

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİMARİ TASARIMDA BİYOİŞBİRLİKÇİ BİR
YAKLAŞIM OLARAK BAKTERİYEL
BİYOKALSİFİKASYONUN KULLANIMI ÜZERİNE
BİR İNCELEME**

Burcu Filiz DEMİRCİ

Temmuz, 2019

İZMİR

**MİMARİ TASARIMDA BİYOİŞBİRLİKÇİ BİR
YAKLAŞIM OLARAK BAKTERİYEL
BİYOKALSİFİKASYONUN KULLANIMI ÜZERİNE
BİR İNCELEME**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Mimarlık Anabilim Dalı, Bina Bilgisi Programı

Burcu Filiz DEMİRCİ

Temmuz, 2019

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

BURCU FİLİZ DEMİRCİ tarafından DOÇ. DR TUTKU DİDEM AKYOL ALTUN yönetiminde hazırlanan “MİMARİ TASARIMDA BİYOİŞBİRLİKÇİ BİR YAKLAŞIM OLARAK BAKTERİYEL BİYOKALSİFİKASYONUN KULLANIMI ÜZERİNE BİR İNCELEME” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Tutku Didem AKYOL ALTUN

Yönetici



DOÇ. DR. ÖZGE ANDIÇ GAKIR

Jüri Üyesi



DR. ÖĞR. Ü. FERZAL ÖZKABAN

Jüri Üyesi



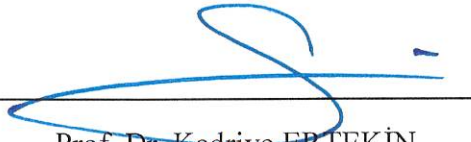
DOÇ. DR. FERHAT TANALİBEYOĞLU

Jüri Üyesi



DOÇ. DR. İNCİ UZUN

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamda beni cesaretlendiren gerek derslerde gerekse de tez aşamasında büyük bir sabır ve özveriyle her türlü desteği ve yapıcı yönlendirmeyi sağlayan Tez Danışmanım Doç. Dr. Tutku Didem AKYOL ALTUN 'a,

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca sabırla beni destekleyen sevgili annem Nuray DEMİRCİ'ye, bir yandan çalışırken bir yandan yüksek lisans eğitimimi sürdürme şansını bana veren Ömer ÇELİKKOL'a, her derdime ve sevincime içtenlikleriyle ortak olan Cemre ŞAHİN ve Kadriye ÖZDEMİR olmak üzere tüm arkadaşlarıma, bu süreçte büyük katkı ve yardımları olan Türkiye Biyotasarım Takımı'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Burcu Filiz DEMİRCİ

MİMARİ TASARIMDA BİYOİŞBİRLİKÇİ BİR YAKLAŞIM OLARAK BAKTERİYEL BİYOKALSİFİKASYONUN KULLANIMI ÜZERİNE BİR İNCELEME

ÖZ

Mimari tasarım örnekleri, biyomimikri ile farklı ilişki biçimlerinde kendini gösterirken, ortak paydada doğadan mimari bir anlam çıkarma amacı gütmektedirler. 21.yüzyılda gelişen biyomühendislik ve biyoteknolojik araştırmalar sayesinde, doğanın, mimarlık ve diğer mühendislik alanlarıyla kurduğu ilişkiler değişmeye başlamıştır. Bu bağlamda gündeme gelen doğa esinlenmeli tasarım yaklaşımlardan biri de biyoişbirliğidir. Tüm kaynakların tüketilmesi, doğanın sürdürülemez olması, kullanılan tüm yapı malzemeleri ve yapım yöntemlerinin gelenekselleşmesi gibi birçok mimari tasarım problemlerine alternatif bir yaklaşım olan biyoişbirlikçi tasarım yaklaşımı yeni bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmanın temel amacı ise, doğanın/canlının tasarıma direkt entegre edilmesi söz konusu olan bu yaklaşım çerçevesinde biyoişbirlikçi bir tasarım yaklaşımı olarak öngörülen bakteriyel biyokalsifikasyonun, mimarlık ve tasarım alanında, çimento, beton ve türevi yapılara alternatif olabilecek şekilde kullanım potansiyellerini araştırmak; mimari tasarımda bir araç olarak kullanımını, bu üretim yönteminin potansiyellerini ve uygulanabilirliğini tartışmaktır.

Bu doğrultuda çalışmanın teorik çerçevesini çizmeyi sağlayan literatür araştırması sonucunda, doğa esinlenmeli tasarım denemeleri irdelenerek kategorize edilmiştir. Tez çalışmasının, literatürde canlı organizmaların sürece entegre olduğu az sayıda örnek içinde konumlanması ve interdisipliner çalışmalara dikkat çekmenin yanı sıra, gelecekte canlı organizmaların mimarlık ve tasarım alanında kullanılması yönünde tasarım disiplinine bir katkı hedeflemesi bakımından önemlidir.

Anahtar kelimeler: Biyomimetik, biyokalsifikasyon, mimari tasarım

A STUDY ON THE USE OF BACTERIAL BIOCALCIFICATION IN ARCHITECTURAL DESIGN AS A BIO-COLLABORATIVE APPROACH

ABSTRACT

While examples of architectural design show themselves in different forms of relationship with biomimicry, they share the purpose of deriving an architectural meaning from the nature of common denominator. Thanks to the bioengineering and biotechnological researches that developed in the 21st century, nature's relations with architecture and other engineering fields began to change. In this context, bio-cooperation is one of the nature-inspired design approaches. Bio-collaborative design approach, which is an alternative approach to many architectural design problems such as depletion of all resources, unsustainable nature, traditionalization of all building materials and construction methods, is emerging as a new solution. The main objective of this study is to investigate the potential of use of bacterial biocalcification as an alternative to cement, concrete and derivative structures in the field of architecture and design; to discuss the use of this technique as a tool in architectural design, its potentials and applicability.

In this respect, as a result of the literature research which provides the theoretical framework of the study, nature-inspired design experiments have been categorized by examining. It is important to place the thesis in a few examples in the literature in which living organisms are integrated into the process and to draw attention to interdisciplinary studies, as well as to contribute to the design discipline for the use of living organisms in architecture and design in the future.

Keywords: Biomimetic, biocalcification, architectural design

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Problemin Tanımı.....	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.3 Araştırmanın Yöntemi	3

BÖLÜM İKİ – MİMARLIK VE DOĞA ORTAKLIĞINDA TASARIM..... 6

2.1 Mimarlık – Doğa İlişkisinde Belirleyici Kavramlar.....	6
2.2 Tarihsel Süreçte Doğa Esinlenmeli Tasarım	13
2.3 Doğa Esinlenmeli Mimarlığa Dair Literatürdeki Sınıflandırmalar	66
2.4 21. Yüzyılın Biyomimari Örnekleri İçin Bir Sınıflandırma Denemesi	69
2.4.1 Biçim Üretmeye Yönelik Biyomimari / Tasarım Örnekleri	70
2.4.2 Canlı Davranışlarını ya da Biyolojik Süreçleri Temel Alan Biyomimari / Tasarım Örnekleri	74
2.4.3 Biyoışbirlikçi Mimari / Tasarım Örnekleri.....	76

BÖLÜM ÜÇ – BİYOİŞBİRLİKÇİ BİR YAKLAŞIM OLARAK BAKTERİYEL BİYOKALSİFİKASYON SÜRECİNİN MİMARLIK ALANINDA KULLANIM POTANSİYELLERİ..... 80

3.1 Bakteriyel Biyokalsifikasyon	80
3.2 Bakteriyel Biyokalsifikasyon Süreci	84
3.3 Doğada Biyokalsifikasyon	87
3.4 Bakteriyel Biyokalsifikasyonun Mimarlık ve İnşaat Sektöründeki Mevcut Kullanımları	92
3.4.1 Beton Çatlaklarının Tamiri İçin Biyokalsifikasyon.....	93
3.4.2 Zemin Güçlendirme Çalışmaları.....	98
3.4.3 Restorasyon Kullanımlarında Çalışmaları.....	101
3.4.4 Yeni Yapı Malzemelerinin Üretimi	103
3.5 Bakteriyel Biyokalsifikasyon Tasarım Alanında Kullanımına İlişkin Öneriler	107
3.5.1 Magnus Larson'un Çölleşmeye Yönelik Önerisi	108
3.5.2 Türkiye Biyotasarım Takımı – Çocuk Oyun Alanı Tasarımı	110
3.5.3 Peter Trimble – Oturma Birimi Üretimi	114
3.6 Bakteriyel Biyokalsifikasyon İle Bir Oturma Birimi Denemesi	115
3.6.1 Prototip Tasarımı, Model Çalışması ve Kalıp Üretimi.....	117
3.6.2 Laboratuvar Denemeleri ve Üretim Aşaması	123
BÖLÜM DÖRT - DEĞERLENDİRMELER VE SONUÇ.....	130
KAYNAKLAR	134

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Mimarlık-doğa ilişkisinde belirleyici kavramlar	9
Şekil 2.2 Farklı coğrafi konumlardaki yapılar ve doğadaki benzerleri.....	15
Şekil 2.3 Leonardo Da Vinci'nin ejderha sineğinden yola çıkarak tasarladığı mekanik kanat mekanizmaları.....	17
Şekil 2.4 Smeaton's Eddystone Lighthouse.....	18
Şekil 2.5 Sagrada Familia'da gözlemlenen doğa analogileri (1882-.).....	18
Şekil 2.6 Crystal Palace, Londra, 1851 / Nilüfer çiçeği.....	19
Şekil 2.7 Tassel Oteli, Belçika, 1894 / Tassel Oteli eskiz çalışması.....	21
Şekil 2.8 Eiffel Kulesi, 1889 / Uyluk kemiğinin anatomik yapısı	22
Şekil 2.9 Deniz kabuğu örnekleri ve Wright'ın farklı ev planları.....	23
Şekil 2.10 Johnson Wax Binası, 1939 / Su zambağı.....	24
Şekil 2.11 Buckminster Fuller ve Jeodezik Kubbe, 1967	25
Şekil 2.12 Frei Otto ve Münih Olimpiyat Stadyumu, 1972	26
Şekil 2.13 Kisho Kurokawa'nın tasarladığı Nagakin Kapsül Tower, Tokyo, 1972 ..	27
Şekil 2.14 Palau De Les Arts Reina Sofia (Opera House) Valencia, 1998.....	28
Şekil 2.15 Esplanade - Theatres on the Bay, 2002.....	29
Şekil 2.16 Çin'in milli çiçeği Peony ve Qi Zhong Stadyumu, Shanghai, Çin, 2005 .	30
Şekil 2.17 Moleküler Kurgulu Ev, kullanım alanları ve platformlar, model, plan ve kesit eskizleri, 1998.....	31
Şekil 2.18 Interactivator'da modelin evrimi- modelin iki evresi	32
Şekil 2.19 Greg Lynn, Embryological House, 1999	32
Şekil 2.20 Graz sanat müzesi. Biomorfik yapı kabuğu, 2003	33
Şekil 2.21 Parachute Pavillion, 2005	34
Şekil 2.22 Tod's Omotesando Building, Toyo Ito, 2003	35
Şekil 2.23 NKPAC yarışmasında site tasarımı için Voronoi diyagramının kullanılması	36
Şekil 2.24 International Terminal Waterloo – London, UK, 1993	37
Şekil 2.25 Karıncayiyenin (pangolin) dış kabuğu.....	37
Şekil 2.26 Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi, 2003	38

Şekil 2.27 Weaire-Phelan adı verilen strüktür modeli	38
Şekil 2.28 Beijing Ulusal Stadyumu ve kuş yuvası strüktürel benzetimi, 2008	39
Şekil 2.29 Mick Pearce - Eastgate Merkezi ve ilham aldıkları termit kuleleri, 1996.....	40
Şekil 2.30 Pasif havalandırmanın 2 farklı yöntemi.....	41
Şekil 2.31 Council House 2 ve konik havalandırma kanalları, 2006	42
Şekil 2.32 Matscape - Mitchell Joachim, 2006	43
Şekil 2.33 The Dragonfly ve yusufçuk böceği kanatları, 2008.....	44
Şekil 2.34 Namibya Çöl Böceği, Namibya Üniversitesi Hidroloji Binası, 2011	45
Şekil 2.35 BioTower, 2009	46
Şekil 2.36 2010 Yılı Gökdelen Tasarımı – Ryszard Rychlicki, Agnieszka Nowak ..	47
Şekil 2.37 Boston Treepods – Influx Studio ve ShiftBoston	48
Şekil 2.38 Plywood on Ice (Kayakçı Barınağı), Canada, 2011	49
Şekil 2.39 Media-TIC Binası, Barcelona, 2009	50
Şekil 2.40 Genetik Barcelona Projesi, 1. Aşama	51
Şekil 2.41 Fab Tree Hab, 2005-.....	52
Şekil 2.42 Protocell Self-Assembling / Kendiliğinden birleşme	53
Şekil 2.43 Venedik şehrini destekleyen sentetik bir resifin görselleri	54
Şekil 2.44 Misel-bağlı paketleme malzemesi, oturma birimi ve yalıtım malzemesi .	55
Şekil 2.45 HI - FI / David Benjamin (American)—The Living – USA, 2014.....	56
Şekil 2.46 Myceliumchair, 2004	57
Şekil 2.47 Pare Sandalye / Sıfır atık kalıbı yapılandırması, 2017	58
Şekil 2.48 Miselyum’un çeşitli nesne tipolojilerinde kullanımı, 2017	59
Şekil 2.49 Alberto Estavez- Biowall Systems.....	60
Şekil 2.50 MIT Medya Laboratuvarı , 2013	61
Şekil 2.51 BIQ – Biyoreaktör Cepheli Bina ve Panel Sistem Detayı, Almanya, 2013	62
Şekil 2.52 “Column” adı verilen konstrüktif tekstil elemanı, 2019	63
Şekil 2.53 Organik beton	64
Şekil 2.54 Organik betonun cephe kullanımı beton	64
Şekil 2.55 Biodigital Barcelona Chair / Biyodijital Barselona Sandalyesi, 2010.....	65

Şekil 3.1 Kalsiyum karbonatın farklı uygulama alanları	82
Şekil 3.2 Kalsiyum karbonatın farklı uygulama alanları 2	83
Şekil 3.3 Bakteri gruplarına bağlı mikrobiyal CaCO_3 oluşum mekanizmaları.....	85
Şekil 3.4 Üreolitik kaynaklı karbonat çökmesinin basitleştirilmiş gösterimi ve işlem sırasında meydana gelen olaylar.....	86
Şekil 3.5 Bakteriyel biyokalsifikasyon süreci.....	86
Şekil 3.6 Doğal ortamda kumun çimentolaşması.....	87
Şekil 3.7 Doğal oluşumlardaki kalsiyum karbonat çökmesi	87
Şekil 3.8 Mercan resifleri oluşumlarındaki kalsiyum karbonat çökmesi	89
Şekil 3.9 Doğal oluşumlardaki kalsiyum karbonat çökmesi 1	89
Şekil 3.10 Doğal oluşumlardaki kalsiyum karbonat çökmesi 2	90
Şekil 3.11 Cango Mağaraları.....	91
Şekil 3.12 Normal ve biyobetonlarda otonom iyileştirme	96
Şekil 3.13 Delft Üniversitesi	97
Şekil 3.14 İyileşme öncesi ve sonrası bakteriyel örnekler	98
Şekil 3.15 Bakteriyel biyokalsifikasyon yöntemi ile oluşturulmuş biyoharç malzemesi ve kullanım alanları.....	104
Şekil 3.16 Kum + bakteri + idrar = biyotuğla	105
Şekil 3.17 Biyotuğla üretim süreci.....	105
Şekil 3.18 Kum ve bakterinin çimentolaşma denemeleri.....	107
Şekil 3.19 TBT tarafından farklı nitelikte kumlarla yapılmış denemeler	107
Şekil 3.20 Kum tepeciklerinin mimariye dönüşümü, 2009	109
Şekil 3.21 Antalya Expo Center Botanik Bölümü, 2016	111
Şekil 3.22 Bakteriyel biyokalsifikasyon yöntemi ile çocuk oyunu alanı üretimi, 2016	112
Şekil 3.23 VII. Kongresi kapsamında TBT tarafından gerçekleştirilen 1.Biyotasarım Atölyesi, Kasım 2015.....	113
Şekil 3.24 Atölye kapsamında çocuk oyun hamurundan yapılan deneysel maket ve sergi için yaptırılan gazbeton maket, 2015	113
Şekil 3. 25 Peter Trimble – Mikrobiyal üretim aşamaları, 2014.....	114
Şekil 3. 26 Peter Trimble Üretimi Oturma Birimi, 2014	115
Şekil 3.27 Prototip tasarımı.....	117

Şekil 3. 28 Prototip tasarımı ve sonuç ürün / İlk deneme	118
Şekil 3.29 Altıgen formu.....	120
Şekil 3.30 Tasarlanan sonuç ürünün kullanıcı isteğine göre biçimlenmesi	120
Şekil 3.31 Tasarlanan sonuç ürünün modüler sistem içerisinde birbirini tamamlaması	121
Şekil 3.32 Tasarlanan sonuç ürünün iki boyutlu çizimleri.....	121
Şekil 3.33 Tasarlanan sonuç ürünün üç boyutlu çizimleri	122
Şekil 3.34 Modellemesi yapılan sonuç ürün için hazırlanan kalıp üretimi	122
Şekil 3.35 Laboratuvar koşullarında bakteri suşlarının canlandırılması	123
Şekil 3.36 Petrideki bakteriler laminar akış kabini içinde erlenler içerisindeki sıvı ortama aktarılması.....	124
Şekil 3.37 İnkübatörde bekletme işlemi	124
Şekil 3.38 Hazırlanan bakteri çözeltileri ve besi ortamı için gerekli malzemeler ...	125
Şekil 3.39 Bakteriyel biyokalsifikasyonun sonuç ürün üzerinde denenmesi.....	126
Şekil 3.40 37 °C ortam sıcaklığına kurumaya bırakılan kum+bakteri çözeltisi.....	126
Şekil 3.41 Sertleşme sonrası elde edilen sonuç ürün	127
Şekil 4.1 Bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin şematizasyonu	127

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Biçim Üretmeye Yönelik Biyomimari / Tasarım Örnekleri 1	72
Tablo 2.2 Biçim Üretmeye Yönelik Biyomimari / Tasarım Örnekleri 2	73
Tablo 2.3 Canlı Davranışlarını ve Biyolojik Süreçleri Temel Alan Biyomimari / Tasarım Örnekleri.....	75
Tablo 2.4 Biyoişbirlikçi Mimari / Tasarım Örnekleri	77
Tablo 2.5 Tarihsel süreçte biyomimari/tasarım kategorileri	78



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımı

Mimarlığın doğa ile kurduğu ilişki, en temelinde doğadan öğrenmek/esinlenmek/uyarlamak başlığı altında şekillenmektedir. Bu etkileşim türünün ilk çağlardan günümüze farklı isimler altında farklı kimliklere büründüğü görülmekle birlikte; çağdaş mimarlık literatüründe doğa esinlenmeli yaklaşımlar, **biyomimetik** ya da **biyomimesis** kavramları çerçevesinde tartışılmaktadır.

21. yüzyıl sonrasında, bilim ve teknolojinin hızla gelişmesiyle içerik olarak da değişime uğrayan doğa ve tasarım ilişkisini bu döneme özgü yapan temel şey, doğa ve canlı organizmaların sadece biçimlerinden esinlenen geçmişin morfolojik yaklaşımlarından farklı olarak; doğal süreçlerden, sistemin bütünselliğinden veya canlıların davranışlarından esinlenen ve hatta biyolojik sistem ve canlıları yeni teknolojiler aracılığıyla mimari tasarımlara entegre eden biyotasarım örneklerinin ortaya çıkmasıdır.

Biyomühendislik ve biyoteknoloji alanlarındaki gelişmeler, mimarlık ve diğer mühendislik alanlarıyla işbirliği içinde geliştirilmiş tasarım ürünlerini gündeme getirmiş; yeni yüzyılın biyomühendislik araştırmaları, mimarlık ve tüm tasarım alanları için farklı bir dönem açmıştır. Ancak hala, biyoloji, mimarlık ve mühendislik disiplinlerinin birlikteliğinde, canlı organizmaların kullanıldığı tasarım çalışmaları az sayıdadır.

Türkiye özelinde ve hatta dünya geneline bakıldığında az sayıda çalışma bulunan fakat heyecan uyandıran bu konu, geleneksel yapım yöntem ve süreçlerine alternatif olarak yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu yenilikçi yaklaşım içinde, bu tezin odaklandığı bakteri gibi mikroorganizmaların mimarlık ya da tasarım alanında kullanım potansiyeli dikkat çekici ve ümit verici görülmektedir.

Bu gelişmeler, yine günümüzün sürdürülebilir yapı teknolojileri arayışları ile de paralellik göstermektedir. Yapılı çevrenin büyük oranda betonarme yapılardan

oluşması, konvansiyonel yapı malzemelerinin üretim ve kullanım süreçlerinin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri ve küresel ölçekteki ekolojik sorunlar sürdürülebilir yapı malzemelerinin önemini arttırmaktadır.

Sürdürülebilir yapı malzemelerine olan ihtiyacın artması, gündemde buna ilişkin yoğun bir talebin varlığı nedeniyle karbon salınım miktarı az, sürdürülebilir ve ekolojik süreçlerin önem kazandığı günümüzde, gelecekte çimento ve beton esaslı yapısal ürünler yerine çevreyi az kirlüten ürünler elde etme konusunda, bütünüyle doğa temelli ve biyolojik bir süreç olan **bakteriyel biyokalsifikasyon**, bu çalışmanın temel konusudur. Geleceğe yönelik atılmış önemli bir adım olarak görülebilecek bakteriyel biyokalsifikasyon, uluslararası ölçekte dahi az bilinen, mimarlık ve tasarımla ilişkisi yeni araştırılan bir konu olması sebebiyle önem taşımaktadır.

Bu nedenle mimaride biyotasarım ürünlerin tartışılması, teorize edilerek irdelenmesi ve tarihsel bir bağlama oturtularak sınıflandırılması, alternatif bir yöntem olan bu yeni yaklaşımın doğru anlaşılması ve potansiyellerinin optimum düzeyde ortaya çıkarılması açısından gerekli görülmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Çalışmanın temel amacı, bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin mimarlık ve tasarım alanında, çimento, beton ve türevi yapılara alternatif olabilecek şekilde kullanım potansiyellerini araştırmak; mimari tasarımda bir araç olarak kullanımını, bu üretim yönteminin potansiyellerini ve uygulanabilirliğini tartışmaktır. Bakteriyel biyokalsifikasyon sürecini yönlendirerek doğayla uyumlu, herhangi bir toksik madde ya da çevresel zarar içermeyen farklı ölçek ve çeşitlilikte ürün geliştirmek mümkün görünmektedir.

Bakteriyel biyokalsifikasyon, yaklaşık 15 yıldır bilim adamları tarafından araştırılmaktadır. Uluslararası ölçekte bu alanda en bilinen araştırmalardan biri; Hollanda Delft Üniversitesi'ndeki Mikrobiyolog Henk Jonkers ve Yerbilimleri ve İnşaat mühendisi Eric Schlangen'ın, beton ve benzeri malzemelerin kendi kendini

iyileştirme potansiyelini bakteri kullanılarak nasıl geliştirebilecekleri üzerine 2006 yılından bu yana yürüttükleri çalışmalardır. Bu projenin ardından giderek artan orandaki çalışmaların ağırlıkla mühendislik alanına odaklandığı ve biyoçimentolaşma, biyolojik onarım, biyolojik tıkama, biyolojik tortulaşma ve zemin güçlendirme çalışmaları gibi konuları kapsadığı görülmektedir (Shackelford ve Jefferis, 2000; Vekariya ve Pitroda, 2013).

Buna ek olarak oldukça az sayıda da olsa malzeme geliştirme üzerine çalışmalar dikkat çekmektedir. Biyoharç üzerine çalışan ekip üyelerinden biyolog Piero Tiano, bakterilerin kalsiyum karbonat üretme yeteneğini kullanarak çimento sanayii atıklarından olan yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silika tozu, kömür külleri ve pirinç kabuğu külünden oluşan bir karışımı birbirine bağlayarak geleneksel çimento malzemesi yerine sürdürülebilir bir yapı malzemesi elde etmeyi hedeflemektedir (Cuzman ve diğer., 2015). Kuzey Carolina'lı BioMason kuluçka şirketi de bakteriyel biyokalsifikasyon yöntemiyle elde ettiği tuğlalar üzerinde çalışma yürütmektedir (Iezzi ve diğer., 2019). Türkiye'de ise Türkiye Biyotasarım Takımı, benzer bir yapı malzemesinin üretimi üzerinde çalışmaktadır. Ancak tüm bu çalışmaların bakteriyel biyokalsifikasyon sürecini mimari tasarım disiplininin bakış açısıyla kavramak ve değerlendirmek için yeterli olmadığı, bu anlamda araştırmaların artmasının gerekliliği görülmektedir.

Dolayısıyla bu çalışma, mimarlık ve doğa ortaklığında gelişen bir alan olan bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin, mimarlık ve tasarım alanı için bir yenilikçi ve biyoişbirlikçi bir yaklaşım olduğu gerçeğini vurgulamasının yanı sıra; onun mimari tasarımda bir araç olarak kullanılma potansiyelleri ortaya konularak, mimarlık ve doğa arakesitinde interdisipliner çalışmanın katkılarına dikkat çekmeyi hedeflemektedir.

1.3 Araştırmanın Yöntemi

21 yüzyılda, mimarlık, biyoloji ve teknoloji arakesitinde mimari tasarıma yön veren içerik ve bileşenler ile tasarımcının düşünsel arka planı ve benzer konularda

sorgu ve tartışmaların biçim değiştirdiği görülmektedir. Mimarlık ve tasarım alanında kullanılan biyolojik esinlenmelerin analogiden öteye geçerek, biyoloji biliminin yaşayan sistemleri analiz etmesi, biyoteknoloji sayesinde ise bu bilgiyi kullanarak ve teknoloji ile de birleştirerek manipüle etmesi ve tasarım alanına farklı teknik ve yöntemlerle entegre olması geleneksel mimari anlayışın dönüştüğünün göstergesidir. Bu dönüşümün mimari tasarım alanına yeni bir bakış açısı kazandırdığı bir nokta olarak **“canlı organizmaların tasarıma direkt entegre olması”**, bu çalışmanın temellendiği ana noktalardan biridir. Bu doğrultuda çalışmanın teorik çerçevesini çizmeyi sağlayan literatür araştırması sonucunda, doğa esinlenmeli tasarım denemeleri irdelenerek kategorize edilmiştir. Bu tez çalışmasının da, söz konusu kategorizasyon içinde, literatürde canlı organizmaların sürece entegre olduğu az sayıda örnek içinde konumlanması hedeflenmektedir.

Çalışmanın ilk bölümünde tezin amacı, kapsamı ve yöntemi anlatılmıştır. Tezin ikinci bölümünde, öncelikle mimarlık-doğa ilişkisinde belirleyici kavramlar irdelenerek tarihsel süreç içerisindeki etkileşimi tartışılmıştır. İzleri antik dönemlere kadar giden mimarlık-doğa ilişkisi, gelişen bilim ve teknoloji ve biyoloji biliminin daha çok 1960’lardan sonra mimarlık alanına entegre olması ile birlikte farklı bir boyut kazanmıştır. Bu doğrultuda doğa esinlenmeli tasarım denemelerinin literatürdeki örnekleri incelenerek sınıflandırılmıştır. Söz konusu örnekler, biyomimetik yaklaşımın tasarım sürecini etkileme biçimleri üzerinden, biçim üretmeye yönelik biyomimari örnekler (1), canlı davranışlarını ve biyolojik süreçleri temel alan biyomimari örnekler (2) ve biyoişbirlikçi mimari örnekler (3) olmak üzere üç temel kategoride tartışılmıştır.

Üçüncü bölümde, ekolojik, sürdürülebilir ve düşük karbon salımı içeren süreçlerin zamanla önem kazandığı günümüzde, mimari tasarım alanına yeni bir bakış açısı getirme potansiyeli taşıyan bakteriyel biyokalsifikasyonun ne olduğu ve sürecin nasıl gerçekleştiği incelenmiştir. Kalsiyum karbonat çökmesi reaksiyonu olarak da adlandırılan olayın doğadaki örnekleri anlatılmış; literatürde farklı alanlardaki ilgili çalışmalar (beton çatlaklarının tamiri, zemin güçlendirme çalışmaları, restorasyon çalışmaları vb.) tartışılmıştır. Bunun sonrasında bakteriyel biyokalsifikasyonun

mimarlık alanında kullanım potansiyelini ortaya koyabilecek çeşitli tasarım örnekleri incelenmiştir.

Aynı zamanda, tez çalışmasının ana hedefine yönelik olarak bakteriyel biyokalsifikasyon süreci kullanılarak, kentsel tasarım ölçeğinde bir ürün üretmenin olasılıkları araştırılmıştır. Bu doğrultuda öncelikle tasarım prototipi denenmiş; ürünün form arayışı sırasında hangi parametlerin kullanıldığına, sürecin avantajları ve dezavantajlarına, ürünün üretimi sırasında karşılaşılan sorunlara ve alternatif çözümlerine değinilmiştir. Laboratuvarda gerçekleştirilen gözleme dayalı deneysel süreçte, bakteriyel biyokalsifikasyon birebir deneyimlenmiştir. Bu süreçte akademik alanda yürüttüğü çalışmaların yanı sıra tasarım, mimarlık ve çeşitli mühendislik alanlarında farklı çalışmalar ve girişimler hedefleyen bir araştırma, çalışma ve proje geliştirme platformu olan Türkiye Biyotasarım Takımı'nın bakteriyel biyokalsifikasyon sürecine ilişkin uygulama desteği alınmıştır. Tez çalışması interdisipliner çalışmalara dikkat çekmenin yanı sıra, gelecekte canlı organizmaların mimarlık ve tasarım alanında kullanılması yönünde tasarım disiplinine bir katkı hedeflemektedir.

BÖLÜM İKİ

MİMARLIK VE DOĞA ORTAKLIĞINDA TASARIM

2.1 Mimarlık - Doğa İlişkisinde Belirleyici Kavramlar

Biomimesis, biyognosis, biyonik, metamorfoz, hibrit, organik, morfogenez, biyomorfoloji gibi bir çok terim, 21. yüzyıl başlarına gelene kadar mimarlıkla ilişkisi olmadığı halde, teknolojinin gelişmesi ve mimarlık-biyoloji ilişkisinin artmasıyla mimari tasarım literatürüne giren kavramlardır. Kökleri modern biyolojiye dayalı bu kavramların, doğa ve tasarımın ilişki biçimlerini tanımlamaya yönelik günümüze ait yeni söylemler olduğunu dile getirmek mümkündür. Öte yandan bu kavramlar çerçevesinde, organik mimarlık, metabolist mimarlık, dijital botanik mimarlık, nanomimarlık, evrimsel tasarım, hücrel özdevinim, kinetik mimarlık, adaptif mimarlık, parametrik tasarım, genetik mimarlık gibi farklı ancak birbiriyle ilişkili pek çok tasarım yaklaşımının da aynı dönemde literatüre dahil olduğu görülmektedir (Uç Zeytün, 2014).

Tasarım ve biyoloji bilimi arasındaki ilk bağlantılar, 1917’de yazılmış olan “On Growth and Form” adlı kitaba dayandırılmaktadır (Becchi, 2009). Aynı zamanda D’Archy Thompson’un klasikleşmiş bu kitabı, mimarlık ve tasarım dünyasını büyük ölçüde harekete geçiren önemli bir çalışmadır. Doğa merkezli tasarım yaklaşımlarındaki kuramsal çalışmalar içinde Christopher Alexander’ın (2003) “The Nature of Order”, William H.Gass’ın (1996) “Finding A Form”, Peter Pearce’ın (1978) “Structure in Nature is a Strategy for Design”, Frei Otto ve Bodo Rasch’ın (1992) , “Finding Form”u öne çıkan kitaplar arasında sayılabilir (Uç Zeytün, 2014).

“Doğadan esinlenmeli mimarlık” adı altında mimarlık pratiğinin biyoloji bilimi ile kurduğu ilişkiye dair, literatürde çok fazla kavram ve tasarım örneğinin olduğu, ancak içeriklerinin yeteri kadar aydınlatıcı olmadığı, bir kavram kargaşasına neden olduğu görülmektedir. Mimarlık pratiğinde; oluş, evrilme, dönüşme, başkalaşma gibi biyolojik metaforları referans alan kavramlar kullanılmaya başlamıştır. Buradan hareketle varılan ilk sonuç, daha çok biçim kaygısı üzerine yoğunlaşan geleneksel

tasarım anlayışlarının yerini süreç üzerinden düşünmeye sevk ettiği ve tasarım sürecinin kendi başına bir tasarım haline geldiği olabilir (Oxman, 2006).

Mimarlığın doğa ile kurduğu ilişki, en temelinde *doğadan esinlenmek* başlığı altında şekillenmektedir. Bu etkileşim türünün ilk çağlardan günümüze farklı isimler altında farklı kimliklere büründüğü görülmektedir. Mimarlık pratiğinin tasarım problemlerini çözerek sonuç ürün elde etme yönünde doğadan esinlendiği yöntemlerden en bilineni, insanlığın ilk dönemlerinde dahi karşımıza çıkan analogilerdir.

Fakat öncesinde mimarlık özelinde “biyomorfoloji” kavramını ele almak gerekir. Mimari tasarımda biyomorfoloji, farklı ölçek ve yöntemlerle canlıların biçim ve görünümlerinden esinlenmek anlamına gelmektedir (Uç Zeytün, 2014). Bu noktada “morfogenez” kavramından da bahsetmek gerekir. Aslında biyoloji kökenli bir kavram olan morfogenez, bir canlının gelişimi esnasındaki büyüme ve hücre farklılaşması ile kendine özgü son halini alması olarak tanımlanmaktadır (Öztürk, 2015). Mimarlıkta *Morfogenez* ise organizma ve hücrenin oluşumu gibi süreçleri izleyen bir tasarlama yöntemidir. Morfogenetik tasarımlar, canlının değişen çevre koşullarına göre adaptasyon geliştiren, gelişimi sırasında kendini yeniden üreterek oluşacak durumları çözümleyen ve örnek alan tasarımlardır. Canlıların sistematik ve biçimsel adaptasyon yeteneklerini mimarlık pratiği altında da uygulamak amaçlandığından, analogik bir yaklaşımın aksine biyolojinin üretken sistemlerinin tasarıma esin kaynağı olmasının önemi büyüktür (Uç Zeytün, 2014).

Mimarlıkta, bu esinlenme biçimi Vitruvius’tan 20. yüzyıl ortalarına kadar daha çok biçimsel analogiler şeklinde olmuştur. Ülkü İnceköse, doğabilimsel bilgiye dayalı çağdaş mimarlık söylemlerinde analogi kavramını, “Özde farklılıklar taşımakla birlikte benzer özellikler gösteren şeyler arasındaki benzeşmedir” diye tanımlamaktadır (İnceköse, 2008). Metaforik ve biçimsel analogiler olarak gruplandırabileceğimiz ve mimarlıkta “biyomorfik tasarım” olarak adlandırılan bu benzeme/ benzeşme türü, 20.yüzyılın sonunda “biyomimesis” kavramı ile içeriksel olarak değişime uğramıştır. Bu dönemin tasarımları, biçimsel analogilerle üretilenlerdeki gibi form odaklı kaygılardan çok gerek malzeme gerek form gerekse

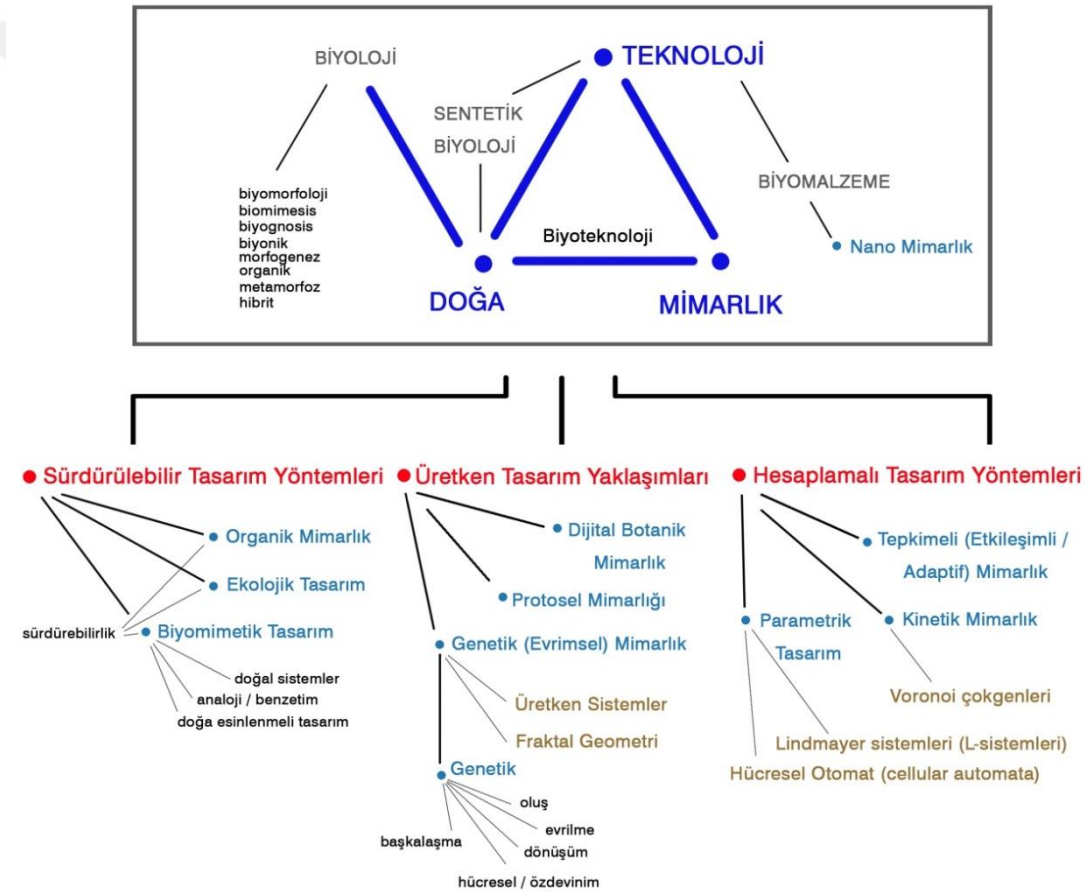
strüktürün oluşum süreci ve sistematik işleyişi için doğadan bilinçli bir öğrenme ve çıkarımda bulunma kaygısı taşımaktadır (Özbudak Akça, 2011; Yeşilyurt, 2008).

Literatürde, biyomimesis ve biyomimetik kavramlarının birbirinin yerine kullanıldığı görülmektedir. Biyomimetik terimi, ilk olarak 1957 yılında Otto Schmitt tarafından doktora tezinde kullanılmıştır. Resmi olarak ise 1974 yılında ilk kez Webster's sözlüğünde “doğal olanların yapay mekanizmalarla sentezlenmesi amacıyla biyolojik olarak üretilmiş nesne ve malzemelerin oluşum, yapı ve fonksiyonlarının incelenmesi, biyolojik mekanizma ve süreçlerin incelenmesi bilimi” olarak tanımlanmıştır. Yunanca kökenli olan “biyomimetik” kavramı, yaşam, hayat anlamında “bios” ve taklit anlamında olan “mimesis” kelimelerinin birleşimiyle oluşturulmuştur (Bhushan, 2009). İlk kez Janine M. Benyus tarafından ortaya atılan "biyomimesis" terimi ise 1990'lı yıllardan bu yana "doğadaki yapılaşmalardan ve oluşumlardan öğrenilmiş, esinlenilmiş, modellenmiş, uyarlanmış ya da uygulanmış" tasarımları anlamak üzere kullanılmaktadır. “Milyonlarca yıllık evrimden sonra, doğa neyin çalıştığını, neyin uygun olduğunu ve neyin uzun ömürlü olduğunu öğrenmiştir” diyen Benyus, 1997 yılında yayınladığı “Biomimicry: Innovation Inspired by Nature (Biomimikri: Doğadan İlham Alan Yenilik)” kitabıyla doğadan öğrenmenin önemini tekrar gündeme getirmiştir. Benzer şekilde "biyomimetik", "biyomimesis", "biyognosis", "biyonik" ve "biyo-taklit" terimleri de farklı disiplinlerde doğadan öğrenerek tasarlama anlamına gelecek şekilde, ileri teknolojilerin geliştirilmesi amacıyla yapılan araştırma ve çalışmalar için kullanılmaktadır (Benyus, 2012).

Tasarım sürecinde, doğal ve yapay süreçlerin yeniden araştırılması, bilgisayar temelli araçlar ve hesaplamalı teori ile elde edilen yeni kurgular, doğal (biyolojik) ve yapay (mimari) organizasyonların arasında arayüz olarak davranarak etkileşimli bilgi alışverişini desteklemektedir (Erdoğan ve Sorguç, 2011). Özellikle 1990 sonrası dönemde, mimarlık evreninde doğabilimsel bilgiye, özellikle de matematik, fizik ve biyolojinin bilgisine olan ilginin artması nedeniyle, doğanın var olan sistem ve mekanizmalarının incelenerek tasarıma aktarılabilmesi için birçok bilim ve disiplinden faydalandığı gerçeği bunun bir kanıtıdır. Temelinde doğa esinlenmeli

yeni bir mimari dil oluşturma çabasında, mimarlık-doğa-teknoloji üçgeni ve beraberinde oluşan doğa esinlenmeli farklı tasarım yaklaşımları önemli yere sahiptir.

Özellikle bilgisayar teknolojisi ve moleküler biyolojinin gelişimiyle birlikte mimarlığa birçok farklı disiplinden yeni kavramlar girmiştir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, bu kavramlar çerçevesinde gelişen yeni mimari yaklaşımlar, farklı disiplinler aracılığıyla kendi kendini organize edebilen ve sürekli verilen bilgiye göre farklı sonuç ve durumlar ortaya koyabilen tasarımlarla, gelecekteki toplulukların, sanal/melez ve etkileşimli mekânlarını yaratmak amacındadırlar.



Şekil 2.1 Mimarlık-doğa ilişkisinde belirleyici kavramlar

Biyoloji ve genetik bilimi ile artan ilişkilere paralel olarak gelişen mimari arayışlar “genetik (evrimsel), tepkimeli (etkileşimli / adaptif), parametrik mimarlık, kinetik mimarlık” gibi farklı birçok adlandırmayı beraberinde getirmiştir. **Genetik**

Mimarlık, hücre ve gen bilgisinin aktarımıyla bütünsel olarak kendi kendini yenileyebilen, üreyebilen, büyüeyebilen ve hatta yaşamsal faaliyetlerine son verebilen mekanlar yaratmak amacındadır. Bu söyleme göre, bilgisayar ortamında kodlama sürecine bağlı olarak yapılar tasarlanacak ve kendi DNA ve metabolizmaları tarafından yaşamsal faaliyetleri sürdürülen canlı organizmalar gibi davranacaklardır. Mimar bu etapta, sonuç ürün odaklı değil, oluşum süreçlerinin tasarımı konusunda sorumlu kişi olarak süreç odaklı bir tasarım anlayışı gütmelidir. Genetik mühendisinin DNA üzerinde yaptığı çalışmalara benzer bir biçimde, mimar da kendi başına ürün geliştirebilecek yazılımlar tasarlayacaktır. Mimari tasarımda genetik algoritmalarından ve tasarlanan yazılımlardan yararlanmanın yolu, doğrulanabilir ya da çelişen ölçütlerin açıklanması, seçilmesi ve inşa edilen biçimin çevresiyle olan etkileşimine göre metabolik ve morfolojik süreçlerin programlanmasıdır. Bu konular çözüme kavuştuktan sonra, bilgisayar tasarım aracı olmaktan çok evrimsel sürece ivme kazandıran bir değiştiren, türeten güç olarak tanımlanabilir (A. Altun ve Köktürk, 2007).

Genetik mimarlıkla zaman zaman aynı anlamda kullanılan ve yapay bir yaşam biçimini tarifleyen **Evrimsel Mimarlık** da kendi kendini organize edebilen bütünsel sistem teknolojileri, büyüme, tekrarlama, gelişme, seçim, genetik kodlar gibi bir takım olguların tasarıma model alınmasını baz alır. Mimarlıkta, evrimin süreçlerini mimari tasarım süreçleri ile benzeştiren bir tasarımda, bina genlerine ayrılır, evrim olgusundaki tekrarlama, seçim gibi stratejiler belirlenerek yapay bir yaşam biçimi simule edilir. Her jenerasyon üzerinden değerlendirme yapıldığında negatif özellik geliştiren çözümler yok edilir ve bir süre sonra popülasyondaki mevcut çözümlerden uygun olanın genetik kodları ve parametreleri uygulanarak binayı oluşturur. **Parametrik Tasarım** ise sayılar, bir takım algoritma ve değişkenlerden oluşan bir parametre çizelgesini; senaryolar, yöntemler, şartlar, her etki sonucu meydana gelen tepkilerden oluşan tasarım setinin tümünü oluşturmaktadır. Parametrik tasarımda; kararlar geri alınıp, değiştirilip yeniden gözden geçirilebilir. Genel anlamıyla bir dizi parametrenin tasarım sürecinin herhangi bir aşamasında değiştirilmesiyle tasarımın yenilenmesi mümkün kılınmaktadır. Parametrik tasarımda değişen formdan ziyade parametrelerdir. Mimarlık pratiğinde de biyolojik metaforların kullanıldığı oluş,

evrilme, dönüşme, başkalaşma gibi kavramlar ile parametreler arasında ilişki kurulabilir. Bu noktada doğayı temel alan hesaplamalı tasarım yöntemlerinden olan **Hücresel Otomat (cellular automata)** ve L-sistemler (L-systems), doğanın karmaşık kurgusunun, parametrik sistemler aracılığıyla kurgulanarak algoritmik işlemlerle modellenmesini sağlamaktadır. Hücresel otomat (CA) çok sayıda homojen etkileşimli çalışmada, hücreler şeklinde bölünen olaylar ve konuların gelecekteki durumunun belirlenmesinde, her bir hücrenin, yanındaki diğer hücrelerin durumuna bağlı olarak değişen bir sistemdir. **Lindenmayer sistemleri (L-sistemleri)** ise, hücresel otomasyonun bir çeşidi olarak, 1968 yılında Aristid Lindenmayer tarafından çok hücreli organizmaların büyümesini simüle etmek için geliştirilmiştir. Sistem, sonrasında pek çok biyolog ve de bilgisayar kuramcısı tarafından program yazımı ve görselleştirmesinde kullanılmıştır. Dolayısıyla mimarlık ve biyoloji etkileşimde doğal ve yapay formların oluşum süreçleri; parametrik sistemlere dayalı hesaplamalı teoriler ve oluşturulan sayısal modellerle, etkileşimli öğrenme, ileri/geri besleme, farkındalık ve adaptasyon gibi biyolojik temalarla ilişkilendirilebilir (Karadağ, 2011).

Herhangi yapısal formun bir şekilde yer değiştirebilir, dönüşebilir ve bulunduğu yerde biçimsel özelliklerini değiştirebilir olmasına dayanan **Kinetik Mimarlık** yaklaşımları fizik ve mekanik bilimlerinin mimarlıkla ilişkisi çerçevesinde ortaya çıkmıştır. Doğadaki canlıların hareketleri ve bu canlıların (hayvanlar, bitkiler, insanlar) hareketleriyle doğaya nasıl uyum sağladıkları, nasıl biçim değiştirdikleri gibi süreç ve mekanizmalardan ilham alındığından biyoloji ve biyomimetikle de yakından ilişkilidir (Akipek ve İnceoğlu, 2007).

Kinetik mimarlığın, elektronik ve robotik bilimlerinin de desteğini almasıyla geliştiği bir sonraki evre olarak görülebilecek **Etkileşimli (tepkimeli / adaptif) Mimarlık** çevresel etkenlerin ve kullanıcının yaptığı etkiye otomatik olarak tepki göstererek değişebilen, biçim değiştirebilen tasarımları kapsamaktadır. Sürekli bir değişme potansiyeline sahip olan etkileşimli mimarlık, sürdürülebilirlik ve çevrenin korunması açısından da önemlidir. Gerek iklimsel koşullara adaptasyon, gerekse sürekli değişen çevresel etkenlere uyum sağlama çabası, bu mimari tasarım

yaklaşımlarında büyük rol oynamaktadır (M. A. Yüzer ve Ş. Yüzer, 2006).

Bunun yanı sıra, 1953 yılında DNA'nın keşfinin, biyomimetik tasarımlar için de önemli bir kırılma noktası olduğunu söylemek mümkündür. 20.yy'ın sonlarına doğru biyoloji kökenli yapılan pek çok araştırmanın sonuçları sayesinde biyoteknoloji ve mimarlık alanında da birçok gelişme olmuştur. DNA'nın keşfi, klonlama, kök hücre, gibi genetik alanında devrim niteliğindeki keşifler; mühendislik alanında yapay sinir ağları, genetik algoritmalar; tıp alanında, yapay organlar, robot protezler; fen bilimlerinde, kaos ve fraktallar, kompleks sistemler, Hopfield ağları gibi geniş bir çeşitlilikte disiplinler arası etkileşimleri artırmış; yeni ve disiplinler arası çalışmalar ortaya çıkarmıştır. Gelişen teknolojiler, hücre teorisi ve evrim teorisi ile kurulan modern biyoloji sayesinde, doğadaki tasarımların öğrenilmesinin ve bunların taklidinin insanlar için sağlayacağı faydalar doğal mekanizmaların moleküler seviyede incelenmesiyle daha iyi anlaşılmış ve önem kazanmıştır. Bu etkileşimlerde "doğadan esinlenmek, öğrenmek, uyarlamak veya uygulamak" anlamında pek çok potansiyeli içinde bulunduran biyoloji ve biyoteknoloji, tasarım disiplini için bir ilgi alanı haline gelmiştir.

Bu bağlamda, 20. yüzyıl sonlarına doğru Tokyo Üniversitesinde Norio Taniguchi tarafından ortaya atılan ve atomik-moleküler boyutta maddenin mühendisliğini yaparak yeni özelliklerini açığa çıkartan **Nanoteknoloji Bilimi**, biyoloji, mühendislik ve mimarlık işbirliğinde yeni açılımlar getirmiştir. Nanoölçeklerde maddenin atomik-moleküler boyutta çok daha farklı kimyasal, fiziksel ve biyolojik boyut ve özellikler kazandığı gözlenmektedir. Malzemeye “atom boyutunda müdahale” edebilmek ya da ortaya çıkan değişik özellikleri kullanabilmek, birçok bilim dalının karşılıklı etkileşimini gerektirdiğinden nanoteknoloji bilimi; kimya, biyoloji, fizik, bilgisayar, uzay ve malzeme bilimleri olduğu kadar mimarlık, tasarım ve inşaat sektörlerini de bir araya getiren, bir bilim dalına dönüşmektedir (Cestel, 2016).

Nanoteknoloji ve nano malzemelerin yapı sektöründeki en somut yansıması, kendi kendini iyileştiren beton karışımına eklenen nanopartiküller, kendi kendini

temizleyen ve kolay temizlenen, hava kalitesini yükseltme işlevi olan, buhar oluşumunu ve bulanık yüzeyi engelleyen nanomalzemeler, Ultraviyole ışınlar ve güneşe karşı korunum sağlayan, ısı yalıtımı ve yangın korunumu sağlayan nanokaplamalar, duvar yazısı tutmayan, aşınmayan çizilmeyen nanoyüzeyler, kir tutmama özelliği sağlayan antibakteriyel yüzeyler, jeneratör ve ışık kaynağı olarak kullanılan nanotüpler ve nanokompozitler, ledli ampuller gibi örneklerdir.

Türkiye’de biyomimikri alanı üzerine çalışmaları olan Zeynep Arhon (2011), “Biyo-ne?’ adlı makalesinde artık çoğu şirketin doğa temelli bir çalışma prensibini benimsediğini söylemekte ve şu bilgileri aktarmaktadır:

1985-2005 yılları arasında doğadan ilham alan patentlerin sayısı tam 93 kat artarken diğer patentlerin sayısı sadece 2,7 kat artış gösterdi. Üstelik söz konusu ürünlerin ve sistemlerin çoğu sektörlerinin başarı hikayeleri haline geldi, ödül üzerine ödül aldı. Ekonomik büyüme ya da iş performansı ile çevrecilik karşı kutuplarda oturan düşmanlar olmaktan çıkıyor. Doğadan gelen inovasyon gelişim kavramının içini dolduruyor: Hayat kalitesinden ödün vermek değil, hayat kalitesini sürdürülebilir bir şekilde arttırmak... Gelecek ile ilgili tahminler de müthiş bir büyümeye işaret ediyor: Fermanian Business & Economic Institute tahminlerine göre 2015 yılında küresel gayri safi milli hasılanın %15'i Biyomimikri kapsamında geliştirilen çözümlerden gelecek (Yıldız, 2012, s.7).

2.2 Tarihsel Süreçte Doğa Esinlenmeli Tasarım

Tarihsel süreçte doğa-insan arasında sürekli bir etkileşim vardır. Ateşin bulunması ile birlikte yerleşik hayata geçen insanlık için yapı inşa etmek, başlangıçtan bugüne süregelen bir dürtüdür. Yapım tekniklerinde ve tasarımda karşılaşılan problemler, belirlenen yöntemler ve bunların doğa ile bütünleşen ve ayrışan yönleri, çeşitli gözlem ve okumalar sonucu mimarlık literatürüne girmiştir.

Sanayi Devrimi ile birlikte mimarlık dünyası, tarihsel imgelerin kullanımını tercih etmeyerek, geleneksel tasarım ve üretim yöntemlerinden uzaklaşmıştır. Bu dönem kendi içinde farklı mimari tasarım anlayışlarını barındırıyor olsa da zamanla

insanlığın başından beri kullanılan doğadan esinlenme, doğanın taklidiyle gelişen biçimsel analogiler yerine doğa ürünü bir organizmanın varoluşundaki sistematik işleyişi ve arkasında yatan mantıksal süreci analiz edip irdelemeye dayalı bir tasarım sürecinin başladığı söylenebilir. 18. ve 19. yüzyıl dönemlerindeki yeni buluşların tetiklediği Endüstri Devrimi de bu duruma önayak olmuş, yeni yapım teknikleri ile yeni ihtiyaçlara cevap verebilecek nitelikte yeni formlar ortaya çıkmıştır. Mimarlıkta; makineleşmenin sağladığı potansiyellerin artması, cam ve çelik endüstrisinin gelişmeye başlaması gibi birçok faktör doğanın giderek daha fazla tahrip edildiği gerçeğinin de farkındalığını artırmıştır. Bu bağlamda modern mimari fikir akımlarının daha hafif strüktürler, yenilikçi arayışlar, sürdürülebilir doğal çevreler yaratmak adına, doğa ile etkileşimleri boyut değiştirmiş ve sanayileşmenin sebep olduğu standardize, seri üretim yapılaşmalara, teknolojinin gelişmesi ile doğru orantılı olarak geliştirilen mimari biçim ve formlara tepki olarak, tasarım ve mimarlık alanlarında farklı anlayışlara gidilmesine ve dolayısıyla gündeme gelecek yeni akımların oluşmasına neden olmuştur. Bu nedenle modern biyolojinin kurulması, mimarlıkta doğa temelli ve canlı organizmalardan esinlenen tasarımlar gibi yeni yönelimleri ortaya çıkarmıştır.

İnsanlığın ilk çağlarından beri doğayı izlemek, anlamak ve görsel çıkarımlarda bulunarak yapı inşa etmek bir tasarım yöntemidir. Günümüze ulaşan ilk yazılı mimari eser olan Vitruvius'un De Architectura kitabında da bahsettiği gibi yapının ergonomik, estetik ve güzellik değerleri, taklit öğretisi çerçevesinde şekillenmiştir. Kitaba göre, mimarlık için gerekli materyal, biçim ya da model, doğa tarafından sağlanacaktır (Kalkan, 2012).

Mimarlıkta, ilk bina yapım tekniklerinin esin kaynağının doğadaki yapısal oluşumlar olduğu söylenebilir. Örneğin Şekil 2.2'de gösterilen resimlere bakıldığında, dünyanın farklı coğrafi konumlarında bulunan mimari örneklerin doğal yapılaşmalar arasındaki benzerlikler dikkat çekicidir.



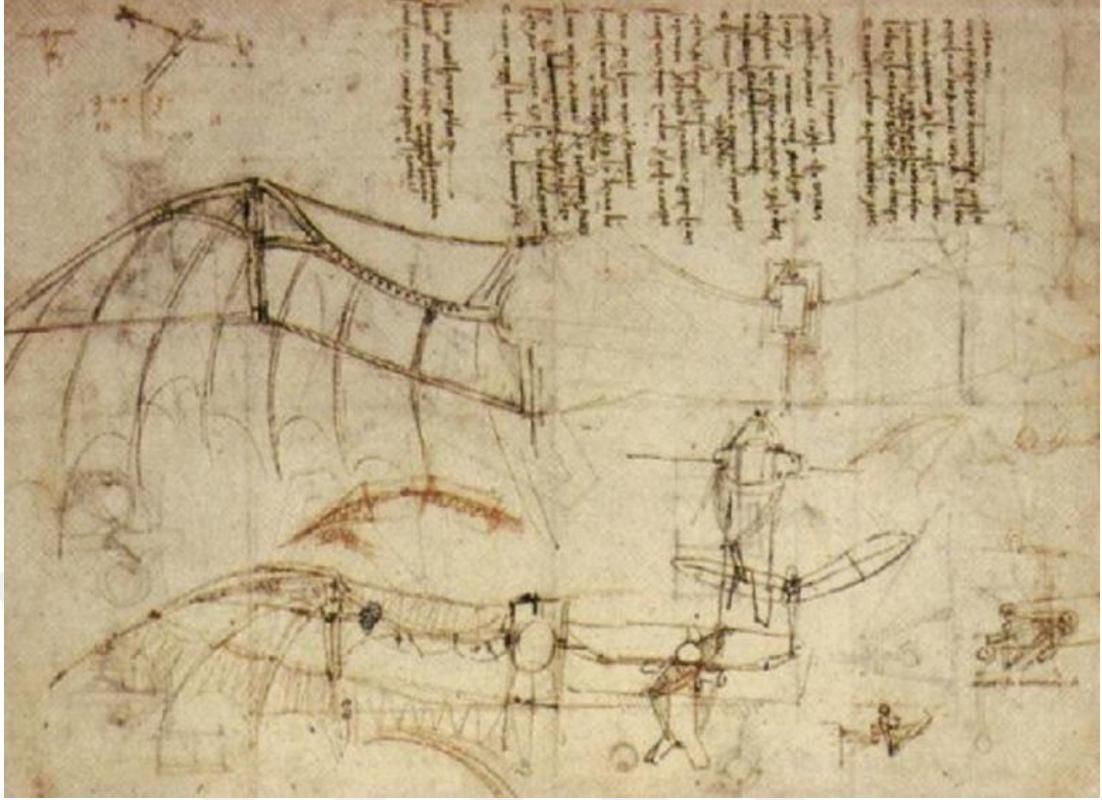
Şekil 2.2 Farklı coğrafi konumlardaki yapılar ve doğadaki benzerleri (Selçuk Arslan ve Gönenç Sorguç, 2007)

Tarihsel süreç içerisinde, Antik Dönem, Yunan ve Roma dönemleri, bugünkü bilimin temellerinin atıldığı dönemler olarak kabul edilir. Bu dönemlerde insanlar, gözlemledikleri doğa ile evren arasında bir ilişki kurmaya çalışmış; kâinatın sırlarını çözmek için yollar aramışlardır. Özellikle matematik ve geometri biliminin önde olduğu bu medeniyetler için evren, belirli bir düzen, tamlik ve güzelliği kendi içinde barındıran bir bütündür. Bu düzenin kökeni, sayılar arası bağlantılara, geometrik ilişkilere ve oranlara dayanmaktadır. Altın oran, bu oranlar içinde en çok bilineni ve belki de en çok kullanılanıdır. Mimarlık tarihi için estetik ve yapısal formların gelişmesinin bir ölçütü olan altın oranın, doğadan esinlenmek/uyarlamak/öğrenmek fikri doğrultusunda gelişen biyomimesisin ilk örneklerinden biri olduğunu söylemek mümkündür. Altın oran, doğada çok çeşitli biçimlerde bulunmaktadır. Sadece bir matematiksel ilişki olarak değil, bitkilerdeki gövde ekseninde yaprakların diziliş şeklinden, çeşitli yumuşakçaların kabuklarındaki spirallere, erkek arıların ve tavşanların üremesiyle ilgili soy tablosundan, akciğerlerdeki bronş ağacı dallanmalarına kadar pek çok olayda kendini göstermektedir. Pek çok bitkideki yaprak sıralanışında ve özellikle papatya, ananas, ayçiçeği ve kozalaklarda yapılan çalışmalarda altın oranı içeren sayıları görmek mümkündür (Selçuk Arslan ve diğer., 2009). Teknolojinin gelişmesiyle bilim adamları DNA moleküllerinde de altın oranla karşılaşmışlardır. Biyomimetik için önemli bir veri olan altın oran sayesinde, mikro ölçekten, makro ölçeğe kadar evrendeki yapı ve organizmaların oluşumlarına, büyüme süreçlerine ve yapısal biçimlerine dair çıkarımlar yapılabilir.

Anadolu ve Mezopotamya uygarlıklarında, Mısır'da, Yunan'da, doğadan esinlenmeli eserlerde dini inanışlar ön plana çıkmışken; Rönesans'la birlikte 'insan'

olgusu önem kazanmaya başlamıştır. Aynı zamanda Rönesans döneminde ‘gerçek nesneler’ önemli hale gelmiş, doğa aracılığıyla gerçek ve mutlak bilgiye ulaşmak gerektiği düşüncesi benimsenmiştir. Yine bu dönemde Thales, Platon, Aristoteles gibi düşünürler doğayla sanat arasındaki bağlantıyı felsefi açıdan da incelemeye ve açıklamaya çalışmışlardır.

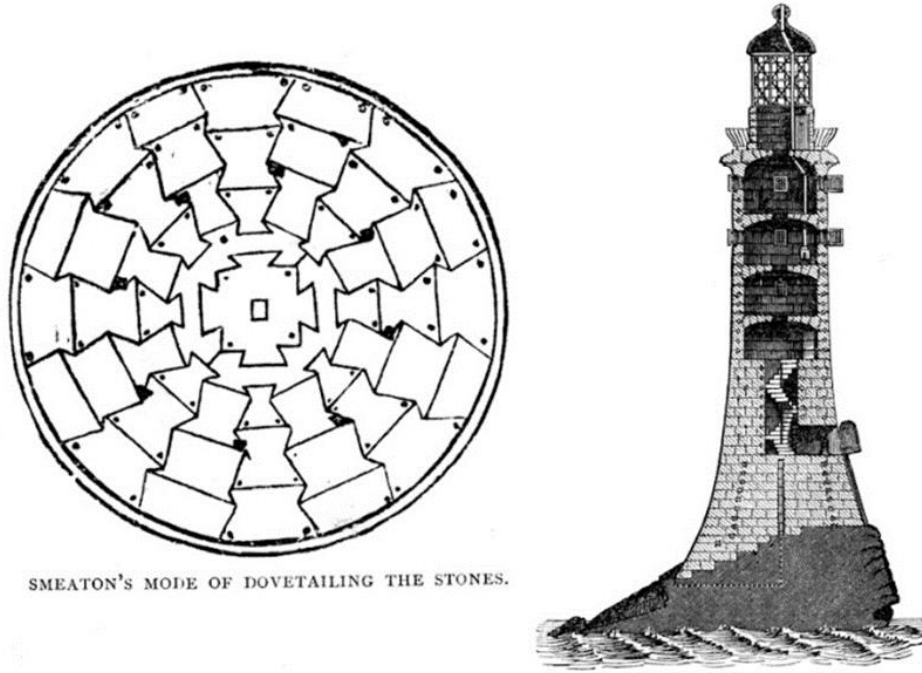
Rönesans dönemi için biyomimetik arayışlar düşünüldüğünde ilk akla gelen kişi, dönemin en büyük dahilerinden biri olarak kabul edilen dünyaca ünlü İtalyan sanatçı Leonardo Da Vinci (1452-1519)’dir. Da Vinci, beş yüzyıl önce farklı akademik ve sanat alanlarında doğayı sistematik olarak gözlemlemiş ve deneyler yapmıştır. Hayatı boyunca yaptığı çalışmalar günümüzde hala heyecan verici ve ilgi odağı olmuştur. “Leonardo’nun Makineleri”, “Da Vinci’nin Bilimi” gibi çok sayıda kitap, makale ve diziye göre Leonardo da Vinci’nin akıl, bilim ve sanatın işbirliği içinde olması gerektiği fikrini savunduğu sonucu çıkarılabilir. Günümüze kadar gelen çizimlerine bakıldığında, doğayı gözlemleyip birçok tasarımında doğadaki canlılardan esinlendiği de anlaşılmaktadır.



Şekil 2.3 Leonardo Da Vinci'nin ejderha sineğinden yola çıkarak tasarladığı mekanik kanat mekanizmaları (Havacılık Tarihi, 2015)

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi Da Vinci'nin hareketli kanat tasarımlarına ait çizimlerinden anlaşılacağı üzere insan bedeninin dinamik yapısı, makineden daha ön plandadır. Doğa ve teknolojiyi birleştirerek tasarımlarını uygulamaya geçiren Da Vinci'nin uçan makinesinin, kuşların izlenmesi ile tasarlanan bilinen ilk hava aracı olduğu düşünülmektedir.

Rönesans sonrası dönemde de doğadan esinlenmelerin mimari yaklaşımlarda varlığını koruduğunu görmek mümkündür. John Smeaton 1759 yılında Plymouth'da ürettiği Eddystone fener kulesinde, bir ağacın büyüme prensibi kullanılmıştır (Şekil 2.4). Smeaton, dallanarak çoğalan İngiliz meşe ağacının yüklere karşı koyabilen en iyi yapılanmaya sahip olduğunu belirtmiş ve fener kulesinde bu bilgiyi kullanarak yük dağılımı problemini çözmeye çalışmıştır.



Şekil 2.4 Smeaton's Eddystone Lighthouse (Trinity House History, 2014)

Doğayı gözlemlediği ve sunduğu sayısız detayları yorumlayarak yapılarına aktardığı bilinen önemli mimarlardan biri de Gaudi'dir. Barselona'da Sagrada Familia Kilisesi'nde; dört adet doğal görünümli bazalt kolondan oluşan bölüm, ormana benzetilmektedir. Diğer pek çok yapısında ise iskelet sistemleri ve kemiklerle yaptığı analogiler, tasarımlarında önemli bir rol oynamış; dinamik ve statik yüklere doğadaki yapılaşmaların nasıl karşı koyduğunu gözlemleyerek kendine özgü bir estetik dil yakalamıştır (Şekil 2.5).

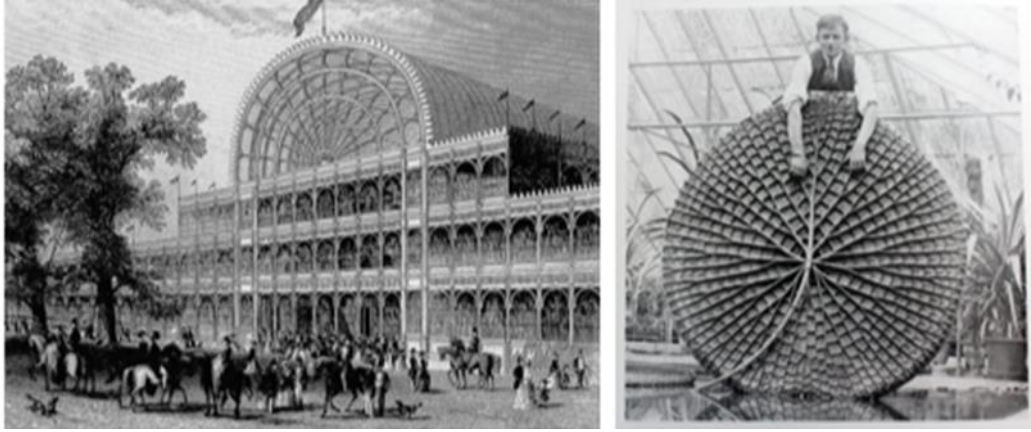


Şekil 2.5 Sagrada Familia'da gözlemlenen doğa analogileri (1882-.) (Mimdap, 2014; Deviantart, 2013)

Özetle, sanayileşme öncesi dönemin yapılarında; biomimesis, doğadaki malzeme, biçim ve strüktürün oluşum sürecinin mimari forma dönüştürülmesiyle sınırlıdır. 19. yüzyılda biyolojinin bir bilim dalı olarak ortaya çıkması ve Sanayi Devrimi ile başlayan teknolojik gelişmelerin hızlanması sonucu, doğaya yönelik çıkarımların mimarlıkta daha bilimsel ve deneysel bir şekilde, daha farklı ve güçlü uygulama alanı bulduğu görülmektedir.

20.yüzyılda doğa-mimarlık ilişkisine bakıldığında, Sanayi Devrimi sonucu hızlanan bilimsel ve teknolojik gelişmeler, mimarideki etkilerini ancak 20. yüzyılda göstermiştir. Mimarlık tarihine bakıldığında, Sanayi Devrimi'nin bir sonucu olarak nitelendirilebilecek olan modern mimarlık akımı, yeni bir mimarlık anlayışının temsilcisi olmuştur. Bu çerçevede mimarlık-doğa ilişkisine bakıldığında ise, doğadan esinlenme yöntemleri, gelişen bilim ve teknoloji sayesinde farklı bir boyut kazanmıştır.

Crystal Palace, Sanayi Devrimi sonrasında başlayan yeni dönemde, geleneksel mimarlık anlayışı ve uygulamalarından keskin bir biçimde ayrılan tavrıyla önemli bir dönüm noktasını ifade etmekte ve modern mimarlığın başlangıcı olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Crystal Palace, Londra, 1851 / Nilüfer çiçeği (Archdaily, 2013; Dallasnews, 2016)

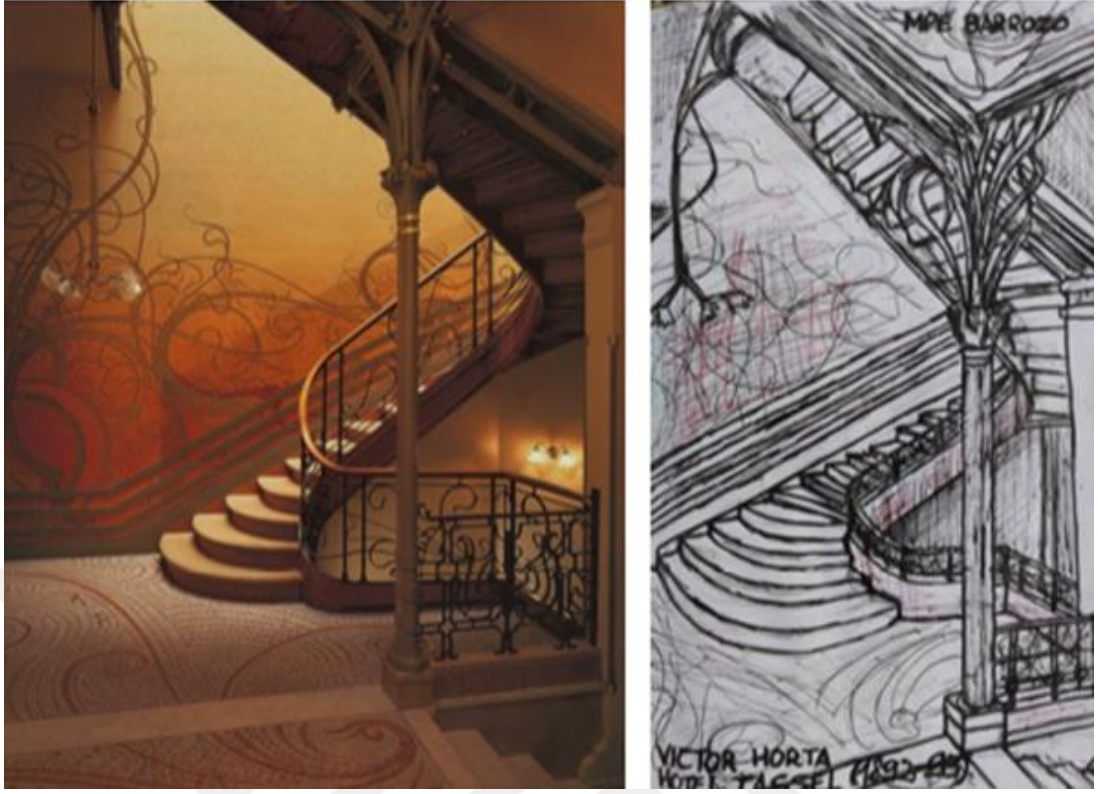
Joseph Paxton, nilüfer çiçeğinin strüktür yapısında yaprağın merkezinden çevreye doğru yayılan damar şeklindeki uzantılar ve bu uzantılar arasında da çaprazlama

daha ince doku olduğunu gözlemlemiştir. Sarayın çok geniş açıklıkları, nilüfer yaprağındaki taşıyıcı strüktür kurgusuna benzer şekilde demir taşıyıcılarla ve camla özdeşleştirmiş ve saray buna göre inşa edilmiştir. Bu anlamda doğadan esinlenilerek tasarlanan bu yapı, mimarlık alanında yeni bir yaklaşımın başlangıcı olarak anılmaktadır.

Sanayi Devrimi'nin hemen ardından gelişen bilim ve teknolojiyle de yakından ilişkili olarak yükselen Modern Mimarlık, aynı zamanda mimarların ve tasarımcıların sanayileşmenin negatif sonuçlarından biri olarak insanın doğadan kopuşunu da sorguladıkları ve eleştirdikleri bir döneme denk gelmektedir. Özellikle 20. yy içerisinde bu doğrultuda doğaya yönelmiş ve mimarlıkta doğada bulunan formlardan esinlendikleri farklı yaklaşımlar geliştirmişlerdir.

Bu yaklaşımlardan biri, 19.yy sonlarında ortaya çıkan Art Nouveau'dur. Yeni sanat akımı olarak da bilinen yaklaşımın tipik özelliği inceltirilip uzatılarak stilize edilen çiçek, böcek gibi doğadan esinlenilen organik motiflerdir. Bu dönemde sıklıkla kullanılan doğa esinlenmeleri ve doğal figürler Art Nouveau akımında, sanayileşme ile birlikte yeni bir malzeme kimliği kazanan demir ve çeliğin de stilize edilmesiyle, yapı ve konstrüktif elemanların farklı yerlerinde, her türlü araç, gereç ve objelerde hem fonksiyonel olarak hem de süsleme amaçlı kullanılmaya başlanmıştır.

Victor Horta'un tasarladığı “Tassel Oteli” (Şekil 2.7) ve uyluk kemiğinin anatomik yapısı incelenerek tasarlanan “Eiffel Kulesi” (Şekil 2.8), bu anlayışın ilk örnekleri arasında sayılabilir.



Şekil 2.7 Tassel Oteli, Belçika, 1894 / Tassel Oteli eskiz çalışması (Pinterest, b.t.)

1893 yılında tamamlanan Hôtel Tassel ile birlikte 19. yüzyılda yeni bir çığır açan Horta'nın tasarımları, demir, cam ve çelik malzemelerinin kullanılarak dış ve iç mekanlarda kendini gösteren, doğadan ilham alan, organik formların etkisiyle bir mimari biçim haline gelen Art Nouveau stilini içerir. Bu üslubun eğrisel botanik formlarını tanımlamak için kullanılan terimler arasında “biyomorfik kırbaç”, "eğrisel", "organik" gibi sözcükler bulunmaktadır.



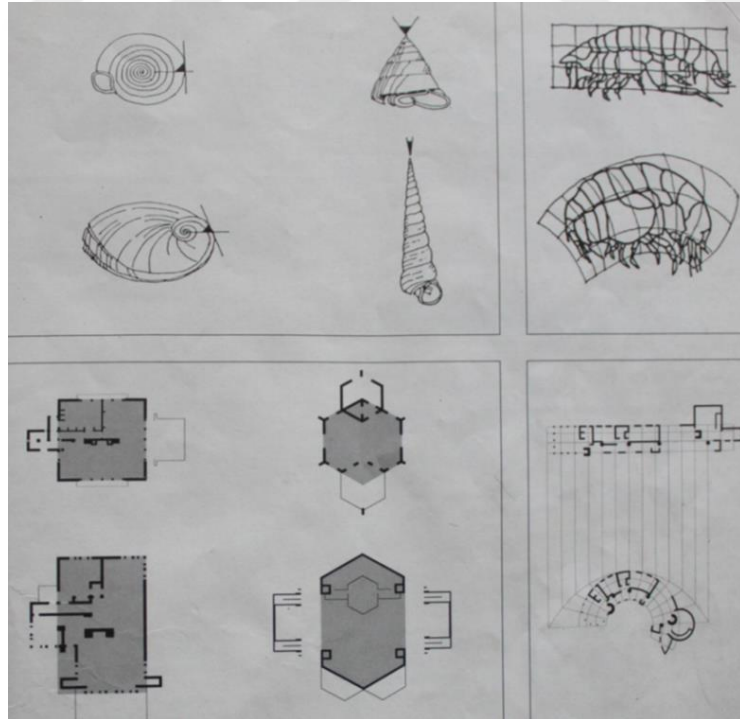
Şekil 2.8 Eiffel Kulesi, 1889 / Uyluk kemiğinin anatomik yapısı (Archozi, 2018; Writteninbone, 2017)

20. yüzyıl başlarında Modern Mimarlık döneminin etkileri artarak devam etmiştir. 1919 yılında Almanya'da başlayan ve Bauhaus akımı olarak bilinen hareket, modern mimarlık anlayışının en etkili yorumlarından biri olmuştur. Tasarım diline bakıldığında tanımlı geometrik formların kullanılması, cam, çelik ve beton gibi malzemeleri çıplak bırakarak malzemenin özgünlüğünü öne çıkarma isteği, doğayla bütünleşen plan düzeni, belirgin yatay veya dikey şerit açıklıklar, iç ve dış mekan algısının arasındaki farkı azaltma isteği, mekanlar arasında görsel bağ kurma hedefi, dışarıdan belirgin olmayan yalın ve net konstrüksiyon çizgileri gibi unsurlar, endüstrileşmenin de getirdiği sonuçlar doğrultusunda Bauhaus'un belirgin özellikleri arasında yer alır. Bu yaklaşımlar sonrasında Amerika'da yayılarak Uluslararası Üslubun (Enternasyonel Stil) doğuşuna sebep olmuş; hatta tüm dünya çapında farklı yerel yorumlarla zenginleşen bir modern mimarlık mirası ortaya çıkarmıştır. Ancak teknolojinin egemenliği, yalın geometriler, süslemeden arındırılmış bir mimari, biçimde sadelik ve mekanda işlevsellik arayışları çerçevesinde, giderek yapının doğa ile ilişkisinin koparılması kendi başına estetik bir obje olarak algılandığını; bu dönemde doğa ile ilişki kurma fikrinin geri planda kaldığını; hatta neredeyse doğanın

sadece bir fon, bir manzaraya indirgendiği söylemek mümkündür.

Bu dönemde doğayla ilişki kurma fikrini önemseyen nadir mimarlardan biri, Frank Lloyd Wright'tır. Mimarlık ve doğa arasında organik bir bağ arayarak adeta mimariyi doğada yaşayan bir organizma olarak nitelendirmiş ve yapılarını bu hassasiyetle tasarlamaya özen göstermiştir. Wright, insanı doğadan soyutlamak yerine insanla doğayı iç içe kurgulamayı tercih etmiştir. İlkeleri Wright tarafından belirlenen ve Organik Mimarlık olarak adlandırılan mimari üslubun bakış açıları arasında doğayla iç içe ve uyumlu olmak kavramları bulunmaktadır. Wright, deniz kabuğunda bulunan spiral açılarının geometrik çeşitliliğini, kabuğun canlıyı çevrelemesini ve dış tehlikeleri engellemesini tasarımında örnek aldığı durumlar olarak belirtmiştir:

Şu sonsuz sayıda sıralanmış minik evlere bakınız. Bu tasarımlarda tek bir fikir ya da ilke mi vardır? Hayır yoktur. O zaman biz insanlar neden evlerimizin hepsini tıpatıp aynı yapmaya çalışıyoruz? Bu minik kabukları doğurgan ve yaratıcı birer örnek olarak neden almayalım? (Laseau ve Tice, 1992, s.2) (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Deniz kabuğu örnekleri ve Wright'ın farklı ev planları (Laseau ve Tice, 1992, s. 7)

Bir başka modern mimarlık örneği olan Johnson Wax Binası'nda Frank Lloyd Wright, özel betonarme kolonlar tasarlamış ve bu sistem literatüre mantar kolon sistemi (mushroom columns) olarak girmiştir. Su zambağının yapraklarından etkilenecek oluşturduğu kolonlar, doğanın biçimsel özelliklerini kullandığı bir örnektir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Johnson Wax Binası, 1939 / Su zambağı (Prezi, 2016)

20. yüzyılın ortalarında ise, Buckminster Fuller ve Frei Otto'nun canlıların oluşum ve gelişim sürecini anlamaya yönelik sorgulamaları, mimarlık-biyoloji ilişkisi kapsamında hem strüktürel hem de ekolojik bağlamda yeni form ve strüktür arayışlarına neden olmuştur. Buckminster Fuller'in jeodezik kubbesinde ya da Otto'nun asmagerme çadır örtülerinde, en az malzeme ile büyük açıklıkları geçme hedefi ve daha hafif yapılar üretme kaygısı, doğadan ilham alarak başlayan bilinçli bir öğrenme sürecinin bir sonucudur.

Buckminster Fuller, 1967 Montreal Dünya Sergisi Amerikan Birleşik Devletleri Pavyonu için tasarladığı jeodezik kubbeyi, doğadakine benzer şekilde, fonksiyonel, dinamik ve hafif bir teknoloji olduğu iddiasıyla üretmiş ve insan yapımı strüktürler söz konusu olduğunda, doğal yapılaşmaların optimum verimlilik taşımasının önemli ipuçları barındırdığını söylemiştir. Yapılan araştırmalara göre, jeodezik kubbe ile bal peteği, arı gözü, papatyağiller familyasından karahindiba, bir hücreli havan sınıfında olan ışnılılar ve karbonun üçüncü formu olan C60 atomunun yapısal birleşimi arasındaki ilginç benzerlikler bu kanıyı pekiştirmektedir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Buckminster Fuller ve Jeodezik Kubbe, 1967 (Mimarizm, 2017)

Frei Otto ise, 1964 de Stuttgart’ da kurduğu enstitüde doğal nesneler üzerinden deneyler yapmış; araştırmalarını strüktürel formlarda sağlamlık ve hafifliğin, sistematik ve estetik olarak en iyi şekilde çalışabilmesi üzerinde yoğunlaştırmıştır. Örümcek ağlarından esinlenen asma-germe sistemler ya da sabun köpüğünden esinlenerek en küçük alanlı yüzey kavramı gibi birçok doğa esinlenmeli yapısal form üzerinde çalışmış; hafif strüktürler, uyarlanabilir, dönüşebilir tasarımlar üretmiştir (Şekil 2.12). Frei Otto ile özdeşleşmiş şişme (pnömatik) yapılar, doğadan esinlenmenin sadece biçimi değil süreci de içermesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Sürdürülebilirlik kavramının öneminin idrak edilmesinden önce bu fikre yönelik adımlar atan Frei Otto, objeleri meydana getiren fiziksel, biyolojik ve teknik süreçleri anlama gerekliliğini savunmuştur.



Şekil 2.12 Frei Otto ve Münih Olimpiyat Stadyumu, 1972 (Kot0, 2018)

1960’larda ortaya çıkan insanın doğayla bütünleşmesine dayalı bir diğer felsefe de metabolist harekettir. Noboru Kawazoe, Kiyoshi Awazu, Masato Otaka, Kisho Kurokawa, Kiyonori Kikutake, Kenji Ekuan’dan oluşan bir grup Japon mimar, şehir plancısı ve tasarımcı, savaş sonrası büyük oranda yok olan Tokyo ve Hiroşima gibi metropollerin, alt yapı sistemlerinden en küçük yaşama birimlerine kadar yeniden planlanması gerektiğinden hareketle insan-doğa ilişkisi odaklı bir tasarım felsefesi geliştirmiş ve sanayileşme sonrası gelişen teknolojiyi de insan ürünü olarak ele almışlardır.

Geleneksel Japon mimarlığı ile sanayileşme sonrası gelişen modern mimarlığın başarılı bir sentezi olarak yorumlanan metabolist mimarlık, atomdan nebula kadar insanı, asıl odak noktası olarak gören bir harekettir. Bu felsefenin en bilinen örneği olan Kurokawa’nın tasarladığı Nagakin Kapsül Kule, hücre sisteminden esinlenmelerle kurulmuştur. Ana taşıyıcı strüktür üzerindeki kapsüllerin gerekli durumlarda değişebilir, tamir edilebilir, yenilenebilir, büyüyebilir niteliklere sahiptir. Aynı zamanda çevresel değişimlere de adaptasyon geliştirebilir ve çevreyle iletişim halindedir (Şekil 2.13).

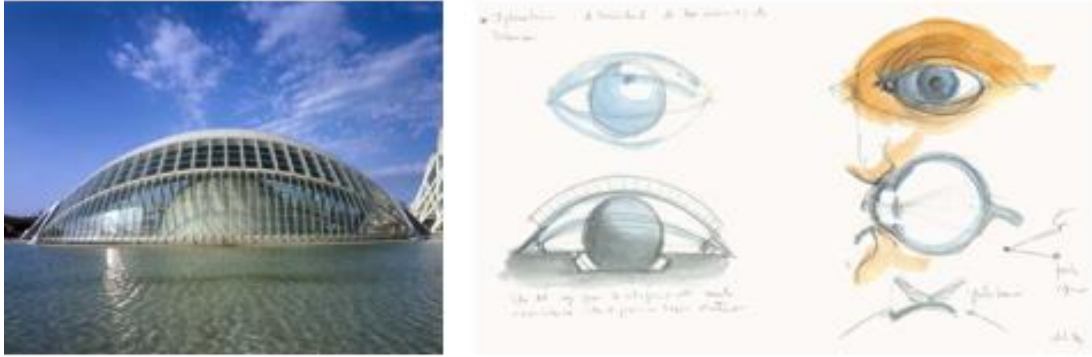


Şekil 2.13 Kisho Kurokawa'nın tasarladığı Nagakin Kapsül Tower, Tokyo, 1972 (Sbpturkiye, 2018)

Kisho Kurokawa (1992, s.36-37) Metabolist yaklaşımı; 'Yaşayan organizmaların metabolizmalarının olması gibi, şehirlerin ve mimarinin de büyüdüğüne ve metabolizmalarının olduğuna inandık. Bu bizim hareketimizin felsefesinin başlangıç noktası idi. Metabolism hareketi birçok farklı yönle yayılmıştır ve tek bir kelimeyle özetlemek mümkün değildir.' sözleriyle açıklamaktadır. Kent ve şehirler, büyüyen metabolizmalara benzetilmektedir. İnsan vücudu ile ilişkilendirilen kentler de, büyüyen ve ölen hücreler gibi sürekli bir devinim ve değişim içerisinde. Bu süreç mimarlık-doğa ilişkisi çerçevesinde değerlendirildiğinde yapıların iskeletini

oluşturan strüktürlerin organik olarak büyüyebilmesi, biyolojik metaforlar ışığında geleceğin tasarımları hakkında fikirler geliştirilmesi açısından önemli olmuştur.

Doğadan esinlendiğini açıkça dile getiren bir başka mimar olan Santiago Calatrava'nın yapılarında, hayvan iskeletleri, bitkiler ve insan vücudu gibi doğal formların izleri görülmektedir. Mimarlığı anlamak için geometrinin esas olduğuna inanan mimar, bitkilerin gövde ve dallanma sistemlerine öykünerek yapılarında statik yüklerin nasıl dağılması gerektiğini öğrenmiştir. 1920'li yıllardan sonra biyoloji ve mimari ilişkilerin çoğalması, kısa süre biyoloji eğitimi almış hem mühendis hem de mimar olan Calatrava'nın, "alışılmışın dışında" olarak tanımlanabilecek form ve strüktürler tasarlamasına olanak sağlamıştır. Sadece analogik ve biçimsel bir esinlenme ile kalmayıp ürünlerinde; ilham kaynaklarını strüktürel dayanıma dönüştürme becerisini de ustalıkla kullanmıştır (Şekil 2.14). Bu tasarım anlayışına, İspanya'da 1998 yılında inşa edilen Palau De Les Arts Reina Sofia yapısı örnek olarak gösterilebilir (Uç Zeytün, 2014).



Şekil 2.14 Palau De Les Arts Reina Sofia (Opera House) Valencia, 1998 (Calatrava, b.t.)

Michael Wilford ve Russell Johnson'un tasarımı olan ve egzotik Durian meyvesinden esinlenilen Esplanade Tiyatrosu'nda da Calatrava'nın strüktürel arayışlarına benzer bir formsal öykünme olduğu söylenebilir. Üçgen şeklindeki alüminyum panellerden oluşan dış cephesi, güneşin dik ve etkili olduğu saatlerde kapanıp binanın içinin ısınmasını engellerken, akşam saatlerinde açılıp içeriden yayılan ışıklar sayesinde kent silüetine ilginç bir mimari sunmaktadır (Şekil 2.15). Esplanade

Tiyatrosu'nun dış kabuğu sadece biçimsel bir esinlenme dışında durian meyvesinin sağlamlığını binanın dış cephesinde okutmayı hedefleyen işlevsel bir yaklaşıma sahiptir. Uzaktan bir böcek gözünü de andıran yapı, sıcak ve doğrudan güneş ışığından korunurken iç mekanlar doğal ışıkla dolmaktadır (Kalaycı, 2010).



Şekil 2.15 Esplanade - Theatres on the Bay, 2002 (Livingnomads, b.t.)

Çin'in Shanghai kentinde 80 hektarlık alana inşa edilmiş Qi Zhong Stadyumu, benzer şekilde strüktürel kaygılarla doğadan esinlenme amacını örnekleyen bir yapıdır. Stadyumun üst örtü tasarım yaklaşımı, hareketli çelik 8 adet kayar taç yaprağından oluşmakta, bu yapraklar birleşince 15.000 m² alan örtmektedir (Çalış, 2002). Çin'in milli çiçeği olarak bilinen Peony (şakayık çiçeği), Qizhong Stadyumu'nda yapılan strüktürel ve konstrüktif unsurlar için fonksiyonel ve biçimsel anlamda ilham kaynağı olmuştur. Yaprak görünümlü üst örtü sekiz hareketli metal levhadan oluşmaktadır. Yükselen sıcak havayı tekrar stadyumun içine üfleyen metal levhalar, dışardan gelen serin havayı da kontrollü bir şekilde içeri almaktadır. Bu sistemde çiçeklerin güneş ve rüzgara göre taç yapraklarını hareket ettirme davranışı ilham alınmıştır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Çin'in milli çiçeği Peony ve Qi Zhong Stadyumu, Shanghai, Çin, 2005 (Çalış, 2002; Clearharmony, 2014)

İnsan bedeni üzerine özellikle DNA'ya ve genetiğe dair mikro düzeydeki araştırmalar, mimarlık alanında giderek farklı esinlenmelere yol açmıştır. Taşıyıcı sistemler ve malzeme bilgisine dayalı detaylarda farklı çözümler keşfedilmiştir. Buradan hareketle, erken döneme göre biyomimikri arayışlarında doğadaki strüktürel tasarımlardaki sağlamlık, dayanıklılık, hafiflik ve doğada görülen dinamik yüklere dayanım, enerji etkin kullanım, malzeme gibi konuların 20.yüzyıl boyunca farklı boyutlarıyla irdelendiği görülmektedir.

Genetik araştırmaların fütürist mimarlar üzerindeki etkisine güzel örneklerden birisi, çalışmaları boyunca teknolojik gelişmeleri takip eden ve uygulamalarında da ileri teknolojilerden sıklıkla faydalanan mimar John M. Johansen'dir. 1998 yılında, bilimler arası etkileşimden ve teknolojilerden faydalanarak Mohamad Alkhayer ile birlikte tasarladıkları Moleküler Kurgulu Ev (Molecular Engineered House), genetik bir algoritma aracılığıyla, genetik bilgiyi taşıyan "tohumlar"ın dokuz günlük bir evrim ve gelişim süreci sonunda konutu oluşturmasına dayanmaktadır. Sırasıyla yapının temelini oluşturacak olan kökler, üst yapı, iç-dış dikey omurga, kafes sistem, dış duvar ve iç duvarlar, platformlar (katlar), açıklıklar, mekanik sistemler bu süreç sonunda tamamlanır. Değişen koşullara ve kullanıcı gereksinimlerine göre kendini yenileyebilen, değişebilen yapı formu, mimarlık-biyoloji etkileşimi ile yaşayan organizmalar olarak tariflenen yapılara örnektir (Şekil 2.17). Form üretmeye dayalı bu tasarımlar, gelişen teknolojiler sayesinde sadece formsal kaygıların ötesine geçmek için yapılan çalışmaların ön etabı olarak nitelendirilebilir (Akyol Altun ve

Köktürk, 2007).

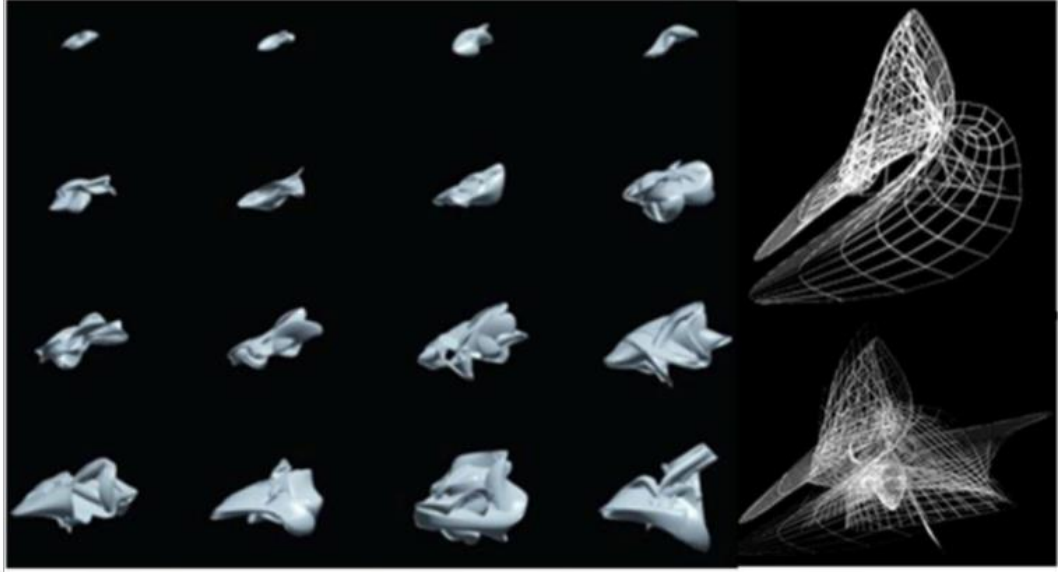


Şekil 2.17 Moleküler Kurgulu Ev, kullanım alanları ve platformlar, model, plan ve kesit eskizleri, 1998 (Özen, 2006)

Dolayısıyla 90'lara gelindiğinde, bilimsel araştırmaların bilgisayar teknolojinin desteğiyle başka bir boyut kazandığı görülmektedir. İçinde biyolojik esinlenmeler/izler barındıran ancak daha formsal arayışlarla sonuçlanan genetik/evrimsel mimarlık bu dönemin arayışları içinde, parametrik modelleme tekniklerinin de desteğiyle ayrı bir yol çizmiştir.

Parametrik destekli form arayışlarına erken örneklerden biri John Frazer danışmanlığında Mani Rastogi, Patrick Janssen ve Peter Graham tarafından 1995 yılında geliştirilen, etkileşimli sayısal bir sistem olan Interactivator modelidir (Şekil 2.18). Johansen'in Moleküler Kurgulu Ev projesinde geliştirdiği mantığa benzer şekilde, yaratılan bir sanal ortamda etkileşimli olarak yeni biçimlerin üretilmesi ve gelişmesi amaçlanmıştır. Bu sanal ortamdaki karmaşık modellerin gelişimini genetik kod üzerinden sağlayan bu süreç, büyüme, gelişme, çoğalma ve mutasyon gibi evrimsel aşamalardan geçmektedir. Literatürde evrimsel mimarlık terimiyle ilişkili olarak da yer bulan projede bir “yapay tohum” sanal bir çevrede doğal seleksiyonla ayrıştırılarak, mekana dönüşmektedir (Alp, 2013).

John Frazer (1995) bu durumu “Mimarlık, morfogenezis, genetik kodlama, replikasyon ve seleksiyon prensiplerine tıpkı doğa gibi sahip olmalıdır. Doğa ile inşa edili doğa arasındaki ilişkisi ancak bilgisayar teknolojisi ile kurulur” şeklinde açıklamaktadır (s.79).



Şekil 2.18 Interactivator'da modelin evrimi- modelin iki evresi (Frazer, 1995)

Yine benzer bir örnek olarak, doğal organizmalara ilgi duyan Greg Lynn'in tasarımı bir form oluşturma süreci olarak gören yaklaşımı ile tasarladığı Embryological House (1997-2002) verilebilir (Şekil 2.19). Kitabı Animate Form'da Lynn, evrim, mutasyon, organik form ve canlılıkla ilgili çağdaş teorilerin, mimari tasarıma uyarlanabileceğinden bahsetmektedir (Lynn, 1999).



Şekil 2.19 Greg Lynn, Embryological House, 1999 (Lynn, 1999)

Graz şehrinin 2003 yılı Avrupa Kültür Başkenti olması sebebiyle inşa edilen **Graz Sanat Müzesi (Kunsthhaus Graz)**'nin biyomorfik yapı kabuğu da bilgisayar destekli doğal form arayışlarına verilebilecek örneklerden biridir (Şekil 2.20). Akrilik cam yüzeyli biyomorfik yapı kabuğun bir bölümü iç mekandaki kültür ve sanat aktivitelerinden görüntüler gösteren bir ekran olarak da tasarlanmıştır. Metaball (ana kütle) ve blob'lar (iç kıvrımlar) ilk olarak Greg Lynn tarafından 1995'te teorik olarak ortaya konan "blob architecture" kavramının bir uzantısı olarak görülebilir. Bu yaklaşım, dik açılı ve katı modellerin yerine doğadan ilham alan esnek, organik formların birleşimine vurgu yapmaktadır (Kartoğlu, 2011).



Şekil 2.20 Graz sanat müzesi. Biyomorfik yapı kabuğu, 2003 (Weburbanist, 2018)

Mimarlık pratiğinde, bilgisayarların işlem güçlerine dayanan dijital değişimin yarattığı etki, bugüne kadar olan tasarım anlayışları ve teknolojik imkanların elverdiği ölçüde yaşanan değişimin yarattığı etkiden fazla olmuştur. Bu doğrultuda 20.yüzyılın sonu ve 21.yüzyılın başları, doğal süreçlerin ilham olduğu ancak form üretmeye odaklı pek çok tasarıma sahne olmuştur.

Roland Snooks ve Robert Stuart-Smith'in birlikte yürüttüğü, deneysel bir mimari araştırma platformu olan Kokkugia, biyolojik, sosyal ve maddesel sistemlerin kendiliğinden ve işbirlikçi örgütleyici davranışlarından oluşan üretken tasarım

metodolojilerini irdelemektedir. Karmaşık sistemlerin işleyişinden çıkan ve mimaride geleneksel çalışma hiyerarşilerini sorgulayan doğrusal olmayan bir mimari geliştirmeye çalışan bu metodolojik araştırma, fraktalları¹ esas almaktadır. Fraktallar, geometrik yapıları Öklidyen yaklaşımla açıklanamayan doğal biçimlerin matematiksel tanımlamasıdır. Bu fraktal kurgular, yeniden yazma sistemleri ile üretken sistemlere dönüştürülüp, tasarımda kullanılabilir. Biçimin üretim sürecinde kullanılan kural sayısının az, kuralın tekrar sayısının fazla ve biçimin kendine benzerlik özelliğinin yüksek olduğu bir araç olarak fraktaller, sistem içinde basit mimari kararların kodlanmasını sağlayarak, kendi tasarım kararlarını kendi kendine organize edebilirken; mimari biçim ve formun oluşması konusunda algoritmalar devreye girerek üretken mimari tasarım alanında kullanılabilirler (Aldemir, 2014).



Şekil 2.21 Parachute Pavillion, 2005 (Kokkugia, 2005)

Şekil 2.21’de Parachute Pavyonu’nda görüldüğü gibi, ıslak bir köpük heterojen bir alan olarak düşünülürse, şekil ve boşluk arasındaki ilişkide, sıvı ve gazın basınçları arasında gelişen bir ilişkiyi yeniden düzenleyerek kafese benzeyen biçimsel bir kurgu yaratılmıştır. Özgül eğriliği ve kenar-yüzey ilişkisi olan bu köpük kafesin karakteri, belirli koşullardan kaynaklanan herhangi bir hücresel konfigürasyona göre daha dayanıklı ve gerçekten daha baskındır. Çünkü, bilgisayar yazılımları yardımıyla oluşturulan fraktal kurguların avantajı hiçbir çevresel etkiye maruz kalmadan, fizyolojik, biyolojik başka hiçbir etkenden etkilenmeyerek sadece matematiğe dayalı geometrilerin üretilmesini mümkün kılmalarıdır (Aldemir, 2014).

¹ Fractal: parçalanmış ya da kırılmış anlamına gelen lâtince fractus kelimesinden gelir, matematikçilerin bilgisayarlarda, matematiksel formlara dayanarak yarattığı düzensiz şekilleri konu alan geometri dalıdır. Bkz: <http://tr.wikipedia.org/wiki/Fraktal>

Doğa esinlenmeli strüktürel arayışlara verilebilecek örneklerden biri de Tokyo'nun Aoyama bölgesinde, ünlü ağaçlı bulvar Omotesando'da konumlanan L şeklinde bir bina olan Tod'un Binası'dır (Şekil 2.22). Yapıda, çapraz beton bağların ve camın oluşturduğu kabuk, caddedeki ağaçların biçimini yansıtır. Öklidyen olmayan bir geometrik biçim öneren tasarımın cephelerinde, doğadan esinlenmeli algoritmaların oluşturduğu açıklıklardan yararlanılmıştır. Üretken sistemlerden yararlanılarak tasarlanan cepheyi oluşturan 9 ağaç strüktür birbirleriyle kesişecek biçimde kurgulanmıştır (Aldemir, 2014).



Şekil 2.22 Tod's Omotesando Building, Toyo Ito, 2003 (Archspeech, b.t.; Pinterest, b.t.)

Bilgisayar ortamında kurulan tasarım sistemlerinden olan Voronoi de pek çok biçimsel üretime ilham olmuştur. Bir noktalar kümesinin birbirleri arasındaki mesafelerinden yola çıkarak genel sınır biçiminin içinde modüller ya da hücreler oluşturan Voronoi, uydu navigasyonu, doğal çevre takibi, kentsel planlama gibi alanlarda kullanılabilen matematiksel tabanlı bir yön bulma aracıdır. Günümüzde çoğunlukla süsleme amaçlı cephe tasarımlarında kullanılmasına rağmen, haritalama ve analiz problemlerinde kullanılması başarılı sonuçlar vermiştir (Öneş, 2011). Voronoi Diyagramları/ Delaunay Üçgenlemesi, doğada arı kovanları, mercanlar, balık pulları, yarası kanatları gibi birçok biyolojik yapılanmada gözlemlenebilir. Doğadaki en temel diyagramlar, mimari tasarımda olduğu gibi giderek kompleks bir hale gelir ve kendi sistemlerini devam ettirerek sonuç ürüne ulaşmaya çalışırlar. Voronoi hücreleri, kompleks bir sistem içerisinde birlikte hareket eden ancak birbirinden bağımsız birimlerdir. Bir binanın program gereksinimlerine – kat alanları,

binalar arasındaki mesafe, kat derinlikleri– karşılık gelen bir bölümlenme elde edebilmek için çok sayıda Voronoi çokgeni denenmiştir.



Şekil 2.23 NKPAC yarışmasında site tasarımı için Voronoi diyagramının kullanılması (A. Şahin ve B. Hatipoğlu Şahin, 2017)

Zaha Hadid, Kaohsiung Ulusal Sanatlar Merkezi'nde, çevre ve vaziyet planı arasındaki ilişkiyi analiz etmek için Voronoi diyagramlarını kullanmıştır (Şekil 2.23). Bu analiz sonucu oluşturulan noktalar, ziyaretçilerin hareketlerinin yönlendirilmesi ile bağlantılıdır. Ziyaretçilerin erişim noktaları, sitedeki ağaçlar, anıtlar ve sınırlar gibi veriler kullanılarak kontrol edilmiştir. Aynı zamanda, kanopi, çatı ve cephe gibi mimari elemanlar Voronoi diyagramından türemiştir. (Bahraminejad ve Babaki, 2015).

Parametrik modelleme, her ne kadar sadece form üretmeye dayalı kurgusal mimari üretimler açısından önemli bir birikim oluşturmuş ve bununla bilinirlik kazanmış olsa da, strüktürel tasarım ve yapı bilgi modellemesi alanında etkin bir araç olmuştur.

Bu doğrultuda Waterloo Uluslararası Tren Terminali için Nicholas Grimshaw ve ortakları tarafından gerçekleştirilen tasarım, biyomimetik tavrının yanı sıra parametrik tasarımın etkin kullanıldığı ilk örneklerden biri olması açısından da önem taşımaktadır (Şekil 2.24). Değişen hava basıncına göre pul esnekliğini ayarlayabilen pullu karıncayiyenin (pangolin) dış kabuğu, terminaldeki cam panel bağlantıları için ilham kaynağı olmuştur. Trenlerin terminale giriş ve çıkışlarında, havadaki basınç değişimlerine uyum sağlayabilmesi için bu dış kabuk örnek alınmıştır (Şekil 2.25).



Şekil 2.24 International Terminal Waterloo – London, UK, 1993 (Grimshaw, 2018)



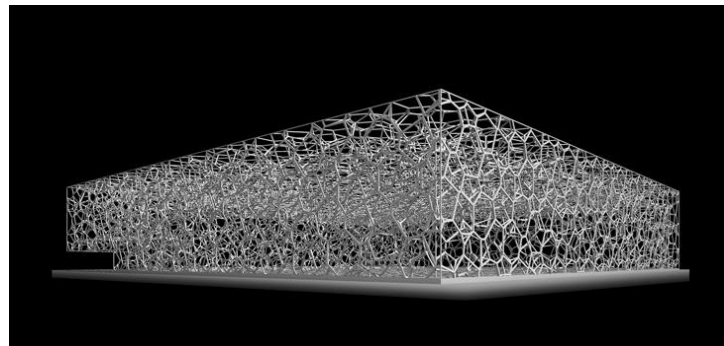
Şekil 2.25 Karıncayiyenin (pangolin) dış kabuğu (Pangolinsg, b.t.)

Parametrik tasarım teknikleri ile tasarlanan geniş çatı örtüsünde, değişen arazi biçimine uyum gösterebilecek, birbirinden farklı ölçü ve biçimdeki taşıyıcı elemanların tasarımı için tek bir tane makasın modeli yapılarak parametrik veriler doğrultusunda bu modelden türeyecek diğer makaslar için tasarım kuralları belirlenmiştir (Baykara, 2011).

Gelişmiş modelleme tekniklerinden faydalanılarak strüktürü tasarlanan doğa esinlenmeli tasarım örneklerinden biri olan Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi'nin (National Aquatics Center- NAC) tasarımı, 2008 yılı Yaz Olimpiyat Oyunları yüzme sporları için PTW (Peddle Throp & Walker) Mimarlık tarafından yapılmıştır (Şekil 2.26). Toplam kullanım alanı 70.000 m² olan yapı, 17.000 kişi kapasitesine sahiptir. “Su Kübü” olarak da bilinen binanın mimari konsepti su moleküllerinin yapısından esinlenilerek tasarlanmıştır. Form, hücresel geometrisi, hücre duruş ve konumlanma biçimleri, sayısal dağılımları, orijinal yapısıyla mimari strüktüre taşınarak, daha düzensiz ve organik sonuçlar verdiği için Weaire-Phelan adı verilen strüktür modeli tercih edilmiştir (Şekil 2.27). Bu nedenle yapının dış cephesinde, içi boş, çelik çerçevelerden oluşan iskeletin üzerinde, 4.000 kabarcıktan oluşan ETFE (etilen tetrafluroetilen) kaplama kullanılmıştır (A. Şahin ve B. Hatipoğlu Şahin, 2017).



Şekil 2.26 Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi, 2003 (Arkitera, 2008)



Şekil 2.27 Weaire-Phelan adı verilen strüktür modeli (Arkitera, 2008)

Aynı olimpiyat oyunları için gerçekleştirilmiş Beijing Ulusal Stadyumu ise, kuş yuvasını yapısal açıdan ve bilgisayar teknolojisinin desteğiyle yorumlamıştır. Arup'un ünlü yapı tasarımcısı Kate McDougall tarafından tasarlanan ve Çin'de uygulanan bu projede biyomimetrik analizin, estetik ve strüktürel başarıda katkısı görülmektedir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 Beijing Ulusal Stadyumu ve kuş yuvası strüktürel benzetimi, 2008 (Mimdap, 2008)

Beijing Ulusal Stadyumu, kırmızı beton arena ve etrafındaki dış çelik kafes olarak iki yapıdan oluşmaktadır. Ortak bir temel üzerine kurulmuş olan ve birbirini destekleyen bu iki yapı arasında 15 metre uzaklık bulunmaktadır. Stadyumun en çarpıcı özelliği olan ve ona kuş yuvası görünümü sağlayan üç boyutlu çelik kafes, 330 metre uzunluğunda ve 220 metre genişliğinde bir alana yayılmakta ve arenayı çevrelemektedir. Stadyumun taşıyıcı dış cephesi, her biri 1.000 tondan oluşan 24 makaralı kolon tarafından desteklenmektedir. Üzerindeki çelik şeritler düzensiz bir desen olarak görünmesine rağmen, dalların yuvayı oluşturma şekli analiz edilerek tasarlanmıştır. Bu formun seçilmesi, yapıya esneklik kazandırmasını ve strüktürel yükün azalmasını sağlamıştır. Yapının çatısında ise, şeffaf bir ETFE membran ve yarı saydam PTFE membran kullanılmıştır. Seyirci koltuklarının yerleştirilmesinde ise parametrik tasarım kullanılarak, seyircilerin en uygun görüşü elde edebileceği şekilde yerleştirilmiştir (Bozkurt, 2010).

Bu örneklerin tümünde, doğa esinlenmelerinin biçimsel kurguya birebir etki ettiği net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. 20.yüzyılın sonuna doğru yükselen

sürdürülebilir arayışlara paralel gelişen ve daha çok sisteme/yapısal işleyişe dönük farklı uygulamalar, “enerji-etkin”, “yeşil”, “ekolojik” bina tasarımı üzerinden ilerleyen aktif bir kanal açmıştır. Bu noktada doğadaki canlıların biçim ve formlarının ötesinde **davranışsal kurallarından esinlenilmesiyle**, farklı bir biyomimetik yaklaşımın geliştiği görülmektedir.

Bunlara verilebilecek en bilindik örneklerden biri olan Eastgate Binası, canlıların biçimsel özelliklerinin ötesinde davranışlarından esinlenen bir örnek olduğundan, biyomimetik tasarım adına önemli bir dönüm noktasına işaret etmektedir.

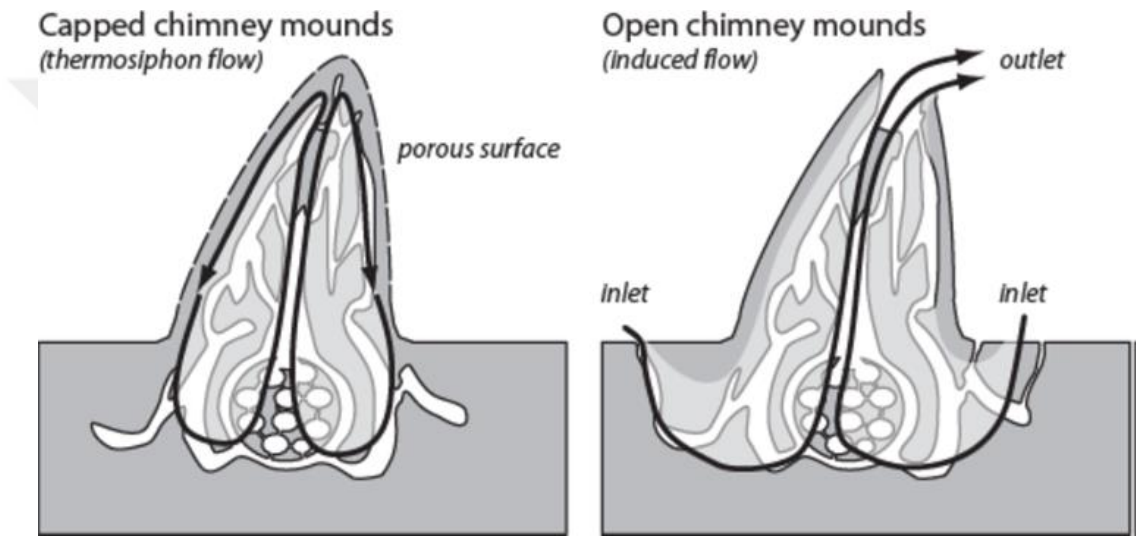


Şekil 2.29 Mick Pearce - Eastgate Merkezi ve ilham aldıkları termit kuleleri, 1996 (Genç, 2013)

Harare, Zimbabwe'de 1996 yılında tamamlanan Eastgate Binası, mimarı Mick Pearce ve Arup mühendislik ortaklığında gerçekleştirilen bir ofis ve konut yapısı olup, akkarıncaların (termit) yuva yapma pratiklerinden esinlenilerek oluşturulan bir doğal havalandırma sistemine sahiptir. Binada, termitlerin yuvalarında varolan, “sıcak havanın yukarı çıkarak soğuk havanın aşağı çökmesi” prensibi ile, hava akımının oluşması ve yuvada biriken CO₂'nin baca işlevi gören boşluklardan dışarı

atılması ilham kaynağı olmuştur (Şekil 2.29). Dünyada ilk doğal havalandırma ve soğutması olan binada kullanılan bu sistem ile soğutma giderlerinin azaltılmasının yanı sıra, sera gazı salınımı azaltılmaktadır (Genç, 2013).

Her ne kadar Eastgate Merkezi, o dönemki araştırmalar çerçevesinde termit yuvalarına ilişkin biyolojik çalışmalardan ilham alınarak tasarlanmış olsa da Scott Turner ve Rupert Soar'ın 2010 yılında yapmış oldukları termitlerin yaşantısını ve yuvalarını inceleyen çalışmada, sistemin daha farklı çalıştığını ortaya koyduklarından bahsetmek gerekir.



Şekil 2.30 Pasif havalandırmanın 2 farklı yöntemi (Turner ve Soar, 2010)

Şekil 2.30'de görüldüğü gibi açık ve kapalı baca olarak 2 ayrı fonksiyonu içerebilen termit tümsekleri, içindeki havalandırma için basınç ve sıcaklık farklarından yararlanmaktadır. İlk resimde hava gözenekler yardımı ile sirküle edilerek yapı içerisinde sürekli bir dolaşım halindedir. Diğer resimde ise havanın, rüzgar yardımı ile topraktaki açık kanallardan girerek açık bacadan dışarı doğru çıktığı, tek yönlü bir sirkülasyon durumu mevcuttur. Yapının üst kısmı olan tümseklerin havalandırması ile yer altındaki yuvaların havalandırılmasının birbiri ile ilgisi olmadığı düşünülmektedir. Bu iki pasif havalandırma durumunun termit ve yuvaları için yeterli olamadığı, bunun yanında termitlerin yaşadığı yuvalardaki solunum için gerekli gaz transferinin sağlanabilmesi için tümseklerde ekstra bağdaştırıcı bir işlevin varlığından söz edilmektedir (Turner ve Soar, 2010).

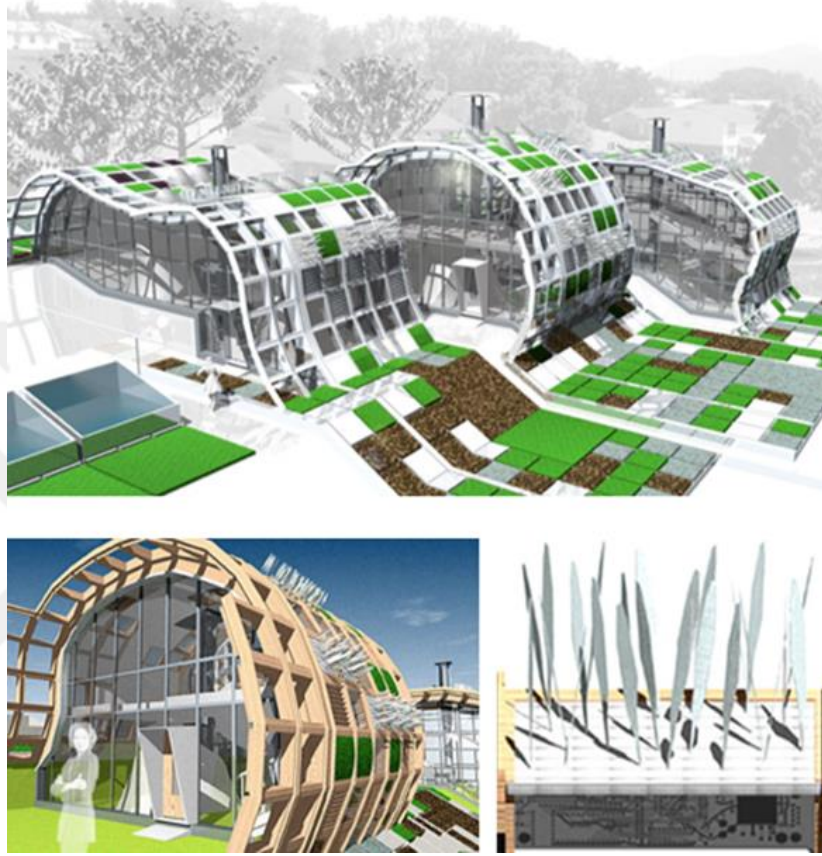
Benzer bir esinlenmenin başarılı olarak kullanıldığı bir diğer yapı olarak CH2 Binası (Council House 2 / Belediye Meclisi 2) verilebilir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 Council House 2 ve konik havalandırma kanalları, 2006 (Archdaily, 2013)

DesignInc Melbourne ve Mick Pearce tarafından tasarlanan ve 2006 yılında yapımı tamamlanan CH2 Binası (Council House 2 / Belediye Meclisi 2), fotovoltaik hücreler, güneş ışığı aydınlatma stratejileri ve binanın ısıtma ve soğutmasında merkezi bir rol oynayan uyarıcı dalgalı beton, atık su geri dönüşüm sistemler dahil olmak üzere, bir çok yenilikçi ve teknolojik özellikler barındıran sürdürülebilir bir binadır. Doğal klimatizasyonu sağlamak için termit tepeliklerinden esinlenilmiştir. Bina en önemli özelliği, her yarım saatte bir hava değişimiyle birlikte % 100 temiz hava sağlamasıdır. 17 metre yukarıdan hava çekebilen ve içinden akan su damlalarının, yavaşça aşağı süzülmesi yoluyla enerji kullanımı düşüren, havayı da soğutan konik havalandırma kanalları, tıpkı termit kulelerindeki çalışma prensibine benzer bir şekilde iç ortam hava sirkülasyonunu optimize eder (G. Minsolmaz Yeler ve S. Yeler, 2017).

Mitchell Joachim MATscape projesinin çıkış noktası, doğa ve insan unsurlarının birlikte yaşam sürebildikleri ve birbirlerine yarar sağladıkları düşüncesidir. Bu ilişki biçiminde mimari formu peyzaj ve iklimsel veriler oluşturmaktadır (Şekil 2.32).



Şekil 2.32 Matscape - Mitchell Joachim, 2006 (Archinode, 2005)

Zamanla oluşan mekanlar ya da farklı bileşenler, hareketli bir mozaik şeklindeki kabuğun biçimlendirilmesinde rol oynar. Kabuk insanların kendi isteklerine göre mekânı değiştirebilmelerini olanaklı kılar. Söz konusu kabuk, konutta sürdürülen yaşam süresince, malzeme ve işlevleri de kapsayacak şekilde dönüşen, sistematik ve simbiyotik doğal bir örüntü olarak tanımlanabilir. Zamanla değişen koşullara göre kendini değiştirip dönüştürebilen bu yapıda, canlılar arasındaki simbiyotik yaşam felsefesi benimsemek ve doğa ile işbirliği halinde yaşamak amaçlanmıştır (Yeşilyurt, 2009). Bu durumun da canlıların ve doğanın özünde var olan değişken yapıdan esinlenme çabası olduğunu söylemek mümkündür.

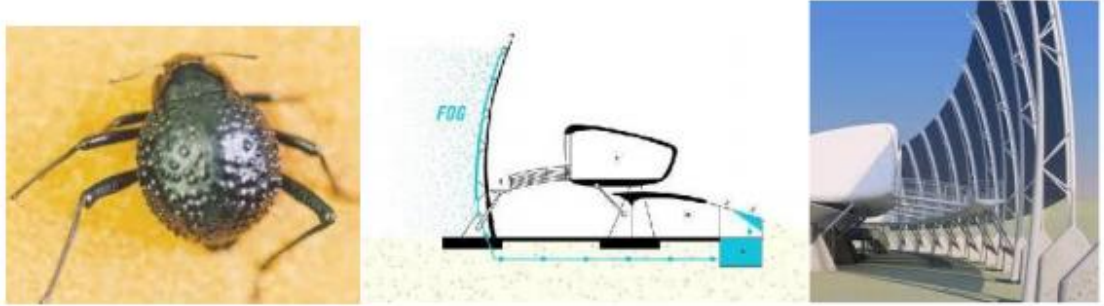
Doğa esinlenmeli tasarımların büyük ölçekli ve işlevsel yaklaşıma örnek verilebilecek bir başka tasarım da, Belçikalı bir mimarlık şirketi olan Vincent Callebaut Mimarlık tarafından hayata geçirilmiştir. Yusufçuk böceği (The Dragonfly) isimli proje New York'un merkezinde, genişleyen nüfusa yönelik olarak bünyesinde barındırdığı bahçelerle yemek ihtiyacını karşılayacak, doğal kaynakları tekrar kullanacak ve biyolojik olarak ayrıştırılabilir atıklar oluşturacak ve kendi kendine yetebilecek, kentsel tarım için metabolik çiftlik olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.33). Yusufçuk böceğinin kanatlarını andıran kısımlar arasında kalan alanın kışın sera etkisi göstermesi nedeniyle bahçeler burada konumlandırılmış, böylece fazladan ısıtma enerjisi kullanımına gerek kalmamıştır (Cıgızoğlu, 2011). Her ne kadar projenin tasarımı felsefesi doğal döngüye odaklı olsa da, sonuç ürün biçimsel öykünme odaklı kalmaktan kurtulamamış görünmektedir.



Şekil 2.33 The Dragonfly ve yusufçuk böceği kanatları, 2008 (Vincent.callebaut, b.t.; Sciencenews 2018)

Doğa esinlenmeli tasarımlarda, özellikle canlıların davranışlarından esinlenme söz konusu olduğunda, literatürde en sık rastlanan canlılardan biri dünyanın en eski ve sert çöllerinden olan Namib çölünde yaşayan Namib Çöl Böceği (*Unguisularis Physasteria Cribripes*)'dir. Yağmur ve akşam çöken sis, suyu bulmak için tek şansıdır. Sis kaplı kumdan suyu emerler, sis biriktirebilmek için kumda siperler oluştururlar. Bu böceğin su toplama sistemi, sırtında bulunan yer yer küçük çıkıntılar sayesinde gerçekleşmektedir. Böceğin sırtının tasarımına dayanan bu sistemde, duruş pozisyonları hem rüzgara karşı dayanım, hem de sisi vücut yüzeyinde

toplayarak ağızlarına akıtabilmek içindir. Küçük sis damlacıkları yeterli büyüklüğe gelene kadar bu alanlarda birikir sonra da huni gibi ağıza dökülür. (Tekin ve Kurugöl, 2011).

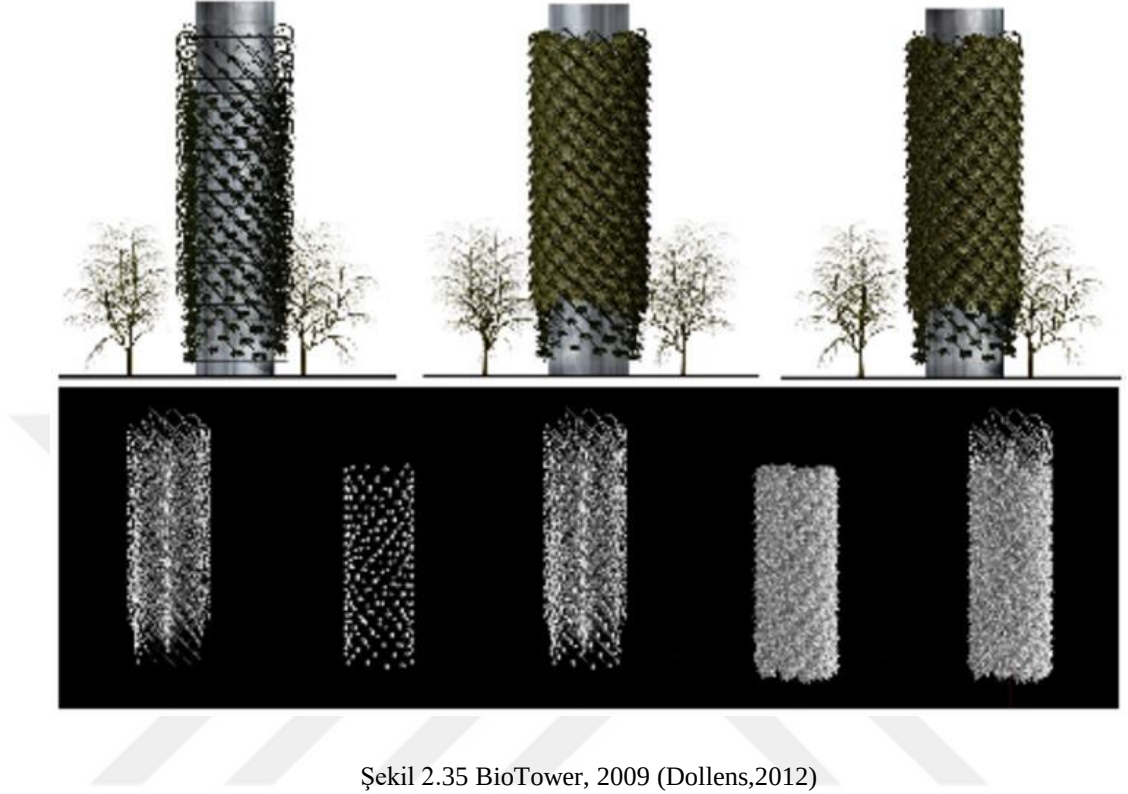


Şekil 2.34 Namibya Çöl Böceği, Namibya Üniversitesi Hidroloji Binası, 2011 (Tekin ve Kurugöl, 2011).

Çevre problemlerine karşı mimari çözümler geliştirebilmek amacı ile bir dönem Afrika'da bulunan İngiliz mimar Matthew Parkes, “flora ve faunanın çölde nasıl canlı kalabildikleri” konusunda araştırmalar yapmıştır. Parkes tasarladığı su kaynağının tasarlamasında zorlu çöl koşullarında hayatta kalabilen çöl böceğinden ilham almıştır (Şekil 2.34). Tasarladığı Namibya Üniversitesi Hidroloji Binası'nda Parkes, sisteki sudan faydalanan bir dizi kemerli kabuk dizisi okyanusa bakan ve döndükçe sisi toplayan naylon ağdan yapılmış uzun bir perdenin arkasında konumlandırılmıştır. Şili ve Peru'da, mümkün olan nemi tutabilmek amacıyla ağaçlar arasında ağ gerilmektedir. Parkes, bu sistemi binanın altyapısıyla bir araya getirmiştir; ağ, doyma noktasına ulaştıkça yerçekimi nemi, oluklara yönlendirmekte ve bu sayede suyun tutulduğu yeraltı sarnıçları soğuk kalmakta ve buharlaşmanın önüne geçililmektedir. Tasarladığı bu sistemin “su yakalayan düşük seviyeli teknolojik bir yaklaşım” olduğunu dile getiren Parkes, “tüm teknolojinin bina formuyla birleştirildiğini” de ifadelerine eklemiştir (Tekin ve Kurugöl, 2011).

Son yıllarda, biyoloji-mimarlık arakesitindeki çalışmaların giderek hız kazandığı görülmektedir. Dennis Dollens tarafından Katalonya Uluslararası Üniversitesinde “Genetik Mimarlık Çalışmaları” başlıklı bir doktora programı kapsamınca yürütülen araştırmalar bu kapsamda örnek olarak verilebilir. Bunlardan Bio Tower projesi, botanik bilimcilerin dijital ortamda, laboratuvar araştırmaları yapmak için

kullandıkları bir yazılım olan X-Frog yazılımını mimariye uyarlamıştır. Tohumdaki ya da bitkideki büyüme kurallarıyla mimari ilişkiler kurulmaya çalışılmaktadır.



Şekil 2.35 BioTower, 2009 (Dollens, 2012)

Dijital olarak benzetilmiş yapısal tasarımın ötesinde, cephe aydınlatması, paneller, yüzeyler bu araştırmanın konusunu oluşturmaktadır. Bitki formlarını ve temel davranışları esinlenerek, elde edilen dijital dosyalar mimarlıkta yeni bir ifade biçimine dönüşmüştür. Dallanma, azaltılmış kıvrılma veya farklı kümelenme gibi dönüşümlü eylemlerin dijital kod setleri mimarlık pratiğinde bir tasarım girdisi olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.35). Dollens, biçimler ve doğadaki süreçler üzerinde çalışarak, deniz kabukları, çekirdekler, bitkiler, ağaçlar, algler ve benzeri canlı maddeleri inceleyerek teknolojinin sağladığı olanaklar sayesinde mimarlığın genetikle, biyomadde veya canlı organizmalar ile bilim/tasarım işbirliğinin nasıl uyum sağlayabileceği üzerinde düşünmektedir (Dollens, 2012).

Ryszard Rychlicki – Agnieszka Nowak, “2010 yılı Gökdelen Tasarımı” konulu yarışmada nilüfer yaprağının kendini temizleme özelliğinden yola çıkarak tasarladıkları binada, cephe boyunca biriken yağmur suyunun bir depoda

toplandıktan sonra arıtılarak, kontrollü bir şekilde yapıya geri verilmesini amaçlamışlardır. Böylece binanın su tüketiminden yaklaşık %25 oranında tasarruf edilmesi öngörülmüştür. Sürece dayalı doğadan esinlenme biçimini sebep sonuç ilişkisi üzerinden değerlendiren bir tasarım örneğidir (Uç Zeytün, 2014).



Şekil 2.36 2010 Yılı Gökdelen Tasarımı – Ryszard Rychlicki, Agnieszka Nowak (Evolu, 2010)

Öncelikle yağmur suyunu olabildiğince çok toplayabilecek özel bir çatı şekli tasarlamak gerekecektir. Çatının altındaki, bir hidro-botanik su birimine hizmet eden geniş huni ve borular olacaktır. Birim, kullanılabilir suları yer çekimiyle apartmanlara aktaracaktır. Ayrıca bundan başka, binanın özel dizayn edilmiş yan yüzeyleri, yağmur sularını bina yüzeyinden yakalayıp aşağıdaki bir rezerve akmasını sağlayacaktır. Binanın aşağısındaki depoda toplanan su daha sonra gene kullanılmak üzere apartmanlara transfer edilecektir (Şekil 2.36).

Influx Studio ve ShiftBoston ortaklığında yürütülen proje olan Treepod'lar, ağaçların karbon filtreleme özelliğinden esinlenilerek oluşturulan, aynı zamanda sürdürülebilir bir kentsel mobilya örneğidir (Şekil 2.37).



Şekil 2.37 Boston Treepods – Influx Studio ve ShiftBoston (Glassman, 2011)

Boston'un küresel karbon salınımı seviyesini düşürmek ve en kısa zamanda fosil yakıt ekonomisinin sıfır karbon ekonomisine dönüştürmek amacıyla tasarlanmıştır. Yapı iskeleti, plastik şişelerin geri dönüşümü ile üretilmektedir. Ejder kanı ağacından (*dracaena cannibari*) esinlenilerek tasarlanan yapıda, strüktürün dallarının ucunda, havadaki CO₂'yi ayrıştırarak O₂ açığa çıkmasını sağlayan ve filtre görevini üstlenen çok sayıda ampul bulunmaktadır. Tasarım, akciğerlerdeki bronşlara benzer bir biçimde hava temizleme işlemi gerçekleştirdiği için yaşayan bir karbondioksit temizleme makinesi olarak nitelendirilebilir. 'Treepod'lar, kentsel çevrede, doğal ağaçlar ile birlikte bir tür hava temizleme amaçlı biyonik bir kentsel öge rolü üstlenmektedir. Treepod üzerinde ziyaretçilerin oynayabileceği tahterevallilerden elde edilen kinetik enerji ile hava filtreleme sistemi ve aydınlatma sağlanmaktadır. Bal peteğinden esinlenen yapısıyla Boston'a dağılacak bir Treepod ağı kurulması hedeflenmektedir. Treepod'un modüler özelliği, farklı kullanıcı isteklerine hitap edebilmekte ve üç farklı biçimde bir araya gelebilmektedir. Tasarım, tek başına bir kent mobilyası olabildiği gibi üçü birleştğinde de oluşan altıgen, bir ağacın sosyal

işlevini de üstlenmektedir. Bu ağaçlardan çoklu halde oluşturulduğunda gölgelenmiş bir kentsel mekân da yaratılabilmektedir (Boston Treepods, 2011).

Winnipeg-Patkau Mimarlık Dünya'nın en soğuk bölgelerinden bir olan Canada'da Plywood on Ice - Kayakçı Barınağı adında oldukça ilginç eserler ortaya koymuşlardır. Bu yapılarda, buffaloların davranışlarından ilham alınarak, kayakçıların soğuk ve rüzgardan korunabilecekleri ahşap barınaklar üretilmiştir. Konumlanma açıları, buffaloların toplanma biçimlerini yansıtmaktadır (Şekil 2.38).



Şekil 2.38 Plywood on Ice (Kayakçı Barınağı), Canada, 2011 (Designboom, 2011)

Barselona'da bulunan bir bilgi ve iletişim teknolojileri merkezi olan Media-TIC binası, doğada var olan biyolojik yüzeyler ve kabuklardan esinlenilerek tasarlanan, canlıların nefes alma ve terleme gibi fizyolojik davranışlara benzer bir şekilde şişme ve sönme hareketini yapan kinetik karaktere sahip bir yapı kabuğundan oluşmaktadır (Şekil 2.39). Binanın cephesi, değişken perde gibi hareket eden, güneş enerjisini almak için kışın açılan ve yazın güneşten korunmak ve gölgelemek için kapanan güneşe dönük şişirilebilir ETFE (etilen tetra fluoro etilen) yastıklardan oluşmaktadır. 3 kat ETFE'nin (ilkkat şeffaf, diğeri ikisi noktalı) üçgensel bir çerçeveye bağlanmasıyla oluşturulmuş ve güneş ışığı karşısında şişen cephe elemanları, sıcaklık arttığında şişmekte ve içindeki hava odacığıyla ısı yalıtımı ve opak cephe sağlamaktadır. Bu filtre sistemi ayrıca UV ışınlarının bina içerisine

girmesini %85 oranında azaltmaktadır (Öztoprak, 2018).



Şekil 2.39 Media-TIC Binası, Barcelona, 2009 (Arkitektuel, 2018)

20. yüzyılın sonlarına gelindiğinde, canlı organizmaların moleküler boyutta incelenebiliyor olması, biyomimetik tasarım yaklaşımlarında, sadece doğanın form, malzeme ve strüktür özelliklerinden ilham alarak değil, canlı organizmanın genetiği üzerinden çıkarımlar yaparak ve **hatta canlıyı tasarımda direkt kullanarak biyoişbirlikçi yaklaşımların** ve gelişebilecek farklı olasılıkların kapılarını açmaktadır. 21. yüzyılda matematik, geometri, biyoloji, fizik, kimya bilimleri sayesinde doğal süreç ve mekanizmaların derinlemesine incelenmesi biyomimetik tasarımda farklı birçok bilim dalı ile interdisipliner bir çalışma sistematiğine zemin oluşturmakta; bu da biyoloji ve mimarlık ortaklığında farklı bir döneme işaret etmektedir.

Doğayı inceleyerek bunu moleküler biyoloji, genetik biyomühendislik alanındaki ilerlemelerle birleştiren Genetik Barselona Projesi, Katalonya Üniversitesi lisansüstü araştırmaları çerçevesinde Alberto Estévez ve ekibi tarafından geliştirilmiş disiplinler arası bir projedir.

Genetik Barselona Projesi kapsamında yapılan biyoişbirlikçi uygulamalardan biri, biyolojik floresan protein üretimi genini ağaçların DNA'sına ekleyerek biyolüminesan bitkilerin üretimidir (Şekil 2.40). Sonuç, zararlı bir atık üretmeyen ve kentlerin daha ekolojik olarak nasıl inşa edilecek ve aydınlatacakları konusunu

sorgulatan, klasik tasarım süreçlerinin tanımını değiştiren bir enerjinin yaratılmasıdır (Estévez, 2014).



şekil 2.40 Genetik Barcelona Projesi, 1. Aşama, 2003-2006 (Geneticarchitectures, 2003)

Mitchell Joachim, Javier Arbona ve Lara Greden tarafından MIT'de geliştirilen Fab Tree Hab biyoışbirlikçi yaklaşımlara bir başka örnektir. Kuramsal bir ekolojik konut öneren bu tasarımda, bir iskelet etrafında yetişen ağağlar ve diğer bitkiler büyüdükçe ev ortaya çıkmaktadır. Fab Tree Hab projesi, kendi tohumlarından byyerek gelişen konutlara dair bir yöntem önerisiyle, kendisini çevreleyen ekosisteme uyum gösterecek ve böylelikle tamamen doğadaki yeşilin bir parçası olabilecektir. Bu yerel konutlar, metabolik akışı düzenleyerek yaşam döngüsüne katkıda bulunur. Ağağlardan yetiştirilen ve byyen evlere dair geliştirilen bu metotta, prefabrike ve CNC ile üretilmiş şekillere aşılanmış olan yaşayan strüktürler paralelinde konutların tamamıyla ekolojik bir topluluğun parçası olmalarını sağlanmaktadır (Myers, 2012).



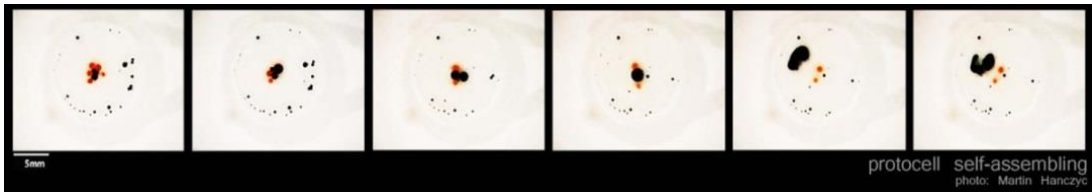
Şekil 2.41 Fab Tree Hab, 2005-.. (Archinode, 2008)

Mitchell Joachim'ın, XXI dergisine verdiği röportajda, Yaşayan Strüktür (Fab Tree Hab) projesi, mimarlık pratiğinde geleneksel tavrın tersine, geçerliliği olmayan, kullanımdan kalkmış ev konseptine dair tasarım çözümlerini yenileriyle değiş-tokuş etmeyi amaçladıklarını dile getirmiştir (Kentlerin Biyolojisi, 2014). Ekosisteme efektif katkılar sağlayan, insan etkilerini ortadan kaldıran, ağaçları işin içine katan ve yeryüzü ortamlarını içeren teknoloji, su ve metabolik akışların simbiyotik sirkülasyonu ve yaşam döngüsünü, kullanımdan atıkların uzaklaştırılmasına kadar düşünen bir projedir (Şekil 2.41).

Mimarlık alanındaki araştırmaların son dönemde sentetik biyolojinin yöntemleri sayesinde farklı bir yöne doğru ilerlediği görülmektedir. Doğayı çevreye daha önce mümkün olmayan bir şekilde entegre edebilmek ve endüstriyel makinelerden farklı işlevler yerine getirebilmek üzere, karmaşık durumlar karşısında dayanıklı, doğaları gereği sağlam ve esnek olduğu gibi, çevresel değişimlere de sürekli olarak cevap verebilen canlı organizmalarla çalışmalar sürmektedir. Bu “yaşayan teknoloji”nin mimari tasarım uygulamalarıyla bütünleştirilmesi, bina dokularının aktif, duyarlı ve uyumlu olduğu şehirlerin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Bu doğrultuda **protosel mimarlık**, gelecekteki sürdürülebilir gelişimin, geleneksel mimari yaklaşım yerine çözümün doğayla etkileşim halinde olan enerjisini kendi üreten çevresindeki kimyasal reaksiyonlara tepki veren ve hareket etme yetisine sahip canlı olmayan ancak yaşayan malzemelerle olabileceği bir yaklaşımın, 21. yüzyılın belirleyici özelliği olacak yepyeni bir teknoloji türüdür. “Yaşayan teknoloji” olarak da adlandırılan protosel, canlı olmadığı halde canlı sistemlerin bazı özelliklerine sahip bir ön hücredir. Protosel mimarlığı, biyoloji ve kimya gibi disiplinlerle kurulan işbirlikleriyle malzeme teknolojilerine odaklanmaktadır. Bu söylem, fizik, kimya ve en çok da sentetik biyoloji sayesinde “canlı-gibi” olarak nitelendirilen “protohücre”ler (ön hücreler) sayesinde malzemeye dair yenilikler üzerinde çalışmaktadır.

Araştırmacılar mimar Rachel Armstrong ve biyolog Martin Hanczyc, “yaşayan” ve “yaşamayanlar” arasındaki farkın ne olduğunu sorgulayan bir araştırma sonucu Protosel’i geliştirmişlerdir. Bu "ön-hücre"ler, canlı hücre gibi davranan, su ile yağın girdiği kimyasal tepkimeyi kullanan ve kimyasal olarak programlanabilir bileşimlerdir (Şekil 2.42). Bunlar, ancak “canlı”ların sahip olduğu, hareket etme, çevrelerini algılayıp değiştirebilme ve hatta birbirleriyle iletişim kurabilme yeteneğine sahiptirler. Protoseller yakıt olarak su ile yağın birbiriyle etkileşiminde doğal olarak bulunan enerjiyi kullanırlar. Bu enerji, protosellerin çevredeki kimyasal ipuçlarını algılamak için kullandıkları iç programlardan herhangi biri seçilerek yönlendirilmektedir. Bütün bu işlemler, biyolojinin bilgi işlem sistemi olan DNA’nın kullanılmasına hiç gerek olmadan gerçekleştirildikleri halde, kimyasal etkileşimler sayesinde kaplamalar, kabuklar ve mikro-yapılar oluşturabilmektedir. Örneğin protoseller su içinde çözünen karbon dioksiti kullanarak, karbonattan oluşan bir kabuk üretebilir ve bu malzeme oluşurken, biyolojik varlıkları andıran, yerel ortama duyarlılık gibi ek özellikler de geliştirebilirler (Mimarinin Geleceği, 2011).



Şekil 2.42 Protocell Self-Assembling / Kendiliğinden birleşme (Bustler, 2014)

Protosellerin özelliklerinin araştırılmasını amaçlayan mimari bir önerme, Venedik kentinin altında yapay kireç taşından oluşan bir resif yetiştirme olasılığı üzerinde durmaktadır. Bu yaklaşım, Venedik'in üzerinde kurulduğu yumuşak delta toprağına batışını yavaşlatmak suretiyle, kentin sürdürülebilir olarak geri kazanılmasına yardımcı olabilir niteliktedir. Rachel Armstrong'a göre (Armstrong, 2009), bu şehri kurtarmak için durağan maddelerin kullanıldığı mimari tarzından vazgeçilmeli ve kendini yenileyen yapılar yapılmalıdır. Armstrong, pek de canlı olmayan ama kendini onarabilen ve aynı zamanda karbon tutabilen bir malzeme olarak protoseli önermektedir.



Şekil 2.43 Venedik şehrini destekleyen sentetik bir resifin görselleri (Dezeen, 2014)

Canlı bir metabolizma gibi yaşayan fakat DNA'sı olmayan bir birim olan protosel, ışıktan uzağı doğru hareket etmeye ve Venedik'in ahşap kazık temellerine yapışarak kalker oluşturmaya programlanmıştır. Ortamda bulunan su ve yağ ile metabolizma kolonize olarak çoğalmakta ve kalker resif oluşması sağlanmaktadır. Bu durum, “buradaki kireç taşı bloğuna protoseller sayesinde yeni özellikler kazandırabilir mi” sorusunu akıllara getirmektedir. Bu doğrultuda, pekala büyüyebilir, kendi kendini onarabilir ve hatta yakın çevresindeki büyük değişikliklere tepki gösterebilir bir resif yaratmak hedeftir (Armstrong, 2009). Nihayetinde oluşan resif kayalıklar Venedik'i mevcut su seviyesi üzerinde temelleriyle birlikte yükselttiği gibi aynı zamanda denizde yaşayan organizmalar için de yeni bir ekoloji kurmuş olmaktadır (Şekil 2.43).

Sentetik biyoloji ve farklı disiplinlerin gücünü tasarımla birleştiren şirketlerden birisi de Ecovative'dir. Eben Bayer ve Gavin McIntyre tarafından 2007 yılında kurulan şirket; tarımsal atık ve mantar miselyumunu birleştirerek yalıtım malzemesi veya tasarım ürünleri üretmektedirler (Şekil 2.44). Mantarlar, gelişim süreçlerinde

miselyum ya da misel olarak bilinen beyazımsı renkte ipliksi filamentler üretirler. Bitki atıklarını tüketen bu yapılar delinmek, pompalanmak, rafine edilmek ve atılmak yerine, büyütülebilir ve geri dönüştürülebilirler.



Şekil 2.44 Misel-bağlı paketlenme malzemesi, oturma birimi ve yalıtım malzemesi (Ecovative, b.t.)

Materyal, iplik benzeri hücrelerden oluşan bir mantar ağının, bitki sapları ve tohum kabuğu gibi tarımsal atıkları sindirdiği bir işlemde yetişir. İşlem, hücreleri kendinden montajlı bir tutkal gibi yapısal bir malzemeye bağlar. Materyale yapışabilme yeteneğiyle sayesinde bu misel denen yapılar oldukça uzun olacak şekilde büyüebilmektedirler. Aynı zamanda, büyüme için su, ışık veya gübre gerekmez ve kullanılan malzeme tüketicilerin arka bahçelerinde aerobik veya anaerobik olarak kompostlanabilir. Bu bitkisel atık ve mantar miseli karışımı maddeyi ile her şeklin yaratılabildiği bir kalıba ekleyip biraz ısıtarak (geriye kalan fungusları öldürmek için) hızlı, kolay ve yenilenebilir bir biyo-malzeme elde edilebilmektedir (Karana ve diğer., 2018).



Şekil 2.45 HI - FI / David Benjamin (American)—The Living – USA, 2014 (Myers, 2012)

Mimar David Benjamin ve stüdyosu The Living ve Ecovative firması tarafından, yeniden kullanılabilir kalıplarda, mısır sapı ve mantar gibi tamamen doğada çözülebilen malzemelerden üretilen 10.000 tuğla ile bir “Hy-Fi” kulesi inşa edilmiştir (Şekil 2.45). Bu süreçte, plastik üretimi için ham madde olarak geri dönüştürülemeyen petrol yerine yenilenebilir şeker kullanılmıştır. The Living stüdyosunun önerdiği yeni yapı kümesi, büyümüş, inşa edilmiş miselyum tuğlalarından oluşmaktadır. Kule, Modern Sanat Müzesi ve MoMA PS1 tarafından her yıl düzenlenen Genç Mimarlar Programı (YAP) kapsamında 2014 yazında sergilenmiştir. 13 metrelik bu kule, yaz sonunda demonte edilerek, tuğlaları yeniden toprağa dönüştürülmüştür (Myers, 2012).

Bu yüzyılın zorluklarından biri mevcut ekonomimizi çevre dostu ve kendi kendine sürdürülebilir bir sisteme dönüştürmektir. Ürün tasarımında miselyum esaslı malzemeler, %100 doğal materyal yetiştirmek için yeni stratejileri araştırmak üzere çok sayıda kurumun işbirliği içerisinde. Miselyumlar, sonrasında çok fazla mimari ve ürün tasarımında kullanılmıştır.

Aynı mantıktan hareketle miselyumların kentsel donatı elemanları için de yeni ve denenebilir bir alternatif olduğu açıktır. Hollandalı bir sanatçı olan Eric Klarenbeek, plastik geri dönüşümünden veya bioplastik filament kullanmaktan bir adım öteye giderek mantar ve miselyumları kullanarak yenilikçi ve sanatsal bir 3D baskı

yöntemi bulmuştur (Şekil 2.46).



Şekil 2.46 Myceliumchair, 2004 (Treehugger, 2013; Pinterest, b.t.)

Stüdyo Klarenbeek ve Dros, 3D tekniği ile yaşayan bir organizmayı basmak için organik substrat ve biyoplastikler kullanmaktadır. Bilim adamları ile birlikte çalışan Klarenbeek, ince bir biyoplastik kaplama ile samandan bir sandalye üretmiştir. Bir çeşit tutkal görevi gören miselyumlar, akıtmak suretiyle enjekte edilerek tüm bu saman parçaları bir araya gelir ve kurur kurulmaz birbirine bağlanan bir çeşit mantar malzemesi elde edilir. Klarenbeek (2018), “Yakın gelecek için samandan ve mantardan yapılmış evler göremesek de, burada kullanılan yöntem kesinlikle merak uyandırıcıdır. Baskılı samanın ekstrüzyon sırasında ısıtılması gerekmediğinden, enerji maliyetlerinden önemli ölçüde tasarruf sağlar. Ayrıca, basılı nesneye artık ihtiyaç duyulmadığında, kolaylıkla kompost edilebilir ve parçalanabilir” demiştir (s.19).

Massey Üniversitesi Yaratıcı Sanatlar Fakültesi'nde de bir yüksek lisans projesi olarak miselyum ve ahşap kaplama malzemesinden üretilen sıfır atık içerikli yeni bir malzeme geliştirilmesine çalışılmıştır (Şekil 2.47).



Şekil 2.47 Pare Sandalye / Sıfır atık kalıbı yapılandırması, 2017 (Catchpoledesign, 2017)

Prototip sandalye miselyum (mantarlar) ve kaplama malzemesi kompoziti, atık üretilmeden büyütülerek karmaşık yüzeyler halinde oluşturulmaktadır (Catchpole, 2017). Ürün tasarımında miselyum esaslı malzemeler, %100 doğal materyal yetiştirmek için yeni stratejileri araştırmak üzere çok sayıda kurumun işbirliği yaptığı bir RTD projesinde miselyumun çevresel ayak izi olmayan malzemelerin geliştirilmesinde kullanımını araştırmaktadır. Mantarlar, çeşitli organik substratlarda misel oluşturur. Spesifik olarak ligno-selülozik substratların; örneğin ahşap, saman, vb. verimli bir şekilde kolonileşmesiyle bilinmektedir. Elde edilen yetiştirilen malzemeler, çeşitli nesne tipolojileri oluşturmak için kullanılmıştır (Şekil 2.48).



Şekil 2.48 Miselyum'un çeşitli nesne tipolojilerinde kullanımı, 2017 (Corpuscoli, b.t.)

Bu projenin bir parçası olarak, elastikten katıya, su emici, su itici, gözenekli ve kompakt olan farklı fiziksel özelliklere sahip miselyum esaslı kompozit malzemelerden oluşan bir paletin geliştirilmesi için çalışılmaktadır. Tasarım odaklı yöntemler ve deneysel çalışmalar ile birleştirilen bilimsel araştırmalar, malzemelerin potansiyelini keşfetmeyi ve miselyumun özelliklerini nasıl geliştirilebileceği konusunda bilgi sağlamaktadır. Amaç, yenilikçi tasarım stratejileri ve ekolojik açıdan sorumlu yeni malzemeler geliştirmek ve bu şekilde sürdürülebilir bir toplumun ortaya çıkmasına katkıda bulunmaktır (Karana ve diğer., 2018).

Biyoloji biliminin bu yüzyıla dair söyleyeceği çok sözünün olduğu geliştirilen projelerden anlaşılmaktadır. Son 10 yılda klonlama, kök hücre, hücre transferi gibi birçok biyolojik temelli pek çok araştırmanın sonuçları şimdiden günlük hayatımızda yer almaya başlamıştır. Aynı zamanda sayısal ve bilişim teknolojilerinde farklı bilgi birikimlerinin oluşmaya başlaması disiplinler arası etkileşimleri artırmış ve farklı bilgi alanlarının ortak ya da benzer araştırma konularını da birleştirmiştir.

Bu bağlamda Alberto Estavez'in yürüttüğü Biowall Systems adlı proje, biyoişbirlikçi tasarım yaklaşımlarının araştırmaya devam ettiğinin göstergesidir (Şekil 2.49). Araştırma, hücre büyümesinin genetik kontrolü sağlanarak yaşayan dokuların aracılığı ile yapı malzemesi üretilmesini incelemektedir. Canlı, büyüyen, yumuşak ve tüylü bir dokunun mimaride kullanılmasıyla tasarımın canlılarla doğrudan iş birliği halinde olmasının sonuçları irdelenmektedir (Estévez, 2014).



Şekil 2.49 Alberto Estavez- Biowall Systems (Estévez, 2014)

Biyoişbirlikçi tasarıma ilişkin çarpıcı çalışmalardan biri de Neri Oxman'ın ipekböceği üzerine yaptığı araştırmalardır. MIT Medya Laboratuvarı'nda Mediated Matter Araştırma grubu tarafından Prof. Fiorenzo Omenetto (TUFTS Üniversitesi) ve Dr. James Weaver (WYSS Enstitüsü, Harvard Üniversitesi) ile birlikte yürütülen araştırmada ipekböceğinin, ipek ipliğinden koza oluşturma yeteneğinden esinlenilmiştir. Birincil yapı, makine ile ipek ipliklerden yapılmış 26 poligon panelden oluşturulmuştur. Oluşturulan pavyonun genel geometrisi, çeşitli yoğunluk dereceleri sağlayan ve iplik atayan bir algoritma kullanılarak yaratılmıştır. İkincil yapı biyolojik bir yazıcı olarak kullanılan ipekböceği tarafından üretilmiştir. Hayatta kalma aşamaları, geometrik yoğunluk, doğal ışık ve ısıdaki değişimler gibi mekânsal ve çevresel koşullardan etkilenen ipekböceklerinin yüzey alanı boyunca farklı ağ ördükleri görülmüştür.

“Silk Pavilion” isimli proje temelde robot dokuma sistemi kullanılarak üretilmiş bir yapıdır. Tasarım ekibi bu projede ipek böceğinin kendi kozasını oluştururken kullandığı malzeme ve örme biçimini esas almıştır. Ağı oluşturan birleşim kısımları ise CNC ile üretilmiş olan 26 çokgen panelden meydana gelmektedir. Pavyonun formu elde edilirken bilgisayar ortamında farklı algoritmalar denenmiştir. Uygulama aşamasında ise 6.500 adet ipek böceğinin bilinçli olarak boş bırakılmış olan liflerin arasını doldurması sağlanmıştır (Şekil 2.50). Bu proje tasarımcı, malzeme mühendisi ve bizzat doğanın iş birliğiyle gerçekleştirilmiş sıradışı bir uygulamadır (Yazıcıoğlu, 2014).



Şekil 2.50 MIT Medya Laboratuvarı , 2013 (Designboom, 2013)

21. yüzyılın bir diğer canlıları aktif kullanan projesi, Avusturyalı Splitterwerk Mimarlık ve uluslararası tasarım firması Arup ortaklığıyla “BIQ House” adı verilen BIQ (Biyolojik Zekâlı Sistem) binasının alglerle kaplı cephesidir (Şekil 2.51). Cephelelerde, içinde canlı agler bulunduran paneller hem gölgeleme elemanı olarak hem de güneşe maruz kaldığı için ısınan su sayesinde iç mekanı ısıtan elemanlar olarak kullanılmaktadır. Fotosentez süresince her 7 saatte bir kütleleri iki katına çıkmaktadır. Çoğaldıklarında panellerden alınarak, güç kaynağı olan metanı üretmek

amacıyla biyokütle santraline aktarılmaktadırlar. Alglerden oluşan paneller sayesinde binanın enerji ihtiyacı bütünüyle karşılanırken karbon salımını da yılda yaklaşık altı ton azaltılmaktadır (Lofgren, 2013).



Şekil 2.51 BIQ – Biyoreaktör Cepheli Bina ve Panel Sistem Detayı, Almanya, 2013 (Faade5, 2013)

Tasarım firması Arup'un Avrupa araştırma başkanı olan ve BIQ evinin yöneticiliğini yürüten Yardımcı Direktör Dr.-Ing. Jan Wurm, bu yeni teknolojiyi "biyo-yararlanma" olarak tanımlamaktadır. Biyoreaktör cephe olarak adlandırdığı sistemin çalışma prensibi için su, karbon, ısı ve hatta besin gibi farklı akış ve döngülerin bir araya geldiğini böylece endüstriyel bir simbiyoz yaratıldığını belirtmektedir. Alg biyoreaktör cephelere sahip bu binanın 21. yüzyıl mimarlık pratiği için yeni bir sürecin başlangıcı mı yoksa tekil bir örnek mi olduğu yoğun biçimde tartışılmaktadır.

Aynı şekilde biyoişbirlikçi yaklaşımlara örnek olarak, Londra Kraliyet Sanat Koleji'nde araştırmacı olarak da çalışan Bastian Beyer'in bir projesinde, biyolojik tekstil ürünlerini, sürdürülebilir yapı malzemeleri olarak kullanma potansiyeli araştırılmaktadır. Beyer, geleneksel örgü tekniklerini sıradışı kumaşlara uygulamak için biyolojik prosesler kullanmıştır (Şekil 2.52). Deney, örülmüş yapının lifi üzerinde kalsit tabakası oluşturmak için sporosarcina pasteurii adı verilen bir bakterinin kullanılarak sert bir yapıya dönüştürülmüş el yapımı, yumuşak bir tekstil sütunu oluşturmaktır.

Beyer, farklı örgü kalıpları üzerinde deney yaparak, bireysel kalıpların farklı yapısal özelliklerinin biyokalsifikasyon işleminde nasıl çalıştığını test etmek için yoğunluğu ve yapıyı ve bunların da son yapının performansını nasıl tanımladığını test etmiştir.



Şekil 2.52 “Column” adı verilen konstrüktif tekstil elemanı, 2019 (Dezeen, 2019)

Örme yapı, bir biyoreaktör içindeki bir sulama işlemi yoluyla bakteriyel bir çözelti ile püskürtülmüştür. Mikroorganizmalar, mikroskobik kalsit kristalleri biriktirerek örme formun içyapısını dönüştürür. Tasarımcılar, ortaya çıkan malzemenin mekansal bölücüler, gölgeleme özellikleri, donatı ve potansiyel olarak yapısal çatı veya duvar sistemleri olarak mimari tasarımda kullanılabileceğini düşünmektedirler. Malzeme, doğal elyaflara dayandığı ve doğal bir işlemle katılaştırıldığı için petrokimyasallardan türetilen kompozit malzemelere göre hem çevre dostu, hem de sürdürülebilir alternatiftir.

Bu noktada, sürdürülebilir üretim, çevre koruyucu ya da geri dönüştürücü malzemelerle, temiz teknolojiler kullanarak, mal ve hizmet süreçleri oluşturarak,

geleceğe yönelik üretim sistemleri yaratılması gerekmektedir. Aslında, sürdürülebilir üretim kavramının daha gelişmiş ve daha ayrıntılı bir boyutu, “çevre dostu üretim” kavramıdır.

İspanya'nın Barselona kentinde bulunan Katalonya Politeknik Üniversitesi (UPC) Yapısal Teknoloji Grubu'ndaki araştırmacılar, üzerinde belirli mikroorganizma, mantar, liken ve yosun familyaları gibi canlıların büyümesi ve gelişmesi için doğal bir biyolojik destek olarak işlev görebilecek bir organik beton hakkında çalışmaktadırlar (Şekil 2.53).

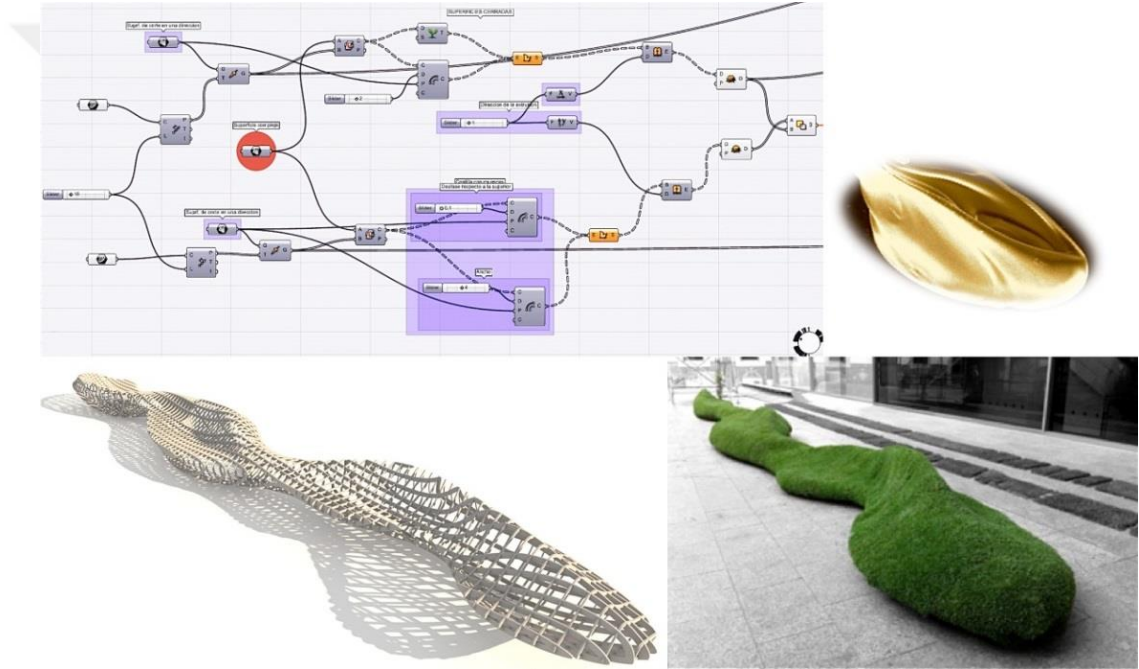


Şekil 2.53 Organik beton (Urbangardensweb, 2013)



Şekil 2.54 Organik betonun cephe kullanımı beton (Urbangardensweb, 2013)

Akdeniz iklimiyle uyumlu malzeme, diğer benzer yapı çözümlerine göre çevresel, termal ve estetik avantajlar sunmaktadır (Şekil 2.54). Malzeme, binalarda termal konforu artırmakta ve atmosferik CO₂ seviyesini düşürmeye yardımcı olmaktadır. Fikri patent altına alan ekip, bu tür organizmaların beton üzerinde daha hızlı büyümesini teşvik etmenin en iyi yolunu araştırırken; doğal kolonizasyon sürecini hızlandırmayı başararak, yüzeyi bir yıldan daha kısa sürede istenen görünüme getirmeyi hedeflemektedir (Liken, yosun ve liken yapı malzemeleri inşa etmek için biyolojik beton, 2012). Aynı mantıktan hareketle kentsel mobilya tasarımları da mümkündür.



Şekil 2.55 Biodigital Barcelona Chair / Biyodijital Barselona Sandalyesi, 2010 (Estévez, 2014)

Yine Katalonya Uluslararası Üniversitesi (UIC-Barcelona) 'nden mimar ve akademisyen Alberto Estévez ve ekibi tarafından geliştirilmiş “Barcelona Chair”, biyo-yapının taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen dijital çizim (sağ üstte) ; CNC makinesi ile üretilmiş ve gerçek çim ile kaplanmıştır (Şekil 2.55).

Yapı, biyo-öğrenme yolu ile yapısal, biçimsel ve süreç verimliliği konuları dahil olmak üzere parametrik ve üretken yazılımlı bir tasarımın ardından, dijital mimari laboratuvarında bir CNC makinesi ile üretilmiştir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş

malzemelerin kullanımı, mimari strüktürün oluşturulma süreci ve biçimi ile sürdürülebilir biyotasarım örnekleri arasında yerini almıştır (Estévez, 2014).

Biyotasarım konusunda ve canlılarla işbirlikçi projeler üzerine Türkiye’de henüz sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bunlardan en bilineni, Dokuz Eylül ve Ege Üniversiteleri ortaklığında kurulmuş akademik bir oluşum olan Türkiye Biyotasarım Takımı’nın çalışmalarıdır. Bu doğrultuda farklı canlılarla yaptıkları çalışmalar içinden bu tez çalışmasının konusuyla da ilişkilenen ve bakterilerle işbirliği içinde gerçekleştirilmiş Çocuk Oyun Alanı tasarımına 3.Bölüm’de detaylı olarak değinilecektir (Biodesignteam, 2015).

2.3 21. Doğa Esinlenmeli Mimarlığa Dair Literatürdeki Sınıflandırmalar

Mimarlık-doğa ilişkisine bakıldığında akla gelen ilk isimlerden Janine Benyus’a göre, bilim ve teknoloji aracılığıyla insanoğlunun çözmeye çalıştığı birçok problem doğada çözülmüş durumdadır ve doğa, tüm ekosistemin devam edebilmesi için gereken bütün bilgi ve birikime sahiptir.

20. yüzyıl, özellikle de 2. Dünya Savaşı sonrasında dünyadaki dengelerin oturmaya başlaması ile iyileşen ekonomik durum, insanlardaki üretim ve tüketim algısındaki değişime ve çevresel problemlerin görece fazlalaşmasına neden olmuştur. 21. yüzyıla gelindiğinde ise bu problemlerin yol açtığı sorunlara karşı tedbir almak adına biyomimetik biliminin çalışma prensibini yansıtan argümanlar önem kazanmıştır (Benyus, 1997). Benyus’un 1997 yılında yazdığı ‘Biomimicry: Innovation Inspired by Nature’ başlıklı kitabında ortaya koyduğu doğanın ilkeleri şunlardır:

- Doğa sadece ihtiyaç duyduğu kadar enerji kullanır.
- Doğa tüm materyalleri geri dönüştürür. Birinin atığı diğerinin hazinesidir.
- Doğa çeşitliliği destekler. Bunun getirdiği karmaşa ve gürültüye karşı

ayakta durabilir ve onlara dayanıklıdır.

- Doğa maksimize etmez, optimize eder. Giren-Çıkan arasında denge kurar. Asla aşırıya kaçmaz.
- Doğa, işbirliğini ve ortak çalışmayı ödüllendirir.
- Doğa bilgi üzerine çalışır, bilgi ile ilerler/konuşur. Gönder/al/cevap ver mekanizmaları vardır.
- Doğa, sadece canlılar için güvenli olan kimyasalları ve materyalleri kullanır.
- Doğa, halihazırda var olan ve bol bulunan kaynakları kullanır, nadir kaynakları sadece tutumlu bir şekilde bünyesinde tutar.
- Doğa, yerleşim yerine ayak uydurur ve cevap verir. Ancak ve ancak, çevredeki bilginin kullanımı ve uygun cevabın verilmesiyle hayatta kalınabilir (adaptasyon yeteneği).
- Doğa, işlev ve biçimi ilişkilendirir. Böylece minimum enerji ve materyalle maksimum çalışır.

Bu ilkeler, günümüzde teknolojinin ve bilimin gelişmesi ile birlikte daha fazla önem arz etmektedir. Artan imkanların ve araştırmaların daha kolay yapıyor olmasının verdiği fırsatlarla, mimar ve tasarımcılar daha etkili ve sürdürülebilir fikirler için doğadan daha derin bilgiler elde etmeye çalışmaktadır. Dolayısıyla biyomimetik biliminin, mimaride bir tasarım stratejisi olarak kullanılması, yapılı ve doğal çevrenin sürdürülebilirliğini artıracak bir fırsat olarak görülmektedir. Günümüz tasarım stratejilerin kullanılmasında biyomimikri ilkeleri, tasarımcıların doğayı daha iyi kavramaları açısından önemlidir. “Doğa nasıl çalışır”, “doğa esin kaynağı olarak nasıl kullanılır” gibi sorular, günümüzde yaşanan sorunların çözümlenmesinde ileriye dönük sürdürülebilir tasarım stratejileri geliştirmeyi sağlar. Benyus’un kitabında da dediği gibi, doğanın yaşam koşulları karşısında nasıl ayakta kaldığı

irdelenir ve doğanın çalışma mantığı kavranmaya çalışılırsa, gelecek adına sürdürülebilir çevrelerde sürdürülebilir tasarımlar yapmak mümkün olacaktır (J. M. Benyus, 1997).

Doğa esinlenmeli mimarlık yöntemleri bağlamında doğa, model olarak, ölçü olarak ve akıl hocası olarak kullanılabilir ve mimarlıkta 3 temel uygulama alanı bulabilir (Benyus, 1997) :

- Kendi kendine ‘birleşebilen’ ve kendi kendini onarabilen malzemelerin daha dayanımlı ve uzun ömürlü olarak geliştirilmesinde
- Yapılı çevre ve binaların iklimlendirilmesinde doğal süreç ve kuvvetlerin kullanılmasında
- Atıkların tekrar kullanılmasına imkân veren, kaynakları tüketerek değil kaynak üreterek enerji korunumlu yapılı çevrelerin oluşturulmasında

Benyus bu doğrultuda biyomimikri kavramını daha detaylı ele alarak, doğadan öğrenme sonucu gerçekleşen taklidi **3 düzeyde açıklamıştır:**

1. Organizma Düzeyinde Esinlenme
2. Davranış Düzeyinde Esinlenme
3. Ekosistem Düzeyinde Esinlenme

Organizma düzeyi, bir organizmanın göze çarpan formu, bileşenleri, malzemesi gibi morfolojik özelliklerinin, kısacası organizmanın doğal biçimin taklit edilmesidir. Davranış düzeyinde esinlenme, bir canlının çevresiyle nasıl ilişki kurduğunu ve çevresi içerisinde nasıl davrandığını araştırarak bunun taklit edilmesidir. Ekosistem düzeyinde esinlenme ise diğer iki düzeyi de içinde barındırarak sürdürülebilir çevreler yaratabilmek için bütüncül bir ekosistem yaratmayı amaçlamaktadır (Benyus, 1997).

2.4 21. Yüzyılın Biyomimari / Tasarım Örnekleri İçin Bir Sınıflandırma Denemesi

Günümüzün doğa esinlenmeli tasarım arayışları, sürdürülebilir mimarlık anlayışlarıyla ilişkili olarak ve yeni bir sürecin başlangıcı olarak değerlendirilmelidir. Mimarlık pratiği için sürdürülebilirlik, 21. yüzyıl öncesinde de ele alınan bir konudur. Ancak 1992 Rio De Janerio’da gerçekleşen Birleşmiş Milletler, Sürdürülebilir Gelişme Konferansı’ndan itibaren konu, küresel ölçekte önem kazanmıştır. Mimarlık disiplini de bu yeni gelişme anlayışına uygun bir söylem oluşturma arayışına girmiştir. Günümüzde “enerji ve çevre dostu tasarım” kapsamında LEED, BREEAM gibi sertifikalar ile kontrol ve denetleme altında tutulan sürdürülebilir mimari yaklaşımlar, farklı bakış açıları ve interdisipliner ilişkiler ile çeşitlenmiştir. 20. yüzyıl içinde teknolojinin mimari tasarıma etkisi oldukça fazla olmasına rağmen 21. yüzyılda yaşanan teknolojik gelişmeler, mekanları öncekine oranla çok daha büyük bir hızla değiştirmektedir. Çağdaş mimarlık dünyasında doğa temelli bilgi, bu hızla birlikte interdisipliner çalışma alanında başvuru en önemli kaynaklarından biri haline gelmiş ve böylece biyomimetik tasarım mimarlık alanında gelişmeye başlayan bir yöntem olmaya başlamıştır. Steve Jobs “21. yüzyılın en büyük yeniliğinin biyoloji ve teknolojinin kesişimi olduğunu düşünüyorum. Yeni bir çağ başlıyor.” demiştir. Önceki dönemin doğadan öğrenme yönteminin biçim değiştirerek çok farklı bir konuma geldiği görülmektedir.

21.yüzyılda mimarlık-doğa ilişkisinde teknolojinin etkisi ve biyoteknolojik araştırmalar çerçevesinde gündeme gelen yaklaşım, **biyoişbirliği**dir. Biyo-işbirliğinde, canlıyı ve doğayı inceleyip, ondan esinlenmenin ötesine geçen bir anlayıştan söz edilebilir. 21.yüzyıl öncesinde sadece form/biçim ve canlıların davranışları/biyolojik süreçlerden esinlenilirken, 21.yüzyılda özellikle biyoloji tabanlı teknolojilerin araştırılması ve geliştirilmesine bağlı olarak, önceki örneklerden farklılaşarak gerçek anlamda biyolojinin yapı ile iç içe geçtiği hibrid sentezler ortaya çıkmıştır. 21. yüzyılda ekolojik problemlerin de artmasıyla, canlı organizmaların oluşum süreçlerini ve çalışma prensiplerini formüle eden rasyonel bilgilerin tasarım bilgisine dönüştürülerek form-strüktür-malzeme ilişkisini irdeleyen

kompleks çalışmalar devam etmektedir.

Bu bağlamda 21.yüzyılın canlıları da bir tasarım parametresi olarak ele alan yeni ve farklı araştırmaları düşünüldüğünde; doğa esinlenmeli tasarım yaklaşımlarını yeniden değerlendirmek ve **mimarlık-doğa ilişkisinde biyolojiyi ve biyo esinlenmeyi kullanan örnekleri üç ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür:**

1. Biçim üretmeye yönelik biyomimari / tasarım örnekleri
2. Canlı davranışlarını ya da biyolojik süreçleri temel alan biyomimari / tasarım örnekleri
3. Biyoişbirlikçi mimari / tasarım örnekleri

2.4.1 Biçim Üretmeye Yönelik Biyomimari / Tasarım Örnekleri

Tarihsel süreç boyunca doğa esinlenmeli tasarım yaklaşımları arasında en sık başvurulan yöntem biçimle analogik bir ilişki kurulması olmuştur. Bu doğrultuda mimarlık tarihi, biçim üretmeye yönelik biyomimari ya da tasarım örneklerinin zengin bir birikimini taşımaktadır.

21. yüzyıl doğa esinlenmeli tasarım yaklaşımları arasında biçim üretmeye yönelik uygulamalar, Selçuk Arslan ve Gönenç Sorguç'a göre iki şekilde ele alınabilir: Birincisi doğadaki biçim ve strüktürlerin bir analogi yoluyla ile yapıya aktarılması, diğeri malzeme, biçim, strüktür ve oluşum sürecinin bilgisayar teknolojileri aracılığıyla, hesaplamalı yöntem ve deneysel veriler kullanılarak mimari biçime dönüştürülmesidir (Selçuk Arslan ve Gönenç Sorguç, 2007).

Bölüm 2.2'de detayları verilen biçim üretmeye yönelik biyomimari / tasarım örnekleri incelendiğinde, 20. yüzyılın ilk yarısına kadar tasarımcıların ilk yöntemi zaten benimsediklerini ve kullandıklarını söylemek mümkündür. 20. yüzyılın son yarısına gelindiğinde ise mimarlık ve tasarım alanında biyolojik öğeleri form olarak

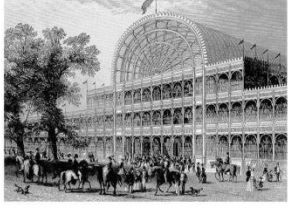
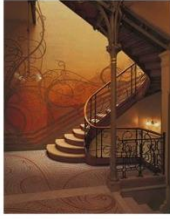
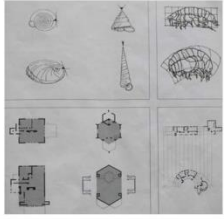
ele alan uygulamaların bilgisayar destekli tasarım yöntemlerini sıklıkla kullandığını; farklı disiplinlerden de faydalanarak, zaman/mekan, biçim/işlev, sanal/gerçek arasındaki ilişkileri radikal olarak sorguladıkları görülmektedir (Tablo 2.1 ve Tablo 2.2).

Bu örnekler de kendi içinde 2 kategoriye ayrılabilir:

- Biçimsel benzerliğin ön planda olduğu örnekler
- Biçimsel özelliklerinin soyut bir yaklaşımla ele alınarak strüktürel amaçlarla kullanıldığı örnekler

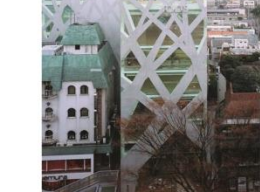
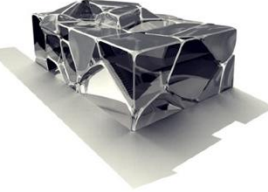
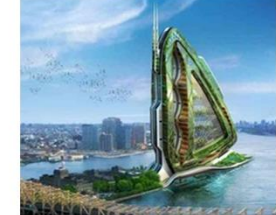


Tablo 2.1 Biçim Üretmeye Yönelik Biyomimari / Tasarım Örnekleri 1

		
Leonardo Da Vinci / Mekanik kanat mekanizmaları Yıl : 1452-1519 E. K. : Ejderha sineği	Gaudi / Sagrada Familia Kilisesi Yıl : (1882-) E. K. : İskelet sistemleri	Joseph Paxton / Crystal Palace Yıl : 1851 E. K. : Nilüfer çiçeği
 	 	
Victor Horta / Tassel Oteli Yıl : 1894 E. K. : Çiçek gibi eğrisel ve organik formlar	Gustave Eiffel / Eiffel Kulesi Yıl : 1889 E. K. : Uyluk kemiğinin anatomik yapısı	Frank Lloyd Wright / Farklı ev planları Yıl : 1867 - 1959 E. K. : Deniz kabuğu
 	 	
Frank Lloyd Wright / Johnson Wax Binası Yıl : 1939 E. K. : Su zambağının yaprakları	B. Fuller / Jeodezik Kubbe Yıl : 1967 E.K. : Arı gözü, bal peteği, ışınlar, karahindiba, C60 atomu	Frei Otto / Münih Olimpiyat Stadyumu Yıl : 1972 E. K. : Örümcek ağı
		
Kisho Kurokawa / Nagakin Kapsül Tower Yıl : 1972 E. K. : Hücre sistemi	Nicholas Grimshaw ve ortakları / International Terminal Waterloo Yıl : 1993 E. K. : Pullu karıncayiyen	Santiago Calatrava / Palau De Les Arts Reina Sofia (Opera House) Yıl : 1998 E. K. : Gözün anatomik yapısı

E. K. : Esin Kaynağı

Tablo 2.2 Biçim Üretmeye Yönelik Biyomimari / Tasarım Örnekleri 2

	 	
Jonh Frazer / Interactivator Yıl : 1995 E. K. : Genetik üreme süreci	John M. Johansen / Moleküler Kurgulu Ev Yıl : 1998 E. K. : Sanal ortamda genetik bilgiyi taşıyan "tohumlar"	Greg Lynn / Embryological House, Yıl : 1997-2002 E. K. : Genetik üreme süreci
		
Michael Wilford ve Russell Johnson / Esplanade - Theatres on the Bay Yıl : 2002 E. K. : Durian meyvesi	Peter Cook, Colin Fournier / Graz sanat müzesi Yıl : 2003 E. K. : Damla formu	Toyo Ito / Tod's Omotesando Building Yıl : 2003 E. K. : Ağaç strüktürü
		
Peddle Throp & Walker Mimarlık / Su Küpü Binası Yıl : 2003 E. K. : Su molekül yapısı	Shanghai Institute of Arc. Design & Research / Qizhong Stadyumu Yıl : 2005 E. K. : Şakayık çiçeği	Kokkugia / Parachute Pavillion Yıl : 2005 E. K. : Fraktallar
		
Zaha Hadid / Kaohsiung Ulusal Sanatlar Merkezi Yıl : 2007 E. K. : Voronoi diyagramı / hücre modeli	Herzog & de Meuron / Beijing Ulusal Stadyumu Yıl : 2008 E. K. : Kuş yuvası	Vincent Callebaut Mimarlık / The Dragonfly Yıl : 2009 E. K. : Yusufçuk böceği kanatları

E. K. : Esin Kaynağı

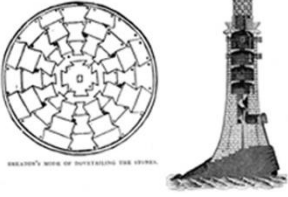
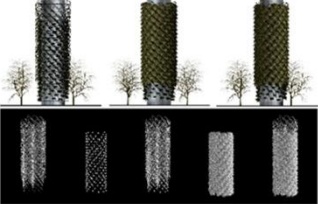
2.4.2 Canlı Davranışlarını ve Biyolojik Süreçleri Temel Alan Biyomimari / Tasarım Örnekleri

Doğa esinlenmeli yaklaşımlardan canlı davranışlarından ve biyolojik süreçlerden ilham alan örnekler geniş ölçekte çevresiyle nasıl bir ilişkiye kurduğu ve tasarımsal olarak hangi davranışı sergilediği ile ilgilidir. Bölüm 2.2’de verilen örnekler, neye benzediği ve neden yapıldığından ziyade, doğadan hangi yönüyle ilham aldığı, nasıl yapıldığı (yapım), nasıl çalıştığı (proses) ya da neler yapabildiği (işlev) ile ilgilidir. Dolayısıyla amaç sadece biçimsel esinlenme değil, bu biçimleri yönlendiren, kontrol eden, oluşturan kuralları ve fonksiyonları inceleyip mimariye aktaran tasarım adımlarından farklı kanallar aracılığıyla yararlanmaktır. Bu örnekler de kendi içinde 3 kategoriye ayrılabilir:

- Sadece canlı davranışlarından esinlenen tasarımlar
- Canlının hem davranışını hem biçimini esas alan tasarımlar
- Canlıların biyolojik büyüme/üreme/gelişme süreçlerini modelleyerek biçime dönüştüren tasarımlar

Özellikle 21. Yüzyılda önem kazanan bu tasarım yaklaşımı daha sürdürülebilir ve sağlıklı çevreler yaratmak açısından önemli bulunmuştur. Doğayı ilham alan tasarımlarda canlı ya da cansız varlıklardan farklı seviyelerde ve şekillerde yararlanılmaktadır. Bir canlının davranışının tamamının ya da bir kısmından ilham alınarak, bu bilgilerin yapılı çevreye ya da bir yapının tasarımına ilham olması ile üretilen uygulanmış örneklerin sayısı çok fazla değildir. Bu anlayışın yanında doğadaki canlının yaşadığı ortama önem veren, bu doğal ortamı koruma esasına dayalı ekolojik temelli bir tasarım anlayışı da beraberinde gelişmeye başlamıştır. Doğada gözlemlenen oluşumların malzeme, enerji korunumu, hafiflik ve bu hafifliğin yanı sıra sahip oldukları dayanıklılık pek çok mimar ve mühendise esin kaynağı olmuştur (Tablo 2.3).

Tablo 2.3 Canlı Davranışlarını ve Biyolojik Süreçleri Temel Alan Biyomimari / Tasarım Örnekleri

		
John Smeaton / Smeaton's Eddystone Lighthouse Yıl : 1759 E. K.: Ağacın büyüme prensibi	Mick Pearce / Eastgate Merkezi Yıl : 1996 E. K. : Termit kulelerindeki doğal havalandırma prensibi	Mitchell Joachim / MATscape Yıl : 2006 E. K. : Canlılar arasındaki simbiyotik yaşam felsefesi
		
DesignInc Melbourne ve Mick Pearce / Council House 2 Yıl : 2006 E. K. : Termit kulelerindeki doğal havalandırma prensibi	Enric Ruiz Geli / Media-TIC Binası Yıl : 2009 E. K. : Canlılar ait nefes alma ve terleme gibi fizyolojik davranışlar	Dennis Dollens / BioTower Yıl : 2009 E. K. : Tohumdaki ya da bitkideki büyüme
		
Winnipeg ve Patkau Mimarlık / Plywood on Ice Yıl : 2011 E. K.: Buffaloaların toplanma biçimleri	Matthew Parkes / Namibya Üniversitesi Hidroloji Binası Yıl : 2011 E. K.: Çöl böceğinin sisteki suyu yakalama özelliği	Influx Studio ve ShiftBoston / Boston Treepods Yıl : 2011 E. K.: Ağaçların karbon filtreleme özelliği

E. K. : Esin Kaynağı

2.4.3 Biyoışbirlikçi Mimari / Tasarım Örnekleri

Mimarlık-doğa etkileşimi son 20 yılda farklı bir yön kazanmış olup, doğadan, canlılardan ve ona ilişkin süreçlerden esinlenmenin ötesine giden, canlıların tasarımında birebir kullanıldığı, canlılar ile biyoışbirliği içerisinde kurgulanmış denemeler yapılmaktadır.

Henüz biyolojik öğelerle mimari yapıları birleştirme veya uygulama tasarım aşamasındadır. Bu anlamda, son dönem ekoloji temelli mimari örneklerde, günümüz yapım ve malzeme teknolojilerindeki ilerlemeler ve biyomimetik çalışmalar sayesinde, her ne kadar yoğunluk bina kabuğu ve çeşitli cephe ve kaplama malzemeleri düzeyinde de olsa, çevre şartlarına tepki veren akıllı yüzeyler, çevreye duyarlı geri dönüşebilen sürdürülebilir biyomalzemeler, tasarlanan mimari yapının biçim ve strüktürünün oluşumunda canlıların kullanılması, doğa esinlenmeli tasarım yaklaşımlarının evrimine ilişkin bir çıkarım yapabilmemizi sağlar (Tablo 2.4). Bu bağlamda, bölüm 2.2’de verilen biyoışbirlikçi örnekler değerlendirildiğinde, canlıların tasarımda aldığı roller şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Tasarımın bir parçasını oluşturma
- Cephe elemanı olma
- Malzeme üretimi
- Strüktür elemanı olma

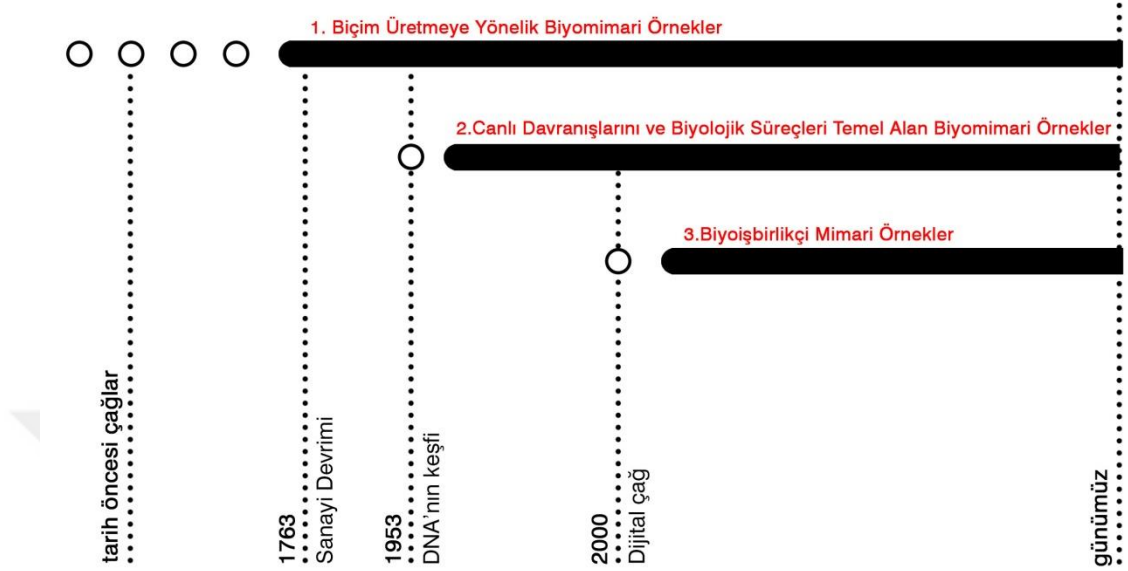
Tablo 2.4 Biyoişbirlikçi Mimari / Tasarım Örnekleri

		
Alberto Estévez / 1. Aşama Genetik Barcelona Projesi, Yıl : 2003-2006 İ. C. : Biyolojik floresan protein üretimi geni	Alberto Estavez / Biowall Systems Yıl : 2007-2010 İ. C. : Canlı doku	Mitchell Joachim / Fab Tree Hab Yıl : (2005-...) İ. C. : Ağaç
		
Katalonya Politeknik Üniversitesi / Organik Beton Yıl : 2005 İ. C. : Bakteri	Rachel Armstrong & Martin Hanczyc / Venedik'te sentetik bir resif çalışması Yıl : (2009-...) İ. C. : Protosel / Ön hücre	Neri Oxman / Silk Pavilion Yıl : 2013 İ. C. : İpekböceği
		
Splitterwerk Mimarlık & Arup / BIQ House Yıl : 2013 İ. C. : Algler	David Benjamin / HI - FI Yıl : 2014 İ. C. : Miselyum	Türkiye Biyotasarım Takımı / Çocuk Oyun Alanı Yıl : 2015 İ. C. : Bakteri

İ. C. : İşbirlikçi Canlı

2.5 Bölüm Sonucu

Tablo 2.5 Tarihsel süreçte biyomimari/tasarım kategorileri



Tablo 2.5'te görüldüğü gibi, yukarıda 3 ana kategori altında ele alınan doğa esinlenmeli yaklaşımlar, tarihsel süreçte bilimsel ve teknolojik gelişmelerle yakından ilişkilidir. Doğa esinlenmeli yaklaşımlar içinde, form üretmeye yönelik biyo-mimari ve tasarım yaklaşımlarının, ele alınış biçimi farklı olsa da, tarihin ilk dönemlerinden günümüze dek varlığını sürdürdüğünü söylemek mümkündür. Sanayi Devrimi sonrasında, mimarlık ve bilimsel araştırmalar arasında, yeni buluşların ve teknolojilerin tetiklediği farklı bir ilişki biçimi gelişmiştir. Özellikle 20.yüzyılın ortalarında DNA'nın keşfi, klonlama, kök hücre gibi genetik alanındaki devrim niteliğindeki keşifler, disiplinlerarası ilişkileri geliştirmiş; daha sürdürülebilir ve sağlıklı çevreler yaratmak kaygısıyla biçimsel esinlenmeden çok bu biçimleri yönlendiren, kontrol eden, oluşturan kuralları ve fonksiyonları inceleyip mimariye aktaran tasarım anlayışları gelişmiştir. Bu doğrultuda ikinci kategoride ele alınan, canlı davranışlarından ve biyolojik süreçlerden ilham alan örneklerin ortaya çıkmış olduğu görülmektedir.

21.yüzyıl'a gelindiğinde ise dijital ve teknolojik çağın başlaması ile mimarlık ve tasarım dünyasının doğayla kurduğu ilişki biçimleri değişmiştir. Paralelinde, yeni ihtiyaçlara cevap arayışı ile, canlıların tasarımda birebir kullanıldığı, canlılar ile biyoişbirliği içerisinde kurgulanmış denemeler, doğadan esinlenmenin alışlagelmiş tavrından öteye giden bir yeni yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Sürdürülebilirlik kavramının da ön plana çıktığı günümüzde biyoişbirlikçi yaklaşımların incelendiği çalışmaların çok değerli olduğu ve araştırılmaya değer olduğu görülmektedir. Buradan hareketle 3. bölümde biyoişbirlikçi yaklaşımlara bir örnek olarak bakteriyel biyokalsifikasyon süreci ve tasarım alanında kullanılma potansiyelleri incelenecektir.



BÖLÜM ÜÇ

BİYOİŞBİRLİKÇİ BİR YAKLAŞIM OLARAK BAKTERİYEL BİYOKALSİFİKASYON SÜRECİNİN MİMARLIK ALANINDA KULLANIM POTANSİYELLERİ

Son dönemde biyomühendislik ve biyoteknoloji alanlarındaki gelişmeler, mimarlık ve diğer mühendislik alanlarıyla işbirliği içinde geliştirilmiş tasarım ürünlerini gündeme getirmiş; yeni yüzyılın biyomühendislik araştırmaları, mimarlık ve tüm tasarım alanları için farklı bir dönem açmıştır. Ancak hala, biyoloji, mimarlık ve mühendislik disiplinlerinin birlikteliğinde gelişen bir alan içinde, canlı organizmaların kullanıldığı, biyoışbirlikçi tasarım yaklaşımlarını içeren çalışmalar az sayıdadır. Bu noktada, bakteriyel biyokalsifikasyon, yani CaCO_3 çöktürülmesi ile kum, toprak gibi yapıların sertleşmesini sağlayan bazı bakteri türlerinin mimarlık ya da tasarım alanında kullanım potansiyeli dikkat çekici ve ümit vaadedici görünmektedir. Bakteriyel biyokalsifikasyon olayı, yaklaşık 20 yıldır bilim insanlarının araştırma konusu haline gelmiştir. Mimarlık ve tasarım alanlarının yanında mühendislik, ekoloji ve geoteknik alanlarında da çatlak onarımı, endüstriyel atıkların minimize edilmesi, yapısal mukavemet için geçirgenliğin azaltılması ve zemin iyileştirilmesi gibi bir çok alanda mevcut çalışmalar yapıldığı gibi ve yapılmaya da devam edilmektedir.

3.1 Bakteriyel Biyokalsifikasyon

Biyotasarım mimari yapıların mühendislik yaklaşımıyla üretilmesini ve bunun için doğadan ilham alınmasını temel alır. Biyotasarımda, doğada var olan biyolojik süreçler kullanılarak, problemlerin çözümüne doğal bakış açıları getirilmektedir ve bununla birlikte sürdürülebilir çevreye duyarlı tasarım ürünlerini üretmek amaçlanmaktadır.

Günümüzde yapılı çevre büyük oranda betonarme yapılardan oluşmaktadır. Bu yapılı çevrenin oluşumunda etkin rol oynayan çimento sanayii, hammadde son ürüne kadar, tüm üretim süreçlerinde çevresel bir kirleticidir. Beton, yapısı gereği

birçok kimyasalı içeren ve çevreye zarar veren süreçler sonucunda elde edilmektedir. Ayrıca çimento fabrikalarının neden olduğu gaz emisyonları, sadece çevreyi kirletmekle kalmayıp, alerjiden ölüme kadar uzanan geniş bir yelpazede insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Çimento fabrikaları enerjilerini genellikle kömürden karşıladıkları için, enerji açısından çok fazla verimli olmadığı gibi çevre dostu da değildir. Dünya Kömür Enstitüsü'nün verilerine göre 1 ton çimento üretmek için 200 kg kömür tüketilmektedir (worldcoal.org, 2019). Bu değer karbon salımının ve sürdürülebilirliğin bu derece önemli olduğu günümüz koşullarında göz ardı edilemeyecek kadar yüksek bir orandır. Ayrıca kömür kullanımındaki fabrika emisyonları sonucunda meydana gelen hava kirliliği; küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi, çevresel flora habitatının zarar görmesi ve biyoçeşitliliğin azalmasına veya yok olmasına neden olabilmektedir (Türkkan, 2015).

Üretim sürecinin yanı sıra kullanım sürecinde de betonun insan sağlığı üzerine etkileri tartışılmaktadır. Bu doğrultuda, günümüzde üzerinde en çok çalışılan konulardan bir tanesi sürdürülebilir yapı malzemeleridir. Petrol türevli malzemelerin aksine, biyoteknoloji ve mühendislik yaklaşımının kullanıldığı biyokalsifikasyonla üretim sürecinde, minimum enerji, minimum çevresel hasar, sıfır karbon ayak izi ve maksimum verim prensibiyle çalışılmaktadır (Bailey ve Ollis, 1986).

Bu doğrultuda; doğa dostu süreçlerin kullanılması, çevre için fabrika atık sisteminin aktif hale getirilerek atıkların minimize edilmesi, çalışan sağlığının korunması çözümler arasındadır. Bu çözümlerden son ikisi kesin sonuç veremeyebilir, ayrıca işveren açısından ekstra maliyet gerektirir ve sürekli bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyar. Bu nedenle çevre dostu yapı malzemesi ve ürünleri önem kazanmakta, ilk maddeyi kapsayan biyokalsifikasyon süreçlerinin önemi artmakta; herhangi bir gaz salımına neden olmadığından biyokalsifikasyon süreci, yenilikçi biyotasarım ürünleri geliştirmek anlamında potansiyel taşımaktadır.

Kalsiyum karbonat (kalsit), halk dilinde kireç taşı olarak da geçen, bileşik formülü CaCO_3 olan bir tür kimyasal bileşiktir. CaCO_3 yeryüzünde en yaygın bulunan en bilindik minerallerden birisidir. Yerkabuğunun ağırlığının %4'ünü

oluşturan kalsit, denizde, tatlı suda ve karada bulunduğu gibi kireçtaşı, tebeşir, mermer, kristal kalsit ve kalkerli kumtaşı gibi oluşumlarda da oldukça çok miktarda bulunmaktadır (Hammes ve Verstraete, 2002).

Kalsiyum karbonat, saflığı, rengi ve ucuzluğu gibi birçok nedenden dolayı geniş bir çeşitliliğe sahiptir ve farklı birçok sektör ve uygulama alanları için ihtiyacı karşılayan doğal bir hammadde olarak talep görmektedir (Şekil 3.1). Yapı malzemelerinin üretiminde, boya üretiminde, poşet, çöp torbaları ve parlatılmış ince film üretiminde, yüksek miktarda kullanılan dolgu maddesi olarak, kağıt sektöründe dolgu ve kaplama pigmenti olarak (kuşe kağıdı), bükülme, eğilme, iç gerilmeyi önleme, yüksek sıcaklık gibi etmenlere karşı direnç göstermesi sebeplerinden dolayı plastik ve kauçuk sektöründe dolgu maddesi olarak, farklı fiziksel kalitelere üretilmesi ve yoğunluğu nedeniyle inşaat ve yapı kimyasalları sektöründe derz dolgu (fuga), sıva, macun, yer dolgusu, alçı, mineral sıva harcı, seramik yapıştırıcıları vb. olarak kullanılmaktadır (Ercan ve diğer., 2018). Aynı zamanda ısı ve su yalıtımı sağlayan membranın üretiminde, ses izolasyonu sağlayan plakaların ve halı tabanı üretiminde kullanılmaktadır. Kağıt sektörü için de önemli bir yer tutan kalsit daha az selüloz kullanımına neden olduğu için çevre korunmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Aynı zamanda tıp alanında, kronik böbrek yetmezliği durumlarında besinlerdeki fosforun bağlamasında ve fosfatlı bileşiklerin dengelenmesinde kullanılır. İlaç sektöründe ise en çok mide ilaçlarında kullanılır.



Şekil 3.1 Kalsiyum karbonatın farklı uygulama alanları (Esenmikronize, b.t.)

Gıda sektöründe; başta kalsiyum kaynağı olarak kullanılmasının yanında soya sütü, bisküvi, ekmek mayası, ciklet, çikolata, bitki ilacı, hayvan yemi, toprak gübresi vb. gıda maddelerinde katkı maddesi olarak yoğun miktarda kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Yüksek beyazlık değerine sahip olduğundan özellikle krem deterjan üretiminde kullanılmakta; tarım sektöründe ise asit özellikli topraklar için kullanılmaktadır. Kalsit ilave edilen topraktaki organizmaların yaşamı düzelmekte ve pH seviyesi 6-7,5 civarında tutulduğu için topraktan iyi ürün alınmaktadır. Ayrıca; diş macunu, kozmetik/temizlik kağıdı, sabun, mürekkep, tarihi eser temizliği, PVC kenar bandı, üretimlerinde katkı maddesi olarak geniş kullanım alanına sahiptir (Leblebici ve Işık, 2018)



Şekil 3.2 Kalsiyum karbonatın farklı uygulama alanları 2 (Esenmikronize, b.t.)

Son yıllarda yapılan araştırmalara göre kalsiyum karbonatın doğal yaşamın dengelenmesinde önemli rol oynadığı görülür. Bitkilerde potasyum sonra en fazla bulunan mineral kalsiyumdur. Bitki filizlerin gelişmesi için mutlak gerekli kalsiyumun eksikliği durumunda, yeni sürgünler oluşmamakta, kök sistemi zarar görmekte ve bitki kuruyup çürümektedir. Dolayısıyla doğadaki bitki ve hayvan yaşamı için önemlidir (Leblebici ve Işık, 2018).

Kalsifikasyon, kimya dilinde söylenecek olursa kireç taşına dönüşme olarak kabul edilirken, tıp alanında ise kalsifikasyon bazı dokularda kalsiyum toplanması yani kireçlenme olarak tabir edilmektedir. Kalsifikasyon sürecinde temel olarak, laboratuvar ortamında, uygun çözelti içine bir kalsiyum kristal çekirdeği

eklenmesiyle, çözeltinin dengesi bozulur ve moleküllerde yığılmalarla küçük çekirdekler oluşur (nükleasyon). Bunlar da giderek irileşir ve kristallere dönüşür (Türkkan, 2015).

Biyokalsifikasyon da, biyolojik süreçler sonucunda kalsiyum karbonat çökmesi ve kalsit oluşması durumudur. **Bakteriyel biyokalsifikasyon** ise basitçe, özel bir bakteri türünün gerekli ortam ve koşullar sağlandığında bir bağlayıcı olarak davranarak kumu sertleştirmesi ve çimento benzeri bir çıktı üretmesi sürecidir. Biyokalsifikasyonda söz konusu süreç biyolojik yol izleri ile gerçekleşir ve doğaya tamamen uyumludur. Biyokalsifikasyon sürecinde açığa çıkan CaCO_3 , bakteriler aracılığıyla, kum, toprak gibi doğada kolaylıkla ulaşılabilen materyalleri birbirine bağlamaktadır.

3.2 Bakteriyel Biyokalsifikasyon Süreci

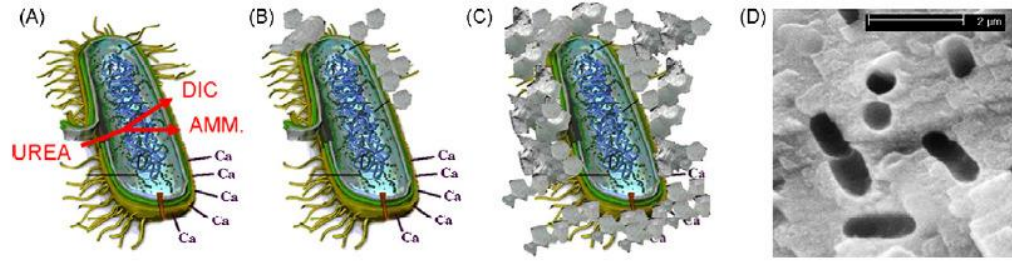
Bakteriyel biyokalsifikasyon süreci, üreaz aktivitesi ile kalsiyum çökmesi sağlayabilen bazı bakteri türleri tarafından gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.3). Bunlar; *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus arenosi*, *Sporosarcina urea*, *Brevibacterium ammoniagenes*, *Bacillus lentus*, *Proteus vulgaris*, *Myxococcus Xanthus* ve *Helicobacter pylori* olarak sıralanabilir.

Sporosarcina pasteurii'nin hücre boyutları 1,3-4 μm , sporları küresel veya hafif ovaldir, spor boyutları 0,8-1,3 μm arasında değişir. 5-15 °C minimum ve 30-45 °C maksimum sıcaklık koşullarında yaşarlar. Bu bakteriler genelde aerobik bir yapıya sahiptir ve pH 8-9 değerlerinde yaşamlarını sürdürürler. Toprak, su ve çamur tabakalarından elde edilirler ve patojen olmayan mikroorganizmalardır (Wiley ve Stokes, 1962).

Bakteri Grubu	Bakteri Çeşitleri	Metabolizma	Reaksiyon	Yan Ürün
Siyanobakter ve Alg	<i>Nostoc calcicola</i>	Fotosentez	$2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 + \text{O}_2$	$\text{O}_2, \text{CH}_2\text{O}$
	<i>Oscillatoria willei</i>			
	<i>Anabaena cycadae</i>			
Ürolitik Bakteriler	<i>Bacillus pasteurii</i>	Üre hidrolizi	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+} + \text{Cell} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{Cell-CaCO}_3$	NH_4^+
	<i>Bacillus sphaericus</i>			
	<i>Bacillus megaterium</i>			
Nitrat İndirgeyen Bakteriler	<i>Diaphorobacter nitroreducens</i>	Denitrifikasyon	$\text{CH}_3\text{COO}^- + 2,6\text{H}^+ + 1,6\text{NO}_3^- \rightarrow 2\text{CO}_2 + 0,8\text{N}_2 + 2,8\text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_{2(\text{aq})} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{CaCO}_{3(\text{s})} + \text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2 + \text{N}_2$ $\text{NO} + \text{N}_2\text{O}$
	<i>Nitrosomonas</i> türleri			
	<i>Nitrobakter</i> türleri			
Mikrobakteriler	<i>Myxococcus xanthus</i>	Amonifikasyon	$\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}^+$	NH_3
Sülfat İndirgeyen Bakteriler	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Sülfat İndirgenmesi	$\text{SO}_4^{2-} + 2[\text{CH}_2\text{O}] + \text{OH}^- + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{HS}^-$	CO_2 HS^-
	<i>Desulfobacterium autotrophicum</i>			

Şekil 3.3 Bakteri gruplarına bağlı mikrobiyal CaCO_3 oluşum mekanizmaları (Yıldırım ve diğer., 2016)

CaCO_3 oluşumu ile ilgili literatürde en fazla, ürolitik bakteriler tarafından gerçekleştirilen tepkimelerin olduğu çalışmalar yer almaktadır (Achal ve diğer., 2015; Achal ve diğer., 2013; Dejong ve diğer., 2014; De Muynck ve diğer., 2010) (Şekil 3.4). Üre hidrolizi yolu ile biyoçimentoşlama, biyolojik onarım, biyolojik tıkama ve biyolojik tortulaşma gibi işlemlerin yapılması için yol gösterici daha birçok çalışma literatürde mevcuttur (Yıldırım ve diğer., 2016).

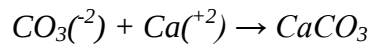
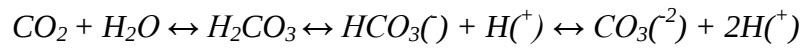
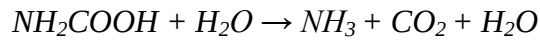
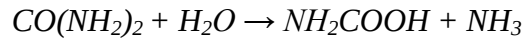


*(A) Ca iyonlarının bakteriye tutunması. (B) Bütün hücrenin kapsüllenmesi. (C) Kalsiyum karbonat çökmesinin sonlanması)

Şekil 3.4 Üreolitik kaynaklı karbonat çökmesinin basitleştirilmiş gösterimi ve işlem sırasında meydana gelen olaylar (Anbu ve diğer., 2016)

Bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinde; üre, iki basamakta karbondioksit ve ardından kalsiyum karbonata dönüşür, PH değerinin artması ile ortamda bulunan kalsiyum iyonlarıyla karbonat buluşur ve kalsiyum karbonat oluşur; çökelen CaCO_3 kuma bağlanarak kumu sertleştirir (Siddique ve Chahal, 2011) (Şekil 3.5).

Kullanılan yol izleri temel olarak aşağıdaki eşitliklerle gösterilebilir:



Şekil 3.5 Bakteriyel biyokalsifikasyon süreci

3.3 Doğada Biyokalsifikasyon

Jeolojik oluşumlar içinde, zaman içerisinde sürekli mineral çökelmeye maruz kalarak gelişen kalsiyum karbonat çökmesinin doğada değişik biçimlerde izleri okunabilir (Şekil 3.6). Bu, fiziko-kimyasal ve biyolojik reaksiyonlar sonucu sürekli olarak gerçekleşen bir doğa olayı olarak belgelenmiştir. Doğada alışılmış bir süreç olan minerallerin çökmesi durumunda gerçekleşen zemin çimentolanması ile ilgili birçok kanıt olması çalışmaların doğruluğunu göstermektedir (Aydilek, 2010).



Şekil 3.6 Doğal ortamda kumun çimentolaşması (Sihirlitur, b.t.)

Kalsiyum karbonat çökmesi reaksiyonu olarak adlandırılan olay, sıcaklık ve basınç değişimleri gibi kimyasal farklılıklardan kaynaklanabileceği gibi mikroorganizmaların hareketleri gibi fiziksel etmenlerle de meydana gelebilmektedir. Karstik arazilerdeki yeraltı sularında erimiş halde bulunan kalsiyum bikarbonatın suyun buharlaşması sonucu kalsiyum karbonat olarak ince katmanlar halinde çökmesiyle oluşan, ülkemizde de sıkça bulunan traverten, sarkıt, dikit ve sütunlar bu duruma örnek gösterilebilir (Şekil 3.7). Halk dilinde kireçtaşı olarak da bilinen CaCO_3 , genellikle doğada en fazla eski kayalarda ve deniz kabuklarında bulunduğu gibi incilerde, yumurta ve salyangozlarda da görülür. Doğada en çok bulunduğu kayaç türleri ise; aragonit, vatarit, tebeşir, kalsit, kireç taşı, mermer ve travertendir.

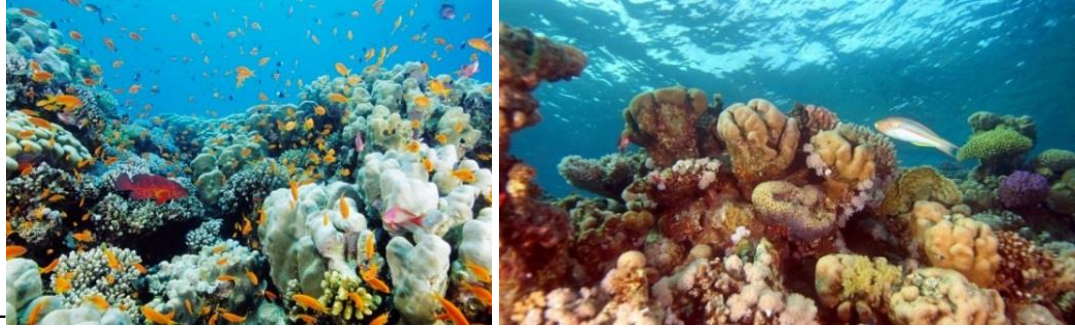


Şekil 3.7 Doğal oluşumlardaki kalsiyum karbonat çökmesi (Yoldaolmak, 2019)

Travertenler; doğada bir takım jeolojik, klimatolojik, kimyasal ve biyolojik faaliyetlerin sonucu olarak ortaya çıkan kimyasal tortul bir kayadır. Travertenlerin ana maddesi CaCO_3 olup, fay, çatlak ya da yarık gibi kalsiyum karbonatlı suların yayılarak aktığı alanlarda kimyasal tepkimeler sonucu bünyelerindeki CaCO_3 'ı çökeltmesiyle oluşur.

Atmosferden ve diğer kaynaklardan gelen yağış ve suların etkisiyle gelen karbondioksit bakımından zengin hale gelen mermer, kalker gibi kimyasal tortul kayalar, bünyelerindeki suların eritici ve aşındırıcı olması sebebiyle temas ettiği kayalardaki kalsiyum karbonatı çözerek bünyesine alır. Kalsiyum bikarbonatça zengin sular, sıcaklık ve basınç gibi yeryüzü koşullarına bağlı olarak buharlaşarak kalsiyum karbonat çökelişi gerçekleşir. Birbirini tamamlayan bu döngü sırasında ince katmanlar halinde oluşan kireçtaşının birikimi sonucu kalınlıkları artar ve travertenler oluşur (Polat, 2011). Bunun yanı sıra traverten oluşumlarında mikroorganizmaların (bakteri) etkisinin oldukça fazla olduğu bilinmektedir. CaCO_3 çökelişine, ya kırıntıları birbirine tutturarak ya da ortamdaki CO_2 'i kullanıp pH'ı düşürerek katkıda bulunurlar. Pamukkale travertenlerinin oluşumunda, Cyanobakteriler'in etkili olduğu bilinmektedir (Kökçü, 2007).

Mercan resiflerinin oluşumu ise, denizlerin sığ bölgelerinde, sert mercanların birikiminin yıllar süren bir sonucudur. Aslında mercanlar, omurgasız oldukları için gerçek iskeletleri olmayan, yumuşak, bir bedene sahip ve resifin ana malzemesini üreten organizmalardır. Ana kütlesi poliplerin önceki kuşakların boş iskeletlerinden oluşan bir resif, binlerce yıllık yaşamın ve ölümün bir ürünüdür. Taş mercan iskeletleri, poliplerin alt kısmı tarafından salgılanır. Periyodik olarak, bir polip tabanını kaldırarak ve eskisinin üzerinde yeni bir bazal plaka salgılayarak iskelette küçük bir oda oluşturmaktadır. Koloni canlı iken, CaCO_3 depolanır ve eklenen yeni bölümlerle mercan yükselir. Fazla miktarda salgılanan kalsiyum, karbonat, magnezyum gibi maddeler üst üste gelerek, resifin sert dış yapısını oluştururlar (*How Do Stony Corals Grow? What Forms Do They Take*, b.t). Böylelikle binlerce ve milyonlarca yılın sonunda büyük resifler oluşur (Şekil 3.8). Bu süreç, travertenlerin oluşum mantığına benzetilebilir.



Şekil 3.8 Mercan resifleri oluşumlarındaki kalsiyum karbonat çökmesi (İnternethaber, 2019)

Kalsiyum karbonat çökmesine bir diğer örnek olan **tafoniler**, Turkington ve Phillips (2004) tarafından kemer şeklinde girişleri olan, oluştuğu tabakanın eğimine göre şekil almış, tabanı ayrışma enkazıyla kaplı kovuklar şeklinde tanımlanmışlardır. Bu türden kovuklar kurak ve yarı-kurak bölgelerde özellikle granit, kumtaşı, kalker ve tuf gibi farklı kayaç türleri üzerinde oluşmaktadır. Bal peteği erozyonu olarak da bilinen tafoninin oluşumunda günlük sıcaklık değişimleri, suyun etkisi, kimyasal ayrışma, tuz kristalizasyonu, rüzgâr erozyonu, donma-çözülme ya da mikroorganizmaların aşındırması temel etkenlerdir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Doğal oluşumlardaki kalsiyum karbonat çökmesi 1 (Wikiwand, b.t.)

Tafonilerin oluştuğu ana kayanın dış yüzeyinde kalsiyum karbonat birikimi nedeniyle kalınlığı değişen sertleşmiş bir kabuk oluşmaktadır. Bu kabuğun hemen altında ise henüz sertleşmemiş bölümler bulunmaktadır. Kabuklaşma (case-hardening) kayacın dış etkenlere karşı doğal direncini artırırken, kayacın iç ve dış

bölümleri arasında da ayrılmaya yol açmaktadır. Bununla birlikte kabuk sertleşmesi, tafoni gelişiminde etkili olsa da tafonilerin oluştuğu farklı topografyaların hepsinde görülmediği için bir etken olarak düşünülmediği de öngörülmüştür (Kopar ve Şaroğlu, 2016).

Başka bir örnek ise, toprağın üzerinde 6-7 metre yüksekliğe ulaşabilen, tepe/kule/höyük görünümlü yapılardır. Bunlar, toprak altındaki **termit yuvalarının** yeryüzü uzantılarıdır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Doğal oluşumlardaki kalsiyum karbonat çökmesi 2 (Miningmagazine, b.t.)

Termit yuvalarının tepelerini, sağır ve kör olan işçi termitler, ağızlarıyla taşıdıkları toprağın içine özel kimyasal maddeler içeren tükürüklerini karıştırarak yaparlar. Kalsiyum karbonatça zengin bu yapılar, kolay kolay yıkılmazlar. Bu tepeler, havalandırma ve ısı dengeleme sistemi olarak görev yapar (Yaşamımızı Termitlere mi Borçluyuz, 2005).

Kireçtaşı mağaraları denen oluşumlar ise, kireçtaşı kayalıklarında kirecin sızan sular nedeniyle erimesiyle ortaya çıkmaktadır. Kayalıkların arasındaki çatlaklardan sızan yağmur ve akarsu suları zamanla kireçtaşı kayalıklarını eritir ve derinliklerde

oyuklar ve mağaralar oluşturur. Kireçtaşı, mağaraların oluşumunu sağlayan en önemli kayadır. Söz konusu kayaların kimyasal bileşimi ve çok çatlaklı yapıları mağara gelişimine elverişli ortam hazırlamaktadır. Genelde olagelen atmosferik şartlarda suda zor çözünen kireçtaşı, asitli suların temasıyla erir. Asitli sular; eritici özelliklerini atmosferden, toprak ve ana kayada yaşayan canlıların solunumu, çözülmüş canlı atıkları, bitkilerin çürümesi ve sülfürlerin oksitleşmesi sonucu açığa çıkan CO₂'den alır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Cango Mağaraları (Wordpress, b.t.)

Mağaralar, yüzlerce metre derinliğe veya yüksekliğe; birkaç metreden, kilometrelerce uzunluğa kadar erişebilirler. Klorürlü (tuz), sülfatlı (jips) ve karbonatlı (kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit, karbonat çimentolu konglomera ve kumtaşı) anakayaların ortaya çıkarken veya ortaya çıktıktan sonraki fiziksel, kimyasal ve biyolojik olaylar sonucu yeraltı suları tarafından aşındırılması ile meydana gelen mağaralar, doğal mağaralar olarak adlandırılır.

Mağara tavanından damlayarak sarkıtları meydana getiren kalsiyum bikarbonatlı sular, CO₂ kaybı ve buharlaşma sebebiyle, temelde düştükleri noktada çökme

başlar. Damlama noktasındaki çekirdeğin etrafındaki karbonat çökelişi art arda devam ederek dikitleri meydana getirir. Boyutları ve biçimleri tavandan düşen suyun akış miktarı ve akış şekli ile içerdiği CO_3 oranına bağlı olarak değişen dikitler, ilk başta kubbe biçimindedir ve üst kısımları damlamaya bağlı olarak çukurdur. Aralıksız damlayan sular, taban ve üst kısımlarının kalınlıkları aşağı yukarı birbirine denk dikitleri meydana getirir. *Karst ve Mağara Nedir* (b.t.)

3.4 Bakteriyel Biyokalsifikasyonun Mimarlık ve İnşaat Sektöründeki Mevcut Kullanımları

Son yıllarda, özellikle yurtdışında mimarlık ve inşaat alanında kalsiyum karbonat oluşumu ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bakteri gruplarına bağlı mikrobiyal CaCO_3 oluşumu, çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar, bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin mimarlık ve tasarım alanından çok inşaat mühendisliği ve çevre mühendisliği alanlarında kullanımına ilişkindir. Çevre mühendisliği alanında; kirli ve atık suların temizlenmesi (Hammes ve diğer., 2003), ağır metallerin toprak ve sulardan uzaklaştırılması (Achal ve diğer., 2012) , toprak güçlendirilmesi ve zemin iyileştirilmesi (Dejong ve diğer., 2006), inşaat mühendisliği alanında ise; taş malzemelerin ve tarihi eserlerin korunması ve restorasyonu (Tiano ve diğer., 1999), yapı malzemesi beton olan yapıların dayanıklılığının oluşturulması, (De Muynck ve diğer., 2010) gibi alanlar üzerine çalışmalar mevcuttur (Yıldırım ve diğer., 2016). Literatürde, biyoçimento, biyolojik onarım gibi kavramlarla da karşımıza çıkan bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinde oluşan CaCO_3 , ilgili birçok çalışmadan anlaşıldığı üzere; hemen her endüstri ürünüde katkısı olan bir maddedir. İnşaat sektöründe ek olarak yol yapımında, killi zeminlerin stabilizasyonunda, sıcak asfalt ve benzeri malzemelerin dayanımını arttırmada, gazbeton, beton blok eleman ve kalsiyum silikat tuğla üretiminde, içinde bol miktarda silis minerali bulunan diatomitle birlikte yalıtım malzemeleri yapımında, bağlayıcılık ve işlenebilirlik özelliğini artırmak için harç, sıva ve boya yapımında kullanılmaktadır (Çiçek, 1999).

Geçmişte doğadan esinlenme ağırlıklı estetik anlamda ya da davranışsal olarak uygulanmaktayken; günümüzde geline nokta doğanın/canlının tasarıma direkt entegre edilmesi söz konusudur. Biyoloji ve mimarlık arakesitinde, mikroorganizmaların inşaat, yapı ve çevre sektöründe kullanım alanları ve

uygulaması mevcuttur. Dünya genelinde bu konuda ülkemize oranla daha çok çalışma olmakla birlikte, Türkiye özelinde ise bakteriyel biyokalsifikasyon henüz yaygın araştırılmayan bir konu olup, bunun kullanımını mimarlık ve tasarım alanlarına taşıyan Türkiye Biyotasarım Takımı dışında çalışmaya rastlanılamamıştır (Gündoğdu ve diğer., 2019).

3.4.1 Beton Çatlaklarının Tamiri için Biyokalsifikasyon

Tarihteki ilk yapılardan bu yana, birçok farklı yapım yöntemine rastlanılır. Kullanılan malzemeler döneme ve bağlama göre farklılık göstermiş; bilimsel ve teknolojik gelişmelerin artmasıyla mimarlık ve disiplinler arası etkileşim çerçevesinde çeşitli yapım yöntemleri geliştirilmiştir. Sanayi Devrimi ile birlikte kullanımı yaygınlaşan beton ve çimento esaslı kimyasallar, inşaat ve mimarlık sektörü için vazgeçilmezdir. Ancak betonun zamanla aşınması ve oluşan çatlakların onarılması işlemi oldukça zor ve maliyetli süreçleri beraberinde getirmektedir. Yapılarda meydana gelen farklı tiplerde çatlaklar, suyun donması ve genleşmesi, zemin hareketleri, aşırı terleme, iklimsel değişimler gibi fiziko-kimyasal değişimler sonucunda oluşmaktadır. Oluşan çatlaklar için, çimento harcı, epoksi reçine, çimento şerbeti, killi malzemeler gibi onarıcı maddeler kullanılmaktadır. Çatlak yüzeyinde en derin noktaya kadar iletilemeyen bu maddeler, çatlakların iç kısımlara kadar devam etmesine engel olamamakta ve iyi kapatılamayan çatlaklarda su sızıntısı meydana gelerek betonarme binanın taşıyıcı sistemi için tehlike arz etmeye başlamaktadır (Yıldırım ve diğer., 2016). Dolayısıyla betondaki bozulmayı hızlandıran bir tetikleyici olmaları sebebiyle çatlaklar istenmeyen bir problemdir. Aynı zamanda betonarme yapılarda su ve oksijene maruz kalan demir ve çelik de zamanla aşınmakta, korozyona uğramaktadır. Bu gibi problemler çok zor ve maliyetli tamirlara neden olmaktadır.

Bakteriyel biyokalsifikasyona ilişkin yapılan çalışmalar, çimentonun bileşiminde barındırdığı bileşiklerin doğada kendiliğinden oluştuğu süreçleri keşfederek ve doğadan esinlenerek kendi kendini onarım (self-healing) işleminin gerçekleştirilebileceği yönündedir. Çimento bazlı kompozitlerden olan beton ve harç gibi malzemeleri iyileştirmenin yolu kimyasal ve biyokimyasal yollardan

geçmektedir. Bilindiği gibi, çimentonun yapısı kalker ve kilden oluşmaktadır. Çimentodaki kalkerin %90'ı ise CaCO_3 'tır. Bu sebeple, özellikle son yıllarda, çimentoyla onarım süreci kapsamında mikroorganizmaların biyokimyasal faaliyetleri sonucu CaCO_3 oluşumu ile ilgili inşaat mühendisliği alanında çalışmalar yapılmaktadır (Shackelford ve Jefferis, 2000; Vekariya ve Pitroda, 2013).

Kendini iyileştirme (self-healing) tüm dünyadan farklı araştırmacıların dikkatini çeken bir konudur ve uzun yıllardır gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda canlı organizmalara benzer şekilde kendini iyileştirme özelliği sergileyen çimento esaslı malzemeler geliştirilebilmiştir. Bu özelliğin farklı malzeme sınıflarına entegre edilebilmesi için oldukça çeşitli teknik ve yöntemler kullanılmış olmasına rağmen, kendini iyileştirme kabiliyetine sahip tüm malzemelerin ortak bir özelliği bulunmaktadır: Bu malzemeler çatlak oluşumu sonucunda azalan yapısal performansın sürekli bir şekilde yenilenmesini sağlamak ve tekrarlı bakım/onarım işlemlerinin sayısını azaltmaktadır. Kendini iyileştirme sonucu sağlanan daha uzun yapısal ömrün yeni inşaat uygulamalarının ve dolayısıyla kirliliğin, enerji tüketiminin ve sera gazı salınımının azaltılmasında etkili olması beklenmektedir. Kendini iyileştirme (self-healing) konsepti literatürde iki gruba ayrılmaktadır (Hearn, 1998; Andiç Çakır, 2015):

- Otojen iyileşme
- Otonom iyileşme
- Çatlak Yüzü İyileşmesi (self-sealing)

Kendini iyileştirme betonun önceden hidratasyon özelliğini devreye sokacak nitelikte üretilmesiyle oluştuğunda otojen iyileşme olarak adlandırılırken, ajan adı verilen katkı maddeleri aracılığıyla oluştuğunda otonom iyileşme olarak adlandırılmaktadır. Çatlak yüzü iyileşmesinde ise sadece fiziksel ve yüzeysel bir kapanma söz konusudur. Hali hazırda kullanılan çimento esaslı malzemelerin 1824 yılında icat edilmesinin hemen ardından, betonun otojen iyileşmesi ilk olarak Fransız Bilim Akademisi tarafından 1836 yılında gözlemlenmiştir (Tolunay, 2015). Ancak

teknoloji çağında bu yöntemler yetersiz kalmakta, yapılan yeni çalışmalar doğrultusunda çimentonun içeriğinde bulunan bileşiklerin zaten doğada kendiliğinden oluşabilmesi, doğadan ilham alarak onarım işleminin gerçekleştirilebileceği savını desteklemektedir. Bu bağlamda kendini iyileştiren beton, otonom iyileşme kategorisinde ele alabileceğimiz, hiçbir dış müdahaleye ihtiyacı olmadan çatlak veya yarık gibi kusurları kendiliğinden onarabilen betondur.

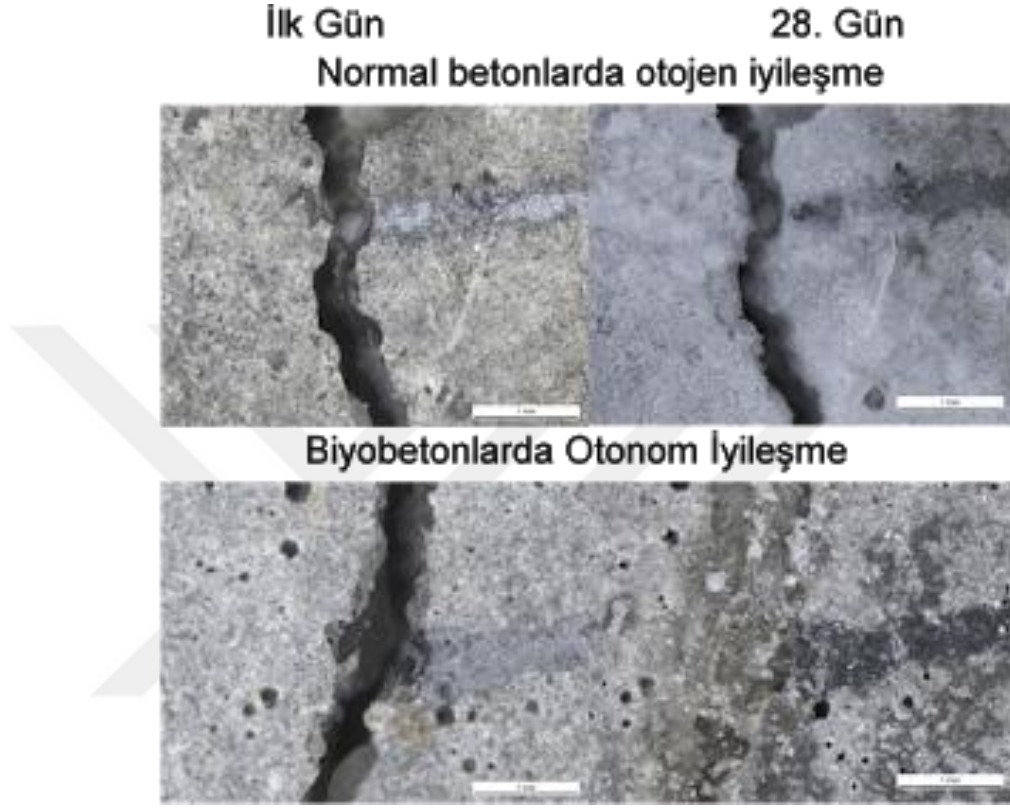
Betonun içerisine eklenen iyileşmeyi tetikleyici, performansı artıran ve düzenleyen katkı maddeleri sayesinde tutarlı ve öngörülebilir bir iyileşme gerçekleşmektedir. İyileşme mekanizmasının asıl sebebinin betonda bulunan kalsiyum hidroksitin yeniden kristalleşmesi olduğu ortaya çıkmıştır. Yüzeylerde gözlemlenen beyaz kristaller üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, bu kristallerin kalsiyum hidroksitin (Ca(OH)_2) karbondioksit (CO_2) ya da kalsiyum bikarbonatla (Ca(HCO_3)) reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıktığını göstermiştir (Tolunay, 2015).

Otonom iyileşmenin esin kaynağının dolaşım sistemi olduğunu söylemek mümkündür. 1994’de ilk olarak insan dolaşım sistemindeki arterlerden esinlenilerek geliştirilen vasküler sistem, beton elemanında bulunan ve çatlak oluştuğunda iyileşme ajanını yayabilecek kırılğan ya da sünek yapay damar benzeri yapılardan oluşmaktadır. Bu damarlar çimento esaslı sistemler içerisine boyuna yerleştirilmektedir. Vasküler damarlar, çatlak olan bölgeye temel maddeleri taşımak ve hasarlı bölgeyi iyileştirebilmek amacıyla kullanılacak iyileşme malzemelerinin depolama merkezleri olarak görev yapmaktadırlar (Andiç Çakır, 2015).

Otonom yöntemlerden bir diğeri olan mikroenkapsülasyon ise, çatlak oluşumunun hemen ardından betonun içine önceden yerleştirilmiş bulunan mikrokapsüllerin içindeki iyileşme maddesi olarak adlandırılan yapışkan bağlayıcı maddenin açığa çıkarılması esasına dayanmaktadır.

Oldukça yeni bir teknik olarak otonom iyileşmede, mikroenkapsülasyonda bakteriler katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Biyobeton adı ile de anılan bu teknikte öngörülebilir ve tutarlı çatlak iyileşmeleri sağlanmaktadır. Araştırmacılar kalsiyum karbonat oluşumunu sürekli hale getirilmesi için, CaCO_3 üreten bakterileri kullanmışlardır (Jonkers, 2007; Jonkers ve diğer., 2010; Jonkers, 2011). Özetle, bu

yöntemde bakteriler ve besin ortamı, kalsiyum karbonat oluşumunun sürekliliği için karışıma ilave edilmektedir. Bu biyolojik müdahale sayesinde çatlak oluşumu durumunda bakteriler devreye girerek çatlağın geçirimliliğini düşürmektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Normal ve biyobetonlarda otonom iyileştirme (Kendini iyileştiren beton, 2016)

Hollanda Delft Üniversitesi'ndeki bilim insanları beton yapıların kendi kendini iyileştirme kapasitesini bakteri kullanılarak nasıl geliştirebilecekleri ve bu bakterilerin gelişmesi için ne gibi şartların gerekli olduğuna ilişkin 2006 yılından bu yana çeşitli araştırmalar yürütmektedirler. Mikrobiyolog Henk Jonkers ve inşaat mühendisi Eric Schlangen'ın beton onarım maliyetlerini en aza indirmek için geliştirdikleri biyo-beton; Bacillus cinsi bakterilerin tepkimeye girebilmesi için gerekli besi ortamı ve su karışımından oluşmaktadır (Şekil 3.13). Böylelikle beton içerisine kalsiyum karbonat çökeltmesine sebep olan bakteriler enjekte edilerek kendini iyileştirebilen yeni nesil bir beton üretimi sağlanması mümkün olabilmektedir (Jonkers, 2011).

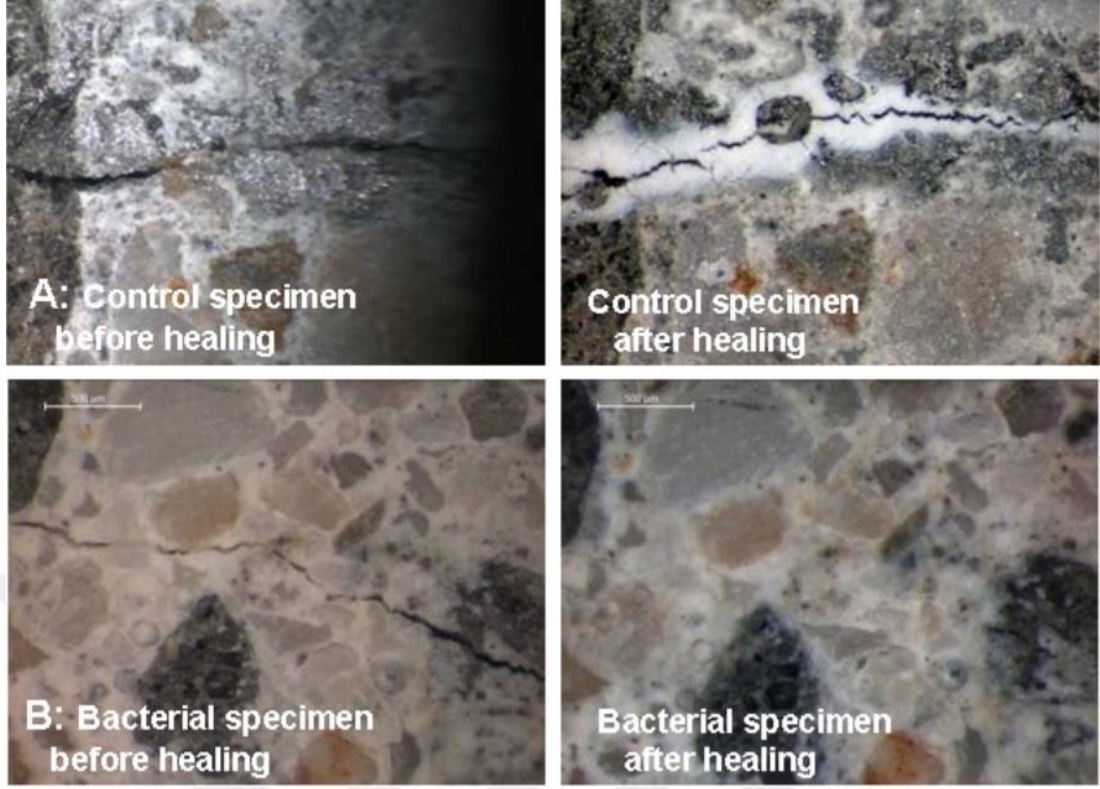


Şekil 3.13 Delft Üniversitesi (Arcus-global, 2017)

Beton karışımına ilave edilen bakteriler cinsine göre farklılık gösterse de ortak noktaları kalsiyum karbonat çökelimini sağlayacak metabolizmaya sahip olmalarıdır. Bu çökeltme makul seviyelere ulaştırılabilirse çatlak ve yarıklar üzerinde gözle görülür bir kapanma sağlanması mümkün olabilecektir.

Biyobeton geliştirmekte yaygın olarak kullanılan bakteri kültürleri; *Bacillus cohnii*, *Bacillus pseudoformis*, *Bacillus alkalinitrilicus*, *Bacillus sphaericus*, *Diaphorobacter nitroreducens*, gibi saf kültürler ile Activated compact denitrifying core (ACDC) , Cyclic Enriched Ureolytic Powder (CERUP) gibi birden fazla bakteri türü içeren çoklu kültürlerdir (Wiktor ve Jonkers, 2011).

Aynı bakteriler çatlak yüzü iyileşmesinde de kullanılabilmekte ve daha yüzeysel tamirler için de çözüm sunabilmektedir. Araştırmalarına hala devam eden Dr. Jonkers, laboratuvar testleri sonucu çatlaklarda 0,5 mm genişliğe kadar başarılı olduklarını açıklamıştır (Şekil 3.14). Teoride; betonda mikro çatlaklar oluştuğunda yağmur suyu bu çatlaklardan içeri girerek bakterilerin aktivasyon sürecini başlatacaktır. Böylece kalsit oluşumu sağlanarak çatlak onarımı sağlanacaktır. Delft Teknik Üniversitesi Raporu'na göre; beton özellikle çelik ve demir donatılı yapılarda dayanıklılık sorunu için yeni ve yenilikçi bir çözümdür. Bunun yanı sıra biyobeton teknolojisi binalardaki çatlakların geleneksel tamirine karşı da ekonomik ve doğa dostu bir alternatiftir.



Şekil 3.14 İyileşme öncesi ve sonrası bakteriyel örnekler (Jonkers, 2011)

Delft Teknik Üniversitesi'nin Malzemeler Merkezi'nde devam eden 'Kendi Kendini İyileştiren Malzemeler Araştırma Programı'nın bir parçası olan Kendini İyileştiren Beton Projesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi Biyoteknoloji Bölümü ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Güney Dakota Maden Okulu işbirliğiyle yürütülmektedir. Araştırma; bakteri için en iyi koşulları oluşturarak maksimum seviyelerde kalsit üretmeye ve bakteri için gerekli olacak besin miktarını optimize etmeye odaklanmış durumdadır. Buna ek olarak da bakteriyel betonun kendi kendini iyileştirme yeteneği incelenerek, sülfat saldırılarından ve sıcaklık dalgalanmalarından doğabilecek çeşitli bozulma mekanizmalarının mantığı araştırılmaktadır (Kendi Çatlaklarını Tamir Eden Biyo-Beton..., 2014)

3.4.2 Zemin Güçlendirme Çalışmaları

Günden güne artan inşaat sektörü uygulamalarında, özellikle sanayi bölgeleri için gereken büyük arazilerin imara açılmasıyla, problemli zeminleri olan alanlar aynı

zamanda birçok sorun meydana getirmiştir. Zeminlerin gelen yükleri güvenle taşıyabilmesi için projede revizasyona gidilmesi, halihazırda zeminin taşıma gücü yüksek bir zeminle değiştirilmesi, zeminlerin güçlendirilmesi ve iyileştirilmesi gibi yöntemlere başvurularak zeminlerde sıvılaşma, şişme, dolgu ve şev stabilitesi, erozyon kontrolü, oturma ve mukavemet gibi özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Genel anlamda zemin iyileştirme yöntemlerinde; taşıma kapasitesi düşük zeminlerde optimum seviyeyi yakalamak, zeminde oturmayı azaltıp konsolidasyonu hızlandırmak, dolgu ve şevlerin stabilizasyonunu sağlamak, istinat duvarlarını sağlamlaştırmak ve zeminin sıvılaşma riskini azaltmaya çalışılmaktadır.

Zemine ait farklı parametreler baz alınarak, ön yükleme, kompaksiyon, halihazır zeminin değiştirilmesi, ısıtma işlemleri, zemin kazıkları, katkı malzemeleri kullanarak iyileştirme gibi birçok uygulama, zemin iyileştirmeye yöneliktir (Coduto, 1999). Son yıllarda bunlara ek olarak, bakteriler aracılığıyla mikrobiyolojik kalsiyum karbonat çökmesi ile zeminleri iyileştirme tekniği ortaya çıkmıştır. Bakteriler aracılığıyla meydana gelen kalsit oluşumları ile zemindeki boşlukların doldurulması, taşıma gücü artışı, gerilme altında şekil değiştirmenin azaltılması, şişme – büzülme potansiyelinin azaltılması, su geçirgenliği ve sızıntı sularının kontrolü, erozyona karşı olan direncin artırılması, deprem, erozyon gibi çevresel faktörlerin sonucunda oluşabilecek fiziksel ve kimyasal etkilerin önlenmesi, oturmaların azaltılması, sıvılaşma gibi özelliklerinin iyileştirilmesi ve yüzey bozulmalarına karşı oluşan direncin artırılması hedeflenmektedir (Özaydın, 2012).

Mikrobiyal geoteknoloji, bir geoteknik mühendisliği alanı olarak, daha uygun yapı ve sağlıklı çevre için zeminlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilme ve optimizasyonunu amaçlar. Mikrobiyal geoteknolojide yer alan mikrobiyal çimentoşlama; istinat duvarı, dolgu ve barajların stabilizasyonunun sağlanmasında, tünel ve metro inşaatlarının mukavemeti için güçlendirme ve iyileştirme yapılmasında, zeminlerin sıvılaşma riskinin azaltılmasında, yol çatlaklarının onarılmasında ve yüzeylerinin iyileştirilmesi esnasında uygulanmaktadır. İyileştirilecek uzun yolun ekonomik bir şekilde iyileştirilmesi ve yolun hizmetinin aksatılmadan yapılması için biyomineralizasyon kapsamında ele alınan

mikrobiyolojik iyileştirme yöntemi kullanılmaktadır. Biyoteknoloji alanında özellikle toprak içerisinde yaşayan alkalofilik bakteriler tarafından üretilen üreaz enziminin, üre substratı ve kalsiyum kaynağı ile reaksiyona girerek CaCO_3 oluşturulması olayı biyoçimentoşlama olarak adlandırılmaktadır. Kalsiyum karbonat çökmesi sonucunda zemin partikülleri arasında bulunan boşluklar dolarak biyolojik tıkanma, partiküllerin bir araya gelmesi ile de biyolojik çimentolaşma meydana gelmektedir. Bu süreç ile ilgili çalışmalar, daha çok zemin iyileştirmesi ve güçlendirilmesi gibi alanlarda yapılmaktadır.

Ayrıca, sıvılaşmanın görüldüğü ince taneli kumlarda mikrobiyolojik kalsiyum karbonat çökmesi yöntemiyle zemin iyileştirilmesi çalışılmaktadır. Erozyon ve şev tehlikelerinden korunmak için toprak barajların güçlendirilmesinde, maden ve çevre mühendisliği alanında kalıcı bariyer inşa etmede, yüzeydeki toz parçacıklarının bağlanarak toz tabakasının azaltılmasında ve kazı sırasında petrol sondaj kuyularının dayanımının artırılmasında, temel ve boru hatlarının sediment erozyonuna karşı dirençli hale getirilmesinde, zemin kirliliğinin giderilmesinde, kıyı alanlarında ve nehirlerde erozyon kontrolünde, su filtrelemede de kullanılmaktadır (Kucharski ve diğer., 2005). (Patent No. WO/2006/066326)

Zemin iyileştirme çalışmalarının çoğunluğu, yeterli taşıma gücünün sağlanması esasına dayanmaktadır. Mikroorganizmalar, jeolojik olaylarda önemli rol aldığı gibi mühendislik alanında zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede de kullanılmaktadır. Zeminlerin biyolojik iyileştirilmesi ile ilgili olarak literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda farklı zemin, bakteri, ortam vb. kullanılarak ve kıyaslamalı uygulamalar yapılmıştır. Dejong ve diğer. (2006) çalışmalarında, *Bacillus Pasteurii* ve kireç taşı kullanarak zemin özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Jimenez-Lopez ve diğer. (2007) çalışmalarında gözenekli kireçtaşlarını bakteri ve kültür ortamı kullanarak güçlendirmeyi amaçlamıştır. Whiffin ve diğer. (2007) çalışmalarında bakteri ile zemin iyileştirmesini incelemiştir. Beş metrelik kum kolonu oluşturarak düşük bir akım hızında sürekli bakteri aşılması yapmışlardır. De Muynck ve diğer. (2008) yapmış oldukları çalışmada farklı su/çimento oranına sahip betonlara, bakteriler aracılığı ile

yüzeysel uygulama yaparak, dayanımının artırılmasını amaçlamışlardır. Çalışmada yapı malzemelerinin korunumu için, mikroorganizmalar aracılığı ile yüzeylerinin kaplanarak toksik madde ve su girişlerinin önlenebileceğini düşünmüşlerdir. Okwadha ve Li (2010), Okmikrobiyolojik karbonat çökmesi için optimum şartları araştırmışlardır. Cheng ve Cord-Ruwisch (2012), yapmış oldukları çalışmada bakteriler ile zemin özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Li (2013), yapmış olduğu çalışmada farklı zeminlerin bakteriler ile iyileştirilmesini incelemiştir. Bernardi ve diğer. (2014) yapmış oldukları çalışmada bakteriler aracılığıyla kumları sertleştirerek kumtaşlarına çevirmeye çalışmışlardır.

Son 20 yılda, mühendislik alanı içerisinde son derece önemli konulardan birisi zemin iyileştirmesi meselesidir. Bunun nedeni ise, taşıma gücü zayıf olan zeminlerin üzerine yapı inşa etme zorunluluğu, sağlam zemin bölgelerinin yetersizliği, artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte inşa edilen büyük yapıların meydana getirdiği büyük gerilmeleri zeminin taşıma potansiyelinin olmamasından kaynaklanmaktadır. Disiplinlerarası çalışma prensibine dayanan, yeni sürdürülebilir bir yöntem olan mikrobiyolojik kalsiyum karbonat çökmesi çalışmaları, çok daha sağlıklı, ekonomik ve kalıcı çözümler önermektedir.

3.4.3 Restorasyon Çalışmalarında Kullanımları

Tarihi eserlerin ve tarihi binaların bozulma sürecinde, mikroorganizmaların rolü son yirmi yıldır kabul gören ve araştırılan bir konu olduğu gibi onarım sürecinde de zararlı ve aşındırıcı bileşiklerin canlı organizmalar aracılığı ile ortamdan uzaklaştırılması, bir başka deyişle mikroorganizma metabolizmaları kullanılarak tarihi eserlerin özellikle taş malzeme üzerindeki kirlilik ürünlerinin temizlenmesi ve mikroorganizma uygulanan bünyenin sağlamlaştırılması ile ilgili yöntemlerin de araştırıldığı ve üzerinde en çok çalışılan konulardan birisi olduğu gerçektir (Tiano ve diğer., 1999).

Tarihi eserlere yönelik koruma ve restorasyon çalışmaları kapsamında, tarihi yapılarda kullanılan yapı malzemeleri; taş, toprak, ahşap ve maden olarak

sınıflandırılabilir (Aydın İpekçi ve diğer., 2015). Geçmişten günümüze gerek yapılarda gerekse plastik eserlerde en çok kullanılan malzemeler arasında yer alan taş, hem renk ve doku olarak çeşitliliği hem de yapısı, dayanımı ve şekil verme özellikleri göz önüne alındığında pek çok farklı kullanımı olduğu görülmektedir. Bu nedenledir ki kültürel mirasın korunması alanında, üzerinde en çok çalışılan konulardan birisi de tarihte kullanılan taş malzemelerin korunması ve onarımı olmuştur.

Geleneksel koruma uygulamalarına alternatif bir yöntem olarak biyolojik iyileştirme konusu, yapılan teknik araştırmalarda, özgün yapıda kullanılan malzeme türleri ve bozulmaların bilimsel olarak tespitine yönelik yapılan çalışmalar oldukça önem arz etmektedir (Şenol, 2017). Hempel (1978) biyolojik temizlik çalışmalarına öncülük eden ilk kişiler arasındadır. Gauri (1992) yılında, *Desulfovibro desulfuricans* türü bakteriler siyah kabuk tabakasının mermer yüzeyinden temizliğinde kullanmıştır. Ayrıca Gauri, bakterinin temizlenmek istenen yüzeyde kirlilik öncesi orijinal yapısı olan kalsiyum karbonata dönüştürdüğünü, yaptığı çalışmalar sonucunda ortaya koymuştur (Doehne ve Price, 2011).

Tarihi eserlerin korunması ve yüzey çatlaklarının onarılması için hidrolik kireç, horasan harcı gibi koruyucu ve yapıştırıcı maddeler kullanılmaktadır. Fakat bu maddeler renkli, kokulu ve yüzeysel kapatıcı maddelerdir. Renkli olmaları sebebiyle, tarihi eser yapılarının renkleri ile uyuşmamakta ve tarihi eserlerin kendi yapısal görünüşlerini değiştirmektedir. $CaCO_3$ ise beyaz renkli ve kokusuz olması sebebiyle tarihi eser yapısının rengi ile uyum sağlayabilir ve kötü koku oluşturmazlar. Ayrıca, mikrobiyal $CaCO_3$ oluşumu, yapıtlarda zamanla oluşan aşınma ve kopmaların tekrardan onarılmasını sağlamaktadır. Mikroorganizmalar tarihi yapıları oluşturan taşlar arasındaki boşluklu bölgelere kolaylıkla yerleşmektedir. Bu sayede, mikroorganizmalar porlu bölgelerde de $CaCO_3$ oluşumunu sağlayarak, sadece yüzeysel değil, iç kısımlarda da güçlendirme yapabileceklerdir. $CaCO_3$, belirtilen özellikleri sayesinde, özellikle tarihi eserlerin onarım ve koruma uygulamalarında, görünüş ve şekli bozmadan etkili onarım yapan bir madde olarak tercih edilebilir (Yıldırım ve diğer., 2016).

3.4.4 Yeni Yapı Malzemelerinin Üretimi

21. yüzyılda teknolojinin gelişmesi ile birlikte elde edilen fırsatlarla, tasarımcılar, daha etkili ve sürdürülebilir fikirler için doğadan daha kapsamlı ve derin bilgiler elde etmeye başlamıştır. Günümüzde sürdürülebilirlik, tasarım ve uygulamada önemli bir unsur olarak öne çıkmakta; sürdürülebilir mekanlar, binalar, geri dönüşebilen çevreci malzemeler gibi çözüm önerileri önem kazanmaktadır.

Bu doğrultuda bakterilerin yakın gelecekte yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmakta ve uygulanabilirliği test edilmektedir. Oldukça az sayıda çalışmanın içinde, biyoharç ve biyotuğlaya ilişkin araştırma projeleri dikkat çekmektedir.

Biyoharç üzerine çalışan ekip üyelerinden biyolog Piero Tiano, üre ve besi ortamında yaklaşık 30 derece sabit sıcaklıkta bakterinin gelişmeye başladığını, bakterilerin genellikle çoğalarak büyüdüğünü ifade etmektedir. Geleneksel çimento malzemesi yerine sürdürülebilir bir yapı malzemesi elde edebilmek için belirli bir miktarda bakteri ve yaklaşık üç saatlik fermantasyon sürecinin gerekliliğinden bahsedilmektedir. Çimento üretiminden kaynaklanan küresel karbon emisyonunun yüzde 6.3 olduğuna dikkat çekilerek, çevre dostu çimentonun inşaat sektöründe kullanılabilirliği ileri sürülmektedir (DEKTMK, 2002). Konuyla ilgili bir Avrupa Birliği araştırma projesinde çalışan bilim adamları, bakterileri çimento sanayisi atıklarından ve pirinç kabuğu külünden oluşan bir kum karışımına eklemektedir. Maden mühendisi Laura Sánchez Alonso bu projede kullandıkları ham maddelerin genellikle atıklar olduğunu belirterek ek maliyetlerinin olmadığını ve enerji maliyetinden de tasarruf ettiklerini belirtmektedir. Bakteriler doğal olarak kalsiyum karbonat üreterek, çimento sanayisi atıklarından ve pirinç kabuğu külünden oluşan bir kum karışımını birbirine bağlar. Mikrobiyologlar ve kimyagerler bu bakterilerin daha verimli hale gelmesi için çalışmalarını sürdürmektedir (Cuzman ve diğer., 2015).



Şekil 3.15 Bakteriye biyokalsifikasyon yöntemi ile oluşturulmuş biyoharç malzemesi ve kullanım alanları (Youtube, b.t.)

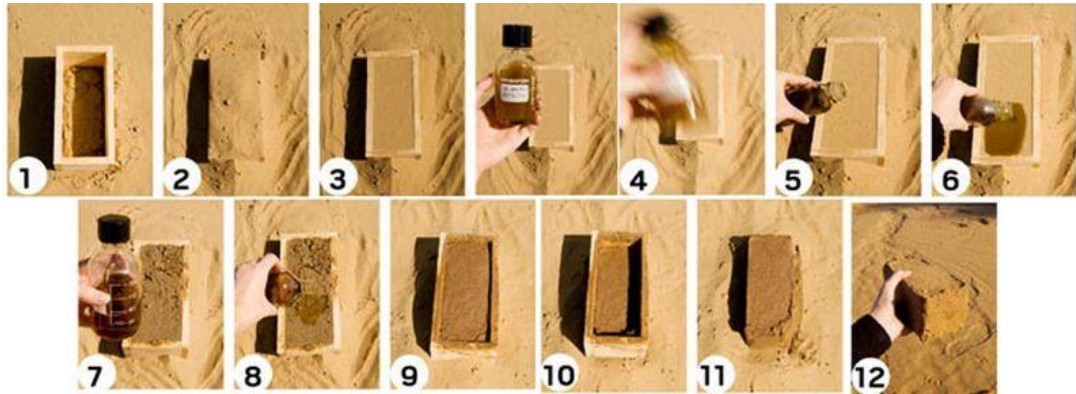
İnşaat mühendisi Nikos Bakas, geleneksel çimento kadar yüksek dayanımı ve dayanıklılığı olmayan bu malzemenin kolayca şekil verilebilir olması nedeniyle, malzemeyi beton olarak değil harç olarak kullanmaya karar verdiklerini belirterek, bu çevre dostu yeni yapı malzemesinin Avrupa'daki inşaat sektöründe kullanılmasını amaçladıklarını dile getirmektedir (Şekil 3.15).

Bir diğer uygulama olan **biyotuğla** ise benzer bir bakteriye süreç doğrultusunda üretilmeye çalışılan tuğladır (Şekil 3.16). Dünya genelinde bu konuda çalışanlardan bir tanesi, Kuzey Carolina Raleigh'deki BioMason adlı ısıya ihtiyaç duymadan tuğla ve inşaat taşı üreten şirkettir. Şirketin kurucu ortağı ve CEO'su mimar Ginger Krieg Dosier, geleneksel yöntemde kilin 2000 dereceye varan sıcaklıktaki fırında birkaç gün ısıtıldığı için, atmosfere yüksek oranda karbon salındığına vurgu yapmaktadır. BioMason, mikroorganizma enjeksiyon yöntemini kullanarak, dört gün süren işlem sonrasında ortaya çıkan tuğla ile evlerde ve diğer yapılarda kullanmak için yeterli sağlamlıkta sürdürebilir bir yapı malzemesi üretmeye çalışmaktadır (Iezzi ve diğer., 2019).



Şekil 3.16 Kum + bakteri + idrar = biyotuğla (Biomason, b.t)

Üretim sürecinde, kum dikdörtgenler prizması formunda bir kalıp içine alınıp sonrasında bakteri aşılacaktır. Bakteri kaplı her bir kum tanesinin çevresinde kalsiyum karbonat kristalleri oluşmaya başladığı süreç boyunca kalıplar, besleyicilik açısından zengin su ile sulanmaktadır. Böylelikle kristaller gittikçe genişlemekte ve kum taneleri arasındaki boşluklar dolmaktadır. Biyotuğla olarak adlandırılan tuğlalar, 3 ile 5 gün arasında kullanıma hazır hale geldiği gibi atık su, bir sonraki üretim sürecinde de kullanılmaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Biyotuğla üretim süreci (Throughthesandglass, 2010)

Dossier ve EPA(Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı)'ya göre küresel karbon salınımının %8'i, tuğla üretiminden gelmektedir. Küresel ısınma arttıkça, sürdürülebilir bir çevre konusundaki baskı ve sorumluluk daha da artmaktadır. Pazar araştırma şirketi IBISWorld'e göre, sürdürülebilir yapı malzemeleri 36,1 milyar dolarlık bir endüstri olup 2020'ye kadar sektörde her yıl %10,6 büyüme beklenmektedir (Bu Girişim Tuğla Yapımında Bakteri Kullanıyor, b.t).

BioMason şirketi birçok firma ile anlaşma sağlamış ve yatırım şirketlerinden de destek almıştır. Dossier (2019), "Amacımız etki yaratmak. Daha önce denenmemiş bir şeyi gerçekleştirmek, sınırları zorlamak istedik. Mevcut yöntemleri optimize ederek daha az zararlı ürün yaratmak yerine, zor olanı, tamamen baştan yaratmayı seçtik." diyerek tasarım ve yapı endüstrisi alanında alışagelmiş yapı malzemelerine benzer alternatifler yaratmaktan ziyade tamamen yapı üretim tekniklerini yeniden sorgulatacak, sürdürülebilir, doğa dostu bir malzemeyi gündeme getirmektedir.

Türkiye'de ise Türkiye Biyotasarım Takımı, benzer bir yapı malzemesinin üretimi üzerinde çalışmalarını yürütmektedir (Şekil 3.18). Mayıs 2016'da resmi bir "Disiplinerarası Ortak Çalışma Protokolü" çerçevesinde, Ege Üniversitesi, Dokuz Eylül Üniversitesi ve Manisa Celal Bayar öğretim üyelerinden sekiz kişi tarafından² hayata geçirilmiş, ortak bir araştırma, çalışma ve proje geliştirme platformu olan Türkiye Biyotasarım Takımı, bir yandan akademik alanda çalışmalar yürütmekte; bir yandan da tasarım, mimarlık ve çeşitli mühendislik alanlarında farklı girişimleri hedeflemektedir (Biodesignteam, 2015). Takımın, sürecin yönlendirilmesi ve sonuç ürününü dayanımının arttırılmasına ilişkin, 2017 yılında bir patent başvurusu mevcuttur. Hedeflerinden biri bakteriyel biyokalsifikasyon yöntemiyle ürün geliştirmek olan takımın, sürdürülebilir doğal ürünler ve yapı malzemeleri için çalışmaları devam etmektedir (Şekil 3.19).

² Doç. Dr. Tutku Didem Akyol Altun, Doç. Dr. Özge Andıç Çakır, Yrd. Doç. Dr. Gülten Köktürk, Yrd. Doç. Dr. Ayça Tokuş, Yrd. Doç. Dr. Feyzal Avcı Özkaban, Yrd.Doç.Dr.Aylin Şendemir Ürkmez, Dr.Tuğba Keskin Gündoğdu, Yrd.Doç.Dr. İrem Deniz



Şekil 3.18 Kum ve bakterinin çimentolaşma denemeleri (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 3.19 TBT tarafından farklı nitelikte kumlarla yapılmış denemeler (Kişisel arşiv, 2018)

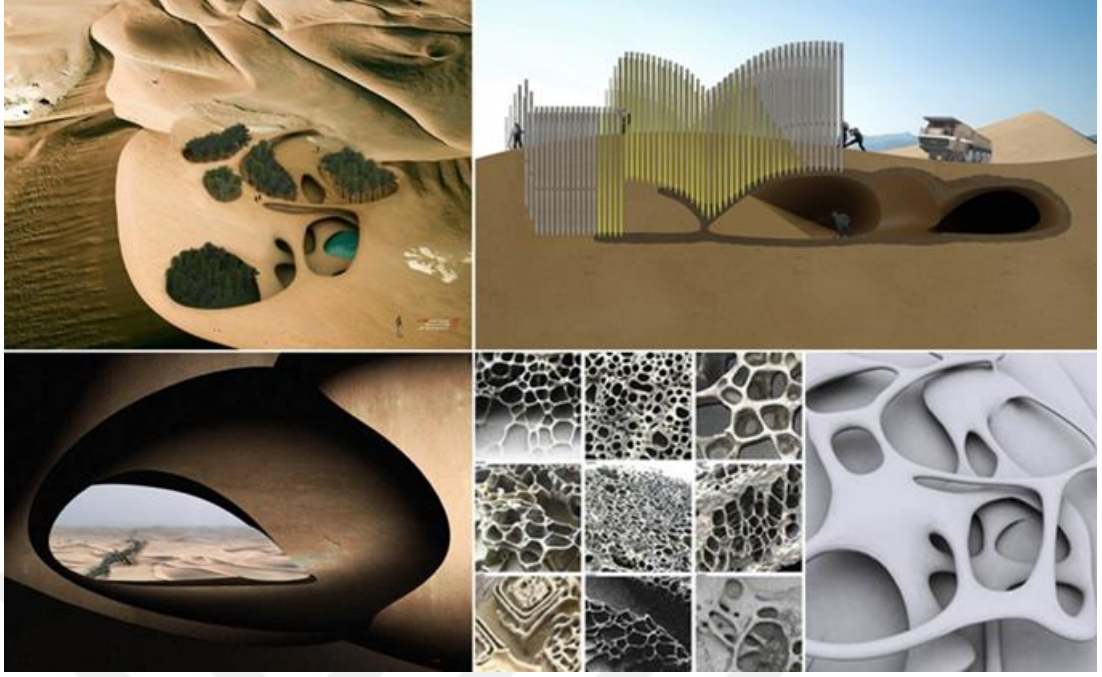
3.5 Bakteriyel Biyokalsifikasyonun Tasarım Alanında Kullanımına İlişkin Öneriler

Yaklaşık 15 yıldır bilim insanlarının araştırma konusu olan bakteriyel biyokalsifikasyonun tasarım alanında kullanımına ilişkin öneriler, mimarlık- doğa ilişkisi çerçevesinde biyoişbirlikçi yaklaşımların önem kazandığını göstermektedir. Günümüzde yapı malzemesi veya sürdürülebilir çevre için daha çok katkı maddesi niteliğinde kullanımları olsa da gelişen teknoloji ile birlikte ise bakteriyel biyokalsifikasyon, insanların hayatını kolaylaştıracak fonksiyonlar sağlamanın yanında doğayla uyum içerisinde olmayı, sürekli olarak büyümekte olan kentler için

“sürdürülebilir, ekolojik” yapılar önermektedir. Bu yaklaşımların ikisi de hem gerçek hem de ütöpik anlamda yaşam biçimlerimizin daha sağlıklı hale getirilmesi yönünde ve aynı zamanda mimarlık doğa ilişkisine vizyon kazandıracak olumlu başlangıçlar olarak nitelendirilmelidir.

3.5.1 Magnus Larson’un Çölleşmeye yönelik Önerisi

Kuraklık, çölleşme, ormanların yok olması, yangınlar ve iklim değışikliği gibi sorunlara, mimarlık pratiğinde de çözüm önerileri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Buna bir örnek olarak Londra Mimarlık Birliği öğrencilerinden Magnus Larsson tarafından, tasarlanan Büyük Sahra Çölü’nde doğu-batı yönünde 6000 kilometre boyunca uzanan suni olarak katılaştırılmış kumtaşından duvar verilebilir. Yapımı gerçekleştiği takdirde Larsson’un kumtaşı duvarı, Afrika kıtası yönünde ağaçlardan bir koruma bandı çekmeyi planlayan Yaşil Sahra Duvarı girişimini de destekleyecektir. Bakteriler ve kum tanecikleri kullanılarak hazırlanan bu taslak projede, kum tepelikleri mülteci evleri olarak işlev görürken aynı zamanda da çölleşmeyi engelleyen bir işlev taşımaktadır. Bu öneri, şu anda kullanılan su koruma, toprak yönetimi, ağaçlandırma, sürdürülebilir enerji, geliştirilmiş arazi kullanımı, doğal hayatı koruma, yoksunluğu azaltma gibi önlemlere göre oldukça büyük bir adım olarak nitelendirilmektedir. Larsson ayrıca, kum tepelerinin iç kısımlarının toprağın gübreli kalmasına, su ve gölge sağlanmasına ve bitkilerle hayvanların korunmasına yardımcı olacak şekilde birden fazla işlevi yerine getireceğini düşünmektedir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Kum tepeliklerinin mimariye dönüşümü, 2009 (Ted, 2009)

Holcim Vakfı'nın Sürdürülebilir Yapı Ödülleri'nde birincilik alan proje, nemli bölgelerde bulunan ve serbest kumu katılaştıran bir mikro organizma olan “*bacillus pasteurii*” kullanmayı önermektedir. Larsson, günün birinde kum zerreciklerinin rüzgâr esintisiyle belirli doku ve şekillere gelebileceğini ve bunların on yıl, yüzyıl ya da bin yıl içinde tekrar tekrar değişerek yeni yapılar ortaya çıkacağını varsaymaktadır. Kum tepeliklerinin bir açıdan hazır yapılmış binalar olduğundan bahseden Larsson, bu yöntemde tasarımcının yapması gereken şey, katı olmasını istediği yerleri katılaştırmak ve kalan kumu çıkartmaktır. Bu doğal süreç için sulak alanlarda ve bataklıklarda çok bulunan bir mikro organizma olan, kum yakalayıcı olarak nitelendirilen “*bacillus pasteurii*”, seyrek halde bulunan kum parçacıklarının üzerine serpiştirilerek kimyasal bir süreç başlatılmaktadır. Partiküller arasındaki boşlukları doldurmaya başlayan bakteri, süreç sonunda kalsit üretmekte ve partikülleri bir arada tutan bir çeşit doğal beton oluşmaktadır. Tüm betonlaşma süreci yaklaşık 24 saat sürmektedir.

Biyolojik süreci U.C. Davis üniversitesinden Jason DeJong adında bir profesörden öğrenen Larsson, kumu katılaştırmayı iki farklı yolla denemiştir. İlki, içi bakterilerle

dolu bir çeşit balon yapı yaratıp, balonun üzerine kumları yükledikten sonra balonu patlatarak, kumun içine bakterilerin yayılmasını ve onu katılaştırmasını sağlamak; birkaç yılın ardından kalıcı kültürleme stratejileri kullanarak, çölün o bölümünü yeşillendirmektir. İkinci alternatifte ise içi bakterilerle dolu enjeksiyon yığınlarını, kum tepcikleri boyunca enjekte ederek birincil bakteriyel yüzey oluşturulur. Sonra kum tepcikleri boyunca devam eden yığınlar ortamdan alınır ve kumun içinde kumdan bir kalıp vazifesi gören ve hiç algılanamayacak şekiller oluşturulabilir. Böylelikle kumu kumtaşına çevirerek yaşanabilir boşluklar çöl tepelerinin içinde oluşturulabilir. Bu noktadan sonra sonuç ürün neye benzemeli sorusunu soran Larsson, doğadan ilham alarak mağaralarda tafoni adlı oluşumdan etkilenmiştir. Mimarlık ve doğa ilişkisinin 21. yüzyılda nasıl ele alındığını göstermesi, biyoloji biliminin mimari tasarıma etkisinin sorgulanması ve gelecek strüktürler ve farklı bakış açıları kazandırma anlamında önemli bir projedir.

3.5.2 Türkiye Biyotasarım Takımı- Çocuk Oyun Alanı Tasarımı

2015 yılından bu yana bakteriyel biyokalsifikasyon üzerine çalışmalar yürüten Türkiye Biyotasarım Takımı, biyoloji ve mimarlık ortaklığında düzenlediği Biyotasarım atölyelerinin ilkinin, 2015 yılı Kasım ayında VII. Uluslararası Biyomühendislik Kongresi kapsamında gerçekleştirmiştir. İzmir Mimarlık Merkezi'nde biyomühendislik ve mimarlık öğrencilerinin³ katılımıyla gerçekleşen atölye kapsamında ortaya çıkan ürünlerden biri olan Çocuk Oyun Alanı, sonraki süreçte TBT tarafından sergiye uygun formatta hazırlanarak “Kumdan Mimariler” başlığı ile “Çiçek ve Çocuk” temalı Uluslararası Expo 2016 Antalya Fuarı'nda sergilenmek üzere seçilmiş ve bir yıl süreyle Antalya Expo Center'da sergilenmiştir (Şekil 3.21).

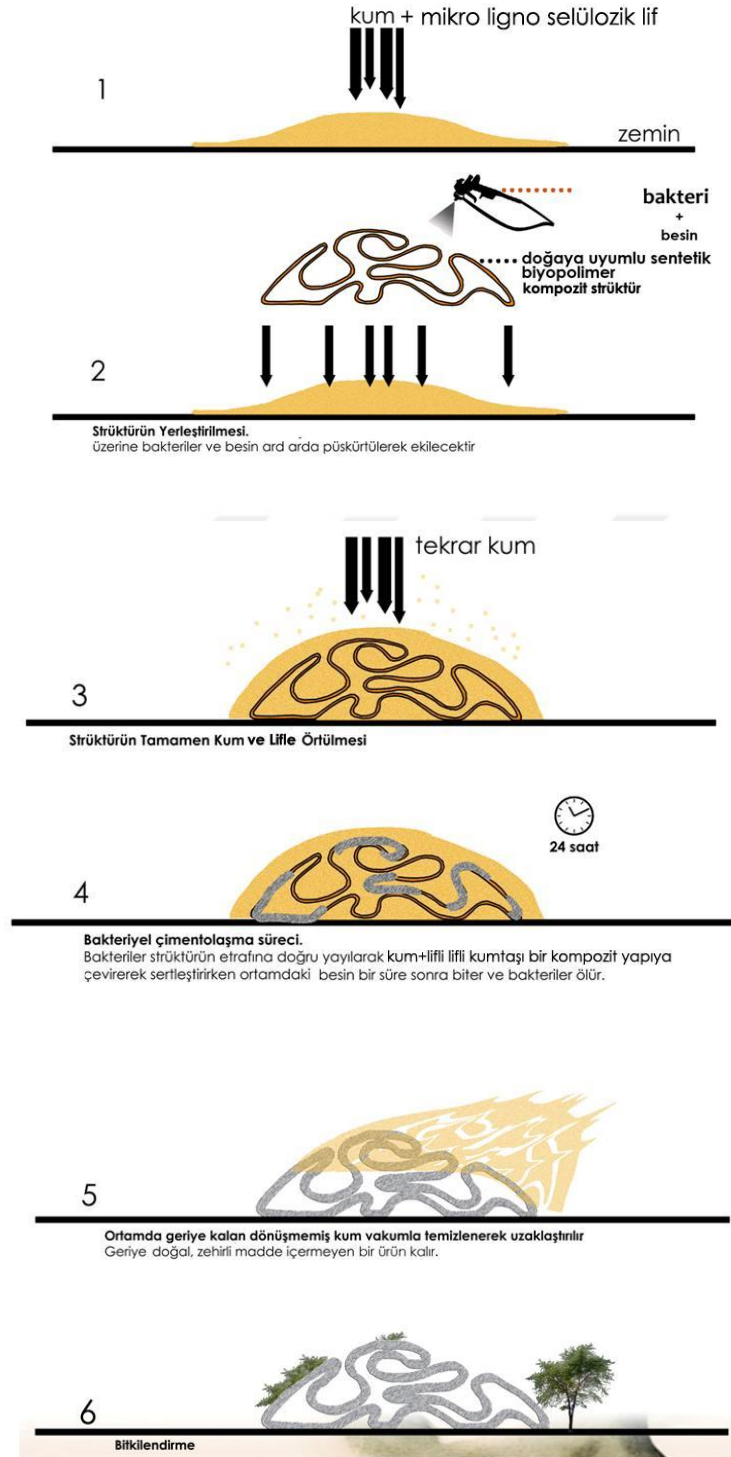
³ Tez sahibinin de katılım sağladığı atölye katılımcıları; Bora Örgülü, Selma Uzunoğlu, Pelin Sağlam Metiner, Eyüp Bilgi, Burcu Filiz Demirci'dir.



Şekil 3.21 Antalya Expo Center Botanik Bölümü, 2016 (Kişisel arşiv, 2016)

Bu projenin temel amacı çocuklarımıza bırakabileceğimiz sürdürülebilir bir gelecek için, kentsel çevrelerin tasarımında bilimsel gelişmelerin ve teknolojinin yardımıyla alternatif yöntemler aramaktır. Bu doğrultuda proje biyoloji ve tasarım ara kesitindeki çalışmalara odaklanarak, kireçtaşı üretebilen bakteri türleri hakkındaki araştırmalardan yola çıkar. Projenin temel konsepti, kumtaşı üretebilen bakteri türlerini kullanarak, kum alanları kendiliğinden oluşmuş mimari ürünlere dönüştürmek üzerine kuruludur. Bu genel konsept çerçevesinde mimari ve kentsel çevrelerin tasarımında pek çok işleve yönelik farklı tasarımlar öngörülebilecektir. Buna bir ilk örnek olarak geliştirilen organik formlu tasarım, "**Çocuklar İçin Doğal Süreçlerle Üretilmiş Bir Oyun Alanı**" önermektedir (Şekil 3.22).

Sürece dair teorik çerçeve ve konsept



Şekil 3.22 Bakteriyel biyokalsifikasyon yöntemi ile çocuk oyunu alanı üretimi, 2016 (Akyol Altun, 2015)



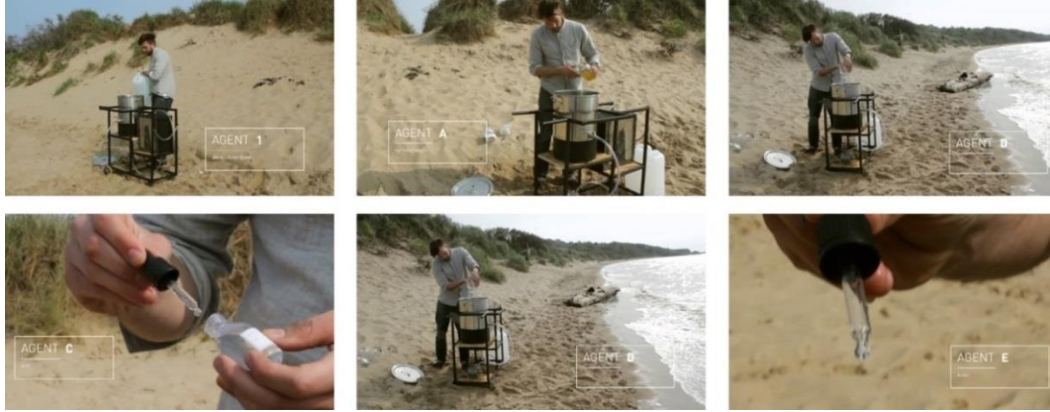
Şekil 3.23 VII. Kongresi kapsamında TBT tarafından gerçekleştirilen 1.Biyotasarım Atölyesi, Kasım 2015 (Biodesignteam, 2015)

Farklı disiplinlerden birçok akademisyen ve araştırma kişilerin katıldığı atölyede biyomimetik tasarım konusunda fikir projeleri üretilmiştir (Şekil 3.23). Atölye kapsamında ortaya çıkan ürünlerden biri olan Çocuk Oyun Alanı fikir projesi, çeşitli eskiz ve maketler üzerinden uygulanabilirliği tartışılmış ve Larsson'ın fikrine benzer alternatif çözümler üretilmiştir. Önce oyun hamuru ile denemesi yapılan çocuk oyun alanı maketi sonrasında gazbeton ve 3d printer sayesinde mısır nişastası ve şeker kamışından üretilen organik bir biyopolimer olan PLA adlı filament ile prototip üretimleri sağlanmıştır (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 Atölye kapsamında çocuk oyun hamurundan yapılan deneysel maket ve sergi için yaptırılan gazbeton maket, 2015 (Kişisel arşiv, 2016)

3.5.3 Peter Trimble - Oturma Birimi Üretimi



Şekil 3. 25 Peter Trimble – Mikrobiyal üretim aşamaları, 2014 (Newatlas, 2014)

Edinburgh Sanat Okulu öğrencisi Peter Trimble, tez çalışmasının bir parçası olarak, “mikrobiyal üretim” olanaklarını araştırmaktadır. İdrarda bulunan bakteri ve ürenin, konvansiyonel betondan daha az kaynak gerektiren yeniden kullanılabilir bir materyal oluşturmak için nasıl kullanılabileceğini araştırmıştır (Şekil 3.25).

Biyolojik beton / Biostone adı verilen malzemeyi oluşturma prosedürü, gerekli son şekle sahip bir kalıbın, bir bakteri besiyerine (bir besiyerinde yetiştirilen) bir bakteri solüsyonunu kalıbın içine pompalamadan önce ve bir gece boyunca kendini oluşturmak üzere karışımı terk etmeden önce kumla doldurulmasını içerir. Daha sonra kalsiyum klorür, üre ve besin sıvısının bir çözeltisi kalıba pompalanır. Bakteriler, kalsiyum klorürü absorbe ederek, kalıbın içinde çimento benzeri bir karışımı kalsiyum karbonat haline dönüştürürler.



Şekil 3. 26 Peter Trimble Üretimi Oturma Birimi, 2014 (Dezeen, 2014)

Peter Trimble tarafından tasarlanan ve bakterili karışımın kumun içinde kolay dağılımını sağlamak üzere Dupe adı verilen bir makinenin de geliştirildiği oturma birimi denemesi ise bakteriyel biyokalsifikasyonun küçük ölçekte de olsa denendiği bir süreci içermektedir (Şekil 3.26).

Enerji üretimi ve hammadde kıtlığı ile ilgili soruların giderek fazlaştığı bir dünyada, bu proje yenilikçi ve sürdürülebilir malzeme üretiminin önemi vurgulanmaktadır.

3.6 Bakteriyel Biyokalsifikasyon İle Bir Oturma Birimi Denemesi

1990'lı yılların sonunda biyomimetik yaklaşımın öneminin kavranmaya başlanmasıyla birlikte doğadan esinlenme/öğrenme/uyarlama/modelleme gibi kavramlar doğrultusunda tasarım alanında da yeni bir bakış açısı gelişmiştir. Her türlü tasarım sürecinde doğadaki oluşumları gözlemleyerek yürütülen ön araştırmalar, enerji korunumu, malzeme, dayanıklılık, hafiflik gibi çeşitli konularda sadece tasarımcı ve mimarlara değil, mühendislere de yol gösterici olmaktadır (Selçuk Arslan ve Gönenç Sorguç, 2007).

Le Corbusier'in yaşayan bir makineye benzettiği 20. yüzyıl mimarlığı, 21. yüzyılda canlılar gibi gerçek anlamda yaşayan birer organizmaya doğru evrilme potansiyeli taşımaktadır. Burada vurgulanmak istenen, akıllı yapılar, ekolojik ve sürdürülebilir mimarlık arayışları ile aynı kaygıları taşıyan doğal çevrenin simbiyotik dengesini bozmamak ve ona uyumlu yapılar tasarlamaktır. Bu da genetik bilimi, moleküler nanoteknoloji ve sentetik biyoloji teknolojilerinin de katkısıyla, doğanın

içinde yine doğal süreçlerle oluşturulmuş yaşayan yapılar tasarlayarak mümkün olabilecektir.

Doğa, enerjiyi her zaman daha etkili ve verimli kullanır; kendi üretim sistemi ve malzemeleri, insanoğlunun yapay olarak ürettiği ve üretim sürecinde çevresel zararları olan pek çok malzeme düşünüldüğünde masum ve zararsızdır. Mimaride biyomimikri genelde anlaşıldığının aksine doğadaki şekilleri kopyalamak değil; doğanın fikir ve çözümlerinden ilham almakla ilişkilidir. Doğanın yol göstericiliğinde farklı tasarım sorunlarını –sürdürülebilir mekanlar, binalar, geri dönüşebilen çevreci malzemeler, vb.- çözebilme konusunda interdisipliner ilişkiler kaçınılmazdır.

Yaşayan, yeniden üreten süreçleri değerlendirmek, çevreye zarar vermemek için çevre etkin doğal malzemeleri en az kullanan, atık bırakmayan, az enerji harcayan ve ürünü en yüksek verimle üretmeye çalışan bir üretim tarzıdır denilebilir. Çevreye duyarlı üretimin temel amacı, doğanın dengesini bozmadan ‘kaynak etkinliğini artırırken, atıkların çevreye olan etkilerinin en az düzeye indirilmesi ve zararlı kimyasalların kullanılmaması; eğer zorunlu ise, bunların çevreye zararlarının kaldırılması olarak belirtilmektedir. Bu temel amaca ulaşmak için sürdürülebilir üretim süreci tasarlanmalı, üretimin planlanması ve kontrolü yapılmalıdır. Sürdürülebilir üretim, çevre koruyucu ya da geri dönüştürücü malzemelerle, temiz teknolojiler kullanarak, geleceğe yönelik üretim sistemleri yaratılmasıdır. Bu noktada **bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin mimari tasarımda bir araç olarak kullanılması**, doğadaki yerimizi hatırlatan, doğal döngüleri ve süreçleri aktif kılan tasarımlar adına önemlidir. Bu çalışmada biyoişbirlikçi bir yaklaşım olarak bakteriyel biyokalsifikasyon yöntemini kent mobilyaları üzerinde deneyerek, henüz üretim ve tasarım sürecinin başlangıcında, sürdürülebilirliğin ve ekolojik yaklaşımların kullanımına ilişkin farkındalığı artırmak hedeflenmiştir. Bakteriyel biyokalsifikasyona ilişkin incelenen literatür doğrultusunda sürecin en kolay ve hızlı denenebileceği alanının bu olduğuna karar verilmiştir.

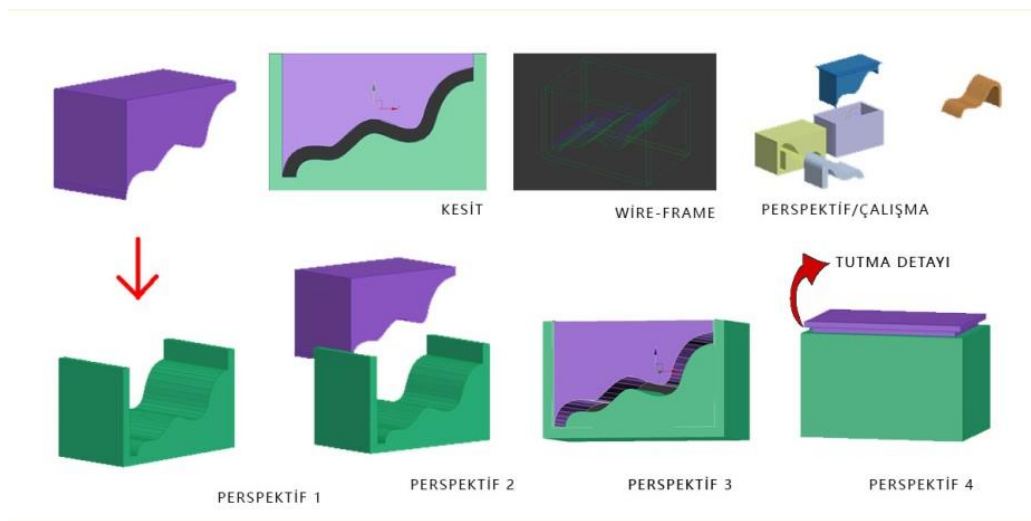
Tezin ana hedefine yönelik olarak bakteriyel biyokalsifikasyon süreci kullanılarak, biyoişbirlikçi yaklaşımların kentsel tasarım ölçeğinde bir ürün üretmenin olasılıkları araştırılmış, çimento, beton ve türevi yapılara alternatif

olabilecek şekilde kullanım potansiyelleri tartışılarak bu üretim yönteminin özgünlüğü ve tasarım alanında, ölçeklenerek uygulanabilirliği üzerine çalışılmıştır.

Tezin alan çalışmasının da yer aldığı bu bölümde kentsel tasarım elemanlarının üretiminde biyoişbirlikçi tasarım yaklaşımı olarak bakteriyel biyokalsifikasyonun kullanımına odaklanılmış; bir prototip denemesi üzerine çalışılmıştır. Laboratuvarda gerçekleştirilen gözleme dayalı deneysel süreçte, bakteriyel biyokalsifikasyon birebir deneyimlenmiştir. Bu süreçte akademik alanda yürüttüğü çalışmaların yanı sıra tasarım, mimarlık ve çeşitli mühendislik alanlarında farklı çalışmalar ve girişimler hedefleyen bir araştırma, çalışma ve proje geliştirme platformu olan Türkiye Biyotasarım Takımı'ndan bakteriyel biyokalsifikasyon sürecine ilişkin uygulama desteği alınmıştır.

3.6.1 Prototip Tasarımı, Model Çalışması ve Kalıp Üretimi

Prototip tasarımında, öncelikle bakteri ve kum karışımının kalsifikasyon sürecini tamamladıktan sonra kalıptan kolayca çıkabilmesi öngörülmüştür. Tasarım sürecinde eğrisel form kullanılmasının sebebi; yapı ögesinin keskin kenar sayısını olabildiğince azaltmaktır. Yarı eğik, şezlong benzeri eleman, kalıptan çıkarıldıktan sonra kendi başına ayakta durabilecek mukavemete sahip bir strüktüre imkân verecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 Prototip tasarımı

Tutma detayı düşünölen kalıpta bakteri ve kumun istenen şekli alabilmesi için arada yeterli bir boşluğun bırakıldığı; iki tabakalı bir kalıp tasarlanmıştır. Karışım, 3D yazıcı teknolojisii ile PLA filamentten üretilen kalıbın içine, üst tabaka ile alt tabaka arasına sıkıştırılmıştır.



Şekil 3. 28 Prototip tasarımı ve sonuç ürün / İlk deneme (Kişisel arşiv, 2018)

Ancak ilk deneme sonrasında ürünün kalıba yapıştığı görölmüş, daha kolay çıkabilmesi için kalıp yağlanmış ve üzerine file serilmiştir. Bunun yanı sıra üretim sürecinde üst kalıp tabakasının yeterince işlemediği fark edilerek sadece alt ünite kullanılmıştır (Şekil 3.28).

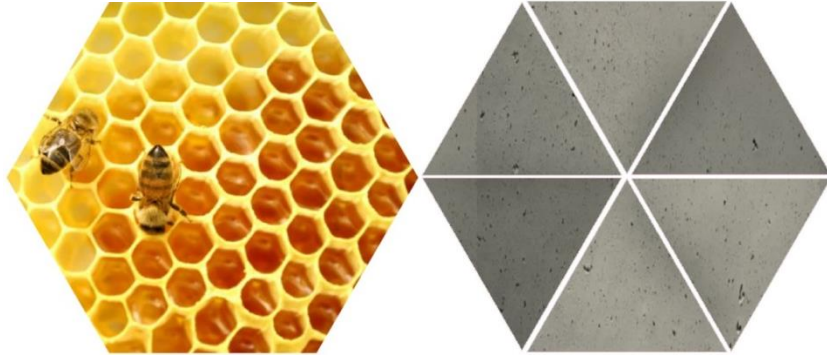
Buradan edinilen deneyimlerle ikinci aşamada ölçek büyütmesine gidilerek birebir ölçekte bir oturma birimi üzerine çalışılmıştır. Büyük ölçekteki prototip, alanı ve dolayısıyla üç boyutlu hacmi minimize etmek amacıyla üçgen kesitli eğik bir prizmatik hacim halinde tasarlanmıştır.

Tasarımda;

- Formun kalsifikasyon süresince mukavemetinin koruyabilmesi adına asal bir geometriye temellenmesi,
- Büyük ölçekli kalıp üretiminde eğrisel yüzeylerin üretimindeki zorluk ve yüzey birleşimlerinin kolaylığı sebebiyle ortagonal formların tercih edilmesi,
- Kalıba döküm kolaylığı ve sonuç ürünün bütünselliğini sağlamak üzere detaysız ve yalın hatlar,
- Yere bakan yüzey alanının olabildiğince yere temas etmesi
- Sonuç ürünün alışıl gelmiş kentsel donatılardan farklılık taşıması, modüler organizasyon ile çoklanmaya olanak sağlayabilmesi hedefiyle, üçgenler ve diğer üçgen çıkışlı formları oluşturma potansiyeli ve bu doğrultuda işlevsel olabilirliği

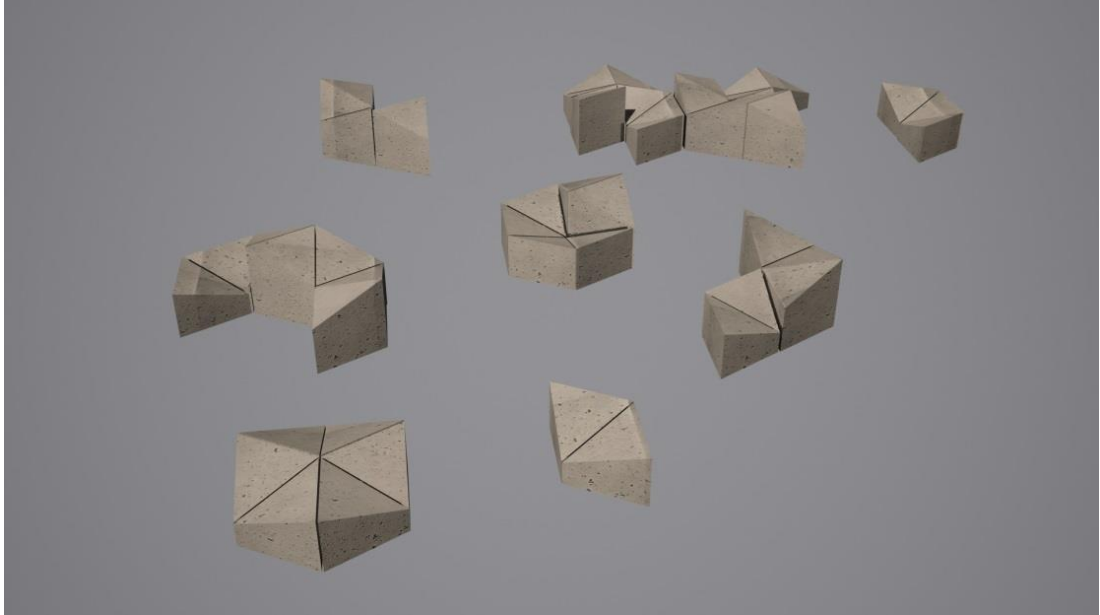
dikkate alınmıştır.

Sonuç ürünün tasarımı için seçilen **altıgen** formu, hem yüzeyi boşluk bırakmadan bölmek için uygundur; hem de belirli bir alanı çevre/alan oranını en düşüğe tutacak şekilde parçalayabilen minimal bir yüzeydir. Düzgün altıgenlerden oluşmuş bölmeler arasında boşluk kalmadığı için kullanılan alanın verimliliği artar. Ayrıca altıgen yapı kare veya dikdörtgen yapıya göre daha dayanıklıdır ve kolay hasar görmez. Köşelerde kırılma tehlikesi de ortadan kalmaktadır. Bu sebeplerden ötürü seçilen altıgen formu, doğadaki strüktürel birçok yapı formunda (kar tanesi, bal peteği) da kendini göstermektedir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29 Altıgen formu

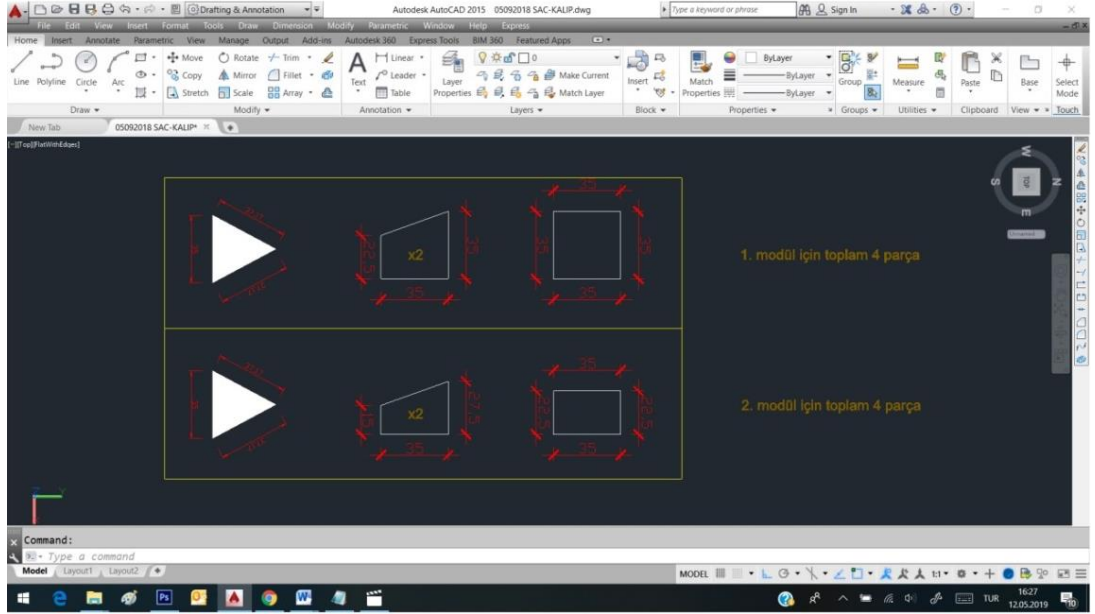
Tasarlanan sonuç ürünün modüler sistem içerisinde birbirini tamamlaması, birbirine eklemlenebilmesi, kentsel ortamda farklı dizilim ve düzenlere imkan verebilmesi; dolayısıyla kullanıcının sonuç ürün ile farklı kullanım biçimleri geliştirebilmesi önemsenmiştir (Şekil 3.30, Şekil 3.31).



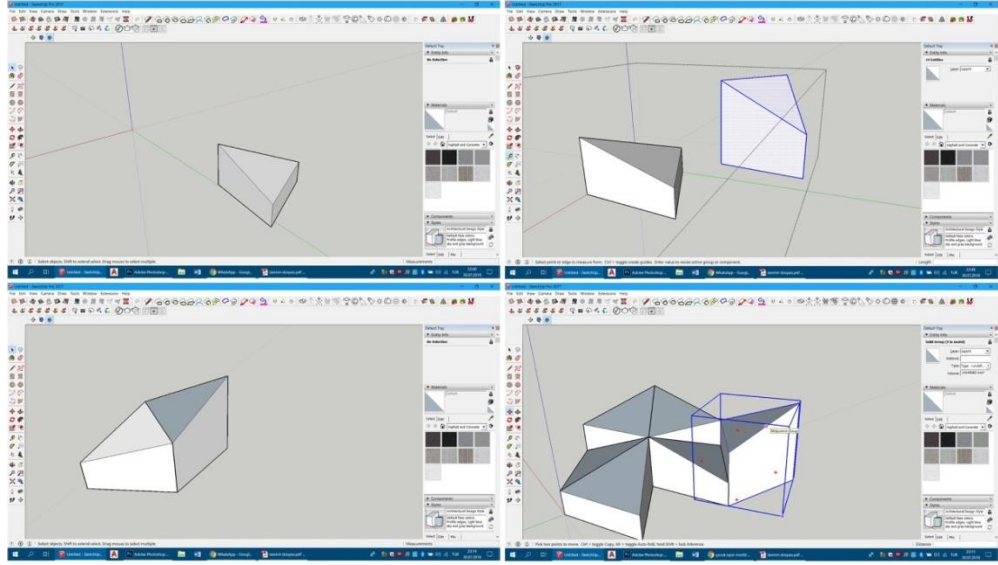
Şekil 3.30 Tasarlanan sonuç ürünün kullanıcı isteğine göre biçimlenmesi



Şekil 3.31 Tasarlanan sonuç ürünün modüler sistem içerisinde birbirini tamamlaması



Şekil 3.32 Tasarlanan sonuç ürünün iki boyutlu çizimleri



Şekil 3.33 Tasarlanan sonuç ürünün üç boyutlu çizimleri

Modellemesi yapılan kentsel oturma birimi için hazırlanan kalıp, farklı malzemelerden yapılabildiği gibi aynı zamanda farklı yapım yöntemleri de bulunmaktadır. Tez kapsamında üretimi maliyeti düşük, kolay üretilen bir kalıp tasarlanmıştır. Öncelikli olarak, kalsifikasyon sonrası sertleşen kumun içinden çıkabileceği rahatlıkta ve esneklikte bir kalıp tercih edilerek sert polistiren köpük malzeme tercih edilmiştir (Şekil 3.34).



Şekil 3.34 Modellemesi yapılan sonuç ürün için hazırlanan kalıp üretimi (Kişisel arşiv, 2018)

3.6.2 Laboratuvar Denemeleri ve Üretim Aşaması

Çalışmanın ilk aşamasında, laboratuvar koşullarında bakteri suşlarının canlandırılması ve kuma karıştırılacak sıvı ortamın hazırlanması gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.35).



Şekil 3.35 Laboratuvar koşullarında bakteri suşlarının canlandırılması (Kişisel arşiv, 2018)

Bunun için öncelikle otoklav sepetine konularak 121 °C' de 15 dk sterilize edilmiş erlenler içinde mikroorganizmanın büyümesi için gerekli besiy ortamı hazırlanmış ve petrideki bakteriler laminar akış kabininde erlenler içerisindeki sıvı ortama aktarılmıştır (Şekil 3.36).



Şekil 3.36 Petrideki bakteriler laminar akış kabininde erlenler içerisindeki sıvı ortama aktarılması (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 3.37 İnkübatörde bekletme işlemi (Kişisel arşiv, 2018)

Sonrasında erlenler, 35 ± 2 °C aralığında çalkalamalı inkübatörde gerekli süre bekletilmiş ve kuma karıştırılmak üzere hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.37).



Şekil 3.38 Hazırlanan bakteri çözeltileri ve besi ortamı için gerekli malzemeler (Kişisel arşiv, 2018)

Laboratuvar ortamında küçük numunelerde ön denemeler yapılarak sertlik derecesi ölçülmüştür. Sonrasında denemesi yapılacak olan prototip için gerekli besi ortamı hazırlanmıştır (Şekil 3.38). Prototipin aldığı kadar kum tartılarak besi ortamı katı olarak kuma ilave edilip karıştırılmıştır. Kalıbın yamuk yüzeyi ile zemin arasına kalıbı desteklemesi amacıyla küçük aparatlar koyulmuştur. Düz yüzeyi üst tarafta kalacak şekilde, sıvı bakteri çözeltileri ve kum kalıba dökülmüştür (Şekil 3.39). Eş zamanlı olarak kum ve sıvı bakteri çözeltileri birbirine yedirilerek karışım işlemi tamamlanmıştır. Karıştırma işlemi sırasında karışıma yardımcı bir eleman kullanılması, sıvı bakteri çözeltilerinin prototip içerisindeki bütün kuma eşit bir şekilde dağılması açısından önemlidir. Sonrasında hazırlanan prototip, 35 ± 2 °C ortam sıcaklığına dikkat edilerek kuruması için 7 gün süre ile önce kapalı alanda sonra güneşte bekletilmiştir (Şekil 3.40).



Şekil 3.39 Bakteriyel biyokalsifikasyonun sonuç ürün üzerinde denenmesi (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 3.40 37 °C ortam sıcaklığına kurumaya bırakılan kum+bakteri çözeltisi (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 3.41 Sertleşme sonrası elde edilen sonuç ürün (Kişisel arşiv, 2018)

Alınan sonuçlar değerlendirildiğinde insan ölçeğinde kullanılabilir ve üzerine oturulabilir sertlikte bir kentsel donatı elemanı elde edilmiştir (Şekil 3.41). Bununla birlikte süreçte ve sonuç üründe karşılaşılan problemler ve olası çözüm önerileri iki kategoride ele alınabilir. Bunlar;

a. Kalıp sorunları;

- Strafor kalıbın kesimi insan eliyle yapıldığı için işçilik hataları olasıdır. Kesimde otomasyon sistemler kullanılabilir.
- Kalıbın yüzey birleşimlerinde açılı olmaları sebebiyle zorluk yaşanmıştır. Bu durum sonrasında çözeltilerin düzgün şekil almasında da sorun yaratmıştır.
- Kalıp birleşimleri silikon malzemeyle gerçekleştirilmiş olup sıvı sızdırmazlık testi yapılmasına rağmen, kum ve bakteri çözeltilisinin ağırlığı nedeniyle küçük

sızdırmalar olmuştur. Söz konusu durum çözeltinin yoğunluğunu / oranlarını değiştirdiğinden ve sertleşme kalitesini etkilediğinden farklı birleşim detayları düşünülmelidir.

- Sonuç üründe strafor kalıbın yarattığı yüzeysel bozukluklar söz konusu olmuştur. Farklı kalıp malzemesi veya ürün ile kalıp arasında kaygan, şeffaf, jelatinimsi bir ara eleman düşünülebilir.
- Strafor kalıbın kenar pah yerlerinin kaybı söz konusu olmuştur. Sonrasında zımparalama ile bu giderilebilir.

b. Sonuç ürün problemleri;

- Form, modüler üretmeye olanak verse de tekil bir eleman olarak açılı köşeler, eğrisel formlara göre daha fazla deforme olmuştur.
- Sonuç üründe, bakterinin her noktaya eşit bir şekilde dağılamaması sebebiyle ufalanma ve parçalanma problemi yaşanmıştır. Büyük ölçekli olduğunda derinlere girebilen bir mikroenjeksiyon yöntemi geliştirmek gereklidir.
- Nem ve suya karşı dayanıklılığın oldukça az olduğu tespit edilmiştir.
- Sertleşme sürecinden sonra, sonuç ürünün fazlasıyla ağırlaşması kullanılabilirlik açısından olumsuz bir durum teşkil etmektedir.

3.8 Bölüm Sonucu

Sürdürülebilir ve düşük karbon salımı içeren süreçlerin zamanla önem kazandığı günümüzde, bakteriyel biyokalsifikasyon olayı, yaklaşık 20 yıldır bilim insanlarının araştırma konusu haline gelmiştir. Kalsiyum karbonat çökmesi reaksiyonu olarak adlandırılan olay doğada değişik biçimlerde meydana geldiği görülmektedir. Mimarlık-doğa arakesitinde ise biyotasarımda, doğada var olan biyolojik süreçler kullanılarak, problemlerin çözümüne doğal bakış açıları getirilmekte ve bununla birlikte sürdürülebilir çevreye duyarlı tasarım ürünlerini üretmek amaçlanmaktadır. Dolayısıyla biyoişbirlikçi bir yaklaşım olan bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin, mühendislik alanlarında daha çok olmakla birlikte tasarım alanında, az sayıda örnekte olsa da, bir araç olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Beton çatlaklarının onarımı, zemin güçlendirme çalışmaları, restorasyon uygulamalarında kullanımlarının yanı sıra, gelişen teknoloji sayesinde mimarlık ve tasarım alanında da potansiyelinin olduğu görülmektedir.

Bu doğrultuda bu tez çalışması kapsamında, geleneksel yapım yöntem ve süreçlerine alternatif bir yöntem olan bu yeni yaklaşımın doğru anlaşılması ve potansiyellerinin ortaya çıkarılması hedeflenmiş ve kentsel ölçekte bir prototipi denenmiştir. Yapılan çalışmada, bakteriyel biyokalsifikasyonun kent mobilyalarına uygulanabilirliğinin daha kolay olduğu düşünülerek; bu biyolojik sürecin yönlendirilmeye çalışıldığı, doğayla uyumlu, herhangi bir toksik madde ya da çevresel zarar içermeyen, farklı ölçek ve çeşitlilikte ürün geliştirmeye yönelik, laboratuvar denemeleri ve üretim sürecinin gözlendiği bir oturma birimi denemesi yapılmıştır. Mimarlık ve doğa arakesitinde interdisipliner çalışmanın katkılarına dikkat çekmeyi hedefleyen bu deneme, bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin doğru anlaşılması ve mimarlık ve tasarım alanlarında doğru yönlendirilebilmesi açısından önemli bir adımdır.

BÖLÜM DÖRT

DEĞERLENDİRMELER VE SONUÇ

21.yüzyılın teknolojik ve bilimsel gelişmelerinin içinde disiplinlerarası çalışmalar, oldukça ve giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesinin yanı sıra, fen bilimleri özelinde biyoloji ve biyoteknoloji alanlarındaki göze çarpan çalışmalar, mimarlık ve tasarım alanında yenilikçi bir bakış açısı kazandırmaktadır. Bu bakış açısının güncel bir türü olan “doğadan esinlenme” fikri ise aslında eski dönemlerden beri bilinen biyomimetik yaklaşımdır. Doğada var olan sistem ve süreçler incelenerek tasarımdan üretime kadar olan her aşamada bir tasarım stratejisi olarak kullanılabilir. Doğal kaynakların tüketilmesi, küresel ısınma, biyoçeşitliliğin azalması gibi birçok çevresel probleme karşılık sürdürülebilir ve düşük karbon salımı içeren süreçler giderek önem kazanmakta; ağırlıkla sentetik biyoloji ve biyomühendislik alanındaki gelişmeler paralelinde yenilikçi biyotasarım ürünleri üzerine çalışmalar artmaktadır.

Tarihsel sürece bakıldığında, ilk çağlardan beri doğayı izlemek, anlamak ve görsel çıkarımlarda bulunarak yapı inşa etmek bir tasarım yöntemi olmuştur. Erken dönemde daha çok biçimsel analogiler şeklindeki bu yaklaşım, günümüzde bilimsel ve teknolojik gelişmeler sayesinde mimarlık-doğa ilişkisinin daha kapsamlı bir şekilde ele alınmasıyla farklı sorgulamaları mümkün kılmıştır. Mimarlık literatüründe, mimarlık-doğa ilişkisine bakıldığında, biyomimetik tasarımı sorgulayan ilk isimlerden Janine Benyus’a göre, doğadan esinlenme düzeyleri, organizma düzeyi, davranış düzeyi ve ekosistem düzeyi olarak kabul görmüştür. Ancak bunlar tarihsel süreçte mimarlık-doğa ilişkisinin nasıl geliştiği ve mimarlık pratiğinin doğadan nasıl etkilendiğinin incelendiği tezin ikinci bölümünde, günümüz tasarım yaklaşımları açısından yetersiz bulunmuş ve yeni bir sınıflandırma önerilmiştir. Biçim üretmeye yönelik biyomimari / tasarım örnekleri, canlı davranışlarını ya da biyolojik süreçleri temel alan biyomimari / tasarım örnekleri ve tezin odağında yer alan biyoişbirlikçi mimari / tasarım örneklerini kapsayan sınıflandırma içerisinde, canlı organizmaların tasarıma direkt entegre olduğu üçüncü kategori, 21.yüzyılın giderek öne çıkan farklı bir eğilimine dikkat çekmektedir. Bu

tez çalışmasının odağında yer alan **bakteriyel biyokalsifikasyon** da, canlılarla işbirliği içinde, biyoişbirlikçi bir tasarım yaklaşımıdır.

Bakteriyel biyokalsifikasyon, özellikle son 20 yılda gündeme gelen ancak az sayıda örneği görülen bir süreçtir. Dünya genelinde ve Türkiye’de az sayıda ancak heyecan verici çalışmalar arasında, doğal ve biyolojik bir süreç olan bakteriyel biyokalsifikasyon, mevcut yapı sektörü için daha ekonomik, verimli ve çevre dostu bir üretim süreci ve çimento alternatifi bir sonuç ürün sunmaktadır. Mimari tasarım alanı için de kullanılabilir bir potansiyel olan bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinde, *Sporosarcina pasteurii* bakterisinin metabolik aktivitesi sonucu açığa çıkan CaCO_3 , doğada kolaylıkla bulunabilen kum, toprak gibi materyalleri birbirine bağlayarak sertleştirmektedir. Bu üretim sürecinde kullanılan biyolojik yol izleri, alışlagelmiş yapım yöntemlerine ve tasarım süreçlerine karşın alternatif ve yenilikçi bir yaklaşıma işaret etmektedir.

Literatürde biyokalsifikasyon sürecinin yani bakterilerin metabolik aktiviteleri sonucu ortaya çıkan CaCO_3 ’ın kum, toprak gibi materyalleri birbirine bağlama yeteneklerinin, daha çok inşaat mühendisliği ve çevre mühendisliği alanlarındaki çalışmalara konu olduğu; ancak mimarlık ve tasarım alanında kullanımına ilişkin yeteri kadar çalışma olmadığı görülmüştür. Özellikle ürün geliştirme konusunda mimarlara/tasarımcılara büyük bir fayda sağlayacağı gibi, sürdürülebilir bir geleceğin hazırlanmasında da geliştirilebilir ve tutarlı bir tasarım aracı olarak öngörülmektedir. Mimar/tasarımcıların bakteriyel biyokalsifikasyon sürecini yönlendirmesi göz önünde bulundurularak, söz konusu tez çalışmasında, canlı organizma olan bakterilerin mimarlık ve tasarım alanındaki rolü sorgulanmakta ve bu bağlamda **literatüre özgün bir katkı** koymak hedeflenmektedir.

Tez kapsamında, kent mobilyalarına uygulanabilirliğinin daha kolay olduğu düşünülerek, bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin gözlemlendiği ve yönlendirildiği, önce küçük ölçekli bir prototipi denenmiş olan, kentsel ölçekte bir oturma birimi tasarlanmıştır. Laboratuvarında yapılan denemeler sonucunda kum maksimum düzeyde sertleştirilmeye çalışılarak, optimum verimliliğe ulaşılmaya çalışılmıştır. İnsan

ölçeğine uygun bir denemeye gidildiğinde ise birtakım sorunlar ile karşılaşmıştır.

Kullanıcı ve çevre odaklı tasarlanan ürünün oluşabilmesi için aynı zamanda üretilen kalıbın da biyolojik bir süreç olan bu üretim yöntemine ne kadar uygun tasarlandığı önem arz etmiştir. Hem birleşim noktalarındaki montaj problemleri hem de kumu sertleştirecek bakteri çözeltisinin kuma eşit oranda yayılamaması sonucu sertleşemeyen kısımda ürünün deforme olduğu görülmüştür. Küçük ölçekli prototip denemelerinde sonuç ürünün sorunsuz sertleşmesi ve deforme olmaması bakteriyel çözeltinin kuma karışımının ölçek küçüklüğü nedeniyle tam olmasına bağlıdır. Bu doğrultuda daha büyük ölçek denemelerde olabildiğince derinlere girebilen bir mikroenjeksiyon yöntemi geliştirmek gerekmektedir. Bu yöntem sayesinde bakteri çözeltisinin ulaşamadığı yerlerdeki ürün kaybı engellenerek, tasarımı yapılacak ürün ve kalıp özelinde bir kısıtlama söz konusu olmayacaktır. Bunun yanı sıra sonuç ürünündeki temel problem neme karşı düşük dayanıklılıktır. Bu doğrultuda nem dayanıklılığını arttıracak katkı maddeleri ile ürünün güçlendirilmesi gerekmektedir.

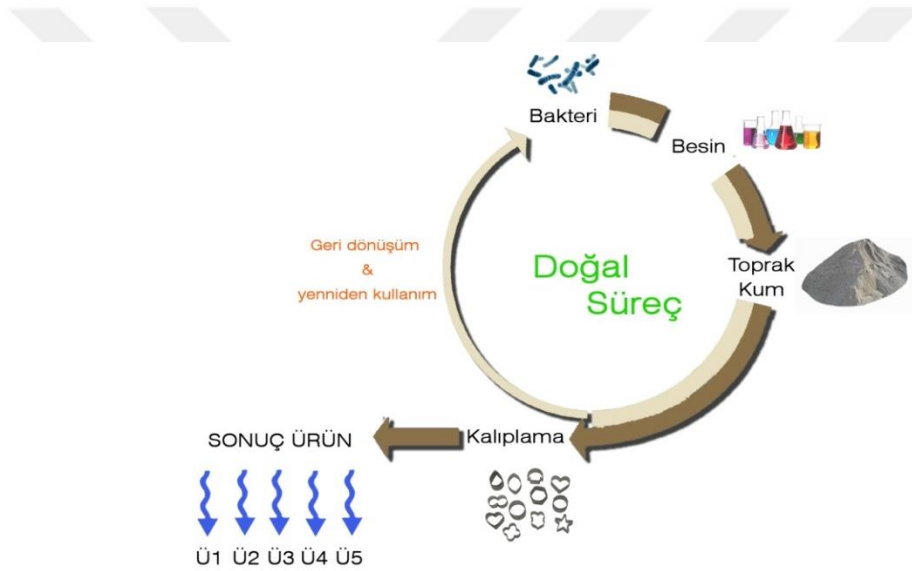
Bu doğrultuda bundan sonraki denemelerde;

- bakteri çözeltisinin kum ile farklı karışma oranları
- sonuç ürünün dayanımını ve dayanıklılığını arttırabilecek farklı ancak doğal kökenli katkı maddeleri
- farklı kum tipleri
- kum harici çeşitli toprak türleri
- farklı pH'lar
- farklı besi ortamları
- farklı geometriler

birer parametre olarak denenebilir.

Mimar/tasarımcıların süreci yönlendirebilmesi için de farklı 3D baskı modeller oluşturularak bakteri çözültisinin buna tutundurması için alternatif denemeler gerçekleştirilebilir.

Bakteriyel biyokalsifikasyon süreci gelecekte, gelişmiş ar-ge çalışmalarının ardından; mimarlık ve tasarım alanında modüler yapı dolgu ya da cephe panel malzemesi üretiminde, (güçlendirilerek) strüktürel eleman olarak, endüstriyel tasarım alanında ambalajlarda, mobilyalarda, kentsel tasarım alanında ise kamusal oturma birimlerinde, kentsel donatı elemanlarında, oyun parklarında, banklarda, aydınlatma elemanlarında kullanılma potansiyeli taşımaktadır.



Şekil 4.1 Bakteriyel biyokalsifikasyon sürecinin şematizasyonu

Bakteriyel biyokalsifikasyon süreci, yaşayan malzemelerden yaşayan nesneler yaratmak, doğayla bütünleşmiş, onunla beraber yaşayan tasarımlar oluşturmak, doğayı taklit etmek yerine gerçek anlamda biyolojinin yapı ile iç içe geçtiği hibrid sentezler oluşturabilmek adına, tasarımcılara ve mimarlara önemli bir potansiyel vadetmektedir (Şekil 4.1). Mevcuttaki kentsel mobilyalar yerine zararsız, patojen ve kanserojen olmayan biyolojik kökenli bir üretim için bakteriyel biyokalsifikasyon yöntemi bu anlamda önem kazanmaktadır. Fakat yapı elemanı ölçeğinde geliştirilmesi için çok araştırma yapılması gerektiği gibi kısıtlı sayıda çalışmanın bulunduğu bu alanda, ülkemizde de çalışmaların yürütülmesi ümit vaad edicidir.

KAYNAKLAR

- Akyol Altun, T. D. ve Köktürk, G. (2007). Ütopyadan gerçeğe: Doğa bilimlerinin mimarlığa etkileri; robotik, genetik ve nanoteknoloji. *15. Yıl Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu*, 2, 220.
- Achal, V., Mukerjee, A. ve Sudhakara Reddy, M. (2013). Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 48, 1–5.
- Achal, V., Mukherjee, A., Kumari, D. ve Zhang, Q. (2015). Biomineralization for sustainable construction - A review of processes and applications. *Earth-Science Reviews*, 148, 1–17.
- Achal, V., Pan, X., Zhang, D. ve Fu, Q. (2012). Bioremediation of Pb-contaminated soil based on microbially induced calcite precipitation. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 22 (2).
- Akipek, F. Ö. ve İnceoğlu, N. (2007). Bilgisayar destekli tasarım ve üretim teknolojilerinin mimarlıktaki kullanımları. *Megaron YTÜ Mimarlık Fakültesi E-Dergisi*, 2 (4), 237–253.
- Aldemir, B. C. (2014). *Bina kabuğunun biçimlenmesinde doğal süreçlere dayalı üretken yaklaşımlar*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Alp, E. G. (2013). *Son dönemde gelişen ‘Yeni’ mimarlık arayışları*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Amerikan Pavyonu: Fuller'dan Montreal'e Armağan*, (2013). 09 Mayıs 2017, http://www.mimarizm.com/makale/amerikan-pavyonu-fuller-dan-montreal-e-armagan_115432.
- Anbu, P., Kang, C. H., Shin, Y. J. ve So, J. S. (2016). Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. *SpringerPlus*, 5 (250), 1-26.
- Andiç Çakır, Ö. (2015). *Kendini İyileştiren Çimentolu Kompozitler*, (2015). 10 Nisan

2019,

<https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/43816FE8DAA747F2A99768CA53F52B03.pdf>.

Aydilek, A. H. (2010). Zeminlerin mikrobiyolojik çimentolanması–bir sürdürülebilir zemin iyileştirme tekniği. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi* içinde (257). İstanbul: İstanbul Kültür Üniversitesi.

Aydın İpekçi, C., Özlem Aydın, E. ve Aktuğ, T. (2015). Tarihi eserler için hazırlanan malzeme analiz lejantlarına yönelik bir değerlendirme. *Restorasyon Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, (18), 54–62.

Bacteria Building Blocks, (b.t). 10 Ağustos 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=TYWkrEunUbU>.

Bahraminejad, F. ve Babaki, K. (2015). Application of voronoi diagram as an architectural and urban planning design tool. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 5 (S1), 1776–1783.

Bailey, J. E. ve Ollis, D. F. (1986). *Biochemical engineering fundamentals* (2. Baskı). New York: McGraw- Hill.

Basílica i Temple Expiatori de la Sagrada Família, (2013). 03 Mayıs 2017, <https://www.deviantart.com/da-phil/art/Basilica-i-Temple-Expiatori-de-la-Sagrada-Familia-361912692>.

Bastian Beyer uses bacteria to calcify knitting into construction materials, (2019). 17 Ağustos 2019, <https://www.dezeen.com/2019/01/16/bastian-beyer-knitted-design-material/>.

Baykara, M. (2011). *Mimarlıkta parametrik tasarım ve arazide kütle yerleşimi için bir model önerisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Becchi, A. (2009). The body of the architect: Flesh, bones and forces between mechanical and architectural theories. *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, 1, 151-158.

- Benyus, J. (2012). Spreading the meme: A biomimicry primer in Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices. In *Biomimicry Resource Handbook*. Scotts Valley, CA, USA: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature* (3.Baskı). New York: In *Harpercollins Publishers Inc.*
- Bernardi, D., Dejong, J. T., Montoya, B. M. ve Martinez, B. C. (2014). Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks. *Construction and Building Materials*, 55b (31), 462–469.
- Bhushan, B. (2009). Biomimetics: Lessons from Nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367 (1893), 1445–1486.
- Biodesignteam. (2015). *Çocuklar için doğal süreçlerle üretilmiş bir oyun alanı*. 22 Eylül 2018, <https://www.biodesignteam.com/>.
- BioMason, (b.t). 10 Ağustos 2019, <https://biomason.com/visual-proof/>.
- Bir Gaudi harikası : Casa Batlló*, (2014). 03 Mayıs 2017, <http://www.mimdap.org/?p=156621>.
- Bu Girişim Tuğla Yapımında Bakteri Kullanıyor, (b.t). 25 Haziran 2019, <https://www.digitaltalks.org/2016/01/21/bu-girisim-tugla-yapiminda-bakteri-kullaniyor/>.
- Biyo-Beton, Kendini Tamir Eden Beton Mu?*, (2017). 22 Ağustos 2019, <https://www.arcus-global.com/wp/bioconcreto-concreto-que-se-auto-repara/>.
- Biyomimikri - Mimari Eleman İlişkisi*, (2016). 08 Mayıs 2017, https://prezi.com/ji2lw_2lmsfa/biyomimikri-mimari-eleman-iliskisi/.
- Bozkurt, C. (2010). *Kinetik sistemlerle çalışan, biyomimetik bir kentsel donatı tasarımı-Urbancot*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Cango Mağaraları*, (b.t). 27 Ağustos 2019,

<https://eskiciveroman.wordpress.com/2015/08/28/cango-magaralari/>.

Catchpole, G. (2017). *Project zero : explorative interrogation of material and fabrication processes through zero waste chair design*. Yüksek Lisans Tezi, Massey Üniversitesi, Wellington, Yeni Zelanda.

Cestel, E. (2016). *Kavramsal tasarım sürecinde Lindenmayer sistemlerin kullanımı*. 3 Haziran 2017, <http://www.ecarch.com/makale-kavramsal-tasarim-surecinde-lindenmayer-sistemlerin-kullanimi-emre-cestel/>.

Cheng, L. ve Cord-Ruwisch, R. (2012). In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation. *Ecological Engineering*, 42, 64–72.

CH2 Melbourne City Council House 2 / DesignInc, (2013). 10 Eylül 2019, <https://www.archdaily.com/395131/ch2-melbourne-city-council-house-2-designinc>.

Çalış, R. (2002). *Hareketli çatıların yapısal özelliklerinin sistematik olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Çiçek, T. (1999). *Kireç ve kullanımı*. 3.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu içinde (184-194). İzmir: Kendi Yayınevi.

Cığızoğlu, M. (2011). *Biyomimetik tepkisel yüzey örtüsü tasarımı için bir model önerisi : Hexa-myosis*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Could trees and termites point to gold?, (b.t). 27 Ağustos 2019, <https://www.miningmagazine.com/exploration/news/1263953/trees-termites-gold>.

Cuzman, O. A., Rescic, S., Richter, K., Wittig, L. ve Tiano, P. (2015). *Sporosarcina pasteurii* use in extreme alkaline conditions for recycling solid industrial wastes. *Journal of Biotechnology*, 214, 49–56.

De Muynck, W., Cox, K., Belie, N. De ve Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*, 22 (5), 875–885.

De Muynck, W., Verbeken, K., De Belie, N. ve Verstraete, W. (2010). Influence of

- urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone. *Ecological Engineering*, 36 (2), 99–111.
- Dejong, J., Proto, C., Kuo, M. ve Gomez, M. (2014). *Bacteria, bio-films, and invertebrates: The next generation of geotechnical engineers?*. Virginia: Asce Press.
- Dejong, J. T., Fritzges, M. B. ve Nüsslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (11), 1381–1392.
- Dragonfly, (b.t). MATscape. 10 Eylül 2019, http://vincent.callebaut.org/object/090429_dragonfly/dragonfly/projects.
- Doehne, E. ve Price, C. A. (2010). *Stone conservation: An overview of current research* (2. Baskı). London: Getty Publications.
- Dollens, D. (2012). *Architecture , eTrees , & Nature Architecture , eTrees , & Nature*. 2 Eylül 2017. <https://issuu.com/exodesic/docs/architecture-etrees-150>.
- Dupe creates "biological concrete" from sand, bacteria and urine, (2014). 10 Ağustos 2019, <https://newatlas.com/dupe-sand-urine-bacteria-concrete-machine/30804/>.
- Ercan, M., Koltka, S. ve Sabah, E. (2018). Mermer artıklarından öğütülmüş kalsiyum karbonat (gcc) üretimi: Yaş ve kuru öğütme ürünlerinin karşılaştırılması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 57 (1), 35–43.
- Erdoğan, E., ve Sorguç, A. G. (2011). *Hesaplamalı modeller aracılığıyla mimari ve doğal biçim türetim ilkelerini ilişkilendirmek. METU Journal of the Faculty of Architecture*, 28 (2), 269–281.
- Eski Çin Gelenekleri: Çin'in Milli Çiçeği Şakayık (Mudan), (2013). 12 Eylül 2019, <http://tr.clearharmony.net/articles/a112783-Eski-Cin-Gelenekleri-Cin%E2%80%99in-Milli-Cicegi-Sakayik-Mudan.html#.XXzYMigZPZ>.
- Estévez, A. T. (2003). *Genetic Barcelona Project", 1st phase, 2003-2006*. 10 Nisan

2019. http://geneticarchitectures.weebly.com/research_group.html.
- Estévez, A. T. (2014). The future of architecture: Biodigital architecture and genetics. *Architecture Research*, 4 (1B), 13–20.
- Frazer, J. (1995). *An evolutionary architecture*. London: Architectural Association.
- Frei Otto, 2015 Pritzker ödülünü ölümünden sonra kazandı, (2013). 10 Mayıs 2017, <http://kot0.com/frei-otto-2015-pritzker-odulunu-olumununden-sonra-kazandi/>.
- Genç, M. (2013). *Doğa, sanat ve biyomimetik bilim*. Hacettepe Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Seramik Anasanat Dalı, Ankara.
- Glassman, A. (2011). *Innovation: Boston Treepod Initiative*. 10 Nisan 2019, <https://www.wgsn.com/blogs/innovation-boston-treepod-initiative/>.
- Growing a "giant artificial reef" could stop Venice sinking, (2014). 20 Aralık 2018, <https://www.dezeen.com/2014/05/30/movie-rachel-armstrong-future-venice-growing-giant-artificial-reef/>.
- Gündoğdu, T. K., Deniz, İ., Arıç, A., Yılmazsoy, B. T., Çakır, Ö. A., Erdoğan, A., ... Özkaban, F. (2019). Development of ecological biodesign products by bacterial biocalcification. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3 (1), 17–25.
- Hammes, F., Boon, N., Clement, G., De Villiers, J., Siciliano, S. D. ve Verstraete, W. (2003). Molecular, biochemical and ecological characterisation of a bio-catalytic calcification reactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 62 (2–3), 191–201.
- Hammes, F. ve Verstraete, W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Environmental Science & Bio/Technology*, 1, 3–7.
- Havacılık Tarihi, (2015). 25 Aralık 2015, <https://havaciligiseviyorum.wordpress.com/2015/12/25/havacilik-tarihi/>.

- Hearn, N. (1998). Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 31 (212), 563–567.
- How Do Stony Corals Grow? What Forms Do They Take, (b.t). 22 Ağustos 2019, https://oceanservice.noaa.gov/education/kits/corals/coral03_growth.html.
- How math helps explain the delicate patterns of dragonfly wings*, (2018). 12 Eylül 2019, <https://www.sciencenews.org/article/how-math-helps-explain-delicate-patterns-dragonfly-wings>.
- Iezzi, B., Brady, R., Sardağ, S., Eu, B. ve Skerlos, S. (2019). Growing bricks: Assessing biocement for lower embodied carbon structures. *26th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference*, 470–475.
- International Terminal Waterloo*, (2018). 12 Mayıs 2017, <https://grimshaw.global/projects/international-terminal-waterloo/>.
- İnceköse, Ü. (2008). Çağdaş mimarlık söylemleri ve doğabilimsel bilgi: “Yeni” mimarlık için “yeni”den bilimsel kavramlar. *Mimarlık Dergisi*, (341), 32-34.
- Jimenez-Lopez, C., Rodriguez-Navarro, C., Piñar, G., Carrillo-Rosúa, F. J., Rodriguez-Gallego, M. ve Gonzalez-Muñoz, M. T. (2007). Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone. *Chemosphere*, 68 (10), 1929–1936.
- Joachim, M. (2005). *MATscape*. 10 Eylül 2019, <http://www.archinode.com/fab-tree-hab-8.html>.
- Joachim, M. (2008). *Fab Tree Hab*. 10 Eylül 2019, <http://www.archinode.com/fab-tree-hab.html>.
- Jonkers, H. M. (2007). Self healing concrete: A biological approach. *Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Material Science (1. Baskı)* içinde (195–204). Dordrecht: Springer.

Jonkers, H. M. (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, 56 (1/2), 1-12.

Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O. ve Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36 (2), 230–235.

Kalaycı, S. (2010). Mimari tasarımlarda pasif iklimlendirme açısından biomimesis etkisi. *Uluslararası Lisansüstü Araştırmaları Sempozyumu* içinde (39-44). Ankara: METU Press Yayınları.

Kalkan, D. (2012). *Tarih boyunca doğa-mimari etkileşimleri ve günümüze yansımaları*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.

Kalsit Kullanım Alanları, (b.t). 27 Mart 2019, <http://www.esenmikronize.com.tr/Menu/detay/kalsit-kullanim-alanlari.html>.

Karadağ, D. (2011). *Dijital tasarım ve üretim araçları ile mimaride malzeme kullanımının dönüşümü*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Karana, E., Blauwhoff, D., Hultink, E.-J. ve Camere, S. (2018). When the material grows: A case study on designing (with) mycelium-based materials. *International Journal of Design*, 12 (2), 119-136.

Kartoğlu, G. (2011). *Digital ortamda mimari tasarım kapsam ve olanakları*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.

Kayalar Fotoğraf Sergisi, (b.t). 27 Nisan 2019, <http://www.sihirlitur.com/sergi/kayalar/index.html>.

Kendini onaran beton nedir?, (2016). 22 Ağustos 2019, <https://kendiniiyilestirenbeton.blogspot.com/2016/10/kendini-iyilestiren-beton-nedir.html>.

Kemiklere Dayanıklılık Kazandıran Yapı, (2013). 05 Mayıs 2017, http://archozi.blogspot.com/2013_01_01_archive.html.

Kentlerin Biyolojisi, (2014). 12 Ocak 2016, <https://xxi.com.tr/i/kentlerin-biyolojisi>.

- Kökçü, M. (2007). *Melişah kuzeyi (ankara-çubuk) pliyosen yaşlı yapı taşlarının petrografik ve mineralojik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Kopar, İ. ve Şaroğlu, F. (2016). Olur Çayı Havzası'nda (Erzurum-KD Türkiye) tafoni oluşumunu kontrol eden faktörler ve tafoni hücrelerinin morfolojik özellikleri. *Türk Coğrafya Dergisi*, (67), 1–9.
- Kucharski, E., Winchester, W., Leeming, W., Cord-Ruwisch, R., Muir, C., Banjup, W., ... Mutlaq, J. (2005). *Patent No. WO/2006/066326*.
- Kurokawa, K. (1992). *Kisho Kurokawa: From metabolism to symbiosis*. Berkshire, UK: Academy Editions / St. Martin's Press.
- Laseau, P. ve Tice, J. (1992). *Frank Lloyd Wright: Between principles and form*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Leblebici, S. ve Işık, G. (2018). Farklı konsantrasyonlarda kalsiyum karbonat (CaCO_3) uygulamasının *carthamus tinctorius* L.'a (asteraceae) ait farklı varyetelerin tohum çimlenmesi üzerine etkileri. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (1), 63–67.
- Li, S. (2013). *A laboratory study of the effects of bio-stabilization on geomaterials*. Yüksek Lisans Tezi, Iowa State Üniversitesi, Ames, Iowa.
- Liken, yosun ve liken yapı malzemeleri inşa etmek için biyolojik beton, (2012). 22 Mart 2019, <https://www.sciencedaily.com/releases/2012/12/121220080310.htm>.
- Living fungus used to make this durable 3D printed chair*, (2013). 15 Nisan 2019, <https://www.treehugger.com/eco-friendly-furniture/mycelium-chair-3d-printed-living-fungus-eric-klarenbeek.html>.
- Lofgren, K. (2013). *Algae Powered House Biofacade Splitterwerk ARUP Colt International SCC Green Power Building « Inhabitat – Green Design, Innovation, Architecture, Green Building*. 15 Nisan 2019, <https://inhabitat.com/splitterwerk-architects-design-worlds-first-algae-powered-building-for-germany/>.

- Lynn, G. (1999). *Animate form*. New York: Princeton Architectural Press.
- M. Yeler, G. ve Yeler, S. (2017). Models from nature for innovative building skins. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 3, (2), 142–165.
- Media-TIC*, (2018). 19 Ağustos 2019, <https://www.arkitektuel.com/media-tic/>.
- Metabolist Hareket*, (2017). 19 Haziran 2017, <http://sbpturkiye.com/metabolist-hareket.html>.
- Mercan resifleri ağarma nedeniyle yok olmak üzere*, (2019). 27 Ağustos 2019, <https://www.internethaber.com/mercan-resifleri-agarma-nedeniyle-yok-olmak-uzere-1836661h.htm>.
- Myers, W. (2012). *Beyond biomimicry*. London: Thames & Hudson.
- Nature: 'The Cabaret of Plants: Forty Thousand Years of Plant Life and the Human Imagination,' by Richard Mabey*, (2013). 03 Mayıs 2017, <https://www.dallasnews.com/arts-entertainment/books/2016/01/15/nature-the-cabaret-of-plants-forty-thousand-years-of-plant-life-and-the-human-imagination-by-richard-mabey/>.
- Next7 1st-prize winner "Growing tomorrow - from inert to living matter" in full detail*, (b.t). 20 Aralık 2018, <https://bustler.net/news/3698/next7-1st-prize-winner-growing-tomorrow-from-inert-to-living-matter-in-full-detail>.
- Okwadha, G. D. O. ve Li, J. (2010). Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. *Chemosphere*, 81 (9), 1143–1148.
- On This Day in Trinity House History – 16 October, (2014). 29 Aralık 2015, <https://trinityhousehistory.wordpress.com/tag/eddystone/>.
- Organic Concrete For Living Green Facades*, (2013). 27 Ağustos 2019, <https://www.urbangardensweb.com/2013/01/10/organic-concrete-for-living-green-facades/>.
- Out of This World Architecture: 16 Real Buildings Inspired by Science Fiction*, (b.t).

- 12 Eylül 2019, <https://weburbanist.com/2017/07/19/out-of-this-world-architecture-16-real-buildings-inspired-by-science-fiction/2/>.
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27 (3), 229–265.
- Öneş, G. (2011). *Bütüncül ve ilişkisel yaklaşımın tasarıma yansımaları ve çizge temelli bir model önerisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özaydın, K. (2012). *Zeminlerin İyileştirilmesi*. 22 Mart 2018, <https://docplayer.biz.tr/5300003-Zeminlerin-iyilestirilmesi.html>.
- Özbudak Akça, Y. B. (2011). *Mimarlıkta genel estetik değerlendirme ve çağrışımsal anlam: Bir araç olarak analogi*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Özen, G. (2006). *Bilim kurgu ve etki alanı üzerinden geleceğin yapay çevrelerinin değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Öztoprak, Z. (2018). *A biomimetic perspective on (retro)fitting of building envelopes*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Öztürk, N. (2015). Form Bulma Kuramı ve “Doğal Üzerinden Yapayın Keşfi” Çalıştayı. *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 1 (12), 83–101.
- Palau De Les Arts Reina Sofia (Opera House)*, (b.t). 15 Mayıs 2017, https://calatrava.com/projects/palau-de-las-artes-valencia.html?view_mode=overview&image=1.
- Parachute Pavilion*, (2005). 25 Ekim 2017, <https://www.kokkugia.com/PARACHUTE-PAVILION>.
- Patkau architects: Winnipeg skating shelters*, (2011). 18 Nisan 2019, <https://www.designboom.com/architecture/patkau-architects-winnipeg-skating-shelters/>.
- Pekin'in “Kuş Yuvası” Stadyumu, Lubetkin Ödülü’nü aldı*, (2009). 01 Eylül 2019, <http://www.mimdap.org/?p=22105>.

Polat, S. (2011). Türkiye’de traverten oluşumu, yayılış alanı ve korunması. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 23, 389–428.

Rain Collector Skyscraper , (2010). 12 Mart 2018, <http://www.evolo.us/rain-collector-skyscraper/>.

Sand and us, (2010). 10 Ağustos 2019, https://throughthesandglass.typepad.com/through_the_sandglass/sand_and_us/page/10/.

Selçuk Arslan, S. ve Sorguç Gönenç, A. (2007). Mimarlık tasarımı paradigmasında Biomimesis’in etkisi. *GÜMMF Dergisi*, 22 (2), 451-459 .

Selçuk Arslan, S., Sorguç Gönenç, A ve Akan, A. E. (2009). Altın Oranla Tasarlamak: Doğada, mimarlıkta ve yapısal tasarımda Φ dizini. *Trakya University Journal Science*, 10 (2), 149–157.

Shackelford, C. D. ve Jefferis, S. A. (2000). *Geoenvironmental engineering for in situ remediation*. 12 Aralık 2018, https://www.researchgate.net/publication/265485823_Geoenvironmental_engineering_for_in_situ_remediation.

Siddique, R. ve Chahal, N. K. (2011). Effect of ureolytic bacteria on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 25 (10), 3791–3801.

Singapore’s Esplanade theater is designed to have appearance of a durian, (b.t). 18 Ağustos 2019, <https://livingnomads.com/2018/04/cheap-eats-singapore/singapores-esplanade-theater-is-designed-to-have-appearance-of-a-durian/>.

Smithsonian National Museum of Natural History-An Inside Look, (b.t). 05 Mayıs 2017, <https://naturalhistory.si.edu/education/teaching-resources/written-bone/skeleton-keys/inside-look>.

Stools made of sand and urine by Peter Trimble, (2014). 10 Ağustos 2019, <https://www.dezeen.com/2014/02/08/stools-made-of-sand-and-urine-by-peter-trimble/>.

“*Su Kübü*”, (2008). 01 Eylül 2019, <https://www.arkitera.com/haber/su-kubu/>.

Şahin, A. ve H. Şahin, B. (2017). Examining the use of voronoi diagrams in architecture on a student project. *3rd International conference on new trends in architecture and interior design* içinde (54). İstanbul: Anka Matbaa.

Şenol, F. (2017). Biyo-remediasyon: Tarihi yapılarda kullanılan karbonatlı taşlarda görülen siyah kabuk tabakasının temizliğinde natif bir yöntem olarak biyo-temizlik ve biyo-sağlamlaştırma. *Journal of International Scientific Researches*, 2 (1), 15.

Tafoni, (b.t). 27 Ağustos 2019, <https://www.wikiwand.com/tr/Tafoni>.

Ted (2009). *Magnus larsson: Kum tepeciklerinin mimariye dönüşümü*. 26 Eylül 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=PXMJobWIXks>.

Tedglobal (2009). Rachel armstrong: *Kendini onaran mimari mi?*. 03 Mart 2019, https://www.ted.com/talks/rachel_armstrong_architecture_that_repairs_itself?language=tr#t-422533%20.

TEDxMaastricht (2018). *Living design for local production | Eric Klarenbeek*. 26 Haziran 2019, https://www.youtube.com/watch?v=MTj0b_99cfs&t=386s.

Tekin, Ç., ve Kurugöl, S. (2011). Üç canlı ile çevre dostu üç bina. *E-Journal of New World Sciences Academy*, 6 (4), 943-952.

The Crystal Palace / Joseph Paxton, (2013). 03 Mayıs 2017, <https://www.archdaily.com/397949/ad-classic-the-crystal-palace-joseph-paxton>.

The Future of Plastic, (b.t). 15 Nisan 2019, <https://www.corpuscoli.com/projects/the-future-of-plastic-images/>.

The silk pavilion by MIT media lab, (2013). 20 Nisan 2019, <https://www.designboom.com/technology/the-silk-pavilion-by-mit-media-labs/>.

The World's First Bio-Facade Ready to Grow, (2013). 17 Mayıs 2017, <http://faade5.blogspot.com/>.

- Tiano, P., Biagiotti, L. ve Mastromei, G. (1999). Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: Methods of evaluation. *Journal of Microbiological Methods*, 36 (1–2), 139–145.
- TOD's Omotesando Building in Tokyo, (2016). 20 Aralık 2017, <https://archspeech.com/en/article/tods-omotesando-building-in-tokyo>.
- Tolunay, B. (2015). *Çimento bağlayıcılı kompozitlerde kendiliğinden iyileşme kabiliyetinin tahribatsız test yöntemleri ile değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Turkington, A. V. ve Phillips, J. D. (2004). Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (6), 665–675.
- Türkkan, A. (2015). *Çimento fabrikalarının sağlık etkileri*. Bursa: Bursa Tabip Odası.
- Turner, J. S. ve Soar, R. C. (2010). Beyond biomimicry : What termites can tell us about realizing the living building. *First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction (I3CON)* içinde (1-8). UK: Loughborough University.
- U. Zeytün, B. (2014). *Mimari Tasarımda Biyomorfik Yaklaşımlar*. Yüksek Lisans Tezi, Yakındoğu Üniversitesi, Lefkoşa.
- Vekariya, M. S. ve Pitroda, J. (2013). Bacterial Concrete: New Era for Construction Industry. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4 (9), 4128-4137.
- We Grow Materials, (b.t). 15 Mart 2019, <https://ecovatedesign.com/>.
- What is a pangolin?, (b.t). 28 Ağustos 2019, <https://www.pangolinsg.org/pangolins/>.
- Whiffin, V. S., van Paassen, L. A. ve Harkes, M. P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, 24, 417–423.

- Wiktor, V. ve Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33 (7), 763–770.
- Wiley, W. R. ve Stokes, J. L. (1962). Requirement of an alkaline pH and ammonia for substrate oxidation by *Bacillus pasteurii*. *Journal of Bacteriology*, 84, 730–733.
- Yaşamımızı Termitlere mi Borçluyuz? (2005), Popüler Bilim Dergisi, (142), 44-48.
- Yazıcıoğlu, D. A. (2014). Bir kamusal strüktür olarak pavyon yapılarının dijital teknolojilerle yeniden biçimlenişi. *VIII. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu* içinde (21–31). İzmir: İYTE Mimarlık Fakültesi.
- Yeryüzünde Benzersiz Bir Coğrafya: Pamukkale*, (2019). 27 Ağustos 2019, <https://yoldaolmak.com/pamukkale-travertenleri.html>.
- Yeşilyurt, E. (2009). *Biyoloji temelli bilimsel kuramlar ile mimari tasarım ilişkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yıldırım, N., Gürtuğ, Y. ve Sesal, C. (2016). Mikrobiyal kalsiyum karbonat oluşum mekanizmaları ve uygulama alanları. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 70–80.
- Yıldız, H. (2012). *Endüstri ürünleri tasarımı kapsamında biyomimetik tasarımın yeri ve metodolojisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yüzer, M. A. ve Yüzer, Ş. (2006). Cellular automata tabanlı LUCAM modeli ile İstanbul'un gelişim ve dönüşümüne ilişkin Makro form simülasyonları. *Journal of Kültür University*, 4 (56), 231–244.