



Araştırma Makalesi / Research Article

Yapı Konstrüksiyonunda Biyomimikrinin İncelenmesi

Examination of Biomimicry in Building Constructions

Damla GÖKALP ATAN ^{1,*}, Adem SOLAK ²

¹ Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 15030, Burdur, Türkiye

² Pamukkale Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 20160, Denizli, Türkiye

<https://doi.org/10.55007/dufed.1830636>

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihi

Alınış, 26 Kasım 2025

Revize, 11 Mayıs 2026

Kabul, 18 Haziran 2026

Online Yayınlama, 01 Ekim 2026

Anahtar Kelimeler

Biyomimikri, Biyometrik tasarım,

Biyometrik konstrüksiyon,

Doğadan esinlenen tasarım

ÖZ

Bu çalışma, yapılardaki enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik gereksinimleri doğrultusunda biyomimikri yaklaşımının konstrüksiyona entegrasyonunu ve yapısal performansa etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Geleneksel yapı sistemlerinin geniş açıklık geçme, yanal stabilite sağlama ve malzeme verimliliği gibi temel konstrüksiyon problemlerinde karşılaşılan sınırlılıklar, araştırmanın çıkış noktasıdır. Bu kapsamda biyomimikri; organizmaların yapısal işleyiş prensiplerinden esinlenerek yapı tasarımına aktarılan sürdürülebilir bir yaklaşım olarak ele alınmıştır. Çalışmada yöntem olarak nitel araştırma benimsenmiş; farklı işlev ve ölçeklere sahip yedi yapı literatür taraması ve karşılaştırmalı analiz ile incelenmiştir. Yapılar; biyomimikri düzeyi, esin kaynağı, konstrüksiyon sistemi, kullanılan malzemeler ve sağladıkları avantajlar açısından sistematik olarak değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda biyometrik tasarımın geniş açıklık geçme, yüksek yapılarda yanal stabilite sağlama, rüzgâr yüklerine karşı dayanım geliştirme ve malzeme verimliliği gibi temel konstrüksiyon sorunlarına etkili çözümler sunduğu belirlenmiştir. Özellikle çok katlı yapılarda merkezi çekirdek ve dış diyagonal sistemlerin, geniş açıklıklı yapılarda ise uzay kafes ve kolonlu sistemlerin daha etkin hale geldiği görülmüştür. Ayrıca biyometrik konstrüksiyonlarda çelik ve yüksek dayanımlı betonarme malzemelerin yaygın uygulandığı tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, biyomimikrinin yalnızca biçimsel değil; yapısal, ekonomik ve çevresel olarak önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak sürdürülebilir yapı tasarımında biyomimikrinin proje planlama ve konstrüksiyon karar süreçlerinde etkin biçimde değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

***Sorumlu Yazar**

E-posta Adresleri: damlagokalp.mim@gmail.com (Damla GÖKALP ATAN), asolak@pau.edu.tr (Adem SOLAK)

ARTICLE INFO

Article History

Received, 26 Kasım 2025

Revised, 11 May 2026

Accepted, 18 June 2026

Available Online, 01 November 2026

Keywords

*Biomimicry, Biomimetic design,
Biomimetic construction, Design
inspired by nature*

ABSTRACT

This study examines the integration of biomimicry into building construction and its effects on structural performance in response to increasing energy consumption and sustainability requirements. The research is based on the limitations of conventional structural systems in spanning large distances, providing lateral stability, and achieving material efficiency. Biomimicry is considered a sustainable design approach that transfers structural principles inspired by living organisms into architectural and structural design. A qualitative research method was adopted, and seven buildings with different functions and scales were analyzed through literature review and comparative analysis. The selected cases were evaluated according to their level of biomimicry, source of inspiration, construction system, materials used, and structural advantages. The findings show that biomimetic design provides effective solutions for long-span structures, lateral stability in tall buildings, resistance to wind loads, and material efficiency. In particular, central core and external diagrid systems in high-rise buildings, as well as space-frame and column-supported systems in long-span structures, were found to perform more effectively when integrated with biomimetic principles. The study concludes that biomimicry offers significant structural, economic, and environmental advantages and should be considered in sustainable building design and construction decision-making processes.

1. GİRİŞ

Yapılarda artan enerji tüketimi, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve çevresel etkilerin giderek görünür hâle gelmesi, mimarlık ve mühendislik disiplinlerinde sürdürülebilir ve enerji etkin tasarım yaklaşımlarının önemini artırmıştır. Bu doğrultuda, yapı tasarımlarında malzeme kullanımını optimize eden, enerji verimliliğini artıran ve yapısal performansı iyileştiren çözümler ön plana çıkmaktadır [1]. Bu arayış sürecinde biyoloji, mimarlık için önemli bir bilgi ve ilham kaynağı hâline gelmiştir. Doğadaki canlı organizmaların minimum kaynak kullanımıyla maksimum performans sağlayan sistemleri, özellikle XX. yüzyılda artan fosil yakıt tüketimiyle birlikte yapı tasarımında yeniden ele alınmaya başlanmıştır. Bu bağlamda ortaya çıkan biyomimesis ya da biyomimikri yaklaşımı, canlıların hücresel yapıları, organizmaları ve doğal işleyiş prensiplerinin mimari tasarıma aktarılmasını amaçlayan disiplinler arası bir alan olarak gelişmiştir [2]. Biyomimikri yaklaşımı, doğada gözlemlenen yapısal verimlilik, adaptasyon ve enerji etkinlik prensiplerini mimariye aktararak sürdürülebilir tasarım hedeflerine katkı sunmaktadır. Canlı organizmaların minimum malzeme kullanımıyla dayanıklı ve işlevsel strüktürler oluşturması, mimari tasarımda özellikle taşıyıcı sistemler, yapı formu ve konstrüksiyon kararları açısından önemli bir potansiyel barındırmaktadır [3]. Bu nedenle biyomimikri, yalnızca biçimsel bir esinlenme yöntemi olarak değil, aynı zamanda yapısal ve performatif bir tasarım yaklaşımı olarak ele alınmaktadır.

Literatürde biyomimikrinin çeşitli yapısal kavramda açıklaması mevcuttur. Biyomimikri yaklaşımı, mimarlık ve tasarım literatüründe farklı ölçek ve disiplinlerde ele alınmış; özellikle sanat,

endüstriyel tasarım, mimari form, yapı kabuğu ve algısal değerlendirme bağlamlarında kapsamlı biçimde incelenmiştir. Inner [4] makalesinde biyomimikri kelimesini, Antik Yunanca'da "yaşamı taklit etmek" anlamına gelen "bios" ve "mimesis" kelimelerinin birleşiminden meydana geldiğini ve parametrik tasarım yaklaşımlarının mimari alanda kullanımını irdelemiştir. Benyus [5] kitabında tasarımlarda biyomimikrinin takip edilmesiyle insanların ihtiyaçlarının çoğuna çözüm bulabileceğini açıklayıp, avantajları üzerinde durmuştur. Janine M. Benyus'a göre biyomimikri kavramının esasları;

- Gün ışığından maksimum verim almak,
- Sadece ihtiyacı olan kadar enerjiyi kullanabilmek,
- Yapı formlarını işlevsel bir fonksiyona dönüştürme,
- Geri dönüşüm potansiyelini arttırmak,
- Çeşitliliği arttırmak,
- Yerel malzeme ve yerel uzmanlar ile çalışmayı tercih etmek,
- Gereksiz fazlalıklardan uzaklaşmak,
- Gücünün ve potansiyelinin sınırlarını zorlamayabilmektir [5].

Gökalp [3] yüksek lisans tezinde yapıdaki enerji dönüşümden maksimum fayda sağlamak ve gerekli ihtiyaçlar doğrultusunda yapı malzemelerin biyomimemis yaklaşımı dahilinde, yapılara zamanla entegre olurken, direkt olarak malzemeden bağımsız olarak tümel bir sistem olarak da karşımıza çıkabileceğini irdelemiştir.

Xiao ve Seong'un çalışmasında, biyomimikri; organizmaların morfolojik, yapısal ve işlevsel özelliklerinin tasarıma aktarılması yoluyla estetik değer, kültürel anlam ve sürdürülebilirlik boyutlarını birlikte ele alan disiplinlerarası bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada biyomimikri, biçimsel taklitten sistem temelli bütüncül yaklaşımlara uzanan kuramsal gelişim süreciyle ele alınmış; mimarlık dâhil olmak üzere farklı tasarım alanlarındaki uygulamaları vaka analizleri üzerinden incelenmiştir. Elde edilen bulgular, biyomimetik tasarımın estetik ve işlevsel bütünlük sağlarken çevresel sürdürülebilirliğe de katkı sunduğunu ortaya koymaktadır [6].

Mimarlık özelinde yapılan çalışmalarda ise biyomimikrinin çoğunlukla yapı kabuğu, cephe tasarımı ve biçimsel yaklaşımlar üzerinden ele alındığı görülmektedir. Gündoğdu ve Arslan tarafından gerçekleştirilen çalışmada, [7] biyomimesisin yapı kabuğu tasarımında kullanımına odaklanılmış; seçili örnekler, sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Çalışma, biyomimikri yaklaşımının mimarlara yapı kabuğu tasarımında yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sunduğunu ortaya koymakla birlikte, değerlendirmelerini ağırlıklı olarak kabuk, malzeme ve ekolojik bağlamda sınırlandırmıştır.

Benzer biçimde Arslan, Yıldırım ve Eser'in biyomorfik yapılar üzerine gerçekleştirdiği çalışmada [8], doğadan esinlenen mimari biçimlerin kullanıcılar tarafından algısal değerlendirilmesi ele alınmıştır. Antromorfik, zoomorfik ve fitomorfik yapı örnekleri üzerinden yapılan analizlerde, biyomorfik yapıların algısal etkileri ve estetik karşılıkları incelenmiş; çalışmanın odağı, yapısal sistemlerden ziyade mimari form ve kullanıcı algısı olmuştur.

Gökalp ve Solak, "Hafif strüktür malzemelerinin çağdaş mimaride yapıya katkıları" makalesinde [9] örneklerin hafif yapı malzemeleri üzerinden incelemişlerdir.

Literatürde yer alan bu çalışmalar, biyomimikri yaklaşımının mimarlık alanındaki estetik, biçimsel, algısal ve çevresel boyutlarını kapsamlı biçimde ortaya koymasına karşın, biyomimikrinin yapı konstrüksiyonuna ve taşıyıcı sistem kararlarına olan etkilerini doğrudan irdeleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle biyomimikri düzeylerinin (organizma, davranış, ekosistem) yapıların konstrüksiyon sistemleri, malzeme tercihleri ve yapısal performansları ile ilişkilendirilerek analiz edildiği çalışmalar literatürde yeterince yer bulmamaktadır.

Bu bağlamda, çalışmanın özgünlüğü biyomimetik doğrudan yapı konstrüksiyonu ekseninde ele alması ile öne çıkmaktadır. Farklı işlev ve ölçeklere sahip seçili yapı örnekleri, biyomimikri düzeyi, esin kaynağı, konstrüksiyon sistemi ve sağladığı yapısal avantajlar açısından sistematik bir biçimde incelenmiştir. Böylece çalışma, biyomimetik ilkelerin yapısal tasarıma nasıl uygulanabileceğine dair özgün bir bakış açısı sunmakta ve yalnızca biçimsel estetiği değil, aynı zamanda fonksiyonel, malzeme ve çevresel performansı da ele alan sonuçlar ortaya koymaktadır. Konstrüksiyonel katkılarının bir başlık altında irdelenmesi, avantajların örnekler üzerinden analiz edilerek, gelecekteki yapılaşmaya ilham kaynağı olması açısından önem arz etmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, ilk olarak biyomimikri ve konstrüksiyon kavramları ve aralarındaki ilişki incelenmiş ve geniş literatür araştırması sonucunda belirlenen yedi tane dünya örneği üzerinden konstrüksiyonel avantajları analiz edilmiştir. Yapılar konstrüksiyon tiplerine göre ayrılmış, malzeme etkinlikleri, enerji dönüşümleri, strüktür türleri ve biyomimikri düzeyleri tespit edilmiştir. Konstrüksiyonların mimari açıdan tasarım değerlendirilmesi yapıp, analiz bulguları kıyaslanmıştır. Çalışma, biyomimikrinin yalnızca biçimsel ya da kavramsal bir yaklaşım değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve enerji etkin yapı üretiminde yapısal bir tasarım aracı olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymayı hedeflemektedir.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada biyomimetik yaklaşımı ile yapı konstrüksiyonu arasındaki ilişki, nitel araştırma yöntemi kapsamında ele alınmıştır. Araştırmanın ilk aşamasında, biyomimikri ve yapı konstrüksiyonu kavramları literatür taraması yoluyla incelenmiş; biyomimikrinin mimarlık ve mühendislik alanındaki kuramsal çerçevesi ve uygulama alanları ortaya konmuştur. Bu kapsamda, biyomimikrinin yapı tasarımında organizma düzeyinde nasıl ele alındığı ve taşıyıcı sistemlere nasıl yansıtıldığı değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, literatür taraması sonucunda biyomimikri yaklaşımını yapı konstrüksiyonunda açık biçimde temsil eden yedi adet yapı örneği belirlenmiştir. Örnek yapıların seçiminde amaçlı örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Seçim kriterleri; yapıların biyomimetik bir esin kaynağına sahip olması, taşıyıcı sistem kararlarında bu yaklaşımın belirleyici rol oynaması, farklı yapı ölçeklerini (yüksek yapılar ve geniş açıklıklı yapılar) temsil etmesi ve literatürde yeterli teknik veriye sahip olması olarak belirlenmiştir.

Belirlenen yapı örnekleri, Tablo 1’de sunulduğu üzere, sistematik bir değerlendirme çerçevesi kapsamında analiz edilmiştir. Analiz sürecinde her yapı; biyomimikri düzeyi (organizma), esin kaynağı, konstrüksiyon sistemi, kullanılan yapı malzemeleri ve sağladığı konstrüksiyonel avantajlar başlıkları altında incelenmiştir. Ayrıca biyomimetik yaklaşımın yapıların geniş açıklık geçme kapasitesi, yanal stabilite, rüzgâr yüklerine karşı dayanım, malzeme verimliliği ve enerji etkinliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, yapıların konstrüksiyon tiplerine göre sınıflandırılarak karşılaştırmalı analiz yöntemiyle ele alınmıştır. Bu analizler sonucunda, biyomimetik yaklaşımının farklı yapı türlerinde taşıyıcı sistem ve malzeme seçimlerine nasıl yön verdiği ve yapı performansına olan katkıları ortaya konmuştur. Böylece çalışma, biyomimikrinin yapı konstrüksiyonuna entegrasyonuna ilişkin literatürdeki mevcut araştırmaları genişletmeyi amaçlamaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Doğada gözlemlenen “ölçek”, “işlev” ve “oluşum süreçleri” yapı strüktürlerinden farklı olması, malzeme seçimi, enerji korunumu ve dönüşümü, konstrüksiyonel hafiflik ve hafif olmasıyla birlikte sağladıkları yüksek dayanım birçok mimara ve mühendise ilham noktası olmuştur [10]. Bu kapsamda organik ve biyolojik formların tasarımları geliştirmesiyle yapıdaki enerjinin dönüşümü mimariyi ileri bir noktaya ilerletmiştir. Canlıların vücut enerjileriyle doğanın enerjisini sönmüleyebilmesi, bu enerjiyi kullanma ve aktarma yolları yapı tasarımlarına ve konstrüksiyonlarına örnek bir referans olmaya başlamıştır. Biyomimetik tasarım yaklaşımlarında ele alınan mimari konstrüksiyonlar;

- 1- Ağaç benzeri konstrüksiyon,
- 2- İskeletsel konstrüksiyon,
- 3- Ağ benzeri konstrüksiyon,
- 4- Pnömatik konstrüksiyon
- 5- Kabuk ve benzeri konstrüksiyon olmak üzere beş ana sınıfa ayrılmıştır.

3.1. Konstrüksiyonlar

3.1.1. Ağaç Benzeri Konstrüksiyonlar

Ağaçlar, yapısal olarak konstrüksiyonel bir taşıma görevi üstlenmektedir [11]. Mimarlık tarihine baktığımızda ağaç benzeri konstrüksiyonlar Şekil 1 ve Şekil 2'deki gibi daha çok Gotik üslupla tasarlanmış yapıların taşıyıcı sisteminde gözlenmektedir.



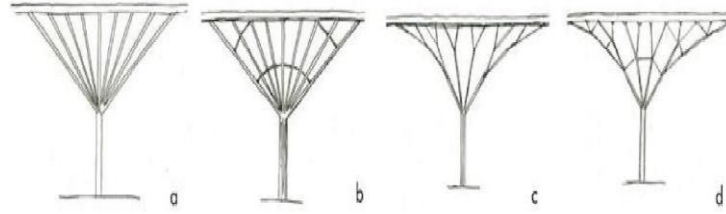
Şekil 1. Londra Kings College Şapeli [12]



Şekil 2. La Sagrada Familia [13]

Kings College Şapeli ve La Sagrada Familia örneklerini incelediğimizde yapıdaki kolonların ağaç benzeri bir yapıda dallandığı gözlenmektedir. Yapılan anketlerde burayı gezen insanların alana girdiği andan itibaren ağaçlar altında yürüyormuş gibi hissettiğini söylemişlerdir. XX. yüzyılın sonrasında teknolojiye artan gelişmelerle birlikte doğadaki formlar esas alınarak daha hafif

konstrüksiyonlar inşa edilebilmiştir [11]. Ağacın dallanmış ve yayılan formunun avantajı, daha az malzeme ile daha fazla taşıma potansiyeline sahip eğimli bir yol ağı oluşturmaktır.



Şekil 3. Frei Otto Dallanma Teorisi Eskizi [14]

Bunu en iyi açıklayan sistem dallanma teorisi (Şekil 3) olarak da bilinen Frei Otto'nun konstrüksiyon çalışmasıdır. Stuttgart Havaalanı'nın yolcu terminal binasının üst örtüsünü taşıyan çelik dallanmış düşey taşıyıcı formları (Şekil 4) ve Stansted Hava Terminali dış kolonları (Şekil 5) teoriyi örnek alarak oluşturulmuş ağaç benzeri konstrüksiyonların en iyi örneklerindendir. Yapıdaki eğimli çatı örtüsü, ağacın dallanmış formuna benzer 12 adet çelik strüktür tarafından taşınmaktadır.



Şekil 4. Stuttgart Hava Terminali Kolon Formu [15]



Şekil 5. Stansted Hava Terminali Dış Kolon Formu ve Referansı [16]

3.1.2. İskelet Benzeri Konstrüksiyonlar

Strüktürel sistemlere en iyi referans konularından biri de insan veya hayvan iskelet sistemleridir. Canlıların vücut sistemlerine baktığımız zaman doğası gereği strüktürel yapısının karmaşık olmasına

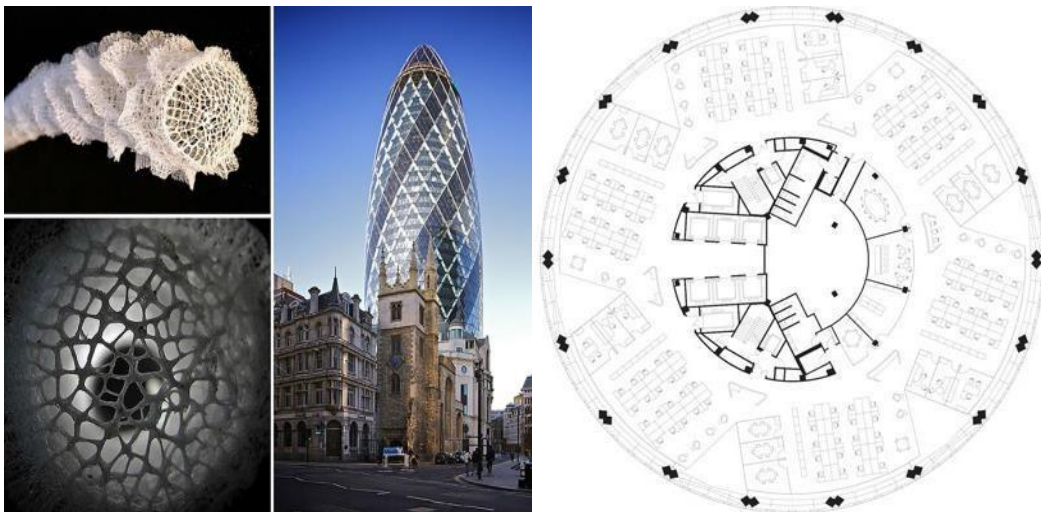
rağmen yüksek yük taşıma kapasitesi ve aynı zamanda sistem hafifliği ile öne çıkmaktadır. Dolayısıyla dayanıklı ve hafif yapısı temel alınan kaburga kemiklerinin formu yapıların temel konstrüksiyon elemanlarında kullanılmaya başlanmıştır [14]. Nitekim Eiffel Kulesi tasarlanırken vücudumuzun hafifliğine rağmen dayanımının yüksek olduğu femur kemiği incelenerek, yapıya ilham vermiştir (Şekil 6).

Gözenekli bir dokuya sahip olmasından dolayı kemik içinde minik hava kanalları oluşturmaktadır [9]. Kemik yapısına benzeyen bir sisteme sahip olan yapılar, uygulama safhasında malzeme optimizasyonu yanı sıra dayanıma yeterli bir esneklik de sağlamaktadır [17].



Şekil 6. Eiffel Kulesi ve Femur Kemiği Bağıntısı [18]

Aynı şekilde Londra'daki Gherkin Kulesi'nin süngere benzer yapısı Venüs bitkisinden ilham alınarak tasarlanmıştır (Şekil 7). Süngerimsi bir yapısı olan Venüs bitkisi, suyun altında daha parlak, yapısı gereği kafes benzeri bir görünüme sahiptir. Norman Foster yapıyı tasarlarken bitkinin bu özelliklerinden ilham almıştır [14]. Venüs bitkisindeki geometri ve dış yapısındaki katmanlı formu esas alınarak oluşturulan Gherkin Kulesi iskelet benzeri konstrüksiyona bir örnektir.



Şekil 7. Gherkin Kulesi Venüs Bitkisi Bağıntısı [19]

Bir başka örnek, Milwaukee Sanat Müzesi'nin orta sütunu tasarımıdır. Kuşların iskeletini ve kanat yapısını inceleyerek oluşturan Calatrava'nın bu yapısına martı omurgasının yapısı şekil vermiştir. Aynı zamanda omurganın devamında martının uçuş esnasındaki kanat yapısına benzetilerek tasarlanan bir üst örtü eklenmiştir. Yapıdaki asma germe sistem ve üst örtünün taşınması bu iskelet benzeri konstrüksiyon ile sağlanır [20] (Şekil 8).



Şekil 8. Millwaukuee Sanat Müzesi [21]

3.1.3. Ağ Benzeri Konstrüksiyonlar

Ağ benzeri konstrüksiyonlar, doğadaki ağ yapısının hafifliği ile beraber yüksek yük taşıma kapasitesinin yapıdaki dönüşümüyle farklı bir önem taşımaktadır. Taşıma özelliği bakımından membran yapısı gibi davranırken yük taşıma potansiyelleri de yüksek olmaktadır [10]. Özellikle dönemine göre Calatrava'nın ve Otto'nun yapılarında (Şekil 9) kullanılan asma germe sistemlerinde oluşan çekme gerilme kuvvetlerine odaklanarak tasarımların oluşturulması yeni bir tasarım prensibini de beraberinde getirmiştir [14]. Aynı zamanda bu sistem hafif malzemelerle geniş açıklıkların geçilmesi ile geleneksel yöntemlerden ayrılarak daha kolay yapım ve daha uygun fiyatta malzeme sunar [17].



Şekil 9. Frei Otto'nun Münih Olimpiyat Stadyumu Üst Örtüsü [22]

3.1.4. Pnömatik Konstrüksiyonlar

Pnömatik konstrüksiyonlar, doğada canlı ya da cansız fark etmeksizin ilham alınan strüktürlerden biridir. Sistemin yapı prensibi, yüzey gerilimi yüksek, elastik bir tabakanın dolgu malzemelerini çevrelemesi üzerine oluşturulmuştur. “Pneu” ilkesinden çeşitlenerek geliştirilmiştir. Çeper tabakası ve dolgu malzemesi ile taşıyıcı bir strüktürü oluşturur [17]. Canlıların hücre yapısındaki zar ve çeper yapısı pnömatik sistemlere örnek teşkil etmiştir. Yeryüzündeki sıvıların yüzey gerilimiyle oluşan mukavemet ile kabarcıklar yaratmasıyla oluşan damla formu ya da hava kabarcıkları yine pnömatik sistem konstrüksiyonlara ilham vermiştir [9]. Yüzey alanı minimuma indirgenerek asgari miktarda malzemeden oluşmaktadır. Dayanıklı yapısıyla, hafif ve esnekliği bir arada tutarak yüksek düzeyde bir plastiklik özelliğine sahiptir [23]. Pnömatik sistemlerin olumlu yanları:

- 1- Büyük ebatlarda üretilebilir.
- 2- Çeşitli fonksiyonda ve işlevde mekanlar yaratabilir.
- 3- Esnek ve oval formlara sahiptir.
- 4- Hafif ve portatif özelliktedir.
- 5- Sökülüp tekrar kullanılabilir. Bu sayede malzeme geri dönüşümüne katkıda bulunmaktadır.
- 6- Uygun bir maliyetle yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlayabilir.

Tokyo'da bulunan Big Egg Dome'un (Şekil 10) çatı örtüsü pnömatik sistemdir. Aynı şekilde Grimshaw'ın Ulusal Uzay Merkezi'nin (Şekil 11) dış kabuğu olarak da karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 10. Big Egg Dome Stadyumunun Üst Örtüsü [24]



Şekil 11. Ulusal Uzay Merkezi [25]

İngiltere'deki Eden Projesi Cornwall (Şekil 12) esin kaynağı ise su kabarcıklarıdır. Organizma düzeyi olan bu benzetim yapıyı pnömatik taşıyıcı olarak işlevlendirmiştir. Proje, 2 adet büyük seradan meydana gelmektedir ve nemli, ılıman iklim özelliklerine sahiptir.



Şekil 12. Eden Projesi ve Kabarcık Formu [26]

3.1.5. Kabuk Konstrüksiyonlar

Kabuk konstrüksiyonlar en az malzeme kullanarak, dayanımı fazla ve geniş açıklık mesafesi olan mekanlar oluşturmaya olanak tanıyan sistemlerdir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan en verimli konstrüksiyonlardır [14]. Kabuğu andıran sistemler daha çok deniz canlılarının formundan ilham alırlar. Doğal geometrilerinin sağladığı maksimum barınak kapasitesi sistemi daha verimli kılar. Bu konstrüksiyonlar belirli bir kesit kalınlığını aşmadan basınç ve çekmeye direnerek, taşıyıcı ve iletici elemanların sanki yekpare gibi düşünüldüğü sistemler olarak tanımlanabilir. Jorn Utzon'un opera yapısı ve Felix Candela'nın L'Oceanogràfic yapısı kabuk konstrüksiyonlara örnektir (Şekil 13).



Şekil 13. Sydney Opera Binası- L'Oceanografic Binası Deniz Kabuğu Bağıntısı [27] [28]

Çoğunlukla kavisli ve ince yüzeyleriyle hacim oluşturarak, destek noktaları dışında fazladan bir taşıyıcı sisteme de ihtiyaç duyulmaz. Bu özellik geniş açıklıklar geçebilebilmesine olanak tanımaktadır [29].

3.2. Yapı Konstrüksiyonunda Biyomimikriden Esinlenilen Yapıların İncelenmesi

3.2.1. Masdar Genel Merkezi (BAE-Dubai)

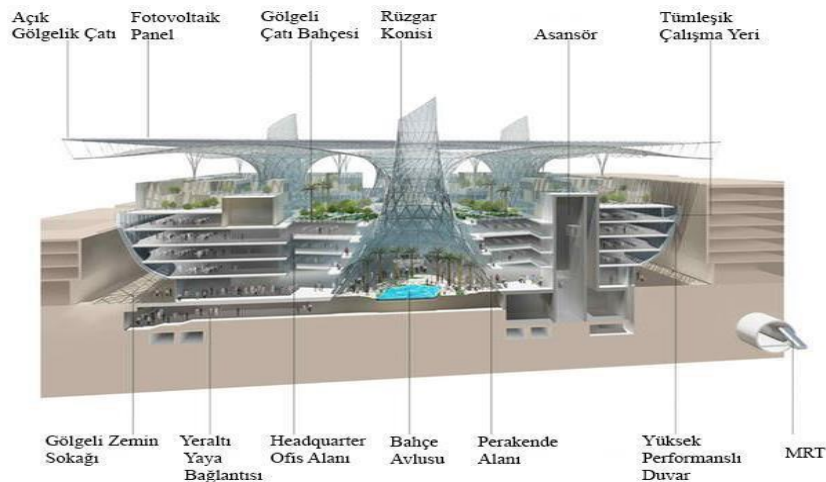
Birleşik Arap Emirlikleri'nin Dubai kentinde yapımı 2012 yılında tamamlanan Masdar Genel Merkezi, iskelet strüktür olacak şekilde tasarlanmıştır. Adrian Smith ile Gordon Gill tarafından tasarlanan yapının plan ve cephe incelemelerinden yoğunlukta olarak betonarme ve çelik malzemesi kullanıldığı görülmektedir. Biyomimikrinin organizma düzeyinde ağaç formunda esinlenilerek bir konstrüksiyon oluşturulmuştur. Dolayısıyla Şekil 14'te de biyomimikrinin ağaç benzeri konstrüksiyon halinde yapıya dahil olduğu görülmektedir.



Şekil 14. Masdar Genel Merkezi [30]

Masdar Genel Merkezi, 134.662 m² alanı olan karma işlevlere sahip bir yapıdır. Yapının sürdürülebilirlik temel ilkesi ile tasarlanan projede ticaret ve konut alanlarının yanı sıra kamusal açık alan bahçeleri ve bir ibadet salonu bulunurken, ulaşım ağlarına da doğrudan erişimi sağlayan bir planı vardır [30] (Şekil 15). Dışarıdan doğal bir havalandırma ve soğutmaya yarayan 11 adet rüzgar kanalı içermektedir. Yapı, pasif iklimlendirme stratejileri ve biyomimetik rüzgar kanalları sayesinde yıllık toplam enerji tüketimini benzer ölçekli yapılara kıyasla yaklaşık %60–70 oranında azaltmıştır. Özellikle 11 adet rüzgar kanalının oluşturduğu baca etkisi, mekanik soğutma ihtiyacını önemli ölçüde düşürmüş; soğutma enerjisi yüklerinde yaklaşık %55'e varan azalma sağlanmıştır [14].

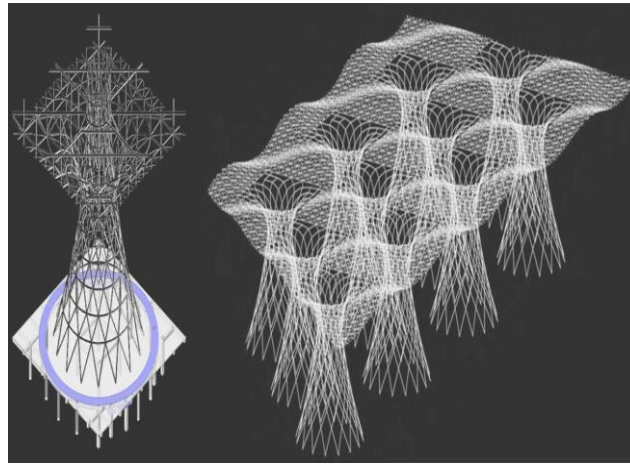
Bu konilerin zemin katta oluşturduğu avlulara gün ışını doğrudan iletilerek doğal aydınlanmayı da sağlar. Aynı zamanda güneş ışığından enerji dönüşümü sağlayabilmek için çatı örtüsünün üzerinde yerleştirilen fotovoltaik paneller enerjinin depolanmasını sağlamaktadır. Çatı örtüsüne entegre edilen fotovoltaik paneller, yapının yıllık elektrik ihtiyacının yaklaşık %30–35'ini karşılayacak kapasitede tasarlanmış olup, pik saatlerde şebekeye olan bağımlılığı azaltmaktadır [30].



Şekil 15. Masdar Genel Merkezi Kesit [30]

Yapı özelliklerinden dolayı yaklaşık metrekareslerdeki karma kullanımlı yapılara göre %70 oranda daha az su ve enerji tüketimi olacak şekilde tasarlandığı için LEED Platinum belgesi almıştır [14]. Dikdörtgen plan yapısı portatif iskelet konstrüksiyon tarafından şekil almaktadır. Yapının çatı örtüsü (Şekil 16) görevi gören dalgalı formu rüzgar yükü performansını da kolaylaştırmaktadır. Yapı ormandaki ağaçlara benzer şekilde doğal havalandırmayı ve soğutmayı sağlamaktadır (Şekil 17). Yapının ağaç benzeri taşıyıcı sistemi, yüklerin kolon-kiriş sistemine homojen biçimde dağıtılmasını sağlayarak malzeme optimizasyonuna olanak tanımıştır. Betonarme ve çelik sistemin hibrit kullanımı sayesinde:

- Taşıyıcı sistemde kullanılan toplam beton hacmi, geleneksel rijit çerçeve sistemlere göre yaklaşık %20–25 oranında azaltılmış,
- Çelik elemanların modüler ve tekrarlanabilir olması sayesinde şantiyede malzeme kaybı %15'in altına düşürülmüştür [14].



Şekil 16. Aerodinamik Çatı Modeli [30]



Şekil 17. Masdar Binası ve Ağaç Formu [30]

3.2.2. Oriente İstasyonu (Lizbon, Portekiz)

Portekiz'in Lizbon kentinde yapımı 1998 yılında tamamlanan Oriente İstasyonu, Santiago Calatrava tarafından iskelet strüktür olacak şekilde tasarlanmıştır. Strüktürel incelemelerinden çelik

malzemesi kullanıldığı görülmektedir. Biyomimikrinin organizma düzeyinde ağaç formunda esinlenilerek bir konstrüksiyon oluşturulmuştur. Dolayısıyla Şekil 18’de biyomimikrinin ağaç benzeri konstrüksiyon halinde yapıya dahil olduğu görülmektedir.



Şekil 18. Oriente İstasyonu Çatı Örtüsü ve Palmiye Formu [31]

Yapı toplam 158.700 m² olup, ana birimi olan tren ve metro istasyonlarına ek ticari birimleri de içeren, alt katı sergi mekanlarına hizmet vermektedir [32]. İstasyon biriminin çatı örtüsü uzay çelik konstrüksiyondan oluşmaktadır. Kullanılan temel yapı elemanları çelik ile yüksek dayanımlı betondur. Yapının çatı örtüsü kare biçiminde ve ön üretimli kolon başlıklarla tasarlanmıştır. Palmiye ağacı ve eğimli dallarından esinlenerek oluşturulan Oriente İstasyonu’nda (Şekil 19) kemerli bağlantı noktalarının keskin ve ince kesitler oluşturması planlanmıştır. Cam kaplı olan yapıda gün ışığı gün boyunca mekanları doğal olarak aydınlatmaktadır. 2023 yılında istasyonun aydınlatma sistemi yenilenmiş, LED teknolojiye geçilerek toplam aydınlatma gücü %40’ın üzerinde azaltılmıştır, dolayısıyla enerji faturası ve CO₂ emisyonu da önemli biçimde düşmüştür [7].



Şekil 19. Oriente İstasyonu Çatı Örtüsü [33]

3.2.3. Turning Torso (Malmö, İsveç)

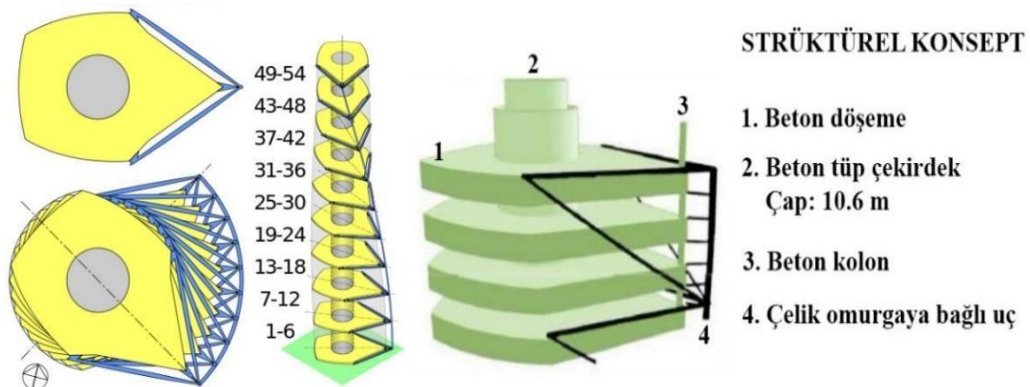
2005 yılında yapımı tamamlanan Turning Torso (Şekil 20), Santiago Calatrava tarafından konsol döşemeli olacak şekilde tasarlanmıştır. Strüktürel incelemelerinde yoğunlukta olarak betonarme ve çelik malzemesi kullanıldığı görülmektedir. Biyomimikrinin organizma düzeyinde insan omurgasından esinlenilerek bir konstrüksiyon oluşturulmuştur.



Şekil 20. Turning Torso [34]

Toplam 190 metre yüksekliğinde ve 54 kattan oluşan bir konut binasıdır [34]. İlk iki katı ofis birimleri olarak hizmet vermektedir. Diğer katlar ise toplamda 147 adet konut biriminin yerleşeceği şekilde tasarlanmıştır. 9 adet küp formun üst üste gelecek şekilde yerleştirilmesinden elde edilen tasarımda her bir küpe 5 kat mevcuttur.

Bu 5 katlı bölümler birbiri üzerinde 5 derece döndürülerek (Şekil 21) insan omurgası benzeri bir dönen bir form oluşturulmuştur. Yapı zemin kattan çatı katına kadar çekirdek ekseninde 90° dönmektedir [14]. Dönen form nedeniyle cephe panelleri özel üretilmiş olup, karmaşık geometrik üretim toleransları gerektirmiştir.



Şekil 21. Turning Torso Binasının Dönme Senaryosu [35]

Turning Torso'nun temel konstrüksiyon elemanları dönel plan yapısına katkıda bulunan perde duvarın çevrelediği betonarme bir çekirdek birimdir. Bu birim yapı planının orta noktasında konumlanarak, ana iskeletin omurga vazifesi gördüğü (Şekil 22) 10,6 metre çaplı bir merkezdir. Ana omurgayı oluşturan bu büyük ebatlı çekirdeğe dış çelik kafes yardım etmektedir. Katların köşe noktalarına yerleştirilen yatay ve çapraz çelik elemanlar, kolonlara bağlanarak dış formu meydana getirmektedir. Dolayısıyla oluşan burulma hareketi, özellikle rüzgar gibi yanal yüklere karşı dayanımı arttırarak, biyomimikrinin iskelet benzeri konstrüksiyon halinde yapıya dahil olduğu görülmektedir. Turning Torso binası ısıtma ve elektrik ihtiyacını yerel olarak üretilen %100 yenilenebilir enerji ile karşılamak üzere tasarlanmıştır. Bu enerji kaynağı; güneş, rüzgâr, jeotermal gibi yerel yenilenebilir sistemlerin entegrasyonundan sağlanmaktadır [36]. Turning Torso, Malmö'nün bölgesel ısıtma (district heating) sistemine bağlıdır. Bu sistemde ısı, merkezi tesislerde üretilir. Malmö'nün "district heating" sistemi ağırlıklı olarak:

- Biyokütle (odun atıkları, biyoyakıtlar)
- Atık yakma tesislerinden geri kazanılan ısı
- Endüstriyel atık ısı kaynaklarını kullanır.

Bu nedenle Turning Torso'da bireysel kazan, fosil yakıtlı kazan veya gaz sistemi yoktur. Isıtma enerjisinin neredeyse tamamı yenilenebilir / geri kazanılmış enerjiden gelir. Turning Torso'nun elektrik ihtiyacı İsveç ulusal elektrik şebekesi üzerinden yenilenebilir enerji sertifikalı (Guarantee of Origin) kaynaklardan karşılanır. Bu şebekede elektrik üretiminin büyük kısmı:

- Hidroelektrik
- Rüzgâr enerjisi
- (kısmen) biyokütle kaynaklarına dayanır [37].



Şekil 22. Turning Torso ve Omurga Benzetmesi [38]

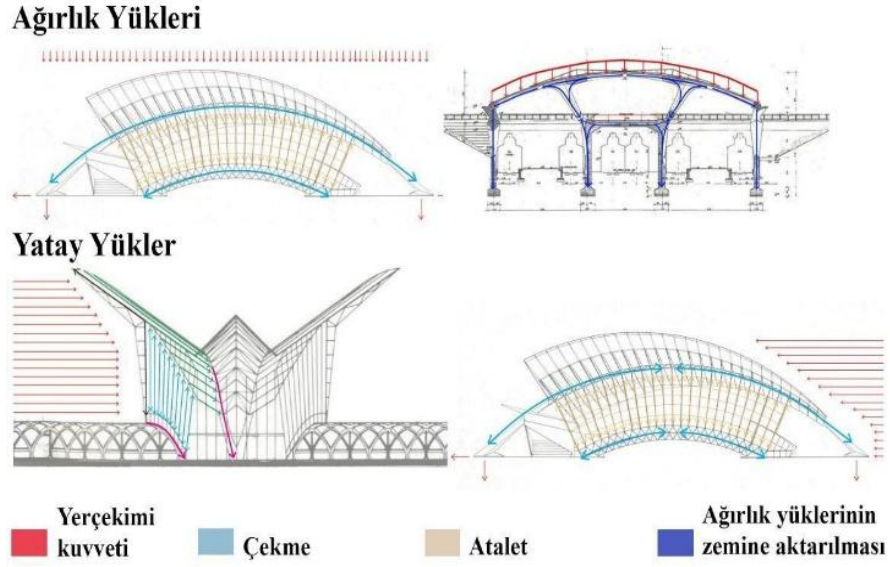
3.2.4. Lyon Saint- Exupéry TGV Tren İstasyonu (Lyon, Fransa)

Fransa'nın Lyon kentinde yapımı 1994 yılında tamamlanan Lyon Hava-Tren İstasyonu, Santiago Calatrava tarafından iskelet strüktür olacak şekilde tasarlanmıştır. Strüktürel incelemelerinde yoğunlukta olarak güçlendirilmiş betonarme ve çelik malzemesi kullanıldığı görülmektedir. Biyomimikrinin organizma düzeyinde kuş iskeletinden esinlenilerek bir konstrüksiyon oluşturulmuştur. Dolayısıyla Şekil 23'de biyomimikrinin iskelet benzeri konstrüksiyon halinde yapıya dahil olduğu görülmektedir. İstasyonun en belirgin konstrüksiyon avantajı, geniş açıklıklı ve yarı saydam çatı kabuğu sayesinde sağlanan doğal aydınlatmadır. Gün boyunca ana yolcu hollerinde yapay aydınlatma ihtiyacı önemli ölçüde azaltılmaktadır. Özellikle gündüz saatlerinde istasyonun ana mekânları, doğrudan gün ışığı ile çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 23. Lyon Saint-Exupéry TGV Tren İstasyonu [14]

Yapı toplamda 5.600 m² alana ve plan tipi üçgen bir geometriye sahiptir. Batı yönü giriş kısmını oluştururken doğu yönü istasyon ile havalimanı arasındaki geçiş birimi olarak çalışmaktadır. Birçok farklı fonksiyonun yer aldığı ana salonda, biletleme ofisleri, mağazalar, restoran ve kafeler yer almaktadır. Yapı, 3 farklı ulaşım hattı için bir aktarma alanı olup, havalimanına, yüksek hızlı trene ve otomobil parkına erişim sağlanabilmektedir. Yapının taşıyıcı sistemi, kaburga formunda bir iskelet benzeri konstrüksiyondur. Ana bölümde, dönel çerçeve yapısıyla oluşan üst örtünün öne eğilerek buna karşı oluşan ters yöndeki kuvvetlere çalışan ağırlık yüklerini zemine dağıtan bir formu vardır (Şekil 24).



Şekil 24. Lyon Tren İstasyonu Strüktür Çizimi [39]

Lyon Tren İstasyonu bir kuşun omurga ve kanatlarının uçuş esnasında oluşturduğu formundan (Şekil 25) ilham alınarak tasarlanmıştır. Dolayısıyla yapı biyomimetik konstrüksiyon tipi iskelet benzeri konstrüksiyonlara bir örnektir.



Şekil 25. Lyon Tren İstasyonu Strüktür Çizimi ve Kuş Formu [40]

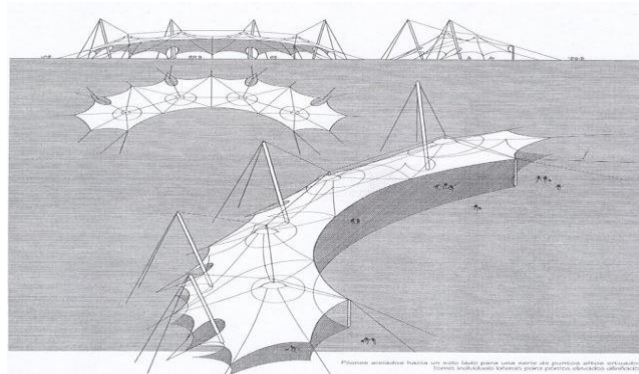
3.2.5. Münih Olimpiyat Stadı (Münih, Almanya)

Almanya'nın Münih kentinde yapımı 1972 yılında tamamlanan Münih Olimpiyat Stadı (Şekil 26) asma germe strüktür olacak şekilde tasarlanmıştır. Frei Otto ve Günther Behnisch, Rudolf Bergemann tarafından tasarlanan yapının strüktürel incelemelerinde çelik malzemesi kullanıldığı görülmektedir. Biyomimikrinin organizma ve davranış düzeyinde örümcek ağından esinlenilerek bir konstrüksiyon oluşturulmuştur. Frei Otto'nun gerilim ağları üzerine yaptığı çalışmalarla minimum yüzey ile minimum malzeme prensibini benimsemiştir. Bu sayede klasik konstrüksiyonlara kıyasla önemli oranda (yaklaşık %15–40 aralığında) malzeme tasarrufu potansiyeli sunduğunu ortaya koymaktadır [41].



Şekil 26. Münih Olimpiyat Stadyumu [42]

Taşıyıcı sistemi asma germe sistem olan stadyum yapısı toplamda 75,000 m²'dir ve 69,300 kişilik kapasitesiye sahiptir [14]. Yapının üst örtüsü sistemi 8 adet kablo birimlerinden oluşmaktadır. Rüzgâr yükünü dengelemek ve iletmek için yardımcı olan çift eğrilikli kablo ağları kullanılmıştır (Şekil 27). Ana taşıyıcı olan kablolar çekme kuvvetini karşılamak üzere zemine bağlantısı için ankre edilmiş, yan taşıyıcı kablolar ise sistemin stabilitesini sağlamak amacıyla birbirlerine bağlanmıştır. Çatı örtüsünde saydam pleksi paneller kullanılmıştır. Örümcek ağlarından ilham alan (Şekil 28) üst örtü yapısı organizma düzeyinde bir biyomimikri konstrüksiyon yaklaşımı görülmektedir.



Şekil 27. Üst Örtüsünün Tasarı Çizimi [43]



Şekil 28. Çatı Strüktürünün Örümcek Ağı Benzetimi [44]

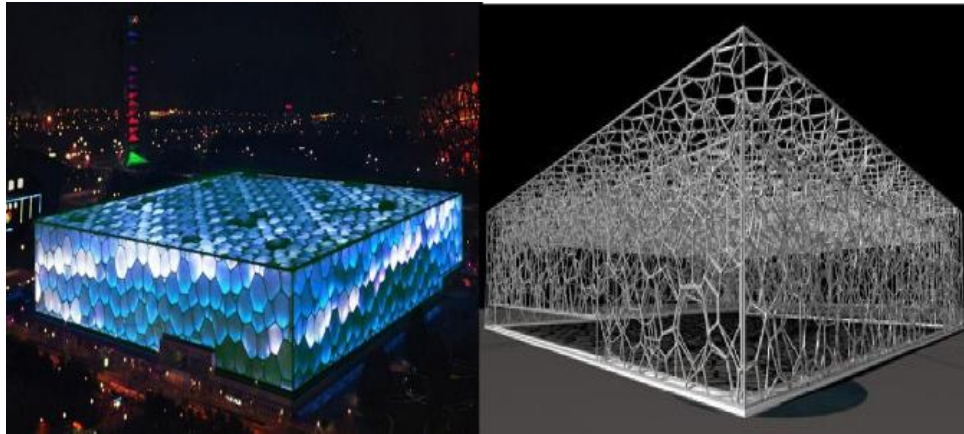
3.2.6. Ulusal Su Sporları Merkezi (Pekin, Çin)

Çin'in Pekin kentinde yapımı 2003 yılında tamamlanan Pekin Ulusal Su Sporları Merkezi (Şekil 29), mimari tasarımı PTW Mimarlık, strüktürel tasarımı Ove Arup tarafından kafes strüktür olacak şekilde tasarlanmıştır. Strüktürel incelemelerinde yoğunlukta olarak çelik ve ETFE malzemesi kullanıldığı görülmektedir. Biyomimikrinin organizma düzeyinde su ve damla formundan esinlenilerek bir konstrüksiyon oluşturulmuştur. Yapı toplamda 70.000 m² ve 17.000 kişilik kapasitesine sahiptir [2].



Şekil 29. Ulusal Su Sporları Merkezi [45]

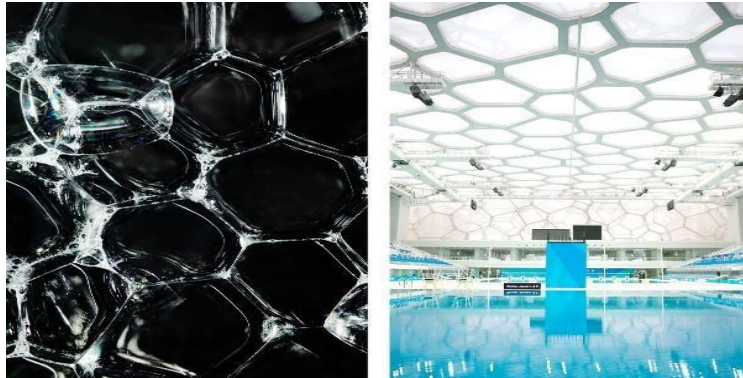
ARUP şirketinin geliştirdiği bir yazılımla sistem bilgisayar ortamında analiz edilmiştir. Üç boyutlu model üzerinden oluşturulan cephe modüllerinin (Şekil 30) hepsi farklı yapı elemanı olacak şekilde değerlendirilmiştir. Bu modüllerin kendi içerisinde en az kütleye sahip olması hedeflenerek portatif uzay çelik strüktür tarafından taşınıp dış cephesinin doldurulmasına karar verilmiştir.



Şekil 30. Strüktür ve Cephe Çalışması [46]

Yapının konstrüksiyonu 3 farklı düğüm çeşidi ve 4 ayrı sistem elemanlarından oluşmaktadır. 22 bin tane çelik eleman ile 12 bin tane düğüm noktası bulunmaktadır. Konstrüksiyonun yanal kalınlığı 3,6

metre ve üst örtü kalınlığı 7,2 metre olarak belirlenmiştir. Sistem hafifliği ile öne çıkan yapıda toplam çelik ağırlığı 7 bin tondan az tutulmuştur [14]. Ulusal Su Sporları Merkezi'nde uzay kafes sistemi dolduran dış cephe yapı malzemesi olarak ısı tasarrufu ve şeffaf görüntü sunan ETFE hava yastıkları tercih edilmiştir. Arup'un raporuna göre bu yapı formu ve cephe kullanımı ile aydınlatma ve enerji maliyetlerinde yaklaşık %30–55 arasında tasarruf sağlanmaktadır [14]. ETFE membran cephe, geleneksel camdan çok daha hafif olup aynı alanda camın yaklaşık %1'i kadar ağırlığa sahiptir ve daha iyi ışık geçirgenliği ve ısı izolasyonu sağlar. Aynı zamanda gün ışığını içeri alırken 20% oranında güneş enerjisini bina içinde tutarak ısıtma yüklerine katkı sağlar [47]. Bu sayede iç mekân gün boyunca yüksek oranda gün ışığı alır. Su kabarcığı ve damla formunun geometrisinden oluşturulan yapının membran dış cephesinde 3 bin tane şişme yastık bulunmaktadır (Şekil 31). Bu yapı tasarımı Water Cube, 2008 Yaz Olimpiyatları'ndan sonra, 2022 Kış Olimpiyatları'nda Ice Cube'ye dönüşüm gibi adaptasyonlarla uzun ömürlü kullanım modelini sergilemiştir. Bu dönüştürülebilir tasarım, sürdürülebilirlik ve yapı ömrü üzerinde önemli bir katkı oluşturur. Çatısı dahil olmak üzere geniş yüzeylerinden yaklaşık 140.000 ton su yıllık olarak toplanıp tekrar kullanılmaktadır. Bu, havuz sistemleri için önemli bir su tasarrufu ve belediye su yükünün azaltılması anlamına gelir. Yaklaşık %80 oranında yağmur suyu ve havuz geri yıkama suyunun filtrelenerek yeniden kullanıldığı ve böylece su kullanımında sürdürülebilirlik sağlandığı belirtilmektedir [47].



Şekil 31. Hava Kabarcıkları ve Cephe Formu [46]

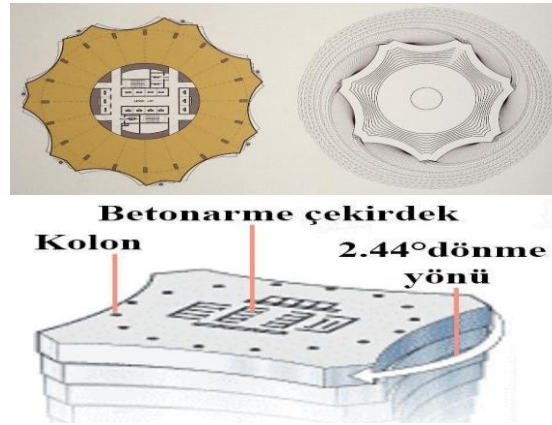
3.2.7. Chicago Spire (Chicago, ABD)

Amerika Birleşik Devletleri'nin Chicago kentinde yapımı 2007-2008 yılında kısmi tamamlanıp sonradan iptal edilen Chicago Spire mimari tasarımı Santiago Calatrava, strüktürel tasarımı Thornton Tomasetti tarafından perde duvarlı ve çerçeveli strüktür olacak şekilde tasarlanmıştır. Strüktürel incelemelerinde yoğunlukta olarak yüksek dayanımlı beton ve çelik malzemesi kullanıldığı görülmektedir. Biyomimikrinin organizma düzeyinde deniz kabuğu formundan esinlenilerek bir konstrüksiyon oluşturulmuştur. Dolayısıyla Şekil 32'de biyomimikrinin kabuk benzeri konstrüksiyon halinde yapıya dahil olduğu görülmektedir.



Şekil 32. Chicago Spire Cephe Formu [48]

Chicago Spire toplamda 610 metre yüksekliğe sahip 150 kattan oluşan 1200 konut hacmine sahip bir binadır. Her kat planının kendi ekseninde 2.44° 'den 360° 'ye kadar dönmesi ile tamamlanan burulma hareketinden oluşmaktadır [48]. Yapının taşıyıcı sistemi, perde duvar ve çerçeve sisteminden oluşmaktadır (Şekil 33). Merkezde yer alan çekirdek sistemi yüksek dayanımlı betonarme perde şeklinde tasarlanmıştır. Yapının yükselmesiyle incelererek küçülmektedir. Yapı formu Michigan Gölü kıyısında bulunan ince deniz kabuklarından ilham alınarak tasarlanmıştır. Bu form yapının dönel hareket yaparak rüzgar yüklerini dengeleyip, yanal stabilite sağlamaktadır. Aynı zamanda bina içinde akıllı bina ve enerji yönetim sistemleri ile kaynakların verimli kullanılacağı belirtilmiştir. Yapının tasarımı ile cam ve cephe yüzeylerinin mevcut enerji verimlilik standartlarından %15 daha iyi performans göstermesi hedeflenmiştir [49].



Şekil 33. Chicago Spire Plan Dönme Senaryosu [14]

3.3. Değerlendirme

Bu çalışmada biyomimikri tasarım yaklaşımının yapı konstrüksiyonuna nasıl katıldığı incelenmiştir. Yapıların mimari açıdan tasarım değerlendirilmesinde incelenen örneklerde, genellikle geniş açıklıklarda örümcek ağı formundan ve ağacın dallanan doğal strüktüründen ilham alındığı

görülmektedir. Tablo 1’de incelenen örneklerde biyomimetik yaklaşımla tasarlanmış yapıların konstrüksiyonel esin kaynakları ve buna bağlı olarak biyomimikri düzeyi, malzeme türü, sağladığı avantajlar olarak analiz edilmiştir (Tablo 1). Örnek yapılarıdaki biyomimetik yaklaşımı yapılara dahil edilirken enerji etkinliği, sürdürülebilirlik, geniş açıklıkları sağlanması, minimum yüzey alanı oluşturmak, rüzgâra göre yönelim, çevre konumuna göre yerleşim gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur [9].

Tablo 1. Biyomimetik Yaklaşımla Tasarlanmış Seçili Yapıların Konstrüksiyonel Özellikleri

Yapı	Yılı	Alan	Malzeme	Biyomimikri Düzeyi Esin Kaynağı	Konstrüksiyonu	Avantajı
Masdar Genel Merkez Dubai, BAE	2012	134.662 m ² , 7 kat	Betonarme Çelik	Organizma düzeyi Ağaç formu	İskelet strüktür	Yaklaşık %70 daha az enerji ve su tüketimi (benzer karma kullanımlı yapılara göre) • 11 adet rüzgâr kulesi ile doğal havalandırma • Fotovoltaik paneller ile yerinde yenilenebilir enerji üretimi • LEED Platinum
Oriente İstasyonu Lizbon, Portekiz	1998	158.700 m ² , çeşitli kat yüksekliği	Çelik, Yüksek dayanımlı beton	Organizma düzeyi Ağaç formu	İskelet strüktür, Uzay çelik çatı	• Geniş açıklıkların kolonsuz geçilmesi • Çatı örtüsü ile doğal gün ışığının yüksek oranda iç mekâna alınması • Malzeme dağılımında yük-kesit optimizasyonu • Kamusal alanlarda aydınlatma enerjisi ihtiyacını %40’ın üzerinde azaltılması
Turning Torso Malmö, İsveç	2005	190 m, 54 kat, 147 adet konut	Betonarme Çelik	Organizma düzeyi İnsan omurgası	Konsol döşemeli, çekirdek, Dış çelik kafes	• Toplamda 90° burulma (her kat ~1,6°) • Burulmalı form ile rüzgâr yüklerinin azaltılması • Merkezi çekirdek sayesinde yüksek yanal stabilize • Mekanik sistem ihtiyacının form yoluyla optimize edilmesi

Müniht Olimpiyat Stadı Müniht, Almanya	1972	74.800 m ²	Çelik kablo, Akrilik cam	Organizma düzeyi Örümcek ağı	Gerilim ağılı (tensile) strüktür, kablo- membran sistem	• Minimum yüzey–minimum malzeme prensibi • Klasik çatı sistemlerine kıyasla ~%15–40 malzeme tasarrufu potansiyeli (literatür temelli) • Yüksek gün ışığı geçirgenliği → aydınlatma enerjisinin azalması • Büyük açıklıkların kolonsuz geçilmesi
Lyon Hava Tren İstasyonu Fransa	1994	5.600 m ² çeşitli kat yüksekliği	Güçlendirilmiş betonarme, Çelik	Organizma düzeyi Kuş iskeleti	İskelet strüktür, Kaburga formu	• Kaburga sistemi ile yüklerin doğrusal aktarımı • Geleneksel sistemlere göre malzeme tasarrufu potansiyeli (~%20–30) (literatür karşılaştırmalı değerlendirme) • Büyük açıklıklarda hafiflik ve strüktürel verimlilik
Ulusal Su Sporları Merkezi Pekin, Çin	2003	70.000 m ² , 31 m yükseklik 17.000 kişi	Çelik, ETFE	Organizma düzeyi Su kabarcığı ve damla formu	Asma uzay kafes, Pnömatik konstrüksiyon	• ETFE cephe ile %30–55 enerji tasarrufu • Cephe camdan 100 kat daha hafif • Yıllık 140.000 ton yağmur suyu toplanması • Suyun %80'inin geri kazanımı • Yüksek gün ışığı geçirgenliği
Chicago Spire, ABD	2007	610 m, 150 kat, 1200 adet konut	Yüksek dayanımlı beton, çelik	Organizma düzeyi Deniz kabuğu	Perde duvarlı çerçevesi sistem	• LEED Gold hedefi (planlanan) • Standart yüksek yapılara göre ~%15 enerji verimliliği hedefi (tasarım verisi)

Mimarlığın başlıca strüktür sorunlarından biri geniş açıklık geçme ve daha yüksek yapılar inşa etmek olduğu için daha hafif ve daha etkin bir tasarımsal yaklaşım ortaya koyarak, doğanın işleyişinden yararlanmak büyük önem arz etmektedir. Örneklerin konstrüksiyon türlerine ilişkin incelemede çok kattan oluşan yapılarda en çok merkezi çekirdek yerleşimi ile bina cephelerinde diyagonal ızgara sisteminden oluşan karma bir konstrüksiyon veya perde duvarlı ve çerçevesi konstrüksiyonların verimli olduğu görülmüştür. Geniş açıklık geçilen yapılarda ise genellikle kolonlu veya uzay kafes taşıyıcı konstrüksiyonun tasarıma dahil edildiği görülmüştür. Örnek yapılar malzeme farklılığı olarak

incelendiğinde, yüksek yapılarda çelik ve yüksek dayanımlı betonarmenin daha yaygın kullanıldığını kanıtlamıştır. Geniş açıklıklı yapılarda ise çelik, betonarme malzemelerinin tercih edildiği görülmüştür. Biyomimikri temelli konstrüksiyon sistemlerinde, tasarım ve uygulama sürecinde bazı teknik zorlukları da beraberinde getirmiştir. Özellikle:

- Karmaşık geometrilerin dijital üretim ve BIM tabanlı koordinasyon gerektirmesi,
- Yerel iş gücünün bu tür özel strüktürlere uyum sürecinde ek eğitim ihtiyacı,
- Modüler elemanların hassas toleranslarla üretilme zorunluluğu, uygulama süresini kısmen uzatan faktörler olarak öne çıkmaktadır.

Bu durum, biyomimikri temelli yapıların yaygınlaşabilmesi için erken tasarım aşamasında disiplinler arası entegrasyonun kritik önem taşıdığını göstermektedir. Bu çalışmanın temel sınırlılığı, biyomimetik yaklaşımla tasarlanmış yapıların büyük bir kısmı için standartlaştırılmış ve karşılaştırılabilir nicel performans verilerinin sınırlı olmasıdır. İncelenen örneklerin bir bölümünde (Masdar Genel Merkezi ve Ulusal Su Sporları Merkezi gibi) enerji ve su tüketimine ilişkin ölçülebilir veriler bulunmakla birlikte, diğer yapılarda bu tür veriler çoğunlukla tasarım raporları, teorik performans öngörülerini veya karşılaştırmalı literatür değerlendirmeleriyle sınırlıdır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, yazarın daha önce gerçekleştirdiği “Çağdaş Hafif Strüktür Malzemelerinin Yapı Formunda Kullanımı ve Tasarıma Etkisi” başlıklı yüksek lisans tezi ile 2023 yılında yayımlanan “Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları” adlı çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırıldığında belirli benzerlikler ve farklılıklar ortaya koymaktadır. Önceki çalışmalarda çağdaş hafif strüktür malzemelerinin mimari forma etkisi, geniş açıklık geçme kapasitesi, taşıyıcı sistemlerin hafifletilmesi ve enerji etkinliğine katkıları ağırlıklı olarak malzeme teknolojileri ve strüktürel performans açısından değerlendirilmiştir. Çelik, ETFE, membran ve kompozit sistemlerin mimari tasarıma sağladığı esneklik ile çağdaş yapı formunun oluşumundaki rolü ön plana çıkarılmıştır. Bu çalışmada ise benzer performans hedeflerinin yalnızca gelişmiş malzemeler aracılığıyla değil, doğadaki organizmaların yapısal prensiplerinin mimariye aktarılması yoluyla sağlandığı görülmüştür. İncelenen örneklerde örümcek ağı, ağaç dallanması, kuş iskeleti, su kabarcığı ve insan omurgası gibi doğal sistemlerin; minimum malzeme ile maksimum dayanım, yük optimizasyonu, doğal havalandırma, aerodinamik form oluşturma ve enerji verimliliği gibi tasarım kriterlerine doğrudan katkı sağladığı belirlenmiştir. Bu yönüyle çalışma, önceki araştırmalarda vurgulanan hafiflik ve strüktürel verimlilik kavramlarını biyolojik organizasyon prensipleri üzerinden yeniden değerlendirmektedir. Ayrıca önceki çalışmalarda yapı formunun oluşumunda malzeme teknolojilerinin belirleyici rolü öne çıkarken, bu araştırmada formun yalnızca estetik bir çıktı olmadığı; çevresel performans, sürdürülebilirlik ve iklimsel uyum kriterleriyle birlikte şekillendiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum biyomimikrinin yalnızca

biçimsel bir benzetme yöntemi olmadığını, aynı zamanda performans temelli bir konstrüksiyon yaklaşımı sunduğunu göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Geçmişten günümüze süregelen doğadan ilham alma süreci, mimarlık disiplininde her zaman önemli bir yer tutmuştur. İlk barınaklardan itibaren insanoğlu doğayı gözlemlemiş, onun sunduğu formlardan, malzemelerden ve işlevsel sistemlerden etkilenecek yaşam alanlarını biçimlendirmiştir. Ancak bu süreç, günümüzde teknolojik gelişmelerin ve malzeme biliminin ilerlemesiyle daha sistematik ve bilimsel bir boyut kazanmıştır. Enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik kapsamındaki oluşan ihtiyaç ve yeni hedefler mimariyi doğayı gözlemlemeye ve ondan ilham almaya itmiştir. Yalnızca doğadaki görsel biçimlerin kopyalanması değil, doğadaki sistemlerin işlevselliğinin anlaşılması ve tasarıma entegre edilmesi mimariye yeni bir boyut kazandırmıştır. Yapılarda form-konstrüksiyon-malzeme ilişkisini yeniden düşünmek için güçlü bir araç sunmuştur. Çalışmada, biyomimikri ve konstrüksiyon ilişkisi açıklanmış ve bu bağlamda geniş literatür araştırması sonucunda belirlenen dünya örnekleri olan Masdar Genel Merkezi, Oriente Tren İstasyonu, Turning Torso, Lyon Hava Tren İstasyonu, Ulusal Su Sporları Merkezi ve Chicago Spire yapıları üzerinden analiz edilmiştir. Çalışma bulgularında yapıların taşıyıcı iskelet sistemlerinde, konstrüksiyon kurgularında, malzeme seçiminde ve cephe tasarımlarında biyomimetik yaklaşımların benimsenmesi hem ekonomik hem de estetik açıdan güçlü çözümler sunduğu görülmüştür. Özellikle incelenen örneklerin tablo analizinde biyomimikri tasarım yaklaşımında yapıların taşıyıcı sistemleri, enerji döngüleri ve çevresel uyum mekanizmalarının minimum enerji ve kaynak kullanımıyla maksimum verimlilik elde etmenin mümkün olduğu görülmektedir. Yalnızca yapıların konstrüksiyon dayanıklılığına katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine de doğrudan hizmet etmektedir. Elde edilen veriler sürdürülebilir yapılaşmanın planlama süreçlerinde analizlerinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Nitekim konstrüksiyon tasarımlarının yapıda daha az su ve enerji tüketimi, güneş paneli yerleşimi için geniş üst örtüye imkan verme, daha düşük enerji kullanımı, daha az rüzgar yüküne maruz kalma, geniş açıklık geçebilme, gün ışığından ve havalandırmadan maksimum verim sağlama, estetik ve strüktürel hafiflik, yanal stabilite, yük dağılımında verimlilik, geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı, ısı tasarrufu, portatiflik, çok işlevli ve karma kullanım gibi avantajların olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla çalışma bulguları özellikle günümüzde artan enerji tüketimi, kaynakların hızla tükenmesi ve çevresel krizler, mimarlık ve mühendislikte doğa odaklı bir yaklaşımı zorunlu hale geldiğini ortaya koymaktadır. Bu noktada biyomimetik konsept, yalnızca estetik bir tercih değil, aynı zamanda işlevsel bir hedef olarak da ele alınmalıdır. Minimum kaynak kullanımı ile maksimum faydayı hedefleyen doğa dostu, yenilenebilir ve sürdürülebilir yapıların inşası, biyomimikrinin sağladığı en önemli katkılardan biridir. Sonuç olarak çalışma biyomimikri yaklaşımın konstrüksiyonlar üzerindeki rolünü ortaya koyarken,

geleceğin mimarlık pratiklerinde yalnızca tasarım estetiğini değil, aynı zamanda konstrüksiyon yapı kabuğunu da şekillendirecek güçlü bir paradigma sunmaktadır. Bu anlayışla tasarlanan yapılar hem doğanın bilgelikliğini hem de insanın yaratıcı gücünü bir araya getirerek daha yaşanabilir, dengeli ve sürdürülebilir bir geleceğin inşasına katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Makale incelemesinde değerli yorum ve yönlendirmelerinden dolayı tüm hakem hocalarımıza teşekkür ederiz. Bu çalışma, 2022 yılı içerisinde tamamlanan “Çağdaş Hafif Strüktür Malzemelerinin Yapı Formunda Kullanımı ve Tasarım Etkisi” [3] başlıklı yüksek lisans tezi ve 2023 yılı içerisinde yayınlanan “Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları” [9] makalesindeki veriler kullanılıp, geliştirilerek hazırlanmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Hazırlanan makalede hiçbir kişi ya da kurumla çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK BEYANI

Bu çalışmada, yazarlar “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamındaki tüm kurallara uyduklarını, ilgili yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” olarak belirtilen başlığı altındaki eylemlerden hiçbirini gerçekleştirmediklerini taahhüt ederler.

YAZARLARIN KATKILARI

Damla GÖKALP ATAN: Kavramsallaştırma, yazma-orijinal taslak hazırlama, veri toplama, yazma-gözden geçirme ve düzenleme, görselleştirme (veri sunumu), analiz, inceleme (bir inceleme sürecini yürütme, deneyleri yapmak ya da veri / kanıt toplamak), metodoloji (metodolojinin geliştirilmesi ya da tasarımı), inceleme (bir inceleme sürecini yürütme, deneyleri yapmak ya da veri / kanıt toplamak). Adem SOLAK: Gözetim ve liderlik sorumluluğu (araştırma faaliyetinin planlanması ve yürütülmesi için gözetim ve liderlik sorumluluğu), verinin düzenlenmesi (çeşitli kaynaklardan toplanan verilerin organizasyonu ve bütünleştirilmesi), inceleme (bir inceleme sürecini yürütme, deneyleri yapmak ya da veri / kanıt toplamak), metodoloji (metodolojinin geliştirilmesi ya da tasarımı), doğrulama (sonuçların / deneylerin ve diğer araştırma çıktılarının genel tekrarının / tekrarlanabilirliğinin doğrulanması), proje yönetimi.

KAYNAKLAR

- [1] N. V. Gür, “Biyomimetik tasarım yaklaşımı ve mimari uygulamalar,” *Yapı Dergisi*, sayı. 421, ss. 148-152, 2016.
- [2] J. F. V. Vincent, O. Bogatyrev, A. K. Pahl, N. R. Bogatyrev and A. Bowyer, “Biomimetics -Its practice and theory,” *Journal Of The Royal Society Interface*, vol. 3, no. 9, pp. 471–482, 2006.
- [3] D. Gökalp, “Çağdaş hafif strüktür malzemelerinin yapı formunda kullanımı ve tasarıma etkisi,” Yüksek lisans tezi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, Türkiye, 2022.
- [4] S. Inner, “Biyomimikri ve parametrik tasarım ilişkisinin mimari alanında kullanımı ve gelişimi,” *Tasarım Enformatiği Dergisi*, c. 1, sayı. 1, ss. 15-29, 2019.
- [5] J. M. Benyus, *Biomimicry: Innovation Inspired By Nature*. New York: Harpercollins Publishers, 1997.
- [6] C. Xiao and D. Seong, “Research on the application of biomimetic design in art and design,” *Biomimetics*, vol. 10, no. 8, pp. 541, 2025.
- [7] E. Gündoğdu ve H.D. Arslan, “Yapı kabuğu tasarımında biyomimesis kullanımının örnekler üzerinden değerlendirilmesi,” *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, c. 2, sayı. 4, ss. 159-168, 2019.
- [8] H. Arslan, K. Yıldırım ve A. Eser, “Biyomorfik yapıların algısal değerlendirmesi,” *Çağdaş Mimarlık Araştırmaları: Kent, Kuram, Tasarım*, 1.basım, Y. Aksoy ve E. Duyan Edt. İstanbul: Damak Yayınları, 2021, ss. 16-36.
- [9] D. Gökalp Atan ve A. Solak, “Hafif strüktür malzemelerinin çağdaş mimaride yapıya katkıları,” *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 14, sayı. 1, ss. 58-72, 2023.
- [10] S. Arslan ve G. A. Sorguç, “Similarities in structures in nature and man-made structures: biomimesis in architecture,” presented at the 2nd International Design and Nature Conference Comparing Design in Nature with Science and Engineering, London, UK, July 28, 2004.
- [11] M. G. Yeler, “Mimarlıkta biyomorfizm,” Doktora tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, Türkiye, 2012.
- [12] Exploring GB, *King's College Chapel*. Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.exploringgb.co.uk/blog/kings-college-chapel-cambridge>
- [13] Ş. Salur, *La Sagrada Familia*. (2025). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.arkitektuel.com/la-sagrada-familia/>.
- [14] S. K. Ercan, “Biyomimetik strüktürlerin örneklerle irdelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [15] D. Harris, *How Can Biomimicry Be Used To Enhance The Design Of An Architectural Column*. (2016). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. https://www.researchgate.net/publication/303655581_.
- [16] E. Gibson, *Stansted Airport Challenged All The Rules Of Terminal Design*. (2019). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.dezeen.com/2019/11/25/stansted-airport-foster-partners-high-tech-architecture/>.

- [17] A. S. Selçuk, “Mimarlıkta boyutsuz parametrik arayüz tasarımı önerisi: Biyomimetik bir yaklaşım,” Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2009.
- [18] Stellar Lab, Doğa ve Teknoloji: Biyomimikri. (2020). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://stellarlabstore.com/doga-ve-teknoloji-biyomimikri/>
- [19] N. Fosters, Gherkin Tower-Exterior/Nature Influences. (2004). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <http://www.fosterandpartners.com/>.
- [20] E. Oh, Spotlight: Santiago Calatrava. (2019). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.Archdaily.Com/531290/Spotlight-Santiago-Calatrava>.
- [21] Arkitektuel, Münih Olimpiyat Stadyumu. (2017). Erişim Tarihi: 02.12.2025. [Online]. <https://www.arkitektuel.com/munih-olimpiyat-stadyumu/>.
- [22] C. Gürsoy, 1972 Münih Olimpiyatı. (2015). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://celalgursoy.com/2015/09/01/1972-munih-olimpiyat/>.
- [23] K. D. Al Hussaini, “Design in nature and architecture,” M.S. thesis, Dept. Civ. Env. Eng., Carleton Üniversitesi, Ottawa, Kanada, 2005.
- [24] J. Y. Chi ve R. M. Pauletti, An Outline Of The Evoluition Of Pneumatic Structures. (2014). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. https://www.researchgate.net/publication/228655700_.
- [25] A. Dace, Leicester Space Station. (2012). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leicester_Space_Station__geograph.org.uk_-_2780973.jpg.
- [26] Y. Özbirinci, Dünyanın En Büyük Serası: Eden Projesi. (2015). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://gaiadergi.com/dunyanin-en-buyuk-serasi-eden-projesi/>.
- [27] Arkitektuel, Sydney Opera Binası. (2017). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.arkitektuel.com/sydney-opera-binasi/>.
- [28] Vikipedi, L'Oceanografic, Valencia, Spain 2. (2007). Erişim Tarihi: 20.01.2026. [Online]. https://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:L%27Oceanografic,_Valencia,_Spain_2_-_Jan_07-cropped.jpg
- [29] B. U. Zeytun, “Mimari tasarımda biyomorfik yaklaşımlar,” Yüksek lisans tezi, Yakın Doğu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Lefkoşa, Kıbrıs, 2014.
- [30] Z. B. Atasoy, Geleceğin Kenti: Masdar City. (2011). Erişim Tarihi: 20.01.2025. [Online]. <https://www.arkitera.com/haber/gelecegin-kenti-masdar-city/>
- [31] S. Calatrava, Oriente Station Lisboa. Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. https://calatrava.com/projects/oriente-station-lisboa.html?view_mode=gallery.
- [32] S. Calatrava, Oriente Station Lisboa. Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. https://Calatrava.Com/Projects/Bce-PlaceGalleriaHeritageSquare%20toronto.Html?View_Mode=Gallery,%20.
- [33] S. Calatrava, Oriente Station Lisboa. Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. https://calatrava.com/projects/orientestationlisboa.html?view_mode=gallery&image=1S.
- [34] S. Calatrava, Turning Turso. Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://calatrava.com/projects/turning-torso-malmoe.html>.
- [35] A. Volkan, Turning Torso Tower. (2020). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://volkanatabey.com.tr/turning-torso-tower-sanatin-insaat-sektoruyule-bulusmasi/>.
- [36] Wolf Group, Turning Turso. (2005). Erişim Tarihi: 20.01.2026. [Online]. <https://www.wolf-group.com/reference/turning-torso/>

- [37] Irena, Steps To Achieving 100% Renewable Energy Use. (2020). Erişim Tarihi: 20.01.2026. [Online]. <https://www.irena.org/>
- [38] M. Demirkollu, Nasıl Yapılır-Turning Turso. (2019). Erişim Tarihi: 04.12.2025. <https://www.sanalsantiye.com/nasil-yapilir-turning-torso-extreme-engineering/>.
- [39] S. Calatrava, Lyon-Saint Exupéry Airport Railway Station. (1995). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. https://calatrava.com/projects/lyon-saint-exupery-airport-railway-station-colombier-saugnieu.html?view_mode=gallery&image=2.
- [40] L. Gallanica, Calatrava's Futurist Station In Lyon, From The Domus Archive. (2024). Erişim Tarihi: 04.12.2025. [Online]. <https://www.domusweb.it/en/from-the-archive/2024/02/28/the-satolas-station-by-santiago-calatrava-from-the-domus-archives.html>.
- [41] G. M. Azanaw, "Material efficiency through mechanics: a systematic review of advanced structural modeling for load-optimized building design," Journal of Sciences, vol. 12, pp. 8-18, 2025.
- [42] İ. Bilgin, *Arenalaşma*. (2019). Erişim Tarihi: 04.12.2025. [Online]. <https://yapidergisi.com/arenalasma/>.
- [43] Arch 365, *Frei Otto Münih Olimpiyat Stadyumu*. (2017). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://arch365bilgi.blogspot.com/2017/05/frei-otto-munih-olimpiyat-stadyumu3.html>.
- [44] Şantiye, *Modern Mimarlık Tarihinin Etkileyici Yapılarından Biri Olan Münih Olimpiyat Stadyumu Hafif Strüktür Teknolojisinde de bir Dönüm Noktasıydı*. (2025). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.santiye.com.tr/modern-mimarlik-tarihinin-etkileyici-yapilarindan-biri-olan-munih-olimpiyat-stadyumu-hafif-struktur-teknolojisinde-de-bir-donum-noktasiydi>.
- [45] E. T. G. Yılmaz, *Su Parkından Sanat Eserine: Water Cube*. (2013). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.arkitera.com/haber/su-parkindan-sanat-eserine-water-cube/>.
- [46] Arkitera, *Su Kübü*. (2008). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.arkitera.com/haber/su-kubu/>.
- [47] ARUP, *The iconic design showpiece of the Beijing Olympics*. (2025). Erişim Tarihi: 20.01.2026. [Online]. <https://www.arup.com/projects/national-aquatics-center-water-cube/>
- [48] R. Stott, *Santiago Calatrava's Chicago Spire Finally Axed*. (2014). Erişim Tarihi: 20.11.2025. [Online]. <https://www.archdaily.com/564045/santiago-calatrava-s-chicago-spire-finally-axed>.
- [49] J. Crawford, *The Chicago Spire in Streeterville*. (2022). Erişim Tarihi: 20.01.2026. [Online]. <https://chicagoyimby.com/2022/10/dead-by-design-6-the-chicago-spire-in-streeterville.html>