

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Methodology for Creating a New Bio-Inspired Bone Model

Alkın Yılmaz Akter^{a,b}, Hüdayim Başak^c

Submitted: 16.04.2024 Revised: 25.05.2024 Accepted: 27.05.2024 doi: 10.30855/gmbd.0705A03

ABSTRACT

Keywords: Bio-inspired design, biomimetics, computer-aided design tool, bone structure, lattice

^{a,*} Gazi University,
Graduate School of Natural and Applied
Sciences,
Industrial Design Engineering Program
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5979-4197
e mail: alkin.akter@cbu.edu.tr

^{b,*} Manisa Celal Bayar University,
Hasan Ferdi Turgutlu Technology
Faculty,
Dept. of Mechatronics Engineering
45400 - Manisa, Türkiye

^c Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Industrial Design Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8066-5384

*Corresponding author:
alkin.akter@cbu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Biyo-esinlenme tasarımı, biyomimetik, bilgisayar destekli tasarım aracı, kemik yapısı, kafes yapıları

Bioinspiration is an approach that involves applying the information obtained by examining the structures, systems and processes found in nature to technology and design. This method aims to produce sustainable and innovative solutions to man-made problems by using solutions from nature's millions of years of evolution. Numerous design tools have been developed for use in the bio-inspired design process. However, there are not enough design tools for integrating the biological solution into the design. This study introduces a CAD module named Bone Structure, intended for designers who wish to reduce material and mass in their designs by drawing inspiration from the porous structure of trabecular bone. This module uses lattice structures when creating the bone structure and uses a hybrid modeling method in which random and periodic lattice formation methods are used together when creating the lattice structure. This software establishes a foundation for future studies in this field, and the consistency of geometric properties of example pieces with the characteristics of biological solutions is promising for this module.

Biyo-Esinlenme Tabanlı Yeni Bir Kemik Modeli Oluşturma Metodolojisi

ÖZ

Biyo-esinlenme yaklaşımı, doğada bulunan yapılar, sistemler ve süreçlerin incelenmesiyle elde edilen bilgilerin teknoloji ve tasarıma uygulanmasını içeren bir yaklaşımdır. Bu yöntem, doğanın milyonlarca yıllık evrim sürecinden gelen çözümleri kullanarak insan yapımı sorunlara sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler üretmeyi amaçlar. Biyo-esinlenme tasarım sürecinde kullanılmak üzere geliştirilmiş birçok tasarım aracı bulunmaktadır. Fakat biyolojik çözümün tasarıma entegre edilmesi aşaması için yeterli tasarım aracı bulunmamaktadır. Bu çalışmada, tasarımında malzeme ve kütle azaltmak için trabeküler kemiğin boşluklu yapısından esinlenmek isteyen tasarımcıların kullanabileceği Bone Structure isimli CAD modülü tanıtılmıştır. Kemik yapısını oluştururken kafes yapıları kullanan bu modül ve kafes yapısını oluştururken rastgele ve periyodik kafes oluşturma yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir modelleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yazılım, bu alanda yapılacak gelecek çalışmaları için bir temel oluşturmakta ve örnek parçalara ait geometrik özelliklerin biyolojik çözümün özellikleri ile uyuşması bu modül için umut vadetmektedir.

1. Giriş (Introduction)

Biyo-esinlenme yaklaşımı, doğadaki organizmaların geçirdikleri evrimsel süreçler sonucunda hayatta kalmalarını sağlayan sıra dışı özelliklerinin insanlığın karşılaştığı problemlere çözüm olabileceğini savunan bir tasarım yaklaşımıdır. Organizmanın doğada karşılaştığı problemlere getirmiş olduğu çözümlerin ideale yakın olduğu iddiasıyla özgün ve optimum çözümlerin bulunabileceğini savunmaktadır. Bu savı ispatlar nitelikte günümüze kadar birçok biyo-esinlenme tasarımı gerçekleştirilmiştir [1]. İlk başlarda vakalar üzerinden sistematik olmayan bir şekilde uygulanan bu tasarım yaklaşımı, gün geçtikçe keşfedilen organizmalara ait biyolojik bilginin inovatif çözümler üretebildiği kanıtlandıkça vaka özelinde [2] veya genel metodolojiler geliştirilerek [3] sistematik hale gelmeye başlamıştır. Her ne kadar bu yaklaşıma dair ISO 18458 gibi standartlar oluşturulmuş olsa da doğadan esinlenmenin birçok yolu vardır [4]. Bu sebeple biyo-esinlenme tasarım sürecinde kullanılmak üzere çeşitli tasarım araçları geliştirilmeye devam etmektedir [5].

Organizmaların morfolojik özellikleri sayesinde elde ettikleri fonksiyonların mühendislik problemlerine çözüm olması morfolojik biyo-esinlenme tasarımı olarak tanımlanacak olursa bu yaklaşım da form-odaklı, yüzey-odaklı ve yapı odaklı olarak kategorilere ayrılabilir. Form-odaklı yaklaşım organizmanın biçimi, geometrisi ve estetik özelliklerini kapsayan dış morfolojisi, yüzey-odaklı yaklaşım organizmaya ait yüzeyin yüzey morfolojisi ve yapı-odaklı yaklaşım ise organizmanın biçimini destekleyen iç morfolojisi ile ilgilenebilir [6].

Biyo-esinlenme tasarım ilkeleri göz önünde bulundurulduğunda biyolojik çözümün tasarıma entegre edilmesine dair CAD yazılımlarının unsurları dışında tasarımcıya tasarım sürecinde yardımcı olacak biyo-esinlenme odaklı tasarım araçları bulunmamaktadır. Bu çalışmada, insan trabeküler kemik yapısı bir yapı odaklı morfolojik biyo-esinlenme çözümü olarak değerlendirilmiş ve bu çözümün tasarıma entegrasyonunda kullanılmak üzere geliştirilmiş yeni bir metot ve Bone Structure CAD yazılımı tanıtılmıştır.

2. Literatür Araştırması (Literature Research)

Biyo-esinlenme yaklaşımının bir tasarım yaklaşımını sistematik hale getirmek için çeşitli metodolojiler ortaya konmuştur [7]. Bu metotlar temelinde problem odaklı ve çözüm odaklı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Problem odaklı yaklaşımda öncelikle bir mühendislik problemi tanımlanır ve daha sonra doğada bu probleme çözüm aranırken, çözüm odaklı yaklaşımda keşfedilen doğadan elde edilmiş bilginin kullanılacağı bir mühendislik problemi aranmaktadır [8]. Her iki yaklaşım için de geliştirilmiş sistematik metotlar mevcuttur.

Endüstriyel ürün tasarımı sürecinde organizmanın biçimi, işlevi veya organizmaya ait bir süreci esas alarak problemi biyoloji alanına çekerek çözen [9], bir mühendislik problemini çelişkiler şeklinde tanımlayıp doğadaki çözüm prensiplerini kullanarak çözen [10], tasarım sürecine ürün yaşam döngüsünü de dahil ederek doğaya sorarak çözen [11], biyoloji ile mühendislik tanımlamalarını ayrı terminolojiler ile yapıp sonrasında bu terminolojileri eşleştirerek çözen [12], tasarım optimizasyon problemini organizmaya ait matematiksel model oluşturarak çözen [13] veya tasarım problemini Konsept-Bilgi teorisini kullanarak çözen [14] problem odaklı metotlar bulunmaktadır. Geliştirilen problem odaklı metotların birçoğu konsept tasarımın elde edilmesine kadar olan sürece odaklansa da tasarımın değerlendirilmesi sürecini de sistematik hale getirmeyi sağlayan metotlar da bulunmaktadır [15-16].

Fayemi'nin biyo-esinlenme tasarım sürecini 4 eylem (analiz, çıkarım, transfer, uygulama) üzerinden anlattığı metodu [17] literatürde büyük öneme sahiptir. Öyle ki bu metot, ISO 18458 nolu standardın ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Çözüm odaklı metotlar çok çeşitlenmeye de Helms ve arkadaşlarının 2009'da tanımladığı "Problem arayışına biyo-çözüm metodu", bir doğa olayının gözlemlenmesinden başlayarak elde edilen bilginin hangi probleme

çözüm olabileceğini keşfetmeye ve sonrasında probleme çözüm olabilecek tasarımın gerçekleştirilmesine dayanan bir biyo-esinlenme tasarım metodudur [12].

Biyo-esinlenme tasarım metodlarının temelinde bazı ilkeler bulunmaktadır. Problemin tespiti ya da tanımlanması, teknik bir dil ile sadeleştirilmesi, biyolojik çözümün bulunması, biyolojik çözümün sadeleştirilmesi, bilgi aktarımı, biyolojik bilginin tasarıma entegre edilmesi ve tasarımın değerlendirilmesi şeklindeki işlemler biyo-esinlenme tasarım ilkeleri (BETİ) olarak nitelendirilebilmektedir. Çalışmada BETİ olarak bahsedilen ilkeler literatürde vazifeler ve süreçler [18], faaliyetler [19], adımlar [12, 17] şeklinde yer almaktadır. Bu ilkeler aşağıdaki gibidir:

- Problemin tespit edilmesi ya da tanımlanması
- Problemin sadeleştirilmesi (Teknik bilginin çıkarılması)
- Biyolojik çözümün bulunması
- Organizmanın sadeleştirilmesi (Biyolojik bilginin çıkarılması)
- Bilginin aktarılması
- Biyolojik çözümün tasarıma entegre edilmesi
- Tasarımın değerlendirilmesi

Biyo-esinlenme tasarım sürecinde, bahsedilen tasarım ilkelerinin gerçekleşme sırası değişiklik gösterebilmektedir. Problem odaklı ve çözüm odaklı yaklaşımlar buna örnek gösterilebilir.

2.1. Bilgisayar destekli biyo-esinlenme tasarım araçları (Computer aided bio-inspired design tools)

Biyo-esinlenme tasarım araçları, BETİ'nin bir veya birkaçının gerçekleştirilmesini sağlayan ve tasarımcının problemine çözüm bulmada yardımcı olan tasarım araçlarıdır. Yukarıda bahsi geçen BETİ'nin tasarım sürecinde gerçekleştirilmesi sırasında ortaya çıkmış birçok tasarım aracı bulunmaktadır [5]. Fakat Appio'ya göre tasarımcılar, bu tasarım araçlarından haberdar olmadıkları için, tasarım sürecinde biyo-esinlenme yaklaşımına ihtiyaç duyduklarında bir uzmana danışmayı tercih etmektedir [20]. Biyo-esinlenme tasarım sürecini tasarımcılar için uzmana ihtiyaç duyulmayacak şekilde kolaylaştırmanın bir yolu bilgisayar yazılımları kullanmaktır.

Problem odaklı biyo-esinlenme tasarımının ilk adımı problemin tespit edilmesi veya halihazırda tespit edilmiş bir problemin teknik olarak tanımlanması sürecidir. Problemin tespiti ya da tanımı için doğal dil analizi [21] veya önceden eğitilmiş dil modelleri (PLM) [22] kullanılabilir. Arka planda kullanılan ontoloji modeline göre tasarımcıdan girdiler alarak problem tanımı oluşturan yazılımlar da mevcuttur [23].

Problemin sadeleştirilmesi, biyo-esinlenme tasarım sürecinde tasarımcının karşılaştığı probleme en uygun çözümleri bulabilmesi adına oldukça önem arz eden bir aşamadır. Bu aşamada problem, bir mühendislik problemi olarak problemin özündeki teknik gereksinim ortaya çıkarılarak tanımlanmaktadır. SAPPPhIRE [24], DANE [25] veya UNO-BID [26] gibi ontoloji modelleri hem organizmanın hem de problemin teknik tanımının yapılmasına imkân sağlamaktadır. Bunun yanında bu aşamada çeşitli fonksiyon taksonomileri [27-28] ve bununla birlikte doğal dil analiz metodlarının [29] kullanımı da söz konusu olabilmektedir.

Biyolojik çözümün bulunması, organizmalara dair şimdiye kadar keşfedilmiş tüm bilgiler içerisinde bir problemi çözmek için ihtiyaç duyulan bilgiyi elde etmeyi ifade etmektedir. DANE ya da SAPPPhIRE ontoloji modelleri veya Biomimicry taksonomi gibi fonksiyon sınıflandırmaları ile oluşturulmuş biyolojik bilgi veri tabanları [23, 28, 30-32] biyolojik çözüm bulmaya imkân tanıyan tasarım araçları arasındadır. Bunun yanı sıra anahtar kelimeler yardımıyla akademik çalışmalar arasında tarama yapan biyo-esinlenme tasarımı için özelleşmiş arama motorları da tasarımcıya biyolojik çözüm bulma konusunda yardımcı olmaktadır [33].

Organizmanın sadeleştirilmesi, keşfedilmiş organizmalara dair biyolojik bilginin esinlenme sürecinde problemle daha kolay eşleştirilebilmesi için sistematik olarak ontoloji modelleri veya çeşitli sınıflandırmalar yapılarak yeniden tanımlanmasını ifade etmektedir. Problem teknik tanımlaması için kullanılan tasarım araçları bu aşamada da kullanılabilirlerdir.

Bilginin aktarılması, biyolojik bilginin tasarımın yapıldığı alana transfer edilmesini ve konsept fikirlerin oluşturulmasını ifade etmektedir. Biyo-esinlenme vaka çalışmaları [30] ya da piyasaya sürülmüş son ürünlerin yer aldığı veri tabanları [32], bünyesindeki biyolojik bilginin tasarım ile bulunduğu biyo-esinlenme tasarım örnekleri ile tasarımcılara yeni tasarım fikirleri oluşturma imkânı tanımaktadır. Bunun yanı sıra TRIZ çelişki matrisinin biyo-esinlenme tasarımı için yeniden düzenlenmesi ile elde edilen BioTRIZ aracı tasarım çelişki problemlerine biyolojik çözümler getirerek özgün tasarım fikirleri oluşturma konusunda tasarımcılara destek olmaktadır [10].

Biyolojik çözümün tasarıma entegre edilmesi, mühendislik tasarımı göz önünde bulundurulduğunda oluşturulan konsept tasarımların üretime hazır hale getirilmesini ifade etmektedir. Bu süreçte CAD yazılımları bir araç olarak kullanılsa da literatürde biyo-esinlenme yaklaşımı odaklı bir CAD yazılımı veya modülü bulunmamaktadır. Kafes yapıların oluşturulmak üzerine geliştirilmiş nTop [34] veya Rhino Grasshopper [35] gibi yazılımlar her ne kadar biyo-esinlenme tasarımına katkı sağlasa da bu amaçla oluşturulmamıştır. Bu sebeple, biyo-esinlenme tasarımları geleneksel CAD unsurları kullanılarak oluşturulmaktadır.

Tasarımın değerlendirilmesi, ortaya çıkan tasarımın bilgisayar destekli mühendislik yöntemleri ile analiz edilerek son ürün haline getirilmesi ve çevresel veya sosyal etkilerinin araştırılması gibi süreçleri ifade etmektedir. Literatürde tasarımların analizini tasarım sürecine dahil eden metotlar bulunmaktadır [15-16]. Fakat biyo-esinlenme tasarımı için özelleştirilmiş tasarım araçları söz konusu olduğunda biyo-esinlenme tasarımlarının çevreye etkilerini değerlendiren BiomiMETRIC yazılımı [36] dışında literatürde çalışma bulunmamaktadır.

2.2. Morfolojik biyo-esinlenme tasarımı (Morphological bio-inspired design)

Nagel biyo-esinlenme boyutlarını 7 kategoriye ayırmıştır. Bunlar, organizmanın görsel özelliklerine odaklanan form, organizmanın iç morfolojisine odaklanan yapı, organizmanın yüzey morfolojisine odaklanan yüzey, organizmanın malzeme özelliklerine odaklanan malzeme, organizmadaki sistemlerin fizyolojisine odaklanan fonksiyon, organizmaların adım adım ilerleyen davranışlarına odaklanan süreç ve organizmaya ait üst seviye prensiplere, stratejilere ya da fonksiyonlara odaklanan sistem kategorileridir [6]. Organizmanın morfolojisine odaklanan form, yapı ve yüzey, bu çalışmada morfolojik biyo-esinlenme boyutları olarak ifade edilmektedir.

Robot uzuvları oluşturma [37], su ortamında itiş gücü elde etme [38], darbe kaynaklı enerji sönümü [39], bir ortamdan diğerine geçiş sırasında ivme kaybını azaltma [40], kazı parçaları üzerindeki gerilme ve deformasyonu azaltma [41] gibi problemlerin çözümü için form odaklı biyo-esinlenme tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Enerji soğurma [42-43], malzeme azaltırken dayanım arttırmak için boşluklu yapı oluşturma ve topolojik optimizasyon [35,44] gibi amaçlar için yapı odaklı biyo-esinlenme tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Kendi kendini temizleme [45], hidrofobi [46-48], yapışma ve aşınma azaltma [49], bölgesel akış türbülansını azaltma [50], eşyönsüz sürtünme oluşturma [51-52] gibi amaçlar için yüzey odaklı biyo-esinlenme tasarımı gerçekleştirilmektedir.

2.3. Morfolojik biyo-esinlenme tasarım sürecine CAD yazılımlarının etkisi (The effect of CAD softwares on morphological bio-inspired design process)

Biyo-esinlenme tasarım araçları endüstri profesyonelleri tarafından yüksek derecede değer görürken, CAD yazılımlarının bu süreçte sağladığı esneklik ve araç çeşitliliği, tasarım ve geliştirme süreçlerinin daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır. Özellikle, biyolojik algoritmaların uygulanmasıyla CAD yazılımları, taşıyıcıların optimum profil değerlerinin belirlenmesi gibi tasarım optimizasyonlarına imkân sağlayabilmektedir. Bu durum, doğadan ilham alan stratejiler aracılığıyla tasarım çözümlerinin geliştirilmesinde CAD yazılımlarının potansiyelini göstermektedir.

Katmanlı imalat teknolojisinin gelişmesiyle kafes yapılara dair unsurlar CAD yazılımlarına entegre edilmeye başlamıştır (nTop ve Rhino Grasshopper). Fakat literatürde matematiksel modellemesi yapılmış biyolojik modellerin [53] başka bir tasarımcı tarafından tekrarlanabilmesi ve kendi problemine göre uyarlayabilmesi için biyo-esinlenme tasarımına özgü CAD unsurlarına dair çalışma bulunmamaktadır.

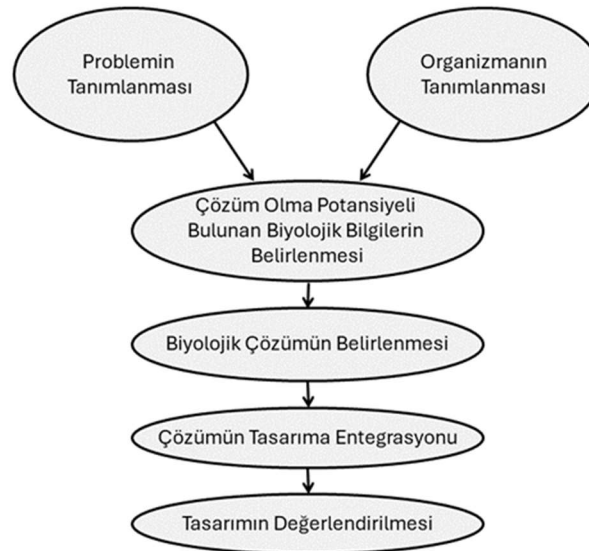
Literatürdeki morfolojik biyo-esinlenme tasarım süreçleri incelendiğinde form, yüzey ve yapı odaklı tasarımlarda yapılan işlemler ve bu işlemler için kullanılan bilgisayar teknolojisi Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Morfolojik biyo-esinlenme sürecinde yapılan işlemler ve bu işlemleri gerçekleştirmek için kullanılan bilgisayar teknolojileri (Procedures performed in the morphological bio-inspiration process and computer technologies used to perform these operations)

Esinlenme Boyutu	İstenen İşlem	Bilgisayar Teknolojisi	Kaynak
Form odaklı	Canlı formunun dijital kopyasının elde edilmesi	MRI ile DICOM uzantılı dosyalar elde edilmiştir. 3D tarama ile STL uzantılı nokta bulutu elde edilmiştir.	[37] [41]
	Dijital kopya üzerinden eğri yerleştirme işlemi	MATLAB ile eğrilerin matematiksel formülü elde edilmiştir.	[37]
	Mesh modelin oluşturulması ve düzenlenmesi	Geomagic Design X ile STL uzantılı dosyalar düzenlenmiştir.	[41]
	Katı modelin oluşturulması	Solidworks ile 3 boyutlu katı model oluşturulmuştur.	[41]
Yüzey odaklı	Canlı formunun dijital kopyasının elde edilmesi	X-Ray CT yüzey morfolojisi dijital ortama aktarılmıştır.	[50]
	Canlı formun geometrisinin incelenmesi	SEM ile organizmanın iç morfolojisi incelenerek ölçümler yapılmıştır.	[42]
Yapı odaklı	Canlı formunun dijital kopyasının elde edilmesi	CT ile elde edilen DICOM uzantılı dosya InVesalium ile STL uzantılı nokta bulutuna dönüştürülmüştür.	[53]
	Mesh modelin oluşturulması ve düzenlenmesi	Rhinoceros – Grasshopper ile parametrik mesh yapısı oluşturulmuştur.	[35]
		K3DSurf ile matematik modeli üzerinden mesh modeli oluşturulmuştur.	[35]
	Vokselizasyon	MATLAB ile kafes yapısının birim hücreleri oluşturulmuştur.	[54]
	Katı modelin oluşturulması	nTop ile kafes yapısı oluşturulmuştur.	[55-56]

3. Metodoloji (Methodology)

Şekil 1’de gösterilen biyo-esinlenme tasarım metodu göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmada, morfolojik biyo-esinlenme tasarım sürecinin çözümün tasarıma entegrasyonu adımıyla kullanılmak üzere bir tasarım aracı geliştirilmiştir. Bu sebeple bu çalışmada bahsedilen biyo-esinlenme tasarımı kavramı morfolojik biyo-esinlenme tasarımı için kullanılmaktadır.



Şekil 1. Biyo-esinlenme tasarım metodu
(Bio-inspired design method)

Organizmanın tanımlanması, halihazırda keşfedilmiş olan organizmalara ait biyolojik bilginin çeşitli sınıflandırmalar veya ontolojik tanımlama modelleri kullanılarak tanımlanmasını ifade etmektedir. Bu sayede, bir probleme çözüm arandığında ya da özgün bir tasarım fikri bulunmak istendiğinde organizmaların tanımlandığı veri tabanları taranabilmektedir.

Problemin tanımlanması, genellikle organizmanın tanımlanması sırasında kullanılan tanımlama yöntemine göre yapılan tanımlamaları ifade etmektedir. Problemin özündeki teknik gereksinimin doğru tespit edilmesi sürecin en önemli noktalarından bir tanesidir.

Çözüm olma potansiyeli olan biyolojik bilgilerin belirlenmesi, tanımlaması yapılmış problem ve bu probleme potansiyel çözüm olabilecek biyolojik bilgilerin ortaya çıkarılmasını ifade etmektedir.

Biyolojik çözümün belirlenmesi, bir tasarım problemine çözüm olabilecek potansiyel biyolojik bilgiler arasından seçim yapılarak bu biyolojik bilgiyi bir esinlenme çözümüne diğer bir deyişle biyolojik çözüme dönüştürmeyi ifade etmektedir. Biyolojik çözüm belirlendikten sonra bu sayede konsept tasarım fikirleri ortaya konmaktadır.

Çözümün tasarıma entegrasyonu, biyolojik çözüm elde edilip konsept tasarım fikri oluşturulduktan sonra üretilebilir ürün tasarımının oluşturulmasını ifade etmektedir. Biyolojik çözümün tasarıma entegrasyonu ile test edilmeye hazır bir ürün ortaya konmaktadır.

Tasarımın değerlendirilmesi, ortaya çıkan ürünün CAE metotları gibi çeşitli analizler veya prototip oluşturularak yapılan deneyler ile test edilmesini ve son haline getirilmek üzere optimize edilmesini ifade etmektedir.

3.1. Biyolojik çözüm (Biological solution)

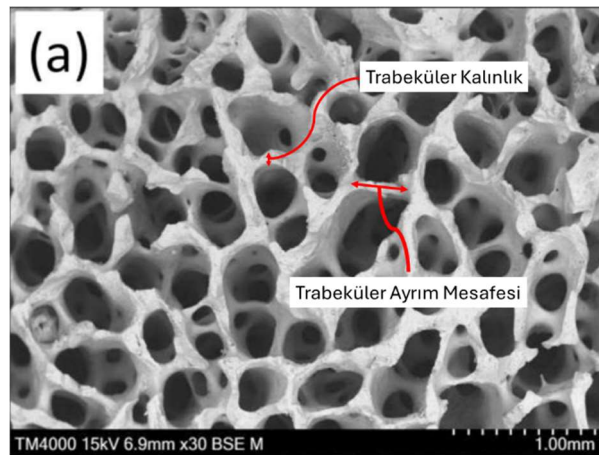
Memelilerin kemik yapısını oluşturan boşluklu yapı sayesinde yapının birim kütledeki dayanımı tamamen dolu yapılara göre daha yüksek olabilmektedir [57]. Kemiğin bu boşluklu yapısı matematik modeli oluşturulabilecek düzenli bir yapı olmadığı için bu yapılara benzer mekanik özellikler gösteren periyodik [58] ve rastlantısal [59] kafes yapıları literatürdeki birçok çalışmada kemik yapısını taklit etmek için kullanılmıştır.

Memelilerde farklı morfolojik ve yapısal özelliğe sahip birçok kemik bulunmaktadır. Bundan sonra, insan trabeküler kemiğinin yapısından kemik yapısı olarak bahsedilecektir. Kemik yapısına ait esinlenmede esas alınan geometrik özellikler Çizelge 2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2. Kemik yapısının esinlenmede kullanılan geometrik özellikleri
(Geometric features of bone structure used for inspiration)

Geometrik Özellik	Miktar	Birim
Porozite oranı [60]	0,75-0,86	-
Trabeküler kalınlık [60]	0,3-2,2	mm
Trabeküler ayırım mesafesi [60]	0,2-1,5	mm

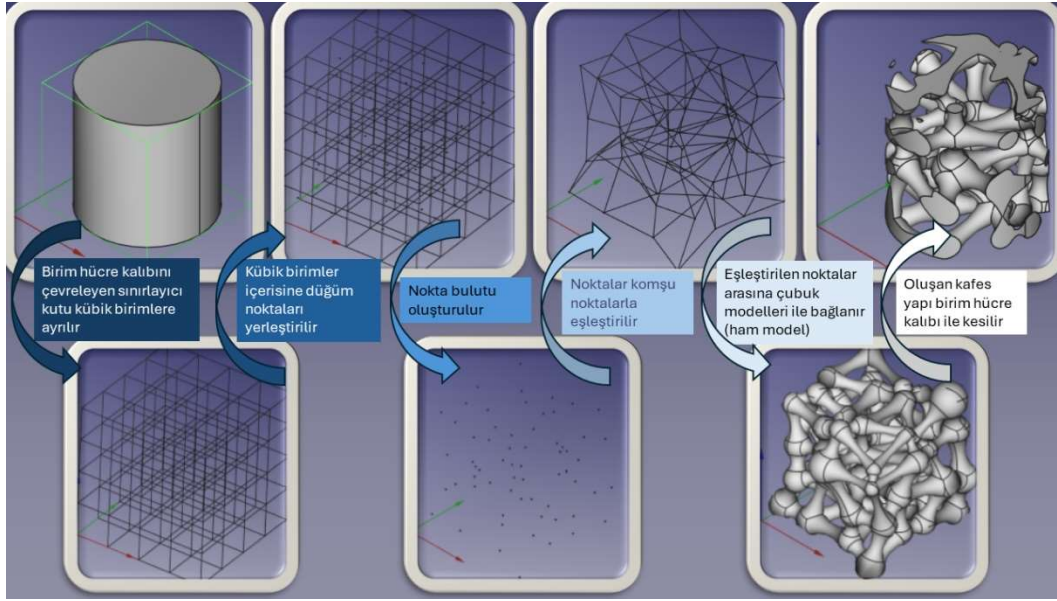
Çizelge 2’deki; porozite oranı kemik yapısındaki boş hacmin kemik hacmine oranını, trabeküler kalınlık trabeküler boşlukların duvar kalınlığını, trabeküler ayırım mesafesi ise trabeküler boşlukların duvar uzunluğunu ifade etmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Trabeküler kemik SEM görüntüsü. Uyarlandı. [60]
(Trabecular bone SEM image. Adapted from [60])

3.2. Birim hücrenin oluşturulması (Creating the unit cell)

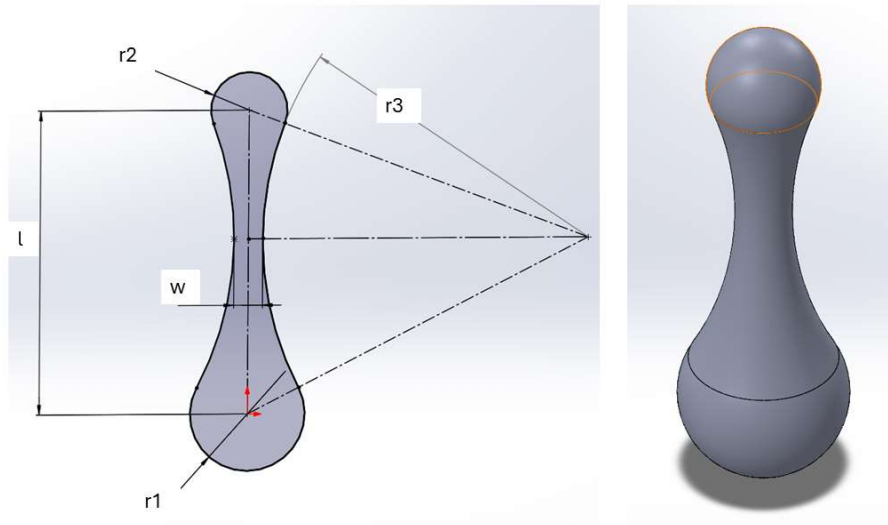
Bu çalışmada kemik yapısı rastlantısal kafes yapısı tekniği oluşturulmuş birim hücrelerin periodik olarak bir araya getirilmesi ile elde edilmiştir. Bu süreçteki ilk adım birim hücrenin rastlantısal bir yöntem ile elde edilmesidir. Bu çalışmada, küp, piramit ve silindir olmak üzere 3 çeşit birim hücre kalıbı kullanılmaktadır. Küp şeklindeki birim hücre kalıbı $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ölçülerinde, piramit şeklindeki birim hücre kalıbı tabanı $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ yüksekliği 2 mm ve koniklik açısı 30° olacak şekilde ve silindir şeklindeki birim hücre kalıbı taban çapı 4 mm ve yüksekliği 2 mm olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 3. Örnek birim hücrenin oluşma şeması
(Formation diagram of the sample unit cell)

Birim hücre yapısı düğümler ve çubuklardan oluşan bir kafes yapısı şeklindedir. Öncelikle, birim hücrenin içerisine girebileceği sınırlayıcı kutu (*bounding box*) $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ kübik birimlere ayrılır. Kafes yapısının düğüm noktaları bu kübik birimler içerisinde küpün kenarına $0,1\text{ mm}$ 'den daha yakın olmayacak ve her bir küpte bir tane olacak şekilde rastgele olarak yerleştirilir. Bu şekilde kısmi olarak rastgele yerleştirilmiş bir nokta bulutu elde edilir. Birbirine x , y ve z doğrultusunda komşu olan kübik birimler içerisindeki düğüm noktaları çiftler halinde eşleştirilerek çubuk bağlantıları oluşturulur.

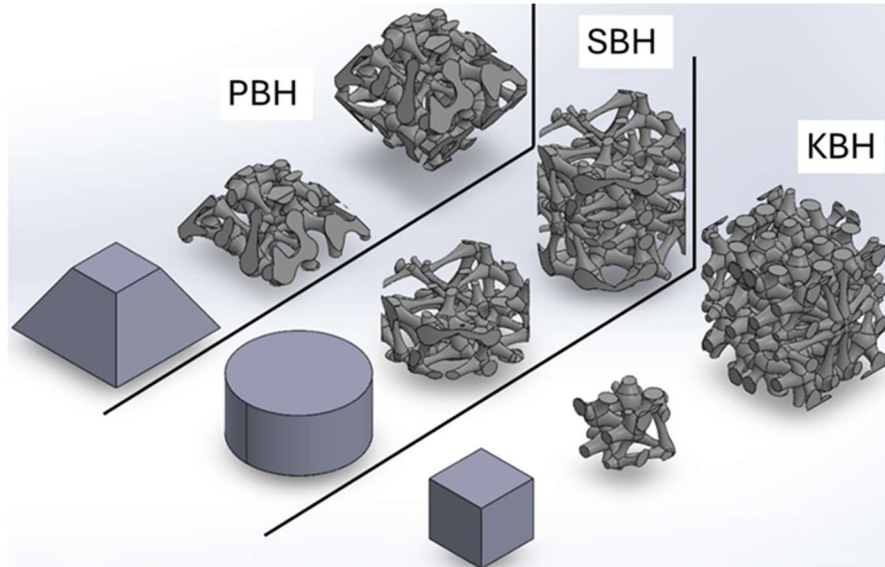
Düğüm noktalarını birbirine bağlayan çubuk elemanları parametrik olarak modellenmektedir. Çubuk modellemede esas alınan parametreler; birinci düğümün yarıçapı ($r1$), ikinci düğümün yarıçapı ($r2$), minimum çubuk genişliği (w) ve çubuk uzunluğudur (l) (Şekil 3). Nokta bulutundaki komşu noktaların arasındaki mesafeler ($0.2 - 1.8\text{ mm}$) çubuk uzunluğunu (l), bir düğüm noktası ile komşu noktalar arasındaki en kısa mesafenin $1/3$ 'ü o düğüm küresinin yarıçapını (r) ve bir çubuğa ait iki düğüm küresi yarıçapı ($r1$ ve $r2$) arasında küçük olan yarıçap değeri çubuk genişliğini (w) belirlemektedir.



Şekil 4. Örnek çubuk ve kesiti
(Sample strut and its cross section)

Nokta bulutundaki her noktanın eşleştirildiği diğer noktalar ile arasına Şekil 4’te kesiti verilen içbükey çubuk modelleri yerleştirilip bu parçalar bütünleştirildiğinde birim kafes yapının ham hali oluşur. Ortaya çıkan ham kafes yapısı merkezine birim hücre kalıbı yerleştirilip kesişim geometrisi çıkarılarak birim hücre elde edilir (Şekil 3).

Bu yöntem ile küp şeklinde birim hücreler oluşturulabildiği gibi kemik yapısının uygulanacağı parçanın geometrisine küp, silindir ya da piramit şeklinde birim hücre kullanılabilir. Ayrıca bu birim hücreler çeşitli simetri düzlemleri kullanılarak periyodik çoğaltmaya uygun hale getirilebilmektedir (Şekil 5).



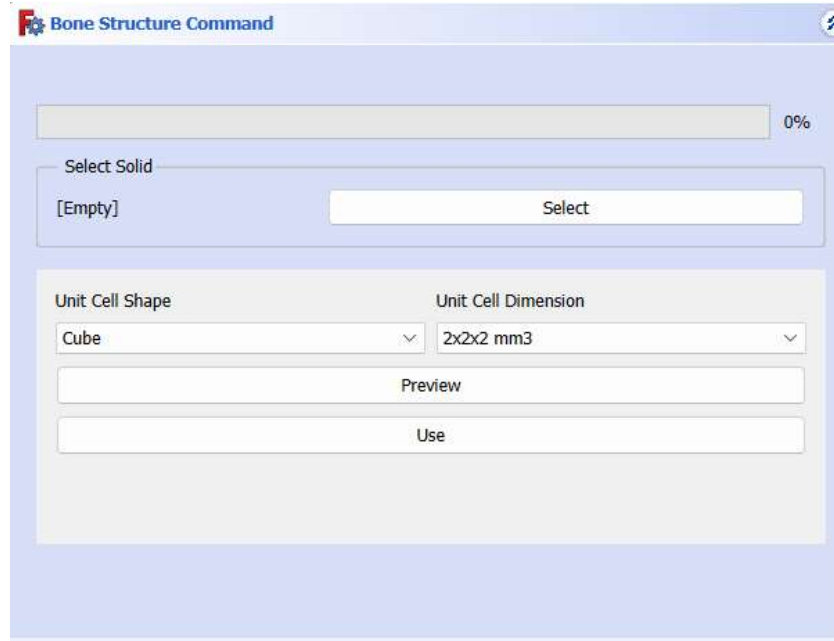
Şekil 5. Küp, silindir ve piramit hücre kalıpları ve oluşturulan kemik yapıları
(Cube, cylinder and pyramid cell molds and bone structures created)

4. Bone Structure Yazılımı (Bone Structure Software)

Bone Structure, kemik yapısının morfolojik özellikleri ile yapı odaklı biyo-esinlenme tasarımları oluşturmak için kullanılan bir FreeCAD modülüdür. Python dilinde yazılmıştır. Başlık 3.2’de anlatılan yöntem ile kemik yapısı oluşturmayı sağlamaktadır. Bu modül ile oluşturulan birim hücreler periyodik şekilde çoğaltılıp birleştirilerek daha büyük modellerin oluşturulmasına imkân sağlamaktadır. Kafes yapısı boşluk oranı, minimum ve maksimum çubuk genişliği ile birlikte minimum ve maksimum çubuk uzunluğu, oluşturulan modellerin kemik yapısının geometrik özelliklerine benzerliği açısından dikkat edilen kriterlerdir.

4.1. Bone Structure arayüzü (Bone Structure interface)

Yazılımın arayüzü bir adet ilerleme çubuğu, kemik yapısı entegre edilmek istenen parçanın seçildiği bir bölüm, kullanılacak birim hücrenin ön izlemesini gösteren bir düğme ve nihai yapıyı oluşturmayı sağlayan bir düğmede oluşmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Bone Structure yazılım arayüzü (Bone Structure software interface)

Tasarımcı STEP formatında yüklediği parçayı seçip “Select” düğmesi ile seçimi tamamladıktan sonra kemik yapısının oluşturulmasında kullanılacak birim hücre biçimi ve birim hücre boyutunu seçimini gerçekleştirir. Yapılan tanımlamalara göre 3. Başlıkta anlatılan metot ile o anda oluşturulan birim hücreyi görüntülemek için “Preview” düğmesine basılır. Tasarımcı oluşan birim hücrede oluşmuş olabilecek komplikasyonlara karşı denetimini bu aşamada yapmaktadır. Yeni bir birim hücre oluşturulması gerekmesi durumunda “Preview” düğmesine tekrar basarak yeni bir birim hücre modeli oluşturulabilir. Oluşan birim hücrenin kullanıma uygun olduğuna karar verildiğinde “Use” düğmesine basılarak kemik yapısı parçaya entegre edilir.

4.2. Örnek birim hücreler (Sample unit cells)

Küp, silindir ve piramit biçimindeki birim hücrelerin kemik yapısına benzerliğini incelemek için her bir birim hücre biçiminden üç adet model oluşturulmuştur. Küp şeklindeki birim hücre modellerine KBH, piramit şeklindeki birim hücre modellerine PBH ve silindir şeklindeki birim hücre modellerine SBH kod adı verilmiştir (Şekil 5). Bone Structure yazılımı ile üretilmiş numunelere ait geometrik bilgiler Çizelge 3’te gösterilmiştir. Çizelgede yer alan ölçümler, birim hücre oluşturulurken kullanılan çubukların uzunluk (l) ve genişlik (w) değerlerinin en küçük ve en büyük değerleridir. Dolayısıyla bu değerler model oluşturulurken kayıt altına alınmaktadır.

Çizelge 3. Bone Structure ile oluşturulan hücre modellerinin geometrik özellikleri

(Geometric properties of cell models created with Bone Structure)

Birim Hücre Numuneleri	Yaklaşık Boşluk Oranı	Minimum çubuk genişliği (μm)	Maksimum çubuk genişliği (μm)	Minimum çubuk uzunluğu (μm)	Maksimum çubuk uzunluğu (μm)
KBH1	0.72	205	450	493	1833
KBH2	0.77	173	515	415	1851
KBH3	0.78	141	510	339	1781
PBH1	0,73	138	485	333	1841
PBH2	0,75	150	481	361	1908
PBH3	0,72	163	527	392	1854
SBH1	0,78	147	490	353	1839
SBH2	0,77	151	586	362	1832
SBH3	0,72	152	615	365	1846

Oluşturulan hücre modellerinin geometrik özellikleri Çizelge 2’deki kemik yapısının geometrik özellikleri ile büyük ölçüde eşleşmektedir. Tüm modellerdeki değerlerin ortalaması alındığında modellerin boşluk oranı

(0,75) ile insan trabeküler kemiğinin boşluk oranına ait sınır değerler içerisinde yer almaktadır. Diğer yandan ortalama minimum çubuk kalınlığı (158 μm) kemik yapısında bulunan minimum trabeküler kalınlığın yaklaşık %50 oranında altında kalmaktadır. Ortalama maksimum çubuk kalınlığı (518 μm) ve ortalama minimum çubuk uzunluğu (379 μm) kemik yapısının değerleri ile örtüşürken ortalama maksimum çubuk uzunluğu (1843 μm) maksimum trabeküler ayırım mesafesinin %23 üzerindedir.

5. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Conclusion)

Kemik yapısını taklit eden boşluklu yapı oluşturmayı sağlayan bu metot, rastgele oluşturulan düğüm noktalarının çubuklarla birbirine bağlanması yoluyla elde edilen birim hücrelerin periyodik olarak çoğaltılması ile kemik yapısının büyük boyutlarda oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu metot ile başka morfolojik özelliklere sahip kafes yapıları ile temsil edilebilecek başka canlılara ait boşluklu yapılar da modellenilebilir. Çünkü birim hücredeki düğüm noktalarının konumları belirli kısıtlar altında rastgele oluşturulmaktadır. Bu durum yapının morfolojik özelliklerini kontrol edebilmeyi mümkün kılmaktadır. Oluşturulan birim hücrelerde zaman zaman bağımsız havada süzülen küçük parçalar oluşabilmektedir. Bu sebeple bu prototipte tasarımcıya birim hücreyi kullanmadan önce kontrol etme imkânı sunulmuştur.

Bone Structure yazılımı bir prototiptir. Fakat özgün kemik yapısı oluşturulma metodu ile kayda değer bir çalışmadır. Yazılımın geliştirildiği CAD programı olarak açık kaynak kodlu FreeCAD yazılımının tercih edilmesinin sebebi, bu çalışma sonrasında bu alanda çalışma yapan araştırmacıların yazılıma ve kaynak kodlarına erişiminin sağlanarak programın bilinirliğini arttırmaktır. Çalışmanın devam etmesi sebebiyle, yazılıma erişim bu makale yazıldığı sırada mümkün olmamakla birlikte çalışmanın tamamlanması itibarıyla FreeCAD eklentileri arasında yerini alması planlanmaktadır.

Modeli oluştururken kullanılan çubuk profili ve çubuk geometrisine ait parametrelerde yapılacak optimizasyon ile bu çalışmada tanımlanan kemik yapısı modelleme metodu iyileştirmeye açık ve umut vadeden bir metottur. Bu modellerin kemik yapısının yapısal özellikleri ile ne derece benzerlik gösterdiği sonraki çalışmalarda araştırılacaktır. Ayrıca, yapısal özelliklere yapıyı oluşturmakta kullanılan çubuk uzunluğu (l), çubuk genişliği (w), düğüm küresi yarıçapı (r_1 ve r_2) ve çubuk profili (içbükey) gibi parametrelerin etkisini incelemek amacıyla optimizasyon çalışması gelecekte yapılabilecek çalışmalar arasındadır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Y. Bar-Cohen, Biomimetics: nature-based innovation. CRC press, 2016.
- [2] S. Jalali, M. Aliabadi, and M. Mahdavinejad, "Learning from plants: a new framework to approach water-harvesting design concepts," *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 40, no. 3, pp. 405–421, May 2022. doi:10.1108/IJBPA-01-2021-0007
- [3] D. A. Coelho and C. A. M. Versos, "A comparative analysis of six bionic design methods," *Int. J. Design Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 114–131, 2011. doi:10.1504/IJDE.2011.045131
- [4] J. F. V Vincent, "Stealing Ideas from Nature," in *Deployable structures*, Springer, 2001, pp. 51–58.
- [5] K. Wanieck, P. E. Fayemi, N. Maranzana, C. Zollfrank, and S. Jacobs, "Biomimetics and its tools," *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, vol. 6, no. 2, pp. 53–66, Aug. 2016. doi:10.1680/jbibr.16.00010

- [6] J. K. S. Nagel, L. Schmidt, and W. Born, "Fostering Diverse Analogical Transfer in Bio-Inspired Design," in *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Boston, Massachusetts, USA, 2015. doi:10.1115/DETC2015-47922
- [7] C. A. M. Versos and D. A. Coelho, "Biologically Inspired Design: Methods and Validation," in *Industrial Design – New Frontiers*, D. Coelho, Ed., InTech, 2017, pp. 101–120. doi:10.5772/20326
- [8] N. Tan et al., "A system-of-systems bio-inspired design process: Conceptual design and physical prototype of a reconfigurable robot capable of multi-modal locomotion," *Front Neurobot*, vol. 13, 2019. doi:10.3389/fnbot.2019.00078
- [9] W. K. Junior and A. S. Guanabara, "Methodology for product design based on the study of bionics," *Mater Des*, vol. 26, no. 2, pp. 149–155, Apr. 2005. doi:10.1016/J.MATDES.2004.05.009
- [10] J. F. V. Vincent, O. A. Bogatyreva, N. R. Bogatyrev, A. Bowyer, and A. K. Pahl, "Biomimetics: Its practice and theory," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 3, no. 9, Royal Society, pp. 471–482, Aug. 22, 2006. doi:10.1098/rsif.2006.0127
- [11] D. Baumeister, "Biomimicry resource handbook, life's principles, and biomimicry spirals," Missoula MT, USA: Biomimicry Group Inc, 2012.
- [12] M. Helms, S. S. Vattam, and A. K. Goel, "Biologically inspired design: process and products," *Des Stud*, vol. 30, no. 5, pp. 606–622, Sep. 2009. doi:10.1016/j.destud.2009.04.003
- [13] B. Yang and W. Yan, "Methods of obtaining, verifying, and reusing optimal biological solutions," *Cogent Eng*, vol. 4, no. 1, Jan. 2017. doi:10.1080/23311916.2017.1306951
- [14] C. F. Salgueiredo, "Modeling biological inspiration for innovative design," in *i3 conference*, 2013.
- [15] J. Y. Huang and S. T. Siao, "Development of an integrated bionic design system," *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 310–327, 2016. doi:10.1108/JEDT-08-2014-0057
- [16] G. Cao, Y. Sun, R. Tan, J. Zhang, and W. Liu, "A function-oriented biologically analogical approach for constructing the design concept of smart product in Industry 4.0," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 49, Aug. 2021. doi:10.1016/j.aei.2021.101352
- [17] P.-E. Fayemi, N. Maranzana, A. Aoussat, and G. Bersano, "Bio-inspired design characterisation and its links with problem solving tools," in *DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference*, Dubrovnik - Croatia, 2014, pp. 173–182.
- [18] A. K. Goel, S. Vattam, B. Wiltgen, and M. Helms, "Information-Processing Theories of Biologically Inspired Design," in *Biologically Inspired Design*, Springer London, 2014, pp. 127–152. doi:10.1007/978-1-4471-5248-4_6
- [19] T. A. Lenau, A.-L. Metzger, and T. Hesselberg, "Paradigms for biologically inspired design," *SPIE-Intl Soc Optical Eng*, Mar. 2018, p. 1. doi:10.1117/12.2296560
- [20] F. P. Appio, S. Achiche, A. Martini, and C. Beaudry, "On designers' use of biomimicry tools during the new product development process: an empirical investigation," *Technol Anal Strateg Manag*, vol. 29, no. 7, pp. 775–789, 2017. doi:10.1080/09537325.2016.1236190

- [21] G. Cascini and D. Russo, "Computer-Aided analysis of patents and search for TRIZ contradictions," *Int. J. Product Development*, vol. 4, no. 1–2, pp. 52–67, 2006. doi:10.1504/IJPD.2007.011533
- [22] Q. Zhu, X. Zhang, and J. Luo, "Biologically inspired design concept generation using generative pre-trained transformers," *Journal of Mechanical Design*, vol. 4, no. 145, pp. 1–46, 2023. doi:10.1115/1.4056598
- [23] L. Siddharth and A. Chakrabarti, "Evaluating the impact of Idea-Inspire 4.0 on analogical transfer of concepts," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, vol. 32, no. 4, pp. 431–448, Nov. 2018. doi:10.1017/S0890060418000136
- [24] A. Chakrabarti, P. Sarkar, B. Leelavathamma, and B. S. Nataraju, "A Functional Representation for Aiding Biomimetic and Artificial Inspiration of New Ideas," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, vol. 19, no. 2, pp. 113–132, Apr. 2006. doi:10.1017/S0890060405050109
- [25] S. S. Vattam and A. K. Goel, "Foraging for Inspiration: Understanding and Supporting the Online Information Seeking Practices of Biologically Inspired Designers," in *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Washington, DC: ASME, Aug. 2011.
- [26] F. Rosa, G. Cascini, and A. Baldussu, "UNO-BID: Unified Ontology for Causal-Function Modeling in Biologically Inspired Design," *International Journal of Design Creativity and Innovation*, vol. 3, no. 3–4, pp. 177–210, 2015. doi:10.1080/21650349.2014.941941
- [27] B. Lucero, C. J. Turner, and J. Linsey, "Design repository & analogy computation via unit language analysis (DRACULA) repository development," in *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2015. doi:10.1115/DETC2015-46640
- [28] E. Spiliopoulou, S. Rugaber, A. Goel, L. Chen, B. Wiltgen, and A. K. Jagannathan, "Intelligent search for biologically inspired design," in *International Conference on Intelligent User Interfaces, Proceedings IUI, Association for Computing Machinery*, Mar. 2015, pp. 77–80. doi:10.1145/2732158.2732182
- [29] P. A. Verhaegen, J. D'Hondt, D. Vandevenne, S. Dewulf, and J. R. Duflou, "Identifying candidates for design-by-analogy," *Comput Ind*, vol. 62, no. 4, pp. 446–459, May 2011. doi:10.1016/J.COMPIND.2010.12.007
- [30] A. K. Goel, G. Zhang, B. Wiltgen, Y. Zhang, S. Vattam, and J. Yen, "On the benefits of digital libraries of case studies of analogical design: Documentation, access, analysis, and learning," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, vol. 29, no. 2, pp. 215–227, Apr. 2015. doi:10.1017/S0890060415000086
- [31] L. Chen et al., "A Knowledge-Based Ideation Approach for Bio-inspired Design," *Proceedings of the Design Society*, vol. 3, pp. 231–240, 2023. doi:10.1017/pds.2023.24
- [32] The Biomimicry Institute, "AskNature." [Online]. Available: <https://asknature.org/> [Accessed: Sep. 07, 2023].
- [33] M. K. Kaiser, H. Hashemi Farzaneh, and U. Lindemann, "BIOscrabble - Extraction of Biological Analogies Out of Large Text Sources," in *IC3K 2013-5th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2013, pp. 10–20.

- [34] M. Z. Khan, J. Bhaskar, and A. Kumar, "Analysis of Lattice-Based Cranial Implant," in *International Conference on Recent Advances in Materials, Manufacturing and Thermal Engineering*, A. Kumar, M. Zunaid, K. A. Subramanian, and H. Lim, Eds., Singapore: Springer, 2022, pp. 397–409. doi:10.1007/978-981-19-8517-1_30
- [35] S. G. González, M. D. Vlad, J. L. López, and E. F. Aguado, "Novel bio-inspired 3D porous scaffold intended for bone-tissue engineering: Design and in silico characterisation of histomorphometric, mechanical and mass-transport properties," *Mater Des*, vol. 225, Jan. 2023. doi:10.1016/j.matdes.2022.111467
- [36] P. Terrier, M. Glaus, and E. Raufflet, "BiomiMETRIC assistance tool: A quantitative performance tool for biomimetic design," *Biomimetics*, vol. 4, no. 3, Sep. 2019. doi:10.3390/biomimetics4030049
- [37] C. H. Hung, A. Etoundi, A. Jafari, J. Matthews, W. C. Chang, and J. J. Chong, "Mimicking Condylar Knee to Design Bio-Inspired Robotic Knee Joint Based on Magnetic Resonance Imaging," in *2021 24th International Conference on Mechatronics Technology, ICMT 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi:10.1109/ICMT53429.2021.9687202
- [38] D. Costa, G. Palmieri, M. C. Palpacelli, D. Scaradozzi, and M. Callegari, "Design of a carangiform swimming robot through a multiphysics simulation environment," *Biomimetics*, vol. 5, no. 4, pp. 1–18, Dec. 2020. doi:10.3390/biomimetics5040046
- [39] Y. Seki, M. S. Schneider, and M. A. Meyers, "Structure and mechanical behavior of a toucan beak," *Acta Mater*, vol. 53, no. 20, pp. 5281–5296, 2005. doi:10.1016/j.actamat.2005.04.048
- [40] K. E. Crandell, R. O. Howe, and P. L. Falkingham, "Repeated evolution of drag reduction at the air-water interface in diving kingfishers," *J R Soc Interface*, vol. 16, no. 154, May 2019. doi:10.1098/rsif.2019.0125
- [41] A. Y. Akter and H. Basak, "Design and analysis of biomimetics based excavator bucket and tooth," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 236, no. 3, pp. 1166–1175, 2022. doi:10.1177/09544089211057645
- [42] G. Raphel, M. M. Jacob, and S. Viswanathan, "Bioinspired designs for shock absorption, based upon nacre and Bouligand structures," *SN Appl Sci*, vol. 1, no. 9, Sep. 2019. doi:10.1007/s42452-019-1062-7
- [43] A. Ghazlan, T. Ngo, T. Nguyen, S. Linforth, and T. Van Le, "Uncovering a high-performance biomimetic cellular structure from trabecular bone," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 14247, 2020. doi:10.1038/s41598-020-70536-7
- [44] N. Kladovasilakis, K. Tsongas, and D. Tzetzis, "Finite element analysis of orthopedic hip implant with functionally graded bioinspired lattice structures," *Biomimetics*, vol. 5, no. 3, Sep. 2020. doi:10.3390/BIOMIMETICS5030044
- [45] W. R. Hansen and K. Autumn, "Evidence for self-cleaning in gecko setae," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, no. 2, pp. 385–389, 2005. doi:10.1073/pnas.0408304102
- [46] A. J. Schulte, D. M. Droste, K. Koch, and W. Barthlott, "Hierarchically structured superhydrophobic flowers with low hysteresis of the wild pansy (*Viola tricolor*) - new design principles for biomimetic materials," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 2, no. 1, pp. 228–236, 2011. doi:10.3762/bjnano.2.27
- [47] R. Helbig, J. Nickerl, C. Neinhuis, and C. Werner, "Smart skin patterns protect springtails," *PLoS One*, vol. 6, no. 9, Sep. 2011. doi:10.1371/journal.pone.0025105

- [48] W. Barthlott and C. Neinhuis, "Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces," *Planta*, no. 202, pp. 1–8, 1997. doi:10.1007/s004250050096
- [49] Z. Q. Liu, D. Jiao, Z. Y. Weng, and Z. F. Zhang, "Structure and mechanical behaviors of protective armored pangolin scales and effects of hydration and orientation," *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 56, pp. 165–174, Mar. 2016. doi:10.1016/j.jmbbm.2015.11.013
- [50] M. Miyazaki, Y. Hirai, H. Moriya, M. Shimomura, A. Miyauchi, and H. Liu, "Biomimetic Riblets Inspired by Sharkskin Denticles: Digitizing, Modeling and Flow Simulation," *J Bionic Eng*, vol. 15, no. 6, pp. 999–1011, Nov. 2018. doi:10.1007/s42235-018-0088-7
- [51] Z. Ji et al., "3D printing of bioinspired topographically oriented surfaces with frictional anisotropy for directional driving," *Tribol Int*, vol. 132, pp. 99–107, Apr. 2019. doi:10.1016/j.triboint.2018.12.010
- [52] Y. Zhang, H. Huang, J. X. Zhang, S. B. Zhang, and L. Q. Ren, "Friction and Wear Properties of the Tergum Surface of Mole Cricket, *Gryllotalpa orientalis*," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 461, pp. 707–711, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.461.707
- [53] V. M. Mustahsan, A. Anugu, D. E. Komatsu, I. Kao, and S. Pentyala, "Biocompatible customized 3D bone scaffolds treated with CRFP, an osteogenic peptide," *Bioengineering*, vol. 8, no. 12, Dec. 2021. doi:10.3390/bioengineering8120199
- [54] P. S. Mehta, J. S. Ocampo, A. Tovar, and P. Chaudhari, "Bio-inspired design of lightweight and protective structures," *SAE Technical Paper*, 2016. doi:10.4271/2016-01-0396
- [55] M. Z. Khan, J. Bhaskar, and A. Kumar, "Design and analysis of strut-based lattice structure cranial implant," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, pp. 9307–9314, 2023. doi:10.15282/jmes.17.1.2023.1.0735
- [56] L. Vaiani, A. E. Uva, and A. Boccaccio, "Structural and topological design of conformal bilayered scaffolds for bone tissue engineering," *Thin-Walled Structures*, vol. 192, p. 111209, 2023. doi:10.1016/j.tws.2023.111209
- [57] N. H. Hart, S. Nimphius, T. Rantalainen, A. Ireland, A. Siafarikas, and R. U. Newton, "Mechanical basis of bone strength: influence of bone material, bone structure and muscle action," *J Musculoskelet Neuronal Interact*, vol. 17, no. 3, p. 114, 2017.
- [58] S. Kanwar, O. Al-Ketan, and S. Vijayavenkataraman, "A novel method to design biomimetic, 3D printable stochastic scaffolds with controlled porosity for bone tissue engineering," *Mater Des*, vol. 220, Aug. 2022. doi:10.1016/j.matdes.2022.110857
- [59] M. Fantini, M. Curto, and F. De Crescenzo, "A method to design biomimetic scaffolds for bone tissue engineering based on Voronoi lattices," *Virtual Phys Prototyp*, vol. 11, no. 2, pp. 77–90, Apr. 2016. doi:10.1080/17452759.2016.1172301
- [60] X. Li et al., "The design and evaluation of bionic porous bone scaffolds in fluid flow characteristics and mechanical properties," *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 225, p. 107059, 2022. doi:10.1016/j.cmpb.2022.107059

