



**BİYOMİMETİK TASARIM METODOLOJİSİ İLE TERMOREGÜLATİF
YAPI KABUĞU BİRİMİ TASARIMI**

Banu Çiçek AVCIOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Banu Çiçek AVCIOĞLU

09/06/2021

BİYOMİMETİK TASARIM METODOLOJİSİ İLE TERMOREGÜLATİF YAPI
KABUĞU BİRİMİ TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)

Banu Çiçek AVCIOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2021

ÖZET

Yaşamını sürdürebilmesi için vücut ısısının sağlıklı bir aralıkta olması insanoğlunun ilk ihtiyaçlarından birisidir. Bu ihtiyacın barınma ile karşılanmasında ise termal konfor kavramı ortaya çıkmaktadır. Termal konforun sağlanabilmesi için kullanılan enerji kaynaklarından doğal gaz, kömür, petrol ve bunlara alternatif olarak yönelinen elektrik enerjisi ise sınırlı rezerve sahip olma, ulaşılabilirlik, mevcut talebe cevap verememe, dağıtım sorunu ve sera gazı salınımı sebebiyle küresel ısınmaya sebep olma gibi birtakım dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu noktada doğadaki canlıların temel enerji kaynağı olan güneş enerjisi, yenilenebilir ve temiz oluşuyla yapılarda termal konfor ihtiyacının karşılanmasında diğer enerji kaynaklarına en iyi alternatiftir. Bu çalışmada, doğada ekstrem sıcaklık koşullarında yaşayan canlıların vücut ve yuva sıcaklıklarını optimum aralıkta tutabilmeleri için sahip oldukları morfolojik özellikler ve uyumlanma davranışları biyomimetik tasarım metodolojisi ile incelenerek, benzer uyumlanmanın yapılara uygulanması ile güneş enerjisinin termal ihtiyaçların karşılanmasında kullanımı amaçlanmıştır. Enerjinin etkin kullanımı ile maksimum verimin sağlanması için doğadaki canlıların mevcut ortam şartlarına uyumlanma becerileri referans alındığında, farklı mevsimlere geçişte benzer uyumlanmanın yapılara uygulanabilmesi için dinamizmin gerekli olduğu görülmüştür. Dinamizm ise morfolojik yapıların akıllı malzemeler ile bir araya getirilmesiyle elde edilen kinetik yapı kabuğu tasarım önerileriyle sağlanmıştır. Mevcut yapı kabuğu tasarımlarında olduğu gibi spesifik bir iklime özel tasarlanan yapı kabuklarına sentezleyici bir yaklaşım ile yenilik getirilmiş ve gerçekleştirilen üç farklı kinetik yapı kabuğu tasarımı önerisi ile hem soğuk hem de sıcak iklime uyumlanabilen tasarım önerileri sunulmuştur. Tasarımı yapılan kinetik yapı kabuğu birimleri arasında termal konfor sağlama performansının karşılaştırılabilmesi için ise ANSYS Workbench analiz programı ile CFD analiz (Computational Fluid Dynamics - Hesaplamaları Akışkanlar Dinamiği) kullanılarak solar termal analiz gerçekleştirilmiş ve sıcak ve soğuk iklim şartlarında en iyi performansı gösteren yapı kabuğu birim tasarımları belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91406
Anahtar Kelimeler : Biyomimetik tasarım metodolojisi, yapı kabuğu birim tasarımı, termoregülasyon, CFD (Computational Fluid Dynamics)
Sayfa Adedi : 135
Danışman : Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

THERMOREGULATIVE BUILDING ENVELOPE UNIT DESIGN WITH
BIOMIMETIC DESIGN METHODOLOGY

(M. Sc. Thesis)

Banu Çiçek AVCIOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

It is one of the first needs of human beings to have a healthy body temperature in order to survive. In meeting this need with accommodation, the concept of thermal comfort emerges. Natural gas, coal, oil, and alternatively electrical energy, which are among the energy sources used to provide thermal comfort, bring along some disadvantages such as having limited reserves, accessibility, inability to respond to current demand, distribution problem and causing global warming due to greenhouse gas emissions. At this point, solar energy, which is the main energy source of living things in nature, is the best alternative to other energy sources in meeting the thermal comfort needs in buildings with its renewable and clean nature. In this study, the morphological features and adaptation behaviors of creatures living in extreme temperature conditions in nature to keep their body and nest temperatures in the optimum range were examined with biomimetic design methodology, and it was aimed to use solar energy to meet thermal needs by applying similar adaptation to buildings. Considering the ability of living things in nature to adapt to the current environmental conditions in order to ensure maximum efficiency with the effective use of energy, it has been seen that dynamism is necessary in order to apply similar adaptation to the buildings in the transition to different seasons. The dynamism is provided by the kinetic structure envelope design proposals obtained by combining morphological structures with smart materials. As with the existing building envelope designs, the building envelopes designed specifically for a specific climate have been innovated with a synthesizing approach, and design proposals that can be adapted to both cold and hot climates are presented with three different kinetic building envelope design proposals. In order to compare the thermal comfort performance among the designed kinetic building envelope units, solar thermal analysis was carried out using CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis with ANSYS Workbench analysis program and the building envelope unit designs showing the best performance in hot and cold climate conditions were determined.

Science Code : 91406
Key Words : Biomimetic design methodology, building envelope unit design, thermoregulation, Computational Fluid Dynamics (CFD)
Page Number : 135
Supervisor : Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde sağladığı yönlendirmelerle ve bilge duruşuyla beni yüreklendiren, motivasyonumu kaybettiğim zamanlarda tekrar canlanmamı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Yaptıkları değerli katkıları ile tezime farklı bakış açıları kazandıran jüri üyeleri sayın Doç. Dr. Hüseyin Kürşad SEZER'e ve Prof. Dr. Mustafa BOZDEMİR'e, tez çalışmamın analiz sürecinde destek olan sayın Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT'a ve değerli bilgi birikimini benimle paylaşan Arş. Gör. Emre Aşkın ELİBOL'a şükranlarımı sunarım.

Destekleyici tutumuyla en çıkmazda hissettiğim zamanlarda yanımda olarak beni güçlendiren sevgili dostum Şeymanur YOĞURT'a minnettarım, o olmasaydı bu çalışmayı olmasını arzu ettiğim şekilde tamamlayamazdım.

Tüm sıkıntılı zamanlarımda beni sabırla dinleyen ve yanımda olan, tez çalışma sürecimde bunaldıkça rahatlamak için yöneldiğim gelecek fikirlerimin hayalini kurma keyfini onlarla da paylaşma noktasında benimle olan sevgili dostlarım Dilvin ABACI'ya, Hatice Betül YÜCEKAYA'ya ve Nesibe ORDU'ya çok teşekkür ederim.

I also would like to thank my lovely friend Manahil HUDA for being in my life with her wisdom, optimism that she shares with me and all the times that were lived at Middle East Technical University. I will always cherish those times. I must add, with skills that she contributed to my life, I enjoyed and learnt a lot from by communicating with people from all around the world.

Sevgisini en içten şekilde katarak yaptığı, en sıkıntılı zamanlarımda tatlı bir esinti gibi gelen tüm ikramları için sevgili komşum Canan TAŞKOPARAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca olduğu gibi tez aşamasında da dirayetli ve dayanıklı kalmam konusunda bana ilham kaynağı olan sevgili annem Rahime ZEYREK ve babam Yunus ZEYREK'e; dualarıyla, maddi ve manevi destekleriyle her zaman arkamda duran sevgili annem Sabahat AVCIOĞLU'na ve babam Erol AVCIOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Son olarak bu tezi, en mutsuz ve umutsuz zamanlarımda bile çıkış kapısını ararken hep yanımda olan ve hiçbir desteğini benden esirgemeyen, beni benden çok düşünen ve beni bana hatırlatan sevgili devletim Alper AVCIOĞLU'na armağan ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	9
2.1. Günümüz Stratejileri ve Teknolojileri	10
2.2. Biyoklimatik Stratejiler	12
2.2.1. Yapı kabuğu.....	12
2.2.2. Pencereler	31
2.3. Kinetik Yapılar.....	34
2.4. Kinetik Yapı Kabukları ve Biyomimetik Yaklaşım	39
3. BİYOMİMETİK TASARIM METODOLOJİSİ	45
3.1. Biyomimetiğin Gelişimi.....	47
3.2. Biyomimikri Tasarımda İki Yönlü Tasarım Süreci	48
3.3. Analoji Tabanlı Tasarım Süreci	49
3.3.1. Problemden biyolojiye biyomimetik tasarım	49
3.3.2. Biyolojiden teknolojiye biyomimetik tasarım	52
3.4. Yapı Kabuklarıyla Termoregülasyonun Sağlanmasında Biyomimetik Tasarım	53
3.4.1. Isı kazanımı.....	54

	Sayfa
3.4.2. Isı korunumu.....	55
3.4.3. Isı yayılımı.....	55
3.4.4. Isı kazanımının önlenmesi.....	56
4. TERMOREGÜLATİF BİYOLOJİK YAPI İNCELEMELERİ.....	59
4.1. Karınca Yuvalarında Termoregülasyon.....	59
4.2. Yapraklarda Termoregülasyon.....	63
4.3. Çöl Salyangozunda Termoregülasyon.....	65
4.4. Kuşlarda Termoregülasyon.....	67
4.5. Zebralarda Termoregülasyon.....	68
4.6. Kaktüslerde Termoregülasyon.....	69
4.7. Encelia Farinosa Çalışında Termoregülasyon.....	70
5. KİNETİK YAPI KABUĞUNDA HAREKET BAŞLATICI: AKILLI MALZEMELER.....	77
5.1. Şekil Hafızalı Malzemelere Genel Bakış.....	80
5.1.1. Termobimetaller.....	82
5.1.2. Şekil hafızalı alaşımlar (Shape memory alloys-sma).....	83
5.1.3. Şekil hafızalı polimerler (Shape memory polymers-smp).....	86
6. BİYOMİMETİK YAPI KABUĞU BİRİM TASARIMLARI.....	93
6.1. Modellerine Genel Bakış.....	95
6.1.1. Model 1: Formica rufa, güvercin ve çöl salyangozu.....	96
6.1.2. Model 2: Formica rufa, güvercin, kaktüs, çöl salyangozu.....	99
6.1.3. Model 3: Konik karınca yuvası, güvercin, loblu geranium sanguineum ve çöl salyangozu.....	102
7. ANSYS WORKBENCH İLE MODELLERİN TERMAL ANALİZİ.....	107
7.1. Modellerin CAD ile Çizimi ve Hazırlanması.....	108
7.2. Mesh Yapısının Oluşturulması.....	110
7.3. Setup Modülü ile Analiz Modelinin Oluşturulması.....	113

	Sayfa
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	121
KAYNAKLAR	123
ÖZGEÇMİŞ	135



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ZEB konseptli yapılarda mevcut teknolojiler	11
Çizelge 2.2. Kinetik yapı kabuğu çalışmalarına örnekler	42
Çizelge 3.1. Biyo-terimler.....	45
Çizelge 3.2. Biyomimetik tasarım yönlendirme terminolojileri	48
Çizelge 3.3. Biyomimetik tasarımda ısı düzenleme sistemi	57
Çizelge 4.1. Termoregülatif yapı kabuğu tasarımında esinlenilebilecek biyolojik yapıların gündüz-gece saatlerine göre ısınma ve soğutma fonksiyonu kazanmalarını sağlayan özellikleri	73
Çizelge 5.1. Yapı kabuklarında kullanılan sıcaklık duyarlı akıllı malzemelerin karşılaştırılması	81
Çizelge 7.1. Analiz modelinin oluşturulmasında tanımlanan özellik ve değerler	113
Çizelge 7.2. Tanımlanan malzeme özellikleri.....	113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Termofiziksel parametrelerin termal konforda ağırlıklı dağılımı	2
Şekil 1.2. Çevre ile insan vücudu arasındaki ana sıcaklık etkileşimleri	2
Şekil 1.3. Binalarda konforun sağlanmasında rol alan alanların ağırlıklı dağılımı	4
Şekil 2.1. Teknolojilerin sıfır enerjili binalara yönlendirilmesi.....	9
Şekil 2.2. Sıfır enerjili bina (Zero Energy Building-ZEB) konsepti.....	10
Şekil 2.3. Sıfır enerjili binaları elde etmek için uygulanabilir pasif ve aktif stratejiler ..	11
Şekil 2.4. Pasif stratejilerin sınıflandırılması	12
Şekil 2.5. Yapı kabuğunun ana bileşenleri ve içindeki fiziksel süreçler	13
Şekil 2.6. Atriyum yoluyla doğal havalandırmayı temsil eden akış diyagramı	19
Şekil 2.7. Dört farklı atriyumun formu (a) Merkezi, (b) yarı kapalı, (c) bağlı, (d) doğrusal.....	19
Şekil 2.8. Klasik trombe duvarı (a), kompozit Trombe duvarı (b)	20
Şekil 2.9. DSF cephelerin sınıflandırılması ve genel yapısı	21
Şekil 2.10. Gölgeleme sistemlerinin sınıflandırılması	23
Şekil 2.11. Pasif gölgeleme sistemi türleri. Üstte: çıkıntı ve panjurlarda, altta: pervaz ve ayarlanabilir panjurlarda.....	23
Şekil 2.12. Dinamik cephe ve cam kontrol sistemi diyagramı	24
Şekil 2.13. Binalarda çeşitli bitki entegrasyonları	25
Şekil 2.14. PCM'nin yapıda kullanımıyla potansiyel pik yüklenim noktasının aşağıya çekilmesi ve enerji kazancı	26
Şekil 2.15. PCM ile serbest soğutma işlemi	27
Şekil 2.16. Pasif çatı teknolojilerinden çatı kaplama	27
Şekil 2.17. Buharlaşmalı soğutma teknikleri: (a) dış bitkilendirme, (b) çatı bitkilendirmesi, (c) çatı spreyleme, (d) iç mekân spreyleme, (e) su birikintisi, (f) su boruları ile soğutma	28
Şekil 2.18. Çatı havuzu çeşitleri	30

Şekil	Sayfa
Şekil 2.19. Havuz içine gömülü izolasyonlu yürünebilir çatı havuzu (a ve b); gece su sirkülasyonlu yürünebilir çatı havuzu (c ve d).....	31
Şekil 2.20. Soğuk ve sıcak hava için ideal akıllı cam	33
Şekil 2.21. Yapı içinde yaşayan kişinin hareketlerini baz alarak çevresel değişikliklere cevap veren cephe tasarımı	34
Şekil 2.22. Yapıları dinamik hale getiren hareket çeşitleri	35
Şekil 3.1. Biyomimikrinin erken tasarım aşamalarında uygulanması	48
Şekil 3.2. Biyomimetik tasarım süreci: probleminden biyolojiye	50
Şekil 3.3. Biyomimetik tasarım süreci: biyolojiden mühendisliğe	53
Şekil 3.4. Soyutlama benzeşimi: doğada ve binalarda sıcaklık düzenlemesi	54
Şekil 4.1. Acromyrmex heyerinin toprak altında ve toprak üstündeki yuva modellerinde gece ve gündüz boyunca gerçekleşen termal etkileşimler	60
Şekil 4.2. Konik yuvaların farklı sıcaklıktaki bölgelere göre yükseklik farkları. Sıcak bölge (a), Soğuk bölge (b)	62
Şekil 4.3. Termit yuvasında havalandırma sistemi	63
Şekil 4.4. Çöl salyangozunun yansıtma, konveksiyon ve yalıtım ile ısı kazanımını önlemeye yönelik stratejileri.....	67
Şekil 5.1. Çevresel uyaranlara cevap veren akıllı malzemelerin sınıflandırılması	79
Şekil 5.2. Bimetal şeritlerin sıcaklık değişiminde eğilme hareketi ve Los Angeles'ta yapı kabuğuna uygulanmış örnek bir çalışmanın oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta davranım şekli	82
Şekil 5.3. Şekil hafızalı alaşımların çalışma prensibini oluşturan martensit-östenit faz değişimi.....	83
Şekil 5.4. NiTi yay ile hareket başlangıcının sağlandığı kinetik yapı kabuğu çalışması örneği. a) kapalı hal b) açık hal.....	86
Şekil 5.5. Şekil hafızalı polimerlerde elastik deformasyonu sağlayan elastik segment ve dönüşüm segmenti.....	87
Şekil 5.6. Beş farklı hücre modeli ve açılma-kapanma morfolojileri	91

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Güneş paneli uygulamalarının binalarda konumlandırıldığı alanlar: (a)Çatı, (b)Balkon, (c)Güneşlik, (d)Duvar.....	5
Resim 2.1. Tipik VIP yapısının ana bileşenleri (sol) ve VIP ile geleneksel termal yalıtımın eşdeğer termal direnç kalınlığının karşılaştırılması (sağ).....	16
Resim 2.2. GFP içindeki bariyer folyo ve tampon yapı.....	16
Resim 2.3. (Sol) NASA'dan Peter Tsou, uzay görevleri için geliştirilen yarı saydam bir aerjel örneğiyle, (orta) aerjelin üstündeki kibritlerin aerjel ile alevden korunması ve (sağda) yüksek performanslı bir termal yalıtım malzemesi olarak bir aerjel örneği malze	17
Resim 2.4. Solar baca. Üst: Cepheye entegre solar baca; alt: Çatıya entegre solar baca	18
Resim 2.5. Mekanik sistemle dönerek güneşe uyumlanan Girasole villa, Verona, İtalya	36
Resim 2.6. İsveç'teki kozanın kelebeğe dönüşümünden ilham alan Dragspelhuset yapısı. Sol taraf normal biçimi ve sağ taraf uzatmadan sonraki hali	37
Resim 2.7. Cennet kuşu bitkisinden esinlenerek tasarlanan menteşesiz panjur sistemi Flectofin® (a) Sistemin çalışma prensibini gösteren maket 0 konumunda, (b) Maket 30 derecelik konumda (c) Maket 90 derecelik konumda.....	38
Resim 2.8. Cennet kuşu bitkisi, maskeli dokumacıkuşu tarafından tozlaştırılırken	38
Resim 2.9. Manolya çiçeğindeki dönme ve öteleme hareketlerinden esinlenerek tasarlanan Shangai'daki spor merkezi	39
Resim 4.1. Acromyrmex türü çim biçen karıncalarının tepe şeklinde inşa ettiği ot, ince dal, toprak ve kille oluşturduğu yuva modeli.....	59
Resim 4.2. Formica rufa.....	62
Resim 4.3. Geranium sanguineum bitkisinin eliptik loblu yaprakları	65
Resim 4.4. Acer rubrum bitkisinin dişli kenarlı yaprakları	65
Resim 4.5. Çöl salyangozu.....	66
Resim 4.6. Soğuk havalarda tüylerini kabartarak ve başını içeri çekerek vücut sıcaklığını koruyan güvercin.....	68
Resim 4.7. Siyah-beyaz çizgileriyle rüzgâr oluşturarak serinleyen zebalar	69

Resim	Sayfa
Resim 4.8. Kaburgaları sayesinde gövdesinde gölgeler oluşturarak vücut sıcaklığını dengeleyen kaktüs	70
Resim 4.9. Encelia farinosanın aşırı ısı kazanımını önleyen gümüş tüylü yaprakları	71
Resim 5.1. NiTi bazlı şekil hafızalı alaşımın düşük ve yüksek sıcaklıktaki davranışı ...	84
Resim 5.2. Solda: 1 mm çapında NiTi tel gömülü silikon parça (a) Üstten görünüm; (b) yandan görünüm; (c) ısıtmadan önce; (d) elektrikle ısıtma sonrası. Sağda: harici olarak bağlanmış ince NiTi telli kompozit kiriş. Elektrik ile ısıtma sonrası (a)'dan (e)'ye ve (e)'den (a)'ya soğutulduktan sonra.....	85
Resim 5.3. SMA şeritlerin gömülü olduğu, elektrikle ısıtılarak açılıp kapanan kanat modeli. Sol sütun: yandan görünüm; sağ sütun: üstten görünüm	85
Resim 5.4. Isıtma sonrası 1 mm çapındaki PU SMP telde sıcaklık yükselişi ile orijinal şekle dönme davranışı	88
Resim 5.5. SMP model örneğinde eğilme hareketi ile menteşe olarak çalışma	89
Resim 5.6. 3B baskılı SMP menteşelerin şekil değiştiren davranış gösterimi	90
Resim 6.1. ETFE'nin seralarda kullanımına bir örnek.....	94
Resim 6.2. Model 1	97
Resim 6.3. Model 1'in kış formundan yaz formuna geçerken yaptığı kapanma hareketi.....	98
Resim 6.4. Model 1'in cephe üzerine uygulanmış kış formu	98
Resim 6.5. Model 1'in cephe üzerine uygulanmış yaz formu	99
Resim 6.6. Model 1'in kış (sol) ve yaz (sağ) kullanımı için cephe üzerinde uygulanmış hali	99
Resim 6.7. Model 2	100
Resim 6.8. Model 2'nin kış formundan yaz formuna geçerken yaptığı kapanma hareketi.....	101
Resim 6.9. Model 2'nin cephe üzerine uygulanmış kış formu	101
Resim 6.10. Model 2'nin cephe üzerine uygulanmış yaz formu	102
Resim 6.11. Model 2'nin kış (sol) ve yaz (sağ) kullanımı için cephe üzerinde uygulanmış hali	102
Resim 6.12. Model 3	104

Resim	Sayfa
Resim 6.13. Model'ün kış formundan yaz formuna geçerken yaptığı kapanma hareketi.....	104
Resim 6.14. Model 3'ün cephe üzerine uygulanmış kış formu.....	105
Resim 6.15. Model 3'ün cephe üzerine uygulanmış yaz formu.....	105
Resim 6.16. Model 3'ün kış (sol) ve yaz (sağ) kullanımı için cephe üzerinde uygulanmış hali.....	106
Resim 7.1. Rhinoceros programında yapılan Model 1'e ait modelleme arayüzü.....	108
Resim 7.2. Design Modeler'da parçaların seçilerek isimlendirilmesi.....	109
Resim 7.3. Dış havanın açık mavi, iç havanın koyu mavi ile renklendirildiği sıvı fazların Spaceclaim ile tanımlanması: (a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3.....	109
Resim 7.4. Spaceclaim'de gerçekleştirilen iyileştirme çalışmalarından topoloji paylaşımı.....	110
Resim 7.5. Fluent with Meshing modülünün geometriye bağlanması.....	111
Resim 7.6. Fluent with Meshing modülünde gerçekleştirilmiş mesh atma işlemleri sonucu elde edilen görüntü.....	112
Resim 7.7. Model 1 için kış (üst) ve yaz (alt) sınır şartları.....	114
Resim 7.8. Model 2 için kış (üst) ve yaz (alt) sınır şartları.....	114
Resim 7.9. Model 3 için kış (üst) ve yaz (alt) sınır şartları.....	115
Resim 7.10. Çözümlemenin tamamlandığını gösteren yeşil tikler.....	115
Resim 7.11. Beton duvarın ve yapı kabuğu birim tasarım önerilirisinin 24 Ocak saat 12.15'teki sıcaklık iletim performanslarının karşılaştırılması: herhangi bir uygulama olmayan beton duvar (a), Model 1 (b), Model 2 (c), Model 3 (d).....	117
Resim 7.12. Beton duvarın ve yapı kabuğu birim tasarım önerilirisinin 3 Ağustos saat 12.45'teki sıcaklık iletim performanslarının karşılaştırılması: herhangi bir uygulama olmayan beton duvar (a), Model 1 (b), Model 2 (c), Model 3 (d).....	119
Resim 8.1. Kış mevsimi şartlarında en iyi ısı kazanım performansını gösteren Model 2 (solda) ve yaz mevsimi şartlarında en iyi ısı kazanım önleme performansını gösteren Model 1 (sağda).....	122

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

°C	Santigrat Derece
cm	santimetre
J	Joule
K	Kelvin
kg	kilogram
m	metre
m ³	metreküp
mm	milimetre
pH	potential of hydrogen
W	Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

3D	3 Dimensional
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
Ar	Argon
ASHP	Air Source Heat Pump
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
AuCd	Aurum Cadmium
BID	Bio-Inspired Design
CAB	Climate Adaptive Building
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHP	Micro-combined Heat and Power
CO ₂	Carbon Dioxide
Cu	Copper

Kısaltmalar	Açıklamalar
DIM	Dynamic Insulation Materials
DO	Discrete Ordinate
DSF	Double Skin Façade
EAP	Electro-active Polymer
EPS	Expanded Polystyrene
ETFE	Ethylen Tetra Fluoro Ethylen
EVA	Ethylene-Vinyl Acetate
Fe	Ferrum
GFP	Gas-Filled Pannels
GSHP	Ground Source Heat Pump
HCN	Hydrogen Cyanide
HSP	Heat Shrinkable Polymer
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
ITKE	The Institute of Building Structures and Structural Design
Kr	Krypton
MMV	Mixed-Mode Ventilation
MVHR	Mechanical Ventilation and Heat Recovery
NIM	Nano Insulation Material
NiTi	Nickel titanium
PCM	Phase Change Material
PE	Polyethene
PS	Polystyrene
PU	Polyurethane
PV	Photovoltaic
PV/T	Photovoltaic-Termal
PZT	Lead Zirconate Titanate
SCM	Shape Change Material
SiO₂	Silicon Dioxide
SMA	Shape Memory Alloys
SMC	Shape Memory Ceramic
SME	Shape Memory Effect
SMG	Shape Memory Gel

Kısaltmalar**Açıklamalar****SMM**

Shape Memory Material

SMP

Shape Memory Polymer

SRM

Stimulus-Responsive Material

T_g

Glass transition temperature

TIM

Transparent Insulation Material

VIM

Vacuum Insulation Material

VIP

Vacuum Insulation Pannel

WSP

Water Shrinkable Polymer

Xe

Xenon

XPS

Extruded Polystyrene

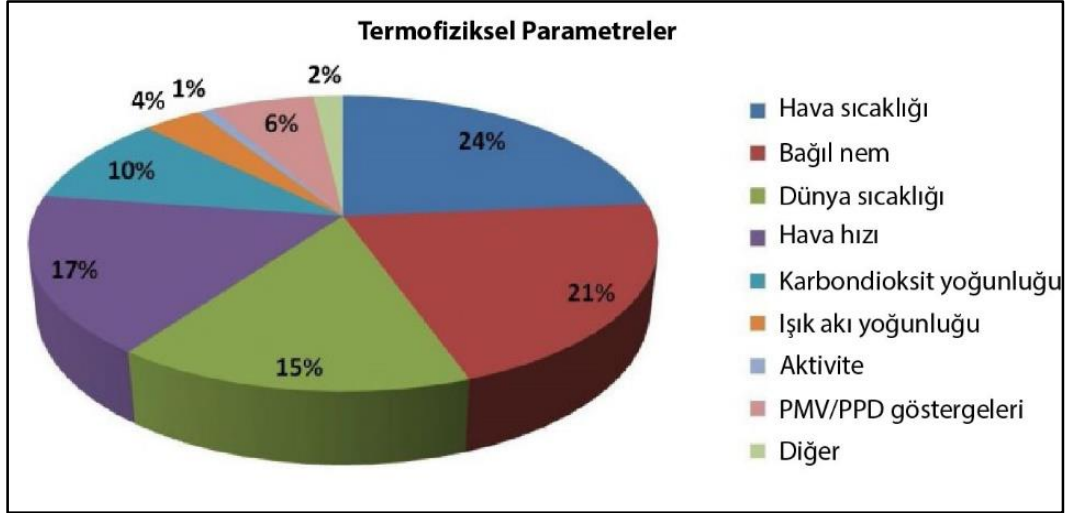
ZEB

Zero Energy Building

1. GİRİŞ

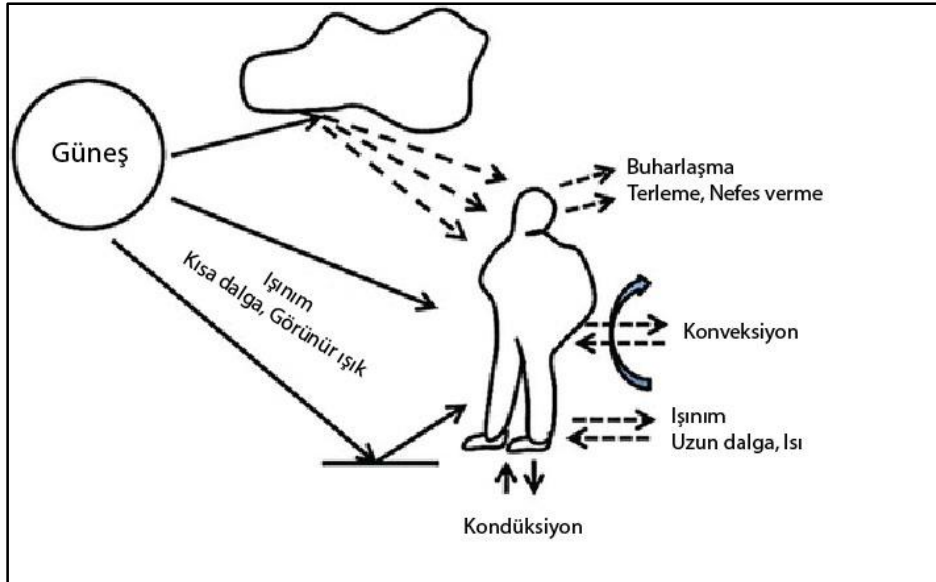
Amerikalı psikolog Abraham Maslow, 1943 yılında insanın ihtiyaçlarını tanımlayan “Maslow’un İhtiyaçlar Hiyerarşisi” teorisini sunmuştur. Teoriye göre ihtiyaçlar, insanoğlunun yaşamını sürdürebilmesi için önceliklendirilmiştir. Bu teoriye göre insanın ilk ihtiyaçları, hayatta kalmasını sağlayan nefes almak, yemek, içmek, uyku gibi fizyolojik ihtiyaçlardır. İkinci seviyedeki ihtiyaçlar ise insan sağlığını doğrudan etkileyen bu yaşamsal faaliyetleri gerçekleştirebilecek güvenli bir ortamın sağlanmasıdır. İnsanoğlu güvenlik ihtiyacını karşılamak için ilkel çağlardan beri bir yapı içine sığınarak kendini çevresel etkenlerden korumayı başarmıştır. Geçmişten günümüze insanlar yaşamsal faaliyetlerinin çok büyük bir kısmını kapalı alanlarda gerçekleştirmektedir ve bu alanların konforu insan sağlığı üzerinde doğrudan etkilidir.

1911’de mühendisler, psikologlar ve tıp bilim insanları, insanların binalarda sağlıklı ve konforlu yaşayabilmelerine yönelik çalışmaları analiz etmeye başlamışlardır. 1960larda konforun üretkenliği de etkilediği tespit edilmiş, 1990larda insanın termal konforu detaylı olarak incelenmeye başlanmış ve 1992 yılında ise ilk kez termal konforun tanımı Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers - ASHRAE) tarafından “termal ortamdan memnuniyeti ifade eden zihin durumu” şeklinde yapılmıştır (Sansaniwal, Mathur ve Mathur, 2020). Scopus veri tabanında son on yılda yapılan araştırmalar incelendiğinde sıcaklığın, termofiziksel parametreler arasında hava kalitesini etkileyen en önemli etken olduğu Şekil 1.1’de gösterilmektedir (Antoniadou ve Papadopoulos, 2017).



Şekil 1.1. Termofiziksel parametrelerin termal konforda ağırlıklı dağılımı (Antoniadou ve Papadopoulos, 2017)

Çevre ile insan vücudu arasındaki sıcaklık diğer ısıtım yapan ısı kaynaklarının sıcaklıklarından etkilenmektedir. Güneş'ten görünür kısa dalga ısıtım (radyasyon), yerden ısı iletimiyle (kondüksiyon), havadan ısı yayınımla (konveksiyon) ve diğer ısı kaynaklarından ise kısa dalga ısıtım ile etkileşmektedir (Şekil 1.2). İnsan vücudu sıcaklık dengesini ise terleyerek ve nefes verme sıklığını değiştirerek sağlamaktadır (Sansaniwal, Mathur ve Mathur, 2020).

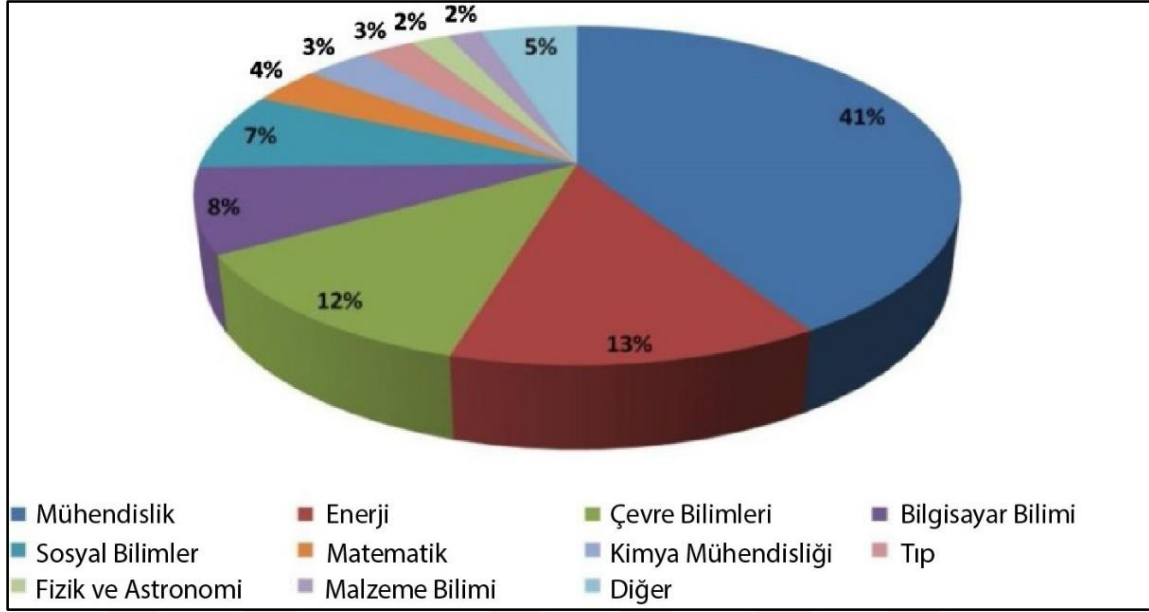


Şekil 1.2. Çevre ile insan vücudu arasındaki ana sıcaklık etkileşimleri (Sansaniwal, Mathur ve Mathur, 2020)

Problem durumu / Konunun tanımı

Yapılan çalışmalara göre yaşam alanlarının iyi ısıtılmaması ile insan vücuduna gerekli sıcaklığın sağlanamaması astım, artrit, romatizma, kalp hastalıkları ve ruh sağlığı problemlerini beraberinde getirirken çocukların astım sebebiyle okula devam etmekte güçlük yaşadığını ortaya koymuştur (Barton ve diğerleri, 2007). Yaşanılan ortamın soğukluğu kişilerde üretkenliği ve sosyal ilişkileri de etkilemektedir. Bu problemlerin önüne geçmek ve yaşam kalitesini yükseltmek için yaşam alanlarının tasarımı ve enerji yönetimi önem arz etmektedir. Bu bağlamda termal konfor, bina tasarımını, sürdürülebilirliği ve enerji yönetimini de kapsamaktadır (Ortiz, Kurvers ve Bluysen, 2017; Sansaniwal, Mathur ve Mathur, 2020). Yapılan araştırmalar, yaşam alanlarında etkin enerji yönetiminin sağlanmasıyla alan kullanımının arttığını göstermektedir. Kullanılan alanın artması ise aile içi ilişkilerin iyileşmesini ve bireylerde daha yüksek öz-saygıyı da beraberinde getirmektedir (Barton ve diğerleri, 2007; Yang, Yan ve Lam, 2014). Yaşam alanlarını ısıtabilen bireylerin kendilerini daha etkin hissettikleri, yaşam huzurlarının artmasıyla stres ve anksiyete seviyelerinin düştüğü ve mental sağlıklarıyla beraber sosyal statülerinde de gelişme olduğu gözlemlenmiştir (Willand, Ridley ve Maller, 2015).

Dünyadaki enerjinin %40'ı binalarda kullanılmaktadır. Binalardaki enerjinin %80'i ise ısınma ve sıcak su ihtiyaçları için kullanılmaktadır. Günümüz şartlarında ısınma ihtiyacı gaz, petrol, kömür ile sağlanırken soğutma ihtiyacı elektrikle sağlanmaktadır ve zamanla elektrik tüketimine olan talep artacaktır. Elektrik tüketiminin artmasıyla elektriğin karbon ayak izinden dolayı karbon dioksit (Carbon Dioxide - CO₂) emisyonu zamanla artacaktır ve bugün bile binaların CO₂ emisyonundaki payı %30'dur. Mevcut ısınma ve soğutma yöntemleri hava kirliliğine, sınırlı kaynakların tüketimine ve küresel ısınmayla beraber iklim değişikliğine sebep olurken ekonomiye de zarar vermektedir. Termal ihtiyaçlar için enerjiye olan talebin aynı oranda karşılanamaması ve dağıtılamaması, enerji kaynaklarının yönetimindeki diğer problemlerdir (Ge ve diğerleri, 2018; Sarbu ve Sebarchievici, 2014; Yang, Yan ve Lam, 2014). Son 40 yılda yapılan çalışmalar incelendiğinde yaşam alanlarındaki konforun sağlanmasında mühendislik ve enerji bilimleri ve çevresel bilimlerin ardışık bir şekilde diğer alanlara göre etkin rol üstlenen alanlar olduğu Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Termal konforu sağlarken ortaya çıkan zararları mümkün olduğunca azaltmak ve mevcut kaynakları en iyi şekilde değerlendirebilmek için enerji, tasarruflu olarak kullanılmalıdır. Bu bağlamda, binalarda etkin sıcaklık yönetimi stratejileri geliştirebilmek için ilgili bilim alanlarının multidisipliner çalışmaları gerekmektedir.



Şekil 1.3. Binalarda konforun sağlanmasında rol alan alanların ağırlıklı dağılımı (Antoniadou ve Papadopoulos, 2017)

Kullanılan yakıt ve enerji miktarının azaltılması ve tasarruf sağlanması amacıyla binalarda bazı destekleyici uygulamalar yapılmaktadır. Merkezi ısıtma, yalıtım, bina elektrik tesisatının yenilenmesi, çatı yalıtımı ve çatı katmanlarının artırılarak güçlendirilmesi, çift katlı cam kullanımı, yansıtıcı yapı kabuklarının tasarımı ve inşası, hassasiyet ve optimizasyon uygulamaları, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri (Heating, Ventilation and Air Conditioning - HVAC) bu uygulamalara örnek olarak verilebilir. Bunların yanı sıra mevcut yapıların teknik ve ekonomik analizleri de yapılarak enerjinin etkin bir şekilde yönetimi sağlanmaya çalışılmaktadır.

Araştırmanın amacı

Yapılan bina geliştirmeleri mevcut fosil yakıtların ve elektrik enerjisinin verimli kullanımına yönelik çözümleri kapsamaktadır. Fakat yaşam alanlarındaki termal konfor ihtiyacı, çevresel ve ekonomik kayıplara sebep olan fosil yakıtların ve elektrik enerjisinin kullanımı yerine çok daha ulaşılabilir bir alternatif olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile karşılanabilir. Doğadaki enerjinin kaynağı olan Güneş, yapılardaki termal ihtiyaçların karşılanabilmesi için en ulaşılabilir, temiz, çevreci ve ekonomik kaynaktır. Günümüzde solar sistemler bu amaçla kullanılarak ısınma ve sıcak su ihtiyaçları karşılanmaktadır. Güneş ışınları binaların duvar, balkon, güneşlik ve çatı alanlarından toplanabilmektedir (Resim 1.1) ve solar sistemlerin çalışabilmesi için, Güneş ışınlarının toplanmasını sağlayan panellerin kapladığı alandan çok daha fazla alana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da yer sorununu ortaya

çıkarmaktadır. Güneş sistemlerinin kullanımı ekonomik olmakla beraber kurulumu maliyetlidir. Kullanım süresi ile kurulum maliyetini karşılamaları 3-15 yıl almaktadır (Ge ve diğerleri, 2018). Bu nedenle Güneş ışınlarından çok daha ekonomik ve minimum alan kullanımı ile hızlı sonuçlara ulaşabilmek için yapının mevcut formundan bağımsız olarak yapıya uygulanabilir, kurulum ve binanın içyapısına müdahale gerektirmeyen bir yapı kabuğu tasarımı ihtiyaç olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen modüler yapı kabuğu birim tasarımlarıyla, yapı içi termal konforun sağlanmasında biyomimetik tasarım metodolojisi ile güneş enerjisinin kullanım verimliliğinin ve uygulanabilirliğinin artırılması amaçlanmıştır. Biyomimetik tasarım metodolojisi ile doğadaki canlıların sıcaklık değişimlerine uyumlanmak için sahip olduğu geometrik özellikler morfolojik bakış açısıyla incelenerek, elde edilen öğretilerle aynı şekilde yapıların da çevresel sıcaklık değişimlerine uyumlanmasını sağlayacak yapı kabuğu birim tasarımının gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.



Resim 1.1. Güneş paneli uygulamalarının binalarda konumlandırıldığı alanlar: (a)Çatı, (b)Balkon, (c)Güneşlik, (d)Duvar (Munari Probst ve Roecker, 2007)

Araştırmanın önemi

Bu tez çalışması, yapılardaki solar sistemlere alternatif olarak daha ulaşılabilir, ekonomik ve çevreci bir çözüm sunabilmek amacıyla biyomimetik tasarım metoduyla geliştirilmiş yapı kabuğu birim tasarımı üzerine yapılmıştır. Biyomimetik tasarım, mühendislikten biyolojiye ve biyolojiden mühendisliğe olmak üzere iki yönlü tasarım metodolojisi önermektedir. Bu çalışma, bir mühendislik probleminden yola çıkılarak doğadaki biyolojik sistemlerin benzer

problemi nasıl çözdüğünü inceleyerek, bu çözümden elde ettiği öğrenim çıktılarını mühendislik problemine uygulama yöntemi olan mühendislikten biyolojiye biyomimetik tasarım yöntemi ile bir tasarım önerisi sunmaktadır. Doğadaki canlıların ekstrem sıcaklık koşullarında hayatta kalabilmeleri ve nesillerini sürdürebilmelerini sağlayan yaşam stratejileri incelenmiştir. Canlıların aşırı sıcaklardan korunma yöntemleri ve aşırı soğuk hava koşullarında vücut sıcaklıklarını sağlıklı aralıklarda tutma davranışları analiz edilmiştir. Bu bağlamda, uzun yıllardır yeryüzünde varlığını koruyabilen canlıların sürdürülebilir yaşam stratejileri, kaynağını doğrudan doğaya bağlı öğretiler haline getirilerek mevcut yapı kabuğu çözümlerinde uygulanabilirliğe ve sürdürülebilirliğe önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Doğaya uyumlanmada canlıların sahip olduğu morfolojik özellikler biyomimetik tasarım metodolojisi ile incelenerek yapı kabuklarına uygulandığında, dış ortamla doğrudan temasta olan yapıların çevresel koşullara uyumlanma kapasitelerinin artırılması da termal konforun sağlanması ve enerji verimliliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu bakımdan ekstrem sıcaklık ve soğukluk şartlarında yaşayan canlıların yapısal özellikleri sentezlenerek, literatürde yalnız sıcak ve kurak bölgeler veya yalnız soğuk iklim bölgeleri için gerçekleştirilmiş yapı kabuğu çalışmalarından farklı olarak her iki duruma da uyumlanabilen dinamik bir model önerilerek literatürden farklılaşmaya gidilmiş olması, bu tez çalışmasını mevcut çalışmalardan ayıran en önemli özelliktir.

Varsayımlar / Sayıtlar

Modellere hareket kazandırarak değişen çevresel koşullarına uyumlanmayı sağlayan akıllı malzemelerden Şekil Hafızalı Polimer (Shape Memory Polymer - SMP), çalışması istenen sıcaklık aralığı malzeme üretimi sırasında belirlenebilen bir malzemedir. Bu sebeple, SMP parçaların istenen sıcaklık aralığında cevap verebilecek şekilde üretilmiş olması varsayımında bulunulmuştur.

Sınırlılıklar

Morfolojik çalışmaları gerçekleştirilen birim tasarımları arasında optimizasyonun yapılabilmesi için, önerilen üç tasarım modeli arasındaki ana farkın alternatif formlara sahip olmaları gerekmektedir. Bu bağlamda renk kullanımı ve konumlandırması da form konseptinde çalışılırken, birim tasarımı için uygun görülen malzemeler ve katman kalınlıkları her üç modelde de aynı tür ve ölçülerde kullanılmıştır.

Yapı kabuğu birimlerinin, yapı üzerinde kullanılmasıyla iç ortam termal konforuna sağlayacakları katkıların tespit edilmesi için yapılan analizde, tüm yapının analizinin yapılmasının sınırlılığı ve alacağı süre göz önünde bulundurularak, modellerin tüm yapı kabuğuna uygulanması yerine tek bir birim olarak analizi gerçekleştirilmiştir.

Birim analizlerinde ise, gerçekleşen sıcaklık değişimlerine verilen cevabın ölçümlenebilmesi için Ankara ili için yılın en sıcak ve en soğuk günleri yerel ekstrem sıcaklık koşulları olarak belirlenmiştir.

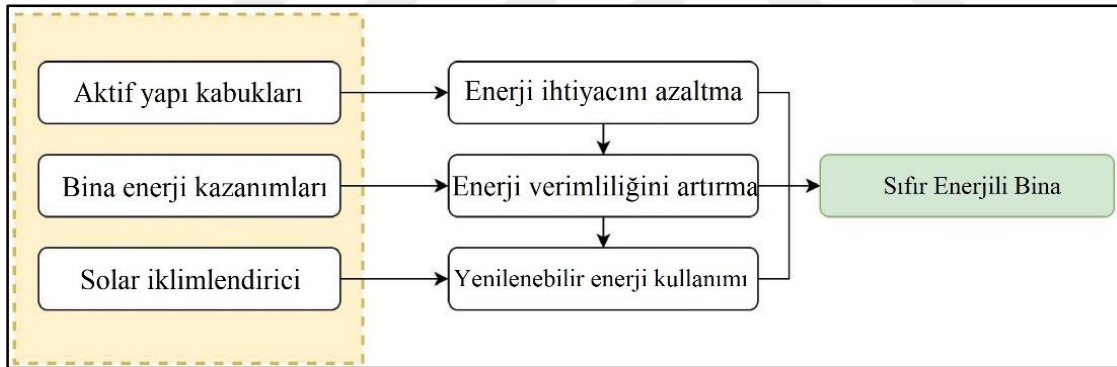
Tanımlar

Yapı kabuğu kavramı, mimari bir yapının iç ortamı ile dış ortamını birbirinden ayıran her türlü bileşene verilen isimdir. Yapının, dış ortamla etkileşiminde önemli bir rol oynadığından oldukça detaylı özellik ve bileşenlerde olabilmektedir. Biyomimetik tasarım ise, bir mühendislik veya tasarım probleminin çözümünde doğadan esinlenme yöntemini kullanan metodolojiye verilen isimdir. Termoregülasyon kavramı ise ısı düzenleme anlamına gelmekte ve ısı alışverişi, ısı kontrol, denge gibi alt bileşenlere sahip bir terimdir.

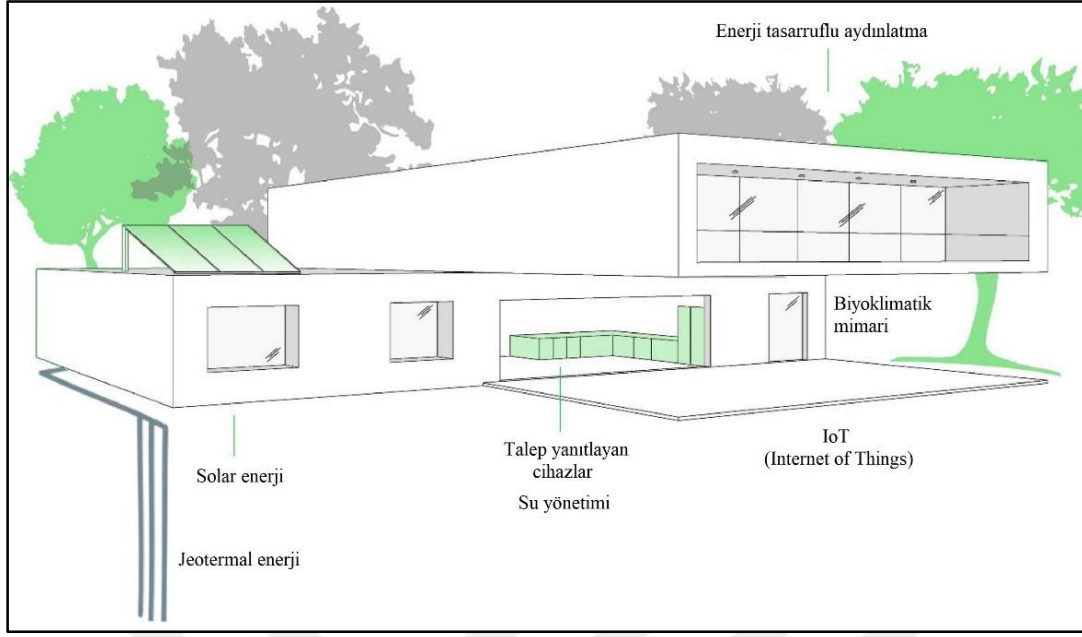


2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yapılarda yaşayan insanların termal konforu sağlanırken aynı zamanda karbon salınımının azaltılması ve iklim değişikliğinin önlenmesi için çevresel etkileri minimuma indirmek gerekmektedir. Literatürde günümüz teknolojilerinin maliyeti ve sistemlerin yönetimi için gerekli enerji tüketimi dikkat çekici noktalar arasındayken, çevresel etkiler de artık önemli hale gelmeye başlamıştır (Carreras, Boer, Cabeza, Jiménez ve Guillén-Gosálbez, 2016). Bu da enerji tüketiminin azaltılmasıyla doğrudan ilgilidir. Binalarda kullanılan enerji tüketiminin azaltılması, öncelikle binalardaki enerji talebini kendi kendine yeterlik ile azaltmak ve sonrasında ise gerekli enerjiyi yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlamakla gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 2.1). Enerjiyi bu şekilde yönetme prensibi üzerine kurulu bu tür binalar (Şekil 2.2), Sıfır Enerjili Bina (Zero Energy Building - ZEB) olarak tanımlanmaktadır (Belussi ve diğerleri, 2019). Bu bölümde ZEB konseptindeki günümüz strateji ve teknolojileri incelendikten sonra aynı amaca yönelik biyomimetik çözümler incelenecektir.



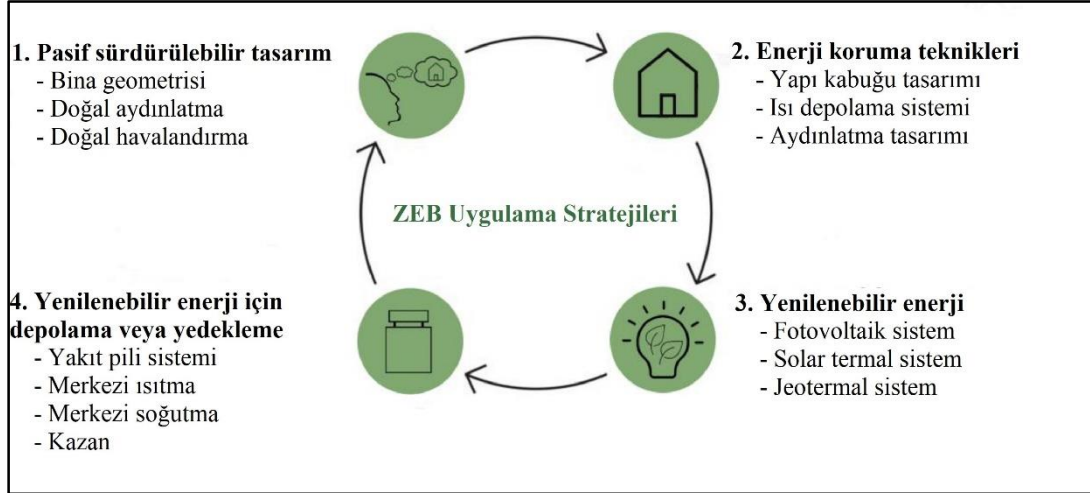
Şekil 2.1. Teknolojilerin sıfır enerjili binalara yönlendirilmesi (Cabeza ve Chàfer, 2020)



Şekil 2.2. Sıfır enerjili bina (Zero Energy Building-ZEB) konsepti (Cabeza ve Chàfer, 2020)

2.1. Günümüz Stratejileri ve Teknolojileri

ZEB yapılarında kendi kendine yetebilirliği sağlamak amacıyla dışarıdan talep edilen enerji miktarını minimize etmeye yönelik stratejiler olarak tanımlanabilecek “pasif stratejiler” ve gerekli enerjiyi doğadan elde etmeye yönelik stratejiler olarak tanımlanabilecek “aktif stratejiler” olmak üzere iki çeşit yaklaşım kullanılmaktadır. Enerji talebini azaltmayı hedefleyen pasif stratejilerin (Şekil 2.3) ilki bina tasarımıdır ve bina geometrisi, doğal ışıklandırma ve doğal havalandırmayı kapsamaktadır. İkincil olarak ise enerji koruma stratejileri gelmektedir. Bu stratejiler de yapı kabuğu ve ısı depolama sistemlerini kapsamaktadır. Sonrasında gerekli enerjiyi mümkün olan en az çevresel etkiyle elde etmeyi hedefleyen aktif stratejiler gelmektedir ve biyokütle, jeotermal ve solar enerjiler gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını kapsamaktadır. Son olarak ise termal enerjinin ve elektrik enerjisinin depolanabilirliği hedeflenmektedir (Cabeza ve Chàfer, 2020). Yönelinen stratejiler Çizelge 2.1’de detaylı olarak gösterilmektedir.



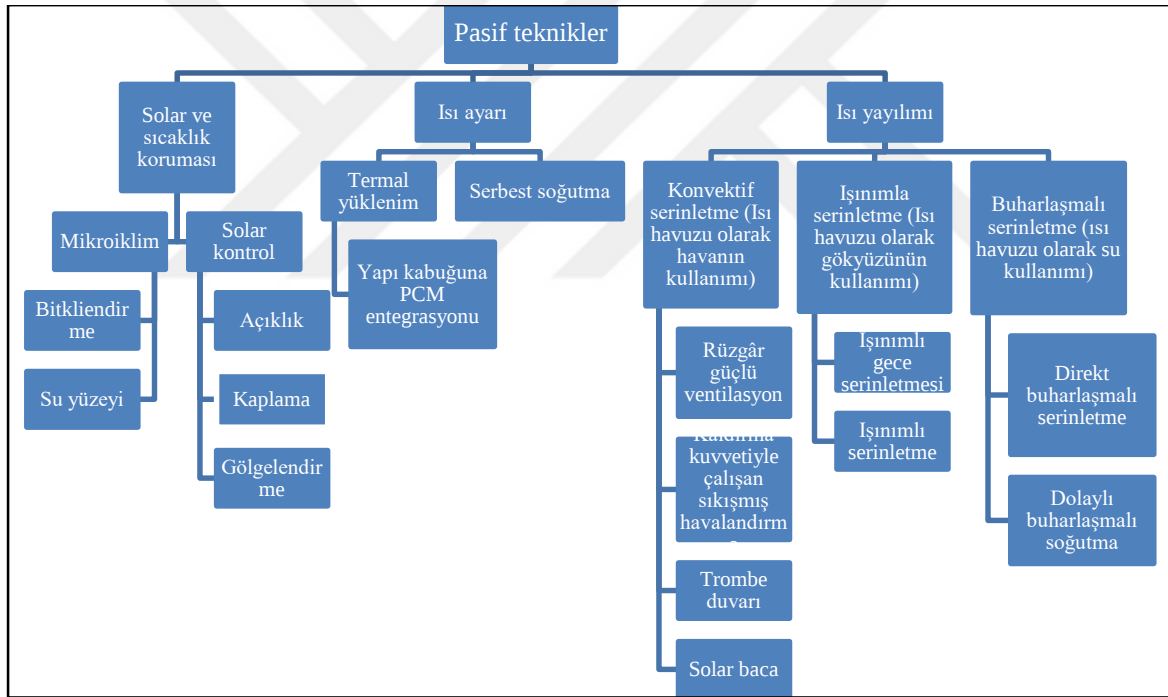
Şekil 2.3. Sıfır enerjili binaları elde etmek için uygulanabilir pasif ve aktif stratejiler (Cabeza ve Chàfer, 2020)

Çizelge 2.1. ZEB konseptli yapılarda mevcut teknolojiler (Cabeza ve Chàfer, 2020)

Bina geometrisi	-
Yapı kabuğu geliştirmeleri	Termal yalıtım Hava sızdırmazlığı Termal yüklenim Yansıtıcı/yeşil çatılar Aktif gölgelendirme sistemleri Yeni/geliştirilmiş/sürdürülebilir malzemeler
Pencere/cam geliştirmeleri	Seçici cam Geliştirilmiş cam Elektrokromik pencere camı
İç koşullar	İç tasarım koşulları İç ısı yükleri
HVAC	Doğal havalandırma Biyokütle kazanı Hava kaynaklı ısı pompası (Air Source Heat Pump - ASHP) Toprak kaynaklı ısı pompası (Ground Source Heat Pump-GSHP) Mekanik havalandırma ve ısı geri kazanımı (Mechanical Ventilation and Heat Recovery - MVHR) Solar termal Merkezi ısıtma ve soğutma
Güç	Solar fotovoltaik (Photovoltaic - PV) Yakıt hücreleri
HVAC ve Güç	Hibrit solar enerji fotovoltaik-termal (PV/T) Mikro kombine ısı ve güç (Micro-combined heat and power - CHP) Mikro rüzgâr üretimi Gerilim optimizatörleri Geliştirilmiş kontrol

2.2. Biyoklimatik Stratejiler

Yapılarda ısı ihtiyaçları karşılamak amacıyla enerji tüketen HVAC sistemleri yerine, bilinen en eski pasif ısı düzenleme yöntemlerini (Şekil 2.4) kullanan ve mevcut çevre şartlarına uyumlanabilen yapılar biyoklimatik yapılar olarak tanımlanmaktadır (Tejero-González, Andrés-Chicote, García-Ibáñez, Velasco-Gómez ve Rey-Martínez, 2016). Bu tür yapılardaki enerji yönetimi, doğadaki enerjinin kaynağı olan Güneş ışınlarının yönetimi ilkesi üzerine kuruludur. Bu ilişki, yapıdaki kapalı yüzeyler olan yapı kabuğu ve açık yüzeyler olan pencereler ile sağlanmaktadır (Manzano-Agugliaro, Montoya, Sabio-Ortega ve García-Cruz, 2015). Doğayla dengeli ve sürdürülebilir çözümler sunan biyoklimatik, biyoesinlenmeli veya biyomimetik tasarımlar olarak tanımlanabilen yapı örnekleri, biyomimetik çözümler kapsamında daha sonra incelenecektir.

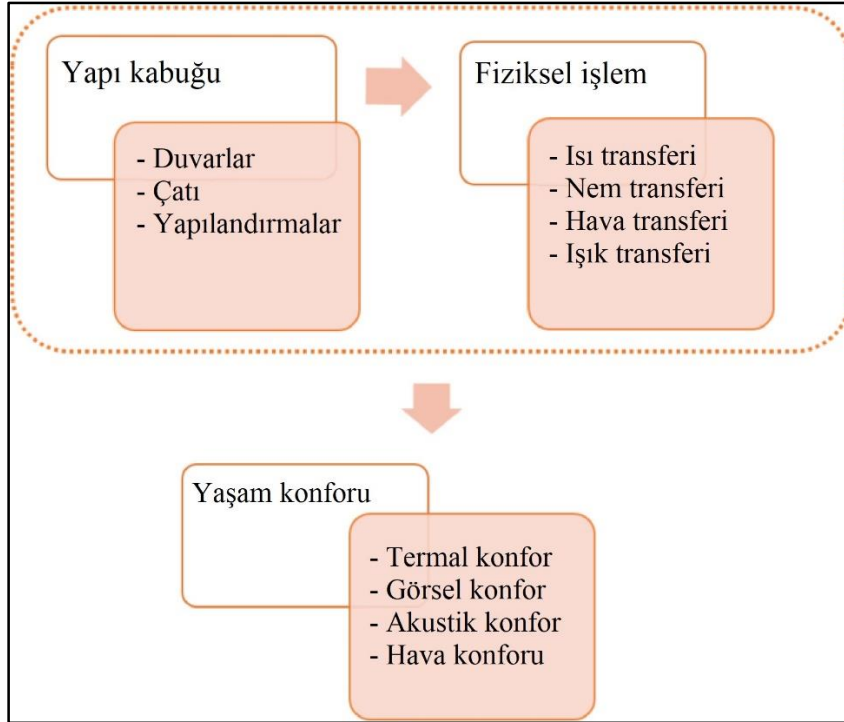


Şekil 2.4. Pasif stratejilerin sınıflandırılması (Bhamare, Rathod ve Banerjee, 2019)

2.2.1. Yapı kabuğu

Yapı kabuklarının birincil amacı yapılarda iç ortam ile dış ortamı birbirinden ayırarak iç ortamdaki yaşam konforunu sağlamaktır. Bu bağlamda, teknolojik, termal, fonksiyonel, çevresel ve estetik bileşenleri olduğu gibi yapının enerji yönetim performansı ve sürdürülebilirlik üzerinde de son derece etkin bir role sahiptir (Şekil 2.5). Bu nedenle yapı

kabuğunun formu ve yapıldığı malzeme oldukça önemlidir (G. Kumar ve Raheja, 2016; Mussard, 2017; Stevanović, 2013).



Şekil 2.5. Yapı kabuğunun ana bileşenleri ve içindeki fiziksel süreçler (Cabeza ve Chàfer, 2020)

Doğayla uyumlanarak minimum zarar, maksimum fayda ilkesi üzerine kurulu ve literatürde iklim uyumlu yapı kabuğu (Climate Adaptive Building - CAB) olarak tanımlanan yapı kabukları, dinamik çözümler sunarak, binaların değişen çevre şartlarında farklı senaryolara cevap verebilmelerini ve enerjiyi optimum şekilde kullanarak performanslarını sürdürebilmelerini sağlamaktadır. Bu da fonksiyonlarının, özelliklerinin ve davranışlarının tekrarlayıcı ve tersine değişim gösterebilme özelliklerine sahip olabilmesiyle sağlanmaktadır (Longo, Montana ve Riva Sanseverino, 2019; Loonen, Trčka, Cóstola ve Hensen, 2013). Günümüze kadar gelmiş yapılarda fonksiyonel ve görsel olarak uygulanabilirlik için yeni stratejilerin geliştirilmesi kadar ekonomik olarak uygulanabilirliği ve performansı da gözeten, aynı zamanda çevreyle uyumlu yeni malzeme seçimi ve geliştirimi de önem arz etmektedir (Cabeza ve diğerleri, 2013; Cabeza, de Gracia ve Pisello, 2018; Lidelöw, Örn, Luciani ve Rizzo, 2019; Webb, 2017).

Yapılarda termal enerji yönetimini doğaya uyumlanarak sağlayan ve yapılarda çatı ve duvarlara uygulanabilir olan pasif yapı kabuğu stratejileri şu şekildedir (Cabeza ve Chàfer, 2020):

- Yalıtım
- Doğal havalandırma
- Çift katmanlı duvarlar (Double Skin Façades - DSFs)
- Gölgeleştirme
- Yeşil alan kullanımı
- Faz Değiştiren Malzeme (Phase Change Material - PCM) ile termal yüklenim
- Serbest soğutma
- Çatı kaplamaları
- Buharlaştırma soğutma
- Çatı havuzları

Yalıtım

Termal yalıtım geliştirmeleri yapı kabuğu teknolojisinin de ilerlemesiyle enerji tüketimini azaltmanın ana bileşenlerindendir. Yapı kabuklarındaki hava kaçağına bağlı ısı kaybı, total ısı kaybının %40'ı kadar olabilmektedir (Cabeza ve Chàfer, 2020; Mélois, Moujalled, Guyot ve Leprince, 2019). Bunu önlemek adına yapılarda kullanılan geleneksel yalıtım malzemeleri şu şekildedir (Jelle, 2011):

- Mineral yün
- Geniştirilmiş polistiren (Expanded Polystyrene - EPS)
- Ekstrüde edilmiş polistiren (Extruded Polystyrene - XPS)
- Poliüretan (Polyurethane - PU)
- Selüloz
- Mantar

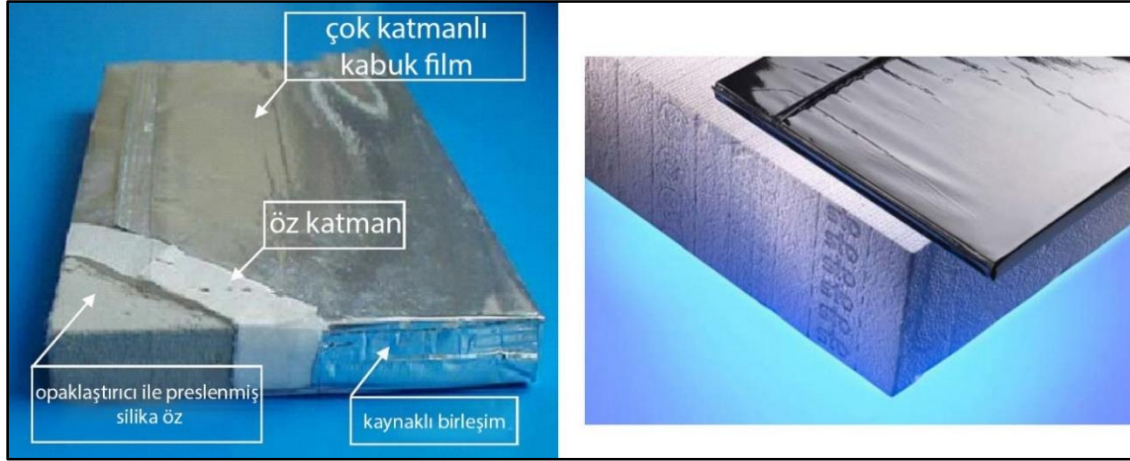
Yalıtımda kullanılan inovatif malzemeler ise şu şekildedir:

- Vakumlu Yalıtım Panelleri (Vacuum Insulation Pannels - VIP)
- Gazlı Yalıtım Panelleri (Gas-Filled Pannels - GFP)
- Aerojeller
- Vakumlu Yalıtım Malzemeleri (Vacuum Insulation Materials - VIM)
- Nano Yalıtım Malzemeleri (Nano Insulation Materials - NIM)
- Dinamik Yalıtım Malzemeleri (Dynamic Insulation Materials - DIM)

Termal iletkenlik, delik hassasiyeti, kesilerek şekillendirme ile binaya uygulanabilirlik, mekanik dayanım, yangın koruması, yangın sırasında duman salınımı, iklimin sebep olduğu termal yaşlanmaya dayanıklılık, donma-çözünme döngülerine dayanıklılık, suya dayanıklılık, maliyet ve çevreyle etkileşim yalıtım malzemelerinde gözetilen etkenlerdir.

Kullanımı yapının yer, duvar, tavan ve çatı gibi yerlerine göre değişmekte olan yalıtım malzemelerinden mineral yün; cam yünü ve taş yünü olmak üzere iki çeşittir ve levha halinde kullanılsa da yapıdaki oyuk ve boşlukları doldurmada sıkça tercih edilmektedir. Su buharının ısıyla şişirilerek elde edilen EPS, termal dayanım özelliğini kaybetmeden kesilerek binaya uygulanabilmektedir. XPS ise eritilmiş ham petrole şişirme gazı eklenmesiyle elde edilmektedir. XPS de EPS gibi kesilerek şekillendirilebilmektedir. Geri dönüştürülmüş kâğıt veya ağaç liflerinden elde edilen selüloz, yapılardaki boşlukları doldurmak için kullanıldığı gibi levha halinde de kullanılmaktadır. Mantar meşesinden elde edilen mantar ise hem dolgu malzemesi hem de levha halinde kullanılabilir. Pencere ve kapılarda dolgu malzemesi olarak kullanılan PU, mineral yün, polistiren (Polystyrene – PS) ve selülozla karşılaştırıldığında minimum termal iletkenliğe sahip, dolayısıyla yalıtımı en iyi şekilde yapan malzemedir. Belirlenen amaçta kullanımı güvenli olan PU, yangın durumunda hidrojen siyanür (Hydrogen Cyanide - HCN) salmaktadır. HCN hücresel solunumu engelleyen çok zehirli bir gazdır. Mineral yün, EPS, XPS, PU ve selülozun termal iletkenliği sıcaklık, nem ve kütle yoğunluğuna göre değişmektedir.

Metalize polimer lamine tabakalar arasında dumanlı silikanın açık gözenekler halinde bir araya getirilmesiyle elde edilen VIP (Resim 2.1), kesildiği zaman bütünlüğünün bozulmasından dolayı iletkenliği artmakta ve yalıtım özelliği düşmektedir. Bu nedenle kesilerek şekillendirmeye uygun değildir. 50-100 yıl kullanım ömründe termal yaşlanma ile iletkenliğinin artması VIP'nin bir diğer dezavantajıyken mineral yün ve polistiren ürünlerle karşılaştırıldığında daha iyi bir termal yaşlanma performansı göstermesi ve ekonomik kazanç sağlaması VIP'i daha tercih edilebilir bir malzeme kılmaktadır.



Resim 2.1. Tipik VIP yapısının ana bileşenleri (sol) ve VIP ile geleneksel termal yalıtımın eşdeğer termal direnç kalınlığının karşılaştırılması (sağ) (Jelle, 2011)

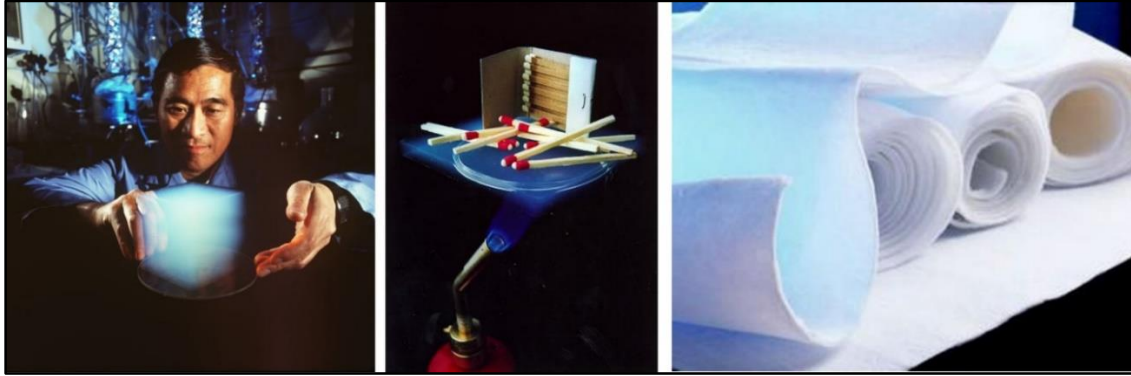
Argon (Argon-Ar), kripton (Krypton - Kr) ve ksenon (Xenon - Xe) gibi havadan daha az iletken bir gazla yalıtım sağlamayı öneren GFP (Resim 2.2), yapısındaki düşük emisyonlu ızgaralar sayesinde ışınlama transferi azaltmaktadır. Yapısındaki gazların havayla veya nemle temasının önlenmesi GFP'lerde önemli bir husustur. Bu bağlamda vakumlu yalıtım panelleri, gazlı yalıtım panellerine göre yalıtım konusunda çok daha başarılıdır.



Resim 2.2. GFP içindeki bariyer folyo ve tampon yapı (Jelle, 2011)

Aerogeller süper kritik kurutma yoluyla, bir jeldeki sıvı bileşenin uzaklaştırılırken katı matrisin jel içinde çökmeden tutulmasıyla elde edilmektedir. Aerogeller yüksek gözenek miktarı ve transparan oluşundan dolayı genellikle silika jellerden üretilir. Silika aerogeller, çapraz bağlı SiO_2 (Silicon Dioxide - Silikon Dioksit) zincirlerinden oluşur ve hava ile doldurulmuş çok sayıda küçük gözeneklere sahiptir. Gözenekli oluşu aerogelleri termal yalıtımda oldukça başarılı yapmaktadır. Diğer yandan, yüksek gözeneklilik aerogellerin mekanik mukavemetinin de düşmesine sebep olmaktadır. Yüksek maliyeti sebebiyle kullanımının yaygın olamasa da günümüzde en iyi performansa sahip yalıtım malzemesi

olarak uzay teknolojilerinde de kullanılan aerojeller, opak, yarı transparan ve transparan olabilmelerinden dolayı oldukça caziptir (Resim 2.3).



Resim 2.3. (Sol) NASA'dan Peter Tsou, uzay görevleri için geliştirilen yarı saydam bir aerojel örneğiyle, (orta) aerojelin üstündeki kibritlerin aerojel ile alevden korunması ve (sağda) yüksek performanslı bir termal yalıtım malzemesi olarak bir aerojel örneği malze (Jelle, 2011)

Termal iletkenliğin istenen aralıkta ayarlanabilmesini sağlayan DIM ve VIP teknolojisindeki gözenekleri nano boyutta küçültürerek termal iletkenliği azaltmayı öneren NIM ise gelecekte kullanımı yaygınlaşacak malzemelerdendir.

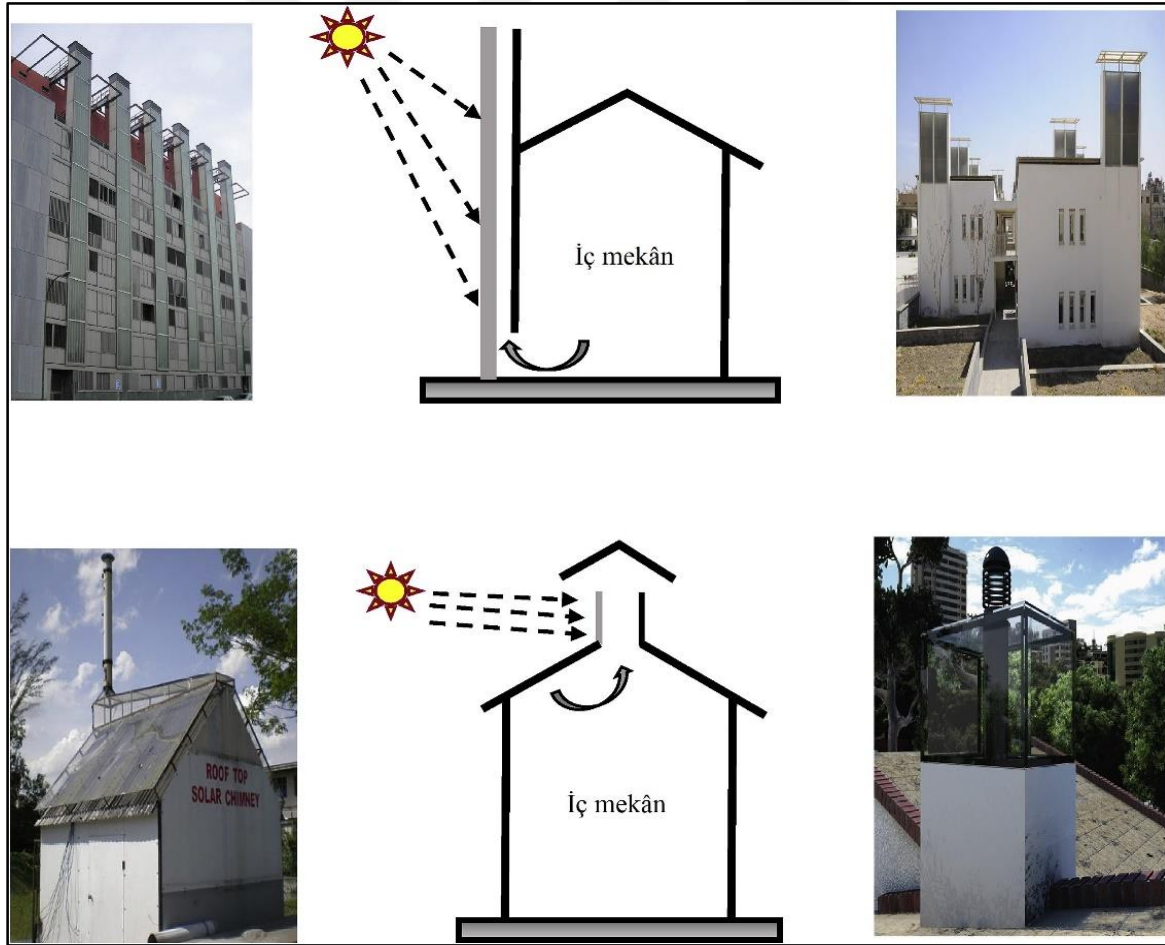
Yalıtım malzemelerinin kullanımında en önemli faktörlerden biri malzeme kalınlığıdır. 50 cm üzeri kalınlıktaki levhalar çatı ve duvarlarda ekstra yapılanma gerektirdiğinden tercih edilmemektedir. Yalıtım malzemesinin kalınlaşması aynı zamanda maliyeti de artırdığından, ideal yalıtım malzemesi kalınlığı termal iletkenliğin ve optimum maliyetin bir arada sağlandığı aralıktır (Aditya ve diğerleri, 2017; Jelle, 2011).

Görsel katkıları kadar güneş ışıklarını kullanarak enerjinin etkin kullanımını sağlayan transparan yalıtım malzemeleri (Transparent Insulation Materials - TIM) kullanımı ise gelecekte bir üst seviye yalıtım teknolojisi olarak tanımlanmaktadır (Y. Sun, Wilson ve Wu, 2018). Sürdürülebilir potansiyeli olan, doğal malzemelerden bitki lifleri veya geri dönüştürülmüş malzemeler, geleceğin yalıtım malzemeleri olarak önerilmektedir (Cabeza ve Chàfer, 2020; Wang ve diğerleri, 2018).

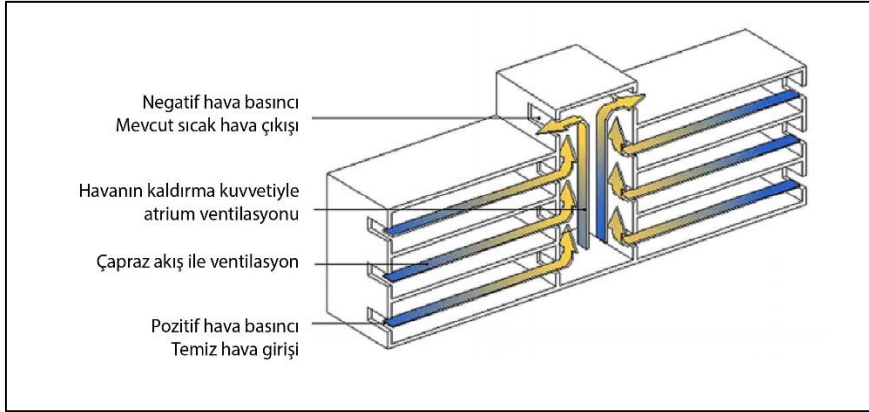
Doğal havalandırma

HVAC sistemler kullanmadan termal konforu sağlamanın bir diğer yolu olan doğal havalandırma, sıcak mevsimlerde güneş ışınlamıyla rüzgârın itirme kuvveti (thermal buoyancy) sayesinde serinleme ihtiyacını enerji tüketmeksizin karşılamaktır (Cabeza ve

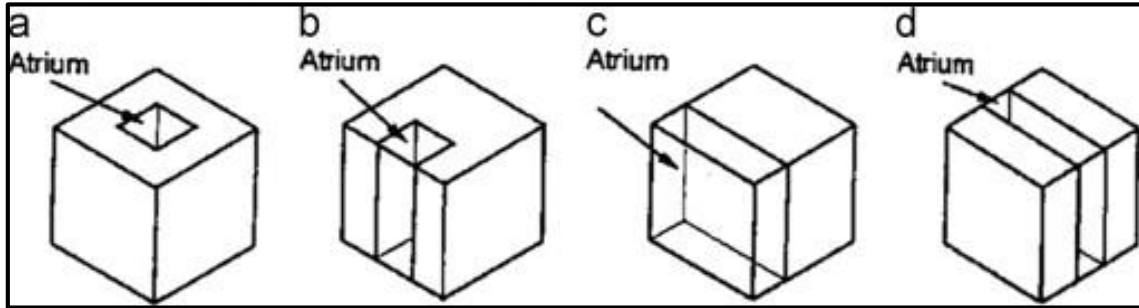
Chàfer, 2020; Tejero-González, Andrés-Chicote, García-Ibáñez, Velasco-Gómez ve Rey-Martínez, 2016). Rüzgâr bacası, güneş bacası (Resim 2.4) ve binalardaki hava koridorları olarak tanımlanabilir atriumlar (Şekil 2.6) da doğal havalandırma ile birlikte kullanılan yapılardandır. Atriumların geometrisi (Şekil 2.7), sayısı ve konumu binada oluşturulacak hava akımlarının etkinliği bakımından önem arz etmektedir (Cabeza ve Chàfer, 2020; Moosavi, Mahyuddin, Ab Ghafar ve Azzam Ismail, 2014). Salcido ve arkadaşlarının ofis binalarında incelediği Karışık-Mod Havalandırma (Mixed-Mode Ventilation - MMV) sistemleri ise hem doğal havalandırma hem mekanik sistemleri birleştirerek günün farklı zamanlarında veya farklı mevsimlerde termal konfor ihtiyacına cevap vermektedir. Bu şekildeki hibrit sistemler ile farklı yön ve hızdaki rüzgâr için optimize edilmiş gölgeleme, kaplama, yalıtım ve cephe tasarımlarıyla doğal havalandırmadan maksimum verim elde edilebilirken mekanik sistemler için gerekli enerji tüketimini de minimize edilmektedir (Salcido, Raheem ve Issa, 2016).



Resim 2.4. Solar baca. Üst: Cepheye entegre solar baca; alt: Çatıya entegre solar baca (Vargas-López, Xamán, Hernández-Pérez, Arce, Zavala-Guillén ve diğerleri, 2019)



Şekil 2.6. Atriyum yoluyla doğal havalandırmayı temsil eden akış diyagramı (Moosavi, Mahyuddin, Ab Ghafar ve Azzam Ismail, 2014)

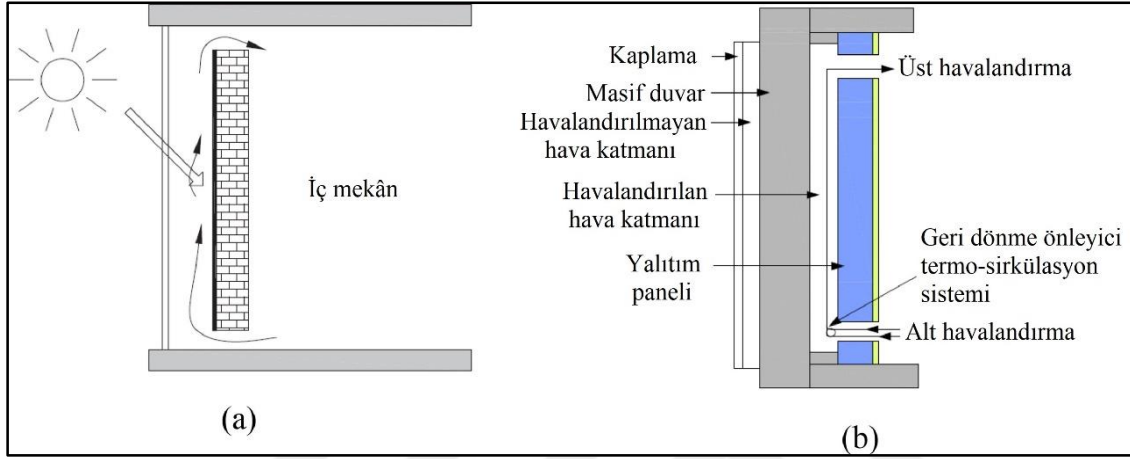


Şekil 2.7. Dört farklı atriyumun formu (a) Merkezi, (b) yarı kapalı, (c) bağlı, (d) doğrusal (Moosavi, Mahyuddin, Ab Ghafar ve Azzam Ismail, 2014)

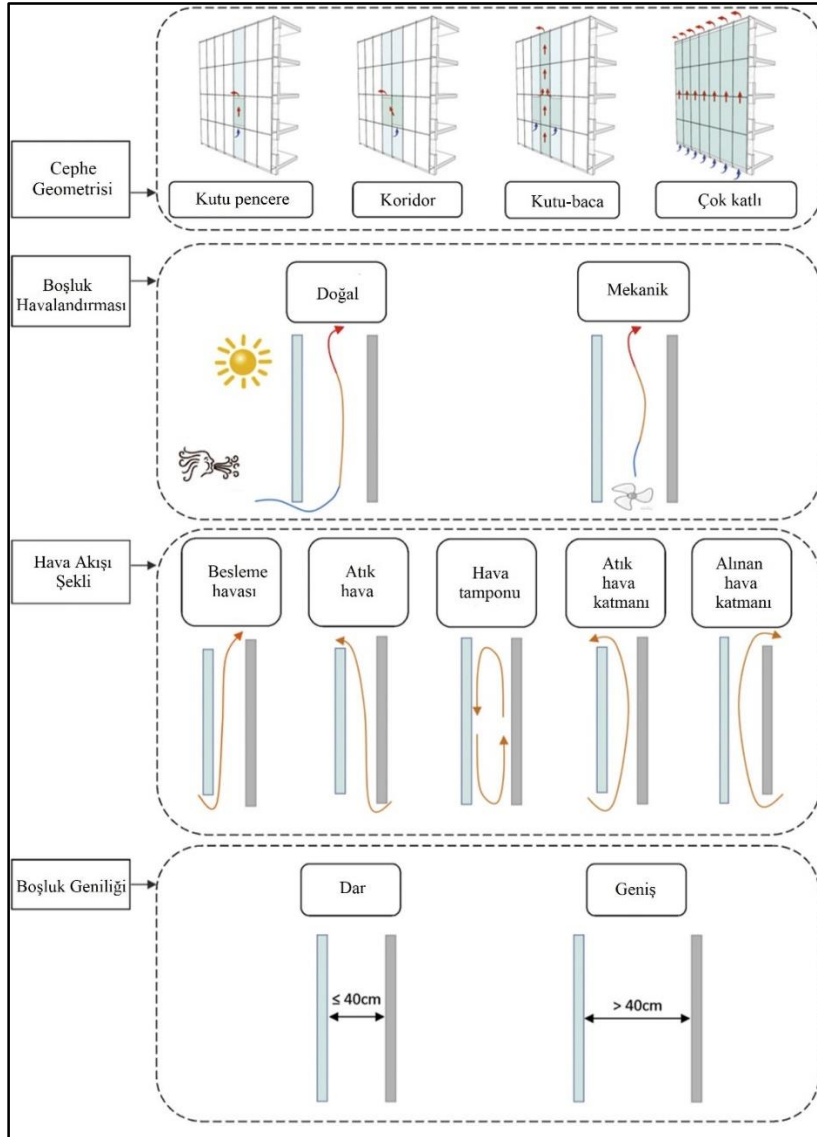
Çift katmanlı duvarlar (Double skin façades-DSFs)

DSF'ler birbirine paralel iki duvar arasındaki boşluktan akan hava akışı prensibine dayanan duvar modeline (Şekil 2.8) verilen genel bir grup olup yapı, geometri, boşluktaki havalandırma mekanizması ve hava akış şemalarına göre çeşitlenmektedir (Şekil 2.9). Özelleşmiş hali Trombe duvarlar (trombe walls) olarak literatürde yer alan bu duvar modeli, solar ön ısıtma, enerji tasarrufu, ses koruması, rüzgâr ve kirlетici maddelerden koruma, estetik kalite, gece soğutması ve fotovoltaik hücreler (Photovoltaik cell - PV cell) ile enerji birikimi için alan sağlayan bir tampon bölge sağlamaktadır (Cabeza ve Chàfer, 2020; Catto Lucchino, Goia, Lobaccaro ve Chaudhary, 2019). Solar ısıyı biriktiren Trombe duvarı, koyu renkte ve yüksek yoğunluklu dış duvar ile bu duvarın 10 cm önündeki saydam bir duvarın birleşiminden oluşmaktadır. Saydam duvar güneş ışınlarını geçirirken arkasındaki duvar ısıyı yüklenir. Kışın ısınmak amacıyla, yazın ise serinlemek amacıyla Trombe duvarlardan yararlanılmaktadır. Kış mevsiminde gelen güneş ışınlarından, duvar tarafından absorbe edilemeyenleri cama geri yansısa da bazıları çıkamaz ve içeride kalır. Bu ışınlar iki duvar

arasındaki boşlukta bulunan havayı ısıtır. Isınan hava duvarın üst kısmında bulunan menfezler ile içeriye aktarılır ve iç ortam ısıtılmış olur. İçeride ısıyı aktardıktan sonra soğuyan ve aşağı çöken hava, aynı şekilde alt menfezlere gelerek tekrar ısınmak üzere hava boşluğuna geçer. Bu döngü duvardaki enerji var olduğu sürece devam etmektedir. Kış gecelerinde gündüz biriktirilen enerji kaybının önlenmesi için ise saydam tabaka yalıtımlı kullanılabilir.



Şekil 2.8. Klasik trombe duvarı (a), kompozit Trombe duvarı (b) (Cabeza ve Chàfer, 2020)



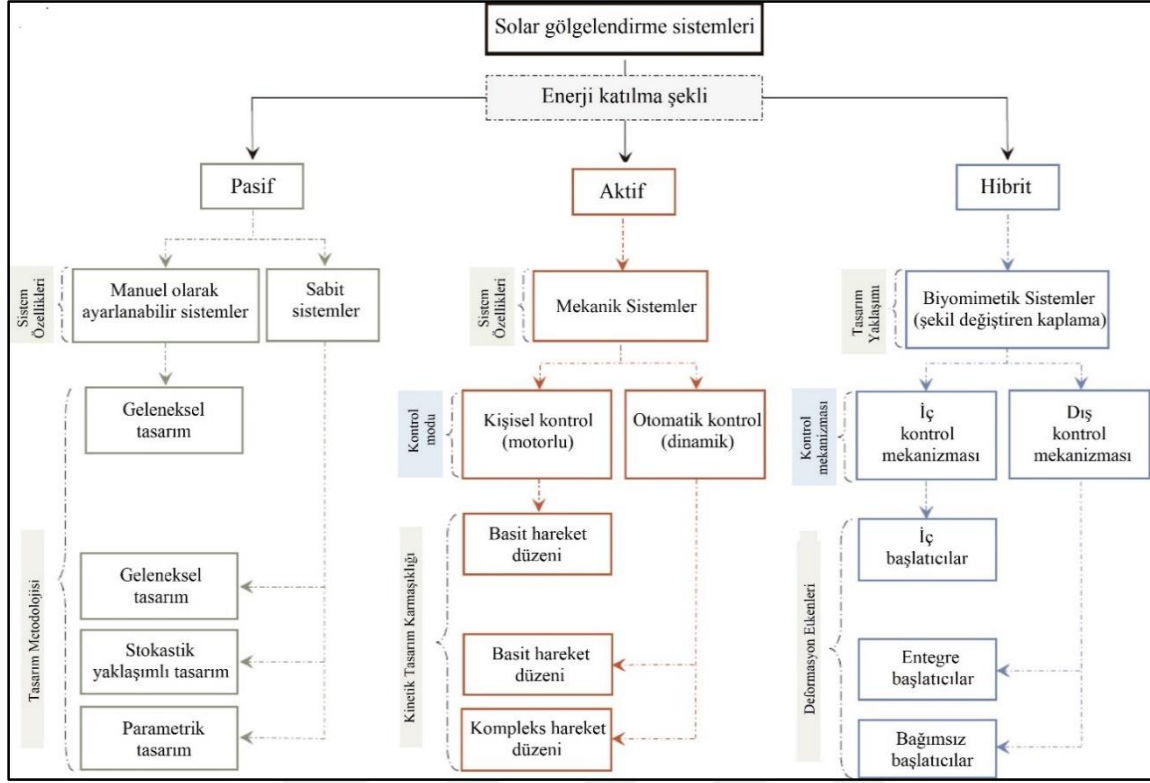
Şekil 2.9. DSF cephelerin sınıflandırılması ve genel yapısı (Pomponi, Piroozfar, Southall, Ashton ve Farr, 2016)

Yaz mevsiminde ise duvarın altına açılan menfezler aracılığı ile dışarıdan serin hava alınır. Serin hava içeride ısınarak yükselir ve duvarın üstündeki menfezlerden dışarı atılır (Tokuç ve Yıldızber, 2009). Trombe duvarlar %16 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır (Pomponi, Piroozfar, Southall, Ashton ve Farr, 2016). Genel olarak DSF yapılardan maksimum verim sağlanabilmesi için yapılandırıldıkları iklime göre tasarımları da çeşitlenmelidir (Ibañez-Puy, Vidaurre-Arbizu, Sacristán-Fernández ve Martín-Gómez, 2017). DSF duvarlar; Trombe-Michel duvarlar, sulu Trombe duvarı, zikzak Trombe duvarı, solar trans-duvarlar, akışkanlaşmış Trombe duvarı ve PV Trombe duvarlar olmak üzere çeşitlenmektedir. Sulu Trombe duvarlar ise, opak yapı kabuklu su duvarı, PCM su duvarı ve diğer pasif yapılarla kombine su duvarları olmak üzere dört çeşittir. Bu seçeneklerin

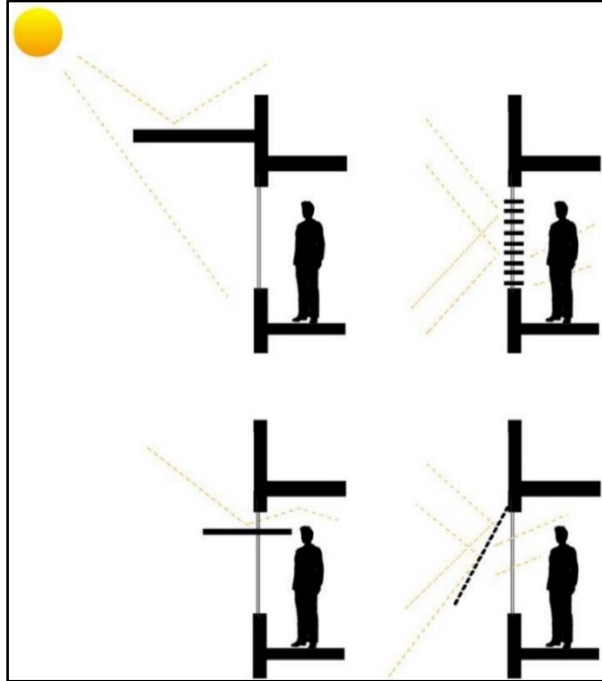
mevsime ve yere göre termal performansları gözetilerek farklı uygulamalara gidilmektedir (Wu ve Lei, 2016).

Gölgelendirme

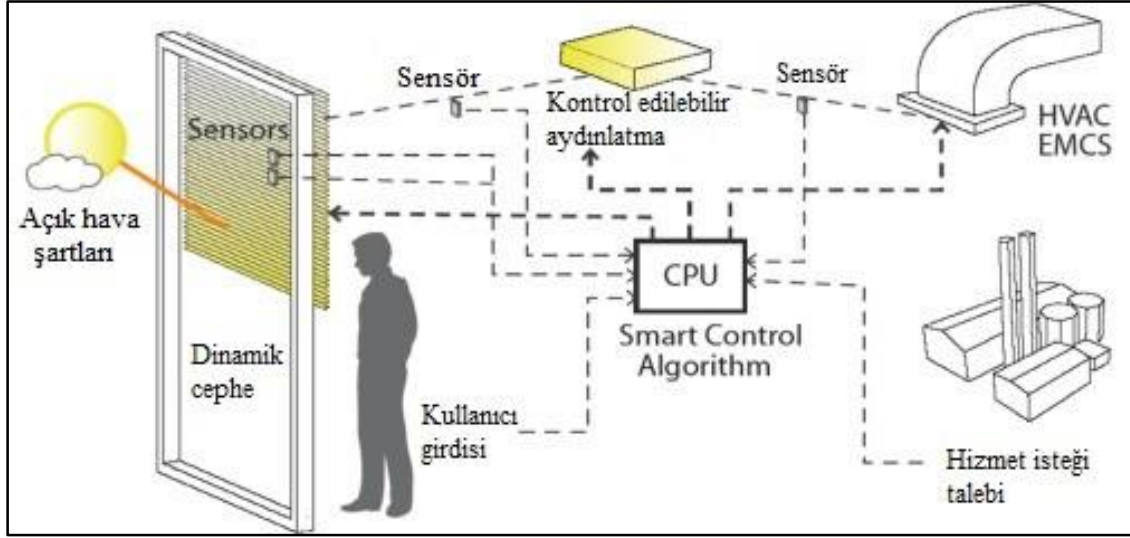
Gölgelendirme sistemleri pasif gölgelendirme, aktif gölgelendirme ve biyomimetik yaklaşım ile entegre edilmiş hibrit sistemler (Şekil 2.10) olmak üzere üç çeşittir (Al-Masrani, Al-Obaidi, Zalin ve Aida Isma, 2018). Pasif gölgelendirme sistemleri güneş ışınlarının binaya özel olarak yönlendirilmesi ile binanın ısı yüklenimini ve serinleme ihtiyacını azaltırken, aynı zamanda yapı içinde doğal aydınlatmayı da sağlamaktadır (Şekil 2.11) (Bhamare, Rathod ve Banerjee, 2019; Cabeza ve Chàfer, 2020). Aktif gölgelendirme sistemleri ise güneş ışınlarını seçerek ve optimize ederek doğal aydınlatmayı ve ısınmayı sağlamaktadır (Şekil 2.12) (Konstantoglou ve Tsangrassoulis, 2016; Oropeza-Perez ve Østergaard, 2018). Aktif gölgelendirme sistemleri akıllı cam, kinetik gölgelendirme ve yenilenebilir enerjiyle entegre edilmiş gölgelendirme olmak üzere üç çeşittir. Kinetik gölgelendirme sistemleri katlanabilir ve döner gölgelendirme sistemleri olmak üzere iki çeşittir. Bunlardan katlanabilir sistemler, akıllı kumanda ve sensörler gerektirdiğinden maliyetinden dolayı kullanımı sınırlandırmaktadır. Döner gölgelendirme sistemleri yatırım maliyeti, malzeme ve kaynak ulaşılabilirliği bakımından katlanabilir sistemlere göre daha tercih edilir durumdadır. Yenilenebilir enerji kullanan PV sistemler ise gölgelendirme sağlarken aynı zamanda enerji üretimi de sağladığından avantajlı ve tercih edilebilir sistemlerdendir (Al Dakheel ve Tabet Aoul, 2017). Aktif gölgelendirme sistemleri, binada soğutma için gerekli enerjiyi %12-%50 arasında azaltmaktadır (Al-Masrani, Al-Obaidi, Zalin ve Aida Isma, 2018).



Şekil 2.10. Gölgeleme sistemlerinin sınıflandırılması (Al-Masrani, Al-Obaidi, Zalin ve Aida Isma, 2018)



Şekil 2.11. Pasif gölgelendirme sistemi türleri. Üstte: çıkıntı ve panjurlarda, altta: pervaz ve ayarlanabilir panjurlarda (Cabeza ve Chàfer, 2020)

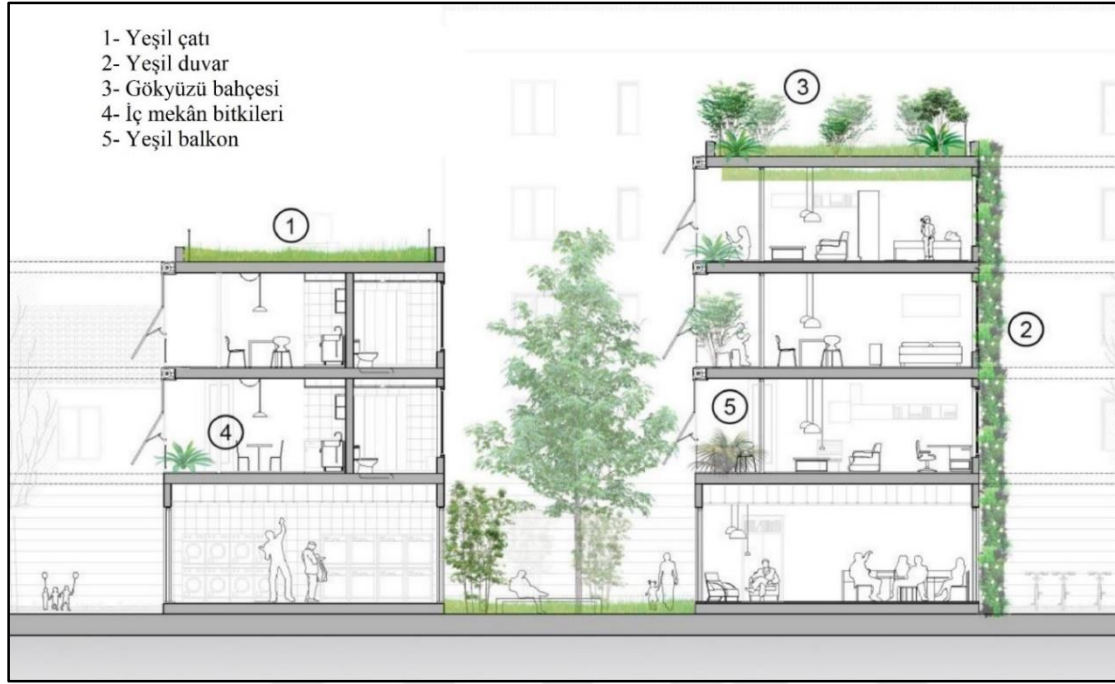


Şekil 2.12. Dinamik cephe ve cam kontrol sistemi diyagramı (Konstantoglou ve Tsangrassoulis, 2016)

Yeşil alan kullanımı

Enerji korunumu için pasif stratejilerden bir diğeri olan yeşil alanların kullanımı ise binanın cephe, çatı ve balkon bölümlerinde tercih edilmektedir (Şekil 2.13). Yeşillik kullanımı, nem ile ani ısı dalgalanmalarını önlerken karbon tutma özelliği ile enerji tüketimini azaltarak iklim değişikliğini de yavaşlatmaktadır. Terleme ile buharlaşma sayesinde havayı nemlendirme ve yaprakların biyofiltrasyon özelliği ile havadaki organik uçucu bileşikleri arındırma sayesinde havayı temizleme özelliği ile iç ortam hava kalitesini yükselten yeşilliklerin kullanımında gözetilmesi gerek bazı faktörler vardır. Bunlar; konumlandırma, yaprak boyutları, nem tutma kapasitesi, bina formuna entegre edilme, yalıtım seviyesi ve farklı mevsimlerdeki performans durumları olup üzerine çalışma yapılması gereken faktörlerdendir. Yeşil alan yerleşiminde yatay konumlandırma sadece çatıda yapıldığından binanın diğer yüzeylerinden yararlanılamamaktadır. Bu durumda verim, çatı ile sınırlı kalmaktadır. Dikey konumlandırmada ise günümüz yüksek binalarında bitki boyunun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bitkilerin ısı tutma kapasitesi kış mevsiminde bir avantajken yaprakların yaptığı gölge, ısıya olan ihtiyacı tekrar ortaya çıkarmaktadır. Özellikle yalıtımı zayıf eski binalarda bitkiler ile oluşturulan ekstra katman yalıtımı geliştirmektedir. Güneş ışınları dik geldiğinden yeşil alan kullanımının maksimum yarar sağladığı mevsim ise yaz mevsimidir. Buharlaşma ile terleme ve gölgeleme sayesinde yazın binanın serinleme ihtiyacını karşılarken, yalıtıma olan katkısı ile de kışın termal enerji yönetimine katkı sağlayan yeşillik kullanımının avantajları dezavantajlarından daha fazla

olduğundan binalarda kullanımı tercih edilebilir durumdadır. (Charoenkit ve Yiemwattana, 2016; Raji, Tenpierik ve van den Dobbelssteen, 2015).

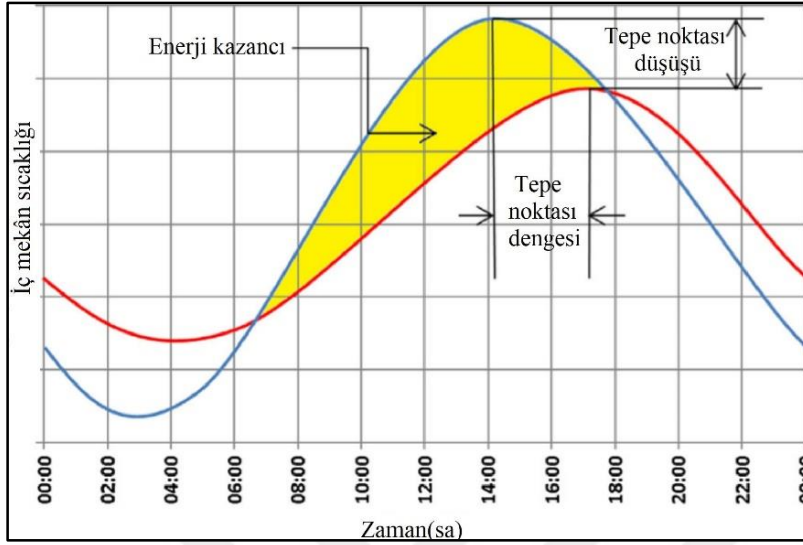


Şekil 2.13. Binalarda çeşitli bitki entegrasyonları (Cabeza ve Chàfer, 2020)

Termal yüklenim

Binalarda ısı yönetimi, ısının emilmesi, depolanması ve salınımı olarak tanımlanabilecek termal yüklenim ile de sağlanabilmektedir. Isının bu şekilde kullanımı, sıkıştırılmış toprak, bitki lifleri, bitki toprakları (plant aggregates) ve ferronikel cüruf ile karıştırılarak mukavemet ve esneklik kazandırılmış beton gibi yüksek yoğunluklu malzemelerle veya PCM ile sağlanabilmektedir (Cabeza ve Chàfer, 2020; Laborel-Préneron, Aubert, Magniont, Tribout ve Bertron, 2016; Saha, Khan ve Sarker, 2018; Shafigh, Asadi ve Mahyuddin, 2018). Yüksek termal yüklenim özelliği olan bina kabukları çevresel sıcaklığı, azaltarak ve geciktirerek binaya iletmektedir. Buna “ısıl eylemsizlik” denilmektedir (Verbeke ve Audenaert, 2018). Termal yüklenim bu özelliği ile pik yüklenim noktasını aşağı çekerek (Şekil 2.14) enerjini bir sonraki gün de kullanımı sağlayarak enerji talebini dengelediğinden enerji korunumunu sağlamaktadır (Olsthoorn, Haghighat, Moreau ve Lacroix, 2017). Yapı kabuğuna PCM eklenmesi, yapıda ani ısı dalgalanmalarını önlediğinden PCM kullanımını bir avantaja dönüştürürken (Cabeza ve Chàfer, 2020) PCM’nin ısınma ve soğuma için istenen sıcaklık değerini sağlamaya çalışması gecikmeyi de beraberinde getirmekte ve zaman gerektirmektedir. Binanın aralıklı kullanıldığı durumlarda da bu durum dezavantaj olarak

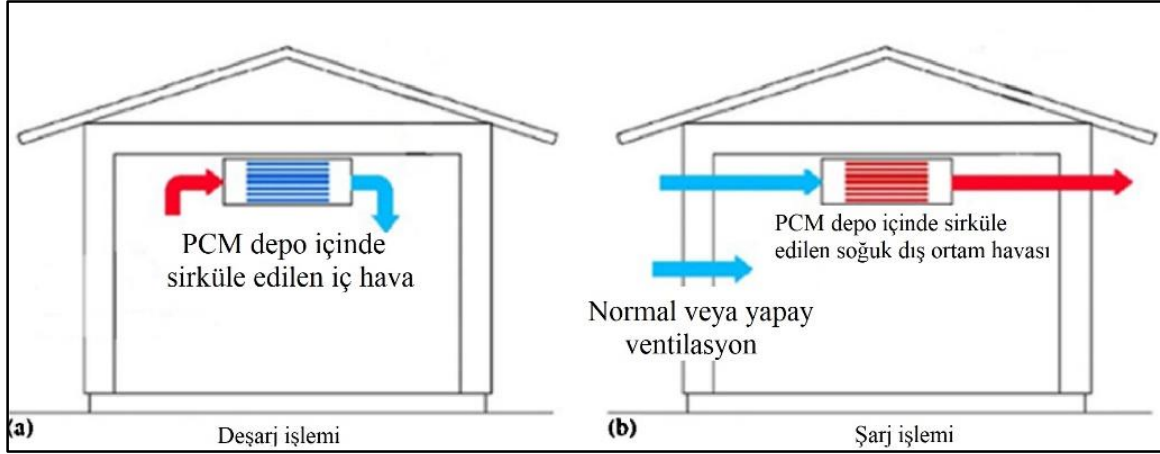
karşımıza çıkmaktadır. Faz değişimi sırasında yüksek hacim gerektirmesi de PCM malzemelerin bir diğer dezavantajıdır (Jelle, 2011).



Şekil 2.14. PCM'nin yapıda kullanımıyla potansiyel pik yüklenim noktasının aşağıya çekilmesi ve enerji kazancı (Akeiber ve diğerleri, 2016)

Serbest soğutma

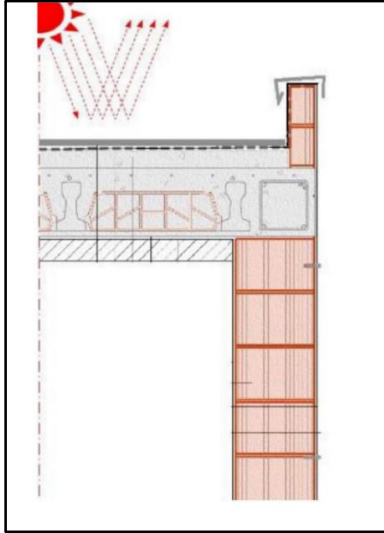
Doğal havalandırmanın soğutma amacıyla kullanıldığı serbest soğutma ise dışarıdaki havayı ventilasyon ile ısı giderici olarak kullanan bir stratejidir. İç ortam sıcaklığı, dış ortam hava sıcaklığından daha yüksek olduğunda kullanılmaktadır. Aynı zamanda dış ortam sıcaklığı da konforlu sıcaklık aralığında olmalıdır. Bu strateji PCM'nin de yapı kabuğuna entegre edilmesi ile daha verimli bir hale getirilebilir (Şekil 2.15). Yapı kabuğu gece elde ettiği serinliği gündüz saatlerinde kullanabilir. Bu yöntemin uygulanması, seçilen PCM malzemesine, PCM sıcaklığına, PCM stratejisine ve iklim koşullarına göre değişmektedir (Cabeza ve Chàfer, 2020).



Şekil 2.15. PCM ile serbest soğutma işlemi (Cabeza ve Chàfer, 2020)

Çatı kaplamaları

Pasif stratejilerden serinletme amaçlı yansıtıcı çatı kaplamaları, yeşil çatılar ve çatı havuzları gibi binanın ısınmasını önlemekte kullanılmaktadır (Şekil 2.16). Bunun için, bir malzemenin beyazlık derecesi anlamına gelen ve yüzeye gelen ışığı soğurmadan yansıtabilme özelliğine sahip albedo malzemeler kullanılmaktadır. Kaplama, membran veya fayans formunda örtülen çatılar, yaz mevsiminde binanın aşırı ısınımını önleyerek iç mekânda termal konforu sağlarken enerji ihtiyacını da %57'ye kadar azaltabilmektedir (Cabeza ve Chàfer, 2020).

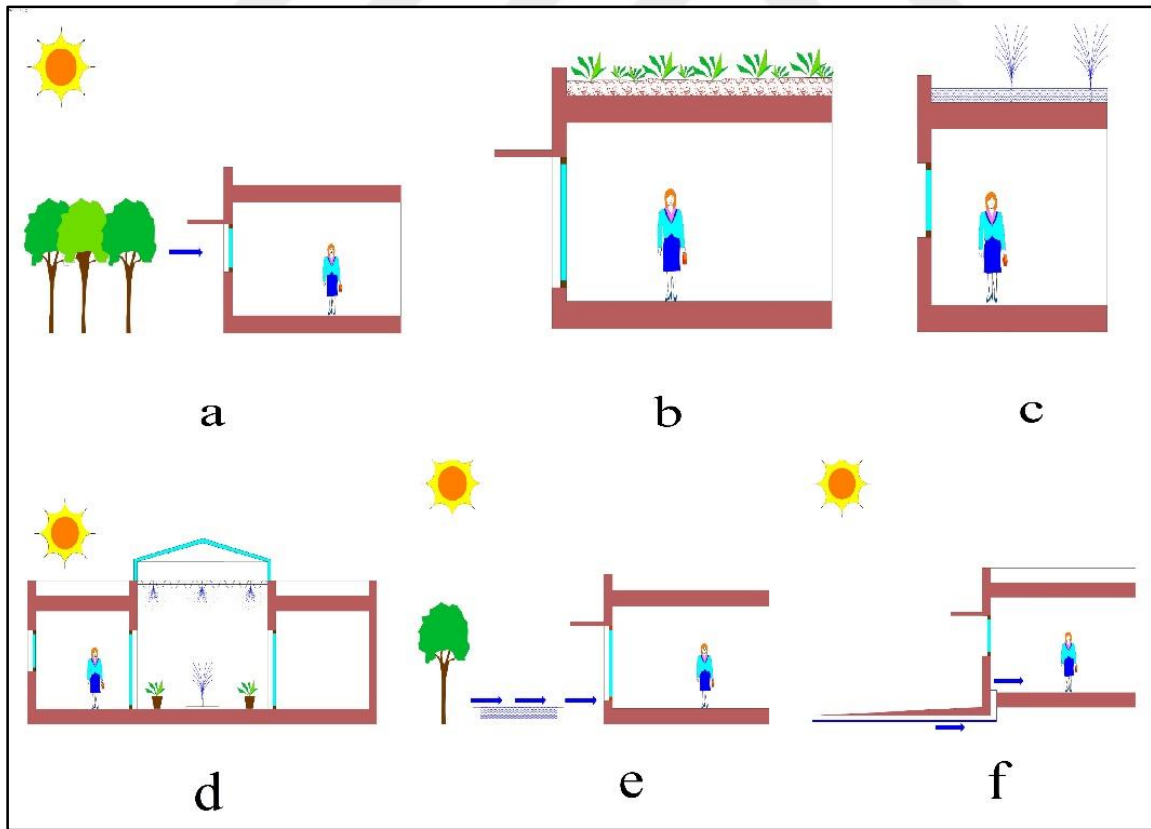


Şekil 2.16. Pasif çatı teknolojilerinden çatı kaplama (Cabeza ve Chàfer, 2020)

Buharlaşmalı soğutma

Suyun bir alanda buharlaştırılması prensibine dayanan buharlaşmalı soğutma, nem aracılığı ile ısı yükünün dışarıdaki havaya aktarımıyla serinleme sağlanmasıdır. Bu yöntem, yaz

mevsiminde ve kurak iklim koşullarında pasif serinletme stratejisi olarak kullanılmaktadır. Buharlaştırma doğrudan su aracılığı ile sağlanabildiği gibi bitkilerdeki nem aracılığı ile de sağlanabilmektedir. Bitkilendirme yapının dışında (Şekil 2.17 (a)) veya çatısında (Şekil 2.17 (b)) olabilmektedir. Spreyle su buharlaştırma ise yapının çatısında (Şekil 2.17 (c)) veya iç mekânda (Şekil 2.17 (d)) gerçekleştirilmektedir. Yapı dışında bir su birikintisinden suyun buharlaşmasıyla serinleyen havanın rüzgâr ile iç mekâna iletilmesi (Şekil 2.17 (e)) ve içinden aynı zamanda hava geçişine de izin verebilmesi için 1/3'üne kadar su ile dolu boruların yapı dışına yerleştirilmesi (Şekil 2.17 (f)) ile de buharlaşmalı soğutma sağlanabilmektedir (Manzano-Agugliaro, Montoya, Sabio-Ortega ve García-Cruz, 2015). Yüksek verimlilik, düşük maliyet, bakım kolaylığı ve geri ödeme süresinin cazip olmasından dolayı geniş kullanım alanı sağlamaktadır. Buharlaşmalı soğutmanın dezavantajı, serinletilmek istenen havanın ulaşabileceği minimum sıcaklığın, dışarıdaki havanın nem miktarına bağlı olmasıdır. Dışarıdaki hava, maksimum nem doygunluğuna ulaştığında nem aracılığı ile ısı alışverişi durmaktadır. Bu problem de kurutucu madde içeren ve buharlaşmalı soğutmanın dolaylı yolla yapıldığı sistemler ile çözülebilmektedir (Cabeza ve Chàfer, 2020).



Şekil 2.17. Buharlaşmalı soğutma teknikleri: (a) dış bitkilendirme, (b) çatı bitkilendirmesi, (c) çatı spreyleme, (d) iç mekân spreyleme, (e) su birikintisi, (f) su boruları ile soğutma (Manzano-Agugliaro, Montoya, Sabio-Ortega ve García-Cruz, 2015)

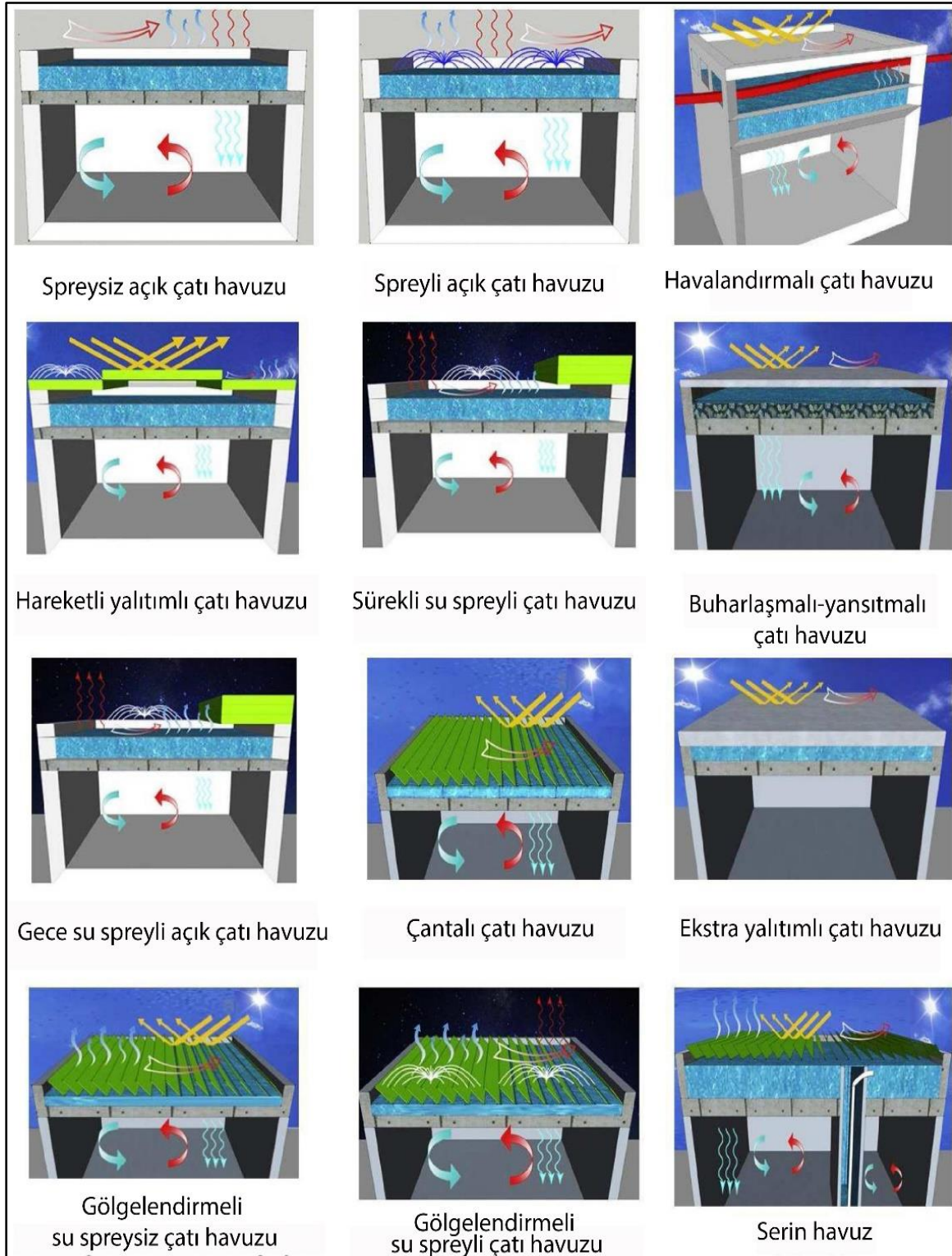
Çatı havuzları

Bir diğer pasif strateji olan çatı havuzlarında ise yazın dolaylı buharlaşmalı soğutma ile ışınlama soğutma yöntemi kombine edilerek serinleme sağlanırken kışın suyun ısı kapasitesi kullanılarak ısınma sağlanmaktadır. Çatıda solar ışınlama maruz kalan su, ısıyı yüklenir ve kondüksiyon ile çatının altında yer alan tavana iletir. Tavana iletilen ısı ise ışınlım ve biraz da konveksiyon ile iç ortamı ısıtır. Soğutma havuzları şu şekilde çeşitlenmektedir (Şekil 2.18, Şekil 2.19):

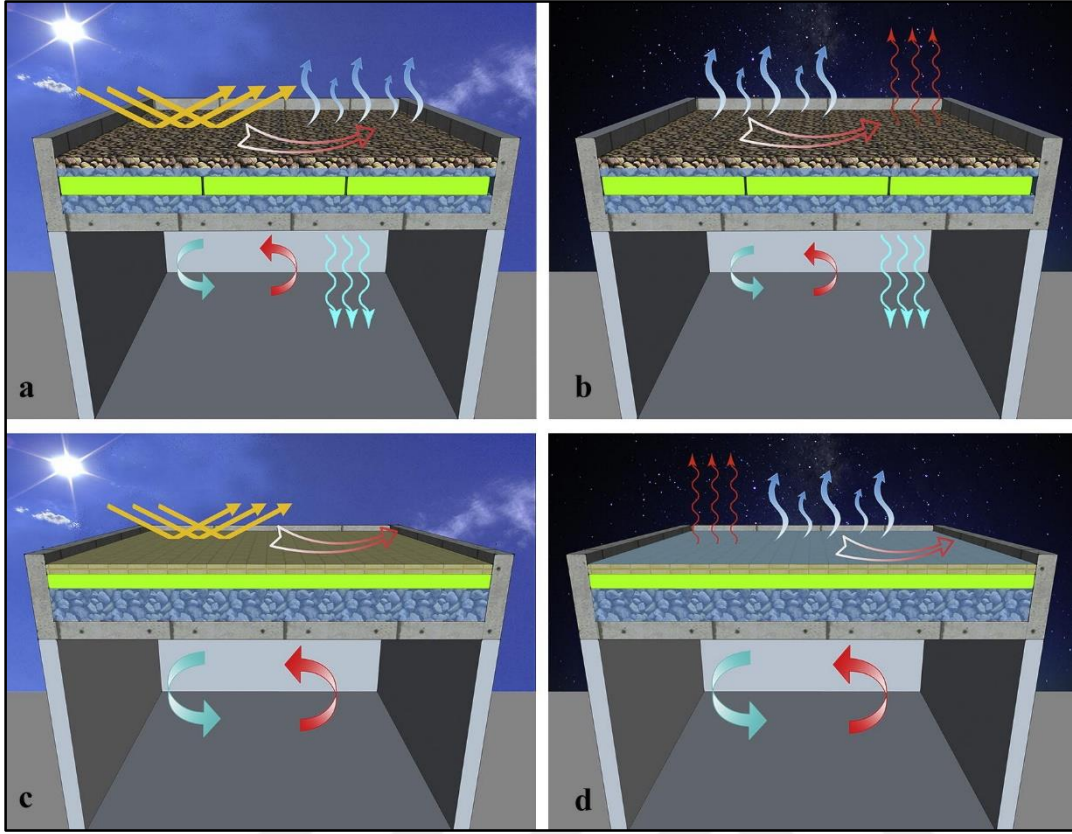
- Açık çatı havuzları
- Hareketli yalıtımlı çatı havuzları
- Yüzer yalıtımlı çatı havuzları
- Yürünebilir çatı havuzları
- Havalandırmalı çatı havuzları
- Çantalı çatı havuzları
- Gölge çatı havuzları
- Havalandırmalı çatı havuzları
- Kapalı çatı havuzları

Isıtma çatı havuzları ise şu şekilde çeşitlenmektedir:

- Skytherm
- Çatıya entegre sulu solar kolektör
- Gündüz saatlerinde su püskürten yürünebilir havuzlar
- Su püskürtmesiz açık çatı havuzları



Şekil 2.18. Çatı havuzu çeşitleri (Bhamare, Rathod ve Banerjee, 2019)



Şekil 2.19. Havuz içine gömülü izolasyonlu yürünebilir çatı havuzu (a ve b); gece su sirkülasyonlu yürünebilir çatı havuzu (c ve d) (Sharifi ve Yamagata, 2015)

Kurak ve ılıman iklimlerde verimli olması, yağmur suyunun depolaması ve yönetiminde etkin olması, aynı zamanda biriktirilen suyun yangın durumlarında da kullanılabilir olması ve diğer pasif stratejilerde olanın tersine performansının bina ile uyumundan etkilenmemesi çatı havuzlarının avantajlarındandır. Sadece çatı üstünde konumlandırılabilmesi ve dolayısıyla çatının kullanımına engel olması, iyi bakım sağlanmazsa su kaçağına veya kirliliğe sebep olması, çok katlı binalarda verimsiz olması, en verimli olduğu kurak iklimde aynı zamanda su temini gibi bir sorunun da olması ve binanın enerji yükünü uzaklaştırmak için tek başına yetersiz olması çatı havuzlarının önemli dezavantajlarındandır (Cabeza ve Châfer, 2020; Sharifi ve Yamagata, 2015).

2.2.2. Pencereleler

Yapının içindeyken dışarıyı görmemizi sağlayan pencereler, pasif solar ısınımı ve hava ventilasyonunu sağlamaktadır. Diğer yandan, geleneksel pencerelerdeki termal iletimin zayıf oluşu, yazın aşırı ısınımla, kışın ise ısı kaybıyla enerji talebinin artmasına sebep olmaktadır. Binalardaki ısıнын yaklaşık %60'ı pencereler ile kaybedilmektedir. Bu nedenle, güneş ışınlarının yansıtılması, emilmesi ve taşınımı ile iklime uyumlanabilen camlara ihtiyaç

duyulmaktadır (Şekil 2.20). Yeni pencere teknolojileri geliştirilmiş camları kullanmaktadır. Bu cam çeşitleri şu şekildedir:

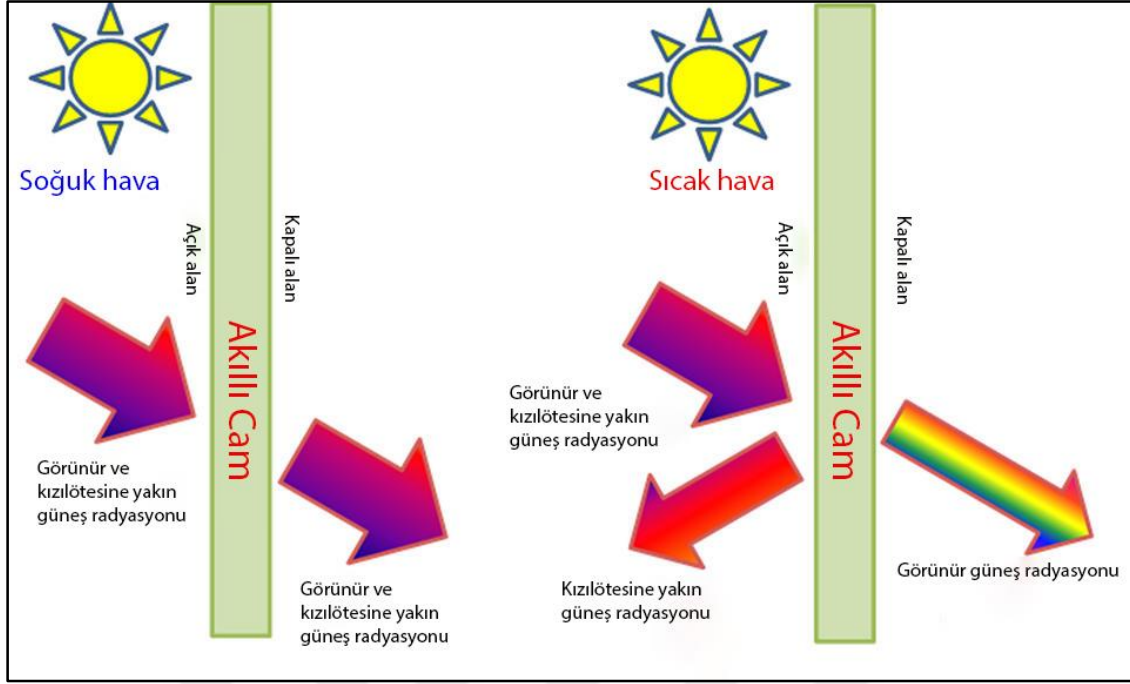
- Çok katmanlı cam
- Süspanse filmler
- Vakumlu cam
- Düşük emisyonlu kaplamalar
- Akıllı cam
- PV cam
- Aerojel cam
- PCM cam
- Gaz dolgulu cam
- Kendi kendini temizleyen cam

Diğer yenilikçi pencere çözümleri ise şu şekildedir:

- Güneş emici pencereler
- Ters çevrilebilir pencere
- Değiştirilebilir elektrokromik pencere
- Şeffaf yalıtım malzemeleri dolgulu pencere
- Havalandırmalı çift camlı pencere

Güneş iletim kontrollü pencereler ise şu şekildedir:

- Hafif renklendirilmiş cam
- Yansıtıcı cam
- Yansıma önleyici kaplamalı cam



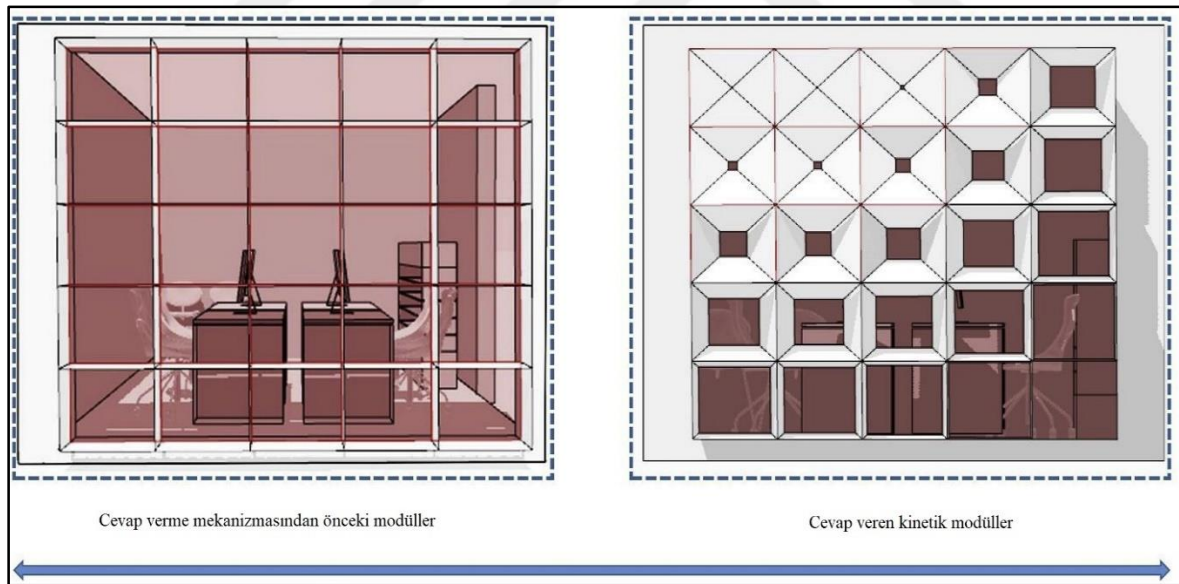
Şekil 2.20. Soğuk ve sıcak hava için ideal akıllı cam (National Institute of Standards and Technology (NIST), 2016)

Pencerelerde kullanılan camlar statik ve dinamik olmak üzere iki çeşittir. Statik camlar sabit termal iletkenlik değeri (U-value), görünür geçirgenlik, solar ısı kazanımı kat sayısına sahiptir. Dinamik camlar ise gazkromik, fotokromik ve elektrokromik gibi renkle ilgili özellikleri ve termotropik (ısı yöneltimli) sıvı kristaller ile optik özellikleri değişebilir camlardır.

İki cam plaka arasında vakumlu alan oluşturma prensibine dayanan vakumlu cam, konveksiyon ve kondüksiyon ile ısı iletimini minimuma indirirken görünür geçirgenliği de sağladığından yüksek performanslı bir çözümdür (Cabeza ve Chàfer, 2020).

Sağlık ve enerji verimliliği açısından pozitif etkilere sahip olan doğal ışığın binalarda istenmeyen ısı değişimlerini de beraberinde getirmesi, termal konforun sağlanması gerekliliğini de ortaya çıkarmıştır. Sıfır enerjili bina konseptinde bu ihtiyaç, pasif stratejiler ile sağlanmaktadır. Pasif stratejilerin çalışması solar kontrol ve doğal havalandırma prensibine dayanmaktadır (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019; Michael ve Heracleous, 2017; Oropeza-Perez, Petzold-Rodriguez ve Bonilla-Lopez, 2017; Tzempelikos, 2017). Pasif stratejiler, hassas ve doğru solar tasarım ile yapay ısınma ve serinlemeye olan ihtiyacı azaltmaktadır (Grynning, Time ve Matusiak, 2014; Kim, Lim, Lim, Schaefer ve Kim, 2012; R. Kumar, Garg ve Kaushik, 2005). Yenilenebilir enerji

kaynaklarını pasif stratejilerle kullanan yapı kabukları özelliklerinden cephe formu ve yüzeyi, geometri, yönlendirme, cam-duvar oranı, cam özellikleri, gölgelendirme, kaplama malzemesi, renk, yansıtıcılık ve yayılım termal konforu etkilemektedir (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019; Korsavi, Zomorodian ve Tahsildoost, 2016; Montazeri, Blocken, Derome, Carmeliet ve Hensen, 2015; Nasrollahi ve Shokri, 2016; Tzempelikos, 2017). Termal konforun sağlanabilmesi için yapı kabuğunun aynı zamanda değişen iklim koşullarına eş zamanlı olarak uyumlanması da gerekmektedir. Mevcut enerji kaynaklarının maksimum verimlilikte kullanılabilmesi ve yapı kabuğunun bu uyumlanmayı gerçekleştirebilmesi, sıfır enerjili bina konseptindeki en önemli faktördür. Bunun için doğanın değişen koşullarına cevap veren aktif teknolojilerin bina yapısına dâhil olması gerekmektedir. Aktif teknolojiler, binadaki kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılamak için yeniden yapılandırılabilir geometri, çok işlevli mekanizma, dinamik ve duyarlı kabuk yapısını kapsamaktadır (Bohnenberger ve diğerleri, 2012; Khoo, Burry ve Burry, 2011; Pesenti, Masera, Fiorito ve Sauchelli, 2015). Aktif teknolojilerden sensörler ve hareket başlatıcılar gibi sistemler, pasif stratejilerin verimini artırmaktadır (Şekil 2.21).

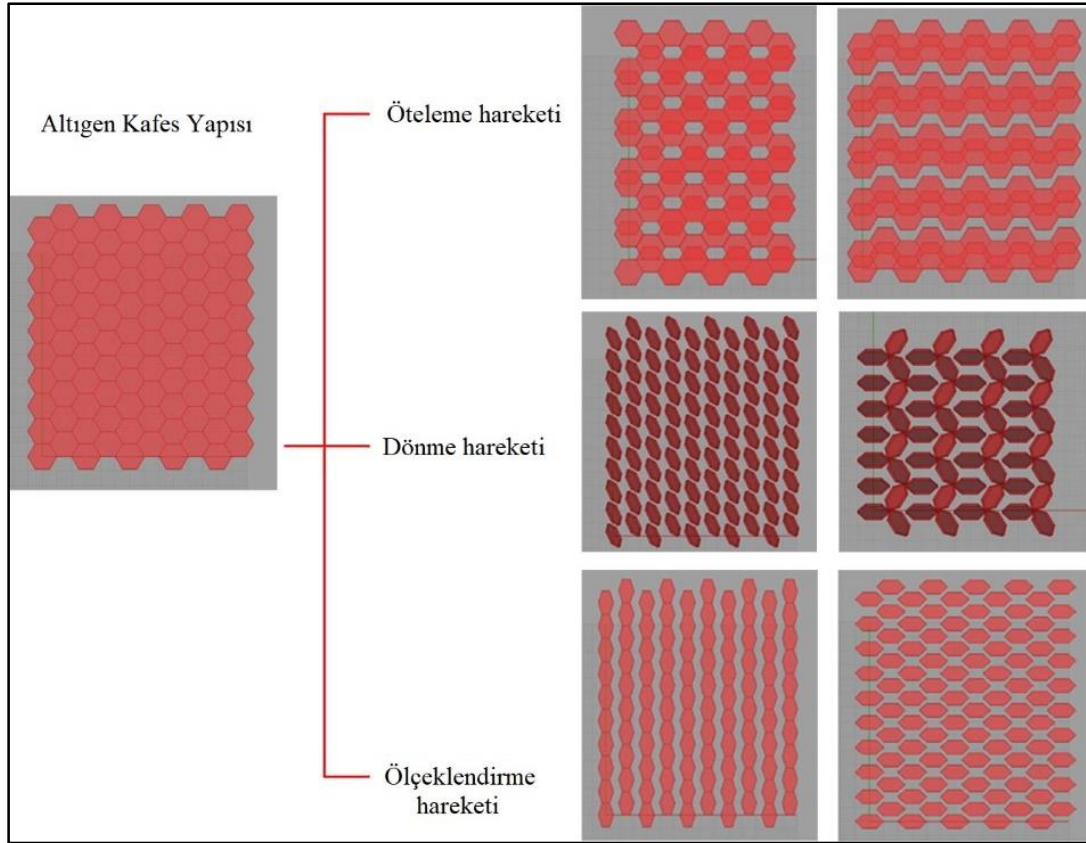


Şekil 2.21. Yapı içinde yaşayan kişinin hareketlerini baz alarak çevresel değişikliklere cevap veren cephe tasarımı (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019)

2.3. Kinetik Yapılar

Kinetik konsepti tasarım, mekanizma, değerlendirme, malzeme ve sürdürülebilirlik kavramlarıyla doğrudan ilişkilidir. Tasarım aşaması, öteleme, döndürme ve ölçeklendirme

hareketleri (Şekil 2.22) ile yapının statik durumdan dinamik hâle geçerek kinetik yapıya dönüşmesinde rol oynamaktadır (Badarnah, 2017). Mekanizma, hareketin sağlanması için gerekli devinimi sağlamaktadır. Bu devinim, geometri veya malzeme özellikleri gibi iç bileşenlerle sağlanabileceği gibi sensörler veya hareket başlatıcılar gibi dış bileşenlerle de sağlanabilmektedir. Bu bağlamda, morfoloji ve kontrol mekanizması birlikte çalışmaktadır.

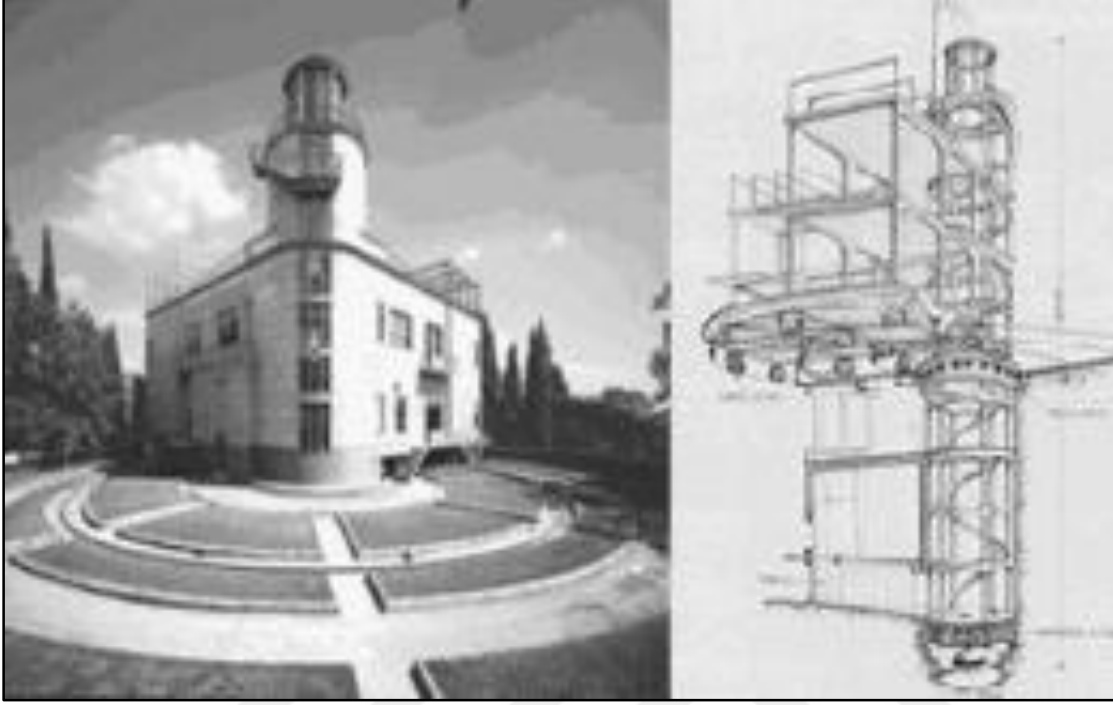


Şekil 2.22. Yapıları dinamik hale getiren hareket çeşitleri (Mahmoud ve Elghazi, 2016)

Değerlendirme, kinetik yapının iç mekân sıcaklığını ölçümlemesini; malzeme ise yapı ve çalışma biçimini kapsamaktadır. Bu noktada uygun malzeme seçimi, güvenlik ve güvenilirlik, imalat gibi faktörler önemlidir. Sürdürebilme ise yaşam ömrü, çalışma, bakım ve maliyet gibi etkenleri kapsamaktadır. Tasarım konsepti, mekanizma ve değerlendirme, kinetik yapıyı meydana getiren ana bileşenlerdir (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019).

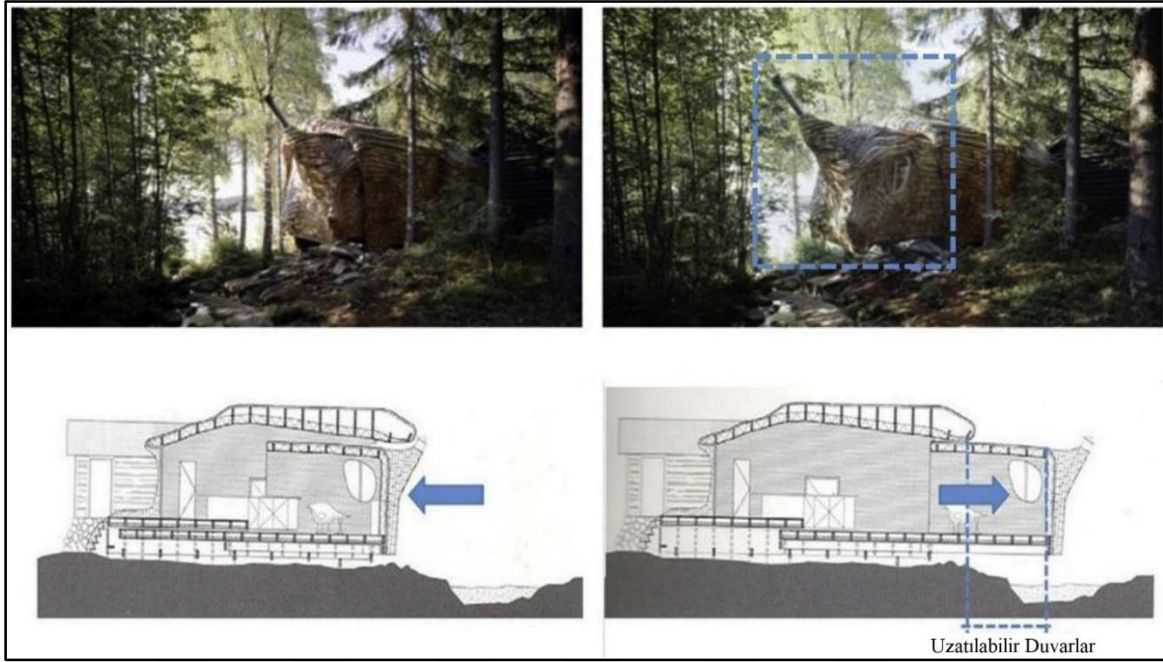
Değişen çevresel koşulları tolere ederken istikrarlı iç koşulları sürdürme yeteneğine sahip olan kinetik yapıların tanınırlığı 1930larda Angelo Invernizzi'nin tam otomatik Girasole villasıyla (Resim 2.5) artmıştır. Ay çiçeğinden esinlenerek tasarlanmış yapı güneşe yönelimini mekanik sistemle sağlamaktadır. Böylece, dönme hareketiyle güneş ışınlarına

adaptasyon maksimum verimle sağlanmıştır (Badarnah, 2017; Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019).



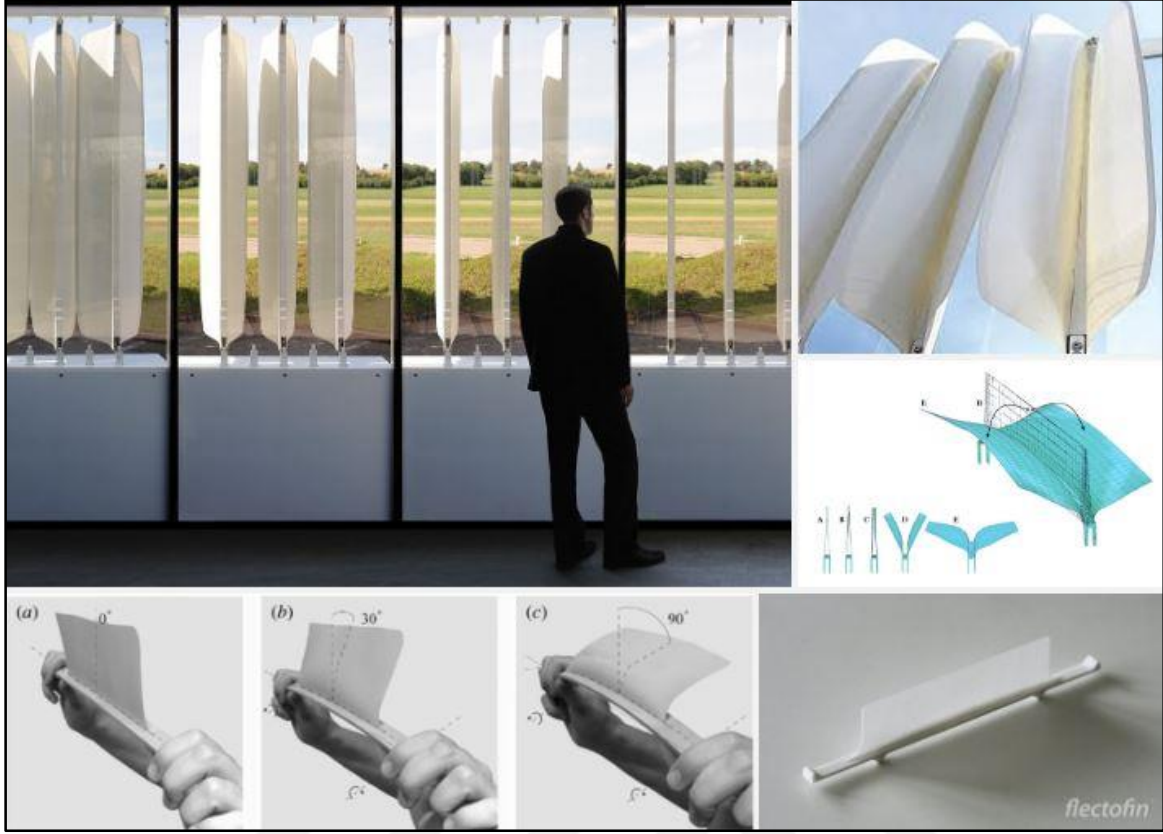
Resim 2.5. Mekanik sistemle dönerek güneşe uyumlanan Girasole villa, Verona, İtalya (Ramzy ve Fayed, 2011)

Kinetik yapı örneklerinden Dragspelhuset (Resim 2.6), İsveç'teki Övre Gla Gölü kıyısında yer alan genişletilebilir bir yapı örneğidir ve kozanın kelebeğe dönüşümünden esinlenerek değişen mevsime, yapıyı kullanan kişi sayısına ve farklı hava koşullarına göre uyumlanabilme özelliğine sahiptir. Ayrıca binanın çift katmanlı oluşu soğuk ve yağışlı havaya karşı daha fazla enerji verimliliği ile ekstra barınma alanı sağlamaktadır (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019).



Resim 2.6. İsveç'teki kozanın kelebeğe dönüşümünden ilham alan Dragspelhuset yapısı. Sol taraf normal biçimi ve sağ taraf uzatmadan sonraki hali (Fouad, 2012)

Stuttgart Üniversitesi Bina Yapıları ve Yapısal Tasarım Enstitüsü'ndeki (The Institute of Building Structures and Structural Design - ITKE) mimarlar, mühendisler ve biyologlar disiplinler arası bir yaklaşımla bir araya gelerek “cennet kuşu” bitkisinin (*Strelitzia reginae*) tozlaşma mekanizmasını incelemiş ve güneş ışınlarını kontrol etmek için Flectofin ismi verilen panjur sistemini tasarlamıştır (Resim 2.7). Cennet kuşu bitkisi tozlaşmayla çoğalması için üzerine konan bir kuşa ihtiyaç duymaktadır. Bitkinin ana gövdesine dik uzanan çiçek, kuşun tüneyebileceği bir çıkıntı oluşturarak kuşu kendisine çekmektedir. Kuş, çiçeğe konduğunda, kuşun ağırlığı alttaki iki yaprağı aşağı iter ve bükülme hareketiyle polenlerin olduğu anterleri (erkek organları) ortaya çıkarır. Kuş, çiçeğin nektarıyla beslenirken kuşun ayağını kaplayan polenler, bir başka cennet kuşu çiçeğine ulaştırılmak üzere kuşa aktarılmış olmaktadır (Resim 2.8). Flectofin, çiçeğin tozlaşması için açılma fonksiyonunu yerine getiren menteşe görevindeki yapıdan esinlenerek tasarlanmıştır. Elastik deformasyon ile çalışma prensibine sahip yapı, malzemenin visko-elastik özelliği ile bir araya gelerek, tersine çevrilebilir hareketi de gerçekleştirebilmektedir. Rijit gövde yumuşak ve esnek bir hâle gelerek 90 dereceye kadar açılabilir (AskNature, 2018; Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019). Flectofin, bitkilerin hareket edemeseler bile ihtiyaç duydukları hareketi oluşturmak için, dışarıdan sağlanan kuvveti cevaplandırabilen form ve malzeme özelliklerini yaprak veya taç yapraklarıyla sağlayabildiklerine bir örnek teşkil etmektedir.

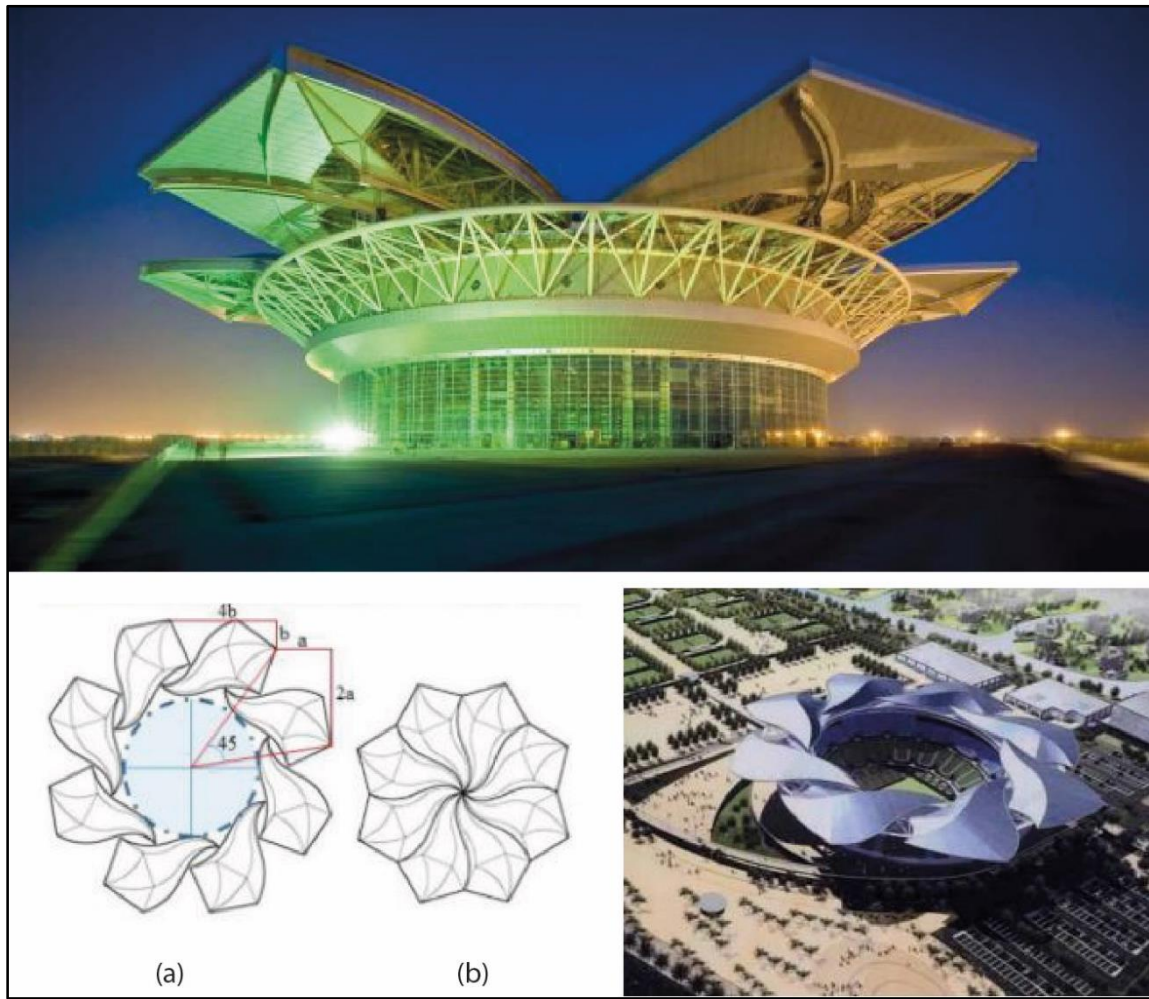


Resim 2.7. Cennet kuşu bitkisinden esinlenerek tasarlanan menteşesiz panjur sistemi Flectofin® (a) Sistemin çalışma prensibini gösteren maket 0 konumunda, (b) Maket 30 derecelik konumda (c) Maket 90 derecelik konumda (AskNature, 2018)



Resim 2.8. Cennet kuşu bitkisi, maskeli dokumacıkuşu tarafından tozlaştırılırken (Schleicher, Lienhard, Poppinga, Speck ve Knippers, 2015)

Çin'in Şangay kentindeki Minhang Bölgesi'nde bulunan dinamik açılır kapanır çatılı Shanghai Qizhang Forest Spor Merkezi bir diğer kinetik yapı örneklerindendir (Resim 2.9). Spor merkezi, Mitsuru Senda Çevre Tasarımı Enstitüsü tarafından manolya çiçeğinin taç yapraklarından esinlenerek tasarlanmıştır. Dinamik çatısı sayesinde çeşitli hava koşullarına uyumlanan ve otomatik olarak açılıp kapanabilen çatı, hem iç ortamın güneş ışığıyla etkileşimini kontrol etmekte hem de iç mekân ve dış mekân spor etkinlikleri için alan sağlamaktadır. Manolya çiçeğinin kinetik yapısındaki dönme ve öteleme hareketleri, matematiksel ilişkiler aracılığıyla tasarım sürecinde esin kaynağı olmuştur.



Resim 2.9. Manolya çiçeğindeki dönme ve öteleme hareketlerinden esinlenerek tasarlanan Shanghai'daki spor merkezi (Fouad, 2012)

2.4. Kinetik Yapı Kabukları ve Biyomimetik Yaklaşım

Yapı kabuklarının iki fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlardan ilki binayı dış ortamdan ayırarak iç ortamı korumaktır. İkinci fonksiyonu ise binanın dış ortamdaki iklim dalgalanmalarından minimum düzeyde etkilenmesini sağlamak üzere termoregülatör eleman

olmaktır (Herzog, Krippner ve Lang, 2012). Termoregülasyon, çevresel koşullara uyumlanarak sağlanmaktadır ve bu uyum, sabit iç mekân koşulları sağlamak için değişen dış ortam şartlarını tolere edebilmeyi gerektirmektedir. Çevreye uyumlanmak için güneş ışığının kontrolünü ve hava akışını sağlayan, dönüşebilir ve uyumlanabilir yapıların; akıllı ve çevre şartlarına cevap veren sistemler ve akıllı malzemelerle hiyerarşik bir yapıda bir araya gelerek enerji verimli hareket değişikliklerinin ve dinamik yapılandırmanın sağlanması gerekmektedir.

Termoregülasyon ısı kazanımı, ısıнын korunumu, ısıнын yayılımı, ısı kazanımını engellemeyi, doğal havalandırmayı ve hava akışını kapsamaktadır (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019). Değişim, kontrol etme ve cevap verme şeklinde üç ana bileşenden oluşan termoregülasyonun gerçekleştirilebilmesi ise dinamik kontrol ile sağlanabilmektedir (Zaera-polo, Truby ve Koolhaas, 2014). Dinamik kontrol hareketin yönetilmesi ve ihtiyaca göre uyarlanmasıyla sağlanabilmektedir. Literatürde “mikro iklimin modifiye edilmesi” olarak tanımlanan bu durum, “kinetik yapı kabuğu” kavramını ortaya çıkarmıştır. Mikro iklimin ana bileşenleri olan güneş ışığı ve rüzgârın yönetilebilmesi için üç boyutlu şekil değişikliğini gerçekleştiren geometri ve yönlendirme, kinetik yapılardaki en önemli unsurlardır (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019). Form, renk, yönlendirme, malzeme değişikliği ve optik özelliklerdeki değişikliklerin sağlanabilmesi aktif teknolojileri taklit ederek maksimum verimliliği sağlamada kinetik yapıların fonksiyonları ile öne çıkmalarını sağlayan özelliklerdir (Chow, Chan, Fong ve Lin, 2005; Chow, Fong, Chan ve Lin, 2006; O’Hegarty, Kinnane ve McCormack, 2016). Çevreye uyumlanmak için sürekli hareket değişikliğinin sağlanabilmesinde malzeme, hareketin ayrılmaz parçasıdır (Lurie-Luke, 2014).

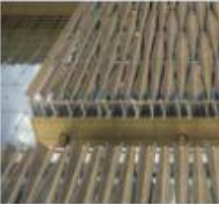
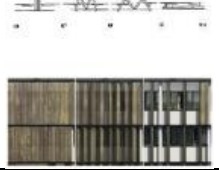
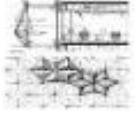
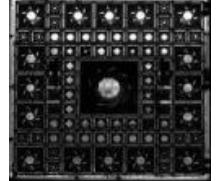
Doğadaki yapı ve sistemlerin mevcut enerji kaynaklarını değişen koşullarda da tam verimle kullanmasından yola çıkarak çözüm sunan biyomimetik sistemler, pasif stratejiler ile aktif teknolojilerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan dinamik çözümleri sunmaktadır. Biyomimetik yaklaşımlar bitki, hayvan ve insanları inceleyerek ve fizyolojik, morfolojik ve davranış boyutunda dinamik etkileşim örneklerini taklit ederek termoregülasyonu sağlama noktasında bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda cepheyi statik halden dinamik hale getirmeyi öneren morfolojik yaklaşım, biyomimetik yaklaşımların en etkili yöntemidir ve biyomimetik çalışmalar da daha çok bir sistemin morfolojik olarak imkân verdiği geometrik transformasyon (dönüşüm) üzerinedir.

Biyomimetik çalışmalar, yapı kabuklarındaki dinamik yapılandırmayı sağlayabilmek için doğadaki kompleks, uyumlanabilir ve dönüşebilir morfolojileri inceleyerek yapı kabuğu parçaları arasındaki basit ilişkilerin bir araya gelerek doğanın değişen şartlarına uyumlanabilen interaktif ilişkileri ve davranışları oluşturmayı ve akıllı malzemelerle de bu etkileşimi destekleyerek maksimum performansa ulaşmayı amaçlamaktadır. Morfolojik yaklaşım doğadan ilhamlı model, geometri veya ilkelerden yola çıkarak yüksek performanslı yüzeyler ile doğaya uyumlanmada eş zamanlı etkileşimi sağlamaktadır. Üç boyutlu (3 Dimensional- 3D) geometrik değişimler, termal konforun sağlanmasında performans iyileştirmeye katkı sağlamaları nedeniyle literatürde ilgi çeken konulardandır (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019).

Kinetik yapı kabuğu çalışmaları örnekleri (Çizelge 2.2) incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019):

- Genellikle ılıman-nemli ve sıcak yazlı iklimler temel alınarak yapılmıştır.
- Kinetik yapı kabukları, çevreyle kendine özel etkileşimde bulunan ikinci katmandır.
- Katlama, dönme ve kayma kinetik yapı kabuklarında sıkça kullanılan hareketlerken, çıkartma ve çekme hareketleri en nadir uygulanan hareketlerdir.
- Bazı yapılarda kinetik yapı kabuğu, cephenin büyük kısmını kaplarken bazılarında belirli bir bölüm veya hacmini kapsamaktadır. Sharifi Ha Evi ve EWE Arena örnekleri cephedeki belirli alan veya hacim üzerine yapılan çalışmalara birer örnektir.
- Dinamik güneş ışığıyla etkileşim kinetik yapı kabuklarının en önemli özelliğiysen fonksiyonel senaryoya göre etkileşim son yıllarda varılmaya çalışılan hedeflerdendir.
- Dönme hareketi, öteleme hareketine göre aydınlatma seviyeleri üzerinde daha etkilidir.

Çizelge 2.2. Kinetik yapı kabuğu çalışmalarına örnekler (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019)

Proje Adı	Yıl	İklim	Karakteristik Eleman	Detay	Hareket Tipi	Kinetik Elemanın Ölçeği	Fonksiyon	İç Mekân Kalitesi
Manitoba Hidro	2009	Nemli			Kanat	Cephede daha büyük eleman	Etkileşimli ve dinamik gün ışığı	Gün Işığı Performansı, Güneş Enerjisiyle Isıtma Kontrolü, Hava Hareketi ve Doğal Havalandırma
Thyssen Krupp Külü, Q1	2010	Ilıman			Kanat Pivot	Cephede daha büyük eleman	Etkileşimli ve dinamik gün ışığı	Gün Işığı Performansı, Parlamayı Azaltma
Kiefer Teknik Galerisi	2007	Ilıman			Katlama	Cephede daha büyük eleman	Etkileşimli ve dinamik gün ışığı, Etkileşimli işlevsel senaryolar	Gün Işığı Performansı, Güneş Enerjisiyle Isıtma Kontrolü
EWE Arena	2005	Ilıman			Kayma	Cephedeki kısımlar veya hacimler	Cephede enerji üretme	Gün Işığı Performansı
Milsertor'daki Ev	2008	Nemli			Katlama Kayma	Cephede daha büyük eleman	Etkileşimli ve dinamik gün ışığı	Gün Işığı Performansı
St. Ingbert Belediye Binası	2009	Ilıman			Katlama Kayma	Cephede daha büyük eleman	Etkileşimli ve dinamik gün ışığı	Gün Işığı Performansı, Güneş Enerjisiyle Isıtma Kontrolü
Al Bahar Kuleleri	2012	Sıcak çöl			Katlama Genişleme/ Daralma	Cephede daha büyük eleman	Etkileşimli ve dinamik gün ışığı	Gün Işığı Performansı, Güneş Enerjisiyle Isıtma Kontrolü, Parlamayı Azaltma
Institut de Monde Arabe	1987	Ilıman			Döndürme	Cephede daha büyük eleman	Etkileşimli ve dinamik gün ışığı	Gün Işığı Performansı

Çizelge 2.2. (devam) Kinetik yapı kabuğu çalışmalarına örnekler (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder ve Lichtenberg, 2019)

Güney Danimarka Üniversitesi Kampüsü	2014	Ilıman			Kanat	Cephede daha büyük eleman	Etkileşimli ve dinamik gün ışığı, Etkileşimli işlevsel senaryolar	Gün Işığı Performansı, Güneş Enerjisiyle Isıtma Kontrolü
Sharifi-Ha Evi	2013	Hafif, yarı nemli			Döndürme	Cephedeki belirli bölümler veya hacimler	Mevsim değişimine etkileşimli, Etkileşimli işlevsel senaryolar	Gün Işığı Performansı, Güneş Enerjisiyle Isıtma Kontrolü



3. BİYOMİMETİK TASARIM METODOLOJİSİ

Tarihin en ilkel zamanlarından beri insanlar doğayı gözlemlemekte ve öğrendiklerinin günlük hayatlarındaki temel ihtiyaçlarında uygulamaktadır. İlk insanların doğadaki kesici yüzey ve formları gözlemleyerek taştan ve odundan el aletleri ve silahlar yapmaları bunun ilk örneklerindendir. Çinliler yapay ipek yapmış, Leonardo Da Vinci kuşlardan esinlenerek yapay kanat tasarlamıştır (Pedro ve Kobayashi, 2015). Elektron mikroskobunun icadıyla doğadan ilham alan çalışmaların kapsamı genişlemiştir ve biyolojik bilgi tabanlı yeni teknoloji fikirleri oluşturan yeni bir alan olarak biyomimikri ortaya çıkmıştır. “Biyo” hayat anlamına gelirken “mimikri” taklit anlamına gelmektedir. Biyomimikri, 3.8 milyar yıldır çözümleriyle hayatta kalan doğayı bir model, mentör ve denetleyici olarak rehber edinmektedir. Biyoloji ve mühendisliğin kesişim parçalarından birisi olan biyomimikri; biyomimetik ve biyo-esinlenmeli tasarım (Bio-Inspired Design - BID) kavramlarıyla birlikte anılmaktadır. Her ne kadar eş anlamlıların gibi kabul edilseler de anlamları farklılaşabilmektedir. Bu biyo-terimleri birbirinden farklı kılmak için üç farklı kriter bulunmaktadır. Bunlar; transfer yönü, bilgi-malzeme ve taklit-esinlenme kriterleriyle, farklı terimler arasındaki alanı daha tanımlı hale getirmektedir (Çizelge 3.1). Biyomimetğin tanımlandığı alan da taklit-esinlenme kriteriyle ortaya çıkmıştır (Cohen ve Reich, 2017).

Çizelge 3.1. Biyo-terimler (Cohen ve Reich, 2017)

Kriter 1 Transfer Yönü	Biyolojiden Teknolojiye Biyoteknoloji Biyo-ekstraksiyon Biyomimikri Biyo-yararlanma Biyomimetik Biyonik BID	Teknolojiden Biyolojiye Biyomühendislik Biyoteknik mühendislik Biyomekanik Teknik Biyoloji Tersine Biyomimikri	
Kriter 2 Bilgi-Malzeme	Bilgi Biyomimikri Biyomimetik Biyonik BID		Malzeme Biyoteknoloji Biyo-ekstraksiyon Biyo-yararlanma
Kriter 3 Esinlenme -Taklit	Esinlenme BID Biyomorfizm	Biyomimikri Kapsam Alanı	Taklit Biyonik Biyomimetik Biyomimikri

Transfer yönü biyolojiden teknolojiye ve teknolojiden biyolojiye olan hareketi ayırırken bilgi-malzeme kriteri, doğayı malzeme boyutunda direkt kullanma ile doğadan öğrenmeyi birbirinden ayırmaktadır. Esinlenme-taklit kriteri ise doğayı olduğu gibi taklit etmeyi ve doğadan esinlenmeyi birbirinden ayırmaktadır. Doğayı doğrudan taklit, boyut, malzeme, üretim yöntemleri gibi birtakım kısıtlamaları da beraberinde getirdiğinden esinlenme, yöntem olarak daha tercih edilebilir durumdadır. Öte yandan doğa, esinlenmeden çok daha fazlasını vermektedir. Örneğin karmaşık matematik hesaplamalarına ihtiyaç duyulmasındansa hazır modellerini sunmaktadır. Akışkanlar mekaniği konusunda yalıçapkını kuşunun optimum model olarak baz alındığı Japon hızlı treni buna birer örnek olarak verilebilir. Taklit, model ve hassas parametrelere yönelik detaylı bilgi gerektirirken biyo-esinlenme daha çok, fikir veya genel çalışma prensiplerini transfer etmekle ilgilidir. Burada ortaya çıkan bir başka terim ise sanat ve mimari alanında karşımıza çıkan ve doğadaki şekilleri ve modelleri konu edinen biyomorfizmdir. Genel olarak doğadan esinlenme, estetik veya fonksiyonel amaçlarla doğadan öğrenme süreçleriyle ilgilenmektedir.

Biyo-terimler genellikle eş anlamlı olarak kabul edilmektedir. Ancak aynı zamanda evrimleşmedikleri için, biyomimikri biliminin farklı gelişim noktalarını temsil etmektedirler. Biyonik terimi, ilk kez ABD (Amerika Birleşik Devletleri) hava kuvvetleri sempozyumu sırasında 1960'ta Jack Steele tarafından önerilmiştir ve doğadan kopyalanan bazı işlevleri içeren veya doğal sistemlerin özelliklerini temsil eden sistemler bilimi olarak tanımlanmıştır. Daha sonra 1969'ta biyomimetik terimi Otto Schmitt tarafından önerilmiştir. Biyomimetik, biyolojik olarak üretilen maddelerin, malzemelerin ve biyolojik mekanizmaların ve işlemlerin, özellikle de benzer mekanizmalarla benzer ürünlerin sentezlenmesi amacıyla, oluşumunun, yapısının ya da fonksiyonunun çalışması olarak tanımlanmıştır. Burada ayrıca sadece fonksiyonlara değil, yapılara, mekanizmalara ve işlemlere de değinilmektedir. Son olarak 1982'de biyomimikri terimi ortaya çıkmıştır ve 1997'de Jenin Benyus tarafından "Doğadan ilham alan biyomimikri-yenilik" kitabıyla bu terim yayılmıştır. Biyomimikri ve biyomimetik kavramlarının her ikisi de Yunanca "bio" ve "mimesis" kelimelerinden türetilmiştir. Biyomimetik, gerçeğin taklidi ve temsiliyle ilgilenen Aristoteles tarafından icat edilmiştir. Benyus, biyomimikriyi "doğanın modellerini inceleyen ve sonra insan problemlerini çözmek için bu tasarım ve süreçlerden ilham alan yeni bir bilim" olarak tanımlamıştır. Bu tanım daha sonra biyomimikri disipliniyle sürdürülebilirlik ve yeniliği ilişkilendirmek için Biyomimikri Enstitüsü tarafından

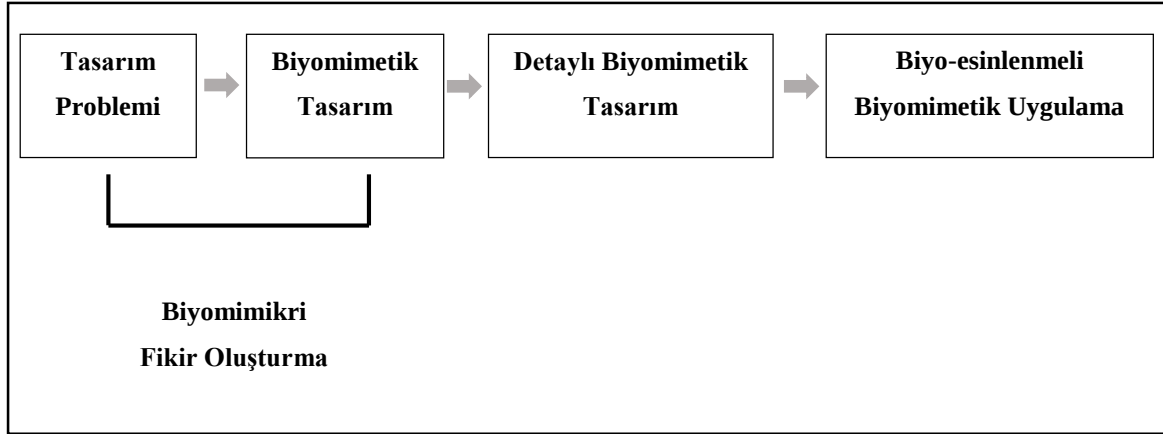
detaylandırılmıştır. Benyus, biyomimikriyi genel insan problemleriyle ilişkilendirmektedir (Cohen ve Reich, 2017). Böylece alan uygulamalarında kapsamını teknolojiye iş, strateji veya psikoloji gibi diğer alanlara kadar genişletmektedir.

3.1. Biyomimetğin Gelişimi

Biyomimetğin gelişiminde üç ana dal belirlenmiştir. Bunlardan ilki ve en eski olanı *fonksiyonel morfolojidir*. Biyolojik form ya da yapıların fonksiyonlarıyla ilişkisini temel alan bu kavramın başarısı, malzemeyle daha ilgisiz olup daha çok form ve yapı ile olan ilgisiyle sağlanmaktadır. Bu nedenle, doğal veya yapay malzeme kullanımı, fonksiyon başarısını düşürmemektedir. İkinci dal ise sinyal ve bilgi işleyen *biyosibernetik, sensör teknolojisi ve robotiktir*. Biyo-esinlenmeli robot ve sensörler örnek olarak verilebilir. Üçüncü ve son dal ise, *nanobiyomimetik, moleküler düzeyde kendini yönetme ve nanoteknolojidir*. Örnek olarak epidermal çıkıntıların nano yapısını taklit eden lotus efekti uygulamaları ve bakterileri uzak tutan fayans ve kaplamalar köpek balığı derisi uygulamaları verilebilir.

Biyomimikri disiplindeki en büyük gelişmeler *malzeme* alanında olup bunlar akıllı malzemeler, yüzey modifikasyonları, malzeme mimarilerini de kapsamaktadır. İkinci en çok gelişen alan ise *hareket uygulamalarıdır*. Uygulamalar, kinetik, serbest bırakma mekanizmaları ve yapısal yapılandırma (enerji verimliliği şekilleri) dahil olmak üzere hayvan hareket modellerine dayalı hareket uygulamalarıdır. Biyomimikri aynı zamanda sürdürülebilir inovasyon üretiminde de kullanılabilir bir araçtır.

Biyomimikri, erken tasarım aşamalarında, özellikle konsept tasarım aşamasına entegre olduğunda yenilikçi tasarım konseptleri üretme yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu aşamada, ayrıntılı tasarım için bir tane seçmek üzere olası tasarım kavramları oluşturulur ve değerlendirilir. Erken tasarım aşamalarının, ürün kalitesine en çok katkıda bulunan aşamalar olduğu bilinmektedir (Şekil 3.1). Ürün geliştirme paradoksuna göre erken tasarım aşamaları, ürünün ilk kalitesinin ve son maliyetinin yaklaşık %70'inden sorumlu iken, bu erken tasarım aşamasını destekleyecek mevcut bilgi azdır. Bu nedenle, yenilikçi çözümleri teşvik etmek için kullanılan ve konsept üreticisi olarak görev yapan biyomimikrinin temel potansiyeli, olası çözümlerin kapsamının belirlendiği erken tasarım aşamalarında uygulandığında ortaya çıkmaktadır (Cohen ve Reich, 2017).



Şekil 3.1. Biyomimikrinin erken tasarım aşamalarında uygulanması (Cohen ve Reich, 2017)

3.2. Biyomimikri Tasarımda İki Yönlü Tasarım Süreci

Biyomimikri, tasarım sürecine iki şekilde dâhil edilebilir (Çizelge 3.2):

1. Mühendislikten biyolojiye: Bu yöntem mevcut bir mühendislik problemine çözüm getirmek için biyolojiyi kullanmaktadır. Örneğin; Japonya'daki trenlerin tünellerden çıkarken basınç değişikliği nedeniyle gürültü yapması problemi, yalıçapkını kuşunun gaga formu sayesinde suya dalarken çok az su sıçratmasından esinlenerek yapılan ve adına “bullet train” adı verilen yeni tasarımla çözülmüştür.

2. Biyolojiden mühendisliğe: Doğada mevcut bir çözümün mühendislik problemlerine uygulanmasıdır. Lotus çiçeği küçük epidermal çıkıntıları sayesinde üzerindeki su damlalarını akıtırken, toz taneciklerini de damlalarla uzaklaştırarak kendi kendini temizleyen bir yapıya sahiptir. Bu özellik kirlenmeyen boya, cam, kumaş gibi ürünlerin geliştirilmesinde esin kaynağı olmuştur.

Çizelge 3.2. Biyomimetik tasarım yönlendirme terminolojileri (Cohen ve Reich, 2017)

	Biyolojiden bir uygulamaya	Bir problemden biyolojiye	Kaynak
1	Çözüm çıkışlı	Problem çıkışlı	(Helms, Vattam ve Goel, 2009)
2	Organizma çıkışlı	Mekanizma çıkışlı	(Hesselberg, 2007)
3	Aşağıdan yukarıya	Yukarıdan aşağıya	(Speck ve Speck, 2008)
4	İten: Biyoloji	Çeken: Teknoloji	(ISO, 2013)
5	Tetikleme ile biyomimetik	Soyutlama ile biyomimetik	(Gebeshuber ve Drack, 2008)
6	Biyolojiden tasarıma	Biyolojik zorluk	(Biomimicry 3.8)

Biyomimikri yaklaşımlarından uygulaması en kolay olanı biyolojiden mühendisliğe doğru olan yaklaşımdır. Çünkü doğada hâlihazırdaki binlerce çözümden birinin uyarlanabileceği bir mühendislik problemi bulmak, mevcut mühendislik problemlerine çözüm sunabilecek doğa yapıları aramaktan daha kolaydır (Cohen ve Reich, 2017).

3.3. Analoji Tabanlı Tasarım Süreci

Biyoloji ile mühendislik ve diğer alanlar arasında analogik (benzeşime dayalı) tasarım bilgisi aktarımı anlamına gelen biyomimikri, sıklıkla birçok alanı kapsayan entegre analogileri kullanmaktadır (T. W. Mak ve Shu, 2004). Böylece, birçok canlının farklı fonksiyonlarını bir araya getiren bir mühendislik sistemleri yapmak mümkün olmaktadır. Bu da disiplinler arası ve çok disiplinli çalışmalarla sağlanmaktadır (Vattam, 2008). Disiplinler arası çalışmalarda, farklı disiplinler teorik, kavram ve metodoloji boyutunda birbirinden ayrılmaktadır. Biyomimetik, tasarım problemini çok disiplinli farklı bakış açılarıyla izlemekte ve disiplinler arası alanları birbirine entegre ederek farklı alanlar arasındaki bağlantıyı kurmaktadır. Bütün bu verimli etkileşimler de *biyomutualizm* olarak tanımlanmaktadır (Full, 2009). Biyomimetik ve biyoloji arasındaki iletişim tek yönlü olmamalıdır. İki taraflı sirkülasyon şeklindeki iletişim, inovasyonun daha yüksek seviyede olmasını sağlayarak tasarım sürecine sağlanan değeri artırmaktadır (Schmidt, 2005).

3.3.1. Problemden biyolojiye biyomimetik tasarım

Tasarım probleminden biyolojiye yönelimli tasarım sürecinde ilk ve en önemli adım, diğer tasarım problemi çözüm yöntemlerinde olduğu gibi iyi bir problem tanıımıdır. Sonrasında analogi yapmak üzere biyolojik sistemler araştırılmakta ve doğadaki çözümler analogik yaklaşımla tasarım problemine uygulanmaktadır. Son adım olarak ise, her tasarım süreci sonunda olduğu gibi değerlendirme ve gerekli görüldüğü durumlarda süreç adımlarının herhangi birinin tekrarı ile tasarım süreci tamamlanmaktadır (Şekil 3.2).

dolayı biyomimetik tasarım sürecinin çekirdeği ve en zor aşamasıdır. Soyutlama, mühendislik problemine uygulanacak biyolojik çözümün modellenmesi olarak da tanımlanabilmektedir. Bu model, fonksiyon, yapı, davranış, tasarım prensibi ve strateji şeklinde olabilir. Mak ve arkadaşları biyolojik çözümlerin soyutlanmış ilkelerini, biyolojik sistemlerin formları ve davranışlarına dair bilgilerle karşılaştırdıklarında, soyutlamaların biyomimetik alanında daha fazla uyandırıcı etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, tasarımcı bulduğu ilk biyolojik çözümden yola çıkarak çözüm aradığında, analogilerin yüzeysel kalabildiğini veya mühendisliğe uygulanabilir olamadığını da belirtmişlerdir (T. Mak ve Shu, 2008; T. W. Mak ve Shu, 2004).

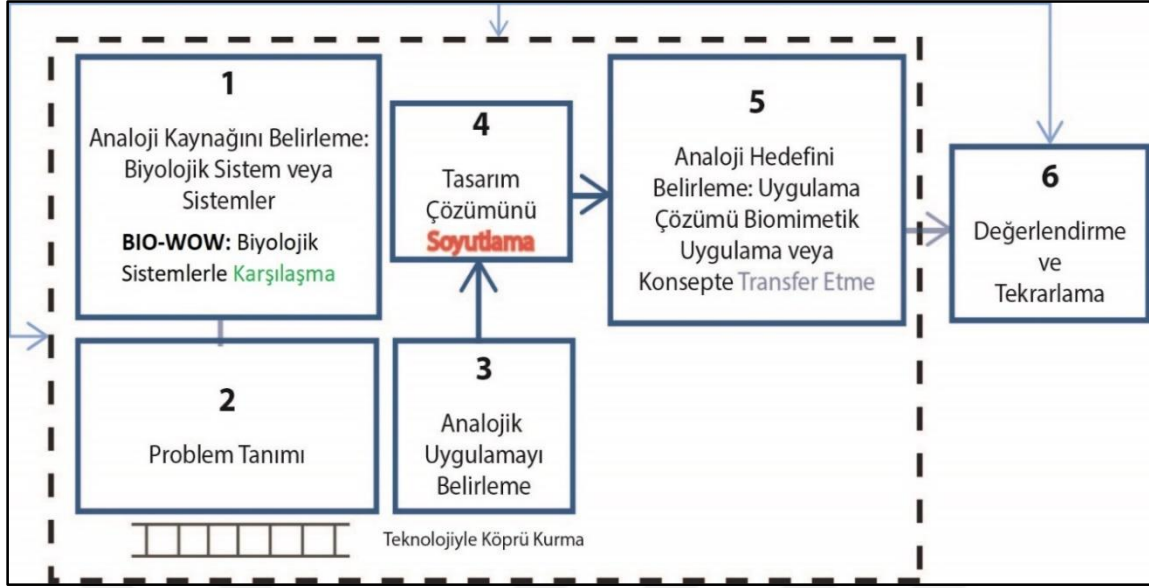
4. Çözüm aktarımı (Aşama 5): Bulunan biyolojik çözümün mühendislik problemlerine uygulanması form, yapı, süreç, fonksiyon, sistem veya prensip seviyesinde olmaktadır. Schmidt bu aktarımı form, yapı ve malzeme (1), fonksiyon (2) ve süreç ve bilgi (3) boyutlarında belirlemiştir (2005). Sartori ise, çözüm aktarımının daha çok fiziksel etki boyutunda olduğunu savunmaktadır. Sistem yapısı veya bir sistemin organları fiziksel etkiler olarak değerlendirilebilmektedir (Julian Sartori, Pal ve Chakrabarti, 2010). Jacobs ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmalarla, biyomimetik inovasyonların %61,8'inin çoğunluğunun form, %51,3'ünün ise tamamen form türünde olduğu sonucuna varmışlardır. Bilgi aktarımı sağlayacak canlılar hücre, organ, organizma veya ekosistem boyutunda olabilmektedir (2014).

5. Değerlendirme ve tekrarlama (Aşama 6): Son aşamada tasarımcılar, sonuçları değerlendirmeli ve gerekli aşamaları tekrar çalışmalıdırlar. Bazı aşamalar, yapılacak uygulama sırasında karşılaşılabilecek karmaşıklık, üretim kısıtları veya yüksek maliyet gibi sorunlardan dolayı tekrarlanabilmektedir. Değerlendirme aşaması, döngüsel şekilde tekrarlayıcı bir değerlendirmeyi tanımlamaktadır. Biyomimikri 3.8 bu değerlendirmeyi spiral diyagram ile açıklamaktadır. Gramann, değerlendirmeyi analoginin değerlendirilmesi, soyutlanan modelin değerlendirilmesi ve organizmanın değerlendirilmesi şeklinde üçe ayırmıştır (2004). Karo halı üreticisi InterfaceFLOR şirketi, modüler halı tasarımında kullanmak üzere farklı yapıştırıcı örneklerini doğada aramış ve sonuç olarak çok karmaşık ve Ar-Ge gerektiren malzeme geliştirme süreçleriyle karşı karşıya kalmıştır. Fakat “yapıştırıcı” yerine “bir arada tutucu” kelimeleriyle yapılan araştırma ile yer çekiminin, modüler parçaları bir arada tutan prensip olarak kullanılmasıyla çözüme ulaşılması, soyutlama aşamasının tekrarlanmasına örnek olarak verilebilir (Anderson, 2009). Soyutlanan model, çözüm için küçük geldiğinde bu aşamaya tekrar dönülüp, örneğin

organizma boyutundaki bir model, sadece kendisiyle sınırlı olmayan ve çevresiyle etkileşim hâlinde bir sistem haline getirilebilmektedir. Bulunan ilk organizma probleme doğru bir çözüm getirmeyebilir. Bu durumda yeni bir bakış açısıyla farklı organizmalar incelenebilir (Cohen ve Reich, 2017).

3.3.2. Biyolojiden teknolojiye biyomimetik tasarım

Biyolojiden mühendisliğe uygulama, mühendislikten biyolojiye olan uygulama ile benzerlik göstermektedir. Öncelikle farklı bir mekanizma veya karakteristiği olan biyolojik bir sistem ile karşılaşılır. Daha sonra bu sistemin inovasyona potansiyel katkıları analoji ile bir mühendislik sistemine uygulanır. Kirli ortam koşullarında lotus çiçeklerinin kendilerini temiz tuttukları gözlemlenmiş ve mühendisliğe uygulanarak kirlenmeyen malzemeler üretilmiştir. Çok düşük derecelerde gövdeleri buz tutmayan penguenlerden ilham alınarak buz oluşumuna dirençli uçak kanatları tasarımı biyolojiden mühendislik uygulamalarına örnek olarak verilebilir. İnovatif potansiyeli olan biyolojik oluşumların fark edildiği ilk evre BIO-WOW aşaması olarak tanımlanmıştır. İkinci aşamada, bu ilgi çeken biyolojik sistemin tam olarak hangi problemi çözdüğü belirlenmektedir. Daha sonra uygulama yapılabilecek analogiler belirlenir, fakat bu aşamada belirli bir uygulama tanımlamaktan çok biyolojik sistem ile olası uygulamalar arasındaki bağı kuracak “bilgi” üzerinde odaklanılmaktadır. Birinci ve üçüncü aşamalar doğrudan analojinin ve analizin yapılmadığı, yalnızca biyolojik sistemi daha iyi anlamamızı sağlayan aşamalardır. Bu aşamalarda mühendislikten biyolojiye yaklaşımında olduğu gibi doğrudan çıkarım yapmak amaçlanmamaktadır. Daha sonra soyutlama yapılır ve uygun mühendislik problemi belirlendikten sonra biyolojik çözüm uygulanır. Son aşamada ise bütün sürecin değerlendirmesi yapılır (Şekil 3.3) (Cohen ve Reich, 2017).

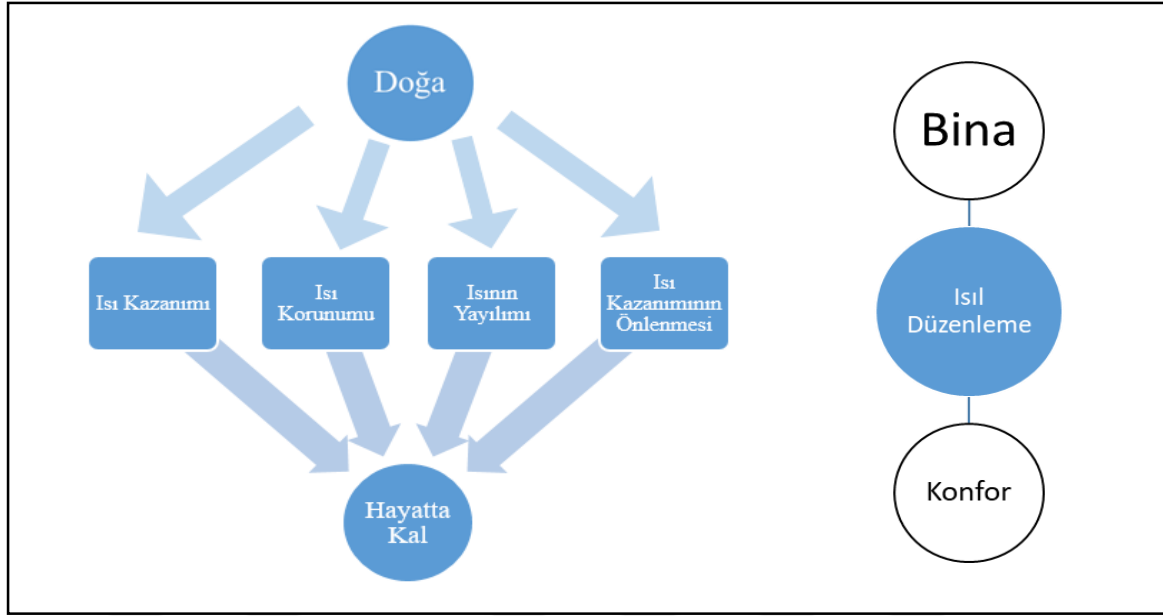


Şekil 3.3. Biyomimetik tasarım süreci: biyolojiden mühendisliğe (Cohen ve Reich, 2017)

3.4. Yapı Kabuklarıyla Termoregülasyonun Sağlanmasında Biyomimetik Tasarım

Canlılar, fizyoloji, morfoloji veya davranış bazında değişikliklerle doğanın değişen sıcaklık koşullarına uyumlanmayı başarmaktadır. Yapı kabuklarının binalardaki sıcaklık düzenleme fonksiyonu, doğada ekstrem sıcaklık şartlarında hayatta kalmayı başaran canlılar örnek alınarak geliştirilebilir. Bazı canlılar deri yoluyla vücutlarında termoregülasyonu sağlarken, bazıları strüktürel özellikleri sayesinde sağlamaktadır. Yapı kabuğu ise, binayı dış çevreden ayıran bir bariyer olmasından çok, dışarıdaki çevresel koşulların binanın iç mekân sıcaklığını da etkilemesinde aracı eleman oluşundan dolayı canlılara benzemektedir. Bu bağlamda, binalarda termal konforu sağlamak için doğadaki canlıların sıcaklık düzenleme yetileri ilham verici olabilmektedir. Doğadaki sıcaklık düzenleme stratejileri şu şekildedir (Şekil 3.4) (Badarnah, 2015);

- Isının kazanımı
- Isının korunumu
- Isının uzaklaştırılması
- Isı kazanımının önlenmesi



Şekil 3.4. Soyutlama benzeşimi: doğada ve binalarda sıcaklık düzenlemesi (Badarnah, 2015)

3.4.1. Isı kazanımı

Doğadaki canlıların ısı kazanımında en çok tercih ettikleri yöntem solar radyasyondur. Renkler, yüzey alanı, iletkenlik ve ısı kaynağına yakınlık radyasyonla ısı kazanımındaki ana faktörlerdir. Koyu renkler açık renklere göre, geniş yüzeyler de küçük yüzeylere göre daha çok solar radyasyona maruziyete imkân sağlamaktadır. Solar radyasyon aracılığıyla ısı kazanımı doğrudan güneş ışınlarıyla temasla sağlanabileceği gibi, güneş ışınlarının ısıttığı bir kütleyle, örneğin büyük bir kayayla temas ederek kondüksiyon (iletim) yoluyla da ısı kazanımı sağlanabilmektedir. Küçük canlılar solar radyasyonla ısı kazanımını daha hızlı sağlamaktadır. Böcekler ve sürüngenler solar radyasyonla ısı kazanımlarını sağlamaktadırlar. Isı kazanımında kullanılan bir diğer yöntem ise metabolik faaliyetleri artırmaktır. Canlılar bunu egzersiz ve titreme hareketleriyle gerçekleştirmektedir. Kas sistemlerinin kullanarak aktif harekette bulunan canlılar egzersiz yoluyla vücutlarını ısıtmaktadır. Soğuk hava şartlarındaki canlılar düşük ve yüksek seviyede olmak üzere iki tür titreme hareketinde bulunmaktadır. Düşük seviyedeki titreme yılın soğuk döneminde aylar boyunca sürdürülmektedir. Yüksek seviyede titreme ise ani sıcaklık üretimi ihtiyacı olduğunda ve kısa süreliğine gerçekleşmektedir. Titreme, egzersize göre çok daha etkin bir ısınma yöntemidir (Badarnah, 2015).

3.4.2. Isı korunumu

Isının korunumu soğuk havalarda yalıtımla ve kondüksiyon ve konveksiyon yoluyla ısı kaybını azaltarak sağlanırken sıcak havalarda ısı alışverişi, ısının dağıtılması ve metabolik faaliyetlerin yavaşlatılması ile sağlanmaktadır. Canlıların vücutlarını kaplayan kürkleri, canlıyı dış etkenlerden korurken yalıtımı da sağlamaktadır. Kuşlar soğuk havalarda başlarını ve ayaklarını vücutlarına çekerek vücutlarının soğukla temas eden yüzey miktarını azaltarak vücut sıcaklıklarını korumaktadır. Tüylerini kabartarak dış ortam ve vücutları arasında hava dolu bir katman oluşturarak da yalıtım yoluyla vücut sıcaklıklarını korumaktadırlar (Badarnah, 2015).

Balinalar vücut sıcaklıklarını daha düşük seviyelerde korumak için damar sistemlerini kullanmaktadır. Atar damarların çevresinde daha ince damar yumakları bulunmaktadır. Vücut sıcaklığı yükseldiğinde atar damarların kanı, vücudun dış yüzeyine daha yakın ince damarlara yollanmasıyla dış ortamla ısı alışverişinde bulunan kan, daha düşük sıcaklıkla ana gövdeye iletilmektedir. Böylece yükselen vücut sıcaklığı belli bir seviyede korunmak üzere düşürülmüş olmaktadır (Schmidt-Nielsen ve Duke, 1972). Canlılar ısı alışverişini vücut yüzeyleriyle gerçekleştirmektedir. Isı alışverişinin gerçekleştiği canlı kürklerindeki ipliklerin çapraz ağılı oluşu ise, ısımayla dağılımı artırmaktadır. Kürk yapısında bulunan farklı uzunluktaki tüyler farklı ısıya saçınımları ile bunu sağlamaktadır (Simonis, Rattal, Oualim, Mouhse ve Vigneron, 2014). Vücut ısısını korumada bir diğer yöntem ise kış uykusudur. Bazı canlılar metabolik faaliyetlerini minimize ederek mevcut vücut enerjilerini ve dolayısıyla vücut sıcaklıklarını koruyarak hayatta kalmaktadır (Tattersall ve Milsom, 2003).

3.4.3. Isı yayılımı

Vücut sıcaklığı çevre sıcaklığından yüksek olduğunda, canlılar konveksiyon, kondüksiyon, radyasyon yayılımı ve buharlaşma ile vücut sıcaklıklarını düşürmektedirler. Isı alışverişinin akışkanlar yoluyla sağlandığı konveksiyonla serinlemeye fillerin kulaklarını çırparak kulakları çevresinde rüzgâr oluşturmaları ve böylece serinlemeleri örnek olarak verilebilir. Zebraaların siyah ve beyaz çizgili oluşlarıyla siyah çizgilerin çevresinde daha sıcak hava oluşturarak ve beyaz çizgilerin çevresindeki havayla da serin hava oluşturarak farklı basınçlarda hava hareketleri sağlayarak ve terleme-buharlaşma hareketleriyle de bunu destekleyerek serinledikleri düşünülmektedir (Badarnah, 2015; Cloudsley-Thompson,

1999). Özellikle katı maddelerde ısı alışverişini sağlayan kondüksiyon ile ısı yayılımında ise malzemenin kalınlığındaki artış kondüksiyonu azaltırken yoğunluğun artması kondüksiyonu artırmaktadır. Isı alışverişini gerçekleştiren yüzey alanının büyümesi de kondüksiyonu artıran faktörlerden birisidir. Radyasyon salınımı yapmak ve serinleyerek yaşamsal faaliyetlerini sürdürmek isteyen çöl hayvanları, geceleri aktif olarak dış ortamı ısı aktarabilecekleri alan olarak kullanmaktadırlar. Yüzeyde bulunan suyun, hava akımları sayesinde uzaklaştırılırken yüzeyde serinleme sağlaması da canlıların kullandığı bir diğer serinleme yöntemidir. Terleme ve memelilerin, örneğin köpeklerin, ağızlarını açarak hızlı nefes alıp vermeleriyle yüzeyde bulunan nemi hava hareketiyle uzaklaştırmaları serinlemeyi sağlamaktadır (Badarnah, 2015).

3.4.4. Isı kazanımının önlenmesi

Canlıların terleme ile serinlemeyi sağlamak için yüzey alanlarını genişletmeleri aynı zamanda solar radyasyonla ısınımı da artırdığından bir çelişki ortaya çıkarmaktadır. Bu durum vücut yüzeyinde çıkıntılar oluşturarak dengelenmektedir. Çıkıntıların oluşturduğu gölgeler yüzeyde aydınlanan alan miktarını azaltarak istenmeyen miktarda ısı kazanımını önlemektedir. Kaktüslerdeki dikey çıkıntılar bu duruma örnek olarak verilebilir. Büyük hacimli hayvanlar ise küçük hacimli hayvanlara göre proporsiyon olarak daha az hacim/yüzey alanı oranına sahip olduğundan daha az ısınmaktadırlar. Canlıların vücutlarını kaplayan yüzeyin yansıtıcılığı, rengi ve yoğunluğu ısı kazanımının önlenmesinde önemli faktörlerdendir. Örneğin bir çöl çalısı olan *Encelia Farinosa* bitkisinin yaprak yüzeyinde bulunan açık renkli tüyler, yaprak yüzeyinde gümüş renkli bir tabaka oluşturarak yansıma yapmakta ve ısı kazanımını bir miktar önlemektedir. Tüylerin canlı olması yerine ölü olması veya su ile dolu olması yerine havayla dolu olması da yansıtıcılığı artırmaktadır. Çünkü açık renkte ve düşük yoğunluktaki malzemeler, koyu renkte ve yüksek yoğunluklu malzemelere göre daha az ışık absorbe etmektedir. Isı alışverişiyle sıcaklık dengesinin sağlanmasında ısı kazanımı, ısının korunumu, ısının yayılımı ve ısı kazanımının önlenmesine yönelik süreç, faktör ve biyolojik örnekler Çizelge 3.3'te gösterilmektedir (Badarnah, 2015).

Çizelge 3.3. Biyomimetik tasarımda ısı düzenleme sistemi (Badarnah, 2015)

Fonksiyonlar	Süreçler	Faktörler	Biyolojik Örnekler
Isı Kazanımı	Radyasyonu absorbe et	Yüzey alanı	Chuckwalla (İguana familyasından bir kertenkele)
		Renk	Koyu pigmentler
		İletkenlik	Kaya
		Postür/yönelim	Kertenkele
	Metabolik faaliyetleri artır	Egzersiz	
Isı Korunumu	Kondüksiyonu azalt	Titreme	Memeliler
		Yoğunluk	Yağ
			Kürk
			İnce tüyler
	Konveksiyonu azalt	Solunum miktarı	
		Yüzey/Hacim oranı	Penguen
	Isı alışverişi yap	Morfoloji	Tuna
			Yunus yüzgeci
	Radyasyonu dağıt	Morfoloji	Kürk
	Metabolik faaliyetleri azalt	Solunum miktarı	
		Kalp atışı	Sincap
Isı Yayılımı	Konveksiyonu artır	Hava akışı	Zebra
			Termit yuvası
	Kondüksiyonu artır	Sirkülasyon	Kan damarları
		Yoğunluk	
	Radyasyon salınımı	Yüzey/Hacim oranı	Çıkıntı
	Buharlaşma	Sıcaklık	İnsan cildi
		Rüzgâr miktarı	Büyük akbalıkçıl
Isı Kazanımının Önlenmesi	Aydınlanmayı azalt	Postür/yönelim	
		Morfoloji	Fil cildi
		Renk	Parlak pigment
		Yansıtıcılık	Skink (bir kertenkele türü)
		Hacim/Yüzey oranı	Deve
	Kondüksiyonu azalt	Yoğunluk	Doku

Canlılar, yaşamsal faaliyetlerini yerine getirmeye devam edebilmeleri için çevresel sıcaklık koşullarına uyumlanmak durumundadırlar. Uyumlanma ise, statik durumdan dinamik duruma geçmeyi gerektirmektedir. Bunun için de canlılar fizyoloji, morfoloji ve davranış boyutunda çevreleriyle etkileşim göstererek çevresel şartların gerektirdiği boyutta ısı kazanımı, ısı korunumu, ısı yayılımı ve ısı kazanımının önlenmesi için çeşitli stratejiler kullanmaktadır. Doğada hareketsiz gibi görünen yapılar bile, çevresel etkenlerin hareketiyle etkileşim kurabilmelerine imkân sağlayacak şekilde form ve malzeme ile donatılmıştır. Böylece canlılar, optimum sıcaklık düzenlemesine yönelebilmektedirler. Bu noktada, vücut bileşenlerini oluşturan yapıların geometrisi, dizilimi, yönelimi, rengi, dokusu, yoğunluğu, yansıtıcılık kat sayısı, yüzey/hacim oranı gibi faktörler canlının kinetik bir yapı hâline dönüşmesinde rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, buradan yola çıkarak yapı

kabuklarının canlılarla ortak bir noktası olan ısı düzenleme ihtiyacına cevap vermek üzere bir biyomimetik çalışma yürütülmüştür. Ana amacı yapıların çevresel sıcaklık faktörlerinden minimum zarar ve maksimum fayda ile etkilenmesini sağlamak ve yapılarda ısı düzenleme ihtiyacını karşılayabilmek olan yeni bir termoregülatif yapı kabuğunun tasarlanmasında Problemden Biyolojiye Biyomimetik Tasarım metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada canlıların ekstrem sıcaklık koşullarına ne tür form ve davranışlarla uyumlandığı incelenmiş ve biyomimetik tasarım metodolojisinin önerdiği şekilde bu incelemelerden yapılan çıkarımlarla elde edilen öğretilerin yapı kabuklarına uygulanması hedeflenmiştir.



4. TERMOREGÜLATİF BİYOLOJİK YAPI İNCELEMELERİ

4.1. Karınca Yuvalarında Termoregülasyon

Yuvalarını toprakta, taş altında, yaprak çöpleri arasında veya ağaç üstlerinde konumlandıran karınca ve termit gibi böcek toplulukları, geniş ve kompleks yuva modeli kurabilme ve kompleks davranışlarda bulunabilme özellikleri sayesinde yuva içi termoregülasyonu sağlamada yalnız yaşayan böceklerle göre daha başarılıdır. Bunun için çeşitli yöntemler kullanılmaktadırlar (Kadochová ve Frouz, 2013).

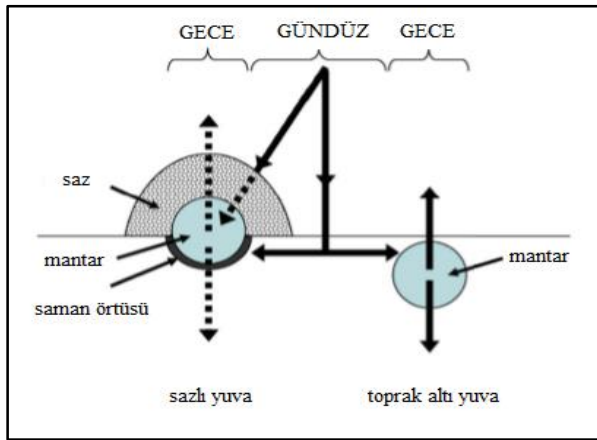
Bunlardan ilki yalıtımdır. Karıncalar yuvalarını inşa ederken toprak, ince dal parçaları, kozalak iğnesi ve çakıl gibi iyi yalıtım sağlayan doğal malzemeler kullanarak yuva yalıtımını sağlamaktadırlar. İnşa için gerekli malzemeleri çevrelerinden elde etmektedirler, fakat malzemeleri rastgele seçmemektedirler. *Acromyrmex* türü çim kesen karıncalar, yuvalarını inşa ederken malzeme kullanımında günümüz inşaat modelinde olduğu gibi kabadan inceye doğru gitmektedir. Önce ot ve ince dallar gibi kaba malzemeler, daha sonra toprak ve kil gibi ince malzemeleri kullanılmaktadırlar (Resim 4.1) (Cosarinsky, Römer ve Roces, 2020). Bu şekilde yapı oluşturmaları, yapı kabuğu tasarımında baz strüktür oluşturma konusunda esin kaynağı olarak kullanılabilir.



Resim 4.1. *Acromyrmex* türü çim biçen karıncalarının tepe şeklinde inşa ettiği ot, ince dal, toprak ve kille oluşturduğu yuva modeli (Cosarinsky, Römer ve Roces, 2020)

Güney Amerika'da yaşayan ve çim kesen bir karınca türü olan *Acromyrmex* heyeri, yuva içindeki larvaların tek besin kaynağı olan mantarlar ile simbiyotik (ortak yaşam) bir yaşam sürmektedir. Mantarların yaşam ortamı 25-30 °C sıcaklık aralığında ve nemli olmalıdır. Bollazzi ve Roces, bu karınca türünün yuvalarını toprağın altında veya üstünde

konumlandırmasının bu durumu nasıl etkilediği üzerine bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada toprakla doğrudan temas eden toprak altı yuva modeli ile toprakla arasında sazlar ile yalıtılmış katman bulunan yuva üstü modeli karşılaştırılmıştır (Şekil 4.1). Çalışmada, toprak altına yapılan yuvanın topraktaki nemin sıcaklık kapasitesinden doğrudan ve aniden etkilendiği, bu nedenle gündüz çok sıcak, gece ise çok soğuk olduğu görülmüştür. Nem, dış ve iç ortam arasında sıcaklık difüzyonuna sebep olmaktadır. Yuva sıcaklığını belirli bir aralıkta tutmak isteyen *Acromyrmex* heyeri için bu istenen bir durum değildir. Aynı karınca türünün toprak üstündeki yuva modelinde yuva üstten, yanlardan ve alttan sazlarla izole edilmektedir. Toprakla teması kesilen bu yuva modelinde hem nemin sebep olduğu iletkenlikten yuva etkilenmemekte hem de sazların izolasyon etkisi ile yuvadaki sıcaklık geçişleri ideal düzeyde ve daha dengeli geçişlerle sağlanmaktadır. Bu durum gece aşırı soğumayı, gündüz ise aşırı ısınmayı engellemektedir. Sazların içinin boş oluşu, yalıtım malzemesinin yoğunluğunu düşürdüğünden iletkenliğini de azaltmaktadır. Bu özellik ile yuva yalıtımı, gündüz güneş ışınlarının yuva içini istenmeyen miktarda ısıtmasına ve gece soğuyan toprağın sahip olduğu nemle yuva içi ısınıpı düşürmesine engel olmaktadır (2010). Bu bağlamda ısı izolasyonu için iletkenliği zayıf olan düşük yoğunluklu malzeme seçimi kriteri göz önünde bulundurulduğunda sazların içinin havayla dolu oluşu yalıtımı desteklerken, eğer yapıdaki su doğrudan buharlaşma ile serinleme amacıyla kullanılmıyacaksa, suyun içeride korunmak istenen ısıyı dışarıya iletmesi yapı kabuğunda nemi dezavantaja çevirmektedir. Bu yaklaşımdan yola çıkılarak, kabuğu oluşturacak strüktür içi malzemenin mümkün olduğunca düşük yoğunlukta olması ve nem olgusunun da, yalnızca sıcak havalarda serinleme amacıyla yapı kabuğuna dâhil edilmesi gerektiği söylenebilir.



Şekil 4.1. *Acromyrmex* heyerinin toprak altında ve toprak üstündeki yuva modellerinde gece ve gündüz boyunca gerçekleşen termal etkileşimler (Oklar ısı geçiş yönlerini, kesikli ve sürekli çizgiler ise ısı akışının sınırlı ve sınırsız oluşunu göstermektedir.) (Bollazzi ve Roces, 2010)

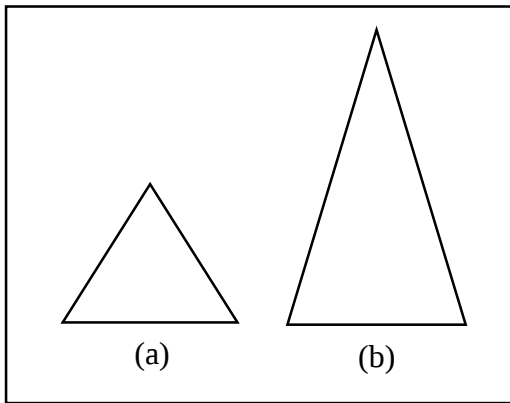
Toprak altındaki yuvalarla karşılaştırıldığında toprak üstü yuvalar, doğrudan güneş ışınlarına maruz kaldıklarından daha hızlı ısınmaktadırlar. Bu nedenle kuzey yarımküredeki bu yuva modeline sahip karıncalar yuvalarını ısıtmak istediklerinde yuvanın güney cephesinde bulunan gölgelendirme fonksiyonuna sahip otları kaldırırlar. Karıncaların yuvadaki yavrulara uygun sıcaklık şartları sağlamada kullandıkları bir diğer yöntem ise “yuva asimetrisi” olarak bilinen taşıma işlemidir. Bu yöntemde yuva kuzey-güney yönlü konumlandırılabilir bir formdadır ve yuvanın iki ucu farklı sıcaklık değerlerine sahiptir. Yavrular, güneş tepedeyken serin kısma, akşamları ise sıcak kısma taşınarak uygun sıcaklık aralığında korunmuş olur (Kadochová ve Frouz, 2013). Gün içinde güneş ışınlarının yapı kabuğuna farklı açılarda gelişi göz önünde bulundurulduğunda, yuva asimetrisi yapı kabuğunda uyumlanma amacıyla kullanılabilir. Güneş ışınlarıyla temas hâlinde olan yapı kabuğu bölümü ile temas etmeyen bölüm farklı davranarak optimum iç mekân sıcaklığını sağlamak için asimetri farklı uyumlanmalar hâlinde yapı kabuğuna uygulanabileceği, bunun da akıllı malzemelerin kullanımı ile farklı durumlara uyumlanma becerilerinin elde edilmesine esin kaynağı olabileceği değerlendirilmiştir.

Yuvayı ısıtmada karıncaların kullandığı bir diğer yöntem ise renktir. Kırmızı ağaç karıncası olarak da bilinen *Formica rufa* cinsindeki yetişkin karıncalar (Resim 4.2), yuvaya girmeden önce güneşlenmekte ve koyu kırmızı renkleri sayesinde güneş ışınlarını absorbe ederek vücut sıcaklıklarını yükseltmektedir. Böylece yuvaya giren her bir karınca, ısı kütlesi birimi olarak davranmakta ve yuvaya ısı taşımaktadır. Böylece yuva içindeki mantarlar ve yavruların ısınma ihtiyacı giderilmektedir (Kadochová ve Frouz, 2013). Koyu renklerin ısı tutma kapasitesi, iç mekânın ısıtılması gerektiğinde yapı kabuğunun renk değiştirmesi şeklinde bir uyumlanmaya esin kaynağı olabilir.



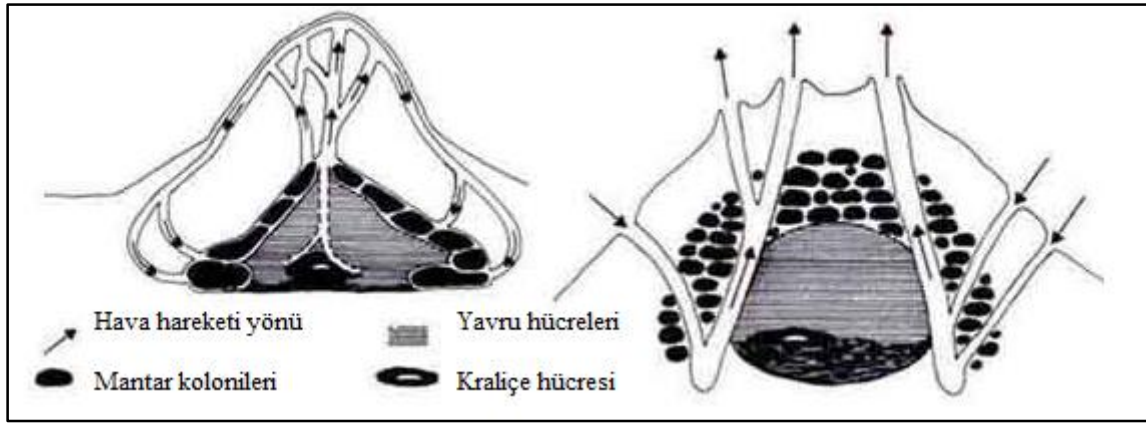
Resim 4.2. Formica rufa (Kukl, 2019)

Karıncaların yuva ısıtmada kullandığı bir diğer yöntem ise yuva formunu biçimlendirirken çevresel sıcaklığı göz önünde bulundurmadır. Az güneş alan ve bu nedenle serin olan bölgelerde karıncalar, yuvalarını daha sıcak bölgelerdeki karınca yuvalarına göre benzer taban alanıyla fakat daha yüksek formda inşa etmektedir (Şekil 4.2). Yuva formu olarak ise, birçok yuva modelinde olduğu gibi konik formu tercih etmektedirler. Yuvanın yüksek ve konik oluşu, yüksek miktarda güneş ışınına maruz kalarak ısınımlı sağlamak için geniş bir yüzey alanı oluşumunu sağlamaktadır. Böylece yuva, toprakla aynı yüzey alanıyla temas kurarak aynı miktarda ısı kaybederken yanıl cephelerinin daha geniş olmasıyla daha fazla ısınlım sağlamaktadır (Kasimova ve diğlerleri, 2014). Konik yapı, güneş ışınlarının eğik açıyla geldiğı soğuk günlerde, yapı kabuğunun güneş ışınlarıyla temas yüzeyini artırarak ve güneş ışınlarının dik tutulmasını sağlayarak daha çok ısı birikimini sağlamasına esin kaynağı olabilir. Bunun tersi olarak, ısı kazanımının istenmediğı durumlarda, yapı kabuğunun güneş ışınlarına paralel konumlanmasıyla minimum etkileşim sağlanabilir.



Şekil 4.2. Konik yuvaların farklı sıcaklıktaki bölgelere göre yükseklik farkları. Sıcak bölge (a), Soğuk bölge (b)

Yuva çeperinden kaldırılan malzeme doğrudan güneş ışınına maruziyetle ısınımı sağladığı gibi yuvada istenmeyen ısı birikiminin de önüne geçmektedir. Atta ve Acromyrmex türleri yuva içinde tüneller açarak hava sirkülasyonu ile serinleme sağlarken, Eciton türü karıncalar yuvanın geçici yapılarını gevşeterek yuvadan dışarı ısı yayınımla serinleme sağlamaktadır. Termit yuvalarının kubbe şeklinde ve içinde dikey hava kanalları içeren yuva modeli ise doğal havalandırma ile serinlemeye bir diğer örnektir (Şekil 4.3). Güneş ışınlarına farklı yönlerden maruz kalan yuva içi havanın farklı miktarlarda ısınmasıyla içeride farklı hava basınçları oluşmaktadır. Böylece yuva içinde doğal bir esinti oluşmaktadır (Kadochová ve Frouz, 2013).



Şekil 4.3. Termit yuvasında havalandırma sistemi (INHABITAT, 2012)

Yapıda rüzgârın oluşması için alçak ve yüksek hava basınçları ve hava giriş-çıkışını sağlayacak açıklıklar olmalıdır. Bunun için havanın farklı düzeylerde ısınması gerekmektedir. Karınca yuvalarındaki doğal havalandırma sistemi, yapı kabuğu içinde kanal oluşturarak ve bu kanallar aracılığı ile yazın iç mekân ile dış mekân arasındaki sıcaklık farkından yola çıkılarak farklı basınçtaki akışkanların hareketi ile serinleme sağlama noktasında esin kaynağı olabilir.

4.2. Yapraklarda Termoregülasyon

Güney Amerika'nın çorak iklimlerinde böcekler, yumurtalarını yüksek sıcaklık şartlarında bozulmaktan korumak durumundadır. Çünkü yüksek sıcaklıklar embriyo metabolizma hızı ve gelişme süresini negatif yönde etkilemektedir. Bunun için de aynı iklime farklı ısı yüklenimi özellikleriyle cevap veren yerleri ve yapıları tercih etmektedirler. Isı yüklenim kapasitesiyle güneş ışınlarına maruz kalan yüzey alanı doğru orantılıdır. Yumurtalarını ağaçlardaki yaprakların altına konumlandıran böcekler, bu sebeple büyük yüzey alanlı ve

yüksek ısı birikimine maruz kalan büyük yapraklardansa küçük yüzey alanlı ve düşük ısı birikimine maruz kalan küçük yaprakları tercih etmektedirler. Küçük yapraklar, embriyonun yaşamsal fonksiyonlarının aksamasına sebep olan yüksek sıcaklığı önlemek için yumurtayı kritik sıcaklık seviyesinin altında koruyabilmektedir (Potter, Davidowitz ve Woods, 2009). Böceklerin bu yönelimi, yapı kabuklarında ısı birikiminin istenmediği zamanlarda yüzeylerin küçük parçalara ayrılması, ısı birikiminin istendiği zamanlarda ise yüzeylerin bütünsel ve büyük parçadan oluşması konusunda esin kaynağı olabilir.

Bitkilerde ısı transferinde, Güneş ve çevreden radyasyon, konveksiyon ve kondüksiyon yolu ile ısı kazanımı sağlanırken, yapraklardan radyasyon, konveksiyon ve buharlaşma yolu ile toprağa ve havaya ısı atımı sağlanmaktadır. Ağaçların farklı çevresel sıcaklıklara uyumlanmaları ise yapraklarının formuyla gerçekleşmektedir. Güneşe doğrudan maruz kalan yapraklar ile gölgede kalan yapraklar genel olarak iki farklı formdadır. Buna dimorfizm (çift biçimlilik) denmektedir. Dimorfizm sayesinde güneş ışınlarının dik geldiği yaz mevsiminde yapraklar daha bölmelidir. Lob olarak tanımlanan bölmeler, yaprak yüzey alanını küçülterek doğrudan güneş ışınına maruz kalan alan miktarını azaltır. Aynı şekilde ağacın üst kısımlarında bulunan güneş yaprakları, güneş ışınlarını absorbe etmek yerine sızdırarak yaprağın ısı absorbe etme kapasitesini düşürerek serinlemek için daha derin loblara sahiptir. Lobların oluşmasını sağlayan girintiler, yaprağın rüzgârla temas alanını artırarak konveksiyonla serinlemeyi de sağlamaktadır. Uzunlamasına ve eliptik yaprak lobları ise *Geranium sanguineum* bitkisinde konveksiyonu artırarak serinlemeyi kolaylaştırmaktadır (Resim 4.3). *Acer rubrum* bitkisinde ise geniş dişli kenarlara sahip yapraklar, rüzgâr temasını artırarak buharlaşma yoluyla serinlemenin daha iyi olmasını sağlamaktadır (Resim 4.4) (Rupp ve Gruber, 2019). Bu noktada, küçük yüzey alanı ile ısı birikiminin azaltılması ve girintiler sayesinde rüzgârla etkileşimin artmasıyla serinlemenin sağlanması konusunda loblu yapraklar, sıcak hava koşullarında iç mekânı serin tutabilen yapı kabuklarına esin kaynağı olabilir.



Resim 4.3. *Geranium sanguineum* bitkisinin eliptik loblu yaprakları (Nature Gate, 2020)



Resim 4.4. *Acer rubrum* bitkisinin dişli kenarlı yaprakları (Sciencephoto Library, 2020)

4.3. Çöl Salyangozunda Termoregülasyon

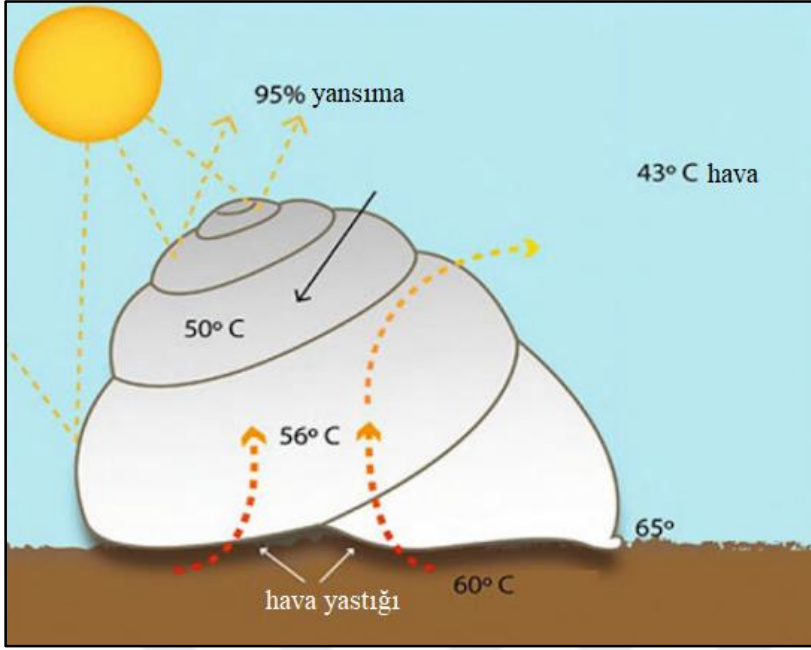
Doğada ekstrem sıcaklık koşullarının olduğu yerlerden birisi çölledir. Çöllerde yaşayan canlılar ise, hava sıcaklığının 70°C'yi bulduğu çevre şartlarında yaşam faaliyetlerini sürdürmek durumundadırlar. Bunun için de birtakım adaptasyon stratejileri geliştirmişlerdir. Bu canlılardan birisi olan çöl salyangozunda, çöldeki yaşam koşullarında hayatta kalabilmek adına yapılabilecek ilk şey olan ısı kazanımının önlenmesi için albedo katsayısı yüksek bir renk olan parlak beyaz renkte kabuk bulunmaktadır (Resim 4.5). Kabuk, yüksek yansıtıcılığı sayesinde %90 oranında solar radyasyonu, %95 oranında da infrared radyasyonu önlemektedir. Sıcak kumun kondüksiyon ile vücudunu ısıtmasını önleyebilmek için ise

yalıtımı kullanmaktadır. Çöl salyangozunun kabuğunun alt kısmının hava ile dolu olması vücut sıcaklığını 5°C daha düşük seviyede tutmasını sağlamaktadır. Suyun ısı tutma kapasitesi ve iletkenliği havaya göre daha iyi olduğundan, yalıtım konusunda havanın tercih edilmesi çöl salyangozunun yüksek sıcaklıklardan kendisini korumasında daha etkilidir. Kabuk yapısının katmanlı oluşu ise, ısınan havanın kabuğun alt kısmından üst kısmına doğru hareket ederek havanın soğumasını sağladığından konveksiyon yoluyla ısınmayı minimuma indirmektedir (Şekil 4.4) (Amin ve Taleb, 2016).



Resim 4.5. Çöl salyangozu (Spatial Experiments, 2020)

Çöl salyangozu renk, form ve malzeme seçimi ile doğrudan ısı kaynağı olan Güneş ile ve güneş ışınlarının ısıttığı hava ve yer ile etkileşimde minimum ısınmayı hedeflemektedir. Öncelikle ısı kazanımını önlemek için güneş ışınlarıyla radyasyonu, yerden yansıyan ışınlarla da konveksiyonu engellemek için yansıtıcı renkte olması, yalıtım ile yerden kondüksiyon yolu ile iletilecek ısı kazanımının önüne geçmesi ve kabuk formu ile havayı yönlendirmesiyle hava sıcaklığını vücut fonksiyonlarını sürdürmeye devam edebileceği noktaya getirebilmesi, çöl salyangozunu yüksek sıcaklık şartlarına uyumlanabilen yapı kabukları konusunda esin kaynağı hâline getirmektedir. Bu noktada, renk ve form önem arz ederken, havanın iletkenliğinin düşük seviyede olması da göz önünde bulundurulduğunda, mümkün olduğunca içerisinde hava tutabilecek dokuda malzeme ve form seçimi, yapı kabuğunun yalıtım konusunda önemli bileşenlerinden birisi olabilir.



Şekil 4.4. Çöl salyangozunun yansıtma, konveksiyon ve yalıtım ile ısı kazanımını önlemeye yönelik stratejileri (Spatial Experiments, 2020)

4.4. Kuşlarda Termoregülasyon

Kuşlar soğuk havada dış ortamdayken vücut sıcaklıklarını belli bir aralıkta korumak durumundadırlar. Bunun için ısı kaynağı olarak metabolik faaliyetlerini kullanmalarına ek olarak tüylü yapıda olmalarını da bir avantaja çevirmektedirler. Vücutlarını çevreleyen tüy katmanlarını kabartarak, tüyleri arasına aldıkları hava kütlesi miktarını artırmaktadırlar (Resim 4.6). Hava gibi iyi bir yalıtkanla doldurulmuş ve kabartılarak kalınlaştırılmış bir katmanla kendilerini çevreleyerek soğuk havayla sıcak vücutları arasındaki sıcaklık iletimini minimize etmeye çalışırlar. Böylece soğuk hava şartlarında vücut sıcaklıklarını korumak üzere çevresel şartlara uyumlanmaktadır (Badarnah, 2015). Güvercinlerin vücut sıcaklıklarını korumada izlediği bir diğer strateji ise başlarını ve ayaklarını gövdelerine doğru içeri çekerek vücut yüzey alanlarını düşürmektir. Soğuk havayla temasta kalan hacim sabitken yüzey alanı azalmaktadır. Böylece sıcak vücutlarından soğuk havaya ısı iletimine sebep olan yüzey alanını azaltarak vücut sıcaklıklarını korumaya çalışırlar.



Resim 4.6. Soğuk havalarda tüylerini kabartarak ve başını içeri çekerek vücut sıcaklığını koruyan güvercin (PxHere, 2020)

4.5. Zebralarda Termoregülasyon

Zebralar, siyah ve beyaz renkte çizgiler oluşturacak şekilde tüylerle kaplı bir vücuda sahiptir. Bu çizgilerin farklı albedo kat sayılarına sahip olması, güneş ışınlarını yansıtma ve absorbe etme özelliklerini de beraberinde getirmektedir (Resim 4.7). Güneş ışınlarının farklı miktarda vücut yüzeyinde tutunumuyla, zıt renkler üzerine farklı miktarda ısınım ve buna bağlı olarak vücutlarının çevreleyen farklı hava basınçları oluşmaktadır. Bu durum, rüzgârın temel bileşenini olan farklı ısınımın renkle sağlanabildiğini göstermektedir. Yapı kabuğu çevresinde veya içinde rüzgâr oluşturarak serinlemede, renklerin de form kadar etkili olabileceği konusunda zebralar esin kaynağı olarak kullanılabilir (Badarnah, 2015).



Resim 4.7. Siyah-beyaz çizgileriyle rüzgâr oluşturarak serinleyen zebralar (Africa Dream Safaris, 2020)

4.6. Kaktüslerde Termoregülasyon

Çöl ikliminde 60-70°C'yi bulan sıcaklıklarda yaşamını sürdüren kaktüsler, hayatta kalabilmek için vücut sıcaklıklarını belirli bir seviyenin altında tutmak zorundadırlar. Bunun için de ısı kazanımını önlemek için güneş ışınlarını engellemeleri veya gövdelerinde gölge oluşması gerekmektedir. Kendilerine gölge yapacak bir yapı veya bitki çevrelerinde olmadığından, gölgelendirmeyi kendileri yapmak durumundadır. Fakat aynı zamanda da fotosentez yoluyla besin sağlayabilmeleri için güneş ışınlarına da ihtiyaç duymaktadırlar. Bu nedenle kaktüsler, gövdelerini tamamen güneş ışınlarından yoksun bırakmadan, gövdenin belirli alanlarını gölgelemek, belirli alanlarını da güneşle etkileşimde bulunarak besin üretebilmesi için aydınlatmaktadırlar. Bu iki farklı ihtiyacın çözülmesi ise gövde formunda farklılaşma ile sağlanmaktadır. Gövdelerine paralel kaburgalar sayesinde (Resim 4.8), girinti-çıkıntı oluşturarak çıkıntı yerlerin güneş ışınlarını alırken aynı zamanda girinti yerlere gölgelik olarak çalışması prensibiyle hem beslenme hem serinleme ihtiyaçlarını gidermektedirler (Badarnah, 2015).



Resim 4.8. Kaburgaları sayesinde gövdesinde gölgeler oluşturarak vücut sıcaklığını dengeleyen kaktüs (Wonderopolis, 2020)

4.7. *Encelia Farinosa* Çalışında Termoregülasyon

Bir çöl çalısı olan *Encelia farinosa* bitkisi, ısı kazanımını önleyerek vücut sıcaklığını dengelemek durumundadır. Bunun için radyasyon ile ısınımı minimize etme eğilimindedir. Radyasyon ile ısınımı önlemede yansıtıcılığı kullanan *Encelia farinosa*, albedo kat sayısı yüksek gümüş renkte tüylerle kaplıdır (Resim 4.9). Tüylerin sık dokulu oluşu, yaprak yüzeyinde ikincil bir katman oluşturarak, güneş ışınlarını yansıtmakta ve yaprağı aşırı ısınımından korumaktadır. Bu noktada, aşırı ısınımı önlemede bir diğer yardımcı etken ise tüylerin cansız oluşudur. Çünkü cansız tüyler, canlı tüylerdeki gibi su yerine hava ile doludur ve canlı tüylere göre yoğunlukları daha düşüktür. Böylece ısı absorpsiyonu daha az olduğundan ısı kazanımı da azalmaktadır. *Encelia farinosa* bitkisi, ısı kazanımının önlenmek istendiği durumlarda açık renkler ile düşük yoğunluklu malzemelerin birlikte çalışmasının etkin sonuçlar sağlayacağı konusunda yapı kabuğu tasarımında esin kaynağı olabilir. Yansıtıcı özellikteki yüzeyin, bütünsel ve tek parça olması yerine, çok sayıda, ince ve küçük bileşenlerden oluşabileceği de *Encelia farinosa* bitkisinin yapı kabuğu tasarımında esin verebilecek başka bir özelliği olabilir.



Resim 4.9. *Encelia farinosana*'nın aşırı ısı kazanımını önleyen gümüş tüylü yaprakları (Calscape, 2020)

Bu bölümde biyomimetik tasarım metodolojisi öğretileri ve termoregülatif yapı kabuğunun sahip olması gereken özellikler göz önünde bulundurularak biyolojik yapılar incelenmiştir. Doğada ekstrem şartlarda hayatta kalmayı başaran biyolojik yapılardan karıncaların;

- Yuvalarının strüktür yapısı ve konik formu
- Yuva asimetrisi davranışı
- Koyu renk vücutlarını birer ısı birimine dönüştürmeleri
- Yalıtım için içi hava dolu sazlar kullanmaları
- Serinleme için yuvalarında rüzgâr kanalları oluşturmaları

Yaprakların;

- Küçük yüzey alanıyla minimum ısı birikimini sağlaması,
- Rüzgârla etkileşimini artırarak konveksiyon ve buharlaşmayla serinleme için loblu ve dişli yapıda olması

Çöl salyangozunun;

- Yüksek albedo kat sayılı renkteki kabuğuyla güneş ışınlarını yansıtması
- Konveksiyonla sıcak havayı yönetmesine izin veren kabuk formu
- Yalıtım için düşük iletkenlikteki havayı malzeme olarak seçmesi

Kuşların;

- Dış vücut katmanını kalınlaştırırken aynı zamanda bu katmanı havayla doldurarak yoğunluğunu düşürmesi ve böylece iletkenliği azaltarak etkin yalıtım sağlaması
- Başlarını ve ayaklarını gövdelerine doğru çekerek soğukla temas eden yüzey alanını düşürmeleri

Zebraların;

- Siyah-beyaz çizgili vücutlarının havayı farklı miktarlarda ısıtmasıyla vücutlarının çevresinde rüzgâr oluşturarak serinlemesi

Kaktüslerin;

- Gövdelerindeki dikey çıkıntılar sayesinde gövdelerinin tamamını güneş ışınlarına maruziyetten ve istenmeyen miktarda ısınmaktan koruması

Encelia farinosa çalısının;

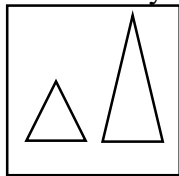
- Yaprakları üzerindeki gümüş renkli ve sık dokulu tüylerin güneş ışınlarını yansıtacak bir yüzey oluşturarak aşırı ısınımı önlemesi, yüzey oluşturmada çok sayıda küçük ve ince bileşenin kullanılabileceği ve yüzeyi oluşturan malzemede renk açıklığıyla yoğunluk düşüklüğünün doğru orantılı olması

Termoregülayon konusunda ilgi çekici bulunmuştur. Bu tez çalışması kapsamında, termoregülatif özellikte bir yapı kabuğu tasarımı için yalıtım, ısı kazanımı ve ısının uzaklaştırılmasıyla serinleme şeklinde üç ana bileşenin çözümlenmesi hedeflenmektedir. Yalıtım konusunda salyangozların yerle temaslarını hava gibi düşük yoğunluklu bir maddeyle önlemeleri, karıncaların yine içi hava dolu sazlarla yuva tabanlarını döşemeleri, kuşların ise tüylerini kabartarak vücutları çevresinde yoğunluğu düşük ve kalın bir katman oluşturmaları; ısı kazanımı konusunda karıncaların konik yuva formları ve koyu renk vücutları, yaprakların tek parçalı ve büyük yüzey alanlı olması; serinleme için ise salyangozların yüksek albedo kat sayılı ve sarmal formdaki kabuklarıyla ısı kazanımını önlemesi, karıncaların yuva içi rüzgâr oluşturan doğal havalandırma kanalları, zebraların siyah-beyaz çizgilerle kendi çevrelerinde rüzgâr oluşturmaları, yaprakların loblu ve dişli formları, Encelia farinosa bitkisinin açık renk ve düşük yoğunluklu tüyleri, yapı içinde ısı konforu artırarak daha sağlıklı yaşam alanı oluşturacak ve yaşam kalitesini yükseltecek

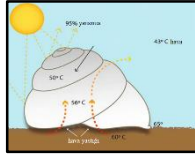
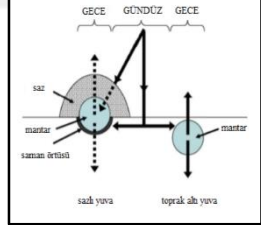
termoregülatif yapı kabuğu tasarımında ilham verici bulunmuştur. Bir sonraki aşama olan yapı kabuğu tasarımında, dinamik yapı tasarımında biyomimetik tasarım metodolojisinin özellikle morfolojik boyutta olan katkıları göz önünde bulundurularak incelenmiş karınca, salyangoz, kuş ve yaprakların form, renk ve yönelim özelliklerinden yola çıkılarak termoregülatif yapı kabuğu birim tasarımı çalışmaları yapılmıştır.

İncelenen biyolojik yapılarla termoregülatif özellikte bir yapı kabuğu tasarımı için gerekli form ve geometrik yapının özellikleri, farklı sıcaklık koşullarına uyumlanmak üzere gece ve gündüz zaman dilimlerinde farklılık göstermelidir. Böylece, enerji verimliliğinde biyomimetik yapı kabuğuna kazandıracağı özelliklerden dinamizm, yapı kabuğuna uygulanabilir. Farklı sıcaklık şartları ve zaman dilimleri göz önünde bulundurulduğunda Çizelge 4.1'deki gibi bir koşul, zaman ve özellik eşleşimi ortaya çıkmaktadır:

Çizelge 4.1. Termoregülatif yapı kabuğu tasarımında esinlenilebilecek biyolojik yapıların gündüz-gece saatlerine göre ısınma ve soğutma fonksiyonu kazanmalarını sağlayan özellikleri

	Isıtma	Çıkarım Yapılacak Biyolojik Yapı	Soğutma	Çıkarım Yapılacak Biyolojik Yapı
Gündüz	Renk	Formica rufanın koyu renk vücudu 	Renk	Çöl salyangozunun parlak beyaz kabuğu 
				Zebraların siyah-beyaz çizgileri 
	Yüzey alanı	Konik karınca yuvası 	Yüzey alanı	Loblu Geranium sanguineum bitkisi yaprakları 

Çizelge 4.1. (devam) Termoregülatif yapı kabuğu tasarımında esinlenilebilecek biyolojik yapıların gündüz-gece saatlerine göre ısınma ve soğutma fonksiyonu kazanmalarını sağlayan özellikleri

Gündüz				 Dişli kenarlı Acer rubrum bitkisi yaprakları
	Form		Form	Kaktüslerin dikey gövde çıkıntıları 
Gece	Yalıtım	Çöl salyangozunun havayla doldurduğu vücut tabanı 	Yalıtım	Acromyrmex heyzerinin sazla döşeli yuva tabanı 
		Kuşların tüylerini kabartmaları 		

Havanın soğuk olduğu günlerde, yapı içi sıcaklığın termal konfor sıcaklık aralığında olabilmesi için güneş enerjisinden ısı kazanımı maksimum miktarda olmalıdır. Bunun için yapı içindeki mevcut ısıнын kaybedilmesinin önüne geçen yalıtımın yüksek olması ve güneş ışınlarının gündüz saatlerinde en etkin şekilde absorbe edilmesi gerekmektedir. Bu noktada yapı kabuğunun;

- Koyu renkli,
- Geniş yüzey alanlı/bütünsel
- Kalın ve

- Düşük yoğunluklu malzemeden olması en uygun form kombinasyonudur.

Havanın sıcak olduğu günlerde ise, ısı kazanımını minimize etmek, konveksiyon ve radyasyon ile serinleme sağlanarak yapı içi ısı seviyesinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle güneş ışınlarına maruz kalınan gündüz saatlerinde yapı kabuğu;

- Açık ve parlak renkli,
- Parçalı,
- Çıkıntılı,
- Havalandırma kanallı,
- Gölgelekli,
- İnce ve
- Düşük yoğunluklu malzemeden olmalıdır.

Yapı kabuğunun doğaya uyumlanma kapasitesi değişen çevresel şartlara eş zamanlı cevap vermesiyle doğru orantılıdır. Bu nedenle yapı kabuğu iç mekân hava sıcaklığını koruyabilmek ve değişen sıcaklıklardan yapı içinin doğrudan ve hızlı bir şekilde etkilenmesini önleyebilmek için öncelikle iyi yalıtılmış olmalıdır. Yalıtımla donatılırken aynı zamanda hem sıcak hem soğuk havalar için uyumlanabilme, her iki duruma da cevap verebilme yetisine sahip olmalıdır. Bu nedenle yapı kabuğu hem güneş ışınlarını optimum şekilde absorbe ederek radyasyon yoluyla ısı kazanımını hem de güneş ışınlarını yansıtarak, gölgelendirme yaparak, rüzgâr oluşturarak ve mevcut rüzgârla etkileşimini artırarak radyasyon ve konveksiyon yolu ile ısı uzaklaştırımını destekler nitelikte olmalıdır. Bu bağlamda yapı kabuğunun en önemli bileşenleri form ve farklı formlara dönüşebilme özelliğini kazandıran dinamik yapıda olma özellikleridir. Biyomimetik tasarım metodolojisi, morfolojik yaklaşım ile yapı kabuğunun ihtiyacı olan dinamik formu tasarlama noktasında yönlendirici olurken, malzeme ve üretim yöntemi de yapı kabuğunun dinamizm kazanmasında önem teşkil etmektedir. Bu bölümde biyolojik esin kaynaklarının doğanın değişen sıcaklık koşullarına uyumlanma ve ekstrem şartlarda hayatta kalma yetileri göz önünde bulundurularak sahip oldukları özelliklerinden elde edilen çıkarım ve öğretiler uygun şekilde sentezlenerek üç farklı yapı kabuğu birimi tasarlanmıştır. Bir sonraki aşama olan malzeme seçimi ve her bir modelin form itibariyle farklı sıcaklık koşullarına cevap verme kapasitesi analiz edilerek optimum dinamik yapı kabuğu birimi tasarımı sonuçlandırılacaktır.



5. KİNETİK YAPI KABUĞUNDA HAREKET BAŞLATICI: AKILLI MALZEMELER

Mevcut geleneksel yapılar statik yapıları sebebiyle doğaya uyumlanma özelliğine sahip değildir. Seramik, metal veya cam gibi geleneksel yapı malzemeleri homojen ve malzemenin her yerinde aynı özelliklerin görüldüğü malzemelerdir. Bu durum, yapı için sabit çözümleri ve sonuçları getirdiğinden sağlam ve ağır malzemelerle oluşturulmuş yapılar yerine, yapının dinamizm kazanması için hafif ve esnek malzemelerden oluşan yüksek teknolojiye sahip sistemlere olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Dinamik yapı kabukları, yapı üzerinde ikincil bir dış katman oluşturarak, yapının değişen çevre şartlarına eş zamanlı cevap verme özellikleri ile yapıyı statik hâlden dinamik hâle getirmektedir. Yapı kabuğunun dinamizm kazanmasında kullanılan akıllı mekanik sistemler; hareket başlatıcılar, elektronik yapılar ve sensörlerden oluşmaktadır. Bu tür sistemler pasif yapı kabuğu sistemlerin verimini artırmaktadır. Fakat dışarıdan yönetilmesi gereken kontrol sistemlerinin kullanıcılarda kontrol karmaşıklığı sebebiyle tekno-strese sebep olması, bakım ve onarım yükü ve maliyetli oluşu akıllı sistemlere olan ilgiyi azaltmaktadır. Örneğin çevreye uyumlanabilen yapı kabuğu donanımına sahip olma konusunda öncü yapılardan olan Arap Dünya Enstitüsü (Arab World Institute) binası, bakım yükü sebebiyle yapımından birkaç yıl sonra popülaritesini kaybetmiştir. Bu sistemler aynı zamanda mekanik ve elektronik bileşenlerden oluştuğu için elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır ve akıllı sistemlerin enerjiye olan bağımlılığı, enerji verimliliği konusunda akıllı sistemleri zayıf kılmaktadır.

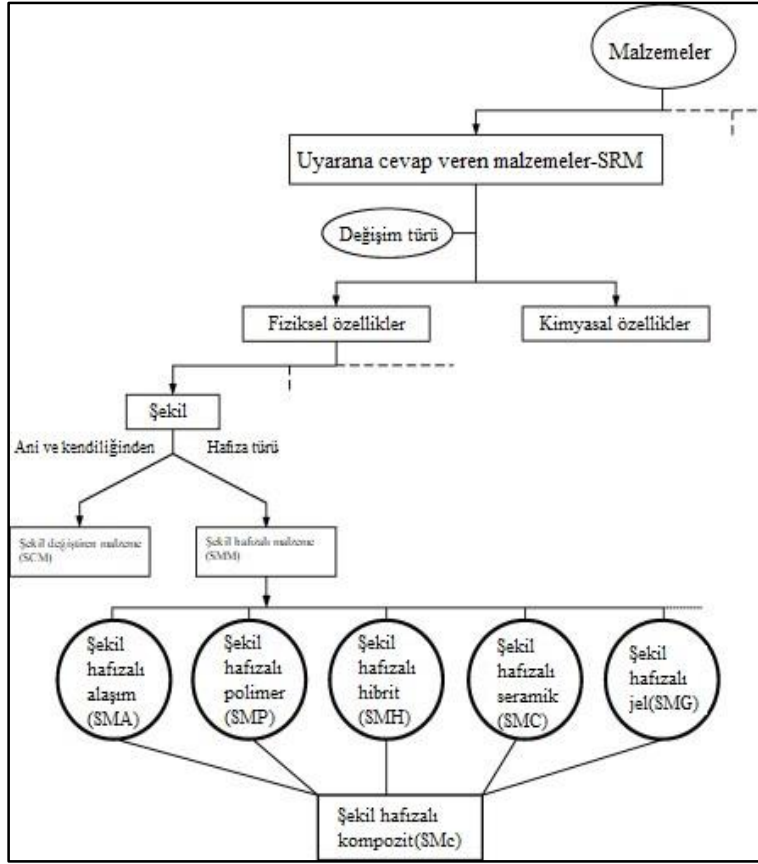
Son zamanlara kadar yapı kabuğunda odak noktası termal yalıtımın geliştirilmesi, enerjinin etkin kullanımı ve HVAC sistemlere olan bağımlılığın azaltılması ihtiyacı ortaya çıktığından artık ZEB yapı konseptine odaklanılmaktadır. ZEB yapı konseptinde doğaya uyumlanma önemli etkenlerdendir ve doğada bu uyumlanmayı başaran yapılar kendi kendine yetebilen yapılara esin kaynağı olabilmektedir. Bu noktada biyomimetik tasarım metodolojisi, yapılarda termal bölmelendirme, doğal ışık kontrolü, ısı kazanımı kontrolü, doğal havalandırma, gölgelendirme ve yapı üzerinde açıklıklar oluşturulabilme konusunda destekleyici nitelikteki morfolojik yaklaşım ile yapı kabuğu tasarımında form itibarıyla esin kaynağı olmaktadır. Bitkilerin statik olmalarına karşın doğaya adapte olmalarını sağlayan dinamizmlerinden yola çıkılarak geliştirilen aktif malzemelerin, eklemeli imalat ile karmaşık geometride ve çoklu malzemeyle basılabilmesi ve simülasyon yazılımları, yapı kabuklarının yapıya dinamizm kazandırmasında etkin rol oynamaktadır. Böylece yapı kabuğu ile enerji verimliliğinin desteklenirken istenen basitlikteki kullanım da beraberinde sağlanabilmektedir.

Yapı içi termal konforun desteklenmesinde yapının doğaya uyumlanma kapasitesini artıran ve pasif sistemleri elektrik enerjisi veya herhangi bir mekanik başlatıcı kullanmaksızın dinamik hâle getiren kinetik yapı kabuklarında malzeme önemli bir bileşendir. Yapısal özellikleri itibariyle termal hassasiyeti olan ve termal değişkenlerle şekil değiştirerek uyumlanmayı sağlayan malzemelerden yapılması ve böylece değişen sıcaklık şartlarına adapte olabilmesi yapıya enerji verimli olma özelliğini kazandırmaktadır. Çevreye uyumlanabilen pasif yapı kabuklarında malzeme ile şunlar sağlanabilmektedir (Al-Obaidi, Azzam Ismail, Hussein ve Abdul Rahman, 2017; López, Rubio, Martín, Croxford ve Jackson, 2015; Villegas, Camilo, Gutiérrez ve Colorado, 2020; Yoon, 2019);

- Yapı kabuğunun aktive edilmesi için dışarıdan temin edilmesi gereken ekstra elektrik enerjisine olan ihtiyaç ortadan kaldırılmaktadır.
- Tamir ve bakım maliyetlerinin karmaşık mekanik sistemlerde olduğu gibi yüksek olmasına engel olunur.
- Elektronik bağlantı elemanları yerine ek bir birleşme elemanı gerekmeksizin esnek çözümler getirilmektedir.
- Mekanik sistemlerdeki gibi karmaşık ve çok sayıda parçanın bir araya gelmesiyle ve enerji kullanarak yerine getirilen fonksiyonlar, malzemenin yapısal özellikleri sayesinde çok daha basit bir şekilde yerine getirilebilir.
- Çoklu malzemenin bir arada kullanımı seçeneği ve doğadaki canlıların sahip oldukları bir yapı ile birkaç işlevi yerine getirebilmesi, kinetik yapı kabuğuna multifonksiyonellik özelliğini de kazandırmakta ve böylece değişen senaryolara uyumlanma kapasitesini artırmaktadır.

Kinetik yapı kabuklarında malzeme seçimi ile etkin enerji yönetiminin sağlanmasını hedefleyen uygulamalarda performans geliştirme ve yeni fonksiyonlar elde etmek amacıyla malzeme geliştirmelerine yönelilmektedir. Bu malzemeler arasında bir uyarıcı ile fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştiren malzemeler de bulunmaktadır. Uyarıcılar sıcaklık, gerilim/basınç, elektrik akımı/voltaj, manyetik alan, pH/nem/çözücü ve ışık olarak malzemelere etki etmektedir. Bu malzemeler genel adıyla uyarana cevap veren (Stimulus-Responsive Materials-SRM) malzemeler olarak tanımlanmaktadır (L. Sun ve diğerleri, 2012). Dinamik yapı kabuklarında güneş ışığının binaya girişini yöneten açılma-kapanma mekanizmalarının odağında sıcaklıkla uyarılan akıllı malzemeler bulunmaktadır (Yoon,

2019). Fiziksel özellikleriyle dış uyaranlara cevap verebilen akıllı malzemelerin genel sınıflandırılması Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Çevresel uyaranlara cevap veren akıllı malzemelerin sınıflandırılması (L. Sun ve diğerleri, 2012)

Uyarıcılara cevap veren SRM’ler, şekil değiştiren malzemeler (Shape Change Material-SCM) ve şekil hafızalı malzemeler (Shape Memory Material-SMM) olmak üzere iki gruptur. SRM doğru uyaran ile kendiliğinden ve aniden şekil değiştirdiğinde SCM olarak tanımlanmaktadır. Elektroaktif polimerler (Electro-active Polymer-EAP) ve kurşun-zirkonat-titanat (Lead Zirconate Titanate - PZT) gibi piezoelektrik malzemeler şekil değiştiren malzemelerin tipik alt gruplarıyken (Aschwanden ve Stemmer, 2006; Haertling, 1999; Lendlein ve Kelch, 2002; Yu, Nakano ve Ikeda, 2003), SMM uyarıcılara cevap veren malzemelerin diğer grubudur. Şekil hafızalı malzemelerde hareket başlangıcını sağlayan doğru uyaran uygulanmadığı sürece malzeme geçici şeklini korur. Bütün şekil hafızalı malzemeler, şekil hafıza etkisi (Shape Memory Effect-SME) ile karakterizedir ve ciddi bir plastik bozulma sonrası doğru uyaran ile orijinal şekline dönebilmektedir (WM Huang ve diğerleri, 2010).

5.1. Şekil Hafızalı Malzemelere Genel Bakış

Birçok çeşidi olan şekil hafızalı malzemeler arasında şekil hafızalı alaşımlar (Shape Memory Alloys-SMA) ve SMP'ler günümüzde en önemli grubu oluşturmaktadır (El Feninat, Laroche, Fiset ve Mantovani, 2002; Gunes ve Jana, 2008; Hornbogen, 2006; Wei, Sandström ve Miyazaki, 1998). Şekil hafızalı alaşımların çalışma prensibi tersine çevrilebilir martensitik dönüşümken, şekil hafızalı polimerler çift segment prensibi ile çalışmaktadır. Şekil hafızalı malzemelerin en yenisi olan şekil hafızalı hibritler (Shape Memory Hybrids-SMH) ise şekil hafıza etkisi özelliğine sahip olmayan en az iki bileşenden oluşur ve şekil hafızalı polimerlerin çalışma prensibinin aynısına sahiptir. Fakat çok daha geniş yelpazede özellik ve fonksiyon sunmaktadır (Fan ve diğerleri, 2011; Funakubo ve Kennedy, 1987; WM Huang ve diğerleri, 2010; L Sun, Huang ve Cheah, 2010; Li Sun ve Huang, 2010). Şekil hafızalı hibritler profesyoneller yerine sıradan insanlar tarafından da kullanılabilir ve herhangi bir malzeme ve işleme bilgisi gerektirmeksizin kullanılabilir gruptur.

Şekil hafızalı jeller (Shape Memory Gel-SMG) ise kabarma etkileri veya elektrik yüklenebilme özelliklerine rağmen şekil değiştiren malzeme grubunda değerlendirilirken, ışıkla uyarılabilmeleri sayesinde yeni ve fonksiyonel bir malzeme olarak da kullanılabilir (Klinger ve Landfester, 2011). Şekil hafızalı seramiklerin (Shape Memory Ceramic-SMC) çalışma prensibi ise tersinir faz değişimi ile şekil hafızalı alaşımlara veya çoklu faz sistemi ile şekil hafızalı polimerlere benzemektedir (Pandit, Gupta ve Wadhawan, 2004; Schurch ve Ashbee, 1977; Swain, 1986).

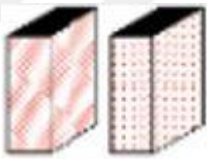
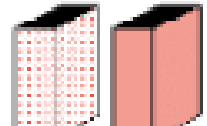
Şekil hafıza etkili malzemelerin keşfi altın-kadmiyum (Aurum-Cadmium - AuCd) alaşım ile 1932'de gerçekleşmiştir. Fakat mühendislik uygulamaları için ilk önemli boyutta değişim gösterebilen Nikel-Titanyum (Nickel Titanium/nitinol - NiTi) alaşımın keşfi 1971'de gerçekleşmiştir. Bugün ise birkaç SMA sistemi geliştirilmiş ve ticari olarak kullanılabilir durumdadır (Funakubo ve Kennedy, 1987; W Huang, 2002; Lagoudas, 2008).

Isıyla büzüşen polimerler (Heat Shrinkable Polymer-HSP) şekil hafızalı polimerler grubuna dahil edildiğinde, şekil hafızalı polimerlerin geçmişi 1906'ya dayanmaktadır. Suyla büzüşen polimerler (Water Shrinkable Polymer-WSP) ise bu şekildeki bir başka gruptur. Polietilen (Polyethylene-PE) ve etilen-vinil asetat (Ethylene-Vinyl Acetate-EVA) ise elektrik mühendisliğinde sistemin mekanik bileşenlerini korumada kullanılmaktadır. Teknik olarak bakıldığında ise şekil hafızalı polimerlerin tarihi 1984 yılına ve Japonya'ya dayanmaktadır.

Japonya’da Mitsubishi Heavy Industries tarafından sağlanan ve en geniş ulaşılabilirliğe sahip termoplastik PU bazlı SMP ve Amerika Birleşik Devletleri’nde geliştirilen termo-set PS bazlı SMP grubu günümüzde ticari olarak ulaşılabilir durumdadır (Dietsch ve Tong, 2007; Hayashi, 1990; Yoon, 2019).

Kinetik yapı kabuklarında güneş ışınlarını kontrol ederek ısı kazanımını yöneten sistemler, açılma-kapanma mekanizmaları üzerine kurulu olduğundan bu tez kapsamında sıcaklıkla uyarılan akıllı malzemeler ele alınmıştır. Bu malzemelerin yapı kabuklarında kullanılabildiği morfolojiler, hangi formatta kullanılabildikleri, sıcaklığın malzeme üzerinde nasıl bir kontrol etkisi olduğu, hareket başlatıcı olarak çalışıp çalışmadıkları ve sıcaklıkla uyarılmaları sonucunda nasıl bir cevap verdikleri Çizelge 5.1’de karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir (Yoon, 2018).

Çizelge 5.1. Yapı kabuklarında kullanılan sıcaklık duyarlı akıllı malzemelerin karşılaştırılması

Malzeme	Morfoloji	Format	Kontrol	Hareket Başlatıcı	Çıktı
PCM		Toz Likit	Faz		Transparanlık
Termobimetal		Levha	Genleşme Eğilme	✓	Hareket Açılma
SMA		Tel/yay Levha	Büzülme Gevşeme	✓	Hareket
SMP		Levha Serbest form	Şekil geçiş	✓	Deformasyon Elastisite
Termokromik		Toz Likit	İç düzen		Renk

Bu çalışma, kinetik yapı kabuğundaki dinamik hareketlere imkân sağlayan ve hareket başlatıcı olarak fonksiyon gören yapıların morfolojik tasarımı üzerine olduğundan dolayı, faz değişimi ile enerjiyi depolayan/salan PCM ile termal değişkenlere şekil değişikliği yerine renk değişikliği ile cevap veren termokromik malzemeler çalışmada kapsam dışı

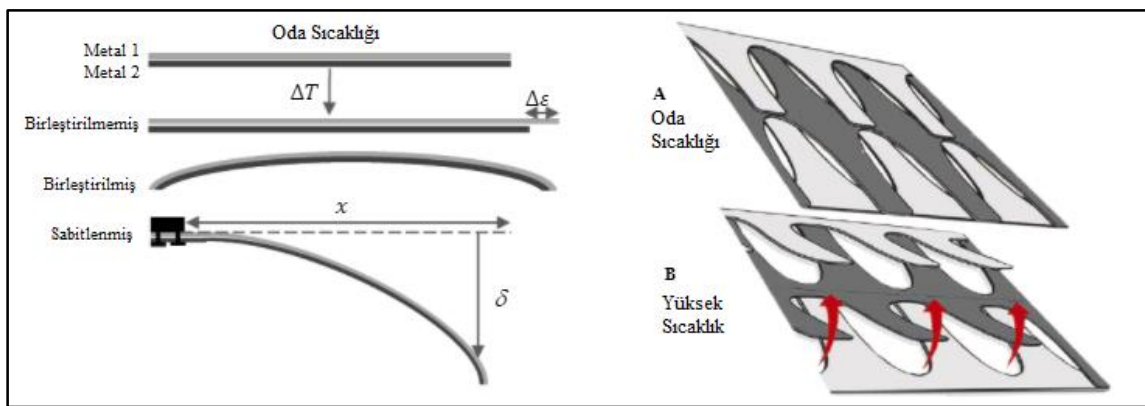
tutulmaktadır. PCM ve termokromik malzemeler, şekil değiştirme özelliği bulunan SMA, SMP ve termobimetallerle kombine edilerek yapılarda kullanılabilir (Yoon, 2018).

5.1.1. Termobimetaller

Termobimetaller şekil hafızalı hibrit grubunun bir üyesidir. Genel olarak şekil hafızalı hibritlerin diğer malzemelere göre avantajı, kimyasal etkileşim olmadığından dolayı malzemenin nasıl davranacağını en baştan beri biliniyor olmasıdır.

Şekil hafızalı polimerlerde sıcaklık döngüsü çok başarılı değilken, şekil hafızalı hibritlerde arka arkaya gerçekleşen sıcaklık döngülerinde alınan sonuçlar her defasında aynı olduğundan sıcaklık döngülerine daha uygundur.

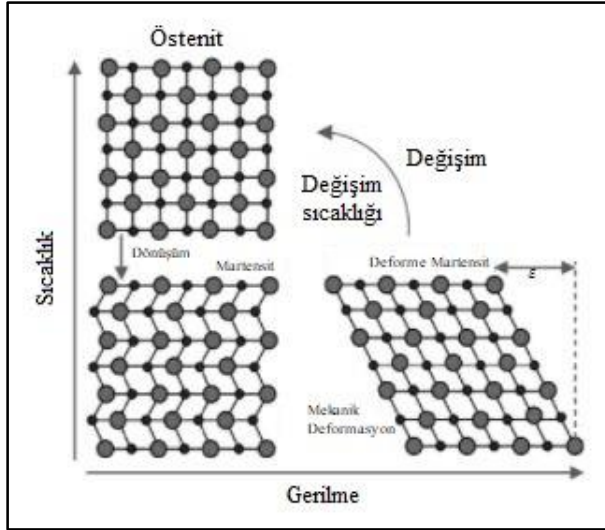
Termal genleşme ile çalışan yapılardan olan bimetal, şekil hafızası olmayan ve farklı genleşme kat sayılarına sahip metallerin elastik bağlayıcı ile bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bimetal sistemlerin çalışması asimetrik stres dağılımı ile gerçekleşmektedir. Bu tür sistemler, doğrudan veya dolaylı sıcaklık değişimlerine eğilme hareketiyle cevap vermektedir. Güneş ışınları veya iklimsel sıcaklık değişimleri ile uyarılan bu sistemler aktif yapı kabuklarında sıcaklık akışının kontrolünde kullanılmaktadır (Şekil 5.2) (Villegas, Camilo, Gutiérrez ve Colorado, 2020). Bimetallerin etkin bir şekilde eğilme hareketini gerçekleştirebilmesi için birbirlerine ve eğilmenin gerçekleşmesi istenen yüzey normalinde sabitlenmiş olması gerekmektedir.



Şekil 5.2. Bimetal şeritlerin sıcaklık değişiminde eğilme hareketi ve Los Angeles'ta yapı kabuğuna uygulanmış örnek bir çalışmanın oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta davranım şekli

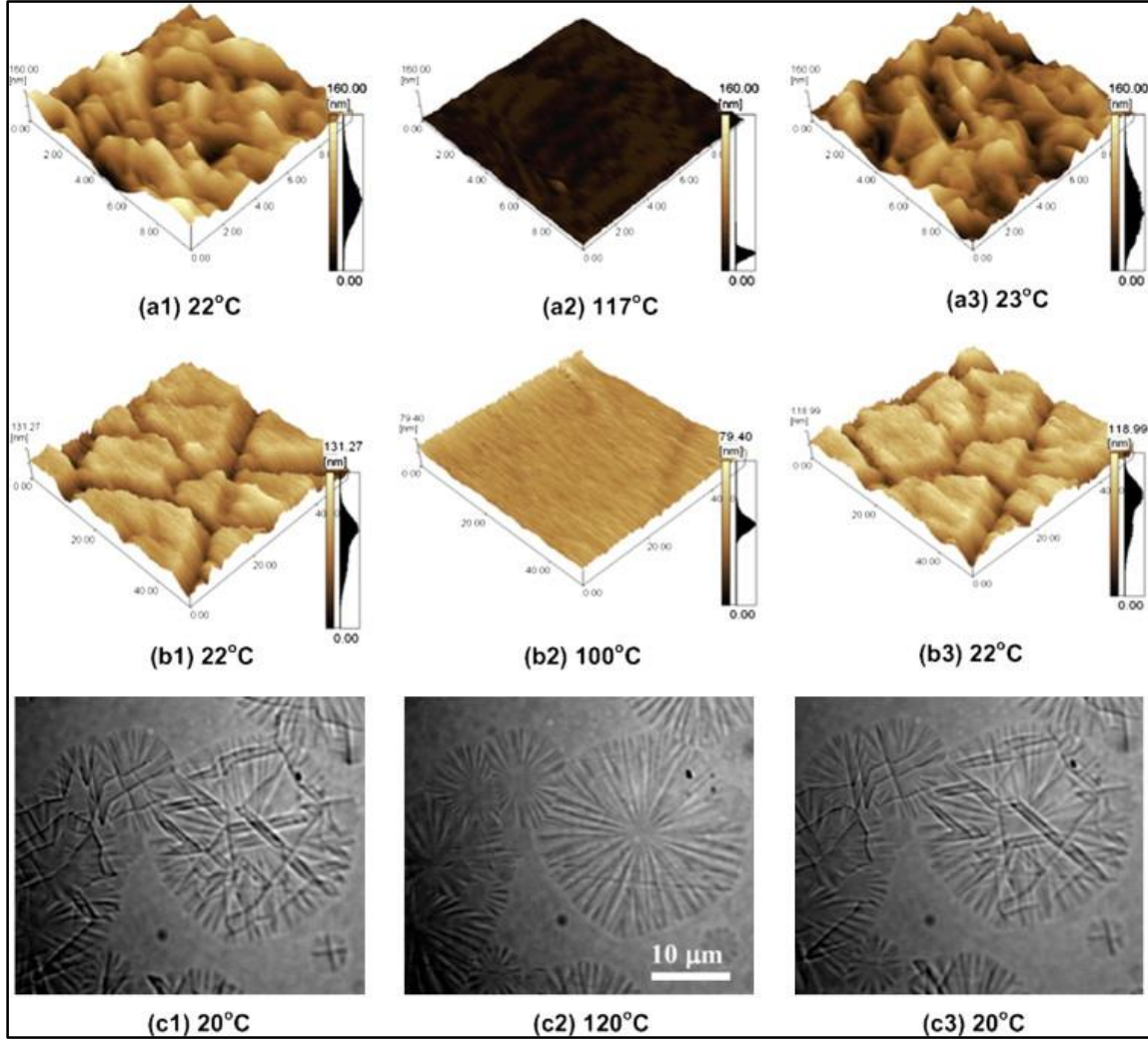
5.1.2. Şekil hafızalı alaşımlar (Shape memory alloys-sma)

Şekil hafızalı alaşımlar sıcaklık ve manyetizma ile uyarılanlar olmak üzere iki çeşittir. Sıcaklıkla uyarılan şekil hafızalı alaşımlar mühendislik uygulamaları ve ticari ulaşılabilirliği itibarıyla daha çok gelişmiştir. Şekil hafızalı alaşımlar tersinir martensitik dönüşüm ile çalışmaktadır. Çalışma prensibi, düşük sıcaklıktaki martensit faz ile yüksek sıcaklıktaki östenit faz arasındaki katı faz değişimi üzerine kuruludur (Şekil 5.3) (Duerig, Melton ve Stöckel, 2013; Funakubo ve Kennedy, 1987; Miyazaki, Fu ve Huang, 2009; Nishiyama, 2012; Otsuka ve Wayman, 1999; L. Sun ve diğerleri, 2012; Yahia, 2012; Yoneyama ve Miyazaki, 2008).



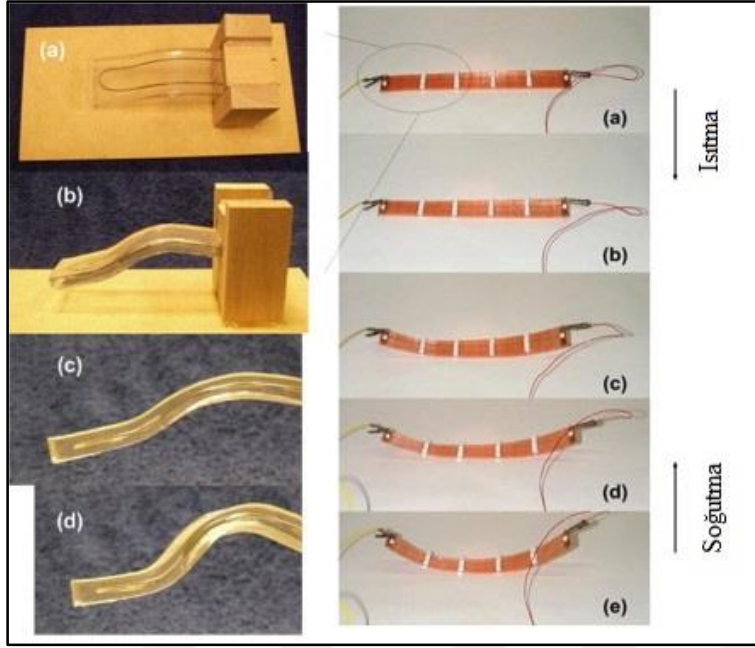
Şekil 5.3. Şekil hafızalı alaşımların çalışma prensibini oluşturan martensit-östenit faz değişimi (Villegas, Camilo, Gutiérrez ve Colorado, 2020)

Sıcaklıkla uyarılan şekil hafızalı alaşımların, bakır (Copper-Cu), NiTi ve demir (Ferrum-Fe) bazlı olmak üzere üç çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan Cu ve NiTi bazlı olanlar mühendislik uygulamaları için çok daha uygunken, Fe bazlı olanlar daha nadir kullanılmaktadır. NiTi bazlı şekil hafızalı alaşımların farklı sıcaklık değerlerindeki davranışı Resim 5.1’de gösterilmektedir.



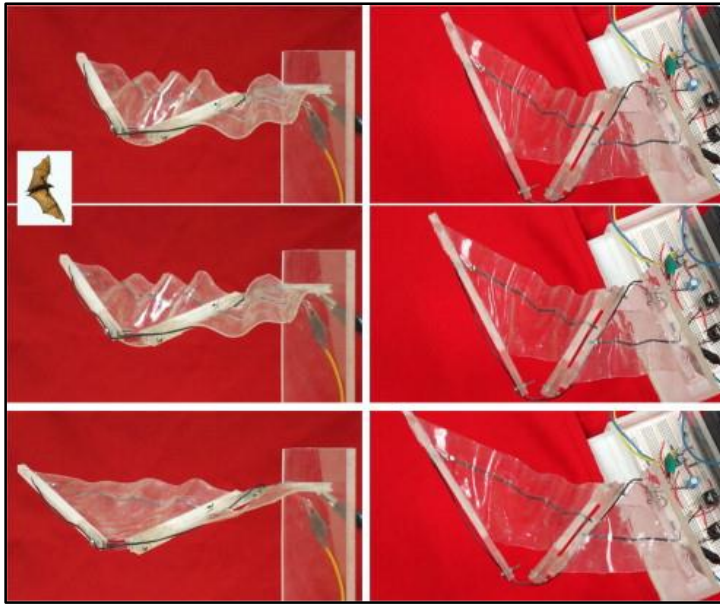
Resim 5.1. NiTi bazlı şekil hafızalı alaşımın düşük ve yüksek sıcaklıktaki davranışı (L. Sun ve diğerleri, 2012)

Homojen hareketle faz değiştiren NiTi alaşım, mekanik performansı itibarıyla diğer şekil hafızalı alaşımlara göre daha güvenilirdir ve yapılarda en çok tercih edilen hareket başlatıcı malzemedir. Sıcaklık değişimleri NiTi alaşımlarda mekanik kuvvet olarak kullanılmaktadır ve bu kuvvet önceden gerilmiş NiTi yay veya NiTi tellerin önceki hallerine dönmelerinde kullanılmaktadır (Wikipedia, 2010; Ryhänen, 1999; L. Sun ve diğerleri, 2012). NiTi telin ısıtma ve soğutma sonucu gösterdiği hareket değişikliği Resim 5.2’de gösterilmektedir.



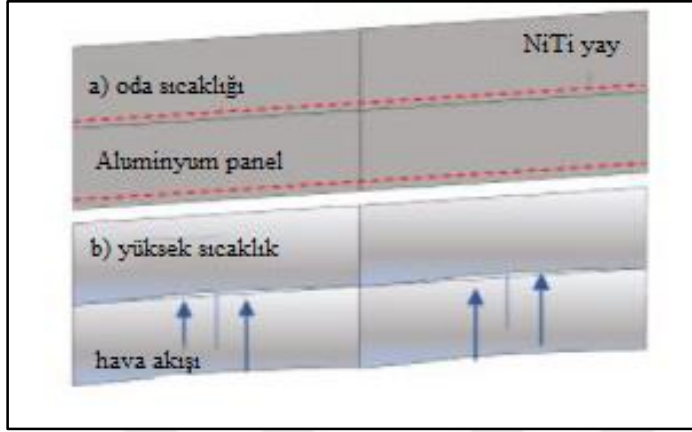
Resim 5.2. Solda: 1 mm $\varnothing$ NiTi tel gömülü silikon parça (a) Üstten görünüm; (b) yandan görünüm; (c) ısıtmadan önce; (d) elektrikle ısıtma sonrası. Sağda: harici olarak bağlanmış ince NiTi telli kompozit kiriş. Elektrik ile ısıtma sonrası (a)'dan (e)'ye ve (e)'den (a)'ya soğutulduktan sonra (L. Sun ve diğerleri, 2012)

Resim 5.3'te bir yarasa kanadını taklit etmek üzere modellenen NiTi şeritlerin gömülü olduğu silikon zar ve elektrikle ısıtılma sonrası NiTi şeritlerin uyarılmasıyla birlikte orijinal hali olan zig-zag şekle dönmesi gösterilmektedir.



Resim 5.3. SMA şeritlerin gömülü olduğu, elektrikle ısıtılarak açılıp kapanan kanat modeli. Sol sütun: yandan görünüm; sağ sütun: üstten görünüm (L. Sun ve diğerleri, 2012)

Şekil 5.4'te ise alüminyum panel aracılığıyla elektrik verilerek ısıtılan ve yapı kabuğu modelinde gömülü olan NiTi yayın ısıtılma sonrası eğrisellik kazanmasıyla hava akışına izin veren aralanmayı gösteren bir çalışma örneği bulunmaktadır.



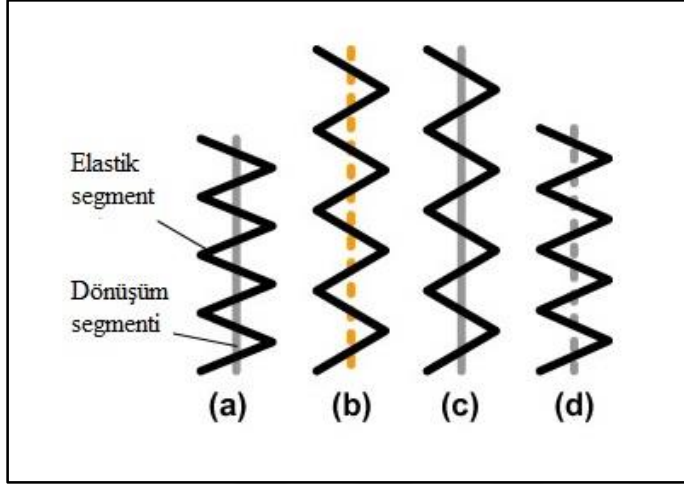
Şekil 5.4. NiTi yay ile hareket başlangıcının sağlandığı kinetik yapı kabuğu çalışması örneği. a) kapalı hal b) açık hal (Villegas, Camilo, Gutiérrez ve Colorado, 2020)

Şekil hafızalı alaşımlar, elektrik akımı ile ısıtılabilirdiği gibi sıcak hava/su maruziyeti ile veya termal radyasyonla da ısıtılabilir (W Huang, 2002). Solar radyasyonla aktivasyon sayesinde şekil hafızalı alaşımlar uzay araçlarında kullanılabilir. Bu tür araçlarda sistem parçalarından güneşe maruz kalan kısım 120°C 'ye kadar ısınırken, gölgede kalan kısım -150°C 'ye kadar soğuyabilir. Böylece her iki duruma da uyumlanabilen iki yönlü şekil hafıza etkili parça uygulamaları gerçekleştirilebilir. Şekil hafızalı alaşımların yeryüzünde kullanılabilmesi için güneş ışınlarının mercekler ile odaklanarak yoğunlaştırılması ve yüzeyde biriken sıcaklık miktarının çok yüksek miktarda artırılması gerekmektedir (L. Sun ve diğerleri, 2012). Bu nedenle doğrudan güneş ışınına maruziyet ile şekil hafızalı alaşımlarda şekil değişikliklerinin gözlemlenebilmesi çok olası değildir.

5.1.3. Şekil hafızalı polimerler (Shape memory polymers-smp)

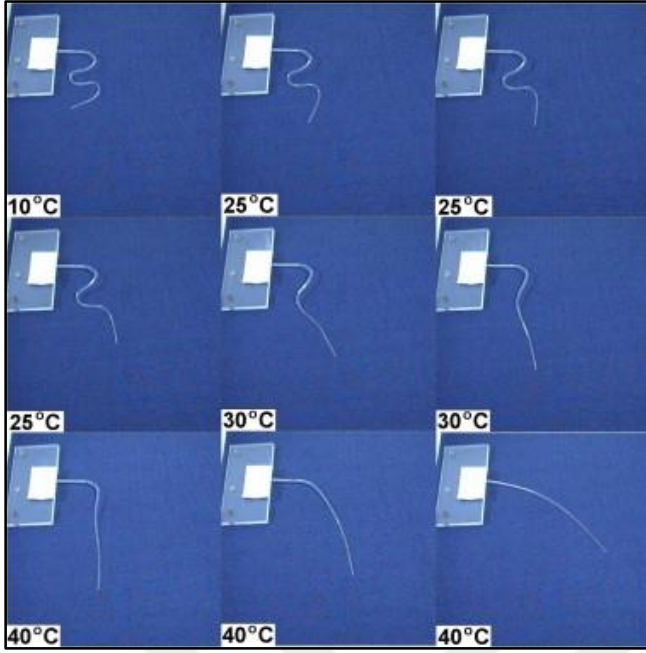
Şekil hafızalı polimerlerde iki farklı segment bulunmaktadır. Biri elastik segment, diğeri ise dönüşüm segmentidir (Şekil 5.5). Parçanın ısınmasıyla erime sıcaklığına ulaşan dönüşüm segmenti yumuşamakta ve kolayca deforme olabilecek hale gelmektedir. Bu durumda gerçekleşecek olan herhangi bir germe hareketine karşı koyacak kısım ise elastik segmenttir. Bu halde iken tekrar soğuma gerçekleştiğinde dönüşüm segmenti deforme şeklini korurken aynı zamanda eski sertliğine de dönmüş olmaktadır. Bu durumda elastik segment, dönüşüm segmentinin sertliği sebebiyle eski haline dönemez ve geçici form elde edilmiş olur.

Enerjinin yönetildiği yer olan elastik segment, son olarak tekrar şekil hafızalı polimerin ısıtılmasıyla parçayı eski haline döndürür. Çalışma prensibi bu şekilde olan şekil hafızalı polimerler, düşük sıcaklıkta sert, yüksek sıcaklıkta ise yumuşak haldedir (L. Sun ve diğerleri, 2012).



Şekil 5.5. Şekil hafızalı polimerlerde elastik deformasyonu sağlayan elastik segment ve dönüşüm segmenti (L. Sun ve diğerleri, 2012)

Şekil hafızalı polimerler, %400'e kadar plastik deformasyona sahip olabilmektedir. Burada, şekil hafızalı polimerlerin kendi malzeme karakteristiği kadar uygulanan termal yük de önemlidir. Verilen üç boyutlu şekil ise şekil hafızalı polimerlerin çalışmasında sonucu doğrudan etkilemektedir. Yapı kabuklarında hareket değiştirme mekanizmaları için kullanılacak şekil hafızalı polimerlerin açma-kapama fonksiyonunu yerine getirmesinde dönme ve eğilme hareketleri ana hareketlerdir. Şekil hafızalı polimer uygulamalarında, aktivasyon sıcaklığı, morfoloji, şekil orantısı, malzeme davranışı, kontrol mekanizması, hareket, deformasyon ve açılma-kapanma, etkisi yapı kabuğunun değişen termal şartlara uyumlanma yetisini belirlemektedir. En yüksek ulaşılabilirliğe sahip ve literatürde yapılan çalışmaların odağındaki SMP türü olan PU SMP bazlı telin, değişen sıcaklıklarda verdiği cevap Resim 5.4'te gösterilmektedir (L. Sun ve diğerleri, 2012).



Resim 5.4. Isıtma sonrası 1 mm çapındaki PU SMP telde sıcaklık yükselişi ile orijinal şekle dönme davranışı (L. Sun ve diğerleri, 2012)

Yapılarda gün ışığının yönetimini sağlayan açılma-kapanma mekanizması, şekil hafızalı polimerlerin yerine getirmesi gereken ana fonksiyondur. -70°C ve 100°C aralığında katılaşma özelliğine sahip şekil hafızalı polimer teknolojileri 7 farklı katılaşma sıcaklığı sunmaktadır. Bunlar 25°C , 35°C , 45°C , 55°C , 65°C , 75°C ve 90°C olarak sınıflandırılmaktadır. Yapılan çalışmalar, şekil hafızalı polimerlerin performans göstermesinde sıcaklığın 25°C dolaylarında olmasının yeterli olduğunu göstermektedir. Şekil hafıza etkileri sınırlı olmasına rağmen geliştirilmekte olan şekil hafızalı polimerlerin, şekil hafızalı alaşımlara göre bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar (L. Sun ve diğerleri, 2012; Yoon, 2019);

- Yoğunluklarının şekil hafızalı alaşımların yoğunluklarının yaklaşık %20'si kadar olması,
- Yüksek kalitede özelleşmiş formları elde etmek için gerekli ham madde ve işleme maliyetlerinin düşük olması ve şekillendirmenin daha kolay olması,
- Her zaman transparan olabilmeleri,
- Şekil değiştirme sıcaklıklarının geniş bir aralıkta olması,
- Reaksiyon sıcaklığına müdahale edilebilir olmaları,
- Şekil değiştirme davranışları,
- Programlanabilir olmaları,
- Yorulma hasarı olmaksızın geniş yelpazede deformasyon gösterebilmeleri ve

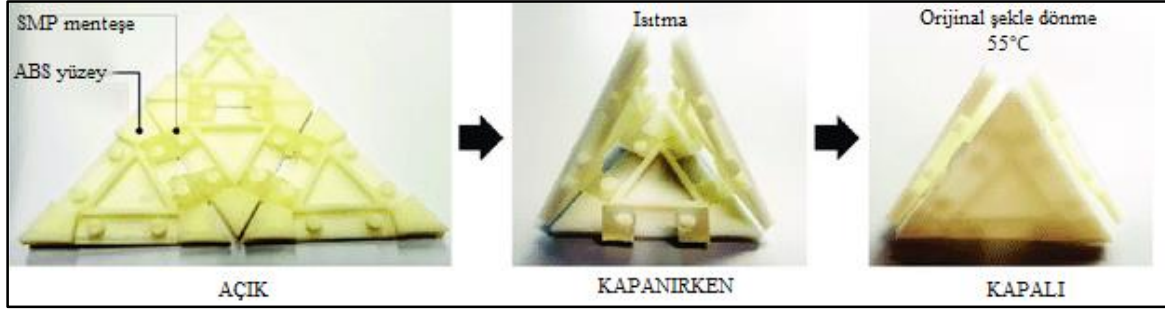
- Hareket değişikliğini düşük miktarda kuvvetle başlatabilme özellikleri ile şekil hafızalı alaşımlara göre çok daha yüksek tercih edilebilirliğe sahiptir.
- Düşük maliyetle geri dönüşüm ve tekrar kullanım potansiyellerinin yüksek olması,
- Şekil hafızalı polimerlerin çoğunun kimyasal kararlılığının, biyo-uyumluluğunun ve biyo-çözünürlüğünün yüksek olmasıyla çok daha çevreci olmaları,
- Şekil hafızalı alaşımlara göre daha düşük iletkenlikte olmaları ile yalıtımı daha iyi sağlamaları ve
- Sıcaklık değişimini renk değişimi ile gösterebilen şekil hafızalı polimerlerde olduğu gibi sıcaklık, nem, çözücü/pH değişikliği veya ışıkla uyarılabilen şekil hafızalı polimerlerin birden fazla uyarana da cevap verebilir olması olarak sıralanabilir.

Şekil hafızalı polimerler, termobimetallerle de karşılaştırıldığında form-fonksiyon itibarıyla birçok avantaja sahiptir. Şekil hafızalı alaşımlara ve bimetallere kıyasla yapı kabuklarında dış ortam ile iç ortam arasındaki uyumlanmayı çok daha iyi gerçekleştirdiğinden, son zamanlarda yapı kabuğu tasarımı için tercih edilen popüler malzemedir.

Sıcaklık ile uyarım sonucunda şekil hafızalı polimerlerin vereceği cevap, morfolojik tasarım ile açılma veya kapanma şeklinde belirlenebilmektedir. Açılma-kapanma hareketleri dönme hareketi ve menteşe/mafsal olarak fonksiyon gören eğilme hareketi (Resim 5.5) ile sağlanırken, hareketsiz parçalar dış ortam şartlarında dayanımı en yüksek olan Akrilonitril Bütadien Stiren (Acrylonitrile Butadiene Styrene - ABS) ve hareketli parçalar ise şekil hafızalı polimerler siyano akrilat bazlı yapıştırıcı ile bir araya getirilmektedir. Şekil hafızalı polimer ve ABS yüzeyden oluşan bir model örneği Resim5.6'da gösterilmektedir.



Resim 5.5. SMP model örneğinde eğilme hareketi ile menteşe olarak çalışma (Yoon, 2019)



Resim 5.6. 3B baskılı SMP menteşelerin şekil değiştiren davranış gösterimi (Yoon, 2019)

Şekil hafızalı polimerler gömülü parçalar ile, hareketli mekanizmaların binaya entegre edilmesi de dahil olmak üzere çok sayıda bağlantı elemanı kullanımının önüne geçilmektedir. Bu sayede ekonomik ve etkin bir kullanım sağlanmaktadır. Fakat, tekrarlayan şekil değişikliğinin, şekil hafızalı polimerlerde %20-40'a kadar performans kaybına sebep olması ve yapı kabuğunun maruz kaldığı suyun şekil hafızalı polimerlerin orijinal formunu ciddi anlamda kaybetmesine sebep olması bu çalışmada ihmal edilmektedir. Malzeme yorgunluğu iki yönlü çalışan şekil hafızalı polimerler ile önlenebilmektedir. Bu yönde gerçekleştirilen çalışmalar literatürde yer almaktadır. Suyla temasın önüne geçilmesinde ise çift katmanlı duvarlar ile bir arada kullanım literatürde sunulan çözümler arasındadır. Bina uygulamalarında karşılaşılan bir diğer sorun ise kalıcı haline dönen malzemenin yer çekimi gibi dış kuvvetlerle gerilme yorgunluğu sonucunda bükülmelere sebep olmasıdır.

Literatürde yapılan prototip çalışmalarında, şekil hafızalı malzemelerin sıcaklık değişimlerine cevap verme süresinin maksimum 4 dakika olduğu ve cevap verme hızının morfoloji, malzeme kalınlığı, hareket ettirilen parçaların oranı ve dönme/eğilme açılarının etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan kinetik yapı kabuğu tasarımında literatürde hücre model tasarımına yönelinmektedir. Yapılan SMP bazlı hücre model tasarımı prototip çalışmalarında çap aksında dönme, menteşeli hücreler, kirigami, radyal katlanma ve kanat ile açılma-kapanma gibi farklı hareket mekanizmalarının (Şekil 5.6) katılma sıcaklığının (T_g) altında ve üzerinde nasıl sonuç verdiği ele alınmış ve bu mekanizmalardan eğilme hareketinin açılma-kapanma fonksiyonunu en ideal şekilde yerine getiren hareket olduğu görülmüştür (Yoon, 2019).

Model	A Cap Aksında Dönme	B Menteşeli Hücreler	C Kirişli	D Radyal Katlanma	E Kanat
Açılma $< T_g$					
Kapanma $> T_g$					

Şekil 5.6. Beş farklı hücre modeli ve açılma-kapanma morfolojileri (Yoon, 2019)

Bu modellerden C modeli her durumda geçirgenken, A ve E modelleri tek hareketle çalışmaktadır. B ve D modelleri ise çoklu hareket ile çalışmaktadır. A ve E modelleri, orijinal şekillerine kolaylıkla dönebilirken, B ve D modelleri dışarıdan kuvvetlerle destelenerek optimal sonucu verebilmektedir. C modelinin verimle çalışabilmesi için ise orijinal şeklini ve geçici şeklini koruyabilmesi için birtakım optimizasyonlara ihtiyacı bulunmaktadır. Bu beş model arasında yapılan karşılaştırma sonucunda menteşe ve kanat ile çalışan B ve E modellerinin tasarım, üretim ve servis verimi olarak en ideal modeller olduğu sonucuna varılmıştır (Yoon, 2019). Buradan yola çıkılarak SMP bazlı modellerde en iyi verimi sağlayan eğilme hareketi, biyomimetik tasarım metodolojisinin morfolojik yaklaşımı ile tasarlanan yapı kabuğu birim tasarımında hareket başlatıcı olarak mekanizmaya dahil olacak şekilde tasarım çalışmaları yapılacaktır.



6. BİYOMİMETİK YAPI KABUĞU BİRİM TASARIMLARI

Binalarda iç mekan ile dış mekan ayırmanın yanı sıra ısı alışverişi fonksiyonunu da üstlenen yapı kabuklarının değişen çevre sıcaklıklarına uyumlanabilmesinde dinamik hareketler ve buna imkan sağlayan hareket başlatıcılar en önemli etkenlerdir. Dinamik hareketlerin yapı kabuğunda etkin bir şekilde yönetilebilmesi, geometri ile doğrudan ilgilidir. Bu bağlamda, biyomimetik tasarım metodolojisinden yararlanılarak, doğanın değişen sıcaklık koşullarına uyumlanmak için canlıların yapısal veya davranış olarak yöneldiği morfolojik özellikler incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda canlıların soğuktan korunmak için öncelikle yalıtıma yöneldiği görülmüştür. Bunun için canlılar, iletkenlik ile ısı kaybını önleyen kalın ve düşük yoğunluklu bir dış katman oluşturma eğilimindedirler. Soğuk havada ısı kazanımını desteklemek için ise güneş ışınlarını toplamada en başarılı bileşenler olan koyu renk, bütüncül ve geniş yüzey temasına yöneldikleri görülmüştür. Aşırı sıcak havalarda hayatta kalabilmek için ise öncelikle ısı kazanımını önlemeyi hedefleyen açık renkli, parçalı, girintili, gölgelikli, havalandırma kanallı ve düşük iletkenliği de beraberinde getiren düşük yoğunluklu ve ince malzeme kullanımına yöneldikleri görülmüştür.

İlk hedefi iç ortam sıcaklığının çevresel sıcaklık değişimlerinden minimum düzeyde etkilenmesi için yalıtımı sağlamak olan yapı kabuğunun ikincil amacı ise, çevresel koşullara uyumlanma becerisi geliştirerek değişen sıcaklık şartlarını avantaja dönüştürmektir. Buradan yola çıkılarak öncelikle güvercinlerde olduğu gibi soğuk havalardan minimum derecede etkilenilmesini sağlamak için, yapı kabuğunda yalıtımı destekleyecek hacim artırımı yetisinin kazandırılması hedeflenmiştir. Bu noktada yapıda yalıtımı destekleyen optimal dış katman kalınlığının belirlenebilmesi için yapılan araştırmalarda, dış cephe yalıtımında 10 cm kalınlığa kadar olan dış katmanların yalıtıma, enerji yönetimine ve dolayısıyla ekonomiye pozitif yönde katkısı olduğu görülürken, 10 cm kalınlık üzerindeki dış katman uygulamalarının ekonomik olarak herhangi bir ekstra katkısının olmadığı görülmüştür. Buna ek olarak trombe duvar uygulamalarında da karşımıza çıkan dış duvar ile iç duvar arasındaki mesafenin 10 cm mesafesinde oluşu referans alınarak yalıtım katmanı kalınlığı ortalama 10 cm olarak belirlenmiştir (Ozel, 2013; Stazi, 2017; Tokuç ve Yıldızber, 2009; Tzoulis ve Kontoleon, 2017). Soğuk havalarda açılarak genişlemesi beklenen yalıtım katmanının sıcak havalarda yapıdan dış ortama daha hızlı ısı transferinin olabilmesi için mümkün olduğunca incelenmesi istenmektedir.

Yapılan araştırmalarda soğuk havalar için yapı çevresinde küçük ölçekli sera etkisi oluşturularak ısı kaybının önlenmesi için %95 ışık geçirgenliğine sahip yalıtım malzemelerinden Etilen Tetra Floro Etilen (Ethylen Tetra Fluoro Ethylen – ETFE) birim tasarımlarında etkin sonuç verebileceğine varılmıştır (Resim 6.1). ETFE membranların bina uygulamalarında sağladığı avantajlar ile yapı kabuğu birim tasarımı için malzeme seçiminde tercih edilmesini sağlayan özellikleri řu şekildedir (Lamnatou, Moreno, Chemisana, Reitsma ve Clariá, 2018):

- Yüksek şeffaflık
- Basılabilirlik
- Yüksek UV geçirgenliği.
- Fleksibilite/Tasarım özgürlüğü
- Düşük ağırlık
- Maliyet etkinliği
- Uzun ömür
- Kendi kendini temizleyen yüzey
- Hava ve UV direnci
- Ateşe dayanıklılık
- Kullanım aşamasında geniş sıcaklık aralığı
- Renklendirilebilirlik
- Geri dönüřtürülebilirlik



Resim 6.1. ETFE'nin seralarda kullanımına bir örnek (Domerama, 2021)

Havanın yapı çevresinde hapsedilmesi ve şeffaf malzeme ile çevrenmesine ek olarak, güvercinlerin vücut sıcaklıkları ile kabaran tüyleri arasında hapsettikleri havayı ısıtmalarına benzer şekilde, membran içindeki havayı ısıtmanın yapı içi ısı korunumuna sağlayacağı katkı göz önünde bulundurulmuş ve güneş enerjisi sistemleri incelenmiştir. Thakur, R. Kumar, S. Kumar ve P. Kumar'ın (2021) ve Mar, Peterson ve Zimmer'in (1976) yaptığı çalışmalar incelendiğinde güneş enerji sistemlerinde, güneş ışınlarından elde edilen ısının en iyi şekilde absorbe edilebilmesi ve iletilebilmesi için siyah boya ile renklendirilmiş veya siyah nikel ile kaplanmış bakır ve alüminyum levhaların kullanıldığı görülmüştür. 3 mm kalınlığında alüminyum plaka ve bakır plaka karşılaştırıldığında, alüminyumun daha yüksek ısı iletkenlik değeri, daha düşük malzeme fiyatı ve malzeme yoğunluğu nedeniyle ısı performans ve üretim maliyetleri açısından bakıra göre avantaj sağladığı görülmüştür (Nalis, Amrul, Yonanda ve Zulfa, 2017).

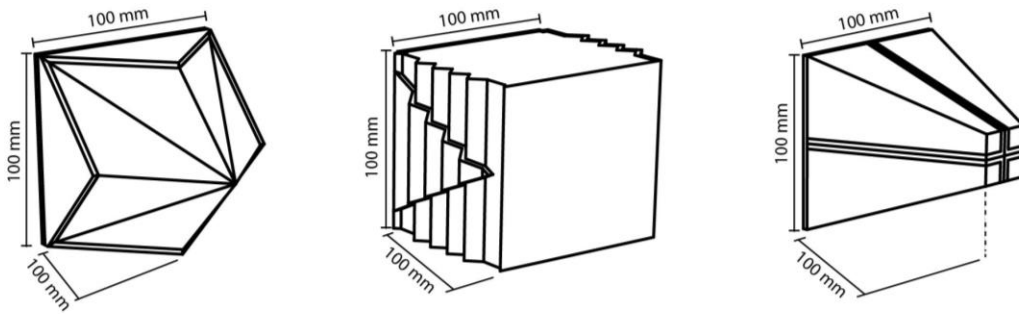
Soğuk havalarda açık, sıcak havalarda ise kapalı olması beklenen yapı kabuğu birimlerinin hava ile temasını ayıran ETFE membran ile yapı duvarını oluşturan beton arasındaki kinetik hareketin aktarımının sağlanabilmesi için ise, darbe, sıcaklık değişimi, rüzgar, yağış ve güneş ışını maruziyetine dayanıklılık performansı göz önünde bulundurularak ABS malzeme tercih edilmiştir. Değişen çevre sıcaklığıyla farklı senaryolara uyumlanmada dinamik harekete uygun form değişimini ve dinamizmi destekleyen ve sıcaklıkla uyarılarak hareket başlatıcı olarak görev yapan malzemelerin bir arada kullanımının elzem olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan malzeme incelemeleri sonucunda dinamik hareketi en yüksek performansla destekleyen malzemenin SMP olduğu sonucuna varılmış, doğanın değişen sıcaklık koşullarına uyumlanmayı sağlayan ve dinamik harekete uygun morfoloji çalışmaları yapılarak SMP ile aktif olan üç farklı model tasarımı gerçekleştirilmiş ve esinlenen canlılar ile birlikte isimlendirilmiştir.

6.1. Modellere Genel Bakış

Tasarlanan her üç model için de dikdörtgensel formdaki bina duvarlarına mevcut alanı en verimli şekilde kullanarak dizilimi sağlamak için dikdörtgensel birer taban alanı uygun görülmüştür. Bu bağlamda, yalıtım katmanının 10 cm kalınlıkta olması referans alınarak taban alanı için de 10 cm x 10 cm ölçülerinde kare form belirlenmiştir (Şekil 6.1). Böylelikle ölçülendirilmede standardizasyona gidilerek, yalnız form farklılıklarının termoregülasyon üzerindeki etkilerinin yalın yansımaları çok daha net bir şekilde incelenebilecektir.

Form farklılıklarının incelenmesine odaklanılabilmesi için modeller arasında malzeme çeşitliliği ve malzeme kalınlığı da standardize edilmiştir. Bu noktada doğadaki canlıların değişen sıcaklık koşullarına uyumlanmalarını sağlayan yapısal özellikleri referans alınarak form ve parça renklendirmelerinde değişikliklere gidilerek üç model arasında çeşitlilik sağlanması amaçlanmıştır.

Malzeme türü olarak, havanın birim içinde hapsedilmesini sağlayan 0,5 mm kalınlığında ETFE membran, yalıtım ve dış ortam şartlarına uyumlanma performansı ile bilinen 3 mm kalınlığında ABS plaka, ısı yüklenimini ve kondüksiyon ile iletimi destekleyen 3 mm kalınlığında alüminyum plaka ve tüm bu parçaların birbirleriyle temas halinde olarak dinamizm kazanmalarını sağlayan SMP bağlantı elemanları kullanılmıştır.

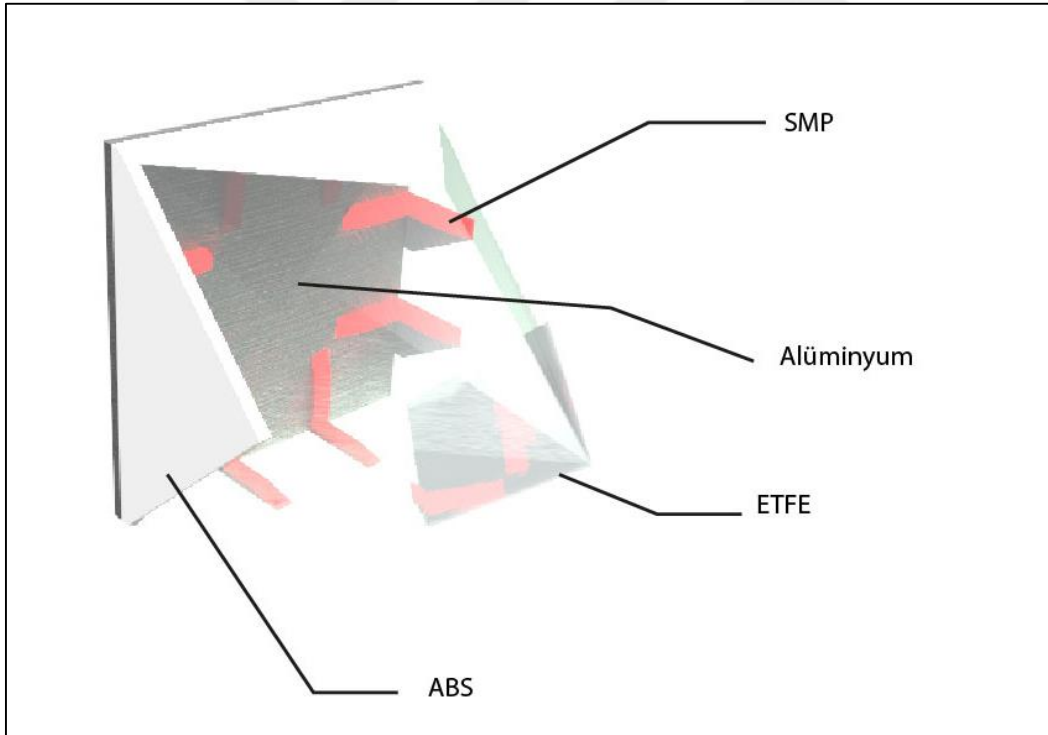


Şekil 6.1. Tasarlanan modellerin genel ölçüleri

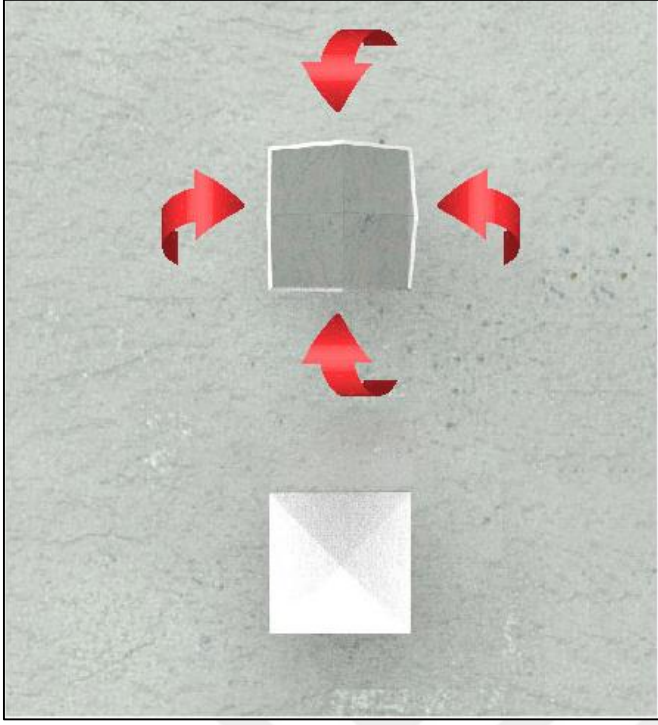
6.1.1. Model 1: Formica rufa, güvercin ve çöl salyangozu

Bu modelin tasarımında düşük sıcaklıktaki iklim bölgelerinde yaşayan Formica rufa cinsi karıncaların koyu vücut renklerinden, çöl salyangozunun parlak beyaz kabuğundan ve soğuk havaya uyumlanmak için tüylerini kabartan güvercinlerden esinlenilmiştir. Yanal üçgensel ABS plakaların arasında kalan alanın ETFE membran ile kapatıldığı Model 1 ile soğuk havalarda dış ortamla temas katmanını kalınlığının artırılmasıyla ve genişleyen hacmin içinin oldukça düşük yoğunlukta bir malzeme olan hava ile doldurulmasıyla yalıtım desteklenmektedir. Hacmin artması, güneş ışınları ile temasta olan yüzey alanının artmasını sağlarken yanal yüzeylerin açılmasıyla ortaya çıkan 3 mm kalınlığındaki siyah boya ile renklendirilmiş alüminyum plaka, absorpsiyonu destekleyerek kazanılan ısı miktarının artırılmasını sağlamaktadır (Resim 6.2).

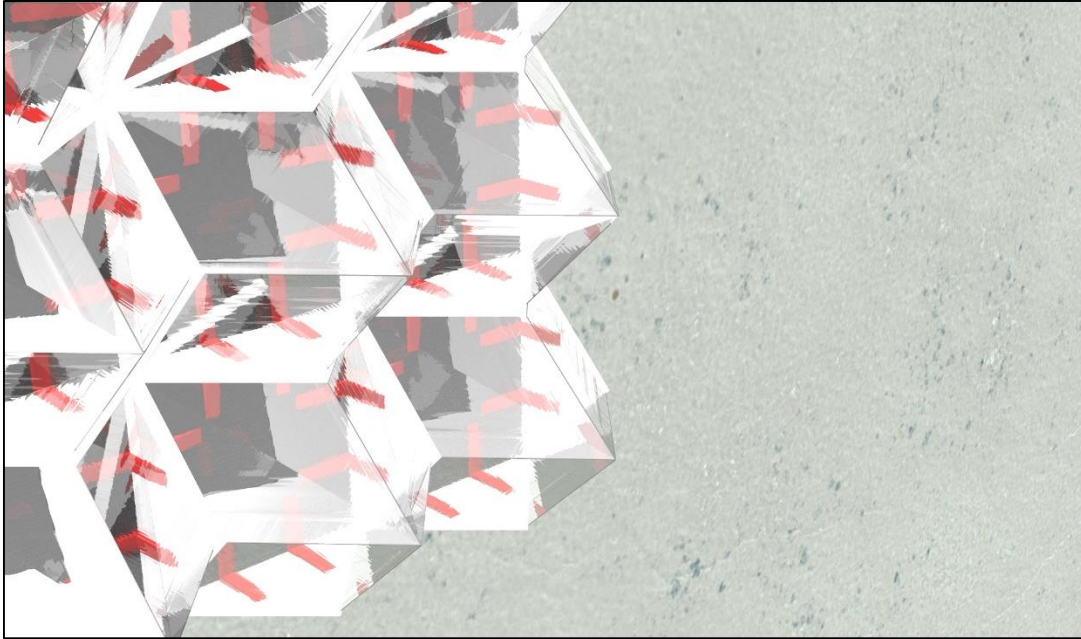
Sıcak havalarda ise ETFE membranının kapanabilmesi için sıcaklık artmasına kapanarak cevap veren, kırmızı ile renklendirilmiş SMP parçalar ve bu hareketin membrana aktarımının sağlanabilmesi için de beyaz ile renklendirilmiş ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) plakalar yerleştirilmiştir. Böylece SMP paçaların sağladığı bükülme hareketiyle kapanma sağlanarak total formun küçültülmesi hedeflenmiştir. Böylelikle dış ortamla temas eden katman inceltilmiş, bina ve dış ortam arasında ısı alışverişinin kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Modelin kapalı halinde siyah alüminyum plakanın örtülmesi ve önüne uzun süreli güneş maruziyetine dayanım konusunda performansı yüksek yalıtım malzemelerinden olan ve yüksek albedo katsayılı beyaz boya ile renklendirilmiş ABS plaka konumlandırılarak çöl salyangozlarının ekstrem çöl sıcaklıklarına dayanabilme stratejisinde olduğu gibi ısı kazanımının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Model 1'in ait kış formundan yaz formuna geçerken gerçekleştirdiği kapanma hareketi Resim 6.3'te gösterilmektedir. Resim 6.4, Resim 6.5 ve Resim 6.6'da Model 1'in kış ve yaz kullanımı gösterilmiştir.



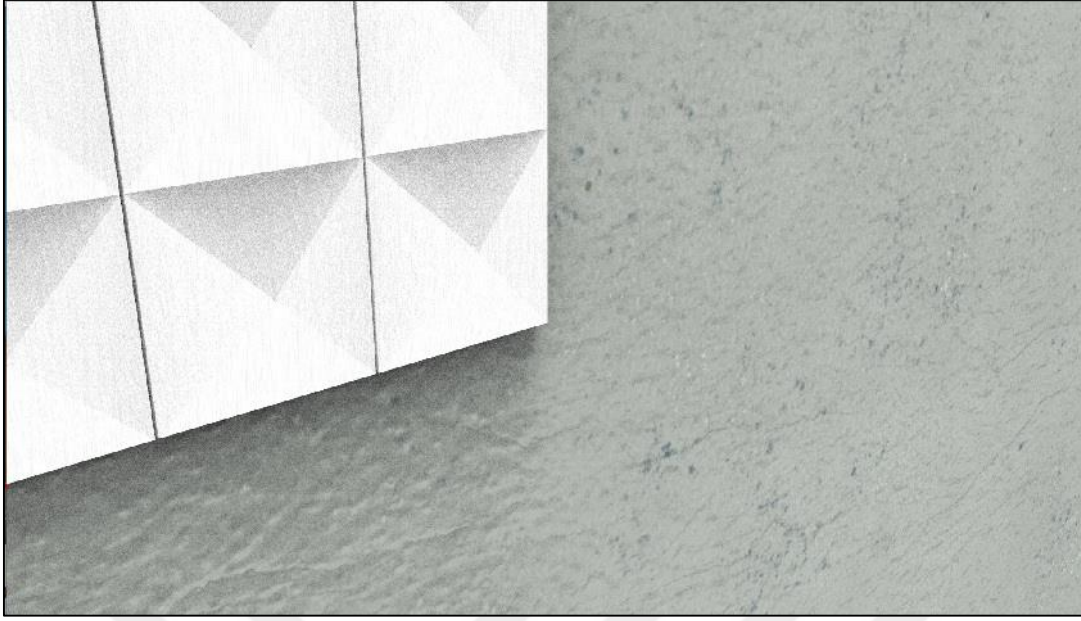
Resim 6.2. Model 1



Resim 6.3. Model 1'in kış formundan yaz formuna geçerken yaptığı kapanma hareketi



Resim 6.4. Model 1'in cephe üzerine uygulanmış kış formu



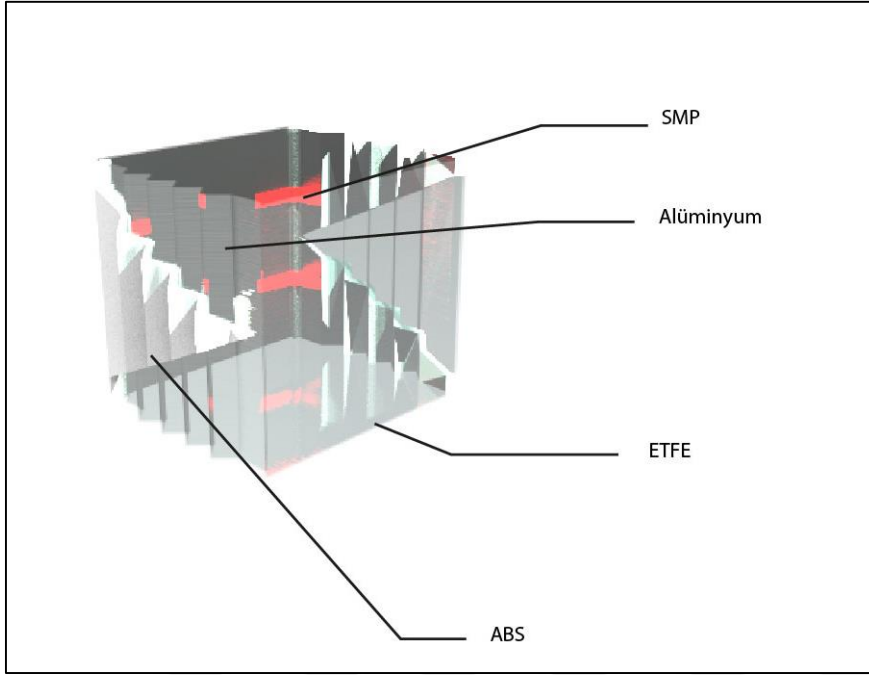
Resim 6.5. Model 1'in cephe üzerine uygulanmış yaz formu



Resim 6.6. Model 1'in kış (sol) ve yaz (sağ) kullanımı için cephe üzerinde uygulanmış hali

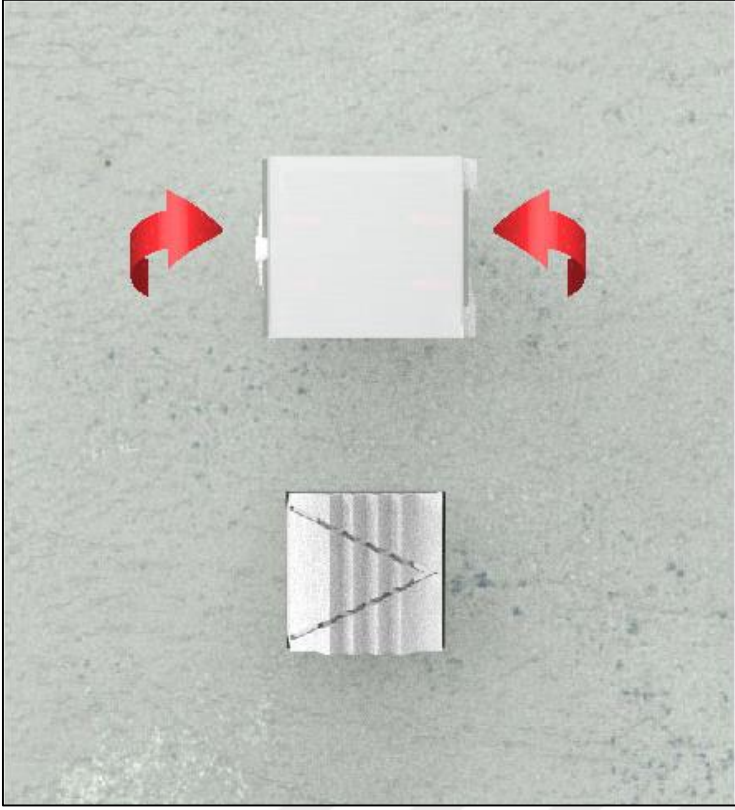
6.1.2. Model 2: Formica rufa, güvercin, kaktüs, çöl salyangozu

Bu modelin tasarımında, koyu renk vücut yapısı ile termal yüklenimi sağlayan Formica rufa cinsi karıncadan, soğuk havalarda tüylerini kabartarak yalıtım katmanını kalınlaştıran güvercinlerden, ekstrem sıcaklıklardaki çöl iklimine uyumlanabilmek için kaburgalı gövde yapısına sahip kaktüslerden ve rengi ile çöl şartlarına dayanabilen çöl salyangozundan esinlenilmiştir. Soğuk havalara uyumlanabilmede güvercinlerin tüylerini kabartmasından esinlenilen bu modelde, SMP plakaların bükülme hareketi aracılığı ile açılarak genişleyen ve böylece güneş ışınlarına maruz kalan alüminyum plaka siyah ile renklendirilerek ısı kazanımının sağlanması hedeflenmiştir (Resim 6.7).

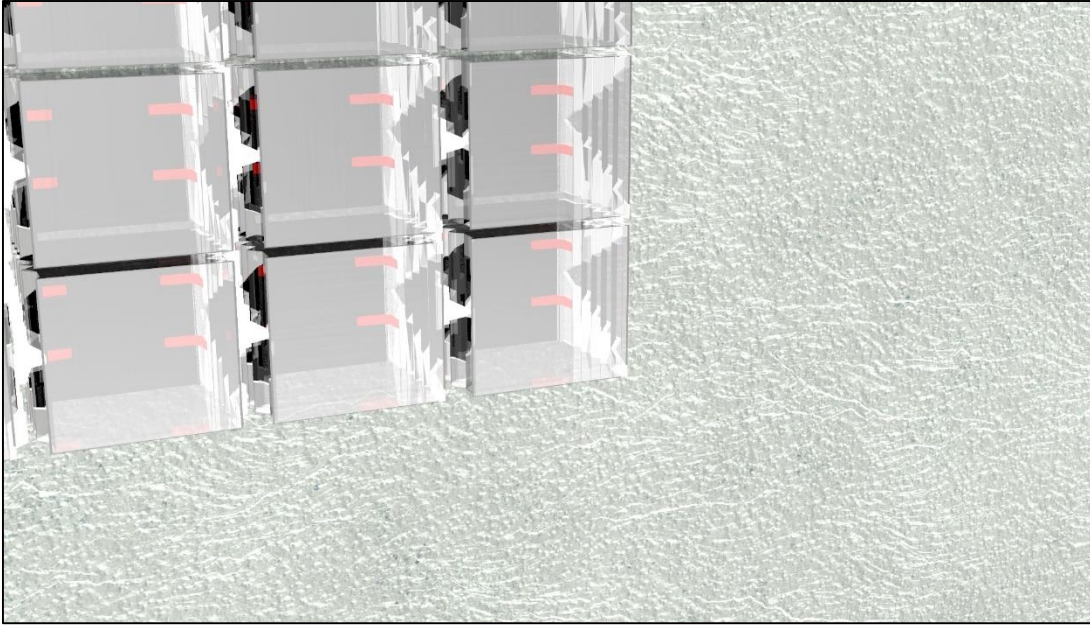


Resim 6.7. Model 2

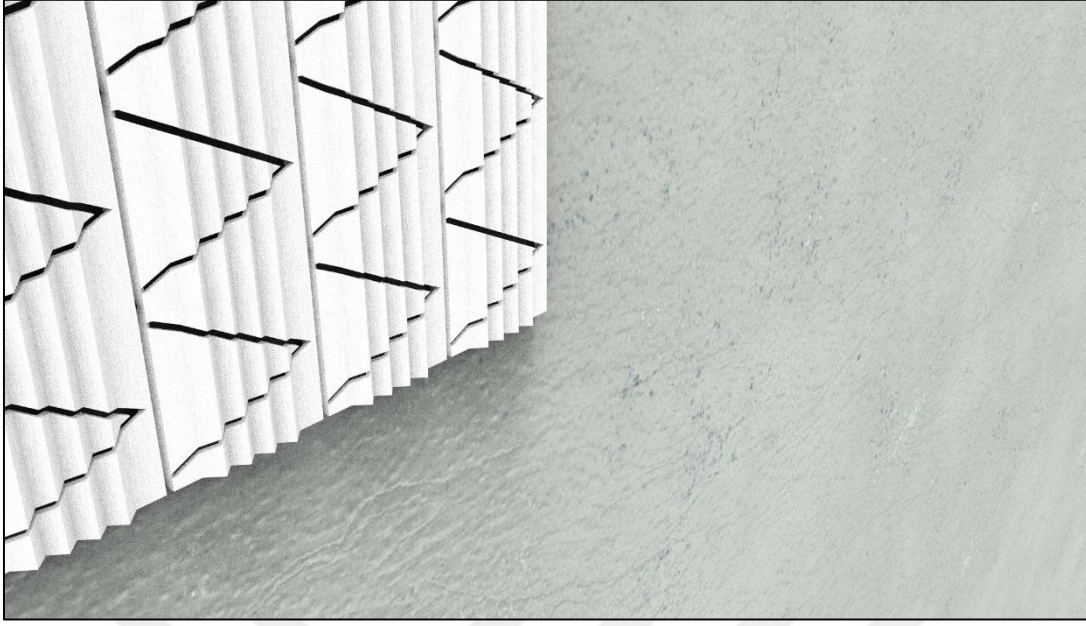
Sıcak havalara uyumlanabilmede ilham kaynağı olan kaburgalı gövdeye sahip kaktüsler ise, kendi gövdeleri üzerinde aralıklı gölge alanları oluşturarak güneş ışınlarına maruziyetlerini azaltmaktadırlar. Böylelikle güneşli ve sıcak günlerde kapalı halinde olan modelin ısı kazanımının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Bu modelde kaburga formlu ABS parçalar beyaz ile renklendirilerek, yalnızca kaburga formunun modelin ısınmasının önüne ne boyutta geçebileceği incelenmek istenmiştir. Model 2'nin kış formundan yaz formuna geçerken yaptığı kapanma hareketi Resim 6.8'de gösterilmektedir. Model 2'nin kış ve yaz kullanımı için cephe üzerinde uygulanmış hali ise Resim 6.9, Resim 10 ve Resim 11'de gösterilmektedir.



Resim 6.8. Model 2'nin kış formundan yaz formuna geçerken yaptığı kapanma hareketi



Resim 6.9. Model 2'nin cephe üzerine uygulanmış kış formu



Resim 6.10. Model 2'nin cephe üzerine uygulanmış yaz formu



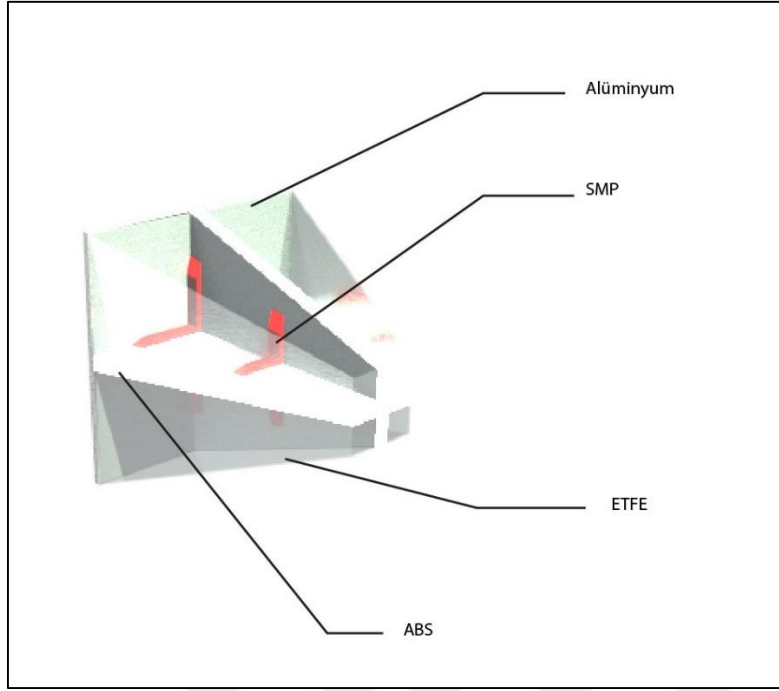
Resim 6.11. Model 2'nin kış (sol) ve yaz (sağ) kullanımı için cephe üzerinde uygulanmış hali

6.1.3. Model 3: Konik karınca yuvası, güvercin, loblu geranium sanguineum ve çöl salyangozu

Soğuk iklim bölgelerindeki konik karınca yuvalarından, soğuk havada tüylerini kabartan güvercinlerden, loblu yaprakları ile sıcak iklim bölgelerine uyumlanan Geranium sanguineum cinsi ağaçların yapraklarından ve yüksek sıcaklardaki çöl ortamında yaşamını sürdüren beyaz kabuklu çöl salyangozundan esinlenilerek tasarlanmış bu modelde, kesik pramit formundaki birim yatay olarak dört eşit parçaya bölünüştür. Her bir bölme, kesik piramidin tabanında bulunan kare alüminyum plakaya ve kesik piramidin tavan ve taban yüzeylerini birleştiren düzlemsel konumlandırılmış ve SMP bağlantı elemanları aracılığı ile birbirine bağlanmış beyaz ABS plakadan oluşmaktadır. Her bir bölme akordeon formunda kanat olarak çalışan katlanabilir ETFE membran malzemedен tasarlanmıştır. Hava soğukken SMP parçalar henüz aktif olmadığından kanatlar açıktır ve bütünsel bir form sağlanmaktadır.

Böylece kesik piramidin tabanında bulunan açık gri renkteki alüminyum plaka ile piramidin tavanı arasında kapalı bir hacim oluşturmaya sağlanmaktadır. Bölmelerin, kesik koninin taban alanına ait alüminyum kısımlarının gri renkte oluşu ve kanatların şeffaf membran malzemeden oluşu ile güneş ışınlarının içeriye geçirgenliği sağlanmış, içeride de güneş ışınlarını alüminyum malzeme ile absorpsiyonu sağlanarak ısı kazanımı maksimize edilmeye çalışılmıştır. Bu model ile önceki iki modele alternatif olarak alüminyum plaka siyah renkte tasarlanmak yerine, standart metal renginde tasarlanmıştır. Böylelikle hem yaz kullanımında hem de kış kullanımında doğrudan ısıya maruz kalan alüminyumun, malzeme özelliği ile kış kullanımında ısı kazanımı sağlaması, yaz kullanımında ise doğrudan açık havaya ve güneş ışınlarına maruz kalsa bile siyah renge göre çok daha düşük absorpsiyona sahip gri renk ile bir miktar güneş ışını yansıma ile ısı kazanımının önlenmesi hedeflenmiştir. Modelin soğuk havalarda aktif olan açık hali Resim 6.12’de gösterilmiştir.

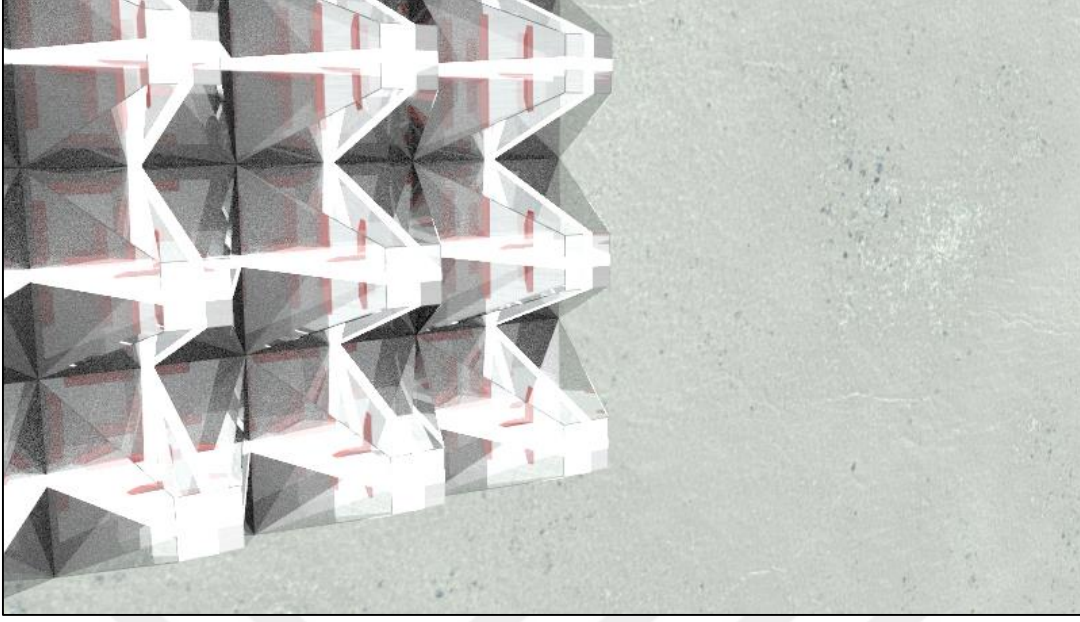
Havanın ısınmasıyla kanat bölmesine içeriden bağlantılandırılmış SMP elemanlar bükülür ve beyaz ile renklendirilmiş ABS plakalar birbirine yaklaşır. Modelin tabanında siyah ile renklendirilmiş alüminyum parça ve ön tarafında beyaz ile renklendirilmiş ABS plakaların kullanımı ile sıcak iklim bölgelerinde yaşayan zebaların siyah-beyaz renkteki vücut çizgileri ile sağladıkları düşünülen rüzgâr etkisinin modelin ısı kazanımına ne boyutta yansıyacağı ölçümlenmek istenmiştir. Havanın ısınmasıyla kapanan kanatlar, güneş ışınlarıyla temas eden yüzey alanını azaltmakta ve katlanma sonucu oluşan girintiler sayesinde rüzgarla teması artırarak serinlemeyi desteklemektedir. Model 3’ün kapalı haline geçerken yaptığı hareket Resim 6.13’teki gibidir. Model 3’ün kış ve yaz kullanımı için cephe üzerinde uygulanmış hali ise Resim 6.14, Resim 15 ve Resim 16’da gösterilmektedir.



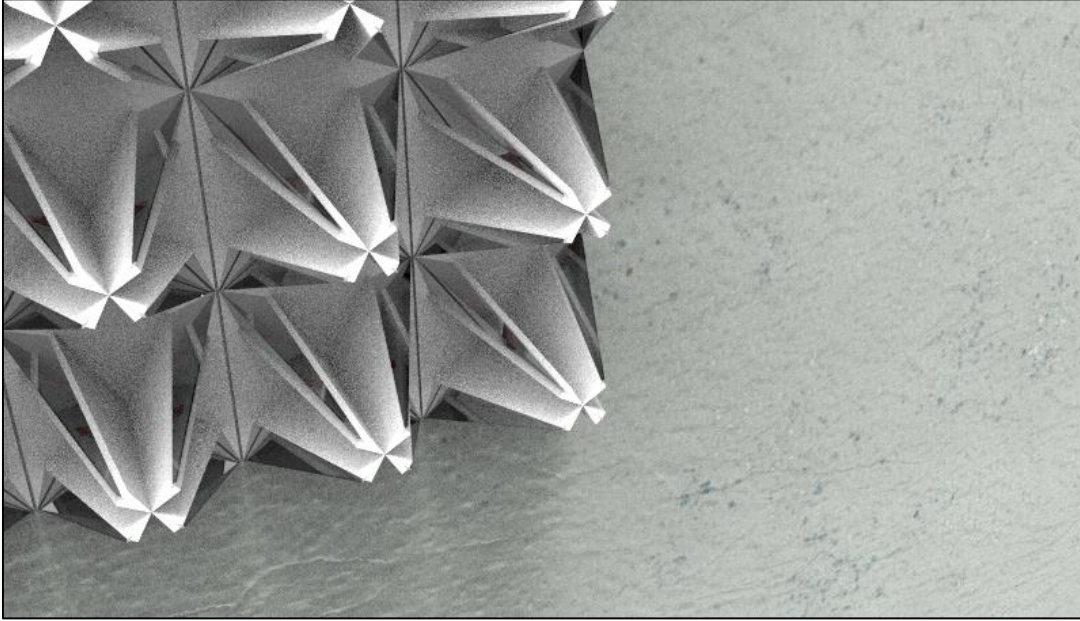
Resim 6.12. Model 3



Resim 6.13. Model'ün kış formundan yaz formuna geçerken yaptığı kapanma hareketi



Resim 6.14. Model 3'ün cephe üzerine uygulanmış kış formu



Resim 6.15. Model 3'ün cephe üzerine uygulanmış yaz formu



Resim 6.16. Model 3'ün kış (sol) ve yaz (sağ) kullanımı için cephe üzerinde uygulanmış hali

7. ANSYS WORKBENCH İLE MODELLERİN TERMAL ANALİZİ

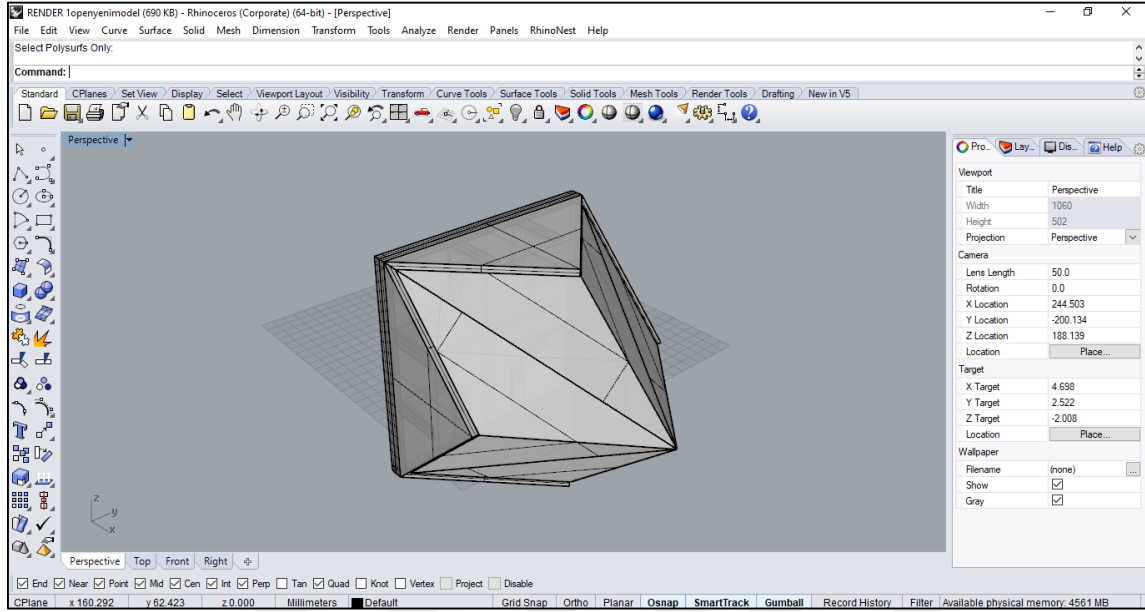
Modellerin soğuk ve sıcak çevre sıcaklığına uyumlanma potansiyellerinin ölçümlenebilmesi için güneş ışınlarıyla radyasyon, dış ortamdaki rüzgarla doğal konveksiyon ve parçaların katı temasından kaynaklı kondüksiyon ile ısı iletim performansları sonucu yapı içi duvara ulaştırdıkları total sıcaklık değerine ulaşılması gerekmektedir. Böylelikle modellerin yapı içi duvara ilettikleri sıcaklıktan yola çıkılarak iç ortam sıcaklık seviyesine dair de bilgi edinilebilecektir. Bunun için dış ortamdaki rüzgar ve modellerin içindeki kapalı havanın akışkan aracılığı ile ısı iletimi prensibinden yola çıkılarak ANSYS Workbench 2020 R1 programı ile CFD analiz yapılmıştır. CFD analizin yapılabilmesi için aşağıdaki adımlar sırasıyla gerçekleştirilmektedir:

- Analiz türünün tanımlanması
- Analizin 2D veya 3D seçeneklerinden hangisi olacağının belirlenmesi
- Modelin geometrisinin bilgisayar destekli tasarımı (Computer Aided Design – CAD) ile elde edilmiş halinin ANSYS Workbench’e aktarımı
- Parçaların Workbench Design Modeler modülünde tanımlanması ve isimlendirilmesi
- Workbench Spaceclaim modülünde katı ve sıvı fazların tanımlanması, mesh atma işlemi için topoloji paylaşımının yapılması
- Workbench Fluent analiz modülünde mesh atılması
- Setup modülünde analiz ile zaman arasındaki bağıntının belirlenmesi
- Enerji kullanım durumu ve analiz türünün seçilmesi
- Malzeme özelliklerinin tanımlanması
- Konveksiyon, radyasyon ve kondüksiyonu kapsayan sınır şartlarının tanımlanması
- Çözümün gerçekleştirilmesi
- Elde edilen sonuçların grafikleştirilmesi

Oluşturulan matematiksel model ile programın analiz sonunda kararlı sonuçlara erişebilmesi için analiz tekrar sayısı belirlenmektedir. Nihai sonuçlara ulaşıldığında program kullanıcıya bildirim sağlayarak sonuçları iletmektedir, böylelikle kullanıcı analiz sonucu elde ettiği çıktıları görselleştirerek okuyabilmektedir.

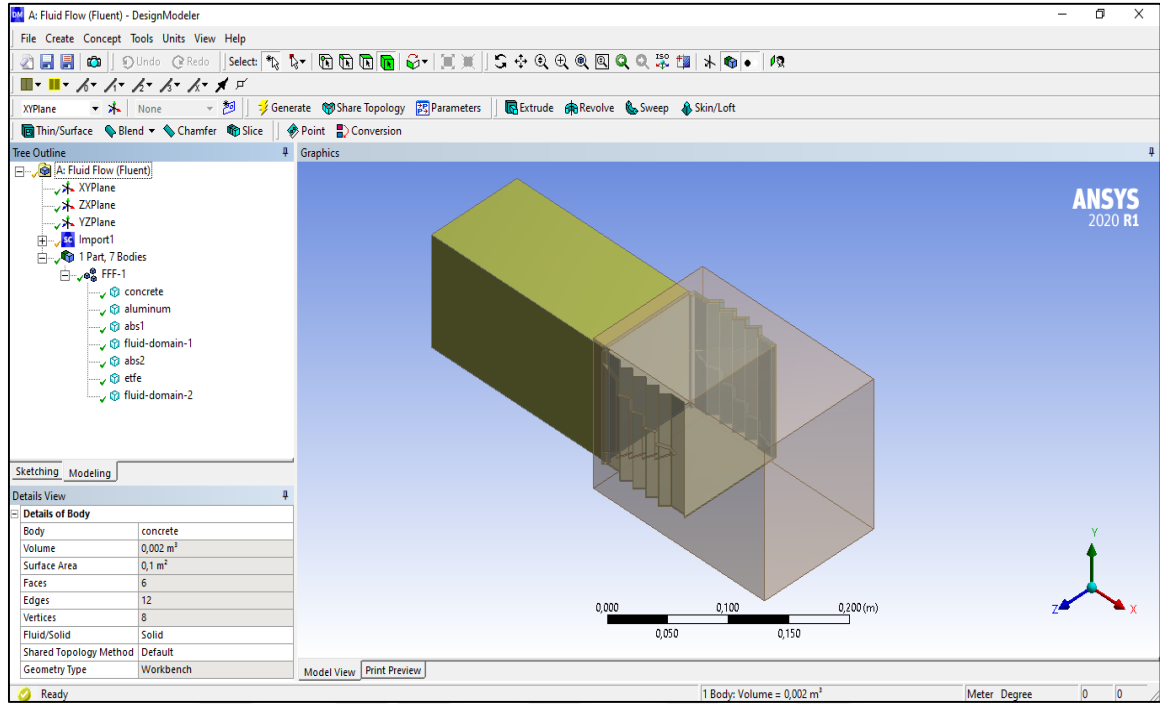
7.1. Modellerin CAD ile Çizimi ve Hazırlanması

Katı modellemelerin Rhinoceros 5 programında gerçekleştirildiği CAD dosyaları Workbench'te çalışılmak üzere step dosya formatında kaydedilmiştir (Resim 7.1).

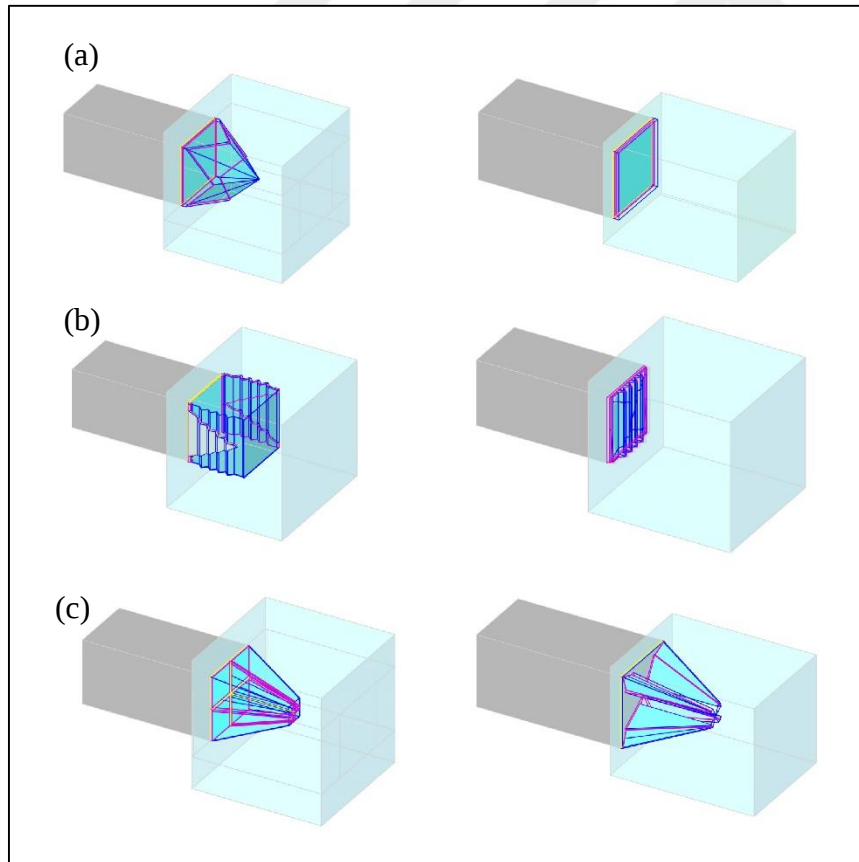


Resim 7.1. Rhinoceros programında yapılan Model 1'e ait modelleme arayüzü

Modelleme sırasında her model içindeki katı ve sıvı alanlar Rhinoceros 5 üzerinde çizildikten sonra kaydedilerek Workbench dosyasına aktarılmadan önce yeni bir Workbench dosyası oluşturulmuş ve isimlendirilen Workbench dosyası kaydedilmiştir. Dosya kaydı, Workbench içinde gerçekleştirilen ve birbiriyle bağıntılı işlem basamaklarının tanımlanabilmesi için önemli bir adımdır. Oluşturulan Workbench dosyasında CFD analiz gerçekleştirilmek üzere Fluid Fluent (Flow) modülü aktive edilerek model aktarılmak üzere bu modül içindeki Design Modeler modülü açılmıştır. Design Modeler'da parçalar body olarak seçildikten sonra isimlendirilmiş (Resim 7.2) ve katı veya sıvı olarak faz durumları tanımlanmıştır (Resim 7.3). Bu isimlendirme ve tanımlamalar mesh aşamasında parçaların özelliklerinin program tarafından anlaşılabilmesi ve sınır şartlarının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için önem arz etmektedir. Bu noktada parçaların Türkçe karakter veya boşluk içermemesi dosya isimlendirme aşamasında da aynı şekilde geçerli olmak üzere bir diğer önemli detaydır.

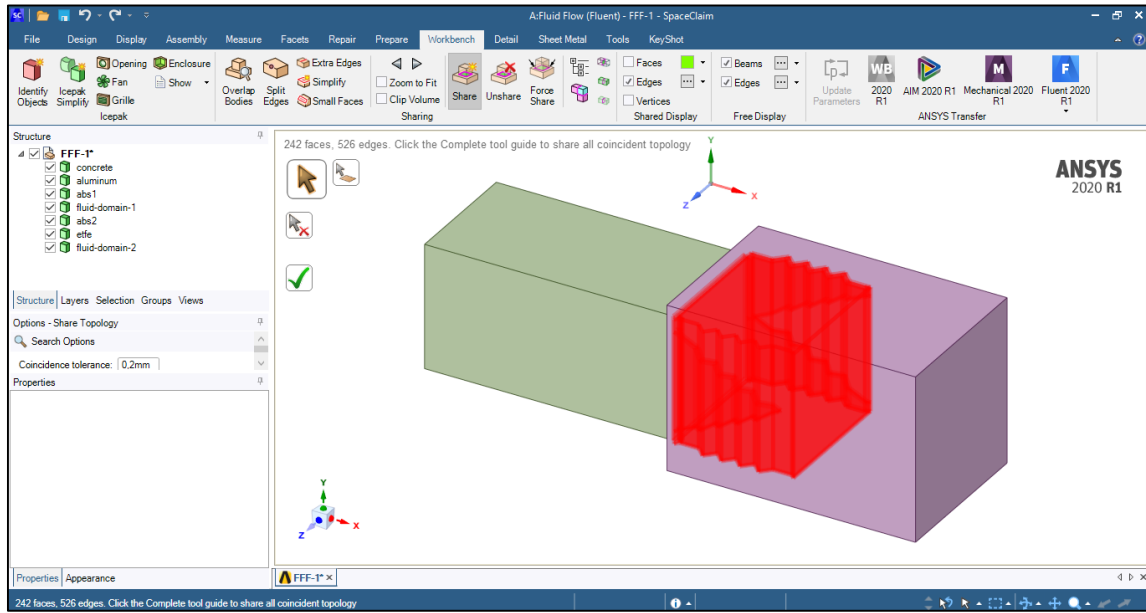


Resim 7.2. Design Modeler'da parçaların seçilerek isimlendirilmesi



Resim 7.3. Dış havanın açık mavi, iç havanın koyu mavi ile renklendirildiği sıvı fazların Spaceclaim ile tanımlanması: (a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3

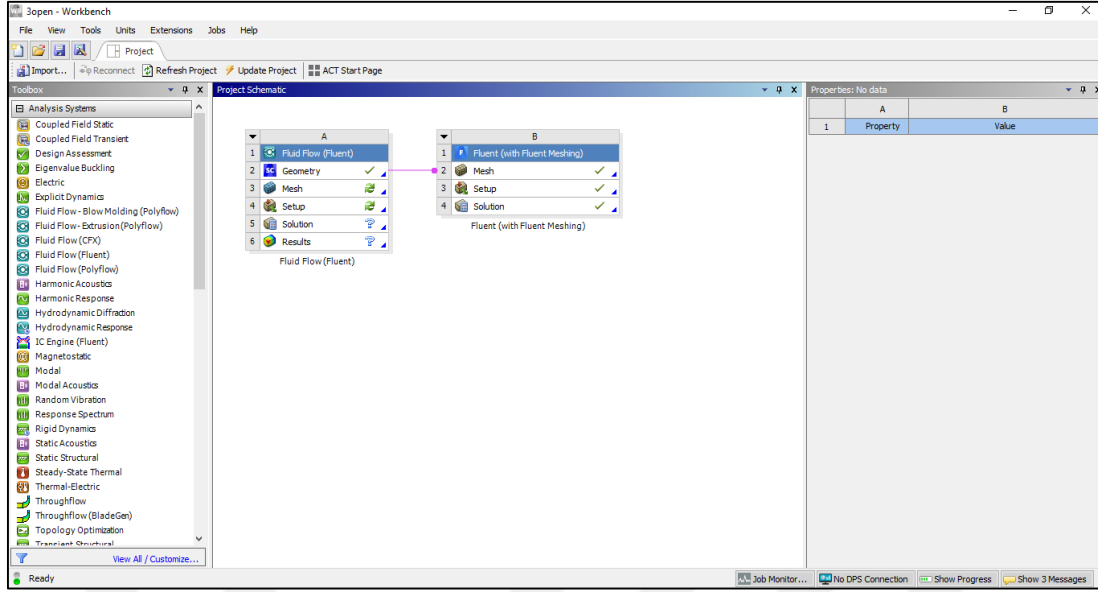
Design Modeler’da parça tanımlamaları gerçekleştirildikten sonra CFD analiz çalışmasındaki ana prensip olan ve enerji akışının kafes sistemine oturtulmuş model üzerinden geçebilmesini sağlayan mesh atma aşamasına hazırlık yapılması gerekmektedir. Bu hazırlık, modelin bir sonraki aşamaya kusursuz varmasını amaçlamakta olan açıkta kalan yüzey veya kenarların iyileştirilmesi, mesh aşamasında karşımıza çıkan ve birbiriyle temastaki komşu yüzeylerin belirlenmesi anlamına gelen topoloji paylaşımı aşamalarını kapsamaktadır (Resim 7.4).



Resim 7.4. Spaceclaim'de gerçekleştirilen iyileştirme çalışmalarından topoloji paylaşımı

7.2. Mesh Yapısının Oluşturulması

Gerçekleştirilen tanımlama ve hazırlık aşamalarından sonra mesh atma işlemi için Fluid Flow (Fluent) modülü içindeki standart mesh basamağı yerine, Fluent with Meshing modülü aktive edilerek geometri ile bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, mesh atma işleminin ve sonraki aşamaların bu modül üzerinden ilerlemesini sağlamaktadır. Buradaki amaç, Fluent with Meshing modülünün, diğer mesh modülüne göre 3D ve karmaşık parçalarda çok daha profesyonelce ve hızlı sonuçlar vermesinden faydalanmaktır (Resim 7.5).



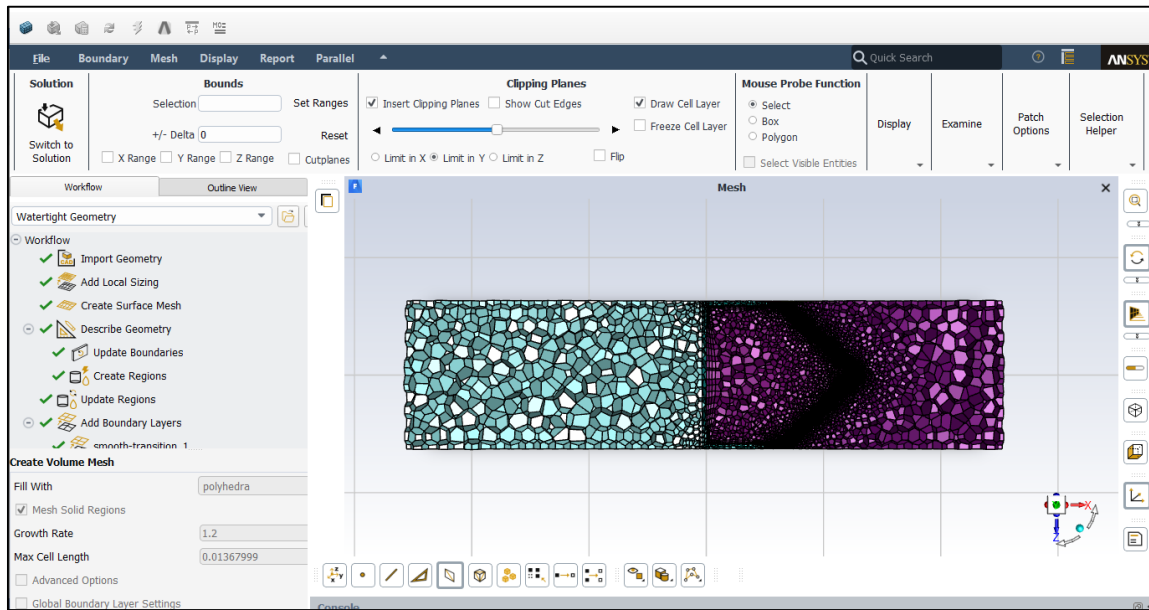
Resim 7.5. Fluent with Meshing modülünün geometriye bağlanması

Fluent with Meshing modülünde sırasıyla şu işlemler yapılmaktadır:

- Geometrinin aktarımı
- Lokal mesh atma
- Yüzey meshlerinin tanımlanması
- Geometrinin tanımlanması
- Modelde akışkanın giriş ve çıkış yerlerinin belirlenmesi
- Katı ve sıvı alanların sayısının ve yerinin belirlenmesi
- Parçalar arası mesh katmanı geçiş yumuşaklığının belirlenmesi
- Meshin birim formunun belirlenmesi

Bu işlemler sırasında mesh boyutunu aktarılan geometri boyut ve karmaşıklığına göre program otomatik olarak belirlemekte, istenildiği takdirde belirlenen parçalara hassas mesh uygulaması da lokal mesh atma ile sağlanabilmektedir. Yüzey meshlerinin atılması kısmında daha önceden Spaceclaim modülünde gerçekleştirilen topoloji paylaşımı işlemi eğer daha önceden yapılmamışsa bu aşamada gerçekleşmekte, fakat bazen sorun çıkarabilmektedir. Bu nedenle Spaceclaim iyileştirmeleri bu noktada zaman ve mesh kalitesi bakımından oldukça büyük avantaj sağlamaktadır. Sonrasında ise Design Modeler modülünde fazları belirlenen ve ona göre isimlendirilen parçalar burada akışkan giriş ve çıkışını kapsayan sınır şartları ve katı/sıvı alan seçimlerinde tanınmaktadır ve kullanıcıdan yalnızca bunların doğruluğunu kontrol etmesi beklenmektedir. Her bir basamak tamamlandığında program basamak aydın

başına yeşil tik atarak işlem basamaklarının sırasıyla ve başarıyla tamamlandığı yönünde kullanıcıyı bilgilendirmektedir. Son adımda mesh ile ilgili tüm detaylar belirlendikten sonra program mesh birim formu seçme konusunda kullanıcıya çeşitlilik sağlamaktadır. Bu çalışmada polyhedra mesh formu seçilmiştir. Fluent with Meshing kullanılarak mesh atma yönelimindeki bir diğer amaç da burada karşımıza çıkmaktadır. Fluid Flow (Fluent) modülündeki hazır mesh modülü kullanılarak atılan dikdörtgensel meshlerde birim boyutlarının belirlenmesi ve farklı incelikteki parçalar arasındaki sağlıklı mesh geçişlerinin profesyonel bir şekilde gerçekleştirilebilmesi oldukça zordur. Öte yandan burada mesh atılabilirse bile bir sonraki aşama olan analiz şartlarının meshe uygulanması noktasında mesh kalitesinin çok yüksek olması beklenmektedir. Mesh birimlerinin kendi içlerinde, birbirleriyle ve geometrinin sınırlarıyla kurduğu ilişki kalitesini belirleyen ortogonal kalite, çarpıklık ve en/boy oranı gibi parametreler Fluent with Meshing modülünde çok daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Resim 7.6'da Fluent with Meshing modülünde tamamlanmış bir mesh işleminin son halinin kesit görüntüsü verilmiştir. Burada ETFE gibi ince parçalar ile diğer kalın parçalar arasındaki geçiş sırasındaki boyut değişimleri, meshin başarılı bir şekilde modele uygulandığını göstermektedir. Mesh geçişlerinin bu şekilde olması bir sonraki aşamada modele verilen enerjinin çok daha hassas bir şekilde ilerleyebilmesini ve buna paralel olarak elde edilecek sonuçların hassaslığını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır.



Resim 7.6. Fluent with Meshing modülünde gerçekleştirilmiş mesh atma işlemleri sonucu elde edilen görüntü

Mesh işleminin tamamlanmasından sonra Fluent with Meshing modülünde sol üst tarafta bulunan “Switch to Solution” seçeneği tıklanarak, meshing Setup modülüne aktarımı sağlanır. Böylece, sonraki aşamada yapılacak olan çözüm modelinin kurulabilmesi için programın mesh kalite standartlarına uygun bir şekilde işlem tamamlanmıştır.

7.3. Setup Modülü ile Analiz Modelinin Oluşturulması

Bu bölümde öncelikle analizin zaman ile bağıntısını belirleyen seçeneklerden “Steady” seçeneği işaretlenerek, konveksiyonun gerçekleştirilebilmesi için yer çekimi ivmesi Y aksında $-9,81$ olarak tanımlanmıştır. Sonrasında analiz modelinin oluşturulabilmesi için “Models” sekmesinden Enerji, viskozite ve radyasyon modelleri aktive edilmiştir (Çizelge 7.1). Bir sonraki aşamada ise analizi gerçekleştirilecek malzemelerin özellikleri katı ve sıvı olarak tanımlanmıştır. Beton, alüminyum, ABS ve ETFE olarak belirlenen ve programa tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 7.2’deki gibidir:

Çizelge 7.1. Analiz modelinin oluşturulmasında tanımlanan özellik ve değerler

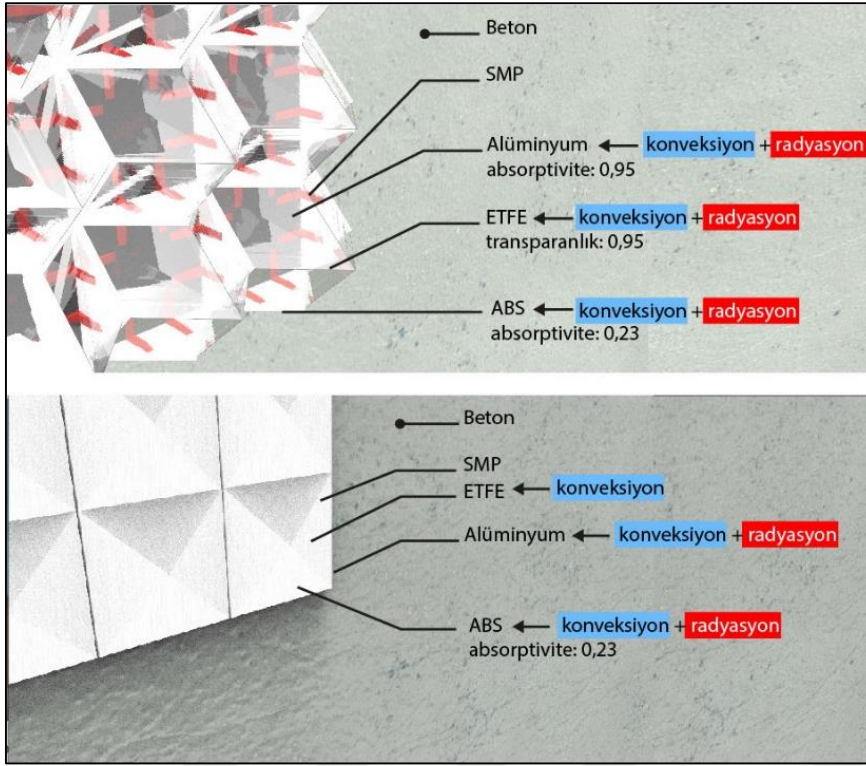
Model tanımlamaları	Seçim/Değer
Zaman	Zamandan bağımsız (Steady State)
Yer çekimi	(-)Y 9,81
Enerji	Aktif
Viskozite	Standart k-epsilon, Standart duvar kanlınlığı
Radyasyon	DO (Discrete Ordinate)
Solar Yük	Aktif

Çizelge 7.2. Tanımlanan malzeme özellikleri

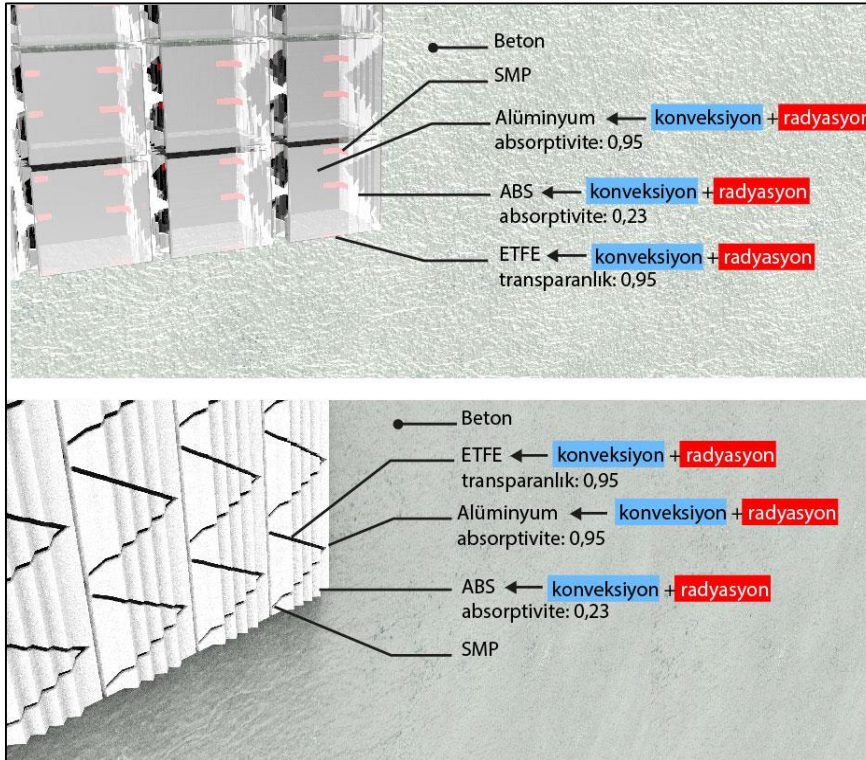
Malzeme Adı	Yoğunluk (kg/m ³)	Öz Isı (J/kg.K)	Termal İletkenlik (W/mK)	Absorptivite / Transparanlık
Beton	2400	1000	2	α : 0,30
Alüminyum	2719	871	202,4	α : 0,95 (siyah) α : 0,40 (gri)
ETFE	1700	1900	0,238	T: 0,95
ABS	1050	2000	0,15	α : 0,23

Malzeme özelliklerinin tanımlanmasından sonra yüzeylerin maruz kalığı sınır şartları belirlenmiştir (Resim 7.7, Resim 7.8 ve Resim 7.9). Bu noktada Ankara’nın en soğuk ve en sıcak günlerinde güneş ışını maruziyetine en dik açıyla maruz kalınan öğle saatleri referans alınmıştır. Ankara’nın en soğuk gün ve saati olarak 24 Ocak 12.15 referans alınırken, en sıcak günü olarak 3 Ağustos saat 12.45 solar modellemede esas alınmıştır. Maruz kalınan

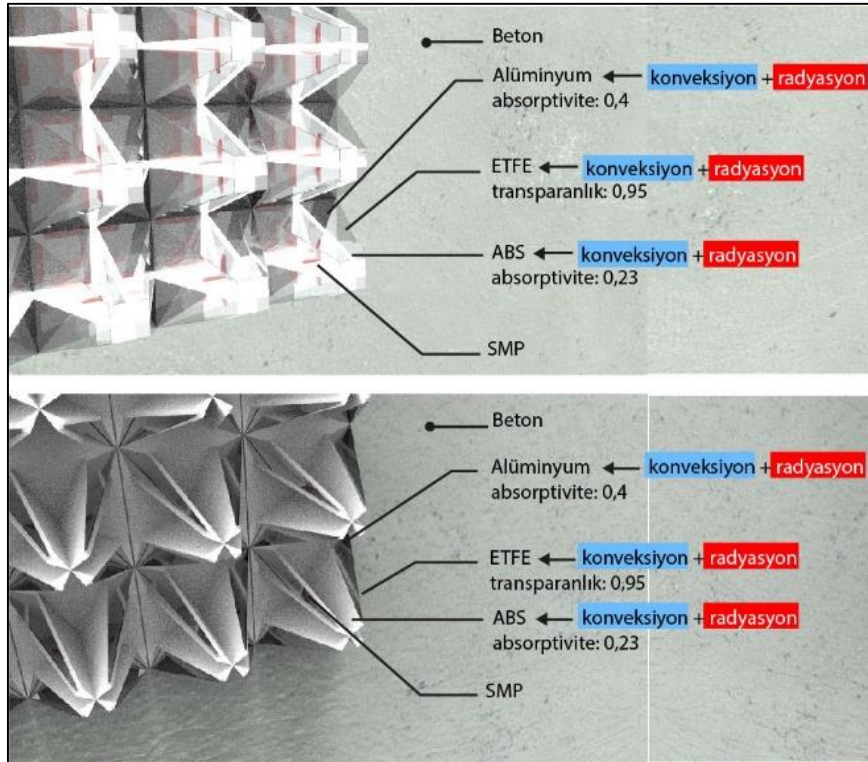
rüzgar akışı ile oluşan konveksiyon etkisi için de belirlenen günlerdeki rüzgar hızı referans alınmıştır (Weather Spark, 2021).



Resim 7.7. Model 1 için kış (üst) ve yaz (alt) sınır şartları

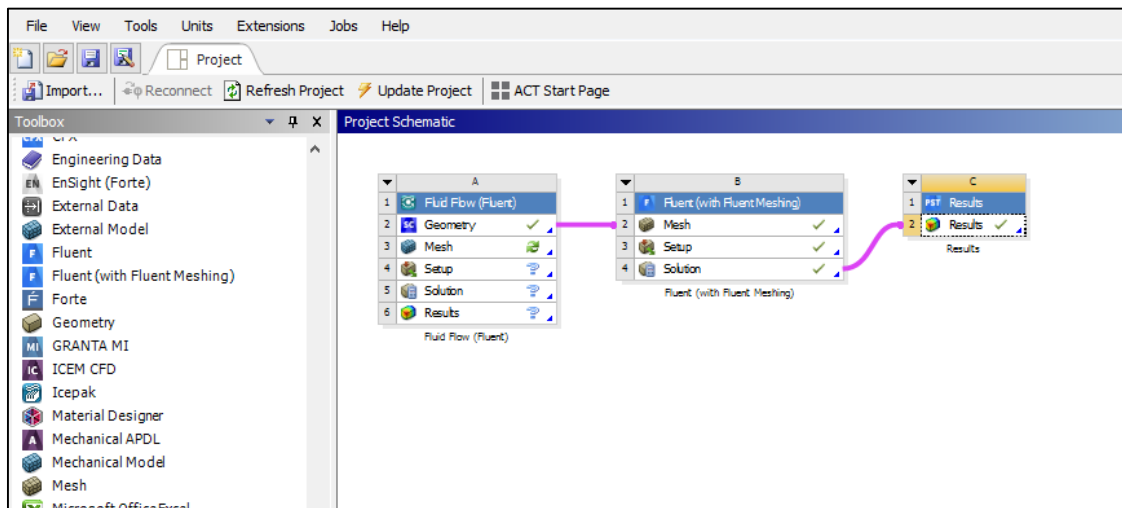


Resim 7.8. Model 2 için kış (üst) ve yaz (alt) sınır şartları



Resim 7.9. Model 3 için kış (üst) ve yaz (alt) sınır şartları

Gerçekleştirilen analiz sonucunda Workbench ana ara yüzünde görüldüğü gibi her modüle program tarafından yeşil tik atılmasıyla analizin başarılı bir şekilde sonuçlandırıldığı görülmektedir (Resim 7.10).

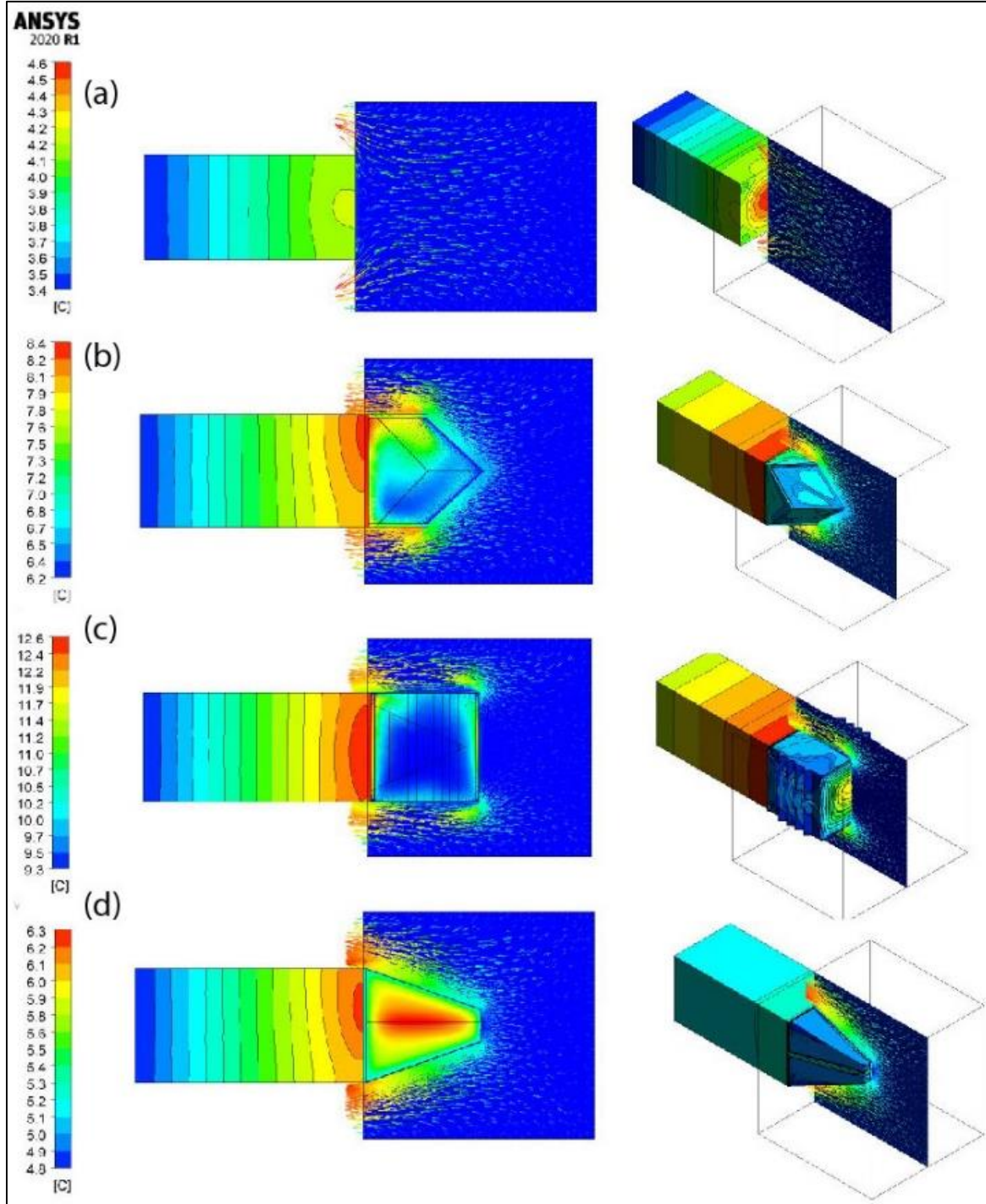


Resim 7.10. Çözümlemenin tamamlandığını gösteren yeşil tikler

Gerçekleştirilen analizler sonucunda modellerin açık hallerinde betonun duvarın yapı iç ortamına bakan yüzündeki sıcaklık değerleri tespit edilebilmesi için, yapı kabuğu birimi modelleriyle kaplanmış duvar modellerine ek olarak herhangi bir uygulama yapılmayan

beton duvar ile karşılaştırma yapılmıştır (Resim 7.10). Yapılan analiz sonuçlarında, yılın en soğuk günü olan 24 Ocak tarihinde, güneş ışınlarının en dik açıyla geldiği saat 12.15'te iç ortama iletilen sıcaklık değerlerinin tespit edilebilmesi için yapılan CFD analizinde herhangi bir yapıyla kaplanmamış beton duvarın yapı içine ilettiği sıcaklık değeri 3.4°C olarak tespit edilmiştir. Yapı kabuğu birim modellerinden; birinci model 6.2°C, ikinci model 9.3°C ve üçüncü model ise 4.8°C sıcaklık sonuçlarıyla ısı iletimi gerçekleştirmiştir. Böylece, herhangi bir uygulama olmayan beton duvarın aynı sıcaklık ve rüzgar etkilerine maruz kaldığı duruma göre, üzerine uygulama yapılan tüm modeller beton duvara göre daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Kış mevsimi şartlarına maruz kalan her üç modelden ise en iyi ısı iletim performansını Model 2 gerçekleştirmiştir. Buradan yola çıkılarak modeller arasında karşılaştırma yapıldığında;

- Birinci modelde yanlara açılan zarf formundaki ABS plakaların, alüminyum plakanın ısınması konusunda özellikle üst ABS plakanın bir miktar güneş ışınına maruziyeti azalttığı sonucuna varılmıştır.
- Üçüncü modelde ise radyal hareketle merkezden katlanan ABS plakaların beyaz renkte olmalarından dolayı üzerlerine gelen güneş ışınlarını yansıtıkları ve böylece ETFE membran içinde hapsedilen havayı ısıttıkları, öte yandan opak olduklarından dolayı modelin alt kısmına güneş ışınlarının iletimini engelledikleri ve bu nedenle alüminyum plakanın ısı kazanımı performansını düşürdüğü sonucuna varılmaktadır. Öte yandan yaz kullanımında doğrudan güneş maruziyetine kalındığından dolayı aşırı ısı kazanımının önüne geçilebilmesi için alüminyum plaka açık gri renkte tasarlanmıştır. Bu durum, ısı kazanımını siyah alüminyum plakalı modellerde olduğundan daha düşük performansla gerçekleştirse de, herhangi bir uygulama olmayan beton duvardan daha yüksek ısı iletim performansı göstermesini sağlamıştır.
- İkinci modelde ise, karşıdan ve yukarıdan gelen güneş ışınlarının en optimum düzeyde alınabilmesi için ABS plakaların yanal yönde açılmasının ısı kazanımı yönünde katkısı olduğu sonucuna varılmıştır.

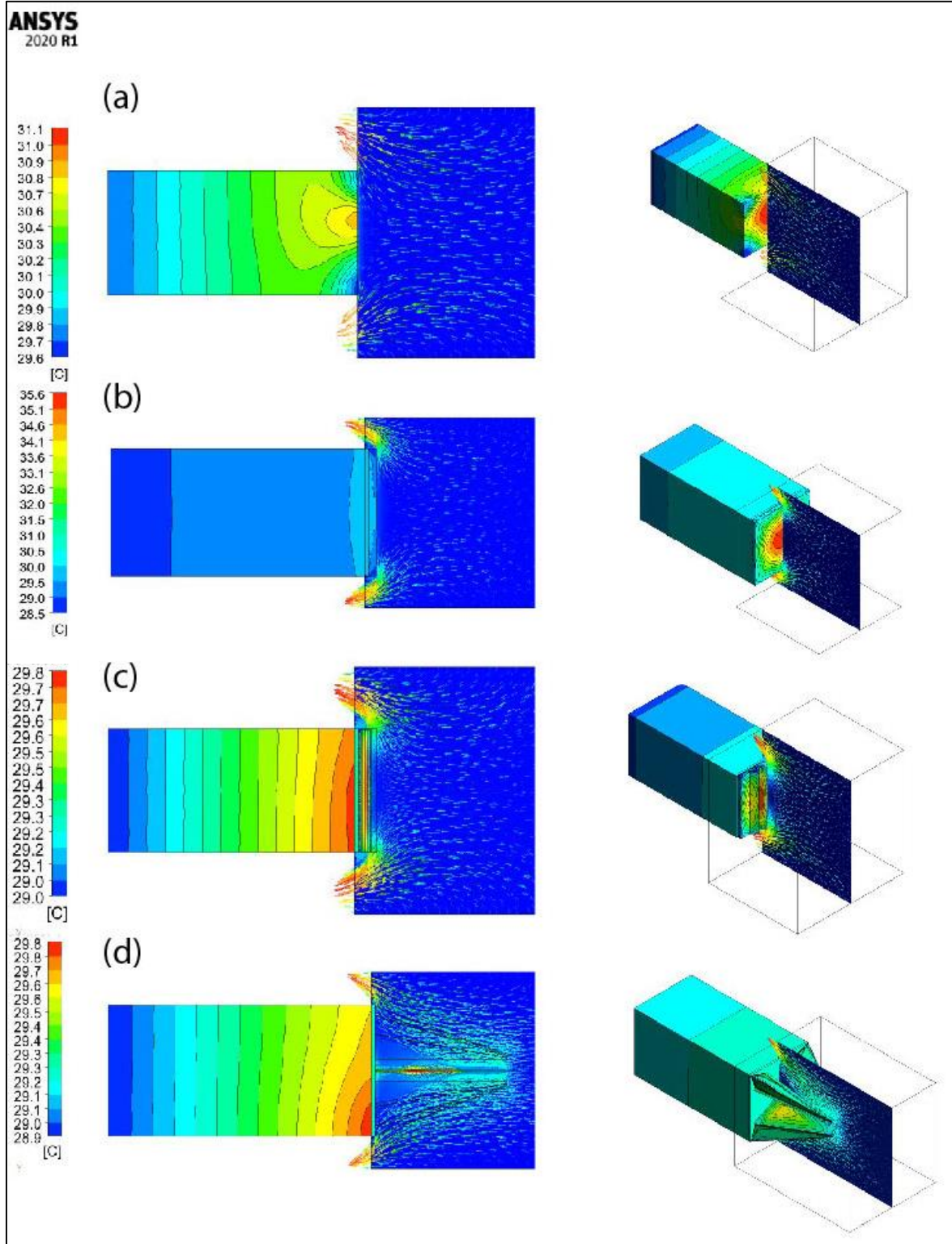


Resim 7.11. Beton duvarın ve yapı kabuğu birim tasarım önerilirisinin 24 Ocak saat 12.15'teki sıcaklık iletim performanslarının karşılaştırılması: herhangi bir uygulama olmayan beton duvar (a), Model 1 (b), Model 2 (c), Model 3 (d)

Yılın en sıcak günü olan 3 Ağustos tarihinde güneş ışınlarının en dik açıyla geldiği saat 12.45'te iç ortama iletilen sıcaklık değerlerinin tespit edilebilmesi için yapılan CFD analizinde herhangi bir yapı ile kaplanmamış beton duvarın yapı içine ilettiği sıcaklık değeri 29.6°C olarak tespit edilmiştir. Yapı kabuğu birim modellerinden; birinci model 28.5°C,

ikinci model 29.0°C ve üçüncü model ise 28.9°C sıcaklık sonuçlarıyla ısı iletimi gerçekleştirmiştir (Resim 7.11). Böylece, herhangi bir uygulama olmayan beton duvarın aynı sıcaklık ve rüzgar etkilerine maruz kaldığı duruma göre, üzerine uygulama yapılan tüm modeller beton duvara göre daha düşük sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Yaz mevsimi şartlarına maruz kalan her üç modelden ise en iyi ısı kazanımı önleme performansını Model 1 gerçekleştirmiştir. Buradan yola çıkılarak modeller arasında karşılaştırma yapıldığında;

- Zarf şeklinde kapanan ve düz yüzeye sahip ABS plakaların, kaburgalı yapıya sahip beyaz ABS plakalardan daha etkili sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bu noktada, beyaz bir yüzeyin kaburgalı yapısından dolayı bazı kısımlarının gölgede kalmasındansa, tüm yüzeyinin düz olmasının ısı kazanımı önleme konusunda daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Öte yandan siyah renkteki alüminyum plaka ve ETFE membranın beyaz ABS plakalar ile kaplanmasıyla ısı kazanımının önlenmesinde başarılı olduğu sonucuna da varılmıştır.
- Siyah alüminyum plakanın yaz kullanımında radyal olarak açıldığı için beyaz ABS plakalarla kaplanmadığı Model 3'te ise, ısı kazanımının önlenmesi için alüminyum plaka, siyah renge göre çok daha düşük absorptivite değerine sahip olan açık gri renkte tasarlanmış, böylece ısı kazanımının önüne bu şekilde geçilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım ile, ısı kazanımının önlenmesinde herhangi bir uygulama yapılmayan beton duvara göre daha yüksek performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.
- Model 3'ten ABS plakalarda yüzeyin maruz kaldığı rüzgar akışıyla sağlanan konveksiyon sayesinde serinletilmesinin ısı kazanımı önleme konusunda tek başına yeterli olmadığı tespit edilmiştir.



Resim 7.12. Beton duvarın ve yapı kabuğu birim tasarım önerilerinin 3 Ağustos saat 12.45'teki sıcaklık iletim performanslarının karşılaştırılması: herhangi bir uygulama olmayan beton duvar (a), Model 1 (b), Model 2 (c), Model 3 (d)

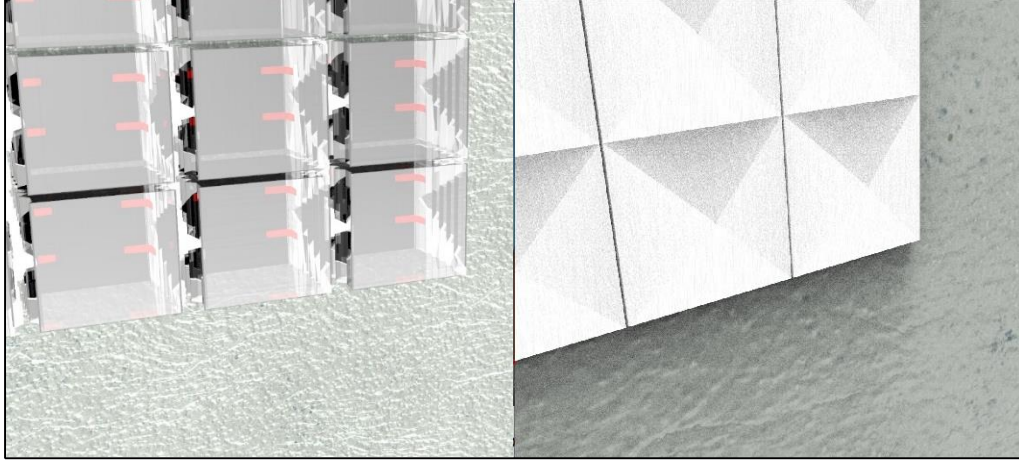


8. SONUÇ VE ÖNERİLER

İnsanoğlunun ilk ihtiyaçlarından olan barınma ihtiyacı ve sağlıklı bir yaşam için barınma ihtiyacının beraberinde gelen termal konforun sağlanması yapılar ile sağlanmaktadır. Dünyadaki enerjinin %80'inin yapılarda kullanılması ve bu enerjinin ciddi bir kısmının tüketilebilir kaynaklar ile temin edildiği göz önünde bulundurulduğunda yapı içi termal konforun sağlanmasında ekonomi ve iklimlendirme ihtiyacının karşılanması sonucu karşımıza çıkan çevresel etkiler de bu sürece dahil olmaktadır. Her geçen gün küresel ısınmanın artması ve kaynakların ulaşılabilirliğinin ve dağıtılabilirliğinin azalması, yenilenebilir enerji kaynaklardan yararlanma miktarının artırılmasının insana ve doğaya olumlu sonuçları olacağı gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Buradan yola çıkılarak, ısınma ve soğuma ihtiyaçlarını karşılarken öncelikle dış kaynaklara bağımlılığını minimum düzeye indirgeyebilen, sonrasında ise ihtiyaç duyduğu enerjiyi kendi yapısında oluşturabilen yapılar üzerinde durulmuştur. Bu noktada, yapının iç ortamı ile dış ortamı arasında bir ayırıcı rolünden çok daha fazlasını üstlenen ve üstlenebilecek yapı kabuğu stratejileri incelenmiştir.

Yapının dışa bağımlılığını ve kendi enerjisini üretebilmede en önemli faktör değişen çevresel sıcaklık koşullarına optimum düzede odaklanabilme kapasitesidir. Bu nedenle enerji alışverişinde oldukça etkin bir rol oynayan yapı kabuklarının, değişen çevresel şartlara uyumlanabilmesinde doğada ekstrem sıcaklık koşullarında yaşayan canlıların sahip olduğu uyumlanma özellikleri ve vücut formları referans alınmıştır. Bu uyumlanma becerisinin çok daha etkin ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ise canlıların morfolojik yapılarına ek olarak kinetik hareketin ve akıllı malzemelerin de oldukça önemli rol üstlendiği görülmüştür.

Oluşturulan üç farklı yapı kabuğu model tasarımı ile literatürde genellikle soğuk veya sıcak iklim bölgeleri olmak üzere seçilen bir ekstrem koşulun ihtiyacının karşılanmasındansa birçok iklimi yıl içinde yaşayan bölgeler referans alınarak sıcak ve soğuk çevre şartlarına uyumlanabilen ve iki yönlü çalışabilen çözüm önerileri sunulmuştur. Malzeme, form ve hareket tanımlamaları ile gerçekleştirilen model tasarımlarının performanslarının karşılaştırılabilmesi için ANSYS Workbench 2020 R1 programı üzerinde CFD termal analiz yapılmış ve kış mevsimi şartlarında en iyi ısı kazanım performansını Model 2'nin, yaz mevsimi sıcaklık şartlarında ısı kazanımının önlenmesinde en yüksek performansı ise Model 1'in gösterdiği tespit edilmiştir (Resim 8.1).



Resim 8.1. Kış mevsimi şartlarında en iyi ısı kazanım performansını gösteren Model 2 (solda) ve yaz mevsimi şartlarında en iyi ısı kazanım önleme performansını gösteren Model 1 (sağda)

Buradan yola çıkılarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Formica rufa cinsi karıncanın koyu renk vücudu, soğuk havalarda tüylerini kabartan güvercin (Model 1) ve beyaz renk kabuğu ile yüksek sıcaklıklardaki çöl ortamında yaşamını sürdürebilen çöl salyangozunun (Model 2), düşük sıcaklıklardaki kış mevsimi şartlarında ısı kazanımın sağlanması, yüksek sıcaklıklardaki yaz mevsiminde ise ısı kazanımın önlenmesi konusunda doğadan esinlenebilecek canlılar konusunda en iyi kombinasyonu oluşturdukları sonucuna varılmıştır.
- Bu sonuç ile, doğadaki canlıların değişen sıcaklık koşullarına uyumlanma becerilerinin yapılara uyarlanması ile ısı yönetiminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebileceği sonucu elde edilmektedir. Böylece sağlık, ekonomi ve çevre bakımından birçok fayda sağlanabileceği ön görülmektedir.
- Sonucun elde edilmesinde modellerin birim bazında referans alınmasında kullanılan ANSYS programına alternatif olarak, tüm yapıya giydirilmiş çok sayıda modelin sağlayacağı sonuçlar da bir başka mimarlık analizi programı aracılığı ile incelenebilir.
- Modeller, stabil yapılara alternatif olarak geçici konaklama için kullanılabilir basit düzeydeki yapılara da uygulanarak elde edilen sonuçlar ile farklı araştırma alanları keşfedilebilir ve daha farklı alanlarda da sağlık, konfor, verimlilik, çevresel etki parametreleri incelenebilir.
- Bu çalışma ile doğanın kendi enerjisini yönetme stratejileri referans alınarak, insanlığın yeryüzündeki tüketici pozisyonundan uzaklaştırılarak temiz kaynakları kullanan ve doğaya zarar vermeyen kullanıcı formatına dönüştürülmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., Muraza, O., and Aditiya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73 (7), 1352-1365.
- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Zeynali Famileh, I., Calautit, J. K., Hughes, B. R., and Zaki, S. A. (2016). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60 (8), 1470-1497.
- Al-Masrani, S. M., Al-Obaidi, K. M., Zalin, N. A., and Aida Isma, M. I. (2018). Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. *Solar Energy*, 170 (12), 849-872.
- Al-Obaidi, K. M., Azzam Ismail, M., Hussein, H., and Abdul Rahman, A. M. (2017). Biomimetic building skins: An adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79 (13), 1472-1491.
- Al Dakheel, J. and Tabet Aoul, K. (2017). Building Applications, Opportunities and Challenges of Active Shading Systems: A State-of-the-Art Review. *Energies*, 10 (10), 1672.
- Amin, F. A. and Taleb, D. H. (2016, October). *Biomimicry Approach To Achieving Thermal Comfort In A Hot Climate*. Paper presented at SBE16, Tallinn, Estonia and Helsinki, Finland.
- Anderson, R. C., and White, R. (2009). *Confessions of a radical industrialist: Profits, people, purpose* (First Edition). New York:St. Martin's Press, 1-320.
- Antoniadou, P. and Papadopoulos, A. M. (2017). Occupants' thermal comfort: State of the art and the prospects of personalized assessment in office buildings. *Energy and Buildings*, 153 (20), 136-149.
- Aschwanden, M. and Stemmer, A. (2006). Polymeric, electrically tunable diffraction grating based on artificial muscles. *Optics letters*, 31 (17), 2610-2612.
- Badarnah, L. (2015). A Biophysical Framework of Heat Regulation Strategies for the Design of Biomimetic Building Envelopes. *Procedia Engineering*, 118 (20), 1225-1235.
- Badarnah, L. (2017). Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation. *Buildings*, 7 (2), 40.
- Barton, A., Basham, M., Foy, C., Buckingham, K., Somerville, M., and Torbay Healthy Housing, G. (2007). The Watcombe Housing Study: the short term effect of improving housing conditions on the health of residents. *J Epidemiol Community Health*, 61 (9), 771-777.

- Belussi, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Danza, L., Devitofrancesco, A., Fanciulli, C., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., Salamone, F., Scamoni, F., and Scrosati, C. (2019). A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*, 25 (5), 100772.
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., and Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198 (17), 467-490.
- Bohnenberger, S., Khoo, C. K., Davis, D., Thomsen, M. R., Karmon, A., and Burry, M. (2012). Sensing Material Systems - Novel Design Strategies. *International Journal of Architectural Computing*, 10 (3), 361-375.
- Bollazzi, M. and Roces, F. (2010). The Thermoregulatory Function of Thatched Nests in the South American Grass-Cutting Ant, *Acromyrmex heyeri*. *Journal of insect science (Online)*, 10 (1), 137.
- Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Bartolí, E., and Inés Fernández, A. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23 (7), 536-542.
- Cabeza, L. F. and Chàfer, M. (2020). Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review. *Energy and Buildings*, 219 (14), 110009.
- Cabeza, L. F., de Gracia, A., and Pisello, A. L. (2018). Integration of renewable technologies in historical and heritage buildings: A review. *Energy and Buildings*, 177 (20), 96-111.
- Carreras, J., Boer, D., Cabeza, L. F., Jiménez, L., and Guillén-Gosálbez, G. (2016). Eco-costs evaluation for the optimal design of buildings with lower environmental impact. *Energy and Buildings*, 119 (10), 189-199.
- Catto Lucchino, E., Goia, F., Lobaccaro, G., and Chaudhary, G. (2019). Modelling of double skin facades in whole-building energy simulation tools: A review of current practices and possibilities for future developments. *Building Simulation*, 12 (1), 3-27.
- Charoenkit, S. and Yiemwattana, S. (2016). Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review. *Building and Environment*, 105 (11), 82-94.
- Chow, T. T., Chan, A. L. S., Fong, K. F., and Lin, Z. (2005). Hong Kong solar radiation on building facades evaluated by numerical models. *Applied Thermal Engineering*, 25 (13), 1908-1921.
- Chow, T. T., Fong, K. F., Chan, A. L. S., and Lin, Z. (2006). Potential application of a centralized solar water-heating system for a high-rise residential building in Hong Kong. *Applied Energy*, 83 (1), 42-54.
- Cloudsley-Thompson, J. (1999). Multiple factors in the evolution of animal coloration. *Naturwissenschaften*, 86 (3), 123-132.

- Cohen, Y. and Reich, Y. (2017). *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability* (First Edition). Berlin: Springer, (1-253)
- Cosarinsky, M., Römer, D., and Roces, F. (2020). Nest Turrets of Acromyrmex Grass-Cutting Ants: Micromorphology Reveals Building Techniques and Construction Dynamics. *Insects*, 11 (2), 140.
- Dietsch, B. and Tong, T. (2007). A review-: Features and benefits of shape memory polymers (smmps). *Journal of advanced materials*, 39 (2), 3-12.
- Duerig, T. W., Melton, K. N., and Stöckel, D. W. C. M. (2013). *Engineering aspects of shape memory alloys* (First Edition). England: Butterworth-heinemann. 1-499.
- El Feninat, F., Laroche, G., Fiset, M., and Mantovani, D. (2002). Shape memory materials for biomedical applications. *Advanced Engineering Materials*, 4 (3), 91-104.
- Fan, K., Huang, W., Wang, C., Ding, Z., Zhao, Y., Purnawali, H., Liew, K., and Zheng, L. (2011). Water-responsive shape memory hybrid: design concept and demonstration. *Express Polymer Letters*, 5 (5), 409-416.
- Funakubo, H. and Kennedy, J. (1987). *Shape memory alloys* (First Edition). New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1-218.
- Ge, T. S., Wang, R. Z., Xu, Z. Y., Pan, Q. W., Du, S., Chen, X. M., Ma, T., Wu, X. N., Sun, X. L., and Chen, J. F. (2018). Solar heating and cooling: Present and future development. *Renewable Energy*, 126 (12), 1126-1140.
- Gebeshuber, I. C. and Drack, M. (2008). An attempt to reveal synergies between biology and mechanical engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (7), 1281-1287.
- Gramann, J. (2004). *Problemmodelle und Bionik als Methode*. Unpublished Doctoral dissertation, University of Munich, Munich
- Grynning, S., Time, B., and Matusiak, B. (2014). Solar shading control strategies in cold climates – Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces. *Solar Energy*, 107 (9), 182-194.
- Gunes, I. S. and Jana, S. C. (2008). Shape memory polymers and their nanocomposites: a review of science and technology of new multifunctional materials. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8 (4), 1616-1637.
- Haertling, G. H. (1999). Ferroelectric ceramics: history and technology. *Journal of the American Ceramic Society*, 82 (4), 797-818.
- Hayashi, S. (1990). Technical Report on Shape Memory Polymers; Nagoya Research and Development Center, Mitsubishi Heavy Industries. *Nagoya, Japan*.
- Helms, M., Vattam, S., and Goel, A. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Design studies*, 30 (6), 606-622.

- Herzog, T., Krippner, R., and Lang, W. (2012). *Facade Construction Manual* (First Edition). München: Birkhäuser, (1-4).
- Hesselberg, T. (2007). Biomimetics and the case of the remarkable ragworms. *Die Naturwissenschaften*, 94 (8), 613-621.
- Hornbogen, E. (2006). Comparison of shape memory metals and polymers. *Advanced Engineering Materials*, 8 (1-2), 101-106.
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Rosemann, A., Schröder, T., and Lichtenberg, J. (2019). A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review. *Building and Environment*, 153 (7), 186-204.
- Huang, W. (2002). On the selection of shape memory alloys for actuators. *Materials and Design*, 23 (1), 11-19.
- Huang, W., Ding, Z., Wang, C., Wei, J., Zhao, Y., and Purnawali, H. (2010). Shape memory materials. *Materials today*, 13 (7-8), 54-61.
- Ibañez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, M., Sacristán-Fernández, J. A., and Martín-Gómez, C. (2017). Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79 (13), 180-191.
- İnternet: Africa Dream Safaris. (2020, August). Long Grass Plains. Web: <https://www.africadreamsafaris.com/long-grass-plains>, Son Erişim Tarihi: 24.08.2020.
- İnternet: AskNature. (2018, August). Flectofin hingeless louver system. Web: <https://asknature.org/idea/flectofin-hingeless-louver-system/>, Son Erişim Tarihi: 07.08.2020.
- İnternet: Biomimicry 3.8. (2020, August). Why Teach Biomimicry? Web: <https://asknature.org/educators/#why-teach-biomimicry>, Son Erişim Tarihi: 24.08.2020.
- İnternet: Calscape. (August, 2020). Brittlebush, *Encelia farinosa*. Web: [https://calscape.org/Encelia-farinosa-\(Brittlebush\)?srchcr=sc570fe62b77b91](https://calscape.org/Encelia-farinosa-(Brittlebush)?srchcr=sc570fe62b77b91), Son Erişim Tarihi: 24.08.2020.
- İnternet: Domerama. (Haziran, 2021). ETFE Microdome. Web: <http://www.domerama.com/coverings/etfe/etfe-microdome/>, Son Erişim Tarihi: 06.06.2021.
- İnternet: Full, R. (2009). TED: Learning from the gecko's tail [video]. Web: <https://www.youtube.com/watch?v=d3syTrElgcg>, Son Erişim Tarihi: 11.09.2020. alınmıştır.
- İnternet: INHABITAT (November, 2012). Biomimetic Architecture: Green Building in Zimbabwe Modeled After Termite Mounds. Web: <https://inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe/>, Son Erişim Tarihi: 11.09.2020.

- İnternet: Mckeag, T. (June, 2013). Framing your problem with the bio-design cube. Web: <https://www.greenbiz.com/article/framing-our-design-challenges-introducing-bio-design-cube>, Son Erişim Tarihi:27.04.2020.
- İnternet: National Institute of Standards and Technology (NIST). (2016, December). A Smart Window to Sustainable Development: A Scientist's Story. Web:<https://www.nist.gov/blogs/taking-measure/smart-window-sustainable-development-scientists-story>, Son Erişim Tarihi:19.07.2020.
- İnternet: Nature Gate (2020, August). Geranium sanguineum. Web: <https://www.luontoportti.com/suomi/en/kukkakasvit/bloody-cranesbill>, Son Erişim Tarihi: 24.08.2020.
- İnternet: PxHere. (2020, August). Güvercin. Web: <https://pxhere.com/tr/photo/765179>, Son Erişim Tarihi: 24.08.2020.
- İnternet: Science Photo Library. (2020, August). Acer rubrum. Web: <https://www.luontoportti.com/suomi/en/kukkakasvit/bloody-cranesbill>, Son Erişim Tarihi: 24.08.2020.
- İnternet: Spatial Experiments. (September, 2016). Learning from the desert snail. Web: <https://spatialexperiments.wordpress.com/2016/09/20/learning-from-the-desert-snail/>, Son Erişim Tarihi: 31.08.2020.
- İnternet: Weather Spark. (April, 2020). Average Weather in Ankara. Web: <https://weatherspark.com/y/97345/Average-Weather-in-Ankara-Turkey-Year-Round#:~:text=In%20Ankara%2C%20the%20summers%20are,or%20above%2095%C2%B0F>, Son Erişim Tarihi: 27.04.2020.
- İnternet: Wikipedia (November, 2010) Diffusionless transformation. Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusionless_transformation, Son Erişim Tarihi: 11.09.2020.
- İnternet: Wonderopolis. (August, 2020). Have You Ever Wondered... Web: <https://wonderopolis.org/wonder/how-does-a-cactus-live-without-water>, Son Erişim Tarihi: 24.08.2020.
- ISO. (2013). Biomimetics—Conception and strategy—Differences between biomimetic and conventional methods/products. In *ISO/TC 266/SC, ISO/WD 18458*.
- Jacobs, S. R., Nichol, E.C., and Helms, M.E. (2014). Where Are We Now and Where Are We Going? The BioM Innovation Database. *Journal of Mechanical Design*, 136 (11), 1-10.
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43 (10), 2549-2563.
- Kadochová, S. and Frouz, J. (2013). Thermoregulation strategies in ants in comparison to other social insects, with a focus on *Formica rufa*. *F1000Research*, 2 (1), 280-295.

- Kasimova, R. G., Tishin, D., Obnosov, Y. V., Dlussky, G. M., Baksht, F. B., and Kacimov, A. R. (2014). Ant mound as an optimal shape in constructal design: Solar irradiation and circadian brood/fungi-warming sorties. *Journal of Theoretical Biology*, 355 (16), 21-32.
- Khoo, C. K., Burry, J., and Burry, M. (2011, October). *Soft responsive kinetic system: An elastic transformable architectural skin for climatic and visual control*. Paper presented at the Integration Through Computation - Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, Banff, Alberta.
- Kim, G., Lim, H. S., Lim, T. S., Schaefer, L., and Kim, J. T. (2012). Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings. *Energy and Buildings*, 46 (3), 105-111.
- Klinger, D. and Landfester, K. (2011). Photo-sensitive PMMA microgels: light-triggered swelling and degradation. *Soft Matter*, 7 (4), 1426-1440.
- Konstantoglou, M. and Tsangrassoulis, A. (2016). Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60 (8), 268-283.
- Korsavi, S. S., Zomorodian, Z. S., and Tahsildoost, M. (2016). Visual comfort assessment of daylit and sunlit areas: A longitudinal field survey in classrooms in Kashan, Iran. *Energy and Buildings*, 128 (19), 305-318.
- Kumar, G. and Raheja, G. (2016). Design Determinants of Building Envelope for Sustainable Built Environment: A Review. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 3 (2), 2016.
- Kumar, R., Garg, S., and Kaushik, S. (2005). Performance evaluation of multi-passive solar applications of a non air-conditioned building. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 5 (1), 60-75.
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., and Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111 (15), 719-734.
- Lagoudas, D. C. (Ed.). (2008). *Shape memory alloys: modeling and engineering applications* (First Edition). Springer Science and Business Media, 1-446.
- Lamnatou, C., Moreno, A., Chemisana, D., Reitsma, F., and Clariá, F. (2018). Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) material: Critical issues and applications with emphasis on buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2), 2186-2201.
- Lendlein, A. and Kelch, S. (2002). Shape-memory polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 41 (12), 2034-2057.
- Lidelöw, S., Örn, T., Luciani, A., and Rizzo, A. (2019). Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 45 (2), 231-242.

- Longo, S., Montana, F., and Riva Sanseverino, E. (2019). A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. *Sustainable Cities and Society*, 45 (2), 87-104.
- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., and Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25 (9), 483-493.
- López, M., Rubio, R., Martín, S., Croxford, B., and Jackson, R. (2015). Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3 (1), 27-38.
- Lurie-Luke, E. (2014). Product and technology innovation: What can biomimicry inspire? *Biotechnology Advances*, 32 (8), 1494-1505.
- Mahmoud, A. H. A. and Elghazi, Y. (2016). Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns. *Solar Energy*, 126 (4), 111-127.
- Mak, T. and Shu, L. H. (2008). Using descriptions of biological phenomena for idea generation. *Research in Engineering Design*, 19 (1), 21-28.
- Mak, T. W. and Shu, L. H. (2004). Abstraction of Biological Analogies for Design. *CIRP Annals*, 53 (1), 117-120.
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., and García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49 (9), 736-755.
- Mar, H. Y. B., Peterson, R. E., and Zimmer, P. B. (1976). Low cost coatings for flat plate solar collectors. *Thin Solid Films*, 39 (9), 95-103.
- Mélois, A. B., Moujalled, B., Guyot, G., and Leprince, V. (2019). Improving building envelope knowledge from analysis of 219,000 certified on-site air leakage measurements in France. *Building and Environment*, 159 (13), 106145.
- Michael, A. and Heracleous, C. (2017). Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus. *Energy and Buildings*, 140 (7), 443-457.
- Miyazaki, S., Fu, Y. Q., and Huang, W. M. (2009). *Thin film shape memory alloys: fundamentals and device applications* (First Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 1-459.
- Montazeri, H., Blocken, B., Derome, D., Carmeliet, J., and Hensen, J. L. M. (2015). CFD analysis of forced convective heat transfer coefficients at windward building facades: Influence of building geometry. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146 (11), 102-116.
- Moosavi, L., Mahyuddin, N., Ab Ghafar, N., and Azzam Ismail, M. (2014). Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34 (6), 654-670.

- Mussard, M. (2017). Solar energy under cold climatic conditions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74 (8), 733-745.
- Nalis, A., Amrul, Yonanda, A., and Zulfa. (2017, October). *Comparison Study of Solar Flat Plate Collector With Two Different Absorber Materials*. Paper presented at the 1st Faculty of Industrial Technology International Congress, Bandung, Indonesia.
- Nasrollahi, N. and Shokri, E. (2016). Daylight illuminance in urban environments for visual comfort and energy performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66 (14), 861-874.
- Nishiyama, Z. (2012). *Martensitic transformation* (First Edition). Amsterdam:Elsevier, 1-432.
- O'Hegarty, R., Kinnane, O., and McCormack, S. J. (2016). Review and analysis of solar thermal facades. *Solar Energy*, 135 (13), 408-422.
- Olsthoorn, D., Haghighat, F., Moreau, A., and Lacroix, G. (2017). Abilities and limitations of thermal mass activation for thermal comfort, peak shifting and shaving: A review. *Building and Environment*, 118 (8), 113-127.
- Oropeza-Perez, I. and Østergaard, P. A. (2018). Active and passive cooling methods for dwellings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2), 531-544.
- Oropeza-Perez, I., Petzold-Rodriguez, A. H., and Bonilla-Lopez, C. (2017). Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buildings*, 145 (12), 251-258.
- Ortiz, M. A., Kurvers, S. R., and Bluysen, P. M. (2017). A review of comfort, health, and energy use: Understanding daily energy use and wellbeing for the development of a new approach to study comfort. *Energy and Buildings*, 152 (9), 323-335.
- Otsuka, K. and Wayman, C. M. (1999). *Shape memory materials* (). Cambridge: Cambridge university press, 777-780.
- Ozel, M. (2013). Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate. *Energy Conversion and Management*, 66 (2), 106-114.
- Pandit, P., Gupta, S. M., and Wadhawan, V. K. (2004). Shape-memory effect in PMN-PT (65/35) ceramic. *Solid state communications*, 131 (11), 665-670.
- Pedro, H. T. C. and Kobayashi, M. H. (2015). On Biomimetic Engineering Design. *IEEE Potentials*, 34 (2), 7-9.
- Pesenti, M., Masera, G., Fiorito, F., and Sauchelli, M. (2015). Kinetic Solar Skin: A Responsive Folding Technique. *Energy Procedia*, 70 (7), 661-672.
- Pomponi, F., Piroozfar, P. A. E., Southall, R., Ashton, P., and Farr, E. R. P. (2016). Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 (2), 1525-1536.

- Potter, K., Davidowitz, G., and Woods, H. A. (2009). Insect eggs protected from high temperatures by limited homeothermy of plant leaves. *Journal of Experimental Biology*, 212 (21), 3448.
- Raji, B., Tenpierik, M. J., and van den Dobbelsteen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45 (5), 610-623.
- Rupp, A. and Gruber, P. (2019). Biomimetic Groundwork for Thermal Exchange Structures Inspired by Plant Leaf Design. *Biomimetics*, 4 (4), 75.
- Ryhänen, J. (1999). *Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy*. Unpublished Master's Thesis, University of Oulu, Finland.
- Saha, A. K., Khan, M. N. N., and Sarker, P. K. (2018). Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 134 (7), 10-24.
- Salcido, J. C., Raheem, A. A., and Issa, R. R. A. (2016). From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review. *Energy and Buildings*, 127 (18), 1008-1018.
- Sansaniwal, S. K., Mathur, J., and Mathur, S. (2020). Review of practices for human thermal comfort in buildings: present and future perspectives. *International Journal of Ambient Energy*, 41 (1), 1-27.
- Sarbu, I. and Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70 (3), 441-454.
- Sartori, J., Pal, U., and Chakrabarti, A. (2010). A methodology for supporting “transfer” in biomimetic design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 24 (4), 483-506.
- Schmidt-Nielsen, K. and Duke, J. B. (1972). *How animals work* (First Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 1-124.
- Schmidt, J. C. (2005). *Bionik und Interdisziplinarität Wege zu einer bionischen Zirkulationstheorie der Interdisziplinarität in Bionik* (First Edition). Amsterdam: Springer, 1-293.
- Schurch, K. and Ashbee, K. (1977). A near perfect shape-memory ceramic material. *Nature*, 266 (5604), 706-707.
- Shafigh, P., Asadi, I., and Mahyuddin, N. B. (2018). Concrete as a thermal mass material for building applications - A review. *Journal of Building Engineering*, 19 (5), 14-25.
- Sharifi, A. and Yamagata, Y. (2015). Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review. *Applied Energy*, 160 (24), 336-357.

- Simonis, P., Rattal, M., Oualim, E. M., Mouhse, A., and Vigneron, J.-P. (2014). Radiative contribution to thermal conductance in animal furs and other woolly insulators. *Optics express*, 22 (2), 1940-1951.
- Speck, T. and Speck, O. (2008). *Process sequences in biomimetic research* (First Edition). WIT Press, Southampton, 3-11.
- Stazi, F. (2017). *Chapter Five - Passive Envelopes* (First Edition). England: Butterworth-Heinemann, 175-255.
- Stevanović, S. (2013). Optimization of passive solar design strategies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25 (9), 177-196.
- Sun, L., Huang, W., and Cheah, J. (2010). The temperature memory effect and the influence of thermo-mechanical cycling in shape memory alloys. *Smart materials and structures*, 19 (5), 055005.
- Sun, L. and Huang, W. M. (2010). Mechanisms of the multi-shape memory effect and temperature memory effect in shape memory polymers. *Soft Matter*, 6 (18), 4403-4406.
- Sun, L., Huang, W. M., Ding, Z., Zhao, Y., Wang, C. C., Purnawali, H., and Tang, C. (2012). Stimulus-responsive shape memory materials: A review. *Materials and Design*, 33 (1), 577-640.
- Sun, Y., Wilson, R., and Wu, Y. (2018). A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort. *Applied Energy*, 226 (18), 713-729.
- Swain, M. (1986). Shape memory behaviour in partially stabilized zirconia ceramics. *Nature*, 322 (6076), 234-236.
- Tattersall, G. J. and Milsom, W. K. (2003). Transient peripheral warming accompanies the hypoxic metabolic response in the golden-mantled ground squirrel. *Journal of Experimental Biology*, 206 (1), 33-42.
- Tejero-González, A., Andrés-Chicote, M., García-Ibáñez, P., Velasco-Gómez, E., and Rey-Martínez, F. J. (2016). Assessing the applicability of passive cooling and heating techniques through climate factors: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65 (13), 727-742.
- Thakur, A., Kumar, R., Kumar, S., and Kumar, P. (2021). Review of developments on flat plate solar collectors for heat transfer enhancements using phase change materials and reflectors. *Materials Today: Proceedings*. 28 (3), 1533-1536.
- Tokuç, A. ve Yıldızber, Z. E. Enerji Etkin Konut Tasarımında Tesisat Bileşenleri İle Birlikte Kullanılacak Yapı Elemanlarının Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 11 (2), 31-42.
- Tzempelikos, A. (2017). Advances on daylighting and visual comfort research. *Building and Environment*, 113 (3), 1-4.

- Tzoulis, T. and Kontoleon, K. J. (2017). Thermal behaviour of concrete walls around all cardinal orientations and optimal thickness of insulation from an economic point of view. *Procedia environmental sciences*, 38 (2), 381-388.
- Vattam, S. S., Helms, M. E., and Goel, A. K. (2008). Compound analogical design: interaction between problem decomposition and analogical transfer in biologically inspired design. (In *Design computing and cognition'08*) Springer, Dordrecht, 377-396.
- Verbeke, S. and Audenaert, A. (2018). Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2), 2300-2318.
- Villegas, J., Camilo, J., Gutiérrez, J., and Colorado, H. (2020). Active materials for adaptive building envelopes: a review. *Journal of Materials and Environmental Science*, 11 (6), 988-1009.
- Wang, H., Chiang, P.-C., Cai, Y., Li, C., Wang, X., Chen, T.-L., Wei, S., and Huang, Q. (2018). Application of Wall and Insulation Materials on Green Building: A Review. *Sustainability*, 10 (9), 3331.
- Webb, A. L. (2017). Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77 (10), 748-759.
- Wei, Z., Sandström, R., and Miyazaki, S. (1998). Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems: Part I Shape-memory materials. *Journal of materials science*, 33 (15), 3743-3762.
- Willand, N., Ridley, I., and Maller, C. (2015). Towards explaining the health impacts of residential energy efficiency interventions - A realist review. Part 1: Pathways. *Soc Sci Med*, 133 (10), 191-201.
- Wu, T. and Lei, C. (2016). A review of research and development on water wall for building applications. *Energy and Buildings*, 112 (3), 198-208. d
- Yahia, L. (2012). *Shape memory implants* (First Edition). Berlin:Springer Science and Business Media, 1-345.
- Yang, L., Yan, H., and Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. *Applied Energy*, 115 (3), 164-173.
- Yoneyama, T. and Miyazaki, S. (2008). *Shape memory alloys for biomedical applications* (First Edition). Cambridge:Elsevier, 1-352.
- Yoon, J. (2018, August). *Climate-adaptive Facade Design with Smart Materials: Evaluation and Strategies of Thermo-responsive Smart Material Applications for Building Skins in Seoul*. Paper presented at PLEA, Seoul.
- Yoon, J. (2019). SMP prototype design and fabrication for thermo-responsive façade elements. *Journal of Facade Design and Engineering*, 7 (1), 41-62.

Yu, Y., Nakano, M., and Ikeda, T. (2003). Directed bending of a polymer film by light. *Nature*, 425 (6954), 145-145.

Zaera-polo, A., Truby, S., and Koolhaas, R. (2014). *Elements of Architecture* (First Edition). Germany: Taschen, 1-2528.





GAZİ GELECEKTİR..