (*responsive architecture*) gibi hareket temelli terminolojiler ele alınmaktadır. Bu kavramlar, temel olarak yapının hareket potansiyeline ve çevresel değişkenlere yanıt verme kabiliyetine odaklansa da her biri farklı bir teknik, işlevsel ve teorik arka plana sahiptir. Bu bağlamda, terminolojik belirsizliklerin önüne geçmek ve disiplinler arası bir kavrayış geliştirmek amacıyla söz konusu kavramlar detaylı biçimde tanımlanmıştır. Literatür taramasına mimari cephe tasarımı ve gün ışığı ile

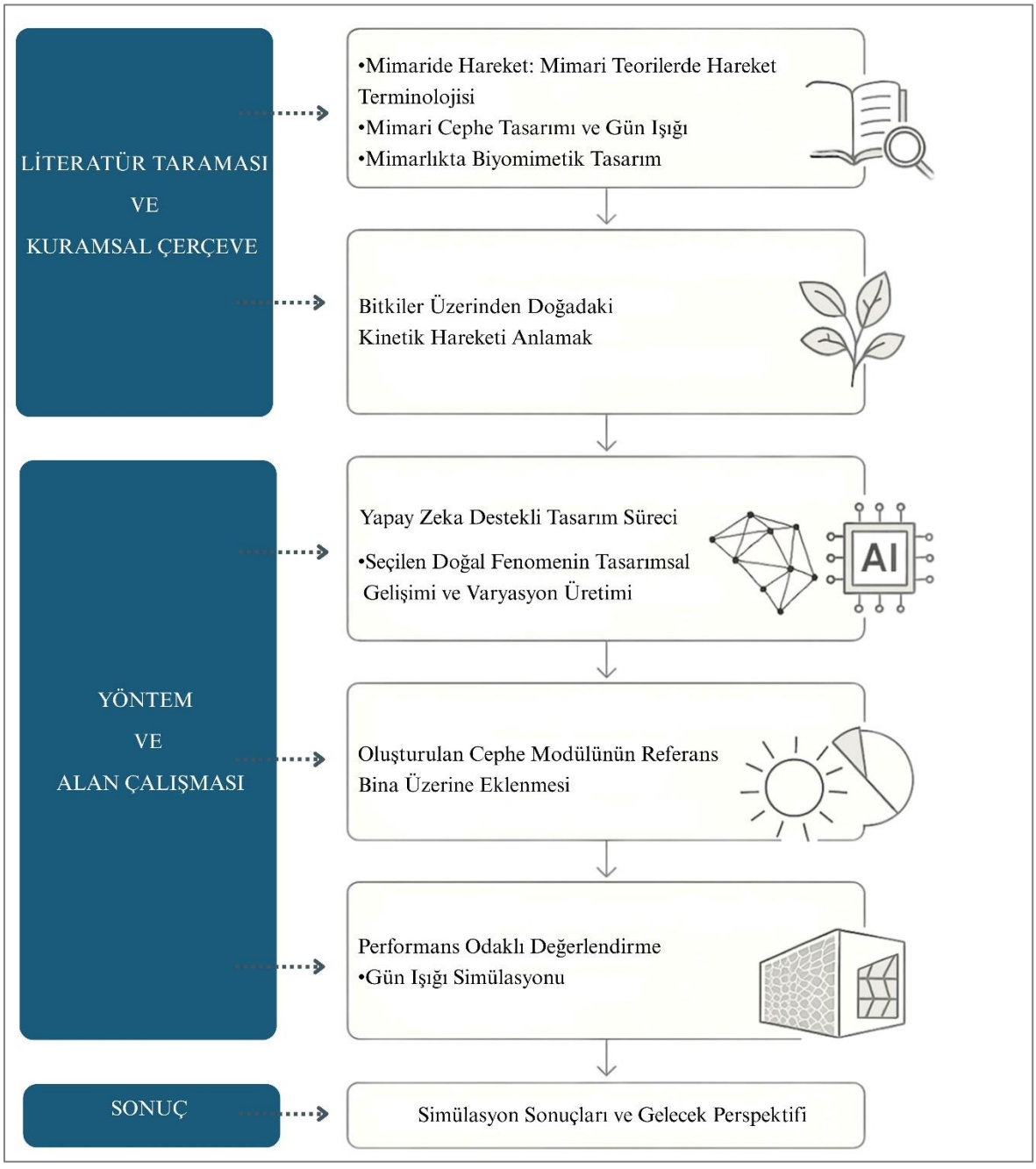
devam edilmiş ardından hareket ve cephe biyomimetik kavramı üzerinden birleştirilmiştir. Biyomimetik ilkelere dayalı kinetik cephe sistemleri üzerine mevcut akademik ve yapısal uygulamalar incelenmiş; gün ışığı optimizasyonuna yönelik adaptif mimari kabuk sistemlerinin evrimi değerlendirilmiştir. Ardından, bitkisel adaptasyon stratejileri detaylandırılarak enerji etkin bina kabuklarına nasıl entegre edilebileceği tartışılmıştır.

Bitkisel hareketin form, işlev ve çevresel tepki gibi yönleri mimari sistemlere aktarıldığında, cephe tasarımında dinamik, esnek ve veri odaklı çözümler üretilebileceği öne sürülmektedir. Bu doğrultuda, parametrik tasarım araçları (Rhino/Grasshopper) ve yapay zekâ destekli algoritmalar, biyolojik verilerin dijital ortama aktarımını kolaylaştırarak, çevresel değişkenlere tepki verebilen adaptif cephe sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Geliştirilen sistemin performansı ise sayısal simülasyonlar (Ladybug/Honeybee) aracılığıyla gün ışığı dağılımı, kamaşma azaltma ve enerji verimliliği gibi kriterler temelinde değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın temel araştırma sorusu, doğadan ilham alan bitki temelli kinetik cephe sistemlerinin, çevresel verilere duyarlı olarak çalıştığında gün ışığı performansını iyileştirmede etkili bir tasarım stratejisi olarak değerlendirilip değerlendirilemeyeceğidir. Temel araştırma sorusunu çok boyutlu olarak ele alabilmek amacıyla beş alt araştırma sorusu yapılandırılmıştır. İlk olarak, mimarlıkta hareket kavramının nasıl tanımlandığı ve bu kavramsal yaklaşımların kinetik cephe tasarımını nasıl yönlendirdiği incelenmiştir. Bu bağlamda, kinetik, adaptif, dönüşebilir ve tepki veren sistemler literatür temelli olarak değerlendirilmiştir. İkinci olarak, biyomimetik temelli yaklaşımların literatürdeki yeri sorgulanmış; doğadaki hareket fenomenlerinin –özellikle bitkisel kaynaklı katlanma ve tepki mekanizmalarının– mimari cephe sistemlerine nasıl aktarılabileceği ele alınmıştır. Üçüncü olarak, çevresel verilere duyarlı çalışabilecek kinetik cephe sistemlerinin nasıl parametrik olarak modellenebileceği araştırılmış; bu süreçte güneş yönelimi, radyasyon verisi ve saat bilgisi gibi parametrelerle çalışan sistem kurguları tasarlanmıştır. Dördüncü alt araştırma sorusu kapsamında, yapay zekâ destekli parametrik modelleme araçlarının bu sistemlerin geliştirilmesindeki rolü irdelenmiş ve doğadaki hareket örüntülerinin dijital tasarıma entegrasyon süreci analiz edilmiştir. Son olarak, geliştirilen kinetik sistem ile sabit cephe sistemi arasındaki fark, günışığı performansına odaklanan simülasyon sonuçları üzerinden değerlendirilmiş; günışığı özerkliği (DA) ve kullanışlı günışığı aydınlatması (UDI) gibi metrikler aracılığıyla karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın

tüm alt soruları hem kuramsal hem de uygulamalı olarak yanıtlanarak temel araştırma sorusuna bütüncül bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Bu tez, 3 ana bölümden oluşmaktadır. Şekil1.1'de akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Tez akış diyagramı

2. LİTERATÜR TARAMASI VE KURAMSAL ÇERÇEVE

"Hiçbir şey kendine ait gibi görünen biçimini korumaz; her şeyin yenileyicisi olan doğa, her biçimi sürekli olarak başka bir şekle dönüştürür."

Ovidius, Metamorfozlar

Pisagor'un "Hiçbir şey kendi formunu korumaz" sözü, evrendeki her şeyin geçici ve sürekli değişen bir doğaya sahip olduğunu anlatan felsefi anlayışı ifade etmektedir (Ovidius, n.d., s. 252). Bu düşünce, varlıkların sürekli evrim geçirdiği veya başka bir şeye dönüştüğü fikrini öne sürmektedir. Hem felsefede hem de bilimde, değişim yaşamın ve evrenin temel ilkesi olarak kabul edililmekte ve bu anlayış, yaşamın dinamik doğasını yansıtmaktadır.

Mimari bağlamda, yapıların sabit ve statik olmaktan çıkıp dinamik ve değişime açık bir yapıya dönüşmesi form ve cephe üzerinden çoğunlukla ele alınmakta ve doğa öğretici rol oynamaktadır. Doğadan ilham alarak tasarlama, sabit yapılar inşa etmekle sınırlı kalmak yerine, çevresel koşullara, kullanıcı ihtiyaçlarına uyum sağlayabilen, hareket ve değişim unsurlarını içeren dinamik yapılar yaratmayı hedeflemektedir. Kinetik mimaride, binalar çevresel faktörlere, değişen koşullara ve insan etkileşimlerine yanıt verecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu perspektif, mimarinin evriminde statik yapıların ötesine geçilerek, binaların dinamik ve dönüşen varlıklar olarak şekillenmesini sağlayan önemli bir adım olarak karşımıza çıkar. Bu dönüşüm, yalnızca fiziksel hareketi değil; kavramsal, işlevsel ve çevresel değişkenlere yanıt verebilen esnek sistemlerin tasarımını da kapsamaktadır. Hareketin mimari kuramlar içerisindeki farklı yorumları ve terminolojik karşılıkları, bu dinamik anlayışın kuramsal temellerini ortaya koymaktadır.

Bu bölümde, hareket kavramının mimari kuramlar içindeki yerini daha net bir şekilde anlamak amacıyla, literatürde sıklıkla birbiriyle ilişkilendirilen fakat özünde farklı anlam ve kullanım alanlarına sahip terimler olan kinetik mimarlık, uyarlanabilir mimarlık, dönüştürülebilir mimarlık ve yanıt veren mimarlık kavramları incelenecektir. Hareketin sadece fiziksel bir dönüşüm değil, aynı zamanda yapının performans, esneklik ve kullanıcı etkileşimi boyutlarını içeren çok yönlü bir tasarım yaklaşımı olduğu bu terminolojiler aracılığıyla ortaya konulacaktır. Böylece, literatürde sıkça birbirine karıştırılan bu kavramlar

arasındaki temel farklar ve ortak temalar belirlenerek, hareket temelli mimarlık yaklaşımlarına daha derinlikli bir bakış sağlanması hedeflenmektedir.

2.1. Mimari Teorilerde Hareket Terminolojisi

Mimarlıkta hareket kavramı, statik yapıların sınırlarını aşarak tasarımın çevresel ve işlevsel ihtiyaçlara dinamik bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanıyan bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Bu bölüm, bu değişimi destekleyen kinetik mimari, uyarlanabilir mimari, dönüşebilen mimari, yanıt veren mimari, deployable yapılar ve akıllı mimari gibi terimleri, literatürdeki tanımları ve birbirleriyle olan ilişkileri üzerinden analiz etmektedir. Hareket terminolojisi "kinetik, uyarlanabilir, dönüşebilen ve yanıt veren" mimarlık başlıkları altında incelenmiştir.

Kinetik Mimari, mekanik hareket yoluyla çevresel performansı iyileştiren sistemleri tanımlamaktadır (Fox ve Yeh, 2005). Örneğin, güneş açısına bağlı olarak dönen paneller veya katlanabilir gölgeleme elemanları, iç mekân aydınlık seviyesini optimize ederken enerji tüketimini azaltmaktadır. Bu terim, hareketin "mekanik" ve "amaçlı" olması gerektiğini vurgular; malzemenin termal genleşmesi gibi pasif olayları dışlamaktadır (Kolarevic, 2003).

Uyarlanabilir Mimari ise zaman içinde değişen çevresel koşullara (iklim, mevsimsel döngüler) veya kullanım ihtiyaçlarına stratejik uyum sağlayan yapıları kapsamaktadır (Attia ve diğerleri, 2017). Örneğin, modüler cephe sistemleri, yazın güneşi bloke ederken kışın iç mekân ısı kazanımını artıracak şekilde yeniden yapılandırılabilmektedir. Bu yaklaşım, hareketin sürekli olmaktan ziyade dönemsel ve planlı bir şekilde gerçekleştiğini öne çıkarmaktadır.

Bu çalışmada, dönüşebilen mimari kavramı; yapıların fiziksel biçimlerini ve işlevlerini çevresel koşullara göre uyarlayabilme yeteneğine sahip olmaları şeklinde tanımlanmaktadır. Hoberman (2014), bu kavramı objelerin ve yapıların boyut ve şekillerinin yumuşak biçimde değiştirilebilmesini sağlayan bir teknoloji olarak ifade etmektedir. Söz konusu yaklaşım, yapıların sabit bir son durumdan ziyade, geçici ve sürekli dönüşen ara durumlara göre tasarlandığı bir anlayışı benimsemektedir. De Temmerman ve diğerleri (2012) ise dönüşebilen yapıların, kullanıcı gereksinimlerine ve çevresel değişkenlere yanıt verebilecek biçimde yeniden yapılandırılabilir sistemler olduğunu belirtmektedir. Bu bağlamda,

dönüşebilen mimari sistemlerin, sürdürülebilir tasarım anlayışını benimseyen toplumların hızla değişen ihtiyaçlarına uyum sağlayabilecek potansiyele sahip olduğu bu çalışmada vurgulanmaktadır (Hoberman, 2014; De Temmerman ve diğerleri, 2012).

Yanıt veren Mimari, sensörler ve veri analizi aracılığıyla çevresel koşullara veya kullanıcı davranışlarına gerçek zamanlı tepki veren sistemleri kapsamaktadır. Oosterhuis (2012), 3 Boyutlu şekil değiştiren cephelerin, kullanıcı pozisyonuna göre dinamik olarak ayarlanarak doğrudan güneş ışınlarını filtrelediğini ve yararlı gün ışığını %24'e kadar artırdığını belirtmektedir. Bu tür sistemler, "akıllı mimari" ile kesişse de temel farkı, insan-merkezli etkileşime verdiği önem olduğu vurgulanmaktadır (Bullivant, 2006:62).

Bu bölüm, hareketin mimari literatürde nasıl temsil edildiğine dair kapsamlı bir bakış açısı sağlamak amacıyla hazırlanmıştır. Bölümün sonuç ürünü, çeşitli tanımlar arasındaki karşılıklı ilişkileri yansıtan, kinetik, dönüşebilen, uyarlanabilir ve yanıt veren mimari cepheyi tanımlamak için en uygun terimi belirlemeye yardımcı olarak, tutarlı ve birbirine bağlı bir terminoloji sistemi oluşturmaktır. Bu terimlerin ortak noktası, "hareket" şemsiyesi altında, yapıların değişen ihtiyaçlara uyum sağlama kapasitesini vurgulamalarıdır. Mimarlıkta hareket odaklı kavramlar, yapıların çevresel, işlevsel ve teknolojik koşullara yanıt verebilme kapasitesini merkeze alan, çağdaş tasarım yaklaşımlarının temelini oluşturmaktadır. Kinetik, uyarlanabilir, dönüşebilen ve yanıt veren mimari gibi kavramlar, her biri hareketin farklı bir boyutunu öne çıkarsa da, ortak biçimde yapının değişime karşı esnekliğini vurgulamaktadır. Bu bölümde tanımları yapılan bu kavramlar, mimarlık literatüründeki kuramsal yaklaşımlar ve tanımsal farklılıklar açısından ele alınmış; aralarındaki kavramsal kesişimler ve ayrımlar üzerinden sistematik bir tartışma zemini oluşturulmuştur. Takip eden alt başlıklarda, her bir yaklaşım kendi teorik bağlamında incelenerek, "hareket" olgusunun mimarlık kuramındaki yeri ve anlamı daha ayrıntılı biçimde tartışılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak, fiziksel hareketin tasarımsal bir ilke olarak değerlendirildiği Kinetik Mimari kavramı üzerinde durulmaktadır.

2.1.1. Kinetik mimari

Kinetik mimarlık, mimari yapıların hareket edebilme ve çevresel koşullara uyum sağlayabilme kabiliyetini içeren tasarımlar olarak tanımlanır. Bu konseptin kökenleri insanlık tarihinin öncesine kadar uzanır. İnsanlar daha iyi yaşam koşulları arayışı içinde,

hareket kabiliyeti olan yapılar inşa etmişlerdir. Örneğin, göçebe toplumların taşınabilir ve katlanabilir barınakları, erken dönem kinetik yapıların ilkel örnekleri arasında gösterilmektedir. Bu barınaklar uzun ömürlü olmasa da yapım teknikleri nesilden nesile aktarılmış ve zamanla geliştirilmiştir (Stevenson, 2011). 1950'lerde Frei Otto, geleneksel çadır yapı prensiplerinden esinlenerek "dönüştürülebilir şemsiyeler" tasarlamış ve bu konsepti hafif ve uyarlanabilir yapıların prototipi olarak kullanmıştır (Selçuk ve Sorguç, 2009).

1960'larda, Pinero iki yönde genişleyebilen yapılar için makas mekanizmalarını kullanarak kinetik yapıların gelişimine katkıda bulunmuştur.Onun çalışmaları, mimari tasarımda hareket ve genişleme ihtimallerini araştıran önemli adımlardan biridir. Pinero'nun ardından, Chuck Hoberman, mekanik sistemleri temel alarak yeni mekânsal düzenlemeler geliştirmiştir. Hoberman'ın tasarımlarında hareketin mekanik organizasyonu açıkça görülmekte ve bu yapıların mekânı dönüştürme yeteneği ön plana çıkmaktadır. Ancak, Selçuk ve Sorguç'a (2009) göre bu tür yapıların çoğu, bina yapı sistemlerinin bütünleşmiş bir parçası olmaktan ziyade genellikle enstalasyonlar olarak değerlendirilmiştir.

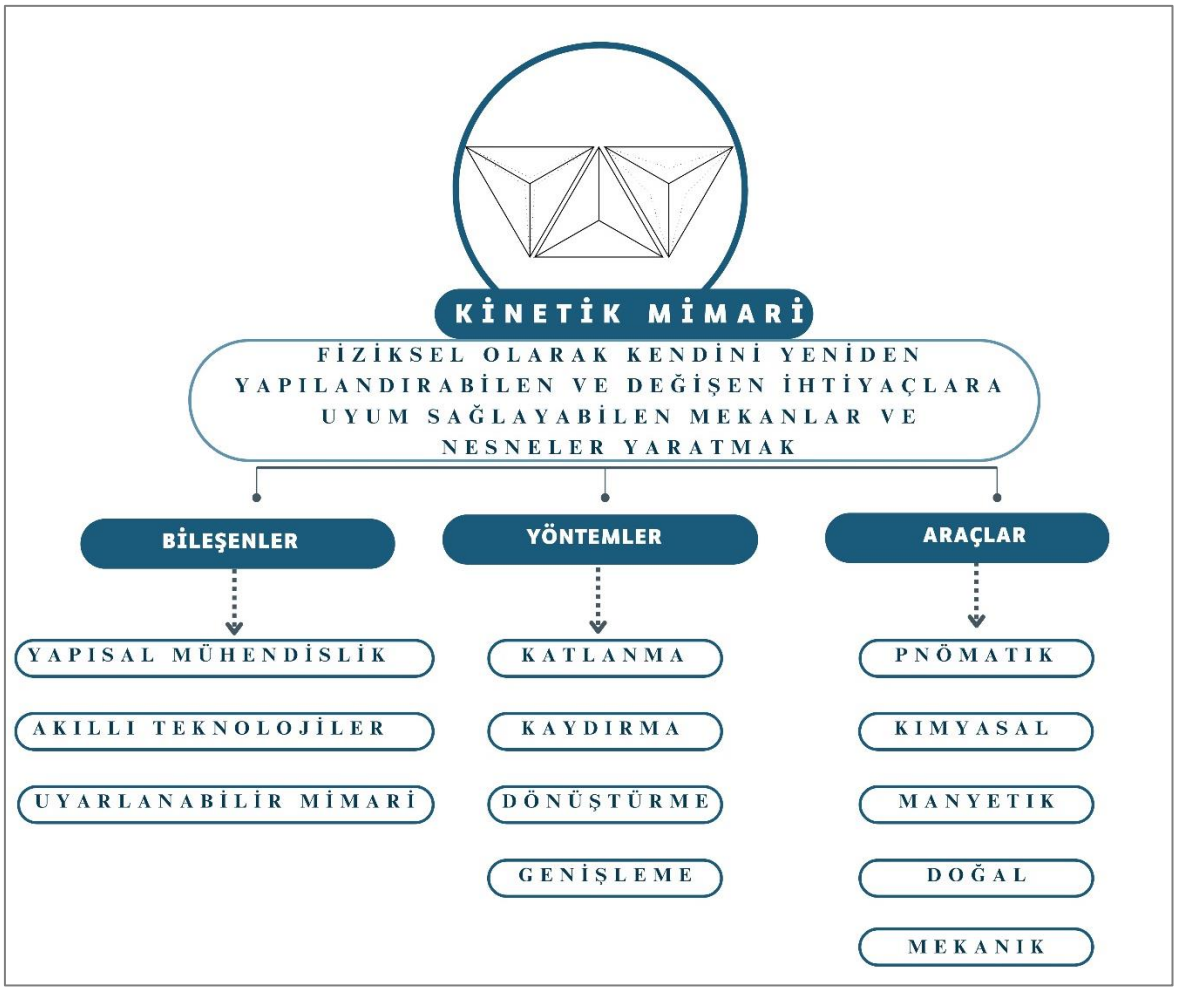
Kinetik mimarlığın kavramsal çerçevesi ilk kez 1970 yılında William Zuk ve Roger H. Clark tarafından yazılan Kinetic Architecture adlı eserde resmiyet kazanmıştır. Bu kitapta kinetik mimarlık "hareket yoluyla değişime uyum sağlayabilen mimari" olarak tanımlamıştır. Bu tanım, kinetik mimarlığı mimari tasarımın ayrılmaz bir parçası olarak "hareketi", farklı biçimlerde ifade edebilme esnekliği sunan bir süreç olarak değerlendirmektedir. Zuk ve Clark (1970), mimarinin tarihsel olarak düşük bir evrimsel seviyede kaldığını ve biyolojik evrimle kıyaslandığında sınırlı uyum kapasitesine sahip olduğunu savunmuşlardır. Ancak bu kavram, hareketi içeren yapıların tarihsel örnekleriyle kinetik bir evrime işaret etmektedir.

Michael Fox, kinetik mimarlık alanında modern bir yaklaşım sunan önemli bir teorisyen ve MIT'deki Kinetic Design Group'un kurucusudur. Fox, kinetik mimarlığı mühendislik prensiplerine dayandırarak daha somut ve yenlikçi bir bakış açısı geliştirmiştir. Zuk ve Clark'ın vizyonunun aksine, Fox'un yaklaşımı mevcut teknolojik ve mühendislik gerçeklerine dayanmaktadır. Fox, kinetik yapıların mevcut malzeme ve teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilebileceğini ve bu yapıların tasarımında mühendisliğin önemli bir yer tuttuğunu savunmaktadır (Fox, 2001; Fox ve Kemp, 2009). Fox'un çalışmaları, kinetik

mimarlığın hareket ilkesini koruduğunu ve mimari inovasyonların yapısal mühendislik ve hesaplamalı tasarım alanındaki gelişmelerle doğrudan bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Kinetik Mimarlık, mimaride yeni bir boyut açarak binaların statik ve durağan doğasını sorgulamaktadır (Fox ve Yeh, 2005). Bilgi teknolojilerindeki gelişmeler, mimari tasarımda esneklik ve uyarlanabilirliği mümkün kılarak, kullanıcı ihtiyaçlarına ve çevresel koşullara duyarlı yapıların tasarlanmasını sağlamaktadır (Attia ve diğerleri, 2017). Bu mimari anlayış, sensörlerle desteklenen mekanizmalar ve algoritmalarla kontrol edilen sistemler sayesinde enerji verimliliğini artırmak, gün ışığını optimize etmek ve sürdürülebilirliği sağlamak için yenilikçi yaklaşımlar ortaya koymaktadır (Oosterhuis, 2012; Loonen ve diğerleri, 2013).

Kinetik yapıların performansı zaman zaman beklentilerin altında kalmakta ve bu, kinetik sistemlerin potansiyelinin tam anlamıyla kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Kolarevic, 2003). Bu nedenle, kinetik yapıların tasarımı matematik, malzeme bilimi, mühendislik ve mimarlık gibi çok disiplinli bir yaklaşımla ele alınmalıdır (Hoberman, 2010). Bu bağlamda mimarlar, hem mekanik mühendisleriyle yaşanan zorlukları aşmalı hem de yapısal dengeyi sağlamalıdır. Örnek olarak origami gibi katlama yöntemleri, form, kuvvet ve hareketin anlaşılmasında mimarlık dahil birçok alanda analog bir araç olarak kullanılabilir (Hoberman, 2010). Bu alanın teorik çerçevesinin tam anlamıyla gelişmemiş olması, kinetik mimarlığın tanımını kapsamlı bir şekilde oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda hazırlanan Şekil 2.1, kinetik mimarinin kuramsal bileşenlerini özetleyerek; yapısal mühendislik, teknolojik araçlar ve hareket yöntemleri ekseninde kinetik sistemlerin nasıl tanımlandığını şematik olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 2.1. Michael Fox'un "*Ephemeralization*" başlıklı makalesinde (2001) sunduğu İleri Kinetik Mimari Sistemler kavramı şeması (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Kinetik mimari, değişen çevresel ve işlevsel koşullara yanıt verebilmek amacıyla fiziksel formunu, konumunu ya da geometrisini aktif olarak yeniden yapılandırabilen yapılar bütününü tanımlamaktadır (Fox, 2001). Michael Fox'un kuramsallaştırdığı ileri düzey kinetik mimari sistemleri yaklaşımı, bu mimarlık biçimini yalnızca hareketli elemanlar olarak değil, yapısal mühendislik, gömülü hesaplama ve uyarlanabilir mimariyi içeren çok katmanlı bir sistem olarak ele almaktadır. Bu anlayış doğrultusunda, kinetik mimaride hareketin gerçekleştirilme biçimleri (örneğin katlanma, kaydırma, dönüşüm ve genişleme) ile bu hareketi sağlayan araçlar (pnömatik, manyetik, kimyasal, doğal ya da mekanik sistemler) sistematik biçimde sınıflandırılmaktadır. Aynı zamanda bu yapıların performansı, onları meydana getiren teknolojik bileşenlerle birlikte ele alınmalıdır.

2.1.2. Uyarlanabilir mimari

Uyarlanabilir mimari, bir binanın yapısal olarak değiştirilme potansiyelini de içeren daha geniş bir bakış açısını kapsayan bir yaklaşımdır. Renebeck, Meldin, Maccreanor, Russell, Moffat, Douglas, Schneider ve Till tarafından yapılan çalışmalar, "adaptasyon" teriminin "esneklik" gibi diğer kavramlarla birlikte kullanıldığını vurgulamaktadır. Esneklik, iki farklı anlama sahiptir. "Esneklik, değiştirilebilirlik ve genişletilebilirlik, bir varlığın fiziksel olarak değişme olasılığı olarak tanımlanırken, diğer bir görüş ise esnekliğin, mekânsal planlamanın değişikliklere uyum sağlama potansiyelini ifade ettiğini savunur" (Li, 2020: 12).

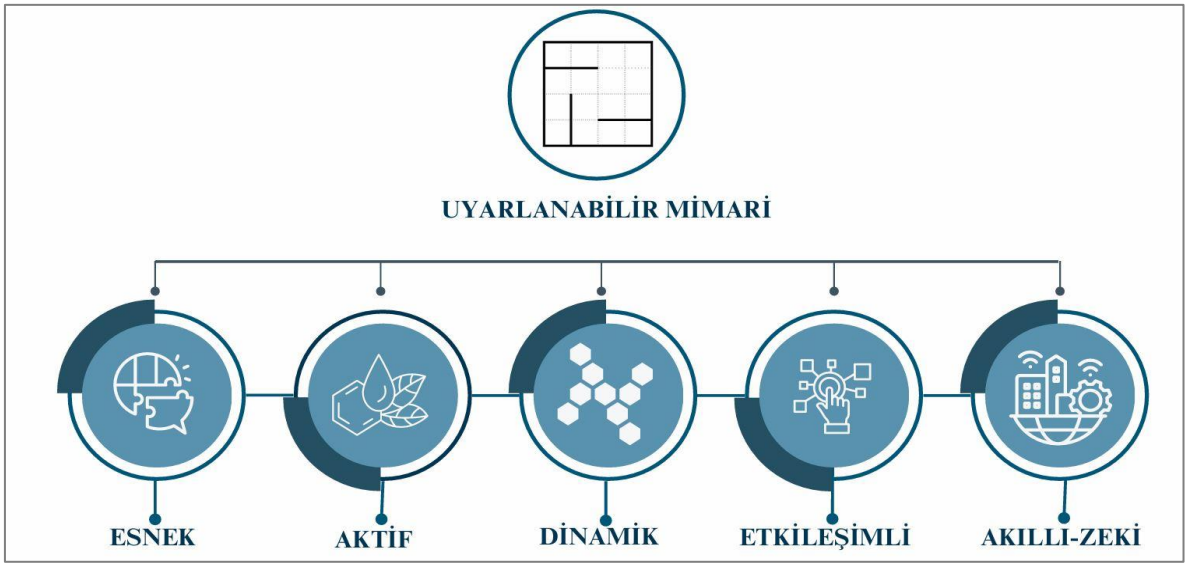
Guopeng Li, uyarlanabilir mimarlığı; değişim gereksinimlerinin ortaya çıkması, bu gereksinimlere yanıt verebilme kapasitesi ve bu kapasitenin biçimsel ya da araçsal yollarla gerçekleştirilmesi süreçlerini kapsayan bir kavramsal çerçeve içinde ele almaktadır. Bu yaklaşımı temel alan Guopeng, uyarlanabilir mimarlığı; büyük ölçekli fiziksel dönüşümleri gerektirmeksizin, tasarlanmış biçimsel ya da araçsal çözümler aracılığıyla farklı çevresel koşullara ya da bireysel ihtiyaçlara yanıt verebilme ve bu koşullara uyum sağlayabilme yetisi olarak tanımlamaktadır. (Li, 2020: 43).

Loughborough Üniversitesi'nden Robert Schmidt III, Toru Eguchi, Simon Austin ve Alistair Gibb'in *'What Is The Meaning of Adaptability In The Building Industry?'* adlı makalesinde adaptasyonun literatürde dört farklı anlamda kullanıldığı tespit edilmiştir: erişilebilirlik, açık plan, bina duyarlılığı ve performansa dayalı bina. Yazarlar, bu dört boyutu sentezleyerek adaptasyonun tanımını şu şekilde önermişlerdir: "Bir binanın, bağlamının evrilen taleplerini etkin bir şekilde karşılayarak yaşam süresi boyunca maksimum değer yaratma kapasitesi" (Schmidt ve diğerleri, 2010). Esasen, bina dönüşümünün temel amacı, yapının performansının optimize edilmesi ve kullanıcılarına fayda sağlamasıdır. Kinetik tasarım kavramından farklı olarak adaptif mimari, yalnızca hareketi değil, aynı zamanda dönüşüm sürecinin verimliliği ve kullanışlılığı gibi ek bir odak noktası içermektedir.

2007 tarihli *'Adaptive Architecture'* başlıklı makalede Lelieveld ve diğerleri, adaptasyonun daha karmaşık bir tanımını önermiş ve altı farklı adaptasyon seviyesinden oluşan bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu seviyeler, sistemin kendi kendini düzenleme kapasitesine dayalı bir gradyan üzerine sıralanmıştır: esnek, aktif, dinamik, etkileşimli, akıllı binalar. Bu spektrumun en düşük basamağında yer alan "esnek" sistemler, yalnızca kullanıcı kontrolü

altında ayarlanabilen sistemler olarak tanımlanırken, “akıllı” seviyesinde olanlar, kendi kendine öğrenme kapasitesine sahip olup, kullanıcılar ve çevreyle maksimum uyum gösterir. (Şekil 2.2) (Lelieveld ve diğerleri, 2007).

Adaptif uyarlanabilir mimarlık, esneklik ve değişebilirlik unsurlarını birleştirerek yapıların kullanıcı ihtiyaçlarına ve çevresel koşullara daha duyarlı hale gelmesini sağlar. Kinetik mimarinin hareket ilkesinin ötesine geçerek, performans optimizasyonu ve kullanıcı deneyimi gibi hedefleri de içermektedir. Bu bağlamda, adaptif sistemler, yalnızca kullanıcı kontrolünde çalışan esnek yapıların ötesine geçerek akıllı ve kendi kendine uyum sağlayan sistemlere evrilmektedir. Uyarlanabilir mimarlık kavramı, farklı seviyelerde gerçekleşebilen bir adaptasyon kapasitesi doğrultusunda çok katmanlı bir şekilde ele alınmaktadır. Lelieveld ve diğerleri tarafından önerilen modelde, adaptasyon beş seviyede tanımlanmakta ve sistemin kendini düzenleme kapasitesine göre esnekten zekîye uzanan bir süreklilik içinde sınıflandırılmaktadır. Bu bağlamda, en düşük seviye olan “esnek” sistemler yalnızca kullanıcı kontrolüyle değişime olanak tanırken; “akıllı-zeki” olarak tanımlanan en üst düzeydeki sistemler, çevreyle ve kullanıcıyla tam uyum içinde çalışabilen, öğrenme yeteneğine sahip yapılar olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.2’de, bu altı adaptasyon düzeyinin grafiksel temsili sunulmaktadır; esnek, aktif, dinamik, etkileşimli ve akıllı-zeki kavramları üzerinden uyarlanabilir mimarinin bileşenleri şematik olarak gösterilmektedir. (Lelieveld ve diğerleri, 2007).



Şekil 2.2. Lelieveld, Voorbij ve Poelman (2007) tarafından tanıtılan, karmaşıklık düzeyine göre sıralanmış uyarlanabilirlik seviyeleri şeması (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Uyarlanabilir mimarlık, yapının kullanıcı ihtiyaçlarına ve çevresel koşullara göre şekil, boyut veya işlev değiştirebilme yeteneğini ifade eden bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, mimari sistemlerin esnek, aktif, dinamik, etkileşimli ve akıllı-zeki özellikler taşıması beklenmektedir. Esnek olabilen sistemler, değişen gereksinimlere uyum sağlayarak formunu veya kullanım şeklini değiştirebilmekte; aktif olabilen yapılar, çevreden gelen fiziksel ve çevresel verilere yanıt verebilmektedir. Dinamik sistemler, zamanla değişebilen ve farklı durumlara göre davranışlarını dönüştürebilen çözümler üretirken; etkileşimli yapılar, kullanıcı ve çevre ile sürekli iletişim kurarak bu etkileşim doğrultusunda kendini güncelleyebilmektedir. Akıllı-zeki sistemler ise sensörler, algoritmalar ve yapay zekâ entegrasyonları aracılığıyla karar verebilmekte ve kendi işlevlerini optimize ederek çevreye daha duyarlı bir şekilde yanıt verebilmektedir. Şekil 2.2' de uyarlanabilir mimarinin çok boyutlu bir kavram olduğunu ve bu kavramın farklı tasarım stratejileri ile zenginleştiğini ortaya koymaktadır.

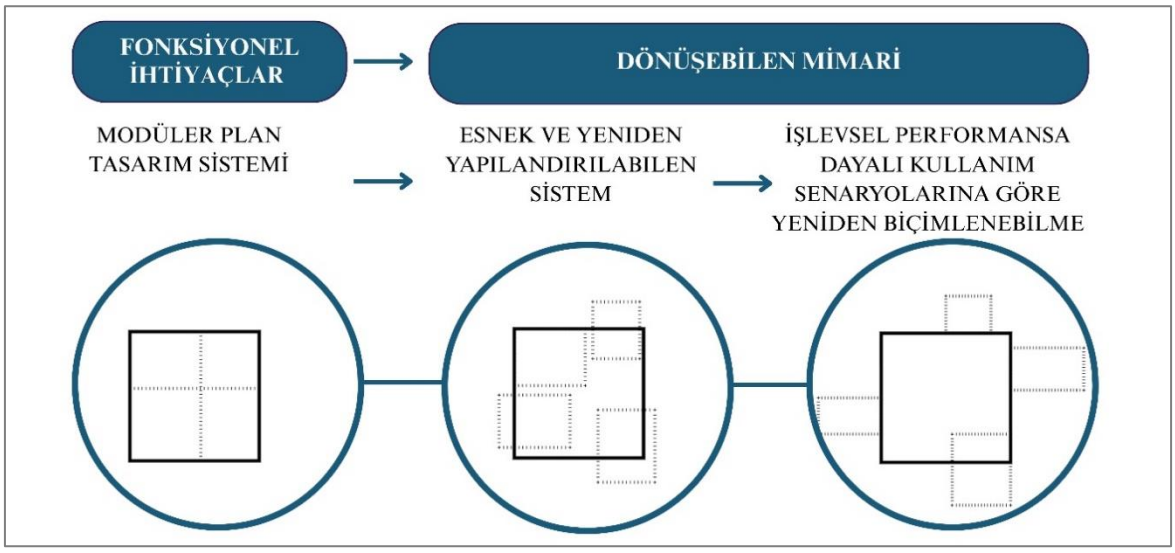
2.1.3. Dönüşebilen mimari

Dönüşebilen mimarlık kavramı, mimari yapıların biçim, işlev ya da konfigürasyon açısından değiştirilebilir olma özelliğini ifade etmektedir. Bu ifade, transformable kelimesinin "dönüştürülebilir" (*capable of being changed or converted*) (Merriam-Webster, n.d.) ve architecture kelimesinin "yapı inşa etme sanatı veya bilimi" (Oxford English Dictionary, n.d.) şeklindeki temel anlamlarına dayanmaktadır. Söz konusu kavram, özellikle kinetik ve uyarlanabilir mimarlık yaklaşımları bağlamında, çevresel koşullara yanıt verebilen esnek yapı sistemlerini tanımlamak üzere kullanılmaktadır.

Ünlü Amerikalı sanatçı, mimar ve mühendis Chuck Hoberman, 2014 yılında Londra'daki Architectural Association'da gerçekleştirdiği konuşmasında, dönüştürülebilir tasarım kavramını iki farklı açıdan tanımlamıştır. İlk olarak, bu kavramı "objelerin ve yapıların boyut ve şekillerinin yumuşak biçimde değiştirilebilmesini sağlayan bir teknoloji" olarak ele alırken, ikinci olarak "koşullara anında yanıt verebilen ürün ve ortamlar yaratma stratejisi" şeklinde ifade etmiştir (Hoberman, 2014). Hoberman'ın bu tanımları, Kronenburg'un daha çok fiziksel değişkenlik üzerine odaklanan yaklaşımından farklı olarak, yapıların çevresel etkilere verdiği tepkileri ve bu tepkiler doğrultusunda geçirdiği dönüşüm evrelerini de içermektedir. Hoberman'a göre dönüştürülebilir mimarlık, yalnızca görsel ya da estetik bir dönüşüm değil, aynı zamanda işlevsel performansa dayalı olarak farklı kullanım

senaryolarına göre yeniden biçimlenebilen tasarım sistemleridir (Hoberman, 2014) (Kronenburg, 2007: 12).

Dönüşebilen mimari, yapının iskeletinde, kabuğunda ve/veya iç mekân yüzeylerinde meydana gelen kontrollü yapısal değişiklikler aracılığıyla, yapıların hızlı biçimde yeni şekil, form, işlev veya mekânsal karakter kazanabilmesini mümkün kılmaktadır (Fox, 2001). Bu tür sistemler, genellikle mafsallı bağlantılarla bir araya getirilen elemanlar üzerinden çalışmakta ve yapının kullanım şekline göre yeniden yapılandırılabilmesine olanak tanımaktadır (Asefi, 2010). Jonathan Bell (2000:47,75) ise dönüşebilirliğin yalnızca fiziksel hareketle sınırlı olmadığını, aynı zamanda modüler sistemler, teknolojik entegrasyon ve gündelik mekânsal özelleştirme kapasitesi ile ilişkili çok katmanlı bir kavram olduğunu vurgulamaktadır. Kronenburg'un (2007) da ifade ettiği üzere, bu tür yapılar yalnızca biçimsel dönüşümü değil, aynı zamanda kullanıma ve algıya yönelik temel değişimleri de kapsamaktadır. Bu bağlamda Şekil 2.3, farklı fonksiyonel ihtiyaçlara uyum sağlayabilmek amacıyla yapının zaman içerisinde geçirilebilir dönüşüm evrelerini temsilen kurgulanmış olup, dönüşebilen mimarinin esnek ve yeniden yapılandırılabilir doğasını görsel olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 2.3 Fonksiyonel ihtiyaçlara göre fiziksel olarak yeniden yapılandırılabilen mimari mekân organizasyonunu temsil eden şematik diyagram (yazar tarafından oluşturulmuştur) (Kronenburg, 2007:12)

Hoberman'ın görüşlerine ek olarak Bell ve Godwin (2000:s.47), hareketin fiziksel performansından ziyade, uyum sürecini mümkün kılan ana unsurlara dikkat çekmiştir: kullanılan teknolojiler, modüler sistemler ve mimari alanı değiştiren ve özelleştiren mekanik yapılar. Bu tanım, dönüştürülebilir mimarlığın kullanıcıların özelleştirebileceği çok işlevli bir yaşam ortamı yaratma yaklaşımı olarak tanımlanabileceğini göstermektedir. Bell ve Godwin'in tanımı, bu bağlamda, uyaranabilir mimarinin bir devamı olarak düşünülmektedir.

Mimari teorik literatürdeki tanımlardan, dönüştürülebilir mimarlığın değişimin fiziksel sonuçlarına ve bunu mümkün kılan teknolojik unsurlara önemli bir vurgu yaptığı anlaşılmaktadır. Bu, hareket türlerine odaklanan kinetik mimarlık kavramından ayrılmaktadır. Ayrıca, dönüştürülebilir mimarlığın sınıflandırılması, yapısal dönüşümü sağlayan sistemlerin mekanik tipolojisine dayanırken, adaptif mimari daha çok yapıların dışsal kuvvetlere nasıl tepki verdiğine odaklanmaktadır(Hoberman, 2014).

Joshua David Lee, yüksek lisans tezinde, ilgili teorik literatürün kapsamlı bir analizine dayanarak uyarlanabilir mimarinin tüm özelliklerini kapsayan en geniş tanımı sunmuştur: "Eklemli bağlantılarla birleştirilen yapı, cephe ve/veya iç yüzeylerdeki değişikliklerle, kontrollü bir şekilde hızla yeni şekiller, formlar, işlevler veya karakterler alabilen binalar ve yapılar" (Lee, 2012). Bu bağlamda, "dönüştürülebilir mimarlık" terimi, mimarlığa hareketin yapısal yönlerini dahil etmeye odaklanan terimlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bu terim, kinetik mimariden daha spesifik olduğu için, tüm hareket türlerini tanımlayan bir üst terim olarak hizmet edemez.

Teorik literatürde yer alan tanımlamalardan, dönüşebilir mimarinin, değişimi oluşturan teknolojik unsurların ve değişimin fiziksel sonuçların öneminin vurgulandığı gözlemlenmektedir. Bu gözlem ile, dönüşebilir mimarinin kinetik mimari kavramından ayrıldığı sonucuna varılabilir. Bunun yanı sıra, dönüşebilir mimarinin sınıflandırılması, yapıların dönüşümü esnasındaki sistemlerin mekanik tipolojisine dayanırken, adaptif mimariden farklı olarak yapıların dış etkenlere uyum sağlama biçimine odaklanmaktadır. Kronenburg (2007) dönüşebilir mimariyi, farklı işlevlere göre değiştirilebilen tasarımlardır. Odak noktası estetik görünümden ziyade işlevsel performanstır" olarak açıklamaktadır (Reuter ve diğerleri, 2006). Joshua David Lee (2012), yüksek lisans tezinde dönüştürlebilir mimarinin kapsamını ifade eden en geniş terimi, yaptığı derin teorik incelemer yardımıyla yapmıştır."Yapılar ve binalar, bağlantılı mafsallar aracılığıyla yapı, dış yüzey ve/veya iç

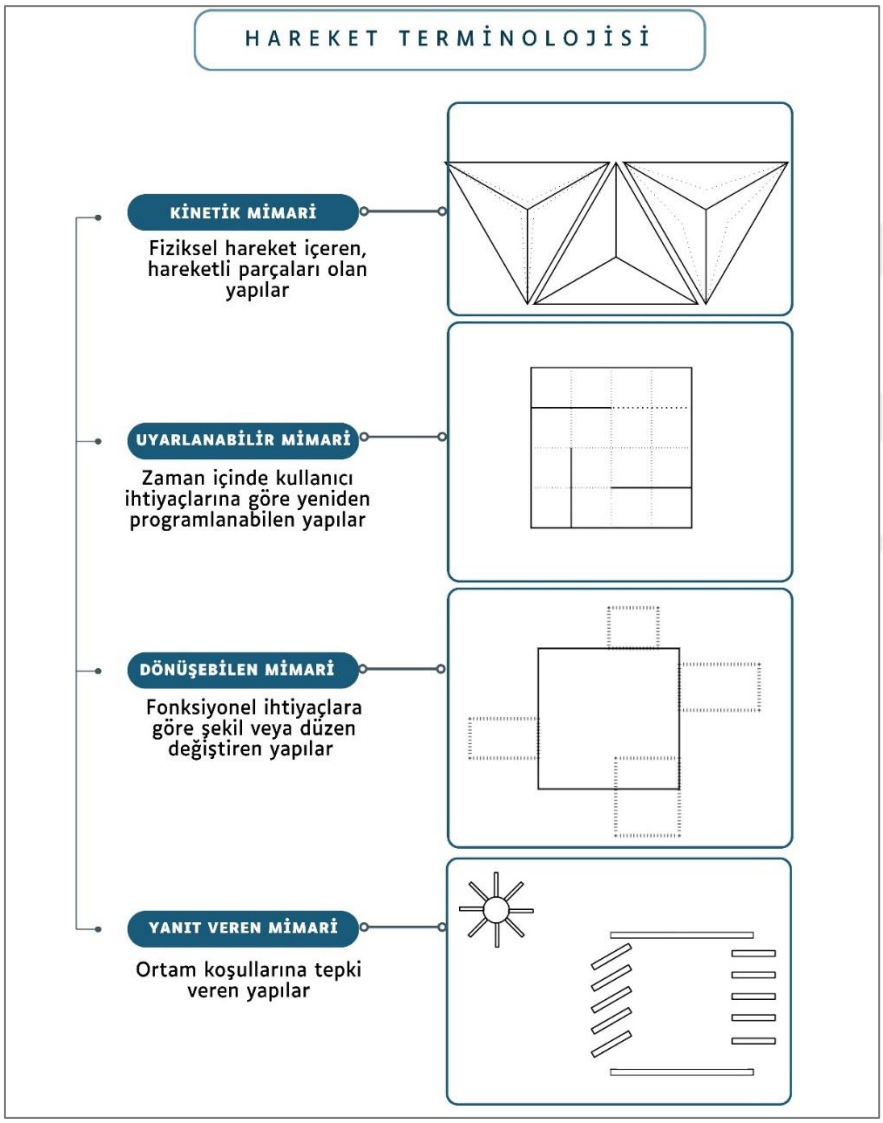
yüzeylerde kontrollü bir şekilde değişiklik yaparak hızla yeni şekiller, formlar, işlevler veya karakterler kazanabilen sistemlerdir." Dönüştürülebilir yapılar, değişen koşullara göre biçimlerini veya işlevlerini uyarlayarak, sürdürülebilir tasarım anlayışını giderek daha fazla benimseyen bir toplumun hızla gelişen ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Bu yaklaşım, yapıların nihai bir duruma göre değil, geçiş halindeki bir duruma göre tasarlandığı anlayışıyla da desteklenmektedir; bu nedenle bu tür yapılara "dönüştürülebilir yapılar" denmektedir (Temmerman ve diğerleri, 2012).

2.1.4. Yanıt veren mimari

1970'li yıllarda, mimarlık kuramında "hareket" kavramı etrafında şekillenen çeşitli dinamik mimari yaklaşımlar eşzamanlı olarak gelişim göstermeye başlamıştır. Bu bağlamda, yanıt veren mimarlık terimi, özellikle bilgisayar destekli tasarımın mimari söyleme dahil olduğu bir dönemde, mimarlık literatüründe belirgin şekilde kullanılmaya başlanmıştır. 3–5 Mayıs 1972 tarihlerinde MIT tarafından düzenlenen "*The Shirt-Sleeve Session in Responsive Housebuilding Technologies*" başlıklı toplantılar, bu yeni mimari yaklaşımın sistematik biçimde ele alındığı ilk kapsamlı girişimlerden biri olarak kabul edilmektedir (Allen, 1974). Söz konusu oturumlarda, yanıt veren mimarlığın kavramsal çerçevesi kesin sınırlarla çizilmemiş olsa da, sunulan bildiriler bu alanda düşünsel bir temel oluşturmuştur. Bu oturumların önemli katılımcılarından biri olan Wolf Hilbertz, mimaride tepkiselliğin yalnızca bina ölçeğinde değil, daha geniş bir çevresel bağlamda ele alınması gerektiğini savunmuştur. Hilbertz'e göre, bir yapı çevresi kullanıcısı üzerinde etkide bulunmaya başladığında, evrimsel bir sistem oluşur ve bu sistem, insan–çevre ilişkisini yeni bir diyalog düzeyine taşır. Tepkisel sistem, yalnızca otomatik yanıtlar veren bir düzlemde kalırken, evrimsel sistem "kasıtlı uyarım yoluyla hem sosyo-kültürel hem de biyolojik evrimi hızlandırır" (Hilbertz, 1972).

Aynı toplantılarda, tepkisel mimarinin öncülerinden Nicholas Negroponte de üç farklı "*responsiveness*" (tepkisellik) kategorisi tanımlamıştır: Birincisi, kullanıcı katılımına dayalı planlama sistemlerini içeren tepkisel tasarım teknolojisi; ikincisi, fiziksel yapı sistemlerinin değişkenliğine odaklanan tepkisel yapı teknolojisi; ve üçüncüsü, insan–yapı ilişkisini bilişsel düzeyde yorumlayan tepkisel mimarlık anlayışı (Negroponte, 1975). Negroponte'ye göre bu üç kavram sıklıkla birbirine karıştırılmakta olup, her biri özünde farklı bir etkileşim ve adaptasyon düzeyini temsil etmektedir.

Bu teorik çerçevede, tepkisel mimarlığın özünde yalnızca çevresel verilere tepki veren sistemler üretmeyi değil; aynı zamanda yapının kullanıcı ile kurduğu karşılıklı etkileşim üzerinden, çevrenin anlamlandırılmasına katkı sunmayı amaçladığı söylenebilir. Hilbertz ve Negroponte'nin bu konudaki katkıları, yalnızca teknolojik bir dönüşümü değil; aynı zamanda mimari üretimin sosyokültürel ve bilişsel boyutlarının yeniden yapılandırılmasını hedefleyen çok disiplinli bir yaklaşımı ortaya koymaktadır (Fox ve Kemp, 2009: 49).



Şekil 2.4. Literatür taraması sonucunda oluşturulan hareket terminolojileri diyagramı (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Bu bağlamda "hareket" kavramı etrafında şekillenen diğer terminolojiler olan kinetik, uyarlanabilir, dönüştürülebilir ve yanıt veren mimarlık terimleri de çoğu zaman birbirinin yerine kullanılsa da, her biri belirli yönlerden farklılaşmaktadır. Şekil 2.4'te görüleceği üzere

kinetik mimarlık, hareketin fiziksel olarak görünür ve mekanik yollarla gerçekleştiği mimari sistemleri ifade ederken, dönüşebilen mimarlık, yapının bileşenlerinin esnek biçimde yeniden konfigüre edilmesini sağlayan teknik kapasiteye odaklanır (Kolarevic, 2003). Uyarlanabilir mimarlık, çevresel koşullara bağlı olarak yapı sistemlerinin performansını optimize etmesine vurgu yaparken; yanıt veren mimarlık, yapının kullanıcıyla sürekli bilgi alışverişinde bulunarak davranışını şekillendirmesini esas alır. Bu ayrımlar, kavramsal karmaşayı azaltmak ve hareket temelli mimarlık yaklaşımlarının özgün yönlerini ortaya koymak açısından önemlidir (Gruber, 2009; Bijari ve diğerleri 2025).

2.2. Mimarlıkta Kinetik Cephe ve Gün Işığı

Gün ışığının mimarlık tarihinde önemli bir rolü olmuştur ve bu, yapıların tasarımından iç mekânlarının fonksiyonlarına kadar geniş bir yelpazede etkisini göstermektedir. Erken dönem insan yerleşimlerinden, mağaraların ilkel açıklıklarına kadar, gün ışığı ilk başta gece ile gündüz arasındaki farkı belirleyen bir işlev taşımıştır. Ancak, yapıların gelişmesiyle birlikte gün ışığının rolü, doğal ışığı içeriye almakla sınırlı kalmamış, bunun yanında estetik ve psikolojik katkılar sunmaya başlamıştır. Magli ve Hannah, (2011) gün ışığının, iç mekânlarda estetik, sıcaklık ve hava kalitesine katkıda bulunarak, zamanla yapının bir parçası haline geldiğini belirtmiştir. Mimarlar, güneşin günlük ve yıllık hareketlerini gözlemleyerek doğal ışığın etkilerini kullanmıştır. Resim 2.1'de de görüldüğü üzere Pantheon'un merkezinde yer alan oculus aracılığıyla, gün boyunca iç mekâna yönlendirilen doğal ışık sayesinde, kubbe içerisinde hareket eden dairesel bir aydınlık oluşmaktadır (Millet ve Marietta, 1996). Bu aydınlık, sabah saatlerinde yapının doğu yönünden başlayarak, yerel öğle saatinde ana giriş kapısı aydınlatılacak şekilde konumlanmakta, günün ilerleyen saatlerinde ise batı yönüne doğru kaymaktadır. Güneşin yıl içerisindeki konum değişimleriyle birlikte, bu ışık halkasının mekândaki yüksekliği ve konumu da farklılaşmaktadır. Böylece Pantheon'un iç mekânı, zamana duyarlı bir düzeneğe dönüştürülmekte ve yapı, mimari bağlamda bir tür sferik güneş saati işleviyle donatılmaktadır. Bu yönüyle yapı içerisinde kutsallık ve anıtsallık duygusu, ışık aracılığıyla pekiştirilmektedir (De Franceschini ve Veneziano, 2014).



Resim 2.1. Açık hava koşullarında, Pantheon'un iç mekânındaki ışığın görünümü [URL-1]

Curtis (1992), mimarlık tarihinin, tümüyle duvar açıklıkları etrafında döndüğünü belirterek tarihsel süreçte mekâna ışık almak için oluşturulan cephedeki açıklıkların mimariyi şekillendirdiğini ifade etmiştir. Özellikle Orta Çağ katedralleri ve Barok kiliseleri gibi yapılar, pencere tasarımının ve gün ışığının mimarideki etkisini gözler önüne sermektedir.

Bununla birlikte, günümüz yapı tasarımında sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi kavramların önemi arttıkça, mimaride gün ışığının yönetimi daha kritik bir hale gelmiştir. Phillips (2012)'in yaptığı araştırmalarda gün ışığının tasarımdaki etkilerini ele alırken, doğal ışığın enerji tasarrufu sağlamak ve iç mekân konforunu artırmak için bir araç olarak kullanılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Gün ışığının bu tür fonksiyonel ve estetik faydaları, mimarların gün ışığını yapılarına bütünleşmiş etme çabalarını daha önemli kılmaktadır. Ancak, aşırı ışık alımı, aşırı ısınma, parlama ve mahremiyet kaybı gibi istenmeyen etkiler de ortaya çıkabilmektedir (Reinhart, 2020). Bu durum, gün ışığının etkin bir şekilde yönetilmesi ve kontrol edilmesi gerekliliğini doğurmuştur.

2.2.1. Geçmişten günümüze cephenin gelişimi

Mimaride cephe, bir yapının dış yüzeyini tanımlayan ve temel olarak iç ve dış ortamları birbirinden ayıran bir sınır oluşturmasının yanı sıra, yapının estetik kimliğini ve imajını belirleyen en önemli bileşen olarak işlev görmektedir (Straube ve Frederick, 1998:8). Yapıdaki pencereler, kapılar, duvar yüzeyleri, malzeme kullanımı, renk ve doku gibi unsurlardan oluşan cepheler, yapının iç ve dış ortamla ilişkisini belirlemektedir. Mimaride

cephe tasarımı, sadece görsel bir öğe değil, aynı zamanda işlevsellik açısından da büyük önem taşımaktadır. Örneğin, cepheler güneş ışığını içeri alacak şekilde tasarlanabilmekte, rüzgar ve yağmur gibi hava koşullarından korunma sağlayabilmekte, iç mekanların doğal aydınlatmasını ve enerji verimliliğini artırabilmektedir.

Tarihsel dönemde cepheler incelendiğinde ilk çağlarda, cepheler genellikle savunma ve güvenlik amaçlı olarak tasarlanmıştır. Doğal malzemelerle inşa edilen basit cephelerde, kale ve surlarda kalın taş duvarlar gibi sert yapı elemanları kullanılmıştır. Orta Çağ'da, kilise ve katedrallerde dini temsiller ve simgelerle süslenmiş cepheler ön plana çıkarken, Rönesans döneminde daha simetrik ve matematiksel olarak düzenlenmiş, orantılı yapılar ortaya çıkmıştır. Barok ve Rokoko dönemlerinde ise cepheler, ihtişamlı ve ayrıntılı işçilikle zenginleştirilmiş, sanat ve gösteriş ön planda tutulmuştur.

Modern çağda ise cepheler, işlevselliği ve estetiği bir araya getiren yeni malzemeler ve teknolojilerle (cam, metal, kompozit malzemeler) daha dinamik ve fonksiyonel hale gelmiştir. Günümüzde, sürdürülebilir tasarım ve enerji verimliliği gibi unsurlar da cephelerin tasarımında önemli rol oynamakta, estetik ve çevre dostu çözümler öncelikli hale gelmektedir (Cucuzzella ve diğerleri, 2023).

Çağdaş mimaride otomatik veya mekanik sistemlerde donatılan dinamik cepheler, estetik ve işlevselliği bir araya getirerek binaların çevreyle etkileşimini geliştiren, zaman ve koşullara göre değişen veya adapte olabilen tasarım unsurlarıdır. Bu cepheler, sabit ve statik yapıların ötesine geçerek hareket edebilir, açılıp kapanabilir, aydınlık ve gölgelik alanlar oluşturabilir ve çevre koşullarına yanıt verebilmektedir. Dinamik cephelerin en önemli özelliklerinden biri, çevreye duyarlılığı ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik fonksiyonel yaklaşımlar sunmasıdır.



Şekil 2.5. Straube ve Frederick, (1998); Cucuzzella ve diğerleri, (2023)'nden yararlanılarak geçmişten günümüze cephenin tarihsel gelişimini gösteren diyagram (yazar tarafından oluşturulmuştur)

2.2.2. Gün ışığının yapı performansındaki rolü

Gün ışığı, yapının enerji verimliliği açısından kritik bir bileşendir. Reinhart (2014), yapılar için uygun doğal ışık seviyelerinin sağlanmasının, elektrikli aydınlatmaya olan bağımlılığı azaltarak enerji tüketimini düşürdüğünü belirtmiştir. Bununla birlikte, gün ışığının fazla girmesi, iç mekânlarda ısınma ve parlama gibi istenmeyen etkiler oluşturabilir. Bu nedenle, gün ışığının yapı içine girmesi kontrol altına alınmalıdır. Gün ışığının etkin bir şekilde yönetilmesi, doğrudan ışığın içeri girmesiyle sağlanabileceği gibi, iç mekandaki ışık dağılımını iyileştiren reflektif yüzeyler ve filtreleme mekanizmaları ile de mümkün olabilir (Tabadkani ve diğerleri, 2021).

Tabadkani ve diğerleri (2021), dinamik ve kinetik cephelerin gün ışığını yönlendirmek ve optimize etmek için etkili bir yöntem sunduğunu ve bu tür tasarımların, çevresel koşullara göre adaptif olabileceğini ileri sürmektedir. Bu cepheler, güneş ışığının girişini optimize ederken, aynı zamanda enerjiyi verimli bir şekilde kullanmaya olanak tanır.

Gün ışığının sadece enerji verimliliği sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda iç mekânlarda termal konforu artırdığı ve insanların psikolojik ihtiyaçlarını karşıladığı da bilinmektedir. Lee ve Kim (2018), Notre-Dame du Haut gibi modern yapıları örnek göstererek, gün ışığının

iç mekânlarda oluşturduğu estetik ve psikolojik etkileri incelemiştir. Bu tür yapılar, içeriye bol miktarda doğal ışık alarak, hem estetik açıdan zengin bir atmosfer yaratmakta, hem de kullanıcıların psikolojik ihtiyaçlarını karşılamak için önemli bir araç olarak işlev görmektedir. Ayrıca, dış cephenin, yapının enerji verimliliğini artıracak şekilde tasarlanması, ısıl konforu sağlamak için önem teşkil etmektedir. Notre-Dame du Haut örneğinde olduğu gibi, dış duvarın termal izolasyonu, yapının enerji tasarrufu sağlamasını ve iç mekânlarda konforlu bir ortam yaratılmasını sağlamaktadır (Lee ve Kim, 2018).

2.2.3. Kinetik cephelerin günışığı ve enerji verimliliği üzerine etkisi

Bina cephesi, dış ve iç mekan arasında ayırıcı ve filtreleyici bir katman olarak hizmet veren bir eşik olarak tanımlanabilir. Tarihsel olarak, iç ve dış mekan arasında etkili bir bariyer oluşturmanın ana nedeni, dış dünyanın potansiyel tehditlerine ve sert hava koşullarına karşı koruma sağlama gereksinimiydi. Bunun yanı sıra, cepheler, bir yapıya giren ışığın kontrol edilmesi ve kullanıcılar için optimal koşulların sağlanması açısından da kritik bir öneme sahiptir (Anastasiia ve diğerleri, 2022). Zamanla, bu koruyucu işlevlere farklı gereklilikler eklenmiştir. Bu bağlamda, bina zarfları olarak tanımlanan cepheler, ışık sağlama, yeterli hava değişim oranını garanti etme ve çevreyle görsel bir ilişki kurma görevlerini üstlenirken, aynı zamanda özel ve kamusal alanlar arasında bir arayüz oluşturur. Tasarımcılar, bu ilişkileri organize etmek ve inşa etmek için özgün sistemler geliştirmeyi hedeflemişlerdir (Herzog ve diğerleri, 2004).

Günümüz mimari yaklaşımlarında geliştirilen özel sistemler, yazılım, donanım ve malzeme teknolojilerinin ilerlemesiyle tasarımcılara özgünlük sunmaktadır. Tasarımcılar, yapı zarflarının istenen iç ve dış değişikliklere ya da hızla değişen çevresel koşullara dinamik bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanıyan kinetik cephe sistemlerine giderek daha fazla ilgi göstermektedir (Hosseini ve diğerleri, 2019). Kinetik cepheler, ısı radyasyonu ve aydınlatma gibi dış uyaranlara yanıt verebilir ve uyum sağlayabilir. Özellikle uyum sürecinde ışık, belirleyici bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, ışık, parlama ve aşırı ısınma gibi rahatsız edici durumlara da neden olabilir. Cephelerde doğal ışığa duyarlı bir zarf oluşturmak, görsel kaliteyi ve enerji verimliliğini artırabilir (Anastasiia ve diğerleri, 2022).

Çevre kirliliği, iklim değişikliği, enerji tüketiminin artışı ve sera gazı üretimi, insanlığı tehdit eden sorunlar olarak ortaya çıkmıştır. Yapılı çevrede artan enerji talebi nedeniyle, verimli ve sürdürülebilir binalar tasarlamak bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu amaçla, enerji verimli adaptif kinetik bina zarlarının yenilikçi bir tasarım yaklaşımı olarak kabul edildiğini söylemek mümkündür.

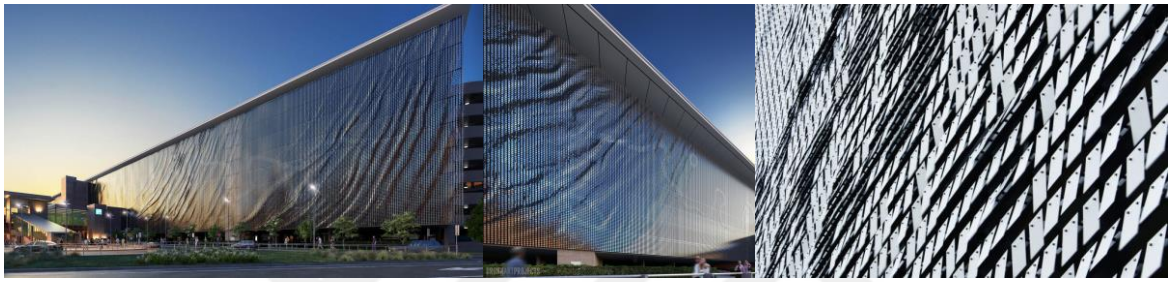
Kinetik cepheler, insan ve çevre etkileşimi bağlamında adaptif sistemlerdir. Katlanabilir, genişletilebilir ve yeniden yapılandırılabilir kinetik yapılar, bina zarfı olan cephenin geometrik morfolojisindeki değişiklikler yoluyla iç mekan iklim performansını iyileştirerek, değişen dış iklimsel faktörlere uyum sağlamasına katkıda bulunur (Foged ve Kirkegaard, 2011). Geleneksel mimari yaklaşımlarda binanın konumu, yönelimi, formu, hacim düzeni ve iç mekan organizasyonu ile cephe açıklıkları gün ışığı mimarisi için temel unsurlar olarak öne çıkarken, günümüz teknolojisi, ışığı daha verimli kullanmak, enerji tasarrufu sağlamak ve mekandaki görsel konforu artırmak amacıyla cephe boyunca yönlendirme ve iletme hedefini benimsemiştir (Çiftçi, 2023).

Doğal gün ışığı iyi bir görüş sağlasa da rahatsız edici güneş parlaması, istenmeyen yansımalar veya aşırı ısınmaya neden olabilir. Tasarımcılar, binaların enerji tüketimini minimize etmek amacıyla her zaman gün ışığından faydalanmaya çalışmış ve bir güneş kırıcı sistem geliştirmiştir. Pratik bir çözüm, tasarımın erken aşamalarında bina formunun uygun seçilmesi veya cephedeki cam alanlarının doğru yönlerde belirlenmesidir. Ancak bina formu veya yönelimi sabitse, iyi tasarlanmış bir kinetik cephe etkili bir alternatif olabilmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde ilk olarak, gün ışığı performansını etkileyen kinetik cephe sistemlerine sahip sürdürülebilir bina örneklerini incelenmektedir. Ardından, Bölüm 2.3.3. bölümünde doğadan ilham alınarak geliştirilen yenilikçi, enerji verimli ve sürdürülebilir mimari sistemler ile gün ışığı arasındaki ilişki tartışılmakta; özellikle bitkilerin fototropik (ışığa yönelimli) hareketlerinden ilham alınarak geliştirilen kinetik cephe elemanları örneklenmektedir. Son olarak, akademik literatürde araştırılmış çeşitli örnekler değerlendirme yapılacaktır. Hareketli cepheler aracılığıyla iç mekân gün ışığını kontrol etmeyi amaçlayan mevcut örneklerden bazıları aşağıda sıralanmaktadır.

Brisbane havalimanı otoparkı

Ned Kahn tarafından tasarlanan kinetik cephe, rüzgar akımlarına tepki veren 250.000 asılı alüminyum panelden oluşmaktadır. Bu tasarım, dinamik bir görsel unsur olmanın yanı sıra, ışık ve hava akışını düzenleyen işlevsel bir rol oynamaktadır. Panellerin hareketi, ışık ve gölgenin dinamik desenlerini oluşturarak cephede görsel bir dinamizm yaratmaktadır. Ayrıca doğal havalandırma ve güneş koruması gibi pratik faydalar sunarken, binanın cephesinin görünümünü de değiştirmektedir (Resim 2.2.) (İbrahim ve Alibaba, 2019).



Resim 2.2. Brisbane havaalanının kinetik cephesi [URL-2]

Schueco tarafından tanıtılan cephe modülü

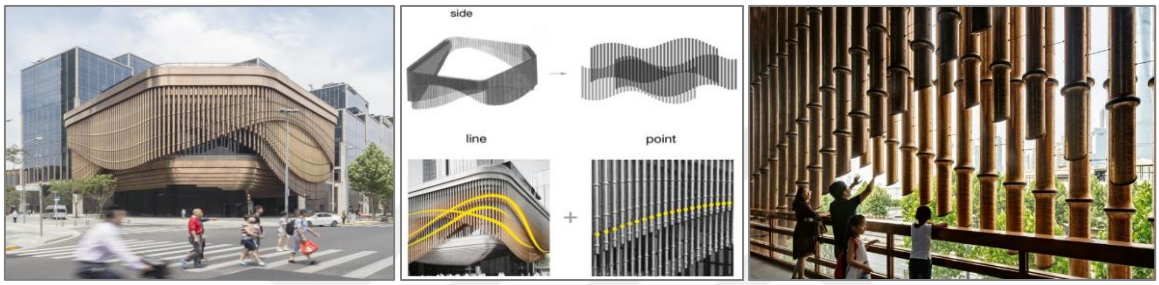
Schueco'nun cephe modülü tasarımı, parametrik tasarım yaklaşımını benimseyerek teknoloji ve estetiğin bir araya getirildiği bir çözüm sunmaktadır. Bu tasarım, binanın konumu ve yönelimine bağlı olarak farklı cephe görünümleri oluşturma özgürlüğünü tasarımcılara tanımaktadır. Parametrik cephe tasarımları, doğal ışığın kullanımını optimize ederek enerji verimliliğine önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Bu durum, parametrik tasarımın modern mimaride işlevsel ve sürdürülebilir çözümler sunabileceğini göstermektedir (Resim 2.3) [URL-3].



Resim 2.3. Parametric Schueco cephe modülü [URL-3]

Foster ve Heatherwick tarafından tasarlanan Fosun Sanat Merkezi, Şanghay

Foster ve Heatherwick tarafından tasarlanan Şanghay'daki Fosun Sanat Merkezi, kinetik cephesiyle dikkat çekmektedir. Kültürel sembollerden ilham alan tasarım, dinamik bir ray sistemi üzerinde hareket eden 675 magnezyum alaşımlı tüpten oluşmaktadır. Bu tüpler, pencerelerin ve balkonların önüne üç farklı katmanda asılarak yarı saydam ekranlar oluşturmaktadır. Tasarım, iç mekanların aydınlatmasına ve ambiyansına katkıda bulunarak görsel konfor sağlamaktadır (Resim 2.4) [URL-4].



Resim 2.4. Foster and Heatherwick Fosun Sanat Merkezi, Şangay [URL-4]

Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi, Singapur

UNStudio ve DP Architects tarafından tasarlanan Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi'nin akademik kampüsü, değişen gün ışığı gereksinimlerine uyum sağlayabilen bir tasarıma sahiptir. Kampüsteki binalar, Singapur'un tropikal iklimine uyum sağlayan özellikler içerir ve duyarlı gölgeleme sistemleri ile dinamik havalandırma mekanizmalarına sahip, enerji verimli binalara örnek teşkil eder (Resim 2.5).



Resim 2.5. Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesinin cephe sistemi [URL-5]

Bu örnekler, kinetik cephe tasarımlarının yalnızca estetik ve yenilikçi mimari ifade araçları olmadığını, aynı zamanda gün ışığı kontrolü ve enerji verimliliği açısından somut katkılar

sunduğunu ortaya koymaktadır. Rüzgarla etkileşen Brisbane Havalimanı cephesi gibi projeler, doğal havalandırmayı teşvik ederken aynı zamanda ısı kazancını azaltmakta; Schueco'nun parametrik modülü ise güneş ışığını optimize ederek enerji tüketimini azaltmaktadır. Fosun Sanat Merkezi, ışık geçirgenliğini değiştirerek iç mekânın konfor seviyesini artırırken, Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi örneği, iklimle uyumlu gölgeleme stratejileriyle sürdürülebilir tasarımın eğitim alanındaki uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu bağlamda, incelenen yapılar, kinetik cephe sistemlerinin uygulama düzeyinde çevresel değişkenlere yanıt verebilen, enerji verimliliğini artıran ve gün ışığı kontrolünü optimize eden niteliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Farklı iklim koşulları ve bağlamsal gereksinimlere göre şekillenen bu uygulamalar, kinetik cephelerin yalnızca teorik değil, aynı zamanda pratik olarak da sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir çözüm olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Mevcut örnekler, bu sistemlerin mimari tasarımda ışık geçirgenliği, gölgeleme, havalandırma ve termal konfor gibi performans kriterlerini etkili biçimde yönetebildiğini ve gün ışığı performansına doğrudan katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

2.3. Mimarlıkta Biyomimetik Tasarım

"Doğanın yaratıcılığı sonsuzdur; her bir form ve süreç, insanlığa ilham veren bir tasarım harikasıdır." – Janine Benyus (*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, 1997).

Bu bölüm kapsamında, biyomimetik tasarımın mimarlık alanındaki yeri çok boyutlu bir yaklaşımla ele alınmıştır. İlk olarak, doğanın evrimsel süreçlerle geliştirdiği verimli çözümler incelenmiş; biyomimikri, biyonik ve biyomimetik gibi kavramların tarihsel gelişimi ve disiplinler arası bağlamları tartışılmıştır. Ardından, "Bitkiler üzerinden doğadaki kinetik hareketi anlamak" bölümünde, bitkilerin çevresel uyaranlara verdiği dinamik tepkiler analiz edilerek, bu hareketlerin mimari tasarıma aktarılabilirliği değerlendirilmiştir. Bitkilerin morfolojik, fizyolojik ve davranışsal adaptasyonları ışığında geliştirilen stratejilerin mimarlıkta nasıl yeniden yorumlanabileceğine dair örnekler sunulmuştur. Son olarak, "Bitki esinli "biyomimetik yaklaşım ile tasarlanan günışığı ve enerji verimli kinetik cephe örnekleri" başlığı altında, doğadaki kinetik stratejilerden esinlenerek geliştirilen Media-TIC, Al Bahr Kuleleri ve Esplanade gibi seçili yapı örnekleri analiz edilmiş; bu yapılar aracılığıyla biyomimetik yaklaşımların sürdürülebilir cephe tasarımına katkı sağlama potansiyeli ortaya konmuştur.

2.3.1. Doğadan ilham alarak tasarlama

Doğa, milyarlarca yıllık evrim süreci boyunca neyin işe yaradığını, neyin uygun olduğunu ve neyin kalıcı olacağını öğrenmiştir. Ayrıca, minimum kaynakla maksimum performans sağlama yöntemlerini keşfetmiş ve uzun ömürlü sayısız çözüm üretmiştir (Gordon, 1976). Mimari ve tasarım alanlarında, doğanın yapı, form ve işleyiş prensiplerinden ilham almak uzun yıllardır sürdürülen bir yaklaşım olmuştur. Özellikle günümüz tasarım anlayışında, doğanın karmaşık ama etkili çözümlerini anlamak ve bunları mimarlıkta kullanmak giderek daha önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda, doğayı model alan ve onun işleyiş mekanizmalarından esinlenen tasarım yaklaşımlarını ifade eden biyonik, biyomimikri ve biyomimetik terimleri öne çıkmaktadır. Bu kavramların literatürde sıkça kullanıldığı görülmektedir. Ancak bu terimlerin farklı tarihsel süreçlerden türediği ve farklı disiplinlerde çeşitli şekillerde tanımlandığı ifade edilmiştir (Iouguina ve diğerleri, 2014).

Biyonik terimi, 1960 yılında ABD Hava Kuvvetleri'nden Dr. Jack E. Steele tarafından ortaya atılmıştır. Terim, "biyoloji" (*biology*) ve "teknik" (t*echnics*) kelimelerinin birleşiminden türetilmiştir (Gray, 1995). Biyonik alanı, özellikle sibernetik ve sistem teorisi bağlamında şekillenmiş; canlı organizmalarda gözlemlenen işlevsel yapılar, bilgisayarlar ve mühendislik sistemlerine aktarılmak üzere modellenmiştir (Wiener, 1948; Bernard, 1962). Biyonik uygulamalar, 20. yüzyıl ortalarında robotik, mekanik ve tıbbi cihazlar gibi alanlarda teknik yenilik üretme amacıyla geliştirilmiştir. Ancak bu yaklaşımın sürdürülebilirlik veya ekolojik bağlamlara yeterince önem vermediği de belirtilmiştir (Iouguina ve diğerleri, 2014).

Biyomimetik kavramı ise, ilk olarak biyofizikçi Otto H. Schmitt tarafından 1969 yılında resmi olarak tanımlanmıştır. Terim, Yunanca "*bios*" (yaşam) ve "*mimesis*" (taklit) kelimelerinden türemiştir. Schmitt, daha önce 1930'larda sinir hücrelerinin elektriksel sinyallerini taklit eden bir fiziksel cihaz geliştirmiş ve mühendisliğe biyolojik ilkelerin uygulanabilirliğini göstermiştir (Schmitt, 1969). Bu alan, biyolojik mekanizmaların ve fonksiyonların mühendislik, kimya, elektronik ve tasarım gibi alanlarda teknik çözümler olarak uygulanmasını hedeflemektedir (Vincent ve diğerleri, 2006).

Bar-Cohen (2006), biyomimetiği "doğanın yöntemlerinin, tasarımlarının ve süreçlerinin incelenmesi ve taklit edilmesi" olarak tanımlamıştır. Vincent (2009) ise bu alanın, mühendislik pratiklerine doğrudan uygulanabilirlik açısından biyonik ile benzer yönlere

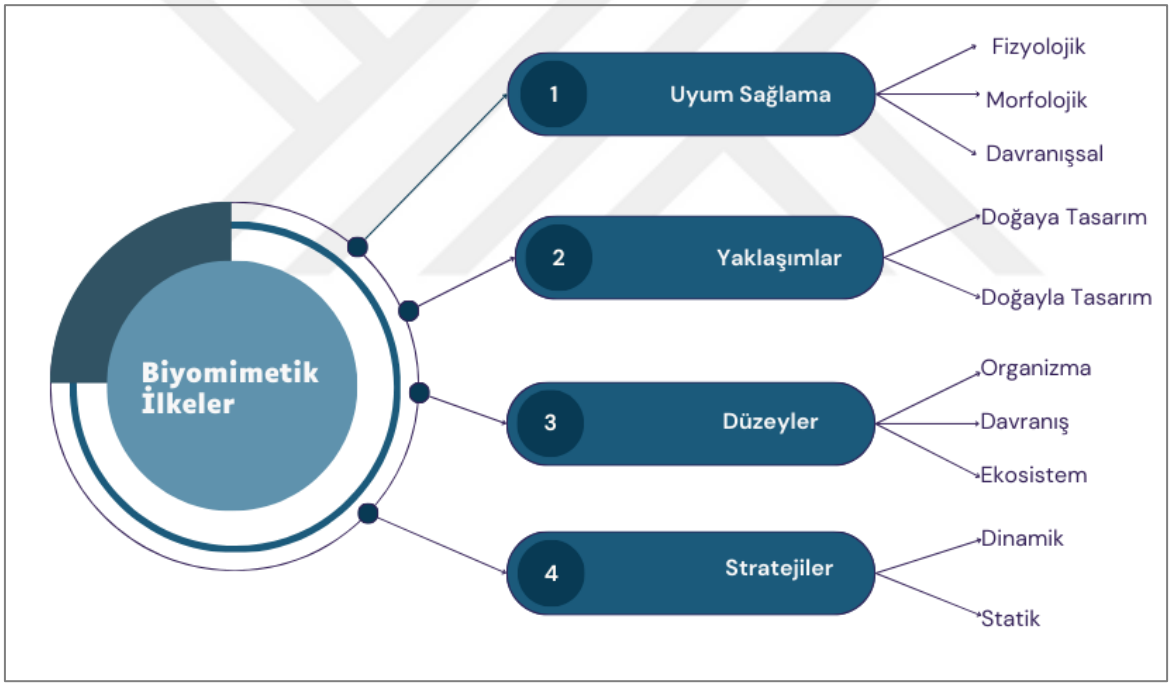
sahip olduğunu, ancak doğrudan doğadan alınan spesifik örneklerle sınırlı kaldığını belirtmiştir. Schmitt, biyomimetik ile biyofizik arasındaki ilişkide biyologların fiziksel bilimlere yaklaşımının çoğunlukla göz ardı edildiğini savunmuş ve bu disiplinin uzun süre mühendis ve fizikçiler tarafından yönlendirildiğini ifade etmiştir (Harkness, 2002). Bu nedenle biyomimetik uygulamalarında sürdürülebilirlik ve çevrebilimle ilgili bağlamlardan ziyade mekanik işlevler ön planda tutulmuştur.

Biyomimikri kavramı ise Janine Benyus tarafından 1997'de yayımlanan *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* adlı eserle geniş kitlelere tanıtılmıştır. Bu yaklaşımda doğa, yalnızca bir model değil; aynı zamanda bir ölçüt ve rehber (mentor) olarak görülmektedir. Biyomimikri, doğadaki formların, süreçlerin ve sistemlerin taklit edilmesini amaçlamakla birlikte, bu taklit sürdürülebilirlik ilkesine dayanmaktadır (Benyus, 1997:43-57). Benyus'a göre, biyomimikri üç temel alan olan form, süreç ve ekosistem olarak uygulanmaktadır. Biyomimikri, organizma düzeyinde formun, süreç düzeyinde işleyişin ve ekosistem düzeyinde ise sistem bütünlüğünün taklit edilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca çevreci çözümler üretmekle kalmayıp, aynı zamanda insan-doğa ilişkisini yeniden düşünmeye çağırmaktadır (Benyus, 1997; Mazzoleni ve Price, 2013; Al-Obaidi ve diğerleri, 2017).

Biyomimetik ilkeler; canlı organizmaların çevresel koşullara uyum sağlama biçimlerini, doğa ile kurulan tasarım ilişkilerini, biyolojik sistemlerin farklı düzeylerdeki yapılarını ve bu sistemlerden türetilen stratejik tasarım yaklaşımlarını içermektedir. Söz konusu ilkeler, tasarım sürecinde yalnızca çözüm üretme motivasyonuyla değil, aynı zamanda doğaya saygılı, çevresel farkındalığı yüksek ve sürdürülebilir yapılı çevreler oluşturma amacıyla ele alınmaktadır (Srisuwan, 2022).

Şekil 2.6 'de görüleceği üzere uyum sağlama başlığı altında fizyolojik, morfolojik ve davranışsal düzeyde biyolojik sistemlere adaptasyon hedeflenmektedir. Fizyolojik uyum, canlıların kimyasal ve biyolojik süreçlerine dayalı çözümleri içerirken; morfolojik uyum, doğadaki şekil, desen ve yapıların taklidine odaklanmaktadır. Davranışsal uyum ise organizmanın çevresiyle kurduğu etkileşimleri ve çevresel geri bildirimlere dayalı adaptasyon mekanizmalarını kapsamaktadır. Yaklaşımlar bölümünde, doğayı "tasarımın nesnesi" olarak gören geleneksel yöntemlerle, doğayla bütünleşik ve işbirlikçi bir süreç öneren yenilikçi yöntemler ayrıştırılmaktadır. "Doğaya tasarım" yaklaşımı doğayı taklit

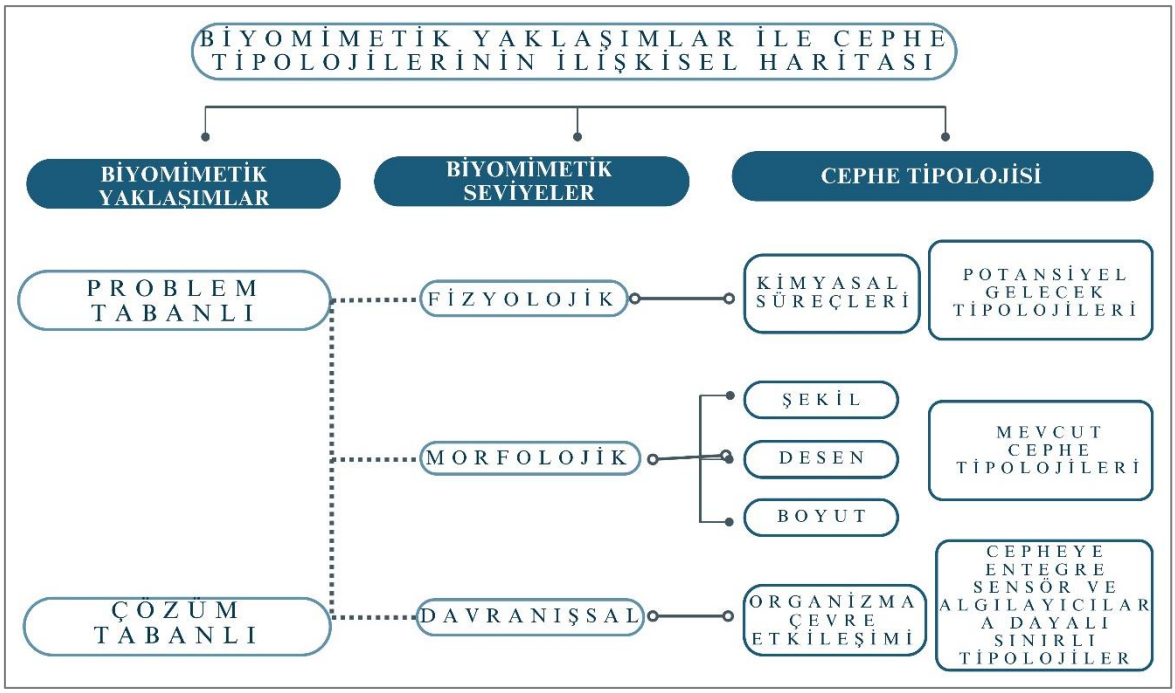
etmeye odaklanırken, “doğayla tasarım” yaklaşımı doğanın süreç ve sistemleriyle birlikte düşünmeyi amaçlamaktadır. Düzeyler başlığı, biyomimetik uygulamaların organizma, davranış ve ekosistem düzeyinde sınıflandırılabileceğini belirtir. Organizma düzeyi, belirli bir canlının formunun taklidini; davranış düzeyi, o canlının işlevsel tepkilerini ve çevreyle ilişkisini; ekosistem düzeyi ise doğanın bütüncül işleyişini model almayı ifade etmektedir. Son olarak stratejiler, biyomimetik çözümlerin tasarım kararlarına nasıl yansıtıldığını açıklar. Dinamik stratejiler, çevresel uyaranlara yanıt verebilen hareketli sistemleri içerirken; statik stratejiler, pasif fakat sürdürülebilir çözümlerle doğadan ilham alan yapıları ifade etmektedir. Bu sınıflandırma, biyomimetik tasarımın çok katmanlı doğasını ve sürdürülebilir yapı üretiminde nasıl bütüncül bir yol haritası sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2.6. Hafizi (2022)’nin makalesinde belirtilen biyomimetik ilkeleri ifade eden şema (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Biyomimetik ilkelerin açıklanmasının ardından, biyomimetik tasarım yaklaşımı genel olarak iki temel strateji çerçevesinde ele alınmaktadır (Faragalla ve Asadi, 2022). İlk strateji olan probleme dayalı yaklaşımda, tasarım süreci insan kaynaklı bir probleme çözüm arayışıyla başlamakta; tasarımcılar öncelikle belirli bir tasarım problemini tanımlamakta, ardından bu probleme yönelik ilham verebilecek doğal sistemleri inceleyerek doğadan örnekler aramaktadır. Diğer bir strateji olan çözüme dayalı yaklaşımda ise tasarım sürecinin başlangıç

noktası insan merkezli bir problem değil, doğa bilimcilerinin ve biyologların sunduğu biyolojik bilgi birikimidir. Bu yöntemde, doğada gözlemlenen çözümlerden yola çıkılarak mimari ve yapısal tasarımlar geliştirilmektedir. Her iki yaklaşım da, Şekil 2.7'de gösterildiği üzere, biyomimetik tasarımın üç temel düzeyi morfolojik düzey (form temelli taklit), davranışsal düzey (hareket veya tepki mekanizmalarının taklidi) ve fizyolojik organizma düzeyi (sistem temelli bütünsel entegrasyon) olarak tanımlamaktadır.



Şekil 2.7. Biyomimetik yaklaşım düzeyleri ile mimari cephe tipolojileri arasındaki kavramsal ilişkileri gösteren şema (yazar tarafından oluşturulmuştur) (Faragalla ve Asadi, 2022)

Şekil 2.7'de de görüleceği üzere, biyomimetik tasarım yaklaşımlarının cephe sistemleriyle nasıl ilişkilendirilebileceği sistematik bir biçimde ortaya konmuştur. Biyomimetik seviyeler fizyolojik, morfolojik ve davranışsal hem problem temelli hem de çözüm temelli bakış açılarıyla eşleştirilmiş ve her bir seviyenin cephe tasarımındaki karşılığı açıkça sınıflandırılmıştır. Mimarlıkta doğadan ilham alan tasarımların yalnızca biçimsel değil, aynı zamanda işlevsel ve çevresel yanıt verme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle davranışsal düzeyin, sensör ve algılayıcı sistemlerle etkileşim kurabilen adaptif cephe çözümlerine olanak sağladığı anlaşılmaktadır. Morfolojik düzey ise geleneksel cephe tipolojileriyle doğrudan ilişki kurarken, fizyolojik düzey gelecek odaklı, daha deneysel çözümlerin önünü açmaktadır. Bu bağlamda, biyomimetik tasarımın çok katmanlı ve

potansiyel açıdan zengin bir tasarım alanı sunduğu gösterilmektedir(Faragalla ve Asadi, 2022).

Sonuç olarak, biyonik, biyomimikri ve biyomimetik, doğadan esinlenilen tasarım süreçlerinin farklı yönlerini temsil etmekteedir. Biyonik işlevselliği ön plana çıkarırken, biyomimikri insanlık ve doğa arasındaki ilişkiyi sürdürülebilirlik çerçevesinde ele almaktadır. Biyomimetik yaklaşım ise bu iki yaklaşımdan harmanlanarak hem teknik hem de etik tasarım çözümleri sunmaktadır. Özellikle mimarlıkta biyomimetik tasarım, doğanın adaptasyon kabiliyetinden ilham alarak yenilikçi çözümler geliştirme potansiyelini ortaya koymaktadır. Biyomimetiğin temel amacı, teknik ilerlemeleri geliştirmek ve sürdürülebilirliği sağlamak, doğanın en iyi fikirlerini alıp bunları tasarım süreçlerinde kullanarak tasarım problemlerini çözmektir. Organizmalardaki çevresel değişimlere adaptasyon özelliklerine yönelik artan bir ilgi, bu özelliklerin performansı artırmak için yeni teknolojik yaklaşımlar sunabileceği iddiasını beraberinde getirmektedir (Mazzoleni ve Price, 2013).

2.3.2. Bitkiler üzerinden doğadaki kinetik hareketi anlamak

Doğa, mimari tasarımda yenilikçi çözümler arayan araştırmacılar için eşsiz bir ilham kaynağıdır. Tarih boyunca, mimarlar bitkilerin stratejilerinden ilham almışlardır. Ancak, çoğu ilham kaynağı yapısal, süsleme veya estetik işlevlerle sınırlı kalmıştır. (ElDin ve Abdou, 2020).

Bitki ve hayvanların çevresel uyaranlara verdikleri tepkiler, özellikle kinetik cephe tasarımlarında dinamik ve adaptif çözümler için temel oluşturmaktadır. Hayvanların hareket mekanizmaları, kas yapıları ve biyolojik adaptasyonları gibi özellikler dinamik hareketlerin anlaşılmasına katkı sağlarken, bitkilerin daha ince ve enerji açısından verimli hareket mekanizmaları mimaride sürdürülebilir tasarım yaklaşımlarına olanak tanımaktadır. Bitkiler, farklı çevresel zorluklara farklı uyum seviyelerinde adapte olabilme yeteneğine sahiptir. Bu adaptasyonlar statik (morfolojik adaptasyonlarla ilgili) veya dinamik (davranışsal ve fizyolojik mekanizmalarla ilgili) olabilmektedir (Zari, 2007).

Morfolojik adaptasyonlar, bitkinin şekli, deseni veya yapısıyla ilgilidir. Örneğin, kaktüs, zorlu çevre koşullarına uyum sağlamak için çeşitli morfolojik adaptasyonlar geliştirmekte;

bazı türlerinde gövde yapıları, dikenler ve küresel şekil gibi özellikler bu adaptasyonlara örnek teşkil etmektedir. Davranışsal adaptasyonlar, organizmanın çevresiyle etkileşimde bulunarak hayatta kalmak için gerçekleştirdiği eylemler ve hareketlerdir. Örneğin, *Mimosa Pudica* fiziksel temasla uyarıldığında yapraklarını içe doğru kapatarak kendini korumaktadır. (Badarnah, 2017).

Üçüncü adaptasyon düzeyi olan fizyolojik adaptasyon, bitkinin dış uyarıcılara kimyasal süreçler yoluyla tepki vererek iç dengesini (hemostaz) koruma yeteneğidir. Örneğin, çoğu CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*) bitkisi, kurak koşullarda fotosentez süreçlerini optimize ederek su verimliliğini artırır. Bitkiler, dokunsal uyarıcılara, ışık yönüne veya nem değişikliklerine karşı hareket ederek çevresel değişimlere uyum sağlar. Örneğin, *Mimosa pudica* dokunmaya yanıt olarak yapraklarını kapatırken, güneş çiçeği (*Helianthus annuus*), gün boyunca güneşi takip ederek fotosentez verimliliğini arttırmaktadır. Bu tür biyolojik süreçler, kinetik cephe sistemlerinin tasarımında dinamik hareket mekanizmalarını kontrol etmek için ilham verici bir temel sunmaktadır (Taiz ve diğerleri, 2015).

Bitkiler ve binalar, çevreleriyle nasıl etkileşime girdikleri konusunda benzerlikler gösterir. Özellikle hareket kabiliyeti sınırlı olan bitkiler, dış etkenlere uyum sağlamak için geliştirdikleri stratejilerle mimarlara önemli bir ilham kaynağı olmaktadır. Bitkiler, hareket edemedikleri için sıcaklıklarını, ışığa maruz kalma seviyelerini ve diğer temel ihtiyaçlarını bağımsız olarak yönetmektedirler. Benzer şekilde, bina mimarisi de güneş ısısı kazanımı, hava dolaşımı, sıcaklık düzenlemesi ve doğal ışığın sağlanması gibi unsurları entegre eden mekanizmalara sahip olmaktadır. (Badarnah, 2017). Bitkiler, hareket kabiliyetlerinin olmaması nedeniyle, karanlık, ışık, nem, yağmur suyu, yangın, sıcaklık, don, hava akımı ve hava kalitesi gibi çeşitli çevresel faktörlere karşı korunmak için özel mekanizmalar geliştirmiştir. Bu adaptasyonlar, değişen çevresel koşullara yanıt olarak zamanla ve nesiller boyunca evrimleşmektedir (Yetkin, 2020).

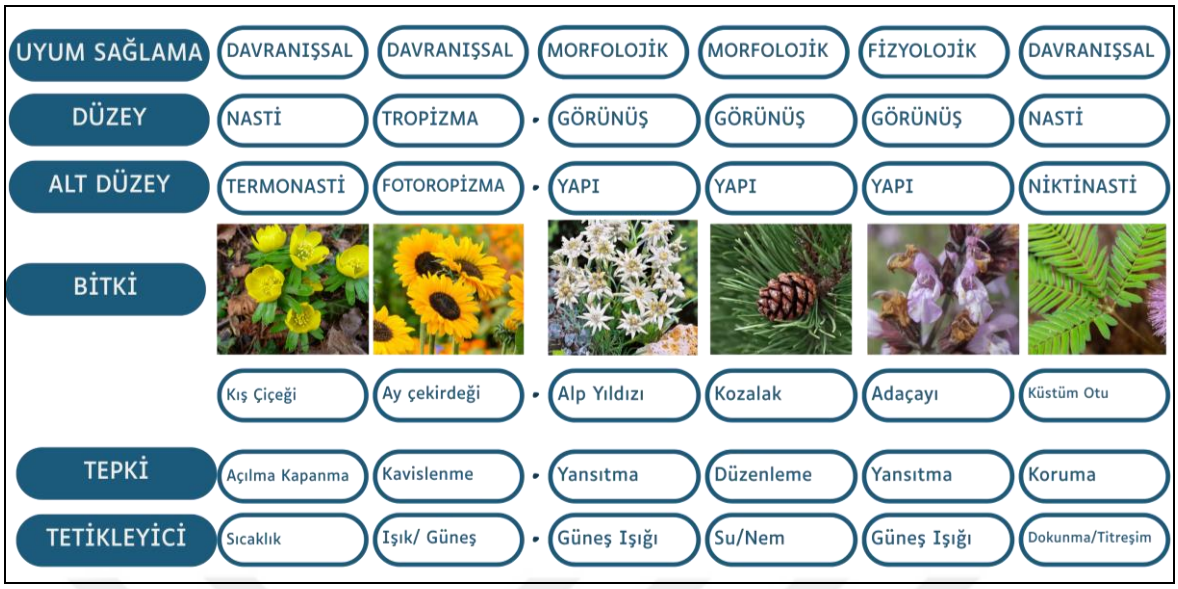
Bitkilerin güneş ışığına uyum sağlama süreçlerini incelemek, bina tasarımında etkili stratejiler geliştirmek için önemli bir yol gösterici olabilir. Güneş enerjisi teknolojilerinin biyomimetik adaptif çözümlerle entegre edilmesi, sürdürülebilir tasarımlar oluşturmaktadır (Jamei ve Vrcelj, 2021).Çoğu bitki hayatta kalmak ve enerjisini koruyabilmek için güneş ışığına ihtiyaç duymaktadır. Fotosentez yoluyla güneş radyasyonunu depolanabilir enerjiye dönüştürürler. Bitkiler, farklı hava koşullarına bağlı olarak konumlarını ve eğimlerini

ayarlamaktadır. Bazı bitkiler ise ışığa duyarlı organları sayesinde güneşi aktif olarak takip edebilir (Jalali ve diğerleri, 2024).

Binalarda gölgeleri minimize etmek, aydınlatma tasarımında yaygın olarak kullanılan bir diğer konsepttir. Bitkiler yalnızca güneş ışığını emme ve depolama yollarına sahip değildir, aynı zamanda ışığı manipüle etme ve kontrol etme yöntemlerine de sahiptir. Bu ilke özellikle yaprak dizilimli geometrilere sahip bitkilerde görülmektedir ve bina aydınlatma tasarımlarında Fibonacci diziliminin kullanılmasına ilham vermiştir (Badarnah, 2016). Bu bağlamda, doğayı taklit ederek bitkilerin doğal ışığı kullanma potansiyelini binalara entegre ederek, yenilenebilir enerjiden farklı şekillerde faydanılabilmektedir.

Bitkilerde tanımlanan hareketler, dış uyaranlarla "tetiklenen" (tropizmler ve nastik hareketler gibi) veya "spontane" (örneğin, stomaların kontrolü ve organ büyümesi gibi) hareketler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu hareketler, birden fazla kez tekrarlanabilen "geri dönüşümlü" (örneğin, stomaların açılma/kapanma mekanizması) veya yalnızca bir kez gerçekleşen "geri dönüşümsüz" (örneğin, bir yaprağın büyümesi) olabilmektedir (Sommese ve diğerleri, 2024).

Şekil 2.8' de verilen diyagram, bitkilerin çevresel uyaranlara karşı geliştirdiği biyolojik tepki biçimlerini sınıflandırarak mimari tasarımda biyomimetik yaklaşımlara temel oluşturan davranışları ortaya koymaktadır. Uyum sağlama stratejileri üç ana düzeyde ele alınmıştır: davranışsal, morfolojik ve fizyolojik. Alt düzeyde ise nasti (uyaran yönünden bağımsız), tropizma (yönlü hareket) ve termonasti, fototropizma gibi ışık-sıcaklık bazlı tepkiler tanımlanmıştır. Şekilde yer alan örnek bitkiler örneğin, ayçiçeğinin güneşe yönelimi (fototropik hareket), kozalakların nem oranına bağlı olarak açılıp kapanması (higroskopik davranış) veya küstüm otunun dokumna ve gece gündüz farkına göre yapraklarını kapatması (niktinasti) doğrudan kinetik cephe tasarımlarında esin kaynağı olabilecek biyolojik sistemleri temsil etmektedir. Her bir bitkinin verdiği tepki ve bu tepkilerin tetikleyicileri (örneğin sıcaklık, ışık, nem, temas vb.) mimari yüzeylerin dinamik biçimde çevresel verilere yanıt vermesi için model teşkil etmektedir. Bu tür sınıflamalar, doğadan ilham alan kinetik cephe sistemlerinin kuramsal temelini güçlendirmektedir (Helliwell, 2013).



Şekil 2.8. Sommese ve diğerleri (2022) tarafından yapılan biyomimetik bina zarfları çalışmasından uyarlanarak oluşturulan bitki hareket inceleme tablosu (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Şekil 2.8'de yer alan bitki örnekleri (örneğin Kış çiçeği, ay çekirdeği, alp yıldızı, kozalak, adaçayı ve küstüm otu), davranışsal, morfolojik ve fizyolojik düzeylerde sınıflandırılmıştır. Bu örneklerin taklit düzeyleri ve verdiği tepkinin hangi biyolojik mekanizmaya dayandığı açık biçimde ortaya konmuştur.

Bununla birlikte, her bitkinin verdiği tepkinin bir çevresel tetikleyici ile ilişkilendirilmesi (örneğin ısı, ışık, nem, güneş yönelimi veya dokunma gibi) bu sınıflandırmanın biyomimetik cephe sistemleri açısından değerli bir kaynak sunduğunu göstermektedir. Özellikle Mimosa pudica'nın dokunmaya tepki veren niktinasti hareketi ya da ayçiçeğinin ışığa yönelim gösteren fototropik davranışı gibi örnekler, kinetik cephe tasarımlarında doğrudan uygulanabilir niteliktedir. Bu kapsamlı sınıflama, bitkisel hareketlerin yalnızca görsel benzerlik üzerinden değil; biyolojik süreç-temelli, çevresel uyaran duyarlılığına sahip, adaptif sistemler geliştirmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Böylece doğa, yalnızca estetik bir referans değil, aynı zamanda parametrik ve performansa dayalı tasarım stratejileri geliştirmek için dinamik bir bilgi kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

2.3.3. Bitki esinli "biyomimetik yaklaşım ile tasarlanan günışığı ve enerji verimli kinetik cephe örnekleri

Günümüzde, mimarlar yapının dış cephesine ekledikleri kinetik ve dinamik elementlerle, gün ışığının içeriye alınmasını ve yapının çevresel koşullara adaptasyonunu artırmaktadır Tabadkani ve diğerleri (2021). Dinamik ve kinetik cephelerin, yapının ışık ihtiyacına göre şekil değiştirebildiğini ve bu özelliklerin iç mekânlarda konforlu bir ortam yaratmak için önemli olduğunu belirtmektedir. Bu cepheler, güneş ışığını doğrudan içeri almak yerine, ışığı yönlendirerek ya da engelleyerek iç mekânlardaki ısıl konforu sağlamakta önemli bir rol oynamaktadır. Gün ışığını yönlendiren bu tür cephelerin, yapının estetik özellikleri ile işlevselliğini birleştirdiğini ve bu tasarımların, iç mekânların konforunu artırırken, yapının çevresel faktörlerle uyumlu hale gelmesini sağladığını vurgulamaktadır.

Gün ışığının yapı tasarımına yön verme etkisi geçmişten beri var olan bir olgudur. Bu olgu tarihin çeşitli dönemlerinde farklı bakış açılarıyla ele alınmış olup günümüzde de etkisini sürdürmektedir (Baker ve diğerleri 2013). Günümüzde yapılarda sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve gün ışığı performansı kavramlarının öneminin anlaşılması, yapı tasarımında gün ışığına farklı bir perspektiften yaklaşma gereksinimini ortaya çıkarmıştır (Phillips, 2012; Tregenza ve Wilson, 2013). Bu amaçla birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalar gün ışığını mekânın performansını belirleyen önemli bir tasarım girdisi olarak değerlendirerek, bu girdiyi yapının tasarım unsurlarına dâhil etmenin oldukça önemli bir boyuta ulaştığını ortaya koymuştur (Arpacıoğlu ve diğerleri,2020). Bu bağlamda, gün ışığının etkin bir şekilde yönetilmesi ve kontrol edilmesi, mimarlar ve tasarımcılar için dikkat çeken bir konu haline gelmiştir (Tokuç ve diğerleri, 2018).

Uzun süredir mimarlar ve tasarımcılar, tasarım problemlerine çözüm bulmak için doğayı bir ilham kaynağı olarak görmektedir (Srisuwan, 2022). Günümüzde biyomimetik tasarım yaklaşımları, doğadaki bilgiyi ilgili alandaki sorunlara çözüm olarak aktarmayı ifade etmektedir. Jeronimidis (2000), bu yaklaşımı biyolojik işlevlerin tasarımlara dönüştürülmesi olarak tanımlamaktadır. Doğada, birçok organizma çevresel adaptasyon stratejilerini desteklemek için davranışsal ve morfolojik özelliklerden faydalanmaktadır (Badarnah, 2017). Biyolojik olarak ilham alınan bina cephe tasarımları, form, işlev, kinetik mekanizma, büyüme süreci, morfoloji ve davranış stratejileri gibi doğal fenomenlerin özellikleri incelenerek tasarlanmaktadır. Bu yaklaşım, son zamanlarda mimari tasarımda enerji

verimliliğini artırmak için en önemli araçlardan biri olarak görülmektedir. Bu çerçevede, binalar ve canlı organizmalar arasındaki benzerlikler kurularak, doğanın adaptif stratejileri enerji verimli bina cephe tasarımlarına aktarılmaktır.

Özellikle doğadan ilham alınan bina zarflarında adaptif cephe çözümleri yenilikçi yönleriyle öne çıkmaktadır. Bu bağlamda adaptasyon stratejileri, çevresel değişimlere daha az enerji tüketerek uyum sağlayabilen bina zarflarının tasarımında kritik bir unsur olarak kabul edilmektedir. Doğadan ilham alınarak geliştirilen başarılı adaptasyon stratejileri, dinamik çevresel değişimlere uyum sağlayan canlı organizmalar veya doğal sistemler gibi davranan adaptif bina zarfları oluşturabilir. Bu durumda bina zarfı ısıyı, suyu, havayı ve ışığı düzenleyip yönetebilmektedir. Bu amaç doğrultusunda doğa, adaptasyon stratejileri için birçok model, fenomen ve strateji sunmaktadır (Badarnah, 2012).

Bu bağlamda, konuya ilişkin literatür incelendiğinde, Badarnah Kadri (2012), Kuru (2019) ve Jeronimidis (2000) tarafından yapılan çalışmalar, biyomimetik yaklaşımın enerji verimli, çevresel ve yapısal açıdan faydalı sistemlerin tasarımında kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çerçevede, cepheye entegre edilen biyomimetik kinetik tasarımlar, iç mekanlardaki gün ışığı performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir (Tavares da Silva, Cruz Gaspari Veras, 2023). Çünkü adaptif (alternatif terimlerle aktif, dinamik, interaktif, kinetik, tepki veren) bir cephe, çevresel koşullardaki değişimlere yanıt vermek için işlevlerini, özelliklerini ve davranışlarını adapte edebilir. Kirkegaard ve Foged (2011), adaptif cephelerin, değişen çevresel koşullara dinamik olarak yanıt vererek genel bina performansını iyileştirebileceğini belirtmektedir.

Tokuç ve diğerleri (2018), gün ışığının yapılar içinde doğru bir şekilde entegre edilmesinin, sürdürülebilirlik açısından önemli bir tasarım stratejisi olduğunu belirtmiştir. Bu bağlamda, biyomietik tasarım, doğadaki çözümleri mimaride kullanmak için önemli bir yöntemdir. Biyomimetik, doğadaki organizmaların çevresel koşullara adaptasyonunu ve hareketlerini taklit ederek, yapıları daha verimli, sürdürülebilir ve konforlu hale getirme amacını gütmektedir. Bu yaklaşım, gün ışığının yönetilmesinde de etkin bir şekilde kullanılabilir. Doğadaki organizmaların ışığa ve çevresel değişimlere verdikleri tepkileri analiz ederek, bu tepkilerin binada nasıl uygulanacağı üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Gün ışığı, mimaride estetik ve fonksiyonel bir bileşen olmasının yanı sıra, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, bu doğal kaynağın etkin bir şekilde yönetilmesi, mimarların en büyük tasarım zorluklarından biri olmuştur. Dinamik ve kinetik cephe tasarımları, gün ışığının optimize edilmesi ve çevresel koşullara adaptasyon sağlanmasında önemli bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, biyomimetik tasarım yaklaşımları, gelecekteki sürdürülebilir bina tasarımlarında önemli bir rol oynayacak gibi görünmektedir. Gün ışığının iç mekandaki etkilerini anlamak ve onu doğru bir şekilde kullanmak, geleceğin yapı tasarımlarında daha verimli, konforlu ve çevre dostu binaların inşa edilmesine olanak tanıyacaktır.

2.2.3 bölümünde verilen kinetik cephe örneklerinin yanı sıra biyomimetik yaklaşım içeren kinetik cephe örnekleri bu bölümde verilmektedir. Kinetik cephe sistemlerinde biyomimetik yaklaşım, doğadaki canlı organizmaların ve biyolojik süreçlerin tasarım stratejilerine uyarlanmasıyla enerji verimliliği, gün ışığı kontrolü ve çevresel etkileşim gibi performans kriterlerini optimize etmeyi hedeflemektedir. Bu bölümde, önce Çizelge 2.2 de belirtilen örnekler üzerinden karşılaştımanın rahat okunabileceği bir tablo oluşturulmuş ardından biyomimetik prensiplerle tasarlanmış ve tez kapsamında incelenen konularla paralellik gösteren üç önemli yapı ele alınmaktadır: Media-TIC Binası (İspanya), Al Bahr Kuleleri (BAE) ve Esplanade – Theatres on the Bay (Singapur). Bu örnekler, doğadan esinlenen stratejilerin mimariye nasıl entegre edildiğini ve enerji etkinliği ile kullanıcı konforunu nasıl artırdığını somutlaştırmaktadır.

Media-TIC Binası – Mimar: Enric Ruiz Geli, Firma: Cloud 9, Şehir: Barselona, İspanya

Barselona'nın 22@ teknolojik bölgesinde yer alan Media-TIC binası, Cloud 9 mimarlık ofisi tarafından tasarlanmış olup, dijital çağın sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda mimarinin enerjiyle etkileşimini yeniden tanımlamayı amaçlamaktadır. Yaklaşık 44x44x38 metre boyutlarındaki kübik yapı, 14,5 metrelik aralıklarla yerleştirilmiş dört rijit çelik çerçeveden oluşan bir strüktüre sahiptir. Bu çerçeveler, üst katları taşıyan ve alt katları asılı şekilde destekleyen bir sistemle entegre edilmiştir. Binanın cephe tasarımı, çevresel koşullara duyarlı adaptif sistemlerle donatılmıştır. Güneydoğu cephesi, üç katmanlı ETFE (Etilen Tetrafloroetilen) yastıklarla kaplanmış olup, bu yastıklar içerdikleri hava basıncı sayesinde şeffaflık düzeyini ayarlayarak güneş ışığını filtrelemektedir. Bu sistem, yaz aylarında güneş radyasyonunun %65'ine kadarını engelleyerek iç mekân sıcaklığını kontrol altında

tutmaktadır (Fernández, Peinado Checa, 2012). Cephede kullanılan ETFE kaplama, iç mekanları dış sıcaklıklardan koruyan bir ETFE Diyaframı oluşturan içbükey ve dışbükey üçgenlerden oluşan bir mozaik şeklinde uygulanmıştır. Bu tasarım stomata hücresinin açılıp kapanma mekanizmasından ilhamını almış, ETFE'nin cephedeki kullanımının dikkat çekici bir örneği olarak öne çıkmaktadır (Resim 2.6.). [URL-6] (Elsakka ve arkadaşları, 2022; Juaristi ve Monge-Barrio, 2016).



Resim 2.6. The Media-TIC Binası cephe ve modül detayları [URL-7]

Esplanade – Theatres on the Bay – Mimar: Michael Wilford and Partners, Firma: DP Architects, Şehir: Singapur

Doğadan ilham alan bir kinetik cephe tasarımı olan Esplanade – Theatres on the Bay, DPA ve Michael Wilford and Partners (Londra) iş birliğiyle geliştirilmiştir. Halk arasında 'Durian' olarak bilinen yapı, doğada bulunan Durian meyvesinden esinlenerek tasarlanmış kendine özgü bir güneş koruma deseni içermektedir. Bina, güneşin açısına dinamik olarak yanıt veren ayarlanabilir kinetik bir cephe tasarımına sahiptir. Bu tasarım, kinetik elemanların yalnızca pratik işlevlerin ötesine geçerek bir binanın kimliğine sorunsuz bir şekilde entegre edilebileceğini göstermekte ve etkili güneş kontrolü sağlarken yapının ikonik görünümüne katkıda bulunmaktadır (Resim 2.7) [URL-8].



Resim 2.7. Biyomimetik cephe görünümü ve ilham aldığı eleman [URL-8]

FlectoFold Demonstrator – Mimarlar: Achim Menges, Oliver David Krieg, Firma: University of Stuttgart – ICD, Şehir: Stuttgart, Almanya

FlectoFold, Stuttgart Doğa Tarihi Müzesi'nde BauBionik sergisi kapsamında tanıtılan ve biyomimetik prensiplere dayanan yenilikçi bir kinetik cephe gölgelendirme sistemidir. Cam elyaf takviyeli plastikten (FRP) üretilen bu modüler sistem, etçil su bitkisi Aldrovanda vesiculosa'nın menteşesiz, ani kapanma hareketinden ilham almaktadır. FlectoFold'un tasarımında, bitkinin esnek ve geri dönüşümlü hareketi sonlu elemanlar analizleriyle modellenmiş; hareketin geometrik ilkeleri kavisli katlama çizgileri ve esnek mafsal bölgeleri şeklinde soyutlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde geleneksel mekanik menteşelere gerek duyulmadan, düşük basınçla (0.04–0.09 bar) çalışan pnömatik yastıklarla aktif olarak şekil değiştirebilen paneller üretilmiştir. Stuttgart'taki demonstratör yapıda kullanılan 36 modül, hem bireysel hem de senkronize şekilde çalışabilen bir kontrol sistemine entegre edilmiştir. (Körner ve diğerleri, 2018) FlectoFold'un uygulandığı bu bina örneği, kompleks yüzeylerde biyolojik hareket mekanizmalarından esinlenilerek geliştirilen kinetik sistemlerin, yalnızca estetik değil aynı zamanda enerji verimliliği ve termal konfor gibi performans kriterleri açısından da mimariye önemli katkılar sunabileceğini kanıtlamaktadır.



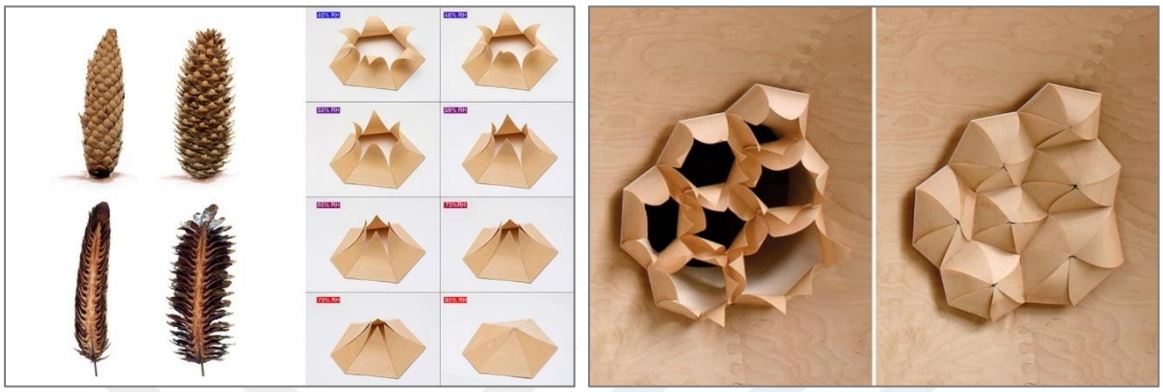
Resim 2.8. FlectoFold Stuttgart Doğa Tarihi Müzesi içerisine tasarlanan kinetik cephe modülü [URL-9]

HygroSkin *Meteorosensitive Pavilion*, Mimarlar: Achim Menges, Steffen Reichert, Firma: University of Stuttgart ICD, Şehir: Stuttgart, Almanya

HygroSkin Pavyonu, iklimsel değişimlere duyarlı mimari kabukların enerjiye ihtiyaç duymadan da çalışabileceğini gösteren öncü bir projedir. Bu pavyon, doğada gözlemlenen malzeme içkin hareket prensiplerinden ilham alarak tasarlanmıştır. Projede kullanılan ahşap esaslı kompozit paneller, ladin kozalaklarının higroskopik tepkime davranışlarını taklit eder. Bu yapı elemanları, herhangi bir motor, sensör veya harici enerjiye ihtiyaç duymaksızın, sadece ortamdaki nem değişimine tepki vererek şekil değiştirmektedir. Bu pasif hareket, ahşabın doğal olarak sahip olduğu anizotropik yapı ve higroskopik özelliklerin bir sonucudur. Odun, doğal olarak büyüyen ve taşıma, iletim ve depolama gibi çok işlevli biyolojik görevleri yerine getirmek üzere evrimleşmiş karmaşık bir dokudur. Bu karmaşıklık, malzemenin yapısal ve higroskopik performansını belirleyen farklılaşmış hücresel anatomisinden kaynaklanmaktadır. Projede hesaplamalı tasarım araçları ve robotik üretim teknikleri entegre edilerek, malzemenin doğal bükülme davranışıyla biçim kazanan, modüler ve hafif yapı bileşenleri geliştirilmiştir.

Projenin tasarım süreci, ince ahşap levhaların elastik bükülme davranışlarını hesaplamalı modellerle analiz ederek, konik yüzeyler oluşturmaya olanak tanımıştır. Her panel çift katmanlı olarak tasarlanmış, vakumla preslenerek sandviç panel haline getirilmiş ve hassas biçimde robotik olarak kesilmiştir. Paneller, ortamdaki nem oranı arttığında birkaç dakika içinde açık konumdan kapalı konuma geçerek iklimsel değişimlere tepki verir. Bu özellikleriyle paneller hem enerji tüketmeden gölgeleme sağlar, hem de iç mekân konforunu artırır. Aynı zamanda her bir panel, gömülü bir sensör, pasif bir motor ve düzenleyici bir eleman işlevi görecek şekilde tasarlanmıştır. Bu proje, doğadaki pasif adaptasyon

stratejilerinin hesaplamalı tasarım süreçleriyle mimariye entegre edilmesi yolunda güçlü bir örnek teşkil etmekte ve gelecekteki iklim duyarlı mimari uygulamalara öncülük etmektedir. (Krieg ve diğerleri, 2014)



Resim 2.9. Stuttgart Üniversitesi Hesaplamalı Tasarım Enstitüsü (ICD) tarafından geliştirilen HygroSkin açıklıklarının hava koşullarına göre uyum sağlama sürecini gösteren yakın plan fotoğraf: düşük bağıl nemde açık konumda (sol) ve yüksek bağıl nemde kapalı konumda (sağ) hareket [URL-10]

Al-Bahr Towers – Mimar: Aedas Architects, Firma: Aedas + Arup, Şehir: Abu Dabi, Birleşik Arap Emirlikleri

Aedas Mimarlık Şirketi tarafından Abu Dhabi'nin çöl iklimine uygun olarak geliştirilen Al-Bahr Kuleleri'nin cephesi, yenilikçi güneş kırıcı panellerle donatılmış bir tepki veren cephe olarak tasarlanmıştır. Cephedeki üçgen birimler, gölgeleme elemanları olarak kullanılarak güneşin hareketine tepki verir ve doğrudan güneş ışığını engeller. (Resim 2.10) (Attia, 2016). Kuleleri'nin duyarlı cephesi, mekanik temelli bir adaptif sistemin öncü örneklerindendir. Cephe sisteminin katlanma hareketi kavramı, İslam mimarisinin geleneksel güneş kırıcı elemanı "*mashrabiya*" ve *mangrov* çiçeklerinin güneşin hareketine tepki vererek katlanmasından esinlenmiştir. 1416 Adaptif gölgeleme sistemi, güneşin konumuna göre açılıp kapanan şemsiye benzeri modüllerden oluşur. Her modül, politetrafloroetilen (PTFE) paneller içerir ve doğrusal bir aktüatör tarafından kontrol edilerek doğrudan güneş ışınımını sınırlar (maksimum 400 W/lineer metre) 14. Bu sistem: %50'ye varan güneş ısı kazancı azaltımı, yılda 1.750 ton CO_2 emisyonu tasarrufu, gün ışığı penetrasyonunda iyileştirme sağlamaktadır (Srisuwan, 2022). Güneş binanın etrafında hareket ettikçe gölge sağlamak amacıyla şemsiye gibi açılıp kapanan modüler bir gölgelendirme sistemi, güneş enerjisi emilimini yaklaşık %20 oranında azaltarak, enerji yoğun klima ve yapay aydınlatma

kullanımını azaltarak yapının işletme kaynaklı karbon salımını düşürmektedir (ARUP, 2012).



(a) (b) (c)

Resim 2.10. Abu Dabi'deki Al Bahr Kuleleri [URL-11], [URL-12] (Srisuwan, 2022)

FlectoLine Facade, Stuttgart Üniversitesi Yapı Yapıları ve Yapısal Tasarım Enstitüsü (ITKE), Freiburg, Almanya

FlectoLine projesi, mimarlıkta enerji verimliliğine odaklanan, sürdürülebilir ve çevresel koşullara uyum sağlayabilen bina kabukları tasarlama ihtiyacından doğmuştur. Almanya'nın Freiburg Botanik Bahçesi'ne yerleştirilen bu cephe sistemi, University of Stuttgart, Freiburg ve Tübingen tarafından yürütülen uluslararası biyomimetik araştırmaların sonucudur. Sistem, doğrudan doğadan ilham alarak, etçil Aldrovanda vesiculosa bitkisinin su altı kapan mekanizmasındaki turgor basıncıyla çalışan motor bölgeleri ve Graphosoma italicum böceğinin kanat damarlarındaki elastik-yapısal malzeme ilişkisini model alır. Bu biyolojik mekanizmalar, FlectoLine modüllerinin tasarımına uyarlanmış ve hareket yönü doğrudan malzeme içinde programlanmıştır. FlectoLine, entegre pnömatik aktüatörlere sahip 101 fiber takviyeli kompozit panelden oluşmaktadır ve 83.5 m²'lik bir cephe alanını kapsamaktadır. Panellerin esnek menteşe bölgeleri sayesinde yalnızca 0.4 bar'lık bir basınçla 90°'ye kadar bükülmesi sağlanabilir. Hareketli panellerin yüzeyine yerleştirilen ince film organik fotovoltaik hücreler, sistemin kendi enerji ihtiyacını karşılamasını sağlar. Bu yönüyle FlectoLine, yalnızca enerji tüketimini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda enerji üretimi de sağlar.Sistem, kullanıcı girdileri ve çevresel değişkenlere (güneş ışığı, rüzgar, sıcaklık vb.) dayalı olarak yapay zekâ destekli bir kontrol algoritmasıyla çalışır. Bu algoritma, gölgeleme, ısı kontrolü, iç mekân konforu ve enerji üretimini optimize eder. FlectoLine, robotik üretim, dijital ikiz teknolojisi, ve hesaplamalı tasarımı birleştirerek, binaların doğayla bütünleşik, esnek ve enerji-pozitif birer organizmaya dönüşebileceğini göstermektedir.

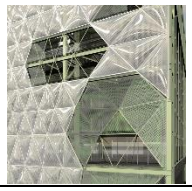
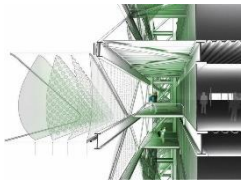
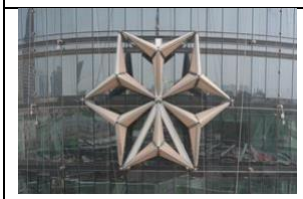
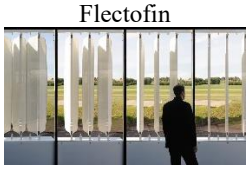


Resim 2.11. Flectoline Stuttgart Üniversitesi Yapı Yapıları ve Yapısal Tasarım Enstitüsü (ITKE) tarafından geliştirilen cephe tasarımı [URL-13]

Sunulan altı yapı örneği, biyomimetik yaklaşımın kinetik cephe sistemlerine entegrasyonu açısından yalnızca teorik bir araştırma alanı olmanın ötesine geçerek, uygulanmış mimari örnekler olarak dikkat çekmektedir. Her biri, doğadan esinlenerek geliştirilmiş hareket prensipleriyle mimari cephe tasarımına yenilikçi katkılarda bulunan bu projeler; malzeme seçiminden yapısal kurgularına, hareket stratejilerinden kontrol sistemlerine kadar geniş bir yelpazede öncü nitelik taşımaktadır. Örneğin, Media-TIC binası enerji verimliliğini dijital kontrolle optimize ederken, Esplanade – Theatres on the Bay binası, doğrudan güneş ışığına tepki veren kinetik bir cepheyle estetik ve işlevselliği birleştirmektedir. Flectofold, FlectoLine, HygroSkin gibi projeler ise biyolojik modellerden (bitki yaprakları, kozalaklar gibi) esinlenerek geliştirilen esnek, uyarlanabilir cephe sistemlerini gerçek ölçekli prototiplere dönüştürerek, bu alandaki uygulamalı araştırmalara somut katkı sağlamaktadır.

Bu kapsamda verilen örneklere ait hazırlanan Çizelge 2.1, her bir yapının değerlendirmesini beş ana başlık altında sunmaktadır: adaptif düzey, biyolojik model, uygulanan strateji, hareket türü ve performans katkısı. Değerlendirmeye alınan her yapı, gerçekleştirilmiş projeler olması nedeniyle, biyomimetik prensiplerin pratikte nasıl işlerlik kazandığını gözlemlemek açısından da önem arz etmektedir. Tablo, bu örneklerin gün ışığı kontrolü, enerji verimliliği, iklim adaptasyonu ve kullanıcı konforu gibi performatif kriterler açısından hangi biçimlerde katkı sunduğunu ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Çizelge 2.1. Tez kapsamında incelenen altı yapıya ait yazar tarafından oluşturulan değerlendirme tablosu

	Proje	Biyolojik Model	Adaptif Düzey	Biyomimetik Strateji	Hareket Türü	Performans
1	Media-TIC binası, Enric Ruiz Geli, Cloud 9, Barselona 	Hücre zarı 	Fizyolojik	Şişme/inme	MB, Fo,	Güneş ışınımını filtreleyerek iç mekân ısısını düzenleme, enerji tüketimini azaltma
2	Esplanade – Theatres on the Bay, Singapur 	Durian meyvesi 	Morfolojik	Açılır/kapanır	MB, PH, E	Güneş kontrolüne olan katkısı sayesinde, enerji verimliliğini arttırma
3	Flectofold-Natural History Museum (University of Stuttgart, 2018 	Aldrovanda vesiculosa 	Morfolojik	Esnek uyumlu mekanizma	MB, Fo, PH	Mekanik karmaşıklıkta azalma / daha az basınçla çalışması
4	HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion 	Pinus türü kozalaklar 	Fizyolojik	Hava koşullarına duyarlı malzeme	MD, EC	Sensör veya elektrikli uyarıcı gerekmez
5	Al-Bahr Kuleleri 	Mangrov çiçekleri 	Morfolojik	Güneşin hareketine yanıt veren katlanma etkisi	MB, Fo, EC	Soğutma yüklerinde %25, ısı kazancında %50'den fazla azalma
6	Flectofin 	Strelitzia reginae 	Morfolojik	Flectofin'den türetilmiş menteşe tipi panjur sistemi	MB, Fo	Gölgeleme verimliliği ve rüzgar dayanımında artış

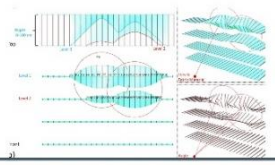
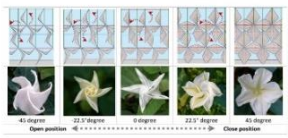
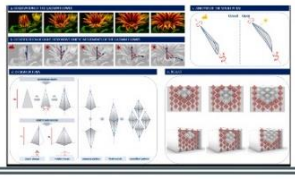
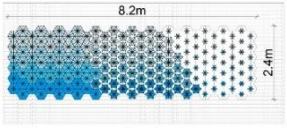
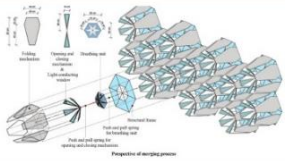
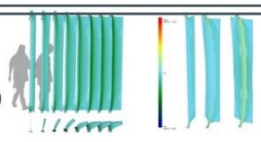
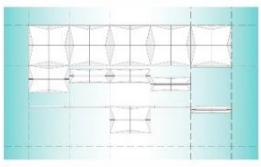
Kısaltmalar: Adaptif Düzey: (M) Morfolojik, (P) Fizyolojik
Hareket Türü: (MB) Mekanik tabanlı, (MD) Malzeme deformasyonu tabanlı
Hareket Mekanizması Türü: (Fo) Katlanma, (PH) Pnömatik veya hidrolik, (EC) Genişleme ve büzülme
Cepheye Uygulama: (E) Dışarıdan eklenmiş, (I) Cepheye entegre

Biyomimetik temelli cephe tasarımlarında, bitkisel hareketlerin güneş ışığına tepkisel davranışları giderek daha fazla araştırmacının ilgisini çekmektedir. Yunitsyna ve Sulaj (2025) bitki esinli güneş enerjisine duyarlı cephe sistemleri için yedi temel yaklaşım ortaya koymuştur: esnek yönelim açısı, modüllerin değişebilir boyut ve şekli, yeniden düzenlenebilme potansiyeli, güneş maruziyetine tepki, yansıtıcılık ve renk değişimi. Bu ilkeler doğrultusunda geliştirilen çeşitli biyokinetik cephe sistemleri, bitkilerden esinlenerek farklı hareket stratejileri (katlanma, dönme, kıvrılma vb.) ve gölgeleme modülleri aracılığıyla çevresel performanslarını artırmayı amaçlamaktadır. (Yunitsyna, Sulaj, 2025).

Şekil 2.9'da yer alan tablo, literatürde yayımlanmış tez ve akademik makalelerde geliştirilen yedi farklı biyomimetik kinetik cephe uygulamasını bir araya getirerek kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Bu örnekler, bitkisel hareketlerden ilham alan mimari cephe sistemlerinin çeşitliliğini ve çok boyutlu performans kriterlerini ortaya koymak amacıyla seçilmiştir. Her bir çalışma, farklı bir biyolojik model üzerinden geliştirilmiş ve belirli tasarım modelleri, hareket tipleri, cephe modülleri ile enerji verimliliği açısından değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmalı analiz, literatürde bu konu üzerine yapılmış araştırmaların mevcut durumunu görselleştirerek tezime katkı sunmayı hedeflemiştir.

Hosseini ve arkadaşları (2021), bitkilerde stomata hareketlerinden esinlenerek tasarlanan "*bio-inspired interactive kinetic façade*" ile yatay gölgelik modüllerinin simülasyon ve parametrik analizler sonucunda görsel konforu iyileştirmeyi hedeflediklerini; özellikle 8x1 modül gridinde güneşin açısına bağlı olarak %60'a kadar performans artışı sağlandığını raporlamışlardır. Mohamed Abd El-Rahman ve diğerleri (2020) ise sıcak iklimlerde bitki adaptasyonlarından esinlenerek geliştirdikleri adaptif cephe sisteminin, yaprak benzeri modüllerin çevresel uyarıcılarla değişen tepkileri sayesinde enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini belirtmişlerdir.Gazanya çiçeğinin ışık duyarlılığından ilham alan Sommesse ve arkadaşları (2024) tarafından geliştirilen kinetik cephe tasarımı, kıvrılma-dönme hareketiyle %20 enerji kazancı sağlarken; bu sistemin özellikle sensör destekli parametrik mantıkla entegre edildiği vurgulanmıştır. Avustralya merkezli çalışmada Kuru ve diğerleri (2020), echino kaktüs formundan türetilmiş modüler yapıların geometrik çoğaltımını uygulamış ve cephede %20'lik enerji kazanımıyla form–işlev ilişkisinin altını çizmiştir. Solliman (2023) tarafından geliştirilen ve *Mimosa pudica* bitkisinin hızlı katlanma tepkisini taklit eden sistem, %11.3 enerji kazancı ile biyomimetik hareket stratejisinin performans analizinin önemini göstermiştir.Schleicher ve arkadaşları (2011), doğal

elastiklik ilkelerine dayanan dönme hareketli dikey modüllerle doğu zambağı yapısını cephe tasarımına uyarlamış; enerji verimliliği verisi olmasa da doğal kinematik modellemenin gerçek ölçeğe aktarılması açısından önemli bir öncü çalışmaya imza atmıştır. Sheikh ve Asghar (2018) ise sekoya ekşisi bitkisinden türetilen folding-katlama mantığıyla %32 enerji kazancı elde etmiş ve bu sistemin özellikle cam cepheli binalarda doğal ışık kontrolü performansına katkısını vurgulamışlardır.

KONU	YER	BİYOLOJİK MODEL	TASARIM MODELİ	CEPHE MODÜLÜ	HAREKET TİPİ	ENERJİ KAZANIMI
Bio-inspired interactive kinetic façade (Hosseini ve arkadaşları)	İran	Stomata		Yatay Gölgelik	Katlama-Dönme	%60
Adaptive Building Envelope (Mohamed Abd El-Rahman ve arkadaşları, 2020)	Mısır	Yıldız Çalısı, Sabah sefası		Modüler Gölgelik	Katlama-Dönme	%50
Light-responsive kinetic façade system (Sommese ve arkadaşları, 2024)	İtalya	Gazanya Çiçeği		Modüler Gölgelik	Kıvrılma-Dönme	%20
Biomimetic Adaptive Building Skins (Kuru ve arkadaşları, 2020)	Avustralya	Echino kaktüs		Modüler Gölgelik	Katlanma	%20
Biomimetic adaptive building envelope based(Solliman, 2023)	Mısır	Mimosa Pudica küstüm otu,		Modüler Gölgelik	Katlanma	%11.3
Adaptive Façade Shading Systems inspired by Natural Elastic Kinematics (Schleicher ve arkadaşları, 2011)	Almanya	Doğu zambağı (Lilium Casablanca)		Dikey Gölgelik	Dönme	-
Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings(Sheikh ve Asghar, 2018)	Pakistan	Sekoya Ekşisi (Oxalis oregana)		Gölgelik	Folding	%32

Şekil 2.9. Yunitsyna ve Sulaj (2025)'ın litaratürde yer alan bitki esinli günışığı verimli kinetik cephe örneklerini içeren tablosu (yazar tarafından oluşturulmuştur)

3. YÖNTEM

3.1. Araştırmanın Tasarımı ve Yöntemi

Bu çalışma, mimari tasarımda doğadan ilham alan hareketli sistemlerin gün ışığı performansını optimize etme potansiyelini araştırmak amacıyla problem odaklı bir biyomimetik yaklaşım benimsemiştir. Araştırma sürecinde hem niteliksel hem de niceliksel veri analiz yöntemleri kullanılmış; biyolojik modellerin davranışsal ve yapısal özellikleri detaylı bir şekilde incelenerek, bu özelliklerin mimari cephe tasarımlarına nasıl entegre edilebileceği değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel hedefi, enerji verimliliğini artıran, görsel konfor koşullarını iyileştiren kinetik cephe sistemleri geliştirmektir. Bu doğrultuda doğadaki hareket mekanizmaları mimari sistemlere referans alınmış ve bu stratejilerin uygulanabilirliği, dijital modelleme ve simülasyon araçları aracılığıyla test edilmiştir. Bu metodolojik yapı doğrultusunda, iki farklı bitkisel model derinlemesine analiz edilmiştir. *Mimosa pudica* (Küstüm otu), bitkinin çevresel uyarıcılara karşı gösterdiği tepkisel hareket mekanizması, iklimsel adaptasyon stratejileri bağlamında değerlendirilmiştir. Bu model, cephe sistemlerinin çevresel değişkenlere karşı duyarlı hale getirilmesi açısından ilham noktası olmuştur. *Hornbeam* (Gürgen) yaprağı ise yaprağın kendine özgü katlanma mekaniği, üç boyutlu yüzey deformasyonları ve yapısal direnci analiz edilerek mimari ölçekte yeniden yorumlanmıştır. Bu model, kinetik cephe modüllerinin hem estetik hem de işlevsel açıdan doğaya benzer bir davranış sergilemesini mümkün kılmıştır.

Bu biyolojik referans modeller temel alınarak, yapay zeka destekli parametrik tasarım yöntemleri (Grasshopper-Python) aracılığıyla üç farklı kinetik gölgelik sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemlerin her biri 1x1m'lik modüler birimler olarak modellenmiş ve grid sistem içinde uygulanabilirliği test edilmiştir. Geliştirilen prototiplerin gün ışığı performansları dijital simülasyon ortamında ölçülmüş, sonuçlar sayısal analiz edilmiştir.

Araştırma, mimarlık ve biyoloji gibi farklı disiplinleri bir araya getiren bütüncül ve disiplinlerarası bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışma kapsamında aşağıdaki üç temel araştırma alanı ön plana çıkmıştır. Biyomimetik prensiplerin mimari tasarıma entegrasyonu, cephe tasarımında hareketli sistemlerin yapısal ve işlevsel olarak bütünleştirilmesi, gün ışığı optimizasyonu doğrultusunda performans temelli değerlendirme yöntemlerinin uygulanması. Bu metodolojik çerçeve, doğadan ilham alınan hareket stratejilerinin mimari

tasarıma sistematik ve ölçülebilir bir biçimde nasıl entegre edilebileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, biyomimetik yaklaşımların bina kabuğu tasarımındaki etkisini yalnızca estetik bir yaklaşım olarak değil, aynı zamanda performans temelli bir tasarım aracı olarak değerlendirme olanağı sunmuştur.

Şekil 3.1'de, araştırmanın yöntemini gösteren araştırmacı tarafından oluşturulan akış şeması sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Araştırmanın yöntemi

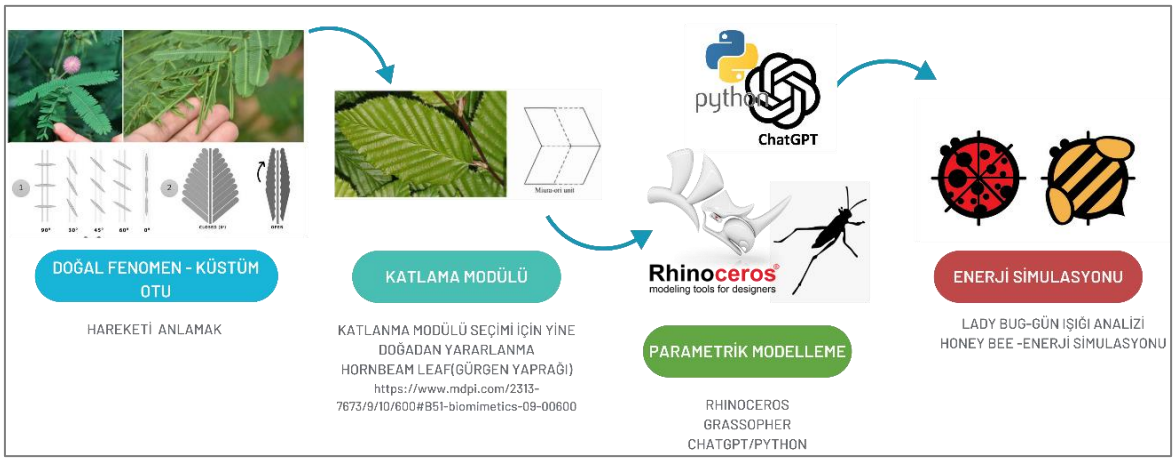
Bu çalışma, doğadaki katlanma ve tepkisel hareket mekanizmalarından ilham alarak geliştirilen dinamik bir kinetik cephe sistemini ortaya koymaktadır. Tasarım süreci, gün ışığı performansını artırmayı ve çevresel koşullara uyum sağlamayı amaçlayan biyomimetik yaklaşım ve parametrik modelleme ilkelerini bütünleştirmektedir. Yaprak katlanma geometrisi açısından *Hornbeam* (Gürgen yaprağı), çevresel uyarıcılara verdiği hızlı tepki yönüyle ise *Mimosa pudica* (Küstüm otu) model alınmıştır. Her biri 1m x 1m boyutunda olan paneller, 5x8 modül ızgara sistemi halinde tasarlanmış ve Rhino 6 ile Grasshopper yazılımları kullanılarak parametrik olarak modellenmiştir. Paneller, gürgen yaprağının

zikzaklı katlanma desenine benzer şekilde açılıp kapanabilen yapılar olarak tanımlanmıştır. Güneş ışığına duyarlı mekanizma, küstüm otunun uyarana bağlı kapanma davranışına benzer şekilde çalışmakta; yoğun güneş ışığında paneller kapanarak gölgeleme sağlamakta, düşük ışıkta ise açılarak gün ışığını içeri almaktadır.

Kinetik davranış, Ladybug Tools ve Honey bee, Grasshopper bileşenleri ile yapılan güneş simülasyonlarıyla kontrol edilmektedir. Güneş vektörüne göre her panelin aldığı ışık miktarı hesaplanmakta ve bu verilere göre katlanma açısı dinamik olarak ayarlanmaktadır. Simülasyonlar, cephe sisteminin farklı saatler ve mevsimlerdeki performansını analiz etmeye olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, tasarım sürecinin çıktısı olan Rhino (.3dm) ve Grasshopper (.gh) dosyaları; açık, parametrelerle yönetilebilir ve farklı projelere kolayca uyarlanabilir bir kinetik cephe şablonu sunmaktadır. Bu yaklaşım, doğadan öğrenilen stratejilerin mimarlıkta sürdürülebilir, estetik ve performansa dayalı çözümler üretme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Şekil 3.2.'de, araştırmadaki uygulama şemasını gösteren araştırmacı tarafından oluşturulan uygulama şeması sunulmaktadır. İlk aşamada, doğal fenomen şeçilmiş, bitkisel hareket mekanizmalarının anlaşılması amacıyla *Mimosa pudica* (küstüm otu) bitkisi incelenmiş; bu bitkinin dışsal uyarana tepki olarak yapraklarını katlaması, hareketin temel biyolojik referansı olarak değerlendirilmiştir. Ardından, katlanabilir bir cephe modülü oluşturmak için yine doğadan esinlenilerek *Hornbeam* (gürgen) yaprağının kıvrımlı yapısı seçilmiştir. Bu yapraktan ilham alınarak geliştirilen katlama şeması, parametrik ortamda modellenmek üzere dijital ortama aktarılmıştır. Üçüncü aşamada, Rhinoceros, Grasshopper ve Python yazılımları ile birlikte ChatGPT desteği kullanılarak katlanabilir modülün parametrik modeli oluşturulmuştur. Son olarak, geliştirilen modelin çevresel performansı Ladybug ve Honeybee araçları kullanılarak simüle edilmiştir. Bu simülasyonlar aracılığıyla, modülün gün ışığı geçirgenliği ve enerji verimliliği gibi temel kriterler açısından nasıl davrandığı analiz edilmiştir.



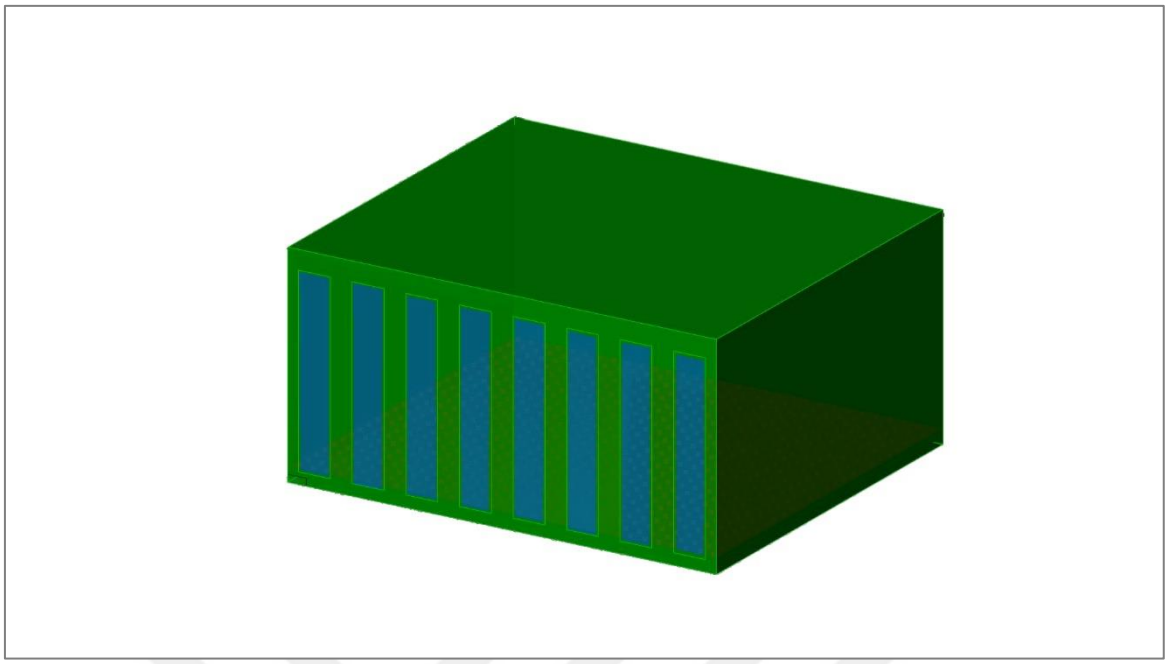
Şekil 3.2. Uygulama şeması

Şekil 3.2'de görüldüğü üzere, bu dört aşamalı süreç; doğadan esinlenme, biyolojik modelleme, parametrik tasarım ve çevresel performans değerlendirmesini içeren bütüncül bir tasarım stratejisini temsil etmektedir.

3.2. Referans Bina Oluşumu ve Kullanılan Simulasyon Programları

Bu tez çalışmasında, performans analizlerinin yürütülmesi amacıyla referans yapı olarak 10x20 metre boyutlarında, tek katlı bir ofis binası tasarlanmıştır. Yapının sade geometrisi, parametrik analizler ve gün ışığı simülasyonları için uygun bir temel sağlamıştır. Çalışmada gün ışığı performansının konum bazlı değerlendirilmesi hedeflendiğinden, Rhino/Grasshopper ortamında çalışan Ladybug eklentisi kullanılmış ve simülasyonlar için Roma kentine ait EPW (*EnergyPlus Weather*) iklim verileri modele entegre edilmiştir. Bu sayede, güneşin yıl içindeki konumu, ışınım açıları ve yönelime bağlı ışık şiddeti gibi çevresel veriler doğrudan tasarımla ilişkilendirilmiştir.

Kinetik cephe modülü, binanın güney cephesine entegre edilmek üzere tasarlanmış olup, bu cephede geniş açıklıklı bir cam yüzey planlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, iç mekâna maksimum doğal ışık girişi sağlanmakta ve modülün gölgeleme potansiyeli daha etkili bir şekilde test edilebilmektedir. Çelik konstrüksiyon taşıyıcı bir sistemle cepheye eklemlenen bu modül, binaya dıştan sarılan bir *envelope* (zar) sistemi olarak kurgulanmıştır. Söz konusu kinetik sistem, güneş ışınımına göre açılıp kapanarak gün boyunca ışık kontrolü sağlamaktadır. Farklı pozisyonlarda yapılan simülasyonlar, bu modülün iç mekâna giren gün ışığını nasıl yönlendirdiğini ve ışık dağılımını nasıl etkilediğini göstermiştir.



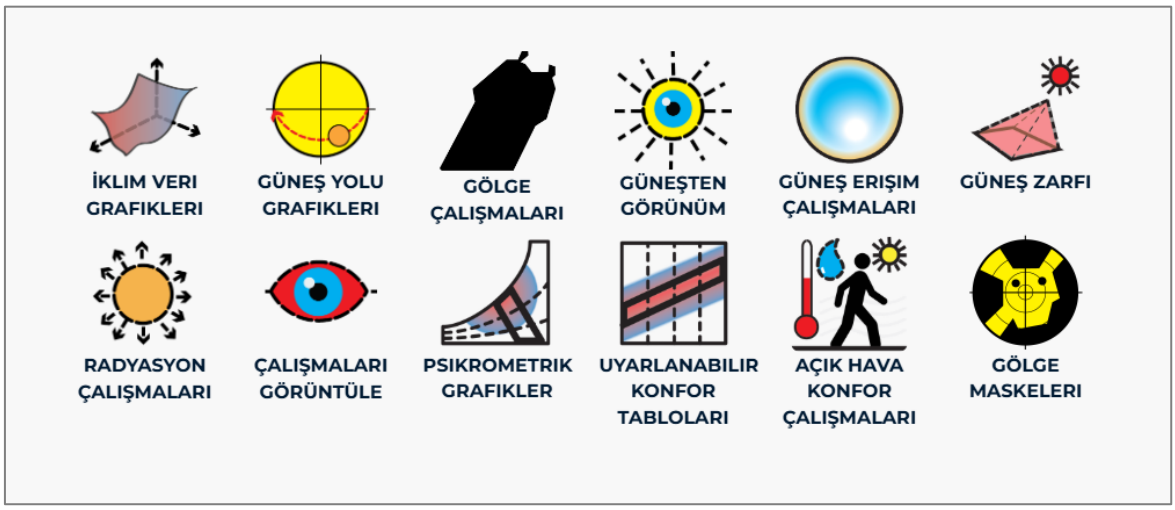
Şekil 3.3. Referans bina görseli

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen enerji ve gün ışığı simülasyonları, parametrik cephe modülünün performansını değerlendirmek amacıyla oluşturulan sadeleştirilmiş bir referans bina modeli üzerinde yürütülmüştür. Şekil 3.3'te görülen bu model, mimari detaylardan arındırılmış, dikdörtgen prizma formunda kurgulanmış opak bir yapı kabuğuna sahiptir. Bu tercih, analizlerin daha sağlıklı ve izole bir biçimde gerçekleştirilmesini sağlamak üzere yapılmıştır. Binanın ön cephesi, çalışmanın odak noktasını oluşturan biyomimetik katlanabilir cephe modülünün yerleştirileceği yüzey olarak tanımlanmıştır. Söz konusu cephe, gün ışığı geçişi, gölgeleme etkisi ve enerji verimliliği açısından performans analizlerine tabi tutulmuştur. Modelin geri kalan cepheleri opak olarak tasarlanmış ve dış etkenlerden izole edilmiştir. Bu sayede yalnızca cephe modülünün etkisi kontrol edilerek simülasyonların güvenilirliği artırılmıştır. Bu referans bina modeli, Ladybug ve Honeybee araçlarıyla gerçekleştirilen parametrik simülasyonlara temel teşkil etmekte olup, cephe sisteminin çevresel performansının sayısal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

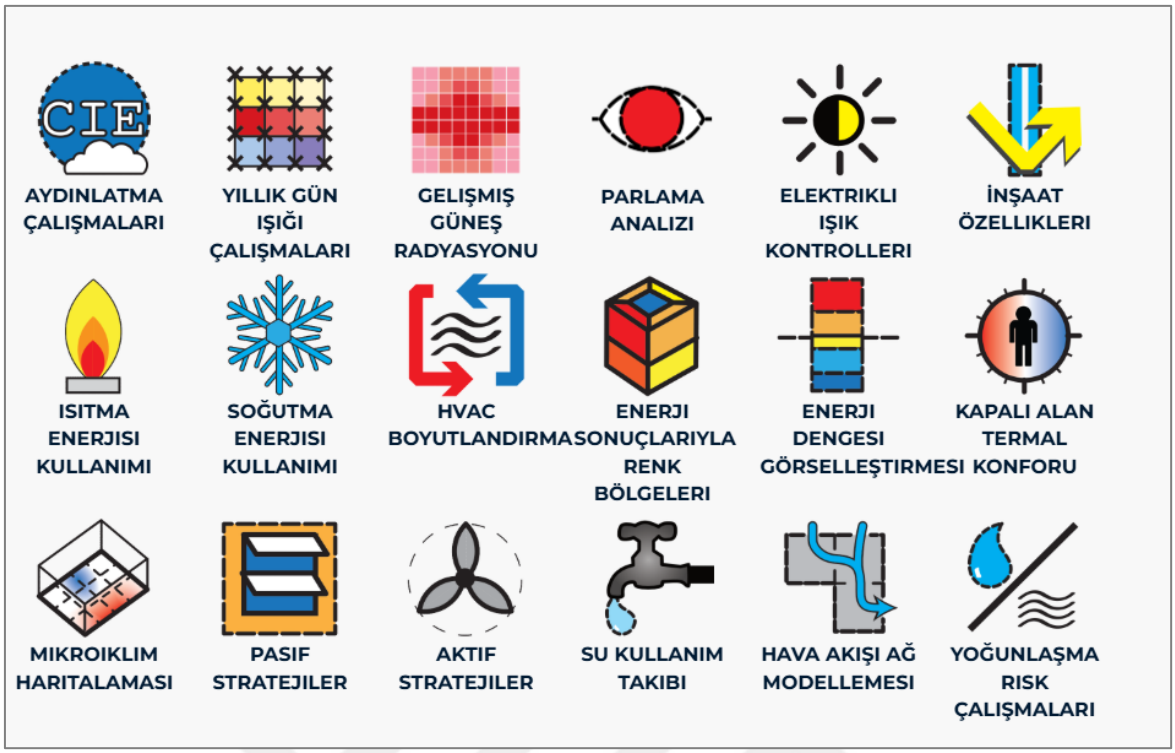
Oluşturulan referans modele enerji simülasyonu yapılabilmesi için uygun programlar araşltırılmış ve simülasyon programlarının kapasitesi araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında, doğadan esinlenerek geliştirilen kinetik cephe modülünün çevresel performansını değerlendirmek amacıyla Ladybug ve Honeybee eklentileri kullanılmıştır. Her iki araç da Rhino/Grasshopper ortamına entegre çalışan açık kaynaklı simülasyon araçlarıdır ve

özellikle iklim verilerine dayalı analizler, gün ışığı hesaplamaları, termal konfor değerlendirmeleri ve enerji performansı simülasyonları gibi konularda mimarlara detaylı ve görselleştirilmiş çıktılar sunma yeteneğine sahiptir. Ladybug, iklim verilerinin analizini, güneş hareketlerinin modellenmesini, gölge etkilerinin değerlendirilmesini ve radyasyon dağılımlarının hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu sayede cephe tasarımının yerel iklimle ilişkisi ortaya konulmaktadır. Honeybee ise daha ileri düzeyde enerji analizi, yıllık gün ışığı simülasyonları, termal konfor ölçütleri, HVAC sistem optimizasyonu ve iç mekân aydınlatma performansı gibi değerlendirmeleri kapsamaktadır.

Bu doğrultuda tez kapsamında; Ladybug aracı ile iklim veri grafikleri, güneş yolu, güneş zarfı oluşturma ve gölge maskeleri hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, cephe modülünün mekânsal konumla olan ilişkisini ve gün ışığına tepkisini değerlendirmeye yöneliktir. Honeybee aracı ile ise yıllık gün ışığı simülasyonları, aydınlatma analizleri yapılmıştır. Bu analizler yardımıyla, parametrik cephe modülünün yalnızca görsel değil, aynı zamanda enerji verimliliği performansı sayısal olarak ortaya konmuştur. Özellikle, cephe elemanlarının tam açık, yarı açık ve kısmen kapalı konumları için gün ışığı simülasyonları gerçekleştirilmiş; bu senaryolar üzerinden aydınlık düzeyi dağılımı değerlendirilmiştir. Böylece biyomimetik tasarımın sürdürülebilir mimarlık bağlamında sağlayabileceği katkılar bilimsel olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.4. Ladybug uzantısının yapabildiği analizler [URL-14]



Şekil 3.5. Honeybee üzerinden yapılabilen simülasyonlar [URL-15]

4. HAREKETİN FORMA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ: ENERJİ PERFORMANSINI ARTIRMAK İÇİN BİYOMİMETİK KİNETİK CEPHE

4.1. Seçilen Doğal Fenomenin Tasarımsal Gelişimi ve Yapay Zeka Kullanımı

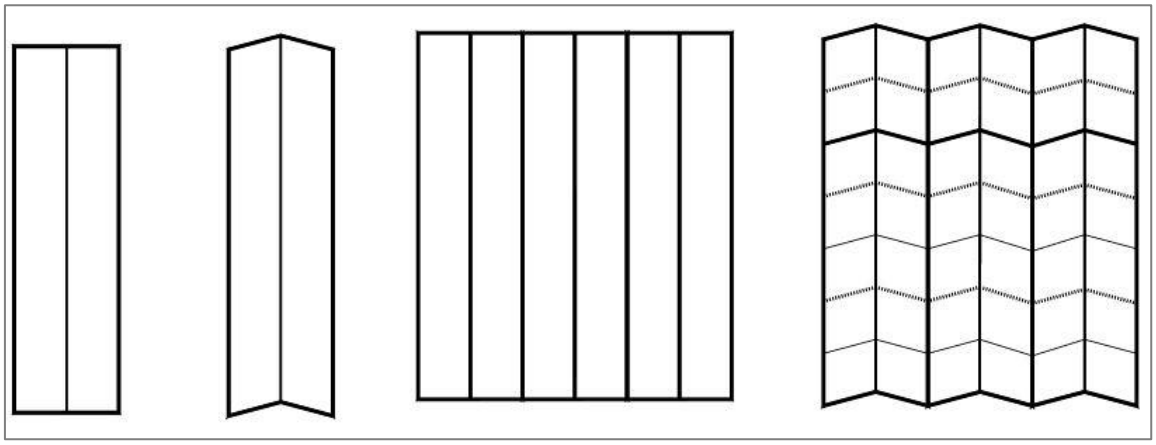
Bu çalışmada, bitkilerin doğal hareket mekanizmalarının mimari tasarım süreçlerine nasıl entegre edilebileceği araştırılmıştır. Görünüşte hareketsiz varlıklar gibi algılansalar da, bitkiler çevresel uyaranlara karşı çok çeşitli hareket biçimleri sergileyebilmektedir. Bu hareketler; turgor basıncı değişimleri, büyüme yönelimleri ve yaprak katlanmaları gibi pasif ya da aktif süreçlerle gerçekleşmektedir (Forterre, 2013). Örneğin, köklerin yerçekimi yönünde toprak altına yönelmesi, yaprak ve çiçeklerin ışık kaynaklarına yönelmesi (fototropizm) ya da dokunsal uyaranlara karşı yanıt üretmesi (tigmotropizm) bu hareketlere örnek olarak gösterilebilir. Bu süreçlerde bitkiler; ışık, sıcaklık, nem gibi dışsal faktörleri algılayan reseptörler aracılığıyla çevrelerine tepki verirler. Bazı hareketler oldukça yavaş olup yalnızca zaman atlamalı gözlemlerle fark edilebilirken (örneğin ayçiçeği bitkisinin güneş takibi), bazıları oldukça hızlı ve dramatiktir. Mimosa pudica (küstüm otu) gibi türler, dış uyaranlara saniyeler içinde verdiği yaprak kapanma tepkisiyle bu hızlı hareketlerin çarpıcı örneklerindendir (Markin ve diğerleri, 2008). Benzer şekilde, etçil bitkilerden *Dionaea muscipula* (Venüs sinekkapanı), yapraklarını hızla kapatarak av yakalayabilmektedir.

Mimosa pudica bitkisi, yalnızca biyolojik değil, aynı zamanda mimari ve mühendislik uygulamaları için de ilham verici bir model sunmaktadır. Bu bitkinin yaprakları, dış uyarana maruz kaldığında hızla katlanmakta ve gövdesini küçülterek kendini savunma pozisyonuna geçmektedir. Bu hareket, yaprak saplarında bulunan "*pulvinus*" adlı hücre gruplarındaki turgor basıncının ani değişimiyle gerçekleşmektedir. Turgor basıncı, vakuollerin hücre duvarına uyguladığı iç basınç ile ilgilidir ve yaprakların dik durmasını sağlamaktadır (Komaraju ve diğerleri, 2020). Uyaran ortadan kalktığında ise yaklaşık 10 dakika içinde bitki eski formuna geri dönmektedir. Bu tür hareket mekanizmaları, dinamik ve çevresel veriye duyarlı mimari sistemlerin geliştirilmesinde önemli bir referans sunmaktadır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de bu biyolojik sürece ilişkin görseller sunulmuştur.



Şekil 4.1. (a) *Mimosa Pudica* hareket görseli [URL-16] (b) Bitkide turgor basıncı nedeniyle nastik hareketler [URL-17]

Mimosa pudica'nın hareketleri yalnızca dokunmayla sınırlı değildir; yaprak pozisyonları gün ışığına ve gece-gündüz döngüsüne göre de değişmektedir (Sankaewthong ve diğerleri, 2023). Söz konusu biyolojik tepki süreçleri, kinetik cephe tasarımında origami temelli katlanabilir sistemlerin modellenmesi açısından ilham verici bir temel oluşturmuştur. Ancak bitkinin tepkisel yapısı hızlılık ve duyarlılık açısından örnek teşkil etse de, bu hareketlerin geometrik olarak dijital ortamda modellenebilmesi adına, daha düzenli ve simetrik bir katlama desenine sahip olan *Hornbeam* (gürgen) yaprağı bu çalışmada ikinci bir biyomimetik kaynak olarak tercih edilmiştir (Carrasco ve González, 2015).

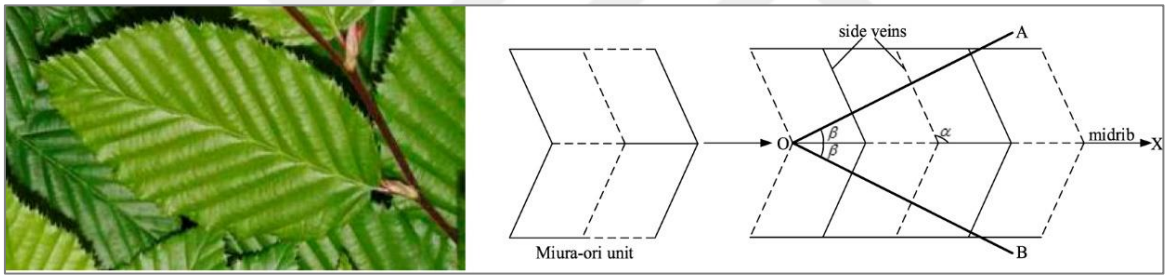


Şekil 4.2. Carrasco ve González (2015) çalışmasından uyarlanarak yazar tarafından oluşturulan katlanma modülü

Hornbeam yaprağı, iç bükey-dış bükey geçişler içeren ve çok yönlü simetrik bir katlanma yapısına sahiptir. Bu özellikleriyle, parametrik ortamda geometrik olarak tanımlanabilen ve matematiksel olarak ifade edilebilen bir yapı sergilemektedir. Şekil 4.2'de, Carrasco ve González (2015) çalışmasından uyarlanarak geliştirilen katlama modülünün bu tasarıma nasıl temel oluşturduğu görselleştirilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada Mimosa pudica

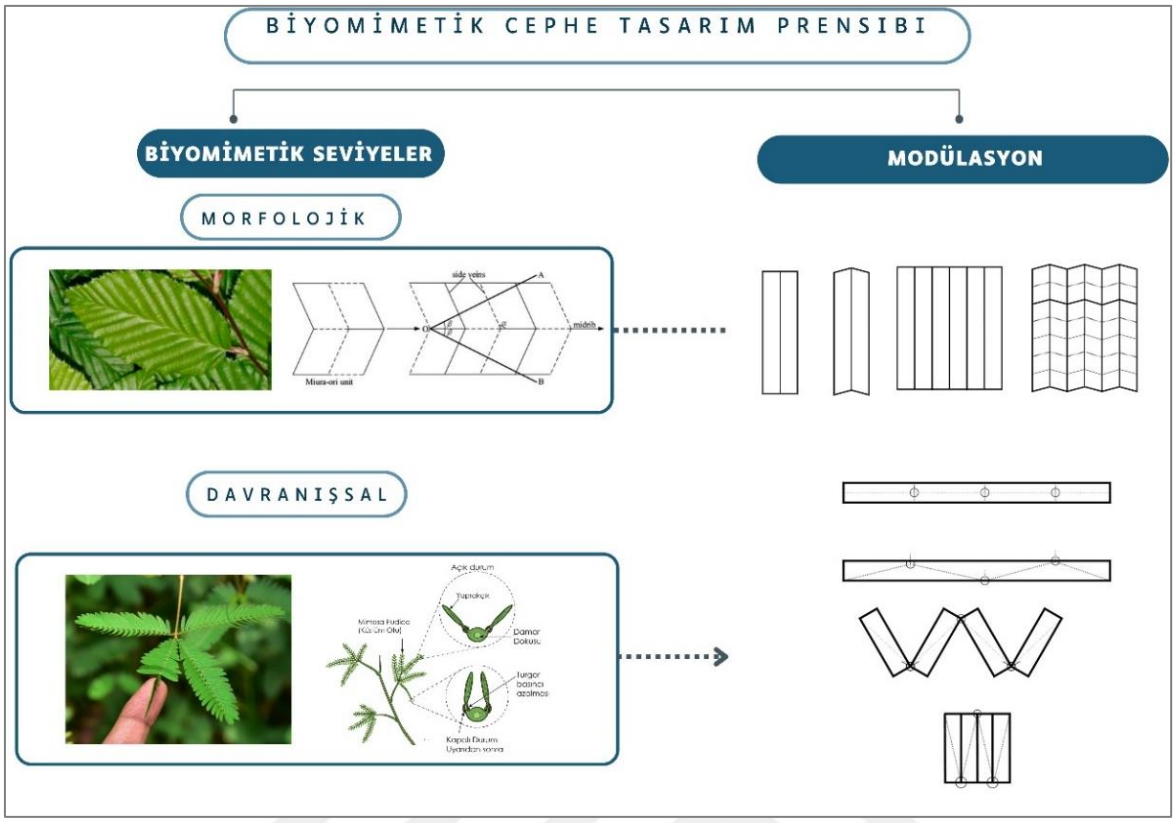
bitkisinin çevresel verilere duyarlı hareketleri modelin dinamik davranış mantığını oluştururken; *Hornbeam* yaprağının katlama geometrisi, parametrik form üretimi ve simülasyon açısından ana matematiksel altyapıyı sağlamıştır.

Tasarım sürecinde, *Hornbeam* yaprağının doğal katlama düzeni önce dijital olarak modellenmiş, ardından bu yapı Grasshopper ortamında yapay zekâ desteğiyle parametrik hale getirilmiştir. *Mimosa pudica'nın* davranışlarını temel alan bir algoritma geliştirilerek, cephe panellerinin açılıp kapanma hareketleri güneş ışığı ve termal koşullara göre optimize edilmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, *Hornbeam* yaprağının oluklu ve kıvrımlı yüzey yapısı, cephe panelinin dinamik açılıp-kapanma mekanizması için temel referans olarak kullanılmıştır (Tang ve diğerleri, 2022). Origami prensipleriyle geliştirilen bu sistem, yalnızca biçimsel bir esneklik değil, aynı zamanda enerji verimliliğini artırmaya yönelik performans odaklı bir çözüm olarak da değerlendirilmektedir.



Şekil 4.3. *Hornbeam* yaprakları ve oluklu yaprak modeline dayalı temel birim (Tang ve diğerleri, 2022)

Sonuç olarak, tasarım süreci morfolojik ve davranışsal iki temel biyomimetik seviyeye dayanmaktadır. Morfolojik düzeyde, *Hornbeam* yaprağının doğal katlanma yapısı referans alınarak geometrik modüller geliştirilmiştir. Bu modüller, yüzey formasyonlarında tekrar eden bir düzen oluşturarak mimari birimlerin biçimsel temelini oluşturmaktadır. Davranışsal düzeyde ise *Mimosa pudica* bitkisinin çevresel uyarıcılara verdiği tepki incelenmiş ve bu tepki mekanizması, cephe elemanlarının dinamik olarak açılıp kapanmasını sağlayacak şekilde tasarıma entegre edilmiştir. Modülasyon aşamasında, bu biyolojik referanslar doğrultusunda oluşturulan hareketli sistemler eklemlenebilir ve katlanabilir yapılar halinde organize edilmiştir.



Şekil 4.4. Biyolojik referanslar doğrultusunda yazar tarafından oluşturulan modülasyon

Grasshopper ve Python tabanlı yapay zekâ algoritmaları aracılığıyla parametrik olarak ifade edilmiştir.

Bu çalışmada, kinetik cephe modülünün modelleme süreci yalnızca manuel olarak değil, yapay zekâ desteğiyle yürütülmüştür. Modelleme için Rhino, Grasshopper içerisinde bulunan Python tabanlı yazılım komutları kullanılmıştır. Bunun temel nedeni, karmaşık katlanma davranışlarının ve çoklu açılma-kapanma senaryolarının manuel olarak modellenmesinin zaman alıcı, tekrar üretimi zor ve geometrik açıdan zorlayıcı olmasıdır. Bu bağlamda, yapay zekâya (ChatGPT) katlanma yapısı, form, işleyiş prensibi gibi parametrik girdiler tanımlanmış ve yapay zekâdan bu girdilere dayalı olarak Python kodları üretmesi istenmiştir. Geliştirilen bu kodlar sayesinde, modülün davranışı matematiksel olarak çözümendirilmiş ve parametrik varyasyonlar oluşturmada hız kazanılmıştır. Ek olarak hem zamandan tasarruf sağlamış hem de mimari tasarımda yapay zekânın yaratıcı üretim sürecine aktif katkısını gösterilmiştir.

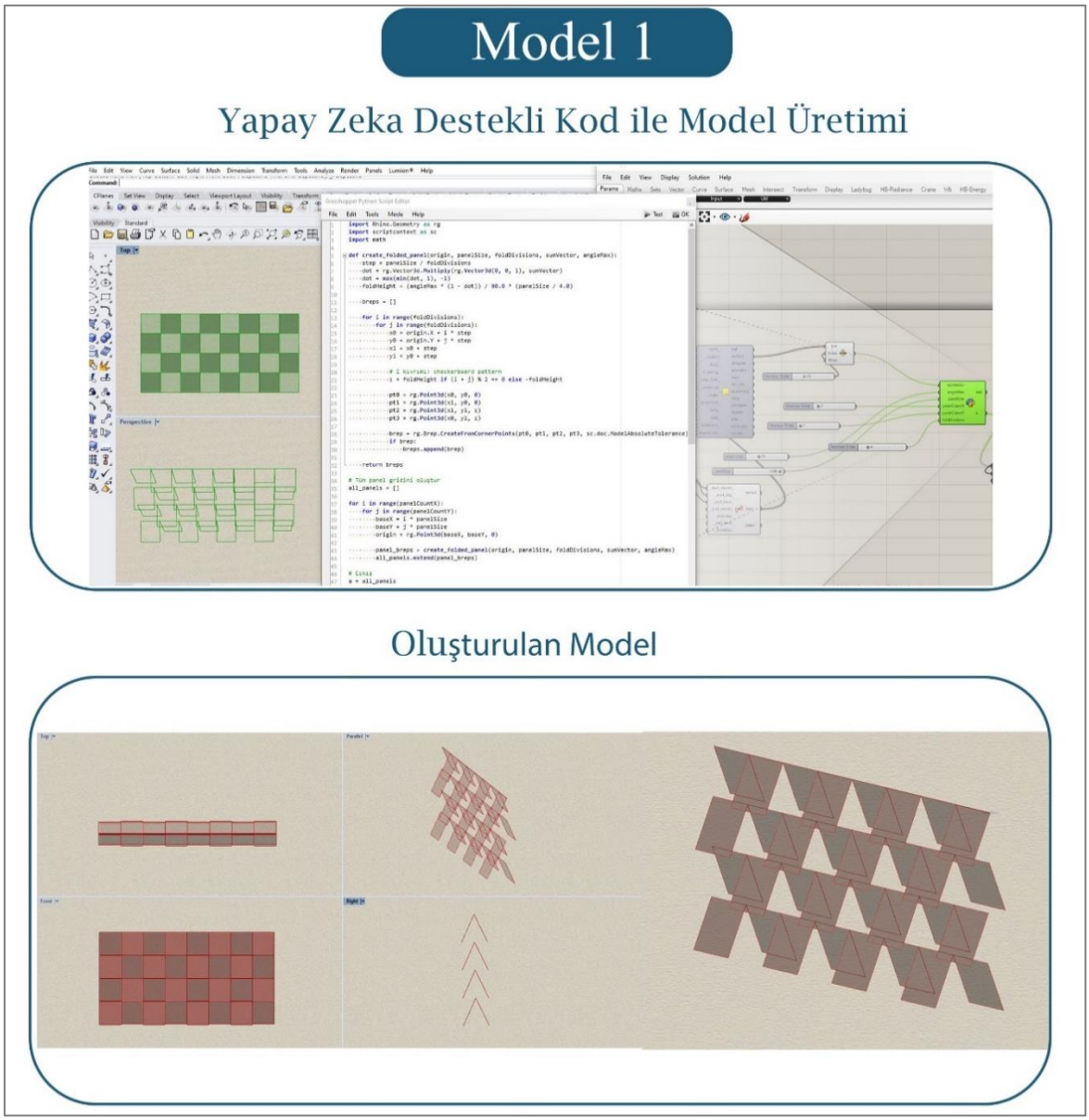
Modelleme süreci, yalnızca doğrudan biyolojik formun taklit edilmesine değil, seçilen doğal fenomenler olan *Mimosa pudica'nın* davranışsal özellikleri ile *Hornbeam* (Gürgen)

yaprağının morfolojik katlanma yapısının sentezlenerek parametrik düzeyde yeniden yorumlanmasına dayanmaktadır. Özellikle cephe panelinin yapısı, biyolojik kaynaklardan türetilen genel davranış ilkelerine bağlı kalınarak yeniden düzenlenmiştir. Bu aşamada, yapay zekâ algoritmasına, temel tasarım ilkeleri sabit tutulmak kaydıyla, karolajın formunu ve yönelimini değiştirebilecek parametrik girdiler tanımlanmış; sistemden farklı varyasyonlar üretmesi istenmiştir. Yapay zekâ tarafından üretilen üç farklı varyasyon, aynı biyolojik ilkeden türemiş olmalarına rağmen karolaj yapılarına ve hareket senaryolarına göre biçimsel ve işlevsel olarak birbirinden ayrışmaktadır.

Bu tez çalışmasında, üçüncü varyasyon (Model 3) parametrik esneklik, cephe bütünlüğü ve çevresel duyarlılık gibi temel tasarım kriterleri ile birlikte, yapının uygulanabilirliği, yapısal olarak yeniden düzenlenebilirliği, üretim süreçlerindeki pratiklik ve güneş ışığına verdiği tepkinin simülasyon verileriyle gösterdiği yüksek uyum gibi çoklu performans ölçütleri doğrultusunda en dengeli çözümü sunduğu için tercih edilmiştir.

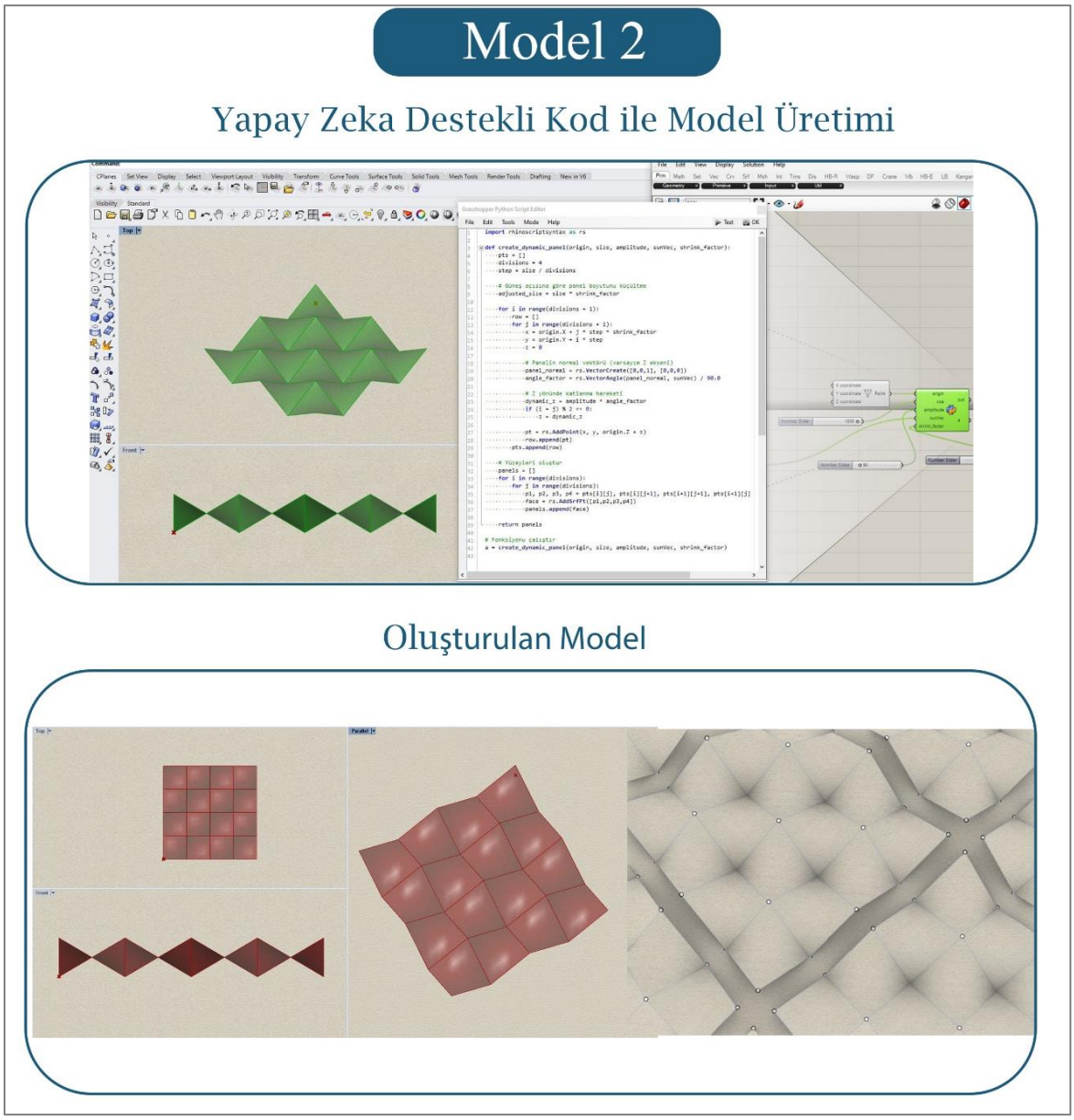
Her bir varyasyonda farklı parametrik kurgular denenmiş; katlanma geometrisi, panel dizilimi ve açıklık yüzdesi gibi tasarım bileşenleri farklılaştırılmıştır. İlk modelde daha basit bir yüzey düzeniyle hareket denemesi yapılmış, ikinci modelde Hornbeam yaprağının kıvrımlı morfolojisi detaylı olarak modellenmiş, üçüncü ve son modelde ise bu morfolojik yapı sadeleştirilerek açıklık yüzdeleri üzerinden performans analizine olanak tanıyan sistematik bir panelleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Modellerin oluşturulma sürecinde yapay zekâya her defasında farklı geometrik tanımlar ve katlanma mantıkları aktarılmış, elde edilen kod çıktıları doğrultusunda üretim hızlandırılmış ve varyasyonlar kolaylıkla test edilmiştir. Aşağıda her bir modele ait oluşturulan varyasyonlar görselleriyle birlikte sırasıyla sunulmuştur (Bkz. Şekil 4.5, 4.6, 4.7).

İlk model (Şekil 4.5), biyomimetik katlama mantığını temel seviyede test etmek amacıyla geliştirilmiştir. Yapay zekâya, “güneş yönüne tepki veren, katlanan, yatay eksen üzerinden açılıp kapanan, yaprak benzeri yüzey modülü” tanımı verilmiş ve Python tabanlı bir kodla temel bir açılır-kapanır sistem üretilmiştir. Ancak bu modelde kullanılan düzen dama tahtası tipi bir karolaj içerdiğinden, Hornbeam yaprağının özgün içbükey-dışbükey kıvrım sistemi tam olarak temsil edilememiştir. Hareket prensibi olarak Mimosa pudica'nın zamana duyarlı kapanma refleksi temel alınsa da, yaprak yapısının morfolojik karmaşıklığı bu modelde eksik kalmıştır.



Şekil 4.5. Yazar tarafından betimleme yoluyla oluşturulan ChatGPT destekli Python kodu ile (Model 1)

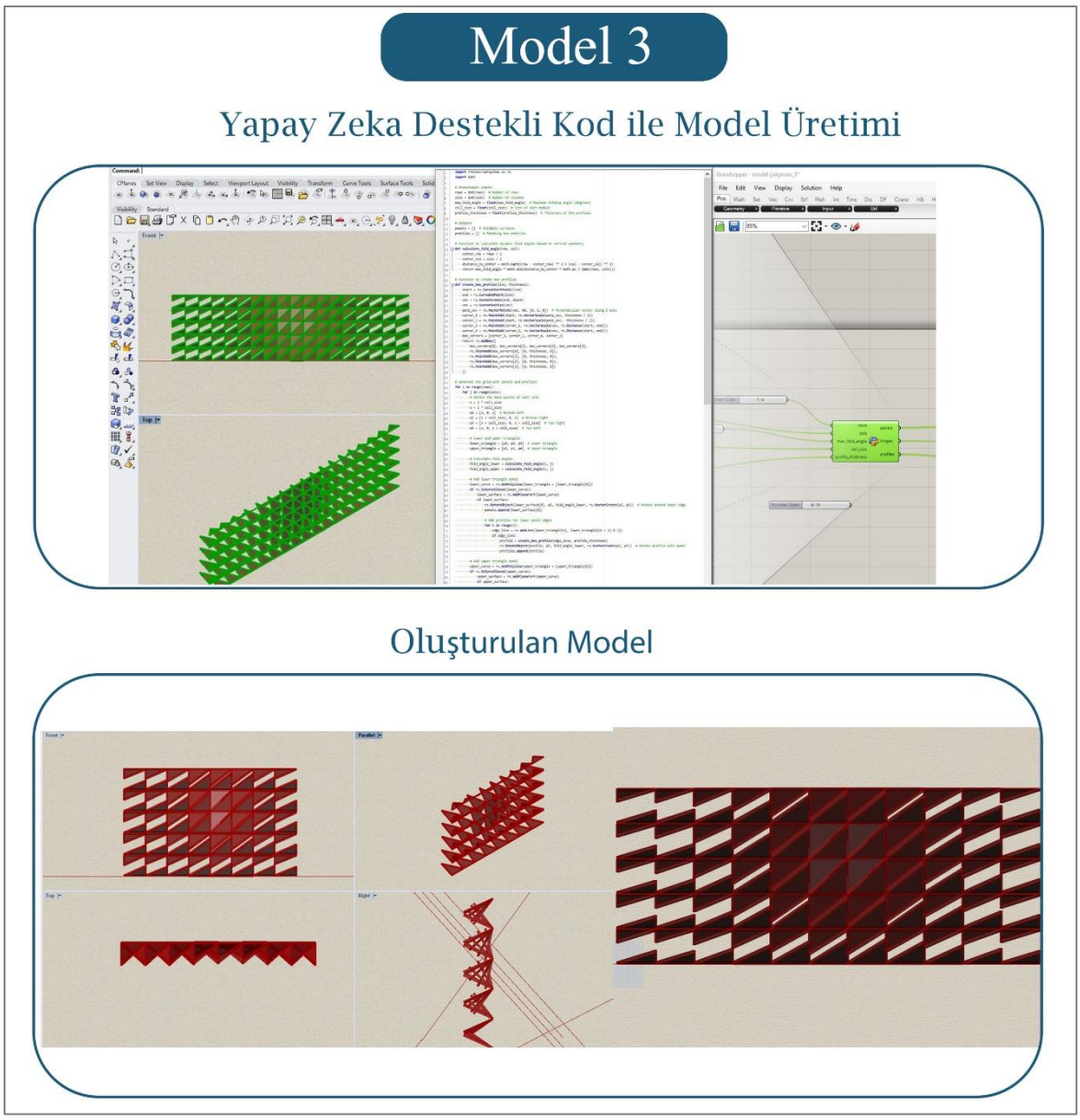
İkinci modelde (Şekil 4.6), Hornbeam yaprağının doğal kıvrım düzeni ve simetrik yapısı detaylı şekilde tariflenmiştir. Yapay zekâya, “Hornbeam yaprağının içe doğru kıvrılan, üçgensel ve yelpaze formundaki panel düzeni, Miura-Ori benzeri katlanma mantığıyla modellenmesi” görevi verilmiş; bu tanıma göre çoklu katlama çizgileri olan geometrik bir sistem tasarlanmıştır. Bu varyasyon, hem estetik hem de mimari katlama davranışlarını daha iyi yansıtmaktadır. Ancak hareket kabiliyeti cehe panelleri için üretime uygun olmadığı ve performans analizi için yeterince esnek olmadığı için, bu model yalnızca morfolojik bir ön çalışma olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.6. Yazar tarafından betimleme yoluyla oluşturulan ChatGPT destekli Python kodu ile (Model 2)

Üçüncü ve nihai modelde (Şekil 4.7), hem *Mimosa pudica*'nın tepkisel kapanma hareketi hem de *Hornbeam* yaprağının geometrik katlanma yapısı birleştirilmiş; bu iki bitkisel davranışın özünü taşıyan sadeleştirilmiş ama analiz edilebilir bir sistem tasarlanmıştır. Yapay zekâya bu kez, "*Hornbeam* yaprağının içbükey katlama karakteristiği korunarak, karolaj sisteminin farklı açıklık oranlarında düzenlenmesi ve panel varyasyonlarının oluşturulması" görevi verilmiştir. Panellerin merkez simetriye göre farklı açılarda katlanmasını sağlayan bu yapı, Hornbeam yaprağının geometrisini üçgen birimler hâlinde tanımlamakta ve her panelin açılma derecesini konumuna göre otomatik olarak

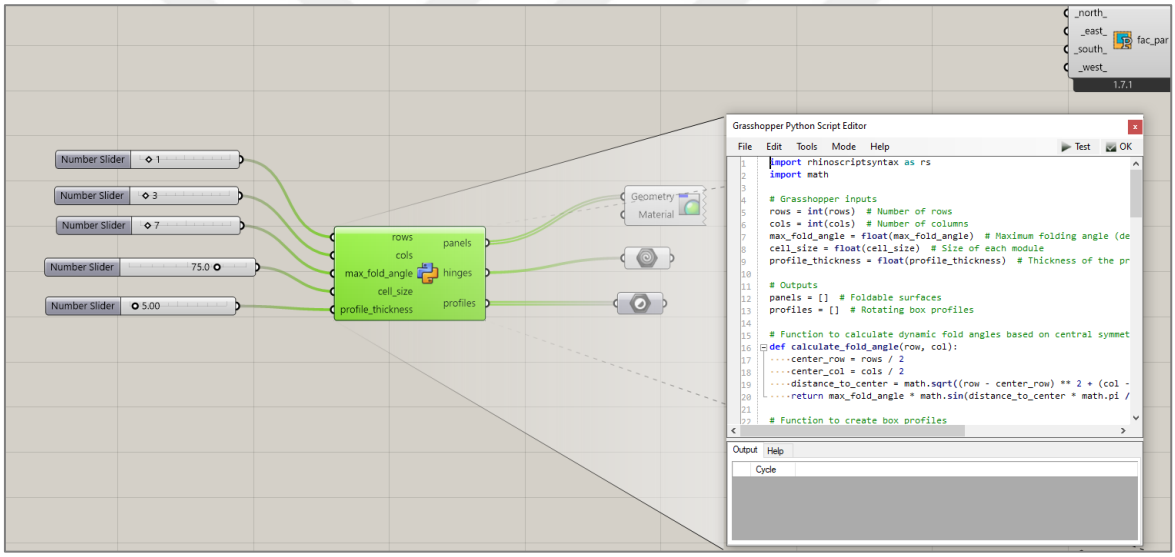
hesaplamaktadır. Ayrıca, her panelin kenarında yer alan menteşe profilleri de Python kodu ile oluşturulmuştur. Bu sistem, mimari açıdan hem estetik hem de üretilebilir bir cephe strüktürü olarak önerilmektedir. Bu yaklaşım, yalnızca görsel olarak doğadaki katlanma örüntüsünün ifadesini değil, aynı zamanda çevresel uyaranlara duyarlı biçimde tepki verebilen kinetik bir cephe sistemini mümkün kılmıştır.



Şekil 4.7. Yazar tarafından betimleme yoluyla oluşturulan ChatGPT destekli Python kodu ile (Model 3)

Üç farklı modelleme yaklaşımı üzerinden yürütülen bu çalışmada, yapay zekâ destekli parametrik tasarım sürecinin biyomimetik ilkelere dayalı kinetik cephe sistemlerinin

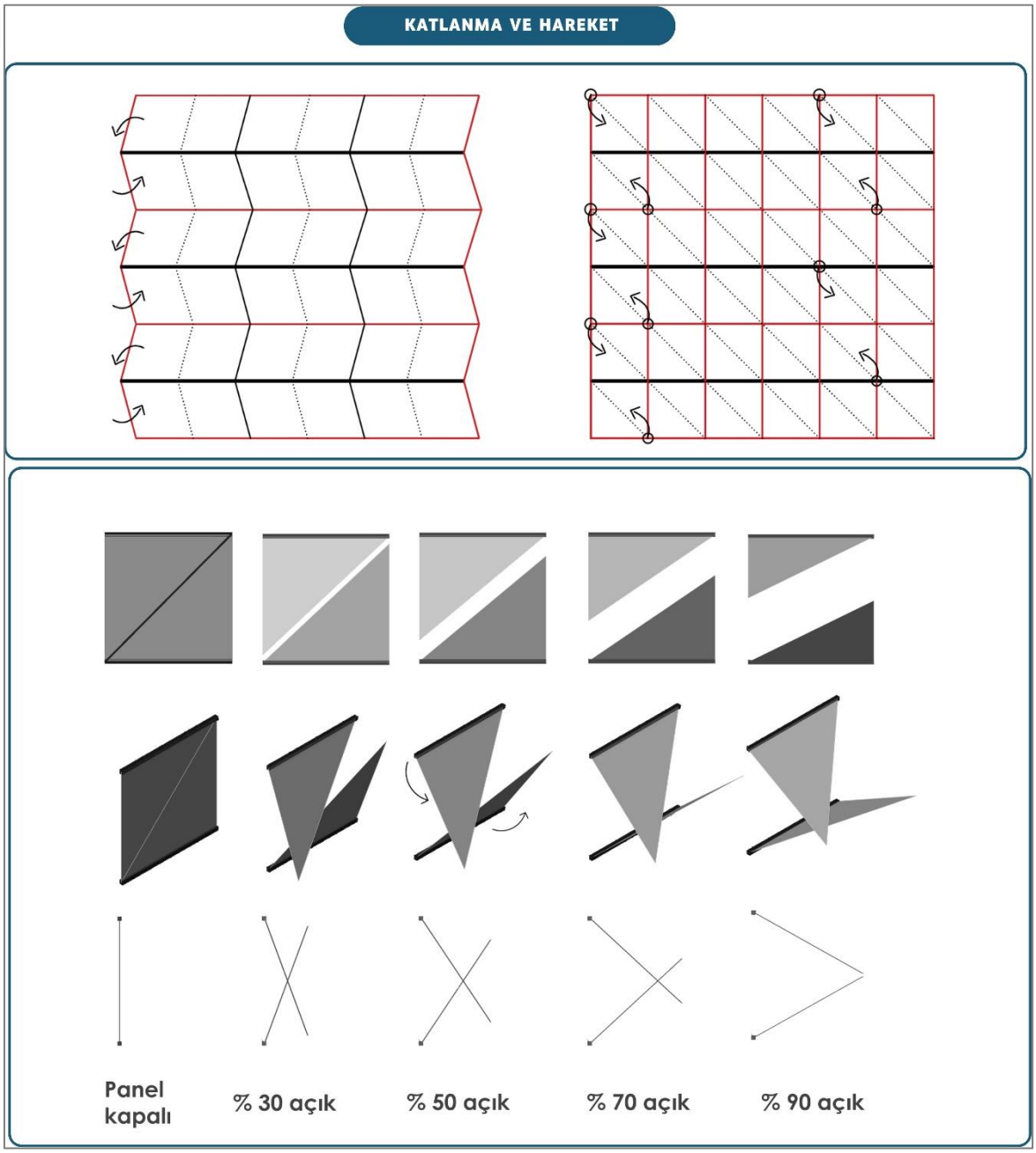
geliştirilmesindeki potansiyeli değerlendirilmiştir. İlk model, temel bir katlanma sistemini tanımlamak adına hızlı bir prototipleme işlevi görürken; ikinci model, Hornbeam yaprağının doğal morfolojisine daha yakın bir yapıyı yansıtarak biçimsel derinlik sağlamıştır. Nihai olarak seçilen üçüncü model ise, hem bitkisel katlanma davranışlarının özünü taşıyan hem de performans analizleri açısından uygulanabilir sonuçlar sunan bir sistem olarak öne çıkmıştır. Bu varyasyon, açıklık oranlarına bağlı ışık geçirgenliğini optimize edebilmesi sayesinde, mimari bağlamda daha bütüncül bir çözüm sunmuştur. Modellerin üretiminde kullanılan yapay zekâ destekli Python kodları, yalnızca biçim oluşturmakla kalmamış; tasarımın çevresel verilere duyarlılığını artırarak, farklı senaryoların hızlıca test edilmesini mümkün kılmıştır. Böylece, doğadan ilham alan karmaşık geometrilerin mimari cephe sistemlerine entegre edilmesine yönelik yeni bir dijital tasarım yaklaşımı ortaya konmuştur.



Şekil 4.8. Grassopher yazılımına entegre edilen Python tabanlı kod

Seçilen üçüncü varyasyonun parametrik modeli, Python destekli kodlar aracılığıyla Grasshopper platformuna başarıyla entegre edilmiştir. Bu aşamada, modelin çevresel performansının değerlendirilmesi için simülasyon sürecine geçilmektedir. Ladybug ve Honeybee eklentileri kullanılarak, farklı açıklık oranlarına sahip panel varyasyonlarının gün ışığı erişimi, görsel konfor ve enerji verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu simülasyonlar, geliştirilen kinetik cephe sisteminin yalnızca formel düzeyde değil, aynı zamanda çevresel tepki kapasitesi açısından da ne ölçüde etkili olduğunu ortaya koymayı amaçlamaktadır. Böylece, tasarımın işlevsel ve sürdürülebilir yönleri parametrik veriler üzerinden kapsamlı şekilde test edilmiş olmuştur. Güneş ışınlarının geliş açısının değerleri

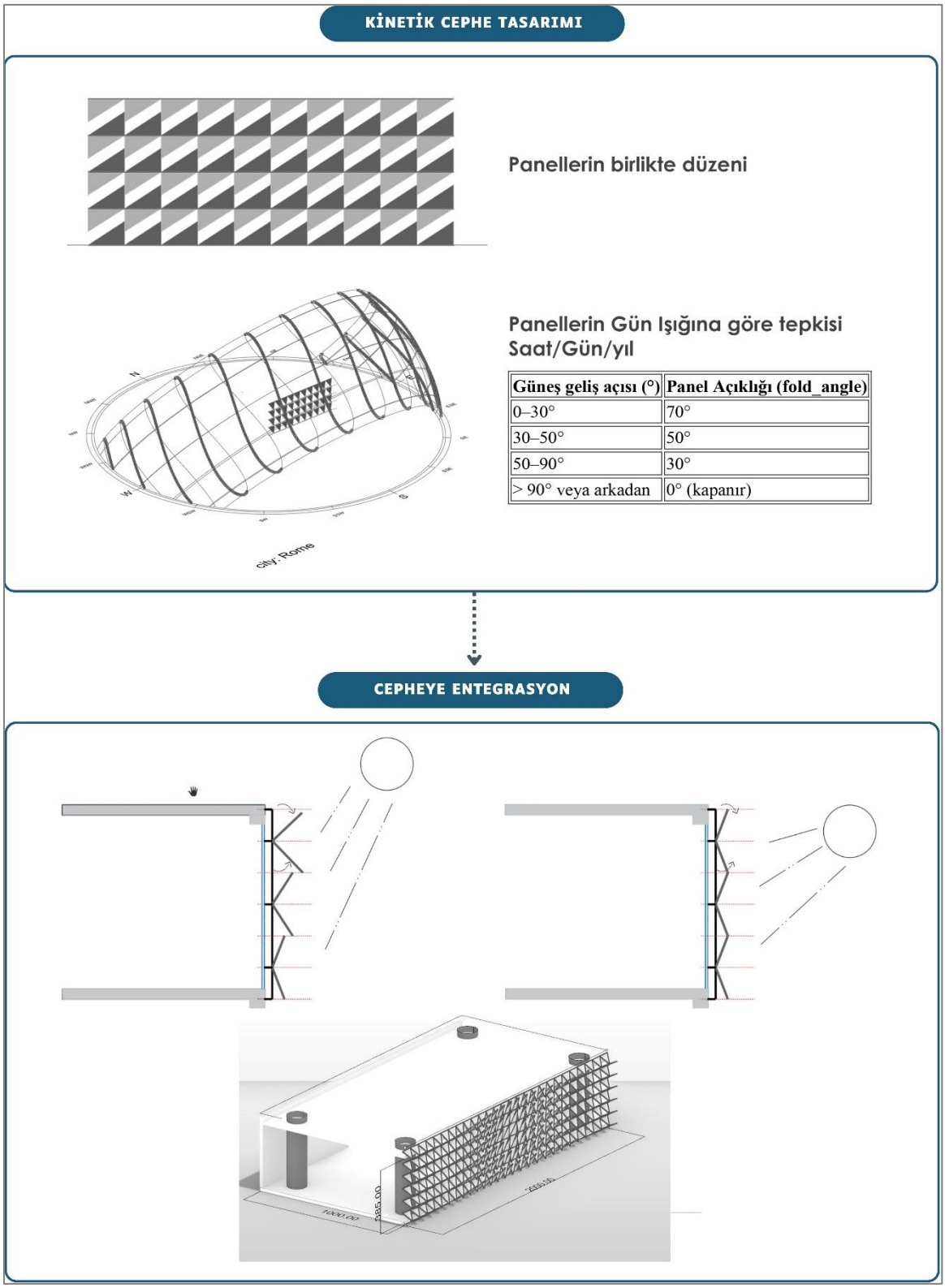
Roma gün ışığı değerlerine göre İnternet üzerinden Lady Bug uzantısıyla elde edilmiştir. Seçilen üçüncü modelin hareket mekanizmasını daha net ifade edebilmek amacıyla, Şekil 4.9'da geliştirilen katlanabilir sistemin modül bazındaki hareket süreci görsel olarak açıklanmaktadır.



Şekil 4.9. Geliştirilen kinetik cephe sistemine ait katlanma ve hareket şemaları. Üstte, panel ızgara dizilimi ve yönlü katlanma hatları; altta ise bir modülün farklı açıklık oranlarındaki açılma senaryoları gösterilmektedir (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Seçilen üçüncü modelin hareket karakteristiğini daha net ortaya koymak amacıyla hazırlanan bu diyagramda, sistemin hem genel ızgara düzeni içerisindeki yerleşimi hem de modül bazındaki açılma-kapanma dinamikleri görselleştirilmiştir. Üst bölümde, panellerin yönlü katlanma prensibi gösterilmiş olup, her bir panelin belirli bir eksen etrafında dönebildiği ve bu dönüşün yüzeyde yönlü bir hareket oluşturduğu ifade edilmektedir. Alt bölümde ise, tekil bir modülün katlanma davranışı farklı açıklık oranlarına göre aşamalı biçimde sunulmuştur. Panelin tamamen kapalı hâlinden başlayarak %30, %50, %70 ve %90 açık konumlara kadar olan geçişleri, ön görürünüş, perspektif ve kesit olarak verilmiştir.

Şekil 4.10'da üretilen diyagram, geliştirilen kinetik panel sisteminin hem yüzey düzeni hem de mimari cepheye entegrasyon süreci açısından çalışma mantığını ortaya koymaktadır. Panellerin bir araya gelişiyle oluşturulan modüler ızgara düzeni gösterilmiştir. Bu düzende, panellerin yönlü yerleşimi ve birbirleriyle kurduğu geometrik ilişki üzerinden, cephe yüzeyine uygulandığında nasıl bir görsel ve işlevsel bütünlük sağladığı ifade edilmektedir. Güneş ışınlarının geliş açısına göre, panel açılma değerleri bir tablo aracılığıyla tanımlanmıştır. Buna göre, 0°–30° aralığında paneller %70 açık, 30°–50° arasında %50 açık, 50°–90° aralığında %30 açık konumda çalışmakta, 90° üzeri ya da ters yönden gelen ışıkta ise paneller tamamen kapanmaktadır. Bu oranlar, panel sisteminin çevresel veriye dayalı bir hareket stratejisine sahip olduğunu ve güneşin yıl boyu değişen açılarına göre otomatik olarak optimize olabildiğini göstermektedir.



Şekil 4.10. Kinetik cephe modülü ve referans cepheye üzerinde şematik gösterimi (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Cepheye entegre edilen bu kinetik sistemin bina cephesiyle olan ilişkisi Şekil 4.10'nun alt bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır. Sol ve sağ kesit diyagramlarında, güneş ışığının

geliş açısına göre panellerin nasıl açılıp kapandığı belirtilmiştir.Açık konumda gün ışığı geçirgenliği artmakta, kapalı konumda ise aşırı ışık ve ısı yükü engellenmektedir. Orta kısımdaki üç boyutlu yerleşim görselinde ise, bu sistemin mimari ölçekte binaya entegre edildiği örnek uygulama sunulmuştur. Böylece hem görsel hem de performatif düzeyde bütüncül bir cephe yaklaşımı elde edilmiştir.

4.2. Seçilen Program ile Gün Işığı Simülasyonu

Enerji simülasyonları, bir binanın farklı koşullar altında enerji performansını analiz etmek için kullanılan hesaplama modelleridir ve genellikle bina cephelerinde aşağıdaki hedeflere ulaşmak için kritik öneme sahiptir.

- Enerji verimliliğini optimize etmek,
- İşletme maliyetlerini azaltmak,
- Kullanıcı konforunu artırmak,
- Sürdürülebilir tasarım ve LEED, BREEAM gibi sertifikasyonları desteklemek.

Bu araştırma kapsamında geliştirilen cephe modüllerinin performans analizi, gün ışığı ve enerji verimliliği odaklı değerlendirmelerle gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, mimari simülasyonlarda yaygın olarak kullanılan Ladybug ve Honeybee eklentileri kullanılarak, parametrik modelleme platformu Grasshopper üzerinden çeşitli simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu araçlar aracılığıyla, tasarlanan gölgelik sisteminin farklı açıklık oranlarına göre gün ışığı performansı ve iç mekân aydınlatma verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Özellikle, cephe elemanlarının tam açık, yarı açık ve kısmen kapalı konumları için gün ışığı simülasyonları gerçekleştirilmiş; bu senaryolar üzerinden aydınlık düzeyi dağılımı, görsel konfor ve potansiyel enerji tasarrufu açısından karşılaştırmalı sonuçlara ulaşılmıştır. Elde edilen veriler, cephe sisteminin çevresel değişkenlere duyarlı biçimde çalışabildiğini ve tasarımın performans odaklı biçimde optimize edilebildiğini ortaya koymuştur.

Bu süreçte, tasarımın performansı farklı açıklık oranları üzerinden değerlendirilmiş ve panellerin açılma ve kapanma hareketleri dikkate alınarak, iç mekanlardaki gölgeleme etkisi analiz edilmiştir. Yapılan gün ışığı simülasyonunda:

- EPW İklim Verileri: Simülasyon için bulunduğunuz bölgeye uygun iklim verileri (EPW dosyası) kullanılmıştır.
- Panellerin bulunduğu konumun güneş ışığına maruz kalma süreleri analiz edilmiştir.
- Test Noktaları: Panellerin yüzeyindeki ışık geçişi hesaplanmış ve doğal ışık performansı test noktaları üzerinden değerlendirilmiştir.
- Gölgeleme Analizi: Gölgelik panellerinin açılma ve kapanma hareketleri, iç mekanlarda oluşan gölge alanlarının analizi için modellenmiştir.

Bu analiz, güneş radyasyonunun etkilerini azaltmayı ve enerji verimliliğini artırmayı hedeflemiştir.

Güneş pozisyonu simülasyonu

- Başlangıçta tüm paneller "açık" (düz) konumda tanımlanmıştır.
- Ladybug Tools eklentisi kullanılarak cephenin bulunduğu konuma özgü güneş yörüngesi hesaplanmıştır.
- Enlem/boylam bilgileri ve analiz periyodu girilerek güneş vektörleri elde edilmiştir.
- Seçilen şehir Roma iklim verilerinden faydalanılmıştır.

Gün ışığı analizi

- Honeybee eklentisi kullanılarak yıllık gün ışığı performans analizleri yapılmıştır.
- Dinamik panel hareketleri ile farklı güneş açılarında iç mekân aydınlık seviyeleri simüle edilmiştir.
- Görsel konfor metrikleri (DA, UDI) hesaplanarak sistem performansı değerlendirilmiştir.

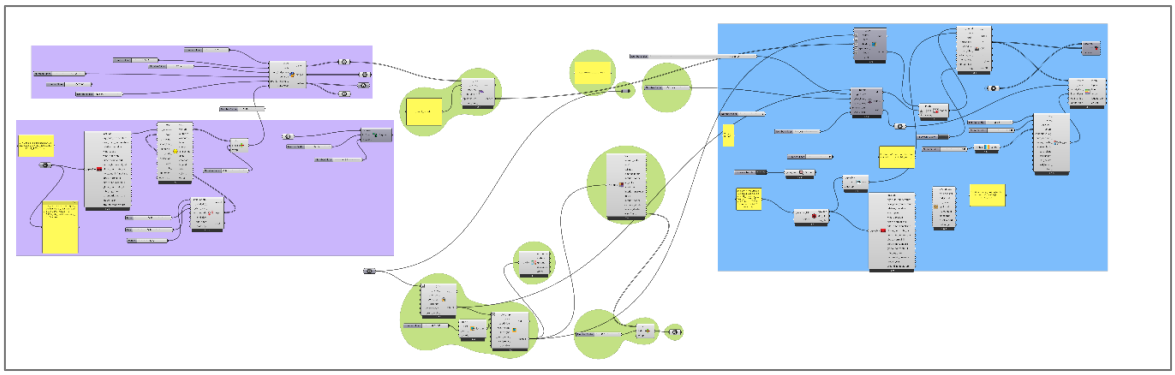
Test

- Sistem, farklı güneş pozisyonlarına verdiği tepkiler açısından test edilmiştir.
- Öğle saatleri (dik güneş açısı) ve sabah/akşam saatleri (yatay güneş açısı) gibi kritik durumlar analiz edilmiştir.
- Panel hareket mantığının doğruluğunu sağlamak için gerekli ayarlamalar yapılmıştır.
- Katlanma açıları ve tepki eğrileri optimize edilerek nihai tasarım elde edilmiştir.

4.3. Araştırma Bulguları

Bina dış yüzeyi alternatiflerinin modellenmesi, Rhino v6 ve Grasshopper kullanılarak gerçekleştirilmiş ve simülasyonlar, onaylı gün ışığı simülasyonu ve analizleri için Ladybug bug ve Honey bee yazılımları kullanılmıştır. Bu simülasyonlar, İtalya'nın Roma şehrinin ilkim verileri değerleri programa yüklenmiştir. Çalışma saatleri (sabah 8'den akşam 4'e kadar) arasındaki Gün Işığı Özerkliği (Daylight Autonomy - DA) ve Kullanışlı Gün Işığı Aydınlatmasına odaklanılmaktadır. Grasshopper platformu üzerinde çalışan Honeybee eklentisi aracılığıyla gerçekleştirilen gün ışığı analizleri, bina kabuğunun çevresel performansını değerlendirmede önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu analizler, gerçek iklim verilerine dayalı olarak bir yıl boyunca saatlik bazda gün ışığına ilişkin aydınlatma düzeylerini simüle etmektedir. (Roudsari ve Pak, 2013). Kullanıcı konforu ve enerji verimliliğini artırmayı amaçlayan bu süreçte, Radiance ışık simülasyon motoru kullanılarak aydınlatma düzeyi kamaşma olasılığı ve yıllık gün ışığı dağılımı gibi kritik görsel konfor metrikleri hesaplanmaktadır (Ward, 1994; Reinhart ve Andersen, 2006).

Üretilen kodlar Grassopher içerisinde Şekil 4.11' de görüleceği üzere entegre edilmiş ilgili kod geliştirilerek Lady bug ve Honey bee parametreleri de eklenmiş ve model ortaya çıkartılmıştır.



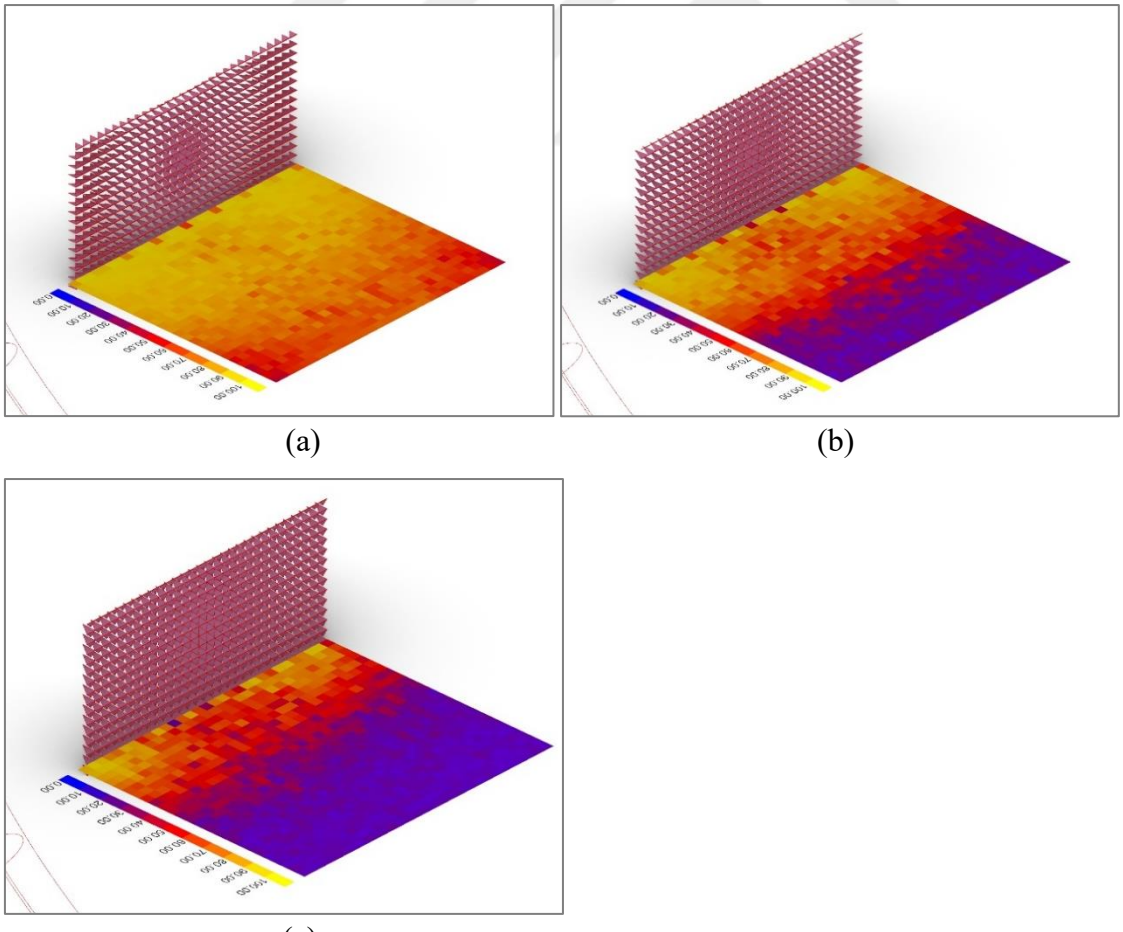
Şekil 4.11. Üretilen Python tabanlı kod-Grassopher Lady Bug-Honeybee uzantıları ile oluşturulan parametreler (yazar tarafından hazırlanmıştır)

Bu bağlamda analizlerde kullanılan iki önemli gösterge, Gün Işığı Özerkliği (DA) ve Kullanışlı Gün Işığı Aydınlatması (UDI) değerleridir. DA, bir mekânda belirli bir aydınlatma eşiğinin (genellikle 500 lüks) yalnızca gün ışığıyla yılın yüzde kaçında sağlandığını ifade ederken; UDI, iç mekândaki gün ışığı düzeylerinin 100–2000 lüks

aralığında ne sıklıkla bulunduğunu belirlemektedir. Bu sayede hem yetersiz hem de aşırı ışık koşulları analiz edilerek, görsel konfor ve enerji performansı açısından dengeli tasarım kararları alınabilmektedir. Bu simülasyonlar, parametrik cephe sistemlerinin ve mimari kabukların tasarım aşamasında performansa dayalı kararlar alınmasını mümkün kılmakta; aynı zamanda sürdürülebilirlik ve kullanıcı odaklılık kriterleri doğrultusunda önemli girdiler sağlamaktadır (Tregenza ve Wilson, 2013).

Gün ışığı performansını değerlendirmek amacıyla her bir panelin tam açık, %50 açık ve %30 açık konumları için gün ışığı simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda, Günışığı Özerkliği (DA) ve Kullanışlı Günışığı Aydınlatması (UDI) gibi performans ölçütleri kullanılmıştır.

Şekil 4.12'de DA değerleri için iç mekânda yalnızca gün ışığı kullanılarak hedef aydınlatma seviyesine ulaşılabilen süreyi yüzde cinsinden ifade etmektedir.



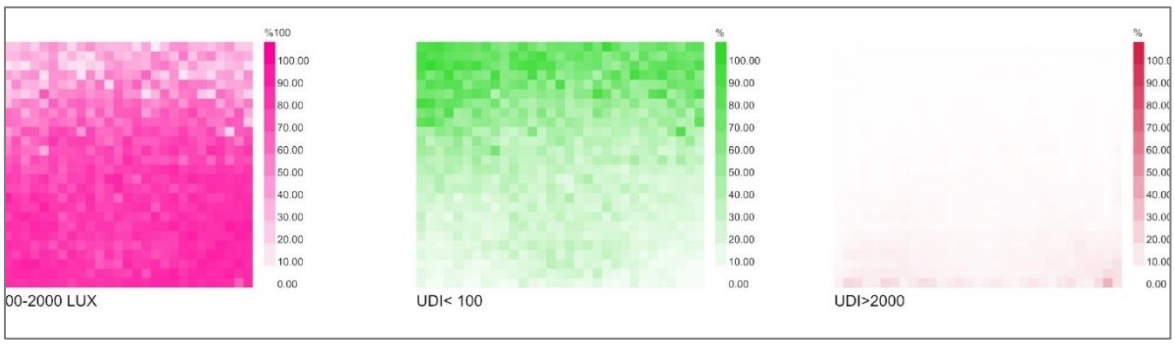
(a) (b)

(c)

Şekil 4.12. Analiz sonuçları (a) Cephe modülü tamamen açıkken (b) Cephe modülü %50 açıkken (c) Cephe modülü %30 açıkken gün ışığı özerkliği

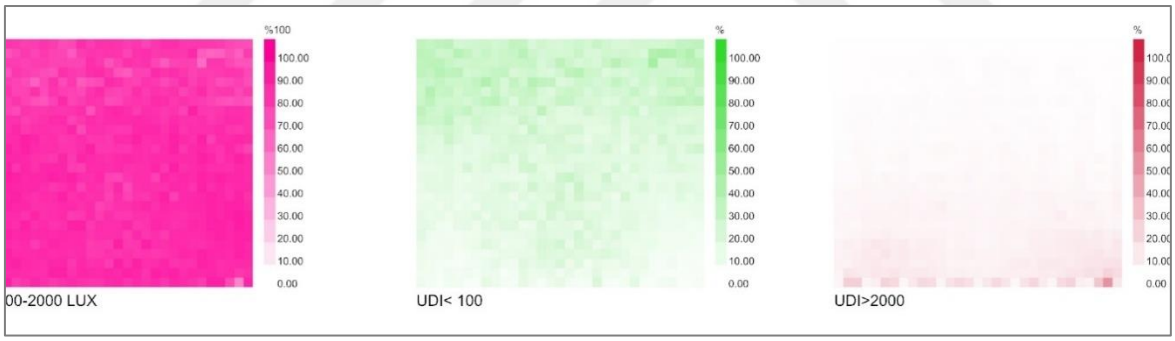
Şekil 4.12'de, cephe modülünün farklı açıklık oranlarında (a: %100, b: %50, c: %30) gün ışığı özerkliğine (DA) etkisi görselleştirilmiştir. Görsellerde kullanılan renk skalası, 0 ile 100 arasında değişen DA değerlerini temsil etmektedir; bu değer, belirli bir noktada yıl boyunca % kaç oranla doğal ışığın yeterli (≥300 lux) düzeyde sağlandığını göstermektedir. Cephe modülünün tamamen açık olduğu durumda (a), iç mekân yüzeyinde özellikle pencereye yakın bölgelerde %90-100 bandına ulaşan yüksek DA değerleri görülmektedir. Bu, doğal ışığın yoğun biçimde mekâna girdiğini ve yapay aydınlatma ihtiyacının minimuma indiğini göstermektedir. Ancak bu senaryoda aşırı aydınlatma ve parlama riski de mevcuttur. Modülün %50 açık olduğu durumda (b), genel aydınlık düzeyinde düşüş gözlenmektedir; görselde turuncu-mor geçişlerle %40-70 aralığında DA değerlerinin hâkim olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, hem görsel konforun sağlandığı hem de doğal ışık kullanımının kısmen sürdürülebildiği dengeli bir çözüm sunar. %30 açıklık senaryosunda ise (c), analiz düzleminde mor ve mavi tonlar ağırlıktadır; bu da DA değerlerinin %10-30 bandına gerilediğini ve yılın büyük bir kısmında doğal ışığın yetersiz kaldığını göstermektedir. Özellikle derin mekân bölgelerinde ışıksızlık daha da belirginleşmektedir. Bu sonuçlar, cephe açıklığının doğal aydınlatma performansı üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymakta ve optimum geçirgenlik oranının, enerji verimliliği ile kullanıcı konforu arasındaki dengeye göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15 görselleri cephe panellerinin farklı açıklık oranlarına göre faydalı gün ışığı aydınlatması (UDI – Useful Daylight Illuminance) analiz sonuçlarını göstermektedir. Bu analiz, mekânda yıl boyunca hangi oranlarda faydalı aydınlık aralığında (100–2000 lux) kalındığını, hangi bölgelerde yetersiz (<100 lux) veya rahatsız edici düzeyde fazla aydınlık (>2000 lux) oluştuğunu üç ayrı harita ile değerlendirmektedir.



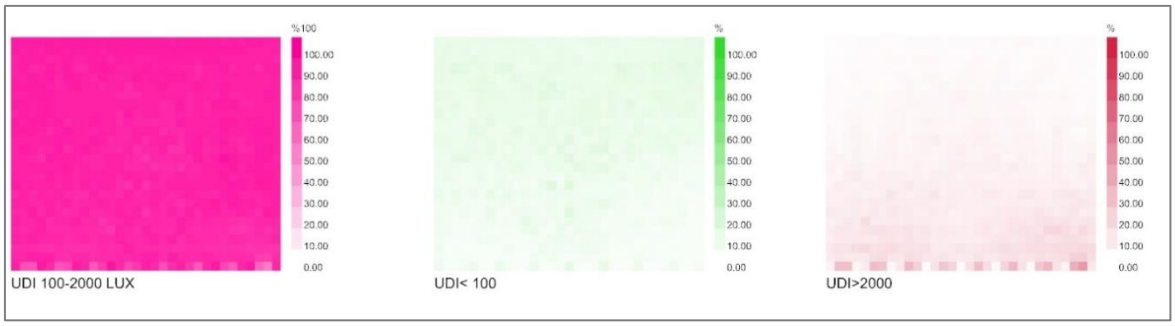
Şekil 4.13. Paneller %30 açıkken faydalı gün ışığı aydınlatması analizi

Şekil 4.13'te yer alan analiz sonuçları, cephe panellerinin %30 açık olduğu durumda faydalı gün ışığı aydınlatması (UDI) performansını ortaya koymaktadır. UDI 100–2000 lux aralığını temsil eden ortadaki haritada, doğal ışığın kullanıcı konforu açısından ideal aralıkta sağlandığı bölgeler yeşil tonlarla gösterilmektedir. Bu haritada yeşil tonlar görece yaygın olmakla birlikte doygunluk düzeylerinin düşük olması, analiz düzleminde faydalı gün ışığına yalnızca sınırlı oranda ulaşıldığını göstermektedir. Soldaki haritada görülen yoğun pembe alanlar, UDI<100 lux aralığını temsil etmekte ve bu durum, mekânın büyük bir kısmında doğal ışık düzeylerinin yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Öte yandan, UDI>2000 lux değerlerini gösteren sağdaki haritada neredeyse hiç kırmızı alan bulunmamakta, bu da aşırı aydınlatmaya bağlı kamaşma veya görsel rahatsızlık riskinin minimum düzeyde olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, %30 açıklık oranıyla cephe panelinin iç mekâna doğal ışık girişini ciddi ölçüde sınırladığı ve aydınlık düzeyinin genel olarak yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Bu senaryoda yapay aydınlatma ihtiyacı oldukça yüksektir; ancak düşük ışık geçirgenliği sayesinde görsel konfor açısından rahatsız edici parlamaların yaşanması engellenmiş olmaktadır.



Şekil 4.14. Paneller %50 açıkken faydalı gün ışığı aydınlatması analizi

Şekil 4.15'de %50 açıklık oranına göre analiz yapılmıştır. UDI 100–2000 lux aralığındaki yeşil alanların yoğunlaştığı görülmekte, bu da doğal ışığın iç mekânda verimli biçimde dağıldığını göstermektedir. Pembe alanların azalması, yetersiz aydınlatma probleminin büyük ölçüde giderildiğini ortaya koyarken, kırmızı alanların hâlâ sınırlı kalması aşırı aydınlatma riskinin düşük olduğunu göstermektedir. Bu senaryo, hem enerji verimliliği hem de görsel konfor açısından dengeli bir performans sunarak optimum gün ışığı kullanımını sağlamaktadır.



Şekil 4.15. Paneller %90 açıkken faydalı gün ışığı aydınlatması analizi

Şekil 4.15'de ise %90 açıklık oranında analiz yapılmış, UDI 100–2000 lux aralığında yeşil doygunluğun en yüksek seviyeye ulaştığı gözlemlenmektedir; bu durum, panellerin geniş açıklığı sayesinde mekâna maksimum düzeyde doğal ışık girişinin sağlandığını göstermektedir. UDI<100 alanlarının neredeyse tamamen ortadan kalkması, tüm iç mekânın yeterli aydınlığa ulaştığını ortaya koyarken, UDI>2000 haritasında kırmızı alanların belirginleşmesi ise bazı bölgelerde aşırı aydınlatma ve parlama riski oluştuğuna işaret etmektedir. Bu senaryo, yapay aydınlatma ihtiyacını ortadan kaldırmakla birlikte, görsel konforun korunması için ek gölgeleme çözümlerinin uygulanmasını gerektirmektedir.

Bu üç farklı açıklık oranına (panelin %30, %50 ve %90 açık olduğu senaryolara) ilişkin UDI analiz sonuçları karşılaştırıldığında, gün ışığı performansı ve görsel konfor açısından belirgin farklar ortaya çıkmaktadır. Yapılan UDI analizleri, panellerin %30, %50 ve %90 açıklık oranlarına göre farklı gün ışığı performansları sunduğunu göstermektedir. %30 açıklıkta doğal ışık alımı sınırlı kalmış, geniş UDI<100 bölgeleri yetersiz aydınlatmaya ve yapay ışık ihtiyacına işaret etmiştir. %90 açıklıkta ise doğal ışık alımı maksimuma ulaşsa da, UDI>2000 değerlerinin artması bazı alanlarda aşırı aydınlık ve parlama riskini doğurmuştur. Buna karşılık, %50 açıklık oranı hem yeterli gün ışığı alımını hem de görsel konforu sağlayarak en dengeli çözüm olarak öne çıkmıştır. Simülasyon verileri, panel açıklık oranlarının yalnızca estetik değil, aynı zamanda işlevsel birer tasarım aracı olduğunu ve gün ışığı performansına doğrudan etki ettiğini ortaya koymuştur. Kinetik cephe sisteminin bu uyarlanabilirliği, iç mekânda doğal aydınlatmayı artırarak enerji tasarrufuna katkı sağlamakta ve kullanıcı konforunu iyileştirmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen araştırma, doğadan ilham alan kinetik cephe sistemlerinin mimari tasarıma entegrasyonunu hem kavramsal hem de hesaplamalı düzeyde ele almıştır. Çalışma, "kinetik", "uyarlanabilir", "dönüştürülebilir" ve "cevap veren" mimari kavramlarının karşılaştırmalı analizi ile başlamış; hareketin sadece yapısal değil aynı zamanda çevresel performans bağlamındaki rolü irdelenmiştir. Bu bağlamda, biyolojik sistemlerden türetilen stratejilerin, özellikle bitkilerin doğal hareket mekanizmalarının mimari kabuk tasarımına entegre edilerek gün ışığı yönetimi, enerji verimliliğini arttırabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, doğadan ilham alan bitki temelli kinetik cephe sistemlerinin, çevresel verilere duyarlı olarak çalıştığında gün ışığı performansını iyileştirmede etkili bir tasarım stratejisi olup olamayacağı araştırılmıştır. Yapılan analiz ve simülasyonlar sonucunda, panellerin gün ışığına göre hareket ettiği durumlarda bina gün ışığı performansının anlamlı düzeyde iyileştiği gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, biyomimetik yaklaşımla tasarlanan kinetik cephe sistemlerinin, sabit sistemlere kıyasla daha etkin bir şekilde gün ışığını iç mekâna yönlendirebildiğini ve böylece enerji verimliliği artırmada önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, kinetik, adaptif, dönüşebilir ve tepki veren sistemler literatür temelli olarak değerlendirilmiştir. İkinci olarak, biyomimetik temelli yaklaşımların literatürdeki yeri sorgulanmış; doğadaki hareket fenomenlerinin özellikle bitkisel kaynaklı katlanma ve tepki mekanizmalarının mimari cephe sistemlerine nasıl aktarılabileceği ele alınmıştır.

Seçilen fenomen *Mimosa pudica*'nın turgor basıncına dayalı tepki mekanizmaları ile *Hornbeam* yaprağının çok yönlü katlanma geometrileri analiz edilmiş, bu biyomekanik süreçlerin tasarım prensiplerine dönüştürülebilirliği değerlendirilmiştir. Bu doğal sistemler, kinetik cephelerde hareketli elemanların davranışsal mantığı için temel referans niteliğinde kullanılmıştır. Gözlemlenen tepki türleri ani ve tekrarlanabilir hareketler cephe sisteminde açılıp kapanan panellerin tasarımına doğrudan yön vermiştir. Bu bulgu, temel araştırma sorusunu destekleyerek, bitkisel mekanizmaların yalnızca sembolik değil aynı zamanda işlevsel bir şekilde mimariye entegre edilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, alt araştırma sorularından biri kapsamında biyomimetik temelli kinetik sistemlerin geliştirilmesinde yapay zekâ destekli parametrik modelleme araçlarının rolü incelenmiştir. Doğal hareket örüntülerinin dijital tasarım ortamına aktarımı sürecinde, yapay zekânın sunduğu olanaklar hem biçimsel hem de işlevsel düzeyde değerlendirilmiştir. Özellikle *Hornbeam* yaprağının katlanma geometrisi ve Mimosa pudica'nın tepkiye dayalı hareket mekanizması, parametrik bir sistem içinde yeniden tanımlanmış ve bu sürecin algoritmik üretimi Python tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Grasshopper ortamında geliştirilen bu kodlama yapısı, ChatGPT'den alınan yapay zekâ desteğiyle oluşturulmuş; böylece yalnızca kod üretimi değil, aynı zamanda sistemin çevresel verilere duyarlı varyasyonlarının da etkin biçimde geliştirilmesi sağlanmıştır. Yapay zekâ, kompleks geometrilerin modellenmesi, geometrik hesaplamaların otomatikleştirilmesi ve farklı açıklık oranları, panel dizilimleri ve katlanma senaryolarının parametrik olarak test edilmesi gibi süreçlerde tasarımcıya zaman kazandıran ve yaratıcı çözümler üreten bir araç olarak katkı sunmuştur.Bu süreçte aynı biyolojik tanımlar kullanılarak, ancak karolaj (grid) sisteminde yapılan değişikliklerle üç ayrı varyasyon üretilmiş; bu varyasyonlar biçimsel tutarlılık korunarak yapay zekâ ile optimize edilmiştir. Üçüncü varyasyonun seçimi, yalnızca estetik veya biçimsel değil, uygulanabilirlik, çevresel yanıt kapasitesi ve parametrik sistem bütünlüğü açısından yapılan değerlendirmelere dayanmaktadır. Sonuç olarak, yapay zekâ destekli bu süreç, biyomimetik ilkelere dayanan kinetik bir cephe sisteminin yalnızca kavramsal düzeyde değil, uygulanabilir ve üretilebilir bir mimari öğeye dönüşmesini mümkün kılmıştır.

Geliştirilen kinetik cephe sistemi ile sabit cephe sistemi arasındaki fark, gün ışığı performansına odaklanan simülasyon sonuçları üzerinden değerlendirilmiş; bu kapsamda Günışığı Özerkliği (DA) ve Kullanışlı Günışığı Aydınlatması (UDI) gibi metrikler aracılığıyla karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın tüm alt araştırma soruları, hem kuramsal hem de uygulamalı olarak yanıtlanarak temel araştırma sorusuna bütüncül bir yaklaşım geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına ilişkin değerlendirme, özellikle üçüncü alt araştırma sorusu ile doğrudan ilişkilendirilmiş ve tasarımın çevresel performansı sayısal verilerle desteklenmiştir. Ladybug ve Honeybee araçları kullanılarak yapılan gün ışığı analizleri sonucunda, cephe modülünün açık konumda %30'un üzerinde gün ışığı kazancı sağladığı; kapalı konumda ise parlama ve ısı yükünü azaltarak iç mekân konforunu artırdığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, geliştirilen sistemin yalnızca teorik bir

öneri olmadığını, aynı zamanda gün ışığı performansı açısından uygulanabilirliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca, Honeybee ve Ladybug gibi eklentilerin sunduğu sonuçlar doğru olmakla birlikte yalnızca Rhino tabanlı bir platformda gerçekleştirilmiş; bu durum, sistemin farklı modelleme ve simülasyon yazılımlarında da test edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, ileride geliştirilecek çalışmalarda Autodesk Forma, Revit, IES-VE ve DesignBuilder gibi alternatif araçlarla sistemin davranış biçimleri yeniden test edilerek simülasyonun yazılım bağımsızlığı ilkesi temelinde doğruluk oranı artırılabilir. Bu tür çoklu doğrulama süreçleri, sistemin farklı coğrafi ve iklimsel bağlamlara entegrasyon potansiyelini daha sağlam temellere oturtacaktır. Kinetik cephe modülünün üretim süreci incelendiğinde, yapay zekâ destekli algoritmaların yalnızca tasarım varyasyonu üretiminde değil, aynı zamanda detaylı üretim çizimlerinin oluşturulmasında da zaman kazandırıcı bir rol üstlendiği görülmüştür. Geliştirilen prototip, karmaşık katlanma hareketlerinin fiziksel olarak modellenebilmesini sağlamış, aynı zamanda üretime yönelik dosyaların (DXF/DWG) sistematik biçimde ayrıştırılmasına olanak tanımıştır. Bu yönüyle çalışma, hesaplamalı tasarım araçlarının yalnızca dijital ortamla sınırlı kalmayıp fiziksel üretim sürecine de doğrudan entegre edilebileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, sistemin çoklu iklim verileriyle test edilerek çevresel bağlamlara göre otomatik adaptasyon yeteneğinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Aynı zamanda, kullanıcı etkileşimine açık fiziksel veya dijital prototiplerin geliştirilmesi; gerçek zamanlı sensör verileriyle hareket kararlarını optimize eden, insan-merkezli deneyimi önceleyen sistemlerin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır. Buna ek olarak, sürdürülebilirlik performansını artırmak amacıyla malzeme türü, üretim tekniği, enerji tüketimi, geri dönüştürülebilirlik ve karbon ayak izi gibi kriterlere dayalı analizlerin yapılması önerilmektedir. Bu tür çalışmalar, doğaya duyarlı tasarım anlayışının yalnızca estetik değil, çevresel, teknolojik ve kullanıcı odaklı birçok yönden desteklenmesini sağlayacaktır. Sonuç olarak, bu tez çalışması doğadan ilham alan kinetik sistemlerin mimari tasarıma entegre edilmesinin hem çevresel performans hem de üretim süreçleri açısından dönüştürücü potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Biyomimetik ilkelerle geliştirilen sistemin yapay zekâ ve parametrik araçlarla desteklenmesi, sadece tasarımı hızlandırmakla kalmamış, aynı zamanda onu farklı bağlamsal koşullara uyarlanabilir, üretime hazır ve performatif bir tasarım ürününe dönüştürmüştür. Bu çalışma, doğa-tabanlı yaklaşımların mimarlığın statik formunu kırarak,

onu yaşayan, duyarlı ve çok katmanlı bir sistem haline getirme potansiyelini vurgulamaktadır.

Bununla birlikte, yapay zekâ destekli bu sistemin geleneksel simülasyon araçlarına entegrasyonu zaman zaman manuel müdahale gerektirmiştir. Dinamik geometriye sahip katlanabilir panellerin Honeybee analiz yüzeyi olarak tanımlanmasında teknik zorluklar yaşanmış; bu nedenle analiz çıktılarının doğruluğu için bazı durumlarda geleneksel yöntemlerle çapraz kontroller yapılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma, doğadaki organizmaların çevresel koşullara duyarlı hareketlerinin mimarlıkta somut ve işlevsel tasarım çözümlerine dönüştürülebileceğini; yapay zekâ destekli parametrik araçların ise bu dönüşüm sürecini hızlandıran, çeşitlendiren ve optimize eden güçlü bir tasarım ortağı olduğunu ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, gelecekte akıllı cephe sistemlerinin geliştirilmesinde doğa ilhamlı tasarımların yalnızca biçimsel değil, aynı zamanda davranışsal düzeyde de etkin rol oynayabileceğini kanıtlamaktadır.

Gelecek çalışmalara yönelik olarak, bu tez kapsamında geliştirilen kinetik cephe modülünün Revit, Autodesk Forma gibi farklı simülasyon ve modelleme yazılımlarıyla entegre edilerek performans doğruluğunun karşılaştırmalı olarak test edilmesi önerilmektedir. Bu tür platformlar üzerinden yürütülecek çoklu senaryolu analizler, sistemin farklı iklim koşullarındaki davranışını daha geniş bir çerçevede değerlendirmeye imkân tanıyacaktır. Böylece, yalnızca tek bir coğrafi veri setine dayalı analizlerin ötesine geçilerek, biyomimetik temelli kinetik sistemlerin farklı bağlamsal koşullarda nasıl işlediğine dair daha kapsamlı sonuçlar elde edilebilir. Gelecek araştırmalarda, bu tezde önerilen sistemin farklı iklim verileri ve bina tipolojileri üzerinde denenmesi; modül performansının uzun vadeli enerji tüketimi, ısıl konfor ve kullanıcı memnuniyeti üzerindeki etkilerinin nicel verilere dayalı olarak analiz edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, yapay zekâ destekli modelleme sürecinin gelişmiş makine öğrenmesi algoritmalarıyla (örneğin, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar) desteklenerek modülün çevresel koşullara gerçek zamanlı tepki verecek şekilde uyarlanabilirliği artırılabilir. Katlanabilir cephe sisteminin üretim ve montaj süreçlerine yönelik malzeme deneyleri ve prototipleme çalışmaları da bu araştırmanın fiziksel ölçekte sürdürülmesini mümkün kılacaktır. Biyomimetik ilkelerin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin geliştirilmesi, sürdürülebilir ve akıllı cephe tasarımlarında disiplinlerarası yeni açılımlar sunabilecektir; bu doğrultuda, doğa temelli tasarım ilkelerinin

ileri teknolojilerle bütünleştiği bu hibrit yaklaşımlar, geleceğin mimarisinde çevresel duyarlılığı yüksek, esnek ve adaptif yapı sistemlerinin öncüsü olma potansiyeli taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Ahamed, M. K., Wang, H., and Hazell, P. J. (2022). From biology to biomimicry: Using nature to build better structures–A review. *Construction and Building Materials*, 320, 126195.

Al, U., Soydal, I., and Yalcin, H. (2010). An Evaluation of the Bibliometric Features of bilig. *Bilig*, 55, 1-120.

Al-Obaidi, K. M., Ismail, M. A., Hussein, H., and Rahman, A. M. A. (2017). Biomimetic building skins: An adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1472-1491.

Anastasiia, S., Georgios, T., and George, P. (2022). Bio-mimetic approaches to kinetic facades: A design proposal for a light-responsive facade module. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 1099(1), 012005.

Arpacıoğlu, Ü., Çalışkan, C.İ., Şahin, B., Ödevci, N. 2020. Mimari Planlamada, Günışığı Etkinliğinin Arttırılması için Kurgusal Tasarım Destek Modeli, *Tasarım Kuram,* 16(29), 53-78.

ARUP. (2012). Al bahr towers-external automated shading system. *CTBUH Innovation Award,* 172-177.

Attia, S. (2016). Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE. *QScience Proceedings*, 2016(3), 8.

Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., and Loonen, R. (2017). Adaptive façades for multifunctional buildings. *Energy and Buildings,* 145, 234-245.

Badarnah, L. (2016). Light management lessons from nature for building applications. *Procedia Engineering,* 145, 595-602.

Badarnah, L. (2017). Form follows environment: Biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation. *Buildings*, 7(2), 40.

Bar-Cohen, Y., *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*, Taylor and Francis Group, LLC: Boca Raton, FL, 2006

Bell, J., and Godwin, S. (Ed.). (2000). *The Transformable House* (1. baskı). London: Wiley-Academy,47-112

Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. New York: Harper Perennial, 126-229.

Benyus, J. (2002). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. New York: Morrow, 135-212.

Bijari, M., Aflaki, A., Esfandiari, M. (2025). Plants inspired biomimetics architecture in modern buildings: A review of form, function and energy. *Biomimetics,* 10*(2)*, 124.

Bullivant, L. (2006). *Responsive environments: Architecture, art, and design*. London: V&A Publications, 128.

Carrasco, J., and González, S. (2015, Ağustos). *Ori-ssors: Research processes in between vegetal crease patterns, expandable scissors and Miura-ori solutions.* IASS 2015 Annual International Symposium on Future Visions kapsamında sunulan bildiri, Amsterdam, Hollanda.

Cucuzzella, C., Rahimi, N., and Soulikias, A. (2023). The evolution of the architectural façade since 1950: A Contemporary Categorization. *Architecture,* 3(1), 1-32.

Curtis, W. J. R. (1992). *Le Corbusier: Ideas and forms.* London: Phaidon Press Ltd., 30-60.

Çiftçi, M. E. (2023). *Mimari tasarımda gün ışığı ve gün ışığı aydınlatma sistemlerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 55-113.

De Franceschini, M., and Veneziano, G. (2014). The pantheon in Rome: New images of light phenomena. The Arch of Light. *In Atti del 16° Seminario di Archeoastronomia dell'Associazione Ligure per lo Sviluppo degli Studi Archeoastronomici*, 1-12.

Dikou, C., and Kourniatis, N. (2022). Sustainability through passive energy biomimetics systems in Architecture. Comparative analysis of case studies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 1123(1), 12027

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., and Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296.

Elsakka, A., Marouf, O., and Madkour, M. (2022). Biomimetic approach for thermal performance optimization in sustainable architecture: Case study: Office buildings in hot climate countries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 1113(1), 12004.

Checa, Z. P., and Fernández-Morales, A. (2012). *Generative Architecture as a methodology of optimisation. Spanish examples.* "Less - More Architecture Design Landscape". Le Vie Dei Mercanti - X Forum Internazionale Di Studi Proceedings, 305-314.

Fox, M. A. (2001). Ephemeralization. *OZ, Journal of Architecture, Published by the Kansas State University Department of Architecture,* 23.

Fox, M., and Yeh, B. (2005). *Kinetic architectural systems design.* Cambridge: MIT Press, 55-70.

Fox, M., and Kemp, M. (2009). *Interactive architecture* (1.Baskı). New York: Princeton Architectural Press, 27-30.

Gruber, P. (2009). Biomimetics in architecture – inspiration from plants. In *Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference.* Cayenne, French Guyana, 412-419.

Gruber, P. (2011). *Biomimetics in architecture: architecture of life and buildings*. New York: Springer, 1-275.

Helliwell, R. (2013). Daylight in relation to plant growth and illumination of buildings. *Arboricultural Journal,* 35(4), 202–219.

Herzog, T., Krippner, R. and Lang, W. (2004). *Facade Construction Manual*. München: Birkhäuser.

Hoberman, C. (2010). Deployable structures in architecture. *International Journal of Space Structures,* 25(3), 123-134.

Hosseini, M., Mohammadi, M., Rosemann, A. L. P., Schroeder, T., and Lichtenberg, J. (2019). A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review. *Building and Environment*.

Harkness, J. M. (2002). In Appreciation A Lifetime of Connections: Otto Herbert Schmitt, 1913 - 1998. *Physics in Perspective,* 4(4), 456-490.

İnternet: Adaptable architecture. Building Stock Activation, 245-252. URL: http://www.tmu-arch.sakura.ne.jp/pdf/26_proc_bsa_e/Proceedings_pdf/245-252%20031SS_B2-2.pdf, Son Erişim Tarihi: 19.02.2025.

İnternet: Allen, E. (1974). *The responsive house: Selected papers and discussions from the Shirt-Sleeve Session in Responsive Housebuilding Technologies held at the Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, May 3-5, 1972*, 1.baskı, 1–250. Cambridge, MA: MIT Press. // URL: https://search.worldcat.org/en/title/16295914, Son Erişim Tarihi: 12.04.2025.

İnternet: Asefi, M. (2010). *Transformable and kinetic architectural structures: design, evaluation and application to intelligent architecture.* Dr. Müller. // URL: https://search.worldcat.org/en/title/678644007, Son Erişim Tarihi: 05.04.2025.

İnternet: Badarnah Kadri, L. (2012). *Towards the living envelope: biomimetics for building envelope adaptation*. Wohrmann. URL: https://books.google.com.tr/books?id=qQ-SngEACAAJ, Son Erişim Tarihi: 22.03.2025.

İnternet: Chuck Hoberman. (2014-02-13). *Lecture 'Transformable: Building Structures that Change Themselves', hold in Architectural Association in London*. URL: https://www.youtube.com/watch?v=VesYwG4NBUs, Son Erişim Tarihi: 04.04.2025.

İnternet: Donoff, E. (2009). One-on-one with Janine Benyus: Championing nature as the source for sustainable design solutions. *Architect.* URL: https://www.architectmagazine.com/technology/lighting/one-on-one-with-janine-benyus_o, Son Erişim Tarihi: 11.04.2025.

İnternet: Faragalla, A. M. A., Asadi, S. (2022). Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture. *Energies,* 15(15), 5390. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/15/5390, Son Erişim Tarihi: 30.04.2025.

İnternet: Fernández, M. L., Rubio, R.,nGonzález, S. M. (2013, 11-13 Aralık 2013). Architectural envelopes that interact with their environment. *2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)*, URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/6708189, Son Erişim Tarihi: 05.04.2025.

İnternet: Forterre, Y. (2013). Slow, fast and furious: understanding the physics of plant movements. *Journal of Experimental Botany*, *64*(15), 4745-4760. URL: https://academic.oup.com/jxb/article/64/15/4745/462045, Son Erişim Tarihi: 30.04.2025

İnternet: Gray, C. H. (1995). *An interview with Jack E. Steele. The Cyborg Handbook,* New York: Routledge, 61–69.

İnternet: Hafizi, N., Karimnezhad, M. . (2021). Biomimetic Architecture Towards Bio Inspired Adaptive Envelopes: In Case of Plant Inspired Concept Generation. *International Journal of Built Environment and Sustainability,* 9(1), 1–10. https://ijbes.utm.my/index.php/ijbes/article/view/820, Son Erişim Tarihi: 11.02.2025.

İnternet: Ibrahim, J. A., Alibaba, H. Z. (2019). Kinetic façade as a tool for energy efficiency. *International Journal of Engineering Research and Reviews, 7*(4), 1–7. URL: https://www.researchpublish.com/upload/book/KINETIC%20FACADE%20AS%20A%20TOOL-8194.pdf, Son Erişim Tarihi: 19.02.2025.

İnternet: Jeronimidis, G. (2000). Chapter 1. Structure-Property Relationships in Biological Materials. *Pergamon Materials Series,* 4. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S147018040080005X?via%3Dihub, Son Erişim Tarihi: 29.04.2025.

İnternet: Kuru, A., Oldfield, P., Bonser, S., ve Fiorito, F. (2019). Biomimetic adaptive building skins: Energy and environmental regulation in buildings. *Energy and Buildings*, *205*, 109544. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819318304?via%3Dihub, Son Erişim Tarihi: 29.04.2025.

İnternet: Landscape. Le vie dei Mercanti - X Forum Internazionale di Studi Proceedings (2012), URL: 305-314. http://www.leviedeimercanti.it/proceeding-x-forum/, , Son Erişim Tarihi: 19.10.2024.

İnternet: Lee, H., Kim, N. (2018). Bio-inspired Adaptable Facade Control Reflecting User's Behavior. *In Advances in mechanical engineering.* // URL*:* https://www.intechopen.com/chapters/58622, Son Erişim Tarihi: 05.04.2025.

İnternet: Lee, J. D. (2012). *Adaptable, Kinetic, Responsive, and Transformable Architecture: An Alternative Approach to Sustainable Design.* Master's thesis, The University of Texas in Austin, under observation Steven A. Moore, Ulrich Dangel // URL: https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/ETD-UT-2012-08-6244/LEE-THESIS.pdf?sequ ence=1&isAllowed=y, Son Erişim Tarihi: 17.03.2025.

İnternet: Markin, V., Volkov, A., Jovanov, E. (2008). Active movements in plants: Mechanism of trap closure by Dionaea muscipula Ellis. *Plant signaling , behavior*, *3*, 778-783. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4161/psb.3.10.6041, Son Erişim Tarihi: 14.03.2025.

İnternet: Mei, X., Liu, C., Li, Z. (2024). Research progress on functional, structural and material design of plant-inspired green bionic buildings. *Energy and Buildings*, 114357. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778824004730?via%3Dihub, Son Erişim Tarihi: 14.03.2025.

İnternet: Ovidius, P. (n.d.). *Metamorphoses* (B. More, Çev.). Perseus Digital Library. // URL:https://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus%3Atext%3A1999.02.0028%3Abook%3D15%3Acard%3D252, Son Erişim Tarihi: 05.03.2025.

İnternet: Srisuwan, T. (2022). Applications of Biomimetic Adaptive Facades for Enhancing Building Energy Efficiency. *International Journal of Building, Urban, Interior and Landscape Technology (BUILT),* 20, 7-18. URL:https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/BUILT/article/view/247184, Son Erişim Tarihi: 05.04.2025.

İnternet: Ward, G. J. (1994). The RADIANCE lighting simulation and rendering system. In Proceedings of the 21st *Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques.* 459–472. URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/192161.192286, Son Erişim Tarihi: 05.04.2025.

İnternet: Yunitsyna, A., Sulaj, E. (2025). Daylight Optimization of the South-Faced Architecture Classrooms Using Biomimicry-Based Kinetic Facade Shading System. *Journal of Daylighting*, 12, 1-20. URL: https://solarlits.com/jd/12-1, Son Erişim Tarihi: 05.04.2025

İnternet: URL-1: https://architecturaltravels.wordpress.com/2012/10/02/oculus/, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-2: *UAP + Ned Kahn to create kinetic artwork for Brisbane Airport.* https://www.archdaily.com/69219/uap-ned-kahn-to-create-kinetic-artwork-for-brisbane-airport Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-3: *Affordable design freedom*, https://www.ribaj.com/products/affordable-design-freedom, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-4: *Bund Finance Center, Shanghai*, https://arquitecturaviva.com/works/centro-financiero-bund-shanghai-4, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-6: *What is kinetic architecture?* https://alubuild.com/en/architecture-kinetic-facades/, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-5: *Study: Daylight in UNStudio Architecture* https://www.archdaily.com/91407/singapore-university-of-technology-and-design-unstudio-dp-architects/un02?next_project=no, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-6: *ETFE dynamic solar shading in MediaTIC*, Barcelona https://www.filt3rs.net/case/etfe-dynamic-solar-shading-mediatic-barcelona-553, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-7: https://www.archdaily.com/49150/media-tic-enric-ruiz geli/50087f5928ba0d50da000bc7-media-tic-enric-ruiz-geli-photo, Son Erişim Tarihi: 04.05.2023.

İnternet: URL-8: *Singapore's Cultural Nerve,* https://www.dpa.com.sg/projects/esplanade-theatres-on-the-bay/, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-9: https://www.biomimicryinnovationlab.com/blog/flectofold-symphony-nature-engineering, Son Erişim Tarihi: 16.12.2023.

İnternet: URL-10: https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/hygroskin-meteorosensitive-pavilion/, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-11: *Al Bahr Towers,* Abu Dhabi, UAE https://www.ahr.co.uk/projects/al-bahr-towers, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-12: https://www.ahr.co.uk/projects/al-bahr-towers, Son Erişim Tarihi: 24.12.2024.

İnternet: URL-13: https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/flectoline/, Son Erişim Tarihi: 24.12.2024.

İnternet: URL-14: https://www.ladybug.tools/, Erişim Tarihi: 24.12.2024.

İnternet: URL-15: https://www.ladybug.tools/honeybee.html, Erişim Tarihi: 24.12.2024.

İnternet: URL-16: https://blog.iaac.net/mimosa-panels/, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

İnternet: URL-17: https://www.nagwa.com/en/explainers/702159062142/, Son Erişim Tarihi: 19.12.2023.

Jalali, S., Nicoletti, E., and Badarnah, L. (2024). From flora to solar adaptive facades: Integrating plant-inspired design with photovoltaic technologies. *Sustainability,* 16(3), 1145.

Jamei, E., and Vrcelj, Z. (2021). Biomimicry and the Built Environment, Learning from Nature's Solutions. *Applied Sciences,* 11(16), 7514.

Juaristi, M., and Monge-Barrio, A. (2016) *Adaptive façades in temperate climates. An in-use assessment of an office building.* In: 11th Conference on Advanced Building Skins.

Kaviani, S. (2023). *Biomimetic building skin development: evolutionary designed building skins with embedded biomimetic adaptation behaviours.* Doctoral dissertation, London South Bank University, London.

Kirkegaard, P. H., and Foged, I. W. (2011). Development and evaluation of a responsive building envelope. In *Adaptive Architecture: 3-5 Marts 2011, The Building Centre London, Conference Papers*. University of Nottingham.

Knippers, J., Speck, T., and Nickel, K. G. (2016). *Biomimetic research for architecture and building construction*. Berlin: Springer, 8.

Kolarevic, B. (Ed.). (2003). *Architecture in the digital age: Design and Manufacturing* (1st ed.). UK: Taylor ve Francis.

Komaraju, B., Battu, A., Kumar, K., Varadarajan, S., and Bingi, J. (2020). Design and manufacturing of *mimosa pudica* inspired smart window and analysis of scale dependent constraints. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912, 062027.

Kouchaki, H., Haghparast, F., and Pourali, S. (2019). *A proposal for designing a retractable shading devices inspired by MIMOSA PUDICA Plant*.

Körner, A., Born, L., Mader, A., Sachse, R., Saffarian, S., Westermeier, A. S., Poppinga, S., Bischoff, M., Gresser, G. T., Milwich, M. (2018). Flectofold—a biomimetic compliant shading device for complex free form facades. *Smart Materials and Structures*, 27(1), 017001.

Kronenburg, R. (2007). *Flexible: Architecture that responds to change*. London: Laurence King Publishing, 235-244.

Le-Thanh, L., Le-Duc, T., Ngo-Minh, H., Nguyen, Q. H., and Nguyen-Xuan, H. (2021). Optimal design of an Origami-inspired kinetic façade by balancing composite motion optimization for improving daylight performance and energy efficiency. *Energy*, 219, 119557.

Lelieveld, C. M. J. L., Voorbij, A. I. M., Poelman, W. A. (2007). Adaptable Building Adaptable Architecture. *In Proceedings of Building Stock Activation*. Tokyo, 245-252.

Li, G. (2020). *Design for adaptability in mass housing.* Scientific Research Publishing, Inc.

Loonen, R., Trčka, M., Cóstola, D., and Hensen, J. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 25, 483-493.

Lopez, M., Rubio, R., and Martin, S. (2017). Adaptive building envelopes: The future of façades. *Automation in Construction*, 83, 79-90.

Magli, G., Hannah, R. (2011). The role of the sun in the Pantheon's design and meaning. *Numen*, *58*(4), 486-513.

Marlén, L., Rubio, R., Martín, S., and Croxford, B. (2017). How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 692-703.

Mazzoleni, I., and Price, S. (2013). *Architecture follows nature: Biomimetic principles for innovative design.* Boca Raton: CRC Press.

Millet Manette, S. (1996). *Light Revealing Architecture.* California: Van Nostrand Reinhold, 67-72

Mutlu Avinç, G., Koç, S. N., Arslan Selçuk, S., (2024). Biomimetic Facade Design Proposal to Improving Thermal Comfort in Hot Climate Region. *Internatıonal Journal Of Bult Envıronment And Sustaınabılıty*, cilt.11, sa.2, 27-39.New York. Nachtigall, W. (1970). Bionics: Learning from Nature for Self-Sufficient, Engineerable Design.

Niklas, K. J. (1999). A mechanical perspective on foliage leaf form and function. *The New Phytologist*, 143(1), 19-31.

Negroponte, N. (1975). *Soft Architecture Machines.* Cambridge: MIT Press, 211.

Nour ElDin, N., and Abdou, A. (2020). An approach to adaptive sustainable facades inspired by plants. *AR*Chive*: Architectural Research in Egypt,* 4(2), 1-12.

Oosterhuis, K. (2012). *Hyperbody: First decade of interactive architecture.* Rotterdam: NAi Publishers, 54-95.

Pawlyn, M. (2011). *Biomimicry in architecture.* (17th ed.), London: RIBA Publishing, 130.

Pedersen Zari M (2010) Biomimetic design for climate change adaptation and mitigation. *Architectural Sci Rev 53*(2):172-183.

Pedersen Zari, M., (2007). *Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.* Paper presented at the Sustainable Building Conference, Auckland

Piñero, E. (1961). Project for a mobile theatre. *Architectural Design,* 12, 570.

Phillips, D., Gardner, C. (2012). *Daylighting: Natural light in architecture.*. Oxford: Architectural Press, 1-212.

Roudsari, M. S., Pak, M. (2013). Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In Proceedings *of the 13th International IBPSA Conference.* Building Simulation 2013, Chambéry, France, 3121-3128.

Reuter, R., Snijders, A., and Bilow, M. (2006). *Space-saving techniques by the use of transformable architecture.* Delft University of Technology, 78.

Reinhart, C. F., Andersen, M. (2006). Development and validation of a radiance model for a translucent panel. *Energy and Buildings*, 38(7), 890–904.

Reinhart C F, Mardaljevic J and Rogers Z. 2006. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Leukos,* 3(1), 1-20.

Reinhart, C. F. (2020). *Daylighting Handbook: Fundamentals Designing with the Sun. I.* Building Technology Press.

Reyna, J. L., and Chester, M. V. (2015). The growth of urban building stock: Unintended lock-in and embedded environmental impacts. *Environmental Science and Technology*. 19(4), 524-537.

Sánchez-Montañés, B., Cabeza-Lainez, J., Pulido Arcas, J., Rubio-Bellido, C., Castilla, M., and Gonzalez-Boado, L. (2015). New computational techniques for solar radiation in architecture. *InTechOpen.*

Sankaewthong, S., Miyata, K., Horanont, T., Xie, H., and Karnjana, J. (2023). Mimosa Kinetic Façade: Bio-Inspired Ventilation Leveraging the *Mimosa Pudica* Mechanism for Enhanced Indoor Air Quality. *Biomimetics,* 8(8), 603.

Schmidt III, R., Eguchi, T., Austin, S., and Gibb, A. (2010). What is the meaning of adaptability in the building industry. *Open and Sustainable Building,* 233-242.

Schmitt, O. H. (1969). Some interesting and useful biomimetic transforms. *Proceedings of the Third International Biophysics Congress,* 197.

Sommese, F., and Gigliola, A. (2023). *From nature to architecture for low tech solutions: Biomimetic principles for climate-adaptive building envelope.* The Urban Book Series. Berlin: Springer, Cham*,* 429-438

Sommese, F., Hosseini, S. M., Badarnah, L., Capozzi, F., Giordano, S., Ambrogi, V., and Ausiello, G. (2024). Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower: A biomimetic approach in parametric design for daylighting. *Building and Environment*, 247, 111052.

Soliman, M. E., ve Bo, S. (2023). An innovative multifunctional biomimetic adaptive building envelope based on a novel integrated methodology of merging biological mechanisms. *Journal of Building Engineering,* 76, 106995.

Selcuk, S., Sorguç, A., (2009). *Exploring Complex Forms in Nature Through Mathematical Modeling: A Case on Turritella Terebra.* 27th Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, İstanbul, Turkey, 665-672.

Schleicher, S., Lienhard, J., Poppinga, S., Masselter, T., Speck, T., Knippers, J. (2011). *Adaptive façade shading systems inspired by natural elastic kinematics*. Proceedings of the International Adaptive Architecture Conference IAAC, London.

Srisuwan, T. (2022). Applications of biomimetic adaptive facades for enhancing building energy efficiency. *International Journal of Building, Urban, Interior and Landscape Technology (BUILT)* 20, 7-18.

Steele, J. (1960). *Bionics: Living Prototypes - The Key to New Technologies.* Symposium. Dayton, Ohio, USA.

Straube, J. and Frederick, J. (1998). *Nem kontrolü ve dış duvar sistemleri* (Doktora tezi, University of Waterloo).

Stevenson, C. M. (2011). Morphological principles: Current kinetic architectural structures. *In Proceedings of Adaptive Architecture,* London, 1–12.

Tabadkani, A., Roetzel, A., Xian Li, H., Tsangrassoulis, A., Attia, S. (2021). Analysis of the impact of automatic shading control scenarios on occupant's comfort and energy load. *Applied Energy*, 294, 116904.

Taiz, L. Zeiger, E., Moller, I. M., and Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development.* 6th Edition, Sinauer Associates, Sunderland, CT.

Tang, Y., Beccarelli, P., Guo, H., Liu, R., De Focatiis, D., and Deng, Z. (2022). Biomimetic folding of triangular deployable membranes. *Bioinspiration and Biomimetics,* 17(6), 66002.

Tavares da Silva, F. and J. Cruz Gaspari Veras (2023). "A design framework for a kinetic shading device system for building envelopes. *Frontiers of Architectural Research* 12(5), 837-854.

Temmerman, N., Alegria Mira, L., Vergauwen, A., Hendrickx, H., and De Wilde, W. P. (2012). Transformable structures in architectural engineering. *High Performance Structures and Materials*, 6(124), 457-468.

Tokuç, A., Özkaban, F. F., and Çakır, Ö. A. (2018). Biomimetic facade applications for a more sustainable future. G. Köktürk and T. D. Akyol Altun (Eds.), *Interdisciplinary Expansions in Engineering and Design With the Power of Biomimicry.* London: IntechOpen, 5.

Tregenza, P., Wilson, M. (2013). *Daylighting: architecture and lighting design*. London: Routledge.

Ulular, I. B. (2022). *Kinetic facades for maximizing human comfort and increasing space use efficiency in highly glazed building interiors* [M.S. - Master of Science]. Middle East Technical University.

Varshabi, N., Arslan Selçuk, S., and Mutlu Avinç, G. (2022). Biomimicry for energy-efficient building design: A bibliometric analysis. *Biomimetics*, 7(1), 21.

Verbrugghe, N., Rubinacci, E., and Khan, A. Z. (2023). Biomimicry in Architecture: A Review of Definitions, Case Studies, and Design Methods. *Biomimetics,* 8, 1.

Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., and Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, *3*(9), 471-Vincent, J.F.V., Biomimetics – a review, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 223(8), 919-939.

Vogel, S. (2009). Leaves in the Wind: Mechanistic aspects of leaf design. *New Phytologist,* 183(1), 13-26.

Yar, M., Korkmaz, K., Kiper, G., Maden, F. ve Akgün, Y. (2017). A novel planar scissor structure transforming between concave and convex configurations. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements,* 5(4), 442-450.

Yetkin, E. G. (2020). Effects of Biomimicry on Architecture. *European Journal of Natural Sciences and Medicine,* 3(2), 106-113.

Zuk, W., and Clark, R. H. (1970). *Kinetic architecture.* New York: Van Nostrand Reinhold, 56-94.



Gazili olmak ayrıcalıktır