

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAMBU MALZEME DAVRANIŞINA BİR MODEL OLARAK KABUK
STRÜKTÜR TASARIM VE ŞEKİL OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra DEMİREL

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Programı

Haziran 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAMBU MALZEME DAVRANIŞINA BİR MODEL OLARAK KABUK
STRÜKTÜR TASARIM VE ŞEKİL OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Esra DEMİREL
(523151007)**

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Leman Figen GÜL

Haziran 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 523151007 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Esra DEMİREL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BAMBU MALZEME DAVRANIŞINA BİR MODEL OLARAK KABUK STRÜKTÜR TASARIM VE ŞEKİL OPTİMİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Leman Figen GÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Sema ALAÇAM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Neşe ÇAKICI ALP
Kocaeli Üniversitesi

Teslim Tarihi : 04 Mayıs 2018
Savunma Tarihi : 06 Haziran 2018







ÖNSÖZ

Öncelikle çalışmayı ilerletici, titizlikle yerinde müdahaleler yapan, fikirlerimi özgürce teze yansıtmamı tecrübesiyle yönlendiren, çözüm odaklı, tez danışmanım Prof. Dr. Leman Figen Gül'e teşekkür etmek isterim. Bana hem hayata bakışı, her zaman pozitif oluşu, yaratıcılığı, hem çok şey istemeyi hem de eldeki fikir yorulanın değerini öğreten, tereddüt ettiğimde hemen toparlayan, inanmanın gücünü öğreten, ayrıca bu çalışmaya katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Sema Alaçam'a en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Tezime yön veren, seminer dersi kapsamında hazırladığım Biyomimikri çalışmasında büyük emeği olan Doç. Dr. Meltem Aksoy'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bana her zaman yanımda olduğunu hissettiren arkadaşlarım, Elif Köklü, Tuba Kapucı ve thesis blues dönemimde de yanımda olan çocukluk arkadaşım Melike Yetim'e, minik meltemler estiren Serenay Elmas'a ayrıca teze yaptığı katkılarından dolayı, tezin gelişmesinde büyük emeği olan, Büşra Güler'e, Varlık Yücel ve Ondřej Veselý, Yeliz Asiltürk ve Sezen Türkoğlu'na yürekten teşekkürler.

Son olarak sorgulamadan her zaman yanımda bulunan, hiç bir zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Perihan Demirel'e, kritik anlarda yanımda beliriveren ve her zaman desteğini hissettiren babam Fahrettin Demirel'e, büyük sabırla beni mutlu etmeye çalışan ağabeyim ve ablama; Serkan Demirel ve Neslihan Demirel'e sonsuz sevgi ve teşekkürler.

Haziran 2018

Esra Demirel
Peyzaj Mimarı



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	23
2. KABUK STRÜKTÜR VE FORM ÜRETİMİ.....	29
2.1 Kabuk Strüktür	31
2.2 Sayısal Tasarım Yönünden Form Bulma ve Optimizasyon	34
2.2.1 Strüktürel optimizasyon	36
2.2.2 Strüktürel optimizasyon çeşitleri.....	37
2.2.3 Strüktürel optimizasyon yöntemleri	38
2.3 Malzeme-Kabuk Strüktür-Form İlişkisi	40
2.3.1 Hafiflik (Lightweight).....	42
2.3.2 Malzemenin davranışını belirleyen mekanik özellikleri	43
3. MALZEME-STRÜKTÜR-FORM BÜTÜNLEŞİK TASARIM SÜRECİ.....	47
3.1 Doğadan Esinlenen Tasarım: Biyomimikri	50
3.1.1 Biyomimikrinin mimarlık disiplinine uygulanma yöntemleri.....	50
3.1.2 Biyomimikri düzeyleri	52
3.2 Doğada Malzeme-Strüktür-Form İlişkisi.....	54
3.3 Biyolojik Rol Model Olarak Bambu	57
3.4 Bambu İle Üretim.....	61
4. MALZEME-STRÜKTÜR-FORM BÜTÜNLEŞİK SÜRECİ İLE KABUK STRÜKTÜR TASARIMI VE OPTİMİZASYONU.....	65
4.1 Araç ve Yöntemler	66
4.1.1 Biyolojik rol model: Bambu.....	66
4.1.2 Optimizasyon çeşidi: Strüktürel şekil optimizasyonu	67
4.1.3 Optimizasyon yöntemi: Evrimsel algoritmalar	68
4.1.4 Kabağın başlangıç yüzeyinin belirlenme süreci.....	69
4.1.5 Strüktürü oluşturan geometri: Voronoi	69
4.2 Strüktürel Şekil Optimizasyonu: Varsayılan Sistemin Oluşturulması.....	71
4.2.1 Geometrilerin değişen açıklığı ile malzemenin davranışı	74
4.2.2 Geometrilerin kalınlığı arttırıldığında malzemenin davranışı	76
4.2.3 Çok hedefli optimizasyon yöntemi ile şekil optimizasyonu süreci	77
4.2.4 Modelin değerlendirilmesi ve bulgular	78
5. SONUÇ.....	81
KAYNAKLAR	85
EKLER.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

ICD/ITKE : Institute for Computational Design / Institute of Building Structures & Structural Design





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Bambunun malzeme davranışını belirleyen mekanik özellikleri. 74





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1:	Doğadan esinlenilen biyolojik modelin mimari tasarım sürecine aktarılması.....	24
Şekil 1.2:	Çalışma için önerilen yöntemin gösterimi.	28
Şekil 2.1:	Gaudi'nin üç boyutlu asılı zincir modelleri.	30
Şekil 2.2:	Frei Otto sabun köpüğü ile yaptığı denemeler(Adriaenssens ve diğ, 2014, s.39).....	30
Şekil 2.3:	a) Eyeri andıran, kenarları kıvrılmış, hiperbolik paraboloid. b) Lomos De Cuernavaca şapeli, Meksika (Adriaenssens ve diğ, 2014, s.250-251). c) Şapelin etkilerini gösteren diyagram (Moussavi, 2011).	32
Şekil 2.4:	Kabuğun yükü basınç ve çekme ile yüzeye dağıtması.....	33
Şekil 2.5:	a) Heinz Isler Heimberg Tenis merkezi kabuk çalışması (Olsson, 2012). b) Felix Candela'nın 1956'da Los Manantiales kabuk (Url-1). c) Frei Otto grid kabuk Multihalle Mainheim (1976) (Adriaenssens ve diğ, 2014, s.143). d) Pier Luigi Nervi hangar (1935) kabuk strüktür.	35
Şekil 2.6:	Strüktürel şekil optimizasyonunun uygulanma aşaması Bletzinger ve Ramm (Adriaenssens ve diğ, 2014, s.50)'dan esinlenerek hazırlanmıştır.	38
Şekil 2.7:	UV koordinatları ile kontrol edilen NURBS eğrilerinden oluşan, geometri optimizasyonu (Dimic ve Knippers, 2011).	38
Şekil 2.8:	Evrimsel algoritmaların akış diyagramı (Kawamura & Ohmori, 2002).	40
Şekil 2.9:	a) ICD/ITKE karbon ve elyaf lif ile tasarlanmış kabuk strüktür 2014-15. b) Lif katmanlarından oluşan sayısal model (Vasey ve diğ, 2015)	43
Şekil 2.10:	Gerilme çeşitleri.	44
Şekil 3.1:	Biyomimikri yöntemlerinin süreçleri, biyoloji etkili ve teknoloji etkili yöntem (Knippers ve Speck, 2012).	50
Şekil 3.2:	a) Cassidia böceği kesiti. b) Chrysomela vigintipunctata böceği kesiti. c) ICD/ITKE 2013-14 araştırma pavyonu (Yunis ve diğ, 2014).	52
Şekil 3.3:	a) Silkpavilion. b) CNC ile üretilen strüktürün etrafına ipek böcekleri tarafından örülen ağ (Oxman, 2012).	53
Şekil 3.4:	Biyomimikrinin mimari tasarımlara uygulanması aşamaları.	54
Şekil 3.5:	Minimum enerji strüktürlerine örnekler; a) radyolarya (Url-2). b) İnsan kemik yapısı (N. Oxman ve diğ, 2010, s.58). c) Sabun köpüğü(Pérez García ve Gómez Martínez, 2009, s.896). d) Bambu en kesiti (Erdine, 2013, s.175).	56
Şekil 3.6:	Bambu kayma (shear), baskı (compression) (Correal D & Arbeláez C, 2010), eğilme (bending) testleri (Url-3).	58
Şekil 3.7:	Bambunun diğer malzemelerle sağlamlık ve dayanım karşılaştırması (Janssen, 2000).	59
Şekil 3.8:	a) Gövde en kesiti. b) En kesitte lif yoğunluk dağılımı (Erdine, 2013).	60

Şekil 3.9:	a) Bambu enine kesit detayı. b) Gövdesi boyunca değişen lif yoğunluğu. c) Bambu en kesiti (Erdine, 2015; Lee ve diğ, 2010).....	61
Şekil 3.10:	a)En kesitten elemana paralel bağlantı(Janssen, 2000). b)En kesitten gövde elemanına dik bağlantı (Janssen, 2000). c) Çelik ve başlıkla sonlandırma şeklinde bağlantı (Rockwood, 2015). d) En kesitlerin tam teması ile birleşme (Janssen, 2000). e) Elemana paralel dıştan bağlantı (Janssen, 2000). f) Metal Ankraj tekniği ile kenetlenerek bağlantı (Url-5).....	62
Şekil 3.11:	a) ZCB Pavyonu. b) Sayısal tasarım araçları ile bambunun eğilerek üst üste kesişimi ve form üretimi. d) Bambu bağlantısı metal tel düğüm detayı. c) Strüktürün yer ile bağlanma şekli (Crolla ve Fingrut, 2016).	63
Şekil 4.1:	Bambunun özelliklerinin bir kısmının soyutlanarak kabuk strüktür tasarımına aktarılması süreci.	67
Şekil 4.2:	Strüktürel şekil optimizasyonunun aşamaları Kaijima ve Michalatos (2014, s.196)'dan esinlenerek hazırlanmıştır.	68
Şekil 4.3:	Başlangıç yüzeyinin belirlenmesi süreci.	70
Şekil 4.4:	a) Bal peteği (Url-7). b) Kaplumbağa kabuğu (Url-8). c)Kuru toprak (Url-9). d) Voronoi diyagramı.	70
Şekil 4.5:	Voronoi diyagramı ile oluşturulan hücresel geometri.	71
Şekil 4.6:	Kenarların daha sık ve ortanın daha seyrek elemanlardan oluşması, üstten görünüş.....	72
Şekil 4.7:	a)Yeşil oklarla gösterilen destek noktaları. b)Karamba ile destek noktalarının tanımlanması.	72
Şekil 4.8:	Kabuk strüktüre kendi ağırlığının uygulandığı çizgi kuvvetlerin gösterimi. b) Yer çekimi kuvveti ve strüktürün kendi yükünün tanımlanması.	73
Şekil 4.9:	Malzemenin mekanik özelliklerinin tanımlandığı <i>Material Properties</i> komponenti.	73
Şekil 4.10:	Malzemenin davranışı ile kabuğun tehlike sınırını gösteren renkler. ...	74
Şekil 4.11:	Geometrilerin arasındaki boşluk arttırıldığında belirlenen yük altında (kahverengi oklarla gösterilen) kabuğun yer değiştirme miktarı.	75
Şekil 4.12:	Kalınlık değişkeni ile malzeme-strüktür uygunluğu.	76
Şekil 4.13:	Optimizasyon öncesi model ve çok hedefli optimizasyon ile malzeme, strüktüre en uygun form bulunması.....	78
Şekil A.1:	Optimizasyon sonucu elde edilen kabuk strüktür modeli	92
Şekil B.1:	Grid kabuk örüntü denemeleri.....	92
Şekil C.1:	Modelin Grasshopper-Karamba ile tanımlanması.....	93

BAMBU MALZEME DAVRANIŞINA BİR MODEL OLARAK KABUK STRÜKTÜR ŞEKİL OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu tez çalışması, sayısal tasarım araçları ve malzemenin davranışının kullanılmasıyla, doğadaki strüktürlerin oluşumundan esinlenerek, kabuk strüktür tasarımına bir alternatif oluşturan, bütünleşik bir tasarım yaklaşımı önermektedir. Tasarım taslak aşamasından itibaren, parametrelerini ve kısıtlarını malzemenin mekanik özelliklerinden alan bir tasarım süreci ile kurgulanmıştır. Çalışmanın başlıca odağını, Voronoi çokgeni kullanılarak optimal formda kabuk strüktür üretimine yönelik gerçekleştirilen analizler ve sonuçları oluşturmaktadır. Doğadan esinlenen, minimum enerji ve malzeme kullanımı ile sağlam ve rijit kabuk strüktür oluşturma potansiyelleri ortaya koyulmuştur. Bu bağlamda kabuk strüktür uygulamalarında minimum enerji ve malzeme kullanılarak sürdürülebilir uygulamalar üretilmesi, tasarım süresine başından sonuna hakim olarak, karar verici konumda olunması hedeflenmiştir. Biyomimikri yaklaşımı ile kabuk strüktürde form bulma sürecinden elde edilen sonuçlar, malzemenin davranışının strüktürel verimliliğe etkilerinin biraz daha anlaşılmasına katkıda bulunma potansiyeline sahiptir.

Tez kapsamında ilk olarak konuya genel bir giriş yapılmış, tezin amacı, kapsamı ve yöntemi açıklanmıştır. İkinci ve üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan yöntemler hakkında literatür araştırmaları aktarılmıştır. Dördüncü bölümde, bahsedilen tüm bilgi ve yöntemlerin kullanılması ile bir model üretilmiş ve modelden edinilen bulgular değerlendirilerek aktarılmıştır. Beşinci bölümünde ise sonuç olarak elde edilen bulgular ve bilgiler özetlenerek, çalışmayı ilerletebilecek potansiyeller aktarılmıştır.

Daha detaylı aktaracak olursak ikinci bölümde kabuk strüktür, alt sistem olarak yatay/hiper-eğrisel kabuk yüzeyleri ve grid kabuklar tanımlanmıştır, optik etkileri ve eğriliğinin tanımlayıcı olduğu akustik etkileri aktarılmıştır. Mimari tasarımda form üretiminin nasıl evrildiği açıklanmıştır. Fiziksel form bulma yöntemlerinden kabuk strüktürde statik dengeyi sağlayan yüzeyler oluşturulmak üzere yararlanıldığına değinilmiştir. Form bulma yöntemlerinin sayısal tasarım araçlarının tasarım sürecine yansması olan optimizasyon yöntemleri ve çeşitleri aktarılmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak doğanın prensiplerini kullanan evrimsel algoritmalarından bahsedilmiştir. Strüktürel tasarımda form bulma süreci ile optimal geometrinin malzeme ile oluşmasından bahsedilerek, malzeme, strüktür ve formun birbiri içine girmiş ilişkisi üzerinde durulmuştur. Malzeme kullanımını minimize ederek verimli bir strüktür elde edilmesi, malzemeye nasıl şekil verildiği ile ilişkili ortaya koyularak, hafiflik kavramı kabuk strüktür bağlamında aktarılmıştır. Kabuk, strüktürel açıdan davranışını doğrudan malzemenin mekanik özelliklerinden alan

özel bir strüktürdür. Bu bağlamda malzemenin limitleri ve özelliklerini keşfedebilmek için malzemenin davranışını belirleyen mekanik özellikleri açıklanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde sayısal tasarım araçları ile malzeme-form-strüktür arasındaki ilişkiden bahsedilmiştir. Bu ilişkiden doğan eş öncelikli süreçlerin araştırılma alanından biri olan biyomimikri kavramı ve mimarlık disiplinine uygulanma yöntemleri güncel örneklerle birlikte aktarılmıştır. Strüktür-malzeme-form bağlamında doğanın nasıl bir stratejide işlediği irdelenmiştir. Doğadaki minimal yüzeylerin araştırılması ile bu kavramın kabuk strüktürde enerjiyi verimli şekilde dağıtması bağlamında sürdürülebilir strüktürler elde edilmesini sağladığı vurgulanmıştır. Çalışmada bambu gövdesinin mekanik davranışı, kabuğun strüktürel davranışı ile entegre edilmiştir. Bambu gövdesinin malzeme davranışı, elastik ve kayma modülü, öz ağırlığı, elastik limit değerleri sayısal tasarım araçlarına girdi olarak kullanılmıştır. Üzerine etki eden kuvvetlerle şekillenen formu, davranış ve organizma düzeyinde biyomimikriye bir örnek teşkil eden bambunun biyolojik model olarak mekanik özellikleri tanıtılmıştır. Üretim aşamasında bambunun tek başına veya liflerinin takviyeli kompozit olarak kullanılması durumları tartışılmıştır.

Dördüncü bölümde bambunun malzeme davranışı ve kabuğun strüktürel davranışından gelen geri beslemelerle bir dizi uygunluk simülasyonu analizi yapılmıştır. *Rhinoceros* üç boyutlu tasarım programının *Grasshopper*, *Karamba* eklentisi ile strüktürel performans analizleri, *Octopus* eklentisi kullanılarak evrimsel algoritma yöntemi ile strüktürel şekil optimizasyonu yapılmıştır. Bu optimizasyon ile hedeflenen, malzeme ile en uygun açıklık ve kalınlıktaki geometri bulunarak strüktürün yer değiştirmesini ve kütleyi minimize etmektir. Çok hedefli optimizasyon sonucu optimal strüktür ile optimizasyon öncesi model karşılaştırılarak değerlendirmeler aktarılmıştır.

Sonuç bölümünde genel bir değerlendirme yapılmış, üretilen modelin sahip olduğu geliştirmeye açık potansiyelleri aktarılmıştır. Çalışma neredeyse atık üretmeyen, minimum enerjili, hafif, hücreli formlu, doğal malzemelerin özellikleri ile kabuk strüktür tasarımına bir alternatif önermektedir. Evrimsel algoritmaları kullanarak yapılan optimizasyon süreci ile elde edilen bulgularda kabuk strüktürün ağırlığı, gerilme ve yer değiştirmesi önemli ölçüde azaltılabilir ve malzeme kullanma korunma dengesi gözeterek stabilite artırılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Malzeme davranışı ve strüktürel davranışı ile bütünleşik tasarım sürecinin sayısal tasarım ortamındaki potansiyelleri ortaya koyulmuştur.

SHELL STRUCTURE DESIGN AND SHAPE OPTIMIZATION AS A MODEL FOR MATERIAL BEHAVIOR OF BAMBOO

SUMMARY

The purpose of this thesis is to develop integrated design approach to shell structure with natural material properties by utilizing material behaviour and computational design tools. The study focuses on the analysis and outcomes obtained from optimal form finding in Voronoi shell structure. A design process has been accomplished by incorporating the constraints of the forces acting upon the material and the parameters of the mechanical properties by taking into consideration in the early stages. In nature, while the matter is forming the structure, the environment that its surrounded comprises effects on it. The process is inspired by the formation of natural structures and abstractions from nature have been transferred to the digital design environment. In this respect, underlying motivation to translate natural systems, behaviour and processes into design principles, minimizing energy and material usage that promises more sustainable structures to generate a robust, efficient, lightweight, rigid shell structure also by considering constraints on early stages thereby saving time and cost. Also, locate the designer to be in a decision-making position from the beginning to the end of the design process.

The thesis contains 5 chapters. Within the scope of the thesis, the first part provides a general introduction to the subject and reveals the purpose, scope and method of the research. Chapter 2 and Chapter 3 comprise the methods that used in the study to support the idea that argued and background of the investigation. A detailed literature review is explained in these two chapters. Chapter 4 presents a model generated by using all the mentioned information and methods and the evaluation of the findings obtained from the model during optimization and simulation process and outcomes. Finally, Chapter 5 presents general conclusion and potential for further studies.

More explicitly, Chapter 2 contains shell structure definition, as a sub-system hyper-curved shell definition and grid shell description. Presents the effects of shell and horizontal tessellation example. According to load distribution along its hyper-surface, shell embeds the optical effects and acoustic effects of the shell determined by the curvature of its surface. Explains how form generation is evolved related to physical and digital methods. It is emphasized that the physical form-finding methods are utilized to create surfaces that provide static equilibrium in the shell structure. Optimization types and methods are explained as a reflection of form-finding methods to the computational design process. The optimization method is mentioned which uses Evolutionary Algorithms that rely on the natural principles such as mutation, selection, recombination and population. The form-finding process is discussed through materials optimal geometry in structural design while considering the relation between form, material and structure. The notion of the lightweight term, forming an efficient structure by minimizing the use of material interpreted through shaping material, in the context of the shell structure. Shell is a

special structure that its structural behaviour directly determined by the mechanical properties of the material. In this context, the mechanical properties are described that defines material behaviour in order to explore the limits and properties of the material.

Chapter 3 presents Biomimicry term as an emerging field to study design solutions to problems by looking at the nature to explore potentials similar to architectural design, structural design and engineering with contemporary examples. The investigation of natural strategies is conveyed in the context of structure-form-material. The concept of nature's sustainable way illustrated by minimizing the material usage and distribution of energy efficiently, in context of the shell structure. In the study, the mechanical behaviour of the bamboo culm is formulated to the structural behaviour of the shell. Material behaviour of the bamboo culm; elastic and shear modulus, specific weight, yield strength values are transferred to digital design tool as input parameters. Bamboo mechanical properties introduced as a biological role model provided by the form, which is shaped by forces acting on it, represents a behaviour and organism level of biomimicry. Fabricating grid shell structure with bamboo as a raw material is discussed through its joint system and how effects force distribution. Bamboo fibre revealed as fibre for reinforcement to variety materials, allows sustainable and more economic structure by alternate the synthetic fibres while providing stiffness and lightness, reducing conventional fibre composites usage.

Chapter 4 represents the core of the thesis, contains a series of feasibility simulation analysis correspondingly the shells structural behaviour and material behaviour of bamboo. Simulation models first part examining the density of Voronoi geometries effect on structural efficiency and the second part is the effect of the geometry thickness. The shell structure is analysed under specific load and support conditions and the parameters have changed according to feedbacks from material behaviour. Rhinoceros 3D design program and Grasshopper plug-in are used as a computational design tool and Karamba plug-in to test structural performances. Octopus plug-in is used to provide structural shape optimization that uses evolutionary algorithms method. In the model, the fitness functions are determined according to the structural efficiency of the material. The fitness functions are determined to minimize, mass and displacement to be able to demonstrate the effect of the mechanical properties of the material on the shell structure efficiency. The variables of this fitness functions the opening and thickness of the geometries. Therewithal, keeping material tension capacity minimum to fit the structure within an optimal distance to the safety requirements. The result of the multi-objective optimization is represented by comparing the model before optimization.

Chapter 5 concludes the thesis and contains concluding remarks and findings for further studies, illustrates the potential of the generated model for further understanding to develop. The research promises an alternative to the design of the shell with energy efficiently, lightweight, cellular formed, the almost waste-free structure with utilizing the natural materials properties. The results obtained from the optimization process that uses evolutionary algorithms, the stress, mass and displacement of the shell structure can be reduced considerably and stability can be improved by considering the material responsible usage. The potential of the integrated design process in the digital design environment with material behaviour and structural behaviour are revealed.

The mechanical properties of the natural materials used in the model to produce solutions for different purposes to provide an alternative to the shell structure. The shell structure form is generated by using the Voronoi diagram (Voronoi tessellations). This cellular form arrangement can be seen all around nature and its underlying idea is to minimize the distance between the points results in a bunch of lines which uses minimum energy. In this context, a model generated utilizing computational design methods and proposes more sustainable structures with minimum energy and material usage. The results obtained from the form-finding process with biomimicry approach on shell structure have the potential to contribute to a better understanding of the material behaviour effects on the structural efficiency.

In summary, Voronoi shell structure that was generated in this research should be considered as an alternative to structure design and possible to set of different input parameters, load and support conditions to achieve structurally efficient systems. Evolutionary algorithms can provide a various solution to defined problems. Using nature's principle as an approach to structural design in order to achieve multi-functional solutions have potential to further studies to explore nature's wisdom. In this investigation, computational design tools are provide getting closer to the better understanding of nature's structural forming strategies and shows the potentials by material behaviour.

The mechanical properties of the natural materials used in the model to produce solutions for different purposes to provide an alternative to the shell structure. The shell structure form is generated by using the Voronoi diagram (Voronoi tessellations). This cellular form arrangement can be seen all around nature and its underlying idea is to minimize the distance between the points results a bunch of lines which uses minimum energy. In this context, a model generated utilizing computational design methods and proposes more sustainable structures with minimum energy and material usage. The results obtained from the form-finding process with biomimicry approach on shell structure have the potential to contribute to a better understanding of the material behaviour effects on the structural efficiency.

In summary, Voronoi shell structure that was generated in this research should be considered as an alternative to structure design and possible to set of different input parameters, load and support conditions to achieve structurally efficient systems. Evolutionary algorithms can provide a various solution to defined problems. Using nature's principle as an approach to structural design in order to achieve multi-functional solutions have potential to further studies to explore nature's wisdom. In this investigation, computational design tools are provide getting closer to the better understanding of nature's structural forming strategies and shows the potentials by material behaviour.

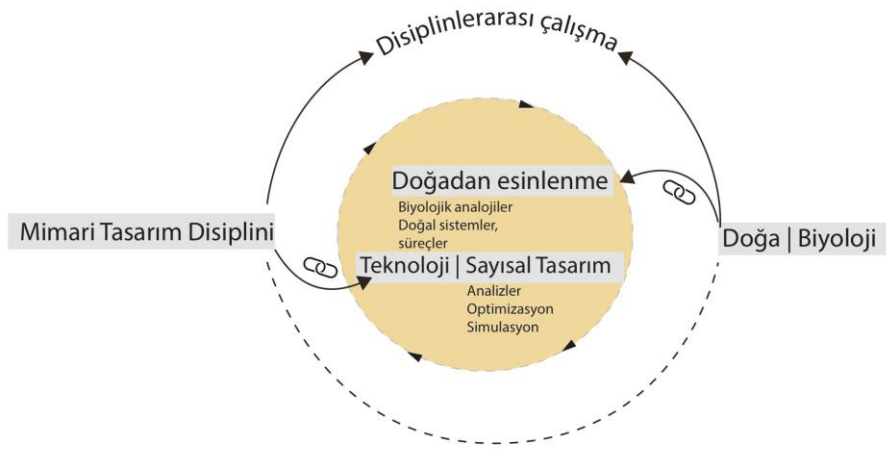


1. GİRİŞ

Modern tasarım anlayışının getirisi, tasarım disiplinlerinde farklı form deneme isteği, farklı malzeme, sistem arayışı yaratmış, geometrik açıdan kompleks tasarımı mümkün kılan yöntemler geliştirilmiştir. Mimarlık tarihinde uzun yıllar süregelen form oluşumunun malzemeden bağımsız olduğu düşüncesi yeni tasarım kültüründe değişime uğramış, formun kendisini oluşturan malzemeden ayrı düşünülmemesi yönünde evrilmiştir. Tasarımcı ve mimarların tasarım sürecinin yeni imkanlara yol açmasını sağlayacak malzeme, araç ve yöntem ilişkisi anlaşılmaya çalışılmış bu ise mimarlığın sınırlarını genişletmeye yönelik araştırmalar ortaya koymuştur. Form üretim sürecinde malzemenin sürecin tamamına yayılması şeklinde bir anlayış gelişmiştir. Neri Oxman (2010), formun öncelikli, malzeme ve strüktürün onu takip eden ikincil önemde olduğu tasarım anlayışının *yeni malzeme (New materialism)* anlayışı ile değiştiğini ve bu anlayışla malzemenin de öncelikli olduğunu vurgulamıştır. Malzeme ile form birbirinden bağımsız olmayıp birbirini desteklediği görüşü ile yenilikçi tasarım kültüründe form stratejileri malzeme bilgisi gerektirmiştir (Ashby, 2005). Tasarım disiplinlerinin karmaşık tasarımları uygulayabilmesi, sayısal tasarım araçları ve uygulama tekniklerindeki teknolojik gelişmeler ile ivme kazanmıştır. Kompleks sistemlerin keşfedilmesi, sayısal tasarım ara kesitinde, üretken ve geliştirilebilir sistemlerin araştırılmasına olanak sağlayan deneysel çalışma ortamları ile mümkün hale gelmiştir. Deneysel çalışma ortamlarının tasarım ve üretim ortamlarına dahil edilerek tasarım disiplinleri tarafından kullanılmaya başlaması ile kompleks tasarımların doğadaki örnekleri incelenebilmiş ve doğal malzemelerin araştırılmasına ortam oluşmuştur.

Form üretimi malzemenin ve strüktürün bir arada düşünüldüğü bir süreç tasarımı da beraberinde getirir. Doğal malzemelerin çevre koşullarına gösterdiği adaptasyon ve davranışı incelenerek edinilen bilgi ile üretilen form, strüktürel tasarımı şekillendirir. Çevreyi kirletmeyen malzemeler (non-polluting materials) ve daha az enerji gerektiren üretim süreçleri arayışı, doğadaki çözümlerin incelenmesi ve doğal malzemelerin davranışını araştırmayı tetiklemiştir. Biyomimikri ile optimal sonucu

elde etmek üzere doğanın malzeme bilgeliği, sayısal tasarım ve üretim teknikleri ile iç içe bir süreci zorunlu kılar (Şekil 1.1). Sayısal tasarım ve üretim teknikleri ile biyolojik analogilerden edinilen bilgiler, form üretim sürecinin başından sonuna sürece entegre olması ile başarılı sonuçlar elde etmek mümkündür.



Şekil 1.1: Doğadan esinlenilen biyolojik modelin mimari tasarım sürecine aktarılması.

Doğada birçok canlı malzeme lifli kompozit yapıya sahiptir. Bu yapı sayesinde hem sağlam hem de hafiflikleri ile çevre koşullarına adapte olabilmektedirler. Palmiye yaprakları, hindistan cevizi, ananas, bambu lifli doğal malzemelerdir ve lif takviyeli kompozit malzeme olarak sağlamlık, yük taşıyabilme mekanik özelliklerinin yanı sıra bükülme ve gerilme mukavemetine sahiptirler (Gruber, 2011). Lifli ve lif takviyeli kompozit malzemeler strüktürel tasarımda hafiflik ve sağlamlığı bir arada yakalamayı mümkün kılarak, verimli strüktürler (efficient structure) elde etmek için sıklıkla tercih edilmektedir. Liflerin boşluklu yapısı bükülmeye dayanıklılık yaratırken hafifliği de sağlar. Liflerin yoğunluğundaki değişimin yarattığı geometrik farklılık, heterojen oluşu sayesinde karmaşık form yaratmaya olanak tanır. Doğal sistemler ve biyolojik analogiler, geometrik farklılıkların yarattığı heterojenite, anizotrop ve çoklu işlev gibi birçok özelliğin tasarıma aktarılmasına esin kaynağı olmuştur. Bu sayede doğadaki sistemler, canlılar ve organizmalar süreçleri analiz edilerek tasarımla entegrasyonu sağlanabilmiştir. Bununla birlikte doğadan esinlenme yalnızca form düzeyinde (biyobenzetim) kalmamış aynı zamanda organizmalar, sistemler ve canlıların gelişim evreleri tasarım sürecinin bir parçası olmuştur. Ana fikir ise doğadan edinilen analizlerin, dijital simülasyonlar ve fiziksel testlerle, tasarımın erken aşamalarında birbiri ile entegrasyonunu sağlayarak,

performans odaklı formu yaratmaktır (Magna ve diğ, 2013; Menges 2012; S ndergaard, Amir ve Knauss 2013).

Yapısal tasarımın sınırlarını genişletmek ve potansiyelleri ortaya çıkarmak adına, mimari ve strüktürel açıdan farklı tasarım yaklaşımları denenmiştir ve denenmeye devam edilmektedir. Tasarım  ncelikleri projenin amacına bağlı olarak değişmektedir. Dijital tasarım ve analiz yöntemleri, taslak tasarım aşamasını dijital ortama taşımıştır ve bu sayede kompleks ve serbest form (free form)  retmeyi daha  zg r kılmıştır. Form denemeleri sayısal tasarım ortamında kolaylıkla test edilerek arzu edilen forma ulaşılırken, malzemeye öncelik verilmemiş bu durum beraberinde malzeme-form arasında büyük bir boşluk yaratmıştır (Oxman, 2010). Doğaya bakıldığında ise form malzeme davranışı ile  ekil olarak str kt r  oluşturmaktadır. Form, malzeme ve strüktür birbiri ile sıkı ilişki içindedir ve e  önceliğe sahiptir.

Bu tezin amacı ise malzeme davranışı ve sayısal tasarım araçlarını kullanarak, doğal malzeme özellikleri ile kabuk strüktürün uygulanabilirliğine yönelik bir tasarım yaklaşımı geliştirmektir. Bu doğrultuda doğanın form üretme stratejisinin bir bölümü soyutlanarak sayısal tasarım ortamına aktarılmıştır. Bu sayede malzeme üzerinde etkili olan kuvvetlerin yarattığı kısıtlar ve mekanik özelliklerin parametreleri, strüktürel performansa etkisi bağlamında, tasarımın erken aşamasında sürece dahil edilmesi ile bütünleşik bir tasarım süreci amaçlanmıştır.

Çalışmanın başlıca odağı, kabuk strüktürün form bulma sürecinde malzemenin özellikleri göz önünde bulundurularak, tasarım aracını bilgilendiren doğal bir araç olarak kullanmaktır, malzeme  nceliğindeki süreç ile istenilen formda strüktür üretmeye bir model oluşturulmuştur. Bu kapsamda Voronoi  okgeni kullanılarak optimal formda grid kabuk strüktür üretimine yönelik gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen analizler ve sonuçları üzerinde durulmuştur. Doğadan esinlenen, minimum enerji ve malzeme kullanımı ile sağlam ve rijit kabuk strüktür oluşturmanın potansiyelleri ortaya koyulmuştur. Bu bağlamda kabuk uygulamalarında sürdürülebilir strüktürler üretilmesi, tasarımcının tasarım süresine başından sonuna hakim olarak, karar verici konumda olması hedeflenmiştir.

Tezin kapsamında, (i) malzemeye öncelik verilerek kurgulanan bir tasarım süreci ile optimal formda, verimli strüktür tasarımı, (ii) enerji ve malzeme kullanımını minimize ederek en uygun form bulunmasıyla hafıf ve sağlam, sürdürülebilir

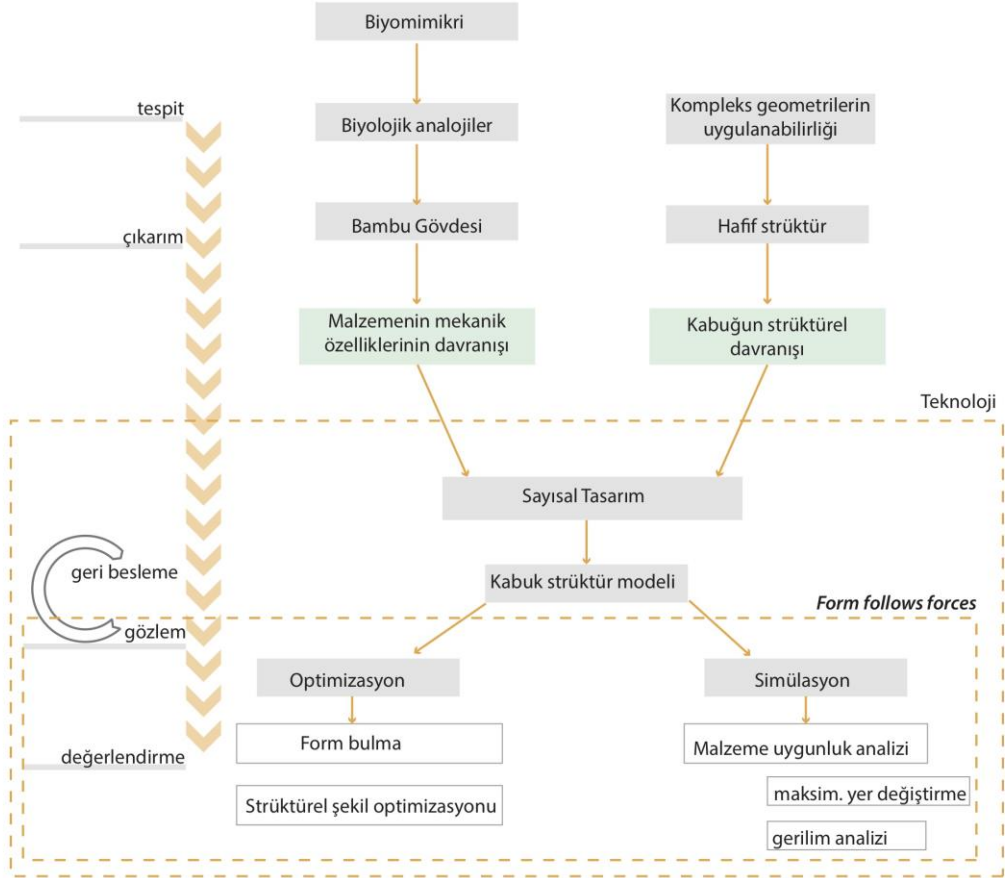
strüktürler, (iii) simülasyonlarla analizler yapılarak tasarımın ileriki aşamalarında karşılaşılabilecek sorunların minimuma indirilmesi üzerinde durmuştur.

Tez çalışması beş ana bölümden oluşmuştur. Tezin ilk bölümünde konuya genel bir giriş yapılarak amaç, kapsam ve yöntem açıklanmıştır. İkinci bölümde kabuk strüktürün tanımı yapılarak, alt sistemleri aktarılmış ve tasarım fonksiyonları ve karmaşıklığına göre etkileri aktarılmıştır. Sayısal tasarım yönünden kabuk strüktürde form bulma ve optimizasyon ilişkisi açıklanmıştır. Strüktürel optimizasyonun tanımı yapılarak, yöntemi ve çeşitleri aktarılmıştır. Kabuk malzeme-strüktür-form bağlamında ilişkilendirilerek, strüktürde hafiflik kavramı ve malzemenin davranışını belirleyen mekanik özellikler hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümünde sayısal tasarım araçlarının malzeme-form-strüktür ile ilişkisi ele alınmıştır. Hesaplamalı tasarım araçlarının yarattığı potansiyellerden bahsedilerek, eş öncelikli süreçlerin bir araştırma alanı olan biyomimikri kavramı tanımlanarak, bu kavramın mimarlık alanına uygulanmasında kullanılan yöntemler irdelenmiştir. Biyomimikri yöntemi ile tasarlanan lifli kabuk strüktürle ilgili çalışmalardan örnekler sunulmuştur. Malzeme, strüktür ve formun doğada nasıl bir ilişki içinde var olduğu irdelenmiştir. Doğadan seçilen rol modelin mekanik özellikleri, davranışı literatür taramalarından edinilen bilgilerle aktarılmıştır. Üretim aşamasında bambunun tek başına kullanıldığı durumda bağlantı noktaları, yük aktarma durumlarına etkisi, aktarılmıştır. Tek başına kullanılmadığında lifleri ile takviyeli kompozit olarak üretimi gerçekleştirildiğindeki potansiyelleri ortaya koyulmuştur. Dördüncü bölümde, biyolojik modelin özelliklerinin tasarım aracına aktarılması ile malzeme davranışına bağlı kabuğun strüktürel davranışı, bir dizi simülasyon ile analiz edilmiştir. Malzemenin limit ve parametrelerinin keşfetmek için yapılan simülasyon sonucu, strüktürün davranışından elde edilen bilgiler göz önüne alınarak, kabuğun çok hedefli strüktürel şekil optimizasyonu yapılmıştır. Tez kapsamında oluşturulan modelde yatay kurgulu hiper-eğrisel başlangıç yüzeyine sahip kabuk, Voronoi diyagramı ile hücrelere bölünerek grid kabuk sistem üzerinden çalışılmıştır. Modelden elde edilen sonuçlar aktarılmış ve literatürdeki çalışılmış benzer örnekler üzerinden tartışılmıştır. Sonuç bölümünde konu ile ilgili yapılan çalışmanın bulguları aktararak gelecek çalışmalara potansiyel vaat eden bulgular aktarılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, literatür araştırmasıyla beraber bir örneklem çalışması geliştirilmiştir. Çalışmanın temel olarak üzerine kurulduğu konular, doğadaki

malzeme-strüktür-form ilişkisi, bu ilişkilerden çıkarım yapılarak sayısal tasarım ortamına aktarılması, malzeme davranışı ile kabuğun optimal geometrisinin bulunması yoluyla strüktür tasarımıdır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında öncelikli olarak bu kavramlar üzerine literatür incelemeleri yapılmış, daha sonra strüktür-malzeme-form arasındaki ilişkileri daha iyi kavrayabilmek adına bir örneklem çalışması yürütülmüştür. Örneklem çalışması ile doğadaki kompleks yapıdaki strüktürler incelenerek, optimal formu elde etmek üzere doğanın malzeme bilgeliğinin bir kısmı soyutlanarak, sayısal tasarım teknikleri ile kabuğun kompleks yapısına bir çözüm alternatifi ortaya koymuştur.

Doğadan esinlenen malzemenin mekanik özelliklerinin, sayısal tasarım aracını bilgilendiren doğal bir araç olarak kullanılması hedeflenmiştir. Kabuk strüktürün kendi ağırlığı ve yer çekimi kuvvetinin malzemeye etkileri bağlamında bambunun mekanik özellikleri ile bir model yaratılmıştır. Bu model, sayısal tasarım ortamında *Rhinoceros*'ın *Grasshopper* eklentisi kullanılarak oluşturulmuş, *Karamba* eklentisi ile strüktürel analizleri yapılmıştır. Belirlen yük koşullarında, kabuk strüktürün davranışı ve malzeme davranışından gelen geri bildirimlerin, tasarım sürecine entegre edilmesiyle simülasyonlar yapılmış, optimizasyon ile malzemeye en uygun strüktürel form bulunmuştur. Malzeme davranışı, kabuğun strüktürel davranışına doğrudan etki ettiği için, kabuğun kendi yükünü taşıyabilmesi açısından, strüktürün formu yük dağılımı üzerinde oldukça etkilidir. Bu sebeple strüktürel şekil optimizasyonu ile kabuğa optimal form üretilmiştir. Strüktürel şekil optimizasyonu *Grasshopper*'ın *Octopus* eklentisi ile çok hedefli optimizasyonun evrimsel algoritma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve üretilen optimal formda kabuk strüktür, optimizasyondan önceki strüktür ile karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında izlenen metodoloji Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Evrimsel algoritmaları kullanarak yapılan çok hedefli optimizasyon süreci sonunda kabuk strüktürün kütlesi, gerilme ve yerdeğiştirmesi önemli ölçüde azaltılabilir ve malzeme kullanma korunma dengesi gözeterek, stabilite artırılabilir, bulguları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçta kabuğun karmaşık strüktürel yapısının, malzeme ve form ile ilişkisini biraz daha anlaşılır kılan bir dijital model üretilmiştir ve çalışmanın geliştirilebilecek potansiyelleri aktarılmış.



Şekil 1.2: Çalışma için önerilen yöntemin gösterimi.

2. KABUK STRÜKTÜR VE FORM ÜRETİMİ

Teknoloji ile birlikte gelişmekte olan sayısal tasarım araçlarından mimarlık pratiğinde yoğun bir şekilde yararlanmanın etkisi, 90'lı yılların başından bu yana, mimarlıktaki biçimsel/formalist projelerin köklü bir değişime uğramasına yol açmıştır. Geometrik olarak karmaşık şekiller, sayısal tasarım ortamlarında yaratıcılığın göstergesi haline gelmiş ve form oluşturma sürecinde, karmaşık geometrilerin tasarımda egemen hale gelmesini desteklemiştir. (Oxman, 2010, s.28)

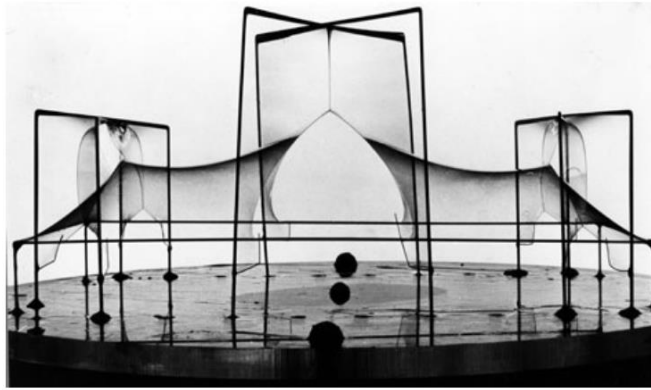
Karmaşık geometrinin sayısal tasarım ortamında kolaylıkla denenebilir oluşu, serbest form (free form) ve isteğe göre uyarlanabilen (customization) üretime olanak sağlayan sayısal üretim teknikleri ile de standart dışı form (non-standart form) üretimine ivme kazandırmıştır.

Teknolojinin tasarım süreçlerine olan yoğun etkisinden önce form bulma çalışmalarında, formun geometrisinin strüktür verimliliğine etkisi birçok fiziksel model denemeleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Kemerlerde strüktürel form bulmanın en eski örneklerinden birini, mühendis ve bilim adamı Robert Hooke (1635–1703) yayımlamıştır. Daha sonradan Hooke'un zincirleri ters çevirerek denediği form bulma çalışmaları (inversion law), tek bir kemerin ötesinde, kabuk strüktürün çeşitli geometrileri olarak ele alınmıştır (Adriaenssens, ve diğ, 2014). Katalan mimar Gaudi, iki ve üç boyutlu *asılı zincir* (hanged chain) modelleri ile geometrinin yalnız basınçla şekillenen strüktürü (compression only structure) gibi çalışabildiği gergili strüktür (tensile structure) üretmiştir (Ahlquist ve Menges, 2011) (Şekil 2.1). Heinz Isler ise farklı malzemeler deneyerek geometrisini tanımlayabildiği, strüktürel davranışını detaylı analiz edebildiği ve hangi takviyeye gerek olduğunu belirleyebildiği, istenilen kalınlıkta, burkulmaya karşı koyabilen, mukavemeti yüksek formlar üretebilmiştir. Form aktif olan asılı modellerden, form pasif olan kabuk strüktürlerde form bulma amacı ile yararlanılmıştır (Adriaenssens, ve diğ, 2014). Frei Otto Stuttgart Üniversitesi (1964-1991), İnstitute for Lightweight Structures'da yürüttüğü araştırmalarda minimum malzeme kullanarak, şekil optimizasyonu sürecinde maksimum mukavemet ve sağlamlığı vurgulayan,

hafiflik (leightweight) prensibinde strüktürel formlar üzerine yoğunlaşmıştır (Şekil 2.2). Otto sabun köpüğü ile yaptığı çalışmada *minimal yüzey* (minimal surface) tanımına değinmektedir (Lewis, 2003). Stabil minimal yüzeylerden, kabuk strüktürde, ağırlıklara karşı statik dengeyi sağlayan yüzeyler oluşturmak üzere yararlanılmıştır. Otto'nun yaptığı bu deneylerle elde ettiği membran strüktür tasarımı ile hali hazırdaki birçok çalışmanın temellerini attığını söylemek mümkündür.



Şekil 2.1: Gaudi'nin üç boyutlu asılı zincir modelleri.



Şekil 2.2: Frei Otto sabun köpüğü ile yaptığı denemeler(Adriaenssens ve diğ, 2014, s.39).

Tezin bu bölümünde, 4. bölümde ayrıntılı olarak ele alınacak olan örnekleme oluşturan kabuk strüktür ve form bulma kavramları açıklanmıştır. Form bulma yöntemi malzemenin davranışı ile kabuğun strüktürel davranışı üzerinden ele alınarak, malzemenin en uygun biçim ile oluşturulmasını sağlayan strüktürel

optimizasyon yöntemleri ve çeşitleri açıklanmıştır. Kabuğun strüktürel verimliliği, sağlamlık ve hafiflik kavramları, formu oluşturan geometri ile malzemenin mekanik özellikleri arasındaki ilişki aktarılmıştır. Bu bağlamda form bulma süreci, strüktürü oluşturan malzeme ile bütünleşik bir açıdan ilişkilendirilerek aktarılmıştır.

2.1 Kabuk Strüktür

Kabuk strüktür iki tarafından eğimli, genelde geometriler ile ifade edilen, malzeme özelliklerinin üzerinde doğrudan etkili olduğu, sürekli, rijit yüzeylerdir (Douthé, Baverel ve Caron, 2006). Bir başka kabuk tanımı ise Moussavi (2011) tarafından, “Yükü düzlemsel olarak dağıtan yüzeylerden oluşmaktadır ve en etkin mukavemeti, yükün eşit olarak dağıtıldığı durumlarda gösterir.” şeklinde yapılmıştır.

Kabuk strüktürün tanımı ve nasıl çalıştığını Williams (2004), Mimarlıkta kabuk strüktür kitabında şu maddelerle açıklamıştır:

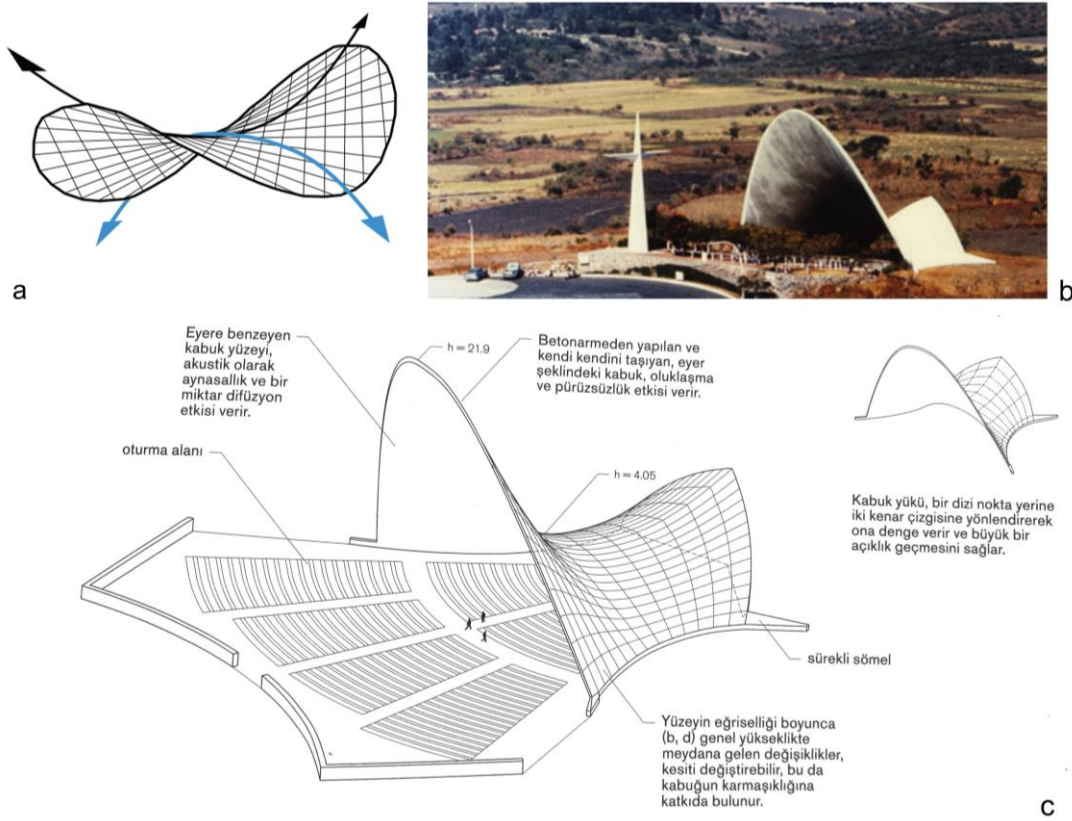
- ‘Kabuk strüktürler geometrik olarak yüzeylerle temsil edilebilirler.
- Kabuklar nispeten serttir ve bu özellikleri ile gergili yapılarından ayırır.
- Kabuklar, membran ve eğilme etkisi kombinasyonu ile çalışır. Membran etkisi (membrane action) daha etkilidir, ancak eğilme etkisi (bending action) olası deformasyona bağlı yer değiştirme durumlarını ve burkulmayı durdurmak için gereklidir.
- Kabuk ne kadar verimli/yeterli olursa, çöküşteki burkulma o kadar ani olur.’ (s.31)

Bu maddelerden bir çıkarım yapmak gerekirse kabuğun geometrik yapısı yani şekli ve maruz kaldığı kuvvetlere dayanıklılığının sağlanması strüktürün oluşma prensibini belirler.

Kabuk strüktürler işlevleri, malzemeleri ve şekillerine göre birçok açıdan kategorize edilebilirler. Kabuk sistemi üç temel alt sistemde incelemek mümkündür (Moussavi, 2011); konik kabuk, hiper-eğrisel şemsiye kolonlu kabuk ve son olarak üç noktalı hiper-eğrisel kabuk. Tezdeki modelde geometrilerin, yükü yatay ekseninde dağıtmaya uygun olması açısından yatay kurgulanan hiper-eğrisel kabuk sistemi çalışılmış, bu sistemin tanımı yapılarak ayrıntıları aktarılmıştır.

Hiper-eğrisel kabuk, çift eğrisellikli hiperbolik yüzeylerle meydana getirilir. Ana yükü kabuğun kesitine dağıtır, böylece kabuğun geometrisi, mukavemet göstereceği kuvvetlerin niteliği ve büyüklüğüyle belirlenir. Etkisi bağlamında incelemek

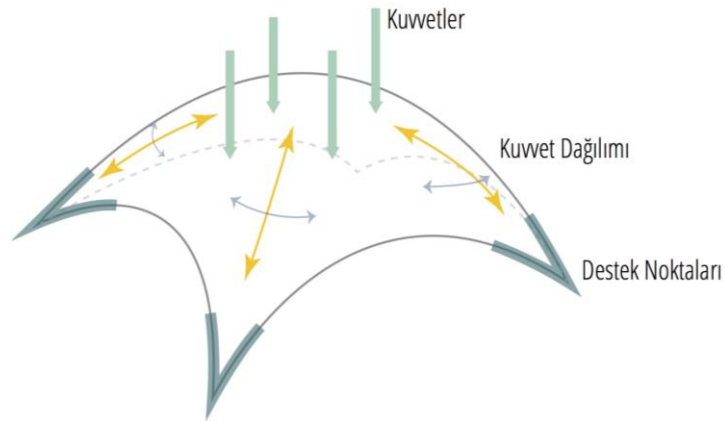
gerekirse hiper-eğrisel kabuk sistemin yükü yüzey boyunca dağıtmasından kaynaklanan, tanımladığı her mekanda, optik olarak hafiflik, ışınsallık etkisi verir. Kabuğun eğriselliği, akustik etkisini tanımlayıcı konumdadır. İç bükey kabukların orta kısımları odaklanma, dış bükey kabukların ise difüzyon etkisi vardır. Özetlemek gerekirse tasarlanma şekline ve program gereksinimlerine göre kabuk, ışınsallık, hafiflik, dolgunluk, sönümleme, incelik, kuşatma, parlaklık, sivrilme gibi çok çeşitli optik etkileri, odaklanma ya da aynasallık şeklinde akustik etkileri vardır (Moussavi, 2011). Tez kapsamındaki model dış merkezli olarak hafiflik etkisi ile tasarlanmıştır ve yüzeyin basık eğime sahip olduğu bölgede akustik açıdan difüzyon ve aynasallık etkisi yakalanmıştır. Üretilen modeldeki yüzeye benzer bir çalışma Candella ve Larrosa tarafından 1958 yılında yapılmıştır. Tasarlanan *Lomos De Cuernavaca* şapelinde, hiperbolik paraboloid şeklindeki kabuk algısal açısından eyere (saddle) benzetilmiştir (Şekil 2.3). Kesitindeki farklılıklara bağlı olarak karmaşık, iki tarafa düzensiz eğimi ile dışmerkezli bir etki yaratılmıştır (Moussavi, 2011).



Şekil 2.3: a) Eyeri andıran, kenarları kıvrılmış, hiperbolik paraboloid. b) Lomos De Cuernavaca şapeli, Meksika (Adriaenssens ve diğ, 2014, s.250-251). c) Şapelin etkilerini gösteren diyagram (Moussavi, 2011).

Voronoi geometrileri ile kabuğun hiper-eğrisel yüzeyi bölünerek *grid shell* (ızgara kabuk) sistem elde edilmiştir. Grid kabuklar “Boru veya dolu çubuk gibi doğrusal elemanlardan oluşurlar.” (Moussavi, 2011) Voronoi geometrileri ile oluşturulan grid kabuk, yükü iki tarafa dağıtan tek katmanlı bir ızgaradır ve optik olarak hücresel etki yaratılmıştır.

Kabuk, kavisli yüzeyle tanımlanan bir yapıdır, farklı yüklere maruz kaldığında şeklinde herhangi bir değişim gerçekleşmez, yani form pasif strüktürlerdir. Kabuk strüktürlerde formu oluşturan ana faktör yüküdür, genelde bu yük ölü yük çoğunlukla da strüktürün kendi yüküdür. Kabuğun geometrik şekli kuvvetlerin basınç ve gerilme ile yüzeye aktarılmasını sağlar. Dengeyi oluşturacak şekilde doğru geometri seçildiğinde strüktür eksenel basıncı, maruz kaldığı yükü, karşılayabilir hale gelir ve bükülme ya da kayma kuvvetleri minimum düzeye inmiş olur (Adriaenssens, ve diğ., 2014) (Şekil 2.4). Bu nedenle uygulanacak kabuk strüktürde geometri dolayısıyla malzeme seçimi önemli ve önceliklidir, tasarımın ilk aşamalarında göz önünde tutulmalıdır.



Şekil 2.4: Kabuğun yükü basınç ve çekme ile yüzeye dağıtması.

Fizik tabanlı algoritmalar ve modelleme ortamlarına giriş ile tasarım süreçleri malzemenin temsil edilmesi halinden, malzemenin takribi özelliklerinin simülasyonuna geçiş yapmıştır. Bu hesaplamalı süreçler, üretken modelleme ortamlarında, fiziksel ve malzeme davranışlarını, yani yer çekimi, sürüklenme, gerilim ve bükülümü kullanmayı temel alır (Ahlquist ve Menges, 2011). Werner Sobek (2010) yeni strüktür anlayışında yeni olan ne sorusunun cevabını; kuvvetlerin malzeme ile üç boyutlandırılmasıyla, kusursuz sistemler tasarımı olarak açıklamaktadır (Oxman ve Oxman, 2010). Böylece strüktürel açıdan sağlam ve malzemeyi verimli kullanan tasarımlar elde edilebilir. Uygun malzemenin çevreden

gelen kuvvetlerin optimizasyonunu sağlayacak şekilde seçilmesi ile strüktürle bütünleşik bir form bulma süreci mümkün hale gelir.

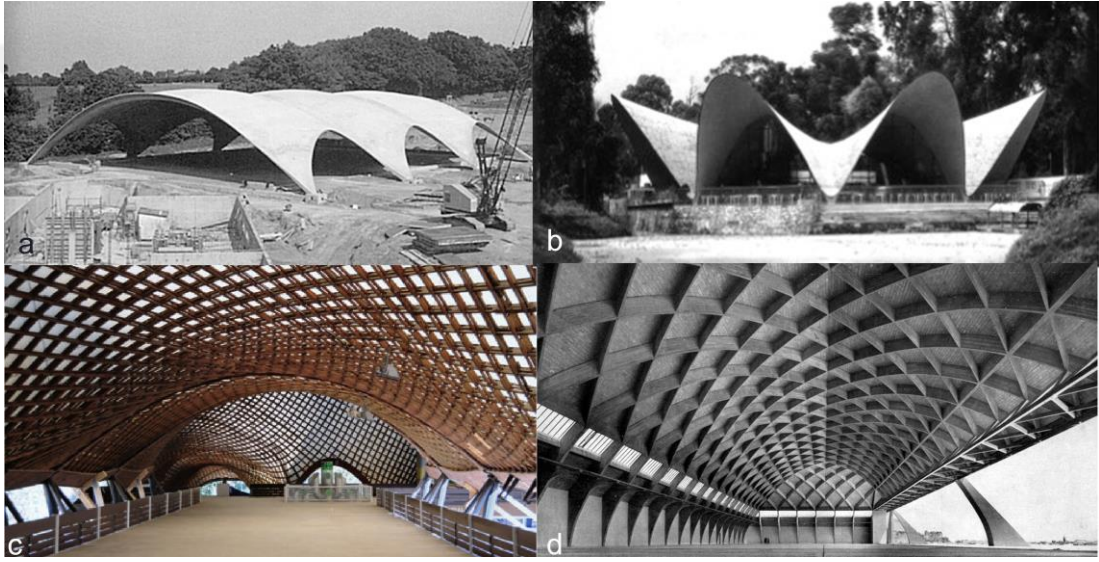
2.2 Sayısal Tasarım Yönünden Form Bulma ve Optimizasyon

Form bulma yöntemleri öncelikle fiziksel modellerle denenmiştir. Teknolojiye paralel olarak sayısal tasarım araçlarındaki gelişmeler fiziksel modellerden dijital ortamdaki modellere geçişi sağlamıştır. ‘Candela ve Isler doğanın neredeyse hiç, düz ve dikdörtgen strüktür yaratmadığını, buna ek olarak organik ve çift eğrili kabukların diğer strüktürlerden hem daha verimli hem de daha doğal olduğunu savunmaktadır.’ (Candela, 2010, s.15) Doğadaki yüzeylere bakıldığında çevreden gelen kuvvetler ve malzemenin kendi ağırlığının, yüzeyin formunu belirlediği gözlemlenmiştir. Sayısal tasarım araçlarında kullanılan teknolojilerin gelişimi ile doğanın bu kendi kendine yetebilme özelliği irdelenebilmiş ve test edilebilmiştir.

Kabuk strüktür ve form bulma çalışmalarının öncü isimlerinden Pier Luigi Nervi (1891-1979), Feliz Candela (1910-1997), Frei Otto (1925-2015) ve Heinz Isler’in (1926-2009) başta gelen çalışmalarından örnekler Şekil 2.5’te gösterilmiştir. Nervi Hangar çalışması ile ve Candela Los Manatiales Restaurantında takviyeli betonu kullanarak, geniş açıklıklar geçerek, ince, hafif ve sağlam kabuklar tasarlamıştır. Heinz Isler 1976’da tasarladığı Heimberg tenis kortunda asılı zincir modelini farklı bir şekilde *asılı membranlar* (hanging reversed membran form) kullanarak form bulma stratejisi geliştirmiştir (Cassinello, 2010). Ove Arup ve Frei Otto tarafından strüktürel açıdan limitleri test eder nitelikteki *Multihalle Mannheim* ahşap ile grid kabuğa optimal form bulunmuştur. Grid kabuk strüktürde form olarak; hegzagon, hücresel, dikdörtgen, beşgen gibi birçok patern seçilebilir. Grid strüktürler ilk olarak çatı strüktüründe kullanılmıştır ve hala kullanılmaktadır. Bu durumda kullanılan malzemenin özellikleri, köşeler ve yüzeyleri, örülü olan alanı ve uzunluklar önemli faktörlerdir (Adriaenssens ve diğ, 2014). Kullanılan malzemeye göre de ahşap, doğal lifler, çelik, takviyeli beton gibi birçok şekilde uygulanmaktadır.

Tasarım araçlarının değişmesi ile form bulma yöntemlerinin fiziksel modellerden sayısal tasarım araçlarının kullanılmasına, simülasyonlara geçiş yapılmıştır, form bulmanın tanımında da değişiklikler olmuştur. Yeni tasarım kültürünü yansıtacak form bulma tanımlarından biri Bletzinger tarafından; “Belli bir stres durumuna ilişkin, belirlenen bir sınırdaki kuvvet dengesinin şeklinin bulunması.” şeklinde

yapılmıştır (Veenendaal ve Block, 2012, s.3742). ‘Form bulma ileriye doğru bir süreçtir, tasarım yükü ile dengesi sağlanmış, strüktürün optimal geometrisini bulmak için direkt olarak parametrelerle kontrol edilir.’ (Adriaenssens, ve diğ, 2014, s.2). Tanımdan da anlaşılacağı üzere form bulma sürecinde kuvvetler ve bununla beraber denge sağlanmak amaçlandığı için optimizasyon ile ifade edilmektedir. Matematik formülleri ve manuel hesaplamalarla optimal sonucun bulunması oldukça zordur. Fakat sayısal tasarım araçlarının kullanımı ile kabuk strüktür için belirlenen optimal seçeneklerin test edilmesi oldukça kolaylaşmıştır. Bu da strüktürlerin istenen parametrelere kontrol edilebilmesini sağlamış, kabuğun serbest ve kompleks forma izin veren strüktürel özellikleri ile de uygulanmasındaki artışı hızlandırmıştır.



Şekil 2.5: a) Heinz Isler Heimberg Tenis merkezi kabuk çalışması (Olsson, 2012). b) Felix Candela'nın 1956'da Los Manantiales kabuk (Url-1). c) Frei Otto grid kabuk Multihalle Mainheim (1976) (Adriaenssens ve diğ, 2014, s.143). d) Pier Luigi Nervi hangar (1935) kabuk strüktür.

Tez kapsamında yapılan çalışmada bir başlangıç yüzeyi belirlenerek kabuğun sınırlar, destek noktaları ve yükler tanımlanmıştır. Kabuğun üzerinde etkili olan kuvvetler, yer çekimi ve kendi ağırlığını karşılayabilmesini sağlayan geometrilerin açıklık ve kalınlıkları strüktürün ve malzemenin davranışına göre belirlenmiştir. Malzemenin, tasarım parametrelerini ve kısıtlarını belirlediği bir form bulma süreci tasarlanmak hedeflenmiştir. Tasarım parametreleri olarak malzemenin mekanik özellikleri; elastik modülü, özgül ağırlığı, kesme modülü, elastik gerilme değerleri sayısal tasarım aracına girdi oluşturmuştur. Malzemeye bağlı olarak kabuğun form bulma sürecinde gerilme bölgeleri ve yer değiştirme değerleri simülasyonlarla analiz edilerek değerlendirilmiş ve optimizasyon ile en uygun geometrik form bulunmuştur.

Formu oluşturan kuvvetlerin optimizasyonu ve strüktürün verimliliği, sağlamlık ve hafiflik kavramları iç içe geçmiştir. Bir sonraki iki başlıkta birbiri ile iç içe geçmiş olan bu kavramlar ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

2.2.1 Strüktürel optimizasyon

Form bulma süreci ve genel olarak tasarım uygulamaları bir optimizasyon sürecidir. Muhakkak bir amaç, bu amaca yönelik çözümler ve alternatifler üretilir. Strüktürel tasarımda ise bu amaçlar genelde statik durumlarla ifade edilir ve bir arada değerlendirilmeleri zaruridir (Dimcic, 2011). Tezin bu bölümünde, optimizasyon sürecinin algılanabilmesi için genel terimleri açıklanmıştır.

Tasarım Değişkenleri

Strüktürü iyileştirmeye yönelik bir takım değişiklikler yapılması ve özgürlükler getirilmesi mümkündür. Tasarımda değişim potansiyeli olan bir grup parametrelerin, izin verilen değişim aralıkları ile ifadesi tasarım değişkenleridir. Strüktürel tasarımda değişkenler; malzeme özellikleri, en kesit boyutları, geometriyi kontrol eden parametreler (açıklığı, sıklığı, içi boş ya da dolu olması gibi) veya geometrik elemanların boyutları olabilir (Haftka, Gürdal ve Kamat, 1990).

Hedef Fonksiyonlar

Optimizasyonda değişkenlerle belirlenen bir amaç, hedef seçilmelidir. Strüktürel optimizasyon için maksimum yer değiştirme, gerilmeler, kütle, maliyet hedef fonksiyonları olabilir (Yazıcı, 2013). Hedef fonksiyonlar genelde azaltmak (minimize) ya da arttırmak (maksimize) şeklinde ifade edilir. Strüktür söz konusu olduğunda genelde hedef fonksiyonu problemi minimize etmek şeklindedir (Dimcic, 2011). Hedef fonksiyonları bir (single objective) veya birden çok (multi-objective) olmaktadır. Çok hedefli optimizasyonlarda çözüm karmaşık olabilir ve çözüm için farklı yöntemler geliştirilmiştir (Haftka ve Gürdal, 1990).

Kısıtlar

Optimizasyon sürecinde tasarımın uygulanabilirliği için bazı kısıtlamalar göz önüne alınmalıdır. Kısıtlar malzeme, üretim yöntemi ve strüktür söz konusu olduğunda genelde sağlamlık, malzemenin mekanik özelliklerine bağlı kısıtlar olabilir (Dimcic, 2011). Tez bağlamında malzemenin mekanik özellikleri ve strüktürün sağlamlığı kısıtlarına öncelik verilerek optimizasyon süreci tasarlanmıştır.

Tez kapsamındaki malzemenin mekanik özelliklerinden gelen kısıtlar göz önünde bulundurularak, strüktürel şekil optimizasyonu ile geometrinin sıklığı ve kalınlığı tasarım değişkeni, yer değiştirmeyi minimize etmek hedef fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Çalışma süreci 4. bölümde ayrıntıları ile aktarılmıştır.

2.2.2 Strüktürel optimizasyon çeşitleri

Tasarım değişkenlerinin belirlenmesinden sonra dört farklı strüktürel optimizasyon yapmak mümkündür. Bunlar, malzeme optimizasyonu, geometri/şekil optimizasyonu, topoloji ve en-kesit optimizasyonudur (Yazıcı, 2013; Dimcic, 2011). Tez ile çalışılan modelde kabuk strüktürün geometrik/şekil optimizasyonu yapılmıştır.

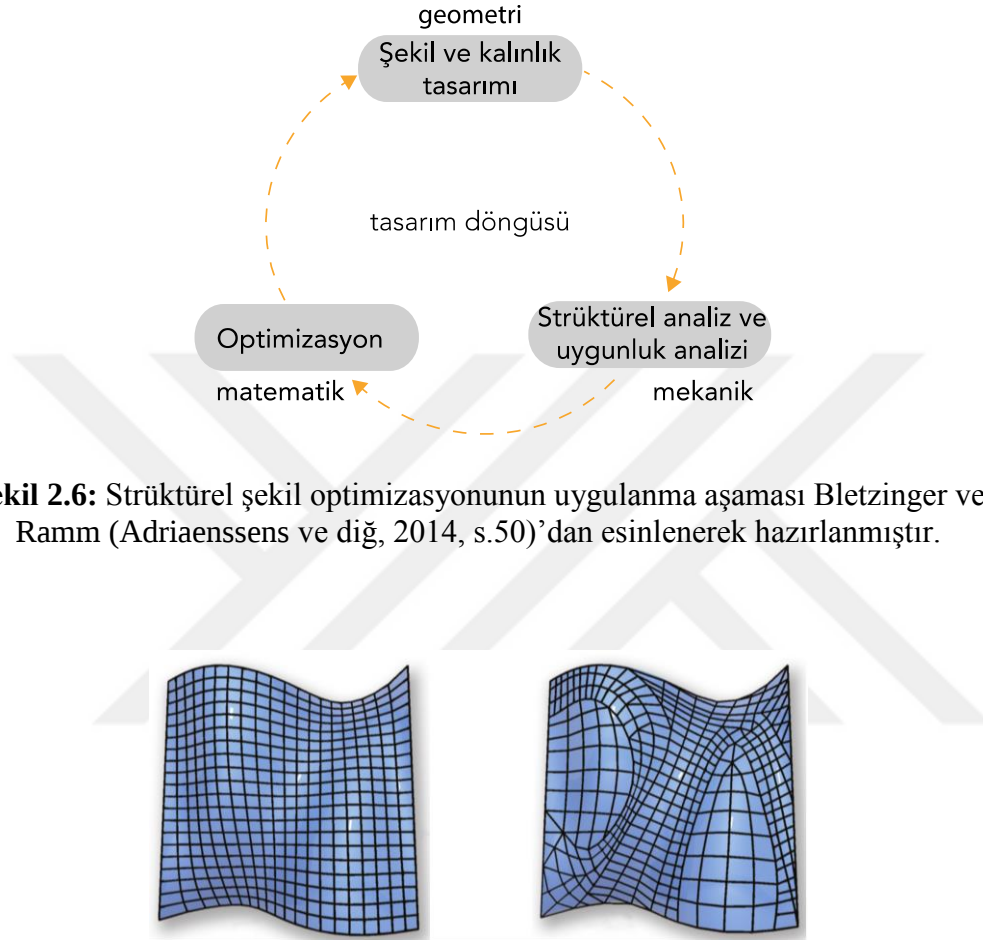
Doğaya bakıldığında malzeme, mekanik özelliklerin belirlediği davranış ve çevresinden gelen kuvvetlere göre, strüktürü oluşturan formu şekillendirir. Doğanın bu özelliğinden esinlenerek tez kapsamında oluşturulan modelde, formu gerçekleyen malzemeye en uygun şekil bulma amacı ile strüktürel şekil optimizasyonu tercih yapılmıştır.

Strüktürel Şekil /Geometri Optimizasyonu:

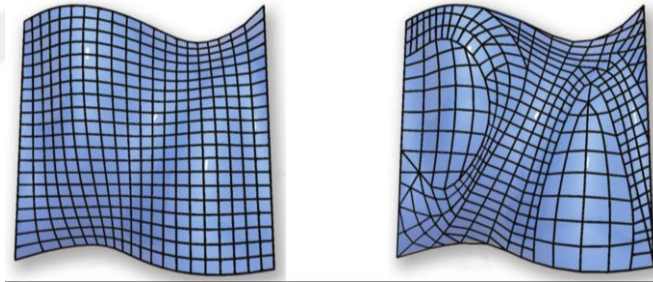
Kabuğun kendisinin içsel geometrisi ve strüktürel özellikleri tarafından belirlenen biçimsel sonuç, yer değiştirme ve örüntü (pattern) optimizasyonudur. Başka bir deyişle şekil optimizasyonu, strüktürün, iç ve dış sınırlarının mekanik gereklilikler doğrultusunda değiştirilmesidir (Yazıcı, 2013). Şekil modifikasyonu yoluyla örüntü üretilir ve şekil optimizasyonu ile geometriyi oluşturan elemanların, takviye bölgelerinin ve açıklıkların yerleri belirlenir. Bu yolla mimari açıdan hedefler ve strüktürel verimliliğin entegre edilmesi amaçlanmıştır (Adriaenssens ve diğ., 2014). Strüktürel şekil optimizasyonun tasarım sürecindeki döngüsü Şekil 2.6'da gösterilmektedir.

Şekil optimizasyonu, geometrinin karmaşıklığına bağlı olarak çok değişkenli çözümleri gerektirir. Örneğin, NURBS tabanlı geometrilerde kontrol noktaları UV değişkenleri olabilir (Dimcic, 2011). Optimal geometri ile strüktürde verimliliği sağlamak mümkündür. Kabuğun üzerinde etkili olan yük durumları ve strüktürü oluşturan elemanlarının biçimleri, kabuğun içsel kuvvetinin türünü ve şeklini belirleyerek, strüktürün verimliliğini etki eder (Yazıcı, 2013, s.48). Geometriyi oluşturan elemanların kalınlık ve açıklıklarının değiştirilmesiyle, strüktürün

sağlamlık ve rijitliğini sağlayarak, strüktürel denge kurmak mümkündür. Şekil 2.7’de gösterilen örnekte, optimizasyon ile belirlenen son durumdaki geometrilerin biçimi, kabuğun yer değiştirme miktarını %25 oranında düşürmüştür (Dimcic ve Knippers, 2011).



Şekil 2.6: Strüktürel şekil optimizasyonunun uygulanma aşaması Bletzinger ve Ramm (Adriaenssens ve diğ, 2014, s.50)’dan esinlenerek hazırlanmıştır.



Şekil 2.7: UV koordinatları ile kontrol edilen NURBS eğrilerinden oluşan, geometri optimizasyonu (Dimcic ve Knippers, 2011).

Tez kapsamında oluşturulan modelde değişkenlerden biri olan geometrilerin sıklığı, Voronoi diyagramı üzerindeki noktalar ile kontrol edilmiştir. Geometrik elemanlarının kalınlıkları optimizasyonun diğer değişkeni olarak belirlenmiş, böylece iç kuvvetler dengelenerek şekil alternatifleri üretilmiş, optimal form bulunmuştur.

2.2.3 Strüktürel optimizasyon yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri temel olarak analitik-deterministik yöntem ve stokastik yöntem olarak ayrılabilir (Dimcic, 2011; Kiranyaz, ve diğ, 2014). Stokastik yöntemin içinde incelenen genetik algoritmalar ve evrimsel yöntemler karmaşık problemleri

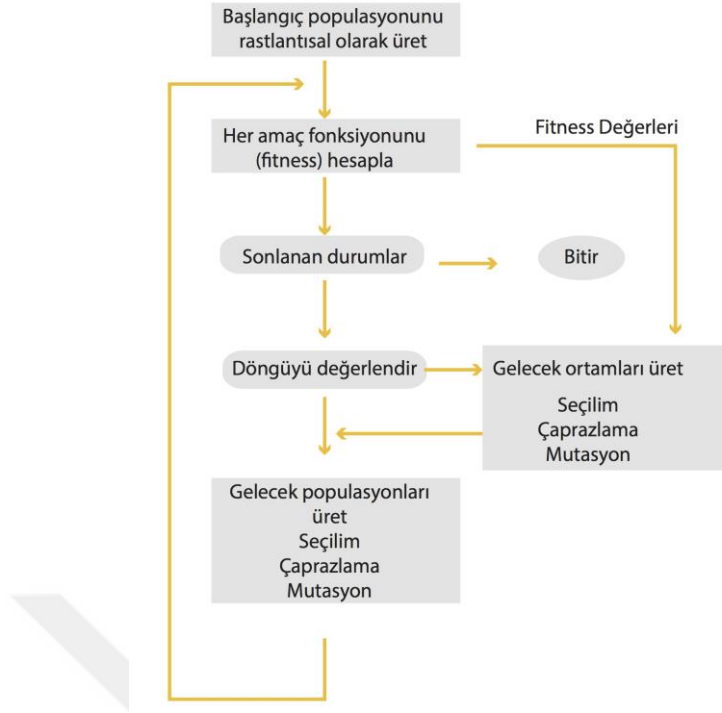
basitleştirerek çözmeyi sağladığından optimizasyon süreçlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Birden fazla çözüm üretme konusunda evrimsel algoritmalar mimarlık alanında ve strüktürel tasarımda önem kazanmıştır. Tez kapsamında oluşturulan modelde birden fazla hedef fonksiyonuna çözüm alternatifi üretmeye uygunluğundan dolayı evrimsel algoritma yöntemi kullanılmıştır.

Evrimsel Algoritmalar

İlk olarak John Holland tarafından 1970’lerde Darwin’in evrim modeline dayanan genetik süreci, bilgisayar ortamında gerçekleştirmek istenmiştir. Ardından Holland’ın doktora öğrencisi David Goldberg bir kitap yayınlarak genetik algoritmaların evrimsel hesaplama stratejileri ile birçok disiplin tarafından kullanılmasını sağlamıştır (İşçi ve Korukoğlu, 2003, s. 192).

Genetik ve evrimsel algoritmalar , rastlantısal seçim ve olasılıklarla karar verme şeklinde işler. Bu özelliklere doğa gözlemlenerek, süreçleri analiz edilerek ulaşılmıştır. Süreç popülasyon, mutasyon, rekombinasyon gibi doğanın temel ilkelerine ve seçilime dayanır (Şekil 2.8). Çözüm grubu popülasyon, çözümün kodları da kromozom olarak ifade edilir (Von Buelow, Falk, ve Turrin, 2010). Çözüm kodu, yani kromozomlar değişkenleri oluşturur, tezle oluşturulan modelde, tasarım değişkenleri formu oluşturan elemanların parametreleri; açıklık/sıklık ve kalınlık olarak belirlenmiştir.

Evrimsel algoritma ve genetik algoritma arasında çok az fark vardır. İkisi de doğanın ilkeleri ile işler fakat genetik algoritmalar genotiplerle birey üretirken, evrimsel algoritma fenotiplerle çalışır. Genotipler tasarımın bir modelini üretirken fenotipler tasarım modelinin kendisini üretir (P. Janssen, 2006). Başlangıçta bir popülasyon rastgele seçilir ve belirlenen hedef fonksiyonu doğrultusunda değerlendirilir. En iyi popülasyonlar mutasyon, çaprazlama ve tekrar üreme ile çoğaltılır ve hedef fonksiyonuna uygunluğu tekrardan değerlendirilir. Hedef fonksiyonu ile örtüşmeyen, elverişsiz bireyler elenir ve döngü istenilen sonuç bulunana kadar tekrarlanır (Dimcic ve Knippers, 2011; İşçi ve Korukoğlu, 2003).



Şekil 2.8: Evrimsel algoritmaların akış diyagramı (Kawamura & Ohmori, 2002).

Çok değişkenli ve çok hedefli optimizasyon mühendisler tarafından sıklıkla tercih edilir. Evrimsel algoritma, strüktürel optimizasyon, serbest formların geometri optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu için kullanılan bir yöntemdir (Yazıcı, 2013; Von Buelow ve diğ, 2010). Darwin evrim görüşüne göre doğa rastlantılar ile seçim yapar, ardından mutasyon ile birçok alternatif üretilir. Bu alternatiften en iyi olan hayatta kalır ve optimum kendiliğinden sağlanmış olur. Bu strüktürel verimlilik açısından uygulanabilecek, basit ve çok geçerli bir yöntemdir (Dimcic, 2011).

2.3 Malzeme-Kabuk Strüktür-Form İlişkisi

‘Yaptığımız her işlevsel nesne, malzemeyi fonksiyonel bir şekle dönüştüren bir süreçten türetilir. Malzeme ve çaba olmadan şekil de olmaz.’ (Beukers ve van Hinte, 2001) Doğada oluşum, madde ile başladığı gibi, morfogenez ya da form üretimi doğanın fiziksel güçlerinin doğurduğu bir süreçtir (Oxman, 2010). Bu görüşlerle malzemenin tek başına düşünülmemesi, birçok kavramla birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Daha ayrıntılı incelemek gerekirse, biçimlere duysal nitelikler kazandıran mimarlar ve yapıyı teknik gereksinimlerine göre şekillendiren mühendis ve teknisyenler tasarım aşamasında ikili sürece neden olmaktadır. Bu ikili durum tasarım sürecinde kopukluk meydana getirmiş ve teknolojinin gelişmesi ile

paralellik gösteren sayısal tasarım araçlarının potansiyellerini ortaya koymasına izin vermemiştir. Bu durum maddeselliğe bakışta değişimi zorunlu kılmıştır. “Maddeyi sadece fiziksel ve somut bir varlık olarak değil, hem fiziksel hem de fiziksel olmayan öğeleri kapsayan bir anlayışla düşünmek gereklidir.” (Moussavi, 2011). Biraz daha açacak olursak malzeme ahşap, beton, çelik örneğin, iklim, ekonomi, akustik, içinde bulunduğu çevreden gelen faktörlerle bir arada düşünülmelidir. Bu sayede yapı biiçimin tasarım sürecindeki ikili durumu ortadan kalkabilir.

Matematik, biyoloji ve bilgisayar teknolojilerinde işlev, o disipline özgü bir dolayım (medium) tarafından birden fazla girdi ile tek bir çıktı yani tekil bir biçim elde etmek için itina ile bir araya getirilen işleme sahiptir. Mimarlıkta da bu durum çeşitli malzemelerin (fiziksel faktörler, bağlam, iklim, ekonomi) bir araya gelerek yapı biiçimi dolayım ile üretmesi şeklinde açıklanabilir (Moussavi, 2011). Başka bir deyişle biçim üretimi ve performansı dolayım ile bütünleşik bir hale getirilerek tekil bir biçim elde edilir.

“Form bulma yöntemleri, stabil kuvvet dengesinin sonucu olan ideal şekiller oluşturur.” (Adriaenssens ve diğ, 2014) Kabuk söz konusu olduğunda geometrik açıdan kompleks olma durumu söz konusudur. Şekil, malzeme üzerinde belirlenen kurallar sonucu meydana gelir. Bu kurallar belirlenirken kabuğun üzerine etki eden tüm öngörülebilir ya da öngörülemez kuvvetleri karşılayabilirliği sağlanmalıdır. Malzeme, şekli ve strüktürü doğrudan bilgilendirir bir başka deyişle kabuk malzeme ile gerçekleşirken, malzeme; şekli ve strüktürü belirleyici konumdadır.

Çalışmada incelenen bambu özelinde bakıldığında malzemenin davranışı çevresel yük/kuvvet durumlarına göre belirlenmektedir. Gövdeyi oluşturan lif yoğunluğu ağırlığın fazla olduğu taban kısımlarında yoğunlaşmıştır. Bu sayede rijitliğini korur. Bambunun kuvvetle şekillenen bu yapısı, kabuk strüktürün yük ve destek parametrelerini bilgilendirmek için kullanılmıştır. Bu çalışmanın detayları bölüm 4’te ayrıntılı olarak aktarılmıştır. Bir sonraki başlıkta malzemenin şekil ve strüktürün davranışını belirlediği mekanik özellikleri ve kabukta hafiflik kavramları incelenmiştir.

2.3.1 Hafiflik (Lightweight)

Kabuk Strüktür Form İlişkisi

“Hafiflik kavramı teknolojinin ve fiziğin sınırlarını zorlayarak limitleri sınamaktır ve geleneksel tasarım yöntemlerinde önceliklerin değişikliğini gerektirir.”(Oxman ve Oxman, 2010)

Beukers ve van Hinte (2001) insanlık tarihinde medeniyet ile birlikte yerleşik hayata geçmenin yapıyı nasıl etkilediğini anlatırken, göçebe (nomad) yaşam tarzının önceliklerinden biri olan yapılarda hafif aynı zamanda sağlam malzemelerin tercihine değinmiştir. Bu kavramın sayısal tasarım araçlarındaki teknolojik gelişmeler ve strüktürün sınırlarını zorlama istediği ve taşınabilirlik ile tekrar gündeme geldiğini belirtmiştir.

Form bulma süreci strüktürün belli bir yük altında dengede kalabilecek optimal geometrisini bulmaya yöneliktir. Kabuğun şekli doğrudan kendi güç akışından (flow of forces) üretilir, yük taşıma davranışını ve hafifliğini tanımlar. Yükler lokal olarak, her bir geometriye dağıtılarak, ayrı değerlendirdiği için malzemeyi minimize etmeyi sağlar. Kabuk strüktürde yük genellikle kendi ağırlığıdır (Adriaenssens ve diğ., 2014). Malzemenin seçimi ve miktarı kadar malzemeye nasıl şekil verildiği, kabuk strüktürün hafiflik tanımını ifade eder. Kabukta hafiflik, yalnızca malzemeyi az kullanmak ya da en hafif malzemeyi seçmek şeklinde yorumlanmamalıdır. Hafifliğin verimli bir strüktür için gerekli kalınlığın sağlanması ile sıkı bir ilişkisi vardır.

Kabuğu oluşturan strüktür aynı zamanda strüktürel özelliklerini içinde barındırır. Bu sebeple strüktürün taşıyıcılığı, hafifliği maruz kaldığı yük karşısında rijit ve sağlamlığını sağlamak ön koşuldur. Hafiflik kabuk strüktür söz konusu olduğunda kalınlık, malzeme ve şekil ile iç içe geçmiştir. Kalınlığı arttırarak veya azaltarak malzemeyi minimize etmek mümkündür. Kabuk strüktürlere form pasif denilmesinin nedeni, basınç ve çekme kuvvetlerine karşı şeklinde belirgin bir değişim görülmemesidir. Basınç uygulandığında üzerine etki eden kuvvetlere direnci azalarak yer değiştirmenin neden olduğu burkulma meydana gelir. Kabuk strüktür özelinde burkulmaya karşı eğilme dayanımı ile karşı koyulur. Bu nedenle kabuk, basınç kuvvetini karşılayabilmek için yeterli kalınlıkta olmalıdır (Williams, 2014).

Kabuk malzeme yoğunluğuna bağlı olarak mümkün olduğunca enerjiyi transfer edebilmelidir. Enerjiden bahsedildiğinde ekolojik olma durumu da söz konusudur

(Oxman ve Oxman, 2010). Doğa ve mühendislik minimum enerji kullanmayı temel alma konusunda ortaktır. Malzemenin doğada olduğu gibi minimum enerji kullanarak strüktürel verimliliğe olan etkisi ‘Doğada Malzeme-Strüktür-Form İlişkisi’ bölümünde (3.2) ayrıntılı olarak incelenmiştir. Malzeme açısından bakıldığında bambu gövdesinin dış kısmının eğilme dayanımı (bending strength) dışarıdan gelen kuvvetlere karşı koyabilmek için daha yüksektir. Bambu liflerinin bu özelliği takviye olarak kullanılmaya elverişlidir ve sıklıkla tercih edilir (Jules J. A. Janssen, 2000). Hafiflik esaslı kabuk strüktür örneklerinden, ICD/ITKE tarafından 2014-15 yılındaki çalışmasında, malzemenin davranışı ile strüktürün davranışı entegre edilerek, doğadaki liflerin anizotrop malzeme özelliğinden esinlenerek bir kabuk strüktür tasarlanmıştır (Vasey ve diğ, 2015) (Şekil 2.9). Doğal liflerin yanı sıra karbon fiber ve cam elyafı gibi alternatifler kullanılarak da takviye ile strüktürel hafiflik sağlanmaktadır. Eduardo Torroja, Felix Candela ve Pier Luigi Nervi (Oxman ve Oxman, 2010) kabuk tasarımında takviye ile betonu ince kullanarak hafifliği sağlamıştır. Tez kapsamında strüktürün verimliliğine etkisi bağlamında, mekanik özelliklerin belirlediği malzeme davranışı bir sonraki başlıkta ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.9: a) ICD/ITKE karbon ve elyaf lif ile tasarlanmış kabuk strüktür 2014-15. b) Lif katmanlarından oluşan sayısal model (Vasey ve diğ, 2015) .

2.3.2 Malzemenin davranışını belirleyen mekanik özellikleri

Kabuk Strüktür-malzeme ilişkisi

Malzeme yaşam döngüsü boyunca çeşitli etkilere maruz kalmaktadır. Bunlar mekanik etkiler, termal etkiler, su, nem etkisi, ses etkisi ve fiziko-kimyasal etkilerdir. Gerilme, şekil değiştirme, elastiklik modülü, kayma, akma dayanımı, süneklik, sertlik, kırılma, yorulma, sünme, gevşeme, tokluk ve viskoelastik davranış gibi

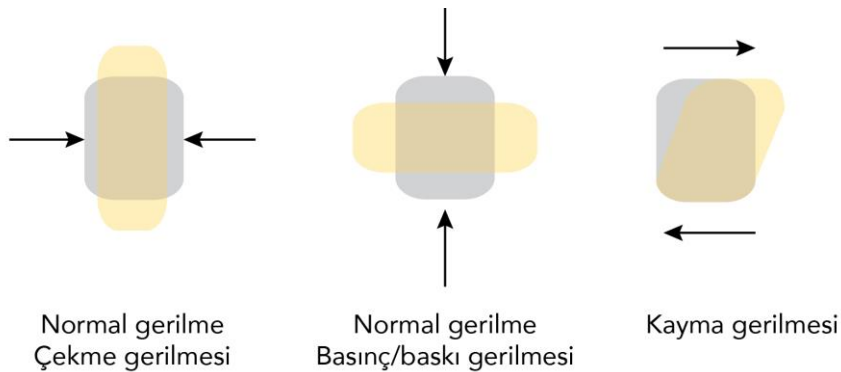
unsurlar malzemenin mekanik özellikleri kapsamında incelenmektedir (Spence ve Kultermann, 2016).

Katı maddenin/cismin (matter) mekanik etkiler/uygulanan kuvvet altındaki davranışı mekanik özellik olarak adlandırır (Simmons, Olin, Schmidt ve Lewis, 2001). Kabuk için strüktürün dengede olmasını kontrol eden parametre, kuvvet uygulandığındaki malzeme davranışdır.

Malzeme ile form arasında sıkı bir bağ vardır. Bu bağ mekanik özelliklerin tanımlanması ile açıklanmaktadır. Mekanik özellikler, malzemenin sınır koşulları ve yüklemelere, yani dış ortam koşullarına verdiği tepkidir. Mekanik davranış, gerilme ve şekil değiştirmelerin incelenmesiyle tanımlanır. Her malzemeye özgü gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi vardır.

Şekil Değiştirme: Cisim kuvvet uygulanmaya başladığında önce şekil değiştirir. Cisim uygulanan kuvvet etkisi altında dayanım gösterir ve dayanımını yitirdiği sınır değerde ise kırılır. Gerilme değerinin düşük olduğu durumlarda elastik yer değiştirme gözlemlenir. Elastik yer değiştirme gerçekleştiğinde cisim eski haline geri döner. Gerilme elastik sınırı aşıyorsa cisim kuvvet kalktığında eski haline dönemez. Bu durumda ise plastik yer değiştirme meydana gelir (Yazıcı, 2013)

Gerilme (Stress): Cismin birim kesit alanına etki eden kuvvete gerilme denir. Kuvvet kesite dik gelerek boyunda değişim yaratıyorsa normal gerilme oluşur. Kuvvet kesit yönünde gelerek cismin açısını değiştiriyorsa kayma gerilmesinden söz edilir (Şekil 2.10). Normal gerilmeler pozitif ise çekme, negatif ise basınç gerilmesi şeklinde ifade edilir.



Şekil 2.10: Gerilme çeşitleri.

Elastik Modülü (E) (Elastic Modulus): Elastik açıdan gerilme ve birim alanda uzama doğru orantılıdır. Bu orantıda doğrunun eğimi elastik modülüdür. Elastik modülü ile eğri ne kadar dik ise malzeme o kadar rijit, ne kadar yatık ise malzeme o kadar esnek olduğu anlaşılır. Elastik modülü üzerindeki atomlar arası bağlar belirleyicidir.

Kayma Modülü (G) (Shear Modulus): Kayma modülü malzemenin ne kadar rijit olduğunu gösterir. Gerilimin gerinime oranını gösteren eğriye kayma modülü denir.

Elastik Limit/Akma Dayanımı (Yield Strength): Malzemenin uygulanan kuvvete karşı bünyesinde kalıcı değişim veya kırılma oluşturacak gerilme sınırı, akma dayanımı ya da elastik limit olarak adlandırılır (Simmons ve diğ, 2001; Spence ve Kultermann, 2016; Yazıcı, 2013).

Anizotrop, İzotrop ve Ortotrop malzeme

Malzemeler anizotrop, izotrop ve ortotrop olmak üzere mekanik özellikleri bağlamında davranışsal farklılık gösterir. Malzeme yönden bağımsız olarak her yönde farklı davranış sergiliyor ise anizotrop, her yönde aynı davranışı sergiliyor ise izotrop, malzeme özelliği birbirine dik doğrultuda farklılaşıyorsa ortotrop malzemedir (Yazıcı, 2013).

Bu bölümde aktarılan mekanik özelliklerinin belirlediği malzeme davranışı, kabuğun strüktürel davranışına etkisi bağlamında simülasyonlar yapılarak, bir dizi analiz yapılmıştır. Bu analizler sonucu, malzemenin strüktür üzerinde belirleyici olan kısıtları ve parametrelerinden gelen geri beslemeler değerlendirilerek malzemeye en uygun formun üretilmesi için strüktürel şekil optimizasyonu yapılmıştır. Malzemenin sayısal parametrelerini belirleyen mekanik özellikleri bambu özelinde ‘Biyolojik rol model bambu’ (3.2.1.1) başlığında ayrıntıları ile aktarılmıştır.



3. MALZEME-STRÜKTÜR-FORM BÜTÜNLEŞİK TASARIM SÜRECİ

Bu bölümde öncelikle form üretiminin geniş anlamını kavrayabilmek için form üretim sürecinde sayısal tasarım araçlarının kullanımı ve malzeme ile ilişkisi irdelenmiştir. Form üretimi ile elde edilen çalışmanın bir süreç olarak ele alınması, bu süreçteki karşılaşılan fırsat ve bulguların, çalışmada yeni olanı keşfetmedeki önemi vurgulanmıştır. Mimarlık disiplininde yeni yöntem arayışları, sayısal tasarım araçlarının yarattığı potansiyellerin kullanılmasıyla biyomimikri yöntemi sıklıkla araştırmaya başvurulmuş bir konu olmuştur. Sayısal tasarım araçlarının kullanımına paralel olarak doğal sistemler araştırılabilmiş, mimari tasarım süreçlerine ve sistemlerine aktarmak mümkün olmuştur. Bu bağlamda tezin bu başlığı altında doğadan esinlenen tasarım olan biyomimikri kavramı tanımlanarak, bu kavramın mimarlık alanına uygulanmasında kullanılan yöntemler açıklanacaktır. Doğadaki var olan biyolojik strüktürlerin yöntem ve davranışları aktararak, doğal strüktürlerin form ve malzeme ile olan sıkı ilişkisi kabuk-malzeme-form bağlamında ortaya koyulmuştur. Doğadaki bu ilişkinin mimarlık ve mühendislik alanına uygulanmasına esin kaynağı olan özellikleri aktarılmış, sayısal tasarım araçları ile biyomimikri yöntemine başvurmanın paralelliğine değinilmiştir. Mekanik doğaları nedeni ile sayısal mekanizmalar insan olmayan oluşumlar olarak algılanır, böylece uzak ve dolaylı olarak kabul edilir (Terzidis, 2003). Bu tez ile beden olarak tasarımı deneyimlemenin mümkün olmadığı sayısal tasarım ortamlarında bu durumu en aza indirmek için çevresel faktörlerin etkisi sayısal tasarım ortamına aktararak üretim aşamasına geçmeden süreç ile gerçeğe yakınsamak, form, malzeme ve strükture eş öncelik ve önem veren tasarım süreci kurgulamak ve deneyimlemek amaçlanmıştır. Tez ile yapılan çalışmada, kabuğun strüktürel davranışı ve malzeme davranışının bütünlük tasarım süreci ile oluşturulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda sayısal tasarım araçlarını bilgilendiren malzeme davranışı, doğadaki seçilen model bambunun mekanik özellikleri, parametre ve kısıtları, bu bölümde aktarılmıştır.

Teknolojik gelişmeler dijital ortamda yaratılan gerçeğe yakın görsellerin üretilmesini mümkün kılmış ve bu durum görselle ilgili bir saplantıya neden olmuştur. Çoğu zaman, kavramsal yapıların veya görsel nesnelleştirmelerin (visual objectification), aslında kavramsal indirgemeleri aşan bir gerçekliğin doğruluğu olduğu varsayılmaktadır (Perez-Gomez, 2002). “Fenomenler belirli davranışların göstergesi olabilirken, görünüşler genellikle aldatıcıdır.” (Terzidis, 2003) Bu açıdan nesneleştirmeye verilen önem tüm boyutları ile ele alınarak doğru yorumlamayı gerektirmektedir, aksi halde araçsal yaklaşımlar malzeme, form, strüktür gibi tasarımın temel öğelerinde kopukluğa neden olmaktadır. Daha açacak olursak dijital ortamlar; tarih, kültür, mekanın özellikleri gibi kavramları göz ardı ederek tasarım yapılması ya da bu kavramların yeniden yaratılması anlamına gelmemektedir. Bilgisayar ve dijital ortamların mimari tasarım araçları olarak kullanılması, tarih, kültür gibi geleneksel tasarım yöntemlerinde önem arz eden kavramlar ve somutlaştırma bilinci (embodied consciousness) ile mekanın ele alınmasında (tasarımı mekanın yönlendirmesi ile) tam bir ihmal sonucunu doğurmuştur (Perez-Gomez, 2002). Sayısal tasarım metodları ile formal keşif ve ifadeye odaklanılmıştır. Sayısal tasarım araçları formun keşfine yeni yöntem ve olanaklar getirirken mekan ve zaman ilişkisine yeni bakış açıları ile çözüm üretme olanağı yaratmıştır. Meydana gelen bu yeni form üretme olasılıklarını anlamak için iki yaklaşım baskın olmuştur. Bu yaklaşımlar, süregelen teori ve pratiğin tekrardan yenilikçi olarak yorumlanması ya da mimarlık disiplinin dışında tutulan, yabancı mekanizma ve konseptlerden türeyen, “önceliği olmayan” (unprecedented) temaları araştırmak üzerine kuruludur (Terzidis, 2003). Bu bağlamda form bulma çalışmalarında sayısal tasarım ortamları yeni bir deney, araştırma, keşif alanı sağlar. Sayısal tasarım araçlarının yarattığı serbest form üretebilme olanağı ve tasarımcıya sağladığı organik form üretebilme özgürlüğü gibi keyfi yaratıcılık ya da hesaplamalı determinizim yerine, hesaplamalı yaratıcılık ya da yaratıcı hesaplama şeklinde kullanıldığında istenilen sonucu almak mümkün olacaktır (Oxman, 2010; Terzidis, 2003). Aksi halde Perez-Gomez (2002), sayısal tasarım ortamları ve dijital araçlar matematik modellerinden ayrı düşerek form egzersizinden öteye gidemeyeceğini vurgulamıştır. Mimarlığın; insanlığımızı, düşünme yeteneğimizi ifade eden dikeylik, tarihsellik; bizi biz yapan kültür, tarih gibi etmenler ve bedenimizle deneyimlediğimiz, içine doğduğumuz dünya; yer çekimi olarak nitelendirdiği kavramlarından giderek uzaklaştığını belirtmiştir. Bu durum sonuçlarını mimari tasarımda araçsal bir

uygulama olarak değerlendirmek yerine, mekanla bağ kuran bir süreç olarak değerlendirilmesi gerekliliğini belirtmiştir. Ortaya çıkan çalışmayı süreç olarak değerlendirmenin yalnız bir formal keşif olarak değil, somutlaştırma yaratmanın aynı zamanda etik açıdan üretim oluşunun altını çizmiştir.

“Form daima, tamamen maddeden ortaya çıkan bir sonuç olarak algılanmamıştır. Form aslında belirli bir geometrik karaktere sahip soyut bir oluşumdur.” (Terzidis, 2003) *Expressive Form* kitabında Terzidis (2003), formun her ne kadar özerk olarak değerlendirilsede, örüntü, düzenleme, şekillenme gibi alternatif terimlerin kullanılması formun sözsüz aktarım yapabilen özelliğinin daha geniş bir şekilde anlaşılmasını sağladığını ve malzemenin özelliklerinden ayrı olarak düşünülmesinin formun davranışını kısıtlarından kurtardığını belirtmiştir. Bu bağlamda malzemenin özelliklerinin formun davranışına doğrudan etkili olduğunu söylemek mümkündür. Bu durum formdan çok form oluşum sürecinin önemini vurgulamaktadır.

Dijital ortamlarda üretilen süreçler genellikle, araçsallığın, tasarımcıların, bilimsel ya da organik doğal prensipte kültürel özgünlük ve temel tasarım sorusunu es geçmelerine neden olabilmektedir. Bu durumda bir kopukluk ortaya çıkar. Perez-Gomez (2002), bir bütün olarak ele alınan süreçlerin beklenmedik fırsatları keşfetmeyi mümkün kıldığını Le Corbusier’in Poema’sından örnek vererek sürecin önemini vurgular. Le Corbusier Poema’da yaratıcı çalışmada fikir gelişim sürecinin önemli olduğunu gösterir ve sabrın önemini vurgulamıştır. Sürecin Le Corbusier’in mimari anlayışına ne kadar çok şey sunduğunun farkında olduğunu, çünkü sürecin 'yeni şeyler', 'beklenmedik' ve 'bilinmeyen' ortaya çıkardığını vurgulamıştır. Bir diğer örnek Pacioli’nin portrelerinde, hiç bir şeyin fazladan ve tesadüfen ortaya çıkmadığını, formların Öklid öğretisindeki gibi porsiyonların bölünmesiyle oluştuğunu vurgulamıştır. Benyus (2005, s.7), doğada da aynı durumun söz konusu olduğunu, hiç bir şeyin tesadüfen ve fazladan üretilmediği, sistemlerin doğal seçim, mutasyon ve rekombinasyon gibi doğal ilkelerle son hallerini alan bir süreç olduğunu ve malzeme-strüktür ve formun eş önceliğe sahip sürecinde bir optimizasyonun varlığından bahsetmiştir. Doğadaki strüktürlerin minimal yüzeylerle oluşması, geometrilerin bölünlenerek optimal formdaki strüktürleri oluşturması yine doğa ile Perez-Gomez’in Pacioli örneğindeki form oluşum sürecinin ile örtüşmektedir. Bu bağlamda sayısal tasarım araçlarının mimari tasarımda kullanılması ile yeni yöntem

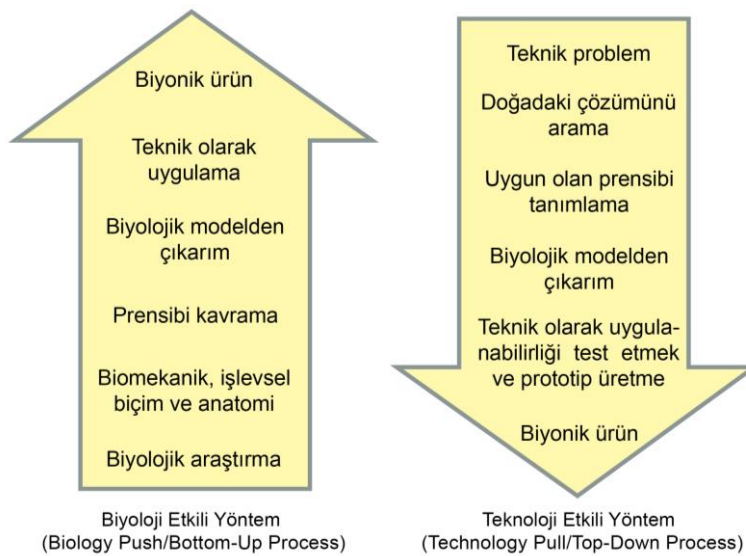
arayışları ve potansiyellerin ortaya çıkarılması, doğadaki yöntemlerin araştırılmasına ve çıkarım yapmaya olanak sağladığını söylemek mümkündür.

3.1 Doğadan Esinlenen Tasarım: Biyomimikri

Mimarlık ve mühendislik alanındaki teknolojik gelişmeler, mevcut malzemelerin daha önce yaygın olarak kullanılmayan ya da negatif sayılan özelliklerinin yeniden ele alınmasını tetiklemiştir. Biyomimikri doğada hali hazırda var olan biyolojik modelleri inceleyen ve sıklıkla mimarlık, tıp ve mühendislik alanlarındaki problemleri çözmek için bu modellerdeki tasarımlardan ve süreçlerden esinlenen veya ilham alan çalışmalardır (Benyus, 1997). Biyomimikri terimi 1960’larda Amerikalı Mühendis Otto H. Schmitt tarafından, yunanca bios (hayat) ve mimesis (taklit) kelimelerinden türetilmiştir. (Schmitt, 1969) Biyomimikri, tasarımcıların tespit ettiği problemleri, doğada var olan daha sürdürülebilir ve verimli yöntemlerle çözmek için, araştırmaya başvurdukları bir konu olmuştur. Başka bir ifade ile doğada bulunan ilkelerin soyutlanması için bir yöntemdir. Bu yöntemle, tasarımcıların, mimar, mühendis ve biyologların, doğayı gözlemleyerek, doğanın içinde mevcut olan sistemlerin tasarımlarına yenilikçi çözümler getirmesi amaçlanır.

3.1.1 Biyomimikrinin mimarlık disiplinine uygulanma yöntemleri

Biyomimikrinin uygulanma yöntemleri temelde iki başlık altında toplanabilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Biyomimikri yöntemlerinin süreçleri, biyoloji etkili ve teknoloji etkili yöntem (Knippers ve Speck, 2012).

Biyolojik etkili yöntem: Öncelikle doğadaki belirli bir biyolojik özellik, işlev ya da davranış tespit edilir. Bu tespitten yararlanarak tasarımcıların tanımladığı bir problemi çözmek için kullanılan yöntem, *biyoloji etkili yöntem* (aşağıdan yukarı yöntem) olarak tanımlanır (Aziz ve El Sherif, 2016). Bu yöntemde ilk aşama biyolojik sistemin mekanizmasını ve işleyiş biçimini analiz etmektir. Daha sonraki aşama biyolojik strüktürün, şeklin ve işleyişin detaylı analizi sonucu, prensibini kavramak ve ardından seçilen biyolojik modelden çıkarım yapma aşamasıdır. Son olarak bu çıkarımdan teknik uygulamaya geçilerek yeni üretim yapılır. Başarılı bir biyomimikri uygulaması için, mimarlık, mühendislik, fizik ve kimya alanlarında iş birliği ile yürütülen çalışmalarda, biyolojik modelden esinlenilen içerik açık ve net bir şekilde belirtilmelidir. Böylece biyoloji uzmanlarının dışındaki farklı disiplinler biyolojik modeldeki analizleri net bir şekilde kavrayarak biyolojik modelden çıkarım yapabilir (Speck ve Speck, 2008; Zari, 2007; Kingsford, 2009).

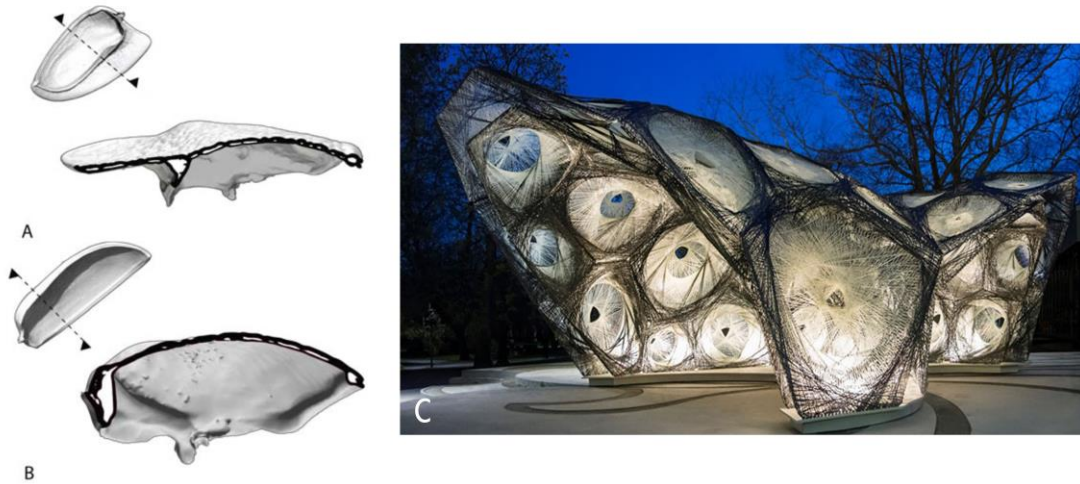
Bu uygulama yöntemi ile doğadaki modellerden çıkarım yapılan aşamada, doğal sistemleri daha işlevsel açıdan, süreçleriyle ve doğanın kendi yöntemleri boyutuyla algılamak, araştırmak için birçok tasarım yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi Achim Menges tarafından yürütülen, liken biyolojik strüktürü ile interaktif olarak form bulma çalışmasıdır (Ladurner, Gabler, Menges, ve Knippers, 2012). Bir diğer örnek olarak, ICD/ITKE tarafından, eklem bacaklı üst derisinden, yengeç kabuğu ve su örümceğinden esinlenerek yapılan pavyon tasarımları verilebilir (Vasey ve diğ, 2015; Weigele ve diğ, 2013; Yunis ve diğ, 2014).

Teknoloji etkili yöntem: İlk olarak problem ve sınırlarının net bir şekilde tanımlanarak daha sonraki aşamada problemin doğadaki çözümünün araştırıldığı yöntemdir (yukarıdan aşağı yöntem). Biyoloji uzmanları teknik sorunun olası çözümü için doğayı gözlemleyerek elde ettikleri bulguları toparlar ve sürdürülebilir tasarımlar elde etmek için doğa modelini daha detaylı analizlerle inceleme aşamasına geçerler. Bundan sonraki adım biyoloji etkili yöntemde olduğu gibi elde edilen doğa modellerinden sonuç çıkarımına ve teknik uygulamaya geçilmesidir. Ardından, biyomimikri bağlamında optimizasyonu sağlanmış ilk prototipler üretilir ve performansları test edilir (Speck ve Speck, 2008, Zari, 2007 ve Kingsford, 2009).

3.1.2 Biyomimikri düzeyleri

Biyoloji etkili ve teknoloji etkili yöntem ile mimarlık, mühendislik gibi alanlara uygulama yöntemlerinin yanı sıra doğadan esinlenme form, süreç ve sistem şeklinde üç farklı *düzeyde* (level) ele alınabilir (Biomimicry Guild, 2007). Zari'ye (2008) göre ise var olan biyomimikri uygulamalarını organizma, davranış ve ekosistem düzeyinde incelemek mümkündür. Ayrıca bu düzeylere ek olarak biyomimikri örneklerinin nasıl görüldüğüne (form), ne ile yapıldığına (malzeme), nasıl yapıldığı (konstrüksiyon), nasıl işlediği (süreç) ve ne yapabilir olduğuna (işlev) göre alt düzeylere ayırmıştır.

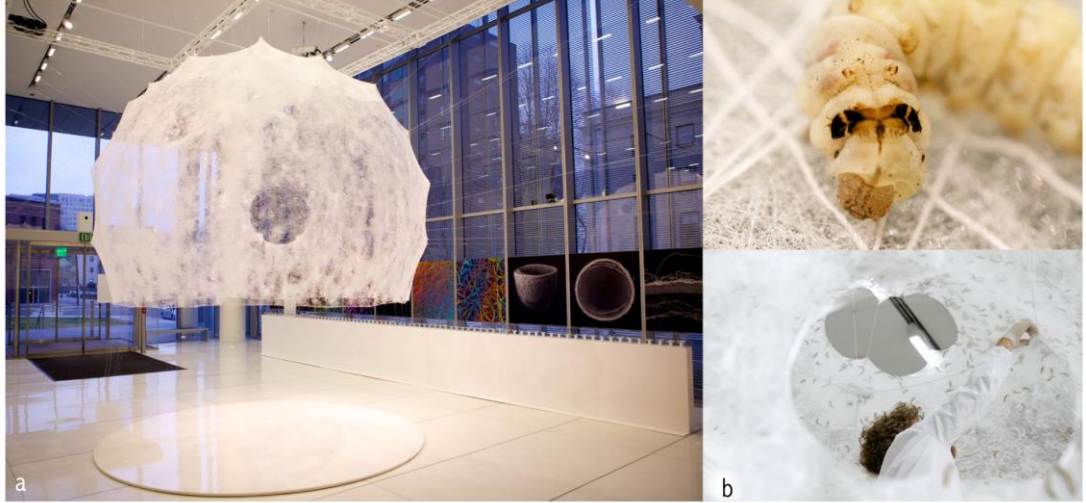
Organizma Düzeyinde Biyomimikri: Bir bitki ya da hayvanın bir kısmından ya da tamamından esinlenme anlamına gelir (Zari, 2006). Eklem bacaklıların üst derisinden (Elitra) esinlenerek tasarlanan, ICD/ITKE 2013-14 pavyonu organizma düzeyinde biyomimikri uygulamasıdır (Şekil 3.2). *Elitra*, trabeküler (boşluklu) yapısı sayesinde canlı uçarken kanatları, basınç ve bükülme kuvvetlerine karşı direnç gösterir. Elitranın bu boşluklu yapısından faydalanarak lif takviyeli, çift katmanlı hafif sistem, çekirdeksiz sarmal modüller, iki robotlu sağlam bir düzenekle üretilmiştir. Bu sayede strüktürel tasarımda minimum tutulan malzemenin dayanıklılığı artmıştır ve liflerle geometrik performansa dayanan parametreler geliştirilmiştir (Yunis ve diğ, 2014).



Şekil 3.2: a) Cassidia böceği kesiti. b) Chrysomela vigintipunctata böceği kesiti. c) ICD/ITKE 2013-14 araştırma pavyonu (Yunis ve diğ, 2014).

Davranış Düzeyinde Biyomimikri: Bir organizmanın tek başına davranışından ya da daha geniş çevre ile kurduğu ilişkilerinden esinlenmedir (Zari, 2006). Davranış düzeyinde uygulama, form ve malzeme optimizasyonu amaçlanarak *Bombyx mori*

ipek böcekleri tarafından ağ örülerek üretilen *Silkpavilion*'dur (  kil 3.3). Lif yoğunluğundaki ve organizasyonundaki değişikliğin, ipek böceğinin ve strüktürün bulunduğu   vre tarafından verilen morfolojik kısıtlamaları yansıtmaları sağlanmıştır. Böylece malzeme özellikleriyle pavyonun bulunduğu ortamın birbiri ile uygunluğu ve entegrasyonu sağlanmak istenmiştir (Oxman, 2012).



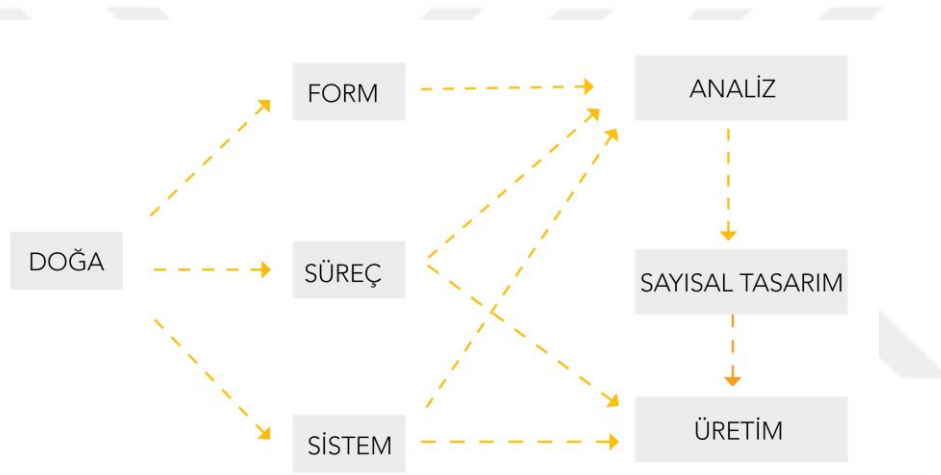
  kil 3.3: a) Silkpavilion. b) CNC ile üretilen strüktürün etrafına ipek böcekleri tarafından örülen ağ (Oxman, 2012).

Ekosistem Düzeyinde Biyomimikri: Ekosistem düzeyinde esinlenme, bütüncül olarak ekosistemden ve bu ekosistemin başarıyla işlevini yerine getirmesini sağlayan genel ilkelerinden esinlenmedir (Kingsford, 2009).

Farklı biyomimikri düzeyleri arasında örtüşmeler mümkündür ve bazı biyomimikri düzeylerinin kesin sınırlarla birbirinden ayrılmadığı görülmektedir. Örneğin bir dizi biyolojik sistem, ekosistem düzeyinde biyomimikri oluşturabilir ve bu sistemler detaylı incelendiğinde ekosistemi oluşturan tek bir organizmadan ya da organizmanın davranışından esinlenme söz konusudur. Aynı zamanda bir ekosistem çok sayıda organizma arasında var olan karmaşık ilişkilerden oluşabilir (Kingsford, 2009).

Sayısal   retim tekniklerinin gelişmesinin etkisi ile doğanın tek bir özelliğinden esinlenerek tasarımlarda yarar sağlamanın yerini dijital tasarımı bilgilendiren ‘‘hesaplama aracı’’ olarak faydalanmaya bıraktığı söylenebilir (Oxman, 2012). Biyomimikri uygulamalarında tek bir form, süreç ve sistem düzeyinde esinlenmek yerine süreçlerin ve sistemlerin tüm tasarım sürecine entegre olması ile istenilen verimlilik sağlanabilir (  kil 3.4). Tez kapsamında yapılan çalışmada biyoloji etkili yöntem kullanılarak bambudan organizma ve davranış düzeyinde esinlenilmiştir.

Bambunun formunu oluşturan liflerin sıklığı içinde bulunduğu çevreden gelen kuvvetlere göre değişmektedir. Örneğin yer çekimi ve kendi ağırlığından kaynaklanan kuvvetlere dayanımını arttırmak için gövdenin taban kısmı uç kısmına göre daha kalındır ve lifler sıklaşır. Bu sayede üzerine uygulanan kuvvetler karşısında rijit yapısını koruyabilmektedir (Ghavami, 2005). Bununla birlikte yapı malzemesi olarak da kullanılan bambunun mekanik özellikleri, elastik modülü, kayma modülü, elastik limit ve özgül ağırlık değerleri sayısal tasarım aracına parametre olarak tanımlanmıştır. Böylece malzemenin mekanik özellikleri strüktürün mekanik davranışını doğrudan bilgilendiren bir hesaplama aracına dönüştürülmüştür. Bambunun oluşturulan model bağlamında ele alınmasını sağlayan özellikleri 3.3 başlığında detaylı olarak aktarılmıştır.



Şekil 3.4: Biyomimikrinin mimari tasarımlara uygulanması aşamaları.

3.2 Doğada Malzeme-Strüktür-Form İlişkisi

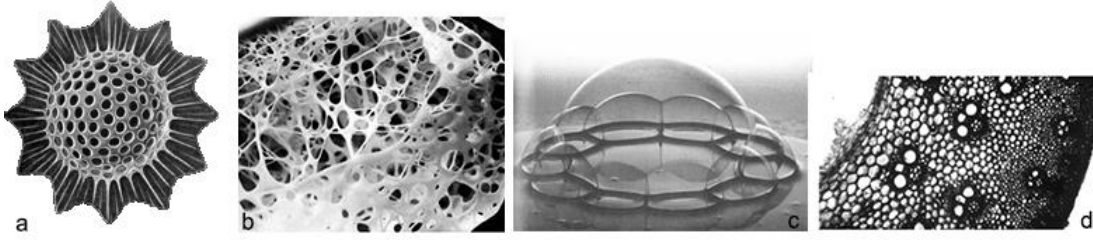
Doğada malzeme-strüktür-form bir arada, bir bütünü oluşturacak şekilde bir süreçte sahiptir. Bu bütünleşik süreç sayesinde doğadaki var olan formlar en verimli şekilde üretilir. Formlar; malzeme, sağlamlık, hafiflik, boyut, enerji korunumu açısından en iyi orana sahiptir (Benyus, 1997). Bu bölümde tez kapsamında oluşturulan modelde kullanılan Voronoi geometrisinin biyomimikri bağlamında ilişkisi ortaya koyulmuştur, doğadaki strüktürlerden bahsedilmiş ve form, malzeme ile ilişkisi üzerinden aktarılmıştır.

Form-Kabuk Strüktür-Malzeme

Doğaya bakıldığında enerji ve madde/malzeme birlikte bahsedilmesi gereken iki terimdir. Strüktürler, moleküler içsel kuvvetler ve yerleşik gerilimler, aynı zamanda tüm çevresel etkileri kapsayan dışsal kuvvetler gibi (örneğin yer çekimi kuvveti) her mevcut kuvvet altında dengeyi bulmak zorundadır (Beukers ve van Hinte, 2001). Bu bağlamda doğa ve strüktürel tasarım minimum enerji kullanımını temel alma konusunda ortaktır. Daha ayrıntılı bahsetmek gerekirse “Evrin sürecinde biyolojik organizmalar, çok işlevli (multi-function) çözümler geliştirerek seçim ve etkileşim yoluyla karakterlerini sürekli değişen çevre koşullarına uyarlamıştır.” (Knippers & Speck, 2012, s.1) Bu, hem organizmanın kendi içinde hem de yaşamın çeşitli işlevleri arasında enerjinin optimal olarak paylaştırılmasında verimliliği gerektirir. Minimum envanter, maksimum çeşitlilik (minimum inventory, maximum diversity) ile enerjinin minimum kullanıldığı sistemlerde, benzer parçaların farklı kombinasyonları ile çeşitlilik yakalamak mümkündür (Pearce, 1978). Kullanılan malzeme ve yöntemlerle yaratılan küçük farklarla, strüktürel formlardan çeşitli alternatifler türetilebilir.

Kuvvetlerin madde üzerinde, her tarafına 2 boyutta etki ederek oluşturulduğu hücrel formlarda minimum enerji ile strüktürün oluşturulduğu görülür. Kabuklar genişleyen sitoplazmanın dış katmanlarında peş peşe form alır, doğada iskeletsi büyüme merkezin dışına doğru gerçekleşir. Bu durum gözenekli strüktürün uzayarak minimum uzunlukta hegzagonal bölünmeye zorlanması ile açıklanır (Beukers ve van Hinte, 2001, s.50).

Pearce (2009) bir düzeleme rastgele noktalar koyulduğunda, bu noktalar arasındaki toplam mesafeyi minimize etmek için, noktaların üçler grubu (threes) ile çizgi segmentlerini oluşturduğunu göstererek, minimum yüzeyleri noktalarla açıklamıştır. Mesafeyi azaltarak oluşturulan bu segmentler minimum enerji strüktürünün tanımıdır. Bunun en iyi örnekleri üçgenler, hegzagonlar, çok yüzlüler, hücrel geometrilerdir. Ernst Heackle’ın incelediği tek hücreli, gözenekli yapıya sahip radyolarya (ışınılılar), sabun köpüğü, insanın kemik dokusu, bambunun gövdesi, malzemeyi en verimli şekilde kullanarak minimum enerji ile strüktürü oluşturan modellerdir (Şekil3.5).



Şekil 3.5:Minimum enerji strüktürlerine örnekler; a) radyolarya (Url-2). b) İnsan kemik yapısı (N. Oxman ve diğ, 2010, s.58). c) Sabun köpüğü(Pérez García ve Gómez Martínez, 2009, s.896). d) Bambu en kesiti (Erdine, 2013, s.175).

Doğadaki Strüktürler

Doğaya bakıldığında strüktürel düzenlemeler *pneu*, kabuklar, ağaç, ağ benzeri ve iskelet benzeri strüktürler olarak kategorize edilebilir (Arslan ve Sorguc, 2004).

Pneu'lar; Açıklık ve kütle açısından verimli strüktürlerdir. Frei Otto'nun sabun köpüğü ile yaptığı strüktür çalışmaları buna örnektir.

Kabuklar; Çekme ve/veya gerilme ile dengede olan, yük taşıyabilen, rijit strüktürlerdir. Kesikli ve kesiksiz olarak ayrılırlar. Kesiksiz kabuklarda (deniz kabuğu, denizkestanesi) ışık alabilen açıklıklar yoktur, kesikli kabuklular (radyolarya) ışık geçiren örüntülere sahiptir. Kesikli kabuklarda boşluklar olduğu için malzeme tüketimi azdır ve kuvvetlere karşı dirençleri yüksektir, bu açıdan mimariye uygulanmaya çok uygundur (Pérez García ve Gómez Martínez, 2009). Tez kapsamında üretilen modelde, doğadaki kesikli kabuk strüktürlere benzer bir kabuk sistemi çalışılmıştır.

Ağaç benzeri strüktürler; Ağaçlardaki dallanma benzeri bir strüktürel oluşumdur.

Ağ benzeri strüktürler; Membrana benzer karakter sergileyen, hafif, tente benzeri strüktürlerdir.

İskelet benzeri strüktürler; insan ve hayvanlardaki kemik yapısını andıran boşluklu, hafif ve sağlam strüktürlerdir (Arslan ve Sorguc, 2004; Pérez García ve Gómez Martínez, 2009).

Doğanın bu özellikleri, teknoloji ara yüzü ile en uygun şekilde yorumlanarak, strüktürlerde farklı şekillerde enerji verimliliğini arttıran tasarımlar geliştirmeyi sağlar. Doğa, biyoloji ve teknoloji arasında ortak bir anlayış vardır. Mimari çevremiz oluşurken doğadaki rol modeller büyük bir etkiye sahiptir. De Castro (2006) doğadan esinlenerek tasarım teknikleri, araçları ve teknolojileri geliştirilmesini *Natural*

Computing “**Doğal Hesaplama**” terimini kullanarak açıklamıştır. Doğal hesaplama ile birçok kompleks problemin çözümü biyoloji, doğa yolu ile sağlanmıştır. De Castro (2006) doğal hesaplamaı üç kategoriye ayırmıştır; araştırma ve optimizasyon, simülasyon, fiziksel modellerin yaratılması. Tez bağlamında malzemenin gerilimi simülasyon ile test edilmiştir, kullanılan evrimsel algoritmalar yöntemi, doğal hesaplamanın araştırma ve optimizasyon kategorisine girmektedir. Araştırma ve optimizasyon için algoritmalar yaratılmaktadır ve bu algoritmalar mühendislik ve mimarlıktaki kompleks tasarımları çözmek için doğadan esinlenerek geliştirilir.

Kabuğun şekli ve malzeme ile ilişkisi bağlamında; Oxman (2010), doğa gözlemlendiğinde “şekil malzemeden daha ucuzdur” genel görüşüne farklı bir görüş ile malzemenin verimli bir şekilde strüktür ve form yaratması ile daha ucuz olacağını vurgulamıştır. Bu bağlamda strüktörü oluşturan detayların tasarımı ile verimliliği sağlamanın mümkün olduğu görülür. Doğada malzemenin akıllıca kullanımı ile bütünü oluşturan parçaların hücresele geri bildirim mekanizması, malzemeye nerede daha çok ihtiyaç varsa büyümeyi oraya yönlendirerek adapte olabilen strüktürleri oluşturur. Doğanın bu özelliği sayısal tasarım aracına aktararak Grasshopper’ın Karamba eklentisinde malzemenin belirlediği strüktürün gerilim bölgelerine simülasyonlarla test edilmiş ve strüktürel geri bildirimlere göre malzemenin tasarım parametreleri değiştirilmiştir. Model bağlamında, geometrilerin dengeyi sağlamada önemli rol oynadığı kabuk strüktürde, doğada sık rastlanan Voronoi hücreleri kullanılmıştır. Voronoi hücreleri başlangıçta oluşturulan hiper-eğrisel kabuğu grid kabuktaki sistem ile hücrelere bölmüş, kesikli hale getirmeyi sağlamıştır. Bu sayede minimum yüzeyde strüktür, hafif ve enerjiyi verimli bir şekilde dağıtan, aynı zamanda malzeme kullanımını da minimize eden kabuk elde edilmek hedeflenmiştir.

3.3 Biyolojik Rol Model Olarak Bambu

“Maddenin (matter) şekli doğrudan üzerine tesir eden kuvvetlerin etkisi ile sıkı bir bağa sahiptir.” (Vogel ve DeFerrari, 2003)

Malzemenin mekanik özellikleri ve içinde bulunduğu çevreden gelen kuvvetler tasarım parametrelerini belirler. Doğadaki malzeme davranışı, formun ortaya çıkabilmesi için bir ön koşuldur. Doğada çevrenin fiziksel koşullarının optimal şekli oluşturduğu gözlemlenmiştir (N. Oxman ve diğ, 2010).

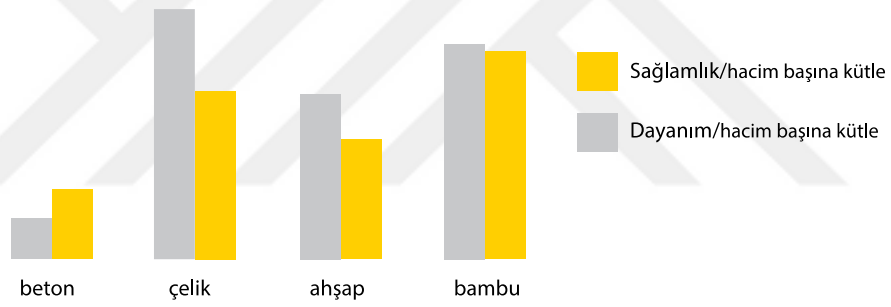
Yapı malzemesi seçilirken genelde işlevsellik, maliyet ve teknik gereklilikleri göz önünde bulundurularak seçim yapılır. Fakat sürdürülebilirlik kavramı beraberinde çevresel yük durumlarına göre malzeme seçmeyi yaygınlaştırmıştır (van der Lugt, van den Dobbelsteen; Janssen, 2006). Bununla beraber enerjiden tasarruf eden, tüm süreçlerde çevreye atık bırakmayan (non-polluting) malzemelerin tercih edilmesinde artış olmuştur. Bu durum ekolojik dengenin doğada nasıl korunduğu gözlemlenerek mimari ve strüktürel problemlere çözüm alternatifleri üretmeyi tetiklemiştir. Mekanik açıdan strüktürel verimliliğin sağlanması için, belirlenen sağlamlık veya dayanımdaki kirişler ve plakalar ya da burkulma direnci göz önüne alındığında kolonları oluşturan malzemelerin seçimi oldukça önemlidir. Bu bağlamda ahşap, palmye ve bambu doğada var olan en verimli malzemelerdendir (Ashby, Gibson, Wegst ve Olive, 1995). Janssen (2000) bambu ile yapılan testler sonucu, bambunun yapı malzemesi olarak incelenmesi ile mekanik özelliklerinin sayısal değerlerini “bambu ile tasarım ve inşa etme” kitabında derleyerek aktarmıştır. Bambu numunesi, plakalar arasına alınarak, belirli yükler uygulanmış, baskı/basınç, eğilim ve kayma testlerine tabii tutulmuştur (Şekil 3.6). Malzemenin en önemli mekanik özelliklerinden biri birim hacmine düşen ağırlığı yani yoğunluğudur (öz ağırlık, kN/m³). Çoğu bambu için yoğunluk değeri 0.70-0.80 kN/m³ arasında değişir. Bu değer, sağlamlık üzerinde etkili olduğu için önemlidir ve değerın yüksek olması birçok açıdan istenen bir özelliktir. Örneğin, eğilme gerilimi üzerinde belirleyicidir, dolayısıyla malzemenin gerilime dayanımını etkiler (Janssen, 1981).



Şekil 3.6: Bambu kayma (shear), baskı (compression) (Correal D & Arbeláez C, 2010), eğilme (bending) testleri (Url-3).

Bambunun diğer malzemelerle karşılaştırıldığında sağlamlık ve dayanım grafiği Şekil 3.7’de görülebilir. Kütlenin yoğunluğa bölünmesi ile hesaplanan dayanım karşılaştırmasında en elverişsiz olan malzeme beton, daha sonra ahşaptır. En iyi dayanıma sahip malzeme çeliktir ve ondan sonra bambu gelir. Sağlamlık, elastik

modülünün yoğunluğa bölünmesiyle hesaplanmıştır ve en iyi sağlamlığa bambu sahiptir. Bambuyu sırası ile çelik, ahşap izlemiştir. Bunlar arasından en az sağlamlığa sahip malzeme ise betonudur. Gerilmeyi karşılamak için birim başına üretilmesi gereken enerji bağlamında kıyaslandığında, çelik, bambudan 50 kat daha fazla enerjiye ihtiyaç duyar (Ghavami, 2005; Janssen, 2000). Boşluklu tüp (hollow tube) yapısından dolayı ahşap kirişlere göre çok daha verimlidir (van der Lugt ve diğ., 2006). Boşluklu yapısı burkulmaya dayanımı arttırmakta, bununla birlikte malzemeyi minimize ederek sağlamlığı ve rijitliği de sağlamaktadır. Ahşaba göre daha hızlı büyüyerek maksimum mekanik dayanıklılığına hızlıca ulaşabildiği için daha ekonomiktir. Bu bağlamda yapı malzemesi olarak tercih edilen doğal malzeme bambu, ahşaba göre daha elverişlidir. Çelikle kıyaslandığında ise enerji gerekliliği açısından daha avantajlı olması nedeni ile daha ekonomiktir. Bahsedilen tüm bu özellikler bambunun mimari ve strüktürel açıdan sürdürülebilir uygulamalar için potansiyelini ortaya koymaktadır.

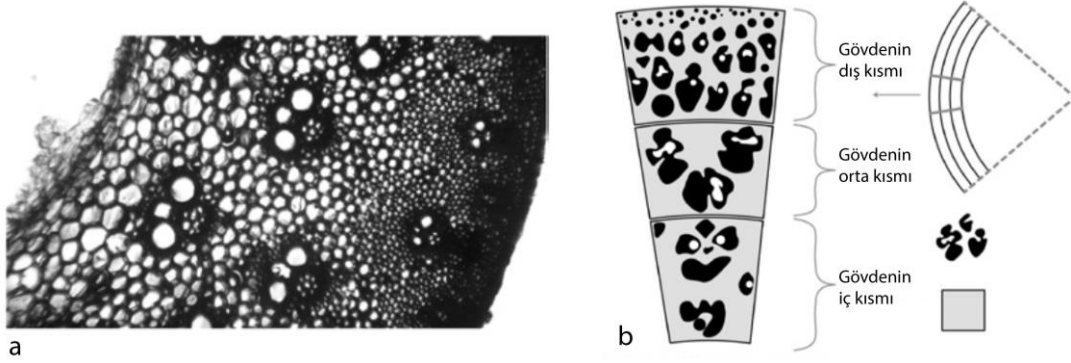


Şekil 3.7: Bambunun diğer malzemelerle sağlamlık ve dayanım karşılaştırması (Janssen, 2000).

Bambunun Karakteri

Bambular sanılanın aksine ağaç değil devasa otlardır. Gövdesi %40 oranında lif, %10 damar ve %50' si parankimadan (destek ve dolgu sağlayan özel doku) oluşur. Lifler odunsu bir matrise gömülü, uzun ve paralel şekilde, bambunun formunu oluşturur. Liflerin dağılımı bambu gövdesinin tepe ve orta noktalarına kıyasla tabanında daha sıktır. Gövdenin dış kısımları da daha sık bir lif yoğunluğuna sahiptir (Şekil 3.8). Bu durum, bambunun bulunduğu ortamdaki gerilim dağılımına göre şekillendiğini gösterir (Ghavami, 2005). Bu sayede rüzgarın ve çevreden gelen diğer kuvvetlerin neden olduğu maksimum eğilme gerilimi ve kendi ağırlığını taşıyabilir. Bambu gövdesi eksenel yüke (kendi kütesinden) ve eğilme momentine (rüzgar yüklerinden) direnç göstererek, strüktürel olarak, kiriş-kolonlar gibi davranır (Gibson ve diğ.,

1995). Gövdenin dış kısmının daha sık lif yoğunluğuna sahip olması, gerilim, kayma ve eğilme mukavemeti için olduğu gibi elastik modülü açısından da pozitif çalışır (Tular ve Sutidjan, 1978). Bambunun üzerine etki eden kuvvetlere ve kendi ağırlığına göre liflerin farklı yoğunluk gösteren özelliği, kabuğu oluşturan strüktürel elemanlarının dağılımı için bir model olarak hizmet edebilir.



Şekil 3.8: a) Gövde en kesiti. b) En kesitte lif yoğunluk dağılımı (Erdine, 2013).

Bambu gövdesi boğum ve boğum aralarından oluşmuştur (Şekil 3.9). Boğumları birbirine bağlayan diyaframlar, boğum aralarının boş kalması ile içi boş (hollow) silindirik bir kabuk oluşturur. Bu içi boşluklu yapı bambu gövdesinin yüksekliği boyunca burkulmaya dayanımını artırır. Bununla birlikte kendi ağırlığını minimize eder ve yer çekimine karşı eğilme direnci gösterir (Erdine, 2013; Ghavami, 2005). Diyafram, ara boğumlar ve bambunun kalınlığı birbiri ile ilişkilidir. Yer çekimi ile kendi ağırlığı ve dışardan etki eden kuvvetler, tabanda fazla etkili olduğu için boğumlar tabanda birbirine daha yakındır ve gövde duvarının kalınlığı tabandan üst kısımlara doğru azalır. (Lee ve diğ, 2010). Bambunun bu doğal oluşumu; mümkün olan en az miktarda malzeme kullanımı ile çevreden gelen kuvvetlere direnç gösteren mekanik özellikleri, mimari strüktürlerde mekanik verimliliği geliştirmek üzere kullanılması mümkündür.

Bambunun aktarılan tüm bu mekanik performansları;

- Lif yoğunluğu ile gövde iç formun ve kalınlığın yükler tarafından belirlendiği,
- İçi boş silindirik yapısı sayesinde malzemenin minimumda kullanılmasıyla birlikte rijit ve sağlam oluşu, burkulmayı engellemesi,

tez kapsamında çalışılan modelde, üzerindeki yüklere göre geometrilerin kalınlıklarının ve sıklığının belirlendiği kabuğun strüktürel verimliliğini sağlayan prensiplere dönüştürülmüştür.



Şekil 3.9: a) Bambu enine kesit detayı. b) Gövdesi boyunca değişen lif yoğunluğu. c) Bambu en kesiti (Erdine, 2015; Lee ve diğ, 2010).

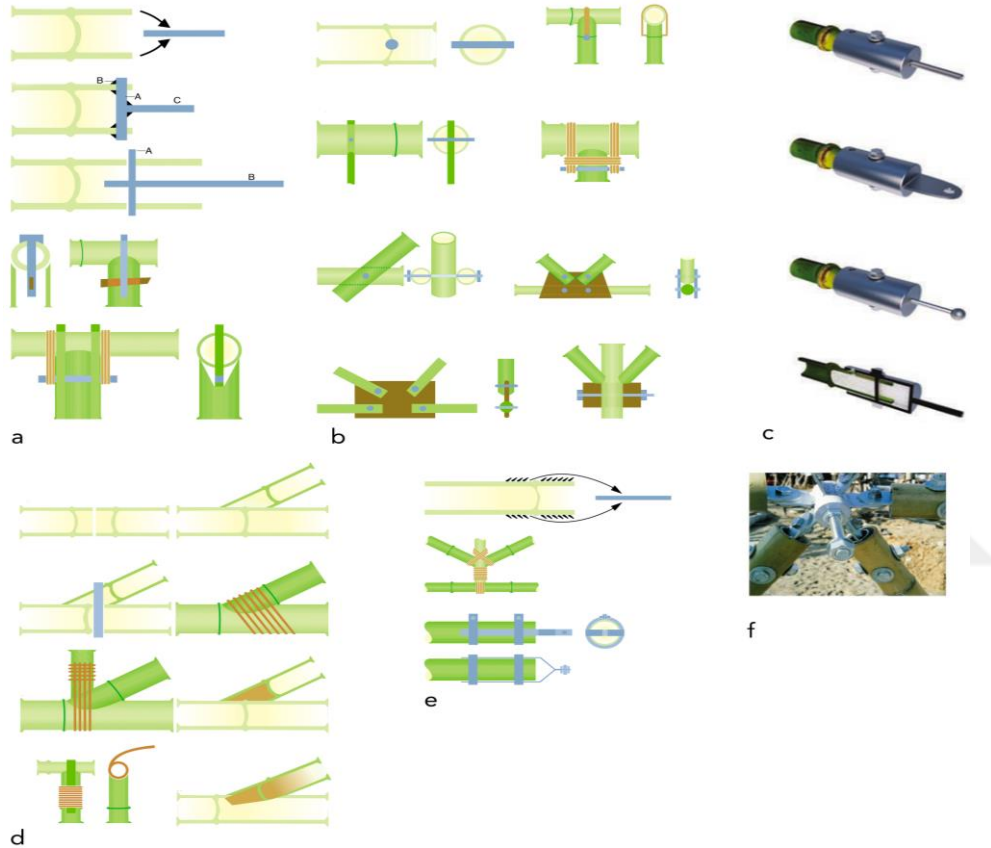
3.4 Bambu İle Üretim

Hesaplamalı araçların tasarım ve üretim aşamasında kullanılması, bambunun tek başına kullanılacağı gibi liflerinin takviye malzemesi olarak tercih edilmesini ve diğer doğal liflerle kompozit şeklinde kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Bu durum, bambu yapı malzemesi olarak tercih edildiğinde geleneksel üretim yöntemleri ile dijital tasarım, üretim yöntemlerini bir arada kullanmayı mümkün hale getirmiştir. Tez kapsamında çalışılan bambu malzeme özellikleri ile grid kabuk tasarımında Voronoi geometrilerinin tek başına bambu ile ve/veya liflerinin takviyeli kompozit malzeme olarak üretimi mümkündür. Bu başlık ile öncelikle bambunun tek başına grid kabuk malzemesi olarak kullanılması durumu ve bağlantı şekillerinden bahsedilmiştir. Daha sonra doğal liflerle bir arada ve takviye malzemesi olarak kullanılma durumu ele alınmıştır.

Bambunun bir önceki başlıkta (3.3) bahsedilen mekanik özelliklerinden görüldüğü gibi, kütle-sağlamlık oranı, kolay elde edilebilir oluşu ile çok işlevli bir malzemedir ve bu açıdan yapı malzemesi olarak avantajlıdır. Bambu yapılarda, çatı strüktürlerinde mertek, kiriş, aşık elemanı olarak, döşemelerde, zeminde, tavanda kullanılmaktadır (Abdul Khalil ve diğ, 2012). Bambu gövdesinin grid kabuğu

oluştururken bağlantı biçimi oldukça önemlidir, doğru bağlantı yapılmadığında bambu gövdesi dayanıklılığını yitirebilir. Bambu bağlantılarını üç farklı ilke ile kategorize etmek mümkündür (Janssen, 2000);

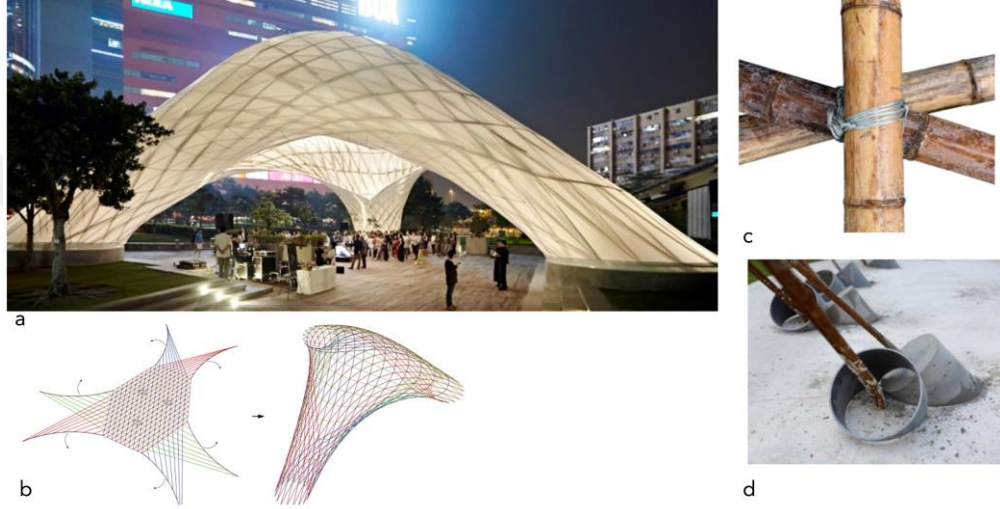
1. İki bütün bambu gövdesi arasında bir bağlantı, ya en kesitler arasında tam temas yoluyla ya da enine kesitten bir birleştirme elemanına kuvvetler toplayarak yapılabilir.
2. Kuvvetlerin toplanması içeriden, kesitten veya dışarıdan meydana gelebilir.
3. Birleştirme elemanı liflere paralel olarak veya dik olarak uzanabilir. (s.90) (Şekil 3.10)



Şekil 3.10: a) En kesitten elemana paralel bağlantı (Janssen, 2000). b) En kesitten gövde elemanına dik bağlantı (Janssen, 2000). c) Çelik ve başlıkla sonlandırma şeklinde bağlantı (Rockwood, 2015). d) En kesitlerin tam teması ile birleşme (Janssen, 2000). e) Elemana paralel dıştan bağlantı (Janssen, 2000). f) Metal Ankraj tekniği ile kenetlenerek bağlantı (Url-5).

Temel yapısal elemanlar olarak bütün bambu kamışların kullanıldığı gridlerin oluşturulması, koniklik, boğum boyutu ve aralıkları, silindirik formun burkulma direnci, bağlantı noktalarında ayrılma, vb. gibi ana hatlarıyla ortaya konan bir dizi zorluk bulunmaktadır (Rockwood, 2015). Bu nedenle, yapı malzemesi olarak tercih edilen bütün haldeki bambunun üretim aşamasındaki çeşitliliği ve kısıtları ortaya koyulmalıdır. Bambunun çeşitli şekillerde birleştirilmesine, *Bamboo Eco Dome* ve *ZCB Bamboo Pavyonu* örnekleri üzerinden çözüm alternatifleri incelenmiştir.

Bamboo Eco Dome uygulamasında bambular grid strüktür sisteminde, çelik ve sentetik polimer kullanılarak birleştirilmiş ve kompleks geodezik geometri elde edilmiştir (Url-6). ZCB (Zero Carbon Building) Bamboo Pavyonunda ise strüktürün belirlenen yükü taşıyabilen optimal formda üretimi için eş zamanlı dijital simülasyonlar ile iş birliği yapılarak üretim aşamasında geleneksel yöntemler kullanılmıştır. Bambunun eğilme kuvvetinden yararlanarak, grid kabuğu oluşturan eğrilerin üst üste kesiştiği yerler üretim aşamasında metal telle bağlanarak birleştirilmiştir (Crolla ve Fingrut, 2016) (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: a) ZCB Pavyonu. b) Sayısal tasarım araçları ile bambunun eğilerek üst üste kesişimi ve form üretimi. d) Bambu bağlantısı metal tel düğüm detayı. c) Strüktürün yer ile bağlanma şekli (Crolla ve Fingrut, 2016).

Sayısal üretim tekniklerindeki teknolojik gelişmeler hibrit süreçlerle, bambu liflerinin takviye malzeme olarak kullanılmasını, cam elyafı, jüt, palmye lifleri, hindistancevizi lifleri ile birlikte kullanılmasını, gelişmiş kompozit malzemelerle karıştırılarak üretimini mümkün kılmıştır. Bu sayede tek malzeme olarak bambunun kullanılmasının yanı sıra kompozit olarak kullanılması ile daha üstün mekanik özelliklere sahip bir ürün sınıfı elde etmek mümkün olmuştur. Bambu lifi takviyeli beton ya da epoksi kompozit ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, bu sayede hafif aynı zamanda sağlam, sürdürülebilir, yenilenebilir malzemelerle daha ekonomik ve geniş aralıklar geçebilen strüktürler elde etmek mümkündür.

Doğadaki bir çok yapı lif takviyeli kompozit malzemelerden oluşur. Doğanın bu yapısından, yüksek performanslı yapı malzemelerin üretilmesinde yararlanılmıştır. Yük dağılımı göz önüne alınarak gerilim bölgelerine göre liflerin takviye bölgelerinin düzenlendiği uygulamalar geliştirilmektedir.



4. MALZEME-STRÜKTÜR-FORM BÜTÜNLEŞİK SÜRECİ İLE KABUK STRÜKTÜR TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Yapıların tasarımıda geometrik bir temsil olarak sunulması, yüzyıllardır süregelen geometri merkezli uygulama baskınlığına, eğrili yüzeylerin çizilmesini kolaylaştıran sayısal tasarım araçları da katılmıştır. Bu beraberinde form önceliği getirmiş, malzeme ikinci plana atılmıştır. Fakat doğaya bakıldığında bunun aksi söz konusu olduğu görülür. Formun geometrisi, malzemenin parametrelerinin çevresi ile ilişkisinden ortaya çıkar (Oxman ve diğ, 2010). Tez kapsamında yapılan çalışmada doğanın bu özelliğinden yararlanarak *Rhinoceros* üç boyutlu tasarım programının *Grasshopper-Karamba* eklentisi kullanılmış ve malzemenin performansına dayalı bir süreç, kabuk strüktür üzerinden çalışılmıştır.

Tezin bu bölümünde önceki bölümlerde aktarılan bilgi ve problemlere karşılık gelen metodolojik kapsam işlenmektedir. Malzemenin form ve strüktür ile bütünleşik tasarım sürecini ortaya koymak için 2. bölümde kabuk strüktür ve form üretimi, 3. bölümde ise biyomimikri; doğadan esinlenen tasarım konularında ayrıntılı olarak incelenmiş olan tüm parametreler, kısıtlar, malzeme-performans bağlamında ilişkilendirilerek bir model üzerinde çalışılmıştır.

Varsayılan sistemde Voronoi geometrileri kullanılarak kabuğun tanımlanan yükler altındaki optimal geometrisinin bulunması hedeflenmiştir. Öncelikle geometrilerin arasındaki boşluklar kademeli olarak arttırılmış, buna göre Karamba eklentisi ile simülasyon yapılarak kabuktaki yer değiştirme miktarı analiz edilmiştir. Daha sonra geometriyi oluşturan elemanların kalınlığı kademeli olarak arttırılarak, kabuğun strüktürel davranışının simülasyonu yapılmış, buna göre malzemenin strüktür ile uygunluğunun analizi aktarılmıştır. Grasshopper'ın *Octopus* eklentisi ile çok hedefli optimizasyon yapılmış ve birden fazla hedef fonksiyonu belirlenerek problemler için birden fazla alternatifler üretilmiştir. Octopus evrimsel algoritmaları kullanarak birden fazla, birbirinden farklı hedef fonksiyonlarıyla (fitness function) ve birden fazla değişkenlerle optimizasyon yapabilmeyi sağlayan Grasshopper eklentisidir.

Strüktür söz konusu olduğunda genelde optimizasyon için yer değiştirme ve kütle seçilir. Tez kapsamında kendi ağırlığının üzerinde büyük etkisi olması ve malzeme davranışının doğrudan kabuğun şeklini belirlemesi ile kabuğu diğer strüktürlerden ayıran özellikleri göz önünde bulundurularak, optimizasyon için belirlenen hedefler; strüktürün ağırlığını ve malzemenin gerilimine bağlı yer değiştirmesini minimize etmektir. Bunun için belirlenen değişkenler ise geometriler arasındaki boşluk yani geometrilerin sıklığı ve geometriyi oluşturan elemanların kalınlıklarıdır. Bununla birlikte tasarım değişkenlerine bağlı malzemenin gerilme analizi aktarılmıştır. Bu çalışmada strüktürün formunun aynı kalması bilinçli bir tasarım kararı olup geometrilerin boşlukları, kalınlıkları değiştirilerek kabuk strüktürün malzeme ile maksimum uygunlukta optimal şeklinin bulunması hedeflenmiştir.

Çalışmanın başlıca odakları, doğadan esinlenerek, malzemenin davranışının kabuk strüktür tasarım süreci ile bütünleştirilmesi ve malzemenin mekanik özelliklerinin oluşturduğu kısıtlar bağlamında, strüktürel açıdan istenen verimliliği sağlayabilirliğinin analizidir. Seçilen biyolojik model bambunun, mekanik özellikleri sayısal tasarım araçları kullanılarak, tasarımın erken aşamasında sürece dahil edilmesiyle, her bir geometrinin optimizasyonu ile strüktürel verimlilik elde etmek hedeflenmiştir.

4.1 Araç ve Yöntemler

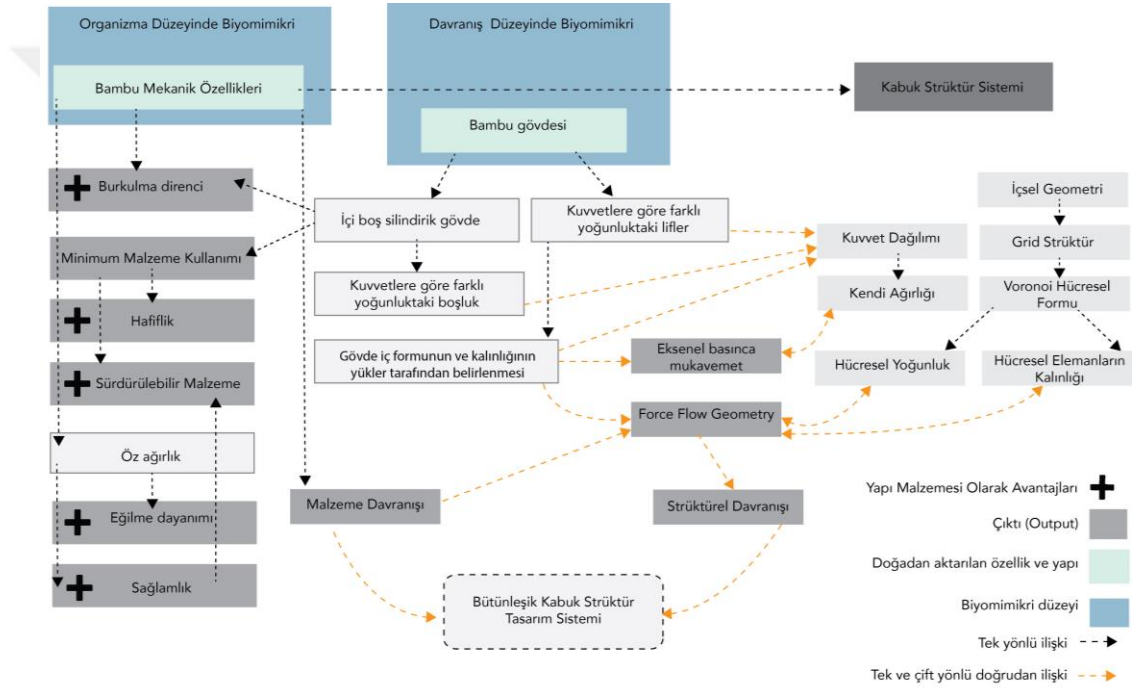
Daha önceki bölümlerde anlatılan yöntemler bir çalışmada toplanmış, bir dizi analiz, tekrar ve değerlendirme yapılmıştır. Üretilen modelle, malzemenin mekanik davranışı ile kabuğun strüktürel davranışlarının entegrasyonunun sağlanabilirliği analiz edilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmada bilişim aracı olarak, farklı tasarım alternatiflerini değerlendirme yolu ile en iyileme/optimizasyon ve malzeme analizleri için benzetim/simülasyon tercih edilmiştir.

4.1.1 Biyolojik rol model: Bambu

Varsayılan sistem için biyolojik etkili (aşağıdan yukarı) biyomimikri tasarım süreci uygulanarak, doğadan seçilen biyolojik modelin strüktürel ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. Buna göre, bambunun üzerine etki eden kuvvetlere göre ve kendi ağırlığını taşıyabilmesi için farklı yoğunluk gösteren lifler, kabuğu oluşturan strüktürel elemanlarının kuvvetten gelen gerilmelere göre oluşması için bir model

olarak hizmet etmiştir (Davranış ve organizma düzeyinde biyomimikri). İçi boş silindirik gövdesi, malzeme kullanımını minimize ederek, çevreden gelen kuvvetlere dayanımı sağlayan mekanik özellikleri, kabuğun strüktürel davranışı ile entegre edilerek verimli bir strüktür elde etmek amaçlanmıştır. Bambunun mekanik özellikleri; elastik modülü, kayma modülü, yoğunluğu ve elastik limiti değerleri, sayısal tasarım aracına, kısıtları oluşturan parametreler olarak girilmiştir (Şekil 4.1).

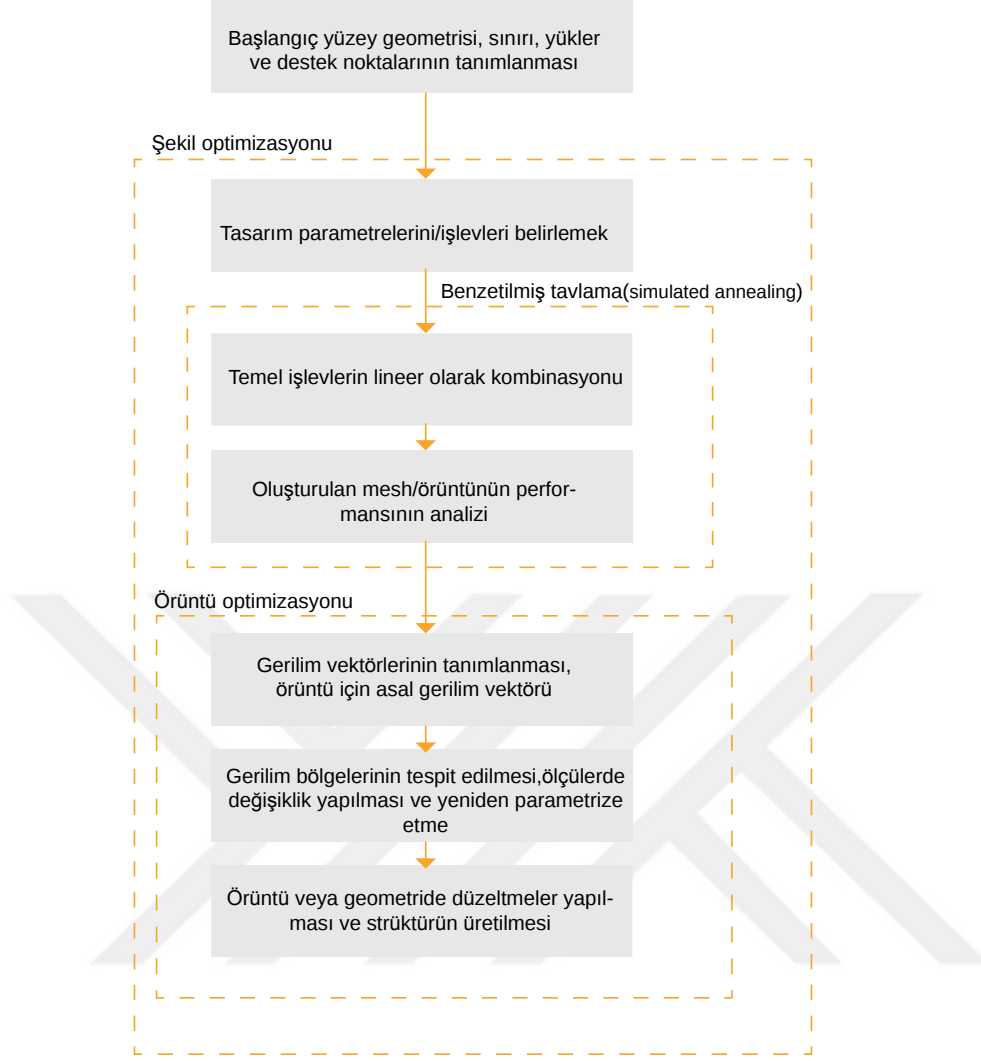
2. Bölümde daha ayrıntılı şekilde irdelenmiş olan bambunun mekanik davranışlarından elde edilen potansiyel bulgular sayısal tasarım araçlarına aktararak, kabuk strüktürün davranışı analiz edilmiş ve şekil optimizasyonu yapılmıştır.



Şekil 4.1: Bambunun özelliklerinin bir kısmının soyutlanarak kabuk strüktür tasarımına aktarılması süreci.

4.1.2 Optimizasyon çeşidi: Strüktürel şekil optimizasyonu

Kabuğu oluşturan geometrilerin ve üretilen örüntünün strüktürel davranışı ve malzemenin davranışının sürece dahil edilmesi ile strüktürel şekil optimizasyonu yapılmıştır. Geometrilerin arasındaki boşluklar ve geometrinin elemanlarının kalınlıkları, değiştirilerek sağlanan optimizasyonun aşamaları Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2: Strüktürel şekil optimizasyonunun aşamaları Kaijima ve Michalatos (2014, s.196)’dan esinlenerek hazırlanmıştır.

4.1.3 Optimizasyon yöntemi: Evrimsel algoritmalar

Problemlere farklı çözümler üretmek için evrimsel algoritmalar sıklıkla başvuru bir yöntemdir. Evrimsel algoritmalar ve genetik algoritma doğayı gözlemleme ile gelen fenomenlerdir (Dimcic, 2011). Bu süreçte doğanın temel ilkeleri ve seçim, yöntemin temel belirleyicileridir. Doğada en iyiler seçilerek hayatta kalır ve kötüler elenir. Bu sebeple evrimsel algoritma yöntemi çok hedefli optimizasyona uygundur (Dimcic, 2011; Kiranyaz ve diğ., 2014; Yazıcı, 2013). Optimizasyon için en iyi sonuçlar bulunana kadar çözümler üretilir ve tasarımcı çözümler arasından en uygunu seçebilir. Tez kapsamında evrimsel algoritma yöntemi Grasshopper’ın Octopus eklentisi kullanılarak, çok hedefli optimizasyon yapılmıştır. Octopus; ETH Zürih ve Galapagos kullanıcı ara yüzünden türetilmiş (Url-4), SPEA-2 ve HypE

(Bader ve diğ, 2011) metodlarını temel alan bir eklentidir. Optimizasyon için birden fazla hedef seçebilmeyi ve çözüm alternatifleri üretmeyi mümkün kılar. Amaçlar ile örtüşen en iyi sonuçlar aranır ve bir çözümden diğerine ulaşılabilecek optimum çözümler üretilmektedir. İstenen iki veya daha çok, birbiri ile uyuşmayan hedeflerin bir veya birden fazla değişkenlerle optimal çözümünün aranmasına olanak tanıdığı için bu çalışmada kullanılmıştır. Bu bağlamda yer değiştirme miktarını ve kütleyi minimize etmek ve malzemenin gerilimini en aza indirerek, tehlike sınırına optimal uzaklıkta kalmak amaçlanmıştır. Bu doğrultuda evrimsel algoritma yöntemini kullanan Octopus eklentisi tercih edilmiştir.

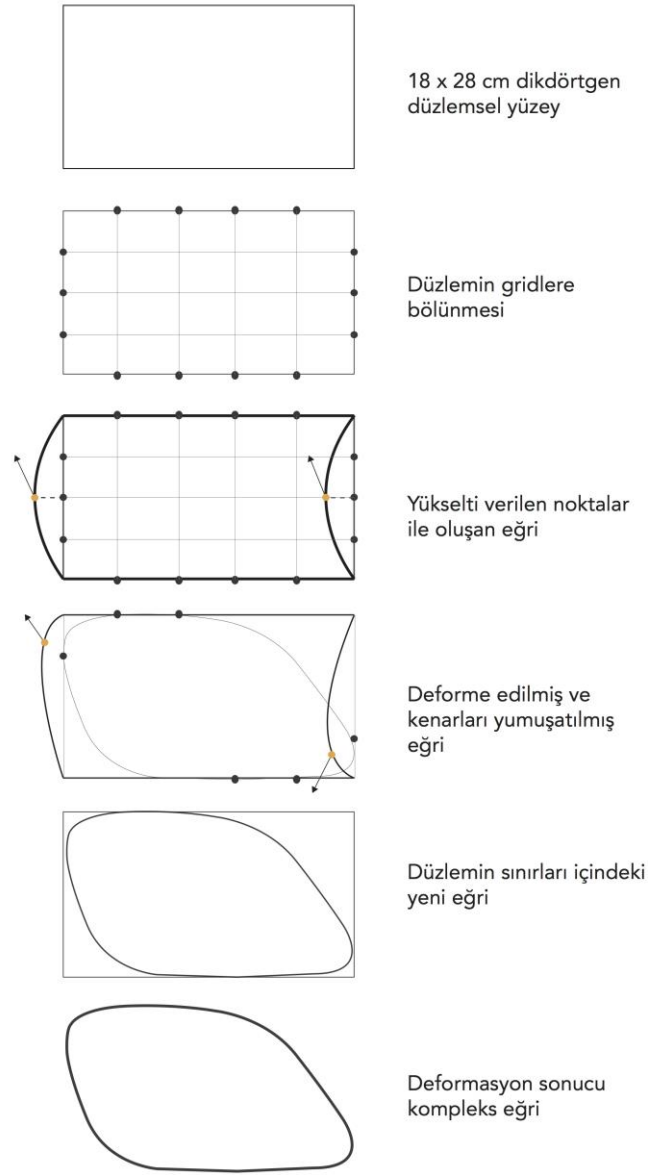
4.1.4 Kabuğun başlangıç yüzeyinin belirlenme süreci

Varsayılan sistemde strüktürün başlangıç yüzeyinin nasıl belirlendiği Şekil 4.3' te gösterilmiştir. Öncelikle bir dikdörtgen ile sınırlar tanımlanmıştır. Oluşturulacak eğrinin en uygun çözümü bu sınıra yakınsaması ile oluşturulmuştur. Dikdörtgende gridler oluşturularak destek ve yükler tanımlanmak üzere noktalar belirlenmiştir. Bu noktalardan ikisine yükseklik verilerek bir eğri elde edilmiştir. Daha sonra bu eğri deforme edilerek kenarları yumuşatılmış, son olarak hiperbolik paraboloid bir eğri elde edilmiştir. Yatay/ hiper-eğrisel kabuk yüzey, Voronoi hücreleri kullanılarak grid kabuk sistem elde edilmiştir. Grid kabuk sayesinde istenilen açıklık geçilebilmiştir, optik olarak hücresel, dış merkezli, hafif ve akustik açıdan difüzyon ve aynasallık etkisi sağlanmıştır.

4.1.5 Strüktürü oluşturan geometri: Voronoi

Voronoi diyagramı doğaya bakıldığında birçok yerde karşımıza çıkmaktadır. Mikroskobik boyutta ele alırsak hücre bölünmesinin temel prensibinde görülmektedir. Daha büyük ölçeklerde ise kuru toprağın üzerindeki çatlaklarda, kaplumbağanın kabuğunda ve daha birçok yerde karşımıza çıkmaktadır (Şekil 4.4) (Dimcic, 2011). Voronoi hücreleri ile oluşturulan yüzey malzeme, form ve verimliliğe eşit derecede önem ve öncelik verir (Yazıcı, 2013). Grid strüktür serbest bir yüzey üzerine çalışılırken, grid çizgileri yerine hücreler üretildiğinde yüzeye daha fazla özgürlük kazandırabilir. Bir grup hücre ya da alanlar daha sonra çizgilerin bağlandığı sistem olarak çalışıldığında daha kolay bir tasarım süreci oluşmaktadır. Geometrilere parçalı olup bir bütünü oluşturduğu, farklı yoğunluk verilebildiği ve her bir hücre bir nokta ile tanımlandığı için malzemenin strüktürel verimlilik açısından

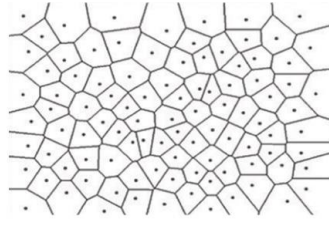
performansını ortaya koymasına elverişliliğinden dolayı, kabuğun geometrisi Voronoi hücrelerinden oluşturulmuştur (Şekil 4.5).



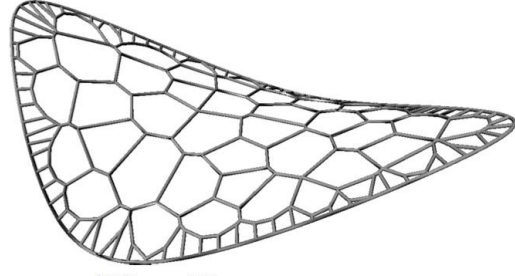
Şekil 4.3: Başlangıç yüzeyinin belirlenmesi süreci.



Şekil 4.4: a) Bal peteği (Url-7). b) Kaplumbağa kabuğu (Url-8). c) Kuru toprak (Url-9). d) Voronoi diyagramı.



2D Voronoi Diyagramı



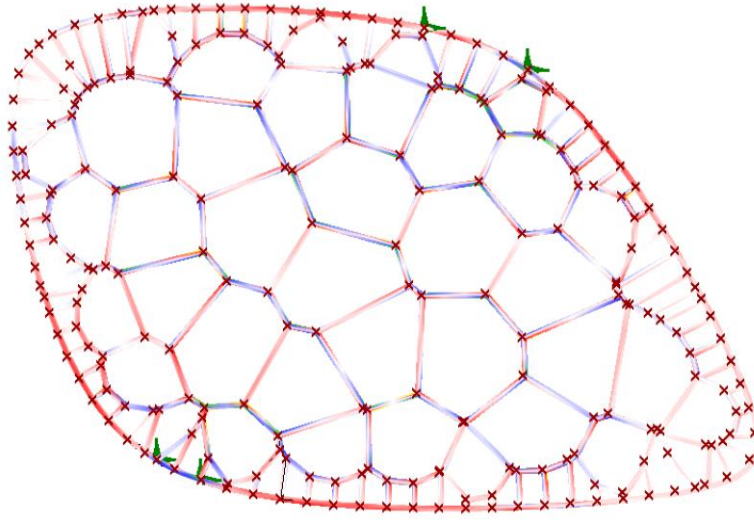
3D Voronoi Diyagramı

Şekil 4.5: Voronoi diyagramı ile oluşturulan hücresel geometri.

Çok hedefli optimizasyon için belirlenen hedefler; gerilmeye bağlı yer değiştirme miktarını ve kütleyi minimuma indirmektir. Bunun için iki farklı değişken belirlenmiştir. Kabuğun hafifliği ve her bir elamanın kalınlığı strüktürel verimlilik açısından önemlidir. Değişkenler; geometriler arasındaki açıklık (geometrilerin yoğunluğu/sıklığı) diğeri ise geometriyi oluşturan elemanların kalınlığıdır. Değişkenlerin optimizasyonu ile malzemenin kabuk strüktürle optimal uygunluğu sağlanması hedeflenmiştir.

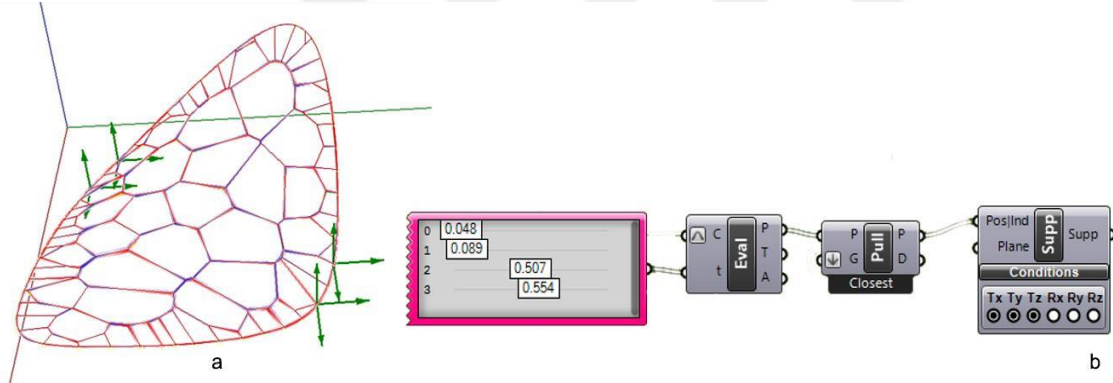
4.2 Strüktürel Şekil Optimizasyonu: Varsayılan Sistemin Oluşturulması

Simülasyonun tasarım kararlarının belirlendiği Grasshopper ortamında, Şekil 4.3'te belirtildiği gibi oluşturulan, kabuk strüktürün başlangıç yüzeyi tanımlanmıştır. Çözüm için bu yüzeye üçüncü boyut verilmiştir ve üzerine iki boyutlu Voronoi diyagramı yansıtılmıştır (projected). Elde edilen Voronoi hücreleri ortasında bulunan noktalarla kontrol edilmiştir. Bu noktalar daha sonra optimizasyon değişkeni olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan yüzeyin kenarları destek noktalarının da tanımlandığı noktalara bölünmüştür. Bu noktalardan Voronoi hücrelerinin kenara en yakın başlangıç ve bitiş noktalarına çizgiler tanımlanmıştır. Kabuğun kenarları ve destek noktalarına yakın olan bölgelerinde daha fazla gerilim olduğu için, geometrinin çizgileri kenarlarda daha sık olacak şekilde oluşturulmuştur (Şekil 4.6). Hücre başlangıç ve bitiş noktaları ile kenarları birleştiren çizgilerin sıklığı simülasyon esnasında strüktürün davranışından geri beslemeler değerlendirilerek değiştirilmiştir. Belirlenen kısıtlar ve parametreler; malzeme, yükler, destek noktaları, *Assemble* komponenti ile birleştirilmiş ve modele eklenmiştir. Birleştirilen modelde kısıtlar ve parametreler, malzeme, destek ve yüklerle detaylı olarak tanımlanarak farklı seçenekler üretilmiştir.



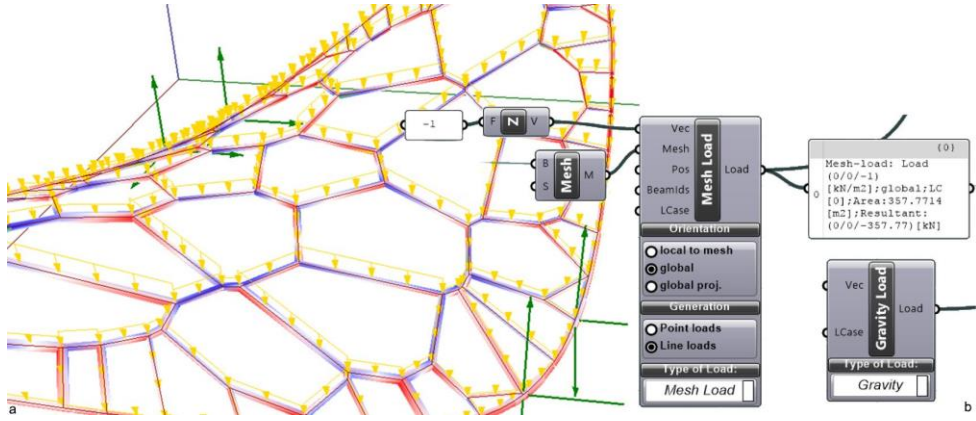
Şekil 4.6: Kenarların daha sık ve ortanın daha seyrek elemanlardan oluşması, üstten görünüş.

Strüktürün üzerine etki eden kuvvetlere dayanımını sağlayabilmesi için, kabuğun kenarı üzerindeki noktalar üzerinden, yer ile temas ettiği karşılıklı iki noktaya, dört adet destek noktası tanımlanmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: a) Yeşil oklarla gösterilen destek noktaları. b) Karamba ile destek noktalarının tanımlanması.

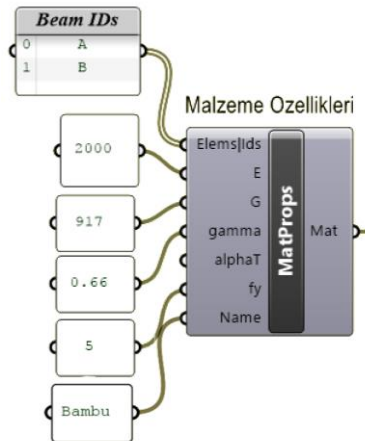
Kabuk ölü yük ve hareketli yüke, sade basınç ve eğme momenti ile karşılık verir ve kayma kuvveti en aza indirilmektedir (Olsson, 2012). Kabuk strüktürde üzerine etki eden kuvvet kendi ağırlığından gelmektedir. Bu sebeple Karamba eklentisinin yük komponenti ile *Mesh Load* seçilerek, global negatif z yönünde üzerine kendi ağırlığı kadar bir çizgi yükü tanımlanmıştır. Yer çekimi kuvveti ayrı bir yük olarak yeryüzünde etki ettiği yönde kabuğa uygulanmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Kabuk strüktüre kendi ağırlığının uygulandığı çizgi kuvvetlerin gösterimi. b) Yer çekimi kuvveti ve strüktürün kendi yükünün tanımlanması.

Kabuğun strüktürel davranışını doğrudan etkileyen malzeme özellikleri tanımlanmış, modele eklenmiştir. Bambunun mekanik özelliklerinin Çizelge 4.1’de verilmiştir. (Janssen, 2000; Askarinejad, Kotowski, Shalchy ve Rahbar, 2015; Trictus, 2014; Lee ve diğ, 2010; Li, 2004; Xioabo, 2004). Bambunun;

- Elastik modülü (young modülü): E [kN/cm^2]
- Kayma modülü: G [kN/cm^2]
- Özgül ağırlık: γ [kN/m^3]
- Elastik limit/akma dayanımı: f_y [kN/cm^2] değerleri girilerek malzemenin özellikleri, tasarım kararlarına dahil edilmiştir. Bunun için Karamba eklentisinde malzemenin mekanik özelliklerinin manuel olarak tanımlanabileceği *Material Properties* komponenti kullanılmıştır (Şekil 4.9).



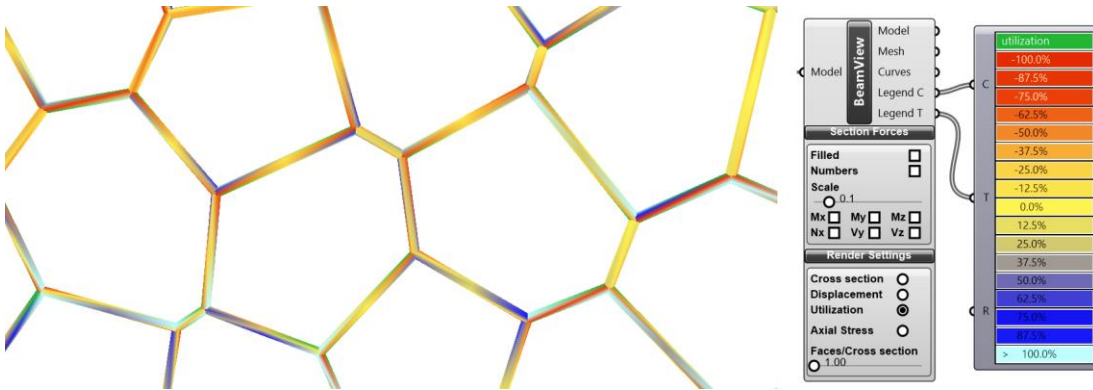
Şekil 4.9: Malzemenin mekanik özelliklerinin tanımlandığı *Material Properties* komponenti.

Çizelge 4.1: Bambunun malzeme davranışını belirleyen mekanik özellikleri.

		E	G	gamma	Alpha T	fyd
Aile	İsim	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/cm ³]	[m/mC ⁻¹]	[kN/cm ²]
Bambu	Bambu	2000	91.7	0.66	-	5

Strüktürü kiriş elemanlarından oluşan model olarak analiz edebilmek için silindirik içi boşluklu en kesit çeşidi ile her bir elemana kalınlık ve çap değerleri tanımlanmıştır. Böylece tanımlı her bir kirişin deformasyonu ve aksiyel gerilimleri hesaplanmıştır.

Karamba'nın *AnalizyeThI* komponenti ile modelin maksimum yer değiştirmesi hesaplanmıştır. Malzemenin maksimum gerilim kapasitesini yüzde olarak gösteren uygunluk (*Utilization*) analizi ile çekme ve basınç gerilimleri kontrol edilmiştir (Şekil 4.10). Böylece kabuk strüktürün tehlike sınırına optimal uzaklıkta kalması sağlanmıştır. Bir başka deyişle malzemenin uygunluğunu gösteren lejanttaki değerler, strüktürün gerekli olan güvenlik sınırına uygun olup olmadığını test etmeyi sağlamaktadır (Preisner, 2016). %100'ün üzerindeki gerilimler (açık mavi) malzemenin uygulanan yük altında kırılabilceğini göstermektedir. Sarı renkli alanlar, az stresli/gerilimli bölgeleri temsil etmektedir. Koyu mavi; pozitif uygunluğu ve yüksek çekme gerilimini temsil ederken, kırmızı alanlar; negatif uygunluğu, yüksek basınç gerilimli bölgeleri göstermektedir.

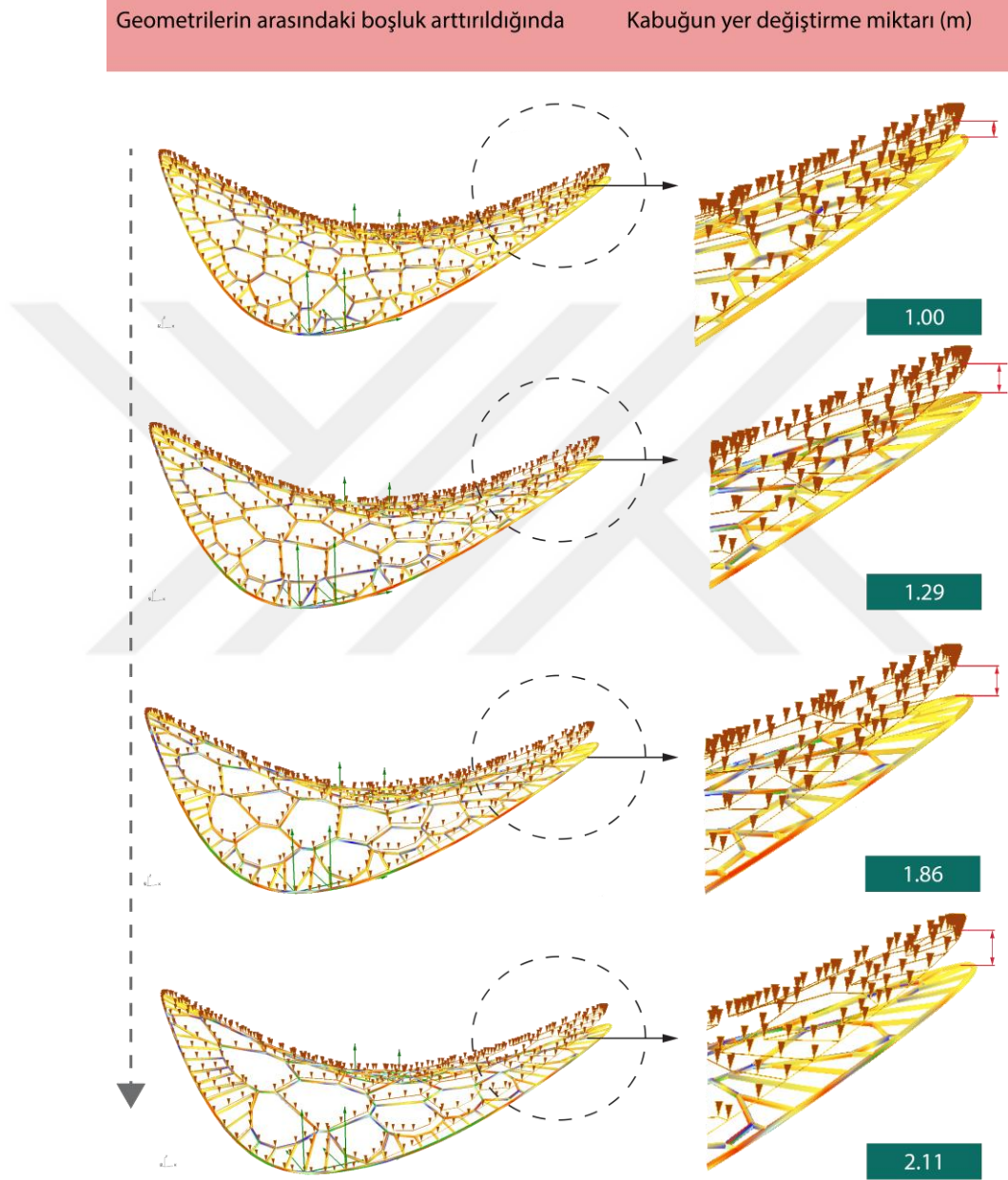


Şekil 4.10: Malzemenin davranışı ile kabuğun tehlike sınırını gösteren renkler.

4.2.1 Geometrilerin değişen açıklığı ile malzemenin davranışı

Kabuğun tasarım sürecinde, malzeme davranışına bağlı strüktürün davranışı bütünlüklü bir şekilde değerlendirilerek, formun sıklığındaki değişimin strüktürün verimliliğine etkisi simülasyonlarla analiz edilmiştir. Böylece şekil optimizasyondan önce strüktürün davranışı keşfedilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.11'de geometriler

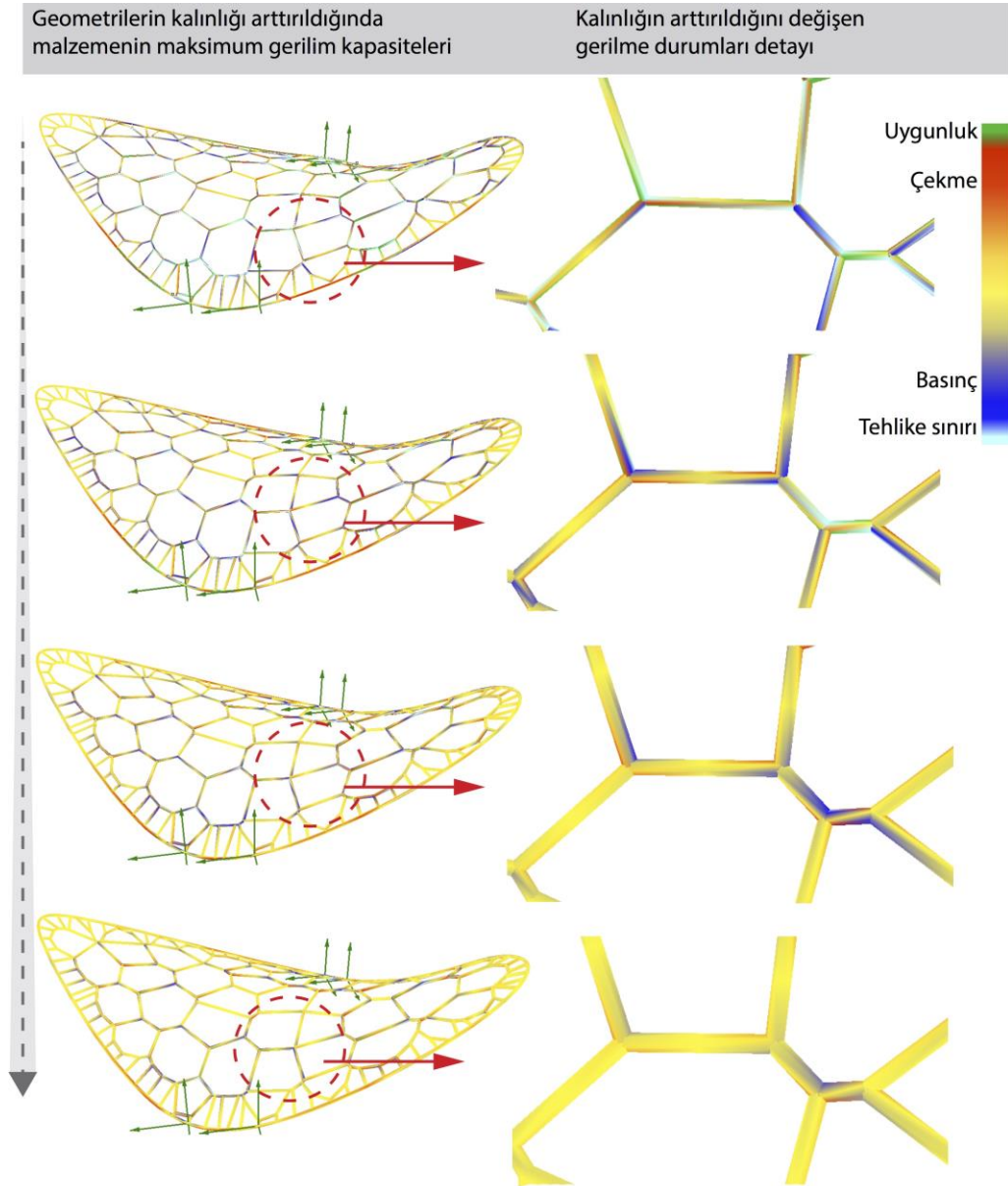
arasındaki boşluklar kademeli olarak arttırıldığında kabuk strüktürdeki maksimum yer değıştirme miktarları gösterilmiştir. Uygulanan eş kuvvetler kahverengi oklarla temsil edilmektedir ve geometriler arasındaki boşluklar arttırıldığında, diğer tüm değerler sabit tutulurken, belirlenen kuvvet altında yer değıştirme miktarında artış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.11: Geometrilerin arasındaki boşluk arttırıldığında belirlenen yük altında (kahverengi oklarla gösterilen) kabuğun yer değıştirme miktarı.

4.2.2 Geometrilerin kalınlığı arttırıldığında malzemenin davranışı

Bu bölümde kabuğu oluşturan geometrilerin kalınlığı değiştirildiğinde malzemesinin gerilme kapasitesine bağlı davranışı analiz edilmiştir (Şekil 4.12). Aynı geometri sıklığında kalınlık arttırıldığında, kabuğun strüktürel davranışı ile malzemenin uygunluğunun arttığı, bir başka deyişle kabuğun gerekli güvenlik sınırını sağlayabilir olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12: Kalınlık değişkeni ile malzeme-strüktür uygunluğu.

Kabuğun geometrisinin elemanlarındaki renklerin sarıya doğru geçişi gerilimin azaldığını göstermektedir. Açık mavi alanlar malzemenin geriliminin çok yüksek olduğu ve kırılabileceği alanları temsil etmektedir. Şekil 4.12’de gösterilen kalınlığın

en ince olduğu ilk durumda, kabuğu oluşturan elemanların açık mavi, yani kırılmaya çok yakın olduğu durum oluşmuştur, kalınlık arttıkça gerilim azalmaktadır. Koyu mavi alanlar yüksek çekme gerilimini (tensile stress) malzemenin pozitif uygun olduğunu, kırmızı alanlar ise yüksek basınç gerilimi (compressive stress) ile malzemenin negatif uygunluğunu temsil etmektedir.

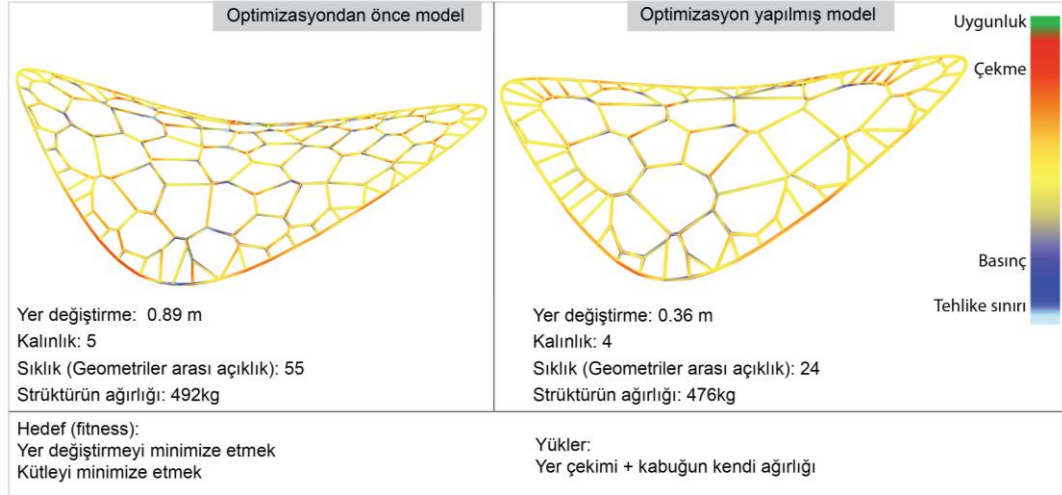
4.2.3 Çok hedefli optimizasyon yöntemi ile şekil optimizasyonu süreci

Optimizasyon sürecinde birden fazla hedef fonksiyonu belirlenebildiği ve çözüm alternatifi üretebildiği için evrimsel algoritma yöntemi ile çalışan Grasshopper'ın Octopus eklentisi kullanılmıştır. Evrimsel algoritmaların değişkenleri genlerle temsil edilmektedir ve bu çalışmada genler yüzey üzerine tanımlanan Voronoi hücre noktalarının tanımlandığı bir reel sayı dizisi şeklinde oluşturulmuştur.

Oluşturulan modelde malzeme, strüktürel verimlilik üzerinden ele alındığından, hedef fonksiyonları buna göre belirlenmiştir. Malzemenin mekanik özelliklerinin kabuk strüktürün verimliliği üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek için hedef fonksiyon, yer değiştirmeyi minimuma indirmektir. Bu hedefin değişkenleri ise geometrilerin aralığı ve kalınlıklarıdır. Aynı zamanda malzemenin gerilim kapasitesini minimumda tutarak strüktürün tehlike sınırına optimal uzaklıkta kalması sağlanmıştır. Malzemenin gerilme durumu model üzerindeki renklerle, lejanttaki belirlenen çekme, basınç ve tehlike sınırı aralıklarına bakarak kontrol edilmiştir.

Optimizasyon sonucu evrimsel algoritmalarla 400 popülasyon üretilmiştir. 400 popülasyon arasından en uygunlar seçilerek, elverişsiz durumlar elenmiştir. Evrimsel algoritmalarla hesaplanan alternatifler arasından optimal formdaki strüktür bulunmuştur ve optimize olmadan önceki model ile Şekil 4.13'te karşılaştırılmıştır.

Buna göre geometri sıklığı 10-80 aralığında, kalınlığı 4-6cm aralığında belirlenen kabuğun yer değiştirme miktarları minimize edilmiştir. Optimizasyondan önceki modelde yer değiştirme miktarı 0.89m, kalınlığı 4-6cm aralığında 5cm ve geometrilerin sıklığı 10-80 aralığında 55, ağırlığı ise 492kg'dır. Optimal sonuçta ise yer değiştirme miktarı 0.36m ve kalınlık 4cm, geometri sıklığı 24 birim olduğu görülmektedir. Malzeme uygunluğu açısından karşılaştırıldığında yer değiştirme miktarı az olan (0.36m) optimize olmuş modelin gerilmesi daha düşük yani tehlike sınırına optimal uzaklıkta olduğu, lejanttaki renk aralıklarından analiz edilebilmektedir.



Şekil 4.13: Optimizasyon öncesi model ve çok hedefli optimizasyon ile malzeme, strüktüre en uygun form bulunması.

Sayısal modelin optimizasyonundan bir sonuca varmak gerekirse, geometrilerin optimal sonucu bulunmadan önce, geometriler daha sık ve kalınken strüktürün ağırlığı daha fazla, yer değiştirme miktarı ve kabuğun gerilimi de fazladır. Optimal sonuçta ise geometri sıklığı azalmış, bir başka deyişle geometri aralıkları artmış, elamanların kalınlığı azalmış, yer değiştirme miktarı, kabuğun gerilimi ve kütlesi minimize edilmiştir. Daha önceki bölümlerde (2.3.1) aktarılan kabukta hafiflik kavramında, malzeme, şekil ve kalınlığın birbiri ile sıkı bir bağı olduğundan bahsedilmiştir. Buna göre optimizasyon sonucunda kabuğun basınç kuvveti karşısında rijitliğini ve verimliliğini sağlamak için geometrilerin kalınlığı ve sıklığı azalmış, kütle minimize edilerek yer değiştirme ile gerçekleşen deformasyon en aza indirilmiştir. Bu sayede hafif, rijit ve sağlam bir kabuk strüktür elde edilmiştir.

4.2.4 Modelin değerlendirmesi ve bulgular

Bu bölümde sayısal tasarım ortamında oluşturulan modelin kısıtları, süreç boyunca karşılaşılan zorlukları, faydaları aktarılmış ve tartışılmıştır. Kabuğun strüktürel şekil optimizasyonu ile elverişsiz durumlar elenmiş ve çözüm alternatifleri üretilmiştir. Bu alternatifler arasından en uygun olanın seçimi için üretim ve değerlendirmeler tekrarlanmıştır. Evrimsel algoritmalar optimizasyon süreci esnasında modele anında müdahale edilebilir, tekrarlar arasından seçilebilir ve performans hedeflerinin değiştirebilir olması ile tasarımcıya birden fazla alternatif sunarak, tasarım sürecini yönetmesini sağlamıştır. Böylece sonradan karşılaşılabilecek sorunlar minimuma indirilmiştir, minimum enerji ve malzeme kullanımı ile maliyetin düşürülmesi,

tasarım sürecine ayrılan zamandan tasarruf ve sürdürülebilir strüktür elde edilmesi öngörülmüştür.

Kabuk strüktür açısından bakıldığında, kuvvetlerin dengesini kontrol etmek tasarımı karmaşık hale getirmektedir. Kabuğun strüktürel dengesini; ağırlığı, üzerine etki eden kuvvetlerin dağılımı, yer çekimi ve destek noktalarının yeri ve adedi belirlemektedir. Varsayılan sistem oluşturulurken önce iki adet destek noktası tanımlanmış, fakat kabuk üzerine etki eden kuvvete direnç gösteremeyerek deforme olmuştur. Bu durumda dört adet noktadan desteklenmiş ve konumları da strüktürel davranış göz önünde bulundurularak değiştirilmiştir.

Biyomimikri ile malzeme, form ve strüktürün bütünleşik olarak tasarım sürecine katıldığı çalışmalar yürüten ICD/ITKE, 2016-17 yılında yaptığı çalışmada, güvelerin ağ örme sistemini, uzun açıklık geçebilen lifli yapıdaki strüktürün üretim sürecine entegre etmiştir. (Felbrich, Früh, Solly, Vasey, & Knippers, 2017). Bu çalışma ile doğal liflerle oluşan ağ sistemi karbon fiber ve cam elyafı kullanılarak üretilmiştir. Daha önceki bölümlerde bahsedilen (3.1.2) Silkpavilion'da ise ipek böceklerinin doğal lifleri kullanılarak malzeme davranışına bağlı şekil optimizasyonu yapılmıştır (Oxman ve diğ, 2012). Biyomimikri yöntemi ile farklı amaçtaki mimari problemlere çözüm alternatifleri aranmaktadır. Bu bağlamda çalışma doğal yapı malzemelerinin farklı amaçlarla kullanılarak, kabuk strüktürde olduğu gibi, başka çalışmalarda geliştirmeye açık olduğunu vurgulamaktadır.

Kullanılan doğal malzeme bambunun özellikleri, sıklıkla tercih edilen beton, çelik gibi yapı malzemelerine kıyasla avantajları ve dezavantajları kabuk strüktürde elde edilen sonuçta ve süreçte gözlemek mümkün olmuştur. Bambu öngörülebilir ya da öngörülemeyen kuvvet durumlarında lifli yapısı sayesinde direkt burkulmamakta, iyileştirmeye gerek duyulsa da ani bir çöküş yaşanmamaktadır. Bu durum kabuk strüktür için bir avantajdır ve bambunun bu mekanik özelliklerinden dolayı deprem bölgelerinde yapı malzemesi olarak ve takviye malzemesi olarak da sıklıkla tercih edilmektedir.

Evrimsel süreçteki seçim, mutasyon ve çaprazlama gibi doğa prensipleri kabuk strüktür tasarım sürecine aktararak, kabuğun en iyi strüktürel performansına yakınsanmaya çalışılmıştır. Minimum enerji esasına dayanan doğal strüktürlerden esinlenerek oluşturulan modelde kullanılan Voronoi çokgenleri ile enerjinin strüktür

içinde dağılımı en verimli şekilde tutulmuş ve malzeme kullanımı minimize edilmiştir. Özetlemek gerekirse evrimsel algoritmaları kullanarak yapılan çok hedefli optimizasyon süreci ile kabuk strüktürün kütlesi, gerilme ve yer değiştirmesi önemli ölçüde azaltılabilir ve malzeme kullanma-korunma dengesi gözeterek stabilite arttırılabilir sonucu çıkarılmaktadır.

Biyomimikrinin mimarlık disiplinine uygulanmasına bir örnek teşkil eden bu çalışmada, Grasshopper ortamında yapılan optimizasyon süreci sonucu elde edilen strüktür ile doğadaki optimal strüktürleri karşılaştırmak doğru olacaktır. Kabuk strüktürün tasarım ve optimizasyon sürecinde biyoloji etkili (aşağıdan yukarıya) biyomimikri yöntemi ile bambunun davranışı ve mekanik özellikleri kullanılmıştır (davranış ve organizma düzeyinde biyomimikri). Doğada strüktürler, malzemenin iç düzeni geometrik düzenlemelerle dış faktörlerden gelen kuvvetler tarafından değişerek kendiliğinden oluşmaktadır. Doğal strüktürler aktif, farklı koşullarda optimizasyon yapabilen, adapte olabilen yapıya sahiptir. Fakat mimaride genelde stabil, durağan, dinamik olmayan sistemler söz konusudur ve çalışma özelindeki kabuk strüktür form pasiftir. Doğanın adapte olabilen, aktif ve daha önemlisi kusursuz yapısını tam manası ile tasarıma aktarmak mümkün değildir. Ancak Grasshopper'ın etkin kullanılması ile doğadan öğrenilen süreçler ve davranışlar üretilen modelde simülasyonlarla test edilmiştir. Bu durumda sonuç üründen ziyade tasarım sürecinin önemli olduğunu belirtmek gerekir. Bu çalışma doğadaki var olan optimal formdaki strüktürleri biraz daha yakından incelemeyi mümkün kılmış ve gelecekteki araştırmalara bir alternatif oluşturmuştur.

5. SONUÇ

Tezin sonuç bölümünde, aktarılan tüm bilgiler ve bulgular özetlenerek gelecek çalışmalara öneriler tartışılmıştır. Çalışma neredeyse atık üretmeyen, minimum enerjili, hafif, hücreli formlu, doğal malzemelerin özellikleri ile strüktür tasarımına bir altlık oluşturarak, malzeme davranışı ve strüktürel davranışın bütünleşik tasarım sürecinin sayısal tasarım ortamındaki potansiyellerini ortaya koymaktadır.

Geleneksel tasarım yöntemlerinin aksine tek bir çözüme odaklanan tasarım süreci yerine, kabuk strüktür tasarım sürecinde evrimsel algoritmalar kullanılarak birden fazla çözüm alternatifi üretilerek optimal sonuç bulma aşamasında, değerlendirme ve seçim imkanı tasarımcıya bırakılmıştır.

Tasarım sürecinin başlangıcını, malzemenin mekanik özelliklerinin belirlediği davranışın keşfi oluşturmaktadır. Bu keşif malzemenin davranışının belirlediği kabuğun strüktürel performansını arttırılmak amacı ile en uygun geometri/şekil bulmak için bir ön koşuldur. Malzeme davranışı ve strüktürel davranışın geri bildirimleri ile Voronoi geometrileriyle oluşturulan form üzerinden alternatifler üretilmiştir. Bu alternatiflerin üretimi mutasyon, seçim, rekombinasyon, çaprazlama ve popülasyon gibi doğanın prensiplerini, optimizasyon sürecinde kullanan evrimsel algoritmalar ile gerçekleştirilmiştir. *Grasshopper*'ın, *Octopus* eklentisi ile sayısal tasarım ortamında parametreler kolaylıkla değiştirilerek optimizasyon sürecine anında müdahale ve seçme olanağı vermiştir.

Doğa yaratıcılık ve en iyi çözümü üretmesi açısından mimarlık ve mühendisliğe esin kaynağı olmaktadır. Doğadaki organizma ve süreçler incelendiğinde malzeme, form ve strüktür eşit derecede önem ve önceliğe sahip olduğu görülmektedir. Model kapsamında kullanılan doğal malzemenin mekanik özellikleri, kabuk strüktürde farklı amaçlara çözüm üretmek için başvurulabilecek bir alternatif ortaya koymaktadır. Doğada form oluştururken dış kuvvetlerin etkisi ile malzemenin mekanik özellikleri sayesinde rijit strüktürler oluşmaktadır. Doğada birçok malzeme lifli yapıdadır (Gruber, 2011; Oxman ve diğ, 2010). Lifli malzemeler anizotrop

özellikleri sayesinde çok verimli ve sağlamdır. Malzeme nerede gerekli ise oraya yönlendirilir, böylece adapte olabilen bu lifli malzemelerde enerji minimize olur. Doğanın enerjii en verimli şekilde kullanması, daha sürdürülebilir strüktürler üretilebilmesi açısından mimari ve mühendisliğe esin kaynağı olmuştur. Yapılan araştırmada lifli malzemelerin kullanımına örnek teşkil eden bambu yerine faklı malzeme, farklı geometriler ile oluşturularak malzemenin kısıtları ve parametreleri keşfedilebilir.

Tez kapsamında oluşturulan modelde başlangıç yüzeyi yatay kurguda hiper-eğrisel kabuk sistem ile oluşturulan strüktür daha sonra Voronoi diyagramı kullanılarak grid kabuk elde edilmiştir. Oluşturulan bu modelde, farklı program gereksinimlerine ve tasarım fonksiyonlarına göre, eğriselliğin tanımladığı akustik etki ve kabuğun yük dağılımının oluşturduğu optik etkiler farklı şekillerde kurgulanabilir.

Kabuk strüktürün gerilme bölgeleri, analizler sonucunda destek noktalarının tanımlandığı bölgelerde yoğunlaştığı görülmüştür. Buna göre optimizasyon sonrasında gerilme yoğunluğunun fazla ve az olma durumuna göre tekrardan değerlendirerek açıklıkları değiştirilebilir. Üretim aşamasında bambu lifleri ile kompozit malzemelerin oranı gerilme yoğunluğuna göre düzenlenebilir. Kabuğun malzeme davranışını ortaya koyabilmek için strüktürel şekil optimizasyonu tercih edilmiştir. Buna ek olarak strüktürel açıdan malzeme odaklı ısı, enerji, maliyet, gibi diğer optimizasyon çeşitleri de modele eklenerek simülasyonlarla test edilebilir. Tasarlanan modelde evrimsel algoritmalarla birden fazla değişkenli bir hedefe çözüm alternatifleri üretilmiş ve optimal formda strüktür bulunmuştur. Hedeflerin sayısı arttırılabilir; tasarımın karmaşıklık düzeyine göre, strüktürel açıdan birçok hedef fonksiyonu belirlenerek modele eklenebilir.

Bu çalışma ile sentetik yapıdaki kompozit malzemelerin çevreye verdiği zarar göz önünde bulundurularak, doğal malzemelerin ve doğal lif takviyeli kompozitlerin kullanımı ile üretimin avantajları ortaya koyulmuştur. Bilinen kompozitlere alternatif olarak bambu liflerinin kullanımı ile sağlamlık ve hafiflikten ödün vermeden yüksek performanslı malzemelerin keşfine bir zemin oluşturan tez çalışması farklı projelerle araştırılabilir. Yapı malzemesi olarak tercih edilen beton, çelik gibi malzemelerin hakimiyetinin yerini alabilecek doğal malzemeler ya da doğal lif takviyeli kompozit malzemelerle üretim süreci ve üretimi daha sürdürülebilir, ekonomik strüktürler elde etmeyi mümkün kılar. Bambu lifi, hızlı büyüme ve daha iyi malzeme özellikleri

açısından yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi nedeni ile üretim aşamasında çevreyi neredeyse kirletmeyen yapı malzemesi olma özelliğini gösteririr. Bambu lif takviyeli malzemeler epoksi, beton, elik gibi çeşitli yapı malzemeleri ile kompozit olarak kullanılabilir. Bu bağlamda sayısal üretim tekniklerini kullanarak, farklı form ve strüktür denemeleri ile çalışma ilerletilebilir. Bambu liflerinin takviye oranı, bağlantı biçimleri de tasarım sürecine katılarak, farklı karışımlarda bambu malzemesinin parametreleri ve kısıtları keşfedilebilir. Doğanın kuvvetlere göre şekillenen form üretme prensibi soyutlanarak, yk dağılımına göre değişen farklı yoğunlukta lif takviye bölgeleri düzenlemesi ile daha özelleştirilmiş, tasarım ihtiyaına uygun çalışmalar yapılabilir. Bu bağlamda tez ile çalışılan kabuk strüktür farklı araştırmalara altlık oluşturmaktadır.

Doğadan esinlenerek oluşturulan kabuk strüktür modelinde kuvvetlerin etkisi ile şekillenen strüktürün formu, malzemenin davranışının tasarımın erken aşamasında sürece dahil edilmesi ile elde edilmiştir. Çalışmanın odağı malzeme-strüktür-formun bütünleşik ilişkisi, malzemenin tasarım parametreleri, kısıtları ve doğadan yapılan çıkarımların, sayısal tasarım aracını bilgilendirmesi yoluyla tasarım sürecinin oluşturulmasıdır. Oluşturulan modelden elde edilen bulgular ve sonuçlar üzerine odaklanılmış, geometrik elemanların bağlantısı gibi üretimine dayalı detaylara odaklanılmamıştır. Bu nedenle üretilen sayısal model, başka uygulamalarla geliştirilebilir ve bütünleşik bir sürecin parçası olarak düşünülmelidir. Bu araştırma son ürün yerine sürece odaklanarak bir çalışma ortaya koymaktadır. Süreç esnasında oluşturulan sistemden gelen sürekli geri beslemeler ile süreç yönetilmiştir. Farklı uygulamalarda, modelin sayısal ortamda tasarlanması yanı sıra, üretim aşamasındaki bağlantı noktaları, tasarımın bulunacağı yer gibi faktörler de göz önüne alınarak belirlenen problemlere çözüm alternatifleri aranabilir ve bire bir ölçekte uygulamalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., Williams, C., Garlock, M. E. M., ve Billington, D. P.** (2014). *Shell Structures for Architecture*. New York: Routledge.
- Arslan, S. ve Sorguc, A.** (2004). Similarities between structures in nature and man-made structures : biomimesis in architecture. *WIT Press Design and Nature II: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, 73, 45–54.
- Ashby, M.** (2005). *Materials selection in mechanical design*, Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M. F., Gibson, L. J., Wegst, U., ve Olive, R.** (1995). The Mechanical Properties of Natural Materials. I. Material Property Charts. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 450(1938), 123–140. <<https://doi.org/10.1098/rspa.1995.0075>> Erişim tarihi 21.05.2018.
- Askarinejad, S., Kotowski, P., Shalchy, F. ve Rahbar, N.** (2015). Effects of humidity on shear behavior of bamboo. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 5(6), 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.11.007>
- Aziz, M. S., ve El Sherif, A. Y.** (2016). Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 707–714. <<https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.015>> Erişim tarihi 21.05.2018.
- Bader, Johannes, Zitzler, E.** (2011). HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization. *Evolutionary Computation*, 19(1), 45–76.
- Benyus, J. M.** (1997). *Biomimicry Innovation Inspired by Nature*, New York: Harper Collins.
- Biomimicry Guild**, (2007). *Innovation Inspired by Nature Work Book*, Biomimicry Guild, Nisan.
- Beukers, A., ve van Hinte, E.** (2001). *Lightness: The Inevitable Renaissance of Minimum Energy Structures*. rotterdam: 010 publishers.
- Cassinello, P., Schlaich, M., ve Torroja, J. A.** (2010). Félix Candela. In memorian (1910-1997). From thin concrete shells to the 21 st century's lightweight structures. *Informes de La Construcción*, 62(519), 5–26.
- Crolla, K., & Fingrut, A.** (2016). Protocol of error. *Caadria*, 415–424.
- Correal D, J. F. ve Arbeláez C, J.** (2010). Influence of Age and Height Position on Colombian Guadua Angustifolia Bamboo Mechanical Properties. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 12(2), 105–113. <<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2010000200005>> Erişim tarihi 20/05/2018
- Dimic, M.** (2011). Structural optimization of grid shells based on genetic

- algorithms, (doktora tezi), Institute of Building Structures and Structural Design, University of Stuttgart, Stuttgart.
- Dimic, M., & Knippers, J.** (2011). Free-Form Grid Shell Design Based On Genetic Algorithms. *ACADIA 11: Integration through Computation [Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)]*, 272–277.
- Douthé, C., Baverel, O. ve Caron, J.** (2006). Form-finding of a grid shell in composite materials. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 47(150), 53–62. Retrieved from [http://navier.enpc.fr/structures/pdf/article 2- SH.pdf](http://navier.enpc.fr/structures/pdf/article%20-%20SH.pdf)
- Erdine, E.** (2013). Biomimetic Strategies in Tower Design, 1, 559–568. Retrieved from http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?ecaade2013_192
- Erdine, E.** (2015). Generative Processes in Tower Design: Simultaneous Integration of Tower Subsystems Through Biomimetic Analogies. *Computational Ecologies: Design in the Anthropocene*, 172–183.
- Felbrich, B., Früh, N., Solly, J., Vasey, L. ve Knippers, J.** (2017). Multi-Machine Fabrication. *ACADIA 2017: Disciplines & Disruption*, 248–259.
- Ghavami, K.** (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement & Concrete Composites*, 27, 637–649 <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>> Erişim tarihi 21.05.2018.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., Karam, G. N., Wegst, U., & Shercliff, H. R.** (1995). The Mechanical Properties of Natural Materials. II. Microstructures for Mechanical Efficiency. *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, 450(1938), 141–162. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/52663>
- Gruber, P.** (2011). *Biomimetics in architecture, architecture of life and buildings*. Vienna, Austria: Springer Wien Newyork.
- Haftka, R. T., Gürdal, Z. ve Kamat, M. P.** (1990). *Elements of Structural Optimization*. Waterloo, Ontario, Canada: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V.
- İşçi, Ö., & Korukoğlu, S.** (2003). Genetik Algoritma Yaklaşımı ve Yöneylem Araştırmasında Bir Uygulama. *Yönetim ve Ekonomi*, 10(2), 191–208.
- Janssen, J. J. A.** (1981). Bamboo in building structures, 235. <<https://doi.org/10.6100/IR11834>> Erişim tarihi 21.05.2018.
- Janssen, J. J. A.** (2000). *Designing and Building with Bamboo*. Eindhoven the Netherlands.
- Janssen, P.** (2006). A generative evolutionary design method A generative evolutionary design method, 6268(March 2013), 37–41.
- Kawamura, H., & Ohmori, H.** (2002). Computational Morphogenesis of Discrete Structures Via Genetic Algorithms, 53(1), 28–55.
- Kingsford, C.** (2009). Algorithms in Nature. *Scientific Series Journal*, 4(1), 5–12.
- Kiranyaz, S., Ince, T., & Gabbouj, M.** (2014). *Multidimensional Particle Swarm Optimization for Machine Learning and Pattern Recognition* (Vol. 15). Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Knippers, J., & Speck, T.** (2012). Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspiration & Biomimetics*, 7(1), 015002. <<https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/015002>> Erişim tarihi 21.05.2018.
- Ladurner, G., Gabler, M., Menges, A., & Knippers, J.** (2012). Interactive Form-

- Finding for Biomimetic Fibre Structures: Development of a Computational Design Tool and Physical Fabrication Technique Based on the Biological Structure of the Lichen, 2, 509–520.
- Lee, P., Long, E., Shook, D., & Sarkisian, M.** (2010). Organic and Natural Forms in Building Design. In *Design Structural Engineering ASCE / SEI 2010 Structures Congress* (pp. 2–3).
- Li, X.** (2004). Physical , chemical , and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for berboard manufacturing.
- Moussavi, F.** (2011). *Biçimin işlevi*. (P. Derviş, Çev.). İstanbul : YEM yayın.
- Olsson, J.** (2012). Form finding and size optimization - Implementation of beam elements and size optimization in real time, 97.
- Oxman, N., Laucks, J., Kayser, M., David, C., & Uribe, G.** (2012). Biological Computation for Digital Design and Fabrication A biologically-informed finite element approach to structural performance and material optimization of robotically deposited fibre structures, 1, 1–10.
- Oxman, N., Mitchell, W. J., Arts, M., Supervisor, T. ve Beinart, J.** (2010). *Material-based Design Computation*. Massachusetts Institute of Technology. <<http://hdl.handle.net/1721.1/59192>> erişim tarihi 21.05.2018.
- Oxman, R. ve Oxman, R.** (2010). New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. *Architectural Design*, 80, 14–23.
- Pearce, P.** (1978). *Structure in Nature is a Strategy for Design*. Cambridge, Massachusetts; Londra, İngiltere: The MIT Press, 1-5.
- Pérez García, A. ve Gómez Martínez, F.** (2009). Natural structures: strategies for geometric and morphological optimization. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures*, (June 2014), 893–906. <<http://dspace.cc.upv.es/handle/10251/6955>> erişim tarihi 25.05.2018.
- Perez-Gomez, A.** (2002). Phenomenology and Virtual Space. Alternative Tactics for Architectural Practice. *OASE*, (58), 35–58.
- Preisinger, C.** (2016). *Karamba_1_2_2_Manual*. Karamba.
- Schmitt, O. H.** (1969). Some interesting and useful biomimetic transforms, In *Proceeding Third International Biophysics Congress*, Boston, p. 297
- Simmons, H. L., Olin, H. B., Schmidt, J. L. ve Lewis, W. H.** (2001). *Construction: Principles, Materials, and Methods*. Wiley. <<https://books.google.com.tr/books?id=SI7nX2OIMt4C>> erişim tarihi 25.05.2018.
- Speck, T. ve Speck, O.** (2008). Process sequences in biomimetic research. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 114, 3–11. <<https://doi.org/10.2495/DN080011>> erişim tarihi 25.05.2018.
- Spence, W. P. ve Kultermann, E.** (2016). *Construction Materials, Methods, and Techniques: Building for a Sustainable Future*. Delmar. <<https://books.google.com.tr/books?id=l8fEDAEEACAAJ>> erişim tarihi 25.05.2018.
- Terzidis, K.** (2003). *Expressive Form A conceptual approach to computational design*. UK London, New York: Spon Press Taylor & Francis Group.
- Trictus, D. E. S.** (2014). Physical and Mechanical Properties of Bamboo (*Dendrocalmus Strictus*), 5(1), 455–459.
- Tular, R. B., & Sutidjan.** (1978). Bamboo as a building material and its processing

- methods, 5(3), 249–254.
- van der Lugt, P., van den Dobbelsteen, A. A. J. F., & Janssen, J. J. A.** (2006). An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Materials*, 20(9), 648–656. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.023>> erişim tarihi 25.05.2018.
- Vasey, L., Baharlou, E., Dörstelmann, M., Koslowski, V., Prado, M., Schieber, G., ... Knippers, J.** (2015). Behavioral Design and Adaptive Robotic Fabrication of a Fiber Composite Compression Shell With Pneumatic Formwork. *Proceedings of ACADIA 2015*, 297–309.
- Veenendaal, D. ve Block, P.** (2012). An overview and comparison of structural form finding methods for general networks. *International Journal of Solids and Structures*, 49(26), 3741–3753. <<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.08.008>> erişim tarihi 25.05.2018.
- Vogel, S. ve DeFerrari, A.** (2003). *Comparative Biomechanics: Life's Physical World*. Princeton University Press. <<https://books.google.com.tr/books?id=UuuPLIxY1cwC>> erişim tarihi 25.05.2018.
- Von Buelow, P., Falk, A. ve Turrin, M.** (2010). Optimization of structural form using a genetic algorithm to search associative parametric geometry. *Structures & Architecture, Proceedings of the First International Conference on Structures and Architecture (ICSA 2010), Portugal*, 195–196.
- Weigele, J., Schloz, M., Schwinn, T., Reichert, S., LaMagna, R., Waimer, F., ... Menges, A.** (2013). Fibrous Morphologies: Integrative design and fabrication of fibre-reinforced structures in architecture using robotic filament winding Jakob. *ECAADe*, 1, 549–558. <http://cumincad.scix.net/data/works/att/ecaade2013_151.content.pdf> erişim tarihi 25.05.2018.
- Yazıcı, S.** (2013). *Mimarlıkta Malzeme Tabanlı Bütünleşik Hesaplamalı Tasarım Modeli* (doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yunis, L., Kyjánek, O., Dörstelmann, M., Prado, M., Schwinn, T., & Menges, A.** (2014). Bio-inspired and fabrication-informed design strategies for modular fibrous structures in architecture. *Fusion - Proceedings of the 32nd ECAADe Konferans - Sayı 1*, 1, 423–432. <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?ecaade2014_159> erişim tarihi 25.05.2018.
- Zari, M. P.** (2006). Biomimetic Approaches To Architectural Design for Increased Sustainability. *Design*, (Nisan), 1-10.
- Url-1** <<https://www.archdaily.com/496202/ad-classics-los-manantiales-felix-candela>>, erişim tarihi 20.05.2018.
- Url-2** <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Haeckel_Spumellaria.jpg>, erişim tarihi 20.05.2018.
- Url-3** <<https://www.glassonweb.com/article/structural-analysis-bending-bamboo-and-thin-glass>>, erişim tarihi 20.05.2018.
- Url-4** <<http://www.grasshopper3d.com/group/octopus>>, erişim tarihi 04.05.2018.
- Url-5** <https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo_-_collettivo_cerretini>, erişim tarihi 02.07.2018.

Url-6<<https://divisare.com/projects/100090-Manuel-Mauricio-Cardenas-Laverde-Boo-Tech-Bamboo-Eco-Dome>>, erişim tarihi 02.07.2018.

Url-7<<https://www.sciencefriday.com/educational-resources/why-do-bees-build-hexagonal-honeycomb-cells/>>, erişim tarihi 20.05.2018.

Url-8<<https://www.turtleselltherapy.com/turtle-shell>>, erişim tarihi 20.05.2018.

Url-9<<http://idahoptv.org/sciencetrek/topics/soil/facts.cfm>>, erişim tarihi 20.05.2018.





EKLER

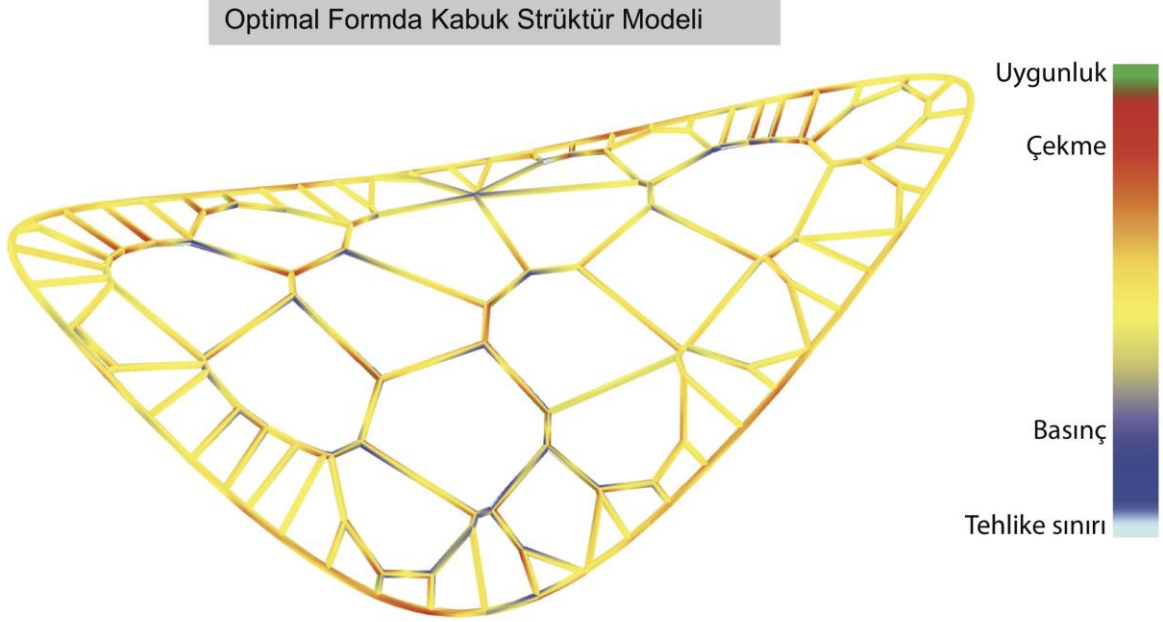
EK A: Optimizasyon sonucu elde edilen kabuk strüktür modeli.

EK B: Grid kabuk örüntü denemeleri.

EK C: Modelin Grasshopper-Karamba ile tanımlanması.

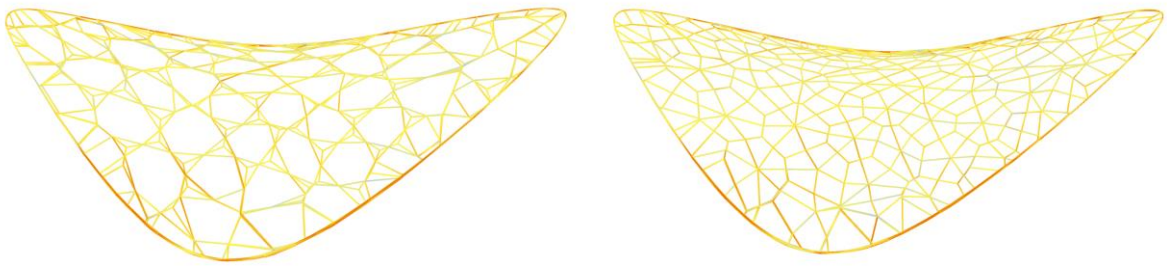


EK A



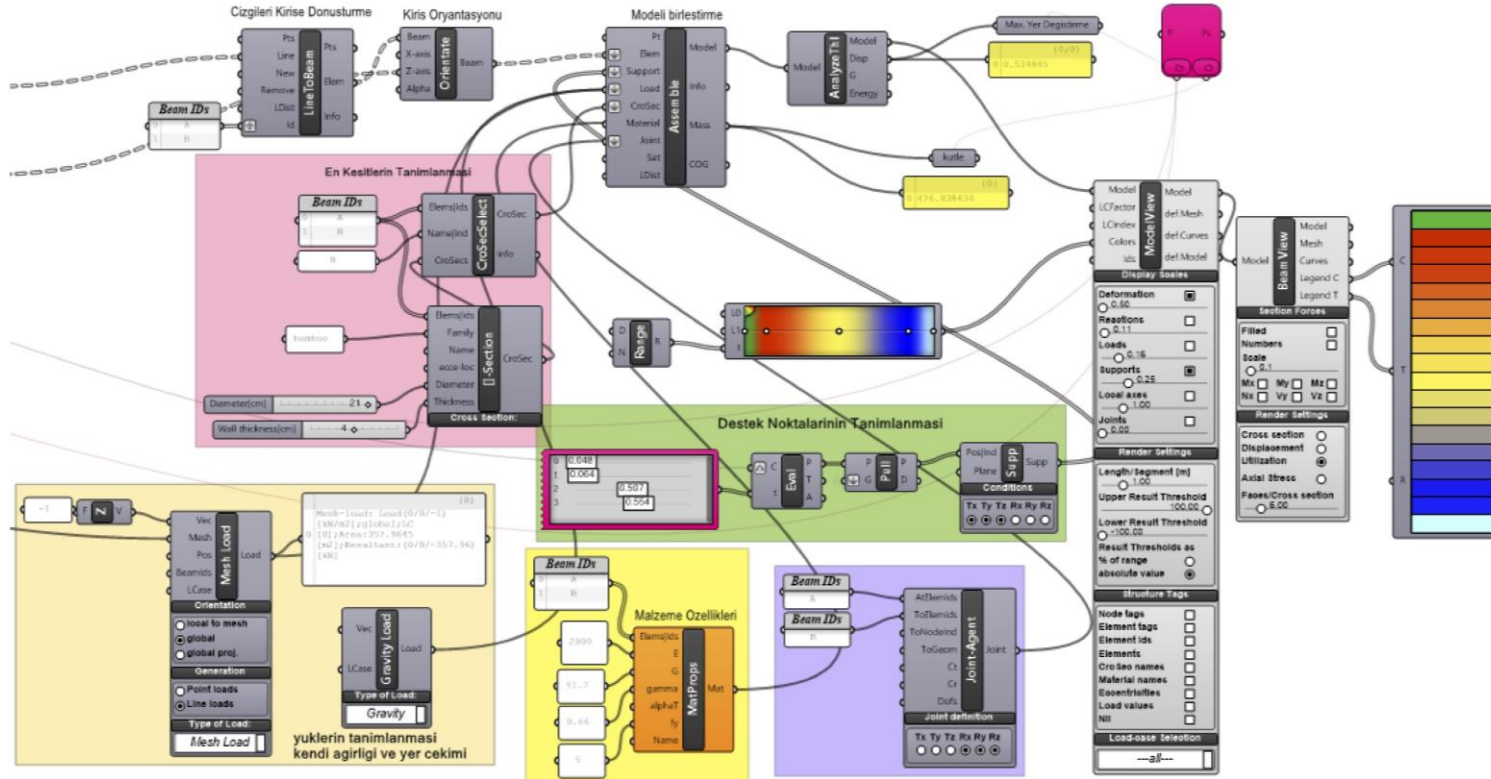
Şekil A.1 : Optimizasyon sonucu elde edilen kabuk strüktür modeli.

EK B



Şekil B.1: Grid kabuk örüntü denemeleri.

EK C



Şekil C.1: Modelin Grasshopper-Karamba ile tanımlanması.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Esra Demirel
Doğum Tarihi ve Yeri : Mudanya, 12.02.1990
E-posta : esra.demirel@yahoo.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı
- **Yüksek lisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Nisan-Eylül 2015- Kutup Planlama, Peyzaj, Mimarlık ve Mühendislik.
- Temmuz 2014-Ocak 2015-Aspey Peyzaj, Mühendislik ve İnşaat.