

# Particle-based Structural System Modelling on Asymmetric Shaped Generic Shell Design

Esra Cevizci<sup>1</sup>; Seçkin Kutucu<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Yaşar Üniversitesi

<sup>1</sup>esracevizci@outlook.com; <sup>2</sup>seckin.kutucu@yasar.edu.tr

**Abstract.** Masonry arch, vault and dome structures have been used in many significant buildings in architecture for many centuries and have been applied by many civilizations as an important knowledge of construction in architecture. Today, they are still being used as shell structures in various structural types and with various materials. With advances in computer-aided design technologies and modelling techniques, new form-finding methods have enabled architects to design more complex structures in various forms. This paper is on explaining design principles of asymmetrically shaped shell systems by using “Autoclaved Aerated Concrete” (AAC) blocks, based on form and structure’s relation. Thus, it is aimed to develop a generic model of particle-based asymmetrically shaped shell, which is more difficult to construct than symmetrical shell, via the geometrical predeterminations on shell making, hanging chain criteria and structural behaviour of AAC blocks. The significance of the generic model is on the flexibility in parameters change such as material thickness, plan geometry, height and length of spans which bring an overall capability to Architects and designers who are not familiar with structural and statics aspects. This feature carry architects and designers to the idea of digital sketching in the very first steps of decision making while bringing benefits of computational design and integrated form finding methods.

**Keywords:** *Computational Design, Shell Systems, Masonry Structures, Form Finding Methods, Particle-based Form Finding, Autoclaved Aerated Concrete (AAC).*

# Parçacık Tabanlı Taşıyıcı Sistem Modellemesi Üzerine Asimetrik Biçimli Jenerik Kabuk Sistemi Tasarımı

Esra Cevizci<sup>1</sup>; Seçkin Kutucu<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Yaşar Üniversitesi

<sup>1</sup>esracevizci@outlook.com; <sup>2</sup>seckin.kutucu@yasar.edu.tr

**Özet.** Kemer, kubbe, tonoz gibi yığma kabuk yapılar, mimarlık tarihi boyunca yapı stoğunun önemli bir kısmını oluşturmuş ve birçok önemli yapı bu sistemlerin uygulama bilgisi ile ayağa kaldırılmıştır. Günümüzde, yığma yapılar yerlerini daha hafif ve taşıyıcılıkta daha etkili malzemelerle oluşturulmuş olan kabuk sistemlere bırakmasına rağmen halen kullanılmaktadırlar. Bilgisayar destekli tasarım teknolojileri ve modelleme tekniklerindeki ilerlemeler ile kabuk sistemlerin tasarlanmasında farklı yaklaşım metotları kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle, çeşitli biçimlerde daha karmaşık geometrilere sahip kabuk sistemlerinin tasarlanabilmesi taşıyıcılık özellikleri de göz önünde bulundurularak kolay hale gelmiştir. Serbest biçimlere sahip olan asimetrik kabuklar da yeni yaklaşım metotları sayesinde basit geometrilerden geliştirilmiş karmaşık strüktür sistemleridir. Bu çalışma ‘Gazbeton’ blokların malzeme olarak tanımlandığı asimetrik kabukların tasarlanabilmesi adına tasarım prensiplerinin taşıyıcılık ve geometri bakımından anlatılmasını kapsamaktadır. Çalışma kapsamında önerilen tasarım yaklaşımı ile, simetrik kabuklara göre daha zor inşa edilebilen asimetrik kabuk sistemlerin, örtücü yüzey oluşturmada kullanılan geometrik öntanımları, malzeme seçimine bağlı zincir eğriligi tanımı ve geometri kriterleri ile gazbeton bloklarının yapısal davranışları üzerinden, parçacık tabanlı ve kabuk sistemlerinin yığma taşıyıcılık prensiplere dayalı bir jenerik modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Seçilen yöntem olan parçacık tabanlı modelleme, malzeme odaklı bir tasarım metodudur. Bu bakımdan bu yöntem ile tasarlanacak olan kabuğun malzemesinin belirlenmesi ve her farklı malzeme için, gerekli olan mekanik özelliklerin, geometrik ön tanımların ve zincir eğrisi kriterlerinin bilinmesi önemlidir. Çalışma kapsamında önerilen genel model ile gerçekleştirilen tasarımlar, bir yandan taşıyıcılık ilkelerini barındırırken diğer yandan kapsamlı bir mühendislik bilgisinden muaf olmaktadır. Jenerik modelin önemi, malzeme kalınlığı, plan geometrisi, kemer yüksekliği ve açıklıkları gibi parametrelerin, model üzerinde esnek olmasıdır. Bu bakımdan mimarlar ve tasarımcılar için müdahale etmek, bu modelde kabuk sistemler için kullanılan birçok yöntemden daha kolay hale getirilmiştir. Bu model, yığma yapıların yapısal ve statik özellikleri konusunda mimarlar ve tasarımcılara bir öngörü oluşturma ve erken tasarım evresinde taşıyıcılığa bağlı karar verebilme olanağı kazandırmaktadır. Bu kazanım ile, mimarlar ve tasarımcılar, bilgisayar ortamında, sayısal biçimlendirme yöntemlerinden yararlanarak, kabuk sistem tasarımları için karar verme sürecinin ilk adımlarında bir bakıma dijital eskizlerini oluştururlar.

**Anahtar Kelimeler:** Bilgisayar Destekli Tasarım, Kabuk Sistemler, Yığma Yapılar, Form Bulma Yöntemleri, Parçacık Tabanlı Form Bulma, Gazbeton.

## 1. Giriş

Kabuklar, binalar için dış örtü olmalarının ötesinde bina için taşıyıcı sistem olarak görev yapan, onu saran ve iç boşluğunda mekân tanımlayan, tek tip ya da kompozit yapı malzemelerinden oluşan sistemlerdir. Yüzey geometrileri kavisli ve değişkendir. Simetrik ve asimetrik kabuk sistemler, taşıyıcılığını geometrik özelliğinden aldığı için malzeme açısından oldukça ekonomik, yapısal davranışlar bakımından ise güvenilir yapılardır. Tarihte kemer, kubbe ve tonoz gibi yapı elemanları olarak karşımıza çıkmış olan kabuk sistemler, mimaride yüzyıllardır kullanılan ve inşaa bilgisi olarak önemli bir yere sahip olan yapı birimleridir. Asıl geometrilerde tasarlanabildikleri gibi asimetrik formlarda da tasarlanabilirler. Ayrıca, farklı kullanım amaçlarına dönük olarak çizgisel veya merkezi, simetrik veya asimetrik mekan kurgularına destek veren farklı geometrik özelliklerde kabuk yapılar tasarlanabilmektedir.

Geniş açıklıkları geçmek için uygun olan yığma kabuk sistemler, tarih boyunca taş veya tuğla gibi yüksek basınç dayanımına sahip geleneksel yapı malzemeleri kullanılarak uygulanmıştır. Yığma bir kabuk yapı tasarlamak için, basınç altında çalışan, çok sayıda kararlı biçime karşılık gelen yapı elemanına ihtiyaç vardır. Sistemin ağırlığı, bu yapı elemanlarının ağırlığının toplamına eşittir ve böylece sistem kendi kendisinin taşıyıcısı durumundadır. Kabuk biçimlerinin hepsinin kendi içinde avantajları ve dezavantajları vardır. Bu bağlamda esas olan, strüktürel anlamda en iyi çalışan kabuk formunu elde etmektir (Ochsendorf ve Block, 2014).

Bu çalışmanın amacı, bilgisayar ortamında parçacık tabanlı hesaplamalı form bulma yöntemi ile tasarlanan kabuk yapıların ince-



**Şekil 1.** Floransa Katedralinin Kubbesi, 1420-1436 (Borden, 2008)



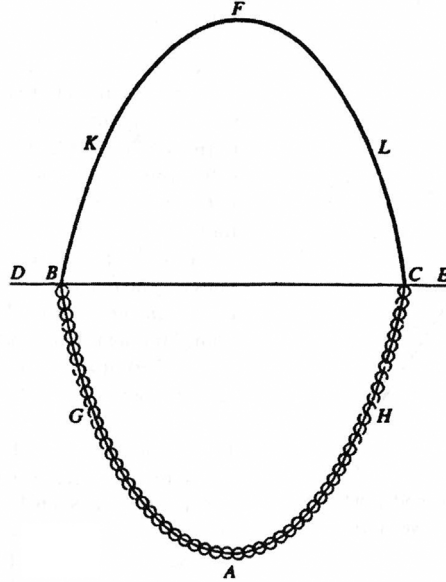
**Şekil 2.** Droneport Prototipi, Norman Foster, 2016. (görsel <<http://www.fosterandpartners.com>> adresinden alınmıştır.)

lenmesi, ve bu incelemeler ışığında yapımı ve inşası simetrik kabuklara göre daha zor olan asimetrik geometriye sahip, bir çok farklı durumda ve geometride uygulanabilecek jenerik bir yığma kabuk modelinin oluşturulmasıdır. Bu kapsamda oluşturulan jenerik yığma kabuk modelinin tasarım ve biçimlenme prensipleri esas inceleme konusu olarak alınmıştır.

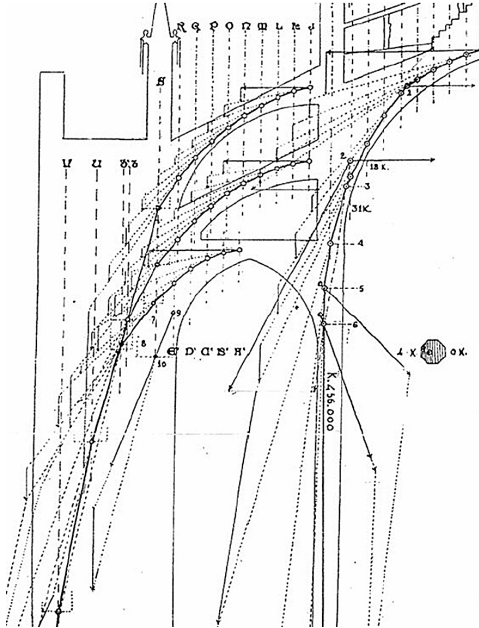
## 2. Kabuk Sistemleri için Geliştirilmiş Hesaplamalı Form Bulma Yöntemleri

Kemer, kubbe ve tonozlar, uzun yıllardır mimaride önemli bir rol üstlenen kabuk yapı elemanlarıdır. Günümüzde yerlerini daha karmaşık strüktürlü kabuk sistemlere bırakmış olsalar da, hala yüzyıllar önce inşa edilmiş bu yapıların tasarım ve uygulama bilgisi merak uyandırmaktadır. Günümüzde bu sistemlerin

**Şekil 3.** Poleni'nin Kemer ve Zincir Eğrisi arasındaki ilişkiyi anlatan çizim, 1748 (Block vd., 2006).



**Şekil 4.** Rubio tarafından Mallorca Katedrali için yapılan grafik statik analiz (Roca vd., 2010).



tasarımları için geliştirilmiş birçok hesaplama-  
lı form bulma yöntemi mevcuttur. Fakat geç-  
mişte bu gelişmiş teknikler mevcut değildi ve  
daha basit yöntemler bu yapı elemanlarının  
tasarlanmasında ve biçimlendirilmesinde kul-  
lanılmıştır. Bu yöntemler 'Basit Form Bulma  
Yöntemleri' adı altında incelenebilirler.

Mimarlık alanında teknolojik ilerlemeler ince-  
lendiğinde, inşaat yöntemleri ile malzeme ve  
uygulama alanlarındaki ilerlemeler eşliğinde  
geliştiği görülür. Günümüz teknolojisi ve mi-  
marinin geldiği noktaya bakıldığında, daha  
karmaşık strüktürlü yapılar 'Hesaplama Form  
Bulma Yöntemleri' kullanılarak tasarlanabilir  
hala gelmiştir. Aşağıda kabuk yapıların 'Ba-  
sit Form Bulma Yöntemleri' ve 'Hesaplama  
Form Bulma Yöntemleri' ne dayalı biçimlenme  
prensiplerine değinilmiştir.

## 2.1 Basit Form Bulma Yöntemleri

Kabuk sistemlerin tasarlanmasında kullanılan  
bilgisayar destekli yöntemler geliştirilmeden  
önce kabuğun alabileceği en iyi ve en dengeli  
biçimi bulabilmek için basit form bulma yön-  
temleri kullanılmıştır. Günümüzde kullanılan  
bilgisayar destekli / hesaplama form bulma  
yöntemleri incelendiğinde eski çağlarda ke-  
mer, kubbe ve tonozlu yapıların tasarımların-  
da kullanılan basit form bulma yöntemlerini  
kendilerine temel aldıkları ve benimsedikleri  
görülmektedir. Bu yüzden, basit form bulma  
yöntemlerin kullanılmaları bu tarz yapıların  
tasarımlarına başlanmadan önce incelenme-  
lidir. 'Zincir Eğrisi Kanunu' (Hooke Kanunu),  
'Grafik Statik Yöntemler' ve 'Fiziksel Model-  
ler', basit form bulma yöntemleri içinde yer  
almaktadır.

Zincir Eğrisi Kanunu (Hooke Kanunu), 1675 yı-  
linda Robert Hooke tarafından geliştirilmiştir  
(Block vd., 2006). İki ucundan asılı olan bir zin-

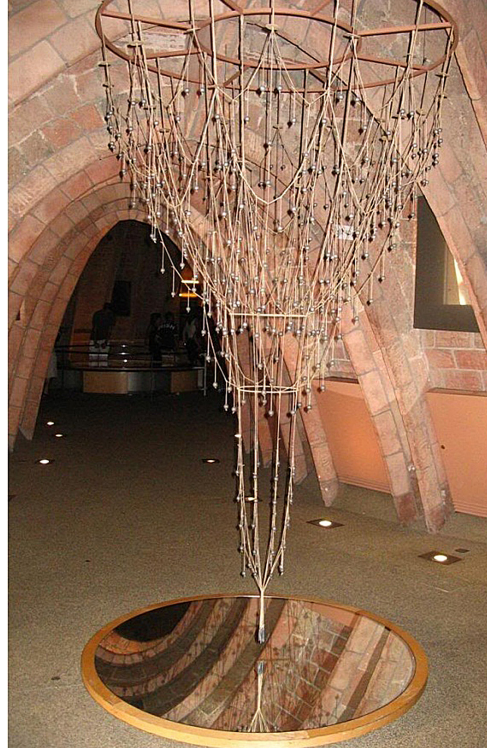
cir, kendi ağırlığı ve gerilim altında bir katenari eğrisi oluşturur. Bu eğri ters çevrildiğinde oluşan şekil, basınç altında rijit bir şekilde çalışan bir kemere karşılık gelir. Etki eden yükler altında, kemerin alabileceği en ideal şekil böyle bulunur (Allen ve Zalewski, 2012). Geçmişte tasarlanmış birçok yapının biçimlenme aşamasında Zincir eğrisi kanunundan yararlanıldığı bilinmektedir.

Grafik Statik Yöntemler ilk defa, 1866 yılında Culmann tarafından strüktürel form bulma süreçlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Yöntem Zincir Eğrisi Kanununa alternatif bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Bu metot ile belirli yükler altında kabuğun alabileceği olası formlar analiz edilir (Block vd., 2014). Analizler Kuvvet ve Form diagramlarından oluşur. Bu diagramlar arasında statik denge oluşturularak kabuğun tamamen basınç altında çalışan üç boyutlu ideal biçiminin nasıl olacağı elde edilir.

Fiziksel Modeller, tasarımcılar ve mimarlar tarafından doğru biçimleri elde etmek için günümüzde hala daha kullanılan yöntemlerdir. Fiziksel modeller geçmiş dönemlerde, kabuk yapı strüktürlerin tasarımları için kumaş, membran gibi malzemeler kullanılarak ya da, strüktürdeki zincir eğrisi sayısını arttırarak üç boyutlu zincir eğrisi modelleri kullanılırdı (Addis, 2014). Katalan mimar Antoni Gaudí'nin birçok önemli eserini zincir eğrisi modelleri oluşturarak tasarladığı bilinmektedir (Huerta, 2006).

## 2.2 Hesaplamalı Form Bulma Yöntemleri

Günümüz mimarisinde tasarlanan karmaşık yapısal gerekliliklere sahip olan asimetrik biçimli geometriler ve karmaşık strüktürler, ağır hesaplama iş yükünü de beraberlerinde getirmektedirler. Bilgisayar destekli tasarım



**Şekil 5.** Gaudinin tasarımlarından biri için yaptığı Zincir Eğrisi Modeli (görsel <<https://architazer.com>> adresinden alınmıştır.).

ve modelleme tekniklerindeki ilerlemeler ile geliştirilen hesaplamalı form bulma yöntemleri bu geometrilerin tasarımını mümkün hale getirmiştir. Hesaplamalı tasarım ile tasarım bileşenleri arasında esnek bir ilişki kurulur ve bilgisayar ortamındaki model üzerinden tasarımın yapısal davranışları simüle edilebilir. Bu sayede, yığma kabuk sistemlerin tasarımındaki zorluk aşılabılır hale gelmiştir.

Hesaplamalı form bulma yöntemlerinin hangisinin kullanılacağına seçimi, taşıyıcılık prensiplerine, malzemeye ve yapım yöntemine göre yapılmaktadır. Kabuk sistemleri için geliştirilmiş hesaplamalı form bulma yöntemleri, bir kabuğun en iyi şeklini elde etmek için değişkenlerin doğrudan bilgisayar ortamında



kontrol edilebilmesine olanak sağlar. Belirlenen performans kriterleri ve mimari biçim ilişkisi içinde çalışırlar. Kabuk sistemleri için geliştirilmiş hesaplamalı tasarım yaklaşımı malzeme odaklı ve geometri odaklı yöntemler olarak iki farklı bölümde incelenebilir. Malzeme odaklı hesaplamalı form bulma yöntemleri ‘Dinamik Gevşeme Yöntemi’, ‘Parçacık Tabanlı Yöntem’; geometri odaklı form bulma yöntemleri ise ‘Kuvvet Yoğunluğu Yöntemi’ ve ‘İtme Ağı Analizi’ olarak incelenirler.

Dinamik Gevşeme Yöntemi, ilk olarak 1965 yılında kullanılmaya başlanmış, sayısal bir yöntemdir. Bu yöntem ile, etki eden yükler altında tekrarlayan bir biçim bulma süreci ile geometrinin formu elde edilir. (Adriaenssens vd., 2014). Genellikle kablo ve kumaş malzemelerden oluşturulacak kabuk geometriler için tercih edilir. Malzeme odaklı hesaplamalı form bulma yöntemlerindendir.

Parçacık Tabanlı Yöntem, 1983’ten beri kullanılmakta olan, malzeme odaklı hesaplamalı form bulma yöntemlerinden biridir. Mimar ve mühendisler tarafından zincir eğrisi modelleri ve çekmeye çalışan membran strüktürler için basit dijital simülasyonlar hazırlamak için kullanılır. Parçacık tabanlı sistem, parçacıklardan, onlara etki eden yüklerden oluşur. Sınır koşulları, zemin bağlantı noktaları ve yer çekimi kuvvetleri gibi parametreler ile kontrol edilir. Simülasyon başladıktan sonra, parçacıklar etki eden yükler altında dengeye gelene kadar salınım yapar ve geometri için en uygun şekli elde eder (Bertin, 2011). Bu çalışma için uygun form bulma yöntemi, zincir eğrisi modelleri oluşturabilmesi açısından da, ‘Parçacık Tabanlı Yöntemi’olarak belirlenmiştir.

Kuvvet Yoğunluğu Yöntemi, 1974 yılından beri kullanılmakta olan, geometri odaklı form bulma yöntemidir. Bu yöntem kullandığı doğrusal

denklem ile, ön-gerilmeli bir kablo ağı için, belirlenmiş kuvvet/uzunluk oranları altında statik dengede çalışan geometriyi elde etmeyi amaçlar. Farklı elastisite özelliklerine sahip kablo ve membran strüktürler için kullanılır (Southern,2011).

İtme Ağı Analizi, Basit Form Bulma Yöntemlerinden grafik statik yöntemi çalışma prensibi olarak baz alan, karmaşık geometrilere sahip yığma kabuk yapı tasarımlarında kullanılan bir yöntemdir (Block, 2009). Bu yöntem ile tasarlanacak kabuk geometriler için kullanılacak malzeme ve özellikleri önemsizdir. Grafik statik yöntemdeki gibi sistem, kuvvet ve form diagramlarından oluşur. Bu diagramlar arasında kurulan statik denge ile kabuğun tamamen basınç altında çalışan üç boyutlu statik dengede olan şekli elde edilir.

### 3. Gazbeton Malzemesi

Parçacık tabanlı form bulma yöntemi, malzeme özelliklerini baz alan bir yöntemdir. Buna bağlı olarak, bu yöntem ile tasarlanacak olan kabuğun malzemesinin belirlenmesi ve her farklı malzeme için, form bulma yöntemi için gerekli olan mekanik özellikleri, geometrik ön tanımları ve zincir eğrisi kriterlerinin araştırılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılacak malzeme “Kürlenmiş, boşluklu beton bloklar (Gazbeton)” olarak belirlenmiştir.

Gazbeton, kimyasal kürlenme yöntemi ile üretilen, bünyesinde gözenekleri bulunan, kullanılacağı yere ve amaca göre kolayca biçimlendirilebilen, hafif, belli düzeylerde statik dayanıma ve yalıtım özelliklerine sahip beton yapı malzemesidir. Yaklaşık 100 yıl önce bulunmuş ve zamanla geliştirilmiş olan gazbeton, mimari yapılar için hem taşıyıcılık hem

| Kuru Yoğunluk<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Basınç Dayanımı<br>(MPa) | Elastisite Modülü<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | Termik<br>Geçirgenlik<br>(W/m°C) |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|
| 400                                   | 1.3-2.8                  | 0.18-1.17                                  | 0.07-0.11                        |
| 500                                   | 2.0-4.4                  | 1.24-1.84                                  | 0.08-0.13                        |
| 600                                   | 2.8-6.3                  | 1.76-2.64                                  | 0.11-0.17                        |
| 700                                   | 3.9-8.5                  | 2.42-3.58                                  | 0.13-0.21                        |

**Tablo 1.** Gazbeton malzemesinin mekanik özellikleri (Narayanan ve Ramamurthy, 2000).

de yalıtım yönünden yığma yapı malzemeleri olan taş ve tuğla ile, taşıyıcılık özelliğine sahip hafif betonun alternatifi olan bir malzemedir. Gazbeton malzemesinin, asimetrik formlu kabuk yapı uygulamalarında henüz çok fazla yer almadığı ve kullanılmadığı görülmüştür.

Parçacık Tabanlı modelin oluşturulabilmesi için malzemenin yoğunluğu ve hacimsel özellikleri kullanılmıştır. Yapısal analiz sırasında ise, malzemenin mekanik özellikleri ile tasarlanan model analiz edilerek, modelin statik dayanımı hesaplanmıştır. Gazbeton malzemesinin mekanik özellikleri, malzemenin yoğunluğuna göre değişiklik göstermektedir (Tablo 1). 600 kg/m<sup>3</sup> kuru yoğunluklu Gazbeton, bu model için malzeme olarak seçilmiştir.

## 4. Parçacık Tabanlı Form Bulma Yöntemi Kullanılarak Geliştirilen Jenerik Modelleme

Parçacık tabanlı form bulma yöntemi ile geliştirilen jenerik modelin tasarımı ve sistemin oluşturulması dört adımda gerçekleştirilmiştir. Bu adımlar;

1. Malzemeye dönük mekanik özellikler ve buna bağlı geometrik ön tanımların elde edilmesi,
2. Topoloji ve açık kenarların belirlenmesi,
3. Biçim optimizasyonu,
4. Yapısal analizdir.

### 4.1 Malzemeye dönük mekanik özellikler ve buna bağlı geometrik ön tanımların elde edilmesi

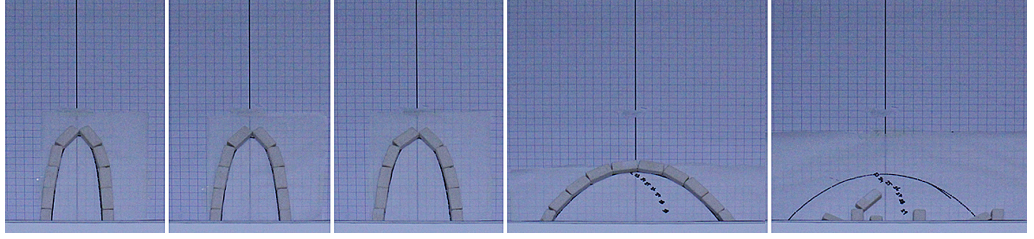
Parçacık tabanlı form bulma yöntemi ile modelleme sürecinde, her malzemenin mekanik özellikleri, geometrik öntanımları ve zincir eğrisi kriterlerinin göz önüne alınması gerekir ve ancak bu değerlere bağlı parçacık tabanlı jenerik bir model geliştirilebilir. Bu nedenle modelin geliştirilmesi sürecinde ilk adım ‘Malzemeye dönük mekanik özellikler ve buna bağlı geometrik ön tanımların elde edilmesi’ olarak adlandırılır.

Bu çalışma için ilk olarak Gazbeton malzemesinin mekanik özellikleri ve kabuk geometrileri için uygunluk kriterleri araştırılmıştır. Kurulan düzenek ve 1/20 ölçekte hazırlanan Gazbeton

|                                             | Zincir Eğrisi Oranı |
|---------------------------------------------|---------------------|
| <i>Maksimum Açıklık/ Maksimum Yükseklik</i> | 0,192               |
| <i>Minimum Açıklık/ Minimum Yükseklik</i>   | 0,775               |

**Tablo 2.** Gazbetonun maksimum ve minimum Zincir Eğrisi oranları.

**Şekil 6.** Malzemenin iki boyutlu ‘Zincir Eğrisi’ testlerine ait fotoğraftır.

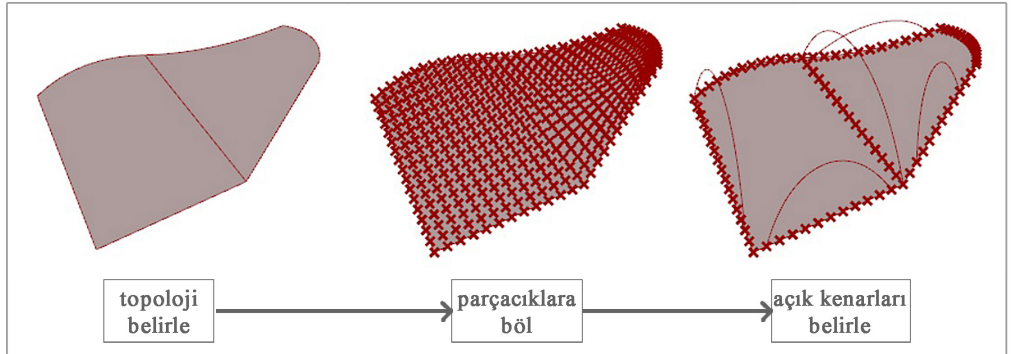


blokları ile, malzemeye iki boyutlu ‘Zincir Eğrisi’ testleri uygulanmıştır. Malzemenin basınç altında güvenli olarak geçebileceği maksimum ve minimum açıklıklar ve yükseklikler belirlenmiştir. Böylelikle, Gazbeton malzemesinin, modelleme sırasında geometrik ön tanım olarak kullanılacak ‘Zincir Eğrisi Oranları’ elde edilmiştir (Tablo 2).

#### 4.2 Topoloji ve açık kenarların belirlenmesi

Topoloji ve açık kenarların belirlenmesi adımı ilk olarak tasarlanmak istenen kabuğun zemin geometrisi yani zeminde izdüşümüne denk gelen topoloji tasarımcı tarafından belirlenir. Bu topoloji parçacık tabanlı modelin esası olan parçacıklarına/partiküllerine ayrılır. Daha sonra belirlenen topoloji üzerinde açık bırakılmak istenilen kenarlar seçilir. Bu kenarlara Zincir Eğrisi testleri sonucunda elde edilmiş olan oranlar kullanılarak kemerler tanımlanır.

**Şekil 7.** Topoloji ve açık kenarların belirlenmesi süreci

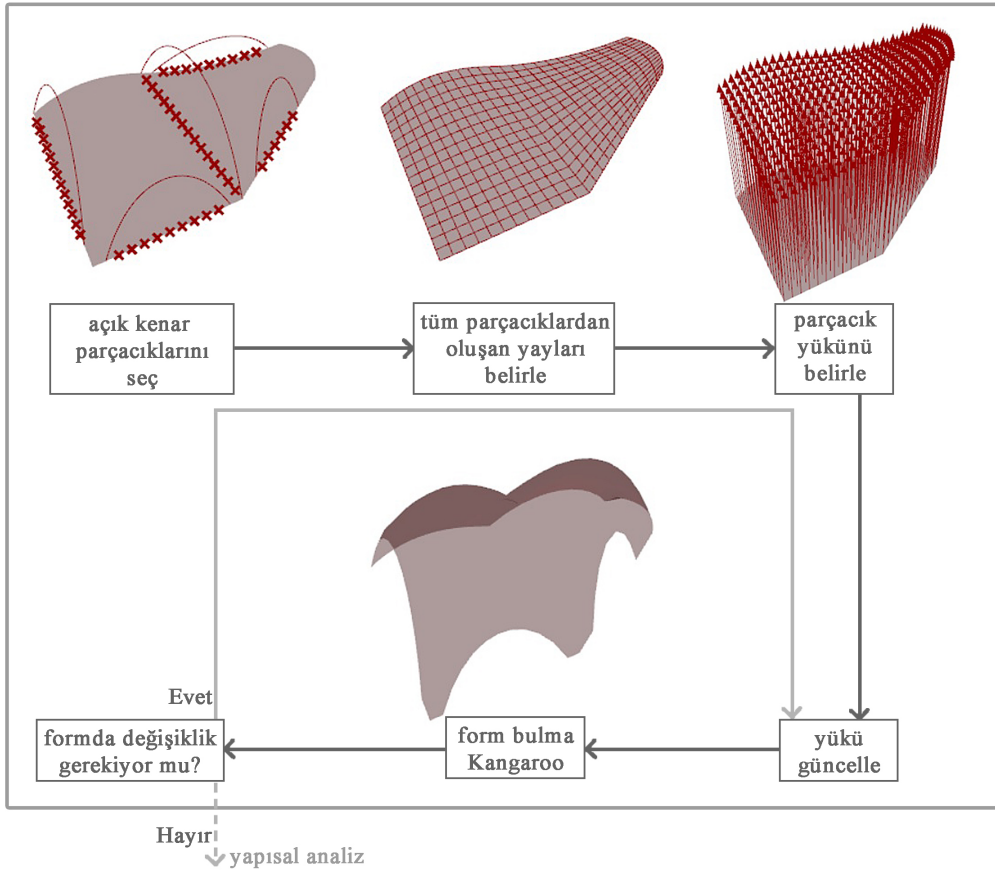


Elde edilen verilerle üç boyutlu modelin oluşturulması için, ‘Rhinceros’ modelleme yazılımı ve bu yazılım içinde çalışan grafik algoritmik yazılım aracı olan ‘Grasshopper’ kullanılmıştır.

#### 4.3 Biçim optimizasyonu

Biçim optimizasyonu, parçacık tabanlı form bulma yöntemini çalışma prensibi olarak kullanan ‘Kangaroo’ fizik motoru tarafından Grasshopper içerisinde yapılır. Biçim optimizasyonunu gerçekleştirmek için, ikinci adımda belirlenmiş olan topoloji ve açık kenarlar, kabuğun zemine bağlantı noktaları, parçacıklardan etki eden kuvvet objeleri ve her bir parçacıktan aktarılan yükün fizik motoru içinde tanımlanmış olması gerekir. Tanımlamalar gerçekleştirildikten sonra fizik motoru çalıştırılarak biçim optimizasyonu simüle edilir. Kangaroo, belirlenen yükler altında en dengeli şekilde çalışan şekli bulana kadar simülasyonu





**Şekil 8.** Topoloji ve açık kenarların belirlenmesi süreci

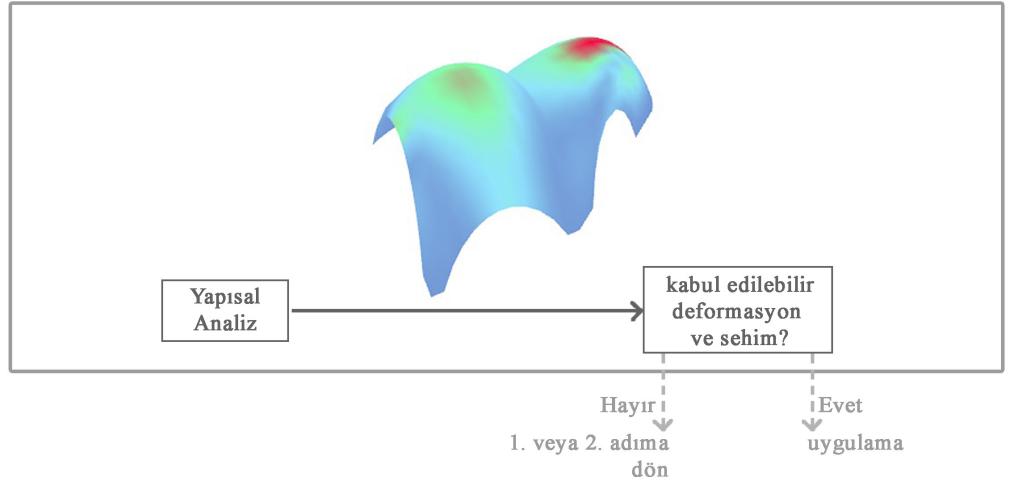
tekrar etmeye devam eder ve optimum şekil bulunduğu sistem durur. Eğer elde edilen formda değişiklik yapılması gerektiği düşünülüyorsa adımlar tekrarlandıktan sonra, simülasyon tekrar gerçekleştirilir.

#### 4.4 Yapısal analiz

Biçim optimizasyonunun tamamlanması ile birlikte elde edilen jenerik modelin yerçekimi ile kendi ağırlık yükleri altında tüm yüzey alanının basınç gerilmeleri altında olması gerekir. Bunun kontrolü için jenerik modele yapısal analiz uygulanır. Yapısal analiz, Grasshopper

içerisinde 'Millipede' yazılımı kullanılarak gerçekleştirilir. Yapılan analizler sonucunda maksimum deformasyon ve sehim, kabuk modelinin en fazla geçtiği açıklığın 1/500'ünden az olması beklenmektedir. Eğer elde edilen sonuç beklenenden fazla ise, form bulma sürecinin ikinci basamağına dönülerek değişiklikler yapılır ve süreç tekrardan başlatılır (Şekil 10). Tüm basamaklar uygulandıktan sonra ve yapısal analizler gerçekleştirildikten bu çalışma için tasarlanan model Şekil 11 de gösterilmiştir.

Şekil 9. Yapısal analiz süreci



Şekil 10. Jenerik model tasarımı ve sistem geliştirilme prosesi



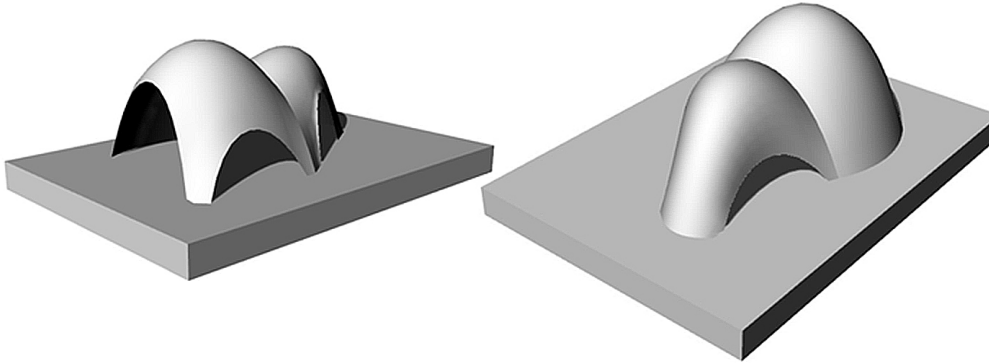
böylece jenerik model başka malzemeler için de kullanılabilir.

Geliştirilen jenerik modelin önemi, malzeme kalınlığı, plan topolojisi, kemer yüksekliği, açıklıkları ve sayısı gibi parametrelerin esnek olmasıdır. Bu model yığma yapıların yapısal ve statik özellikleri konusunda mimarlar ve tasarımcılar için bir öngörü oluşturma ve erken tasarım evresinde taşıyıcılığa bağlı karar verme olanağı kazandırmaktadır. Bu kazanım ile, mimarlar ve tasarımcılar, bilgisayar ortamında, sayısal biçimlendirme yöntemlerinden yararlanarak, karar verme sürecinin ilk adımlarında oluşturmak istedikleri kabuk yapılar için malzemeye bağlı olarak taşıyıcılık özelliğini göz ardı etmeksizin, dijital eskizlerini oluşturabilme olanağına sahip olurlar. Kullanılan modelleme, optimizasyon ve analiz programları ile kabuk strüktürlerin modellemelerinde kullanılabilecek bir dijital modelleme araçları seti oluşturulmuştur. Bu set esnekliği ile, tasarımcıların ve mimarların, kabuk yapı tasarım süreçlerinde bakış açılarını geliştirebilir.

## 5. Sonuçlar

Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen jenerik model, yığma kabuk yapıların tasarımlarında kullanılabilecek bir model önerisi getirmektedir. Tasarımda göz önünde bulundurulmuş en önemli faktör Hooke'un Zincir Eğrisi Kuralı ve iki boyutlu testler ile elde edilmiş zincir eğrisi oranlarının modelde kullanılıyor olmasıdır. Böylelikle, tasarlanan yığma kabuğun, ilk adımdan itibaren strüktürel dayanımı artırılmış olur. Bu testler farklı malzemelere de uygulanarak zincir eğrisi oranları elde edilebilir,

**Şekil 11.** Çalışma sonucunda elde edilen model



## KAYNAKLAR

ADDIS, B. 2014. Physical Modelling and Form Finding. Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization. Routledge.

ALLEN E., ZALEWSKI W. 2012. Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey.

ADRIAENSSENS, S., LACHOUER, L., RIPP-MANN, M. 2014. Dynamic Relaxation: Design of a Strained Timber Gridshell. Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization. Routledge, 89-102.

BERTIN, T. B. 2013. Evaluating the Use of Particle-Springs in the Conceptual Design of Grid Shell Structure. Master Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, MIT.

Block, P. 2009. Thrust Network Analysis; Exploring Three-dimensional Equilibrium. PHD Thesis. Building Technology, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology.

BLOCK, P., LACHAUER, L. 2014. Three-dimensional funicular analysis of masonry vaults. Mechanics Research Communications. 56, 53-60.

BHOOSHAN, S., VEENENDAAL, D., BLOCK, P. 2014. Particle Spring System: Design of a Cantilevering Concrete Shell. Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization. Routledge.

BLOCK, P., DEJONG, M., OCHSENDORF J. 2006. As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches. Nexus Network Journal, 8, 2.

BOOTHBY, T. E. 2001. Analysis of masonry arches and vaults. Progress in structural engineering and materials. 3(3), 246-256.

BORDEN, D., ELANOWSKI, J., LAWRENZ, C., MILLER, D., SMITH, A., & TAYLOR, J. 2009. Mimarlık. Ntv Yayınları, 170-171.

HUERTA S. 2006. Structural Design in the Work of Gaudi. Architectural Science Review 49(4), 324-339.

KORKMAZ K. A., ÇARHOĞLU A. I., ORHON A. V., NUHOĞLU A. 2014. Farklı Yapısal Malzeme Özelliklerinin Yığma Yapı Davranışına Etkisi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 3(1), 69-78.

- KILIAN, A., OCHSENDORF, J. 2005. Particle-Spring Systems for Structural Form Finding. Journal of The International Association for Shell and Spatial Structures. IASS. 46, 147.
- LOURENÇO, P. B. 2008. Structural masonry analysis: Recent developments and prospects. In 14th international brick and block masonry conference. University of Newcastle, Australia.
- NARAYANAN, N., RAMAMURTHY K. 2000. Structure and properties of aerated concrete: a review. Cement & Concrete Composites, 22, 321-329.
- OCHSENDORF, J. & BLOCK, P. 2014. Exploring shell forms. Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization. Routledge.
- RIPPMANN, M., BLOCK, P. 2013. Funicular Shell Design Exploration. ACADIA. Waterloo, Canada.
- ROCA, P., CERVERA, M., & GARIUP, G. (2010). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. Archives of Computational Methods in Engineering, 17(3), 299-325.
- SOUTHERN, R. 2011. The force density method: A brief introduction. The National Centre for Computer Animation, Bournemouth University, United Kingdom.
- VAN MELE, T., LACHAUER, L., RIPPMANN, M., & BLOCK, P. 2012. Geometry-based understanding of structures. Journal of the International Association of Shell and Spatial Structures. 53(4), 285-295.
- VEENENDAAL, D., & BLOCK, P. 2014. Comparison of Form Finding Methods. Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization. Routledge. 115-130.
- WITTMANN, F. 1992. Advances in Autoclaved Aerated Concrete. Proceeding of the 3rd Rilem International Symposium of Autoclaved Aerated Concrete, Switzerland.