



**GEOMETRİK MİMARİ TASARIMDA TESSELASYON KAVRAMI;  
TAŞIYICI SİSTEMLER ÜZERİNE BİR DENEME**

**Çağatay TAKVA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MİMARLIK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2021**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Çağatay TAKVA

23/12/2021

# GEOMETRİK MİMARİ TASARIMDA TESSELYON KAVRAMI; TAŞIYICI SİSTEMLER ÜZERİNE BİR DENEME

(Yüksek Lisans Tezi)

Çağatay TAKVA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

## ÖZET

Temel kararlarda ve fonksiyonlarda rol oynayarak yapı inşa etme sürecinde sınırlayıcı bir görev üstlenen geometri-mimari ilişkisi, yapıların kimliğini belirlemede gerek form tasarımları gerek mekânsal ilişkilerin tanımlanması gerekse de taşıyıcı sistem kararlarında önemli bir yer tutmaktadır. Belirtilen ilişkiler matrisinde tasarım sürecinde kullanılarak yapı ürünlerinin birbirlerinden farklılaşmasında rol oynayan tesselyonlar, geometri-mimari ilişkisini oluşturan temel yöntemlerdendir. Özellikle modern mimarlık dünyasında yapıların biçimlenişinde, cephelerinde ve taşıyıcı sistem tasarımlarında tesselyon kurgularına rastlamak mümkündür. Tez çalışmasında, tasarım konseptinin güçlendirilmesinde rol oynayan önemli bir tasarım bileşeni olan tesselyon örüntülerinin, özellikle taşıyıcı sistem tasarımlarına yansımaları incelenmiştir. İlk etapta, farklı tesselyon kurgularına sahip simgesel mimarlık yapıları aracılığı ile durum analizi yapılarak taşıyıcı nitelikteki örüntüler analiz edilmiştir. Ardından en fazla kullanılan geometriler ile 8 adet tesselyon örüntüsü oluşturulup, geometrik karakteristikleri, yapısal performansları ve maliyet bakımından etkileri araştırılmıştır. Karşılaştırılabilir bir yapısal çerçeve oluşturmak, tesselyon örüntüleri ile taşıyıcı sistemler arasında bağ kurarak her tesselyon kurgusunun bu sistemlerdeki geometrik potansiyellerini ve farklarını tartışmak amacıyla simetrik/periodyk tesselyon çeşitlerinin uygulanabildiği düzlemsel ve tek eğrilikli tonoz ızgara sistemler kullanılmıştır. Grasshopper programı ile tasarlanan tesselyonlu taşıyıcı sistemlerin, sonlu elemanlar yöntemi ile Sap2000 programında yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, sekiz farklı geometrik örüntü ile elde edilen tesselyon konfigürasyonlarının geometrik karakteristikleri sorgulanarak statik açıdan davranışları performans testlerinden geçirilmiştir, tesselyon modülasyonlarının artmasına bağlı olarak grid yoğunluklarına ve grid faktör değerlerine göre düzenlenen taşıyıcı strüktür sistemlerinde optimum çözümler aranmıştır. İleride kullanım oranları artacak benzer tasarımlar için bu çalışma ile taşıyıcı sistemlerde geometrinin önemi ve tesselyon kurgularının kullanımında farkındalık oluşturmak istenmiştir.

Bilim Kodu : 80115

Anahtar Kelimeler : Tesselyon, Geometrik şekil, Taşıyıcı sistem, Izgara kabuk sistem

Sayfa Adedi : 156

Danışman : Doç. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY

THE CONCEPT OF TESSELLATION IN GEOMETRIC ARCHITECTURAL DESIGN;  
AN ESSAY ON LOAD-BEARING SYSTEMS

(Master Thesis)

Çağatay TAKVA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2021

ABSTRACT

The geometry-architecture relationship, which plays a role in basic decisions and functions and plays a limiting role in the building construction process, has an important place in determining the identity of the buildings, both in the form designs, in the definition of spatial relations, and in the decisions of the load-bearing system. Tessellations, which play a role in the differentiation of building products from each other by being used in the design process in the specified relations matrix, are among the basic methods that create the geometry-architecture relationship. Especially in the world of modern architecture, it is possible to come across tessellation configurations in the formation of buildings, their facades and load-bearing system designs. In the thesis study, the reflections of tessellation patterns, which are an important design component that plays a role in strengthening the design concept, especially on load-bearing system designs are examined. In the first stage, the load-bearing patterns were analyzed by making a situation analysis through symbolic architectural structures with different tessellation configurations. Then, 8 tessellation patterns were created with the most used geometries and their effects in terms of geometric characteristics, structural performance and cost were investigated. Planar and single curvature vault grid systems, in which symmetric/periodic types of tessellation can be applied, are used in order to create a comparable structural framework, to link tessellation patterns and load-bearing systems and to discuss the geometric potentials and differences of each tessellation configurations in these systems. The structural analyzes of the tessellated load-bearing systems designed with the Grasshopper program were carried out in the Sap2000 program using the finite element method. As a result, the geometric characteristics of the tessellation configurations obtained with eight different geometric patterns were questioned and their static behavior was tested for performance. For similar designs that will increase in use in the future, this study aims to raise awareness about the importance of geometry in load-bearing systems and the use of tessellation configurations.

Science Code : 80115

Key Words : Tessellation, Geometric shape, Load-bearing system, Gridshell system

Page Number : 156

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY

## TEŞEKKÜR

İlk olarak tez çalıŐma sűresince deęerli bilgi ve tecrűbeleri ile çalıŐmamın planlanması ve yűrűtűlmesinde beni yűnlendiren, deęerli yardımlarını esirgemeyen danıŐman hocam Sn. Doç. Dr. Zeynep YeŐim İLERİSOY'a, deęerli tavsiye ve eleŐtirileriyle tezin geliŐmesine yardımcı olan Sn. Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA'ya ve Sn. Prof. Dr. Sare SAHİL'e teŐekkűrű bir borç bilirim. Tezin alan çalıŐması kısmında űzveriyle bana yardımcı olan bilgi ve tecrűbelerinden faydalandıęım Sn. Doç. Dr. Fatma Zehra ÇAKICI'ya ve Sn. İnaŐat Műhendisi Őműr ŐZGER'e de çok teŐekkűr ederim. Ayrıca hayatım boyunca her tűrlű destekleri ile yanımda olan canım annem Nurten TAKVA, canım babam İsmet TAKVA ve deęerli kardeŐim Yenal TAKVA'ya sonsuz teŐekkűrlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. TESSELASYON KAVRAMI.....</b>	<b>11</b>
2.1. Tesselasyon Kavramının Geometri ile İlişkisi .....	13
2.2. Tesselasyon Kavramının Tarihçesi ve Örnekleri .....	17
2.3. Tesselasyon Çeşitleri.....	22
<b>3. TAŞIYICI SİSTEMLER .....</b>	<b>25</b>
3.1. Taşıyıcı Sistem Çeşitleri.....	32
3.2. Taşıyıcı Sistemlerin Yapısal Gereklilikleri .....	38
3.3. Kabuk Yapılar .....	40
3.4. Izgara Kabuk Yapılar .....	47
<b>4. TAŞIYICI SİSTEMLERDE TESSELASYON KURGULARI.....</b>	<b>67</b>
4.1. Örnek Yapılar Üzerinden Durum Değerlendirmesi .....	67
4.2. Konu Bağlamında Literatür Taraması.....	73
<b>5. ALAN ÇALIŞMASI.....</b>	<b>79</b>
5.1. Taşıyıcı Izgara Kabuk Sistemlerin Tasarım Esasları .....	81
5.2. Statik Modelleme Süreci .....	86

5.3. Birinci aşama; Tesselasyon Örüntülerinin Statik Performans Esaslı Değerlendirmesi.....	92
5.4. İkinci Aşama; Tesselasyon Örüntülerinin Maliyet Esaslı Değerlendirmesi .....	99
6. BULGULAR VE KARŞILAŞTIRMALAR.....	105
7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	111
KAYNAKLAR .....	115
EKLER.....	125
EK-1. Üçgen (3.3.3.3.3) tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi.....	126
EK-2. Altıgen (6.6.6) tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi.....	127
EK-3. Üçgen-dörtgen (3.4.3.4) tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi.....	128
EK-4. Üçgen-altıgen (3.6.3.6) tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi.....	129
EK-5. Dörtgen-sekizgen (4.8.8) tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi .....	130
EK-6. Üçgen-dörtgen (3.3.3.4.4) tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi .....	131
EK-7. Üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi .....	132
EK-8. Üçgen (3.3.3.3.3) tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi.....	133
EK-9. Altıgen (6.6.6) tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi.....	134
EK-10. Üçgen-dörtgen (3.4.3.4) tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi .....	135
EK-11. Üçgen-altıgen (3.6.3.6) tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi .....	136
EK-12. Dörtgen-sekizgen (4.8.8) tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi .....	137

**Sayfa**

EK-13. Üçgen-dörtgen (3.3.3.4.4) tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi .....	138
EK-14. Üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi .....	139
EK-15. Dikdörtgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri .....	140
EK-16. Üçgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri ...	141
EK-17. Altıgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri..	142
EK-18. Üçgen-dörtgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri .....	143
EK-19. Üçgen-altıgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri .....	144
EK-20. Dörtgen-sekizgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri.....	145
EK-21. Üçgen-dörtgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri .....	146
EK-22. Üçgen-altıgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri .....	147
EK-23. Dikdörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri.....	148
EK-24. Üçgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri.....	149
EK-25. Altıgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri .....	150
EK-26. Üçgen-dörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri ...	151
EK-27. Üçgen-altıgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri ....	152
EK-28. Dörtgen-sekizgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri .....	153
EK-29. Üçgen-dörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri ...	154
EK-30. Üçgen-altıgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri ....	155
ÖZGEÇMİŞ .....	156

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Düzgün çokgenlerin tesselasyon durumları.....	16
Çizelge 2.2. Tesselasyon çeşitleri .....	22
Çizelge 3.1. Taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması.....	33
Çizelge 3.2. Taşıyıcı sistemlerde strüktür verimliliği .....	36
Çizelge 3.3. Taşıyıcı sistemlerin özelliklerine göre karşılaştırılması .....	37
Çizelge 3.4. Ahşap ve çelik malzemenin özellikleri.....	42
Çizelge 3.5. Ahşap ve çelik malzemenin ızgara kabuk karşılaştırması .....	49
Çizelge 3.6. Kronolojik olarak geçmişten günümüze tasarlanmış bazı ızgara kabuk yapılar.....	50
Çizelge 3.7. Elastik ızgara kabuk yapılar.....	53
Çizelge 3.8. 3 ayrı sınıfta bulunan ızgara kabuk sistemlerin kategorizasyonu .....	54
Çizelge 3.9. Küçük boyutlu ızgara kabuk sistemler .....	54
Çizelge 3.10. Orta boyutlu ızgara kabuk sistemler .....	55
Çizelge 3.11. Büyük boyutlu ızgara kabuk sistemler .....	55
Çizelge 3.12. Izgara kabuk sistemin artıları ve eksileri.....	56
Çizelge 3.13. Kullanım alanlarına göre ızgara kabuk sistemlerin özellikleri .....	57
Çizelge 4.1. Cephe konstrüksiyonuna göre tesselasyon örüntüleri.....	68
Çizelge 4.2. Açıklık geçilen yapılara göre tesselasyon örüntüleri.....	69
Çizelge 4.3. Kubbe yapılarda tesselasyon örüntüleri.....	70
Çizelge 4.4. Tonoz ızgara kabuklara göre tesselasyon örüntüleri .....	71
Çizelge 4.5. Taşıyıcı sistemler ve özellikleri hakkında literatür taraması .....	73
Çizelge 4.6. Izgara sistemler ve oluşum mekanizmaları hakkında literatür taraması.....	74
Çizelge 5.1. Düzlemsel ızgara sistemdeki tesselasyon modelleri ve matematiksel ifadeleri .....	82
Çizelge 5.2. 10*10 metre boyutlarındaki düzlemsel ızgara modellerinin geometrik performansları .....	83

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 5.3. Tek eğrilikli tonoz ızgara sistemdeki tesselasyon modelleri ve matematiksel ifadeleri .....	84
Çizelge 5.4. 10*10 metre boyutlarındaki tonoz ızgara modellerinin geometrik performansları .....	85
Çizelge 5.5. S235 alaşımsız yapısal çelik malzemenin özellikleri .....	87
Çizelge 5.6. Temperli cam malzemenin özellikleri .....	88
Çizelge 5.7. Modal analiz sonucunda oluşan görünüm ve ilk doğal titreşim periyot değerleri.....	93
Çizelge 5.8. Modellerde eğilme momentlerinin dağılımı ve en yüksek değerler (kN/m) .....	95
Çizelge 5.9. Eleman kesitleri sabit tutulan modellerin sehim ve yüzdelik oranda performansları .....	97
Çizelge 5.10. Eleman kesitleri sabit tutulan modellerin etki kapasite oranları.....	98
Çizelge 5.11. Düzlemsel ızgara sistemlerin optimizasyon değerleri .....	100
Çizelge 5.12. Tonoz ızgara sistemlerdeki optimizasyon değerleri .....	102
Çizelge 6.1. Düzlemsel ızgara sistemlerin puanlanması.....	106
Çizelge 6.2. Tonoz ızgara modellerin puanlanması.....	107
Çizelge 6.3. Optimize edilen düzlemsel ızgara sistemlerin zati ağırlığa göre puanlanması.....	108
Çizelge 6.4. Optimize edilen tonoz ızgara sistemlerin zati ağırlığa göre puanlanması ..	108
Çizelge 6.5. İncelenen tesselasyonların farklı formlardaki puanlama dağılımı.....	110

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. (a) Bir örüntü örneği, (b) Bir ritim örneği .....	12
Şekil 2.2. Üçgen geometrik form ve matematiksel bağlamda tesselasyon kurgusu .....	13
Şekil 2.3. Dörtgen geometrik form ve matematiksel bağlamda tesselasyon kurgusu ....	14
Şekil 2.4. Altıgen geometrik form ve matematiksel bağlamda tesselasyon kurgusu.....	14
Şekil 2.5. Tesselasyon kurgusunun oluşturulmadığı düzgün çokgenler .....	15
Şekil 2.6. Örüntüleri oluşturmak için gerekli olan öteleme, yansıma ve dönme hareketleri .....	15
Şekil 2.7. Tesselasyon örnekleri; (a) Düzgün tesselasyonlar, (b) Yarı düzgün tesselasyonlar .....	16
Şekil 2.8. Düzgün ve yarı düzgün tesselasyonlarla elde edilen düzlemsel yüzeyler ve matematiksel ifadeleri .....	17
Şekil 2.9. Altılık olarak kullanılan üçgen tesselasyon modeli ve yeni türetilen modeller .....	17
Şekil 2.10. Penrose döşemelerinin farklı desen görünüşleri .....	20
Şekil 2.11. Bir bölgenin farklı tesselasyon kurguları.....	21
Şekil 2.12. Geometrik modellerin şehir planlamadaki etkisi.....	21
Şekil 2.13. 2 boyutlu tesselasyonlar.....	23
Şekil 2.14. 3 boyutlu tesselasyonlar.....	23
Şekil 2.15. 13 Arşimet çokyüzlüsünün 3 boyutlu görünüşleri .....	24
Şekil 2.16. C60 kararlı karbon molekülü .....	24
Şekil 3.1. Farklı strüktür kullanımına göre mimari boşlukların oluşturulması.....	25
Şekil 3.2. Yapı formlarının oluşmasını sağlayan strüktürlerin taksonomisi.....	26
Şekil 3.3. (a) Göbeklitepe, (b) Çin'deki Banpo evi, (c) Mısır'daki Amun Tapınağı, (d) Atina'daki Parthenon Tapınağı .....	27
Şekil 3.4. (a) Yerçekimi kuvvetine ve yatay yönlü kuvvete direnç gösteremeyen kararsız sistem, (b) Yerçekimi kuvvetine ek olarak yatay yöndeki kuvvete de mukavemet gösterebilen kararlı sistem.....	38

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.5. Dikdörtgen bir çerçeve sistemin (a) diyagonal, (b) yapı malzemesi, (c) rijit bağlantı noktalarıyla stabilize edilmesi.....	39
Şekil 3.6. (a) Çelik yapı, (b) Çelik bir yapıda üzerine uygulanan yüklere karşı temelde ve taşıyıcı strüktürlerde oluşan reaksiyon kuvvetleri.....	39
Şekil 3.7. Kabuk sistemlerin sınıflandırılması.....	41
Şekil 3.8. (a) Negatif, (b) Pozitif ve (c) Sıfır Gauss eğriliği yüzeyleri.....	43
Şekil 3.9. (a) Kubbe, (b) hiperboloid, (c) silindir geometrileri.....	43
Şekil 3.10. (a) Eliptik paraboloid, (b) silindirik paraboloid, (c) Hiperbolik paraboloid.	44
Şekil 3.11. (a) Çizgisel olarak gösterilen hipar kabuğu (Garlock, Billington, 2009), (b) Paraboloid ve (c) Konoid kabuk geometrik biçimleri.....	44
Şekil 3.12. (a) Düz bir yüzeyden elde edilen dörtgensel bir ızgara kabuk (Toussaint, 2007), (b) Düz bir yüzeyden elde edilen serbest biçimli parametrik kabuk	47
Şekil 3.13. (a) Kuvvetlerin etkisinde yaratılan bir ızgara kabuk (Poulsen, 2015) ve (b) Farklı geometrik şekillerle tesselle edilen ızgara kabuklar.....	48
Şekil 3.14. Tesselasyon dokusu ve yüzey geometrisi birleşimi.....	48
Şekil 3.15. EXPO Shanghai Sun Valleys ızgara kabuk strüktürü tasarım süreci.....	49
Şekil 3.16. 1851’de inşa edilen prefabrike demir beşik tonozun görünüşleri.....	58
Şekil 3.17. Tonoz çeşitleri; 1. Beşik tonoz, 2. Sivri beşik tonoz, sivri uçlu tonoz, Gotik tonoz, 3. Yaygın tonoz, 4.Konik tonoz, genişleyen tonoz, 5. Manastır tonoz, kubbe tonoz, 6. Sivri manastır tonoz, kubbe tonoz, 7. Kasık tonoz, çapraz tonoz, kesişen beşik tonoz, 8. Uçlu kasık tonoz, sivri tonoz, 9. Dormer tonoz, 10. Çukur tonoz, 11. Kemerli tonoz, 12. Bölümlü tonoz, parçalı beşik tonoz.....	60
Şekil 3.18. Silindirik tonoz ızgara kabuk sistemlere eklenebilen yeni sistemler.....	61
Şekil 3.19. Enine kesitli tek ve çift katmanlı tonoz örnekleri.....	61
Şekil 3.20. 12 metre küplük ahşap yapı malzemesi ile geniş bir yapı alanı oluşturma ..	65
Şekil 5.1. Periyodik/simetrik tesselasyon çeşitleri olarak düzgün (a, b, c) ve yarı düzgün (d, e, f, g, h) örüntü modelleri.....	80
Şekil 5.2. Alan çalışması için izlenecek yol ve adımlar.....	81
Şekil 5.3. Izgara kabuk strüktür modelleri; (a) Düzlemsel ızgara, (b) Tek eğrilikli tonoz ızgara.....	82

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.4. Dikdörtgen tesselasyonlu düzlemsel sistemin Grasshopper programındaki görseli ve ifadesi .....	86
Şekil 5.5. Dikdörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara sistemin Grasshopper programındaki görseli ve ifadesi.....	86
Şekil 5.6. Düzlemsel ve tonoz sistemlerin iki kenardan mesnetlenmesi .....	87
Şekil 5.7. S235 yapısal çelik ve temperli cam malzemelerin Sap2000 programındaki veri tanımlamaları .....	88
Şekil 5.8. Stahlbau çelik profillerinden boru malzeme kesitlerinin görünümü ve strüktür modellerin özelliklerine göre kullanılan malzeme kesitleri aralığının gösterimi .....	90
Şekil 5.9. Çubuklara ve cam elemanlara etkiyen ve homojen dağılan yük gösterimi ....	90
Şekil 5.10. Matematiksel modelleme için kullanılan programların akış şeması.....	91
Şekil 6.1. İncelenen tesselasyonların farklı formlardaki sonuç puanlaması .....	110

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 1.1. Tonoz örnekleri; (a) İnce kesitli Katalan tonozları (URL-1), (b) Crystal Palace'ın tonoz kabuk üst örtüsü (URL-2), (c) Elbrücken metro istasyonunun tonoz kabuk sistemi (URL-3).....	3
Resim 2.1. (a) Sugamo Shinkin bankası ve rastlantısal ritim, (b) Mülimatt lisesi ve düzenli ritim .....	12
Resim 2.2. (a) Simetrik denge sağlanmış bir figür, (b) Hallgrmur kilisesi.....	12
Resim 2.3. (a) Radyal denge sağlanmış bir figür, (b) Reichstag Parlamento binası.....	13
Resim 2.4. (a) Mozaik desen (Saadien Mezarları-Marakeş'ten), (b) 48 kat desen (Fas'tan),.....	18
Resim 2.5. Güney Mezopotamya'nın Uruk (VI – IV) ve Jemdet Nasr dönemlerinde kullanılan bir çeşit duvar dekorasyonu (URL-5) .....	18
Resim 2.6. (a) Üstte Ayasofya Kilisesi, altta Süleymaniye Camii iç görselleri (Khaira, 2009), (b) Elhamra Sarayı.....	19
Resim 2.7. Peyzaj düzenlemeleri (URL-6, URL-7, URL-8, URL-9).....	20
Resim 3.1. (a) Parthenon Tapınağının ön görünümü, (b) Parthenon Tapınağının perspektif görünümü .....	27
Resim 3.2. (a) İglo Eskimo evi, (b) CNIT sergi binası .....	28
Resim 3.3. (a) Shard Kulesi taşıyıcı sistemi, (b) Water Cube strüktür biçimlenmesi (Wang ve diğerleri, 2010) .....	29
Resim 3.4. (a) Multihalle and Restaurant yapısı (Tang ve diğerleri, 2013), (b) Savill Garden yapısının iç görünümü.....	30
Resim 3.5. (a) Kesitlerine göre çelik yapı elemanları, (b) Spectrum building strüktür sisteminin görünümü.....	31
Resim 3.6. (a) Betonarme bir yapının taşıyıcı elemanları (Macdonald, 2018), (b) Günümüzdeki Brasilia Cathedral cephe görünümü .....	32
Resim 3.7. (a) Los Manantiales Restoran, Meksika, (b) Bacardi Rum Fabrikası, Meksika.....	45
Resim 3.8. (a) Heilig Geist Kirche (Holy Spirit Church), İsviçre, (b) “Stenkirche” Cazis, İsviçre.....	46
Resim 3.9. (a) Palazetto dello Sport, Roma (b) Orvieto Havaalanındaki Uçak Hangarları, İtalya .....	46

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.10. (a) Madan halkı tarafından inşa edilen evin yapım aşaması, (b) Evin son hali.....	51
Resim 3.11. (a) Mannheim Multihalle yapısının kuşbakışı görünümü, (b) Yapının strüktür inşası .....	52
Resim 3.12. (a) Neckarsulm yüzme havuzu kubbesi, (b) Yapının iç görünümü .....	52
Resim 3.13. (a) Nervi'nin hangar yapısının strüktür görünümü, (b) Yapının planı .....	59
Resim 3.14. Kafes ızgara tonoz kabuk sistemler .....	60
Resim 3.15. (a) Çalışmanın uygulamadaki hali, (b) Planlanan şekil ile inşa edilen şekil arasında gözlenen tutarsızlıkların sayısal olarak gösterimi .....	62
Resim 3.16. (a) Çalışmanın uygulamadaki hali, (b) Modelleme programındaki görünümü .....	63
Resim 3.17. (a) Uygulanan yapı, (b) Bir merkez etrafında oluşturulan simetrik model.	63
Resim 3.18. (a) Uygulanan yapının iç strüktür görünümü, (b) Kaplamanın geometrisi	64
Resim 3.19. Salonun iç görünümü ve Kuka robotuyla dişli parça oluşumu.....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>C</b>	Kapasite
<b>cm</b>	Santimetre
<b>cm<sup>2</sup></b>	Santimetrekare
<b>D</b>	Etki
<b>E</b>	Elastisite modülü
<b>G</b>	Kayma modülü
<b>G</b>	Sabit yük
<b>GPa</b>	Gigapaskal
<b>k</b>	Rijitlik
<b>kg</b>	Kilogram
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>L</b>	Uzunluk
<b>m</b>	Kütle
<b>m</b>	Metre
<b>mm</b>	Milimetre
<b>mm<sup>2</sup></b>	Milimetrekare
<b>m<sup>2</sup></b>	Metrekare
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>%</b>	Yüzde işareti
<b>N</b>	Newton
$\pi$	İrrasyonel matematik sabiti
<b>Q</b>	Hareketli yük
<b>T</b>	Periyot
<b>N</b>	Newton

**Kısaltmalar****Açıklamalar****AISC**

Amerikan çelik yapılar için tasarım ve inşaat yönetmeliği

**ASD**

Emniyet gerilmelerine göre tasarım

**CNC**

Bilgisayarlı sayısal kontrol

**ETFE**

Etilen tetrafloroetilen

**EXPO**

Dünya fuarı

**S235**

Akma dayanımı 235 olan yapısal çelik

**S275**

Akma dayanımı 275 olan yapısal çelik

**S355**

Akma dayanımı 355 olan yapısal çelik

**SWOT**

Güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar, tehditler

**SUTD**

Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi

**SWOT**

Güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar, tehditler

**YDKT**

Yük ve mukavemet çarpanına göre tasarım

## 1. GİRİŞ

Çok katmanlı ilişkiler matrisi ile varolan mimarlık biliminde matematik, geometri ve tasarım birbirleriyle en sık etkileşimde olan sanat dallarıdır. Matematik, mimarlığı formülize eden bir yapıtaşı olup en sık geometrik şekiller ve biçimler ile mimari tasarım sürecine yansımaktadır. Mimarlıkta geometri, tasarım sürecinin mutlak bir parçasıdır. Geniş kapsamda ele alındığında; dayanım, mekân algısı, yapı fiziği gereklilikleri gibi farklı süreçlerde dahil diğer tasarım girdileriyle etkileşim halindedir ve sonuç ürüne etki eder. İkel zamanlardan günümüze her zaman ana roldeki bu bilim dalı, özellikle teknolojinin gelişmesiyle yaygınlaşan hesaplamalı tasarım imkanıyla mimaride yeniliklere zemin hazırlayarak sınırı olmayan geometrik özgürlükler getirmiştir ve çeşitlilik sağlamaktadır.

Geometri, mimari ve mühendislik yönüyle yapıların tasarımında ve analizinde merkezi bir rol üstlenmektedir. Mimarlık ve geometri bilimi pratikte, temsilde ve değerlendirmede uzun soluklu ve bütünleşik bir konfigürasyon oluşturmaktadır. Tarih boyunca mimarlar, sayıları ve şekilleri kayda değer olan farklı temalarda metaforik, sembolik ve semiyotik bağlamda temsil etme aracı olarak kullanmışlardır (Williams ve Ostwald, 2015). Paralel bir bakış açısında ise mimarlık, matematik ve geometrinin alt bilim dallarını, tasarımcının görüşünü analiz etmek, mekânsal hiyerarşileri sorgulamak veya görsel/estetik özellikleri ölçmek amacıyla ele almıştır. Bu örneklerin tümü mimarlık ve geometri arasındaki ilişkilerin çeşitli türlerini içermektedir. Birçok mimar ve sanatçı oran/orantı, altın oran, modüller gibi kuramları ve simetri, perspektif, kompozisyon gibi geometrik bilgileri yapı tasarımına entegre etmişlerdir.

Mimari tasarımda kompozisyon, diğer sanat dallarında olduğu gibi estetik bakımdan kayda değer bir oluşum girdisidir. Bu sebeple mimarlar, mühendisler ve sanatçılar tasarımların gereksinimlerine ve estetik kapsamlarına göre geometrik kurallarla tanımladıkları kompozisyon yöntemleri geliştirmişlerdir (Güner, 2016). Köklü bir geçmişe sahip olan tesselasyon yöntemi de tam bu noktada en temel olanlardan bir tanesidir. Tesselasyon yöntemi geometrik kurallara dayanan ve mimari tasarım kompozisyonları oluşturan bir geometri-mimarlık kombinasyonudur. Mimarlık, mühendislik, matematik ve sanat alanlarında örnekleri bulunan tesselasyonlar antik dönemden günümüze kadar varlığını sürdürmüştür.

Günümüzde Renzo Piano ve Santiago Calatrava gibi birçok mimar tasarımlarını, geometri ve yapı arasındaki ilişki üzerine kurgulamaktadır. Bütünsel ve performatif yaklaşımın ötesinde, mimari alanlar tekil unsurlardan veya organize edilmesi gereken yapı bileşenlerinden geometrik kısıtlamalara, inşa edilebilirliğe ve montaj parametrelerine göre yapılmaktadır. Bu nedenle bütündeki parçaları oluşturmak için parçaların konfigürasyonunu tanımlamak gerekmektedir ve bu oluşumlarda tesselasyon kurgularının etkileri görülmektedir.

Matematiksel olarak yüzey oluşturmada kullanılan bir teknik olan tesselasyon kavramı, tarih boyunca mimari yapıların tasarımında, planlanmasında ve inşa sürecinde kullanılmıştır. Literatürde mozaikleme olarak da adlandırılan bu kurgu cephelerde, yer döşemelerinde, duvarlarda, tavanlarda, ferforjelerde, İslami örüntülerde kendini göstermiştir. Modern mimaride de farklı uygulamalarda tesselasyon örüntülerinin mevcut olduğu yapılan literatür taramasıyla ortaya konmaktadır. Geniş ölçekte şehir planlamasından peyzaj oluşumlarına, mimari çözümlerden sofistike detay çalışmalarına kadar birçok üretim ve dizayn aşamasında kendini gösteren bu kurgulama tekniği ile matematik, geometri ve mimarlık arasında bütünleşik tasarımlar meydana gelmektedir.

Tesselasyon kavramıyla geometri zenginleştirilerek çeşitlenmekte ve mimari uygulamalarda farklılıklar elde edilmektedir. Geometrik biçimler ve tesselasyon kurguları, kare, dikdörtgen, altıgen veya daire gibi basit geometrik formlardan oluşmaktadır veya bunlardan üretilmektedir. Döndürme, simetrisini alma, kopyalama gibi bir dizi algoritmik işlemler aracılığıyla temel geometrilerden karmaşık ve detaylı desenler geliştirilebilmektedir. Bu desenlerin altında matematiksel bir yapı vardır ve bu matematiksel yapı düzenlilik arayışı olarak görülebilir (Moussavi ve Kubo, 2006).

Platonik ve Arşimet mozaikleme desenleri matematiksel yapılaşma içinde düzenlilik çerçevesinde doku oluşturma prensibini temsil etmektedir. Geometrik ve estetik kimliğinin yanı sıra bir temel matematiksel birim sistemin kendi ağırlığını oluşturma özelliğini de göstermektedir. İç ve dış kuvvetleri kapladığı tüm yüzey boyunca dağıtan modeller temel birimler olan geometrik biçimler aracılığıyla ortaya çıkarılmaktadır. Arşimet çokyüzlüleri sistemin kendi ağırlığını oluşturma konusunda kabuk yapılar ile benzer nitelikler taşımakta ve taşıyıcı sistem işleyişi bazında fonksiyonel biçimlenmede paralellik göstermektedir.

Kabuk yapılar da matematik formüllerinden ve hesaplamalardan elde edilen yüzey geometrisi komplikasyonlarıdır.

Kabuk yapılar, yapısal olarak üzerine tanımlanan yükleri tek bir noktada toplamayıp tüm yüzey boyunca dağıtma özelliği bulunan matematiksel oran ve orantıların uygulanmasıyla tasarlanabilmektedir. Bu yapılarda güç ve mukavemet sağlamak üzere, sistemi oluşturan malzemeye özel şekillerde form verilmektedir ve bu şekil muhtelif tesselasyonlar ile güçlendirilmektedir. Rafael Guastavino'nun etkileyici kabuk yapıları, Katalan tonozları (Rippmann ve diğerleri, 2012) ve Eladio Dieste'nin çift eğrilikli devamlı olmayan tonoz (Hemmerling ve diğerleri, 2018) çalışmaları da düz bir yüzeyden ziyade şekillendirilerek kabukların gelişimi için (Resim 1.1a), ancak bu formların günümüz uygulamaları ise tessele edilmiş kurgusal potansiyelleri için referans oluşturmaktadır (Resim 1.1b).

Endüstriyel gelişim ile de imkân bulan ve yaygınlaşan hesaplamalı tasarıma dayalı bütünleşik mimari üretim bağlamında farklılık oluşturma amacıyla kabuk yapı sistemleri ilerleme kaydedilmiştir. Bu durumu daha da özelleştirerek taşıyıcı sistem anahtar kelimesine indirgemek gerekirse, mimari organizasyonlarda taşıyıcı sistemlerin etkin katkısı olan örneklerde tesselasyon kurguları mevcuttur (Resim 1.1c). Özellikle dolu gövdeli monolitik yapılardan ziyade eksenleri ile idealize edilen çubuk taşıyıcı sistemlerde daha net okunabilen kurgular ile strüktürlerin kendi mimari bütünlükleri içinde konuştuğu ve hatta yüksek sesle kendini gösterdiği pek çok proje günümüzde ön plana çıkmaktadır (Coşkun ve Arık, 2011).



Resim 1.1. Tonoz örnekleri; (a) İnce kesitli Katalan tonozları (URL-1), (b) Crystal Palace'ın tonoz kabuk üst örtüsü (URL-2), (c) Elbrücken metro istasyonunun tonoz kabuk sistemi (URL-3)

Taşıyıcı sistemlerin dayanıklı olabilmesi için mimarinin zorunlu bir bileşeni olması gerçeği, onun mimari anlamda saklanması, gizlenmesi gerekliliğini oluşturmamaktadır. Bu

noktada mimaride taşıyıcı sistem kurgularını açıkça kullanan ve gösteren yapıların kullandığı dil; estetik duruşun kaynağı olması yanında kullanılan geometrik düzenlemeler ile yapısal çevrede mimarinin dışavurumudur. Mimarideki geometrik düzenlemelerin algısı da estetik biçimlenmeye katkıda bulunarak genişleyen bir yapı hiyerarşisi yaratmaktadır. Tesselasyonlar da bu noktada hiyerarşinin bir parçası olarak estetik ve fonksiyonel yapı oluşumlarında yer almaktadır.

Tez çalışmasında odak noktası olarak geometri ve yapısal tasarım arasındaki ilişki incelendiğinde, önemli mimarların farklılaşan tasarımları ile bu tutumu sergilemesi uygulanan tutumların araştırılması gerekliliğini doğurmuştur. Yapılarda inceleme ve sentez aşamalarında ortaya konan kurguların öncelikli olarak geometrik potansiyelleri denetim altında tutularak tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu noktada tessellasyon desenlerinin biçimlenişleri doğrultusunda değerlendirilip sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılması ile karar sürecindeki tasarımcılara ışık tutmak istenmiştir. Basit geometrik biçimler ile oluşturulan tessellasyon örüntülerinin taşıyıcı sistem performansı etkilerine bakılmıştır.

### Problemin Tanımı

Mimaride geometrik tasarımda kullanılan birçok yöntem vardır ve aralarında en temel olanlardan bir tanesi tessellasyon yöntemidir. Tessellasyon kavramı özellikle sanat dallarında karşımıza çıkan önemli bir olgudur. Leonardo Vinci, M.S. Escher, Albert Dürer, Luca Pacioli gibi sanatçıların geometriye dayalı birçok sanat eseri vermelerine olanak tanıyan bu kavram desen oluşturma, süsleme analizleri gibi başlıklar aracılığı ile bilinmektedir. Bu bağlamda mimari yapıların tasarımında etkilerinin neler olduğu tezin problemi olarak ele alınmıştır.

Aynı geometrik şekillerle farklı örüntüler elde etmeyi sağlayan tessellasyon kavramının mimari açıdan uygulanabilirliğine odaklanıldığında ilk akla gelen örnek ise modern yapı kabuklarındaki taşıyıcı nitelikteki konstrüksiyonlardır.

Modern yapı kabuklarında uygulanabilecek yüzey geometrileri ve kullanılacak geometrik örüntülerin tanımlanması ve saptanması, inşa etme aşamalarında ise imal etme, yerinde yapım ve malzeme kullanımının kabul edilebilir düzeyde tutulması sağlanmalıdır. Bu sebeple, modernize edilen yapı kabuklarının geometrik bağlamda düzenlenmesi ve

aplikasyonunda kullanılan yöntem ve metotların sistematik ve hiyerarşik bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir. Böylece özellikle ızgara kabuklar gibi modern yapı kabuklarının oluşturulmasında geometrik tasarımın önemi ve etkileri mimariye sağlayacağı potansiyel katkıların bakımından önem teşkil etmektedir. Bu perspektifte ise farklı örüntülerin taşıyıcı sistem tasarımında davranışa ve sistem maliyetine etkilerine yönelik araştırmaların yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu kapsamda bir araştırmanın yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Özellikle dijital tasarım araçlarının kullanılması ve inşa edilmeden önce simülasyon olarak görülmesi, analiz edilmesi imkanları ile taşıyıcı sistemlerin günümüzde ve gelecekte potansiyeline yönelik çıkarımlarda bulunulması önem teşkil etmektedir. Taşıyıcı sistem ve kurgusundaki tesselasyon örüntülerinin birleştirilerek ortaya konan bu tez çalışmasının araştırma soruları aşağıdaki gibidir ve bu sorulara çözümler aranmıştır;

1. Tesselasyon kavramı nedir, özellikleri nelerdir ve kullanım alanları nasıldır?
2. Tesselasyon kavramının taşıyıcı sistem tasarımı ile ilişkisi nedir?
3. Taşıyıcı strüktür sistemlerinden tesselasyon kavramının denemesine en çok izin verebilecek ızgara kabuk sistemi nedir ve temel taşıyıcılık prensipleri nelerdir?
4. Tesselasyon örüntüleriyle oluşturulan ızgara kabuk yapılarının birbirlerine göre davranışları farklılaşmakta mıdır?

Bu soruların ardından ise “*analiz sonucunda elde edilen verilerden mimari tasarıma yönelik ne gibi çıkarımlar yapılabilir?*” sorusuna cevap aranmıştır ve değerlendirmelerde bulunulmuştur.

### Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Araştırmanın öncelikli amacı, geometrinin alt dallarından olan tesselasyon kavramını açıklamak, kurgusal oluşumları ve düzenlemeleri betimlemek, mimaride kullanılan örnekler üzerinden oluşumlarına dikkat çekmektir. Üçgen, dörtgen, altıgen gibi temel şekillerin birleşimlerinin belli oran ve orantısal çerçevede düzenlenmesi işlemi olan tesselasyon kavramıyla birlikte, kavramın derinliklerine inilmesi, özelliklerinin açıklanması ve nasıl sınıflandırıldığına aktarılması amaçlanmaktadır.

Sonrasında ise uluslararası ve ulusal yapı stoku içerisinde özellikle taşıyıcı görevi üstlenen kurgularda tesselasyon kavramının gözlemlendiği örnek uygulamalar belirlenmiş, uygulanan tesselasyon örüntüleri tanımlanmış ve tablolastırılarak durum analizi yapılmıştır. Bu analiz ile alan çalışması için referans kurgular saptanması hedeflenmiştir.

Bu doğrultuda tez çalışması geometri, geometrik şekiller ve bu kavramların taşıyıcı sistem tasarımı ile ilişkisini merkeze almaktadır. Taşıyıcı sistemlerde farklı geometrik dizimlere sahip strüktürel tasarımların benzer düzlemlerde uygulanması ile ortaya çıkacak davranış farklılığının ortaya konulması ve idealize edilmesi planlanmıştır. Taşıyıcı strüktür sistemlerinin optimum sınırlar içerisindeki çözümlerinin belirlenmesi ile de geometrik düzenlemelerin maliyete etkisi merak edilmiştir. Tüm bu hedefler ise alan çalışmasında konstrüksiyona dayalı bir yaklaşım sergileyen, çelik strüktür elemanlarını adeta görsel tasarım ögesi haline getiren, teknoloji-imgelem ve kullanım esnekliğine büyük öncelik veren “ızgara kabuk” sistemler aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Özellikle açıklık geçmede etkin olarak kullanılan, mevcut yapılarda düz veya eğrisel olarak uygulanabilen, çubuk elemanlar ile inşa edilen ve modern bir yapısal form olarak görülen ızgara kabuk sistemler mekân sınırlayıcı özelliğinden öteye giderek tasarım unsuru olarak kullanılmaktadır.

Alan çalışmasına geçilmeden önce, teknolojinin gelişmesi ile birlikte geçmişten günümüze ızgara kabuk sistemlerin dönüşümü de ele alınmış ve tesselasyon örüntüleri ile kullanımları gösterilmiştir. Tez bölümlerinde taşıyıcı strüktür sistemlerinin tanımı yapılarak çeşitlerinden bahsedilmiş ve farklı açıklıklarda farklı strüktür yapılarının kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Mevcut örnekler üzerinden yapılan literatür taraması ile elde edilen ve aynı temel geometrik formları birleştirilerek 8 adet tesselasyon örüntüsünün geometrik karakteristiklerini, yapısal performanslarını ve maliyet bakımından etkilerini anlamak amacı doğrultusunda tasarlanan ızgara kabuk sistemlerin farklılaşan tek özelliklerinin geometrik konfigürasyonları olması istenmektedir. Bu doğrultuda iki farklı forma sahip olarak ele alınan ızgara kabuk sistemlerin uygulanacakları açıklık, uzunluk ve yükseklik gibi parametreleri sabit tutulmuş, değişen tek parametre olarak tesselasyon örüntüleri ayarlanmıştır. Form olarak düzlemsel ızgara ve tek eğrilikli tonoz ızgara kabuk sistemler kurgulanmıştır.

Her bir örüntünün farklı yapısal davranışlar ortaya koyması beklentisi çalışmanın hipotezini oluşturmaktadır. Hipotezi test etmek için iki farklı forma sahip ızgara kabuk sistem kurgulanmıştır. Belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilen 8 örüntü, açıklık geçilen düzlemsel taşıyıcı sistemlere ve tek eğrilikli tonoz formundaki ızgara kabuk strüktür sistemlerine entegre edilmiştir ve örüntülerin tesselasyon kurguları ile üretilen strüktür modellerinin strüktür verimliliğine etkisi değerlendirilmiştir.

### Çalışmanın Yöntemi ve Tezin Aşamaları

Birinci bölümde, tesselasyon kavramının odak noktasında yer alan matematik ve geometri bilimleri ile yapısal tasarım arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışmanın sınırlılıkları, amacı, yöntemi ve önemi vurgulanmıştır.

İkinci bölümde, tesselasyon yönteminin tanımı açıklanmış, geometrik bağlamda oluşum aşamaları görseller üzerinden desteklenerek ortaya konulmuştur. Tesselasyon desenlerinin geçmişten günümüze kullanımı irdelenmiş ve çeşitlerinden bahsedilerek iki boyuttaki ve üç boyuttaki geometrik uygulamalarından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, tümdengelim yöntemi ile temel olarak taşıyıcı sistem kavramı tanımlanmıştır. Strüktür türleri kategorize edilmiş, taşıyıcı sistemlerden kısaca bahsedilmiştir. Statik anlamda taşıyıcı sistemlerin sahip olması gereken geometrik durumlar açıklanmıştır ve alan çalışmasının zeminini oluşturan kabuk ve ızgara kabuk sistemlerin özellikleri anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, tesselasyon ve taşıyıcı sistemlerin yapılarıdaki birlikteliği ele alınmıştır. Alan çalışmasında hedeflenen karşılaştırmanın kavramsal çerçevesini doğrulamak ve uygulamasını örneklendirmek için mevcut yapı stoğu üzerinden literatür taraması yapılmıştır. Araştırmaların neticesinde cephe konstrüksiyonu kubbe, tonoz ve açıklık geçilen diğer yapı başlıklarıyla tesselasyon konfigürasyonları detaylandırılmıştır ve durum analizi yapılmıştır. Örnek yapı grupları mimarlık tarihi içerisinde referans gösterilen yapılardan ve modern dönem tasarımlarından oluşturulmuştur. Cephe konstrüksiyonu ve strüktür sistemleri olarak incelenen yapılar kategorize edilerek geometrik şekillerin yapılarda uygulanabilirliğine yönelik çıkarımlarda bulunulmuştur. Arıca kuramsal çerçeveye yönelik literatür çalışmaları yapılmıştır.

Beşinci bölümde, analizi yapılacak taşıyıcı ızgara sistemler, sonlu elemanlar modeli oluşturularak belirlenen parametrelere göre tasarlanmıştır. Modeller aracılığı ile test edilecek tesselasyon kurguları, geometrik performansları gözetilerek değiştirilmiştir. Örüntülerin karşılaştırılabilmesi için birbirlerine yakın özelliklere sahip olması gerekmektedir. Geometrik tesselasyon kurgularında bu şartı sağlamak için ise grid yoğunluğu ve grid faktör parametreleri referans alınmıştır. Kontrollü şekilde elde edilen kurgular ızgara sistemler üzerinden uygulanmıştır.

Tezin alan çalışması 2 farklı aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, tüm örüntülerde ve formlardaki modellerin emelan kesitleri sabit tutularak yapısal performansları değerlendirilmiştir. Bu aşama neticesinde en rijit ve en kararlı örüntü belirlenmiştir. İkinci aşamada ise önceki analiz sonuçlarına bağlı olarak düzlemsel ve tek eğrilikli tonoz ızgara strüktürlerin uygulama alanında efektif çözümlenmesi ve tasarımcılar için strüktür dizaynı bağlamında optimum sistem seviyesine ulaşabilmek hedeflenmiştir. Bunun için yapı malzemelerinin farklı kesitleri alınarak optimizasyon işlemleri yapılmıştır. Optimizasyon analizleri için sınırlandırmalar ve gereklilikler ortaya konulmuştur.

Bahsedilen aşamalarda en temel amaç kurgular arasında karşılaştırılabilir bir yapısal çerçeve oluşturmaktır. Bu aşamada geometrik kurguların karakteristik yapılarının ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Analiz sonuçlarına bağlı olarak elde edilen veriler ile birlikte karşılaştırmalı analizlerin yapılması ile birlikte taşıyıcı sistemler hakkında çıkarımlar ortaya konulmuştur.

Çalışmada ızgara kabuk strüktürler ile oluşturulan tesselasyon sistemleri mimari programlar ile tasarlanmıştır. İlk olarak Rhinoceros ve Grasshopper ile tasarlanan düzgün ve yarı düzgün tesselasyonlar ile oluşturulmuş ızgara kabuk strüktürler, AutoCAD programına aktarılmış, ardından gerekli düzenlemeler yapılmış ve Sap2000 programında sonlu elemanlar yöntemi çerçevesinde ayarlanarak yapısal analiz için testlerden geçirilmiştir. Tez alan çalışmasında uygulanan değişkenler ışığında izlenecek adım sıralaması sonucunda optimum çözümler için değerlendirmeler yapılmıştır. Tesselasyon kurgularının sistemlere yansımaları yorumlanarak taşıyıcı strüktür sistemlerdeki geometrik formların, strüktürlerin performanslarına etkisi gözlemlenmiştir. Detaylı açıklamalar alan çalışması bölümünde verilmiştir.

Altıncı bölümde, yapısal performans analiz sonuçlarının karşılaştırmalı analiz yöntemiyle değerlendirilmesi puanlama sistemine göre yapılmış, elde edilen veriler kapsamında değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Yedinci bölümde, yapılan analizler ışığında sonuçlar tartışılmış, tasarımcılara ve kullanıcılara yönelik önerilerde bulunulmuştur.



## 2. TESSELASYON KAVRAMI

Tesselasyon, boş bir bölge veya belirli bir alanı tamamen ya da kısmen kaplamada, tekrar eden düzgün çokgenleri (eşkenar üçgen, kare, düzgün altıgen vb.) ya da düzgün olmayan çokgenleri aynı veya farklı geometrik şekillerin kullanılmasıyla belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmesiyle oluşturulan yüzeylerin boşluk kalmayacak şekilde tasarlanmasını ifade etmektedir.

Tesselasyon kavramı, literatürde mozaikleme olarak adlandırılmaktadır. Mozaikleme, bir yüzeyi geometrik şekiller kullanarak bölme işlemidir. Mozaikleme süreci esas olarak bir veya daha fazla geometrinin düzenli tekrar eden desenlerine sahip düzlemsel yüzeyler oluşturularak kullanılmıştır. Farklı algoritmalar kullanılarak bu işlem herhangi bir yüzeye uygulanabilir (Iuorio ve diğerleri, 2019).

Bu bütünlük teknolojinin gelişmesiyle birlikte matematiksel modelleme programlarını da geliştirmiştir. Matematiksel modelleme ile birlikte strüktür tasarımları ve geometri parametreleri ön plana çıkmaktadır. Oluşturulan her geometrik form, mimarlık ile ilişkilendirilebilir ve mimari tasarım sürecine dâhil edilebilir. Tesselasyon kavramını anlamak için öncelikle mimari tasarım ilkelerini bilmek gerekmektedir.

Mimaride tekrar ve ritim birer tasarım ilkesidir. Tekrar, görsel bütünlüğün sağlanması için neredeyse tüm sanat dallarında çeşitli davranış biçimleri ile başvurulan bir uygulamadır. Ritim, tekrarlama temeli üzerine oluşturulmuş bir tasarım prensibidir (Şekil 2.1). Ritmin oluşmasını sağlayan tekrarlar, tasarımda tutarlılık kurulmasını sağlayan düzen, denge ve intizam algısı yaratmaktadır (Chan, 2012).

Tekrar ve örüntü sözcükleri direkt olarak ritim kavramıyla ilişkilidir (Bradley, 2013). Yinelenen elemanlar arasındaki boşluklar ritim hissi yaratmaktadır (Resim 2.1). Tasarımda, belirli bir alana dikkat çekmek için ya da bu elemanlar arasındaki ilişkiyi göstermek için kullanılmaktadır (Bulu, 2018).

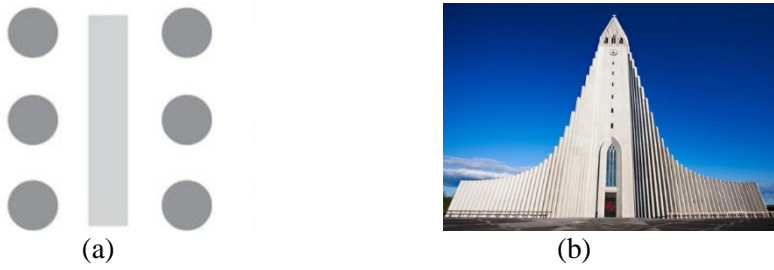


Şekil 2.1. (a) Bir örüntü örneği, (b) Bir ritim örneği (Takva ve İlerisoy, 2021)



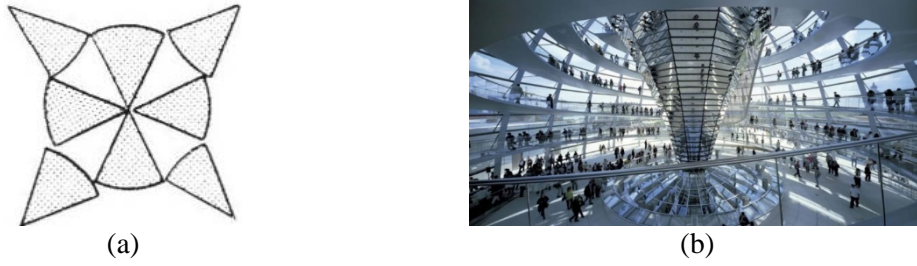
Resim 2.1. (a) Sugamo Shinkin bankası ve rastlantısal ritim, (b) Mülimatt lisesi ve düzenli ritim (Bulu, 2018)

Bütün ve parçalar arasındaki bütünlük mantığı harmoni ilkesini tanımlamaktadır. Tasarım çerçevesinde düzen, ahenk kavramları ile bağlantılı olan harmoni, parçaların bir düzen içerisinde bir araya getirilmesini gerektirmektedir (Bulu, 2018).



Resim 2.2. (a) Simetrik denge sağlanmış bir figür, (b) Hallgrímur kilisesi (Bulu, 2018)

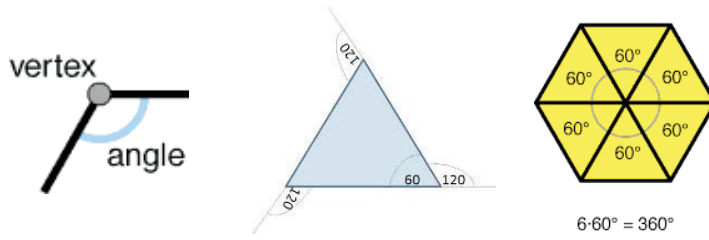
Harmoni oluşturma yollarından biri de dengedir. Denge, görsel parçaların dağılımını adlandıran bir kavramdır (Lohr, 2008). Denge durumunu sağlamanın biri olan simetrik dengede tasarım ortadan ikiye ayrıldığında bir taraf diğerinin aynası olacak biçimde düzenlenmelidir (Resim 2.2, 2.3). Ayna etkisi, formalite ve statik durma hissi doğurmaktadır (Alharbi, 2016).



Resim 2.3. (a) Radyal denge sağlanmış bir figür, (b) Reichstag Parlamento binası (Bulu, 2018)

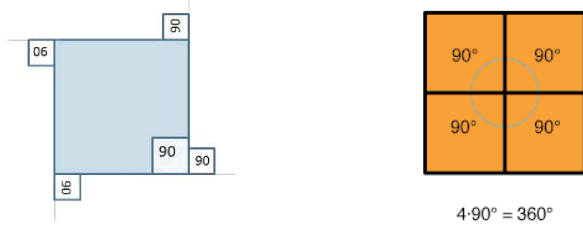
## 2.1. Tesselasyon Kavramının Geometri ile İlişkisi

Tesselasyon yönteminin uygulanması için belli kurallar mevcuttur. Öncelikle geometrik şekiller ardışık bir düzen içerisinde ve aralarında boşluk olmadan yerleştirilmelidir. Ayrıca şekiller üst üste binmeden kapalı hacimler oluşturulmalıdır.



Şekil 2.2. Üçgen geometrik form ve matematiksel bağlamda tesselasyon kurgusu (Khaira, 2009)

Üçgen geometrik şekil ile saat yönünde aynı şeklin döndürülmesiyle 360 dereceyi tamamlayan altıgen bir tesselasyon modülü oluşturabilmektedir (Şekil 2.2). Altıgen modüllerin üst üste bindirilmeden yan yana çoğaltılmasıyla ardışık örüntüler oluşturularak bir yüzey kaplanabilir ve mimari bir yüzey elde edilmiş olur. Elde edilen mimari örüntü duvarlarda, tavanlarda, yapı elemanlarında dekoratif ve süsleme amacıyla kullanılabilir. Ayrıca geniş açıklıklı yapı kabuklarında temelde üçgen modüller ile yaratılan düzgün altıgen modüller göze çarpmaktadır.



Şekil 2.3. Dörtgen geometrik form ve matematiksel bağlamda tesselasyon kurgusu (Khaira, 2009)

Kare geometrik şekil saat yönünde kenarlar üst üste çakışmayacak şekilde eklendiğinde 360 dereceyi tamamlayan kare modül meydana gelmektedir (Şekil 2.3). Örüntüyü elde etmek için kare geometrik form zorunlu değildir. Dikdörtgen veya dörtgensel düzgün olmayan çokgenlerin kullanılmasıyla da modüller ve kurgular ortaya çıkarılabilir. Kare modüller kararlı ve simetrik yapılarından dolayı en çok kullanılan mimari ve geometrik figürlerden biridir. Kare veya dörtgensel örüntüleri mimari elemanlarda sıklıkla görebilmemiz mümkündür.



Şekil 2.4. Altıgen geometrik form ve matematiksel bağlamda tesselasyon kurgusu (Khaira, 2009)

Altıgen geometrik şekil 360 dereceyi tamamlayarak yan yana getirildiğinde bir tesselasyon modülü oluşturulmuş olur (Şekil 2.4). Modül aslında doğada oldukça göze çarpmaktadır. Arıların bal petekleri doğadaki altıgen tesselasyon örüntülerinin açıkça bir örneği sayılabilir. Düzgün altıgen modül, kenarlarından diğer kenarlara çizgiler çekildiğinde altı adet üçgen geometrinin birleşmesinden oluşur. Geniş açıklıklı yüzey oluşumlarında, dekoratif panellerde, cephelerde, yer döşemelerinde altıgen kurguların örneklerine rastlamak olasıdır.

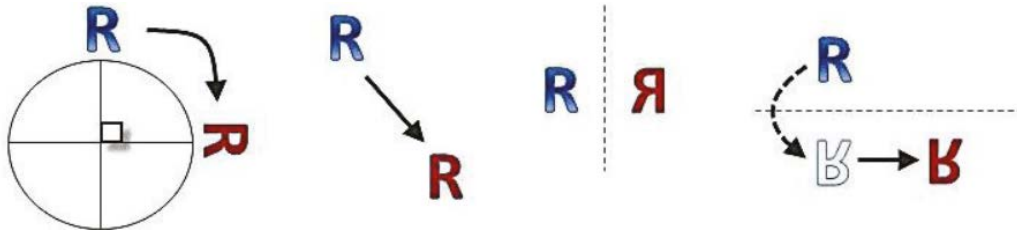
Düzgün sekizgen figürlerde de aynı durum söz konusudur. İki aynı şekil yan yana birleştirilebilir, ancak 3. Şekil veya 4. Şekil devamında getirildiğinde açı ve kenar

uzunlukları sebebiyle örüntü bozulmaktadır. Bu sebeple bazı düzgün çokgenlerde istisnai durumlar görülebilmektedir (Şekil 2.5).



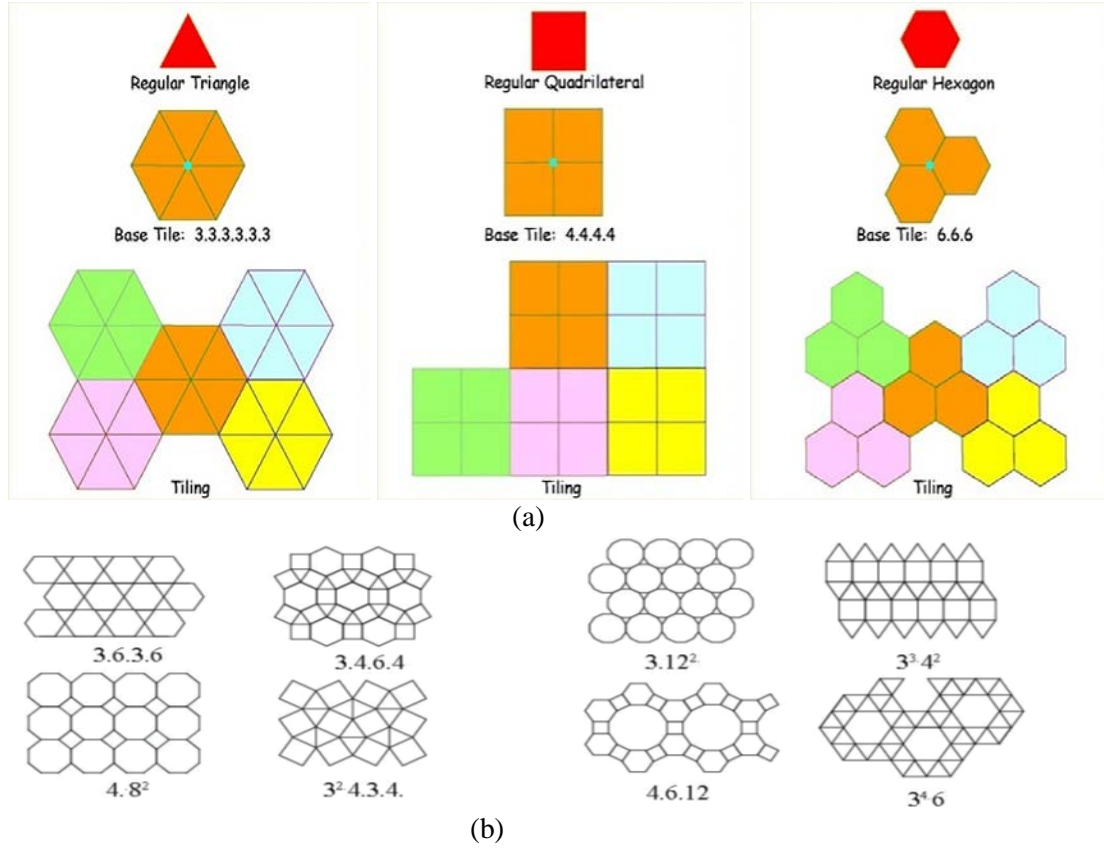
Şekil 2.5. Tesselasyon kurgusunun oluşturulamadığı düzgün çokgenler (Khaira, 2009)

Örüntülerin yaratılması için geometrik şekillere ihtiyaç vardır. Şekil modüllerinin çoğaltılması matematiksel terimlerin kullanılmasıyla sağlanabilir. Matematiksel terimler kelimesi derinleştirildiğinde öteleme, yansıma ve dönme kavramları önümüze çıkmaktadır. Bir tesselasyon örüntüsü bu kavramların çoklu kombinasyonlarıyla meydana gelmektedir. Kombinasyonlar çeşitlilik gösterebilmektedir. Üçgen geometrik form ile sadece öteleme hareketi ile bir kurgu yaratılabilirken öteleme, dönme, yansıma parametrelerinin hepsinin bir arada kullanımı ile çeşitli dokular oluşturulabilmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Örüntüleri oluşturmak için gerekli olan öteleme, yansıma ve dönme hareketleri (Deger, K., Deger, A., 2012)

Mühendislik, sanat ve özellikle mimarlık dalında tarih boyunca tesselasyon tekniği birçok şekilde sınıflandırılır, fakat en çok kullanılan sınıflandırılma şekli düzgün çokgenler ile türeyen kurgulardır. Şekil 2.7'deki geometrik şekillerde kırmızı renkli noktanın etrafındaki çokgenlerin kenar sayılarına ve kaç tane olduklarına göre matematiksel olarak tesselasyon örüntüleri adlandırılır. Düzgün geometrik şekillerin tek başlarına bir araya getirilmesi ile yaratılan tesselasyon formları düzgün tesselasyon olarak isimlendirilirken, farklı düzgün geometrik şekillerin yan yana getirilmesi ile yarı düzgün tesselasyon formları elde edilmiş olur (Gazi, Korkmaz, 2015).

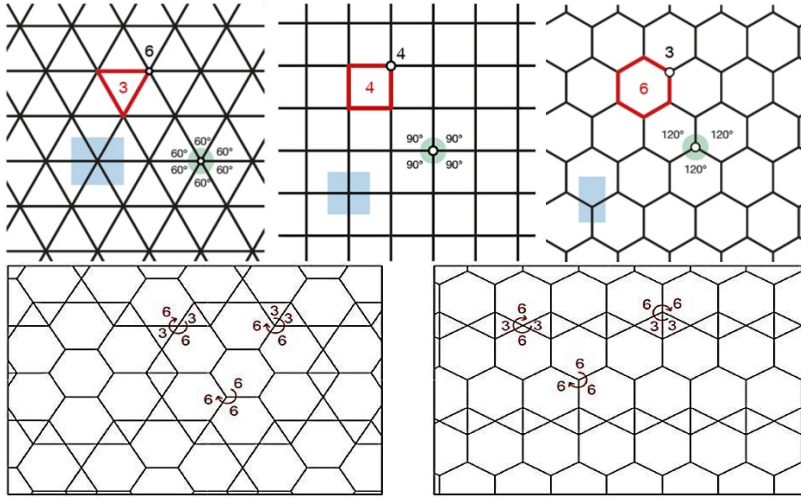


Şekil 2.7. Tesselasyon örnekleri; (a) Düzgün tesselasyonlar, (b) Yarı düzgün tesselasyonlar (Gazi, Korkmaz, 2015), (URL-4)

Düzgün ve yarı düzgün tesselasyon oluşumları elde etmek için bir yüzey meydana getirmek gerekmektedir. Bu amaçla hangi geometrik düzenlerin bir araya getirildiğini görmek önemlidir (Şekil 2.8). Örneğin üçgen ve dörtgen geometrilerinin yan yana getirildiğinde tam bir tesselasyon modülü oluşturup oluşturmadığı test edildikten sonra yan yana getirilip bir düzlem oluşturma işlemine geçilmelidir. Bu işlem sürecinde geometrik şekillerin kenar sayısı ve iç açı ölçüleri başlıca dikkat edilmesi gereken durumlardır (Çizelge 2.1).

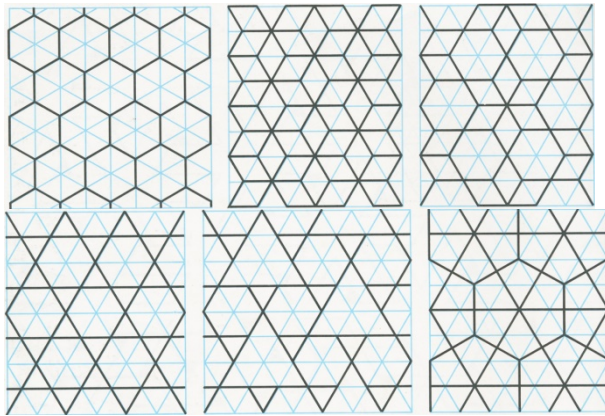
Çizelge 2.1. Düzgün çokgenlerin tesselasyon durumları (Deger, K., Deger, A., 2012)

Düzgün çokgen	Kenar sayısı	İç açı ölçüsü	Tessele edilebilme
Üçgen	3	60	Evet
Kare	4	90	Evet
Dikdörtgen	4	90	Evet
Beşgen	5	108	Hayır
Altıgen	6	120	Evet
Yedigen	7	128,57	Hayır
Sekizgen	8	135	Hayır
Dokuzgen	9	140	Hayır
Ongen	10	144	Hayır



Şekil 2.8. Düzgün ve yarı düzgün tesselsasyonlarla elde edilen düzlemsel yüzeyler ve matematiksel ifadeleri (Takva ve İlerisoy, 2021)

Tesselsasyon kurguları, tek şekil ile oluşturulabilirken altlık olarak da tek şekiller kullanılabilir. Örneğin, üçgen tesselsasyon örüntüsü altlık olarak çizildikten sonra bu örüntünün üzerinde farklı çizgisel oynamalar ile çeşitli biçim arayışlarına girilebilir. Üçgen kararlı bir form olmasından dolayı hem düzgün hem de yarı düzgün oluşumlara fırsat tanımaktadır. Üçgen örüntüler yeni tesselsasyon kurgusunu oluşturarak temelde üçgen olan bir biçimin çok yönlü betimlenmesine olanak sunmaktadır (Şekil 2.9).

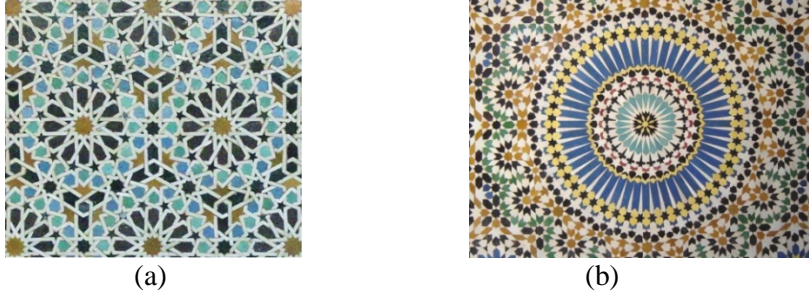


Şekil 2.9. Altlık olarak kullanılan üçgen tesselsasyon modeli ve yeni türetilen modeller (Wade, 1982)

## 2.2. Tesselsasyon Kavramının Tarihçesi ve Örnekleri

Tesselsasyon kavramı literatürde mozaikleme, fayanslama gibi anlamlara gelmektedir. Mozaikleme anlamıyla sanat tarihi, İslam sanatı gibi alanlarda da görüldüğünü söylemek

mümkündür. Ayrıca karo ve çini yüzeylerde de tesselasyon tekniği ile yer döşemesinde, tavanlarda veya duvarlarda bu yöntem gözlemlenebilir (Resim 2.4).



Resim 2.4. (a) Mozaik desen (Saadien Mezarları-Marakeş'ten), (b) 48 kat desen (Fas'tan), (Thalal ve diğerleri, 2011)

Özellikleri ve dekoratif estetiği nedeniyle, tesselasyon sanat ve mimaride benzer şekilde kullanılmıştır. Kökeni, Sümerlilerin evlerinde ve tapınaklarında dekorasyon malzemesi oluşturmak için kil karoları kullandıkları milattan önce 4000 yıllarına kadar uzanabilir (Resim 2.5). Ardından, Mısırlılar, Persler, Romalılar ve Yunanlılardan Bizans, Arap, Japon, Çin ve Moorlara kadar birçok medeniyet sanatında yerini bulmuştur. Tekniğin doğası ve tasarımı, bu kültürlerin ve geleneklerin her birine uyacak şekilde geliştikleri ve adapte oldukları için değişmiştir. 19. Yüzyılda Orta Çağ boyunca, bir grup aydın, geometrik yapılarını açıklamak için doğada mevcut tesselasyon örüntülerini gözlemlemeye başlamış ve bu da matematiğe dayanan çok sayıda çalışma ile sonuçlanmıştır (URL-5).

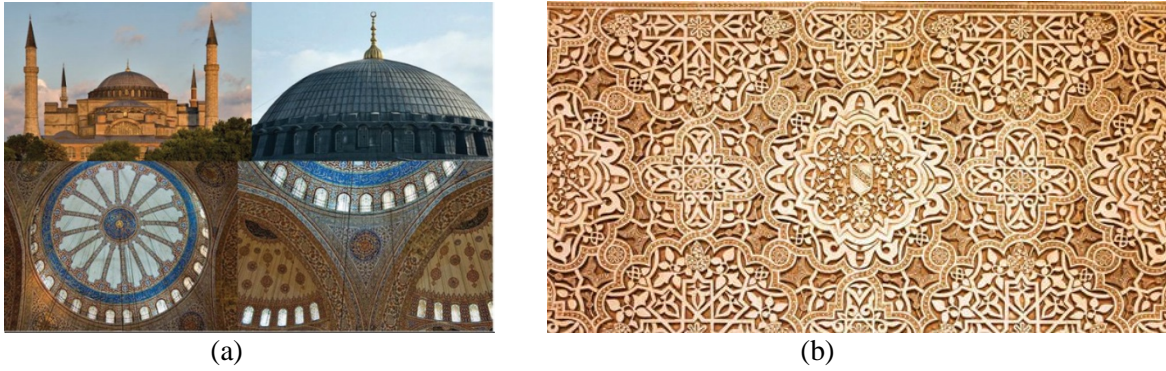


Resim 2.5. Güney Mezopotamya'nın Uruk (VI – IV) ve Jemdet Nasr dönemlerinde kullanılan bir çeşit duvar dekorasyonu (URL-5)

Antik Roma mozaiklerinden İslam mimarlığının vitraylarına kadar çoğu alanda teknik kullanılmıştır. Teknik ile oluşturulan dekoratif yüzeyler, mekânı tanımlamak veya sembolik bir algı yaratmak için oluşturulmuştur (Sevgi, 2013). Dini yapılarda, özellikle

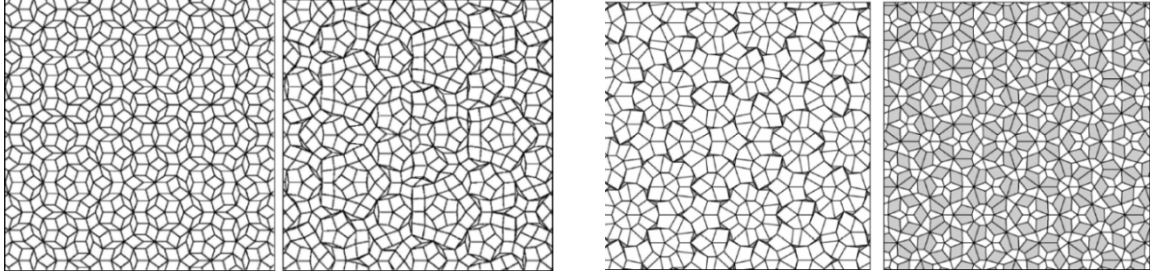
İslam mimarlığında süsleme ve bezemelerde mozaikleme tekniği geniş çapta yer tutmaktadır. Ayasofya'nın kubbesinin yüzeyindeki yapı elemanı dikdörtgen tesselasyon ve Sultanahmet'in iç mekânındaki bezemeler, süslemeler ayrıca vitraylı camlar tesselasyon kavramına örnek teşkil etmektedir.

13.yüzyılda eski Granada kentine bakan bir tepede inşa edilen Elhamra Sarayı birkaç kule ile çevrili bir saraydan oluşmaktadır. Matematiksel simetri ile ilgili çeşitli fikirlerin anlaşılmasını sağlamak için 'Elhamra geometrisi' kavramı da mevcuttur (Resim 2.6). Elhamra'da bulunan İslami çini desenleri geometrik tekrar, simetri ve süreklilik kurallarına uymaktadır (Tennant, 2009).



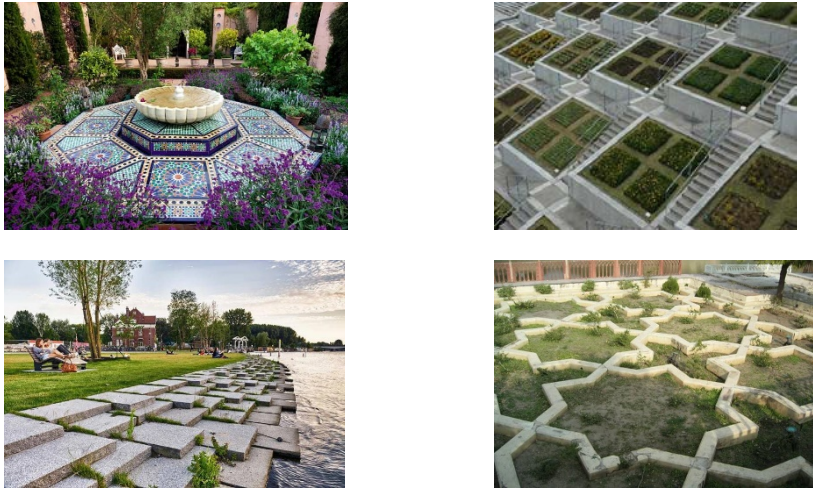
Resim 2.6. (a) Üstte Ayasofya Kilisesi, altta Süleymaniye Camii iç görselleri (Khaira, 2009), (b) Elhamra Sarayı (Chang, 2018)

Tesselasyon yöntemi, ressam ve grafik sanatçısı olan Maurits Cornelle Escher ve İngiliz fizikçi ve matematikçi Roger Penrose'un çalışmalarında da görülmektedir. Penrose tarafından geliştirilen Penrose karolaması (Penrose Tiling), kabaca bir düzlemin kaplanmasını ele alır. Belli sayıda farklı görünümlü desenler bir araya gelerek zemin kaplanmaktadır. Belirli bir tekrar örüntüsüyle simetrik bir görünüm oluşturulmuştur. İlk Penrose döşeme sistemi beşgenlerden elde edilmiştir. Beşgen geometriye pentagram ve eşkenar dörtgen eşlik ederek yüzey kaplaması sağlanmaktadır (Şekil 2.10). Penrose kaplamaları, ayrıca Orta Çağ İslam sanatının bazı mimari örneklerinde de yer almaktadır. 1453 yılında İran'da inşa edilen Darb-ı İmam Camisindeki motifler bu döşeme sisteminin keşfinden 500 yıl önce görülmektedir (Ural, 2020).



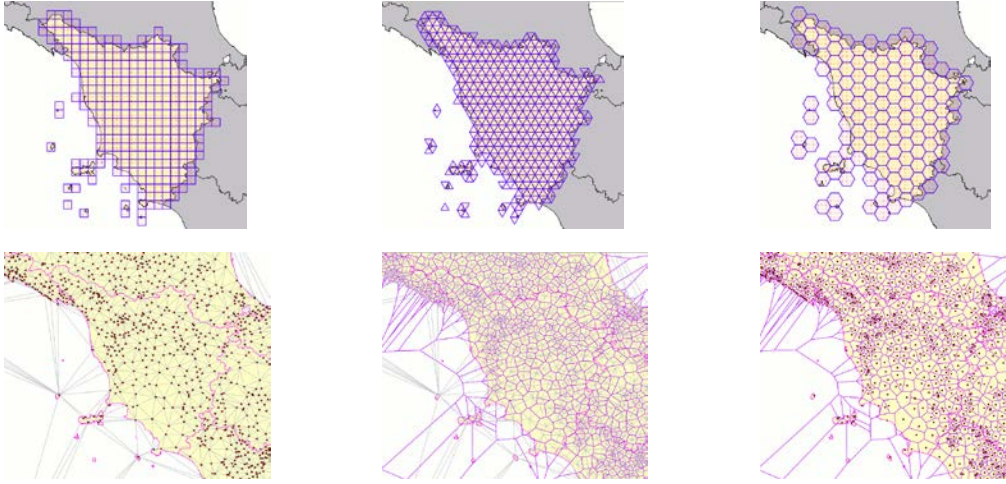
Şekil 2.10. Penrose döşemelerinin farklı desen görünümleri (Sing ve Welberry, 2006)

Mimarlık disiplini ile ilişkili dallarda da tesselasyon kurgularına rastlanmaktadır. Peyzaj düzenlemelerinde bu kurgu düzenli ya da düzensiz geometrik örüntüler ile sağlanabilmektedir. Dekoratif veya süsleme amaçlı tasarım örnekleri bahçe planlamalarında yapılabilmektedir. Tesselasyon yöntemiyle peyzaj düzenlemeleri göze hitap etmesinin yanında estetik bir özellik yaratmak için de kullanılabilir. Tekniğin uygulanması ile düzen veya düzensizlik oluşumları türetilmektedir (Resim 2.7).



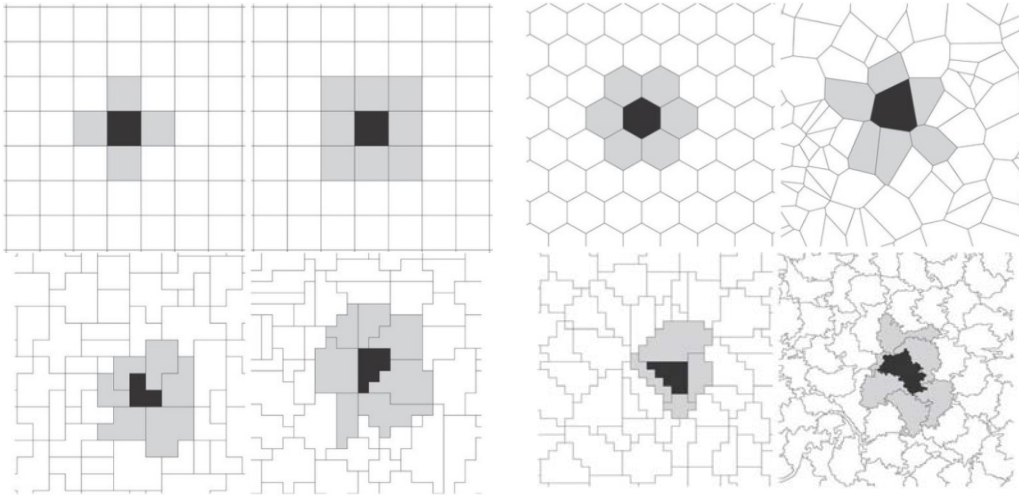
Resim 2.7. Peyzaj düzenlemeleri (URL-6, URL-7, URL-8, URL-9)

Peyzaj mimarlığında olduğu gibi şehir bölge planlamada da tesselasyon kurgusu görülmektedir. Bir bölgenin planlanmasında düzenli tesselasyon örüntülerini kullanmak o alanı karmaşıklıktan uzak, kolay anlaşılabilen ve tanımlanabilen bir hale dönüştürmektedir. Aynı alan voronoi ve delaunay diyagramları ile oluşturulduğunda düzensiz ve periyodik devam etmeyen geometrik şekiller ortaya çıkmaktadır. Her iki sistem (düzenli ve düzensiz tesselasyonlar) de uygulanabilmektedir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Bir bölgenin farklı tesselasyon kurguları (URL-10)

Geometrinin homojen tasarlanarak örüntüler oluşturması ile hücresel hareketi nasıl etkileyeceği test edilebilmektedir ve düzenli, düzensiz tesselasyonlardan oluşan bir takım geometriler karşılaştırılabilmektedir. Düzenli geometrilerin örnekleri nitel ve nicel hatalar oluşturabilmektedir, ancak bunlar çoklu geometrik örneklerin kullanılmasıyla birlikte asgari seviyeye indirilebilmekte veya engellenebilmektedir (Şekil 2.12). Düzensiz geometriler kullanılarak oluşturulan modeller karmaşık dünya görüntülerini temsil etmektedir (Holland ve diğerleri, 2007).



Şekil 2.12. Geometrik modellerin şehir planlamadaki etkisi (Holland ve diğerleri, 2007)

### 2.3. Tesselasyon Çeşitleri

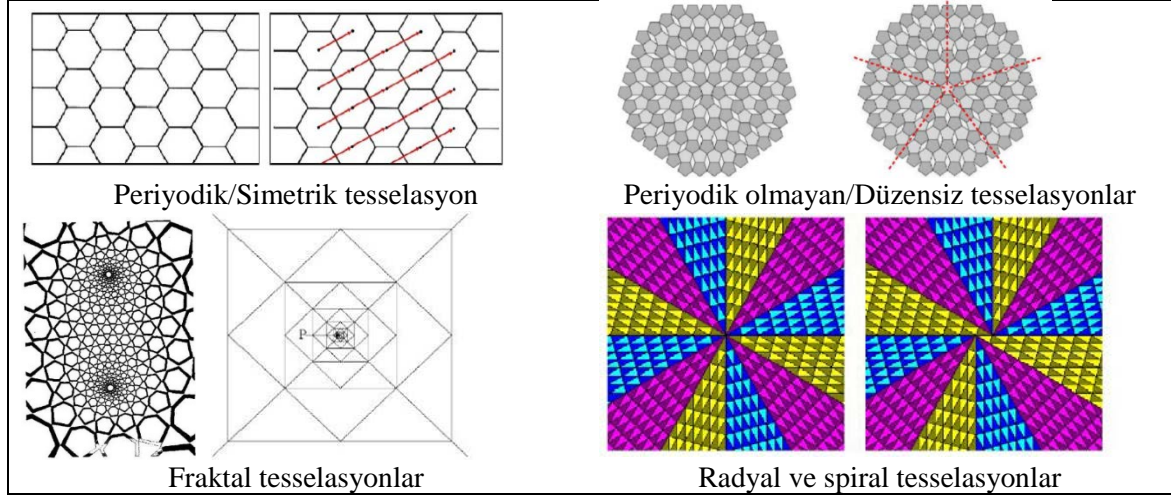
Tesselasyon tekniği, kabaca 2 boyutlu tesselasyonlar ve 3 boyutlu tesselasyonlar olmak üzere 2 çeşitten oluşmaktadır (Chang, 2018). 2 boyutlu tesselasyonlar, periyodik/simetrik, periyodik olmayan/düzensiz, fraktal, radyal ve spiral tesselasyonlar olarak alt sınıflara ayrılabilir (Şekil 2.13). 3 boyutlu tesselasyonlar ise kristal ve yarı kristal yapılar ve diğer türler olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.14).

Periyodik/simetrik tesselasyonlar, geometrik şekillerin öteleme, yansıma ve dönme hareketleriyle oluşturulan matematiksel ifade olarak düzgün ve yarı düzgün tesselasyon kurgularını içinde barındıran yöntemdir. Periyodik olmayan/düzensiz tesselasyonlar, voronoi ve delauney tesselasyon gruplarını kapsayan düzensiz geometrik şekillerin periyodik olmayan tekrarlarının bir sonucudur. Fraktal tesselasyonlar, aynı geometrik şekillerin boyut ve ölçek açısından küçülme veya büyüme durumlarına göre şekillenen tesselasyon çeşididir. Radyal ve spiral tesselasyonlarda, radyal tesselasyonlar eş merkezli çemberler ile oluşturulabilen geometrik düzlemleri anlatırken, spiral tesselasyonlar eğrisel açıdan bir araya getirilen formların tesselasyon kurgularını içermektedir.

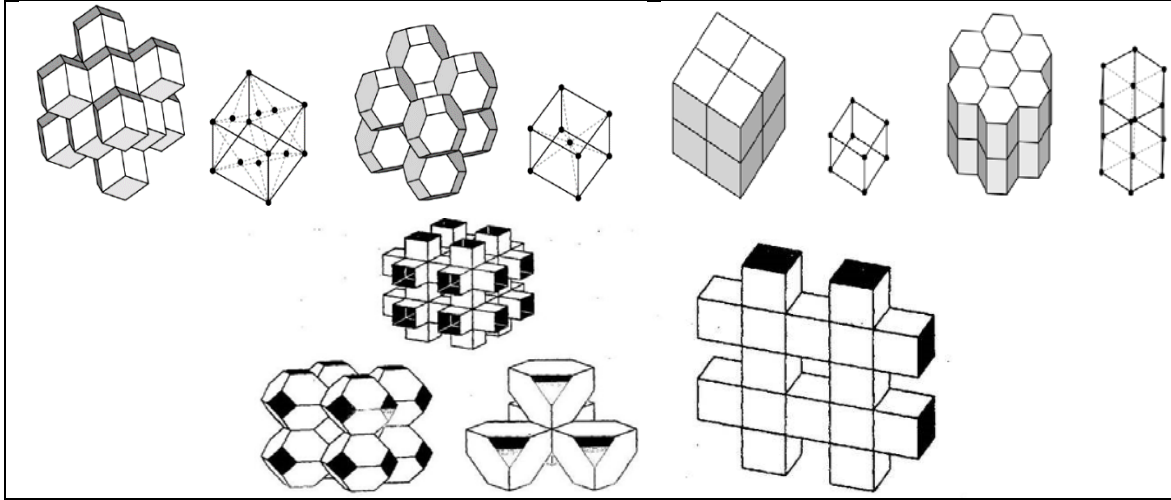
3 boyutlu tesselasyonlar incelendiğinde, kristal ve yarı kristal yapılar, 3 boyutlu geometrik hacimlerin tekrarını kapsamaktadır. Diğer türler, kristal yapıda olmayan düzensiz geometrik hacimlerin birleşimlerini araştırmaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Tesselasyon çeşitleri (Chang, 2018)

2 BOYUTLU TESSELASYONLAR	3 BOYUTLU TESSELASYONLAR
Periyodik/Simetrik tesselasyonlar	Kristal ve yarı kristal yapılar
Periyodik olmayan/Düzensiz tesselasyonlar	Diğer türler
Fraktal tesselasyonlar	
Radyal ve spiral tesselasyonlar	

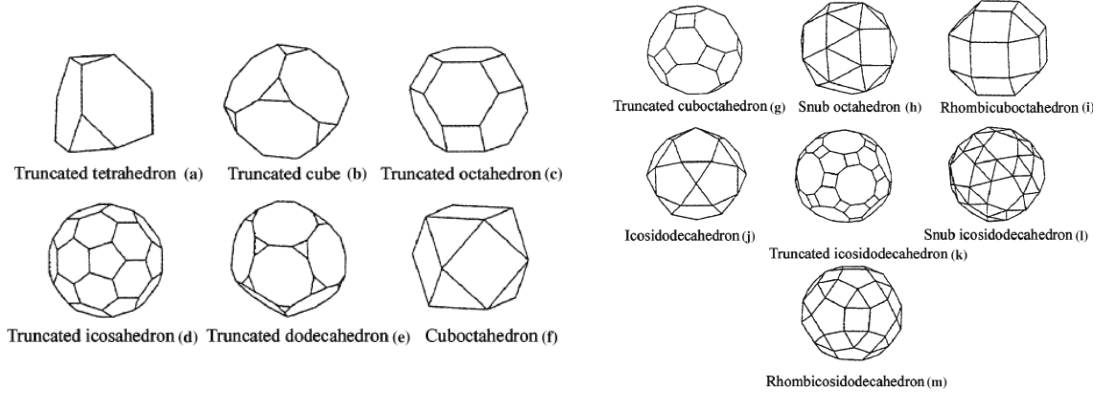


Şekil 2.13. 2 boyutlu tessellasyonlar (Chang, 2018), (Wells ve Alsan, 2000)



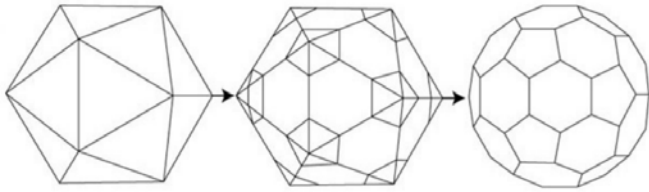
Şekil 2.14. 3 boyutlu tessellasyonlar (Chang, 2018), (Wells ve Alsan, 2000)

Düzen ve yarı düzen çokyüzlüler de 3 boyutlu tessellasyon sınıfına girmektedir. 13 adet yarı düzen çokyüzlü (polihedra) Arşimet adını taşımaktadır (Şekil 2.15). Arşimet cisimlerinin özelliklerinden biri, her yüzün düzen bir çokgen ile kaplanması ve her köşenin çevresinde aynı çokgenlerin aynı dizilişte bulunmasıdır (Ural, 2020).



Şekil 2.15. 13 Arşimet çokyüzlüsünün 3 boyutlu görünümüleri (Rajtmajer ve diğerleri, 2006)

1987 yılında Amerikan mimar ve tasarımcı Buckminster Fuller, Fullerene adlı bir keşif yapmıştır. Aynı ölçüde kesilmiş 20 eşit yüzlü biçimdeki küresel kubbeler Fuller'ın keşiflerinden birisidir (Şekil 2.16). 1985 yılında çoğaltılan karbon zinciri, Buckminster Fuller tarafından oluşturulan küresel kubbe şekline benzediği için bu yapıya buckminster fullerene ismi verilmiştir. Yapı, bir 20 yüzlüdür ve 12 beşgen-20 altıgen içermektedir (Ural, 2020).

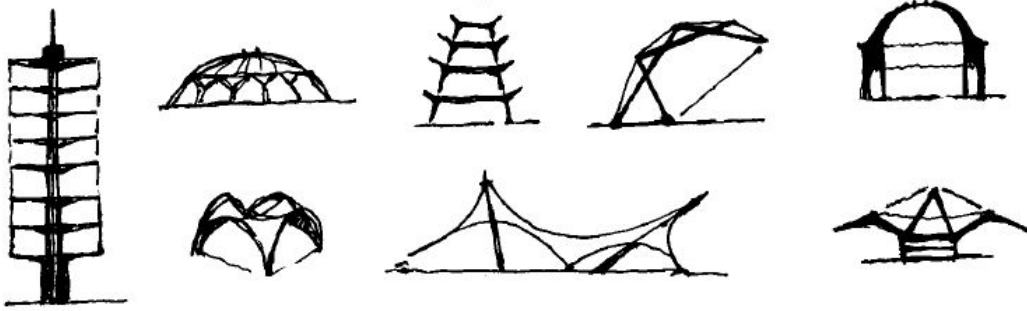


Şekil 2.16. C60 kararlı karbon molekülü (Ural, 2020)

### 3. TAŞIYICI SİSTEMLER

Strüktür, yapının iskeletini oluşturan taşıyıcı sistemin ve elemanlarının genel adı olarak tanımlanabilir. Yatay veya dikey yapı elemanları kullanılarak oluşturulabilirler, ya da bu iki yapı elemanının kombinasyonu ile elde edilebilirler. Bu kapsamda, kolonlar, kirişler ve duvarlar gibi yapıyı betimleyen elemanlar, strüktür sisteminin örüntüsünü, basitlik-karmaşıklık, düzenlilik-rastgelelik gibi özelliklerini belirlemektedir. Bu nedenle strüktürler boşluğu tanımlamak, birimleri oluşturmak, sirkülasyonu sağlamak ve çeşitli kompozisyonlar ve modülasyonlar meydana getirerek mimari yapıların kalitesini ve kurgusunu ön plana çıkarmaktadır (Charleson, 2014).

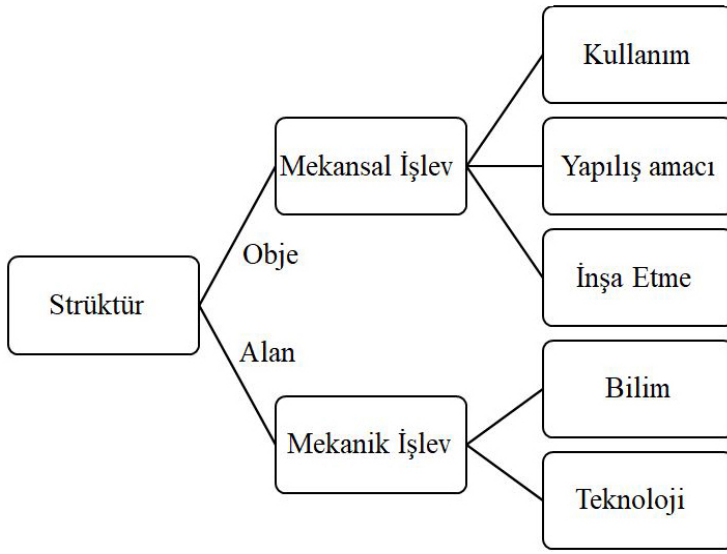
Mimari olmadan strüktürleri hayal etmek kolay olsa da, strüktürler olmadan mimari yapılar bir bütün olarak algılanamamaktadır. Mimaride yapıların tasarımı, genellikle ağırlığının da taşınması gereken çatıları, duvarları ve döşemeleri içermektedir ve strüktürlerin yardımıyla dengelenmektedir. Mimari ve strüktür arasında birbirine bağımlı bir ilişki söz konusudur. Bu iki kavram arasındaki özel ilişkiyi anlamak için temel strüktür fonksiyonlarına odaklanmak gerekmektedir. Bir strüktürün en temel ve belirgin işlevi, herhangi bir yapı elemanını belli bir zemin üzerinde yüklemelere karşı ayakta tutmaktır. Dolayısıyla yaşanabilir alanlar yaratmak strüktürlerin görevidir (Şekil 3.1). Mimari bağlamda alanlar oluştururken, bu alanlar için farklı tasarımlara zemin hazırlayarak mekanik özelliğinin yanında fiziksel değer de kazanmaktadır (Sandaker ve diğerleri, 2019).



Şekil 3.1. Farklı strüktür kullanımlarına göre mimari boşlukların oluşturulması (Mosseri, 2004)

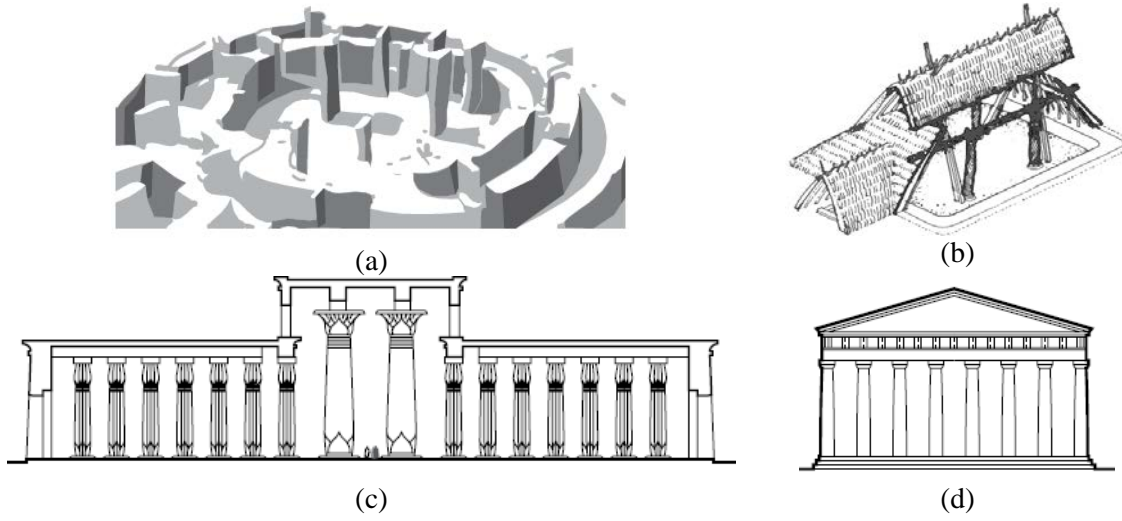
Strüktür sistemleri, insanlığın varoluşuyla ortaya çıkmıştır ve evrimiyle de genişlemiştir. En az on bin yıllık bir gelişim dönemini kapsayan bu sistemler, konstrüksiyonun davranışı

göz önünde bulundurulduğunda şekil ve boyut olarak geniş bir aralığı örtmektedir (Mainstone, 2013). Gelişen taşıyıcı sistemler, mekânsal ve mekanik işlemlere göre gruplandırılmıştır ve farklı alanlara göre çeşitli düzenlemeler gerektirmektedir (Şekil 3.2). Strüktür sistemleri yalnızca düzen kurmak ve yükleri aktarmak için planlanmamaktadır, çoğu halde tasarımın ana parçası olarak bir mimari yapının hem estetik yönüne hem de yapısal özelliklerine önemli derecede etki ettiği söylenebilmektedir (Kavurmacioğlu ve Arıdağ, 2013).



Şekil 3.2. Yapı formlarının oluşmasını sağlayan strüktürlerin taksonomisi (Cruz, 2013)

İnsanlar, tarih boyunca basit barınaklardan (kerpiç, taş, ahşap) daha sofistike olanlara (betonarme, çelik, cam, kompozit) doğru yaşayabilecekleri yapılar geliştirmişlerdir. Yapı teknolojisinin bu evrimi boyunca, sabit kalan durumlardan biri ise biçimin kalıcı varlığıdır. Yerçekimi, rüzgâr ve depremler gibi doğal afet kuvvetlerine dayanabilmesi üzerine belirli bir işlevi gerçekleştirmek için tasarlanan ve inşa edilen, uygulanan yükleri, gerilimleri güvenli ve kararlı bir şekilde zemine aktaran yapısal elemanlar taşıyıcı sistem olarak adlandırılır (Ching ve diğerleri, 2014). Zaman içerisinde, temel insan ihtiyacını karşılamaya yönelik ilk girişimler güneşe, rüzgâra ve yağmura karşı daha geniş alanlara sığınmak için, daha yüksek seviyelerde, modernliği artan ve karmaşıklığı da beraberinde getiren mimariyi meydana çıkarmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. (a) Göbeklitepe, (b) Çin'deki Banpo evi, (c) Mısır'daki Amun Tapınağı, (d) Atina'daki Parthenon Tapınağı (Ching ve diğerleri, 2014)

Bazı dönemlerde taşıyıcı strüktürler süsleme olarak da görülmüştür ve yapılarda görsel bütünlük sağlamıştır. Tercih edilen bir yapısal sistemin biçimsel mantığı binaların genel biçimlerini de etkilemektedir. Süsleme-strüktür ilişkisi, Batı Mimarisi geleneğinde kendini göstermektedir. Bu geleneğin en önemli örneklerinden biri Parthenon Tapınağı sayılabilir (Resim 3.1). Yapıyı çevreleyen sütunlar strüktür biçimlenmesini yansıtırken, aynı zamanda yapının süslemesini de oluşturmaktadır ve görüntü olarak da süsleme-strüktür bağlamında bütünlük sağlamaktadır. Dönemsel olarak strüktürler ile göze çarpan süsleme sanatı, post-modern çağda yerini kolon ve kiriş düzenlemelerine bırakmıştır. Parthenon Tapınağı, bu anlamda süslemeden konstrüksiyon sistemine geçişi sembolize eden bir yapı konumundadır (Macdonald, 2018).



(a)



(b)

Resim 3.1. (a) Parthenon Tapınağı'nın ön görünümü, (b) Parthenon Tapınağı'nın perspektif görünümü (Macdonald, 2018), (Azad ve diğerleri, 2015)

Parthenon Tapınağı gibi yapıların arketip formu ve süslemelerin okunması, sembolik yapıların geometrisini de ilgi çekici hale getirmektedir. Günümüze dek ulaşan yapı malzemeleri ile tasarlanan bu yapılar, strüktür ve geometrik formlarıyla harmoni oluşturmaktadır. Yapılar strüktür sistemlerinden oluşmaktadır ancak sadece strüktür sistemlerinden oluşan yapılar da bulunmaktadır. Eskimo evleri olarak bilinen İglo yapıları, zincir eğrisi formunda üstteki kar blokların alttakilere bindirdiği yükü eşit bir şekilde dağıtmaktadır ve bu sayede yapısal direnç oluşturmaktadır. Böylece, yüklere karşı yapı ayakta kalmaktadır. Günümüze kadar İglo evleri varlığını sürdürmüştür. Paris'teki CNIT sergi yapısı ise İglo evlerinin modernize edilerek geliştirilmesi ile elde edilen kompleks bir bina versiyonudur (Resim 3.2). Yapının formunu oluşturan ana strüktür sistemi betonarme kabuktur. Cam yapı malzemesi de yapının strüktür sistemini desteklemektedir (Macdonald, 2018).



(a)

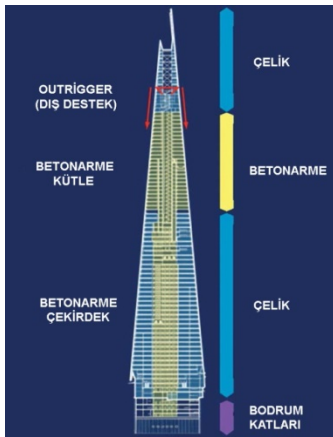


(b)

Resim 3.2. (a) İglo Eskimo evi, (b) CNIT sergi binası (Macdonald, 2018)

Günümüzde taşıyıcı sistem tasarımlarında strüktürlerin olası limitleri zorlanarak geniş açıklıklı yapılar ve yüksek binalar inşa edilmektedir. Ayrıca bu yapılar planlanırken yapı ağırlığı da düşünülerek hafif taşıyıcı sistemlere yönelim söz konusudur ve yük taşıma kapasiteleri de hesaplanmaktadır. Yüksek binalarda, yer çekimi, rüzgâr ve deprem gibi doğal kuvvetlere karşı önlemler yapısal çözümlere yani taşıyıcı sistemlere bağlıdır. Aynı zamanda bina formunun aerodinamik modifikasyonları da yapısal optimizasyonlar ile test edilmektedir (Ali ve Al-Kodmany, 2012). Shard Kulesi, yüksek yapılarda konstrüksiyon sistemlerinin birlikte harmanlanması açısından iyi bir örnektir ve Renzo Piano tarafından tasarlanmıştır (Resim 3.3a). Beton bir çekirdek etrafında 40. kata kadar çelik bir çerçeve sistemi kullanılmıştır, 41. kattan 69. kata kadar betonarme döşeme ve 95.kat seviyesine kadar çelik yapı malzemesi kullanılarak yapı tamamlanmıştır. Ayrıca bodrum katlarda yapının konumuna bağlı olarak yenilikçi bir yöntem olan top-down yöntemiyle kazık temel uygulaması yapılmıştır (Parker, 2013).

Geniş açıklıklı yapılar, 1970 ve 1980'lerde gelişme göstermeye başlamıştır ve günümüzde modern taşıyıcı sistemler ile gelişmeye devam etmektedir. Bu yapıların tasarım metodolojisinde strüktür sistemleri, hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerden oluşmaktadır. Açıklık geçilmesinde farklı malzemelerin ve hesaplamaların kullanımına bağlı olarak çeşitli geometrik formlarda yapılar inşa edilebilmektedir (Dong ve diğerleri, 2012). Water Cube, bu bağlamda geniş açıklıklı bir sistem olarak tasarlanan ve farklı bir geometrik düzeni bulunan bir yapıdır (Resim 3.3b). Karmaşık ve düzensiz polihedron çelik uzay kafes çerçevesi kaplı etilen tetrafloroetilen membran örtüler ile kaplanan yapı, modern ve teknolojik taşıyıcı sistem prensibine sahiptir (Wang ve diğerleri, 2010).



(a)



(b)

Resim 3.3. (a) Shard Kulesi taşıyıcı sistemi, (b) Water Cube strüktür biçimlenmesi (Wang ve diğerleri, 2010)

Taşıyıcı sistemlerde yapının türüne, açıklığına, formuna ve fonksiyonuna göre malzeme seçimi değişkenlik göstermektedir. Malzemenin karakteristik özelliklerine ve mukavemetlerine bakılarak yapının yük taşıma potansiyeli, maksimum geçilecek açıklık ve maksimum yükseklik gibi parametreler oluşturulmaktadır. Malzemenin fiziksel özellikleri de taşınabilecek iç kuvvet türlerini belirlemektedir. Beton yapı malzemesi, basınç ve eğilmeye karşı yüklendiğinde iyi performans ortaya koymaktadır, fakat özellikle aksel gerilimde iyi performans göstermemektedir. Çelik ise diğer malzemelere göre çekme kuvveti açısından en uygun yapı malzemesidir. Ayrıca farklı yapı malzemeleri ile tasarlanan yapılardaki form ve görsel nitelik de farklı olmaktadır. Bir strüktür malzemesinin özelleştiği diğer nokta ise sürdürülebilirliğe katkısıdır. Sürdürülebilirlik için iki ana düşünce ise; ekolojik ayak izi ve geri dönüşüm için materyal potansiyelidir. Yapı malzemeleri ahşap, çelik ve betonarmeden meydana gelmektedir (Macdonald, 2018).

Ahşap yapı malzemesi, geleneksel strüktür malzemelerinden biridir. Gerilmelere ve basınca karşı mukavemetli olan ahşap malzeme, yüksek mukavemet / ağırlık oranı ile de hafif bir yapı elemanıdır. Farklı formların üretilmesinde belirli kısıtlamaları mevcuttur ancak büyük strüktürlerin inşa edilmesinde birbirlerine kenetlenerek bağlantı elemanlarıyla strüktür sistemleri meydana gelebilmektedir. Sürdürülebilirlik açısından en uygun malzemelerden biridir, ahşap yapı parçaları geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilir. Ahşap malzemenin dezavantajlarından birisi ise nemden etkilenmesidir. Bu sebeple, belirli periyotlarda değiştirilmesi veya neme karşı koruyucu tedbirlerin alınması gerekmektedir. Ahşap, hem gerilme hem de basınç dayanımına sahip olduğundan aksel basınç, aksel gerilme ve eğilmeye karşı çalışan yüklemelere mukavemetlidir. Çerçeve sistemlerde, kafeslerde, çeşitli tiplerdeki kirişlerde, kemerlerde, kabuklarda ve katlanmış formlarda bu yapı malzemesine rastlamak mümkündür (Macdonald, 2018). Multihalle and Restaurant yapısı, 1975’de geliştirilmiş ahşap yapı malzemesinin uygulandığı geniş açıklıklı binalardandır (Resim 3.4a). Açıklık fazla olduğundan iki katmanlı ahşap yapı malzemesi kullanılmıştır. Savill Garden yapısı ise teknolojinin ve yapı malzemesinin gelişmesiyle birlikte 2005’de inşa edilmiştir. 90 metre uzunluğunda ve 20 metre genişliğindeki yapı da Multihalle gibi iki katmanlı ahşap malzemedan oluşturulmuştur (Resim 3.4b). Ancak Multihalle yapısının aksine çelik bağlantı elemanları kullanılmıştır (Tang ve diğerleri, 2013).



(a)



(b)

Resim 3.4. (a) Multihalle and Restaurant yapısı (Tang ve diğerleri, 2013), (b) Savill Garden yapısının iç görünümü (Lara-Bocanegra ve diğerleri, 2018)

Taşıyıcı sistemlerde kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden birisi de çeliktir. Çelik malzeme, fiziksel ve mekanik özellikleri yönüyle en güçlü yapı elemanlarından ve bu yüzden en yüksek ve en geniş açıklıklı yapılarda yerini almaktadır. Cıvatalı veya kaynaklı birleşimlerle birbirine bağlanabilmektedir. Ayrıca diğer yapı elemanları ile bağlantı

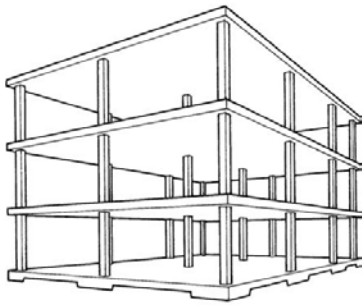
elemanları yoluyla kenetlenmesi ve kombinasyonu sebebiyle çeşitli yapılarda kullanım skalası artmıştır. Geleneksel yapı malzemelerinde belli bir mimari forma sıkışma söz konusu iken, çelik malzemenin gelişmesi ile karmaşık ve kompleks mimari geometrilerin inşası olanaklı hale gelmiştir. Çeliğin yüksek mukavemeti ve yoğunluğu strüktür sistemlerinde kullanılmasını desteklemektedir. I ve H kesitli çelik yapı elemanları, strüktür sisteminin iskelet yapısında kolon ve kiriş olarak kullanılmaktadır. Ayrıca dikdörtgen, kare ve daire kesitli içi boş gövdeli çelik elemanlar da yapılarda uygulanmaktadır (Resim 3.5a). Çelik elemanlar ve iskelet sistemi prefabrik şekilde de üretilebilmektedir. Hafif taşıyıcı sistemlerin elde edilmesini sağlar ve dayanıklı olması yönüyle uzun süre ayakta kalacak yapı üretimlerini desteklemektedir. Spectrum building (Renault Sales Headquarters) çelik yapılardan biridir (Resim 3.5b). 1983’de Norman Foster ve ekibi tarafından inşa edilmiştir. Çelik işçiliğinin dış cepheden algılandığı yapıda çelik elemanlar I kesitlidir ve strüktür sistemini meydana çıkarmaktadır (Macdonald, 2018).



Resim 3.5. (a) Kesitlerine göre çelik yapı elemanları, (b) Spectrum building strüktür sisteminin görünümü (Macdonald, 2018).

Betonarme yapı malzemesi ise agrega, çimento ve diğer kimyasal malzeme parçalarından oluşan bir kompozit malzemedir. Taş veya tuğla gibi yüksek yoğunluktadır, orta basınç dayanımına sahiptir ve minimum çekme dayanımı özelliklerini göstermektedir. Betonarmenin yapısına çeşitli mineraller ve kimyasallar eklenerek de mukavemeti artırılabilir. Bu malzemelerin entegrasyonu, eğilme mukavemeti kazanmaktadır ve betonarme yapı malzemesinin çeşitli formlarda kullanılmasını sağlamaktadır. Modern dönemin büyük bir kısmı için büyük ölçekli, serbest formların inşa edilmesinde yer alan tek yapı malzemesidir. Beton karmaşık şekillerde kalıplanabilmesine rağmen, düzgün geometrili mimari yapılar genellikle inşaat sektöründe ekonomik nedenlerden dolayı tercih edilmektedir (Resim 3.6a). Aynı zamanda kalıp yapımı ve montajı kolaylaşmaktadır, bu

kalıplar yeni yapılarda tekrar tekrar kullanılabilir. Bu nedenle betonarme yapıların çoğunluğu düz kolon ve kirişlerden oluşmaktadır. Betonun kalıplanabilir olması, karmaşık şekillerin kullanılmasını da mümkün kılmaktadır. Bu nedenle betonarme çok geniş bir yelpazede mimari ürün vermektedir (Macdonald, 2018). Cathedral of Brasilia, yapı geometrisi olarak hiperboloid formunda betonarme bir yapıdır (Resim 3.6b). Hiperboloid şeklindeki betonarme ayaklar 30 metreye kadar yükselmektedir. Katedralin en üst kısmındaki betonarme halka ise ayakların birleşim yeridir ve strüktür sistemini rijit bir hale getirmektedir (Porto, 2013).



(a)



(b)

Resim 3.6. (a) Betonarme bir yapının taşıyıcı elemanları (Macdonald, 2018), (b) Günümüzdeki Brasilia Cathedral cephe görünümü (Porto, 2013)

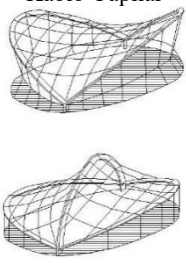
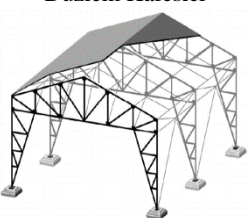
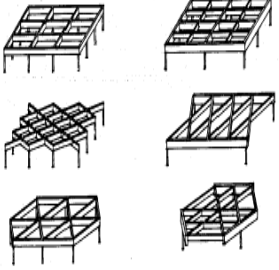
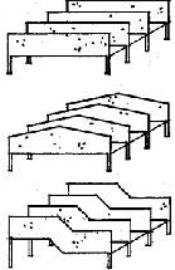
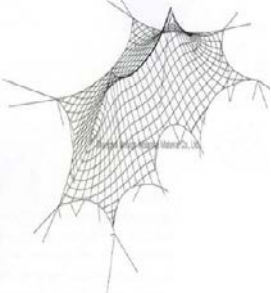
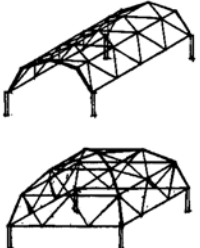
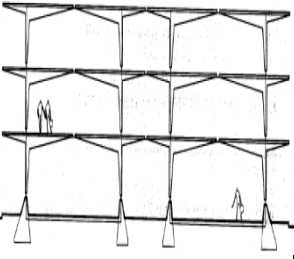
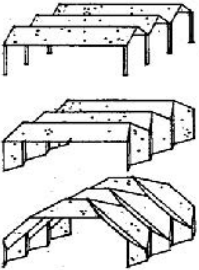
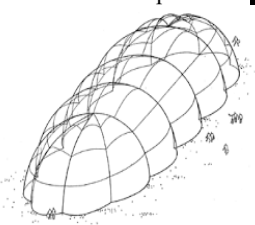
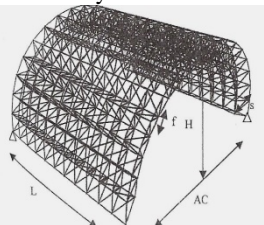
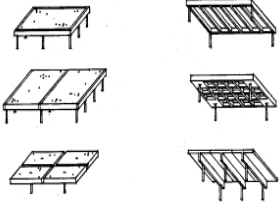
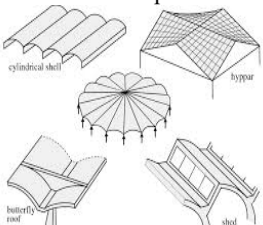
Taşıyıcı sistem tasarımı, yapının form ve estetiğine katkı sağladığı gibi yapıya etki eden yüklerin bina genelinde dağılımını da belirlemektedir. Yapısal formların ve malzemelerin teknolojiye ilerlemelerle birlikte gelişmesiyle taşıyıcı sistemler de ilerleme kaydetmektedir.

### 3.1. Taşıyıcı Sistem Çeşitleri

Hacimlerin sayısını çoğaltmak yerine boyutlarını genişletmek için çeşitli sistemler ve mekanizmalar geliştirilmiştir. Teknolojinin gelişimi ve toplumsal birlikteliğin değişimi ile artan yeni mekân tipleri ve oluşumlar ortaya çıkmıştır. Yeni taşıyıcı sistemlerin büyümesine duyulan gereksinim gitgide artış göstermiştir. Bu sebeple yapılan araştırmalar ve girişimler, mevcut taşıyıcı sistemlerinin oluşumlarının geliştirilmesinin yanı sıra daha etkin rol oynayacak yeni sistemlerin getirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır (Çizelge 3.1). İnsan faaliyetlerini kolaylaştırmak ve belli bir düzene sokmak amacıyla yapılan

tasarımlarda, minimum yapı elemanı ile maksimum boşluğun tanımlanması ve sınırlandırılması arzusu önemli bir yaklaşım ilkesi olarak önümüze çıkmaktadır.

Çizelge 3.1. Taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması

TAŞIYICI SİSTEMLER			
Form Aktif Sistemler	Vektör Aktif Sistemler	Kesit Aktif Sistemler	Yüzey Aktif Sistemler
<p>Kablo Yapılar</p> 	<p>Düzlem Kafesler</p> 	<p>Kiriş Yapılar</p> 	<p>Levha Yapılar</p> 
<p>Asma-Germe Yapılar</p> 	<p>Eğri Yüzeyle Kafesler</p> 	<p>Çerçeve Yapılar</p> 	<p>Katlanmış Plaklar</p> 
<p>PNömatik Yapılar</p> 	<p>Uzay Kafesler</p> 	<p>Döşeme Yapılar</p> 	<p>Kabuk Yapılar</p> 

Yapının ana yüklerinin, bağlantı noktaları arasında gerilen çekme elemanları tarafından taşındığı strüktür sistemler kablo sistemler olarak adlandırılmaktadır. Bu yapılar, çok sayıda kablo elemanın farklı geometrilerle bir araya getirilerek düğüm noktalarıyla birleştirilmesiyle tek ve çift eğrilikli yüzeylerin oluşturulduğu ve sadece çekmeye çalışan sistemlerdir (Yıldız, 2013). Asma-germe sistemler, geleneksel çelik sistemlerden ve dolu gövdeli iskelet sistemlerden daha hafif olan, geniş açıklıklı yapılarda ekonomik çözümler getiren taşıyıcı sistemlerdir. Çekmeye çalışan çelik malzemeden imal edilen kabloların ve çelik ipliği ile sağlamlaştırılmış ince membran örtülerin kesitlerinin çok az olması nedeniyle (1 – 3 mm) bu strüktürler hafif strüktürler sınıfına girmektedir. Asma-germe sistemlerde kalıp ve iskele az kullanılmaktadır, bu yönüyle ekonomik bir sistemdir

(Gündoğ, 2007). Membran malzeme, taşıyıcı olmasına ek olarak, kar, yağmur ve güneşin zararlı etkilerine karşı koymalı ve yangınlara karşı dayanıklı olmalıdır (Say, 1998).

Şişme (hava destekli) veya diğer adıyla pnömatik strüktürler stabilitesini hava basıncı ile karşılayan esnek membran sistemlerdir (Schierle, 2006). Sistem özelliği olarak hafiflik, kısa sürede kurulabilme olanağı, deprem yüklerine karşı mukavemetinin yüksek olması gibi önemli avantajları bulunmaktadır (Türkçü, 2017). Strüktür sisteminin hafifliği sebebiyle temel maliyetini azaltması ve ışık geçirgenliği sağlayarak aydınlatma masraflarından tasarruf edilmesi ile sürdürülebilir taşıyıcı sistemlere örnek olduğu söylenebilmektedir (Tuğrul ve Sev, 2015).

Düzlem kafes taşıyıcı sistemler, bir veya birden fazla paralel ve düzlemsel tabakadan meydana gelen kafes yapı sistemlerine denir. Düzlem kafes sistemler, sistem geometrisini oluşturan elemanların düz olmasından dolayı eğrilikli yapıya sahip değildir. Bu taşıyıcı sistemler, alt ve üst tabaka çubuklarının arasındaki yüksekliğe bağlı olarak kiriş gibi davranmaktadır. Tek tabakalı düzlem kafesler, eksenleri aynı düzlemde olan kiriş yapı elemanlarının birleşmesinden elde edilmektedir. Tek tabakalı sistemlerde düğüm noktaları rijit olmalıdır. Çift tabakalı veya çok tabakalı düzlem kafes sistemler birbirine paralel iki veya ikiden fazla tabakanın birleşmesinden oluşmaktadır. Bu tip sistemlerde alt ve üst tabakalar diyagonal ara çubuklar yardımıyla birbirlerine birleştirilmektedir (Mahmud, 2017). Eğri yüzeyli kafes sistemler, bir eğri yüzeyin bir çizgi ağına bölünmesi sonucunda çizgilerin kesiştikleri noktalara düğüm noktalarının getirilmesi ve bunların arasına da çizgiler doğrultusunda taşıyıcı çubukların yerleştirilmesi ile meydana gelmektedir (Gündoğ, 2007).

Uzay kafes strüktür sistemleri, düz çubuklar ve mafsallı düğüm noktalarından elde edilen 3 boyutlu, modüler düzenli taşıyıcı sistemlerdir. Tüm elemanları birbirine birleşik olup her doğrultuda bir bütün halinde çalışan sistem, üzerine gelen yükleri üç boyutlu olarak çubuk elemanlara dağıtmaktadır. Uzay kafes sistemlerin statik hesaplamalarında düğüm noktalarının mafsallı olduğu ve moment taşımadığı, çubukların ise yalnız aksenal yükleri aktardığı kabul edilmektedir. Bir düğüm noktasında birleşen diyagonal çubukların eksenleri, düğüm noktasının merkezinden geçmelidir ve düğüm noktaları mafsallı oluşturulmalıdır. Montajının hızlı ve pratik olması sebebiyle çubuk birleşimlerinin hızlı yapılmasını sağlayan pek çok düğüm elemanı modülü geliştirilmiştir. Üç çubuğun entegre

edilerek oluşturduğu üçgen geometrik form, düğüm noktaları mafsallı olsa bile denge durumunu korumaktadır. Bu sebeple uzay kafes strüktür sistemlerinde üçgen modüller kullanılmaktadır (Dağılgan, 2019).

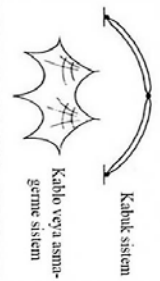
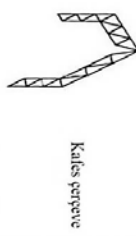
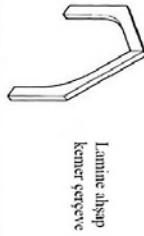
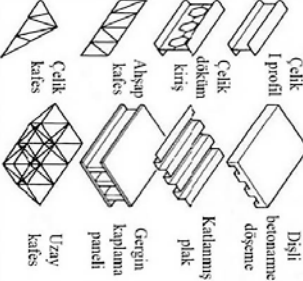

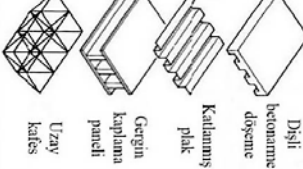
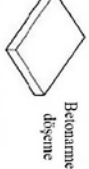
Kesit aktif sınıfında bulunan kiriş, çerçeve ve döşeme taşıyıcı sistemleri, doğrusal elemanlarla oluşturulmuş yapısal elemanlardan biçimlenmektedir. Yükü doğrusal bir kurgu içinde dağıtan strüktürlerde, kiriş ve kolonlardan oluşan çerçeveler yükün eşit bir şekilde dağıtılmasına olanak sağlamaktadır (Moussavi, 2011). Ahşap, çelik veya betonarmeden yapılan tek yönlü taşıyıcı strüktürler, temel eğilme momentlerini uçlarda yer alan kolon ve kirişlere iletmektedir. Çift yönlü çerçeve sistemler ise temel eğilme momentlerini x ve y eksenleri boyunca kirişlerden kolonlara yönlendirilerek temele kadar aktarmaktadır (Uslu, 2013).

Katlanmış plaklar, düzlemsel yüzeylerin belirli açılarla katlanması ile oluşmaktadır. Bu açı  $15^\circ$  den küçük ve  $165^\circ$  den büyük olmamalıdır. Katlanmış plak sistemler, eğilmeye karşı çalıştığı için imal edilmesinde çekmeye ve basınca mukavemetli malzemeler kullanılmalıdır. Katlanmış yüzeyler ilk olarak betonarme plaklarla inşa edildiği için “katlanmış plak” olarak adlandırılmaktadır ancak ahşap ve çelik panellerle de uygulanabilmektedir. Çelik ve alüminyum yapı malzemeleri yüksek mukavemetlerine rağmen levha olarak düzenlendiklerinde deformasyona uğrayabilmektedir (Yıldırım, 2003). Geçilen açıklığa bağlı olarak plak kalınlığı, plak genişliği ve yükseklik arasındaki oran korunarak tasarımlar yapılmalıdır.

Kabuk yapılar, uygulanan dış yükleri destekleyen kavisli yüzey aktif strüktür sistemlerdir. Doğada iskelet sistemlerinde ve jeolojik katmanlarda da görülen kabuk strüktürler, antik zamanlardan günümüze kadar varlığını sürdürmektedir. Geniş açıklıklar ekonomik ve efektif bir şekilde betonarme, çelik, ahşap ve bu malzemelerin türevlerinden inşa edilebilmektedir. Mimari yapıların dışında mühendisliğin çeşitli dallarında da kabuk yapım sistemleri uygulanmaktadır. Form ve biçim olarak da geniş bir skalada tasarım çeşitliği sağlayan bu strüktürler, yapının fonksiyonuna göre düzenlenerek mimari oluşumlar sergilemektedir. Geçilen açıklık miktarına göre tek eğrilikli, çift eğrilikli veya daha farklı form ve şekillerde tasarım kolaylığı sağlamaktadır (Farshad, 2013).

Farklı yapı tasarımlarına ve bu yapıların gereksinimlerine göre farklı taşıyıcı sistem kullanımları yapılmaktadır. Ancak her bir taşıyıcı strüktür sisteminin verimlilik düzeyi birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Yapı malzemelerinin kesitlerine ve profillerin uzunluğuna bakılarak da bu malzemelerin gelişmişlik düzeyi ortaya çıkarılabilmektedir (Çizelge 3.2). Taşıyıcı sistemler arasındaki taşıyıcı eleman unsurları, parametrelere ve kombinasyonlara göre çoğaltılabilmektedir ancak genel prensiplere bakılarak basit yapı malzemelerinden ve taşıyıcı sistemlerden karmaşık ve kompleks yapı sistemlerine doğru verimlilik düzeyinin arttığı söylenebilmektedir (Macdonald, 2018).

Çizelge 3.2. Taşıyıcı sistemlerde strüktür verimliliği (Macdonald, 2018)

STRÜKTÜR VERİMLİLİĞİ				
YÜKSEK		DÜŞÜK		
Kompleks yapı	İlkel taşıyıcı strüktür		Taşıyıcı eleman modülleri	
Gelişmiş	Gelişmiş	Basit	Gelişmiş	Basit
 <p>Kablo veya asma-geme sistem Kablo sistem</p>	 <p>Kales çerçeve</p>	 <p>Lamine ahşap kemer çerçeve</p>	 <p>Çelik kales Ahşap kales Çelik kales Çelik I profili Çelik I profili Çelik I profili Çelik I profili</p>	 <p>Ahşap kiriş Ahşap kiriş Ahşap kiriş Ahşap kiriş Ahşap kiriş Ahşap kiriş</p>
			 <p>Uzay kales Gergin kaplı panel Kalanmış plak Dışi betonarme döşeme Dışi betonarme döşeme</p>	 <p>Betonarme döşeme</p>

Her taşıyıcı strüktür sisteminin kullanım alanına, geçilen açıklığa ve yüksekliğe, fonksiyonuna, taşıyabileceği yük miktarına, ağırlığına ve strüktür yoğunluğuna göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Yapı malzemelerindeki teknolojik ilerlemeler ile taşıyıcı sistemlerin de paralel olarak gelişmesiyle dezavantajlar avantajlara dönüşmektedir. Ancak yine de her taşıyıcı sistemin belirli yapısal davranışları vardır ve kısıtlayıcı faktörler bulunmaktadır. Bu bağlamda taşıyıcı sistemlerin artı ve eksi yönlerini görmek amacıyla belirli parametreler bir araya getirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Taşıyıcı sistemlerin özelliklerine göre karşılaştırılması (Subramanian ve Clemmie, 2017)

	SINIRLAMALAR	SİSTEMİN ESNEKLİĞİ	ESTETİKLİK	MATERYAL
Kemerler	Geniş açıklık geçilmesi, açıklık oranına bağlı olarak yapının yüksekliğinin artmasına sebep olacaktır.	Yükseklik, kemer yapının segmentlere ayrılarak veya yarı dairesel hale getirilerek değiştirilebilir, ancak büyük ölçüde esneklik sağlanmaz.	Monoton yapılar tasarlandığı için, estetiklik yönünden çeşitlilik bulunmamaktadır.	Tuğla, taş ve beton malzemeler
Düzlem Kafes Sistemler	Kuvvetlerin rijitliğini elde etmek için belli bir yüksekliğe kadar açıklığın fazla olması gerekir. Geniş açıklık geçilmesi mümkündür, ancak malzemelerin ağırlığı nedeniyle sınırlama oluşmaktadır.	Elemanları tek veya çift eğrilikli düzlemlerde düzenleyerek, kuvvetlerin form aktif bir şekilde yeniden yönlendirilmesi sağlanmaktadır.	Rijid vektör aktif yapıdan, form aktif yapılara dönüştürülebilir.	Ön gerilmeli beton, lamine ahşap, çelik
Kabuk Sistemler	Yüzey, geometrik olarak tanımlanmalıdır.	Bu yapılar, bir sınırlama görevi gören ve diğer yapısal sistemlerde kolayca mümkün olmayan formları elde etmek için kullanılan eğriler olarak tanımlanabilir.	Kabuk elemanlar kullanılarak yeni değişken formlar elde edilebilir, böylece yapıya tek bir birleşik karakter dışında farklı özellikler kazandırılır.	Küçük kesitli malzemeler (Çelik, ahşap, kompozit vb.)
Kablo Sistemler	Bu yapılar, rüzgâr kuvvetlerine, titreşime, asimetric ve hareketli yüklere karşı hassastır.	Açıklığın artmasına bağlı olarak oldukça esnek kablo sistemler yapılabilir. Uç elemanların profil kesitlerini değiştirerek, farklı eğrisel kablo taşıyıcı sistemler oluşturulabilir.	Sonsuz çeşitlilikte eğriler elde edilebilir. Bu sebeple estetiklik yönünden başarılıdır.	Ana yapıyı destekleyen çelik veya kompozit kablolu elemanlar
Uzay Kafes Sistemler	Minimum sınırlamalara sahiptir. Jeodezik kubbeler için yüksek açıklık-yükseklik oranına sahiptir.	Eğrilikli kafes sistem ile birçok çatı formu mümkündür. Örneğin, tonoz, silindir veya kubbeler inşa edilebilir.	Yüzey ızgaraları ile belirli aralıklar için farklı desenler geliştirilebilir.	Çelik ve beton kombinasyonu
Asma-Germe Örtü Sistemler	Fazlasıyla esnek yapılardır. Örtülerin altında cephelerin kapanması güçtür.	Rijit destek noktaları gerektiren geleneksel çatı sistemlerinin aksine esnekliği sayesinde büyük açıklıkları kolonsuz bir şekilde geçebilmektedir.	Malzemeler yarı saydam olduğundan, iç mekân alanları parlak LED aydınlatmaları ile renklendirilebilir, buna bağlı olarak yapının gece görünümü değiştirilebilir.	PVC (Poli Vinil Klorit) kaplı polyester membran ve PTFE (Poli Tetra Floro Etilen) (Teflon) kaplı cam örtü sistemi
Pnömatik Sistemler	Şişirme ekipmanındaki mekanik arıza veya kapak yırtılması gibi sorunlar sonucu yapıların çökme olasılığı bulunur.	Membran, hem gerilme hem de basınç kuvvetlerini destekleyebilir ve böylece eğilme momentine karşı direnç gösterilebilir.	Farklı formlarda şişirme teknikleriyle estetik bir görünüm sağlanabilir.	Pamuklu dokuma ve PVC

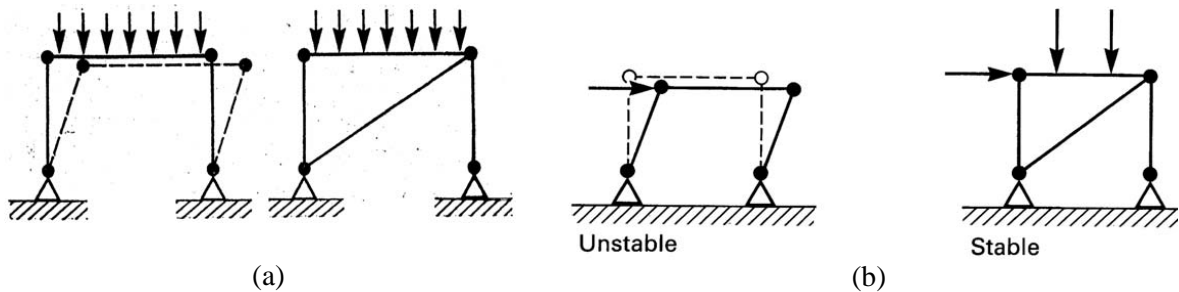
### 3.2. Taşıyıcı Sistemlerin Yapısal Gereklilikleri

Bir yapının strüktür sisteminin öncelikli görevi, yapının ayakta kalmasını sağlamak ve üzerine uygulanacak yüklere karşı direnç göstererek yapıyı desteklemektir. Bunun dışında yapının taşıyıcı sisteminin dört temel özelliğe sahip olması gerekmektedir;

1. Statik bir denge durumuna ulaşabilmelidir.
2. Yapısal olarak kararlı bir sistem olmalıdır.
3. Taşıyıcı elemanlar ile birlikte yeterli mukavemeti bünyesinde bulundurmalıdır.
4. Yeterli rijitliğe sahip olmalıdır (Macdonald, 2018).

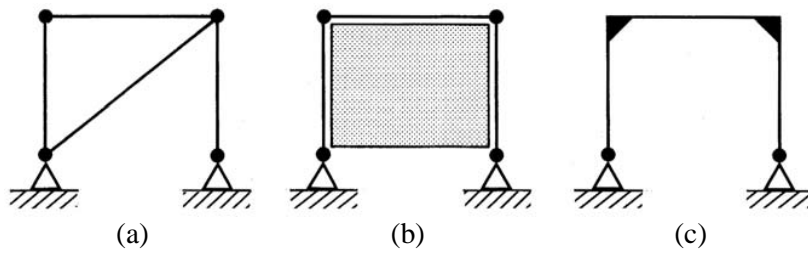
Yapıların statik bir denge durumuna ulaşması için ise belirli şartlar mevcuttur. Uygulanan yükün etkisine bağlı olarak temele aktarılan tüm yüklere karşı direnç göstermelidir. Yüklere karşı stabil bir davranış sergilebilmesi için tüm taşıyıcı sistem elemanları birbirlerine dengeli bir şekilde kenetlenmeli veya bağlanmalıdır. Bu denge durumu, bütün olası yükleme koşulları altında kurulmalıdır (Macdonald, 2018).

Geometrik kararlılık, bir yapının geometrisini koruyan başlıca özelliktir ve strüktür elemanlarının yüke direnmek için birlikte hareket etmesine izin vermektedir. Yerçekimi kuvvetinin etkisi altındaki bir taşıyıcı sistem, aynı zamanda yatay yönlü yüklemelere göre de etkin bir şekilde tasarlanmalıdır (Şekil 3.4). Bir taşıyıcı sistem elemanları yeterince rijit ve yüklere karşı mukavemetli olsa dahi kararlı bir sistem değilse taşıyıcı sistem uzun süre ayakta kalamamaktadır (Macdonald, 2018).



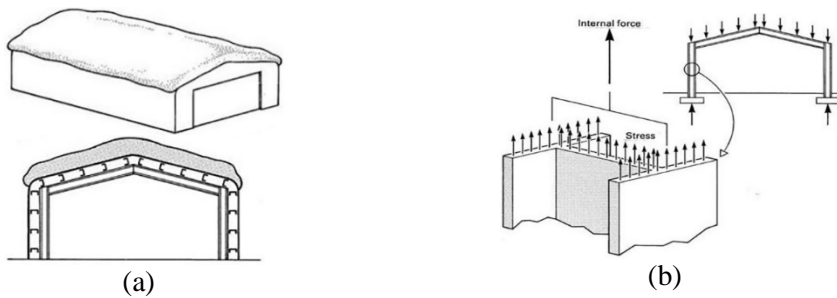
Şekil 3.4. (a) Yerçekimi kuvvetine ve yatay yönlü kuvvete direnç gösteremeyen kararsız sistem, (b) Yerçekimi kuvvetine ek olarak yatay yöndeki kuvvete de mukavemet gösterebilen kararlı sistem (Macdonald, 2018)

Kararlı sistemler üzerine uygulanan yüklere karşı elastik bir şekilde davranarak deformasyona uğramadan eski hallerine dönmektedir. Kararsız sistemler ise herhangi bir yük altında etkiye karşı tepki veremediği için eski hallerine dönemezler ve bu sebeple deforme olarak biçim değişikliğine uğramaktadırlar. Bir yapı sisteminin kararlı olmasındaki etkenler içerisinde geometrik kararlar önemli yer tutmaktadır. Diyagonal bağlantılar dikdörtgen çerçeveli geometrik bir sistemde stabilite yaratırken, serbest biçimli forma sahip eğrilikli bir yapıda destek mekanizmaları olmadan tek başına yeterli olmayabilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Dikdörtgen bir çerçeve sistemin (a) diyagonal, (b) yapı malzemesi, (c) rijit bağlantı noktalarıyla stabilize edilmesi (Macdonald, 2018)

Bir yapıya uygulanan yükler, taşıyıcı sistem elemanlarında iç kuvvetler oluşturmaktadır, temellerde de dış kuvvet reaksiyonları üretmektedir (Şekil 3.6). Strüktür elemanları, bu yüklere karşı direnmek için yeterli güce ve rijitliğe sahip olmalıdır. Maksimum uygulanacak olan yüklenmeler altında yer değiştirme ve deformasyon miktarları olağan hesaplamalara yakın olmalı ve kabul edilebilir sınırların dışına çıkmamalıdır. Yapısal analizler ile birlikte bir strüktürün taşıyabileceği maksimum yük hesabı yapılarak iç kuvvetlerin değerlendirilmesi de yapılabilmektedir. Ayrıca yapı elemanlarının kesitleri, boyutları da hesaplamaya dahil edilerek optimum taşıyıcı sistem tasarımı elde edilmektedir (Macdonald, 2018).

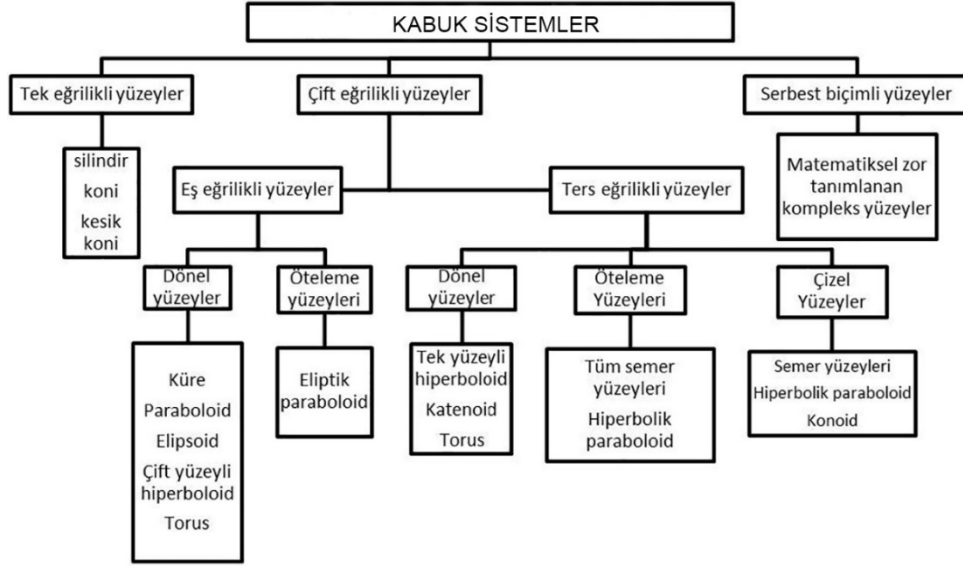


Şekil 3.6. (a) Çelik yapı, (b) Çelik bir yapıda üzerine uygulanan yüklere karşı temelde ve taşıyıcı strüktürlerde oluşan reaksiyon kuvvetleri (Macdonald, 2018)

### 3.3. Kabuk Yapılar

Kabuk sözcüğünün Türkçe'deki anlamı, genel bir ibareyle dış örtü veya örtücü dış tabaka olarak isimlendirilmektedir. Mimarlıkta yapı kabuğu söylemi ise binayı çevreleyen bütün örtücü elemanlar için kullanılmaktadır. Bir başka tanımla yükü düzlemsel olarak dağıtan yüzeylerden meydana gelmektedir ve en etkin mukavemet durumunu, yükün eşit olarak dağıtıldığı hususlarda göstermektedir (Moussavi, 2011). Kabuk strüktürlerin eğrilik, sertlik/rijitlik ve incelik olmak üzere üç özelliği ön plana çıkmaktadır. Eğrilik olarak bakıldığında, yüzey geometrileri, tek veya çift eğrilikli biçimsel organizasyonda tasarlanabilmektedir. Tek veya çift eğrilikli yüzey elemanlarının basit veya kompleks şekillerde birleşmeleriyle farklı formlar elde edilmektedir. Kabuk taşıyıcı sistemlerin malzemeleri rijit ve homojendir, bu sebeple eğilmeye dayanıklıdır. İncelik olarak ise kabuk yüzeyi basınç altında burkulmayacak kadar kalın planlanmalıdır (Türkçü, 2017).

Kabuk yapılar, kalınlığı iki katına göre çok daha küçük olan ve taşıma ile örtme fonksiyonunu aynı anda karşılayan eğrilikli hacimsel strüktür sistemlerdir. Kabuklar malzeme olarak çelik, betonarme ve ahşap ile oluşturulabilmektedir. Taşıyıcı sistem olarak ele alındığında, kabuk tasarımında yüzey eğrisinin devamlı olması gerekmektedir. Statik açıdan düşünüldüğünde, yüzey eğriliğindeki ani değişimler, kuvvetler tarafında ani değişimler oluşturmakta ve eğilme momenti yaratmaktadır. Bu sebeple yapının rijitliğinin sağlanması açısından yüzey eğriliği önem teşkil etmektedir. Yapıya etki eden dış kuvvetler kabuğun orta çizgisine teğet olan aksenal kuvvetlerle karşılanmaktadır. Kabuk sistem elemanları, basınç, çekme ve eğilmeye karşı dayanıklı olmalıdır (Gündoğ, 2007). Kabuk yapılar, eğriliklerine ve yüzey geometrilerine bakılarak kategorize edilmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Kabuk sistemlerin sınıflandırılması (Türkçü, 2017)

Yapılan sınıflandırma doğrultusunda eğrisel yüzeylerden meydana gelen kabuklar, kalınlığı yüzeyel yayılıma kıyasla çok ince, taşıma ve örtme işlemini aynı anda gerçekleştiren, uzay içinde her yönde gelen yükleri yine her yöne (X, Y, Z doğrultuları) aktarma özelliğine sahip, tek veya çift eğrilikli yüzeyel strüktür sistemleri olarak tanımlanabilmektedir (Koç, 2020).

Kabuk sistemlerde malzeme kullanımı olarak betonarme, ahşap ve çelik yapı örneklerine rastlamak olasıdır. Betonarme kabuklar strüktürel yönden oldukça ince yapılabilmektedir fakat donatıya yeterli alan oluşturması gerekmektedir (Özşen ve Yamantürk, 1991). Buna ek olarak, betonarme yapı malzemesi, sistemin ağırlığını artırmaktadır ve sürdürülebilirlik açısından diğer yapı malzemelerinin gerisinde kalmaktadır. Eğrilikli yüzeyler ile betonarme kabuk strüktürler inşa edilmiştir fakat kalıp masrafları maliyeti yükseltmektedir, uygulama kolaylığı ve hafiflik açısından da çelik ve ahşap yapı malzemelerine oranla daha az tercih edilmektedir (Dağılgan, 2019). Betonarme kabukların dezavantajlı yönlerinin bulunması nedeniyle kabuk yapılar, genellikle ahşap ve çelik yapı malzemesinden tasarlanmaktadır. Ahşap ve çelik yapı malzemelerinin belirli özellikler altında karşılaştırılması aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Ahşap ve çelik malzemenin özellikleri (Ertaştan, 2005)

Yapısal Özellikleri	Ahşap	Çelik
Alan Uygulamaları	Düşük ölü yük nedeniyle yerinde kolayca inşa edilebilir, alan uygulamaları basit el aletleri ile yapılabilir, hatalı çalışma kolaylıkla düzeltilir. Ahşap, güneş, yağmur ve nemden korunmalıdır.	Yüksek ölü yük nedeniyle alan uygulaması için vinç gereklidir. Uygulamalar, özel araçlar ile yapılmalıdır, özellikle kaynaklı birleşimler için gereklidir. Hatayı düzeltmek alanda değil, fabrika ortamında daha iyi sonuçlar verir. Elemanlar deforme olmaz.
Ulaşım	Ulaşım maliyetleri, düşük ölü ağırlıktan dolayı ucuzdur. Geniş açıklıklar, tek parça üretilen yapılandırılmış lamine kirişler ile sağlanabilir. Ancak açıklık arttıkça bu sistem zayıflar.	Ulaşım maliyetleri, yüksek ölü ağırlıktan dolayı ahşaba göre daha maliyetlidir. Belirli bir hacme sahip aynı ulaşım aracındaki ahşaptan daha az çelik taşınabilir.
Bağlantılar	Çelik bağlantılar ile ahşap malzemenin verimliliği artar. Bağlantılar, alanda basit araçlar ile yapılabilir.	Çelik, çelik aparatlar ile montaj edilir veya kaynaklanarak birleştirilir.
Maliyet	İmalat, fazla enerji gerektirmediğinden maliyeti çeliğe göre iyidir.	Üretimi açısından teknolojik fabrikalara ihtiyaç duyulur, bu sebeple maliyeti fazladır.
Bakım	Ahşap strüktürler, iklim koşullarına ve böcek saldırılarına karşı korunmalıdır, gerekli görüldüğünde koruyucu maddeler uygulanmalıdır.	Çelik, korozyona karşı yıllık olarak boyanmalıdır. Maliyet, yüksekliğin fazla olduğu çelik yapılarda boyama zorluğu dolayısıyla artmaktadır.

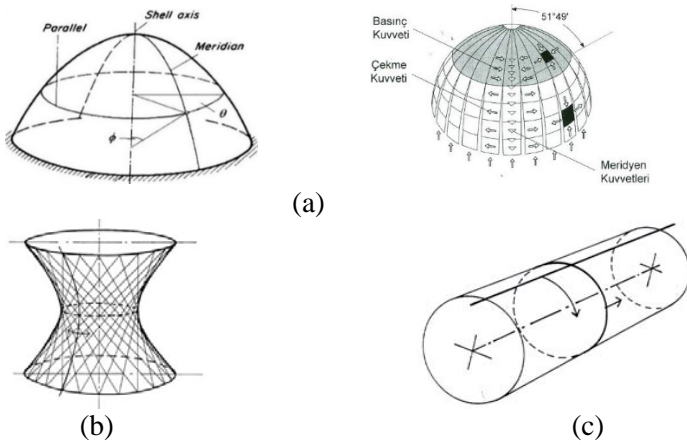
Kabuk yapılar, geometrileri boyunca yüklere direnen üç boyutlu yüzeylerdir. Dış yükleri taşımak için gerekli sertlik, boyutsal formundan dolayı kabuğa doğal olarak sağlanır. Bu tür yapıların kabuk yüzeyleri matematiksel formüller ile anlam bulmaktadır (Paoli, 2007). Kabuk yüzeylerinin çeşitliliği çok fazladır. Bir veya daha fazla yönde kavisli herhangi bir yüzey bir kabuk yüzeyi olarak görülebilir. Kabuk yüzeylerini tanımlamanın bir yolu Gauss eğriliğidir. Bir diğeri ise yüzeyin nasıl üretildiğidir (Toussaint, 2007).

Gauss eğriliği, bir kabuğun eğrilerini belirlemeyi tarif etmektedir. Bir kabuk üzerinde bir noktaya bakarken, yüzeyde farklı eğriler olabilir. Gauss eğriliğine göre ifade edilebilen kabuk yüzeylerinde, pozitif Gauss eğrilikli yüzeyler, ana eğrilik merkezleri aynı yönde, çift eğrilikli yüzeylerdir. Negatif Gauss eğrilikli yüzeyler, ana eğrilik merkezleri birbirinin tersi yönde çift eğrilikli yüzeylerdir. Sıfır Gauss eğrilikli yüzeyler ise, eğrisel bir doğrultman ile doğru parçasının oluşturduğu, tek eğrilikli yüzeylerdir (Koç, 2020). Bu tanımlamalar ile birlikte çift eğrilikli yüzeyler, ters eğrilikli (antiklastik) ya da eş eğrilikli (sinklastik) olarak tasarlanabilmekte ve uygulanabilmektedir (Şekil 3.8). Ters eğrilikli tasarım yapıldığında, negatif eğrilikler çekmeye, pozitif eğrilikler ise basınca çalışarak kabuk sistemi ortaya çıkmaktadır (Yılmaz, 2011).



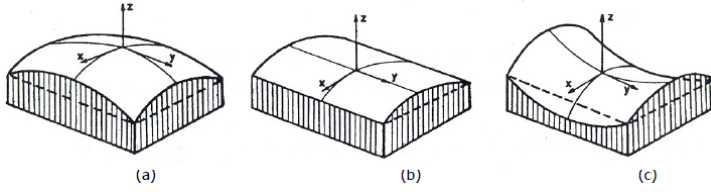
Şekil 3.8. (a) Negatif, (b) Pozitif ve (c) Sıfır Gauss eğriliği yüzeyleri (Toussaint, 2007)

Yüzey üretimi ise, yüzeyin oluşturulma şeklidir. Yüzeyleri oluşturmak için farklı kombinasyonlar mevcuttur. Döndürülen yüzeyler bu kombinasyonlardan biridir. Bu yüzeyler, bir eğrinin belirli bir dönme açısı etrafında döndürülmesiyle üretilmektedir. Bu eğriye meridyen eğrisi denir. Bir kabuk yapısının döndürülme ile elde edilen en yaygın örneği kubbelerdir (Şekil 3.9). Ayrıca örnek olarak koni, kubbe, hiperboloid ve aynı zamanda silindir bu yöntem ile meydana gelmektedir (Toussaint, 2007).



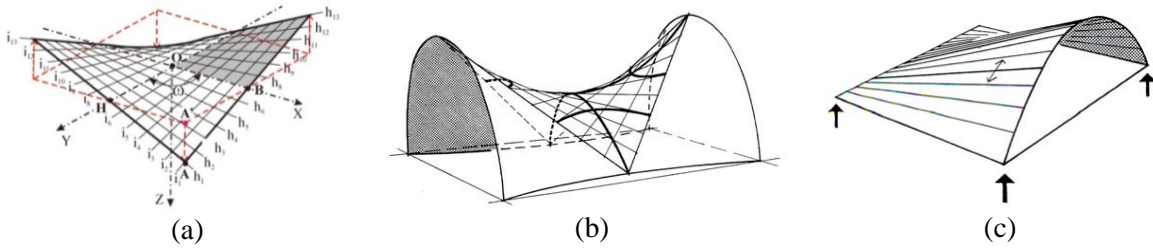
Şekil 3.9. (a) Kubbe, (b) Hiperboloid, (c) Silindir geometrileri (Farnsworth, 1999), (Çelik ve Özgen, 2005), (Toussaint, 2007)

Çevrilen yüzeyler diğer bir kabuk sistem yüzey üretme çeşididir. Bu yüzeyler bir düzlem eğrisinin belli bir açı çerçevesinde çevrilmesiyle elde edilmektedir (Şekil 3.10). Kayan eğrinin yönü sabit tutulurken diğer yönlerde hareket ettirilerek yüzey oluşumu sağlanmaktadır (Toussaint, 2007).



Şekil 3.10. (a) Eliptik paraboloid, (b) silindirik paraboloid, (c) hiperbolik paraboloid (Hoefakker ve Blaauwendraad, 2004)

Çizgili yüzeyler, yüzey oluşturma sürecinde kullanılan başka bir kabuk tasarlama metodudur. Sınır eğrisi boyunca düz bir çizginin uçlarının kaydırılması ile türetilmektedir. Yön olarak düz çizgiyi öngörülen çizgiye paralel tutmak gereklidir. Örnekleri konoid ve hipar geometrileri gösterilebilir (Şekil 3.11). Hipar, kabuk strüktür sistemlerinde diğerlerinden farklı olarak özel bir kabuk tasarımıdır, çünkü aynı zamanda bir hiperbolik paraboloidden dört düz çizgi ile kesilebilmektedir (Toussaint, 2007).



Şekil 3.11. (a) Çizgisel olarak gösterilen hipar kabuğu (Garlock, Billington, 2009), (b) Paraboloid ve (c) Konoid kabuk geometrik biçimleri (Toussaint, 2007)

Kabuk sistemler, antik çağlardan bu yana farklı malzemeler ve en uygun geometrilerle yapı üretiminde yerini almıştır (Türkçü, 2017). Endüstri Devrimi'yle birlikte nüfusun giderek artması ve buna bağlı yapı ihtiyacının önemli ölçüde artması, geleneksel sistemlerin yetersiz kalması, yapısal analiz yöntemlerinde gelişmeler ve yeni yapı gereçlerinin ortaya çıkışı, çağdaş yapım sistemlerinden kabukların kullanımını yaygınlaştırmıştır. 1920'li yıllardan itibaren dik açılı geometrik biçimlerden uzaklaşıp serbest mekânsal formların oluşturulması çabası sebebiyle kabuklar üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. 19. yüzyılın 2. yarısında betonarmenin giderek artan kullanımı ile kabuk taşıyıcı sistemler için yeni bir dönem açılmıştır. İkinci Dünya Savaşı'nda betonarme teknelerin yapımı bu malzemenin güvenilirliğini artırmıştır ve mimari boyutta betonarme yapı malzemesi yükselen bir değer olmuştur (Koç, 2020). Pier Luigi Nervi, antik Roma döneminin kubbe ve tonozlarını modern malzemeler ile birlikte betonarme kabuk tonoz ve küresel kabuklar şeklinde

tasarlamıştır (Türkçü, 2017). 1920-1970 yılları arasında kabuk yapı inşasında hızlı bir ilerleme kaydedilmiştir. 1912-1939 döneminde, kabuk sistem türleri ‘tonoz ve kubbelerden’ türetilirken, 1960’ları takip eden yıllarda form arayış süreci ve yaşanan teknolojik gelişmeler ile birlikte Felix Candela, Heinz Isler, Pier Luigi Nervi ve Eladio Dieste betonarme kabuk taşıyıcı strüktürlerin dünya üzerinde inşa edilmesini sağlayan önemli kabuk yapım çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Naicu, 2012). Max Berg tarafından 1913’te projelendirilen Centennial Hall, ince kabukların ilk temsilcisi sayılmaktadır (Koç, 2020).

İspanyol mimar Felix Candela, düz çizgiler kullanılarak üretilen hiperbolik paraboloid (hipar) yüzeylere dayalı betonarme ince kabukların öncülerinden biridir. Tek bir hipar geometrik şeklinden kesilmiş bir parça olarak tasarlanan Los Manantiales Restoran, Xochimilco (1958) mimarın kabuk yapılarından bir tanesidir (Resim 3.7a). Bacardi Rum fabrikasında, serbest biçimli kabuğun kenarının arkasına yerleştirilmiş bir kemer giriş kullanarak aynı zamanda yapının strüktürel yönüne de dikkat çekmiştir (Resim 3.7b). Candela, bu yönüyle yapılarını inşa ederken mimari üretimin yanında mühendislik açısından da çalışmalar yapmıştır (Chilton ve Chuang, 2017).



Resim 3.7. (a) Los Manantiales Restoran, Meksika, (b) Bacardi Rum Fabrikası, Meksika (Chilton ve Chuang, 2017)

İsviçreli mühendis Heinz Isler, 1950’li yıllarda yaptığı çalışmalarla, minimum kalınlıklı kabuk yapı sisteminin öncülerinden sayılmaktadır. Isler, uyguladığı deneysel çalışmalar ile betonarme silindirik kabuk strüktürlerin basınca karşı iyi çalışan ancak çekmeye karşı zayıf olan sistemler olduğunu ortaya koymuştur (Çelik ve Özgen, 2005). Birçok kabuk tasarımcısı matematiksel olarak tanımlanan yüzeyler ile tasarımlarını oluştururken, Isler farklı bir metot kullanarak form bulma yöntemiyle projelendirme faaliyetlerini sürdürmüştür (Borgart ve Eigenraam, 2012). 1967’de Heilig Geist Kirche (Holy Spirit Church) adlı yapısında Felix Candela gibi hiperbolik paraboloid (hipar) geometrik biçimini kullanmıştır. Mimari yapının formu, dalları merkeze doğru kıvrılırken yükselen bir çevre

duvarı gibi tanımlanan birbirine bağlı spiral eğrilere benzemektedir (Resim 3.8a). 1996'da inşa edilen Evangelische Kirchengemeinde Steinkirche, Cazis kabuk yapısı kilise işlevinde tasarlanmıştır. Geometrik formu, üç adet birbirine bağlı oval kabuk sistemidir (Resim 3.8b). Asimetrik ve amorf yapıdaki bu yapı, çift eğrilikli dışbükey yüzeylerden oluşmaktadır ve betonarme ince kabuk sınıfında yerini almıştır (Chilton, 2011).



Resim 3.8. (a) Heilig Geist Kirche (Holy Spirit Church), İsviçre, (b) “Steinkirche” Cazis, İsviçre (Chilton, 2011)

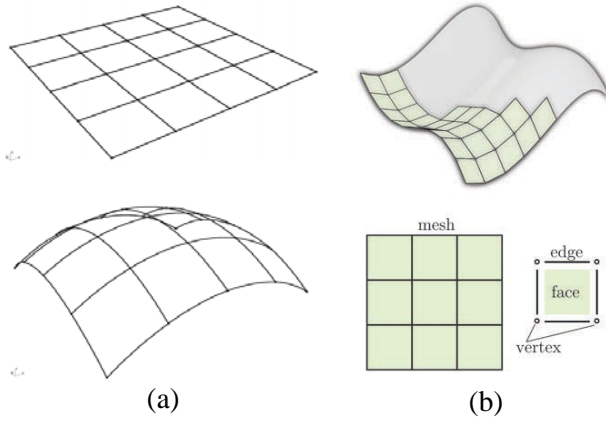
İtalyan mühendis Pier Luigi Nervi, betonarmenin ve prefabrikasyonun tasarım sınırlarını zorlayarak estetik, fonksiyonel ve strüktürel problemlere uygun cevaplar verebilen yapılarla kabuk yapı sistemlerin öncü isimlerinden biri konumundadır. En önemli kabuk yapılarından birisi Palazetto dello Sport (Small Sports Palace), 1960 Roma Olimpiyatları için 1957'de tamamlanmıştır. Betonarme kabuğun kalınlığını azaltmak için kenar bölümleri dalgalı hale getirilmiştir (Resim 3.9a). Pier Luigi Nervi, ince donatı ağına uygulanan ince agregalı beton yapı malzemelerinin kullanımı ile de ünlenmiştir (Chilton ve Chuang, 2017). 2. Dünya Savaşı döneminde Nervi, Orvieto Havaalanı'nda (1935-1942) jeodezik uçak hangarları gibi geniş kapsamlı yarı açık hava barınakları dizayn etmiştir (Resim 3.9b). Savaş ile birlikte prekast beton üretimi hızlanmıştır ve betonarme, yapılarda merkezi bir rol üstlenmiştir (Tang, 2015).



Resim 3.9. (a) Palazetto dello Sport, Roma (b) Orvieto Havaalanı'ndaki Uçak Hangarları, İtalya (Chilton ve Chuang, 2017), (Tang, 2015)

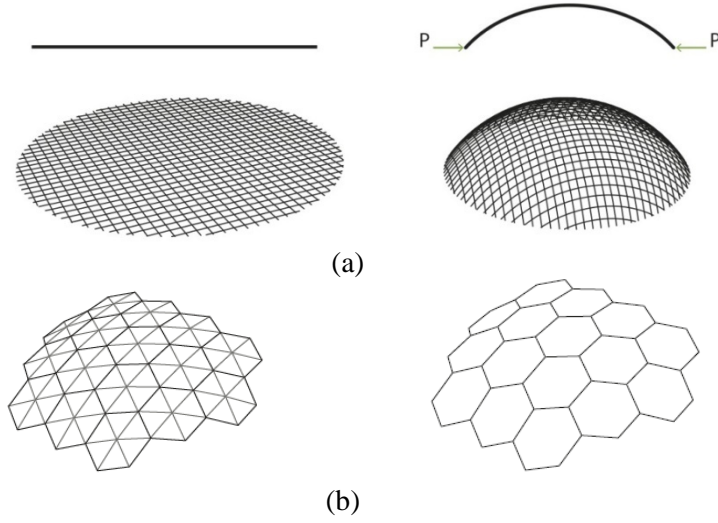
### 3.4. Izgara Kabuk Yapılar

Izgara kabuklar, genellikle kuvvetlerini ve şekillerini çift eğrilikten türeten yapılar olarak tanımlanmaktadır. Tüm kabuklar gibi bu yapılar da ince kesitlidir. Izgara içindeki kuvvetler, basit gerginlik veya sıkıştırmaya karşı dirençlidir. Sürekli kabukların aksine, ızgara kabukları ızgaralardan veya kafes ağlarından oluşmaktadır (Şekil 3.12). Bu yapılar çelik, alüminyum, ahşap ve kompozitler de dâhil olmak üzere herhangi bir yapı malzemedan üretilebilmektedir. Izgara kabukları, minimum malzeme ile geniş mesafelere yayılabilir ve aynı zamanda karmaşık geometrilere sahip olabilmesi nedeniyle çok yönlü bir kabuk sistemdir (Bertin, 2013).



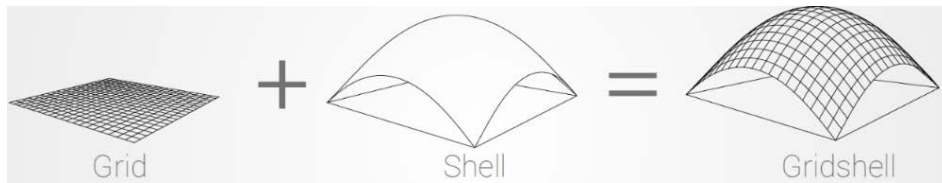
Şekil 3.12. (a) Düz bir yüzeyden elde edilen dörtgensel bir ızgara kabuk (Toussaint, 2007), (b) Düz bir yüzeyden elde edilen serbest biçimli parametrik kabuk (Dimcic, 2011)

Döşeme ve çerçeve sistemine sahip taşıyıcı sistemlerin kullanımına kıyasla ızgara kabuk sistemleri inşa etmenin faydaları yapısal, estetik ve çevreci bir boyuttadır. Maliyet ve performans açısından bakıldığında tipik binalardaki yapısal sistemlerin aksine, ızgara kabuklar bir şeklin veya biçimin mimari seçimi ile başlar. Formun estetik hissi ve uygulama etkinliği yüzey yapılarında doğal olarak şekillenir (Şekil 3.13). Şekillenen geometrik form ile birlikte yapının fonksiyonuna ve geçilen açıklık gibi statik durumlarına bağlı olarak ızgara sistem seçilmektedir ve sürdürülebilir tasarımlar oluşturulmaktadır (Bertin, 2013).



Şekil 3.13. (a) Kuvvetlerin etkisinde yaratılan bir ızgara kabuk (Poulsen, 2015) ve (b) Farklı geometrik şekillerle tesselle edilen ızgara kabuklar (Green ve Lauri, 2017)

Bir ızgara kabuğu strüktür yapısının seçilmesinin nedeni mimari şekle bağlı olarak performans, verimlilik ve maliyete bağlıdır. Bir geometrik tasarımın formuna göre farklı şekiller (üçgen, dikdörtgen, altıgen vb.) ile ızgara çizgileri üretilerek karakteristik binalar oluşturabilmektedir (Şekil 3.14). Ek olarak, 3 boyutlu niteliklere sahip yapı kullanım ve sirkülasyon alanı sağlanmaktadır. Kendinden taşıyıcı olan kabuk strüktürler, iç mekânda esneklik ve işlevsel geniş alanlar yaratmaktadır. Izgara kabuğunun şekli yapısal olmalıdır, bu da mimari bir anlayış gerektirmektedir. Yalnızca tasarıma bağlı olarak verilen kararlar sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Tasarım kaygısıyla meydana getirilen şekil, yapısal uyum içinde yapılmak zorundadır. Ayrıca yapı tüm inşaat süreci boyunca dayanıklı olmalıdır (Dyvik ve Mork, 2015).



Şekil 3.14. Tesselasyon dokusu ve yüzey geometrisi birleşimi (Dyvik ve Mork, 2015)

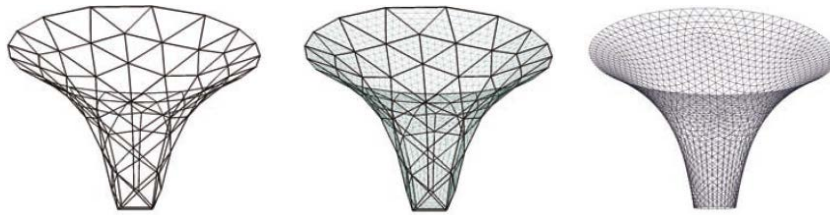
Tipik çerçeveleme sistemlerinden ve sürekli kabuklardan farklı olarak, ızgara kabukları, kuvvetlerden dolayı oluşan çalışma enerjisini azaltmakta ve somut enerji kaybını düşürerek avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, mevcut alanlar için bölmeli mekânlar türetmesinin yanı sıra bağımsız geniş açıklıklar da yaratarak çok yönlü mimari üretimler gerçekleştirebilir. Izgara

kabuklarının tarihi son 100 yıla kadar uzanmaktadır; buna rağmen, ızgara kabuklarında anlayış ve veri eksikliği bulunmaktadır. Ancak zamanla bu strüktür yapıları gitgide artmaya başlamıştır. Hem ahşap hem de çelikten yapılmış ızgara kabukları daha yaygın hale gelmektedir (Çizelge 3.5). Ahşap ve çelik ızgara kabuklar özel bağlantı elemanlarıyla veya kompozit malzemeler ile ankraj edilerek tasarım çeşitliliği sağlamaktadır (Bertin, 2013).

Çizelge 3.5. Ahşap ve çelik malzemenin ızgara kabuk karşılaştırması (Ertaştan, 2005)

AHŞAP	ÇELİK
<p>Izgara Kabuklar:</p> <p>Açıklık olarak 30 metre ve 45 metre aralığında tasarlanabilir. Derinlik, kabuk şekline göre değişir ve özel olarak hesaplanmalıdır.</p>	<p>Izgara Kabuklar:</p> <p>Açıklık olarak ahşap malzemenin daha geniş açıklıklar geçilebilir. Tasarımın şekline göre (içbükey veya dışbükey) özel hesaplama parametreleri uygulanmalıdır.</p>

Bir ızgara kabuğunun küresel geometrisini yönetmek için üç ana parametre tanımlanabilir; Bunlar ızgara kabuğunun yüksekliği, ızgaranın grid yoğunluğu ve geometrik oluşumun panel şeklidir (Malek, 2012). Izgara kabuğunun yüksekliği, tabandan yapının en yüksek noktasına olan mesafedir ve  $h/l$  oranına bağlı olarak yükseklik ve açıklık doğru orantılıdır. Izgaranın grid yoğunluğu, her panelin boyutunu açıklamaktadır ve geometrik biçimin kenar uzunluğunu belirlemektedir (Şekil 3.15). Panel şekli, her panelin görünümünü tanımlamaya yardımcı olmaktadır. Panel görünümleri, düzgün geometrik bir şekilden karmaşık geometriye sahip panel elemanına kadar değişebilmektedir (Bertin, 2013).



Şekil 3.15. EXPO Shanghai Sun Valleys ızgara kabuk strüktürü tasarım süreci (Dimcic, 2011)

Izgara kabukları, sürdürülebilir kalkınmayı üç ana şekilde kolaylaştırmaktadır. İlk olarak tarihi binaların efektif yeniden kullanımını sağlayarak ve açık alanların kapalı hale gelmesine izin vererek barınak, ticari veya eğlence olanaklarını etkin hale getirirler. İkinci olarak, yapısal malzeme ihtiyaçlarını geleneksel çerçeve sistemli yapılara kıyasla %50'den

fazla korurlar ve ahşap veya karton borular, çubuklar gibi daha düşük somutlaşmış enerjiye sahip çeşitli malzemeler ile bunu sağlayabilirler. Ayrıca son olarak da doğal elementleri kullanarak konforlu ısıtma ve soğutma ortamları oluşturur ve daha fazla doğal ışığa izin verirler.

Izgara kabukları ayrıca geçici binalar olarak kullanım için keşfedilmemiş bir potansiyele sahiptir. Örneğin; Olimpiyatlarda veya EXPO organizasyonlarında geçici büyük yapılara olan ihtiyacı karşılayarak kullanılabilirler. Izgara kabukları, afet yardımı durumları veya sergi alanları için de tercih edilebilecek sistemlerdir (Malek, 2012). Çeşitli amaçlar ve fonksiyonlar için tasarlanma özgürlüğüne sahip bu strüktürler geçmişten günümüze mimari tasarımlarla desteklenerek inşa edilmektedir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6. Kronolojik olarak geçmişten günümüze tasarlanmış bazı ızgara kabuk yapılar

Yıl	Yapı	Konumu	Yıl	Yapı	Konumu
1967	Montreal Biosphere	Montreal, Kanada	2009	The Yas Hotel	Abu Dhabi, Birleşik Arap Emirlikleri
1975	Mannheim Multihalle	Mannheim, Almanya	2009	MyZeil Shopping Mall	Frankfurt, Almanya
1989	Museum for Hamburg History	Hamburg, Almanya	2010	Waitomo Caves Visitor Centre	Waitomo, Yeni Zelanda
1989	Swimming Arena Neckarsulm	Neckarsulm, Almanya	2010	Lincoln Park Zoo South Pond	Chicago, ABD
1994	Meeting Hall Flemish Council	Brüksel, Belçika	2010	The Bridge Of Peace	Tiflis, Gürcistan
1996	Zoo Berlin Hippo House	Berlin, Almanya	2011	Centre Pompidou-Metz	Metz, Fransa
1998	Dz-Bank	Berlin, Almanya	2011	National Maritime Museum	Amsterdam, Hollanda
2000	Great Court	Londra, İngiltere	2011	The Dalí Museum	Florida, ABD
2000	Japan Pavilion Hannover Expo	Hannover, Almanya	2012	King's Cross Station	Londra, İngiltere
2001	Porticullis House	Londra, İngiltere	2012	Gardens by the Bay	Bedok South, Singapur
2001	Eden Project	St. Austell, İngiltere	2013	The Ephemeral Cathedral of Créteil	Paris, Fransa
2002	Weald and Downland Museum	Batı Sussex, Birleşik Krallık	2014	Highway Support Center	Assen, Hollanda
2002	German Historical Museum	Berlin, Almanya	2014	Coastlands Aquatic Centre	Wellington, Yeni Zelanda
2005	Fiera Milano	Milan, İtalya	2014	Central Taiwan Innovation Campus MOEA	Nantou City, Tayvan

Çizelge 3.6. (devamı) Kronolojik olarak geçmişten günümüze tasarlanmış bazı ızgara kabuk yapılar

2006	Berlin Main Train Station	Berlin, Almanya	2014	Budapest Underground Line M4 - Bikás Park Station	Budapeşte, Macaristan
2007	Kogod Courtyard	Washington, ABD	2015	Gemdale Lake Town Dajing Shopping Mall	Shanxi, Çin
2007	Savill Gardens	Egham, Birleşik Krallık	2016	Keukenhof	Lisse, Hollanda
2007	Odeon Courtyard	Münih, Almanya	2016	Chadstone Shopping Centre	Melbourne, Avustralya
2007	Golden Terraces	Varşova, Polonya	2019	Luum Temple	Tulum, Meksika
2008	Cabot Circus Roof	Bristol, Birleşik Krallık	2019	Jewel Changi Airport	Changi, Singapur
2009	Palacio de Comunicaciones	Madrid, İspanya	2019	Beijing Daxing International Airport	Daxing, Çin
2009	Nine Bridges Country Club	Yeoju-Gun, Güney Kore	2020	Taiyuan Domes, Botanical Garden	Taiyuan, Çin

1960'larda, Frei Otto ve Stuttgart'daki bir enstitü yenilikçi bir yapısal sistem geliştirmiştir. Izgara kabuğu, Edmund Happold tarafından 'bir ahşap kafesten oluşan iki kat kavisli bir yüzey' olarak tanımlanmıştır. Bu yapı, geniş açıklığı basit bir düzencele geçerek karmaşıklığın üstesinden gelen özel bir montaj mekanizmasını içermektedir. Ayrıca deforme olmayan yapının sadeliği sayesinde son şekil verilmiştir. Eğrilik elde etmek için malzemenin deformasyonunu kullanma fikri yapı inşa edilmeden daha önce diğer kültürler tarafından kullanılmıştır. Madan halkı bu tekniği kavisli, büyük ve toplu bir ev inşa etmek için ortaya çıkarmıştır. Kavisli bir çatıya sahip mekânda kullanılan ana yapısal malzeme samandır (Resim 3.10). Yapıda ilk olarak ana taşıyıcı elemanlar yerleştirilmiştir, ardından kemer haline getirilmek üzere bükülen taşıyıcılar üst örtü sistemini oluşturmuştur (Mesnil, 2013).



(a)



(b)

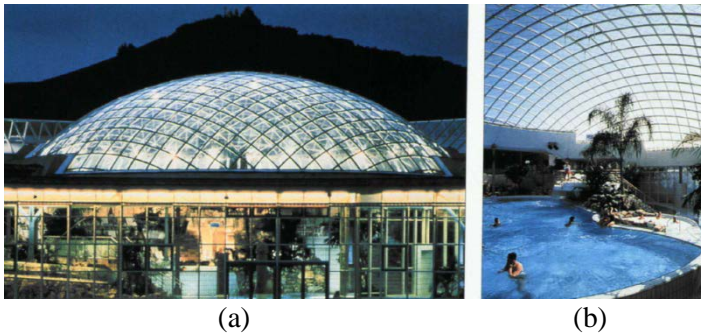
Resim 3.10. (a) Madan halkı tarafından inşa edilen evin yapım aşaması, (b) Evin son hali (Mesnil, 2013)

Madan halkının inşa ettiği evin modernize edilerek yapım tekniği olarak benzerlikler gösterdiği bir diğer yapı ise Multihalle yapısıdır. 1976'da Mannheim'da tasarımı ve uygulaması yapılan ızgara kabuk strüktür sistemi, ahşap ızgara kabuk ile oluşturulmuştur (Resim 3.11). Kabuk yapısı, yalnızca 20 kilogramlık kendi ağırlığı ile 55 metre açıklıklı bir konstrüksiyona dönüşmüştür. 9.500 metrekarelik yer kaplayan çatı strüktür yapısını monte ve ankraj etmek üç hafta sürmüştür (Mesnil, 2013).



Resim 3.11. (a) Mannheim Multihalle yapısının kuşbakışı görünümü, (b) Yapının strüktür inşası (Liddell, 2015)

1989 yılında inşa edilen Neckarsulm'da bir yüzme havuzu çatısı, çelik ızgara kabuk sisteminin ve Jorg Schlaich – Hans Schober tarafından geliştirilen yapım tekniklerinin ilk örneklerden biridir (Resim 3.12). Bu ızgara kabuğu, köşedeki yapı elemanları hariç, aynı uzunluktaki elemanlardan yapılmıştır. Şekil olarak tüm cam panellerin aynı eğriğe sahip olduğu kabuk yapı, kürenin bir parçasıdır. Dörtgen ızgara konstrüksiyon sisteminin kendi yüklerini taşıyamayacağı anlaşıldığında, yapıyı desteklemek için ayrıca kablo ağları oluşturularak strüktürlere tanımlandı ve entegre edildi (Mesnil, 2013).



Resim 3.12. (a) Neckarsulm yüzme havuzu kubbesi, (b) Yapının iç görünümü (Schlaich ve Schober, 1996)

1990'larda, Hans Schober ve Jorg Schlaich sırlı çelik ızgara kabukları geliştirdi. Bu tasarımda, yapı bu zamandan önce inşa edilen kabuklara göre farklı bir kabuk davranışı

sergiledi ve montaj sırasında ızgara sisteminin deformasyonu önlenmiş oldu. İnşa etme sürecinde özellikle cam malzemenin uygulandığı kısımlarda zorluklar oluştu. Bir paneldeki dört nokta, kavisli bir şekilde yerleştirildiği için ve aynı düzlemde olmadığı görülerek özel önlemler alındı (Mesnil, 2013). İlk uygulanan çelik ızgara yapıların ardından teknolojinin ilerlemesiyle birlikte dijital tasarım ve üretim teknikleri, bu yapılara ekonomik bir bakış açısı kazandırmıştır. Izgara sistemler, teknolojik malzemelerin gelişmesiyle elastik olarak inşa edilerek mukavemeti artırılmaktadır (Çizelge 3.7). Izgara kabukların hafifliği ve şeffaflık yaratılabilmesi sebebiyle ikonik biçimler ortaya çıkarılabilmektedir (Mesnil, 2013).

Çizelge 3.7. Elastik ızgara kabuk yapılar (Mesnil, 2013)

Yapı İsmi	Yapım Yılı	Açıklık	Katman Sayısı	Malzeme
Essen	1963	15 m×15 m	2	Ahşap kereste
Mannheim	1976	60 m×60 m	4	Ahşap (Balıran)
Polydome	1991	25 m×25 m	2	Ahşap kereste
Earth Centre	1998	6 m×6 m	4	Ahşap (Meşe)
EXPO 2000	2000	72 m×35 m	2	Karton
Downland	2002	48 m×15 m	4	Ahşap (Meşe)
Savill Garden	2004	90 m×25 m	4	Ahşap (Karaçam)
Chiddingstone Orangerie	2007	12 m × 5 m	4	Ahşap (Meşe)
Gridshell UR Navier	2007	6 m×23.6 m	2	Cam kompozit
Solidays' Festival	2011	10 m×35 m	2	Cam kompozit
Creteil geçici katedrali	2013	15 m	2	Cam kompozit

Izgara kabuk strüktürlerin açıklıklarına ve karmaşıklığına bakılarak, uygulanmış olan yapılar, küçük boyutlu ızgara kabuklar, orta boyutlu ızgara kabuklar ve büyük boyutlu ızgara kabuklar olarak kategorize edilebilmektedir. Böyle bir sınıflandırma yapılmasının amacı, ızgara kabuk örneklerinin tanımlanmasını kolaylaştırmak ve akademik projelerden ticari kabuk sistemlere doğru giden örnekleri incelemektir. Çizelge 3.8, 3 kategorinin de temel özelliklerini listelemektedir. Her kategoride bulunan örnekler için yapım yılı, projenin büyüklüğü, kullanılan malzemeler gösterilmiştir (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017).

Çizelge 3.8. 3 ayrı sınıfta bulunan ızgara kabuk sistemlerin kategorizasyonu (Ghiyasinasab ve diğerleri, 2017)

Kategori	Alan	Tasarımcı	Fonksiyonellik	Bütçe
Küçük Boyutlu	80 - 300 m <sup>2</sup>	Akademisyenler ve Öğrenciler	Ticari Olmayan	Akademik Fon
Orta Boyutlu	60 - 550 m <sup>2</sup>	Profesyonel Şirketler	Çoğunlukla Ticari	Akademik Fon ve Müşteri Yatırımları
Büyük Boyutlu	720 - 9500 m <sup>2</sup>	Profesyonel Şirketler (Çok Yönlü Mesleki Destekler)	Ticari	Müşteri Yatırımları

Küçük boyutlu ızgara kabuk sistemler inşa etmenin temel amacı, yapının uygulanabilirliğini görmek ve akademik araştırma yapmak olduğu söylenebilir. Bütçe genellikle akademik finansman ile sağlanmaktadır. Bu projeler müşterinin siparişine göre inşa edilmez ve profesyonel şirketlerin inşaatları için kullanılmaz. Bir grup akademisyen, öğrenci veya mimar, mühendis topluluğu tarafından tasarlanmaktadır. Örneklerin büyüklüğü 80 ile 300 m<sup>2</sup> arasındadır ve inşa edilen ızgara yapıları ticari binalar olarak kullanılmamıştır (Çizelge 3.9). Bu kategori, orta ve büyük olanlara kıyasla şekil ve tasarımda genellikle daha küçük ve daha az karmaşık olan ızgara sistemlerini içermektedir (Ghiyasinasab ve diğerleri, 2017).

Çizelge 3.9. Küçük boyutlu ızgara kabuk sistemler (Ghiyasinasab ve diğerleri, 2017)

Yapı İsmi	Yapım Yılı	Alan	Malzeme	Ülke
German Building Exhibition	1962	198 m <sup>2</sup>	Çam	Almanya
Pishwanton gridshell	2002	80 m <sup>2</sup>	Karaçam	İngiltere
Courtyard roofing of rural villa, Ostuni	2007	100 m <sup>2</sup>	Karaçam	İtalya
Masseria Ospitale's terrace, Lecce	2010	100 m <sup>2</sup>	Karaçam	İtalya
Dining pavilion, Ross Creek Centre	2010	127 m <sup>2</sup>	Polikarbonat levha ve ahşap lamel	Kanada
Toledo gridshell	2012	120 m <sup>2</sup>	Ladin	İtalya
Pavilion in Selinunte's Archeological Park	2012	80 m <sup>2</sup>	Sarı Çam	İtalya
Farmers' market gridshell, Cheticamp	2015	300 m <sup>2</sup>	Kırmızı Meşe	Kanada
Lafayette strong pavilion	2015	88.25 m <sup>2</sup>	Beyaz Meşe	Amerika

Orta boyutlu ızgara kabuk sistemler, küçük ızgara kabukların boyutuna yakın olan 60 ila 550 m<sup>2</sup> arasında değişen ızgara kabuk strüktürleri kapsamaktadır (Çizelge 3.10). Bu yapıların farklı bir kategoriye alınmasının nedeni, inşaat projesinde yer alan tarafların çoğunlukla profesyonel şirketler olması ve işlevselliklerine bakıldığında daha çok ticari olarak kullanılmalarıdır. Örneğin, bu kategorideki Chiddingstone ızgarasının boyutu, ilk kategorideki ızgaralardan daha küçüktür. Ancak, bu konstrüksiyon yapısı ticari bir binadır ve bir yapı sahibinin isteğine göre profesyonel şirketler tarafından inşa edilmiştir. Ayrıca,

çerçevesiz cam sistemine sahip tek ızgara kabuk strüktür sistemine sahiptir. Orta boyutlu ızgara kabuklar daha karmaşık ve kompleks yapılardır. Küçük ızgaralı kabuk sistemler, serbest biçimli bir yapı olarak ızgaraların tasarımı ve inşasında araştırma merkezlerinin bilgi edinmesini sağlamak amacıyla inşa edilirken, orta boyutlu sistemler için ticari bir motivasyon söz konusudur (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017).

Çizelge 3.10. Orta boyutlu ızgara kabuk sistemler (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017)

Yapı İsmi	Yapım Yılı	Alan	Malzeme	Ülke
Flimwell Woodland Girişimcilik Merkezi	1999	550 m <sup>2</sup>	Kestane	İngiltere
Chiddingstone Orangery gridshell	2007	60 m <sup>2</sup>	Kestane	İngiltere
Helsinki Zoo, gözlem kulesi	2002	82 m <sup>2</sup>	Çam	Finlandiya
SUTD gridshell	2013	200 m <sup>2</sup>	Kontrplak	Singapur

Büyük boyutlu ızgara kabuk sistemler, büyüklüğü 720 ila 9,500 m<sup>2</sup> arasında değişen kabuklardır ve genel olarak ticari bina sınıfında yer alırlar (Çizelge 3.11). Peyzaj mimarı, ahşap montaj uzmanı ve çatı aplikasyon mühendisi gibi kabuk strüktür alanında uzmanlaşmış çeşitli meslek sınıflarını da içerisinde barındırmaktadır (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017). Bu ızgara kabuk örnekleri birden fazla fonksiyonu aynı anda yapabilen mekânsal organizasyonlara sahiptir. Günümüzde büyük boyutlu yapı stokunun artışına paralel olarak ihtiyaç duyulan fonksiyonların hayata geçirilmesi de sağlanmaktadır ve kabuk strüktürler bu bağlamda mimari üretime katkıda bulunmaktadır.

Çizelge 3.11. Büyük boyutlu ızgara kabuk sistemler (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017)

Yapı İsmi	Yapım Yılı	Alan	Malzeme	Ülke
Mannheim Multihalle	1975	9500 m <sup>2</sup>	Baldıran	Almanya
Japan Pavilion, Expo 2000	2000	2500 m <sup>2</sup>	Karton	Almanya
Weald and Downland Gridshell	2002	720 m <sup>2</sup>	Meşe	İngiltere
Savill Garden gridshell	2005	2250 m <sup>2</sup>	Karaçam	İngiltere
Haesley Nine Bridges Golf Clubhouse	2010	2592 m <sup>2</sup>	Ladin (Glulam)	Güney Kore
Centre Pompidou Metz	2010	8500 m <sup>2</sup>	Ladin (Glulam)	Fransa
Pods Sports Academy	2011	5000 m <sup>2</sup>	Ladin (Glulam)	İngiltere

Bir ızgara yapısının güçlü yönleri zarif ve yenilikçi şekline dayanmaktadır. Yapı, modern mimaride parametrik tasarımların gelişmesiyle de dikkatleri üzerine çekmektedir. Küresel, hiperbolik vb. tasarımların dijital üretimle gerçekleştirilebilmesi sonucu kabuk strüktür yapım teknikleri de ilerleme kaydetmektedir. Sürdürülebilirlik, bu yapım sistemleri için bir başka güçlü teşviiktir. Örneğin, yapı elemanları, döşeme ve kaplama malzemelerinin inşası için ahşap kullanımı, küresel karbon emisyonlarının azaltılmasına olumlu katkıda

bulunmaktadır (Harris, 2005). Malzemeye ek olarak, yapının kendisi doğal ışık ve havalandırma alternatiflerini mümkün kılmaktadır.

Öte yandan, bu tür bir strüktür yapısının kullanımı ile ilgili bazı zayıf noktalar da söz konusudur. Mimari tasarım karmaşık bir süreç olduğundan tasarım aşaması zaman alıcıdır ve ölçüt olarak kullanılacak nitelikli örnek sayısı sınırlıdır. Büyük boyutlu ızgara kabuk yapılarında yer alan çok sayıda paydaş vardır ve özellikle projenin ilk aşamalarında aralarındaki işbirliğini yönetmek için bir koordinasyon olması gerekmektedir. Son olarak, yapının rijit ve güçlü durumda olacağından emin olmak için yüksek kaliteli malzemelerin test ve analiz edilmesi önemlidir (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017). Izgara kabuk konstrüksiyon sistemlerini daha iyi anlayabilmek için SWOT analizi yapılmıştır (Çizelge 3.12).

Çizelge 3.12. Izgara kabuk sistemin artıları ve eksileri (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017)

Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
1. Yenilikçi ve gelişmeye açık strüktür sistemi 2. Sürdürülebilir ve çevre dostu tasarım özelliği 3. Geniş kapsamlı yapı kataloğu 4. Yerinde montaj kolaylığı / Hibrit sistemlerin hızlı konstrüksiyonu 5. Materyallerin minimum kullanımı 6. Hafiflik 7. Cezbedici şekiller yelpazesi 8. Doğal ışık ve havalandırma olanağı	1. Kompleks (Karmaşık) dizayn 2. Örnek çeşitliliğinin sınırlı olması 3. Çok sayıda tedarikçi ve üretici müdahalesi 4. Yüksek kaliteli materyallerin seçilme ihtiyacı 5. Tasarım ve hazırlama için uzun dönemli bir çalışmanın gerekmesi
Fırsatlar	Tehditler
1. Özellikle Türkiye'deki piyasa boşluğu 2. Sürdürülebilir konstrüksiyon sistemine doğru eğilimler 3. Ahşap ve çelik sistemlerde yeniliklere ihtiyaçların olması	1. Strüktür sisteminin tam olarak anlaşılması ve bilinmemesi 2. Piyasanın ve müşterilerin ikna edilme süreci 3. Gereksiz rekabetçilik

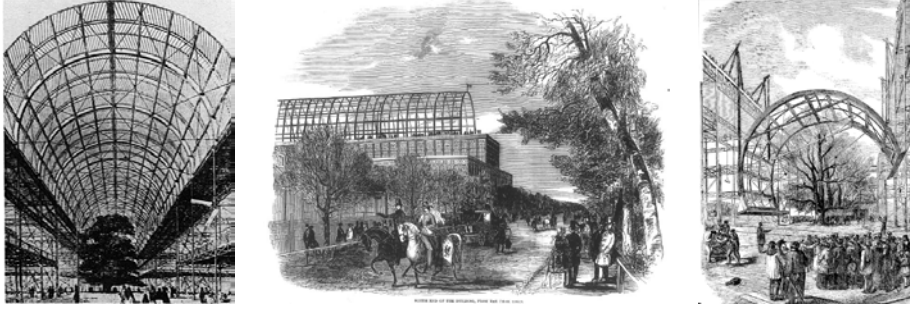
Izgara kabuk yapıların yapı türleri arasındaki konumu belirlenmeli ve bu yapı türlerine göre de değerlendirilmesi gerekmektedir. Her yapı sınıfının kendine özgü özellikleri bulunmaktadır ve kabuk sistemlerin bu özelliklere uygun olarak kullanım alanında ihtisaslaşması şarttır (Çizelge 3.13). Mekanların karakteristiklerine bakılarak dengeli ızgara kabuk sistemler tasarlanmalı ve uygulaması düşünülmelidir (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017). Yapının işlevine, konumuna, strüktür ve ızgara biçimlenişine bakılarak planlamalar yapılmalıdır.

Çizelge 3.13. Kullanım alanlarına göre ızgara kabuk sistemlerin özellikleri (Ghiyasinab ve diğerleri, 2017)

Yapı Tipi	Öne Çıkan Özellikler
Barınaklar Toplanma yerleri Restoranlar ( Dekorasyon)	-Yenilikçi ve hareketli bir yapı sistemi -Karmaşık yapıların inşasında özel mekanizmaların geliştirilmesi -Sürdürülebilirlik ve çevre dostu tasarım
Spor merkezleri Yüzme havuzları Dans salonları	-Geniş açıklık geçilmesi -Doğal ışık ve havalandırma kullanımı -Ahşabın nemi emme yeteneğinin faydaları -Ahşabın akustik konularla ilgili özellikleri -Çeliğin mukavemetinin fazla olması - Çeliğin kolayca sökülüp takılabilmesi
Ziyaret merkezleri Müzeler Sergiler Kütüphaneler Anıtsal mekanlar	-Zarif şekiller ve estetik yapı oluşumları -Sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu -Kolonsuz büyük bir alan imkanı -Mekan bölünlenmesinin rahatça yapılabilmesi ve esnek mekan örüntüleri
Tren istasyonları Terminaller Bisiklet istasyonları	-Geniş alanlar yaratma / yerinde montaj -Hibrit sistemler oluşturma becerisi -Minimum malzeme kullanımı/hafiflik -Hızlı inşaat süreci -Sürdürülebilirlik ve çevre dostu tasarım
Depolar Sanayi alanları	-Büyük araçların girip çıkabilmesine olanak tanıma -Çok sayıda stok madde yapılabilecek alan oluşturma -Uzun ömürlü malzemelerin kullanımı
Seralar Hayvanat bahçeleri Bitki araştırma enstitüleri	-Doğal ışık ve havalandırma sağlanması -Rahatça dolaşma fırsatı sunulması -Tesisat sistemi açısından kolaylıklar

Tonoz geometrisi de ızgara kabuk sistemlerde kullanılabilen ve antik çağlardan beri süregelen en eski mimari formlardan biridir. Tuğla ile inşa edilen Doğu Mimarisi yapıları veya Romalıların kâgir tonozlarının kullanımı yaygındır. Kemerlerin çoklu birleşimi sonucu oluşan bu sistemler, Mezopotamya, Pers ve özellikle Roma İmparatorluğu'nda anıtsal yapılarda tapınaklar, hamamlar veya seyirci salonları olarak geniş açıklıklar sağlamıştır. Silindirik olan bu yapılar, ölü ve hareketli yüklere karşı yatay kuvvetler üretmektedir. 19. yüzyılda demir çubukların tanıtılması ile tonozdan gelen yatay itmeye direnen yatay bağlantı elemanları olarak hareket eden elemanlar türetilmiştir ve yapının ince duvarlar veya kolonlar üzerinde desteklenmesi sağlanmıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte geniş açıklıklı çatı yapılarının yapımında tonoz formlar tercih edilmiştir (Makowski, 1986).

1809'da Paris'te Mısır pazarının üzerinde 40 metre açıklıklı nervürlü demir kubbe ve 1820'de Viyana'daki Diana hamamları üzerinde 19 metre açıklıklı tonoz sistemler inşa edilmiştir. Bu yapı, yarım daire biçimli bir dizi demir kemerden oluşturulmuştur. Çaprazlanmış bir beşik tonozun ilk örneklerinden biri, Joseph Paxton tarafından tasarlanan ve Londra Hyde Park'ta 1851 Büyük Sergisi için Crystal Palace'da orta nef üzerine dikilen demir beşik tonozdur (Şekil 3.16). Yapı, birçok mimar tarafından dikdörtgen bir ızgaradan oluşan prefabrik tek katmanlı beşik tonoz örneği olarak kabul edilmektedir. Simetrik olmayan yüklere karşı sağlamlık sağlayan diyagonal demir çubuklar ile sistem zenginleştirilmiştir (Makowski, 1986).



Şekil 3.16. 1851'de inşa edilen prefabrike demir beşik tonozun görünüşleri (Makowski, 1986), (Addis, 2006)

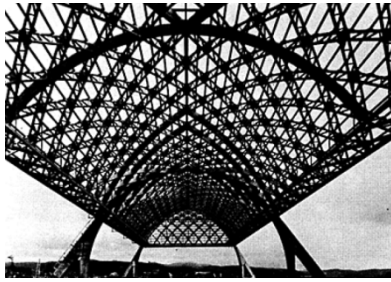
Demir üretim tekniklerinde ve kalitesindeki hızlı gelişmeler tren istasyonları üzerinde büyük açıklıklı çatıları ortaya çıkarmıştır. Kemerler, iki boyutlu parçaları birbirine bağlayan çapraz rüzgâr destek elemanları ile sertleştirilerek 3 boyutlu bir yapıya dönüşmüştür. Kemerlerin standart ve simetrik yapısı sayesinde tonozlar ekonomik olarak da avantaj oluşturmuştur. Aynı zamanda, silindirik şekil, demiryolu için belirgin bir avantaj üreterek çatının altında büyük bir hacim yaratmıştır, bu sebeple büyük açıklıklı depolar için de artışa neden olmuştur (Makowski, 1986).

1906'da Alman mimar Zollinger tarafından Dessau'da ahşap lamel çatı sistemi geliştirilmiştir.

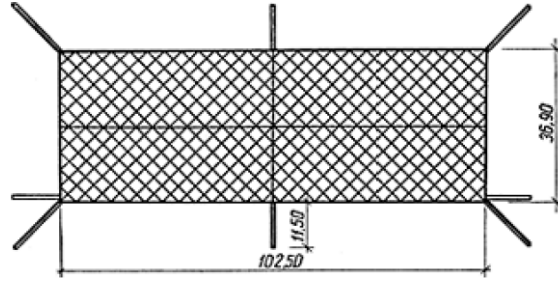
Bu sistem, cıvatalı veya çivilenmiş ince ahşap lamel ünitelerinden oluşmaktadır ve bağlanma noktalarında çapraz olarak silindirik tek katmanlı ızgara sistemli bir tabaka yaratmaktadır. Birinci Dünya Savaşı'ndan önce İsveç, Norveç, Hollanda, İsviçre, Polonya ve Rusya'da kullanımı hızla yayılmıştır. ABD'ye Dr. G. R. Kiewitt tarafından 1925 yılında

tanıtılmıştır. O zamandan beri ABD'de çok sayıda ahşap tonoz inşa edilmiştir (Makowski, 1986).

Birbirine bağlı ahşap lamel ünitelerinin temel geometrisi üçgensel diyagonal bir ızgara oluşturmaktadır. Yapı bu özellik ile birlikte rijitlik kazanmıştır, rüzgâr ve kar yüklerine karşı dayanım sağlanmaktadır. Yapısal avantajları sayesinde yüzme havuzları, spor merkezleri, kiliseler vb. üzerindeki çatılarda ahşap lamel ızgara kabuklar yayılmıştır. İtalyan tasarımcı Pier Luigi Nervi, de Demanio Aeronautico hangar yapısı için 1935 yılında Roma yakınlarındaki Cecchignola'da  $102.5 \times 39.6$  metrelik bir alanda sadece altı noktada desteklenen bir yapı inşa etmiştir (Resim 3.13). Yapıda destek noktaları, köşe birleşimlerinde ve ızgara sistemin orta noktalarında konumlandırılmıştır (Makowski, 1986).



(a)



(b)

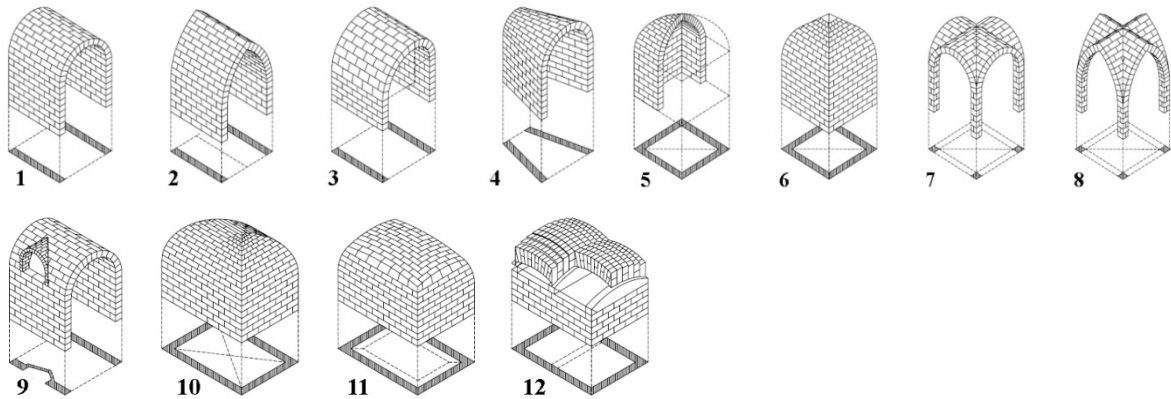
Resim 3.13. (a) Nervi'nin hangar yapısının strüktür görünümü, (b) Yapının planı (Makowski, 1986)

Büyük Britanya'da, birkaç yapı mühendisi İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra geniş endüstriyel binaları kapsayacak şekilde çeşitli tipte diyagonal çubuklu tonoz sistemleri üretmeye başlamıştır. Messrs Ove Arup ve Ortakları tarafından tanıtılan bir sistem Scaffolding (İngiltere)'de inşa edilmiştir. Bu sistem kafes ızgara tonoz kabuk olarak bilinmektedir (Resim 3.14). İngiltere'de bu tarzdaki yapıların çoğu oluklu asbestli çimento levhalarla veya şeffaf levha, cam veya reçineyle bağlanmış fiberglas kaplama panelleri ile örtülmüştür. İnşa edilen yapılar, beşik tonozlar olarak silindirik kabuklarla sınırlı değildir; birçoğu iki yönde kavisli tasarlanmıştır (Makowski, 1986).



Resim 3.14. Kafes ızgara tonoz kabuk sistemler (Makowski, 1986)

Tonoz kabuk sistemler bir zemini desteklemek için üç boyutlu kemerli bir tavan konstrüksiyonu veya çatı yapısı oluşturmaktadır. 11. yüzyılın başlarında Batı Avrupa'da dini mimaride duvarcılık anlayışı ile yuvarlak kemer şeklinde kabuk yapılar inşa edilmiştir. 12 çeşit tonoz tipi mevcuttur (Şekil 3.17). Bu türler ana kemer, enine kemer ve duvar kemerleri olarak adlandırılmakta ve çoklu kullanımları ile yapılar meydana gelmektedir (Davies ve Jokiniemi, 2008).

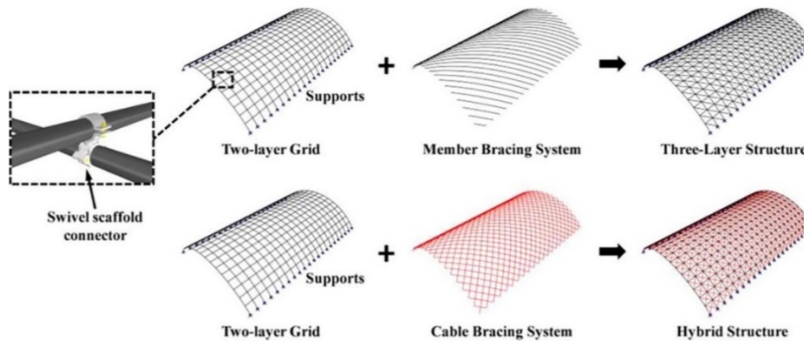


Şekil 3.17. Tonoz çeşitleri; 1. Beşik tonoz, 2. Sivri beşik tonoz, sivri uçlu tonoz, Gotik tonoz, 3. Yaygın tonoz, 4. Konik tonoz, genişleyen tonoz, 5. Manastır tonoz, kubbe tonoz, 6. Sivri manastır tonoz, kubbe tonoz, 7. Kasık tonoz, çapraz tonoz, kesişen beşik tonoz, 8. Uçlu kasık tonoz, sivri tonoz, 9. Dormer tonoz, 10. Çukur tonoz, 11. Kemerli tonoz, 12. Bölümlü tonoz, parçalı beşik tonoz (Davies ve Jokiniemi, 2008)

Çok eski zamanlardan bu yana bilinen ve uygulanan tonoz konstrüksiyon sistemler, geleneksel uygulama sürecinde sıralanmış birden çok kemer davranışı göstermekte ve bünyesinde sadece basınç kuvvetini karşılayabilmektedir. Yanal etkilere ve simetrik yüklere karşı şekil değiştirerek direnen silindirik kabuk strüktür sistemlerde, basınca ek olarak çekmeye ya da kısaca eğilmeye uygun yapı malzemesi kullanılması gerekmektedir. Tek eğrilikli, açınımlı yapılabilir olması, bununla birlikte kalıp yapım giderlerinin azlığı,

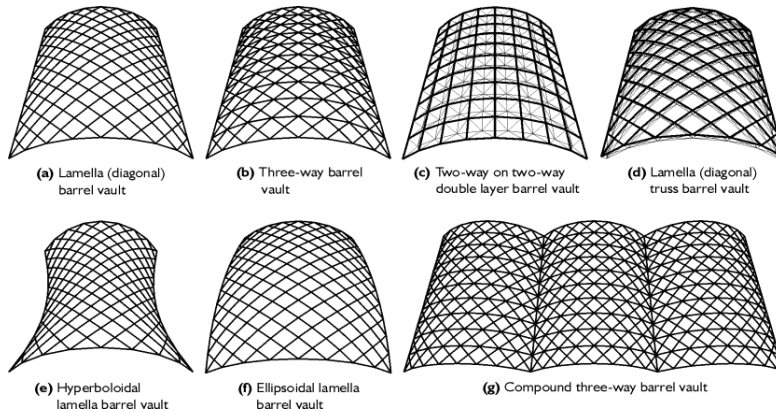
matematiksel ve geometrik çözümünün kolaylığı vb. gibi nedenlerden ötürü, silindirik tonoz kabuklar, özellikle büyük dikdörtgen alanları geçmede avantajlı taşıyıcı sistemler arasında yer alırlar (Türkçü, 2017).

Tonoz elastik ızgara kabukları, tek eğrilikli yüzey şekli ile elastik ızgara kabuk çeşitlerinden biridir. Bu sistemler, gerekli rijitliğin ve mukavemetin sağlanabilmesi için diyagonal destek sistemleri veya kablo sistemler ile takviye edilebilmektedir (Şekil 3.18). Böylece hibrit tonoz ızgara kabuk sistemler oluşturulabilmektedir. Esnek ve hafif olması, bağlantı elemanlarının mevcut konstrüksiyon sistemine ek yapım teknikleri uygulanmasına olanak tanınması ızgara kabuğun avantajlarından sayılabilir (Xiang ve diğerleri, 2021).



Şekil 3.18. Silindirik tonoz ızgara kabuk sistemlere eklenebilen yeni sistemler (Xiang ve diğerleri, 2021)

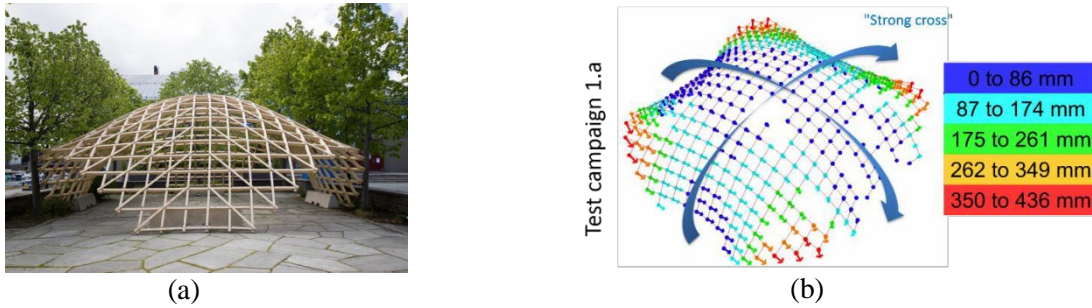
Tonoz ızgara kabuk sistemlerin yapımında kullanılan çeşitli ızgara türleri vardır; çelik, alüminyum veya ahşaptan yapılabilecek tek katmanlı tonozlar bunlardan biridir (Şekil 3.19). Günümüzde, 100 metreye yaklaşan büyük açıklıklar ile çift katmanlı sistemler kullanılabilir. (Ghadim, 2013)



Şekil 3.19. Enine kesitli tek ve çift katmanlı tonoz örnekleri (Ghadim, 2013)

Izgara kabuklarda yeni yapım tekniklerinin uygulanması vb. gibi farklı inşa metotlarının denenmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Deneysel çalışmalar, gelecekte inşa edilecek yapılar için ön çalışmayı içermektedir ve gelecekteki araştırmalar için yol göstericidir. Kabuk strüktürlerin farklı konstrüksiyon sistemleri ile farklı bağlantı ve materyallerin kullanılması sonucunda farklı performans göstereceği bilinmektedir. Bu amaçla deneysel çalışmaların, yapısal özellikleri ölçme, zaman içindeki strüktür değişimlerini gözlemleme, teorik değerleri uygulamada karşılaştırma açısından olumlu etkileri görülmektedir.

The Timber Gridshell Pavilion, Norveç'in Trondheim kentinde Haziran 2015'te 4 metre yüksekliğinde, 10 metre genişliğinde inşa edilmiştir. 23 x 48 milimetre ızgara elemanları dört katman halinde düzenlenmiştir. Ahşap kereste elemanlarının tümü düğümsüz yapılmıştır ve C14 dayanıklılık sınıfında olduğu varsayılmıştır (Mork ve diğerleri, 2016). Bu ızgara kabuklu pavyonun yenilikçi modüler tasarımı, birbirine bağlı 520 özdeş modüle dayanmaktadır (Resim 3.15). Form bulma için tasarım prosedürü, bir parçacık yay modeli aracılığıyla uygulanmıştır. Form bulma süreci büyük ölçüde Rhino'nun modelleme araçlarıyla entegre edilmiş bir grafik algoritma editörü olan Grasshopper ile sağlanmıştır. Izgara kabuğu, bir kaldırma kulesi vasıtasıyla oluşturulmuştur (Mork ve diğerleri, 2016).



Resim 3.15. (a) Çalışmanın uygulamadaki hali, (b) Planlanan şekil ile inşa edilen şekil arasında gözlenen tutarsızlıkların sayısal olarak gösterimi (Mork ve diğerleri, 2016)

Pavilion ZA, Romanya'nın Cluj kentinde bir öğrenci atölyesi sırasında çift katmanlı bir ahşap ızgara kabuğu olarak dijital fiziksel modelleme programı olan Kangaroo Live Physics ile tasarlanmıştır. Yerel ticari kurumların sponsorluğuyla geçici bir kültür mekanı olarak işlev görmüştür. Sibiryaya karaçamından 70 mm x 20 mm kesitli ahşap bir malzeme kullanılarak 4 metre yüksekliğinde, 18 metre x 13 metre boyutlarında inşa edilmiştir. Izgara sistemi, 3,5 metreye 3,5 metrelik modüllerden monte edilmiştir (Resim 3.16).

Modüler bir sistemin kullanılması, bağlantılardan yeterli yanal direnç olmadığında şekil alan ızgara sistemlerdeki eğrisel görünümü sağlamaktadır (Naicu ve diğerleri, 2014).



Resim 3.16. (a) Çalışmanın uygulamadaki hali, (b) Modelleme programındaki görünümü (Naicu ve diğerleri, 2014)

Toledo Gridshell 2.0, Diarc ("Federico II" Üniversitesi) ve "Suor Orsola Benincasa" Üniversitesi arasındaki ortak bir araştırma projesinin sonucudur. Mayıs 2014'de bir ekip tarafından tasarlanan ve üretilen yapı, performans açısından kabuk sistemin zaman içindeki değişimini izlemek için uygulanmıştır (Resim 3.17). Bir ızgara kabuğu için en uygun çözümü elde etmek için, ilk mimari fikirden sahadaki montaja kadar sürekli bir mühendislik süreci gereklidir. Bu süreç temelde, şeklin optimize edilmesi, kesme çizgilerinin ve düz kafesin yönünün tanımı, dış kısıtlamaların tasarımı, yapısal analiz, üretim, montaj, izleme gibi adımlardan geçmektedir. Grasshopper programı tasarım ve form bulma sürecinde tercih edilmiştir (D'Amico ve diğerleri, 2015).



Resim 3.17. (a) Uygulanan yapı, (b) Bir merkez etrafında oluşturulan simetrik model (D'Amico ve diğerleri, 2015)

SUTD Kütüphane Pavyonu, Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi'nde kontrplak panellerden inşa edilmiş ve sac levha karolarla kaplanmış 200 metrekarelik bir pavyon yapısıdır. Ortaya çıkan yapı, ince kabuk ve tek katmanlı ızgara yapılarının ilkelerini birleştirmektedir. Tasarımdaki yenilik, tüm yapısal elemanların düz panellerden kesilebildiği üç boyutlu bir geometrik düzenlemede yatmaktadır. Önerilen yöntemin

avantajı, basit kesme teknolojisi (örneğin; testereler, lazer kesiciler, 3 eksenli CNC yönlendiriciler) kullanılarak çok çeşitli hat ağları için yapısal destek sistemlerinin oluşturulabilmesidir ve bu da geometrik olarak karmaşık yapıların yapımını önemli ölçüde daha düşük bir maliyetle daha geniş kütlelerin yaratılmasını sağlamaktadır. Çeşitli bina uygulamaları için farklı şekil ve desenlerdeki karmaşık yapıları imal etmek için yüksek derecede esneklikle benzer bir yaklaşım kullanılabilirliğini göstermektedir (Sevtsuk ve Kalvo, 2014).

Tasarım, Rhino Python komut dosyalarında uygulanmıştır ve bunların doğrusal bağlantı elemanları olarak kullanıma hazır kapı menteşeleri kullanılarak düz kontrplak levhalardan üretilen SUTD'deki bir pavyon projesinde yapımı denenmiştir. (Resim 3.18a). Benzer bir yöntem, başka bir yerde farklı form, desen ve malzemede ızgara kabukları geliştirmek için kullanılabilir. Pavyon, 200 mm'lik dikey derinliğe sahip 12 mm'lik kontrplak elemanları ile inşa edilmiştir. Komşu paneller, üçgen halkalar oluşturan, 2,5 cm'lik bir kapı menteşesiyle sabitlenmiştir. Yapı, her düğümün üzerinde üst üste binen altıgen bir "balık derisi" oluşturan 2 mm'lik haddelenmiş çelik kaplama karolarıyla kaplanmıştır (Resim 3.18b). Kaplama levhaları, doğrudan kontrplak duvarlar arasındaki ara bloklara vidalanmıştır, böylece aksenal yükler, sac levha karolar aracılığıyla kenardan kenara dağıtılmıştır. Tüm kontrplak elemanlar ve ara bloklar düzdür, standart düz yataklı CNC yönlendiricilerde kesilmiştir (Sevtsuk ve Kalvo, 2014).



(a)

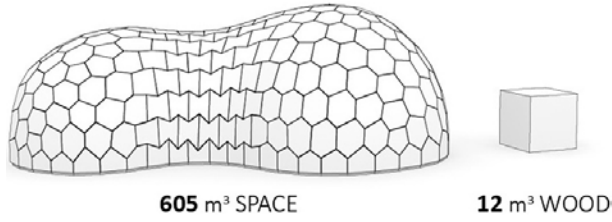


(b)

Resim 3.18. (a) Uygulanan yapının iç strüktür görünümü, (b) Kaplamanın geometrisi (Sevtsuk ve Kalvo, 2014)

Landesgartenschau Sergi Salonu, Almanya'nın Schwäbisch Gmünd kentinde Landesgartenschau'nun bir parçası olarak 2014 yılında büyük ölçekli bir prototip bina bağlamında uygulanmıştır (Şekil 3.20). Ahşap levha yapılar için geliştirilen entegre hesaplamalı tasarım ve dijital üretim yöntemi kullanılmıştır. Etkinlik alanı olarak hizmet

verecek olan yapı, tamamen kapalı, yalıtımlı ve su geçirmez bir binadır. Izgara yapı sistemi, yerel olarak temin edilebilen kayın kontrplak kullanılarak inşa edilmiştir. Robotik üretim, bu çalışmanın yeniliklerinden biridir. Kuka markasıyla CNC kesim için robotik üretim kodunun oluşturulmasından başlayarak üretim gerçekleştirilmiştir (Schwinn ve diğerleri, 2014).



Şekil 3.20. 12 metreküplük ahşap yapı malzemesi ile geniş bir yapı alanı oluşturma (Schwinn ve diğerleri, 2014)

243 prefabrike poligonal modülden oluşan salon, yapısal kayın kontrplak tabakasının 50 mm kalınlığında ve neredeyse 10 metre genişliğinde olması ile oldukça hafif özellikler sergilemektedir (Resim 3.19). Genel olarak, 125 m<sup>2</sup> kullanılabilir zemin alanı ve 605 m<sup>3</sup> brüt hacim, 12 metrelik kayın kontrplak ile çevrenmiştir ve bu durum kabuğun yalnızca 37,9 kg / m<sup>2</sup> yapısal ağırlığının oluşmasına neden olmaktadır. Mevcut yapı malzemesinin kullanımını en üst düzeye çıkarma amacına uygun olarak, stok parçalarının kesilmesiyle oluşturulan kesim, parke lamelleri olarak parke döşemede yeniden kullanılabilen ve sürdürülebilir bir yapı malzemesidir (Schwinn ve diğerleri, 2014).



(a)



(b)

Resim 3.19. Salonun iç görünümü ve Kuka robotuyla dişli parça oluşumu (Schwinn ve diğerleri, 2014)



## 4. TAŞIYICI SİSTEMLERDE TESSELYON KURGULARI

Yapı kimliğinde önemli bir rol oynayan geometrik kararlar ve şekiller, taşıyıcı sistemler ile iş birliği içinde yapılara özgürlük ve özgünlük kazandırmaktadır. Bu bölümde, geometrik bir yöntem olan tesselyon kavramı ve taşıyıcı sistemler kesişimindeki kuramsal çerçeveye yönelik literatür araştırmaları verilmiştir. İlk alt başlıkta farklı tesselyon kurgularına sahip simgesel mimarlık yapıları aracılığı ile durum analizi yapılması hedeflenmiştir. Örüntüler tek bir modüle indirgenmiş ve matematiksel dizilimleri türetilmiştir. Böylece en yaygın kullanılan örüntü dizilimlerine ulaşılmıştır. Sonraki alt başlıkta ise literatür araştırmasında tez konusunda paralellik gösteren ve yararlanılan bilimsel çalışmalardan sistematik bir şekilde kısaca bahsedilmiştir.

### 4.1. Örnek Yapılar Üzerinden Durum Değerlendirmesi




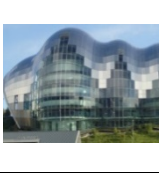





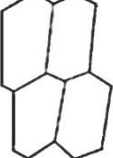


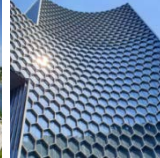


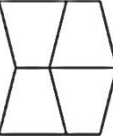
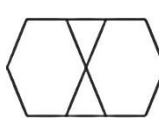

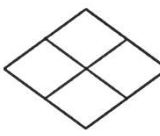
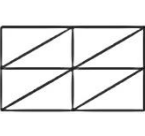
Yapı elemanlarının bütünü oluşturarak taşıyıcı sistemler çeşitlilik göstermektedir ve tesselyon yöntemi de farklı oluşumlara ortam hazırlamaktadır. Yüksek yapılar, kültür merkezleri, konser salonları, ofis binaları gibi farklı fonksiyonlara imkan veren taşıyıcı konstrüksiyonlarda tesselyon kurgularına rastlamak olasıdır. Cephe sistemlerinde ve üst örtü sistemlerinde tesselyon örüntüleri, hem panel malzemesi olarak hem de taşıyıcı kurguda görülebilmektedir.

Bu bölümde farklı konstrüksiyon teknikleriyle inşa edilen yapılar üzerinden olası geometrik tasarım kararları açığa çıkartılmıştır. Her bir yapının kullanılma fonksiyonu (sosyal, kültürel, bilimsel vs.) birbirinden farklıdır ve buna bağlı olarak tasarlanan yapıların tesselyon örüntüleri saptanarak geometrik oluşumları gösterilmiştir. Örüntüler tek bir modüle indirgenmiştir ve matematiksel dizilimleri türetilmiştir.

Farklılaşan cephe sistemleri araştırıldığında, tesselyon kurguları ile ilişkili olarak, tesselyon modülü, panel şekli, modül oluşumu, matematiksel dizilim ve taşıyıcı sistem gibi etkenlere bağlı olarak sınıflandırılma yapılmıştır. Çizelge 4.1'den anlaşılacağı üzere üçgen bir modülün tekrarlanması, ötelenmesi, döndürülmesi veya yansıması ile oluşturulan ve kullanımı yaygın olan bu örnekler tesselyon yönteminin bir sonucudur. Üçgen dışında dikdörtgen ve altıgen gibi düzgün geometrik şekiller ve bunların karma

kullanımı da geometride çeşitlilik sağlayarak tesselasyon kavramının çok yönlü olarak ele alınabileceğini işaret etmektedir.



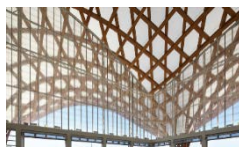

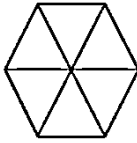


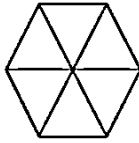




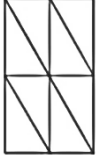

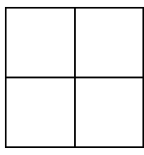

Çizelge 4.1. Cephe konstrüksiyonuna göre tesselasyon örüntüleri

	Federation Square	30 St Mary Axe, Londra	London City Hall	Sage Gateshead Building	Harpa Concert Hall
Örnek Yapı					
Tesselasyon Modülü					
Panel Şekli	Üçgen	Dörtgen	Üçgen	Dörtgen	Serbest Biçimli Geometriler
Modül oluşumu	Dönme-Yansıma	Öteleme	Dönme-Yansıma	Öteleme	-----
Matematiksel Dizilim	3.3.3.3.3.3.3.3	4.4.4.4	3.3.3.3.3.3	4.4.4.4	6.6.6
Taşıyıcı sistem	Grid Giydirmeye Cephe Yapı Sistemi (Kumtaşı, Çinko ve Cam)	Diagrid Strüktür Sistemleri (Çelik ve Cam)	Diagrid Strüktür Sistemleri (Çelik ve Cam)	Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Grid Giydirmeye Cephe Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)
Örnek Yapı	Dalian Sports Center Stadium	La Seine Musicale	Duo Twin Towers	The Prada Aoyama Store	Aula Medica
					
Tesselasyon Modülü					
Panel Şekli	Dörtgen(Yamuk Geometri)	Üçgen-Altıgen	Altıgen	Dörtgen	Üçgen
Modül oluşumu	Dönme-Yansıma	Öteleme-Yansıma	Öteleme	Öteleme	Dönme-Yansıma
Matematiksel Dizilim	4.4.4.4	3.6.3.6	6.06.2006	4.4.4.4	3.3.3.3.3.3
Taşıyıcı sistem	Grid Giydirmeye Cephe Yapı Sistemi (ETFE ve metal panel)	Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Ahşap ve Cam)	Grid Giydirmeye Cephe Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Diagrid Strüktür Sistemleri (Metal ve Cam)	Grid Giydirmeye Cephe Yapı Sistemi (Ahşap Çerçeve ve Cam)







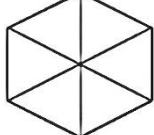
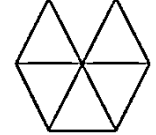







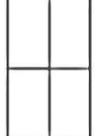

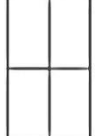
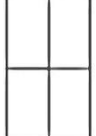
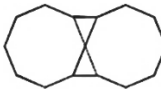
Malzeme, form ve açıklığa göre değişen tesselasyon kurguları üst örtü sistemlerinde de çeşitlilik göstermektedir. Dizgesel bir şekilde tablolaştırılan yapılar, tesselasyon ve taşıyıcı

sistem özelliklerine göre gruplandırılmıştır. Farklı yapım sistemlerinde farklı tessellasyon oluşumlarına rastlamak mümkündür. Cephe konstrüksiyonu, kubbe ve tonoz sistemler gibi açıklık geçilen yapılarda incelenen tessellasyon örüntüleri yapı fonksiyonuna göre çeşitlenmekte ve zenginleşmektedir. Açıklık geçilen taşıyıcı sistem yapıları için de sınıflandırma yapılarak yapılar arasında karşılaştırılabilir bir çerçeve oluşturulmuştur (Çizelge 4.2, 4.3, 4.4).







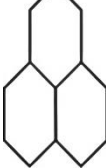

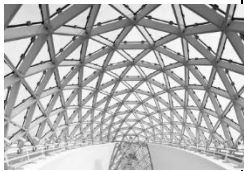



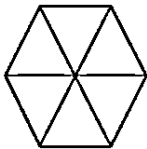


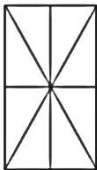
Çizelge 4.2. Açıklık geçilen yapılara göre tessellasyon örüntüleri

Örnek Yapı	The Z lote Tarasy Warsaw AVM	Louvre Müzesi	Centre Pompidou – Metz	Dinosaur Theme Park Entrance Building
				
Tessellasyon Modülü				
Panel Şekli	Üçgen	Dörtgen	Üçgen-Altıgen	Üçgen
Modül oluşumu	Dönme-Yansıma	Öteleme-Yansıma	Öteleme-Yansıma	Dönme-Yansıma
Matematiksel Dizilim	3.3.3.3.3.3	4.4.4.4	3.6.3.6	3.3.3.3.3.3
Taşıyıcı sistem	Serbest Biçimli Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Piramidal Izgara Kabuk ve Kafes Yapı Sistemi (Çelik, Alüminyum ve Cam)	Serbest Biçimli Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Ahşap çerçeve)	Serbest Biçimli Izgara Kabuk Yapı Sistemi (ETFE ve Ahşap)
Örnek Yapı	New Milan Trade Fair	Kogod Courtyard	Metropol Parasol	Moynihan Train Hall
				
Tessellasyon Modülü				
Panel Şekli	Üçgen	Dörtgen	Dörtgen	Dörtgen
Modül oluşumu	Dönme-Yansıma	Öteleme	Öteleme	Öteleme
Matematiksel Dizilim	3.3.3.3.3.3	4.4.4.4	4.4.4.4	4.4.4.4
Taşıyıcı sistem	Serbest Biçimli Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Serbest Biçimli Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Serbest Biçimli Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Ahşap)	Serbest Biçimli Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)

Çizelge 4.3. Kubbe yapılarda tesselasyon örüntüleri

Örnek Yapı	Panora AVM	Climatron, Missouri Botanik	Buckminster Fuller- Jeodezik Kubbe	Pioneer Center for the Performing Arts	Union Tank Car Dome
					
Tesselasyon Modüllü					
Panel Şekli	Üçgen	Üçgen	Üçgen	Üçgen	Üçgen
Modül oluşumu	Dönme-Yansıma	Dönme-Yansıma	Dönme-Yansıma	Dönme-Yansıma	Öteleme
Matematiksel Dizilim	3.3.3.3.3.3	3.3.3.3.3.3	3.3.3.3.3.3	3.03.2003	6.06.2006
Taşıyıcı sistem	Kubbesel Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Jeodezik Kubbe Yapı Sistemi (Çelik)	Jeodezik Kubbe Yapı Sistemi (Çelik)	Jeodezik Kubbe Yapı Sistemi	Jeodezik Kubbe Yapı Sistemi (Çelik)
Örnek Yapı	De Koepel	Disney's Epcot Center	The Taiyuan Domes	Foxconn Data Center	Louvre Abu Dhabi Dome
					
Tesselasyon Modülü					
Panel Şekli	Dörtgen	Üçgen	Dörtgen	Dörtgen	Üçgen, Sekizgen
Modül oluşumu	Öteleme	Dönme-Yansıma	Öteleme	Öteleme	Öteleme-Yansıma
Matematiksel Dizilim	4.4.4.4	3.03.2003	4.4.4.4	4.4.4.4	3.8.3.8
Taşıyıcı sistem	Kubbesel Izgara Kabuk Yapı Sistemi	Jeodezik Kubbe (Alucobond ve Çelik)	Kubbesel Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Ahşap ve Cam)	Kubbesel Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Kubbesel Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Alüminyum)

Çizelge 4.4. Tonoz ızgara kabuklara göre tessellasyon örüntüleri

	Crystal Palace	Atlanta airport domestic terminal	The Wellington Zoo Hub	ARCTIC Center / HOK
Örnek Yapı				
Tessellasyon Modülü				
Panel Şekli	Dörtgen	Üçgen, Dörtgen	Altıgen	Dörtgen
Modül oluşumu	Öteleme	Dönme Yansıma	Öteleme	Öteleme
Matematiksel Dizilim	4.4.4.4	3.4.3.4	6.6.6	4.4.4.4
Taşıyıcı sistem	Tonoz Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Tonoz Izgara Kabuk Üst Örtü Sistemi (ETFE ve Çelik)	Tonoz Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik Çerçeve)	Tonoz Izgara Kabuk Yapı Sistemi (ETFE ve Çelik)
Örnek Yapı	The Dalı Museum / HOK	Eden Project	Swatch Headquarters	Kansai İnternational Airport
				
Tessellasyon Modülü				
Panel Şekli	Üçgen	Altıgen	Dörtgen	Üçgen
Modül oluşumu	Dönme-Yansıma	Öteleme	Öteleme	Dönme-Yansıma
Matematiksel Dizilim	3.3.3.3.3.3	6.06.2006	4.4.4.4	3.3.3.3.3.3.3.3
Taşıyıcı sistem	Serbest Biçimli Tonoz Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik ve Cam)	Küresel Izgara Kabuk Yapı Sistemleri (ETFE ve Çelik)	Tonoz Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Ahşap)	Tonoz Izgara Kabuk Yapı Sistemi (Çelik)

Yapılarda standart bir geometrik biçimin kullanılmaması, geometrinin sınırsız kullanım alanına vurgu yapmaktadır. Bu sebeple, geometrinin bir ifadesi olan tessellasyon yönteminin de gelecek yıllarda yapı tipolojisine yeni katkılar sunacağı görülmektedir. Tessellasyon kurgularına sistematik olarak bakıldığında;

- Geniş açıklıklı ilk sistemlerde temel geometrik formlar olan üçgen ve dikdörtgen şekiller ile tasarımlar oluşturulurken günümüze yakın mimari eserlerde alışılmışın dışına çıkılarak altıgen, sekizgen gibi geometrilerin kullanıldığı tespit edilmiştir.
- Tesselasyon yönteminin getirdiği matematiksel hesaplamalar ile mimari yaklaşımların arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi ise farklı geometrilerin tek başına veya birden fazla geometrik şekil ile entegre edilmesi ve bunun oluşumunda geometrik tasarım yöntemi olan tesselasyondan yararlanıldığı belirlenmiştir.
- Açıklık geçilen yapılar arasında geometrik tasarımın kompleks bir strüktür sistemine tesselasyon kurgularıyla aktarılmasının önemli bir örneğini teşkil eden örüntülerin üretilmesinde çelik, alüminyum ve cam endüstrisindeki teknolojik gelişmelerin de kayda değer etkisinin olduğunu söylemek mümkündür.
- Düzgün ve yarı düzgün tesselasyon örüntülerinin yanı sıra serbest biçimli tesselasyon örüntüleri de geniş açıklıklı yapılarda kullanılmaktadır (Takva ve İlerisoy, 2021).

Konstrüksiyon sınıflandırmasına bakıldığında,

- Üçgen, dörtgen ve altıgen geometrik şekillerinin kullanıldığı ve buna ek olarak komplike serbest biçimli geometrilerin de yapılarda uygulanabildiği saptanmıştır. Buna bağlı olarak periyodik/simetrik tesselasyon çeşidi ile elde edilen düzgün ve yarı düzgün tesselasyon oluşumlarının yanı sıra periyodik olmayan/düzensiz tesselasyon türleri ile de örüntülerin oluşturulabildiği söylenebilmektedir.
- Ayrıca üçgen geometrik şekil ile oluşturulan tesselasyonlarda, tesselasyon modülleri ve modüllerin oluşum şekli (öteleme, yansıma, dönme) ve matematiksel formüller de değişerek tesselasyon yönteminin derinliğine ve yayılmacı potansiyeline dikkat çekilmektedir. Bu durum, sadece üçgen geometrisi için geçerli olmayıp, diğer geometrik biçimler için de aynı durum söz konusudur.
- Öteleme, dönme ve yansıma işlemlerinden birinin kullanılması ile çok çeşitli kurguların meydana gelmesi, tesselasyon yönteminin geniş bir skalada değerlendirilmesini de sağlamaktadır.

Araştırılan örnek yapılardaki örüntüler referans alınarak alan çalışmasında kullanılan taşıyıcı sistemlere entegre edilmiştir.

## 4.2. Konu Bağlamında Literatür Taraması

Öncelikle geniş açıklıklı yapılarda taşıyıcı sistem tasarımına bakıldığında, geniş açıklı yapı kavramı, geniş açıklıkları geçebilen taşıyıcı sistemler, taşıyıcı sistem türleri, taşıyıcı sistem malzemeleri, ürün seçim yöntemleri ve ölçütler, yapıya ilişkin sistemlerin seçimini konu alan bilimsel çalışmaların incelemeleri yapılmış ve ilgili çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. Taşıyıcı sistemler ve özellikleri hakkında literatür taraması

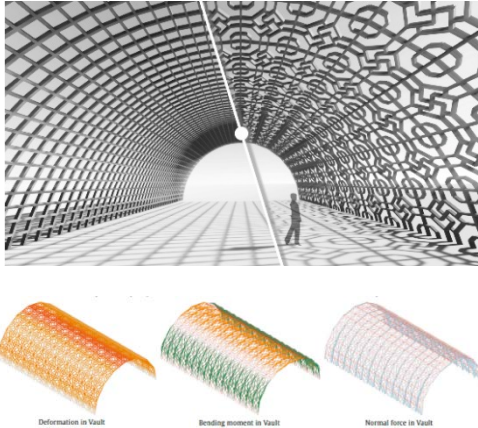
Referans	Konusu ve Yöntemi
Dağlıgan (2019)	Malzeme özellikleri de dikkate alınarak büyük açıklıkların hangi koşullarda hangi sistemle en uygun biçimde geçilebileceği ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Tablolar yardımı ile, çok ölçütlü karar analiz yöntemi kullanılmıştır. Açıklık geçmek için kullanılan taşıyıcı sistemler tanımlanmış ve sınıflandırmaları yapılmıştır. Yöntem olarak; Tez çalışmasında bilgi toplama, analiz ve sentez yöntemleri kullanılmıştır. Analiz aşamasında geniş açıklıkların örtülmesinde kullanılan yapı malzemelerinin ve taşıyıcı sistem tiplerinin sınıflandırması yapılmıştır. Sentez aşamasında ise literatür taraması yöntemi ile saptanan çeşitli ölçütler kullanılarak çok ölçütlü bir karar analiz yöntemi uygulanmıştır. Sonuç yöntem önerisi bir bilgisayar yazılımıyla desteklenmiştir.
Kayakıran (2019)	Tutkallı tabakalı ahşap yapı elemanlarının tanımı, geçmişten günümüze tarihçesi, malzeme seçimi, geniş açıklıklarda kullanılan konstrüksiyon tipleri, diğer sistemlerdeki yapı malzemeleri ile karşılaştırılması, yurt dışındaki ve yurt içindeki durumu, yurt dışından örnek uygulamalar ile yurt içinden Kocaeli örneği; Körfez yüzme havuzu taşıyıcı çatı elemanı incelenmesi çalışmanın konularını oluşturmaktadır. Yöntem olarak; güncel literatür taraması ve örnekleme kullanılmıştır.
Arun (2018)	“Taşıyıcı Sistem Tasarımı” adlı bildirisinde taşıyıcı sistem tasarımına dair ilkeleri ortaya koymuş, taşıyıcı sistemlerin oluşturulma prensipleri ve özellikleri hakkında literatürdeki kaynaklara dayanarak bilgiler vermiştir. Yöntem olarak; kaynak taraması, örnekleme gibi kriterler ile çalışma sunulmuştur.
Akçaeer (2016)	Havalimanı terminal binası tanımı yapılmış ve bu yapılarında büyük açıklık geçme ihtiyacını belirleyen faktörlerden söz edilmiştir. Türkiye ve Dünya’daki havalimanı terminal örneklerine yer verilmektedir. Kriterler doğrultusunda tasarlanan havalimanı terminal binası örneğinin yapısal analizi ve analiz sonuçlarını ile çalışma tamamlanmıştır. Yöntem olarak; literatür taraması, biçim, malzeme ve taşıyıcı sistem araştırması ve tasarlanan terminal binalarının yapısal analizinin yapılması (Sap2000 programı) üzerine kurgulanmıştır.
Özdemir (2016)	Geniş açıklıklı mekan sistemleri araştırılmıştır, parametrik tasarım üzerine literatür araştırması yapılmıştır, parametrik programlar araştırılıp incelenmiştir, bir yazılım geliştirilerek geniş açıklıklı örnek çalışmaların kodlamaları yapılmıştır. Yöntem olarak; ilk aşamada kaynak taraması ile süreç başlamıştır, ardından önerilerin 3DS Max programı altında MaxScript kod sisteminin kullanılarak parametrik olarak hazırlanmasıyla devam etmiştir.
İpek (2014)	Mimarlık ve strüktür mühendisliği disiplinlerinin işbirliği ile hesaplamalı bir ürün tasarımı önerisi geliştirilmiştir. Farklı disiplinler arası ilişkilerin ortaya konulmasına ek olarak, bütünleşik tasarım kavramı, bununla birlikte mevcut tasarım ve analiz araçları üzerine incelemeler yapılmıştır. Sonra da strüktür türleri örnekler üzerinden incelenmiştir. Araştırmaların ardından voronoi örüntüsüne dayalı bir kabuk tasarımı geliştirilmiştir. Yöntem olarak; ilk bölümlerde literatür taraması ile başlanmış, alan çalışmasında tonoz kabuk sistemiyle Rhinoceros ve Grasshopper programları işbirliği çerçevesinde analizler üretilmiştir.

Çizelge 4.5.(devamı) Taşıyıcı sistemler ve özellikleri hakkında literatür taraması

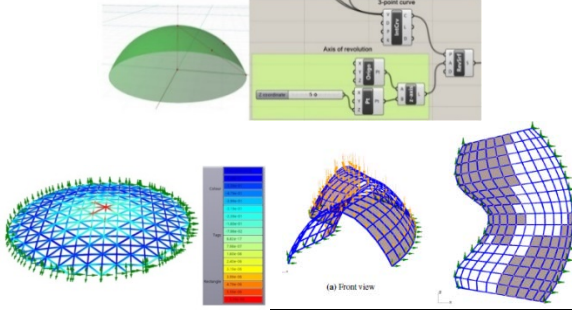
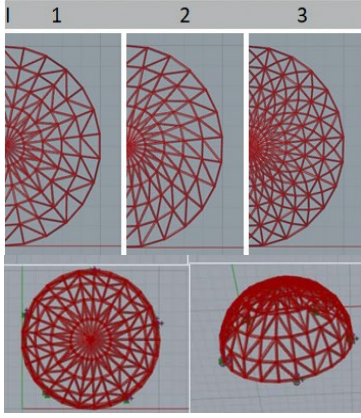
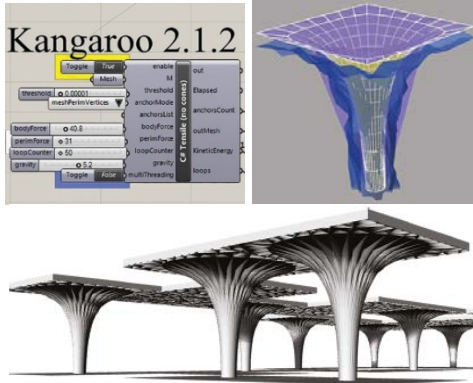
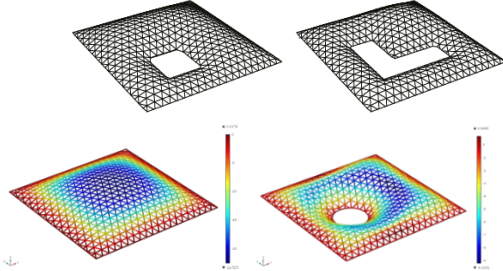
Özet (2014)	Membran sistemlerin taşıyıcı sistemler içerisindeki yeri, taşıyıcı sistem kurgusu, malzeme ve destek elemanları ile ilgili uygulama detaylarına ilişkin bilgiler vermiştir. Geniş açıklık geçme kriterlerini esas alarak yapılmış örnekleri incelemiştir. Çalışmada kullanılan yöntem; membran sistemlere ait bilgi ve detayların belirlenen örnekler üzerinde karşılaştırılmalı analizinin yapılmasıdır.
Uslu (2013)	Sürdürülebilirlik, sürdürülebilir tasarım prensipleri, sürdürülebilir yapı sistemleri, geniş açıklıklı yapılar, konstrüksiyon ve fonksiyonlarına göre incelenmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde dünyada uygulamaları yapılmış geniş açıklıklı yapı örnekleri, proje bilgileri, konstrüksiyonları ve sürdürülebilir özellikleri incelenmiştir. Yöntem olarak; literatür taraması ve örneklendirmeye başvurularak sınıflandırma oluşturulmuştur.
Urfalı (2012)	Geniş açıklıklı yapıların çelik taşıyıcı sistemleri incelenmiş, taşıyıcı sistemlerin dünyadaki güncel örnekler üzerinden analizleri yapılmıştır. Yöntem olarak; taşıyıcı sistemlerin yapısal davranışları ve uygulanabilirlikleri irdelenmiştir. Ardından, en az bir boyutu (açıklık, yükseklik vb.) bilinen yapılar, autocad ortamında oranlanmak suretiyle eleman boyutları elde edilmiş ve böylece yapısal davranışları yorumlanmıştır.
Yılmaz (2011)	Türkiye’de yaygın kullanım imkânı bulamayan yapısal ahşap kompozitler hakkında detaylı bilgi verilmiş ve bu elemanlarla oluşturulan geniş açıklık yapı sistemlerinin nitelikleri ortaya konmuştur. Yapısal ahşap kompozitler ile oluşturulan geniş açıklık taşıyıcı sistemlerin dünyadaki önemli örnekleri sıralanmıştır. Yöntem olarak; kaynak taraması ve örnekleme yapılmıştır.
Kayalar (2010)	Geniş açıklık ihtiyacı ele alınmış ve tarihte yapılmış farklı geniş açıklıklı yapılar incelenmiştir. Çalışmada önce taşıyıcı sistem tanımına değinilmiştir, ardından geniş açıklıklı taşıyıcı sistemlere form ve malzemeleri açısından bakılmıştır. Son olarak maliyet, geçilebilen açıklık, uygulanabilirlik, ağırlık gibi kriterler göz önüne alınarak malzemelerine göre (Çelik, Tutkallı Tabakalı Ahşap, Betonarme) performansları karşılaştırılmıştır. Yöntem olarak; literatür taraması, internet araştırmaları, sistem analizleri ve karşılaştırılması, üretici firmalarla görüşmeler yapılmıştır.

Sonraki aşamada; Elastik malzemeler ile tasarlanan ızgara kabuk sistemlere yönelik literatür taraması yapılmıştır. Artan ilgi ile bu tür yapılarda avantajlar ve dezavantajların tespiti, sınırlamalar ve kısıtlamaların belirlenebilmesi için ilgili akademik çalışmalar aktarılmıştır (Çizelge 4.6).

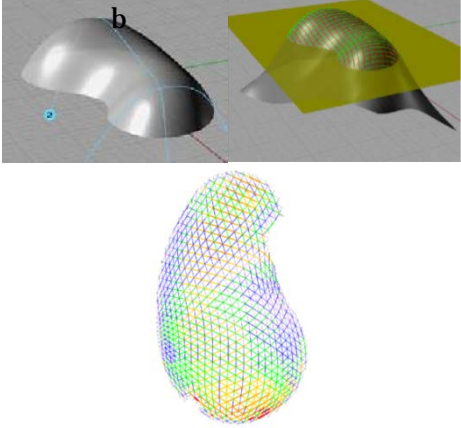
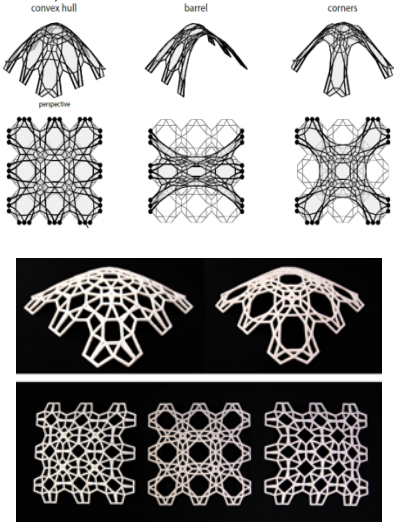
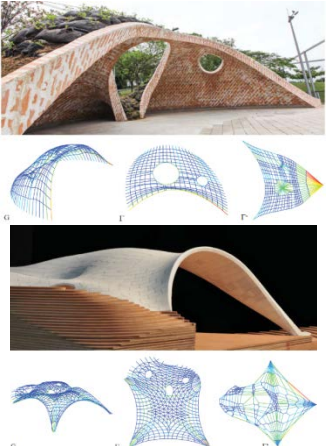
Çizelge 4.6. Izgara sistemler ve oluşum mekanizmaları hakkında literatür taraması

Referans	Konusu ve Yöntemi
Chokshi (2020) 	Kuzey Asya'daki antik sanat desenlerinin çoğu geleneksel mimaride tarihi öneme sahip tapınlardan, kapılardan, evlerden korkuluklara ve hatta sanat eserlerine kadar bulunmaktadır. Bu dokuları yeniden canlandırmak amacıyla modern mimaride ızgara kabuk sistemlerde denenmesi planlanmıştır. Bir tren istasyonu kompleksinde ızgara kabuk proje önerilmiştir. Yer değiştirme, moment grafiklerine göre desenlerin ızgara kabuk sistemlerdeki karşılaştırmaları ile sonuca bağlanmıştır. Yöntem olarak; Kabuk yapısında geleneksel dokuların uygulanabilirliği gözlemlenmiştir. Grasshopper, Diana programlarıyla yapısal analizler yapılmış ve performans değerlendirilmeleri ile bitirilmiştir.

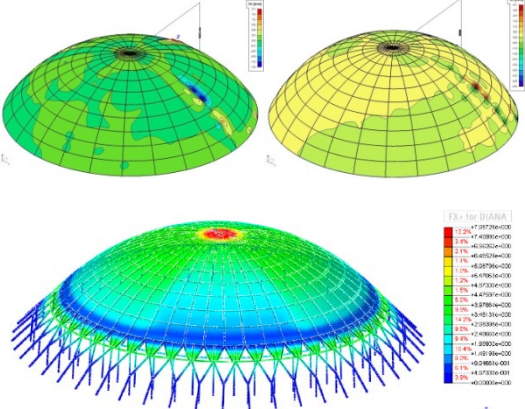
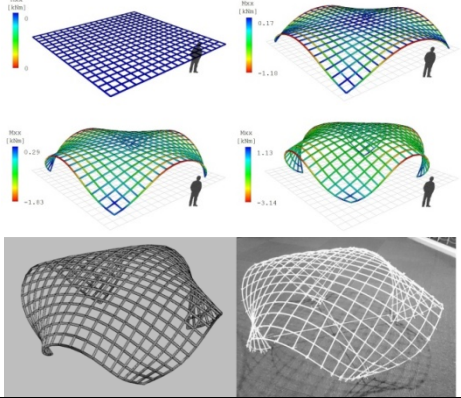
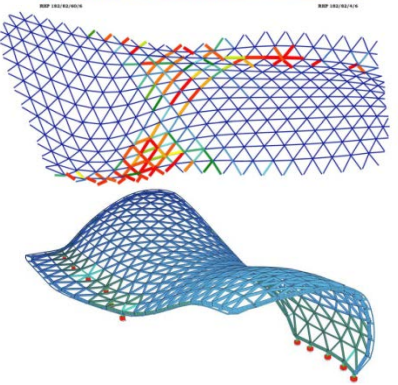
Çizelge 4.6.(devamı) Izgara sistemler ve oluşum mekanizmaları hakkında literatür taraması

<p>Eliassen, Huseby (2018)</p> 	<p>Tez çalışmasında, Eurocode standartlarına göre kabuk yapılar üzerinde kar ve rüzgâr yüklerinin hareketi incelenmiştir. Basit geometrik kabuk konstrüksiyon sistemlerinin kabuklardaki yapısal etkisi araştırılmıştır. Parametrik tasarım ve optimizasyon çalışmanın temelinde yer almıştır. Yöntem olarak; Grasshopper, Karamba ve Galapagos üçlüsü (Rhino programı eklentileri) kullanılmıştır. Rhino ile modellenen kabuk sistemler, Karamba 3D ile yapısal analizine tabi tutulmuş, Galapagos programıyla algoritmalar oluşturulmuştur.</p>
<p>Dźwierzynska (2018)</p> 	<p>Eğri çelik çubuk yapılarının efektif şekillendirilmesi sorunu ele almaktadır. Önerilen parametrik tasarım süreci, geometrik şekillendirmeyi birbirine entegre ederek gerçekleştirilmektedir. Şekiller ve çeşitli izgara desenleri ile değişimi hesaplamak için bir metodoloji geliştirme amacı vardır. Eğriliklerine bağlı olarak izgara yapılarının yük taşıma kapasiteleri, kısıtlamalar, alternatifler aranmaktadır. Yöntem olarak; Rhino 3D yazılımında çalışan tasarım araçları ile yapısal analizi ve optimizasyonu ile izgara modellerinin uygulanmasıyla modeller elde edilmiştir. Önerilen izgara yapılarının parametrik modellemesine tasarım yaklaşımı çok yönlü araçlar olan Grasshopper ve Karamba 3D ile sağlanmıştır.</p>
<p>Torki Baghbadorani (2017)</p> <p>Kangaroo 2.1.2</p> 	<p>Çalışma, parametrik ve modüler bir tasarım süreci ile inşa edilen bir kabuk yapısının yüzey eklemine odaklanmaktadır. Kabuk formu, topoğrafya ve şekil gibi çeşitli alan koşullarına uyum sağlayan tonoz tipolojisini kullanır. Mekânsal, yöresel mukarnaların ve geometrilerinin yönlerini analiz ederek yeni yüzey süslemelerinde yeniden yorumlamıştır ve estetik nitelikler elde edilmiştir. Simetrik homojen form ve simetrik olmayan heterojen form üzerine yoğunlaşma yapılmıştır. Yöntem olarak; Mukarnas, hem yerel hem de çağdaş parametrik tasarım yöntemlerinde kullanılmıştır. Grasshopper yazılım bileşenlerini içeren çok katmanlı bir tasarım sürecinde nasıl kullanıldığını gösteren yazılımlar oluşturulmuştur.</p>
<p>Green, Lauri (2017)</p> 	<p>Araştırma, serbest biçimli üçgen geometrik formlu izgara kabuk sisteminin form bulma, optimizasyon, yapısal analiz aşamalarını içermektedir. Mevcut örneklerden farklılığı, çeşitli izgara kabuk sistemlerde boşlukların farklı olmasıdır. Yapısal olarak verimli formlar oluşturmak için parametrik modele uygun bir şekilde algoritmalar geliştirilmiştir. Algoritma, çeşitli kabuk formlarını işlemek için parametrik modeller ile test edilmiştir. Son olarak geliştirilen algoritma ve sonuçları tartışılmıştır. Yöntem olarak; form bulma ve optimizasyon, algoritma yazılımı için Grasshopper eklentisi kullanılmıştır.</p>

Çizelge 4.6.(devamı) Izgara sistemler ve oluşum mekanizmaları hakkında literatür taraması

<p>Du Peloux (2017)</p> 	<p>Elastik ızgara kabukların tasarımının açıklanmasında teorik ve teknik yapılar ele alınmıştır. Minimum serbestlik derecesine izin veren strüktür sistemi oluşturulmuştur. Eurocode standartlarına göre malzeme tanımlamaları yapılarak sistem kurgulanmıştır. Ayrıca ankraj ve çubuk detayları işlenerek sistem detayları entegre edilmiştir. Sıcaklık ve nem testleri uygulanmış, maliyet sorgulaması yapılmıştır. Yöntem olarak; güncel maliyet değerleri toplanmış, rhinoceros programı eklentisi Grasshopper programıyla tasarım ve analiz süreci sonlandırılmıştır.</p>
<p>Khouri (2017)</p> 	<p>Tez, parametrik tasarım aracılığıyla bir modeli incelemektedir, kavramsal tasarım bağlamında performans odaklı çerçevede sistem alternatifleri sunmaktadır. Form bulma ve optimizasyon için analizler yapılmıştır, değişken olarak ızgara kabuğu yüksekliği seçilmiştir. Yapılardaki geometri, modele hassasiyet kazandırmaktadır ve desen topolojisinin strüktüre katkılarını araştırmayı amaçlamaktadır. En yüksek yoğunluklu tasarlanan kabuk yapısı en iyi strüktürel analiz performansını vermiştir. Yöntem olarak; desen üretme işlemleri Grasshopper programı ile, güç yoğunluğu metotları ile form bulma ve optimizasyon işlemleri, değerlendirme ve görselleştirme MATLAB analiz programı ile düzenlenmiştir.</p>
<p>Rippmann (2016)</p> 	<p>Çalışma, farklı geometrik formlardaki kabuk sistemlerin form bulma, optimizasyon gibi özelliklerini incelemiştir. Ayrıca bu strüktürlerin deneysel olarak duvarcılık sistemleriyle inşa edilmesinde ne tür durumların ortaya çıktığını göstermektedir. Çalışmada serbest formlu yapı araştırması ağırlıkta olup geometrik konstrüksiyonları üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Strüktürel analizler ile sonuçlar tartışılmıştır. Yöntem olarak; RhinoVAULT eklentisi ile form bulma ve geometrilerin duvar sistemlere entegrasyonu saptanmıştır. Deneysel çalışmaların analizinde Rhinoceros programı ön plandadır.</p>

Çizelge 4.6.(devamı) Izgara sistemler ve oluşum mekanizmaları hakkında literatür taraması

<p>Kanta (2015)</p> 	<p>Araştırma, bir basketbol sahası için çatı tasarımını içermektedir. 20.000 seyirci kapasiteli ve beton kabuk yapı olarak tasarlanmıştır. Boyut olarak stadyum ölçüsünde geniş açıklıklı bir kabuk yapısı gerektirmektedir. Çalışmada, estetik, yapısal düzenlemeler ve uygulamadaki verimliliğe dikkat edilmiştir. Kabuk sistem olarak kubbe seçilmiştir. Strüktürel analizler yapılmıştır. Yöntem olarak; kabuk geometrisi ve matematiksel model Rhinoceros programında oluşturulmuştur. Ardından DIANA programına model aktarılmış ve strüktürel model, yük tanımlamaları, materyaller, mesnetler eklenmiştir.</p>
<p>Poulsen (2015)</p> 	<p>Tezin amacı, ızgara kabuk sistem tasarımını formüleştiren bir tasarım yapmak ve elastik olarak strüktür analizini gerçekleştirmektir. Son olarak oluşturulan yapının fiziksel olarak bir prototipi elde edilmiştir. Yöntem olarak; C#.NET programında kodlama sistemiyle veriler oluşturulmuştur. Bu veriler Grasshopper 3D yazılımına aktarılarak modelin yaratılması sağlanmıştır. Kodlama içinde materyal tanımlama, form bulma bulguları girilmiştir.</p>
<p>Pruszkowski (2015)</p> 	<p>Tez projesinde, programlama, hesaplama yöntemleri ve yapısal optimizasyon konusunda genel literatür taraması yapılmıştır. Ardından kodlama sistemleri yaratılarak örnek bir çalışma üzerinden kabuk sistem değerlendirilmiştir. Çelik elemanlar Eurocode 3 standartlarına göre kullanılmıştır. Yöntem olarak; Rhinoceros 5 ve FEA Sofistik programları kullanılmıştır. Tüm kodlamalar Grasshopper eklentisinde oluşturulmuştur. Kodlamalar için C# programlama dilinden de destek alınmıştır.</p>

Yapılan araştırmalar sonucunda; tez kapsamındaki oluşturulan farklı geometrik formları ele alan, yapı maliyet analizlerinin yapıldığı çalışmalara mevcut olanaklar doğrultusunda ulaşılabilmiştir. Bu nedenle tez çalışmasının literatürde fark edilen eksikliği kapatması konusunda önemli olduğu düşünülmektedir.



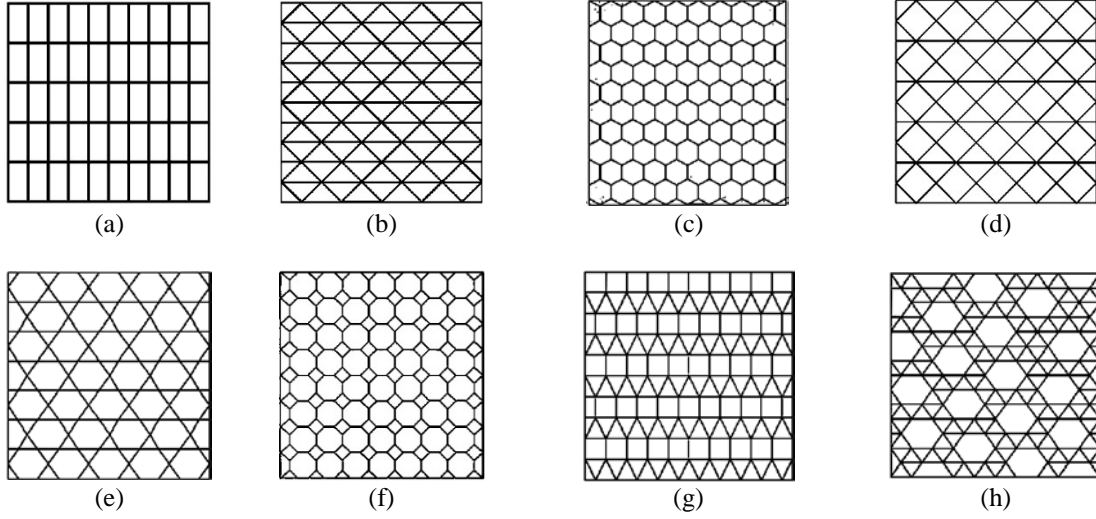
## 5. ALAN ÇALIŞMASI

Kabuk yapılar, sonsuz sayıda form üretme becerisine sahip olan ve aynı zamanda geniş açıklık geçmede, malzeme kullanımında çeşitlilik sağlayan etkin bir yapı sistemidir. Kabuk tasarımındaki avantajlardan biri ölü yükü en aza indirerek strüktürde büyük eğilme gerilmeleri olmadan ince kesitli yapıların inşasına izin vermesidir. Bu sistemin ortaya çıkmasıyla minimum malzeme ile maksimum strüktürel kazanç elde edilmiştir (Say, 1998). Yüzeyi geometrik olarak tanımlayan kabuk sistemler kullanılan malzemeye göre farklı biçimlerde oluşturulabilmektedir. Eskiden betonarme kabuklar tercih edilirken açıklığın artmasına bağlı olarak yapı teknolojisinde dayanım/yoğunluk oranı yönündeki arayışlarda gerek malzeme gerek konstrüksiyon temelinde arayışlar artmıştır. Özellikle endüstrileşme ile geliştirilen yapı malzemeleri sayesinde de kabuk sistemler mekân sınırlayıcı özelliğinden öteye giderek tasarım unsuru olarak kullanılmaktadır. Bu noktada da çelik malzeme ile oluşturulan ızgara kabuk sistemler farklı örüntüler ile sık sık kullanılır duruma gelmiştir.

Tez çalışmasında farklı tesselasyon kurgularının taşıyıcı sistemler üzerindeki etkilerini araştırmak doğrultusunda özellikle açıklık geçmede etkin olarak kullanılan, mevcut yapılarda düz veya eğrisel olarak uygulanabilen, çubuk elemanlar ile inşa edilen ve modern bir yapısal form olarak görülen ızgara kabuk sistemler kullanılmıştır. Önceki bölümlerde aktarılan değişen geometrik örüntülerin uygulandığı ızgara kabuk yapılar hakkındaki bilgiler ışığında, bu bölümde tesselasyon kavramı ile oluşturulan farklı geometrik konfigürasyona sahip yapılar tasarlanmıştır.

Karşılaştırmalı bir analiz yapılması hedeflenen tezde mevcut yapılar üzerinden yapılan incelemeler doğrultusunda periyodik/simetrik tesselasyon çeşitleri ile oluşturulan ızgara kabuk yapı sistemlerinin daha fazla uygulandığı gözlemlenmiştir. Tesselasyon örüntülerinin meydana getirilmesinde öteleme, dönme, yansıma hareketleri ile elde edilen geometrik kurguların kullanıldığı, değişen geometrik şekiller ile çeşitli kombinasyonlar elde edildiği tespit edilmiştir. Mevcut örnekler üzerinden yapılan literatür taraması ile elde edilen ve en fazla kullanılan tesselasyon örüntülerinin yapısal performanslarını ve geometrik karakteristiklerini anlamak tez çalışmasının temel hedefidir. Bu doğrultuda da 2 boyutlu düzgün ve yarı düzgün tesselasyon türleri kullanılmıştır. Düzgün örüntülerden dikdörtgen (4.4.4.4), üçgen (3.3.3.3.3.3), altıgen (6.6.6) geometrik şekilleri; yarı düzgün

tesselsasyon türlerinden ise üçgen – dikdörtgen (3.4.3.4), üçgen – altıgen (3.6.3.6), kare – sekizgen (4.8.8), üçgen – kare (3.3.3.4.4) ve üçgen – altıgen (3.3.3.3.6) geometrik biçimler ile sınırlandırma yapılmıştır (Şekil 5.1).



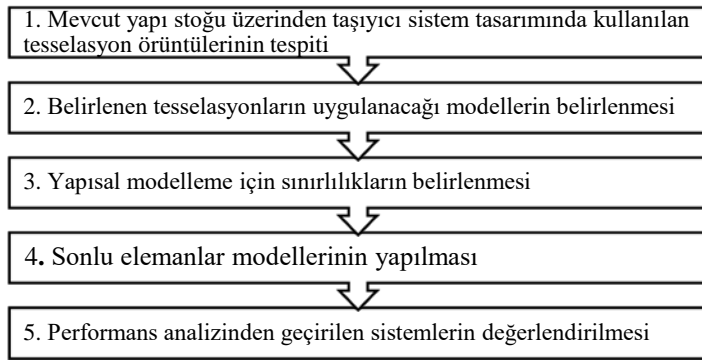
Şekil 5.1. Periyodik/simetrik tesselsasyon çeşitleri olarak düzgün (a, b, c) ve yarı düzgün (d, e, f, g, h) örüntü modelleri

Mimari açıdan uygulanabilirlik ve inşaa süreci sadece tasarım boyutunda kalmamaktadır. bu sebeple her bir örüntünün farklı yapısal gereklilikler ortaya koyacağı düşünülerek çalışmanın hipotezi oluşturulmuştur. Hipotezi test etmek için iki farklı forma sahip ızgara kabuk sistem kurgulanmıştır. Belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilen 8 örüntü, açıklık geçilen düzlemsel ızgara ve tek eğrilikli tonoz formundaki ızgara kabuk strüktür sistemine entegre edilmiştir ve tesselsasyon kurguları ile üretilen modellerinin strüktürel verimliliğine etkisi değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda tez alan çalışmasında, öncelikle izlenen yol ve adımlar Şekil 5.2’de belirtilmiştir.

Literatürden elde edilen bilgiler ışığında belirlenen tesselsasyon kurgularının ızgara kabuk sistemlerdeki uygulanabilirliği ve uygulama ile en optimum davranışı sergileyen yapı sistemini öne çıkarmak amaçlanmıştır. Yapısal analiz için uygun parametreler saptanmıştır ve bu parametrelere göre analizler gerçekleştirilmiştir.

Analizler ise 2 farklı aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada her form grubu içerisinde malzeme kesitleri sabit tutularak sistemlerin davranışları karşılaştırılmıştır. Buradaki amaç, aynı malzemeler ve yüklemeler altında değişken olarak kullanılan tesselsasyon

örüntülerindeki geometrik konfigürasyonların analiz bulgularına göre performansını sorgulamak ve en uygun sistemi seçmektir. İkinci aşamada ise analiz sonuçlarına bağlı olarak düzlemsel ve tonoz ızgara strüktürlerin uygulama alanında efektif çözümlenmesi ve tasarımcılar için strüktür dizaynı bağlamında optimum sistem seviyesine ulaşabilmesi için yapı malzemelerinde farklı kesitler kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Buradaki amaç ise optimal davranışlar altında sınır limitlere ulaşan modellerin malzeme kesitlerine bağlı olarak değişen yapı zati ağırlıklarına bakılarak çıkarımlarda bulunmaktır. İki farklı analiz çalışmasının sonrasında etkin bir karşılaştırma sistematığı yaratmak ve sağlıklı bir değerlendirme için puanlama sistemi ortaya konulmuştur ve mod değeri kıyaslaması yapılmıştır.



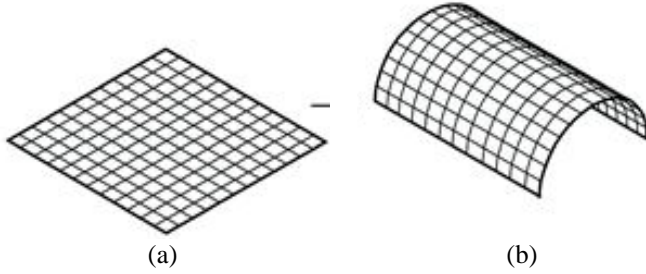
Şekil 5.2. Alan çalışması için izlenecek yol ve adımlar

Alan çalışmasında bahsedilen aşamalarda en temel amaç kurgular arasında karşılaştırılabilir bir yapısal çerçeve oluşturmaktır. Bu noktada geometrik kurguların karakteristik yapılarının ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Farklı durumlarda değerlendirmesi yapıların örüntüler içerisinde en rijit ve en kararlı davranış sergileyen örüntünün belirlenmesinde ise nitel bir yaklaşım ile derecelendirme yapılmıştır. Yapılan bu derecelendirme ile de analiz sonuçlarına bağlı olarak çıkarımlar ortaya konulmuştur.

### 5.1. Taşıyıcı Izgara Kabuk Sistemlerin Tasarım Esasları

Matematiksel modelleme amacı doğrultusunda tasarlanan ızgara kabuk sistemlerin farklılaşan tek özelliklerinin geometrik konfigürasyonları olması istenmiştir. Bu doğrultuda ızgara kabuk sistemlerin uygulanacakları açıklık, uzunluk ve yükseklik gibi parametreleri sabit tutulmuş, değişen tek parametre olarak tesselasyon örüntüleri ayarlanmıştır. İlk etapta tesselasyon kurgularının net bir şekilde oluşturulabildiği ve açıklık geçmede sıklıkla

kullanılan düzlemsel ızgara sistemler tasarlanmıştır. Ardından uygulanan tesselayon örüntülerinin üç boyutlu, eğrilikli yüzeylerdeki yapısal performanslarını da gözlemlemek amacıyla tek eğrilikli tonoz ızgara sistemler kurgulanmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Izgara kabuk yapıları; (a) Düzlemsel ızgara, (b) Tek eğrilikli tonoz ızgara

Izgara kabuk yapı ölçüleri, düzlemsel tesselayonlu modellerde 10\*10 metre boyutlarında alınmıştır. Matematiksel modellerde farklılaşan tek özellik tesselayon kurguları olup, kullanılan düzgün ve yarı düzgün tesselayon kurguları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Düzlemsel ızgara sistemdeki tesselayon yapıları ve matematiksel ifadeleri

Dikdörtgen Tesselayonlu Düzlemsel Izgara Sistem (4.4.4.4)	Üçgen Tesselayonlu Düzlemsel Izgara Sistem (3.3.3.3.3.3)	Altıgen Tesselayonlu Düzlemsel Izgara Sistem (6.6.6)	Üçgen-Dikdörtgen Tesselayonlu Düzlemsel Izgara Sistem (3.4.3.4)
Üçgen-Altıgen Tesselayonlu Düzlemsel Izgara Sistem (3.6.3.6)	Dikdörtgen-Sekizgen Tesselayonlu Düzlemsel Izgara Sistem (4.8.8)	Üçgen-Dikdörtgen Tesselayonlu Düzlemsel Izgara Sistem (3.3.3.4.4)	Üçgen-Altıgen Tesselayonlu Düzlemsel Izgara Sistem (3.3.3.3.6)

10\*10 metre boyutlarında oluşturulan yüzey modellerinde oluşturulacak tesselayon kurguları ise geometrik performansları gözetilerek değiştirilmiştir. Örüntülerin karşılaştırılabilmesi için birbirlerine yakın özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Geometrik tesselasyon kurgularında bu şartı sağlamak için ise grid yoğunluğu ve grid faktör gibi iki ayrı parametre referans tutulmuştur.

Grid yoğunluğu, her bir modeldeki çubukların toplam uzunluğunu ifade etmektedir. Tesselasyon kurguları, strüktür analizinin efektif olması amacıyla birbirlerine en yakın grid yoğunluklarına göre düzenlenmiştir. Grid faktör ise grid yoğunluğu ayarlanırken x ve y yönünde her bir tesselasyon modülünün kaç defa tekrarlandığı anlamına gelmektedir. Grid yoğunluğu, grid faktörlerin düzenlenmesi ile yaklaşık değerlere getirilerek analizin verimli olmasını sağlamaktadır. Grid yoğunluğunun düzenlenmesi ile her bir geometrik şeklin kenar uzunluğu belirlenmiştir. Alan çalışmasının aşamalarında ortaya konan kurguların öncelikli olarak geometrik potansiyelleri denetim altında tutularak tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Grid yoğunluğuna ve grid faktör özelliklerine göre kontrollü şekilde elde edilen kurgular düzlemsel ızgara sistemler için Çizelge 5.2’de verilmiştir. Sağlıklı bir şekilde analiz yapılması için grid yoğunlukları mümkün olduğunca yakın değerlerde tutularak geometrik örüntülerin yapısal çözümlenmeleri gerçekleştirilmiştir. Grid yoğunluğunun en fazla olduğu dikdörtgen sistem ve en düşük olduğu dörtgen – sekizgen sistem arasındaki yoğunluk farkı %7,56 kadardır.

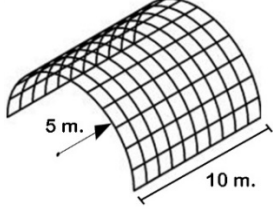
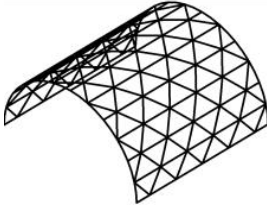
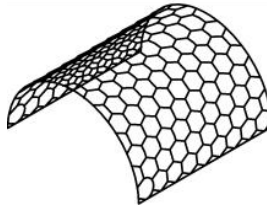
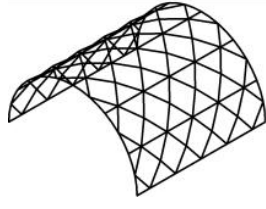
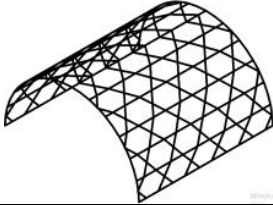
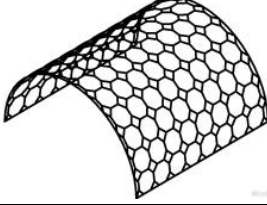
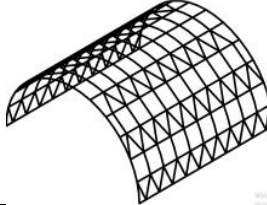
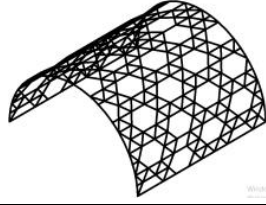
Çizelge 5.2. 10\*10 metre boyutlarındaki düzlemsel ızgara modellerinin geometrik performansları

Tesselasyon modelleri	Modellerinin özellikleri	Grid Yoğunluğu (Tesselasyon örüntüsündeki tüm elemanların toplam uzunluğu) (metre)	Grid Faktör (Tesselasyon modülünün tekrar sayısı)		Tesselasyon örüntülerindeki geometrik şekillerin kenar uzunluğu (metre)
			X yönü	Y yönü	
Dikdörtgen (4.4.4.4)		240	10	12	1*0,8
Üçgen (3.3.3)		238,06	9	8	1,6 *1,6*2
Altıgen (6.6.6)		231,84	10	9	0,6
Üçgen - Dörtgen (3.4.3.4)		231,25	5	4	Üçgen; 1,4*1,4*1,4 Dörtgen; 1,4*1,4
Üçgen - Altıgen (3.6.3.6)		234,18	6	6	Üçgen; 0,9*0,9*0,9 Altıgen; 0,9
Dörtgen - Sekizgen (4.8.8)		223,14	8	8	Dörtgen; 0,5*0,5 Sekizgen; 0,5
Üçgen - Dörtgen (3.3.3.4.4)		236,94	7	7	Üçgen; 1,25*1,4*1,4 Dörtgen; 1,25*1,25
Üçgen - Altıgen (3.3.3.3.6)		230,56	6	6	Üçgen; 1,25*1,25*1,25 Altıgen; 1,25

Üst örtü sistemi olarak kullanılan düzlemsel ızgara sistemlerin ardından bir diğer üst örtü sistemi olan tek eğrilikli tonoz ızgara strüktürler tasarlanmıştır. Tonoz formun seçilmesinin

en önemli sebeplerinden biri düzgün/periyodik tessellasyon örüntülerinin kullanılmasına olanak tanınmasıdır (Çizelge 5.3). Tonz sistemler ile 2 boyutlu tessellasyon örüntüleri 3 boyutlu strüktür sistemine yüklenmiştir. Bu sebeple ızgara kabuk strüktür sistemlerinden en fazla örüntünün uygulanabileceği tonoz ızgara sistem çalışmaya uyarlanmıştır.

Çizelge 5.3. Tek eğrilikli tonoz ızgara sistemdeki tessellasyon modelleri ve matematiksel ifadeleri

Dikdörtgen Tessellasyonlu Tonz Iızgara Sistem (4.4.4.4)	Üçgen Tessellasyonlu Tonz Iızgara Sistem (3.3.3.3.3.3)	Altıgen Tessellasyonlu Tonz Iızgara Sistem (6.6.6)	Üçgen-Dikdörtgen Tessellasyonlu Tonz Iızgara Sistem (3.4.3.4)
			
Üçgen-Altıgen Tessellasyonlu Tonz Iızgara Sistem (3.6.3.6)	Dikdörtgen-Sekizgen Tessellasyonlu Tonz Iızgara Sistem (4.8.8)	Üçgen-Dikdörtgen Tessellasyonlu Tonz Iızgara Sistem (3.3.3.4.4)	Üçgen-Altıgen Tessellasyonlu Tonz Iızgara Sistem (3.3.3.3.6)
			

10\*10 metre boyutlarında oluşturulan tonoz (dairesel silindir) modeller yatay strüktürlerde olduğu gibi ayrıca grid yoğunluğuna ve grid faktör özelliklerine göre ayarlanmış, yapısal analizinin efektif olması amacıyla birbirlerine en yakın değerlere göre düzenlenmiştir (Çizelge 5.4). Grid yoğunluğunun düzenlenmesi ile her bir tessellasyon modelindeki geometrik şekillerin kenar uzunluğu da ortaya çıkarılmıştır. Grid yoğunluğunun en fazla olduğu üçgen – altıgen sistem ve en düşük olduğu altıgen sistem arasındaki yoğunluk farkı %6,3 kadardır.

Tonz ızgara kabuklarda uygulanan bu modeller ile birlikte düz yüzeylerden kavisli yüzeylere geçişte tessellasyon yöntemiyle elde edilen strüktürlerin performanslarının nasıl değiştiğini görmek amaçlanmıştır. Pratik olarak kavisli bir yüzey yatay ve dikey yüzeylerin birleşiminden oluşmaktadır, bu sebeple her iki yön de kavisli bir yüzeyin strüktürel

performansını etkilemektedir. Tasarım ve strüktür analizi aşamalarında izlenecek adımlar tanımlanmıştır ve bu adımlardaki değişkenlere bakılarak sistemler oluşturulmuştur.

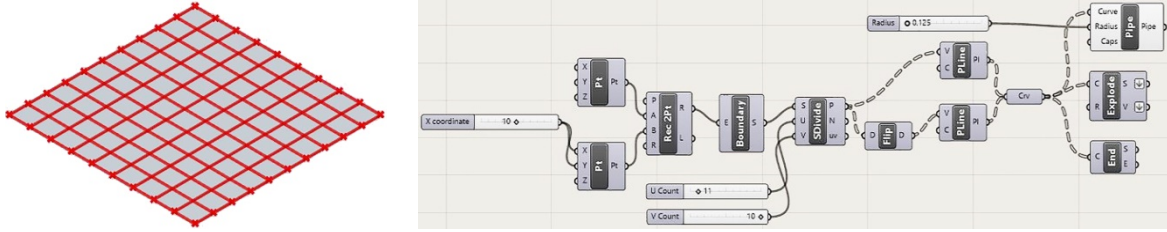
Çizelge 5.4. 10\*10 metre boyutlarındaki tonoz ızgara modellerinin geometrik performansları

Tesselasyon modelleri / Modellerinin özellikleri	Grid Yoğunluğu (Tesselasyon örüntüsündeki tüm elemanların toplam uzunluğu) (metre)	Grid Faktör (Tesselasyon modülünün tekrar sayısı)		Tesselasyon örüntülerindeki geometrik şekillerin kenar uzunluğu (metre)
		X yönü	Y yönü	
Dikdörtgen (4.4.4.4)	362,6	18	10	1*0,8
Üçgen (3.3.3.3.3.3)	358,6	12	9	1,6 *1,6 *2
Altıgen (6.6.6)	353	20	7	0,7
Üçgen - Dörtgen (3.4.3.4)	370,1	9	4	Üçgen; 1,3*1,3*2 Dörtgen; 1,3*1,3
Üçgen - Altıgen (3.6.3.6)	358,9	12	4	Üçgen; 0,9*0,9*0,9 Altıgen; 0,9
Dörtgen - Sekizgen (4.8.8)	375	12	9	Dörtgen; 0,5*0,5 Sekizgen; 0,5
Üçgen - Dörtgen (3.3.3.4.4)	357,7	10	8	Üçgen; 1,3*1,3*1,3 Dörtgen; 1,3*1,3
Üçgen - Altıgen (3.3.3.3.6)	375,2	6	4	Üçgen; 1*1,4*1,4 Altıgen; 1,4

Analiz edilecek modellerin tasarımı Rhinoceros modelleme programının eklentisi olan Grasshopper ile yapılmıştır. Örüntü esasına dayanarak bilgisayar ortamında sonlu sayıda çubuk elemanlara dönüştürülen matematiksel modeller tasarlanmıştır. Grasshopper programının seçilmesinin amacı, algoritmik biçim araştırması ve gerçek zamanlı modelleme fonksiyonu ile veri akış diyagramlarını kullanarak dinamik modeller yaratması ve geometrik biçim keşiflerini sunmasıdır. Grasshopper programının geometrik ilişkileri tanımlama şekli ile öncülük ettiği tasarı hesaplama yöntemi günümüzde günden güne popülerleşmektedir.

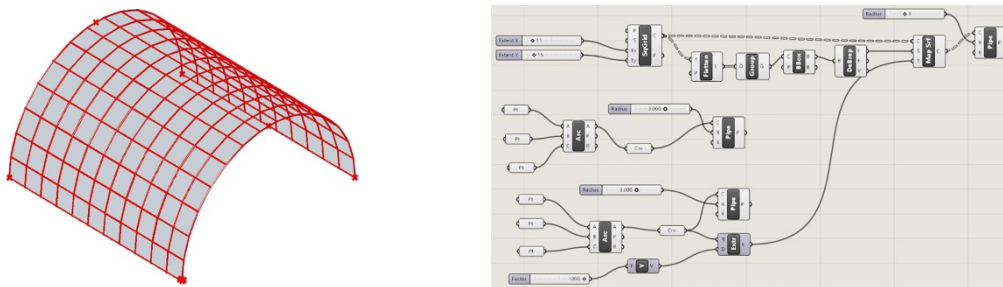
İlk aşamada düzlemsel sistemler modellenmiştir. Grasshopper yazılımının arayüzünde öncelikle 10\*10 metrelik bir alan tanımlanmıştır. 10 metre uzunluğunda ve genişliğinde olan çerçeve sistemin kenar birleşimleri referans noktaları olarak Rhinoceros programında yerleştirildikten sonra Grasshopper yazılımına tanıtılmıştır, sonrasında dikdörtgen aracı ile sınırlandırmalar ifade edilmiştir. Köşe noktaların sınırlandırılmasıyla beraber grid yoğunluğuna bağlı olarak sistem içinde bölünmeler yapılmıştır. Dikdörtgen tesselasyonlu düzlemsel sistem tasarımı örnek verilecek olursa; yatay ve düşey yönde ızgara şeklinde

bölmeler oluşturulduktan sonra grid faktör değeri de ayarlanarak Grasshopper strüktür modeli tamamlanmıştır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Dikdörtgen tesselasyonlu düzlemsel sistemin Grasshopper programındaki görseli ve ifadesi

İkinci alan çalışması aşamasında tek eğrilikli tonoz ızgara sistemler tasarlanmıştır. İlk olarak kemer yapısı oluşturulmuştur. Bu yapıda referans kısımları olarak başlangıç, bitiş ve tepe noktaları seçilmiştir. Rhinoceros programında belirlenen noktalar, Grasshopper eklentisine aktarılmıştır. Alan çalışmasının birinci bölümünde olduğu gibi 10\*10 metrelik bir alan oluşturmak amacıyla kemer yapısı çoğaltılmıştır. Dikdörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara sistem tasarımı örnek verilecek olursa; 'square grid' komutuyla grid yoğunluğu düşünülerek düzenlemeler yapılmış ve ızgara şeklinde bölmeler oluşturulmuştur, ardından grid faktör değeri de ayarlanarak Grasshopper strüktür modeli üretilmiştir (Şekil 5.5).

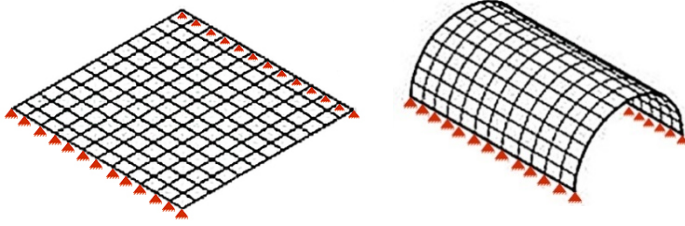


Şekil 5.5. Dikdörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara sistemin Grasshopper programındaki görseli ve ifadesi

## 5.2. Statik Modelleme Süreci

Tasarım aşamasından sonra sistemlerinin yapısal performanslarının karşılaştırılabilmesi için tesselasyon kurguları dışında tüm şartlar ve analiz kriterleri aynı tutulmuştur.

Öncelikle sağlıklı bir yapısal analiz için sistemin stabil durumda olması gereklidir. Buna bağlı olarak hem düzlemsel hem de tonoz ızgara strüktürler iki kenarı sabit mesnetli olarak ayarlanarak döşeme veya üst örtü yapı elemanı şeklinde düşünülmüştür (Şekil 5.6). Modellerdeki mesnet noktaları için tüm yönlerde dönmeye izin verilmiş, ankastre özellik tanımlanmamıştır.



Şekil 5.6. Düzlemsel ve tonoz sistemlerin iki kenardan mesnetlenmesi

Sonraki aşamalarda malzeme kararları önem teşkil etmektedir. Ele alınan sistemlerde malzeme tercihi olarak günümüzde kabuk yapılarda en fazla kullanılan malzemelerden biri olan yapısal çelik malzeme tercih edilmiştir. Çelik malzeme ile çubuklar belirlendikten sonra ortaya çıkan tesselayon örüntüsündeki boşluklar ise cam malzeme ile doldurularak kaplama yapılmıştır. Çelik ve cam yapı malzemesinin seçilmesinin nedeni, estetik ve fonksiyonel olmalarının yanında mukavemetleri ile de ızgara kabuk sistemlerde vazgeçilmez yapı elemanları olmalarıdır. Cam malzeme ile ayrıca sistem strüktüründen gelen yükler zemine homojen bir şekilde aktarılabilir.

Kullanılan malzeme çeşitleri ve özellikleri detaylandırılacak olursa;

- Yapısal çelik sınıfında yaygın olarak S235 (St37), S275 (St44), S355 (St52) gibi yapısal çelik türleri bulunurken dayanımı (mukavemeti) fazla olan ve Türkiye’de çelik üreticileri ve tasarımcılar tarafından kullanım aralığı diğer çelik türlerine göre daha geniş olan S235 alaşımsız yapısal çelik malzemesi yapısal performans analizi için uygun görülmüştür (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.5. S235 alaşımsız yapısal çelik malzemenin özellikleri (URL-11)

Yoğunluğu:	7,850 kg / m <sup>3</sup>	Çeliğin minimum akma dayanımı:	235 N/mm <sup>2</sup>
Elastisite modülü:	210 GPa (210000 MPa)	Poisson oranı:	0.286 - 0.315 (0.30 alınacaktır.)
Kayma modülü:	8100 kN/cm <sup>2</sup>	Çekme mukavemeti:	360 - 510 MPa

- Cam çeşidi olarak ise temperli cam yapı malzemesi seçilmiştir (Çizelge 5.6). Aynı kalınlıktaki diğer camlara göre daha dayanıklı olan temperli camın tercih edilmesindeki amaç, güçlendirilmiş yapısı ile kırılmasının zor olması ve kırıldığında keskin köşeler bırakmamasının yanında dayanıklı olmasıyla birlikte güvenlik camı olarak da adlandırılmasıdır. Temperli cam malzemenin kalınlığı 2,5 santimetre olarak alınmıştır.

Çizelge 5.6. Temperli cam malzemenin özellikleri (URL-12)

Yoğunluğu:	2,500 kg / m <sup>3</sup>	Kayma modülü:	29268 MPa
Elastisite modülü:	7,2 GPa (7200 MPa)	Poisson oranı:	0,22
Maksimum Basınç dayanımı:	300 MPa	Maksimum Çekme mukavemeti:	165 MPa

Sap2000 programında S235 yapısal çeliğin ve temperli camın mekanik özellikleri girilerek analiz öncesi malzeme tanımlamaları yapılmıştır (Şekil 5.7). Sistemde alan (shell) eleman olarak modellenen temperli camların taşıyıcılık özellik göstermemesi, sadece yük olarak analiz modeline etki etmesi istenmiştir. Sistemdeki tüm taşıyıcı özelliğin tesselasyon örüntüsünün verildiği çelik elemanlara aktarılması için cam malzemenin elastisite modülü 1 megapascal (MPa) olarak alınmıştır.

The image shows two side-by-side screenshots of the Sap2000 material properties dialog boxes. The left dialog is for S235 steel, and the right dialog is for tempered glass (TEMPERLİ CAM).

**Left Dialog (S235 Steel):**

- General Data:** Material Name and Display Color: S235; Material Type: Steel; Material Grade: ; Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 78,5; Mass per Unit Volume: 8,0048; Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E: 2,100E+08; Poisson, U: 0,3; Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,200E-05; Shear Modulus, G: 80769231
- Other Properties For Steel Materials:** Minimum Yield Stress, Fy: 235000; Minimum Tensile Stress, Fu: 360000; Expected Yield Stress, Fye: 235000; Expected Tensile Stress, Fue: 360000

**Right Dialog (TEMPERLİ CAM):**

- General Data:** Material Name and Display Color: TEMPERLİ CAM; Material Type: Other; Material Grade: ; Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 25,; Mass per Unit Volume: 2,5493; Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E: 1000,; Poisson, U: 0,22; Coefficient Of Thermal Expansion, A: 8,500E-06; Shear Modulus, G: 409,8361

Şekil 5.7. S235 yapısal çelik ve temperli cam malzemelerin Sap2000 programındaki veri tanımlamaları

Malzeme tanımları ardından kesit kararlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çelik yapı profilleri dikdörtgen, kare ve boru kesitli profiller olarak üretilebilmektedir. Çelik kesiti olarak ise ızgara kabuklarda ve geniş açıklıklı yapılarda sivri uçlardan kaçınmak amacıyla tercih edilen ve uygulama kolaylığı sağlayan içi boşluklu dairesel çelik seçilmiştir.

Uygulanacak modellere uygun olarak seçilen boru elemanların çeşitli kesitlerde imal edildiği görülmektedir. Boru elemanlar, dış çap, et kalınlığı, birim ağırlık, kesit ve yüzey alanı açısından farklılıklar göstermektedir. Buna bağlı olarak ürün yelpazesi bakımından zengin olan ve ülkemizde de kullanılan Stahlbau çelik kesitli profiller çalışmada kullanılmıştır (Şekil 5.8). Malzeme kesitlerinin çeşitliliği ile dizayn aşamasında optimizasyon analizlerinin dengeli yapılabilmesi sağlanmıştır. Farklı malzeme kesitlerinin kullanımı ile de tesselayon örüntülerindeki statik kombinasyonlar ortaya çıkarılmıştır.

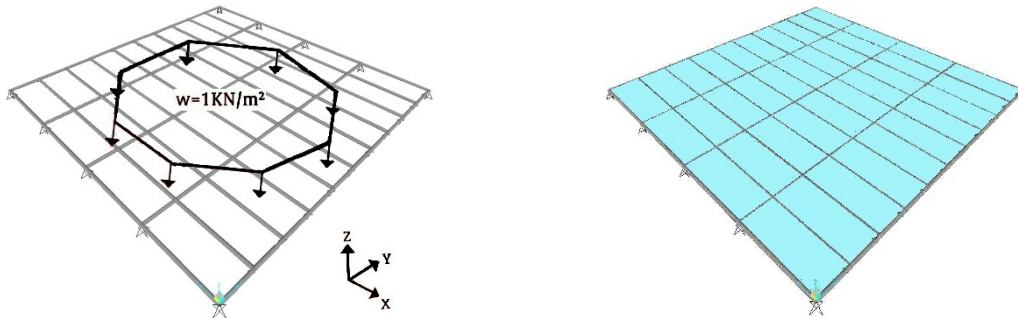
Sistemlerin yapısal analizleri için her modele etki eden hareketli ve kalıcı yükler sabit tutulmuştur. Tüm modellerin düşey yüklenme altında performansları temel alınmıştır. Sistemi oluşturan tüm elemanların zati ağırlıkları, kaplama malzemesi olarak tanımlanan çubukların arasını dolduran temperli camın ağırlığı ve cam malzemelerin üzerine  $1 \text{ kN/m}^2$ 'lik düzgün yayılı (uniform) hareketli yük tanımlanmıştır (Şekil 5.9).

Yürürlükte olan çelik yönetmeliğindeki Emniyet gerilmelerine göre tasarım (ASD) ve Yük ve mukavemet çarpanına göre tasarım (YDKT) yöntemleri olarak iki farklı tasarım metodu vardır. Tez kapsamında çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelikte YDKT metodu uygulanmış, yüklemeler sisteme entegre edilmiştir. Yük ve yükleme kombinasyonları yapının gerçek etkiler altında optimum davranış özelliklerini kavrayabilme açısından önemlidir. Modellerde sistem ve elemanlar için gerekli dayanım, artırılmış yükleri içeren farklı kritik yük kombinasyonlarına göre belirlenmektedir. G sabit yük sembolü ve Q hareketli yük sembolü olmak üzere aşağıda verile üç farklı temel yük kombinasyonu tanımlanmıştır.

- G+Q
- 1.4G
- 1.2G+1.6Q

D	T	A	M	I	W	i	D	T	A	M	I	W	i
mm	mm	cm <sup>2</sup>	kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
○ Kreisförmige Hohlprofile Auswahl aus: { DIN EN 10210-2 (warmgefertigt, nahtlos oder geschweißt) } Ausgabe { DIN EN 10219-2 (kaltgefertigt, geschweißt) } November 1997													
33,7	2,6	2,54	1,99	3,09	1,84	1,10	355,6	12,5	135	106	19 852	1 117	12,1
	3,2	3,07	2,41	3,60	2,14	1,08		16	171	154	24 663	1 387	12,0
	4	3,73	2,93	4,19	2,49	1,06		20	211	166	29 792	1 676	11,9
								25	260	204	35 677	2 007	11,7
42,4	2,6	3,25	2,55	6,46	3,05	1,41	406,4	10	125	97,8	24 476	1 205	14,0
	3,2	3,94	3,09	7,62	3,59	1,39		12,5	155	121	30 031	1 478	13,9
	4	4,83	3,79	8,99	4,24	1,36		16	196	154	37 449	1 843	13,8
48,3	2,6	3,73	2,93	9,78	4,05	1,62		20	243	191	45 432	2 236	13,7
	3,2	4,53	3,58	11,6	4,80	1,60		25	300	235	54 702	2 692	13,5
	4	5,57	4,37	13,8	5,70	1,57		30	355	278	63 224	3 111	13,3
60,3	3,2	5,74	4,51	23,5	7,78	2,02		40	460	361	78 186	3 848	13,0
	4	7,07	5,55	28,2	9,34	2,00	457	10	140	110	35 091	1 536	15,8
	5	8,69	6,89	33,5	11,1	1,98		12,5	175	137	43 145	1 888	15,7
76,1	3,2	7,33	5,75	48,8	12,8	2,58		16	222	174	53 959	2 361	15,6
	4	9,06	7,11	59,1	15,5	2,55		20	275	216	65 681	2 874	15,5
	5	11,2	8,77	70,9	18,6	2,52		25	339	266	79 415	3 475	15,3
88,9	3,2	8,62	6,76	79,2	17,8	3,03		30	402	316	92 173	4 034	15,1
	4	10,7	8,38	96,3	21,7	3,00		40	524	411	114 949	5 031	14,8
	5	13,2	10,3	116	26,2	2,97		50	639	502	134 375	5 881	14,5
	6	15,6	12,3	135	30,4	2,94	508	10	156	123	48 520	1 910	17,6
	6,3	16,3	12,8	140	31,5	2,93		12,5	195	153	59 755	2 353	17,5
101,6	4	12,3	9,63	146	28,8	3,45		16	247	194	74 909	2 949	17,4
	5	15,2	11,9	177	34,9	3,42		20	307	241	91 428	3 600	17,3
	6,3	18,9	14,8	215	42,3	3,38		25	379	298	110 918	4 367	17,1
114,3	4	13,9	10,9	211	36,9	3,90		30	451	354	129 173	5 036	16,9
	5	17,2	13,5	257	45,0	3,87		40	588	462	162 188	6 385	16,6
	6,3	21,4	16,8	313	54,7	3,82		50	719	565	190 885	7 515	16,3
	8	26,7	21,0	379	66,4	3,77	610	10	188	148	84 847	2 782	21,2
139,7	4	17,1	13,4	393	56,2	4,80		12,5	235	184	104 755	3 435	21,1
	5	21,2	16,6	481	68,8	4,77		16	299	234	131 781	4 321	21,0
	6,3	26,4	20,7	589	84,3	4,72		20	371	291	161 490	5 295	20,9
	8	33,1	26,0	720	103	4,66		25	459	361	196 906	6 456	20,7
	12,5	50,0	39,2	1 020	146	4,52		30	547	429	230 478	7 557	20,5
168,3	5	25,7	20,1	656	102	5,78		40	718	562	292 333	9 595	20,2
	6,3	32,1	25,2	1 053	125	5,73		50	880	691	347 570	11 396	19,9
	8	40,3	31,6	1 297	154	5,67	711	10	220	173	135 301	3 806	24,8
	10	49,7	39,0	1 564	186	5,61		20	434	341	259 351	7 295	24,4
	12,5	61,2	48,0	1 868	222	5,53		25	539	423	317 357	8 927	24,3
177,8	6,3	33,9	26,6	1 250	141	6,07		30	642	504	372 790	10 486	24,1
	8	42,7	33,5	1 541	173	6,01		40	843	662	476 242	13 396	23,8
	10	52,7	41,4	1 882	209	5,94		50	1038	815	570 312	16 043	23,4
	12,5	64,9	51,0	2 230	251	5,86		60	1227	963	655 583	18 441	23,1
193,7	6,3	37,1	29,1	1 630	168	6,63	762	10	236	185	167 028	4 396	26,6
	8	46,7	36,6	2 018	208	6,57		16	375	294	260 973	6 850	26,4
	10	57,7	45,3	2 442	252	6,50		20	466	366	321 083	8 427	26,2
	16	89,0	70,1	3 554	367	6,31		25	579	454	393 461	10 327	26,1
219,1	6,3	42,1	33,1	2 386	218	7,53		30	690	542	462 853	12 148	25,9
	8	53,1	41,6	2 960	270	7,47		40	907	712	593 011	15 585	25,6
	10	65,7	51,6	3 598	328	7,40		50	1118	878	712 207	18 693	25,2
	16	102	80,1	5 297	483	7,20	813	10	252	198	203 364	5 003	28,4
	20	127	98,2	6 261	572	7,07		16	401	314	318 222	7 828	28,2
244,5	6,3	47,1	37,0	3 346	274	8,42		20	498	391	391 909	9 641	28,0
	8	59,4	46,7	4 160	340	8,37		25	619	486	480 856	11 829	27,9
	10	73,7	57,8	5 073	415	8,30		30	738	579	566 374	13 933	27,7
	12,5	91,1	71,5	6 947	503	8,21	914	10	284	223	290 147	6 349	32,0
	16	115	90,2	7 533	616	8,10		16	451	354	455 142	9 959	31,8
	20	141	111	8 957	733	7,97		25	698	548	690 317	15 105	31,4
	25	172	135	10 517	860	7,81		30	833	656	814 775	17 629	31,3
273	6,3	52,8	41,4	4 686	344	9,43		10	316	248	399 850	7 871	35,6
	8	66,6	52,3	5 852	429	9,37		16	503	395	628 479	12 372	35,4
	10	82,6	64,9	7 154	524	9,31		25	778	611	956 086	18 821	35,0
	12,5	102	80,3	8 697	637	9,22		30	929	729	1 130 352	22 251	34,9
	16	129	101	10 707	784	9,10	1067	10	332	261	463 792	8 693	37,4
	20	159	125	12 798	938	8,97		16	528	415	729 600	13 676	37,0
	25	195	153	15 127	1108	8,81		25	818	642	1 111 355	20 831	36,9
323,9	8	79,4	62,3	9 910	612	11,2		30	977	767	1 314 864	24 646	36,7
	10	98,6	77,4	12 158	751	11,1	1168	10	364	286	608 843	10 443	40,9
	12,5	122	96,0	14 847	917	11,0		16	579	455	960 774	16 452	40,7
	20	191	150	22 139	1367	10,8		25	898	705	1 486 717	25 115	40,4
	25	235	184	26 400	1630	10,6	1219	10	380	298	694 014	11 387	42,7
355,6	8	87,4	68,6	13 201	742	12,3		16	605	475	1 094 091	17 951	42,5
	10	109	85,2	16 223	912	12,2		25	938	738	1 671 873	27 430	42,2

Şekil 5.8. Stahlbau çelik profillerinden boru malzeme kesitlerinin görünümü ve struktur modellerin özelliklerine göre kullanılan malzeme kesitleri aralığının gösterimi



Şekil 5.9. Çubuklara ve cam elemanlara etkiyen ve homojen dağılan yük gösterimi

Çalışmada, Sap2000 programında çelik yapılar yönetmeliğinin bulunmaması nedeniyle yönetmeliğimize en yakın şartname olan Amerikan Şartnamesi AISC 360-10 (Specification for Structural Steel Buildings) çelik yapılar için tasarım ve inşaat yönetmeliğinden yararlanılmıştır. Bu yönetmeliğin seçilmesinin sebebi çelik boyutlandırılması yapılırken uluslararası geçerliliği olması ve yaygın olarak kullanılmasıdır. AISC 360-10 yönetmeliğinin uygulamada daha geniş alanlara yayıldığı, mühendisler tarafından tercih edildiği, analiz sonuçlarının daha anlaşılabilir ve uygulanabilir olduğu görülmektedir (Ülker ve Savaş, 2018).

Düşey yüklenme altında olan sistemlerde düşey yer değiştirme (sehim) kontrollerinin yapılabilmesi için ise yapısal olmayan bileşenlerin hasar görmemesi, işlevlerinin olumsuz etkilenmemesi, ikinci mertebeye etkilerinin yüksek değerler almaması ve yapı güvenliğinin bozulmaması için düşeydeki yer değiştirmelerin sınırlandırılması gereklidir. Sınırlandırma yapılırken Çelik Yapıların Tasarım Hesap Ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik baz alınmıştır ve düşey yer değiştirme miktarının limit değerleri bulunmuştur. Bu oranı geçen teselsasyonlu strüktür modelleri rijit olmayan kararsız sistemler sınıfına girmektedir ve yapısal analiz sonucunda tasarım olarak tercih edilmemektedir.

Analiz ortamı için sınırlandırılmaların ve gerekliliklerin yapılmasının ardından Grasshopper programı ile tasarlanan ızgara sistemlerin yapısal performanslarına ait veriler ise Sap2000 analiz programı ile elde edilmiştir. Programlar arası geçişte ise AutoCAD programında ayarlamalar yapılarak aktarım sağlanmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Matematiksel modelleme için kullanılan programların akış şeması

### 5.3. Birinci aşama; Tesselasyon Örüntülerinin Statik Performans Esaslı Değerlendirmesi

Analiz verilerine bakılarak düzlemsel ve tonoz kabuk strüktür modellerin verileri bir araya getirilerek karşılaştırılması yapılmıştır. Yapısal analizde, (i) geometrik tesselasyon modelinin rijitliğini anlamak için yer değiştirme (deformasyon), (ii) basınca ve çekmeye bağlı olarak tüm bileşenlerdeki maksimum ve minimum gerilmeleri bulmak için yataydaki ve düşeydeki kuvvetler, kesme kuvveti ve (iii) tesselasyon geometrilerinin bağlantı ve birleşim noktalarında moment direncini saptamak amacıyla eğilme momenti parametrelerine bakılmıştır. Modellere yönelik detaylı analiz sonuçları Ekler kısmında verilmiş olup, bu bölümde temel nitelikteki mod değerleri, eğilme momenti verileri ve sehim miktarı (düşey yer değiştirme) aktarılmıştır.

Performans analizi sonucunda öncelikle sisteme ait periyot değerlerine ulaşılmıştır. Mod değerleri, yapının asal eksenlerindeki doğal titreşim periyodu verileridir (Çizelge 5.7). Mod kavramı, periyotların deformasyon şekillerinin gösterilmesini sağlamaktadır.

Mod değerlerinde kütle katılımı en fazla olan ilk 3 doğal titreşim periyot değerleri dikkate alınır. Dikkate alınan periyot değerinin ise 1 saniyenin altında olması beklenir. Tez kapsamında Mod değeri olarak sadece en çok kütle katılımı sağlayan ilk mod değerine bakılmıştır. Bunun sebebi; modellerin sadece 2 boyutlu örtü elemanı olmasıdır. Üç boyutlu bir bina tipinde olmayan modellerde sadece düşeyde doğal titreşim periyodunun oluşması beklenmektedir.

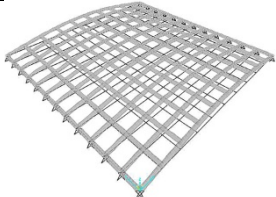
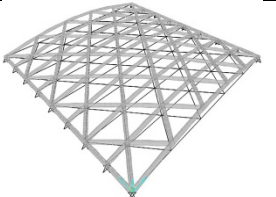
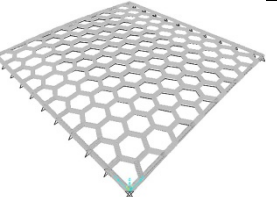
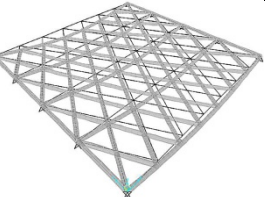
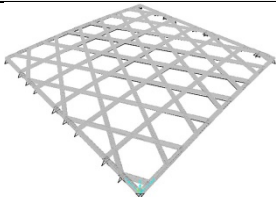
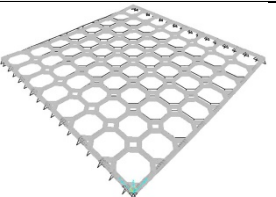
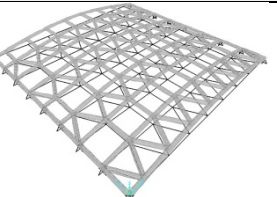
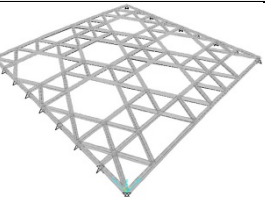
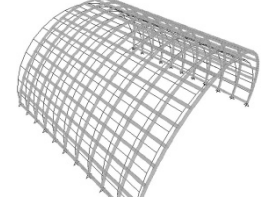
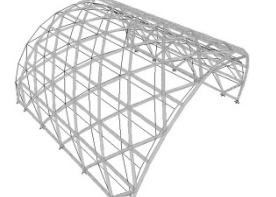
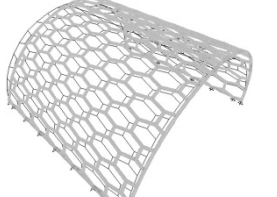
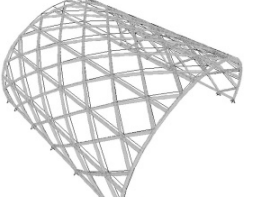
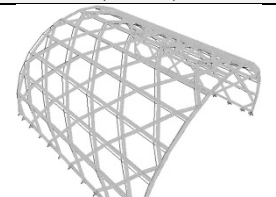
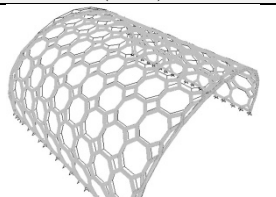
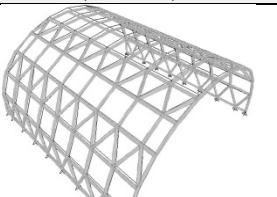
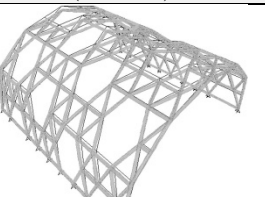
Periyot değerlerini yorumlayabilmek için ilgili formüle bakmak önem taşır. Bu kapsamda periyot değeri aşağıda verilmiştir;

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5.1)$$

Periyot denkleminde bakıldığında  $\pi$  (Pi sayısı) sabit bir değerdir, m sembolü kütleyi ve k sembolü de rijitliği temsil etmektedir. Bu formülden hareketle, tez kapsamındaki tesselasyonlu ızgara kabuk sistemlerinin kütlelerinin de aynı olması neticesinde değişkenler periyot değeri ve rijitlik değeridir. Periyot değerinin büyük olması, rijitliğin

düşük olması anlamına gelmektedir ve ters orantı söz konusudur. Bu bağlamda periyot değeri ile rijitliğin kıyaslaması yapılabilmektedir.

Çizelge 5.7. Modal analiz sonucunda oluşan görünümler ve ilk doğal titreşim periyot değerleri

Düzlemsel Izgara Strüktür			
Dikdörtgen tesselasyonlu Sistem (4.4.4.4)	Üçgen tesselasyonlu Sistem (3.3.3.3.3.3)	Altıgen tesselasyonlu Sistem (6.6.6)	Üçgen-Dikdörtgen tesselasyonlu Sistem (3.4.3.4)
			
T1= 0.422 saniye	T1= 0.402 saniye	T1= 1.414 saniye	T1= 0.50 saniye
Üçgen-Altıgen Tesselasyonlu Sistem (3.6.3.6)	Dikdörtgen-Sekizgen Tesselasyonlu Sistem (4.8.8)	Üçgen-Dikdörtgen Tesselasyonlu Sistem (3.3.3.4.4)	Üçgen-Altıgen Tesselasyonlu Sistem (3.3.3.3.6)
			
T1= 1.51 saniye	T1= 1.069 saniye	T1= 0.458 saniye	T1= 0.570 saniye
Tonoz Izgara Kabuk Strüktür			
Dikdörtgen tesselasyonlu Sistem (4.4.4.4)	Üçgen tesselasyonlu Sistem (3.3.3.3.3.3)	Altıgen tesselasyonlu Sistem (6.6.6)	Üçgen-Dikdörtgen tesselasyonlu Sistem (3.4.3.4)
			
T1= 0.90 saniye	T1= 0.95 saniye	T1= 1.648 saniye	T1= 1.04 saniye
Üçgen-Altıgen Tesselasyonlu Sistem (3.6.3.6)	Dikdörtgen-Sekizgen Tesselasyonlu Sistem (4.8.8)	Üçgen-Dikdörtgen Tesselasyonlu Sistem (3.3.3.4.4)	Üçgen-Altıgen Tesselasyonlu Sistem (3.3.3.3.6)
			
T1= 1.782 saniye	T1= 1.068 saniye	T1= 0.855 saniye	T1= 0.707 saniye

Düzlemsel ızgara sistemler değerlendirildiğinde;

- Mod 1 değerinin en fazla olduğu sistem üçgen-altıgen tesselasyonlu (3.6.3.6) sistemdir. Diğer sistemler ile kıyaslandığında bu sistemin rijitliğinin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca 1 saniyenin üzerinde değer skalasına sahip olan altıgen tesselasyonlu (6.6.6) ve dikdörtgen-sekizgen tesselasyonlu (4.8.8) sistemlerin de sünek davranışlar sergilediği söylenebilmektedir.
- Mod 1 değerinin en düşük olduğu sistem ise üçgen tesselasyonlu (3.3.3.3.3) sistemdir. Bu sebeple en rijit ve kararlı sistem, üçgen örüntülerle meydana gelen strüktür modelidir.

Tonoz ızgara sistemler değerlendirildiğinde;

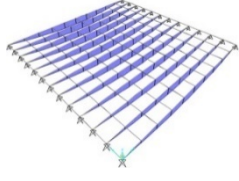
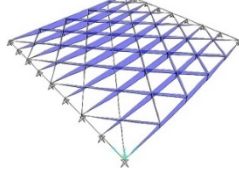
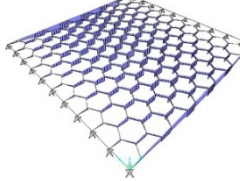
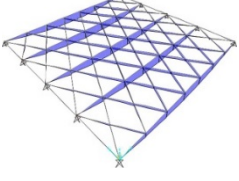
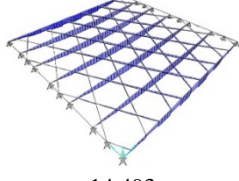
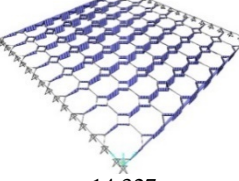
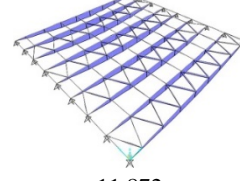
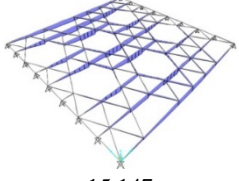
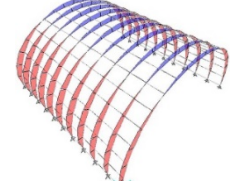
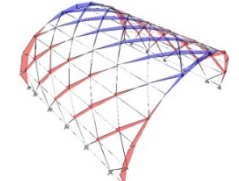
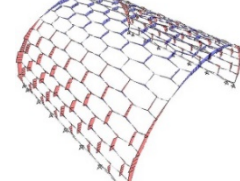
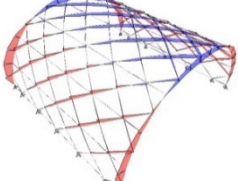
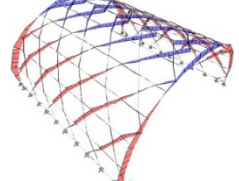
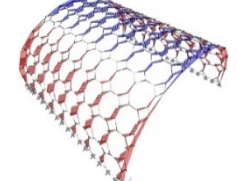
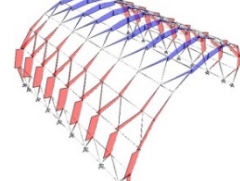
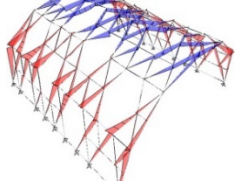
- Mod 1 değerinin en fazla olduğu sistem üçgen-altıgen tesselasyonlu (3.6.3.6) sistemdir. Diğer sistemler ile karşılaştırıldığında bu sistemin rijitliğinin ve stabilitesinin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. 1 saniyenin üzerinde değer aralığına sahip olan altıgen tesselasyonlu (6.6.6), dikdörtgen-sekizgen tesselasyonlu (4.8.8) ve üçgen-dikdörtgen tesselasyonlu (3.4.3.4) sistemlerin de sünek davranışlar sergilediği söylenebilmektedir.
- Mod 1 değerinin en düşük olduğu sistem ise üçgen-altıgen tesselasyonlu (3.3.3.3.6) sistemdir. Buna dayanarak en rijit ve kararlı sistemin, üçgen-altıgen örüntülerle oluşturulan strüktür modeli olduğu ifade edilebilmektedir.

Sistemlerin eğilme moment değerleri incelendiğinde ise; öncelikle 10 metre açıklığın geçildiği ızgara sistemlerde mesnetlerin arasında sürekli olan elemanların adetlerinin değişmesi sebebiyle bu elemanların eğilme momenti değerleri ve üzerine gelen yükler de değişmektedir (Çizelge 5.8). Eğilme momenti etkisindeki değişim ise eleman kesitlerinin belirlenmesinde rol oynamaktadır. Bu nedenle çubuk elemanların geometrilerine göre yerleştirilme sıklığı, eğilme momenti değerlerini de bir değerlendirme kriteri niteliğini gündeme getirmiştir.

Bu noktayı açmak gerekirse, dikdörtgen tesselasyonlu (4.4.4.4) sistemde y yönünde devamlı bir aks oluşturan çubuk elemanların yerleştirilme sıklığı, üçgen-dikdörtgen tesselasyonlu (3.4.3.4) sisteme göre daha fazladır. Bu sebeple üçgen-dikdörtgen

kurgusundan elde edilen sistemin y yönündeki sürekli çubuk elemanlarında eğilme momenti değeri ve üzerine uygulanan yük miktarı daha fazladır. Bu mantıkla düşünüldüğünde eğilme momentiyle birlikte etki kapasite oranı (D/C oranı) da doğru orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca sistemlerin formlarından dolayı da farklı değerler elde edilmiştir. Tonoz ızgara sistemlerde kemer yapısından dolayı yük aktarımı daha dengeli dağıldığı için düzlemsel sistemlere göre eğilme momenti değerleri daha düşük çıkmaktadır.

Çizelge 5.8. Modellerde eğilme momentlerinin dağılımı ve en yüksek değerler (kN/m)

Düzlemsel Izgara Strüktür			
Dikdörtgen tesselasyonlu Sistem (4.4.4.4)	Üçgen tesselasyonlu Sistem (3.3.3.3.3.3)	Altıgen tesselasyonlu Sistem (6.6.6)	Üçgen-Dikdörtgen tesselasyonlu Sistem (3.4.3.4)
 9.740	 9.251	 13.435	 14.373
Üçgen-Altıgen Tesselasyonlu Sistem (3.6.3.6)	Dikdörtgen-Sekizgen Tesselasyonlu Sistem (4.8.8)	Üçgen-Dikdörtgen Tesselasyonlu Sistem (3.3.3.4.4)	Üçgen-Altıgen Tesselasyonlu Sistem (3.3.3.3.6)
 14.493	 14.327	 11.872	 15.147
Tonoz Izgara Kabuk Strüktür			
Dikdörtgen tesselasyonlu Sistem (4.4.4.4)	Üçgen tesselasyonlu Sistem (3.3.3.3.3.3)	Altıgen tesselasyonlu Sistem (6.6.6)	Üçgen-Dikdörtgen tesselasyonlu Sistem (3.4.3.4)
 1.631	 1.811	 3.324	 2.158
Üçgen-Altıgen Tesselasyonlu Sistem (3.6.3.6)	Dikdörtgen-Sekizgen Tesselasyonlu Sistem (4.8.8)	Üçgen-Dikdörtgen Tesselasyonlu Sistem (3.3.3.4.4)	Üçgen-Altıgen Tesselasyonlu Sistem (3.3.3.3.6)
 1.860	 5.278	 1.870	 1.281

Düzlemsel ızgara sistemler değerlendirildiğinde;

- Eğilme momenti değerleri bakımından en yüksek değere üçgen-altıgen tesselasyonlu (3.3.3.3.6) sistem ulaşmaktadır. 10 metrelik çerçeve sistem içerisinde altıgen boşlukların diğer tesselasyonlu sistemlere göre büyük olması altıgen geometrinin kenarlarında eğilme momenti değerinin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Buna ek olarak, yük etkimelerinin de bu çubuk elemanlarda fazla olduğu gözlemlenmektedir.
- Üçgen ve dikdörtgen geometrik şekillerine kıyasla altıgen ve sekizgen geometrik şekilleri ile meydana gelen tesselasyonlu sistemlerin eğilme momentlerinin fazla olması bu geometrilerin kullanımını açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

Tonoz ızgara sistemler değerlendirildiğinde;

- Eğilme momenti değerleri bakımından en yüksek değere dikdörtgen-sekizgen tesselasyonlu (4.8.8) sistem ulaşmaktadır. 10 metrelik sistem içerisinde sekizgen boşlukların geometrisinden kaynaklı olarak ortasındaki boşluğun diğer tesselasyonlu sistemlere göre fazla olması sekizgen geometrinin kenarlarında eğilme momenti değerinin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Buna ek olarak, yük etkimelerinin de bu çubuk elemanlarda fazla olduğu gözlemlenmektedir.
- Düzlemsel sistemlerdeki çıkarıma paralel olarak, üçgen ve dikdörtgen geometrik şekillerine kıyasla altıgen ve sekizgen geometrik şekilleri ile meydana gelen tesselasyonlu sistemlerin eğilme momentlerinin fazla olması bu geometrilerin kullanımını açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

Modellerde sehim miktarını kontrol altına almak amacıyla maksimum sehim miktarı, çelik yapıların tasarım hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelik referans alınarak belirlenmiştir. Yönetmelik, hareketli yüklerden oluşan düşey yer değiştirmelerin açıklık oranını çatı döşemelerinde  $L/240$  olarak sınırlandırılmaktadır. Tez kapsamındaki hem düz hem tonoz formda mesnetlenmeler aynı olduğu için geçilen açıklık da aynıdır. Bu doğrultuda 10 metrelik açıklık için sınır sehim değeri  $L/240$  oranına bağlı olarak 4.167'dir. Düşey yüklemeler sonucunda hareketli yük altında farklı örüntülerdeki iki sistemin sehim miktarı Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Eleman kesitleri sabit tutulan modellerin sehim ve yüzdellik oranda performansları

	Düzlemsel ızgara strüktür		Tonoz ızgara strüktür	
	Sehim miktarı (santimetre)	Limit sınırına göre performansı	Sehim miktarı (santimetre)	Limit sınırına göre performansı
Dikdörtgen (4.4.4.4)	2.693	%64.6	1.159	%27.8
Üçgen (3.3.3.3.3.3)	2.481	%59.5	1.268	%30.4
Altıgen (6.6.6)	3.099	%74.4	2.011	%48.3
Üçgen-Dörtgen (3.4.3.4)	3.954	%94.9	1.563	%37.5
Üçgen-Altıgen (3.6.3.6)	3.454	%82.9	1.058	%25.4
Dörtgen-Sekizgen (4.8.8)	3.336	%80.1	3.048	%73.2
Üçgen-Dörtgen (3.3.3.4.4)	3.259	%78.2	0.912	%21.9
Üçgen-Altıgen (3.3.3.3.6)	3.452	%82.8	0.659	%15.8

Düşey yer değiştirme miktarlarının limit değerleri bulunarak tasarımda oluşan yer değiştirme değerleri hakkında yorum yapılabilmektedir. Bu doğrultuda aynı tabloda ayrıca sehim miktarının limit sınırına göre performansları yüzdellik olarak verilmiştir.

Örüntülerde eleman dağılımlarından dolayı sehim miktarları, aynı zamanda rijitlikleri de değişmektedir. Aynı elemanlara ve yüklemelere sahip geometrilerde oluşan deplasmanlar farklılaşmaktadır. Örüntünün uygulanacağı geometrik form, örüntü üzerindeki performansı da etkilemektedir. Örneğin, aynı tesselsasyonlu bir ızgara sistemde, düzlemsel geometrik formunda görülen sehim miktarları genel olarak tonoz geometrisine kıyasla daha fazladır. Bunun sebebi, geometrik biçimlerin performanslarının aynı koşullar altında farklı davranışlar sergilemesinden kaynaklanmaktadır.

Düzlemsel ızgara strüktürler değerlendirildiğinde,

- Sehim miktarının en fazla olduğu üçgen-dörtgen tesselsasyonlu (3.4.3.4) taşıyıcı sistem, en kararsız sistem olarak gözlemlenirken en stabil ve dengeli sistemin üçgen tesselsasyonlu (3.3.3.3.3.3) taşıyıcı sistem olduğu göze çarpmaktadır. Yüzdellik performans olarak bakıldığında da bu sistemin en efektif yapı olduğu görülmektedir.
- Üçgen ve dikdörtgen geometrik şekillerinin tek başına kullanıldığı düzgün tesselsasyon sistemlerinde sehim miktarı az olurken üçgen-dikdörtgen kullanımının oluşturduğu yarı düzgün tesselsasyonlu (3.4.3.4) taşıyıcı sistemde verimlilik düşmektedir. Genel olarak bakıldığında düzgün tesselsasyonlu taşıyıcı sistemler, yarı düzgün tesselsasyonlu taşıyıcı sistemlere göre daha iyi performans göstermektedir.

Tonoz ızgara kabuk strüktürler değerlendirildiğinde,

- Sehim miktarının en fazla olduğu dörtgen-sekizgen tesselasyonlu (4.8.8) taşıyıcı sistem, en kararsız sistem olarak gözlemlenirken en stabil ve dengeli sistemin üçgen-altıgen tesselasyonlu (3.3.3.3.6) taşıyıcı sistem olduğu göze çarpmaktadır. Yüzdellik performans olarak bakıldığında da bu sistemin en efektif yapı olduğu görülmektedir.
- Düzlemsel taşıyıcı sistemlerin aksine, yarı düzgün tesselasyonlu taşıyıcı sistemler stabil davranışlar sergilemektedir. Düzgün tesselasyonlu sistemler kendi içinde değerlendirildiğinde en kararsız sistem altıgen iken yarı düzgün tesselasyonlu sistemler kendi içinde kıyaslandığında en kötü performans verisi dörtgen-sekizgen kombinasyonlu taşıyıcı sistemi göstermektedir.

İncelenen modellerde bir diğer değerlendirme kriteri ise etki-kapasite oranı (D/C oranı) parametresidir. D/C oranı, bir malzemenin kapasitesine göre bir yapı elemana gösterilen etkiyi ifade etmektedir. Etki kapasite oranı bir sistemdeki tüm elemanlar için %100 oranının altında olmalıdır. Bu oranın altında kalan elemanlar taşıma kapasitesini aşmamaktadır ve yapısal olarak güvenli bir sistem sayılmaktadır. Taşıma kapasitesini geçmeyen elemanlar için daha küçük kesitli malzemeler kullanılarak strüktür sistemi daha fazla zorlanabilmektedir. Bu doğrultuda tez çalışması kapsamındaki düzlemsel ve tonoz ızgara sistemlerin tüm şartları aynı tutularak elde edilen etki/kapasite oranları belirlenmiştir (Çizelge 5.10).

Çizelge 5.10. Eleman kesitleri sabit tutulan modellerin etki kapasite oranları (D/C oranı)

	Etki kapasite oranı (D/C oranı)	
	Düzlemsel ızgara strüktür	Tonoz ızgara strüktür
Dikdörtgen (4.4.4.4)	%50.4	%39.1
Üçgen (3.3.3.3.3.3)	%47	%44.1
Altıgen (6.6.6)	%68.5	%68.7
Üçgen-Dörtgen (3.4.3.4)	%72.2	%53.9
Üçgen-Altıgen (3.6.3.6)	%72.7	%43.4
Dörtgen-Sekizgen (4.8.8)	%72	%90
Üçgen-Dörtgen (3.3.3.4.4)	%60.4	%45.1
Üçgen-Altıgen (3.3.3.3.6)	%77.5	%36.5

Düzlemsel ve tonoz ızgara strüktürlerdeki etki kapasite oranları değerlendirildiğinde;

- Aynı çelik elemanlarla tasarlanan düzlemsel taşıyıcı sistemlerde, etki kapasite oranını daha düşük seviyede karşılayarak performans gösteren sistem üçgen tesselasyonlu (3.3.3.3.3) ızgara modelidir. En az zorlanma davranışını bu kurguda oluşturulan çelik çubuklar göstermektedir. Yapı elemanlarının en fazla zorlandığı sistem ise üçgen-altıgen tesselasyon (3.3.3.6) kurgusuna sahip taşıyıcı sistemdir.
- Tonoz ızgara kabuk strüktürlerde etki kapasite oranında en efektif davranış sergileyen sistem üçgen-altıgen (3.3.3.6) tesselasyonlu örüntülerden elde edilen sistemdir. Düzlemsel strüktürlerde en çok zorlanan yapı, tonoz biçimlenmede en iyi performansı göstermektedir. İki model arasında değişen parametreler geometrik form ve tesselasyonların grid yoğunluklarıdır. Bu iki parametre düşünüldüğünde, geometrik form ve grid yoğunluğu değişikliğinin etki kapasite oranına da tesir ettiği görülmektedir. Buna ek olarak, altıgen (6.6.6) tesselasyonlu strüktürlerin hem Düzlemsel hem de tonoz ızgara biçimlerinde benzer ölçüde zorlanma gösterdiği gözlenmektedir.

#### **5.4. İkinci Aşama; Tesselasyon Örüntülerinin Maliyet Esaslı Değerlendirmesi**

Yapıların tasarımı yapılırken, güvenlik sınırları içerisindeki etkin bir tasarımdan en az maliyetle en fazla verim alınması hedeflenmektedir. Malzeme kesitinde, yük taşıması için yeterli olacak boyutların gerektiğinden büyük seçilmesi, yapının güvenli bölgede kalmasını sağlamakta, fakat strüktür yapısı ekonomik olmaktan uzaklaşmaktadır. Yapının hem güvenli olarak planlanması hem de optimum çözümler ile ekonomik açıdan uygun olması gerekmektedir. Bu kapsamda en ideal sistem çözümlemesinin yapılması şart olmaktadır ve bu da optimum tasarım kuralları çerçevesinde ele alınmaktadır. Yapının tasarım prensiplerine göre, en uygun sonuçları verecek kararlar ile analizleri yapılmalıdır.

Düzlemsel ve tonoz ızgara sistemlerin eleman kesitleri sabit tutulan modellerde değişim gözetmeksizin sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan yapısal analizin ardından her bir tesselasyon modelinin ayrıca optimum tasarımı için farklı çelik kesitleri ile performansı incelenmiştir. Buradaki amaç, tesselasyonlu çelik yapı sistemlerinin maksimum sehim (yer değiştirme) ve etki kapasite oranını (D/C oranı) sağlayacak şekilde bu parametrelere bağlı olarak optimal tasarımını oluşturabilmektir. Çelik yapı malzemesi olarak boru kesitli çubuk

elemanlar Stahlbau kataloğuna göre seçilmiştir ve maksimum sınırlar altında optimum çözümler aranmıştır.

Bu aşamada malzeme kesitlerinde optimizasyonu sağlamak amacıyla düzlemsel strüktür sistemlerinin bazı tesselasyon modellerinde tek bir elik malzeme kesiti ile en uygun tasarım çözümü yapılırken bazı tesselasyon modellerinde sehim ve etki kapasite oranlarında sınır değerlere yaklaşmak için iki ayrı elik yapı malzemesi kesiti kullanılmıştır (izelge 5.11).

Çizelge 5.11. Düzlemsel ızgara sistemlerin optimizasyon değerleri

	Optimal sistemlerde sehim miktarı (santimetre)	Optimal sistemin sehimde performansı	Optimal sistemlerde etki kapasite oranı	Optimal sistemlerin zati ağırlığı (kilogram)	Optimal sistemlerde kullanılan boru elik yapı malzemesi kesitleri (milimetre)
Dikdörtgen (4.4.4.4)	4.140	%99.35	%74.3	6827	177.8*6.3-219.1*8
Üçgen (3.3.3.3.3.3)	4.161	%99.85	%66.1	7979.8	168.3*8-168.3*10
Altıgen (6.6.6)	4.159	%99.8	%78.6	9715.7	168.3*10-177.8*12.5
Üçgen-Dörtgen (3.4.3.4)	4.010	%96.23	%78.9	8741.4	193.7*8-219.1*8
Üçgen-Altıgen (3.6.3.6)	4.136	%99.25	%82.4	9882.1	177.8x10
Dörtgen-Sekizgen (4.8.8)	3.995	%95.87	%81.6	11469.3	177.8*10
Üçgen-Dörtgen (3.3.3.4.4)	3.917	%94	%66.7	9587.7	177.8*8-193.7*16
Üçgen-Altıgen (3.3.3.3.6)	4.140	%99.35	%73	9791.8	219.1*8

Bu doğrultuda,

- Üçgen-altıgen (3.6.3.6), dörtgen-sekizgen (4.8.8) ve üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) modellerde tüm çubuk elemanlar aynı elik kesiti ile geçilirken,
- Dikdörtgen (4.4.4.4), gen (3.3.3.3.3.3), altıgen (6.6.6), üçgen-dörtgen (3.4.3.4) ve üçgen-dörtgen (3.3.3.4.4) modellerde düzlemsel ızgara yapısının ereve kısmında (dış kenarlarda) kesit boyutları daha büyüktür, i kısımdaki çubuk elemanlar ise daha küçük kesitli olarak optimize edilmiştir.

Yapılan tasarımlar sonucunda elik konstrüksiyonların dizaynı, sehim kriteri göz önüne alınarak belirlenmektedir. Mantık olarak düşünüldüğünde ise hiçbir sistemde etki kapasite oranı sınır değerdeyken sehim değeri limitlerin altına düşmemektedir. Aksine sehim miktarları limitlere yaklaşmış olup etki kapasite oranları limit değerlerin altında kalmaktadır.

Düzlemsel ızgara sistemlerde sehim miktarları ve etki kapasite oranları karşılaştırıldığında;

- Profil kesitlerine bağlı olarak limit sehim değerine en fazla yaklaşan sistem üçgen tesselasyonlu (3.3.3.3.3) sistemdir. Diğer sistemlere göre daha ince kesitli çelik yapı malzemesinin kullanılmasına rağmen etki kapasite oranı hesaba katıldığında da en iyi performansı gösteren sistem konumunda olması kararlı bir yapı olduğunu ispatlamaktadır. En iyi performansı ortaya koyan diğer bir sistem ise üçgen-dörtgen tesselasyonlu (3.3.3.4.4) taşıyıcı sistemdir. En iyi sonuç veren modellerde üçgen geometrisinin kullanımı dikkat çekmektedir. Üçgen şeklinin tek başına veya dörtgen ile entegrasi neticesinde tasarımların ortaya konulmasında zorlanma düzeyi fazla olmayan taşıyıcı strüktür tasarımlarının uygulanabileceği öngörülmektedir.
- Maksimum sehim değerine göre ayarlanan taşıyıcı strüktürlerde etki kapasite oranı açısından en kararsız sistem üçgen-altıgen tesselasyonlu (3.6.3.6) taşıyıcı strüktür sistemidir. İncelenen yapılar arasında kapasitesini maksimum seviyede kullanarak zorlanmaktadır. Üçgen geometrisinin tek başına kullanıldığı optimum davranış gösteren örüntü sistemine kıyasla minimum seviyelerde kalması sonucunda çıkarım yapıldığında üçgen-altıgen entegrasyonunun efektif çözüm sunmadığı söylenebilmektedir.

Optimal sistemlerin zati ağırlığı, bir sistemin maliyet ile paralel bir şekilde orantılı olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Kullanılan malzeme, montaj, ulaşım ve imalat da maliyeti etkileyen diğer özelliklerdir. Aynı zamanda karmaşıklığı fazla olan ve buna bağlı olarak da birleşim detayı çeşitlenen sistemlerde ve kullanılan malzeme sayısı birden fazla olan yapımlarda maliyetin arttığı söylenebilmektedir.

Optimum çözümler altında düzlemsel ızgara sistemlerin zati ağırlıklarına bakıldığında;

- Dikdörtgen (4.4.4.4) geometrik biçimiyle meydana gelen taşıyıcı strüktürlerde sistem ağırlığının en düşük çıktığı görülmektedir. Ağırlık ile maliyet hesabının doğru orantılı olduğu düşünüldüğünde en az maliyete sahip olan taşıyıcı strüktür sisteminin dikdörtgen tesselasyonlu sistem olduğu söylenebilmektedir. Zati ağırlık olarak en yakın değerdeki üçgen (3.3.3.3.3) tesselasyonlu strüktürlerde etki kapasite oranının dikdörtgen strüktürlere göre daha iyi olması nedeniyle maliyet artsa da üçgen taşıyıcı sistem uygulamasının tercih edilebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

- Dörtgen-sekizgen (4.8.8) örüntüsüne sahip taşıyıcı sistemde zati ağırlık değeri en yüksektir. Tesselasyon kurguları açısından bakıldığında, dikdörtgen dışında sekizgen geometrik şeklin sisteme dâhil edilmesi ile zati ağırlığın arttığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu sebeple, tek bir geometrik biçim ile tasarlanan düzgün/periodyk tesselasyonlu taşıyıcı sistemlerin yarı düzgün/periodyk tesselasyonlu sistemlere kıyasla maliyet bakımından daha ekonomik çözümler sunduğu ifade edilebilmektedir. Ayrıca üçgen ve dörtgen geometriler dışında altıgen ve sekizgen gibi biçimlerin kullanılmasının ağırlık değerine etki ederek bu noktada yükselttiği göz önüne alınmalıdır.

Tonoz ızgara kabuk strüktürlerde optimizasyonu sağlamak amacıyla da benzer yaklaşım sergilenmiş, sınır değerlere yaklaşmak için farklı çelik yapı malzeme kesitleri kullanılmıştır (Çizelge 5.12). Bu kapsamda,

- Üçgen-dörtgen (3.4.3.4), üçgen-altıgen (3.6.3.6), dörtgen-sekizgen (4.8.8) modellerde tüm çubuk elemanlar aynı çelik kesiti ile geçilirken,
- Dikdörtgen (4.4.4.4), üçgen (3.3.3.3.3.3), altıgen (6.6.6), üçgen-dörtgen (3.3.3.4.4) ve üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) modellerde tonoz ızgara yapısının zemine oturan iki kenarında ve iki dış kemerlerinde kesit boyutları daha büyüktür, iç kısımdaki çubuk elemanlar ise daha küçük kesitli olarak tasarlanmıştır.
- Üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) strüktür modelinde ise ayrıca altıgeni meydana getiren boru çubuklarda büyük kesitli çelik malzeme uygulanmıştır.

Çizelge 5.12. Tonoz ızgara sistemlerdeki optimizasyon değerleri

	Optimal sistemlerde sehim miktarı (santimetre)	Optimal sistemin sehimde performansı	Optimal sistemlerde etki kapasite oranı	Optimal sistemlerin zati ağırlığı (kilogram)	Optimal sistemlerde kullanılan boru çelik yapı malzemesi kesitleri (milimetre)
Dikdörtgen (4.4.4.4)	4.038	%96.9	%86.8	3176.5	88.9*4-114.3*4
Üçgen (3.3.3.3.3.3)	3.99	%95.75	%93.9	3745.9	88.9*5-101.6*4
Altıgen (6.6.6)	3.935	%94.43	%100	4368.9	101.6*5-114.3*5
Üçgen-Dörtgen (3.4.3.4)	4.105	%98.51	%97.6	3634	101.6*4
Üçgen-Altıgen (3.6.3.6)	4.144	%99.44	%83	3785.8	88.9*5
Dörtgen-Sekizgen (4.8.8)	3.792	%91	%90.4	6417.1	114.3*6.3
Üçgen-Dörtgen (3.3.3.4.4)	3.951	%94.81	%98.3	3239.8	88.9*4-101.6*5
Üçgen-Altıgen (3.3.3.3.6)	2.981	%71.53	%96.1	3293	76.1*5-88.9*4

Tonoz ızgara kabuk taşıyıcı strüktür sistemlerde sehim miktarları ve etki kapasite oranları karşılaştırıldığında;

- Optimizasyon için Stahlbau malzeme profillerinden en uygun olan kesitlerin seçilmesi sonrasında limit sehim değerine en fazla yaklaşan sistem üçgen-altıgen tesselasyonlu (3.6.3.6.) sistemdir. Diğer strüktür sistemlerine kıyasla daha ince kesitli çelik yapı malzemesinin kullanılmasına rağmen etki kapasite oranı hesaba katıldığında da en iyi performansı gösteren sistem konumunda olması rijit ve kararlı bir yapı olduğunu kanıtlamaktadır. Düzlemsel taşıyıcı modellerde en çok zorlanan sistem durumundaki bu sistem tonoz geometrisinde en iyi performansı ortaya koymaktadır. Etki kapasite oranına bakılarak en iyi reaksiyon gösteren diğer bir sistem ise dikdörtgen tesselasyonlu (4.4.4.4) taşıyıcı sistemdir. Maksimum sehim miktarına göre %90 etki kapasite oranının altında kalarak optimum davranış sergileyen bu sistemler tonoz biçimlenmesinde stabilizasyon ve denge oluşturmaktadır.
- Limit sehim değerine göre ayarlanan taşıyıcı strüktürlerde etki kapasite oranı açısından en kararsız sistem altıgen tesselasyonlu (6.6.6) taşıyıcı strüktür sistemidir. İncelenen yapılar arasında kapasitesini maksimum seviyede kullanarak zorlanmaktadır. Altıgen örüntülerden elde edilen düzgün tesselasyonlu taşıyıcı sistem rijit olmayan davranışlar göstermesine rağmen, üçgen-altıgen (3.6.3.6) kurgulamaya sahip taşıyıcı strüktürün en ideal konumda bulunması ise üçgen geometrik şeklin altıgen geometrisi ile kombinasyonu ile denge seviyesine geldiğini göstermektedir. Bu çerçevede üçgen geometrik biçiminin taşıyıcı sistemlerdeki statik mukavemetinin fazla olduğu ortaya çıkmaktadır.

Optimum çözümler altında tek eğrilikli tonoz ızgara sistemlerin zati ağırlıklarına bakıldığında;

- Dikdörtgen (4.4.4.4) kurgularıyla üretilen taşıyıcı strüktürlerde sistem ağırlığının en düşük çıktığı göze çarpmaktadır. Ağırlık ile maliyet hesabının paralel bir şekilde arttığı düşünüldüğünde en ekonomik çözümlenmeye sahip olan taşıyıcı strüktür sisteminin dikdörtgen tesselasyonlu sistem olduğu söylenebilmektedir. Bu yapı sistemini ise üçgen-dörtgen (3.3.3.4.4) ve üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) tesselasyonlu strüktürler izlemektedir. Üçgen-dörtgen (3.3.3.4.4) geometrik tasarımından türetilen taşıyıcı

sistemde dikdörtgen sisteme göre ince kesitli elemanların kullanımı da maliyet bakımından efektif sonuçlara ulaştırabilmektedir.

- Düzlemsel strüktürlerde olduğu gibi dörtgen-sekizgen (4.8.8) tesselayon örüntüsüne sahip taşıyıcı sistemde zati ağırlık değeri en yüksektir. Tesselayon kurguları açısından çıkarımlar yapıldığında, dikdörtgen geometrik sistem ile optimum sonuçlara varılırken dikdörtgen şekline sekizgen kombinasyonu yapılması ters etki yaratmıştır ve ekonomik çözümlerden uzaklaşmıştır. Sekizgen geometrisi zati ağırlığı büyük ölçüde artırarak dörtgen sistemlerin sağladığı avantajı dezavantaja dönüştürmüştür. Bu nedenle her iki geometrik form ile tasarlanan dörtgen-sekizgen (4.8.8) konfigürasyonu, maliyet konusunda ortalamanın altında kalmıştır.

## 6. BULGULAR VE KARŞILAŞTIRMALAR

Analizden senteze ve çözümlenmeye geçilen bu bölümde elde edilen verilerden uygulama kapsamında bütüncül sonuçlar çıkarılması hedeflenmektedir. Farklı performans kriterleri bağlamında tüm örüntülerin sonuçları elde edilmiştir. Sıralanabilir çerçevede elde edilen tüm veriler ışığında nitel bir değerlendirme ile çıkarımlar yapılmıştır. Bu nitel değerlendirme için puanlama sistemi kullanılmıştır. Puanlamada aynı şartlar altında analiz edilen 8 ayrı örüntüdeki modellerin en kararlı davranışı ortaya koyan strüktür sistemine 8 puan, en kararsız davranışı gösteren sistem modeline 1 puan verilmiştir. Puanlama yapıldıktan sonra hem bu parametrelere bakılarak hem de genel olarak hangi örüntünün optimum davranış sergilediği ortaya konulmuştur. Toplamda, analiz etaplarına göre her bir performans kriteri için puanlama çizelgesi hazırlanmış, her aşama için gerçekleştirilen puanlama ile de nihai bir sıralama elde edilmiştir.

İlk aşamada eleman kesitleri sabit tutularak düşey yükler altındaki statik performansların analizi aşamasında; düzlemsel ve tek eğrilikli modellerde ayrı ayrı puanlama yapılarak en kararlı ve rijit sistem belirlenmiştir (Çizelge 6.1, 6.2). Sehim (yer değiştirme) miktarına ve etki kapasite oranına (D/C oranı) göre puanlama yapıldıktan sonra hem bu parametrelere bakılarak hem de genel olarak hangi ızgara sistemin optimum davranış gösterdiği ortaya çıkarılmıştır.

Puanlama işlemi yapıldıktan sonra düzlemsel sistemlerde değerlendirmeler yapılacak olursa (Çizelge 6.1);

- Sehim (yer değiştirme) verilerine göre en iyi davranışı sergileyen model, düzgün tesselasyonlu üçgen (3.3.3.3.3) strüktür modeli olurken en kötü davranışı sergileyen model, yarı düzgün tesselasyon kombinasyonu olan üçgen-dörtgen (3.4.3.4) ve üçgen-altıgen (3.6.3.6) strüktür modelidir. Düzgün tesselasyonlu dikdörtgen (4.4.4.4), üçgen (3.3.3.3.3) ve altıgen (6.6.6) sistem modelleri genel olarak yarı düzgün tesselasyonlu sistemler ile karşılaştırıldığında iyi performans ortaya koymaktadır.
- Etki kapasite oranına göre, üçgen strüktür sistemi en iyi sistem olarak görülürken üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) yarı düzgün tesselasyonlu Düzlemsel sistemi en kötü sistem modeli konumundadır. Altıgen ve sekizgen geometrilerinin entegre edildiği strüktür sistemlerinde genel olarak %70 seviyelerine ulaşılmakta ve bu durum stabilizasyon

sorunları yaratmaktadır. Temel geometriler olan dikdörtgen ve üçgen örüntülerinden tasarlanan taşıyıcı sistemlerde ise rijit ve dengeli eleman hareketleri gözlenmektedir.

Çizelge 6.1. Düzlemsel ızgara sistemlerin puanlanması

	Dikdörtgen (4.4.4.4)	Üçgen (3.3.3.3.3.3)	Altıgen (6.6.6)	Üçgen- Dörtgen (3.4.3.4)	Üçgen- Altıgen (3.6.3.6)	Dörtgen- Sekizgen (4.8.8)	Üçgen- Dörtgen (3.3.3.4.4 )	Üçgen- Altıgen (3.3.3.3.6)
Sehim (yer değiştirme) miktarı (santimetre)	2.693	2.481	3.099	3.954	3.454	3.336	3.259	3.452
Sehim miktarına göre alınan puan	7	8	6	1	2	4	5	3
Etki kapasite oranı (D/C oranı)	%50.4	47%	%68.5	%72.2	%72.7	72%	%60.4	%77.5
Etki kapasite oranına göre alınan puan	7	8	5	3	2	4	6	1
Toplam puan	14	16	11	4	4	8	11	4

\* Yapılan puanlamalara göre en kararlı sistem üçgen (3.3.3.3.3.3) sistem iken en kararsız sistem ise üçgen-dörtgen (3.4.3.4), üçgen-altıgen (3.6.3.6) ve üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) strüktür sistemidir.

Bu verilerden yola çıkarak düzlemsel sistemde her iki parametrenin yorumlanması sonucunda 8 tesselasyon-strüktür yapısı arasında optimum sistem davranışı gösteren model üçgen (3.3.3.3.3.3) modelidir. Genel olarak en kötü performansı gösteren modeller, üçgen-dörtgen (3.4.3.4), üçgen-altıgen (3.6.3.6) ve üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) ızgara sistemleridir.

Tonoz kabuk yapısında puanlama sistemi yapıldıktan sonra çıkarımlar yapılacak olursa (Çizelge 6.2);

- Sehim (yer değiştirme) verilerine göre en iyi davranışı sergileyen model, yarı düzgün tesselasyonlu üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) strüktür modeli olurken en kötü davranışı sergileyen model, bir başka yarı düzgün tesselasyon kombinasyonu olan dörtgen-sekizgen (4.8.8) strüktür modelidir. Düzlemsel ızgaralarda düzgün tesselasyonlu 3 strüktür modeli de verimli devinimler sağlarken tonoz ızgara kabuklarda maksimum verim elde edilememiştir.
- Etki kapasite oranına bakılırsa, üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) strüktür sistemi en iyi sistem olarak görülürken dörtgen-sekizgen (4.8.8) yarı düzgün tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk modeli en kötü sistem konumundadır.

Çizelge 6.2. Tonoz ızgara modellerin puanlanması

	Dikdörtgen (4.4.4.4)	Üçgen (3.3.3.3.3.3)	Altıgen (6.6.6)	Üçgen- Dörtgen (3.4.3.4)	Üçgen- Altıgen (3.6.3.6)	Dörtgen- Sekizgen (4.8.8)	Üçgen- Dörtgen (3.3.3.4.4 )	Üçgen- Altıgen (3.3.3.3.6)
Sehim (yer değiştirme) miktarı (santimetre)	1.159	1.268	2.011	1.563	1.058	3.048	0.912	0.659
Sehim miktarına göre alınan puan	5	4	2	3	6	1	7	8
Etki kapasite oranı (D/C oranı)	%39.1	%44.1	%68.7	%53.9	%43.4	90%	%45.1	%36.5
Etki kapasite oranına göre alınan puan	7	5	2	3	6	1	4	8
Toplam puan	12	9	4	6	12	2	11	16

\* Yapılan puanlamalara göre en kararlı sistem üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) sistem iken en kararsız sistem ise dörtgen-sekizgen (4.8.8) strüktür sistemidir.

Elde edilen verilerden hareketle tonoz sistemde her iki parametrenin yorumlanması sonucunda 8 tesselayon-strüktür yapısı arasında optimum sistem davranışı gösteren model üçgen-altıgen (3.3.3.3.6), onu takip eden sistem ise dikdörtgen (4.4.4.4) ve üçgen-altıgen (3.6.3.6) tesselayonlu strüktür modelidir. Genel olarak en kötü performansı gösteren strüktür modeli, dörtgen-sekizgen (4.8.8) ızgara sistemidir.

İkinci aşamadaki alan çalışması analiz verileri ışığında, düşey yükler altındaki en optimum tasarım kararlarında en uygun malzeme kesitleri yardımıyla performans çözümlenmeleri yapılan düzlemsel ve tonoz ızgara modeller, puanlama sistemi ile zati ağırlıkları bakımından sıralanmıştır (Çizelge 6.3, 6.4). Puanlamada aynı şartlar altında analiz edilen 8 ayrı örüntüdeki modellerin en kararlı davranışı ortaya koyan strüktür sistemine 8 puan, en kararsız davranışı gösteren sistem modeline 1 puan verilmiştir. Yapı sistemlerinin grid yoğunlukları da verilerek zati ağırlık ve grid yoğunluğu arasında karşılaştırılabilir bir çerçeve oluşturulmuştur. Bu aşamadaki amaç, eleman tasarımı doğrultusunda maliyete yönelik de katkı sağlamaktır.

Çizelge 6.3.Optimize edilen düzlemsel ızgara sistemlerin zati ağırlığa göre puanlanması

	Dikdörtgen (4.4.4.4)	Üçgen (3.3.3.3.3.3)	Altıgen (6.6.6)	Üçgen- Dörtgen (3.4.3.4)	Üçgen- Altıgen (3.6.3.6)	Dörtgen- Sekizgen (4.8.8)	Üçgen- Dörtgen (3.3.3.4.4)	Üçgen- Altıgen (3.3.3.3.6)
Grid yoğunluğu (metre)	240	238,06	231,84	231,25	234,18	223,14	236,94	230,56
Yapı Zati Ağırlığı (kilogram)	6827	7979.8	9715.7	8741.4	9882.1	11469.3	9587.7	9791.8
Yapı Zati Ağırlık puanı	8	7	4	6	2	1	5	3

\* Yapılan puanlamalara göre en ekonomik sistem dikdörtgen (4.4.4.4) sistem iken en maliyetli sistem ise dörtgen-sekizgen (4.8.8) strüktür sistemidir.

Puanlama işlemi ile optimum malzeme kesiti altında düzlemsel ızgara sistemlerin zati ağırlıkları incelendiğinde;

- Dikdörtgen (4.4.4.4) örüntülerden meydana gelen taşıyıcı strüktürlerde sistem ağırlığı en düşük seviyededir. Buna dayanarak en az maliyete sahip olan ve ekonomik çözümler sunan taşıyıcı strüktür sisteminin dikdörtgen tesselasyonlu sistem olduğu görülmektedir. Dörtgen-sekizgen (4.8.8) örüntüsüne sahip taşıyıcı sistemde zati ağırlık değeri en yüksektir. Bu sebeple, en maliyetli sistem ise dörtgen-sekizgen kurgusal strüktür yapısıdır. Dörtgen-sekizgen (4.8.8) tesselasyonlu sistem, dikdörtgen (4.4.4.4) tesselasyonlu strüktür sisteminden %40,47 oranında daha ağırdır.
- Yapı sistemlerinin grid yoğunlukları baz alındığında ise tesselasyon örüntüsündeki tüm elemanların toplam uzunluğu, dikdörtgen taşıyıcı sistemde en fazla, dörtgen-sekizgen taşıyıcı sistemde ise en düşük durumdadır. İki strüktür arasında %7,56 oranında bir fark görülmektedir. Verilerden hareketle grid yoğunluğu ile sistemlerin zati ağırlıkları arasında bir ters orantı mevcuttur.

Çizelge 6.4. Optimize edilen tonoz ızgara sistemlerin zati ağırlığa göre puanlanması

	Dikdörtgen (4.4.4.4)	Üçgen (3.3.3.3.3.3)	Altıgen (6.6.6)	Üçgen- Dörtgen (3.4.3.4)	Üçgen- Altıgen (3.6.3.6)	Dörtgen- Sekizgen (4.8.8)	Üçgen- Dörtgen (3.3.3.4.4)	Üçgen- Altıgen (3.3.3.3.6)
Grid yoğunluğu (metre)	362,6	358,6	353	370,1	358,9	375	357,7	375,2
Yapı Zati Ağırlığı (kilogram)	3176.5	3745.9	4368.9	3634	3785.8	6417.1	3239.8	3293
Yapı Zati Ağırlık puanı	8	4	2	5	3	1	7	6

\* Yapılan puanlamalara göre en ekonomik sistem dikdörtgen (4.4.4.4) sistem iken en maliyetli sistem ise dörtgen-sekizgen (4.8.8) strüktür sistemidir.

Tonoz ızgara strüktür yapısında puanlama sisteminin yapılmasının ardından optimum malzeme kesiti altında tek eğrilikli tonoz ızgara kabuk sistemlerin zati ağırlıkları incelendiğinde;

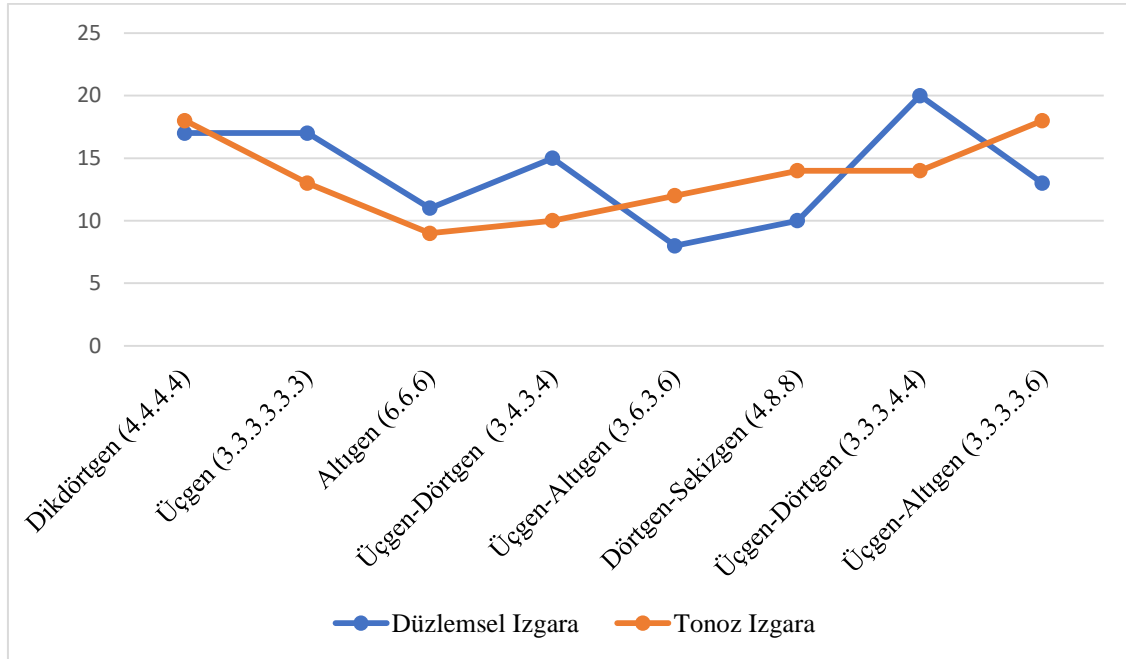
- Dikdörtgen (4.4.4.4) geometrik şekilden meydana gelen taşıyıcı strüktürlerde sistem ağırlığı en düşük seviyededir. Buna dayanarak en az maliyete sahip olan ve ekonomik çözümler sunan taşıyıcı strüktür sisteminin dikdörtgen tesselasyonlu sistem olduğu söylenebilmektedir. Dörtgen-sekizgen (4.8.8) yarı düzgün geometrilere sahip taşıyıcı sistemde zati ağırlık değeri en yüksektir. Bu sebeple, en maliyetli sistem ise dörtgen-sekizgen kurgusal strüktür yapısıdır. Dörtgen-sekizgen (4.8.8) tesselasyonlu sistem, dikdörtgen (4.4.4.4) tesselasyonlu strüktür sisteminden %50,49 oranında daha ağırdır.
- Yapı sistemlerinin grid yoğunlukları dikkate alındığında ise tesselasyon örüntüsündeki tüm elemanların toplam uzunluğu, dikdörtgen taşıyıcı sistemde dörtgen-sekizgen taşıyıcı sistemle karşılaştırıldığında daha düşük durumdadır. İki strüktür arasında grid yoğunluğu anlamında %3 oranında bir fark görülmektedir. Verilerden hareketle grid yoğunluğu ile sistemlerin zati ağırlıkları arasında bir doğru orantı mevcuttur.

Düzlemsel ve tonoz ızgara formlarında optimize edilen geometrik yapılandırma ile üretilmiş taşıyıcı ızgara sistemler, statik ve dinamik yüklemeler altında performans analizlerinden geçirildikten sonra yapısal performans ve maliyet karşılaştırmasını anlamak amacıyla sistematik bir şekilde diyagram haline getirilmiştir (Şekil 6.1). Yapısal performans puanı; Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12'deki sehim (düşey yer değiştirme) ve etki kapasite oranı (D/C oranı) verilerinden elde edilmiştir. Çizelgelerde, aynı şartlar altında analiz edilen 8 ayrı örüntüdeki modellerin en kararlı davranışı ortaya koyan strüktür sistemine 8 puan, en kararsız davranışı gösteren sistem modeline 1 puan verilmiştir ve yapısal performans puanı oluşturulmuştur. Maliyet değeri ise sistemlerin zati ağırlıkları ile doğru orantılı olarak puanlandırılmıştır (Çizelge 6.5).

Çizelge 6.5. İncelenen tesselsyonların farklı formlardaki puanlama dağılımı

		Dikdörtgen (4.4.4.4)	Üçgen (3.3.3.3.3.3)	Altıgen (6.6.6)	Üçgen- Dörtgen (3.4.3.4)	Üçgen- Altıgen (3.6.3.6)	Dörtgen- Sekizgen (4.8.8)	Üçgen- Dörtgen (3.3.3.4.4)	Üçgen- Altıgen (3.3.3.3.6)
DÜZLEMSEL	Yapısal performans puanı	9	10	7	9	6	9	15	10
	Maliyet puanı	8	7	4	6	2	1	5	3
	Toplam puan	17	17	11	15	8	10	20	13
TONOZ	Yapısal performans puanı	10	9	7	5	9	13	7	12
	Maliyet puanı	8	4	2	5	3	1	7	6
	Toplam puan	18	13	9	10	12	14	14	18

\* Yapılan puanlamalara göre düzlemsel strüktürlerde performans ve maliyet toplamında en iyi sistem, üçgen-dörtgen (3.4.3.4) sistemdir. Tonoz ızgara strüktürlerde ise performans ve maliyet toplamında en iyi sistem, dikdörtgen (4.4.4.4) ve üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) sistemlerdir.



Şekil 6.1. İncelenen tesselsyonların farklı formlardaki sonuç puanlaması

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mimari tasarım sürecinde tesselasyon kavramı, geometri biliminin mimarlık alanı kapsamı içine dâhil olduğu aplikasyonlardan biridir. Geometrik biçimlerin tesselasyon kurgularında kurallı ve düzenli örüntülerde üretilmesi ile mimari tasarıma aktarılan kurgulanmış desenler, mimari yapı uygulamalarından olan taşıyıcı strüktürlerde de görülmektedir. Yapılarda kullanılan bu geometrik teknik ile birlikte çeşitli tasarımlar planlanmakta ve projelendirilmektedir, bu sayede yapı çeşitliliği sağlanmaktadır. Geometrik şekillerin bir araya getirilip belirli parametreler ile bütünleşik bir biçimde türetilmesiyle meydana gelen tesselasyon kurgularıyla birlikte yapı malzemeleri ve elemanları, prefabrik yapım teknikleri ile çoğaltılarak mimari yapıların çok yönlü organizmalar haline getirilmesine olanak sağlamaktadır ve aynı zamanda strüktür-yapı fonksiyonu bağlamında farklı bir boyut kazandırmaktadır. Yapı teknolojisi ve metodolojisindeki gelişmeler, büyük organizasyonlar için açıklıklı taşıyıcı strüktür sistemlerinin geometrik kombinasyonlar ve entegrasyonlar ile desteklenmesiyle birlikte yapı stoğu aralığının genişlemesine zemin hazırlayarak mimari ve mühendislik sektörlerinde iş birliği çerçevesinde kompleks yapılar ortaya koymaktadır.

Mevcut yapı stoğunda ve gelecekteki mimari planlamalarda taşıyıcı sistemlerin farklı geometriler ile tasarımının artması göze çarpmaktadır. Bu yapıların tasarlanması ve analiz edilmesi için teorik ilkeler ile birlikte dijital tasarım ve görselleştirmeye de ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel tasarım prensiplerinin sınırlarını zorlamak için simülasyon araçları kullanılarak tasarımların oluşturulması sağlanmaktadır. Tasarımlar yaratılırken belli teknikler kullanılmaktadır. Geometrik figürler, tasarımların oluşturulmasında merkezi bir görev üstlenmektedir. Bir taşıyıcı strüktür tasarımının şekillenmesinde geometrik biçimler rol oynamaktadır. Literatür kısmında taşıyıcı sistemler hakkında bilgiler verildikten sonra her sistem kısaca tanıtılmıştır. Bu sistemler içerisinde geleneksel taşıyıcı strüktürlerde geometrik kurgulanmaya ve açıklık geçilmesine olanak tanınmasına izin veren sistemlerden biri kabuk yapılarıdır. Kabuk yapılar, geliştirilen teknolojik yapı elemanları, inşaa sürecindeki yenilikler, maliyet ve demografik durumlara göre ilerleme gösteren mimarlık ve mühendislik alanıdır. Izgara kabuk sistemler de malzemedan tasarruf sağlama, yenilikçi yapı elemanlarının denenmesi, kolay montaj edilebilen, kurulum açısından avantaj oluşturan ve gün geçtikçe daha fazla tercih edilen taşıyıcı strüktürlerdir. Geometrik biçimler, ızgara sistemlerin meydana gelmesini sağlayan, estetik ve statik

açından değerlendirmeler yapılarak yapıya entegre edilen unsurlardır. Geometrik biçim çeşitliliğinin en fazla uygulandığı komplike taşıyıcı sistemlerin başında ızgara kabuk sistemler gelmektedir. Bu sistemlerde geometrinin baskınlığı öne çıkmaktadır.

Tesselasyon kavramı ve örüntüleri, ızgara kabuk sistemler ile birleştirilerek konfigürasyonlar oluşturulabilmektedir. Kavram, geometrinin mimaride kullanımıyla yüzeyleri canlandırmakta ve beslemektedir. Yüzey oluşturma sürecinde, mimaride deneysel çalışmalarda, cephelerde ve kabuklarda yöntem ve kurgulara dikkat çekilmiştir, derinleştirilen konu ızgara kabuk strüktür sistemlerine indirgenmiştir. Çalışmada, geometrik biçimler ile üretilen tesselasyon yönteminin açıklanması ve ızgara kabuk taşıyıcı sistemlerde incelenmesi amaçlanmıştır. İncelenen yapı örneklerine bakılarak farklı kurgularda oluşturulmuş 8 tesselasyon örüntüsü düzlemsel yatay ızgara sistemler ve tek eğrilikli tonoz kabuk sistemlere entegrasyon yapılmıştır. ızgara kabuk yapılar için en fazla kullanılan tesselasyon çeşitlerinden biri olan ve net bir şekilde örüntülerin oluşturulabildiği periyodik/simetrik tesselasyon çeşidinin Düzlemsel ızgaralara ve tonoz ızgara kabuk sistemlere entegrasyonu yapılmıştır. Rhinoceros programının eklentisi olan Grasshopper ile modellenmiş ve Sap2000 programında sonlu elemanlar yöntemiyle test edilmiştir. Alan çalışması ikiye ayrılmıştır, statik performans ve maliyet esaslı değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir ve sağlıklı bir şekilde karşılaştırma yapılabilmesi için puanlama sistemine bağlı olarak çıkarımlarda bulunulmuştur.

Sonuç olarak, tesselasyon kurguları ile ızgara kabuk sistemlerin oluşturulabildiği ve performans analizi ile değerlendirilebildiği görülmüştür. Yapısal analizler ile birlikte geometrik şekiller ile meydana gelen tesselasyon örüntülerinin ızgara kabuk sistemlerde statik açıdan etkin bir şekilde rol oynadığı tespit edilmiştir. Temel geometrik şekiller ile oluşturulan düzgün tesselasyonların ve temel şekillerin bir araya gelerek kombinasyon yapıldığı yarı düzgün tesselasyonların geometrik karakteristiklerinin aynı olmadığı ve analiz çıktılarına bağlı olarak farklı davranışlar sergilediği saptanmıştır. Tesselasyon kurgularının taşıyıcı strüktürlerde sağlıklı bir şekilde analizinin yapılabilmesi için grid yoğunluğu ve ve grid faktör gibi tasarım kararları uygulanmıştır. Bu kararlar, tesselasyon örüntüleri arasındaki farklılıkları gidererek düzlemsel ızgara ve tonoz ızgara sistemlerin geometrik potansiyellerinin kendi içinde ve düzlemsel-tonoz form kıyaslaması bağlamında karşılaştırmalı analiz için önem teşkil etmektedir.

Tesselasyon konfigürasyonları, mimarlık disiplini için tasarım sırasında görsel etki meydana getirmesi ile başlasa da değişimin yansımaları, yapılan tez çalışması ile hem dayanıma etkileri, hem de maliyete etkisini de doğrudan kanıtlamıştır. Tesselasyon modülasyonlarının artmasına bağlı olarak grid yoğunluklarına ve grid faktör değerlerine göre düzenlenen taşıyıcı strüktür sistemlerinde yapıların zati ağırlıkları ile orantılı olarak tonaj artmakta ve buna bağlı olarak da maliyet senaryoları ortaya çıkmaktadır. Performans sonuçlarından hareketle optimizasyonlar yapılarak kararlı ve rijit sistemler belirlenmiştir ve maliyet ile ilgili saptamalar yapılmıştır.

Mimarlık disiplini için, çağdaş ve güncel stratejiler geliştirmek ve tartışmaya açmak, çalışmaları yönlendirmek, olanakları araştırmak, çeşitli anlatım yolları ile paylaşım açmak ve ekonomik çözümler getirmek başlıca mesleki sorumluluk alanlarındandır. Özellikle tasarım aşamasında bilinçli kararlar almak, yapının statik ve dinamik çözümlerine ve maliyete de doğrudan etkimektedir. Mimari tasarımın omurgasını teşkil eden taşıyıcı sistemin belirlenmesinde, fonksiyonellik ve ekonomiklik kavramlarının etkisi önemli bir şekilde rol oynamaktadır. Yapılan değerlendirmelerde de bu kriterlere ve parametrelere bağlı olarak tasarımcılar için optimum çözümler aranmıştır ve gelecek çalışmalar için zemin hazırlanarak farkındalık oluşturmak istenmiştir.



## KAYNAKLAR

- Addis, B. (2006). The Crystal Palace and its place in structural history. *International Journal of Space Structures*, 21(1), 3-19.
- Akçaer, G. (2016). *Havalimanı Terminal Binalarında Geniş Açıklık Geçme Sorununun Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-6.
- Ali, M. M. and Al-Kodmany, K. (2012). Tall buildings and urban habitat of the 21st century: a global perspective. *Buildings*, 2(4), 384-423.
- Alharbi, A. (2016). Balance as a principle of interior design. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(4), 325-326.
- Arun, G. (2018, 10-13 Temmuz). *Structural systems of traditional timber construction in Turkey*, Presented at ICOMOS- Inter-ISC Meeting and Colloquium on Inter-ISC'18 Anti-Seismic Vernacular Heritage of Anatolia and Beyond, Kastamonu, 2-11.
- Azad, M. M., Barua, A. and Sultana, S. (2015). A Review Analysis of Ancient Greek Architecture. *International Journal of Civil Engineering, Construction and Estate Management*, 3(2), 48-58.
- Bertin, T. B. (2013). *Evaluating the use of particle-spring systems in the conceptual design of grid shell structures*, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 45-52.
- Borgart, A. and Eigenraam, P. (2012, 21-24 May). *Scanning in 3D and analysing the models of Heinz Isler, the preliminary results*. Presented at IASS-APCS 2012: From spatial structures to space structures, Seoul, 63-65.
- Bradley, S. (2013). *Design fundamentals: Elements, attributes, & principles*. (2nd Edition). Colorado: Vanseo design, 11.
- Bulu, A. (2018). *Müzik ile Mekan Arasındaki İlişkiye Yönelik Deneysel Yaklaşımların İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Ankara, 37-41.
- Chan, C. S. (2012). Phenomenology of rhythm in design. *Frontiers of Architectural Research*, 1(3), 253-258.
- Chang, W. (2018, 13-15 April). *Application of tessellation in architectural geometry design*. Presented at E3S Web of Conferences, Malaysia, 1-8.
- Charleson, A. (2014). *Structure as architecture: a source book for architects and structural engineers*. (2nd Edition). London: Routledge, 130-138.
- Chilton, J. (2011). Heinz Isler: shells for two churches. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 52(3), 173-183.

- Chilton, J. and Chuang, C. C. (2017). Rooted in nature: aesthetics, geometry and structure in the shells of Heinz Isler. *Nexus Network Journal*, 19(3), 763-785.
- Ching, F. D., Onouye, B. and Zuberbuhler, D. (2014). *Manual de estructuras ilustrado*. Barcelona: Editorial GG, 247-250.
- Chokshi, S. (2020). *Patterned Grid-shell: Designing a method to analyze and compare grid-shells influenced by traditional lattice patterns of north Asia*, Master's Thesis, TU Delft University of Technology, Delft, 33-37.
- Coşkun, E., Arık, G. (2011, 24-26 Kasım). *Yüksek yapıların tasarımında yenilikçi yaklaşımlar*, Mimarlıkta Taşıyıcı Sistemler Sempozyumunda sunuldu, İstanbul, 4-6.
- Cruz, P. J. (Ed.). (2013). *Structures and Architecture: New concepts, applications and challenges*. (1st Edition). Florida: CRC Press, 352-356.
- Çelik, O. C. ve Özgen, K. (2005). Betonarme Kabuklar; Tarihsel Gelişimi, Bugünü ve Geleceği. *Betonart Dergisi*, 53-61.
- D'Amico, B., Kermani, A., Zhang, H., Pugnale, A., Colabella, S. and Pone, S. (2015). Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure. *Structures*, 3(27), 227-235.
- Dağılgan S. (2019). *Geniş Açıklıkların Örtülmesinde Kullanılan Taşıyıcı Sistem Seçimi İçin Bir Model Önerisi*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 23-29.
- Davies, N., and Jokiniemi, E. (2008). *Dictionary of architecture and building construction*. (1st Edition). London: Routledge, 667-674.
- Deger, K. O. and Deger, A. H. (2012). An application of mathematical tessellation method in interior designing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 51, 249-256.
- Dimcic, M. (2011). *Structural optimization of grid shells based on genetic algorithms*, Thesis, Universität Stuttgart, Stuttgart, 81-84.
- Dong, S., Zhao, Y. and Xing, D. (2012). Application and development of modern long-span space structures in China. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6(3), 224-239.
- Du Peloux, L. (2017). *Modeling of bending-torsion couplings in active-bending structures; Application to the design of elastic gridshells*, Doctoral thesis, Université Paris Est, École des Ponts Paris Tech, Paris, 49-57.
- Dyvik, S. H. and Mork, J. H. (2015). *Kan avansert geometri vere rasjonelt byggjeri?*, Master's thesis, NTNU, Trondheim, 18-23.
- Dźwierzynska, J. (2018). Shaping curved steel rod structures. *Czasopismo Techniczne*, 8, 87-98.

- Eliassen, M. and Huseby, Å. (2018). *The Digital Workflow of Parametric Structural Design-Developing Grid Shells in a Nordic Climate*, Master's thesis, NTNU, Trondheim, 76-82.
- Ertaştan, E. (2005). *The performance of medium and long span timber roof structures: a comparative study between structural timber and steel*, Master's thesis, METU, Ankara, 65-69.
- Farnsworth, D. B. (1999). *Behavior of shell structures*, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 21-27.
- Farshad, M. (2013). *Design and analysis of shell structures*. Berlin: Springer Science and Business Media, 79-85.
- Garlock, M. E. M. and Billington, D. P. (2009, 28 September – 2 October). *Felix Candela's legacy*. Presented at Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia, 154-161.
- Gazi, A. ve Korkmaz, K. (2015, 14-17 Haziran). *8.8.4 Tesselasyon Kullanarak Genisleyebilen Strüktür Tasarımı*. Uluslararası Katılımlı Makina Teorisi Sempozyumunda sunuldu, İzmir, 441-442.
- Ghadim, G. T. (2013). *Geometry, Form and Structure Relationship in Blob, Liquid and Formless Architecture*, Doctoral thesis, Eastern Mediterranean University, Famagusta, 91-96.
- Ghiyasinab, M., Lehoux, N. and Ménard, S. (2017). Production phases and market for timber gridshell structures: a state-of-the-art review. *BioResources*, 12(4), 9538-9555.
- Green, H. and Lauri, D. (2017). *Form Finding of Grid Shells-a Parametric Approach using Dynamic Relaxation*, Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 12-24.
- Gündoğ, G. (2007). *Çağdaş Strüktür Sistemlerinin Mimarlığa Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 53-59.
- Güner, Y. R. (2016). *Üç Yönlü Periyodik Minimal Yüzeyler İle Oluşturulan Bir Tasarım Önerisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 32-34.
- Harris, R. (2005). 21st Century timber engineering – The age of enlightenment for timber design. Part 2: Environmental credentials, *The Structural Engineer*, 83(2), 23-28.
- Hemmerling, M., de Falco, C., and Angeli, E. (2018, August 3-7). *Shell tessellation-research based design strategies between architecture and mathematics*. Presented at International Conference on Geometry and Graphics, 1582-1592.

Hoefakker, J. H. and Blaauwendraad, J. (2004). *Analytical study of full circular cylindrical shells under wind loading*. Presented at 5th International PhD Symposium in Civil Engineering, 813-822.

Holland, E. P., Aegerter, J. N., Dytham, C. and Smith, G. C. (2007). Landscape as a model: the importance of geometry. *PLoS Computational Biology*, 3(10), 1979-1992.

İnternet: Katalan tonozları, URL-1: <https://www.treehugger.com/guastavian-vaults-are-still-being-built-and-are-thin-and-elegant-ever-4855447>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Crystal Palace tarihçesi, URL-2: <https://www.britannica.com/topic/Crystal-Palace-building-London>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Izgara tonoz kabuklarının tanımı ve özellikleri, URL-3: [https://en.wikipedia.org/wiki/Elbr%C3%BCcken\\_station](https://en.wikipedia.org/wiki/Elbr%C3%BCcken_station), Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Tesselasyon kavramı, örüntüleri ve çeşitleri, URL-4: <https://www.slideserve.com/frye/tessellations>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Geometri ve matematik bilim dallarının alt dalı olan tessellasyonlar, URL-5: <https://www.widewalls.ch/magazine/tessellation-mathematics-method-art>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Peyzaj düzenlemelerinde geometri ve tessellasyonlar, URL-6: <https://artsandculture.google.com/partner/highgrove-gardens>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: M. Escher'in matematik ve geometri bağlamında çalışmaları, URL-7: <http://www.eschertile.com/kids/math-art.htm>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Bahçe planlamasında geometrik figürlerin önemi, URL-8: [http://archilibra.com/living/journal/jan\\_05/1\\_04\\_05.htm](http://archilibra.com/living/journal/jan_05/1_04_05.htm), Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Peyzaj tasarımlarında boşlukların doldurulması ve simetrik tessellasyon, URL-9: <https://www.landscapefirst.it/rubriche/making-spaces/park-somerlust-felixx-landscape/>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Tesselasyon kurgularının şehir bölge planlamadaki görsel etkisi, URL-10: <https://www.gaia-gis.it/fossil/libspatialite/wiki?name=tesselations-4.0>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Yapısal çelik malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri, URL-11: <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

İnternet: Temperli cam yapı malzemesinde mekanik ve fiziksel özellikler, URL-12: [https://www.researchgate.net/publication/349960727\\_STRUCTUREAL\\_STRENGTH](https://www.researchgate.net/publication/349960727_STRUCTUREAL_STRENGTH)

[ANALYSIS OF FRAMED GLASSGLASS PHOTOVOLTAIC MODULE AT DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS/stats](#), Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.

- İpek, Y. (2014). *Hesaplamalı Tasarım Yaklaşımları: Bütünleşik Bir Tasarım Önerisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 108-114.
- Iuorio, O., Korkis, E. and Contestabile, M. (2019). *Digital Tessellation and Fabrication of the ECHO shell*. Presented at Proceedings of IASS Annual Symposia, 2019(5), 1-8.
- Kanta, N. (2015). *Design of a Thin Concrete Shell Roof for a Basketball Arena of 20,000 spectator capacity*, Master's Thesis, TU Delft University of Technology, Delft, 3-11.
- Kavurmacioğlu, Ö. ve Arıdağ, L. (2013). Strüktür Tasarımında Geometri ve Matematiksel Model İlişkisi, *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 59-76.
- Kayakıran, S. (2019). *Geçmişten Günümüze Tutkallı Tabakalı Ahşap Yapı Elemanlarının Geniş Açıklıklı Mimari Tasarımlarda Kullanılması Ve Kocaeli Körfez Yüzme Havuzu Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 53-56.
- Kayalar, R. (2010). *Geniş açıklıklı binalarda belirli kimi taşıyıcı sistemlerin malzeme ve formlarının açıklık geçme açısından incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 4-8.
- Khaira, J. (2009). What are Tilings and Tessellations and how are they used in Architecture?. *Young Scientists Journal*, 2(7), 35-46.
- Khouri, N. K. (2017). *Structural grid shell design with Islamic pattern topologies*, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 31-42.
- Koç, S. (2020). *Ahşap Izgara Kabuk Strüktürlerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 68-71.
- Lara-Bocanegra, A. J., Roig, A., Majano-Majano, A. and Guaita, M. (2018, 20-23 August). *Innovative developments in the design and construction of a permanent elastic timber gridshell*. Presented at World Conference on Timber Engineering, Seoul, 16-21.
- Liddell, I. (2015). Frei Otto and the development of gridshells. *Case Studies in Structural Engineering*, 4, 39-49.
- Lohr, L. (2008). *Lesson in visual literacy. Creating graphics for learning and performance*. (1st Edition). New Jersey Columbus, Ohio USA: Pearson Merrill Prentice Hall, 221-224.
- Macdonald, A. J. (2018). *Structure and architecture*. (3rd Edition). London: Routledge, 133-178.

- Mahmud, E. (2017). *Çelik Yapılarda Çağdaş Prefabrike Yapı Sistemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 14-29.
- Mainstone, R. (2013). *Developments in structural form*. London: Routledge, 78-145.
- Makowski, Z. S. (Ed.). (1986). *Analysis, design and construction of braced barrel vaults*. Florida: CRC Press, 61-97.
- Malek, S. R. (2012). *The effect of geometry and topology on the mechanics of grid shells*, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 56-69.
- Mesnil, R. (2013). *Stability of elastic grid shells*, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 19-31.
- Mork, H. J., Dyvik, H. S., Manum, B., Rønquist, A. and Labonnote, N. (2016, 22-25 August). *Introducing the segment lath—a simplified modular timber gridshell built in Trondheim Norway*. Presented at World Conference on Timber Engineering, Vienna, 1-8.
- Mosseri, A. (2004). Structural design in nature and in architecture. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 73, 590-599.
- Moussavi, F. and Kubo, M. (Eds.). (2006). *The function of ornament*. Barcelona: Actar Publishers, 59-68.
- Moussavi, F. (2011). *Biçimin İşlevi*. İstanbul: YEM Kitabevi, 24-33.
- Naicu, D. (2012). *Geometry and Performance of Timber Gridshells*, Master's thesis, University of Bath, Bath, 8-17.
- Naicu, D., Harris, R. and Williams, C. (2014, August 10-14). *Timber gridshells: Design methods and their application to a temporary pavilion*. Presented at World Conference on Timber Engineering, 10-14.
- Rajtmajer, S. M., Miličević, A., Trinajstić, N., Randić, M. and Vukičević, D. (2006). On the complexity of Archimedean solids. *Journal of mathematical chemistry*, 39(1), 119-132.
- Rippmann, M., Lachauer, L. and Block, P. (2012). Interactive vault design. *International Journal of Space Structures*, 27(4), 219-230.
- Rippmann, M. (2016). *Funicular Shell Design: Geometric approaches to form finding and fabrication of discrete funicular structures*, Doctoral thesis, ETH Zurich, Zurich, 46-54.
- Özat, S. (2014). *Geniş Açıklıkların Geçilmesinde Membran Sistemlerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 12-37.

- Özdemir, E. S. (2016). *Geniş açıklıklı mekan sistemlerinin parametrikleştirilmesinde bir yöntem*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 26-45.
- Özşen, E. G. ve Yamantürk, E. (1991). *Taşıyıcı Sistem Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 11-18.
- Parker, J. (2013, May). *Engineering The Shard, London: tallest building in western Europe*. Presented at Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 166(2), 66-73.
- Paoli, C. C. A. (2007). *Past and future of grid shell structures*, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 47-55.
- Porto, C. E. (2013). A Comparative Architectural Study of the Structural Form between Two Religious Buildings in Brasília: The Cathedral and the Tibetan Stupa. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 7(9), 1092-1110.
- Poulsen, E. (2015). *Structural design and analysis of elastically bent gridshells-The development of a numerical simulation tool*, Master's thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 26-42.
- Pruszkowski, W. (2015). *Steel Grid Shells Stress-Based Sizing Optimisation*, Master's Thesis, TU Delft University, Delft, 13-15.
- Sandaker, B. N., Eggen, A. P. and Cruvellier, M. R. (2019). *The structural basis of architecture*. (3rd Edition). London: Routledge, 333-368.
- Say, F. N. (1998). *Çağdaş yapılarda strüktür-biçim ilişkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 7-11.
- Schierle, G. G. (2006). *Architectural Structures*. Los Angeles: University Custom Publishing, 26-63.
- Schlaich, J. and Schober, H. (1996). Glass-covered grid-shells. *Structural engineering international*, 6(2), 88-90.
- Schwinn, T., Krieg, O. D. and Menges, A. (2014, 23-25 October). *Behavioral Strategies: Synthesizing Design Computation And Robotic Fabrication Of Lightweight Timber Plate Structures*. Presented at Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), 177-188.
- Sevgi, S. Y. (2013). *İç Mimaride Sayısal Tasarım Ve Üretim Teknikleri: Sergileme Elemanı Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 23-34.
- Sevtsuk, A. and Kalvo, R. (2014, January). *A freeform surface fabrication method with 2D cutting*. Presented at Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design, 109-116.

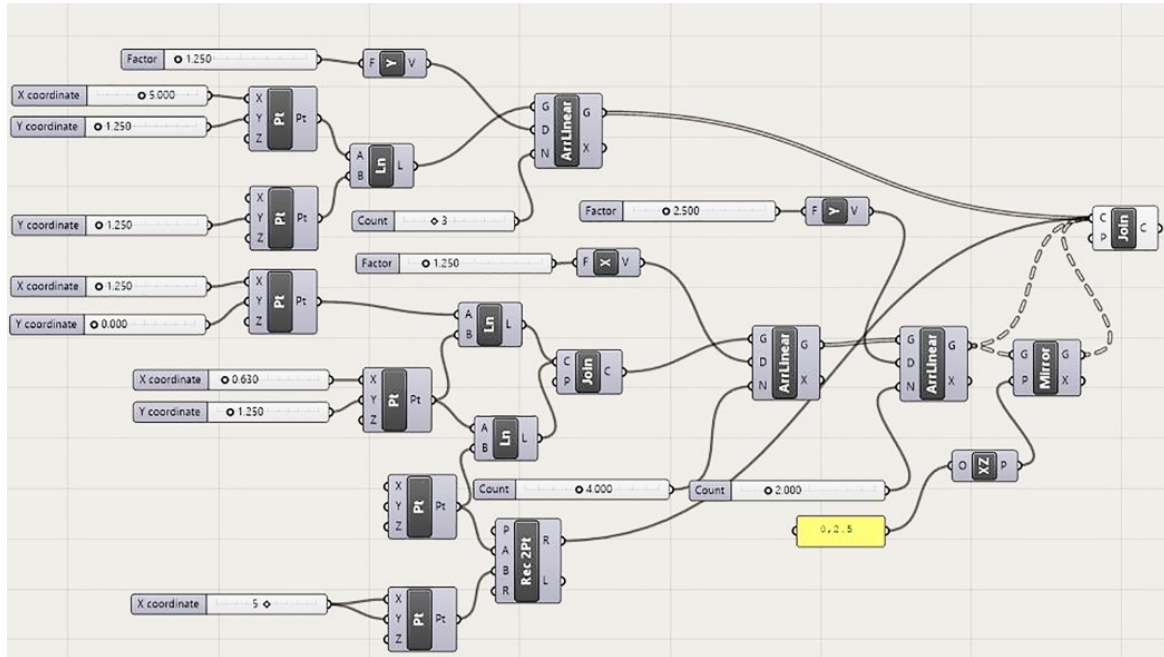
- Sing, B. and Welberry, T. R. (2006). Deformed model sets and distorted Penrose tilings. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 221(9), 621-634.
- Subramanian, C. V. and Clemmie, L. (2017). Structural systems for Large span Sports Complex structures. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research (IJRTER)*, 3(01), 39-45.
- Tang, G., Chilton, J. and Beccarelli, P. (2013, 23-27 September). *Progressive Development of Timber Gridshell Design, Analysis and Construction*. Presented at Proceedings of IASS Annual Symposia, 2013(14), 1-6.
- Tang, G. (2015). An overview of historical and contemporary concrete shells, their construction and factors in their general disappearance. *International Journal of Space Structures*, 30(1), 1-12.
- Takva, Ç. ve İlerisoy, Z. Y. (2021). Investigation of Tessellation Patterns in Long-Span Structures. *Gazi University Journal of Science Part B: Art Humanities Design and Planning*, 9(3), 235-249.
- Thalal, A., Benatia, M. J., Jali, A., Aboufadi, Y. and Elidrissi Raghni, M. A. (2011). Islamic geometric patterns constructed by craftsmen working on wood. *Symmetry: Culture and Science*, 22, 103-130.
- Tennant, R. F. (2009). Islamic tilings of the Alhambra Palace: teaching the beauty of mathematics. *Teachers, Learners, and Curriculum Journal*, 2, 1-6.
- Torki Baghbadorani, S. (2017). *Contemplative Space: Design for Generative Parametric Tessellations Applied to a Shell Structure*, Master's thesis, University of Waterloo, Ontario, 25-34.
- Toussaint, M. H. (2007). *A design tool for timber gridshells: the development of a grid generation tool*, Master's Thesis, TU Delft University, Delft, 38-62.
- Tuğrul, F. ve Sev, A. (2015, 28-30 May). *Geleceğin Sürdürülebilir Yapı Teknolojilerine Bir Bakış: Hafif Strüktürler*. Presented at 2. International Sustainable Buildings Symposium, 303-308.
- Türkçü, Ç. (2017). *Çağdaş Taşıyıcı Sistemler*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 14-17.
- Ural, A. (2020). *Matematik ve Yaşam*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 29-39.
- Urfalı, F. K. (2012). *Güncel Çelik Yapı Sistemlerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 11-26.
- Uslu, A. (2013). *Geniş Açıklıklı Yapılarda Sürdürülebilir Tasarım*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 54-66.
- Ülker, M. ve Savaş, S. (2018). AISC 360-10 ve Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Çelik Yapıların Tasarımı. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 21-32.

- Wade, D. (1982). *Geometric Patterns & Borders Geometric Patterns and Borders*. London: Wildwood House, 44-49.
- Wang, C., Abdul-Rahman, H. and Wang, H. (2010). *Delivering the Beijing national aquatics center*. Presented at Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 163(4), 170-177.
- Wells, D. and Alsan, S. (2000). *Geometrinin gizli dünyası*. Bursa: Mavi Ada Yayınevi, 27-33.
- Williams, K. and Ostwald, M. J. (Eds.). (2015). *Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future*. Basel: Birkhäuser, 445-472.
- Xiang, S., Cheng, B., Kookalani, S. and Zhao, J. (2021). An analytic approach to predict the shape and internal forces of barrel vault elastic gridshells during lifting construction. *Structures*, 29, 628-637.
- Yıldırım, M. G. (2003). *Taşıyıcı Sistem Seçimine Yönelik Çok Ölçütlü Bir Yaklaşım*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 46-58.
- Yıldız, T. (2013). *Kablo Askılı Stadyum Konsol Çatısının Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 19-27.
- Yılmaz, D. G. (2011). *Ahşap Kompozit Elemanlarla Oluşturulmuş Geniş Açıklıklı Sistemlerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 58-71.

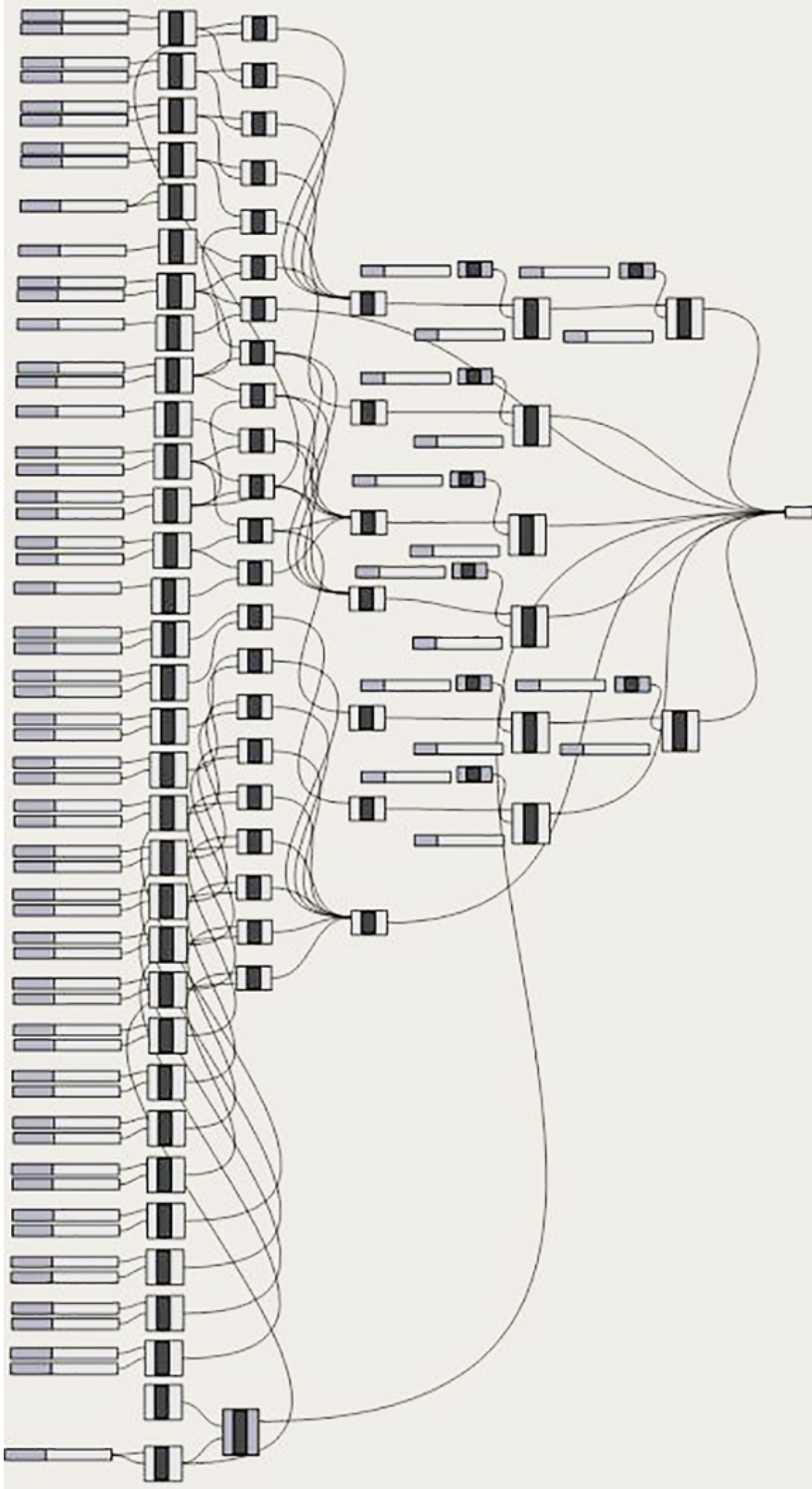


**EKLER**

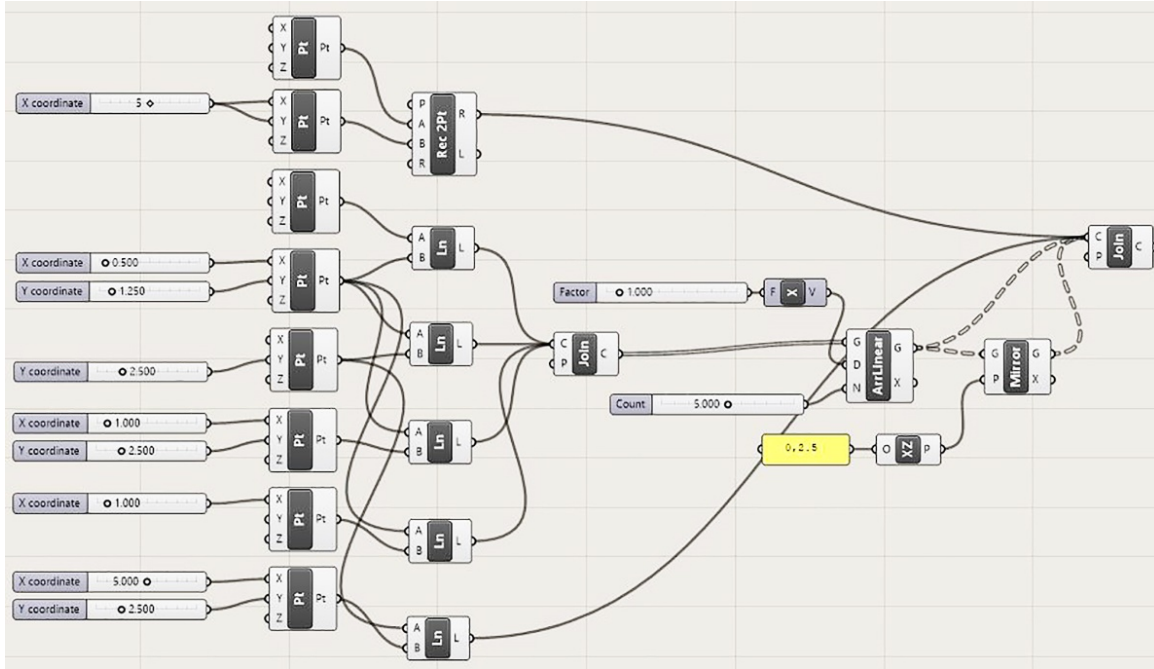
EK-1. Üçgen (3.3.3.3.3) tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



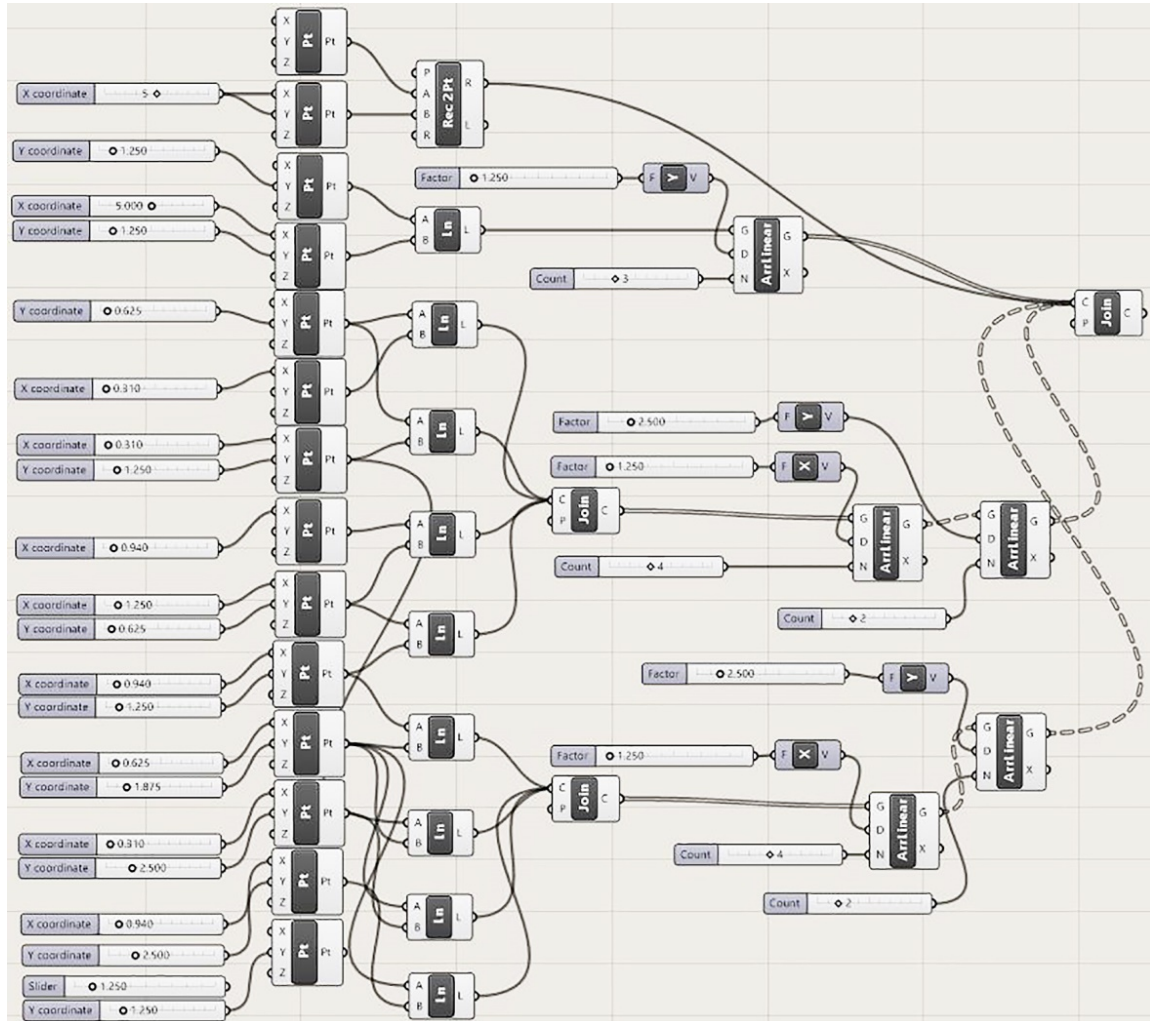
EK-2. Altıgen (6.6.6) tessellasyonlu düzlemsel ızgara struktur sisteminin Grasshopper ifadesi



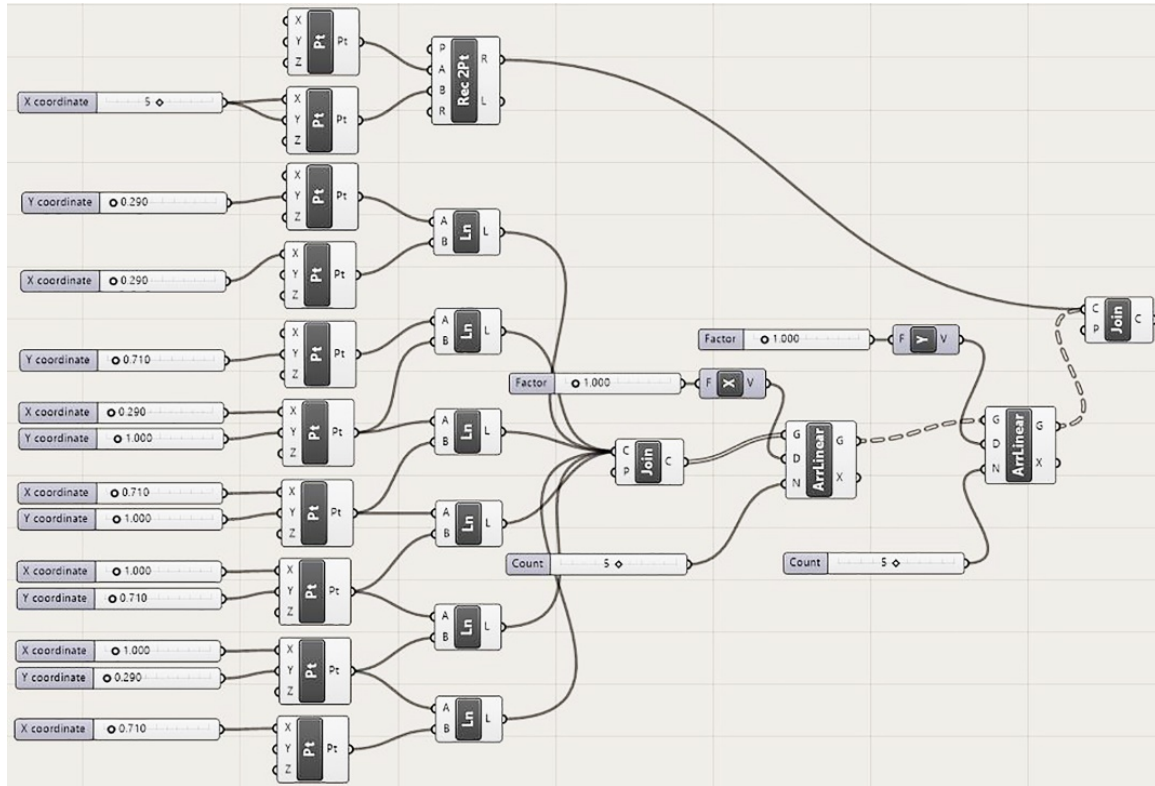
EK-3. Üçgen-dörtgen (3.4.3.4) tesselsasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



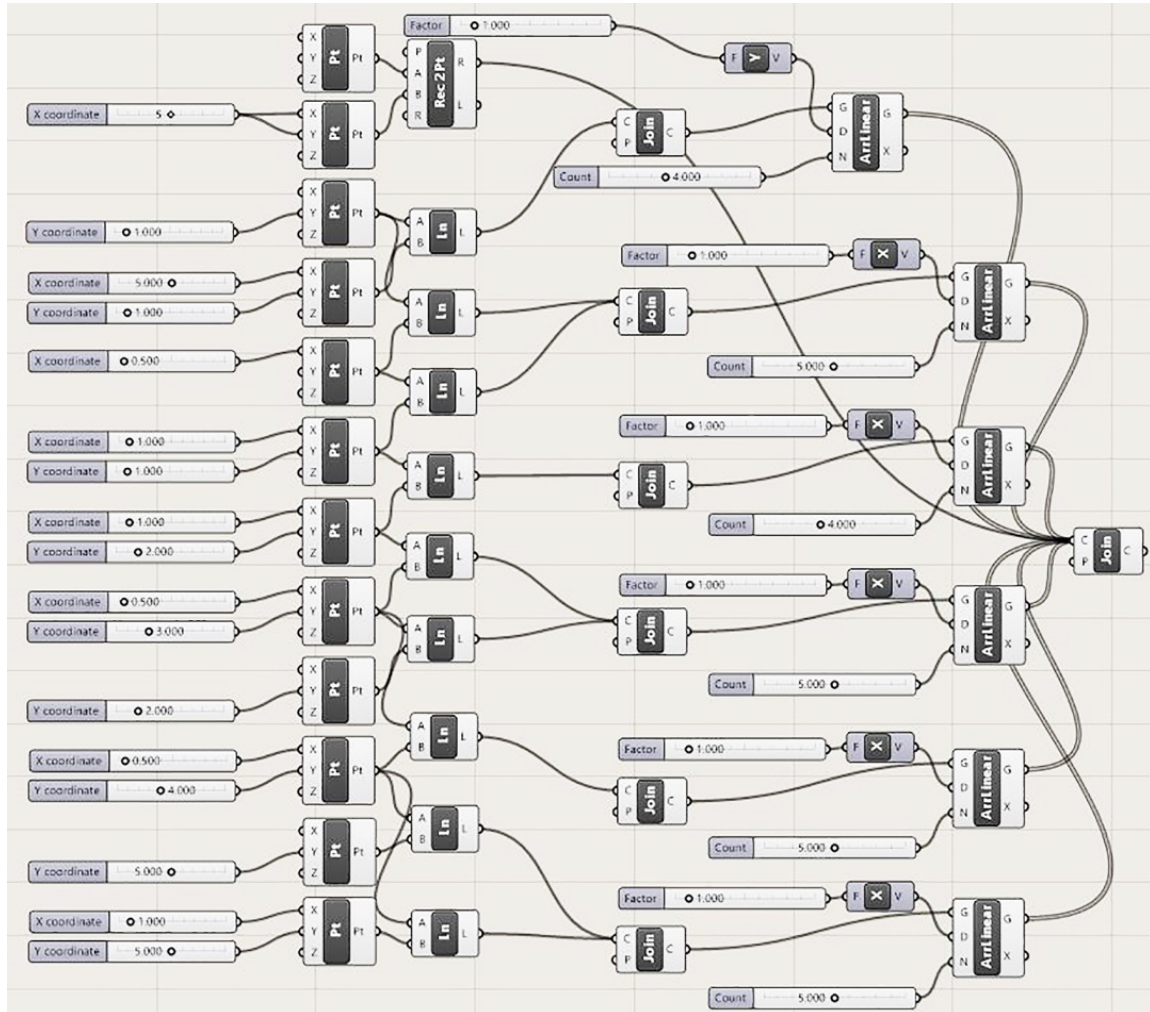
EK-4. Üçgen-altıgen (3.6.3.6) tessellasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



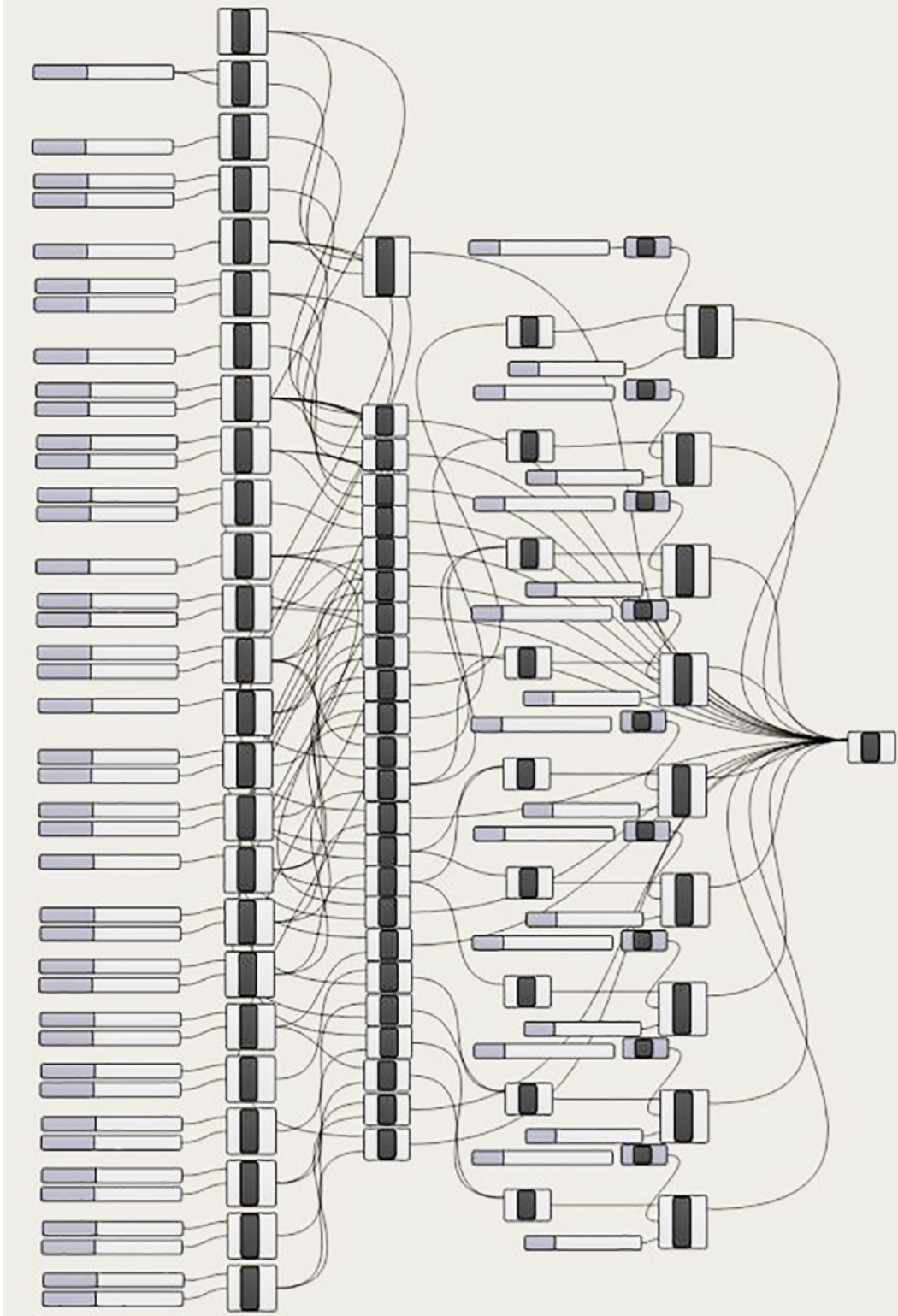
EK-5. Dörtgen-sekizgen (4.8.8) tesselsasyonlu düzlemsel ızgara struktur sisteminin Grasshopper ifadesi



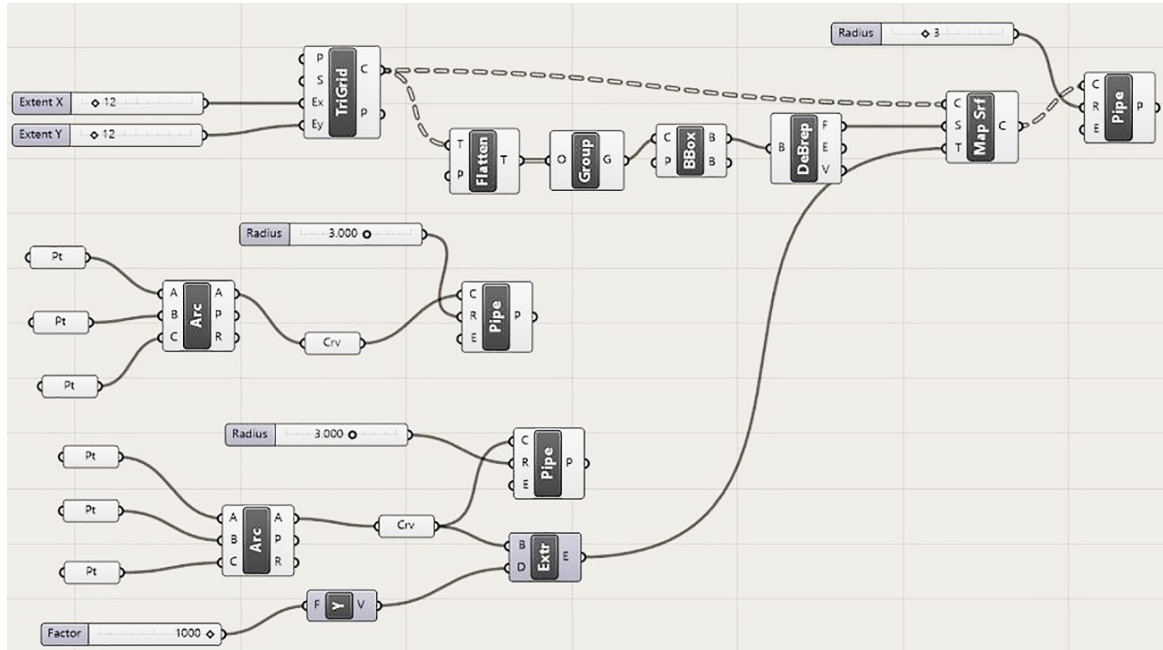
EK-6. Üçgen-dörtgen (3.3.3.4.4) tesselsasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



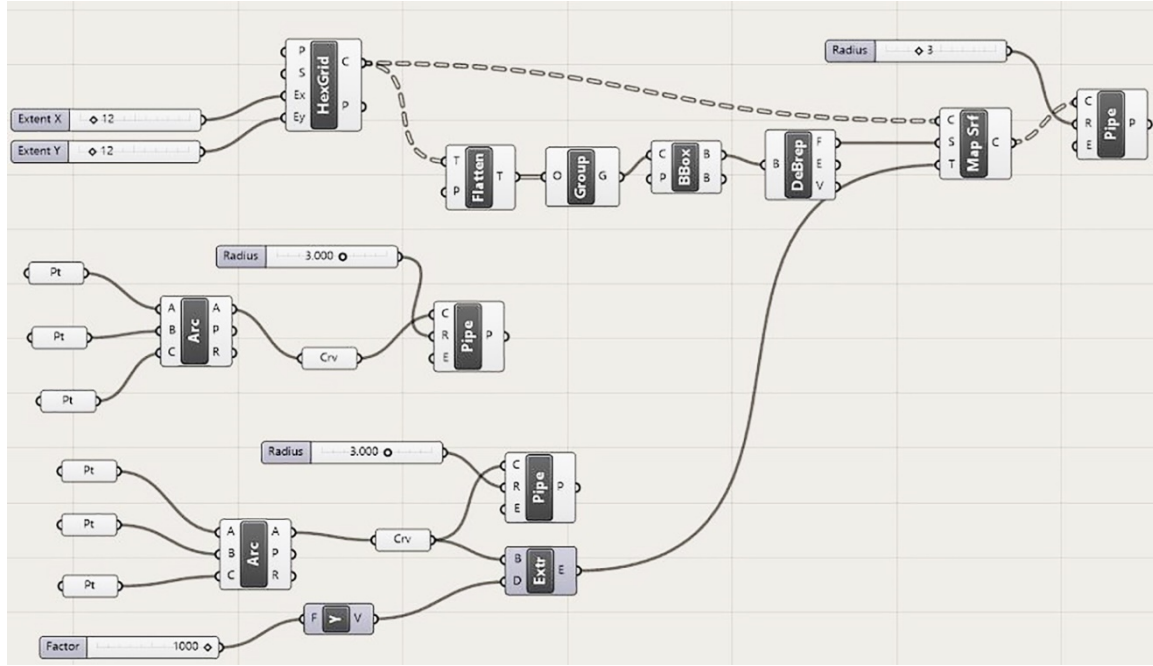
EK-7. Üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) tessellasyonlu düzlemsel ızgara struktur sisteminin Grasshopper ifadesi



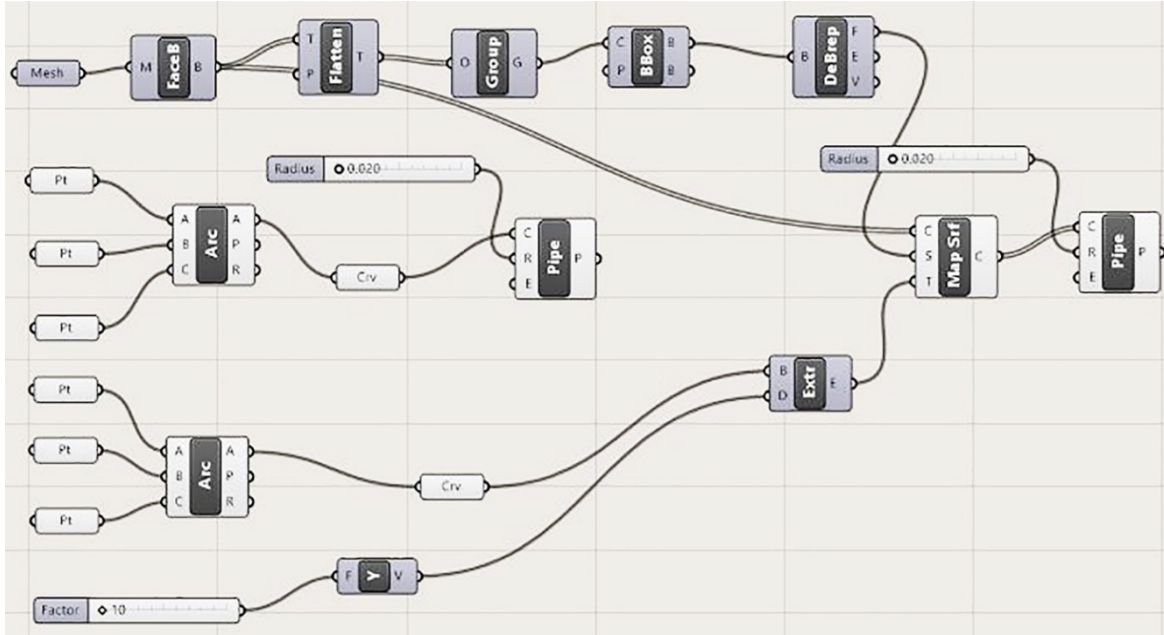
EK-8. Üçgen (3.3.3.3.3) tessellasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



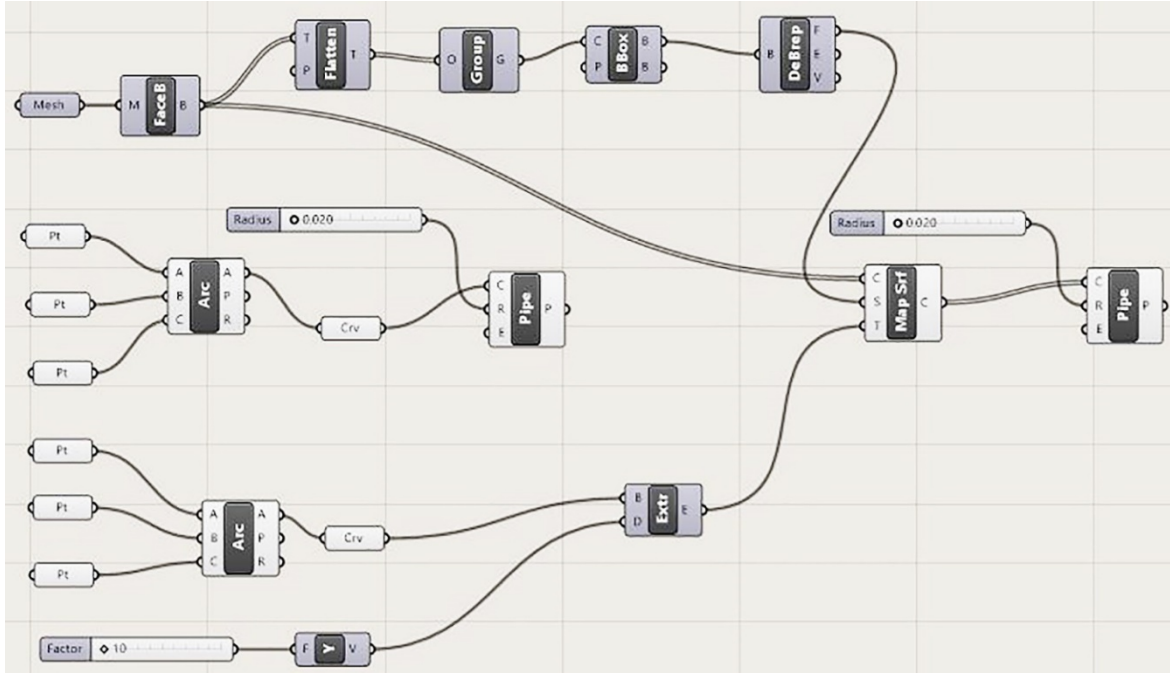
EK-9. Altıgen (6.6.6) tesselsasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



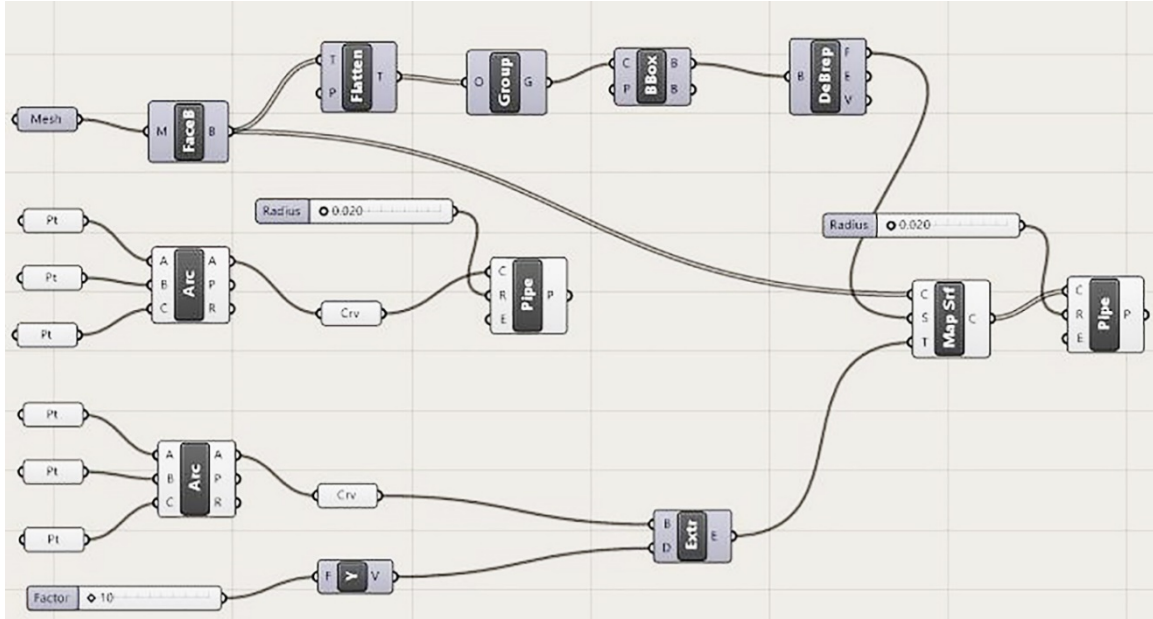
EK-10. Üçgen-dörtgen (3.4.3.4) tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



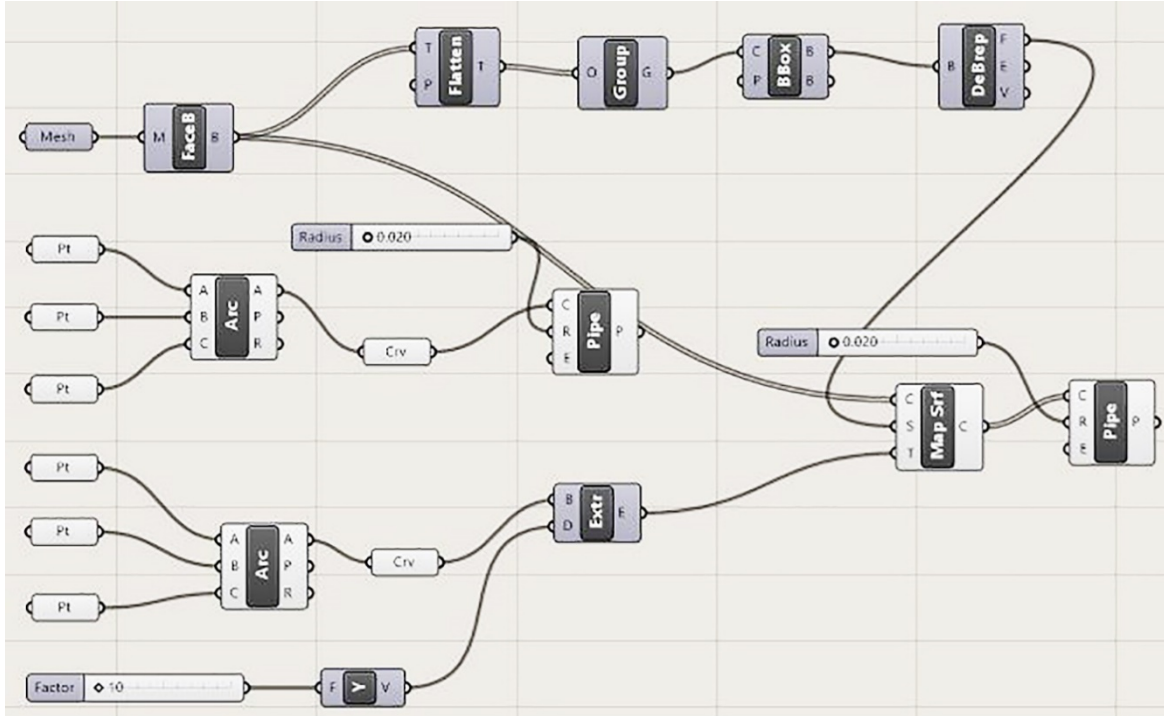
EK-11. Üçgen-altıgen (3.6.3.6) tessellasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



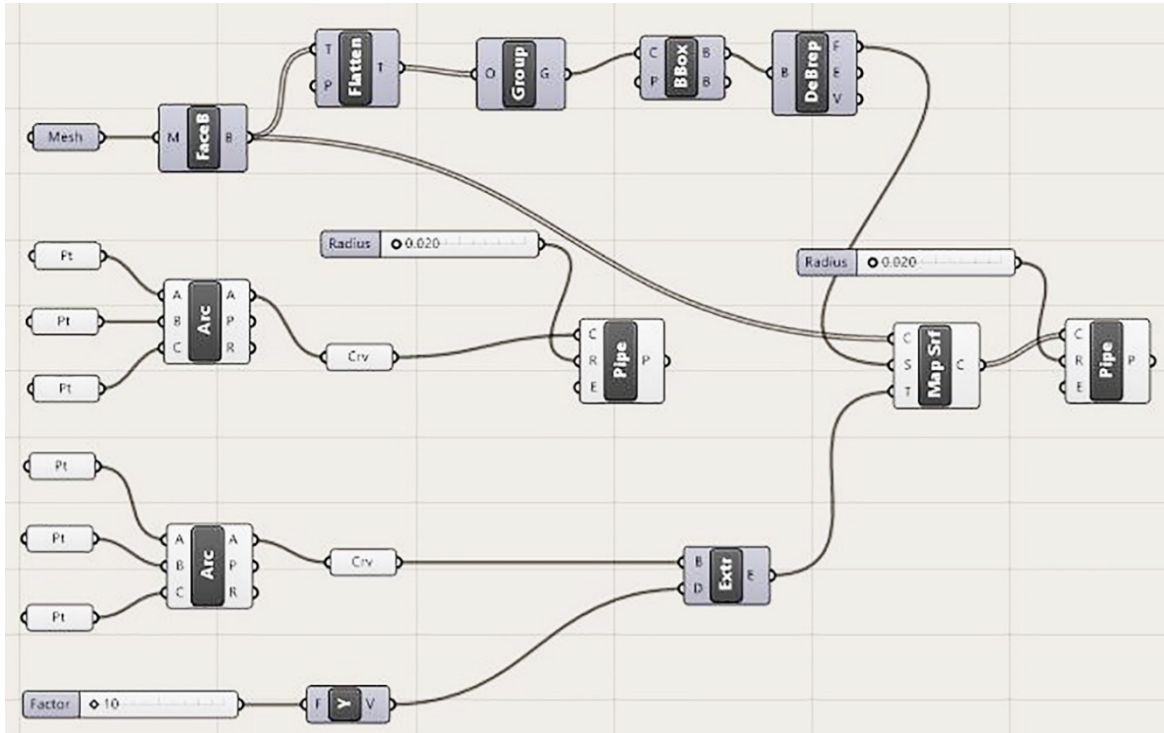
EK-12. Dörtgen-sekizgen (4.8.8) tesselsasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



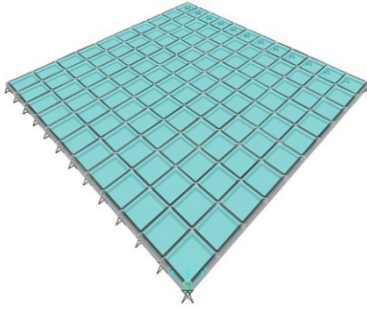
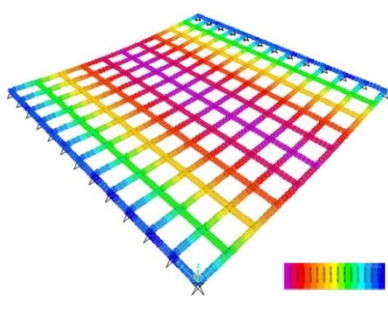
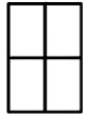
EK-13. Üçgen-dörtgen (3.3.3.4.4) tesselsasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



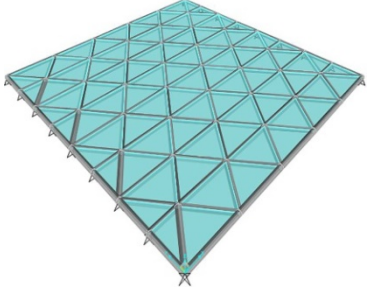
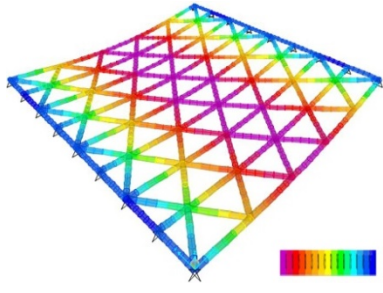
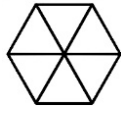
EK-14. Üçgen-altıgen (3.3.3.3.6) tesselsasyonlu tonoz ızgara kabuk strüktür sisteminin Grasshopper ifadesi



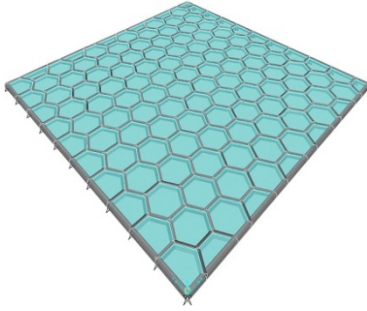
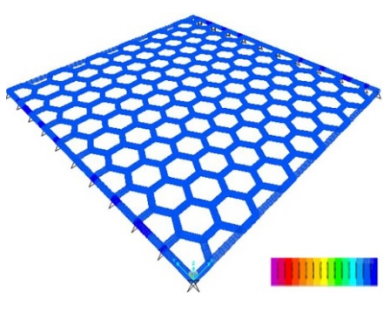
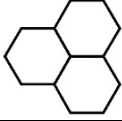
EK-15. Dikdörtgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	240		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli		
	Grid Faktör	X	Y					
		10	12					
	Tesselasyon modülü							
Matematiksel dizilim	4.4.4.4							
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	2.693		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---			
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	9.740		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	3.633			
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.422		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---			
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	4.134		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	12470.523			
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.140		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---			
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	17.893		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	4.695			
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.445		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---			
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	5.231		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	6827			

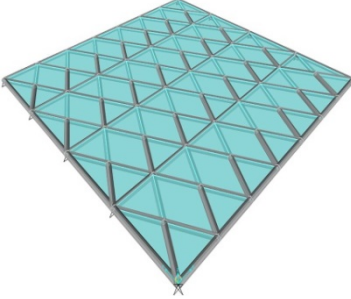
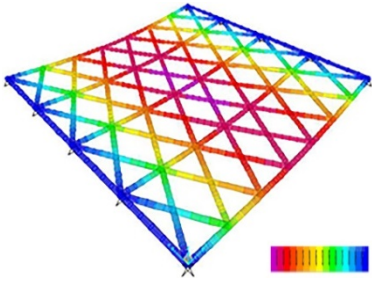

EK-16. Üçgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	238,06		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		9	8				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	3.3.3.3.3.						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	2.481		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	9.251		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	4.24		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.402		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	7.567		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	12369.878		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.161		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	10.046		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	4.229		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.465		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	7.49		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	7979.8		

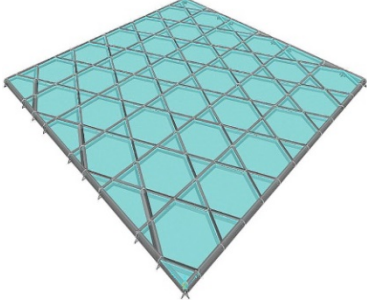
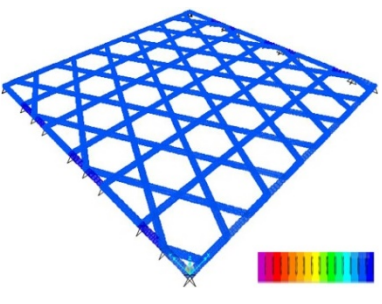
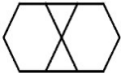
EK-17. Altıgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	231,84		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		10	9				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	6.6.6						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.099		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	13.435		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	4.513		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.414		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	5.15		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	12046.939		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.159		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	16.668		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	4.536		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.420		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	5.486		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	9715.7		

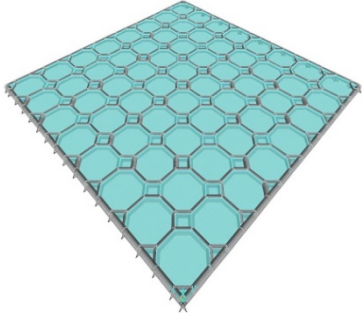
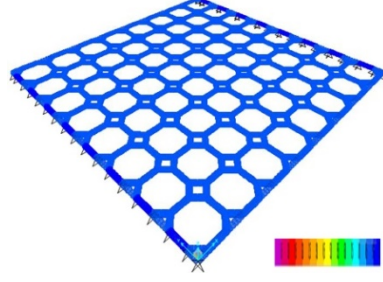
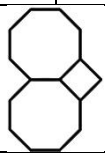
EK-18. Üçgen-dörtgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	231,25		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli		
	Grid Faktör	X	Y					
		5	4					
	Tesselasyon modülü							
Matematiksel dizilim	3.4.3.4							
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.954		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---			
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	14.373		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	6.266			
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.50		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---			
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	12.651		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	12015.634			
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.010		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---			
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	18.02		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	5.935			
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.464		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---			
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	12.423		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	8741.4			

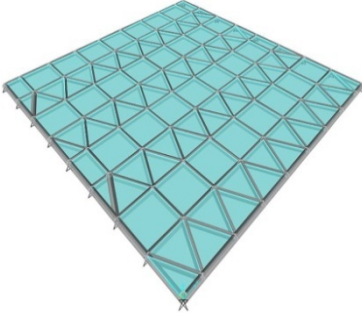
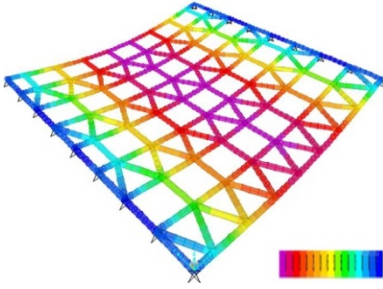
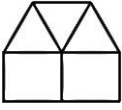
EK-19. Üçgen-altıgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	234,18		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		6	6				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	3.6.3.6						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.454		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	14.493		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	6.528		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.51		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	7.797		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	12168.487		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.136		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	14.493		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	6.523		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.515		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	7.79		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	9882.1		

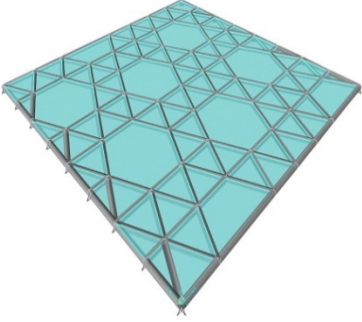
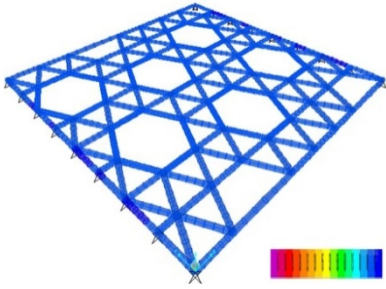
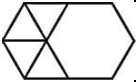
## EK-20. Dörtgen-sekizgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara struktur sisteminin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	223,14		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		8	8				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	4.8.8						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.336		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	14.327		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	5.398		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.069		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	3.199		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	11594.396		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.995		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	14.328		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	5.399		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.07		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	3.2		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	11469.3		

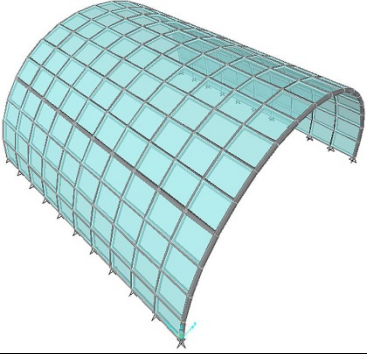
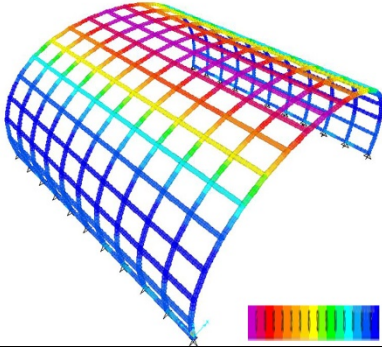

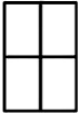
## EK-21. Üçgen-dörtgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara struktur sisteminin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	236,94		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		7	7				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	3.3.3.4.4						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.259		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	11.872		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	5.605		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.458		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	6.33		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	12311.653		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.917		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	20.571		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	5.656		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.457		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	6.935		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	9587.7		

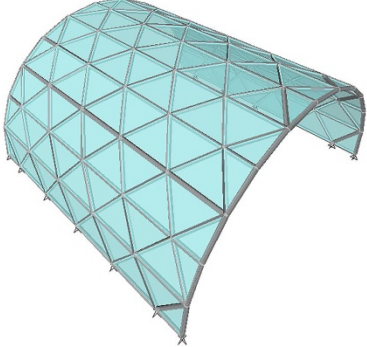
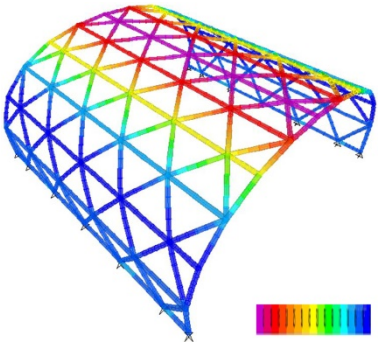
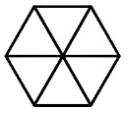
EK-22. Üçgen-altıgen tesselasyonlu düzlemsel ızgara strüktür sisteminin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	230,56		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		6	6				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	3.3.3.3.6						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.452		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	15.147		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	6.029		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.570		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	7.377		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	11980.149		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.140		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	---		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	16.303		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	6.253		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.570		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	---		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	7.757		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	9791.8		

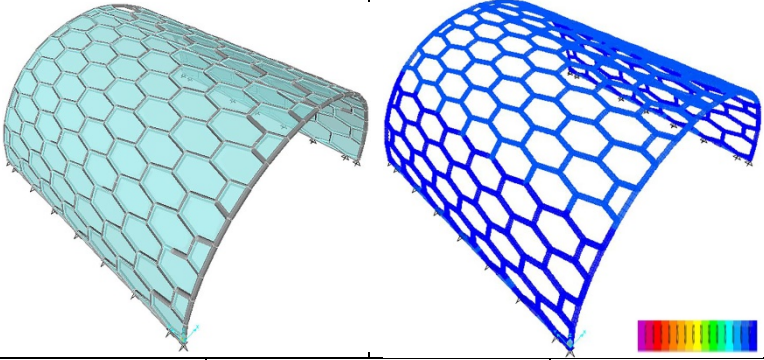
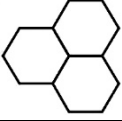
## EK-23. Dikdörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	362,6		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		18	10				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	4.4.4.4						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	1.159		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	0.32		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	1.631		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	1.765		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.90		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	2.413		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	7.666		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	4949.011		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.038		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	0.601		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	2.159		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	1.902		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.664		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	2.336		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	7.481		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	3176.5		

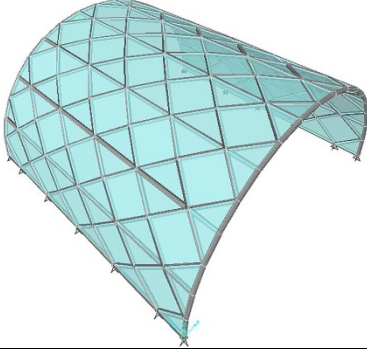
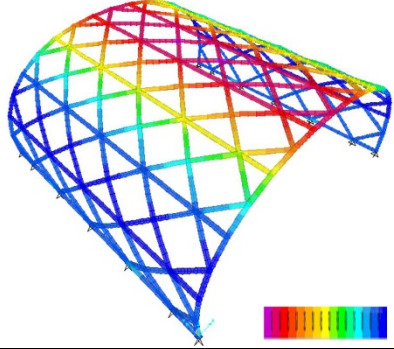

EK-24. Üçgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	358,6		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		12	9				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	3.3.3.3.3						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	1.268		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	4.029		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	1.811		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	1.855		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.95		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	6.22		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	12.351		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	4895.477		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.99		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	4.681		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	2.168		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	2.162		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.654		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	6.214		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	11.741		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	3745.9		

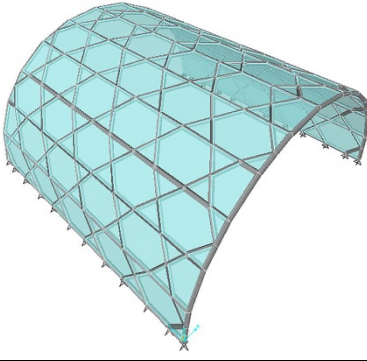
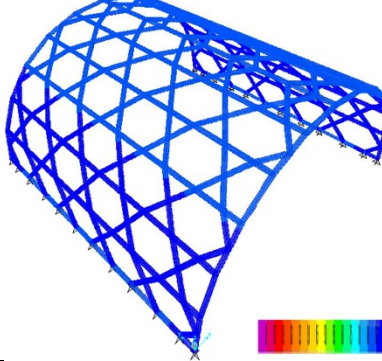
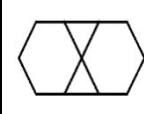
EK-25. Altıgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	353		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		20	7				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	6.6.6						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	2.011		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	4.632		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	3.324		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	4.086		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.648		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	13.007		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	16.62		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	4817.674		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.935		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	7.056		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	3.935		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	4.151		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.844		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	16.197		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	18.609		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	4368.9		

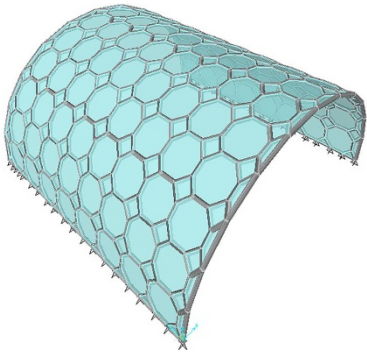
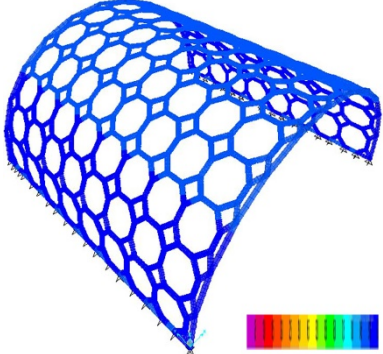
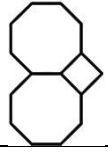
EK-26. Üçgen-dörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	370,1		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		9	4				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	3.4.3.4						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	1.563		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	8.032		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	2.158		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	2.952		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.04		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	13.929		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	18.513		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	5052.511		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.105		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	9.142		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	2.16		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	2.907		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.642		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	14.53		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	18.621		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	3634		

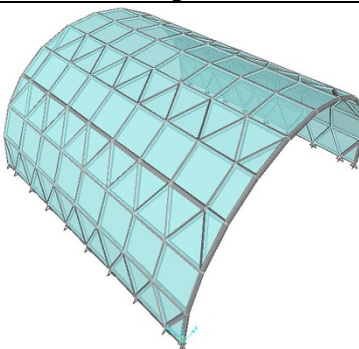
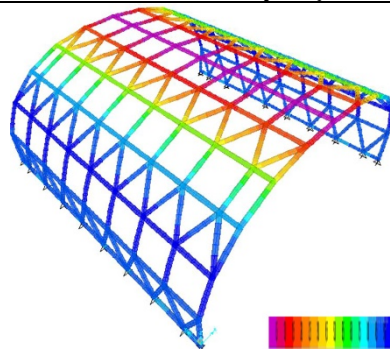

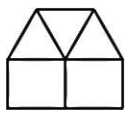
EK-27. Üçgen-altıgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	358,9		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli		
	Grid Faktör	X	Y					
		12	4					
	Tesselasyon modülü							
Matematiksel dizilim	3.6.3.6							
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	1.058		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	4.218			
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	1.860		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	2.036			
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.782		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	6.394			
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	16.11		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	4898.638			
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	4.144		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	5.988			
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	1.744		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	1.949			
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.598		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	6.356			
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	17.735		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	3785.8			

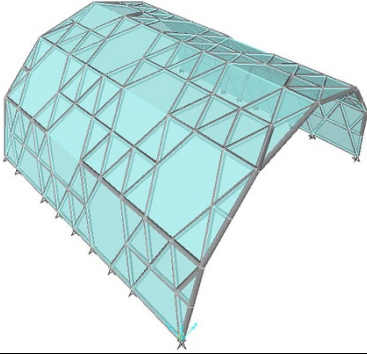
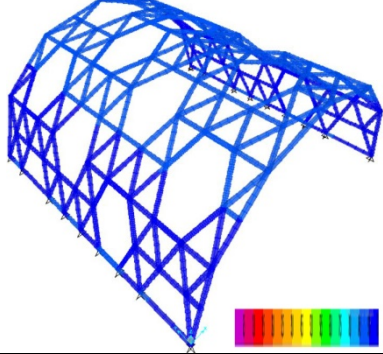
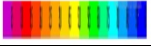
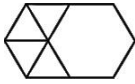
EK-28. Dörtgen-sekizgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	375		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli		
	Grid Faktör	X	Y					
		12	9					
	Tesselasyon modülü							
Matematiksel dizilim	4.8.8							
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.048		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	2.475			
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	5.278		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	5.271			
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.068		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	12.286			
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	44.196		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	5119.301			
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.792		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	4.534			
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	5.266		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	5.254			
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.089		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	12.51			
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	45.629		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	6417.1			

EK-29. Üçgen-dörtgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	357,7		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		10	8				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	3.3.3.4.4						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	0.912		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	2.444		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	1.870		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	0.969		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.855		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	2.941		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	9.24		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	4882.425		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	3.951		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	5.673		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	2.856		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	1.708		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.544		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	2.674		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	8.698		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	3239.8		

EK-30. Üçgen-altıgen tesselasyonlu tonoz ızgara kabuk sistemin analiz verileri

MODEL TANIMI	Grid Yoğunluğu (metre)	375,2		Modelin görünümü		Strüktürün deformasyon şekli	
	Grid Faktör	X	Y				
		6	4				
	Tesselasyon modülü						
Matematiksel dizilim	3.3.3.3.6						
1. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	0.659		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	2.999		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	1.281		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	1.409		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	0.707		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	4.587		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	13.146		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	5121.851		
2. ALAN ÇALIŞMASI	Maksimum yer değiştirme (santimetre)	2.981		Maksimum normal kuvvet (kilonewton)	3.069		
	Maksimum eğilme momenti (kilonewton metre)	1.303		Maksimum kesme kuvveti (kilonewton)	1.391		
	Mode 1 periyot süresi (saniye)	1.448		Yatayda oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	4.569		
	Düşeyde oluşan maksimum kuvvet (kilonewton)	13.181		Sistemin zati ağırlığı (kilogram)	3293		



*GAZİ GELECEKTİR..*