

A Material-Based Computational Framework for Masonry Shell Structures

Zeynep Sena Sancak¹, Bülent Onur Turan²

ORCID NO: 0000-0002-7413-6213¹, 0000-0003-0531-874X²

¹ Mimar Sinan Fine Arts University, Graduate School, Department of Informatics, Computer Based Art and Design, Istanbul, Türkiye

² Mimar Sinan Fine Arts University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, Istanbul, Türkiye

Shell structures have been an interesting subject from past to present due to their ability to cross wide openings, produce free forms, efficient material usage and design potential. In addition to all these advantages, design and production processes also bring various difficulties. The oldest examples of shell structures, masonry shell structures, have come to the fore again with the increasing use of digital design technologies. Forms produced by making physical models have given way to simulations, models and calculations performed in digital environments. However, material information is generally ignored while performing form finding studies. Based on this observation, the study aimed to examine the relationship between form, material and structural performance. First, a literature review was conducted and shell structures were classified. Then, masonry shell structures were discussed; and the changes in form finding, material usage and production methods from past to present were examined. Finally, a three-stage algorithm proposal was developed in which material information was integrated into the early design phase of masonry shell structures. In the first stage, the shape generation was performed with the RhinoVault plugin, which handles the Thrust Network Analysis method. In the second stage, the surface was divided into sub-parts using the NGon plugin and the thickness was given. In the third stage, the Young's Modulus, tensile and compressive strength information of six different materials, namely C20 concrete, C40 concrete, clay brick, firebrick, limestone and sandstone, were integrated into the algorithm using the Karamba3D plugin. Then, performance analysis was performed using the Finite Element Method (FEM). As a result of the analysis, it was observed that limestone was the best performing material among the six materials, while clay brick was the lowest performing material. Considering the properties of the materials and their performances, it was observed that the Young's Modulus value was the parameter that affected the performance the most.

Received: 08.07.2024

Accepted: 22.11.2024

Corresponding Author:

20222109004@ogr.msgsu.edu.tr

Sancak, Z. S. & Turan, B. O. (2025). A Material-Based Computational Framework for Masonry Shell Structures. JCoDe: Journal of Computational Design, 6(1), 67-88. <https://doi.org/10.53710/jcode.1512888>

Keywords: Finite Element Method, Masonry Shell Structures, Material, Structural Performance, Thrust Network Analysis

Yığma Kabuk Strüktürler İçin Malzeme Tabanlı Hesaplamalı Bir Çerçeve

Zeynep Sena Sancak¹, Bülent Onur Turan²

ORCID NO: 0000-0002-7413-6213¹, 0000-0003-0531-874X²

¹ Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enformatik Anabilim Dalı, Bilgisayar Ortamında Sanat ve Tasarım, İstanbul, Türkiye

² Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye

Kabuk strüktürler geniş açıklık geçebilme, serbest biçim üretebilme, verimli malzeme kullanımı ve tasarım potansiyeli sebebiyle geçmişten günümüze ilgi çekici bir konu olmuştur. Bütün bu avantajlarının yanında tasarım ve üretim süreçleri çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Kabuk strüktürlerin en eski örneklerini oluşturan yığma kabuk strüktürler, sayısal tasarım teknolojilerinin kullanımının artmasıyla beraber yeniden gündeme gelmiştir. Fiziksel modeller yapılarak üretilen biçimler yerini dijital ortamda gerçekleştirilen simülasyonlara, modellere ve hesaplamalara bırakmıştır. Fakat biçim bulma çalışmaları gerçekleştirilirken genellikle malzeme bilgisi göz ardı edilmektedir. Bu gözlemden yola çıkılarak yapılan çalışmada biçim, malzeme ve strüktürel başarımlar arasındaki ilişkinin incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak literatür taraması yapılarak kabuk strüktürlerin sınıflandırılması yapılmıştır. Ardından yığma kabuk strüktürler ele alınıp; geçmişten günümüze biçim bulma, malzeme kullanımı ve üretim yöntemlerinin değişimi incelenmiştir. Son olarak yığma kabuk strüktürlerin erken tasarım evresine malzeme bilgisinin entegre edildiği, üç aşamadan oluşan bir algoritma önerisi geliştirilmiştir. Birinci aşamada İtme Ağı Analizi yöntemini ele alan RhinoVault eklentisi ile biçim üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada NGon eklentisi kullanılarak yüzey alt parçalara ayrılmış ve kalınlık verilmiştir. Üçüncü aşamada ise Karamba3D eklentisi kullanılarak; C20 betonu, C40 betonu, kil tuğlası, ateş tuğlası, kireçtaşı ve kumtaşı olmak üzere altı farklı malzemenin Young's Modülü, çekme ve basınç dayanımı bilgileri algoritmaya entegre edilmiştir. Ardından Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak performans analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda altı malzeme arasında kireçtaşının en iyi performans gösteren malzeme olduğu gözlemlenirken, kil tuğlası en düşük performans gösteren malzeme olmuştur. Malzemelerin özellikleri ve gösterdiği performanslar göz önüne alındığında, Young's Modülü değerinin performansı en çok etkileyen parametre olduğu gözlemlenmiştir.

Teslim Tarihi: 08.07.2024

Kabul Tarihi: 22.11.2024

Sorumlu Yazar:

20222109004@ogr.msgsu.edu.tr

Sancak, Z. S. & Turan, B. O. (2025). Yığma Kabuk Strüktürler İçin Malzeme Tabanlı Hesaplamalı Bir Çerçeve. JCoDe: Journal of Computational Design, 6(1), 67-88. <https://doi.org/10.53710/jcode.1512888>

Anahtar Kelimeler: İtme Ağı Analizi, Malzeme, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Strüktürel Başarımlar, Yığma Kabuk Strüktürler

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kabuk yapılar, üç boyutlu eğrisel yüzeyler ile oluşturulan, bir boyutu diğer iki boyutuna göre küçük olan yapılar olarak tanımlanmaktadır (Adriaenssens ve diğ., 2014). Yığma taş, tuğla, ahşap, kompozit betonarme gibi çeşitli malzemelerle inşa edilebilen kabuk strüktürler; malzeme verimliliği sağlaması, hafif olması, geniş açıklıklar geçebilmesi ve tasarım özgünlüğü sunması gibi sebeplerle mimarlık ve mühendislik alanları için önemli bir yapı grubu haline gelmiştir. Roma ve Bizans İmparatorlukları döneminde kubbe ve tonoz şeklinde üretilen kabuk strüktürler, günümüzde ileri analiz teknikleri sayesinde çeşitli malzemeler kullanılarak serbest biçimlerde tasarlanabilmektedir. Özellikle Felix Candela ve Eduardo Torroja gibi mimarların öncülüğünde, 1930'lu ve 1940'lı yıllarda ince beton kabukların kullanımı popülerlik kazanmıştır (Ejaz, 2023).

Kabuk yapıların ilk örnekleri olan yığma kabuk strüktürler, kendi ağırlığını ve üzerine gelen yükleri verimli bir şekilde dağıtabilmesi sebebiyle geçmişten günümüze kadar sağlam bir şekilde ayakta kalabilmiştir. Tonozlar ve kemerler gibi yığma kabuk formları, estetik ve işlevsel bir mimari anlayışın temsilcisi olmuştur. Yığma kabuk strüktürler, geniş açıklık, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi avantajları nedeniyle yüzyıllardır dünyanın dört bir yanında kemerler, kubbeler ve tonozlar şeklinde inşa edilmiştir (Adriaenssens ve diğ., 2014). Özellikle tarihi dönemlerde; taş, tuğla veya benzeri malzemelerle oluşturulan bu yapılar hem estetik hem de işlevsel açıdan üstün bir performans sergilemiştir (Heyman, 1995). Günümüzde, geleneksel yığma tekniklerinin hesaplamalı tasarım araçlarıyla ele alınması, bu yapıların yeniden ilgi odağı haline gelmesine neden olmuştur.

Sayısal tasarım teknolojilerinin mimaride kullanılmasıyla beraber; algoritmik tasarım ve simülasyonlar aracılığıyla erken tasarım evresinden itibaren; tasarımın bitmiş halini tahmin edebilmek, çıkabilecek olası problemleri öngörmek, çeşitli sayıda tasarım alternatifi oluşturup değerlendirmek kolaylaşmıştır. Yığma kabuk strüktürlerin de tasarım ve üretim süreci doğası gereği ciddi bir hesaplama ve karmaşık analizler gerektirir. Bu nedenle sayısal tasarım teknolojilerinin tasarım ve üretim sürecine dahil olması zaman ve nitelik açısından verimliliği artırmıştır. Kabuk strüktürlerin tasarım sürecini verimli bir hale getirmek için hesaplama araçlarının kullanılmasının yanı sıra tasarım

aşamalarından itibaren mimarlar ve mühendisler arasında yakın bir işbirliği önem kazanmıştır (Tessmann, 2008). Yığma kabuk strüktürler üzerine yapılan çalışmalar hesaplamalı tasarım bağlamında incelendiğinde; parametrik modelleme tekniklerinin geliştirilmesi, biçim bulma, biçim optimizasyonunun gerçekleştirilmesi, davranış testleri, tarihi yığma yapıların restorasyon projelerinde dijital ikiz modellemeleri ile mevcut yapıların detaylı analizini yaparak hasar tespitinde kullanılması ve dijital fabrikasyon araçlarının üretim sürecine dahil edilmesi üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu bağlamda yığma kabuk strüktürler için erken tasarım evresinden itibaren kullanılabilir; biçim, malzeme ve strüktürel başarımlar arasındaki ilişkiyi inceleme konusunda literatürde boşluk bulunmaktadır. Günümüz mimari uygulamalarında, form, malzeme, form ve performans arasındaki ilişkiler dikkate alınmadan genel tasarım sürecine dikkate edilmektedir (Yazici & Tanacan, 2018). Malzeme parametresi sonuç ürün için en önemli kriterlerden biri olmasına rağmen genellikle tasarım sürecinde değerlendirilmemektedir. Bu nedenle yapılacak olan çalışmada, malzeme bilgisinin erken tasarım evresine entegre edilerek, biçim, malzeme ve strüktürel başarımlar arasındaki ilişkinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılacak olan bu konuda bir çerçeve çizmeyi amaçlarken, sonraki çalışmalar için kapsamı genişletilerek malzemenin erken tasarım evresinden itibaren değerlendirilmesine olanak sağlayan bir yöntem olma potansiyeli taşımaktadır.

2. YÖNTEM (METHOD)

Yığma yapı tekniği, mimarlık tarihinin en eski inşaat yöntemlerinden biridir. Kökenleri, insanlığın yerleşik hayata geçişine kadar uzanır ve farklı coğrafyalarda binlerce yıl boyunca kullanılmıştır. Yığma teknikle üretilen kabuk strüktürler ise tasarımdan uygulamaya kadar mimarlık ve mühendislik başta olmak üzere birden çok disiplinin rol aldığı çok katmanlı bir tasarım sürecine sahiptir. Günümüzde hesaplamalı tasarımın geleneksel üretim yöntemi olan yığma teknikle olan ilişkisi incelenen bir araştırma konusu olmuştur. Yaklaşık son yirmi yılda mimarlık alanında kullanımı yaygınlaşan hesaplamalı tasarım araçları biçim, malzeme ve strüktürel başarımlar arasındaki ilişkiyi tasarımın erken evresinden itibaren irdelemeye olanak sağlayarak sürecin verimliliğini artırmaktadır. Bu gözlemden yola çıkılarak çalışmanın amacı, karmaşık bir hesaplama süreci olan yığma kabuk strüktürlerin erken tasarım evresinin irdelenerek, tasarımda önemli bir parametre olan malzeme

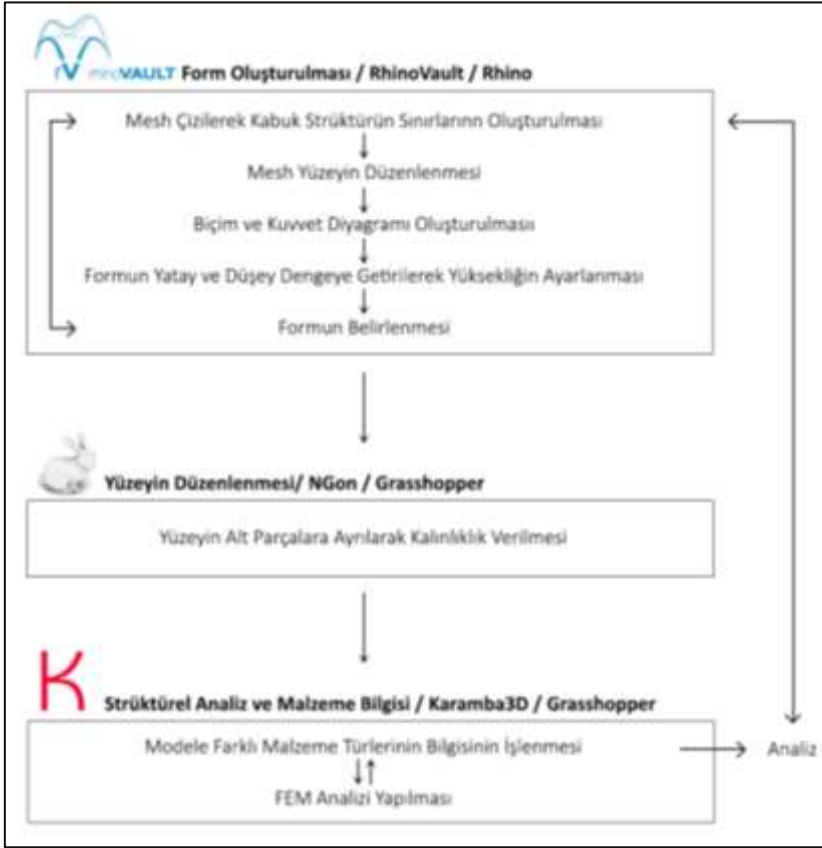
bilgisinin de sürece entegre edilebildiği; biçim, malzeme ve strüktürel başarımlar arasındaki ilişkinin beraber ele alındığı bütünleşik bir çerçeve oluşturmaktır.

İlk olarak literatür taraması yapılarak kabuk strüktürlerin sınıflandırılması yapılmıştır. Ardından yığma kabuk strüktürler ele alınıp; geçmişten günümüze biçim bulma, malzeme kullanımı ve üretim yöntemlerinin değişimi incelenmiştir. Son olarak yığma kabuk strüktürlerin biçim üretiminin yapılabileceği ve tasarım sürecine malzeme bilgisinin entegre edilip strüktürel performansının analiz edilebileceği bir algoritma tasarlanmıştır. Yığma kabuk strüktürler basınca dayanıklı olarak çalışırlar. Bu durum yığma kabuk strüktürler için gerilme olmadan yerçekimi karşısında sadece basınç yükleri oluşturan geometrilerin arayışını doğurmuştur (Er, 2022).

Algoritma üç aşamadan oluşmaktadır (**Şekil 1**). Birinci aşamada Matthias Rippmann tarafından geliştirilen RhinoVault eklentisi kullanılarak biçim oluşturulmuştur (Block Research Group, 2024). RhinoVault, föniküler kabuk yapıları tasarlamak için kullanılan ve İtme Ağı Analizi'ni temel alan bir Rhinoceros eklentisidir. Yapı içindeki kuvvetler arasındaki ilişkiye odaklanır ve biçimin uygulanan yükleri gerilim veya bükülme olmadan tamamen sıkıştırma yoluyla dengede kalmasını sağlar. Tasarımcının iki boyutlu yüzeyde kuvvet ağlarını etkileşimli olarak değiştirmesine ve sınırları düzenlemesine olanak tanıyarak, biçimi sezgisel bir şekilde oluşturur. Eklenti, iki boyutlu yüzeyleri manipüle ederek üç boyutlu hale getirerek yığma kabuk strüktürler için en uygun biçimi bulmayı sağladığı için tercih edilmiştir.

İkinci aşamada Petras Vestartas tarafından geliştirilen, Grasshopper eklentisi olan NGon kullanılmıştır (Golay, n.d.). Ngon eklentisi mesh oluşturma, düzenleme ve alt parçalara ayırmaya olanak sağlar. Algoritmada RV3 eklentisinin çıktısı olan mesh yüzeyinin alt parçalara ayrılması ve kalınlık verilmesi amacıyla kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise Karamba3D eklentisi kullanılarak, algoritmaya farklı türlerde malzeme bilgisi entegre edilmiştir ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak strüktürel olarak gerilim gösteren alanların analizi yapıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karamba3D, Grasshopper ortamında çalışan yapısal analiz eklentisidir (Preisinger, n.d.). Yapıları analiz edip performans olarak değerlendirmeyi ve optimize etmeyi sağlar. Aynı zamanda kullanılacak malzemenin mekanik özellikleri algoritmaya

eklenerek yapısal davranışı malzeme bilgisi ile birlikte analiz etmek de mümkün olmaktadır. Karamba3D eklentisi ile malzeme ve performans arasındaki ilişki eşzamanlı olarak incelenebildiği için tercih edilmiştir. Algoritmaya C20 ve C40 olmak üzere iki farklı beton; kil tuğlası ve ateş tuğlası olmak üzere iki farklı tuğla; kireçtaşı ve kumtaşı olmak üzere iki farklı taş türünün mekanik özellikleri entegre edilmiştir. Malzemeler seçilirken Young's modülü, çekme dayanımı ve basınç dayanımı özelliklerinin birbirine benzer olmaması göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 1: Çalışmaya Ait Yöntem Şeması (Method Chart of the Study) (Produced by the Authors).

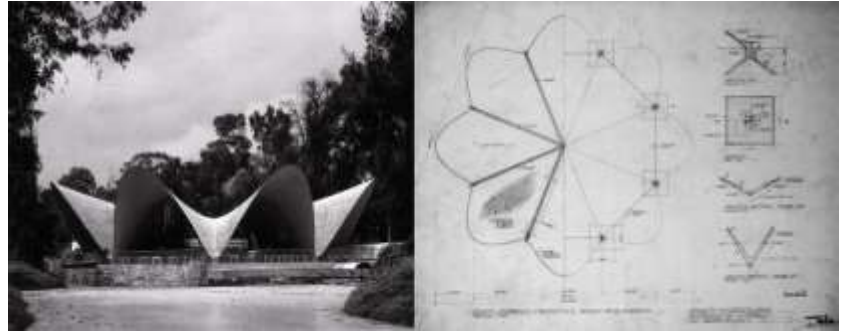
3. KABUK STRÜKTÜRLER (SHELL STRUCTURES)

Kabuk strüktürler, mimaride geniş açıklıklar geçebilme, verimli malzeme kullanımı ve çeşitli biçim denemelerine imkân sağlayan yapılardır. Tasarım olanakları ilgi çekici olan kabuk strüktürler; malzeme bilimi, mimarlık ve yapı mühendisliği gibi çeşitli alanları kapsamakta, bu nedenle farklı disiplinlerin birlikte ele alması gereken bir konudur. Sayısal tasarım teknolojilerinin gelişmesiyle beraber, geleneksel üretim yöntemlerinden öğrenilen bilgilerle kabuk strüktürler günümüzde

hesaplamalı tasarım ortamında yeniden ele alınmaktadır. İlk örnekleri yığma kabuk strüktürler olan bu yapı grubu, 20. yüzyılın başından itibaren teknolojinin olanaklarının genişlemesiyle ve beton malzeme kullanımının yaygınlaşmasıyla beraber üzerine yapılan çalışmalar artmıştır (Ejaz, 2023).

Alman mühendis ve mimar Franz Dischinger ile mimar Walter Bauersfeld tarafından 1920'lerde tasarlanan Zeiss-Dywidag fabrika binaları, ilk beton kabuk yapılarından biri olarak örnek verilebilir. Bu yapı grubu arasından en dikkat çeken, yapımı 1924'te tamamlanan Almanya'nın Jena kentindeki Zeiss Planetaryumu'dur. Bu yapı, beton malzeme kullanılarak hafif ve estetik açıdan yeni biçimler oluşturulabileceğine örnek olan ince kabuklu beton bir kubbeye sahiptir. 1930'lu ve 40' lı yıllarda İspanyol mühendis Eduardo Torroja ve Meksikalı mühendis Felix Candela, beton kabuk yapılar üzerinde çalışmalar yaparak bu alanda önemli ilerlemeler kaydetmişlerdir (Ejaz, 2023). Candela, iki boyutlu bir eğriyi bir eksen etrafında döndürerek üç boyutlu formlar oluşturmuştur. Yapımı 1958 yılında tamamlanan Mexico City'deki Los Manantiales Restoranı'nın çatısı bu yöntem kullanılarak tasarlanmıştır (**Şekil 2**). Candela ayrıca, çift eğrilik ve yükü yapı üzerinde dağıtmanın etkili bir yolu ile karakterize edilen "hiperbolik parabolit" yöntemini de geliştirmiştir (Cassinello ve diğ., 2010).

Şekil 2: (Solda) Los Manantiales Restoranı, (Sağda) Tasarım Aşaması ((Left) Los Manantiales Restaurant, (Right) Design Stage) (Miller, 2014).



1950'ler ve 60'lar, özellikle ince beton kabuklar ve germe membran yapılar için önemli bir zaman dilimi olmuştur. Bu dönemde Eero Saarinen tarafından tasarlanan Kresge Oditoryumu, Luigi Nervi tarafından tasarlanan Palazzetto dello Sport ve Frei Otto tarafından tasarlanan Expo 67 Alman Pavyonu, kabuk strüktürlere örnek olarak verilebilir. 1970'li yıllardan sonra kabuk strüktürler popülerliğini kaybetmeye başlamıştır (Vatandoost ve diğ., 2024). Bunun sebebi,

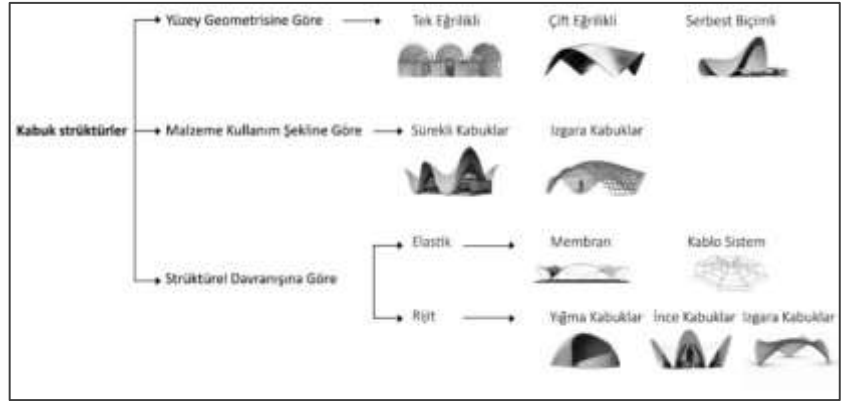
kısmen inşaat aşamasında gerekli olan karmaşık inşaat tekniklerine bağlanabilir (Hines ve diğ., 2004). 2000'li yılların başından itibaren bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretim (CAM) teknolojilerinin yaygın kullanımı, kabuk strüktürlerin daha karmaşık ve optimize edilmiş formlarda tasarlanmasını ve üretilmesini sağlamıştır.

Literatür taraması yapıldığında kabuk strüktürlerin birçok farklı şekilde sınıflandırıldığı gözlemlenmiştir. Özet olarak kabuk strüktürler yüzey geometrisine göre, malzeme kullanım şekline göre ve strüktürel davranışına göre üç ana başlıkta sınıflandırılabilir (**Şekil 3**). Kabuk strüktürler, yüzey geometrilerine göre sınıflandırılırken Gauss Eğriliği baz alınır. Gauss Eğriliği pozitif olan yüzeyler tek eğrilikli, Gauss Eğriliği negatif olan yüzeyler ise çift eğrilikli yüzeyler olarak tanımlanır. Serbest biçimli strüktürler ise, eğri yüzeylerin kesiştirilmesi ve basit geometrilerin birbirleriyle kombinasyonu ile oluşturulan karmaşık yüzeylerdir ve serbest biçim çalışmalarıyla veya deneysel yöntemlerle türetilirler (Türkçü, 2017, s. 111).

Malzeme kullanım şekline göre ise sürekli kabuklar ve ızgara kabuklar olarak ikiye ayrılabilirler. Sürekli kabuk strüktürler, kullanılan bir malzemenin tüm yüzeyde devam ettiği ve yapısal eleman olarak davranış gösteren yapılardır. Sürekli kabuk sistemleri dikey ve yatay olarak ayırık yapısal elemanlardan oluşmazlar; bunun yerine yükleri geometrileri aracılığıyla taşırlar (Ağırbaş, 2019). Sürekli kabuk strüktürlerde ağırlıklı olarak beton, tuğla, taş gibi malzemeler kullanılmaktadır. Izgara kabuk strüktürler ise sürekli kabuk strüktürlerin aksine katı bir yüzeyden oluşmazlar. Ortaya çıkan yapı, birbirine bağlı ayırık yapısal elemanlardan oluşan bir uzay-çerçeve yapısıdır (Ağırbaş, 2019).

Strüktürel davranışlarına göre ise elastik ve rijit olmak üzere ikiye ayrılabilirler. Elastik davranış gösteren kabuk strüktürler, çevresel kuvvetler altında şekil değiştirebilen sistemlerdir. Membran ve kablo sistemler hafif olmaları sebebiyle bu gruba örnek olarak verilebilir. Rijit davranış gösteren kabuk strüktürler ise çevresel kuvvetler altında şekil değiştirmezler. Belirli bir kalınlığa sahip olan yığma kabuk strüktürler, ince kabuk strüktürler ve ızgara kabuk strüktürler bu gruba örnek olarak verilebilir.

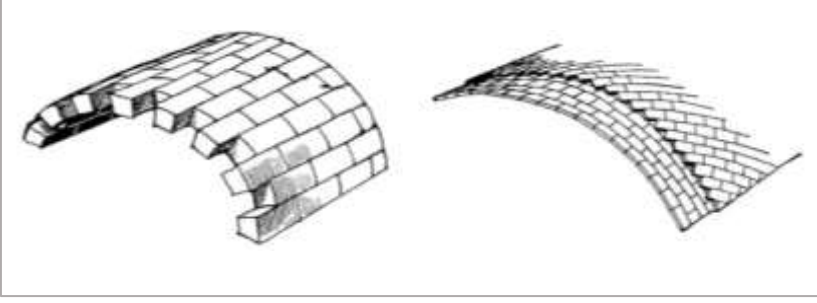
Şekil 3: Kabuk Strüktürlerin Sınıflandırılması (Classification of Shell Structures) (Produced by the Author).



4. YIĞMA KABUK STRÜKTÜRLER (MASONRY SHELL STRUCTURES)

Yığma yapım tekniği; taş, kil, tuğla veya beton gibi blok malzemelerle inşa ve üretim sanatı olarak tanımlanmaktadır (DeJong, 2009). Antik Mısır ve Roma döneminde de yığma yapım tekniğine sıklıkla rastlanmaktadır. Orta Çağ'da, özellikle Avrupa'daki katedral ve kalelerin inşasında tuğla ve taş işçiliği gelişmiştir. Günümüzde de sayısal tasarım teknolojileri benimsenerek yığma yapım tekniği yeniden ele alınmakta ve çeşitli potansiyeller araştırılmaktadır.

Geleneksel yığma kabuk strüktürlerin mimaride ve inşaatta uzun bir geçmişi vardır ve belli boyuttaki malzemelerin bir araya gelmesinde her ne kadar sınırlamalar olsa da etkileyici yapılar inşa edilmiştir. Yığma kabuk strüktürlerin ilk örnekleri kubbeler ve tonozlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür kabuklar öncelikle basınç altında bulunurlar çünkü tuğla ve taş gibi duvar malzemeleri basınçta güçlü, çekmede ise zayıftır (Ochsendorf & Block, 2014). Bu strüktürlerin biçim bulma sürecinde tamamen sıkılaşmayla çalışan formlar bulmak konusu kısıtlayıcı olmuştur. Katalan tonozu ve Guastavino tekniği yığma kabuklar için önemli çözümler sunmuşlardır. 14. yüzyılda İspanya'da ortaya çıkan Katalan tonozu, kemer veya tonoz oluşturmak için kalıp yüzeyinin ince tuğlalarla kaplanması ile oluşur (Ochsendorf, 2014). Tuğlalar, alışlagelmiş uygulamanın aksine, yan yana monte edilir. Bu teknikte, tuğlaları oluşturmak için kil ve tuğlaları birbirine bağlamak için harç gibi bağlayıcı bir malzeme kullanılması yeterlidir.



Şekil 4: Geleneksel taş tonoz ile Guastavino kiremit tonozunun karşılaştırılması (Comparison of the traditional stone vault and the Guastavino tile vault) (Moya, 1947).

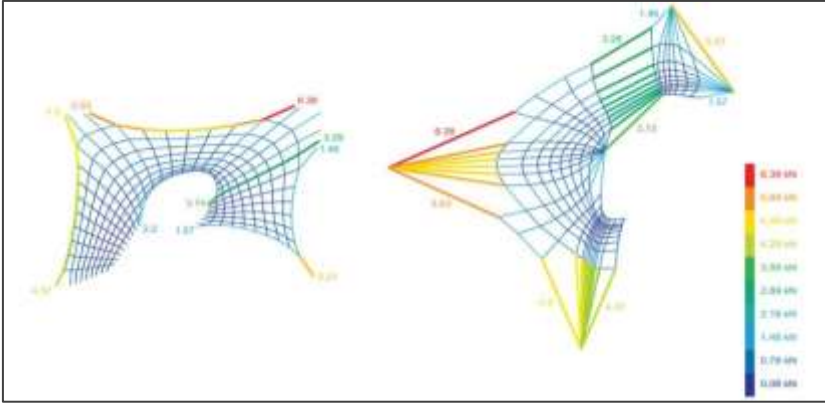
Kökleri Akdeniz'e uzanan bu tekniğin tarihi, Arapların ve Romalıların benzer inşaat tekniklerini kullandıkları antik çağlara kadar uzanmaktadır (Ritisan ve Pierre, 2022). 19. yüzyılın sonlarında Rafael Guastavino Sr. (1842-1908) ve Jr. (1872-1950), geleneksel Akdeniz tonoz yöntemini Amerikan inşaatının taleplerine uyarlayarak Amerika Birleşik Devletleri'nde büyük bir etki yaratmıştır (Ochsendorf, 2014). Katalan tonozunu temel alan bu yöntemde birden fazla sıra halinde düz olarak döşenen yaklaşık 15 x 38 x 2,5 cm ölçülerinde ince kiremit karolar kullanılmıştır. Geleneksel olarak taş kullanılan tonozlara göre Guastavino yönteminde daha az malzeme kullanılır (Şekil 4). Ağırlık olarak da Guastavino yöntemiyle inşa edilen strüktürler daha hafif olduğu için geleneksel yönetime göre yatay itme kuvveti daha azdır. Geleneksel yığma kabuklar çoğu zaman yapısal hesaplamalar yapılmadan inşa edilmiş olsa da tarihi tonoz inşaatçıları çift kavisli yığma kabuklarda mümkün olan çoklu denge durumları konusunda önemli bir farkındalık geliştirmişlerdir (Ochsendorf & Block, 2014).

Geleneksel yığma yapım yöntemlerinde, ustalar orantı ve geometri kurallarına dayalı tasarım yöntemlerini kullanmışlardır. Yığma yapıların stabilitesine ilişkin ilk bilimsel anlayış olan Hooke'un tersinme yasası, 1676 yılında İngiliz bilim adamı Robert Hooke tarafından, ters asılı zincir şeklinde formüle edilmiştir (Block & Ochsendorf, 2007). Bu anlayış birçok yığma kabuk strüktürün biçim bulma sürecine önemli katkılar sağlamıştır. Asılı bir ipe her bir parçanın öz ağırlığı ile orantılı olacak şekilde ağırlıklar eklenir ve oluşan geometri ters çevrildiğinde kemerin yaklaşık olarak sıkıştırma dengesi ortaya çıkmaktadır. Londra'daki St Paul Katedrali'nin tasarımı sırasında Robert Hooke ile Christopher Wren beraber çalışmıştır ve kubbenin tasarımına yardımcı olmak için Hooke'un tersinirlik yasasını kullanmışlardır (Addis, 2014). 33 m çapındaki kubbeye ilişkin çizimlerde binanın kesiti üzerinde asılı duran bir zincir şekli gözükmemektedir. Bu model testi, Hooke ve Wren'in kubbenin bir sıkıştırma yapısı olarak iyi bir şekilde çalışacağına ve bir

yapının biçimini belirlemeye yardımcı olmak için kullanılan fiziksel bir modelin bilinen en eski kullanımı olduğuna dair bir kanıt olmuştur (Addis, 2014).

Giovanni Poleni (1683–1761), 1740'larda Hooke ilkesini, bir dizi endişe verici radyal çatlak geliştiren Roma'daki Aziz Petrus Katedrali'nin yüz yıllık 41,9 metre çapındaki kubbesinin güvenliğini değerlendirmek için kullanmıştır (Addis, 2014). Poleni, modeli taş kemerlerin ideal şeklini belirlemek için kullanmıştır. Heinrich Hübsch (1795-1863) de Hooke'un tekniğini kullanarak, istenilen kemer veya tonoz şeklini elde etmek için gereken kemerlerin ağırlıklarını belirlemek amacıyla askı ipi modelleri yapmıştır (Addis, 2014). Bu yöntem 1837'de bir dökümhanenin 16 m çapındaki yarım küre şeklindeki kubbesinin yapımında kullanılmıştır. Hafif ve içi boş kil çömlerle yapılan kubbenin bir kısmının kalınlığı 17,5 cm'e düşürülebilmektedir. 19. yüzyılda da kemerler ve tonozların ideal biçimini bulmak için askı modelleri sıklıkla kullanılmıştır. Antoni Gaudí (1852–1926) bu dönemde tasarladığı birçok yapıda üç boyutlu askı modeli kullanmıştır. Bunlardan en iyi bilineni Colònia Güell'in mezarıdır (Tomlow, 2011).

Günümüzde yağma kabuk strüktürlerin biçim bulma sürecinde ETH Zürih Blok Araştırma Grubu tarafından geliştirilen İtme Ağı Analizi yöntemi kullanılmaktadır (**Şekil 5**). Bu yöntem, yağma yapıların askı zincirleri ile bindirme çizgileri arasındaki benzerliklerden ilham almıştır (Saltık, 2018). Matthias Rippmann tarafından geliştirilen Rhinoceros yazılımı eklentisi olarak çalışan RhinoVault aracıyla kolaylıkla biçim üretimi yapılabilmektedir. Eklenti aracılığıyla biçim üretimi iki adımda gerçekleştirilir. İlk olarak, yağma kabuk strüktürün sınırları belirlenir ve biçim diyagramı oluşturulur. Ardından, oluşturulan biçim diyagramından hareketle kuvvet diyagramı oluşturulur. Bu adımda yatay itme kuvvetlerinin dengesi çözülmektedir. Hem biçim hem de kuvvet diyagramları manipüle edilebilir. İkinci adımda ise dikey yüklere ve yüksekliğe bağlı olarak itme analizi gerçekleştirilir. İtme Ağı Analizi'ndeki temel strateji, tasarımcıya sistemdeki itkilerin dağılımı üzerinde doğrudan kontrol vermektir (Saltık, 2018). İtme Ağı Analizi yönteminde kullanılacak malzemeden bağımsız olarak geometrik bir biçim bulma gerçekleştirilir.



Şekil 5: İtme Ağı Analizi Yöntemi (Thrust Network Analysis Method) (Rippmann ve diğ., 2012).

Malzeme bilgisi mimari tasarım sürecinde sonuç ürünü elde etmek adına en önemli parametrelerden biridir. Geleneksel tasarım sürecinde, kullanılacak olan malzemelere genellikle proje aşaması bittikten sonra üretim aşamasında deneme-yanılma yoluyla karar verilmektedir. Sayısal tasarım araçlarının gelişmesiyle beraber hem malzeme kavramına bakış değişmiş hem de malzeme kullanımını sürece dahil etmek daha kolaylaşmıştır. Ancak yine de pratik olarak bu yaklaşım çok yaygınlaşmamıştır. İlk kez Gramazio ve Kohler tarafından tanımlanan 'dijital materyalite' kavramı malzeme kavramını yeniden değerlendirmeye olanak sağlayıp tasarım sürecine dahil olma biçimini değiştirmiştir. Geçmişten günümüze kadar yığma kabuk strüktürlerin tasarımında malzeme kullanımı ve üretim biçimleri şekil değiştirmiştir. Zanaat, mimarlık ve mühendislik birleşimi olan yığma kabuk strüktürler geçmişte insan gücüyle üretilirken, günümüzde insan gücü ve robotların iş birliğiyle de üretilebilmektedir.

2016 yılında ETH Zurich Blok Araştırma Grubu tarafından Venedik Bienali için tasarlanan Armadillo Vault, takviyesiz ve harçsız olarak birleştirilen 399 ayrı kireçtaşı parçasından oluşmaktadır. Tarihi taş katedrallerin tasarım prensiplerinden yola çıkarak oluşturulan bu strüktür, tasarım süreci ve malzeme kullanım biçimiyle yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır (**Şekil 6**). Tonoz, basınç altında durmakta ve sınırı boyunca üç doğrusal destek ve ortada bir destek ile toplam 75 m²'lik bir alana yayılmaktadır (Rippmann ve diğ., 2016). Hesaplamalı tasarım ve optimizasyon yöntemleri kullanılan tasarım sürecinde, bilgisayar ortamında formları belirlenen ayırık birimler 5 eksenli CNC kullanılarak oluşturulmuştur. Kontrplak kullanılarak yapılan kalıp üzerine birimler yerleştirilmiştir. Montaj sırasında taş ustalarının hassas bir şekilde birleşimleri yapmaları gerekmiştir (Rippmann ve diğ., 2016). Proje, karmaşık bir tasarım ve üretim sürecinin hesaplamalı tasarım ve dijital

fabrikasyon yoluyla en az hatayla sonuçlandırılabilceğini göstermektedir.

Şekil 6: (Solda) Armadillo Vault İnşa Süreci, (Sağda) Tasarım Süreci ((Left) Armadillo Vault Building Process, (Right) Design Process) (Rippmann ve diğ., 2016).



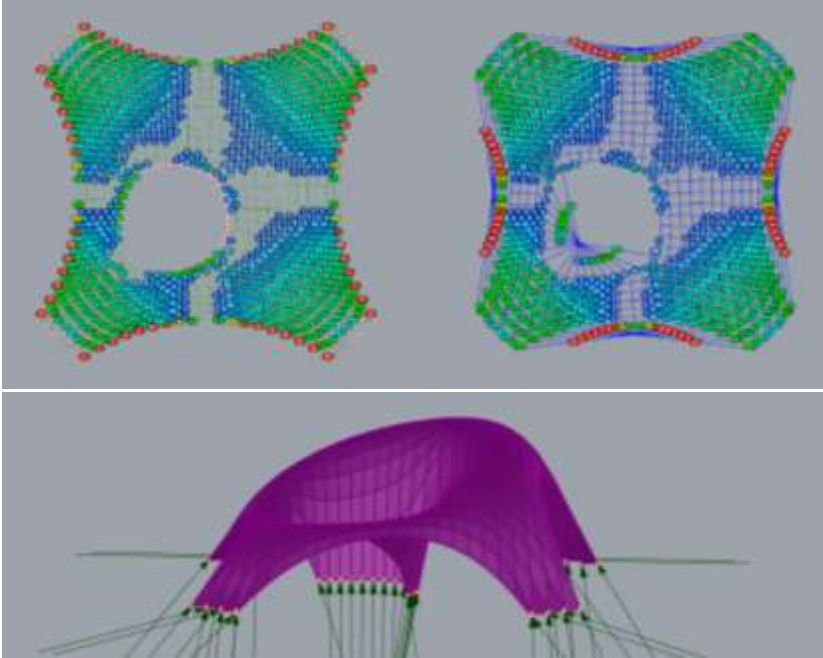
2023 HCCH Studio tarafından tasarlanan Konsept Kütüphane, çağdaş yapım teknikleri ve yerel malzeme kullanımının birleşimidir. Kütüphane yaklaşık 10 m çapında ve 5 m yüksekliğindedir ve malzeme olarak yerinde dökme tuğla kullanılmıştır. Kütüphanenin yapımında tamamen insan gücü kullanılmıştır. Çift kavisli yüzey üzerine tuğlaların yerleştirilmesi projenin en zor kısmı olmuştur. Çelik iskelet arasında tuğlalar yerleştirilmiş ve araları yüksek dayanımlı betonla doldurulmuştur. Radyal devamlılığı sağlamak için 12 farklı genişlikte tuğla kullanılmıştır. Stüdyo, en eski malzemelerden biri olan tuğlayla çağdaş yapım teknikleri ve tasarım yöntemleri kullanarak biçim denemesi gerçekleştirmiştir (Shuangyu, 2023).

Bilgi teknolojilerinin mimarlık alanındaki artan etkisi, malzeme ile mimari tasarım arasında, malzemenin temel itici güç haline geldiği yeni bir ilişki tanımlamıştır (Yazici & Tanacan, 2020). Mimaride sayısal tasarım araçlarının kullanılmasıyla birlikte malzeme bilgisi modele entegre edilebilmektedir. Bu sayede modelin strüktürel başarımı, maliyet bilgisi ve çevresel etmenler ile ilişkisi tasarım evresindeyken değerlendirilebilir ve optimum seçenekler belirlenebilir.

5. VAKA ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

Geliştirilen algoritmada, yığma kabuk strüktürlerin tasarım sürecine malzeme bilgisinin de entegre edilebildiği; biçim, malzeme ve strüktürel başarımlar arasındaki ilişkinin birlikte ele alındığı bütünleşik bir çerçeve oluşturulması amaçlanmıştır. Algoritma üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada Rhinoceros eklentisi olan RhinoVault kullanılarak biçim oluşumu gerçekleştirilmiştir. RhinoVault eklentisi, yapısal biçim bulma sürecinde kullanıcı odaklı ve kontrollü bir keşif için gerekli olan görsel

diyagramlarda temsil edilen biçim ve kuvvetlerin doğal, çift yönlü karşılıklı bağımlılığından yararlanır (Rippmann & Block, 2013). Bu eklenti, kubbe ve tonoz gibi yapıların denge durumunu inceleyen İtme Ağı Analizi yöntemini temel alır. İtme Ağı Analizi, yapıların sıkıştırma kuvvetiyle çalıştığını varsayarak, bu kuvvetin dağılımını inceler. Sıkıştırma kuvvetinin yapıda nasıl dağıldığı iki boyutlu olarak bir ağ sistemi olarak temsil edilir. RhinoVault ile biçim oluşturulurken ilk olarak 15m x 15m ölçülerinde bir mesh çizilmiştir. Ölçüye sezgisel olarak karar verilmiştir. Ardından mesh düzenlenerek bir kısmında açıklık oluşturulup destek noktaları belirlenmiştir. Mesh düzenleme kısmındaki 'Relax' komutu kullanılarak köşelerdeki gerilimi azaltmak amacıyla köşelere eğim verilmiştir. İstenilen eğim elde edildikten sonra, ilk önce biçim diyagramı ardından da kuvvet diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 7). Diyagramlar oluşturulduktan sonra, ilk önce yatay denge, ardından da insan ölçeği göz önünde bulundurularak 4 m yükseklik verilerek düşey denge oluşturulmuştur (Şekil 8).



Şekil 7: (Solda) Biçim Diyagramı, (Sağda) Kuvvet Diyagramı ((Left) Form Diagram, (Right) Force Diagram) (Produced by Authors).

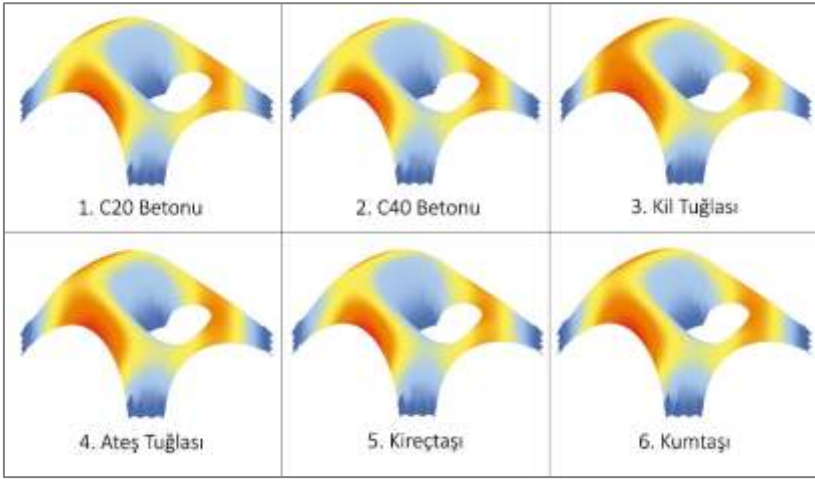
Şekil 8: Düşey Denge (Vertical Equilibrium) (Produced by Authors).

İkinci aşamada oluşturulan yüzey, Grasshopper ortamında Ngon eklentisi kullanılarak alt parçalara ayrılmış ve kalınlık verilmiştir. Üçüncü aşamada ise Karamba3D eklentisi kullanılarak malzeme bilgisi algoritmaya entegre edilmiştir ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak farklı malzemeler için gerilmelerin olduğu kısımlar karşılaştırılmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi, yapının bileşenlerinin çeşitli yükler altında gösterdiği davranışı inceleyen yapısal analiz için kullanılan bir yöntemdir. Tasarımcıların geleneksel yöntemlerle değerlendirmesi zor olan karmaşık yüzeylerin analiz edilmesini sağlar.

Modele iki farklı beton, iki farklı tuğla ve iki farklı taş olmak üzere toplamda altı adet farklı malzeme bilgisi entegre edilmiştir (**Şekil 9**). Malzemelerin Young's Modülü, çekme dayanımı ve basınç dayanımı bilgileri belirlenerek kN/cm^2 birimi olarak algoritmaya eklenmiştir. Beton malzemesi için TS500 Standardı kaynak olarak kullanılırken; tuğla ve taş malzemeler için MatWeb (2024) veri tabanından yararlanılmıştır. Malzemelerin özellikleri, içeriğinin bileşenlerine göre değiştiği için Şekil 10'da verilen değerler ortalama bir değer olarak belirlenmiştir. Beton malzemesinin basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise düşüktür. Young's Modülü ise malzemenin basınç altında ne kadar esneyebileceğini ifade eder. Beton malzemesi sert bir malzeme olarak kabul edilir. Algoritmaya C20 ve C40 olmak üzere iki farklı beton türü entegre edilmiştir. Tuğla malzemesinin ise çekme dayanımı, basınç dayanımına göre daha zayıftır. Young's Modülü ise tuğlanın türüne göre farklılık göstermektedir. Algoritmaya düşük yoğunluktaki kil tuğlası ile ateş tuğlası entegre edilmiştir. Taş malzemedeki ise basınç ve çekme dayanımları taşın türüne göre değişiklik göstermektedir. Genellikle basınç dayanımları yüksektir ve çekme dayanımları basınç dayanımına göre daha düşüktür. Young's Modülü ise taşın türüne göre değişiklik göstermektedir. Belirlenen altı adet malzeme özelliklerine göre kıyaslandığında; en yüksek Young's Modülü değerine kireçtaşı sahipken, en düşük değere kil tuğlası sahiptir. Kireçtaşı en yüksek çekme dayanımına sahipken, kil tuğlasının çekme dayanımı en düşüktür. Basınç dayanımında ise en yüksek değere C40 Betonu sahipken, kil tuğlası en düşük basınç dayanımına sahiptir.

Şekil 9: Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of the Materials Used) (Produced by Authors).

Sıra	İsim	Sınıf	Young's Modülü [kN/cm^2]	Çekme Dayanımı [kN/cm^2]	Basınç Dayanımı [kN/cm^2]
1	C20	Beton	2800	0,16	2
2	C40	Beton	3400	0,22	8
3	Kil Tuğlası (Düşük Yoğunluk)	Tuğla	300	0,1	1
4	Ateş Tuğlası	Tuğla	1000	0,3	3
5	Kireçtaşı	Taş	3500	1,6	7
6	Kumtaşı	Taş	1300	0,5	1,3



Şekil 10: Kullanılan Malzemelerin SEY Analizi Yapılarak Karşılaştırılması (Comparison of Used Materials by FEM Analysis) (Produced by Authors).

Seçilen malzemeler sırayla modele entegre edilmiştir ve SEY analizi yapılmıştır (**Şekil 10**). Maviden kırmızıya doğru gittikçe gerilim artmaktadır. Yapılan analiz sonucunda altı malzeme arasında kireçtaşının en iyi performans gösteren malzeme olduğu gözlemlenirken, kil tuğlası en az performans gösteren malzeme olmuştur. Malzemeler kendi sınıfları arasında kıyaslandığında C20 ve C40 betonları arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Kil tuğlası ile ateş tuğlası arasında ve kireçtaşı ile kumtaşı arasında ise belirgin bir fark gözlemlenmiştir. Malzemelerin özellikleri ve gösterdiği performanslar göz önüne alındığında, malzemelerin Young's modülünün performansı en çok etkileyen parametre olduğu gözlemlenmiştir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma, yığma kabuk strüktürlerin erken tasarım evresine malzeme bilgisini entegre edip; biçim, malzeme ve strüktürel başarımlar arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Öncelikle kabuk strüktürler incelenmiş olup; yüzey geometrisine göre, malzeme kullanım şekline göre ve strüktürel davranışına göre sınıflandırılmıştır. Rijit davranış gösteren sürekli yüzeye sahip yığma kabuk strüktürler çalışmanın odak noktasını oluşturmuştur. Ardından yığma kabuk strüktürlerin biçim bulma, malzeme kullanımı ve üretim yöntemlerindeki geçirdiği değişimler ele alınmıştır. Fiziksel deneyler yapılarak gerçekleştirilen biçim bulma denemeleri, yerini sayısal tasarım teknolojilerinin gelişmesiyle beraber bilgisayar ortamındaki çeşitli simülasyonlara ve araçlara bırakmıştır.

Günümüzde ise çeşitli eklentilerin yanında İtme Ağı Analizi yöntemini temel alan RhinoVault eklentisi kullanılmaktadır. Geçmişte genellikle benzer boyutlarda tuğla, taş, kerpiç blok gibi malzemeler kullanılırken, günümüzde ise 5 eksenli CNC gibi dijital fabrikasyon araçlarının ve sayısal hesaplama araçlarının yaygınlaşmasıyla çeşitli biçimlerde ve ebatlarda malzemelerle çeşitlilik sağlanabilmiştir.

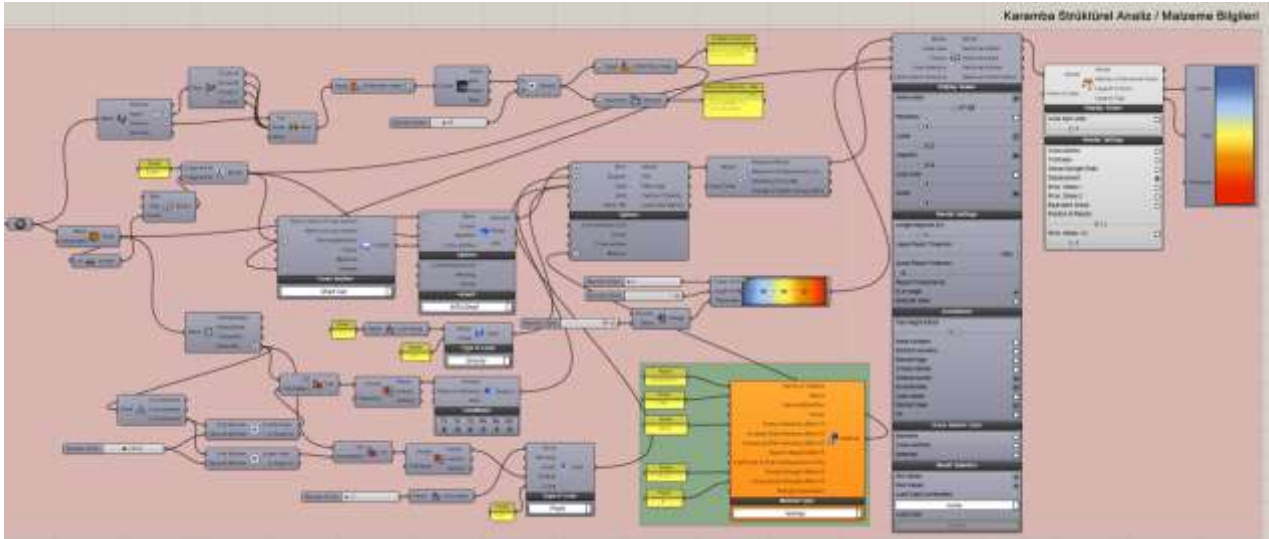
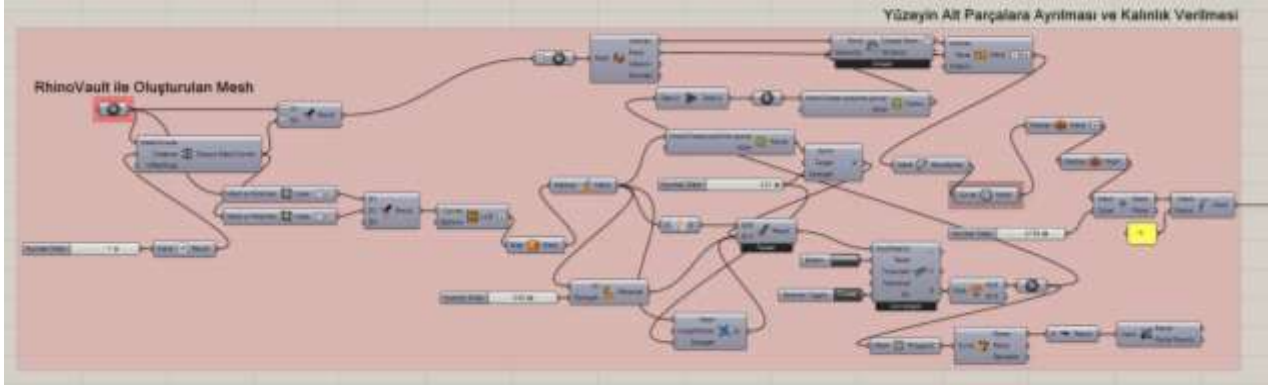
Yapılan çalışmada biçim, malzeme ve performans arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla üç aşamadan oluşan bir algoritma geliştirilmiştir. Birinci aşamada Rhinoceros eklentisi olan ve İtme Ağı Analizi yöntemi temelli RhinoVault eklentisi ile biçim bulma denemesi yapılmıştır. 15 m x 15 m ölçülerindeki mesh yüzey üzerinde düzenlemeler yapıp 4 m yüksekliğinde bir strüktür oluşturulmuştur. İtme Ağı Analizi yönteminde malzemeden bağımsız olarak statik dengeyi sağlamak amacıyla bir biçim bulma işlemi gerçekleştirilir. İkinci aşamada RhinoVault eklentisi ile elde edilen 'mesh' yüzey NGon eklentisi kullanılarak yüzeyin alt parçalarına kalınlık verilmiştir (**Şekil 11**). Üçüncü aşamada ise Karamba3D eklentisi kullanılarak tasarım sürecine malzeme bilgisi entegre edilip Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak, strüktürün farklı malzemeler tercih edildiğinde gösterdiği performans değişimi incelenmiştir (**Şekil 12**). Malzeme olarak C20 betonu, C40 betonu, kil tuğlası, ateş tuğlası, kireçtaşı ve kumtaşı olmak üzere altı farklı malzeme tercih edilmiştir. Kıyaslama yapılabilmesi için malzemelerin mekanik özelliklerinin birbirine benzer olmamasına dikkat edilmiştir. Ardından beton malzemeler için TS500 standardından, tuğla ve taş malzemeler için ise malzemelerin özelliklerinin bulunduğu veritabanına sahip olan MatWeb üzerinden ortalama sayısal değerler alınmıştır. Alınan bu değerler Karamba3D eklentisi ile algoritmaya entegre edilmiştir ve performans analizi yapılmıştır. Kırmızı olan bölgeler strüktürel zorlanmanın fazla, mavi olan bölgeler ise strüktürel zorlanmanın az olduğu yüzeyleri göstermektedir. Yapılan kıyaslama sonucunda kireçtaşı en iyi performansı gösterirken, kil tuğlası en düşük performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Malzemelerin mekanik özelliklerinden Young's Modülü değeri analiz için en önemli parametre olmuştur. Young's Modülü değeri arttıkça performans artmıştır.

Gerçekleştirilen algoritma yığma kabuk strüktürlerin tasarım süreci için deneysel bir çalışmadır ve geliştirilmeye devam edecektir. Farklı malzemelerin farklı performanslar gösterdiği gözlemlenmiş olup; tasarım sürecinin erken evresinden itibaren malzeme bilgisinin de

sürece katılması, üretim aşamasında çıkabilecek problemleri minimuma indirmeyi sağlayabilir. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri için ortalama değerler kullanılmıştır. Çalışmanın daha özelleştirilmiş sonuçlar vermesi için, kullanılabilir malzemelerin numuneleri hazırlanıp test edilmelidir. Gelecek çalışmalarda birim malzemelerin özelliklerinin modele nasıl entegre edilebileceği, oluşabilecek tessellasyonların biçimi ve strüktürel başarımı nasıl etkileyeceği, biçim ve malzeme ilişkisinin optimizasyon yöntemleri araştırılabilir.

Şekil 11: Algoritmanın 2. Aşaması (2nd Stage of the Algorithm) (Produced by Authors).

Şekil 12: Algoritmanın 3. Aşaması (3rd Stage of the Algorithm) (Produced by Authors).



Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Çalışmanın tüm yazarları, bu çalışmada sonuçları veya yorumları etkileyebilecek herhangi bir maddi veya diğer asli çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkı Beyanı (Author Contributions)

Makale, danışmanlığı Doç. Dr. Bülent Onur Turan (makalenin ikinci yazarı) tarafından yapılan ve MSGSÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne teslim edilecek olan 'Yığma Kabuk Strüktürler İçin Malzeme Tabanlı Hesaplamalı Tasarım Modeli' başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. İkinci yazar, makalenin bilimsel ve yazınsal sürecine yönlendirici ve denetleyici uzman olarak katkı vermiştir. Model önerisi birinci yazar tarafından geliştirilmiş olup, ikinci yazar ile beraber elde edilen çıktılar değerlendirilip makale haline getirilmiştir.

Referanslar (References)

- Addis, B. (2014). Physical Modelling and Form Finding. In *Shell structures for architecture* (pp. 33-43). Routledge.
- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (Eds.). (2014). *Shell structures for architecture: form finding and optimization*. Routledge.
- Agırbaş, A. (2019). A Physics-Based Design Method of Gridshell Systems: Optimization of Form and Construction Cost. [Master's Thesis, Yasar University].
- Block, P., Lachauer, L., Rippmann, M. (2014). Thrust Network Analysis (ss. 71-86). Routledge.
- Block, P., & Ochsendorf, J. (2007). Thrust network analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium. *Journal Of The International Association For Shell And Spatial Structures*, 48(3), 167-173.
- Block Research Group. (2024, June 15). compas-RV. Retrieved 16 March 2025, from GitHub. <https://github.com/BlockResearchGroup/compas-RV?tab=readme-ov-file>
- Cassinello, P., Schlaich, M., & Torroja, J. A. (2010). Félix Candela. en memoria (1910-1997). Del Cascarón de Hormigón a las estructuras Ligeras del S. XXI. *Informes de La Construcción*, 62(519), 5-26. <https://doi.org/10.3989/ic.10.040>
- DeJong, M. J. (2009). *Seismic assessment strategies for masonry structures* (Doctoral dissertation). Massachusetts Institute of Technology. https://web.mit.edu/masonry/papers/DeJong_PhD_2009.pdf

- Ejaz, K. T. (2023). A study on shell structures through a comparative case study analysis (Master thesis). Bilkent University <https://repository.bilkent.edu.tr/server/api/core/bitstreams/3762a917-f5c2-4935-a94c-dc56f23e9485/content>
- Er, İ. E. (2022). Kabuk Yapılar İçin Evrimsel Algoritma Tabanlı Parametrik Tasarım Önerisi. (Master thesis). Yıldız Technical University. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=kScA8XnrRb0WogX-qPGFkhMr88B-l3J2XzpxWTUW-3mhZ3Ve3Osmdsl-YTFwwJki>
- Golay, P. (n.d.). Ngon. food4Rhino. Retrieved March 16, 2025, from <https://www.food4rhino.com/en/app/ngon>
- Gramazio, F., & Kohler, M. (2008). *Digital materiality in architecture*. Lars Müller Publishers.
- Heyman, J. (1995). *The stone skeleton: Structural engineering of masonry architecture*. Cambridge University Press.
- Hines, E. M., & Billington, D. P. (2004). Anton Tedesco and the introduction of thin shell concrete roofs in the United States. *Journal of Structural Engineering*, 130(11), 1639–1650. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2004\)130:11\(1639\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:11(1639))
- Karamba3D. (2024, July 1). *Karamba3D*. - <https://karamba3d.com/>
- MatWeb. (2024, September 26). MatWeb material property data. MatWeb. <https://www.matweb.com/>
- Mitchell, M. (2014, April 14). AD Classics: Los Manantiales / Felix Candela. Retrieved from 16 March 2025, from <https://www.archdaily.com/496202/ad-classics-los-manantiales-felix-candela>
- Ochsendorf, J., & Block, P. (2014). Exploring shell forms. In S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, C. Williams (eds.), *Shell structures for architecture Form Finding and Optimization* (pp. 7-14). Routledge (1st edition). <https://doi.org/10.4324/9781315849270>
- Ochsendorf, J. (2014). Guastavino Masonry Shells. *STRUCTURE*, 26.
- Panozzo, D., Block, P., & Sorkine-Hornung, O. (2013). Designing unreinforced masonry models. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(4), 1-12. <https://doi.org/10.1145/2461912.2461958>
- Preisinger, C. (n.d.). Karamba3D. Retrieved March 16, 2025, from <https://karamba3d.com/>
- Rippmann, M., & Block, P. (2013, September). Funicular shell design exploration. In *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the ACADIA* (Vol. 27, pp. 337-346). Riverside Architectural Press.

- Rippmann, M., Lachauer, L., & Block, P. (2012). Interactive vault design. *International Journal of Space Structures*, 27(4), 219-230. <https://doi.org/10.1260/0266-3511.27.4.219>
- Shuangyu, H. (2023). Twisted brick shell concept library / HCCH Studio. ArchDaily. Retrieved March 16, 2025, from <https://www.archdaily.com/1012561/twisted-brick-shell-concept-library-hcch-studio>
- Saltik, E. (2018). Experiments for Design and Optimization of Thin Shell Structures. (Master Thesis). Istanbul Technical University.
- Tessmann, O. (2008). *Collaborative design procedures for architects and engineers* (Doctoral dissertation). University of Kassel. <https://kobra.uni-kassel.de/bitstreams/e2e8d9e7-217b-45f6-8c47-82803a1ccd88/download>
- Tomlow, J. (2011). Gaudí's reluctant attitude towards the inverted catenary. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering History and Heritage*, 164(4), 219-233. <https://doi.org/10.1680/ehah.2011.164.4.219>
- Türkçü, Ç. (2017). *Çağdaş taşıyıcı sistemler*. Birsen Yayınevi.
- Vatandoost, M., Ekhlasi, A., Golabchi, M., Rahbar, M., & von Buelow, P. (2024). Fabrication methods of shell structures. *Automation in Construction*, 165, 105570. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105570>
- Yazici, S., & Tanacan, L. (2020). Material-based computational design (MCD) in sustainable architecture. *Journal of Building Engineering*, 32, 101543. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101543>
- Yazici, S., & Tanacan, L. (2018). A study towards interdisciplinary research: a Material-based Integrated Computational Design Model (MICD-m) in architecture. *Architectural Science Review*, 61(1-2), 68-82. <https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1416575>

