

Mimari Tasarımda Biyomimetik Yaklaşımlar: Pavyonlar Üzerine Bir Araştırma

Güneş MUTLU AVİNÇ

*Muş Alparslan Üniversitesi, Mimarlık Bölümü
gunesavinc@gmail.com*

Semra ARSLAN SELÇUK

*Gazi Üniversitesi, Mimarlık Bölümü
semraselcuk@gazi.edu.tr*

ÖZET

21. yüzyıl pavyon tasarımlarının pek çoğunda biyoloji bilimi ile biyomimetik araştırmalardan mimarlık disiplinine bilgi ve yöntem aktarımlarının yapıldığı, yenilikçi üretim yöntemlerinin denendiği veyenî nesil malzemelerin kullanımıyla çevresel koşullara duyarlı kabuk ya da benzeri tektoniklerin araştırıldığı görülmektedir. Bu denemelerin, yenilikçi tasarım ve üretim biçimlerinin geliştirilmesinde öncül modeller olduğu açıktır. Ancak tasarım süreci ve sonuç ürünlerin disiplinler arası bir tasarım anlayışıyla "biyomimetik bir yaklaşım" benimsediği konusu pek çok soru işareti barındırmaktadır. Bu bağlamda bu çalışma, "biyomimetik tasarım" yaklaşımları ile üretilen pavyonlara ait teorileri, kavramları, konuları, metodolojileri, malzemeler ve tektonikleri araştırmaktadır. Biyomimesis kavramının pavyon tasarımında sonuç ürüne ve sürece yansıma biçimlerinin sistematik bir biçimde tartışılması amaçlanan çalışmada örneklem olarak son yıllarda öne çıkan 5 pavyon incelenmiştir. Yapılan araştırmada, biyomimetik yaklaşımlarla biyolojik model/organizmaya neden başvurulduğu, ne ve hangi düzeyde öğrenildiği sorularına cevap aranmış, tasarımların canlılara ait form, fonksiyon ve malzeme gibi özelliklerden çıkarımlar yapılarak gerçekleştirildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Biyomimetik, biyomimetik tasarım, biyomimetik adaptasyon, mimari pavyonlar

ABSTRACT

It is observed that in the vast majority of 21st century pavilion designs biomimetic researches and science of biology are used to transfer information and methods to architectural disciplines, innovative production methods are tested, and new-generation materials are used to investigate shells or similar tectonics sensitive to environmental conditions. It is clear that these experiments are the forerunner models in the development of innovative design and production methods. However, the subject of design process and final products' adopting a "biomimetic approach" with an interdisciplinary design concept has many questions. In this context, this study investigates the theories, concepts, topics, methodologies, materials and tectonics of pavilions produced by "biomimetic design" approaches. In the study aiming to discuss the reflection of biomimesis concept in pavilion design to the final product and process in a systematic way 5 pavilions which have been prominent in recent years are examined. In the research, the researchers tried to answers the questions of why biological model /and organism were applied with biomimetic approaches, and what learned at what level, and it was found out that designs were made by making conclusions from features such as life forms, functions and materials.

Keywords: Biomimetics, biomimetic design, biomimetic adaptation, pavilions.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimi, tasarımcılara, mühendislere ve bir çok bilim insanına problemlerini çözme konusunda uygun ortamlar/araçlar/yaklaşımlar sunmaktadır. Bu gelişim aynı zamanda öznenin, çevreye, doğaya, nesneye farklı bakış açıları geliştirmesine önyak

olmaktadır. 3000 yılı aşkın süredir çözüm amaçlı gözlenen doğa, artık sadece problemin çözümü için incelenmemekte aynı zamanda içerisinde barındırdığı çözümlerle disiplinlere özgü yeni problemlerin tariflenmesinde yol gösterici olmaktadır.

1950'lerde literatüre "biyomimetik" terimiyle giren bu yaklaşım, yeni malzemelerin, araçların, yöntemlerin geliştirilmesi için güçlü bir konsept ve araç olma potansiyeli taşımaktadır. Bu yeni disiplin, doğayı biçimsel bir taklidin ötesine taşımakta ve doğa gibi davranma yollarını da araştırmaktadır. Doğadaki oluşum/üretim süreçlerinin var olma biçimlerinin anlaşılmasına ve uygulanmaya çalışılması pek çok tasarım disiplininde olduğu gibi mimarlık alanında da devrim niteliğinde gelişmeleri beraberinde getirmektedir.

Mimarlık/biyoloji/teknoloji birlikteliği sonucu oluşan bu gelişmeler, gelecekte insan hayatında büyük değişikliklere yol açacak potansiyeldedir. Disiplinler arası ortamın önemini farkında olan biyologlar/mimarlar/mühendisler bu alanda çalışmalar yürütmekte, paradigma değişimine yol açan teoriler ve söylemler üretmektedir. Bu makale, söz konusu araştırmalara odaklanarak, geliştirilen biyomimetik yaklaşımları, teorileri, araçları, malzemeleri "pavyonlar" üzerinden okuma çabasıdır.

2. BİYOMİMETİK KAVRAMI

Doğanın en uygun çözümleri ve performans kriterlerini içeren bir ilham kaynağı olması öngörüsü ile insanoğlu, tarih boyunca doğayı taklit ederek ve/veya yorumlayarak çözümler elde etmiştir. Sanayi devrimi ile beraber ilham kaynağı olarak gördüğü doğayı gözlemlemek/anlamak için yeni teknolojilerin sunduğu olanakları kullanmaya başlamıştır. 50'li yıllara gelindiğinde ise doğayı taklit etmenin ötesinde onun en iyi fikirlerinden öğrenme/uyarlama/uygulama olarak nitelendirilebilecek yeni bir bilim dalı oluşmuştur. Biyomimetik, biyolojide tasarımın temelleri olarak görülen "stratejilere öykünme" (Zari, 2009) gibi genel bir yaklaşımla literatüre girmiş ve kısa zamanda daha sürdürülebilir tasarımlar yaratmak için doğal formların ve süreçlerin işleyiş biçimlerini öğrenerek bunları insanlığın tasarım sorunları için çözümler barındıran/sunan bir bilim alanına evrilmiştir [URL-1].

1950'lerde Otto Schmitt tarafından doğadaki fikirlerin aktarımı için kullanılan "biyomimetik kavramı"; biyomimesis, biyomimikri, biyonik, biognosis, biyolojik esinlenme ve benzeri pek çok terim ile benzer anlamlarda (Vincent vd., 2006) kullanılsa da araştırmanın yapıldığı "disiplin" özelinde gerek yaklaşıma, gerekse sonuç ürüne dair farklılıklar barındırmaktadır. Teknolojideki gelişmelerin sağladığı ivme ile "...doğadan esinlenme/öğrenme/uyarlama ve/veya uygulama biçimlerinin neler olabileceği ve farklı bilgi/teknoloji alanlarında nasıl kullanılabileceği sistematik olarak tartışılmaya başlanmıştır" (Selçuk ve Sorguç, 2007). Böylece, her disiplinin kendine özgü yöntem arayışları sürerken, biyomimesis disiplinlere özgü veri aktarımının ve bilgi üretiminin etkin arayüzünü oluşturmaya devam etmektedir.

Diğer pek çok tasarım disiplininde olduğu gibi mimarlık alanında da doğadan öğrenmek, elde edilen bilgilerin bağlama uygun tasarım diline aktarılması sürecini içermektedir. Her ne kadar bu süreç, farklı bağlamlardan ötürü esinlenen/öğrenilen canlı organizmaya doğrudan karşılık gelen tasarım çözümleri ile sonuçlanmasa da canlı organizmaların benzer problemlerle nasıl başa çıktıklarını ayrıntılı olarak incelemek ve daha sonra bunların uygulanması için işlevsel ilkeleri ayarlamak önemlidir (Park ve Dave, 2014).

3. MİMARLIKTA BİYOMİMETİK YAKLAŞIMLAR VE SINIFLAMALAR

Biyomimetik bilimini mimarlık pratiğine uygulamak için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Garcia-Holguera ve arkadaşları (2016), mimarlar ve araştırmacılar tarafından kullanılan yaklaşımları üç başlıkta sınıflamışlardır. Bunlardan ilki, deneysel tasarım durum incelemeleri ve programların geliştirilmesi gibi disiplinin akademik programlara girişi (Gruber, 2011; Helms, Vattam, & Goel, 2009; Lenau, 2009), ikincisi bilimsel ve sistematik araştırmalar desteklemek amacıyla yöntem ve tasarım araçlarının geliştirilmesi

(Cheong & Shu, 2012; Zari, 2012, 2015; Vincent, 2003; Vincent & Mann, 2002)ve son olarak mimarlık firmaları tarafından gerçekleştirilen gerçek durum çalışmalarıdır(Turner & Soar, 2008). Bazı durumlarda, mimarlık firmaları sürdürülebilir tasarım yaklaşımları geliştirmek için disiplinler arası ortaklıklar kurmuşlardır (Lazarus & Crawford, 2011).Tüm bu biyomimetik yöntem arayışları, doğa referanslı çözümleriyle tasarım uygulamaları için yol gösterici olmaktadır.

Literatürde, tasarım alanında temel olarak iki farklı biyomimetik yaklaşım yer almaktadır. Bunlardan ilki farklı terminolojilerle anılan(*Biology Influencing Design, Bottom-Up Approach , Solution-Driven Biologically Inspired Design, Biological push*) ancak aynı anlama gelen "çözüm odaklı yaklaşım" olup; biyolojik bir çözümle başlayıp bu çözümünden bir ilke çıkarılması yaklaşımıdır. Daha sonra bu "ilkenin" hangi probleme nasıl uyarlanacağı/uygulanacağı belirlenmektedir. Tablo 1'de çözüm odaklı tasarımın adımları görülmektedir. Bu süreçte ilk olarak biyolog ya da ekolojist, biyolojik özellikleri bir teknolojiye uyarlayarak cevaplar aramaya ve daha sonra insanlığa ait tasarım problemi için çözümler üretmeye çalışmaktadır. Zari'ye (2009) göre bu ilke, bir organizmada veya ekosistemde belirli karakteristikler veya davranışlarda denenmeli ve mimari tasarımların veya endüstriyel ürünlerin geliştirilmesinde potansiyeller oluşturacak biçimde şekillendirilmelidir.

Tablo 1. Biyomimetik araştırmada kullanılan çözüm odaklı yaklaşım (Helms, Vattam, & Goel, 2009)

Çözüm odaklı tasarım (<i>Solution-driven biologically inspired design process /Solution-BasedApproach/Bottom-Up</i>)
1. Adım:Biyojik çözümün belirlenmesi (<i>biological solution identification</i>)
2. Adım: Biyolojik çözümün tanımlanması (<i>define the biological solution</i>) (biyomekanik, fonksiyonel, biyofizik, morfolojik, vb.)
3. Adım: İlkenin çıkarılması (<i>principle extraction</i>)
4. Adım: Çözümün yeniden şekillendirilmesi (<i>reframe the solution</i>)
5. Adım: Problemin araştırılması(<i>problem search</i>)
6. Adım: Problemin tanımı(<i>problem definition</i>)
7. Adım: İlkelerin uygulanması(<i>principleapplication</i>)

Çözüm odaklı tasarım yaklaşımı ile elde edilen kuramların, uyarılma ve evrilmesi; kendini örgütlenme, maksimizasyonerine optimizasyon, serbest enerji ve yaşamı kolaylaştıran malzeme ve süreçleri kullanarak biyo-kürenin iyileştirilmesini içermektedir. Bu teorilerin pek çoğu bugüne kadar endüstri ürünlerinde uygulanmıştır. Ancak, bu durumsınırlı olup pek çoğu henüz mimarlıkta keşfedilmemiştir(Vincent, 2003; Zari, 2009).İkinci yaklaşım olarak bilinen problem-odaklı tasarım literatürde "biyolojiye bakan tasarım" (*design looking to biology*) (Zari, 2007), "yukardan aşağıya yaklaşım" (*top-downapproaches*) (Garcia-Holguera ve ark., 2016) "problem odaklı biyolojik esinli tasarım" (*problem-driven biologically inspired design*) (Helms, Vattam ve Goel, 2009), teknolojik çekme (*technologypull*) (Magna vd., 2013) olarak aynı anlama gelen farklı terimlerle ifade edilmektedir (Tablo2). Bu yaklaşımda süreç,problemin tanımlanmasıyla başlamaktadır. El Ahmar (2011), biyologlar ya da ekolojistlerle disiplinler arası çalışma ve derinlemesine bilimsel bir sezgi olmadan biyomimetik çözümlere ulaşmanın ancak bu yaklaşımla

mümkün olduğunu savunmuştur. Ancak bu yaklaşımda, biyolojik bilginin teknik olarak çözümlenmesi, bilimsel anlayışını yüzeysel olması nedeniyle sınırlı olmaktadır.

Tablo 2. Biyomimetik araştırmada kullanılan problem odaklı yaklaşım (Helms, Vattam, & Goel, 2009)

Problem odaklı tasarım (<i>Problem-Based Approach/Top-down</i>)
1. Adım: Problemin tanımlanması (<i>problem definition</i>)
2. Adım: Problemi yeni bir çerçeveye oturtmak (<i>reframe the problem</i>)
3. Adım: Biyolojik çözümün araştırılması (<i>biological solution search</i>)
4. Adım: Biyolojik çözümün tanımlanması (<i>define the biological solution</i>)
5. Adım: İlkelerin çıkarılması (<i>principle extraction</i>)
6. Adım: İlkelerin Uygulanması (<i>principle application</i>)

Doğrusal adımlarla tanımlanan bu süreçlerin kendinamikleri içinde gerekli iyileştirmeler için geri beslemeli olarak çalışması kaçınılmazdır.

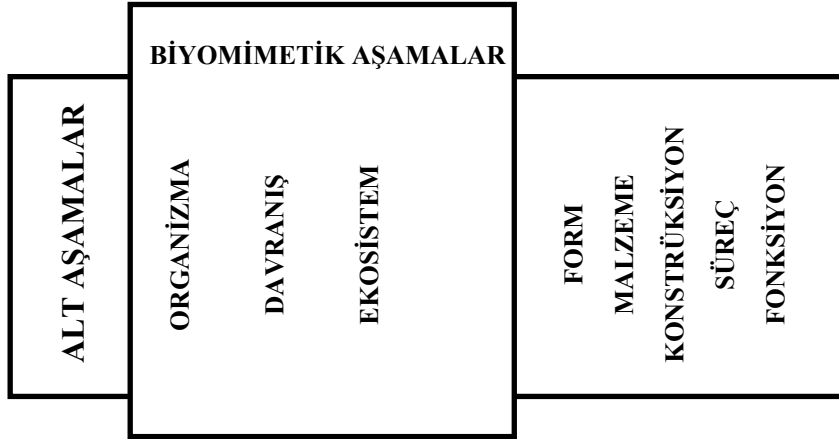
4. TASARIMDA BİYOMİMETİK AŞAMALAR

Yukarıda tartışılan iki yaklaşımda tasarım problemine uygulanabilecek form, süreç ve ekosistem olmak üzere üç biyomimetik aşama bulunmaktadır [URL-1]. Bir organizma ya da ekosistem çalışılırken form ve süreç bir organizmanın ve ekosistemin taklit edilebilecek özellikleridir (Zari, 2007).

Zari (2007) mevcut biyomimetik teknolojilerin araştırılması için organizma, davranış ve ekosistem olmak üzere "üç aşama" tariflemektedir. "Organizma" düzeyi, bir bitki veya hayvan gibi bütüncül organizmaya karşılık gelebileceği gibi bunun dışında organizmanın belli bir bölümünün ya da tümünün taklit edilmesi anlamında kullanılmaktadır. İkinci aşama, "davranış" ifade etmekte ve organizmanın belirli/sınırlı ya da daha geniş bağlamda bütüncül davranışlarının aktarılmasını içermektedir. Üçüncü aşama ise tüm "ekosistemin" taklit edilmesi anlamına gelmekte ve bu durum genel ilkelerinin aktarılmasını kapsamaktadır.

Organizma, davranış ve ekosistem aşamalarının her biri içerisinde, beş olası taklit ölçeği barındırır. Biyomimetik tasarım, nasıl görüldüğü (form), neden yapıldığı (malzeme), nasıl yapıldığı (konstrüksiyon), nasıl çalıştığı (süreç) ve ne yapabildiği (fonksiyon) ile ilgili olabilir (Zari, 2007) (Tablo 3).

Tablo 3. Biyomimetik aşamalar (Zari, 2007'den uyarlanmıştır)



Zari (2007) söz konusu bu biyomimetik aşamaları Tablo 4'de görüldüğü üzere "termit" üzerinden örneklendirmiştir.

Tablo 4. Biyomimetik aşamaları gösteren bir çerçeve (Zari, 2007)

Biyomimetik aşamalar	Termitten esinlenilerek oluşturulan örnek yapı	
Organizma Aşaması (Spesifik olarak organizmanın taklidi)	form	Yapı termit gibi görünür. (Ne gibi görünüyor?)
	malzeme	Yapı, kabuk ya da termit iskeletinin taklidi gibi termitle aynı malzemeden yapılır. (Hangi malzemeden yapılmış?)
	konstrüksiyon	Yapı, termitle aynı büyüme ya da inşa edilme şekline göre oluşur. (Nasıl yapılmış?)
	süreç	Yapı, bireysel bir termit gibi çalışır; örneğin meta-genomik yoluyla hidrojen üretir.
	fonksiyon	Yapı, daha geniş bağlamda bir termit gibi işlev görür; selülozu geri dönüştürür atık ve toprak yaratır. (Ne yapabiliyor?)
Davranış Aşaması (Bir organizmanın nasıl davrandığı ya da daha geniş bir bağlamda nasıl ilişkilendirilebileceğinin taklidi)	form	Yapı, bir termit tarafından yapılmış gibi görünür; bir termit kulesinin kopyası gibi.
	malzeme	Yapı termitin inşa etme için kullandığı aynı malzemeleri kullanır, örneğin sindirilmiş ince toprakları birincil malzeme olarak kullanılması.
	konstrüksiyon	Yapı bir termitin inşa edeceği şekilde yapılır; Örneğin belirli zamanlarda belirli yerlerde toprak istifleyerek.
	süreç	Yapı, termit höyük gibi çalışır; dikkatli yönelim, şekil, malzeme seçimi ve doğal havalandırma, veya termitlerin nasıl birlikte çalıştığını taklit eder.
	fonksiyon	Yapı, termitlerle aynı şekilde çalışır; iç koşullar optimal ve termal olarak stabil olarak düzenlenir. Daha geniş bir bağlamda, bir termit höyüğün yaptığı gibi de işlev görebilir.
Ekosistem aşaması (Ekosistemin taklidi)	form	Yapı bir ekosisteme benzer (içerisinde bir termit yaşıyor gibi).
	malzeme	Yapı, (termit) bir ekosistemin yapıldığı

		malzemeden yapılır; örneğin doğal olarak oluşan ortak bileşikler ve suyu birincil kimyasal madde olarak kullanır.
	konstrüksiyon	Yapı bir (termit) ekosisteminde olan ardışıklık ilkeleri ve zamanla artan karmaşıklık gibi aynı şekilde birleştirilir.
	süreç	Yapı bir (termit) ekosistem ile aynı şekilde çalışır; enerjiyi güneşten dönüştürür ve su depolar.
	fonksiyon	Yapı, (termit) bir ekosistemin ilişkileri kullanılarak karmaşık sistemin bir parçasını oluşturur, örneğin bir ekosisteme benzer biçimde hidrolojik, karbonlu, azotlu döngülere katılabilmektedir.

5. YÖNTEM VE VERİLERİN ANALİZLERİ

Çalışmanın örneklem bölümünde verilerin toplanması ve değerlendirilmesi için nitel yöntemler kullanılmıştır. Örnekler, biyomimetik tasarım yaklaşımlarını ve süreçlerini bilimsel bir yayına dönüştürerek açıklayan, 2010 yılı ve sonrası gerçekleştirilmiş olan pavyonlar arasından seçilmiştir. Örnek olarak seçilen pavyonlarda hangi canlının taklit edildiği, hangi biyomimetik yaklaşımın benimsendiği ve ortaya konulan sonuç ürün sınıflandırılmıştır. Pavyon örneği üzerinden yapılan araştırmanın "problem" doğrultusunda ortaya koyduğu yöntem, taklit ettiği doğal yapılaşma ve "öğrenme" sürecinde kullandığı yaklaşım ortaya konulmuştur. Pavyon tasarımında yeni bir malzemenin geliştirilip geliştirilmediği, sergilemiş olduğu dinamik ya da statik davranış, biyomimetik adaptasyon gibi başlıklar taranmıştır. Bu bağlamda taranan 14 tane pavyon içindenseçilen örnekler:

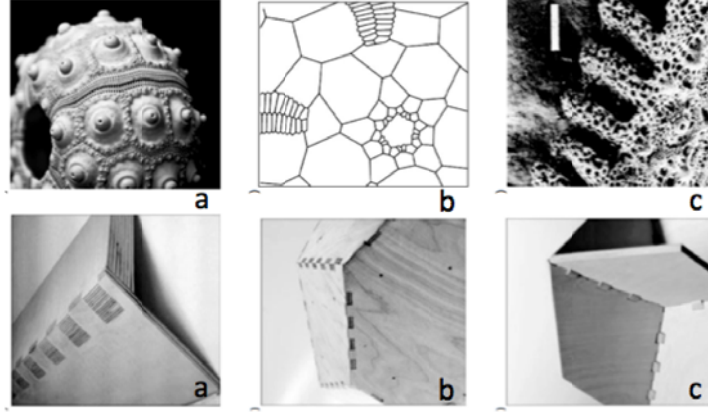
1. ICD/ITKE ResearchPavillion, 2011
2. ICD/ITKE ResearchPavillion, 2012
3. ICD/ITKE ResearchPavillion 2013-14
4. HygroSkinPavillion 2013
5. ICD/ITKE ResearchPavillion 2014-15

Pavyonların nasıl değerlendirileceği konusundaveri toplamak ve biyomimetik olma durumunu tartışmak için gereken aşamalar örneklerin anlatımı ile analiz edilerek tablolastırılmıştır. Böylece pavyonların hangi **biyomimetik aşamayı** ve **yaklaşımı** dikkate alarak tasarlandığı, sorgulandığı, problem odaklı ya da çözüm odaklı olarak hangi **biyomimetik yaklaşımın** dikkate alındığı belirlenmiştir. **Biyomimetik araştırma** sınıflaması içerisinde, hangi kavramı kullandığı, süreç ya da davranış, morfoloji, form, yapı, kabuk tasarımı gibi yapılan biyomimetik araştırma; **biyomimetik yöntem** olarak pavyonun tasarım süreci içerisinde ürünü oluşturmak için yararlanılan yöntemler; **biyomimetik adaptasyon** içerisinde doğadan öğrenilmiş/uygulanmış/uyarlanmış bir adaptasyon çeşidi olup olmadığı araştırılmıştır.

5.1. Örnek 1: ICD | ITKE Research Pavilion 2011

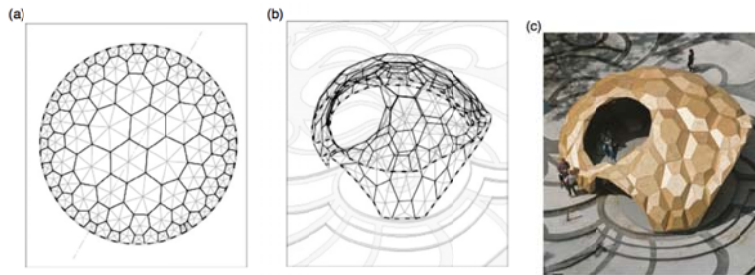
2011 yılında Stuttgart Üniversitesi'nde gerçekleştirilen bu çalışmada, deniz kestanesi (*Echinoids*) ve kum dolarıkabuğunun (*sand dollar shell*) iskelet morfolojisine ait biyolojik ilkelerin bilgisayar teknolojileri, simülasyon yöntemleri ve bilgisayar kontrollü üretim yöntemleri ile mimari yapıya aktarılması süreci araştırılmıştır. Yapılan çalışma, biyolojik yapıların performans kapasitesinin mimari tasarıma entegre etmeyi bu bağlamda ortaya çıkan mekânsal ve yapısal malzeme sistemlerini tam ölçekte test etmeyi amaçlamıştır (Magna vd., 2013), [URL-4]. Problem odaklı başlayan bu çalışmada, deniz kestanesi (*echinoids*) kabuk iskeletlerini oluşturan bölümlerin kendine özgü düzenlemesinin, levha tasarımı için en uygun ilkelere sahip olduğu görülmüştür. Canlıya ait, kabuk şekli, kabuk düzenlenişi, yük dağılımı, dışardan gelen yüklerin dağılımı, hiyerarşik oluşum, çok katmanlı mekanik strüktür, kenar formülasyonu ve geçirgenlik gibi performans kriterlerine bakılarak karar verilmiştir (Şekil 1). Deniz kestaneleri ve onun alt türü olarak bilinen kum

doları(*sanddollar*), kurucu plakalarını birbirine bağlamak için geliştirilmiş parmak benzeri bağlantı sistemine(*finger-like jointing system*) sahiptir. Bu bağlantı şekli kenarlar boyunca etki eden kesme kuvvetlerine karşı koyabilen önemli bir tekniktir. Bu iki ilke, mevcut araştırma projesinin geliştirilmesinde itici güç olmuştur aktarılmıştır (Krieg vd., 2011).



Şekil 1. (Üstte) (a) Deniz kestanesi(*Echinoids*); (b) kabuk bölmelerinin düzenini gösteren şematik üst görünüş; (c) parmak derzlerine (*fingerjoints*) benzer kalsit plakalara ait mikroskopik görünüş, (Altta) Robotik olarak imal edilen parmak derzler (a) belirli bir açıda farklı malzeme kalınlığına sahip iki plakayı birleştirmek; (b) farklılaştırılmış parmak derzler(*fingerjoints*) ile üretilen prototip; (c) parmak derzler ile plakaların mekansal bağlantısı; (Magna vd., 2013)

Deniz kestanesinin(*Echinoids*) kabuğu, kenarlarda parmak benzeri kalsit çıkıntılarla birbirine bağlanmış modüler bir poligonal plak sisteminden oluşmaktadır. Yüksek yük taşıma kapasitesi, levhaların ve bunların birleştirme sisteminin geometrik düzeni ile elde edilmiştir. Bu bağlamda bir bağlantı noktasında maksimum üç plaka birleşmektedir. Bağlantı noktasında üç plakanın birleşmesi kuralı, hesaplamalı tasarım sürecinde voronoi diyagramı yardımıyla tasarıma aktarılmıştır (Krieg vd., 2011) (Şekil 2).



Şekil 2. (a) 2D topoloji modeli; (b) 3B geometri modeli; (c) tam ölçekli prototip.

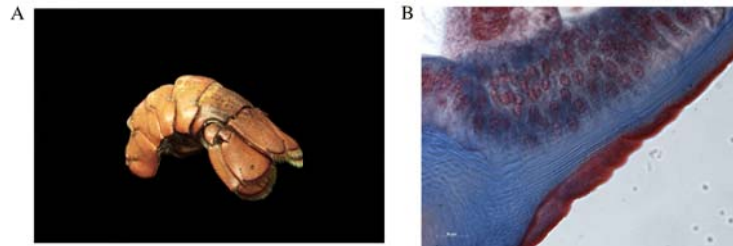
Deniz kestanesi kabuğunda, plakalar birbirlerine kolajen elyaf olarak adlandırılan esnek bir güçlendirici ile birleştiği tespit edilmiştir. Delikli kalsit plakalar, normal ve yanal kuvvetleri aktarmak için birbirlerine dikişlerle bağlanırlar. Araştırma pavyonunun gelişmiş bağlantıları söz konusu olduğunda, bağlar PU (*Polyurethane*) esnek bir yapıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir (Magna vd., 2013). Sonuç olarak biyolojik rol model olarak deniz kestanesi analiz edilmiş, topolojik ve yapısal ilkeleri tanımlanmıştır. Tanımlanan biyomimetik kuralları pavyonun geometrisine ve üretim aşamasına aktarılmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. Biyomimetikpavyon tasarımı için gerçekleştirilen aşamaların özeti

ICD/ITKE RESEARCH PAVILLON 2011				
1	Biyomimetik Aşama	Organizma	Konstrüksiyon	Deniz kestanesi kabuğu, kabuğun bağlantı noktası, plakaların birbirlerine yapışmasını sağlayan kolajen elyaf.
2	Biyomimetik Yaklaşım	Problem odaklı tasarım (Deniz kestanesi kabuğunda yer alan parmak eklemleri (<i>finger joints</i>) kullanılarak ahşap levhaların ek bağlantı elemanları kullanılmadan birleştirilmesi)		
3	Biyomimetik araştırma sınıflaması	Strüktürel Morfoloji, Kabuk bölmelerinin parmak eklemleri, kabuk performansı		
4	Biyomimetik Yöntem	Kompleks mekânsal strüktürler üretmek için biyomimetik tasarım ilkeleri		
5	Biyomimetik Adaptasyon	Deniz kestanesi kabuğunun morfolojisi (statik)		

5.2. Örnek 2: ICD | ITKE Research Pavilion 2012

2012 yılında Stuttgart Üniversitesi'nde gerçekleştirilen bu çalışma hem hafif hem de maliyet olarak uygun hesaplamalı (*computational*) biçimlerin geliştirilmesi için biyomimetik tasarım, simülasyon ve robotik imalatı birleştirerek yeni bir mimari tektonik geliştirmeyi amaçlamaktadır (Knippers, vd., 2015). Bu bağlamda eklem bacaklı sınıfına giren Amerikan istakozunun lifli morfolojiye sahip dış iskeletine ait prensiplerden yola çıkarak çekirdeksiz lifli sarmal hafif yapı araştırılmıştır (*ArthropodExoskeleton*) (Şekil 3).



Şekil 3. Biyolojik rol modeli. (A) Amerikan istakozunun kabuğu (*Homarus americanus*) (B) Üst derinin (*epiderm*) mikroskopik görünümü ve lif düzeni (Reichert vd., 2014)

Bir yıl süren araştırma süresince, biyomimetik ilkeler, hesaplamalı tasarım, lifli kompozit malzemeler ve robotik üretim başlıkları birlikte ele alınmıştır. Doğal morfolojinin araştırılmasının amacı, (1) hafif, malzeme açısından verimli, taşıyıcı sistemler için biyolojik ilkeleri tanımlamak; (2) performatif bir malzeme sistemini mümkün kılmak için, yapısal ve üretim unsurlarını içeren hesaplamalı bir tasarım sürecinin geliştirilmesi ve biyolojik ilkelerin sürece entegrasyonu (3) gelişmiş malzeme sisteminin tam ölçekli bir yapıda uygulanması ve değerlendirilmesidir (Reichert vd., 2014) (Şekil 4).



Şekil 4 Pavyon prototipi (Reichert vd., 2014)

İncelenen canlıda, **hiyerarşi, anizotropi, heterojenlik, adaptasyon, çok işlevlilik** gibi **biyolojik ilkeler** tespit edilmiştir. Tespit edilen bu özellikler pavyona aktarılmıştır (Reichert vd., 2014) (Tablo 6).

Tablo 6. Biyometikpavyon tasarımı için gerçekleştirilen aşamaların özeti

ICD/ITKE RESEARCH PAVILLON 2012				
1	Biyometik Aşama	Organizma	Konstrüksiyon	Amerikan istakozunun lifli strüktürel ve morfolojik ilkeleri, dış iskeletin geometrik düzeni, yüksek performansa sahip malzeme
2	Biyometik Yaklaşım	Problem odaklı tasarım		
3	Biyometik araştırma sınıflaması	Strüktürel Morfoloji, malzeme araştırması, malzeme davranışı, biyometik süreç, doğal morfogenez, performatif malzeme, lifli biyolojik sistemlerin özelliklerinin araştırılması		
4	Biyometik Yöntem	Modüler Fiber Bileşik Morfolojiler için Bütünleşik Hesaplamalı Tasarım Metodolojisi, robotik sargı yöntemi		
5	Biyometik Adaptasyon	Amerikan istakozunun kabuğunun strüktürel, geometrik ve morfolojik özellikleri (statik yapısı)		

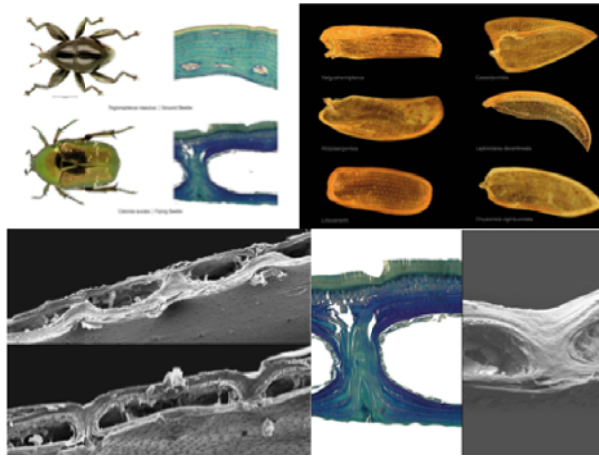
5.3. Örnek 3: ICD | ITKE Research Pavilion 2013-14

Stuttgart Üniversitesi SayısalTasarım (ICD) ve Yapı Strüktürleri ve Strüktürel Tasarım (ITKE) enstitüsü yeni bir biyolojik pavyon tasarlamıştır. Yeni tasarım fikirlerinin araştırıldığı pavyon, simülasyon ve fabrikasyon sürecini kapsamaktadır. Proje, öğrenciler, biyologlar, paleontologlar, mimarlar ve mühendisler arasında kurulan disiplinler arası işbirliği sonucu bir buçuk yılda tamamlanmıştır [URL-2] (Şekil 5).



Şekil 5.ICD/ITKE 2013-14Pavyonu[URL-2]

Projenin amacı, doğal fiber kompozit kabukların tasarım stratejisi için biyomimetik araştırma ve fiber güçlendirilmiş polimer yapılar için yeni robotik üretim metotlarının geliştirilmesidir. Bir başka amaç ise, modüler, çift katmanlı fiber kompozit yapılar için geniş çapta geometrik özgürlük sağlamak ve gerekli olan yapı işini minimuma indiren bir rüzgâr tekniği geliştirmektir (Doerstelmann vd., 2015). İlk olarak hafif doğal strüktürlerin tespiti için biyomimetik araştırmayapılmıştır. Bu araştırma ile böceklerin kanatları ve karınları için koruyucu bir kabuk (hücre) olan Elytron'un uygun model olduğuna karar verilmiştir. (Şekil 6) Bu hafif yapıların performansı çift katmanlı bir sistemin geometrik morfolojisine ve doğal fiber kompozitin mekanik özelliklerine dayanmaktadır. Bir protein matrisi içerisinde gömülü kitin liflerden oluşan bu materyalin eşyönsüz (*anisotropic*) özellikleri yerel olarak farklılaşmış malzeme özellikleri sağlamaktadır. Elytra'nın hem yapısal morfolojisi hem de bölmecik (*trabecular*) dağılımı, verimli malzeme kullanımı, malzeme farklılaşması yol gösterici olmuştur (Doerstelmann vd., 2015).



Şekil6.Elytra'nıntaramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesi [URL-2].

2. aşamada form, malzeme ve strüktürün eşzamanlı oluşumunuanlamak için SEM tarayıcıları ile birlikte böcekkabuğunun karmaşık iç yapısı analiz edilmiştir.Elytra morfolojisi sütun benzeri çift kıvrımlı destek elemanlarıyla (*trabecular*) çift katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır. Trabecular içerisindeki bir fiber plan üst ve alt kabuk parçalarıyla devamlı liflerle birleşmektedir. Trabecuların bağ dağılımı ve geometrisi böcek kabukları boyunca yüksek derecede değişkenlik göstermektedir (Doerstelmann vd., 2015).

Robotik üretim işlemi cam ve karbon elyafların6 katmandan oluşan bir sarmal içerir. Birinci cam elyaf tabaka elementlerin geometrisini belirlemekte olup daha sonraki karbon elyaf katmanları için kalıp olarak hizmet etmektedir. Bu karbon fiber katmanlar yapısal destek olarak hareket etmekte olup bireysel olarak liflerin anizotropik düzenlenme ile çeşitlenmektedir. Sonlu elemanlar analizleri (FEA) ile bileşenler üzerine etki eden kuvvetler belirlenerek karbon fiberlerin bireysel düzeni kurgulanmıştır. 3. aşama olarak

planlanan robotik sarmal sürecinde oluşturulan sarmal sözdizimi robotlara aktarılmakta ve 6 elyaf tabakanın otomatik olarak endüstriyel robot kolları ile sarılması gerçekleştirilmektedir. 4. aşama olan biyomimetik prototipin inşa edilmesinde ise, oluşturulan modüllerin manüel olarak montajı yapılmıştır (Parascho vd., 2015).

Pavyon tasarımında biyomimetik aşama olarak Elytraböceğinin yapısal morfolojisine odaklanılmıştır. Zari'nin (2007) yapmış olduğu sınıflamada organizmanın kabuk malzemesi olan doğal kitin fiber kompozit malzeme (*naturalchitin fiber compositematerial*) ve konstrüksiyonu araştırılmıştır. Yaklaşım olarak problem odaklı tasarım (*Problem-Based Approach/Top-down*) süreci izlenmiştir. Biyolojik, performatif hafif yapı sistemleri için biyomimetik malzeme davranışı araştırılmıştır (yöntem). (Tablo 7)

Tablo 7. Biyomimetikpavyon tasarımı için gerçekleştirilen aşamaların özeti

ICD/ITKE RESEARCH PAVILLON 2013-14				
1	BiyomimetikAşama	Organizma	Konstrüksiyon	elytra böceğinin yapısal morfolojisi
2	Biyomimetik Yaklaşım	Problem odaklı tasarım		
3	Biyomimetik araştırma sınıflaması	Strüktürel Morfoloji, malzeme araştırması, malzeme davranışı, biyomimetik süreç, doğal morfogenez, performatif malzeme, lifli biyolojik sistemlerin özelliklerinin araştırılması		
4	Biyomimetik Yöntem	Modüler Fiber Bileşik Morfolojiler için Bütünleşik Hesaplamalı Tasarım Metodolojisi, civatasız robotik sargı yöntemi		
5	Biyomimetik Adaptasyon	Elytra böceğinin strüktürel, geometrik ve morfolojik özellikleri (statik yapısı)		

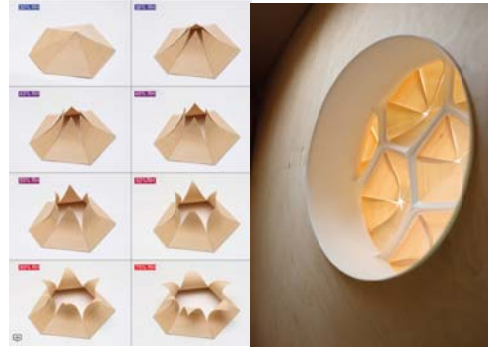
5.4. Örnek 4: HYGROSKIN – Meteoro sensitive Pavilion -2013

Bu çalışmada neme duyarlı ahşap ile herhangi bir mekanizmaya ihtiyaç duymadan hava koşullarına karşı duyarlı ve iklim değişimlerine yanıt veren (*meteorosensitive*) mimari kabuk üretilmesi amaçlanmıştır. Elastik olarak bükülmüş kontroplakların birleştirilmesiyle ve içerisinde yer alan kompozit açıklıklar ile oluşan buhafif kabuk robotik olarak üretilmiştir. Cephede yer alan nem hassasiyetine sahip boşluklar nem değişikliğine karşı açılıp kapanarak yanıt vermektedir. Pavyon, yerel mikro iklimle doğrudan geribildirimde bulunarak, açıklık ve gözeneklilik derecesi ayarı ve ışık iletimi ile de kabuğun görsel geçirgenliğini kontrol etmektedir. Bu proje algılayıcı (*sensor*), çalıştırıcı (*actuator*) ve motor gibi herhangi bir mekanik ve elektronik güç gerektirmeden akıllı (*smart*) malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. (Krieg vd., 2013) (Şekil 7)



Şekil 7. HygroSkin – MeteorosensitivePavilion [URL-3]

Pavyon tasarımının ilk aşamasında araştırmacılar tarafından ahşabın davranışını etkileyen çeşitli parametreleri açığa çıkarmak, analiz etmek ve çözüm üretmek için bir dizi malzeme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Farklı ahşap türlerine ait moleküler yapılar önemli ölçüde farklı su tutma (*hygroscopic*) ve yapısal özelliklere sahiptir. Deneyler sonucunda akçaağaç türünün en uygun performans özelliklerini gösterdiği tespit edilmiştir (Reichert vd., 2015).



Şekil 8. Neme duyarlı ahşap kompozitlerin açılıp kapanması [URL-3]

Malzeme türüne karar verildikten sonra malzeme neme karşı test edilmiş en uygun açılıp kapanma, boyutu belirlenmiştir. Malzeme, laboratuvar ve dış ortamda performans testlerine tabi tutulmuştur. (Şekil 8) Malzemenin işlevsel özelliklerini test etmek için prototip inşa edilmiştir. Sonuç olarak bu pavyon araştırmasında elektromekanik bir paradigmadan çok, biyomimetik yöntemle elde edilen, otonom, tepki veren bir mimari sistem sunulmuştur (Reichert vd., 2015).

Tablo 8. Biyomimetik pavyon tasarımı için gerçekleştirilen aşamaların özeti

HYGROSKIN-Meteorosensitive Pavilion-2013				
1	Biyomimetik Aşama	Ekosistem	Malzeme	Ağacın anizotropik yapısal ve higroskopik özellikleri
2	Biyomimetik Yaklaşım	Problem odaklı tasarım		
3	Biyomimetik araştırma sınıflaması	Malzeme araştırması, malzeme davranışı, performatif malzeme, Organik sistemlerdeki hesaplama kapasitelerine erişim ve araçsallaştırma Ahşabın aktif bükülme davranışı ve malzemenin higroskopik olarak harekete geçirilmesi, makina gibi malzeme (algılama, kontrol etme ve harekete geçirme), duyarlı mimarlık (responsive architecture)		
4	Biyomimetik Yöntem	Herhangi bir mekanik ya da elektronik ekipmana ihtiyaç duymadan hava koşullarına yanıt verebilen akıllı		
5	Biyomimetik Adaptasyon	Ağaca ait anizotropik yapısal ve higroskopik özellikleri sayesinde dinamik davranış sergilemektedir. % 45 ile % 75 arasındaki nem değişikliğine adapte olabilmek, İklimsel değişikliklere cevap verebilecek çevre bilinci oluşturan mimari sistemler		

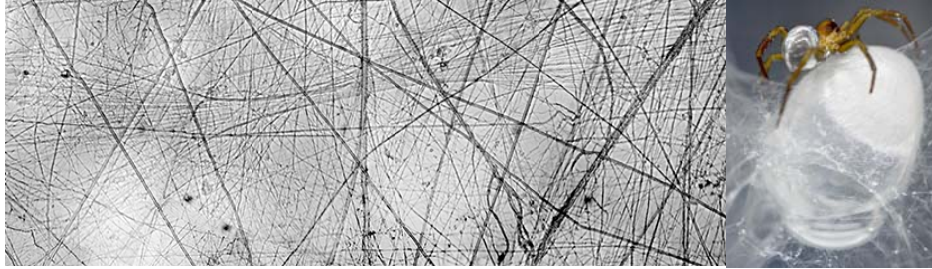
5.5. Örnek 5: ICD | ITKE Research Pavillion 2014-15

Disiplinler arası çalışmalar sonucu geliştirilen ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2014-15, sayısal tasarım, simülasyon ve robotik üretim süreçlerinin birlikteliğini araştırmaktadır. Bu amaçla su örümceğinin yuva yapımından ilham alarak yeni bir yapı üretim yönteminin olanakları araştırılmıştır. (Şekil 9) Yeni bir robotik üretim süreci ile başlangıçta esnek bir pnömatik kalıp içerisinde karbon elyafları ile takviye edilerek kademeli olarak sertleştirilmiştir. Elde edilen hafif fiber kompozit kabuk farklı mimari niteliklere sahip bir pavyon oluştururken, malzeme etkin bir yapı ortaya koymak hedeflenmiştir (Vasey vd., 2015).



Şekil 9. ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2014/2015 [URL-4]

Bu çalışma, elyaf takviyeli malzemeler ile üretebilecek yapı araştırmaları için biyolojik yapı süreçlerini incelemektedir. Bu bağlamda su örümceğinin ağ yapım süreci analiz edilmiş, davranış kalıpları ve tasarım kuralları incelenerek teknolojik üretim sürecine aktarılmıştır. Biyolojik süreci dikkate alınan su örümceğinin hayatının büyük kısmı suyun altında geçmekte ve örümcek hayatta kalabilmek için güçlendirilmiş bir hava kabarcığı oluşturmaktadır. Örümcek ilk olarak hava kabarcıklarının altında yatay bir tabaka halinde örgü oluşturur. Sonrasında ise hiyerarşik bir düzen içerisinde yapısını güçlendirir. Sonuçta kendisi için güvenilir, su akımlarının mekanik güçlerine dayanıklı bir yapı oluşur. Bu süreç robotik ve fiber takviyeli malzemeler ile yapılar oluşturmak için dikkate değer bulunmuştur (Vasey vd., 2015). (Şekil10)



Şekil 10. Örümcek ağının mikroskopik görüntüsü (Vasey vd., 2015) ve yapısı [URL-4]



Şekil 11. Pnömatik membran içerisinde robot kolu ile karbon fiberli üretim [URL-4]

Pnömatik kalıp olarak kullanılan ETFE'den yapılmış hava ile desteklenmiş bir zar tabakası içerisine endüstriyel robot yerleştirilmiştir. Oluşturulan bu yumuşak kabuk, başlangıçta hava tabakası ile desteklenmiş ve kabuğun iç kısmı robotik kol tarafından karbon elyafla örülmüştür [URL-4] (Şekil11). Malzeme olarak daha önceki yıllarda uygulanan pavyonlarla

benzerlikleri olsa da bu projede kalıp ve kabuk bütünleşiktir. Bu yöntem ile beraber, karmaşık formlu kabuklar ve farklı strüktürel çözümler için biyomimetik çözümlerin potansiyelleri gösterilmiştir. (Tablo 9)

Tablo 9. Biyomimetikpavyon tasarımı için gerçekleştirilen aşamaların özeti

ICD/ITKE RESEARCH PAVILLON 2014-15				
1	Biyomimetik Aşama	Davranış	Konstrüksiyon	Su örümceğinin ağ yapım süreci, ağ yapım davranışı
2	Biyomimetik Yaklaşım	Problem odaklı tasarım		
3	Biyomimetik araştırma sınıflaması	Strüktürel Morfoloji, malzeme araştırması, malzeme davranışı, biyomimetik süreç, performatif malzeme, robotik üretim sürecinin araştırılması (doğal organizma davranışını taklit eden robotik davranış)		
4	Biyomimetik Yöntem	Robotik fabrikasyon ve Doğal organizma davranışının robotik taklidi		
5	Biyomimetik Adaptasyon	Su örümceğinin ait yapı konstrüksiyonu (ağ yapısının taklidi/statik)		

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Son yıllarda, gelişen teknoloji ile birlikte, mimarlıkta tasarım sorunsalına biyomimetikçözüm arayışları yaygınlaşmaya ve farklı platformlarda tartışılmaya başlamıştır. Doğadaki canlılara, oluşum ve işleyişlere ait, etkin malzeme kullanımı, hafifliğine rağmen göstermiş olduğu dayanım ve yük taşıma kapasitesi, geri dönüşüm ve enerji kullanımı gibi performatif özellikler mimarların tasarımda çözüm getirmeyi amaçladığı konular arasındadır.

Biyomimetik pavyonların ele alındığı bu çalışmada, seçilen pavyonların tasarımında kullanılan biyomimetik aşamalar, yaklaşımlar, doğadaki bir çözüme nasıl bakıldığı, bulunan çözüm fikrinin hangi yöntemle tasarıma transfer edilerek veriye dönüştürüldüğü ve bu öğrenilen yaklaşımların nasıl malzemeleştirilerek uygulandığı araştırılmıştır. Analiz edilen araştırma pavyonlarında canlıların kabuklarına ait morfolojik özelliklerin ve statik düzenlenişlerin uyarlanmaya çalışıldığı, akıllı malzemelerin geliştirilmesi ile mekanik ya da elektronik güce gereksinim duymadan tıpkı bir canlı gibi çevresiyle etkileşim halinde olan yapıların araştırıldığı görülmüştür. Bu arayışlarstrüktürel sorunlara ve malzeme davranışı konularınaçözüm üretmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Ayrıca disiplinler arası ekiplerce gerçekleştirilen bu çalışmalarda örnek alınan canlılarda eş zamanlı olarak gelişen form, malzeme ve strüktürün biyolojik oluşum süreçleri de anlaşılmaya çalışılmıştır. Söz konusu eşzamanlı üretim biçimlerinin anlaşılabilmesi tüm tasarım ve üretim disiplinleri için devrimsel nitelikte ipuçları barındırmaktadır.

Biyomimetik yaklaşımlarla geliştirilen yenilikçi tektoniklerin, mekânsal ve yapısal özelliklerinin malzeme ile olan ilişkisinin test edildiği bu pavyonlarda, doğada yer alan statik ve dinamik adaptasyon çözümlerinden faydalandığı da görülmüştür. Form, malzeme, strüktür, mekân, üretim ve çevre koşulları gibi birçok değişkeni eşzamanlı ele alarak en uygun çözümü geliştirmek için, doğadaki canlıların bu özellikleri dikkate alınmıştır. Örümcek yapısını örnek alan pavyon tasarımlarında bu durumu arama çabası daha net algılanabilmektedir. Yük dayanımına maksimum düzeyde yanıt verebilmek için, örümcek kanatlarının/yuvasının biçimleniş dikkate alınmıştır. Aynı zamanda tıpkı

ekosistemde olduğu gibi malzemeyi en doğru şekilde kullanabilmek için çözüm arayışlarına gidildiği görülmektedir.

Doğadaki yapılaşmaların işlevlerinin, ölçeklerinin (doğadaki üretim nano boyuttadır) ve oluşum/üretim süreçlerinin insan yapımı yapılaşmalarla bire bir örtüşmesini beklemek olası değildir. Ancak tasarım sürecinde doğada gerçekleşen oluşuma ait bir ya da bir kaç ilkenin öğrenilmesi/uygulanması/uyarlanması biyomimetik yaklaşım/çözüm olarak nitelendirilebilir. Araştırılan problemlere getirilen çözüm önerilerinin uygulama örneği olan pavyonlarla yürütülen bu çalışmalar, mimarının "biyomimetik" anlama, sistemleştirme ve inşa etme çabalarını ortaya sermektedir.

KAYNAKLAR

- Cheong, H., & Shu, L. H. (2012). Automatic Extraction of Causally Related Functions from Natural-Language Text for Biomimetic Design. ASME Paper No. DETC2012-70732.
- Dorstelmann, M., Parascho, S., Prado, M., Menges, A., & Knippers, J. (2014). Integrative Computational Design Methodologies for Modular Architectural Fiber Composite Morphologies. In Design agency, proceedings of the 34th annual conference of the association for computer aided design in architecture (ACADIA), Los Angeles, 219-228.
- Doerstelmann, M., Knippers, J., Menges, A., Parascho, S., Prado, M., & Schwinn, T. (2015). ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14: Modular Coreless Filament Winding Based on Beetle Elytra. Architectural Design, 85(5), 54-59.
- El Ahmar, S. A. S. (2011). *Biomimicry as a Tool for Sustainable Architectural Design*. Unpublished Master of Science Thesis, Alexandria University, Alexandria.
- Garcia-Holguera, M., Clark, O. G., Sprecher, A., & Gaskin, S. (2016). Ecosystem biomimetics for resource use optimization in buildings. Building Research & Information, 44(3), 263-278.
- Gruber, P. Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings. 2011. Wien: Springer.
- Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). Biologically Inspired Design: Process and Products. Design Studies, 30(5), 606-622.
- Knippers, J., La Magna, R., Menges, A., Reichert, S., Schwinn, T., & Waimer, F. (2015). ICD/ITKE Research Pavilion 2012: Coreless Filament Winding Based on the Morphological Principles of an Arthropod Exoskeleton. Architectural Design, 85(5), 48-53.
- Krieg O., Dierichs K., Reichert S., Schwinn T., Menges A. (2011) Performative Architectural Morphology Finger-Joined Plate Structures Integrating Robotic Manufacturing, Biological Principles and Location-Specific Requirements. In: Gengnagel C., Kilian A., Palz N., Scheurer F. (eds) Computational Design Modelling. Springer, Berlin, Heidelberg, 259-266.
- Krieg OD, Christian Z, Correa D, Menges A, Reichert S, Rinderspacher K, Schwinn T. Hygroskin: Meteorosensitive Pavilion. In: Proceedings of the Fabricate 2014 Conference Zurich, 60-67.
- Lazarus, M. A., & Crawford, C. (2011). Returning Genius to the Place. Architectural Design, 81(6), 48-53.
- Lenau, T. A. (2009). Biomimetics as a Design Methodology-Possibilities and Challenges. In DS 58-5: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 5, Design Methods and Tools (pt. 1), Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009.
- Magna, R. L., Gabler, M., Reichert, S., Schwinn, T., Waimer, F., Menges, A., & Knippers, J. (2013). From Nature to Fabrication: Biomimetic Design Principles for the Production of Complex Spatial Structures. International Journal of Space Structures, 28(1), 27-39.

- Park, J. J., & Dave, B. (2014, April). Bio-inspired Parametric Design for Adaptive Stadium Façades. In *Australasian Journal of Construction Economics and Building-Conference Series*, Vol. 2, No. 2, 27-35.
- Parascho, S., Knippers, J., Dörstelmann, M., Prado, M., & Menges, A. (2015). Modular Fibrous Morphologies: Computational Design, Simulation and Fabrication of Differentiated Fibre Composite Building Components. In *Advances in Architectural Geometry*, Springer, Cham, 2014, 29-45,
- Pedersen Zari, M. (2012). Ecosystem Services Analysis for the Design of Regenerative Built Environments. *Building Research & Information*, 40(1), 54-64.
- Pedersen Zari, M. (2015). Ecosystem Processes for Biomimetic Architectural and Urban Design. *Architectural Science Review*, 58(2), 106-119.
- Reichert, S., Schwinn, T., La Magna, R., Waimer, F., Knippers, J., & Menges, A. (2014). Fibrous structures: An Integrative Approach to Design Computation, Simulation and Fabrication for Lightweight, Glass and Carbon Fibre Composite Structures in Architecture Based on Biomimetic Design Principles. *Computer-Aided Design*, 52, 27-39.
- Reichert, S., Menges, A., & Correa, D. (2015). Meteorosensitive Architecture: Biomimetic Building Skins Based on Materially Embedded and Hygroscopically Enabled Responsiveness. *Computer-Aided Design*, 60, 50-69.
- Selçuk, S., & Sorguç, A. (2007). Mimarlık Tasarımı Paradigmasında Biomimesis' in Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 451-459.
- Turner, J. S., & Soar, R. C. (2008, May). Beyond Biomimicry: What Termites Can Tell Us About Realizing the Living Building. In *First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction at Loughborough University*.
- Vasey, L., Baharlou, E., Dörstelmann, M., Koslowski, V., Prado, M., Schieber, G., ... & Knippers, J. (2015). Behavioral Design And Adaptive Robotic Fabrication Of A Fiber Composite Compression Shell With Pneumatic Formwork. In *Computational ecologies: design in the anthropocene*, Proceedings of the 35th annual conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), University of Cincinnati, Cincinnati, OH, 297-309.
- Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: Its Practice and Theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
- Vincent, J. F. (2003). Biomimetic Modeling. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 358(1437), 1597-1603.
- Vincent, J. F., & Mann, D. L. (2002). Systematic Technology Transfer From Biology to Engineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1791), 159-173.
- Zari, M. P. (2009). An architectural Love of the Living: Bio-Inspired Design in The Pursuit of Ecological Regeneration and Psychological Wellbeing. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 120, 293-302.
- Zari, M. P. (2007, November). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. In *The SB07 NZ Sustainable Building Conference*, 33-42.

İnternet Kaynakları:

- [URL-1] https://biomimicry.net/b38files/A_Biomimicry_Primer_Janine_Benyus.pdf, Erişimtarihi: 11.12.2017
- [URL-2] <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11187>, Erişimtarihi: 13.12.2017
- [URL-3] <https://www.archdaily.com/424911/hygroskin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert>, Erişimtarihi: 16.12.2017
- [URL-4] <https://www.archdaily.com/200685/icditke-research-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart>, Erişimtarihi: 16.12.2017