Kabuk Yapıları için Evrimsel Algoritma Tabanlı Parametrik Tasarım Önerisi

İhsan Erdem Er [1]; Togan Tong[2]
[1]Yıldız Teknik Üniversitesi; [2]Yıldız Teknik Üniversitesi
[1]ihsanerdemer@gmail.com; [2] https://avesis.yildiz.edu.tr/tong/, [2] togantong@yahoo.com

Özet

Kabuk sistemleri, az malzeme ile geniş açıklıkları geçebildikleri için mimarlar tarafından yıllarca ilgi duyulan bir konu olmuştur. Kabuk sistemleri geniş açıklıkları geçebilmenin yanında serbest formların üretimine de imkân sunarken karmaşık yapıları birçok tasarım zorluğunu da beraberinde getirmektedir. Bu durum, tasarım gereksinimleri karşılayabilen bir form arayışını doğurmaktadır. Form arayışı için başlarda fiziksel modellemeye dayalı yöntemler kullanılırken, parametrik tasarım araçlarının gelişimi ile fiziksel modellere alternatif olarak "Dinamik Gevşeme" gibi dijital form bulma yöntemleri geliştirilmiştir. Dijital yöntemler mekanik yöntemlere göre daha hızlı olsalar da parametrik tasarım, parametre ve başarımların net bir şekilde tanımlanmasını gerektirmektedir. Kabuk yapılarının tasarımında yükseklik, statik, maliyet ve estetik gibi birden çok başarım göz önünde bulundurulmak zorundadır. Bu sebeple kabuk yapılarında çok hedefli optimizasyon, birçok farklı araştırmanın da odak noktası olmuştur. Evrimsel algoritmalar birden çok başarım için optimizasyon imkânı sunabildikleri için çok hedefli optimizasyon problemleri için en çok kullanılan yöntemdir. Bu çalışmanın da temel amacı, kabuk yapıları için form bulma optimizasyon işlemini eş zamanlı olarak gerçekleştirebilen parametrik tasarım modeli geliştirmektir. Bu çalışmada, iki boyutlu bir çokgenden yola çıkılarak üç boyutlu düzlemsel panellere sahip kabuk üretimi ve optimizasyonunu ele alınmaktadır. Üretilen kabuk formunun biçim ve maliyet optimizasyonu için evrimsel algoritma kullanılmıştır. Çalışmada önerilen model, üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde köşe sayısı belirlenerek iki boyutlu yüzey üretimi yapılmaktadır. Ardından üretilen yüzey panellenerek kabuğun ağ sistemi oluşturulmaktadır. İkinci bölümde "Dinamik Gevşeme" yöntemi kullanılarak ağ sisteminden üç boyutlu kabuk formu üretilmektedir. Son bölümde ise üretilen kabuk formu; maksimum yükseklik, minimum panel maliyeti ve maksimum akışkanlık olmak üzere üç farklı başarım için evrimsel algoritma kullanılarak optimize edilmektedir. Optimizasyon sonucunda üretilen sonuçlar arasından "Pareto Verimliliği" yöntemi ile beş öncül seçilmiştir. Seçilen öncüllerin; akışkanlık, yükseklik ve panel maliyeti açısından değişimleri ile formların açıklık oranları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda evrimsel algoritmanın, kullanıcıya farklı başarım değerlerine sahip geniş bir çözüm havuzu sunduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple önerilen modelin, tasarımcıya karar verme sürecinde yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Çok hedefli optimizasyon, Panel optimizasyonu, Kabuk optimizasyonu, Evrimsel algoritmalar, Kabuk tasarımı*

Parametric Design Proposal for Shell Structures Based on Evolutionary Algorithm

Ihsan Erdem Er [1], Togan Tong [2]
[1] Yıldız Technical University; [2] Yıldız Technical University
[1]ihsanerdemer@gmail.com; [2] https://avesis.yildiz.edu.tr/tong/, [2] togantong@yahoo.com

Abstract

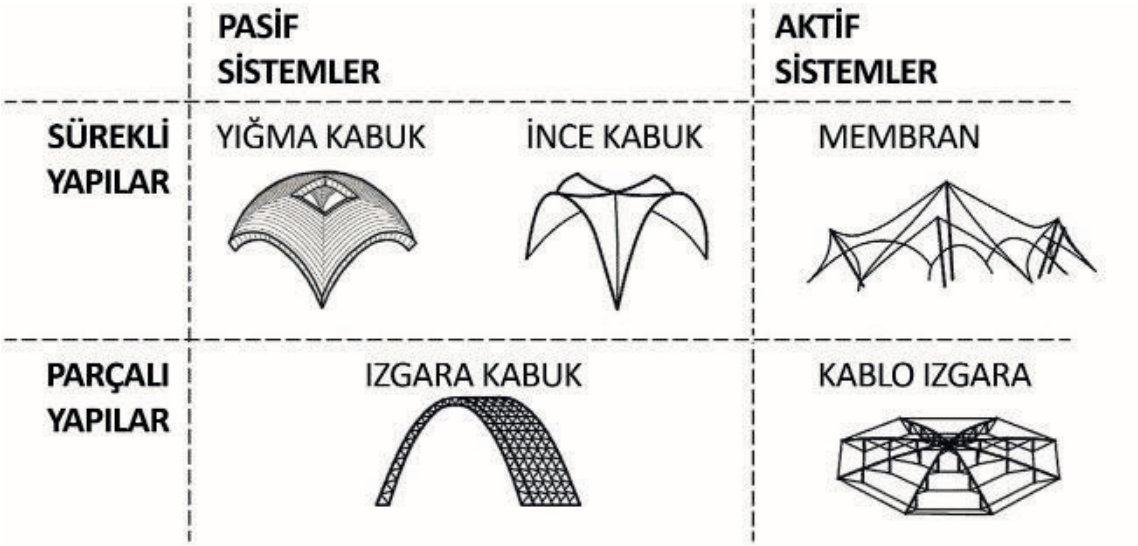
Shell systems have been a subject to architects for years because they can pass large openings with less material. While shell systems allow the production of free forms and can span large spans, their complex structures introduce many design problems. This situation leads to the search for a form, called "form finding," that can solve the design problems. In the early days, physical models were used for form finding. With the development of parametric design tools, digital form finding methods such as "Dynamic Relaxation" were developed as an alternative to physical models. Although digital methods are faster than mechanical methods, parametric design requires clear definition of parameters and objectives. When designing shell structures, multiple objectives such as height, static, cost, and aesthetics must be considered. For this reason, multi-objective optimization of shell structures has been investigated in many different studies. Evolutionary algorithms are the most commonly used method for multi-objective optimization problems because they can provide optimization opportunities for multiple objectives. The main objective of this study is to develop a parametric design model for shell structures that can simultaneously perform form finding and optimization. In this study, the production and optimization of a three-dimensional shell with planar panels starting from a two-dimensional polygon is discussed. An evolutionary algorithm was used for shape and cost optimization of the produced shell form. The model proposed in the study consists of three parts. In the first part, the number of corners is determined and a two-dimensional surface production is generated. Then, the generated surface is discretized into panels and the mesh system of the shell is formed. In the second part, a three-dimensional shell form is generated from the mesh system using the "Dynamic Relaxation" method. In the last section, the shell form is created and optimized using evolutionary algorithms for three different objectives, namely maximum height, minimum panel cost, and maximum smoothness. From the optimization results, five frontiers were selected for comparison using the "Pareto Front" method. Selected frontiers were evaluated according to the optimization objectives and the opening ratios of the forms. As a result of the study, it was found that the evolutionary algorithm provides the user with a wide pool of solutions with different trade-offs. For this reason, the proposed model is expected to help the designer in the decision-making process.

Keywords: *Multi objective optimization, Panel optimization, Shell optimization, Evolutionary algorithms, Shell design*

1. Giriş

Kabuk sistemleri, geniş açıklıkları minimum malzeme ile geçebilmeyi sağlayan verimli ve hafif yapılardır (Malek & Vassallo, 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 ve diğ., 2014). Aktif sistemler esneklikleri ile dış yükler karşısında hareket edebilen, pasif sistemler ise dış yükleri membran davranışı ile şekil değiştirmeden destek noktalarına ileten sistemlerdir. Kabuk yapıları ayrıca yüzey yapılarına göre **Tablo 1**'deki gibi sürekli ve parçalı yapılar olarak ikiye ayrılmaktadır.

Tablo 1: Kabuk yapılarının sınıflandırılması ((Kamal et al., 2020) çalışmasından uyarlanmıştır.)



Kabuk yapıların statik davranışları baskın olarak geometrilerine dayandığı için kabuk strüktürü, kabuğun formuyla doğrudan ilişkilidir (Adriaenssens ve diğ., 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 oluşturulduğu yeniden tanımlanması gerekmemektedir. Farklı kabuk yapı tasarımları için farklı form bulma yöntemleri kullanılmaktadır. "Kuvvet Yoğunluğu" (Force Density) yöntemi aktif kabuk yapı çalışmaları (Malerba ve diğ., 2012; J. Y. Zhang & Ohsaki, 2006) için kullanılırken "Baskı Ağı" (Thrust Network) yöntemi yığma kabuk yapı çalışmaları (Rippmann ve diğ., 2013) için kullanılmaktadır. "Dinamik Gevşeme" (Dynamic Relaxation) ve "Parça Dizisi" (Particle String) yöntemleri ise hem pasif (Larsen ve diğ., 2012; Naboni, 2016)hem de aktif (Bel Hadj Ali ve diğ., 2011; Noel ve diğ., 2021) kabuk yapı çalışmaları için kullanılmaktadır.

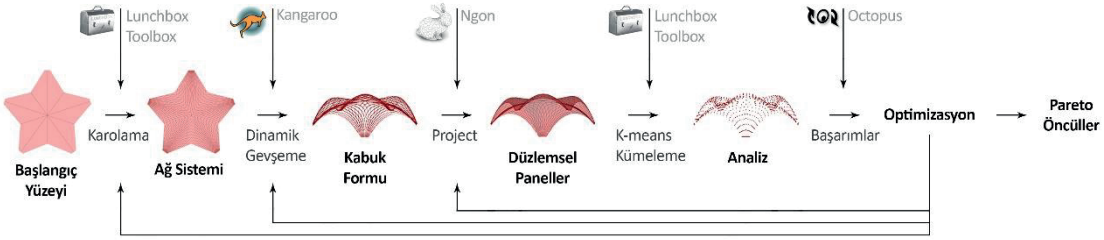
Kabuk yapıları sadece strüktürden oluşabilmektedir. Ancak bu tür yapılarda, kabuk genellikle hem duvar hem de çatı görevi görmektedir (Cuvilliers ve diğ., 2017). Bu sebepten kabuğun biçimsel sorunlarının yanı sıra, ışık geçirgenliği ve yalıtım gibi sorunlara da cevap vermesi gerekmektedir. Bu gibi durumlarda kabuk, esnek membran benzeri bir malzeme veya cam gibi esnek olmayan 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

paneller tekrarı (Pena & Sanchez-Alvarez, 2012) veya kalıp tekrarı (Eigensatz ve diğ., 2010) çalışmaları bulunmaktadır. Düzlemsel panellerde ise maliyet optimizasyonu ise panel üretiminde kullanılan malzeme ve üretim sırasında oluşan artık malzemenin azaltılması ile sağlanmaktadır.

Kabuk tasarımında yükseklik, statik, maliyet ve estetik gibi birden çok başarım göz önünde bulundurulmak zorundadır (Chilton & Tang, 2016). Evrimsel algoritmalar birden çok başarım için optimizasyon imkânı sunmaktadır. Bu sebeple mimari tasarım alanında sıkça kullanılmaya başlanmıştır (L. Zhang ve diğ., 2021). Mueller (2015)'de yapı tasarımında enerji ve biçim başarımlarını hedeflerken, Mesnil ve diğ., (2017)'de kabuk yapı tasarımında biçim ve statik başarımlarını hedeflemiştir. Kabuk yapılarının optimizasyonu, birçok farklı araştırmanın (Ağırbaş, 2019; Demirel, 2018; Saltık & Alaçam, 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. Önerilen modelde, iki boyutlu bir çokgenden yola çıkılarak "Dinamik Gevşeme" yöntemi ile üç boyutlu kabuk üretimi ve üretilen formun evrimsel algoritma yardımıyla optimizasyonu çalışılarak evrimsel algoritmaların 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.

2. Metot

Çalışma kapsamında, iki boyutlu bir çokgenden yola çıkılarak üç boyutlu bir kabuk üretimi ve optimizasyonu yapılmaktadır. Çalışma "Rhino-Grasshopper" ortamında gerçekleştirilen üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde iki boyutlu başlangıç yüzeyi oluşturulmaktadır. Ardından oluşturulan yüzeyden panelleme yöntemi ile ağ sistemi üretilmektedir. İkinci bölümde "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. Üçüncü bölümde kabuk formunun akışkanlığı, yüksekliği ve panel maliyeti optimize edilmektedir. Akışkanlık analizi için "Kümeleme" (K-Means Cluster) makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Çalışmanın son adımında ise optimizasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, optimizasyon öncesi rastgele parametreler kullanılarak üretilen bir adet başlangıç formu ile optimizasyon öncülleri üzerinden yapılmıştır. Çok hedefli optimizasyonun öncülleri "Pareto Öncül" (Pareto Front) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Karşılaştırma için her başarımın en iyi öncülü ve ortalamada en iyi ilk iki öncül seçilmiştir. Çalışmada yararlanılan yöntemler için kullanılan eklentiler **Şekil 1**'de gösterilmiştir.

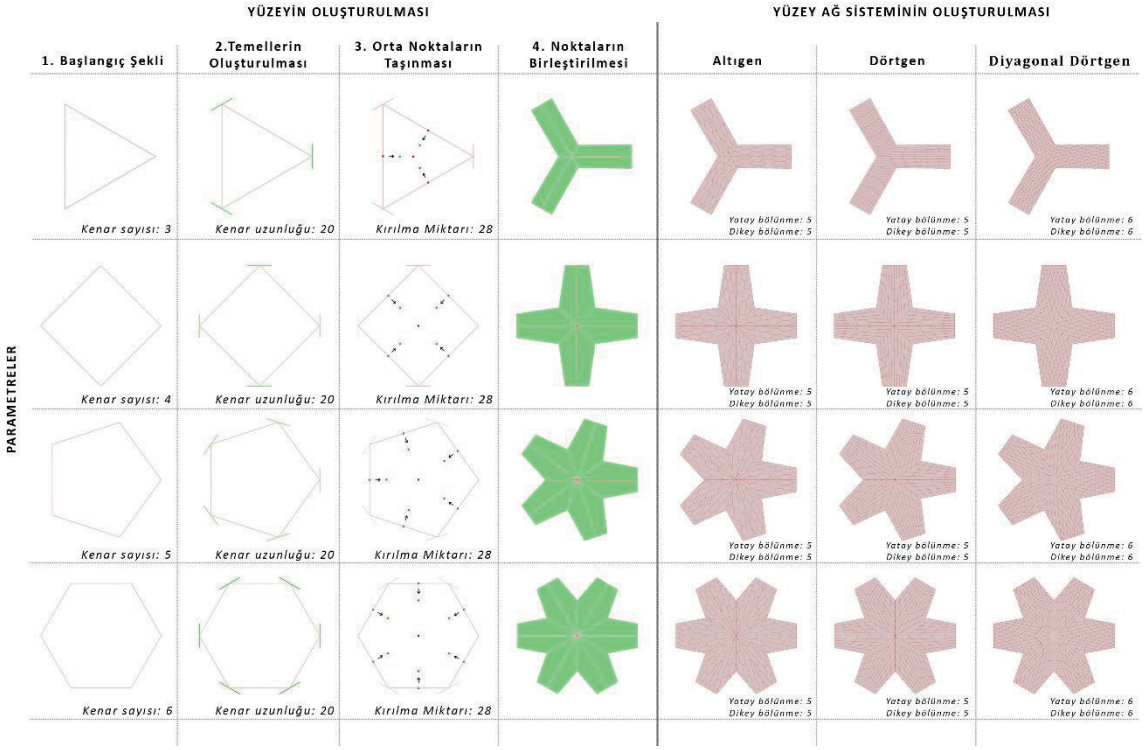


Şekil 1: Çalışmanın metodu ve kullanılan eklentiler (Şekiller yazarlar tarafından hazırlanmıştır.)

2.1. Köşe Nokta Sayısı ile Ağ Sisteminin Oluşturulması

Bu bölümde ilk olarak 5 metre yarıçaplı daire içerisinde kenar sayısı belirlenerek çokgen oluşturulmaktadır. Çokgenler geometrileri gereği panelleme işlemine uygun oldukları için tercih edilmiştir. Çokgenin köşe noktaları orta nokta olacak şekilde çokgenin açıortaylarına dik yeni kenar çizgileri oluşturulmaktadır. Bu çizgiler aynı zamanda üretilecek olan kabuk strüktürünün zemin ile bağlantı noktaların 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. Ardından yüzey karolama yöntemi ile panellenerek düzlemsel ağ sistemi oluşturulmaktadır. Karolama için altıgen, dörtgen ve diyagonal dörtgen olmak üzere üç yöntem seçeneği sunulmuştur. Kenar sayısı ve karolama yöntemine göre oluşturulan alternatifler **Tablo 2**'de gösterilmiştir.

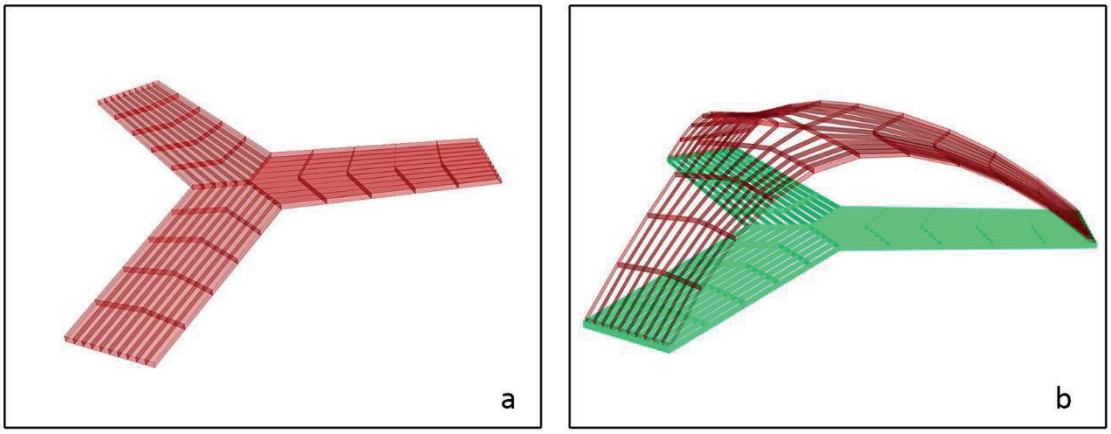
Tablo 2: Yüzey oluşumu ve ağ sisteminin üretimi (Şekiller yazarlar tarafından hazırlanmıştır.)



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.

2.2. Kabuk Geometrinin Oluşturulması

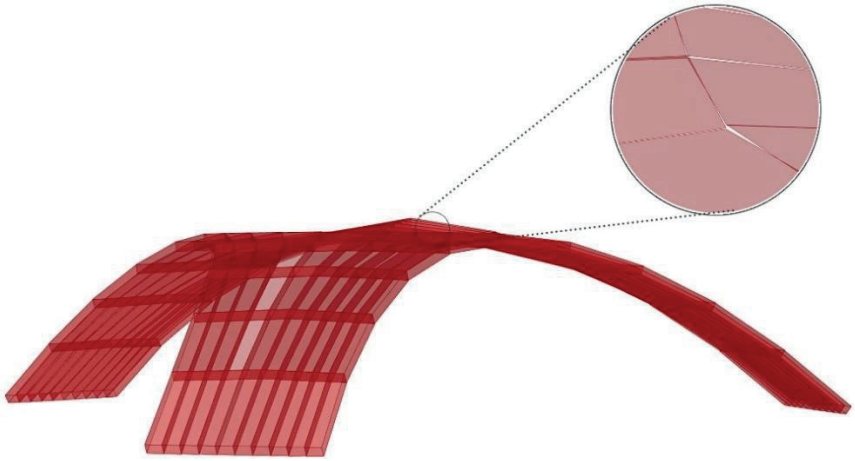
Bu bölümde, ilk bölüm sonunda oluşturulan ağ sistemi "loft" işlemi ile yükseltilmiştir. Bu sayede düzlemsel elemanlardan yeni ağ sistemi oluşturulmuştur (**Şekil 2a**). Yükseklik kazandırılan ağ sisteminden "Dinamik Gevşeme" yöntemi kullanılarak kabuk strüktürü oluşturulmaktadır (**Şekil 2b**).



Şekil 2: a: Yükseltilmiş düzlemsel ağ sistemi, **b:** Dinamik Gevşeme yöntemi ile üretilen kabuk strüktürü (Şekiller yazarlar tarafından hazırlanmıştır.)

Oluşturulan ağ sisteminin geometrisi çift eğrilikli olduğu için düzlemsel paneller kullanılarak üretimi mümkün değildir. Düzlemsel panellere geçiş için ağ sisteminin dış çeperinde bulunan panellere "Project" işlemi uygulanmıştır. Bu sayede

düzlemsel paneller ile üretilebilecek kabuk tasarımı elde edilmiştir. Ancak düzlemsel paneller kullanıldığında geometrinin akışkanlığında bozulmalar oluşmaktadır (**Şekil 3**).



Şekil 3: Düzlemsel panelleme sonucunda kabuk geometrisinde oluşan akışkanlık bozulmaları (Şekiller yazarlar tarafından hazırlanmıştır.)

2.3. Çok Hedefli Optimizasyon

Çalışmanın devamında çok hedefli optimizasyon algoritması ile akışkanlık, yükseklik ve panel sayısı başarımları için potansiyel çözümler araştırılmıştır. Optimizasyon işlemi için "Octopus" eklentisi kullanılmıştır. Kullanılan optimizasyon algoritmasının ayarları **Tablo 3**'de gösterilmiştir. 50 popülasyon ile 20 nesil üretilmiştir. $4{,}4x10^{9}$ sonuç olasılığı içerisinden 1000 tanesi incelenmiştir.

Tablo 3: Octopus eklentisi ve kullanılan ayarlar

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

2.3.1. Optimizasyonun Başarım Kriterleri

Optimizasyon için 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 komşu panellerin köşe noktalarının birbirine olan uzaklıkları bulunarak hesaplanmıştır. Panel köşe noktalarını komşuluk ilişkilerine göre sınıflandırmak için "Kümeleme" makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır.

2.3.2. Parametreler ve Sınırları

Modelin ilk parametresi çokgenin kenar sayısıdır. 3-6 aralığıyla sınırlandırılmıştır. 2.1 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. 2.1 bölümünde anlatılan yüzey karolama yöntemi ve yoğunluğu da bu bölümün son parametreleri olarak belirlenmiştir. Panelleme yöntemleri altıgen, dörtgen ve diyagonal dörtgen ile sınırlandırılmıştır. Panelleme yoğunluğu için ise yatay ve dikey bölünme sayıları parametre olarak belirlenmiş ve 5-12 aralığı ile sınırlandırılmıştır.

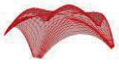
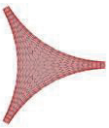
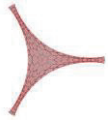
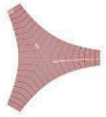
2.2 bölümünde ise "loft" işleminin mesafesi parametre olarak belirlenmiş ve 1-10 cm aralığı ile sınırlandırılmıştır. Bu parametre aynı zamanda panel kalınlığını da belirlemektedir. Modelin son parametresi ise "Dinamik Gevşeme" yönteminde kullanılan ağın düğüm noktalarına uygulanan yüktür ve **(1)** formülü ile belirlenmektedir. Formülün x değeri 0-8 aralığıyla sınırlandırılmıştır.

$$f(x)=0{,}5+2x.10^{-1} \quad (1)$$

3. Değerlendirme

20 nesil sonunda 33 adet pareto öncül üretilmiştir. Teorik olarak bu öncüllerin hepsi sonuç ürün olarak kullanılabilmektedir (Xhao v.d. 2021). Ancak bu bölümde değerlendirme için her başarımın en iyi öncülü ve ortalamada en iyi ilk iki öncül olmak üzere beş seçilmiştir. Beş öncülün başarım değerlerinin değişimini ölçebilmek için optimizasyonun başlangıç şekli referans alınmıştır. Seçilen öncüllerin formları, parametre ve başarım değerleri **Tablo 4**'te gösterilmiştir.

Tablo 4: Optimizasyon sonucu seçilen öncüller, DD: Diyagonal Dörtgen, D: Dörtgen, A: Altıgen (Şekiller yazarlar tarafından hazırlanmıştır.)

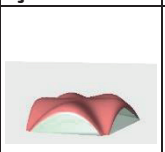
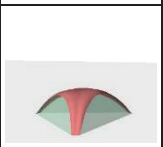
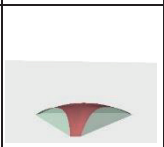
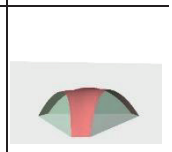
Çözüm		Parametreler		Panel Kırılması	Kabuk Yüksekliği	Panel Sayısı
Başlangıç Şekli		Kenar Sayısı	5			
		Kenar Uzunluğu	60 cm			
		Orta Nokta Konumu	91 cm			
		Panelleme Yöntemi	DD			
		Yatay Bölüntü Sayısı	12			
		Dikey Bölüntü Sayısı	6			
		Panel Kalınlığı	2 cm			
		Yük	2,1	10,15cm	2,22m	871
1.Öncül	*Minimum Panel Sayısı*	Kenar Sayısı	3			
		Kenar Uzunluğu	60 cm			
		Orta Nokta Konumu	10 cm			
		Panelleme Yöntemi	A			
		Yatay Bölüntü Sayısı	5			
		Dikey Bölüntü Sayısı	5			
		Panel Kalınlığı	6 cm			
		Yük	2,1	13,15cm / %29,56	2,74m / %23,42	108 / % -87,60
2.Öncül	*Minimum Panel Kırılması*	Kenar Sayısı	3			
		Kenar Uzunluğu	70 cm			
		Orta Nokta Konumu	97 cm			
		Panelleme Yöntemi	D			
		Yatay Bölüntü Sayısı	10			
		Dikey Bölüntü Sayısı	6			
		Panel Kalınlığı	1 cm			
		Yük	0,5	0,17cm / % -98,33	1,23m / % -44,59	600 / % -31,11
3.Öncül	*Maksimum Kabuk Yüksekliği*	Kenar Sayısı	3			
		Kenar Uzunluğu	50 cm			
		Orta Nokta Konumu	89 cm			
		Panelleme Yöntemi	A			
		Yatay Bölüntü Sayısı	12			
		Dikey Bölüntü Sayısı	12			
		Panel Kalınlığı	6 cm			
		Yük	2,1	8,76cm / % -13,69	7,56m / %240,54	510 / % -41,45
4.Öncül	*1. En İyi (Ortalama)*	Kenar Sayısı	3			
		Kenar Uzunluğu	60 cm			
		Orta Nokta Konumu	89 cm			
		Panelleme Yöntemi	A			
		Yatay Bölüntü Sayısı	5			
		Dikey Bölüntü Sayısı	12			
		Panel Kalınlığı	6 cm			
		Yük	2,1	6,65cm / % -34,48	7,02m / %216,22	234 / % -73,13
5.Öncü	*2. En İyi*	Kenar Sayısı	3			
		Kenar Uzunluğu	130 cm			
		Orta Nokta Konumu	99 cm			
		Panelleme Yöntemi	D			
		Yatay Bölüntü Sayısı	9			
		Dikey Bölüntü Sayısı	11			
		Panel Kalınlığı	4 cm			
		Yük	2,1	0,61cm / % -93,99	2,84m / %27,93	486 / % -44,20

Optimizasyon sonunda öncüllerin panel sayısı 108 ile 864, kabuk yüksekliği 38 cm ile 757 cm, panel kırılması ise 0,17 cm ile 19,63 cm arasındadır. Kabuk yüksekliği ile panel kırılması arasında ters orantı gözlemlenmiştir. Panel sayısı ile panel kırılması arasında da ters orantı gözlemlenmiştir. Yükseklik başarımı, diğer iki başarıma göre kabuk geometrisinde daha fazla değişikliğe sebep olmaktadır. 3. ve 4. öncüller teoride diğer öncüllerden daha başarılı iken yüzey alanları diğer öncüllere göre daha düşüktür ve geometrik oranları açısından estetik gözükmemektedir. Bu sebeple beş öncül pratikte daha iyi bir tercih kabul edilebilir. Optimizasyon sürecinde parametreler başarım değerini artırabilmek için sürekli değişmiştir. Ancak yük parametresi yükseklik başarımı ile doğrudan ilişkili olduğu için, sürekli yükselme eğilimi göstermiştir.

Kabuk yapıları, giriş bölümünde de bahsedildiği gibi hem duvar hem de çatı görevi görmektedir. Bu sebeple çalışma sonucunda üretilen öncüller 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 5**'de gösterilmiştir. 3. ve 4. öncüllerde A/K oranının çok yüksek olduğu görülmektedir. A/K oranın çok artması durumunda iç mekânda aydınlanma ve ısı kontrolünü zorlaştıracağı öngörülmektedir. 1,2 ve 3. öncüllerde ise açıklık yüzeyinin eğiminin başlangıç şekline göre arttığı görülmüştür. Kabuk yüksekliği ile açıklık alanı arasında doğru, açıklık yüzey eğimi arasında ise ters orantı görülmüştür.

Tablo 5: Optimizasyon sonucu seçilen öncüllerin açıklık oranları, A/K: Toplam açıklık alanının kabuk yüzeyine oranı (Şekiller yazarlar tarafından hazırlanmıştır.)

	Başlangıç Şekli	**1. Öncül**	**2. Öncül**	**3. Öncül**	**4. Öncül**	**5. Öncül**
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
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
A/K Oranı	%34	%135	%93	%344	%581	%125
Açıklık Yüzey Eğimi	%7	%24,76	%41,82	%10,06	%14,78	%20,58

4. Sonuçlar

Optimizasyon 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. Ayrıca evrimsel algoritmanın, kullanıcıya farklı başarım değerlerine sahip geniş bir çözüm havuzu sunduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple önerilen modelin, tasarımcıya karar verme sürecinde yardımcı olacağı düşünülmektedir. Ancak çok hedefli optimizasyon 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 başarım kriteri olarak dahil edilerek çalışmanın kapalı alan tasarımını da kapsayacak şekilde geliştirilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca değerlendirme sonucunda yükseklik başarımının diğer başarımlara göre baskın geldiği görülmüştür ayrıca kenar sayısı parametresinin tüm optimizasyon başarımları ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Çözüm havuzu çeşitliliğini artırmak için ileriki çalışmalarda modele yeni başarım kriterleri eklenebilir ve yükseklik başarımı için baraj değer sınırlaması getirilebilir. Sınırlama sayesinde başarısız sonuçların optimizasyon sürecine girmesi önlenebilir. Bu çalışmada önerilen model tamamen otomatik bir kabuk tasarım yöntemi değil, tasarımcıya karar verme sürecinde yardımcı bir araçtır. Modelin, benzer performans odaklı tasarım süreçlerine de uygulanarak mimari optimizasyon alanında, evrimsel algoritmaların farklı kullanım potansiyellerinin keşfedilebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (2014). *Shell Structures for Architecture*. Routledge, https://doi.org/10.4324/9781315849270

Ağırbaş, A. (2019). *A Physics-Based Design Method of Gridshell Systems: Optimization of Form and Construction Cost*. (539776) [Master's thesis, Yaşar Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Bel Hadj Ali, N., Rhode-Barbarigos, L., & Smith, I. F. C. (2011). Analysis of Clustered Tensegrity Structures Using a Modified Dynamic Relaxation Algorithm. *International Journal of Solids and Structures*, *48*(5), 637–647. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.10.029

Chilton, J., & Tang, G. (2016). *Timber Gridshells*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315773872

Cuvilliers, P., Douthe, C., du Peloux, L., & le Roy, R. (2017). Hybrid Structural Skin: Prototype of a GFRP Elastic Gridshell Braced by a Fiber-Reinforced Concrete Envelope. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, *58*(1), 65–78. https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.191.853

Demirel, E. (2018). *Bambu Malzeme Davranışına Bir Model Olarak Kabuk Strüktür Tasarım ve Şekil Optimizasyonu.* (512037) [Master's thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Eigensatz, M., Kilian, M., Schiftner, A., Mitra, N. J., Pottmann, H., & Pauly, M. (2010). Paneling Architectural Freeform Surfaces. *ACM SIGGRAPH 2010* (pp. 1-10). https://doi.org/10.1145/1833349.1778782

Kamal, M. A., Setya, A., & Brar, T. S. (2020). Exploration of Catenary Based Ferrocement Shell Structures: Form, Design and Architectural Interventions. *Architecture Research*, 93–101.

Larsen, N. M., Pedersen, O. E., & Pigram, D. (2012). A Method for The Realization of Complex Concrete Gridshell Structures in Pre-Cast Concrete. *ACADİA: Synthetic Digital Ecologies*, 209–216.

Malek, S., & Vassallo, M. (2017). Design and Structural Analysis for a Deployable Gridshell Shelter. *Proceedings of IASS Annual Symposia*, 1–8.

Malerba, P. G., Patelli, M., & Quagliaroli, M. (2012). An Extended Force Density Method for The Form Finding of Cable Systems with New Forms. *Structural Engineering and Mechanics*, *42*(2), 191–210. https://doi.org/10.12989/sem.2012.42.2.191

Mesnil, R., Douthe, C., & Baverel, O. (2017). Non-Standard Patterns for Gridshell Structures: Fabrication and Structural Optimization. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, *58*(4), 277–286. https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.194.893

Mueller, V. (2015). Learning about Parametric Model Behavior through Multi-Objective Optimization. *Anais Do XIX Congresso Da Sociedade Ibero-Americana de Gráfica Digital 2015*, 405–413. https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2015-80328

Naboni, R. (2016). Form-Finding to Fabrication of Super-Thin Anisotropic Gridshell. *Blucher Design Proceedings*, 418–425. https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-807

Noel, V., Nikookar, N., Pye, J., & Tran, P. K. (2021). The Infinite Line Active Bending Pavilion: Culture, Craft and Computation. *International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 351–360.

Pena, A., & Sanchez-Alvarez, J. (2012). *Rationalisation of Freeform Façades: A Technique for Uniform Hexagonal Panelling*. *International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 243-252.

Rippmann, M., Block, P., & Zurich, E. (2013). Funicular Shell Design Exploration. *Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture. 337-346*

Saltık, E., & Alaçam, S. (2020). Experiments for Design and Optimization of Thin Shell Structures. *Architecture, Technology and Innovation (ATI)*, 76–90.

Zhang, J. Y., & Ohsaki, M. (2006). Adaptive Force Density Method for Form-Finding Problem of Tensegrity Structures. *International Journal of Solids and Structures*, *43*(18–19), 5658–5673. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.10.011

Zhang, L., Wang, C., Chen, Y., & Zhang, L. (2021). Multi-Objective Optimization Method for the Shape of Large-Space Buildings Dominated by Solar Energy Gain in the Early Design Stage. *Frontiers in Energy Research*, *9*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.744974