

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABUK YAPILAR İÇİN EVRİMSEL ALGORİTMA TABANLI
PARAMETRİK TASARIM ÖNERİSİ

İhsan Erdem ER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mimarlık Anabilim Dalı
Bilgisayar Ortamında Mimarlık Programı

Danışman
Doç. Dr. Togan TONG

Haziran, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABUK YAPILAR İÇİN EVRİMSEL ALGORİTMA TABANLI
PARAMETRİK TASARIM ÖNERİSİ

İhsan Erdem ER tarafından hazırlanan tez çalışması 27.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Bilgisayar Ortamında Mimarlık Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Togan TONG
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Togan TONG, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doc. Dr. Feride Pınar ARABACIOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Kerem ERÇOŞKUN, Üye
Okan Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Togan TONG sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kabuk Yapılar İçin Evrimsel Algoritma Tabanlı Parametrik Tasarım Önerisi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İhsan Erdem ER

İmza

*Sevgili eşim,
Cemre AKALIN ER'e*



TEŞEKKÜR

Lisans sürecimde olduğu gibi, tez çalışmamda da teşvik edici, motive edici, yönlendirici ve yapıcı yaklaşımlarıyla desteğini esirgemeyen, her zaman olumlu yaklaşımıyla, kıymetli katkılarıyla tezimin topluma, bilime faydalı olması için yol gösteren, öğrencisi olmaktan mutluluk duyduğum değerli tez danışmanım Sn. Doc. Dr. Togan TONG'a; tez çalışmamın ilerlemesinde, tamamlanmasında her zaman desteklerini hissettiğim, kıymetli katkıları, destekleri ve yapıcı yorumları için Hasan TAŞTAN'a; son olarak yüksek lisans sürecinde tanıştığım ve bu süreçte beni destekleyen, sevgisiyle her zaman yanımda olan, sabrını ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen biricik eşim Cemre AKALIN ER'e teşekkür ederim.

İhsan Erdem ER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
2 KABUK YAPI SİSTEMLERİNDE FORM BULMA VE OPTİMİZASYON	5
2.1 Aktif Kabuk Sistemleri	5
2.1.1 Kablo Izgara Yapılar	6
2.1.2 Membran Yapılar	6
2.2 Pasif Kabuk Sistemleri	8
2.2.1 Yığma Kabuk Yapılar	8
2.2.2 İnce Kabuk Yapıları	12
2.2.3 Izgara Kabuk Yapıları	16
2.2.3.1 Gerilmesiz Izgara Kabuk Yapıları	17
2.2.3.2 Gerilmeli Izgara Kabuk Yapıları	17
2.3 Kabuk Yapılarında Form Bulma Yöntemleri	20
2.3.1 Matematik Temelli Form Bulma	22
2.3.2 Fizik Temelli Form Bulma	23
2.3.2.1 Kuvvet Yoğunluğu (Force Density)	23
2.3.2.2 Eksenel Baskı Ağı (Thrust Network)	24
2.3.2.3 Dinamik Gevşeme (Dynamic Relaxation)	26
2.3.2.4 Parçacık Dizgisi (Particle String)	27

2.3.3	Serbest Modelleme ile Form Bulma	27
2.4	Evrimsel Algoritmalar	31
2.4.1	Genetik Algoritmalar	32
2.4.2	Pareto Öncül Yöntemi	33
2.4.3	Tek ve Çok Hedefli Optimizasyon Farkları	35
3	YIĞMA KABUK YAPILAR İÇİN OPTİMİZASYON MODELİ	37
3.1	Ağ Sisteminin Oluşturulması	37
3.2	Kabuk Formunun Oluşturulması	41
3.3	Genetik Algoritma ile Optimizasyon	42
3.3.1	Çok Hedefli Optimizasyon	43
3.3.1.1	Optimizasyonun Başarım Değerleri	43
3.3.1.2	Optimizasyonun Parametreleri ve Sınırları	44
3.3.2	Tek Hedefli Optimizasyon	46
3.4	Değerlendirme	47
4	SONUÇ VE ÖNERİLER	50
	KAYNAKÇA	52
A	KULLANILAN ALGORİTMALAR	56
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	58

SİMGE LİSTESİ

P	Ağırlık
l_0	Başlangıç Uzunluğu
EA	Eksenel Sertlik
k	Esneklik Katsayısı
e	Gerilmeye Bağlı Uzama
f	Hedef Fonksiyon
v	İvme
F	Kuvvet
I	Kuvvet Diyagramı
q	Kuvvet Yoğunluğu
C	Sönümleme Değeri
l	Uzama Miktarı
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

AEM	Ayrık Eleman Modeli
ÇHO	Çok Hedefli Optimizasyon
EA	Evrimsel Algoritmalar
GA	Genetik Algoritmalar
İK	Izgara Kabuk
İK	İnce Kabuk
SEA	Sonlu Eleman Analizi
THO	Tek Hedefli Optimizasyon

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Bolinger + Grohmann tarafından yapılan Hermès Rive Gauche pavilyonu (John Chilton, Tang 2016)	1
Şekil 1.2	Autoban tarafından Haydar Haliev Hava Alanında Tasarlanan Pavilyon (Sanliman n.d.)	3
Şekil 2.1	Dorton Arena Kapalı Spor Salonu	6
Şekil 2.2	İlk membran kabuk örnekleri	7
Şekil 2.3	Ön germe kullanılan membran kabuk örnekleri (Chilton, Velasco 2005)	7
Şekil 2.4	Kabuk yapılarının sınıflandırılması (Kamal, Setya, Brar (2020) çalışmasından uyarlanmıştır.)	9
Şekil 2.5	Tonoz ve kubbe biçiminde yığma kabuk örnekleri	9
Şekil 2.6	Katalan Tonozu kesiti ve detayı (Saliklis, White (2008) 'den uyarlanmıştır.)	10
Şekil 2.7	Geleneksel yığma tekniği ile oluşturulan yığma kabuk yapısı (P Block et al. 2016).	11
Şekil 2.8	Yığma kabuk yapılarında kuvvet dengeliyici eleman örnekleri	12
Şekil 2.9	Geometri temelli İK yapı örnekleri	13
Şekil 2.10 (a)	Eğrisel ve düz kenarlı hiperbolik yüzey - (b) Hiperbolik yüzeyde aç toplamının 360 dereceyi geçtiği nokta (Pottmann et al. 2007).	14
Şekil 2.11 (a)	Lomas de Cuernavaca Şapeli (Draper, Garlock, Billington 2008) - (b) Los Manantiales Restoranı (John Chilton, Chuang 2017) - (c) Bacardi Rom Fabrikası (John Chilton, Chuang 2017) - (d) High Life Tekstil Fabrikası (S. Wang et al. 2020)	15
Şekil 2.12	BP benzin istasyonu için Almanya'da tasarlanan ikiz İK yapısı, Heinz Isler, Almanya, 1968	16
Şekil 2.13 (a)	La Monja Kültür Merkezi, Mimarlık Fakültesi, BUAP, Meksika, 2012.(Mundo-Hernandez, Valerdi-Nochebuena, Sosa-Oliver 2014) - (b) The Rolex Learning Centre, SANAA, İsviçre, 2011 (Tang 2012) - (c) Saijo Crematorium, Toyo Ito, Japonya, 2008 (Tang 2012) - (d) Grin Grin Park çatısı, Toyo Ito, Japonya, 2005 (Tang 2012)	17

Şekil 2.14 (a) Buckminster Fuller tarafından tasarlanan The Biosphere yapısı, Montreal, Canada (Ağırbaş 2019) - (b) Mannheim Multihalle yapısının yarı geçirgen membran ile kaplanma süreci (Stuttgart Üniversitesi Hafif Yapı Tasarım Fakültesi Arşivi) - (c) The Savill Garden çatısının içeriden görünüşü (John Chilton, Tang 2016) . . .	18
Şekil 2.15 Izgara kabuk yapıları için farklı bağlantı noktası tasarımları	18
Şekil 2.16 (a) Frei Otto tarafından Alman Yapı Fuarı için tasarlanan ilk gerilmeli IK yapısı, Essen, Almanya, 1962 (Liddell 2015) - (b) – Expodach yapısının kurulum aşaması, Hanover, Almanya, 2000, (John Chilton, Tang 2016) - (c, d) Mannheim Bundesgartenschau inşasında ızgara sistemini kaldırmak için kullanılan dikey elemanlar(John Chilton, Tang 2016) - (e) 1990 Dünya kupası için kurulan geçici IK sistemi, İtalya (Liuti, Pugnale 2015) - (f) Yer çekimi kuvveti ile şekillendirilen Downland Gridshell, İngiltere, 2002, (Cullinanstudio n.d.) - (g) Önceden delinmiş elemanların inşaat alanında birleştirilmesi ile oluşturulan Flimwell Woodland Enterprise Centre, İngiltere, 1999, (John Chilton, Tang 2016)	19
Şekil 2.17 Mannheim Bundesgartenschau’da kayma gerilmesi dayanımı arttırmak için kullanılan diyagonal kablo elemanları (Liddell 2015). . .	20
Şekil 2.18 (a) Shigeru Ban tarafından Expo 2000 için tasarlanan Japon Pavilyonu, Hannover, Almanya, 2000 (Arquitecturaviva n.d.) - (b) – Ephemeral Katedrali iç görünüşü, Paris,Fransa, 2013(Du Peloux et al. 2015) - (c) Centre Pompidou, Metz, Fransa, 2010 (Shuang 2014) - (d) Savill Garden iç görünüşü, Windsor, İngiltere, 2006, (Lara-Bocanegra et al. 2018)	21
Şekil 2.19 Düğüm noktasında oluşan kuvvetler((Adriaenssens et al. 2014). . .	24
Şekil 2.20 Kuvvet yoğunluğu yönteminin akış şeması, parametreleri ve üretilen form örnekleri	25
Şekil 2.21 EBA yönteminin akış şeması, parametreleri ve üretilen form örnekleri	26
Şekil 2.22 Dinamik gevşeme yönteminin akış şeması, parametreleri ve üretilen form örnekleri	28
Şekil 2.23 Parçacık dizgisi yönteminin akış şeması, parametreleri ve iki farklı modelle üretilen form örnekleri	29
Şekil 2.24 Kresge oditoryum yapısının serbest kenarlarında kullanılan çelik kirişler (Adriaenssens et al. 2014)	30
Şekil 2.25 Genetik algoritmaların çalışma mekanizması	33
Şekil 2.26 6 sonucun f_1 ve f_2 başarımları için değerlendirme grafiği (4 numaralı sonucu domine eden öncüller sarı ile gösterilmiştir.)	34
Şekil 2.27 Başarım kriterlerine göre pareto öncül çizgisinin değişimi	35

Şekil 2.28	5 hedefli optimizasyon sonuçlarının grafik temsili (Yuan Cao, Mao 2022)	35
Şekil 3.1	Çalışmanın modeli	38
Şekil 3.2	Çalışmanın akış şeması ve kullanılan eklentiler	39
Şekil 3.3	“loft” işlemi ile 6 cm yükseltilerek oluşturulan üç boyutlu ağ sistemi	41
Şekil 3.4	Dinamik gevşeme işlemi için kullanılan görsel kod	42
Şekil 3.5	(a) Dinamik gevşeme sonucunda üretilen strüktür biçimindeki kabuk formu - (b) Panellerdn oluşacak şekilde düzenlenen kabuk formu .	42
Şekil 3.6	"Project" işlemi sonucunda kabuk yüzeyinde oluşan kırılmalar	43
Şekil 3.7	Paneller arası kırılmayı hesaplamak için kullanılan kod	44
Şekil 3.8	Panel kalınlığı için belirlenen sınır değerler	45
Şekil 3.9	Ölçekleme algoritması	46
Şekil A.1	Ağ Sistemi Oluşum Algoritması	56
Şekil A.2	Kabuk Formu Oluşum Algoritması	56
Şekil A.3	Project Algoritması	57
Şekil A.4	Optimizasyon Algoritması	57

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Yığma kabuk yapıların avantaj ve dezavantajları	11
Tablo 2.2	Gerilmeli ve gerilmesiz IK sistemlerin karşılaştırılması	20
Tablo 2.3	Kabuk Yapıları İçin Form Bulma Yöntemleri	21
Tablo 2.4	Kabuk yapı örnekleri ve matematiksel temelleri	22
Tablo 3.1	İki boyutlu yüzey üretim alternatifleri	39
Tablo 3.2	Üretilebilecek ağ sistemi alternatifleri	40
Tablo 3.3	Octopus eklentisi için kullanılan ayarlar	43
Tablo 3.4	Optimizasyon algoritmasının hedef fonksiyonu için belirlenen başarım kriterleri	44
Tablo 3.5	Optimizasyon parametreleri ve sınır değerleri	45
Tablo 3.6	THO algoritmasında kullanılan ayarlar	46
Tablo 3.7	Optimizasyon sonucu seçilen öncüller, DD: Diyagonal Dörtgen, D: Dörtgen, A: Altıgen	48
Tablo 3.8	Optimizasyon sonucu seçilen öncüllerin açıklık oranları, A/K: Toplam açıklık alanının kabuk yüzeyine oranı	49

Kabuk Yapılar İçin Evrimsel Algoritma Tabanlı Parametrik Tasarım Önerisi

İhsan Erdem ER

Mimarlık Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Togan TONG

Kabuk sistemleri, az malzeme ile geniş açıklıkları geçebilmektedir. Bu sebeple kabuk sistemleri geçmişten günümüze araştırılan ve geliştirilen bir konu olmuştur. Kabuk sistemleri, geniş açıklıkları geçebilmenin yanında serbest formların üretimine de imkân sağlamaktadır. Ancak karmaşık yapıları birçok tasarım ve uygulama zorluğunu da beraberinde getirmektedir. Bu durum, kabuk tasarımında hem mimari gereksinimleri karşılayabilen hem de strüktürel olarak başarılı olabilecek bir form arayışını doğurmaktadır. Form arayışı için başlarda fiziksel modellemeye dayalı yöntemler kullanılırken, hesaplmalı tasarım araçlarının gelişimi ile fiziksel modellere alternatif olarak dijital form bulma yöntemleri geliştirilmiştir. Dijital yöntemler mekanik yöntemlere göre daha hızlı olsalar da hesaplmalı tasarım, parametre ve başarımların net bir şekilde tanımlanmasını gerektirmektedir. Kabuk tasarımında yükseklik, statik, maliyet ve estetik gibi birden çok başarımlar göz önünde bulundurulmak zorundadır. Son yıllarda evrimsel algoritmalar birden çok başarımlar için optimizasyon imkânı sunabildikleri için mimari tasarım alanında kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada da kabuk yapıları için evrimsel algoritmaya dayalı optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Önerilen modelde düzlemsel panellerden oluşan yığma kabuk yapılar için dinamik gevşeme yöntemiyle form bulma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından üretilen form panel sayısı, paneller arası kırılma ve yükseklik açısından evrimsel algoritmalar kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon işlemi ilk olarak tek hedefli optimizasyon ardından çok hedefli optimizasyon algoritması ile gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geliştirilen hesaplmalı tasarım yönteminin, kabuk yapılarının ön tasarım süreçlerine katkı

sağlaması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok Kriterli Optimizasyon, eğrisel kabuk yapılar, form bulma, geometri optimizasyonu, evrimsel algoritmalar



Evolutionary Algorithm Based Parametric Design Proposal for Shell Structures

İhsan Erdem ER

Department of Architecture

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Togan TONG

Shell systems can pass large openings with less material. For this reason, shell systems have been a subject that has been researched and developed from past to present. Shell systems allow the production of free forms as well as being able to pass large openings. However, their complex structures bring many design and production difficulties. This situation leads to the search for a form that can both meet the architectural requirements and be structurally successful in shell design. While methods based on physical modeling were used in the beginning for form seeking, digital form finding methods have been developed as an alternative to physical models with the development of computational design tools. Although digital methods are faster than mechanical methods, computational design requires clear definition of design variables and objectives. In shell design, multiple objectives such as height, static, cost and aesthetics have to be considered. In recent years, evolutionary algorithms have started to be used in the field of architectural design, as they can offer optimization for multiple performances. In this study, an optimisation model for shell structures based on an evolutionary algorithm was developed. The dynamic relaxation method was used for form finding in the proposed model, which was developed for masonry shell structures consisting of planar panels. Then, the generated shape was optimised in terms of number of panels, height and panel breakage using evolutionary algorithms. The optimisation process was carried out first with a single-objective optimisation and then with a multi-objective optimisation algorithm, and the results were compared. The results were compared with each other. The developed computer-aided design method is expected to contribute to the early design processes of shell structures.

Keywords: Multi Criteria Optimization, curvilinear shell structures, form finding, geometry optimisation, evolutionary algorithms



1.1 Literatür Özeti

Kabuk sistemleri; geniş açıklıkları minimum malzeme ile geçebilmeyi sağlayan verimli ve hafif yapılardır (Vassallo, Malek 2017). Bu sebeple tarih boyunca, mimarlar geniş açıklıkların geçilebilmesi için kabuk sistemlerini kullanmışlardır. Kabuk sistemleri; yükler karşısında hareket edebilen aktif sistemler ve hareket edemeyen pasif sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır (Adriaenssens et al. 2014). Aktif sistemler esneklikleri ile dış yükler karşısında hareket edebilen, pasif sistemler ise dış yükleri membran davranışı ile şekil değiştirmeden destek noktalarına ileten sistemlerdir. Ayrıca kabuk yapılar, yüzey yapılarına göre sürekli ve parçalı yapılar olarak ikiye ayrılmaktadır. 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren beton ve betonarme kullanımının artması sürekli kabuk sistemlerinin gelişmesini sağlamıştır (Koç 2020). Yüzyılda Felix Candela, Eladio Dieste, Heinz Isler ve Pier Luigi Nervi çalışmaları ile ince kabuk (İK) sistemlerin yaygınlaşmasını sağlamışlardır. 21. yüzyılda, dijital üretim araçlarının ve form bulma yöntemlerinin gelişmesi ise Hermès Rive Gauche Pavilyonu gibi serbest eğrilikli ızgara kabuk (IK) yapılarının yapılmasını mümkün kılmıştır (Şekil 1.1).



(a) Yapının fiziksel görünüşü



(b) Yapının dijital modeli

Şekil 1.1 Bolinger + Grohmann tarafından yapılan Hermès Rive Gauche pavilyonu (John Chilton, Tang 2016)

Kabuk yapıların statik davranışları baskın olarak geometrilerine dayandığı için kabuk strüktürü, kabuğun formuyla doğrudan ilişkilidir (Adriaenssens et al. 2014). Bu sebeple kabuk yapı tasarımında biçimsel kararlar ile strüktürün eş zamanlı olarak düşünülmesi gerekmektedir. Bu durum kabuk tasarımında hem estetik gereksinimleri karşılayabilen hem de strüktürel olarak başarılı bir form arayışını doğurmaktadır (Ağırbaş 2019). Bunun için yıllar içerisinde çeşitli form bulma yöntemleri kullanılmıştır. Form bulma sonunda elde edilen geometrinin aynı zamanda üretim için tanımlanabilir ve aktarılabilir olması gerekmektedir; bu sebeple ilk form bulma çalışmaları, matematiksel olarak tanımlanabilen temel geometrilere dayanmaktadır. Ardından fizik temelli form bulma yöntemleri gelmektedir. Hooke'un (1676) "Hooke's Law of Elasticity" çalışmasından doğan sarkıt modelleri bu çalışmaların ilki olarak kabul edilebilir. Fiziksel model ile form bulma günümüzde halen kullanılan verimli bir yöntemdir. Ancak fiziksel model sonucu üretilen formun üretim için yeniden tanımlanması gerekmektedir. Hesaplamalı tasarım araçlarının gelişimiyle fiziksel model çalışmalarına alternatif olarak dijital form bulma yöntemleri geliştirilmiştir. Bu sayede form bulma sonucu üretilen geometri, dijital ortamda da oluşturulduğu için yeniden tanımlanması gerekmemektedir. Farklı kabuk yapı tasarımları için farklı form bulma yöntemleri kullanılmaktadır. "Kuvvet Yoğunluğu" (Force Density) yöntemi aktif kabuk yapı çalışmaları (Malerba, Patelli, Quagliaroli, et al. 2012; Zhang, Ohsaki 2006) için kullanılırken "Eksenel Baskı Ağı" (Thrust Network) yöntemi yığma kabuk yapı çalışmaları (Rippmann, Philippe Block 2013) için kullanılmaktadır. "Dinamik Gevşeme" (Dynamic Relaxation) ve "Parçacık Dizisi" (Particle String) yöntemleri ise hem pasif (Larsen, Pedersen, Pigram 2012; Naboni 2016) hem de aktif (Ali, Rhode-Barbarigos, I. F. Smith 2011; Noel et al. 2021) kabuk yapı çalışmaları için kullanılmaktadır.

Kabuk yapıları Şekil 1.1'deki gibi sadece strüktürden oluşabilmektedir. Ancak bu tür yapılarda, kabuk genellikle hem duvar hem de çatı görevi görmektedir (Cuvilliers et al. 2017). Bu sebepten kabuğun biçimsel sorunlarının yanı sıra, ışık geçirgenliği ve yalıtım gibi sorunlara da cevap vermesi gerekmektedir. Bu gibi durumlarda kabuk, esnek membran benzeri bir malzeme veya Şekil 1.2'deki gibi ahşap, ve metal gibi görece daha az esnek olan paneller ile kaplanmaktadır.

Bu durumda yüzey geometrisine göre düzlemsel veya eğrisel paneller tercih edilmektedir. Eğrisel paneller, dijital üretim teknikleri ile mümkün olsalar da kalıp maliyetleri sebebiyle düzlemsel panellere göre daha pahalı sistemlerdir. Düzlemsel paneller ise üretim kolaylığı sebebiyle eğrisel panellere göre daha az maliyetli sistemlerdir. Ancak kabuk yüzeyinde kırılmalara sebep oldukları için düzlemsel panellerde estetik olarak eğrisel panellerdeki akışkanlık sağlanamamaktadır. Eğrisel panellerde üretim maliyetini optimize etmek için panel tekrarı (Peña de Leon 2012)



Şekil 1.2 Autoban trafından Haydar Haliev Hava Alanında Tasarlanan Pavilyon (Sanlıman n.d.)

veya kalıp tekrarı (Eigensatz et al. 2010) çalışmaları bulunmaktadır. Düzlemsel panellerde ise maliyet optimizasyonu, panel üretiminde kullanılan malzeme ve üretim sırasında oluşan artık malzemenin azaltılması ile sağlanmaktadır.

Kabuk tasarımı yükseklik, statik, maliyet ve estetik gibi birden çok başarımla göz önünde bulundurulmak zorundadır (John Chilton, Tang 2016). Evrimsel algoritmalar (EA) birden çok başarımla için optimizasyon imkânı sunmaktadır. Bu sebeple mimari tasarım alanında sıkça kullanılmaya başlanmıştır (Zhang, Ohsaki 2006). Mueller (2015)'de yapı tasarımında enerji ve biçim başarımlarını hedeflerken, Mesnil, Douthe, Baverel (2017)'de kabuk yapı tasarımında biçim ve statik başarımlarını hedeflemiştir. Kabuk yapılarının optimizasyonu, birçok farklı araştırmanın (Ağırbaş 2019; Demirel 2018; Saltık, Alacam 2020) da odak noktası olmuştur. Kabuk yapılarında optimizasyon genellikle formun optimizasyonu ile sağlanmaktadır. Formunda optimizasyonu da baskın olarak kullanılan form yöntemine bağlıdır. Bu çalışmada düzlemsel panellere sahip pasif ve sürekli kabuk yapıları için form bulma ve optimizasyon işlemini eş zamanlı olarak gerçekleştirebilen parametrik tasarım modeli önerilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, kabuk yapıları için hem form bulma sürecini hem de optimizasyon işlemini gerçekleştirebilen, hesaplamalı tasarım modeli geliştirmektir. Bu model sayesinde tasarım parametrelerinin sonuca etkisinin, tasarımın erken aşamasında görülmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede modelin, karar verme sürecine yardımcı olması amaçlanmıştır. Optimizasyon adımı EA aracılığıyla form ve maliyet optimizasyonunun gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir. Önerilen modelde, iki boyutlu bir çokgenden yola çıkılarak “Dinamik Gevşeme” yöntemi ile üç boyutlu kabuk üretimi ve üretilen formun EA yardımıyla optimizasyonu çalışılarak EA'nın kabuk tasarımındaki potansiyeli incelenmiştir. Bu çalışmada düzlemsel paneller

hedeflendiği için panel ve kalıp tekrarı kapsam dışı bırakılarak panel maliyeti, panel üretiminde kullanılan malzeme üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca kabuk formunun statik başarımı da kapsam dışında bırakılmıştır. İleriki çalışmalarda modelin geliştirilerek statik başarımın da optimizasyona dahil edilmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Çalışmada aşağıdaki hipotezler sorgulanmıştır:

- Kabuk yapılarının erken tasarım aşamalarında karar verme sürecine yardımcı hesaplamalı tasarım modeli oluşturulabilir.
- Bu modelde, doğanın evrim sürecini taklit eden genetik algoritmalar (GA) kullanılabilir. GA'nın kullanımı ile kabuk yapılarına yönelik olarak, form ve maliyet bağlamında optimizasyon modeli geliştirilebilir.
- Optimizasyon problemlerinin çözümünde çok hedefli algoritmalar, tek hedeflilere göre daha verimlidir.
- Tek hedefli optimizasyon (THO) işlemi çok hedefli optimizasyon (ÇHO) sonuçlarını geliştirmek için kullanılabilir.
- ÇHO'da, başarımların sabit bir değer aralığına ölçeklendirilmemesi optimizasyon sonuçlarını etkilemez.

2 KABUK YAPI SİSTEMLERİNDE FORM BULMA VE OPTİMİZASYON

Tarih boyunca, kalabalık insan topluluklarının bir araya gelmesini gerektiren etkinlikler için geniş mekanlara ihtiyaç duyulmuştur. Kabuk yapıları da, az malzeme kullanımı ile geniş açıklıkların desteksiz olarak geçilmesini sağlayan sistemlerdir. Bu sebeple geçmişten günümüze, kabuk yapıları ihtiyaç duyulan ve devamlı geliştirilen sistemler olarak literatürde yer edinmişlerdir. Kabuk yapıları üç boyutlu eğrisel yüzeyler ile oluşturulan ve bir boyutu diğer iki boyutuna göre küçük olan yapılar olarak tanımlanmaktadır (Adriaenssens et al. 2014). Günümüzde membran; çelik kablo gibi esnek malzemeler ile, veya beton, cam, ahşap ve metal gibi daha rijid malzemeler ile kabuk tasarımları yapılabilmektedir. Ancak seçilecek olan malzemenin davranışına göre kabuk yapısının davranışı da değişiklik göstermektedir. Adriaenssens et al. (2014)'e göre kabuk yapıları seçilecek malzeme çeşidine göre, pasif sistemler ve aktif sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Aktif kabuk sistemleri esneklikleri ile dış yükler karşısında hareket edebilen sistemlerdir. Pasif kabuk sistemleri ise kullanılan malzemenin doğası gereği yükler karşısında esneklik göstermeyen rijid sistemlerdir. Çalışmanın 2.1 bölümünde aktif kabuk yapıları, 2.2 bölümünde pasif kabuk yapıları açıklanarak sınıflandırılmıştır.

Kabuk yapılarında, kabuk formu yapının estetik maliyet ve statik gibi birçok başarımlarını doğrudan etkilemektedir. Bu durum kabuk yapılarında, tüm bu kriterleri sağlayacak form arayışını doğurmaktadır. Form bulma sonucunda elde edilen formun aynı zamanda farklı başarımlar için optimize edilmesi gerekmektedir. Çalışmanın devamında kabuk yapılarda form bulma için kullanılan yöntemler (Bölüm 2.3), ve optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan EA (Bölüm 2.4) incelenmiştir.

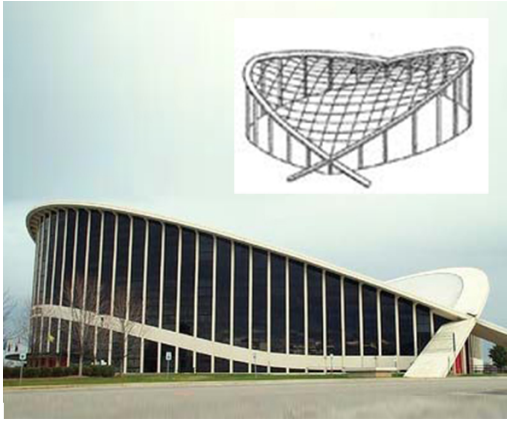
2.1 Aktif Kabuk Sistemleri

Dış yükler karşısında esneklik göstererek şekil değiştirebilen kabuk yapıları, aktif kabuk sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler, membran veya kablo

türevi hafif malzemeler kullanılarak üretilen hafif yapılardır. Bu sebeple aktif kabuk yapılarının şekil değiştirme kabiliyetleri üretimlerinde kullanılan malzemelerin doğasından kaynaklanmaktadır. Aktif kabuk sistemleri; kendi içerisinde kablo ızgara ve membran sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Çalışmanın devamındaki 2.1.1 bölümünde kablo ızgara sistemleri, 2.1.2 bölümünde ise membran sistemler açıklanmıştır.

2.1.1 Kablo ızgara Yapılar

Kablo ızgara yapıları aktif kabuk sistem sınıfına girmektedir. Kablo ızgara yapılarının ilk örneği Şekil 2.1a'da görülen, 1953 yılında yapılan Kuzey Karolina'daki Dorton Arena Kapalı Spor Salonu'dur. Kablo ızgara yapıları, gerilmeye çalışan yapılar oldukları için ızgara sistemini oluşturan kabloların sarkmayı önleyecek şekilde gerilmeleri gerekmektedir (Şekil 2.1b). Kablo ızgara yapıları deformasyonu arttıkça gerilmeleri artarak rijitleşen yapılardır (Z. Wang, Li, Yuyan Cao 2013). Kablo ızgara yapılarında sistemin rijitliğini arttırmak için yapı yüzeyi kaplanabilir veya sisteme dışarıdan yük eklenebilir. Bu gibi durumlarda kaplama yüzeyinin, ızgara sisteminin hareketlerine uyum sağlaması gerekmektedir. Bu sebeple kaplama işlemi için genellikle kumaş veya folyo gibi esnek malzemeler tercih edilmektedir (Gonzalez Quelle 2009).



(a) Dorton Arena kablo ızgara sistemi (Gonzalez Quelle 2009).



(b) Üretim aşamasında gerilen kablo ızgara sistemi (Watson 2010).

Şekil 2.1 Dorton Arena Kapalı Spor Salonu

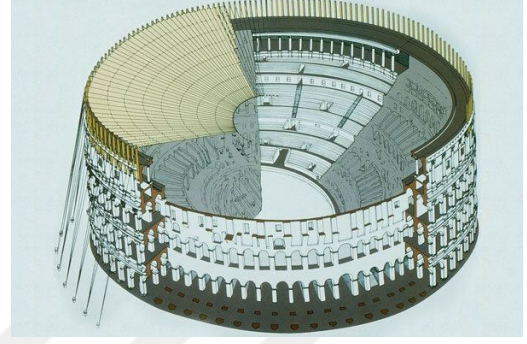
2.1.2 Membran Yapılar

Aktif kabuk yapılarının diğer örneği olan membran yapılar da kablo ızgara sistemleri gibi esnek sistemlerdir ve yük değişimine göre şekil değiştirirler (Lienhard, Knippers 2015). Membran sistemleri ilk olarak Şekil 2.2a'daki gibi geçici hafif yapılar olarak

veya Şekil 2.2b'de olduğu gibi üst örtü elemanları olarak kullanılmıştır. Ancak 19. Yüzyıla kadar membran sistemleri günümüzdeki anlamıyla, geniş açıklık geçebilen çatı örtüsü olarak kullanılmamıştır (Chilton 2010). Mebran sistemleri, 19. yy. da kompozit malzemelerin gelişmesinden sonra geniş açıklıklı mekân tanımlayan çatı sistemleri olarak kullanılmaya başlanmıştır (Chilton, Velasco 2005).



(a) Siyah Arap Çadırı (Andrews 2009)



(b) Kolezyumlarda kullanılan Velarium örneği (Mahajan 2021).

Şekil 2.2 İlk membran kabuk örnekleri

Membran kabuk yapılarının, rüzgâr ve kar gibi dış yükler karşısında rijitliklerini koruyabilmesi için sistemi oluşturan membran parçalarına ön germe işlemi uygulanması gerekmektedir (Motevalli et al. 2019). Bu işlem kabuk formunun eğrilğine göre çeşitlilik göstermektedir. Negatif eğrilikli formlarda Şekil 2.3a örneğinde olduğu gibi kablo veya kiriş benzeri elemanlarla sistem gerilerek yüzey gerilmesi sağlanmaktadır. Pozitif eğrilikli formlarda ise Şekil 2.3b örneğinde görülen, hava basıncı ile şişirme gibi yöntemler kullanılarak yüzey gerilmesi sağlanmaktadır.



(a) Millennium Garden, Nottingham Üniversitesi, UK



(b) Toyota Stadyumu, Toyota City, Japonya .

Şekil 2.3 Ön germe kullanılan membran kabuk örnekleri (Chilton, Velasco 2005)

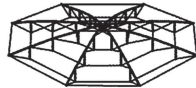
2.2 Pasif Kabuk Sistemleri

Pasif kabuk sistemler ise, aktif kabuk sistemlerin aksine sahip oldukları membran stresi ile dış yükler karşısında şekil değiştirmeyen sistemlerdir. Kabuk yapıları dış yüklerini, yüzeylerinde oluşan kuvvetler ile mesnet noktalarına iletirler. Bu davranış sonucunda yapı yüzeyinde membran stresi oluşmaktadır. Pasif sistemler, dış yüklerle karşı sadece membran stresi ile yani basınç ve gerilme ile dayanan sistemlerdir (Gabriele et al. 2018). Bu sebeple aktif sistemlerden farklı olarak pasif kabuk yapıları kalınlıkları olan sistemlerdir. Aksi durumda yüzeyde strese bağlı olarak burulma meydana gelmektedir.

Pasif kabuk sistemleri, yüzey yapısına göre sürekli ve parçalı yapılar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Kamal, Setya, Brar 2020). İlk kabuk örnekleri, taş ve tuğla benzeri malzemelerin üst üste konulması ile üretilen yığma kemer, kubbe ve tonoz şeklindeki yığma kabuk yapılarıdır. 19. Yy'a gelindiğinde ise beton teknolojilerinin gelişmesi ile yığma kabuk yapılarının yerine, farklı eğriliklere ve yüksekliklere izin veren İK yapıları kullanılmaya başlanmıştır. Yığma ve İK yapılarında yapı yüzeyi, sürekliliği olan boşluksuz bir yapıdır. Bu sayede sürekli kabuk yapılarında, yapı yüzeyi üzerindeki yükleri mesnet noktalarına aktararak taşıyıcı eleman özelliği göstermektedir. Bu sebeple bu tür yapılar sürekli kabuk yapıları olarak kabul edilmektedir. Parçalı kabuk yapılarında ise kabuk yüzeyi alt elemanlara bölünerek parçalar halinde üretilmektedir. İki sistem de temelde aynı membran davranışını göstermelerine rağmen, parçalı kabuk sistemlerinde yüzey üzerinde oluşan kuvvetlerin izleyeceği yol kabuk yüzeyini oluşturan elemanlarla sınırlıdır. Sürekli kabuk sistemlerinde yapı, yüzey olarak tanımlanırken; parçalı kabuk sistemlerinde ise yapı, yüzeyi oluşturan ızgara sistemi olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple parçalı pasif kabuk sistemleri, İK sistemleri olarak da adlandırılmaktadır. Bu çalışmada sürekli kabuk yapıları donatı bulundurmalarına göre yığma kabuk yapıları ve İK yapıları olarak ikiye ayrılmıştır (Şekil 2.4). Donatı bulundurmayan sürekli kabuk yapıları, yığma kabuk yapıları olarak 2.2.1 bölümünde; donatı bulunduran sürekli kabuk yapıları ise İK yapıları olarak 2.2.1 bölümünde incelenmiştir.

2.2.1 Yığma Kabuk Yapılar

Yığma; taş, kil, tuğla veya beton gibi blok malzemeler ile inşa ve üretim sanatı olarak tanımlanmaktadır (DeJong 2009). Yığma yapılar, içinde destek iskelet sistemi bulunmayan harç ile üst üste eklenerek üretilen yapıları tanımlamak için kullanılmaktadır. İlk kabuk yapı örnekleri de yığma sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. İlk yığma kabuk yapıları kubbe ve tonoz biçimlerinde kullanılmıştır. Tonoz yapılarının ilk örnekleri Mısır'da bulunmaktadır. M.Ö. 13. Yüzyıla ait olduğu düşünülen Ramesseum tapınağında tuğlaların üst üste konulmasıyla oluşturulan

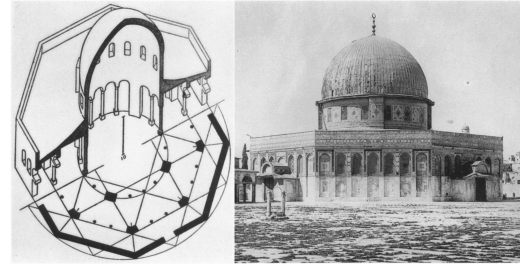
	PASİF SİSTEMLER	AKTİF SİSTEMLER	
SÜREKLİ YAPILAR	YIĞMA KABUK 	İNCE KABUK 	MEMBRAN 
PARÇALI YAPILAR	IZGARA KABUK 	KABLO IZGARA 	

Şekil 2.4 Kabuk yapılarının sınıflandırılması (Kamal, Setya, Brar (2020) çalışmasından uyarlanmıştır.)

tonozlar (Şekil 2.5a) depo odası olarak kullanılmıştır (El-Derby, Elyamani 2016). Kubbe yapılar da tonoz yapılarının bir parçası olarak kabul edilmektedir. Ancak tonoz yapıları kemer sistemine dayanırken, kubbe yapıları kemerin belirli bir eksen etrafında döndürülmesi ile oluşturulmaktadır. Kubbe kelimesinin İngilizcesi olan “dome” Latince ev anlamında gelen “domus” kelimesinden gelmektedir. (Melaragno 2012). Bunun sebebi kubbelerin, Tanrının evi olarak kabul edilen tapınak, kilise gibi dini yapılarda kullanılmasıdır. Kubbe yapıları tarih boyunca gücün ve heybetin sembolü olarak görülmüştür. Bu sebeple yığma kabuk yapıları, tarih boyunca Ayasofya, Pantehon, Kubbet’üs-Sahra (Şekil 2.5b) gibi dini yapılarda kullanılmıştır.



(a) Ramesseum tapınağında kullanılan tonoz kalıntıları(El-Derby, Elyamani 2016).



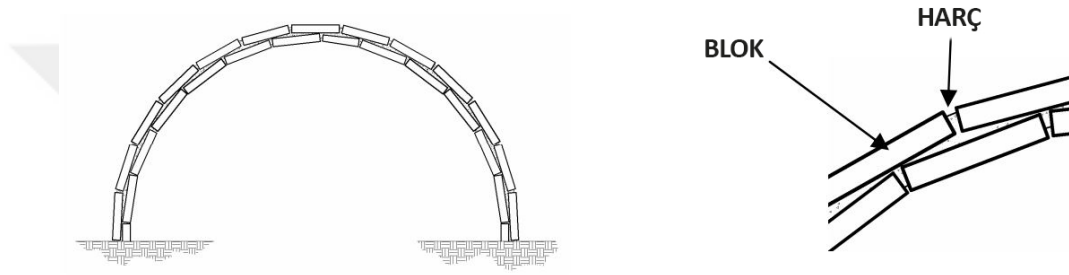
(b) Kubbet’üs-Sahra genel görünüşü ve kesiti (Grabar 1959).

Şekil 2.5 Tonoz ve kubbe biçiminde yığma kabuk örnekleri

Yığma kabuk yapıları genellikle taş ve tuğla tipi blok malzemelerden oluşmaktadır. Bu sebeple bu yapılar, basınca dayanıklı gerilmeye karşı zayıf yapıdadır. Bu durum yığma kabuk yapılar için gerilme olmadan yerçekimi karşısında sadece basınç yükleri oluşturan geometrilerin arayışını doğurmuştur. Sadece basınca çalışan geometriler genellikle diğer kabuk yapılar için de verimli geometrilerdir. Geleneksel yığma

yapılarında kullanılan malzemelerden dolayı baskın yük yapının kendi ağırlığıdır. Bu sebeple yığma kabuk yapıları, basınca çalışan geometriler ile sınırlıdır. Ancak sadece basınca çalışan yığma kabuk yapıları için konikten küresele birçok geometri alternatifi bulunmaktadır (Adriaenssens et al. 2014). Ayrıca yığma kabuk yapılarında birçok açıklık alternatifi de oluşturulabilmektedir.

Geleneksel yığma yapılarda blok elemanların eğrisel bir form alabilmesi için kenarlarının birleşime uygun olarak kesilmesi gerekmektedir. Bu durum işçiliği ve yapım süresini arttırmaktadır. İspanya'nın Katalan bölgesinde ortaya çıkan, bu sebeple Katalan Tonozu olarak adlandırılan sistemde ise, blok araları harç ile doldurularak düz bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Katalan Tonozu kesiti ve detayı (Saliklis, White (2008) 'den uyarlanmıştır.)

Rafael Guastavino ve Rafael Jr , St. John Katedrali ve Boston Halk Kütüphanesi gibi yapılar ile Katalan Tonozunun yaygınlaşmasını sağlamışlardır (Saliklis, White 2008). Günümüzde ise dijital üretim araçlarının gelişmesi özelleşmiş elemanların üretimini kolaylaştırmıştır. Bu sebeple geleneksel yığma kabuk yapılarındaki gibi özelleşmiş elemanlarla yığma kabuk çalışmalarına ilgi artmıştır. Şekil 2.7'de yığma kabuk yapısını oluşturmak için 339 adet özelleşmiş kireç taşı kullanılmıştır (P. Block et al. 2016).

Geleneksel yığma yapıları deprem gibi aktif yükler hesaplanarak yapılan yapılar değildir. Bunun yerine statik kuvvet dengesi hesapları ve geleneksel ön kabuller ile tasarlanmaktadır (Adriaenssens et al. 2014). Statik kuvvet dengesi yöntemi malzeme ve ölçekten bağımsız sadece geometri temelli bir yöntemdir (DeJong 2009). Bu yöntem yapıda gerilme olmadığı için basınç kuvvetlerinin dengede olmasına dayanmaktadır. Yığma kabuk yapılarında kabuğun yüksekliği azaldıkça, temel noktalarında büyük tepki kuvvetleri oluşmaktadır. Geleneksel yığma kabuk yapılarında bu tepki kuvvetlerini ve olası deprem yüklerini dengeleyebilmek için ahşap veya demirden gergi çubukları (Şekil 2.8a) ve gergi halkaları (Şekil 2.8b) kullanılmıştır.

Günümüzde deprem yükleri karşısında, yapının statik başarımını ölçmek için Sonlu Eleman Analizi (SEA) yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde yapının



Şekil 2.7 Geleneksel yığma tekniği ile oluşturulan yığma kabuk yapısı (P. Block et al. 2016).

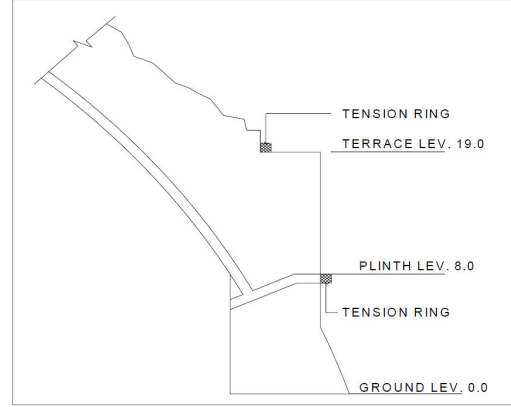
kiriş, kolon gibi taşıyıcı elemanlarının bütün olarak hareket edeceği varsayılmaktadır. Çelik ve betonarme yapılar yükler karşısında sürekliliği olduğu için bütüncül hareket etmektedir. Yığma kabuk yapılar ise yük karşısında doğası gereği ayrık yapıdır. Yığma kabuk yapılarında bozulma eleman bazlı ve bağımsız olarak gerçekleşmektedir (DeJong 2009). Bu sebeple yığma kabuk yapılarında SEA'nın kullanılabilmesi için yapının yüzey olarak bütüncül hareket edeceği varsayılmak zorundadır. Yapıyı oluşturan her bir bloğun ayrı hareketinin hesaplanabilmesi için Ayrıık Eleman Modeli'ne (AEM) ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak AEM, SEA'ya göre hesaplama yükü çok daha fazla olan bir yöntemdir (Kao et al. 2017).

Yığma Kabuk Yapılar	
Avantajlar	Dezeavantajlar
Az malzeme kullanılarak geniş açıklıkların geçilmesine olanak sağlar.	Negatif eğrilikli yüzeyler için uygun değildir.
Malzeme kullanımını azalttığı için karbon ayak izi düşük yapılardır.	Ayrıık eleman davranışı yüzünden dinamik yüklere karşı statik hesaplaması zordur.
Yapı yüzeyinde açıklıklar oluşturulabilir.	Kurulum aşamasında geçici destek elemanlara ihtiyaç duyulur.
Baskın yük olarak basınç kuvvetlerine çalışan yapılardır.	Tavan yükseklikleri sebebiyle ısıtma ve soğutma maliyetleri çoktur.
Sadece basınca çalışan ve yüzeyinde açıklığa izin veren birçok geometri alternatifi bulunmaktadır.	Kabuk geometrisi basıclaştıkça, temel noktalarında oluşan tepki kuvvetlerinin dengelenmesi için destek elemanlarına ihtiyaç duyulur.

Tablo 2.1 Yığma kabuk yapıların avantaj ve dezavantajları



(a) Cami yapısında demir gergi elemanı kullanımı (Celik, Sesigur, Cili 2010).



(b) Grand Pagoda yapısında gergi halkası kullanımı (Varma, Jangid, Achwal 2006).

Şekil 2.8 Yığma kabuk yapılarında kuvvet dengeliyici eleman örnekleri

Tablo 2.1’de yığma kabuk yapılarının avantajları ve dezavantajları listelenmiştir. Yığma kabuk yapılarının en büyük zorluklarından birisi de üretim sürecidir. Yığma kabuk yapılarının üretim aşamasında, yapı tamamlanana kadar destek taşıyıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel yığma kabuk yapılarında, ahşap veya demir iskeletler ile gergi halatları, geçici taşıyıcılar olarak kullanılmıştır. Günümüzde ise bunlara alternatif çalışmalar bulunmaktadır. Deuss et al. (2014) çalışmasında seyrek çelik zincirleri önerirken, Fitchen (1981) geleneksel gergi sisteminden yola çıkan alternatif bir sistem önermiştir. Ayrıca yığma kabuk yapıların üretimi sürecinde, destek elemanların yanı sıra blokların diziliş sırası da çözülmesi gereken bir sorundur. Bu alanda Kao et al. (2017)’unki gibi çalışmalar olsa da farklı form alternatifleri için çalışılması gereken bir konudur.

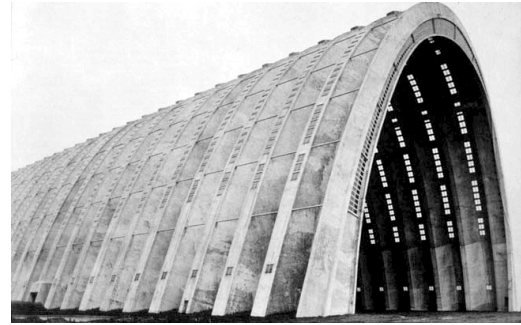
2.2.2 İnce Kabuk Yapıları

Kabuk yapıları yükler karşında baskın olarak membran stresi ile çalışan yapılardır. Membran davranışında yapı üzerinde oluşan basınç ve gerilme yüklerini, eşit olarak dağıtarak destek noktalarına iletir. Eğer kabuk geometrisi kuvvet dengesini sağlayacak şekilde seçilirse, yapı maruz kaldığı yükü, karşılayabilir hale gelerek bükülme ve kayma kuvvetleri minimum düzeye inmiş olur (Adriaenssens et al. 2014). Bu sebeple İK yapılarının statik davranışları baskın olarak geometrilerine dayanmaktadır. Düz bir kâğıt karşılıklı kenarları üzerindeki iki notadan sabitlendiğinde kendi ağırlığını taşıyamaz. Ancak kâğıt, bükülerek yüzey eğriliği kazandırılırsa kendi ağırlığını taşıyabilir hale gelir. İnce kabuk yapılar da yüzey eğriliği ile kendi ağırlıklarını taşıyabilen yapılardır. İnce kabuk yapılar için tek, ters ve eş eğrilikli olmak üzere birçok geometri alternatifi bulunmaktadır. Isler (1960) çalışmasında İK yapılar için geometri alternatiflerinin sonsuz olduğunu belirtmiştir.

İnce kabuk yapılar, hem basınç hem de gerilme kuvvetlerine dayanıklı yapılar oldukları için kullanımları 20. yy 'da geliştirilen donatılı betonarme teknolojilerine dayanmaktadır. 19.yy'da geniş açıklık gerektiren köprü ve çatı örtüleri için genellikle dövme demirden kafes veya kemer sistemleri tercih edilmiştir. Ancak 20.yy başlarında betonarmenin dövme demire göre maliyet, yangın dayanımı ve geometri çeşitliliği açısından daha verimli olduğunun keşfedilmesiyle; geniş açıklık gerektiren yapılar için dövme demir yerine betonarme sistemler tercih edilmeye başlanmıştır (Cassinello 2013). İnce kabuk yapılar dövme demir yapılara göre daha ekonomik sistemler olsalar da betonarme yapı yüzeyi dayanımını kazanana kadar üretim aşamasında kullanılan geçici iskele sistemi ve kalıp maliyeti, yapının geometrisi karmaşıklaştıkça artmaktadır. Bu sebeple ilk İK örnekleri matematiksel olarak tanımlanabilir geometrilere dayanmaktadır. Şekil 2.9a'deki Zeiss Planetaryum'u ilk betonarme İK yapısı olarak kabuk edilmektedir (Kurrer 2018). Ildefonso Sánchez del Río Pisón tarafından tasarlanan ve 1924 yılında tamamlanan İK yapısı jeodezik küre geometrisine sahiptir. Geometri temelli İK yapılarının bir başka örneği ise Şekil 2.9b'deki Eugene Freyssinet tarafından tasarlanan uçak hangarı yapısıdır. 75 metre açıklık geçen yapı, parabolik kesitleri ve oluklu yüzeyi ile beşik tonoz sistemi olarak tasarlanmıştır.



(a) Alamanya'nın Jena kentinde bulunan Zeiss Planetarium yapısının yapım aşaması (Donatılar tamamlandıktan sonra yapı yüzeyine püskürtme beton uygulanmıştır (Cassinello 2013)).

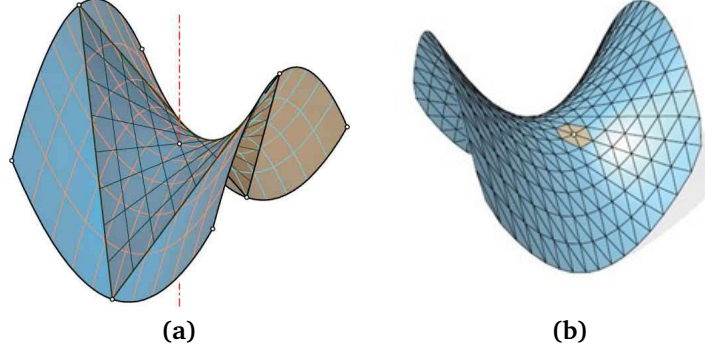


(b) Fransa'nın Orly kentinde bulunan uçak hangarı yapısı (Cassinello 2013).

Şekil 2.9 Geometri temelli İK yapı örnekleri

Felic Candela geometri temelli İK yapılarının en önemli temsilcilerinden birisi olarak kabul edilmektedir. Candela yapılarında hem ters eğrilikli hem de düzlemsel elemanlar ile üretilebilen özel hiperbolik parabolit yüzeyleri kullanmıştır. Hiperbolik parabolit yüzeyler aynı zamanda hiperbolik yüzey olarak da adlandırılmaktadır.

Hiperbolik yüzeylerin kenarları eğrisel olabildiği gibi yüzeyin kesilmesi ile düzlemsel de olabilmektedir (Şekil 2.10a). Ancak hiperbolik yüzeyler, Şekil 2.10b'deki gibi bazı noktalarda açı toplamı 360 dereceden fazla olduğu için düzlemsel olarak açılmayan yüzeylerdir.



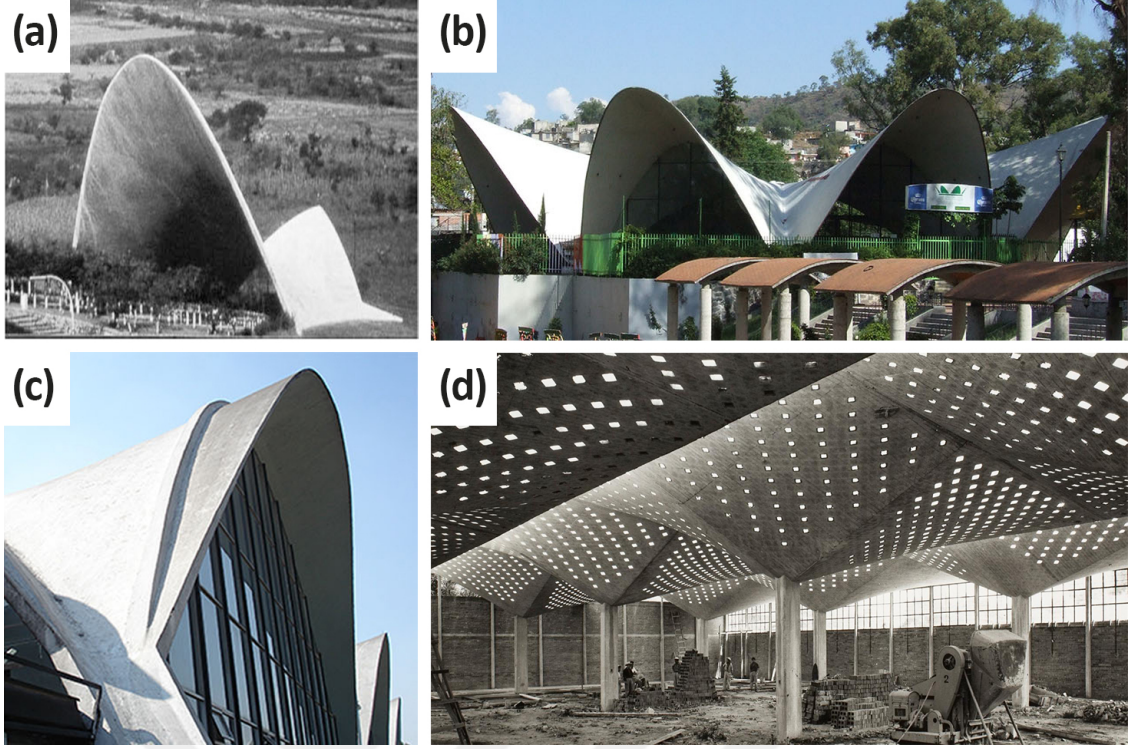
Şekil 2.10 (a) Eğrisel ve düz kenarlı hiperbolik yüzey - **(b)** Hiperbolik yüzeyde açı toplamının 360 dereceyi geçtiği nokta (Pottmann et al. 2007).

Candela hiperbolik yüzeyleri kullanarak, Şekil 2.11a'deki gibi tek yüzey olarak; Şekil 2.11b'deki gibi birden fazla hiperbolik yüzeyi birleştirerek; Şekil 2.11c'deki gibi eğrisel kenarlı; Şekil 2.11d'deki gibi düz kenarlı hiperbolik yüzey olmak üzere çeşitli İK yapıları üretmiştir. Candela'nın hiperbolik yüzeyleri tercih etmesinin sebebi; bu yüzeylerin negatif eğrilikleri sayesinde burulmaya dayanıklı ve baskın olarak membran davranışı ile çalışan yapılar oluşturmasıdır. Ayrıca hiperbolik yüzeyler düzlemsel elemanlar ile üretilbildikleri için kalıp ve iskele maliyetlerini azaltmaktadır.

Heinz Isler 1959 yılında IASS (International Association for Shell Structures) konferansında "New Shapes for Shells" başlığı ile İK yapılar için form bulma yöntemlerini anlattığı çalışmasını yayınlamıştır (John Chilton, Chuang 2017). O zamana kadar İK yapıları yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak küre (Şekil 2.9a) ve parabol (Şekil 2.9b) gibi matematiksel olarak tanımlanabilir yüzeyler ile sınırlıdır. Isler çalışmasında kabuk yapılar için üç farklı form bulma yöntemi önermiştir:

1. Toprağın yığılmasıyla oluşturulan tepe üzerine beton dökülmesi ardından toprağın kazılması,
2. Membran elemanın hava ile şişirilerek şekillendirilmesi,
3. Membran elemanların asılarak yer çekimi ile şekillendirilmesi, ardından oluşan formun ters çevrilmesi.

Isler'in çalışması Eduardo Torroja, Nicolas Esquillan ve Ove Arup da aralarında bulunduğu dinleyiciler arasında uzun süren tartışmalara sebep olmuştur. Bu



Şekil 2.11 (a) Lomas de Cuernavaca Şapeli (Draper, Garlock, Billington 2008) - **(b)** Los Manantiales Restoranı (John Chilton, Chuang 2017) - **(c)** Bacardi Rom Fabrikası (John Chilton, Chuang 2017) - **(d)** High Life Tekstil Fabrikası (S. Wang et al. 2020)

tartışmaların en önemli sorusu formun mimari bir problem olduğu, maliyet konusunun nasıl çözüleceği olmuştur. Isler buna karşılık formun çözülmesi gereken ilk problem olduğunu ikinci problemin ise maliyet olduğunu belirterek modelleme ile ürettiği formların üretim yöntemini de üç adımda açıklamıştır:

1. İlk olarak taşıyıcı olarak lamine ahşaptan eğrisel kirişler kullanılmıştır.
2. Kirişleri yerleştirmek için hafif demirden geçici iskele sistemi oluşturmuştur.
3. Kirişlerin üzerinde kalıp olarak ısı yalıtım levhalarını kullanmıştır.

Beton dayanımını aldıktan sonra kirişleri ve iskeleleri sökerek başka projelerde kullanılırken levhalar yalıtım için yapı içerisinde bırakılmıştır (Billington 2003). Isler çalışmalarında, Candela'dan etkilenecek kabuk yapılarında taşıyıcı elemanlar kullanmak yerine kendi kendini taşıyabilen İK yapıları tasarlamıştır. Ancak yapılarının çoğu İsviçre gibi soğuk bölgelerde yer aldığı için kar yükünün yaratacağı bükülme yüklerini karşılayabilmek için Candela'ya göre daha kalın kabuk yapıları üretmiştir. En önemli İK örneklerinden biri de Şekil 2.12'deki BP firması için tasarlanan İK yapısıdır. Üçgen planlı ikiz İK yapısı 9 cm kalınlık ile 31,6 m açıklık geçmektedir.

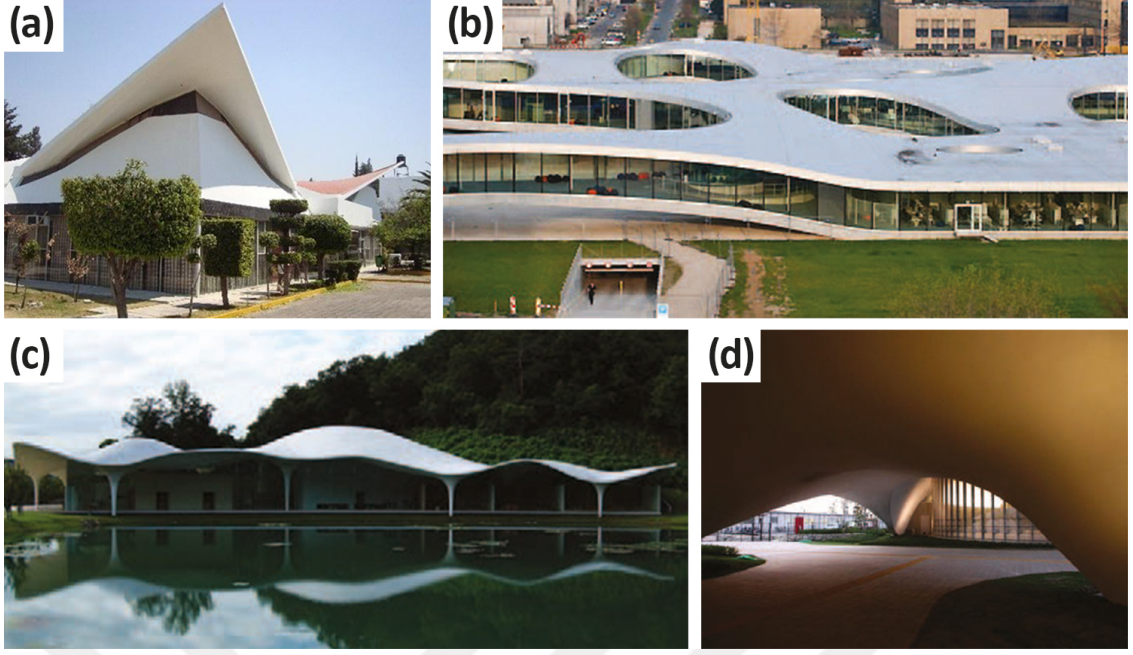


Şekil 2.12 BP benzin istasyonu için Almanya’da tasarlanan ikiz İK yapısı, Heinz Isler, Almanya, 1968

21. yy’a gelindiğinde, şekil 2.13’de gibi İK örnekleri görülse de İK yapıları 20. yy’daki popülerliğini kaybetmiştir. Bunun başlıca sebebi olarak; eskiden üretim için gereken malzemenin pahalı, işçiliğin ise ucuz olup günümüzde bu durumun tersine dönmesi gösterilebilir. Ayrıca kabuk yapıları baskın olarak membran stresi ile çalışan yapılar olsalar da, yapı yüzeyinde burulma olmaması için bükülme dayanımına da ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak kabuk yapıları verimli yapılar oldukları için burulmaları ani olmaktadır. İnce kabuk yapılarında zaman içinde yavaş yavaş gerçekleşen bozulmalar görülmeden bir anda gerçekleşen çökme söz konusudur (Adriaenssens et al. 2014).

2.2.3 Izgara Kabuk Yapıları

Izgara kabuk yapıları, sürekli kabuk yapılarının türeği olarak düşünülebilir. Izgara kabuk yapıları, sürekli kabuk yüzeyinden ızgara sistemi oluşturacak şekilde malzeme boşaltılmasıyla oluşmaktadır (Paoli 2007). Malzeme boşaltımı sonucunda ortaya çıkan yapı, düğüm noktaları ile bağlanan ve ayrık elemanlardan oluşan kafes sistemidir. Izgara kabuk yapıları için demir, çelik, alüminyum, ahşap ve kompozit gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır (Douthe, Caron, Baverel 2010). Izgara kabuk yapılarında da İK yapılarında olduğu gibi tek, negatif ve eş eğrilikli formlar üretilmektedir. Ancak İK yapılarının statik davranışları İK yapılarından farklıdır. İnce kabuk yapılarında yükler, yapı yüzeyinde sonsuz sayıda rotada dağılarak ilerlerler. Izgara kabuk yapılarında ise yükler, ızgara sistemini oluşturan ayrık elemanlar ile destek noktalarına aktarılır. Bu sebeple yüklerin izleyebileceği yollar ızgara sistemi ile sınırlandırılmıştır. Izgara kabuk yapıları doğası gereği boşluklu yapıda olduğu için yapı yüzeyi Şekil 2.14a örneğindeki gibi boşluklu olarak kullanılabilir gibi Şekil 2.14b’deki gibi cam, membran vb. geçirgen veya Şekil 2.14’deki gibi ahşap, metal vb. opak malzemeler ile kaplanabilmektedir.



Şekil 2.13 (a) La Monja Kültür Merkezi, Mimarlık Fakültesi, BUAP, Meksika, 2012.(Mundo-Hernandez, Valerdi-Nochebuena, Sosa-Oliver 2014) - **(b)** The Rolex Learning Centre, SANAA, İsviçre, 2011 (Tang 2012) - **(c)** Saijo Crematorium, Toyo Ito, Japonya, 2008 (Tang 2012) - **(d)** Grin Grin Park çatısı, Toyo Ito, Japonya, 2005 (Tang 2012)

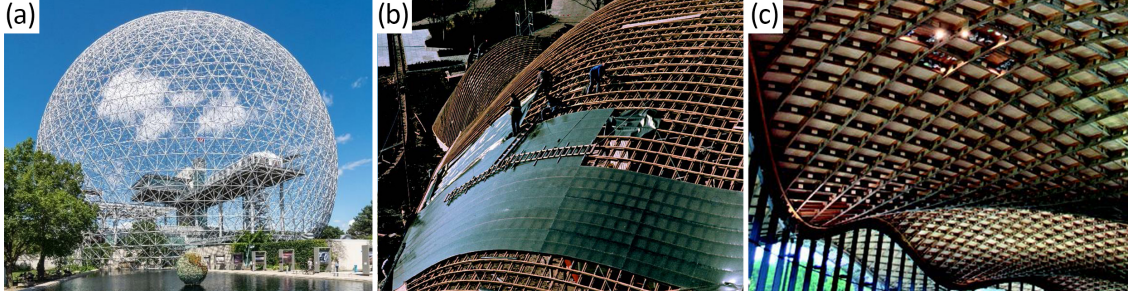
Rombouts et al. (2019)'a göre IK yapıları, gerilmeli ve gerilmesiz IK olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çalışmanın 2.2.3.1 bölümünde gerilmesiz IK yapıları, 2.2.3.1 bölümünde ise gerilmeli IK yapıları açıklanmıştır.

2.2.3.1 Gerilmesiz Izgara Kabuk Yapıları

Gerilmesiz IK yapılarında, ızgara sistemini oluşturacak olan ayrık elemanlar ve düğüm noktaları önceden üretilip, inşaat alanına getirilerek kabuk yüzeyini oluşturacak şekilde birleştirilmektedir. Gerilmesiz IK yapılarında elemanlar prefabrikasyon ile üretildikleri için çoğunlukla demir ve çelik benzeri metal malzemeler tercih edilmektedir. Gerilmesiz IK yapılarında, farklı elemanların bir araya getirilebilmesi için Şekil 2.15aa'daki gibi özelleşmiş bağlantı noktalarında ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2.3.2 Gerilmeli Izgara Kabuk Yapıları

Gerilmeli IK yapıları Frei Otto'nun 1960'lı yıllarda düzlemsel ızgara sistemleri ile yaptığı çalışmalara dayanmaktadır (John Chilton, Tang 2016). Frei Otto çalışmalarında sarkıt zincir modelleri ile oluşturduğu formları iki boyutlu ızgara sistemlerini bükerek oluşturmaya çalışmıştır. Otto'nun çalışmalarında ilk olarak, uzun ve sürekli elemanlar birbiri üzerine düzlemsel ızgara sistemini oluşturacak şekilde



Şekil 2.14 (a) Buckminster Fuller tarafından tasarlanan The Biosphere yapısı, Montreal, Canada (Ağırbaş 2019) - **(b)** Mannheim Multihalle yapısının yarı geçirgen membran ile kaplanma süreci (Stuttgart Üniversitesi Hafif Yapı Tasarım Fakültesi Arşivi) - **(c)** The Savill Garden çatısının içeriden görünüşü (John Chilton, Tang 2016)



(a) Gerilmesiz IK yapısı için sabit birleşim detayı örneği (Oliveira, Oliveira Pauletti, Meneghetti 2020)



(b) Gerilmeli IK yapısı için hareketli birleşim detayı örneği (Oliveira, Oliveira Pauletti, Meneghetti 2020)

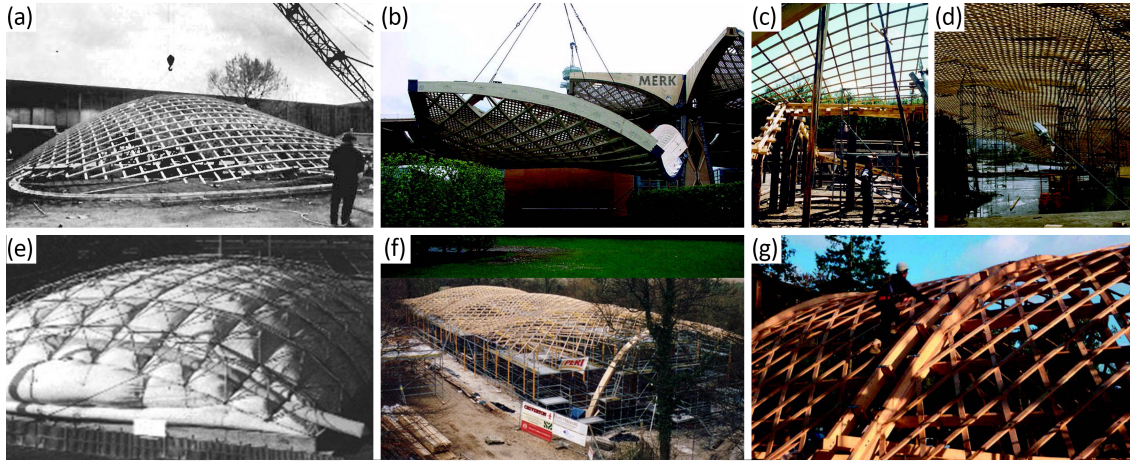
Şekil 2.15 Izgara kabuk yapıları için farklı bağlantı noktası tasarımları

yerleştirilir ve sistem düğüm noktalarından harekete izin veren Şekil 2.15b'deki gibi bağlantı elemanları ile birleştirilir. Başlangıçta bağlantı elemanları sistemin hareketine izin verecek şekilde serbest konumdadır. Ardından düğüm noktaları serbest olduğu için kayma gerilmesi dayanımı bulunmayan ızgara sistemi belirli noktalardan itilerek veya çekilerek bükülür, bu sayede sisteme yüzey eğriliği kazandırılır. Izgara sistemi istenilen formu aldığı anda düğüm noktaları sıkılarak sisteme kayma gerilmesi dayanımı kazandırılarak IK yapısı oluşturulur. Frei Otto'nun Şekil 2.16a'daki ilk gerçek ölçekli gerilmeli IK çalışmasından sonra, gerilmeli IK üretimi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. John Chilton, Tang (2016) bu yöntemleri:

- Zeminde oluşturulan ızgara sisteminin vinç ile belirli noktalardan yukarı çekilmesi (Şekil 2.16a),
- Sistemin parçalanarak, ayrı ayrı gerilen parçaların vinç yardımı ile birleştirilmesi

(Şekil 2.16b),

- Zeminde oluşturulan ızgara sisteminin alttan itilmesi (Şekil 2.16c ve d'deki gibi dikey elemanlar veya Şekil 2.16e'deki gibi membran elemanlar kullanılır),
- Yüksekte oluşturulan ızgara sistemin yer çekimi ile şekillendirilmesi (Şekil 2.16f),
- Önceden delinmiş elemanların yerinde birleştirilmesi (Şekil 2.16g) olarak sıralamıştır.



Şekil 2.16 (a) Frei Otto tarafından Alman Yapı Fuarı için tasarlanan ilk gerilmeli IK yapısı, Essen, Almanya, 1962 (Liddell 2015) - (b) – Expodach yapısının kurulum aşaması, Hanover, Almanya, 2000, (John Chilton, Tang 2016) - (c, d) Mannheim Bundestgartenschau inşasında ızgara sistemini kaldırmak için kullanılan dikey elemanlar(John Chilton, Tang 2016) - (e) 1990 Dünya kupası için kurulan geçici IK sistemi, İtalya (Liuti, Pugnale 2015) - (f) Yer çekimi kuvveti ile şekillendirilen Downland Gridshell, İngiltere, 2002, (Cullinanstudio n.d.) - (g) Önceden delinmiş elemanların inşaat alanında birleştirilmesi ile oluşturulan Flimwell Woodland Enterprise Centre, İngiltere, 1999, (John Chilton, Tang 2016)

Tablo 2.2’da gerilmeli ve gerilmesiz IK sistemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Gerilmesiz IK sistemleri düz bir yüzey olarak açılmayan sistemlerdir. Bu sebeple gerilmesiz sistemler üçgen, gerilmeli sistemler ise dörtgen ızgara sistemine sahip yapılardır. Gerilmesiz IK yapıların elemanları prefabrikasyon ile üretildikleri için inşaat alanındaki yapım süreleri gerilmeli sistemlere göre daha kısadır. Gerilmesiz sistemlerde bağlantı noktaları rijit olduğu için sistemin kayma gerilmesi dayanımı yüksektir. Gerilmeli sistemlerde ise kayma gerilmesi dayanımını arttırmak için Şekil 2.17’deki diyagonal kablo bağlantıları gibi destek elamanları kullanılmaktadır (Paoli 2007).

Izgara kabuk yapılarında sistem parçalı yapıda olduğu için, statik hesaplama yükleri fazla olan yapılardır. Bu sebeple 20. Yy da çok fazla tercih edilmeyen yapılardır

	Gerilmeli Izgara Kabuk	Gerilmesiz Izgara Kabuk
Geometri	Eş ve ters eğrilikli geometriler üretilebilir	Serbest eğrilikli geometriler üretilebilir
Izgara Elemanları	Sürekli ve tekrar eden elemanlar	Özelleşmiş elemanlar
Bağlantı Noktaları	Rijit bağlantı noktaları	Hareketli bağlantı noktaları
Izgara Yapısı	Dörtgen ızgara sistemi	Serbest ızgara sistemi
Kayma Gerilmesi Dayanımı	Kayma gerilmesi dayanımı rijit bağlantı noktaları ile sağlanır	Kayma gerilmesi dayanımı bağlantı noktaları ve diyagonal gergi elemanları ile sağlanır.
Üretim Süreci	Ön üretim süreci kısa, kurulum süreci uzundur.	Ön üretim süreci uzun, kurulum süreci kısadır.
Prefabrikasyon	Yüzey bazlı	Eleman bazlı

Tablo 2.2 Gerilmeli ve gerilmesiz IK sistemlerin karşılaştırılması



Şekil 2.17 Mannheim Bundesgartenschau’da kayma gerilmesi dayanımı arttırmak için kullanılan diyagonal kablo elemanları (Liddell 2015).

(Douthe, Caron, Baverel 2010). 21. yy’da ise SEA gibi dijital analiz ve form bulma yöntemlerinin gelişmesiyle IK yapılarının tasarım ve analiz süreçleri kolaylaşmıştır. 21. yy başında Shigeru Ban, tamamen geri dönüşüm malzemeleri ile yapılması planlanan Şekil 2.18a’deki yapı ile IK yapılarına olan ilgiyi arttırmıştır. Şekil 2.18b, 2.18c ve 2.18d ise 21. Yy’daki diğer önemli IK yapılarıdır.

2.3 Kabuk Yapılarında Form Bulma Yöntemleri

Kabuk yapı tasarımı, ilk olarak tasarım sorunlarına en uygun formun arayışı ile başlar. Seçilecek formun plan şekli ve yapı yüksekliği gibi biçimsel ihtiyaçların yanı sıra statik açıdan da tasarlandığı gibi davranması ve uzun yıllar bu davranışını koruyabilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada en uygun form arayışı süreci form bulma olarak



Şekil 2.18 (a) Shigeru Ban tarafından Expo 2000 için tasarlanan Japon Pavilyonu, Hannover, Almanya, 2000 (Arquitecturaviva n.d.) - (b) – Ephemeral Katedrali iç görünüşü, Paris,Fransa, 2013(Du Peloux et al. 2015) - (c) Centre Pompidou, Metz, Fransa, 2010 (Shuang 2014) - (d) Savill Garden iç görünüşü, Windsor, İngiltere, 2006, (Lara-Bocanegra et al. 2018)

isimlendirilmiştir. Form bulma ile oluşturulan formun üretilebilmesi için ölçülerinin tanımlanabilir olması gerekmektedir. Bu sebeple formun, başkalarına aktarılabilecek şekilde açıklanabilmesi gerekmektedir.

Form Bulma Yöntemleri			
Matematik Temelli	Fizik Temelli		Serbest Modelleme
	Maket	Hesaplamalı	
Küre	Sarkıt Modeller	Kuvvet Yoğunluğu	NURBS
Silindir	Sabun Köpüğü	Eksenel Baskı Ağı	Bezier
Konik	Şişirme Modeller	Parçacık Dizgisi	B-Splines
Parabolik		Dinamik Gevşeme	Fiziksel Maket
Hiperbolik ... vb			

Tablo 2.3 Kabuk Yapıları İçin Form Bulma Yöntemleri

Kabuk yapılarında form bulma için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler Tablo 2.3’da gösterilmiştir. Çalışmanın devamında bu yöntemler; matematik temelli (Bölüm 2.3.1), fizik temelli (Bölüm 2.3.2) ve serbest modelleme (Bölüm 2.3.3) olarak kronolojik olarak açıklanmıştır.

2.3.1 Matematik Temelli Form Bulma

Matematiksel olarak tanımlı geometriler üretim ve tasarım kolaylıkları sebebiyle kabuk yapıları oluşturmak için tercih edilmektedir. Tarihteki ilk kabuk yapı örnekleri küre ve silindir gibi eş eğrilikli geometrilere dayanmaktadır. Tablo 2.4’de farklı kabuk yapı örnekleri ve matematiksel temelleri listelenmiştir.

Tablo 2.4 Kabuk yapı örnekleri ve matematiksel temelleri

YAPI	KONUM	YIL	MİMAR	MATEMATİKSEL TEMEL	SİSTEM	YÜZEY EĞRİLİĞİ	AÇIKLIK	KALINLIK
 Kimbell Sanat Müzesi	ABD	1972	Louis Kahn	 Silindir	İnce Kabuk	Tek	7m	10cm
 Lee Valley Velopark	İngiltere	2011	Hopkins Architects	 Hiperbolik	Kablo Ağ	Ters	115	B/E
 Oceanografic	İspanya	2003	Félix Candela	 Hiperbolik	İnce Kabuk	Ters	35,5 m	6cm
 Biosphere	Kanada	1967	Buckminster Fuller	 Küresel	İzgara Kabuk	Eş	76m	B/E
 Ayasofya	Türkiye	563	Trallesli Antemius ve Miletli Isidoros	 Küresel	Yığma Kabuk	Eş	~ 32m	61cm
 Reichstag Cupola	Almanya	1999	Norman Foster	 Küresel	İzgara Kabuk	Eş	40m	B/E
 Bristol Country Courthouse	ABD	1891	Frank Irving Cooper	 Parabolik	Yığma Kabuk	Eş	B/E	B/E
 Xinzhai Coffe Monor	Çin	2018	TAO	 Parabolik	Yığma Kabuk	Eş	B/E	B/E

Küre, hiperbolik ve silindir yüzeylerin geometrileri gereği statik açıdan başarılı formlar

oluşturduğu görülmektedir. Bu sebeple geniş açıklıklı yapılarda bu geometrilerin kullanıldığı görülmektedir. Bu geometriler bir bütün olarak kullanılabilirdiği gibi kesilerek parçalar halinde de kullanılabilir. Ayrıca bu geometriler uygun kesim tekniği ile parçalandığında, modüler kullanım imkanı sağlayarak seriler halinde eklemelenebilmektedir.

2.3.2 Fizik Temelli Form Bulma

Kabuk yapılarda form bulma süreci, kabuk formuna etki edecek kuvvetler için denge konumunun bulunmasına dayanmaktadır. Fizik temelli form bulma yöntemleri ayrıca parametrik yöntemler olduklarından, tasarımcıya ön tasarım sürecinde form alternatiflerini keşfetme imkanı sunmaktadır. Fizik temelli form bulma yöntemleri fiziksel ortamda gerçekleştirilen maket çalışmaları ve dijital ortamda gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları olarak ikiye ayrılmaktadır. Her iki yöntem de öncelikle topoloji ve ağırlık gibi parametrelerin belirlenmesini gerektirmektedir. Bu parametrelerin değiştirilmesi ile denge konumunda formlar üretilmektedir. Bilinen en eski maket ile form bulma çalışması Hook'un sarkıt zincir modelleridir. Sarkıt zincir modelleri malzemeden bağımsız geometri temelli bir yöntemdir. Ardından Heinz Isler ve Frei otto'nun çalışmaları yer almaktadır. Otto sabun köpüğü çalışmaları ile minimal yüzeyli formlar üreterek hafif kabuk yapılar tasarlamıştır. Isler ise sarkıt kumaş modelleri kullanarak sarkıt modellere malzeme parametresinin eklenmesini sağlamıştır. Fiziksel çalışmaların ardından hesaplamalı dijital yöntemler geliştirilmiştir. Temelleri fiziksel maket çalışmalarına dayanmaktadır. Çalışmanın devamında günümüzde yaygın olarak kullanılan dijital form bulma yöntemlerinden dördü açıklanmıştır.

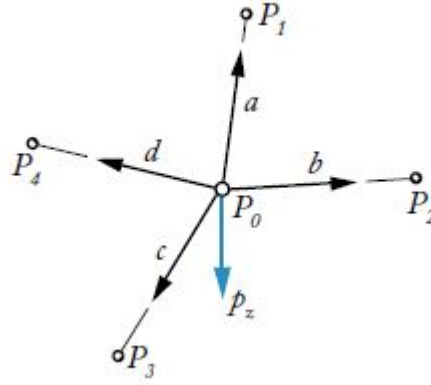
2.3.2.1 Kuvvet Yoğunluğu (Force Density)

Kuvvet yoğunluğu yöntemi malzemeden bağımsız geometri temelli bir form bulma yöntemidir. Bu yöntem sarkıt zincir modellerindeki gibi her bir düğüm noktasında oluşan kuvvetlerin toplamının dengede olmasına dayanmaktadır (2.19). Düğüm noktalarında gerilmeye bağlı oluşan kuvvet F_i , yerçekimine bağlı oluşan kuvvet ise P_i ile gösterilmektedir.

F_i , 2.1 formülü ile hesaplanmaktadır. EA: malzemenin eksenel sertliğini, e: gerilmeye bağlı uzama miktarını, l_0 : başlangıç uzunluğunu tanımlamaktadır.

$$F_i = \frac{EA}{l_0 \cdot e} \quad (2.1)$$

Denge durumunun x,y,z eksenleri için ayrı ayrı sağlanması gerekmektedir. X eksenine için denge durumu yazıldığında 2.2 formülü elde edilmektedir.



Şekil 2.19 Düğüm noktasında oluşan kuvvetler((Adriaenssens et al. 2014).

$$F_i \cdot \cos(i) + \dots P_i = 0 \quad (2.2)$$

2.2 formülündeki cos değeri açıldığında 2.3 formülü elde edilmektedir.

$$\frac{x_i - x_0}{l_0} \cdot F_i + \dots P_i = 0 \quad (2.3)$$

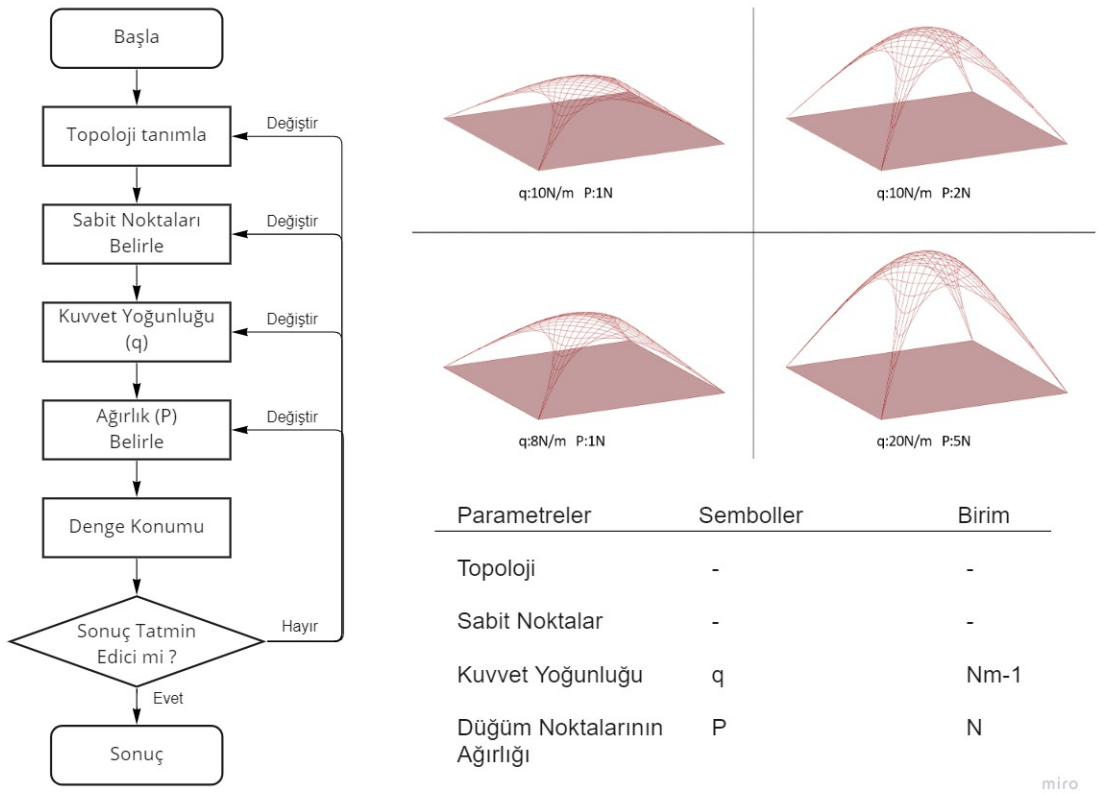
F/l_0 değeri kuvvet yoğunluğu (q) olarak tanımlanarak formül yeniden yazıldığında 2.4 formülü elde edilmektedir.

$$(x_i - x_0) \cdot q_i + \dots P_i = 0 \quad (2.4)$$

Bu durumda kuvvet yoğunluğu (q), noktaların ağırlığı (P) belirlendiğinde aynı formül x, y ve z eksenleri için ayrı ayrı hesaplanarak. Belirli noktalarından sabitlenmiş bir ağ sisteminin denge konumu hesaplanabilmektedir. Kuvvet dengesi yönteminin akış şeması ve farklı parametre değerleri ile üretilen form örnekleri 2.20’de gösterilmiştir.

2.3.2.2 Eksenel Baskı Ağı (Thrust Network)

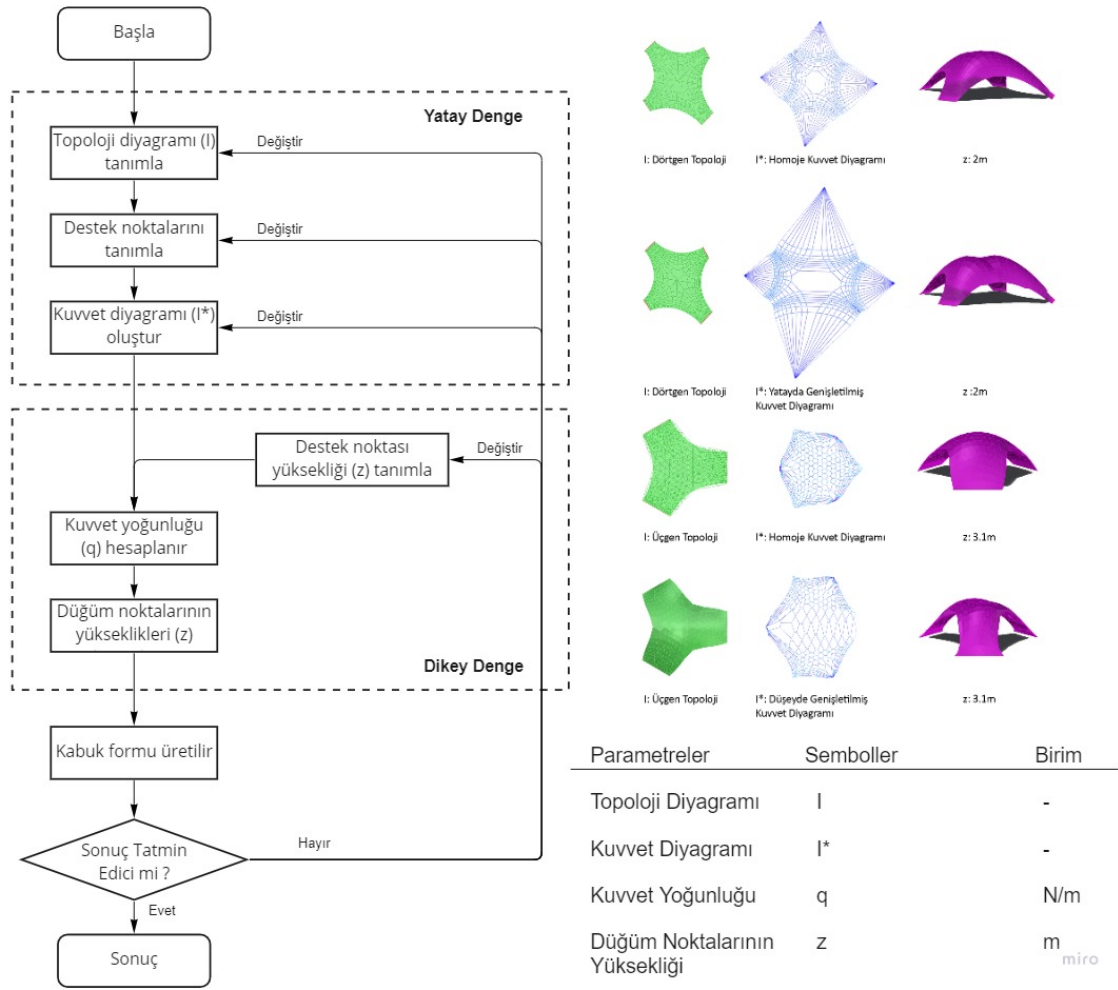
Eksenel Baskı Ağı (EBA) yöntemi yığma yapılar tasarlamak için kullanılan bir yöntemdir. Temel olarak Hook’un sarkıt zincir modellerine dayanmaktadır. EBA yönteminde sarkıt zincir modellerindeki kuvvetler, dijital grafik olarak temsil edilir. Her bir bağlantının uzunluğu, kabuk üzerinde temsil ettiği noktadaki kuvvetin büyüklüğünü göstermektedir. EBA yönteminde yerçekimi karşısında desteksiz ayakta durabilen formlar üretilmektedir. Ancak bu yöntemde, kabuğu oluşturan elemanlar arasında yeterli sürtünme kuvveti oluşarak kayma durumunun olmayacağı



Şekil 2.20 Kuvvet yoğunluğu yönteminin akış şeması, parametreleri ve üretilen form örnekleri

ve blok elemanların, basınç dayanımının parçalanmayı engelleyecek seviyede olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca EBA yönteminde sadece yerçekimine bağlı dikey yükler hesaplanarak, deprem ve rüzgâr sonucu oluşabilecek yanal yükler yok sayılmaktadır. Bu sebeple EBA ile üretilen formların bu dayanımlar için ayrı olarak test edilmesi gerekmektedir.

EBA yöntemi iki adımdan oluşmaktadır. İlk adımda iki boyutlu topoloji diyagramı (I) oluşturularak destek noktaları belirlenir. Ardından topolojiyi oluşturan yüzeylerin ağırlık merkezleri düğüm noktası olacak şekilde kuvvet diyagramı (I^*) oluşturulur. Kuvvet diyagramındaki çizgilerin uzunluğu, bağlı olduğu düğüm noktasına etki eden kuvvet ile doğru orantılıdır. I ve I^* diyagramlarının oluşturulduğu ilk adım yatay denge bölümüdür. İkinci adım ise dikey denge bölümüdür. Bu adımda destek noktaları için hedef yükseklik (z) belirlenir. Ardından sistem düğüm noktalarında oluşan kuvvet yoğunluğu (q) ve yükseklik (z) değerleri hesaplanarak kabuk formu üretilir. Arzu edilen kabuk formuna ulaşılan kadar parametreler değiştirilerek farklı kabuk formları üretilebilmektedir. EBA yönteminin akış şeması ve farklı parametre değerleri ile üretilen form örnekleri 2.21’de gösterilmiştir.



Şekil 2.21 EBA yönteminin akış şeması, parametreleri ve üretilen form örnekleri

2.3.2.3 Dinamik Gevşeme (Dynamic Relaxation)

Dinamik gevşeme yöntemi, temel olarak Newton'un ikinci yasasına (hareket yasası) dayanmaktadır. Bu yöntemde, iki boyutlu bir ağ sisteminin her bir düğüm noktasında bağlı olduğu diğer noktalardan F kuvvetleri ve noktanın ağırlığına bağlı olarak P kuvveti oluşmaktadır. Her bir düğüm noktası bu kuvvetlere bağlı olarak, bileşke kuvvet yönünde hareket etmektedir. Düğüm noktalarının birim zamandaki (t) hareketleri, noktaların ivme (v) değerlerini belirlemektedir. Amaç; noktaların kademeli olarak hareket ettirilerek kuvvet dengesinin sağlandığı konumun (denge konumunun) bulunmasıdır. Dinamik gevşeme yönteminde denge konumu aranırken kenar eşitliği veya açı sınırlaması gibi farklı başarımların değerleri de algoritmaya eklenebilmektedir. Algoritma her bir başarımın sapma değerini en aza indirerek kademeli olarak denge konumunu aramaktadır. Bu yöntem, 2.3.2.1, ve 2.3.2.2 bölümlerinde açıklanan geometrik yöntemlerde farklı olarak zaman parametresi bulundurduğu için dinamik bir yöntemdir. Bu yöntemde düğüm noktalarında oluşan kuvvetlerin dengelenerek sıfırlanamadığı durumlarda amaç, düğüm noktalarında oluşan enerjinin en aza indirilmesidir. Bunun için viskoz veya kinetik sönmüleme algoritmaları

kullanılmaktadır. Viskoz sönümlemede düğüm noktalarına hareket yönüne ters yönlü kuvvet uygulanarak sistem denge konumuna getirilmeye çalışılır. Kinetik sönümlemede ise, sistemin kinetik enerjisi belirlenen değerin altına indiğinde düğüm noktalarının akışkanlığı sıfırlanmaktadır. Her iki yöntemde de gerçek denge konumu bulunamasa da, belirlenen toleransta kullanılabilir denge konumu bulunmaktadır. 2.22’de dinamik gevşeme yönteminin akış şeması ve farklı parametre değerleri ile üretilen form örnekleri gösterilmiştir.

2.3.2.4 Parçacık Dizgisi (Particle String)

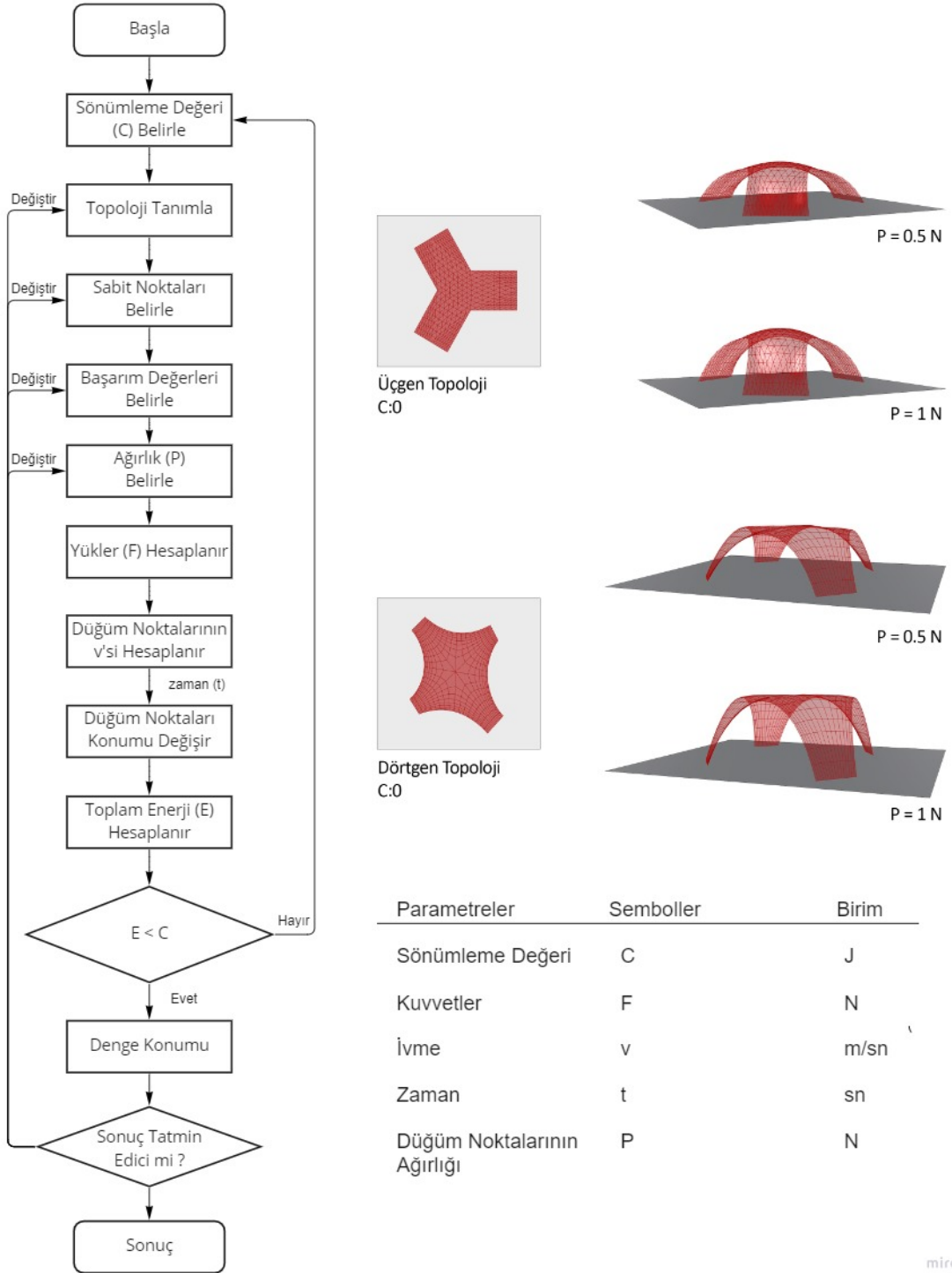
Parçacık dizgisi yöntemi, fiziksel ortamdaki sarkıt zincir ve gergi kumaş modellerinin dijital ortamdaki simülasyonu olarak tanımlanabilir. Bu yöntemde ilk olarak kabuk formunun plan düzleminde düşük çözünürlüklü topolojisi oluşturulur. Düşük çözünürlüklü topoloji üzerinde açıklık ve sınır çizgileri gibi temel kararlar verildikten sonra alt bölümlenme ile düşük çözünürlükten yüksek çözünürlüğe geçiş yapılır. Topoloji yapısına karar verildikten sonra elde edilen ağ yapısında düğüm noktaları parçacıkları ile düğüm noktalarını birleştiren çizgiler de dizgileri tanımlamaktadır. Bu yöntem de 2.3.2.3’deki gibi Newton’un ikinci yasasına (hareket yasası) dayanmaktadır. Her bir parçacıkta dizgilere bağlı olarak 2.5 formülü ile tanımlanan F kuvveti oluşmaktadır.

$$F = k.(l_i - l) \quad (2.5)$$

2.5 formülünde k esneklik katsayısını, l_i dizginin başlangıç uzunluğunu, l ise dizginin uzama sınırını tanımlamaktadır. Her bir parçacık kendisine etki eden F kuvvetleri ve ağırlıklarına (P) bağlı olarak birim zamanda (t) hareket etmektedir. Bu yöntemde de amaç, parçacıkların kademeli olarak hareket ettirilerek kuvvet dengesinin sağlandığı konumun (denge konumunun) bulunmasıdır. Bu yöntem de zaman parametresi bulundurduğu için 2.3.2.3’de açıklanan yöntem gibi dinamik bir yöntemdir. Parçacık dizgisi yönteminde P ve l değerleri 0 veya 0 yakın bir değer olarak belirlendiğinde sistem kumaş gibi davranarak ters eğrilikli formlar oluşturmaktadır. Bu sayede fiziksel form bulma için kullanılan gergi kumaş modelleri simüle edilebilmektedir. P ve l değerleri 0’dan farklı olarak tanımlandığında ise sistem sarkıt zincir modeli gibi davranarak eş eğrilikli formlar oluşturmaktadır. 2.23’de parçacık dizgisi yönteminin akış şeması, parametreleri ve iki farklı modelle üretilen form örnekleri gösterilmiştir.

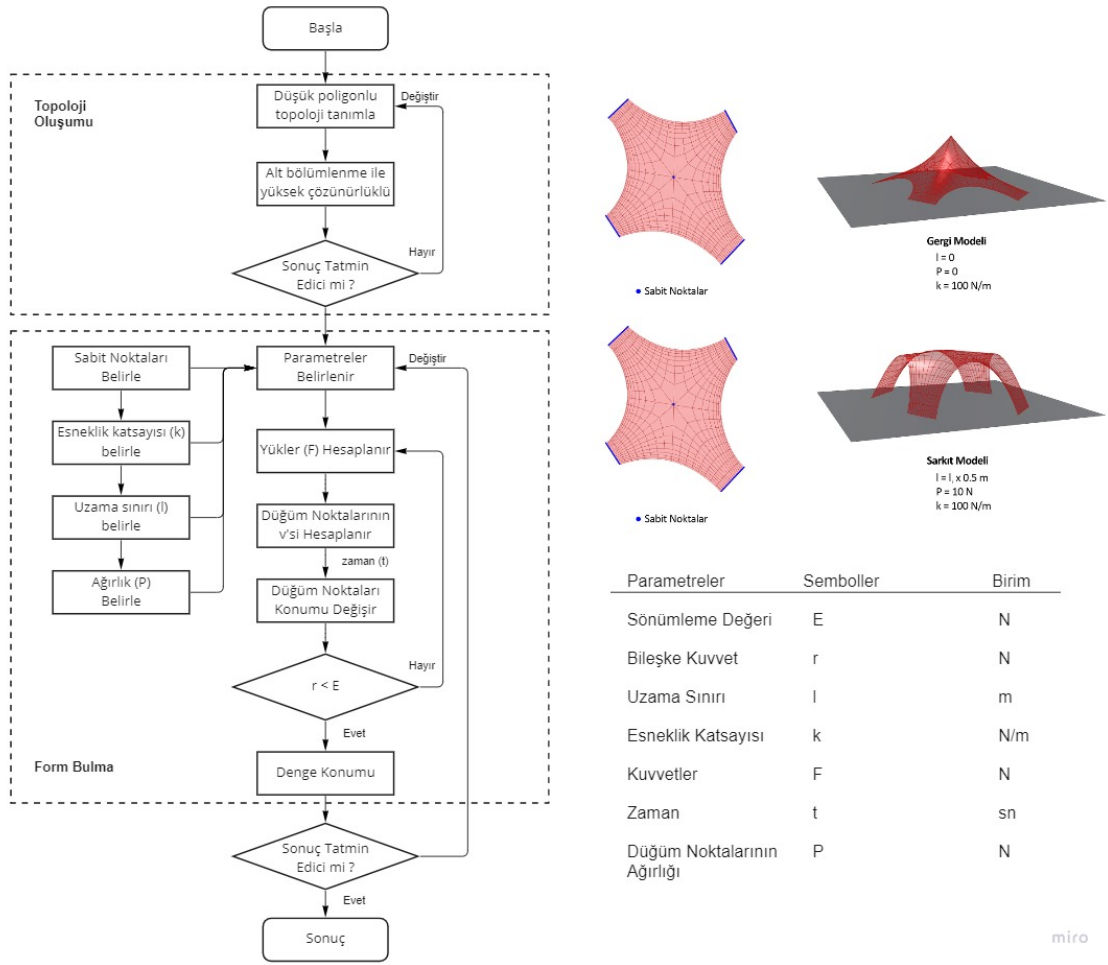
2.3.3 Serbest Modelleme ile Form Bulma

Serbest modelleme yönteminde diğer yöntemlerden farklı olarak herhangi bir kurala bağlı olmadan biçim üretimi yapılmaktadır. Bu yöntem heykel tasarlama yöntemine benzetilebilir. Biçim üretimi Frank Ghery’nin kağıt ile yaptığı maket çalışmalarında



Şekil 2.22 Dinamik gevşeme yönteminin akış şeması, parametreleri ve üretilen form örnekleri

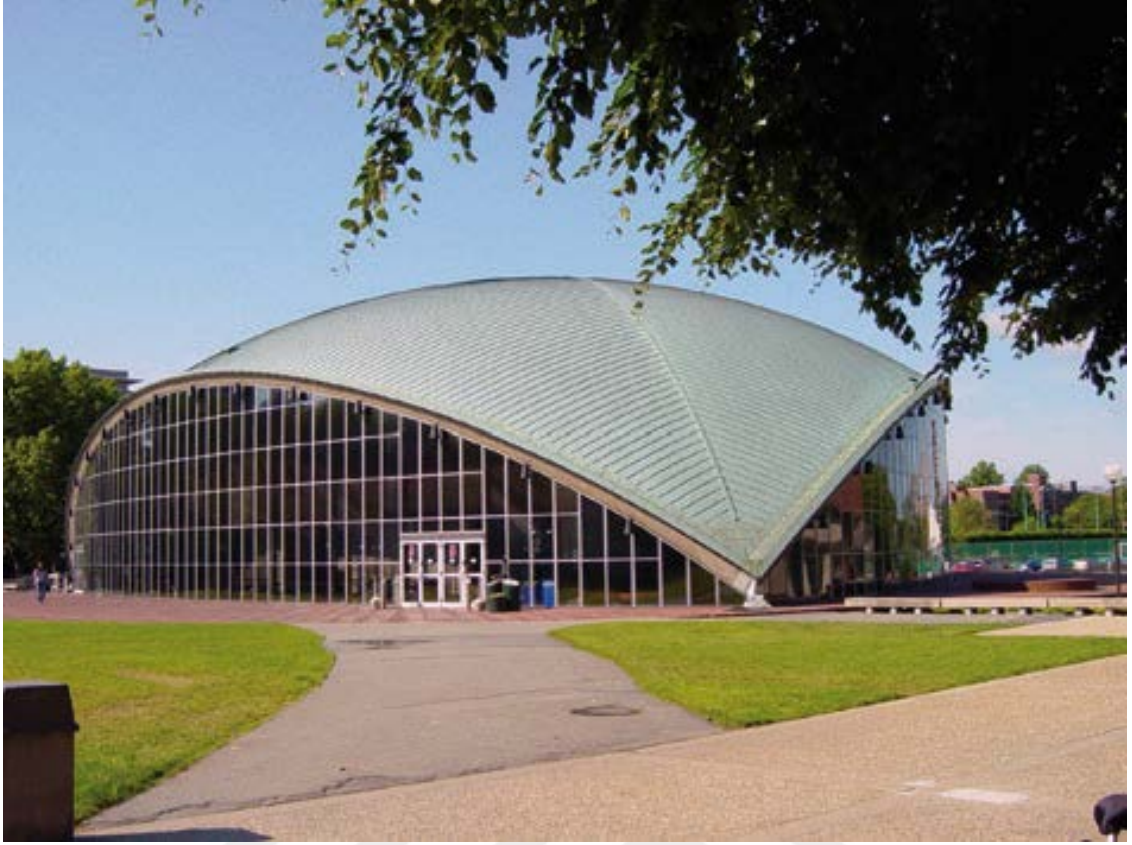
olduğu gibi fiziksel ortamda yapılabildiği gibi NURBS, B-Spline gibi araçlar ile dijital ortamda da yapılabilmektedir. Fiziksel üretim yönteminin tercih edilmesi durumunda üretilen formun hem tasarım hem de üretim ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde yeniden tanımlanarak optimize edilmesi gerekmektedir. Dijital yöntemlerin tercih edilmesi durumunda ise formun statik açıdan inşa edilebilir hale getirilecek



Şekil 2.23 Parçacık dizgisi yönteminin akış şeması, parametreleri ve iki farklı modelle üretilen form örnekleri

şekilde yeniden tanımlanarak optimize edilmektedir. Bu durum statik sorunların giderilmesi için özgün çözümlerin geliştirilmesini gerektirebilir. Örneğin Şekil 2.24'de serbest modelleme ile oluşturulan formun statik açıdan taşınabilir olmadığı için kabuğun serbest kenarlarına çelik kirişlerin kullanıldığı görülmektedir.

Kabuk yapı tasarımında kullanılan matematik temelli yöntemler mevcut yapı örnekleri üzerinden incelenmiştir. İnceleme sonucunda bu yöntem üretim kolaylığı sağladığı ve üretilen formların statik açıdan başarılı olduğu görülmüştür. Fizik temelli yöntemler ise algoritmaları test edilerek incelenmiştir. İnceleme sonucunda bu yöntemlerin de statik açıdan başarılı formlar ürettikleri ve hesaplamalı tasarım ile dijital ortamda kullanılabildiği görülmüştür. Aynı zamanda dijital ortamda kullanılan fizik temelli yöntemlerin de üretim kolaylığı sağladığı görülmüştür. Serbest modelleme yöntemleri mevcut yapı örnekleri üzerinden incelenmiştir. İnceleme sonucunda bu yöntemin diğerlerine kıyasla ekonomik açıdan daha verimsiz bir yöntem olduğu görülmüştür. Ancak matematiksel ve fiziksel yöntemin üretebileceği geometriler sınırlıyken. Serbest modelleme tasarımcının hayal gücüne bağlıdır. Bu sebeple bu yöntemin, diğer



Şekil 2.24 Kresge oditoryum yapısının serbest kenarlarında kullanılan çelik kirişler (Adriaenssens et al. 2014)

form bulma yöntemlerine göre tasarımcıya daha esnek bir tasarım imkânı sağladığı görülmüştür.

Form bulma sonucunda elde edilen formlar bazı yönlerden güçlüyken bazı yönlerden eksik kalmaktadır. Bu formların üretilmesi için birden çok başarımlarını sağlaması gerekmektedir. Bunun için formların başarımlarına göre optimize edilmesi gerekmektedir. Çalışmanın devamında optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan EA incelenmiştir.

2.4 Evrimsel Algoritmalar

Charles Darwin'e göre canlıların evrimi üç temel ilkeye dayanmaktadır:

- Ebeveyn ve çocukları arasındaki karakteristik özelliklerin çeşitliliğine,
- Bu karakteristik özelliklerin aktarılabilirliğine,
- Doğal seçim sonucunda faydalı özelliklere sahip bireylerin hayatta kalmasına.

Bu ilkelerden yola çıkarak; Darwin doğal seçim sayesinde faydalı özelliklerin nesilden nesile aktararak devam ederken, işe yaramayan özelliklerin yok olacağını savunarak evrim teorisini öne sürmüştür. 1950'li yıllarda bazı araştırmacılar Darwin'in evrim teorisinin mühendislik problemlerini çözmek için de kullanılabileceğini test etmişlerdir. Fakat o dönemin teknolojisinin hesaplama gücü yetersiz kalmıştır (Pétrowski, Ben-Hamida 2017). 1970'lerde ise bilgisayar teknolojilerinin gelişen hesaplama gücüyle, EA mühendislik problemlerinin çözümü olarak kullanılmaya başlamıştır. Pétrowski, Ben-Hamida (2017)'a göre evrimsel stratejiler, evrimsel programlama ve GA olmak üzere üç temel evrim algoritması bulunmaktadır. Günümüzde ise EA terimi, popülasyon temelli stokastik arama algoritmalarını tanımlamak için kullanılmaktadır (Bartz-Beielstein et al. 2014) Optimizasyon veya öğrenme işlemi için kullanılan EA'nın üç temel özelliği bulunmaktadır (Yu, Gen 2010). Bunlar:

- **Popülasyon Temellilik:** EA popülasyon olarak adlandırılan çözüm kümelerinden oluşmaktadır. Optimizasyon veya öğrenme işlemi bu popülasyonlar kullanılarak gerçekleştirir.
- **Başarımlar Hedeflilik:** Popülasyon içindeki her bir çözüm, popülasyonun bir bireyini tanımlamaktadır. Her bir bireyin kendini tanımlayan genetik dizilimi bulunmaktadır. Optimizasyon için hedeflenen kriter ise başarımlar olarak

tanımlanmaktadır. Algoritma, popülasyon içinden başarımlı değeri yüksek olan bireylerin tercih edilmesi ile optimizasyon işlemini gerçekleştirmektedir.

- **Varyasyon Odaklılık:** Popülasyon içerisindeki bireylerin genleri çeşitli işlemler ile değiştirilerek yeni nesiller üretilerek çözüm havuzu oluşturulmaktadır. Bu sayede genetik çeşitlilik sağlanmaktadır.

Mimarlık alanında da tasarım problemleri birçok başarımın aynı anda düşünülmesini gerektirmektedir. Bu sebeple parametrik tasarım araçlarının gelişmesiyle, EA mimari problemlerin çözümü için de kullanılmaya başlanmıştır. Çalışmanın devamındaki 2.25 bölümünde, GA'nın çalışma mekanizmaları açıklanmıştır. 2.4.2 bölümünde, optimizasyon sonuçlarının değerlendirilmesi için kullanılan Pareto yöntemi açıklanmıştır. 2.4.3 bölümünde tek ve çok hedefli optimizasyon farkları açıklanmıştır.

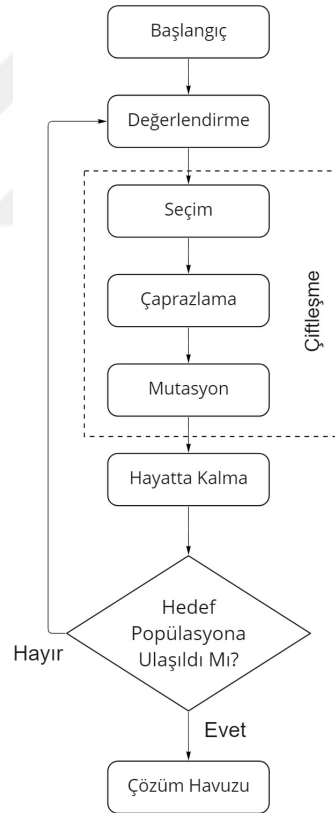
2.4.1 Genetik Algoritmalar

EA'nın bir çeşidi olan gen algoritmalarında ise popülasyonu oluşturan bireylerin genleri biyolojideki DNA'ya benzer şekilde 0-1 serileri olarak kodlanmaktadır. GA, popülasyonu oluşturan bireyler arasında güçlü başarımlı değerlerine sahip bireylerin genlerinin çaprazlanması ile yeni nesiller oluşturmaktadır. Her bir nesil üretiminin sonunda bu işlem tekrarlanarak hedeflenen nesil sayısına ulaşılan kadar devam etmektedir. Bu süreçte optimizasyon işlemi başarılı genlerin gelecek nesillere aktarılmasıyla daha başarılı genler üretmesine bağlıdır. GA'da ilk olarak optimizasyon hedef fonksiyonuna karar verilmesi gerekmektedir. Ardından arama yapılacak çözüm havuzunun sınırlarını belirlemek için popülasyon sayısına karar verilmektedir. Popülasyonun küçük tutulması süreci hızlandırırken, çeşitliliği azaltarak daha başarılı sonuçların üretilmesine engel olmaktadır. Popülasyon sayısının çok artırılması ise, çeşitliliği artırırken optimizasyon süresinin uzamasına sebep olmaktadır (Deb 2014). Optimizasyonun başarımlı kriterleri ve popülasyon sayısına karar verildikten sonra çözüm havuzunu oluşturacak bireylerin parametreleri genetik kod olarak kodlanır. Ardından optimizasyon işlemi Şekil 2.25'de görülen 6 adımdan oluşmaktadır:

- **Başlangıç:** Bu adımda genellikle rastgele seçilen genler ile başlangıç popülasyonu oluşturulur.
- **Değerlendirme:** Yeni popülasyon oluşturulduktan sonra her bir bireyin belirlenen hedef fonksiyonuna göre başarımlı ölçülür.
- **Seçim:** Değerlendirmesi tamamlanan bireyler arasından bir sonraki adımda kullanılmak üzere bireylerin seçildiği adımdır. Seçim adımında genellikle daha

başarılı bireyler seçilmektedir. Ancak bu adım için kullanılan farklı seçim yöntemleri bulunmaktadır.

- **Çaprazlama:** Çaprazlama operasyonu, bireylerin genetik bilgilerinin değiş tokuşunu yaparak yeni bir yavru oluşturma ve bir sonraki nesil için yeni bir popülasyon oluşturma işlemidir.
- **Mutasyon:** Bu adımda bireylerin gen yapısı değiştirilerek popülasyonun çeşitliliği sağlanmaktadır. Bu adımda değiştirilmek için seçilen gen ve değiştirme işlemi rastgele bir süreçtir. Çaprazlama ve mutasyon arasındaki fark; çaprazlama iki kromozom arasındaki genetik bilgiyi değiştirerek yeni yavrular oluştururken, mutasyon işleminde bireyin genleri rastgele değiştirilerek çeşitlilik sağlanmaktadır.
- **Hayatta Kalma:** Önceki adımlar sonucunda üretilen yeni bireyler bir önceki nesilden seçilen başarısız bireyler ile değiştirilerek yeni nesil oluşturulur.

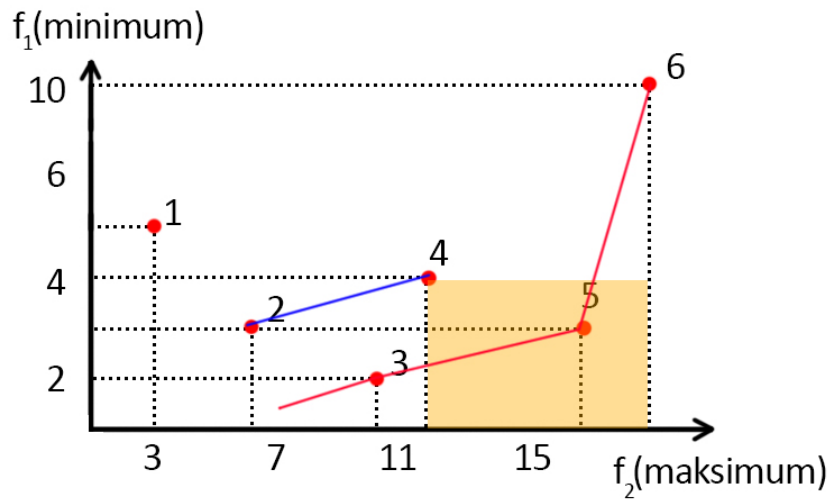


Şekil 2.25 Genetik algoritmaların çalışma mekanizması

2.4.2 Pareto Öncül Yöntemi

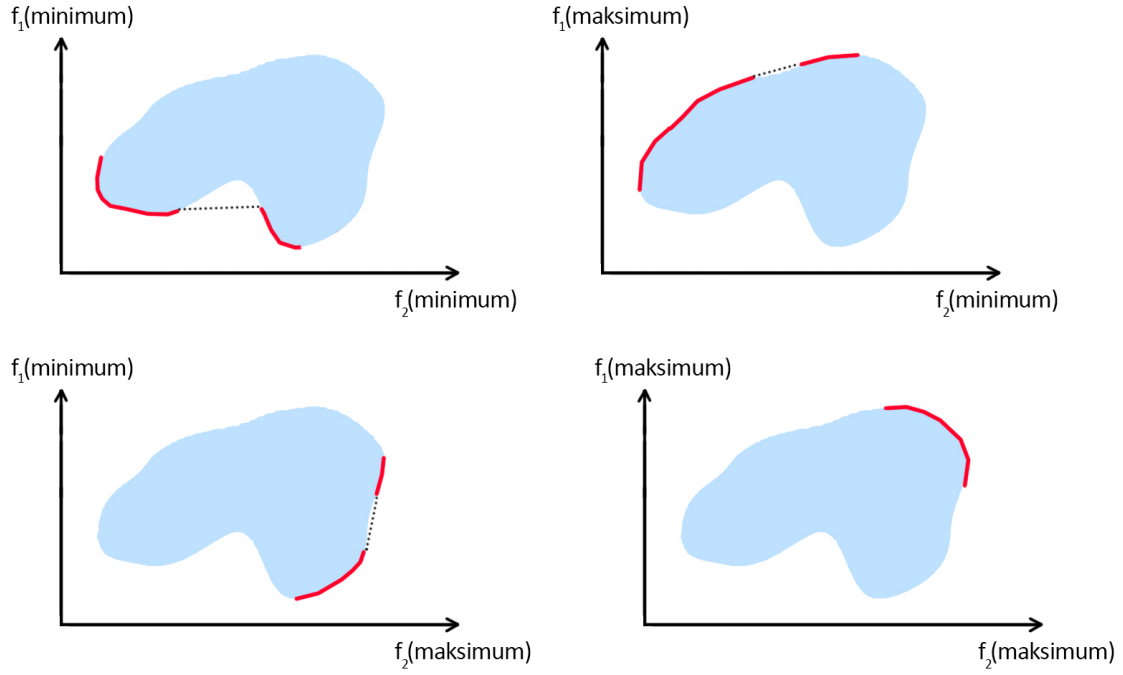
ÇHO sonucunda üretilen bireyler, popülasyonu yani çözüm havuzunu oluşturmaktadır. Gen algoritmalarından bu çözüm havuzu içerisinde başarıyı yüksek olanların

seçilmesi gerekmektedir. Bu seçim işlemi için de en yaygın olarak kullanılan yöntem pareto öncül yöntemidir. Pareto öncül yönteminde başarımlar açısından diğer bireyler tarafından baskılanamayan sonuçlar öncül olarak belirlenmektedir. Örneğin Şekil 3.3.1.2’de gösterilen grafikte altı sonuç ürün ile bu ürünlerin f_1 ve f_2 başarımların değerleri gösterilmiştir. Optimizasyon sürecinde f_1 başarımının minimize edilmeye çalışılırken f_2 başarımının maksimize edilmeye çalışıldığı görülmektedir. Grafik incelendiğinde 1 numaralı sonucun diğer tüm sonuçlardan hem f_1 hem de f_2 hedefi için başarısız olduğu görülmektedir. Bu sebeple 1 numaralı sonuç diğer sonuçlar tarafından domine edilmiştir. 3 numaralı sonucun f_2 hedefi için 5. ve 6. Sonuçtan başarısızken f_1 hedefi için 5. ve 6. Sonuçtan daha başarılıdır. Bu sebeple domine edilememiştir. Pareto yönteminde domine edilemeyen sonuçlar, Pareto öncül olarak kabul edilmektedir. Şekil 3.3.1.2’de kırmızı çizgi ile birleştirilen sonuçlar bu optimizasyon probleminin Pareto öncüllerini göstermektedir. Mavi çizgi ise ikincil öncülleri göstermektedir. Bazı algoritmalarda çaprazlama işlemi için sadece pareto öncüller kullanılırken, bazı algoritmalarda çeşitliliği arttırmak için ikinci öncüller de çaprazlama işlemine katılabilmektedir.

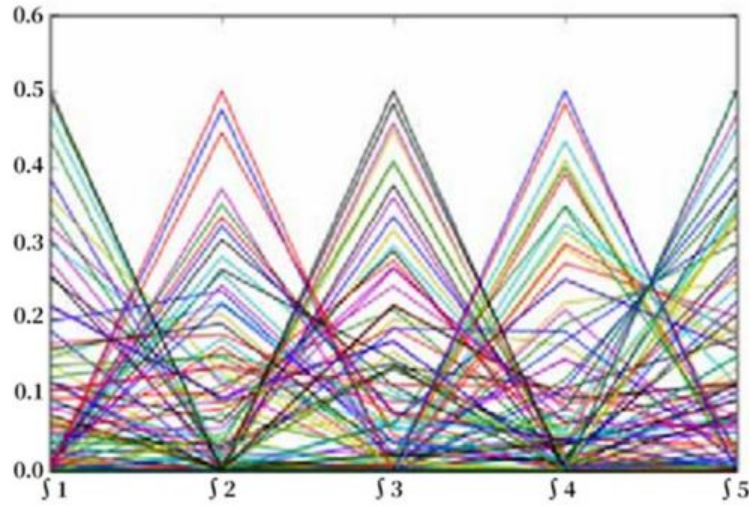


Şekil 2.26 6 sonucun f_1 ve f_2 başarımları için değerlendirme grafiği (4 numaralı sonucu domine eden öncüller sarı ile gösterilmiştir.)

Pareto öncül yönteminde, öncüllerin konumu optimizasyon probleminin başarımlar kriterlerine göre değişmektedir. Şekil 2.27’de farklı başarımlar kriterlerine göre Pareto öncüller gösterilmiştir. Pareto öncüller her zaman çözüm havuzunun sınır değerlerinde oluşmaktadır. Ancak başarımlar kriterlerinin sayısının artmasına bağlı olarak, çözüm havuzu çok boyutlu hale gelmektedir. Bu durumda Şekil 2.4.3 örneğindeki gibi çizgi grafikte temsil edilebilmektedir.



Şekil 2.27 Başarım kriterlerine göre pareto öncül çizgisinin değişimi



Şekil 2.28 5 hedefli optimizasyon sonuçlarının grafik temsili (Yuan Cao, Mao 2022)

2.4.3 Tek ve Çok Hedefli Optimizasyon Farkları

Optimizasyon problemleri kendi içerisinde tek ve çok hedefli olarak ikiye ayrılabilir. CHO'nun, optimizasyon problemlerinin çözümünde tek hedefliye göre daha yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Çünkü neredeyse tüm optimizasyon problemlerinde birden çok değerlendirme kriteri bulunmaktadır (Konak, Coit, A. E. Smith 2006). CHO algoritmalarında tek bir optimum yerine farklı başarımların değerlerine sahip çözüm havuzu üretilmektedir. Çoğu optimizasyon probleminde düşünülmesi gereken çok fazla başarımlar bulunmaktadır. Tüm bu başarımların hedef

olarak tanımlanması mümkün olmadığı için öncelikle önemli hedefler belirlenerek optimizasyon işlemi gerçekleştirilerek çözüm havuzu oluşturulmalıdır. Ardından oluşturulan çözüm havuzu içerisinde, optimizasyona dahil edilmeyen başarımlara göre değerlendirilerek seçim yapılması gerekmektedir.

THO algoritmalarında ise çok hedefliden farklı olarak tek bir hedef fonksiyonu tanımlanabilmektedir. Bu algoritmaların ÇHO problemlerinde kullanılabilmesi için hedef değerlerin (f) 2.6 formülündeki gibi ölçeklenerek tek bir hedef fonksiyon olarak tanımlanması gerekmektedir.

$$F = w_1 * f_1 + w_2 * f_2 + w_3 * f_3... \quad (2.6)$$

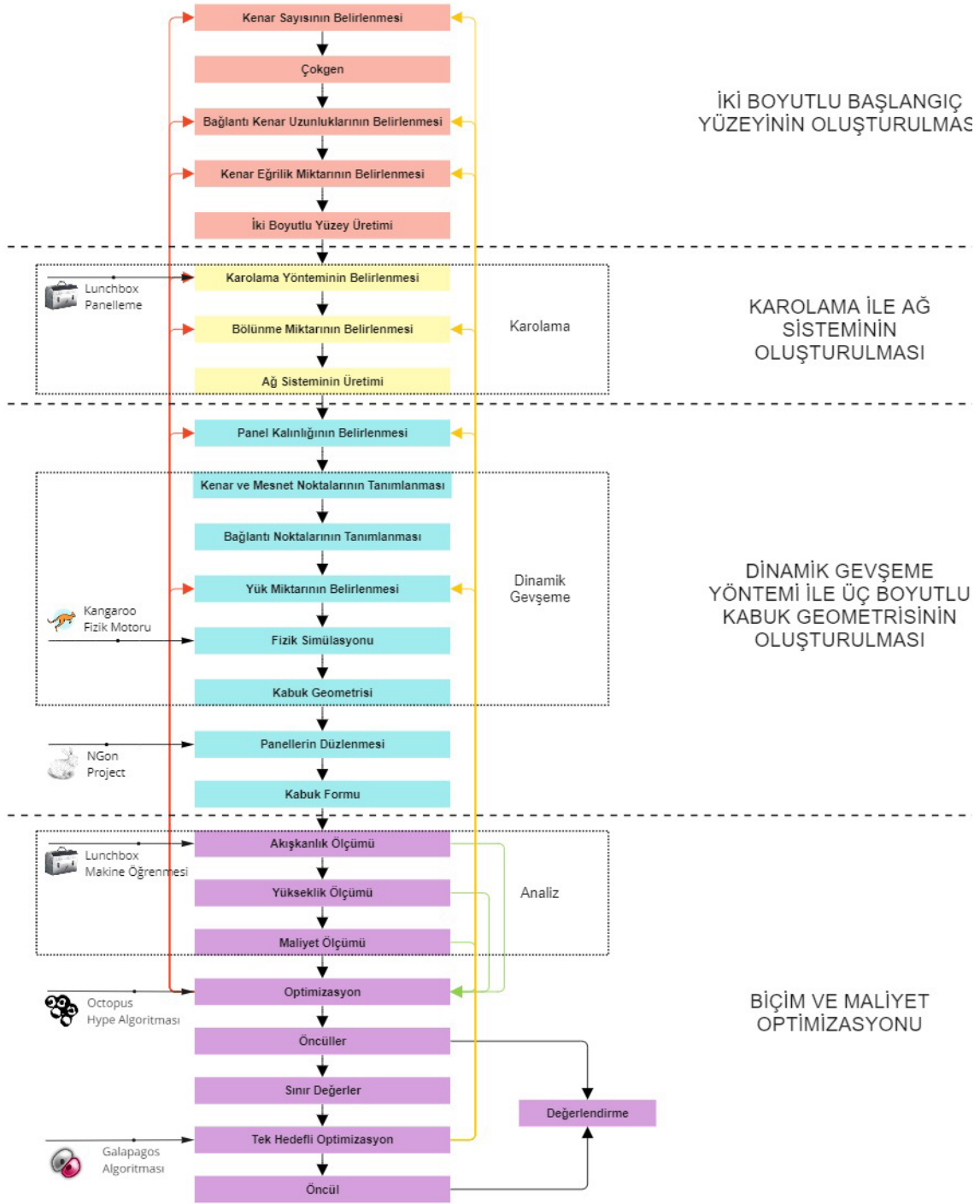
Ancak hedef değerlerin fonksiyona yazılmadan önce 0-1 arasına ölçeklenerek eşitlenmesi gerekmektedir. Ölçekleme sonrasında hedeflerin ağırlık katsayıları (w) kullanılarak önem sıraları düzenlenebilmektedir. Eşitleme işlemi genellikle rastgele oluşturulan bir popülasyon ile hedeflerin sınır değerleri belirlenerek yapılmaktadır (Deb 2014).

Çalışmanın bu bölümünde, iki boyutlu bir çokgenden yola çıkılarak üç boyutlu bir kabuk üretimi ve optimizasyonu yapılmaktadır. Çalışma “Rhino-Grasshopper” ortamında gerçekleştirilen üç bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın metodu Şekil 3.1’de gösterilmiştir. 3.1 bölümünde iki boyutlu başlangıç yüzeyi oluşturulmaktadır. Ardından oluşturulan yüzeyden karolama yöntemi ile ağ sistemi üretilmektedir. 3.2 bölümünde “Dinamik Gevşeme” yöntemi kullanılarak ağ sisteminden üç boyutlu kabuk geometrisi üretilmektedir. “Dinamik Gevşeme” ile üretilen kabuk, eğrisel panellere sahiptir. Eğrisel panellerden düzlemsel panellere geçiş için “Project” yöntemi kullanılmıştır. Ancak panellerin düzlemsel hale getirilmesi, biçimin akışkanlığını bozarak kabuk yüzeyinde kırılmalara sebep olmaktadır. 3.3 bölümünde ise kabuk formunun akışkanlığı, yüksekliği ve panel sayısı optimize edilmektedir. Akışkanlık analizi için “Kümeleme” (K-Means Cluster) makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Çalışmanın son adımında ise çok hedefli ve tek hedefli iki farklı gen algoritması ile optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. ÇHO’nun öncülleri “Pareto Öncül” (Pareto Front) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Çok hedefli algoritma sonucunda üretilen öncüllerin başarımların THO başarımlarını ölçmek için kullanılmıştır.

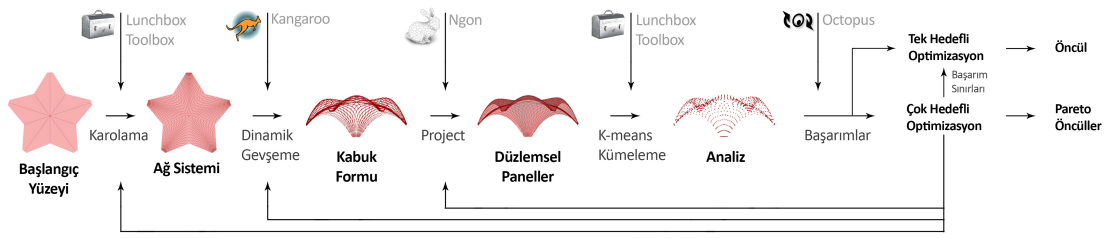
3.4’bölümünde, optimizasyon öncesi yazar tarafından tasarlanan bir adet başlangıç formu belirlenmiştir. ÇHO öncülleri arasında başarımların en iyi öncülü ve ortalamada en iyi ilk iki öncül seçilmiştir. THO sonucundan ise en iyi öncül seçilmiştir. Seçilen öncüler, başlangıç formu ile karşılaştırılarak optimizasyon algoritmalarının verimlilikleri yüzdesel olarak değerlendirilmiştir. Modelde yararlanılan yöntemler için kullanılan eklentiler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

3.1 Ağ Sisteminin Oluşturulması

Bu bölümde ilk olarak 5 metre yarıçaplı daire içerisinde kenar sayısı belirlenerek çokgen oluşturulmaktadır. Çokgenler geometrileri gereği panelleme işlemine uygun



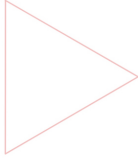
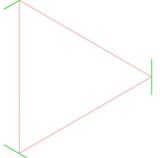
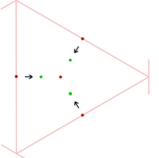
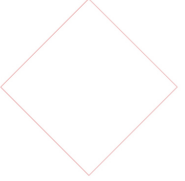
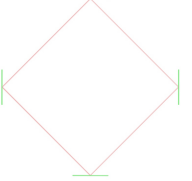
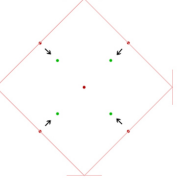
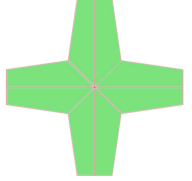
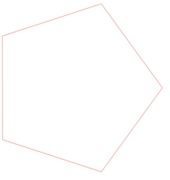
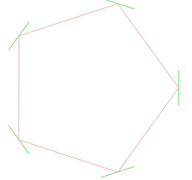
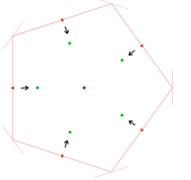
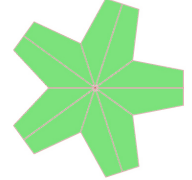
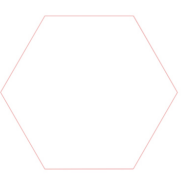
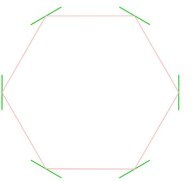
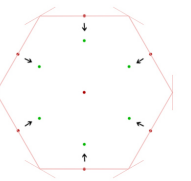
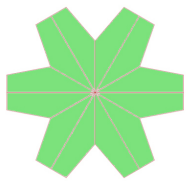
Şekil 3.1 Çalışmanın modeli



Şekil 3.2 Çalışmanın akış şeması ve kullanılan eklentiler

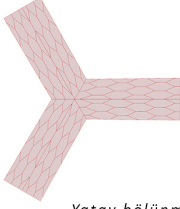
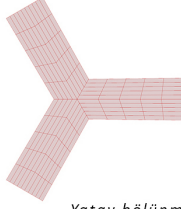
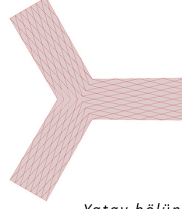
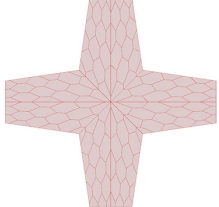
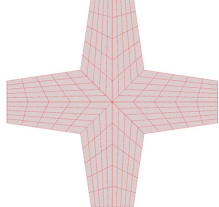
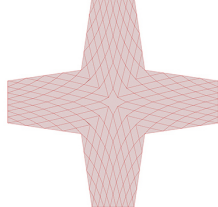
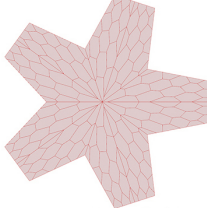
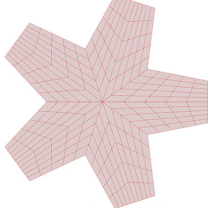
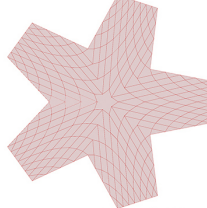
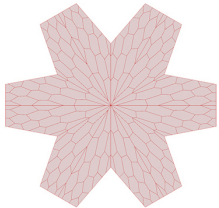
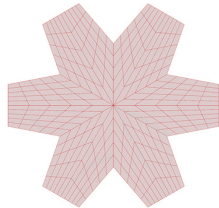
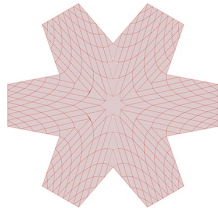
oldukları için tercih edilmiştir. Çokgenin köşe noktaları orta nokta olacak şekilde çokgenin açılırtaylarına dik yeni kenar çizgileri oluşturulmaktadır. Bu çizgiler aynı zamanda üretilecek olan kabuk strüktürünün zemin ile bağlantı noktalarının bulunacağı kenarlardır. Çokgen kenarlarının orta noktaları, şeklin ağırlık merkezine doğru taşınarak yeni köşe noktaları oluşturmaktadır. Oluşturulan yeni kenar çizgileri ve köşe noktaları birleştirilerek başlangıç yüzeyi oluşturulmaktadır. Bu yöntem ile oluşturulan yüzey alternatifleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 İki boyutlu yüzey üretim alternatifleri

1. Başlangıç Şekli	2. Temellerin Oluşturulması	3. Orta Noktaların Taşınması	4. Noktaların Birleştirilmesi
 Kenar sayısı: 3	 Kenar uzunluğu: 20	 Kırılma Miktarı: 28	
 Kenar sayısı: 4	 Kenar uzunluğu: 20	 Kırılma Miktarı: 28	
 Kenar sayısı: 5	 Kenar uzunluğu: 20	 Kırılma Miktarı: 28	
 Kenar sayısı: 6	 Kenar uzunluğu: 20	 Kırılma Miktarı: 28	

Ardından oluşturulan yüzey karolama yöntemi ile panellenerek düzlemsel ağ sistemi üretilmektedir. Karolama için altıgen, dörtgen ve diyagonal dörtgen olmak üzere üç yöntem alternatifi belirlenmiştir. Kenar sayısı ve karolama yöntemine göre oluşturulan alternatifler Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

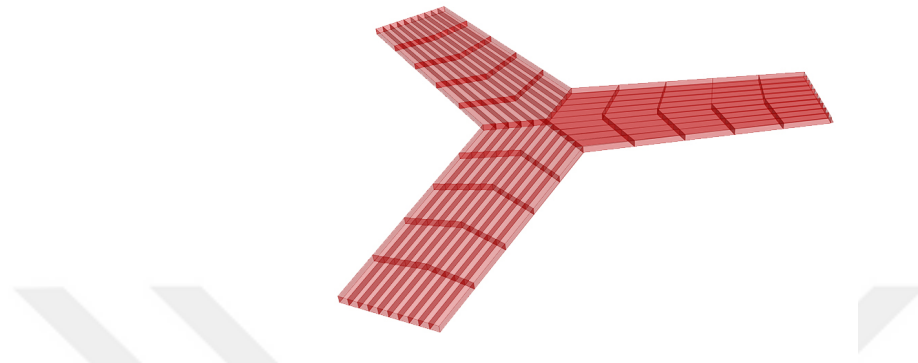
Tablo 3.2 Üretilebilecek ağ sistemi alternatifleri

Altıgen	Dörtgen	Diyagonal Dörtgen
 Yatay bölünme: 5 Dikey bölünme: 5	 Yatay bölünme: 5 Dikey bölünme: 5	 Yatay bölünme: 6 Dikey bölünme: 6
 Yatay bölünme: 5 Dikey bölünme: 5	 Yatay bölünme: 5 Dikey bölünme: 5	 Yatay bölünme: 6 Dikey bölünme: 6
 Yatay bölünme: 5 Dikey bölünme: 5	 Yatay bölünme: 5 Dikey bölünme: 5	 Yatay bölünme: 6 Dikey bölünme: 6
 Yatay bölünme: 5 Dikey bölünme: 5	 Yatay bölünme: 5 Dikey bölünme: 5	 Yatay bölünme: 6 Dikey bölünme: 6

Altıgen ağ sistemini oluşturmak için “Lunchbox”, dörtgen ve diyagonal dörtgen ağlar için ise “NGon” eklentisi kullanılmıştır. Her ağ sisteminin yatay ve dikey bölünme sayısı iki parametre ile belirlenmektedir. Ağ sistemlerinin yoğunluklarını birbirine yakın tutabilmek için diyagonal dörtgen sistemin her iki parametresi, altıgen sistemin ise dikey bölünme parametresi 1.5 değeri ile çarpılmıştır.

3.2 Kabuk Formunun Oluşturulması

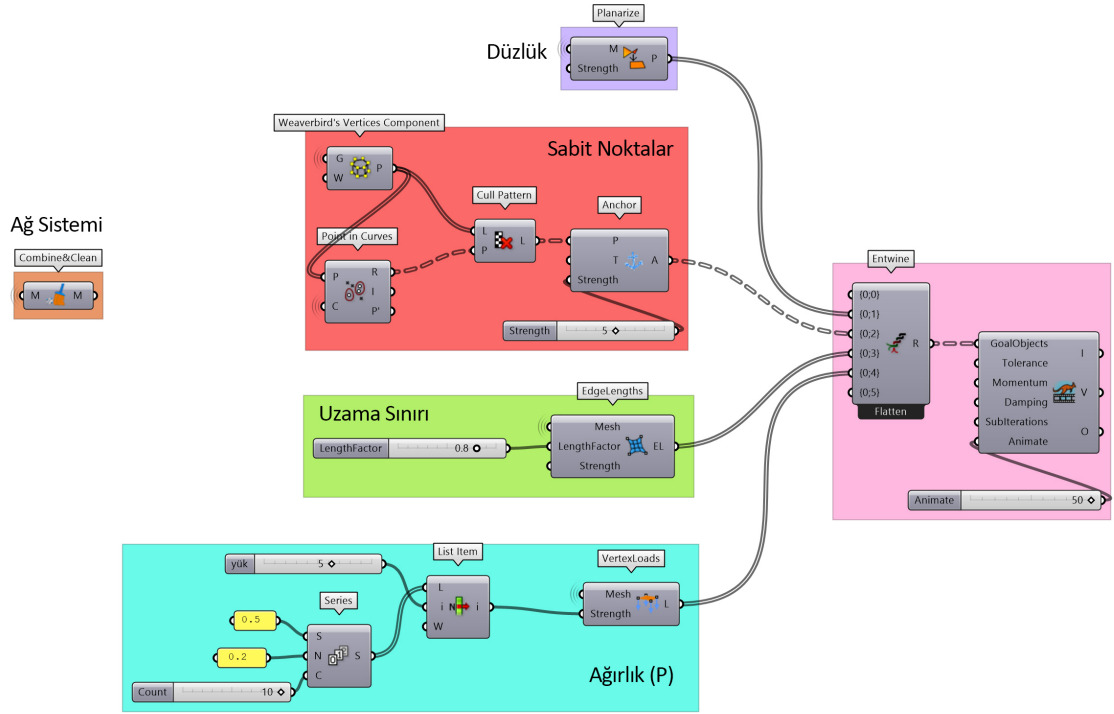
Bu bölümde, ilk 3.1 bölümü sonunda oluşturulan ağ sistemi “loft” işlemi ile yükseltilmiştir. Bu sayede düzlemsel elemanlardan yeni ağ sistemi oluşturularak iki boyuttan üç boyuta geçiş sağlanmıştır. Şekil 3.3’de “loft” işlemi ile 6 cm yükseltilerek oluşturulan üç boyutlu ağ sistemi gösterilmiştir. Yükseklik



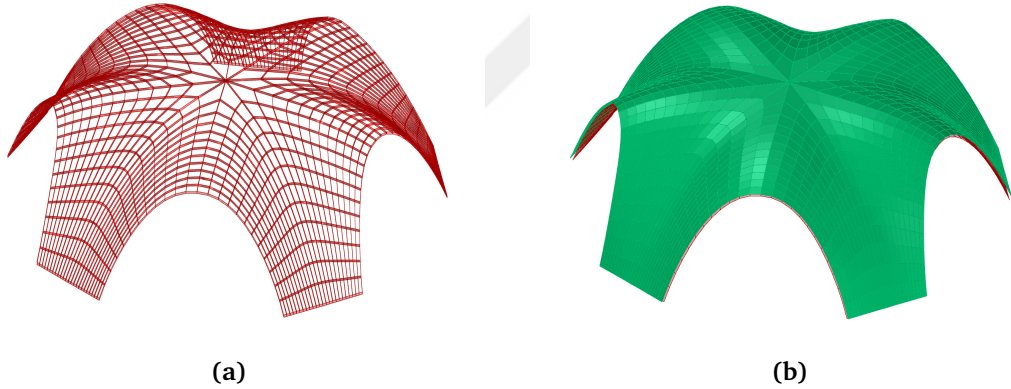
Şekil 3.3 “loft” işlemi ile 6 cm yükseltilerek oluşturulan üç boyutlu ağ sistemi

kazandırılan ağ sisteminden, “Dinamik Gevşeme” yöntemi kullanılarak kabuk strüktürü oluşturulmaktadır. Dinamik gevşeme işlemi için kullanılan görsel kod Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Şekilde görülen turuncu renk girdi olarak kullanılan ağ sistemini, mor renk ağ sistemini oluşturan panellerin düzlük başarımını, kırmızı renk sistemin sabit noktalarını, turkuaz renk ağ sisteminin düğüm noktalarına uygulanan ağırlığı, pembe renk ise dinamik gevşeme algoritmasını göstermektedir. Kırmızı renkli kısımda tezin 3.1 bölümünde anlatılan kenar çizgilerine en yakın olan noktalar sabit nokta kabul edilecek şekilde tanımlanmıştır. Dinamik gevşeme işlemi sonunda üretilen geometri kabuk formu olarak kabul edilmiştir. Ancak ağ sistemi kullanılarak oluşturulan kabuk formunun elemanları çift eğrilikli ve Şekil 3.5a’de görüldüğü gibi strüktür biçimindedir. Bu sebeple düzlemsel paneller kullanılarak üretimi mümkün değildir. Düzlemsel panellere geçiş için ilk olarak strüktür biçimindeki form kenar çizgileri düzenlenerek Şekil 3.5b’deki gibi panellerden oluşacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Ardından formun dış çeperinde bulunan panellere “Project” işlemi uygulanmıştır.

Bu sayede düzlemsel paneller ile üretililecek kabuk tasarımı elde edilmiştir. Ancak düzlemsel paneller kullanıldığında kabuk yüzeyinde Şekil 3.6’de görülen kırılmalar oluşarak geometrinin akışkanlığı bozulmaktadır. Çalışmanın devamında bu akışkanlık problemi optimize edilerek azaltılmaya çalışılmıştır.



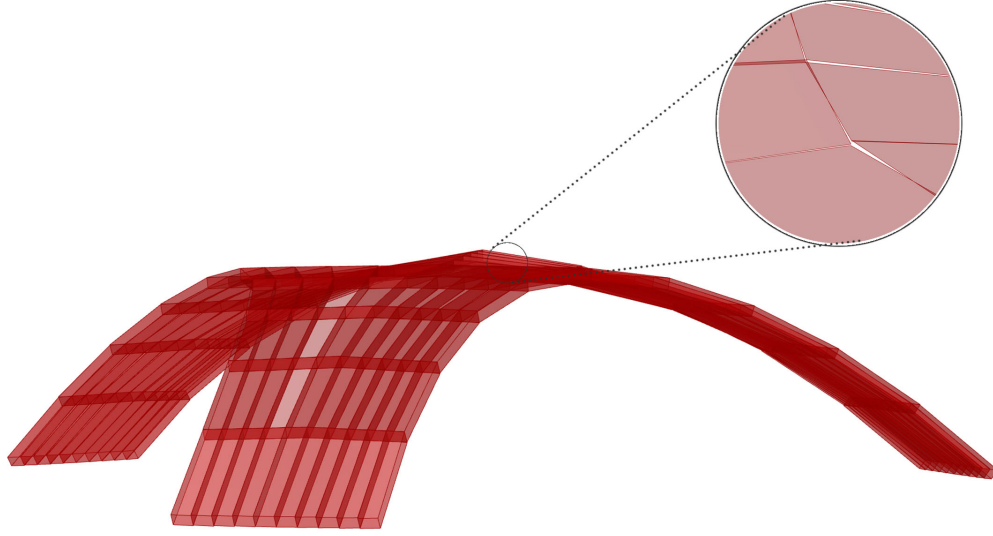
Şekil 3.4 Dinamik gevşeme işlemi için kullanılan görsel kod



Şekil 3.5 (a) Dinamik gevşeme sonucunda üretilen strüktür biçimindeki kabuk formu - (b) Panellerdn oluşacak şekilde düzenlenen kabuk formu

3.3 Genetik Algoritma ile Optimizasyon

Çalışmanın bu bölümde, önceki bölümlerde anlatılan model, ilk olarak çok hedefli gen algoritması ile optimize edilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda üretilen sonuçların başarımları incelenerek sınır değerleri belirlenmiştir. Ardından modelin başarımlar ölçümleri, bu sınır değerlerine göre 0-1 aralığına ölçeklenerek THO işlemi gerçekleştirilmiştir. CHO işleminde kullanılan yöntem 3.3.1 bölümünde açıklanmıştır. THO yöntemi ise 3.3.2 bölümünde açıklanmıştır.



Şekil 3.6 "Project" işlemi sonucunda kabuk yüzeyinde oluşan kırılmalar

3.3.1 Çok Hedefli Optimizasyon

Çalışmanın bu bölümünde ÇHO algoritması ile akışkanlık, yükseklik ve panel sayısı başarımları için potansiyel çözümler araştırılmıştır. Optimizasyon işlemi için "Octopus" eklentisi kullanılmıştır. Kullanılan optimizasyon algoritmasının ayarları Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Octopus eklentisi için kullanılan ayarlar

Algoritma Parametresi	Elitlik	Mutasyon Olasılığı	Mutasyon Oranı	Çaprazlama Oranı	Popülasyon	Nesil Sayısı
Değer	0,5	0,2	0,9	0,8	50	20

$4,4 \times 10^9$ sonuç olasılığı içerisinde 50 popülasyona sahip 20 nesil oluşturularak toplamda 1000 kabuk alternatifi üretilmiştir. 1000 kabuk alternatifi arasından baskılanamayan pareto öncüller arasından seçim yapılarak 3.4 bölümünde optimizasyon işlemi değerlendirilmiştir. Optimasyon algoritmasında hedef fonksiyon için kullanılan başarım kriterleri 3.3.1.1 bölümünde, değişken olarak kullanılan parametreler ve sınır değerleri ise 3.3.1.2 bölümünde açıklanmıştır.

3.3.1.1 Optimizasyonun Başarım Değerleri

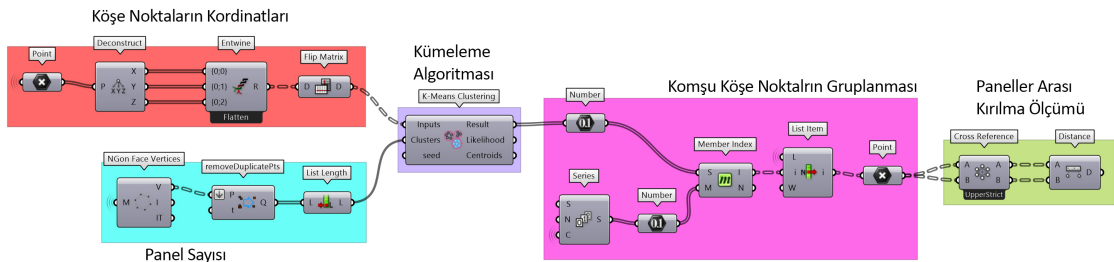
Bu bölümde optimizasyon algoritmasının hedef fonksiyonu için belirlenen başarım kriterleri Tablo 3.4'da sıralanmıştır. Bu optimizasyon başarımları arasından kabuk yüksekliği ve akışkanlık artırılmaya, panel maliyeti ise azaltılmaya çalışılmıştır. Bu başarımlar doğaları gereği birbiriyle çelişmektedir. Panel maliyeti, panel sayısı ile doğru orantılı olduğu için panel maliyeti panel sayısı ile ölçülmüştür. Kabuk yüksekliği kabuğun en üst noktasının zemine olan dikey uzaklığı ile ölçülmüştür. Kabuk

akışkanlığı paneller arası kırılma miktarı ile ters orantılıdır. Bu sebeple akışkanlık için paneller arasındaki en büyük kırılma miktarı azaltılmaya çalışılmıştır. Kırılma miktarı

Tablo 3.4 Optimizasyon algoritmasının hedef fonksiyonu için belirlenen başarımlar kriterleri

Başarımlar	Hedef
Akışkanlık	En az
Panel Sayısı	En az
Kabuk Yüksekliği	En çok

Şekil 3.7’de gösterilen kod ile komşu panellerin köşe noktalarının birbirine olan uzaklıkları bulunarak hesaplanmıştır. Panellerin köşe noktalarını komşuluk ilişkilerine göre sınıflandırmak için “Kümeleme” makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Her bir köşe noktası x,y,z koordinatlarına göre (Şekil 3.7’de kırmızı ile gösterilmiştir) toplam panel sayısı (Şekil 3.7’de turkuaz ile gösterilmiştir) kadar gruba ayrılmıştır. Makine öğrenmesi yardımıyla benzer konum değerlerine sahip köşe noktaları, aynı kümede yer alacak şekilde köşe noktaları kümelere ayrılmıştır (Şekil 3.7’de pembe ile gösterilmiştir). Bu sayede her bir panelin komşu panelleri ile arasındaki kırılma miktarları hesaplanmıştır (Şekil 3.7’de yeşil ile gösterilmiştir).



Şekil 3.7 Paneller arası kırılmayı hesaplamak için kullanılan kod

3.3.1.2 Optimizasyonun Parametreleri ve Sınırları

Çok hedefli GA için; ağ sisteminin oluşturulması bölümünden (3.1) 6, kabuk formunun oluşturulması bölümünden (3.2) ise 2 olmak üzere toplamda 8 farklı parametre kullanılmıştır. Bu parametreler ve belirlenen sınır değerleri Tablo 3.5’de listelenmiştir.

Modelin ilk parametresi çokgenin kenar sayısıdır. 3-6 aralığıyla sınırlandırılmıştır. Tezin 3.1 bölümünde anlatılan yeni kenar uzunluğu ve orta nokta konumu da optimizasyon parametresi olarak kullanılmıştır. Bu parametreler sırasıyla 32-200 cm ve 0-100 cm aralığı ile sınırlandırılmışlardır. Yine tezin 3.1 bölümünde anlatılan yüzey karolama yöntemi ve yoğunluğu da, bu bölümün son parametreleri olarak belirlenmiştir. Pannelleme yöntemleri altıgen, dörtgen ve diyagonal dörtgen ile

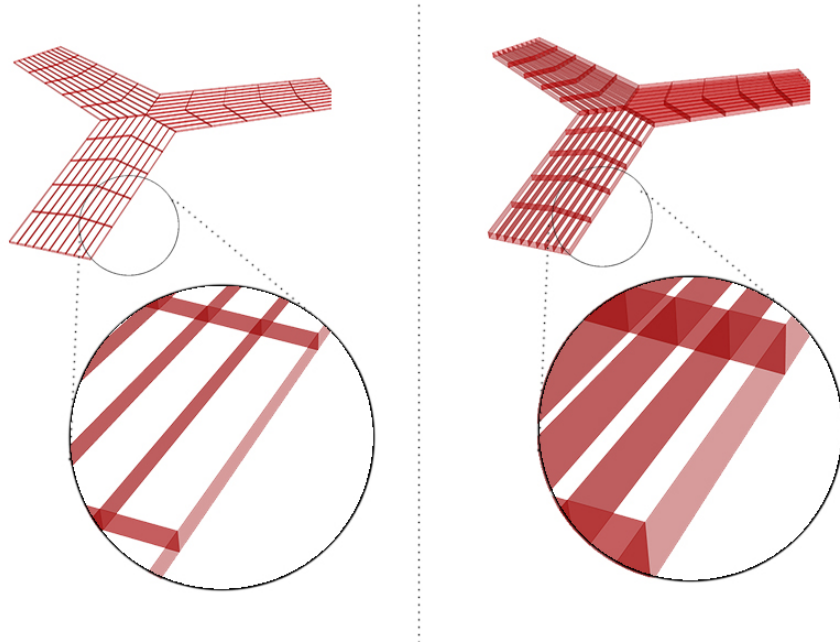
Tablo 3.5 Optimizasyon parametreleri ve sınır değerleri

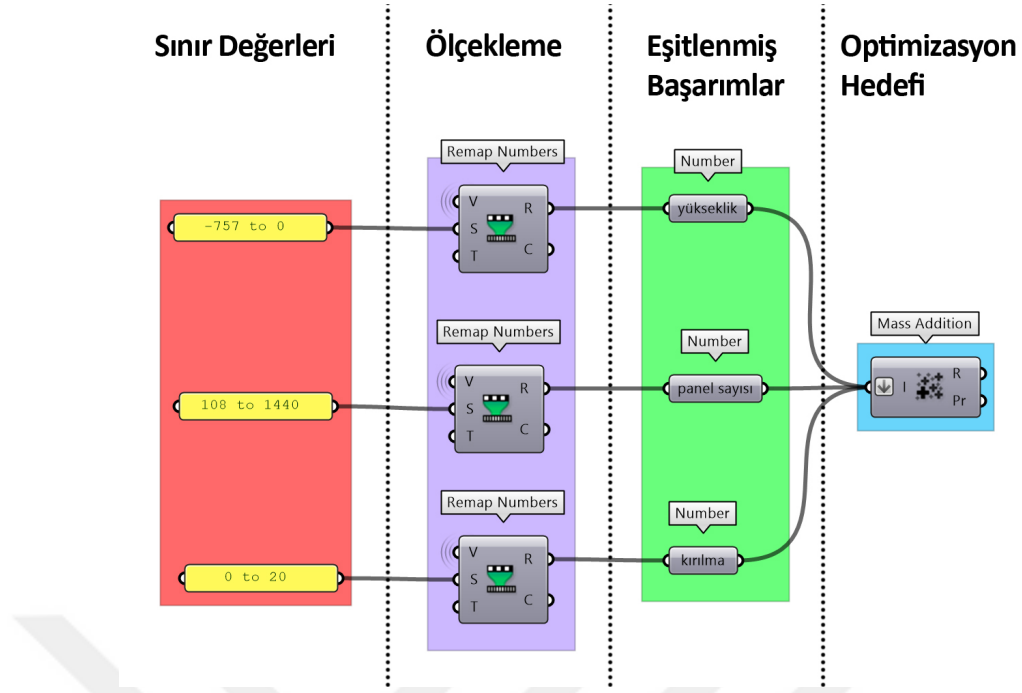
	Parametre	Sınırlar
Ağ Sisteminin Oluşturulması		
1	Kenar Sayısı	3-6
2	Kenar Uzunluğu	32-200 cm
3	Orta Nokta Konumu	1-100 cm
4	Karolama Yöntemi	3
5	Yatay Bölüntü Sayısı	5-12
6	Dikey Bölüntü Sayısı	5-12
Kabuk Formunun Oluşturulması		
1	Panel Kalınlığı	1-10 cm
2	Yük	0,5-2,1 kgN

sınırlandırılmıştır. Pannelleme yoğunluğu için ise yatay ve dikey bölünme sayıları parametre olarak belirlenmiş ve 5-12 aralığı ile sınırlandırılmıştır.

Tezin 3.2 bölümünden ise “loft” işleminin mesafesi parametre olarak belirlenmiş ve 1-10 cm aralığı ile sınırlandırılmıştır. Panel kalınlıkları için belirlenen sınır değerlerinin sonuçları Şekil 3.8’de görülmektedir. Bu parametre aynı zamanda panel kalınlığını da belirlemektedir. Modelin son parametresi ise “Dinamik Gevşeme” yönteminde kullanılan ağın düğüm noktalarına uygulanan yüküdür ve 3.1 formülü ile belirlenmektedir. Formülün x değeri 0-8 aralığıyla sınırlandırılmıştır.

$$f(x) = 0,5 + \frac{2x}{10} \quad (3.1)$$

**Şekil 3.8** Panel kalınlığı için belirlenen sınır değerler



Şekil 3.9 Ölçekleme algoritması

3.3.2 Tek Hedefli Optimizasyon

Çalışmanın bu bölümünde, 3.3.1.2 bölümündeki parametreler kullanılarak THO algoritması ile akışkanlık, yükseklik ve panel sayısı başarımları için optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.6 THO algoritmasında kullanılan ayarlar

Hedef	Çalışma Süresi	Popülasyon	Başlangıç Çarpanı	Koruma (Maintain)	Üreme (Inbreeding)
Minimize	8 saat	50	2	%5	%75

Optimizasyon algoritması olarak “Galapagos” eklentisi kullanılmıştır. Kullanılan optimizasyon algoritmasının ayarları Tablo 3.6’de gösterilmiştir. THO algoritmalarında hedef fonksiyonların 0-1 arasına ölçeklenerek eşitlenmesi gerekmektedir. Bu ölçekleme işlemi için sınır değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada sınır değerleri 3.3.1 bölümünde açıklanan optimizasyon sonuçları üzerinden belirlenmiştir. Ölçekleme için kullanılan algoritma ve sınır değerleri Şekil 3.9’de gösterilmiştir. Optimizasyon sırasında hedef fonksiyon minimize edilmeye çalışılırken, yükseklik başarımının artırılması istendiği için başarımların negatifi alınmıştır.

8 saatlik optimizasyon sonucunda elde edilen 26 öncül içinden en iyi öncül değerlendirme bölümünde (3.4), ÇHO öncülleri ve başlangıç şekli ile karşılaştırılmıştır.

3.4 Değerlendirme

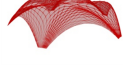
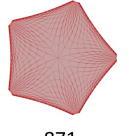
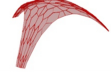
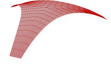
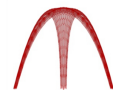
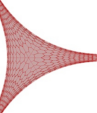
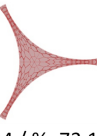
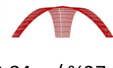
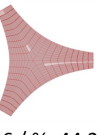
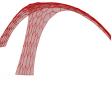
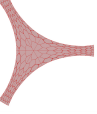
ÇHO sonucunda 20 nesilden toplam 1000 adet kabuk formu üretilmiştir. Bu formlar arasından domine edilemeyen 33 adet pareto öncül bulunmaktadır. Teorik olarak bu öncüllerin hepsi sonuç ürün olarak kullanılabilir (Zhao, Han, Shen 2021). Ancak bu bölümde değerlendirme için her başarımın en iyi öncülü ve ortalamada en iyi ilk iki öncül olmak üzere beş öncül seçilmiştir.

THO adımıyla ise 26 nesil içerisinde en başarılı kabuk formu seçilmiştir. Beş öncülün seçilen öncüllerin başarım değerlerinin değişimini ölçebilmek için optimizasyon öncesinde yazar tarafından tasarlanan başlangıç şekli referans alınmıştır. Seçilen öncüllerin formları, parametre ve başarım değerleri Tablo 3.7’te gösterilmiştir.

Optimizasyon sonunda seçilen öncüller incelendiğinde aşağıda listelenen çıkarımlar yapılmıştır:

- Panel kırılmasının hem yükseklik hem de panel sayısı başarımı ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Bu sayede tek bir en iyi yerine 37 pareto öncül elde edilmiştir.
- ÇHA’da yükseklik başarımının diğer başarımlara göre baskın geldiği görülmüştür. THO’da ise bu durum gözlemlenmemiştir.
- THO sonunda, 3. ve 4. ve 6. öncüllerin yüzey alanları sebebiyle pratikte kullanılamayacağı düşünülmektedir. Kabuk formunun yüzey alanının yeni başarım kriteri olarak optimizasyon işlemine eklenmesi gerektiği saptanmıştır.
- Kenar sayısı parametresinin sürekli azalma eğilimi göstererek çeşitliliği azalttığı görülmüştür. Bu parametre ile çelişen yeni bir başarım kriterine ihtiyaç duyulduğu görülmüştür.
- Optimizasyon sürecinde parametreler başarım değerini arttırabilmek için sürekli değişmiştir. Ancak yük parametresi yükseklik başarımı ile doğrudan ilişkili olduğu için, sürekli yükselme eğilimi göstermiştir.
- ÇHO sonucunda üretilen öncüllerin panel sayısı 108 ile 1440, kabuk yüksekliği 0 cm ile 757 cm, panel kırılması ise 0,17 cm ile 20 cm arasındadır. EA’nın, kullanıcıya farklı başarım değerlerine sahip geniş bir çözüm havuzu sunduğu gözlemlenmiştir. THO sonucunda ise tek bir öncül üretildiği için başarım sınırları kefedilememiştir.

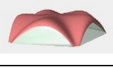
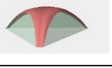
Tablo 3.7 Optimizasyon sonucu seçilen öncüller, DD: Diyagonal Dörtgen, D: Dörtgen, A: Altıgen

Çözüm		Parametreler	Panel Kırılması	Kabuk Yüksekliği	Panel Sayısı
Başlangıç Şekli		Kenar Sayısı			
		Kenar Uzunluğu			
		Orta Nokta Konumu			
		Panelleme Yöntemi			
		Yatay Bölüntü Sayısı			
		Dikey Bölüntü Sayısı			
		Panel Kalınlığı			
		Yük			
1.Öncül	Minimum Panel Sayısı	Kenar Sayısı			
		Kenar Uzunluğu			
		Orta Nokta Konumu			
		Panelleme Yöntemi			
		Yatay Bölüntü Sayısı			
		Dikey Bölüntü Sayısı			
		Panel Kalınlığı			
		Yük			
2.Öncül	Minimum Panel Kırılması	Kenar Sayısı			
		Kenar Uzunluğu			
		Orta Nokta Konumu			
		Panelleme Yöntemi			
		Yatay Bölüntü Sayısı			
		Dikey Bölüntü Sayısı			
		Panel Kalınlığı			
		Yük			
3.Öncül	Maksimum Kabuk Yüksekliği	Kenar Sayısı			
		Kenar Uzunluğu			
		Orta Nokta Konumu			
		Panelleme Yöntemi			
		Yatay Bölüntü Sayısı			
		Dikey Bölüntü Sayısı			
		Panel Kalınlığı			
		Yük			
4.Öncül	1. En İyi (Ortalama)	Kenar Sayısı			
		Kenar Uzunluğu			
		Orta Nokta Konumu			
		Panelleme Yöntemi			
		Yatay Bölüntü Sayısı			
		Dikey Bölüntü Sayısı			
		Panel Kalınlığı			
		Yük			
5.Öncü	2. En İyi	Kenar Sayısı			
		Kenar Uzunluğu			
		Orta Nokta Konumu			
		Panelleme Yöntemi			
		Yatay Bölüntü Sayısı			
		Dikey Bölüntü Sayısı			
		Panel Kalınlığı			
		Yük			
Tek Hedefli Optimizasyon		Kenar Sayısı			
		Kenar Uzunluğu			
		Orta Nokta Konumu			
		Panelleme Yöntemi			
		Yatay Bölüntü Sayısı			
		Dikey Bölüntü Sayısı			
		Panel Kalınlığı			
		Yük			

- Ancak ÇHO sonucunda üretilen öncüllerin hepsi pratikte kullanıma uygun değildir. Bu sebeple optimizasyon sonunda üretilen öncüller arasından tasarımcının seçim yapması gerektiği görülmüştür.
- THO'nun, çok hedefliye göre ortalamada daha iyi öncül ürettiği ancak tüm başarımlarda gelişme sağlayamadığı görülmüştür.

Kabuk yapıları, giriş bölümünde de bahsedildiği gibi hem duvar hem de çatı görevi görmektedir. Bu sebeple önerilen model sonucunda üretilen öncüller,

Tablo 3.8 Optimizasyon sonucu seçilen öncüllerin açıklık oranları, A/K: Toplam açıklık alanının kabuk yüzeyine oranı

	Başlangıç Şekli	1. Öncül	2. Öncül	3. Öncül	4. Öncül	5. Öncül	Tek Hedefli Optimizasyon
Form							
Açıklık Alanı	25,47 m ²	38,63 m ²	24,33 m ²	108,54 m ²	115,07 m ²	45,44 m ²	56,00 m ²
Kabuk Alanı	74,17 m ²	28,72 m ²	26,21 m ²	31,51 m ²	19,79 m ²	36,35 m ²	22,83 m ²
A/K Oranı	%34	%135	%93	%344	%581	%125	%245
Açıklık Yüzey Eğimi	%7	%24,76	%41,82	%10,06	%14,78	%20,58	%18,33

yarı açık mekanlar oluşturmak için kullanılabilmektedir. Ancak kapalı alan oluşturulmak istendiğinde kabuk yüzeyi dışında kalan açıklık yüzeylerinin kaplanması gerekmektedir. Kabuk yüzeyinin ışık geçirgenliği olmadığı durumlarda açıklık alanlar, ışık geçirgenliği için cam benzeri saydam malzemeler ile kaplanarak cephe oluşturulmaktadır. Bu durumda cephe yüzeyinin eğimi de taşıyıcılık açısından önem kazanmaktadır. Eğimin çok artması durumunda kabuk formunun serbest kenarlarında ekstra cephe yükü oluşacağı için ek taşıyıcı kirişlere ihtiyaç duyulacaktır. Optimizasyon sonucunda seçilen öncüllerin açıklık oranları ve açıklık yüzeylerinin eğimleri Tablo 3.8’de gösterilmiştir. 3., 4. ve 6. öncüllerde A/K oranının çok yüksek olduğu görülmektedir. A/K oranının çok artması durumunda iç mekânda aydınlanma ve ısı kontrolünü zorlaştıracakları öngörülmektedir. Tüm öncüllerde, açıklık yüzeyinin eğiminin başlangıç şekline göre arttığı görülmüştür. Kabuk yüksekliği ile açıklık alanı arasında doğru, açıklık yüzey eğimi arasında ise ters orantı görülmüştür. Optimizasyon algoritmalarına açıklık ve eğim başarımlarının eklenmesine ihtiyaç duyulduğu saptanmıştır.

4 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, geniş açıklı mekanlar için kullanılan kabuk yapıları incelenerek sınıflandırılmıştır. Bu yapılarında form bulma için kullanılan yöntemler incelenmiştir. Fizik temelli form bulma yöntemleri ile elde edilen formların parametrik tasarım sürecine entegre edilebildiği ve üretim kolaylığı sağladığı görülmüştür. Ardından optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan EA incelenerek mimari problemlerin çözümü için kullanılabilecek tek ve çok hedefli gen algoritmaları araştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda yığma kabuk yapıları için hem form bulma sürecini hem de optimizasyon işlemini gerçekleştirebilen, hesaplamalı tasarım modeli önerilmiştir. Önerilen model “Rhino-Grasshopper” ortamında simüle edilerek test edilmiştir. Modelde ilk olarak, iki boyutlu başlangıç yüzeyi oluşturulmaktadır. Ardından oluşturulan yüzeyden karolama yöntemi ile ağ sistemi üretilerek “Dinamik Gevşeme” yöntemi kullanılarak ağ sisteminden üç boyutlu kabuk formu elde edilmiştir. Çalışmada düzlemsel paneller hedeflendiği için eğrisel panellerden düzlemsel panellere geçiş için “Project” yöntemi kullanılmıştır. Ancak panellerin düzlemsel hale getirilmesi, biçimin akışkanlığını bozarak kabuk yüzeyinde kırılmalara sebep olmuştur.

Optimizasyon adımı ilk olarak CHO algoritması kullanılarak, kabuğun akışkanlığı ve yüksekliği artırılmaya, maliyeti ise azaltılmaya çalışılmıştır. Akışkanlık paneller arasındaki en büyük açıklık seviyesi üzerinden maliyet ise panel sayısı üzerinden hesaplanmıştır. CHO sonuçları pareto öncül yöntemi ile değerlendirilerek karşılaştırma için 5 öncül seçilmiştir. Ayrıca CHO sonucunda üretilen çözüm havuzu sayesinde hedeflenen başarımların sınır değerleri belirlenmiştir. THO adımı ise CHO sonucunda belirlenen sınır değerlerine göre başarımlar 0-1 aralığına ölçeklenerek eşitlenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen en iyi öncül karşılaştırma için seçilmiştir. Optimizasyon öncüllerinin gelişmelerinin ölçülebilmesi için optimizasyon öncesi yazar tarafından üretilen başlangıç şekli kullanılmıştır.

Değerlendirme sonucunda CHO sonunda üretilen pareto öncüllerde; başlangıç formuna kıyasla akışkanlık, yükseklik ve panel maliyeti başarımlarından en az ikisinde

gelişme görülürken 4. ve 5. öncül gibi bazı öncüllerde üç başarımda da gelişme görülmüştür. THO sonucunda ise panel sayısı ve yükseklikte gelişme, akışkanlıkta azalma görülmüştür. Ancak ÇHO'nun 5. öncülüne göre ortalamada daha başarılı sonuç üretildiği görülmüştür. Bu sebeple ÇHO sonrasında yapılan THO'nun sonuçları geliştirmek için kullanılabileceği görülmüştür. Ancak THO algoritmalarının CHO algoritmalarından daha verimli olduğu hipotezi doğrulanamamıştır.

EA'nın, kullanıcıya farklı başarımla değerlerine sahip geniş bir çözüm havuzu sunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çözüm havuzunun genişliği sayesinde düşünülmesi gereken diğer başarımla kriterlerinin belirlenmesine yardımcı olduğu görülmüştür. Bu sebeple önerilen modelin, tasarımcıya karar verme sürecinde yardımcı olacağı düşünülmektedir. Ancak ÇHO sonucunda üretilen öncüllerin hepsi pratikte kullanıma uygun değildir. Bu sebeple optimizasyon sonunda üretilen öncüller arasından tasarımcının seçim yapması gerekmektedir. Optimizasyon sonuçları incelendiğinde çalışmada önerilen yöntemin kapalı alan oluşturan kabuk yapıları için uygun olmadığı görülmüştür. Kabuk formunun açıklık yüzey alanı ve eğiminin, optimizasyona başarımla kriteri olarak dahil edilerek çalışmanın kapalı alan tasarımını da kapsayacak şekilde geliştirilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca değerlendirme sonucunda bazı parametre ve başarımlarda çelişki sağlanamadığı görülmüştür. ÇHO çalışmalarında çeşitliliğin sağlanabilmesi için birbiriyle çelişen parametre ve başarımlara ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Çözüm havuzu çeşitliliğini artırmak için ileriki çalışmalarda; modele yeni başarımla kriterleri eklenebilir ve yükseklik başarımla için baraj değeri sınırlaması getirilebilir. Sınırlama sayesinde başarısız sonuçların optimizasyon sürecine girmesi önlenir. Bu çalışmada önerilen model tamamen otomatik bir kabuk tasarım yöntemi değil, tasarımcıya karar verme sürecinde yardımcı bir araçtır.

Gelecek çalışmalarda, önerilen modeldeki, başarımla değeri artırılarak karşılaşılan sorunların çözümlerinin aranması planlanmaktadır. Ayrıca kapsam dışı bırakılan statik başarımla da optimizasyon modelin eklemlenerek modelin geliştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca yığma kabuk yapıları için önerilen modelin, farklı form bulma yöntemleri kullanılarak farklı kabuk yapılarının tasarımı için de potansiyeli araştırılabilir. Çalışmanın benzer performans odaklı tasarım süreçlerine de uygulanarak mimari optimizasyon alanında, EA'nın kullanım potansiyellerinin keşfedilebileceği öngörülmektedir.

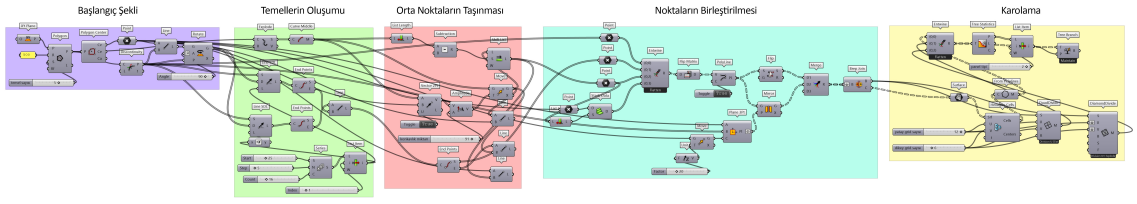
- Adriaenssens, Sigrid et al. (2014). *Shell structures for architecture: form finding and optimization*. Routledge.
- Ağırbaş, Arda (2019). “A physics-based design method of gridshell systems: optimization of form and construction cost”. MA thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ali, Nizar Bel Hadj, Landolf Rhode-Barbarigos, Ian FC Smith (2011). “Analysis of clustered tensegrity structures using a modified dynamic relaxation algorithm”. In: *International Journal of Solids and Structures* 48.5, pp. 637–647.
- Andrews, Peter Alford (2009). *TENTS in Iran*. URL: <https://iranicaonline.org/articles/tents-cador-ii#prettyPhoto>. (accessed: 18.03.2021).
- Arquiteturaviva (n.d.). *Expo 2000 Japan Pavilion, Hannover*. URL: <https://www.flickr.com/photos/wakegov/sets/72157624828355984/with/4936260394/>. (accessed: 08.04.2022).
- Bartz-Beielstein, Thomas et al. (2014). “Evolutionary algorithms”. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 4.3, pp. 178–195.
- Billington, David P (2003). “The art of structural design. A Swiss legacy”. In:
- Block, P et al. (Oct. 2016). “Armadillo Vault - An extreme discrete stone shell”. In: *DETAIL* 10, pp. 940–942.
- Cao, Yuan, Huaqing Mao (2022). “High-dimensional multi-objective optimization strategy based on directional search in decision space and sports training data simulation”. In: *Alexandria Engineering Journal* 61.1, pp. 159–173.
- Cassinello, Pepa (2013). “The evolution of concrete shells; innovations by Ildefonso Sánchez del Río”. In: *Informes de la Construcción* 65.530, pp. 147–154.
- Celik, Oguz C, Haluk Sesigur, Feridun Cili (2010). “Importance of wood and iron tension members on seismic performance of historic masonry buildings: Three case studies from Turkey”. In: *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, pp. 1374–1383.
- Chilton, J (2010). “Tensile structures–textiles for architecture and design”. In: *Textiles, polymers and composites for buildings*. Elsevier, pp. 229–257.
- Chilton, J, R Velasco (2005). “Applications of textile composites in the construction industry”. In: *Design and manufacture of textile composites*. Elsevier, pp. 424–435.
- Chilton, John, Chu-Chun Chuang (2017). “Rooted in nature: aesthetics, geometry and structure in the shells of Heinz Isler”. In: *Nexus Network Journal* 19.3, pp. 763–785.
- Chilton, John, Gabriel Tang (2016). *Timber gridshells: architecture, structure and craft*. Routledge.
- Cullinanstudio (n.d.). *A new architectural idiom for the countryside*. URL: <https://www.cullinanstudio.com/project-downland-gridshell>. (accessed: 08.04.2022).

- Cuvilliers, Pierre et al. (2017). "Hybrid structural skin: prototype of a GFRP elastic gridshell braced by a fiber-reinforced concrete envelope". In: *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 58.1, pp. 65–78.
- Deb, Kalyanmoy (2014). "Multi-objective optimization". In: *Search methodologies*. Springer, pp. 403–449.
- DeJong, Matthew Justin (2009). "Seismic assessment strategies for masonry structures". PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Demirel, Esra (2018). "Bambu Malzeme Davranışına Bir Model Olarak Kabuk Strüktür Tasarım ve Şekil Optimizasyonu". MA thesis. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- El-Derby, AAOD, Ahmed Elyamani (2016). "The adobe barrel vaulted structures in ancient Egypt: a study of two case studies for conservation purposes". In: *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 16.1, pp. 295–315.
- Deuss, Mario et al. (2014). "Assembling self-supporting structures." In: *ACM Trans. Graph.* 33.6, pp. 214–1.
- Douthe, Cyril, Jean-François Caron, Olivier Baverel (2010). "Gridshell structures in glass fibre reinforced polymers". In: *Construction and building materials* 24.9, pp. 1580–1589.
- Draper, Powell, Maria E Garlock, David P Billington (2008). "Finite-element analysis of Félix Candela's chapel of Lomas de Cuernavaca". In: *Journal of architectural engineering* 14.2, pp. 47–52.
- Du Peloux, Lionel et al. (2015). "The Ephemeral Cathedral of Créteil: a 350m2 lightweight gridshell structure made of 2 kilometers of GFRP tubes". In: *CIGOS 2015: "Innovations in Construction"*.
- Eigensatz, Michael et al. (2010). "Paneling architectural freeform surfaces". In: *ACM SIGGRAPH 2010 papers*, pp. 1–10.
- Fitchen, John (1981). *The construction of Gothic cathedrals: a study of medieval vault erection*. University of Chicago Press.
- Gabriele, Stefano et al. (2018). "R-Funicularity of form found shell structures". In: *Engineering Structures* 157, pp. 157–169.
- Gonzalez Quelle, Iago (2009). "Cable roofs. Evolution, classification and future trends". In: *Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Grabar, Oleg (1959). "The Umayyad Dome of the Rock in Jerusalem". In: *Ars Orientalis*, pp. 33–62.
- Isler, H. (1960). *New shapes for shells: Heinz Isler ...* A.G. Mag. URL: <https://books.google.com.tr/books?id=9qa0PAAACAAJ>.
- Kamal, Mohammad Arif, Atul Setya, Tejwant Brar (Sept. 2020). "Exploration of Catenary Based Ferrocement Shell Structures: Form, Design and Architectural Interventions". In: *Architecture Research* 10, pp. 93–101. DOI: 10.5923/j.arch.20201004.01.
- Kao, Gene TC et al. (2017). "Assembly-aware design of masonry shell structures: a computational approach". In: *Proceedings of IASS Annual Symposia*. Vol. 2017. 23. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), pp. 1–10.
- Koç, Selen (2020). "Ahşap ızgara kabuk strüktürlerin incelenmesi". MA thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü.

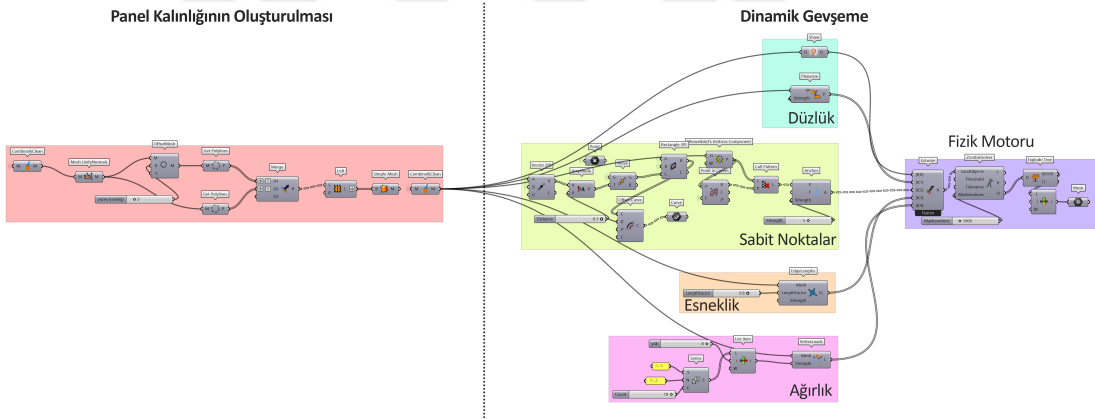
- Konak, Abdullah, David W Coit, Alice E Smith (2006). "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial". In: *Reliability engineering & system safety* 91.9, pp. 992–1007.
- Kurrer, Karl-Eugen (2018). *The history of the theory of structures: searching for equilibrium*. John Wiley & Sons.
- Lara-Bocanegra, Antonio José et al. (2018). "Innovative developments in the design and construction of a permanent elastic timber gridshell". In: *World Conference on Timber Engineering*.
- Larsen, Niels Martin, Ole Egholm Pedersen, Dave Pigram (2012). "A method for the realization of complex concrete gridshell structures in pre-cast concrete". In.
- Liddell, Ian (2015). "Frei Otto and the development of gridshells". In: *Case Studies in Structural Engineering* 4, pp. 39–49.
- Lienhard, Julian, Jan Knippers (2015). "Bending-active textile hybrids". In: *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 56.1, pp. 37–48.
- Liuti, Alessandro, Alberto Pugnale (2015). "Erection of post-formed gridshells by means of inflatable membrane technology". In: *Proceedings of the 49th International Conference of the Architectural Science Association-ASA (ANZAScA): Living and Learning. Research for a Better Built Environment*.
- Mahajan, Girish (2021). *Velarium*. URL: <https://alchetron.com/Velarium>. (accessed: 18.03.2021).
- Malerba, Pier Giorgio, M Patelli, Manuel Quagliaroli, et al. (2012). "An extended force density method for the form finding of cable systems with new forms". In: *Structural Engineering and Mechanics* 42.2, pp. 191–210.
- Melaragno, Michele (2012). *An introduction to shell structures: The art and science of vaulting*. Springer Science.
- Mesnil, Romain, Cyril Douthe, Olivier Baverel (2017). "Non-standard patterns for gridshell structures: fabrication and structural optimization". In: *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 58.4, pp. 277–286.
- Motevalli, Mehran et al. (2019). "Geometrically nonlinear simulation of textile membrane structures based on orthotropic hyperelastic energy functions". In: *Composite Structures* 223, p. 110908.
- Mueller, Volker (2015). "Learning about Parametric Model Behavior through Multi-Objective Optimization". In.
- Mundo-Hernandez, J, MC Valerdi-Nochebuena, J Sosa-Oliver (2014). "Preservation of Concrete Shell Structures". In: *American Journal of Engineering Research* 3, pp. 9–13.
- Naboni, Roberto Stefano ve diğ. (2016). "Form-finding to fabrication of super-thin anisotropic gridshell". In: *SIGraDi 2016*. BRA, pp. 418–425.
- Noel, Vernelle AA et al. (2021). "The Infinite Line Active Bending Pavilion: Culture, Craft and Computation". In.
- Oliveira, Isabel Moreira de, Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti, Leila Cristina Meneghetti (2020). "Connection system for gridshell structures using parametric modeling and digital fabrication". In: *Automation in Construction* 109, p. 102996.
- Paoli, Céline Céline Aude (2007). "Past and future of grid shell structures". PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Peña de Leon, Alexander (2012). "Rationalisation of freeform façades: A technique for uniform hexagonal panelling". In.

- Pérowski, Alain, Sana Ben-Hamida (2017). *Evolutionary algorithms*. John Wiley and Sons.
- Pottmann, Helmut et al. (2007). *Architectural geometry*. Vol. 724. Bentley Institute Press Exton.
- Rippmann, Matthias, Philippe Block (2013). “Funicular shell design exploration”. In: Rombouts, Jef et al. (2019). “A novel shape optimization approach for strained gridshells: Design and construction of a simply supported gridshell”. In: *Engineering Structures* 192, pp. 166–180.
- Saliklis, Edmond, Kyle White (2008). “Testing, Modeling and Constructing Wood-Plastic Composite Catalan Vaults”. In: *6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM*, pp. 1–4.
- Saltik, E, S Alacam (2020). “Experiments for design and optimization of thin shell structures”. In: *ATI 2020: “Smart Buildings, Smart Cities” Proceedings*, pp. 76–90.
- Sanliman, Kerem (n.d.). *Heydar Aliyev International Airport Baku / Autoban*. URL: https://www.archdaily.com/532770/heydar-aliyev-international-airport-baku-autoban?ad_medium=gallery. (accessed: 08.05.2022).
- Shuang, HAN (2014). *Centre Pompidou-Metz*. URL: <https://www.archdaily.com/490141/centre-pompidou-metz-shigeru-ban-architects>. (accessed: 08.04.2022).
- Tang, Gabriel (2012). “The rise and fall of the thin concrete shell”. In: *Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork*. University of Bath, pp. 324–333.
- Varma, Mahesh N, RS Jangid, VG Achwal (2006). “Tension Ring in Masonry Domes”. In: *New Delhi: International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*.
- Vassallo, Michael, Samar Malek (2017). “Design and Structural Analysis for a Deployable Gridshell Shelter”. In: *Proceedings of IASS Annual Symposia*. Vol. 2017. 3. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), pp. 1–8.
- Wang, Shengzhe et al. (2020). “Structural evaluation of Félix Candela’s 8-sided hyperbolic paraboloidal umbrellas”. In: *Engineering Structures* 222, pp. 111–156.
- Wang, Zuwei, Tuanjie Li, Yuyan Cao (2013). “Active shape adjustment of cable net structures with PZT actuators”. In: *Aerospace Science and Technology* 26.1, pp. 160–168.
- Watson, Lewis P (2010). *Dorton Arena*. URL: <https://www.flickr.com/photos/wakegov/sets/72157624828355984/with/4936260394/>. (accessed: 18.03.2021).
- Yu, Xinjie, Mitsuo Gen (2010). *Introduction to evolutionary algorithms*. Springer Science & Business Media.
- Zhang, JY, M Ohsaki (2006). “Adaptive force density method for form-finding problem of tensegrity structures”. In: *International journal of Solids and Structures* 43.18-19, pp. 5658–5673.
- Zhao, Xin, Yunsong Han, Linhai Shen (2021). “Multi-objective Optimisation of a Free-form Building Shape to improve the Solar Energy Utilisation Potential using Artificial Neural Networks”. In:

A KULLANILAN ALGORİTMALAR



Şekil A.1 Ağ Sistemi Oluşum Algoritması



Şekil A.2 Kabuk Formu Oluşum Algoritması

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Er, İhsan Erdem. Tong, Togan. (2022). "Kabuk Yapıları İçin Evrimsel Algoritma Tabanlı Parametrik Tasarım Önerisi". Mimarlıkta Sayısal Tasarım Sempozyumu: 22-26 Haziran 2022 - Eskişehir

