

Analysis of Structural System Behaviors for Architectural Form Alternatives in the Schematic Design

Salih Özdemir¹

ORCID NO: 0000-0002-3755-7166¹

¹ Istanbul Technical University, Graduate School, Department of Informatics, Architectural Design Computing, Istanbul, Turkey

The schematic design phase, in which the architectural form is determined, is the phase where the greatest benefits can be produced with small changes. In the schematic design stage, the structural features of the building can also be taken into account to a very limited extent as like the amount of sunlight, prevailing wind directions, topography, and the relationship with neighboring buildings. This is because the designer or engineer specialized for structural analysis is usually not involved in the schematic design phase. The structural designer begins to contribute to the design at the stage where the building form reaches a certain level of development. In this phase, where the main form of the building is determined, the structural data undertakes the task of producing solutions to realize the design, rather than being the information that feeds the design. In structural system calculations, there are many components such as soil behavior, seismic properties, strength data of materials and the purpose for which the building will be used. It is often not possible for the architect, who is already focused on the design processes, to devote time to a detailed analysis of the structural features at this level. In addition, structural analysis and calculations do not occupy a large place in the education life of the architect. Unlike traditional design processes, when a building's form is roughly revealed, adding basic structural data to the design knowledge pool will make the design unique, make the designer's decisions more accurate and the structure will guide the architectural form. It will contribute to the detailed analyzes to be made during the advanced design phase and to the compliance with the standards required by the regulations. It is also expected to be effective in the coordinated work of design stakeholders. The design tool, which allows the assignment of carrier materials and sections to structural elements, will present the weight of the structure and the regions where maximum stresses occur to the user at the schematic design stage. In this study, in the schematic design phase, with the emergence of the architectural form, a computation tool is proposed that can make structural analyzes for both parametric design and traditional design and produce results.

Received: 17.08.2021

Accepted: 23.09.2021

Corresponding Author:

ozdemirsal@itu.edu.tr

Özdemir, S. (2021). Analysis of structural system behaviors for architectural form alternatives in the schematic design. *JCoDe: Journal of Computational Design*, 2(2), 103-126.

<https://doi.org/10.53710/jcode.984086>

Keywords: Structural Analysis, Schematic Design, Karamba3D, Computation.

Şematik Tasarım Evresinde Mimari Form Alternatiflerine Yönelik Taşıyıcı Sistem Davranışlarının Analizi

Salih Özdemir¹

ORCID NO: 0000-0002-3755-7166¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim, İstanbul, Türkiye

Mimari formun belirlendiği şematik tasarım aşaması küçük değişimlerle en büyük faydaların üretilebildiği evredir. Şematik tasarım evresinde güneş ışığından faydalanma miktarı, hâkim rüzgâr yönleri, topoğrafya, çevre yapılarla kurulan ilişki ve iklim özelliklerine benzer şekilde yapının strüktürel davranışları da oldukça kısıtlı miktarda göz önüne alınabilmektedir. Bunun nedenleri, strüktürel analiz için uzmanlaşmış tasarımcı veya mühendisin ön tasarım evresinde genellikle yer almamasıdır. Strüktür tasarımcısı yapı formunun belli bir gelişmişlik düzeyine ulaştığı evrede tasarıma katkı sunmaya başlamaktadır. Yapının ana formunun belirlenmiş olduğu bu evrede strüktürel veriler tasarımı besleyen bilgi olmaktan ziyade, tasarımı gerçekleştirmek için çözümler üreten görevini üstlenmektedir. Taşıyıcı sistem hesaplamalarında zemin davranışları, sismik özellikler, malzemelerin dayanım verileri ve binanın hangi amaçla kullanılacağı gibi fazla sayıda bileşen bulunmaktadır. Yapısal özelliklerin bu düzeyde detaylı bir analizine, zaten tasarım süreçlerine yoğunlaşmış olan mimarın vakit ayırması genellikle mümkün olmamaktadır. Bu aşamada eldeki sınırlı tasarım girdileriyle yapısal davranışa yönelik veriler elde etmek, ileri tasarım aşamasında yapılacak detaylı analizlere ve yönetmeliklerin zorunlu tuttuğu standartlara uyulmasına katkı verecektir. Yapısal elemanlara taşıyıcı malzeme ve kesit atamasına izin veren öneri tasarım aracı, yapının ağırlığını ve maksimum gerilmelerin olduğu bölgeleri ön tasarım aşamasında kullanıcıya sunacaktır. Bu çalışmada şematik tasarım aşamasında, mimari formun ortaya çıkmaya başlamasıyla beraber hem parametrik tasarıma hem de geleneksel tasarıma yönelik strüktürel analizler yapıp sonuçlar üretebilecek hesap aracı önerilmekte ve üretilen modeller üzerinden sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Çalışmayla önerilen yöntem, Grasshopper eklentilerinin sunduğu imkanları bir araya getirmektedir.

Teslim Tarihi: 17.08.2021

Kabul Tarihi: 23.09.2021

Sorumlu Yazar:

ozdemirsal@itu.edu.tr

Özdemir, S. (2021). Şematik tasarım evresinde mimari form alternatiflerine yönelik taşıyıcı sistem davranışlarının analizi. JCoDe: Journal of Computational Design, 2(2), 103-126.

<https://doi.org/10.53710/jcode.984086>

Anahtar Kelimeler: Yapısal Analiz, Şematik Tasarım, Karamba3D, Hesaplama.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir yapının tasarımında biçimi etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Rüzgar yükleri, güneş enerjisi, sismik koşullar, toprak yapısı ve bulunduğu topoğrafya gibi sıralanabilecek çok sayıda değişken tasarlanan yapının ana sınır ve koşullarını oluşturmaktadır. Bu koşullardan günümüzde sıkça değerlendirmeye alınan ve önemli olarak görülen kriter sürdürülebilirliktir (Jalali, Noorzai and Heidari, 2020). Çok işlevli, serbest biçime sahip ve sürdürülebilir yapıların başarıları son yıllarda popülerlik kazanmıştır (Hu et al., 2020). Ancak yapısal ve taşıyıcı özelliklerin çalışmalarda daha fazla yer tutması sürdürülebilirlik anlamında da oldukça katkı sağlayacaktır.

Estetik formaların teknolojik imkanlarla birlikte kullanıldığı Pudong Havalimanı (kiriş yapılı), Londra Olimpiyat Stadyumu (kablo sistem), Fuji Grup Pavyonu (membran yapı) gibi geniş açıklıklı yapılar üst düzey mekanik ve yapısal özelliklere sahiptir (Hu et al., 2020). Tasarım olarak ön plana çıkan bu yapılarda yapısal sistem anlamında daha nitelikli ve yenilikçi çözümlere başvurulmaktadır. Özellikle gergi sistemlerde yapısal tasarım üzerine çalışmalar nispeten daha yenidir ve geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır (Subhrajit and Siddhartha, 2019).

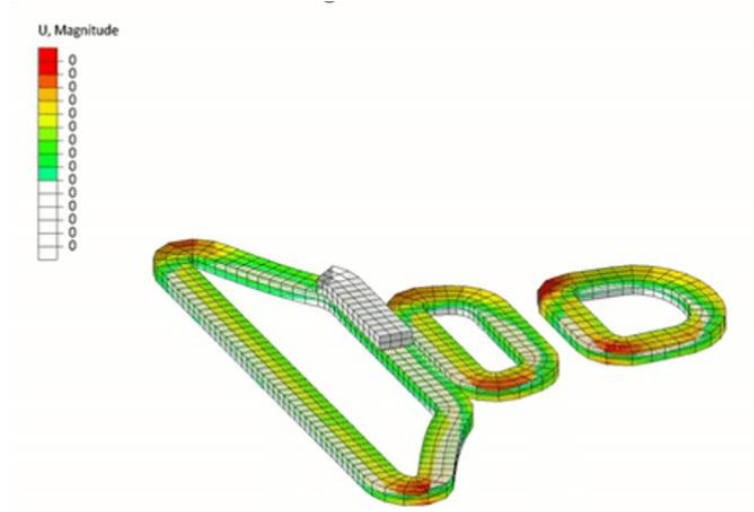
Ön tasarım aşamasında yapısal analizle mimari tasarım için veri üretilmesi konusu belirlenene kadar literatür araştırması yapılmış, üretilmiş bilgilere ek neler yapılabilir, hangi aşamalarda literatür boşlukları var tespit edilmeye çalışılmıştır. Makalede, çalışmaların başladığı ilk süreç, “Öncül Araştırmalar” başlığı altında tartışılmıştır. Ardından, konu kapsamı daraltılarak “İlerlemiş Çalışmalar” evresine geçilmiştir. Son olarak analizler amaçların ve hedeflerin netleştiği “Geliştirilmiş Modeller” bölümünde irdelenmiştir. “Geliştirilmiş Modeller” bölümünde strüktürel analizlerin farklı mimari formlarda benzer bir dille tasarım sürecine bilgi aktarabilmesine yönelik çeşitli modeller ortaya koyulmuştur.

2. UYGULANABİLİR MODEL ANALİZLERİ VE YÖNTEM ÜRETİLMESİ (APPLICABLE MODEL ANALYSIS AND METHOD GENERATION)

2.1 Öncül Araştırmalar (Preliminary Research)

Projeye başlangıç evresinde şematik tasarımdan üretime hızlı geçiş imkanını sağlayabilecek yöntemlerin araştırılması üzerine olmuştur. Tasarımın uygulamaya ara basamaklar olmadan hızlıca dönüştüğü bir yöntem, aynı zamanda şematik tasarım evresindeki yapının uygulanabilirliğinin arttırılmasının da önünü açacaktır. Bu aşamada tasarımcıdan ürüne geçişte ara basamak sayısının en az olduğu 3D baskı yöntemi ele alınmıştır. 3B baskı ile oluşturulacak bir modelin fiziksel davranışının nasıl olacağı üzerine yapılan arayışlarda Concrete3DLab isimli Grasshopper eklentisi ele alınmıştır. Yapı ölçeğinde baskı üzerine düşünüldüğünde çimento esaslı malzemeler ön plana çıkmaktadır. Ancak çimento esaslı malzemeyle baskı işlemi, güncel 3B baskı metodlarından ayrılmakta yeni bazı parçalar, eklentiler ve yazılımlara ihtiyaç duymaktadır. Ölçeğin büyümesi, yapı elemanlarının birlikte çalışması amacıyla hepsinin ayrı ayrı modellenmesini de gerektirebilmektedir. Gelişen teknolojinin çok sayıda parçanın özelleştirilmesine imkan sağlaması otomasyon, verimlilik ve tasarım özgünlüğü üzerine büyük potansiyel yaratmaktadır (Crolla et al., 2017). Bu imkân sayesinde büyük bir formu üretebilmemiz için küçük alt yapı elemanlarına bölümlendirerek her parça için 3B yazıcı kullanarak üretim tamamlanabilecektir.

Rhino-Grasshopper'da üç boyutlu üretilmiş bir modelin vokseleştirilmesi sonrasında sonlu elemanlar teorisiyle 3B beton baskı süreçlerinin simülasyonunu oluşturmaktadır (Vantighem, Ooms & De Corte, 2021). İki boyutta piksel olarak tanımlanan noktalar üç boyutlu uzayda vokselleştirilmiştir. Bu sayede üç boyutlu bir modelin nokta verileri haline getirilmesine imkân sağlanır. **Şekil 1**'de Grasshopper eklentisi olan Concrete3dLab ile simüle edilmiş beton baskı görülmektedir.

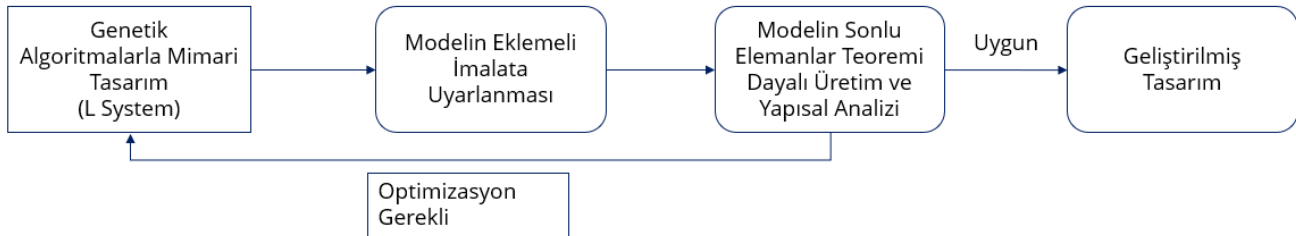


Şekil 1 : Concrete3DLab eklentisinde baskı aşamasının simülasyon örneği (Simulation example of printing phase in Concrete3DLab plugin) (Vantghem and Ooms, n.d.).

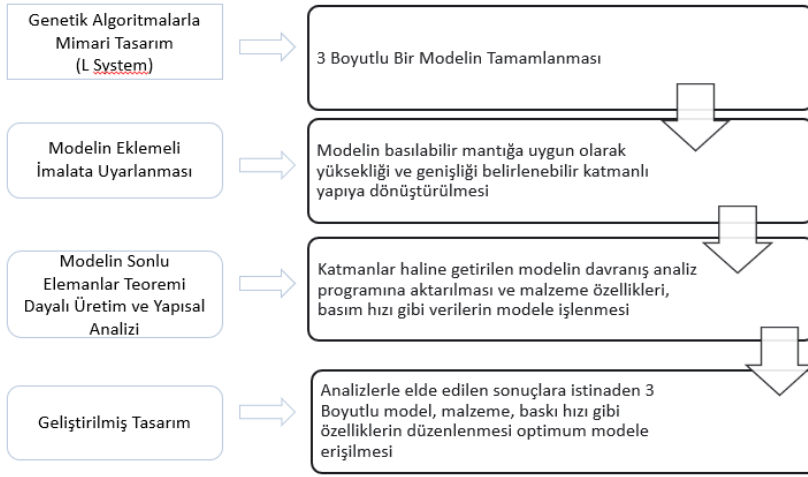
Concrete3DLab eklentisi robotik imalatla yapı üretimini esas almaktadır. Uygulama metodu çimento esaslı malzeme basımı olarak belirlenen ilk aşamaya yönelik tasarım sürecinin teorik altyapısı kurulmuştur. Tasarım aşamasında hem yaratıcı tasarıma imkân veren hem de yapısal analizleri tasarımın ilk aşamalarına entegre eden bir iş akışı oluşturmak hedeflenmiştir. Hem tasarım aşamasının hem de üretim aşamasının olabildiğince bilgisayar destekli hale getirilmesi kurgulanan modelin gelişmesine olanak sağlayacaktır. Bu nedenle modelleme aşamasında genetik algoritmalar uygulama aşamasında ise robotik imalat yöntemleri seçilmiştir.

Şekil 2 : Genetik algoritmayla üretilen modelin üretim ve yapısal analiz akış diyagramı (Production and structural analysis flow diagram of the model produced by genetic algorithm).

Şekil 2’de genetik algoritmalarla üretilmiş bir modelin 3B Baskı simülasyonunun oluşturulması için temel düzeyde bir akış diyagramı üretilmiş, bu sistem çalışır hale getirilirse ön tasarım aşamasının da yeniden organize edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2’de önerilen akış diyagramının çalışma prensipleri hangi aşamada hangi işlerin tamamlanacağına yönelik bilgiler Şekil 3’de tanımlanmıştır.



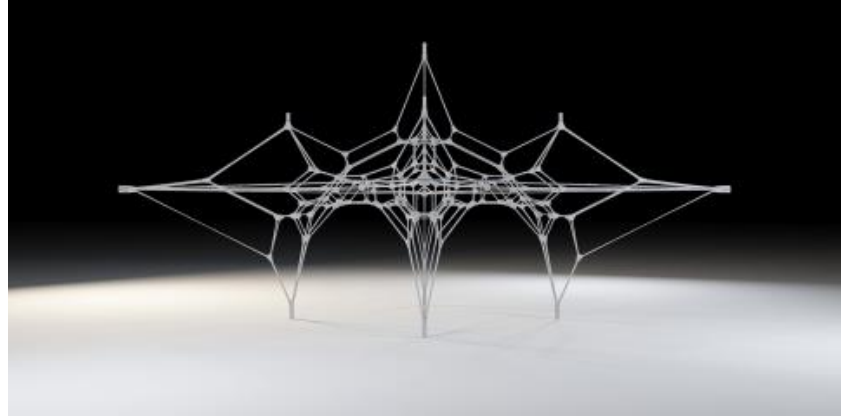
Şekil 3 : Yapısal akış diyagramı uygulama aşamaları (Structural flowchart application stages).

Öncül araştırmalar evresinin ilk aşamasında genetik algoritmalarla parametrik olarak üretilen modelin yapısal ve imalat aşaması davranışlarının hesaplandığı simülasyonların oluşturulması hedeflenmiştir. Takip eden süreçte 3B Beton baskı yöntemiyle kurulan bu sistem işler hale geldiğinde mimari form üzerinde nasıl farklılaşmalar üretilebilir sorusu ortaya çıkmıştır. Özellikle 3B Baskı yönteminin sağladığı imkanlar geleneksel inşaat yapım yöntemleriyle çok zor üretilecek bazı formların kolaylıkla üretilmesine imkân sağlayacaktır. 3B baskı ile inşaat süreçlerini hızlandırılabilir, doğruluğu daha yüksek imalat yapılabilir, iş güvenliği artırılabilir ve mimari form için daha fazla özgürlük sağlanabilecektir (Buchanan and Gardner, 2019). Mimari formun özgürleşmesi ve üretimde hassasiyetin artması tasarım açısından yeni bakış açılarının da üretilmesine ve yapısal analizlerin şematik tasarım aşamasında ciddi şekilde ele alınmasına olanak sağlayacaktır.

Öncül araştırma evresi sonucunda Concrete3D Lab Grasshopper eklentisiyle çalışılarak sunduğu analiz yöntemleri araştırılmıştır. Öneri modele yapacağı katkılar incelenerek bir kullanım yöntemi geliştirilmiş, akış diyagramı ortaya konulmuştur. Ancak katmanlı üretimde her katman arası oluşan kuvvetlerin belirlenememesi, hesaplamalara yönelik fiziksel deneylere dayanan yeterli genel geçer kabul görmüş verilerin olmaması oluşturulan bu yöntemi bu çalışma kapsamında kullanışsız hale getirmiştir. 3B baskı yöntemini temel alıp bunun üzerine kurulan modellerin analizini, fiziki deneyler olmadan yapabilmek için bir

çok öngörünün modele eklenmesi gerektiği ve sonuçların düşük hassasiyetli olacağı görülmüştür.

Genetik algoritma ve 3B beton baskı yönteminde eksik kalının kısımların tamamlanması ve alternatif bir yöntem bulunmasına yönelik araştırmalar sonucu Tasarım Alan Keşfi (Design Space Exploration) yöntemi incelenmiştir. Tasarım Alan Keşfi (Design Space Exploration), tasarımda belirlenen parametreler çerçevesinde ihtiyaç duyulmayan veya istenmeyen bölgelerin ürünün içinden çıkartılmasına olanak tanınmaktadır. Tasarım Alan Keşfi (TAK) yaklaşımını temel alan Grasshopper eklentisi “3D Graphic Statics” alışılmış tasarım yaklaşımlarından ayrılmaktadır.



Şekil 4: 3D Graphic Statics’le üretilen tasarım örneği
(Example of design produced with 3D Graphic Statics) (Graovac, n.d.).

TAK yaklaşımıyla modelleme imkanlarının araştırılarak 3D Graphic Statics Grasshopper eklentisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. 3B Baskı yönteminin mimari forma etkisinin sorgulanmasıyla başlayan öncül araştırmalar, baskı sürecinde ortaya çıkan kuvvetler ve davranışların hesaplanmasına evrilmiştir. Bu aşamada görselleştirme için Grasshopper ve Abaqus programları kullanılmıştır. Ancak yine yapısal ölçekte üretimde 3B baskıda kullanılacak malzemelerin davranışı, katmanlar arası birleşim özellikleri, baskı öncesi ve sonrası düşey ve yanal kuvvetlere kaşı dayanımı gibi özelliklere yönelik bilinmezlikler daha geleneksel yöntemlerin kullanılması gerektiğini göstermiştir. Teorik altyapısı genel geçer kabul görmüş yapısal hesaplama yöntemleri, ön tasarım aşamasında yapısal özelliklerin araştırılmasında daha güvenli sonuçların ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Bu seçim tasarım özgürlüğü anlamında 3B baskı yöntemlerine göre kısıtlar

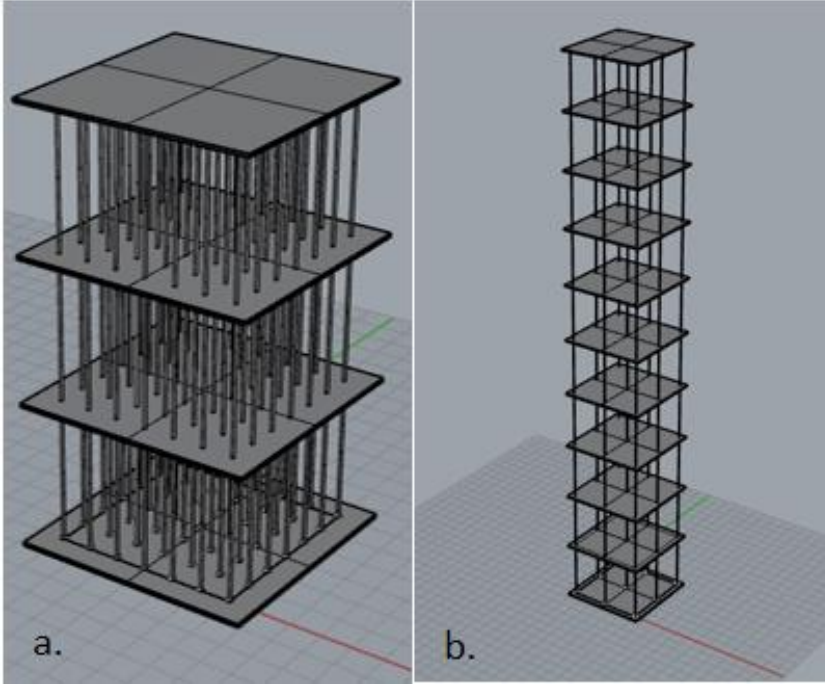
getirecek olsa da daha güvenilir yapısal hesaplama sonuçlarının ortaya çıkmasına olanak sağlayacaktır.

Yapısal analizler için yapı üzerinde oluşan değişimlerin gösterilmesi ve mimari form arayışıyla entegre olunması amacıyla Grasshopper'ın Karamba3D ve Kangaroo eklentilerinin ileriki aşamalarda kullanımına, 3B baskı yönteminden geleneksel üretimin kabul ettiği yöntem ve hesaplamalara geçişe karar verilmiştir.

2.2 İlerlemiş Çalışmalar (Further Studies)

Öneri modelin geliştirilmesine yönelik çalışmalarda şimdiye kadar ortaya koyulan çalışmalar ve öneriler yapısal analiz modelinin şekillenmesinde altlık oluşturacaktır. Farklı 3B modellerin taşıyıcı sistem alternatiflerinin belirli bir düşünce sistematığıyla geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır.

Öncelikle parametrik olarak taşıyıcı sistemi belirlenebilecek bir model oluşturulmak istenmiştir. Yükseklik ve kat sayısı değişimiyle ortaya çıkan modeller Şekil 5'de görüldüğü gibi en temel seviyede oluşturulmuştur.



Şekil 5: a. Az katlı ve sık taşıyıcı bina. b. Çok katlı ve seyrek taşıyıcı bina. (a. Building with low floors and frequent carriers b. Multi-storey and sparse load-bearing building).

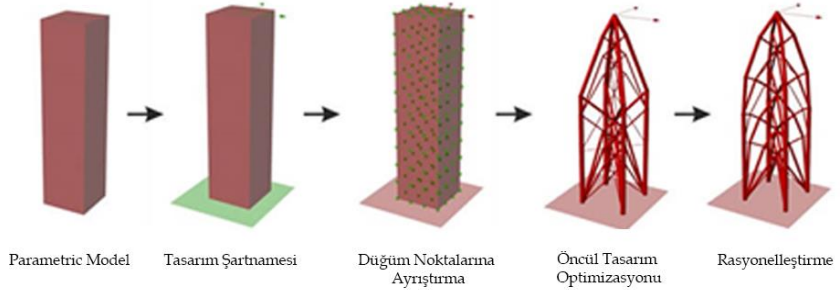
Model yükseklik, kolon büyüklüğü, döşemenin ayrıştırılacağı grid sayısı, kat sayısı ve konsol mesafesinin parametrik olarak belirlenebilmesine olanak tanımaktadır. Bu aşamada yapısal analiz kısmına geçilmemiştir.

Üretilen mimari formların özgünlük değerinin zayıf kalması öneri sistemin geliştirilmesine ihtiyaç olduğunu göstermiştir.

Bu aşamada yüksek katlı bir binada hem form kaygısının ön planda olduğu hem de taşıyıcı optimizasyonuna imkân tanınan model kurma çalışmasına geçilmiştir. Parametrik olarak kurgulanan ve değişkenleri kat yüksekliği, kolon büyüklüğü, grid sayısı gibi formdan bağımsız değişkenlere dayanan bir sistem yerine mimari formun da işin içinde olduğu bir Grasshopper kodu oluşturulmak istenmiştir.

Grasshopper eklentisi olan Peregrine bu taleplere çözüm üretme alternatifleri sunmaktadır. Peregrine görsel programlama dili ve ortamı olan Grasshopper için bir sınır koşullu biçim destekli optimizasyon eklentisidir (Peregrine | Parametric House, n.d.). **Şekil 6'**da Peregrine ile optimize edilmiş bir yapı örneği bulunmaktadır. Güçlü düzenleme ve rasyonelleştirme imkanlarıyla Grasshopper' da hızlıca model tanımlama ve optimize etmeye imkân verir.

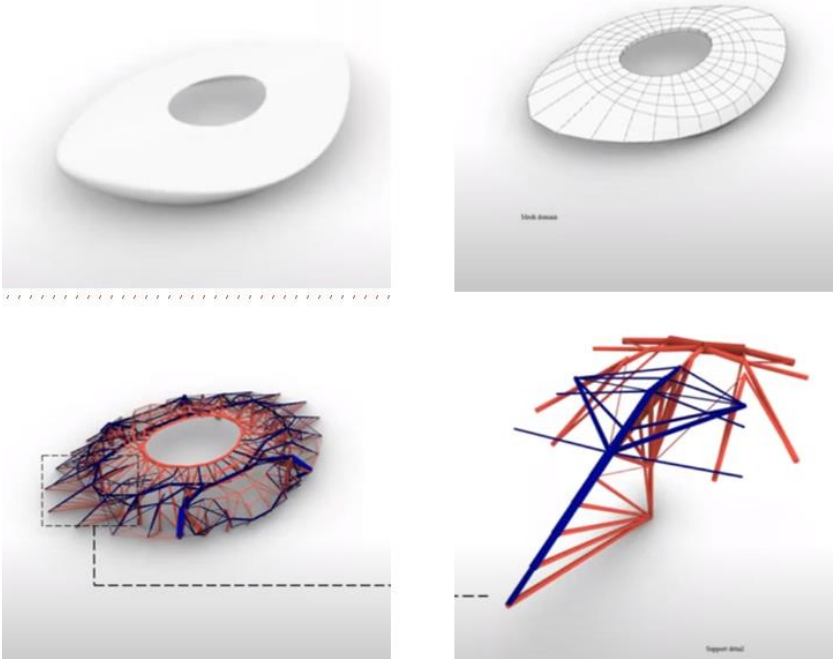
Şekil 6: Peregrine eklentisinde örnek bina optimizasyonu (Example building optimization in the Peregrine plugin) (Peregrine | Parametric House, n.d.).



Yapısal özelliklerle mimari formun ortak çalışması üzerine ortaya koyulacak gelişmelerde Peregrine eklentisinin çok güçlü imkanları olsa da form oluşum evresinde bir girdi sağlama konusunda yeterli imkanı oluşturamamıştır. Bu nedenle yapısal olarak temel yaklaşımı daha farklı olan yapılara yönelme ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

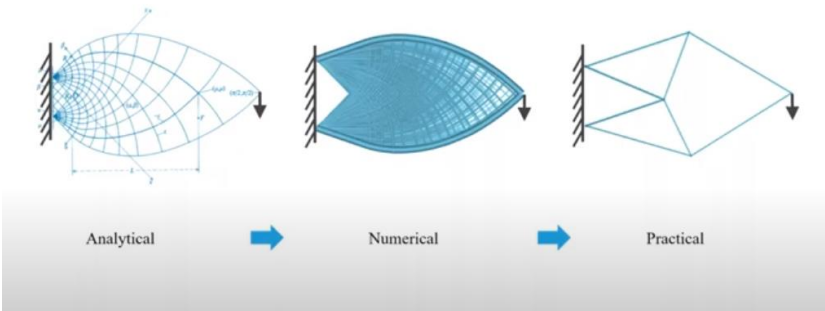
Dünyanın önde gelen statik tasarımcılarından ARUP ekiplerince yapılan bir çalışmada, bir stadyumun tasarımının çatısının taşınması için parametrik yöntemler kullanılmıştır. Stadyumun taşıyıcı sistemi için de tek tip bir yapısal elemana indirgeme çalışması yapılmıştır. Dairesel sistemli bir çatı için üretilen ana taşıyıcı parçası **Şekil 7'**de görülmektedir. Şematik bir tasarımdan yapısal bir çözüme gitme süreci için bu

çalışmanın yaklaşımı benimsenmiş, kurulacak modelin sayısal analizi sürecinde **Şekil 7**'de görülen yalınlaştırma tekniği kullanılacaktır.



Şekil 7: Stadyum çatısı taşıyıcı sistem tasarımı (Stadium roof structural system design) (Gilbert et al., 2020).

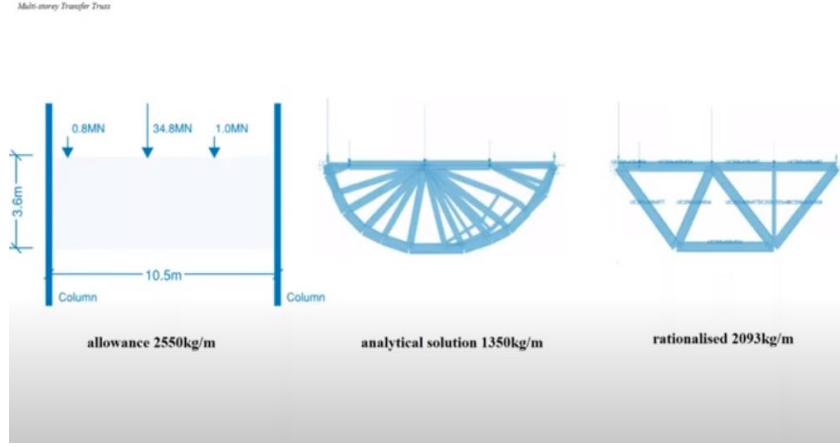
Bağlantı noktası yerçekimi yönünde olmayan ve konsol mantığında çalışan bir sistemin hesaplamaları, analitik olarak çözülmesi ve son olarak gerçek hayatta kullanılabilir pratik model özelliği kazanması belirli optimizasyonlar sonrasında olmaktadır. Tasarıma uygun temel bir fizik kuralının belirlenerek çözüm arayışına gitmek optimum çözümü elde etme yolunda iyi bir adım olacaktır. **Şekil 8**'de 2 farklı noktadan mesnetlenmiş, yer çekimi doğrultusunda kuvvete maruz bırakılan cismin analitik modeli, numerik modeli ve pratik çözümü gösterilmektedir.



Şekil 8: Bir modele ait analitik, numerik ve pratik görseller (Analytical, numerical and practical visuals of a model) (Gilbert et al., 2020).

Buradaki yaklaşımla stadyumun çatısı için çözüm getirilebileceği gibi birçok farklı sisteme de temel dayanak noktası kurgulanabilir. Şekil 9'da görülen bir statik problemde sistemin optimizasyonu ile yük taşıma kapasitesinde sağlanan artış net olarak görülebilir.

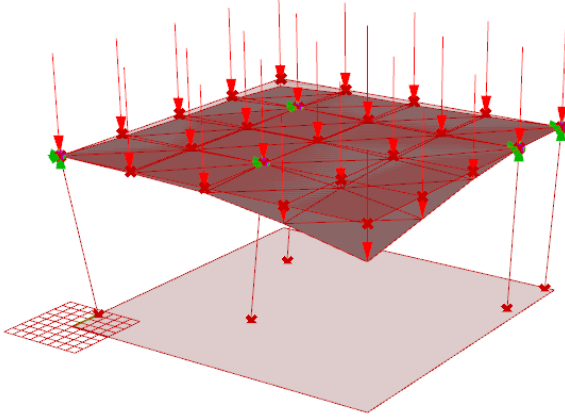
Şekil 9: Belirli yük altında analitik çözüm ve rasyonelleştirilmiş çözümle elde edilen yük taşıma kapasiteleri (Load bearing capacities obtained with analytical solution and rationalized solution under certain load) (Gilbert et al., 2020)



Bu örnek analiziyle modelleme için temeli fiziksel bir kurala dayanan yaklaşımının hedeflenmesine karar verilmiştir. İlerletilmiş çalışmalar evresinde öncelikle bir eklenti kullanmadan daha binanın statik özelliklerine yönelik model çalışması yapılmıştır. Sonra PEREGRINE'nin sağladığı optimizasyon imkanları incelenmiştir. Çalışmanın bina ölçeğinde mi yoksa yapısal bir eleman (kolon, kiriş v.b) ölçeğinde mi ilerleyeceği üzerine çalışılmıştır. Yapısal bir birleşen detayından öte yapı boyutunda ve mümkünse bir alanı örtecek tasarımlar üzerine çalışmalar yapma kararı alınmıştır. Tek çatı altında bir alan tasarımı için kısıtları anlayabilmek ve doğru bir yöntem önerebilmek adına geçerli fiziksel kurallar üzerine araştırma yapılmıştır. Çok eski bir yöntem olan aynı zamanda büyük verimlilik sağlayan kemer sistemi bu noktada ön plana çıkmıştır. Bu yöntem malzeme kesitinin alt kısmında oluşan çekme kuvvetinin azaltılması prensibini kullanmaktadır. Taş ve beton gibi malzemeler çekme kuvvetine karşı oldukça dayanıksızdır. Bu sebeple ya çekme kapasiteleri arttırılmalı ya da üzerlerine çekme kuvveti etki ettirilmemelidir. Kemer sisteminde yapısal elemana etkiyen yük dağılım grafiklerinin tam tersine yönde biçimsel oluşum kurgulanmaktadır. Bu yöntem çalışmada hedeflenen amacın ilk örneklerinden biri olarak değerlendirilebilir.

2.3 Geliştirilmiş Modeller (Developed Models)

Geliştirilmiş model çalışmalarına çatı kısmı örtü olan ve kolonlarla taşınan bir sistemin model çalışmalarıyla başlanmıştır. Çatı örtüsünün form değişimiyle kolonların optimum lokasyonlara yerleşimini hedefleyen Grasshopper kodunda Biomorpher genetik algoritmasından yararlanılmıştır.



Şekil 10: Grasshopper ile oluşturulan çatı örtüsü taşıyıcı elemanlar ve kuvvetler (Roof cover structural elements and forces created with Grasshopper).

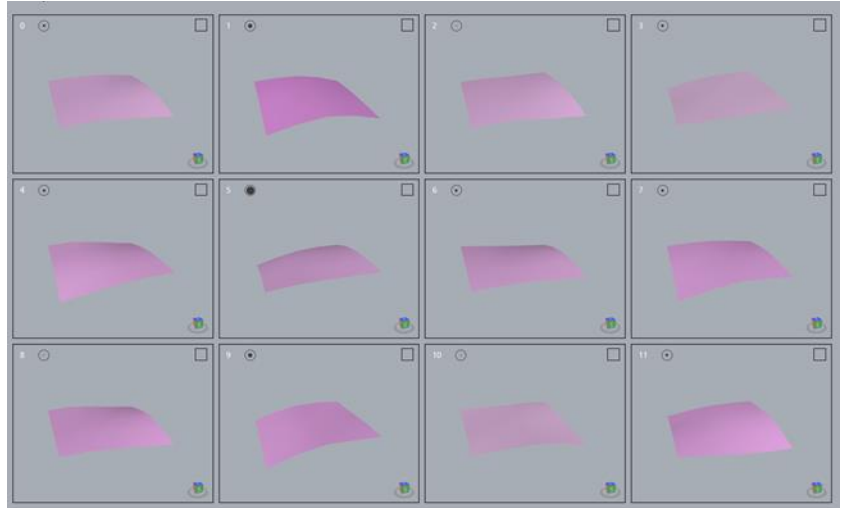
Şekil 10'da gösterilen model temel olarak zemin bağlantısından çatıya kadar taşıyıcı kolonları ve çatıda çok eğrilikli yüzeyi içermektedir. Model içerisinde yer alan Biomorpher koduyla Şekil 11'de görüldüğü gibi birçok alternatif çatı örtüsü elde edilebilmektedir. Bu örtülerden hangisi daha uygun karar verebilmek adına bazı uygunluk koşulları belirlenmiştir. Çatı örtüsünün yüzey alanı ve toplam kolon boylarının uzunlukları üzerine belirlenen uygunluk koşulları üretilen modellerin içerisinde elemeler yapılmasına imkân tanımıştır.

Burada oluşturulan çatı örtülerinin bütüncül bir tasarımın çok uzağında kalması ve uzayda tanımsız yüzeylere dönüşmesi sebebiyle modelin kapladığı hacmi daha tanımlı yapabildiği ve mimari biçimle daha ilişkili çıktılar üretebildiği bir seviyeye gelmesi gerektiği düşünülerek çalışma geliştirilmeye devam edilmiştir.

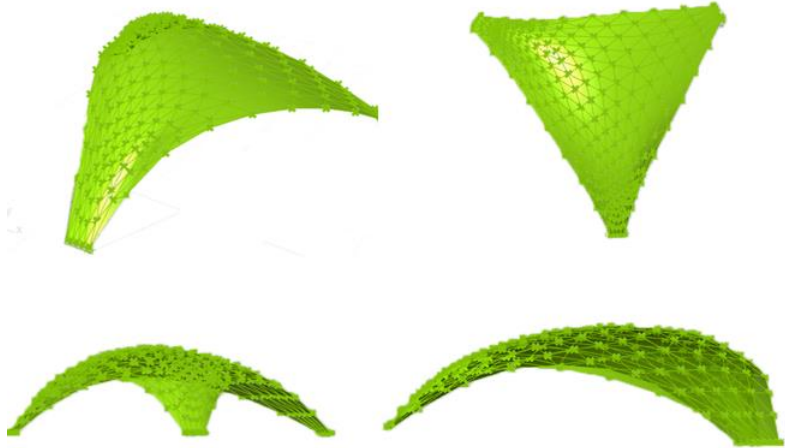
Belli bir hacmi tanımlayan kabuk bir yapı arayışının başladığı bu evrede üzerine çalışılmış birçok pavyon projesi incelenmiştir. Başlangıç modeli olarak 2020 yılında Norrköping, İsveç'te yapımı tamamlanan Portalen Pavilion'undan esinlenilerek modelleme yapılmıştır. Şekil 12'de görülen model zemine üç noktadan bağlanmıştır. Pavyonun formu üzerine etkili kuvvetlerle ilişkilidir. Kuvvet miktarı arttıkça pavyonun eğriliği ve dolayısıyla yüksekliği artmaktadır. Bunun sebebi makalede ifade

edilen çekme kuvvetlerinin minimumda oluşmasını sağlamaktır. Modelin yüzeyi üçgen mesh sistemle oluşturulmuştur. Böylece sonlu elemanlar yöntemleriyle modele etkiyen yükler hesaplanabilecektir.

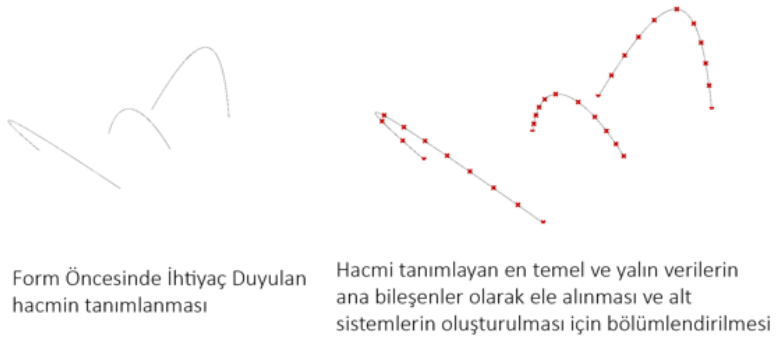
Şekil 11: Biomorpher ile elde edilen çatı örtüsü alternatifleri (Roofing alternatives obtained with Biomorpher).



Şekil 12 : Üç noktadan zemine mesnetlenen pavyon tasarımı (Three-point pavilion design).

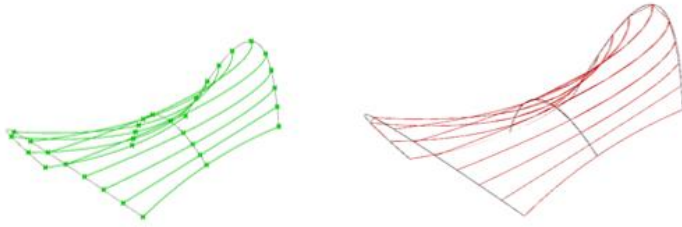


Şekil 13: Modelin oluşması için seçilen üç kesit ve bu kesitlerin tasarımcı tarafından belirlenen eş parçalara bölünmesi (Three sections selected for the formation of the model and the division of these sections into equal parts determined by the designer).



Grasshopper'da hazırlanan bu kod için mimari esneklik ve form arayışı sınırlı kalmıştır. Tasarımcıya sadece zemin bağlantısı kurulacak noktaların yeri ve sayısını belirleme imkânı tanınabilmektedir. Aslında bu seviyede bir analiz kötü değildir ancak istenen bir modelin strüktürel analizine olanak vermediği için geliştirmeye yönelik çalışmalara devam edilmiştir.

Şekil 12'de görülen modelle istenilen analizlerin elde edilmesi yolunda sağlanan gelişmeler bundan sonraki Grasshopper çalışmalarına kaynaklık etmiştir. Bir sonraki çalışma yarım daire kesitinde birden fazla parçanın birleştirilerek hacim üretilmesine odaklanmaktadır. **Şekil 13'**de ön tasarım aşamasında bulunan mimari formdan alınmış üç kesit bulunmaktadır. Daha sonra bu kesitler eş parçalara bölümlendirilmektedir. Bu sayede formu oluşturacak kirişlerin lokasyonları belli olacak ve kabuk örtüsü için öneri form oluşturulacaktır.



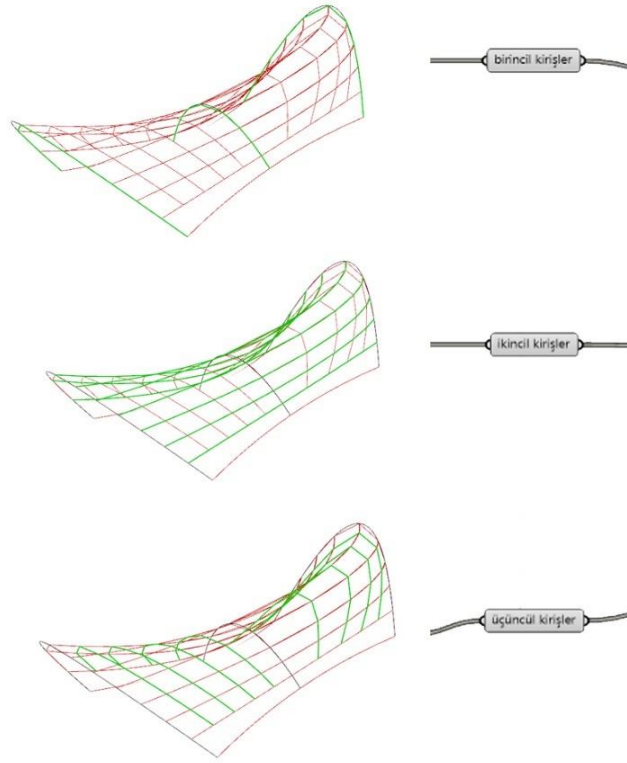
Bölmelere ayrılmış yapının ara taşıyıcı sisteminin kurgulanması

Farklı yönde bileşenlerin farklı bilgileri taşınması
Ana taşıyıcı / Ara Taşıyıcılar

Şekil 14: Kirişler (Beams).

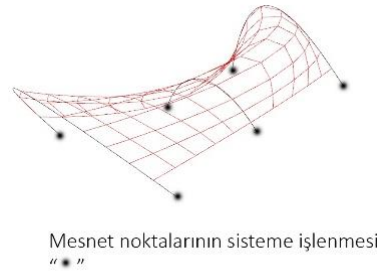
Kesitler üzerinde belirlenen bölümlere istinaden oluşan kirişler **Şekil 14'**te görülmektedir. Mimari modelden alınan herhangi ilk üç kesit bu sistemde ana taşıyıcı olarak ele alınacaktır. Sistemde yer alan kirişlerin öncelik sırası **Şekil 15'**de görüldüğü gibidir. **Şekil 15'**de her kademe görülen yeşil çizgiler belirtilen seviye kirişleri ifade etmektedir.

Şekil 15: Taşıyıcı elemanların sistemdeki görev sıralaması (Task order of structural elements in the system).



Modelin zemin ile kurduğu ilişkiler de ilk olarak belirlenen kesitler üzerinden olacaktır. Diğer bir ifadeyle ilk alınan kesitler mimari formun oluşturulma sürecinde de oldukça etkilidir. Bunlar **Şekil 16**'da görüldüğü gibi ana taşıyıcı görevini üstlenir yapıya etkiyen yükün toprağa aktarılmasını sağlamaktadır.

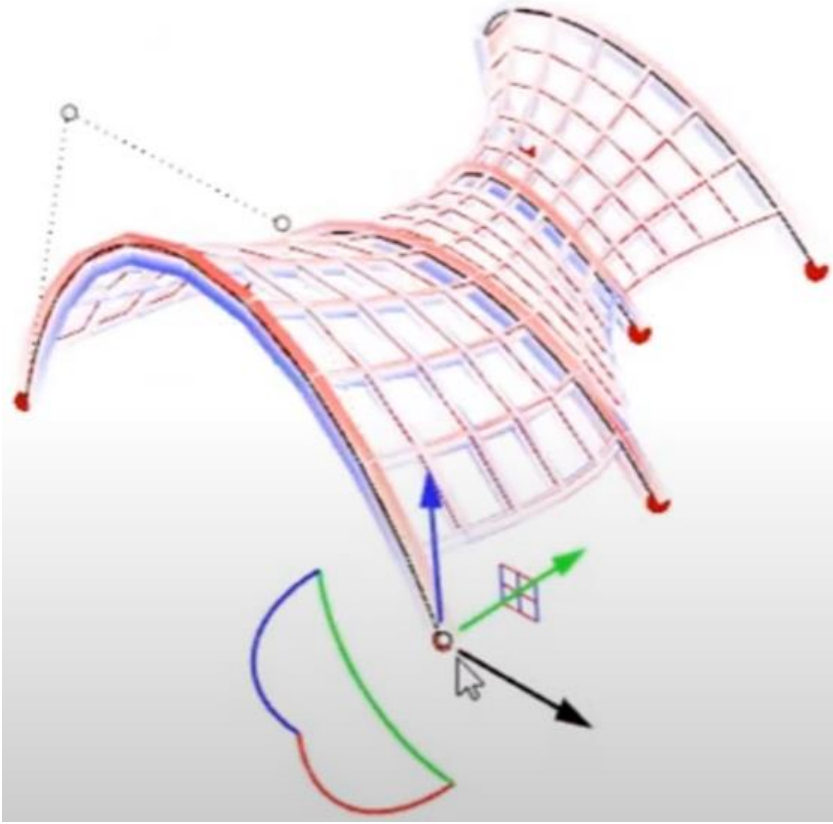
Şekil 16: Modelin zemin ile bağlantı kurduğu noktalar (The points where the model connects with the ground).



Modelin kurgulanması ve sistem analizleri aşamalarında Karamba3D isimli Grasshopper eklentisi kullanılmıştır. Bu sayede oldukça gelişmiş

bir eklenti üzerinden gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmekte ve analizler yapılmaktadır.

Şekil 17'de şimdiye kadar anlatılan modelin analiz sonuçlarıyla elde edilen görsel bulunmaktadır. Bu görselde ana taşıyıcı olarak görev yapan dört adet kesit bulunmaktadır. Dört kesitin bulunma sebebi Grasshopper kodunun istenilen kadar kesit eklemeye imkan tanınması bu sayede ön tasarım aşamasında yer alan taslak çizimlere en yakın formun strüktürel analizinin yapılması istenmesidir.

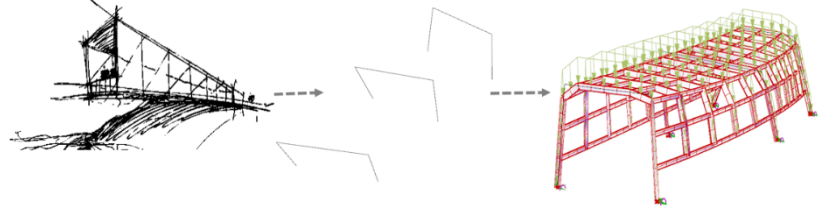


Şekil 17: Analiz sonuç verilerine göre görselleştirilmiş model
(Analysis results of the visualized model)

Ön tasarım evresinde üretilmiş bir eskizin mimari formu oluşturacak önemli noktalarından kesitler alındığında Grasshopper kodu için gerekli olan veri de hazırlanmış olacaktır. Söz konusu kesitler ilk aşamada Rhino'da çizilerek Grasshopper kodundaki Geometri'ye tanıtılmaktadır. **Şekil 18**'de tasarım sistematığı anlatılan kodun uygulandığı bir eskiz çalışması ve ortaya çıkan model görülmektedir. Eskizden ana formu tanımlayan kesitler alınmıştır. Formun ortaya çıkması için Rhino'da bu 3 kesit çizilmiştir. Grasshopper kodu, bu kesitleri, binanın zemine bağlantı kurduğu mesnet noktaları olarak ele almaktadır. Mesnet noktaları

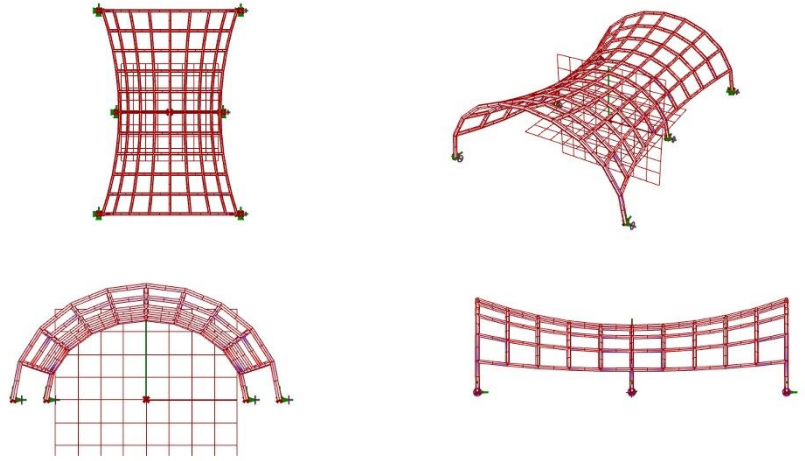
arasında bağlantı elemanları atayarak sistemin strüktürel olarak çalışır hale gelmesine imkân vermektedir. Modeli renklendirerek gerilmenin fazla olduğu noktaları göstermekte ve tasarımcıya binada yapısal anlamda sorun olabilecek noktaları işaret etmektedir. Modele yük etkitmek de mümkündür. Bu sayede farklı sismik etki altındaki bölgeler için farklı yük verileri oluşturulabilir.

Şekil 18: Şematik bir çizimin strüktürel analiz aşamasına geçişi (Transition of a schematic drawing to the structural analysis stage).



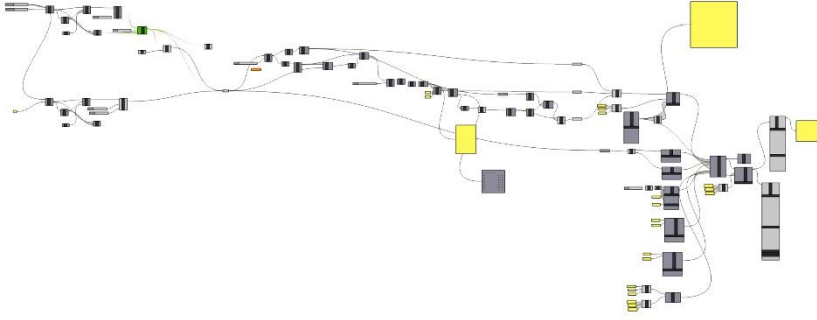
Şekil 18’de eskiz üzerinden alınan kesitleri Rhino’ya çizilerek modele tanıtılması süreci işletilmiştir. Bu yöntem geliştirilerek modelin parametrik hale getirilmesi de sağlanmıştır. Böylece yüksekliği, kesit sayısı, kesitler arası uzaklık, kesit formu verileri parametrik olarak değiştirilebilecek ve anlık olarak strüktürel davranışa yönelik veriler elde edilebilecektir. Şekil 19’da parametrik olarak üretilmiş bir modele ait strüktürel davranış görseli bulunmaktadır.

Şekil 19: Parametrik modelin strüktürel analizi (Structural analysis of the parametric model).



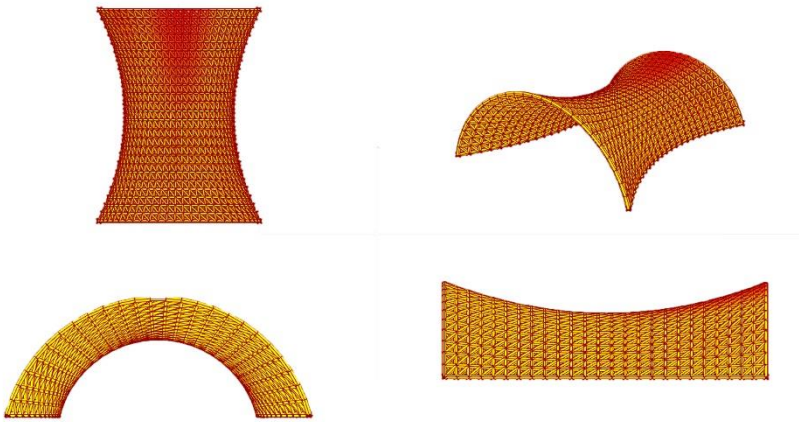
Parametrik yöntemle oluşturulan modelin Grasshopper kodu Şekil 20’de gösterilmektedir. Kod ile istenirse parametrelerle mimari form

üretilecek strüktürel davranışlar görülebilir, istenirse bir eskiz çalışmasından alınan kesitler Rhino'da çizilerek koda tanımlanabilir.



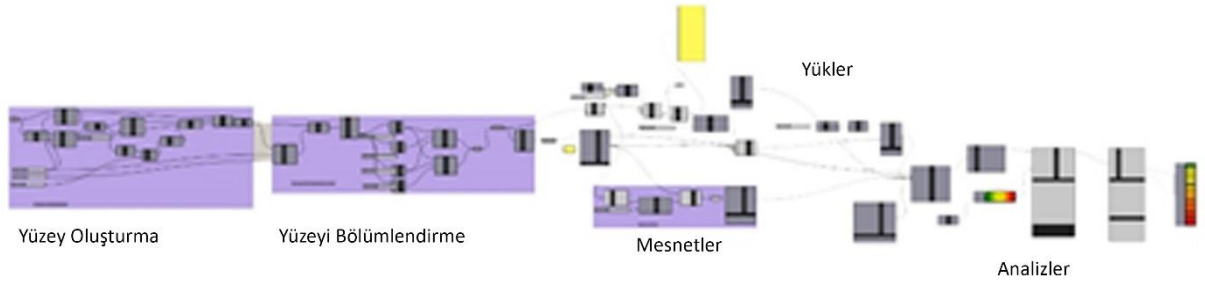
Şekil 20: Oluşturulan Grasshopper kodu (Generated Grasshopper code).

Şekil 19 'de görülen parametrik modelde kafes sistemlerin genelinde kullanılan üçgen mesh sistem yoktur. Ayrıca zemine bağlantısı da sadece üç kesit üzerinden yapılmaktadır. Özellikle biçimsel kaygılar ön planda tutularak en genel geçer kabul gören çözümlere gidilmemiştir. Ancak halihazırda strüktürel uygulamalarla aynı modelleme yapılsaydı model nasıl olurdu elde edilen sonuçlardaki farklılık ne kadar olur sorularına cevaplar bulabilmek için Şekil 21'de modeli görülen Grasshopper kodu üretilmiştir. Bu modelde birçok noktadan zemine bağlantı bulunmaktadır. Model kesitler üzerindeki bölümlendirme sayısını kendi yapmakta ve mesh sistemini üçgen formu üzerine kurulumaktadır.



Şekil 21: Strüktürel yaklaşım ön plana alınarak üretilen model (The model produced by taking the structural approach to the forefront).

Şekil 22: Strüktürel yaklaşım ön plana alınarak üretilen modelin Grasshopper kodu (Grasshopper code of the model produced by taking the structural approach to the forefront).



3. TARTIŞMALAR VE SONUÇLAR (DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS)

Şematik tasarım aşamasında bir binanın strüktürel davranışının gösterilmesi amaçlayan bu çalışma çeşitli yöntem arayışlarıyla başlamıştır. Başlangıç aşamasında yeni ve tasarımdan uygulamaya geçişi çok daha hızlı olan 3B baskı metoduna yönelik olarak model geliştirilmekte istenmiştir. Ancak özellikle malzeme bazlı veriler, yapının bütüncül davranışının tespit edilememesi, baskı katmalarının dayanımları gibi temel verilerde genel geçer kabul görmüş standartların olmaması sebebiyle 3B baskıyla üretime yönelik yapısal analizlerle çalışma ilerletilmemiştir. 3B baskı yöntemiyle üretilecek yapıların şematik tasarım aşamasındaki strüktürel davranışı gelecek çalışmalar için oldukça önemli görülmektedir.

3B baskı yöntemindeki veri eksikliği nedeniyle ele alınan Tasarım Alan Keşfi yöntemine tasarım parametreleri dışında kalan yapı bölümlerinin tasarımdan çıkarılarak form oluşturulmasına dayanmaktadır. Geleneksel inşaat yapım yöntemlerinde verimli olamayacağı tespit edilen bu yaklaşım, 3B Beton Yazdırma teknolojisiyle mümkün olabilecektir. Tasarım Alan Keşfi yöntemiyle modelleme yapmak için bu

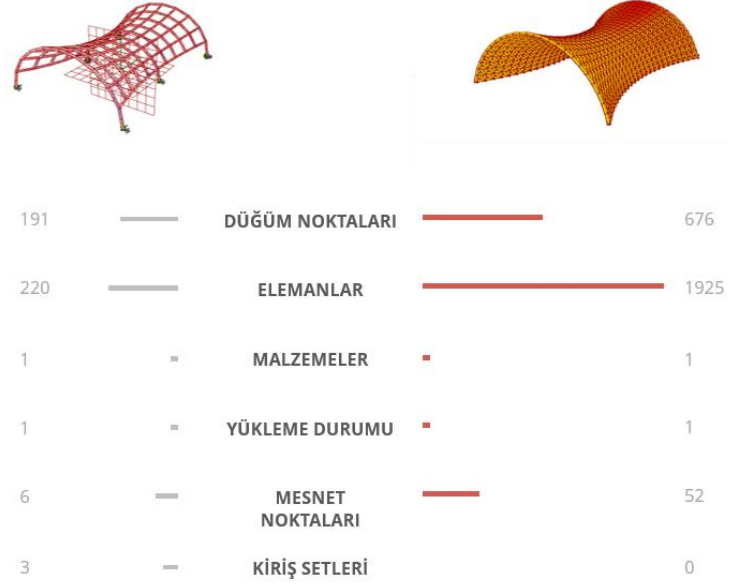
aşamada 3D Graphic Statics adlı Grasshopper eklentisi kullanılmıştır. Özellikle yapım yöntemleri sebebiyle üretilen kesitlerin bazı kısımlarının hiçbir yüke çalışmaması bu yöntemi gelecek anlamında verimli kılmaktadır. Ancak bu yöntem fazla sayıda veriyle birlikte kullanılmadığı gibi yapısal davranış açısından inceleme de yapmamaktadır. Bu nedenle şematik tasarım evresinde hali hazırdaki gelişmiş düzeyi ile kullanıma uygun görülmemiştir.

Takip eden araştırmalarda tasarımın başlangıç aşamasında yapısal analizlerini görebilmeye odaklanılmış, geleneksel yöntemler üzerinden ilerlenmiştir. Bina ölçeği üzerinden kolon, kat yüksekliği gibi değişkenleri parametrik olarak üreten bir model hazırlanmıştır. Bu model de bir apartman yapısı formuna sıkışmış ve form arayışı konusunda isteneni verememiştir. Peregrine adlı Grasshopper eklentisi, hem form arayışına imkan sağlaması hem de optimizasyona olanak tanınmasıyla model oluşturmak için modellemenin bu evresinde ön plana çıkmaktadır. Peregrine ile mimari form optimizasyonu, önceden üretilmiş form kullanılarak yapılmaktadır. Tasarımın ilk aşamasında strüktürel veriler elde edilerek mimari formun geliştirilmesi yaklaşımına bu sebeple destek vermemektedir. Devam eden süreçte temel fizik kuralları üzerinden yaklaşımlar geliştirilmiş ve kemer sistemi veya ters ip davranışı ele alınmıştır.

Bunları takiben zeminden yükselen ve konumları değişken kolonlar üzerinde bir çatı örtüsü kabuğunun formu genetik algoritmalarla üretilmiştir. Üretilen modeller bir yapıdan çok bir yüzeyin şekil değiştirmesine evrildiği için modelin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Portalen Pavilion'undan esinlenilerek pavyon modellemesi yapılmıştır. Ancak modelle sadece zemine bağlantı noktası sayısı ve etkililen kuvvetle yapının yüksekliği parametrelere bağlanabilmiştir. Bu da mimari form arayış evresinde istenen özgürlük alanını oluşturmada yeterli olmamıştır.

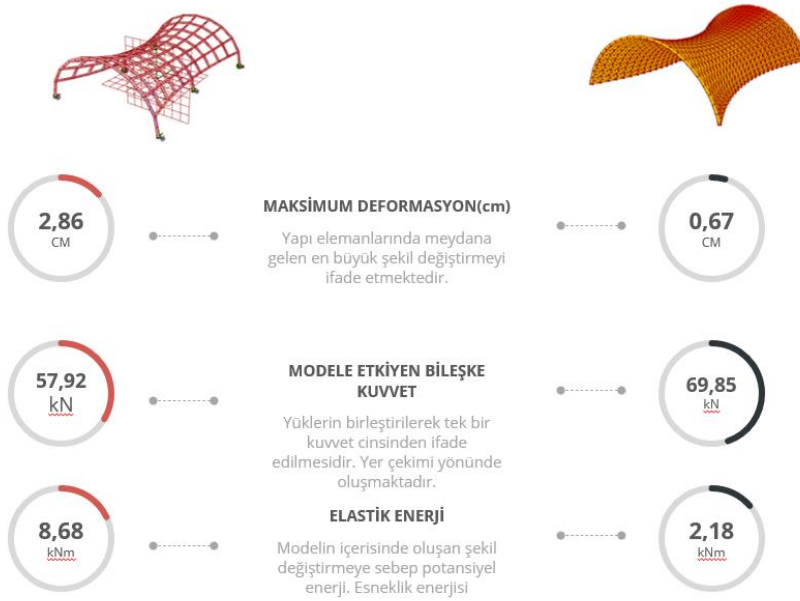
Son olarak bir mimari formun çeşitli noktalarında alınan kesitlerin Rhino'da oluşturulup Grasshopper'da hazır kodla analiz edilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Grasshopper'ın Karamba3D eklentisi kullanılarak üretilen kod iki ve üzeri kesitlerde bir form oluşturabilmekte ve strüktürel analizini görselleştirme kabiliyetindedir. Ancak ilk kod ile

parametrik modelleme imkânı yoktur ve günümüz yapılarında kullanılan temel strüktür kararlarına uymamaktadır. Parametrik model üretimi sonraki aşamada koda eklenmiştir. Strüktürel olarak yapı kabuğunun üçgen meshlere bölünmesi ve birçok noktadan zemine bağlantı kurabilmesine imkân veren bir model daha oluşturulmuştur. İki en gelişmiş model sayısal veriler çerçevesinde Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25’de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır.



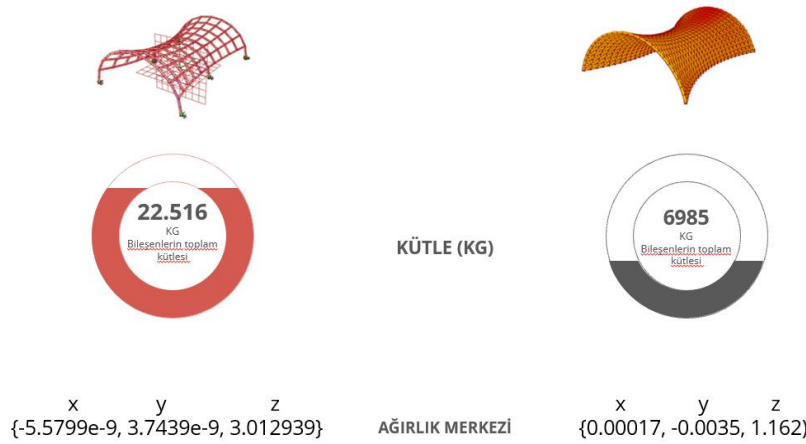
Şekil 23: Model karşılaştırmaları-1 (Model comparisons-1).

Şekil 24’te maksimum deformasyon, modele etkiyen bileşke kuvvet ve Elastik enerji değerleri görülmektedir.



Şekil 24: Model Karşılaştırmaları-2 (Model comparisons-2).

Zemine üç noktadan bağlı parametrik model kirişlerinin 10 parçaya bölüdüğü durum ile strüktürel olarak optimum model ağırlıklar **Şekil 25**'de gösterilmiştir.



Şekil 25: Model Karşılaştırmaları-3 (Model comparisons-3).

Parametrik modelin üç ana kirişinin bölünme sayısına istinaden oluşan modellerin toplam ağırlıkları **Şekil 26**'da gösterilmektedir.

KİRİŞ BÖLÜNME SAYISI	KÜTLE (KG)	KİRİŞ BÖLÜNME SAYISI	KÜTLE (KG)	KİRİŞ BÖLÜNME SAYISI	KÜTLE (KG)
0	/ND	4	11286,41	8	20848,13
1	3568,83	5	15218,92	9	19899,54
2	2091,31	6	16483,16	10	22516,07
3	6359,82	7	19140,50		

Şekil 26: Kiriş bölünme sayısı ve model kütlesi ilişkisi (The relationship between the number of beam splits and the mass of the model).

Bu karşılaştırma tabloları da göz önüne alındığında üçgen meshlere ayrılıp birçok noktadan zemine bağlanan kabuk yapı çözümü daha verimli çıkmıştır. Ancak parametrik modelin kiriş bölünme sayısı 3 olduğunda toplam ağırlığı 6359 kilograma düşmektedir ve bu değer en iyi çözüm yaklaşımından daha azdır. Bu modelde kirişleri üçe bölmek mimari formun tam olarak elde edilmesine imkân vermese de tek tip strüktür çözümü yerine strüktürün de mimari tasarım sürecinin bir parçası haline gelmesi fikrini desteklemiştir. Genel kabuller ve yatırımcı istekleri sebebiyle en bilindik yöntemlerin her binada uygulanmasına bu arayışlar alternatif oluşturacaktır. Bu veri seti ön tasarım aşamasındaki mimarın tasarım fikirlerini zenginleştireceği gibi güçlü kararlar almasına imkân verecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimari Tasarım Bilişim Doktora Programı, MBL 601 Mimari Tasarımda Evrimsel Yaklaşımlar dersi kapsamında hazırlanmıştır. Ders dönemi boyunca verilen okumalar ve proje ile ilgili kritiklerinden ötürü ders yürütücüleri Prof.Dr. Gülen Çağdaş'a ve Dr. Öğr. Üyesi Ethem Gürer'e teşekkürlerimi sunarım.

Referanslar (References)

- Buchanan, C., & Gardner, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, *180*, 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>
- Crolla, K., Williams, N., Muehlbauer, M., & Burry, J. (2017). *SmartNodes Pavilion - Towards Custom-optimized Nodes Applications in Construction*.
- Gilbert, M., He, L., Rankine, C., & Reale, V. (2020). *Identifying materially efficient structures using Peregrine - YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=5vNSXwniuKw>
- Graovac, O. (no date) 3D Graphic Statics | Food4Rhino. Available at: <https://www.food4rhino.com/en/app/3d-graphic-statics> (Accessed: 18 June 2021).
- Hu, J., Chen, W., Qu, Y., & Yang, D. (2020). Safety and serviceability of membrane buildings: A critical review on architectural, material and structural performance. *Engineering Structures*, *210*, 110292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110292>
- Jalali, Z., Noorzai, E., & Heidari, S. (2020). Design and optimization of form and facade of an office building using the genetic algorithm. *Science and Technology for the Built Environment*, *26*(2), 128–140. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1624095>
- Peregrine | Parametric House*. (n.d.). Retrieved June 18, 2021, from <https://parametrichouse.com/peregrine/>
- Subhrajit, D., & Siddhartha, G. (2019). Analysis and Design of Tensile Membrane Structures: Challenges and Recommendations. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, *24*(3), 4019009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000426)
- Vantyghe, G., & Ooms, T. (n.d.). *Concre3DLab | Food4Rhino*. Retrieved June 18, 2021, from <https://www.food4rhino.com/en/app/concre3dlab>
- Vantyghe, G., Ooms, T., & De Corte, W. (2021). VoxelPrint: A Grasshopper plug-in for voxel-based numerical simulation of concrete printing. *Automation in Construction*, *122*, 103469. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103469>