

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MODERN YAPI KABUKLARININ GEOMETRİK
TASARIMI VE UYGULAMASI

Çağatay ÖZÜER

Haziran, 2020
İZMİR

MODERN YAPI KABUKLARININ GEOMETRİK TASARIMI VE UYGULAMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilgisi Yüksek Lisans Programı



Çağatay ÖZÜER

Haziran, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÇAĞATAY ÖZÜER tarafından **DOÇ. DR. AHMET VEFA ORHON** yönetiminde hazırlanan “**MODERN YAPI KABUKLARININ GEOMETRİK TASARIMI VE UYGULAMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Doç. Dr. Ahmet Vefa ORHON

Yönetici

.....
Doç. Dr. Müjde ALTIN

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Yenal AKGÜN

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde bana çok yardımcı olan değerli hocam Doç.Dr. Ahmet Vefa ORHON'a ve hiçbir zaman desteklerini benden esirgemeyen aileme, arkadaşlarıma ve üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Çağatay ÖZÜER



MODERN YAPI KABUKLARININ GEOMETRİK TASARIMI VE UYGULAMASI

ÖZ

Hava koşulları, iklim değışiklikleri ve doğal afetlerden korunma ihtiyacı ile insanların gereksinimleri doğrultusunda ilk taşıyıcı sistemler kurgulanmıştır. Doğadaki canlılardan ve cisimlerden ilham alarak taşıyıcı sistemler tasarlayan insanoğlu, sosyal ve kültürel yapısı gereği, strüktür sistemlerini geliştirmek durumunda kalmıştır. Taşıyıcı sistemler için gelişimin karşılığı ise geniş açıklıkların, ekonomik ve hafif bir şekilde geçilmesidir. Strüktür, bir bütün oluşturan parçaların düzenlenmesidir ve bir taşıyıcı sistemde ise bu parçalar elemanlardır. Karolama ve biçim bulma yöntemleri kullanılarak strüktürü oluşturan elemanların geometrik olarak düzenlenmesi sağlanmakta, bu yöntemler sayesinde hem kullanılan malzeme azaltılmakta hem de farklı elemanların sayısını en aza indirilmektedir.

Araştırmada, karolama yöntemleri ile geometrik ağların oluşturulması ve oluşturulan ağların yapı kabukları gibi taşıyıcı sistemlerde uygulanmasında kullanılan yöntemler incelenmiştir. Ardından, biçim bulma yöntemlerinin kökeni ve gelişim süreci ele alınmıştır. Sonra, yapı kabuklarında kullanılabilecek eğri yüzeyler incelenmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın devamında ızgara kabuk sistemlerin tasarımında ve uygulamasında kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Karolama ve biçim bulma yöntemlerinin kullanıldığı bir dizi uluslararası örnek üzerinden inceleme yapılmıştır. Sonuç bölümünde, çalışma kapsamında genel değerlendirme ve incelenen örnekler arasında karşılaştırma yapılarak, ileride yapılacak araştırmalar için öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Biçim bulma, geometrik ağlar, ızgara kabuk strüktürler, karolama yöntemleri, modern yapı kabukları

GEOMETRIC DESIGN AND APPLICATION OF MODERN SHELL STRUCTURES

ABSTRACT

Weather conditions, climate changes and natural disasters have an important role in humankind's inventions and developments on structure systems as the need for shelter have triggered it. With the inspiration that has been received from nature, humans have designed, developed and improved these structure systems. For structure systems, improvement always means to cover up the wide spans in both economic and light-weighted way. Structure is an organization of parts that form a unity together. In a structure system, these parts are the components. Tessellation and form finding methods allow us to reduce the quantity of the materials and variants of components used as these methods are used in order to organize the components that form the structure geometrically.

In this research, the way to create geometric networks with tessellation methods and the methods of application of these geometric networks into the structure systems, such as shell structures, are analyzed. Afterwards, form finding methods' origin and the development processes are discussed. Then, the curved surfaces that can be used in shell structures and the methods of both design and application of the grid shells are also analyzed and addressed. Examinations are made through international case studies that used tessellation and form finding methods. In the conclusion part, general evaluation and comparison of the examples used are made and suggestions are presented for the future researches.

Keywords: Form finding, geometric networks, grid shell structures, tessellation methods, modern shell structures

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Problemin Tanımlanması	2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
1.3 Araştırma Yöntemi	3
1.4 Çalışmanın Organizasyonu.....	4
BÖLÜM İKİ - GEOMETRİK AĞLARIN TÜRETİLMESİ	5
2.1 Karolama Yöntemiyle Geometrik Ağların Türetilmesi.....	5
2.1.1 Düzgün Ağlar.....	8
2.1.2 Düzgün Çokgenli Yarı Düzgün Ağlar	9
2.1.3 Yarı Düzgün Ağlar	11
2.1.4 Düzgün Olmayan Ağlar.....	13
2.1.4 Dual Ağlar	16
2.2 Projeksiyon Yöntemleri.....	17
2.2.1 Dik Projeksiyon Yöntemi	20
2.2.2 Merkezi Projeksiyon Yöntemi	21
2.2.3 Kutupsal Projeksiyon Yöntemi.....	21
2.3 Biçim Bulma.....	22
2.3.1 Temel Yaklaşım ve Kavramlar	22
2.3.1.1 Engel'in Strüktür Sınıflandırması	24

2.3.1.2 Minimal Yüzeyler ve Minimal Ağlar	29
2.3.2 Deneysel Biçim Bulma Yöntemleri.....	34
2.3.3 Sayısal Biçim Bulma Yöntemleri	41
2.3.3.1 Malzeme Özellikleri Gerektirmeden Denge Problemini Çözen Yöntemler	41
2.3.3.2 Malzeme Özellikleri veya Yay Sabiti Eklenerek Denge Problemini Çözen Yöntemler	43

BÖLÜM ÜÇ - GEOMETRİK AĞLARIN IZGARA KABUK SİSTEMLERDE UYGULANMASI..... 45

3.1 Kabuk Yüzeylerinin Eğriliklerine Göre Sınıflandırılması	45
3.1.1 Tek Eğrilikli Kabuklar	46
3.1.2 Çift Eğrilikli Kabuklar	47
3.1.2.1 Ters Eğrilikli Kabuklar	48
3.1.2.2 Eş Eğrilikli Kabuklar	49
3.1.3 Serbest Eğrilikli Kabuklar	50
3.2 Kabuk Sistemlerin Gelişimi ve Sınıflandırılması	51
3.2.1 Kabuk Sistemlerin Gelişimi.....	52
3.2.2 İnce Kabuk ve Izgara Kabukların Farkları	54
3.2.3 Izgara Kabuk Sistemler.....	55
3.2.3.1 Gerilmesiz Izgara Kabuklar	56
3.2.3.2 Gerilmeli Izgara Kabuklar	56

BÖLÜM DÖRT - MODERN YAPI KABUKLARININ GEOMETRİK TASARIMI İLE ÜRETİLEN BİNA ÖRNEKLERİNİN İNCELENMESİ 60

4.1 Pompidou Center	61
4.2 British Museum	66
4.3 Expo 2000 Japon Pavyonu	76
4.4 Mannheim Multihalle	81
4.5 Metropol Parasol	90

4.6 Smithsonian Enstitüsü Kogod Avlusu.....	98
4.7 Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi	107
4.8 Myzeil Alışveriş Merkezi.....	114
4.9 Waitomo Ziyaretçi Merkezi Kanopisi	123
4.10 Westfield Alışveriş Merkezi	131
 BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR	139
 KAYNAKLAR	145



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kinematik ve rijit ağların gerilmesi durumundaki değişimi	6
Şekil 2.2 İki yönlü ızgaralarda sabitlenmemiş düğüm noktalarındaki döndürme ve bozulmanın ızgara boyunca yayılması	7
Şekil 2.3 Kuvvet altındaki mafsallı bir dörtgenin hareketi	8
Şekil 2.4 Kuvvet altındaki mafsallı bir üçgenin hareketi	8
Şekil 2.5 Düzgün ağ geometrileri.....	8
Şekil 2.6 Düzgün çokgenli yarı düzgün ağ karolaması 3,4,3,4,3 ağı.....	9
Şekil 2.7 Doğada bulunan Voronoi diyagramı örnekleri	13
Şekil 2.8 Descartes'in maddenin Güneş sisteminde dağılımını anlatan Voronoi diyagramı.....	14
Şekil 2.9 Voronoi diyagramı	15
Şekil 2.10 Delaunay üçgenlemesi	15
Şekil 2.11 Üç boyutlu Voronoi diyagramında çevrel çemberin merkezi.....	16
Şekil 2.12 Üç boyutlu Voronoi diyagramında dört noktadan geçen kürenin merkezi.....	16
Şekil 2.13 Düzgün üçgen ağı ve duali olan altıgen ağ birleşimi.....	17
Şekil 2.14 Kesit etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı	25
Şekil 2.15 Yüzey etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı	26
Şekil 2.16 Biçim etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı	27
Şekil 2.17 Vektör etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı.....	27
Şekil 2.18 Yükseklik etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı	28
Şekil 2.19 Sabun köpüğü ile minimal yüzeyler yaratılması deneylerinde kullanılan malzemeler, 1992 yılı Villa Stuck sergisi Münih, Almanya	30
Şekil 2.20 Spiral çerçeveli sabun köpüğü ile minimal yüzey	30
Şekil 2.21 Membaların şişirilmesinde kullanılan kalıplar, 1992 yılı Villa Stuck sergisi Münih, Almanya	31
Şekil 2.22 Sabun köpüğüne daldırılan cam plakalar arasında oluşan minimal ağ	32
Şekil 2.23 Sabun köpüğünden oluşan minimal ağın oluşma evreleri	32
Şekil 2.24 Montreal Expo 1967 Alman pavyonu çalışma maketi.....	35
Şekil 2.25 Montreal Expo 1967 Alman Pavyonu ölçüm maketi.....	35

Şekil 2.26 Stereofotogrametrik yöntemler ile asılı ağ ölçümü.....	36
Şekil 2.27 Ölçü masası yöntemi ile asılı ağ ölçümü	37
Şekil 2.28 Paralel ışık yöntemi ile asılı ağ ölçümü	38
Şekil 2.29 Kuvvetlerin ölçülmesinde kullanılan yaylar	38
Şekil 2.30 Antoni Gaudi'nin asılı zincir modeli	39
Şekil 2.31 Eero Saarinen'in Gatewayarch yapısının son parçası yerleştirilmesi, Ekim 1965.....	40
Şekil 3.1 Heinz Isler, düzlemsel eleman ile eğimli elemanın karşılaştırılması.....	45
Şekil 3.2 Silindirik kabuk.....	47
Şekil 3.3 Konik kabuk.....	47
Şekil 3.4 Düz kenarlı hiperbolik parabolit kabuk	48
Şekil 3.5 Eğri kenarlı hiperbolik parabolit kabuk	48
Şekil 3.6 Hiperbolit	49
Şekil 3.7 Eğik kesimli konoit kabuk	49
Şekil 3.8 Beşgen planlı küresel kabuk veya kubbe	50
Şekil 3.9 Torus yüzeyi ile oluşturulan kabuk.....	50
Şekil 3.10 Asılı bir ağ ve ters çevrilmesi ile üretilebilecek ızgara kabuk geometrisi .	51
Şekil 3.11 Basınca çalışan kabuk formları oluşturmasında, alçı bandajlarla yapılan deneyler 1992 yılı Villa Stuck sergisi Münih, Almanya.....	51
Şekil 3.12 Pantheon.....	52
Şekil 3.13 Kabuk kubbelerde kırılma çizgisinin yeri ve farklı bölgelerdeki gerilmeler	53
Şekil 3.14 Kırılma çizgisinin göre farklı bölgelerdeki gerilmeler	53
Şekil 3.15 Kabuk kubbelerde kullanılan basınç ve çekme çemberlerinin etkisi.....	53
Şekil 3.16 Stabilité için düğüm noktalarında ızgaranın diyagonal kablolarla desteklenmesi	54
Şekil 3.17 Jerwood gridshell çok katmanlı ızgara kabuk.....	56
Şekil 3.18 Ahşap katmanlarını birbirine kenetleyen, ancak dönmeye izin veren sistemin bağlantısı	58
Şekil 3.19 Düğüm noktası detayı	58
Şekil 3.20 Yurt	59
Şekil 4.1 Pompidou Center kesit.....	62

Şekil 4.2 Çelik çekirdek ve çekme çemberi	62
Şekil 4.3 Katmanlar ve cıvatalı birleşim	63
Şekil 4.4 Altıgen planlı karolama ve üç boyutlu strüktür modeli	63
Şekil 4.5 CNC için çizilen prefabrik elemanların modelleri.....	64
Şekil 4.6 Şantiye ve PTFE membranın yerleştirilmesi	65
Şekil 4.7 PTFE membranın yerleştirildiği kanallar	65
Şekil 4.8 Tamamlanmış yapının yarı saydam çatısı.....	65
Şekil 4.9 Gün ışığından yararlanan iklimlendirilmiş iç avlu	67
Şekil 4.10 Okuma odası etrafına yerleştirilen yeni kolonlar.....	68
Şekil 4.11 Sol tarafta dikdörtgen olarak çevreleyen duvarların kesiti sağ tarafta okuma odasının kesiti.....	69
Şekil 4.12 Eşit aralıklarla bölünen dikdörtgen ve çemberin ilk karolamaları ve devingen şekil değiştirme uygulanması sonrası	70
Şekil 4.13 Okuma odasının tam merkezde olmaması nedeniyle oluşan asimetrik kesit.	71
Şekil 4.14 Dikdörtgenin köşelerindeki sapmalar	71
Şekil 4.15 Köşelerdeki sapmalar nedeni ile çökebilecek güney cephesi	71
Şekil 4.16 Çelik panellerden kesilen düğüm noktaları.....	72
Şekil 4.17 Düğüm noktası ve sivri uçlu elemanların birleştirilmesiyle oluşan üçgen birim	73
Şekil 4.18 Üçgen birimler ile oluşturulan paneller	73
Şekil 4.19 Çubuk elemanlar, düğüm noktaları ve cam panellerin birleşimi	74
Şekil 4.20 Yapı iskeleleri ve destekler üzerinde birleştirilen paneller.....	74
Şekil 4.21 Uygulamanın üçte ikisinin tamamlanmış hali	75
Şekil 4.22 Izgara kabuğun son hali	75
Şekil 4.23 Öteleme yüzeyler ile oluşturulmuş üç tepeli pavyonun plan ve kesiti.....	77
Şekil 4.24 Kumaş bant ve kağıt tüp birleşimi	78
Şekil 4.25 Yapının kaldırılması.....	78
Şekil 4.26 Yapı katmanlarının birleşimi	79
Şekil 4.27 Membran gerildikten sonra kağıt tüp ızgara ve ahşap kemerler	80
Şekil 4.28 İki uçta bulunan kablo destekli petek örgülü karton elemanlar	80
Şekil 4.29 Yapının son hali	80

Şekil 4.30 Çok amaçlı salon ve restoranın planı	82
Şekil 4.31 Asılı zincir modeli	83
Şekil 4.32 Stereo fotogrametrik yöntemler	83
Şekil 4.33 Linkwitz tarafından bilgisayarda yapılan genel ızgara kabuk planı	84
Şekil 4.34 İki yönlü 4 katmanlı olarak yapılan ızgara	84
Şekil 4.35 Düğüm noktası detayı	85
Şekil 4.36 4.5 metre aralıklar ile gerilen 6,5 mm'lik çift çelik kablolar	85
Şekil 4.37 Çelik kablo desteklerin geçtiği ve geçmediği düğüm noktaları.....	85
Şekil 4.38 Yapının kaldırılmasında kullanılan forklift ve iskeleler, üstte yayıcılar...	86
Şekil 4.39 Yapıyı çevreleyen sınırlar boyunca, farklı bölgelerde kullanılan destekler	87
Şekil 4.40 Sırasıyla betonarme duvarlar, çift tutkal lamine ahşap kenar kirişleri, ahşap kemerler ve çift çelik kablolar.....	87
Şekil 4.41 Transparan gri kaplama.....	88
Şekil 4.42 Sonradan değiştirilen beyaz membran	88
Şekil 4.43 Izgara kabuk yapısının günümüzdeki hali	89
Şekil 4.44 Metropol Parasol üst görünüşü	91
Şekil 4.45 Kare ağ karolaması ve çelik diyagonaller	92
Şekil 4.46 Çelik diyagonalleri gösteren model	92
Şekil 4.47 Yapıyı oluşturan bölümleri gösteren kesit	93
Şekil 4.48 Yapının farklı bölümlerinde kullanılan malzemeler	93
Şekil 4.49 Beton çekirdek ve çelik profillerden yapılmış eğimli desteklerle testere dişli bağlantıları.....	93
Şekil 4.50 Müze ve zemin katta kullanılan çelik kompozit strüktürün kesiti	94
Şekil 4.51 Müze kısmında bulunan w kolonlar.....	94
Şekil 4.52 Aynı en kesite sahip elemanlar için oluşturulan kesme kalıpları.....	94
Şekil 4.53 Yapıştırılmış dişli çubuklar içeren panellerin cıvatalanarak çatal başlı bağlantı ile birleştirilmesi.....	95
Şekil 4.54 Farklı açılarda uygulanabilen esnek düğüm noktası detayları.....	96
Şekil 4.55 Çelik diyagonal kablolar için kullanılan düğüm noktası detayı.....	96
Şekil 4.56 Uygulamada kullanılan yapı iskeleleri	97
Şekil 4.57 Özel olarak üretilmiş montaj sepetleri	97

Şekil 4.58 Kogod avlusu	99
Şekil 4.59 Izgara planı.....	100
Şekil 4.60 Yüzey geometrisinin türetilmesi	100
Şekil 4.61 Mevcut yapı üzerinde yükseltilen ızgara kabuk.....	101
Şekil 4.62 V şeklindeki çentikli elemanlar	102
Şekil 4.63 Kolonlara yakınlaştıkça kalınlaşan ızgara kabuk elemanları.....	102
Şekil 4.64 Elemanların üzerinde kullanılan oluklu akustik yüzeyler.....	103
Şekil 4.65 Kolon başları.....	103
Şekil 4.66 Yağmur suyunun eğrilikli yüzey üzerinde aktırılması.....	104
Şekil 4.67 Yapıda kullanılması tercih edilen dörtgen cam paneller.....	104
Şekil 4.68 Diyagonallere göre yerleştirilen farklı açılardaki cam paneller.....	105
Şekil 4.69 Fabrikada birleştirilen elemanlar ile oluşturulan paneller	105
Şekil 4.70 Lojistik imkanların belirlediği panel boyutları	106
Şekil 4.71 Uygulamada kullanılan yapı iskeleleri ve vinçler.....	106
Şekil 4.72 Su küpü iç mekan.....	108
Şekil 4.73 Weaire Phelan geometrisi ile birleşen çokyüzlüler.....	109
Şekil 4.74 Weaire Phelan uzayından yapının boyutlarına sahip dikdörtgenler prizması kesilmesi	109
Şekil 4.75 Oluşturulan uzay kafes sistem	110
Şekil 4.76 Cephede kendini tekrarlayan hücreler	110
Şekil 4.77 Katmanların birleştirilmesi	110
Şekil 4.78 Çelik elemanlar ve kaynaklı düğüm noktaları	111
Şekil 4.79 ETFE'nin çokgen yüzeylerine uyacak şekilde üretilmesi.....	112
Şekil 4.80 Şantiyede çokgen yüzeylerine ETFE'nin yerleştirilmesi.....	112
Şekil 4.81 ETFE balonlarının şişirilerek sabit basınçta tutulmasında kullanılan sistem.....	112
Şekil 4.82 ETFE balonları arasındaki ısınan havanın kullanılması	113
Şekil 4.83 Yapının farklı bölgelerine göre değişen ETFE yüzeyinin nokta yoğunlukları.....	113
Şekil 4.84 Myzeil alışveriş merkezi üç boyutlu modeli.....	115
Şekil 4.85 İç mekanda girdabı takip eden döşemeler	115
Şekil 4.86 Cephe tarafından desteklenen girdap	117

Şekil 4.87 Yükleri zemine aktaran girdap.....	117
Şekil 4.88 Yüzeyin keskin kenarlı ilk şekli ve kenarların yumuşatılmasından sonraki hali.....	117
Şekil 4.89 Diyagonal ön cephe karolaması ile üçgen karolamanın birleşmesi.....	118
Şekil 4.90 Geometrik sınırlar ve yönlendirme çizgileri.....	119
Şekil 4.91 Düzenlemeler sonrası oluşturulan ızgara kabuğun karolaması.....	119
Şekil 4.92 Yıldız şeklindeki altı elemanlı düğüm noktaları.....	120
Şekil 4.93 Diyagonal ızgarada kullanılan düğüm noktası.....	120
Şekil 4.94 Döşemeye asılan diyagonal cephe	121
Şekil 4.95 Farklı bölgelerde kullanılan farklı kaplama malzemeleri	121
Şekil 4.96 Önceden birleştirilmiş paneller	122
Şekil 4.97 Yapı iskeleleri kullanılarak desteklenen ızgara kabuk	122
Şekil 4.98 Vaziyet planı ve ızgara kabuk yapısının yerleşimini gösteren perspektif.....	124
Şekil 4.99 Vaziyet planına Torusun yerleştirilmesi	125
Şekil 4.100 Torus yüzeyinden kesilen ızgara kabuk parçası.....	125
Şekil 4.101 Izgara kabuk planı.....	126
Şekil 4.102 Hem eğilen hem de bükülen elemanlar.....	126
Şekil 4.103 Elemanların uç uca eklenmesinde kullanılan çelik bağlantılar.....	127
Şekil 4.104 İki yönlü dört katmanlı ızgara kabuk	127
Şekil 4.105 Bazı düğüm noktalarından geçen çelik diyagonal kablolar	128
Şekil 4.106 Izgara kabuğun yapı iskeleleri kullanılarak birleştirilmesi.....	129
Şekil 4.107 ETFE'nin alüminyum desteklere yerleşimini gösteren kesit.....	129
Şekil 4.108 ETFE'nin gerilmesinde kullanılan çelik kenar kabloları	129
Şekil 4.109 ETFE balonlarının şişirilmesinde ve sabit basınçta tutulmasında kullanılan sistem.....	130
Şekil 4.110 AVM dış cephe ve ızgara kabuk bölümleri	132
Şekil 4.111 Izgara kabukların vaziyet planı	132
Şekil 4.112 Pasajları örten ızgara kabukların ilk modeli	133
Şekil 4.113 Merkezde bulunan avlu.....	133
Şekil 4.114 Dalgalardan esinlenen yüzeyin eskizi.....	134

Şekil 4.115 Ağ yönünü izlemeyen dalgalanma ve ağ yönünü izleyen 60°'lik dalgalanmanın farkı	134
Şekil 4.116 Projeksiyon yöntemi sonrası oluşturulan ızgara kabuk	135
Şekil 4.117 Düğüm noktasını oluşturan levhaların ayırık modeli.....	135
Şekil 4.118 Düğüm noktasının son geometrisinin ayarlanması	136
Şekil 4.119 Düğüm noktası ve elemanların cıvatalı birleşimi	136
Şekil 4.120 Kaynaklı düğüm noktası merkez	137
Şekil 4.121 Farklı cıvata sayısına ve enkesite sahip olan elemanlar.....	137
Şekil 4.122 Izgara kabuğun birleştirilmesi	138
Şekil 4.123 Kullanılan üçgen cam ve metal paneller	138



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Yatay, dikey ve eğrilikli bir yüzeyde karolama	6
Tablo 2.2 Düzgün çokgenli yarı düzgün ağ geometrileri.....	10
Tablo 2.3 Sabit çubuk boyu ile yarı düzgün ağ karolaması	11
Tablo 2.4 Karolama yöntemleri ile türetilebilecek yarı düzgün ağ geometrileri	12
Tablo 2.5 Voronoi diyagramının projeksiyon uygulamaları.....	18
Tablo 2.6 Voronoi diyagramının vaziyet planı ve plana uygulanması, ardından projeksiyon yöntemi ile üretilen tonoz strüktür	19
Tablo 2.7 Dik projeksiyon yöntemi	20
Tablo 2.8 Merkezi projeksiyon yöntemi	21
Tablo 2.9 Kutupsal projeksiyon yöntemi	22
Tablo 2.10 Nokta kümeleri için farklı yapılandırma uzunluklarının incelenmesi	33
Tablo 4.1 Pompidou center incelemesi	61
Tablo 4.2 British museum büyük avlu incelemesi	66
Tablo 4.3 Expo 2000 Japon pavyonu incelemesi.....	76
Tablo 4.4 Mannheim multihalle incelemesi.....	81
Tablo 4.5 Metropol Parasol incelemesi.....	90
Tablo 4.6 Smithsonian enstitüsü Kogod avlusu incelemesi.....	98
Tablo 4.7 Beijing ulusal su sporları merkezi incelemesi	107
Tablo 4.8 Myzeil alışveriş merkezi incelemesi.....	114
Tablo 4.9 Waitomo ziyaretçi merkezi kanopisi incelemesi	123
Tablo 4.10 Westfield alışveriş merkezi incelemesi.....	131
Tablo 5.1 Tez kapsamında incelenen binalar ve özellikleri	140
Tablo 5.2 Tez kapsamında incelenen binaların uygulamasında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması	141

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüz toplumunda, nüfus ile birlikte insanların gereksinimleri de artmıştır, barınma ihtiyacının yanı sıra, yapıların da bu gereksinimleri karşılayacak şekilde gelişmesi gerekmiştir. Günümüz dünyasının koşulları ise sosyal ve kültürel aktiviteler ile birçok insanın aynı anda bir yapı altında toplanmasını gerektirebilmektedir, spor salonları, yüzme havuzları, konser alanları, tiyatrolar statlar gibi yapılar bunlara en güzel örneklerdendir. Bu yapıların, gereken ihtiyaçları karşılaması için geniş açıklıklıların geçilmesi gerekmiş, bu neden ile modern taşıyıcı sistemlere olan ihtiyaç arttırmıştır. Zaman içinde oluşan ihtiyaçlara göre yapı alanları genişledikçe, geniş açıklıkları örtme ihtiyacı ortaya çıkmış, çatı oluşturma teknikleri kurgulanmıştır. Geniş açıklıkların aşılmasında ise daha az malzeme kullanılarak yapılan ekonomik ve hafif yapı tasarımları ise hedeflenen kriter haline gelmiştir. Modern taşıyıcı sistemler, özellikle büyük açıklıkları örtmeye uygun sistemlerdir. Teknolojik açıdan farklı özellikler gösteren malzemelerden üretilebilmektedirler (Türkçü, 1988).

Teknolojik gelişmeler her alanda olduğu gibi mimarlığı da etkilemiştir. Bilgisayarların ve bilgisayar destekli tasarım programlarının gelişmesi ile bilgisayarlar sunum aracı olmaktan çıkıp tasarımın bir parçası haline gelmiştir. Tasarım ve üretim konusunda bir çağır açılmış, tasarımcılara özgürlük tanıyan geometrik ağlar, strüktür tasarımlarının önemli bir etki yaratmıştır. Çeşitli hacimlerin ve formların kapatılmasında, malzeme çeşitliliğinin azaltılması, üretim ve uygulama kolaylığı sağlanması, geleneksel yöntemlere göre daha az malzeme kullanarak hafif ve etkin strüktürler oluşturulması, geniş açıklıkların geçilmesi gibi problemlerin çözümlenmesinde, biçim bulma ve karolama yöntemleri kolaylıkları da beraberinde getirmektedir.

Mimari yapıların tasarım şekli, kullanılan yapı malzemeleri, inşa şeklini ve sürecini etkilemektedir. Yapının içerdiği birimler, kullanıcıların ihtiyaçları ve yapının işlevi, farklı tasarım kararlarını gerektirmektedir. Bu kararlar doğrultusunda

ise çeşitli malzemelere ve strüktürlere ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan yenilikçi malzemeler, dış cephe kaplamaları ve strüktür seçimi, yapım aşamasında ise maliyeti etkilemektedir. Biçim bulma ve karolama yöntemleri ile üretilmiş geometriler ise farklı strüktür sistemlerinde kullanılabilmekte ve çeşitli malzeme seçenekleri ile üretilebilmektedir. Bu sayede tasarımcıya esneklik sağlanmakta bu da gelişen teknoloji ve bilgisayar destekli tasarım programları sayesinde elde edilmektedir (Casini, 2017).

Teknolojik gelişmeler ile birlikte farklı yapılar inşa edilmeye başlanmış, son elli yılda ızgara kabuklar gibi daha karmaşık strüktürler ortaya çıkmıştır. Bu modern, geniş açıklıkları aşabilen yapıların tasarımı, mimar ve mühendislerin koordinasyonlu bir şekilde çalışması, uygun formun ve karolamanın elde edilmesinde, kuvvetlerin hesaplanması temeline dayanan sistemlerle meydana getirilmiştir. Biçim bulmada kullanılan sistemler, tasarımcının üreteceği modelde yüklerin dağılımı, ağların belirli bir düzen içerisinde oluşturulması, birbiriyle ilişkilendirilmesi ve çözümlemesiyle farklı seçenekler elde edilmesini sağlamaktadır.

Mimari açıdan uygulanabilirliğine bakıldığında ise; modern yapı kabukları gibi farklı strüktür sistemlerinde, geniş bir malzeme yelpazesi ile uygulanabilmekte ve farklı eğrilikteki yüzeylere sahip strüktürlerin oluşturulmasında kullanılabilirler.

1.1 Problemin Tanımlanması

Geniş açıklıkları geçebilen strüktürlere olan ihtiyacın artması nedeniyle, teknoloji ve kullanılan malzemelerin gelişimi, mimarlar ile mühendislerin ortak çalışmaları, modern yapı kabukları gibi çağdaş taşıyıcı sistemlerin oluşmasını sağlamıştır. Modern yapı kabuklarında kullanılabilecek yüzey geometrileri ve uygulanabilecek karolamaların belirlenmesi, uygulamanın kolaylaştırılmasında ise üretim, montaj ve malzeme kullanımının kabul edilebilir seviyede tutulması gerekmektedir. Bu nedenle, modern yapı kabuklarının geometrik olarak düzenlenmesi ve uygulamasında kullanılan yöntemlerin sistematik bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda, bu çalışmada belirlenen problem; tasarım ilkelerinin ve bu ilkelerin uygulama yöntemlerinin, ızgara kabuklar gibi modern yapı kabuklarının oluşturulmasındaki etkisi ve sağlayacağı potansiyel katkıların ortaya çıkarılmasıdır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Çalışmanın amacı; modern yapı kabuklarının geometrik olarak düzenlenmesi ve uygulamasında kullanılan yöntemlerin belirlenmesi, bu yöntemlerin uygulama örnekleri üzerinden irdelenmesidir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında karolama yöntemleri ile üretilebilecek ağ geometrileri belirtilmiş ve üretilen karolamaların 3. boyuta taşınmasında kullanılabilecek yöntemler incelenmiştir. Biçim bulma yöntemleri ve gelişimi incelenerek, farklı eğriliklere sahip kabuk yüzeylerde uygulama yöntemleri incelenmiştir. Çalışmada biçim bulma ve geometrik ağların kullanıldığı modern yapı kabukları ile yapımı gerçekleştirilen bina örnekleri irdelenmiştir. Örneklerin irdelenmesi sonucu elde edilen bulguların ışığında tasarım ilkelerinin ve uygulama yöntemlerinin, etkin ve modern yapı kabuklarının oluşturulmasındaki etkisi ve sağlayabileceği potansiyel katkılar belirlenmiştir.

1.3 Araştırma Yöntemi

Bu çalışmada biçim bulma yöntemleri ve karolama yöntemleri kullanılarak oluşturulan yapı kabuklarının tasarımı ve uygulanmasına yönelik literatüre dayanan bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması sonucunda elde edilen bilgilerin ışığında biçim bulmada kullanılan yöntemler ve karolama yöntemlerinin strüktür tasarımına sağladığı potansiyel katkıların belirlenmesi amacıyla bu ilkeler kullanılarak yapılmış bina örnekleri üzerinde irdeleme yapılmıştır. Örneklerin tasarım yaklaşımları, yüzey geometrileri, kullanılan malzemeler, uygulamasında kullanılan yöntemler, modellemeler ile görselleştirilmiştir. Bunun sonucunda, çalışma kapsamında incelenen bina örneklerinin taşıyıcı sisteminde kullanılan karolamalar, yüzey geometrileri, geçilen açıklık, kullanılan eleman tipi ve boyutları, karşılaştırılarak geniş açıklıkları geçen yapı kabuklarının oluşturulmasındaki potansiyel katkılar ortaya çıkarılmıştır.

1.4 Çalışmanın Organizasyonu

Bu tez, aşağıda açıklandığı gibi beş bölüm olarak organize edilmiştir:

“Giriş” başlığı ile tanımlanan birinci bölüm çalışmayla ilgili genel bilgileri ve çalışma alanını içermektedir. Aynı zamanda problemin tanımlanması, amacı, kapsamı, yöntemi ve hedefleri yer almaktadır.

“Geometrik ağların türetilmesi” başlığıyla tanımlanan ikinci bölümde, karolama yöntemleri ile türetilen geometrik ağlar, ağ geometrilerinin üçüncü boyuta taşınmasında kullanılan yöntemler, Engel’in strüktür sınıflandırması, minimal yüzeyler, biçim bulma ve biçim bulmada kullanılan yöntemler ile ilgili kavramlar yer almaktadır.

“Geometrik ağların ızgara kabuk sistemlerde uygulanması” başlığıyla tanımlanan üçüncü bölümde karolama ve biçim bulma yöntemleri ile üretilen ağların uygulandığı kabuk yüzeyleri, kabuk sistemlerin gelişimi ve ızgara kabuk sistemlerde kullanılan farklı uygulama yöntemlerinin sınıflandırılması yer almaktadır.

“Modern yapı kabuklarının geometrik tasarımı ile üretilen bina örneklerinin incelenmesi” başlığıyla tanımlanan dördüncü bölümde, karolama ve biçim bulma yöntemleri kullanılarak oluşturulmuş strüktürlere sahip 10 adet yapı örneğini incelenmiş kullanılan yapım sistemleri, geometrileri ve malzemeleri incelenmiştir.

“Sonuçlar” başlıklı beşinci bölümde, çalışma kapsamında genel değerlendirme yapılarak sonuçlar açıklanmıştır. Gelecekte yapılacak bilimsel araştırmalar ve modern yapı kabukları uygulamaları için öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM İKİ

GEOMETRİK AĞLARIN TÜRETİLMESİ

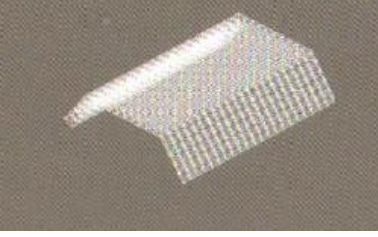
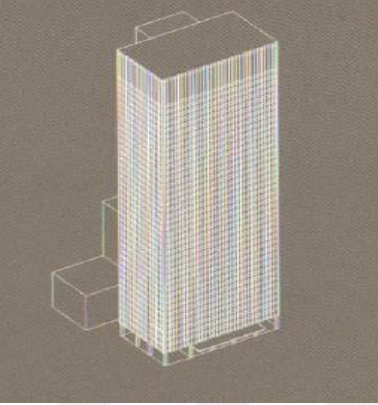
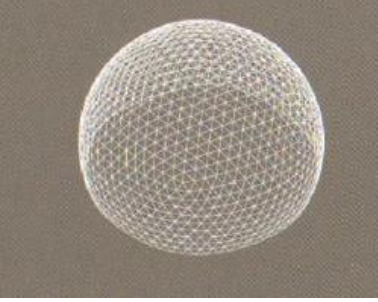
Bu bölümde karolama yöntemleri ile türetilen geometrik ağlar, bu ağ geometrilerinin üçüncü boyuta taşınmasında kullanılan yöntemler, Engel' in strüktür sınıflandırması, minimal yüzeyler, biçim bulma ve biçim bulmada kullanılan yöntemler ile ilgili kavramlar yer almaktadır.

2.1 Karolama Yöntemiyle Geometrik Ağların Türetilmesi

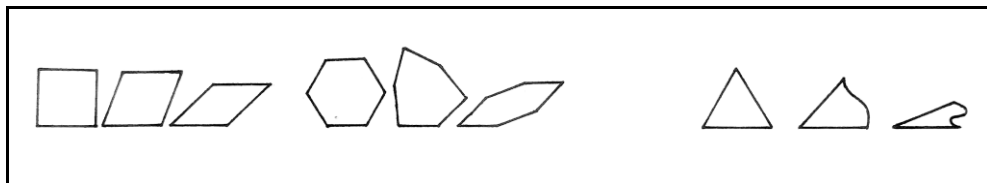
Karolama, *Tessellation*: 2 boyutlu bir düzlem yüzeyin birbiri üzerine binmeden ve boşluk bırakmadan tekrar eden geometrik şekillerle kaplanmasıdır (Orhon, 2013). Karolama yöntemleri ile üretilen geometriler sadece düzlemsel yüzeyler için değil eğimli yüzeyler veya dikeyde de uygulanabilmektedir (Tablo 2.1) (Moussavi, 2009). Uzay ve düzlem kafes, jeodezik kubbe vb. uygulamalar başta olmak üzere karolama, mimari tasarımlarda kullanılmaktadır. Strüktür tasarımında kullanılabilecek düzgün, düzgün çokgenli yarı düzgün, yarı düzgün, düzgün olmayan ağlar gibi çokgen ağ geometrisi kombinasyonlarının belirlenmesinde ve türetilmesinde kullanılır. Açık ve kenar uzunlukları belirlenen çokgen veya çokgenlerin bir düğüm noktası etrafında belirlenen sırayla dönerek birleşmesi ile oluşurlar. Çokgenler birleşirken bir biri üzerine binmez veya boşluk bırakmazlar (Orhon, 2013).

Geometrik terimler olan köşe, kenar ve çokgen yerine bir taşıyıcı sistemde bunlara karşılık gelen terimleri, strüktür tasarımına uygun olacak şekilde tanımlamak mümkündür. Köşe yerine düğüm noktası, kenar yerine çubuk veya eleman, oluşturdukları çokgenlerin alanı ise ağ gözü olarak isimlendirilebilir (Türkçü, 2009). Aynı yüzey üzerinde bulunan tüm düğüm noktalarına ise tabaka veya katman denmektedir. Bir tabaka veya katman da bulunan, düğüm noktalarını birbirine bağlayan elemanların doğrultusuna ise yön denmektedir (Türkçü, 2017).

Tablo 2.1 Yatay, dikey ve eğrilikli bir yüzeyde karolama (Moussavi, 2009)

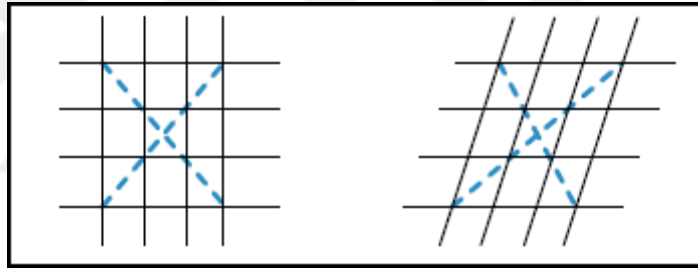
Yatay karolama	
Dikey karolama	
Eğrilikli yüzeyde karolama	

Ağ geometrileri, kinematik ve kinematik olmayan geometriler olarak ikiye ayrılır. Halat veya zincirlerden yapılmış bir ağ karolaması içerisindeki düğüm noktaları arasındaki mesafe, ağ gözündeki açının değiştirilmesi ile sabit kalıyorsa ağ geometrisi kinematiktir. Üçgen, kinematik olmayan tek formdur. Ağ gözündeki açı değiştirildiğinde, ağdaki düğümler arasındaki mesafe değişir ve şekil deforme olur. Düzlem üzerinde bulunan ağlarda ağ tamamen gerildiğinde düğüm noktaları düz bir çizgi halini alır (Şekil 2.1) (Hennicke, 1974).



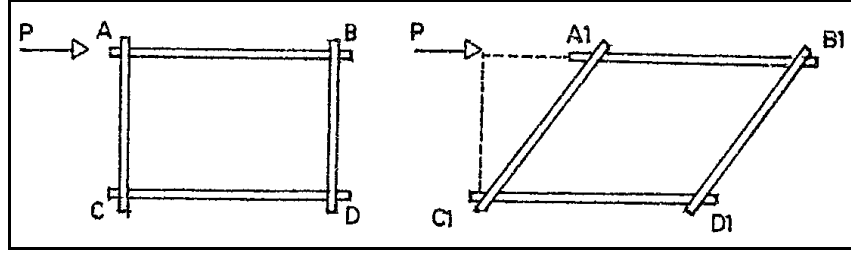
Şekil 2.1 Kinematik ve rijit ağların gerilmesi durumundaki değişimi (Hennicke, 1974)

Düğüm noktasından geçen kuvvetlerin yönüne göre 2 yönlü ve 3 yönlü ızgara karolamaları yapılmaktadır. 2 yönlü karolamalar kinematik (Şekil 2.2) yani daha esnek ve imalat, kurulum aşamaları daha kolaydır ve daha basit düğüm noktalarına sahiptirler, kablo sistemlerde bu neden ile tercih edilirler. 3 yönlü karolamalardan biri olan üçgen ızgaralar ise statik bakımından daha olumludur. Üçgenin rijitliği sebebi ile genellikle, üçgen karolamalara sahip ızgara kabukların elemanları önce parçalar halinde birleştirilir ve paneller oluşturulur. Daha sonra oluşan paneller kaldırılıp diğer paneller ile birleştirilir, üçgen modüllerinin rijitliği sebebi ile bütün düğümler birleştirildikten sonra gerilmeli ızgaranın bükülüp form kazandırılması mümkün olmamaktadır (Türkçü, 2017). 2 yönlü karolamalar ile yapılan strüktürler 3 yönlü karolamalara sahip olanlardan daha hafiftir, bunun nedeni ise 2 yönlü bir karolamada bir düğüm noktasında 4 eleman birleşirken, 3 yönlü karolamada bir düğüm noktasında 6 adet elemanın birleşmesidir.

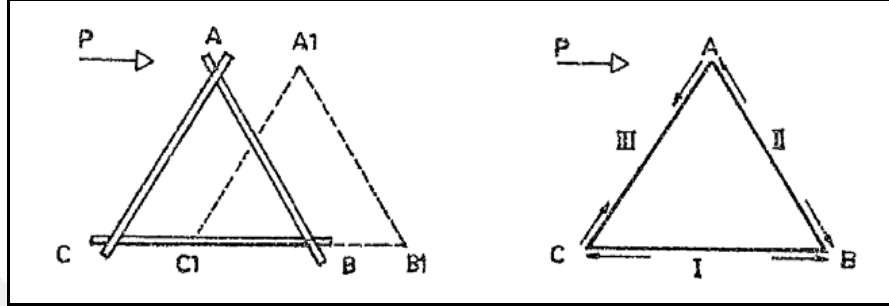


Şekil 2.2 İki yönlü ızgaralarda sabitlenmemiş düğüm noktalarındaki döndürme ve bozulmanın ızgara boyunca yayılması (Adrianssens, Block, Veenendaal ve Williams, 2014)

Üçgen karolamalar uzay kafes strüktürlerde de kullanılmaktadır, bunun nedeni üçgenin kararlı bir geometrik biçime sahip olmasıdır, yani şekil değiştirip deforme olması daha zordur. Örneğin düğüm noktaları mafsallı olan bir üçgen denge durumunda olmasına rağmen, dörtgen takviyeler ile birlikte stabil duruma gelebilmektedir. Uygulanan bir kuvvet karşısında dörtgen deforme olacak ve şekil değiştirecektir (Şekil 2.3). Üçgene uygulanan bir kuvvette ise üçgen şeklini koruyacaktır (Şekil 2.4) (Bayülgen, 1993).



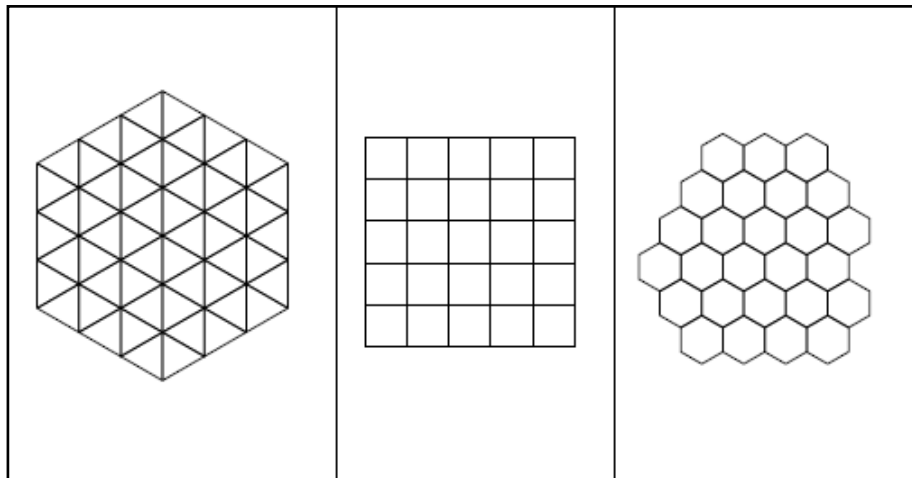
Şekil 2.3 Kuvvet altındaki mafsallı bir dörtgenin hareketi (Bayülgen, 1993)



Şekil 2.4 Kuvvet altındaki mafsallı bir üçgenin hareketi (Bayülgen, 1993)

2.1.1 Düzgün Ağlar

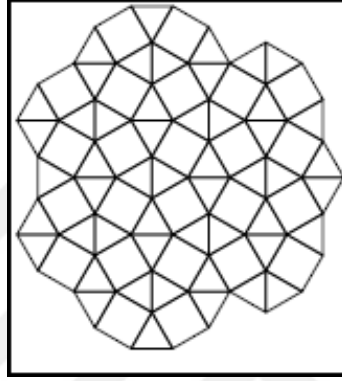
Tek bir düzgün çokgenden türetilen yani çubuk, düğüm noktaları ve ağ gözleri eşit olan, tek tip çokgenin tekrarı ile bir düzlemin karolamasından elde edilen ağlara düzgün ağlar denmektedir. 3 adet düzgün ağ bulunmaktadır. Bunlar eşkenar üçgen, kare ve düzgün altıgen ağlardır (Şekil 2.5) (Türkçü, 2017).



Şekil 2.5 Düzgün ağ geometrileri (Orhon, 2013)

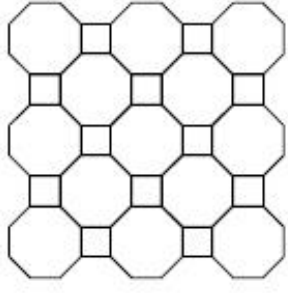
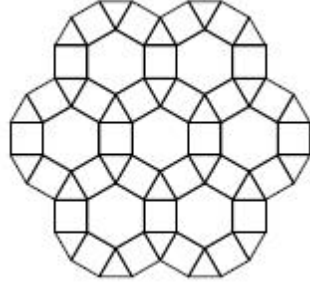
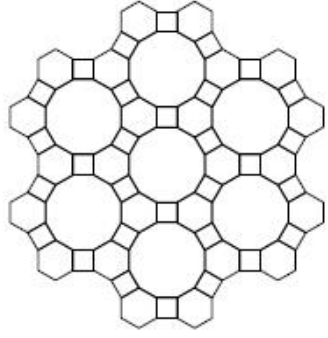
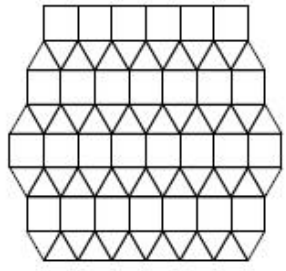
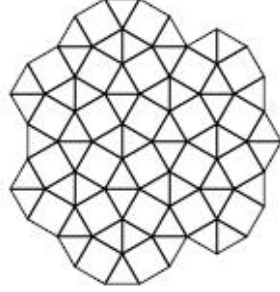
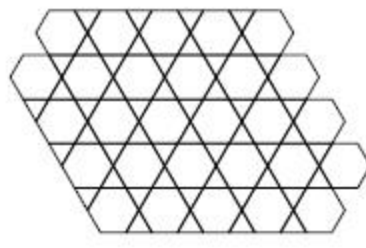
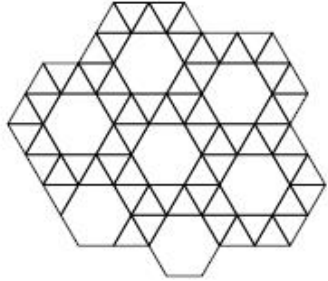
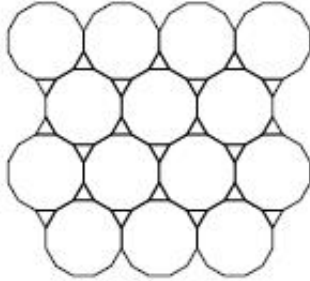
2.1.2 Düzgün Çokgenli Yarı Düzgün Ağlar

Bir düğüm noktasında birkaç farklı düzgün çokgenin birleşmesiyle türeyen ağlardır. Düğüm noktaları eşit açılı ve çubuk boyları eşittir ancak ağ gözleri farklı alanlara sahiptir. Bir düğüm noktasında birleşen düzgün çokgenlerin, birleşme sırası ile tanımlanabilirler (Tablo 2.2). Eşkenar üçgen ve karelerden oluşan şekildeki (Şekil 2.6) düzgün çokgenli yarı düzgün ağ ise örneğini şu biçimde tanımlanır 3,4,3,4,3.



Şekil 2.6 Düzgün çokgenli yarı düzgün ağ karolaması 3,4,3,4,3 ağı (Orhon, 2013)

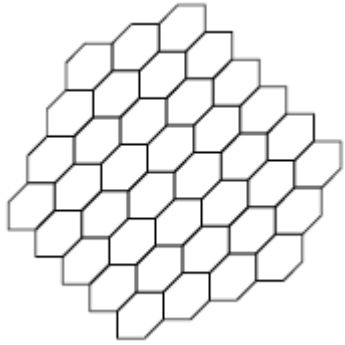
Tablo 2.2 Düzgün çokgenli yarı düzgün ağ geometrileri (Orhon, 2013)

	
4,8,8	3,4,6,4
	
4,6,12	3,3,3,4,4
	
3,4,3,4,3	6,3,6,3
	
6,3,3,3,3	3,12,12

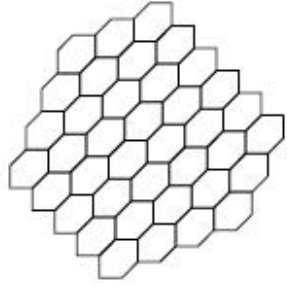
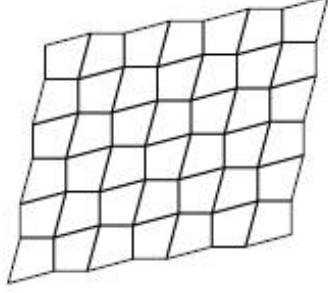
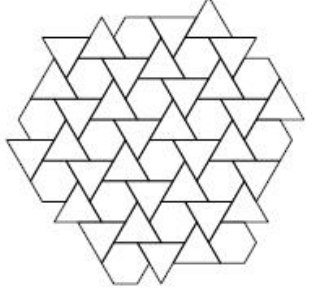
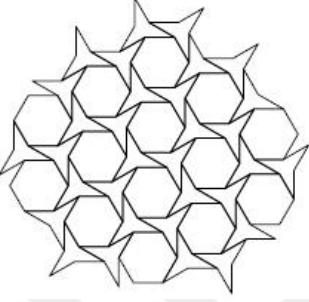
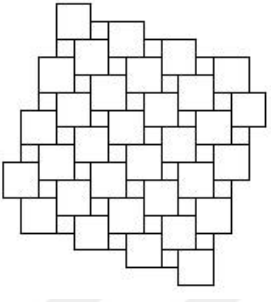
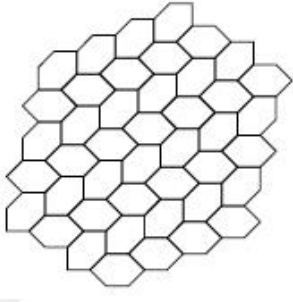
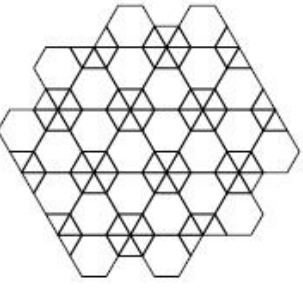
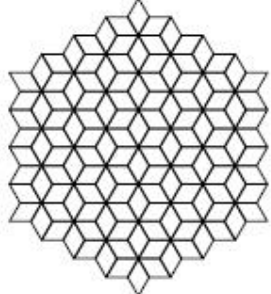
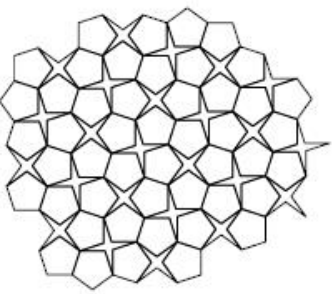
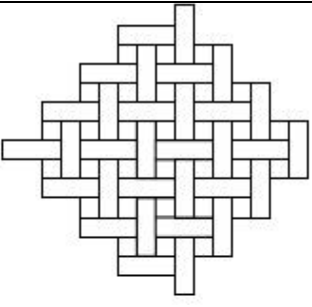
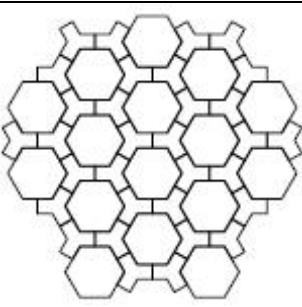
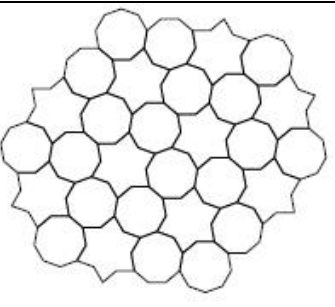
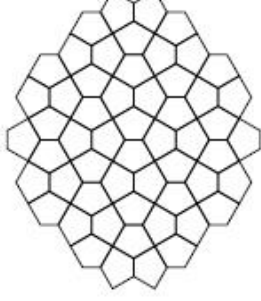
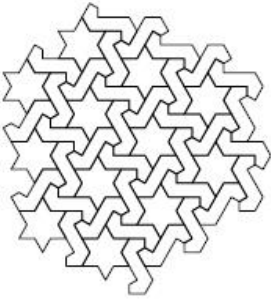
2.1.3 Yarı Düzgün Ağlar

Bir düğüm noktasında bir veya birkaç farklı düzgün olmayan çokgenin birleşmesiyle meydana gelen ağlardır. Karolamayı oluşturan çokgenlerin düğüm noktaları farklı açıdır, yani iç açıları eşit olmayan çokgenlerden meydana gelirler. Çubuk boyları ise eşittir ve birkaç çokgeniden meydana gelen karolamalarda ağ gözleri farklı alanlara sahiptir. Bir düğüm noktasında birleşen çokgenlerin, birleşme sırası ile tanımlanabilirler. Ancak tanımlanırken çubuk elemanların arasındaki açıların, yani düğüm noktalarındaki açıların da tanımlanması gerekmektedir. Örneğin tek bir düzgün olmayan çokgeniden meydana gelen, çubuk boyları eşit ancak düğüm noktaları farklı açılara sahip olan yarı düzgün ağı şu şekilde tanımlayabiliriz (Tablo 2.3). Çubuk boylarının eşit olması nedeni ile sadece düğüm noktalarında meydana gelen iç açıların sırası ile “,” yazılması ile tanımlama yapılmakta, bir düğüm noktasında birleşen çokgenler ise bir biri ile “+” ile ayrılmaktadır (Orhon, 2013) bu örnekte bir düğüm noktasında 3 adet altıgen birleşmektedir. Yarı düzgün ağlardan yararlanılarak türetilebilecek birçok karolama örneği bulunmaktadır (Tablo 2.4).

Tablo 2.3 Sabit çubuk boyu ile yarı düzgün ağ karolaması (Orhon, 2013)

90, 135, 135, 90, 135, 135 + 135, 90, 135, 135, 90, 135 +135, 135, 90, 135, 135, 90	
(2.1)	

Tablo 2.4 Karolama yöntemleri ile türetilebilecek yarı düzgün ağ geometrileri (Orhon, 2013)

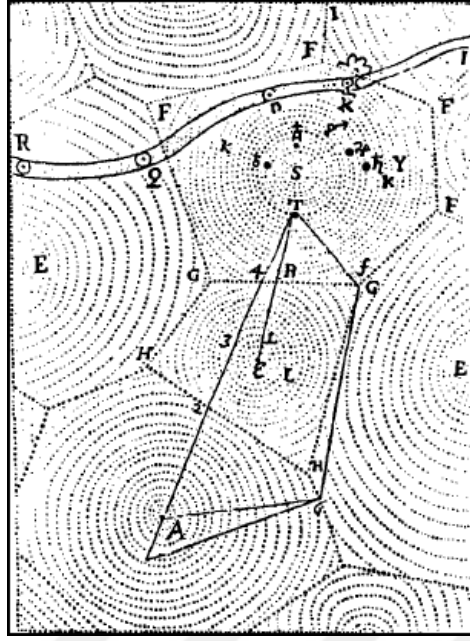
		
		
		
		
		

2.1.4 Düzgün Olmayan Ağlar

Düzgün olmayan ağ örneklerinden en yaygın olarak kullanılanlardan birisi olan Voronoi diyagramına, benzer yapılar doğada da gözlemlenmektedir (Şekil 2.7). Birçok alanda yaygın olarak kullanılan Voronoi diyagramları mimaride de yaygın olarak kullanılmaktadır. Voronoi diyagramının ilk kullanım örneklerinden biri ise 17. yüzyılda filozof Descartes tarafından olmuştur. Maddenin güneş sisteminde dağılımını açıklamak için Descartes, Voronoi diyagramlarından yararlanmıştır (Şekil 2.8) (Okabe, Boots, Sugihara ve Chiu, 2000). Hesaplamalı geometri araştırma alanında, Voronoi diyagramlarının hesaplanması için etkin algoritmalar geliştirilmiştir.



Şekil 2.7 Doğada bulunan Voronoi diyagramı örnekleri (D'Agostino 2019)

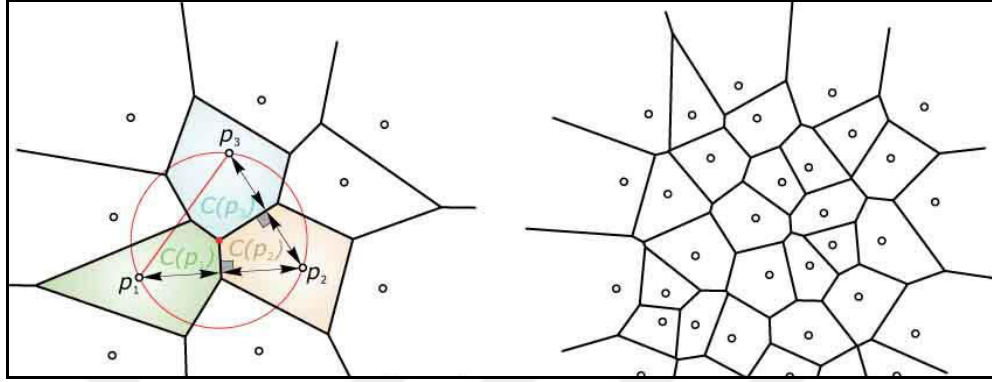


Şekil 2.8 Descartes'in maddenin Güneş sisteminde dağılımını anlatan Voronoi diyagramı (Okabe ve diğer., 2000)

İki boyutlu düzlem üzerindeki bir dizi noktanın, üçgenlerin köşelerine denk gelen üçgenlemenin hesaplanması gerektiğinde, düzlemin ilk başta en yakın komşu bölgelerine ayrılmasının daha verimli bir yöntem olduğu ortaya çıkmaktadır. Üçgenleme ise belli sayıdaki noktanın konumunu kesin olarak tespit edebilmek için, bu noktaları tepe noktası olarak kabul ederek alanı üçgenlere bölmek olarak tanımlanmaktadır. Voronoi diyagramı, Öklid düzlemi üzerinde bir biri ile çakışmayan, en az iki veya daha fazla sonlu sayıdaki (P_n) noktalar kümesinin, üzerinde bulunduğu düzlem alanlarını bölerken, alanların kendilerine en yakın nokta ile ilişkilendirilmesidir (Okabe ve diğer., 2000).

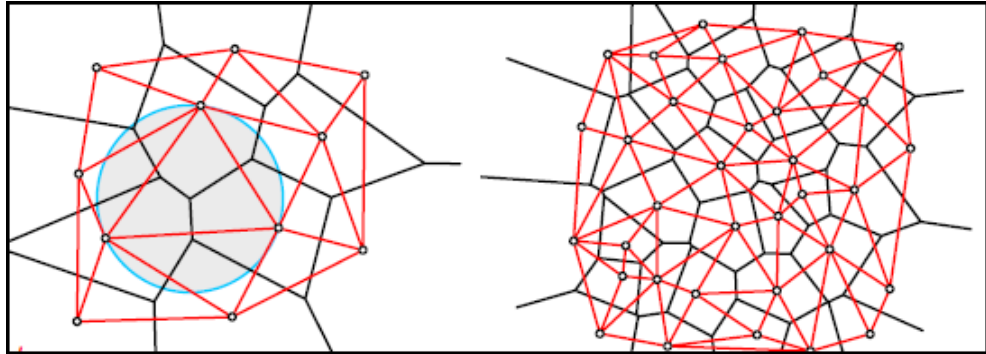
Örneğin bir düzlem üzerindeki P_1 , P_2 ve P_3 noktaları için, en yakın komşu bölgeleri $C(P_1)$, $C(P_2)$ ve $C(P_3)$ voronoi hücrelerini olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.9). Bir voronoi hücresi belirlenen bir P noktası için düzlem üzerindeki diğer P noktalarından kendine daha yakın olan düzlemdeki alanı kapsamaktadır. Yani birbirine komşu olan iki nokta arasındaki mesafe hücrelere ayrılırken, iki noktaya da eş uzaklıkta olan bir kenar ile hücreler bölünmektedir. Birbirine komşu olan üç hücrenin ortak bir tepe noktası *vertex* bulunmaktadır, bu tepe noktası üç (veya verilen Voronoi diyagramının kısıtlamalarına bağlı olarak daha fazlada olabilir) Voronoi

hücresinin kenarlarının kesişimidir. Aşağıdaki örnek için tepe noktası, düzlem üzerinde bulunan P_1 , P_2 ve P_3 noktalarından meydana gelen bir üçgenin, çevrel çemberinin ise merkezidir (Pottmann, Asperl, Hofer ve Kilian, 2007).



Şekil 2.9 Voronoi diyagramı (Pottmann ve diğer., 2007)

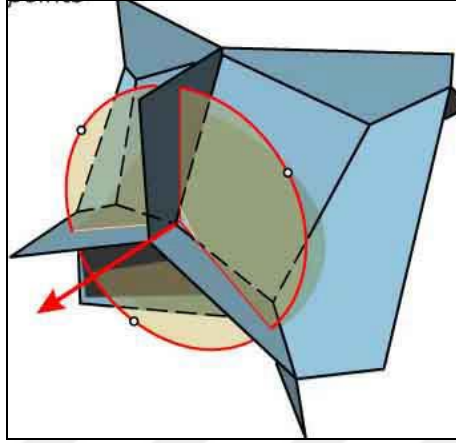
Delaunay üçgenlemesi ise Voronoi hücrelerini meydana getirilmesinde kullanılan P_1 , P_2 ve P_3 noktalarının düz çizgiler ile birleştirilmesi ile meydana gelen karolamadır (Şekil 2.10). Dolayısı ile bir Voronoi ağının dual ağı, aynı noktaları kullanan Delaunay ağı olmaktadır (Pottmann ve diğer., 2007).



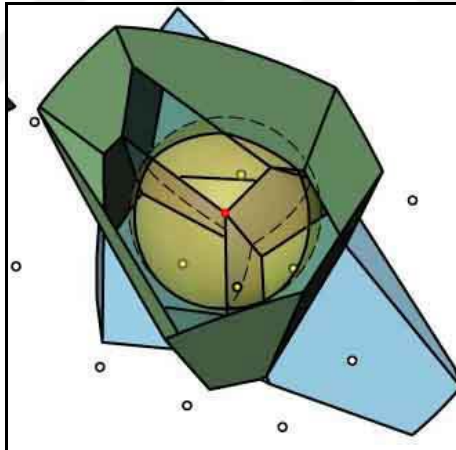
Şekil 2.10 Delaunay üçgenlemesi (Pottmann ve diğer., 2007)

Voronoi diyagramlarından oluşturulan bir taşıyıcı sistem geometrisi projeksiyon yöntemleri ile 3. Boyuta aktarılabileceği gibi Voronoi diyagramı 3 boyutlu olarak ta oluşturulabilir. 3 boyutlu bir Voronoi diyagramının tanımı 2 boyutlu olan ile benzerdir. Düzlem yerine uzayda bulunan P_1 , P_2 ve P_3 noktaları için, en yakın komşu bölgeleri $C(P_1)$, $C(P_2)$ ve $C(P_3)$ konveks çok yüzlülerdir. Üç boyutlu hücrelerin kenarları iki yönlüdür yani bir birine komşu olan iki hücrenin ortak yüzeylerini

oluştururlar. Kenarlar ise çevrel çemberin merkezinde yer alan 3 adet iki yönlü yüzeyin kesişim noktasıdır (Şekil 2.11), tepe noktaları ise dört noktadan da geçen bir kürenin merkezinde yer alır (Şekil 2.12) (Pottmann ve diğer., 2007).



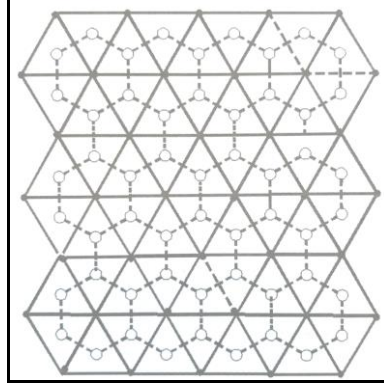
Şekil 2.11 Üç boyutlu Voronoi diyagramında çevrel çemberin merkezi (Pottmann ve diğer., 2007)



Şekil 2.12 Üç boyutlu Voronoi diyagramında dört noktadan geçen kürenin merkezi (Pottmann ve diğer., 2007)

2.1.5 Dual Ağlar

Dual ağlar, düzgün ve düzgün çokgenli yarı düzgün ağlardaki, ağ gözlerinin merkez noktalarına, düğüm noktaları denk gelen ikinci katmandaki ağlardır. Örneğin 3,3,3,3,3 ağının dual ağı olan 6,6,6 ağı (Şekil 2.13) kesikli çizgiler ile gösterilmiştir.

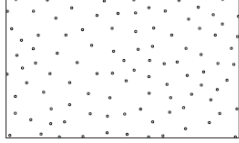
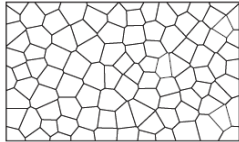
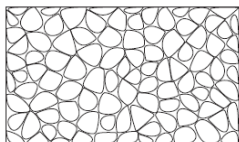
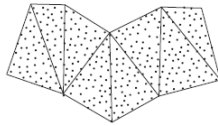
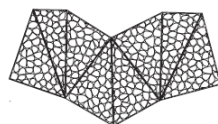
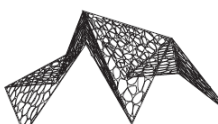
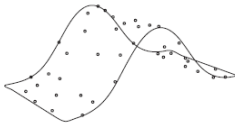
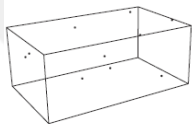
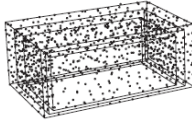
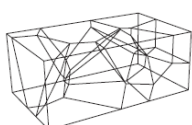
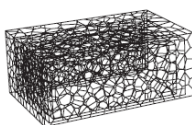
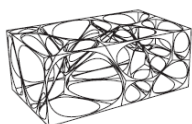
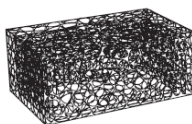
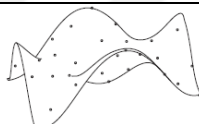
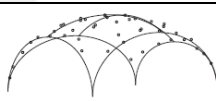


Şekil 2.13 Düzgün üçgen ağı ve duali olan altıgen ağı birleşimi (Türkçü, 2009)

2.2 Projeksiyon Yöntemleri

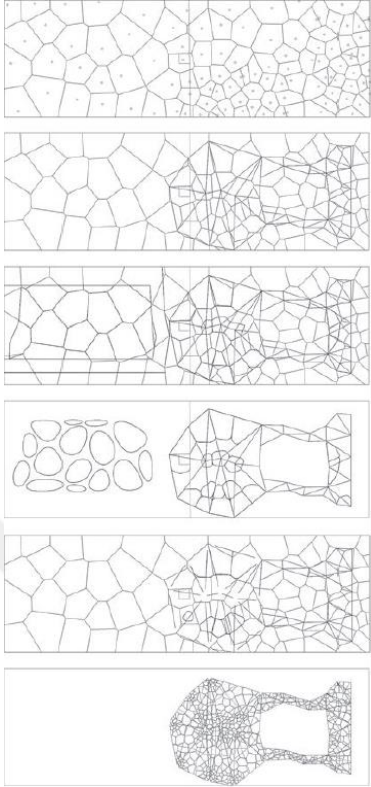
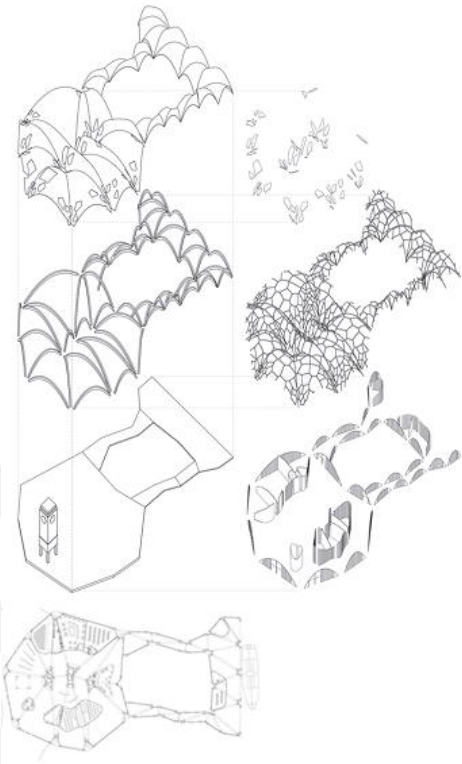
Karolama ile türetilen ağlar projeksiyon yöntemleri ile başka düzlem ve yüzeylere aktarılabilir, bu yöntemler ile türetilen ağlar ile taşıyıcı sistemler yaratılabilir (Türkçü, 2009). Örneğin bu çalışmada dikdörtgen bir plan üzerine Voronoi diyagramı kullanılarak karolama yapılmış daha sonra üretilen ağın üç boyutlu, farklı biçim ve eğriliklerdeki yüzeylere projeksiyonu ile elde edilebilecek taşıyıcı sistemler incelenmiştir. Katlanmış plak, dikdörtgenler prizması, tek eğrilikli, çift eğrilikli, eş ve ters eğrilikli yüzeyler gibi farklı yüzeylere uygulanmıştır (Tablo 2.5) (Agkathidis, 2015).

Tablo 2.5 Voronoi diyagramının projeksiyon uygulamaları (Agkathidis, 2015)

  	  	  	  
Voronoi Karolaması	Katlanmış plak geo.	Tek eğrilikli	Karma eğrilikli
     		  	  
Dikdörtgenler prizması		Ters eğrilikli	Eş eğrilikli yüzey

Daha sonra bir feribot terminali için vaziyet planı ve planı da içeren, Voronoi diyagramı ile karolama yapılmıştır (Tablo 2.6). İncelenen taşıyıcı sistemler ve yüzey geometrileri arasından, eş eğrilikli yüzey seçilmiştir. Uygulanmasında, taşıyıcı sistem elemanları için lamine ahşap ve üst örtüsünde ise gün ışığından yararlanmak adına belirli hücrelerde PTFE folyo kullanılması planlanmıştır (Agkathidis, 2015).

Tablo 2.6 Voronoi diyagramının vaziyet planı ve plana uygulanması, ardından projeksiyon yöntemi ile üretilen tonoz strüktür (Agkathidis, 2015)

	
Plan üzerindeki Voronoi karolaması	Strüktür, cephe kaplaması ve planı içeren katmanların perspektifleri
	
Strüktür maketi	Feribot terminali 3 boyutlu görseli

Oluşturulan karolamaların düzlemden yüzeylere aktarılmasında kullanılan projeksiyon yöntemleri şunlardır:

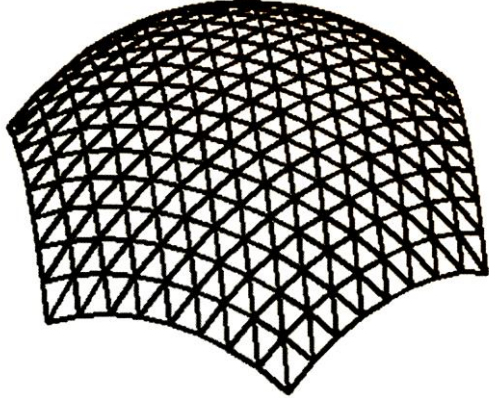
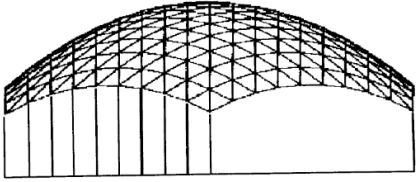
- 1- Dik projeksiyon yöntemi
- 2- Merkezi projeksiyon yöntemi
- 3- Kutupsal projeksiyon yöntemi

2.2.1 Dik Projeksiyon Yöntemi

Karolama yöntemleri ile üretilen düzgün ve düzgün çokgenli yarı düzgün ağların dual ağları kullanılarak çift katmanlı uzay kafes sistemler üretilmesi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile strüktürde kullanılan çubuk ve düğüm noktası çeşidi azaltılmaktadır. Dik projeksiyon yönteminde düzlemde bulunan bir ağın veya dualinin kendi düzlemine paralel başka bir düzleme aktarılması ve birleştirilmesi ile yapılır. Eğer iki katmanda da aynı karolama kullanılacaksa düğüm noktaları, dik elemanlar ile birleştirilir. Diğer bir yöntem ise ilk katmanda kullanılan ağın ikinci katmanda ise duali ile birleştirilmesidir, bu şekilde ikinci katmanda bulunan ağın, birinci katmandaki ağın ağ gözlerinin merkezine gelecek şekilde yerleştirilmesi ve bir birine elemanlar ile bağlanmasıdır.

Dik projeksiyon yöntemini aynı şekilde, eğri yüzeylerde de uygulamak mümkündür. Düzlem üzerinde yapılan karolamanın üzerine, herhangi bir eğri yüzey yerleştirildikten sonra planda bulunan düğüm noktaları dik bir şekilde eğri yüzeyi kesene kadar uzatılır, kesiştikleri yerlerde diğer düğüm noktaları ile düz çizgiler vasıtası ile birleştirilir (Tablo 2.7) ve bu sayede düzlemde yapılan karolama eğri bir yüzeye yansıtılmış olur (Türkçü, 2009).

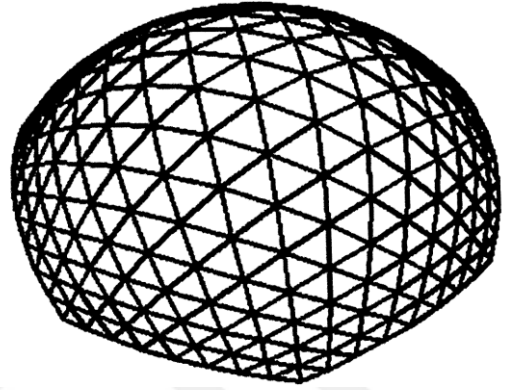
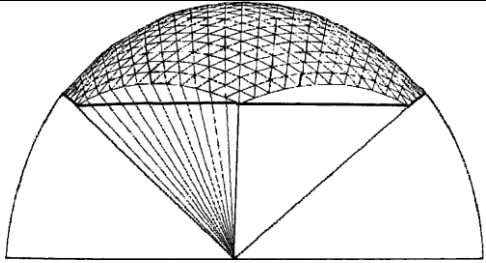
Tablo 2.7 Dik projeksiyon yöntemi (Türkçü, 2009)

Dik projeksiyon yöntemi ile üretilmiş çubuk ağı kubbesi perspektifi	
Dik projeksiyon yöntemi	

2.2.2 Merkezi Projeksiyon Yöntemi

Küre ve küre parçalarında dik projeksiyon yöntemi haricinde merkezi projeksiyon yöntemi de kullanılmaktadır (Tablo 2.8). Plan seviyesindeki karolama yansıtıldığı kürenin merkezi ile birleştirilip daha sonra küre yüzeyini kesene kadar uzatılır ve küre yüzeyindeki düğüm noktaları bulunur. 3 projeksiyon yöntemi arasında minimum ve maksimum çubuk boylarındaki fark en fazladır (Türkçü, 2009).

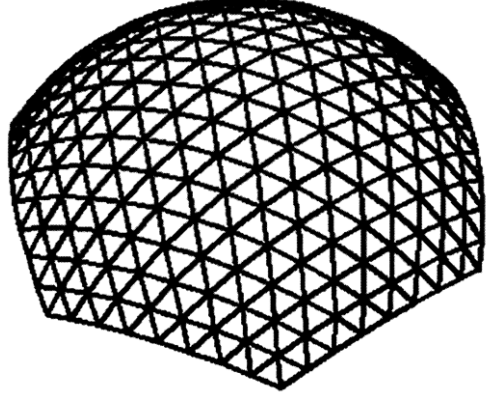
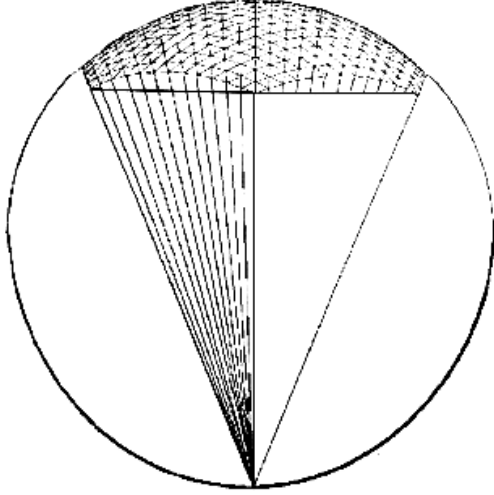
Tablo 2.8 Merkezi projeksiyon yöntemi (Türkçü, 2009)

Merkezi projeksiyon yöntemi ile üretilmiş çubuk ağı kubbesi perspektifi	
Merkezi projeksiyon yöntemi	

2.2.3 Kutupsal Projeksiyon Yöntemi

Küre ve küre parçalarında kullanılan bir diğer yöntem ise kutupsal projeksiyon yöntemidir (Tablo 2.9). Plan seviyesindeki karolama yansıtıldığı kürenin alttaki kutup noktası ile birleştirilip daha sonra küre yüzeyini kesene kadar uzatılır ve küre yüzeyindeki düğüm noktaları bulunur. 3 projeksiyon yöntemi arasında minimum ve maksimum çubuk boylarındaki fark ise en az kutupsal projeksiyonda meydana gelmektedir (Türkçü, 2009).

Tablo 2.9 Kutupsal projeksiyon yöntemi (Türkçü, 2009)

Kutupsal projeksiyon yöntemi ile üretilmiş çubuk ağı kubbesi perspektifi	
Kutupsal projeksiyon yöntemi	

2.3 Biçim Bulma

Biçim etken strüktür sistemlerinin şeklinin belirlenmesinde yararlanılan tasarım sürecine, *form finding* yani biçim bulma denmektedir. Biçim etken strüktürlerde en uygun statik denge durumunda olan formun bulunmasıdır. Biçim bulma işleminde sayısal ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır.

2.3.1 Temel Yaklaşım ve Kavramlar

Canlılar, milyonlarca yıl boyunca devam eden evrimleri sonrasında, dış etkenler ve doğa şartları ile bulundukları çevre koşullarına göre en uygun biçime ulaşmışlardır. Bu organik formlar, ortogonal açılara sahip olmayan, farklı eğri

geometrileri sayesinde mukavemet ve dayanıklılık kazanmış biçimlerdir. Sınır tanımayan varyasyonlara kümesine sahip organik geometrideki formların ise tasarımının ve üretimlerindeki zorluk ve ekonomik nedenlerden dolayı strüktür tasarımlarında tercih edilmemiştir. Bunun yerine kolay, düzgün ve basit geometriler tercih edilmiştir (Türkçü, 2009). Eğrisel formlar ve yuvarlak hatlar mimari tasarımda daima göz ardı edilmiştir. Teknolojinin diğer tasarım alanlarında kullanılması ama mimariye geç girmesi buna neden olan başlıca faktörlerden biridir.

Son dönemlerde mekanikten, dijital sürece geçişle birlikte değişimler başlamıştır. Bu bağlamda geometrilerin geliştirilmesi, mimari açısından bir devrim niteliği taşımaktadır (Schumacher, 2018). 20. yüz yılın başlarında ise Frederick Kiesler ve Frei Otto gibi mimar ve tasarımcılar üretken tasarım ve biçim bulma gibi teknikleri kullanmaya başlamıştır. Bunlar günümüzün hesaplama yaklaşımlarına benzeyen yöntemlerdir (Agkathidis, 2015). Mimaride biçimin incelenmesi, bilgisayar teknikleri ve hesaplamalar sayesinde, yapılarda simetrik olmayan biçim ve geometriler mümkün kılınmıştır. Bununla birlikte yapıların stabilitesinin de artırılması sağlanmıştır.

Gelişen teknoloji ile bilgisayar çağı, hızlı üretim sürecini ve maliyetleri baz alarak mimarlık alanında değişimlere yol açmıştır. Bilgisayar destekli tasarımın mimaride kullanılmaya başlaması tasarım anlamında alışıldan farklı yöntemlerin önünü açmıştır. Mimari form ve bilgisayardaki model arasındaki karmaşık ilişkileri hesaplamalı yöntemler ile ortadan kaldırarak yeni tasarım yöntemlerinin oluşturulmasını sağlamıştır. Odak noktası ise biçim oluşturmak değil doğru biçimi bulmak olmuştur (Agkathidis, 2015; Kolarevic, 2003).

Biçim bulma, biçim etken strüktür sistemlerinin şeklinin belirlenmesinde yararlanılan bir geometrik tasarım yöntemi olduğuna göre biçim etken strüktür tanımının ortaya konulduğu Engel'in strüktür sınıflamasına ve bu sınıflandırma da geçen strüktür sistemlerine değinilmelidir.

2.3.1.1 Engel'in Strüktür Sınıflandırması

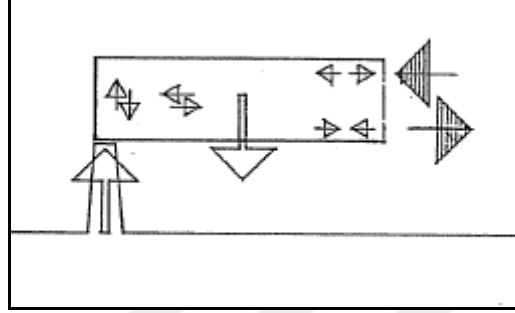
H. Engel'e göre bir strüktürün özü işlevidir. Strüktür için işlev ise kuvvetlerin nasıl aktarıldığıdır. Bu yaklaşım ile Engel yapı strüktür sistemlerini ve elemanlarını kuvvetleri aktarımlarına göre sınıflandırmış ve beş gruba ayırmıştır:

- 1- Kesit etken strüktür sistemleri
- 2- Yüzey etken strüktür sistemleri
- 3- Biçim etken strüktür sistemleri
- 4- Vektör etken strüktür sistemleri
- 5- Yükseklik etken strüktür sistemleri

Bu sınıflandırmada bir strüktür sistemindeki elemanlar farklı malzemeler kullanılarak yapılabilmektedir. Kuvvetleri sınırlandıranlar, kesit etken strüktür sistemleri. Kuvvetlerin dağılımı yapanlar, yüzey etken strüktür sistemleri. Kuvvetlere uyum sağlayanlar, biçim etken strüktür sistemleri. Kuvvetlerin bölünmesini sağlayanlar, vektör etken strüktür sistemleri. Yükleri toplayıp toprağa aktaranlar ise yükseklik etken strüktür sistemleridir (Engel, 2013). Bu kategoriler, strüktür sistemlerinin büyük çoğunluğunun gruplandırılıp, incelemesinde yararlı bir şema oluşturmaktadır. Bir yapıdaki yük aktarımının tanımlanması, tasarımcının hangi parametre veya değerlerin yapıdaki strüktürel verimliliği etkileyip, etkilemeyeceği belirlemesinde ve buna göre bir tasarım geliştirmesine olanak sağlamaktadır (Silver, McLean ve Evans, 2013).

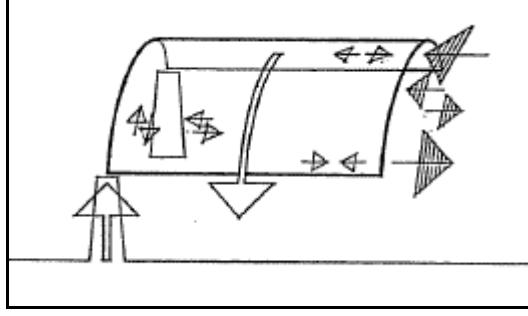
Kesit etken strüktür sistemleri, Engel'in sınıflandırmasındaki en yaygın ve çok yönlü yapı türüdür. Kesit etken yapıları, uygulanan yükleri desteklemek için kiriş, kolonlar gibi tek tek rijit bileşenlerin enkesit özelliklerine dayanmaktadır. Kirişler, levhalar ve sütunlar ile inşa edilen tüm yapılar, kesit etken olarak tanımlanabilir. Bu grupta yüklere karşı kütle ve enkesitleri ile dayanan strüktür sistemleri bulunmaktadır. Kuvvet aktarımında basınç ve eğilme gerilmelerinin yanı sıra çekme gerilmelerini de eğilme ile birlikte içerirler (Şekil 2.14). Strüktürdeki elemanların enkesitleri arttırıldığında yüklere karşı direnci de artmaktadır, bununla birlikte kütle

ağırlığı da doğru oranda artmaktadır. Ancak bu artış oranı eşit değildir ve bir noktadan sonra sistem etkinliğini kaybetmektedir. Kütle / Kesit etken strüktür sistemlerine örnek olarak: İskelet (Karkas) sistemler, yığma sistemler, verilebilir (Türkçü, 2017).



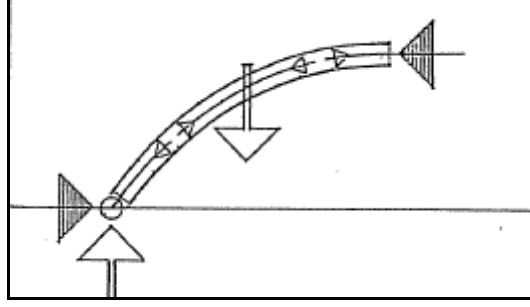
Şekil 2.14 Kesit etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı (Engel, 2013)

Yüzey etken strüktür sistemleri grubunda, yüklere karşı yüzey biçimleri ve yüzey direnci ile dayanan strüktür sistemleri bulunmaktadır. Basınç, eğilme, çekme ve kayma gerilmeleri bulunmaktadır (Şekil 2.15). Enkesitleri uzunluk ve genişliklerine göre az olan sistemlerdir. Katlanmış ve eğri yüzeylerden meydana gelirler birçok gerilme türünü barındırdıkları için rijit ve homojen malzemeler ile yapılmaları daha uygundur (betonarme, metal sac, kompozit plastik). Biçim etken yapılarda olduğu gibi, uygulanan herhangi bir kuvvet, yapıların biçim veya şekli aracılığıyla yönlendirilir ve bu nedenle ile biçim, yapısal olarak strüktür performansı ile ilişkilidir. Yine benzer bir şekilde, yüzey etken yapılar, bölgesel eğilme gerilmeleri oluşturan destek noktalarında zayıftır. Yüzeydeki açıklıklar veya diğer devamsızlıklar da sistemin yapısal verimliliğini azaltır. Bir yüzey etken yapı sadece kendisine uygulanan kuvvetlere karşılık verecek şekilde tasarlandığında, son derece verimli bir strüktür meydana getirebilir (Silver ve diğer., 2013). Yüzey etken strüktür sistemlerine örnek olarak: Katlanmış plaklar, tek eğrilikli kabuklar, çift eğrilikli kabuklar: Eş eğrilikli, ters eğrilikli, karma eğrilikli (hem eş ve hem ters eğrilikli olanlar), serbest formlar, verilebilir (Türkçü, 2017).



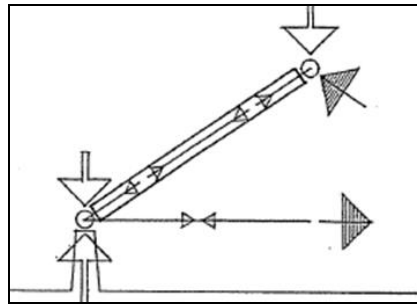
Şekil 2.15 Yüzey etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı (Engel, 2013)

Biçim etken strüktür sistemleri grubunda biçim, yük ile oluşturulur. Biçim etken yapılar, yük altında stabil bir biçim elde etmek için bir dizi esnek, rijit olmayan bileşene dayanır. Çekme veya basınç gerilmelerine çalışırlar (Şekil 2.16). İki ucundan sabitlenerek sarkıtılan kablo ve zincirlerin oluşturduğu catenary eğrileri, zincir eğrileri, ters asılı membranlar ve sabun köpükleri gibi doğal yollar ile oluşan geometrileri içeren strüktürler bu grupta yer alır. Rijit olmayan, esnek malzemeler veya çok mafsallı elemanlardan meydana gelen sistemlerdir. Bu elemanlar tek başlarına değil destek elemanları ile formlarını korurlar bu neden ile çekmeye karşı dirençli malzemeler kullanılarak yapılmaları gerekmektedir. Biçim etken yapıların en basit örnekleri zincir ve halat köprülerdir. Bir diğer örnek ise pnömatik yapılarıdır, biçimleri kendilerine uygulanan kuvvetlerle doğrudan ilişkili olan strüktürlerdir. Oluşturulan geometrilerin ters çevrilmesi ve basınca dayanıklı malzemeler ile yapılması ile sadece basınca çalışan taşıyıcı sistemler türetilmektedir. Esnek bir biçim etken yapının yüzeyine bir noktasal yük uygulanırsa, deformasyonlar meydana gelecektir. Rijit kemerlerde bile yük kemerin tepesine dikey olarak uygulanmadığı sürece noktasal yükler altında eğilme geliştirecektir, bu da yapısal verimliliklerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Silver ve diğer., 2013). Biçim etken strüktür sistemlerine örnek olarak: Kablo sistemler, kablo destekli sistemler, çadır sistemler, pnömatik sistemler (tek cidarlı, çift cidarlı), kemer destekli sistemler, ızgara kabuklar verilebilir (Türkçü, 2017).



Şekil 2.16 Bıçım etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı (Engel, 2013)

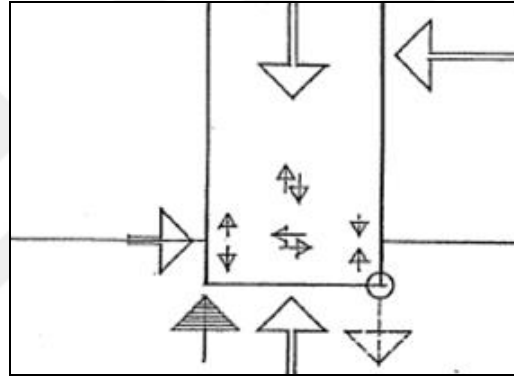
Vektör etken strüktür sistemleri grubunda yükü, genel yapının uzunluğuna kıyasla küçük olan ve bu nedenle belirgin eğilme veya kayma gerilmeleri geliştiremeyen bir dizi birbirine bağlı rijit eleman yoluyla aktarmaktadır. Uygulanan dış yüklerin destek noktalarına yönlendirilmesindeki geometrik ve yönlü ilişki nedeni ve sistemde oluşan bu yüklerin vektörel yükler olması nedeni ile vektör etken tanımı yapılmaktadır. Mafsallı düğüm noktaları ve düz çubuk elemanlar ile yapılan düzlem kafes sistemler ve uzay kafes sistemleri bu grupta yer almaktadır. Mafsallı düğüm noktalarından oluşan sistemlerdeki elemanların, ek koşulları sağlaması ile basınç ve çekme kuvvetleri meydana gelmektedir (Şekil 2.17). Malzeme olarak ahşap, çelik veya sert plastik çubuk elemanlar kullanılmaktadır. Vektör etken strüktür sistemlerine örnek olarak: Ahşap makaslar, düzlem veya eğri kafes kirişler, düzlem veya eğri yüzeyli uzay kafes sistemler, Radyal, çubuk ağı ve jeodezik kubbeler, verilebilir (Türkçü, 2017).



Şekil 2.17 Vektör etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı (Engel, 2013)

Yükseklik etken strüktür sistemleri gurubunda kuvvetleri, çekirdekler vasıtasıyla zemine ileten çok katlı ve yüksek yapılar bulunmaktadır (Şekil 2.18). Yüksekliklerine göre diğer boyutları az olan strüktürlerdir. Yatay elemanların

boyutlandırılmasında eğilme etkiliyken, dikeyde ise elemanlar basınca çalışmasına rağmen, yapının boyutları nedeni ile statik boyutlandırmada burkulma da önem kazanmaktadır. Bu yapılarda, yatay taşıyıcı elemanlar döşeme ve kat plakları, dikey taşıyıcı elemanlar ise çekirdeklerdir. Bu yatay elemanlar konsol olarak çalışabilecekleri gibi iki çekirdek arasına mesnetlenebilirler. Yatay elemanlar çizgisel, düzlemsel veya hacimsel (birkaç perde elemanın bir araya gelmesiyle oluşan, kısmen kapalı hücreler) olabilirler. Strüktürü oluşturan elemanların muazzam boyutları bu yapıları iskelet sistemlerden ayırmaktadır. Kullanılan malzemeler ise iskelet sistemlerdekiyle aynıdır homojen malzemeler beton ve çelik tercih edilmektedir (Türkçü, 2017).



Şekil 2.18 Yükseklik etken strüktür sistemlerinde yük aktarımı (Engel, 2013)

Eğrilikli yüzey etken strüktürlerin geometrileri, biçim etken strüktürlerin geometrilerine benzemektedir. Ancak kullanılan malzemeler farklıdır, esnek ve bükülebilir malzemeler ile yapılan biçim etkenlere göre yüzey etken strüktürlerde rijit malzemeler kullanılmaktadır. Biçim etken strüktürler membran gibi sürekli yüzeyler haricinde, kablo sistemler gibi ayrık yüzeyler ile de yapılmaktadır. Kablo ağlarının ve membaların ters döndürülmesi ile üretilen biçimlerde kullanılan malzemeler rijit olmalıdır (Türkçü, 2017).

Yüzey etken bir sistem, kablo veya membran yapıları gibi biçim etken sistemlerin aksine, değişken yük koşullarında şeklini aktif olarak değiştirmez. Bir kabuk dış yükleri, ağırlıklı olarak meridyenler doğrultusunda mesnetlere basınç kuvvetleri ile aktarmaktadır, kırılma çizgisi enlemi altında ise çekme gerilmesi oluşturmaktadır.

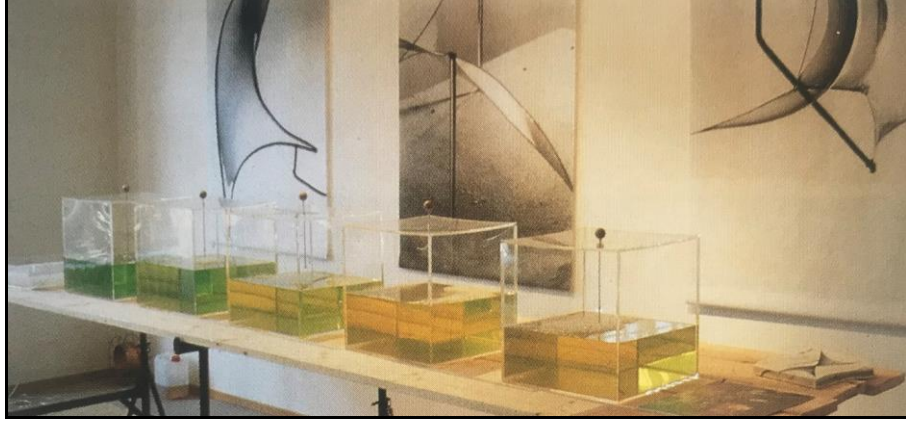
Membran gerilmeleri olarak adlandırılan ve basınç ya da hem basınç hem gerilme birleşimi olan kuvvetler meydana gelmektedir (Türkçü, 2017). Biçim etken strüktürlerdeki membran gerilmeleri, yüzey etken strüktürlerde bulunan kabukların serbest bölgeleri için de geçerlidir. Bu nedenle ince bir kabuk, bu gerilmeleri burkulmadan taşımak için yeterli miktarda da kalın olmalıdır (Adrianssens ve diğer., 2014).

2.3.1.2 Minimal Yüzeyler ve Minimal Ağlar

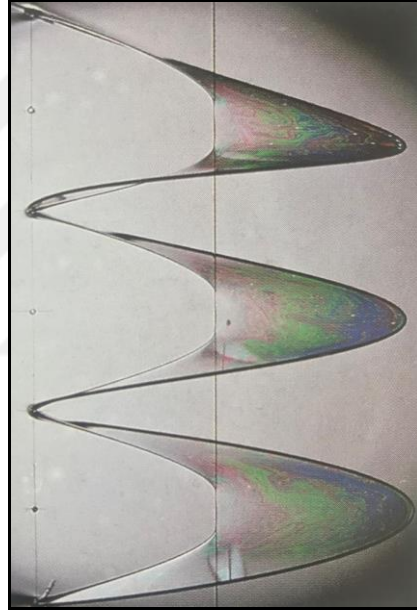
Frei Otto'nun minimal strüktürler teorisi, yapı ve malzemelerin maksimum verimi ile mevcut inşaat enerjisinden en iyi şekilde yararlanma girişimi olarak özetlenebilir. Ancak, bunu sadece ekonomik nedenlere bağlamamak gerekir. Hafif strüktür sistemleri ile strüktür tasarımında, hem yapısal hem de malzeme kısıtlamalarından kurtularak, daha yaşanabilir mekanlar yaratmak ana hedeflerden biri olmuştur.

Sabun köpüğü gibi birçok nesnede bulunan sabit yüzey gerilmelerinin özelliği, yüzey geriliminin, potansiyel enerjisinin en aza indirilmesi işleminden kaynaklanmaktadır. Biyolojik olarak ilham alan bu hafif prensibi uygulamayı hedefleyen tasarımlar, sabit, dayanıklı ve estetik açıdan hoş yapısal biçimleri minimum miktarda malzeme kullanarak üretirler. Bu özellikler sürdürülebilir kalkınmanın temel ölçütleridir (Lewis, 2003).

Minimal yüzeyler, verilen üç boyutlu sınırlar içerisinde; belirlenen hacmi örten yüzeyler arasında en küçük yüzey alanına sahip olan yüzeylerdir. Serbest şekilli bir çerçevenin, bir sabun çözeltisine daldırılmasıyla üretilmeleri mümkündür. Çok ince tabakalarda ise arıtılmış su ve birkaç damla deterjan veya Pustefix kullanılmaktadır (Şekil 2.19) (Otto, Bodo, Pfafferoth, Schönborn ve Schanz, 1995). Sabun köpüğü ile kaplanan çerçeve yerçekiminin etkisi ile ortalama eğriliği sıfır "0" ve eşit yüzey gerilimine sahip, minimal bir yüzey meydana getirmektedir (Şekil 2.20) (Gründig ve diğer., 2000).



Şekil 2.19 Sabun köpüğü ile minimal yüzeyler yaratılması deneylerinde kullanılan malzemeler, 1992 yılı Villa Stuck sergisi Münih, Almanya (Otto ve diğer., 1995)



Şekil 2.20 Spiral çerçeveli sabun köpüğü ile minimal yüzey (Otto ve diğer., 1995)

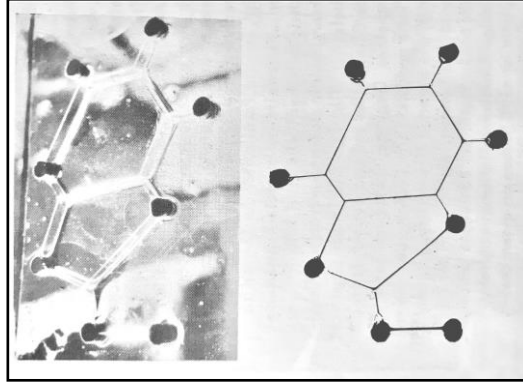
Pnömatik sistemlerde ise belirlenen alan içerisindeki hacmi, en küçük yüzey ile kaplayan yüzeyler, minimal yüzeylerdir. Bir sınırlama getirilmemesi durumunda bir küre en küçük yüzey alanı ile en büyük hacmi kaplamaktadır. Bu neden ile pnömatik minimal yüzeylerin belirlenmesinde ahşap kalıplar ile sınırlandırılmış ve iç basınç ile şişirilen membranlar ile kabuklarda kullanılabilecek biçimlerin bulunması amaçlanmıştır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Membaların şişirilmesinde kullanılan kalıplar, 1992 yılı Villa Stuck sergisi Münih, Almanya (Otto ve diğer., 1995)

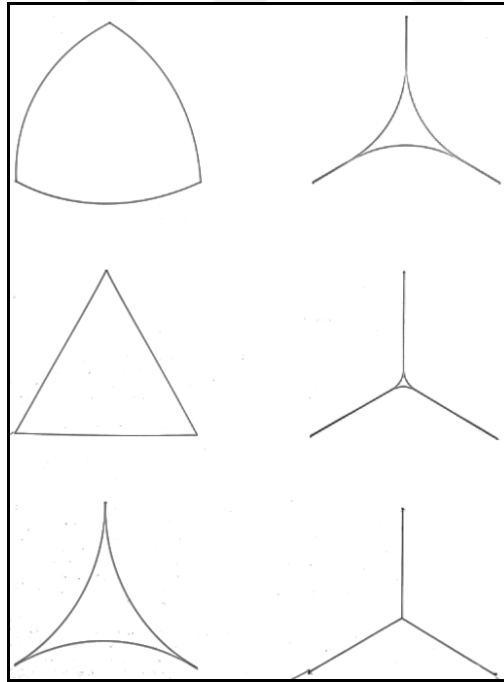
1956-1964 yılları arasında Berlin’de birçok sabun köpüğü testi yapılmış ve deneylerde kolayca üretilen son derece karmaşık minimal yüzeyler gözlemlenmiştir. Deneyler ile üretilen minimal yüzeylerin iki boyutlu yüzeysel elemanlar yerine, tek boyutlu çizgisel elemanlar ile oluşturulacak bir ağ ile üretilmesi hedefi ile çalışmalar yapılmıştır.

Jochen Schilling tarafından yapılan makine ile birbirine paralel iki düzlem cam plaka arasına yaklaşık 1 cm yüksekliğinde kauçuk tıplar takılmıştır, daha sonra sabun çözeltisine batırılıp çıkarıldığında sabun köpüğü şeritlerinden minimal ağlar meydana gelmiştir (Şekil 2.22). Bu sayede cam tabakalar arasında oluşturulan minimal yüzey aynı zamanda bir minimal ağ sistemi oluşturmuştur. Sonuç olarak kablolar ile aynı yüzey gerilmelerine sahip yüzeysel membranların şeklini belirleyen bir yöntem bulunmuştur. Bir düzlem üzerinde bulunan noktalar kümesini birbirine bağlayan çizgilerin oluşturduğu ağa biçimlenim denilmektedir. Minimum toplam uzunluğa sahip biçimlenim ise minimal ağ olarak tanımlanmaktadır. Frei Otto düzlem üzerine yerleştirilen farklı noktalar için biçimlenimleri incelenmiş ve oluşturulan toplam ağ uzunlukları karşılaştırmıştır (Tablo 2.10) (Otto, 1971).



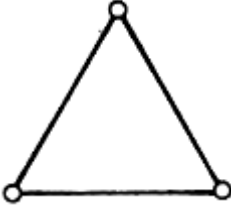
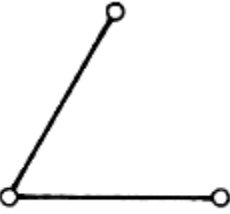
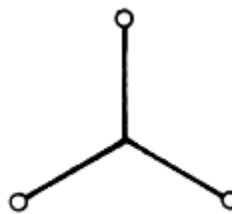
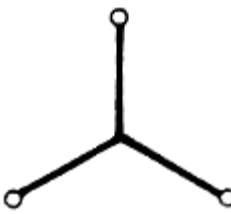
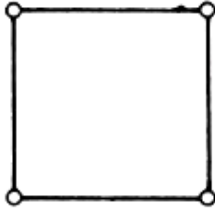
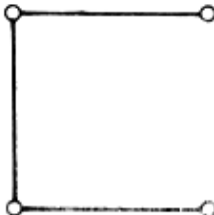
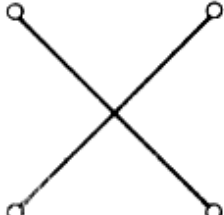
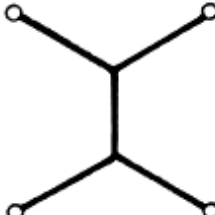
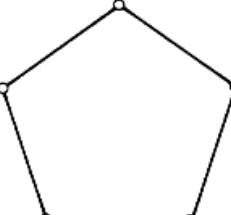
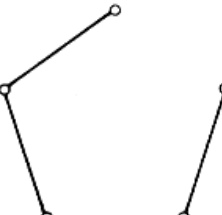
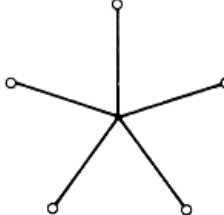
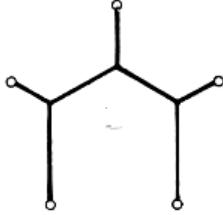
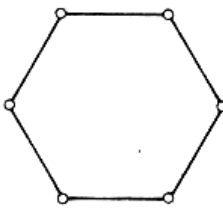
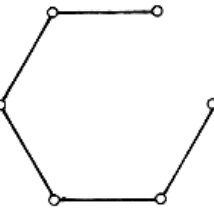
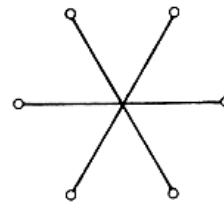
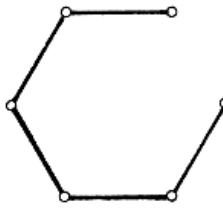
Şekil 2.22 Sabun köpüğüne daldırılan cam plakalar arasında oluşan minimal ağ (Otto, 1971)

Sabun köpüğü prensibinde minimal ağ biçimlenimleri deneylerinde sabun köpüğü şeridinden oluşan çerçeveler uygun görülmüştür. Sabun çözeltileri, her noktada ve tüm yönlerde aynı yüzey gerilmelerine sahip membran yüzeyleri oluşturur. Bu yüzeylerin özelliği ise minimal yüzeyler olmasıdır. Üç noktadan oluşan bir kümelenmede minimal bir ağ oluşturma süreci aşağıda (Şekil 2.23) gösterilmektedir, süreç boyunca çözelti miktarı sürekli olarak azalmaktadır.



Şekil 2.23 Sabun köpüğünden oluşan minimal ağın oluşma evreleri (Otto, 1971)

Tablo 2.10 Nokta kümeleri için farklı yapılandırma uzunluklarının incelenmesi (Otto, 1971)

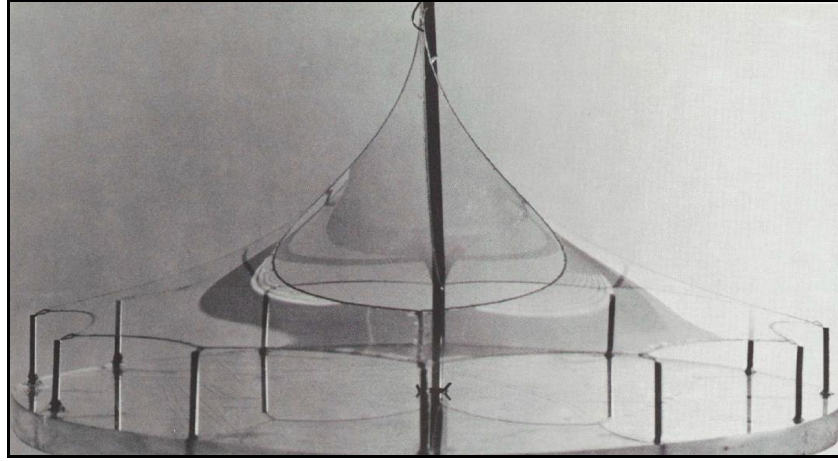
Kapalı devre	Açık devre	Merkezi birleşim	Minimal ağ
			
3 a	2 a	1,73 a	1,73 a
			
4 a	3 a	2,83 a	2,75 a
			
5 a	4 a	4,25 a	3,92 a
			
6 a	5 a	6 a	5 a

Otto'nun yöntemleri sayesinde karmaşık kodlama veya hesaplamalara gerek duyulmadan basit ölçümler ile optimizasyon mümkün kılınmıştır. Sabun köpüğü şeritlerinde, basit yöntemler ile yeterli doğrulukta ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzde ulaşım ağlarının ve iletişim ağlarının düzenlenmesinde de bu yöntemlerden yararlanılabilmektedir (Otto, 1971).

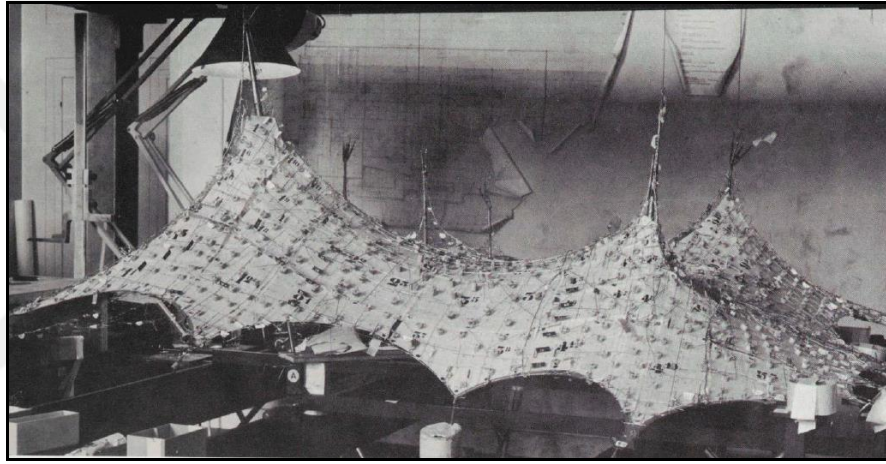
2.3.2 Deneysel Biçim Bulma Yöntemleri

Biçim bulma, bir tasarımla statik dengede olan yapının, optimal geometrisini bulmak için parametrelerin doğrudan kontrol edildiği, ileri bir işlemdir ve geometrinin üretilmesidir. Form kuvveti izler ilkesi özellikle, yükleri eksenler doğrultusunda veya düzlem içerisindeki yükler ile aktaran yapılarda önem kazanmaktadır. Bükülmenin görülmediği bu durumlarda formu, kuvvetler belirlemektedir. Bu ilke ile çalışan farklı strüktür örnekleri arasında gerilmesiz ızgara kabuklar basınca, kablo ağları germeye ve hem basınca hem gerilmeye çalışan tensegrity strüktürler bulunmaktadır. Bu tarz strüktürlerde taşıyıcı sistemin şekli önceden bilinmemektedir yani biçim etkendirler, bu neden ile biçim bulma süreci gerekmektedir. Geçtiğimiz yıllarda çeşitli biçim bulma yöntemleri geliştirilmiştir. Erken dönem yöntemleri tipik olarak farklı kablo ağı strüktürlerine uygulanmış ve daha sonraki yöntemlerle uygulamalar, membran yapıları için genişletilmiştir (Veenendaal ve Block, 2012).

Çadırlar gibi öngerilmeli yapılar ilk insan yapımı strüktürler olsa da analitik modellemede yük davranışları hakkında çok az şey bilinmekteydi. Öngerilmeli kablo ağları ve membranlarda, geometri ve yük dağılımı arasındaki doğal etkileşim ayırt edici bir özelliktir. Montreal Expo 1967 Alman Pavyonu inşa edilirken kablo ağı biçimi ve dış yükler altındaki davranışı belirlemek için analitik bir çözüm bulunmamaktaydı (Şekil 2.24). O dönemlerde bu tür yapıların tasarımında, fiziksel bir model veya maket referans olarak kullanılmaktaydı. Bu modellerdeki ölçümlerden, kabloların uzunlukları ve kablo ağındaki gerilmeler belirlenmekteydi (Şekil 2.25) (Linkwitz ve Schek, 1971).



Şekil 2.24 Montreal Expo 1967 Alman pavyonu çalışma maketi (Glaeser, 1972)

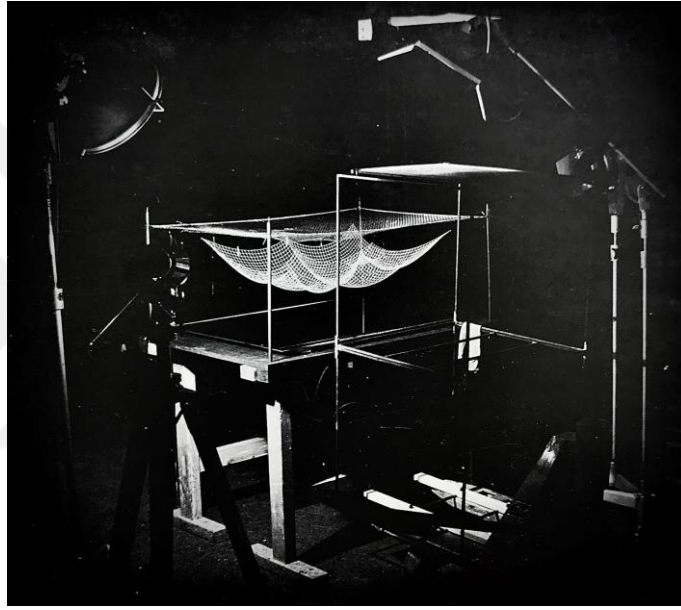


Şekil 2.25 Montreal Expo 1967 Alman Pavyonu ölçüm maketi (Glaeser, 1972)

Sarkan bir modelin formu, ağ içerisinde ve kenarlarda belirlenen noktaların x,y,z koordinatları tarafından geometrik olarak saptanır. Ağ genişliği, ağların sayısı ve biçimi ve ağ çizgileri, kenar eğrilerinin işlevleri ile geometrik olarak Koordinatların belirlenmesi için Institute for Lightweight Structures (IL)'ta üç yöntem uygulanmıştır (Hennicke, 1974). Bunlar, kısa menzilli stereo fotogrametri, ölçü masası ve paralel ışık yöntemleridir.

Kısa menzilli stereo fotogrametri, prensip olarak, uygulamada haritacılıkta kullanılan hava fotogrametri haritalaması yöntemidir. Kayıt cihazı yakın mesafeden kullanılabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Bu uygulama ilk olarak Münih olimpiyat stadı projesinde başarıyla kullanılmıştır. Her türlü boyutta model için

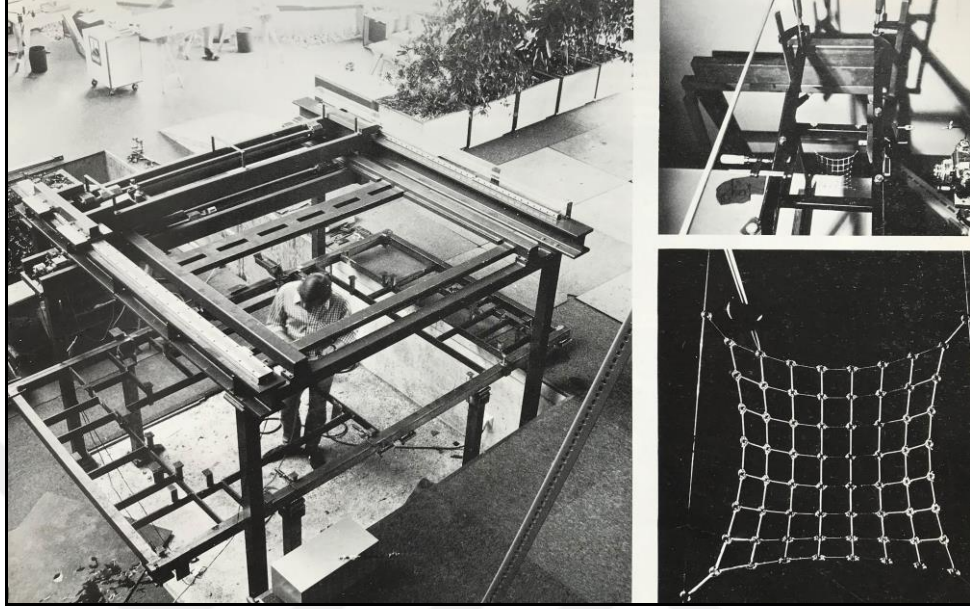
uygulanabilen bir yöntemdir. Yapılan kayıtların değerlendirmeleri stereo karşılaştırmacı ile sağlanır. Yöntemin doğruluğu temel olarak öncelikle kullanılan kameraların hassasiyetine, fotoğraf kayıtları için kullanılan kayıt odalarına, bununla birlikte ağ türüne ve model ölçeğine de bağlıdır. Ayrıca işlemi gerçekleştiren kişinin kabiliyeti de ölçümün hassasiyetine etki etmektedir. Doğruluk oranı model ölçeğine ve görüntü boyutuna bağlı olarak yaklaşık $\pm 1/10$ mm aralığındadır. Ölçü masası ile karşılaştırıldığında, stereo fotogrametri yöntemi önemli ölçüde zaman ve ekipman gerektirmektedir (Şekil 2.26) (Hennicke, 1974).



Şekil 2.26 Stereofotogrametrik yöntemler ile asılı ağ ölçümü (Glaeser, 1977)

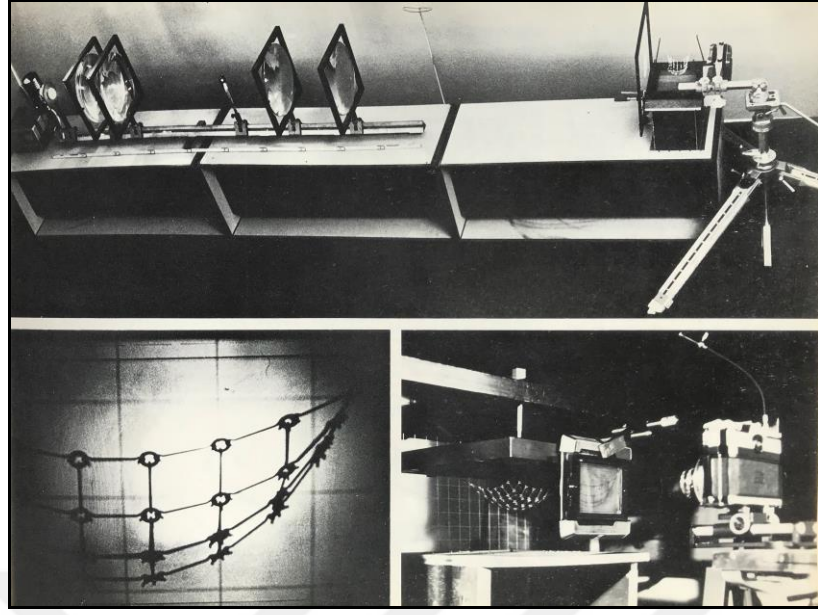
Ölçü masası, ölçülecek noktanın çekül çizgisi ile x, y, z koordinatlarında yerini değiştirmesi için kullanılan bir makinedir. Her koordinat yönü bir vidalı mil ile temsil edilir ve elektrikli motor ile hareket eder, milin devirleri ölçülür. Ölçülen değerler ekrandan okunabilmekte bununla birlikte düz metin veya delikli kart olarak yazdırılabilmektedir. Delikli kartlar bilgisayar ve otomatik çizim makinelerinde veri olarak kullanılabilmektedir. Koordinatlar ölçülürken, modelin plan görünümü, ölçüm tablosu panosuna raptiye ve zimbalar ile işaretlenerek çizilmektedir. Çizim tahtası özel bir çerçevede iki büyük yatay eleman arasında bulunur, askıya alınmış form, çekülün ayırık model noktaları boyunca hareket ettirilmesiyle ölçülür. Ölçüm işleminin doğruluğu $\pm 1/10$ mm aralığındadır. Ölçüm hassasiyeti ağın türüne ve

işlemi gerçekleştiren kişinin çekül kullanma yeteneğine bağlıdır (Şekil 2.27) (Hennicke, 1974).



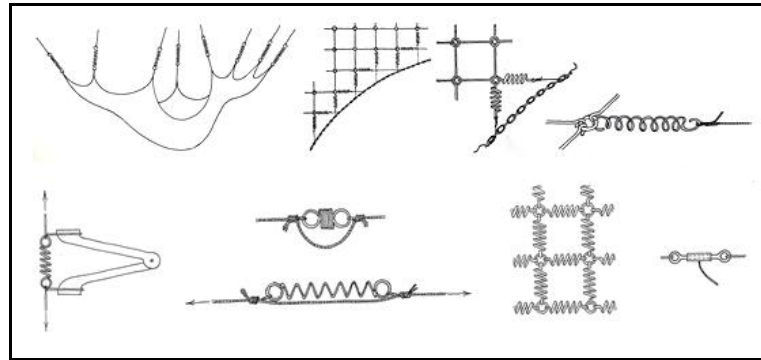
Şekil 2.27 Ölçü masası yöntemi ile asılı ağı ölçümü (Hennicke, 1974)

Optik tezgah ile paralel ışık üretilerek ölçüm yapılabilir. Uygulama şu şekilde gerçekleşir; En solda, ışık kaynağı olarak yüksek basınçlı cıva buharı lambası (kırmızı nokta çapı 5 mm) bulunmaktadır. Yanında ise, ışık huzmesini odaklayan iki lens takip eder. Çapı 2 mm olan bir disk diyaframı, paralel ışığın bir sonraki iki mercekten geçerek sağ tarafta bulunan modele düştüğü ışık noktasını sağlar. Modelin önünde ise 15x15 mm ebatlarında gözeneklere sahip, koordinatların belirlenmesi için bir ölçüt görevi gören dikey bir ızgara bulunmaktadır. Bu uygulamada Modelin boyutu, lenslerin görüntüleme skalası ile sınırlıdır. Yansımada herhangi bir perspektif bozulması olmadan görüntüleme sağlanabilmektedir. Modelin fotoğrafı şeffaf ekran görüntüsünün fotoğraflanması ya da doğrudan filmin ışığa duyarlı diğer materyallere maruz bırakılması ile elde edilir. Elde edilen negatifin büyültmesi ölçümde kullanılır. Bu işlem için iki eksen yönünden en az iki fotoğraf gerekmektedir. Her ölçüm fotoğrafından iki koordinat yönü okunabilir (Şekil 2.28) (Hennicke, 1974).



Şekil 2.28 Paralel ışık yöntemi ile asılı ağ ölçümü (Hennicke, 1974)

IL’de yapılan uygulama ve araştırmalarda, modellerin asılma noktalarında, kenarlarda ve ağ içerisindeki noktalarda, kuvvet ölçümleri için farklı şekilli yaylar kullanılmıştır. Özellikle helezon yaylar deformasyonu belli ettikleri için tercih edilmiştir. Yayın uzunluğundaki aksenal değişiklik, meydana gelen kuvvetin bir ölçüsü olarak değerlendirilir buda şekillendirilmiş bir mikrometre vida ile ölçülür. Aşırı gerginliği önlemek için özel olarak, yay bir iplikle sabitlenir. Yaylar yerine kauçuk bantlar da kullanılabilir bantlardaki çizgi değişiklikler uzunluktaki değişikliğin okunmasını kolaylaştırır (Şekil 2.29) (Hennicke, 1974).



Şekil 2.29 Kuvvetlerin ölçülmesinde kullanılan yaylar (Hennicke, 1974)

Antoni Gaudi'nin asılı zincir modelleri (Şekil 2.30) ve Heinz Isler'in ters asılı membranları biçim bulmanın ilk örneklerindendir. Antoni Gaudí'nin modelleri tonozlu basınca çalışan yapıların tasarımında, katener eğrisi ile aynı prensibi kullanılarak bulunmuştur. Esnek ağırlar kendi ağırlıkları ile asılmış ve sonra ortaya çıkan formları tersine çevrilmiştir (Silver ve diğer., 2013).



Şekil 2.30 Antoni Gaudi'nin asılı zincir modeli (Silver ve diğer., 2013)

Bir katener eğrisi, iki ucundan sabitlenerek kendi ağırlığı altında bükülmesine izin verilen bir zincir veya kablo ile türetilir. Asma köprülerde, direkler arasında uzanan kablolar başta bir katener eğrisi oluşturur ancak kablolar yüklendikten sonra eğri bir parabol haline gelir. Bir katener eğrisi ters çevrildiğinde, doğal olarak stabil bir kemer oluşturur (Şekil 2.31). Bu şekilde üretilen kemerler yapısal olarak etkilidir çünkü kuvvet yay çizgisini takip etmektedir.



Şekil 2.31 Eero Saarinen'in Gateway arch yapısının son parçası yerleştirilmesi Ekim 1965 (Campbell, 2013)

Biçim bulma için kullanılan modellerde, ters asılı zincir veya kumaşların fiziksel maketinden hesaplanan sayısal bir simülasyonu kullanılabilir veya fiziksel olarak simüle edilemeyen hayali modellerin özellikleri veri olarak kullanılabilir. Hem fiziksel hem de sayısal ters asılı modeller ile biçim etken sistemlerin şeklinin, kabuk yapılarının biçiminin bulunmasında kullanılması mümkündür (Adrianssens ve diğer., 2014). Ancak büyük açıklıklı yapıların tasarımının çeşitliliği, statik strüktürlerin analitik olarak hesaplanmasına ihtiyaç duymaktadır. Daha önceleri sadece önceden bilinen şekillere ait kuvvet ve deformasyonlar ölçülebilmekteydi ve bu şekiller basit ağ strüktürleri ile sınırlı kalmıştı. Biçimin, yüksüz ve yüklü durumdaki deformasyonları ve kuvvetleri büyük ölçüde etkilemesi, uygun biçim arayışının önem kazanmasına neden olmuştur. Minimal yüzeyler ve ızgara kabuklar da biçim bulma için deneysel ve analitik yöntemler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntemler problemin görselleştirilmesine yardımcı olmak ile beraber eksiklikleri de bulunmaktadır, varyasyonlar çok sınırlıdır ve modellerin ölçülmesi gerekmektedir (Schek, 1974).

Bilgisayarların gelişmesi ile birlikte 1960'lı yıllardan sonra araştırmalar ile kablo ağı asma germe üst örtülerinin uygulanmasında sayısal yöntemlerden yararlanılmaya başlanmıştır (Veenendaal ve Block, 2012). Bilgisayar destekli tasarımın ortaya

çıkmasıyla ve malzeme davranışları hakkında daha fazla bilgi sahibi olunması ile, biçim bulmaya yönelik çeşitli yaklaşımlar, verilen geometrik parametreler için optimum strüktürel çözümlerin hesaplanmasında bilgisayarlar kullanılmaya başlanmıştır (Silver ve diğer., 2013).

2.3.3 Sayısal Biçim Bulma Yöntemleri

Mimar ve mühendisler, basit geometriler dışında strüktürel ve uygulama kolaylığı açısından verimli üç boyutlu ızgara kabuk biçimleri oluşturmak için fiziksel ve sayısal yöntemler geliştirmişlerdir. Kabuk yapılarında biçim bulma işlemi bir başlangıç geometrisi gerektirebilir, geometrinin son şekli belirlendiğinde, sayısal model, gerçek fiziksel malzeme ve eleman özellikleri eklenerek güncellenir. Bu yeni güncellenmiş model, strüktür analizinin temelini oluşturmaktadır. Kabuk yapılarında biçim bulma için geliştirilen sayısal yöntemler ikiye ayrılabilir (Adrianssens ve diğer., 2014). Bu yöntemler:

- 1- Malzeme özellikleri gerektirmeden denge problemini çözen yöntemler
- 2- Malzeme özellikleri veya yay sabiti eklenerek denge problemini çözen yöntemler

2.3.3.1 Malzeme Özellikleri Gerektirmeden Denge Problemini Çözen Yöntemler

Malzeme özellikleri gerektirmeden statik denge sorununu çözen yöntemler; Kuvvet yoğunluğu yöntemi, *force density method*, basınç ağı analizi *thrust network analysis*. Tasarım örnekleri, her yöntemin belirli bir uygulamaya daha uygun olduğunu göstermektedir. Gerilmesiz ahşap ızgara kabuklar için kuvvet yoğunluğu yöntemi, donatısız kesme taşlar ile yapılan kabukları için basınç ağı analizi genellikle kullanılmaktadır (Adrianssens ve diğer., 2014).

Kuvvet yoğunluğu yöntemi; Klaus Linkwitz ve H. J. Sheck tarafından 1971 yılında geliştirilen yöntem ile kuvvetler dengesi için yeni bir formül keşfedilmiş, bu formülün kuvvetler dengesi problemi çözmek için uygun bir başlangıç geometrisi bulmada etkili bir yöntem olduğunu fark edilmiştir (Gründig ve diğer., 2000).

Düğüm noktaları olan bir kablo ağ strüktürünün denge durumu, iç ve dış kuvvetlerin dengede olduğu durum olarak tanımlanabilir. Ön gerilmeli ağlar ve membran yapılarında başlangıç koordinatlarına ihtiyaç duyulmadan, denge denklemlerini kurmak ve çözmek için, yararlanılan bir yöntemdir.

Kuvvet yoğunluğu yöntemi, *Force Density Method* veya *Kraft Dichte Methode* olarak adlandırılmış, 1972 Münih Olimpiyat Oyunları stadyumunun çatısının oluşturulmasında kablo ağ yapılarında kuvvet dengesini bulmak için kullanılmıştır. Ağ hesaplamalarında yeni bir yönteme duyulan ihtiyaç ve çift eğrilikli bir yüzeyin basit ve minimum veri ile çözme arayışı ile ortaya çıkmıştır. Yöntem bir ağ strüktürdeki, her bir elemanın kuvvet ve uzunluk oranına dayanmaktadır. Buradaki elemanlar, düğüm noktaları arasında bulunan kablo veya çubuk elemanlardır. Düğüm noktaları ve elemanlardan oluşan bir ağın bir çerçeveye asılması veya belirli noktalardan gerilmesi ile alabileceği tüm olası denge formlarını tanımlamak hedeflenmiştir. İlk başta herhangi bir geometrik kısıtlama uygulanmamış sadece biçimin denge durumunda olması yani her düğüm noktasında toplam kuvvetin sıfır olduğu durumda olması hedeflenmiştir. Elemanların esnek veya esnek olmaması ise önemsizdir (Schek, 1974).

Yöntemin geliştirilmesi Heinz Isler tarafından gerçekleştirilen ters asılı maket ve bezlere dayanmaktadır, membranın elastik olmadığı ve gerilme kuvvetlerini ilettiği varsayılmaktadır. Sabit bir alanı olmasına rağmen, membranın sabit bir şekli bulunmamaktadır ve uygulanan kuvvete göre şekli değişmektedir. Her bir noktadaki gerilmelerin eşit olması teorisi ve membran kullanılarak serbest sarkan bir membranın alacağı biçim bulunabilmektedir.

Biçim ve kuvvetlerin etkileşimine dayanarak, biçim bulma işlemi, bir formun geometrisini istenen bir ön gerilme ve belirlenen ağ geometrisini sağlayarak yüzeyi bölmeyi amaçlamaktadır. Kuvvet yoğunluğu yönteminin, büyük sapsmaların meydana geldiği ve yapının parçalarının gevşediği hafif strüktürlerin sayısal olarak hesaplanmasına ise uygundur (Gründig ve diğer., 2000). Kuvvet yoğunluğu yönteminin biçim bulmada uygulanması için ana sorun, yüzeyin en iyi şekilde nasıl

bölüneceğidir. Otomatik bir bölünme işlemi genellikle düzgün ve düzenli ağlar meydana getirir; ancak gerçekçi olmayan kısa elemanları da içermektedir. Bu kısa elemanlarda genellikle analiz sırasında bükülmeler meydana gelmektedir. Ağdaki bağlantı elemanlarının düzeltilmesi, biçim bulma sürecinde zaman alan bir kısımdır (Gründig ve diğer., 2000).

Yöntemin ana avantajı, genel bir ağ yapısının herhangi bir denge durumunun, çözümü ile elde edilebilmesidir. Bu sistem, bir ağı tanımlamak için elemanlardaki kuvvet-uzunluk oranlarından yararlanmaktadır. Her bir eleman için tek bir kuvvet yoğunluğu belirlenmekte ve bir lineer denklem sisteminin çözülmesi ile uygun denge durumu elde edilmektedir. Bu denge durumundaki strüktür her bir kolda öngörülen kuvvet uzunluk oranına sahiptir ve birçok farklı biçim hesaplanabilmektedir (Schek, 1974).

Basınç ağı analizi; yalnızca basınca çalışan funiküler kabuklarda sistemin denge durumunun hesaplanmasında kullanılan bir biçim bulma yöntemidir. Donatısız kesme taş gibi kagir yapılar için kullanımı uygundur, genellikle tonoz ve kubbe yüzeyleri için biçim bulmada kullanılır.

2.3.3.2 Malzeme Özellikleri veya Yay Sabiti Eklenerek Denge Problemini Çözen Yöntemler

Malzeme özellikleri veya yay sabiti eklenerek dinamik denge problemini çözen yöntemler; Devingen şekil değiştirme, *dynamic relaxation*, Parçacık-Yay simülasyonu, *Particle-Spring simulation*. Tasarım örnekleri, gerilmeli ızgara kabukları için devingen şekil değiştirme ve ince beton kabuklar için parçacık-yay simülasyonunun daha uygun olduğunu göstermektedir (Adrianssens ve diğer., 2014).

Devingen şekil değiştirme, 1965 yılında Alistair Day tarafından icat edilmiştir ve bir dizi doğrusal olmayan denklemi çözen sayısal bir prosedürden oluşur. Uygulanan yük altında yapının zaman içindeki değişen durumunu, devinimi izler. Malzeme özelliklerini içermektedir. Yöntemin temeli, yapı statik dengede duruncaya kadar,

kademeli olarak artan zaman aralıklarında ızgaranın birbirine bağı her düğümünün hareketini, adım adım izlemektir. Devingen şekil değıştirme inşaat uygulanması için hassas geometrik bilgiler sağlamaktadır. Devingen şekil değıştirme yöntemleri, uygulama basitliğı ve büyük yer değıştirmelerle uğraşırken üstün bir noktada birleştirme davranışı nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir.

Parçacık-Yay simülasyonu, doğrusal elastik yaylar ile birbirine bağlanan parçacıklar adı verilen toplanmış kütlelere dayanmaktadır. Kablolara asılan ağırlıkların fiziksel davranışının canlandırılması için toplanmış kütleleri bağlayan eksenel yaylar kullanır. Toplanmış ağ yığınları için bir ağ geometrisi tanımlayarak sabit denge durumunu bulur. Parçacıklar düğüm noktalarıdır, yaylar ise elastik çubuk elemanlar. Sistemdeki tüm kuvvetlerin toplamını eşitler. Dengede olmayan kuvvetler, çubukların geometrik uzunlukları ve düğümlere etki eden yerçekimi yükleri ile ortaya çıkar. Her bir yaya sabit bir eksenel sertlik, bir başlangıç uzunluğu ve katsayısı atanır.

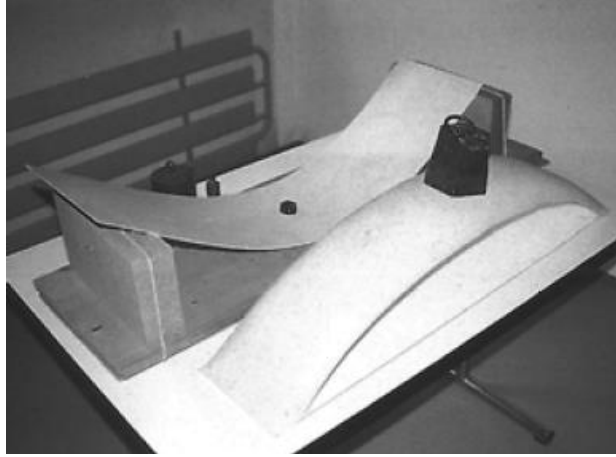
BÖLÜM ÜÇ

GEOMETRİK AĞLARIN IZGARA KABUK SİSTEMLERDE UYGULANMASI

Bu bölümde, karolama ve biçim bulma yöntemleri ile üretilen ağların uygulandığı kabuk yüzeyleri, kabuk sistemlerin gelişimi ve ızgara kabuk sistemlerde kullanılan farklı uygulama yöntemlerinin sınıflandırılması incelenmektedir.

3.1 Kabuk Yüzeylerinin Eğriliklerine Göre Sınıflandırılması

Kabuk strüktürlerin geometrileri eğri yüzeylerdir. Eğri yüzeylerin yapısal performans açısından düz yüzeylere göre daha verimli olduğu ise kanıtlanmıştır. Heinz Isler yaptığı bir deneyde eğimli bir plastik eleman ile aynı ebatlardaki düzlemsel bir elemanı yük taşıma kapasitesine göre karşılaştırmış, eğimli olan elemanın taşıyabileceği yükün düz elemanın taşıyabildiği yükün 30 katı olduğunu ölçmüştür (Şekil 3.1) (Dimčić, 2011). Kabuk yüzeyleri eğriliklerine göre tek eğrilikli, çift eğrilikli veya serbest eğrilikli yüzeylerden oluşabilmektedir.



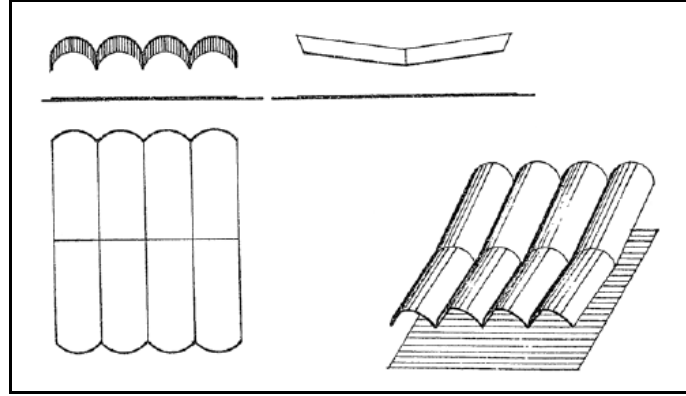
Şekil 3.1 Heinz Isler, düzlemsel eleman ile eğimli elemanın karşılaştırılması (Dimčić, 2011)

Düzlem üzerinde bir eğrinin her noktasında bir eğriliği bulunmaktadır. Üç boyutlu yüzeylerde ise yüzey üzerindeki herhangi bir noktadan sonsuz sayıda eğrinin geçebilmesi nedeniyle, eğriliği incelenecek olan noktanın yüzeyine teğet bir düzlem alınarak, bu teğet düzleme dik olan ve bu noktadan geçen düzlemler göz önüne

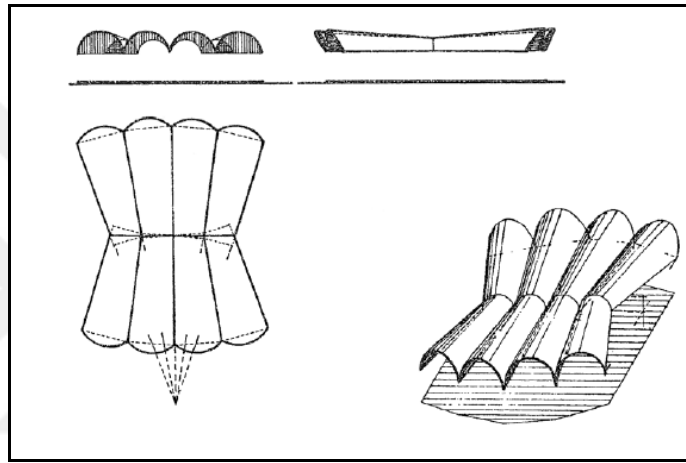
alınmaktadır. Bir noktadan sonsuz sayıda düzlem geçirilebilmektedir. Bu bağlamda, sonsuz sayıda olduğu bilinen bu eğriliklerin uç sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu uç sınırlardan büyük olan maksimum eğrilik, küçük olan ise minimum eğriliktir. Bu eğrilikler ise asal eğrilik olarak tanımlanmaktadır. Asal eğriliklerin, aritmetik ortalaması ise ortalama eğriliktir, ortalama eğrilik minimum ve maksimum eğriliklerin toplamının yarısına eşittir. Ortalama eğriliği sıfır olan yüzeyler ise minimal yüzeylerdir. Kuadrik yüzeylerde asal eğrilikler birbirlerini dik olarak kesmektedir. Bütün eğri yüzeyler ya tek ya da çift eğriliklidir, asal eğrilikler sıfır veya sıfırdan farklı değerlere sahip olabilmektedir. Eğrilikleri konkav yani aşağıya bakanlar “+”, eğrilikleri konveks yani yukarıya doğru bakanlar “-” olarak tanımlanabilir. Asal eğriliklerin çarpımı ise Gauss eğriliğini vermektedir. Bir yüzeyi oluşturan asal eğriliklerinin ikisi de aynı yöne bakıyorsa yani ikisi de konkav “+” veya ikisi de konveks “-” ise yüzey eş eğriliktir. Yüzeyi oluşturan asal eğriliklerden birisi konkav “+” diğeri konveks “-” ise yüzey ters eğriliklidir (Türkçü, 2017).

3.1.1 Tek Eğrilikli Kabuklar

Asal eğriliklerinden bir tanesi sıfır olan yani Gauss eğriliği sıfır olan yüzeylere tek eğrilikli *monoclastic* yüzeyler denilmektedir. Bu yüzeylere örnek olarak koni (Şekil 3.2), silindir, kesik koni (Şekil 3.3) verilebilir. Kabuklarda tek eğrilikli yüzey uygulamalarının ise yaygın bilineni ise tonoz kabuklardır, büyük dikdörtgen alanların örtülmesinde genel olarak kullanılırlar. Geleneksel yöntemler ile yapılan tonozlar bir biri ardına sıralanmış ayırık kemer sistemleri gibi çalışır bir bölümü yıkıldığında geri kalanı ayakta kalabilir. Ancak ince kabuklar da ise sistem bir bütün olarak çalışmaktadır.



Şekil 3.2 Silindirik kabuk (Bayülgen, 1993)



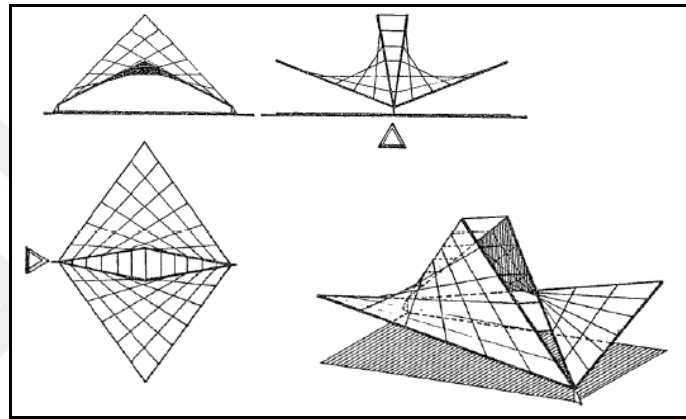
Şekil 3.3 Konik kabuk (Bayülgen, 1993)

3.1.2 Çift Eğrilikli Kabuklar

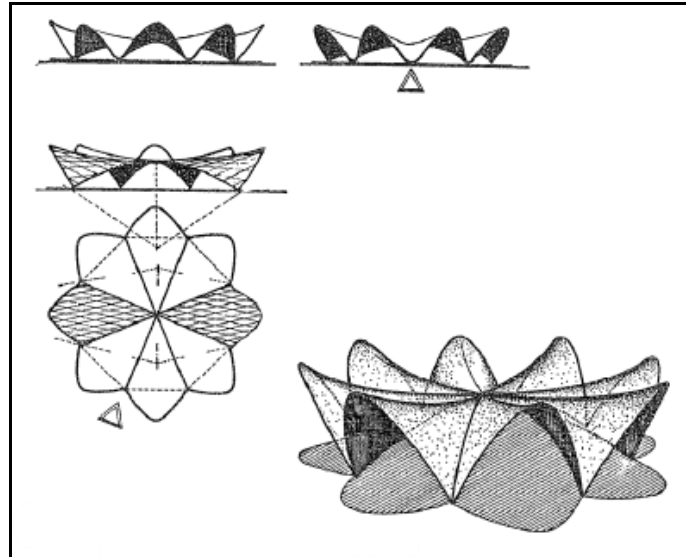
Asal eğriliklerinin ikisi de sıfırdan farklı olan yüzeyler çift eğriliklidir. Çift eğrilikli yüzeyler eş ve ters eğrilikli olmak üzere ikiye ayrılır. Dönel yüzeyler *surface of rotation*, çizel yüzeyler *ruled surface* ve öteleme yüzeyleri *surface of translation*, ile üretilebilirler. Kabuklarda uygulamaları ise, doğrudan analitik fonksiyonlarla tanımlanmaktadır. Bu işlevler genellikle daha ileri analitik hesaplamalar yapma kolaylığı ve bir kabuğun fabrikasyon sürecinde şeklini tanımlama yetenekleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bunlar genellikle düşük dereceli polinomlar, hiperboloitler, elipsoitler ve hiperbolik veya eliptik paraboloidler yada trigonometrik veya hiperbolik fonksiyonlar ile oluşturulurlar (Adrianssens ve diğer., 2014).

3.1.2.1 Ters Eğrilikli Kabuklar

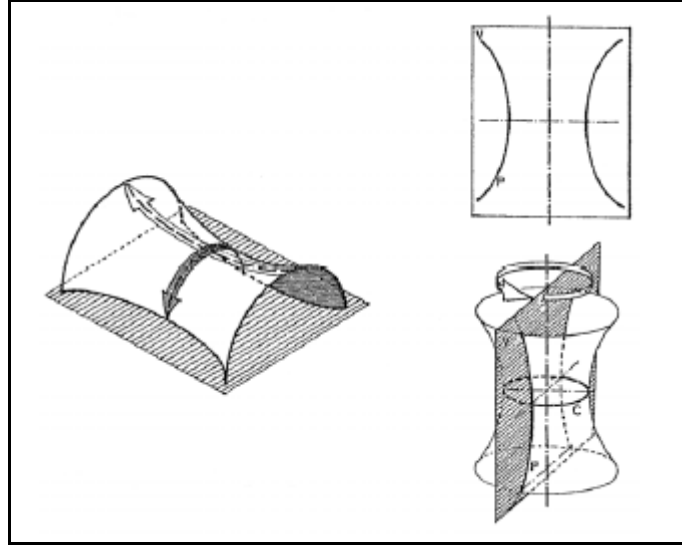
Asal eğrilikleri aynı yönde olan yüzeyler ile oluşturulan yüzeyler eş eğrilikli *anticlastic* yüzeylerdir. Öteleme yüzeyleri ile hiperbolik paraboloid (Şekil 3.4) ve semer yüzeyleri (Şekil 3.5). Dönel yüzeyler ile tor yüzeyin iç kısmı, termik santraller ve reaktörlerin soğutma kulelerinde de yaygın olarak kullanılan tek yüzeyli hiperboloid (Şekil 3.6) ve katenoid. Çizel yüzeyler ile semer yüzeyleri, hiperbolik paraboloid ve konoit (Şekil 3.7) oluşturulabilir.



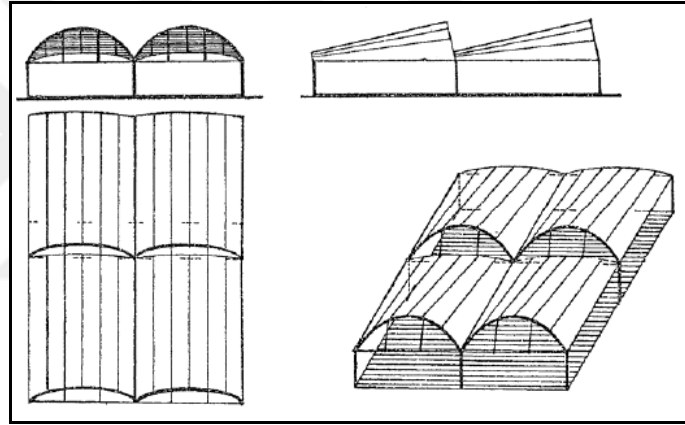
Şekil 3.4 Düz kenarlı hiperbolik paraboloid kabuk (Bayülgen, 1993)



Şekil 3.5 Eğri kenarlı hiperbolik paraboloid kabuk (Bayülgen, 1993)



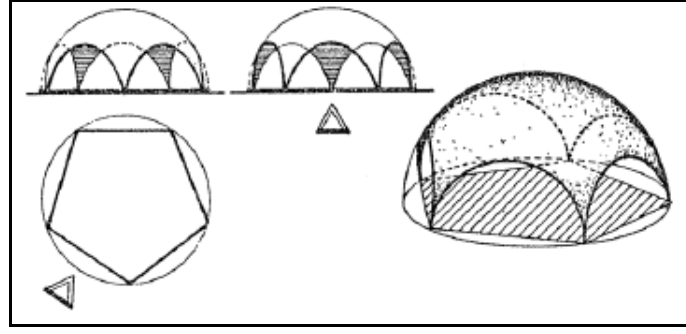
Şekil 3.6 Hiperboloit (Bayülgen, 1993)



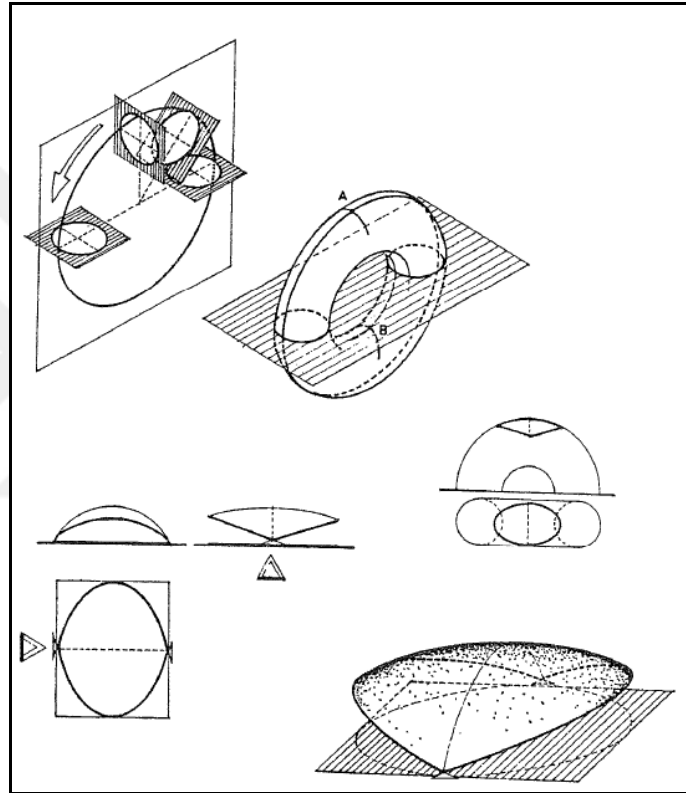
Şekil 3.7 Eğik kesimli konoit kabuk (Bayülgen, 1993)

3.1.2.2 Eş Eğrilikli Kabuklar

Asal eğrilikleri aynı yönde olan yüzeyler eş eğrilikli *synclastic* yüzeylerdir. Öteleme yüzeyleri ile eliptik paraboloid. Dönel yüzeyler ile küre (Şekil 3.8), paraboloid, elipsoit, çift yüzeyli dönel hiperboloit ve torus yüzeyi (Şekil 3.9) oluşturulabilir.



Şekil 3.8 Beşgen planlı küresel kabuk veya kubbe (Bayülgen, 1993)

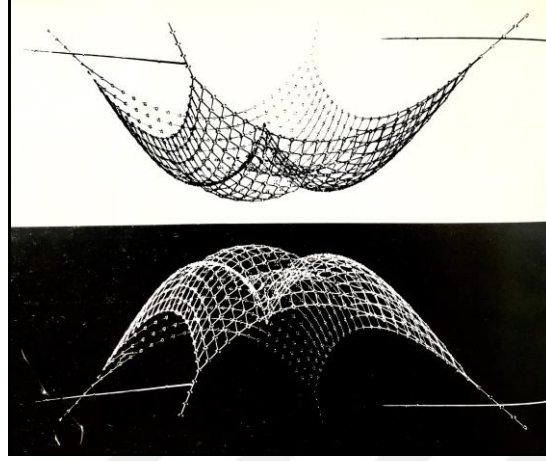


Şekil 3.9 Torus yüzeyi ile oluşturulan kabuk (Bayülgen, 1993)

3.1.3 Serbest Eğrilikli Kabuklar

Matematiksel olarak belirli bir tanımlaması zor yapılabilen serbest biçimli yüzeylerdir. Bu yüzeyler ile oluşturulan kabuklar arasında Antoni Gaudí, Frei Otto ve Heinz Isler'in kablolu yapılarıyla ilişkili doğal, ters asılı modeller ve aynı zamanda eğilme gerilmeleri olan ızgara kabukları bulunmaktadır (Şekil 3.10). Germeye çalışan sarkan formlarının tersine çevrilmesiyle basınca çalışan kabuk biçimleri oluşturulabilmektedir (Şekil 3.11). Şekil dijital olarak üretilirse, başlangıçta

parçalı veya daha yüksek dereceli polinomlar tarafından parametrelendirilir (Adrianssens ve diğer., 2014).



Şekil 3.10 Asılı bir ağ ve ters çevrilmesi ile üretilebilecek ızgara kabuk geometrisi (Hennicke, 1974)



Şekil 3.11 Basınca çalışan kabuk formları oluşturmada, alçı bandajlarla yapılan deneyler 1992 yılı Villa Stuck sergisi Münih, Almanya (Otto ve diğer., 1995)

3.2 Kabuk Sistemlerin Gelişimi ve Sınıflandırılması

Geniş açıklıkların geçilmesinde kullanılan ince kabuk sistemler, yüzeylerine oranla kalınlıkları çok küçük olan sistemlerdir. Modern taşıyıcı sistemlerin genel hedefi olan, en az malzeme kullanılarak, en hafif ve ekonomik şekilde en büyük açıklığı geçmek, bu strüktür sistemlerinin önemini vurgulamaktadır. Kuvvetlerin, esas itibariyle gerilmelerin orta yüzeylerine paralel olarak etkelediği strüktürlerdir. Biçimleri sayesinde kabuklar ara taşıyıcı elemanlara ihtiyaç duyulmadan mekanların

örtülmesine olanak sağlamaktadır. Yüzeyleri kendi kendini taşıyabildiği için kar ve rüzgar gibi hareketli yükleri strüktür hesaplamalarında göz önünde bulundurmak gerekmektedir (Bayülgen, 1993).

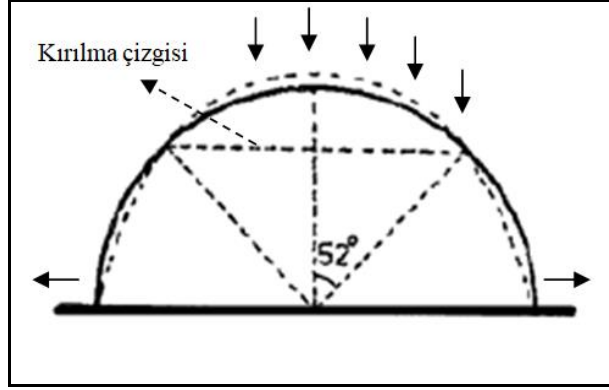
3.2.1 Kabuk Sistemlerin Gelişimi

Günümüzde en büyük, donatısız beton kabuk kubbe yapısı yarım küre geometrisine sahip Roma'daki Pantheon'dur (Şekil 3.12). İki bin yıl önce inşa edilmiş olan bu küresel kubbe, % 2,8'lik bir kalınlık - açıklık oranına sahiptir ve 43,3 metre açıklık geçmektedir. Pozzolana betonu; kireç, volkanik pozzolana kumu ve su birleşimi bir karışımdan yapılan kubbede, yapının hafifletilmesi için sünger taşı kullanılmıştır ve kaset döşemeye benzer şekilde boşluklar yaratılmıştır. Tabandan tepeye doğru gidildikçe kubbenin kalınlığı ise azalmaktadır.

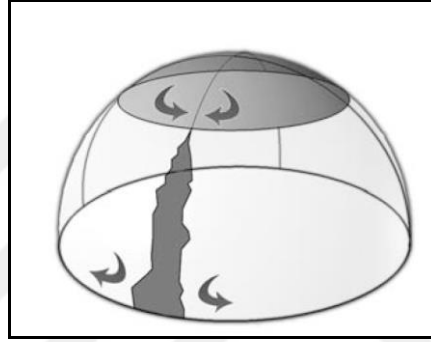


Şekil 3.12 Pantheon (Savaşır, 2016)

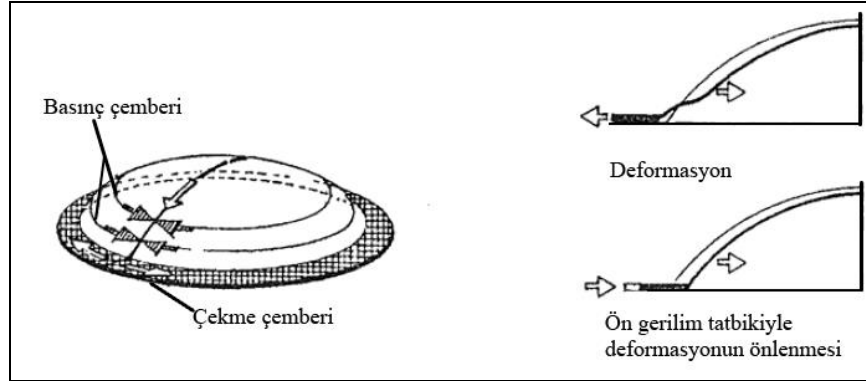
Küresel kabuklarda kırılma çizgisinin (Şekil 3.13) üstünde bulunan bölgelerde, hem meridyen hem de enlemler boyunca basınç, kırılma çizgisinin altında kalan bölgelerde ise meridyenlerde basınç, enlemlerde ise çekme gerilmeleri görülmektedir (Şekil 3.14) (Türkçü, 2009). Pantheon'un tepesinde 8.2 metre çapında bir basınç çemberi bulunmaktadır. Kubbe eteğindeki açılmaları önlemek amacı ile 7 sıra beton halka eklenerek çekme çemberi işlevi sağlanmıştır (Şekil 3.15) (Savaşır, 2016).



Şekil 3.13 Kabuk kubbelerde, kırılma çizgisinin yeri ve farklı bölgelerdeki gerilmeler (Bayülgen, 1993)



Şekil 3.14 Kırılma çizgisinin göre farklı bölgelerdeki gerilmeler (Dimčić, 2011)



Şekil 3.15 Kabuk kubbelerde kullanılan basınç ve çekme çemberlerinin etkisi (Bayülgen, 1993)

19. Yüzyılda kabuk yapıları betonarme ile birlikte daha da gelişmiştir. Hem basınca hem de germeye çalışan bu malzeme dökülerek yapılması nedeni ile eşit bir kuvvet dağılımına sahip, homojen bir malzemedir. Betonarme ile birlikte ince kabuk yapılarının kullanımı yaygınlaşmıştır. İnce kabuk yapıları ve ızgara kabukların gelişme süreci ise birlikte olmuştur. Izgara kabuklarda amaçlanan ise, karolama veya

biçim bulma yöntemlerinden yararlanılarak, yüzeyi ayırık elemanlara bölmek ve doğrusal sistemler ile kabuk strüktürleri birleştirerek çalıştırmaktır. Çelik ve ahşap gibi malzemeler ile üretilebilecek bu sistemlerde karolama tekniği ile bölünen yüzey ve düğüm noktalarının tasarımı ile basınç ve gerilme kuvvetlerini yönetmek mümkündür (Dimčić, 2011).

3.2.2 İnce Kabuk ve Izgara Kabukların Farkları

Izgara kabuklar geçebildikleri açıklığa ve diğer iki boyutlarına göre nispeten ince en kesitli kabuk strüktürlerdir. Hem ince kabuklar hem de ızgara kabuklar eğri yüzeylere sahiptir. Kabuk strüktürler, sürekli bir yüzey olarak inşa edilebildikleri gibi, ızgara kabuklar gibi bir yüzeyi takip eden ayırık elemanlardan da oluşturulabilirler. Izgara kabukların farkı ise uzay kafes kubbeler gibi ayırık yüzeylerden meydana gelen eğri yüzeylere sahip olmalarıdır. Statik özellikleri ise ince kabuk ve uzay kafes sistemlerden farklıdır. Sürekli olan hacimlerde yükler yüzey içerisinde, ayırık yüzeylerde ise yükler çizgiler boyunca etki eder. İnce kabuklarda çekme, basınç ve kayma gerilmeleri bazı bölgelerde eğilme görülmekte. Izgara kabuklarda ise ağırlıklı olarak basınç ve çekme gerilmeleri görülmektedir, ancak kayma gerilmeleri karşılanamamaktadır. Bu neden ile kayma gerilmelerini önlemek için kullanılabilecek yöntemler, elemanların rijit bağlantılar ile birleştirilmesi, bazı düğümlerde diyagonal kablolar (Şekil 3.16) ve rüzgar bağlantıları gibi ek önlemler alınması veya kayma takozu eklenmesidir (Türkçü, 2017).



Şekil 3.16 Stabilité için düğüm noktalarında ızgaranın diyagonal kablolarla desteklenmesi (Chilton ve Tang, 2017)

Uygulamada kullanılan malzeme farklılıklarında ise ince kabukların yapımında betonarme gibi ağır ve rijit malzemeler tercih edilirken, ızgara kabuklarda ahşap, çelik çubuklar gibi hafif malzemeler kullanılmaktadır. İnce kabuklarda ihtiyaç duyulmayan ancak ızgara kabukların ayırık elemanlardan oluşmaları ve boşluklu yapıları gereği üstlerini örten membran veya cam gibi elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

3.2.3 Izgara Kabuk Sistemler

Izgara kabukların tasarımında geometri ve uygulama sırasındaki optimizasyon odak noktası olmuş tasarım hedefi ise elemanların ebatlarını azaltırken malzeme kullanımını azaltmak ve optimizasyon ile farklı elemanların sayısını azaltmak olmuştur (Gengnagel, Kilian, Palz ve Scheurer, 2011). Izgara kabuklar günümüzde genellikle üst örtüsü olarak kullanılmalarına rağmen, farklı formlara uyarlanabildikleri için bir yapıda sadece üst örtüsü olarak değil, yapının bütününde de uygulanmaları mümkündür. Cephe ve strüktürün birleşmesine olanak sağlayan bu sistemler, günümüzde farklı parça ve elemanların da imalatındaki gelişme ve kolaylıklar sayesinde, mimarlara tasarımlarında özgürlük kazandırmıştır (Dimčić, 2011).

Izgara kabuklar ahşap, kompozit veya çelik çubuklar gibi farklı elemanlardan yapılabilirler. Bu elemanlar kısa elemanlar veya uzun elemanlar olabilir. Kısa elemanlardan oluşan ızgara kabuklarda, elemanlar düğümden düğüme cıvatalı veya kaynaklı olarak geçebilir. Bir diğer yöntem ise uzun, ince ve devamlı elemanların, düğüm noktalarında sürekli olarak bir biri üzerinden katmanlar şeklinde (Şekil 3.17) geçerek oluşturulmalarıdır. Eğri geometrili, boşluklu, uzun ancak ince enkesitili taşıyıcı sistemlerdir. Üç boyutlu geometrileri ızgara kabuklarının etkin bir strüktür olmasını sağlamaktadır. Kabuk eğriliği, önceden düz olan elemanların bükülmesiyle veya başlangıçta prefabrik olarak üretilmiş eğri elemanlardan meydana gelebilmektedir. Izgara kabuklar kullanılan yapım tekniğine göre, gerilmeli veya gerilmesiz ızgara kabuklar olarak ayırım yapılabilmektedir (Rombouts, Lombaert, De

Laet ve Schevenels, 2019). İyi tasarlanmış hafif bir ızgara kabuk çok büyük açıklıkları geçebilmektedir.



Şekil 3.17 Jerwood gridshell çok katmanlı ızgara kabuk (Chilton ve Tang, 2017)

3.2.3.1 Gerilmesiz Izgara Kabuklar

Genellikle çelik, ahşap ve alüminyum kullanılır. Kabuk eğriliği iki yöntem ile oluşturulmaktadır, İlk yöntem prefabrik olarak eğilmiş çelik, alüminyum elemanlar veya eğimli kesilmiş lamine ahşap elemanlar kullanmaktır. İkinci yöntem ise aynı malzemeler ile üretilmiş düz elemanların, düğüm noktaları aracılığıyla yüzeye eğim kazandırmasıdır. Burkulmayı önlemek için düğüm noktalarının moment dirençli olması veya kabuğun birden fazla katmandan oluşması ve kavisli bir çerçeve oluşturması gerekmektedir (Rombouts ve diğer., 2019). Gerilmesiz ızgara kabuklarda prefabrikasyon mümkün olduğu için inşaat alanındaki uygulanma süresi gerilmeli ızgara kabuklardan daha kısadır.

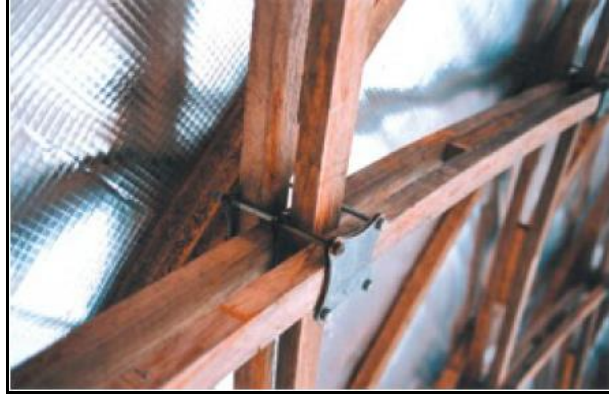
3.2.3.2 Gerilmeli Izgara Kabuklar

Gerilmeli ızgara kabuklar konsepti Frei Otto tarafından geliştirilmiş ve 1975 yılında Mannheim Multihalle'nin inşasında uygulanmıştır. Strüktür detaylı bir ters

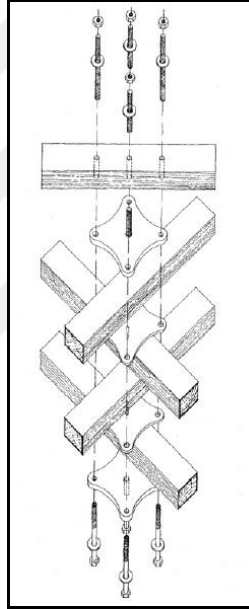
çevrili maket kullanılarak tasarlanmıştır. Daha sonra Buro Happold Expo 2000 için Hannover'daki Japon Pavyonu tasarımında ve 2002'de Jerwood Gridshell'in tasarımında gerilmeli ızgara kabuklardan yararlanmıştır. Bu yapıların ızgara kabukları, bir karolamanın matematiksel olarak tarif edilen bir yüzeye yerleştirilmesiyle belirlenmiştir (Rombouts ve diğer., 2019).

Başlangıçta düz olan, devamlı bir ızgaradan meydana gelen gerilmeli ızgara kabuklar, vinçler veya iskeleler yardımı ile sahada bükülerek, yüzey eğriligi meydana getirilmektedir. Izgara içerisindeki düğüm noktaları ilk başta gevşektir, istenilen eğrilik sağlandığında bütün bağlantıların sabitlenmesi ile ızgara düzlemi içerisinde kayma gerilmeleri meydana gelmediğinden emin olunmakta ve bu sayede ızgaranın serbest eğrilikli biçimleri alması sağlanmaktadır. Eğer gerilmeli ızgara kabuk çok katmanlı ise katmanlar ilk başta üst üste yere konup birlikte şekillendirilebilir veya ilk katman şekillendirilip yerleştirildikten sonra diğer katmanlar üzerine yerleştirilip sabitlenebilir.

Gerilmesiz ızgara kabukların aksine gerilmeli ızgara kabuklar özel olarak üretilmiş düğüm noktalarına (Şekil 3.18) ve elemanlara ihtiyaç duymazlar (Şekil 3.19). Eğilme karakteristikleri nedeni ile gerilmeli ızgara kabuklarda genellikle ahşap kullanılır bunun yanı sıra cam elyaf takviyeli polimer gibi kompozit malzemelerde kullanılmaktadır (Rombouts ve diğer., 2019). Uygulama tekniği basittir ancak prefabrik olan gerilmesiz ızgara kabuklara göre inşaat alanındaki uygulanma süresi daha fazladır. Örneğin Jerwood gridshell projesinde, marangozların kabuğu oluşturması için ana yüklenici dört ay boyunca sahadan ayrılmak zorunda kalmıştır (Adrianssens ve diğer., 2014).



Şekil 3.18 Ahşap katmanlarını birbirine kenetleyen, ancak dönmeye izin veren sistemin bağlantısı (Chilton ve Tang, 2017)



Şekil 3.19 Düğüm noktası detayı (Chilton ve Tang, 2017)

Kabuklarda olduğu gibi gerilmeli ızgara kabuklarda da bir strüktürün etkinliğini şekilleri belirlemektedir. Lienhard, Alpermann, Gengnagel ve Knippers, gerilmeli ızgara kabukları da dahil ettikleri. Eğilmeyi aktif olarak kullanarak kendini şekillendiren strüktürler tasarlamak için üç yaklaşım arasında ayrım yapmaktadır (Lienhard, Alpermann, Gengnagel ve Knippers, 2013).

Fiziksel elemanların asıl eğilmesinin tasarımı yönlendirdiği davranış tabanlı bir yaklaşımda eğilme başlangıçta sezgisel olarak kullanılır; sistemin geometrisi ve yapısal davranışı deneysel olarak incelenir. Malzeme sınırlamaları fiziksel olarak test

edilir. Yaygın uygulama geçici veya mobil barınaklar için eğilme aktif inşaat sistemleridir. Tipik örnekler, Orta Asya'daki göçebe kabilelerin çadırları ve yurtlardır (Şekil 3.20) (Lienhard ve diğer., 2013).



Şekil 3.20 Yurt (Lienhard ve diğer., 2013)

Geometri tabanlı yaklaşım ise analitik geometri veya ters asılı modelleri içeren deneysel biçim bulma yöntemlerine dayanmaktadır. Bu yaklaşım hem analitik hem de deneysel olarak değerlendirilebilir. Ancak, simülasyon teknikleri henüz büyük elastik bozulmaları hesaplayamamaktadır. Malzeme limitleri, momentum eğrilik ilişkisine dayalı olarak analitik olarak değerlendirilir. Elemanların eğilme davranışlarının dikkate alınmadığı yaklaşımdır. Biçim geometrik olarak belirlenir (Lienhard ve diğer., 2013).

Diğer iki yöntemi birleştiren integral tabanlı yaklaşımda ise biçim bulma sırasında eğilme davranışı simüle edilerek şekil belirlenmektedir. Malzemenin eğilme davranışını biçim bulma sürecine entegre etmek için malzeme özellikleri ve sınırları da dikkate alınarak sayısal analiz modeli yapılmalıdır (Lienhard ve diğer., 2013).

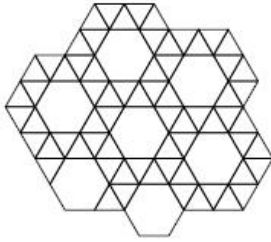
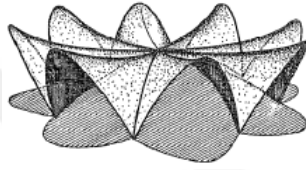
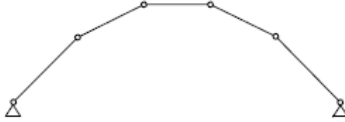
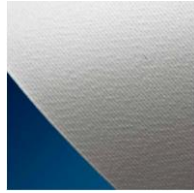
BÖLÜM DÖRT

MODERN YAPI KABUKLARININ GEOMETRİK TASARIMI İLE ÜRETİLEN BİNA ÖRNEKLERİNİN İNCELENMESİ

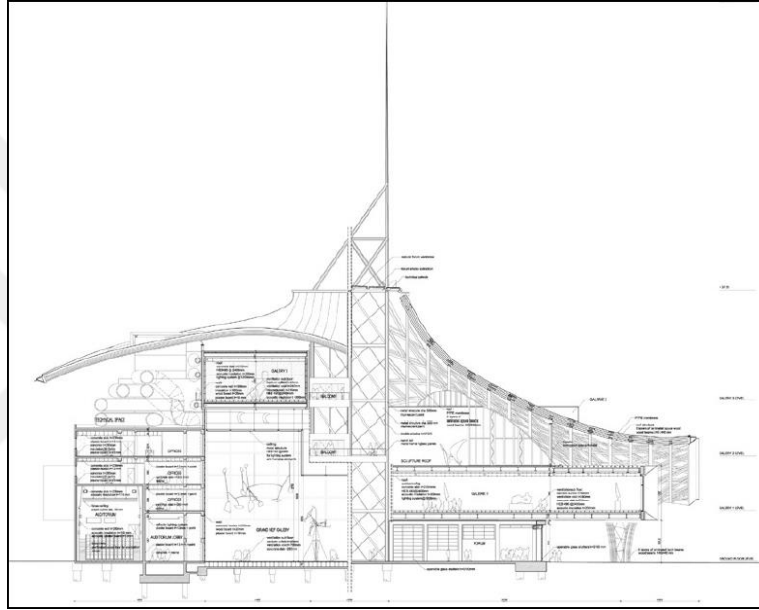
Bu bölümde, karolama ve biçim bulma yöntemleri kullanılarak oluşturulmuş strüktürlere sahip 10 adet yapı örneği araştırılmış, yapım sistemleri, yüzey geometrileri, kullanılan malzeme ve elemanları incelenmiştir. Araştırma kapsamında incelenen örneklerle genel bir bakış içeren tablolar, Pompidou Center (Tablo 4.1), British Museum (Tablo 4.2), Expo 2000 Japon pavyonu (Tablo 4.3), Mannheim Multihalle (Tablo 4.4), Metropol Parasol (Tablo 4.5), Smithsonian enstitüsü Kogod avlusu (Tablo 4.6), Beijing ulusal su sporları merkezi (Tablo 4.7), Myzeil alışveriş merkezi (Tablo 4.8), Waitomo ziyaretçi merkezi kanopisi (Tablo 4.9), Westfield alışveriş merkezi (Tablo 4.10) oluşturulmuştur.

4.1 Pompidou Center

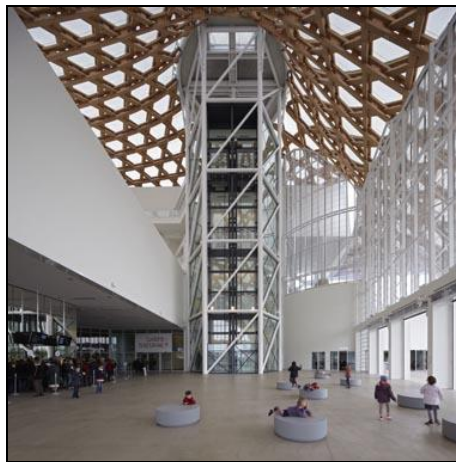
Tablo 4.1 Pompidou center incelemesi (Shigeru Ban Architects, 2020a)

Pompidou Center			
Mimari	Yıl: 2010 Yer: Metz, Fransa Mimar: Shigeru Ban Mühendis: Hermann Blumer, Cecil Balmond, Ove Arup Program: GSA yazılımı		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 6,3,3,3,3		 Ters eğrilikli yüzey
Üretim	Strüktür		Malzeme
	 Gerilmesiz ızgara kabuk		 TiO ₂ kaplamalı PTFE membran  Lamine ahşap

Müzeyi oluşturan 3 adet 90 m x 15 m ebatlarındaki sergi alanı üst üste durmaktadır (Şekil 4.1). Düz blokların üstünü örten, hasır şapkalardan esinlenen çatı, müzenin ihtiyaçları doğrultusunda az sayıda kolon içerecek şekilde tasarlanmıştır (Shigeru Ban Architects, 2020a). Sonuç olarak bir kısmı çekmeye bir kısmı basınca çalışan asılı bir form elde edilmiştir (Balmond Studio, 2020). Lamine ahşap strüktür ve merkezde ise 36 metre yüksekliğinde bir çelik çekirdek bulunmaktadır. Çelik kule etrafında çelik çekme çemberi bulunmaktadır (Şekil 4.2) (Chilton ve Tang, 2017).



Şekil 4.1 Pompidou Center kesit (Chilton ve Tang, 2017)

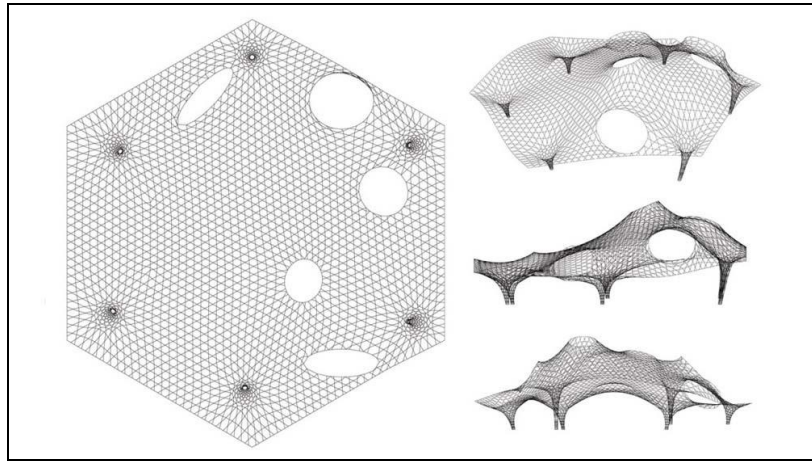


Şekil 4.2 Çelik çekirdek ve çekme çemberi (Chilton ve Tang, 2017)

Enkesitleri 14 cm x 44 cm olan lamine ahşap elemanlar ile 2 yönlü ve 4 katmanlı bir ağ oluşturulmuştur. Kesişimlerde ahşap elemanlar civatalanmıştır. Bir düğüm noktasında üçgen ve altıgenlerden oluşan düzgün çokgenli yarı düzgün ağ karolaması yapılmıştır (Şekil 4.3) (Türkçü, 2017). Çokgen kenarları 1,57 m'lik kenar uzunluğuna sahiptir, altıgenin kenarların 33'e bölünmesiyle elde edilmişlerdir (Şekil 4.4). Biçim bulma ile minimum yüzey Arup'un GSA yazılımı ile oluşturulmuştur, kabul edilebilir bir biçim ve kuvvet yoğunluğu elde edilene kadar form, mimarlar ve mühendisler arasında yeniden düzenlenmiştir (Chilton ve Tang, 2017).



Şekil 4.3 Katmanlar ve civatalı birleşim (Balmond Studio, 2020)



Şekil 4.4 Altıgen planlı karolama ve üç boyutlu strüktür modeli (Balmond Studio, 2020)

52 m. kenar uzunluğuna ile altıgen bir plana sahip olan çatı 7.900 m²'dir. Çatı açıklığı 20-50 metre arasında değişmekte 22 metreye kadar konsol çalışmaktadır.

Ahşap çatı Holzbau Amann tarafından üretilmiştir. Eş ve ters eğrilikli ahşap strüktür elemanlarının üretimi CNC ile yapılmıştır. CNC için NURBS modeli kullanılarak temel dijital modelden düğüm noktalarını içeren hassas bir referans yüzeyi oluşturulmuştur (Şekil 4.5). CNC işlemden büyük ahşap bloklardan tek ve çift eğrilikli strüktür elemanları yontulmuştur. Zeminde birleştirilen birimler vinçler yardımı ile kaldırıp montaj yapılmıştır. Daha sonra Taiyo Europe firmasının ürettiği hava kirliliğini azaltan TiO_2 kaplamalı PTFE membran ile kapatılmıştır (Şekil 4.6) (Taiyo Europe, 2020). Ahşap ızgara kabuğuna temas eden membranın iç yüzeyinde yoğunlaşma olasılığını en aza indirmek için, kumaş şeritler ızgara kabuğunun üst katmanına yükseltilerek sabitlenmiş kanallar arasında gerilmiştir (Şekil 4.7) (Chilton ve Tang, 2017). Nihai yapının yarı saydam çatısı tamamlanmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.5 CNC için çizilen prefabrik elemanların modelleri (Designtoproduction, 2020)



Şekil 4.6 Şantiye ve PTFE membranın yerleştirilmesi (Chilton ve Tang, 2017)



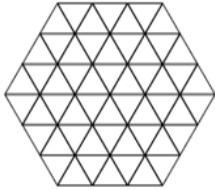
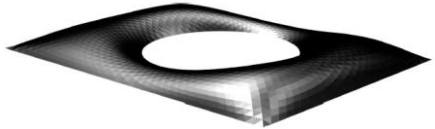
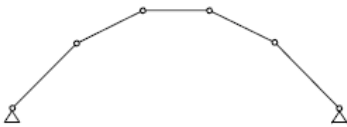
Şekil 4.7 PTFE membranın yerleştirildiği kanallar (Chilton ve Tang, 2017)



Şekil 4.8 Tamamlanmış yapının yarı saydam çatısı (Shigeru Ban Architects, 2020a)

4.2 British Museum

Tablo 4.2 British museum büyük avlu incelemesi (Fosterandpartners, 2000a)

British Museum - Greate Court			
Mimari	Yıl: 2000 Yer: Londra, İngiltere Mimar: Foster Mühendis: Buro Happold, Waagner Biro Program: Devingen şekil değiştirme		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 3,3,3,3,3,3	DR	 $1 - \frac{a}{r}$ $\frac{\sqrt{(b-x)^2 + (c-y)^2}}{(b-x)(c-y)} + \frac{\sqrt{(b-x)^2 + (d+y)^2}}{(b-x)(d+y)} + \frac{\sqrt{(b+x)^2 + (c-y)^2}}{(b+x)(c-y)} + \frac{\sqrt{(b+x)^2 + (d+y)^2}}{(b+x)(d+y)}$ (4.1)
Üretim	Strüktür		Malzeme
	 Gerilmesiz ızgara kabuk		 Çelik  Cam

Avluyu kapatan ızgara kabuk yapısı bilgisayar destekli hesaplama modelleri kullanılarak yapılmıştır. 1823 yılında inşa edilen tarihi yapının dikdörtgen avlusunun merkezinde 1857 yılında eklenen yuvarlak okuma odası bulunmaktadır. Yapı içerisinde galeriler ve sergi alanları, konferans salonları, eğitim ve çalışma odaları, dükkanlar ve restoranlar bulunmaktadır (Burohappold, 2020; Fosterandpartners, 2000a). Avlu dalga formuna benzeyen analitik ve sayısal olarak tanımlanabilen cam ve çelikten oluşan gerilmesiz ızgara kabuk ile örtülmüştür ve bu sayede avlunun iklimlendirilmesi ve gün ışığı alınması mümkün olmuştur (Şekil 4.9) (Fosterandpartners, 2000b).

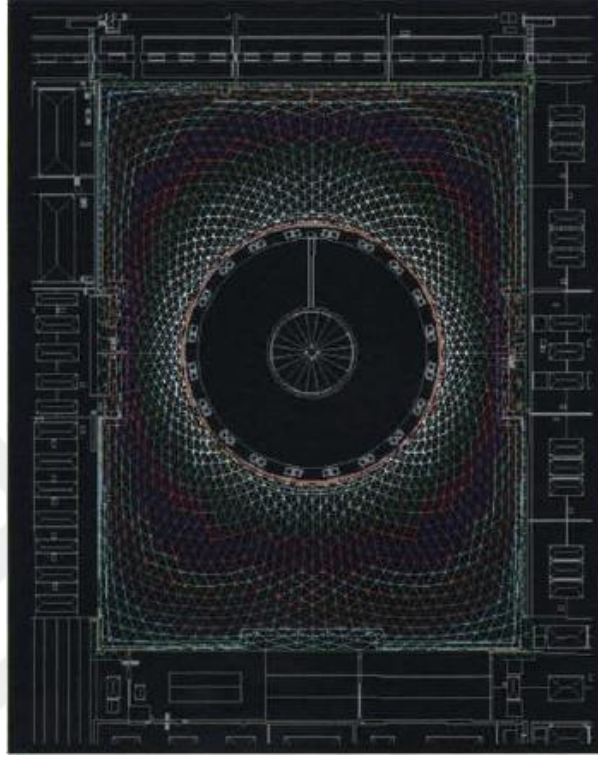


Şekil 4.9 Gün ışığından yararlanan iklimlendirilmiş iç avlu (Fosterandpartners, 2000a)

Çelik ızgara kabuk strüktürler, hafif olması nedeni ile daha önceden yapılmış binaların kapatılması gerektiğinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Türkçü, 2017). Ancak avlunun hem merkezinde bulunan silindirik okuma odası hem de avluyu çevreleyen dikdörtgen duvarlar yatay yükleri karşılayamamaktadır, bu neden ile mevcut yapılarda ek önlemler alınması gerekmiştir.

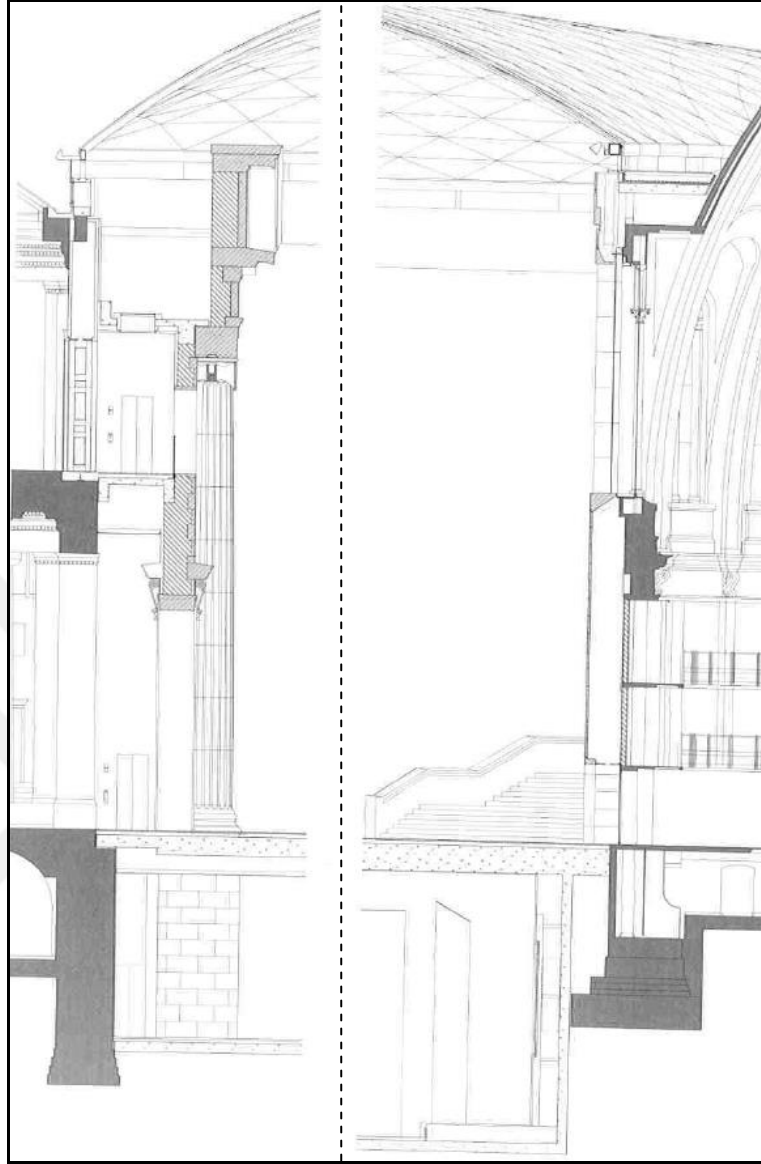
Okuma odası ek yükleri taşıyamayacağı için 20 kompozit sütun eklenmiştir bu sütunlar ise zeminde yeni yapılan temellere oturmaktadır (Şekil 4.10). Sütunların üstüne ise tüm çatı elemanlarının bağlandığı dairesel bir çelik kiriş vardır. Bu çelik kirişin biraz altına yatay beton halka eklenmiştir. Bu halka, sütunlara yatay olarak sabitlenmiştir ve yanal yükler açısından çatının önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

Halka okuma odasının üstünde bulunan kayar yataklara oturur, bu sayede halka sadece rijitlik sağlamakta ve mevcut yapının karşılayamayacağı yatay yükleri iletmemektedir (Barnes, 2000).



Şekil 4.10 Okuma odası etrafına yerleştirilen yeni kolonlar (Barnes, 2000)

Avluyu dikdörtgen olarak çevreleyen duvarların yatay yükleri karşılayamaması nedeni ile ızgara kabuk dikdörtgen şeklindeki bir kayar yatağa oturmaktadır, bu nedenle aşağıdaki katların alüminyum havalandırma kanallarını da gizleyen dikdörtgen kenarlar boyunca devam eden çelik bir kiriş eklenmiştir (Williams, 2001). Izgara kabuk 6 metre mesafedeki dikmeler bulunan çelik kirişe bağlanır, Bu dikmeler, yükleri dağıtmak için mevcut duvar üzerine inşa edilen beton kolonlu bir halkanın üzerinde desteklenir (Şekil 4.11) (Barnes, 2000).



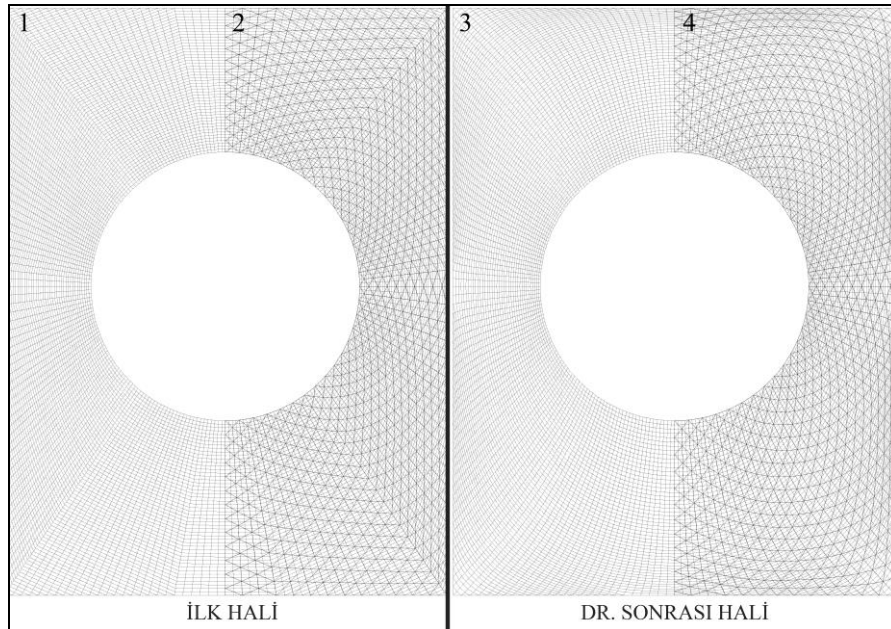
Şekil 4.11 Sol tarafta dikdörtgen olarak çevreleyen duvarların kesiti sağ tarafta okuma odasının kesiti (Foster, Sudjic ve De Grey, 2001)

Mevcut binaların yük taşıma kapasitelerinin bir sonucu olarak, bu istisnai destek koşullarının çatının yapısal davranışı üzerinde büyük etkisi olmuştur. Geleneksel biçim bulma teknikleri, kayar yataklar nedeniyle kullanılamamıştır, farklı destek koşulları nedeni ile yapı normal kuvvetlere ek olarak önemli eğilme momentleri ve kayma kuvvetleri almaktadır (Barnes, 2000).

Dikdörtgen avlu, üçgen ağdan türetilmiş 6.700 m^2 'lik bir ızgara kabuk ile örtülmüştür (Türkçü, 2017). 95 metre uzunluğundaki 74 metre genişliğindeki alanın

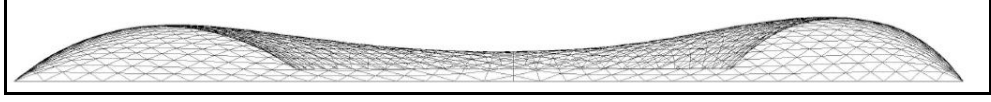
tamamı kapatılmıştır, maksimum açıklık 39 m'dir. 3.312 üçgen cam panelin, her biri çatının geometrik formu nedeniyle boyut ve şekil bakımından farklıdır, bu farklılığın sebebi silindirik yapının avlunun tam merkezinde değil de Kuzey tarafına 5 metre daha yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Her elemanın boyutlarını ve açılarını belirlemek için özel olarak yazılmış bir bilgisayar programı gerekmiştir. Hepsi birbirinden farklı 4878 eleman ve 1566 düğümden oluşmaktadır. Biçim bulma işlemi Buro Happold tarafından geliştirilmiştir. Karolamanın belirlemesindeki faktör, cam performansı göz önünde bulundurularak imalat açısından mümkün olan maksimum boyuttaki cam panellerdir (Barnes, 2000).

Karolama son haline ulaşmadan önce birçok aşamadan geçmiştir, başlangıç noktası; okuma odasının çevresinin ve dikdörtgen sınır çevresinin eşit aralıklarla bölünüp birleştirilmesiyle oluşmuştur. Bu şekilde oluşturulan radyal çizgiler daha sonra farklı sayıda eşit parçaya bölünmüştür. Izgara kabuk, karolamanın Şekil 4.12'nin 2. bölümünde görüldüğü gibi noktalar birleştirilerek üretilmiştir (Williams, 2001). Ancak bu yöntem diyagonal yönlerde sürekliliği bozmaktadır, sorunu ortadan kaldırmak için devingen şekil değiştirme uygulanmıştır (Şekil 4.12).



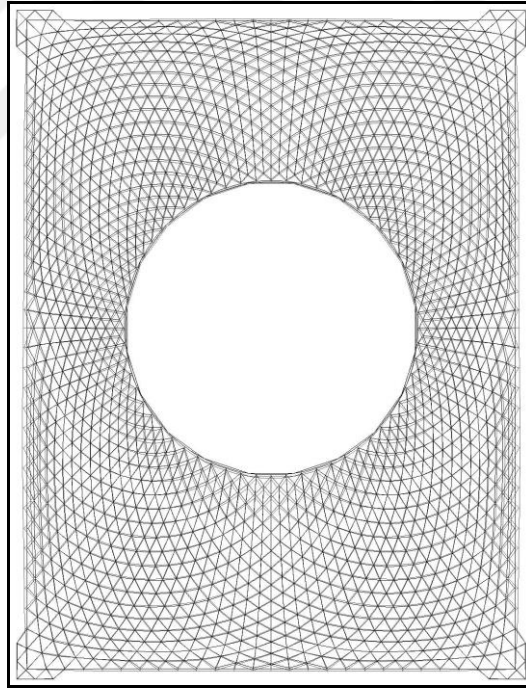
Şekil 4.12 Eşit aralıklarla bölünen dikdörtgen ve çemberin ilk karolamaları ve devingen şekil değiştirme uygulanması sonrası (Williams, 2001)

Kuzeydeki açıklık 28,8 m. kemer yüksekliği 5,48 m., Doğu ve Batıdaki açıklık 14,4 m. kemer yüksekliği 5,1 m. ve güneydeki açıklık 23,8 m., kemer yüksekliği 6,4 metredir (Şekil 4.13).

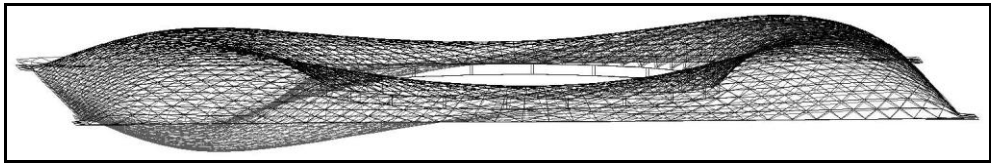


Şekil 4.13 Okuma odasının tam merkezde olmaması nedeniyle oluşan asimetrik kesit (Williams, 2001)

Hesaplamalar dörtgenin köşe noktalarında mevcut yapının karşılayamayacağı sapmalar olacağını göstermiştir (Şekil 4.14), bu nedenle yapının Kuzey kısmının ayakta kalırken Güney kısmının çökeceğini hesaplanmıştır (Şekil 4.15) ve bu nedenle dikdörtgen kayar yataklar eklenmiştir.

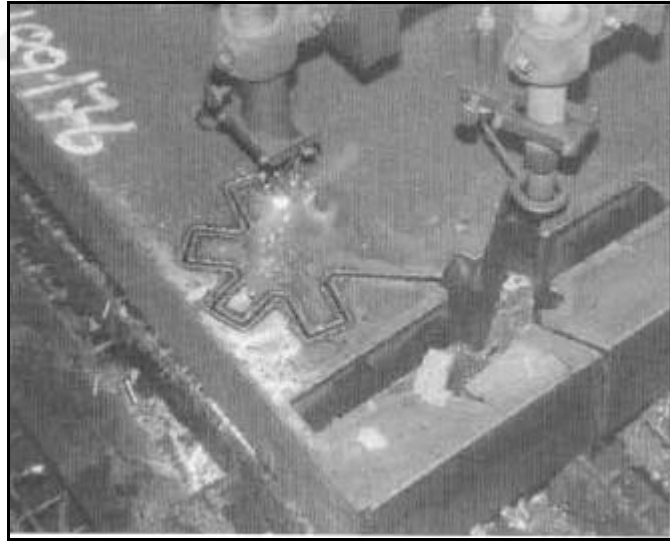


Şekil 4.14 Dikdörtgenin köşelerindeki sapmalar (Williams, 2001)



Şekil 4.15 Köşelerdeki sapmalar nedeni ile çökebilecek güney cephesi (Williams, 2001)

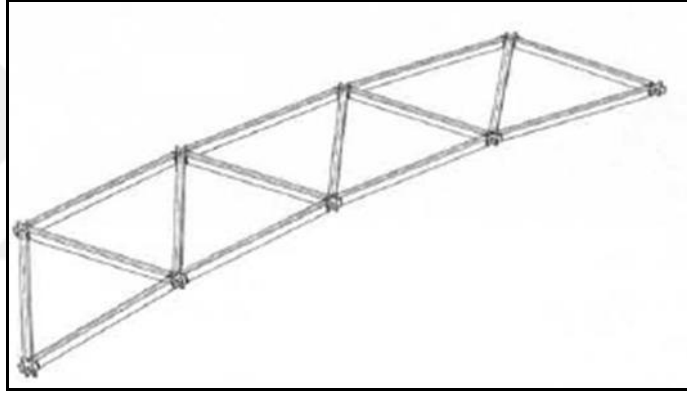
Farklı açı ve uzunluklardaki elemanların birleştirilmesi için düğüm noktaları geliştirilmiştir. Düğüm noktalarının tasarımında elemanlar arasındaki çeşitli açılar, minimum 26 derece, maksimum 110 derece ve elemanların birbirlerine farklı eğriliklerle bağlanması dikkate alınmıştır. 6 kollu yıldız şeklindeki düğüm noktalarının eşit kalınlıktaki düğümler işaretlenerek bir levha üzerine toplanmış ve CNC ile çelik plakalardan kesilmiştir (Şekil 4.16). Çubuk elemanların üretimi karışık sivrileşen uç noktaları nedeni ile zor olmuştur, konik uçlu elemanlar çelik plakalardan kesilmiştir. Elemanlar düğüm noktalarına kaynaklanmıştır (Şekil 4.17). Tüm elemanlar ve düğümler için imalat sıralaması şantiyedeki uygulanma sırasına göre belirlenerek oluşturulmuştur ve çatı uygulaması 8 bölümde gerçekleştirilmiştir. Şantiye alanındaki süreyi azaltmak için prefabrik olarak önceden monte edilmiş ve kaynak yapılarak birleştirilmiş elemanlar ve düğüm noktaları kullanılarak paneller oluşturulmuştur. Yapıda bu panellerden 152 adet bulunmaktadır (Şekil 4.18). Yapılan panellerin boyutu ise mümkün olan lojistik ebatlar göz önünde bulundurularak yapılmıştır.



Şekil 4.16 Çelik panellerden kesilen düğüm noktaları (Barnes, 2000)

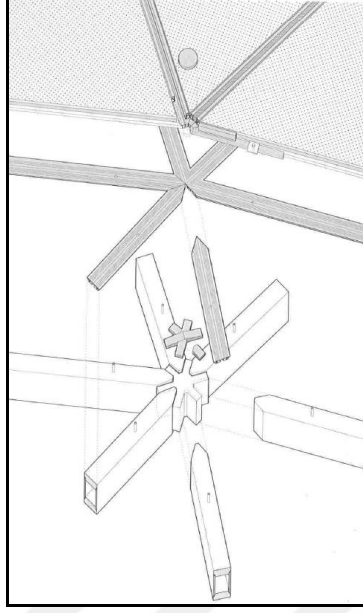


Şekil 4.17 Düğüm noktası ve sivri uçlu elemanların birleştirilmesiyle oluşan üçgen birim (Barnes, 2000)



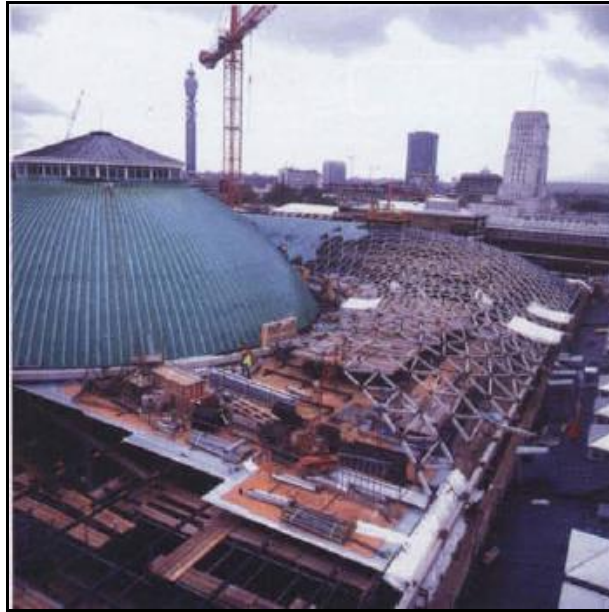
Şekil 4.18 Üçgen birimler ile oluşturulan paneller (Barnes, 2000)

Konforlu iklimlendirme koşulları sağlamak için yüksek performanslı izolasyonlu cam gerekmiştir. Dış katmanda güçlendirilmiş 10 mm cam, 16 mm hava boşluğu ve iç kısımda 2 x 6 mm tavlanmış lamine cam kullanılmıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 Çubuk elemanlar, düğüm noktaları ve cam panellerin birleşimi (Foster ve diğer., 2001)

Izgara kabuk yapısının karmaşık yapısal davranışı, uygulama yöntemlerini kısıtlamıştır. Tüm çelik bağlantılar tamamlanmadığı sürece strüktür sabit kalamamakta ve bu nedenle uygulama süreci boyunca geçici desteklere ihtiyaç duyulmaktadır. Yapı iskeleleri, çelik kiriş ve platformlardan oluşan geçici bir destek yapısı kullanılmıştır (Şekil 4.20). Platformların üzerine prefabrik panelleri destekleyen 600 destek eklenmiştir, paneller yerleştirilip bağlantılar kaynaklanmıştır.



Şekil 4.20 Yapı iskeleleri ve destekler üzerinde birleştirilen paneller (Foster ve diğer., 2001)

Izgara kabukta platformlar ile uygulanan destek işleminin temel amacı, yapıyı kontrollü bir şekilde indirmek ve adım adım yüklemektir. Tüm çatı yapısı, ilk başta daha yüksek bir konumda inşa edilmiştir. Serbest bırakıldıktan sonra hem kendi yükünü hem de camın yükünü taşımak zorunda kalacağından, yapının hesaplanan sapması bu şekilde telafi edilmiştir. Strüktürün tamamının bir anda indirilmesi elemanlarda aşırı gerilmelere neden olacağı için bu işlem dört fazda gerçekleştirilmiştir. Çatı bu işlem için 12 bölgeye ayrılmış, bu işlem bölge bölge yapılmış (Şekil 4.21) ve ızgara kabuk tamamlanmıştır (Şekil 4.22).



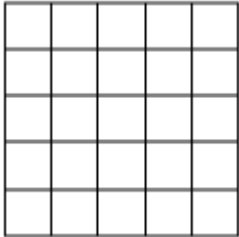
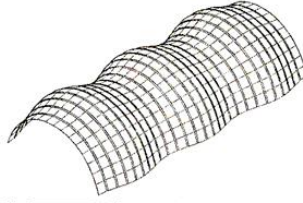
Şekil 4.21 Uygulamanın üçte ikisinin tamamlanmış hali (Barnes, 2000)



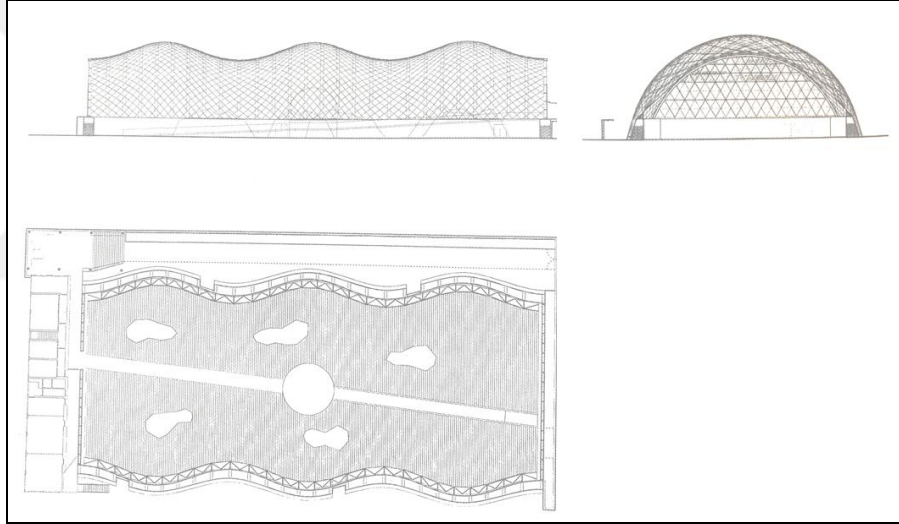
Şekil 4.22 Izgara kabuğun son hali (Burohappold, 2020)

4.3 Expo 2000 Japon Pavyonu

Tablo 4.3 Expo 2000 Japon pavyonu incelemesi (Shigeru Ban Architects, 2020b)

Expo 2000 Japan pavyonu			
Mimari	Yıl: 2000 Yer: Hannover, Almanya Mimar: Shigeru Ban Mühendis: Buro Happold, Frei Otto Program: GSA yazılımı		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 4,4,4,4	Maket + Sayısal	 Karma eğrilikli öteleme yüzey
Üretim	Strüktür	Malzeme	
	 Gerilmeli ızgara kabuk	 Kağıt tüp ve lamine ahşap  Membran	

Izgara kabuk strüktürden meydana gelen 3.100 m²'lik pavyonun ana taşıyıcı elemanları geri dönüştürülmüş kağıt tüplerdir, EXPO sonrasında tamamen geri dönüştürülmesi planlanmıştır. Frei Otto'nun danışmanlığı ile Ban, 74m x 25m ve 16m yüksekliğinde bir tünel önerisi yapmıştır (McQuaid, 2006). Daha önceleri kağıt tüplerin eğrilikli yüzeylerde kullanılmaması nedeni ile strüktür analizi ve yapısal davranış için bir çok model yapılmıştır. Yapılan modellerden biri yapının 1/6'sını kapsacak şekilde gerçek ölçekte yapılmıştır. Biçim bulma ve burkulma analizine dayanarak, form tekrar tekrar revize edilmiştir bu da burkulmaya karşı kendi kendini destekleyen üç tepeli öteleme yüzey geometrisini (Şekil 4.23) oluşturmayı mümkün kılmıştır (Chilton ve Tang, 2017). Yükseklik ve genişlikteki girintilere sahip üç boyutlu eğimli geometri ile yanal kuvvetlere karşı stabilite sağlamıştır.



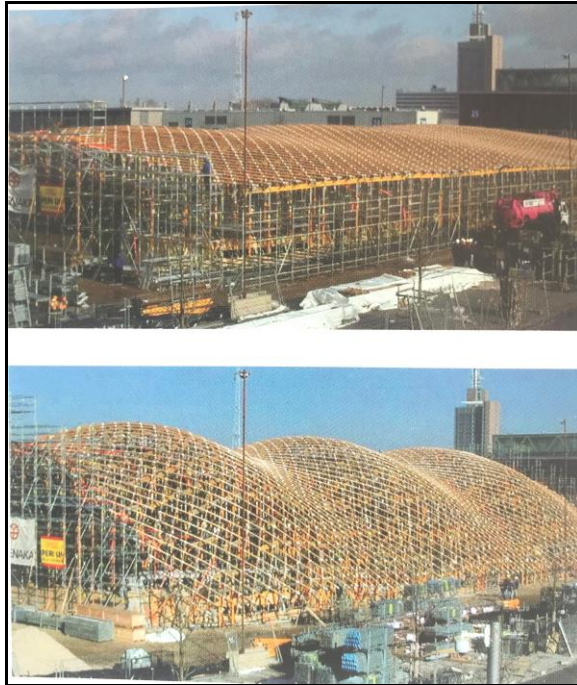
Şekil 4.23 Öteleme yüzeyler ile oluşturulmuş üç tepeli pavyonun plan ve kesiti (McQuaid, 2006)

Kağıt tüplerin istenilen her ebatta üretilebilmesi nedeni ile ızgara kabuk, özel düğüm noktaları olmadan yapılabilmektedir. Bu sayede pahalı ahşap düğüm noktalarının masraflarından da tasarruf edilmiştir. Kağıt tüpler lojistik nedenlerden dolayı 20 metre uzunluğunda ve 100 kg ağırlığında üretilmiştir, düğüm noktası kullanmak yerine daha sonra uçlarından soketli eklemler ile birleştirilmiştir (Chilton ve Tang, 2017; McQuaid, 2006). 12 cm çapındaki 2,2 cm kalınlığındaki kağıt rulolar ile 1m'lik 2 katmanlı kare düzgün ağ karolamasına sahip ızgara oluşturulmuştur. Bir boru diğerinin üzerine yerleştirilerek polyester dokuma bantlar ile bağlanmıştır (Şekil 4.24).



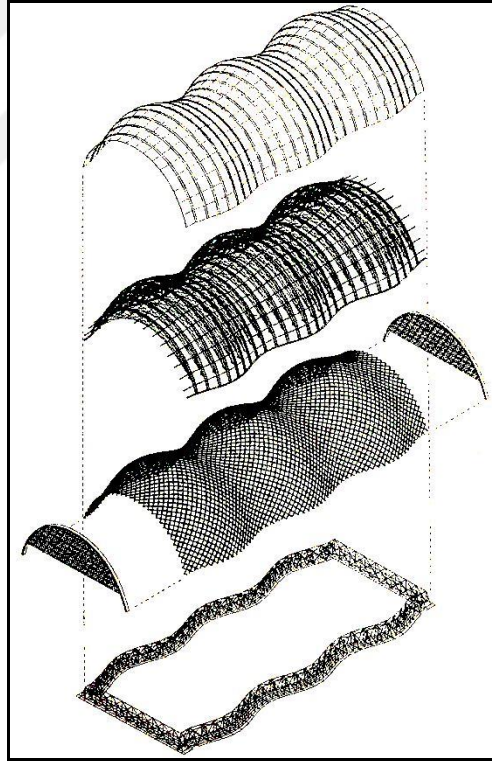
Şekil 4.24 Kumaş bant ve kağıt t p birleşimi (McQuaid, 2006)

Strüktür sisteminin yerinde kaldırılıp son şeklini alabilmesi için esnek bir bağlantı sistemine ihtiyaç duyulmuştur, bu neden ile bantlar tercih edilmiştir. Modüler iskele sistemi Peri-Up ile ızgara kabuk önce düşük seviyede bir iskele yatağına düz olarak yerleştirilmiş daha sonra Multi-Prop sistemi adı verilen hassas bir krika sistemi kullanılarak kabuk yukarı doğru itilmiştir ( ekil 4.25). Kaldırma işlemi 7 ana fazda gerçekleştirilmiştir (Chilton ve Tang, 2017).

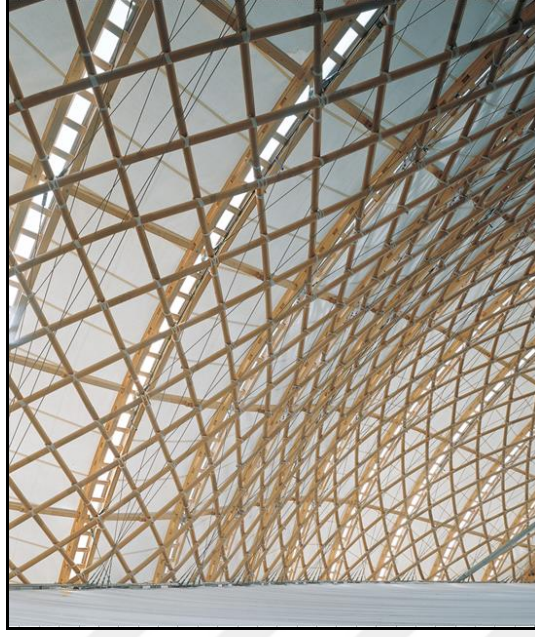


Şekil 4.25 Yapının kaldırılması (McQuaid, 2006)

Almanya'daki yapı kontrol mühendisleri kağıt tüplerden yapılacak bir strüktürün gerekli güvenlik şartları karşılamadığı gerekçesi ile ikincil bir strüktür eklenmesini talep etmişlerdir, bu nedenle kemer şeklindeki ahşap iskeletler ile rijitlik arttırılmıştır (Şekil 4.26). Temel olarak içi kum ve toprak kaplı çelik kutular kullanılmıştır, bunlar kemerlerin altına yerleştirilmiştir. 3 metre aralıklı aşıklar ise membranın yapı üzerine tutturulmasında kolaylık sağlamıştır (Şekil 4.27). Yapının iki ucunda ise kablo destekli petek örgülü karton ile yapılmış diyafram duvarları bulunmaktadır (Şekil 4.28). Daha sonra ızgara kabuk yapısı membran ile örtülüp tamamlanmıştır (Şekil 4.29). Güvenlik nedeni ile membran su geçirmez ve yanmaz olarak yapılmıştır 5 katmandan oluşan membran polietilen yanmaz folyo, kağıt, cam elyaf takviyeli kumaş katmanlarından oluşmaktadır. 12 cm çapındaki kağıt rulolar ise durolene kağıdı ve polivinil asetat PVA tutkalı karışımıdır (McQuaid, 2006).



Şekil 4.26 Yapı katmanlarının birleşimi (McQuaid, 2006)



Şekil 4.27 Membran gerildikten sonra kağıt tüp ızgara ve ahşap kemerler (Detail Inspiration, 2000)



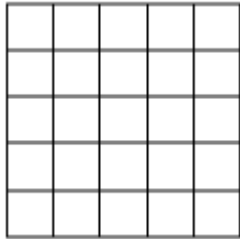
Şekil 4.28 İki uçta bulunan kablo destekli petek örgülü karton elemanlar (Detail Inspiration, 2000)



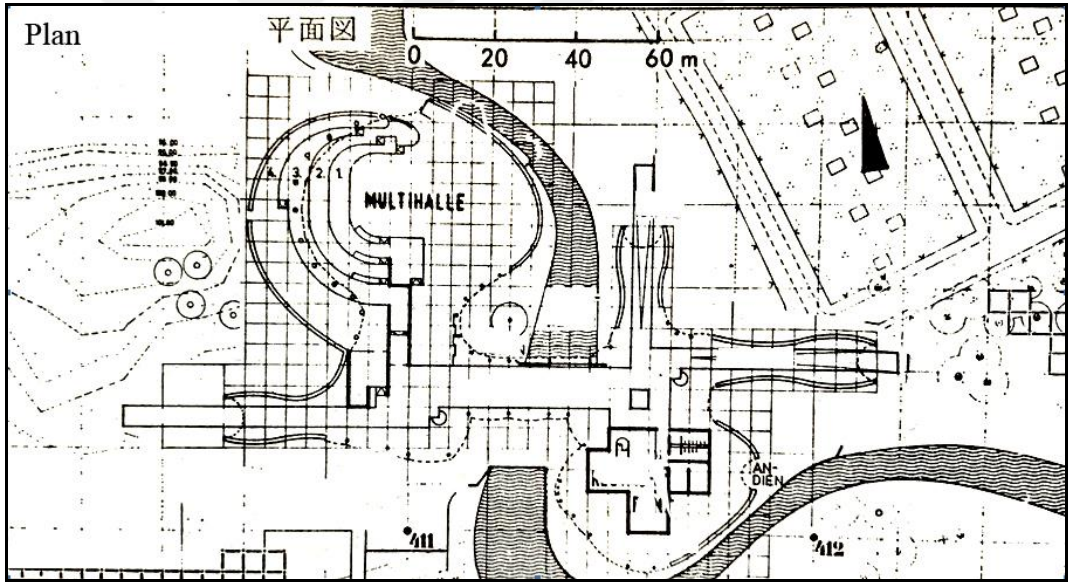
Şekil 4.29 Yapının son hali (Shigeru Ban Architects, 2020b)

4.4 Mannheim Multihalle

Tablo 4.4 Mannheim multihalle incelemesi (Hennicke, 1974)

Mannheim Bundesgartenschau multihalle			
Mimari	Yıl: 1975 Yer: Mannheim, Almanya Mimar: Mutschler, C. ve Langner, W. Mühendis: Frei Otto, Buro Happold, Ove Arup		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 4,4,4,4	Maket + Sayısal	 Serbest eğrilikli yüzey
Üretim	Strüktür		Malzeme
	 Gerilmeli ızgara kabuk		 Ahşap  PVC kaplamalı Membran

İki yılda bir Batı Almanya’da düzenlenen altı ay boyunca açık kalan genellikle çiçek türlerinin ve bitkilerin sergilendiği, çocuk oyun alanları ve parkları içeren. Konser, tiyatro, spor etkinlikleri ve oyunların yapıldığı bahçe fuarı *Bundesgartenschau* için 1971 yılında yapılan yarışmayı kazanan Mutschler B Partners çok amaçlı bir salon ve restoran içeren bir proje hazırlamış, balonlar ile desteklenen geçici bir membran çatı kullanmayı önermişlerdir ancak bu fikir otoriteler tarafından kabul edilmemiştir. Mutschler B Partners yapılacak yapının çatısı için Frei Otto’dan yardım istemiştir. Çeşitli çadır ve pnömatik strüktür seçenekleri değerlendirilmiş, çok amaçlı salon ve restoran için tüneller ile bir birine bağlanan çift kubbeli bir ızgara kabukta karar kılınmıştır (Şekil 4.30) (Happold ve Liddell, 1975). Geçici olması planlanan ama başarılı olan yapı günümüzde hala kullanılmaktadır.



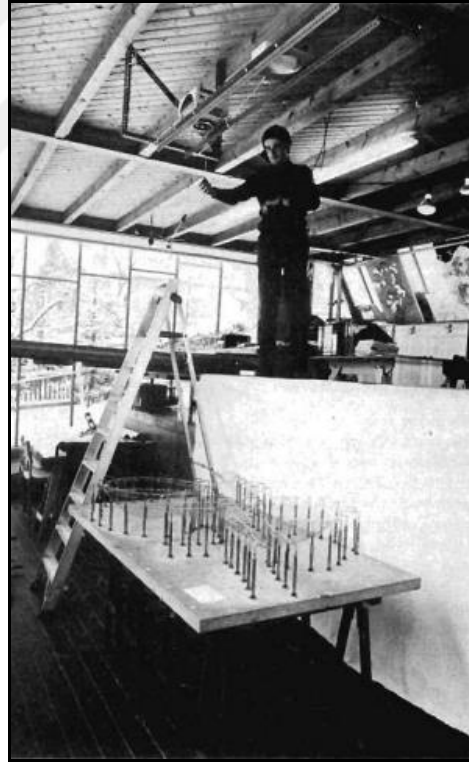
Şekil 4.30 Çok amaçlı salon ve restoranın planı (Hennicke, 1974)

Izgara kabuğun tasarlandığı zamanlarda bilgisayar analizi, yavaş ve sınırlı bir yöntemdi, bu neden ile strüktürün tasarımında ilk başta fiziksel asılı zincir modelleri kullanılmıştır (Şekil 4.31). İleri maketler plexiglass malzemeden 1:16 ve 1:60 ölçekli olarak yapılmıştır. Modellerin hesaplanması stereo fotogrametrik yöntemler kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.32). Daha sonra bilgisayar modellerinden yararlanılarak imalat ve montaj ile ilgili hesaplamalar Gründig ve Linkwitz tarafından yapılmıştır (Şekil 4.33). Strüktür analizinde, Newton – Raphson

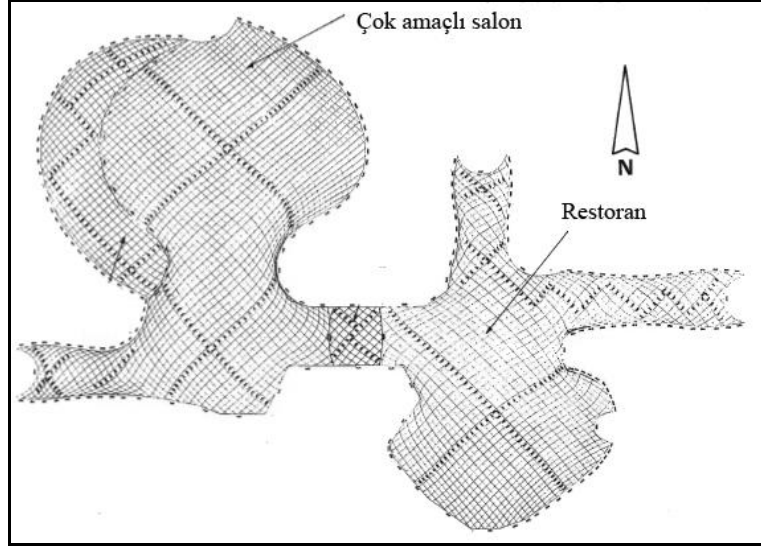
algoritması kullanılarak doğrusal olmayan bilgisayar analizi ve fiziksel modeller kullanılmıştır (Adrianssens, 2014; Hennicke, 1974).



Şekil 4.31 Asılı zincir modeli (Chilton ve Tang, 2017)

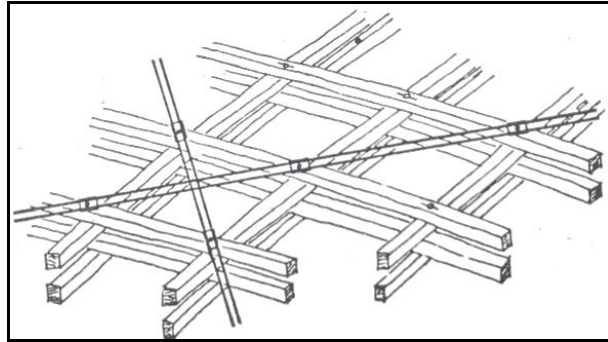


Şekil 4.32 Stereo fotogrametrik yöntemler (Happold ve Liddell, 1975)

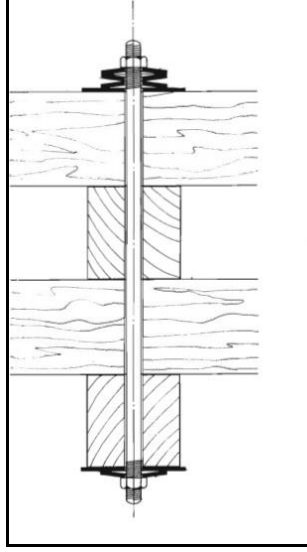


Şekil 4.33 Linkwitz tarafından bilgisayarda yapılan genel ızgara kabuk planı (Hennicke, 1974)

80 metre uzunluğundaki yapının, maksimum açıklığı çok amaçlı salonda 60 m ve yüksekliği 20 m'dir. Restoran kısmının açıklığı 50 m ve yüksekliği 18 m'dir. Izgara kabuk 7.400 m^2 'lik bir alanı örtmekte yüzey alanı ise yaklaşık 9.500 m^2 'dir. Taşıyıcı sistem olarak çift eğrilikli ahşap ızgara kabuk strüktür tercih edilmiştir. 50 cm'lik kenar boyu olan düzgün kare ağ karolamasına sahiptir. İki yönlü 4 katmanlı olarak yapılmıştır (Şekil 4.34). 5cm x 5cm ahşap çیتالarda Kanada sugası *hemlock* kullanılmıştır. Yangın kontrol gerekliliklerinin sağlanması için, çیتالara su bazlı alev geciktirici tuzlar uygulanmıştır. Strüktürde kullanılan ahşap çیتالının, ikisi ızgaranın bir yönüne diğer ikisi bir yönüne olacak şekilde bir düğümde toplam 4 adettir (Şekil 4.35). Toplamda 34.000 düğüm noktası bulunmaktadır. Yanal yüklere karşı ızgara kabuğu güçlendirmek için 4.5 m aralıklar ile 6.5 mm'lik çift çelik kablolar (Şekil 4.36) eklenmiş ve bunlar düğümlere bağlanmıştır (Şekil 4.37) (Hennicke, 1974).



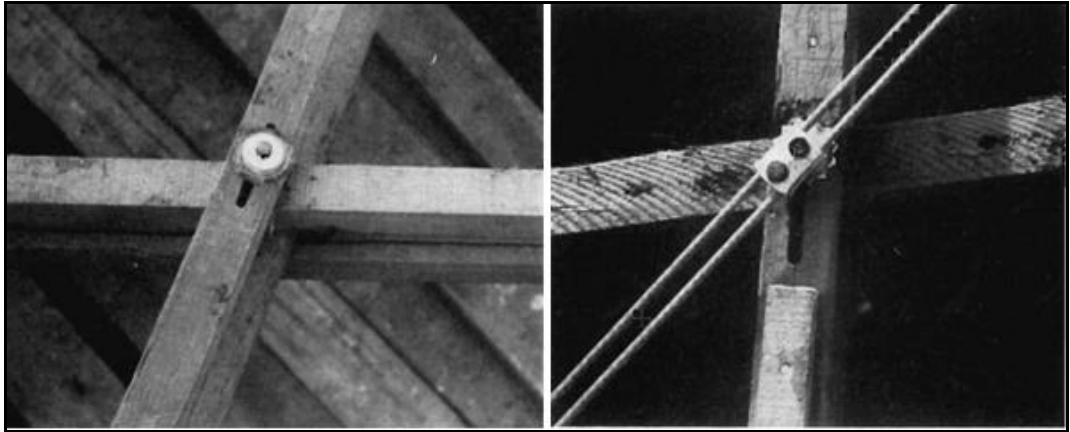
Şekil 4.34 İki yönlü 4 katmanlı olarak yapılan ızgara (Hennicke, 1974)



Şekil 4.35 Düğüm noktası detayı (Happold ve Liddell, 1975)



Şekil 4.36 4.5 metre aralıklar ile gerilen 6,5 mm'lik çift çelik kablolar (Chilton ve Tang, 2017)



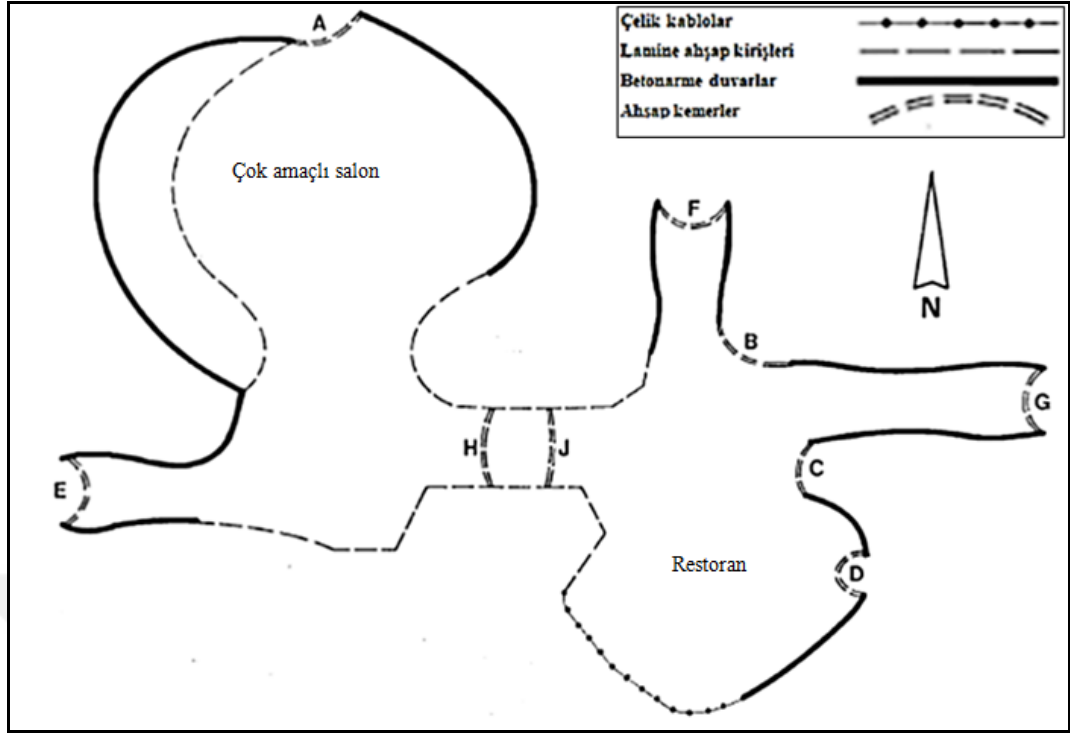
Şekil 4.37 Çelik kablo desteklerin geçtiği ve geçmediği düğüm noktaları (Happold ve Liddell, 1975)

Gerilmeli ızgara kabuğun kaldırılmasında ise ilk başta vinçler önerilmiştir ancak Arup mühendisleri, çok büyük vinçlere ihtiyaç duyulacağını ve strüktürün tamamen stabil hale gelmesinin birkaç hafta süreceğini, bunun da masraflı olacağını belirtmiştir. Bu nedenle daha ekonomik bir yöntem olan yapı iskeleleri tercih edilmiştir. 9 m aralıklarla kurulan iskeleler forkliftler ile kaldırmış, iskeleler ile ızgara arasına 2,5 m x 3,5 m genişliğinde “I” şeklindeki yayıcı elemanlar yerleştirilmiştir (Şekil 4.38). Daha sonra bükülerek üç boyutlu formu kazandırılmış ardından çیتالardaki düğümler sabitlenmiş ve kubbeli bir ızgara kabuk strüktür meydana getirilmiştir (Chilton ve Tang, 2017).



Şekil 4.38 Yapının kaldırılmasında kullanılan forklift ve iskeleler, üstte yayıcılar (Chilton ve Tang, 2017)

Farklı geometrilerin kesiştiği yerlerde, lamine ahşap takviye kemerleri kullanılmıştır (Otto ve diğer., 1995). Izgara kabuk strüktür, yapıyı çevreleyen sınırlar boyunca, farklı bölgelerde (Şekil 4.39) dört farklı uygulama ile desteklenmiştir; kenarlarda betonarme duvarlar, çift tutkal lamine ahşap kenar kirişleri, ahşap kemerler ve çift çelik kablolar kullanılmıştır (Şekil 4.40) (Happold ve Liddell, 1975).



Şekil 4.39 Yapıyı çevreleyen sınırlar boyunca, farklı bölgelerde kullanılan destekler (Happold ve Liddell, 1975)



Şekil 4.40 Sırasıyla betonarme duvarlar, çift tutkal lamine ahşap kenar kirişleri, ahşap kemerler ve çift çelik kablolar (Chilton ve Tang, 2017)

Birçok kaplama malzemesinin düz olarak üretilmesi çift eğrilikli geometrilere sahip yapıların kaplanmasında sorunları da beraberinde getirmektedir. Çift eğrilikli yüzeylere uyacak şekilde kesme kalıplarının oluşturulması genelde daha zor ve daha masraflıdır. Bu problem Mannheim Multihalle’de esnek gri renkli %30 transparan, 5mm örgü aralıklı, PVC kaplı, polyester membran kullanılarak çözülmüştür. Membran farklı eğriliklere uyacak şekilde önce sahada 150 cm genişliğinde parçalara ayrılmış ve düzgün bir yüzey oluşturmak için elle gerilerek zımbalanmıştır, bağlantılar yerleri ise yapışkan kullanılarak ve ısı tabancaları ile eritilerek yapılmıştır (Şekil 4.41) (Hennicke, 1974). Ultraviyole bozulması ve koyu renkli kaplamanın neden olduğu aşırı ısınma sonucu membranda çatlama ve sızıntılar oluşmuştur, 1981 yılında yapılan bir bakımda gri kaplama, beyaz bir membran kaplama ile değiştirilmiş (Şekil 4.42) ve yapı son haline ulaşmıştır (Şekil 4.43) (Chilton ve Tang, 2017).



Şekil 4.41 Transparan gri kaplama (Chilton ve Tang, 2017)



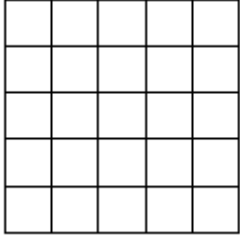
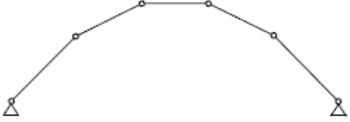
Şekil 4.42 Sonradan değiştirilen beyaz membran (Chilton ve Tang, 2017)



Şekil 4.43 Izgara kabuk yapısının günümüzdeki hali (Lukac, 2020)

4.5 Metropol Parasol

Tablo 4.5 Metropol Parasol incelemesi (Mayer, 2020)

Metropol Parasol Plaza de la Encarnación			
Mimari	Yıl: 2011 Yer: Sevilla, İspanya Mimar: Jürgen Mayer H. Architects Mühendis: Arup		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 4,4,4,4	Sayısal + Projeksiyon	 Serbest eğrilikli yüzey
Üretim	Strüktür	Malzeme	
	 Gerilmesiz ızgara kabuk	 Çelik  Kerto LVL Lamine kaplama ahşap	

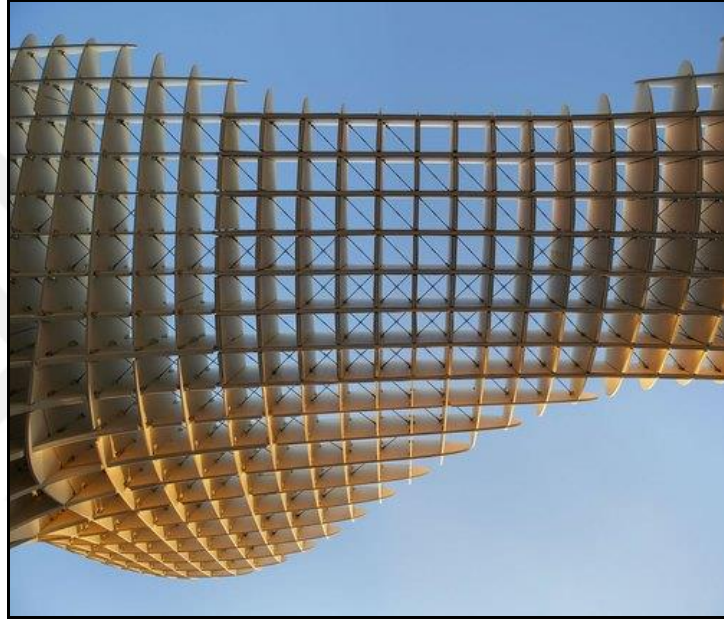
Yapı bulunduğu konum itibarı ile yılın çoğu zamanı güneşli ve sıcak olan şehir merkezinde yer almaktadır. Plaza de la Encarnación'un yeniden düzenlenmesi için 2004 yılında yapılan yarışmada birinci olmuştur. Yapı içerisinde yeni kazılan Roma mozaikleri için bir müze, zemin seviyesinde 2.155 m²'lik pazar yeri, 5 metre yükseklikte ise bar ve restoranlar içeren meydan bulunmaktadır. 21 metre yükseklikte ise 250 metrelik bir yürüyüş yolu ve seyir terası bulunmaktadır. Yapı 28 metre yüksekliğe, 70 metre maksimum açıklığa ve 150 m uzunluğa sahiptir. Strüktür, kent merkezi için bir şemsiye görevi görmekte ve gölge sağlamaktadır (Şekil 4.44).



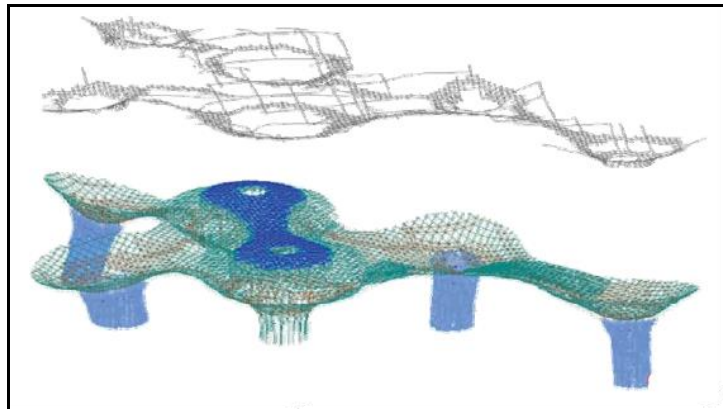
Şekil 4.44 Metropol Parasol üst görünüşü (Mayer, 2020)

Ahşap panellerin boyutlarının hesaplanmasında birbirine bağlı olan üç değişkenin aynı anda değerlendirilmesi gerekmiştir; bunlar panel kalınlığı, ahşap ve metal bağlantıların toplam kütlesi ve her düğüme etki eden kuvvetlerdir. Denge durumunun doğrudan hesaplanmasının mümkün olmaması nedeni ile farklı bir yazılım kullanılmıştır. Her bir eleman için üç değişkeni değerlendiren ve elde edilen çözümün yük ve geometrik koşulları sağlayıp sağlamadığını tüm yapı üzerinde değerlendiren, sonuca göre yinelemeli olarak değiştiren bir algoritma kullanılmıştır. Tüm gereksinimler karşılanana kadar bu döngü tekrarlanmıştır. Çok sayıda eleman bulunması nedeni ile denge durumunun doğru hesaplanması birkaç gün sürmüştür (Koppitz, Quinn, Schmid ve Thurik, 2012).

Strüktür biçimi sayısal yöntemler ile yaratılmıştır. Planda yapılan 1.5m x 1.5 m düzgün kare ağ karolaması, dik olarak yansıtılmış ve yüzey kesilmiştir. Kare ağ karolamasına sahip ahşap strüktürde stabilizeyi arttırmak için diyagonaller kablolar gerekmiştir (Şekil 4.45), çelik diyagonallerin düzenlenmesi, ahşap ızgarada üç yönlü kabuk hareketinin elde edilmesini mümkün kılmıştır (Şekil 4.46) (Koppitz ve diğer., 2012).

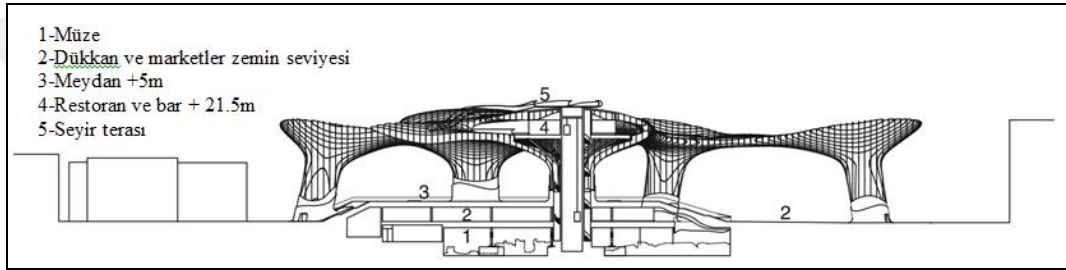


Şekil 4.45 Kare ağ karolaması ve çelik diyagonaller (Jurgenmayer Architects, 2012)

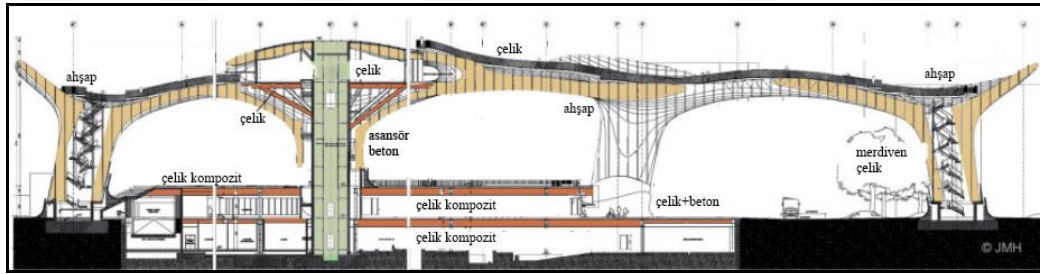


Şekil 4.46 Çelik diyagonalleri gösteren model (Koppitz ve diğer., 2012)

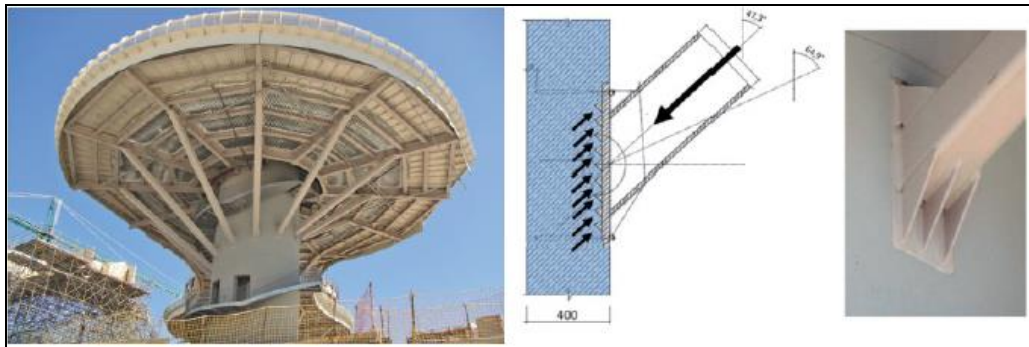
5 ana bölümden oluşan yapının (Şekil 4.47) farklı kısımlarında farklı malzemeler kullanılmıştır (Şekil 4.48). Temeller ve silindirik asansör boşlukları betondan yapılmıştır ve 40 cm kalınlığındadır. Restoran kısmı 8 şeklindeki kompozit çelik strüktür üzerinde bulunmaktadır ve yükleri iki beton çekirdeğe aktarır. Restoranı taşıyan çelik kısım, beton çekirdeklere çelik profillerden yapılmış eğimli desteklerle taşınmaktadır (Şekil 4.49). Yeraltı müzesi, zemin kattaki dükkanlar ve meydan bölümünde, kompozit çelik kiriş ve betonarme kullanılmıştır (Şekil 4.50). Müze bölümünde W şeklinde çelik kolonlar bulunmaktadır (Şekil 4.51) (Koppitz ve diğer., 2012).



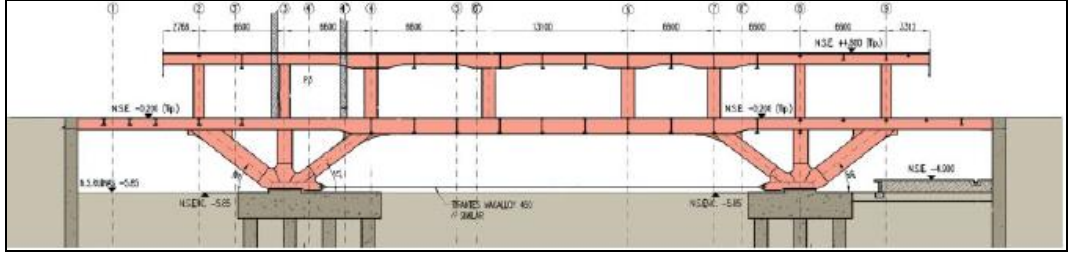
Şekil 4.47 Yapıyı oluşturan bölümleri gösteren kesit (Caneparo, 2014)



Şekil 4.48 Yapının farklı bölümlerinde kullanılan malzemeler (Schmid, Faller ve Koppitz, 2011)



Şekil 4.49 Beton çekirdek ve çelik profillerden yapılmış eğimli desteklerle testere dişli bağlantıları (Schmid ve diğer., 2011)

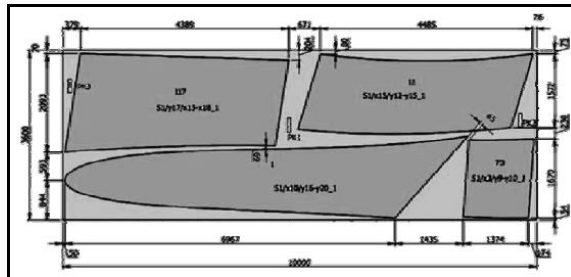


Şekil 4.50 Müze ve zemin katta kullanılan çelik kompozit strüktürün kesiti (Schmid ve diğer., 2011)



Şekil 4.51 Müze kısmında bulunan w kolonlar (Caneparo, 2014)

Strüktürde Kerto mikro lamine ahşap kullanmıştır, birbirine yapıştırılmış 3 mm kalınlığında katmanlar kullanılarak enkesiti 68 mm ile 311 mm arasında değişen levhalar oluşturulmuş. Aynı enkesite sahip olan elemanlar ortak levhalarda toplanmış numaralandırılmış ve CNC ile kesilmiştir. 3.400 adet lamine eleman oluşturulmuştur (Şekil 4.52). Malzeme yüksek kesme mukavemeti sağlamasından ötürü tercih edilmiştir (Chilton ve Tang, 2017). Daha sonra 2-3 mm kalınlığında su geçirmez 2-K poliüretan kaplama yapılmıştır bu işlem ahşap yüzeyinde çatlakların gelişmesini önlemektedir (Arup, 2020). Poliüretan kaplama üzerine, UV koruma görevi gören hafif fildişi renkli boya uygulanmış ve yüzey kalitesi artırılmıştır (Koppitz ve diğer., 2012).



Şekil 4.52 Aynı en kesite sahip elemanlar için oluşturulan kesme kalıpları (Koppitz ve diğer., 2012)

Kesitte her elemanın farklı açılara sahip olması nedeni ile esnek, modüler ve montajı kolay bir düğüm noktasına ihtiyaç duyulmuştur. Düğüm noktalarının görünür olması sebebi ile boyutlarının mümkün olduğunca az olması tercih edilmiştir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda ahşap elemanların kesişme noktalarında kullanılan düğüm noktaları, Arup tarafından özel olarak geliştirilmiş, şantiyede hızlı montaj için optimize edilmiş bir tür clevis bağlantısıdır.

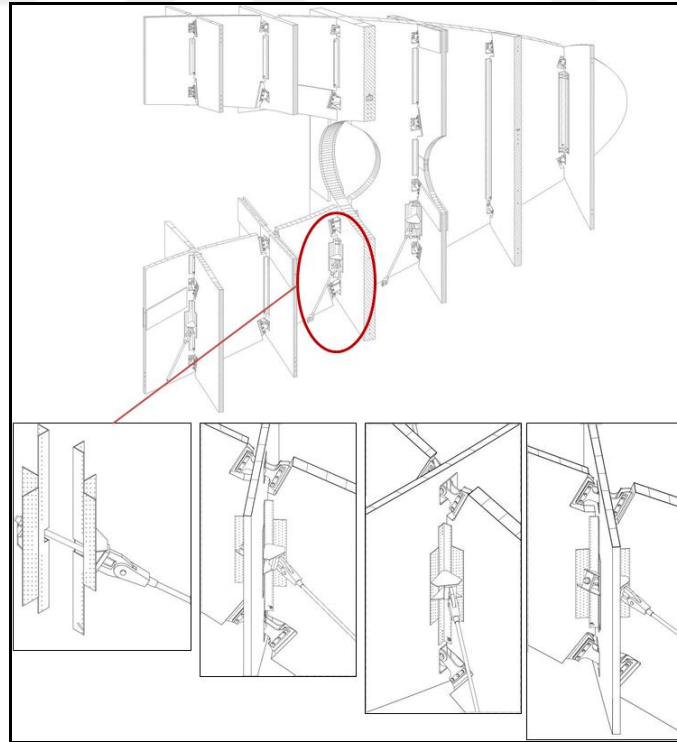
Düğüm noktalarının bağlanması için önce ahşap elemanların içine dikey olarak 35.000 adet 65-70 cm derinliğinde delik açılmıştır. Özel geliştirilmiş yüksek dayanımlı tutkal ile çelik dişli çubuklar yapıştırılmış, çatal başlı bağlantı ile çubuklu paneller cıvatalanmıştır (Şekil 4.53) (Caneparo, 2014). Bağlantı kancaları birbirine çelik pimlerle sabitlenir. Çatalın flanşı, dişli çubuklara vidalanmış önceden yüklenmiş cıvatalar kullanılarak panellere sabitlenir. Farklı açılarda uygulanabilen esnek düğüm noktalarından strüktüre 3.000 adet kullanılmıştır (Şekil 4.54) (Arup, 2020). Ahşap elemanların bazılarında ise çelik diyagonal kablolar için ek düğüm noktaları da kullanılmıştır (Şekil 4.55).



Şekil 4.53 Yapıştırılmış dişli çubuklar içeren panellerin cıvatalanarak çatal başlı bağlantı ile birleştirilmesi (Caneparo, 2014)



Şekil 4.54 Farklı açılarda uygulanabilen esnek düğüm noktası detayları (Koppitz ve diğer., 2012)



Şekil 4.55 Çelik diyagonal kablolar için kullanılan düğüm noktası detayı (Koppitz ve diğer., 2012)

Uygulama, ızgara kabuk geometrisi ve yükler ile koordine edilen karmaşık bir iskele sistemi yardımı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.56). İşçilerin cıvata montaj aşaması sırasında 1.50 metrelik karolamanın arasına erişebilmeleri için özel üretilmiş montaj sepetleri de kullanılmıştır (Şekil 4.57) (Koppitz ve diğer., 2012).



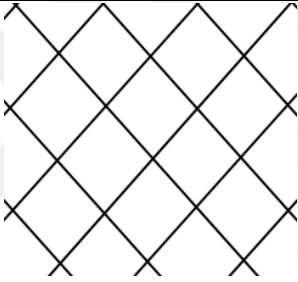
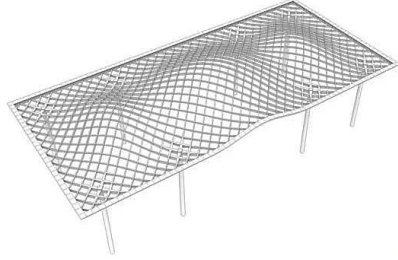
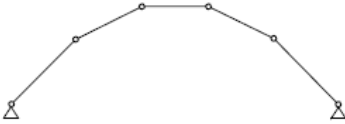
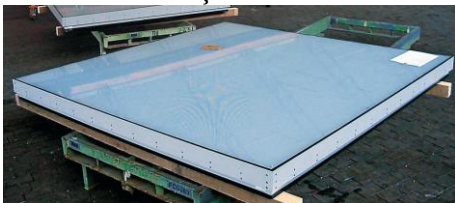
Şekil 4.56 Uygulamada kullanılan yapı iskeleleri (Jurgenmayer Architects, 2012)



Şekil 4.57 Özel olarak üretilmiş montaj sepetleri (Koppitz ve diğer., 2012)

4.6 Smithsonian Enstitüsü Kogod Avlusu

Tablo 4.6 Smithsonian enstitüsü Kogod avlusu incelemesi (Fosterandpartners, 2007)

Kogod Avlusu			
Mimarî	Yıl: 2007 Yer: Washington, Amerika Mimar: Foster and Partners Mühendis: Buro Happold		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 Yarı düzgün diyagonal ağ		 Serbest eğrilikli yüzey
Üretim	Strüktür		Malzeme
	 Gerilmesiz ızgara kabuk		 Çelik  Cam

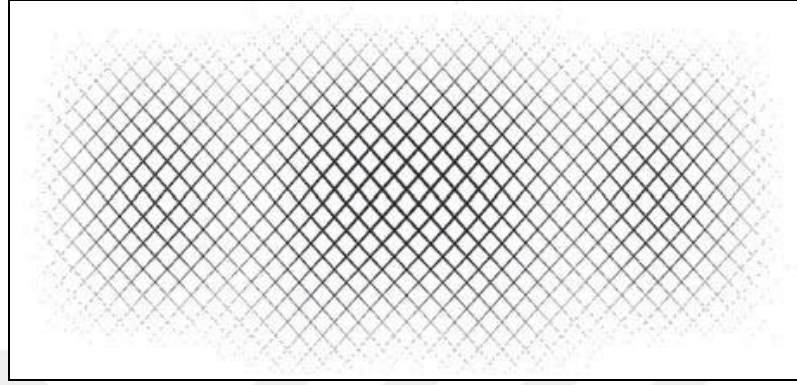
2004 yılında gerçekleştirilen uluslararası yarışmada birinci olan proje Ulusal Portre Galerisi'ne ve Ulusal Amerikan Sanatı Müzesi'ne ev sahipliği yapan binanın merkezinde bulunan büyük avlunun yeniden düzenlenmesini ve proje kapsamında koruma laboratuvarı, oditoryum ve sergi alanı içermektedir. Ziyaretçiler çevredeki galerilere avludan ulaşabilmekte ve müze saatleri dışında avlu düzenli olarak konserler ve halka açık gösterileri gibi çeşitli sosyal etkinliklere ev sahipliği yapmaktadır (Fosterandpartners, 2007). Etkinlik alanı olarak kullanılacak avlunun üzerinin kapatılmasında, iklim kontrolü, akustik ve aydınlatma önemli bir yer tutmuştur ayrıca mevcut bina dokusunun da olabildiğince korunması ana hedeflerden biri olmuştur (şekil 4.58) (Davey, 2009).



şekil 4.58 Kogod avlusu (Fosterandpartners, 2007)

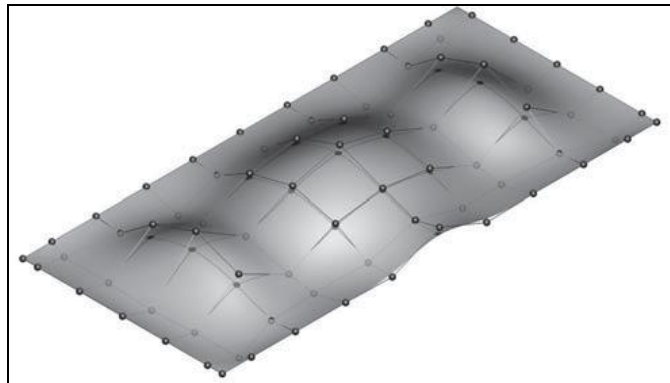
İklim koşulları nedeniyle, geçmişte açık avlu sadece ilkbahar ve sonbaharda kullanılabilmekteydi. Izgara kabuk strüktür 2.600 m²'lik avluyu Güneş ve hava şartlarına karşı korumakta ayrıca akustik emici eleman olarak işlev görmektedir.

Strüktür, prefabrik çelik elemanların birleşiminden oluşan, iki yönlü yarı düzgün diyagonal ağ karolamasına sahip ve tek katmanlı olarak yapılmıştır (Şekil 4.59) (Peters, 2007).



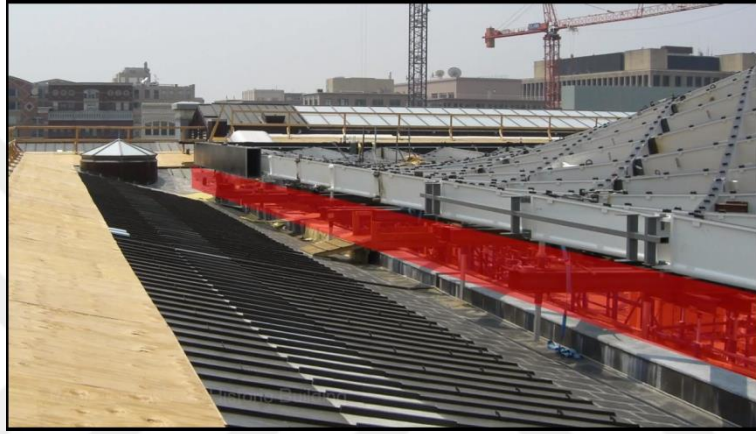
Şekil 4.59 Izgara planı (Peters, 2007)

Karmaşık geometriyi kontrol etmek ve yönlendirmek için kolayca kullanılabilecek bir dijital şema geliştirilmiştir. Birbiri ile ilişkili olan geometrilerin tasarım kısıtlamaları kodlanmıştır; kolonların konumları, 3 kubbe ve yükseklikleri, avluyu sınırlandıran kenar kirişi ve drenaj noktaları gibi kısıtlamalar, bir dizi kontrol hattından oluşturulan B-spline yüzeyi olan yüzey geometrisini belirlemektedir (Şekil 4.60). Düğüm noktalarının konumları, dik projeksiyon yöntemi ile plan seviyesinden belirlenen noktaların, yüzey geometrisine yansıtılması ve ardından kesişimlerinden, yükseklikleri belirlenerek bulunmuştur (Peters, 2010).



Şekil 4.60 Yüzey geometrisinin türetilmesi (Peters, 2007)

Birbirine bağlanan 3 kubbeden oluşan serbest eğrilikli ızgara kabuk, dikdörtgen avlu içerisinde yer alan sütunların başlarına yatay olarak birleştirmekte ve yükleri 8 adet kolona aktarmaktadır. Bu 3 kubbeden merkezde bulunan en geniş ve yüksek olanıdır 36 metre açıklığı geçmektedir (Davey, 2009). Avluyu çevreleyen mevcut yapıların herhangi bir ek yükü karşılamayacak olması sebebi ile ızgara kabuk strüktür mevcut yapının duvarlarından yükseltilmiş ve konsol olarak çalıştırılmıştır (Şekil 4.61) (Peters, 2007).



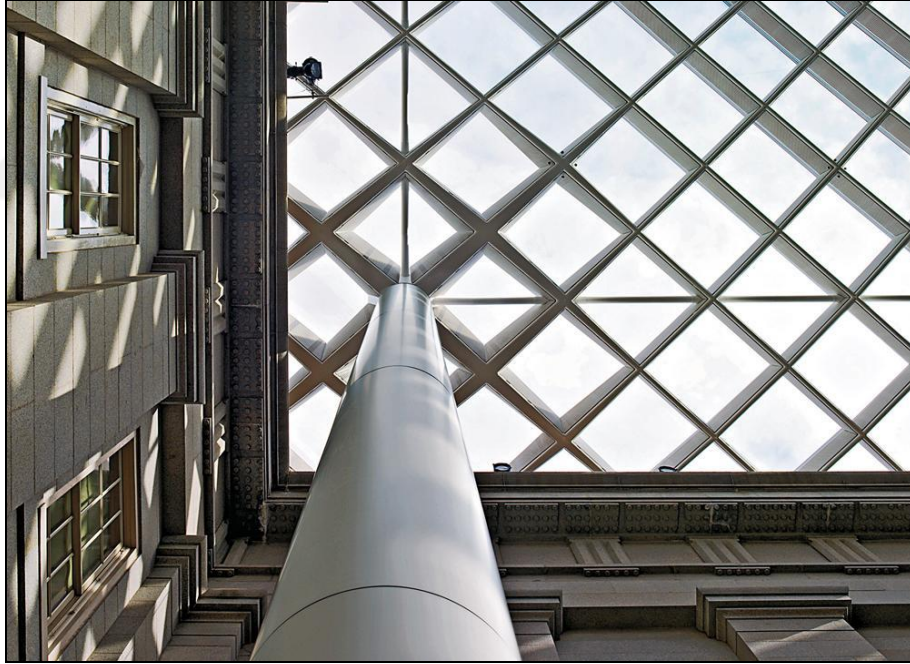
Şekil 4.61 Mevcut yapı üzerinde yükseltilen ızgara kabuk (Fosterandpartners, 2007)

Sütunlar, sütun başları, ızgarayı oluşturan özel üretilmiş V şeklindeki elemanlar (Şekil 4.62) ve ızgara içerisinde kolonlara yakın olan konumlarda kalınlaşan elemanlar, dört farklı alt yüklenici tarafından üretilmiştir. Kolonlar 50 mm kalınlığında haddelenmiş çelikten yapılmıştır. V şeklindeki ana elemanlar ise SMG Flatpattern aracı ile düzleştirilmiş ve yatay çelik levhalardan plazma kesiciler ile 2 boyutlu CAD dosyaları veri olarak kullanılarak kesilmiştir. Kesilen çentikli elemanlar katlanarak kolayca monte edilmiştir. Tüm parçalarının farklı olması nedeniyle elemanlar kimlik numaralarıyla işaretlenmiş bu sayede elemanların uygulama sırasında izlenebilir olması sağlanmıştır. Strüktür içerisinde kolonlara yaklaştıkça artan kuvvetleri karşılayabilmek için kullanılan elemanların ise kolonlara doğru hem yüksekliği hem de genişliği artmaktadır (Şekil 4.63). Elemanlar ayrı ayrı yerleştirilmiş ve akustik emici malzemeye kaplanmıştır, yüzeylerinde bulunan akustik emici malzeme ise sesin emilmesine sağlayacak şekilde olukludur (Şekil 4.64) (Peters, 2010). Yaklaşık 8 ton çelikten kum döküm işlemi kullanılarak üretilen

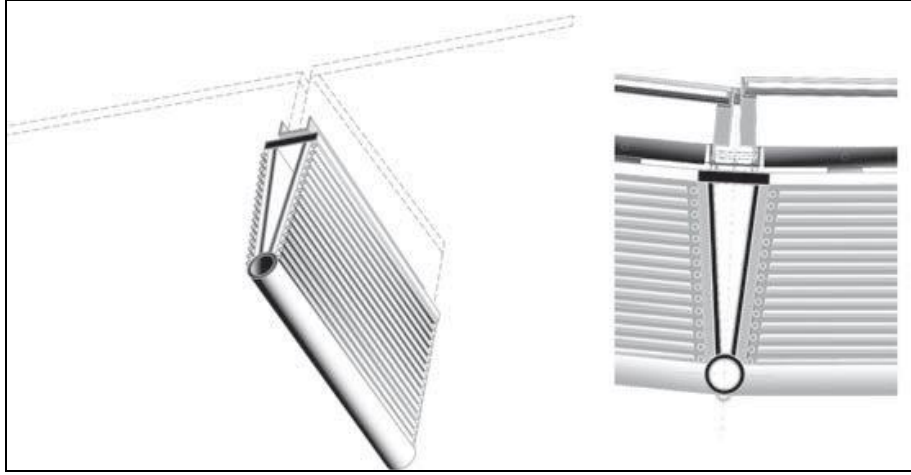
sütun başlıkları; kesme, zımparalama ve öğütme işlemleriyle yaklaşık 4 tona düşürülmüştür (Şekil 4.65) (Peters, 2007).



Şekil 4.62 V şeklindeki çentikli elemanlar (Fosterandpartners, 2007)



Şekil 4.63 Kolonlara yaklaştıkça kalınlaşan ızgara kabuk elemanları (Rudolph, 2009)

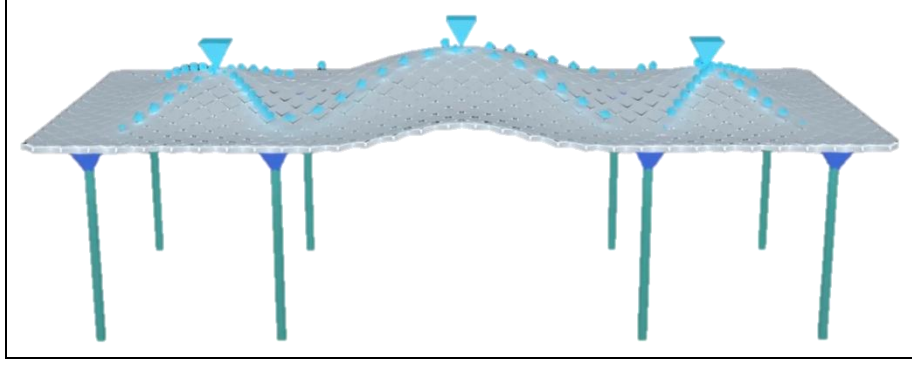


Şekil 4.64 Elemanların üzerinde kullanılan oluklu akustik yüzeyler (Peters, 2007)



Şekil 4.65 Kolon başları (Rudolph, 2009)

Yağmur suları çatının serbest eğrilikli biçimi sayesinde kolonların tepe noktasında alçalan bölümlerde toplanmakta ve kolonlarda bulunan tahliye boruları üzerinden aktarılmaktadır (Şekil 4.66) (Fosterandpartners, 2007).



Şekil 4.66 Yağmur suyunun eğrilikli yüzey üzerinde aktırılması (Fosterandpartners, 2007)

Avlu içerisinden bakıldığında üçgen cam panellere göre gökyüzünün daha fazla görünmesini sağladığı için dörtgen cam paneller tercih edilmiştir (Şekil 4.67) (Peters, 2007). Çift eğrilikli yüzeyde düzlemsel bir dörtgen çözüm elde etmek için cam köşelerinin ideal konumundan uzaklaştırılması gerekmiştir. Farklı açılarda duran çift camlı 862 panel aralarındaki yükseklik farkını en aza indirmek için birbirini çapraz şekilde takip eden ağ gözlerinin köşegenlerine göre yerleştirilmiştir (Fosterandpartners, 2007). Yüzeydeki dört cam köşesinden ikisi korunurken, diğer ikisi yüzeyin üzerinde eşit miktarda yer değiştirmiştir (Şekil 4.68).



Şekil 4.67 Yapıda kullanılması tercih edilen dörtgen cam paneller (Rudolph, 2009)



Şekil 4.68 Diyagonallere göre yerleştirilen farklı açılardaki cam paneller (Fosterandpartners, 2007)

Fabrikada üretilen elemanlar, lojistik imkanların ve şantiyede kullanılacak vinçlerin kaldırma kapasitesinin izin verdiği sınırlar çerçevesinde, birleştirilerek paneller haline getirilmiş (Şekil 4.69) ve nakliye edilmiştir (Şekil 4.70). Uygulamada ise yapı iskeleleri ve vinçler kullanılmıştır (Şekil 4.71).



Şekil 4.69 Fabrikada birleştirilen elemanlar ile oluşturulan paneller (Rudolph, 2009)



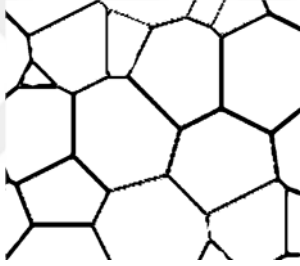
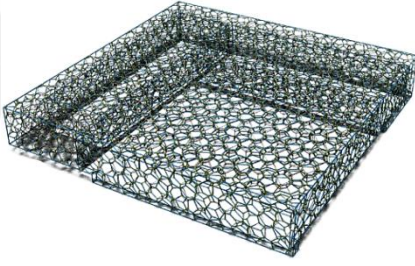
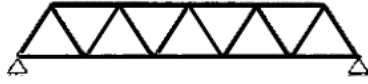
Şekil 4.70 Lojistik imkanların belirlediği panel boyutları (Rudolph, 2009)



Şekil 4.71 Uygulamada kullanılan yapı iskeleleri ve vinçler (Rudolph, 2009)

4.7 Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi

Tablo 4.7 Beijing ulusal su sporları merkezi incelemesi (Ptw Architects, 2020)

Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi-Water Cube			
Mimari	Yıl: 2008 Yer: Beijing, Çin Mimar: : PTW Architects Mühendis: Arup, CSCEC, CCDI		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 Voronoi		 Dikdörtgenler prizması
Üretim	Strüktür		Malzeme
	 Uzay kafes		 ETFE balon  Çelik

29. Yaz olimpiyatları kapsamında, Ulusal Su Sporları Merkezinin tasarımı için 2003 yılında yapılan proje yarışmasında birinci seçilen Su K   . 50 metrelik bir yüzme havuzu, 33 metrelik bir dalış havuzu, 50 m'lik bir ısınma havuzu, su parkı ve restoran gibi birimleri barındırmaktadır (şekil 4.72). Tasarımın gelişmesinde sürdürülebilirlik ve enerji kullanımı önemli bir yer tutmuştur. Yapı cephesi için, hafif olması ve iyi bir yalıtım sağlamasından dolayı ETFE (Etilen tetrafloro etilen) seçilmiştir. Güneş enerjisinin yaklaşık %20'si yapı içerisine hapsedilmekte ve ısıtma için kullanılmaktadır. %55 oranında aydınlatmadan tasarruf sağlanmış ve enerji tüketimi toplamda %30 azalmıştır (Arup, 2007).

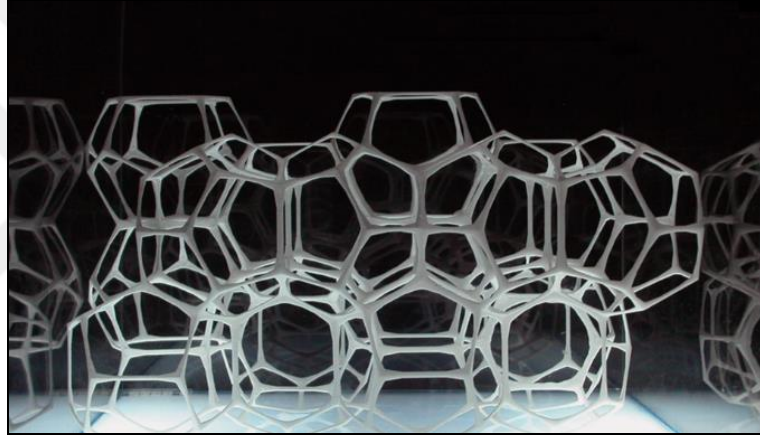


şekil 4.72 Su k    iç mekan (Arup, 2007)

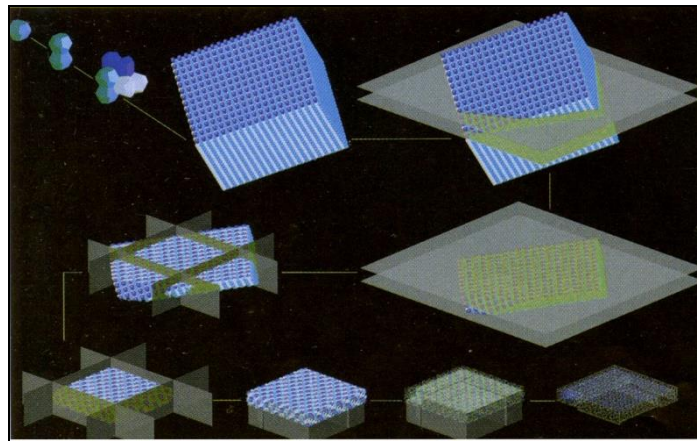
Duvarları ve çatıyı kaplayan sürekli bir yüzey kavramı tercih edilmiş, 177 metre kenar uzunluğundaki kare plana sahip 31 metre yüksekliğinde bir yapı yapılmıştır. Strüktür sabun k    klerinin birleşiminden esinlenilmiştir. Voronoi diyagramları üç boyutlu uzayda yapılabilir ve özelliklerinin iki boyutlu Voronoi diyagramlarının özelliklerine çok benzerdir. Su k    n  n tasarımı 3 boyutlu bir Voronoi diyagramına dayanmaktadır (Pottman ve diğer., 2007).

Uzayda bulunan bir hacmin aralarında en az yüzey alanına sahip olan eşit hacimdeki farklı çok y  zl  lere nasıl bölünebileceği sorusuna cevap olan Weaire-Phelan (WP) geometrisi organik ve rastgele görünmesine rağmen aslında tekrarlanabilir ve düzenlidir (Carfrae, 2007). Bir uzay kafes strüktür olan sistem üç

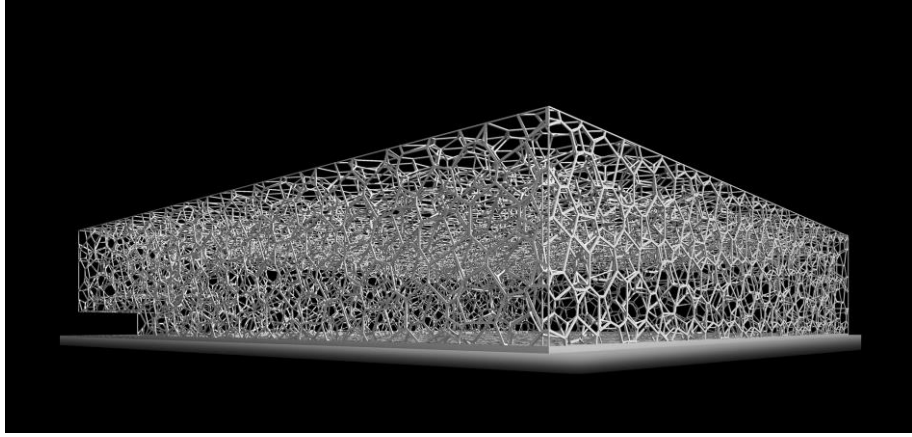
boyutlu yapıların en etkili alt bölümü olan farklı çok yüzlü hücrelere dayanmaktadır (Oñate ve Kröplin, 2005). Proje için WP geometrisi ile üretilecek bir strüktürün uygulanabilir olduğu fark edilmiştir. Kullanılan eşit hacimdeki çokyüzlüler düzgün çok yüzlüler değildir, çokyüzlülerin dörtte üçü 14 yüzlü, geri kalanı ise 12 yüzlüdür (Şekil 4.73). WP'den oluşturulan bir uzaydan, yapının boyutlarına sahip bir dikdörtgenler prizması kesilerek çıkartılmış (Şekil 4.74) ve uzay kafes strüktürü oluşturacak eleman ve düğüm noktalarının geometrisi belirlenmiştir (Şekil 4.75). Bazıları 9.14 metre ye kadar genişleyen hücrelerden, çatı kısmında 7, duvarlarda ise 15 farklı boyutta bulunmaktadır, hücreler organik görülmelerine rağmen aslında kendini tekrar etmektedir (Şekil 4.76) (Carfrae, 2007).



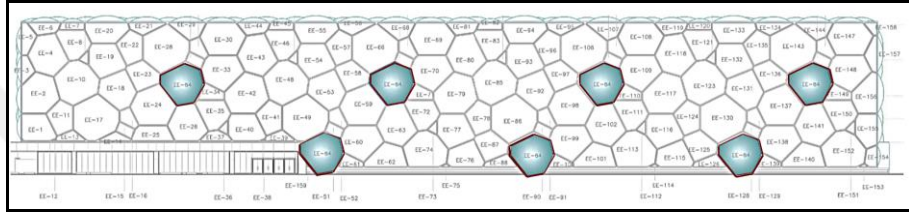
Şekil 4.73 Weaire Phelan geometrisi ile birleşen çokyüzlüler (Arup, 2007)



Şekil 4.74 Weaire Phelan uzayından yapının boyutlarına sahip dikdörtgenler prizması kesilmesi (Carfrae, 2007)

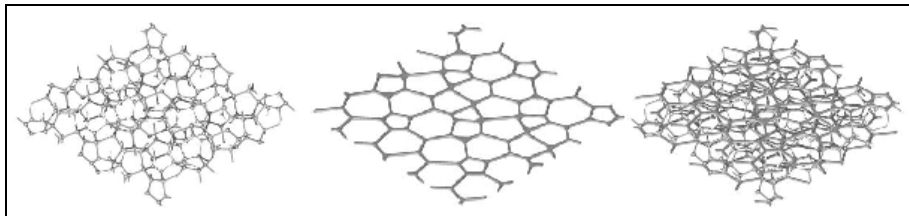


Şekil 4.75 Oluşturulan uzay kafes sistem (Ptw Architects, 2020)



Şekil 4.76 Cephe kendini tekrarlayan hücreler (Carfrae, 2007)

Çatı ve duvarları oluşturan strüktürün kalınlığı tavan kısmında 7.2 metre duvarlarda ise 3.6 m'dir. Toplamda 12.000 düğüm noktası ve 22.000 çelik boru elemandan meydana gelmektedir. Çokgen uzay kafes çerçevesi ile düz yüzeyli iç ve dış katman birleştirilmiş ve ikisinin kombinasyonu olan bir uzay kafes strüktür meydana getirilmiştir (Şekil 4.77) (Oñate ve Kröplin, 2005). Üretimi kolaylaştırmak için basit boru elemanlar ve küresel düğüm noktaları tercih edilmiş, bunlar her iki ucunda kaynaklanarak birleştirilmiştir (Şekil 4.78).

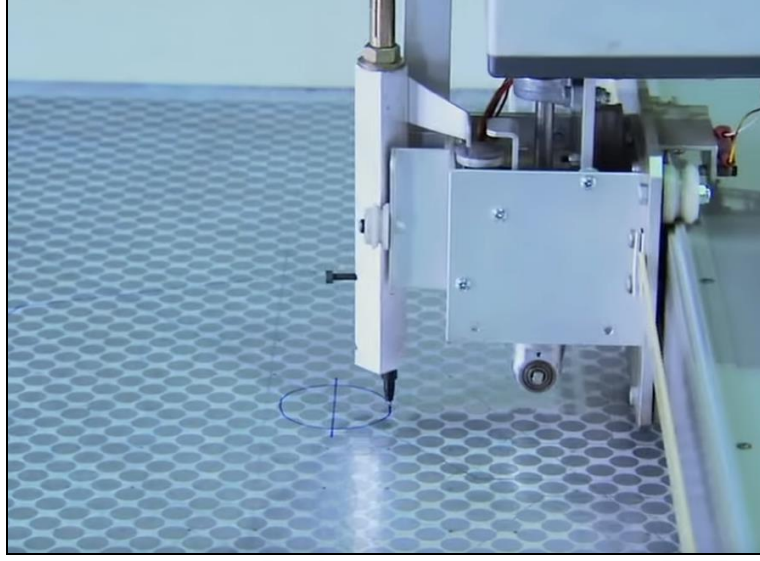


Şekil 4.77 Katmanların birleştirilmesi (Oñate ve Kröplin, 2005)



Şekil 4.78 Çelik elemanlar ve kaynaklı düğüm noktaları (Talley, 2008)

Su K p n n cephesi 4.000 adet Texlon ETFE katmanından oluşmaktadır. 100.000 m²'lik cephe günümüzün en büyük tek parça ETFE cephesidir. Texlon ETFE, iyi akustik ve yalıtım özelliklere sahip olması, ultraviyole ışık ve hava kirliliği kaynaklı bozulmaya karşı dirençli olması ve cepheyi desteklemek için ikincil bir taşıyıcı sisteme olan ihtiyaç ortadan kaldırması nedeni ile tercih edilmiştir. Yapı yüzeyini kaplayacak ETFE'nin üretilmesi için kesim masası üzerine yerleştirilen bir katman, iki boyutlu veri dosyasını girdi olarak kullanan bilgisayar programlı bir bıçak tarafından kesilerek çıkartılmış (Şekil 4.79), daha sonra yerleştirilecekleri çokgen yüzeylerine göre numaralandırılmış ve rulolar halinde arşivlenmiştir. Numaralandırılan ETFE katmanları uygulamada ise yapı iskeleleri kullanılarak çokgen kenarları arasına elle gerilerek birleştirilmiştir (Şekil 4.80). WP hücreleri arasında bağlanan fanlar ile ETFE balonları şişirilmış ve her balonda bulunan sensörler ile sabit bir basınçta tutulmaları sağlanmıştır (Şekil 4.81) (Talley, 2008).



Şekil 4.79 ETFE'nin çokgen yüzeylerine uyacak şekilde üretilmesi (Talley, 2008)

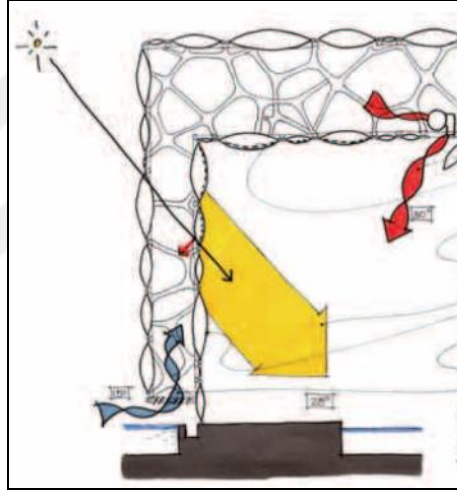


Şekil 4.80 Şantiyede çokgen yüzeylerine ETFE'nin yerleştirilmesi (Talley, 2008)

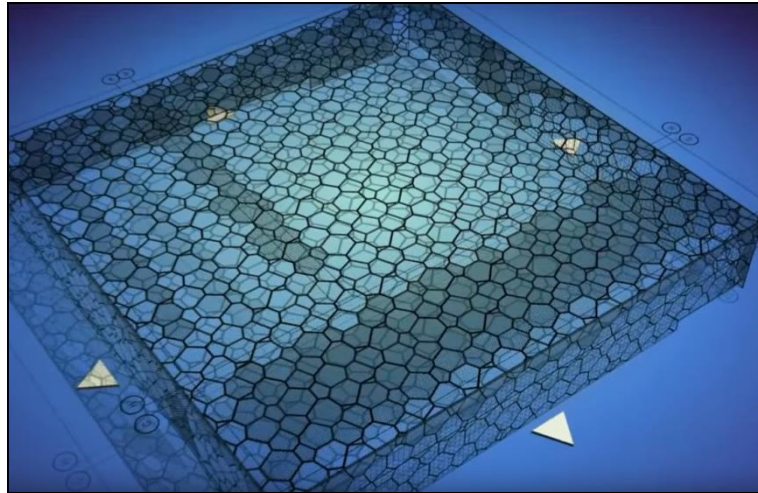


Şekil 4.81 ETFE balonlarının şişirilerek sabit basınçta tutulmasında kullanılan sistem (Talley, 2008)

ETFE kullanımı sayesinde kışın yapının ısıtılması kolaylaşmış, sera etkisi yaratılarak Güneş enerjisi yapı içerisine hapsedilmiştir (Şekil 4.82). Güneş ışığının iyi alınması sayesinde aydınlatma için gereken enerji masrafı da azalmaktadır. ETFE yüzeyinde bulunan noktalar ise yaz aylarında sıcaklık ortalamasının yüksek olması sebebi ile Güneş ışığının kontrol edilmesi amacı ile eklenmiştir, yapının belli bölümlerinin işlevleri ve ihtiyaçları doğrultusunda bu noktaların yoğunluğu artarken bazı bölgelerde ise azalmaktadır bu sayede yapının iklimlendirme sistemlerinin harcadığı enerji ise düşürülmektedir (Şekil 4.83). ETFE katmanları arasındaki ısınan hava kış aylarında tutulmakta yaz aylarında ise havalandırma kanalları sayesinde dışarıya verilmektedir.



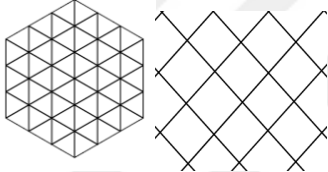
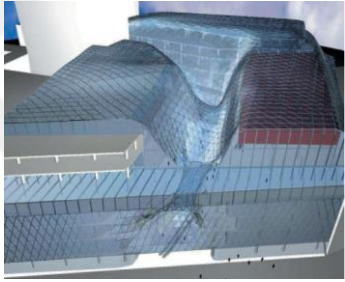
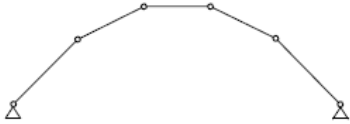
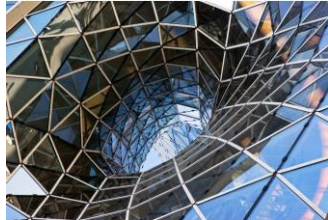
Şekil 4.82 ETFE balonları arasındaki ısınan havanın kullanılması (Carfrae, 2007)



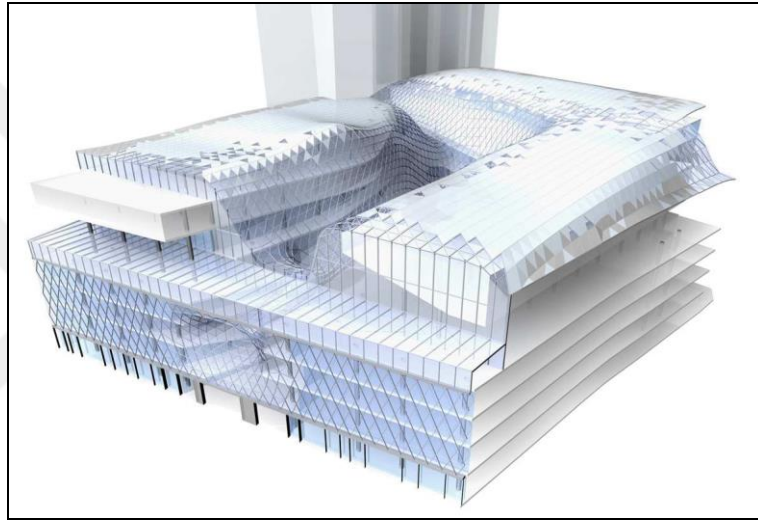
Şekil 4.83 Yapının farklı bölgelerine göre değişen ETFE yüzeyinin nokta yoğunlukları (Talley, 2008)

4.8 Myzeil Alışveriş Merkezi

Tablo 4.8 Myzeil alışveriş merkezi incelemesi (Knippershelbig, 2020a)

Palais Quartier - MyZeil Alışveriş Merkezi			
Mimari	Yıl: 2009 Yer: Frankfurt, Almanya Mimar: Studio Fuksas Mühendis: Knippers Helbig, Waagner Biro		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 3,3,3,3,3,3 + Yarı düzgün diyagonal ağ		 Serbest eğrilikli yüzey
Üretim	Strüktür		Malzeme
	 Gerilmesiz ızgara kabuk		 Çelik  Cam

Palais Quartier, ofis, otel ve alışveriş merkezi gibi birimleri içeren 226.000m²'lik bir yapı kompleksidir. Merkezinde ise MyZeil alışveriş merkezi bulunmaktadır 77.000 m²'lik 8 katlı alışveriş merkezinin içerisinde mağazalar, eğlence alanları, çocuk oyun alanları, restoranlar ve spor merkezi gibi birimler bulunmaktadır (Şekil 4.84). 43 metre yüksekliğindeki yapının ortasında bulunan girdap sayesinde Güneş ışığı yapının zemin katına kadar ulaşmaktadır. Beşinci kattan itibaren yapının döşemeleri, bir kanyon şeklinde devam eden ızgara kabuğa takip etmektedir (Şekil 4.85) (Batista, Vellasco ve Lima, 2015).



Şekil 4.84 Myzeil alışveriş merkezi üç boyutlu modeli (Knippers ve Helbig, 2009)



Şekil 4.85 İç mekanda girdabı takip eden döşemeler (Knippershelbig, 2020a)

13.000 m²'lik ızgara kabuk, bütün katlarda kapalı mekanlar oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Binanın 8.500 m²'lik ön cephesinde diyagonal, kanyon kısmında ise üçgen bir karolama kullanılmıştır. Izgara kabuk yapısına biçim etken elemanların kullanılması ve serbest eğrilikli geometrinin üçgenlere bölünmesi ile ulaşılmıştır. Standart yöntem ve araçların kabul edilebilir bir sonuç oluşturmaması sebebi ile ilk başta estetik, strüktürel ve fonksiyonel gereksinimleri karşılamak için yapıyı oluşturacak elemanların yönlendirilmesinin belirlenmesi gerekmiştir. Daha sonra yüzey, düğüm noktalarını belirleyen büyük üçgenlere bölünmüş ve en sonunda daha küçük üçgenlere bölünmüştür (Knippershelbig, 2020a).

Serbest eğrilikli yüzeyinin ilk modeli, bir Pleksiglas tabakasının bina modelinin üzerinde ısıtılması ile oluşturulmuştur (Batista ve diğer., 2015). İlk mimari tasarım kararlarında, ızgara kabuk geometrisi, keskin bir şekilde kıvrılmış kenarlar ile birbirine bağlanan düz yüzeylerden meydana gelmekteydi. Ayrıca alışveriş merkezinin kanyon bölümünün yayaların daha rahat hareket edebilmeleri için kolonsuz olarak tasarlanması planlanmıştır (Knippers ve Helbig, 2009).

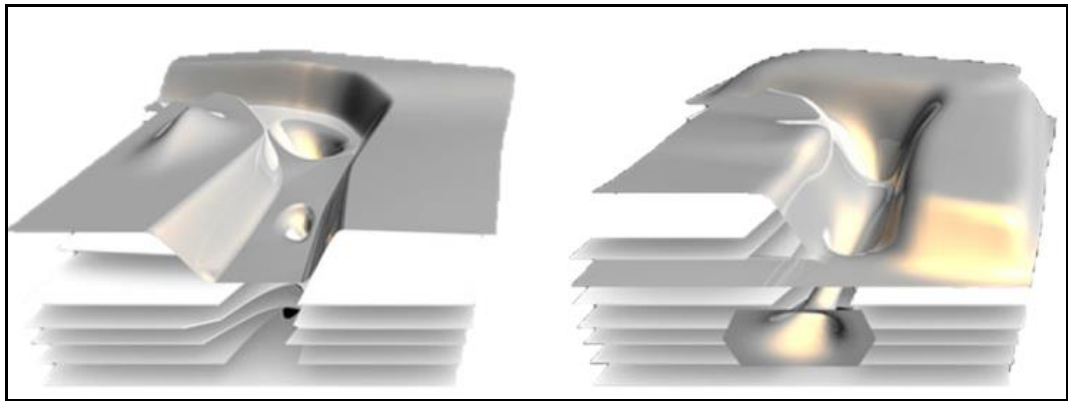
Optimizasyon sırasında mühendisler ilk başta yalnızca estetik değerler taşıyan girdapları strüktürün bir parçası haline getirmiştir. Kanyon ve girdap sürekli bir yüzey haline getirilmiş ve girdap basınç kuvvetlerini beton yapıya aktaran bir sütun görevi görmüştür (Batista ve diğer., 2015). Bu iki girdaptan biri cephe kısmından (Şekil 4.86) diğeri ise zeminden desteklenmektedir (Şekil 4.87). İlk tasarımdaki keskin kıvrımlar ise daha sonra çelik elemanlardaki eğilme momentlerini azaltarak ızgara kabuk davranışını mümkün kılmak için yumuşatılmıştır (Şekil 4.88) (Knippers ve Helbig, 2009)



Şekil 4.86 Cephe tarafından desteklenen girdap (Knippershelbig, 2020a)

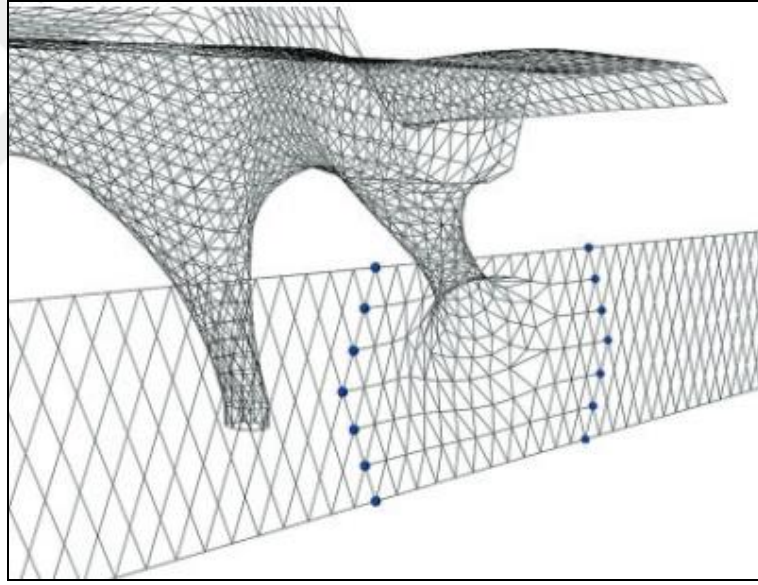


Şekil 4.87 Yükleri zemine aktaran girdap (Knippershelbig, 2020a)

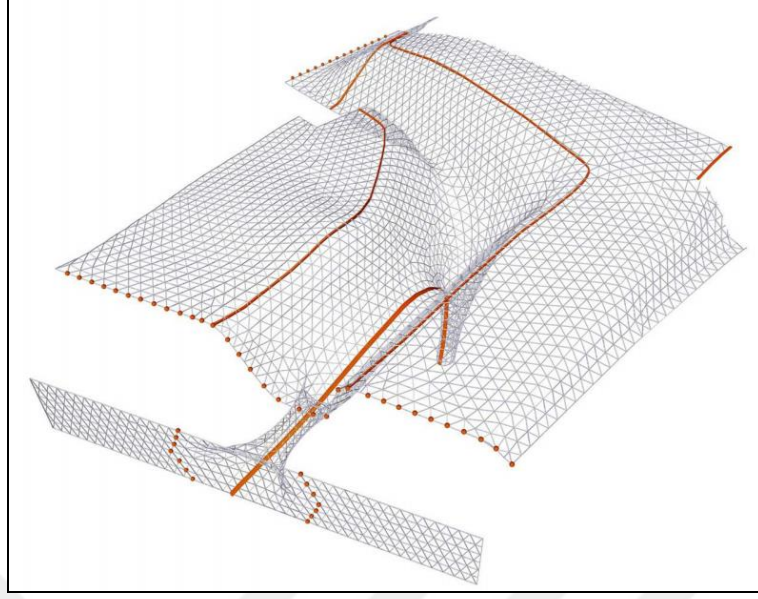


Şekil 4.88 Yüzeyin keskin kenarlı ilk şekli ve kenarların yumuşatılmasından sonraki hali (Knippers ve Helbig, 2009)

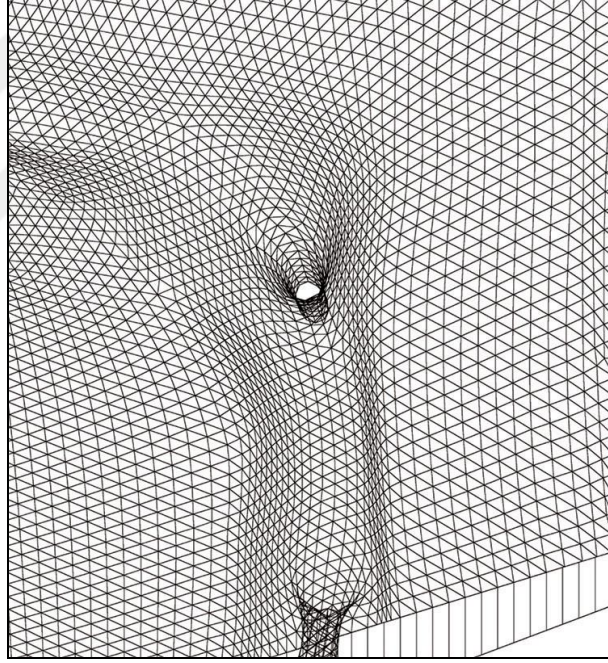
Karmaşık serbest eğrilikli geometrisi sebebiyle projeksiyon yöntemleri kullanılamamıştır. Yapıyı oluşturacak elemanların geometrisinin belirlenmesi için ilk başta yönlendirme çizgileri ve ızgara kabuk ile ön cephenin bağlantı noktaları tanımlanmıştır (Şekil 4.89). Tanımlanan noktalar, ızgara kabuğu oluşturacak karolamanın başlangıç noktaları ve sınırları olarak kullanılmıştır (Şekil 4.90). Yüzey geometrisi ilk başta Buckminster Fullerin jeodezik kubbelerde kullandığı yaklaşıma benzer bir şekilde bölünmüştür. Bölme işlemi için serbest eğrilikli yüzey ilk başta beş ögeli düğümler ile tanımlanan büyük üçgenlere bölünmüş, daha sonrada bu büyük üçgenler kendi içerisinde tekrar üçgenlere bölünmüştür (Knippers ve Helbig, 2009). Bazı ayarlamalar yapılmasından sonra sonuç olarak 6 elemanlı düğüm noktası ile birleşen 3 yönlü üçgen ağ karolamasına sahip ızgara kabuk elde edilmiştir (Şekil 4.91).



Şekil 4.89 Diyagonal ön cephe karolaması ile üçgen karolamanın birleşmesi (Batista ve diğer., 2015)



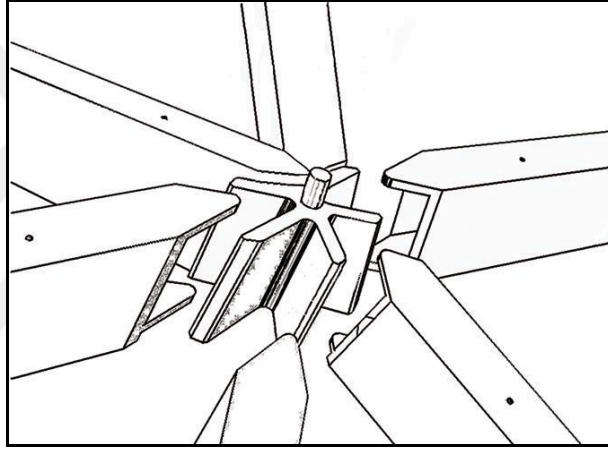
Şekil 4.90 Geometrik sınırlar ve yönlendirme çizgileri (Knippers ve Helbig, 2009)



Şekil 4.91 Düzenlemeler sonrası oluşturulan ızgara kabuğun karolaması (Knippers ve Helbig, 2009)

Serbest eğrilikli geometri içerisinde ağ gözlerinin alanları değişmektedir. Çatının düz olan kısımlarında 3m^2 'den büyük olabilen ağ gözleri, eğriliğin arttığı girdap kısımlarında ise 1m^2 'den daha küçüktür (Batista ve diğer., 2015). Izgara kabuğun yapımında 8.130 eleman ve 2.830 düğüm noktası kullanılmıştır. Farklı alanlara sahip ağ gözleri nedeni ile eleman boyları da 1 m. ile 3 m. arasında değişmektedir.

Elemanlar ortalama 12 cm x 6 cm enkesitli kaynaklı içi boş kutu profillerden oluşmaktadır ve uzunlukları ortalama 2.30 metredir. Diyagonal ön cephede ise 18 cm x 8 cm enkesitli elemanlar kullanılmıştır. Izgara kabuk kısmında kalın bir çelik levhadan üretilen yıldız şeklindeki kaynaklı düğüm noktaları kullanılmıştır (Şekil 4.92), diyagonal cephede kullanılan düğüm noktaları ise artı şeklindedir (Şekil 4.93). Elemanların kesilerek sivrilen uçları, düğüm noktalarına kaynaklanarak birleştirilmiştir (Knippershelbig, 2020a). Diyagonal karolamaya sahip olan ön cephe ise yapının 1. katından başlamakta ve 3. kata kadar devam etmektedir. Ön cephenin yüksekliği 15 metredir. Ön cephe, döşeme levhasının kenarından 3. katın üzerine asılıdır ve yükleri döşemeye aktarır (Şekil 4.94).



Şekil 4.92 Yıldız şeklindeki altı elemanlı düğüm noktaları (Knippers ve Helbig, 2009)



Şekil 4.93 Diyagonal ızgarada kullanılan düğüm noktası (Batista ve diğer., 2015)



Şekil 4.94 Döşemeye asılan diyagonal cephe (Batista ve diğer., 2015)

Izgara kabuk yüzeyinin farklı bölgeleri farklı malzemeler kullanılarak kaplanmıştır (Şekil 4.95). Kanyon ve girdap kısımlarında, ayrıca alışveriş merkezinin üzerinde 6.000 m² yalıtımlı cam kullanılmıştır. Alışveriş merkezi ve yapı birimleri arasındaki geçiş alanlarında ise 4.100 m² ısı yalıtımlı alüminyum panel kullanılmıştır. Yapının teknik birimlerinin üzeri 3.400 m² trapez sac levha ile kapatılmıştır.



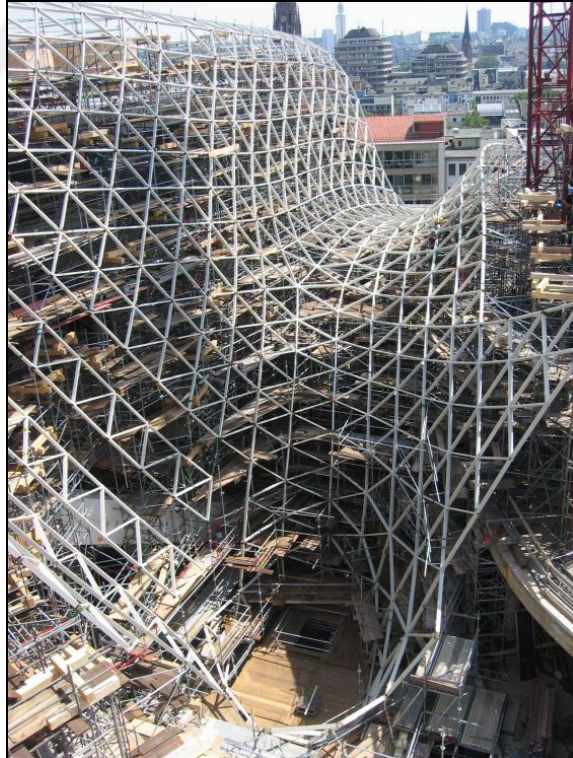
Şekil 4.95 Farklı bölgelerde kullanılan farklı kaplama malzemeleri (Knippershelbig, 2020a)

Izgara kabuk uygulaması ise girdabın en alt kısmından başlamıştır. Şantiyedeki iş yükünü azaltmak için prefabrik elemanlar atölyede paneller halinde birleştirilmiştir (Şekil 4.96) (Knippershelbig, 2020a). Montajın sağlanabilmesi için ızgara kabuğu

oluşturacak elemanlar yapı iskeleleri kullanılarak desteklenmiştir (Şekil 4.97). Oluşturulan paneller vinçlerle kaldırılarak hizalanmış, yerlerine yerleştirilmiş ve ek elemanların montajı gerçekleştirilmiştir, daha sonra ise cam paneller ve diğer kaplama malzemelerinin montajı yapılmıştır (Batista ve diğer., 2015).



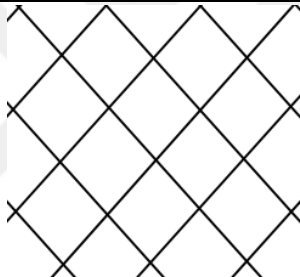
Şekil 4.96 Önceden birleştirilmiş paneller (Batista ve diğer., 2015)



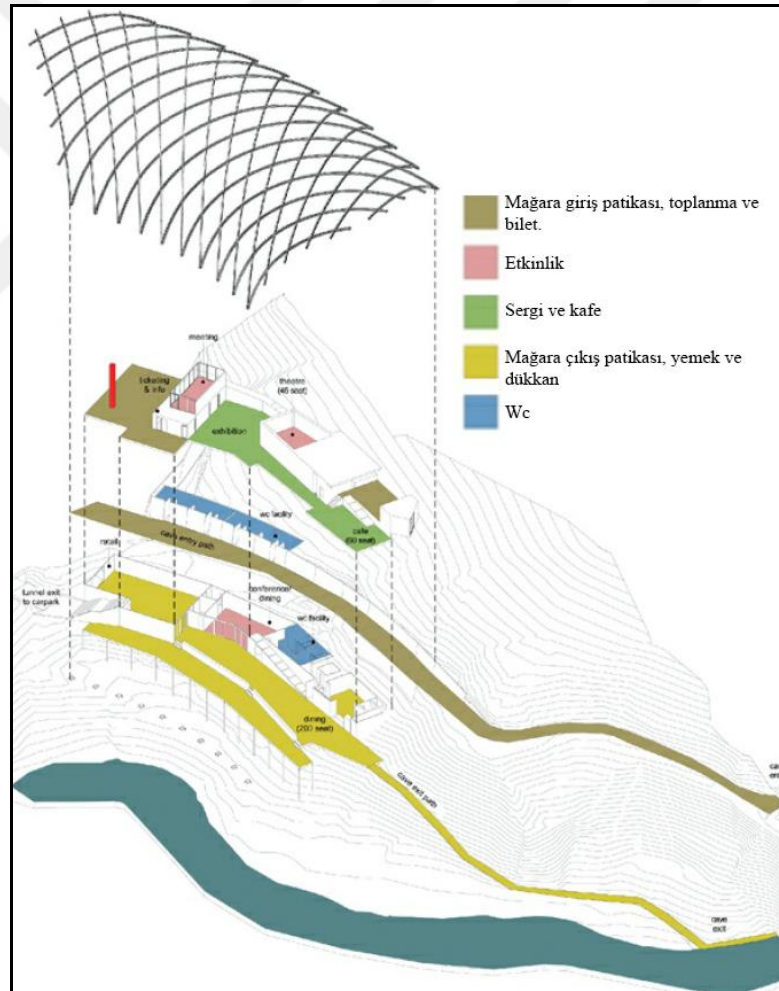
Şekil 4.97 Yapı iskeleleri kullanılarak desteklenen ızgara kabuk (Knippers ve Helbig, 2009)

4.9 Waitomo Ziyaretçi Merkezi Kanopisi

Tablo 4.9 Waitomo ziyaretçi merkezi kanopisi incelemesi (Architecture Workshop, 2020)

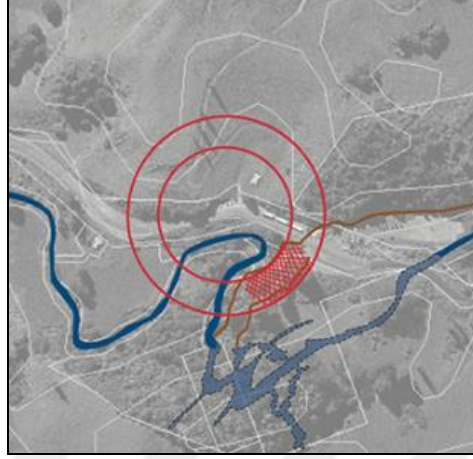
Waitomo glowworm caves ziyaretçi merkezi			
Mimari	Yıl: 2010 Yer: Otorohanga, Waikato, Yeni Zelanda Mimar: Christopher Kelly, Architecture Workshop Ltd. Mühendis: Dunning Thorton		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 Yarı düzgün diyagonal ağ		 Torus yüzeyinden kesilen parça
Üretim	Strüktür		Malzeme
	 Gerilmesiz ızgara kabuk		 Texlon ETFE Balon  Lamine kaplama çam

Yeni Zelanda'nın Kuzey adasında yer alan, ülkenin önemli doğa turizmi merkezlerinden biri olan Waitomo, *Arachnocampa luminosa* cinsi ateş böceği larvalarının bulunduğu mağaralara ev sahipliği yapmaktadır. 2005 yılında meydana gelen yangın ile eski ziyaretçi merkezi hasar görmüş ve ziyaretçi merkezinin yenilenme projesi kapsamında yeni bir kanopi yapılmıştır. Yeni yapılan kanopi, mağaralara giriş ve çıkışın yapıldığı ziyaretçi merkezinin üstünü örtmekte, 240 kişilik bir yemek salonu, kafe, dükkan, tiyatro, seminer ve sergi alanı gibi birimleri barındırmaktadır. Mağaralara düzenlenecek turlar öncesinde ziyaretçilerin rezervasyon işlemlerini gerçekleştirdikleri bir toplanma alanı yaratmaktadır (Şekil 4.98) (Architecture Workshop, 2020).

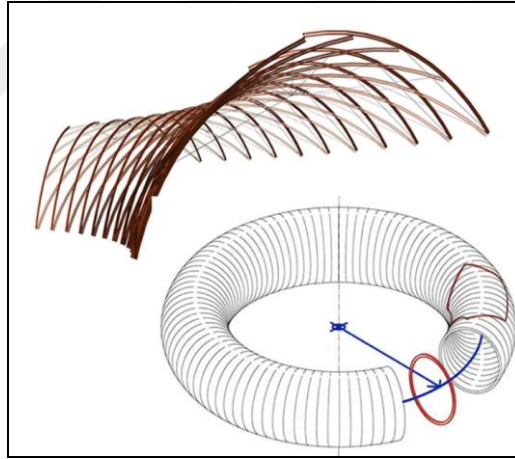


Şekil 4.98 Vaziyet planı ve ızgara kabuk yapısının yerleşimini gösteren perspektif (Chilton ve Tang, 2017)

Izgara kabuğun geometrisi, elipsin, çember üzerinde döndürülmesi ile oluşturulan torus (Şekil 4.99) yüzeyinden kesilen bir parçadır (Şekil 4.100). Izgara kabuk yapısı 30 metre genişliğinde, 55 metre uzunluğunda, 15 metre yüksekliğinde ve 1.846 m²'dir.



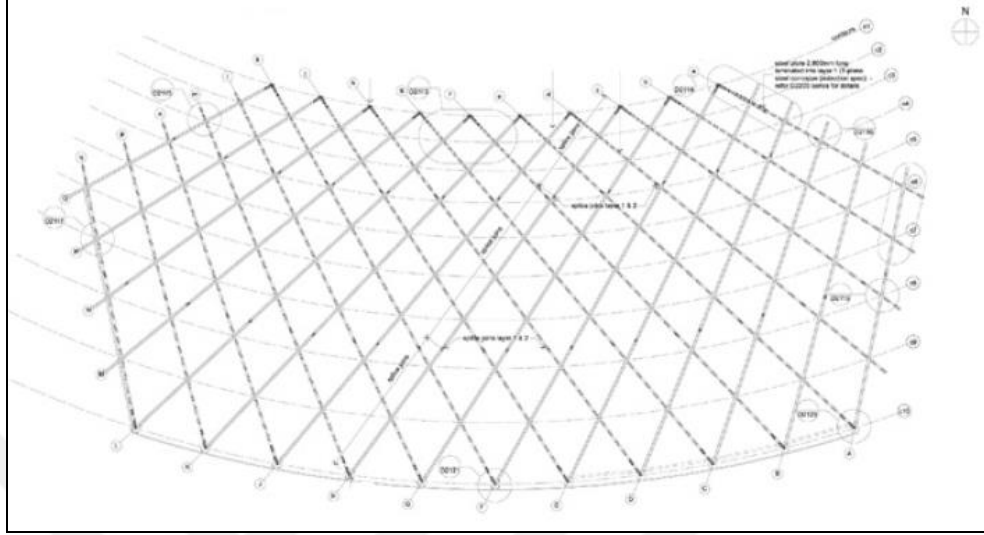
Şekil 4.99 Vaziyet planına Torusun yerleştirilmesi (Architecture Workshop, 2020)



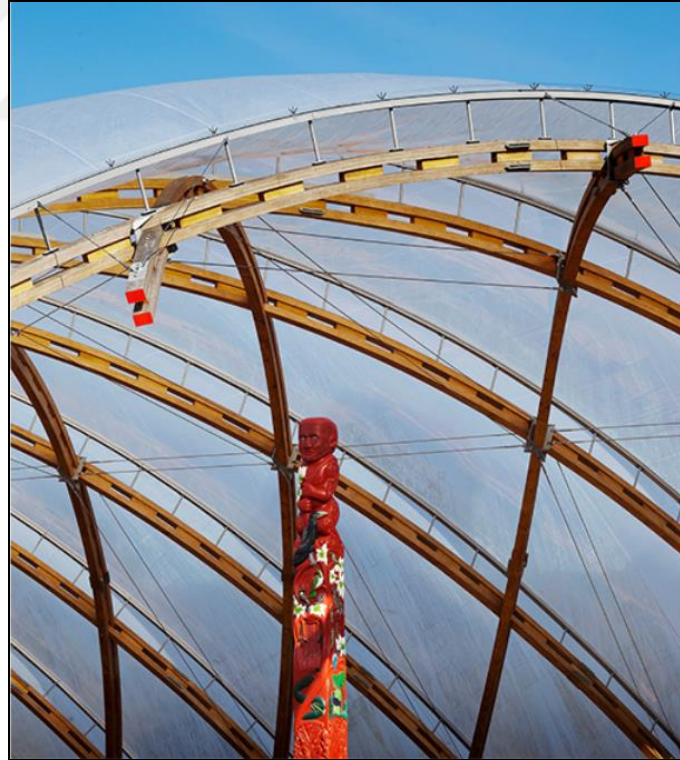
Şekil 4.100 Torus yüzeyinden kesilen ızgara kabuk parçası (Architecture Workshop, 2020)

Izgara kabuğu oluşturan karolama ise torusu meydana getiren doğrultmana 45° ile hizalanan, elemanların sıralanması ile oluşturulmuştur (Şekil 4.101) (Chilton ve Tang, 2017). Ortogonal yerine diyagonal bir karolama kullanılması sebebi ile çubuk elemanların yüzey boyunca eğilirken, bükülmeleri de gerekmiştir. Izgarayı oluşturan elemanlar doğrultmanı oluşturan çember yayına bakacak şekilde bükülmüştür. Bunun gerçekleştirilebilmesi için elemanlar prefabrik olarak üretilmiştir. Açıklık geçildikçe

hem eğilmekte hem de uzunlukları doğrultusunda bükülmektedirler (Şekil 4.102)
(Lightweight Structures Association Australia [LSAA], 2020).



Şekil 4.101 Izgara kabuk planı (Chilton ve Tang, 2017)



Şekil 4.102 Hem eğilen hem de bükülen elemanlar (Architecture Workshop, 2020)

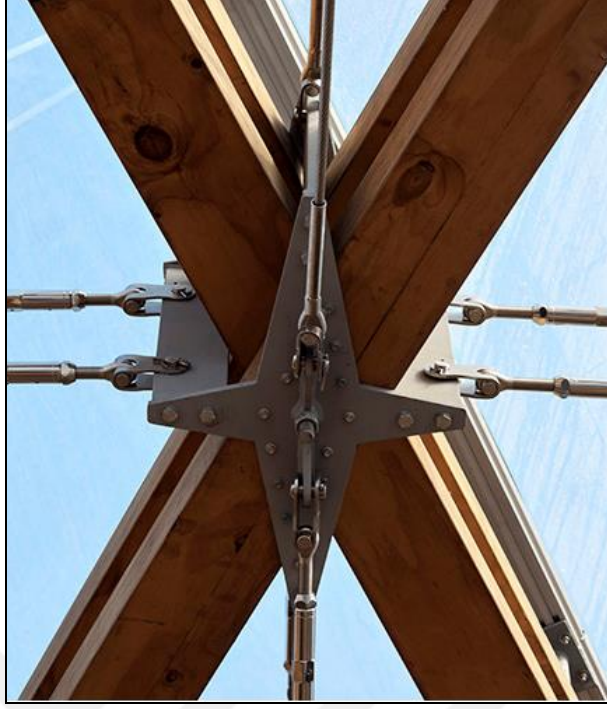
Izgara kabuk yapımında kullanılan prefabrik çift eğrilikli, bükülen elemanlar, lamine kaplama çam malzemeden üretilmiştir. Elemanlar yaklaşık 15 metre uzunluğunda ve 2 katmanın üst üste birleştirilmesi ile meydana gelmektedir. Elemanları oluşturan çıtalar ise 10,6 cm'lik enkesite sahiptir. Bu elemanlardan 3 tanesi uç uca eklendiğinde 30 metre açıklık geçmekte ve karolamanın bir yönünü oluşturmaktadır. Eklenen uçlar ise çelik çubuklar ile bir birine bağlanmaktadır (Şekil 4.103). Bir düğümde 4 elemanın birleşiminden oluşan, iki çift katmanlı, 2 yönlü ızgara kabuk yapısına sahiptir (Şekil 4.104). Bazı düğüm noktalarında ise çelik diyagonal kablolar ile rijitlik arttırılmıştır (Şekil 4.105).



Şekil 4.103 Elemanların uç uca eklenmesinde kullanılan çelik bağlantılar (Architecture Workshop, 2020)



Şekil 4.104 İki yönlü dört katmanlı ızgara kabuk (Architecture Workshop, 2020)



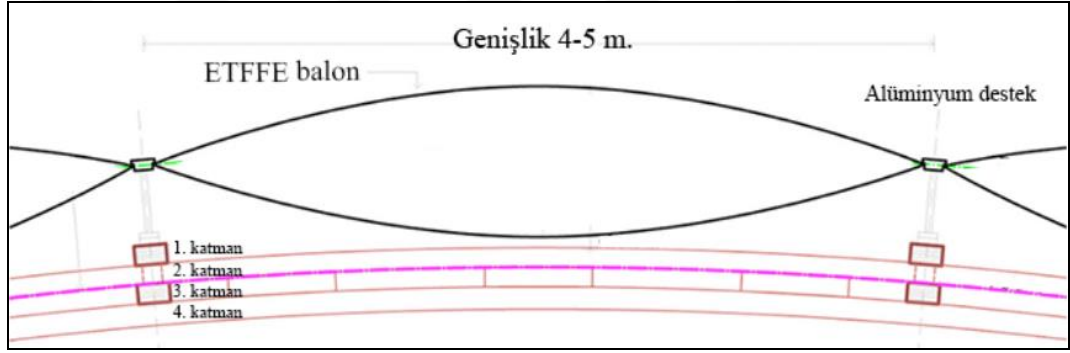
Şekil 4.105 Bazı düğüm noktalarından geçen çelik diyagonal kablolar (Reynolds, 2020)

Uzun parçalar halinde gelen 150 kg'lık elemanlar şantiyede yapı iskelelerinin üzerine vinç ile yerleştirilmiştir. Konumları kontrol edilen elemanlar daha sonra üst üste yerleştirilip bir birine geçirilmiş, cıvatalanmış ve kablolar gerilmiştir (Şekil 4.106) (LSAA, 2020).

4-5 metre genişliğinde ve uzun şeritler halinde kesilen Texlon ETFE balon katmanları, ızgara kabuktan 50 cm yükseltilerek alüminyum desteklere monte edilmiştir (Şekil 4.107). Bitişik ahşap düğümler arasına yerleştirilen çelik kenar kabloları ETFE'nin kısa kenarlarını germek için kullanılmıştır (Şekil 4.108). Izgara yönünü takip ederek yükseltlen ETFE balonları ise uçlarında bulunan sistem ile şişirilmekte ve sabit basınçta tutulmaktadır. ETFE balonlarının, ızgara kabuktan yükseltilmesi uzun ve tek parçalı şeritleri mümkün kılmıştır bu sayede hava dağıtım sistemleri minimumda tutulabilmiştir (Şekil 4.109) (Vector Foiltec, 2020).



Şekil 4.106 Izgara kabuğun yapı iskeleleri kullanılarak birleştirilmesi (Architecture Workshop, 2020)



Şekil 4.107 ETFE'nin alüminyum desteklere yerleşimini gösteren kesit (Architecture Workshop, 2020)



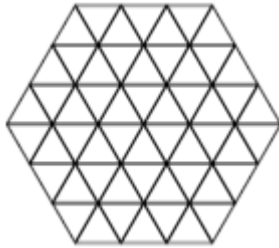
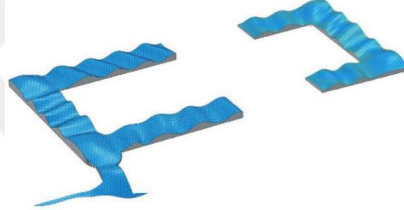
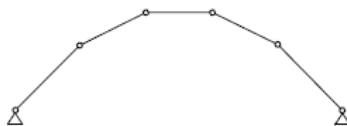
Şekil 4.108 ETFE'nin gerilmesinde kullanılan çelik kenar kabloları (Architecture Workshop, 2020)



Şekil 4.109 ETFE balonlarının şişirilmesinde ve sabit basınçta tutulmasında kullanılan sistem (Chilton ve Tang, 2017)

4.10 Westfield Alışveriş Merkezi

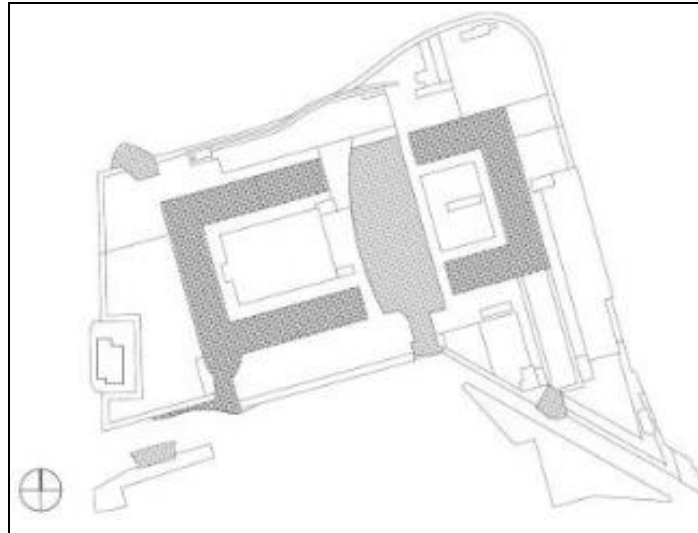
Tablo 4.10 Westfield alışveriş merkezi incelemesi (Knippers ve Helbig, 2009)

Westfield London Shopping Mall			
Mimari	Yıl: 2007 Yer: Londra, İngiltere Mimar: Buchan Group International, Benoy Mühendis: Knippers Helbig, Waagner biro		
Türetim	Karolama	Türetim Yöntemi	Geometri
	 3,3,3,3,3,3	Projeksiyon	 Serbest eğrilikli yüzey
Üretim	Strüktür		Malzeme
	 Gerilmesiz ızgara kabuk		 Çelik  Cam + Metal paneller

120.000 m²'lik taban alanına sahip olan 350.000 m²'lik alışveriş merkezi Westfield London Avrupa'nın en büyük alışveriş merkezidir. İçerisinde 280 mağaza, 47 restoran, spor salonu ve eğlence alanları bulunmaktadır. Kısmen şeffaf ızgara kabuk çatısı sayesinde alışveriş merkezi içerisine gün ışığı alınabilmektedir (Benoy, 2020). Alışveriş merkezi projesinin ızgara kabuk yapısı 3 ayrı bölümden meydana gelmektedir (Şekil 4.110), bunlar alışveriş merkezinin doğu ve batı pasajlarını örten U şeklindeki birimler ve merkezde bulunan *Wintergarden* avlusudur (Şekil 4.111).

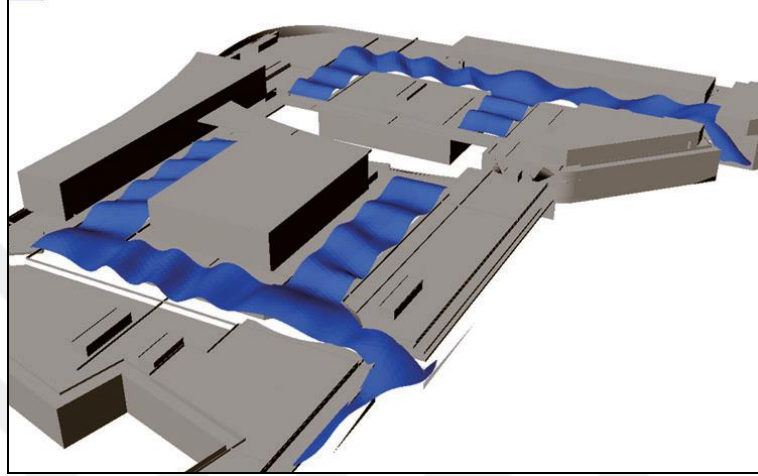


Şekil 4.110 AVM dış cephe ve ızgara kabuk bölümleri (Knippershelbig, 2020b)



Şekil 4.111 Izgara kabukların vaziyet planı (Behling, Brensing, Fuchs ve Ingenhoven, 2010)

Pasajları örten ızgara kabuk yapısı iki birimden oluşmaktadır ve toplamda 18.000 m²'dir. En uzun kısmı 124 metredir ve genel olarak 24 metrelik açıklığa sahiptir, serbest eğrilikli bir yüzey olarak tasarlanmıştır (Şekil 4.112). Merkezde bulunan ve daha geniş açıklığa sahip olan avluyu örten ızgara kabuk ise 7.650 m²'dir ve ağaca benzeyen kolonlar ile desteklenmektedir (Şekil 4.113) (Behling ve diğer., 2010).

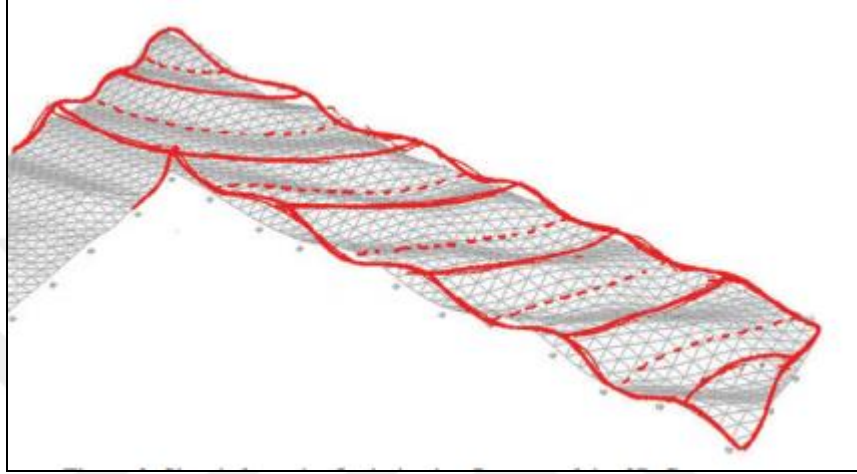


Şekil 4.112 Pasajları örten ızgara kabukların ilk modeli (Knippers ve Helbig, 2009)

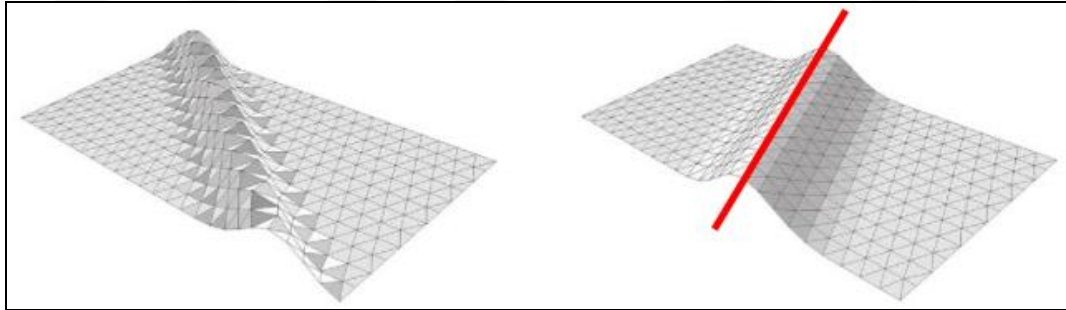


Şekil 4.113 Merkezde bulunan avlu (Benoy, 2020)

Tasarımcıların dalgalardan esinlenen bir yüzey (Şekil 4.114) seçmesi bazı tasarım kararlarını da beraberinde getirmiştir. Kabuk yüzeyinin, keskin kenarları olmayan, yumuşak ve akışkan bir şekilde oluşturulması için dalgalanmanın ağ karolamasının yönlerinden birini takip etmesi gerekmiştir. Dalgalanma için 60°'lik bir açı tercih edilmiştir (Şekil 4.115) (Knippers ve Helbig, 2009).

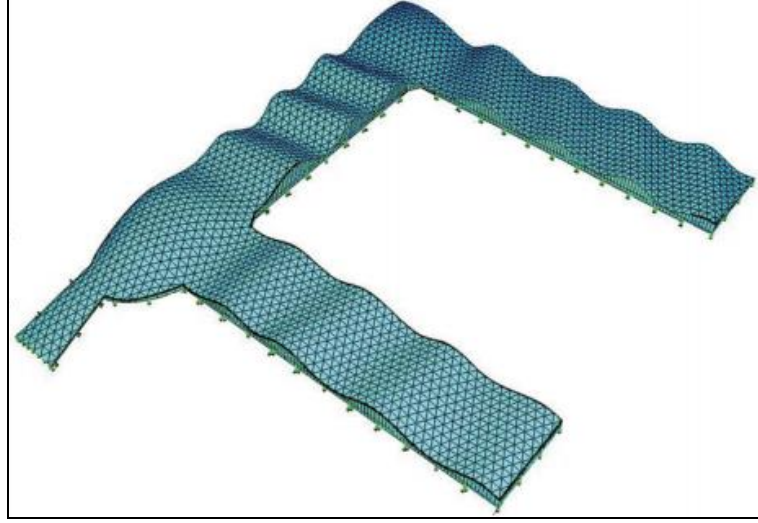


Şekil 4.114 Dalgalardan esinlenen yüzeyin eskizi (Knippers ve Helbig, 2009)



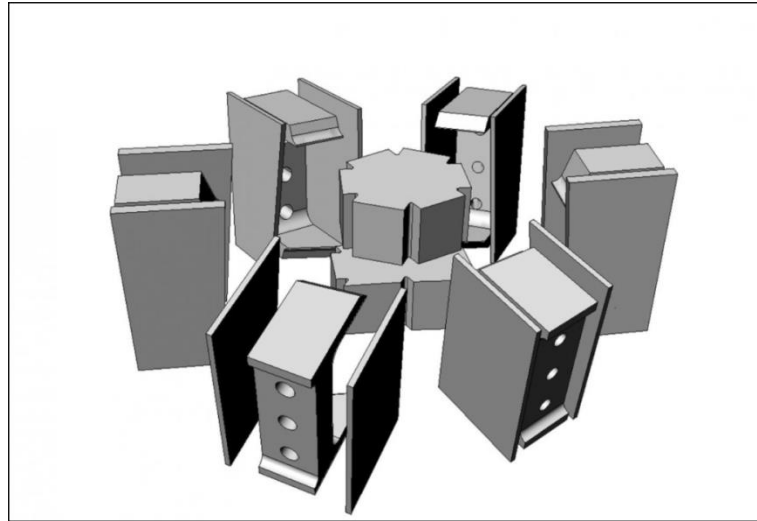
Şekil 4.115 Ağ yönünü izlemeyen dalgalanma ve ağ yönünü izleyen 60°'lik dalgalanmanın farkı (Behling ve diğer., 2010).

Yüzeydeki eğriliğin uygun olması nedeni ile projeksiyon yöntemi kullanılabilmektedir (Knippers ve Helbig, 2009). Düzlemdeki üçgen ağ karolaması yüzeye dikey olarak yansıtılmıştır. Her bir düğümdeki elemanlar arasındaki açının yatay düzlemde 60° olması üretimi kolaylaştırmıştır ve maliyetini düşürmüştür. Elemanların eğiminin farklı olması sebebiyle açıların ayarlanması gerekmiştir (Şekil 4.116) (Dimčić, 2011).



Şekil 4.116 Projeksiyon yöntemi sonrası oluşturulan ızgara kabuk (Knippers ve Helbig, 2009)

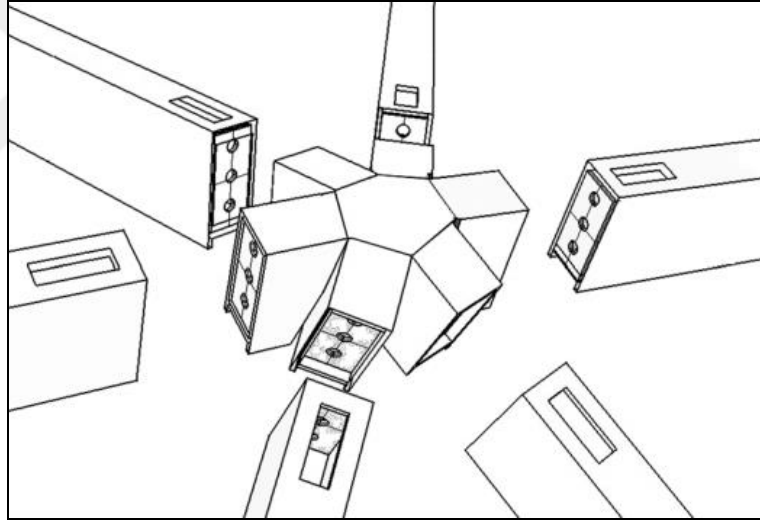
Izgara kabukta 7.000 düğüm noktası kullanılmıştır. Yüzey geometrisi nedeni ile farklı yüksekliklerde bulunan düğüm noktaları, birbirinden farklıdır. 26 ayrı çelik levhanın birleşiminden üretilen düğüm noktaları (Şekil 4.117) CNC ile kesilip kaynaklanmış ve prefabrik olarak üretilmiştir. Levhaların her birinin kalınlığı ve cıvataların boyutu, düğümelerde belirlenen yüklere göre ayarlanmıştır. Düğümelerin son geometrisinin ayarlanması, mekanik frezeleme kullanılarak levhaların işlenmesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.118). Düğümlemler ilave bir uygulamaya gerek kalmadan sahada elemanlara kolayca cıvatalanmıştır (Şekil 4.119) (Benoy, 2020; Knippershelbig, 2020b; Seele, 2020).



Şekil 4.117 Düğüm noktasını oluşturan levhaların ayırık modeli (Knippershelbig, 2020b)



Şekil 4.118 Düğüm noktasının son geometrisinin ayarlanması (Knippers ve Helbig, 2009)



Şekil 4.119 Düğüm noktası ve elemanların cıvatalı birleşimi (Knippers ve Helbig, 2009)

Merkez avluda bulunan ızgara kabukta ise daha farklı bir yöntem izlenmiş ve uçları sivri kesilen elemanlar ile yıldız şeklindeki kaynaklı düğüm noktaları kullanılmıştır (Şekil 4.120) (Behling ve diğer., 2010).



Şekil 4.120 Kaynaklı düğüm noktası merkez avlu (Behling ve diğer., 2010)

Izgara kabuk yapısında kullanılan 8.500 çelik eleman, 160 x 65 mm ebatlarında ve ortalama uzunluğu 2.30 m olan kaynaklı kutu profillerden meydana gelmektedir (Şekil 4.121). Elemanların enkesiti yapısal gereksinimlere bağlı olarak değişmektedir ancak bu işlem dış ebatları sabit tutularak gerçekleştirilmiştir, bu sayede düzgün bir ızgara üretilmiştir (Knippers ve Helbig, 2009).



Şekil 4.121 Farklı cıvata sayısına ve enkesite sahip olan elemanlar (Knippershelbig, 2020b)

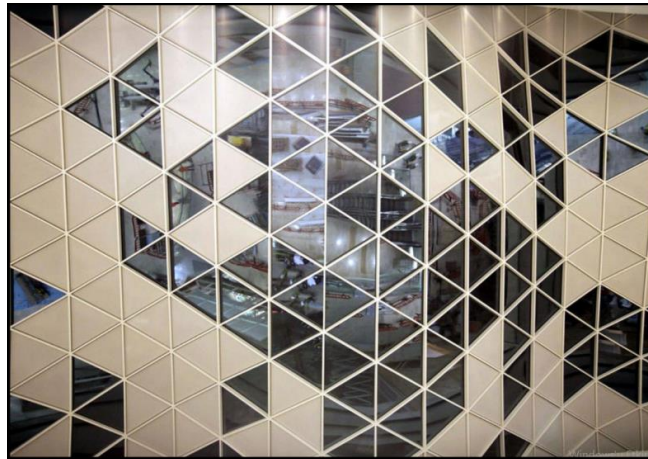
Izgara kabuğun serbest eğrilikli geometrisi ve yüksekliği nedeni ile iki parçalı yapı iskelesi kullanılmıştır, bunlardan biri basamaklar şeklinde yükselip alçalan iskele platformu, diğeri ise ızgara kabuğun kenarları boyunca 1.5 metre mesafeden çevreleyen yapı iskelesidir. Izgara kabuk tamamen birleştirilmeden önce yüklerin

aktarılması için düğüm noktalarının altlarına geçici destekler eklenmiştir (Şekil 4.122) (Behling ve diğer., 2010). Elemanlar ile düğüm noktalarının cıvatalı birleşimi hava koşullarından bağımsız bir şekilde hızlı ve kolay montaj sürecine olanak sağlamıştır. Cıvatalı birleşim sayesinde düğüm noktaları estetik açıdan görünmemekte ve gizli kalmaktadır (Knippers ve Helbig, 2009).



Şekil 4.122 Izgara kabuğun birleştirilmesi (Knippers ve Helbig, 2009)

Izgara kabuk yapısının kaplaması bazı bölgelerde şeffaf bazı bölgelerde ise opaktır. Kaplamanın % 40'ı yalıtımlı çift cam ve % 60'ı ısı yalıtımlı metal panellerden oluşmaktadır (Şekil 4.123) (Seele, 2020). Bu dağılım göze rastgeleymiş gibi görünse de yaz aylarında iklimlendirme sistemlerinin harcayacağı enerji tüketiminin azaltılması için, Güneş'in gün içerisindeki hareketine göre konumlandırılmışlardır (Behling ve diğer., 2010).



Şekil 4.123 Kullanılan üçgen cam ve metal paneller (Knippershelbig, 2020b)

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Tez çalışmasında, modern yapı kabuklarının geometrik olarak düzenlenmesi ve uygulamasında kullanılan yöntemlerin belirlenmesi ve karolama yöntemleri ile üretilebilecek ağ geometrilerinin kullanımına yönelik bilimsel literatüre dayanan bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, biçim bulma yöntemleri ve gelişimi incelenerek, farklı eğriliklere sahip kabuk yüzeylerde uygulama yöntemlerine ilişkin teorik bilgi verilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada biçim bulma ve geometrik ağların kullanıldığı modern yapı kabukları ile yapımı gerçekleştirilen on adet bina örneği incelenmiştir. İncelenen binaların taşıyıcı sisteminin oluşturulmasında kullanılan karolamalar, yüzey geometrileri, geçilen açıklık, düğüm noktaları, kullanılan eleman tipi ve boyutlarına göre karşılaştırılmıştır (Tablo 5.1), (Tablo 5.2). Çalışma kapsamında incelenen ve karşılaştırması yapılan on adet bina örneğinde geniş açıklıkları geçen yapı kabuklarının geometrik olarak düzenlenmesinin sağladığı potansiyel katkılar ortaya çıkarılmıştır. İncelenen yapı örneklerinin taşıyıcı sistemleri arasında ise 2 gerilmeli ızgara kabuk, 7 gerilmesiz ızgara kabuk ve 1 uzay kafes sistem bulunmaktadır.

Çift eğrilikli bir yüzeyin karolamasında, eğriliğin arttığı yerlerde eğriliğin sağlanabilmesi için karolamada bulunan ağ gözlerinin küçülmesi gerekmektedir. Küçülen ağ gözleri ise farklı eleman tipi sayısının artmasına neden olmaktadır. Karolamaların projeksiyon yöntemleri ile bir yüzeye aktarılmasının strüktürdeki eleman tipi sayısına büyük bir etki edeceği görülmüştür. İncelenen örnekler arasında projeksiyon yöntemi kullanılan yapıların eleman tipi sayısı azaltılmakta ve düzenli yapı kabukları oluşturulabilmektedir. Ancak bu uygulama yüzey geometrisinin uygun olması ile sağlanabilmektedir.

Tablo 5.1 Tez kapsamında incelenen binalar ve özellikleri

No	Bina	Yıl	Yer	Karolama	Geometri	Türetim Yöntemi	Açıklık (Maksimum)
1	Pompidou Center	2010	Metz, Fransa	6,3,3,3,3	Ters eğrilikli yüzey		50 metre
2	British Museum	2000	Londra, İngiltere	3,3,3,3,3,3	Sayısal olarak tanımlanabilen yüzey	DR	39 metre
3	Expo 2000 Japon Pavyonu	2000	Hannover, Almanya	4,4,4,4	Karma eğrilikli öteleme yüzey	Maket + Sayısal	74 metre
4	Mannheim Multihalle	1975	Mannheim, Almanya	4,4,4,4	Serbest eğrilikli yüzey	Maket + Sayısal	60 metre
5	Metropol Parasol	2011	Sevilla, İspanya	4,4,4,4	Serbest eğrilikli yüzey	Sayısal + Projeksiyon	70 metre
6	Smithsonian Enstitüsü Kogod Avlusu	2007	Washington, Amerika	Yarı düzgün diyagonal ağ	Serbest eğrilikli yüzey		36 metre
7	Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi	2008	Beijing, Çin	Voronoi	Weaire – Phelan, Dikdörtgenler prizması		140 metre
8	Myzeil Alışveriş Merkezi	2009	Frankfurt, Almanya	3,3,3,3,3,3 + Yarı düzgün diyagonal ağ	Serbest eğrilikli yüzey	Biçim bulma + Üçgenleme	
9	Waitomo Ziyaretçi Merkezi Kanopisi	2010	Otorohanga, Waikato, Yeni Zelanda	Yarı düzgün diyagonal ağ	Torus yüzeyinden kesilen parça		30 metre
10	Westfield Alışveriş Merkezi	2007	Londra, İngiltere	3,3,3,3,3,3	Serbest eğrilikli yüzey	Projeksiyon	24 metre

Tablo 5.2 Tez kapsamında incelenen binaların uygulamasında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

No	Bina	Strüktür	Katman	Düğüm Noktası	Eleman	Eleman uzunluğu	Üst Örtüsü
1	Pompidou Center	Gerilmesiz ızgara kabuk	4	Dişli cıvata	Eğrilikli Lamine Ahşap (CNC)	1,57 - 14 metre	TiO ₂ kaplamalı PTFE membran
2	British Museum	Gerilmesiz ızgara kabuk	1	6 elemanlı Çelik (CNC) Kaynaklı	Konik uçlu Kesilmiş Çelik		Cam
3	Expo 2000 Japon Pavyonu	Gerilmeli ızgara kabuk	2	Polyester bant	Kağıt tüp ve lamine ahşap	20 metre	Membran
4	Mannheim Multihalle	Gerilmeli ızgara kabuk	4	8 mm dişli cıvata	5cm x 5cm çıta (Kanada sugası)		PVC kaplamalı Membran
5	Metropol Parasol	Gerilmesiz ızgara kabuk	1	Bir çeşit Clevis bağlantısı	Eğrilikli Lamine ahşap (CNC)		-
6	Smithsonian Enstitüsü Kogod Avlusu	Gerilmesiz ızgara kabuk	1	-	V şekli. Çelik (CNC ile kesilen çentikli katlanan elemanlar)		Çift Cam panel
7	Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi	Uzay kafes	-	Küresel Kaynaklı	Çelik boru		ETFE balon
8	Myzeil Alışveriş Merkezi	Gerilmesiz ızgara kabuk	1	6 elemanlı Çelik (CNC) Kaynaklı + ön cephede ise 4 elemanlı düğüm noktası	12 cm x 6 cm ve 18 cm x 8 cm kaynaklı kutu profil	1-3 metre, Ortalama 2.30 metre	Yalıtımlı Cam ve alüminyum panel
9	Waitomo Ziyaretçi Merkezi Kanopisi	Gerilmesiz ızgara kabuk	4	Alüminyum ETFE destekli, M20 cıvatalı	Eğrilikli 10 cm Lamine çam (Prefabrik)	± 15	ETFE Balon
10	Westfield Alışveriş Merkezi	Gerilmesiz ızgara kabuk	1	6 elemanlı CNC Çelik gizli cıvatalı + 6 elemanlı kaynaklı	160 x 65 mm Çelik kutu profil cıvatalı + konik uçlu	Ortalama 2.30 metre	Yalıtımlı çift Cam + yalıtımlı metal paneller

İncelenen yapı örneklerinin geçilen maksimum açıklıkları karşılaştırıldığında, en geniş açıklık 140 metre ile uzay kafes sisteme sahip olan yapı örneğinde gözlemlenmiştir. Gerilmeli ızgara kabuk örnekleri ise 74 - 60 metre ile ikinci sırada yer alırken, gerilmesiz ızgara kabuk örnekleri 70 - 24 metre arasında değişen maksimum açıklığa sahiptir.

İncelenen yapı örnekleri arasında 3,3,3,3,3 ağ karolamasına sahip 3 yapı, 4,4,4,4 karolamasına sahip 3 yapı, yarı düzgün diyagonal ağ karolamasına sahip 3 yapı, 6,3,3,3,3 ve Voronoi karolamasına sahip birer yapı bulunmaktadır. Örneklerin 5 tanesi 1 katmanlı, 3 tanesi ise 4 katmanlı, 1 tanesi 2 katmanlıdır. Bu bağlamda, üçgen ve dörtgen karolamalar ile 1 katmanlı ızgara kabuklar incelenen örnekler arasında en yaygın kullanıma sahip olanlardır. Izgara kabuklarda rijit üçgen karolamaların yerine, kinematik olan dörtgen karolamaların kullanılması stabilite problemlerine neden olmaktadır. Dörtgen karolamalara sahip incelenen ahşap yapı örneklerinde karolamanın köşegenleri arasına gerilen çelik kablolar ile stabilite problemi giderilmiştir.

İncelenen yapı örneklerinin geometrilerine bakıldığında ise örneklerin çoğunluğunun serbest eğrilikli yüzeye sahip oluşu belirlenmiştir. İncelenen yapı örneklerinin türetim yöntemleri karşılaştırıldığında ise 2 örnekte projeksiyon yöntemi kullanılmış, 2 örnekte ise hem maket hem de sayısal biçim bulma yöntemleri kullanılmıştır. İncelenen örnekler arasında karmaşık serbest eğrilikli yüzeylere sahip yapılarda, projeksiyon yöntemleri kullanılamamaktadır.

İncelenen yapı örneklerinde kullanılan elemanların malzemeleri karşılaştırıldığında 5 yapıda çelik, 4 yapıda ahşap, 1 yapıda ise kağıt rulo elemanlar kullanılmıştır. Ahşap elemanlar kullanan 4 yapının üçünde ise prefabrik olarak eğrilikli üretilmiş elemanlar kullanılmıştır. Yapı kabuklarında hem hafif hem de kararlı strüktürler oluşturulurken, kullanılan panel ve elemanların fabrika ortamında üretilebilmesi uygulama süresini de azalmaktadır. Ulaşılan bilgiler ışığında en uzun ve hafif olan elemanlar kağıt rulolardan üretilen elemanlardır, daha sonra ise ahşap elemanlar gelmekte ve en kısa eleman boyu ise çelik elemanlarda bulunmaktadır.

Elemanların boyutlandırılmasında ve şantiyeye paneller halinde getirilecek birleşimlerde lojistik imkanların göz önünde bulundurulmasında yarar vardır.

İncelenen gerilmesiz ızgara kabuk uygulamalarında yüzey eğriliğinin 2 yöntemle sağlandığı gözlemlenmiştir. Çelik eleman kullanılan örneklerde yüzey eğriliği düğüm noktası aracılığı ile sağlanırken, ahşap eleman kullanılan örneklerde yüzey eğriliği eğrilikli olarak üretilmiş elemanlar ile sağlanmaktadır. Ancak eğrilikli elemanlara sahip olan gerilmesiz ızgara kabuklarda ahşap elemanların CNC ile üretilmesinde ise malzemeden kayıp yaşanmaktadır.

Gerilmeli ızgara kabuklarda ise eleman seçiminde kağıt rulolardan yapılan elemanların istenilen boyutlarda üretilebilmesi, çok basit düğüm noktaları içermesi ve elemanların daha hafif olması tasarımcıya esneklik ve avantaj sağlayabilir.

İncelenen örneklerin düğüm noktaları ele alındığında ise gerilmeli ızgara kabuklar gerilmelilere göre daha basit ve esnek düğüm noktaları içermektedir. Gerilmesiz ızgara kabuklarda ise özellikle çelik uygulamalarındaki düğüm noktaları özel olarak üretilmekte ve tek tip olmamaktadır.

İncelenen yapı örneklerinde kullanılan üst örtüsü 3 yapıda membran, 2 yapıda şişime ETFE balon, 4 yapıda ise camdır, cam kullanılan yapıların ikisinde cam haricinde alüminyum ve metal panellerde kullanılmıştır. Izgara kabuklarda üst örtüsü olarak cam kullanılacak ise cam limitlerini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu bağlamda, üçgen karolamalara sahip yapı örneklerinde eleman boyunun 2m - 3 m ve dörtgen karolamalara sahip yapı örneklerinde eleman boyunun 1.5m - 2m ile sınırlandırıldığı gözlemlenmiştir.

Eğrilikli bir yüzeye sahip olan ızgara kabuk yapılarında karolamanın seçiminde ekonomik etkiler de göz önünde bulundurulabilir. Aynı yüzeyin, üçgen veya dörtgen olarak karolanmasında, üçgen karolamada bulunan diyagonal elemanın dörtgende ortadan kalkması nedeni ile kullanılan eleman sayısı değişmektedir. Bu sayede hem eleman sayısında ekonomik bir avantaj sağlamak hem de yapı hafifletilmektedir.

Bununla birlikte, dörtgen karolamalarda elde edilen bu ekonomik avantaj ancak ağ gözü düzlemsel olarak tutulursa korunabilir. Tek veya çift eğrilikli cam yüzeylerin maliyeti, dörtgen karolamanın kazandıracadı ekonomik avantajları ortadan kaldırmaktadır. Eğrilikli cam panellerin imalatından kaynaklanacak maliyet artışını önlenmesi için, cam panellerinin birleştirilmesinde farklı teknikler tercih edilebilir veya yüzey geometrisinin oluşturulmasında ağ yönüne göre önlemler alınabilir.



KAYNAKLAR

Adrianssens, S., Block, P., Veenendaal, D. ve Williams, C. (2014). *Shell structures for architecture*. Londra: Routledge.

Agkathidis, A. (2015). *Generative design*. Londra: Laurence King Publishing.

Architecture Workshop. (2020). *Waitomo glowworm caves visitors centre | waitomo*. 10 Nisan 2020, <https://architectureworkshop.co.nz/projects/waitomo-caves-visitors-centre/>

Arup. (2007). *National aquatics center water cube, Beijing a form inspired by the natural formation of soap bubbles*. 17 Aralık 2019, <https://www.arup.com/projects/chinese-national-aquatics-center>.

Arup. (2020). *Metropol Parasol, Seville one of the largest timber structures ever built*. 06 Nisan 2020, <https://www.arup.com/projects/metropol-parasol>.

Balmond Studio. (2020). *Metz Pompidou*. 11 Mart 2020, <https://www.balmondstudio.com/work/metz-pompidou.php>.

Barnes, M. (2000). *Widespan roof structures*. Londra: Thomas Telford Publishing.

Batista, E., Vellasco, P. ve Lima, L. (2015). *Tubular structures XV*. Londra: CRC Press.

Bayülgen, C., (1993). *Çağdaş strüktür sistemleri*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi

Behling, S., Brensing, C., Fuchs, A., ve Ingenhoven, C. (2010). *Innovative design + construction*. Münih: Institut für internationale.

- Benoy. (2020). *Westfield London*. 15 Mart 2020, <https://www.benoy.com/projects/westfield-london/>
- Burohappold. (2020). *Queen Elizabeth II great court*. 11 Mart 2020, <https://www.burohappold.com/projects/queen-elizabeth-ii-great-court-the-british-museum/#>.
- Campbell, T. (2013). *The gateway arch*. New Haven: Yale University Press.
- Caneparo, L. (2014). *Digital fabrication in architecture, engineering and construction*. Dordrecht: Springer.
- Carfrae, T. (2007). Box of bubbles: Visualisation of the entrance to the Water cube – the China national aquatic centre. *Ingenia*, 33, 45-51.
- Casini, M. (2017). *Tecnologia dell'architettura*. Roma: DEI tipografia del genio civile.
- Chilton, J. ve Tang, G. (2017). *Timber gridshells: architecture, structure and craft*. Oxford: Routhledge.
- D'Agostino, S. (2019). *Voronoi tessellations and scutoids are everywhere*. 21 Mart 2020, <https://blogs.scientificamerican.com/observations/voronoi-tessellations-and-scutoids-are-everywhere/>.
- Davey, P. (2009). *Engineering for a finite planet, sustainable solutions by Buro Happold*. Basel: Birkhäuser.
- Designtoproduction. (2020). *Centre Pompidou Metz*. 25 Mart 2020, <https://www.designtoproduction.com/en/>

Detail Inspiration. (2000). *Japanese pavilion at the EXPO in Hanover*. 04 Nisan 2020, <https://inspiration.detail.de/japanese-pavilion-at-the-expo-in-hanover-106867.html?lang=en>.

Dimčić, M. (2011). *Structural optimization of grid shells based on genetic algorithms*. Stuttgart: ITKE.

Engel, H. (2013). *Tragsysteme* (5. Baskı). Ostfildern: Hatje Cantz.

Fosterandpartners. (2000a). *Great court at the British Museum*. 11 Mart 2020, <https://www.fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/#gallery>.

Fosterandpartners. (2000b). *Queen Elizabeth II great court, British Museum opens*. 11 Mart 2020, <https://www.fosterandpartners.com/news/archive/2000/12/queen-elizabeth-ii-great-court-british-museum-opens/>.

Fosterandpartners. (2007). *Smithsonian institution courtyard*. 08 Nisan 2020, <https://www.fosterandpartners.com/projects/smithsonian-institution-courtyard/>

Foster, N., Sudjic, D. ve De Grey, S. (2001). *Norman Foster and the British Museum*. Münih: Prestel.

Gengnagel, C., Kilian, A., Palz, N. ve Scheurer, F. (Ed.). (2011). *Computational design modelling*. Berlin: Springer.

Glaeser, L. (1972). *The work of Frei Otto*. New York: Museum of Modern Art.

Glaeser, L. (1977). *The work of Frei Otto and his teams 1955-1976*. Stuttgart: Universität Stuttgart.

- Gründig, L., Moncrieff, E., Singer, P. ve Ströbel, D. (2000). A history of the principal developments and applications of the force density method in Germany 1970–1999, *4th International Colloquium on Computation of Shell & Spatial Structures. Hanya, Yunanistan*, 586-599.
- Happold, E. ve Liddell, W.I. (1975). Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau. *The Structural Engineer*, 53, 99-135.
- Hennicke, J. (1974). *Gitterschalen: Grid shells*. Stuttgart: The Institute for Lightweight Structures.
- Jurgenmayer Architects. (2012). *Metropol Parasol shades sunny seville*. 07 Nisan 2020, https://www.solaripedia.com/13/393/5663/metropol_parasol_grid.html.
- Knippershelbig. (2020a). *Palaisquartier*. 11 Mart 2020, <https://www.knippershelbig.com/en/projects/palaisquartier>
- Knippershelbig. (2020b). *Westfield Shopping Mall*. 15 Mart 2020, <https://www.knippershelbig.com/en/projects/westfield-shopping-mall>
- Knippers, J. ve Helbig, T. (2009). Recent developments in the design of glazed grid shells. *International Journal of Space Structures*, 24(2), 111-126.
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age*. New York: Taylor & Francis.
- Koppitz, J. P., Quinn, G. C., Schmid, V. ve Thurik, A. (2012). Metropol parasol – digital timber design. *Computational Design Modelling*. içinde (249-257). Berlin: Springer.
- Lewis, W. (2003). *Tension structures form and behaviour*. Londra: Thomas Telford.

Lienhard, J., Alpermann, H., Gengnagel, C. ve Knippers, J. (2013). Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process. *International Journal of Space Structures*, 28(3-4), 187-196.

Lightweight Structures Association Australia [LSAA]. (2020). *Waitomo glowworm caves visitor centre*. 11 Nisan 2020, <https://www.lsaa.org/index.php/projects/large-fabric-structures/108-waitomo-glowworm-caves-visitor-centre>

Linkwitz, K. ve Schek, H. (1971). Einige bemerkungen zur berechnung von vorgespannten seilnetz-konstruktionen. *Ingenieur-Archiv*, 40, 145–158.

Lukac, D (2020). *Multihalle mannheim*. 05 Nisan 2020, <https://mannheim-multihalle.de/architektur/>.

Mayer, J. (2020). *Metropol Parasol*. 07 Nisan 2020, <https://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html>.

McQuaid, M. (2006). *Shigeru Ban*. Londra: Phaidon Press.

Moussavi, F. (2009). *The function of form*. New York: Actar and Harvard University Graduate School of Design.

Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K. ve Chiu, S. (2000). *Spatial tessellations: Concepts and applications of Voronoi diagrams* (2. Baskı). New York: John Wiley & Sons.

Oñate, E. ve Kröplin, B. (2005). *Textile composites and inflatable structures*. Dordrecht: Springer.

Orhon, V. (2013). *Geodel v.1.0.1 başlangıç ve tanıtım rehberi*. İzmir

Otto, F. (1971). *Minimalnetze = Minimal nets*. Stuttgart: Krämer.

Otto, F., Bodo, R., Pfafferoth, G., Schönborn, A. ve Schanz, S. (1995). *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding form*. Stuttgart: Axel Menges.

Peters, B. (2007). The Smithsonian courtyard enclosure a case-study of digital design processes. Lilley, B. ve Beesley, P. (Ed.), *Expanding bodies* (74-82). Halifax: Riverside Architectural Press and Tuns Press.

Peters, B. (2010). Acoustic performance as a design driver: Sound simulation and parametric modeling using smartgeometry. *International Journal of Architectural Computing*, 8(3), 337-358.

Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M. ve Kilian, A. (2007). *Architectural geometry*. Pensilvanya: Bentley Institute Press.

PTW Architects. (2020). *Watercube - National Swimming Centre*. 08 Nisan 2020, https://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/.

Reynolds P. (2020). *Waitomo Glowworm Caves Visitors Centre*. 10 Nisan 2020, <http://www.dunningthornton.co.nz/projects/#>

Rombouts, J., Lombaert, G., De Laet, L. ve Schevenels, M. (2019). A novel shape optimization approach for strained grid shells: Design and construction of a simply supported grid shell. *Engineering Structures*, 192, 166-180.

Rudolph, W. (2009). *Technology: The canopy at the Smithsonian institution's Kogod courtyard in Washington D.C.*. 08 Nisan 2020, <https://inspiration.detail.de/technology-the-canopy-at-the-smithsonian-institutions-kogod-courtyard-in-washington-d.c.-114048.html?lang=en>

Savaşır, K. (2016). Kubbelerin yapım sistemlerinin yük aktarım prensiplerine göre irdelenmesi. 8. *Ulusal Çatı ve Cephe Sempozyumu. İstanbul, Türkiye*, 203-210.

Schek, H. (1974). The force density method for form finding and computation of general networks. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(1), 115-134.

Schumacher, P. (2018). *The progress of geometry as design resource*. 20 Haziran 2019, <https://www.patrikschumacher.com/Texts/The%20Progress%20of%20Geometry%20as%20Design%20Resource.html>.

Schmid, V., Faller, G. ve Koppitz, J. (2011). Metropol Parasol in Sevilla. *Bautechnik*, 88(10), 715-722.

Seele. (2020). *Westfield London – glass shell roof*. 15 Mart 2020, <https://seele.com/references/westfield-london-glass-shell-roof>

Shigeru Ban Architects. (2020a). *Centre Pompidou-Metz*. 11 Nisan 2020, http://www.shigerubanarchitects.com/works/2010_centre-pompidou-metz/index.html

Shigeru Ban Architects. (2020b). *SBA_EXPO Japan pavillion*. 11 Mart 2020, http://www.shigerubanarchitects.com/works/2000_japan-pavilion-hannover-expo/index.html.

Silver, P., McLean, W. ve Evans, P. (2013). *Structural engineering for architects: a handbook*. Londra: Laurence King Publishing.

Taiyo Europe. (2020). *Centre Pompidou-Metz*. 11 Mart 2020, https://www.taiyo-europe.com/en/projects?tx_jcmprojectportfolio_projectportfolio%5Baction%5D=show&tx_jcmprojectportfolio%5Bcontroller%5D=Project&tx_jcmprojectportfolio_projectportfolio%5Bproject%5D=28&cHash=269c06714e96a878a550eafe731c91cb.

Talley, R. S. (2008). *Nationalgeographic: Mega structures, the water cube*. 16 Aralık 2019, <http://cheops.cc/mega-structures-water-cube/>.

Türkçü, Ç. (1988). *Endüstrileşmiş yapım konut sorunu açısından irdelenmesi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi.

Türkçü, Ç. (2009). *Çağdaş taşıyıcı sistemler* (2. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınları.

Türkçü, Ç. (2017). *Çağdaş taşıyıcı sistemler* (3. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınları.

Vector Foiltec. (2020). *Waitomo caves*. 10 Nisan 2020, <https://www.vector-foiltec.com/projects/waitomo-caves/>

Veenendaal, D. ve Block, P. (2012). An overview and comparison of structural form finding methods for general networks. *International Journal Of Solids And Structures*, 49(26), 3741-3753.

Williams, C. J. K. (2001). The analytic and numerical definition of the geometry of the British museum great court roof. M., Burry, S., Datta, A., Dawson ve Rollo, A.J. (Ed.), *Mathematics & Design* içinde (434-440). Geelong: Deakin University.