

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPI KABUKLARININ PREFABRİKASYONLA
ÜRETİMİNDE MODÜLER KOORDİNASYON
ARACI OLARAK PARAMETRİK TASARIM**

Bengisu AKIN

Mayıs, 2023
İZMİR

YAPI KABUKLARININ PREFABRİKASYONLA ÜRETİMİNDE MODÜLER KOORDİNASYON ARACI OLARAK PARAMETRİK TASARIM

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilgisi Programı**

Bengisu AKIN

**Mayıs, 2023
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

BENGİSU AKIN, tarafından **PROF. DR. A. VEFA ORHON** yönetiminde hazırlanan “**YAPI KABUKLARININ PREFABRİKASYONLA ÜRETİMİNDE MODÜLER KOORDİNASYON ARACI OLARAK PARAMETRİK TASARIM**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. A. Vefa ORHON

Yönetici

Prof. Dr. Müjde ALTIN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa Emre İLAL

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca beni destekleyen, birikim ve tecrübeleriyle araştırmalarım katkı sağlayan, danışman hocam sayın Prof. Dr. A. Vefa ORHON'a destek ve alakalarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan sevgili eşim Burak CAN'a, annem Gamze AKIN'a, babam İsmet AKIN'a, biricik kardeşim Necati AKIN'a ve desteklerini hiç esirgemeyen arkadaşlarıma hep yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

Bengisu AKIN

YAPI KABUKLARININ PREFABRİKASYONLA ÜRETİMİNDE MODÜLER KOORDİNASYON ARACI OLARAK PARAMETRİK TASARIM

ÖZ

Geleneksel üretim yöntemlerinin ve uygulama süreçlerinin zorluğu tasarımcıyı yeni arayışlara yöneltmiştir. Tasarımcının hayal gücünün sınırsızlığına rağmen üretim ve uygulama yöntemlerinin sınırlı oluşu, istenilen özgürlükte yapılar yapılmasına olanak sağlamamaktadır. Bilgisayar teknolojilerinin 20. Yüzyıl'ın sonlarına doğru hızla gelişmesi sonucunda bilgisayarlar da tasarım sürecine dahil olmuştur.

Parametrik tasarım, algoritmalara dayalı bir tasarım yöntemidir. Algoritmalar arasındaki ilişkileri belirleyerek bir tasarım geliştirilir. Geleneksel tasarım yöntemlerinde tasarımcı tek bir sonuç oluşturabilirken, parametrik tasarım yöntemlerinde ise parametrelere dayalı birden fazla sonuç oluşturulmaktadır. Parametrik tasarım ile kompleks yapılar oluşturulabilir ancak sadece yapı modellemek için değil, mühendislik hesaplamaları yapmak için, çevresel analizleri yapmak için, görsel temsilleri oluşturmak için ve maliyet hesabı yapmak için kullanılır.

Günümüz şartlarında, yapı üretimlerinde zaman ve maliyet en önemli iki faktör olmuştur. Gelişen teknolojiyle birlikte parametrik tasarım yöntemleri ile hem prefabrik hem de ekonomik yapılar üretilebilmektedir. Geçmişten beri süsleme sanatı olarak yapılarda da kullanılan karolama yöntemleri günümüzde de yapı kabuklarını süsleme amaçlı modüler olarak üretilerek hem estetik hem de az maliyetli yapılar üretilmesine olanak sağlamıştır. Araştırmada, karolama yöntemleriyle parametrik tasarım araçları kullanılarak modüler olarak üretilen yapı kabukları incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Modüler koordinasyon, parametrik tasarım, karolama yöntemleri, yapı kabukları

PARAMETRIC DESIGN AS A MODULAR COORDINATION TOOL FOR PREFABRICATION OF BUILDING SHELLS

ABSTRACT

The difficulty of traditional production methods and application processes had led the designer to new searches. Despite the unlimited imagination of designer, the limited production and application methods do not allow the construction of buildings with desired freedom. As a result of the rapid development of computer technologies towards the end of the 20th century, computers have also been included in the design process.

Parametric design is a design method based on algorithms. A design is developed by identifying the relationships between algorithms. While the designer can create a single result in traditional design methods, more than one result is created based on parameters in parametric design methods. Complex structures can be created with parametric design, but it is used not only for building modeling, but also for engineering calculations, environmental analysis, creating visual representations, and calculating costs.

In today's conditions, time and cost have been the two most important factors in building production. With the developing technology, both prefabricated and economical structures can be produced with parametric design methods. Tiling methods, which have been used in buildings as an ornamental art since the past, have been produced as modular to decorate building shells today, allowing both aesthetic and low-cost structures to be produced. In the research, building shells produced modularly using parametric design tools with tiling methods were examined.

Keywords: Modular coordination, parametric design, tessellation methods, shell structures

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLOLAR LİSTESİ.....	xvii
KISALTMALAR.....	xviii
SEMBOLLER LİSTESİ	xix

BÖLÜM BİR- GİRİŞ 1

1.1 Problemin Tanımlanması.....	2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.3 Araştırma Yöntemi	3
1.4 Çalışmanın Organizasyonu.....	3

BÖLÜM İKİ- YAPI KABUKLARININ ÜRETİMİNDE KAROLAMA KULLANIMI 5

2.1 Yüzeyin (Düzlemin) Karolanması	5
2.1.1 Karolama Yapılabilen Şekiller	6
2.1.2 Periyodik Karolama.....	8
2.1.2.1 Düzgün Ağ Karolama.....	10
2.1.2.2 Yarı Düzgün Ağ Karolama.....	11
2.1.2.3 Çok Düğümlü Yarı Düzgün Karolama.....	11
2.1.2.4 Düzgün Olmayan Ağ Karolama.....	13
2.1.3 Aperiodyik Karolama	14
2.1.4 Simetriler	20
2.1.4.1 Öteleme (Kayma) Simetrisi.....	21
2.1.4.2 Yansıma Simetrisi.....	21

2.1.4.2 Dönme Simetrisi.....	22
2.2 Hacmin (Uzayın) Karolanması	23
2.3 Geçmişten Günümüze Karolama Kullanımı	29
BÖLÜM ÜÇ- YAPI KABUKLARININ MODÜLER KOORDİNASYONUNDA PARAMETRİK TASARIM.....	34
3.1 Modüler Koordinasyon	34
3.1.1 Modüler Koordinasyonun Tarihi	34
3.1.2 Modül ve Modüler Koordinasyon Kavramları	36
3.1.2.1 Oransal Modüller.....	41
3.1.2.2 Ölçüsel Modüller.....	43
3.1.3 Modüler Koordinasyonun Gelişim Süreci.....	42
3.2 Parametrik Tasarım	43
3.2.1 Parametrik Tasarımın Gelişimi ve Tarihçesi	44
3.2.2 Geleneksel ve Parametrik Tasarımın Araçları.....	58
3.2.2.1 Geleneksel Tasarım Araçları.....	61
3.2.2.2 Parametrik Tasarım Araçları.....	68
BÖLÜM DÖRT- PARAMETRİK TASARIMLA ÜRETİLMİŞ MODÜLER YAPI KABUKLARINDAN ÖRNEKLER	74
4.1 Waterloo Tren İstasyonu.....	75
4.2 British Museum Büyük Avlu	81
4.3 Eden Projesi	94
4.4 Gantenbein Şarap Evi.....	99
4.5 Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi	105
4.6 Al Bahar Kuleleri	118
4.7 Manuel Gea Gonzalez Hastanesi	123
4.8 Toronto Bergeron Merkezi.....	129
4.9 The Boys Erkek Öğrenci Yurdu.....	137
4.10 Lane 189 Alışveriş Merkezi	140

4.11 Mistral İzmir	145
BÖLÜM BEŞ- GRASSHOPPER İLE EĞRİ YÜZEYLERİN KAROLANMASI VE ÇEVRE ANALİZLERİNİN YAPILARAK CEPHEDEKİ AÇIKLIKLARIN BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ ÖNERİ ÖRNEK.....	148
BÖLÜM ALTI- SONUÇLAR.....	154
KAYNAKLAR	162



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 M.C. Escher'in iki boyutlu karolama örneği olan eseri Cycle	6
Şekil 2.2 Eşkenar üçgen ve eşkenar üçgenlerle yapılan altıgen	7
Şekil 2.3 Dörtgen, beşgen, altıgen ve sekizgen'in bir düğüm noktası etrafında birleştirilmesi	7
Şekil 2.4 Yüzey karolama formülü	8
Şekil 2.5 Periyodik kaplama örneği	9
Şekil 2.6 Periyodik kaplamada karoların küçük parçalara bölünmesi örneği	9
Şekil 2.7 Periyodik kaplama örneğinde harita karosunun gösterilmesi	10
Şekil 2.8 Düzgün ağ geometrileri	10
Şekil 2.9 Düzgün karolamanın gösterimi	11
Şekil 2.10 Düzgün olmayan karolama örnekleri	13
Şekil 2.11 Voronoi Diagramı	14
Şekil 2.12 Düzgün beşgenlerin bir nokta etrafında birleştirilmesi	15
Şekil 2.13 Beşgen ve 5 köşeli yıldız ile yüzey karolaması	15
Şekil 2.14 Beşgenin küçük parçalara ayrılması	16
Şekil 2.15 İki şekle dayalı pentapleks kaplaması	16
Şekil 2.16 Uçurtma ve dart şekilleri	17
Şekil 2.17 Aperiodyik kaplama örneği	17
Şekil 2.18 Girinti çıktı oluşturarak aperiodyik kaplama yapılması	18
Şekil 2.19 Girinti çıktı oluşturarak aperiodyik kaplama yapılması	18
Şekil 2.20 Penrose'un zayıf ve şişman olarak adlandırdığı eşkenar dörtgenler	19
Şekil 2.21 Pentapleks kaplama örneği	19
Şekil 2.22 Pentapleks kaplama örneği	20
Şekil 2.23 Sonsuzluğa Uzanış	21
Şekil 2.24 Yansıma simetrisi örneği	21
Şekil 2.25 Dönme simetrisi örneği	22
Şekil 2.26 İlkler ve Sonlar	22
Şekil 2.27 Düzgün çokgenlerin yansıma simetrileri	23
Şekil 2.28 Platonik cisimler	24
Şekil 2.29 Düzgün çokyüzlüler	24

Şekil 2.30 Küp ve düzgün onikiyüzlü.....	25
Şekil 2.31 Platonik cisimler.....	25
Şekil 2.32 Düzgün ve yarı düzgün çok yüzlüler tablosu	26
Şekil 2.33 kesik sekizyüzlü ile yapılan uzay karolaması örneği.....	27
Şekil 2.34 Kesik küp ve düzgün sekizyüzlü ile yapılan uzay karolaması örneği	27
Şekil 2.35 Küp sekizyüzlü ve düzgün sekizyüzlü ile yapılan uzay karolaması örneği	28
Şekil 2.36 İki düzgün dörtyüzlü ve iki kesik dörtyüzlü ile yapılan uzay karolaması örneği	28
Şekil 2.37 Portekizde 15. Yüzyıldan kalma antik yapılarda karşılaştığımız süslemeler	29
Şekil 2.38 Avrupa ve Ortadoğu’da mimari yapılarda kullanılan kaplama desenleri. 29	
Şekil 2.39 Avrupa ve Ortadoğu’da mimari yapılarda kullanılan kaplama desenleri. 30	
Şekil 2.40 Bursa Hüdavendigâr Cami’nden bir süsleme gösterilmiştir.....	30
Şekil 2.41 Antik Roma döneminden kalma bir mozaik.....	30
Şekil 2.42 Ahlat mezartaşı, Şahideli silindirik sanduka	31
Şekil 2.43 Aksaray, Darphane tonoz göbeğinde tuğla.....	31
Şekil 2.44 Yale sanat galerisi.....	32
Şekil 2.45 Swiss Re binası cephe görünüşü.....	32
Şekil 2.46 British Museum büyük avlu iç görünüş.....	33
Şekil 2.47 Dans eden pavilion	33
Şekil 3.1 Vitruvius ‘un Modulor ‘u	35
Şekil 3.2 Modüler Izgara Diyagramı	37
Şekil 3.3 Planlama Modülü Diyagramı	38
Şekil 3.4 Strüktür Modülü Diyagramı	39
Şekil 3.5 Referans Izgarası	40
Şekil 3.6 Altın Oran’ın Mısır’daki Giza Piramidine Uygulanışı	41
Şekil 3.7 Moretti’ nin parametrik olarak tasarladığı stadyum projesinin plan çizimleri	45
Şekil 3.8 Zincir Eğrisi, Antoni Gaudí, 1882. El çizimi ve maket gösterimi.....	46
Şekil 3.9 Sagrada Família modeli ve görselleştirilmiş hali	47
Şekil 3.10 Sagrada Família Kilisesi’nin eskiz çizimi	47

Şekil 3.11 Sagrada Familia'nın sütunlarının oluşma biçimi	48
Şekil 3.12 Sagrada Familia'nın kolonlarının diyagramı	48
Şekil 3.13 Sagrada Familia'nın kolonlarının oluşum diyagramı.....	49
Şekil 3.14 Sidney Opera Binası cephe görünüşü.....	50
Şekil 3.15 Sidney Opera Binası çatı malzemesi görünüşü	50
Şekil 3.16 Sidney Opera Binası yapı kabuğu formunun ortaya çıkış diyagramı	51
Şekil 3.17 Sidney Opera Binası küre kabukları gösterimi.....	51
Şekil 3.18 Geometrik şekillerin döndürülmesi ile oluşturulan şekiller	52
Şekil 3.19 Frazer'ın parametrik tasarım diyagramları	54
Şekil 3.20 Mediopadana Tren İstasyonu cephe görünüşü	55
Şekil 3.21 Mediopadana Tren İstasyonu cephe kabuğu formunun oluşum diyagramı	56
Şekil 3.22 Mediopadana Tren İstasyonu cephe kabuğu formunun grasshopper ile oluşum şeması.....	57
Şekil 3.23 Eskişehir Odunpazarı Modern Sanat Müzesi cephe görünüşü	58
Şekil 3.24 Geleneksel modelleme araçlarından sketchup programının arayüzü	61
Şekil 3.25 Geleneksel modelleme araçlarından SAP2000 programının arayüzü	61
Şekil 3.26 Geleneksel modelleme araçlarından AutoCad programının arayüzü	62
Şekil 3.27 1982 yılında, AutoCad programının ilk versiyonu.....	63
Şekil 3.28 Geleneksel modelleme araçlarından Solidworks programının arayüzü ...	63
Şekil 3.29 Geleneksel modelleme araçlarından Catia programının arayüzü	64
Şekil 3.30 Geleneksel modelleme araçlarından Rhino programının arayüzü.....	64
Şekil 3.31 Geleneksel modelleme araçlarından Microstation programının arayüzü .	65
Şekil 3.32 Geleneksel modelleme araçlarından BIM tabanlı Revit programının arayüzü	65
Şekil 3.33 Geleneksel modelleme araçlarından Archicad programının arayüzü.....	66
Şekil 3.34 Geleneksel modelleme araçlarından BIM tabanlı Vektorworks programının arayüzü.....	66
Şekil 3.35 Parametrik modelleme araçlarından yazılı algoritma düzenleyici Rhinoscript programının arayüzü	68
Şekil 3.36 Parametrik modelleme araçlarından Generative Components programının arayüzü.....	68

Şekil 3.37 Parametrik tasarım araçlarından Grasshopper programının arayüzü	69
Şekil 3.38 Parametrik tasarım araçlarından Dynamo' programının arayüzü.....	69
Şekil 3.39 Grasshopper eklentilerinden Karamba ile yapılmış strüktür analizi görseli, yük dağılımını göstermektedir	71
Şekil 3.40 Grasshopper eklentilerinden SWIFT ile yapılmış rüzgar analizi görseli .	71
Şekil 3.41 Gün ışığı analiz programları Diva ve Rosetta karşılaştırması	72
Şekil 3.42 Analiz programlarından Khepri' nin arayüz gösterimi.....	72
Şekil 4.1 Waterloo Tren İstasyonu, yapı kabuğunun görüntüsü.....	76
Şekil 4.2 Waterloo Tren İstasyonu, yapı kabuğu modüllerinin çalışma sistemi diyagramı	77
Şekil 4.3 Waterloo Tren İstasyonu kirişlerin parametrik olarak formüllerinin hesaplanması diyagramı.....	78
Şekil 4.4 Waterloo Tren İstasyonu, uzun kesit görünüşü	79
Şekil 4.5 Waterloo Tren İstasyonu, kısa kesit görünüşü.....	79
Şekil 4.6 Waterloo Tren İstasyonu, çatı strüktürü	80
Şekil 4.7 Waterloo Tren İstasyonu, çatı strüktürü birleşim detayı	80
Şekil 4.8 Büyük avlunun yıllar içindeki değişim planları	82
Şekil 4.9 Gün ışığından yararlanan iklimlendirilmiş iç avlu görseli	82
Şekil 4.10 Okuma odası etrafına yerleştirilen yeni kolonların gösterimi	83
Şekil 4.11 Sol tarafta dikdörtgen olarak çevreleyen duvarların kesiti sağ tarafta okuma odasının kesiti	84
Şekil 4.12 Büyük avlu yapı diyagramı	85
Şekil 4.13 Eşit aralıklarla bölünen dikdörtgen ve çemberin ilk karolamaları ve devingen şekil değiştirme uygulanması sonrası.....	86
Şekil 4.14 Okuma odasının tam merkezde olmaması nedeniyle oluşan asimetric kesit	86
Şekil 4.15 Çelik panellerden kesilen düğüm noktaları	87
Şekil 4.16 Çubuk elemanlar, düğüm noktaları ve cam panellerin birleşimi.....	87
Şekil 4.17 Yapı iskeleleri ve destekler üzerinde birleştirilen paneller	88
Şekil 4.18 Izgara kabuğun son hali.....	88
Şekil 4.19 Grasshopper'da British Museum modellemesi, birinci adım	89
Şekil 4.20 Grasshopper'da British Museum modellemesi, ikinci adım	89

Şekil 4.21 Grasshopper’da British Museum modellemesi, üçüncü adım	90
Şekil 4.22 Grasshopper’da British Museum modellemesi, dördüncü adım	90
Şekil 4.23 Grasshopper’da British Museum modellemesi, beşinci adım	91
Şekil 4.24 Grasshopper’da British Museum modellemesi, altıncı adım.....	91
Şekil 4.25 Grasshopper’da British Museum modellemesi, yedinci adım.....	92
Şekil 4.26 Grasshopper’da British Museum modellemesi, sekizinci adım	92
Şekil 4.27 Grasshopper’da British Museum modellemesi, dokuzuncu adım	93
Şekil 4.28 Eden projesi, jeodezik kubbelerin görünüşü.....	95
Şekil 4.29 Eden projesi, jeodezik kubbelerin yapım aşaması.....	96
4.30 Eden projesi, jeodezik kubbe diyagramları.....	96
Şekil 4.31 Eden projesi, jeodezik kubbe diyagramları	97
Şekil 4.32 Eden projesi, RSTRAB programında modellenmesi.....	98
Şekil 4.33 Gantenbein Şarap Evi Cephesi	100
Şekil 4.34 Gantenbein Şarap Evi, Fermantasyon Odası	101
Şekil 4.35 Gantenbein Şarap Evi cephe tasarım simülasyonu.....	102
Şekil 4.36 Gantenbein Şarap Evi cephe tasarım pixel mapping	102
Şekil 4.37 Gantenbein Şarap Evi cephe tasarım simülasyonu.....	103
Şekil 4.38 Gantenbein Şarap Evi duvar modülleri	103
Şekil 4.39 Gantenbein Şarap Evi duvar modüllerinin şantiyede montaj yapılması.	104
Şekil 4.40 Gantenbein Şarap Evi, robotik üretimde kullanılan IRB-140 robotik kol	104
Şekil 4.41 ETFE kaplı cephe görüntüsü	106
Şekil 4.42 Weaire Phelan geometrisi ile birleşen çokyüzlüler	107
Şekil 4.43 Cephede kendini tekrarlayan hücreler	107
Şekil 4.44 Katmanların birleştirilmesi	108
Şekil 4.45 ETFE’nin çokgen yüzeylerine uyacak şekilde üretilmesi (Talley, 2008)	108
Şekil 4.46 Şantiyede çokgen yüzeylerine ETFE’nin yerleştirilmesi (Talley, 2008)	109
Şekil 4.47 ETFE balonları arasındaki ısınan havanın kullanılması (Carfrae, 2007)	109
Şekil 4.48 Cephe kesiti	110
Şekil 4.49 ETFE kaplanmadan önceki strüktür görseli	110
Şekil 4.50 ETFE kaplanırken strüktür görseli	110
Şekil 4.51 Yapının parametrik olarak modelleme aşamalarından veri aktarımı.....	111

Şekil 4.52 Yapının parametrik olarak modelleme aşamalarından veri aktarımı.....	111
Şekil 4.53 Yapının Strand programında modellenmiş görüntüsü.....	112
Şekil 4.54 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 1. adım.....	113
Şekil 4.55 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 2. adım.....	113
Şekil 4.56 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 3. adım.....	114
Şekil 4.57 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 4. adım.....	115
Şekil 4.58 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 5. adım.....	116
Şekil 4.59 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 6. adım.....	117
Şekil 4.60 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 7. adım.....	117
Şekil 4.61 Al Bahar kuleleri gölgeleme elemanı diyagramı.....	119
Şekil 4.62 Geleneksel maşrabiya deseni.....	120
Şekil 4.63 BIM ile modellenmiş Güneş Işığı analizleri.....	121
Şekil 4.64 Maşrabiya modüllerinin açık ve kapalı pozisyonları.....	121
Şekil 4.65 Maşrabiya modüllerinin Güneş' e göre açılıp kapanma hareketinin otomasyonunun analizi	122
Şekil 4.66 Maşrabiya modüllerinin şantiyede montaj aşaması	122
Şekil 4.67 Rhino ile tasarlanmış, TiO2 kaplı Prosolve Karolar.....	124
Şekil 4.68 5 parçadan oluşan Prosolve 370e parçaların cepheye yerleşimi.....	125
Şekil 4.69 Prosolve 370e modül	126
Şekil 4.70 Prosolve 370e modül elemanlar diyagramı	126
Şekil 4.71 Prosolve 370e cephede modül yerleşimi	127
Şekil 4.72 Prosolve 370e modül birleşimi	127
Şekil 4.73 Prosolve 370e modüllerin üretim aşaması.....	128
Şekil 4.74 Prosolve 370e modüllerin üretim aşaması.....	128
Şekil 4.75 Prosolve 370e modüllerin üretim aşaması.....	128
Şekil 4.76 Bergeron Merkezi Dış Görünüş.....	130
Şekil 4.77 Bergeron Merkezi konsept tasarım çizimi.....	131
Şekil 4.78 Bergeron Merkezi, Penrose karoları	131
Şekil 4.79 Bergeron Merkezi, Prefabrik modüllerin şantiyede yerleştirilmesi.....	132
Şekil 4.80 Bergeron Merkezi, Revit ile modellenmiş 3B görsel	132
Şekil 4.81 Bergeron Merkezi, Penrose karolamasının modülleri, şematik gösterimi	133

Şekil 4.82 Bergeron Merkezi, cephenin yüzde 80'i penrose karoları ile kaplanmıştır	133
Şekil 4.83 Bergeron Merkezi, cephe kabuğundaki penrose karoları	133
Şekil 4.84 Bergeron Merkezi, cephe kabuğundaki penrose karoları	134
Şekil 4.85 Bergeron Merkezi, cephe kabuğundaki penrose karolarının çerçevesi plan, görünüş ve kesit	134
Şekil 4.86 Bergeron Merkezi, cephe panellerinin BIM' deki 3B modeli	135
Şekil 4.87 Bergeron Merkezi, cephe panellerinin şantiyede montajdan önceki fotoğrafı	135
Şekil 4.88 Bergeron Merkezi, BIM Revit modelleme aşamasından.....	136
Şekil 4.89 The Boys erkek öğrenci yurdunun kesit diyagramı.....	138
Şekil 4.90 The Boys erkek öğrenci yurdu ikincil cephenin tuğla yerleşim diyagramı	138
Şekil 4.91 The Boys erkek öğrenci yurdu, Ladybug ile gün ışığı analizi.....	139
Şekil 4.92 The Boys erkek öğrenci yurdu, Honeybee ile radyasyon analizi	139
Şekil 4.93 Lane 189 alışveriş merkezi, 3B cephe diyagramı.....	141
Şekil 4.94 Lane 189 alışveriş merkezi, tek katmanlı cephe modülü diyagramı	142
Şekil 4.95 Lane 189 alışveriş merkezi, çift katmanlı cephe modülü diyagramı	142
Şekil 4.96 Lane 189 alışveriş merkezi, üç katmanlı cephe modülü diyagramı	142
Şekil 4.97 Lane 189 cephe görünüşü	143
Şekil 4.98 Lane 189 cephe görünüşü	143
Şekil 4.99 Lane 189 Grasshopper ile modelleme	144
Şekil 4.100 Lane 189 grasshopper ile modelleme ile çıkan sonuç	144
Şekil 4.101 Mistral İzmir kulelerinin güneş ve rüzgar analiz diyagramları	146
Şekil 4.102 Mistral İzmir kulelerinin şantiye aşaması.....	147
Şekil 4.103 Mistral İzmir kulelerinin form bulma diyagramları	147
Şekil 5.1 Kaynak ve amaç yüzeylerin oluşturulması.....	148
Şekil 5.2 Oluşturulan yüzeylerin Grasshopper'da tanımlanması.....	148
Şekil 5.3 Paneling tools ile karolamanın yapılması.....	149
Şekil 5.4 Kaynak yüzeydeki karolamanın hedef yüzeye aktarılması	149
Şekil 5.5 Kaynak yüzeydeki karolamanın merkez noktalarının belirlenmesi	150
Şekil 5.6 Kaynak yüzeydeki karolamanın hedef yüzeye aktarılması	150

Şekil 5.7 Kaynak yüzeydeki karolamanın iç yüzeylerinin ayrılması.....	150
Şekil 5.8 Kaynak yüzeyine z koordinatında kalınlık verilmesi	151
Şekil 5.9 Kaynak yüzeyindeki karolamanın eğrisel hedef yüzeyine aktarılması	151
Şekil 5.10 İkincil cephe yapılacak eğrisel yapı.....	152
Şekil 5.11 İkincil cephe yapılacak eğrisel yapıya altıgen desenli cephe tasarlanması	152
Şekil 5.12 Eğrisel binaya yapılan çevre analizleri.....	153
Şekil 6.1 İncelenen binaların yapım yıllarına göre karşılaştırılması	157
Şekil 6.2 İncelenen binaların kullanılan malzemeye göre karşılaştırılması.....	157
Şekil 6.3 İncelenen binaların kullanılan programlara göre karşılaştırılması	158
Şekil 6.4 İncelenen binaların karolama türüne göre karşılaştırılması.....	158
Şekil 6.5 İncelenen binaların m2 başına maliyet karşılaştırılması.....	159

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Düzgün Çokgenli Yarı Düzgün Ağ Geometrileri Tablosu.....	12
Tablo 3.1 Hesaplamalı Tasarım Araçlarının Sınıflandırılması.....	61
Tablo 3.2 Geleneksel Modelleme Araçlarının Görsel Parametrik Tasarım Araçları	71
Tablo 3.3 Grasshopper Eklentileri ve Özellikleri	71
Tablo 3.4 Geleneksel ve Parametrik Tasarım Araçlarının Karşılaştırılması	73
Tablo 3.4 Geleneksel ve Parametrik Tasarım Araçlarının Karşılaştırılması	73
Tablo 4.1 Waterloo Tren İstasyonu İncelemesi	75
Tablo 4.2 British Museum Büyük Avlu İncelemesi	81
Tablo 4.3 Eden Projesi İncelemesi	94
Tablo 4.4 Gantenbein Şarap Evi İncelemesi.....	99
Tablo 4.5 Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi İncelemesi	105
Tablo 4.6 Al Bahar Kuleleri İncelemesi	118
Tablo 4.7 Manuel Gea Gonzalez Hastanesi İncelemesi	123
Tablo 4.8 Toronto Bergeron Merkezi İncelemesi.....	129
Tablo 4.9 The Boys Erkek Öğrenci Yurdu İncelemesi.....	137
Tablo 4.10 Lane 189 Alışveriş Merkezi İncelemesi	140
Tablo 4.11 Mistral İzmir İncelemesi.....	140
Tablo 6.1 Tez Kapsamında İncelenen Binaların Mimari Özellikleri.....	152
Tablo 6.2 Tez Kapsamında İncelenen Binaların Tasarım ve Yapım Özellikleri.....	153

KISALTMALAR

BIM	: Yapı Bilgi Modellemesi
CAD	: Bilgisayar Yardımıyla Yapılan Tasarım ve Üretim
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol Sistemi
CTBUH	: Yüksek Binalar ve Kentsel Habitat Konseyi
ETFE	: EtylenTetraFluoroEtylen
GB	: Gigabayt
HSS	: Yüksek Hız Çelikleri
LEED	: Enerji ve Çevre Tasarımında Liderlik
M.Ö.	: Milattan Önce
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
M	: Modül
YY	: Yüzyıl
NURBS	: Düzgün Olmayan Rasyonel Temelli Eğri
PTFE	: PoliTetraFluoroEtylen
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

SEMBOLLER LİSTESİ

TiO ₂	: titanyumdioksit
°C	: Santigrad derece
CO ₂	: kabondioksit
C++	: programlama dili



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Tarih boyunca insanoğlunun yapıyı çevreyle etkileşimi, doğrudan veya dolaylı olarak yapı kabuğuyla olmuştur. Cephe veya yapı kabukları mimarlığın dışa vurumudur. Tarih boyunca uygarlıkların kültürleri, sanat akımları ve ekonomik değişimler yapı cephelerine yansımıştır.

Sanayi devrimi ile gelişen endüstrileşme, nüfus artışı, yoğun kentleşme ve konut ihtiyacındaki artış hızlı, seri konut üretimi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yapım yöntemlerinin endüstrileşmesiyle birlikte daha az insan gücüyle, kısa sürede ve düşük maliyetle prefabrik yapılar üretilmeye başlanmıştır. Endüstrileşme ve standartlaşma sürecinde, modül, modülasyon ve modüler koordinasyon kavramları etkili olmuştur. Sanayi devrimine kadar prefabrikasyon sadece sanayi yapılarında kullanılan bir yöntem olmuşken, sanayi devrimiyle birlikte neredeyse tüm yapılarda da kullanılan bir yönteme dönüşmüştür. Prefabrik olarak üretilen modüller, yerinde montajla hızlı konut üretimini sağlamaya olanak sunmuştur. Ancak tek tip yapılar ve estetik açıdan yoksunluk, tasarımcıyı estetik arayışına yöneltmiştir.

Tasarımcının estetik arayışında sık sık başvurduğu bir yol olan karolama, bir diğer adıyla karolama geçmişten günümüze kadar oldukça kullanılan bir geometrik tasarım şeklidir. Karolamayı basitçe tanımlayacak olursak eğer, bir düzlemin veya uzayın birbirini tekrar eden karo kaplanmasıdır. Bu yöntemle hem estetik açıdan güzel hem de prefabrik üretime uygun yapılar oluşturulabilir.

Günümüzde bilgisayar destekli hesaplamalı tasarım programlarının geliştirilmesiyle birlikte tasarımcıların daha karmaşık yapıları tasarlayabilmesi sağlanmıştır. Bu süreçte ortaya çıkan bir kavram olan parametrik tasarımda parametrelerin belirlenmesi ve bu parametreler arasındaki ilişkinin kurulması esastır. Belirlenen parametrelerin değiştirilmesiyle tasarım süreci ve ürün de değişir. Parametrik tasarımda, her ne kadar tasarımcı tasarım yöntemini (yaklaşımını) belirlese de çıkan sonuç onun kontrolünde değildir. Çıkan sonuç, girilen parametrelere ve onlar

arasındaki ilişkilere bağlıdır. Parametrik tasarım yöntemleri ile, yapı formunun biçimlendirilmesi, son yıllarda giderek önem kazanmaya başlayan bir uygulamadır. Bu çalışmada, karolama kullanılarak oluşturulan modüler yapı kabuklarının parametrik tasarım yöntemiyle yapılması incelenmiştir.

1.1 Problemin Tanımlanması

Tasarımcının geleneksel tasarım yöntemlerinin sınırlandırması olmadan kompleks yapılar tasarlama arzusuyla, teknolojinin de gelişmesiyle parametrik tasarım yöntemleri, tasarımcının sayısız yöntemlerle üretebilecek modüler yapılar tasarlayabilmesini sağlamıştır. Yapı kabuklarında ve cephelerde uygulanabilecek karolamaların belirlenmesi, uygulamanın kolaylaştırılmasında ise modüler üretim ve parametrik tasarım araçlarının koordine ve sistematik bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada belirlenen problem; modüler olarak üretilen cephe ve yapı kabuklarının, karolama yöntemiyle yapılmasında parametrik tasarım yöntemlerinin etkisi ve sağlayacağı katkıların ortaya çıkarılmasıdır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Çalışmanın amacı; yapı kabuklarının karolama yöntemiyle modüler olarak tasarlanması ve parametrik tasarım yöntemleriyle uygulanmasında kullanılan yöntemlerin belirlenmesi, bu yöntemlerin uygulama örnekleri üzerinden irdelenmesidir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında karolama yöntemleri ile üretilen yapı kabuklarının hangi parametrik tasarım araçları ile tasarlanabileceği incelenmiştir. Karolama yöntemleri ve geometrik yaklaşımlar incelenerek, parametrik tasarım araçlarının hangi yöntemlerle kullanıldığı incelenmiştir. Çalışmada modüler koordinasyonla üretilen yapı kabukları ve bina cepheleri örnekler üzerinden incelenmiştir. Örneklerin irdelenmesi sonucu elde edilen bulguların ışığında parametrik tasarım ilkelerinin ve uygulama yöntemlerinin, yapı kabuklarının ve bina cephelerinin oluşturulmasındaki etkisi ve sağlayabileceği potansiyel katkılar belirlenmiştir.

1.3 Araştırma Yöntemi

Bu çalışmada karolama yöntemleri kullanılarak parametrik tasarım araçları ile oluşturulan yapı kabuklarının tasarımı ve uygulanmasına yönelik literatüre dayanan bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması sonucunda elde edilen bilgilerin ışığında parametrik tasarım araçları ve karolama yöntemlerinin modüler yapı kabukları üzerindeki etkisi ve sağladığı potansiyel katkıların belirlenmesi amacıyla bu yöntemlerin kullanıldığı örnekler incelenmiştir. Örneklerin tasarım yaklaşımları, karolama yöntemleri, kullanılan parametrik tasarım araçları modellemeler ile görselleştirilmiştir. Kullanılan parametrik tasarım programları, kurulan algoritma ilişkileri ve programların ara yüzleri ile her örnek için adım adım açıklanmıştır. Kullanılan parametrik tasarım araçlarının amaç ve yöntemleri detaylı olarak aktarılmıştır. İncelenen örnekler ışığında, örnek bir çalışma sunulmuştur. Sunulan örnekte, irdelenen örnekler doğrultusunda çıkarılan sonuçlar göz önünde bulundurularak, mevcut bir yapıya parametrik tasarım araçları ile ikincil bir cephe tasarlanmış ve bu cephe tasarımı sırasında karolama yöntemleri kullanılmıştır. Tasarlanan ikincil cephe için yine parametrik tasarım araçlarından analiz eklentileri kullanılarak cephe analizleri yapılmıştır.

1.4 Çalışmanın Organizasyonu

Bu tez, aşağıda açıklandığı gibi altı 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.

“Yapı kabuklarının üretiminde karolama kullanımı” başlığı ile tanımlanan ikinci bölümde, karolama yöntemleri yüzeyin ve hacmin Karolanması olarak iki başlık altında ele alınmıştır. Yüzey Karolanması başlığında, periyodik ve aperiodyik karolamalar incelenmiş olup simetri kavramları ele alınmıştır. Hacmin Karolanması başlığında ise çokyüzlüler ve çokyüzlülerle oluşturulan

karolamalar incelenmiştir. Bölüm sonunda da karolamanın geçmişten günümüze kullanılmasıyla ilgili kısaca örneklerden bahsedilmiştir.

“Yapı kabuklarının modüler koordinasyonunda parametrik tasarım” başlığı ile tanımlanan üçüncü bölümde, modüler koordinasyon tanımları ele alınmıştır. Modüler koordinasyonun tarihsel gelişimine bakılmıştır. Bölümün devamında ise parametrik tasarım incelenmiştir. Parametrik tasarım nedir, tarihsel gelişimi nasıldır soruları cevaplanmıştır. Parametrik tasarım tarihi örnekler üzerinden ele alınmıştır. Sonrasında tasarım araçları geleneksel ve parametrik olarak iki başlık altında sınıflandırılmıştır.

“Parametrik tasarımla üretilmiş modüler yapı kabuklarından örnekler” başlığıyla tanımlanan dördüncü bölümde, parametrik tasarım kullanılarak karolama yöntemleri ile türetilen yapı kabuklarına sahip 10 adet örnek incelenmiş olup, kullanılan karolama yöntemi, parametrik tasarım aracı ve modüller incelenmiştir.

“Grasshopper ile eğri yüzeylerin karolanması ve çevre analizleri yapılarak cephedeki açıklıkların belirlenmesi ile ilgili öneri örnek” başlığı ile tanımlanan beşinci bölümde, incelenen örnekler doğrultusunda öneri bir örnek çalışması sunulmuştur.

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

BÖLÜM İKİ

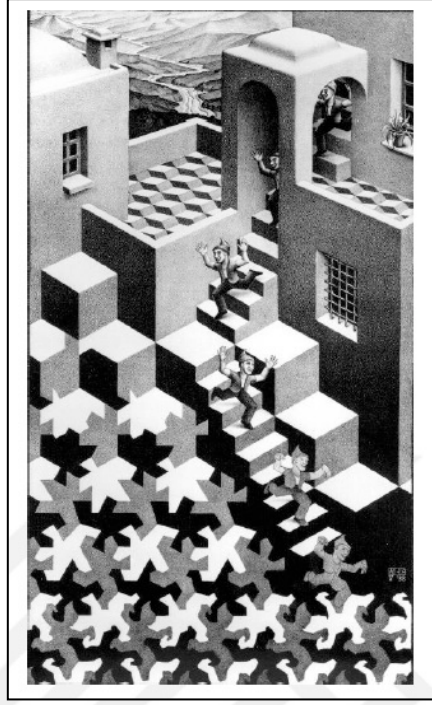
YAPI KABUKLARININ ÜRETİMİNDE KAROLAMA KULLANIMI

Karolama bir diğer adıyla tesselayon; antik Roma mozaiklerinde kullanılan kare taş anlamına gelen Latince ‘tessella’ kelimesinden türemiştir. Mozaik yapımında kullanılan küp şeklindeki kil, taş veya cam parçası anlamına gelen ‘tessella’ kelimesi, Yunanca küçük kare anlamına gelen ‘tessera’ kelimesinden gelmektedir. (Britton ve Seymour, 1989). Karolamayı sonsuz bir düzlemin veya sonsuz bir uzayın sınırlı sayıda desen ile parçalara bölünmesi olarak da tanımlayabiliriz. Yapı kabuklarında uygulanan karolama işleminde sınırlı sayıda parça kullanılması, üretim kolaylığı sağlamaktadır. Karolama, üretim bileşenlerinin standardizasyonuna yardımcı olur, modüler üretim olanağı sağlar.

Karolama, mimarlık tarihine baktığımızda geçmişte sadece süsleme olarak kullanılmış olsa da günümüzde teknolojinin de gelişmesi ile; taşıyıcı strüktür, ikincil cephe, yapısal formlar veya kinetik cephe örnekleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Karolama sistemlerini yüzey ve hacim olarak iki başlıkta inceleyebiliriz.

2.1 Yüzeyin (Düzlemin) Karolanması

Karolama konusunda en bilindik isimlerin başında, Mauritus Cornelius Escher gelmektedir. Escher yaşamı boyunca, çoğu bugün hâlâ hayranlıkla izlenen 100’ün üzerinde karolama esaslı desen tasarlamıştır (Şekil 2.1) (Escher, 1989).

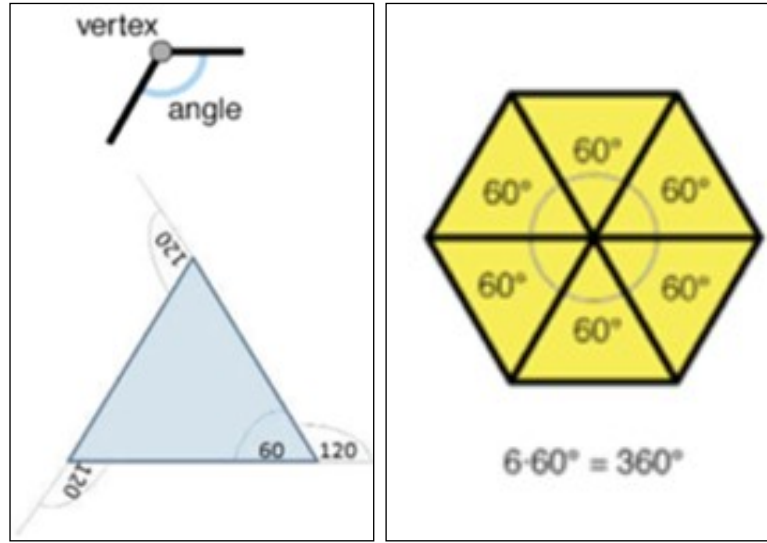


Şekil 2.1 M.C. Escher'in iki boyutlu karolama örneği olan eseri Cycle (Escher,1938)

2.1.1 Karolama Yapılabilen Şekiller

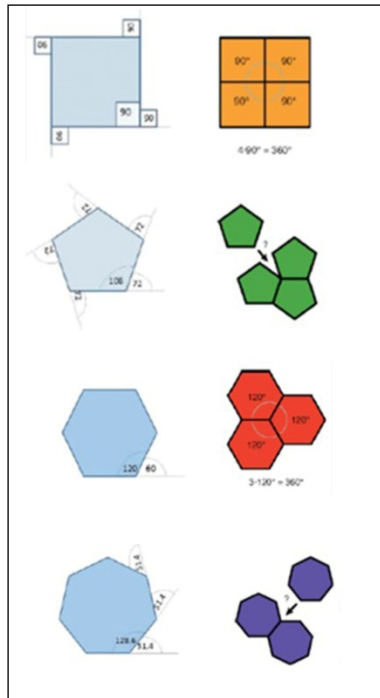
İki boyutlu bir düzlemin belirli desenlerle kaplanması için, desen olarak kullanılan şeklin iç açılarının bir tepe noktası (düğüm noktası) etrafındaki tüm boşluğu doldurması gerekmektedir (Orhon, 2013). Eşkenar üçgenlerin, karelerin ve düzgün altıgenlerin de düzenli karolamalar oluşturduğu keşfedilmiştir. Ancak düzgün beşgen ve düzgün yedigenlerle boşluk bırakmadan veya çakışmadan bunun yapılamadığı fark edilmiştir.

Herhangi bir çokgenin dış açılarının toplamının 360 derece olmasından yola çıkarak, çokgenin iç açılarını hesaplayabilir ve 360' ın çarpanı olup olmadığını kontrol edebiliriz. Eğer bir çokgenin iç açıları toplamı 360 derecenin çarpanı ise, düğüm noktasının etrafındaki boşluğu tamamen doldurur ve karolama oluşturabilir. Bu işlemi formüle dökersek; $a = 180 - 360/n$, Burada a çokgenin iç açısı ve n çokgenin kenar sayısıdır. Bu bir çokgenin iç açısını bulma formülüdür. Bir karolama için gerekli olan çokgen sayısını bulmak için ise şu formül kullanılır; $k(n) = 360/a = 2n/(n-2)$, burada k(n) gereken çokgen sayısıdır (Britton ve Seymour, 1989).



Şekil 2.2 Eşkenar üçgen ve eşkenar üçgenlerle yapılan altıgen (Britton ve Seymour, 1989)

Şekil 2.2’de dış açılarının toplamı 360 derece yapan bir eşkenar üçgen gösterilmiştir. Her bir iç açısı 60 derece olduğundan, 60, 360’ın çarpanı olduğu için bir düğüm noktası etrafında 6 adet iç açıları 60 derece olan üçgenleri birleştirerek boşluk kalmayacak şekilde birleştirerek karolama yapılabilir (Britton ve Seymour, 1989).



Şekil 2.3 Dörtgen, beşgen, altıgen ve sekizgen’in bir düğüm noktası etrafında birleştirilmesi (Britton ve Seymour, 1989)

2.1.2 Periyodik Karolama

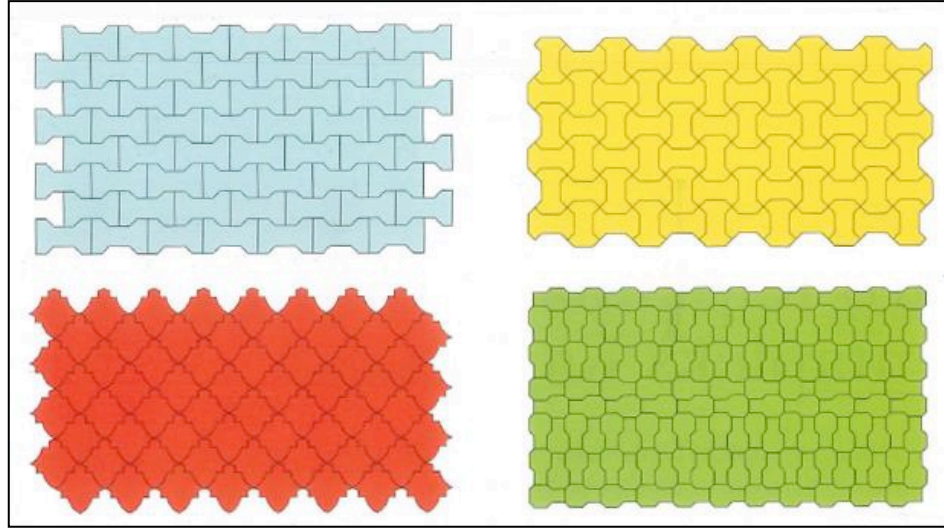
Periyodik karolama oluşturmak için, desen üzerinde seçilen herhangi bir noktanın diğerk herhangi bir nokta ile aynı konfigürasyona sahip olması gerekir. Basit bir formül ile karolama çeşidini belirleyebiliriz. İlk olarak bir düğüm noktası seçeriz ve bu noktanın etrafında konumlanan çokgenlerin kenar sayılarını saat yönünde veya saat yönünün tersinde yan yana yazarız. rnek olarak, altıgenlerden oluşan karolama 6.6.6 karolama olarak adlandırılır çünkü her düğüm noktasında üç adet düzgün altıgen vardır (Grünbaum ve Shephard, 1987).

$$\frac{n_1-2}{n_1} + \dots + \frac{n_r-2}{n_r} = 2$$

şekil 2.4 Yüzey karolama formülü (Grünbaum ve Shephard, 1987)

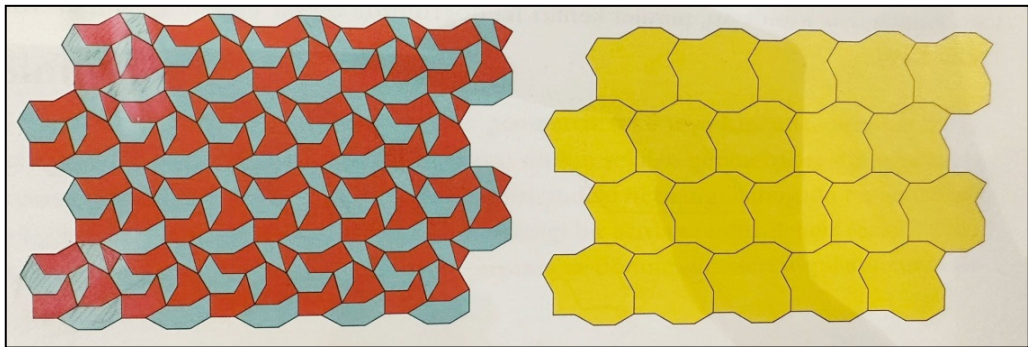
şekil 2.4'teki formüle göre, bir düzgün çokgenin (n_1) kenar sayısı her adımda çıkarılırsa, $n_r = 1$ olduğnda sonuç 2'ye eşittir. Bu, çokgenin yüzeyi kaplayabileceğ anlamına gelir. Mozaigın sınırsız tekrarı, dönme eksenlerinin yansıma eksenleri üzerinde olmasıyla ilişkilidir (Grünbaum ve Shephard, 1987).

Genel olarak, karolamada kullanılan karoların rastgele yerleştirilmesi yerine, karolamanın bir kısmının kendini tekrarlama zelliğ kullanılır. Eğerk bir karolamanın belirli bir kısmı, iki farklı doğrultuda, sabit bir mesafe gidip devamlı kendini tekrarlıyorsa, o karolama periyodik bir karolamadır (şekil 2.5) (Arık ve Sancak, 2007).

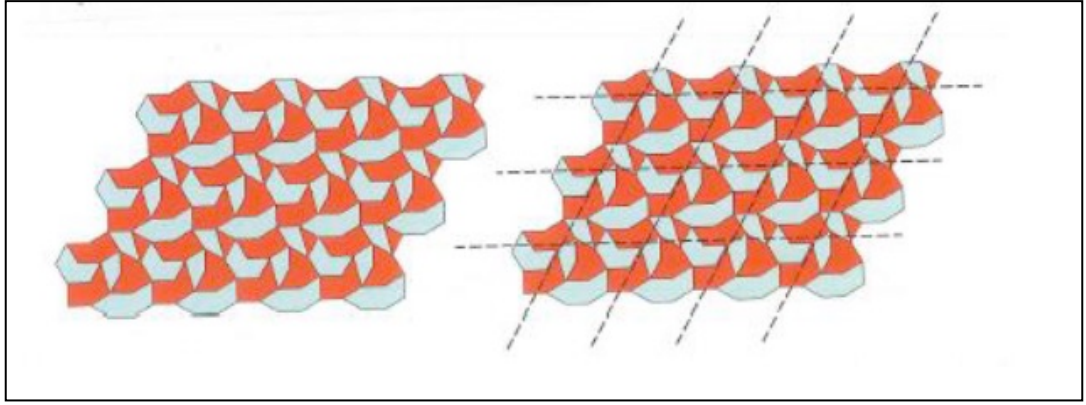


Şekil 2.5 Periyodik karolama örneği (Arık ve Sancak, 2007)

Periyodik bir karolamada kendini tekrar eden kısımlar paralel kenarlarla gösterilebilir. Her periyodik karolama, çok sayıda paralel kenarın birleşiminden oluşan, daha büyük paralel kenarlarla da gösterilebilir. Aslında periyodik karolama, tek karonun ya da içi çok sayıda parçaya bölünmüş tek karonun düzlemi periyodik olarak karolamasıdır (Arık ve Sancak, 2007). En karmaşık periyodik karolama bile bir paralel kenarın, paralel kenarlarında birbirine uyacak şekilde girinti ve çıkıntılar yapıp, içinin çok sayıda parçaya bölünmesinden oluşan sonlu bir karolamanın iki yönde tekrar ettirilmesinden ibarettir (Şekil 2.6). Bu yüzden paralelkenar için tüm periyodik karolamaların harita kerosu diyebiliriz (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 Periyodik karolamada karoların küçük parçalara bölünmesi örneği (Arık ve Sancak, 2007)

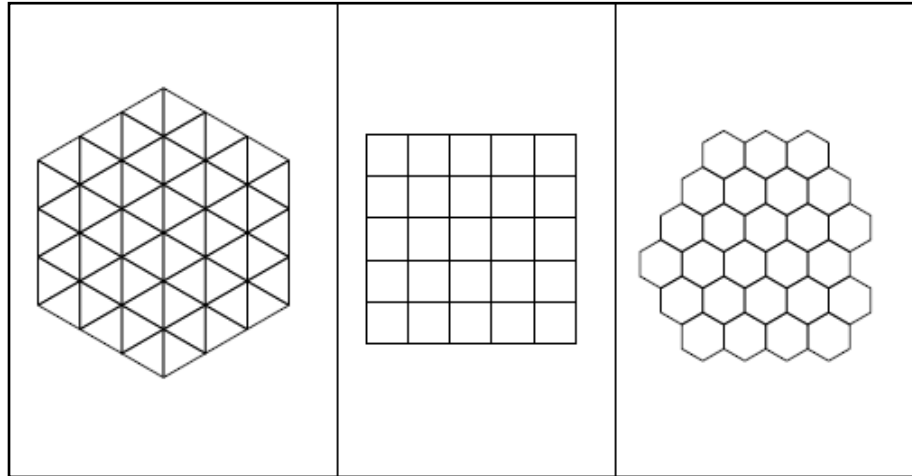


Şekil 2.7 Periyodik karolama örneğinde harita karosunun gösterilmesi (Arık ve Sancak, 2007)

Periyodik karolamaları dört başlıkta inceleyebiliriz.

2.1.2.1 Düzgün Ağ Karolama

Bu karolamada tek tip ‘düzgün çokgen’ ve ‘tek tip düğüm noktası’ vardır. 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 2.8) (Türkçü, 2017).



Şekil 2.8 Düzgün ağ geometrileri (Orhon, 2013)

Düzenli karolamanın matematiksel ifadesini şu şekilde tanımlayabiliriz; kesişen bir nokta etrafındaki her bir çokgenin kenar sayılarının saat yönü veya tersinde ilerleyerek

sırasıyla yazılmasıdır. Örnek olarak şekil 2.9’da noktanın etrafında altı tane üç kenarlı düzgün çokgen bulunmaktadır, çokgenlerin tek tek kenar sayılarının yazılması ile oluşan karolamanın matematiksel olarak ifadesi 3.3.3.3.3.3 (3 üzeri 6) olarak yazılır.



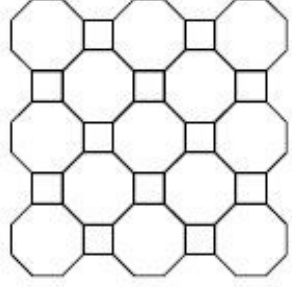
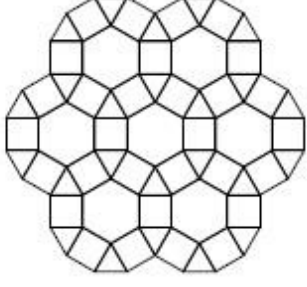
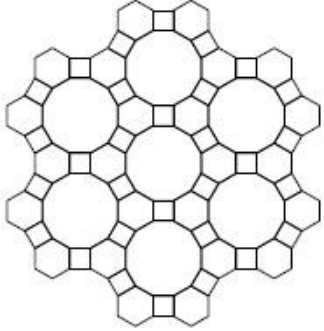
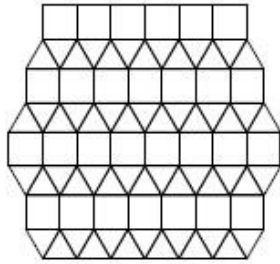
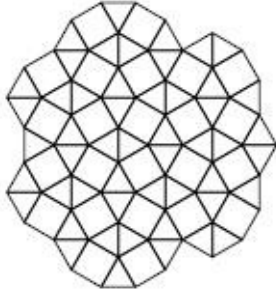
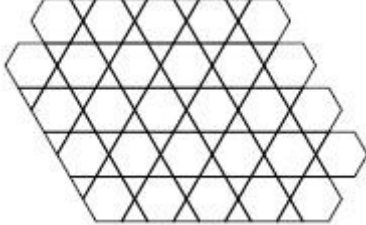
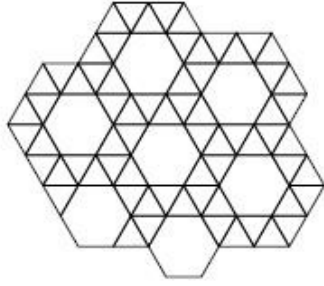
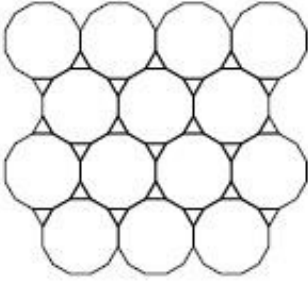
Şekil 2.9 Düzgün karolamanın gösterimi (Kinsey ve Moore, 2006)

2.1.2.2 Yarı Düzgün Ağ Karolama

Bu karolamada birden çok ‘düzgün çokgen’ ve ‘tek tip düğüm noktası’ vardır. Yarı düzgün karolamada, her köşe noktasında aynı şekilde düzenlenmiş iki veya daha fazla düzgün çokgen oluşur. Yarı düzgün ağ karolamada çokgenlerin kenar uzunlukları, desenin oluşması ve yinelenmesi için aynı uzunlukta olmalıdır. Yalnızca sekiz çeşit yarı düzgün ağ karolama vardır.

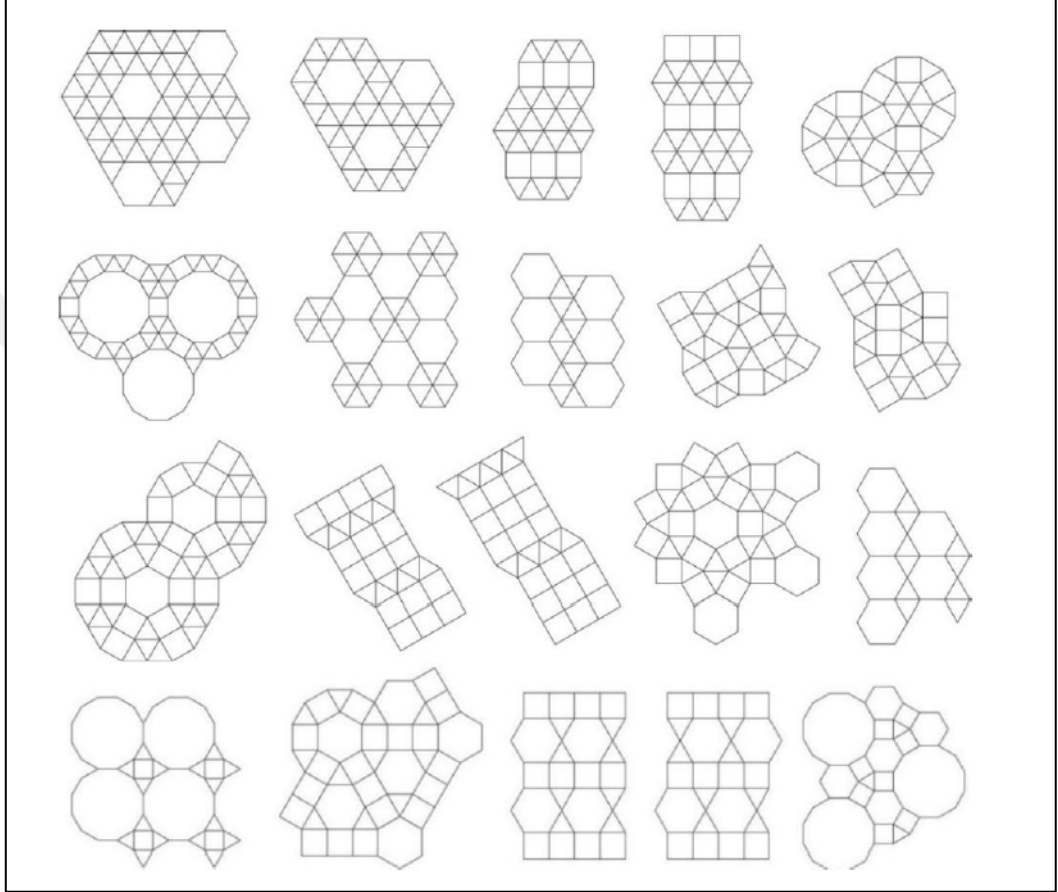
Bir düğüm noktasında birkaç farklı düzgün çokgenin birleşmesiyle türeyen ağlardır. Düğüm noktaları eşit açılı ve çubuk boyları eşittir ancak ağ gözleri farklı alanlara sahiptir. Bir düğüm noktasında birleşen düzgün çokgenlerin, birleşme sırası ile tanımlanabilirler (Tablo 2.1). Eşkenar üçgen ve karelerden oluşan şekildeki düzgün çokgenli yarı düzgün ağ ise örneğini şu biçimde tanımlanır 3,4,3,4,3 (Orhon, 2013).

Tablo 2.1 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

2.1.2.3 Çok Düzgümlü Yarı Düzgün Ağ Karolama

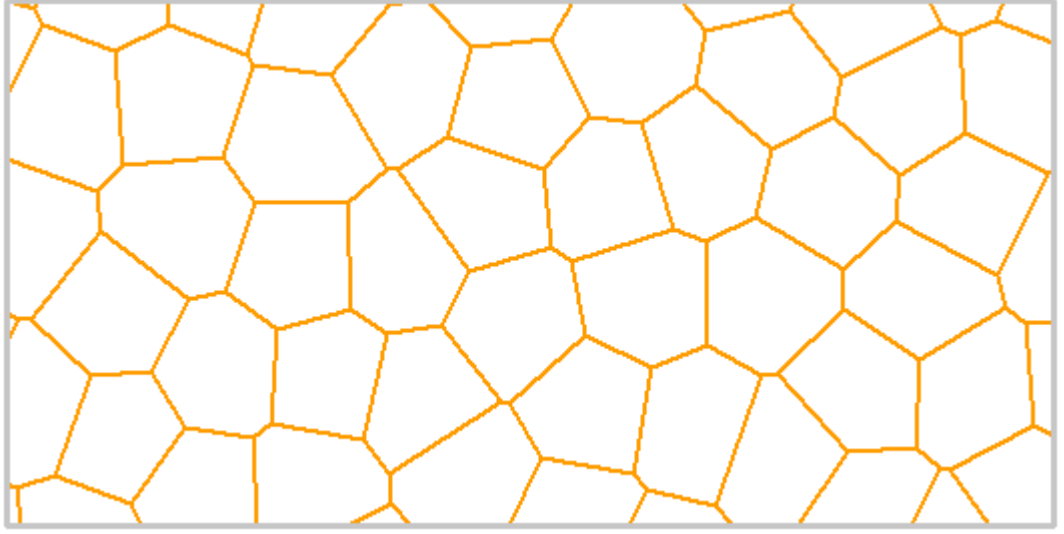
Bu karolamada birden çok ‘düzgün çokgen’ ve birden çok ‘düğüm noktası’ vardır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Düzgün olmayan karolama örnekleri (Kinsey ve Moore, 2006)

2.1.2.4 Düzgün Olmayan Ağ Karoloma

Bu karolama, düzgün olmayan ve birden fazla düğüm noktasından oluşan ağ karolamalardan oluşur. Bu tanımlamaya örnek olarak voronoi diagramı da verilebilir. 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 (Okabe, Boots, Sugihara ve Chiu, 2000).

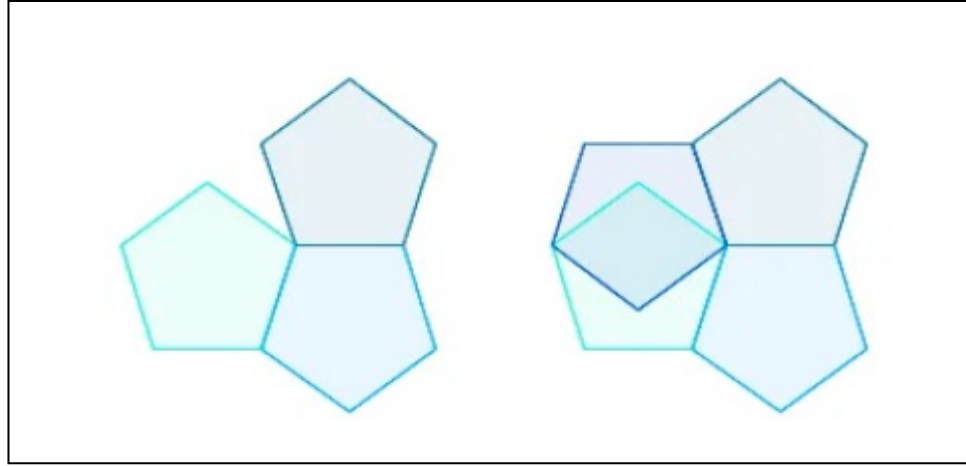


Şekil 2.11 Voronoi Diagramı (Okabe, Boots, Sugihara ve Chiu, 2000)

2.1.3 Aperiyojik (Periyodik Olmayan) Karolama

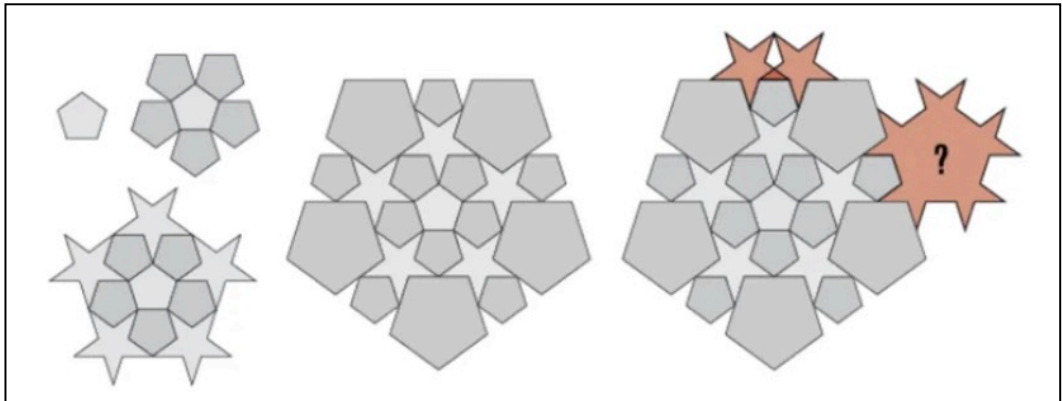
Periyodik karolama örneklerinde, bir düzlemin eşkenar üçgen, eşkenar dörtgen ve düzgün altıgenlerle boşluk kalmayacak şekilde kaplanabildiğini gördük peki bir düzlemi düzgün beşgen ile karolamak mümkün müdür? Bu sorunun cevabı aperiyojik karolamaların temelini oluşturmuştur. Aperiyojik terimi, Grünbaum ve Shephard'ın *Tilings and Patterns* adlı kitaplarında kullanmayı tercih ettikleri bir terimdir ve düzlemi yalnızca periyodik olmadan kaplayabilen karo kümelerinin karşılığıdır.

Bir düzlemi beşgen ile kaplayabilir miyiz? Düzgün çokgenlerle yapılan karolamalarda, beşgenler yoktur. Bunun nedeni ise bir beşgenin iç açısı 108 derecedir. Beşgenleri bir nokta etrafına yerleştirmeye çalışırsak aralarında boşluk kalır (Şekil 2.12). Çünkü $3 \times 108 = 324$ yapar bu 360 dereceden küçüktür. $4 \times 108 = 432$ yapar bu da 360 dereceden büyüktür.



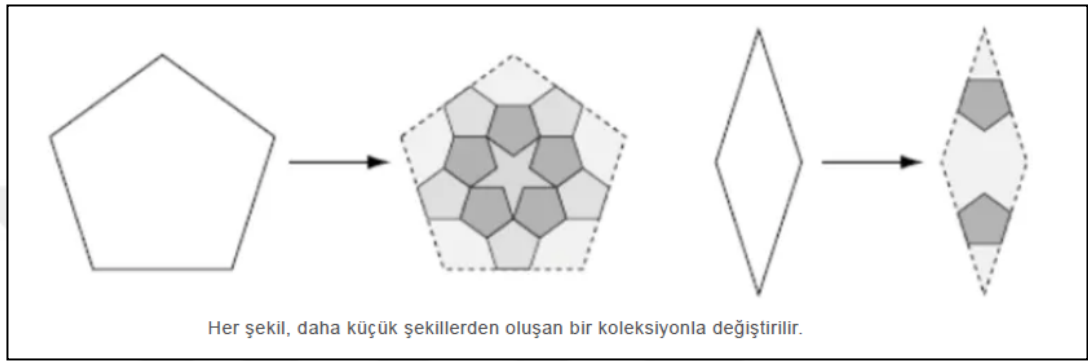
Şekil 2.12 Düzgün beşgenlerin bir nokta etrafında birleştirilmesi (Çağlar, www.matematikselsel.org, 2017)

Beş katlı dönme simetrisine sahip olduğunu bildiğimiz düzgün beşgeni yerleştirelim önce, bu şeklin beş kenarının her birine bir beşgen daha ekleyebiliriz. Eklediğimizde beşgenler arasında 36 derece boşluk kaldığını görebiliriz. Şimdi bu boşlukları yine beş katlı dönme simetrisine sahip bir başka şekil olan beş köşeli yıldız ile doldurmayı deneyelim. Beş köşeli yıldızlardan kalan boşlukları da yine beşgenler ile dolduralım. Ancak şeklimiz burada tıkanı, aşağıdaki şekilde de görebileceğimiz gibi bu karolamaya yeni bir yıldız veya beşgen ekleyemiyoruz. Başka şekille devam edebiliriz ancak sonucunda yine bir yerde tıkanığımızı göreceğiz. Buradan çıkan sonuca göre düzlemi kaplayabilmek için beş katlı dönme simetrisine sahip olmayan bazı ek şekilleri de kabul etmemiz gerekiyor (Şekil 2.13) (Çağlar, www.matematikselsel.org, 2017).



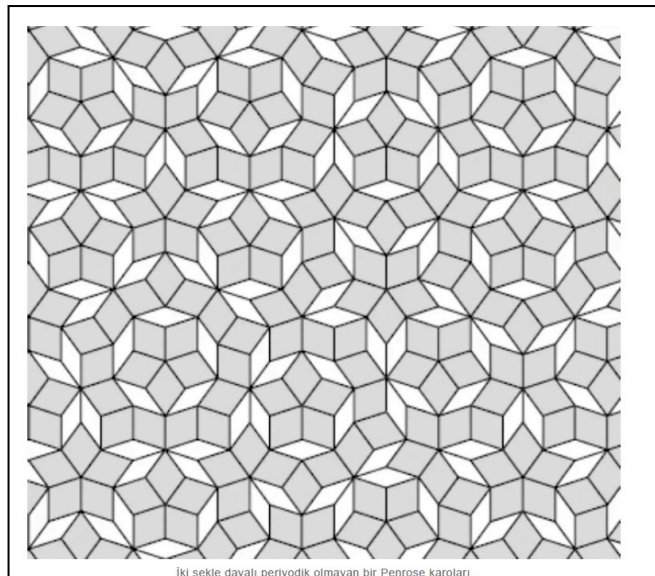
Şekil 2.13 Beşgen ve 5 köşeli yıldız ile yüzey karolaması (Çağlar, www.matematikselsel.org, 2017)

Peki beş katlı dönme simetrisine sahip olmayan eşkenar dörtgen gibi şekillere izin verdikten sonra, onları daha uygun şekillere bölebilir miyiz? Bu soru bizi karolama teorisindeki en önemli kavramlardan biri olan Penrose Karolamasına götürür. Bu kural sayesinde bir beşgen ve eşkenar dörtgen aşağıdaki biçimde bölünmektedir. Bu sayede de daha önceden üretemediğimiz şekilleri oluşturmamız mümkün olur (Çağlar, www.matematiksel.org, 2017).



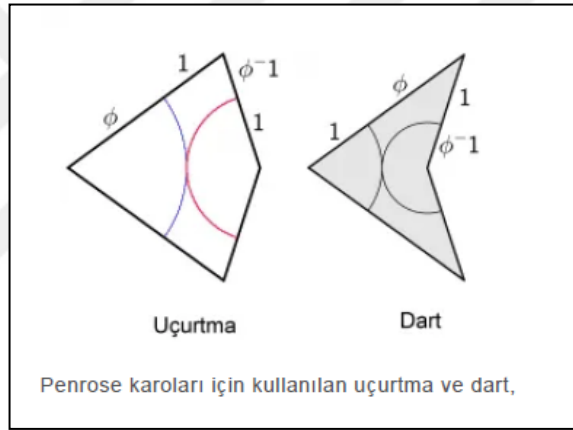
Şekil 2.14 Beşgenin küçük parçalara ayrılması (Çağlar, www.matematiksel.org, 2017)

Bahsettiğimiz çokgenleri küçük parçalara ayırma yöntemine benzer bir yöntem (Şekil 2.14), yirminci yüzyılda Sir Roger Penrose tarafından geliştirilmiştir. Beşli dönme simetrisine sahip (pentapleks) karolarla bir düzlemi kaplayan ama kendini tekrarlamayan yani periyodik olmayan karolamalar yapmıştır (Şekil 2.15).

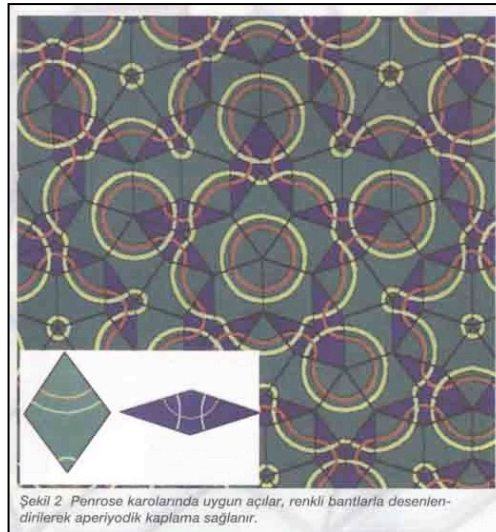


Şekil 2.15 İki şekle dayalı pentapleks karolaması (Arık & Sancak, 2007)

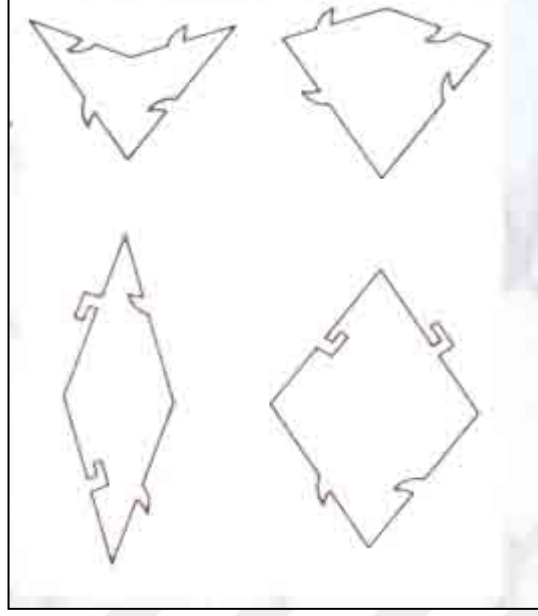
Roger Penrose, 72 ve 180 derecelik iki farklı iç açıya sahip eşkenar dörtgeni ikiye bölerek iki farklı şekil elde etmiştir. Eşkenar dörtgenin içine çizilen iki köşegenden uzun olanı altın orana göre bölersek ve bu iki noktayı birleştirecek bu iki şekli elde edebiliriz. Bu iki şekle benzerliklerinden dolayı ‘ok ucu’ ve ‘uçurtma’ adlarını vermiştir (Şekil 2.16). Eşkenar dörtgenle bir düzlem periyodik olarak da kaplanabilir ancak aperiodyk karolama için diziliş kuralları belirlemek gerekir. Penrose, bu iki şeklin üzerine bir yay çizerek ve yayların birleştirilmesi (Şekil 2.17) ile bir düzlemi boşluk bırakmadan ve tekrarlamadan aperiodyk şekilde karolamayı başarmıştır. Diğer bir diziliş kuralı da bu şekillere çıkıntılar koymaktır (Şekil 2.18 ve Şekil 2.19). Bu sayede hem karoların dizilişi kolaylaşır hem de aperiodyk karolama yapılır (Arık & Sancak, 2007).



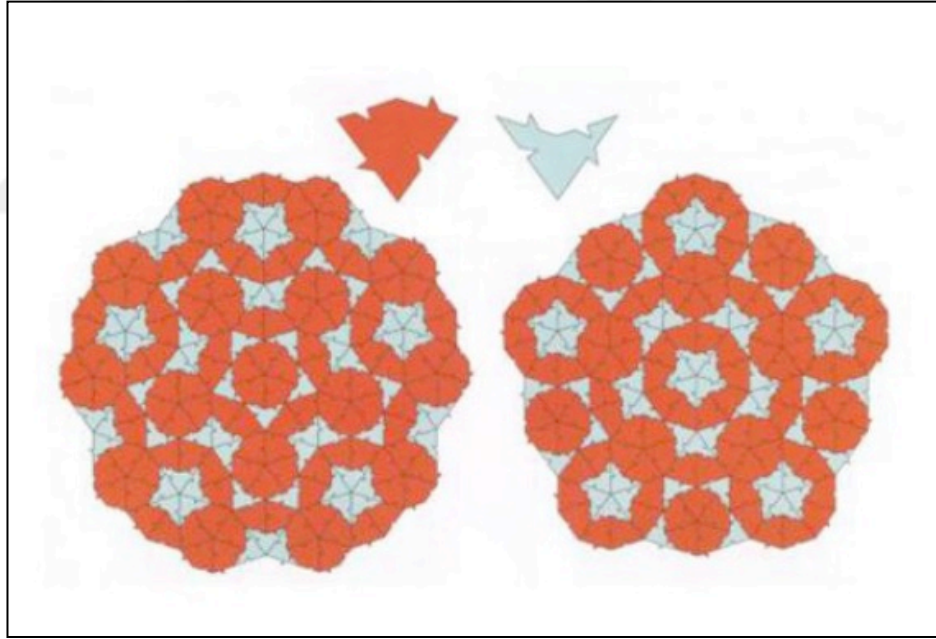
Şekil 2.16 Uçurtma ve dart şekilleri (Arık & Sancak, 2007)



Şekil 2.17 Aperiodyk karolama örneği (Arık & Sancak, 2007)

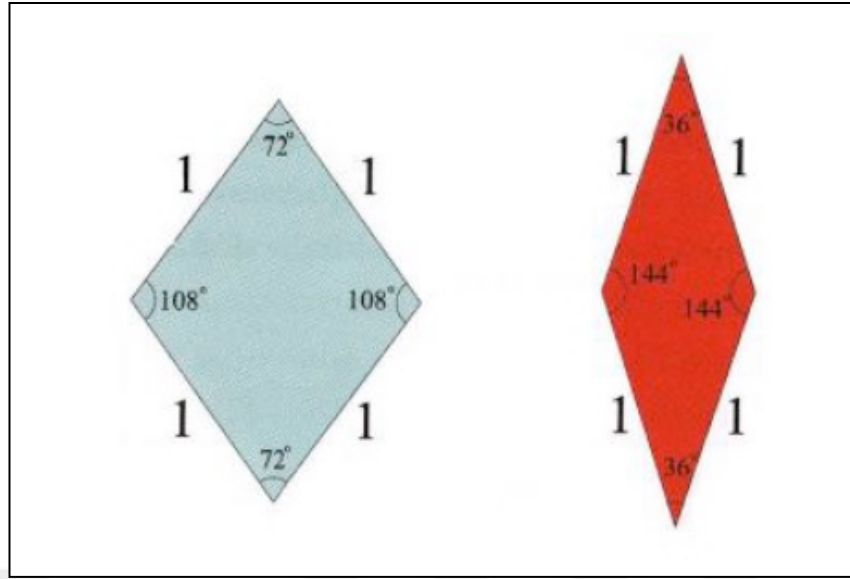


Şekil 2.18 Girinti çıktı oluşturarak aperiodyk karolama yapılması (Sarigül, 2017)

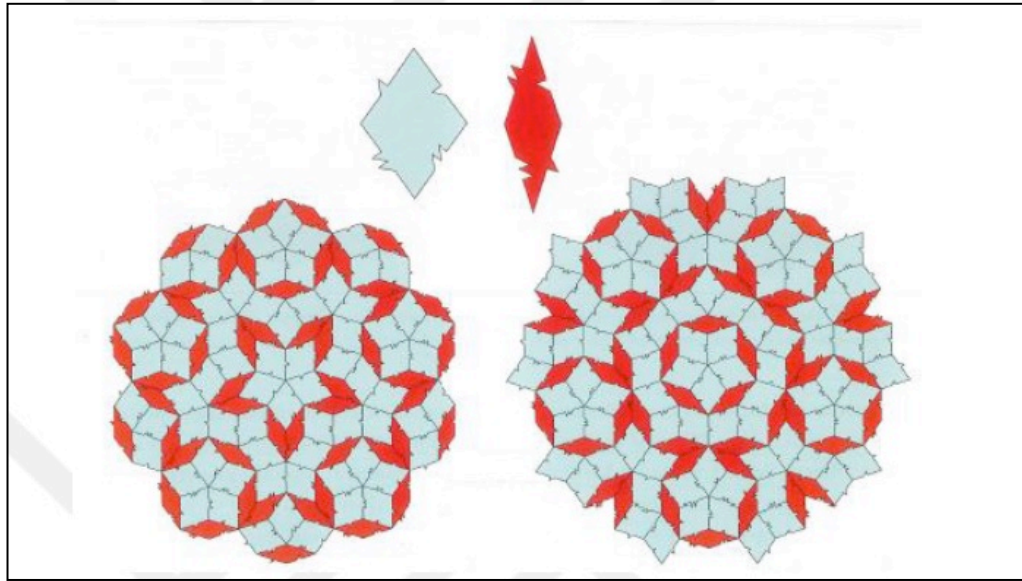


Şekil 2.19 Girinti çıktı oluşturarak aperiodyk karolama yapılması (Arık ve Sancak, 2007)

Yukarıda incelediğimiz örnek, Penrose'un en meşhur karo kümesi olan 'ok ucu' ve 'uçurtma' kümeleridir. Penrose'un diğer karo kümelerinden olan 'zayıf' ve 'şişman' olarak adlandırılan (Şekil 2.20), eşkenar dörtgenden oluşan karo kümesini incelediğimizde de yine benzer yaklaşımları görebiliriz. Şişman eşkenar dörtgenin alanının zayıf eşkenar dörtgenin alanına oranı, yine altın oranı verir (Arık ve Sancak, 2007).

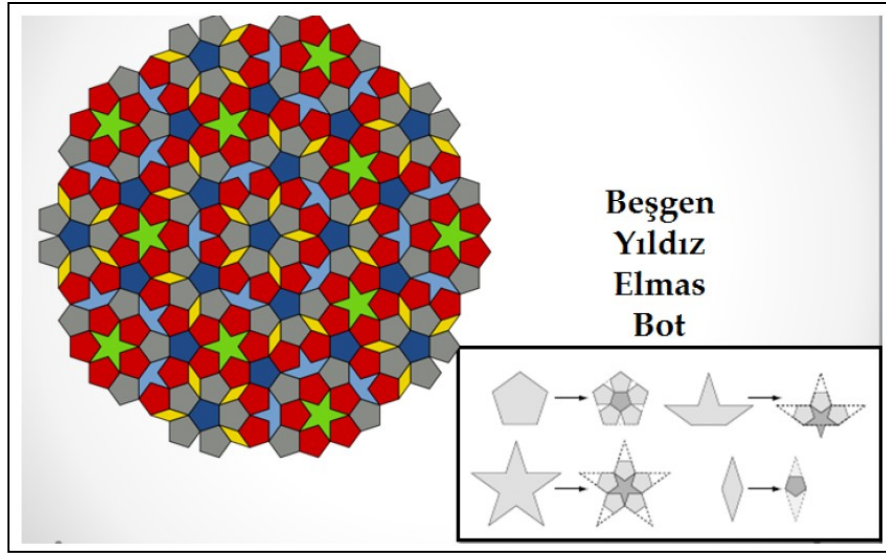


Şekil 2.20 Penrose'un zayıf ve şişman olarak adlandırdığı eşkenar dörtgenler (Arık ve Sancak, 2007)



Şekil 2.21 Pentapleks karolama örneği (Arık ve Sancak, 2007)

Düzlemi bu özelliklerle karolayabilen başka karo kümeleri de mevcuttur. Bu karo kümeleri kullanılarak yapılan karolamalar Pentapleks Karolamalar olarak adlandırılırlar (Şekil 2.21) (Arık & Sancak, 2007).



Şekil 2.22 Pentapleks karolama örneği (Arık ve Sancak, 2007)

Bir karolamanın periyodik ya da aperiodyk olduğunu anlamak için desenlerin belirli aralıklarla tekrar edip etmemesine bakarız. Tekrar eden deseninin kopyasını zemin üzerinde kaydırduğımızda ya da ayna görüntüsü aldığımızda alttaki desenle eşleşmiyorsa bunlara aperiodyk karolama (Şekil 2.22) diyebiliriz. Ya da bir diğer yöntem şu şekilde, tekrar eden desen döndürüldüğünde alttaki desenle eşleşiyorsa yani dönme simetrisi kullanılmışsa bu tür karolamalar da aperiodyktir (Sarıgül, 2017).

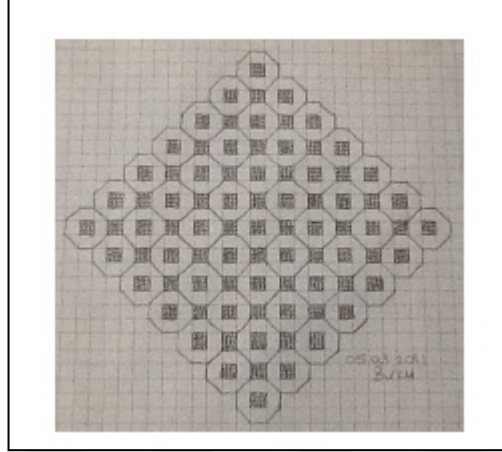
2.1.4 Simetriler

Simetri bir dönüşümdür (Bassarear, 1995). Simetri denince ilk başta akla yansıma simetrisi gelse de aslında öteleme ve dönme de birer simetri türüdür. Karolama türlerine baktığımızda, periyodik karolama sadece öteleme simetrisi ile yapılırken aperiodyk karolamalar ise dönme simetrisine sahiptir (Arık ve Sancak, 2007). Üç çeşit simetri türü vardır; öteleme, dönme, yansıma ve ötelemeli yansıma simetrisi (Britton ve Seymour, 1989).

2.1.4.1 Öteleme (Kayma) Simetrisi

Şekil 2.23'te de görüldüğü gibi, bir deseni sağa sola ve yukarı aşağı doğru kaydırarak düzlemi kaplayabiliriz. Bu harekete öteleme simetrisi denir. Öteleme

simetrisinde, şekil üzerindeki her nokta aynı aralıktadır ve aynı yöne doğru hareket eder (Britton & Seymour, 1989). Periyodik karolamaların tamamı öteleme simetrisi kullanılarak yapılır.



Şekil 2.23 Sonsuzluğa Uzaniş (Aktaş, B.)

2.1.4.2 Yansıma Simetrisi (Doğruya Göre Simetri- Ayna Simetrisi)

Düzlemde bulunan iki boyutlu bir geometrik şekil, doğrusal bir eksene göre yansıtıldığında buna aynı zamanda aynalama da denir oluşan şekil, o geometrik şeklin yansımasıdır (Şekil 2.24) (Arık ve Sancak, 2007). Bir geometrik şekil doğrusal bir eksene göre yansıtıldığında değişmiyorsa, şeklin o eksene göre yansıma simetrisi vardır.



Şekil 2.24 Yansıma simetrisi örneği (Arık ve Sancak, 2007)

2.1.4.3 Dönme Simetrisi

Şekil, yüzeye dik bir eksen etrafında döndürüldüğünde yapısal özellikleri ve bu noktaların eksene olan uzaklıkları değişmiyorsa buna dönme simetrisi denir (Şekil

2.25) (György, 2007). O halde, bir şekil “n” defa döndürüldükten sonra kendi şekliyle çakışiyorsa o zaman bu şekil n katlı dönme simetrisine sahiptir denir (Britton ve Seymour, 1989).



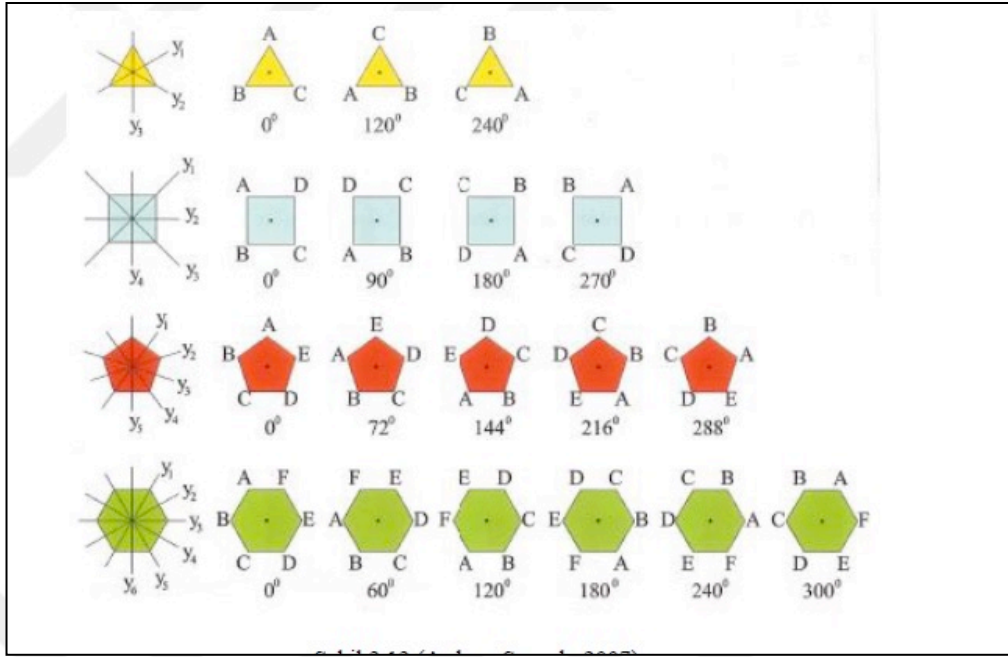
Şekil 2.25 Dönme simetrisi örneği (Arık ve Sancak, 2007)

2.1.4.4 Ötelemeli- Yansıma Simetrisi

Bir şekil, belirlenen bir çizgi üzerine yansıtılıp, bu çizgiye paralel yönde ve doğrultuda kaydırılınca tekrar kendisiyle çakışiyorsa bu şekil ötelemeli yansıma simetrisine sahiptir denir (Şekil 2.26) (Britton ve Seymour, 1989). Ötelemeli yansıma simetrisinde, yansıma veya öteleme tek başlarına istenilen sonucu vermez; mutlaka yansıma ve öteleme birbirini takip etmelidir.



Şekil 2.26 İlkler ve Sonlar (Aktaş, B.)



Şekil 2.27 Düzgün çokgenlerin yansıma simetrileri (Arık ve Sancak, 2007)

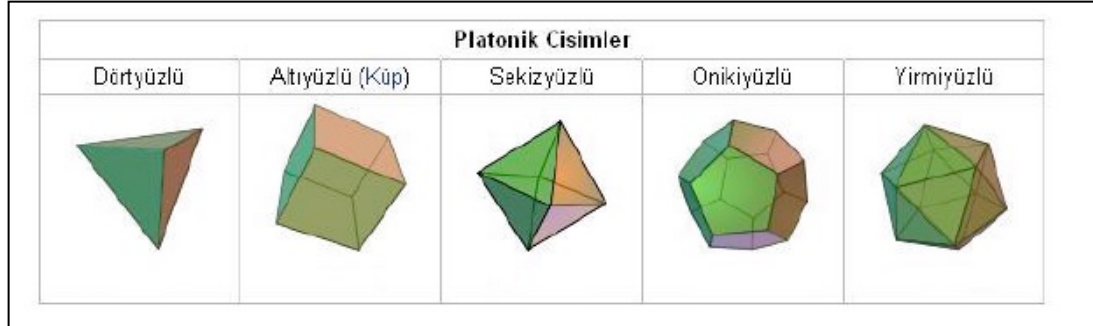
Şekil 2.27’de düzgün geometrik şekillerden eşkenar üçgen, kare, düzgün beşgen ve düzgün altıgenin sahip olduğu tüm yansıma simetri eksenleri ve dönel simetrileri gösterilmiştir (Arık ve Sancak, 2007).

2.2 Hacmin (Uzayın) Karolanması

Estetik ve simetri matematiksel dünyada oldukça karşılık bulan kavramlardır. Sahip oldukları birden çok simetri özelliğinden dolayı, çokyüzlüler matematiksel ve estetik açıdan insanların ilgisini üzerine çeken objeler olmuşlardır. Her bir yüzü düzlemsel çokgenler ile sınırlanan, ayırt ve köşeleri de bu çokgenlerin kenar ve köşeleri olan cisimlere çokyüzlü denilmektedir (Ermiş, 2014).

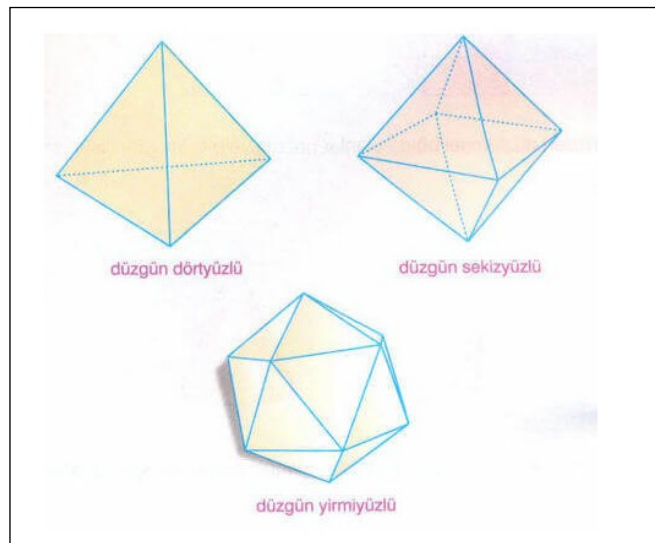
Tüm kenar uzunlukları ve iç açıları aynı olan çokgenlere düzgün çokgenler denir. Bunların bir diğer boyuta taşınmış haline, yani tüm kenar ve yüzleri aynı ve her köşeden aynı sayıda yüz geçen çokyüzlülere düzgün çokyüzlü denir. Aynı zamanda düzgün çokyüzlülere platonik cisimler de denir (Şekil 2.28) (Ermiş, 2014).

Uzun yıllar üzerine çalışılmış olmasına rağmen sadece beş tane düzgün çokyüzlü bulunabilmiştir.



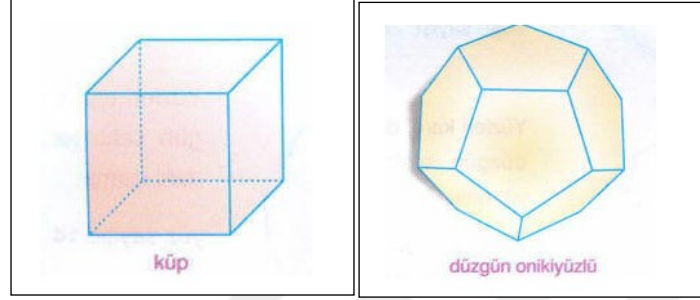
Şekil 2.28 Platonik cisimler (Ermiş, 2014)

Platon katıları olarak da adlandırılan bu düzgün çokyüzlüler; dörtüzlü (tetrahedron diğer adıyla üçgen piramit), altıyüzlü (hexahedron diğer adıyla küp), sekizyüzlü (oktahedron), onikiyüzlü (dodecahedron) ve yirmiyüzlü (icosahedron) dur. Platonik çokyüzlülerin yüzü eşkenar üçgen, kare veya düzgün beşgen olabilir. Yüzleri eşkenar üçgen olan üç tane platonik çokyüzlü vardır. Bunlar; düzgün dörtüzlü, düzgün sekizyüzlü ve düzgün yirmiyüzlüdür. Düzgün dörtüzlünün bir köşesindeki yüz sayısı 3 tür. Düzgün sekizyüzlünün bir köşesindeki yüz sayısı 4 tür. Düzgün yirmiyüzlünün bir köşesindeki yüz sayısı 5 tir (Şekil 2.29).



Şekil 2.29 Düzgün çokyüzlüler (Platonik Cisimler Nelerdir, 2018)

Yüzleri kare olan bir tane platonik çokyüzlü vardır. Bu da küptür. Küpün bir köşesindeki yüz sayısı 3 tür (Şekil 2.30). Yüzleri düzgün beşgen olan platonik çokyüzlü düzgün onikiyüzlüdür. Düzgün onikiyüzlünün bir köşesindeki yüz sayısı 3 tür (Şekil 2.30).

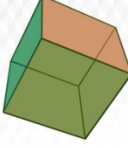
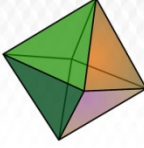
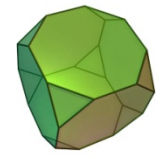
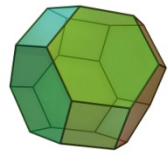
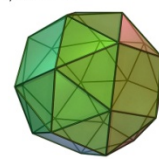
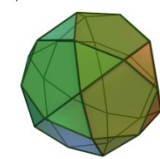
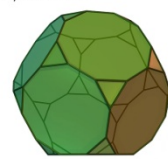
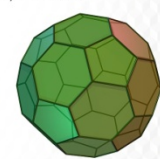
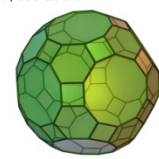
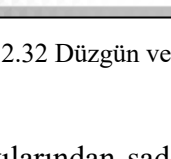
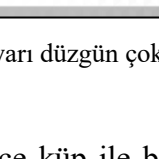
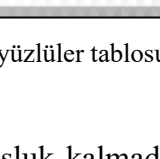


Şekil 2.30 Küp ve düzgün onikiyüzlü (Platonik Cisimler Nelerdir, 2018)

Platonik çokyüzlülerde bir köşedeki açıların ölçüleri toplamı 360° den küçük olmalıdır. 360° olursa, düzlemsel olacağından cisim oluşmaz. Platonik çokyüzlüler konveks yani dışbükey çokyüzlülerdir (Platonik Cisimler Nelerdir, 2018).

	Yüzleri	Bir Köşede Yüz Sayısı	Bir Köşedeki Açılar Toplamı
Düzgün Dörtüzlü	Eşkenar üçgen	3	$3 \cdot 60^\circ = 180^\circ$
Düzgün Sekizyüzlü	Eşkenar üçgen	4	$4 \cdot 60^\circ = 240^\circ$
Düzgün Yirmiyüzlü	Eşkenar üçgen	5	$5 \cdot 60^\circ = 300^\circ$
Küp	Kare	3	$3 \cdot 90^\circ = 270^\circ$
Düzgün Onikiyüzlü	Düzgün Beşgen	3	$3 \cdot 108^\circ = 324^\circ$

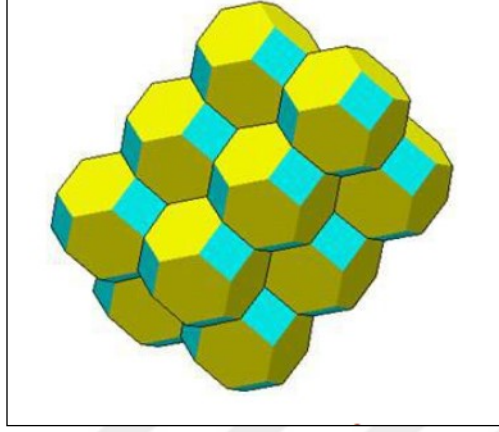
Şekil 2.31 Platonik cisimler (Platonik Cisimler Nelerdir, 2018)

DÜZGÜN ÇOK YÜZLÜLER PLATONİK YÜZEYLER					
	DÜZGÜN DÖRT YÜZLÜ tetrahedron	DÜZGÜN ALTI YÜZLÜ hexahedron	DÜZGÜN SEKİZ YÜZLÜ octahedron	DÜZGÜN ONİKİ YÜZLÜ dodecahedron	DÜZGÜN YIRMI YÜZLÜ icosahedron
	Schläfli sembolü: {3,3}	{3,4}	{4,3}	{3,5}	{5,3}
	Yüzler: 4 tane eşkenar üçgen	6 tane kare	8 tane eşkenar üçgen	12 tane düzgün beşgen	20 tane eşkenar beşgen
	Kenar sayısı: 6 kenar	12 kenar	12 kenar	30 kenar	30 kenar
	Köşe sayısı: 4 köşe	8 köşe	6 köşe	20 köşe	12 köşe
YARI DÜZGÜN ÇOK YÜZLÜLER ARŞİMET YÜZEYLERİ					
	KESİK DÖRT YÜZLÜ truncated tetrahedron	KÜP SEKİZYÜZLÜ cuboctahedron	KESİK KÜP truncated cube	KESİK SEKİZ YÜZLÜ truncated octahedron	KÜÇÜK ROMBİ KÜP 8 YÜZLÜ rhombicuboctahedron
	Schläfli sembolü: $t\{3,3\}$	$r\{4,3\}$ veya $rr\{3,3\}$	$t\{4,3\}$	$t\{3,4\}$ veya $tr\{3,3\}$	$rr\{4,3\}$
	Yüzler: 4 üçgen, 4 altıgen	8 üçgen, 6 kare	8 üçgen, 6 sekizgen	6 kare, 8 altıgen	8 üçgen, 18 kare
	Kenar sayısı: 18 kenar	24 kenar	36 kenar	36 kenar	48 kenar
	Köşe sayısı: 12 köşe	12 köşe	24 köşe	24 köşe	24 köşe
DÜZGÜN ve YARI DÜZGÜN ÇOK YÜZLÜLER TABLOSU					
	BÜYÜK ROMBİ KÜP 8 YÜZLÜ truncated cuboctahedron	KALKIK KÜP snub cuboctahedron	BİRLEŞİK 20 ve 12 YÜZLÜ icosidodecahedron	KESİK SEKİZ YÜZLÜ truncated octahedron	KESİK YIRMI YÜZLÜ truncated icosahedron
	Schläfli sembolü: $tr\{4,3\}$	$sr\{4,3\}$	$r\{5,3\}$	$t\{5,3\}$	$t\{3,5\}$
	Yüzler: 12 kare, 8 altıgen, 6 sekizgen	32 üçgen, 6 kare	20 üçgen, 12 beşgen	20 üçgen, 12 ongen	12 beşgen, 20 sekizgen
	Kenar sayısı: 72 kenar	60 kenar	60 kenar	90 kenar	90 kenar
	Köşe sayısı: 48 köşe	24 köşe	30 köşe	60 köşe	60 köşe
DÜZGÜN ve YARI DÜZGÜN ÇOK YÜZLÜLER TABLOSU				DÜZGÜN ve YARI DÜZGÜN ÇOK YÜZLÜLER TABLOSU  13-67 YASİN YILMAZ 13-08 BUSE AYVAZ 13-60 BESTE TUFAN DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ MİMARLIK FAKÜLTESİ ÇAĞDAŞ STRÜKTÜR SİSTEMLERİ MİM3613 DERSİ	
	KÜÇÜK ROMBİ 12 ve 20 YÜZLÜ rhombicuboctahedron	BÜYÜK ROMBİ 12 ve 20 YÜZLÜ truncated icosidodecahedron	KALKIK ON YÜZLÜ snub dodecahedron		
	Schläfli sembolü: $rr\{5,3\}$	$tr\{5,3\}$	$sr\{5,3\}$		
	Yüzler: 20 üçgen, 30 kare, 12 beşgen	30 kare, 20 altıgen, 12 ongen	80 üçgen, 12 beşgen		
	Kenar sayısı: 120 kenar	180 kenar	150 kenar		
	Köşe sayısı: 60 köşe	120 köşe	60 köşe		
DÜZGÜN ve YARI DÜZGÜN ÇOK YÜZLÜLER TABLOSU				DÜZGÜN ve YARI DÜZGÜN ÇOK YÜZLÜLER TABLOSU  13-67 YASİN YILMAZ 13-08 BUSE AYVAZ 13-60 BESTE TUFAN DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ MİMARLIK FAKÜLTESİ ÇAĞDAŞ STRÜKTÜR SİSTEMLERİ MİM3613 DERSİ	
	KÜÇÜK ROMBİ 12 ve 20 YÜZLÜ rhombicuboctahedron	BÜYÜK ROMBİ 12 ve 20 YÜZLÜ truncated icosidodecahedron	KALKIK ON YÜZLÜ snub dodecahedron		
	Schläfli sembolü: $rr\{5,3\}$	$tr\{5,3\}$	$sr\{5,3\}$		
	Yüzler: 20 üçgen, 30 kare, 12 beşgen	30 kare, 20 altıgen, 12 ongen	80 üçgen, 12 beşgen		
	Kenar sayısı: 120 kenar	180 kenar	150 kenar		
	Köşe sayısı: 60 köşe	120 köşe	60 köşe		

Şekil 2.32 Düzgün ve yarı düzgün çok yüzlüler tablosu (Yılmaz, Ayvaz, & Tufan)

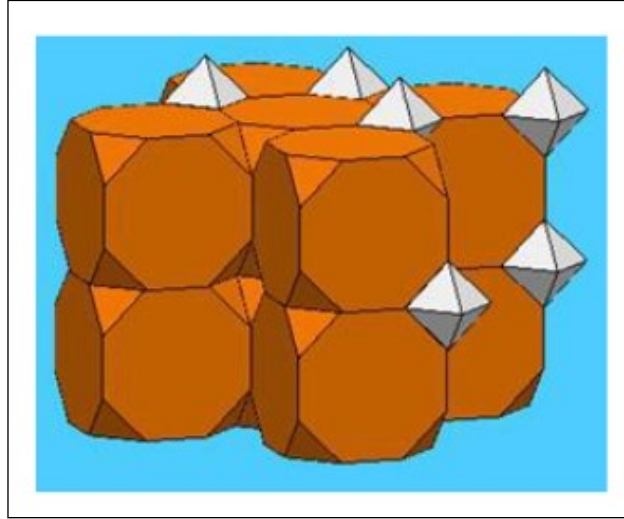
Platon katılarından sadece küp ile boşluk kalmadan uzay karolaması yapılabilir, ancak Arşimed katıları yani yarı düzgün çokyüzlüler kullanılarak uzay karolaması yapılabilmektedir. Örnek olarak, kesik oktahedrona bakarsak eğer düzenli olarak uzayı

kapladığını görebiliriz. Kesik oktahedronun (sekizyüzlü) tepe noktası, bir kare yüzeyden ve iki altıgen yüzeyden oluşur (Şekil 2.33).



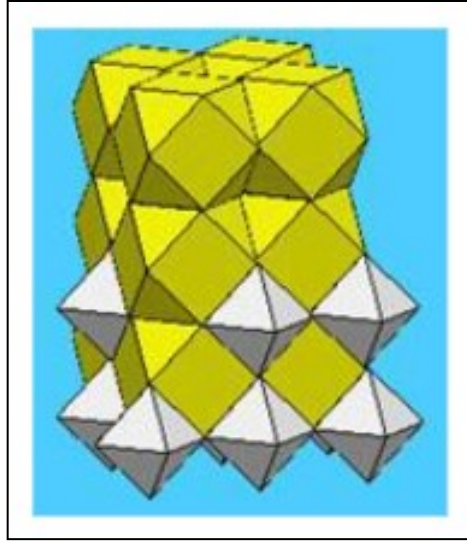
Şekil 2.33 kesik sekizyüzlü ile yapılan uzay karolaması örneği (Wagg, 2015)

Birden fazla yarı düzgün çokyüzlü veya bir düzgün, bir yarı düzgün çokyüzlü kullanarak uzay karolaması yapılabilir. Örnek olarak, yarı düzgün çokyüzlülerden kesik küp ile düzgün sekiz yüzlü kullanarak uzay karolaması yapılabilir (Şekil 2.34).



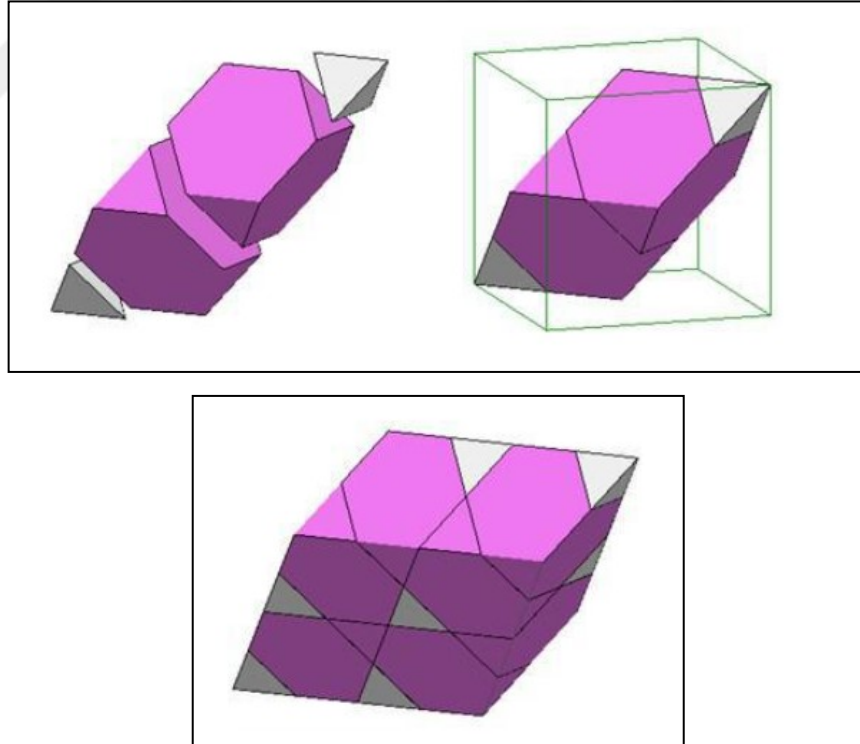
Şekil 2.34 Kesik küp ve düzgün sekizyüzlü ile yapılan uzay karolaması örneği (Wagg, 2015)

Yine aynı şekilde, yarı düzgün çokyüzlülerden küp sekizyüzlü ile düzgün sekizyüzlü kullanılarak da uzay karolaması yapılmaktadır (Şekil 2.35).



Şekil 2.35 K p sekizyüzlü ve düzgün sekizyüzlü ile yapılan uzay karolaması  rneęi (Wagg, 2015)

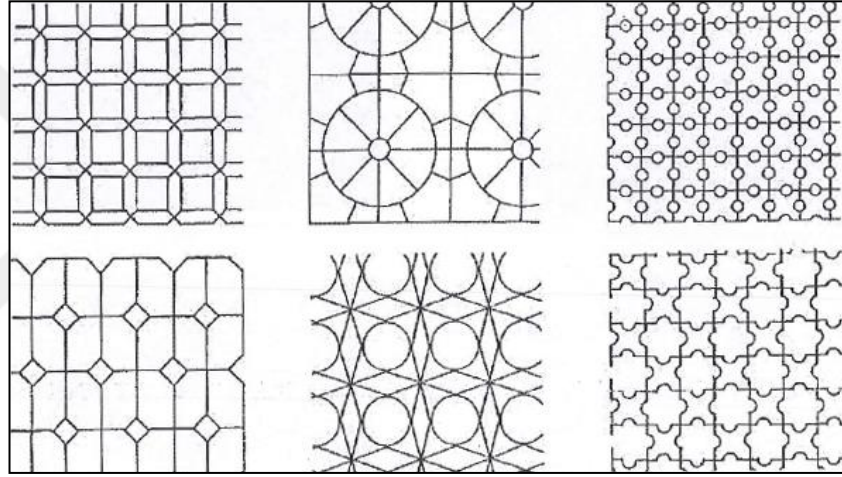
Diğer bir örnek de, iki tetrahedron (düzgün dörtyüzlü) ve iki adet truncated tetrahedra (kesik dörtyüzlü) kullanarak uzay karolaması yapılır (Şekil 2.36).



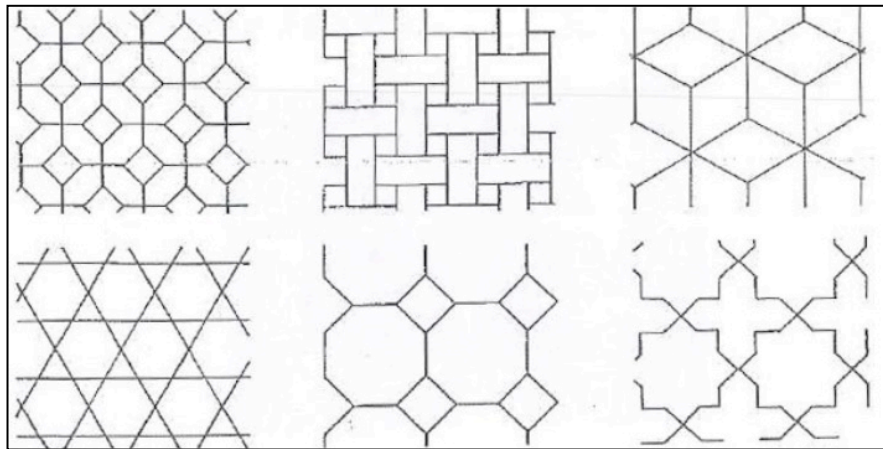
Şekil 2.36 İki düzgün dörtyüzlü ve iki kesik dörtyüzlü ile yapılan uzay karolaması  rneęi (Wagg, 2015)

2.3 Geçmişten Günümüze Karolama Kullanımı

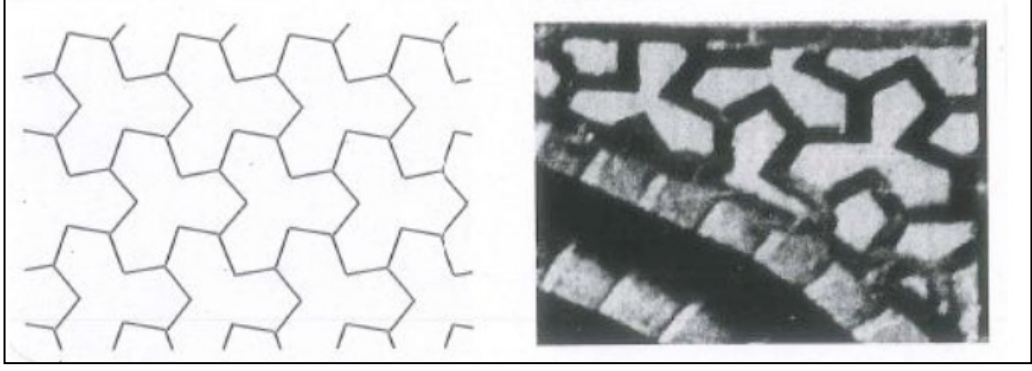
Karolamanın mimaride kullanımı çok eski zamanlara dayanmaktadır. İlk örneklerden birisi M.Ö. 4000 yıllarında Sümerler tarafından yapılan duvar süslemelerinde karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.37) (Pickover, 2009). Karolamanın Mısırlılar, Persler, Romalılar, Yunanlılar, Araplar, Japonlar ve Çinliler gibi başka uygarlıklar tarafından da kullanıldığı biliniyor ancak kullanılan desenler kültürden kültüre farklılık gösteriyor. Örneğin, antik çağda kare bloklardan yapılan mozaikler kullanılırken, Arap kültüründe daha karmaşık geometrik desenler kullanılmıştır (Şekil 2.38, Şekil 2.39 ve Şekil 2.40) (Dunbabin, 1999).



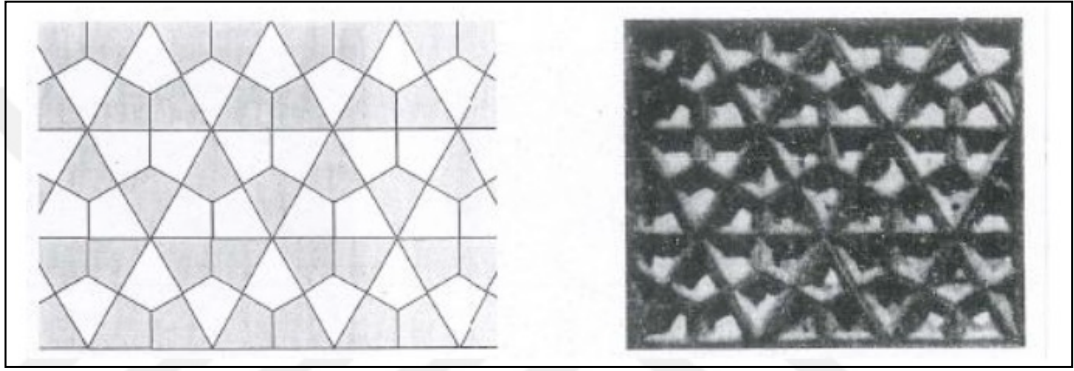
Şekil 2.37 Portekizde 15. Yüzyıldan kalma antik yapılarda karşılaştığımız süslemeler (Grunbaum ve Shephard, 1987)



Şekil 2.38 Avrupa ve Ortadoğu'da mimari yapılarda kullanılan karolama desenleri (Grunbaum ve Shephard, 1987)



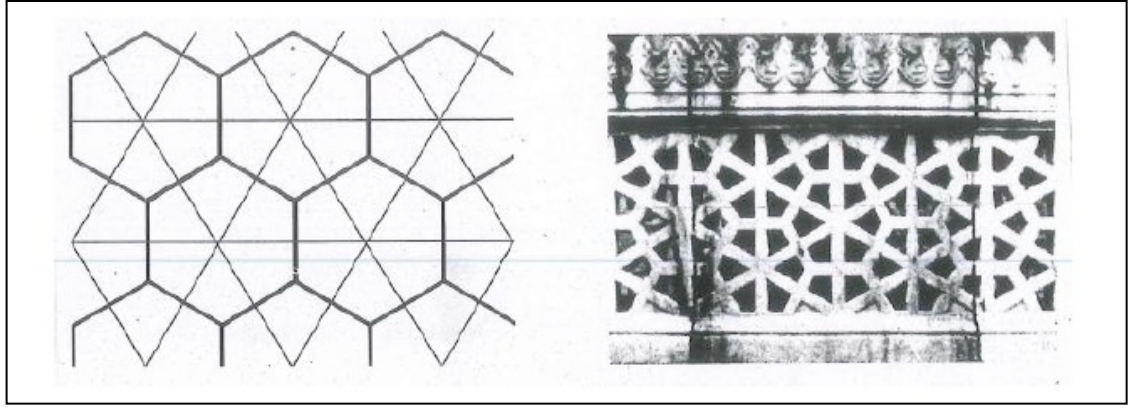
Şekil 2.39 Avrupa ve Ortadoğu’da mimari yapılarda kullanılan karolama desenleri (Demiriz, 2004)



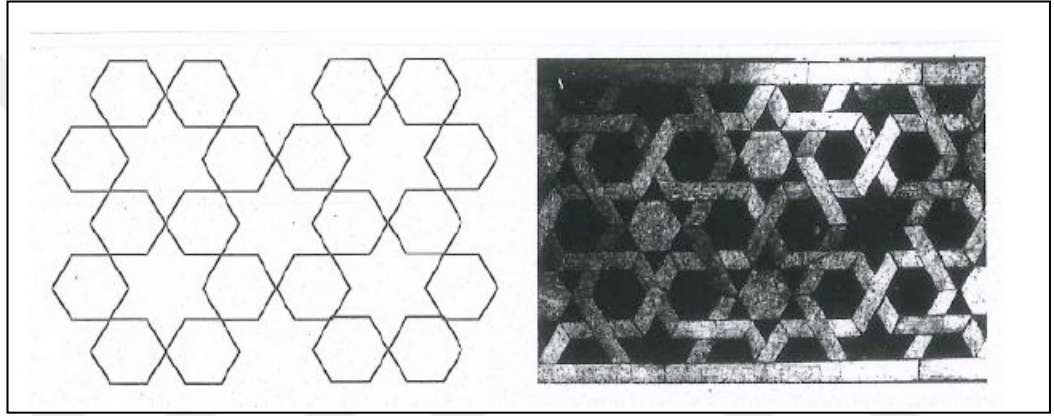
Şekil 2.40 Bursa Hüdavendigar Cami’nden bir süsleme gösterilmiştir (Demiriz, 2004)



Şekil 2.41 Antik Roma döneminden kalma bir mozaik (Grunbaum ve Shephard, 1987)



Şekil 2.42 Ahlat mezar taşı, Şahideli silindirik sanduka (Karamağaralı, 1972)



Şekil 2.43 Aksaray, Darphane tonoz göbeğinde tuğla (Bakırer, 1981)

21.yüzyıl yapılarında da karolama örneklerine sıkça rastlamamız mümkündür. Bunlardan ilki, Louis Khan tarafından 1953 yılında yapılan Yale Sanat Galerisi'nin tavanına uygulanan *Waffle* levhadır. Eşkenar üçgenlerden oluşan bu levha aynı zamanda düzenli karolama örneğidir (Şekil 2.44).



Şekil 2.44 Yale sanat galerisi @ Samuel Ludwig

2004 yılında Norman Foster tarafından tasarlanan Swiss Re binasında uygulanan diyagrid sisteminde de eşkenar üçgenlerle düzenli karolama yapılmıştır (Şekil 2.45).



Şekil 2.45 Swiss Re binası cephe görünüşü (Archdaily, 2016)

Üç boyutlu karolamanın en önemli örneklerinden biri Londra'daki British Museum'un Foster and Partners tarafından tasarlanan çatısında görülebilir. Üçgen karolamadan oluşan çatı geometrisi, yan uzunlukların olduğu bir matematiksel model kullanılarak üretildi (Şekil 2.46). Üçgenler bir algoritmaya göre optimize edildi. Mozaik desenler hem düzenli hem de düzensiz geometriler kullanılarak üretilebilir.



Şekil 2.46 British Museum büyük avlu iç görünüş (Foster+Partners, tarih yok)

Gelişen teknoloji ile karolama örnekleri de gelişmiştir, statik örneklerle ilave olarak kinetik olarak tasarlanmış örnekler de zamanla artmıştır. Örnek olarak Brezilya’da inşa edilen ‘Dans Eden Pavyon’da, yatay yönde tam dönüş yapan 345 adet yuvarlak ayna elemanı bulunuyor (Şekil 2.47). Binanın içinde, dans eden insanların hareketlerini ve müziğini yakalayan sensörler var. Sensörler tarafından toplanan veriler buna göre motorları ve cephedeki aynaları harekete geçirir. Bu bina geçici kullanımda olduğu için cephenin sıcaklık kontrolü veya gün ışığı kontrolü gibi işlevsel bir amacı yoktur (Archdaily, 2016)



Şekil 2.47 Dans eden pavilion (Archdaily, 2016)

BÖLÜM ÜÇ

YAPI KABUKLARININ MODÜLER KOORDİNASYONUNDA PARAMETRİK TASARIM

Mimarlık, form ve yapı tasarımıdır. Uygulama aşamasında yapının kolayca anlaşılabilmesi için mimarlar tasarımlarını, iki veya üç boyutlu temsillerle anlatabilmek için geometri bilgilerine ihtiyaç duymuşlardır. Mimarlar geometriyi dört farklı şekilde kullanırlar; ölçeklendirme için, oran orantı için, analiz ve değerlendirme yapmak için ve form üretim aracı olarak. Mimarların form tasarım sürecinde geometrilerle daha karmaşık ilişkileri bütünleştirebileceği ve bunları tasarlayabileceği ortamların eksikliği, bilgisayar destekli parametrik modelleme araçlarının geliştirilmesiyle giderilmeye çalışılmıştır (Ma, 2012).

Parametrik tasarım sürecinde, süreci ve tasarımı etkileyecek verilerin birer parametre olarak girilmesi ve bu parametreler arası ilişkinin kurulması esas kuraldır. Böyle bir modelde, parametrelerin değiştirilmesiyle yeni durumlar türetilir. Geleneksel tasarım süreçlerinden farkı ise, parametrik tasarımda tasarımcı başlangıç ve sürece karar verebilir ancak ortaya çıkan sonuç tasarımcının kontrolünde değildir.

3.1 Modüler Koordinasyon

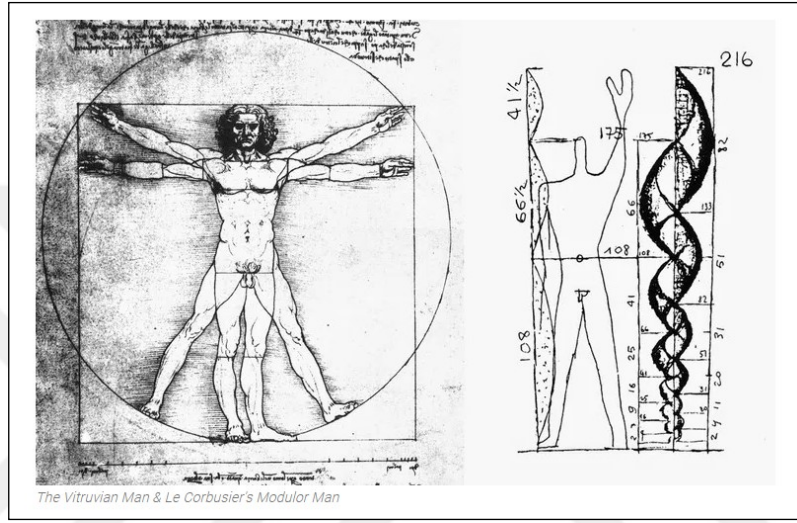
Modüler koordinasyon, üretilen yapı bileşenlerinin genel koordinasyon boyutlarıyla; yapıda elemanlarının yapı bileşenleriyle koordinasyonu yönünden önemli olan yatay veya dikey boyutlarını standart bir ölçü biriminin katlarından seçmek şartına uygulanan standartlaşma yöntemidir. Modüler koordinasyonun amacı, yapı üretiminin standardizasyonu ve endüstrileşmesidir.

3.1.1 Modüler Koordinasyonun Tarihi

Modül ve modülasyon insanların barınma ihtiyacından doğan ve tarih boyunca geliştirilen kavramlardır. Eski Yunan, Mısır ve Mezopotamya gibi uygarlıklarda, yapının sütun olan bölümü modül kabul edilerek geri kalan bölümleri bu sütuna göre boyutlandırılmıştır. Vitruvius “Mimarlık Üzerine On Kitap” adlı kitabında, kolon

boyutları ve yapı ölçüleri arasındaki bağlantılarla modül kavramından bahsetmiştir (Çalışkan, 2008).

Bina üretiminde kullanılmış en eski modüllerden biri ‘altın kesit (golden section)’ tir. Le Corbusier, altın kesiti ve Finonacci serisindeki estetik boyutlandırmayla insan vücudunun oranlarını harmanlayarak ‘Modulor’ ını oluşturmuştur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Vitruvius ‘un Modulor’ u (Nysha Harpermichon, tarih yok)

Endüstri devrimine kadar ölçü sistemleri her ülkede farklılık göstermekteydi. Genellikle ölçü sistemi olarak el ve ayak uzunlukları kullanılmaktaydı ancak sanayileşmenin de etkisiyle ortak ölçü sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Uluslararası kurullar 1791 yılında toplandığında, dünya çapının on milyonda biri 1 m olarak kabul edilmiştir.

Yapı sektörüne baktığımızda ise, daha çok el emeğine dayalı bir sektör olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle 19. yy. da prefabrikasyon düşüncesi yeni bir buluş olmasa bile göz ardı ediliyor ve sanatsal bulunmuyordu.

2. Dünya Savaşı’ndan sonra, özellikle Batı Avrupa ülkelerinde ciddi miktarda yapı ihtiyacı doğmuştur. Bu yapıları hızlı bir şekilde üretmek için de prefabrikasyon yöntemine başvurulmuştur. Türkiye’de ise bu sürece geçiş sanayileşme ile 1960’lı yılları bulmuştur.

Endüstrileşmede amaçlanan; yerinde yapımı mümkün olduğunca azaltıp, yapı elemanlarının fabrikada yapılmasını arttırmaktır. Bu yöntemle, üretim kaynaklarının ve zamanın daha verimli kullanılması amaçlanmaktadır. Burada amaçlanan, az zamanda daha fazla ve daha ekonomik yapı üretimini sağlamaktır.

Endüstrileşmeyi 3 madde ile tanımlayabiliriz; mekanizasyon, prefabrikasyon ve standardizasyon.

Mekanizasyon; Makineleşme ile ürünlerin hızlı ve büyük parçalar halinde üretilmesi ve standardizasyonudur (Akışan, 1984).

Prefabrikasyon; Bir yapının bileşenlerinin her bir parçasının, endüstriyel olarak üretilmesidir. Burda amaç, yapı bileşenlerinin birleşme sürelerini kısaltıp, insan gücünden daha az yararlanmaktır. Aynı zamanda minimum derz aralığı sağlayarak diğer sistemlerle bir araya gelmesi sağlanır. Bu yöntemle şantiyelerdeki birleştirme süreleri kısılır ve bu da hem insan gücünden hem zamandan hem de maliyetten tasarruf sağlar.

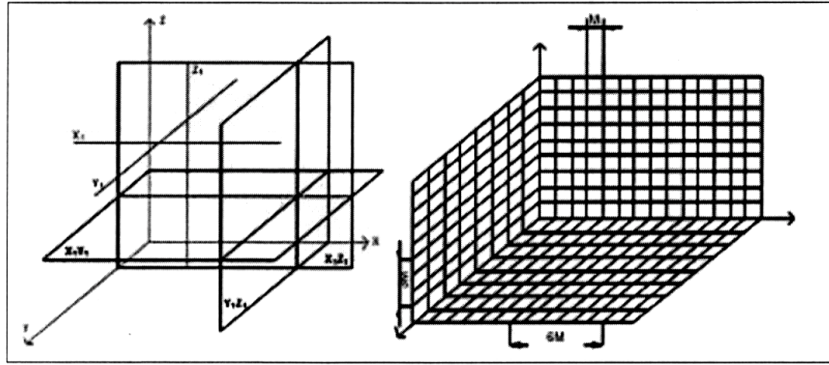
Standardizasyon: Endüstriyel üretim için boyutların belirli standartlara oturması gerekmektedir. Boyutsal standartlaşma denilince en önemli konu modül ve modülasyondur. Boyutları belirli standartlara oturturken en önemli nokta modül seçimidir (Erdoğan,1984).

3.1.2 Modül ve Modüler Koordinasyon Kavramları

Modül kavramı, bazı ülkeler tarafından benimsenen boyutsal koordinasyonun büyüklüğü olarak seçilen bir değerdir (Gökhan ve Baytin, 1979).

Modül: Modül kavramı Latince ‘Modülüs’ yani ölçü kelimesinden gelmektedir, belirli bir boyutu ifade etmek yerine tanımlanmış boyutları ifade etmektedir (Tuna, 1972).

Modüler Izgara: Yapı elemanlarının boyutları ele alınarak oluşturulmuş, yapı bileşenlerinin ve kullanılacak malzemelerin yerlerini belirten ızgara sistemidir. Izgarayı oluşturan ırsal çizgiler arası mesafeler, temel modül ve katları şeklinde gitmektedir (Koman, 2004). Tasarımın son aşamasında oluşturulur. Böylece o yapının, kolon, kiriş, duvar, döşeme, zemin karolaması, tavan, kapı, pencere ve elektronik mekanik alt yapıları ölçüsel olarak tanımlar (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Modüler Izgara Diyagramı (Çalışkan, 2008)

Temel Modül ($M=10$): 4 inç ve 10 cm olarak belirlenen modüldür. M ile gösterilir ve $1M=100\text{ mm}$ dir. 20. Yy ‘ın ikinci yarısından itibaren kabul edilip uygulamaya koyulmuştur (Tuna, 1972).

Modüler Ölçü: Temel modülün katların oluşan sistemdir. Verilen ölçülerin $M=10$ cm ve katı olması anlamına gelmektedir (AIA, 1962).

Derz: Farklı malzeme veya elemanlar arasındaki mesafe demektir. Yapılar, farklı malzeme ve boyutlardaki bileşenlerden oluşur, bu bileşenlerin hiçbirisi sürekli değildir bu nedenle birleşim problemleri çıkar. Bu birleşim yerlerine derz denir ve buralar elemanın ve yapının en zayıf noktalarıdır (Işık, 1988).

Modüler Boşluk: Modüler ızgarada, derzler göz önüne alınmadan yapının elemanları veya malzemeleri için bırakılmış boşluklardır.

Minimum Boşluk: Derz boşluğunun yarısına eşit olan boşluk olarak tanımlanmıştır.

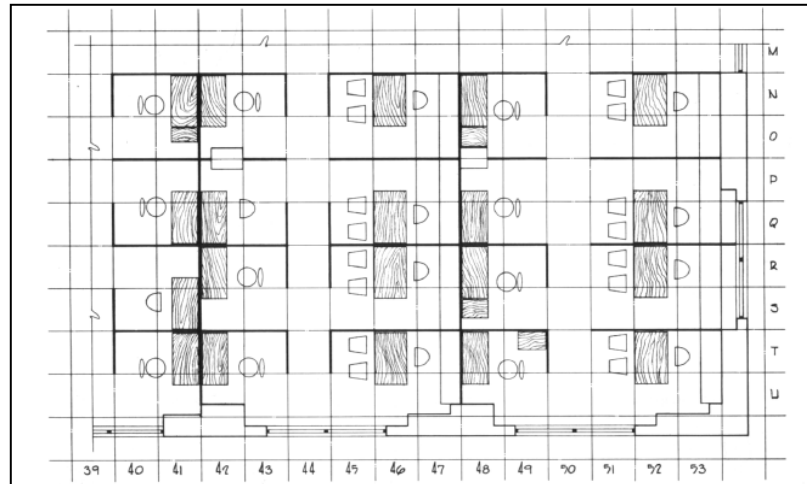
Aynı zamanda modüler ızgara ve koordinasyon yüzeyi arasında kalan ölçüdür (RIBA, 1965).

Pozisyon Toleransı: Malzeme veya eleman için planlanmış boşluk ölçüsünden maksimum sapma payına denir (Işık, 1988).

Maksimum ve Minimum Ölçü: Yapıda kullanılan malzemeler aynı boyutlarda ve türlerde olsa da üretim hatalarından doğan boyut farklılıkları olabilir. Kullanılan aynı tür malzemelerden en büyük olanının boyutlarına maksimum ölçü ve en küçük olanının boyutlarına da minimum ölçü denir (Işık, 1988).

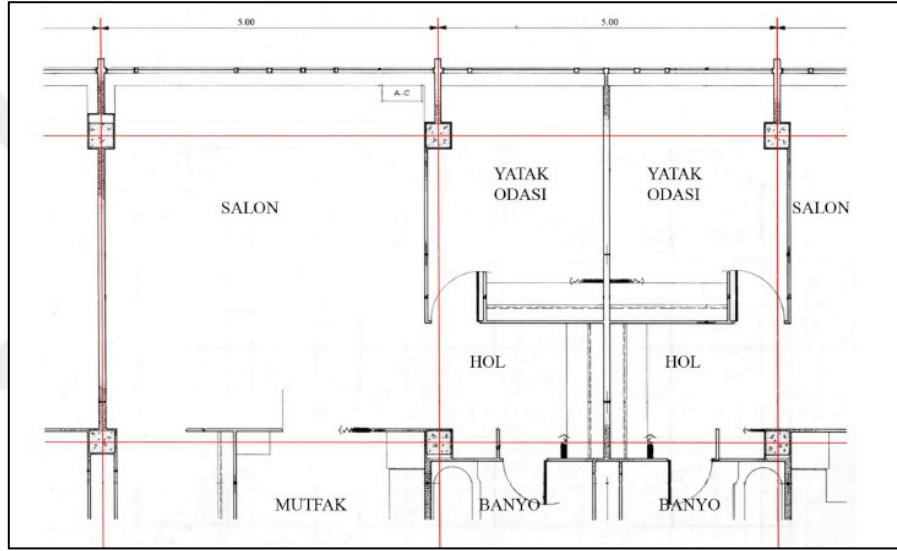
Modüler Bileşen: Temel modül M' nin katlarından seçilmiş olan bileşenlere denir (RIBA, 1965).

Planlama Modülü (Plan Izgarası): Genellikle temel modülün katları şeklindedir. Batı Avrupa'da 3M, 6M, 12M olan planlama modülü Doğu Avrupa ve Rusya'da 20M, 30M, 60M ve 90M'dir. 3M ve 6M büyük modülleri esas olarak binalar için düşünülmüştür. Daha küçük plan-lama modülleri, daha fazla esneklik ve çeşitlilik getirirken, daha büyük planlama modülleri, çeşitlilikte azalma sonucunu getirmektedir. Buna karşılık, özellikle endüstriyel ve çok sayıda üretim söz konusu olduğunda, büyük modül daha ekonomik olmaktadır (Şekil 3.3) (Baytin, 1979).



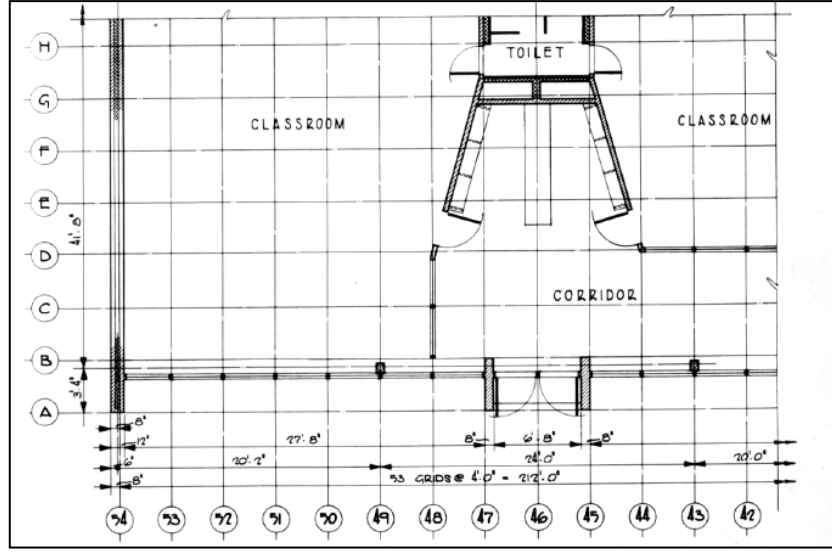
Şekil 3.3 Planlama Modülü Diyagramı (Çalışkan, 2008)

Strüktür modülü (Strüktürel Izgara); taşıyıcı sistemin aks aralıklarının modülünü ifade etmektedir. Aks ızgarası da denilmektedir. Mimari planlamada mekân sınırları taşıyıcı sistemle aynı ise planlama ve strüktür modülünün aynı ve tek olduğu söylenebilir. Örneğin, yığma binalarda genellikle planlama ve strüktürel modül aynıdır. Ana iskelet sistemlerde (yani betonarme karkas sistemlerde), iç bölmeler ve mimari hacimler strüktürün getirdiği boyutlardan farklı olabilir. Taşıyıcı akslar arasındaki uzaklık 7 m (70 M), buna karşılık planlama modülü 3,5 m (35 M) olabilir (Şekil 3.4) (T.S.E., 1975).



Şekil 3.4 Strüktür Modülü Diyagramı (Çalışkan, 2008)

Referans Izgarası; Referans ızgarası mimar ve yüklenici, mal sahibi arasındaki iletişimi ve koordinasyonu sağlamak için kullanılır ve mimar tarafından detay projeleri tamamlandıktan sonra çizime eklenir. Çizgilerin geçtiği yerler ise strüktürel ızgaranın M temel modüle bölünmesi ile elde edilir. Bu çizgiler çizimde fazla dikkat çekmeyecek şekilde yer alır belli belirsiz bir renkte geçirilir ve çoğunlukla tüm çizimden geçmez. Referans ızgarası binada alanların, özel çözümlerin, son karar istek ve lokal, çözümlerin yerlerini ve özel detayların yerlerini belirtmek için kullanılır (Şekil 3.5) (AIA, 1962).



Şekil 3.5 Referans Izgarası (Çalışkan, 2008)

3.1.2.1 Oransal Modüller

Oransal modüller, tarih boyunca yapılan yapılarda insanlarda güzellik hissi uyandırdığına inanılan modüllerdir. Yeni yapılan yapılarda da bu oranların kullanılması gerektiğine inanılır.

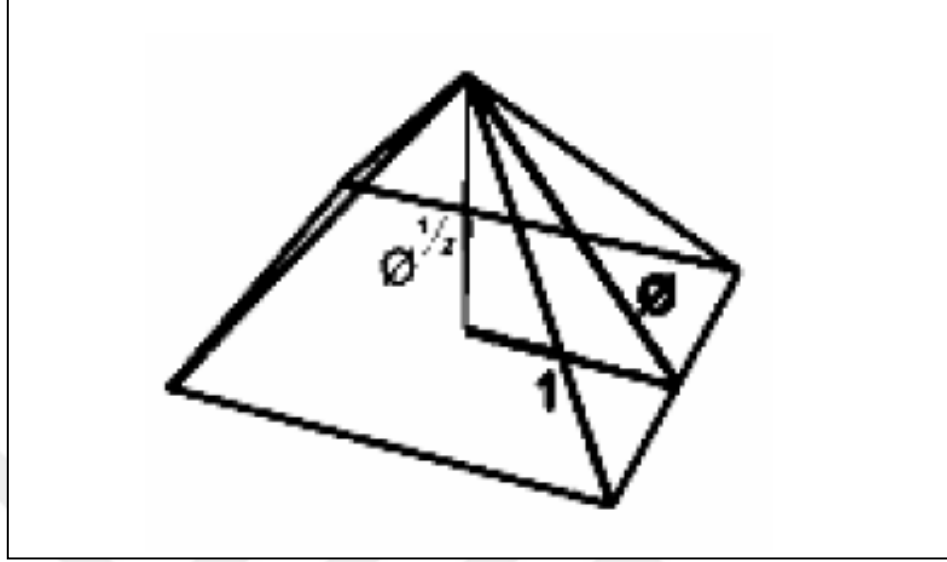
Modüller oluşturulurken genelde belirli oranlar çerçevesinde yapılmaktadır, bunun sebebi de boyutsal oranların insanlarda güzellik hissi uyandırdığı düşünülmektedir. Bu da ikinci bölümde incelediğimiz karolama yöntemlerinde modüler koordinasyonun neden kullanıldığını anlamamızı sağlıyor.

Statik Oransal Modüller: Aritmetik çözümlemelere dayalı seçilen sayı dizilerinin sıralı sayılardan oluşması durumunda modüller Statik Oransal Modüllerdir ($1/2$; $2/3$; $3/4$; $4/5$; ...) (Tuna, 1972)

Dinamik Oransal Modüller: Geometrik çözümlemelere dayalı seçilen sayı dizilerinin kareköklü sıralı sayılardan oluşması durumunda modüller Dinamik Oransal Modüller' dir ($1/2$; $1/3$; $1/5$;...) (Tuna, 1972)

Altın Oran: Çeşitli geometrik çıkarımlarla doğada ve canlılarda bulunan, ayrıca eski yapılarda da kullanıldığına ve bu şekilde de sağlam ve güzel yapılar elde edildiğine

inanılan boyutsal oran. $(\frac{1}{2}(1+5) = 1.618033975 = _)$. (Sekil 3.6) $1/j$; $1/j$; $1/j^2$ ise altın orana ait dizilerdir (Tuna, 1972)



Şekil 3.6 Altın Oran'ın Mısır'daki Giza Piramidine Uygulanışı (Tuna, 1972)

Geometrik Oransal Yöntem: Bu yöntem üzerine çok fazla araştırma yapılmıştır. Özellikle Eski Yunan ve Roma eserlerinde, plan kesit ve görünüşler incelendiğinde rastlanan düzenli ve tasarlanabilir ilişkilerdir. Bu yöntemi Romadaki Pantheon tapınağının çizimlerinde de görmek mümkündür (Berköz, 1968).

Analitik Oransal Yöntem: Tarihi yapılardan yola çıkarak, yapı bileşenlerinin boyutlarında oransal büyüklükler ele alınmıştır. Bu oransal büyüklükler de sistematik sayısal seriler ortaya koymuştur (Tuna, 1972).

Belli Bir Yapısal Eleman Modülü Temel Alınan Yöntem: Yapı elemanlarından birini temel alıp diğer yapı elemanlarını bu temel alınan boyutun katlarından seçerek oluşturan yöntemdir. Vitruvius örneğinde de bunu görmüştük, sütunu temel modül kabul edip diğer yapı elemanlarının boyutlarını bu temel modüle göre seçmiştir (Tuna, 1972).

Hem Bir Modüle Hem de Analitik Bir Seriyeye Dayalı Yöntem: Yapı elemanından alınarak elde edilmiş sayılar arasında Platon'un serisinde olduğu gibi, sistematik bir

seri ilişkisi varsa her iki durum birleştirilmiş olur (Berköz, 1968).

3.1.2.2 Ölçüsel Modüller

Yapı ve malzeme bileşenlerinin boyutları belli bir sayının katlarından seçilip sayı dizileri oluşturulur. Sayılar arasında oransal modül ilişkisi aranmaz (Berköz, 1968). Ölçüsel modüller 3 başlıkta incelenebilir; tarihi ölçüsel modüller, tasarım modülleri ve bemis metodu ve modüler koordinasyon.

Tarihi Ölçüsel Modüller: Tarihi yapıları temel alan bir yöntemdir. Tarihte uygulanan modüllerin günümüze uyarlanmasıdır (Berköz, 1968).

Dizayn Modülleri: 20.yy'dan itibaren kullanılan yöntemdir. Yapı bileşenleri arasında boyutsal modül kullanılarak bir sistem oluşturulmasıdır (Tuna, 1972).

Bemis Metodu ve Modüler Koordinasyon: Albert Farwell Bemis tarafından oluşturulmuş bir sistemdir. 10 cm veya 4 inçlik modül temel alınarak yapılmıştır (Tuna, 1972).

3.1.3 Modüler Koordinasyonun Gelişim Süreci

Çıkış noktası Bemis metodu olan modüler koordinasyon yöntemi 1950 yılında uluslararası toplantılar sonucunda geliştirilmiştir (Tuna, 1972). Bu konuda çeşitli çalışmalar ve geliştirilmeler Türkiye'de de yapılmıştır. Bu yöntemle modüller oluşturulduktan sonra şantiyede bir araya getirilmesi de kolaylaştırılmış ve malzeme kayıplarının önüne geçilmiştir.

M= 10 cm modülü temel modül olarak kabul edilir, yapı elemanlarının yatay ve düşey boyutları temel modülün katlarından seçilir. Üç boyutlu modüler ızgara üzerinde prefabrik üretilcek elemanların boyutları belirlenir bu şekilde yapı bileşenleri birbiri ile uyumlu olur (Şener, 1984).

Modüler koordinasyonda metrik ölçülere göre M katlarından seçildiği için

belirgindir ve uluslararası geçerliliği vardır. Modüler koordinasyondan önceki yaklaşımlarda, net bir sayı çıkmadığı için üretim açısından zor olmuştur. Ancak modüler koordinasyonda boyutlar M katlarından seçildiği için tam sayılarla üretim yapılmaktadır.

TS 2020'ye göre modüler koordinasyon şu esaslara dayanır:

- Modüllerin kullanılması (temel modül ve büyük modüller).
- Yapı elemanları ve bu elemanları oluşturan bileşenler için koordinasyon boşluklarını ve modüler bölgeleri belirten referans sisteminin kullanılması.
- Referans sistemlerinde yapı elemanlarının yerleştirilmesi için kurallar.
- Üretim boyutları değerlerinin belirlenmesi için yapı bileşenleri boyutlarının değerlendirilmesi kuralları.
- Yapı bileşenleri ve bina kontrol boyutları için tercih edilecek ölçülerin saptanmasında uygulanacak olan kurallar (TSE, 1975).

3.2 Parametrik Tasarım

Bölüm 3.1' de modüler koordinasyondan bahsettik. Modüler koordinasyon nedir, tarihteki gelişimi nasıl olmuştur ve yöntemleri nelerdir inceledik. Bu araştırmada modüler koordinasyon aracı olarak parametrik tasarımın kullanılması ele alınmıştır.

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile bilgisayarlar hayatın her alanında, her iş kolunda önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Mimari açıdan ele alırsak da hem tasarım alanında hem de üretim alanında önemli ölçüde etkisi olduğunu söyleyebiliriz.

Parametrik mimari, tanımlanmış parametrelere ve bu parametreler arası ilişkiye dayanarak bir geometri tanımlayan, doğrusal olmayan bir tasarım yöntemidir. Bu tasarım yönteminde tasarımcı, çalışmasının geometrisini sayısız varyasyon ve çözüme sahip olmasını sağlayacak şekilde ayarlayabileceği ve kontrol edebileceği bazı parametreler tanımlar.

Parametrik tasarım bir diğer adıyla hesaplamalı tasarım; temeli algoritmalara dayanan, mimari tasarımı bir bütün olarak ele alabilen bir tasarım yöntemidir. Parametrik tasarımın konusuna giriş yapmadan önce kavramlara bakalım. Parametrik tasarımı anlayabilmemiz için parametrenin ne olduğunu bilmeliyiz önce.

Parametre; en basit tanımıyla değiştirilebilen nicelik olarak tanımlayabiliriz.

Parametrik; içinde bir veya birden çok parametre barındıran durumdur.

Parametrik Tasarım; parametrelere bağlı tasarım yöntemidir.

Algoritma; belli bir problemi çözmek veya belirli bir amaca ulaşmak için tasarlanan yol. Matematikte ve bilgisayar biliminde bir işi yapmak için tanımlanan, bir başlangıç durumundan başladığında, açıkça belirlenmiş bir son durumunda sonlanan, sonlu işlemler kümesidir (Erdoğan ve Sorguç, 2011:274).

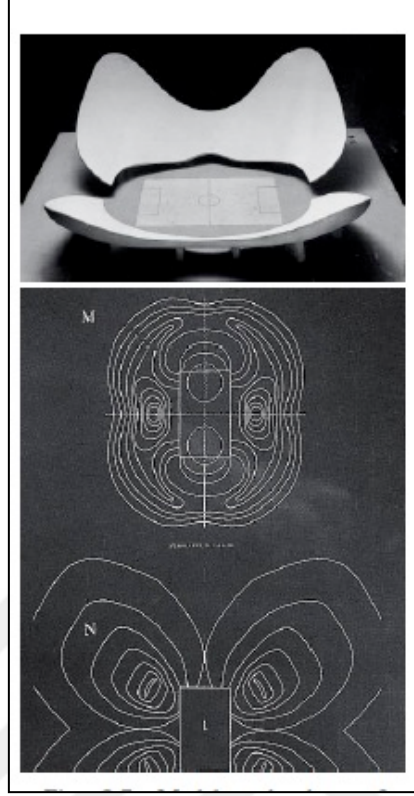
Mimarlık alanına algoritmik düşüncüyü uyarlamaya çalışan Terzidis “programlamayı mimarlığın eklentisi olarak görmektense mimarlığın programlamayla bir arada harmanlaması ve özümsemesi gerektiğini savunur” (Erdoğan ve Sorguç, 2011:274).

Parametrik tasarım aşamaları şu şekilde sıralanabilir; ilk olarak parametrelerin belirlenmesi, sonrasında bu parametreler arasındaki ilişkinin oluşturulması, tahmini geometrinin oluşturulması, sonrasında alternatiflerin üretilmesi ve son olarak da çıkan sonucun test edilmesi.

3.2.1 Parametrik Tasarımın Gelişimi ve Tarihçesi

Parametrik tasarım ilk olarak İtalyan mimar Luigi Moretti (1907-1973) tarafından 1939 yılında yazdığı ‘*Architettura Parametrica*’ kitabında tanımlanmıştır (Bucci ve Mulazzani, 2000). Moretti, farklı parametrelere dayalı ölçülerle çalışmıştır. 1960 yılında tasarladığı ‘12th Milan Triennial’ projesi parametrik tasarım önerilerinden

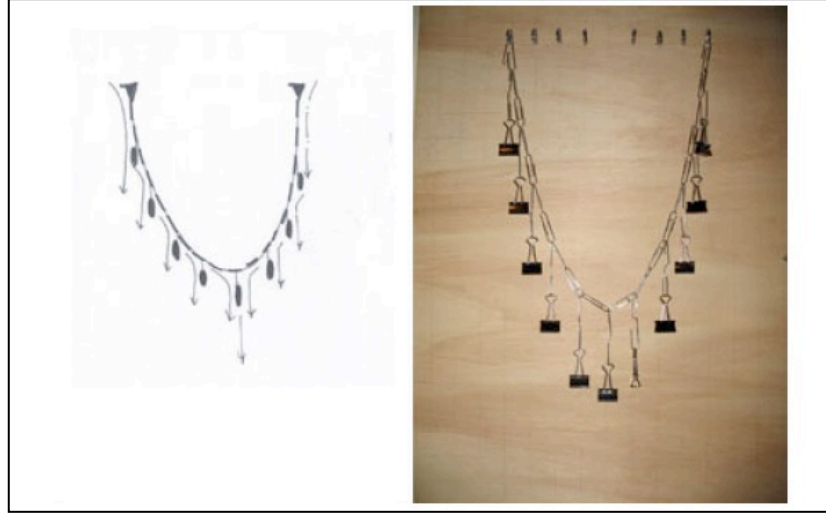
biridir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Moretti' nin parametrik olarak tasarladığı stadyum projesinin plan çizimleri (Sammer, 2019).

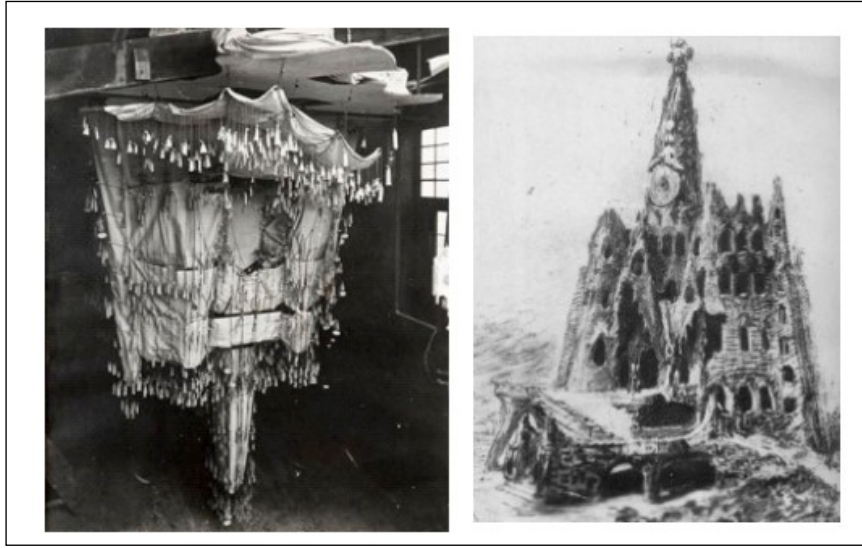
Parametrik tasarımın temelini bilgisayarların erişilebildiği zamanlara denk geldiğini düşünürsek yanlış oluruz. Geometriyi parametrik denklemlerle ifade etmeye yönelik ilk çalışmalar 1800'lü yılların başında Leon Battista Alberti tarafından yapılsa da parametrik tasarımın temelleri, 1800'lü yılların sonlarına Antonio Gaudi ye dayanır. Gaudi' nin Sagrada Familia Kilisesi bilinen ilk parametrik tasarım olarak kabul edilir (Nonell, Burry, 1992).

Gaudi, daha önce kullanmış olduğu zincir eğrisi kemeri çeşitlendirerek, Sagrada Familia Kilisesi gibi çoklu (kompleks) yapıların uygulanmasına olanak sağlamaya çalışmıştır (Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10) (Mutlu, 2009).

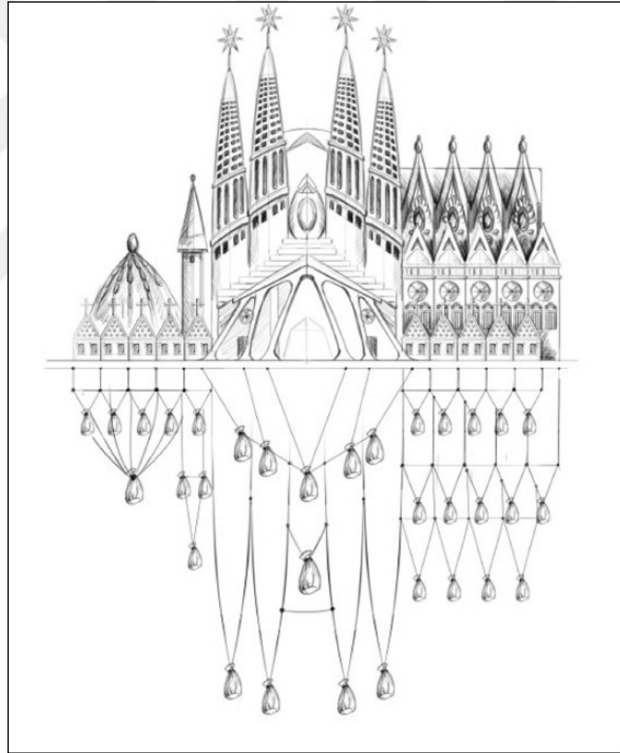


Şekil 3.8 Zincir eğrisi, Antoni Gaudi, 1882. El çizimi ve maket gösterimi (Mutlu, 2009)

Projenin tasarımı, asılı zincirlerden yapılmış ve aynı zamanda ilk parametrik model olarak adlandırılan bir makete dayanmaktadır. Zincirlerin uçlarına çeşitli ağırlıklar asarak hesaplamalar otomatik olarak yapılabilmekte ve böylece manuel olarak hesaplamalara gerek kalmadan çatı geometrisi değiştirilebilmektedir. Bu yöntem daha sonra Frei Otto tarafından, 1961 yılında Münih Olimpiyatlarında form bulma yöntemi olarak kullanılmıştır. Gaudi, planladığı biçimi yapabilmek için hiperboloid, paraboloid, helikoid, elipsoid gibi geometrik şekillere başvurmuştur. Bunun yanı sıra, Gaudi kilisenin bütün yapı elemanlarına uyacak bir ölçü sistemi geliştirmiştir (Hernandez, 2006).



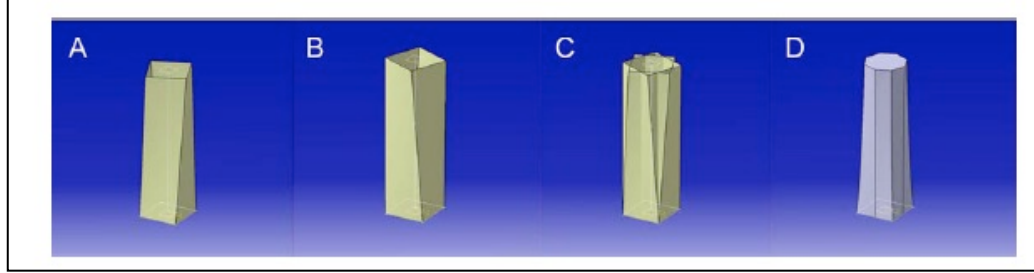
Şekil 3.9 Sagrada Familia modeli ve görselleştirilmiş hali (Maher and Burry, 2003)



Şekil 3.10 Sagrada Familia Kilisesi'nin eskiz çizimi (Journal of Sketchle, tarih yok)

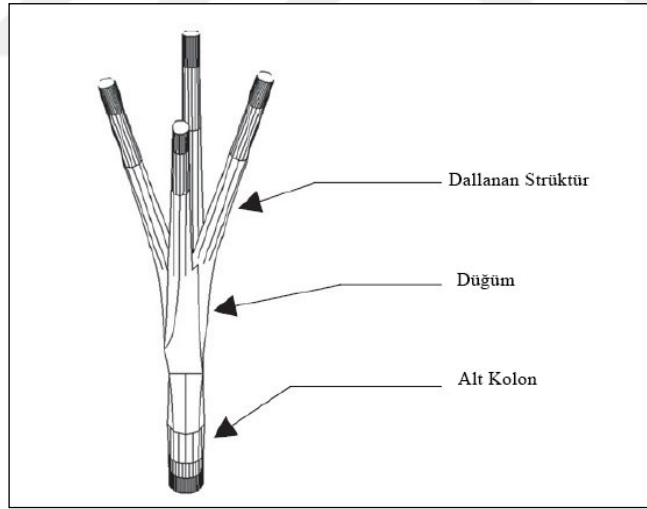
Gaudinin ömrü kiliseyi tamamlamaya yetmediği için, ondan sonrasında kiliseyi tamamlama çalışan mimarlardan Burry, parametrik tasarım yöntemlerine başvurmuştur. Burry, kilisenin üç kemerli kolonlarını parametrik tasarım ile modellemiş, parametreleri değiştirerek benzer formları elde etmiş ve bu yöntemi tasarımı geliştiren kullanmıştır (Akipek ve İnceoğlu, 2007).

Sagrada Familia' nın kolonlarını tasarlarken Gaudi rotasyon yöntemine başvurmuştur. Döndürülmüş sütunun tek başına zayıf durduğunu düşündüğü için, zıt yönlerde döndürülmüş iki sütunun birleşimini tek sütun olarak kullanmıştır (Şekil 3.11) ve bu yöntemi kilisedeki tüm sütunları tasarlarken kullanmıştır.



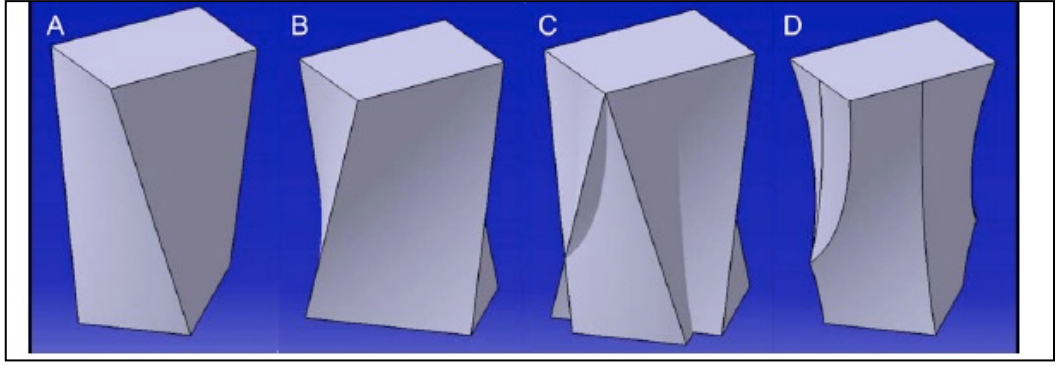
Şekil 3.11 Sagrada Familia'nın sütunlarının oluşma biçimi (Hernandez, 2006)

Kolonlardan dallara geçiş bölümlerinde düğüm olarak adlandırılan özel bileşenler vardır. Bu düğüm, altı köşeli kolon için kolon başı gördüğü gibi dallanan strüktür için de temel görevi görmektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Sagrada Familia'nın kolonlarının diyagramı (Hernandez, 2006)

Dikdörtgen düğümler, 45 derece döndürülmüş ve birbirlerine 90 derece yöneltilmiş iki dikdörtgen şeklin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu şekilde burmalı iki farklı biçim oluşturulmuştur.



Şekil 3.13 Sagrada Familia'nın kolonlarının oluşum diyagramı (Hernandez, 2006)

Antoni Gaudí, parametrik zincir eğrileri ve parametrik hiperbolik parabolitlerle mimari tasarlama başlandı. Parametrik denklemlerin kullanımı, Gaudí' nin mimarisinin birçok yönünde görülebilir, özellikle asılı zincir eğrisi modelini kullanması bunu en iyi şekilde göstermektedir. Gaudí' nin zincir eğrisi kullanmasının nedeni, iki nokta arasında birbirine bağlı bir zincirde, kendi ağırlığının sürekli yüküne göre sistemin minimum enerji durumu oluşur. Gaudí' nin çalışmaları, o dönemden günümüze kadar pek çok tasarımcıya ilham olmuş ve hesaplamalı tasarım yöntemlerinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Zincir eğrisi, X ekseninde döndürüldüğünde katenoidi veya minimum yüzeyi veren matematiksel bir eğridir (Burry & Burry,2010).

Tarihte bir diğer parametrik tasarım örneği de Danimarkalı mimar Jorn Utzon tarafından 1973 yılında tasarlanan Sidney Opera Binası' dır. Bina'nın tasarımı 1956 yılına dayanmaktadır. Yapının uygulamasına, tasarımı tamamlanmadan başladığı için, yapının belirli bölümlerinde strüktürel problemler ortaya çıkmıştır. Bu problemleri çözmek için, podyum olarak adlandırılan ilk bölümü bittikten sonra strüktüründe değişikliğe gidilmiştir. 1957-1963 yılları arasında, yapının mimarı John Utzon ve yapının inşaat mühendislik işlerini üstlenen Arup firması birlikte çalışarak, yapının küresel şeklini strüktürel olarak mümkün kılan bir kabuk sistemi geliştirmişlerdir. Tam 12 kez denedikten sonra, bir kürenin kesitlerinden oluşan nervürlü prekast beton kabuk sistemi oluşturulmuştur (Arkitektuel, 2006). Utzon, bu kabuklu yapının yelkenli gibi görünmesini amaçlamıştır (Şekil 3.14) Bu görüntüyü oluşturmak için bina'nın çatısı İsveç' ten getirilmiş 1,056,000 adet beyaz seramik fayans ile kaplanmıştır. Çatı inşası 11 yıl sürmüştür (Şekil 3.15).



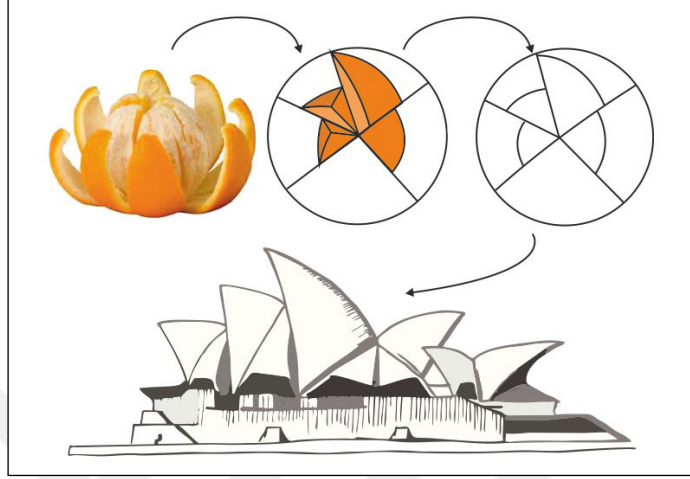
Şekil 3.14 Sidney Opera Binası cephe görünüşü (Sdney Opera Binası)



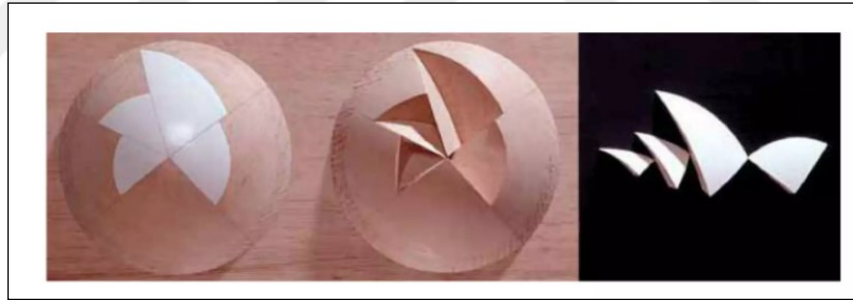
Şekil 3.15 Sidney Opera Binası çatı malzemesi görünüşü (Sdney Opera Binası)

Yapı yaklaşık olarak 65 metre yüksekliğinde ve 120 metre genişliğindedir. Böyle geniş açıklıklı yapıya yapı kabuğu oluşturmak oldukça zorlayıcı olmuştur. Yarışma projesiyle seçilen tasarımın uygulaması planlanandan çok daha zorlu ve uzun sürede tamamlanmıştır. Tasarımda birbirine kenetlenen tonozlu kabuklar vardı ve kabukların her biri, 350 km' lik gerilmiş çelik kabloyla bir arada tutulan, bir mahya kirişine yükselen prefabrik beton nervür parçalarından yapılmıştır. Başlangıçta yelken görünümü, paraboller olarak tasarlandı ancak uygulamada mühendislik çözümü bulunamayınca başka bir çözüm arayışına gidilmiştir. Uzun denemeler sonucu çözüm olarak, küre kabukları kullanıldı (Sydney Opera House, tarih yok). Her bir kabuğun yarısı bir küre parçası olarak tasarlandı. Çatı karolamasında kullanılan seramikler iki çeşittir ve bu iki çeşit seramikle, 2. Bölümde incelediğimiz karolama yöntemleri

kullanılarak düzlem karolaması yapılmıştır. Kabukların yapımında bilgisayarlı analiz sistemleri kullanıldı. Kabuk yapımında kullanılan tüm parçalar prefabrik olarak üretildiği için, yerinde kalıp yapılmasına gerek kalmamıştır (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17).



Şekil 3.16 Sidney Opera Binası yapı kabuğu formunun ortaya çıkış diyagramı (Sdney Opera Binası, tarih yok)



Şekil 3.17 Sidney Opera Binası küre kabukları gösterimi (Sdney Opera Binası, tarih yok)

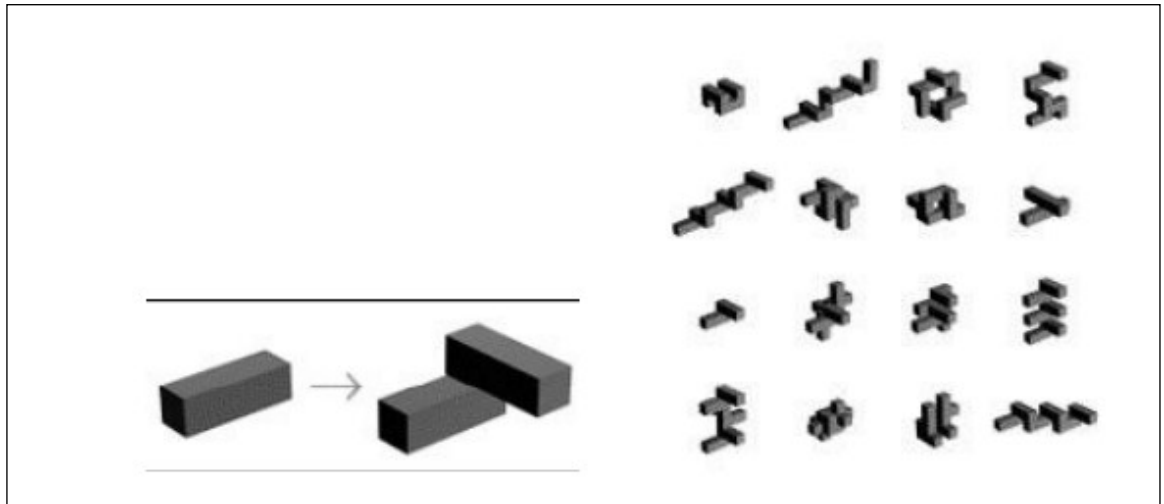
Aşağı yukarı aynı zamanlarda, tasarım sürecinde bilgisayarı kullanmaya yönelik ilk girişimler yapıldı. 1963 yılında sketchpad yazılımı geliştirildi (The Architect's Newspaper, 2010). 1960' lar ve 1970' ler boyunca, çeşitli mimarlar, matematikçiler, bilgisayar bilimciler ve fizikçiler, parametrik tasarımın da gelişmesine yarayacak bilgisayar alanında büyük ilerleme kaydetti. Postmodernizm ve dekonstrüktivizm, tasarımcıları yeni bir araştırma ve yenilik çağına götüren geçiş hareketleriydi.

William J. Mitchell, teknolojinin ve bilgisayarların şehir yaşamına entegrasyonuna yönelik geniş kapsamlı araştırmaları ile çığır açtı. Mitchell, MIT'de 1992-2003 yılları

arasında mimarlık bölümünün dekanlığını yapmıştır. Hesaplamalı tasarımda öncü olan Mitchell aynı zamanda akıllı şehirler ve elektrikli şehir arabası prototipinin gelişmesinde de önce olmuştur (The Architect's Newspaper, 2010).

John Von Neumann, modern bilgisayarın babası olarak anılmaktadır. Macar-Amerikalı matematikçi ve bilgisayar bilimcidir. 1945'te, bir bilgisayarın basit, sabit bir yapıya sahip olabileceğini, ancak uygun şekilde programlanmış kontrol verildiğinde herhangi bir hesaplamayı donanım değişikliğine gerek kalmadan gerçekleştirebileceğini gösteren bir hesaplama çalışması yaptı. Neumann aynı zamanda bilgisayar alanında devrim sayılan hücresel otomat'ın da mucididir (Çağlar, Matematiksel, 2017)

George Stiny, 1972 yılında şekil gramerleri adını verdiği, geometrik şekiller üreten belirli bir üretim sistemi sınıfını keşfetmiştir. Tipik olarak şekiller iki veya üç boyutludur. Bu sistem, tasarımcıya tasarım sürecisini ve tasarım kurallarını metin yerine şekillerle gösterme yeteneği verir. Şekil grameri, tasarımlar oluşturmak için ilk şekle uygulanan bir dizi kuraldır. Kurallar, ilk şekilleri dönüştürmek için tasarlanmıştır ve böylece tasarımcı istenen sonuca ulaşmak için hangi kuralın kullanılabileceğine karar verebilmiştir (Şekil 3.18) (Prakash, Shekhawat, ve Goyal, 2017).



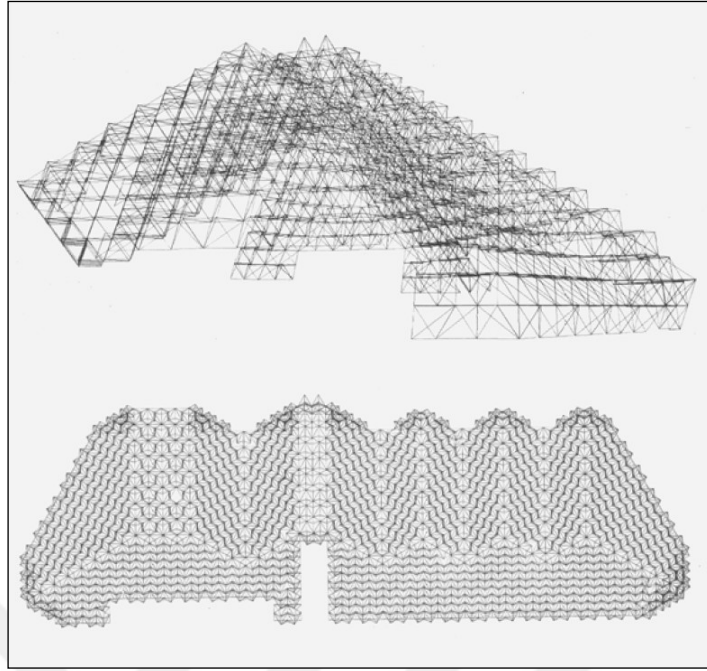
Şekil 3.18 Geometrik şekillerin döndürülmesi ile oluşturulan şekiller (Prakash, Shekhawat, ve Goyal, 2017)

Bilgisayar Destekli Tasarımı ile William J. Mitchel; Hücresel otomata sahip John Von Neumann father of şekil gramerleri ile George Stiny; Bézier eğrilerinin gelişimi, filozof Jacques Derrida' nın fikirleri, bugün parametrik tasarım dediğimiz şeyin temellerini oluşturan eserlerden birkaçıdır.

1980' lerde autocad' in piyasaya sürülmesiyle birlikte hesaplamalı tasarım mimariyi etkilemeye başladı. Catia programının da gelişimi dekonstrüktivist mimarların da işini kolaylaştırdı. Patrick Schumacher' göre, kapitalizmin kitlesel tüketim taleplerinin yönlendirdiği endüstriyel toplumdan kaynaklanan özgünlük ihtiyacı, mimarları ve tasarımcıları yeni bir stil arayışına yöneltti (Schumacher, 2008). Parametrik tasarım, mimar ve mühendislerin karmaşık geometriler üretme isteklerine yanıt verdi. Dijital imalat makineleri, yapı elemanlarını doğrudan dijital tasarımlardan oluşturulmasına imkân sağladı. Dijital fabrikasyonun en yaygın biçimleri cnc makinesi, 3D yazıcılar ve lazer kesim makineleridir.

John Frazer, hesaplamalı tasarım alanındaki öncülerden biridir. 1970'li yıllarda dünyanın ilk mikrobilgisayar tabanlı tasarım sistemlerini geliştirdi ve somut ara yüzler icat etti. Frazer, 1995 yılında 'Evrimsel Bir Mimari' adını verdiği kitabını yazmıştır. Kitabında, parametrik mimarlığın tarihini inceliyor ve parametrisizm 2,0 olarak yeniden tanımlanan parametriklik (parametrisizm) tanımını inceliyor.

Parametriklik, çağdaş öncü mimaride Modern ve Postmodern mimarinin halefi olarak tanıtılan bir stildir. Terim, 2008 yılında Zaha Hadid'in mimari ortağı Patrik Schumacher tarafından yapıldı. Parametrikliğin kökeni, parametrik bir denklemdeki kısıtlamalara dayanan parametrik tasarımdadır (Schumacher, 2008). Parametrikizm, Modernizm' den sonraki büyük yeni stildir.



Şekil 3.19 Frazer'in parametrik tasarım diyagramları (Schumacher, 2008)

Şekil 3.19'da üstteki şekil, Frazer'in minimal bir yapısal birim çekirdeğinden karmaşık muhafaza yapıları parametrik olarak geliştirmek için kullandığı konsept çizim tekniği. Altındaki şekil, 1969'da Cambridge Üniversitesi Matematik Laboratuvarı'nda ekrandaki parametrik tasarım programı. Parametrik olarak kontrol edilen bir çizim, Frazer'in kurallarına uygun olarak ilk kez ekran üzerinde etkileşimli olarak geliştiriliyor.

Yazılımdaki parametrik fonksiyonlar, değişken geometrilere izin verir, ancak kendi başlarına formun oluşturulmasını sağlamaz. Bir morfogenetik üretken sistem oluşturmak için, parametriklerle düşünülenin aksine ilgisi olmayan, parametrik grafik sistemi içine kodlanmış olan başka öğeler gereklidir. Bunlar; üretken bir motor (generative engine), seçilmiş bir prosedür, öğrenme algoritması ve başlangıçtan geliştirmeye, optimizasyona ve çözümleme kadar eksiksiz bir tasarım sistemidir (Frazer, 2016).

Yakın tarihten, parametrik tasarım ile yapılmış Calatrava' nın modüler üretilmiş bir örneğini inceleyelim.

Mediopadana tren istasyonu, Santiago Calatrava' nın 2002-2014 yılları arasında tamamlanan, İtalya Reggio Emilia kentinde bulunan bir yapıdır. İstasyon, 15.000 metre karelik bir alanı kapsamaktadır ve yıllık 4 milyon yolcu tarafından kullanılmaktadır (Santiago Calatrava Architects and Engineers, 2010). Çelik modüllerden oluşan yapı kabuğu üç boyutlu bir sinüs eğrisi efekti yaratmaktadır. Modüller yaklaşık 1 metre aralıklarla yerleştirilerek toplam 483 metre uzunluğundaki örtü strüktürü oluşturuyor. Birbirinden bağımsız görünümü, değişen en ve yükseklikleriyle modüller istasyonun dalga şeklinde kurgusunu sağlamış. Beyaza boyanmış çelik elemanlar ve camla oluşturulan kanopi, 19 modülle oluşturulmuş. Her biri 25,4 metre uzunluğundaki modüllerin genişlikleri ve yükseklikleri farklılık gösteriyor. Modüller, 35 metreden 50 metreye kadar değişen enlere karşılık ortalama 20 metrelik yüksekliğe kadar çıkıyor. İstasyon parametrik tasarım programlarından grasshopper eklentisi ile modellenmiştir (Şekil 3.20).

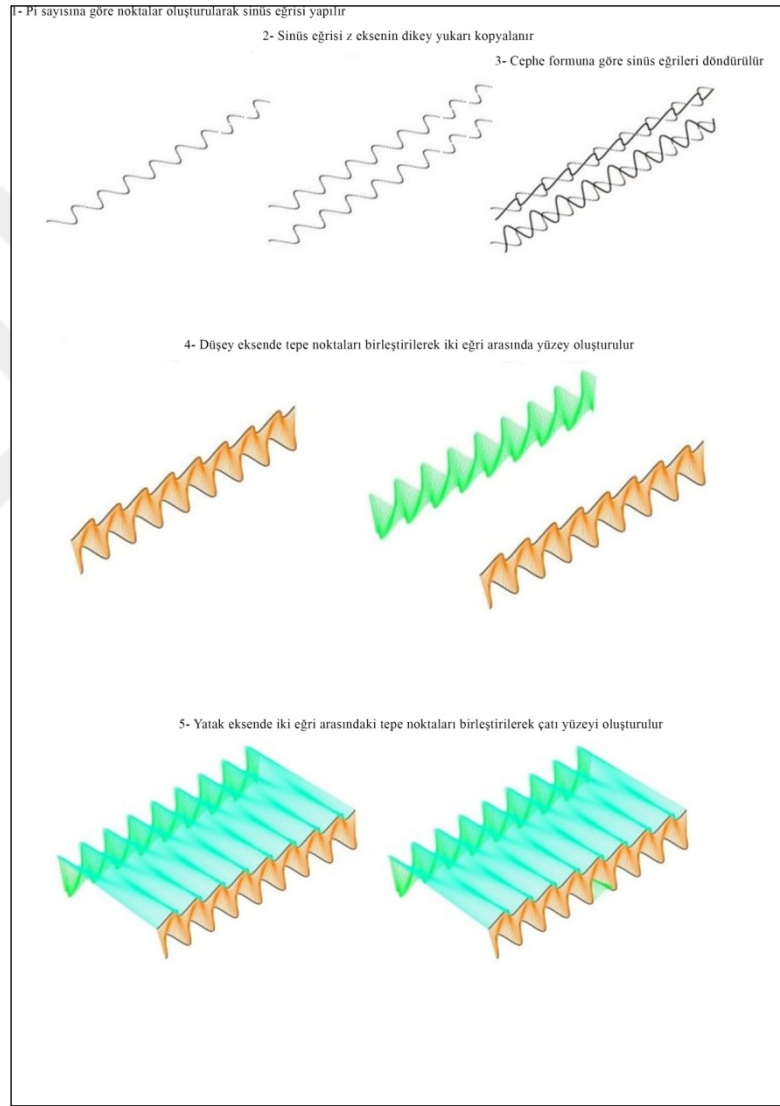


Şekil 3.20 Mediapadana Tren İstasyonu cephe görünüşü (Reggio Emilia Stazione Mediapadana, tarih yok)

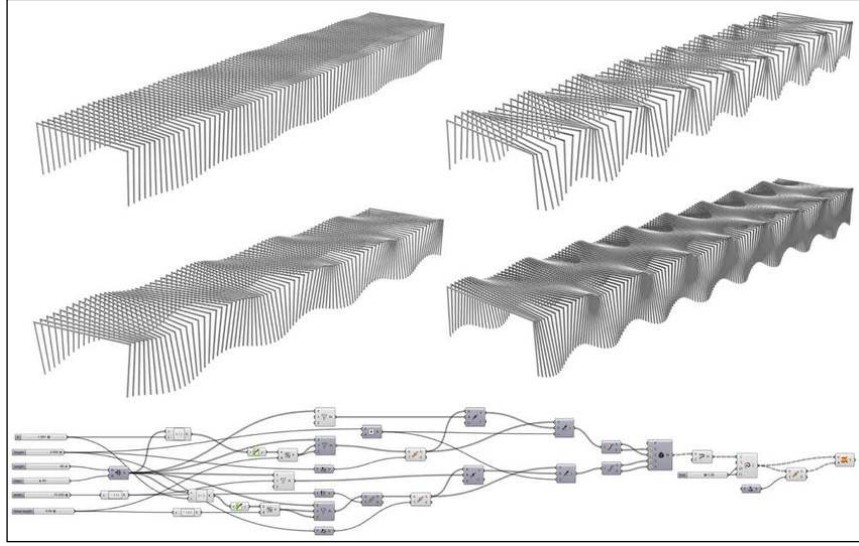
Sinüs Dalgası: (Şekil 3.21) Nokta sayımı, genlik, uzunluk, z ekseninde çoğaltma, x eksenini etrafında frekans ve dönüş açısı. İki sinüs eğrisi oluşturuyoruz ve ilişkili noktaları çizgilerle birleştirerek regle bir yüzey elde ediyoruz. Bu çizgiler cephe kolonlarımız haline gelir ve kalınlık verilir. Bir giriş noktası oluşturmak için, bir dalga boyu arasındaki noktaları çıkartabiliriz. Bunu eğrinin ortasındaki dalga boyunu

seçerek yapıyoruz. Noktaları elde ettikten sonra, onları dengeleyebilir ve iki nokta listesini çizgilerle birleştirebiliriz (Elseth, 2016).

Arka cephe aslında ön cephenin bir aynasıdır. Üstteki iki sinüs eğrisini çizgilerle birleştiririz ve bununla anında değişen bir desenle dalgalanan bir çatı oluştururuz (Elseth, 2016).



Şekil 3.21 Mediopadana Tren İstasyonu cephe kabuğu formunun oluşum diyagramı (Reggio Emilia Stazione Mediopadana)



Şekil 3.22 Mediapadana Tren İstasyonu cephe kabuğu formunun grasshopper ile oluşum şeması (Reggio Emilia Stazione Mediapadana)

Son olarak da yakın zamanda Türkiye’de yapılan Eskişehir’deki Odunpazarı Modern Sanat Müzesi’ni inceleyelim. Kengo Kuma tarafından 2019 yılında yapılan müze, 1950’lerden günümüze uzanan uluslararası düzeyde önemli bir modern ve çağdaş sanat koleksiyonuna ev sahipliği yapmaktadır. Müze, iş adamı ve sanat koleksiyoncusu Erol Tabanca tarafından kurulmuştur (Hassanzadeh, 2019). Farklı yönlere yönlendirilmiş istiflenmiş kutular kümesinden oluşan proje, çeşitli ölçeklerde sergi salonlarının yanı sıra yapı içinde ve çevresinde ziyaretçiler için daha fazla kamusal alan barındırıyor. Hacimler, müzenin tüm katlarını birbirine bağlayan merkezi bir avlu oluşturmak için dört kutunun birleştiği müzenin merkezine doğru yükseliyor. Çıtalı ahşap avlu, ışığın alt kattaki galerilere sızmasına izin veren geniş bir ıdıklık içerir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 Eskişehir Odunpazarı Modern Sanat Müzesi cephe görünüşü (Hassanzadeh, 2019)

3.2.2 Geleneksel ve Parametrik Tasarımın Araçları

Hesaplamaalı tasarım araçları, tasarımcılar için önemli rol oynamaktadır ve bu tasarım araçları, sürekli gelişim ve değişim içindedirler. Bu değişim 1963'te bilgisayar destekli iki boyutlu ilk modelleme aracı olan Sketchpad' i bulan Ivan Sutherland tarafından başlatılmıştır (Davis, 2013).

Somut olarak elde edilmesi istenen tasarımların, bilgisayar destekli yazılımlar kullanarak tasarlanmasına modelleme denir. Nurbs (doğal) ve polygon (çokgen) modellemeler en çok kullanılan yöntemlerdir. Tasarım araçlarını iki başlıkta inceleyebiliriz; geleneksel tasarım araçları ve parametrik tasarım araçları olarak (Tablo 3.1 ve Tablo 3.2).

Tablo 3.1: Hesaplama tasarımlarının sınıflandırılması

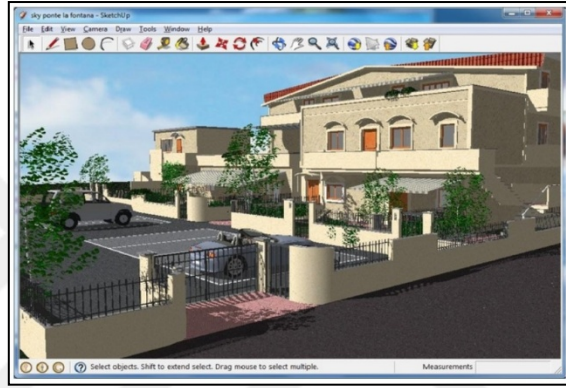
Hesaplama Tasarım Araçları					
Geleneksel Tasarım Araçları			Parametrik Tasarım Araçları		
		CAD	BIM	Yazılı Parametrik Tasarım Araçları	Görsel Parametrik Tasarım Araçları
- Sketchup	- Sap2000	- Autocad - Solidworks - Catia - Rhinoceros - Microstation	- Revit - Archicad - Vektorworks	- Rhinoscript - Generative Components - Mayascript	- Grasshopper - Dynamo

3.2.2.1 Geleneksel Tasarım Araçları

Geleneksel tasarım araçları, genellikle ‘tasarla ve değiştir’ sistemiyle çalışır ve tasarımcının serbest biçimli formları basit geometrilerin oluşturduğu bir sonuç ortaya çıkarmasını sağlar (Kaçmaz, 2017). Genel olarak CAD ve BIM programları ile gerçekleştirilen modellemelerdir. CAD ve BIM nedir peki? CAD, bilgisayar destekli tasarım demektir. Hatta CADD dersek de bilgisayar destekli tasarım ve çizim anlamına gelir. BIM ise yapı bilgi modellemesi olarak kullanılmaktadır. Tasarımdan inşaata ve işletmeye kadar bir proje hakkında koordineli bilgiler üzerin inşa edilmiş bir iş akışıdır. CAD ve BIM tasarım programları değil birer metodolojidir. Revit gibi çizim programları teknik olarak CAD programları iken CAD terimi daha çok taslak anlamında kullanılır. İki tasarım yöntemini şu şekilde açıklayabiliriz; CAD programlarından biriyle çizilmiş olan bir duvara tıkladığımızda sadece çizgiden oluştuğunu görürüz, özellikler paneline tıkladığımızda kullanılan tek parametre çizgi stilidir. BIM programlarından biriyle çizilmiş bir duvara tıkladığımızda ise bunun gerçek bir duvar elemanı olduğunu görürüz. Özellikler paneline tıkladığımızda duvarı tanımlamak için kullanılan birden fazla parametreyi görürüz. BIM yaklaşımı, gerçek dünya bileşenlerini temsil etmek için gerçek öğeleri kullanılır. Bunlar sadece 3B öğeler değil onlara programlanmış parametrelerdir. CAD ile çizimler oluşturmaya odaklanırsınız BIM ile modellemeye. BIM metodolojisi iş birliği ve sürdürülebilirliğe odaklanmaktadır. BIM, CAD modelleri dahil tüm tasarımları tek bir veritabanına getirmeye olanak sağlar, aynı zamanda bulut sistemini kullanarak tüm proje üyelerine bu veri tabanına erişim sağlar. Aynı zamanda tüm proje yetkileri aynı model üzerinde eşzamanlı olarak çalışabilir. Bu sayede inşaat başlamadan proje sorunlarını tespit edebilirler.

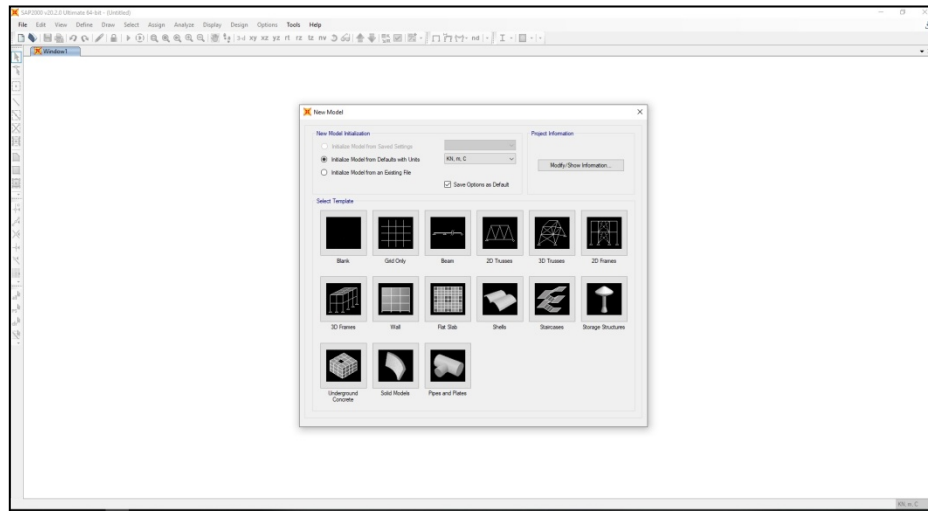
CAD programlarına örnek olarak; AutoCad, Solidworks, Catia ve Rhinoceros verilebilir. BIM (yapı bilgi modelleme) programları ise, CAD programlarına göre daha kapsamlı programlardır; malzeme belirleme, süre, maliyet gibi tasarımın ve uygulamanın tüm aşamalarının incelendiği programlardır. CAD ve BIM tabanlı modelleme araçları dışında da geleneksel modelleme araçları vardır bunlara örnek olarak da Sketchup ve SAP2000’ i gösterebiliriz.

Sketchup; üç boyutlu modelleme programıdır. Başlangıçta Last Software tarafından geliştirilmiş ancak sonrasında Google tarafından satın alınmıştır. 6 yıl sonrasında da Trimble firmasına satılmıştır (CADSA, 2021). Ara yüz olarak diğer tasarım programlarına göre basit olduğu için mimarlık ve mühendislik alanları dışında da birçok kullanım olanağı sağlar. Autocad programı gibi diğer tasarım programlarına uyumlu çalışır. Kendi içinde geniş malzeme ve model kütüphanesine sahiptir. Gelişen versiyonlarıyla birlikte hem modelleme hem de render özelliği aynı anda kullanılabilir. Çizim yapmayı kolaylaştıran eklentileri vardır (Şekil 3.24).



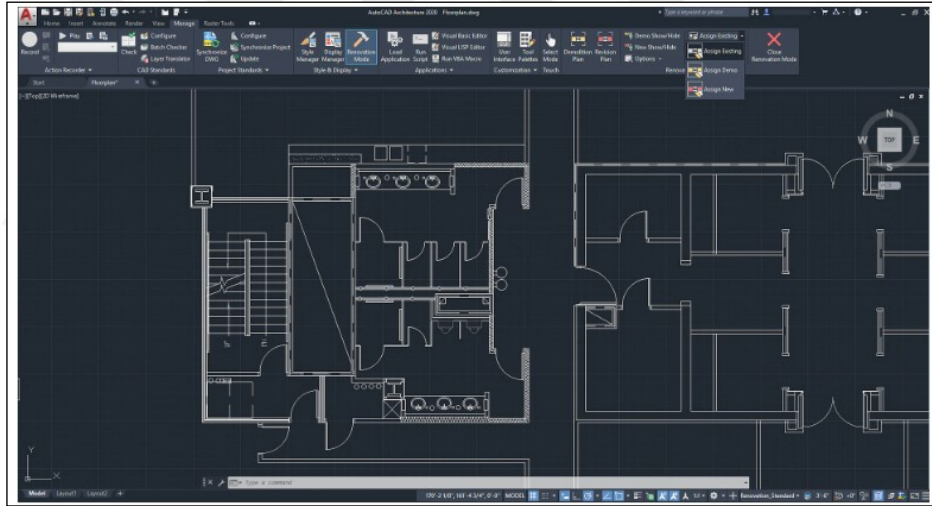
Şekil 3.24 Geleneksel modelleme araçlarından sketchup programının arayüzü (CADSA, 2021)

SAP2000; Computers & Structures Inc. Firması tarafından geliştirilmiştir. Genellikle inşaat mühendisleri tarafından kullanılır. Yapı strüktürlerinin tasarım ve analizi için kullanılmaktadır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Geleneksel modelleme araçlarından SAP2000 programının arayüzü (CADSA, 2021)

Autocad; 1980 yılında Amerika merkezli Autodesk firması tarafından geliştirilmiştir (Şekil 3.27). Günümüzde de yaygın olarak kullanılan bilgisayar destekli (CAD) tasarım programıdır. İlk vektör tabanlı çizim programıdır ve çizimler çözünürlükten bağımsızdır. İki boyutlu ve üç boyutlu çizimler rahatlıkla yapılabilir. Teknik resim formatlarının başında gelen DWG, AutoCAD programının resmi dosya uzantısıdır. Kullanıcılar, AutoCAD programını kullanarak çalışma alanlarına bağlı olarak bir binanın planını yapabilir, üretimi yapılacak bir makine parçasını çizebilir, dekorasyonu yapılacak bir odanın modelini bilgisayar ortamında tasarlayabilir (CADSA, 2021). AutoCAD programı, darbe ve yüke maruz kalacak tasarımların analiz ve simülasyonunun yapılmasına da olanak verir. Kullanıcılar, AutoCAD programını kullanarak sonlu elemanlar analizi ve benzeri metotlar ile hazırladıkları tasarımın mukavemet analizlerini yapabilirler (Şekil 3.26).

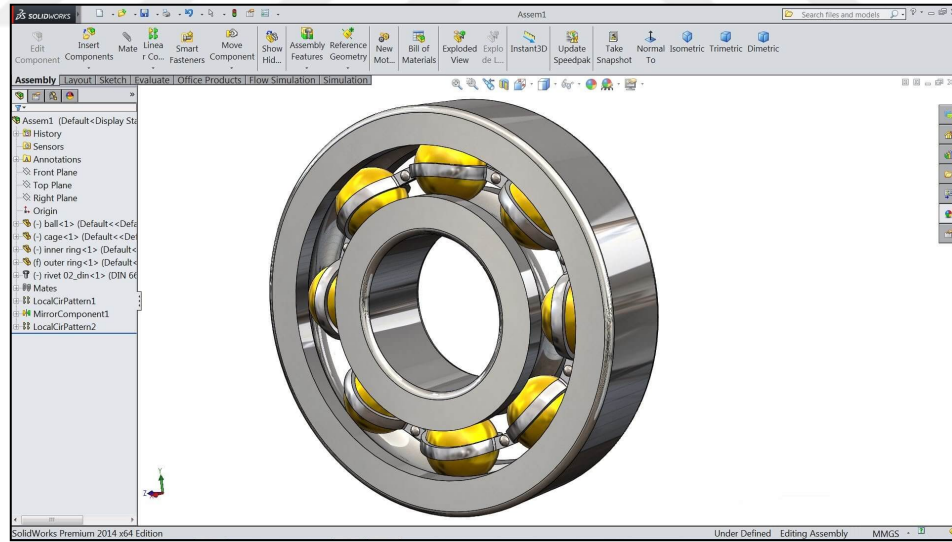


Şekil 3.26 Geleneksel modelleme araçlarından AutoCad programının arayüzü (CADSA, 2021)



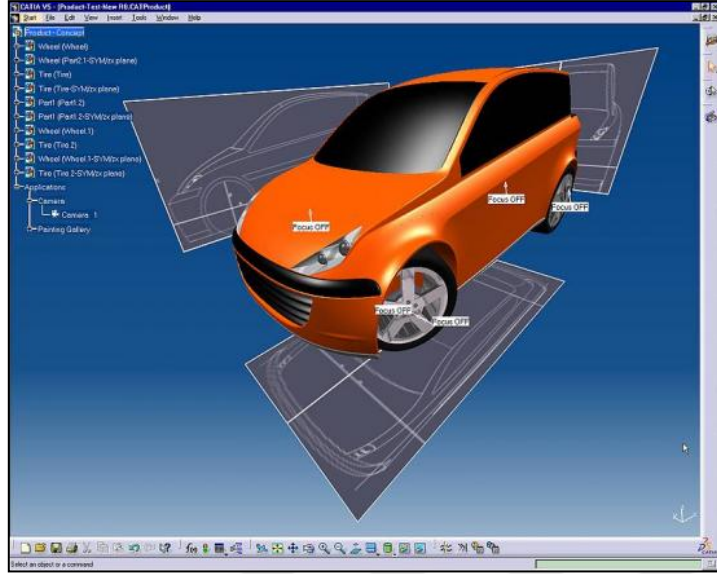
Şekil 3.27 1982 yılında, AutoCad programının ilk versiyonu (Sammer, 2019)

Solidworks; Jon Hirschtick tarafından 1995 yılında piyasaya sunulmuştur. 1997 yılında Dassault Systemes tarafından satın alınmış olan Cad tabanlı tasarım programıdır. Çoğunlukla mühendislerin parça tasarlamak için kullandığı 3 boyutlu tasarım aracıdır (Şekil 3.28).



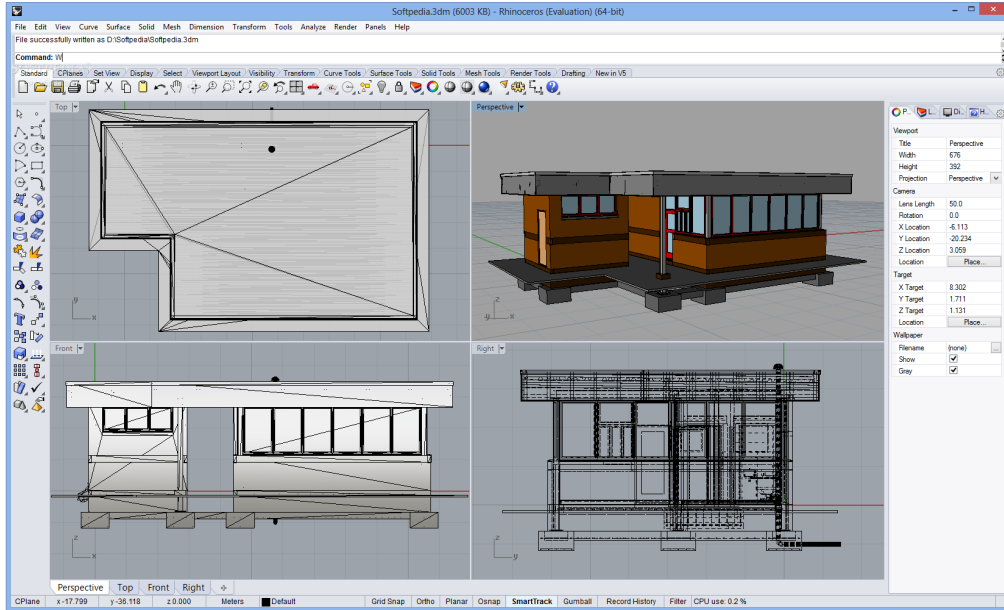
Şekil 3.28 Geleneksel modelleme araçlarından Solidworks programının arayüzü (Yakar, 2022)

Catia; 1981 yılında Dassault Systemes tarafından geliştirilen mekanik tasarım yazılımıdır. Her sektörde kullanılabilir ancak en yaygın olarak otomotiv sektöründe kullanılmaktadır (Şekil 3.29).



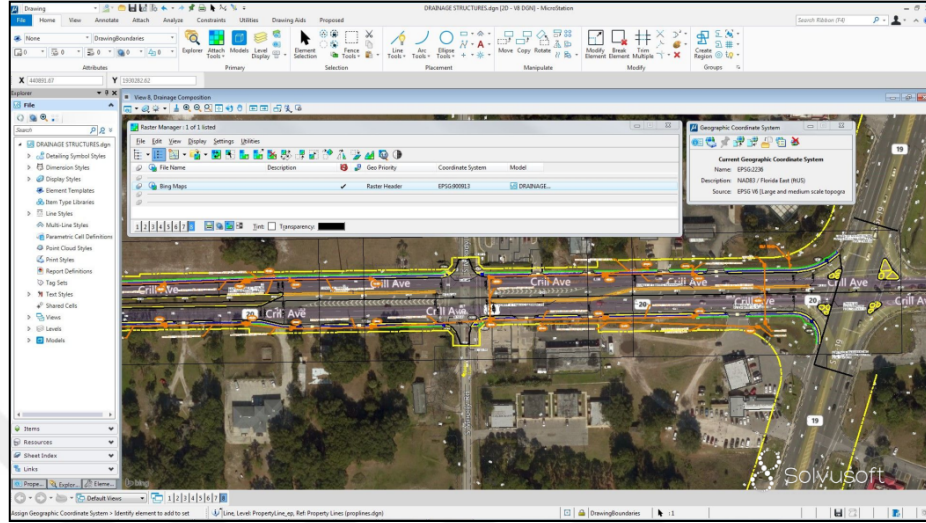
Şekil 3.29 Geleneksel modelleme araçlarından Catia programının arayüzü (Kalkan, 2020)

Rhino; Robert McNeel tarafından geliştirilen nurbs tabanlı modelleme programıdır. Başlangıçta AutoCad programı olarak eklenti olarak düşünülmüştür ancak sonra bundan vazgeçilip bağımsız yazılım olarak piyasaya sürülmüştür. Nurbs tabanlı olduğu için özellikle sanayi alanında çok kullanılmaktadır. Çok yüksek hassasiyete sahiptir. Visual Basic tabanlı rhinoscript isminde bir kodlama programı vardır. Ara yüzü sayesinde aynı anda 4 bakış açısıyla çizim yapılabilir (Şekil 3.30).



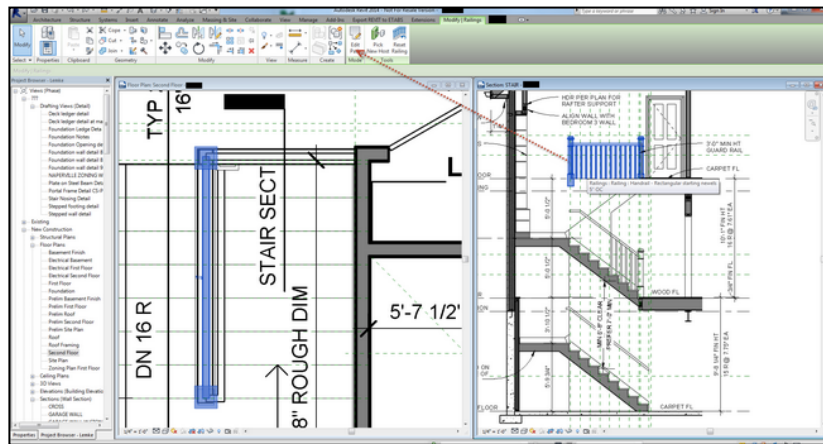
Şekil 3.30 Geleneksel modelleme araçlarından Rhino programının arayüzü (CADSA, 2021)

Microstation; 1980 yılında Bentley Systems tarafından geliştirilmiştir. Mimarlık ve mühendislik alanlarında kullanılan CAD tabanlı modelleme programıdır. Visual Basic programlama diliyle yazılmıştır (Şekil 3.31).



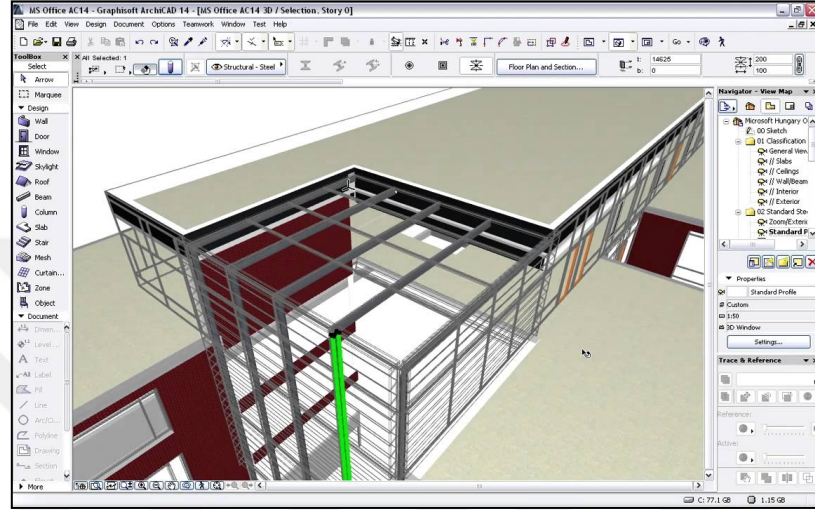
Şekil 3.31 Geleneksel modelleme araçlarından Microstation programının arayüzü (CADSA, 2021)

Revit; AutoCad programının da geliştiricisi olan Autodesk firması tarafından geliştirilen modelleme programıdır. BIM tabanlı olan program 1999 yılında geliştirilmiştir. Revit programı, inşaat mühendisleri, mimarlar, tasarımcılar, elektrik, mekanik ve sıhhi tesisatçılar için kullanıma uygundur. Bu program ile yapı bilgi sistemi sayesinde proje ile ilgili tüm veriler otomatik olarak alınabilir. Tasarım ve tasarıma bağlı bilgiler aynı veritabanından kontrol edilmektedir (Şekil 3.32).



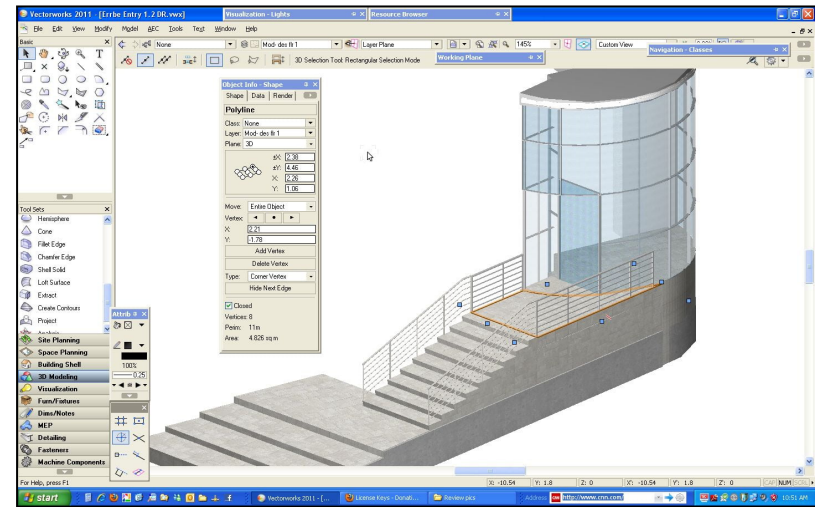
Şekil 3.32 Geleneksel modelleme araçlarından BIM tabanlı Revit programının arayüzü (CADSA, 2021)

Archicad; 1984 yılında Graphisoft tarafından geliştirilmiştir. BIM tabanlı program hem Microsoft Windows hem de Apple Macintosh işletim sistemleri için geliştirilen ilk mimari tasarım programıdır. Archicad' in IFC tabanlı açık tasarım iş akışı projenin tasarım ve uygulama aşamalarında mimarlar ve mühendislerin sorunsuz iş birliği yapmasını sağlar (Şekil 3.33).



Şekil 3.33 Geleneksel modelleme araçlarından Archicad programının arayüzü (Archicad, tarih yok)

Vektorworks; Nemetschek North America tarafından 1985 yılında geliştirilmeye başlanan BIM tabanlı bir programdır. Mimarların ve mühendislerin ortak kullandığı bir modelleme programıdır. El çizimi tarzı çizimler yapma imkânı sunar (Şekil 3.34).



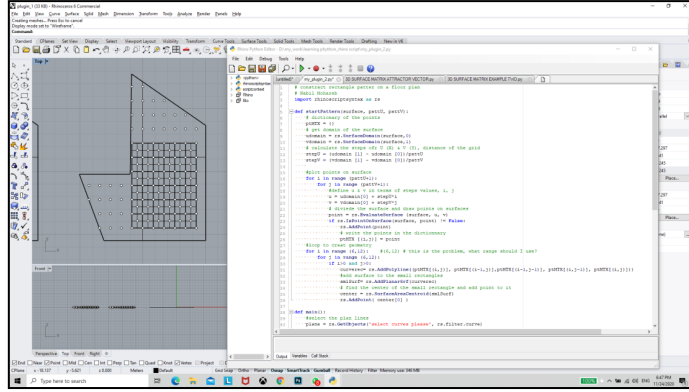
Şekil 3.34 Geleneksel modelleme araçlarından BIM tabanlı Vektorworks programının arayüzü (Oberste-Ufer, 2021)

3.2.2.2 Parametrik Tasarım Araçları

Parametrik tasarım araçları, tasarımcının tasarım parametreleri arasındaki ilişkileri modellemesine ve oluşturduğu algoritma yoluyla tasarım alternatifleri oluşturmasını sağlar (Woodbury, 2010). Tasarımcı, tasarımını üç boyutlu tasarım araçlarında modellemek için programlama dilleri aracılığıyla uygulanan algoritmaları kullanır. Bu algoritmalar kullanıcıya, geleneksel modelleme araçlarının sınırlamalarından kurtulma özgürlüğü sağlar.

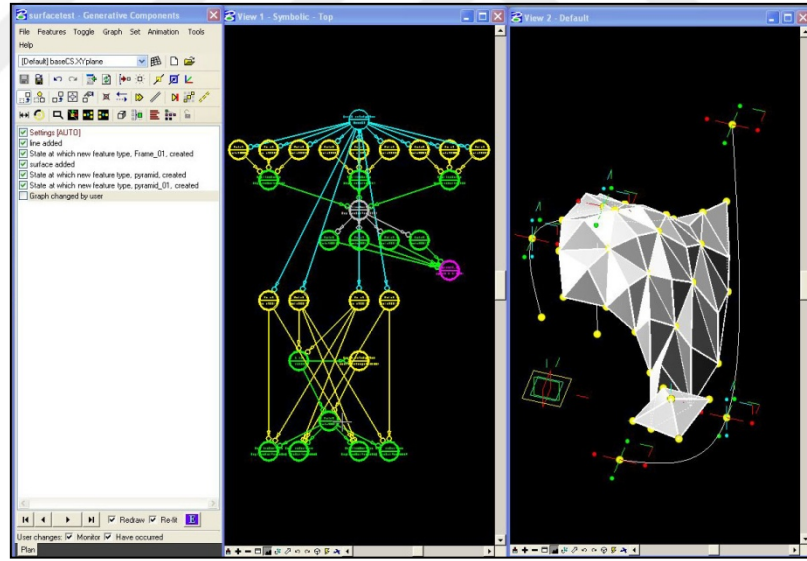
Parametrik tasarım araçları da kendi içerisinde yazılı ve görsel algoritma düzenleyiciler olarak ikiye ayrılır. Hem yazılı hem de görsel programların ikisinde de tasarımcıya iki farklı pencere sunar. Bunlardan bir tanesi algoritmanın yaratılması ve düzenlenmesini sağlar diğeri ise bunun sonucunda oluşan geometrinin görüntülenmesini sağlar. Yazılı algoritma düzenleyicilere örnek olarak; Rhinoscript (McNeel), Generative Components (Bentley) ve Mayascript (Autodesk) gösterilebilir. Ancak bu araçlar Java gibi ayrıntılı kodlama bilgisi gerektirdiği için kodlama bilmeyen tasarımcılar için oldukça zordur (Kaçmaz, 2017). Görsel algoritma düzenleyicilere örnek olarak da Grasshopper (McNeel) ve Dynamo (Autodesk) gösterilebilir. Bunlarda ise kod bilgisi gerektirmez ve kullanımı kolaydır.

Rhinoscript; Rhino'nun açık mimarisi, Rhino'yu bir geliştirme platformu olarak kullanmaya izin verir: bir C++ SDK ve bir dizi komut dosyası yöntemi, herhangi bir uzmanlık seviyesindeki programcıların Rhino'yu özelleştirmelerine ve otomatikleştirmelerine olanak tanır ve yeteneklerini genişletir. Yazılı algoritma düzenleyicidir ve kod sistemine dayanır (Şekil 3.35).



Şekil 3.35 Parametrik modelleme araçlarından yazılı algoritma düzenleyici Rhinocript programının arayüzü (Rhinocript Guides, tarih yok)

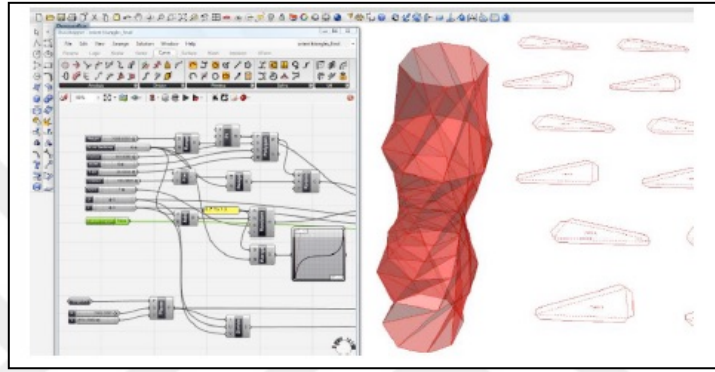
Generative Components; Bentley Systems tarafından geliştirilen parametrik bir CAD yazılımıdır, ilk olarak 2003'te tanıtıldı, 2005'in başlarında uygulamada giderek daha fazla kullanıldı ve Kasım 2007'de ticari olarak piyasaya sürüldü. Microstation modelleme programı ile çalışır (Şekil 3.36).



Şekil 3.36 Parametrik modelleme araçlarından Generative Components programının arayüzü (Rhinocript Guides, tarih yok)

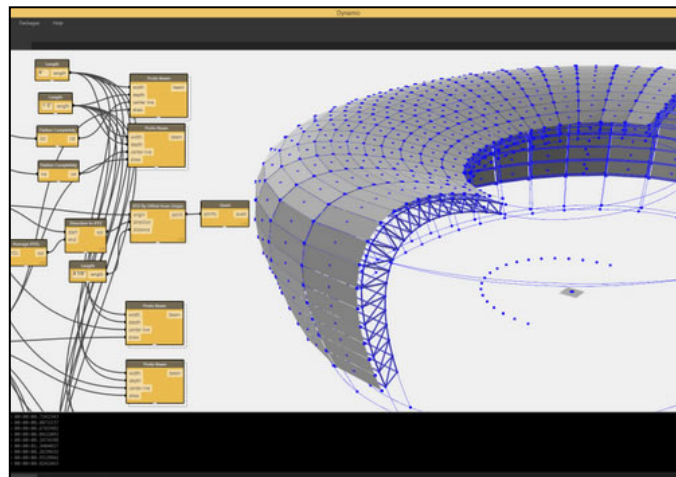
Mayascript; ilk olarak 1998 yılında piyasa sürülen autodesk maya programı, Alia firması tarafından uzun yıllar geliştirildikten sonra 2006 yılında Autodesk firmasına satılmıştır. Üç boyutlu modelleme yapmak için kullanılır, kodlamaya dayalı yazılı algoritmalarla geliştirilir. Özellikle film ve animasyon sektöründe kullanılır.

Grasshopper; Görsel algoritmalarla dayalı, gerçek zamanlı parametrik modelleme aracıdır. Modellenen cisim parça parça ele alınır, verilerdeki girdiler değiştirilerek tamamlanmış bir çizim değiştirilebilir. Grasshopper mantık olarak, girdi dediğimiz verilerin bir işlemden geçirilip çıktı elde ettiğimiz bir programdır. Grasshopper çizimler .gh uzantısıyla kaydedilir. Bu çizimler açıldığı zaman, Rhino ile Grasshopper'da otomatik olarak açılır ve çizimin ön izlemesi gözükür. Grasshopper' da programlama dili olarak; Python, C# ve VB.net kullanılmaktadır (Şekil 3.37).



Şekil 3.37 Parametrik tasarım araçlarından Grasshopper programının arayüzü (Sammer, 2019)

Dynamo (Autodesk); BIM tabanlı Autodesk programları üzerinde çalışır, görsel parametrik tasarım uygulamasıdır. Grasshopper' a benzer bir arayüzü vardır. Çalışma mantığı olarak da grasshopper ile aynıdır (Şekil 3.38).



Şekil 3.38 Parametrik tasarım araçlarından Dynamo' programının arayüzü (Sammer, 2019)

Tablo 3.2 Geleneksel modelleme araçlarının görsel parametrik tasarım araçları (Sammer, 2019)

Geleneksel Modelleme Aracı	Görsel Parametrik Tasarım Aracı
Rhino	Grasshopper
Revit	Dyamo
Microstation	Generative Components

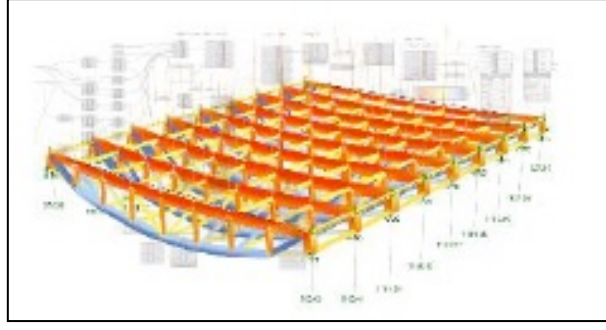
3.2.2.3 Parametrik Tasarım ve Yapı Analizleri

Parametrik tasarım araçları sadece yapıya formunu vermek için değil, var olan yapının analizleri için de kullanılır. En yaygın kullanılan analiz eklentileri; çevre analizi, enerji analizi ve strüktür analizidir (Tablo 3.3) (Şekil 3.39 ve Şekil 3.40).

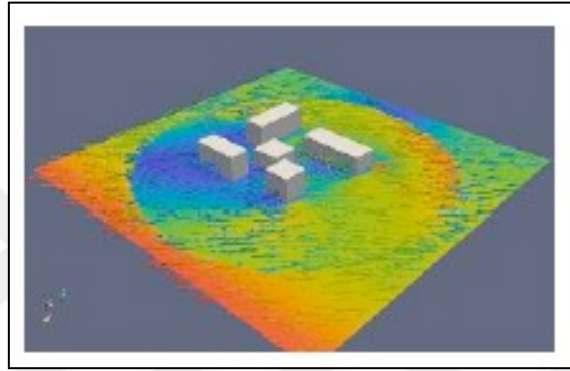
Grasshopper Eklentileri;

Tablo 3.3 Grasshopper eklentileri ve özellikleri

Eklenti	Analiz Türü
Ladybug	Güneş ışıınımı analizi, hava durumu analizi
Butterfly	Havalandırma analizi
Dragonfly	İklim analizi
Esquissons	Akustik analizi
GEKO	Çevresel analizler
Honeybee	Termal ısınım, Enerji analizleri
Kangaroo	Strüktürel analiz
Karamba 3D	Strüktürel analiz
ParaStaad	Strüktürel analiz
Pigeon	Havalandırma analizleri
Sunflower	Gün ışığı analizleri
SWIFT	Rüzgâr analizi
TRNLizard	Termal ve Gün ışığı analizi



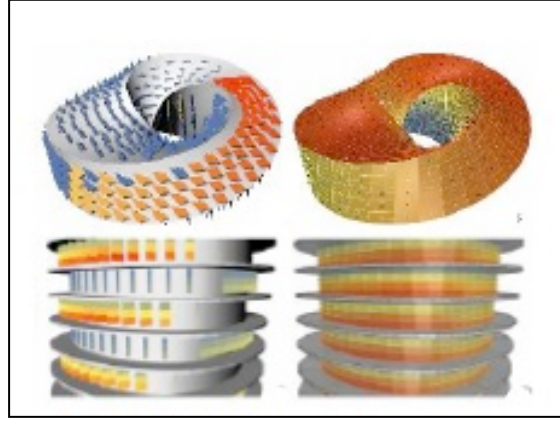
Şekil 3.39 Grasshopper eklentilerinden Karamba ile yapılmış strüktür analizi görseli, yük dağılımını göstermektedir (Sammer, 2019)



Şekil 3.40 Grasshopper eklentilerinden SWIFT ile yapılmış rüzgâr analizi görseli (Sammer, 2019)

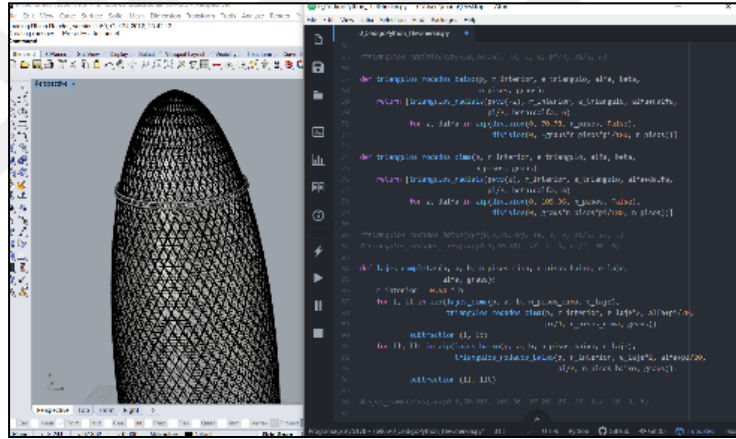
Hummingbird; bu eklenti rhino ve revit dosyaları arasındaki algoritmaların dönüşümünü sağlar. Grasshopper ile tasarlanmış karmaşık bir yapıyı, BIM ile daha pratik bir hale getirir.

Rosetta; Hem BIM hem de CAD tabanlı modelleme programları ile kullanıma uygundur. Işıma, termal analizler ve Gün ışığı analizleri yapmaya yardımcı olur (Şekil 3.42).



Şekil 3.41 Gün ışığı analiz programları Diva ve Rosetta karşılaştırması (Sammer, 2019)

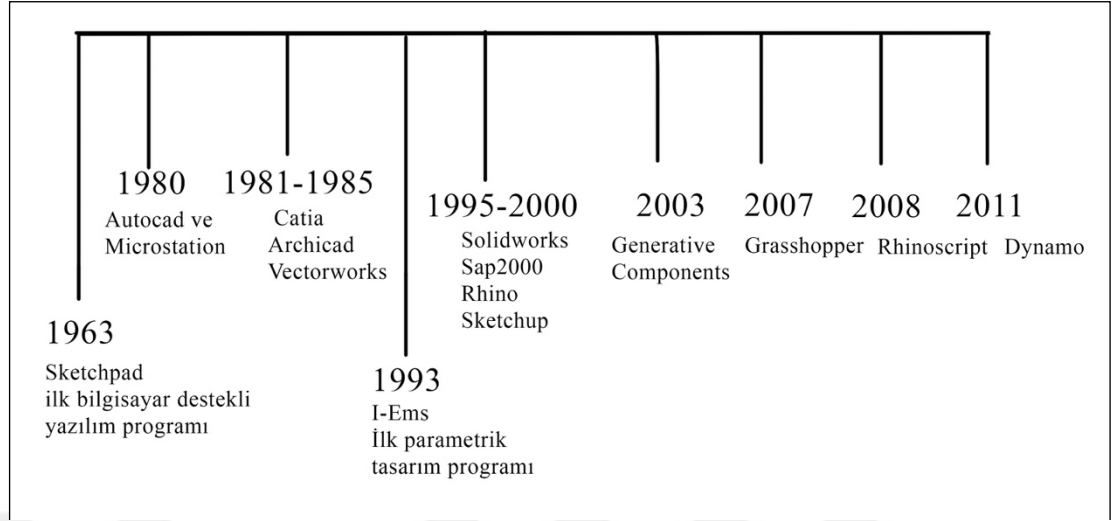
Khepri; Rosetta eklentisi gibi hem CAD hem BIM tabanlı programlarla çalışır. Güneş analizleri için kullanılır (Şekil 3.42).



Şekil 3.42 Analiz programlarından Khepri' nin arayüz gösterimi (Sammer, 2019)

Geleneksel modelleme araçları ile parametrik tasarım araçlarını karşılaştırılmasında, geleneksel modelleme araçları (autocad, rhinoceros, revit vb. gibi) ile tasarımda tek bir sonuç model oluşturulur, sonucun değiştirilmesi istenirse de tasarımın en başına dönüp modelleme aşamasına baştan başlamak gerekir. Ancak parametrik tasarım araçları ile (grasshopper, dynamo vb. gibi) birden fazla sonuç oluşturmak mümkündür. Tasarım parametrelerden oluştuğu için, bir parametreyi değiştirerek farklı sonuçlar elde etmek mümkündür.

Tablo 3.5 Geleneksel ve parametrik tasarım programlarının zaman çizelgesi



Bilgisayar destekli tasarım programlarının ilk olarak 1963 yılında sketchpad'in bulunmasıyla başladığını biliyoruz (Tablo 3.5). İlk olarak CAD tabanlı programlar olan Autocad ve Microstation programları geliştirilmiştir hemen arkasından da BIM tabanlı olan Archicad ve vectorworks geliştirilmiştir. 1993 yılında Waterloo tren istasyonu için parametrik tasarım programı I-Ems geliştirilmiş olsa da tam olarak parametrik tasarım programlarının geliştirilme süreci 10 seneyi bulmuştur. 2000 yılı ve sonrası için parametrik tasarım programlarının geliştirildiğini ve yaygınlaştığını söyleyebiliriz.

BÖLÜM DÖRT

PARAMETRİK TASARIMLA ÜRETİLMİŞ MODÜLER YAPI

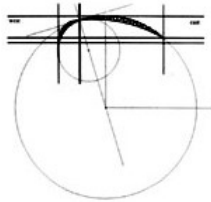
KABUKLARINDAN ÖRNEKLER

Bu bölümde, parametrik tasarım araçlarıyla karolama yöntemleri kullanılarak oluşturulmuş modüler 10 adet yapı örneği araştırılmış, parametrik tasarım araçları, karolama yöntemleri, geometrik yaklaşım, modül çeşitleri ve kullanılan malzemeler incelenmiştir. Araştırma kapsamında incelenen örneklerle genel bir bakış içeren tablolar, Waterloo tren istasyonu (Tablo 4.1), British Museum büyük avlu (Tablo 4.2), Eden projesi (Tablo 4.3), Gantenbein şarap evi (Tablo 4.4), Beijing ulusal su sporları merkezi (Tablo 4.5), Al Bahar kuleleri (Tablo 4.6), Manuel Gea Gonzalez hastanesi (Tablo 4.8), The Boys erkek öğrenci yurdu (Tablo 4.9), Lane 189 alışveriş merkezi (Tablo 4.10) ve Mistral İzmir (Tablo 4.11) oluşturulmuştur.

4.1 Waterloo Tren İstasyonu

1993 yılında İngiltere’de yapılan Waterloo tren istasyonu İngiltere’nin en yoğun, Avrupa’nın ise en yoğun 15. tren istasyonudur.

Tablo 4.1 Waterloo Tren İstasyonu incelemesi (International Terminal Waterloo).

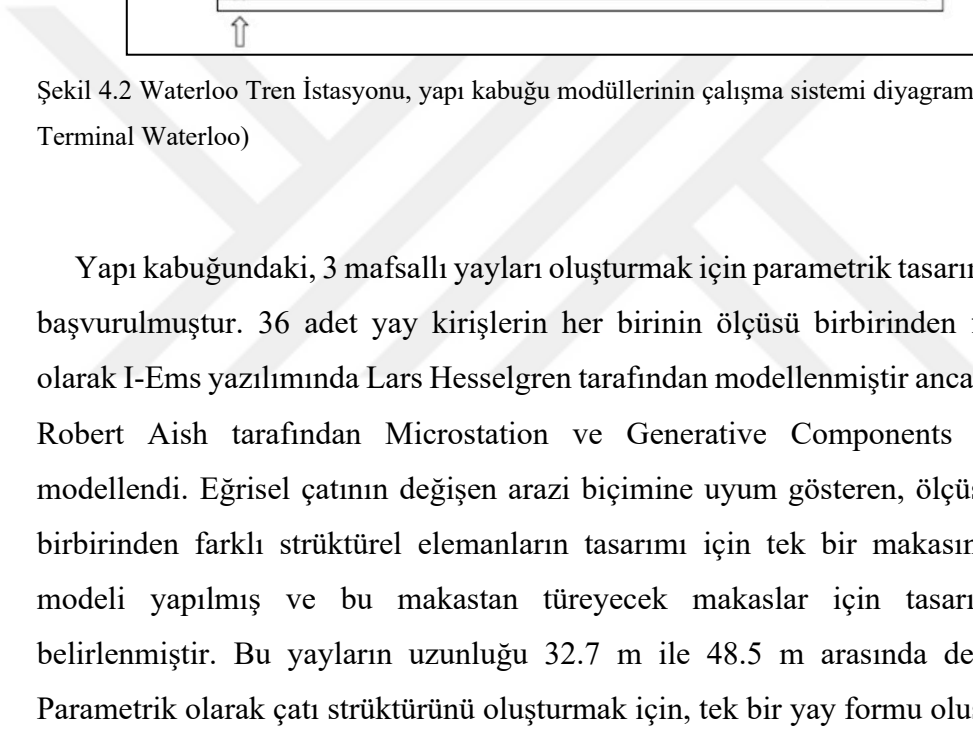
Waterloo Tren İstasyonu			
Mimarî	Yıl: 1993 Yer: Londra, İngiltere Mimar: Nicholas Grimshaw Mühendis: YRM Anthony Hunt & Partners , Arup Cephe/ Kabuk Alanı: 17.000 m2 Fonksiyon: Tren İstasyonu		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	 Akordiyon şeklinde		• I Ems • Generative Components • Microstation
Yapım	Modül		Malzeme
			• Çelik • Cam
	Modül Sayısı: 36		Maliyet: 155 Milyon dolar

Yılda 15 milyon yolcu tarafından kullanılmaktadır. En önemli özelliği ise İngiltere'yi denizin altından Avrupa'ya bağlamasıdır. Tren istasyonu toplamda 3 bölümden oluşur; 1. Bölüm giriş cephesindedir 1848 yılında inşa edilmiştir, 2. Bölüm 1950 yılında yapılmıştır bu bölümde şehir içi eski tren hatları vardır ve hala kullanılmaktadır, 3. Bölüm ise 1993 yılında yapılan çelik çatı strüktürüne sahip olan bölümdür (Binney, 1995).



Şekil 4.1 Waterloo Tren İstasyonu, yapı kabuğunun görüntüsü (International Terminal Waterloo)

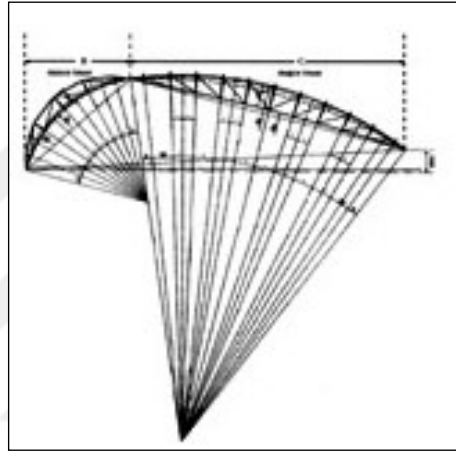
Tren istasyonunun çatı strüktürü, şekil 4.1'de de görüldüğü gibi üç mafsallı yay benzeri bir kafes sistemi ile çözülmüştür ve düşey taşıyıcı elemanları kullanılmamıştır. Bu bölümde 5 hatlı demiryolu, yapının formunun belirleyicisi olmuştur. Yapı 4 ana öğeden oluşur; yapının alt kısmını oluşturan betonarme kutu otoparkı tanımlarken aynı zamanda temel vazifesi de görür. Bu betonarme kutu üzerine 400 m uzunluğundaki platformlardan oluşan iki katlı viyadük oturmaktadır. Üçüncü olarak mevcut yapının arkasındaki tuğla tonozlu yapı yedek servisler için kullanılmaktadır. Bu istasyon her biri farklı ölçüdeki 36 adet yay benzeri strüktürden oluşmuştur (Tablo 4.1).



Terminal Waterloo)

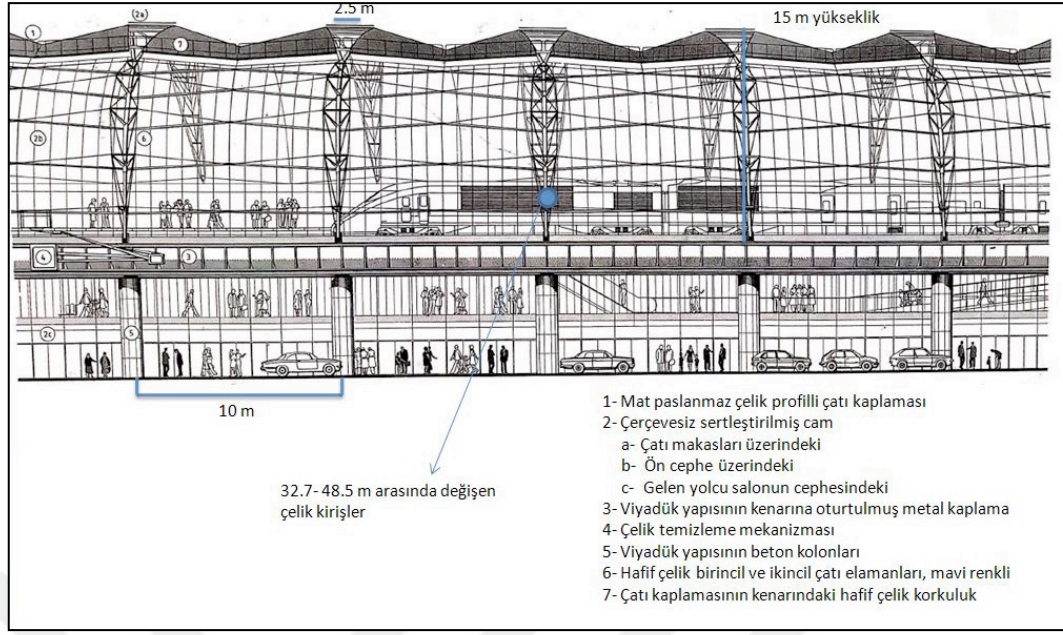
Yapı kabuğundaki, 3 mafsallı yayları oluşturmak için parametrik tasarım yöntemine başvurulmuştur. 36 adet yay kirişlerin her birinin ölçüsü birbirinden farklıdır. İlk olarak I-Ems yazılımında Lars Hesselgren tarafından modellenmiştir ancak sonrasında Robert Aish tarafından Microstation ve Generative Components ile yeniden modellendi. Eğrisel çatının değişen arazi biçimine uyum gösteren, ölçüsü ve biçimi birbirinden farklı strüktürel elemanların tasarımı için tek bir makasın parametrik modeli yapılmış ve bu makastan türeyecek makaslar için tasarım kuralları belirlenmiştir. Bu yayların uzunluğu 32.7 m ile 48.5 m arasında değişmektedir. Parametrik olarak çatı strüktürünü oluşturmak için, tek bir yay formu oluşturulup, ray hattının uzunluğuna göre parametreleri değiştirilerek çoğaltılabilir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi bu yaylar iki kirişten oluşur, bir tanesi çekme bir tanesi germe basıncıyla çalışır. Bu kirişlerden kısa olanın üzeri cam modüllerle kaplanmışken uzun olan paslanmaz çelik malzeme ile kaplanmıştır. Şekil 4.3’te de görebileceğimiz üzere kirişler, daha küçük parçaların radyal yerleşimi için merkezleri koruyan Pisagor ilişkisi ile her bir modülün iç ölçülerini uzunluğa orantılı ölçek faktörüne göre değiştiren bir yazılım programı tanımlandı. Bu sayede değişken kesitli sürekli bir yüzey üretildi.

Ana kiriş modülünden türetilen diğer kirişlerin hesaplaması şu şekilde yapılmıştır; ana kirişin boyutu, kiriş ölçeklendirme faktörü (h_x/H) tarafından belirlenir. H ve h_x Pisagor denklemiyle çıkarılabilir. Kirişler için, diğer kirişlerin ana kirişe göre nasıl hesaplandığını şu şekilde formüle edebiliriz; $h_x = [(2915)^2 + (B + C)^2]^{1/2}$ B, en küçük kiriş açıklığı ve C, en büyük kiriş açıklığıdır. Kiriş ölçeklendirme faktörü, hipotenüs noktasının diğer kenarlara oranına eşittir (Szalapaj, 2001). Parametrik model ve denklemi, kirişlerin tanımlanmasından kiriş çiftleri arasındaki bağlantıları tanımlamaya kadar genişletilebilir.

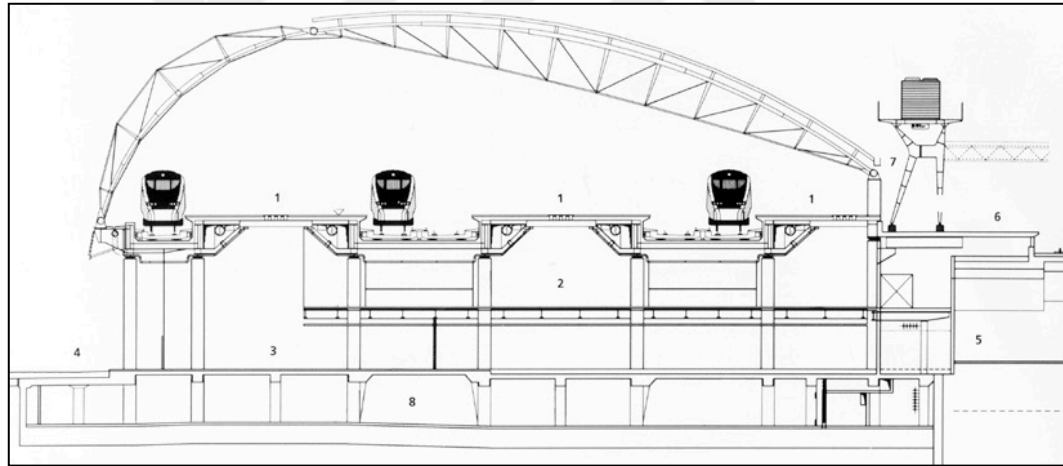


Şekil 4.3 Waterloo Tren İstasyonu kirişlerin parametrik olarak formüllerinin hesaplanması diyagramı (Szalapaj, 2001)

Çatının cephesinde 2 farklı makas kiriş sistemi birbirine bağlanıyor. Uzun, ana makas kiriş çatının içerisinden, kısa olan ise onun üstüne gelecek şekilde bağlanmıştır. Çatı strüktürü minimum 35 m ve maksimum 50 m arasında değişen açıklıkları geçmektedir. Şekil 4.6’da gösterildiği gibi, trenler perona girerken özellikle fren yaptıklarında peronlarda çok fazla basınç dalgası oluşur, yapıda bunu önlemek için çatı strüktürüne yerleştirilen camların çerçeveleri akordiyon gibi boşluklu olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu boşluklar basınç dalgalarının yayılmasını sağlamaktadır.

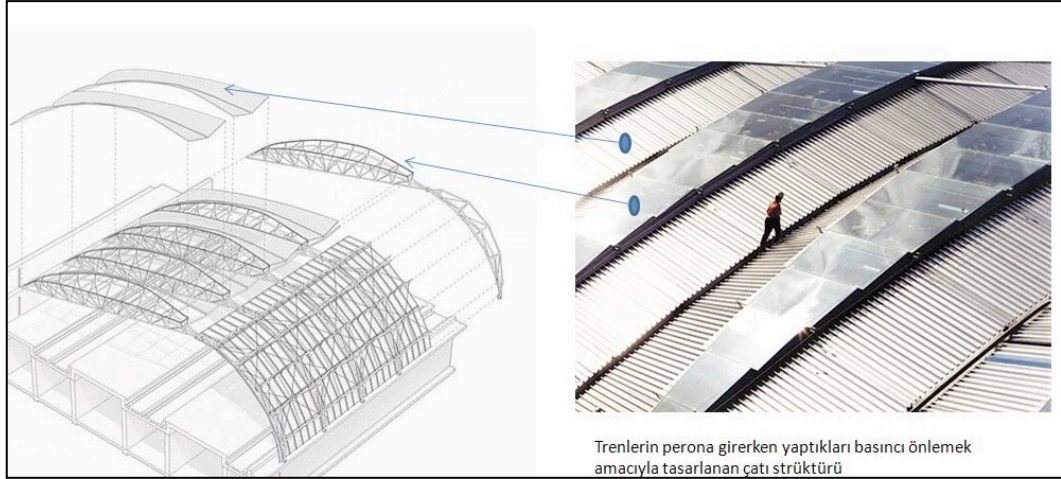


Şekil 4.4 Waterloo Tren İstasyonu, uzun kesit görünüşü (Binney, 1995)

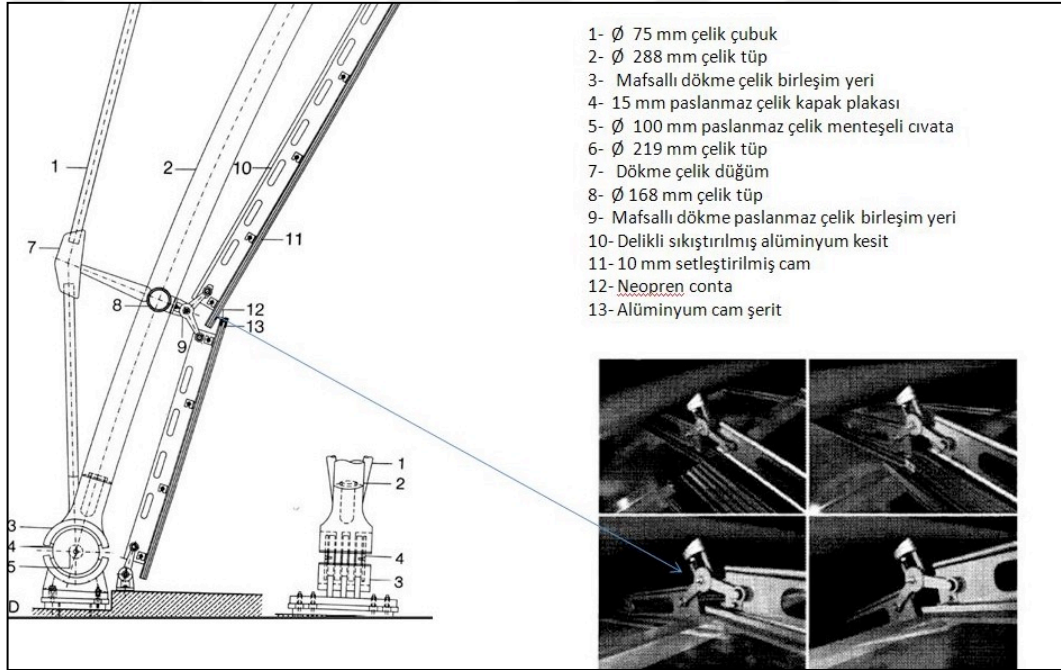


Şekil 4.5 Waterloo Tren İstasyonu, kısa kesit görünüşü (Binney, 1995)

Şekil 4.4 ve şekil 4.5'te tren istasyonunun dikey ve yatak kesitleri incelenmiştir. Kısa kesitte belirtildiği üzere; 1. bölüm platformlardan oluşuyor, 2. bölüm bilet satış noktası, 3. bölüm gelen yolcu salonu, 4. Bölüm otobüs durakları, 5. bölüm tramvay durakları, 6. bölüm hızlı tren bölümü ve 7. bölüm çatı strüktüründen oluşmaktadır.



Şekil 4.6 Waterloo Tren İstasyonu, çatı strüktürü (International Terminal Waterloo)



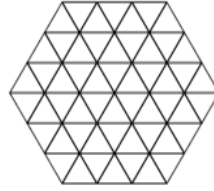
Şekil 4.7 Waterloo Tren İstasyonu, çatı strüktürü birleşim detayı (Detail Magazine, 2005)

Şekil 4.7’de kirişlerin bağlantı detayları gösterilmiştir. Şekil 4.6’da ise çatı strüktürünün cam ve alüminyum paneller kullanılarak karolama yapıldığını görebiliriz. Kullanılan paneller ortada büyükken, strüktürün alt kısımlarına doğru gittikçe orantılı olarak küçülmektedir. Çatı strüktüründe, her bir kiriş modülü yüzeyinde panellerle aperiodyk bir karolama yapıldığını söyleyebiliriz.

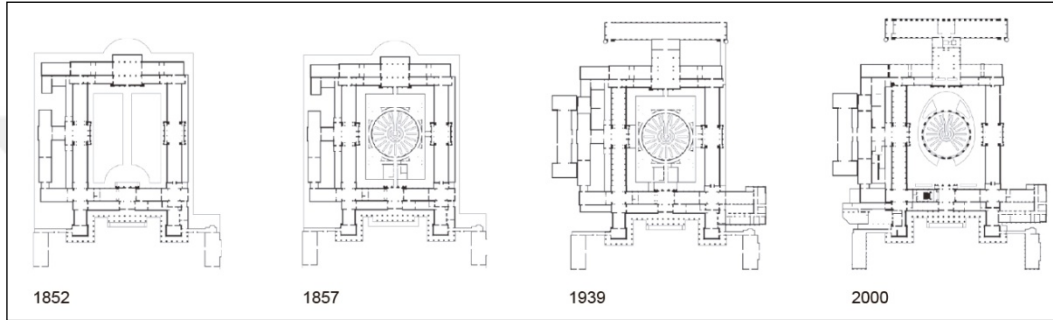
4.2 British Museum Büyük Avlu

Bu örnekte 1823 yılında yapılan British Museum' un avlu renovasyon projesi incelenmiştir.

Tablo 4.2 British Museum Büyük Avlu incelemesi (Foster+Partners)

British Museum Büyük Avlu			
Mimarî	Yıl: 2000		
	Yer: Londra, İngiltere		
	Mimar: Foster + Partners		
	Mühendis: Buro Happold		
	Cephe/ Kabuk Alanı: 6.700 metre kare		
	Fonksiyon: Avlu		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	 3,3,3,3,3,3		Proje için özel olarak geliştirilmiştir
Yapım	Modül		Malzeme
			- Çelik - Cam
	Modül Sayısı: Kullanılan karolama modüler değil, ancak kullanılan paneller modüler, 152 adet		Maliyet: 120 milyon dolar

1823 yılında inşa edilen British Museum' un merkezindeki avlu, başlangıçta bahçe olarak tasarlanmıştır ancak 19.yy' da bu avlunun tam ortasına okuma odası ve kütüphane yapılmıştır. 20. yy' da kütüphane bölümü buradan ayrılmıştır ve sadece bu bölümün ortasında, etrafını çevreleyen merdivenlerle birlikte dairesel bir kütle olan okuma odası kalmıştır (Şekil 4.8). Okuma odası şu anda herkese açık sergi alanı olarak kullanılmaktadır (Foster+Partners, tarih yok). Avlu bölümünü yeniden tasarlamak için bir yarışma projesi düzenlenmiştir ve yarışmayı kazanan Foster ve ekibi olmuştur.



Şekil 4.8 Büyük avlunun yıllar içindeki değişim planları (Great Court at the British Museum, London, 2022)

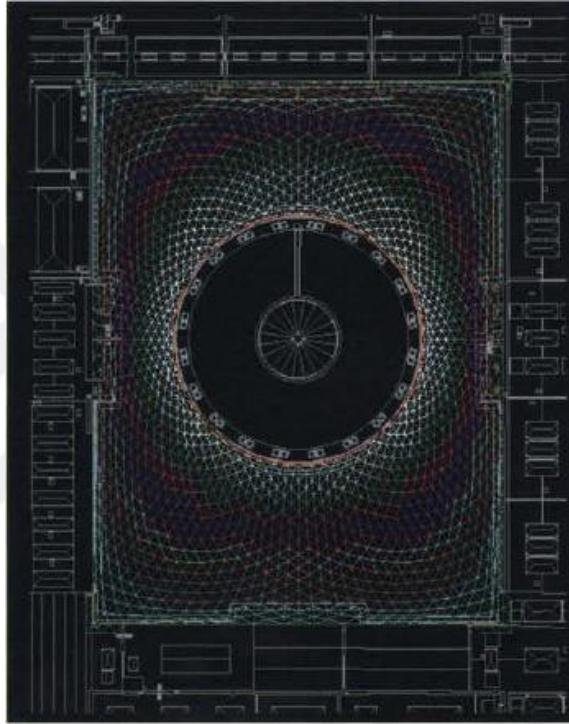
Avluyu tasarımı için yapılan kabuk ızgara yapısı, bilgisayar destekli hesaplama modelleri kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 4.9'da görebileceğimiz üzere avlu, cam ve çelik malzeme kullanılarak gerilmesiz ızgara kabuk sistemi ile örtülmüştür. Bu sayede avlunun doğal ışıklandırması ve iklimlendirmesi sağlanmıştır (Fosterandpartners, 2000b).



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

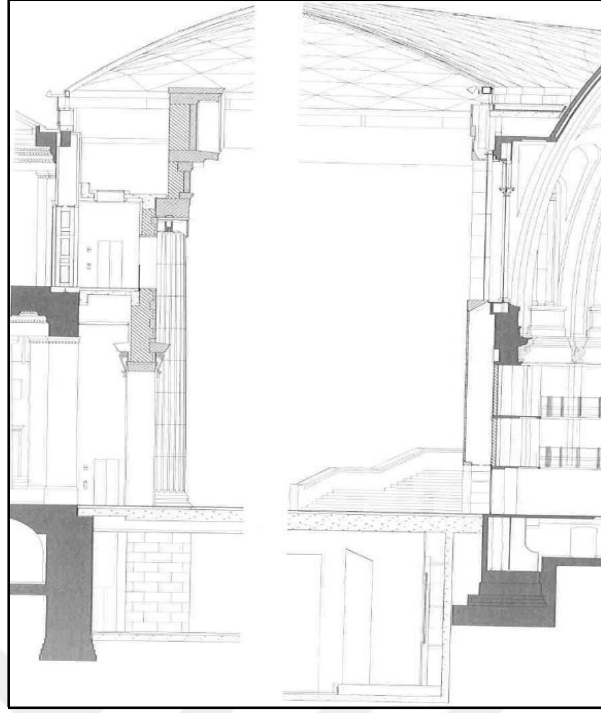
Çelik ızgara kabuk strüktür sistemler, hafif olduğu için bu tarz eski binaların

restorasyonunda oldukça başvurulan bir yöntemdir (Türkçü, 2017). Avlunun merkezindeki okuma odası ve avluyu çevreleyen duvarlar yatay yükleri karşılayamadığı için bu kabuk strüktüre ek önlemler yapılması gerekmiştir (Şekil 4.10). Okuma odasına ek olarak 20 kompozit sütun eklenmiş ve bu sütunlar yeni yapılan temellere oturtulmuştur. Sütunların üzerinde ise, çatı elemanlarının bağlandığı dairesel çelik kiriş vardır (Barnes, 2000).



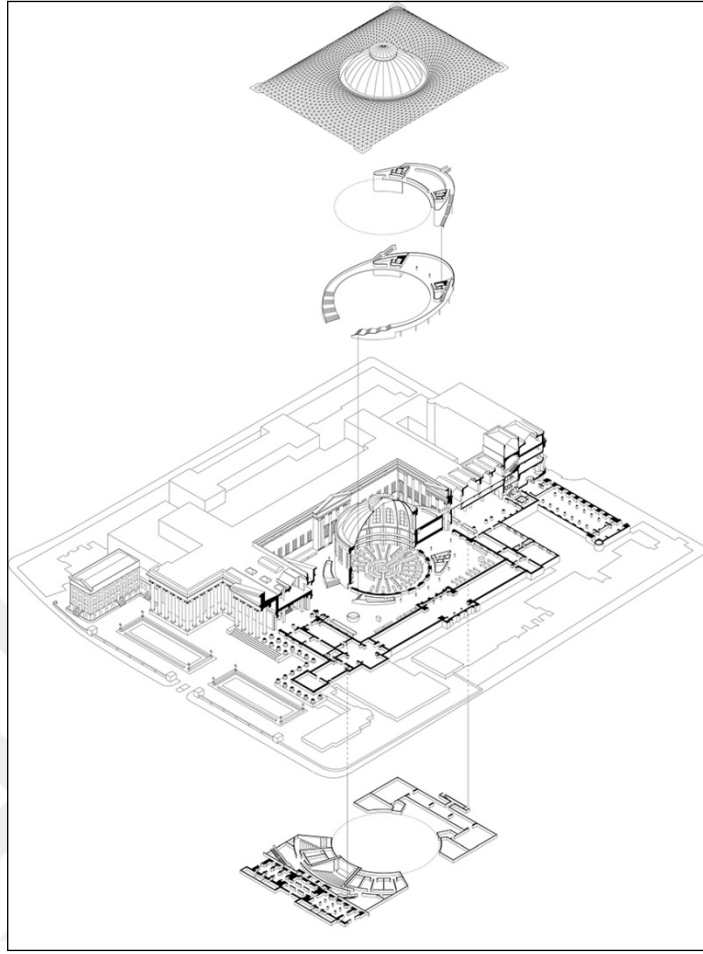
Şekil 4.10 Okuma odası etrafına yerleştirilen yeni kolonların gösterimi (Barnes, 2000)

Avluyu çevreleyen duvarlar içinse, dikdörtgen şeklinde bir kayar yatak yapılmıştır ve ızgara kabuk sistemi bu yatağa oturtulmuştur (Williams, 2001). Şekil 4.11’de okuma odasını çevreleyen duvarların dikey kesitleri gösterilmiştir. Bu kesitlerle kayar yatak sisteminin uygulandığını görebiliriz.



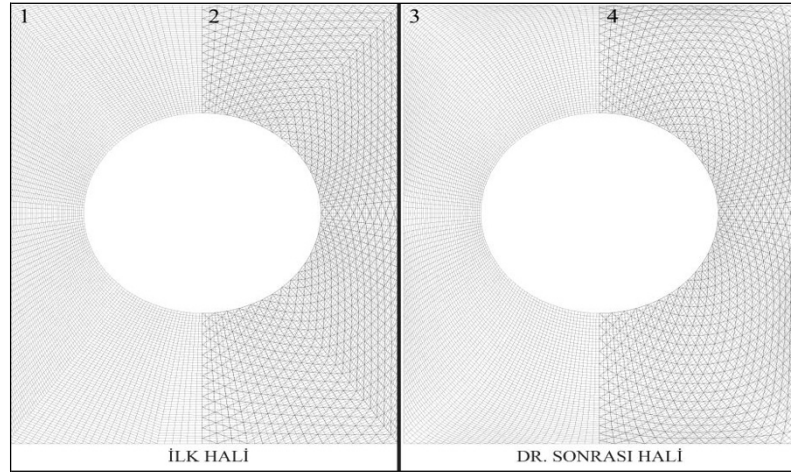
Şekil 4.11 Sol tarafta dikdörtgen olarak çevreleyen duvarların kesiti sağ tarafta okuma odasının kesiti (Foster, Sudjic ve De Grey, 2001)

Büyük avlu, üçgen ağdan türetilmiş 6.700 metre karelik bir ızgara kabuk sistemi ile örtülmüştür (Türkçü, 2017). 95 metre uzunluğunda 74 metre genişliğindeki alanın tamamı, 3.312 üçgen cam panel kullanılarak kapatılmış ve periyodik karolama yapılmıştır. Maksimum geçilen açıklık 39 metredir. Tasarımı oluştururken burada en önemli nokta, avlunun ortasında bulunan okuma odasının tam ortada bulunmamasıydı. Kuzey tarafına 5 metre daha yakın bulunan okuma odası, çatı formunun modüler olarak üretilmesine engel olmuştur. Bu sebeple, üretilen 3.312 üçgen panelin her biri birbirinden farklı ölçüde yapılmıştır. Her bir elemanın boyutlarını ve açılarını oluşturmak için geleneksel tasarım yöntemleri yeterli gelmemiştir ve bu yüzden bilgisayar yazılımına ihtiyaç duyulmuştur. Her biri birbirinden farklı 4878 eleman ve 1566 düğüm noktasından oluşmaktadır. Biçim bulma işlemi, Buro Happold tarafından yapılmıştır. Karolama yöntemindeki belirleyici faktör, cam malzemeyi göz önünde bulundurarak imalat açısından mümkün olan maksimum boyuttaki cam panelleri üretebilmektir (Barnes, 2000).



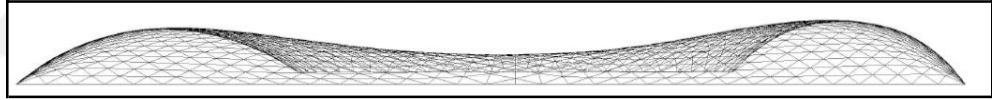
Şekil 4.12 Büyük avlu yapı diyagramı (Great Court at the British Museum, London, 2022)

Şekil 4.12 ve şekil 4.13'te büyük avlunun yapı diyagramında da göreceğimiz gibi çatı örtüsünün karolanması birçok aşamadan geçtikten sonra son haline ulaşmıştır. Çıkış noktası, okuma odasının çevresinin ve kenarlardaki duvarların sınır çevresinin eşit aralıklarla bölünüp birleştirilmesiydi. Bu şekilde oluşturulan radyal çizgiler daha sonra farklı sayıda eşit parçaya bölünmüştür. İlk önce noktalar birleştirilerek üretilen bu şekil sürekliliği bozduğu için, devingen şekil değiştirme ile oluşturulmuştur (Williams, 2001).



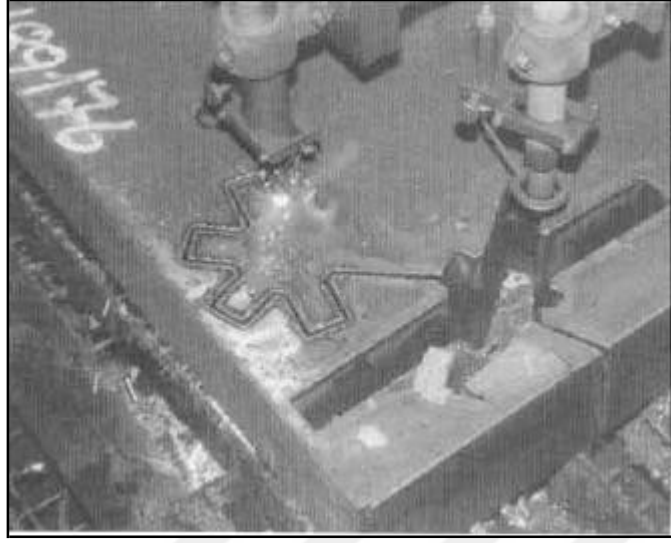
Şekil 4.13 Eşit aralıklarla bölünen dikdörtgen ve çemberin ilk karolamaları ve devingen şekil değiştirme uygulanması sonrası (Williams, 2001)

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 4.14).

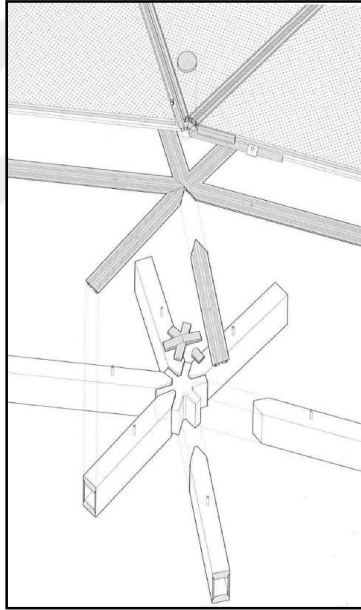


Şekil 4.14 Okuma odasının tam merkezde olmaması nedeniyle oluşan asimetric kesit (Williams, 2001)

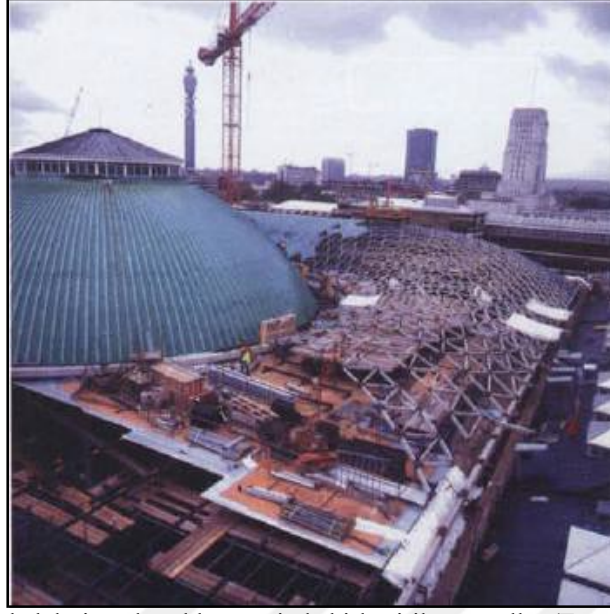
Yapılan hesaplamalara göre, sapmalardan dolayı yapının Kuzey kısmı ayakta kalırken Güney kısmının çökeceği öngörülmüştür. Bu nedenle yapıya kayar yataklar eklenmiştir yük dağılımını sağlayabilmek için (Williams, 2001). Aynı ölçüde üçgen paneller yapılamayacağı için, farklı açı ve uzunluktaki elemanların birleştirilmesi için özel olarak düğüm noktaları geliştirilmiştir. Düğüm noktaları tasarlanırken elemanlar arasındaki açılar, minimum 26 derece ve maksimum 110 derece olacak şekilde ayarlanmıştır. 6 kollu yıldız şeklinde tasarlanan düğüm noktaları arasından eşit kalınlıktaki düğüm noktaları işaretlenerek bir levha üzerinde toplanmıştır ve bunlar CNC ile çelik plakalardan kesilmiştir. Çubuk elemanları, konik uçlu çelik plakalardan kesilmiş ve düğüm noktalarına kaynaklanmıştır. Şantiye alanındaki süreyi kısaltmak için, prefabrik olarak önceden monte edilmiş ve kaynaklanarak birleştirilmiş olan çubuk ve düğüm noktaları kullanılarak paneller oluşturulmuştur. Yapıda bu panellerden 152 adet bulunmaktadır (Barnes, 2000).



Şekil 4.15 Çelik panellerden kesilen düğüm noktaları (Barnes, 2000)



Şekil 4.16 Çubuk elemanlar, düğüm noktaları ve cam panellerin birleşimi (Foster ve diğer., 2001)

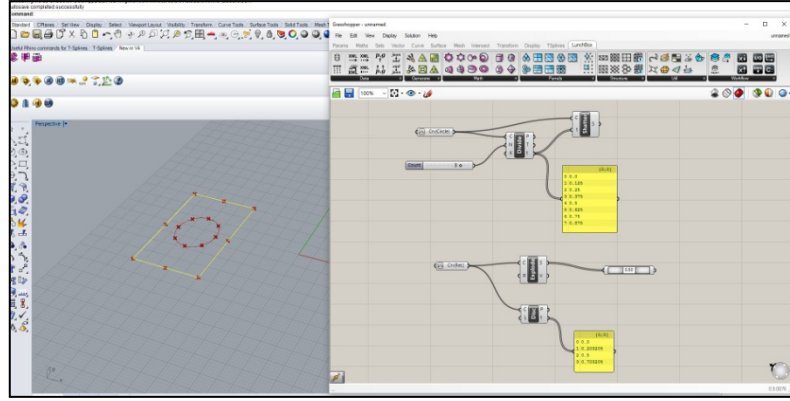


Şekil 4.17 Yapı iskeleleri ve destekler üzerinde birleştirilen paneller (Foster ve diğer., 2001)



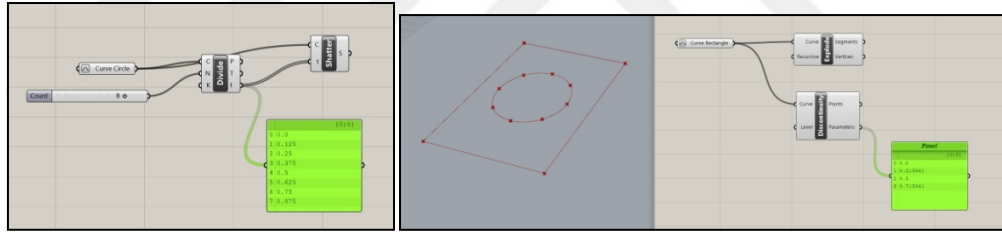
Şekil 4.18 Izgara kabuğun son hali (Burohappold, 2020)

Büyük avlu, o dönemde parametrik tasarım araçlarından Grasshopper olmadığı için, özel yazılım programları ile tasarlanmıştır. Peki Grasshopper ile yapacak olsaydık nasıl olurdu inceleyelim; (Arturo Tedeschi' nin Grasshopper webinarı ile hazırlanmıştır) Kullanılan Grasshopper eklentileri; kangaroo ve panel tools.



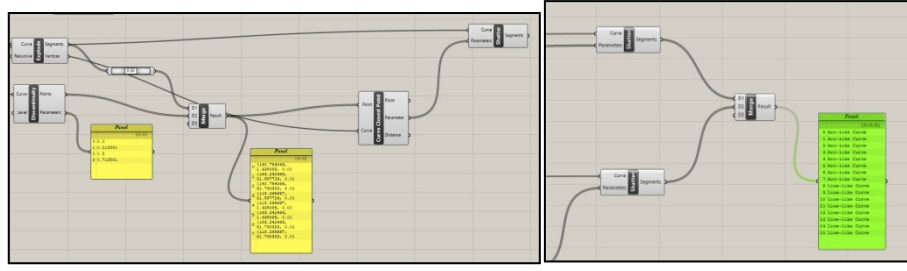
Şekil 4.19 Grasshopper'da British Museum modellemesi, birinci adım

Büyük avlu için, bir dikdörtgen bir de ortasında bulunan okuma odası için daireye ihtiyacımız vardı, *curve* komutu ile bunları çizdik ve Grasshopper'a tanımladık. Dairesel geometrik şekli de *divide* komutuyla 8 parçaya böldük. Parametre olarak verdiğimiz 8 değerini istersek değiştirebiliriz. Daha sonra bu 8 parçayı geometriden ayırmak için *shatter* komutunu kullandık.



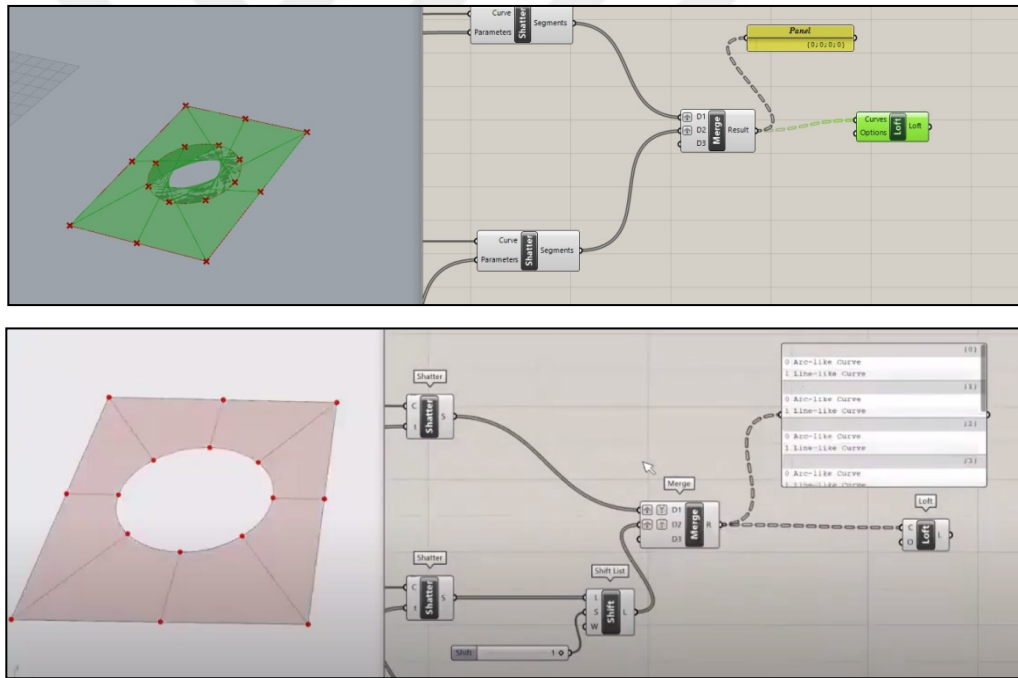
Şekil 4.20 Grasshopper'da British Museum modellemesi, ikinci adım

Noktalarımızın konumlarını ve değerlerini görebilmek için *tparameter* sonuç kısımlarına paneller bağlayabiliriz. Dikdörtgenimiz için zaten köşe noktaları belli olduğu için *divide* komutunu kullanmıyoruz *explode* komutu ile noktaları patlatmamız yeterli. Ancak yine panel koyup görebiliriz ki 4 nokta değil 5 noktamız var, kapalı bir *polyline* olduğu için bu şekilde. Burda üst üste binen noktaları çıkarmak için *discontinuity* komutundan faydalanıyoruz. Dikdörtgende de 8 nokta elde etmek için orta noktalarını da seçiyoruz. Bunu *point on curve* komutu ile yapıyoruz ve değere 0.50 giriyoruz.



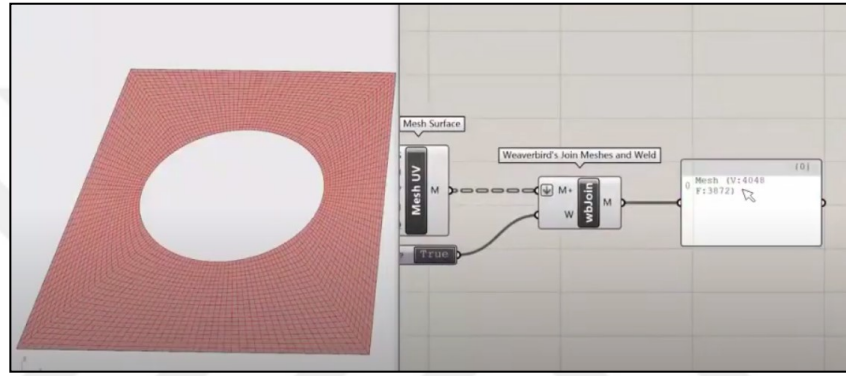
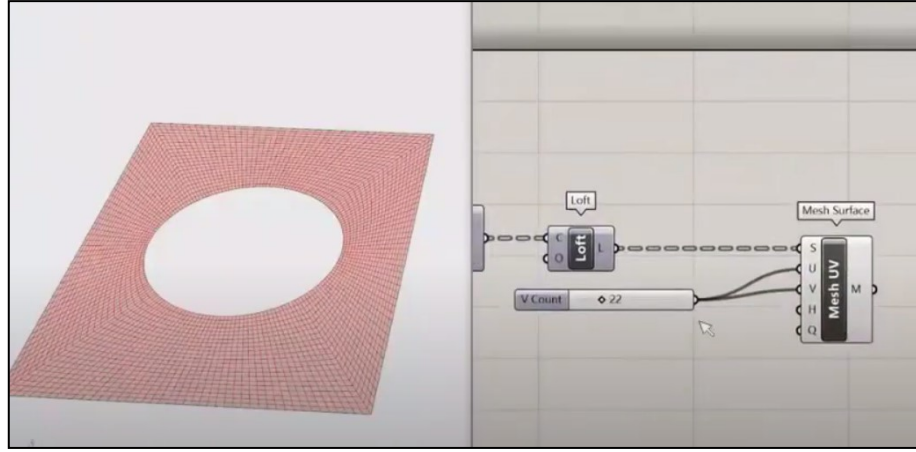
Şekil 4.21 Grasshopper'da British Museum modellemesi, üçüncü adım

Dikdörtgen şeklimiz üzerinde hem köşe hem de orta noktaları birleştirmek için *merge* komutunu kullanıyoruz, daha sonra dairede yaptığımız gibi bu parçaları şeklimizden ayırmak için *shatter* komutunu kullanıyoruz. Her iki şeklimizde de şu an 8'er noktamız var. Bu noktaları *merge* ile bağlıyoruz.



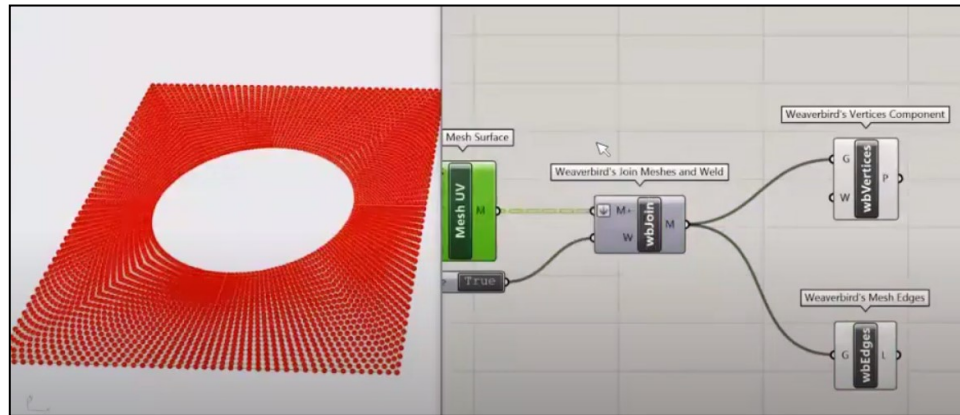
Şekil 4.22 Grasshopper'da British Museum modellemesi, dördüncü adım

İki şeklimizdeki noktaları birbiri ile birleştirip *loft* komutuyla yüzey oluşturuyoruz. Ancak yukarıdaki şekilde de göreceğimiz gibi noktalar rastgele birbiri ile eşleşti bunu düzeltmek için, *merge* komutunda bulunan *simplify* komutuyla en yakındaki noktayla eşleşmesini sağlıyoruz.



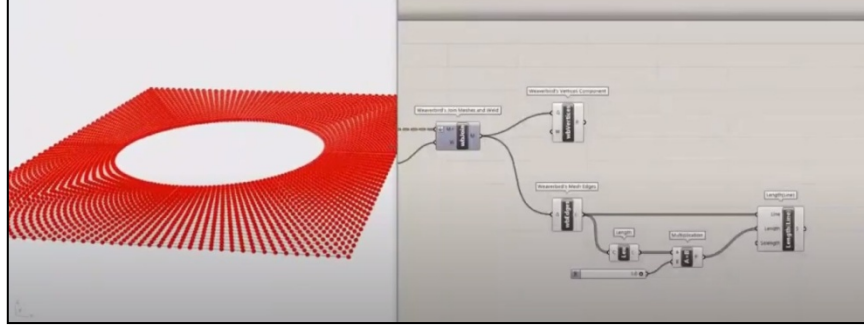
Şekil 4.23 Grasshopper'da British Museum modellemesi, beşinci adım

Oluşturduğumuz bu iki boyulu yüzeyi *mesh* komutuyla ağ haline getiriyoruz ve u ve v değerleri girerek noktalar arasında oluşturduğumuz her bir ayrı parçanın kaç parçaya bölüneceğini belirtiyoruz. Daha sonra da *weaverbird's join meshes and weld* komutuyla bu ayrı ayrı parçaları tek bir ağ haline dönüştürüyoruz.



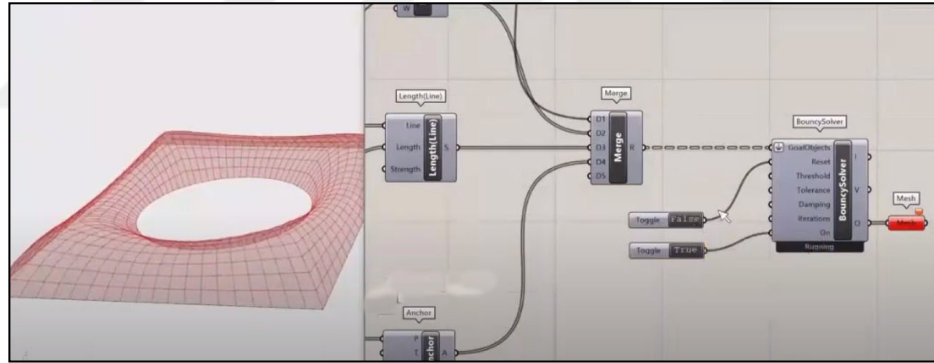
Şekil 4.24 Grasshopper'da British Museum modellemesi, altıncı adım

Tek parça oluşturduğumuz ağıımızın, hangi noktalarla bölünüp *grid* oluşturacağını belirliyoruz.



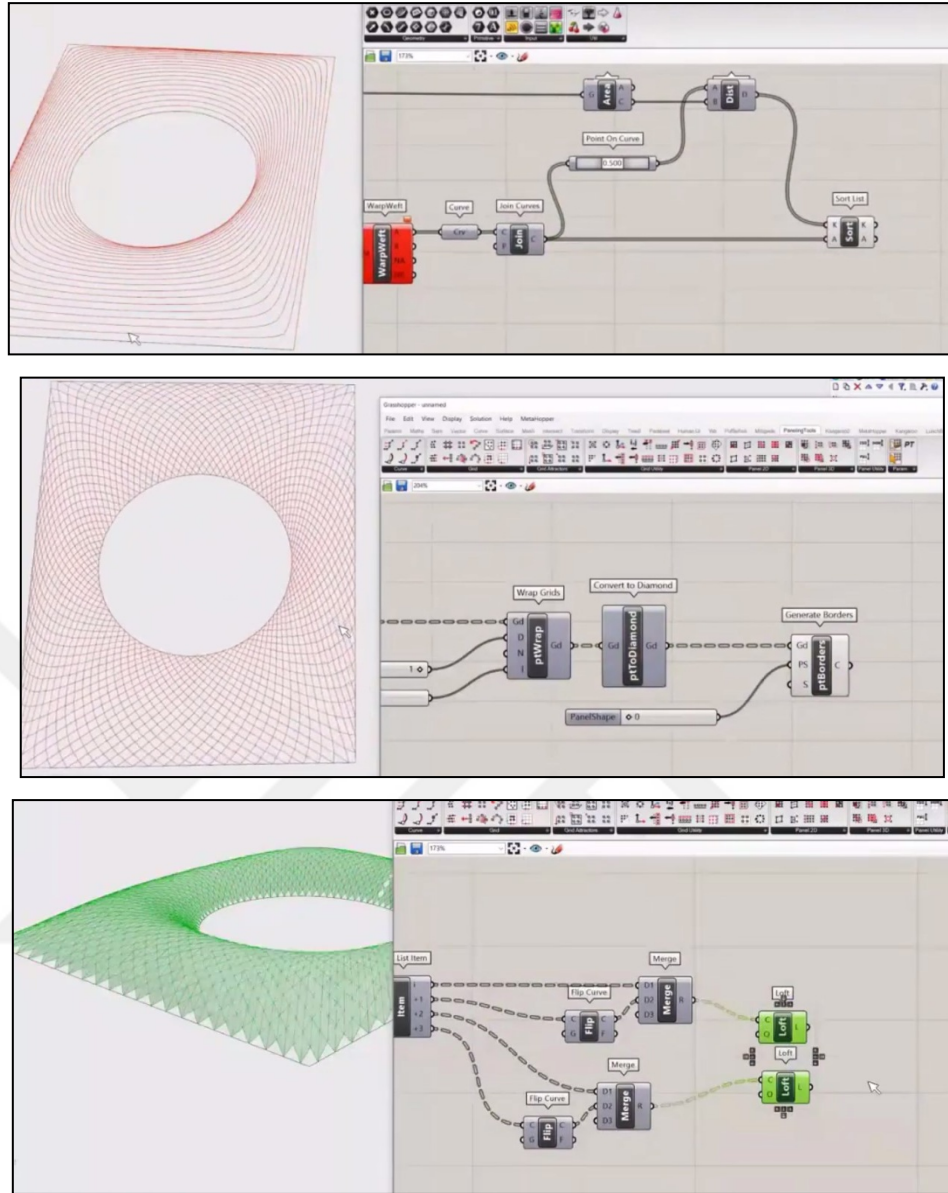
Şekil 4.25 Grasshopper’da British Museum modellemesi, yedinci adım

Daha sonrasında *Kangaroo* eklentisiyle bu oluşturduğumuz ağ şeklini daha esnek bir hale getiriyoruz. *load* ve *anchor* komutlarını kullanıyoruz.



Şekil 4.26 Grasshopper’da British Museum modellemesi, sekizinci adım

Oluşan üç boyutlu şeklin, *grid* sistemine bakarsak istediğimiz gibi üçgenlerden değil dikdörtgen modüllerden oluştuğunu görüyoruz. Bunu üçgen hale getirmek içinse *paneling tools* eklentisini kullanıyoruz.

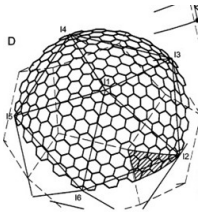


Şekil 4.27 Grasshopper’da British Museum modellemesi, dokuzuncu adım

4.3 Eden Projesi

2001 yılında yapımı tamamlanan Eden projesi, 15 hektarlık bir alanı kaplayan nemli, tropik ve ılıman bölgeleri kapsayan 8 adet biyom içeren birbirine bağlı jeodezik kubbeden oluşuyor.

Tablo 4.3 Eden projesi incelemesi (The Eden Project: The Biomes)

Eden Projesi			
Mimari	Yıl: 2001 Yer: Cornwall, İngiltere Mimar: Nicholas Grimshaw Mühendis: Arup ve Anthony Hunt Cephe/ Kabuk Alanı: 39.540 m 2 Fonksiyon: Ekosfer		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	Tri-Hex-Tri Karolaması 	Jeodezik Kubbe 	• RSTAB • BIM
Yapım	Modül		Malzeme
			• ETFE • Çelik
	Modül Sayısı: 625 altıgen modül 16 beşgen modül		Maliyet: 174 Milyon dolar

Dünya'nın en büyük botanik bahçesidir, 5.000' den fazla bitki türünü içermektedir. Waterloo istasyonundan dolayı bu proje Grimshaw'a verilmiştir. Farklı mikro iklimleri kontrol altına almanın en etkili yolunu arayan Grimshaw, alanı mümkün olan en az yüzeyle çevirmeyi öneren Buckminster US Filler tarafından icat edilen organik bir form olan jeodezik kubbeden ilham almıştır. İlk aşamada ziyaretçilere yönelik olan ve biyomlar arasında bağlantı görevi gören bir alan tasarlandı. Bu alan, giriş, bilet satış noktası ve galerilerden oluşuyor ve sahanın en üstünde yer alıyor. İkinci aşamada, biyomlar oluşturuldu. Her bir biyom farklı iklim ve bitki türlerine sahiptir. (Tablo 4.3)



Şekil 4.28 Eden projesi, jeodezik kubbelerin görünüşü (The Eden Project: The Biomes)

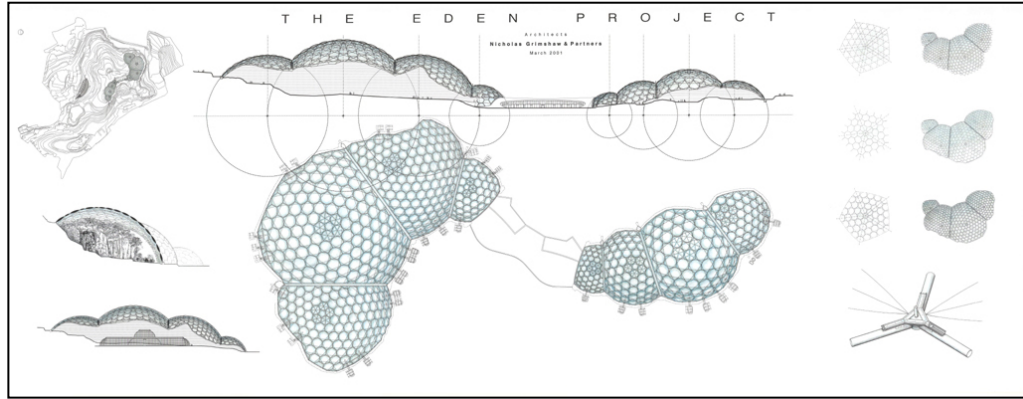
Biyomların kaplama panelleri, maksimum yüzey alanına ve minimum çevre detaylandırmasına sahip 3 katmanlı ETFE panelleridir (Şekil 4.28). Jeodezik kubbeler, farklı boyutlarda çelik strüktürler ile oluşturulmuştur. Grimshaw'ın ekibi yapıyı geliştirmek ve her bir çelik modülü 3B modellemek için Anthony Hunt ve Mero Plc ile yakın bir şekilde çalışmıştır.

Yapısal olarak her bir jeodezik kubbe, iki katmandan oluşan *hex-tri-hex* uzay çerçevesidir. Yapı strüktürü için sabun köpüğü yapısından ilham alındı. Yapı strüktüründe oluşturulan altıgenler camla kaplamak için çok büyük olduğu için ETFE

ile kaplanmıştır. ETFE panellerinin camın ağırlığının yüzde bir ağırlığında olmasından dolayı yapıdaki ağırlık azaldığı için, daha az çelik malzeme kullanılmıştır. Tüm projede toplamda 625 altıgen modül, 16 beşgen modül ve 190 adet de üçgen modül kullanılmıştır (The Eden Project: The Biomes, tarih yok). İkişer gruptan 4'er tane biyom vardır. Bunlardan ilk gruptaki biyomlarda en büyük olanın çapı, 125 metre ve yüksekliği 55 metredir. İkinci grupta ise en büyük olan biyom kubbesinin çapı 150 metre ve yüksekliği 35 metredir. Şekil 4.29'da biyomların ETFE ile kaplanması gösterilmiştir.



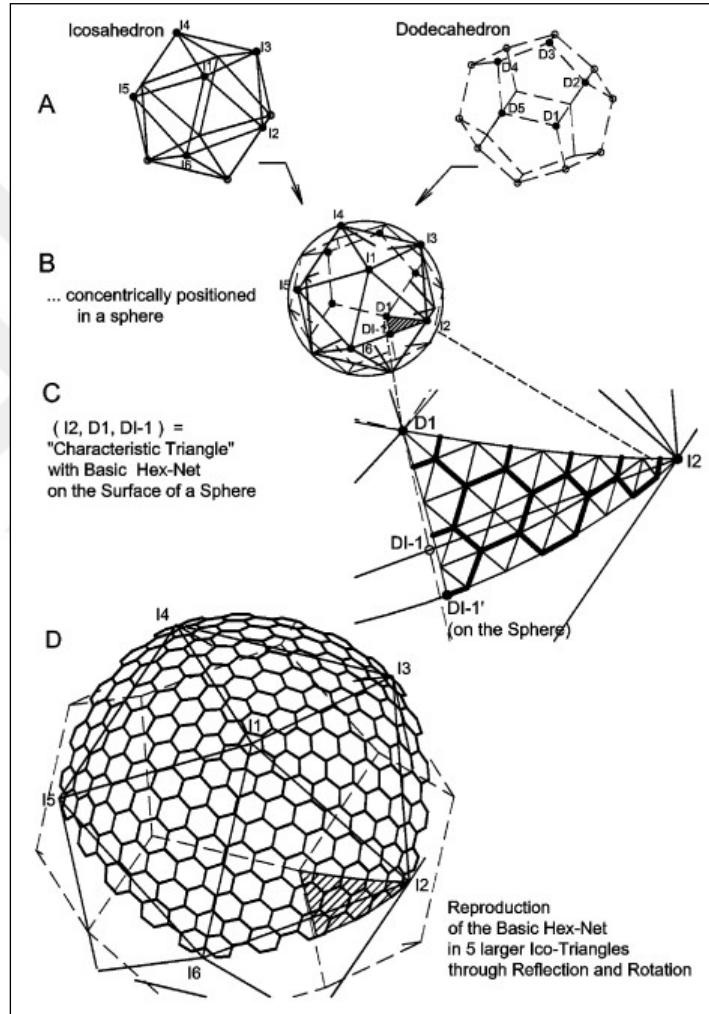
Şekil 4.29 Eden projesi, jeodezik kubbelerin yapım aşaması @apex photo agency



4.30 Eden projesi, jeodezik kubbe diyagramları (The Eden Project: The Biomes)

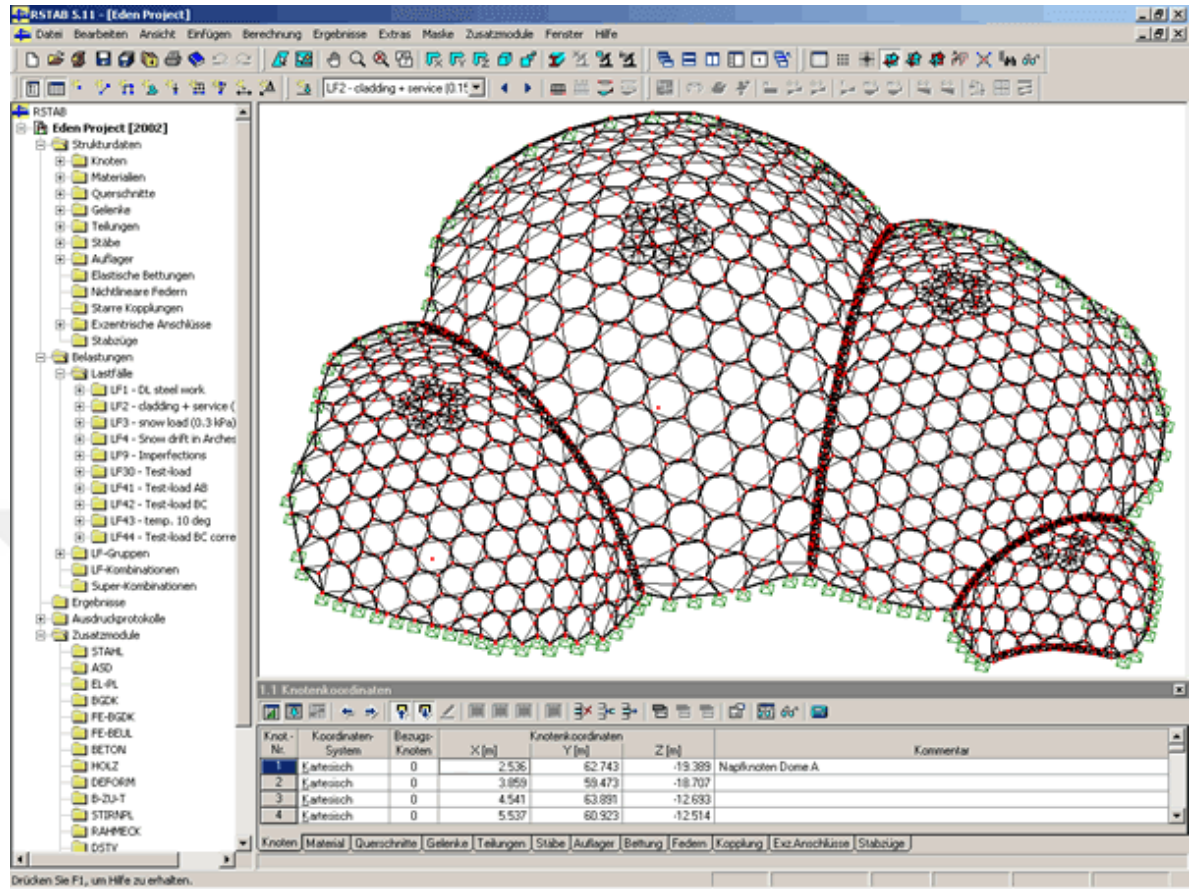
Proje için konsept çizimler oluşturulurken ilk olarak Waterloo tren istasyonunda kullanılan kirişler düşünülmüştür ancak çok fazla çelik ve az sayıda cam kullanılacağı düşünüldüğü için bu fikirden vazgeçilmiştir çünkü sera projesi için tam tersine ihtiyaç vardı

daha çok Güneş ışığı ve daha az çelik kullanımı (Knebel, Alvarez, & Zimmerman). Eden Projesi'ndeki bir kubbenin yapısal ağı, aralarında önceden belirlenmiş bir yarıçap farkı veya yapısal derinlik bulunan iki eşmerkezli küresel ağdan oluşur. Eden kubbelerinde çift katmanlı küresel bir ağ vardır, dış katmanda 'Hex-Net' adı verilen altıgen bir ağdan oluşur, iç katman ise üçgen ve altıgenlerden oluşur bu yüzden de bu karolamaya 'Tri-Hex-Net' adı verilmiştir (Şekil 4.31).



Şekil 4.31 Eden projesi, jeodezik kubbe diyagramları (Knebel, Alvarez, & Zimmerman)

Jeodezik kubbelerin altıgenleri, düz değil küresel formdadır. ETFE yastıklarının kolay montajının sağlanabilmesi için mümkün olduğunca düzlemsel altıgenler oluşturmak için özel bir algoritma geliştirilmiştir. Proje, parametrik olarak BIM ve RSTRAB programları kullanılarak modellenmiştir.

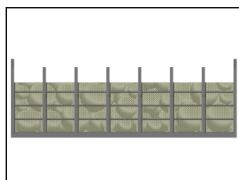
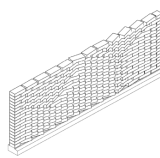


Şekil 4.32 Eden projesi, RSTRAB programında modellenmesi (Knebel, Alvarez, & Zimmerman)

4.4 Gantenbein Şarap Evi

İsviçre’ de şarap imalathanesi olarak tasarlanan Gantenbein Şarap Evi, eski binaya ek olarak yapılmış yeni servis alanları ve ziyaretçi terasından oluşuyor.

Tablo 4.4 Gantenbein şarap evi incelemesi (Gramazio Kohler Architects)

Gantenbein Şarap Evi			
Mimarî	Yıl: 2006 Yer: İsviçre Mimar: Gramazio Kohler Architects ve Bearth & Deplazes Architekten Mühendis: Jürg Buchli, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich Cephe/ Kabuk Alanı: 400 metre kare Fonksiyon: Şarap Evi		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım
	Hacmin karolanması	Pixel Mapping 	Grasshopper (Speedsim+ Diva eklentileriyle)
Yapım	Modül	Malzeme	
		Tuğla	
	Modül Sayısı: 72	Maliyet: -	

2006-2007 yılları arasında yapımı tamamlanan imalathanenin mimari tasarımı Bearth & Deplazes mimarlık firması tarafından yapılmıştır, cephe tasarımını ise Gramazio ve Kohler mimarlık yapmıştır (Tablo 4.4). Gantenbein şarapları, özel bir üretim yöntemiyle yapılmaktadır. *Terroir* olarak adlandırılan bu yöntem, şarap evinin mekân organizasyonunda ve mimarisinde de büyük bir rol oynuyor (Bilgiç, 2015). *Terroir*; iklim, toprak, hava ve üzümün yetiştirildiği konum anlamına gelmektedir. Bu üç elemanın birleşimi şarap tadını etkiler.

Proje tasarlanırken, özgün bir form oluşturmak için parametrik ve robotik tasarımdan yararlanılmıştır. Cephe malzemesi olarak tuğla kullanılmıştır. ETH’ de geliştirilen robotik üretim yöntemi 20.000 tuğlanın her birini tam olarak programlanmış parametrelere göre istenilen açıda ve aralıkta koyulmasını sağlamıştır. Her bir duvar istenen ışık ve hava geçirgenliğine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Cephede beton çerçeve içinde üzümler varmış gibi bir görünüm oluşturulmuştur (Şekil 4.33).



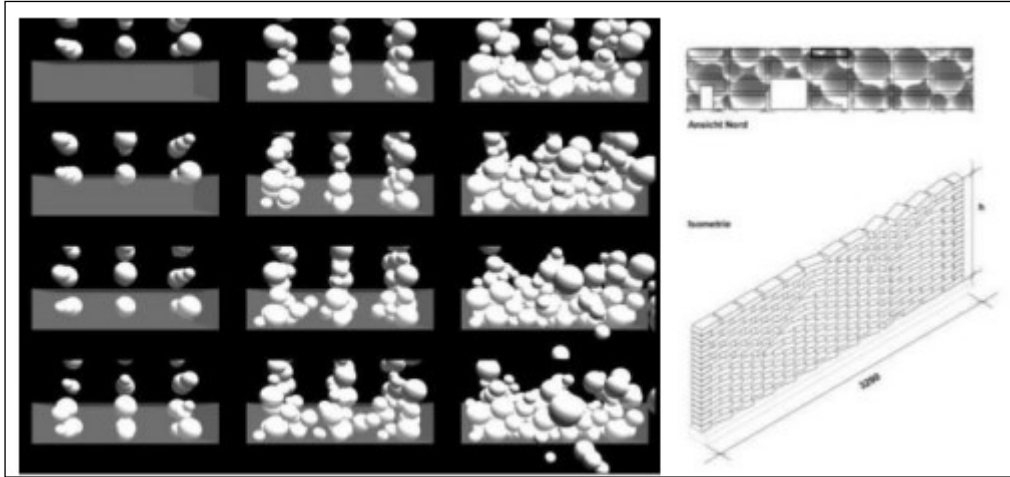
Şekil 4.33 Gantenbein Şarap Evi Cephesi @ Ralph Feiner

Yapının cephesi için kullanılan robotik yöntem, ETH Zürich’ te geliştirilmiştir. Kullanılan parametrik tasarım aracı Grasshopper, 20.000 tuğlanın her birini tam olarak programlanmış parametrelere göre istenilen açıda ve aralıkta koyulmasını sağlamıştır. Her bir cephe, istenilen ışık ve hava geçirgenliğine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Direkt ışık, üzümlerin fermantasyonu üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğu için, yapılan analizler ile optimum seviyede ışık alınması sağlanmıştır (Şekil 4.34).

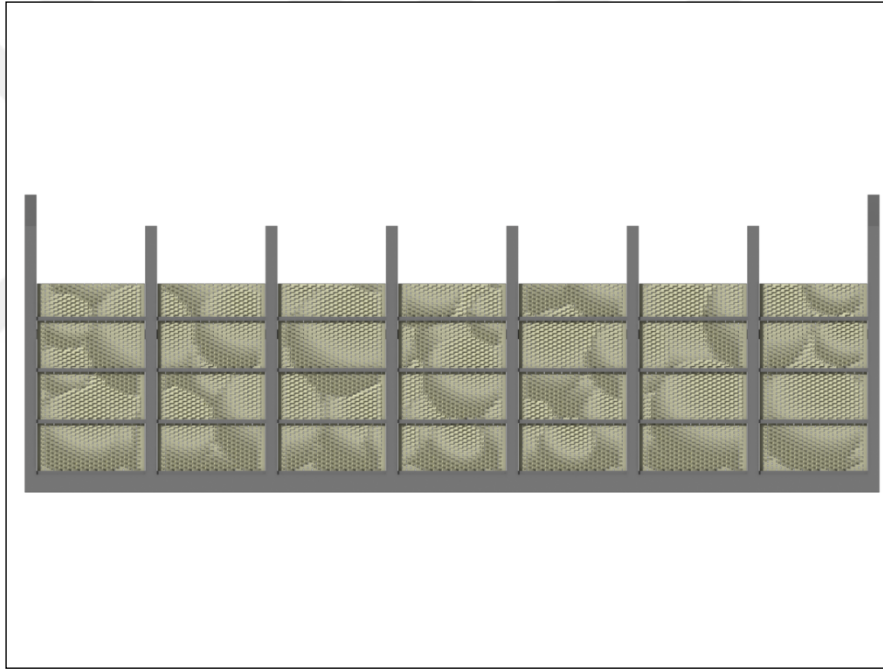


Şekil 4.34 Gantenbein Şarap Evi, Fermantasyon Odası @ Ralph Feiner

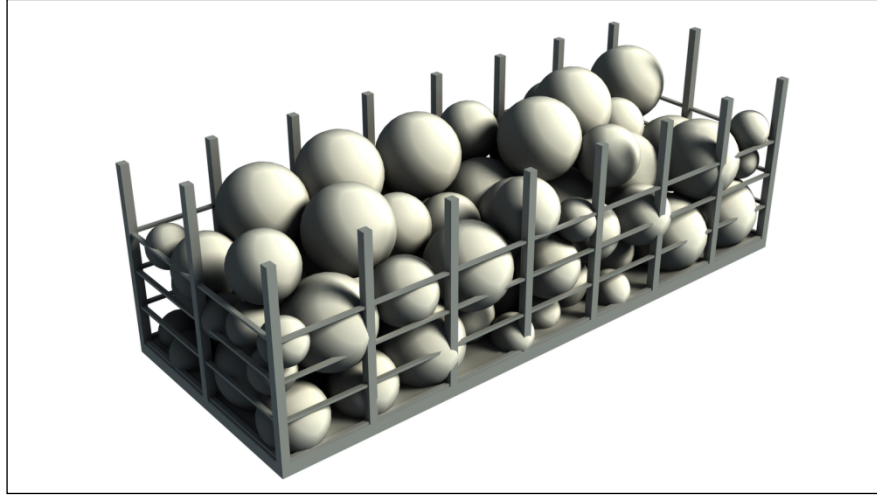
Yapı strüktürü, betonarme olarak yapılmış olup tuğlalar dolgu görevi görmüştür. Parametrik tasarım programı olarak Grasshopper’ın diva eklentisi kullanılmıştır. Proje tasarlanırken modellemesi rhino ile yapılmıştır ve sonrasında optimum seviyedeki çevresel faktörleri hesaplayabilmek için diva eklentisi kullanılmıştır (Şekil 4.35). Diva eklentisinde; yıllık Güneş ışığına maruz kalma (ASE) ve günlük Güneş ışığına maruz kalma (DA) hesaplamaları yapılmıştır (Elghandour, Saleh, Aboeineen ve Elmokadem). Proje konum bilgileri girilerek, çevresel analizler yapılmış olup bu sonuçları en uygun şekilde oluşturacak olan tuğla açıları hazırlanmıştır. Şekil 4.36 ve şekil 4.37’de de görebileceğimiz gibi, daha sonra bu sonuca uyacak ama aynı zamanda üzüm görüntüsü oluşturacak cephe tasarımı için, rhino ile ‘pixel mapping’ yapılmıştır.



Şekil 4.35 Gantenbein Şarap Evi cephe tasarım simülasyonu (Gramazio Kohler Research)

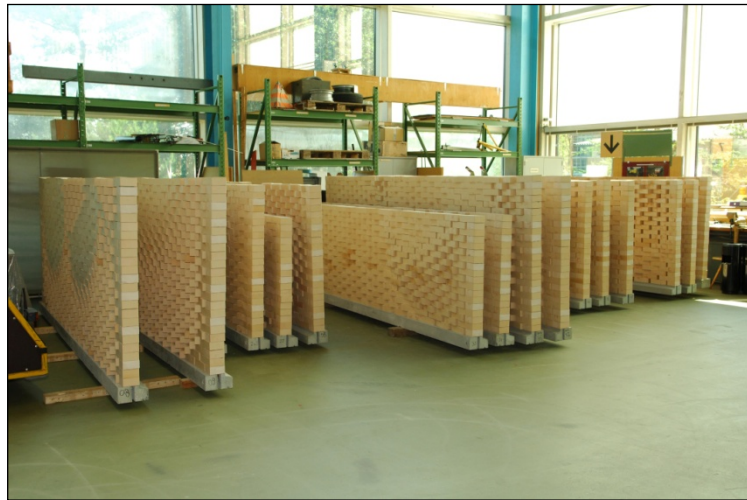


Şekil 4.36 Gantenbein Şarap Evi cephe tasarım pixel mapping (Gramazio Kohler Research)



Şekil 4.37 Gantenbein Şarap Evi cephe tasarım simülasyonu (Gramazio Kohler Research)

Tasarım ve çizim aşaması tamamlandıktan sonra, üretim ve uygulama aşaması için robotik tasarımdan faydalanılmıştır. Cephe elemanları ETH Zürich araştırma merkezinde 3 ayda üretilmiştir. Cephe toplamda 72 parça modülden oluşmaktadır. Tuğlalar, robot tarafından atölyede monte edildi, modüller oluşturuldu daha sonra bu modüller şantiye alanına taşındı ve vinç yardımıyla betonarme çerçeveye monte edildi (Gramazio Kohler Research, tarih yok). Tuğlalar monte edilirken, burada açılı ve bu deseni oluştururken farklı harç yüksekliklerinden faydalanılmıştır, 5-30 mm arasında değişen harç kalınlığı kullanılmıştır. Tek tek tuğlaların dönüşü alttaki harç kalınlığıyla ilişkiliydi (-20 derece ile + 20 derece dönüş) (Şekil 4.38).



Şekil 4.38 Gantenbein Şarap Evi duvar modülleri (Gramazio Kohler Research)



Şekil 4.39 Gantenbein Şarap Evi duvar modüllerinin şantiyede montaj yapılması (Gramazio Kohler Research)

Oluşturulan modüller, şekil 4.39’da gördüğümüz gibi vinçlerle şantiye alanına taşınmıştır. Modüller robotlar yardımıyla yapılmıştır. Robotik üretim için kullanılan robot, IRB-140 dır. Robotun kol uzunluğu 42 inç’tir (şekil 4.40).

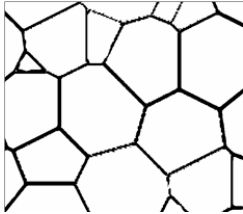
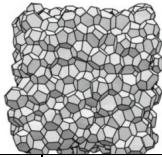


Şekil 4.40 Gantenbein Şarap Evi, robotik üretimde kullanılan IRB-140 robotik kol (Gramazio Kohler Research)

4.5 Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi

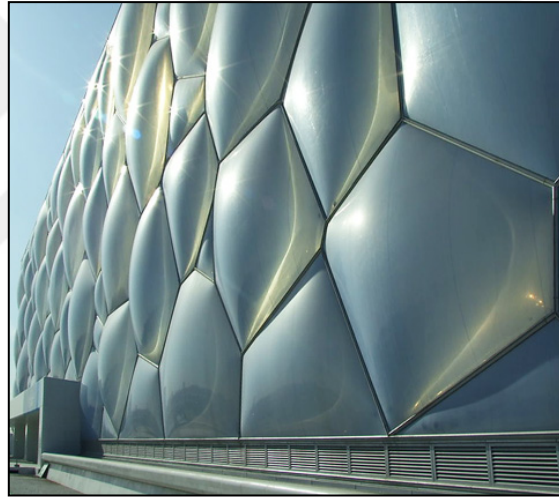
Pekin Ulusal Su Sporları Merkezi veya diğer adıyla ‘Su Küpü’, 2008 Olimpiyat Oyunları için inşa edildi.

Tablo 4.5 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		
	Cephe/ Kabuk Alanı: 100.000 metre kare		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	 Aperiyodik Voronoi	Weaire-Phelan yapısı- Düzgün Olmayan Çokyüzlüler 	• BIM • Strand • Visual Basic • Microstation
Yapım	Modül		Malzeme
	 Voronoi Hücresi		• ETFE • Çelik
	Modül Sayısı: Çatı strüktüründe 7 Cephelerde 15 farklı modül		Maliyet: 140 Milyon dolar

2003 yılında yarışma projesi ile seçilen projenin konsepti, Çin'in geleneksel evleri ile ilişkilendirilmiştir (Korqa, 2015) Bir zamanlar Pekin'de su kaynağı kıtlığı yaşandığından, suyu simgeleyen bir yapı çok ilgi görmüştür. Ayrıca bina, yapı elemanlarının karmaşıklığı ve formun basitliği ile görenler üzerinde güzel bir etki bırakmaktadır.

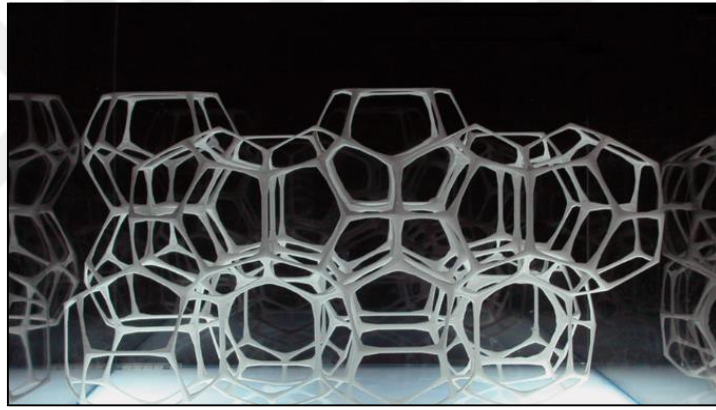
Su küpü, içerisinde 50 metrelik bir yüzme havuzu, 33 metrelik bir dalış havuzu, 50 metrelik bir ısınma havuzu, su parkı ve bir restoran bulundurmaktadır. Kare bir plandan oluşan yapının kenar uzunluğu 177 metre olup yüksekliği ise 31 metredir (Arup, 2007). Olimpiyatlar bittikten sonra işlevine eğlence merkezi olarak devam eden yapının en ilgi çeken bölümü ise cephe tasarımında kullanılan malzemedir.



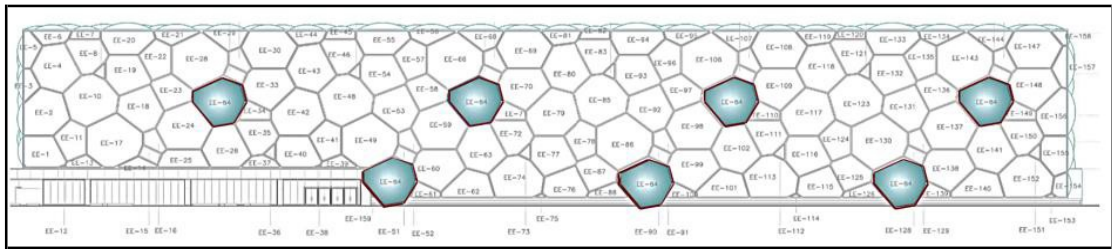
Şekil 4.41 ETFE kaplı cephe görüntüsü (Stylepark, 2010)

Sürdürülebilirliği korumak isteyen tasarımcılar, cephe tasarımında; cam ağırlığının yüzde 1' i ağırlığında ve iyi bir yalıtım malzemesi olan ETFE (Etilen tetrafloro etilen) 'i tercih etmişlerdir (Şekil 4.41). ETFE, Güneş enerjisinin %20' sini yapı içerisine hapseder ve bu enerji yapı içerisinde ısıtma için kullanılmaktadır. Yapılan analizlere göre, malzeme seçiminden dolayı enerji tüketimi %30 azalmıştır (Şekil 4.47) (Arup, 2007). Binanın cephesi, 100.000 m²' lik ETFE kaplamasından oluşmaktadır. Binanın çatısı, binanın ihtiyacı için yeniden kullanılan ve geri dönüştürülen suyun %80' ini tutmaktadır. 22.000 çelik boru ve 12.000 düğüm noktasından oluşan cephe sisteminde 3000 ETFE kabarcığı kullanılmıştır (Korqa, 2015) (Tablo 4.5).

Cephe sistemi 3 boyutlu bir voronoi diyagramıdır. 2. Bölümde bahsettiğimiz gibi voronoi diyagramı, periyodik karolamadır. Bina strüktürü, sabun köpüğünden esinlenilerek tasarlanmıştır. Sabun köpüğüne benzer yapı olan Weaire Phelan (WP) geometrisi yapılmak istenmiştir. Weaire Phelan geometrisi, organik ve düzensiz görüldüğü halde aslında tekrarlanabilir (dolayısıyla modüler) ve düzenlidir (periyodik) (Carfrae, 2007). Bu geometri, uzay karolama örneği olduğu gibi, uzayda bulunan bir hacmin en az yüzey alanına sahip, farklı çok yüzlülere nasıl bölüneceği sorusuna da cevap olmuştur. Model, bir köpüğün ortasından bir parça dilimlenerek oluşturulmuştur. Eşit hacimli, düzgün olmayan 14 ve 12 yüzlüler kullanılmıştır. Hücreler modüler ve periyodiktir; çatı bölümünde 7, duvarlarda ise 15 farklı boyutta hücre modeli bulunmaktadır (Şekil 4.42) (Carfrae, 2007).

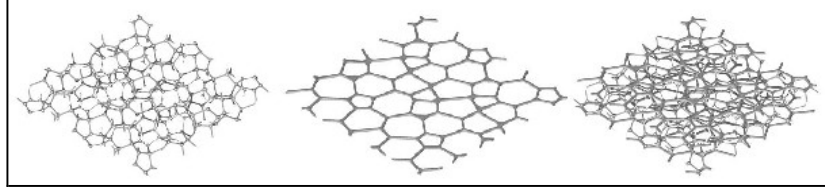


Şekil 4.42 Weaire Phelan geometrisi ile birleşen çokyüzlüler (Arup, 2007)



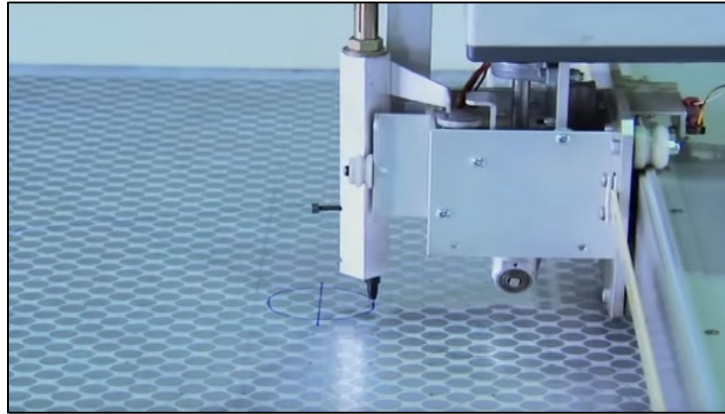
Şekil 4.43 Cephe de kendini tekrarlayan hücreler (Carfrae, 2007)

Çokgen uzay kafes çerçevesi ile düz yüzeyli iç ve dış katman birleştirilmiş ve ikisinin kombinasyonu olan bir uzay kafes strüktür meydana getirilmiştir (Şekil 4.44) (Oñate ve Kröplin, 2005).



Şekil 4.44 Katmanların birleştirilmesi (Oñate ve Kröplin, 2005)

Cephede kullanılan ETFE malzemesi için, bilgisayar programları kullanılmıştır. ETFE malzemesini istenilen ölçülerde üretebilmek için, iki boyutlu veri dosyaları hazırlanmıştır bu veriler kullanılan CNC makinelerine tanımlanmıştır (Şekil 4.45). Makinelerde bıçaklar yardımıyla istenilen boyut ve şekilde ETFE malzemeleri kesilmiştir, daha sonra yerleştirilecekleri çokgen yüzeylere göre numara verilmiştir bu modüllere. Numaralandırılan modüller, uygulama sırasında yapı iskeletleri kullanılarak çokgen strüktür sistemine elle geçirilerek birleştirilmiştir (Şekil 4.49 ve Şekil 4.50). Daha sonra aradaki boşluklar fanlar ile şişirilmiştir ve hücrelerde bulunan sensörler sayesinde doldurulan havayı sabit basınçta tutması sağlanmıştır (Şekil 4.46 ve Şekil 4.46) (Talley, 2008).



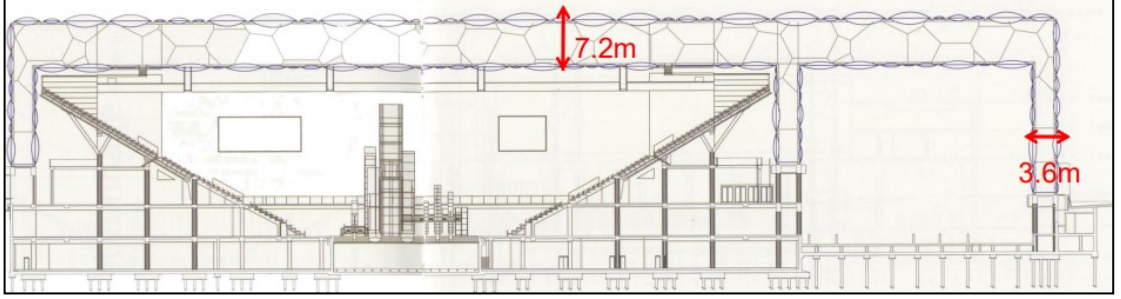
Şekil 4.45 ETFE'nin çokgen yüzeylerine uyacak şekilde üretilmesi (Talley, 2008)



Şekil 4.46 Şantiyede çokgen yüzeylerine ETFE'nin yerleştirilmesi (Talley, 2008)



Şekil 4.47 ETFE balonları arasındaki ısıtılan havanın kullanılması (Carfrae, 2007)



Şekil 4.48 Cephe kesiti (Talley, 2008)

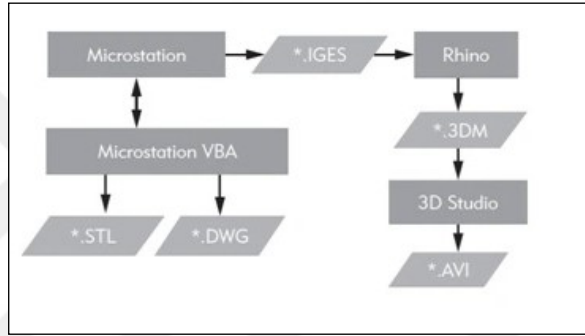


Şekil 4.49 ETFE kaplanmadan önceki strüktür görseli (Talley, 2008)



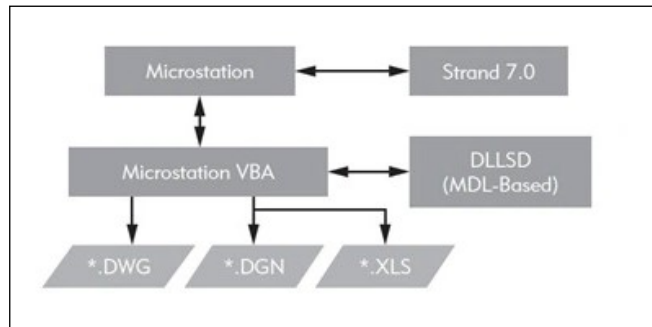
Şekil 4.50 ETFE kaplanırken strüktür görseli (Talley, 2008)

Yapının tasarım aşamasında BIM kullanılmıştır. Projenin parametrik tasarım programları ile yapılış aşamaları; Microstation VBA’da scriptler ile model yapısı oluşturulmuştur. Bu model yapısı, görselleştirme ve modüller için başka bir CAD platformuna aktarılmıştır. Görselleştirme için ARUP, AVI dosyaları oluşturmak için dosyaları Microstation'dan Rhino'ya oradan da 3dsmax’e aktarmaya yarayan bir sanal gerçeklik geliştirdi ancak iyi çalışmadı çünkü 1.2 GB ile çok büyük dosyalar oluşturuldu. Modüller için bu dosyalar 3D Microstation’dan STL dosyasına ve oradan da yapısal analizlerin yapılması için DXF formatında strand 7.0 a aktarıldı (Şekil 4.51 ve Şekil 4.52).



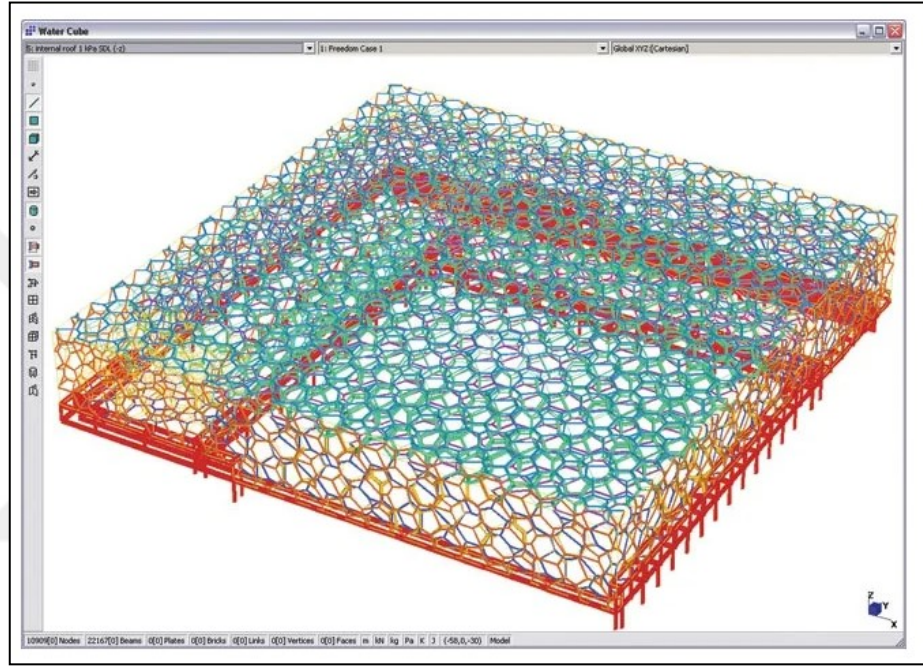
Şekil 4.51 Yapının parametrik olarak modelleme aşamalarından veri aktarımı (Sacks, Eastman, Lee, & Teicholz, 2018)

Tasarım geliştirme aşamasında model, VBA komut dosyası ile AutoCAD (dwg) ve Microstation Triforma (DGN) çizimlerine ve ayrıca Microsoft Excel (XLS) veritabanına aktarıldı. VBA ile her yapısal elemanın boyutları ve özellikleri girildi. Doğru modeli elde edebilmek için bu yapısal elemanlar Triforma ile şekillendirildi.



Şekil 4.52 Yapının parametrik olarak modelleme aşamalarından veri aktarımı (Sacks, Eastman, Lee, & Teicholz, 2018)

Yapısal verilerin oluşturulması için, bir BIM yazılımı olan MicroStation kullanılmıştır. Bu program ile, boyut, malzeme ve diğer bilgilerle ilgili veriler çok etkili bir şekilde çıkarılmıştır. Tüm yapısal bilgileri oluşturmak için 112 bölüme ihtiyaç vardı ve microstation bunu kolayca oluşturdu. Bu programın ana faydalarından bir tanesi de projedeki insan hatalarını azaltması ve tüm değişiklikleri model üzerinde otomatik olarak güncellemesiydi.



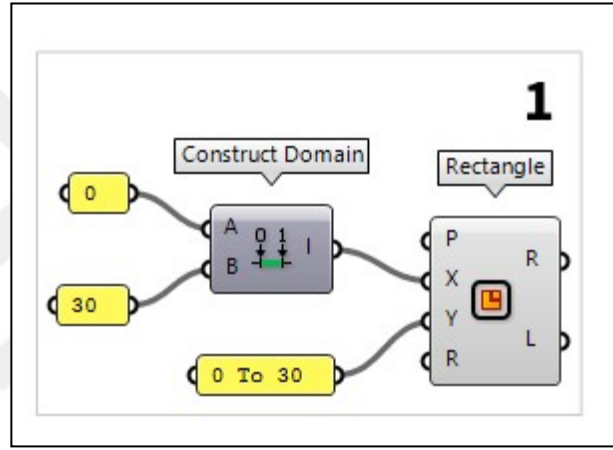
Şekil 4.53 Yapının Strand programında modellenmiş görüntüsü (Beijing, 2005)

Bu yapının en büyük zorluklarından birisi, yapısal tasarımı ve imalatıydı. İlk önce çelik yapının boyutlarının optimize edilmesi gerekiyordu ve bunu yaparken Pekin'in sismik durumu göz önünde bulundurulmalıydı. Arup, baştan itibaren tüm optimizasyon sürecini Visual Basic 6.0 programını kullanarak yönetti. Daha sonra komut dosyası oluşturuldu. Bu komut dosyası ile;

- Projenin tam dökümantasyonu (plan, kesit, görünüşler ve model dosyası) oluşturuldu.
- Modelleme hızı artırıldı (tüm model 25 dakikada oluşturuldu)
- 3dAutoCad' e aktararak render görselleri oluşturuldu

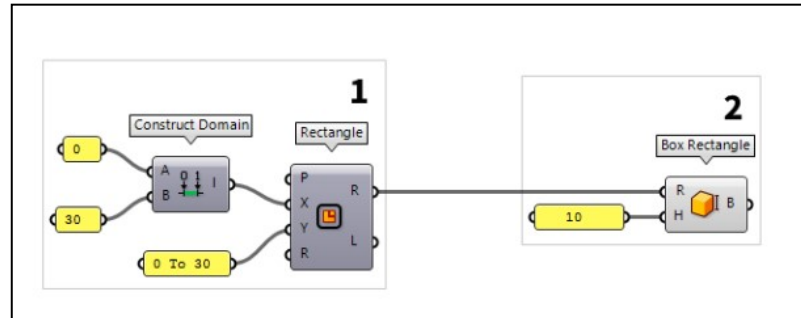
Peki bu tasarımı BIM yerine Rhinoceros ve Grasshopper kullanarak da yapabilirler miydi? Nasıl yapıldı kısaca inceleyelim;

- 1.Adım: K p m z n hacmini belirlemek. Bunu yapmak için Grasshopper'daki çalışma sayfamıza *Rectangle* yerle tiriyoruz.  l  lerimiz için bu *rectangle* ın X ve Y verilerine etki alanı (*construction domain*) değerleri girelim. Minimum ve maksimum değerleri tanımlıyoruz burada ( ekil 4.54).



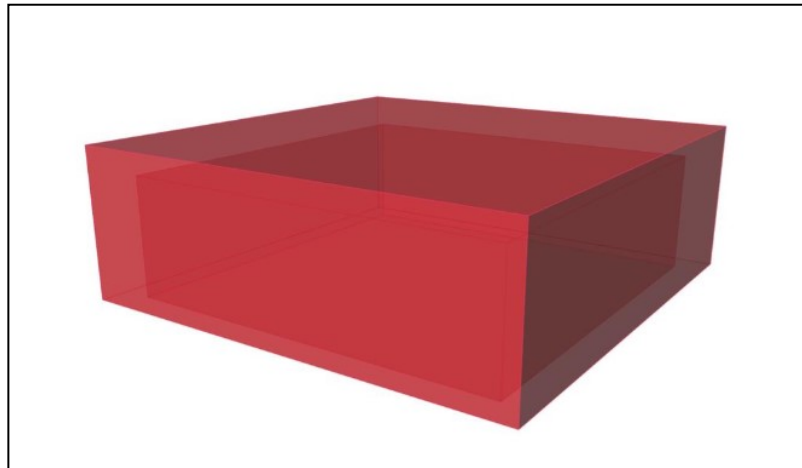
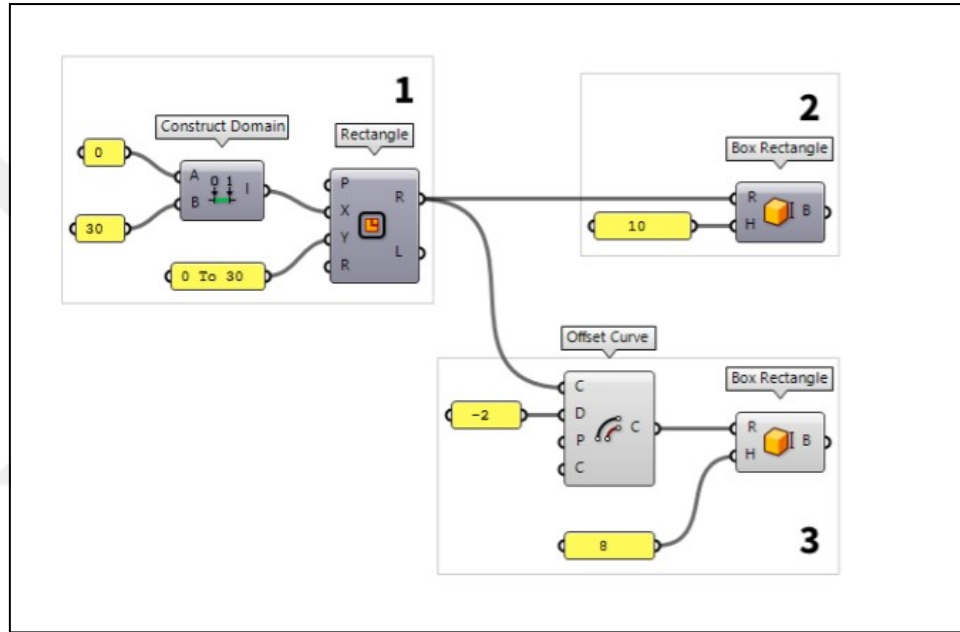
Şekil 4.54 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 1. adım

- 2.Adım: Bu tanımladığımız dikdörtgene hacim vermek için, dikdörtgenin çıktı kısmındaki *R*'ye, *Box* a ba larız. Ve yükseklik değeri için de H girdisine bir değer tanımlarız ( ekil 4.55).



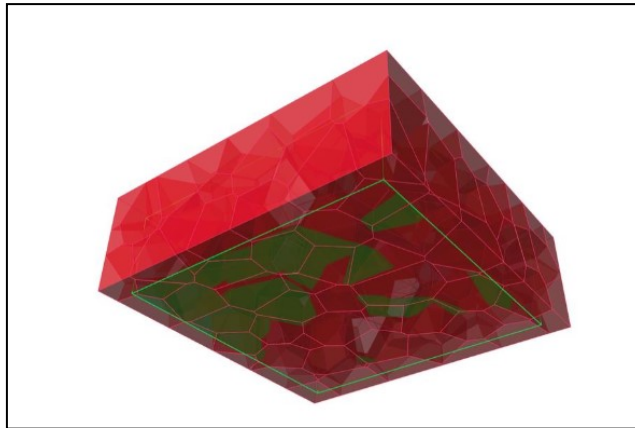
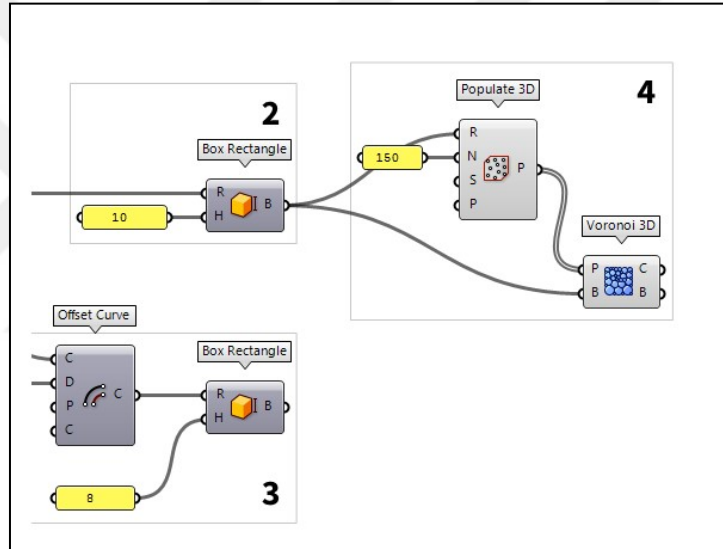
Şekil 4.55 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 2. adım

- 3.Adım: İçerideki ikinci küpü oluşturmak için *offset curve* komutunu kullanıyoruz. Bu ikinci dikdörtgeni, ilk yaptığımız dikdörtgenin çıktısı olan *R*'ye bağlıyoruz ve *D* girdisine de değer veriyoruz ancak burada içerdeki küpü oluşturmak istediğimiz için değeri negatif sayıyla tanımlamamız gereklidir. Ve sonrasında bu dikdörtgenimize de hacim vermek için *Box Rectangle* tanımlıyoruz ve ilkinden daha küçük bir değer veriyoruz (Şekil 4.56).



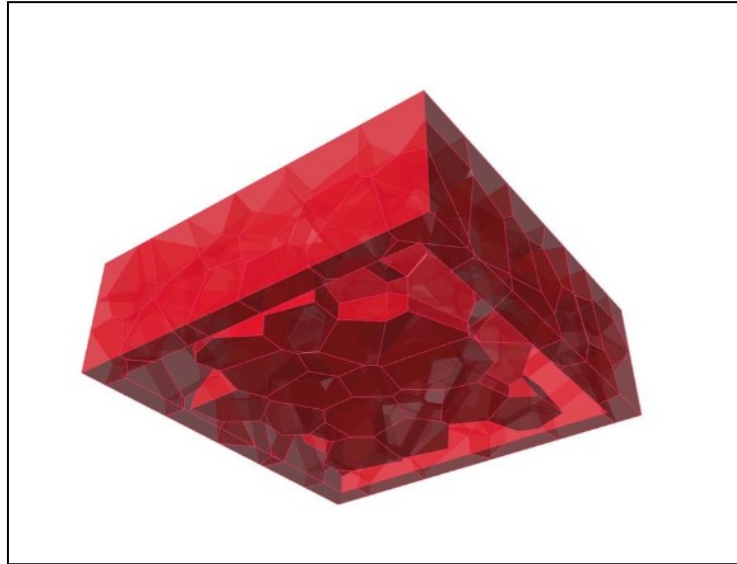
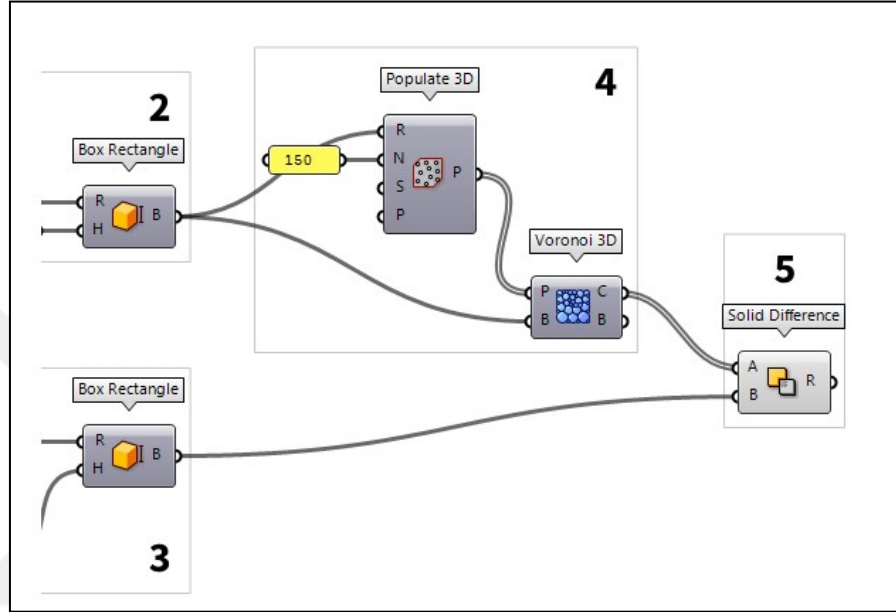
Şekil 4.56 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 3. adım

- 4.Adım: *Voronoi* yapısını oluşturmak. Birinci ve ikinci küpümüz arasında üç boyutlu bir *voronoi* yapısı oluşturmamız gerekiyor. Bunun için *voronoi* hücrelerinin üretileceği noktalara ihtiyacımız var, büyük küpümüzde rastgele 3 boyutlu noktalar oluşturuyoruz uzay sisteminde. Bunun için *Populate 3D* komutunu kullanabiliriz. Bu komutta *R*'ye büyük küpümüzün çıktısını bağlıyoruz. *N* girdisine de kaç adet nokta oluşturmak istiyorsak onu tanımlıyoruz. 3 boyutlu nokta komutumuzu *voronoi 3D* komutumuza bağlıyoruz. Yine aynı şekilde *voronoi* şekli oluşturmak istediğimiz küpümüzü de bu komuta bağlıyoruz (Şekil 4.57).



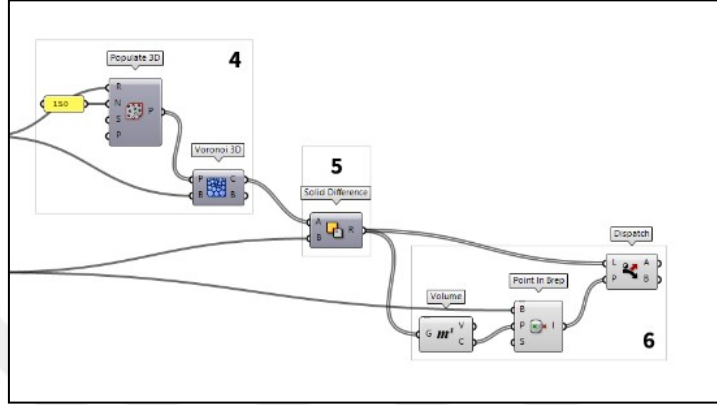
Şekil 4.57 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 4. Adım

- 5.Adım: 4. Adımda, voronoi hücrelerinin hem büyük hem küçük hacmi doldurduğunu görüyoruz ancak istediğimiz bu değil. Bunun için voronoi hacmini kesmemiz gerekiyor. Bunun için de *solid difference* komutunu kullanıyoruz. Büyük hacimden küçük hacmi çıkartıyoruz böylece sadece cephede voronoi hücrelerini oluşturmuş olacağız (Şekil 4.58).



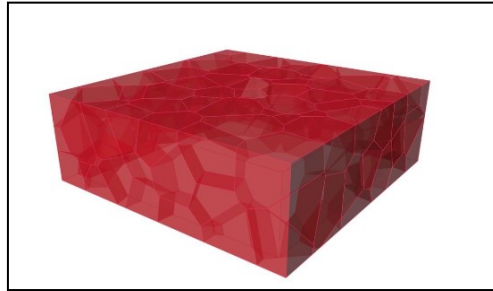
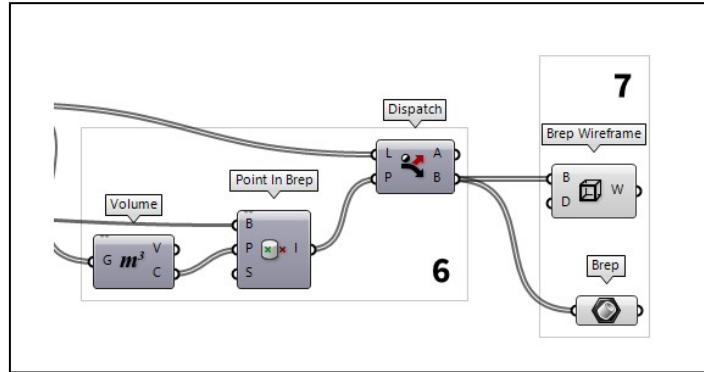
Şekil 4.58 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 5. adım

- 6.Adım: Bir önceki adımda, hacim kesme işlemimiz işe yaradı ancak büyük hacmimizin içinde hala voronoi hücreleri var. Bunu filtrelemek için, noktalarımızın sınırlarını belirleyelim. Bunun için *volume*, *point in brep* ve *dispatch* komutlarını kullanalım (Şekil 4.59).



Şekil 4.59 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 6. adım

- 7.Adım: Son adımımızda da hücrelerden kenarları çıkarmak için *brep wireframe* komutunu kullanırız (Şekil 4.60).

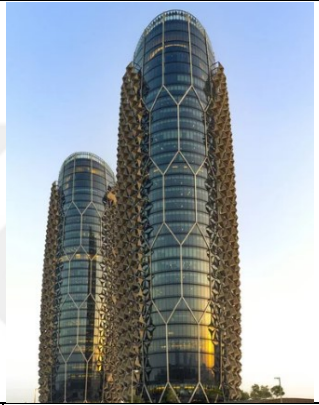
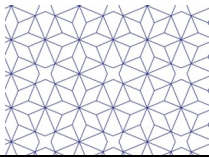
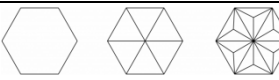
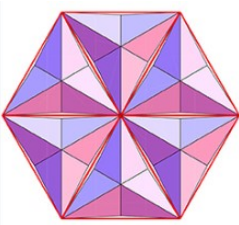


Şekil 4.60 Yapının Grasshopper ile modellenmesinde 7. adım

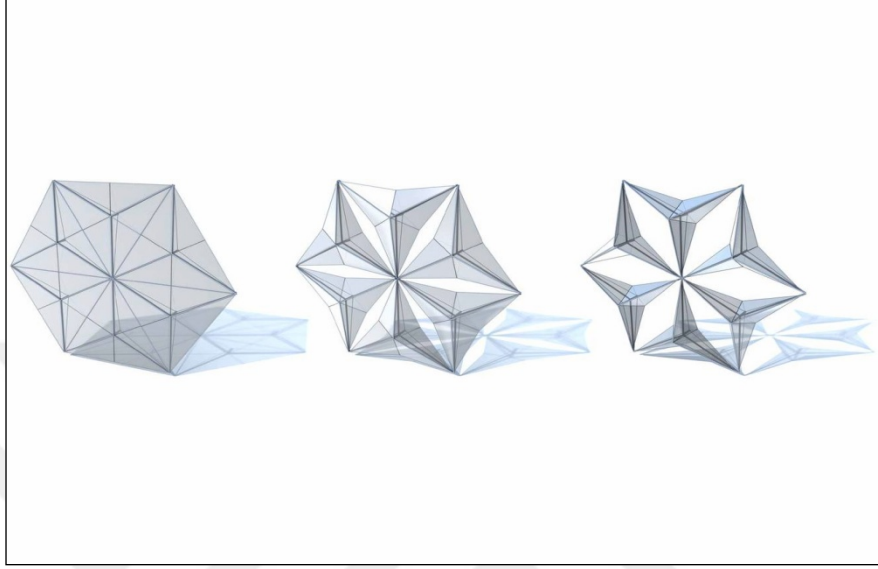
4.6 Al Bahar Kuleleri

Aedas mimarlık ofisi tarafından Abu Dhabi’de inşa edilen Al Bahar kuleleri, Abu Dhabi Yatırım Konseyi için yapılan uluslararası mimari yarışma için tasarlanmıştır (Okumuş, 2020).

Tablo 4.6 Al Bahar kuleleri incelemesi (Ciento, 2012)

Al Bahar Kuleleri			
Mimari	Yıl: 2012 Yer: Dubai Mimar: Aedas Architects Mühendis: Arup Cephe/ Kabuk Alanı: Fonksiyon: Ofis Binası		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	Maşrabiya karolaması 	 Eşkenar üçgenlerden oluşur	• BIM • CODE
Yapım	Modül		Malzeme
			• PTFE • Çelik • Cam
	Modül Sayısı: Tek tip Toplamda 2098 panel vardır		Maliyet: 390 Milyon dolar

Birleşik Arap Emirlikleri'nde 25 katlı ikiz kulelerin en dikkat çeken özelliği cephe kaplamasıdır. Koza görünümüne bu yapılar, geleneksel İslami deseni olan *maşrabiya*dan esinlenmiştir (Tablo 4.6).



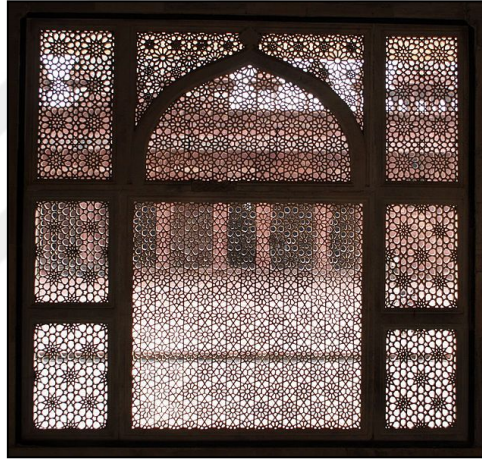
Şekil 4.61 Al Bahar kuleleri gölgeleme elemanı diyagramı (Cliento, 2012)

Abu Dhabi'nin hava koşulları göz önünde bulundurularak tasarlanan kuleler, şimdiye kadar alışık olduğumuz sabit gölgeleme elemanları yerine kinetik, açılır kapanır gölgeleme elemanlarına sahiptir. Al Bahar kuleleri, gün boyu Gün Işığı'na göre açılıp kapanabilen 2098 adet hareketli paneller içerir. 145 metrelik kulelerin, gölgeleme sistemi parametrik tasarım programları ile tasarlanmıştır. Ana binaların 2 metre dış kısmına ikincil cephe olarak tasarlanan gölgeleme elemanları, desen olarak *maşrabiya* oluşturmak için üçgen panellerden oluşturulmuştur (Şekil 4.61). Işığı filtreleyen ve parlamayı azaltan bu gölgeleme elemanları, fotovoltaiik panellerden elde edilen yenilenebilir enerji ile çalışırlar. Gölge elemanları kulelerin Kuzey cephesi hariç tüm cephelerini sararlar. Geceleri tüm modüller açık olur, cam cephe tamamen görünür. Doğu cephesinde sabahları Güneş doğarken, o cephedeki *maşrabiya*lar kapanmaya başlar.

Kulelerin genel şekli gölgeleme sistemini tamamlamak için tasarlanmıştır. Kinetik paneller, enerji kullanımı yüzde 50 azaltmıştır. Yapı, Birleşik Arap Emirlikleri'nde *Leed Silver* alan ilk binalardan birisidir. Kulelerin Güney cephesine bakan çatılarında

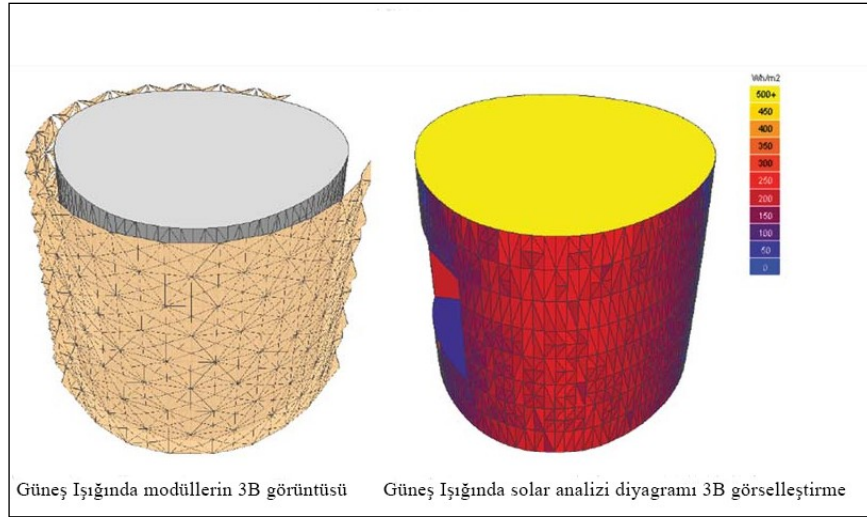
bulunan fotovoltaik paneller sayesinde yapının enerjisi için gerekli olan enerjinin yüzde 5'i üretilir. Ofis binaları olarak kullanılan bu kuleler, gölgeleme sistemi sayesinde çalışma saatleri aralığında optimum Güneş ışığını almaktadır. Ayrıca tavanlara yerleştirilen ışık sensörleri sayesinde, Güneş'ten gelen ışık optimum seviyenin altına düştüğünde otomatik olarak yapay aydınlatmalar açılmaktadır.

Maşrabiya deseni, İslam mimarisinde adını gölgeleme perdesi anlamına gelmektedir. Geleneksel Arap mimarisinde pencerelerin önünde gölgeleme elemanı olarak sıkça kullanılmaktadır. *Maşrabiya*lar Arap mimarisinde, gölgeleme elemanının yanı sıra mahremiyet için de oldukça kullanılmaktadır (Şekil 4.62).

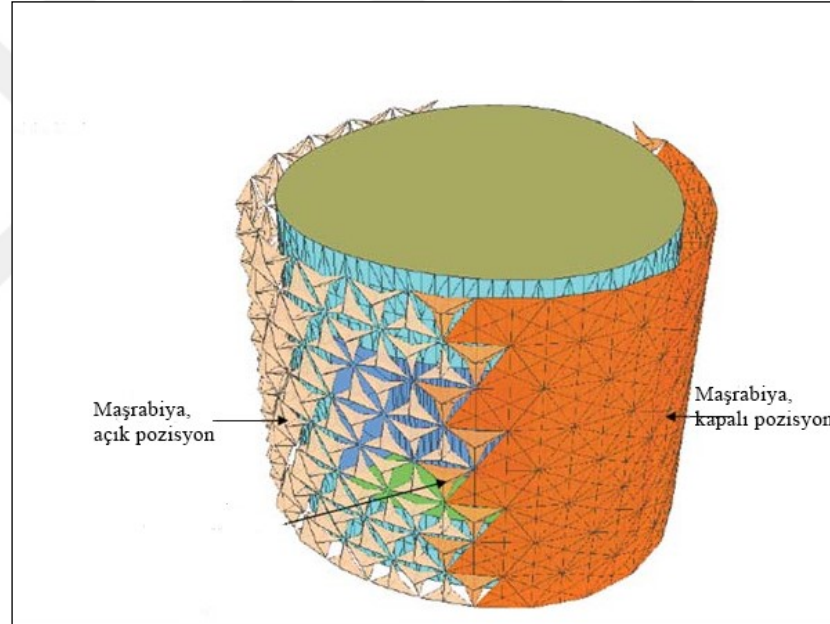


Şekil 4.62 Geleneksel maşrabiya deseni (Buffoni, 2017)

Yapıda gölgeleme elemanı olarak kullanılan her bir panelin yüksekliği 4200 mm ve açıklığı 3100 mm dir. Her bir modül, birbirinden bağımsız şekilde açılıp kapanır. Çelik iskelet sistemi üzerine monte edilen bu paneller, PTFE (politetrafloroetilen) malzemeden oluşmaktaydı (Attia, Evaluation of Adaptive Facades: The Case Study of Al Bahar Towers in the UAE, 2017) Panellerin üzerinde bulunan Güneş, rüzgâr vb. sensörleriyle paneller kinetik olarak çalışmaktadır.

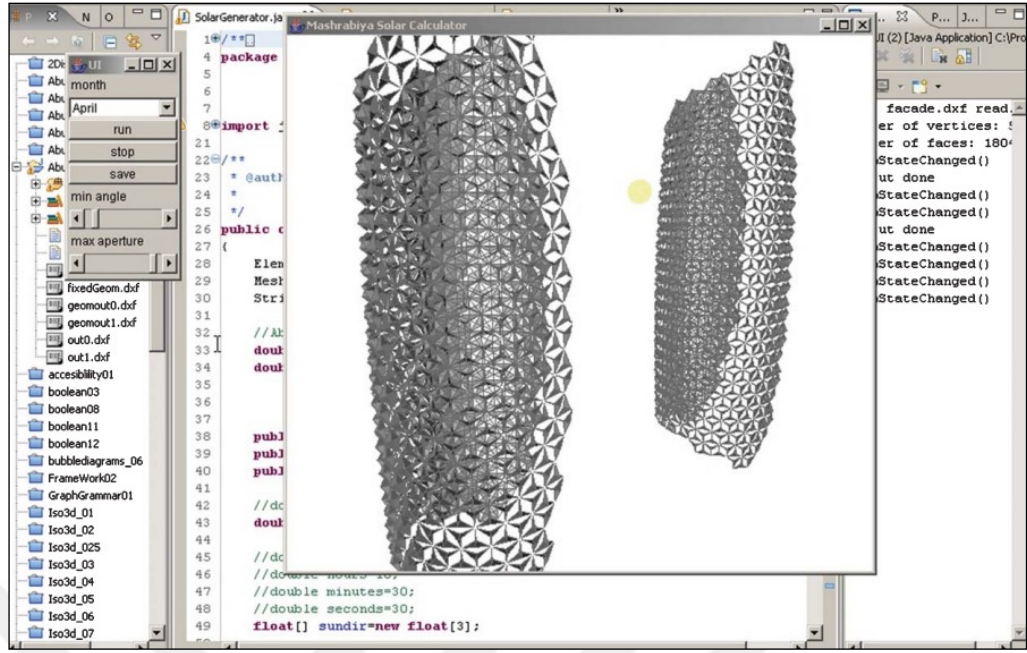


Şekil 4.63 BIM ile modellenmiş Güneş Işığı analizleri (Karanouha & Kerkerb, 2015)



Şekil 4.64 Maşrabiya modüllerinin açık ve kapalı pozisyonları (Karanouha & Kerkerb, 2015)

Şekil 4.63 ve Şekil 4.64’te, Al Bahar kuleleri için yapılan çevre analizlerinden Gün ışığı analizlerini görebiliriz. Panellerden önce sadece cam cephe varken, çok fazla Gün ışığı ve ısıma yaşanırken, panellerden sonra optimu seviyede almayı başarmıştır.



Şekil 4.65 Maşrabiya modüllerinin Güneş’ e göre açılıp kapanma hareketinin otomasyonunun analizi (Karanouha & Kerkerb, 2015)

Şekil 4.65’te ise solar generator programı ile yapılan, maşrabiya panellerinin Güneş’ e göre açılıp kapanma durumunu görebiliriz.

Şekil 4.66’da ise PTFE kaplı panellerin şantiyede montajından bir görsel vardır. Prefabrik olarak üretilen paneller şantiyede çelik iskelet sistemi üzerine monte ediliyor.

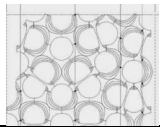
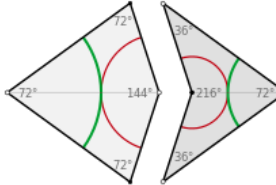
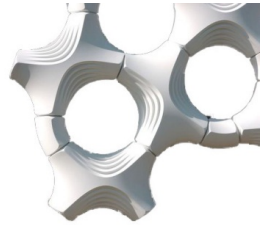


Şekil 4.66 Maşrabiya modüllerinin şantiyede montaj aşaması (Karanouha & Kerkerb, 2015)

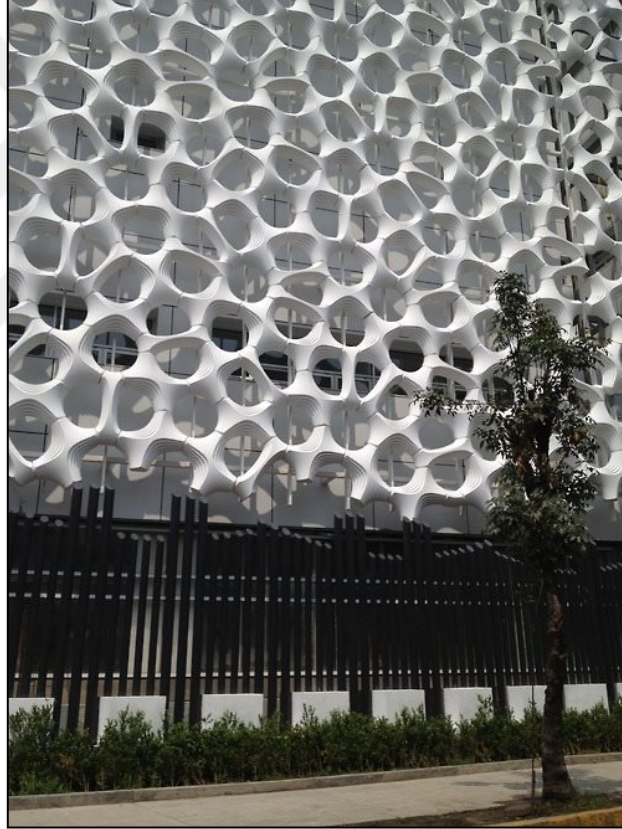
4.7 Manuel Gea Gonzalez Hastanesi

Berlin merkezli Elegant Embellishment firması tarafından 2013 yılında tasarlanıp inşa edilen Meksika’ daki Manuel Gea Gonzalez Hastanesi’nin yeni cephesi, binanın etrafındaki dumanı aktif olarak gidermek için çalışıyor.

Tablo 4.7 Manuel Gea Gonzalez hastanesi incelemesi (Elegant Embellishment)

Manuel Gea Gonzalez Hastanesi- Duman yiyen cephe			
Mimarî	Yıl: 2013		
	Yer: Meksika		
	Mimar: Elegant Embellishment		
	Mühendis: Elegant Embellishment		
	Cephe/ Kabuk Alanı: 2.500 m2		
	Fonksiyon: Hastane Binası		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	Aperiyodik Penrose Karolaması 		• Rhino • VisualArq
Yapım	Modül	Malzeme	
		• Prosolve 370e • Çelik	
	Modül Sayısı: 3 Her modül 5 parçadan oluşur	Maliyet: 20 Milyon dolar	

Ana binanın önüne ikinci bir katman olarak tasarlanan cephenin malzemesi, alışık olduğumuz malzemelerden biraz daha farklı. Cephe, duman parçacıklarını yakalayan ve nötralize eden bir fotokatalitik madde olan titanyum dioksit kaplamasından oluşmuş hafif plastik (fiber) malzemeden yapılmıştır. 2.500 metre kare yüzey alanına sahip olan ikincil cephe, gün ışığıyla reaksiyona girerek havadaki CO₂ gazlarını nötrlüyor. Güneş ışığı, TiO₂ kaplı yüzeye çarparak TiO₂ nin kirletici gazlarla reaksiyona girmesini sağlar (Salla, 2014). Cephe malzemesine Prosolve 370e adı verilmiştir (Şekil 4.67). Yapılan bir araştırmaya göre cephe, her gün 8750 aracın oluşturduğu kirli havayı yok etmektedir (Al-Zaidi, 2020). Prosolve 370e malzemesinin ömrü 10 senedir, püskürtme yöntemi ile uygulanır (Tablo 4.7).



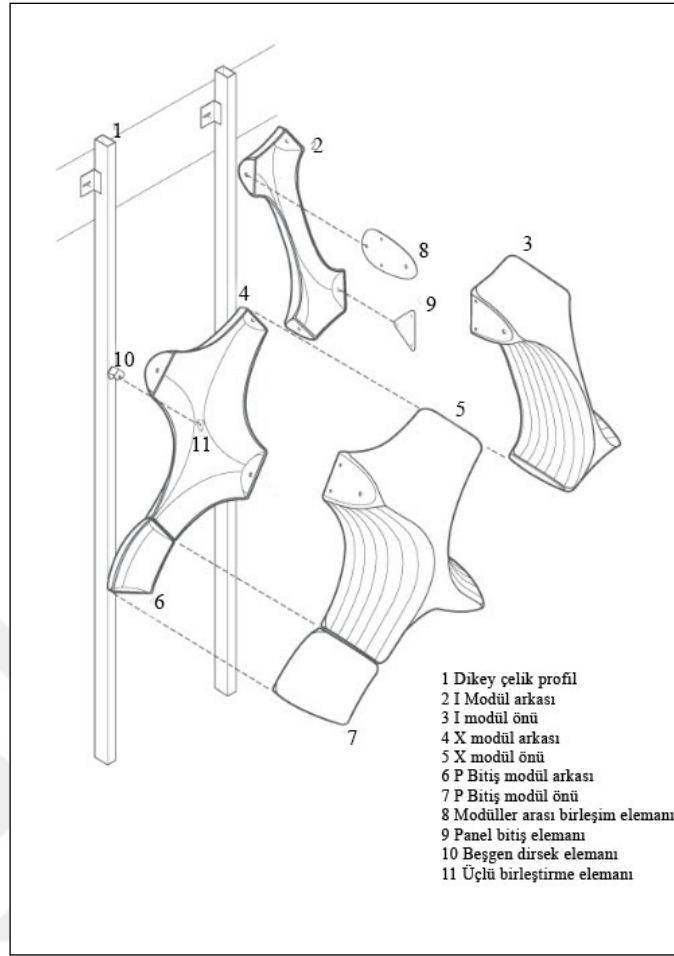
Şekil 4.67 Rhino ile tasarlanmış, TiO₂ kaplı Prosolve Karolar (Joseph Larroa-Fink)

Cephede, maksimum ölçüde kirli havayı temizlemek için yapısal form olarak üç boyutlu penrose formu oluşturulmuştur. Penrose yapısının çok yönlülüğü ve yüzey alanının çokluğu sayesinde çok daha fazla kirli hava cephe ile temas etmektedir. Güneş

kırıcı görevi gören cephe, sadece 3 farklı modülün birleşmesinden oluşmaktadır (Salla, 2014). Toplam 500 parça bloktan oluşan cephe, dikey bir çelik yapı üzerine monte edilmiştir. Her blok 5 adet üç boyutlu modülden oluşur. Böylesine karmaşık bir deseni oluşturmak için parametrik tasarım araçlarından rhinoceros' a başvurulmuştur. Cephenin yükseklik ve kesit çizimlerini oluşturmak için ise Visualarq programından yararlanılmıştır. Modüller prefabrik olarak üretilip, şantiyede montajı yapılmıştır (Şekil 4.68).

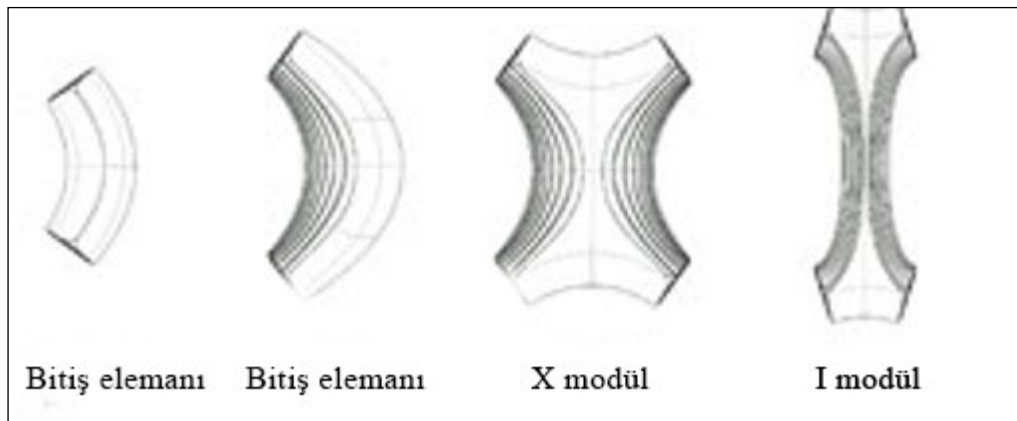


Şekil 4.68 5 parçadan oluşan Prosolve 370e parçaların cepheye yerleşimi (Elegant Embellishment)

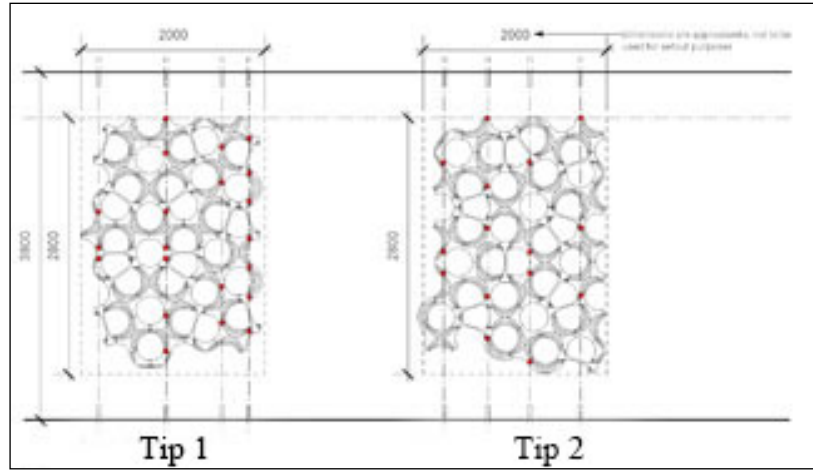


Şekil 4.69 Prosolve 370e modül (Castillo, Martinez, Sosa, Garcia, & Romero, 2022)

Her bir modül elemanı, 4 parça ve 1 birleştirici parçadan toplam 5 parçadan oluşur (Şekil 4.69 ve Şekil 4.70).

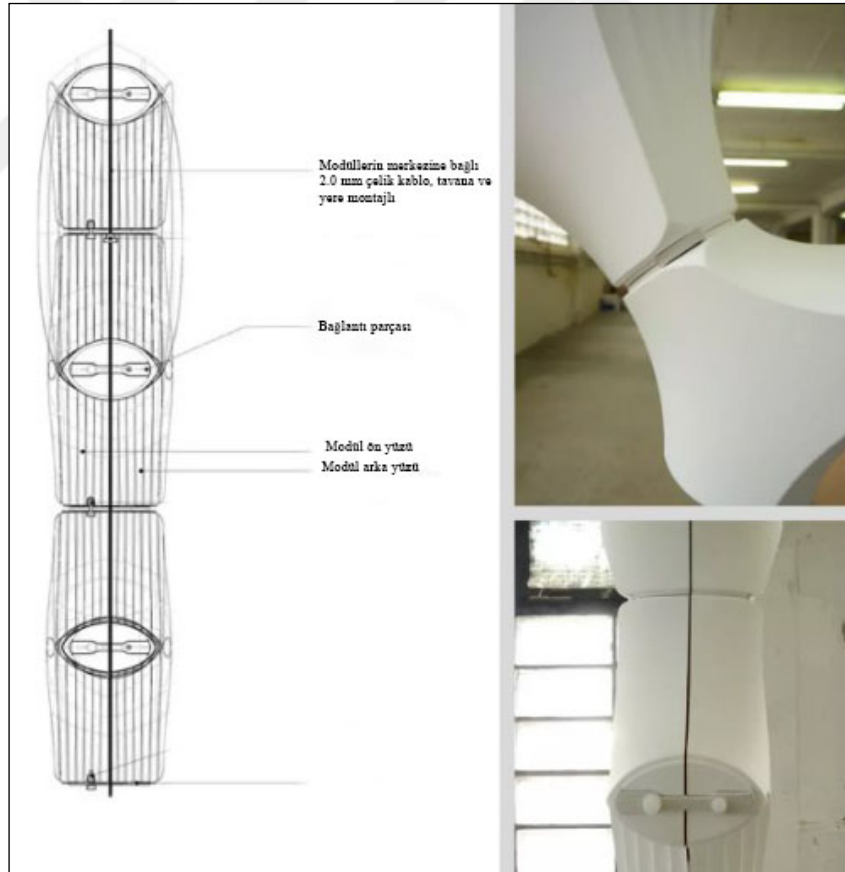


Şekil 4.70 Prosolve 370e modül elemanlar diyagramı (Castillo, Martinez, Sosa, Garcia, & Romero, 2022)

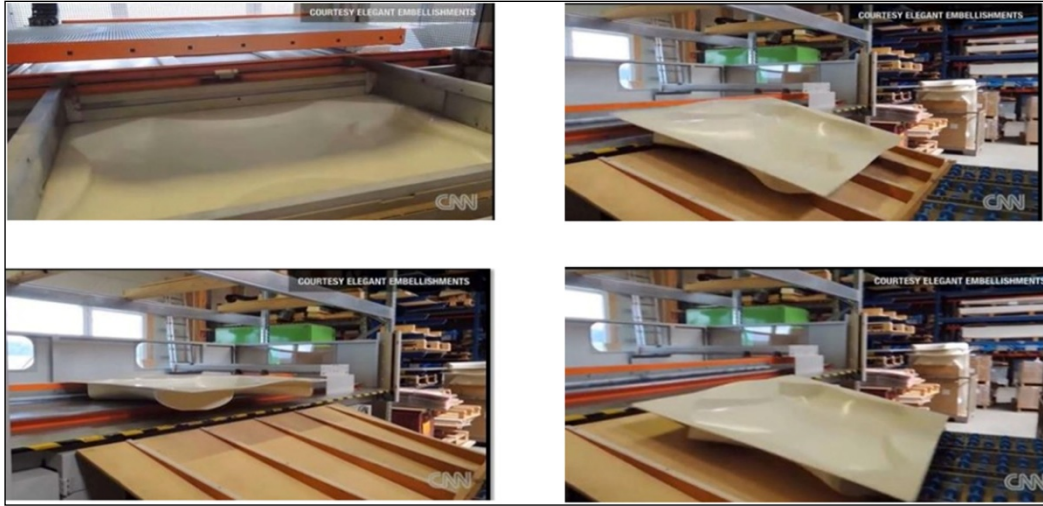


Şekil 4.71 Prosolve 370e cephe modül yerleşimi (Castillo, Martinez, Sosa, Garcia, & Romero, 2022)

Modüller birleştirilerek cepheye monte edilir, her modülün cephe iskeletinde nereye yerleşeceği öncesinden belirlenmiştir (Şekil 4.71).



Şekil 4.72 Prosolve 370e modül birleşimi (Castillo, Martinez, Sosa, Garcia, & Romero, 2022)



Şekil 4.73 Prosolve 370e modüllerin üretim aşaması (Elegant Embellishment)



Şekil 4.74 Prosolve 370e modüllerin üretim aşaması (Elegant Embellishment)



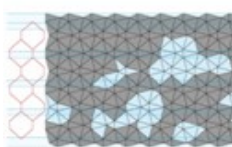
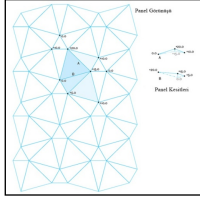
Şekil 4.75 Prosolve 370e modüllerin üretim aşaması (Elegant Embellishment)

Yukarıda Şekil 4.73, Şekil 4.74 ve Şekil 4.75’te gösterildiği gibi, modüllerin üretim aşamasında kalıplar ısıtılarak şekil veriliyor. Kullanılan termo plastik malzemeler ısı ile şekil alıp en son aşamada üzerini püskürtme yöntemiyle TiO_2 maddesi sıkılıyor.

4.8 Toronto Bergeron Merkezi

Kanada Toronto’ da York Üniversitesi’nin mühendislik fakültesi olarak tasarlanan yapı içerisinde amfi ve sınıflara yer verilmemiştir.

Tablo 4.8 Toronto Bergeron merkezi incelemesi (Bergeron Centre for Engineering Excellence)

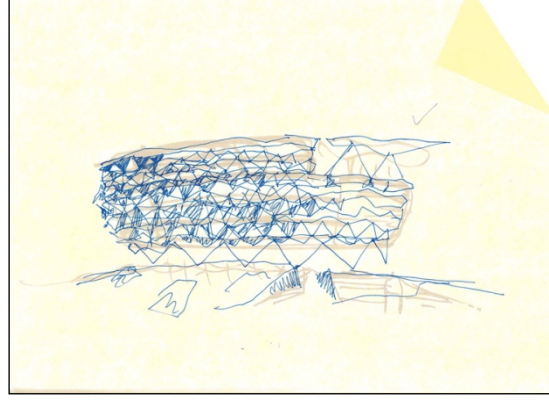
York Üniversitesi- Bergeron Mühendislik Merkezi			
Mimarî	Yıl: 2016 Yer: Toronto, Kanada Mimar: Zas Architecture, Dieter Janssen Architecture Mühendis: Zas Architecture, Arup Cephe/ Kabuk Alanı: - Fonksiyon: Eğitim Binası		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	Penrose Karolaması 		- BIM - Solidworks
Yapım	Modül		Malzeme
			- Çelik - Cam
	Modül Sayısı: 3 Toplam Modül Sayısı: 10.000		Maliyet: 63 Milyon dolar

Proje tabanlı eğitimi hedefleyen okul binasında, aydınlık ve açık ortak alanlar tasarlanmıştır. Proje tasarım aşamasında sürdürülebilirliğe ve enerji verimliliğine özen gösterilmiş olup *LEED Gold* sertifikası almaya yönelik tasarlanmıştır.



Şekil 4.76 Bergeron Merkezi Dış Görünüş (@ doublespacephotography)

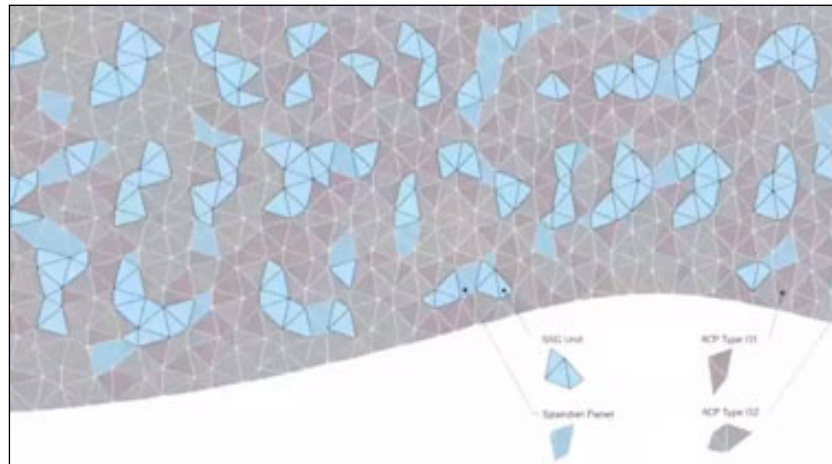
Tüm proje BIM tabanlı programlarla tasarlanmıştır. Yapı elemanları prefabrik olarak üretilmiştir bu yüzden normalde 2 hafta sürmesi planlanan montaj süresi 3 güne indirilmiştir (Bergeron Centre for Engineering Excellence, tarih yok). Cephe modellemesi yapılırken, çevre analizleri yapılarak optimum gün ışığını alacak şekilde açıklıklar belirlenmiştir. İç mekanlarda aydınlatma için doğrusal sarkıt aydınlatma elemanları kullanılmıştır. Bina çatısının yarısı bitki örtüsünden oluşmaktadır. Bina yapımında kullanılan malzemelerin yüksek çoğunluğu geri dönüştürülmüş malzemelerden oluşmaktadır. Yağmur suyunu tutmak ve geri dönüştürmek için iki adet yağmur suyu havuzu yapılmıştır. Bina kabuğu, optimum bileşenlerle yüksek ısı yalıtımı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Yapı elemanları prefabrik üretildiği gibi aynı zamanda yerel ve yakın çevreden gelecek şekilde üretimi sağlanmıştır. Tüm yapı elemanlarının 800 km yakından gelmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.77 Bergeron Merkezi konsept tasarım çizimi @ Greg Woods

Yapı kabuğu tasarımı, kayanın üzerini sarmış bir bulut görüntüsünden esinlenmiştir. Bu sebeple dalgalı bir yapı kabuğu tasarlanmıştır (Şekil 4.77).

Yapı kabuğu, 165 birbirinden farklı HSS (yüksek hız çelikleri) çelik çerçevelerden oluşuyor. Bu çerçevelerin yüksekliği 3,6 metre ve uzunluğu 6 metredir. Desen olarak aperiodyk kaplama olan penrose karoları tercih edilmiştir. Kat planları, 8 eğri etrafında tasarlanmıştır. Her köşede bir yarıçap ile Kuzey, Güney, Doğu ve Batı yönelimlerini belirleyen bir ana eğrisel form oluşturulmuştur (Şekil 4.76) Yarıçapların merkez noktaları, inşaat aşamasında ek geometri setleri ve saha ölçme kıyaslamaları için referans noktaları sağlamıştır. Penrose karoları için 3 üçgen şekil ile binanın yüzde 85'ini kaplayabildiler (Tablo 4.8) (Şekil 4.78) (The Bergeron Centre for Engineering Excellence, tarih yok).



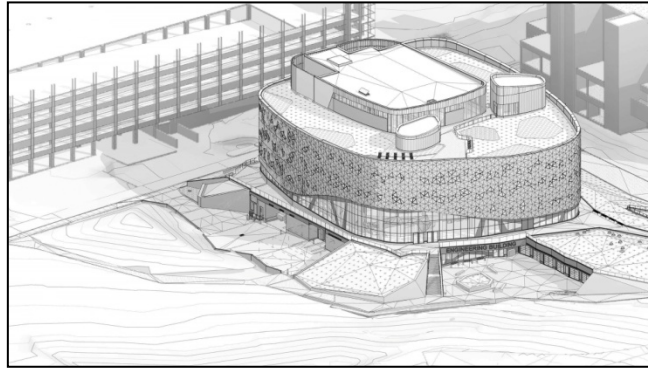
Şekil 4.78 Bergeron Merkezi, Penrose karoları (Bergeron Centre for Engineering Excellence, tarih yok)

Yapı elemanlarının modellemesi *3D Solidworks* programıyla yapıldı (Şekil 4.80). Başlangıçta pencereler metal malzemeden üretilecekti ancak pencerelerin ağırlığı ve lojistik gereksinimlerden dolayı yapısal çelik malzemesiyle üretildi ve paneller çelik strüktürün üzerine monte edildi (Şekil 4.79) (Bradford, 2016). Cephenin karmaşık geometrisine çözüm bulmak için, BIM modeli geliştirilmiştir. BIM programlarından Revit kullanılarak modellenen yapı, çelik imalatı açısından da önemli rol oynamıştır (Şekil 4.80).

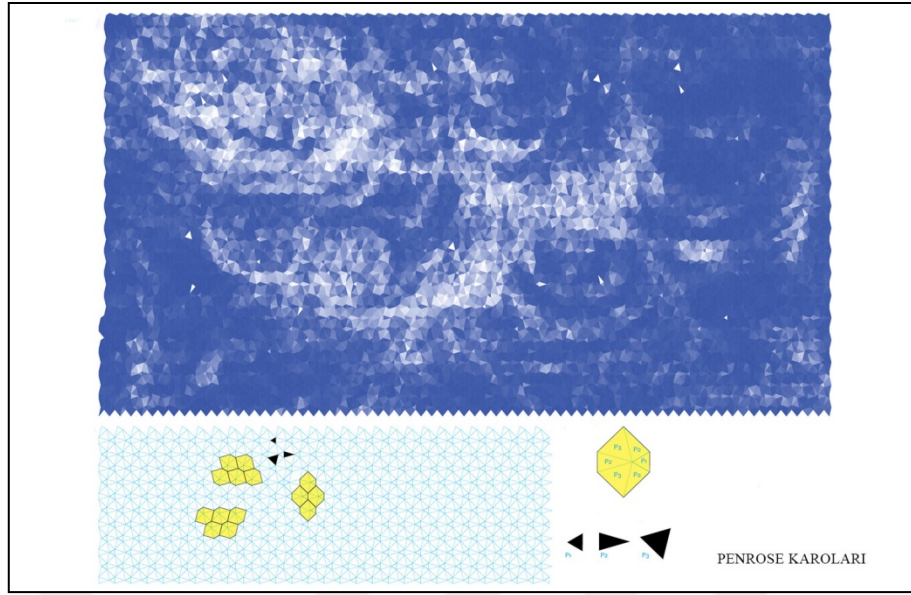


Şekil 4.79 Bergeron Merkezi, Prefabrik modüllerin şantiyede yerleştirilmesi (Dieter Janssen Architecture, tarih yok)

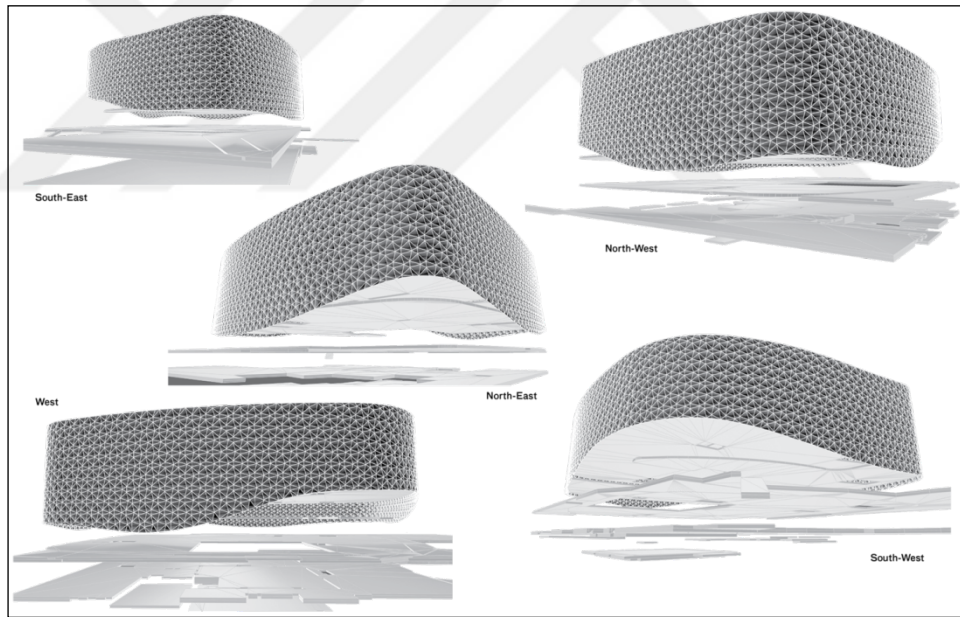
Proje müdürü Boris Shtulberg' e göre, duvarların yarıçaplı olması ve tüm pencerelerin farklı boyutlarda olmasından dolayı imalat aşamasında BIM kullanılmasaydı projeyi tamamlamak zor olurdu. Projeyi sorunsuz çözebilmek için SDS/2 (çelik strüktür için yazılım programı) kullanılmıştır. Bu program ile çelik strüktür sorunsuz çözülmüş ve CNC dosyaları hazırlanmıştır (Bradford, 2016).



Şekil 4.80 Bergeron Merkezi, Revit ile modellenmiş 3B görsel (Dieter Janssen Architecture, tarih yok)



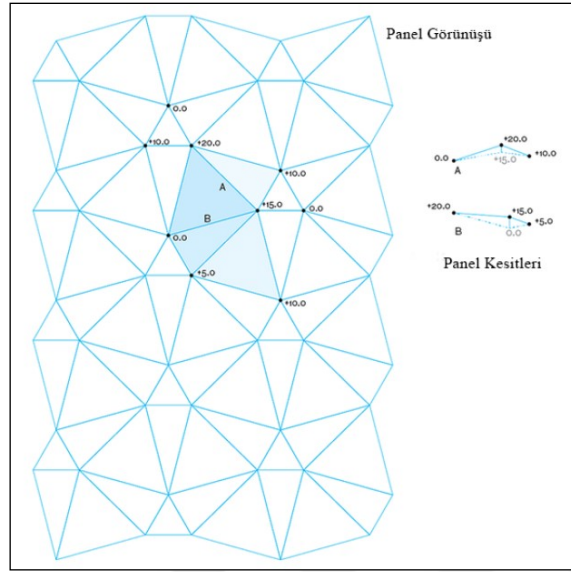
Şekil 4.81 Bergeron Merkezi, Penrose karolamasının modülleri, şematik gösterimi (Dieter Janssen Architecture, tarih yok)



Şekil 4.82 Bergeron Merkezi, cephenin yüzde 80'i penrose karoları ile kaplanmıştır (Dieter Janssen Architecture, tarih yok)

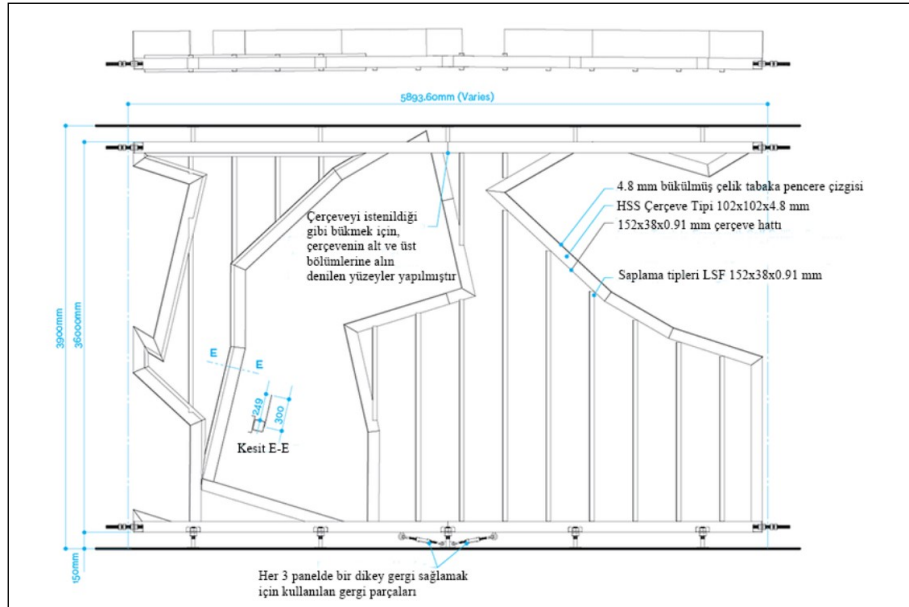


Şekil 4.83 Bergeron Merkezi, cephe kabuğundaki penrose karoları (Dieter Janssen Architecture)



Şekil 4.84 Bergeron Merkezi, cephe kabuğundaki penrose karoları (Dieter Janssen Architecture)

Şekil 4.83 ve Şekil 4.84'te gösterildiği üzere, 3 tip üçgen panel ile cephenin yüzde 80'i kaplanmıştır. Üçgen paneller, çelik strüktür üzerine monte edilmiştir ancak çelik strüktür düzlemsel değil hacimseldir. Cepheye dinamik görüntüsünü verebilmek için ızgara olarak yapılan çelik strüktür aynı düzlem üzerinde yapılmamıştır (Şekil 4.85, Şekil 4.86 ve Şekil 4.87).



Şekil 4.85 Bergeron Merkezi, cephe kabuğundaki penrose karolarının çerçevesi plan, görüntüş ve kesit (Dieter Janssen Architecture)



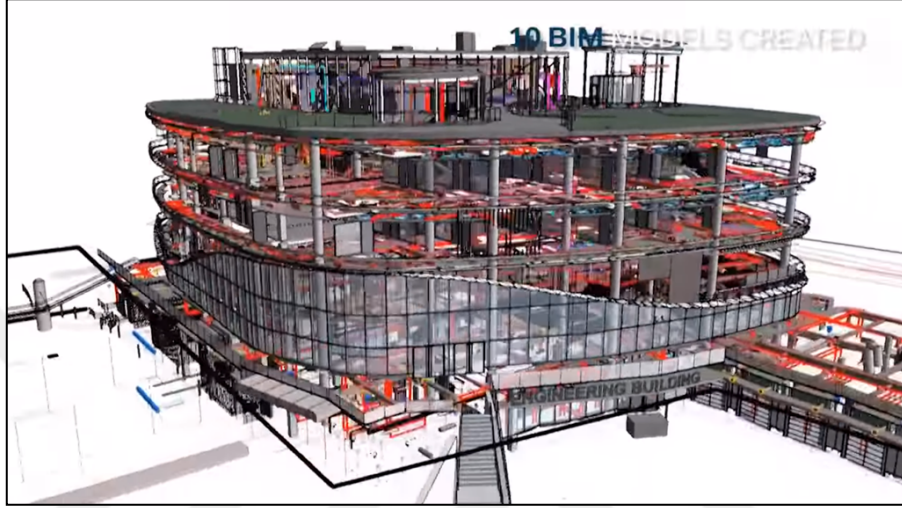
Şekil 4.86 Bergeron Merkezi, cephe panellerinin BIM’ deki 3B modeli (Saavedra, 2016)



Şekil 4.87 Bergeron Merkezi, cephe panellerinin şantiyede montajdan önceki fotoğrafı (Saavedra, 2016)

Proje 2016 yılında CanBIM ödülünü kazanmıştır. CanBIM, Kanada’da BIM projelerinin ödüllendirildiği bir yarışmadır. Model, Autodesk Revit ile oluşturulan ve daha sonra tek bir merkezi modelde birleştirilen 10 BIM modelinden oluşuyordu (Şekil 4.88). Model planı 9 farklı yarıçap üzerinde modellenmiştir. 10.000 panelden oluşmaktadır. NFL alüminyum kompozit panelleri ve NFL TB-50 cam sistemleri kullanılmıştır. Kompozit paneller ve cam kesitleri özel bir yöntemle modellendi çok az bir sapma payıyla uygulaması yapıldı. İnşaat sürecini hızlandırmak için paneller saha dışında monte edildi ve vinçler yardımıyla cepheye monte edildi. Her bir panel

16 adet üçgen modülden oluşuyordu. Bu paneller cephedeki çelik dikmelere yerleştirildi, revit ile modellenirken hani panelin hangi bölüme geleceği önceden belirlenmişti. Paneller bir düğüm noktası etrafında 12 adet çubuk elemanın birleşmesi ile oluşturuldu. 10 mm kalınlığında alüminyum plakalardan oluşan her bir modül, BIM ile tanımlanan gerekli açılara ve eğimine göre lazer kesim yöntemiyle oluşturulmuştur.



Şekil 4.88 Bergeron Merkezi, BIM Revit modelleme aşamasından @CanBIM Awards 2016

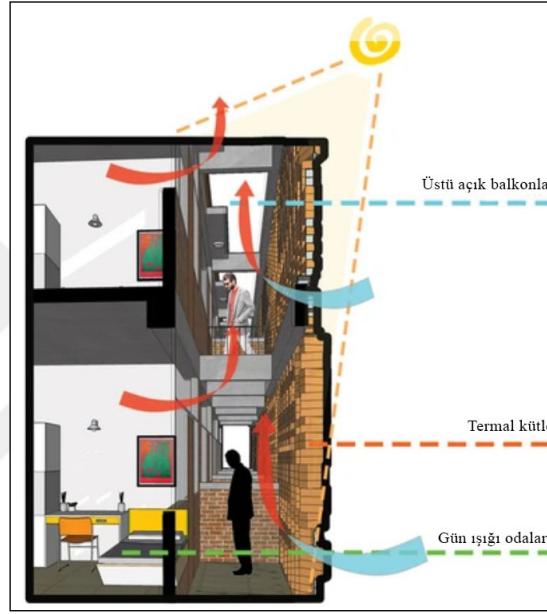
4.9 The Boys Erkek Öğrenci Yurdu

The Boys erkek öğrenci yurdu 2017 yılında Hindistan'ın Haryana kentinde inşa edilmiştir (Tablo 4.9).

Tablo 4.9 The Boys erkek öğrenci yurdu incelemesi (ZED)

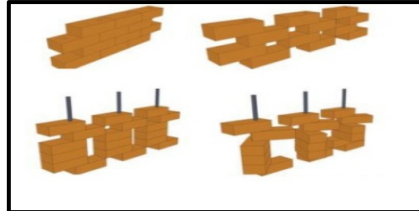
The Boys Erkek Öğrenci Yurdu			
Mimari	Yıl: 2017		
	Yer: Haryana, Hindistan		
	Mimar: Zero Energy Design Lab		
	Mühendis: Design Solutions		
	Cephe/ Kabuk Alanı: 1.000 metre kare		
	Fonksiyon: Öğrenci Yurdu		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	Jaali	Tuğlaların aynı eksek etrafında + ve – 20 derece döndürülmesiyle oluşturulmuştur.	• Grasshopper • Ladybug • Honeybee • Ecotect
Yapım	Modül		Malzeme
			• Tuğla
			Maliyet: 8 Milyon dolar
	Modül Sayısı: 11		

Düşük bütçeli maliyetle inşa edilen yapı 18 ayda tamamlanmıştır. Cephede ısı yalıtımı ve ışık geçirgenliği için tuğladan ikincil bir cephe örülmüştür. Her tuğlanın dönüş açısı, Güneş ışınlarını (*solar radiation*) en aza indirmek ve cepheye doğrudan ısı kazanımı sağlamak için Ecotect ve Grasshopper programları kullanılarak yapılmıştır. Tuğla kaplaması, yıl boyunca iç ve dış mekân arasındaki ortalama sıcaklıklarda kalmak üzere tasarlanan tampon bölge olarak işlev gören balkonları oluşturur (Şekil 4.89).



Şekil 4.89 The Boys erkek öğrenci yurdunun kesit diyagramı (ZED)

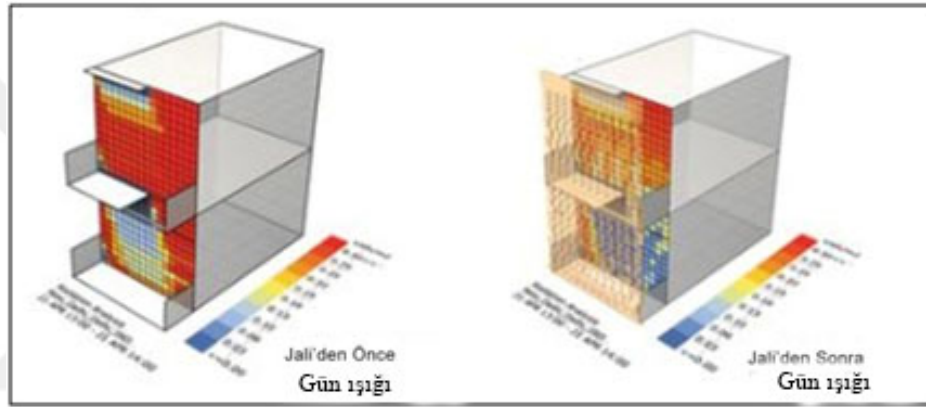
Cephede kullanılan tüm malzemeler yerel ve 500 km'lik bir alandan getirilmiştir. Tuğlalar özel olarak tek delikli üretilmiştir. Bu şekilde, tek bir çelik çubuk geçirilerek üst üste sabitlenebilir (Şekil 4.90).



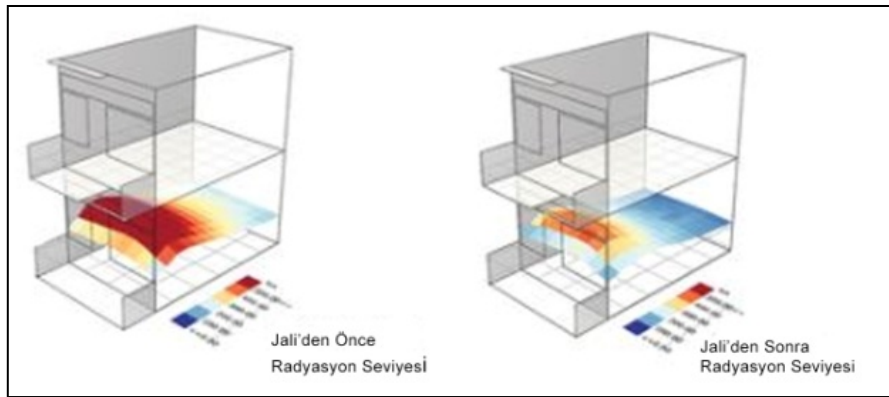
Şekil 4.90 The Boys erkek öğrenci yurdu ikincil cephenin tuğla yerleşim diyagramı (ZED)

Parametrik tasarım araçlarından Grasshopper ile yapılan gün ışığı analizlerine göre,

tuğlalar odalara optimum Güneş ışığı alacak şekilde tasarlanmıştır. 6,4 m yüksekliğinde ve 76 metre uzunluğundaki cephenin yapımında çimento harcı kullanılmamıştır. Rhino, Grasshopper ve Ladybug programları kullanılarak birincil cephedeki direkt ve dağınık radyasyon ve gündüz aydınlatma seviyeleri analiz edilmiştir. Daha sonra ikincil tuğla cephede tuğlaların dönüş açıları ayarlanarak, cephedeki radyasyon oranı %70 azaltılmıştır (Şekil 4.91). Şekilde, kırmızı renkli alanlar gün ışığının yoğun olduğu alanları göstermektedir. Şekil 4.92’de ise Honeybee eklentisiyle radyasyon (ışırma) analizi yapılmıştır. İkincil cepheden önce yoğun olan kırmızı alanlar, cepheden sonra maviye ve turuncu rengine dönmüştür.



Şekil 4.91 The Boys erkek öğrenci yurdu, Ladybug ile gün ışığı analizi (ZED)

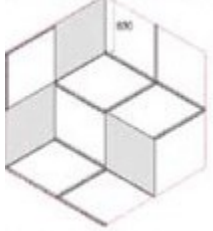


Şekil 4.92 The Boys erkek öğrenci yurdu, Honeybee ile radyasyon analizi (ZED)

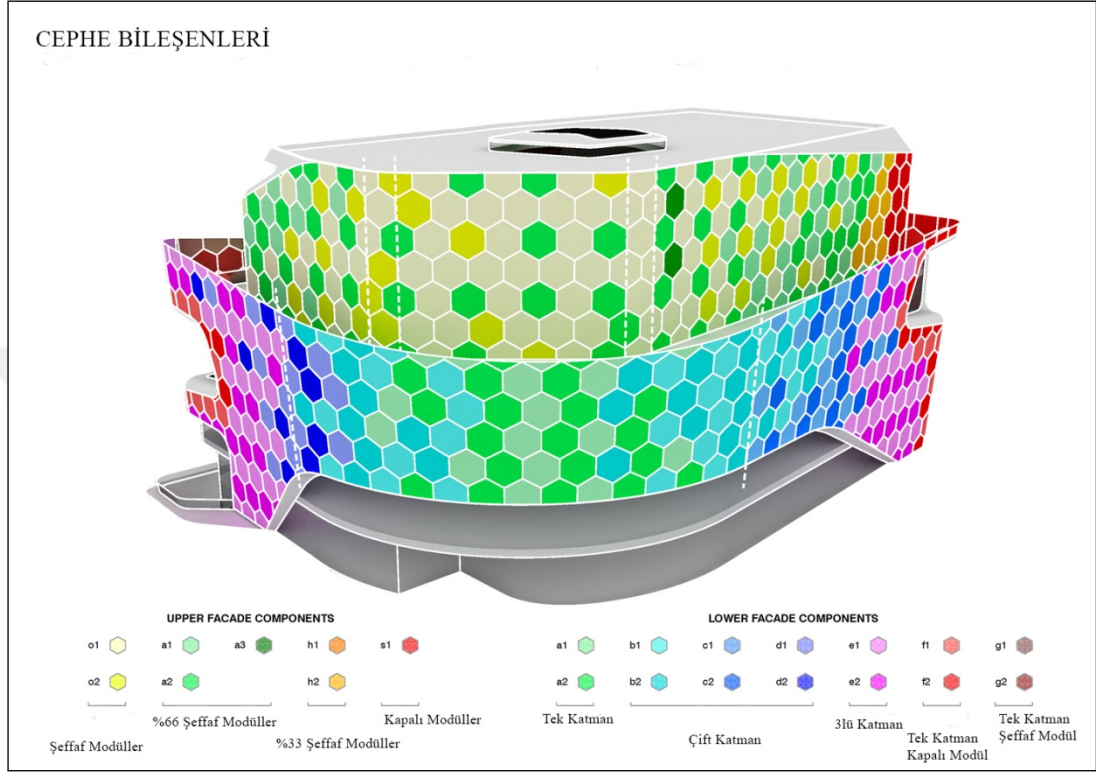
4.10 Lane 189 Alışveriş Merkezi

Lane 189, şehrin merkezinde bulunan dikey olarak tasarlanan bir alışveriş merkezidir.

Tablo 4.10 Lane 189 alışveriş merkezi incelemesi (Lane 189)

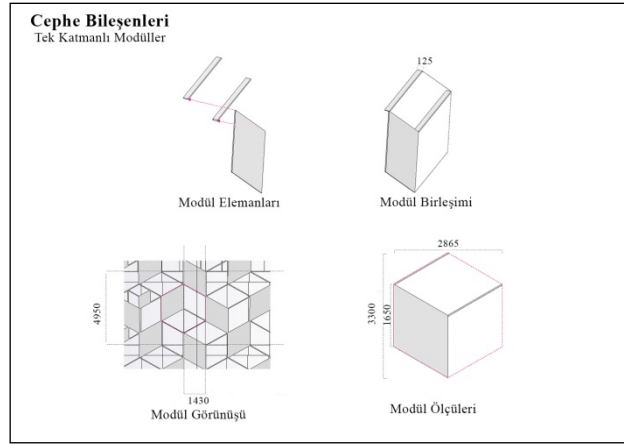
Lane 189 Alışveriş Merkezi			
Mimarî	Yıl: 2018 Yer: Şanghay, Çin Mimar: UNStudio Mühendis: UNStudio Cephe/ Kabuk Alanı: 38.800 mere kare Fonksiyon: Alışveriş Merkezi		
	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
Tasarım		3 seviyeli ızgara üzerinde dolu boş paneller	• Rhino • Grasshopper
Yapım	Modül	Malzeme	
		• Alüminyum Panel • Çelik • Cam	
	Modül Sayısı: 3	Maliyet: 50 Milyon Dolar	

Cephe tasarımı, geleneksel Şanghay motiflerinden ilham almıştır. Alışveriş merkezinin cephesi, bina kabuğunda derinlik yaratmak için çok katmanlı cephe elemanlarının kullanılmasıyla tasarlanmıştır (Tablo 4.10).

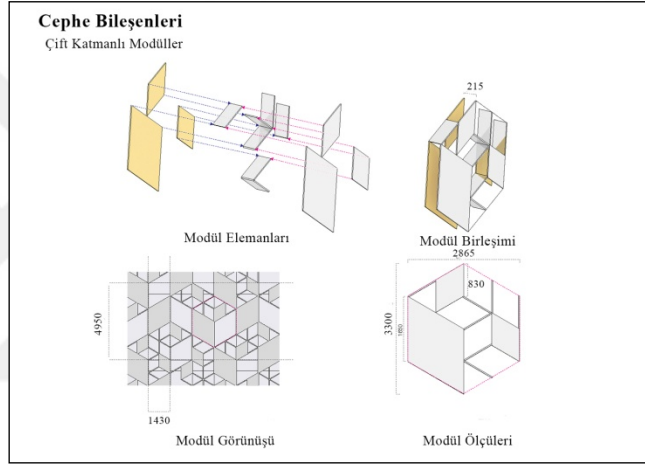


Şekil 4.93 Lane 189 alışveriş merkezi, 3B cephe diyagramı (Kocaağa & Özcan, 2022)

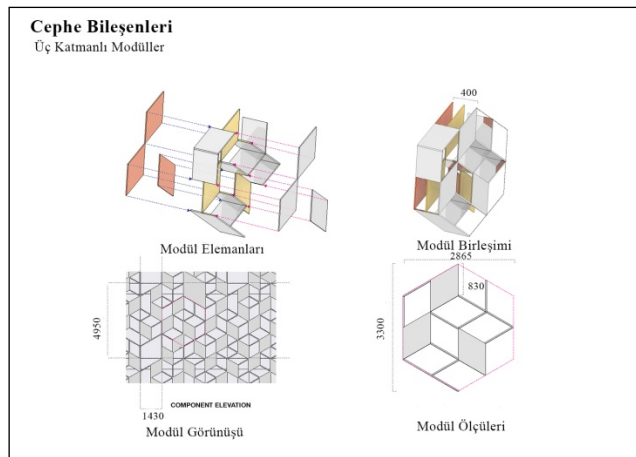
Cephe bileşenleri oluşturulurken hem kapalıdan açığa doğru modüller kullanılmak istenmiş hem de vitrinler, manzara noktaları ve restoran alanları şeffaf modüllerle kaplanmak istenmiştir. Her iki amaca uygun olması için de parametrik tasarım araçlarından faydalanılmıştır. Cephenin alt kısmında, altıgen bir ızgara sistemi vardır, bu sistemin üzerinde dörtgen (elmas) modüller vardır bu modüller cephenin tasarımına göre tek katmanlıdan üç katmanlıya şeffaftan opağa doğru gitmektedir (Şekil 4.93). Üç katmanlı modüllerin derinliği 400 mm'e kadar çıkmaktadır (Lane 189/UNStudio). Led aydınlatmalarla aydınlatılan modüller cephede farklı görsel efektler oluşturur.



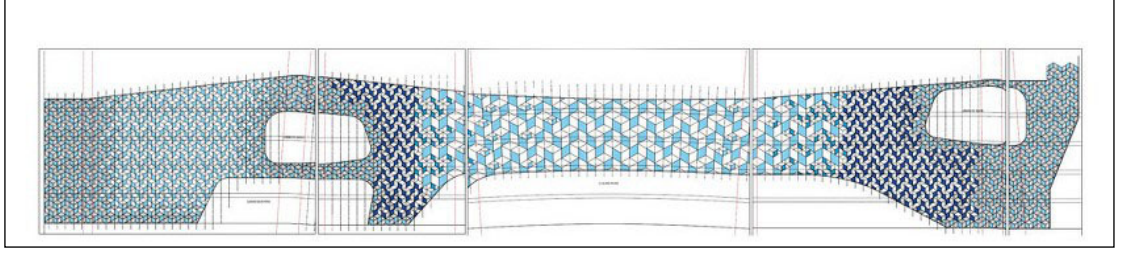
Şekil 4.94 Lane 189 alışveriş merkezi, tek katmanlı cephe modülü diyagramı (Lane 189/UNStudio)



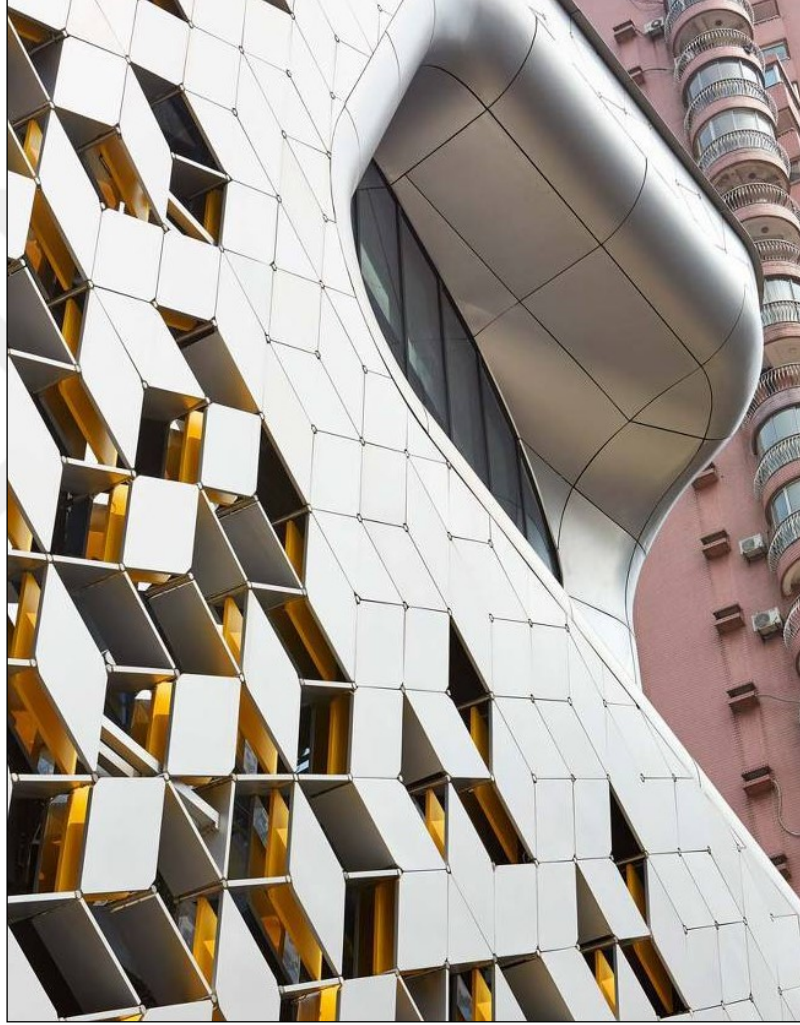
Şekil 4.95 Lane 189 alışveriş merkezi, çift katmanlı cephe modülü diyagramı (Lane 189/UNStudio)



Şekil 4.96 Lane 189 alışveriş merkezi, üç katmanlı cephe modülü diyagramı (Lane 189/UNStudio)



Şekil 4.97 Lane 189 cephe görünüşü (Lane 189/UNStudio)



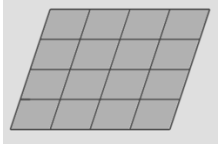
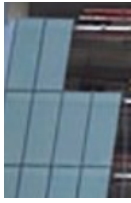
Şekil 4.98 Lane 189 cephe görünüşü (Lane 189/UNStudio)

Yaptığı projelerde hem BIM yazılımlarını hem de Rhino ve Grasshopper yazılımlarını kullanan UNStudio bu projede Grasshopper yazılımını kullansaydı nasıl modellerdi yorumlarsak eğer;

4.11 Mistral İzmir

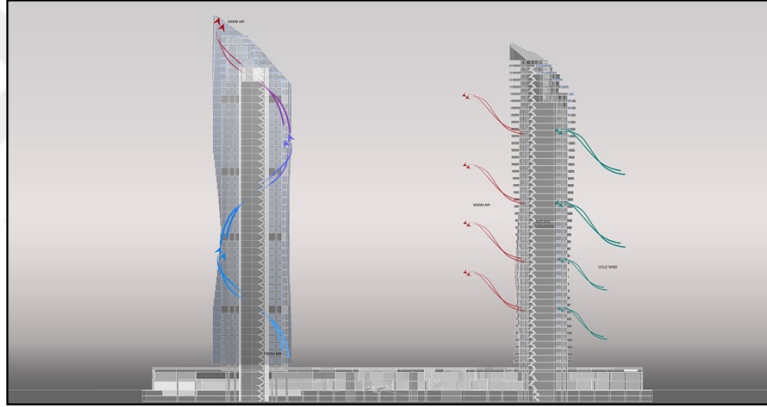
Projesine 2011 yılında başlanan Mistral Kuleleri 2013 yılında tamamlanmıştır.

Tablo 4.11 Mistral İzmir incelemesi (Mistral İzmir, 2011)

Mistral İzmir			
Mimarî	Yıl: 2011 Yer: İzmir, Türkiye Mimar: DNA Mimarlık Mühendis: Emir Mühendislik Cephe/ Kabuk Alanı: 13.922 m ² Fonksiyon: Alışveriş Merkezi, Otel		
Tasarım	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı
	Periyodik karolama 	Her kat döşemesinin bir öncekinden 1,2 derece döndürülmesiyle oluşturulmuştur	• Rhino • Grasshopper
Yapım	Modül	Malzeme	
		• Beton • Cam • Çelik	
	Modül Sayısı: 3 çeşit	Maliyet: 7 Milyon dolar	

Kentin en yüksek binasıdır. Proje sistem kalıp ile inşa edilmekte olup, yapısı kompozit yapı olarak çelik ve betonarmenin bir arada kullanıldığı Türkiye'nin sayılı ve İzmir'in ilk projesi olma özelliğine sahiptir. Projenin zemin iyileştirme çalışmaları sırasında çok derin baret kazıklar kullanılmıştır. Konut ve ofis kulesi olmak üzere iki farklı kuleden oluşmaktadır. Ofis kulesi 48, konut kulesi de 38 katlı yapılmıştır.

Çift cepheli olacak şekilde yapılan kuleler, sürdürülebilirlik açısından İzmir' de önemli örneklerden biridir. Her iki kulenin tasarımı, dinamizmi ve hareketi dönen bir biçimde birleştirerek, İzmir'in hareketli semtlerinde yeni bir dönüm noktası haline geliyor. Hem ofis hem de konut kulelerinin cephe tasarımında, güneş ve radyasyon analizleri yapılmış olup bu analizlerin sonuçlarına göre tasarım şekillenmiştir (Şekil 4.101).



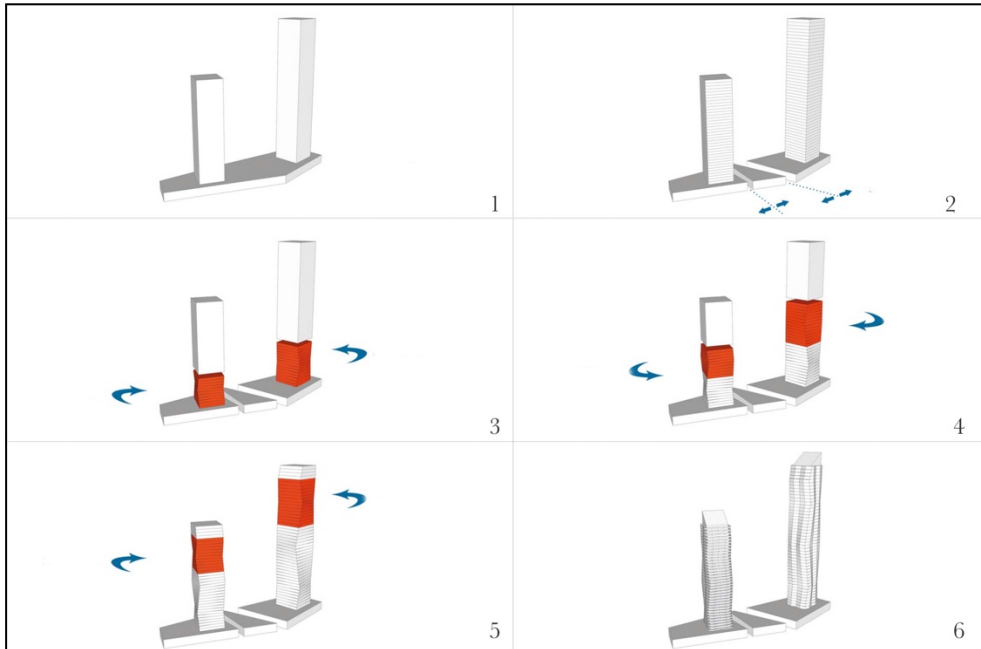
Şekil 4.101 Mistral İzmir kulelerinin güneş ve rüzgâr analiz diyagramları (MISTRAL & MIRAY MIXED USE COMPLEX, 2017)

Kulelerin tasarımında her kat döşemesi bir öncekinden 1,2 derece döndürülerek dinamik bir form oluşturulmuştur. Bu formun oluşturulmasında parametrik tasarım araçlarından rhino ve grasshopper kullanılmıştır (Şekil 4.103). Uygulama aşamasında ise, soğuk büküm yöntemi kullanılarak cephe panellerine istenilen şekil verilmiştir. Dış cephede 8 mm kalınlığında iki lamine cam panel (dış taraf) ve 8 mm kalınlığında (iç taraf) monolitik bir cam panelden oluşan 1528 mm x 4000 mm dikdörtgen yalıtım cam modülden oluşur (Şekil 4.102) (Mistral Tower: Solutions for SSG Joint Optimization in Cold Bent Units, 2019).



Şekil 4.102 Mistral İzmir kulelerinin şantiye aşaması (MISTRAL & MIRAY MIXED USE COMPLEX, 2017)

Yapının formu, cephenin rüzgâr yüklerine karşı davranışını olumlu yönde etkiliyor. Dış ve iç cephe arasında kalan kısım, kışın güneş etkisiyle ısıtılan havanın muhafaza edilmesi ile ısıtmaya, yazın ikincil cephe sayesinde soğutmaya katkısı oluyor.



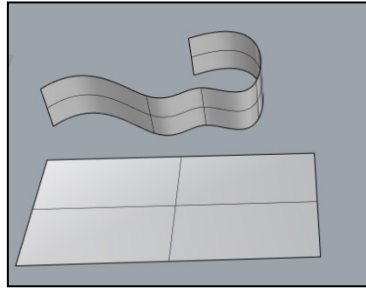
Şekil 4.103 Mistral İzmir kulelerinin form bulma diyagramları (MISTRAL & MIRAY MIXED USE COMPLEX, 2017)

BÖLÜM BEŞ

GRASSHOPPER İLE EĞRİ YÜZEYLERİN KAROLANMASI VE ÇEVRE ANALİZLERİNİN YAPILARAK CEPHEDEKİ AÇIKLIKLARIN BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ ÖNERİ ÖRNEK

Bu bölümde, eğri yüzeyin parametrik tasarımla modüler karolanması için çalışma yapılmıştır. Çalışmada parametrik tasarım araçlarından Grasshopper kullanarak İzmir’ de yapılmış olan eğri yüzeyli bir projeye ikincil bir cephe tasarım önerisi sunulmuştur. Bu örnekte, ilk olarak *surface morph* komutu kullanılarak düzlemsel bir yüzeyde yapılan karolamanın eğrisel bir yüzeye aktarımı yapılmış, daha sonrasında ise karolama yapılan eğrisel yüzeyin *ladybug* eklentisi kullanılarak çevre analizleri yapılarak cephe açıklıkları belirlenmiştir. Cephede hangi modüllerin cam hangi modüllerin kapalı panel olacağı çevre ve güneş ışığı analizleri ile saptanmıştır.

İlk olarak Rhinoceros 3D ile bir düzlemsel, bir eğrisel yüzey oluşturulmuştur. Bunlardan eğrisel olan amaç yüzeyi, düzlemsel olan ise kaynak yüzeyidir (Şekil 5.1).



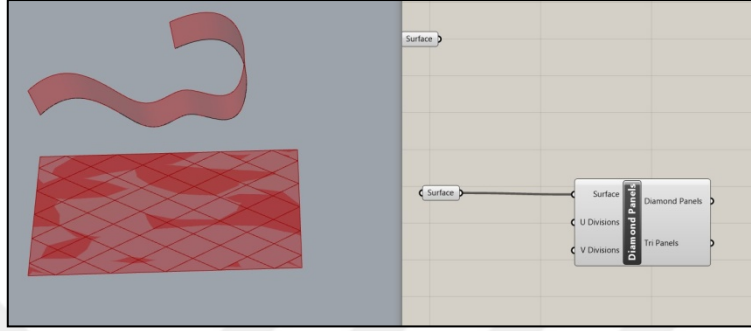
Şekil 5.1 kaynak ve amaç yüzeylerin oluşturulması

Sonrasında Rhinoceros 3D uygulamasının Grasshopper eklentisinde bu yüzeyler ‘surface’ komutuyla tanımlanmıştır (Şekil 5.2).



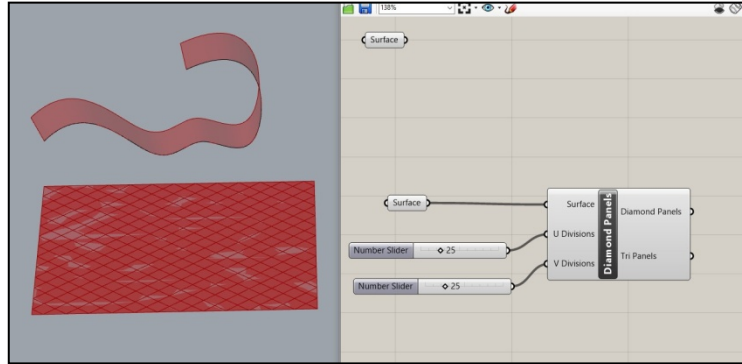
Şekil 5.2 Oluşturulan yüzeylerin Grasshopper’da tanımlanması

Grasshopper’ da bir yüzeyi karolamak için geometrik bağıntılara ihtiyacımız yoktur, *paneling tools* eklentisi ile belirli bir karolama deseni kullanılarak yüzey karolanabilir. Burada ilk olarak *diamond panels* komutunu kullanılarak karolama için seçilen eşkenar dörtgen desen oluşturulmuştur (Şekil 5.3).



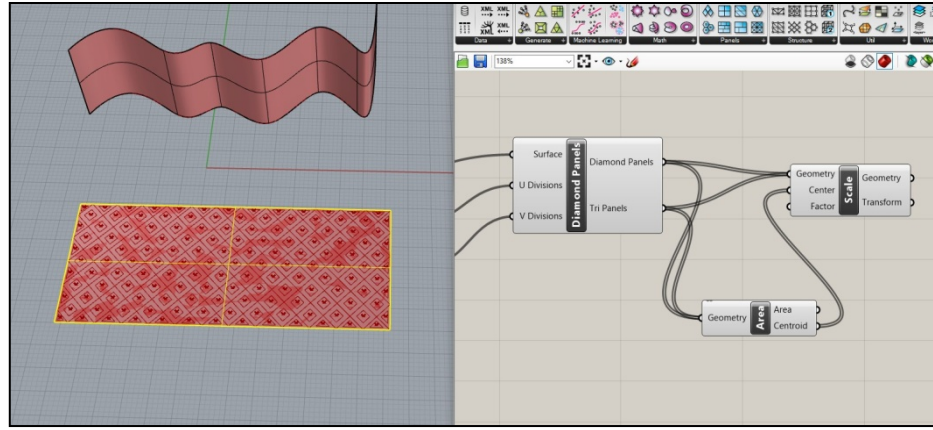
Şekil 5.3 Paneling tools ile karolamanın yapılması

Başta oluşturulan iki yüzeyden düzlemsel olan yüzey kaynak yüzeyi olarak tanımlanmış, eğrisel olan yüzey ise hedef yüzey olarak seçilmiştir. Kaynak yüzeyinde karolama oluşturulup, *surface morph* komutu ile hedef yüzeye aktarılmıştır (Şekil 5.4).

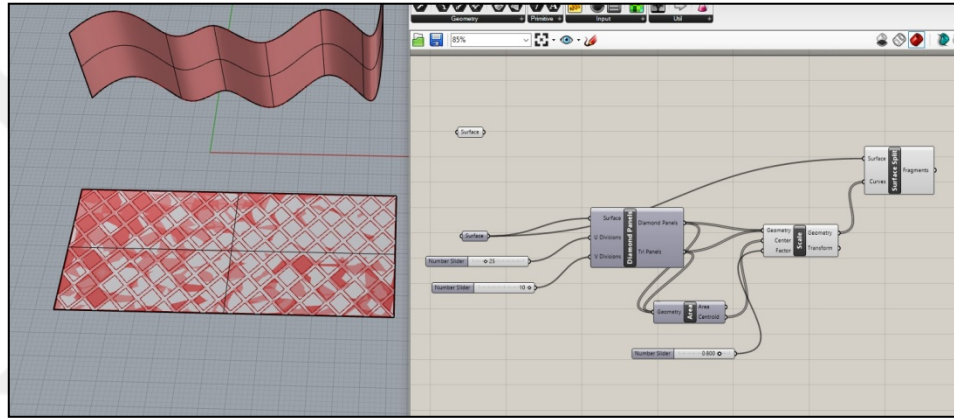


Şekil 5.4 Kaynak yüzeydeki karolamanın hedef yüzeye aktarılması

Kaynak yüzeyinde, u ve v ile tanımlanan domain parametrelerinde bölünme sayısı değerleri, *slider* komutu ile *diamond panels* komutuna tanımlanmıştır. Sonrasında ise merkez noktaları belirlenmiştir.

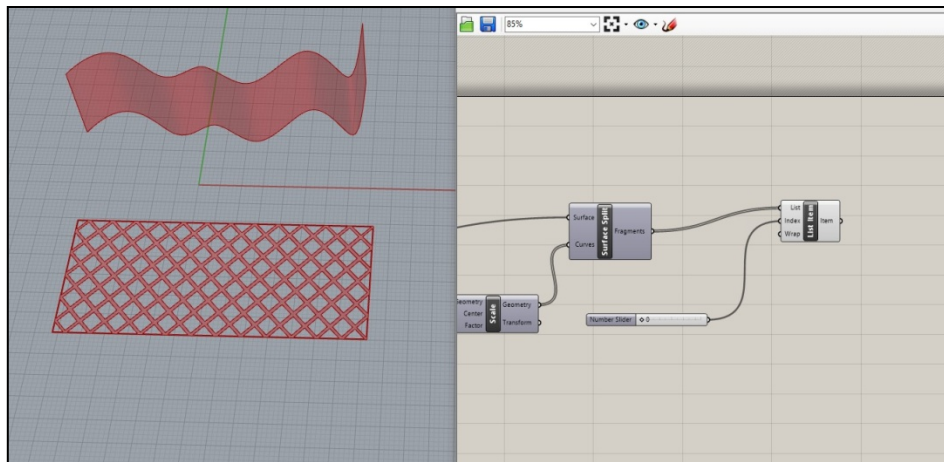


Şekil 5.5 Kaynak yüzeydeki karolamanın merkez noktalarının belirlenmesi



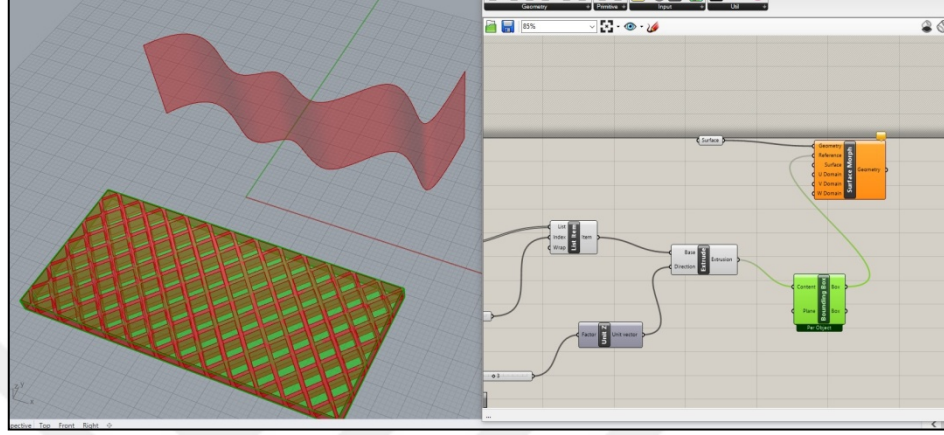
Şekil 5.6 Kaynak yüzeydeki karolamanın hedef yüzeye aktarılması

Kaynak yüzeyinde ilk başta oluşturulan yüzeyi ayırmak ve panelleri içi boş hale getirmek için *split surface* komutu kullanılmıştır (Şekil 5.7).



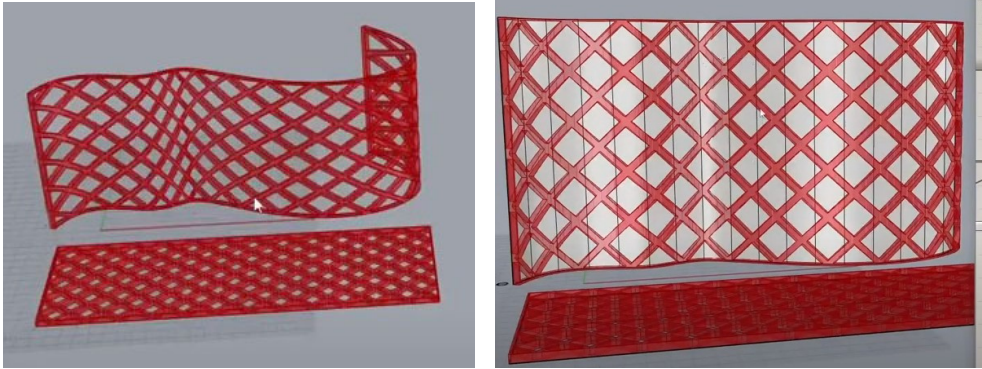
Şekil 5.7 Kaynak yüzeydeki karolamanın iç yüzeylerinin ayrılması

Kaynak yüzeyine *extrude* komutuyla kalınlık verilip z koordinatına bağlanmıştır, *unit z* komutuyla z ekseninde ne kadar kalınlık verileceğini *slider* ile değer girerek tanımlanmıştır. Sonrasında da oluşan geometriyi *bounding box* olarak tanımlayıp yapmak istediğimiz işlem olan *surface morph* komutuna tanımlanmıştır (Şekil 5.8).



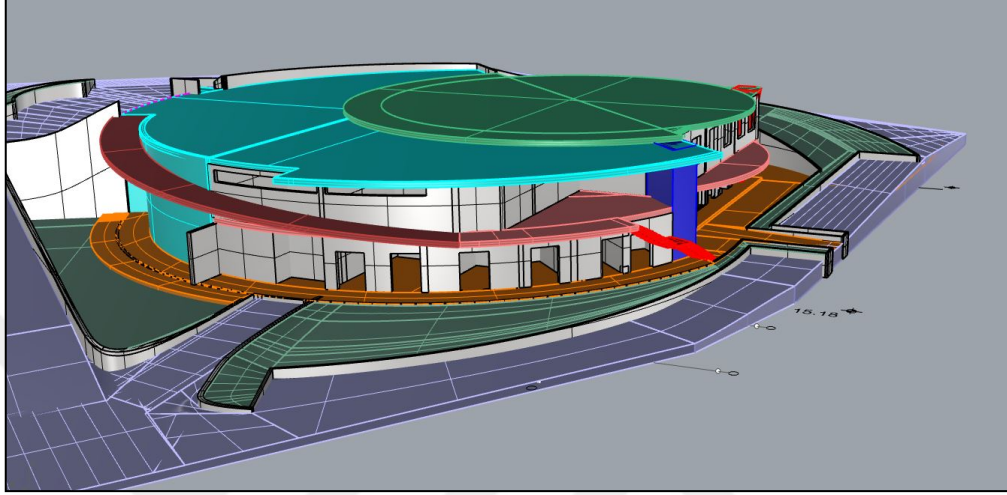
Şekil 5.8 Kaynak yüzeyine z koordinatında kalınlık verilmesi

Kaynak yüzeyindeki desenleri *surface morph* komutu ile hedef yüzeyine aktarmak için, *deconstruction domain* komutunu kullanılmıştır (Şekil 5.9).



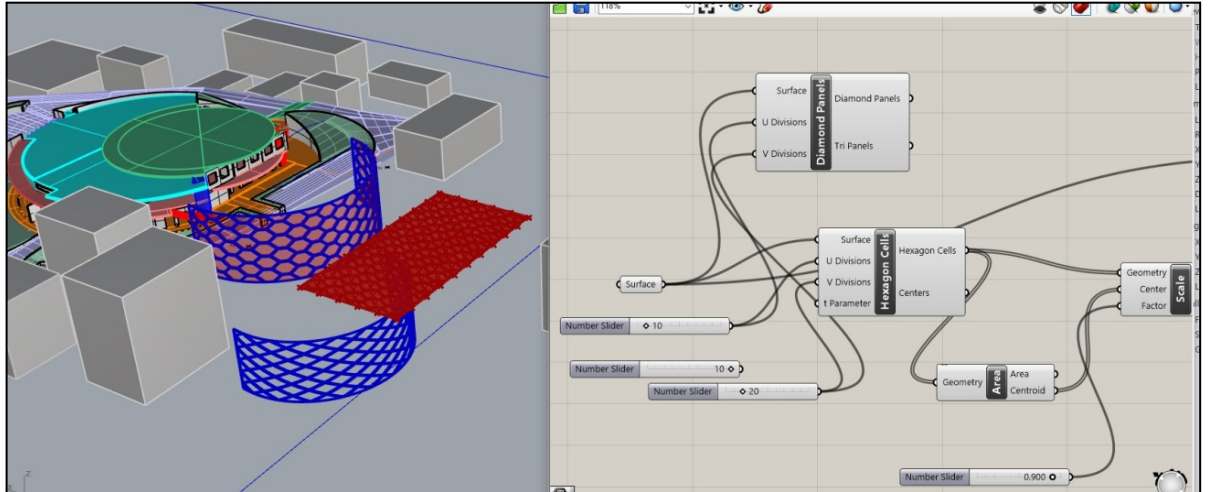
Şekil 5.9 Kaynak yüzeyindeki karolamanın eğrisel hedef yüzeyine aktarılması

Sonraki süreçte parametrik tasarımıyla üretilen bu modüler cepheyi İzmir Seferihisar’da seçilen örnek yapı üzerinde denemek üzere seçilen projeye ikincil cephe olarak bir güneş kırıcı panel tasarlanmıştır. Bu maksatla Grasshopper’daki *paneling tools* tan altıgen karolama seçilmiştir (Şekil 5.10).



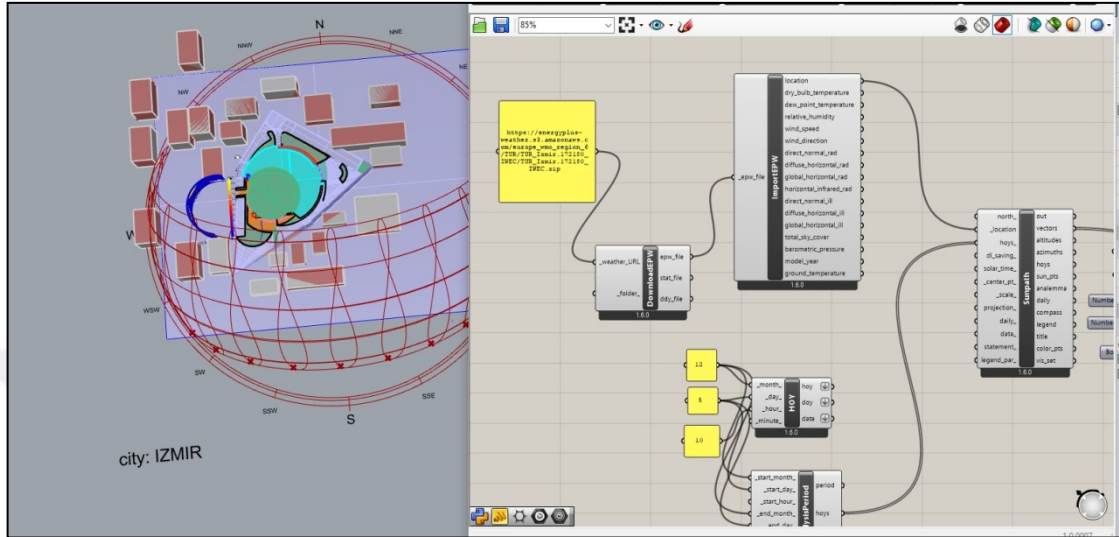
Şekil 5.10 İkincil cephe yapılacak eğrisel yapı

Yukarıda bahsedilen adımları takip ederek hem dörtgen hem altıgen karolama yapılmıştır. Dörtgenler için, *diamond panels* altıgenler içinse *hexagon cells* komutlarını kullanılmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 İkincil cephe yapılacak eğrisel yapıya altıgen desenli cephe tasarlanması

Bu proje için yapılan öneri cephe için Grasshopper’da çevre analizi eklentileri kullanarak gün ışığı analizi yapılmıştır, bu analize göre de cephede hangi panellerin cam hangi panellerin kapalı modül olacağını belirlenmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 Eğrisel binaya yapılan çevre analizleri

Güneş analizi yapabilmek için Grasshopper ‘ın ladybug eklentisi kullanılmıştır. Bu eklenti, *energyplus* datasıyla birlikte çalışır ve web sitesinden konum bilgilerini seçtikten sonra seçtiğimiz konuma, girdiğimiz parametrelere göre ay, yıl ve gün olarak veya seçtiğimiz saat olarak gün boyu gelecek Güneş ışığı yoğunluğunu gösterir. Konum bilgileri Şekil 5.12’deki gibi eklenmiştir. Analiz sonuçları bize cephenin hangi noktalarının direkt Güneş ışığı alacağını gösterir; bu sayede optimum gün ışığı seviyesini sağlamak için hangi panellerin kapalı olarak yapılacağı belirlenmiştir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Tez çalışmasında, yapı kabuklarının prefabrikasyonla üretiminde modüler koordinasyon aracı olarak parametrik tasarımın kullanılmasına yönelik bilimsel literatüre dayanan bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, karolama yöntemleriyle modüler olarak üretilen yapı kabukları ve bina cepheleri incelenerek, kullanılan farklı parametrik tasarım yöntemlerine ilişkin görsellere dayalı bilgiler verilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada karolama yöntemlerinin kullanıldığı modüler on adet bina örneği incelenmiştir. İncelenen binaların cephe veya yapı kabuklarının oluşturulmasında kullanılan karolamalar, modüller, üretim yöntemleri ve parametrik tasarım araçlarının kullanım amaçları karşılaştırılmıştır. (Tablo 6.1). (Tablo 6.2). İncelenen yapılar, yapım yıllarına, kullanılan malzemeye, kullanılan parametrik tasarım programına ve karolama çeşitlerine göre sunulmuştur (Şekil 6.1), (Şekil 6.2), (Şekil 6.3), (Şekil 6.4).

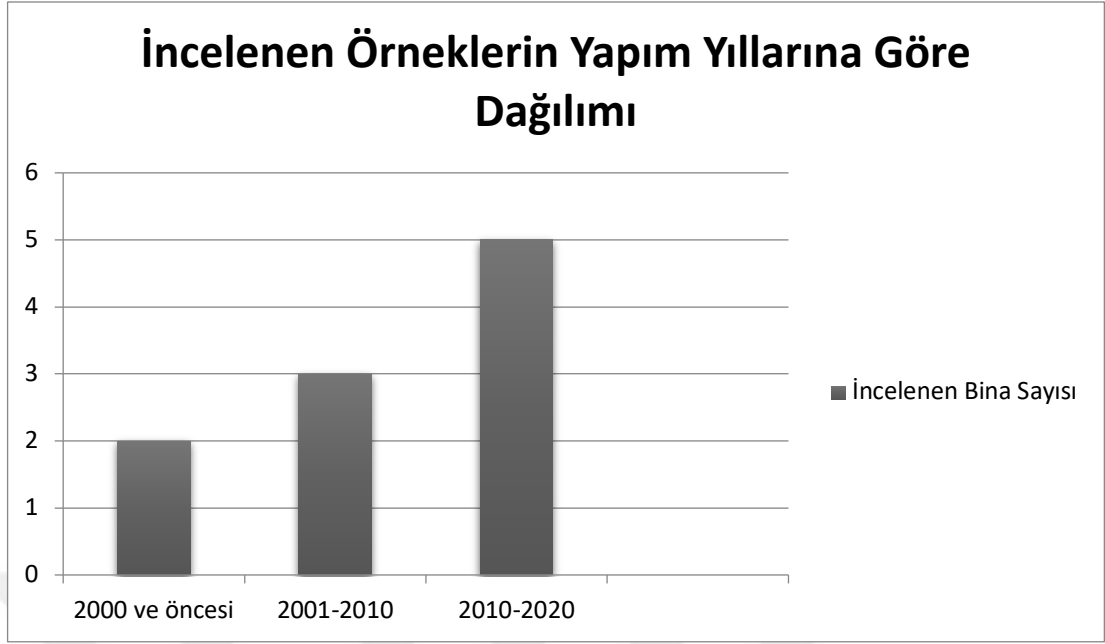
Çalışma kapsamında incelenen ve karşılaştırılan yapılar, parametrik tasarım programlarının hem modelleme sürecine hem de çevre analizlerine sağladığı katkıları ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, uygulamada farklı amaçlarla çalışan parametrik tasarım programlarının çalışma yöntemleri ve veri akış sistemleri anlatılmıştır. İncelenen yapı örneklerinin 3 tanesi periyodik karolama, 7 tanesi de aperiodyik karolama yöntemleriyle yapılmıştır. Her projede birden fazla parametrik tasarım aracı kullanılmıştır. Bunun sebebi, kullanılan programların her birinin ayrı bir amaç için kullanılmış olmasıdır. Örneğin, strüktür analizi için genellikle Strab programı kullanılmış, modelleme için BIM veya Rhino kullanılmış ancak bazen de o proje için özel yazılımlar geliştirilmiştir. Genel bir saptama olarak, modüllerin ve prefabrik yöntemlerin üretim süresini kısalttığını söyleyebiliriz.

Tablo 6.1 Tez kapsamında incelenen binaların mimari özellikleri

No	Bina	Yıl	Yer	Cephe/Kabuk Alanı m2	Fonksiyon	Mimar	Mühendis
1	Waterloo Tren İstasyonu	1993	Londra, İngiltere	17.000	Tren İstasyonu	Nicholas Grimshaw	A.Hunt Arup
2	British Museum Büyük Avlu	2000	Londra, İngiltere	6.700	Avlu	Foster + Partners	Buro Happold, Wagner Biro
3	Eden Projesi	2001	Cornwall, İngiltere	39.540	Ekosfer	Nicholas Grimshaw	A.Hunt Arup
4	Gantenbein Şarap Evi	2006	İsviçre	400	Şarap Evi	Gramazio Kohler	ETH Zurih
5	Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi	2008	Beijing, Çin	100.000	Su Sporları Merkezi	PTW Architects	Arup
6	Al Bahar Kuleleri	2012	Dubai		Ofis Binası	Aedas Architects	Arup
7	Manuel Gea Gonzalez Hastanesi	2013	Meksika	2.500	Hastane Binası	Elegant Embellishment	Elegant Embellishment
8	Toronto Bergeron Merkezi	2016	Toronto, Kanada		Eğitim Binası	Zas Architecture	Arup
9	The Boys Erkek Öğrenci Yurdu	2017	Haryana, Hindistan	1000	Öğrenci Yurdu	Zero Energy Design Lab	Design Solutions
10	Lane 189 Alışveriş Merkezi	2018	Şangay, Çin	38.800	Aışveriş Merkezi	UNStudio	UNStudio

Tablo 6.2 Tez kapsamında incelenen binaların tasarım ve yapım yöntemlerinin karşılaştırılması

No	Bina	Karolama	Geometrik Yaklaşım	Parametrik Tasarım Aracı m2	Modül Çeşidi	Malzeme	Maliyet
1	Waterloo Tren İstasyonu	Akordeon Şeklinde	Çekme/Germe ile giriş yaylar	I Ems Generative Components Microstation	36	Çelik Cam	155 Milyon Dolar
2	British Museum Büyük Avlu	Eşkenar üçgenlerle 3,3,3,3,3,3 karolaması	Düzgün ağlarla üretilen çatı örtüsü		152	Çelik Cam	120 Milyon Dolar
3	Eden Projesi	Tri-Hex-Tri	Jeodezik Kubbe	RSTAB BIM	625	Çelik ETFE	174 Milyon Dolar
4	Gantenbein Şarap Evi	Hacmin Karolanması	Pixel Mapping	Grasshopper	72	Tuğla	
5	Beijing Ulusal Su Sporları Merkezi	Voronoi	Weaire-Phelan Yapısı	BIM Strand Visual Basic Microstation	15	Çelik ETFE	140 Milyon Dolar
6	AlBahar Kuleleri	Maşrabiya	Eşkenar üçgenlerle	BIM CODE	1	Çelik Cam PTFE	390 Milyon Dolar
7	Manuel Gea Gonzalez Hastanesi	Penrose	Kite ve Dart dörtgenleriyle	Rhino Visualarq	3	Çelik Prosolve 370e	20 Milyon Dolar
8	Toronto Bergeron Merkezi	Penrose	Üçgenlerle	BIM Solidworks	3	Çelik Cam Alüminyum Panel	63 Milyon Dolar
9	The Boys Erkek Öğrenci Yurdu	Jaali	Tuğlaların + - 20 derece döndürülmesiyle	Grasshopper Ladybug Honeybee Ecotect	11	Tuğla	8 Milyon Dolar
10	Lane 189 Alışveriş Merkezi	Eşkenar dörtgenler 3B karolama	3 seviyeli ızgara üzerinde dolu boş	Rhino Grasshopper	3	Alüminyum Panel Çelik	50 Milyon Dolar



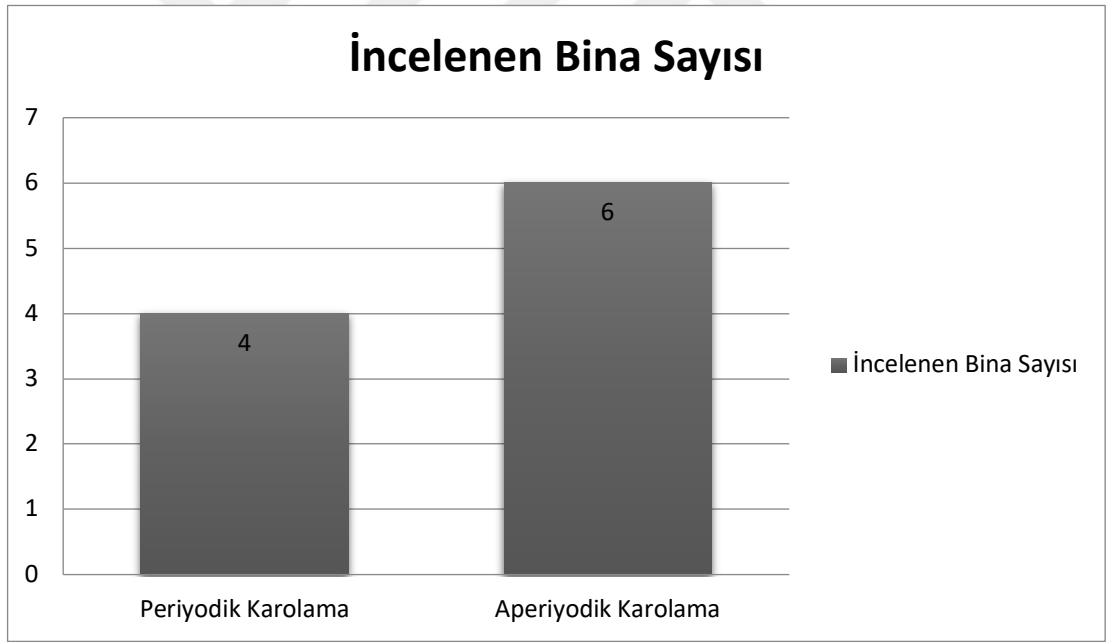
Şekil 6.1 İncelenen binaların yapım yıllarına göre karşılaştırılması



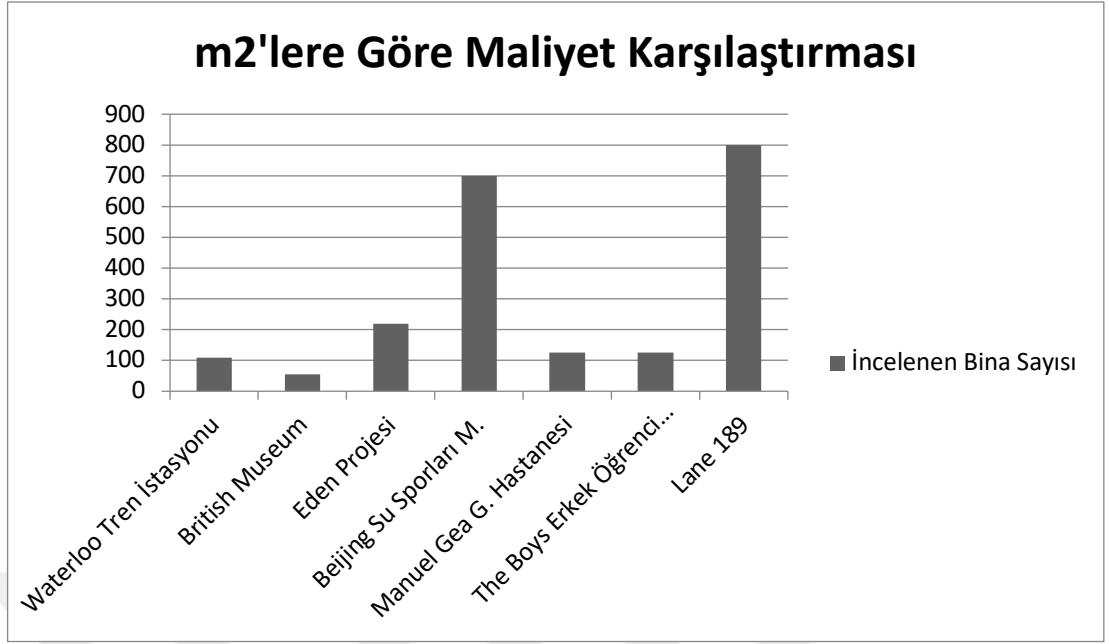
Şekil 6.2 İncelenen binaların kullanılan malzemeye göre karşılaştırılması



Şekil 6.3 İncelenen binaların kullanılan programlara göre karşılaştırılması



Şekil 6.4 İncelenen binaların karolama türüne göre karşılaştırılması



Şekil 6.5 İncelenen binaların m2 başına maliyet karşılaştırılması

İncelenen örneklerin seçiminde kullanılan karolama türüne ve kullanılan parametrik tasarım programlarının çeşitliliğine öncelik verilmiştir. Mümkün olduğunca karolama türlerinin eşit dağılmasına yönelik örnek seçimi yapılmıştır.

İncelenen yapı örneklerinin yıllara göre dağılımına bakıldığında, parametrik tasarım araçlarının 2000 yılından sonra gün geçtikçe daha çok tercih edilen bir araç olduğunu söyleyebiliriz. 2000’li yıllardan önce parametrik tasarım araçlarının kullanılmasının yapı alanında dönüm noktaları olduğunu belirtmek yanlış olmaz, örneğin Waterloo istasyonundan sonra yapılacak mega projelerde aranan mimarlar yine Waterloo istasyonun mimarları olmuştur.

İncelenen yapı örneklerinin, kullanılan malzemeye göre karşılaştırılmasına göre çelik ve cam malzemelerin çokça kullanıldığını gözlemliyoruz. Ancak çok büyük yapılarda ise cam yerine ETFE’ nin kullanıldığını görüyoruz. Bunun nedeni de cama göre daha hafif bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Malzeme tablosuna baktığımızda bir nokta da karşılaştırmada malzeme olarak betonun bulunmamasıdır. Bunun sebebi de incelenen örneklerde betonun taşıyıcı olarak strüktürde kullanılmasıdır, ele aldığımız yapı kabuğunda yani dışa temas eden kısımda örneklerde beton kullanılmamıştır. Örneklerden 8 tanesinde çelik malzemesi, 5 tanesinde de cam

malzemesi kullanılmıştır. Yapı malzemesi olarak tuğla kullanılan projelerin daha az maliyetli olduğunu da söyleyebiliriz.

İncelenen yapı örnekleri arasında en çok tercih edilen parametrik tasarım araçları BIM tabanlı olanlardır. Bu aynı zamanda mimar ve mühendislerin tercihlerinden kaynaklandığı için görüyoruz ki mühendislik işlerini ARUP firmasının yaptığı projelerde aracı olarak BIM tercih edilmiş. Projeye özel yazılan programlara veya ilk kez kullanılan programlara bakarsak da 2000 yılından önce olduğunu söyleyebiliriz, bunun sebebi de henüz parametrik modelleme ve analiz araçlarının yaygın olmaması ve piyasaya sürülmemiş olmasıdır. BIM'den sonra en çok tercih edilen ikinci program Grasshopper olmuştur, bunun sebebinin de Grasshopper'ın tüm ihtiyaçlar için ayrı bir eklentisi olduğunu söylemek yanlış olmaz, Grasshopper'ın yıllara göre kullanımına bakarsak eğer 2010 yılından sonrasında daha çok tercih edildiğini gözlemleyebiliriz. Maliyet karşılaştırması yapamayız birçok parametreye bağlı olduğu için ancak şunu söyleyebiliriz ki maliyeti yüksek olan projelerde tasarım aracı olarak BIM'den yararlanılmıştır. Yine kullanılan tasarım programlarına baktığımızda, 2010 yılından önce parametrik tasarım programlarının modelleme ve strüktür analizi için kullanıldığını söylemek mümkündür, 2010 yılından sonra çevre analizleri için kullanım oranı artmıştır.

İncelenen örneklerin 1 tanesi robotik olarak üretilmiştir, 9 tanesi prefabrik üretildiği halde robotik değildir. Gantenbein şarap evi projesine baktığımızda, robotik üretimin parametrik tasarım ile ilişkisini görebiliyoruz aynı zamanda bu yöntemlerin montaj süresini ne kadar kısalttığını da gözlemleyebiliriz. Yine aynı şekilde incelediğimiz örnekler arasında 1 tanesi kinetik cephe olarak uygulanmıştır.

Bu da yakın zamanda yapılan yapı kabuğu veya cephe tasarımlarında her ne kadar çevre, iklim ve Güneş analizleri yapılsa da, yıl boyu sabit değerler için geçerlidir ancak Al Bahar kulelerinde gün ve saatlere göre değişen cephe modüllerinin hareketleri sayesinde tüm gün optimum seviyede Güneş ışığından faydalanılabiliyor.

İncelediğimiz projelerin ortak özelliği modüllerden oluşmalarıdır. Modül çeşit ve

sayıları her örnekte farklıdır. Ancak ortak olan bir diğer nokta ise modüller olmalarından dolayı üretim sürelerinin kısaldığıdır.

Örneklerin 7 tanesi aperiodyk yani düzensiz karolama ile yapılmışken sadece 3 tanesi periyodik karolama örneğidir.

İncelenen örneklerden parametrik tasarımın tarihçe bölümünde bahsedilen Sagrada Familia ve Gantenbein şarap evi arasındaki benzerlikten söz edebiliriz. İki örnekte de yapı prefabrik olarak üretilmiştir. Yapı elemanları saha dışında üretilip sahada modüller birleştirilmiştir. Sagrada Familia’da cepheyi oluşturan levha panel taşlar vinçler yardımıyla taşınıp şantiye alanında birleştirilmiştir bu yönteme Gantenbein şarap evinde de rastlıyoruz, cephe için oluşturulan tuğla modüller vinçler yardımıyla şantiye alanına taşınıp orada birleştirilmiştir. Ayrıca incelenen bu iki örneğin sadece üretim yöntemi değil yapım sistemleri de benzerlik göstermektedir. Sagrada Familia yığma sistem, Gantenbein şarap evi ise tuğla cephelerle yapılmış olsa da her ikisi de öngermeli sistemle üretilmiştir.

KAYNAKLAR

AIA Modular Building Standards Association, 1962. *Modular practice : the schoolhouse and the building industry*, Wiley, New York.

Akısan, L., 1984. *Türkiye’de Prefabrikasyonun Gelismesinde Karşılaşılan Engeller*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Al-Zaidi, B. M. (2020, Kasım). Eating air pollution using building's façade technology. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8(4), 2218-2231.

(tarih yok). Aralık 25, 2022 tarihinde Nysha Harpermichon: <https://nyasha-harpermichon.com/practice/built-hospitality-beyond-reference-man/> adresinden alındı

Çalışkan, O. (2008). *Modüler Koordinasyon Açısından Kaplama Malzemelerinin Boyutsal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Çağlar, S. (2017, Temmuz 9). Mart 5, 2021 tarihinde Matematiksel: <https://www.matematiksel.org/gizemlerle-dolu-bir-matematikci-von-neumann/> adresinden alındı

Çağlar, S. (2017, Temmuz 9). *matematiksel.org*. Mart 5, 2021 tarihinde Matematiksel: <https://www.matematiksel.org/gizemlerle-dolu-bir-matematikci-von-neumann/> adresinden alındı

Çağlar, S. (2017, Mart 18). *www.matematiksel.org*. Ocak 5, 2021 tarihinde Matematiksel: <https://www.matematiksel.org/periodyolmak-ya-da-olmamak-penrose-karolari/> adresinden alındı

Çeven, S., & Özer, K. (2012). Büro ergonomisinin çalışma psikolojisi ve iş verimine etkisi. *11. Ulusal büro yönetimi ve sekreterlik kongresi "Büro ergonomisinin çalışan sağlığına etkisi"* (s. 235-241). Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi uzaktan eğitim meslek yüksekokulu.

Çeven, S., & Özer, K. (2013). Büro Ergonomisinin Çalışma Psikolojisi ve İş Verimine Etkisi. *DergiPark*(Büro Yönetimi I Özel Sayısı), 61-70.

- Özdamar, M., & Umaroğulları, F. (2017). Bir ofis yapısı örneğinde ısı konfor ve iç hava kalitesinin incelenmesi. *Megaron*, 12(1), 27-40.
- Adaptasyon. (tarih yok). (21 Mart 2022) tarihinde <https://tr.wikipedia.org/wiki/Adaptasyon> adresinden alındı
- Aelenei, D., Aelenei, L., & Vieira, C. P. (2016). Adaptive facade: Concept, applications, research questions. *SHC 2015, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*. 91, s. 261-275. İstanbul, Türkiye: Energy Procedia. Eylül 11, 2022 tarihinde <https://www.sciencedirect.com/journal/energy-procedia/vol/91/suppl/C> adresinden alındı
- Aelenei, L., Aelenei, D., Romano, R., Mazzucchelli, E., Brzezicki, M., & Rico-Martinez, J. (2018). Case studies-Adaptive facade network. TU Delft Open for the COSTAction 1403 adaptive facade network. Ağustos 30, 2022 tarihinde <http://tu1403.eu/> adresinden alındı
- Affiliated Engineers. (2022, Ekim 23). *Promega Corporation Kornberg Center*. <https://aeieng.com/markets/project/promega-corporation-kornberg-center> adresinden alındı
- Akgün, Y. (2012). Biçim değiştirebilen yapılar ve mimariye kattıkları. *Ege Mimarlık*, 80(1), 26-29.
- Altın, M., & Orhon, A. (2014). Akıllı yapı cepheleri ve sürdürülebilirlik. 7. *Ulusal çatı ve cephe sempozyumu*. İstanbul. file:///C:/Users/LENOVO/Downloads/Akilli_Yapi_Cepheleri_ve_Surdurulebilirlik.pdf adresinden alındı
- Altın, M., & Orhon, A. V. (2016). Enerji korunumunda adaptif/uyarlı cepheler. 8. *Ulusal çatı ve cephe sempozyumu* (s. 113-118). Fındıklı, İstanbul: B2B medya. 10 6, 2021 tarihinde <https://www.b2bmedya.com/ekitap/8inci-ulusal-cati-ve-cephe-sempozyumu-bildiriler-kitabi-2016/> adresinden alındı
- Al-Zaidi, B. M. (2020, Kasım). Eating air pollution using building's façade technology. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8(4), 2218-2231.
- Anonim. (17 Mart 2022). *Adaptasyon Nedir? Hakkında Kısaca Bilgi*. <https://www.basarisiralamalari.com/adaptasyon-nedir/> adresinden alındı
- Arık, M., & Sancak, M. (2007). *Pentapleks Kaplamalar*. Ankara: Tübitak Yayınları.

- Archdaily*. (2016, Ağustos 22). Şubat 15, 2021 tarihinde [archdaily.com](https://www.archdaily.com/793754/rio-2016-olympic-the-dancing-pavilion-estudio-guto-requena):
<https://www.archdaily.com/793754/rio-2016-olympic-the-dancing-pavilion-estudio-guto-requena> adresinden alındı
- Archdaily*. (b.t.). *Q1, ThyssenKrupp Quarter Essen / JSWD Architekten + Chaix & Morel et Associés*. 10 12, 2022 tarihinde
<https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associés> adresinden alındı
- Archicad*. (tarih yok). Aralık 25, 2022 tarihinde Bimsoft Web Sitesi:
<https://bimsoft.com.tr/archicad/ozellikler/#:~:text=ARCHICAD%20hem%20Microsoft%20Windows%20hem,i%C5%9F%20birli%C4%9Fini%20garanti%20alt%C4%B1na%20al%C4%B1r>. adresinden alındı
- Arkitektuel*. (2006, Ağustos 6). [www.arkitektuel.com](https://www.arkitektuel.com/sydney-opera-binası/#:~:text=Danimarka%C4%B1%20mimar%20J%C3%B8rn%20Utzon%20taraf%C4%B1ndan,bina%C4%B1n%20tasar%C4%B1m%C4%B1%201956%20y%C4%B1l%C4%B1na%20dayanmaktad%C4%B1r):
<https://www.arkitektuel.com/sydney-opera-binası/#:~:text=Danimarka%C4%B1%20mimar%20J%C3%B8rn%20Utzon%20taraf%C4%B1ndan,bina%C4%B1n%20tasar%C4%B1m%C4%B1%201956%20y%C4%B1l%C4%B1na%20dayanmaktad%C4%B1r>. adresinden alındı
- Asefi, M., Mitton, M., & Currie, S. (2017). A new foldable kinetic architectural system: Through an evaluative approach of built examples, case studies: Resonant Chamber, Cheiljedang Research Center, Madina Shadi Project. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 10(18), 1-12.
- Attia, S. (2017, Kasım 10). *Evaluation of Adaptive Facades: The Case Study of Al Bahar Towers in the UAE*. Aralık 25, 2021 tarihinde GlassonWeb Web Sitesi:
<https://www.glassonweb.com/article/evaluation-adaptive-facades-case-study-al-bahr-towers-uae> adresinden alındı
- Attia, S., Lioure, R., & Declaude, Q. (2020, Mayıs 18). Future trends and main concepts of adaptive facade systems. *Energy Science & Engineering*, 8(9). Ağustos 8, 2022 tarihinde
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.725> adresinden alındı
- Avcı, A. N., & Akbay, S. (2021). İnsan odaklı aydınlatma: Sirkadiyen aydınlatma tasarımı ve iç mekan ilişkisinin incelenmesi. *13. Ulusal aydınlatma kongresi: Aydınlatmada dönüşüm*. İstanbul, Türkiye.

https://www.researchgate.net/publication/355400567_Insan_odakli_aydinlatma_Sirkadiyen_aydinlatma_tasarimi_ve_ic_mekan_iliskisinin_incelenmesi adresinden alındı

Aydın, D., & Mihlayanlar, E. (2017). Yüksek konut yapılarında iç ortam kalitesinin incelenmesi. *Megaron*, 12, 213-227.

Aytaç, S., & Tüfekçi, U. (2018). Hasta bina sendromunun azaltılmasında ergonomik önlemlerin önemi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(Özel Sayı), 137-142.

B.Grünbaum, & Shephard, G. C. (1987). *Tilings and patterns*. Courier Dover Publications.

Böke, J., Knaack, U., & Hemmerling, M. (2019). State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems. *Intelligent Building International*, 11(1), 27-45. Ağustos 27, 2022 tarihinde <https://www.tandfonline.com/doi/epub/10.1080/17508975.2018.1447437?needAccess=true> adresinden alındı

Başarır, B. (2019). *Tepki veren cephelerin standar ürünlerle tasarımı: Yeniden tasarım modeli [Doktora Tezi]*. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Baba, E. C. (2020). *İdeal kent arayışında mimari ütopyalar*. İstanbul: YEM Yayın.

Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The sustainability of adaptive envelopes: Developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 275-284.

Bassarear, T. (1995). *Mathematics for Elementary School Teachers*. New York: Houghton Mifflin Compony.

Bayram, F. (2009). Işık ve aydınlatma: Işığın televizyon ve sinemada işlevsel kullanımı üzerine bir değerlendirme. *Erciyes İletişim Dergisi*, 1(2), 122-131.

Beijing. (2005, Ağustos 25). Aralık 25, 2022 tarihinde AEC Magazine: <https://aecmag.com/features/beijing-waterworld/> adresinden alındı

Bell, R. (2021). *Growing Through Sustainability Sensibilities*. Ekim 23, 2022 tarihinde <https://www.promegaconnections.com/growing-through-sustainability-sensibilities/> adresinden alındı

Bergeron Centre for Engineering Excellence. (tarih yok). Nisan 4, 2022 tarihinde Zas Architects + Interiors:

- <https://www.zasa.com/bergeronyork/2018/1/26/bergeron-centre-for-engineering-excellence-at-york-university> adresinden alındı
- Bergeron Centre for Engineering Excellence*. (tarih yok). Nisan 11, 2022 tarihinde Arup Web Sitesi: <https://www.arup.com/projects/bergeron-centre-for-engineering-excellence> adresinden alındı
- Berkmen, H., & Altın, M. (2019). Rüzgâr ve güneş enerjisi kullanan uyarlı cephe tasarımları. *10. Yenilenebilir enerji kaynakları sempozyumu ve sergisi*, (s. 374-381). Antalya.
- Bilgiç, B. (2015, Kasım 13). *Arkitera*. Nisan 15, 2021 tarihinde Arkitera Web Sitesi: <https://www.arkitera.com/proje/gantenbein-sarap-imalathanesi/> adresinden alındı
- Binney, M. (1995). *Architecture of Rail: The Way Ahead*. Wiley.
- Bradford, M. (2016). Heads in the Clouds at York University's Bergeron Centre. *Advantage Steel*(56), 17-22.
- Britton, J., & Seymour, D. (1989). *Introduction to architecture*. Dale Seymour Publications.
- Brzezicki, M. (2021). A typology of adaptive façades. An empirical study based on the morphology of glazed facades. *Cogent Arts & Humanities*, 8(1). Ağustos 27, 2022 tarihinde <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311983.2021.1960699> adresinden alındı
- Buffoni, G. (2017, Eylül 27). *The Al Bahar Towers: Shading, The Real Envelope*. Aralık 25, 2021 tarihinde igsmag web sitesi: <https://igsmag.com/features/case-studies/the-al-bahar-towers-shading-the-real-envelope/> adresinden alındı
- Burgiel, H., Conway, J., & Strauss, G. C. (2008). *The Symmetries of Things*. Wellesley: A K Peters Ltd.
- CADSAY. (2021, Ocak 5). Cadsay Web Sitesi: <https://cadsay.com/autocad-programi-nedir> adresinden alındı
- Castillo, M. J., Martinez, M. S., Sosa, A., Garcia, A. C., & Romero, L. (2022). Proseolve370e on Architectural Skins. *SHS Web of Conferences* (s. 3). ETLTC.

- Cengiz, M. S. (2021). Analysis of visual lighting criteria according to the human-Centered lighting concept. *Mas Journal of Applied Sciences*, 6(4), 891-898. Mayıs 20, 2022 tarihinde www.masjaps.com adresinden alındı
- Ceylan, O. (2020). *Büro yönetimi*. Dünya Tıp Kitapevi. Mayıs 14, 2022 tarihinde https://books.google.com.tr/books/about/B%C3%9CRO_Y%C3%96NET%C4%B0M%C4%B0.html?id=nJ7bDwAAQBAJ&redir_esc=y adresinden alındı
- Clinto, K. (2012, Eylül 5). *Al Bahar Towers Responsive Facade/Aedas*. Aralık 25, 2021 tarihinde Archdaily: <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas> adresinden alındı
- Dökmeci, V., Dülgeroğlu, Y., & Akkal, L. B. (1993). *İstanbul şehir merkezi transformasyonu ve büro binaları*. İstanbul: Literatür.
- Demirarslan, K. O., & Başak, S. (2018). Hasta bina sendromu kavramı literatür araştırması ve çeşitli mekanların iç hava kalitelerinin karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(2), 190-201.
- Detail Magazine. (2005). *Detail*(12), 108.
- Dieter Janssen Architecture. (tarih yok). Nisan 14, 2022 tarihinde Dieter Janssen Architecture Web Sitesi: <https://www.dieterjanssen.com/lassonde/s0pf0fun4836kulw2qvsahnngcgk0h> adresinden alındı
- Douglas, J. (2006). *Building Adaptation* (2. b.). Routledge.
- Dunbabin, K. M. (1999). *Mosaics of the Greek and Roman World*. Cambridge University Press.
- Elghandour, A., Saleh, A., Aboeineen, O., & Elmokadem, A. (tarih yok). Using parametric design to optimize bulging's facade skin to improve indoor daylighting performance.
- Elseth, L. E. (2016, kasım 16). *PARAMETRİK CEPHE – MEDİOPADANA İSTASYONU*. iaacblog web sitesi: <https://www.iaacblog.com/programs/parametric-facade-mediopadana-station/> adresinden alındı
- Engineering Transsolar Klima. (2022, Ekim 23). *Research & Development Facility Kornberg Center, Madison, WI, USA*. <https://transsolar.com/projects/madison-fitchburg-research-development-kornberg-center> adresinden alındı

- Ergin, Ö. (2019). uyarlanabilir cephe sistemlerinde güncel yaklaşımlar ve akıllı malzeme kullanımı [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Ermiş, T. (2014). *Düzgün Çokyüzlülerin Metrik Geometrilere İlişkileri Üzerine*. Eskişehir: Doktora Tezi.
- Ersoy, S., & Ersoy, A. F. (2007). Konutlarda verimli aydınlatma ilkeleri. *Verimlilik Dergisi*(4), 29-41.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/verimlilik/issue/21745/233816> adresinden alındı
- Fortmeyer, R., & Linn, C. D. (2014). *Kinetic architecture: Design for active envelopes*. Avustralya, Avustralya: Images publishing.
- Foster+Partners. (tarih yok). Mayıs 20, 2022 tarihinde Foster and Partners Web Sitesi: <https://www.fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/> adresinden alındı
- Frazer, J. (2016). Parametric Computation History and Future. J. Frazer içinde, *Parametric Computation History and Future* (s. 20-22).
- Gökhan, Ç., & Baytin, D. (1979). Standartlaşma ve Boyutsal Eşgüdüm. *Mimarlık Dergisi sayı 158*, 77-79.
- Gürbüz, F. Z. (2009). Tepkimeli mimarlık için öngörüler [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Gramazio Kohler Architects. (tarih yok). Mart 10, 2021 tarihinde Gramazio Kohler Web Sitesi: <https://www.gramaziokohler.com/web/d/bauten/52.html> adresinden alındı
- Gramazio Kohler Research. (tarih yok). Ekim 21, 2022 tarihinde Gramazio Kohler Research Web Sitesi: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/projekte/52.html> adresinden alındı
- Great Court at the British Museum, London. (2022, Mart 10). Architecturaviva Web Sitesi: <https://architecturaviva.com/works/renovacion-del-british-museum-2> adresinden alındı
- György, D. (2007). *Symmetry*. Budapeşte: Springer.
- Hamza, N. (2014). The sustainable corporate image and renewables: From technique to the sensory experience. A. Sayigh içinde, *Sustainability, energy and architecture* (s. 105-106). Academic Press.

- Hassanzadeh, H. (2019, Eylül 9). *Odunpazari Modern Art Museum By Kengo Kuma*. Aralık 12, 2022 tarihinde Parametric Architecture Web Sitesi: <https://parametric-architecture.com/odunpazari-modern-art-museum-by-kengo-kuma/> adresinden alındı
- Heidari Matin, N., & Eydgahi, A. (2019). Factors affecting the design and development of responsive facades: A historical evolution. *Intelligent Building International*, 12(4), 257-270. doi:<https://doi.org/10.1080/17508975.2018.1562414>
- Heidari Matin, N., Eydgahi, A., & Shyu, S. (2017). Comparative analysis of technologies used in responsive building facades. *2017 ASEE Annual Conference & Exposition*. Columbus, Ohio: ASEE. doi:10.18260/1-2--28052
- İmal, F. (2009). *Sektörel ofis binalarında çalışma mekanları ve sosyal alanlar [Yüksek Lisans Tezi]*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- International Terminal Waterloo*. (tarih yok). Ekim 25, 2018 tarihinde Grimshaw Global Web Sitesi: <https://grimshaw.global/projects/rail-and-mass-transit/international-terminal-waterloo/> adresinden alındı
- İzmir Ticaret Odası Yeni Hizmet Binası. (2018). *Çatı ve Cephe*(77), 40-41. *Journal of Sketchle*. (tarih yok). Aralık 25, 2022 tarihinde Journal of Sketchle: http://sketchle.eskisehir.edu.tr/assets/sketchle_vol1_issue1.pdf adresinden alındı
- Juaristi, M., & Monge-Barrio, A. (2016). Adaptive façades in temperate climates. An in-use assessment of an office building. *Advance building skins*. İsviçre.
- Kürklü, G., Görhan, G., & Burgan, H. (2013). Çalışma hayatında gürültünün etkisi ve inşaat teknolojileri eğitimi açısından değerlendirilmesi. *S.D.Ü. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 5(1), 22-35. Mayıs 31, 2022 tarihinde <https://dergipark.org.tr/tr/pub/utbd> adresinden alındı
- Kaçmaz, Ş. (2017). Parametrik Tasarım ve BİM. *Uluslararası Hakemli Akademik Dergi*, 1(1), 5.
- Kalkan, C. (2020, Kasım 15). *Catia Nedir? Kullanım Alanları Nelerdir?* 15 Aralık, 2022 tarihinde Mühendistan Web Sitesi: <https://muhendistan.com/word-kisayol-tuslari/> adresinden alındı

- Karaağaç, S. (2020). Uyum gösteren cepheler : Bir meta analizi [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Karanouha, A., & Kerkerb, E. (2015). Innovations in Dynamic Architecture The Al Bahr Towers Design and Delivery of Complex Facades. *Semantic Scholar*.
- Kayan, H. Z., & Tekin, Ç. (2013). İç mekanda işitsel konfor ve estetik. 3. *Ulusal iç mimarlık sempozyumu*, (s. 210-221). İstanbul.
- Kinsey, L. C., & Moore, T. E. (2006). *Symmetry, Shape and Space: An Introduction to mathematics through geometry*. Springer Science and Business Media.
- Knebel, K., Alvarez, J. S., & Zimmerman, S. (tarih yok). *Space Feeling*. Würzburg Germany: Mero GmbH & Co.
- Kocağa, M., & Özcan, U. (2022). Variables Affecting The Performance of Facade Systems in ARchitecture. V. Çavuş, & S. Bardak içinde, *Research & Reviews In Engineering* (s. 104-106). Ankara: Gece Kitaplığı.
- Konis, K., & Selkowitz, S. (2017). Innovative daylight systems. *Effective daylighting with high-performance facades* (s. 101-154). içinde İsviçre: Springer.
- Korqa, N. (2015, Nisan 13). *Generative Design for BIM*. Ocak 8, 2023 tarihinde yeswebim.wordpress.com: <https://yeswebim.wordpress.com/2015/04/13/bim-and-scripting-beijing-national-aquatics-center/> adresinden alındı
- Kurtcu, F. (2019). 20. Yüzyıl modernizmi tipografi'de içerik ve biçim ilişkisi. *Çeşm-i Cihan: Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları E- Dergisi*, 6(1), 29-110. Mayıs 9, 2022 tarihinde <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cesmicihan> adresinden alındı
- Kurtoğlu, D., & Kıstır, M. R. (2018). Akademeik ofislerin verimlilik üzerine değerlendirilmesi: Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi örneği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 109-118.
- Ladybug Tools. (tarih yok). Kasım 10, 2021 tarihinde food4rhino Web Sitesi: <https://www.food4rhino.com/en/app/ladybug-tools?page=3> adresinden alındı
- Lane 189. (tarih yok). Ocak 19, 2022 tarihinde Unstudio Web Sitesi: <https://www.unstudio.com/en/page/11768/lane-189> adresinden alındı
- Lane 189/UNStudio. (tarih yok). Ocak 19, 2022 tarihinde archdaily: <https://www.archdaily.com/874598/lane-189-unstudio> adresinden alındı
- Lochhead, H., & Oldfield, P. (2017). The role of design competitions in shaping Sdney's public realm. *CTBUH Journal*(4), 34-39.

- Loonen, R., Rico-Martinez, J., Favoino, F., Marcin, B., Menezo, C., La Ferla, G., & Aelenei, L. (2015). Design for façade adaptability – Towards a unified and systematic characterization. *Proceedings of 10th Energy Forum - Advanced Building Skins*, (s. 1274-84). Bern İsviçre.
- Lou, H., & Ou, D. (2019). A comparative field study of indoor environmental quality in two types of open-plan offices: Open-plan administrative offices and open-plan research offices. *Building and Environment*, 148, 394-404.
- Mülayim, S. (1999). *Yüzyılın (1900-1999) Kültür ve Sanat Kronolojisi*. Kaknüs Yayınları.
- Marangoz, E. (2018). *İç mimaride aydınlatmanın tanımı ve ofis mekanlarında aydınlatma kriterlerinin incelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]*. Haliç Üniversitesi.
- Margalit, H. (2019). *Australia: Modern architectures in history*. Londra: Reaktion Books.
- Marysse, C. (2016). Structural adaptive facade [Yükseklisans Tezi]. Belçika.
- Merritt, E. (2016, Ekim 25). *Media-Tic, with almost-finished works, is the new image of Barcelona digital*. Ekim 25, 2021 tarihinde Silo.tips: <https://silo.tips/download/media-tic-with-the-almost-finished-works-is-the-new-image-of-barcelona-digital> adresinden alındı
- Mirvac. (2017, Nisan 10). EY Centre, 200 George Street, Sydney [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=-HR1__idOOOk adresinden alındı
- Mirvac wins trifecta of international property awards for 200 George Street. (2018). *Construct Magazine*(2), 7.
- Montgomery, S. (2013). *Architecture of the early Twenty-First Century - A global need for sustainability*.
- Mosa, R. (2018). Developing a strategic framework for the design of adaptive building envelopes [Yüksek Lisans Tezi]. Heriot Watt University.
- Obermoser, E. (2018). Elegance meets efficiency: EY Centre by FJMT in Sydney. *Detail*.
- Oberste-Ufer, D. K. (2021, Ocak 13). *2020 Yılıının En İyi BIM Yazılımı*. Aralık 20, 2022 tarihinde Dormakaba Blog Sitesi: <https://blog.dormakaba.com/tr/2020-yilinin-en-iyi-bim-yazilimi-aciklandi/> adresinden alındı

- Okumuş, E. M. (2020). Sürdürülebilir mimarlık kapsamında akıllı cephe sistemlerinin incelenmesi. *8th International symposium on innovative technologies in engineering and science*. 3, s. 267-281. Bursa: Academic perspective procedia.
- Oldfield, P. (2017). Intrinsically Sydney: The EY centre. *Architecture Australia*, 106(4), 78-86.
- Omran, H., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Raahemifar, K., & Tookey, J. (2016). Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1256-1269.
- Orhon, V. (2013). Geodel v.1.0.1 başlangıç ve tanıtım rehberi.
- Pickover, C. A. (2009). *The Math Book*. Barnes and Noble Books.
- Pile, J. (1976). *Interiors 3rd book of offices*. New York: Whitney Library of Design.
- Platonik Cisimler Nelerdir. (2018, Şubat 16). Aralık 10, 2022 tarihinde NKFU Web Sitesi: <https://www.nkfu.com/platonik-cok-yuzluler-nelerdir/> adresinden alındı
- PPG. (2017, Nisan 14). The Tower at PNC Plaza. Ekim 31, 2022 tarihinde <https://www.bdcnetwork.com/tower-pnc-plaza?page=2> adresinden alındı
- Prakash, A., Shekhawat, H., & Goyal, G. (2017, Kasım 11). Visual Calculation Through Shape Grammar In Architecture. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(11), 293.
- Prism. (2018, Mart 26). The tower at PNC plaza Pittsburgh, Pennsylvania. Şubat 3, 2022 tarihinde <https://prism.pub.com/the-tower-at-pnc-plaza-pittsburgh-pennsylvania/> adresinden alındı
- Reggio Emilia Stazione Mediopadana. (tarih yok). Mart 18, 2020 tarihinde Calatrava Web Sitesi: <https://calatrava.com/projects/reggio-emilia-stazione-mediopadana-reggio-emilia.html> adresinden alındı
- Rhinoscript Guides. (tarih yok). Aralık 25, 2022 tarihinde Developer Rhino3d: <https://developer.rhino3d.com/guides/rhinoscript/> adresinden alındı
- Rogers, E. (2017). A new façade technology combines energy performance, aesthetics and transparency. *USGlass, Metal & Glazing*, 52(2), 38-40.

- Romano, R., Aelenei, L., Aelenei, D., & Mazzucchelli, E. S. (2018). What is an adaptive facade analysis of recent terms and definitions from an international perspective. *Journal of Facade Design and Engineering*, 6(3), 66-76.
- Sönmez, B., & Çakır Kiasif, G. (2018). Çevresel, sosyal ve ekonomik bağlamda akıllı cephe sistemlerinin sürdürülebilir kalkınmaya etkileri. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 63-98.
- Saavedra, P. (2016). BIM at York Campuses A New Paradigm for Campuses. *Erappa 2016*, (s. 7--118). Ontario.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. Wiley Yayınları.
- Salla, F. (2014, Mart 7). *Rhino Projects: a smog-eating facade*. Mart 7, 2022 tarihinde VisualARQ Web Sitesi: <https://www.visualarq.com/rhino-projects-a-smog-eating-facade/> adresinden alındı
- Sammer, M. J. (2019). *The Expressive Power of Programming Languages in Architecture*. Yüksek Lisans Tezi, Lizbon.
- Santiago Calatrava Architects and Engineers. (2010, şubat 16). ocak 17, 2019 tarihinde calatrava.com: <https://calatrava.com/projects/reggio-emilia-stazione-mediopadana-reggio-emilia.html> adresinden alındı
- Sarıgül, T. (2017, 11 13). *Mozaiklerin Matematiği*. Ocak 5, 2021 tarihinde <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/>:
<https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/mozaiklerin-matematigi> adresinden alındı
- Sağlam, O. (2019). *Ofis tasarımlarında çevresel faktörler [Yüksek Lisans Tezi]*. Işık Üniversitesi.
- Schröder, N. (2021). Intelligente fassadenlösung als visitenkarte. *Immobilien*, 46-47.
- Schröder, N., & Brandstätter, G. (2020). Der neue SisCampus im Urner Reusstal-Intelligente fassadenlösung als visitenkarte. *Fassade, Façade*, 13-17. Ocak 16, 2022 tarihinde <https://www.fachwerk.ch/wp-content/uploads/2021/07/FASSADE-04-2020-SisCampus.pdf> adresinden alındı

- Sdney Opera Binası*. (tarih yok). Aralık 25, 2022 tarihinde Arkitektuel Web Sitesi: <https://www.arkitektuel.com/sydney-opera-binasi/> adresinden alındı
- Serpil Aytaç, U. T. (2018). Hasta bina sendromunun azaltılmasında ergonomik önlemlerin önemi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(Özel Sayı), 137-142.
- Shahin, H. S. (2019). Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 345-352.
- Stylepark*. (2010, Ocak 11). Mayıs 25, 2022 tarihinde Stylepark Web Sitesi: <https://www.stylepark.com/en/news/these-bubbles-wont-burst> adresinden alındı
- Sucu, İ. (2012). Sanat akımlarının etkisinde sinemada klasik ve alternatif Eğilimler. *Akdeniz Üniversitesi İletişim Fakültesi Dergisi*(17), 111-125. Mayıs 9, 2022 tarihinde <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akil> adresinden alındı
- Sydney Opera House*. (tarih yok). Nisan 21, 2022 tarihinde Designing Buildings: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Sydney_Opera_House adresinden alındı
- Szalapaj, P. (2001). *CAD Principles for Architectural Design*. Architectural Press.
- Türk Dil Kurumu. (b.t). Adaptasyon. *Güncel Türkçe Sözlük*. Mart 17, 2022 tarihinde <https://sozluk.gov.tr/> adresinden alındı
- Türk Dil Kurumu. (b.t.). Büro. *Türk dil kurumu sözlükleri*. 27 Ekim, 2021 tarihinde <https://sozluk.gov.tr/> adresinden alındı
- Türk Dil Kurumu. (b.t.). Ofis. 27 Ekim, 2021 tarihinde <https://sozluk.gov.tr/> adresinden alındı
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassolis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*.
- The Architect's Newspaper*. (2010, Haziran 6). Şubat 16, 2021 tarihinde archpaper.com: <https://www.archpaper.com/2010/07/william-j-mitchell-1944-2010/> adresinden alındı
- The Bergeron Centre for Engineering Excellence*. (tarih yok). Nisan 11, 2022 tarihinde archello web sitesi: <https://archello.com/project/the-bergeron-centre-for-engineering-excellence> adresinden alındı

- The Eden Project: The Biomes*. (tarih yok). Ocak 5, 2022 tarihinde grimshaw global: <https://grimshaw.global/projects/culture-and-exhibition-halls/the-eden-project-the-biomes/> adresinden alındı
- Tokuç, A., Özkaban, F. A., & Çakır, Ö. A. (2018). Biomimetic facade applications for a more sustainable future. G. Köktürk, & T. D. Altun (Ed.) içinde, *Interdisciplinary expansions in engineering and design with the power of biomimicry* (s. 77-99). IntechOpen. Ekim 19, 2021 tarihinde <https://www.intechopen.com/> adresinden alındı
- Tranel, B., & Ko, H. (2016). Tower at PNC Plaza, Pittsburgh. *CTBUH Journal*(2), 12-19.
- Velikov, K., & Thün, G. (2012). Responsive building envelopes: Characteristics and evolving paradigms. F. Trubiano (Ed.) içinde, *Design and construction of high-performance homes* (s. 75-92). Londra: Routledge.
- Wagg, D. (2015). Tiling Space with Regular and Semi-regular Polyhedra.
- Yıldız, B. (2007). Adaptasyon Meselesi, Ahmet Vefik Paşa ve Zoraki Tabib Örneği. *Turkish Studies*, 2(3), 638-659.
- Yılmaz, G. (2018). Yüksek Performanslı Bir Yeşil Bina: İzmir Ticaret Odası Yeni Hizmet Binası. *Yeşilbina*(50), 20-22.
- Yılmaz, M. (2015). Geleceğin cepheleri. Ağustos 15, 2022 tarihinde <https://www.winartproje.com/icindekiler/teknik/157-gelecegin-cepheleri> adresinden alındı
- Yılmaz, Y., Ayvaz, B., & Tufan, B. (tarih yok). Yarı Düzgün Çok Yüzlüler Tablosu. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık Fakültesi.
- Yakar, U. (2022, Ekim). *Solidworks Nedir?* Ocak 27, 2023 tarihinde Webtekno Web Sitesi: <https://www.webtekno.com/solidworks-nedir-h121381.html> adresinden alındı
- Yaman, B., & Arpacıoğlu, Ü. T. (2021). Dinamik kontrollü uyarlanabilir cephe ve gölgeleme sistemleri. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi*, 6(1), 153-164.
- Yararel, B. (2019). Ofis tasarımında ergonomik ve antropometrik etkenler. *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 4(1), 141-153.

- Yeles Karaman, S. (2018). *Sosyo-Kültürel adaptasyon sürecinde yabancı uyruklu üniversite öğrencilerinin kültürlerarası iletişim duyarlılığı [Yüksek Lisans Tezi]*. Selçuk Üniversitesi.
- Yelkenci Sert, F. (2016). Çatı ve cephe sistemlerinde ETFE kaplamalarının kullanımı. 8. *Ulusal çatı & cephe sempozyumu*. İstanbul: Çatıder. <https://catider.org.tr/> adresinden alındı
- Zülfikar, H. (2012, Ocak). Dünden Bugüne Türkçe/Türkçesi Olduğu Hâlde Fransızcasını Kullanmaya Devam mı? *Türk Dili*, 102(721), 71-76. Mart 17, 2022 tarihinde <https://www.tdk.gov.tr/yayinlar/sureli-yayinlarimiz/ocak-2012-sayi-721/> adresinden alındı
- ZED. (tarih yok). Aralık 25, 2021 tarihinde Zero Energy Design Lab: <https://www.zeroenergydesignlab.com/boyshostel> adresinden alındı
- ZED. (tarih yok). Aralık 25, 2021 tarihinde Zero Energy Design Lab: <https://www.zeroenergydesignlab.com/boyshostel> adresinden alındı