

# Venüs'ün Çiçek Sepeti Süngerinden Esinlenerek Tasarlanmış Bir Kafes Sistemin Yapısal Davranışının İncelenmesi

Dinçer Öykünç<sup>1</sup>, M. Erden Yıldızdağ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>oykunc16@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8415-3378  
<sup>2</sup>(sorumlu yazar), yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

## ÖZET

Bu çalışmada Venüs'ün Çiçek Sepeti adlı deniz süngerinden esinlenilerek tasarlanmış bir kafes yapının mekanik davranışı incelenmiştir. İlk olarak canlının sahip olduğu silindirik iskelet ve iskeleti oluşturan yapısal elemanlar göz önüne alınarak tasarlanan kafes sistemin sonlu elemanlar modeli kirliş elemanlar yardımıyla oluşturulmuştur. Tasarlanan yapının mekanik davranışı canlının yaşadığı ortam da göz önüne alınarak burkulma açısından incelenmiştir. Lineer burkulma analizleri yapının hem boyuna hem de çevresel yönde basınca maruz kaldığı kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Belirlenen ön dizayn değerleriyle hesaplanan kritik burkulma yükünü iyileştirmek için Tepki Yüzey Metodolojisi tabanlı bir algoritma ile geometrik parametreler optimize edilmiştir. Yapısal optimizasyon çalışmasıyla hacmin azaltılırken kritik burkulma yükünün arttırılabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyomimetik, deniz süngeri, sonlu elemanlar metodu, Venüs'ün Çiçek Sepeti, lineer burkulma

**Makale geçmişi:** Geliş 04/08/2022 – Kabul 28/11/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1156139>

# Investigating Mechanical Behavior of a Lattice Structure Inspired by Venus' Flower Basket

Dinçer Öykünç<sup>1</sup>, M. Erden Yıldızdağ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>oykunc16@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8415-3378

<sup>2</sup>(corresponding author), yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

## ABSTRACT

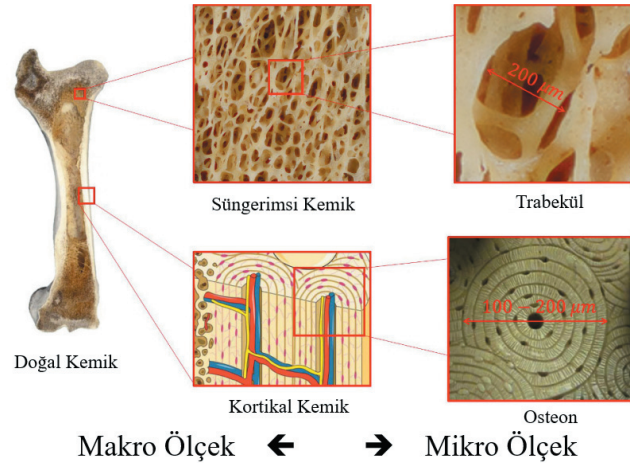
In this study, mechanical behavior of a lattice structure inspired by Venus' Flower Basket, a deep sea sponge, is investigated. To this end, the lattice structure is first designed considering the structural elements constituting the skeleton of the sponge. Then, a finite element model is generated by using beam elements. Critical buckling load of the preliminary design is determined by conducting linear buckling analysis (eigenvalue buckling analysis) assuming the structure is under pressure both in longitudinal and circumferential directions. Next, to improve the critical buckling load of the preliminary design, a surface response optimization-based algorithm is utilized to obtain optimum geometric parameters. It is shown that the critical buckling load can be improved while total volume of the structure is reduced with the adapted optimization algorithm.

**Keywords:** biomimetics, sea sponge, finite element method, Venus' Flower Basket, linear buckling

**Article history:** Received 04/08/2022 – Accepted 28/11/2022

## 1. Giriş

Doğa, insanlık tarihi boyunca örnek alınan bir alandır. Doğadan yararlanılarak aletler ve makineler yapılmakta; çözümün bulunamadığı, tıkanılan noktalarda doğaya başvurulmakta ve doğadan dersler çıkarılarak teknoloji ilerletilmektedir. Doğada bulunan sistemlerin davranışları oldukça ilgi çekicidir. Bu sistemlerin bütünsel davranışları (makro davranış) ihtiva ettikleri alt sistemlerin bir arada görevlerini (mikro davranış) yerine getirmesiyle oluşur. Doğada birçok farklı örneğini gözlemleyebileceğimiz bu yapılar, farklı uzunluk ölçeklerinde kendilerine has karakteristik özellikleri içerisinde barındıran hiyerarşik bir düzene sahiptir. Yapının davranışını, bu hiyerarşik düzeni oluşturan bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimi belirler. İlerleyen teknoloji ile birlikte bu karmaşık yapılar büyük bir ilgi görmektedir ve daha iyi anlaşılabilirlikleri için matematiksel modeller geliştirilmektedir. Geliştirilen matematiksel modeller ile doğal sistemlerin farklı koşullardaki davranışlarını ön görmenin yanında bu sistemlerden esinlenilerek geliştirilecek mühendislik tasarımlarının da daha iyi anlaşılması sağlanmaktadır. Bu matematiksel modeller geliştirilirken dikkat edilmesi gereken husus, hiyerarşik düzenin ön görülmesi zor davranıştır. Bu karmaşık yapılara verilebilecek en güzel örneklerden biri kemiğin yapısıdır. Şekil 1’de bir kemiğin sahip olduğu hiyerarşik düzen gösterilmiştir. Kemik dokunun belli bir etki altındaki tepkisini, farklı uzunluk ölçeğindeki çeşitli mikro yapıların etkileşimi meydana getirmektedir. Kemik yapısı gözlemlenerek ve analiz edilerek birçok alanda kullanılmıştır. Çok ölçekli yapısından yola çıkarak, bio-emilebilir yapay malzemeler üretilmiş ve bu da kemik aşılama işlemlerinde kullanılmıştır. Süngerimsi kemik dokusu göz önüne alınarak alüminyum köpük gibi hafif bir yapı elde edilmiştir (Yıldızdag vd., 2019).



**Şekil 1.** Kemiğin yapısı (Yıldızdag vd., 2019)

Mühendisliğin ana fikri, uygun amaca hizmet verecek optimum yapıyı oluşturmaktır. Bunu mükemmel şekilde başarmak mümkün değildir fakat mükemmel yakın başarmış olan doğal sistemlerin örnek alınması gereklidir. Hiyerarşik düzene sahip doğal sistemler, canlının oluşumundan günümüze kadar uğradığı doğal seçimler, mutasyonlar ve adaptasyonlarla birlikte görevlerini en optimum şekilde yerine getirebilecekleri koşullara evrilmişlerdir (Yıldızdag vd., 2019). Mühendislik dalları; doğayı gözlemleyerek ve örnek alarak, doğal sistemleri analiz ederek ve yapılan analizleri yorumlayarak aradığı optimum koşullara ulaşmaya çalışır. Doğadan ilham alınarak geliştirilen sentetik malzemelere verilebilecek en iyi örneklerden biri Geko kertenkelelerinden esinlenilerek geliştirilmiş eldivenlerdir (Şekil 2). Bu kertenkeleler, tavanda asılı kalabilme ve cam yüzeylerde rahat bir şekilde yürüyebilme özelliklerine sahiptir. Kertenkelenin bu özellikleri, ayaklarının altında bulunan tüylerden dolayıdır. Bu

tüyler kare şeklinde gruplar oluşturmaktadır ve oluşturdukları van der Waals kuvveti ile kertenkelenin yüzeye tutunabilmesini sağlamaktadır. Kertenkeleler ayaklarının açısını değiştirerek de bu kuvvetin dengesini ayarlayabilmektedir (Sevencan, 2020). Bu canlıdan yola çıkarak tasarlanan eldivene ait görsel Şekil 2’de verilmiştir.

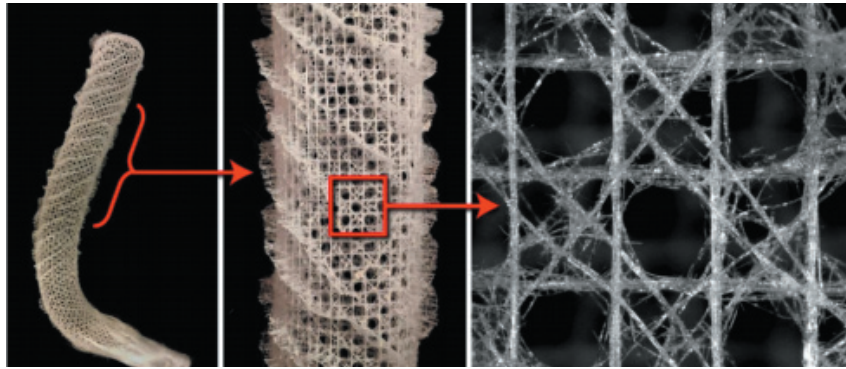


**Şekil 2.** Geko kertenkelesinden esinlenilerek geliştirilmiş eldiven

Doğadan esinlenilerek yeni ürünlerin tasarlanması günümüzde gelişen yeni üretim teknikleriyle birlikte fazlasıyla ilgi gören bir alandır. Biyonik terimi ilk kez 1960’lı yıllarda Jack E. Steele tarafından tanımlanmıştır. Steele biyoniği “doğadan baz alınan ve bazı fonksiyonlara sahip sistem bilimi” olarak belirtmiştir (Reisen vd., 2016). Biyomimetik tanımını ise ilk kez Amerikalı bir mühendis olan Otto Schmitt, yaptığı doktora çalışmasında ortaya çıkarmıştır. Schmitt, biyomimetliği biyoloji ve teknolojinin birleşimi olarak tanımlamıştır (Taşkan vd., 2022). Biyomimetik kelimesinin anlamı Yunancadan gelmektedir. Yunancada “bios (yaşam)” ve “mimesis (taklit etmek)” kelimelerinin birleşiminden oluşan bir terimdir. Farklı yerlerde İngilizce “biomimetics (biyomimetik)” kavramı yerine “biomimicry (biyomimikri)”, “biognosis (biyognoz)” ya da “biologically inspired design (biyolojik olarak ilham alan tasarım)” kavramları da kullanılmaktadır (Reisen vd., 2016). Genel anlamıyla bakılırsa, biyomimetik kavramı doğadan ilham alınarak yapılan çalışmalar için kullanılmaktadır. Bugünkü anlamıyla karşımıza ilk olarak Janine Benyus’un kitabında çıkmaktadır. Benyus biyomimetliği yeni bir bilim dalı olarak tanımlarken bu bilim dalının amacının insanoğlunun sorunlarını çözmeye doğayı örnek alma metodunu kullanmak olduğunu söylemiştir (Sevencan, 2020).

Bu çalışmada Venüs’ün Çiçek Sepeti (*Euplectella Aspergillum*) deniz süngerinden esinlenerek tasarlanmış bir kafes yapının mekanik davranışı sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Camsı süngerlerden, Hecactinellida grubuna ait olan Venüs’ün Çiçek Sepeti, diğer süngerlerle karşılaştırıldığında üstün mukavemet özelliklerine sahiptir. Aynı boyutlara sahip, silikadan yapılmış bir çubuk 190 MPa eğilme mukavemeti ve 0.7% uzama gösterirken Venüs’ün Çiçek Sepeti 850 MPa eğilme mukavemeti ve 2.5% uzama göstermektedir (Sarıkaya vd, 2001). Bu canlının iskelet sistemi oldukça karmaşıktır. Simetrik açık ve kapalı boşluklu hücresel bir yapısı vardır (Şekil 3). İskeletinde ince lifler, organik materyalleri oluşturan eş merkezli katmanlı silindirik yapı ve silis seramiği bulunur. Eş merkezli iç içe geçmiş silindirik yapıya spikül (spicule) denilir. Bu yapı amorf silikadan meydana gelmiştir. Bu katmanlar; protein, silikaten, kollajen gibi organik malzemelerden oluşur. Bu katmanlı yapı sayesinde; tokluk, mukavemet ve bükülme gibi mekanik özellikler bakımından sağlamdır. Meydana gelecek çatlama, katmanlı yapı nedeniyle ilerlemez ve bu da Venüs’ün Çiçek Sepeti’ne kırılmama özelliği kazandırır (Tavangarian vd., 2021). Bu tür deniz süngerlerinin sahip oldukları karmaşık iç yapıları sayesinde mekanik özellikleri açısından diğer sünger türlerine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Sahip oldukları bu özellikler birçok farklı çalışmada irdelenmiş ve yeni mühendislik tasarımlarına ilham

verebileceği belirtilmiştir. Aizenberg vd. (2005) ve Weaver vd. (2007) süngerin sahip olduğu iskeleti ve bileşenlerinin mekanik özelliklerinin detaylı bir şekilde incelendiği ilk çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Moon vd. (2015) süngerin yapısını oluşturan spiküllerin mekanik davranışı için bir giriş modeli geliştirmiştir. Robson Brown vd. (2019) Venüs'ün Çiçek Sepeti'nden esinlenerek dizayn edilip eklemeli imalat teknikleri ile üretilebilecek yeni metalmalzemeleri deneysel ve sayısal olarak inceleyen literatürdeki ilk çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Fernandes vd. (2021) Venüs'ün Çiçek Sepeti'nden esinlenerek dizayn ettikleri farklı geometrik özelliklere sahip kafes yapıların mekanik davranışını deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Morankar vd. (2022) sünger spiküllerinin çekme ve kırılma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Sharma ve Hiramath (2022) Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin sahip olduğu iskeletten faydalanarak dizayn edilebilecek malzemelerin enerji sönümlenme davranışını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Sharma vd. (2022) Venüs'ün Çiçek Sepeti'nden esinlenerek tasarladıkları iki boyutlu mekanik metalmalzemeleri seçmeli lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretimini ve üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Süngerin mekanik davranışının yanında, Falcucci vd. (2021) derin denizlerde yaşadığı için yapının hidrodinamik davranışını sayısal olarak incelemiştir. Fernandes vd. (2021) süngerin davranışını geliştirdikleri bir bağlaık sonlu elemanlar-hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile sayısal olarak incelemiştir.



Şekil 3. Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin iskeletinin yapısı

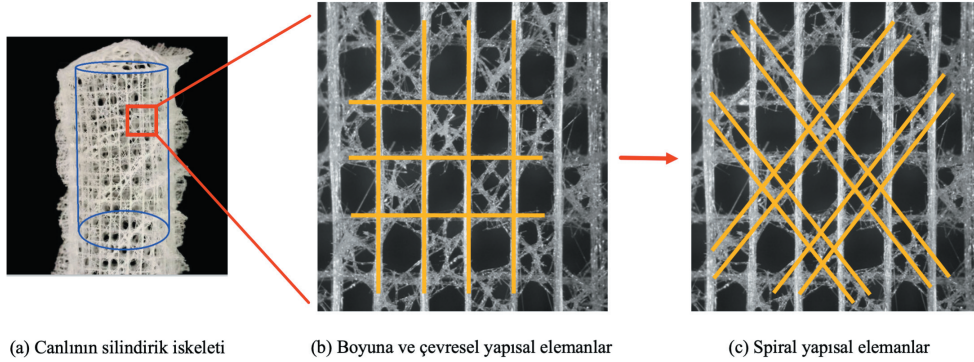
Literatürde Venüs'ün Çiçek Sepeti ile ilgili özellikle mekanik davranışının irdelendiği sayısal çalışmalara raslamaktayız fakat bunların bir çoğu yapının basit bir idealizasyonunun ele alındığı veya yapının kısıtlı bir bölgesinin ele alındığı çalışmalardan oluşmaktadır. Ayrıca canlının sahip olduğu yapıdan esinlenerek dizayn edilip üretilen farklı tipte iki boyutlu metalmalzemelerin mekanik davranışının incelendiği çalışmalara da fazlasıyla raslanmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak süngerin bütün yapısal elemanlarını içerisinde barındıran bir kafes sistem dizayn edilmiş ve kafes sistemin mekanik davranışı burkulma açısından sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Tasarlanan yapının mekanik davranışı canlının yaşadığı ortam da göz önüne alınarak burkulma açısından incelenmiştir. Lineer burkulma analizleri yapının hem boyuna hem de çevresel yönde basınca maruz kaldığı kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, belirlenen ön dizayn değerleriyle hesaplanan kritik burkulma yükünü iyileştirmek için Tepki Yüzey Metodolojisi tabanlı bir algoritma ile geometrik parametreler optimize edilmiştir. Yapısal optimizasyon çalışmasıyla hacmin azaltılırken kritik burkulma yükünün arttırılabileceği gösterilmiştir.

## 2. Biomimetik Tasarım ve Sonlu Elemanlar Modeli

Venüs'ün Çiçek Sepeti Şekil 4'te gösterildiği gibi bir silindire benzetilebilir. Canlıya daha yakından baktığımızda ise bu silindirik iskeleti oluşturan yapısal elemanları (spikülleri) dizilimlerine göre dörde

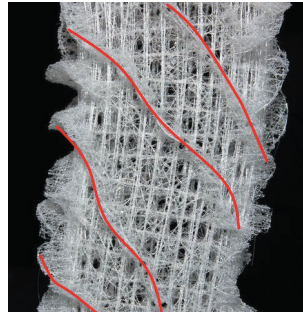


ayırabiliriz. Bunlardan üç tanesi silindirik iskeletin boyuna ve çevresel yapısal elemanlar ve bu yapısal elemanların kesişimleri boyunca uzanan spiral yapısal elemanlardır (Şekil 4).



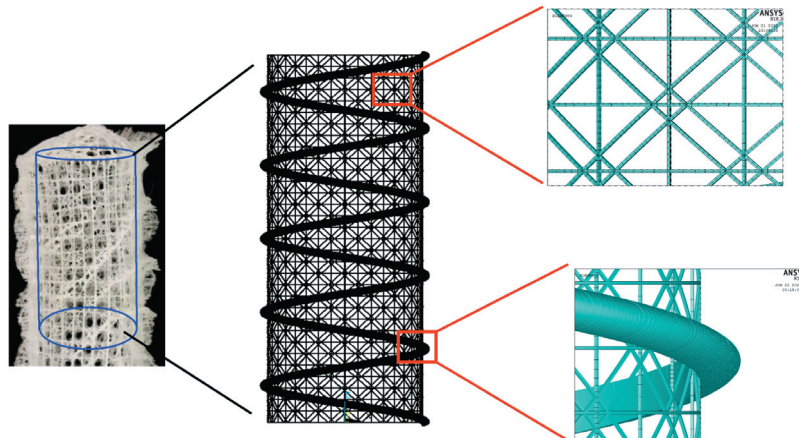
**Şekil 4.** Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin silindirik iskeletini oluşturan boyuna, çevresel ve spiral yapısal elemanlar

İskeletin diğer yapısal elemanı ise silindirik gövdeyi saran dış spirallerdir. Bu dış spiraller Şekil 5'te gösterildiği gibi iskeleti oluşturan diğer yapısal elemanlara göre daha belirgindir ve süngerin gövdesini sarmaktadırlar.



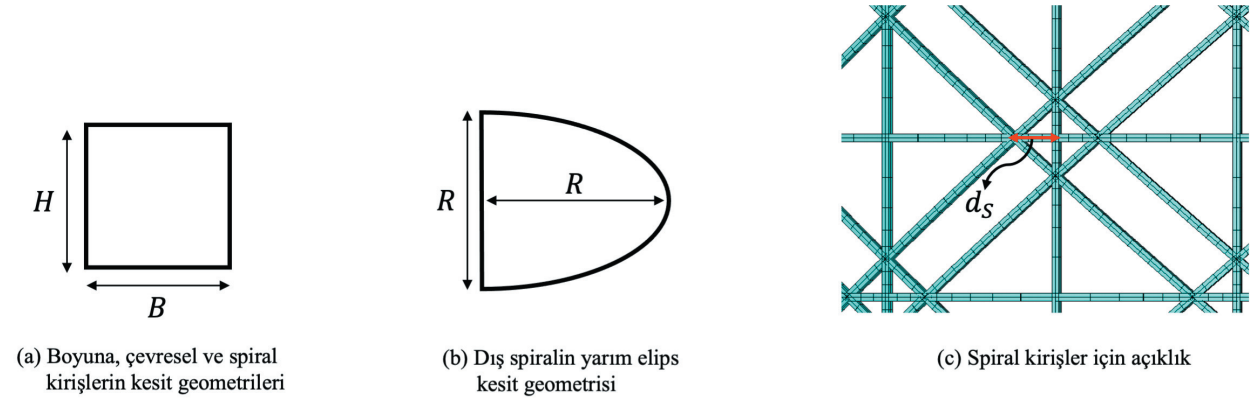
**Şekil 5.** Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin silindirik iskeletini saran dış spiraller

Bu gözlemler yardımı ile Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin sahip olduğu iskeletten esinlenilerek tasarlanan kafes sistemin ANSYS Mechanical APDL'de oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 6'da gösterilmiştir. Kafes yapının bütün yapısal elemanları BEAM 188 kiriş elemanları kullanılarak modellenmiştir.



**Şekil 6.** Biyomimetik kafes sistemin kiriş elemanlar ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli

Şekil 6'da gösterilen sonlu eleman modelinde silindirik yapıyı oluşturan boyuna, çevresel ve spiral kirişler aynı kesit geometrisine sahip iken silindirik yapıyı saran dış spiralin kesit geometrisi yarım elips olarak modellenmiştir (Şekil 7(a) ve 7(b)). Ayrıca, Şekil 7(c)'de gösterildiği gibi spiral kirişlerin geçtiği konumları belirlemek için bir mesafe tanımlanmıştır. Önemli olarak, bu çalışma kapsamında daha basit bir geometriye sahip olmak adına silindirik iskeleti saran sadece bir adet dış spiral olduğu kabul edilmiştir.



**Şekil 7.** Kiriş elemanları için kullanılan kesit geometrileri ve spiral kirişler için açıklık

Dizayn edilen kafes yapının sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical APDL içerisinde koşturulabilen bir kod yardımı ile oluşturulmuştur (<https://github.com/yildizdag/sponge> adresinden koda ulaşılabilir). Tablo 1'de kod içerisinde tanımlanan geometrik parametreler, tanımları ve ön dizayn değerleri verilmiştir. Oluşturulan parametrik kod ile farklı topolojiler, ilgili parametreleri değiştirerek hızlı bir şekilde analiz edilebilir. Ayrıca, bu çalışmada sistemi oluşturan yapısal elemanların lineer elastik, izotropik ve homojen bir malzemeden oluştuğu kabulü ile Elastisite modülü 91.9 GPa ve Poisson oranı 0.17 olarak alınmıştır.

**Tablo 1.** Geometrik parametreler, tanımları ve ön dizayn değerleri

Parametre	Tanım	Ön Dizayn Değeri
$L_S$	Silindirin boyu	60 mm
$R_S$	Silindirin yarıçapı	12.6 mm
$B$	Kesit genişliği	0.18 mm
$H$	Kesit yüksekliği	0.18 mm
$R$	Dış spiral kesit yarıçapı (yarım elips)	1.2 mm
$N_V$	Boyuna kiriş sayısı	36
$N_C$	Çevresel kiriş sayısı	33
$d_S$	Spiral kirişler için açıklık	1.05 mm
$N_L$	Dış spiralin döngü sayısı	5

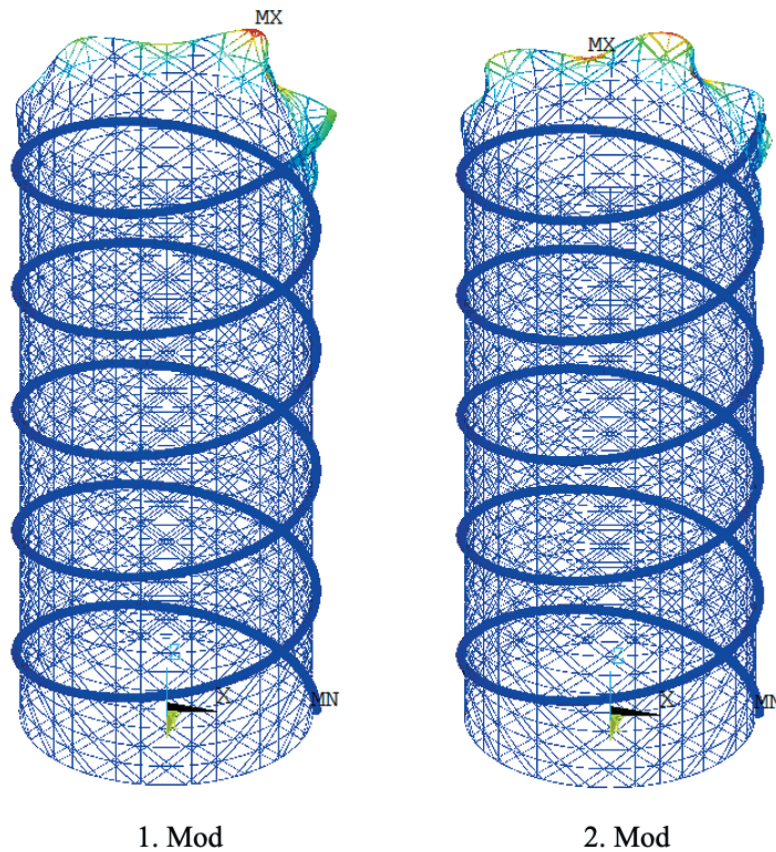
### 3. Sonlu Elemanlar Analizi ve Yapısal Optimizasyon

Dizayn edilen kafes yapının mekanik davranışı burkulma yönünden değerlendirilmiştir. Belirlenen geometrik parametreler optimize edilerek kritik burkulma yükü ön dizayn hacmi sabit tutularak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Süngerin yaşadığı deniz ortamını da göz önüne alarak hem boyuna yönde hem çevresel yönde basınca maruz kaldığı, silindirin tabanının ise ankastre mesnet olduğu kabulü

yapılmıştır. Sayısal çalışmanın ilk kısmında, lineer burkulma analizi (eigenvalue buckling analysis) ön dizayn değerleri (Tablo 1) ile gerçekleştirilmiştir. Lineer burkulma analizinde aşağıdaki özdeğer probleminin çözümü elde edilir:

$$(\mathbf{K} + \lambda_i \mathbf{P})\mathbf{U}_i = 0. \quad (1)$$

Burada  $\mathbf{K}$  sistemin katılık matrisi ve  $\mathbf{P}$  sistemin ön gerilme matrisidir. Özdeğer probleminin çözümü ile yük çarpanları (özdeğerler)  $\lambda_i$  ve bunlara karşılık gelen burkulma modları (özvektörler)  $\mathbf{U}_i$  elde edilir. Genellikle  $\mathbf{P}$  matrisi bir birimlik yük (veya basınç) için hesaplanır, böylece elde edilen özdeğerler yapının burkulma yüklerine karşılık gelir. Elde edilen minimum  $\lambda_i$  değeri ise yapının kritik burkulma yükünü temsil eder. Bu yüzden elde edilen ilk burkulma modu analizlerin yorumlanmasında önemlidir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulan kafes sistemin ilk iki burkulma moduna Şekil 8'de yer verilmiştir. Bu analiz sonucunda elde edilen kritik burkulma yükü 1. Mod için 3.1092 N olarak belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda boyuna yönde uygulanan basınca bağlı burkulma gerçekleşeceği görülmüştür. Bu da aslında yapının boyuna yönde burkulma davranışının iyileştirilmesi gerektiği göstermektedir.

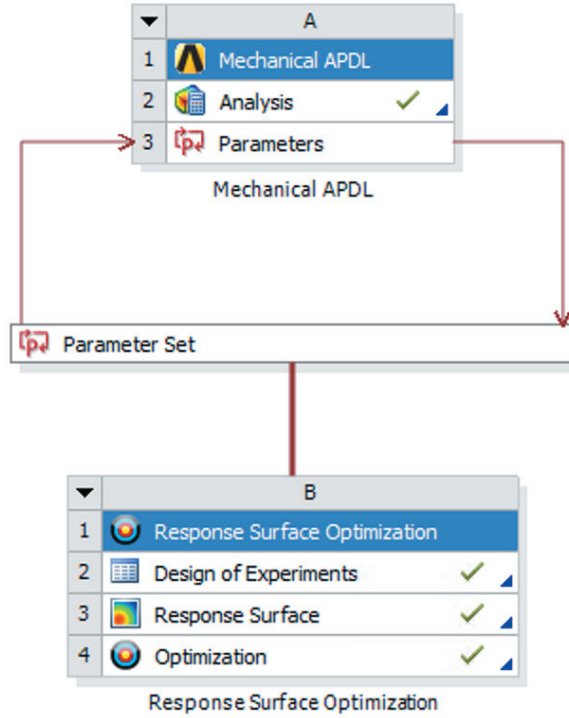


Şekil 8. Lineer burkulma analizi sonucu elde edilen ilk iki mod şekli

Sayısal çalışmanın ikinci kısmında, ANSYS Workbench Design Exploration modülünde bulunan Tepki Yüzey Metodolojisi tabanlı optimizasyon aracı kullanılmıştır. Tepki yüzeyi için hazırlanan kod, belirlenen parametrelerin (bağımsız değişkenler) farklı değerleri ile koşturulmuş ve sayısal bir deney seti oluşturulmuştur. Optimizasyon için ANSYS Workbench içerisinde Şekil 9'da gösterilen proje şeması oluşturulmuştur. Şemada gösterildiği gibi Mechanical APDL ile Response Surface Optimization



modülleri birleştirilmiştir. Mechanical APDL modülü ile oluşturulan kod koşuturulabilmekte ve belirlenen bağımsız değişkenler simülasyon sonuçlarıyla Response Surface Optimization modülüne aktarılabilir. Tepki yüzey metodolojisi problemin sahip olduğu değişkenlerin etkilerini araştırmak için kullanılan teknikleri ve bu değişkenlerin arzu edilen yanıtın elde edilmesi için kullanılan optimizasyon tekniklerini içermektedir.



**Şekil 9.** ANSYS Workbench’de oluşturulan proje şeması

Sayısal deney setinin oluşturulması için kullanılan parametreler ve limit değerlerine Tablo 2’de yer verilmiştir. Bu çalışmada kullandığımız sayısal deney seti gerçekleştirilen 1875 simülasyon ile oluşturulmuştur.

**Tablo 2.** Tepki yüzeyinin oluşturulması için kullanılan parametreler ve limit değerleri

Parametre	Minimum Değer	Maksimum Değer
$N_V$	32	40
$N_C$	29	37
$B$	0.162 mm	0.198 mm
$H$	0.162 mm	0.198 mm
$N_L$	3	6
$R$	1.08 mm	1.32 mm
$d_S$	0.945 mm	1.155 mm

Optimum değerlerin tespit edilmesi için amaç ve kısıt fonksiyonları, yapının hacmini ön dizayn hacmi ( $2.1771E-6 \text{ m}^3$ ) civarında tutup kritik burkulma yükünün maksimum olması şeklinde kurgulanmıştır. Yüzey tepki optimizasyonu modülü içerisinde tanımlanan amaç ve kısıt fonksiyonları Şekil 10’da gösterilmiştir. Kritik burkulma yükünün alt limiti 3.1 N olacak şekilde maksimize edilmesi ve toplam hacmin  $1.5E-6-2.2E-6 \text{ m}^3$  aralığında kalması amaçlanmıştır.

Name	Parameter	Objective		Constraint		
		Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
Kritik Yük	P10 - CRITICAL_LOAD	Maximize		Values >= Lower Bound	3.1	
Toplam Hacim	P11 - TOTVOL	Seek Target	0	Lower Bound <= Values <= Upper Bound	1.5E-06	2.2E-06

**Şekil 10.** Optimizasyon için belirlenen amaç ve kısıt fonksiyonları

Belirlenen amaç ve kısıtlarla elde edilen optimum geometrik parametreler ve bunlara karşılık gelen hacim ve kritik yüklere Tablo 3'te yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre birinci parametre setinin kullanılması durumunda hacimde %21.88'lik bir azaltım gerçekleşirken kritik burkulma yükü ön dizaynda elde edilen değere göre %27.58 artmıştır. İkinci parametre setinde ise hacimde %8.32'lik bir azaltım gerçekleşirken kritik burkulma yükü ön dizaynda elde edilen değere göre %29.12 artmıştır.

**Tablo 3.** Elde edilen optimum değerler ve bunlara karşılık gelen hacim ve kritik yük

No	$B$ (mm)	$H$ (mm)	$R$ (mm)	$N_V$	$N_C$	$d_s$ (mm)	$N_L$	Hacim (m <sup>3</sup> )	Kritik Yük (N)
1	0.18848	0.19735	1.1071	40	35	0.99187	4	1.7008E-6	4.2934
2	0.19453	0.19376	1.2269	40	37	0.97804	4	1.9967E-6	4.3779

Her iki parametre setine baktığımızda boyuna ve çevresel yöndeki kiriş sayıları artarken dış spiral döngü sayısının azaldığını gözleriz. Ayrıca kiriş kesit alanları artarken spiral kiriş açıklığı azalmıştır. Buradaki önemli bir gözlemimiz de yapının çevresel yöndeki basınca karşı dayanımı yüksek iken boyuna yöndeki basınca karşı zayıf olduğudur. Boyuna yöndeki basınca bağlı kritik burkulma yükünü arttırmak için kiriş sayısının ve kesit alanının artması gerekmektedir. Buna karşılık dış spiral döngü sayısının azaltılması toplam hacimde ciddi bir azaltım sağlamıştır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada derin denizlerde yaşayan Venüs'ün Çiçek Sepeti adlı süngerin iskeletinden esinlenilerek dizayn edilen bir kafes sistemin mekanik davranışı incelenmiştir. İlk olarak canlının iskelet yapısını oluşturan yapısal elemanlar geometrik olarak idealize edilmiş ve kafes sistem tanımlanmıştır. Daha sonra yapının sonlu eleman modeli kiriş elemanlar (BEAM 188) kullanılarak ANSYS Mechanical APDL'de oluşturulmuştur. Sonlu eleman modeli program içerisinde koşturulabilen bir kod yardımıyla parametrik olarak tanımlanmıştır. Dizayn edilen yapının mekanik davranışı burkulma yönünden değerlendirilmiştir. Yapının ön dizayn geometrik değerleriyle elde edilen kritik burkulma yükünü iyileştirmek için ANSYS Workbench içerisinde yer alan Tepki Yüzey Metodolojisi tabanlı optimizasyon modülü kullanılarak yapının geometrik parametreleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon çalışmasında amaç ve kısıt fonksiyonları hacmi ön dizayn değerine yakın tutarken kritik burkulma yükünü arttıracak şekilde tanımlanmıştır. Çalışmada elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Ön dizayn değerleri ile gerçekleştirilen lineer burkulma analizinde burkulmanın boyuna yöndeki basınca bağlı oluşacağı gözlemlenmiştir.
- Tepki yüzey metodolojisi tabanlı optimizasyon ile yapının burkulma kapasitesinde iyileştirme sağlanırken ön dizayn hacmi %21.88 azaltılabilmektedir.
- Gerçekleştirilen optimizasyon sonucu geometrik parametrelerin boyuna yönde burkulmayı iyileştirmeyi sağlayacak şekilde artarken (boyuna kiriş sayısı, kiriş genişlik ve yüksekliği) hacim

azaltımının çevresel yönde burkulma dayanımı sağlayan yapısal elemanlar (dış spiral) ile sağlandığı gözlemlenmiştir.

Bu başlangıç çalışmasında yapının davranışı lineer burkulma analizleri ile sınırlı tutulmuştur. İleriki çalışmalarda yapının mekanik davranışı nonlineer burkulma analizleri ile daha kapsamlı bir şekilde ele alınmalıdır. Ayrıca ileriki çalışmalarda canlının sahip olduğu iskeletin geometrik idealizasyonu özellikle dış spiraller göz önüne alındığında daha farklı dizaynlar önerilebilir.

## Referanslar

Aizenberg, J., Weaver, J. C., Thanawala, M. S., Sundar, V. C., Morse, D. E., & Fratzl, P. (2005). Skeleton of *Euplectella* sp.: structural hierarchy from the nanoscale to the macroscale. *Science*, 309(5732), 275-278.

Chen, H., Jia, Z., & Li, L. (2022). Lightweight lattice-based skeleton of the sponge *Euplectella aspergillum*: On the multifunctional design. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 135, 105448.

Falcucci, G., Amati, G., Fanelli, P., Krastev, V. K., Polverino, G., Porfiri, M., & Succi, S. (2021). Extreme flow simulations reveal skeletal adaptations of deep-sea sponges. *Nature*, 595(7868), 537-541.

Fernandes, M. C., Aizenberg, J., Weaver, J. C., & Bertoldi, K. (2021). Mechanically robust lattices inspired by deep-sea glass sponges. *Nature Materials*, 20(2), 237-241.

Fernandes, M. C., Saadat, M., Cauchy-Dubois, P., Inamura, C., Sirota, T., Milliron, G., ... & Weaver, J. C. (2021). Mechanical and hydrodynamic analyses of helical strake-like ridges in a glass sponge. *Journal of the Royal Society Interface*, 18(182), 20210559.

Monn, M. A., Weaver, J. C., Zhang, T., Aizenberg, J., and Kesari, H. (2015). New functional insights into the internal architecture of the laminated anchor spicules of *Euplectella aspergillum*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(16), 4976-4981.

Morankar, S., Singaravelu, A. S. S., Niverty, S., Mistry, Y., Penick, C. A., Bhate, D., and Chawla, N. (2022). Tensile and fracture behavior of silica fibers from the Venus flower basket (*Euplectella aspergillum*). *International Journal of Solids and Structures*, 111622.

Reisen, K., Teschemacher, U., Niehues, M., and Reinhart, G. (2016). Biomimetics in production organization—a literature study and framework. *Journal of Bionic Engineering*, 13(2), 200-212.

Robson Brown, K., Bacheva, D., & Trask, R. S. (2019). The structural efficiency of the sea sponge *Euplectella aspergillum* skeleton: bio-inspiration for 3D printed architectures. *Journal of the Royal Society Interface*, 16(154), 20180965.

Sarikaya, M., Fong, H., Sunderland, N., Flinn, B. D., Mayer, G., Mescher, A., & Gaiño, E. (2001). Biomimetic model of a sponge-spicular optical fiber—mechanical properties and structure. *Journal of Materials Research*, 16(5), 1420-1428.

Sevencan, H. (2020). Tekstil ve giysi tasarımında biyomimetik uygulamaları. *Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat*, 5(10), 101-118.

Sharma, D., & Hiremath, S. S. (2022). Bio-inspired repeatable lattice structures for energy absorption: Experimental and finite element study. *Composite Structures*, 283, 115102.

Sharma, D., Hiremath, S. S., & Kenchappa, N. B. (2022). Bio-inspired Ti-6Al-4V mechanical metamaterials fabricated using selective laser melting process. *Materials Today Communications*, 104631.

Taşkan, M., Mutlu Avinç, G., & Arslan Selçuk, S. (2022). Canlıların su dengesi sağlama stratejileri ve biyo-bilgili yapı kabuğu tasarımı. *Online Journal of Art and Design*, 10(1).

Tavangarian, F., Sadeghzade, S., and Davami, K. (2021). A novel biomimetic design inspired by nested cylindrical structures of spicules. *Journal of Alloys and Compounds*, 864, 158197.

Weaver, J. C., Aizenberg, J., Fantner, G. E., Kisailus, D., Woesz, A., Allen, P., Fields, K., Porter, M. J., Zok, F. W., Hansma, P. K., Fratzl, P. & Morse, D. E. (2007). Hierarchical assembly of the siliceous skeletal lattice of the hexactinellid sponge *Euplectella aspergillum*. *Journal of structural biology*, 158(1), 93-106.

Yildizdag, M. E., Tran, C. A., Barchiesi, E., Spagnuolo, M., and Hild, F. (2019). A multi-disciplinary approach for mechanical metamaterial synthesis: A hierarchical modular multiscale cellular structure paradigm. In *State of the art and future trends in material modeling* (pp. 485-505). Springer, Cham.