KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

HESAPLAMALI TASARIM TEKNİKLERİ İLE ELDE EDİLEN NON-LİNEER YAPILARIN STRÜKTÜR VE MALZEME AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif ÖZEN

AĞUSTOS 2023
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

HESAPLAMALI TASARIM TEKNİKLERİ İLE ELDE EDİLEN NON-LİNEER YAPILARIN STRÜKTÜR VE MALZEME AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elif ÖZEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"YÜKSEK MİMAR"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 / 07 / 2023
Tezin Savunma Tarihi : 04 / 08 / 2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nilhan VURAL

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Hesaplamalı Tasarım Teknikleri ile Elde Edilen Non-Lineer Yapıların Strüktür ve Malzeme Açısından Değerlendirilmesi” isimli bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, olumlu yaklaşımıyla beni motive eden, kıymetli bilgi ve deneyimleri ile beni doğru bir biçimde yönlendiren sevgili tez danışmanım Doç. Dr. Nilhan Vural’a, lisans ve yüksek lisans programında beni yetiştiren KTÜ Mimarlık ailesine içtenlikle teşekkür ederim.

Hayatımın her anında beni destekleyen, geleceğimi şekillendirebilmem için elinden gelen bütün imkanları sunan, beni motive eden ve her daim sevgisini hissettiğim başta babam Mustafa ÖZEN, annem Lütfiye ÖZEN olmak üzere tüm aileme; bu süreçte her zaman yanımda olan ve beni destekleyen tüm dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Elif ÖZEN

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Hesaplamalı Tasarım Teknikleri ile Elde Edilen Non-Lineer Yapıların Strüktür ve Malzeme Açısından Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Nilhan Vural‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/08/2023

Elif ÖZEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VII
SUMMARY VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ IX
TABLOLAR DİZİNİ XVIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XIX
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 2
1.3. Araştırmanın Yöntem ve Teknikleri 3
1.4. Literatür Taraması 4
1.4.1. Bilgisayar Teknolojisinin ve Sayısal Teknolojilerin Tarihsel Gelişimi 4
1.4.2. Hesaplamalı Tasarım 8
1.4.3. Hesaplamalı Tasarım Teknikleri 9
1.4.4. Bilgisayarlı Sayısal Üretim (CAM) 16
1.4.5. Bilgisayarlı Sayısal Üretim (CNC) Teknikleri 17
1.4.6. Non-Lineer Yapı Kavramı ve Hesaplamalı Teknolojilerin Mimarlık Üzerindeki Etkisi 22
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 25
2.1. Örneklem Grubunun Belirlenmesi 25
2.2. Örneklerin Analizi 26
2.2.1. Heydar Aliyev Kültür Merkezi 27
2.2.2. Dongdaemun Tasarım Merkezi 48
2.2.3. Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi 58
2.2.4. Hangzhou Olimpik Spor Merkezi 77
2.2.5. Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi 101
2.2.6. Al Janoub Stadyumu 122

2.2.7.Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı 138
2.2.8.Geleceğin Müzesi 157
3. BULGULAR VE İRDELEMELER 171
3.4. Genel Bilgiler ile İlgili Bulgular ve İrdeleme 171
3.5. Strüktür Sistemi ile İlgili Bulgular ve İrdeleme 173
3.6. Cephe Sistemi ile İlgili Bulgular ve İrdeleme 182
3.7. Hesaplamalı Tasarım Süreci ile İlgili Bulgular ve İrdeleme 187
3.8. Sürdürülebilirlik ile İlgili Bulgular ve İrdeleme 188
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 191
5. KAYNAKLAR 195
ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HESAPLAMALI TASARIM TEKNİKLERİ İLE ELDE EDİLEN NON-LİNEER YAPILARIN STRÜKTÜR VE MALZEME AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elif ÖZEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Nilhan Vural
2023, 205 Sayfa

Mimarlık; farklı bilim alanlarından beslenen, teknolojiyi yakından takip eden, sürekli kendini yenileyen bir disiplindir. Başlangıçta Öklid'in sınırlı geometrisine bağlı olan mimarlık, bilgisayarın keşfi ile non-lineer (lineer olmayan), sıra dışı geometrilere yönelmiştir. Bu yönelim; tüm mimari süreçleri karmaşıklaştırmış ve farklı tasarım, malzeme, üretim ve yapım ihtiyacını doğurmuştur. Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ile ortaya çıkan hesaplamalı tasarım ve üretim teknikleri, bu ihtiyacı karşılayabilmekte ve karmaşık geometrilerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada; non-lineer, karmaşık yapıların üretim gerekliliklerinin anlaşılması hedeflenerek yapıların tasarımdan üretime ve yapıma kadar tüm mimari aşamaları irdelenmiş, özellikle strüktür ve malzeme bağlamında detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmanın ilk bölümünde gerekli literatür bilgisi verilmiş, daha sonra hesaplamalı tasarım teknikleri ile tasarlanan, son on yılda üretilmiş, non-lineer, ödüllü ve mimari açıdan özgün 8 adet yapı ele alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bilgiler, bulgular ve irdeleme bölümünde tablolar yardımı ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda; her yapının projeye özgü detaylara ve yeniliklere sahip olduğu, dolayısıyla bu yapıların üretiminde hesaplamalı tasarım ve üretim tekniklerinin kullanılmasının gerekli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı Tasarım, Non-Lineer Yapılar, Sayısal Üretim Teknikleri

SUMMARY

Master Thesis

EVALUATION OF CONSTRUCTION PROCESS OF NON-LINEAR BUILDINGS OBTAINED BY COMPUTATIONAL DESIGN TECHNIQUES IN TERMS OF STRUCTURE AND MATERIALS

Elif ÖZEN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Architecture Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nilhan VURAL
2023, 205 Pages

Architecture is a discipline that feeds from different sciences, follows technology closely, and constantly renews itself. Architecture, which was initially connected to the limited geometry of Euclid, has turned to non-linear, unusual geometries with the discovery of the computer. This orientation has complicated all architectural processes and has given rise to different design, materials, production and construction needs. Computational design and manufacturing techniques, are able to compensate these needs and make it possible to realize complex geometries. Therefore, in this study, all architectural stages of buildings were examined in order to understand the requirements of the production of non-linear, complex buildings, and detailed analyses were performed, especially in the context of structure and materials. In this direction, the necessary literature information was given in the first part of the study, and then 8 non-linear, award-winning and architecturally original buildings designed with computational design techniques, produced in the last ten years, were considered. The information obtained was tabulated and evaluated in the findings and discussion section. As a result of the study, it was found that each structure has project-specific details and innovations, so it is necessary to use computational design and production techniques in the production of these structures.

Key Words: Computational Design, Non-Linear Buildings, Computer Aided Manifacturing

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Ivan Sutherland'in geliştirdiği 'Sketchpad' 5
Şekil 2. Walt Disney Konser Salonu, Los Angeles, 1997 6
Şekil 3. Kahve bardağının torusa (simit biçimi, halka) dönüşümü 9
Şekil 4. Topolojik mimari: Walt Disney Konser Salonu 10
Şekil 5. İzomorfik yüzeylerin oluşumu 11
Şekil 6. BMW Pavyonu, Bernhard Franken, 1999 11
Şekil 7. New York Presbiteryen Kilisesi (Lynn & Partners, 1999) 12
Şekil 8. Üstra Ofis Binası (Frank Gehry, Hannover, 1997) 13
Şekil 9. Emriyolojik Ev tasarım süreci (Greg Lynn) 14
Şekil 10. Grasshopper'da parametrelere bağlı olarak modellenen bir biçim 15
Şekil 11. Waterloo Uluslararası İstasyon, Nicola Grimshaw, Londra, 1989-1993 16
Şekil 12. Soumaya Müzesi (FR-EE), Bee'ah Headquarters (ZHA), Aranya Cloud Center (MAD) 16
Şekil 13. Lazer kesim makinesi 18
Şekil 14. Su jeti kesim makinesi (sol); Plazma kesim makinesi (sağ) 19
Şekil 15. CNC frezeleme makinesi 20
Şekil 16. TECLA projesi (sol); 3B baskı makinesi (sağ) 20
Şekil 17. Boru bükme makinesi 21
Şekil 18. Dongdamun Design Plaza alüminyum cephe panelleri 21
Şekil 19. Guggenheim Müzesi, New York, 1956-1959 23
Şekil 20. Heydar Aliyev Kültür Merkezi vaziyet planı 28
Şekil 21. HAKM yapı kesiti 29
Şekil 22. HAKM Güneybatı görünüşü 29
Şekil 23. HAKM yapı konstrüksiyonu (çelik uzay kafes strüktür ve betonarme çerçeve strüktür) 30
Şekil 24. Betonarme çerçeve sistem ve çelik uzay kafes strüktür (HAKM) 31
Şekil 25. Çift katmanlı uzay kafes strüktürün tek katmanlı strüktüre geçişte uygulanan "kırlangıç kuyruğu" yöntemi 31
Şekil 26. Birbirine entegre edilmiş strüktür sistemi 32
Şekil 27. Küresel çelik düğüm noktası ve çubuk elemanlar 32

Şekil 28. Küresel düğüm noktası 33
Şekil 29. Çelik strüktürün montaj aşaması 34
Şekil 30. Uzay kafes strüktür (sol); bütünleşmiş taşıyıcı sistem (sağ) 34
Şekil 31. HAKM'de kullanılan makineye benzer CNC dairesel boru bükme makinesi 35
Şekil 32. Betonarme çerçeve sistem 3B model (sol); uzay kafes strüktür 3B model (sağ) 35
Şekil 33. 3B model (Rhinoceros) 36
Şekil 34. GFR paneller üzerindeki stres testi 37
Şekil 35. Solar radyasyon analizi 37
Şekil 36. Çerçeve elemanlardaki eğilme momentinin dağılımı (sol); eğilme momentinin yakından görünümü (sağ) 38
Şekil 37. GFRC panellerin panelizasyonu 38
Şekil 38. Panelizasyonun 3B model üzerindeki gösterimi 39
Şekil 39. HAKM panel montajı 40
Şekil 40. HAKM cephe panelleri 40
Şekil 41. Giydirme cephenin 3B görünümü (sol); giydirme cephe elemanları (sağ) 41
Şekil 42. 3B sistem kesiti 42
Şekil 43. GFRP panellerin montajı (sol); cephe detayı (Sağ) 43
Şekil 44. Cephe panellerinin vinç yardımıyla yerine kaldırılması 43
Şekil 45. Panel montajı 44
Şekil 46. HAKM inşaat aşaması 44
Şekil 47. 3B cephe sistemi arka görünüm 45
Şekil 48. Low-e kaplamalı çift cam üniteler 45
Şekil 49. Cam panellerin montajı 46
Şekil 50. Montajı tamamlanan cephe panelleri 46
Şekil 51. Cam ünitelerden oluşan cephe 47
Şekil 52. Dongdaemun Tasarım Merkezi vaziyet planı 49
Şekil 53. DTM yapı kesiti 50
Şekil 54. Yapı konstrüksiyonu (sol); alüminyum cephe kaplaması (sağ; 3B model) 50
Şekil 55. Mega kafes sistemi (mega-truss) 51
Şekil 56. Uzay kafes strüktür ile alüminyum panellerin birleşim detayı 51

Şekil 57. 3B uzay kafes strüktür modeli 52
Şekil 58. DTM inşaat aşaması 52
Şekil 59. Dongdaemun Tasarım Merkezi YBM modeli 53
Şekil 60. DTM YBM modelleri 54
Şekil 61. DTM uzay kafes strüktürün bir kısmının modeli 54
Şekil 62. 3B modele göre çift eğrilikli, tek eğrilikli ve düz panellerin konumları 55
Şekil 63. Alüminyum cephe paneli (sol); inşa aşamasındaki cephe (sağ) 55
Şekil 64. Çift eğrilikli panel üretim sistemi 56
Şekil 65. Çok noktalı CNC streç şekillendirme makinesi 56
Şekil 66. DTM'nin yeşil çatısı 57
Şekil 67. KADKM (Ithra) Vaziyet Planı 59
Şekil 68. Ithra yapı konstrüksiyonu 60
Şekil 69. Ithra yapı kesiti 60
Şekil 70. Ithra bodrum kat planı 61
Şekil 71. Ithra 3B model (Tekla Structures) 62
Şekil 72. Betonarme sistem ve çelik strüktür (uzay kafes sistem) 63
Şekil 73. Bulonlu bağlantı detayı (Tekla Structures) 63
Şekil 74. Işıklığı destekleyen eğimli ahşap elemanlar 64
Şekil 75. Ladin (iç) ve meşeden (dış) oluşturulmuş eğimli ahşap eleman 64
Şekil 76. Üretimi tamamlanmış ahşap elemanların Ithra'ya gönderilmek üzere Almanya'da depoya kaldırılması 64
Şekil 77. Ahşap kirişin geometrisi 65
Şekil 78. Frezelenmiş ahşap kiriş (sol); örümcek bağlantısı ve kenet yeri (orta, sağ) 65
Şekil 79. Ambalajlanmadan önce üretimi tamamlanmış ahşap elemanlar 65
Şekil 80. Betonarme ve çelik strüktür 3B model (Tekla Structures) 66
Şekil 81. Hesaplamalı tasarım araçları ile oluşturulan izometrik görünüm (çelik strüktür) 67
Şekil 82. Katı cisimlerin parametrik modellenmesi (Rhinoceros) 67
Şekil 83. Son yüzey modeli (Rhinoceros) 68
Şekil 84. Serbest geometriye sahip yüzeylerin üretim kolaylığı için elemanlara bölünmesi 69
Şekil 85. Geometry Gym uygulaması kullanılarak cephe bileşenlerinin modellenmesi 70
Şekil 86. Geri adım işlemi 70

Şekil 87. Çelik borular ve boruları tutan cephe paneli 71
Şekil 88. Ithra 3B cephe sistemi 71
Şekil 89. Ithra cephe detayı 72
Şekil 90. Ithra Cephe Detayı 72
Şekil 91. Paslanmaz çelik boruların korunarak taşınması (sol); paslanmaz çelik borular (sağ) 73
Şekil 92. Cephe kaplama sistemi ve paslanmaz çelik borular 73
Şekil 93. 3B cephe ünitesi içeriği (sol); 3B cephe ünitesi modeli (sağ) 73
Şekil 94. Çelik boruların 3B verilere göre CNC makinelerde şekillendirilmesi 74
Şekil 95. Proje için kullanılan CNC makinelerine benzer makineler 74
Şekil 96. Her bir çelik boru için oluşturulmuş QR kodları 75
Şekil 97. Peyzaj tasarımı 75
Şekil 98. Pencere kısımlarında düzleştirilen çelik borular 76
Şekil 99. HOSM vaziyet planı 78
Şekil 100. Yapı konstrüksiyonu; ana stadyum (sol), tenis stadyumu (sağ) 79
Şekil 101. Yapı cephesi; ana stadyum (sol), tenis stadyumu (sağ) 79
Şekil 102. Ana stadyum yapı kesiti 80
Şekil 103. Tenis stadyumu yapı kesiti 80
Şekil 104. Betonarme yapının oluşturulması (ana stadyum) 81
Şekil 105. Çelik uzay kafes ve betonarme strüktür (ana stadyum, inşaat aşaması) 81
Şekil 106. Yapı konstrüksiyonu (tenis stadyumu) 82
Şekil 107. Büyük çelik modül (ana stadyum) 82
Şekil 108. Alt mesnet ile yaprak modülün arasındaki bağlantının yapılması (ana stadyum) 83
Şekil 109. Platform ile çelik modül arasındaki şematik diyagram (ana stadyum) 83
Şekil 110. Hareketli çatı strüktürü montaj sıralaması (tenis stadyumu) 84
Şekil 111. Hareketli çatı (tenis stadyumu) 84
Şekil 112. Yapı kesiti (tenis stadyumu) 85
Şekil 113. Büyük ve küçük taç yaprağın birleşimi (ana stadyum) 85
Şekil 114. Şekil Çelik çatı yapısı (ana stadyum) 86
Şekil 115. Dökme çelik eleman ve çelik borularla olan birleşim detayı (sol); iç köşe kaynağı (sağ) 86
Şekil 116. Birden çok elemana sahip düğüm noktasının kesişme sıralaması 87
Şekil 117. Çelik borunun şekillendirilmesi ve ardından 90º döndürülmesi 87

Şekil 118. Hidrolik pres ile çelik boruların bükülmesi 88
Şekil 119. Kontrol noktaları ile çelik boruların sapma tespiti 88
Şekil 120. Çelik strüktürün montajı (sol, ana stadyum); ana taç yaprağı kirişlerinin kaynaklanması (sağ, ana stadyum) 89
Şekil 121. Çeşitli disiplinlerin kapsamlı çakışma denetimini gerçekleştirebilen YBM modeli 90
Şekil 122. 2B ve 3B bilgi alışverişi süreçlerini gösteren diyagram 90
Şekil 123. NURBS eğrileri ile tanımlanan yapı cephesi ve strüktür (Grasshopper) 91
Şekil 124. Ana stadyumun parametrelere bağlı tasarımı (Grasshopper) 91
Şekil 125. Dış kabuğu tasarlamak için kullanılan Grasshopper algoritması 92
Şekil 126. Dış kabuğun geometrisini tanımlanması 93
Şekil 127. Parametrik tasarım kullanılarak oluşturulan varyasyonlar (tenis stadyumu) 93
Şekil 128. Yapısal parametrik tasarım modeli (Rhinoceros, Grasshopper) 94
Şekil 129. Kafes kiriş merkez hattı modelinde yerçekimi yüklemesinin görselleştirilmesi (Kangroo fizik motoru) 95
Şekil 130. Panel kiriş formunun yüzey analizi ve kaplaması 95
Şekil 131. Grasshopper ve Revit Architecture çizimlerinin kombinasyonu 96
Şekil 132. Cephe katmanları (ana stadyum) 97
Şekil 133. Ana stadyumun cephesi (sol); tenis stadyumunun cephesi (sağ) 98
Şekil 134. Panel montajı (Tenis stadyumu) 98
Şekil 135. Alüminyum panel ve ETFE montajı (ana stadyum) 99
Şekil 136. Şeffaf polikarbonat panellerin taşınması 99
Şekil 137. Şeffaf polikarbonat panel montajı (ana stadyum) 100
Şekil 138. CMUKM vaziyet planı 102
Şekil 139. CMUKM yapı konstrüksiyonu 103
Şekil 140. CMUKM büyük tiyatro yapı kesiti 103
Şekil 141. CMUKM sanat müzesi yapı kesiti 104
Şekil 142. CMUKM küçük tiyatro yapı kesiti 104
Şekil 143. Entegre çelik yapı modeli (Tekla structures) 105
Şekil 144. Betonarme strüktür ile çelik yapı (inşaat aşaması) 105
Şekil 145. Çelik elemanlar ve bazı birleşim noktaları 106
Şekil 146. Çelik strüktürün betonarme strüktür ile yakından ilişkisi (büyük tiyatro) 106
Şekil 147. Çelik yapının 3B lazer tarama nokta bulutu (büyük tiyatro) 107

Şekil 148. Kutu kesitli çelik elemanların yerine kaldırılması ve monte edilmesi 107
Şekil 149. Üç silindirli levha haddeleme makinesi (sol); hidrolik pres (sağ)..... 108
Şekil 150. Üretilen kutu kesitli çelik elemanların lazer ile kontrol edilmesi..... 108
Şekil 151. Çelik levhaların birleştirilmesi (sol); kutu kesitli çelik eleman (sağ)..... 109
Şekil 152. CMUKM yapı strüktürü (inşaat aşaması)..... 110
Şekil 153. CMUKM YBM sistemi 110
Şekil 154. CMUKM YBM modeli 111
Şekil 155. CMUKM Entegre inşaat modeli (Revit 2014)..... 112
Şekil 156. Bütünleşmiş elektromekanik model (Revit 2014) 112
Şekil 157. Sanat müzesi alüminyum levhaların şekil ve boyut analizi (sol); GFRC kalıp modeli (Digital Project/ Gehry Technologies) 113
Şekil 158. GFRC inşaatı dinamik izleme..... 113
Şekil 159. Küçük tiyatro cephe panelizasyonu (Digital Project) 114
Şekil 160. 3B lazer tarama nokta bulutu (büyük tiyatro)..... 114
Şekil 161. CMUKM inşaat aşaması..... 115
Şekil 162. Havalandırmalı giydirme cephe detayı (GFRC rain-screen panel) 115
Şekil 163. Büyük tiyatrodaki GFRC panellerin 3B modeli: düz paneller (turuncu). Tek eğrilikli (beyaz), çift eğrilikli (yeşil) 116
Şekil 164. Cephe panellerinin montajında kullanılan sistem detayı 117
Şekil 165. GFRC panellerin montajı..... 117
Şekil 166. Ahşap kalıpların yapımı (sol); tamamlanmış GFRC panel (sağ)..... 118
Şekil 167. Cephe panellerinin taşınması 118
Şekil 168. GFRC panel kare kodu 119
Şekil 169. Cephe panellerinin yerine kaldırılması..... 119
Şekil 170. GFRC panellerin montajı..... 120
Şekil 171. Alüminyum panellerin montajı..... 120
Şekil 172. Sanat müzesi cam açıklık..... 121
Şekil 173. Al Janoub Stadyumu vaziyet planı 123
Şekil 174. Al Janoub Stadyumu yapı kesiti 124
Şekil 175. Al Janoub Stadyumu yapı konstrüksiyonu 124
Şekil 176. Al Janoub Stadyumu zemin kat planı 125
Şekil 177. Betonarme temel (sol); inşaat aşaması (sağ) 125
Şekil 178. Çelik ve betonarme sistem..... 126
Şekil 179. Çelik uzay kafes sistem 126

Şekil 180. Çelik uzay kafes sistem ve çelik kirişleri destekleyen elemanlar 127
Şekil 181. Oculus kirişi ve çelik strüktür 128
Şekil 182. AJS Oculus kirişi 128
Şekil 183. Kendinden tahrikli motorlu taşıyıcı (SPMT) 129
Şekil 184. Bulonlu birleşim ve geçici kuleler ile ayakta tutulan çelik kafes kiriş 129
Şekil 185. SCIA'da oluşturulmuş 3B model 130
Şekil 186. Grasshopper 3B yazılımında kullanılan araç 130
Şekil 187. Tasarımın Grasshopper yazılımında modellenmesi 131
Şekil 188. Dijital fabrikasyon için üretilen modeller 131
Şekil 189. PTFE membran ve çelik kablolar 132
Şekil 190. PTFE örtünün montaj aşaması 132
Şekil 191. Al Janoub Stadyumu ikincil çelik strüktür 133
Şekil 192. Çelik alt yapı ve alüminyum paneller (sol); alüminyum panelleri tutan çelik elemanlar 133
Şekil 193. PVC TiO_2 kapmalı iç çatı ve kablolar 134
Şekil 194. Al Janoub stadyumu çelik strüktür modeli 134
Şekil 195. Açılır kapanır membran çatı yapısı 3B model 135
Şekil 196. Al Janoub Stadyumu inşaat aşaması 136
Şekil 197. Soğutma sistemi: soğuk hava akışı 137
Şekil 198. Açılıp kapanabilen çatı sistemi 137
Şekil 199. Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı zemin kat planı 139
Şekil 200. BDUH yapı kesiti 140
Şekil 201. BDUH yapı konstrüksiyonu 140
Şekil 202. BDUH betonarme ve uzay kafes strüktür (inşaat aşaması) 141
Şekil 203. C tipi kolonların yerleşimi 142
Şekil 204. C tipi kolonların görünümü (iç mekan) 142
Şekil 205. Alüminyum bağlantı elemanlarına sahip aydınlatma çatısı 143
Şekil 206. Alüminyum bağlantı elemanları (sol); bağlantı elemanlarının üretimi (CNC, orta); elemanların montajı (sağ) 143
Şekil 207. I şekilli alüminyum bağlantı elemanı (sol); düğüm plakası (sağ üst); çelik strüktür ile bağlantı detayı (sağ alt) 144
Şekil 208. Alüminyum bağlantı elemanları 144
Şekil 209. Alüminyum plakaların I profillere montajı (sol); montajın bitmiş hali (orta); camların alüminyum bağlantı elemanlarına montajı (sağ) 145

Şekil 210. Çatı pencerelerinin montaj aşaması 145
Şekil 211. Uzay kafes strüktür montajı (küresel düğüm noktası) 146
Şekil 212. Tambur şeklindeki kaynaklı içi boş küresel bağlantı elemanı 146
Şekil 213. BDUH sismik izolasyon sistemi 147
Şekil 214. BDUH 3B plan modeli 148
Şekil 215. BDUH serbest biçimli çatının Grasshopper şeması 149
Şekil 216. Uzay kafes strüktür ve çatı panellerinin ilişkisi (sol); geometrik konumlandırma (Rhinoceros, sağ) 149
Şekil 217. Kapsamlı tasarım modeli (Revit) 150
Şekil 218. Serbest biçimli yüzeyin oluşturulması (sol); çatı panellerinin hesaplamalı tasarımı (sağ) 150
Şekil 219. Çatı pencerelerinin kontrol noktası ile hesaplanarak eşit bölmelere ayrılması 151
Şekil 220. Eğrisel cephenin analizi 151
Şekil 221. BDUH çatı sistemi 152
Şekil 222. Çatı panellerinin montajı 153
Şekil 223. Merkezi çatı aydınlatması (sol); C şekilli sütunların oluşturduğu aydınlatma çatıları (sağ) 153
Şekil 224. Çatı pencerelerinde kullanılan alüminyum fileli cam 153
Şekil 225. BDUH cam giydirme cephe 154
Şekil 226. Orijinal giydirme cephe sistemi (sol); geliştirilmiş uygulama planı (sağ) 154
Şekil 227. Giydirme cephe sisteminin montaj karşılaştırması (sol); giydirme cephenin yatay çelik kirişlerle olan bağlantısı (sağ) 155
Şekil 228. Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı 156
Şekil 229. Geleceğin Müzesi vaziyet planı 158
Şekil 230. Geleceğin Müzesi yapı kesiti 159
Şekil 231. Geleceğin Müzesi yapı konstrüksiyonu 159
Şekil 232. Geleceğin Müzesi GFRP cephe panelleri 160
Şekil 233. Geleceğin Müzesi betonarme ve çapraz ızgara strüktür (inşaat aşaması) 160
Şekil 234. Geleceğin Müzesi 3B kat planları 161
Şekil 235. Yapı strüktürünün modellenmesi (Tekla Structure) 161
Şekil 236. Başlangıçta planlanan birleşim detayı (Tekla Structures, sol); uygulanan birleşim tekniği (kaynaklama, sağ) 162
Şekil 237. Üretilen çelik modüller 162

Şekil 238. Modüllerin üretimi (sol); modüllerin kaynaklanması (inşaat aşaması, sağ) 163
Şekil 239. Geleceğin Müzesi YBM modeli 163
Şekil 240. Çapraz çelik ızgara strüktürün parametrik olarak modellenmesi (Buro Happold) 164
Şekil 241. Çapraz çelik ızgara strüktürün 3B modeli (Tekla Structures) 165
Şekil 242. Panelleri gösteren 3B model (sol); CATIA yazılımında modellenen cephe paneli (sağ) 165
Şekil 243. GM cephe panellerinin montajı (inşaat aşaması) 166
Şekil 244. GM cephe paneli (CATIA) 166
Şekil 245. GM cephe detayı (Buro Happold) 167
Şekil 246. Poliüretan köpük kalıpların frezelenmesi (sol); kalıba dökülen panellerin fırınlanması (sağ) 167
Şekil 247. Kalıptan çıkan GFRP paneller (sol); paslanmaz çelik kaplamanın montajı (sağ) 168
Şekil 248. GFRP panellerin montajı 169
Şekil 249. GM'nin yeşil çatısı 169
Şekil 250. Yeşil çatı detayı 170

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Çalışma modelinin oluşturulması 4
Tablo 2. Heydar Aliyev Kültür Merkezi yapı künyesi 27
Tablo 3. Dongdaemun Tasarım Merkezi yapı künyesi 48
Tablo 4. Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi yapı künyesi 58
Tablo 5. Hangzhou Olimpik Spor Merkezi yapı künyesi 77
Tablo 6. Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi yapı künyesi 101
Tablo 7. Al Janoub Stadyumu yapı künyesi 122
Tablo 8. Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı yapı künyesi 138
Tablo 9. Geleceğin Müzesi yapı künyesi 157
Tablo 10. Yapıların yapı tasarımını ve strüktür mühendisliğini yürüten ofisler 172
Tablo 11. Yapıların yapım yeri ve yapım yılı 172
Tablo 12. Yapıların maliyeti ve m² başına düşen maliyeti 173
Tablo 13. Yapıların strüktür türü ve malzemesi 174
Tablo 14. Yapıların strüktür türü ve malzemesi (görseller ile) 175
Tablo 15. Çelik strüktür elemanlarının biçimi 178
Tablo 16. Çelik strüktürün bağlantı türü 179
Tablo 17. Çelik strüktür bağlantı türü (görseller ile) 179
Tablo 18. Çelik strüktür elemanların üretim tekniği 181
Tablo 19. Yapılarda kullanılan kaplama malzemeleri 183
Tablo 20. Yapılarda kullanılan kaplama malzemeleri (görseller ile) 184
Tablo 21. Yapılarda kullanılan kaplama malzemelerinin üretim tekniği 185
Tablo 22. Kullanılan hesaplamalı tasarım araçları 187
Tablo 23. Sürdürülebilirlik ile ilgili bulgular 189

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AJS : Al Janoub Stadyumu
BDUH : Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı
BIM : Building Information Modeling
CAM : Computer Aided Manufacturing
CFD : Computational Fluid Dynamics
CMUKM : Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi
CNC : Computer Numerical Control
DTM : Dongdaemun Tasarım Merkezi
EPS : Expanded Polystyren Foam
ETFE : Etilen Tetra Floro Etilen
GFRC : Glass Fiber Reinforced Concrete
GFRP : Glass Fiber Reinforced Polimer
GM : Museum of the Future
HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HOSM : Hangzhou Olimpic Spor Merkezi
HAKM : Heydar Aliyev Kültür Merkezi
KADKM : Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi
MET : Mekanik, Elektrik, Tesisat
NURBS : Non-Uniform Rational Basis Spline
PTFE : Poli Tetra Floro Etilen
YBM : Yapı Bilgi Modellemesi
MPa : Basınç birimi
Φ : Donatı çapı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Mimarlık; insanlık tarihi boyunca var olan, sürekli değişen, gelişen ve teknolojik gelişmelerle doğrudan ilişkili olan bir disiplindir. Bu değişim ve dönüşüm Sanayi Çağı ile öne çıkmış ve Bilişim Çağı ile hız kazanmıştır. Geçtiğimiz yüzyılın sonunda başlayan ve halen devam eden bilişim çağının ilk adımı, bilgisayarın keşfi ile atılmıştır. Pek çok teknolojinin ortaya çıktığı ve geliştiği bu dönemde; başlangıçta otomotiv, uçak ve gemi inşa endüstrisi gibi farklı disiplinler etkilenirken zamanla mimarlık da bundan payını almıştır. Mimarlar; her zaman teknolojiyi yakından takip etmiş, farklı disiplinlerden öğrenmeyi sürdürmüş ve aldığı bilgileri mimariye entegre etmeyi başarmıştır. Bu süreçte; yeni malzemeler üretilmiş, yeni tasarım, üretim ve yapım teknikleri ortaya çıkmıştır. Bunun sonucunda Öklid'in sınırlı geometrisinden uzaklaşılmış ve farklı form arayışlarına gidilmiştir.

Mimarlığın lineer olmayan, eğrisel ve sıra dışı geometrilere yönelmesi; bir mimari ürünün tasarımdan yapımına kadar olan tüm sürecini değiştirmiştir. Mimarlık, karmaşık bir hale geldikçe bu karmaşıklığı anlamak, hesaplamak ve uygulamak da zorlaşmıştır. Tasarım ne kadar karmaşıksa o kadar veri içermektedir. Dolayısıyla geleneksel tasarım ve üretim yöntemleri kullanılarak yapı strüktürünü ve yapı kabuğunu doğru bir şekilde kurgulamak, bu strüktüre ve kabuğa ait elemanların boyutlarını hesaplamak ve uygun ölçülerde üretebilmek, dahası bütün bunları düşük bir hata payı ile gerçekleştirmek oldukça güç, hatta neredeyse imkânsızdır. Ancak bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ile ortaya çıkan ve mimariye dahil olan, literatüre; hesaplamalı, işlemsel veya sayısal olarak geçen yeni teknikler sayesinde büyük miktarda veri içeren bu Öklid dışı, karmaşık geometrilerin gerçekleştirilebilmesi de mümkün olmuştur.

Özellikle son on yılda hesaplamalı tasarım ve üretim tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Dolayısıyla karmaşık yapıların üretimi artmıştır. Bu teknikler ile elde edilen yapıların her biri; farklı strüktür ve cephe sistemleri, farklı kaplama malzemeleri, farklı tasarım ve üretim teknikleri ile kendine özgüdür. Aynı zamanda bu yapıların gerçekleştirilmesinin tasarım ve üretim süreci bakımından çeşitli zorluklar içerdiği söylenebilir. Fakat bu tür serbest formlu karmaşık yapıların elde edilme zorluğu sadece

tasarımın oluşturulmasından ibaret değildir. Projenin üretim ve inşa aşaması da sonuç ürünün başarısı için oldukça önemlidir. Her yapı birbirinden farklı teknikler içermekte hatta yapıların proje sürecinde yeni yöntemler keşfedilmektedir. Buna bağlı olarak, bu karmaşık süreçlerin sonucunda oluşan etkileyici non-lineer yapıların nasıl gerçekleştirildiği merak konusu olmuştur. Dolayısıyla bu yapılar; farklı tasarım süreçleri, strüktür ve cephe sistemleri, üretim ve yapım teknikleri, aynı zamanda projeye özgü farklı nitelikler içermesi nedeniyle araştırmaya değer bulunmuştur.

Hesaplamalı tasarım bağlamında yapılan mevcut çalışmalarda, yapıların tüm yönleriyle incelendiği bir analize rastlanmamıştır. Bu noktada, yapıların nasıl elde edildiğinin tam olarak anlaşılabilmesi için yukarıda da bahsedildiği gibi yapıların sadece form bağlamındaki analizi olmak üzere tek yönlü bir şekilde değil, tüm mimari sürecinin araştırılarak her yönüyle analiz edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak bu araştırma, hesaplamalı tasarım teknikleri ile elde edilen non-lineer yapıların tasarımdan üretime kadar tüm mimari süreçlerinin analiz edilerek hesaplamalı tasarım ile gerçekleştirilen yapı tasarımının, yapılarda kullanılan strüktür ve kaplama malzemelerinin tasarım, üretim ve montaj aşamalarının anlaşılması açısından önem taşımaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Hesaplamalı tasarım teknikleri ile elde edilen ve tasarımları ile dikkat çeken serbest formlu geometriler; tasarım, üretim ve yapım tekniği bakımından kendine özgü detaylara sahiptir ve pek çok yenilik içermektedir. Yapıların tasarım ve üretim aşamalarının ve bu süreçlerde kullanılan tekniklerin araştırılması, bu geometrilerin inşa edilebilirliğinin anlaşılması açısından önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada, hesaplamalı tasarım ile üretilen non-lineer (lineer olmayan) ve karmaşık geometrilerin tasarımından yapımına kadar tüm mimari süreçlerinin araştırılarak ve analiz edilerek detayları ile ortaya koyulması, bu sayede literatüre katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda; yapıya ait özellikler, yapı tasarımında kullanılan hesaplamalı tasarım yöntemleri ve araçları, yapıda tercih edilen strüktür türü, yapının strüktür ve örtü malzemesi, yapı bileşenlerinin üretim yöntemi ve montajı detaylı olarak incelenmiştir.

Çalışmada ilk olarak; bilgisayarın keşfinden bu yana yaşanan teknolojik gelişmeler ele alınmış, hesaplamalı tasarım yöntemleri ve sayısal üretim teknikleri ile ilgili literatür bilgisi verilmiştir. Ardından hesaplamalı tasarımın mimariye olan etkisinden kısaca söz edilmiştir.

Bu bilgiler; incelenen yapılara ait yapısal detayların, tasarım ve üretim süreçlerinde kullanılan yöntemlerin anlaşılması açısından önemlidir.

Bu çalışma kapsamında; yukarıda değinilen konularda incelenmek üzere son 10 yılda üretilmiş olan 8 adet yapı ele alınmıştır. Bu yapıların; hesaplamalı tasarım yöntemleri ile tasarlanmış, ödüllü, mimari açıdan özgün olması ve non-lineer formlara sahip olmaları esastır. Ayrıca yapıların tasarım, üretim ve yapım süreci hakkındaki bilgilerin yeterli seviyede ve ulaşılabilir olması da göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen bilgiler sonucunda bu denli karmaşık yapıların nasıl tasarlanıp üretildiği, tasarım ve üretim sürecinde karşılaşılan zorlukların neler olduğu ve yapıyı mümkün kılabilmek için gerekli teknolojilerin nasıl ve nerelerde kullanıldığı irdelenerek aktarılmaya çalışılmıştır.

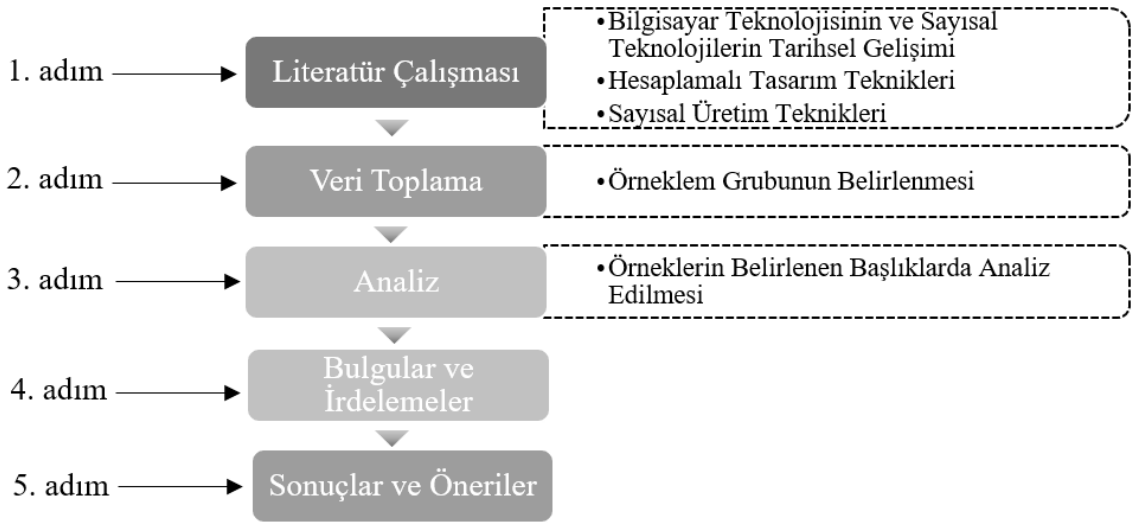
1.3. Araştırmanın Yöntem ve Teknikleri

Çalışma sürecinde ilk olarak literatür taraması yapılmış, bilgisayarın keşfinden bu yana yaşanan teknolojik gelişmeler, hesaplamalı tasarım ve sayısal üretim teknikleri ile ilgili bilgi verilmiştir. Bu bilgiler, incelenen yapılara ait yapısal detayların, tasarım ve üretim süreçlerinde kullanılan yöntemlerin anlaşılması açısından önemlidir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, hesaplamalı tasarım ile üretilen yapıların tüm mimari sürecini detaylarıyla ortaya koymak amacıyla bir örneklem grubu oluşturulmuştur. Örneklere ait bilgilerin bir kısmı, yapıların bulunduğu ülkeler nedeniyle farklı dillerdeki (Çince, Arapça, Korece) çalışmalardan (veri tabanları, makaleler, tezler vb.) elde edilmiştir. Belirlenen örnekler; genel bilgiler, strüktür tasarımı, hesaplamalı tasarım, cephe tasarımı ve sürdürülebilirlik olmak üzere 5 başlık altında incelenmiştir. Bu başlıklarda; yapının strüktür türü, cephe ve strüktür malzemesi, yapının hesaplamalı tasarım yöntemleri ile nasıl ve hangi programlar kullanılarak tasarlandığı, yapı bileşenlerinin hangi sayısal üretim yöntemleri ile üretildiği ve nasıl monte edildiği, yapıya ait sürdürülebilir tasarım kararları gibi konularda detaylı analizler yapılmıştır. Yapılan analizler, yapılara ait görseller ile desteklenerek detaylandırılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda analiz edilen örneklere ait bulgular, tablolar yardımıyla açıklanmıştır. Bununla birlikte hesaplamalı tasarım tekniklerinin ve sayısal üretim yöntemlerinin; mimari ürünlerin tasarım, üretim ve yapım süreci üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Bu bağlamda çalışma süreci boyunca nasıl bir yol izlendiği Tablo 1’de verilen çalışma modeli ile özetlenmiştir.

Tablo 1. Çalışma modelinin oluşturulması



1.4. Literatür Taraması

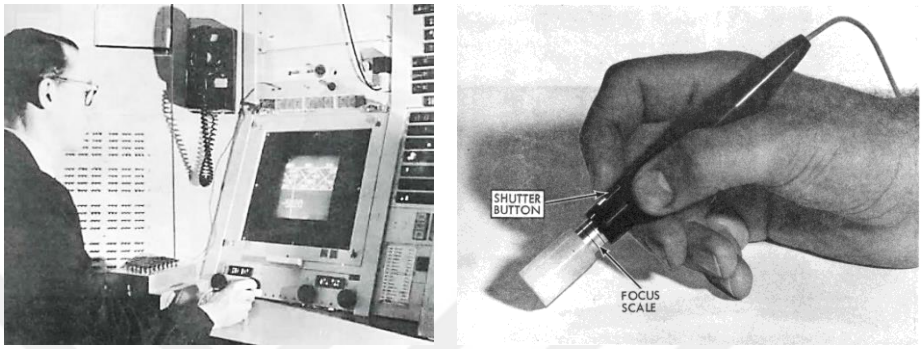
Bu bölümde hesaplamalı tasarım ile elde edilen yapıların tasarım, üretim ve yapım süreçlerinin anlaşılması için gerekli literatür bilgisi verilmiştir. İlk olarak bilgisayarın ve sayısal teknolojilerin tarihsel gelişimi ile ilgili bilgi verilmiş, daha sonra hesaplamalı tasarım, hesaplamalı tasarım teknikleri; sayısal üretim ve sayısal üretim teknikleri açıklanmış, son olarak da non-lineer yapı kavramından ve bu tekniklerin mimarlık üzerindeki etkisinden söz edilmiştir.

1.4.1. Bilgisayar Teknolojisinin ve Sayısal Teknolojilerin Tarihsel Gelişimi

Günümüzde birçok sektörün vazgeçilemez bir parçası olan bilgisayar teknolojisinin temelini oluşturan ilk adımlar, 1940'ların ortalarında atılmıştır. 1945 ve 1960'lı yıllar arasında ise bilgisayarlar hakkında pek çok fikir üretilmiş ve Memex gibi çeşitli makineler tasarlanmıştır. Bu çalışmalar güçlü bir fikir oluştursa da tasarlanan makineler hiçbir zaman üretilememiş ve pratik kullanıma girememiştir. 1960'lı yıllara gelince, Steven Coons tarafından CAD (Computer Aided Design) sisteminin işlevleri ayrıntılı bir şekilde ortaya konmuştur. Böylelikle ilk çalışan prototipler üretilmiştir (Mitchell, 1990).

Bilgisayar grafiklerindeki ilk atılım ise 1962'de Ivan Sutherland tarafından gerçekleştirilmiştir. Sutherland'in Massachusetts Institute of Technology'deki doktora

tezinin bir parçası olarak tanıttığı ‘Sketchpad’, ilk CAD sistemidir (Şekil 1). Büyük ses getiren bu sistem; etkileşimli bir gerçek zamanlı grafik ekranı, etkileşimli bir giriş cihazı (kalem) ve bir kısıtlama modelinden oluşan temel özelliklere sahiptir (Sutherland, Ocak 1963). Dolayısıyla 60’lı yılların başında tasarımcı tarafından kontrol edilebilen, akıllı bir modele sahip bir CAD sistemi fikri tamamen yerleşmiştir (Aish, 2013).



Şekil 1. Ivan Sutherland’in geliştirdiği ‘Sketchpad’ (Aish, 2013)

1970’lere gelince daha kompakt, daha sağlam ve daha iyi performansa sahip sistemler üretilmiştir. Bu sistemlerden birkaçı büyük mimarlık ofislerine girmeyi başarmış fakat günlük tasarım pratiğini yeterince etkileyememiştir. Bununla birlikte 70’li yılların ortalarında çıkan kişisel bilgisayarlar, bu endüstrinin daha da büyümesini sağlamıştır. (Mitchell, 1990). 1980’li yıllarda ise teknolojinin gelişmesine bağlı olarak CAD sistemi, daha kapsamlı ve karmaşık hale gelmiştir (Mitchell, 1990).

Bilgisayar destekli tasarım teknolojisinin ortaya çıkmasından bu yana bu teknolojiler, birçok sektör tarafından kullanılmıştır. Başlangıçta endüstriyel tasarım, uçak ve gemi tasarımı gibi farklı alanlarda kullanılan bilgisayarlar, mimarlık disiplini için oldukça yabancı görülmüştür. Buna rağmen mimarlar, her zaman farklı disiplinlerden öğrenmeyi sürdürmüş ve bu disiplinlerde kullanılan malzeme, yöntem ve süreçleri mimarlık disiplinine entegre etmeyi başarmıştır (Kolarevic, 2003). Ayrıca otomotiv, uçak ve gemi inşa endüstrileri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılan ve CAD teknolojisine paralel olarak ilerleyen bilgisayar destekli üretim de (Computer Aided Manufacturing, CAM) mimarlığın önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Özetle 70’li ve 80’li yıllarda farklı disiplinler tarafından tasarıma dahil edilen bilgisayar teknolojilerinin, mimarlık pratiğine somut olarak girmesi 90’lı yılları bulmuştur. Bunun en iyi örneği Frank Gehry’nin 1997 yılında tamamlanan Walt Disney Konser Salonu’dur (Şekil 2). Walt Disney Konser Salonu, teknoloji çağının ruhunu yansıtan birçok yeniliğe sahiptir. Frank Gehry, bu teknolojinin mimarlık sektörüne girmesini

sağlayan öncü isimlerden biridir. CAD ve CAM teknolojilerini, karmaşık yapı formlarına sahip mimari ürünlerin tasarım ve üretim sürecine entegre eden Gehry, otomotiv ve uçak tasarımında kullanılan, bir 3B modelleme programı olan CATIA'yı kullanmıştır (Akipek, İnceoğlu, 2007). Matematiksel hesaplar kullanılarak üretilen bu yapı, mimarlığın farklı disiplinlerden faydalandığını ve etkilendiğini göstermektedir.

Şekil 2. Walt Disney Konser Salonu, Los Angeles, 1997

Başlangıçta mimarlar, farklı endüstriler için geliştirilmiş CATIA gibi programları kullanırken, bilgisayar teknolojilerinin gelişimine paralel olarak mimarlık pratiğinde yaygın kullanılan çeşitli programlar geliştirilmiştir. Örneğin 1982 yılında, bilgisayar destekli tasarım yazılımı geliştiren Autodesk kurulmuş ve günümüzde halen kullanılan AutoCAD'in ilk versiyonları ortaya çıkmıştır. 1985 yılında Autodesk tarafından üretilen 3B modelleme programları ile dijital ortamda 3B tasarım süreci başlamıştır (URL-1). 1990 yılında, 3D Studio adlı program geliştirilmiştir. Öte yandan ArchiCAD kullanıcısı 40.000'e ulaşmış ve 3B modellerden gerçekçi görüntüler oluşturan Render teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır (Özlüdil, 2005; Aktaran Vural & Oktan, 2013). Bununla birlikte 1994 yılında Rhinoceros programı ve 2007'de Rhinoceros'un bir alt bileşeni olan ve hesaplamalı tasarımda sıklıkla kullanılan Grasshopper geliştirilmiştir (URL-2).

Yeni yazılımların üretilmesi, kişisel bilgisayarların günlük yaşamda ve mimaride kullanımının yaygınlaşması ve daha kolay erişilebilir hale gelmesi ile bilgisayarlar, çoğu mimar için yabancı bir teknoloji olmaktan çıkmıştır (Dunn, 2012). Fakat bilgisayarın mimari tasarım dünyasına girmesinin ilk yıllarında bilgisayarlar, bu teknolojinin hesaplama yeteneğinden ziyade mimari ürünler için bir görselleştirme aracı olarak kullanılmıştır. Bu nedenle 1990'lı yıllarda bilgisayarlar, 3B modelleme ve animasyon gibi teknikler ile geleneksel tasarım sürecini desteklemek ve geleneksel çizim sürecini hızlandırmak için

tercih edilmiştir (Akipek & İnceoğlu, 2007). CAD'in geleneksel tasarımın dijital bir versiyonu olarak kullanılması, değişen mimari tasarım anlayışının gerektirdiği karmaşık hesaplamaları karşılayamamıştır. Bu da daha gelişmiş program ihtiyacını doğurmuştur. Zamanla sayısal teknolojiler gelişmiş ve tasarımda hesaplama dönemi ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda Aish (2013), bilgisayar ve sayısal teknolojilerdeki gelişimi üç döneme ayırmıştır. Bu dönemler; 2B Çizim Dönemi, Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) Dönemi ve Hesaplamalı Tasarım Dönemidir.

2B Çizim Dönemi olarak adlandırılan geleneksel CAD sistemi, Bertol (1994) tarafından geleneksel çizimin bilgisayar destekli bir versiyonu olarak tanımlanmaktadır. Yukarıda da söz edildiği gibi CAD, büyük çoğunlukla çizim sistemleri ile tanınmaktadır. Bununla birlikte 2B Çizim Döneminde, yaratıcı bir tasarım aracı olan bilgisayarlardan yeterince yararlanılamamıştır (Aish, 2013). Oxman'in (2012) deyişine göre ilk CAD modelleri, tanımlayıcı olarak ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla 2B Çizim Döneminde CAD'in tasarıma ciddi bir katkısı yoktur ve yalnızca geleneksel çizim sistemini dijital bir sisteme dönüştüren bir temele sahiptir.

YBM dönemi, düşünülenin aksine 80'li yıllarda 2B Çizim Dönemine paralel olarak doğmuş, YBM ilkeleri ise 1980'lerin ortalarında oluşturulmuştur. YBM'nin temel amaçlarından biri, birbirinden bağımsız birçok çizimi tek bir model altında birleştirmektir (Aish, 2013). Başka bir deyişle YBM, tüm verilerin birbirine bağlı olduğu ve proje üstündeki değişikliklerin ve yeniliklerin eş zamanlı olarak YBM modeline yansıtıldığı sanal bir model oluşturma fikrine dayanmaktadır. Ayrıca YBM, tasarımdan üretime kadar olan mimari süreçler arasındaki kopukluğu çözmektedir (Krygiel, 2008). Bu dönem ile hesaplamalı tasarım dönemi örtüşmekte ve bu iki dönem bağlantılı bir şekilde devam etmektedir.

Hesaplamalı tasarım, 90'lı yıllardan bu yana tasarım üzerindeki güçlü etkisi nedeniyle mimarlık disiplininin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Hesaplamalı tasarım ortamı, geleneksel tasarım ortamından büyük ölçüde farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte yüzlerce çizim ve zor hesaplamalar gerektiren Öklid dışı geometriler (non-lineer) gibi karmaşık formlardaki tasarımların, tasarımdan üretime kadar, mümkün olduğunca en kısa sürede ve en verimli şekilde oluşturulmasını sağlamaktadır.

Hesaplamalı tasarımda tasarımcı, projenin fiziksel bir temsilini 3B olarak doğrudan modellemek yerine bir komut dosyası aracılığıyla parametrelere veya algoritmalara bağlı olarak çeşitli teknikler ile geliştirmektedir (Aish, 2013). Böylelikle hesaplamalı tasarım, geleneksel CAD sistemine göre karmaşık formların üretilmesine izin vererek tasarıma ve

tasarımcıya yeni olanaklar sunmaktadır. Gehry'nin öncülüğünde kendini gösteren bu teknolojiler; Greg Lynn, Zaha Hadid gibi uygulamacı ve araştırmacı mimarlar tarafından da kullanılarak devam ettirilmiştir.

1.4.2. Hesaplamalı Tasarım

Hesaplamalı tasarım, tanımlı bir çevreyi oluşturan bileşenler arasındaki etkileşim ve bilginin işlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Menges & Ahlquist, 2011). Başka bir deyişle hesaplamalı tasarım; yeni teknolojilerle desteklenen, farklı tasarım sınıfları üreten ve hızla gelişen bir olgudur. Ayrıca hesaplamalı tasarım, farklı tasarım metodolojileri, farklı biçimsel içerik geliştirmeye başlama yöntemi ve farklı tasarım etkileşimi biçimleri açısından öne çıkmaktadır (Oxman, 2006). Hesaplamalı teknolojilerin ve üretim biçimlerinin mimarlık pratiğindeki artan rolü ve artan önemi, mimarlık söyleminde yeni tekniklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Hesaplamalı tasarım, nesneden çok sürecin tasarımına ve tasarımın dizgesel bir çerçevede tanımlanmasına odaklanmaktadır. Tasarımcı, hesaplanabilir bir tasarımı oluşturabilmek için algoritmalar, kurallar, parametreler ve matematiksel ilişkiler kullanmaktadır (Dino, 2012). Hesaplamalı tasarım ile form üretmenin birçok yöntemi vardır. Bu tekniklerin ve yönelimlerin ortaya çıkmasıyla birlikte Oxman ve Kolarevic gibi araştırmacılar, sayısal teknolojileri belli sınıflandırmalar ile tanımlamış ve çeşitli başlıklara ayırmıştır. Oxman (2006), ilk olarak hesaplamalı tasarım ile geleneksel çizim sistemi arasındaki farkları ortaya koymuş ve CAD modelleri, Dijital Oluşum Modelleri, Üretken Tasarım Modelleri, Performans Modelleri ve Bileşik Modeller olmak üzere 5 farklı yeni model önermiştir. Kolarevic (2000) ise, hesaplamalı tasarım tekniklerini form oluşturma yöntemleri bağlamında değerlendirmiş ve 6 başlık altında sınıflandırmıştır. Bu tez kapsamındaki hesaplamalı tasarım teknikleri, Kolarevic'in sınıflandırması dikkate alınarak açıklanmıştır. Buna göre, Kolarevic'e ait sınıflandırma aşağıda sıralanmıştır:

1. Topolojik Mimarlık
2. İzomorfik Mimarlık
3. Animasyona Dayalı Mimarlık
4. Metamorfik Mimarlık
5. Evrimsel Mimarlık
6. Parametrik Mimarlık

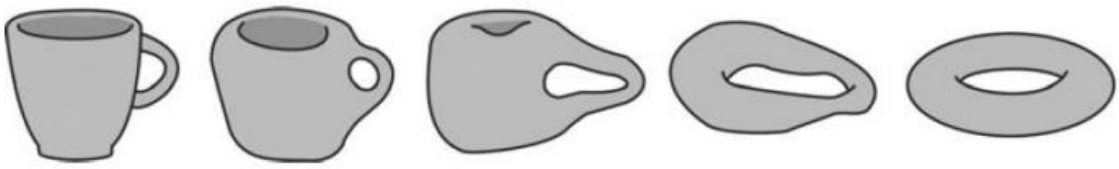
1.4.3. Hesaplamalı Tasarım Teknikleri

Bilgisayarın keşfi ve sonrasında CAD teknolojilerinin ortaya çıkması ile otomobil, uçak ve gemi endüstrisi gibi birçok alan bu teknolojilerden etkilenmiştir. Mimariye de yansıyan bu durum, tasarım ve üretim sürecine önemli katkılar sağlamıştır. Başlangıçta bu teknolojiler, mimari tasarım sürecini kolaylaştırsa da tasarımı etkileyememiştir.

Kolarevic (2000), hesaplamalı tasarım ile üretilen mimarileri matematiksel işlemlere dayanan form oluşturma ve dönüştürme süreci olarak ifade etmiş ve hesaplamalı tasarım tekniklerini 6 başlık altında sınıflandırmıştır.

Bu sınıflandırmanın ilk başlığı Topolojik Mimarlıktır. Matematiksel tanımına göre Topoloji, esneme ve eğilme gibi elastik deformasyonlara maruz kaldığında değişmeden kalan geometrik şekilleri inceleyen bir bilim dalıdır. Topoloji, geometriden ziyade nesnelerin ilişkisel yapısını incelemektedir. Aynı zamanda topoloji, mekânsal ayrımlardan çok mekânsal ilişkilerle ilgilidir (Kolarevic, 2003).

Topolojik formlar, geometrik olarak çok sayıda karmaşık biçimler tanımlanabilir. Bu formlar, herhangi bir yırtılma ve kopma olmaksızın yalnızca eğilip bükülerek başka bir forma dönüşebilmektedir. Bu olaya “homeomorfizma” denir. Her yeni şekil, diğerinin topolojik olarak dönüşmüş halidir. Buna göre bir daire ile bir elips veya bir kare ile bir dikdörtgen, topolojik olarak birbirinin eşdeğeri kabul edilebilir. Topolojik formlar değiştiğinde topolojik özelliklerini kaybetmez (URL-3, 2021; Lynn, 1993). Bunun tipik bir örneği olarak, bir kahve bardağının eğilip bükülerek simit biçimindeki bir objeye dönüşmesi gösterilebilir (Şekil 3).



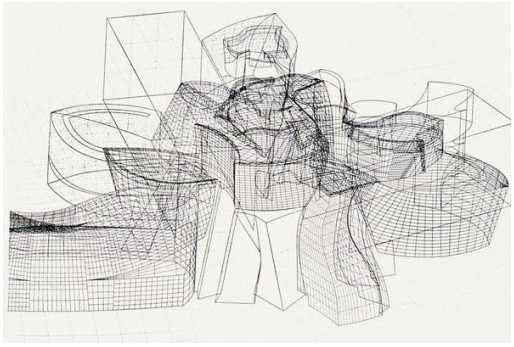
Şekil 3. Kahve bardağının torusa (simit biçimi, halka) dönüşümü (URL-3, 2021)

Topolojik mimarlık ise, formun dinamik türevlerinin hesaplamalı teknolojiler aracılığıyla üretilmesi sonucunda oluşmaktadır. Ayrıca topolojik mimarlık, yeni tasarım modelleri öneren Oxman’in (2006), Topolojik Oluşum Modelleri başlığı altında sınıflandırdığı hesaplamalı tasarım modellerinden biridir.

Topolojik yüzeyler, genel olarak Öklid dışı bir geometriye sahiptir ve matematiksel olarak NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline) adı verilen düzgün olmayan eğriler ile oluşturulmaktadır. NURBS olarak adlandırılan eğriler ve bu eğrilerden oluşan yüzeyler; kontrol noktaları, etki merkezleri ve düğümleri aracılığıyla kontrol edilebilme yeteneğine sahiptir. Aynı zamanda NURBS, topolojik mimarilerin heterojen ancak tutarlı formlarının hesaplamalı bir şekilde oluşturulabilmesini sağlamakta ve bu formların bilgisayarlar tarafından hesaplamalı olarak kontrol edilebilen makineler (CNC) aracılığıyla üretilebilmesine imkan tanımaktadır (Oxman, 2006; Kolarevic, 2001 & 2000).

Topolojik yapılar, matematikçiler tarafından eğrisel biçimler olarak tanımlansa da Kolarevic'e (2003) göre bu temel bir yanlış anlamadır. Eğrisel bir formun topolojik yapısından bahsedilebileceği gibi doğrusal bir geometriye sahip bir formun da topolojik yapısından bahsedilebilir. Yani topolojik formlar, yalnızca Öklid geometrisini (kare, dikdörtgen, piramit vb.) yansıtmamaktadır. Yani doğrusal ve eğrisel bir şekilde ifade edilebilen yeni bir matematiksel anlayışa sahiptir. Ayrıca bir topolojik yapıya, eğrisel veya doğrusal bir form verilip verilemeyeceği morfolojik, malzeme ve çevresel etkiler gibi belirli parametreler ile belirlenmektedir (Kolarevic, 2003).

Özet olarak topolojik tasarımın, biçim olarak farklı görünen fakat kendi içerisinde bir uyuma sahip formlardan oluştuğu söylenebilir. Topolojik mimarlığın en iyi bilinen örneği literatürde sıklıkla geçen ve Frank Gehry'nin tasarladığı, dahası NURBS eğrileri ile üretilmiş olan, Bilbao'daki Walt Disney Konser Salonu'dur. Bu yapıdaki yüzeylerin eğilip bükülebilen topolojik yüzeylerden oluştuğu görülmektedir (Şekil 4).

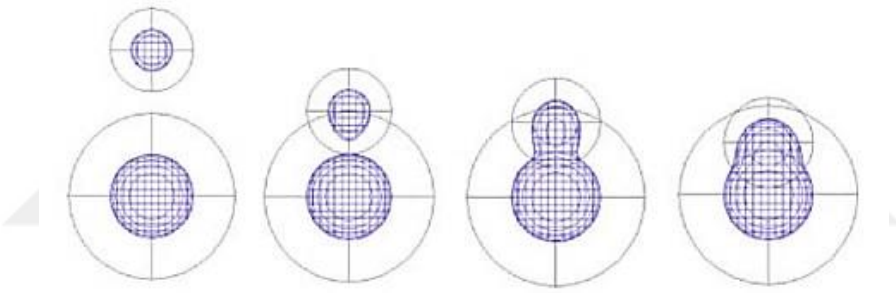


Şekil 4. Topolojik mimari: Walt Disney Konser Salonu (Kolarevic, 2000)

İkinci sınıflandırma başlığı ise İzomorfik Mimarlıktır. İzomorf, yapı ya da yapılış özellikleri bakımından benzer olan biçimlere verilen isimdir. Ayrıca "eş biçim" anlamına gelmektedir. İzomorfik yüzeyler veya formlar, birbirinin aynısı olmak zorunda değildir.

Kolarevic'e (2000) göre izomorfik yüzeyler, çok yüzlü katılardan ve kartezyen uzaydan başka bir hareket noktasını temsil etmektedir. Bir izomorfik yüzey örneği olan ve "metaball" olarak adlandırılan su damlası şeklindeki formlar (blobs), iç kütle ve çekim kuvvetleri ile karşılıklı olarak bükülerek oluşan amorf yapılardır. Bu yapılar parametrik nesnelerin bileşik toplulukları ile ortaya çıkmaktadır. Hesaplanan yeni izomorfik geometriler, ekleme ve çıkarma yapılabilen etki alanları veya bölgeler kullanılarak aynı yoğunluğa sahip yüzeyler ile oluşturulmaktadır (Şekil 5).

İzomorfik yüzeyler, biçimlerin yeni olasılıklara yol açan değişikliklere maruz kalabileceği başka bir biçimsel evrenin oluşmasını sağlamaktadır. Biçimler birbirleri ile etkileşim içindedir ve bu etkileşim ile yeni biçimler oluşmaktadır. Böylece izomorfik yüzey; etki alanları, konumları ve yoğunlukları bakımından değiştikçe hareket eder ve statik haldeki oluşum dinamik bir hale gelir (Kolarevic, 2000).



Şekil 5. İzomorfik yüzeylerin oluşumu (Kolarevic, 2000)

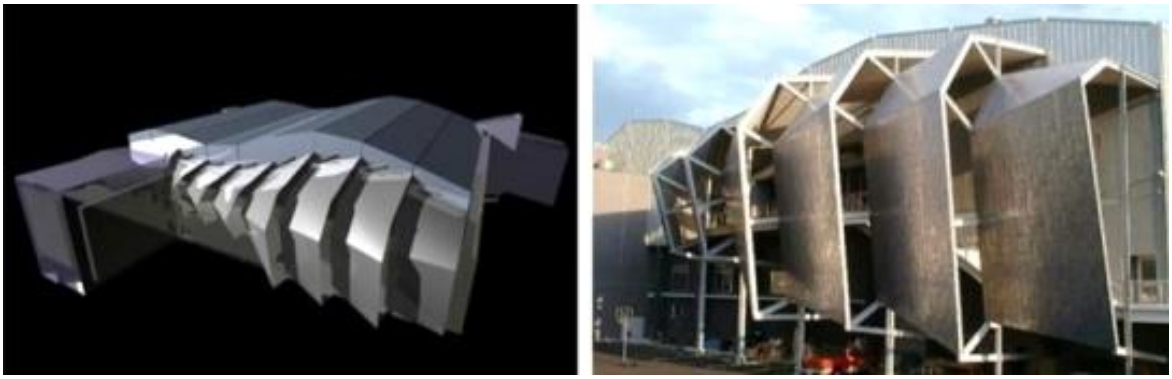
Bu form üretim yöntemine bir örnek olarak 1999 yılında Frankfurt Araba Fuarı'nda inşa edilen "The Bubble" isimli proje gösterilebilir. Bernhard Franken'in tasarladığı bu projede iki izomorf yapının birbirine eklenerek oluşturduğu "blob" formu görülmektedir (Şekil 1.6).

Şekil 6. BMW Pavyonu, Bernhard Franken, 1999

Sınıflandırmanın üçüncü başlığı Animasyona Dayalı Mimarlıktır. TDK'ye göre "canlandırma" anlamına gelen animasyon, başlangıçta mimaride görsel temsil olarak kullanılsa da zamanla bu teknik bir tasarım yöntemine dönüşmüştür. Bu yöntemi kullanan ilk mimarlardan biri olan Greg Lynn, yaptığı araştırmalarda animasyonun tasarımda kullanılabilirliğine dikkat çekmiş ve animasyonun mimariye hareketi ve zamanı ekleyerek tasarımı dördüncü boyuta taşıdığından bahsetmiştir (Lynn, 1999). Lynn'e göre animasyon, bir biçimi ve onu şekillendiren güçlerin değişimini içermektedir. Hareket eden kareler (sahne) değil, yapı ve yapıya etki eden kuvvetlerdir. Ayrıca Lynn'e göre, bilgisayar teknolojisi ile gerçekleştirilen tasarım, üç önemli açıda farklılaşmaktadır. Bunlar; topoloji, parametre ve zamandır. Dolayısıyla animasyon teknolojisi, kavramsal olarak zaman ve hareketin tasarıma dahil edilmesini sağlamıştır (Akipek & İnceoğlu, 2007).

Animasyona dayalı tasarım tekniği kullanılarak oluşturulan tasarımlarda iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, form oluşturma amaçlıdır. Bu yöntem, bir zaman diliminde belirlenen parametreler aracılığıyla biçimin şekillenmesi sağlanarak istenilen bir anda animasyonun durdurulması yoluyla formun belirlenmesidir. İkinci yöntemde ise daha çok çevresel faktörlerin biçime veya mekana olan etkisi gözlemlenerek analiz yapılır. Bu etkilerin sonucunda oluşan kompozisyonlar tasarım için bir fikir oluşturmaktadır (Akipek & İnceoğlu 2007).

Bu tasarım tekniğine örnek olarak New York'ta bulunan Authority Otobüs Terminali projesi, Long Island'daki Lynn'in Ev Prototipi ve 1999 yılında kiliseye dönüştürülen ve ek bir yapı olarak geliştirilen New York Presbiteryen Kilisesi gösterilebilir (Şekil 7). Bu projelerde çeşitli animasyon teknikleri kullanılarak çevresel kuvvetlerin etkisi altında nesnenin davranışı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak nesnelere ait tüm yüzeyler, bu kuvvetlerle çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Lynn, 1999; Akipek & İnceoğlu, 2007).



Şekil 7. New York Presbiteryen Kilisesi (Lynn & Partners, 1999)

Metamorfik mimarlık, Kolarevic'in sınıflandırmasının dördüncü başlığıdır. Metamorfik, "başkalaşıma uğrayan, dönüşen" anlamına gelmektedir. Metamorfizma, mimaride bir nesnenin deforme olarak başka bir nesneye dönüşmesini ifade eder.

Metamorfik mimarlık; metamorfoz (keyshape animation), sınırlı bir kutu kullanan model etrafındaki modelleme alanının deformasyonu (Lattice deformation/kafes deformasyonu), bir objenin çizgisel bir yol boyunca veya bir Spline eğrisi ile deformasyonu gibi üretici tekniklere dayanmaktadır (Kolarevic, 2001). Bu teknik ile form değişimi, dışarıdan uygulanan yapay bir kuvvet altında simüle edilmektedir (Kara, 2021).

Frank Gehry'nin temel bir prizmatik biçimi bükerek, biçimi deforme ettiği, 1999'da Hanover'da inşa edilen Üstra Ofis Binası, metamorfik mimarlığa bir örnek olarak gösterilebilir (Altunbaş, 2009; Şekil 8).

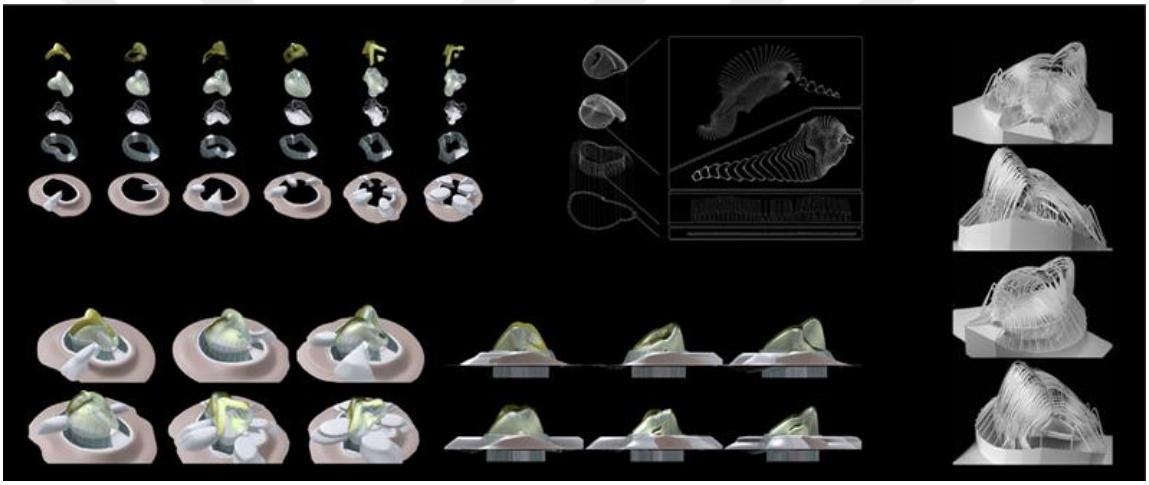
Şekil 8. Üstra Ofis Binası (Frank Gehry, Hannover, 1997)

Beşinci başlık olarak Evrimsel Mimarlık, mimari form tasarımında doğanın evrimsel modelini önermektedir. Bu tasarım tekniğinde, genetik kodların çalışma prensibi kullanılır. Bilgisayar aracılığıyla geliştirilen genetik kodlar ile evrim sürecinde olduğu gibi dış etkenlere bağlı olarak en iyi prototip oluşturulur. Yani, oluşturulan alternatif formlar arasından, belirlenen tasarım problemine en uygun olan tasarım seçilmektedir (Kolarevic, 2001).

Frazer'a (1995) göre evrimsel mimarinin arkasındaki anahtar kavram genetik algoritmadır. Genetik algoritmalar, evrimsel tasarımın özünü oluşturan doğadaki kromozomlara eşdeğer, üreme, gen çaprazlama ve mutasyon gibi kurallara benzer bir

sistemden oluşur (Frazer, 1995). Doğada canlıların oluşmasını ve değişmesini sağlayan genlerin yerini sayısal ortamda algoritma ve kodlar almaktadır (Akipek & İnceoğlu, 2007). Parametreler tarafından değişen tasarım sonucunda birbirine benzer yapay organizmalar oluşturulur ve evrimde olduğu gibi belirlenen kriterlere uyum sağlayıp sağlamadıklarına göre elenir (Frazer, 1995). Dolayısıyla evrimsel tasarım, bir organizmanın ortama uyum sağlamak adına zamanla değişerek ve gelişerek en uygun hale gelmesi gibi, tasarımın sürekli yinelendiği ve geliştiği süreçlerden oluşmaktadır.

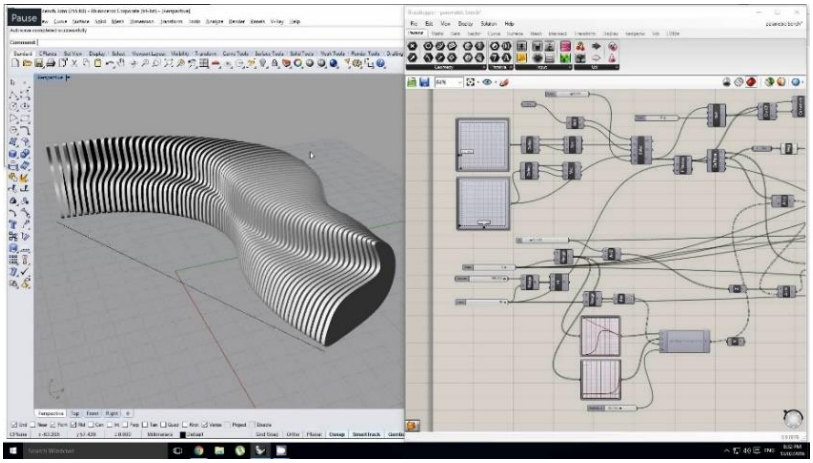
Genetik algoritmaların kullanıldığı projelere örnek olarak Greg Lynn'in Embriyolojik Ev'i gösterilebilir. Bu projeyi çekici yapan şey tamamen dijital bir sürecin ürünü olmasıdır (Kolarevic, 2000; Şekil 9).



Şekil 9. Emriyolojik Ev tasarım süreci (Greg Lynn)

Kolarevic'in sınıflandırmasının altıncı başlığı olan Parametrik Mimarlık, günümüzde en çok kullanılan hesaplamalı tasarım tekniğidir. Genel anlamıyla parametre, bir işlemin sonucuna etki eden değerdir. Mimarlık ve tasarım bağlamında ise, olasılıkların tanımlanmasında ve sistemin belirlenmesinde ya da sınırlandırılmasında kullanılmaktadır. Başka bir deyişle parametrik tasarım, tasarımın belli parametreler yani değişkenler üzerine kurulduğu tasarım biçimidir (Kolarevic, 2001).

Parametrik tasarım, komut dosyası oluşturma veya yazılımlar aracılığı ile kurulan, matematiksel olarak tanımlı, parametre, kural ve ilişkiler ile oluşturulmaktadır. Bu tasarım tekniğinde kullanılan programlara örnek olarak sıklıkla tercih edilen Dijital Project, Generative Components, Grasshopper, Max Script, MEL Script gösterilebilir (Dunn, 2012; Şekil 10).

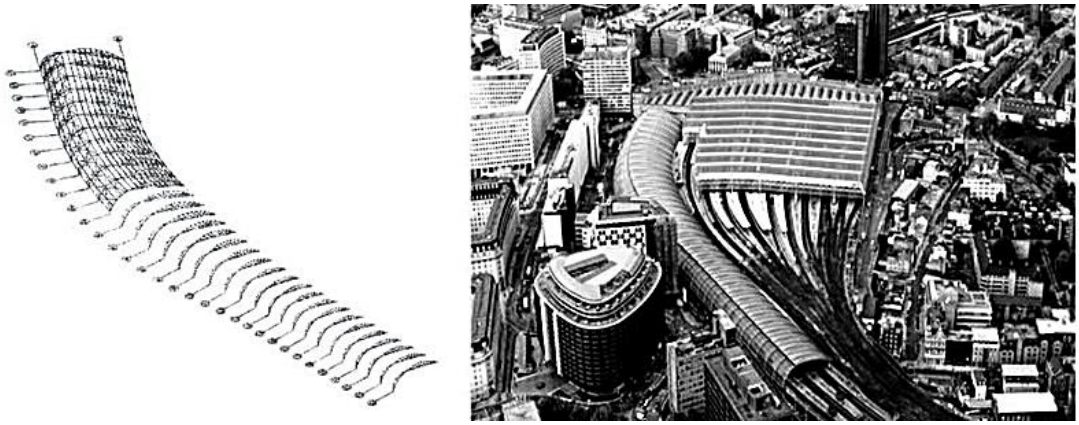


Şekil 10. Grasshopper'da parametrelere bağlı olarak modellenen bir biçim

Parametrik tasarımda kullanılan değişkenler formu oluşturan temel unsurlardır. Bunun nedeni belirlenen parametrelere verilen farklı değerler sonucunda sonsuz olasılıklar aralığından birbirinden farklı form varyasyonlarının oluşturulabilmesidir. Denklemler, nesneler arasındaki ilişkileri tanımlamak için kullanılmaktadır. Böylece bir ilişkisel geometri yani karşılıklı olarak bağlantılı bileşen geometrisi tanımlanır (Burry, 1999). Geometriler bir kez oluşturulduktan sonra, tanımlanan parametreler üzerindeki değişikliklerin geometrilerin kolayca dönüşebilmesini ve manipüle edilebilmesini sağlamaktadır (Oxman, 2006). Örneğin, bir uzay kafes strüktüre ait çelik elemanların kalınlığı bir parametreye bağlanarak bu strüktürün kalınlığı tasarım süreci boyunca bu parametre aracılığıyla değişebilmektedir. Bernard Cache'in (1995) deyimiyle parametrik tasarımda nesneler, artık tasarlanmamakta bunun yerine hesaplanmaktadır.

1980'li yılların sonu ve 1990'ların başında, bilgisayar teknolojilerindeki gelişimin mimari tasarıma olan yansıması ile geleneksel bir şekilde tasarlanan mimari ürünlerin yerine birtakım ilkelere göre ve bir dizi parametre ile tanımlanan mimari ürünler ortaya konmuştur (Kolarevic, 2013).

Günümüzde mevcut parametrik tasarım teknikleri ile lineer olmayan pek çok karmaşık geometri hesaplanabilmektedir. Parametrik tasarım tekniklerinin erken uygulamalarından birine, Londra'da bulunan Waterloo İstasyonu'ndaki dış hatlar terminalinin kıvrımlı ve eğrisel camlardan oluşan çatısı örnek gösterilebilir (Oxman, 2006; Şekil 11).



Şekil 11. Waterloo Uluslararası İstasyon, Nicola Grimshaw, Londra, 1989-1993 (Kolarevic, 2003; 2013)

2011 yılında tamamlanan ve Fernando Romero Enterprise'ın tasarladığı Soumaya Müzesi, Zaha Hadid Architects tarafından tasarlanan ve 2022 yılında tamamlanan Bee'ah Headquarters ve henüz tamamlanmamış olan Aranya Cloud Center gibi birçok projede parametrik tasarım tekniği kullanılmıştır (Şekil 12).

Şekil 12. Soumaya Müzesi (FR-EE), Bee'ah Headquarters (ZHA), Aranya Cloud Center (MAD)

1.4.4. Bilgisayarlı Sayısal Üretim (CAM)

CAD ve CAM teknolojilerinin kullanımından önce mimarideki yapım, üretim ve montaj süreci endüstriyel üretimin ve standardizasyonun bir sonucuydu. Bu dönemde, üretilen yapılardaki geometrik karmaşıklık daha masraflı ve uzun bir süreç anlamına geldiği için daha basit ve sınırlı formlar üretilmekteydi. Dolayısıyla bu durum, mimarlık dünyasını yeni yöntemlerin keşfine itmiştir (Dunn, 2012).

20. yüzyıla gelindiğinde çok sayıda yeni malzeme ve teknolojinin üretilmesi, dahası tasarım anlayışının değişmesi sebebiyle mimari tasarım ve üretim süreci de kompleks bir hale gelmiştir. Başka bir deyişle, mimarlıkta hesaplamalı tasarım dönemine girilmesi ile mimarlık dünyası; Öklid'in geometrik sınırlarından uzaklaşmış, eğrisel ve karmaşık biçimlere yönelmiş, böylece büyük miktarda veri içeren, tasarımı oluşturma ve inşa etme süreci daha karmaşık bir hale gelmiştir (Kolarevic, 2003).

Gelişen teknolojinin etkisiyle mimarlar, mühendisler ve yapı malzemesi üreticileri, binaların tasarımını ve üretimini hesaplamalı teknolojiler ile bütünleştirerek tasarım ve üretim arasındaki ilişkileri yeniden tanımlamıştır (Kolarevic, 2003). Buna bağlı olarak hesaplamalı tasarım ile tasarlanmış mimari ürünlerde, tasarım ve inşaat ayrı bir süreç olmaktan çıkmış ve tasarım ve üretim arasındaki açık kapanmıştır. Dolayısıyla geleneksel yöntemlerle üretilmesi imkânsız olan karmaşık geometrilerin, yeni yöntem ve makul bütçelerle gerçekleştirilebilmesi ve birbirinden farklı birçok geometrinin daha kolay bir şekilde ve kısa bir sürede üretilebilmesi mümkün hale gelmiştir.

Tasarımın erken aşamalarında, mühendisler ve yapı malzemesi imalatını sağlayan üreticiler gibi diğer disiplinler de mimari ürünün tasarlanmasından üretilmesine kadar tüm sürece dahil olmaktadır. Mühendis ve üreticiler yapıyı oluşturan elemanların üretilmesini sağlayacak verileri doğrudan hesaplamalı modelden alabilmektedir. Böylece karmaşık tasarımlardaki birbirinden farklı boyut ve biçimlerde olan tüm elemanlar, kontrollü ve hatasız bir şekilde üretilebilmekte ve belirlenen konuma doğru bir şekilde monte edilebilmektedir.

1.4.5. Bilgisayarlı Sayısal Üretim (CNC) Teknikleri

Günümüzde yaygın olarak kullanılan sayısal üretim tekniklerinin, serbest formlu yapıların gerçekleştirilebilmesindeki rolü oldukça büyüktür. Özellikle çift eğrilikli strüktür ve cephe elemanlarına sahip yapıların üretiminde bilgisayar tarafından sağlanan verilerle kontrol edilebilen hassas makinelere ihtiyaç vardır. Başka bir deyişle, sayısal üretimi yapılacak karmaşık geometrilerin tümünün hesaplanabilir olması, sayısal kontrollü üretim makineleri (Computer Numerical Control, CNC) ile elde edilebilmelerine olanak tanımaktadır (Kolarevic, 2001). Bununla birlikte non-lineer, karmaşık geometrileri CNC ile elde etmenin birkaç yöntemi vardır. Bu birbirinden farklı üretim teknikleri, yapılardaki tasarım ihtiyaçları doğrultusunda çeşitlenmektedir. Örneğin plaka veya levha şeklindeki

düzlemsel elemanlar 2B kesim tekniği ile, eğilip bükülemeyen özelliklere sahip cephe elemanları çıkartmalı üretim kullanılarak üretilen kalıplar ile, tek veya çift eğriliğe sahip çelik elemanlar ise biçimlendirici üretim tekniği ile şekillendirilmektedir. Buna göre, sayısal üretim teknikleri 2B üretim, çıkartmalı üretim, eklemeli üretim ve biçimlendirici üretim olmak üzere 4 başlık altında sınıflandırılmaktadır:

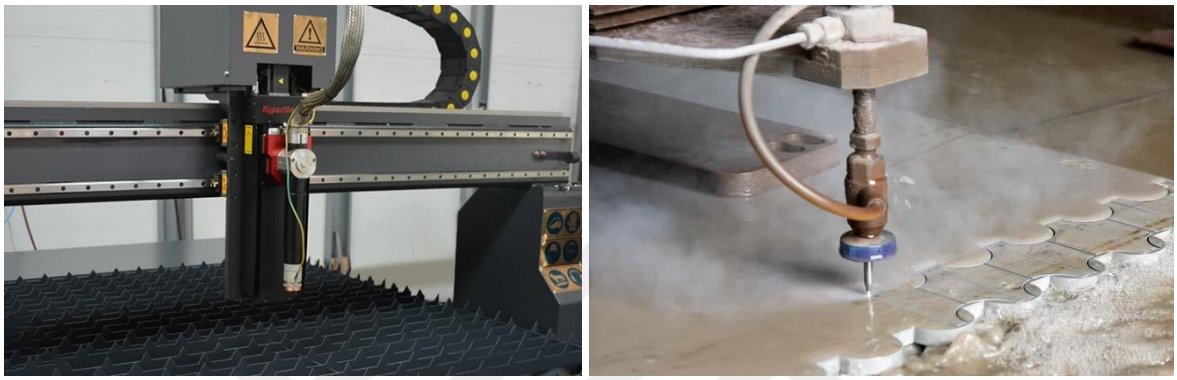
- 2B Üretim
- Çıkartmalı Üretim
- Eklemeli Üretim
- Biçimlendirici Üretim

Sayısal üretimin en yaygın ve erişilebilir tekniği, 2B üretim yani kesme tekniğidir. Birkaç farklı kesim yöntemi olsa da genel olarak hepsi hesaplamalı modellerden alınan dijital verilerden sağlanan yönergeler ile hareket eden bir kesme başlığı kullanarak düz bileşenlerin oluşturulmasını sağlamaktadır. Kesme başlığı ve levha şeklindeki malzemeler, birbirine göre iki eksen boyunca hareket etmektedir. 2B üretim tekniğinde kesilecek malzemenin kalınlığına göre uygulanan lazer ışını, su jeti ve plazma kesim tekniği gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu teknikler arasından lazer ışını kullanılarak yapılan kesim işlemi en yaygın kullanılan yöntemdir (Dunn, 2012).

Lazer kesim, lazer ışınını kullanan bir kesme başlığı ile çalışmaktadır (Şekil 13). Bu teknik ile 20 mm kalınlığa kadar olan kağıt, karton, metal plakalar, ahşap gibi malzemelerin yüksek doğrulukta kesilmesi sağlanır. Endüstriyel ölçekte uygulanmadıkça lazer kesicilerin çoğu küçük boyutludur ve bu durum üretilen elemanların boyutunun belli sınırlarda olmasını gerektirir. Bu tekniğin avantajlarından biri eğrisel kenarlara sahip malzemelerin kesiminin geleneksel yöntemlere göre daha kolay olmasıdır.

Şekil 13. Lazer kesim makinesi

Bir diğer 2B kesme tekniği olan su jeti, bir aşındırıcı ile karıştırılmış yüksek basınçlı suyun bir kesme başlığından geçirilmesi ile çalışmaktadır. Bu yüksek basınçlı su, malzemenin hassas bir şekilde kesilmesini sağlamaktadır. Plazma kesim ise, güç kaynağının basınçlı havayı iyonize ederek plazma haline getirmesi ile çalışır. Isınan gaz alüminyum gibi iletken malzemelerin kesme işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Şekil 14; Dunn, 2012; Kolarevic, 2001).



Şekil 14. Su jeti kesim makinesi (sol); Plazma kesim makinesi (sağ)

İkinci CNC tekniği olan çıkarma işlemi ile üretim, istenilen sonuç ürünü ortaya çıkarmak için malzemenin öğütülmesi ile gerçekleştirilir. Bir kesme başlığı kullanılarak çalışan bu makineler, iki eksenli veya üç eksenli olarak öğütme işlemini uygulayabilmektedir. İki eksenli öğütme işleminde kesme başlığı, X ve Y düzleminde ilerleyerek öğütme işlemini gerçekleştirir. Üç eksenli öğütme işleminde ise Z ekseninde hareket ederek malzemenin hacimsel olarak çıkarılmasına olanak tanır. İki veya üç eksenli frezeleme (öğütme) makinelerinde üretilen sonuç ürünün geometrisi sınırlıdır. Bu nedenle ek dönme eksenleri sağlanarak kesme başlığının daha fazla manipüle edilmesi yoluyla karmaşık formlar ve yüzey özellikleri elde edilebilmektedir. Bu formları elde etmek için 4 veya 5 eksenli CNC frezeleme makineleri gerekmektedir. Ek olarak kesme başlığındaki matkap uçları farklı boyutlardadır ve frezeleme işleminde çeşitlilik ve hassasiyet sağlamaktadır (Şekil 15).

CNC frezeleme makineleri hesaplamalı modellerden alınan komut dosyası ile frezeleme başlığını hareket ettirerek çalışmaktadır. Bu teknik kullanılarak taş, cam ve ahşap gibi pek çok malzeme öğütülerek şekillendirilebilmektedir. Mimari ürünler elde etmek için CNC frezeleme makinelerinin kullanımındaki ilk deneyler ise, 1970'lerin başında Birleşik Krallık'ta gerçekleştirilmiştir (Kolarevic, 2001).

Şekil 15. CNC frezeleme makinesi

Üçüncü teknik olan eklemeli üretim, diğer üretim biçimlerinden farklıdır. Malzemeyi keserek ya da öğüterek eksiltmek yerine katmanlar halinde ekleyerek biçimin yavaşça oluşturulması ile gerçekleştirilir. Eklemeli üretimde, malzeme türüne bağlı olmak üzere soğuk veya eritilerek baskı tekniği kullanılabilir. Bu üretimi sağlayan tüm süreçler dijital modellerden alınan veriler ile yürütülür. Ürünü oluşturan her katman için gereken veriler ayrı ayrı elde edilir. CNC makinesinin başlığı bu veriler ile yönlendirilerek sonuç ürünü oluşturan her katman tek tek eklenir. Dolayısıyla bu teknik ile karmaşık biçimler oluşturulabilmektedir (Dunn, 2012).

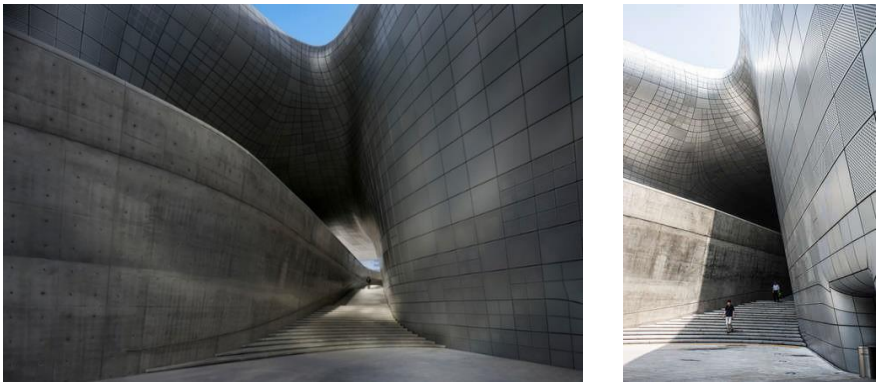
Üretilecek nesnelerin sınırlı boyutları, maliyeti ve uzun üretim süreci sebebiyle eklemeli üretim tekniğinin bina tasarımı ve üretimindeki kullanımı oldukça sınırlıdır. Bu teknik genellikle karmaşık ve eğrisel biçimlerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Örneğin, hafif kafes yapılardaki çelik elemanlar gibi bileşenleri seri halde üretebilmek için kalıp yapımında kullanılabilir (Kolarevic, 2001). Fakat son zamanlarda teknolojinin gelişmesine bağlı olarak büyük ölçekte çeşitli uygulamalar da yapılmaktadır. Buna örnek olarak üretimi WASP tarafından yapılan ve MC A-Mario Cucinella Architects tarafından tasarlanan TECLA projesi gösterilebilir. Proje, 2021 yılında İtalya'da, yerel malzemeler kullanılarak büyük ölçekli bir 3B baskı makinesi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 16).

Şekil 16. TECLA projesi (sol); 3B baskı makinesi (sağ)

Biçimlendirici üretimde ise ürün, malzemeyi eksilterek veya ekleyerek oluşturmak yerine mekanik kuvvetler, sınırlayıcı formlar, ısı veya buhar uygulanarak yeniden şekillendirme veya deforme etme yöntemi ile oluşturulur. Malzemeye daha kolay şekil verebilmek için malzemeyi gerdirerek veya ısıtarak biçimlendirme işlemi uygulanır, ardından soğutularak malzemenin şeklinin korunması sağlanır (Kolarevic, 2001; Dunn, 2012; Şekil 17).

Şekil 17. Boru bükme makinesi

Biçimlendirici üretimde ahşap ve metal gibi bükülebilir özelliğe sahip cephe kaplamaları ve strüktür elemanları üretilebilmektedir. Özellikle eğrisel forma sahip karmaşık yapılarda çift eğrilikli cephe panelleri ve çelik uzay kafes strüktürdeki eğrisel boruların üretiminde bu teknik yaygın olarak kullanılmaktadır. Biçimlendirici imalata örnek olarak 2014'te tamamlanan ve Zaha Hadid Architects tarafından tasarlanan Dongdaemun Tasarım Merkezi'nin alüminyum cephe panelleri gösterilebilir (Şekil 18).



Şekil 18. Dongdamun Design Plaza alüminyum cephe panelleri

Sayısal üretim yöntemleri ile üretilen bütün bileşenler üretildikten sonra sahadaki montaj süreci, dijital teknolojiler aracılığıyla iyileştirilebilmektedir. Hesaplamalı modellerde her strüktür bileşeninin veya cephe panelinin konumu, boyutu ve özellikleri bulunmaktadır. Bu sayede sayısız elemandan oluşan karmaşık çelik strüktürün her bir parçası kare kodlarla işaretlenmekte ve nereye ait olduğu kolayca bulunabilmektedir. Ayrıca her biri farklı biçim ve boyutlarda olan cephe elemanları da aynı teknikle tespit edilmekte ve bu panellerin konumu kolayca saptanabilmektedir. Panellerin herhangi birinde sorun çıkması durumunda arızalı olan panel veya eleman, kare kod yardımıyla tespit edilebilmekte ve bu kodla ulaşılan panel bilgileri ile yeniden üretilebilmektedir.

Birbirinden farklı tüm bu bileşenlerin en düşük hata payı ile monte edilebilmesi için lazer tarama teknolojisi kullanılmaktadır. İnşa aşamasındaki bu yapılardan lazer tarama aracılığıyla alınan veriler, hesaplamalı model ile karşılaştırılarak hatalı kısımlar tespit edilmektedir. Bu sayede yapı elemanları, en doğru konumuna yerleştirilmektedir. Bunun sonucunda hesaplamalı modele en yakın ve en doğru sonuç ürün elde edilmektedir.

1.4.6. Non-Lineer Yapı Kavramı ve Hesaplamalı Teknolojilerin Mimarlık Üzerindeki Etkisi

Günümüzde yaygın olarak kullanılan hesaplamalı tasarım ve üretim tekniklerinin mimarlık dünyasına girmesinden bu yana ortaya çıkan Öklid dışı (kare, dikdörtgen, daire vb. olmayan) ve karmaşık formlara sahip mimari yapılar oldukça dikkat çekmektedir. Tez kapsamında tanımlanan non-lineer (lineer olmayan) yapılar, doğrusal olmayan sürekli yüzeylere, karmaşık strüktür ve cephe sistemlerine sahiptir. Bu eğrisel ve sürekli yüzeyler, genellikle NURBS adı verilen eğriler ile tasarlanmaktadır.

Yapıların sahip olduğu eğrisellik yani non-lineer tasarım anlayışı; sadece yapı formunda değil, yapıların iç mekanında da devam etmekte, 2B plan bazında kendini göstermektedir. Bununla birlikte teknolojik ilerlemelere bağlı olarak dönüşen mimarinin eğrisel olarak tanımlanabilecek ilk örneklerine 1950'li yıllarda rastlanabilir. New York'da bulunan, Frank Lloyd Wright'ın tasarladığı ve "kesintisiz dalga" olarak adlandırdığı dairesel sergi alanı ile öne çıkan Guggenheim Müzesi (1956-1959), eğrisel yapı formu arayışına örnek olarak gösterilebilir (Şekil 19). Fakat bu yapı, tez kapsamında incelenen non-lineer yapıların sahip olduğu gibi karmaşık strüktür ve cephe sistemine sahip değildir.

Şekil 19. Guggenheim Müzesi, New York, 1956-1959

Non-lineer yapılar; büyük miktarda veri içerdiği için tasarım ve üretim bakımından birtakım zorluklara sahiptir. Bu durumun başlıca sebeplerinden biri, yapıların eğrisel formunun yol açtığı karmaşık strüktür ve cephe sistemleridir. Bu noktada, non-lineer yapıları geleneksel tasarım ve üretim teknikleri ile elde etmenin mümkün olmadığı söylenebilir. Bilişim çağı ile ortaya çıkan hesaplamalı teknolojiler ise, non-lineer yapıların gerçekleştirilebilmesine izin vermekte, yapı tasarımı ve üretimindeki sorunların aşılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla teknolojinin, yapıyı sadece tasarım bağlamında değil, strüktür ve malzeme gibi yapıyı var eden diğer unsurlar bakımından da etkilediği açıktır. Yeni malzemelerin ve araçların geliştirilmesi ve bunların kullanımı non-lineer yapılar ile sonuçlanmıştır. Bu tür yapıların strüktür ve cephe elemanları birbirinden farklı boyut ve biçimde tasarlanmak zorundadır. Dolayısıyla bu elemanlara ait binlerce veri üretilmektedir. Veriler elde edildikten sonra bu elemanların her birinin hatasız bir şekilde ve en kısa sürede üretilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bir mimari ürünü ortaya koymak, birçok farklı disiplini bir araya getirmektedir. Disiplinler arası iş birliği ve veri aktarımı; non-lineer yapıların tasarımdan üretime ve yapıma kadar tüm mimari süreci için oldukça önemlidir. Geleneksel yöntemlerin hakim olduğu mimari süreçlerde; tasarım, üretim ve yapım arasındaki bağlantı kopuktur. Bu durum, süreci yavaşlatmakta ve veri aktarımının doğru bir şekilde gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Fakat dijital teknolojilerin önemli bir parçası olan Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) platformları ile bu durum aşılabilmektedir. Yapının tüm mimari aşamalarına ait verileri içeren YBM modeli sayesinde, yapı tasarımı ve üretimine dahil olan bütün disiplinler verilere kolayca ulaşabilmekte ve eş zamanlı olarak veri paylaşımı yapılabilmektedir.

Sonuç olarak, mimarların zamanla Öklid'in sınırlı geometrisinden uzaklaşarak daha karmaşık ve serbest formlu yani non-lineer yapılar tasarlamaya yönelmesi ile bu tasarımları

gerçekleştirebilecek hesaplamalı araçlara, strüktür sistemlerine, yeni malzemelere ve üretim yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Geleneksel tasarım ve üretim yöntemlerinin yetersiz kaldığı görülerek; ihtiyaçlar doğrultusunda yeni tasarım, üretim ve yapım yöntemleri geliştirilmiştir. Dolayısıyla günümüzde yaygın olarak kullanılan ve hesaplamalı tasarım ve üretim teknikleri olarak adlandırılan bu yöntemler, non-lineer yapıların üretimini mümkün hale getirmiştir. Hesaplamalı tasarım ve üretim yöntemleri ile birbirinden farklı boyut ve biçimdeki binlerce strüktür ve cephe elemanı kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda elemanların konumunun, montaj biçiminin ve üretim özelliklerinin hesaplamalı modeller aracılığıyla elde edilebilmesi, bu karmaşık yapıların kısa sürede ve en az hata payı ile gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çalışmanın bu bölümünde hesaplamalı tasarım teknikleri ile üretilmiş olan yapıların, tasarımdan üretime ve yapıma kadar olan tüm mimari süreçlerini detaylarıyla ortaya koymak için çalışmanın amacı ve kapsamı dahilinde belirlenen örneklem grubu ve bu örneklerin analizi yer almaktadır.

2.1. Örneklem Grubunun Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında, çalışmanın amacı doğrultusunda incelenmek üzere son 10 yılda üretilmiş olan 8 adet yapı ele alınmıştır. Yapılar seçilirken, yapıların hesaplamalı tasarım yöntemleri ile tasarlanmış, ödül almış, mimari açıdan etkileyici ve non-lineer formlara sahip olması dikkate alınmıştır. Bununla birlikte yapıların tasarım, üretim ve yapım süreci ile ilgili bilgilerin yeterli seviyede ve ulaşılabilir olması göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre belirlenen yapılar, kronolojik olarak bitiş tarihlerine göre aşağıda sıralanmıştır:

- Heydar Aliyev Kültür Merkezi, 2012
- Dongdaemun Tasarım Merkezi, 2014
- Kral Abdulaziz Dünya Kültür ve Sanat Merkezi, 2018
- Hangzhou Olimpik Spor Merkezi, 2019
    - Ana Stadyum
    - Tenis Merkezi
- Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi, 2019
- Al Janoub Stadyumu, 2019
- Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı, 2019
- Geleceğin Müzesi, 2022

Seçilen yapılarda 4. Sırada olan Hangzhou Olimpik Spor Merkezi, ana stadyum ve tenis stadyumu olmak üzere iki adet yapı içermektedir. Bu yapıların yapım süreci, strüktür ve örtü malzemesi olarak benzerlik göstermesi ve aynı proje içerisinde yer alması sebebiyle birlikte incelenmiştir.

2.2. Örneklerin Analizi

Bu bölümde seçilen örnek yapılara ait analizler verilmiştir. Örneklerin analizinde kullanılacak olan ve yapılara ait temel bilgileri içeren bir tablo oluşturulmuştur. Bu tablonun ilk kısmında, yapının kimlik bilgisine yani yapı adına, yapı tasarımını kimin gerçekleştirdiğine, yapım yerine ve yılına, yapı işlevine; alan, yükseklik ve genişlikten oluşan yapı boyutlarına, yapının aldığı ödüllere ve yapım maliyetine yer verilmiştir. Yapıların aldığı ödüller arasında tasarım, strüktür, sürdürülebilirlik bağlamında birçok uluslararası ve ulusal ödül yer almaktadır. İkinci kısım ise yapının strüktür mühendisi, strüktür üreticisi, strüktür türü ve malzemesi olmak üzere strüktür ile ilgili bilgileri içermektedir. Bununla birlikte yapı kabuğuna şekil veren ve hesaplamalı tasarım ile üretilen strüktür HT, taşıyıcı görevi gören strüktür TS olmak üzere iki gruba ayrılarak gösterilmiştir. Ayrıca strüktür üreticisi, sadece çelik elemanların üretimini sağladığı için HT grubuna dahil edilmiştir. Üçüncü kısımda; cephe tasarımını veya mühendisliğini kimin gerçekleştirdiği, yapının kaplama malzemesi, kaplama malzemesi üreticisi, cephe yüzey boyutu yer almaktadır. Dördüncü kısımda ise yapıda kullanılan hesaplamalı tasarım tekniği, yazılımları ve platformları içeren hesaplamalı tasarım araçları ve sayısal üretim teknikleri ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Son olarak beşinci kısımda, yapı görseli/görselleri bulunmaktadır. Yapıların analizi; genel bilgiler, strüktür tasarımı, hesaplamalı tasarım, cephe tasarımı ve sürdürülebilirlik olmak üzere 5 başlık oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Yapıların analizi özellikle strüktür ve malzeme açısından gerçekleştirildiği için sürdürülebilirlik ile ilgili bilgiler, oluşturulan tablolarda yer almamaktadır.

2.2.1. Heydar Aliyev Kültür Merkezi

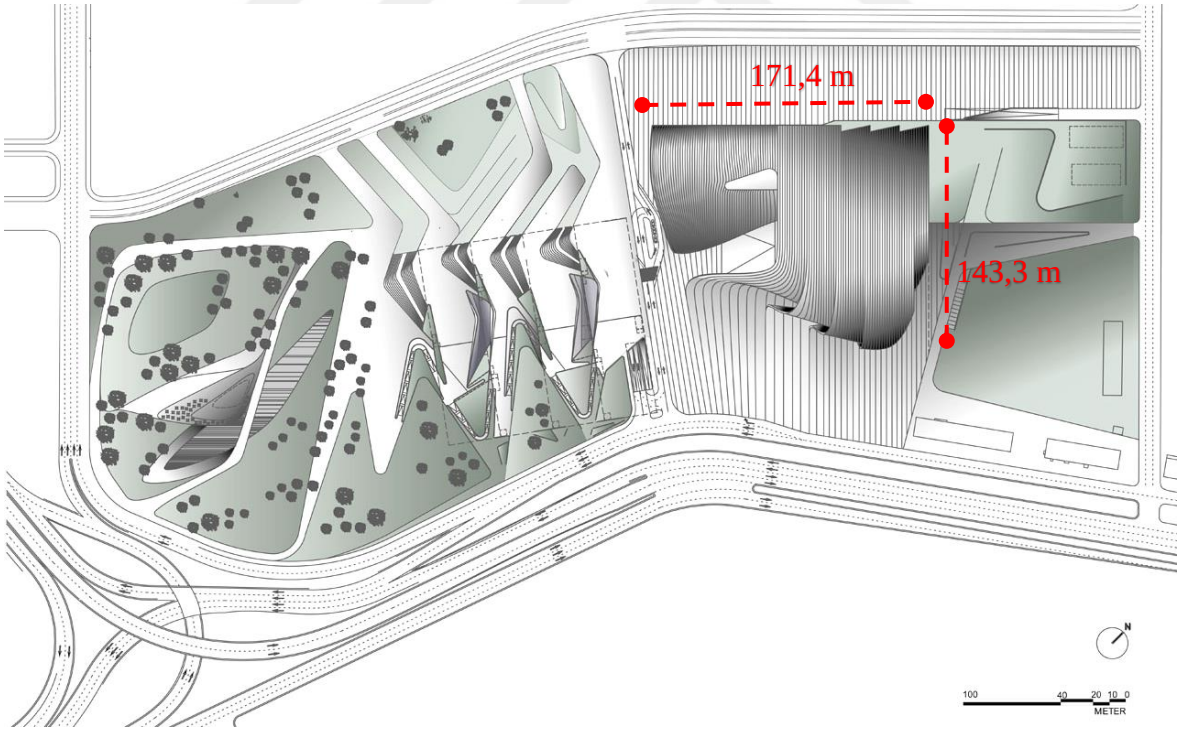
Tablo 2. Heydar Aliyev Kültür Merkezi yapı künyesi

<table>
<tr><td rowspan="8">Kimlik</td><td>Yapı Adı</td><td colspan="5">HEYDAR ALİYEV KÜLTÜR MERKEZİ
(Heydar Aliyev Cultural Center)</td></tr>
<tr><td>Yapı Tasarımı</td><td colspan="5">Zaha Hadid Architects (ZHA)</td></tr>
<tr><td>Yapının Yeri</td><td colspan="5">Bakü, Azerbaycan</td></tr>
<tr><td>Yapım Yılı</td><td colspan="5">2007-2012</td></tr>
<tr><td>Yapı İşlevi</td><td colspan="5">Kültür merkezi</td></tr>
<tr><td>Yapı Boyutları</td><td colspan="2">Alan: 57.519 m²
Toplam: 101.801 m²</td><td>Yükseklik:
74,1 m</td><td colspan="2">Genişlik:
171,4 × 143,3 m</td></tr>
<tr><td>Ödüller</td><td colspan="5">London Design Museum Best Architectural Design of the Year 2014, Royal Institute of British Architects (RIBA) International Prize 2016</td></tr>
<tr><td>Maliyet</td><td colspan="5">$ 250.000.000</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Strüktür</td><td>Strüktür Mühendisi</td><td colspan="5">AKT, Tuncel Mühendislik</td></tr>
<tr><td>Strüktür Üreticisi</td><td rowspan="3">HT</td><td colspan="4">MIM Mühendislik, MERO</td></tr>
<tr><td>Strüktür Malzemesi</td><td>Çelik</td><td rowspan="2">TS</td><td colspan="2">Beton</td></tr>
<tr><td>Strüktür Türü</td><td>Uzay kafes strüktür</td><td colspan="2">Betonarme çerçeve strüktür</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Cephe</td><td>Cephe Tasarımı/ Müh.</td><td colspan="5">ZHA, Werner Sobek, Newtecnic</td></tr>
<tr><td>Kaplama M. Üreticisi</td><td colspan="5">Arabian Profile</td></tr>
<tr><td>Kaplama Malzemesi</td><td colspan="5">GFRC panel, GFRP panel, cam</td></tr>
<tr><td>Yüzey Boyutu</td><td colspan="5">50.000 m²</td></tr>
<tr><td rowspan="3">HT</td><td>HT Tekniği</td><td colspan="5">Parametrik Tasarım</td></tr>
<tr><td>HT Araçları</td><td colspan="5">Rhinoceros 3D, AutoCAD, ODEON</td></tr>
<tr><td>Sayısal Üretim Teknikleri</td><td colspan="5">CNC frezeleme makinesi, CNC boru bükme makinesi</td></tr>
<tr><td>YAPI GÖRSELİ</td><td colspan="6"> </td></tr>
</table>

- Genel Bilgiler

Azerbaycan'ın başkenti Bakü'de bulunan Haydar Aliyev Kültür Merkezi, Zaha Hadid Architects tarafından tasarlanmıştır (URL-4; URL-5). 2007 yılında inşaatına başlanan proje 2012 yılında tamamlanmıştır. Eğrisel bir forma sahip bu yapı, çeşitli işlevleri barındıran karma kullanımlı bir merkezdir. Bu merkez; üç oditoryum içeren bir kongre merkezi, bir milli kütüphane ve bir müzeden oluşmaktadır (NRMCA, 2022). Projenin strüktür mühendisliği AKT ve Tuncel Mühendislik tarafından, cephe mühendisliği ise Werner Sobek ve Newtecnic tarafından gerçekleştirilmiştir (Watts, 2016).

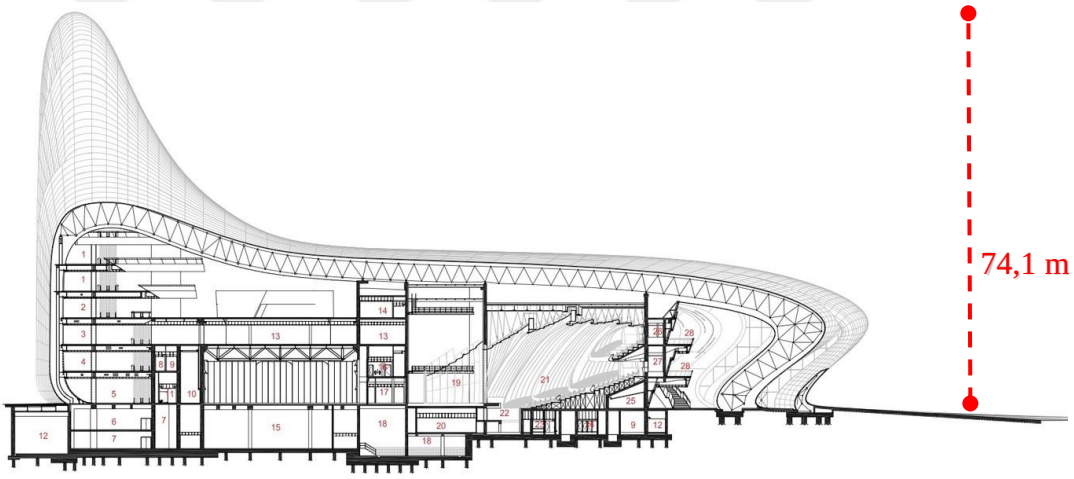
İç ve dış mekan arasındaki geleneksel farklılaşmayı saydamlaştıran başka bir deyişle iç ve dış mekan arasındaki geçişi güçlendirerek bir bütün haline getiren bir tasarıma sahip Haydar Aliyev Kültür Merkezi, akışkan ve eğrisel bir formdan oluşmaktadır. Bu yapı içerisinde bulunan üç ayrı işleve sahip üç mekan, tek bir çatı altında toplanmıştır. Yapı 57.519 m², projenin toplamı ise 101.801 m²'lik bir alanı kaplamaktadır. (URL-4; Şekil 20).



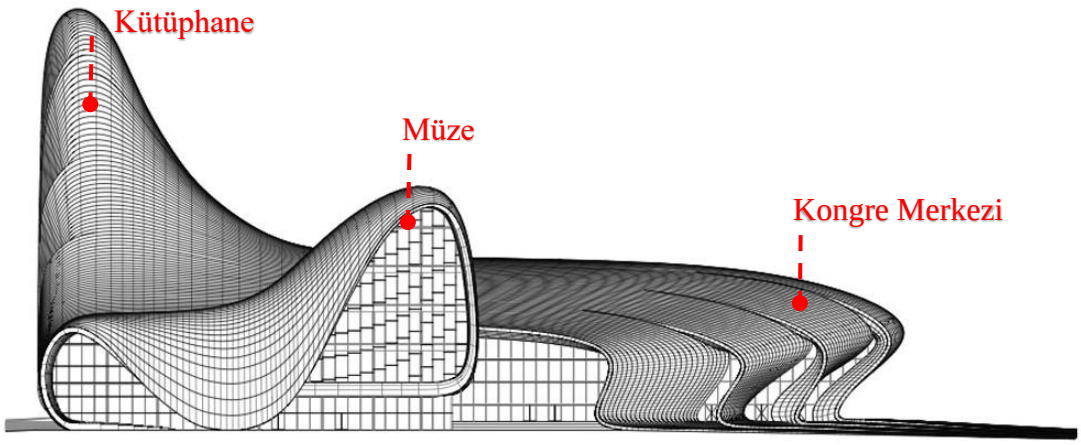
Şekil 20. Heydar Aliyev Kültür Merkezi vaziyet planı (URL-4)

Yapı esas olarak betonarme ve çelik sistem olmak üzere iki ayrı sistem ile inşa edilmiştir. Yapı cephesi ise GFRP (cam elyaf takviyeli polimer) ve GFRC (cam elyaf takviyeli beton) paneller ile kaplanmıştır. Bu panellerin dışında cephede cam giydirme cephe kullanılarak yapı görünümü hafifletilmiştir (Wright, 2012).

Eğrisel bir forma sahip olan yapının yüksekliği değişkendir. Kongre merkezi 4 kattan oluşmaktadır. Kongre merkezinde bulunan 960 kişilik ve 1200 m²'lik oditoryum, 18 metre yüksekliğinde ve 28 metre genişliğindedir. Çok işlevli salon ise 27 metre genişliğinde ve 10,5 metre yüksekliğindedir. Kütüphane projedeki en yüksek bölümdür ve 8 katlıdır. Bütün yapının maksimum yüksekliği kütüphane kısmındadır ve 74,1 m'dir (Şekil 21, Şekil 22). Yapı boyutu ise yaklaşık 171,4 metreye 143,3 metredir (College of Architecture, 2016; Şekil 20).



Şekil 21. HAKM yapı kesiti (URL-4)



Şekil 22. HAKM Güneybatı görünüşü (URL-4)

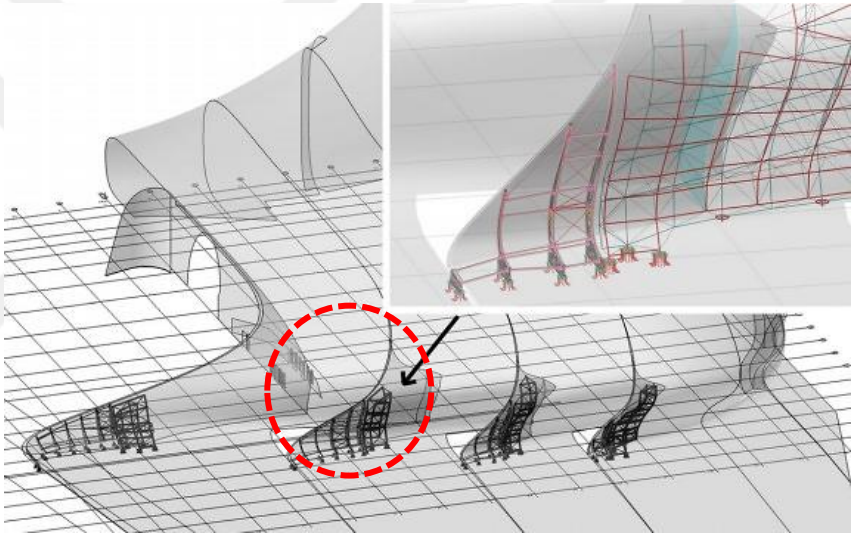
- Strüktür Tasarımı

Heydar Aliyev Kültür Merkezi, betonarme çerçeve strüktür ve çelik uzay kafes strüktür olmak üzere birbirine entegre şekilde çalışan iki ayrı strüktür sistemden oluşmaktadır. Bu sistemlerde toplam 5.500 ton çelik ile 121.000 m³ beton kullanılmıştır (Januszkiewicz, 2016; Şekil 23).

Şekil 23. HAKM yapı konstrüksiyonu (çelik uzay kafes strüktür ve betonarme çerçeve strüktür)

Serbest bir yüzey geometrisine sahip bu yapı, istenilen formu gerçekleştirebilmek için geleneksel olmayan yapısal çözümleri gerektirmiştir. İç mekanda kolonsuz geniş alanlar yaratabilmek için ön germeli kolonlar ve yapıya çift eğrilikli formunu verebilmek için yüzeyin serbest ucuna doğru sivrilen "kırlangıç kuyruğu" adı verilen konsol kirişler kullanılmıştır (Bekiroğlu ve ZHA, 2013; Şekil 24, Şekil 25). Ayrıca yapı, 3,1 metrelik kalın bir radye temel üzerine inşa edilmiştir. Dahası yapının deprem yüklerine dayanabilmesi için yapı temelinde kullanılan 1,1 m çapındaki kazıklar, 45,72 m (150 fit) derinliğe ulaşmaktadır. Dolayısıyla yapı en az 7,0 büyüklüğündeki depremlere dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır (College of Architecture, 2016; URL-6).

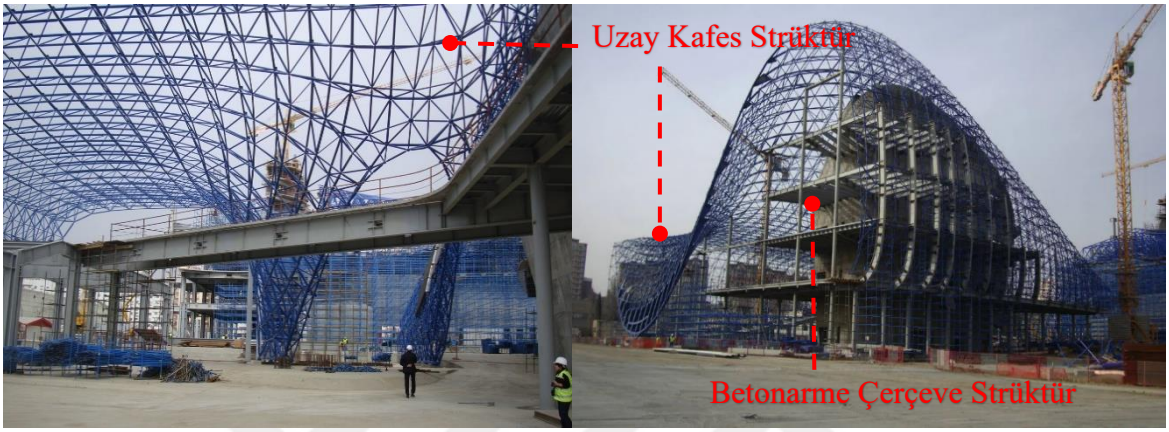
Şekil 24. Betonarme çerçeve sistem ve çelik uzay kafes strüktür (HAKM)



Şekil 25. Çift katmanlı uzay kafes strüktürün tek katmanlı strüktüre geçişte uygulanan "kırlangıç kuyruğu" yöntemi (Sanchez-Alvarez, 2009)

Yapı deprem bölgesinde bulunduğu için çelik strüktür hem yatay hem de düşey yüklere maruz kalmaktadır. Bu sebeple bu tipik yükleme koşulları altında, strüktürün performans üzerindeki etkisini, formun yapısal davranışını anlamak ve yapısal optimizasyonu sağlanmak için erken bir aşamada kullanılacak parametrik keşifler ve hesaplamalı yöntemler kullanılmıştır (Veltkamp, 2019). Dolayısıyla hesaplamalı tasarım yöntemleri ile oluşturulan bu bütünleşmiş taşıyıcı sistemin deprem bölgesinde ve aşırı koşullar altında nasıl çalışacağını görmek için 3B modeller ile çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak; bina boyunca 9 m, merkezlerde ise 150 m uzunluğunda ve 70 metre yüksekliğe ulaşan kirişlerin yerleştirilmesine karar verilmiştir. Formun serbest biçimi nedeniyle kirişler

dairesel bir geometriye sahiptir. Bazı kirişler ise diğerlerinden farklı bir yarıçapa sahiptir. Kirişlerden bazılarının uzunluğu yapının büyük kısımlarında 45 metredir. Müze alanındaki kirişlerin uzunluğu ise 25 metredir ve bu kirişler birbirine daha yakın aralıklarla yerleştirilmiştir. Buna ek olarak kütüphane kısmında sekiz katlı bir perde duvar kullanılarak yanal stabilite sağlanmıştır (Winterstetter vd., 2015; Şekil 26).



Şekil 26. Birbirine entegre edilmiş strüktür sistemi

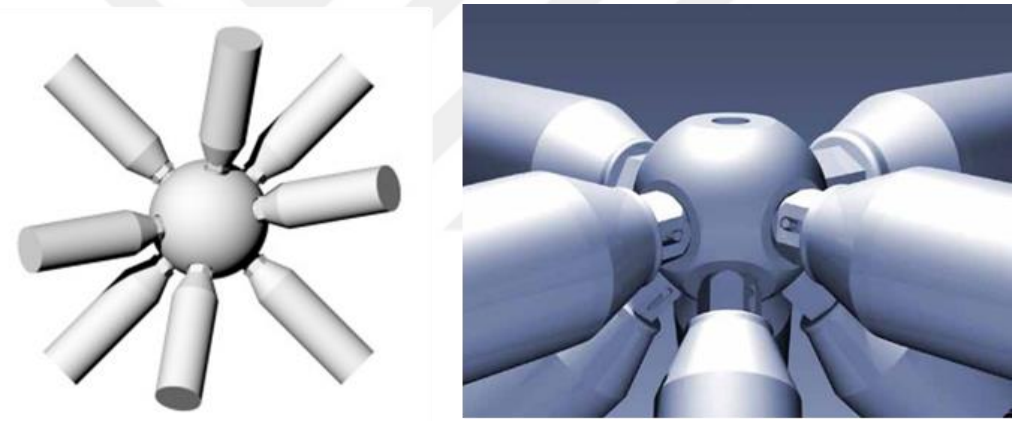
Çatı için tercih edilen çelik uzay kafes strüktür, iç ve dış kaplamaların serbest biçimli şekilleri arasında yapısal bir bölgenin tanımlanmasıyla başlayan çok adımlı bir süreç olarak oluşturulmuş ve betonarmeden oluşan taşıyıcı ile uyumlu hale getirilmiştir (Wintterstetter vd., 2015; Şekil 27).

Şekil 27. Küresel çelik düğüm noktası ve çubuk elemanlar

Çelik strüktürdeki karmaşık ağın toplam uzunluğu 90 kilometredir. Bu uzay kafes strüktür oluşturulurken MERO-TSK adı verilen özel bir çelik boru ve düğüm sisteminden

yararlanılmıştır (Winterstetter vd., 2015). Üretimini MIM Mühendislik ofisi ve MERO firmasının üstlendiği bu sistem orijinal olarak önerilen çelik strüktürden 2.500 ton hafif olmasının yanısıra sistemin bağlantı noktaları, her yöne uyumlu olacak şekilde esneklik sağlamaktadır. Bu esnek küresel düğüm noktaları sayesinde farklı geometriye sahip elemanlar kısa sürede monte edilebilmekte ve çok miktarda eleman otomatikleştirilmiş bir üretim hattı ile kolayca üretilebilmektedir (Sanchez-Alvarez, 2009).

Cepheyi destekleyen bu çift katlı uzay kafes yapısı, yekpare çelik küresel düğüm noktalarından ve çelik çubuk elemanlardan üretilmiştir. 110 ve 350 mm çapında olan küre şeklindeki çelik düğümler farklı yönlerde 16 adede kadar dişli delik içermektedir. Yapının serbest formu nedeniyle tüm düğümler ve elemanlar hesaplamalı tasarım yöntemleri ile tasarlanmıştır. Başka bir deyişle, bu düğüm ve çubukların her biri birbirinden farklı boyutlara sahiptir ve ayrı ayrı üretilmeleri gerekmektedir (Şekil 28).



Şekil 28. Küresel düğüm noktası

Çapı 60,3 ile 273 mm arasında olan ve 4,5 m uzunluğa kadar olan çelik borular, dişli cıvatalar ve düğümler otomatik olarak üretilebilmektedir. Ayrıca tüm bu çelik küre noktaları ve çelik borular, kaynak yapılmadan yerinde monte edilebilmektedir (Januszkiewicz, 2016; Şekil 29).

Şekil 29. Çelik strüktürün montaj aşaması

Pek çok farklı eleman ve küresel düğüm noktası içeren uzay kafes strüktürün müze bölümünde 12.569 çelik boru ve 3.266 küresel düğüm noktası, kongre merkezi alanında ise 17.569 çelik boru ve 4.513 küresel düğüm noktası kullanılmıştır (College of Architecture, 2016). Bununla birlikte çelik strüktürün yapısal derinliği, strüktüre etki eden kuvvetleri karşılayabilmek için betonarme çekirdek tarafından desteklenmeyen ve büyük bir alanı kaplayan kısımlarda arttırılmaktadır. Yani strüktürün yapısal derinliği ve ızgara boyutu yapının formu boyunca değişmektedir. Kütüphane ve oditoryumu kaplayan uzay kafes strüktür yaklaşık 3 metrelik bir ızgara genişliğine sahiptir ve 3 m strüktür derinliği vardır. Müze bölümünde ise strüktür derinliği 1 m kadardır ve ızgara 2,3×2,3 metre genişliğe sahiptir (Sanchez ve Klimke, 2020; Şekil 30).

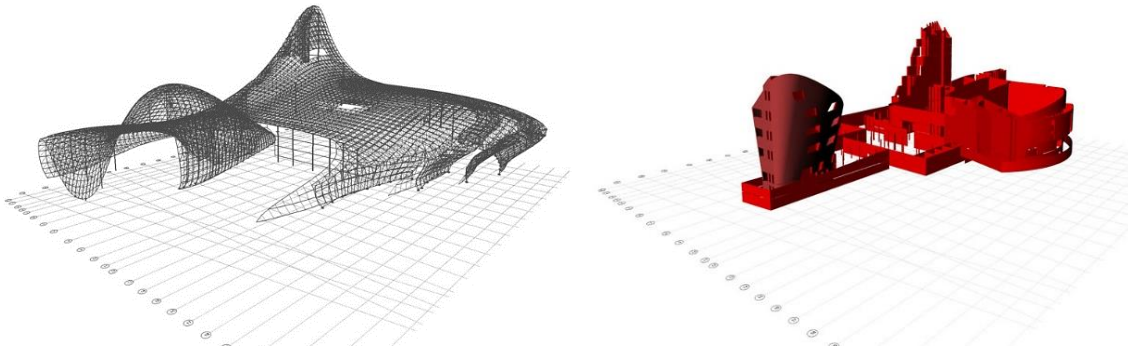
Bütün bu birbirinden farklı boyut ve şekle sahip strüktür elemanları hesaplamalı tasarım araçlarından elde edilen veriler ile yapının mimari görünümünden ödün vermeden ince ayarlar kullanılarak dairesel boru bükme işlemi ile şekillendirilmiştir (Eigenraam ve Schipper, 2015; Şekil 31).

Şekil 30. Uzay kafes strüktür (sol); bütünleşmiş taşıyıcı sistem (sağ)

Şekil 31. HAKM'de kullanılan makineye benzer CNC dairesel boru bükme makinesi

- Hesaplamalı Tasarım

Projenin en kritik ve zorlu unsurlarından biri bina kabuğunun geometrik tasarımının ve uzay kafes strüktür sisteminin oluşturulmasıdır. Homojen ve sürekli bir yüzey altında birçok işlevi barındıran bu yapının tasarımını, geleneksel yöntemlerle ortaya koyabilmek oldukça zordur. Buna bağlı olarak yapı formu hesaplamalı tasarım araçları kullanılarak parametrelere bağlı olarak modellenmiştir. Ayrıca yapıda kullanılan birbirinden farklı şekil ve ölçülerdeki çelik elemanlar ve kaplama malzemeleri yine hesaplamalı tasarım araçları kullanılarak özel olarak üretilmiştir (Şekil 32).

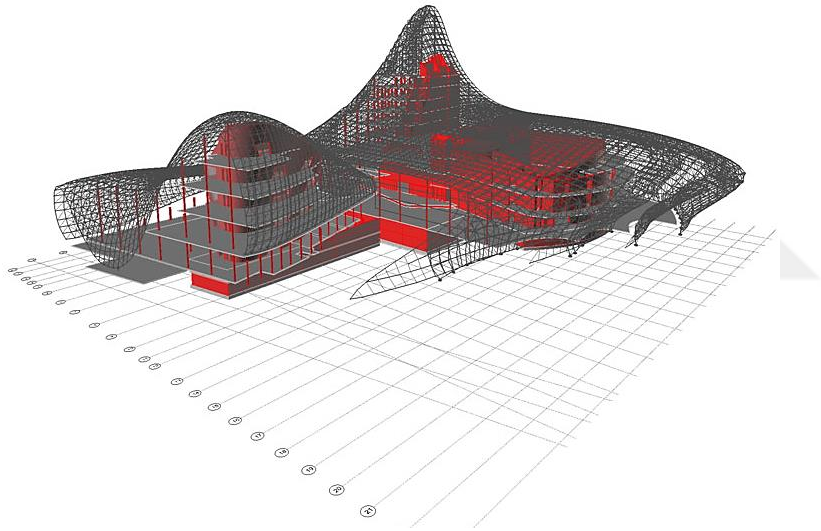


Şekil 32. Betonarme çerçeve sistem 3B model (sol); uzay kafes strüktür 3B model (sağ)

Yapının eğrisel formu oluşturulurken değişkenleri tanımlamak için ilk olarak NURBS eğrileri kullanılarak bir kontrol yüzeyi oluşturulmuştur. Bu model Rhinoceros 3D programı kullanılarak yapılmıştır (Sanchez-Alvarez, 2009). Buna ek olarak yapı çizimleri için

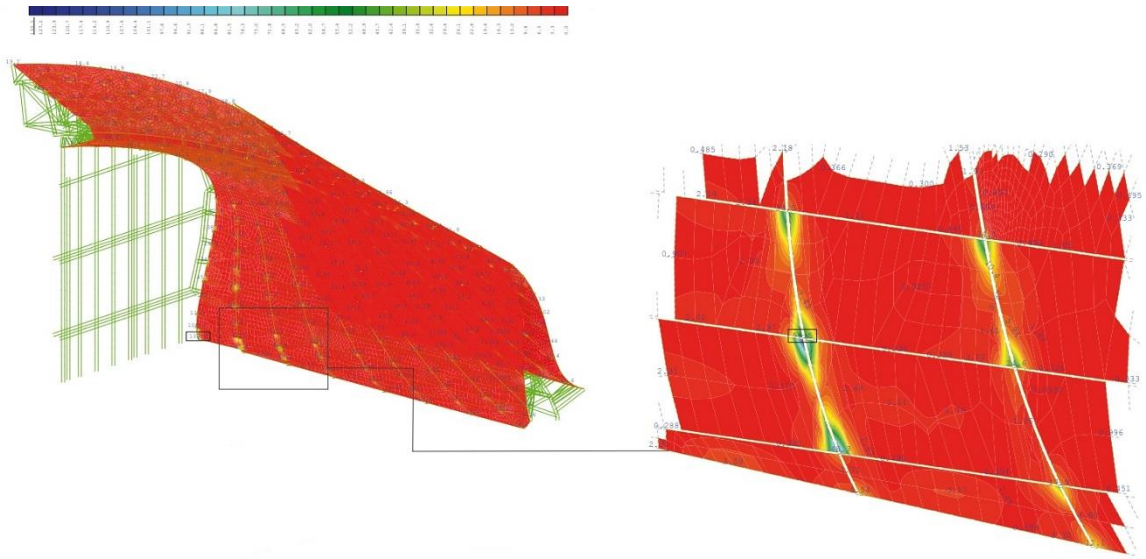
AutoCAD ve yapı içerisindeki akustik performansı denetlemek için ODEON gibi hesaplamalı tasarım araçları da kullanılmıştır (Sü-gül ve Çalışkan, 2010).

Karmaşık strüktür sistemi tasarlanırken ilk olarak üst ve alt kiriş ızgara çizgileri tanımlanmıştır. İkinci aşamada üç boyutlu köşegenlerden oluşan bir ızgara yerleştirilmiştir ve oluşturulan geometrinin form yüzeyi ile çakışmaması için model, sürekli olarak kontrol edilmiştir. Son olarak MERO tarafından sağlanan özel bir yazılım ile bu strüktürdeki çelik elemanların kesitleri ve sayıları bir sonlu elemanlar modeli oluşturularak hesaplanmıştır ve detaylar ana yapı ile koordine edilmiştir (Winterstetter vd., 2015; Şekil 2.16). Hesaplamalı tasarım araçları ile boyutlandırılan strüktür sistemine ait elemanlardan belirli ölçülerin arasında olanlar, CNC dairesel boru bükme makineleri ile üretilmiştir (Januszkiewicz, 2016; Şekil 31, Şekil 33).

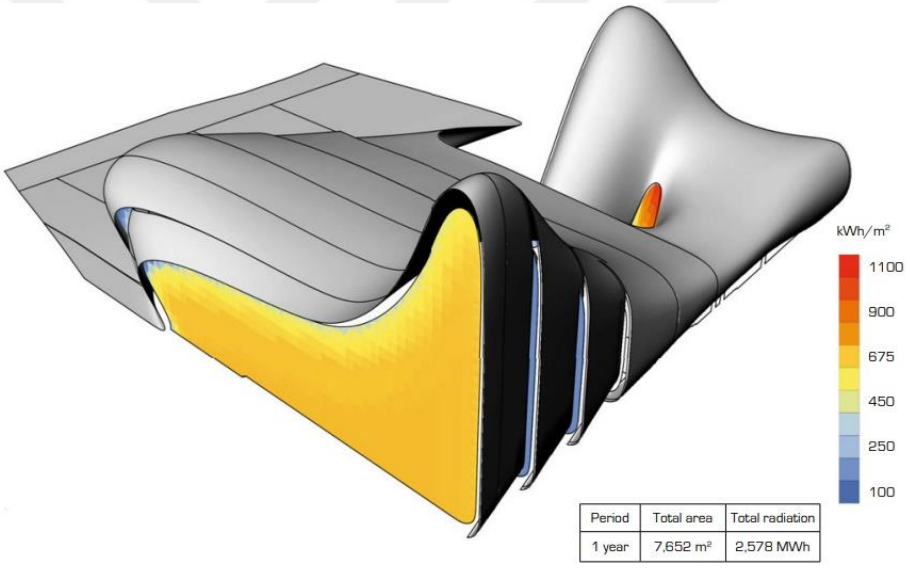


Şekil 33. 3B model (Rhinoceros)

Tasarım sürecinin başlangıcında matematiksel tabanlı bilgisayar programları kullanılarak çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ile yapısal hesaplamalar yapılarak deprem ve rüzgâr yükü de dahil olmak üzere pek çok veri hesaplanmıştır. Yapı içindeki doğal hava akışını ve çeşitli yapı elemanlarının nasıl etkileşime girdiğini daha iyi anlamak için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) kullanılmıştır. Ayrıca bu koşulların iyileştirilmesi için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir (URL-7; Şekil 34, Şekil 35).

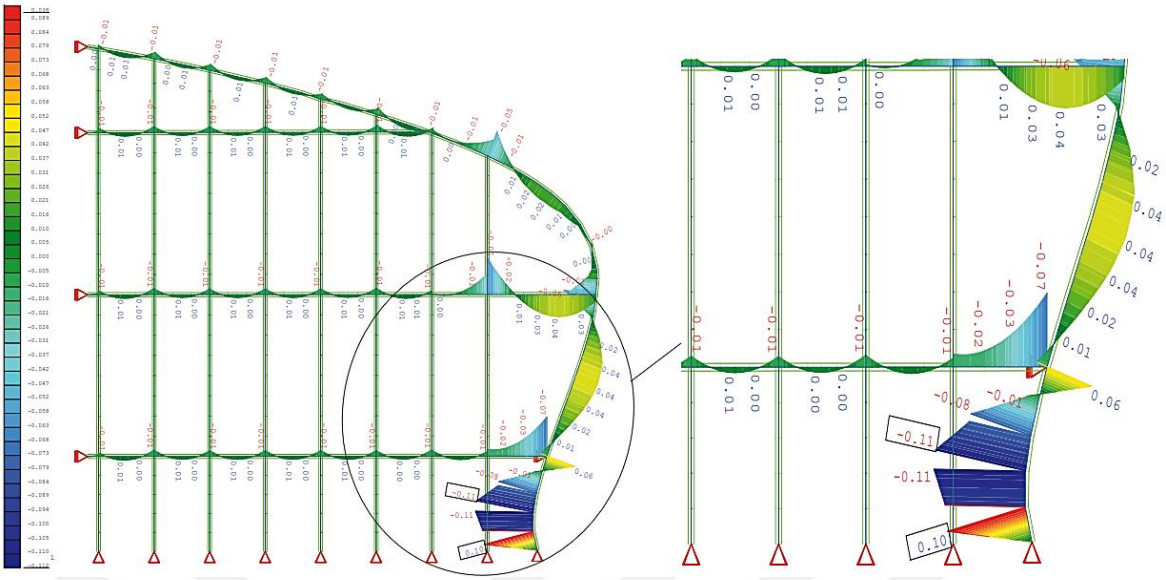


Şekil 34. GFR paneller üzerindeki stres testi (Watts, 2016)



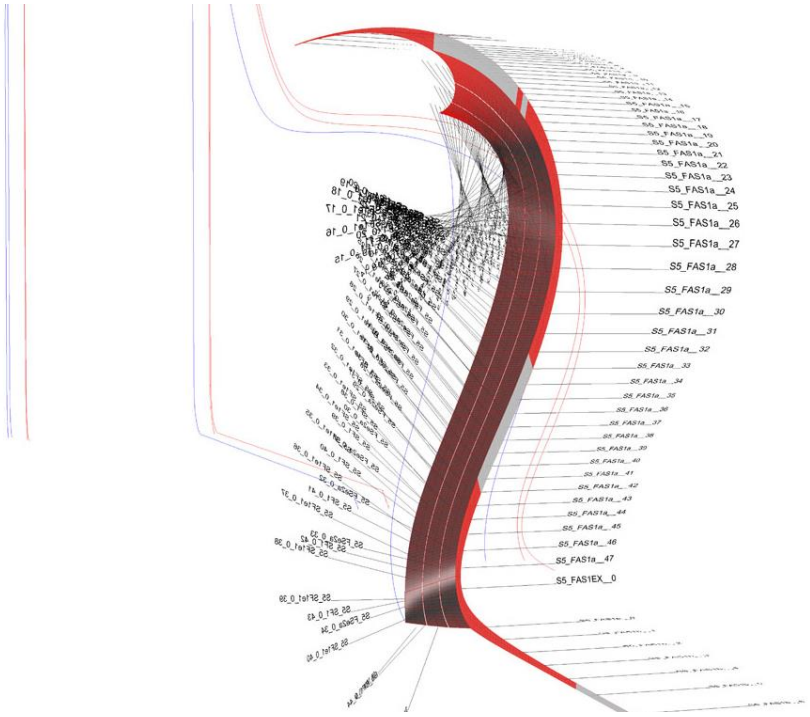
Şekil 35. Solar radyasyon analizi (Watts, 2016)

Hesaplamalı gerilme analizi sırasında uzay kafes strüktür ile betonarme çerçeve sisteminin birleşik hareketinin doğru bir modelini oluşturmak yapı için oldukça önemlidir (Şekil 36). Aynı zamanda strüktür elemanlarının montajı, geçici koşullar altında yapısal güvenliği korumak ve montaj aşamasında sabit yük sapmalarının ve diğer sorunların etkilerini en aza indirmek için hesaplanmış modele göre belirlenen bir kurulum sırasına göre gerçekleştirilmiştir (Winterstetter vd., 2015).

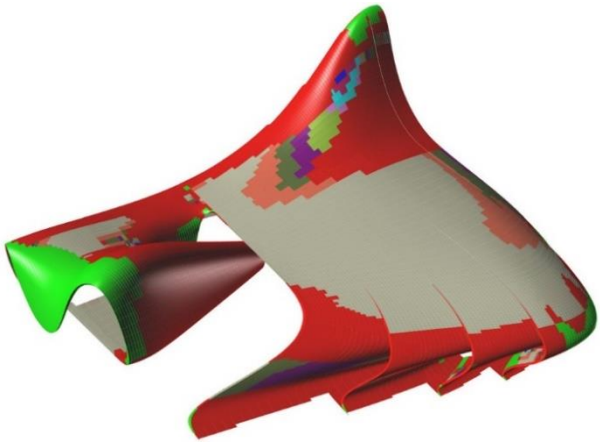


Şekil 36. Çerçeve elemanlardaki eğilme momentinin dağılımı (sol); eğilme momentinin yakından görünümü (sağ; Watts, 2016)

Yapının dış yüzeyi, tasarımın ana mimari özelliğidir ve serbest biçimli bir geometriye sahiptir. Yapı üzerindeki kaplamanın üretilebilmesi için hesaplamalı araçlar ile panelizasyon gerçekleştirilerek paneller 3 ayrı kategoriye ayrılmıştır (Şekil 37, Şekil 38). Bunlar; düz, tek eğrilikli ve çift eğriliklidir.



Şekil 37. GFRC panellerin panelizasyonu



Şekil 38. Panelizasyonun 3B model üzerindeki gösterimi

Panellerin üretimini sağlayacak 3B çizimleri ve verileri Londra merkezli firma Newtecnic sağlamıştır. Daha sonra bu paneller, hesaplamalı modelden alınan veriler ile CNC frezeleme kullanılarak kalıplar aracılığıyla üretilmiştir. Panellerin konumu, panellerin her birine üretimden sonra yerleştirilen mikroçipler ile kolayca izlenebilmektedir. Bu panellerin çelik strüktüre monte edilebilmesi için gerekli olan bütün veriler parametrik 3B modelleme kullanılarak sağlanmıştır (Winterstetter vd., 2015; Eigenraam ve Schipper, 2015).

Bütün bu sistemler oluşturulurken kullanılan hesaplamalı araçlar, karmaşık strüktür sisteminin her bir elemanının ve serbest formlu cephe yüzeyini kaplayan panellerin boyut ve şeklinin tanımlanmasını sağlamakla kalmamış aynı zamanda inşaat sürecini de önemli ölçüde azaltmıştır.

- Cephe Tasarımı

Heydar Aliyev Kültür Merkezi'nin eğrisel serbest formu karmaşık bir strüktür sistemi ile tanımlanmış ve bu sistemin üzeri ikincil strüktür ile desteklenen GFRC ve GFRP panellerden oluşan giydirme cephe sistemi ile kaplanmıştır. Bununla birlikte düşey cephelerde solar low-e kaplamalı cam giydirme cephe kullanılmıştır. Yapı kabuğunda kullanılan toplam panel sayısı 16.150'dir. Bu panellerin yaklaşık 13.000 adedi GFRP panellerden oluşmakta ve 40.000 m²'lik bir alanı kaplamaktadır. Geriye kalan paneller, GFRC paneldir ve kapladığı alan 10.000 m²'dir. Yapı cephesinde, dış duvarların alt kısmı ve plaza için yerden 3 m yüksekliğe kadar GFRC ve çatı alanının büyük bir kısmında GFRP

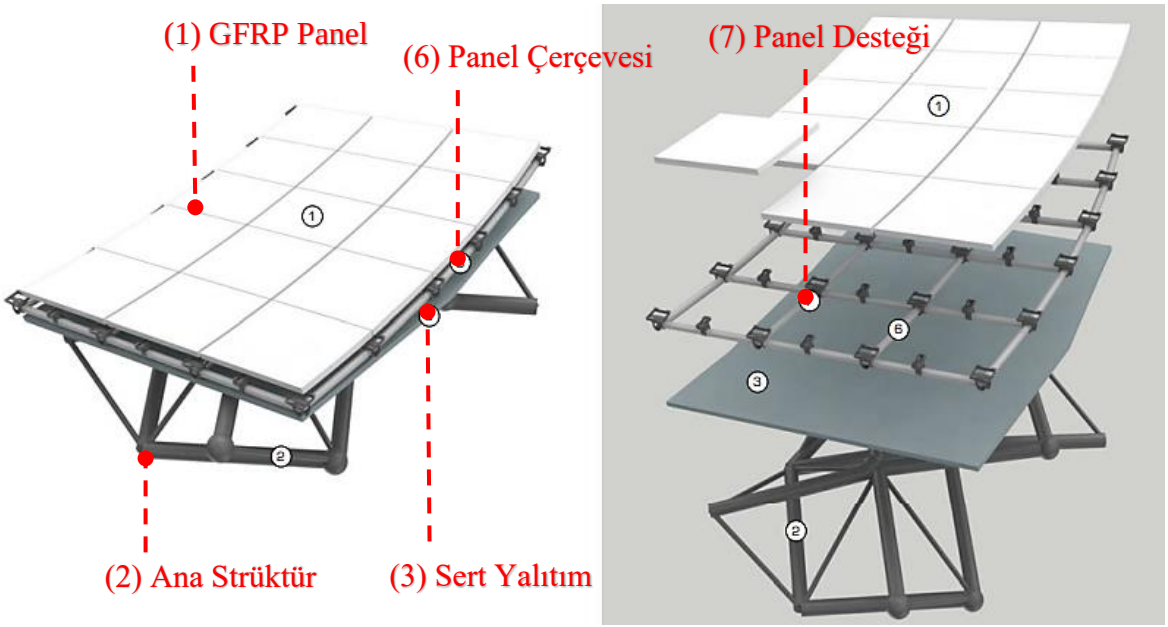
panel kullanılmıştır. Toplam cephe alanı yaklaşık 50.000 m²'dir (Winterstetter, 2015; Şekil 39).

Şekil 39. HAKM panel montajı

Birbirinden farklı boyut ve şekle sahip GFRC ve GFRP cephe panelleri, Arabian Profile tarafından Birleşik Arap Emirlikleri'nde üretilmiştir. Panellerin üretilmesi ve detaylandırılması ile ilgili bütün bilgiler cephe mühendisleri tarafından sağlanmıştır. Hafif olması ve kolay şekil verilebilmesi sebebiyle GFRC ve GFRP panellerin cephe kaplaması olarak kullanımı oldukça uygundur (Winterstetter vd., 2015). Ek olarak bu paneller UV ışınlarına dayanıklıdır ve üzerindeki nano kaplama sayesinde temizlenebilmesi kolay ve kir tutmayan bir malzeme oluşundan dolayı hava kirliliğinin yoğun olduğu bölgelerde kullanılması avantaj sağlamaktadır (Pazdur-Czarnowska, 2019; Şekil 40).

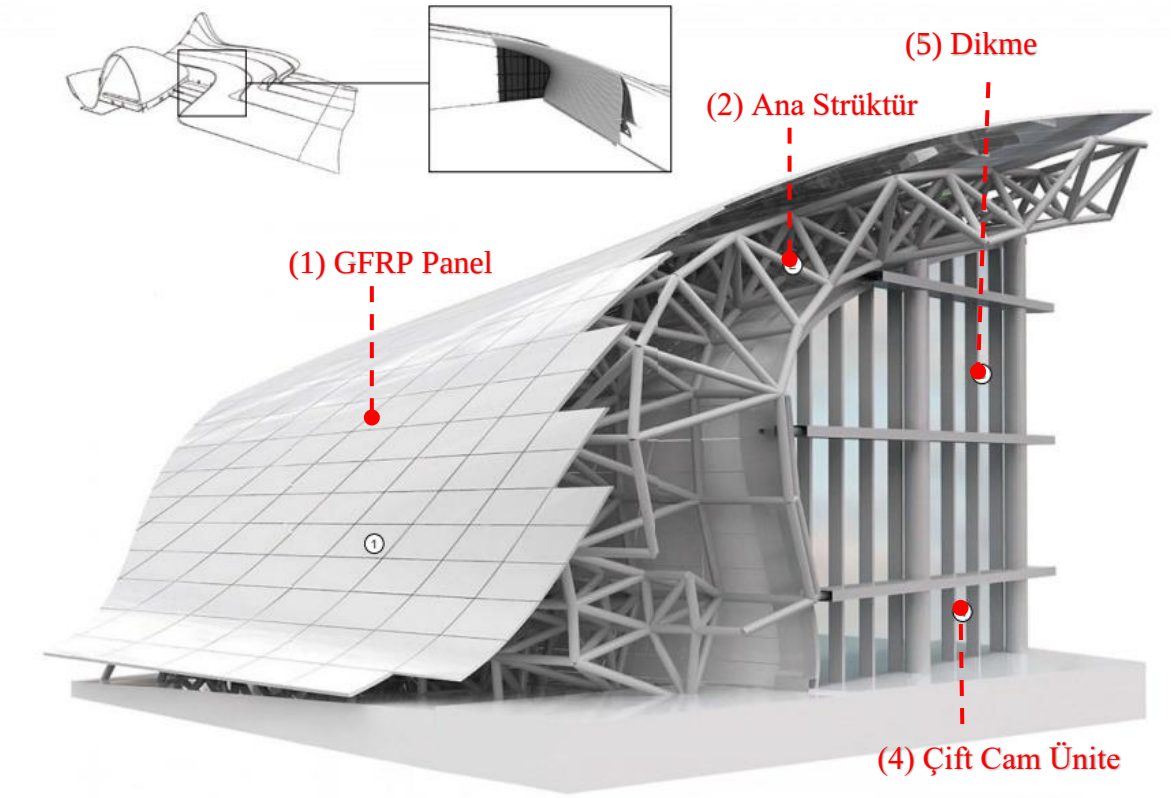
Şekil 40. HAKM cephe panelleri

Cephede kullanılan paneller, çelik takviye olmadan ve eğilme mukavemetlerini kaybetmeden 8-13 mm'ye kadar inceltilebilmektedir. Hafif ve ince bir malzeme olmasının yanısıra aynı zamanda yüksek eğilme mukavemetine sahiptir. Paneller 5 mm kalınlığında yaklaşık 1×2 m boyutlarındadır. Dahası panel boyutları 1,5 m genişliğe ve 7 m uzunluğa kadar ulaşabilmektedir (Sanchez ve Klimke, 2020; Şekil 41).



Şekil 41. Giydirme cephenin 3B görünümü (sol); giydirme cephe elemanları (sağ; Watts, 2016)

Çok sayıda farklı boyut ve geometriye sahip olan bu paneller, temel olarak düz, tek eğrilikli ve çift eğrilikli olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Her bir panel 3B hesaplamalı araçlardan alınan veriler aracılığıyla CNC makinelerinde frezelenen kalıplar ile belirlenen geometriye göre tek tek imal edilmiştir (Eigenraam ve Schipper, 2015; Şekil 42). Günlük 70 adede kadar panel üretilebilmektedir (Arabian Profile, 2022).

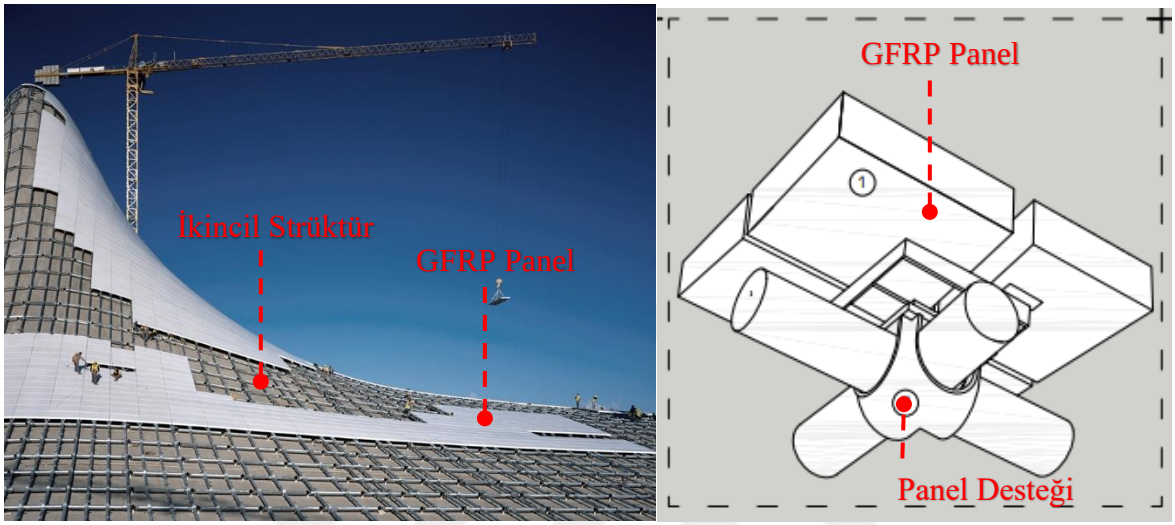


Şekil 42. 3B sistem kesiti (Watts, 2016)

Panellerin monte edilebilmesi için çelik kafes strüktürün düğüm noktalarına bağlanan ikincil bir çelik strüktür tasarlanmıştır. Bu strüktür 39.000 m²'lik bir alanı kaplamakta ve 12.500'den fazla eleman içermektedir. İkincil strüktürü ana strüktürün düğüm noktalarına denk gelecek şekilde tasarlamak için birçok hesaplamalı tasarım aracı kullanılmıştır. Tasarım aşamasında detaylıca yapılan hesaplamalar montaj aşamasındaki olası problemleri ortadan kaldırmaktadır (Winterstetter vd., 2015; Şekil 43).

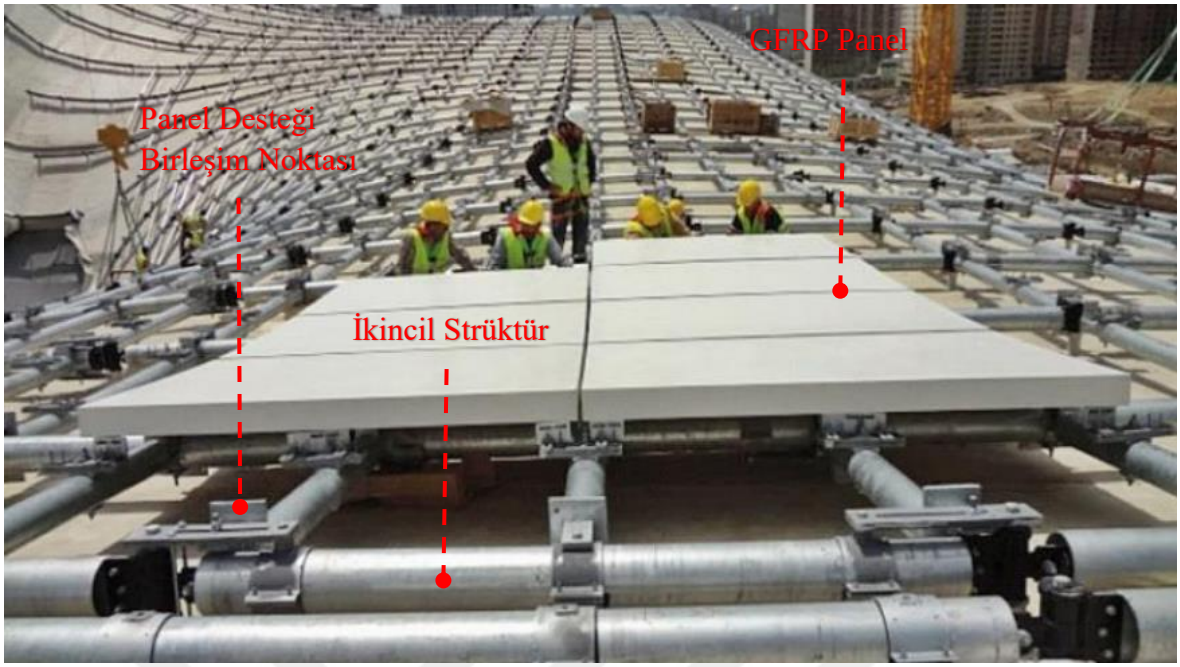
Oluşturulan ikincil sistem özel bir bindirme sistemi ile iki adet U profilli aşık, trapez metal döşeme, kendinden yapışkanlı buhar bariyeri, yanmaz taş yünü yalıtım levhaları ve hava koşullarına dayanıklı membrandan oluşmaktadır. Yapının serbest formu nedeniyle panellere bölünmüş dış cephe formunun her bir bölmesindeki cephe üniteleri eğimlidir. Bununla birlikte kurulum aşamasında tasarlanan cephe ünitelerinin ısıtılmadan bükülebilmesi için kabul edilebilir maksimum kriterler tanımlanmıştır. Bu kriterleri aşan cephe panelleri üçgenlere bölünerek ayrı parçalar halinde üretilmiştir. Ayrıca ikincil destek yapısının ve cephe sisteminin ana strüktüre sabitlenebilmesi için her açıya uyum sağlayan küresel bağlantı elemanları kullanılmıştır.

Önceden birleştirilmiş cephe üniteleri vinçler yardımıyla çatıya kaldırılarak monte edilmiştir (Şekil 44). Montaj sırasında oluşan toleransları ve diğer yapısal, termal veya yüzey sapmalarını ortadan kaldırabilmek için bazı panel sıraları, kurulum sonunda kapatılmak üzere açık bırakılmıştır (Winterstetter vd., 2015; Şekil 45).



Şekil 43. GFRP panellerin montajı (sol); cephe detayı (Sağ; Watts, 2016)

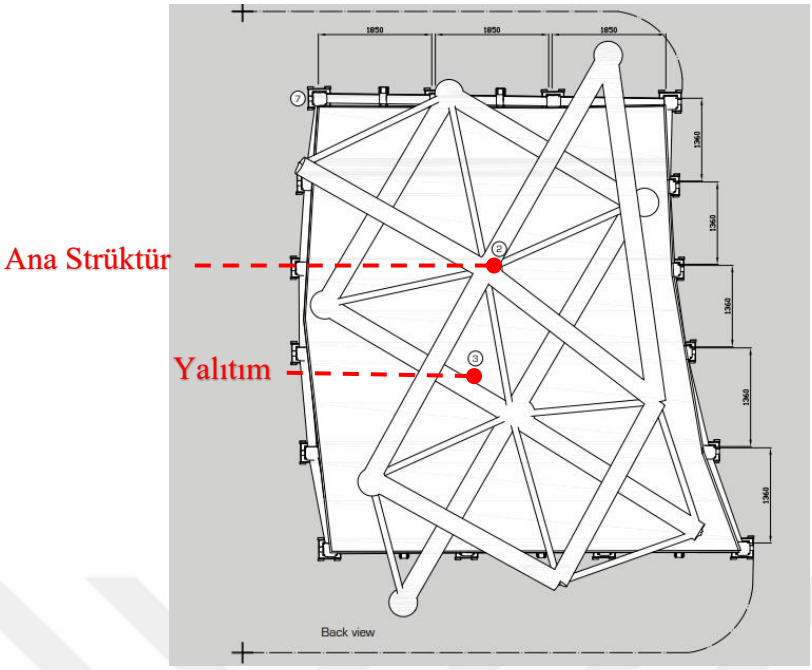
Şekil 44. Cephe panellerinin vinç yardımıyla yerine kaldırılması



Şekil 45. Panel montajı (Sanchez ve Klimke, 2020)

Yapının cephesi panellerin birleşim noktalarında bulunan yapı formunu güçlendiren ve yapı formu boyunca devam eden eğrisel mimari hatlar ile tanımlanmıştır. Bu hatları oluşturabilmek için her panelin 4 kenarında 12 cm derinliğinde dik kenar dönüşleri vardır. Yapı cephesindeki ana hat, 40 mm genişliğindedir ve yapının eğrisel cephesini vurgulamaktadır. Ayrıca diğer yöndeki ikincil bağlantıları 10 mm genişliğinde olması gerekmektedir. Bu durum imalatta yüksek hassasiyete ihtiyaç olduğunu göstermektedir (Winterstetter vd., 2015; Şekil 46, Şekil 47).

Şekil 46. HAKM inşaat aşaması



Şekil 47. 3B cephe sistemi arka görünüm (Watts, 2016)

Yapının cephesini oluşturan bir diğer kaplama malzemesi de cam giydirme cephedir. Bu cephe solar low-e kaplamalı çift cam ünitelerden oluşmaktadır. Bu üniteler yapısal silikon ile yapıştırılmış, çerçeveli, birleştirilmiş sabit camlı bir giydirme cephedir. Her cephe paneli üst noktasından monte edilmektedir. Bu destek; termal, yapısal hareketleri ve özellikle deprem kayma kuvvetini karşılamak için yeterli esneklik sağlamaktadır (Winterstetter vd., 2015; Şekil 48, Şekil 49).

Şekil 48. Low-e kaplamalı çift cam üniteler (Watts, 2016)

Şekil 49. Cam panellerin montajı

- Sürdürülebilirlik

Heydar Aliyev Kültür Merkezi tasarımında kullanılan hesaplamalı yöntemler ile pek çok avantaj sağlanmıştır. Hesaplamalı tasarım araçları ile tasarlanan uzay kafes strüktürün karmaşıklığı en aza indirilmiş ve her elemanın tek tek hesaplanıp üretilmesi ile olası hatalar önlenmiştir. Bu durum maliyeti düşürmekte, cephe paneli ve çelik strüktür kullanımında tasarruf sağlamaktadır.

Projede kullanılan GFRC ve GFRP paneller kirli hava koşulları göz önüne alınarak seçilmiştir. Bu panellerin üzeri panelin kendi kendine temizlenmesini sağlayan nano kaplama ile kaplanmıştır. Böylece paneller, uzun yıllar boyunca rengini koruyabilmekte ve UV ışınına dayanıklıdır. Bununla birlikte bu paneller, her boyut ve şekilde üretilebildikleri için üretim ve montaj aşamasında kolaylık sağlamaktadır (Pazdur-Czarnowska, 2019; Şekil 50).

Şekil 50. Montajı tamamlanan cephe panelleri

Yapının düşey cephesinde bulunan solar low-e kaplamalı çift cam üniteler gün ışığından yararlanılmasına izin verirken ışığı yansıtarak iç ortamın optimum sıcaklığının korunmasını sağlamaktadır (Bekiroğlu ve ZHA, 2013; Şekil 51). Böylece enerji tasarrufu sağlanarak daha sürdürülebilir bir yapı gerçekleştirilmiştir.

Şekil 51. Cam ünitelerden oluşan cephe

2.2.2. Dongdaemun Tasarım Merkezi

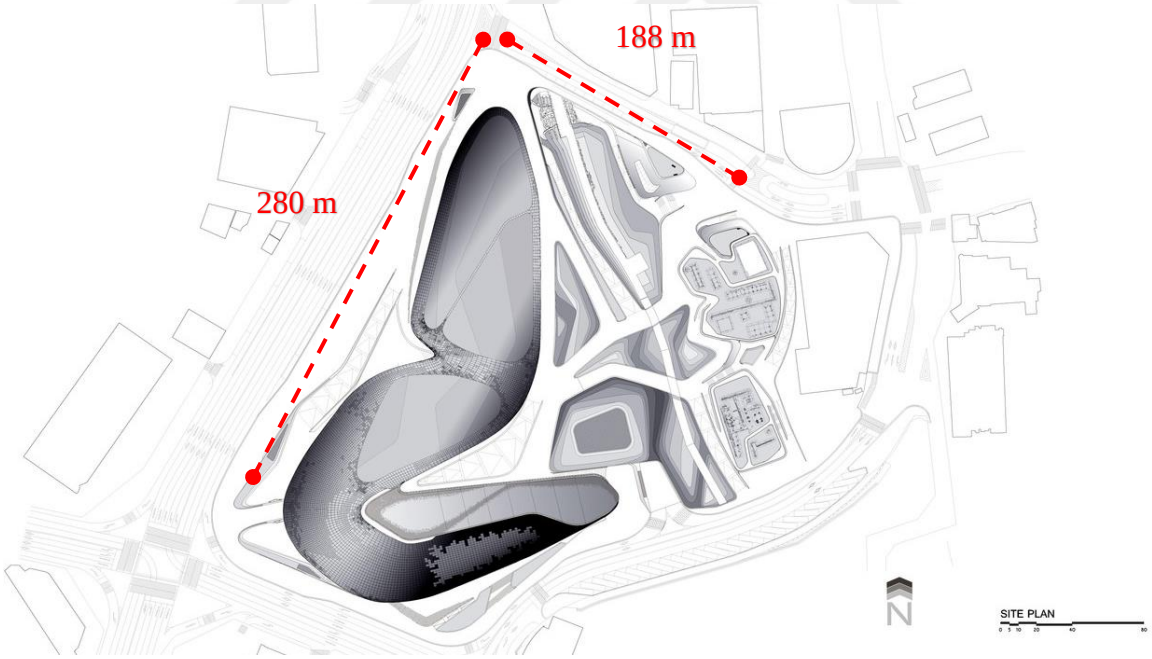
Tablo 3. Dongdaemun Tasarım Merkezi yapı künyesi

<table>
<tr><td rowspan="8">Kimlik</td><td>Yapı Adı</td><td colspan="5">DONGDAEMUN TASARIM MERKEZİ
(Dongdaemun Design Plaza)</td></tr>
<tr><td>Yapı Tasarımı</td><td colspan="5">Zaha Hadid Architects, Samoo Architects & Engineers</td></tr>
<tr><td>Yapının Yeri</td><td colspan="5">Seul, Güneykore</td></tr>
<tr><td>Yapım Yılı</td><td colspan="5">2007-2014</td></tr>
<tr><td>Yapı İşlevi</td><td colspan="5">Kültür Merkezi</td></tr>
<tr><td>Yapı Boyutları</td><td colspan="2">Alan:
86.574 m²</td><td>Yükseklik:
34 m</td><td colspan="2">Genişlik:
188 × 280 m</td></tr>
<tr><td>Ödüller</td><td colspan="5">SEGD Merit Ödülü (2015), LEED Platin</td></tr>
<tr><td>Maliyet</td><td colspan="5">$ 466.000.000</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Strüktür</td><td>Strüktür Mühendisi</td><td colspan="5">ARUP</td></tr>
<tr><td>Strüktür Üreticisi</td><td rowspan="3">HT</td><td colspan="3">Postech</td></tr>
<tr><td>Strüktür Malzemesi</td><td>Çelik</td><td rowspan="2">TS</td><td colspan="2">Beton</td></tr>
<tr><td>Strüktür Türü</td><td>Uzay kafes strüktür</td><td colspan="2">Betonarme çerçeve strüktür</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Cephe</td><td>Cephe Tasarımı/ Müh.</td><td colspan="5">Zaha Hadid</td></tr>
<tr><td>Kaplama M. Üreticisi</td><td colspan="5">Mac M&C</td></tr>
<tr><td>Kaplama Malzemesi</td><td colspan="5">Alüminyum panel</td></tr>
<tr><td>Yüzey Boyutu</td><td colspan="5">29.021 m²</td></tr>
<tr><td rowspan="3">HT</td><td>HT Tekniği</td><td colspan="5">Parametrik Tasarım</td></tr>
<tr><td>HT Araçları</td><td colspan="5">Digital Project 3D (GT), CATIA, Tekla Structures, Rhinoceros 3D</td></tr>
<tr><td>Sayısal Üretim Teknikleri</td><td colspan="5">CNC boru bükme makinesi, CNC streç şekillendirme makinesi, CNC frezeleme makinesi</td></tr>
<tr><td>YAPI GÖRSELİ</td><td colspan="6"> </td></tr>
</table>

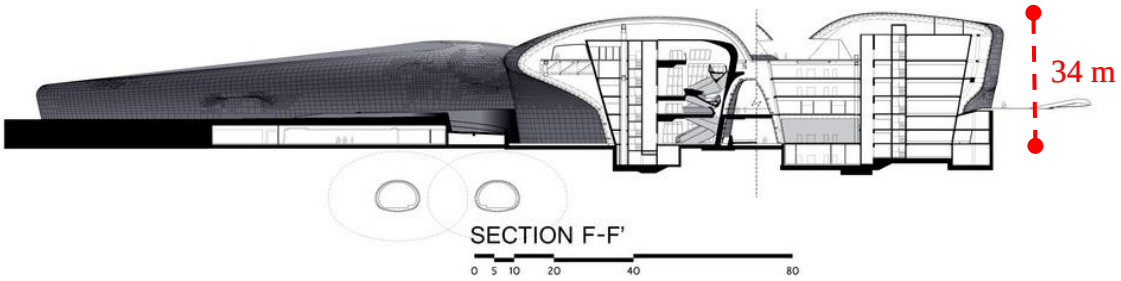
- Genel Bilgiler

Dongdaemun Tasarım Merkezi, Zaha Hadid Architects, ARUP ve yerel mimarlarla olan iş birliği ile tasarlanmıştır. Güney Kore'nin başkenti Seul'de bulunan bu yapı, Kore'nin YBM ve diğer hesaplamalı tasarım araçlarını kullanan ilk kamu projesidir. Yapının strüktür mühendisliği ARUP tarafından, cephe mühendisliği ise Mac M&C tarafından yürütülmüştür. Lineer olmayan bir forma sahip bu yapı, içerisinde sanat salonu, eğitim merkezi, tasarım laboratuvarı, tasarım pazarı, tarih ve kültür parkı olmak üzere beş farklı işleve sahip mekan bulunmaktadır (URL-8).

Yapının inşaatına 2009 yılında başlanmıştır. Proje, tasarım ve inşa zorluğuna rağmen 5 senede bitirilmiş ve 2014 yılında tamamlanmıştır. Toplam yüksekliği 34 metre olan yapının genişliği 188, uzunluğu ise 280 metredir (Tarboush & Akçay, 2019). Bununla birlikte 3'ü bodrum kat olmak üzere 7 kata sahiptir. Projenin toplam alanı ise 86.574 m²'dir (Şekil 52, Şekil 53)

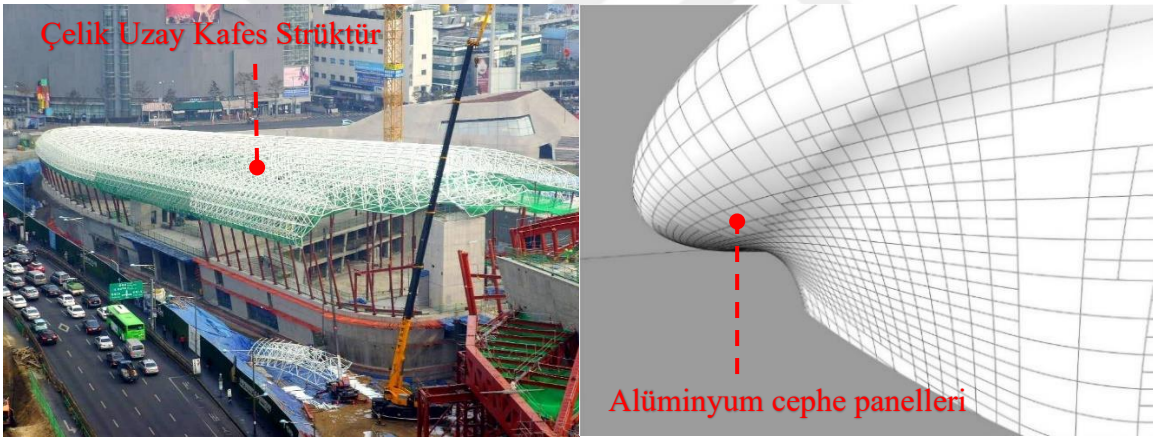


Şekil 52. Dongdaemun Tasarım Merkezi vaziyet planı



Şekil 53. DTM yapı kesiti

Dongdaemun Tasarım Merkezi (DTM), iki strüktür sistemden oluşmaktadır. Bunlar, çelik strüktür ve betonarme sistemdir. Yapının cephesi, birbirinden farklı eğrilik ve boyutta olan binlerce alüminyum panel ile kaplanmıştır (Şekil 54). Bununla birlikte yapı, toplamı bir futbol sahası büyüklüğünde olan iki adet yeşil çatıya sahiptir.

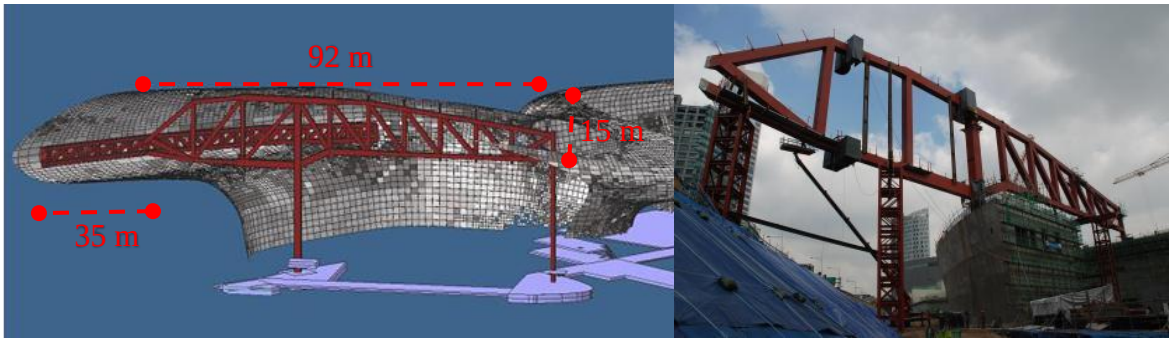


Şekil 54. Yapı konstrüksiyonu (sol); alüminyum cephe kaplaması (sağ; 3B model; URL-8; URL-9)

- Strüktür Tasarımı

DTM, çelik uzay kafes strüktür ve betonarme çerçeve sistem olmak üzere iki farklı strüktür sistemi ile oluşturulmuştur. Ayrıca iç mekandaki kolonları azaltmak ve bu eğrisel, serbest biçimli formu oluşturabilmek için mega makas teknolojisi (Mega-truss technology) olarak bilinen büyük kirişler kullanılmıştır (Şekil 55). Boyut itibariyle büyük elemanlardan oluştuğu için mega makas sistemi olarak adlandırılmaktadır. Bu sistem, yapının büyük bir alanı kaplayan eğrisel çatısını taşıyarak yapının inşa edilebilmesini sağlamıştır. Betonarme

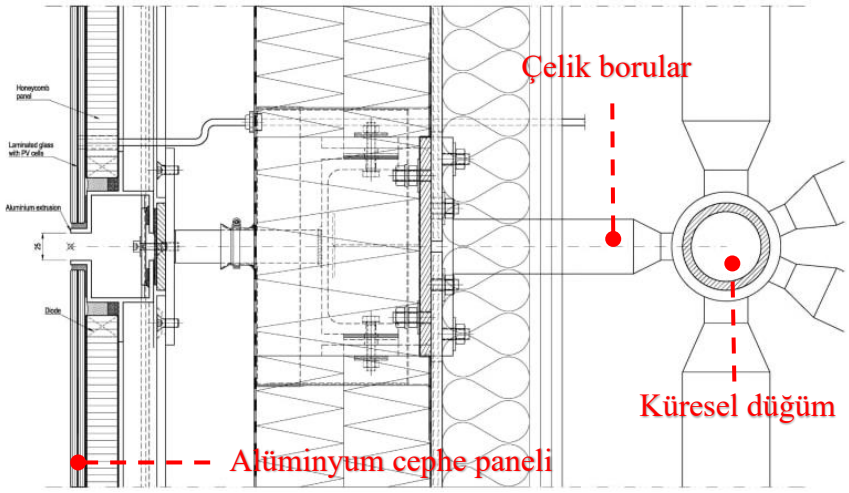
çerçeve sistem ve mega makas sistem yapıda taşıyıcı olarak görev almaktadır. Çelik uzay kafes strüktür ise cepheyi taşımakta ve yapıya eğrisel formunu vermektedir.



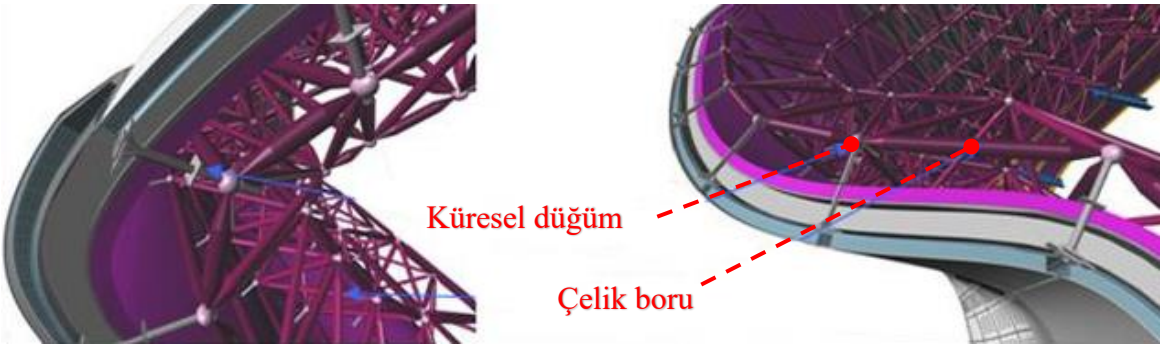
Şekil 55. Mega kafes sistemi (mega-truss)

Yapının cephe sistemini taşıyan çelik uzay kafes strüktürün toplam ağırlığı 5.800 tondur. Bu sistem içerisinde kullanılan mega makas ise 529 ton ağırlığında ve 92 metre uzunluğunda ve 15 m yüksekliğindedir. Mega makasta kullanılan demirin maksimum kalınlığı 10 cm'dir. Mega kirişin ucundaki konsol ise tek başına 35 m'ye kadar ulaşmaktadır. (Lee ve Kim, 2012). Bu uzay kafes sistem, 70 cm'lik kar yükü yani m² başına 100 kg kadar olan yükleri taşıyabilmektedir. Dahası bu yapı en az 5,5 ile 6,0 büyüklüğündeki depremlere dayanacak şekilde tasarlanmıştır.

Bu karmaşık uzay kafes çelik strüktürde strüktürü oluşturan boru biçimindeki elemanlar küresel düğüm noktaları ile birbirine bağlanmıştır (Şekil 56, Şekil 57). Mega makas sisteminin kullanıldığı yerlerde ise bulonlu birleşim tercih edilmiştir.



Şekil 56. Uzay kafes strüktür ile alüminyum panellerin birleşim detayı



Şekil 57. 3B uzay kafes strüktür modeli

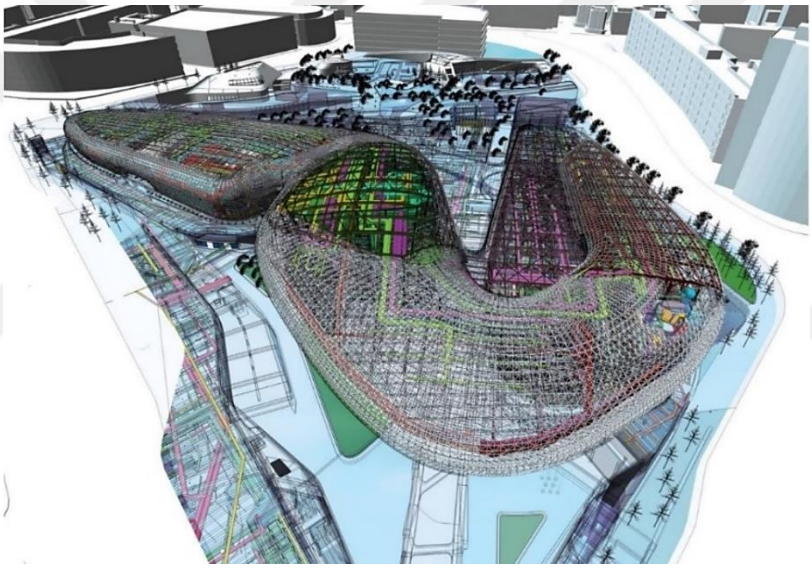
Tamamıyla hesaplamalı tasarım ve YBM yöntemi ile oluşturulan bu sistemdeki bütün elemanlar ve birleşim noktalarının detayları hesaplamalı model aracılığıyla elde edilmiştir (Şekil 58). Dolayısıyla bükme ve kaynaklama gibi üretim planlaması için gereken bilgileri ve serbest kavisli şekillerin birleşim detayları oluşturulan hesaplamalı model tarafından sağlanmıştır. Ek olarak bütün çelik elemanların net yarı çap değerlerinin hesaplanması çatının tüm çelik elemanlarının hızlı ve uygun bir şekilde üretilmesini sağlamıştır (URL-8).

Şekil 58. DTM inşaat aşaması

Yapının iç mekanında görülen beton sütunlar, öncelikle açık beton kalıp yöntemi ile yani CNC işleme ile elde edilen EPS ve strafor blokları ile üretilmiştir. Kalıp söküm işleminde straforun beton yüzeyine yapışması sonucunda beton yüzeyinde kusurlar oluşması sebebiyle uygulanmamıştır. Bu sorunu çözebilmek için beton kalıplarında kontrplak kullanılmıştır (URL-9).

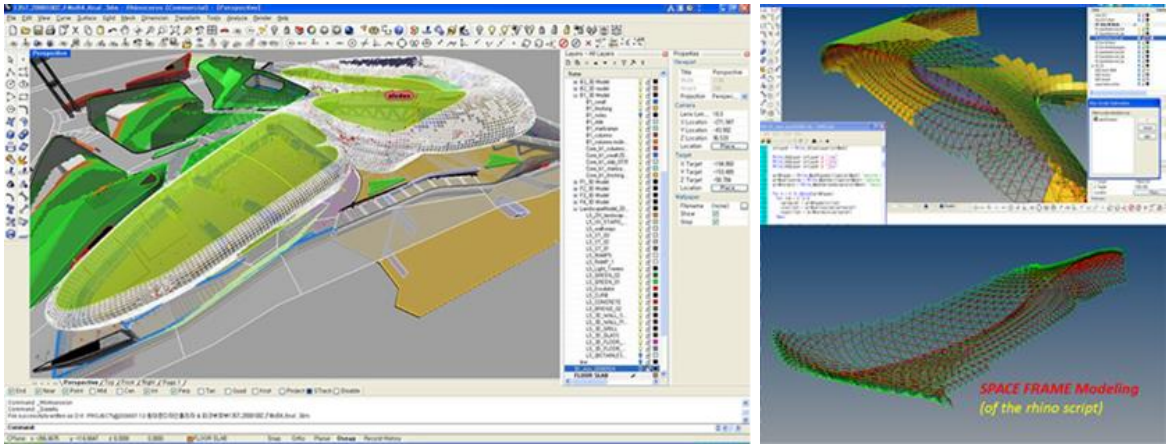
- Hesaplamalı Tasarım

DTM, tamamen hesaplamalı tasarım araçları ile YBM yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Yapıda kullanılan parametrik yöntemler, yapı tasarımı için oldukça önemli bir rol oynamıştır. Parametrik modelleme süreci yalnızca iş akışının verimliliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda en bilinçli tasarım kararlarının çok sıkıştırılmış bir proje süresi içinde gerçekleştirilmesine yardımcı olmuştur. Dijital tasarım modeli; ek saha koşullarına, yerel düzenlemelere, mühendislik gereksinimlerine ve maliyet kontrollerine uyum sağlamak için tasarım ve inşaat boyunca herhangi bir zamanda geliştirilebilmektedir (URL-8; Şekil 59).



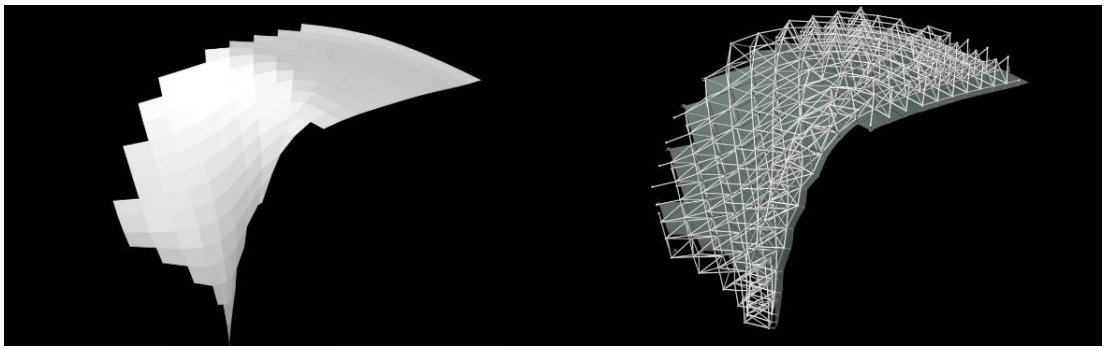
Şekil 59. Dongdaemun Tasarım Merkezi YBM modeli (URL-8)

Proje sürecinde, yapının 3B YBM modeli Gehry Technologies tarafından üretilen Digital Project 3D modelleme aracı ile oluşturulmuştur. Ayrıca projenin hesaplamalı tasarım aşamasında parametrelere bağlı hesaplamalı modelin oluşturulmasını sağlayan Rhinoceros 3D ve strüktür detaylarının modellendiği ve hesaplandığı Tekla Structures gibi çeşitli hesaplamalı tasarım araçları da kullanılmıştır. (URL-10; Şekil 60).



Şekil 60. DTM YBM modelleri

Tamamen hesaplamalı tasarım ile üretilen DTM, üretim ve montaj aşamasında birçok verinin kolayca elde edilebilmesini sağlamış, bu sayede yapının inşa süresi azaltılmıştır. Uzay kafes strüktür sistemine ait strüktür boyutları ve birçok farklı şekil ve boyuta sahip bu bileşenlerin birleşim detayları gibi birçok veri hesaplamalı araçlar yardımıyla hesaplanmıştır (Şekil 61). Örneğin yapıda kullanılan büyük kirişler Tekla Structures yazılımı kullanılarak 3B olarak modellenmiştir (Şekil 55).

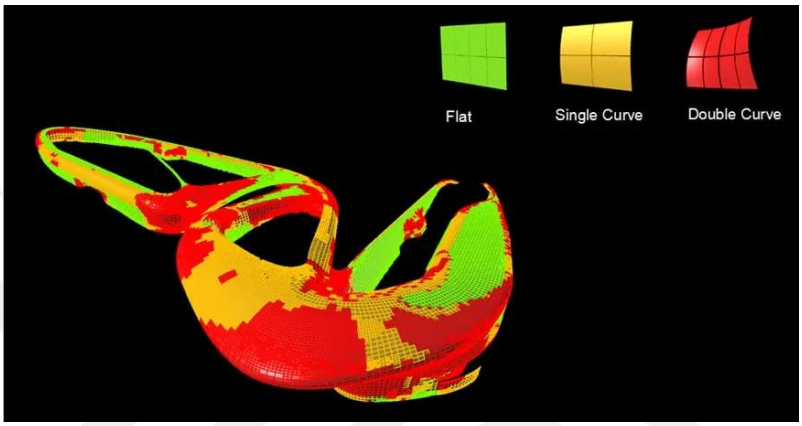


Şekil 61. DTM uzay kafes strüktürün bir kısmının modeli (URL-8)

- Cephe Tasarımı

Birbirinden farklı boyut ve biçimsel özelliğe sahip alüminyum panellerle kaplanan bu yapıda toplamda 45.133 adet panel kullanılmıştır. Paneller birbirinden farklı desenlerde olup 4 mm kalınlığında ve ortalama 1,6 x 1,2 metre boyutundadır (Lee ve Kim, 2012). Bu paneller, çelik strüktürün üzerindeki ikincil bir strüktüre bağlanmaktadır. Toplam cephe alanı ise 29.021 m²'dir.

Detaylı olarak incelendiğinde bu cephe panellerinin %48,1'i çift eğrilikli, %30,7'si tek eğrilikli ve kalan %21,2'lik kısmı ise düzdür. Yani bu panellerin yaklaşık 14.000'i düz, geri kalan yaklaşık 31.000 panel ise tek veya çift eğriliklidir. Dolayısıyla bu panellerin üretimi oldukça dikkat gerektiren bir iştir. Bütün paneller 25 mm'lik derz aralığı ile monte edilmiştir. Bu, panel boyutlarında üretimden kaynaklanabilecek hataları önlemeye yetecek bir aralıktır (Lee ve Kim, 2012; Şekil 62).

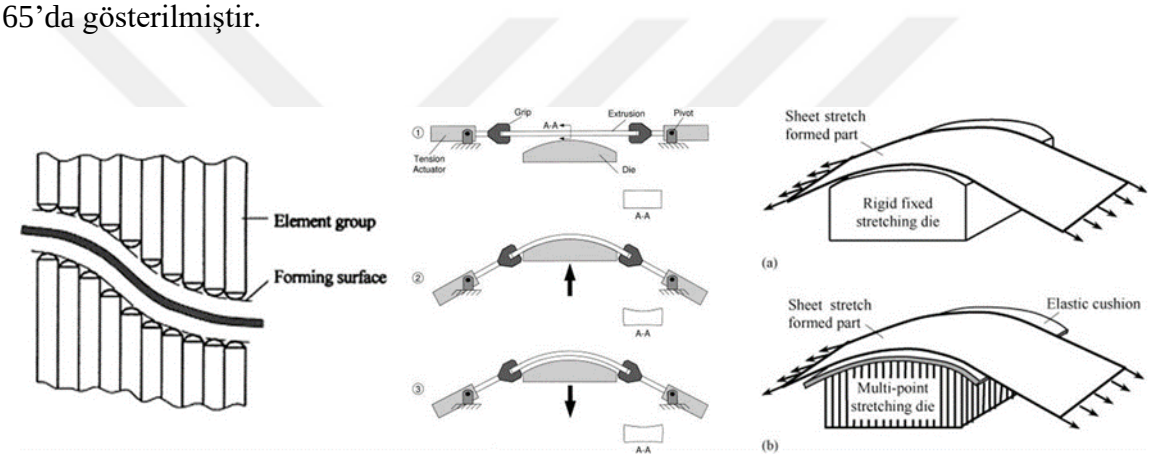


Şekil 62. 3B modele göre çift eğrilikli, tek eğrilikli ve düz panellerin konumları

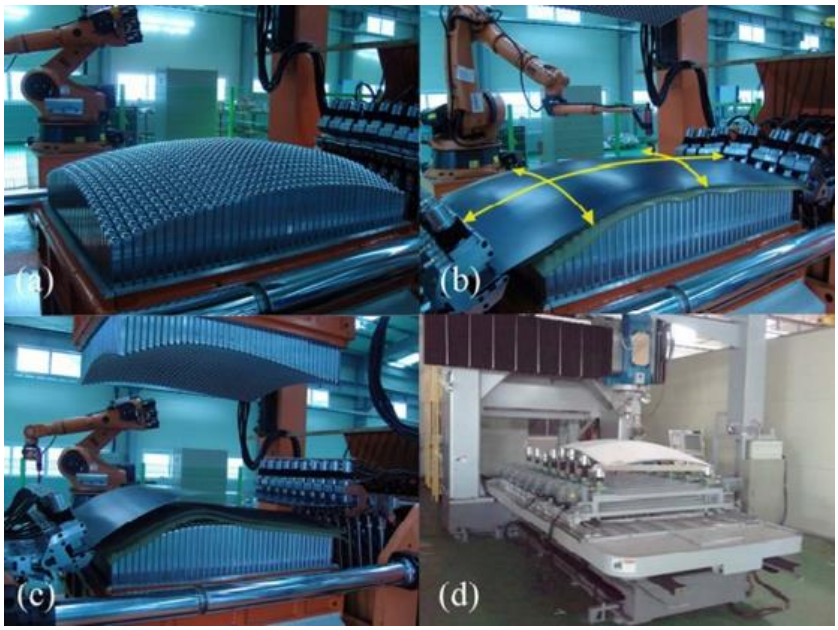
Hesaplamalı modelden alınan veriler ile biçimlendirici CNC makineler yardımıyla oluşturulan bu paneller, geleneksel kalıp yöntemi ile oluşturulsaydı 45 binden fazla kalıbın üretilmesini gerektirecekti ve doğru panellerin üretilmesi oldukça uzun bir sürecekti. Fakat CNC makinesine aktarılan komutlar ile panellerin üretim süresi kısaltılmış ve hata payının en aza indirilmesini sağlamıştır (Şekil 63).

Şekil 63. Alüminyum cephe paneli (sol); inşa aşamasındaki cephe (sağ; URL-8)

Tek eğrilikli panellerin çift eğrilikli panellere göre üretimi nispeten kolaydır, fakat bir panele çift yönde eğrilik kazandırmak oldukça masraflı ve zordur. Çift eğrilikli yüzeyleri tasarlamanın zorluğunun yanısıra tasarlanan yüzeylerin üretilmesi de bir hayli güçtür. Bu yüzden mühendisler, tasarlanan çift eğrilikli yüzey için bilinen yöntemlerin bir kombinasyonu olan çok noktalı streç şekillendirme yöntemini keşfetmiştir (Park vd., 2014; Yua ve Hahma, 2015). Bu sayede panellerin üretimi daha düşük maliyetler ile gerçekleştirilmiştir. Paneller Digital Project yazılımda modellenerek, her bir panele ait veriler bilgisayarlı çok noktalı streç şekillendirme makinesine aktarılmıştır. Bu yöntem ile her panel ortalama 15 dakikadan az bir sürede üretilmiştir (Lee ve Kim, 2012; Park vd., 2014). Panellerin üretim tekniği ve uygulamada kullanılan CNC makinesi Şekil 64 ve Şekil 65'da gösterilmiştir.



Şekil 64. Çift eğrilikli panel üretim sistemi (Lee ve Kim, 2012)



Şekil 65. Çok noktalı CNC streç şekillendirme makinesi (Lee ve Kim, 2012)

- Sürdürülebilirlik

Dongdaemun Tasarım Merkezi, yerin 150 metre altına kurulmuş olan çevre dostu ve enerji açısından verimli bir jeotermal sistemle donatılmıştır. Yapı yıl boyunca yaklaşık 12 derecelik bir sıcaklığı korumaktadır ve binanın çeşitli alanlarını ısıtmak veya soğutmak için 88 boru kullanılmıştır.

DTM, geleneksel bir Kore bahçesinin özelliklerini barındıran büyük bir parkın yanısıra 11.250 m²'lik yeşil bir çatı ile tasarlanmıştır. Kongre salonunun ve sergi salonunun çatılarına yaklaşık 800 bin adet Damkoruğu (Sedum) bitkisi dikilmiştir. Bu tür bitkiler, su depolayan kalın yaprakları ile kuraklığa karşı güçlü dirençleri ile bilinmektedirler (Şekil 66). Dolayısıyla oldukça az sulama gerektirirler.

Şekil 66. DTM'nin yeşil çatısı

2.2.3. Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi

Tablo 4. Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi yapı künyesi

<table>
<tr><td rowspan="7">Kimlik</td><td>Yapı Adı</td><td colspan="5">KRAL ABDULAZİZ DÜNYA KÜLTÜR MERKEZİ
(King Abdulaziz Center for World Culture, Ithra)</td></tr>
<tr><td>Yapı Tasarımı</td><td colspan="5">Snøhetta</td></tr>
<tr><td>Yapının Yeri</td><td colspan="5">Dahran, Suudi Arabistan</td></tr>
<tr><td>Yapım Yılı</td><td colspan="5">2008-2018</td></tr>
<tr><td>Yapı İşlevi</td><td colspan="5">Kültür Merkezi</td></tr>
<tr><td>Yapı Boyutları</td><td colspan="2">Alan:
100.000 m²</td><td colspan="2">Yükseklik:
90 m</td><td>Genişlik: -</td></tr>
<tr><td>Ödüller</td><td colspan="5">Big Project Middle East Construction and Sustainability Awards: Winner of Award for Excellence in BIM Implementation (2016), American Concrete Institute “Excellence Award” (2019), LEED Gold</td></tr>
<tr><td>Maliyet</td><td colspan="5">$ 400.000.000</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Strüktür</td><td>Strüktür Mühendisi</td><td colspan="5">Buro Happold</td></tr>
<tr><td>Strüktür Üreticisi</td><td rowspan="3">HT</td><td colspan="4">Summit Steel Construction, Zamil Steel Construction</td></tr>
<tr><td>Strüktür Malzemesi</td><td>Çelik</td><td rowspan="2">TS</td><td colspan="2">Beton</td></tr>
<tr><td>Strüktür Türü</td><td>Uzay kafes strüktür</td><td colspan="2">Betonarme çerçeve strüktür</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Cephe</td><td>Cephe Tasarımı/ Müh.</td><td colspan="5">Snøhetta</td></tr>
<tr><td>Kaplama M. Üreticisi</td><td colspan="5">Seele, Dynobend Inoclad</td></tr>
<tr><td>Kaplama Malzemesi</td><td colspan="5">Kavisli paslanmaz çelik boru, cam</td></tr>
<tr><td>Yüzey Boyutu</td><td colspan="5">30.260 m²</td></tr>
<tr><td rowspan="3">HT</td><td>HT Tekniği</td><td colspan="5">Parametrik Tasarım</td></tr>
<tr><td>HT Araçları</td><td colspan="5">Rhinoceros 3D, Grasshopper, Grasshopper Geometry Gym, Python, Tekla Structures, Revit, CATIA, Digital Project 3D (Gehry Technologies), Robot FEA</td></tr>
<tr><td>Sayısal Üretim Teknikleri</td><td colspan="5">CNC boru bükme makinesi</td></tr>
<tr><td>YAPI GÖRSELİ</td><td colspan="6"> </td></tr>
</table>

- Genel Bilgiler

Arapçada “zenginleştirme” anlamına gelen Ithra olarak da bilinen Kral Abdulaziz Dünya Kültürü Merkezi’nin inşasına 2008 yılında Suudi Arabistan’ın Dhahran kentinde başlanmıştır ve 2018 yılında proje tamamlanmıştır. Proje, Norveç mimarlık firması olan Snohetta tarafından tasarlanmıştır. Projenin strüktürel tasarım gibi mühendislik tasarımları ise Buro Happold tarafından yönetilmiştir (Snohetta, 2008; URL-11).

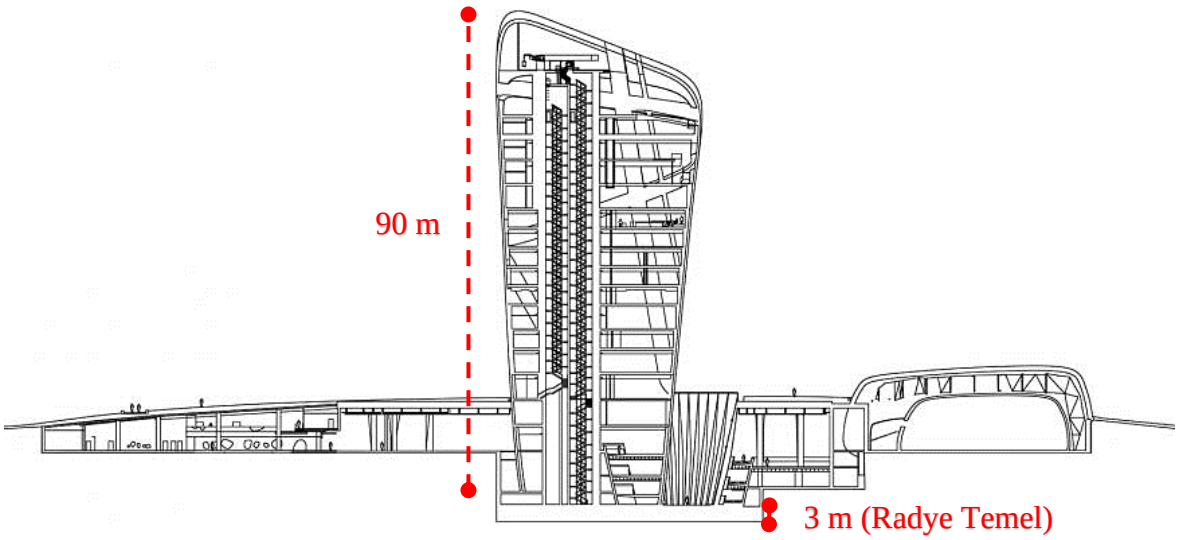
Proje, her birinin etrafı paslanmaz çelik borularla sarılmış 5 farklı çakıl taşı şeklindeki kütleden oluşmaktadır. Bu kütleler, planı birleştiren ortak bir podyum seviyesinde birleşmektedir (Bos vd., 2012; Snohetta, 2008; Şekil 67). Tasarımdaki çakıl taşı benzeri kütleleri çevreleyen endüstriyel cephenin aksine konstrüksiyonun duvarları oluşturulurken kum, çakıl ve kil içeren sıkıştırılmış toprak yöntemi de dahil olmak üzere geleneksel inşa teknikleri de kullanılmıştır (Chin, 2013). Proje, 220.000 m²’lik bir bilgi parkını ve 100.000 m²’lik alana sahip yapıyı içermektedir (ACI, 2019).

Şekil 67. KADKM (Ithra) Vaziyet Planı

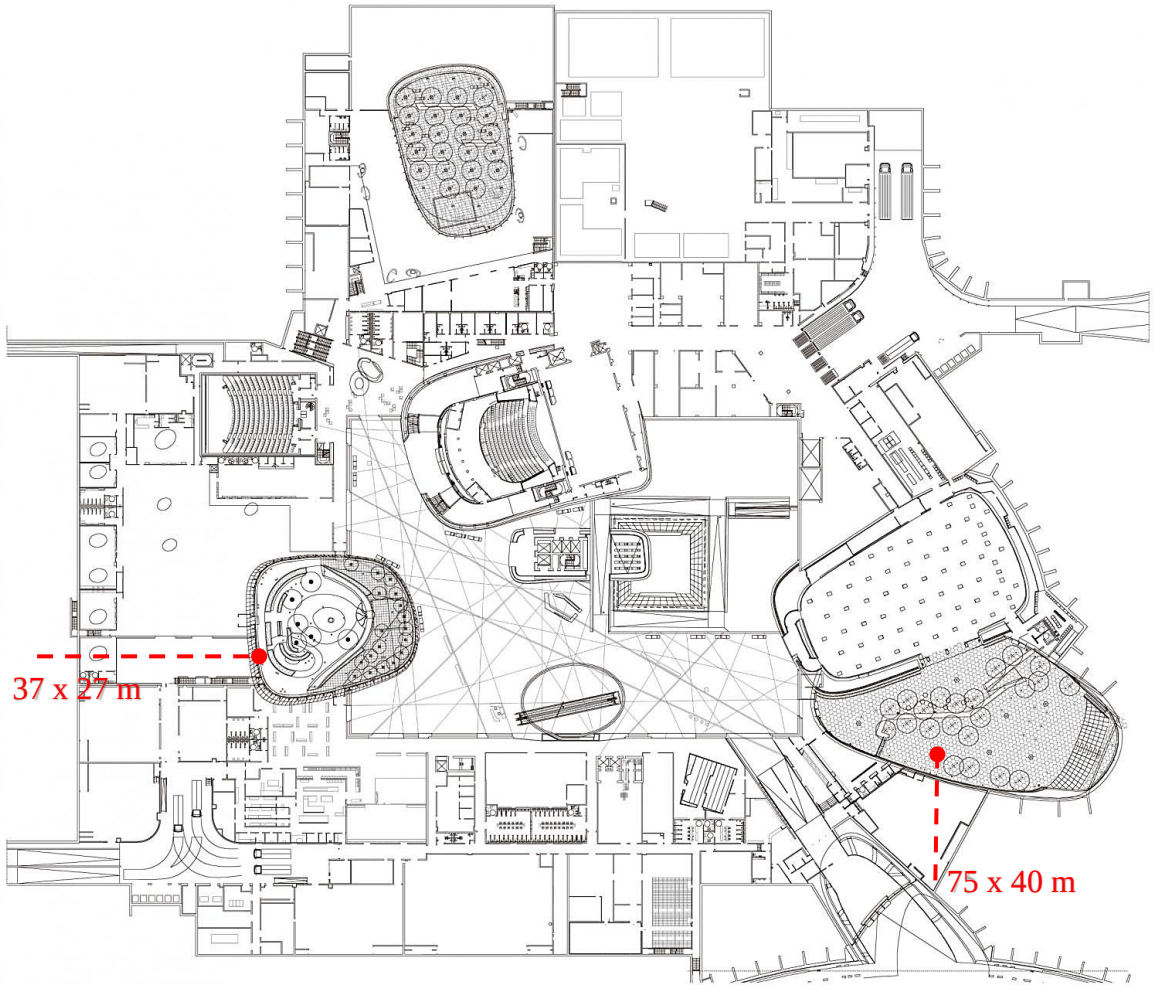
Yapı esas olarak iki elemandan oluşmaktadır, bunlar strüktür ve örtüdür. Strüktür, betonarme ve çelikten oluşan iki farklı sistemi içermektedir. Yapı kabuğu ise tamamıyla paslanmaz çelik borular ve camdan oluşmaktadır (Şekil 68). Yapıdaki kule, 90 metre yüksekliğindedir ve 3 m kalınlığında radye temel üzerine inşa edilmiştir (ACI, 2019; Snohetta, 2008; Şekil 69).

Proje, bodrum kattaki müzeye ışık sağlamak amacıyla dış mekana açılan ve podyuma batırılmış üç adet vahayı içermektedir. Bu vahalardan en büyüğü 75 metreye 40 metre, en küçüğü ise 37 metreye 27 metre boyutundadır (Şekil 70).

Şekil 68. Ithra yapı konstrüksiyonu



Şekil 69. Ithra yapı kesiti



Şekil 70. Ithra bodrum kat planı

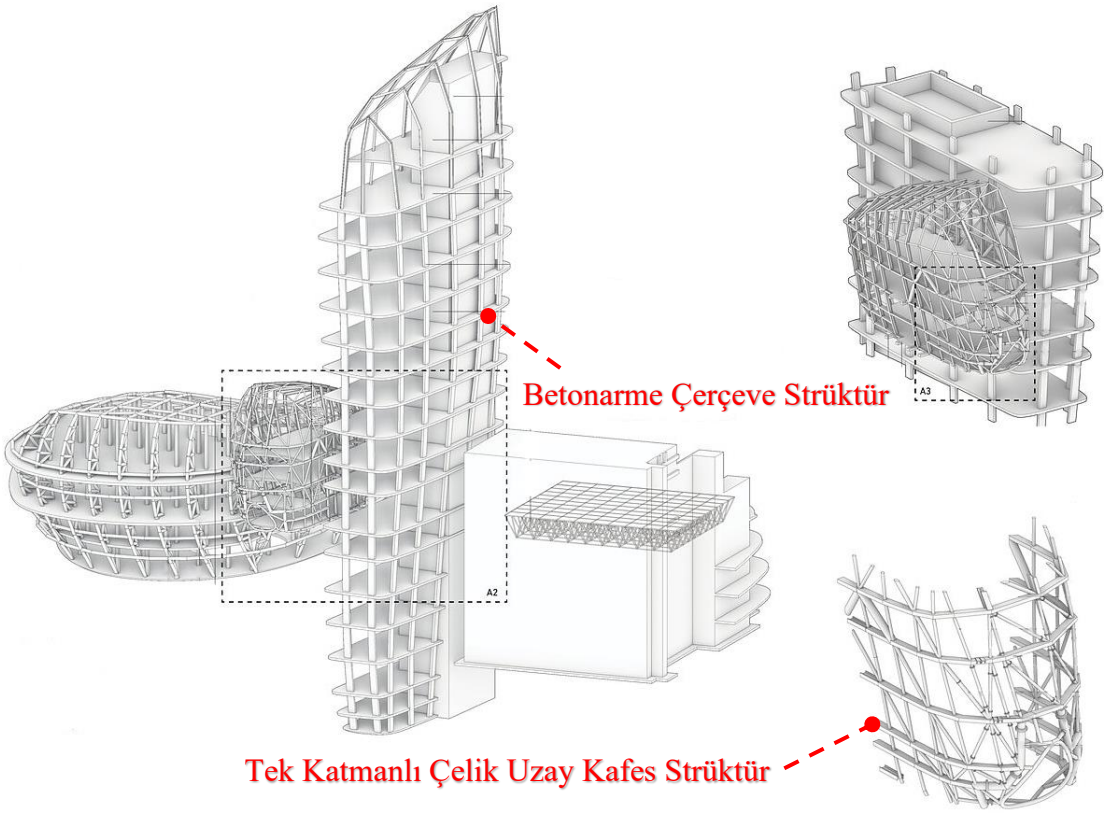
- Strüktür Tasarımı

Ithra, çelik uzay kafes strüktür ve betonarme çerçeve sistem olmak üzere iki farklı strüktür sisteminden oluşmaktadır. Döşeme ve kolonlardan oluşan betonarme çerçeve sistem taşıyıcı görevi görürken, düzlem kafes kirişlerden ve karmaşık bir sistemden oluşan uzay kafes strüktür yapıya formunu vermekte ve yapı kabuğunu taşımaktadır (Naeim, 2015). Projenin bazı kısımlarında taşıyıcı görevi gören eğimli ahşap elemanlar da kullanılmıştır (Thomson, 2013).

Projenin strüktür mühendisliğini yapan Buro Happold, YBM veri yönetimi araçlarıyla entegre olarak dijital modellerin otomatik olarak oluşturulmasını iyileştirecek bir yazılım geliştirmesi için Revit'i görevlendirmiştir. Geliştirilen yazılım sayesinde Revit ile iyi çalışan ayrıca üç boyutlu yapı elemanlarını modelleyebilen, üretim ve montajını destekleyen Tekla Structures kullanılarak hesaplamalı tasarım ile ilgili süreçler iyileştirilmiştir. Aynı zamanda

bu yazılım; yapıların güvenilirliğinin değerlendirilmesi, yapı elemanlarının sayılması ve düzenlenmesi ve yapının rüzgar kuvvetine karşı direncinin iyileştirilmesi için karmaşık işlemlerde kullanılmıştır (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020; Şekil 71).

Yapının özellikleri arasında 15,9 m uzunluğundaki ard-germeli levhalar, eğimli beton duvarlar ve rampalar, beton kaplamalı eğimli betonarme kolonlar gösterilebilir. Bununla birlikte 90 m yüksekliğindeki kulenin stabilitesi, destekli bir konsol görevi gören betonarme çekirdek ile sağlanmaktadır (Snohetta, 2008).

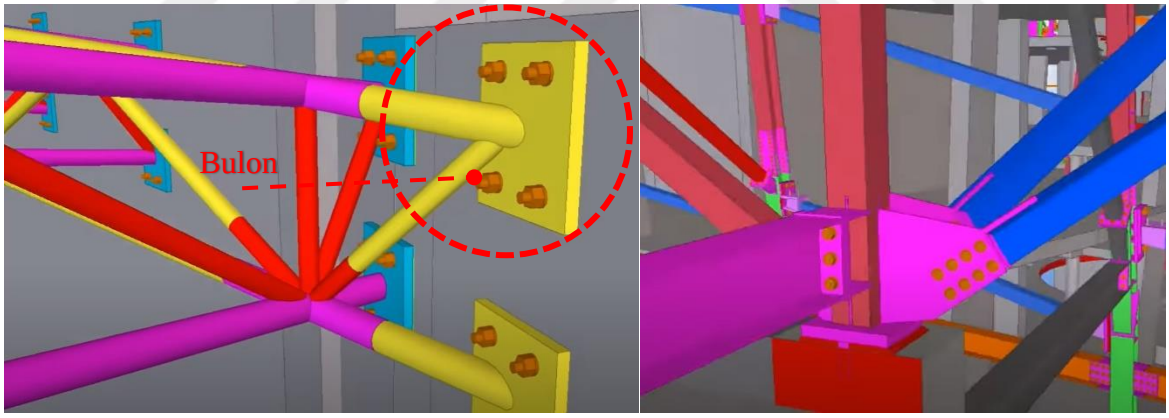


Şekil 71. Ithra 3B model (Tekla Structures)

Yapısal çelik strüktür ve bu strüktürün destekleyici orta direkleri, C & T profilleri, katlanmış paneller, kavisli raylar, kaldırma kancaları, gölgeleme cihazı destekleri, tüm cıvatalar ve armatürler, tasarım sürecini kolaylaştırmak ve modelin eş zamanlı modifikasyonunu sağlamak amacıyla bu proje için özel olarak oluşturulmuş bir bilgisayar programı kullanılarak modeldeki tam konumuna yerleştirilmiştir. Dijital hesaplama araçları ile oluşturulan yapı elemanları, 3B lazer konumlandırıcı sayesinde hassas bir şekilde yerleştirilmektedir. Bu araçlar, üretim sürecini kısaltmakta ve olası hataları azaltmaktadır (Naeim, 2015).

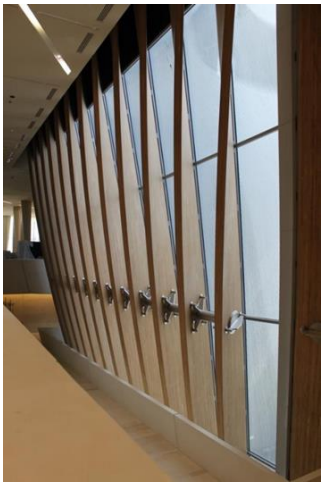
Betonarme çerçeve sistem ve uzay kafes çelik strüktürden oluşan serbest formlu bu yapıda, karmaşık strüktür sisteminin oluşturulabilmesi için birçok farklı bağlantı noktası çözümlenmiştir. Bu elemanların birleşim detayları hesaplamalı tasarım araçları ile önceden kesin olarak tanımlanmıştır. Yapıdaki çelik elemanlar birbirine bulonlar ile bağlanmıştır (Şekil 72, Şekil 73).

Şekil 72. Betonarme sistem ve çelik strüktür (uzay kafes sistem)



Şekil 73. Bulonlu bağlantı detayı (Tekla Structures)

İlaveten projede, sarmal müze rampasını çevreleyen ve ışık kuyusunu destekleyen, her biri 26 metre yüksekliğinde ve 2 metre genişliğinde olan kendi etrafında 90 derece döndürülmüş, 42 adet kompozit ahşap kiriş kullanılmıştır (Şekil 74). İçte ladin ve dış tarafta meşe ağacından elde edilen bu kirişler, Hess Timber tarafından Almanya'da üretilmiştir (Teller, 2019; Şekil 75, Şekil 76).



Şekil 74. Işıklığı destekleyen eğimli ahşap elemanlar (URL-13)

Şekil 75. Ladin (iç) ve meşeden (dış) oluşturulmuş eğimli ahşap eleman (Thomson, 2013)

Şekil 76. Üretimi tamamlanmış ahşap elemanların Ithra'ya gönderilmek üzere Almanya'da depoya kaldırılması (Teller, 2019)

Uzun eksenleri boyunca hafifçe eğimli olan ahşap taşıyıcı elemanların genişliği taban alanında 1 m ile başlamakta ve 2 m'ye kadar genişlemektedir. Ahşap elemanlar üretilirken kompozit ahşabı oluşturan 30 mm kalınlığındaki katmanlar, elde edilecek kirişin şekline göre preslenmiş ve yapıştırılmıştır (Şekil 77). Elde edilen sonuçlar lazer ile ölçülerek kontrol edilmiştir. Üretilen ahşapların bağlantı noktaları CNC makine ile frezelenmiştir. Kirişlerin dış katmanındaki 10 mm'lik kalınlık nedeniyle işlem hassas bir şekilde yürütülmüştür.

Bunun mümkün olmadığı durumlarda, frezelemedeki en ufak sapma ile ahşap elemanın çekirdeğindeki ahşabın görünür olması kaçınılmazdır. Elde edilen 5 ton ağırlığındaki ahşap elemanlar, CNC ile frezelenmiş noktalardan "örümcek" adı verilen bir bağlantı parçası kullanılarak cıvatalar aracılığıyla yapı ile birleştirilmiştir (Thomson, 2013; Şekil 78).

Şekil 77. Ahşap kirişin geometrisi (Thomson, 2013)

Şekil 78. Frezelenmiş ahşap kiriş (sol); örümcek bağlantısı ve kenet yeri (orta, sağ; Thomson, 2013)

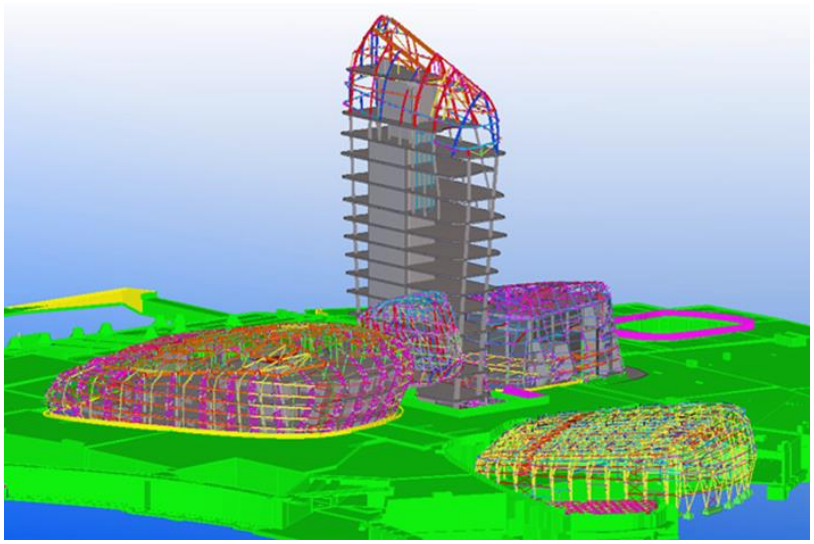
Ahşap elemanların yangına karşı dayanıklı olabilmesi için bu elemanlara, ısıya maruz kaldığında ısı yalıtımı sağlayan ve yangın geciktirici özellikte olan şeffaf, su bazlı bir yalıtım katmanı uygulanmıştır (Thomson, 2013; Şekil 79).

Şekil 79. Ambalajlanmadan önce üretimi tamamlanmış ahşap elemanlar

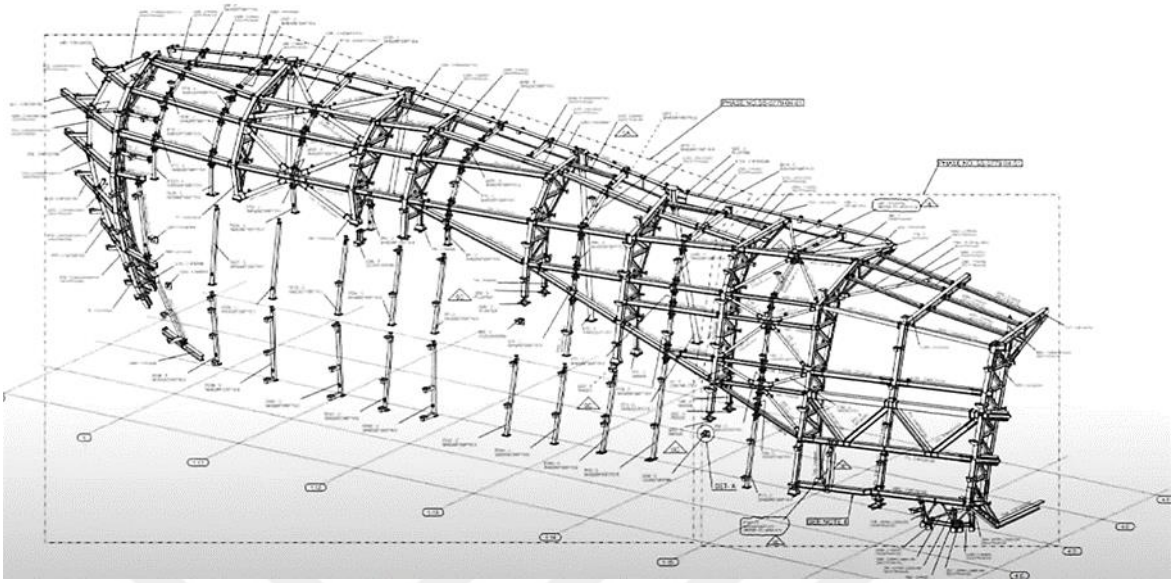
- Hesaplamalı Tasarım

Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi'nin parametrik modellemesi birkaç aşamada gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta oluşturulan basit dijital CAD modeli, karmaşık yapılar için gerekli olan bilgiyi sağlayamamıştır. Bunun sebebi serbest biçimli yapılarda, mesafeleri ölçmenin mümkün olduğu kartezyen düzlemler (XYZ düzlemi) gibi referans sistemlerinin olmamasıdır. Bu yapılarda birbirinden farklı çok sayıda eleman vardır ve bu elemanların her biri farklı bir konuma sahiptir. Bu da, her öğe için kendi kendine referans veren bir düzlemi gerektirmektedir (Naeim, 2015).

Başlangıçtaki CAD modeli, bina kabuğunun karmaşıklığı nedeniyle mimarinin her bir parçasına ait bilgi ve verileri içeren YBM modeline dönüştürülmüştür. Bu 3B model, renk ve işleve göre kodlanmış tüm öğeleri içermektedir (Naeim, 2015). Optimum çözümleri sağlamak için YBM yazılımı ile Revit ve CATIA'da bulunan dijital CAD araçları kullanılmıştır (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020; URL-11). Ayrıca YBM ortamında 3B yapı elemanlarını modelleyebilen ve üretim ve montajını destekleyen Tekla Structures yazılımı da kullanılmıştır (Şekil 80, Şekil 81). Fakat bu elemanlardan yapı ile ilgili daha spesifik veriler elde edebilmek için elemanları tanımlamak ve sınıflandırmak gerekmektedir. Bu sebeple Inoclad GmbH ve Imagine Computation GmbH, görsel algoritmik bir komut dosyası düzenleyicisi olan Grasshopper ve Python betik (komut) dilinde oluşturulan tanımlar ile Rhinoceros 3D'de manuel modellemenin bir kombinasyonunu kullanmıştır (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020).

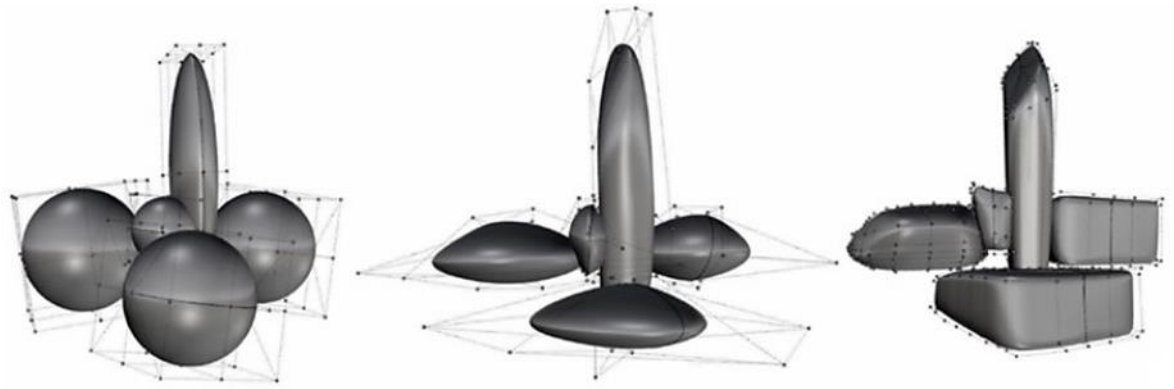


Şekil 80. Betonarme ve çelik strüktür 3B model (Tekla Structures; URL-67)



Şekil 81. Hesaplamalı tasarım araçları ile oluşturulan izometrik görünüm (çelik strüktür)

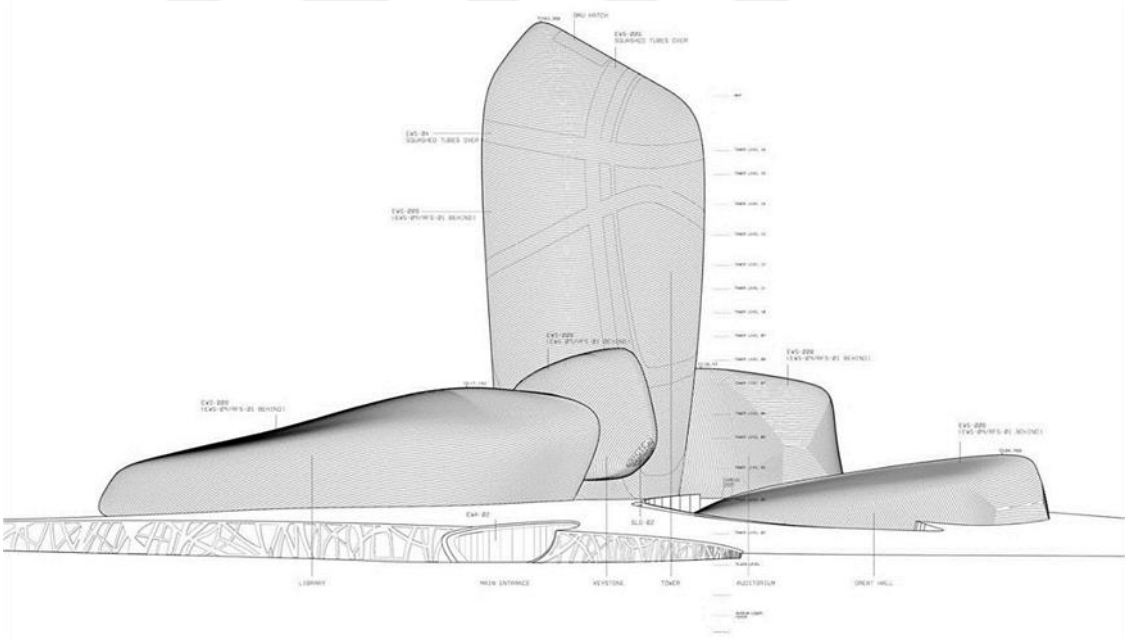
İlk aşamada Rhinoceros 3D Grasshopper'da NURBS eğrileri ve yüzeylerine dayalı bir model oluşturulmuştur. Temel geometrik cisimlerin kontrol noktaları manipüle edilerek farklı işlevlere sahip çakıl taşı şeklindeki formlar modellenmiştir (Şekil 82). Kontrol noktaları, NURBS eğrilerinin ve parametrik yüzeylerin önemli özelliklerinden biridir. Bu noktalar sayesinde çeşitli serbest biçimli yüzeyler oluşturulabilmektedir (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020).



Şekil 82. Katı cisimlerin parametrik modellenmesi (Rhinoceros; Januszkiewicz ve Kowalski, 2020)

Ithra'nın parametrik modellemesinde çeşitli hesaplamalı tasarım stratejileri kullanılmıştır. Bunlar; kontrol noktalarının sayısının yeniden oluşturulması yani

izoparametrik eğrilerin artırılması, kontrol noktalarının çıkarılması veya eklenmesi için bir araç geliştirilmesi ve kontrol noktalarının ağırlığının düzenlenmesidir. Kontrol noktalarındaki temel değişimler ve işlemler, kütlelerin geometrik formlarının eğriliğinin sürekliliğini değiştirmemiştir fakat bu eylemler sayesinde kütlelerin kenarlarında değişken yarıçaplı karakteristik eğriler elde edilmiştir. Bir sonraki adımda özellikle kuledeki karakteristik cam şeritlerinin olduğu serbest biçimli yüzeyler üzerindeki eğrilerin enterpolasyonu (bilinmeyen bir fonksiyondan bilinen değişken değer setleri kullanılarak bilinen bir fonksiyon elde etme yöntemi) yapılmıştır (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020). İkinci aşamada, eğrilik analizi ve HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) testleri sonrasında kütlelerin geometrisi düzeltilmiştir. Bu düzeltmeler ve boyutlandırma sonucunda projenin nihai 3B parametrik modeli oluşturulmuştur (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020; Şekil 83).

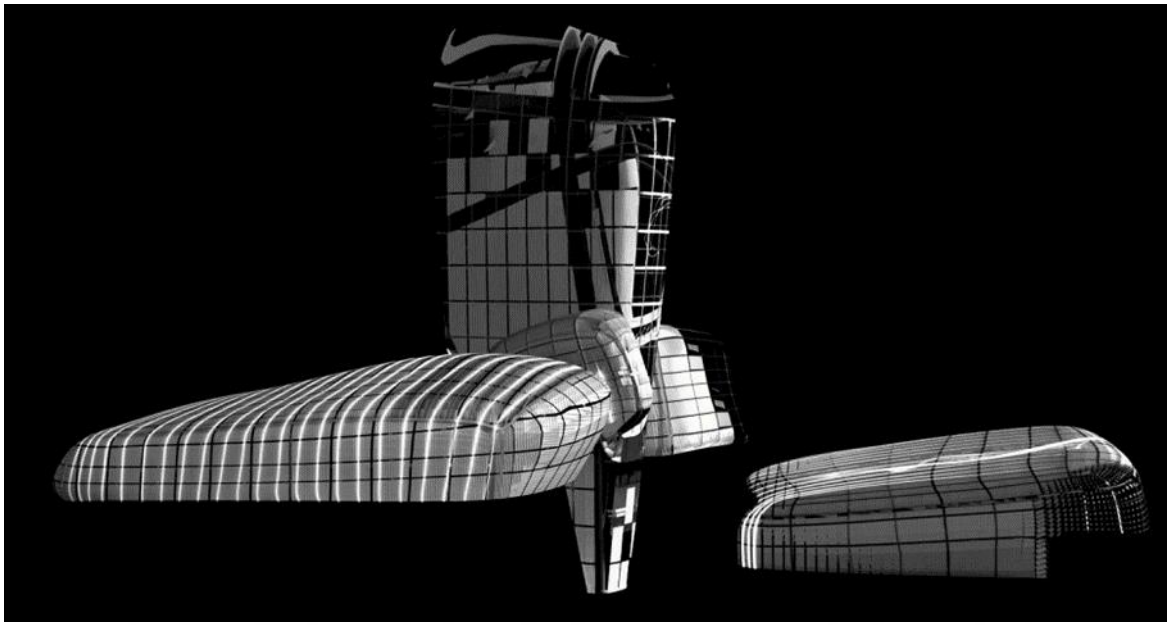


Şekil 83. Son yüzey modeli (Rhinoceros; Januszkiewicz ve Kowalski, 2020)

Yapının parametrik modeli oluşturulduktan sonra bu beş serbest biçimli formun kabuk tasarımının nasıl yapılandırılacağına ilişkin stratejiler geliştirilmiştir ve destekleyici yapıların ve alt tabakanın nasıl olacağı tanımlanmıştır.

Ithra'nın sahip olduğu serbest biçimli formların yüzeyinin üretilebilir parçalara dönüştürülebilmesi için iki strateji belirlenmiştir. Birincisi yüzeyin uygun boyutta dörtgen panellere bölünmesi (Şekil 84), ikinci strateji ise destekleyici yapıyı geometrik olarak

tanımlamak için yüzey şekillendirme yapılmasıdır. Bu işlem hesaplamalı tasarım araçlarıyla parametrik bir geometrik model üzerinde otomatik gerçekleştirilir. Bu veriler, bir yapının yapısal bileşenlerini doğrudan ifade edebilmek için kullanılmaktadır. Elde edilen kesit çizgileri, bir yüzeyin veya yapının yapısal iskeletini oluşturmak için daha manipüle edilebilir bir kontür ağının oluşturulmasını sağlamaktadır (Şekil 81).



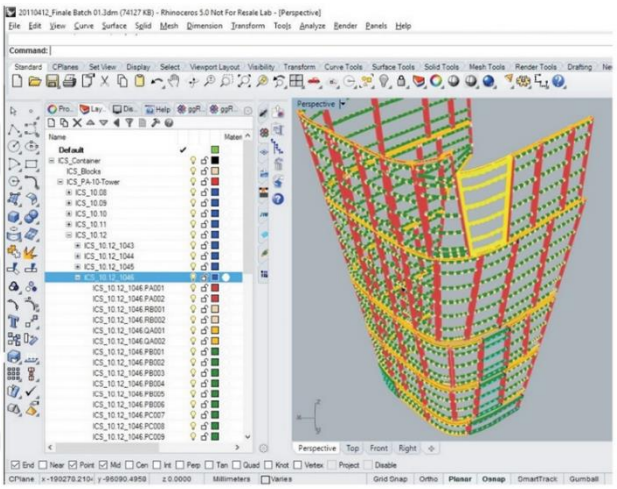
Şekil 84. Serbest geometriye sahip yüzeylerin üretim kolaylığı için elemanlara bölünmesi (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020)

Yapının tüm unsurlarını tanımlamak için dijital araçlarla tasarım analizleri gerçekleştirilmiştir. Geometrik işlemlerin sonucu 3.000'den fazla modül elde edilmiştir ve modüllerin her biri, konumları tanımlanmış birkaç yüz farklı eleman içermektedir. Bu öğelerin her birine meta veriler atanarak oluşturulan dosyalar (IFC) Tekla Structure yazılımına aktarılmıştır (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020; Şekil 80). Birbirinden farklı biçim, yönlendirme ve konumdan oluşan bu 3000'den fazla farklı öğe oluşturulurken hesaplamalı tasarım araçlarının ve stratejilerinin kullanılması proje için oldukça önemlidir. Çünkü bu araçlar sayesinde projedeki doğruluk, tasarım ve üretim sürecindeki verimlilik ve hız önemli ölçüde artmaktadır (Naeim, 2015).

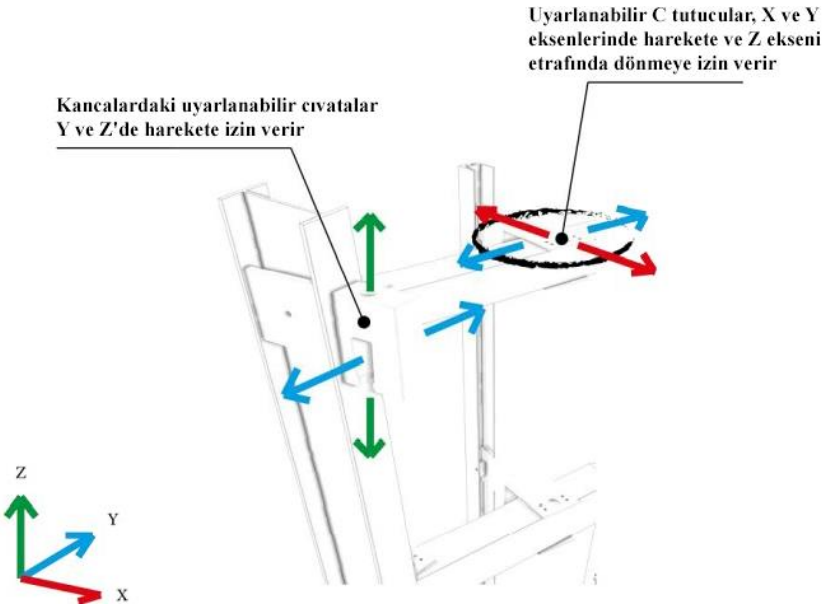
Yazılımlar arası otomatik veri alışverişini sağlamak ve geometri üzerinde değişiklikler yapabilmek için sürecin ilerlemesi önemlidir. Bunu sağlamak amacıyla Grasshopper'ın Geometry Gym uygulaması kullanılmıştır. Bu uygulama, Rhinoceros 3D yazılımında

bulunan gerekli özelliklere ve ilişkilere sahip Tekla Structures öğeleri oluşturabilmek için geliştirilmiştir (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020; Naeim, 2015; Şekil 85).

Proje sürecinde parametrik modeller, hem Revit hem de Tekla Structures yazılımında sürekli olarak test edilmiştir. Bu durum, olası hataların önlenmesini ve yapılan değişikliklerin geri dönülemez olmamasını sağlamıştır (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020; Şekil 86). Üretim sürecinde hesaplamalı tasarım araçlarının yanı sıra, bu araçlardan alınan veriler ile 3B lazer konumlandırıcılar ve CNC makineleri (serbest biçimli bükme makinesi vb.) kullanılmıştır (Khedr ve Ali, 2018; Naeim, 2015).



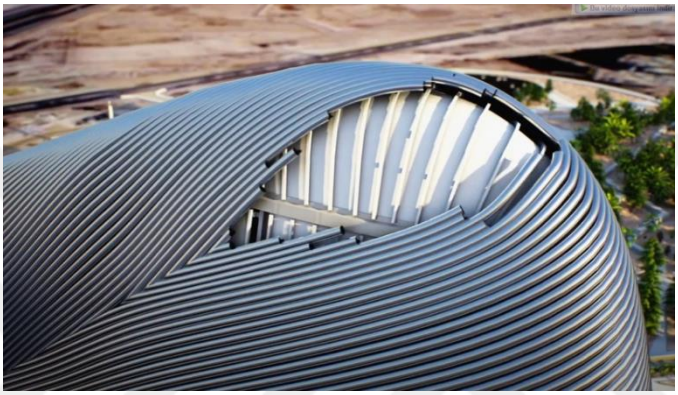
Şekil 85. Geometry Gym uygulaması kullanılarak cephe bileşenlerinin modellenmesi (Januszkiewicz ve Kowalski, 2020)



Şekil 86. Geri adım işlemi (Naeim, 2015)

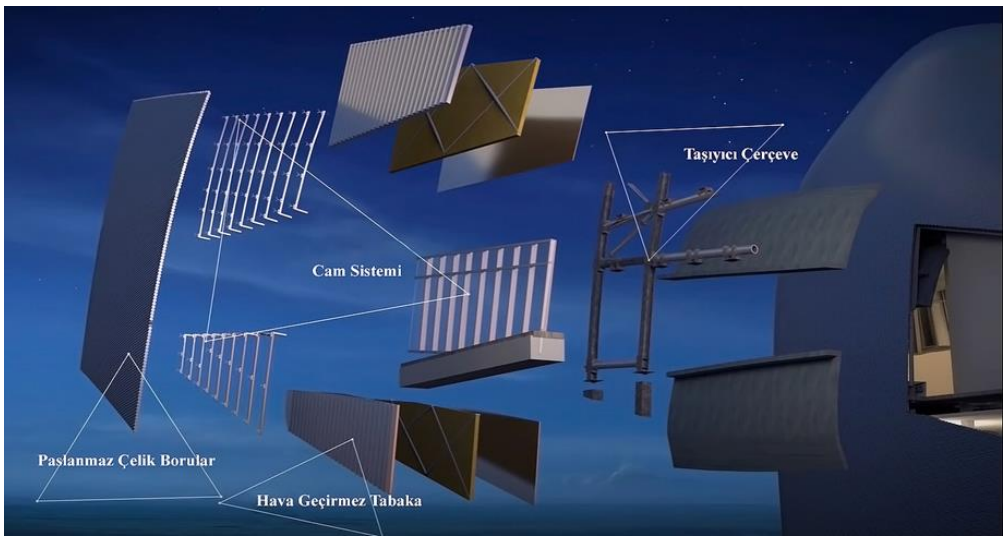
- Cephe Tasarımı

Yapının cephesi, yapıyı sert dış iklimden koruyan yalıtılmış hava geçirmez bir tabaka ve güneş kırıcı olarak da görev yapan ve yapıyı tümüyle saran paslanmaz çelik borular olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır (Naeim, 2015; URL-11; Şekil 87). Yapıda kullanılan cam tipi, yüksek performanslı solar low-e kaplamaya sahip çift camdır. Toplam cephe alanı 30.260 m²'dir.

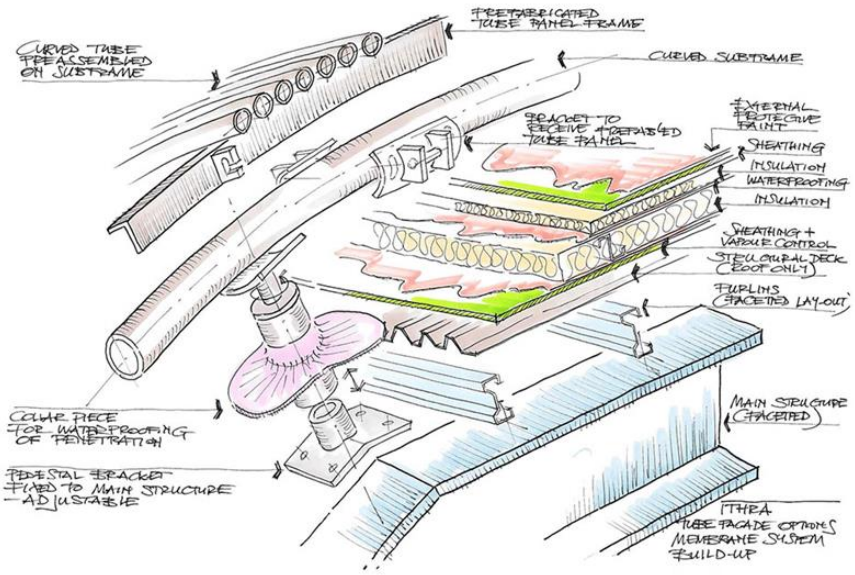


Şekil 87. Çelik borular ve boruları tutan cephe paneli

Birinci katman, ana çelik taşıyıcı ve betonarme döşemenin etrafına sarılmış, 2000 ton ağırlığındaki çokgen bir çelik ızgaradır (URL-12). Çelik borulardan oluşan ikincil ızgara ise; trapez çelik sac, yalıtım ve kenet sacından oluşan bir sandviç yapıya entegre edilmiştir. Bu yapı, organik şekillerin tam olarak istenilen şekilde olmasını sağlamıştır (Şekil 88, Şekil 89).

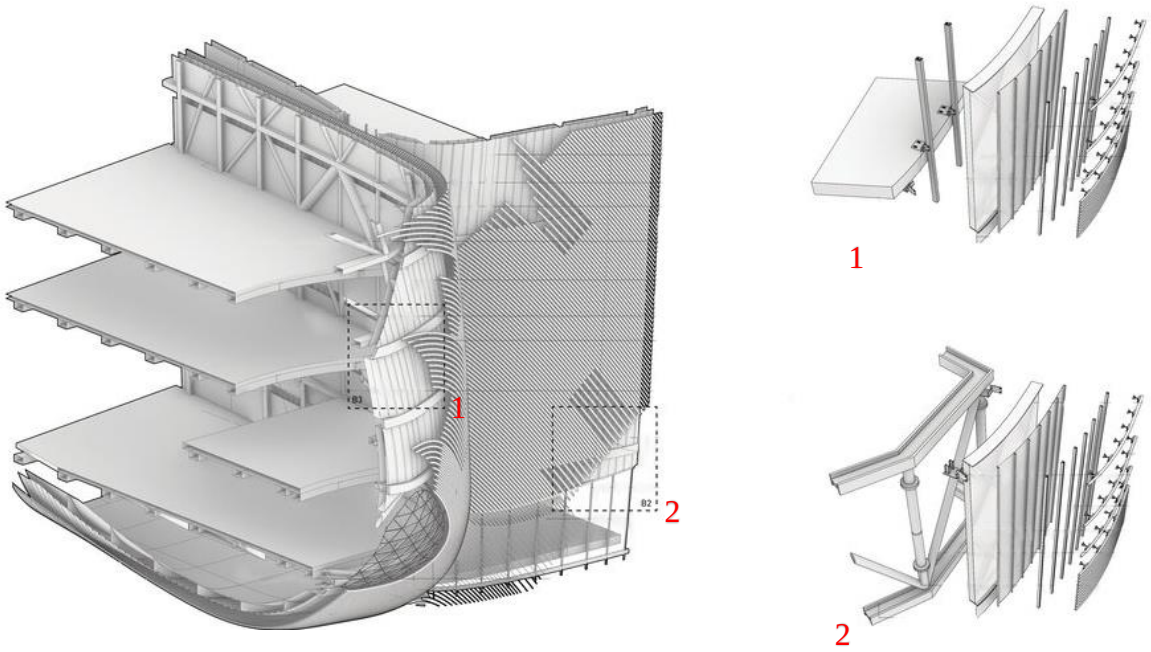


Şekil 88. Ithra 3B cephe sistemi

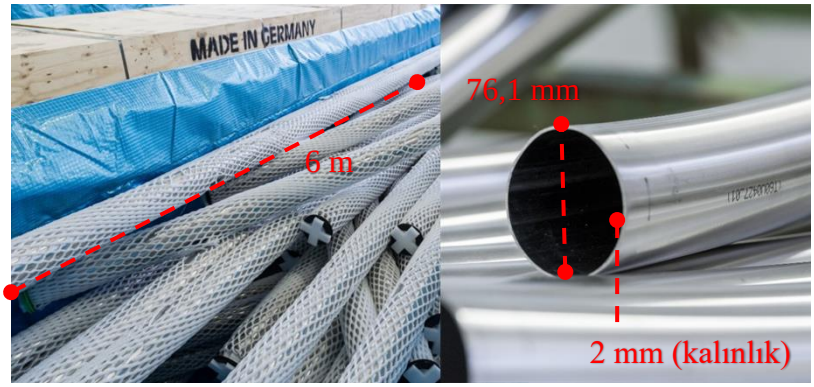


Şekil 89. Ithra cephe detayı (URL-11)

Cepheyi kaplayan 93.403 adet paslanmaz çelik boru, Seele tarafından Avrupa'da üretilmiştir ve Suudi Arabistan'a getirilmiştir (Teller, 2019; URL-13). Çapı 76,1 mm ve kalınlığı 2 mm olan çelik boruların her biri, birbirinden farklı geometriye sahiptir ve 6 m uzunluğundadır. Boruların toplam uzunluğu ise 365 km'dir (Thorsen ve Greewood, 2010; URL-14; Şekil 90; Şekil 91).



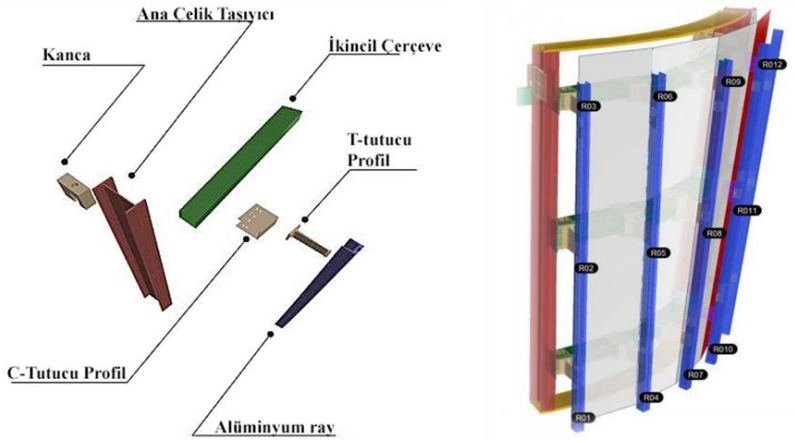
Şekil 90. Ithra Cephe Detayı



Şekil 91. Paslanmaz çelik boruların korunarak taşınması (sol); paslanmaz çelik borular (sağ; URL-13)

Paslanmaz çelik borular, 9,9 mm aralıklarla yerleştirilmiştir ve Titanyumdan yapılmış ve özel olarak üretilmiş armatürler ile yerine tutturulmuştur (URL-13; Şekil 92, Şekil 93). Bu malzeme, çeliğe oranla daha yüksek mukavemete sahiptir ve iklim sebebiyle oluşan sıcaklık dalgalanmalarına daha az tepki göstermektedir. Ek olarak, iklim koşullarından kaynaklanan korozyona karşı dayanıklıdır (URL-15).

Şekil 92. Cephe kaplama sistemi ve paslanmaz çelik borular



Şekil 93. 3B cephe ünitesi içeriği (sol); 3B cephe ünitesi modeli (sağ; Naeim, 2015)

Çelik boruların her biri, önceden belirlenmiş 3B verilere göre karmaşık mekanizma ve elektronik ölçüm teknolojisi kullanan CNC boru bükme makinesi ve CNC serbest form makinesi aracılığıyla haddelenmiştir (Şekil 94, Şekil 95). Ürünlerin monte edilirken ayarlanması imkânsız olduğu için boruların %100 kesinlik ve sadece %0,5 atıkla üretilmesi sağlanmıştır. Hesaplamalı tasarım araçları ile belirlenen kurulum sırası ve her eleman için tanımlanan kodlar sayesinde birbirinden farklı bu elemanların her biri için kurulum talimatı oluşturulmuştur (Şekil 96). Şekillendirilen boruların uçları, birbirine geçebilmesi için sivriltilmiştir ve kesin bağlantı noktaları önceden delinmiştir. Üretilen çelik borular, hasar almaması için paketlenmiş ve önceden belirlenmiş bir sırayla nakliye kasalarına yerleştirilmiştir (URL-13, URL-14).

Şekil 94. Çelik boruların 3B verilere göre CNC makinelerde şekillendirilmesi (URL-13)

Şekil 95. Proje için kullanılan CNC makinelerine benzer makineler (Naeim, 2015)

Şekil 96. Her bir çelik boru için oluşturulmuş QR kodları

- Sürdürülebilirlik

Çevresel kaygılarla tasarlanan yapı, olumsuz ekolojik etkileri en aza indirmek için LEED Gold standartlarına uygun tasarlanmıştır (Abowardah ve Ramadan, 2014). Projede kullanılan asgari miktarda sulama gerektiren ve çöl bölgesine özgü bitki örtüsü, projenin karbon ayak izini etkileyen önemli bir faktördür. Çöl bitkileri kullanılarak tasarlanan yeşil alanlarda uygulanan bu yönteme "Xeriscaping" denir (Şekil 97). Xeriscaping'in faydaları arasında, daha düşük su faturaları ilemaliyet tasarrufu ve peyzaj için gerekli olan işçiliği azaltmak yer almaktadır. Peyzajdaki sulama için gerekli olan su, yağmur sularının toplanmasından karşılanmaktadır (Elmoghazy vd., 2017; Khedr ve Ali, 2018).

Şekil 97. Peyzaj tasarımı (Xeriscaping; Elmoghazy vd., 2017)

Yürüyüş yolları ve sosyal alanlar için doğal bir ortam oluşturabilmek amacıyla bu alanlar iç içe tasarlanmıştır. Bu alanın sulamasında, suyun tasarruflu ve verimli kullanılabilmesi için su hacmini hesaplayan su sayaçlarının kullanılması gibi çeşitli girişimlerde bulunulmuştur. Buna ek olarak, peyzajda kullanılan bitkiler için genel hava koşullarına göre sulama seviyelerini programlamak ve aşırı su tüketimini önlemek için akıllı su kontrol cihazları kullanılmıştır (Al-Sadat ve Abdelaal, 2020).

Cephede kullanılan kaplama sistemi, arkasındaki yalıtımlı duvarlar için hem gölge hem de havalandırma sağlamaktadır. Aynı zamanda güneş ısısını toplayarak 80˚C (176˚F) civarında yüzey sıcaklığına ulaşmaktadır (Thorsen, Greewood, 2010). Çelik borular, iç mekana doğal ışık sağlamak için pencerelerin yakınında düzleşmekte ve aradaki hava boşluğu, bu elemanlar üzerinde biriken ısının tahliye edilmesini sağlamaktadır. Bu tasarım kararı, manzaraya izin vererek görsel konforu sağlarken aynı zamanda iç mekanı fazla güneş ışığından koruyarak neredeyse %100 pasif gölgelemeye olanak tanımaktadır (URL-11; Şekil 98).

Şekil 98. Pencere kısımlarında düzleştirilen çelik borular (Thorsen ve Greewood, 2010)

2.2.4. Hangzhou Olimpik Spor Merkezi

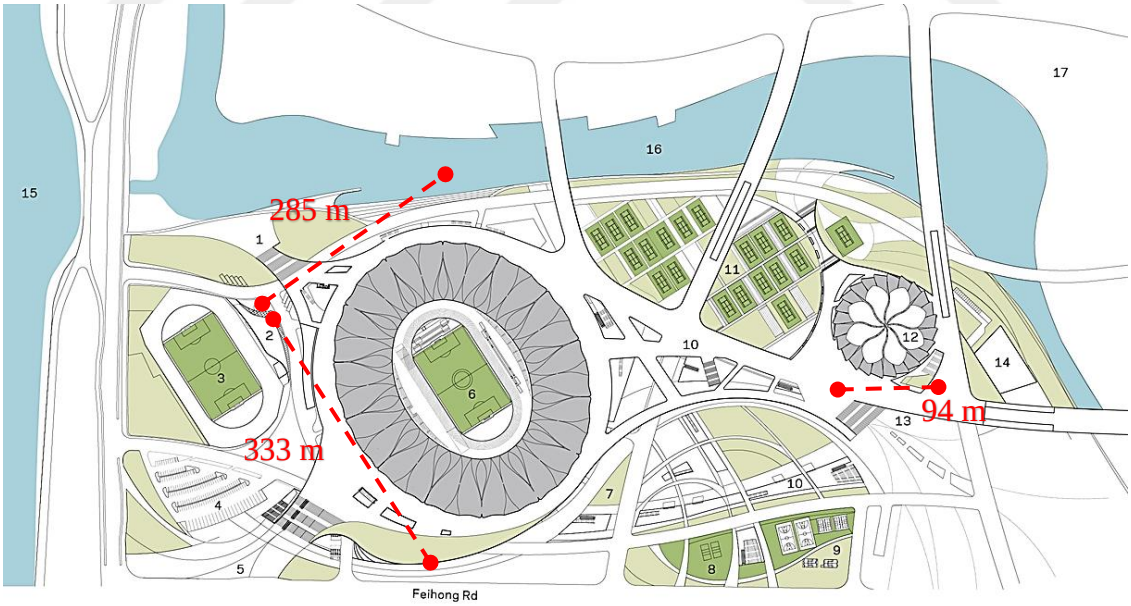
Tablo 5. Hangzhou Olimpik Spor Merkezi yapı künyesi

<table>
<tr><td rowspan="8">Kimlik</td><td>Yapı Adı</td><td colspan="6">HANGZHOU OLİMPİK SPOR MERKEZİ
(Hangzhou Olympic Sports Center)</td></tr>
<tr><td>Yapı Tasarımı</td><td colspan="6">NBBJ, CCDI</td></tr>
<tr><td>Yapının Yeri</td><td colspan="6">Hangzhou, Çin</td></tr>
<tr><td>Yapım Yılı</td><td colspan="6">2011-2019</td></tr>
<tr><td>Yapı İşlevi</td><td colspan="6">Spor Merkezi</td></tr>
<tr><td>Yapı Boyutları</td><td colspan="2">Alan: 82.904 m² / 27.400 m²</td><td colspan="2">Yükseklik: 59,4 m / 37,9 m</td><td colspan="2">Genişlik: 333-285 m / 94 m (çap)</td></tr>
<tr><td>Ödüller</td><td colspan="6">Interior Design Magazine (Best of the Year), Prix Versailles Sports Awards, China Construction Engineering Luban Prize, China National Science and Technology Progress Award, Fast Company Innovation Design Awards (Mansiyon ödülü), Çin Çelik Yapı Altın Ödülü, Mühendislik Teknolojisi Jinyu Ödülü</td></tr>
<tr><td>Maliyet</td><td colspan="6">$ 365.000.000 / 155.000.000 (stadyum/ tenis merkezi)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Strüktür</td><td>Strüktür Mühendisi</td><td colspan="6">Buro Happold, CCDI (China Construction International Design Consulting)</td></tr>
<tr><td>Strüktür Üreticisi</td><td rowspan="3">HT</td><td colspan="5">ZJU Team, Southeast Space Frame Group, Zjeijang Southeast Grid</td></tr>
<tr><td>Strüktür Malzemesi</td><td colspan="2">Çelik</td><td rowspan="2">TS</td><td colspan="2">Beton</td></tr>
<tr><td>Strüktür Türü</td><td colspan="2">Uzay kafes strüktür</td><td colspan="2">Betonarme Çerçeve Strüktür</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Cephe</td><td>Cephe Tasarımı/ Müh.</td><td colspan="6">NBBJ, CCDI</td></tr>
<tr><td>Kaplama M. Üreticisi</td><td colspan="6">Novelis Inc. (Alüminyum levha), Beijing N&L Fabric Technology (tenis merkezi), Palram Industries (polikarbonat levha)</td></tr>
<tr><td>Kaplama Malzemesi</td><td colspan="6">Alüminyum levha, Polikarbonat levha, ETFE membran, PTFE membran</td></tr>
<tr><td>Yüzey Boyutu</td><td colspan="6">75.000 m² (Big Lotus), 5.662 m² (Little Lotus)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">HT</td><td>HT Tekniği</td><td colspan="6">Parametrik Tasarım</td></tr>
<tr><td>HT Araçları</td><td colspan="6">Rhinoceros 3D, Grasshopper, Revit, Revit MEP, Naviswork, Tekla Structure, SAP2000, Kangaroo Physics, WIN3D</td></tr>
<tr><td>Sayısal Üretim Teknikleri</td><td colspan="6">CNC boru bükme makinesi, CNC 2B kesim makinesi</td></tr>
<tr><td>YAPI GÖRSELLERİ</td><td colspan="6"> </td></tr>
</table>

- Genel Bilgiler

NBBJ (Amerika) ve Çin'de bulunan yerel ofis CCDI tarafından tasarlanan Hangzhou Olimpik Spor Merkezi'nin inşaatına 2011 yılında başlanmış ve tüm inşaat 2019 yılında tamamlanmıştır. Hangzhou Olimpik Spor Merkezi; ana stadyum, tenis stadyumu, su sporları merkezi, kongre merkezi ve zemin altı satış alanlarından oluşmaktadır. Ana stadyum (Big Lotus) ve tenis stadyumu (Little lotus) sırasıyla 2019 ve 2018 yılında tamamlanmıştır. Proje, Çin'in Hangzhou kentinde Qiantang ve Qijia adlı iki nehrin kesiştiği bir bölgede yapılmıştır (URL-16). Projenin cephe mühendisliği NBBJ ve CCDI, strüktür mühendisliği ise Buro Happold ve CCDI tarafından gerçekleştirilmiştir (URL-17).

Nilüfer yapraklarına benzeyen farklı bir tasarıma sahip ana stadyum ve tenis stadyumu, sırasıyla 82.904 m² ve 27.400 m²'lik bir alanı kaplamaktadır ve sırasıyla 80.011 ve 10.499 adet koltuğa sahiptirler (URL-18). Toplam inşaat alanı ise 210.110 m²'dir. Ana stadyumun çatısı iç içe geçmiş, 28 büyük ve 28 küçük taç yaprağından oluşmaktadır. Tenis stadyumunda ise 24 eşit taç yaprağı vardır. Ayrıca çatıda açılıp kapanabilen 8 adet taç yaprağı mevcuttur (Mingguang, 2017; Şekil 99).



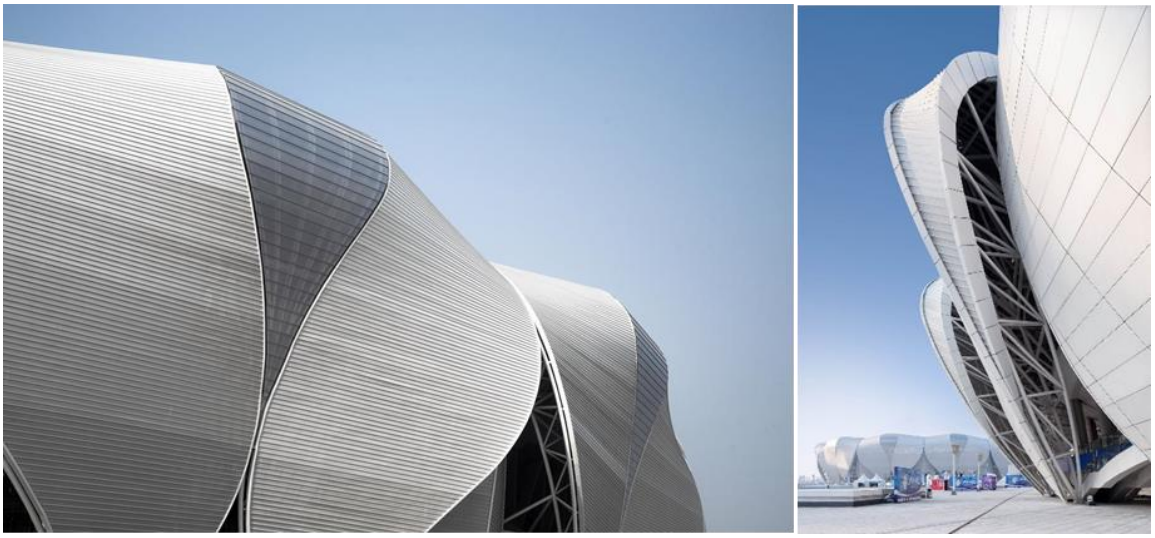
Şekil 99. HOSM vaziyet planı (URL-17)

Çin'de 2018 yılında her bir ton çelik üretimi için ortalama 2 ton CO_2 gazı salınması sebebiyle NBBJ ilk olarak, yapıda kullanılan çelik miktarını azaltmayı hedeflenmiştir.

Dolayısıyla proje; kullanılan çelik miktarını azaltmak, seyircilerin sahaya olan görüşünü iyileştirmek ve en üst düzeye çıkarmak gibi pek çok avantaj elde etmek amacıyla hesaplamalı tasarım yöntemleri kullanılarak tasarlanmıştır (URL-17). Dış cepheyi tasarlamak için kullanılacak karmaşık geometrik sistemleri oluşturabilmek için hesaplamalı tasarım tekniklerinin kullanılmasının yanısıra Yapı Bilgi Modellemesi de kullanılarak sürecin verimli bir şekilde yönetilmesi sağlanmıştır.

Ana stadyum ve tenis stadyumu birbirine entegre edilmiş betonarme sistem ve çelik modüllerden oluşmaktadır (Şekil 100). Ayrıca bu projede, kuş yuvası olarak adlandırılan Pekin Ulusal Stadyumu'na göre %60 daha az çelik kullanılmıştır (URL-19).

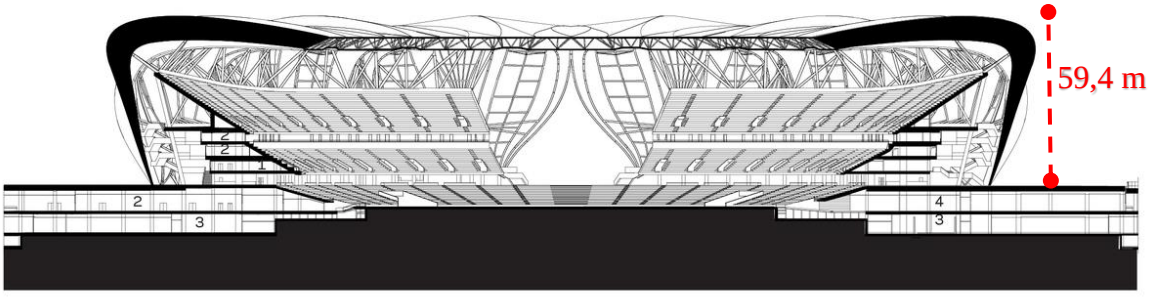
Şekil 100. Yapı konstrüksiyonu; ana stadyum (sol), tenis stadyumu (sağ)



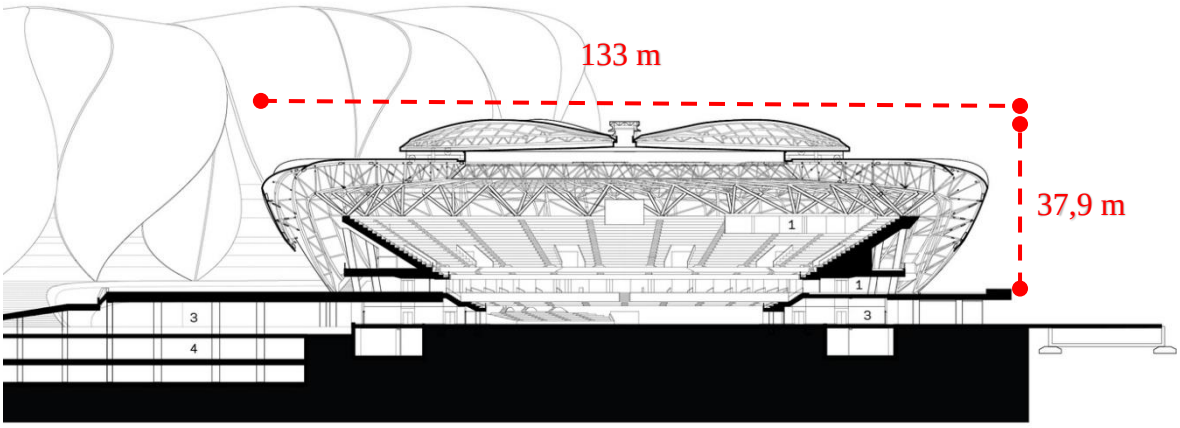
Şekil 101. Yapı cephesi; ana stadyum (sol), tenis stadyumu (sağ; URL-17, 2023)

Ana stadyumun çelik modüllerden oluşan cephesinde, alüminyum paneller kullanılmıştır. Bu panellerin üzeri, yapı görünümünü yumuşatmak için ince ve şeffaf ETFE membran ile kaplanmıştır. Tenis stadyumunun cephesinde ise PTFE membran kullanılmıştır (ZSSD, 2020; Şekil 101).

Elips şeklindeki ana stadyum kuzey-güney yönünde yaklaşık 333 m, doğu-batı yönünde ise 285 m uzunluğundadır (Şekil 99). Yapı yüksekliği ise 59,4 metredir (Şekil 102). Küçük Nilüfer (Little Lotus) olarak adlandırılan halka şeklindeki tenis stadyumu ise yaklaşık 133 m çapındadır ve maksimum yapı yüksekliği 37,9 metredir (ZSSD; Şekil 103).



Şekil 102. Ana stadyum yapı kesiti (URL-17, 2023)

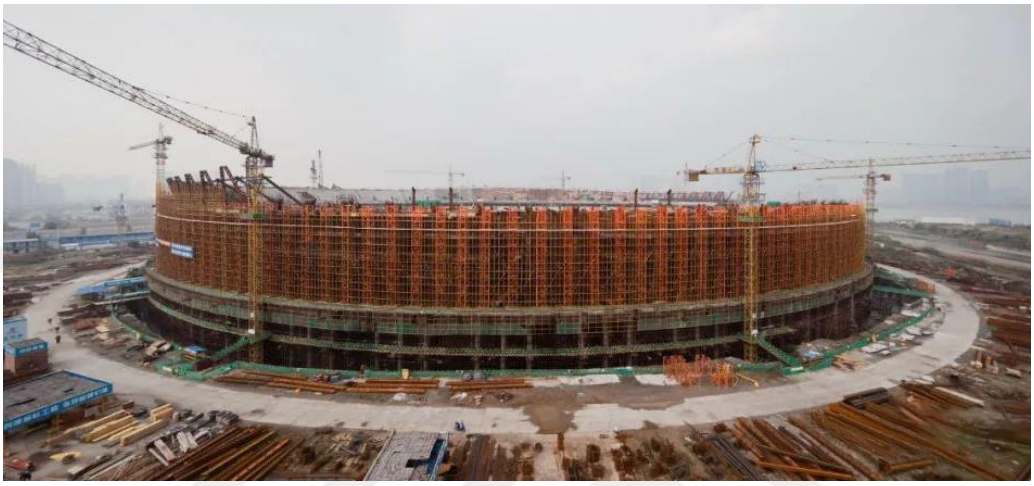


Şekil 103. Tenis stadyumu yapı kesiti (URL-17, 2023)

- Strüktür Tasarımı

Hangzhou Olimpik Spor Merkezi, tasarım ve kurulum aşamasında birçok zorluğa neden olabilecek nilüfer şeklindeki karmaşık bir biçime sahiptir. Projedeki ana stadyum ve

tenis stadyumu, betonarme çerçeve sistem ve çelik uzay kafes strüktür olmak üzere iki ayrı taşıyıcı sistemden oluşmaktadır (Şekil 104, Şekil 105, Şekil 106). Tasarıma nilüfer şeklini verebilmek için birbirinden ayrı görülen fakat bir bütün olarak inşa edilmiş olan heykelsi çelik uzay kafes modülleri kullanılmıştır. Sistemin uyum içinde çalışabilmesi için betonarme ve çelik uzay kafes strüktür her seviyede birbirine bağlanmıştır (Zhang ve Luo, 2017).

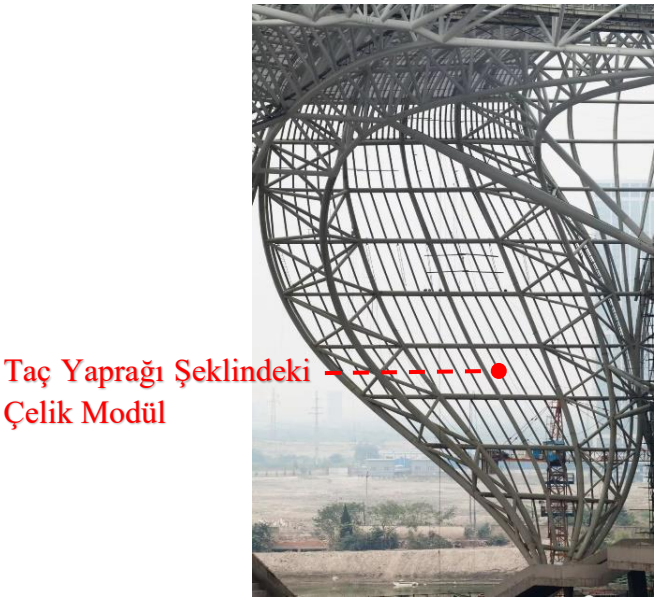


Şekil 104. Betonarme yapının oluşturulması (ana stadyum)

Şekil 105. Çelik uzay kafes ve betonarme strüktür (ana stadyum, inşaat aşaması)

Şekil 106. Yapı konstrüksiyonu (tenis stadyumu)

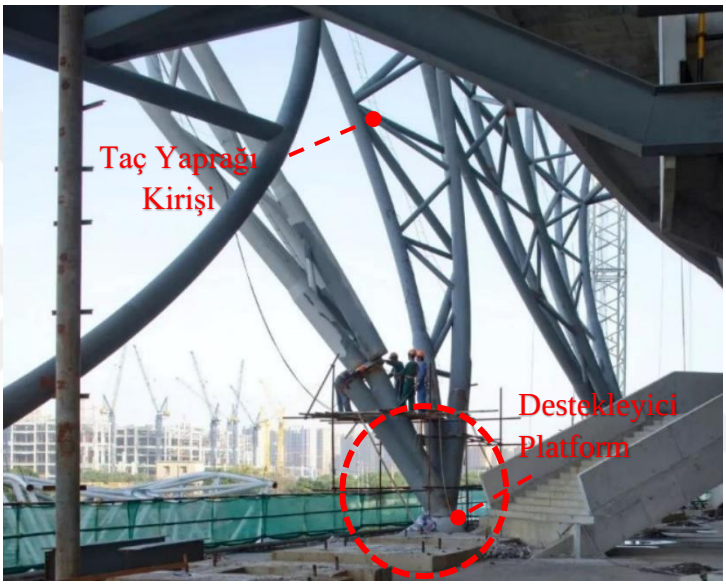
Ana stadyum 28'i büyük ve 28'si küçük olmak üzere toplam 56 çelik modülden oluşmaktadır (Şekil 107). Bu karmaşık biçimli tasarımda istenilen geometriyi oluşturabilmek, optimize edebilmek ve kullanılan çelik miktarını azaltabilmek için parametrelere bağlı hesaplamalı tasarım tekniği kullanılmıştır (URL-19). Böylece yapıda 26.000 ton çelik kullanılmıştır. Bu da, tipik bir stadyumda kullanılacak çeliğin yarısına eşittir. Tenis stadyumu ise 24 adet eşit çelik yapraktan oluşmaktadır. Ayrıca çatının üst kısmın 8 ayrı modülden oluşan açılıp kapanabilen bir çatı mevcuttur (Miller, 2011).



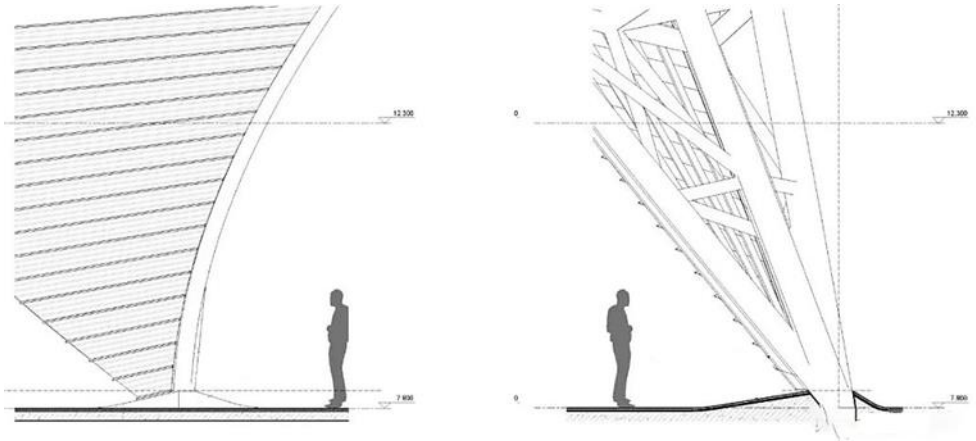
Şekil 107. Büyük çelik modül (ana stadyum; URL-68)

Ana stadyumda, “taç yaprağı” olarak adlandırılan modüllerden oluşan kanopi, karmaşık çelik uzay kafes strüktürden oluşmaktadır ve destekleyici platformlar ile üst ve alt noktalardan mesnetlenmiştir (Şekil 108, Şekil 109). Destekler ile kanopi arasındaki bağlantı, kaynaklama ile oluşturulmuştur (ZCG, 2021).

Heykelsi taç yapraklarının çevrelediği dairesel strüktürün maksimum genişliği 68 m ve ana kirişin konsol uzunluğu 52,5 metredir (URL-16). Modüllerden en büyüğü 839 ton ağırlığındadır. Bu modüller, 1,5 m × 2,2 m değişken kesitli bir iç halka kirişe bağlanmıştır. Halka kirişin üst çubuğunun yerden yüksekliği yaklaşık 42 metredir (ZCG, 2021).

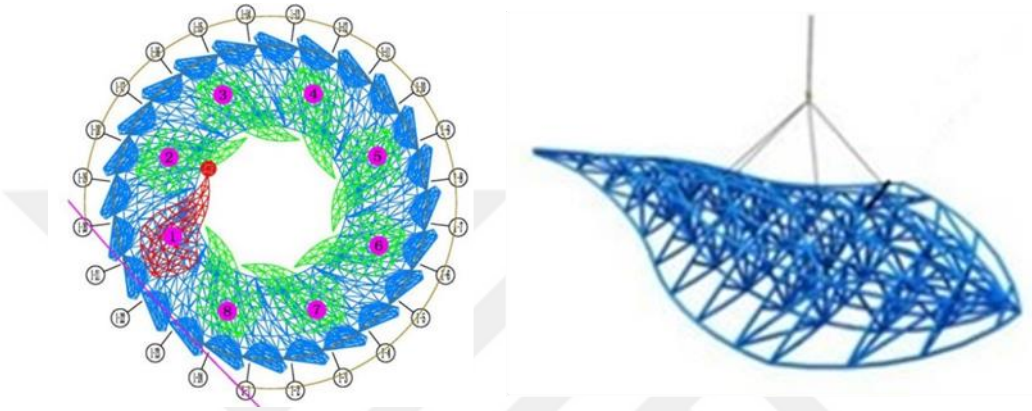


Şekil 108. Alt mesnet ile yaprak modülün arasındaki bağlantının yapılması (ana stadyum; URL-68)

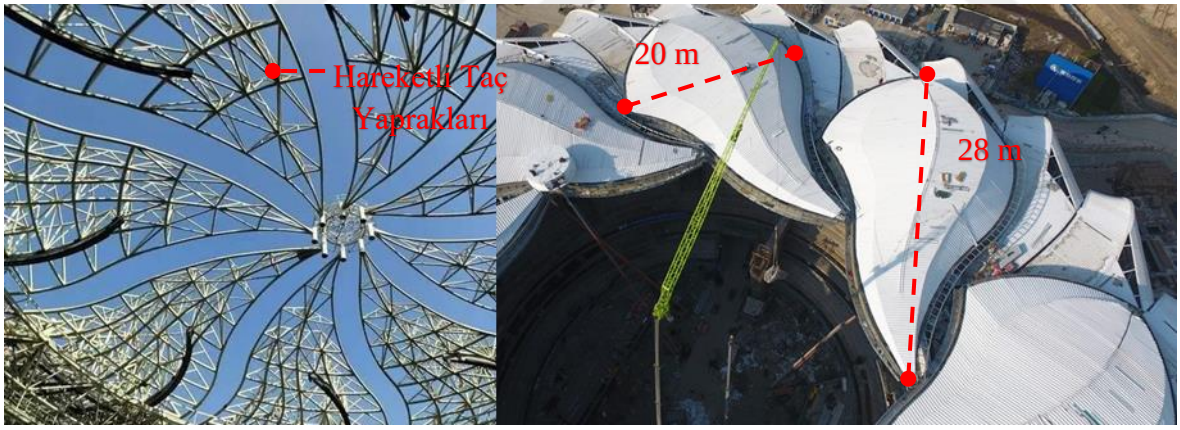


Şekil 109. Platform ile çelik modül arasındaki şematik diyagram (ana stadyum; URL-68)

Tenis stadyumundaki açılıp kapanabilir çatıdaki bağımsız olarak dönebilen her taç yaprağı yaklaşık 28 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindedir (Şekil 110). Her bir yaprak 8 ton ağırlığındadır. Çatının açılıp kapanabilmesini sağlayan hareketli yay, sabit çelik kafes kirişlerin üst çubuğuna yerleştirilmiştir. Bu hareketli çatının açılıp kapanabilmesi yaklaşık 15 dakika sürmektedir (Miller, 2011; Şekil 111). Ek olarak bu çatı, Zheijang Southeast Grid tarafından imal edilmiş ve kurulmuştur (ZCG, 2021).



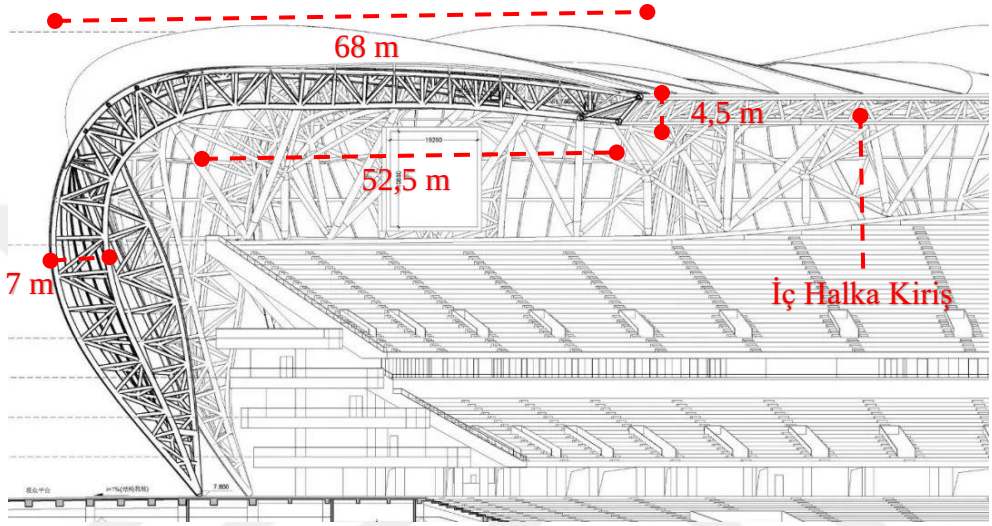
Şekil 110. Hareketli çatı strüktürü montaj sıralaması (tenis stadyumu)



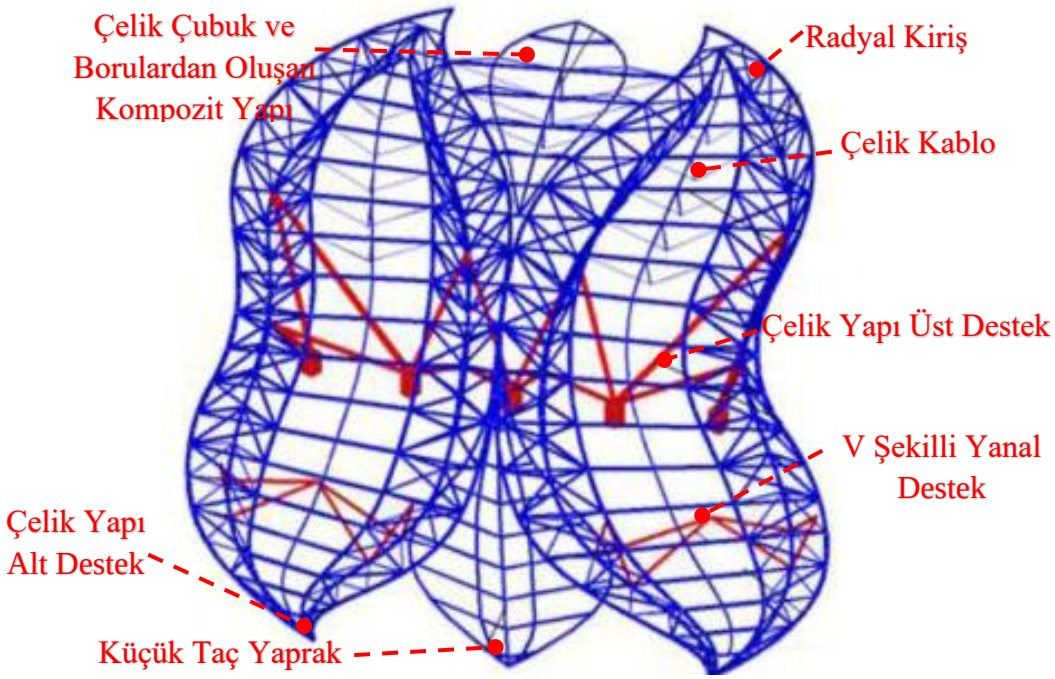
Şekil 111. Hareketli çatı (tenis stadyumu)

Ana stadyumda bulunan her bir taç yaprağı, tek katmanlı uzay kafes strüktür ve dairesel çelik borulardan oluşan ters üçgen şeklinde çift katmanlı uzay kafes kirişten oluşmaktadır. Yapraklarda bulunan uzay kafes kirişin maksimum yüksekliği 7 metredir ve konsolun ucunda 4,5 m kadardır (Şekil 112). Ana kafes kirişler arasındaki yapı, ana kirişler tarafından desteklenen çelik kablolarla güçlendirilmiş tek katmanlı uzay kafes strüktürdür. Çelik kablodan oluşan destek yapısı, ortasında bir payanda bulunan Φ30 çelik kablo

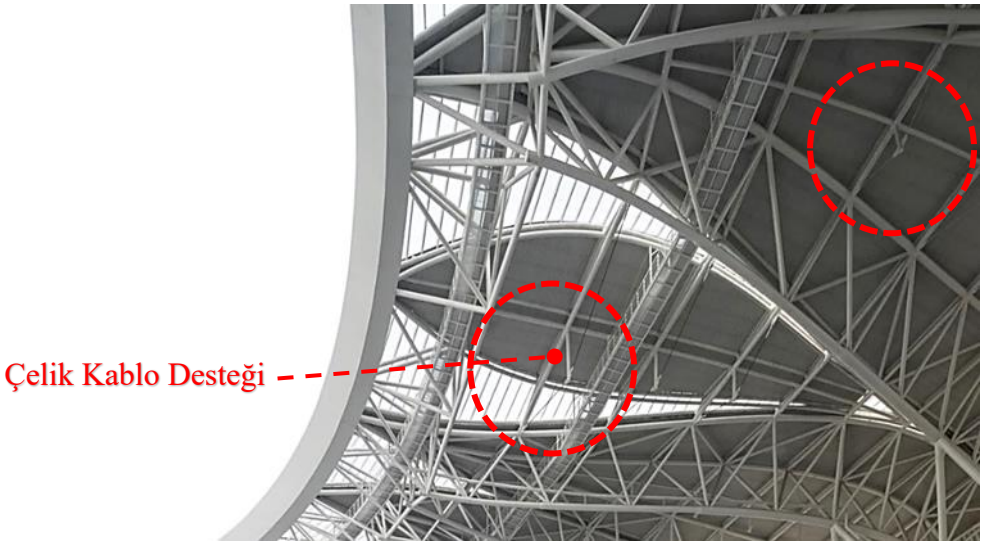
elemanlardır. Çatıdaki küçük taç yapraklar ise yine çelik kablolar ve çelik çubuklardan oluşan kompozit bir yapıya sahiptir. Çelik kablo destekler, büyük taç yaprakların ana kirişleri üzerindedir ve destekleyici kablo, Φ5×61 yüksek mukavemetli çelik tellerden oluşmuştur. Küçük yaprakların üst ve alt uçları ortak bir noktada birleşmektedir. Alt uçta buluşan çubuklar beton platform tarafından desteklenmektedir. Üstte birleşen çubuklar ise ana kirişlerin üst çubuğu ile birleşmektedir (Guangen vd., 2014; Şekil 113, Şekil 114).



Şekil 112. Yapı kesiti (tenis stadyumu; URL-68)

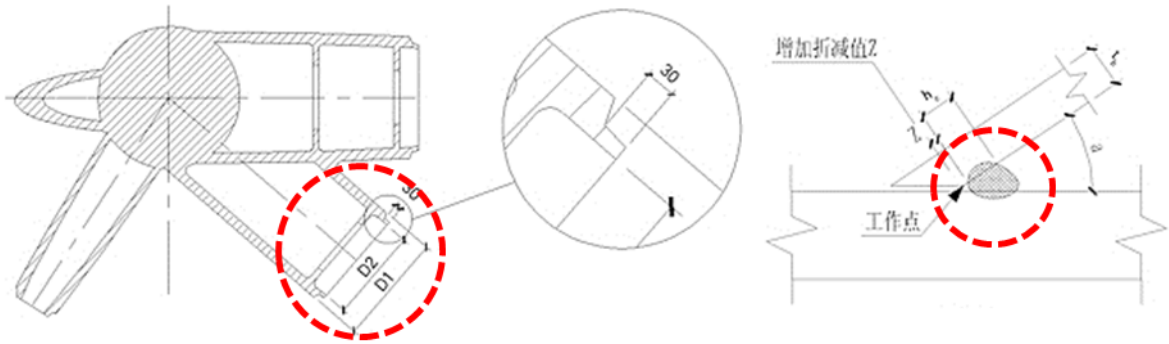


Şekil 113. Büyük ve küçük taç yaprağın birleşimi (ana stadyum)



Şekil 114. Şekil Çelik çatı yapısı (ana stadyum)

İç halka kiriş ile ana taç yaprağının kirişleri bir kesişme noktasına sahiptir. Ayrıca tek katmanlı uzay kafes strüktür ve küçük taç yaprağı da bu iç halka ile kesişmektedir. Bu durum, birçok farklı düğüm noktası ortaya çıkarmıştır. Birden fazla çelik borunun kesişmesinden oluşan karmaşık birleşim noktalarında boruların birleşim açısı oldukça küçük olup minimum açı 7 derecedir. Bu, yapının kuvvet performansını etkilenmesine yol açmaktadır. Bu sorunu çözmek için çok elemanlı düğümlerde, dökme çelik elemanlar kullanılmıştır. Dökme çelik elemanların ve çelik boruların düzgün bir şekilde bağlanmasını sağlamak için tasarım detaylandırılmıştır. Çelik döküm elemanların uçları 30 mm'lik kademeli uzun bir bağlantı olarak yapılmıştır. Buna ek olarak, kaynak açısının küçüklüğü nedeniyle birleşim noktalarını güçlendirmek için iç köşe kaynağı kullanılmıştır (Guangen vd., 2014; Şekil 115).

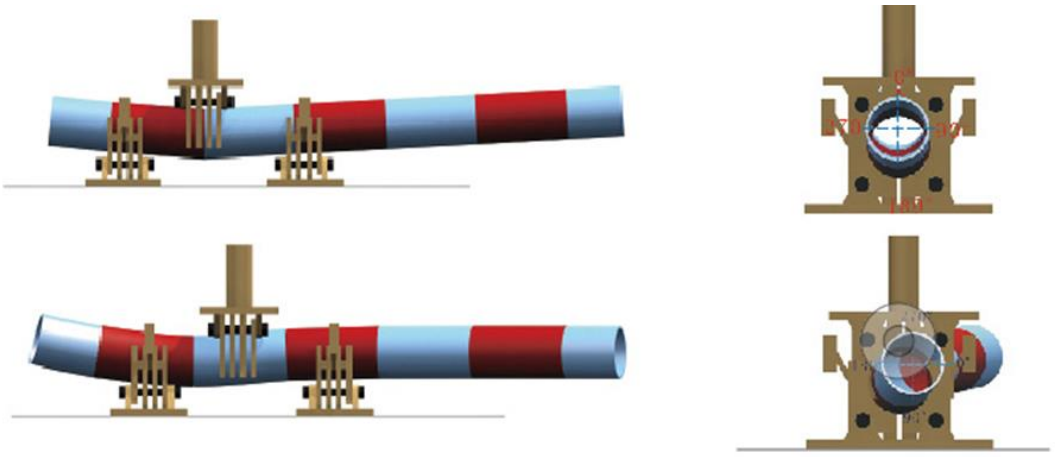


Şekil 115. Dökme çelik eleman ve çelik borularla olan birleşim detayı (sol); iç köşe kaynağı (sağ)

Çelik borular, boruların kalınlığına ve boyutuna bağlı olarak numaralandırılmıştır ve bu sıralamaya göre kaynaklanmaktadır. Birleşim noktalarının doğru bir şekilde kaynaklanması, mekanik performansı ve yerinde montajı etkileyeceğinden oldukça önemlidir (Guangen vd., 2014; Şekil 116).

Şekil 116. Birden çok elemana sahip düğüm noktasının kesişme sıralaması

Ana stadyumda kullanılan çelik borulara istenilen eğriliği verebilmek için iki ayrı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler, boruların eğrilik yarıçaplarına göre belirlenmiştir. Eğrilik yarıçapı R<10 m olan uzaysal eğriler için ara frekans şekillendirme (sıcak bükme) yöntemi, eğrilik yarıçapı R>10 m olan uzaysal eğriler için hidrolik pres şekillendirme (iki taraflı bükme ve şekillendirme) yöntemi kullanılmıştır (Şekil 117, Şekil 118). Ara frekans şekillendirme işleminde çelik borunun bükülecek bölümüne ara frekans akımı verilerek ısıl işlem sıcaklığına ulaşması sağlanır ve daha sonra dış kuvvet etkisi altında şekillendirme işlemi yapılır. Pres şekillendirme işleminde ise çelik eleman belli noktalardan preslenerek şekillendirilir. Daha sonra 90º döndürülerek işlem tekrarlanır (Guangen vd., 2014).

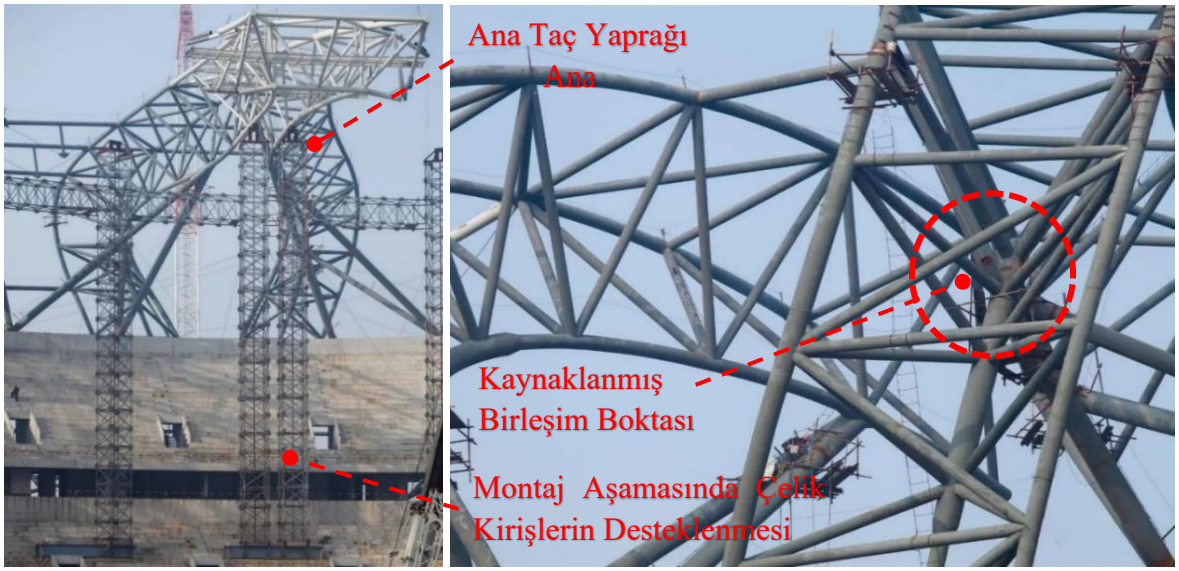


Şekil 117. Çelik borunun şekillendirilmesi ve ardından 90º döndürülmesi

Şekil 118. Hidrolik pres ile çelik boruların bükülmesi

Çelik borular, yukarıdaki iki yönteme göre bükülüp işlendikten sonra kontrol noktası tespiti ile doğrulama yapılmıştır. Hata payı 3 mm içerisinde ise düzeltme işlemi uygulanmamıştır. Bu, çelik borunun bu şekilde değerlendirilebileceği anlamındadır (Şekil 119). Montaj aşamasında yapı elemanları kaldırılırken 650, 400 ve 160 tonluk paletli vinçler kullanılmıştır. İnşaat sırasında kaldırma simülasyonu hesaplaması ve 3B uzay konumlandırma teknolojisi gibi yöntemler kullanılarak inşaat zorluğunun önüne geçilmiştir (Guangen vd., 2014; Şekil 120).

Şekil 119. Kontrol noktaları ile çelik boruların sapma tespiti

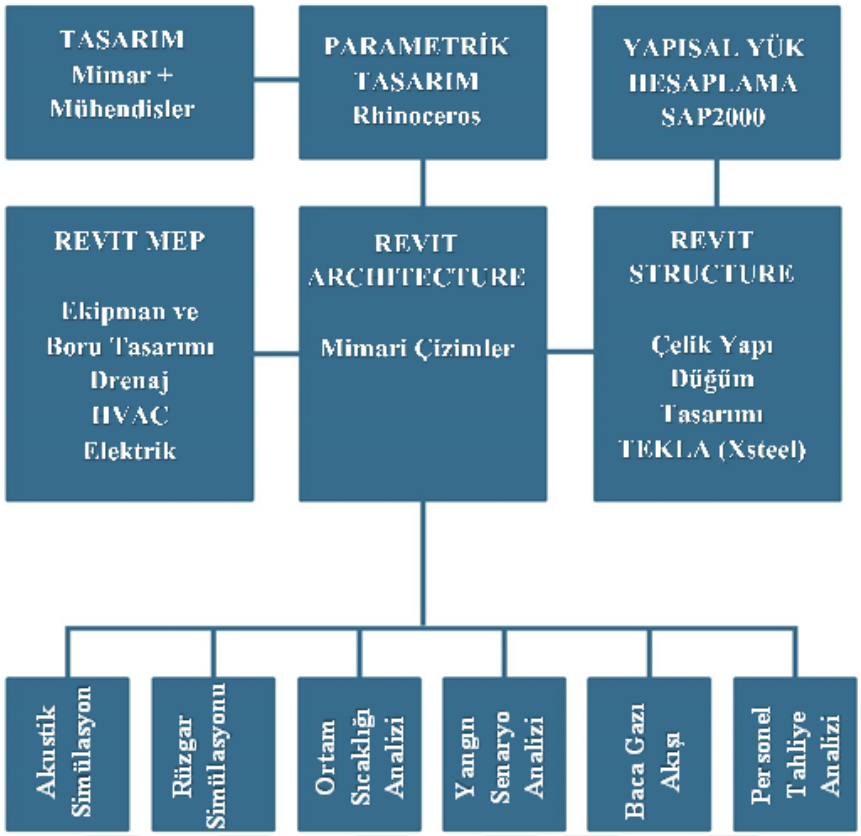


Şekil 120. Çelik strüktürün montajı (sol, ana stadyum); ana taç yaprağı kirişlerinin kaynaklanması (sağ, ana stadyum; URL-68)

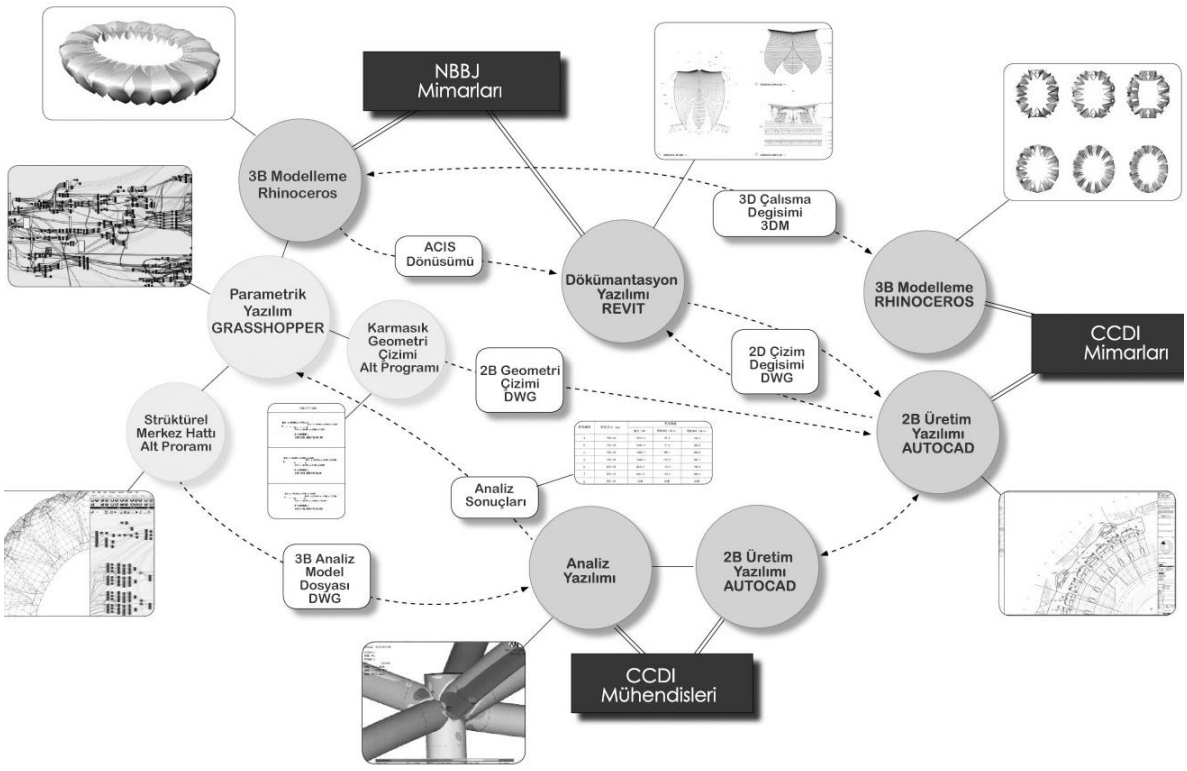
- Hesaplamalı Tasarım

Hangzhou Olimpik Spor Merkezi'ni tasarlayan mühendislik ekibi, tasarımın karmaşıklığı nedeniyle çok geçmeden geleneksel metodolojilerin yetersiz kalacağını fark etmiştir. Her iki tesis de heykelsi kafes kirişlerden oluşan karmaşık bir mimariden oluşmaktadır. Bu sebeple NBBJ; daha az çelik kullanmak, geometriyi kontrol edebilmek, enerji performansını modellemek ve esneklik yaratmak için parametrelere bağlı hesaplamalı tasarım tekniği ve YBM kullanmıştır (Şekil 121). Böylece ilk tasarım modeli, programlama veya komut dosyası oluşturma yoluyla YBM süreci ile uyumlu bir parametrik modele dönüştürülmüştür. Oluşturulan model, parametrik olduğu için stadyumdaki koltuk sayısı, sahadan uzaklıkları ve görüş hattı standartları gibi birçok girdiye kolaylıkla yanıt verebilmektedir. Buna ek olarak projede, temel yapısal davranışları tespit edebilmek için çeşitli fizik simülasyon araçları da kullanılmıştır (Casini, 2021; URL-19).

Proje üzerinde ayrıntılı bir analiz gerçekleştirmek ve bilgilerin yapısal mühendislik ekibine iletilmesini otomatikleştirmek için özel komut dosyaları kullanılmıştır. Belgelendirme sürecini daha sorunsuz bir hale getirebilmek ve disiplinler arası iş birliği için farklı tasarım ve belgelendirme ortamlarını birbirine bağlayan parametrik iş akışı sistemleri oluşturulmuştur (Miller, 2011; Şekil 122).



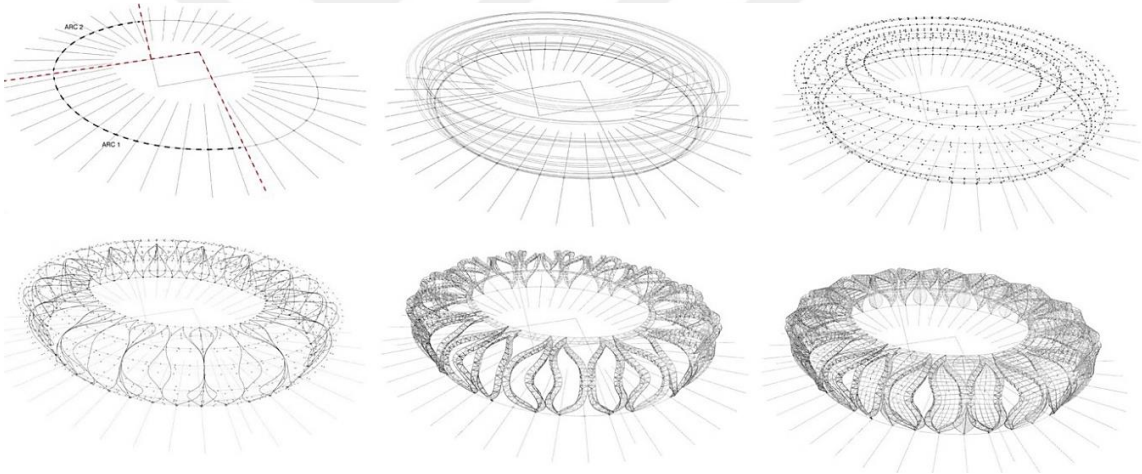
Şekil 121. Çeşitli disiplinlerin kapsamlı çakışma denetimini gerçekleştirebilen YBM modeli



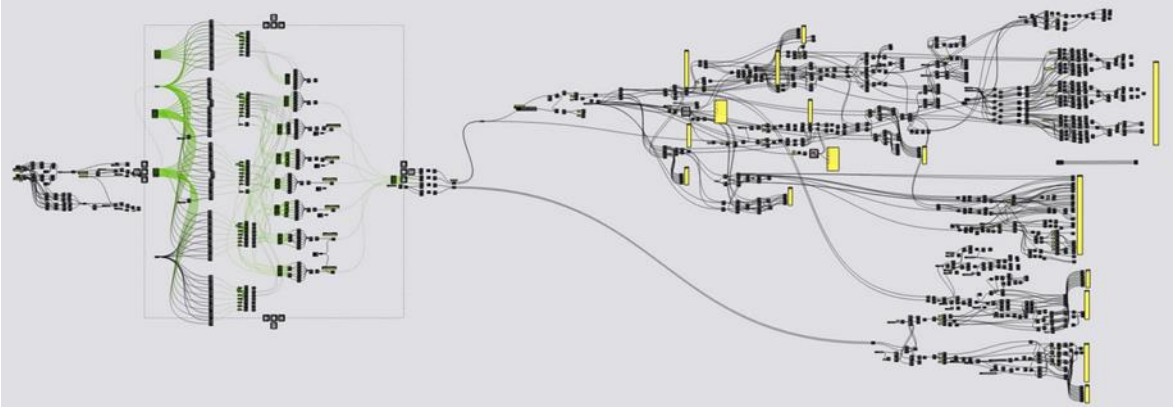
Şekil 122. 2B ve 3B bilgi alışverişi süreçlerini gösteren diyagram (Miller, 2011)

HOSM'un tasarımı birkaç aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle tasarımcıların müdahale edebilecekleri temel geometri tasarlanmıştır. Daha sonra tasarım alternatifleri oluşturabilmek için tasarım yüzeyine önceden tanımlanmış parametreler atanmıştır. Bu alternatifler, bir projeden diğerine farklılık gösteren belirli faktörlere bağlı kriterler üzerinden tasarımcılar tarafından dikkatli ve doğru bir şekilde değerlendirilmektedir. Bununla birlikte faktörler, tipik olarak dört alanla ilgilidir: yapı, inşaat, estetik, çevre (El Shahr, 2016).

Oluşturulan parametrik modellerdeki kontrol yüzeyi geometrisi, biçimsel varyasyonları inceleyebilmek amacıyla NURBS eğrileri ile açık bir şekilde tanımlanmıştır. Her iki yapıda da yapı kabuğu oluşturulurken doğru bir logaritmik tasarım gerçekleştirebilmek için temel olarak Rhinoceros 3D ve Grasshopper yazılımı kullanılmıştır (El Shahr, 2016; Şekil 123, Şekil 124).

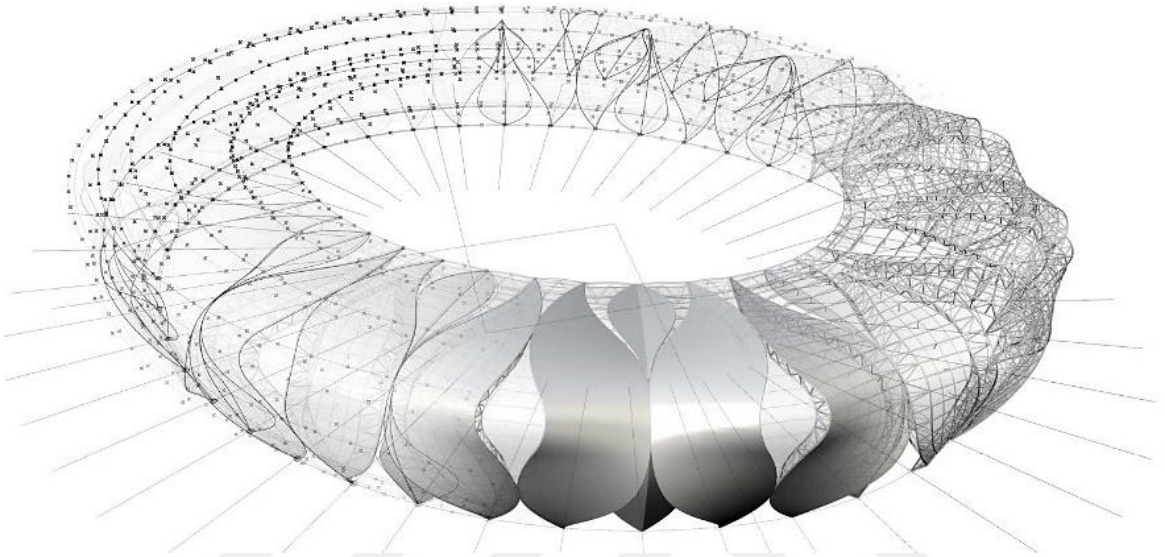


Şekil 123. NURBS eğrileri ile tanımlanan yapı cephesi ve strüktür (Grasshopper; Miller, 2011)



Şekil 124. Ana stadyumun parametrelere bağlı tasarımı (Grasshopper, Miller 2011)

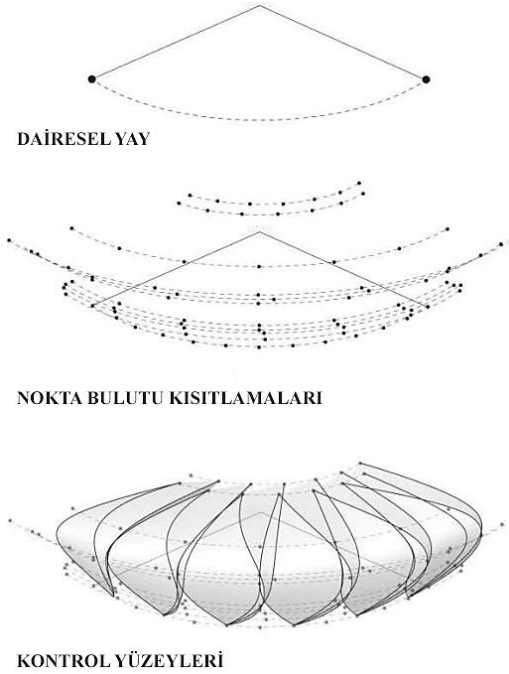
İlk yüzey geometrisi, sonraki aşamalarda yapıya eklenecek karmaşıklıklara karşı bir kısıtlama görevi görmüştür. Cephedeki modüler sistem, yüzeyin kenar eğrilerini tanımlamak için kontrol noktaları görevi görecek bir nokta bulutu sistemi kurularak parametrik olarak tanımlanmıştır (Miller, 2011; Şekil 125).



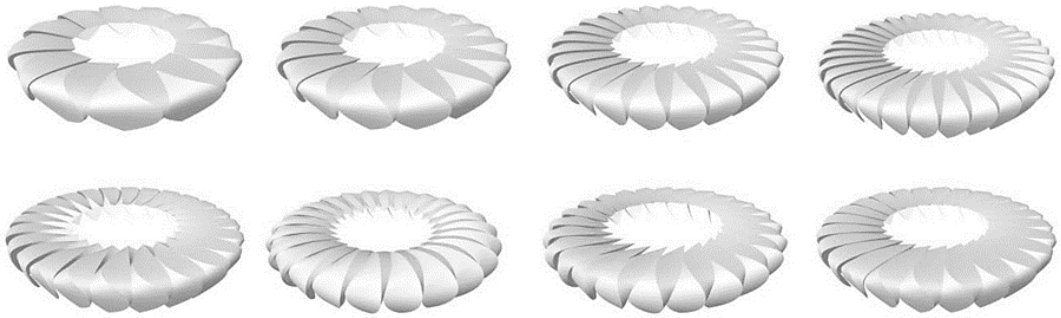
Şekil 125. Dış kabuğu tasarlamak için kullanılan Grasshopper algoritması (Miller, 2011)

Tenis stadyumunun simetrik yapısı nedeniyle yapı kabuğu tasarlanırken kabuğun yalnızca çeyreği hesaplanmıştır. Bu durum, çok daha hızlı yinelemelere izin vermiş ve sistemin hesaplama performansını iyileştirmiştir (Miller, 2011).

Dış cephe tasarlanırken, oluşturulan nokta bulutunun parametrik kontrolü, biçimin istenilen şekilde kontrol edilebilmesini sağlamıştır (Şekil 126). Nokta bulutunu manipüle etmeye yönelik sıralama ve dönüştürme gibi parametreler, tasarım ekibinin yüzeyin farklı varyasyonlarının oluşturabilmesini sağlamıştır. Böylelikle tasarıma yönelik farklı konfigürasyonlar incelenebilmiştir (Şekil 127). Değerlendirmenin çoğu estetik kaygıyla yapılsa da yapısal performans, teknik sistemler, gölge gibi etkenler son forma ulaşmada dikkate alınmıştır (Miller, 2009).



Şekil 126. Dış kabuğun geometrisini tanımlanması (Miller, 2011)

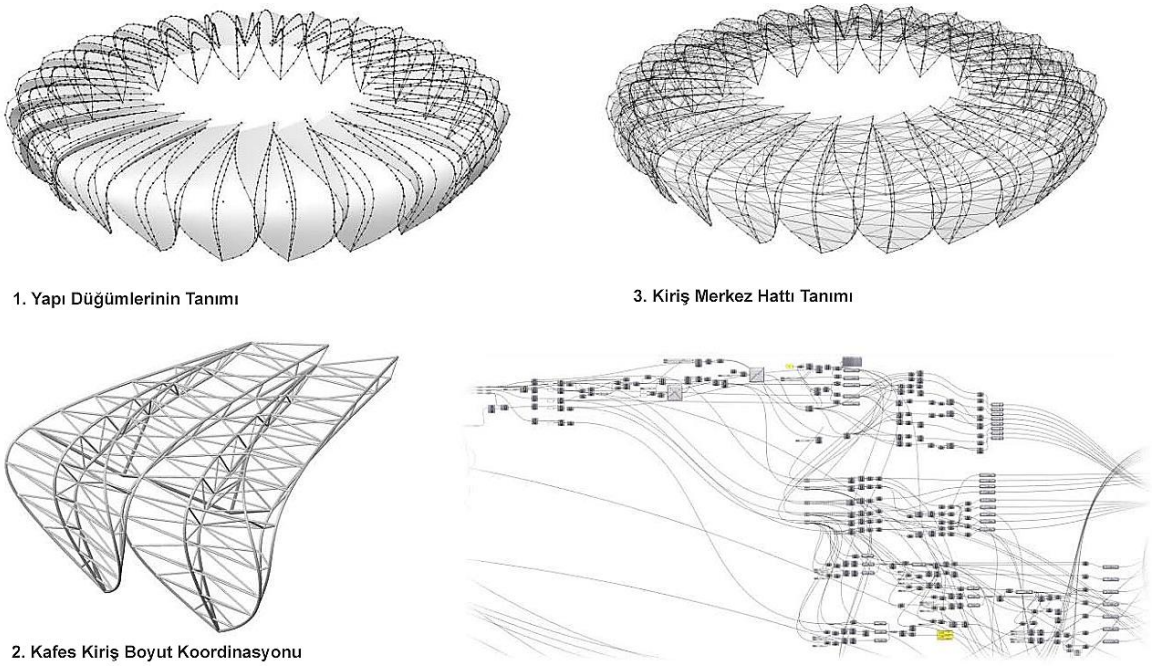


Şekil 127. Parametrik tasarım kullanılarak oluşturulan varyasyonlar (tenis stadyumu; Miller, 2011)

Form ve yapı arasındaki yakın ilişki tasarım ekibi ile yapı mühendislerinin iş birliği içinde çalışmasını gerektirmektedir. NBBJ, 3B çelik modeli koordine etmek için CCDI yapısal mühendislik ekibiyle birlikte çalışmıştır. Taç yaprağındaki kafes kiriş hattı modeli, parametrik olarak kontrol edilebilir kurallı yüzey geometrisi boyunca yapılandırılmıştır. Bununla birlikte yapısal eleman aralığı ve kiriş derinliği üzerinde kontrol sağlayabilmek için parametreler oluşturulmuştur (Miller, 2011).

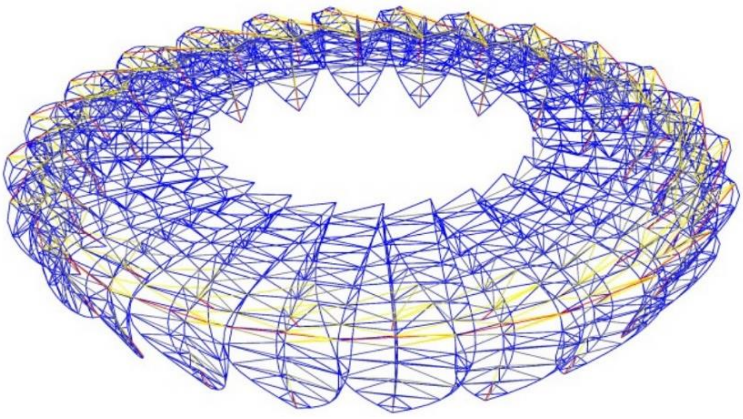
Hesaplamalı tasarım araçları kullanılarak optimize edilen sistemde, çelik ve beton uyum içinde çalışmaktadır. Bağlantı noktaları parametreler tarafından değiştirildikçe taç yapraklarından oluşan uzay kafes çelik strüktür de sisteme göre uyarlanmıştır. Böylece çelik kullanımı da 2/3 oranında düşürülmüştür (Casini, 2021; Lu, Wang, Shi, 2014).

Mühendislerin yapısal bir analiz gerçekleştirebilmesi için Grasshopper yazılımı kullanılarak analiz yazılımının toleranslarıyla uyumlu bir kafes kiriş yapısının oluşturulması sağlanmıştır. Grasshopper'a eklenmiş alt program, B-spline geometrisini segmentlere ayırarak mimari geometrideki tüm bağlantıların düğüm noktalarında hizalanmasını sağlamıştır (Miller; 2010; Şekil 128). Bu yöntem bazı küçük istisnalar dışında, mühendisliğe özgü bir modelin yeniden oluşturulmasıyla oluşan geri dönüş süresini ortadan kaldırılmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca mühendislerin hesaplamalarına göre modelde hızlı bir şekilde değişiklik yapılabilmektedir (Miller, 2011).



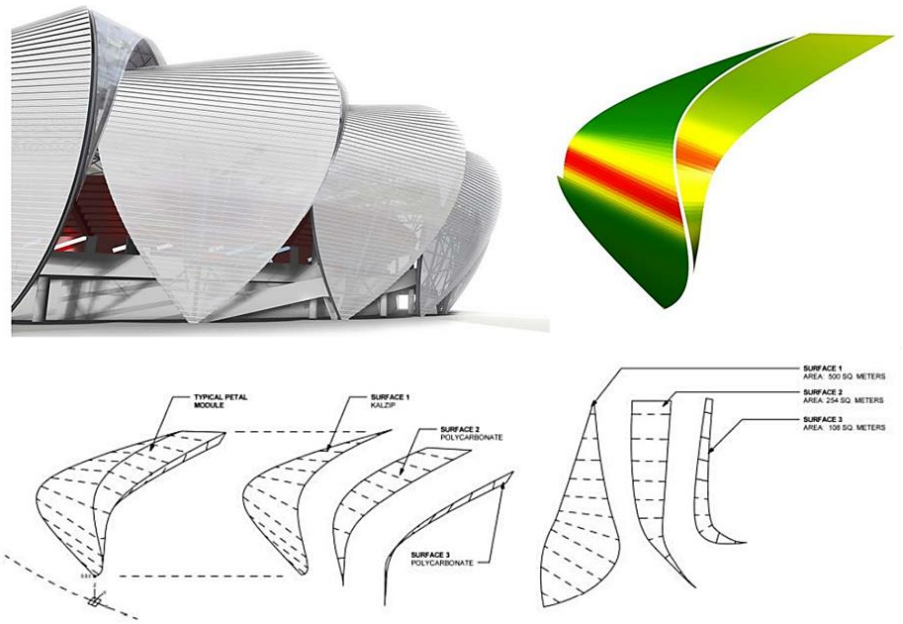
Şekil 128. Yapısal parametrik tasarım modeli (Rhinoceros, Grasshopper; Miller, 2009)

Yapı ekibi, yapısal sistemleri tasarlamak için kapsamlı bir analiz gerçekleştirebilmek amacıyla Grasshopper algoritmasına yerçekimi yükünü görselleştirebilen Kangroo Fizik Motoru (Kangroo Physic Engine) gibi ek fonksiyonlar eklenmiştir. Deneysel fizik motoru, çelik kafes yapı üzerindeki yerçekimi kuvvetinin yapı boyunca nasıl hareket ettiğinin simüle edilebilmesini sağlamıştır (Şekil 129). Ek olarak bu yazılım maksimum gerilim alanlarındaki çekme ve sıkıştırma kuvvetlerini görselleştirebilmektedir. Bu yeteneğin tasarım aşamasında modele eklenmesi ile tasarım ekibinin daha bilinçli kararlar almasına ve yapı ekibiyle birlikte tasarımın derinleştirilmesine olanak sağlamıştır (Miller, 2011).



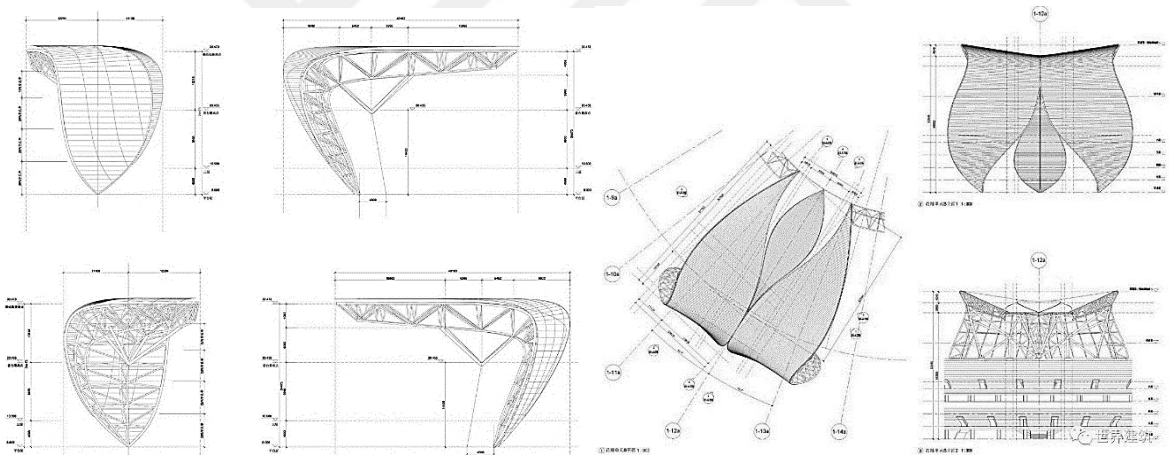
Şekil 129. Kafes kiriş merkez hattı modelinde yerçekimi yüklemesinin görselleştirilmesi (Kangroo fizik motoru)

Oluşturulan geometrideki eğrisel alanları görselleştirebilmek ve hesaplamak için bir çeşit yüzey analizi de parametrik algoritmaya entegre edilmiştir. Taç yapraklarının kurallı yüzeyi, UV koordinatları kullanılarak panellere ayrılmıştır. Panel ek yerlerinin, boşlukların ve perforasyon oranlarının görsel görünümünü iyileştirmek için kaplama sistemi parametrik olarak modellenmiştir (Miller, 2011; Şekil 130). Yapının kaplanması için ayrıntılı bir panel kenet sistemi oluşturulmuştur ve tahmini malzeme miktarı, algoritmalar ile tespit edilmiştir. Ayrıca bu yazılımlardan alınan panellere ait veriler, G kodu halinde hassas bir CNC makinesine aktarılarak bu panellerin dijital olarak üretilmesi sağlanmıştır (El Shahr, 2016).



Şekil 130. Panel kiriş formunun yüzey analizi ve kaplaması (Miller, 2011)

Tasarımın geliştirme aşamasında oluşturulan geometrilerin, belgelenerek dışarıya aktarılması gerekmektedir. Grasshopper algoritmasının, geometrik geliştirme ve yapısal tasarım için temel bir araç olmasının yanısıra diğer hesaplamalı tasarım araçlarıyla olan koordinasyonu da kolaylaştırılmasını sağlamıştır. 3B modelin, 3B DWG dosyaları olarak dışa aktarılabilmesini sağlayan özel komut dosyaları oluşturulmuştur. Böylece diğer yazılımlar en güncel bilgileri kullanabilmektedir. Tasarım ekibi bu yöntemi 3B verileri Revit modeline çevirmek için kullanmıştır. Revit, 2B ortografik çizimleri belgelemek için kullanılmıştır (Miller, 2011; Şekil 131). Bununla birlikte Revit'te üretilen geleneksel plan, kesit ve cephe ile ilgili belgelerin karmaşık geometriyi tam olarak tanımlayamadığı ortaya çıkmıştır (Miller, 2010). Ek olarak proje sürecinde, projedeki diğer sistemler ile strüktür arasındaki çakışmayı test edebilmek için Naviswork, taç yapraklarının rüzgar dayanımını ölçmek için WIN3D ve yapısal yüklerin hesaplanmasını sağlayan SAP2000 gibi çeşitli yazılımlar da kullanılmıştır.

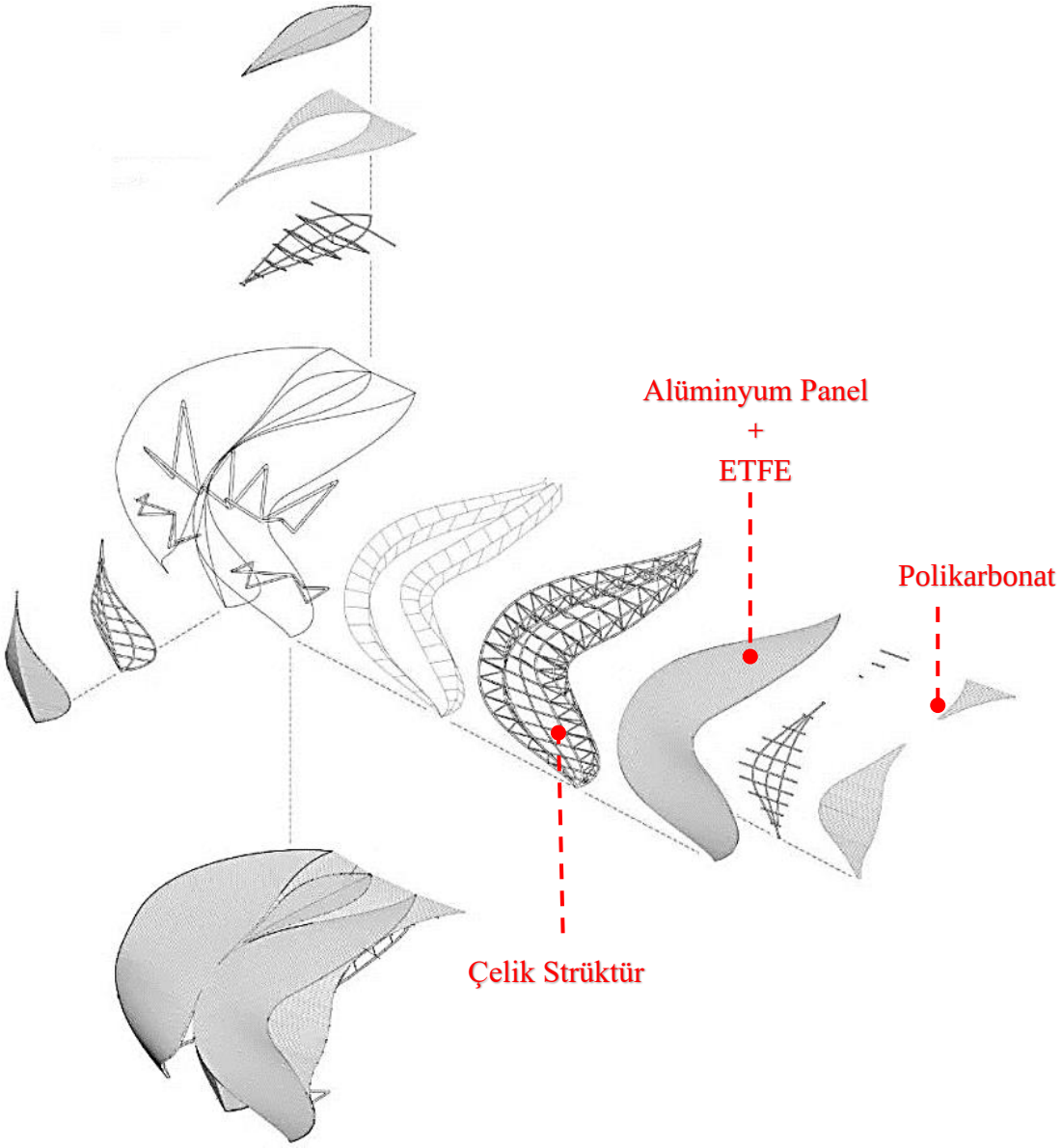


Şekil 131. Grasshopper ve Revit Architecture çizimlerinin kombinasyonu (URL-68)

- Cephe Tasarımı

Hangzhou Olimpik Spor Merkezi'nde kullanılan cephe taç yapraklarını oluşturan strüktür ile bir bütün halindedir ve yapı formunu çelik strüktür oluşturmaktadır (Şekil 132). Stadyumlar, benzer dış cephe malzemesi ile kaplanmıştır. Ana stadyumun taç yaprakları için alüminyum-magnezyum-mangan dik kenetli metal çatı panelleri, çatının üst kısmında ise gün ışığının değişmesiyle farklı ışık açıları elde etmek ve yapı cephesinin görünümünü hafifletmek için şeffaf bir görünüme sahip polikarbonat paneller kullanılmıştır. Ayrıca

alüminyum panellerin üzeri ince ve şeffaf bir yapıya sahip ETFE membran ile kaplanmıştır (URL-16). Perforesiz alüminyum çatı panelleri yaklaşık 43.000 m², perforeli paneller 32.000 m², polikarbonat çatı panelleri ise 14.000 m²'lik bir alanı kaplamaktadır (URL-20). Toplam cephe alanı 75.000 m²'dir. Tenis stadyumunda ise alüminyum panellerle birlikte PTFE membran kullanılmıştır. Toplam cephe alanı ise 5.662 m²'dir (URL-21; Şekil 133).



Şekil 132. Cephe katmanları (ana stadyum; URL-68)

Şekil 133. Ana stadyumun cephesi (sol); tenis stadyumunun cephesi (sağ; URL-20)

Projede kullanılan alüminyum levhalar, Novelis Inc. Tarafından; ETFE ve PTFE membranlar ise Beijing N&L Fabric Technology tarafından üretilmiştir. Ayrıca ana stadyumda kullanılan polikarbonat çatı panellerini Palram Industries üretmiştir (Şekil 134).

Şekil 134. Panel montajı (Tenis stadyumu)

Stadyumların cephesinde kullanılan alüminyum panellerin sayısı ve miktarı parametrik model sayesinde belirlenmiştir. Buna ek olarak, bu paneller parametrik modelden alınan veriler ile hassas bir CNC makinesinde kesilmiştir ve preslenerek panellere şekil verilmiştir (El Shahr, 2016). Bu şekilde üretilen her bir panel, özel bir kenet sistemi ile cepheye monte edilmiştir. Paneller arasındaki boşluğu kapatmak ve cephe görünümünü daha yumuşak bir hale getirmek için cephe, ETFE ve PTFE membranlar ile kaplanmıştır. Cephede kullanılan önceden boyanmış alüminyum paneller 1,2 mm kalınlığındadır ve yaklaşık 400 metrik ton ağırlığındadır. Alüminyum-magnezyum-mangan alaşımından oluşan paneller geleneksel alüminyum alaşımlara göre daha büyük bir yüzey alanını kaplayacak şekilde

üretilebilir ve bu tip bir alaşımda ağırlık, birim yüzey alanı başına 1/3 oranında azalmaktadır (URL-22). Cephede kullanılan en büyük membran yaklaşık 25 m², en küçük membran ise 1 m²'dir (URL-21; Şekil 135).

Şekil 135. Alüminyum panel ve ETFE montajı (ana stadyum; URL-20)

Ana stadyumdaki şeffaf yüzeyler için kullanılan polikarbonat çatı panelleri 310 kg/m²'lik rüzgar yüküne dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bazı levhaların uzunluğu 18 metreden daha fazladır. Bu sebeple bu panelleri taşıyabilmek için ahşaptan yapılmış özel kasalar tasarlanmıştır (Şekil 136). Bu paneller, T kesitli alüminyum bağlantı elemanları ile çatıya bağlanmıştır. Panel kalınlığı 20 mm kadardır ve ana stadyum çatısının 15.000 m²'lik alanını kaplamaktadır (URL-23; Şekil 137).

Şekil 136. Şeffaf polikarbonat panellerin taşınması (URL-23)

Şekil 137. Şeffaf polikarbonat panel montajı (ana stadyum)

- Sürdürülebilirlik

Hangzhou Olimpik Spor Merkezi, parametreler kullanılarak hesaplamalı olarak tasarlanmıştır. Bu, yapıda diğer stadyumlara kıyasla %60 daha az çelik kullanılmasını sağlamış ve böylelikle binanın mümkün olduğu kadar hafif olmasını sağlamıştır. Ayrıca hesaplamalı tasarım, malzeme israfını önlemiş ve yapıların karbon ayak izini azaltmıştır (URL-19).

Stadyumu çevreleyen alanda, açık renkli yüzeyler, zemin altı park alanları ve yeşil alanlar kullanılmıştır. Bu çevre düzenlemesinin, su akışının azaltılmasına ve kentsel ısı adası etkisinin önlenmesine yardımcı olmuştur. Bununla birlikte projede, yağmur suyu toplama teknolojisi kullanılmıştır. Ek olarak projede kullanılan güç tasarruflu aydınlatma sistemi sayesinde sera gazı emisyonlarının azaltılması sağlanmıştır. Cephede kullanılan malzemelerin uzun hizmet ömrü ve kendi kendini temizleyebilme performansı ile çevre üzerinde olumlu katkı sağlanmıştır (URL-16, URL-24).

2.2.5. Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi

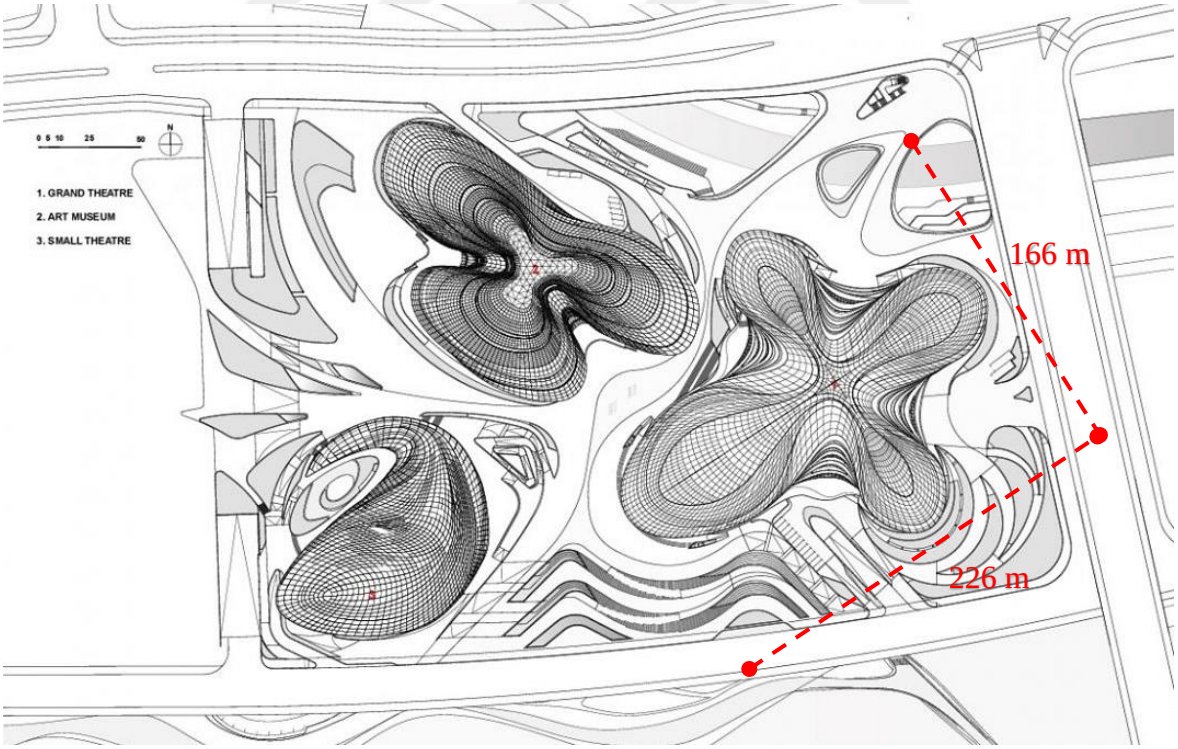
Tablo 6. Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi yapı künyesi

<table>
<tr><td rowspan="8">Kimlik</td><td>Yapı Adı</td><td colspan="5">CHANGSHA MEIXIHU ULUSLARARASI KÜLTÜR VE SANAT MERKEZİ
(Changsha Meixihu International Culture and Art Centre)</td></tr>
<tr><td>Yapı Tasarımı</td><td colspan="5">ZHA, Patrik Schumacher</td></tr>
<tr><td>Yapının Yeri</td><td colspan="5">Changsha Shi, Çin</td></tr>
<tr><td>Yapım Yılı</td><td colspan="5">2013-2019</td></tr>
<tr><td>Yapı İşlevi</td><td colspan="5">Kültür Merkezi</td></tr>
<tr><td>Yapı Boyutları</td><td colspan="2">Alan:
115.000 m²</td><td colspan="2">Yükseklik:
52,12 m</td><td>Genişlik: 226-166 m (Büyük Tiyatro)</td></tr>
<tr><td>Ödüller</td><td colspan="5">London Design Awards 2020 Gold Prize, Çin Çelik Yapı Altın Ödülü, The Plan Award 2020 (Finalist, Kültür), Light Design Awards - Exterior Architectural Illumination, WA Awards</td></tr>
<tr><td>Maliyet</td><td colspan="5">$ 390,000,000</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Strüktür</td><td>Strüktür Mühendisi</td><td colspan="5">Beijing Architecture Design and Research Institute, Buro Happold</td></tr>
<tr><td>Strüktür Üreticisi</td><td rowspan="3">HT</td><td colspan="4">Hunan YongLingYi Steel Trading</td></tr>
<tr><td>Strüktür Malzemesi</td><td>Çelik</td><td rowspan="2">TS</td><td colspan="2">Beton</td></tr>
<tr><td>Strüktür Türü</td><td>Uzay kafes strüktür</td><td colspan="2">Betonarme Çerçeve Strüktür</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Cephe</td><td>Cephe Tasarımı/ Müh.</td><td colspan="5">ZHA / Newtecnic (İngiltere), PFT Construction Consulting (Shangai, Çin)</td></tr>
<tr><td>Kaplama M. Üreticisi</td><td colspan="5">Nanhjing Beilida New Material System Engineering</td></tr>
<tr><td>Kaplama Malzemesi</td><td colspan="5">GFRC panel, cam</td></tr>
<tr><td>Yüzey Boyutu</td><td colspan="5">126.012,59 m²</td></tr>
<tr><td rowspan="3">HT</td><td>HT Tekniği</td><td colspan="5">Parametrik Tasarım</td></tr>
<tr><td>HT Araçları</td><td colspan="5">Tekla Structures, Revit, Digital Project 3D (Gehry Technologies), Rhinoceros 3D, Grasshopper, Navisworks, Trimble Connect, TreUo</td></tr>
<tr><td>Sayısal Üretim Teknikleri</td><td colspan="5">CNC boru bükme makinesi, CNC levha haddeleme makinesi, CNC frezeleme makinesi</td></tr>
<tr><td>YAPI GÖRSELİ</td><td colspan="6"> </td></tr>
</table>

- Genel Bilgiler

Zaha Hadid Architects tarafından tasarlanan Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi'nin (CMUKM) inşaatına 2013 yılında başlanmış ve inşaat 2019 yılında tamamlanmıştır. Çin'in Changsha Shi şehrinde bulunan CMUKM'nin strüktür mühendisliğini Pekin Mimari Tasarım ve Araştırma Enstitüsü yapmıştır. Ayrıca, projenin yarışma aşamasındaki strüktür mühendisliği Buro Happold tarafından yönetilmiştir. Cephe mühendisliği ise Newtechnic (İngiltere) ve PFT Construction Consulting (Shangai, Çin) tarafından gerçekleştirilmiştir (URL-25).

CMUKM, dışarıdan bakıldığında Ebegümeci çiçeğini andırmaktadır ve üç ayrı kütleden oluşmaktadır. Bunlar; 1.800 kişilik büyük tiyatro, 500 kişilik çok işlevli küçük tiyatro ve 10.000 m²'den fazla sergi salonu alanına sahip bir çağdaş sanat müzesidir. Bu birbirinden farklı 3 kütleden oluşan projenin toplam alanı 115.000 m²'dir (URL-26; Şekil 138).

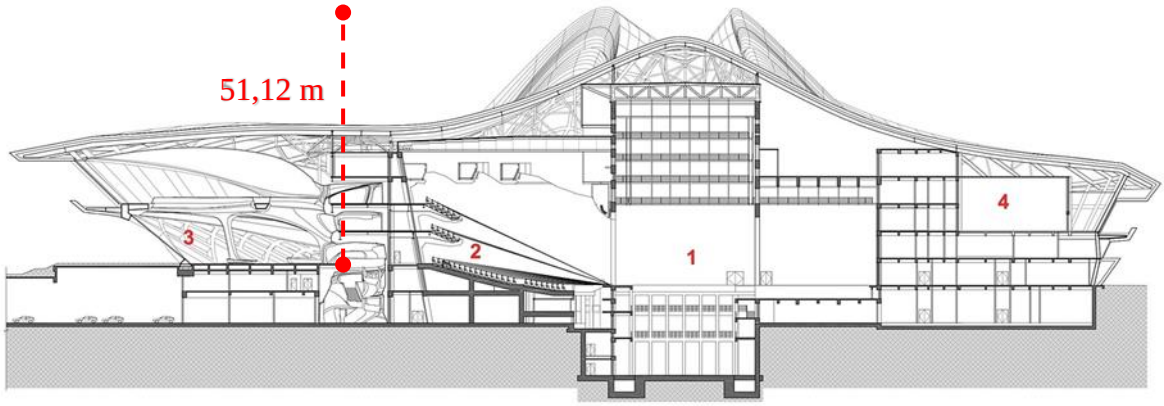


Şekil 138. CMUKM vaziyet planı (ZHA, 2020 Ocak)

Projedeki karmaşık mimari şekiller, tasarım ve inşaat sürecini de karmaşıklaştırmıştır. Projenin strüktürü, betonarme ve çelik olmak üzere iki ayrı sistemden oluşmaktadır (Şekil

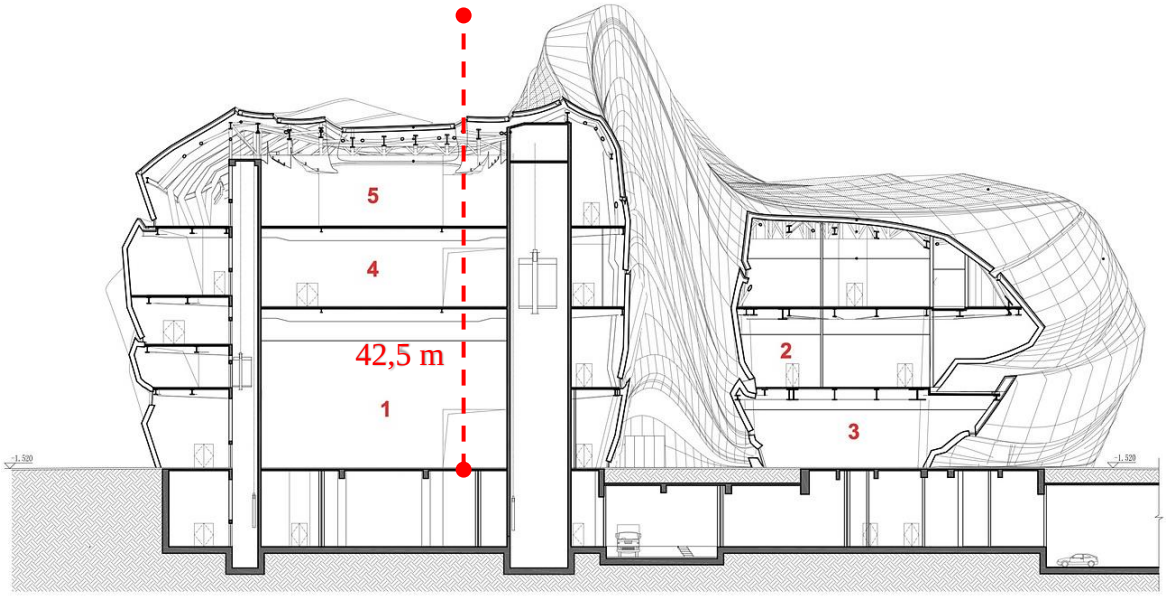
139). Böylesine büyük karmaşık bir formu oluşturabilmek için birçok açıdan avantajlı olan çelik ilk tercih olmuştur (ZHA, 2020). Birbirinden ayrı 3 kütlenin de kaplama malzemesi GFRC panel ve cam kombinasyonundan oluşmaktadır (Watts, 2016; Jie ve Taiyun, 2013).

Şekil 139. CMUKM yapı konstrüksiyonu

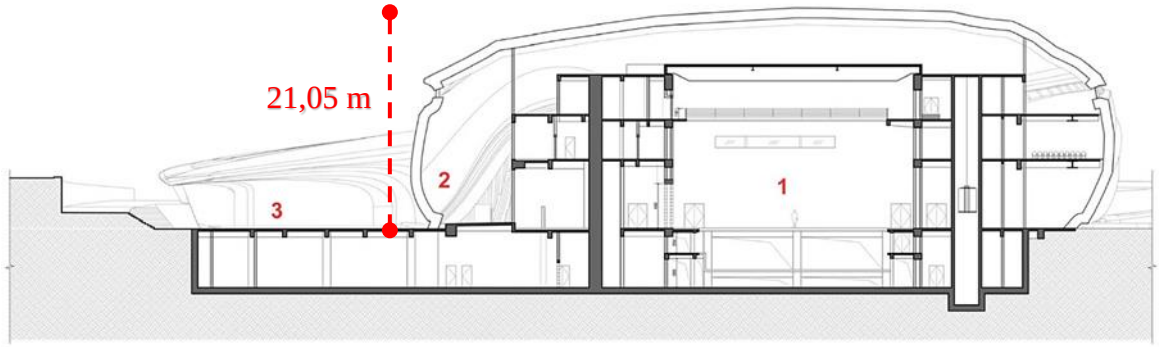


Şekil 140. CMUKM büyük tiyatro yapı kesiti (URL-25)

Yapılar arasında en büyük hacme sahip olan büyük tiyatrodur. Dikey yüksekliğin değişmesi ile düzlem boyutu sürekli değişmektedir. Maksimum iki yönlü uzunluk, 226 metreye 166 metredir (Zhao vd., 2017). Büyük tiyatronun çatısının özel şekilli bir yüzey olması nedeniyle yükseklik 16 ile 51 metre arasında değişmektedir. Maksimum yükseklik ise 51,12 metredir (Şekil 140). Ayrıca sanat müzesi 42,5 metre, küçük tiyatro ise 21,05 metre yüksekliğindedir (Jie, Taiyun, 2013; Şekil 141, Şekil 142).



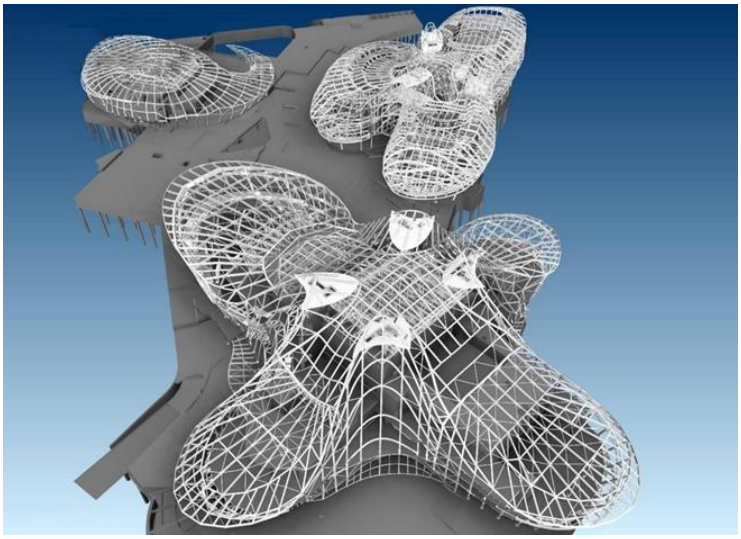
Şekil 141. CMUKM sanat müzesi yapı kesiti (URL-25)



Şekil 142. CMUKM küçük tiyatro yapı kesiti (URL-25)

- Strüktür Tasarımı

Birbirinden farklı serbest biçimlerden oluşan CMUKM, betonarme çerçeve sistem ve bu sisteme bağlı tek katmanlı ve çift katmanlı hiperbolik uzay kafes strüktür olmak üzere iki ayrı sistemden oluşmaktadır (Şekil 143, Şekil 144). Taşıyıcı sistem betonarme çerçeve sistemdir ve bu sistemin üzerini çelik bir strüktür örtmekte ve yapıların serbest formunu oluşturmaktadır.



Şekil 143. Entegre çelik yapı modeli (Tekla structures)

Şekil 144. Betonarme strüktür ile çelik yapı (inşaat aşaması)

Çelik strüktürde kullanılan çelik miktarı 22.000 tona ulaşmaktadır. Çelik elemanlar arasındaki ilişki karmaşıktır ve çelik strüktür çok sayıda kavisli, bükülmüş ve yay şeklinde elemandan oluşmaktadır. Bu elemanlar arasında kutu tipi, H tipi ve çelik boru şeklinde birçok form mevcuttur (Şekil 145). Bunun yanında kesişen birçok düğüm noktası ve çok sayıda çubuğa sahip diğer yapısal elemanlar bulunmaktadır. Çelik taşıyıcı sistemin karmaşık yapısı; bükme, kesme, sıkıştırma, germe ve burulma gibi çeşitli kuvvetlerin birleşik etkisi altındaki kuvvet akışını oldukça zorlaştırmaktadır (ZHA, 2020; URL-27).

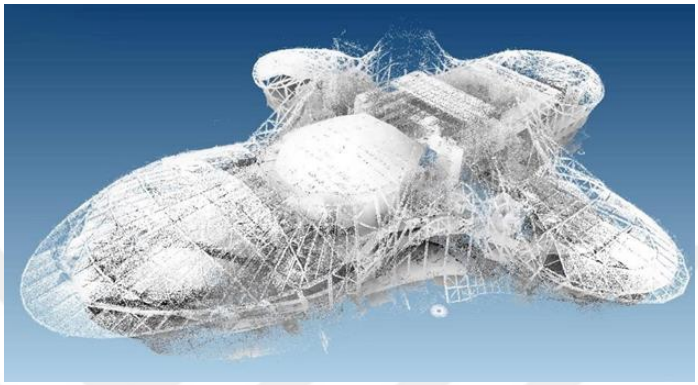
Şekil 145. Çelik elemanlar ve bazı birleşim noktaları (URL-29)

Yapıların büyüklüğü ve karmaşıklığı sebebiyle üretim ve montajdaki doğruluğu kontrol etmek nispeten zordur. Ayrıca çelik yapının betonarme strüktürün dışında olması ve aralarındaki yakın bağlantı nedeniyle çelik elemanların sırası ile monte edilmesi gerekir (URL-27; Şekil 146). Montaj işlemi gerçekleştirilirken bulonlu birleşim ve kaynaklama kullanılmıştır. Çok sayıda farklı çelik elemanın ve düğüm noktasının oluşu çeşitli birleşim yöntemlerini gerektirmiştir.

Şekil 146. Çelik strüktürün betonarme strüktür ile yakından ilişkisi (büyük tiyatro)

Projenin eğrisel yapısı nedeniyle iki boyutlu çizimlerin projedeki yapısal özellikleri tam olarak ifade etmesi imkânsızdır. Bu sebeple bir 3B model oluşturularak çok sayıda çelik çubuğun sorunsuz bir şekilde bağlandığının ve hata payının 5 mm içinde olduğunun kontrol

edilmesi gerekir (Şekil 147). Bununla birlikte projenin kendine özgü şekli, çeliğin bükülmesini ve monte edilmesini son derece zorlaştırmaktadır. Yapısal formu oluşturabilmek için çelik elemanlar kaynaklanmak üzere inşaat alanına tek tek taşınamaz, bu nedenle çelik elemanlar modelleme verilerine göre üretilmeli ve fabrikadan şantiyeye doğrudan taşınmalıdır (Beilida, 2019).



Şekil 147. Çelik yapının 3B lazer tarama nokta bulutu (büyük tiyatro)

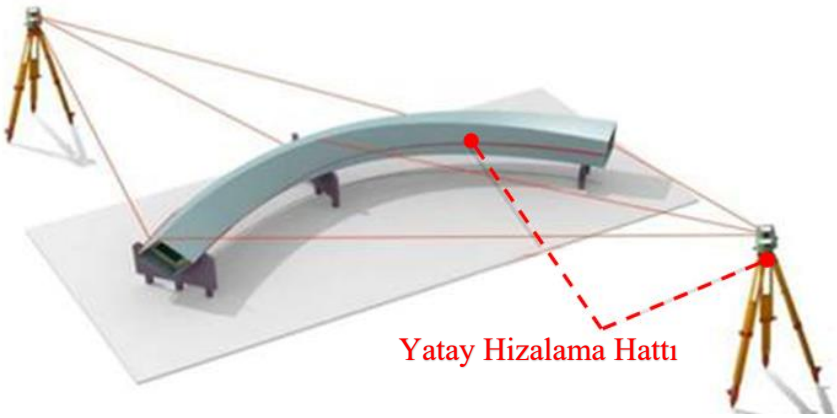
Büyük tiyatro, sanat müzesi ve küçük tiyatronun her birinde 10.000'den fazla çelik çubuk kullanılmıştır. Büyük tiyatronun ön salonunun girişindeki eğimli tek katmanlı uzay kafes strüktür, 45-51 mm kalınlığındaki elemanlardan oluşmaktadır. Bu strüktür, kutu şeklindeki kavisli, bükülmüş çelik elemanları ve 17 adet dökme çelik düğümü içermektedir (Şekil 148). Kutu şeklindeki elemanların maksimum kesiti 1200×1100×45 mm'dir. En ağır çubuk 22 ton, en büyük dökme çelik eleman ise 83 ton ağırlığındadır. Ayrıca maksimum konsol uzunluğu 12 metredir (Zhao vd., 2017). Bu da inşaatı oldukça zorlaştırmakta ve bu parçaların yerine kaldırılıp monte edilmesi zaman almaktadır.

Şekil 148. Kutu kesitli çelik elemanların yerine kaldırılması ve monte edilmesi

Bükülmüş kutu şeklindeki çelik elemanların yay uzunluğu 15 metreyi geçtiğinden bu elemanların yüzeyleri iki parçaya bölünerek ayrı ayrı işlenmiştir. Kutu şeklindeki çelik elemanların duvar levhalarına uygulanan sıcak şekillendirme işlemi çelik levhalara zarar verdiğinden soğuk şekillendirme için üç silindirli levha haddeleme makinesi ve hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 149). Pres yapılırken bir uçtan diğer uca kademeli olarak yapılmış ve aşırı preslenmeyi önlemek için levha belirli aralıklarla ölçülmüştür (Zhao vd., 2017).

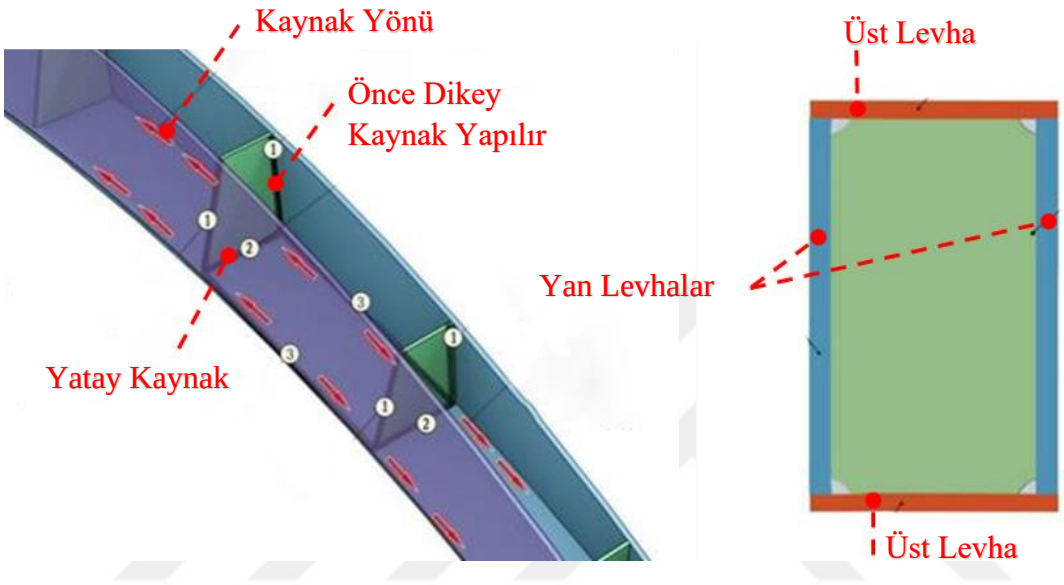
Şekil 149. Üç silindirli levha haddeleme makinesi (sol); hidrolik pres (sağ)

Oluşturulan çelik levhalar lazer tarama aracılığıyla ayrıntılı olarak kontrol edilmiştir (Şekil 150). Elemanlar test edildikten sonra doğruluğu montaj gerekliliğini karşılamayan levhalar için tekrar düzeltme işlemi uygulanması gerekmektedir. Diğer elemanlar üretilirken hidrolik pres kullanıldığından düzeltme gereken levhalara ısıl işlem uygulanmıştır (Zhao vd., 2017).



Şekil 150. Üretilen kutu kesitli çelik elemanların lazer ile kontrol edilmesi

Çatıdaki tek katmanlı uzay kafes strüktürün çoğu elemanı 700×450×10×14 mm'lik ince duvarlı, az sayıda eleman ise 700×450×50×50 mm'lik kalın duvarlı kutu kesitinden oluşmaktadır. Oluşturulan kutu kesitli çelik elemanların işlenmesi ve üretimi projenin kilit noktasıdır (Şekil 151). Bu sebeple çelik elemanlar üzerindeki gerilme, bükme ve burulma kuvvetlerini kontrol edebilmek için birçok araştırma yapılmıştır. Böylece üretim ve montaj sürecinin sorunsuz geçmesi sağlanmıştır (Zhao vd., 2017).



Şekil 151. Çelik levhaların birleştirilmesi (sol); kutu kesitli çelik eleman (sağ)

Büyük tiyatronun cephe kaplamasını da taşıyan çelik strüktürünün ana elemanları H kesitli çelikten yapılmıştır ve kiriş yüksekliği 500-900 mm'dir. Bu tek katmanlı uzay kafes strüktür, zeminle bağlantılı olan eğimli çelik kolonlarla desteklenmektedir. Eğimli çelik kolonlar, giydirme cepheyi ve üzerindeki çatı yükünü taşımasının yanısıra destek kolonları olarak da görev yapmaktadır. Bu eğik kolonlarla zemin arasındaki açı 37º'dir. Binayı çevreleyen halka kiriş, eğimli kolonların kararlı bir yük taşıyan yapı haline gelmesini ve düşey yük stabilitesini sağlayan önemli bir elemandır. Halka kiriş, tüm bu eğimli kolonlara rijit bir şekilde bağlanmıştır, böylece tüm eğimli çerçeve kademeli çökmeye karşı daha iyi bir dirence sahip olmuştur (URL-28; Şekil 152).

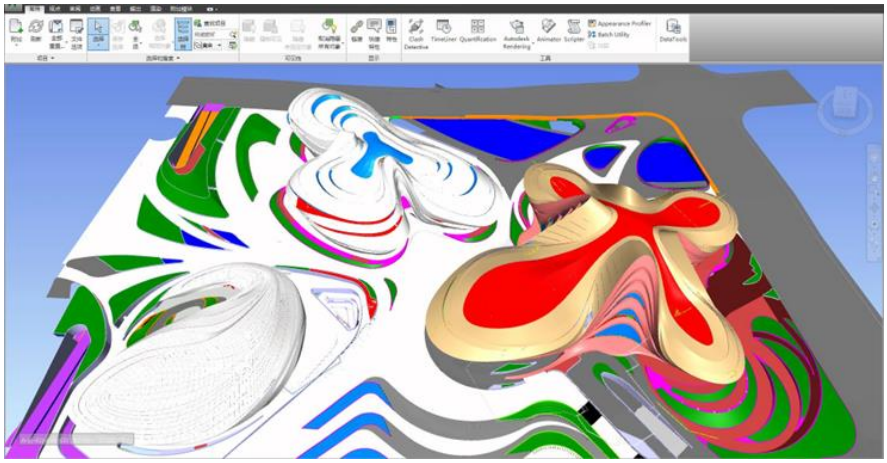
Şekil 152. CMUKM yapı strüktürü (inşaat aşaması)

- Hesaplamalı Tasarım

CMUKM'nin sahip olduğu karmaşık sistem sebebiyle bütün tasarım ve üretim sürecinin kontrol edilebilmesini sağlamak, olası değişiklikleri disiplinler arası iş birliği ile çözümlemek için ilk olarak bir YBM ekibi oluşturulmuştur (Jingcheng ve Liyuan, 2017; Şekil 153).

YBM ile planlama, üretim, kurulum gibi süreçlerde veri iletiminin uygun ve doğru olması gerekmektedir. Karmaşık teknik modellemelerin varlığı ve çok sayıda üretici nedeniyle, tüm disiplinler için YBM'nin koordinasyonunu yönetmek oldukça zordur. YBM teknolojisi, inşaat süresini, malzeme ve işçilik maliyetini azaltmıştır (Jingcheng ve Liyuan, 2017; Şekil 154).

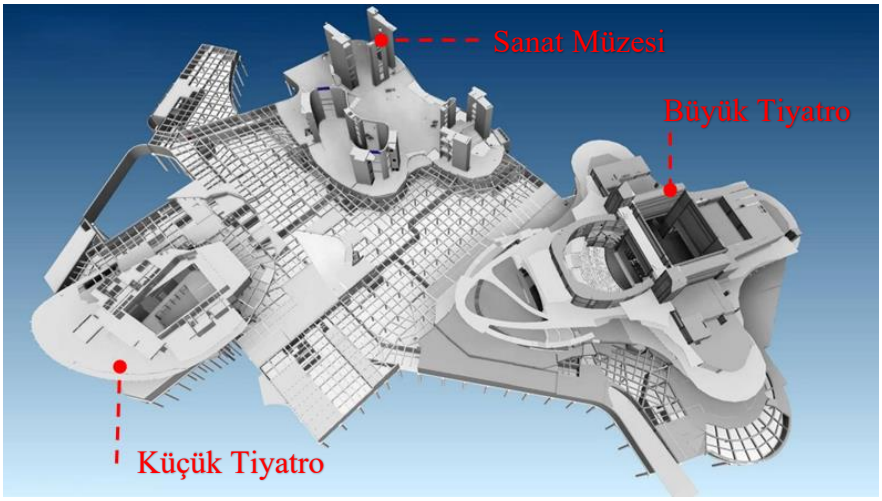
Şekil 153. CMUKM YBM sistemi (Jingcheng ve Liyuan, 2017)



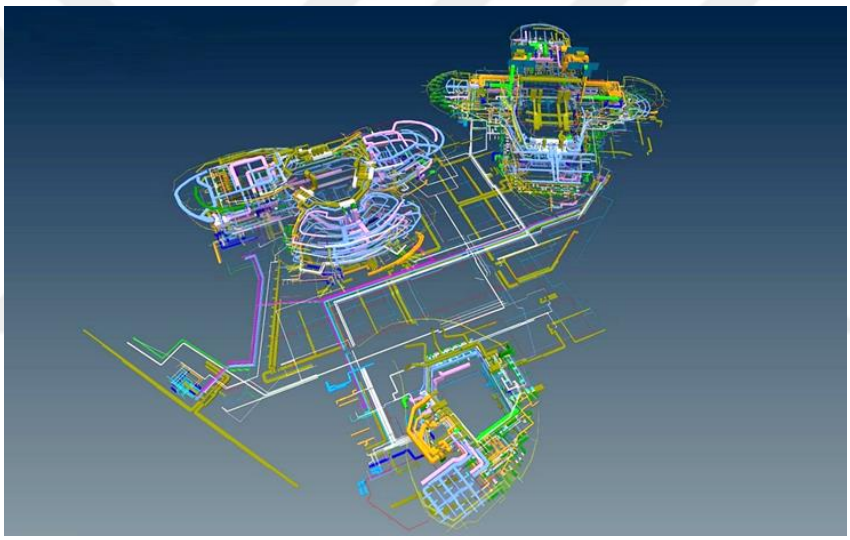
Şekil 154. CMUKM YBM modeli (Jingcheng ve Liyuan, 2017)

Projedeki her alan uzmanlık gerektirmekte ve son derece karmaşıktır. İki boyutlu çizimler projedeki olası problemleri yansıtamaz. Bu karmaşıklığı doğru bir şekilde çözümlemek ve hata payını en aza indirmek için projede birden çok hesaplamalı tasarım aracı kullanılmıştır. Bu araçlar arasında Revit, Tekla Structures, Rhinoceros, Grasshopper, Digital Project, Navisworks, Trimble Connect ve Trello gibi çeşitli parametrik modelleme araçları, YBM yazılımları ve platformları vardır (Şekil 155). Projenin her bölümü için en uygun yazılımın seçilmesi gerekmektedir. Örneğin; mimari çizimler ve elektromekanik için Revit, çelik strüktürün tasarlanıp detaylandırılabilmesi için Tekla Structures kullanılmıştır (Liyuan vd., 2018; Şekil 156). Ayrıca GFRC panellerden oluşan giydirme cephenin karmaşık şekli nedeniyle serbest eğrilerin modellenebilmesi ve detaylandırılabilmesi için Rhinoceros 3D ve Digital Project 3D (Gehry Technologies) yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımlar ile GFRC giydirme cephenin doğruluğu 0,0001 mm'ye kadar ulaşmaktadır (Jingcheng ve Liyuan, 2017).

Parametrik modelleme tamamlandıktan sonra, modeli entegre etmek için projedeki sistemlerin (mekanik, elektrik ve tesisat) birbiri ile ilişkisinin denetlenmesi gerekir. Verileri karşılaştırmak ve sistemler arasında herhangi bir çakışma olup olmadığını tespit etmek için Navisworks yazılımı kullanılmıştır. Bu sayede modelleme hataları veya tasarım kusurları tespit edilebilir ve yerinde yıkımı önlemek için tasarım değişiklikleri önceden yapılabilir. Ayrıca çarpışma tespiti doğrulandıktan sonra, CAD dosyası doğrudan dışa aktarılabilir.



Şekil 155. CMUKM Entegre inşaat modeli (Revit 2014)



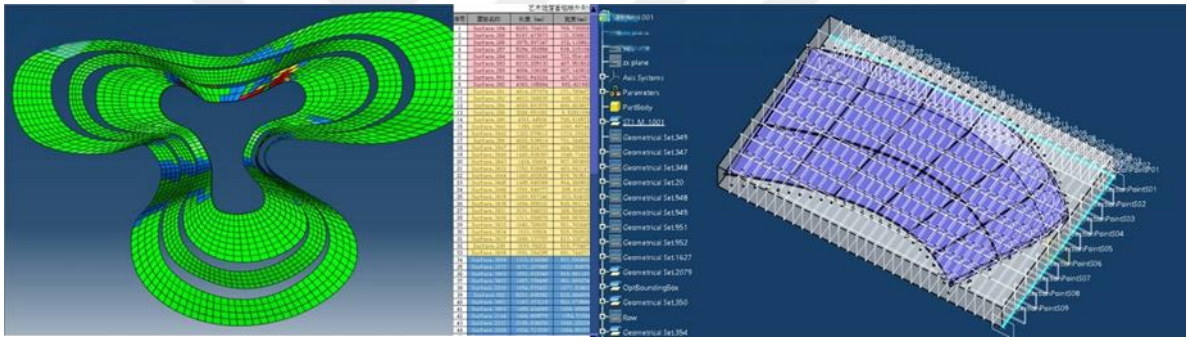
Şekil 156. Bütünleşmiş elektromekanik model (Revit 2014)

Her bir disipline ait detaylı tasarım doğrudan YBM modelinde gerçekleştirilse de projede görev alan mimar ve mühendisler İngiltere, Hong Kong, Şanghay, Guangzhou, Changsha, Nanjing gibi farklı bölgelerde bulunmaktadır. Dolayısıyla veri iletişimi kolay değildir. Bu sebeple mimari çizimler, modeller ve belgeleri yönetmek için Trimble Connect platformu kullanılmıştır. Bu şekilde dosyalar ve modeller gerçek zamanlı olarak buluta yüklenebilir, indirilebilir ve değiştirilebilir. Trello platformu ise bölgeler arasında eş zamanlı etkin bir iletişim kurmak için kullanılmıştır. Bununla birlikte YBM sisteminde bir çeşit GRC yönetim sistemi de mevcuttur (Liyuan vd., 2018).

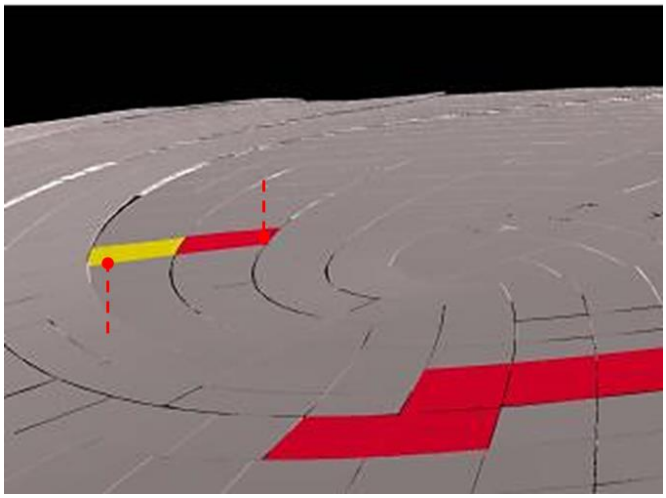
Projedeki ayrıntılı tasarım, Digital Project yazılımı tarafından oluşturulan tasarım modeli altında gerçekleştirilmiştir (Şekil 157). İkincil çelik yapıları ve GFRC cephe panelleri

gibi diğer bileşenleri hızlı bir şekilde modellemek için ise Rhinoceros yazılımı kullanılmıştır (Jingcheng ve Liyuan, 2017).

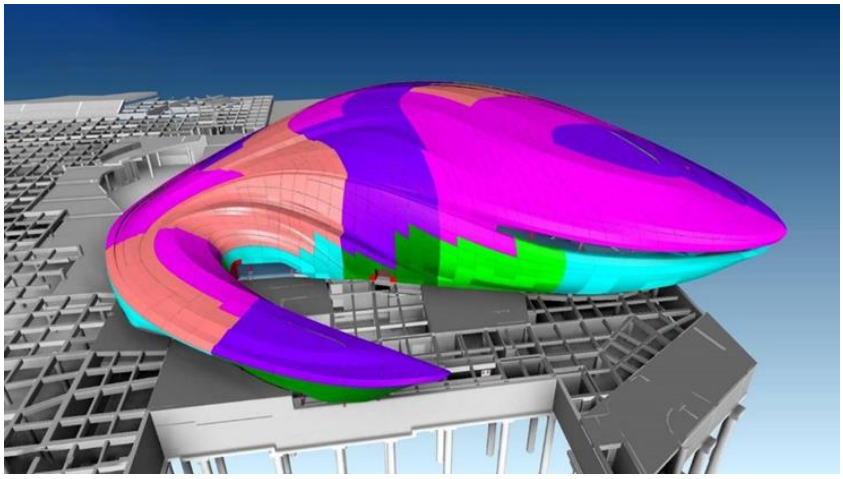
Gehry Technologies; GFRC panelleri düz, tek eğrilikli ve çift eğrilikli olmak üzere sınıflandırmıştır. Yaklaşık 74.000 GFRC panel verisi, Digital Project yazılımında bulunan bir eklenti ile alınan G kodlu komut dosyası ile CNC makinesine aktarılmıştır. Böylelikle üç eksenli CNC frezeleme makinesi kullanılarak GFRC panel kalıpları oluşturulmuştur. 10.000'den fazla özel şekilli GFRC panel, kare kod ile isimlendirilmiştir. GFRC panellerin hasar gördüğü tespit edilirse panellere atanan kare kodlar ile panel numarasına ve temel bilgilere erişilebilmektedir. Ayrıca QR kodun okutulması ile YBM modelindeki paneller izlenebilmektedir. Mevcut GFRC panelin nerede olduğu sarı renk ile, monte edilmiş paneller kırmızı renk ile ve geriye kalan paneller gri ile gösterilmiştir (Liyuan vd., 2018; Şekil 158, Şekil 159).



Şekil 157. Sanat müzesi alüminyum levhaların şekil ve boyut analizi (sol); GFRC kalıp modeli (Digital Project/ Gehry Technologies)

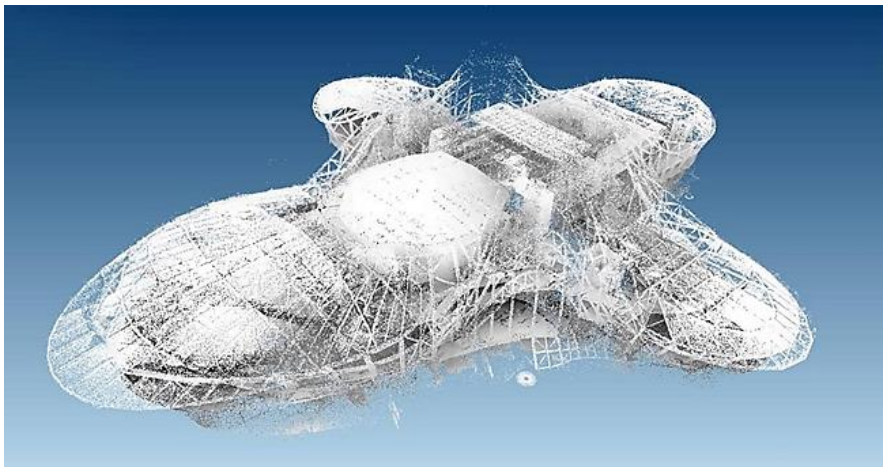


Şekil 158. GFRC inşaatı dinamik izleme (Jingcheng ve Liyuan, 2017)



Şekil 159. Küçük tiyatro cephe panelizasyonu (Digital Project)

Çelik strüktür, Tekla Structure ve Digital Project kullanılarak oluşturulmuştur. Strüktürün her bir elemanı boyutlandırılmış ve birleşim noktaları bu yazılımlar ile detaylandırılmıştır. Sahadaki çelik yapı, 3B lazer tarama ekipmanı ile 1 cm, 5 cm ve 10 cm'lik farklı doğruluk aralıklarında analiz edilerek bir nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 160). Bu sayede GFRC paneller ve ikincil çelik yapılar gibi yapısal elemanlar, elde edilen karşılaştırma verilerine göre yeniden ayarlanabilmektedir (Jingcheng ve Liyuan, 2017).



Şekil 160. 3B lazer tarama nokta bulutu (büyük tiyatro)

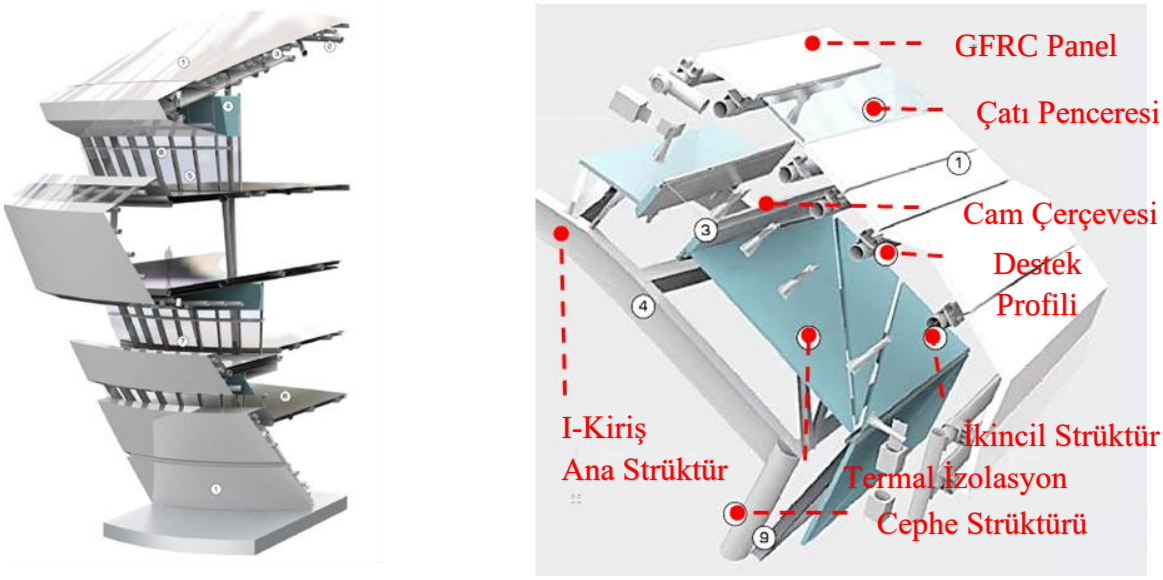
- Cephe Tasarımı

CMUKM'daki birbirinden farklı formlara sahip 3 kütlenin de dış giydirme cephe malzemesi havalandırmalı GFRC panel ve low-e kaplamalı çift cam kombinasyonundan

oluşmaktadır. GFRC paneller, monolitik GRC panellere göre iki kat daha hafiftir. Cephelerde kullanılan toplam GFRC panel sayısı 74.000'dir. Bunlar arasında birbirinden farklı boyut ve eğriliğe sahip, üretimi ve montajı oldukça zor olan 11.353 GFRC panel vardır. Toplam cephe alanı 126.012 m²'dir (Watts, 2016; ZHA, 2020; Şekil 161).

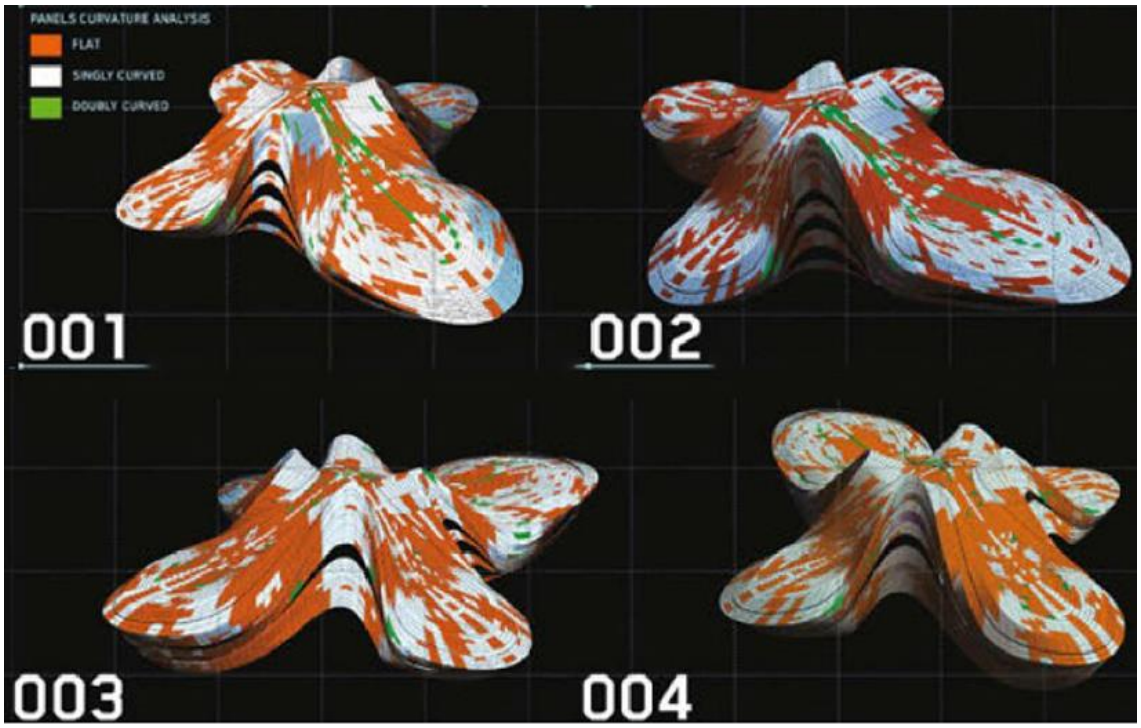
Şekil 161. CMUKM inşaat aşaması (URL-29)

Proje için kullanılacak olan GFRC paneller Nanjing Beilida New Material System Engineering tarafından üretmiştir. Serbest formlu bu cephelerin panelizasyonu ve her panelin boyut ve eğimi bir 3B yazılım programı kullanılarak Newtecnic tarafından gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte kullanılan yazılımlar ile her panelin yapı üzerindeki tam konumu tanımlanmıştır (ZHA, 2020; URL-29; URL-30; Şekil 162).



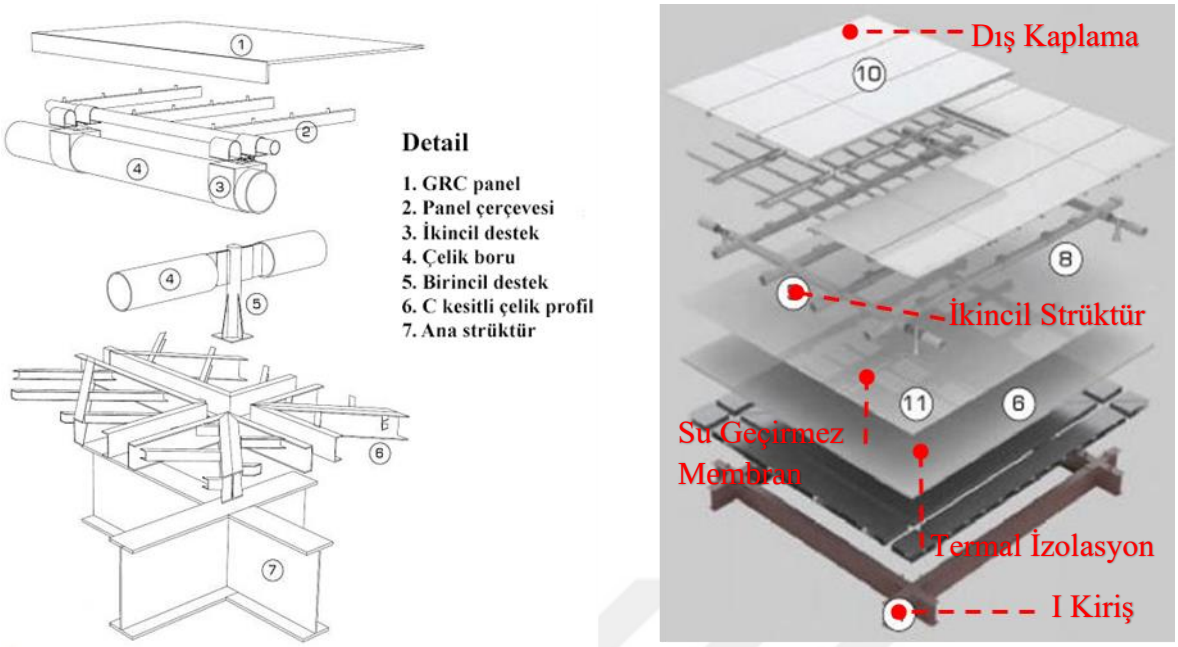
Şekil 162. Havalandırmalı giydirme cephe detayı (GFRC rain-screen panel; Watts, 2016)

Rastgele kıvrılarak oluşturulan bu düzensiz hiperbolik GFRC paneller herhangi bir kurala uymamaktadır. Her bir panelin ana yapı ile arasındaki bağlantı açısı birbirinden farklıdır (Şekil 163). Bu sebeple standart bağlantı parçaları teknik gereksinimleri karşılayamamaktadır. Beilida tüm bu zorluk ve gereksinimler için yüksek hassasiyetli, cıvatalı, ayarlanabilir, sökülebilir ve özel şekilli GFRC paneller üreterek uygun çözümler geliştirmiştir.



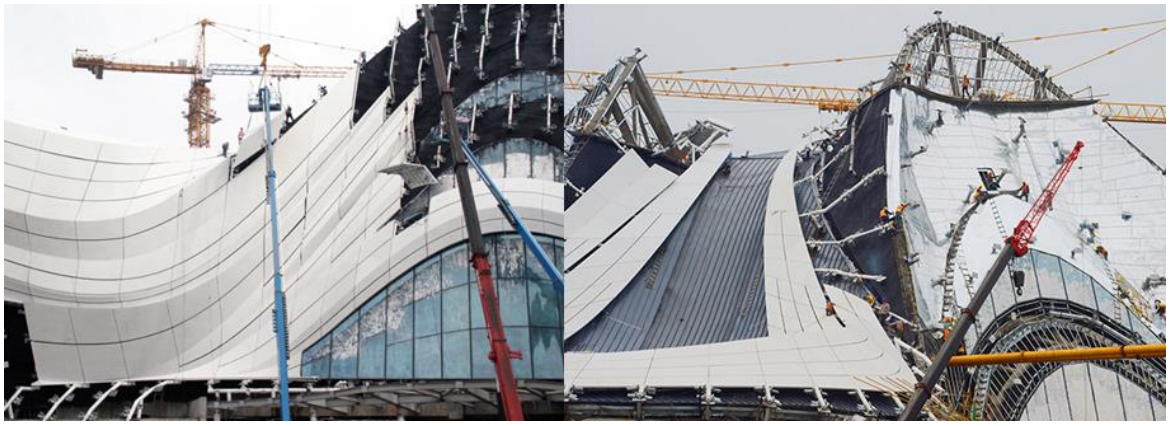
Şekil 163. Büyük tiyatrodaki GFRC panellerin 3B modeli: düz paneller (turuncu). Tek eğrilikli (beyaz), çift eğrilikli (yeşil; Watts, 2016)

Yapılan araştırmalar sonucunda birbirinden farklı 10.000'den fazla GFRC panel tipinin gereksinimlerini karşılamak için tek tip düğümler kullanılmıştır. Mekanik hesaplama, projenin güvenliğini sağlamak için Tongji Üniversitesi ile iş birliği içinde gerçekleştirilmiştir (ZHA, 2020; Şekil 164).



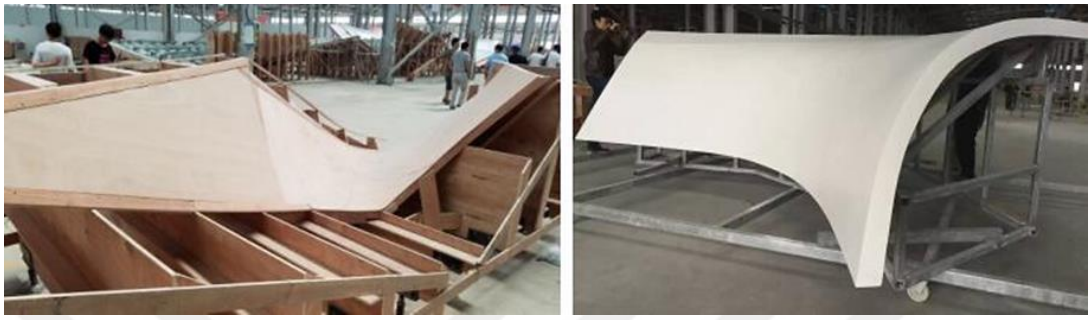
Şekil 164. Cephe panellerinin montajında kullanılan sistem detayı (Watts, 2016)

GFRC panellerden en büyüğü 15 m² ve 1 ton ağırlığındadır. Bu birbirinden farklı her panel; tasarımdan modellemeye, işlemeden kuruluma hassas bilgisayar hesaplamaları gerektirmektedir. Karmaşık bina formunu oluşturabilmek ve ayrıntıları optimize etmek için Digital Project ve Rhinoceros yazılımı, cephe panellerini tutan ikincil çelik çerçeve ve GFRC kalıpları için ise Grasshopper yazılımı kullanılmıştır (Beilida, 2019). Ana yapının ekonomik bir şekilde inşa edilebilmesi için cephe yükünün maksimum 150 kg/m² olması gerekmektedir. Bu tasarım kısıtlaması, sonlu elemanlar analizi ile yapısal boyutların güvenli bir şekilde azaltılmasını ve her elemanın ağırlığının optimizasyonunu gerektirmiştir (Watts, 2016; Şekil 165).



Şekil 165. GFRC panellerin montajı (URL-29)

Geleneksel yöntemler bu projenin hiperbolik GFRC panellerinin şekillendirilme işlemini yeterince karşılayamamıştır. Dolayısıyla panel üretiminde kullanılan ahşap kalıbın doğruluğu panelin şeklini doğrudan etkileyeceğinden kalıpların üretimi oldukça önemlidir (Jie ve Taiyun, 2013; Şekil 166).



Şekil 166. Ahşap kalıpların yapımı (sol); tamamlanmış GFRC panel (sağ; Jingcheng ve Liyuan, 2017)

Fabrika tarafından manuel olarak kontrol edilen makinelerle kesilen kalıplar beklenilen hassasiyete sahip değildir. Geleneksel kalıp çerçevesi, ahşap bir parçanın üzerinin istenilen eğrinin bulunduğu bir kağıdın kaplanıp kesilmesiyle elde edilmektedir. Bu şekildeki bir üretim ile doğruluğu garanti etmek oldukça zordur. Bu yüzden 3B tasarım yazılımlarından alınan G kodlu komut dosyası ile panellere ait veriler, bir üç eksenli CNC frezeleme makinesine aktarılmıştır. Böylece CNC makinesi kullanılarak milimetrik düzeyde doğruluk elde edilebilmektedir. Ahşap kalıp üretimi tamamlandıktan sonra kalıplara 5 mm'lik bir kontrplak yapıştırılmıştır. Kalıplar 3 kat macun sonrası boyanmış, daha sonra GFRC harcı kalıba dökülmüştür. Panel belirli bir mukavemete sahip olduktan sonra, taşıyıcı çelik çerçeveye bağlanmıştır. Paneller, kalıp tahliyesi ve yüzey düzeltmelerinden sonra paketlenerek sahaya taşınmıştır (Jingcheng ve Liyuan, 2017; Şekil 167).

Şekil 167. Cephe panellerinin taşınması (URL-29)

CNC makinelerle üretilen kalıplar hatasız olsa da belirtilen sürede inşaat hedeflerine ulaşabilmek için GFRC üretiminin hızlandırılması gerekmiştir. GFRC üretim kapasitesinin artırılması için geleneksel yöntemler ile üretime de devam edilmiştir (Jingcheng ve Liyuan, 2017). Üretimi tamamlanan panellerin her birine kendine özgü bir kare kod verilmiştir. Kare kod okutularak panelin konumu, boyutu gibi birçok teknik bilgi elde edilebilmektedir (Şekil 168).

Şekil 168. GFRC panel kare kodu (URL-29)

Bütün paneller GRC yönetim sistemi aracığıyla tek bir platform altında toplanarak kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Her bir giydirme cephe parçasının montaj sapması 2 mm'yi geçmemelidir. Ayrıca her panel arasında belirli bir boşluk bırakılmıştır. Üretilen tüm paneller kaldırma platformları ile yavaşça yerine kaldırılarak monte edilmiştir (Şekil 169, Şekil 170).

Şekil 169. Cephe panellerinin yerine kaldırılması (URL-29)

Şekil 170. GFRC panellerin montajı (URL-29)

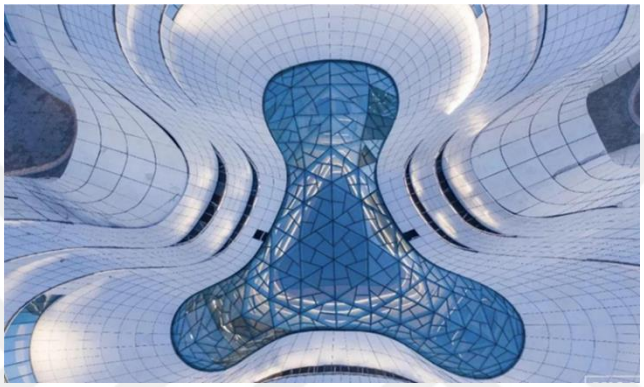
Ana çelik yapı ile GFRC giydirme cephe arasındaki teorik boşluk 1 metredir. GFRC panellerin kolaylıkla sökülebilir olması bu boşluktaki diğer sistemlere erişimi kolaylaştırmaktadır. Gehry Technologies, giydirme cephe sistemi ile ana çelik yapı ve elektromekanik gibi diğer sistemler arasındaki boşluğu, 3B lazer tarama teknolojisi ile çarpışma testi yaparak kontrol etmiştir (Jingcheng ve Liyuan, 2017; URL-28).

GFRC giydirme cephenin altında boyutu 2 m'yi aşmayan alüminyum levhalar bulunmaktadır. Bu levhalar 2 mm aralıklarla monte edilmiş ve düz, tek ve çift eğrilikli olmak üzere birbirinden farklı formlardan oluşmaktadırlar (URL-31; Şekil 171).

Şekil 171. Alüminyum panellerin montajı

- Sürdürülebilirlik

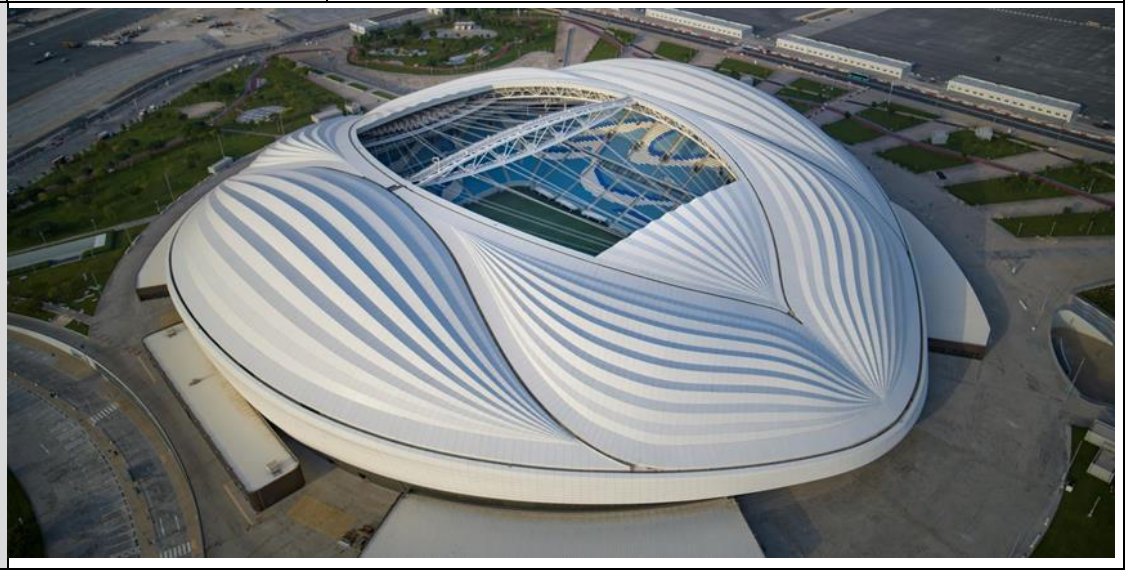
CMUKM'nin estetik ve işlevsel ihtiyaçlarını karşılamak için yapıya entegre edilen LED aydınlatma ekipmanı, serbest formlu cephedeki cam kısımlardan içeriye giren doğal ışık ile birleşerek maksimum enerji tasarrufu sağlanmış ve CO_2 emisyonu azaltılmıştır (Beilida, 2019; Şekil 172). Dahası hesaplamalı yöntemler ile tasarlanan bu yapıda hata payı en aza indirilerek malzeme israfının önlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 172. Sanat müzesi cam açıklık (URL-25)

2.2.6. Al Janoub Stadyumu

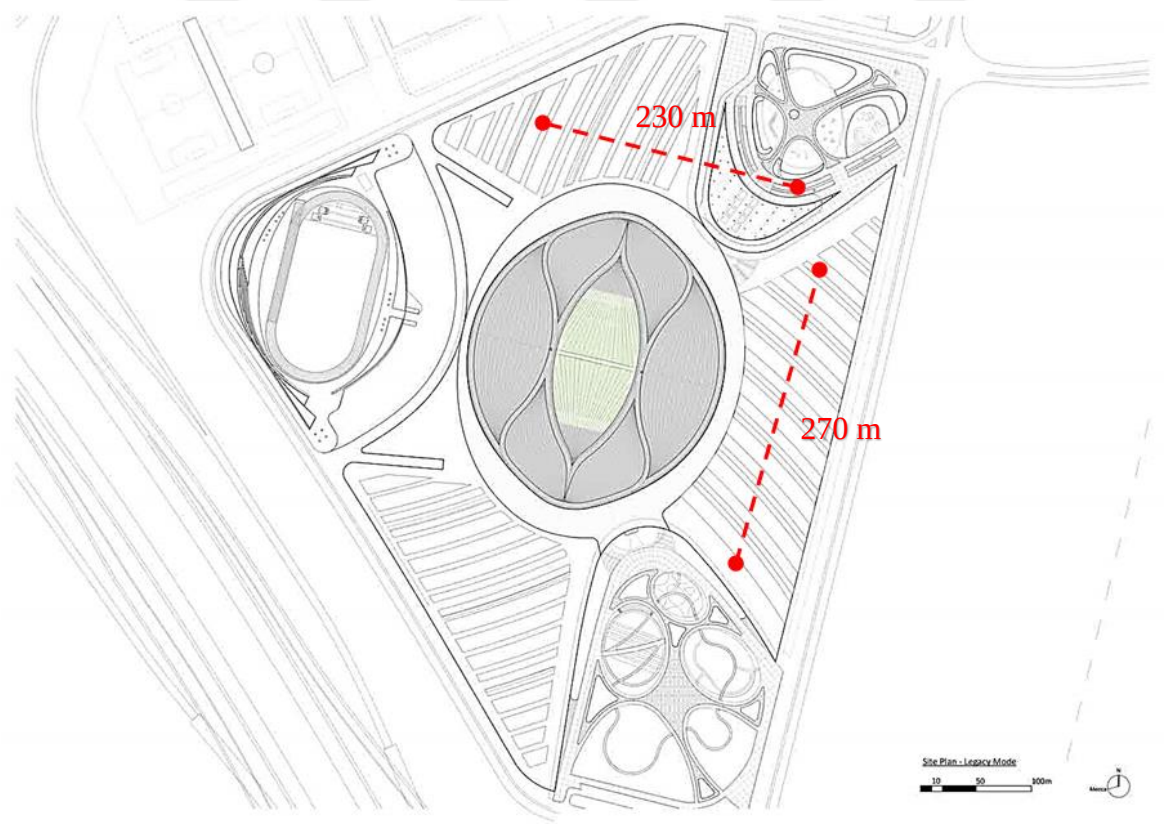
Tablo 7. Al Janoub Stadyumu yapı künyesi

<table>
<tr><td rowspan="7">Kimlik</td><td>Yapı Adı</td><td colspan="5">AL JANOUB STADYUMU
(Al Janoub Stadium)</td></tr>
<tr><td>Yapı Tasarımı</td><td colspan="5">Zaha Hadid Architects, Patrik Schumacher</td></tr>
<tr><td>Yapının Yeri</td><td colspan="5">Al Wakrah, Katar</td></tr>
<tr><td>Yapım Yılı</td><td colspan="5">2014-2019</td></tr>
<tr><td>Yapı İşlevi</td><td colspan="5">Stadyum</td></tr>
<tr><td>Yapı Boyutları</td><td colspan="2">Alan:
126.000 m²</td><td colspan="2">Yükseklik:
50 m</td><td>Genişlik:
230 × 270 m</td></tr>
<tr><td>Ödüller</td><td colspan="5">GSAS Sustainability Award (2018) Construction Management Class A, GSAS Design & Building Gold Standard, The Plan Awards (2020), Seasonal Energy Eiciency Ratio certificate for Al Wakrah Energy Centre</td></tr>
<tr><td>Maliyet</td><td colspan="5">€ 587.000.000</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Strüktür</td><td>Strüktür Mühendisi</td><td colspan="5">Echoes Paris, Maffeis Engineering, Maeg Construction</td></tr>
<tr><td>Strüktür Üreticisi</td><td rowspan="3">HT</td><td colspan="4">SOLB26, Maeg Construction</td></tr>
<tr><td>Strüktür Malzemesi</td><td>Çelik</td><td rowspan="2">TS</td><td colspan="2">Beton</td></tr>
<tr><td>Strüktür Türü</td><td>Uzay kafes strüktür</td><td colspan="2">Betonarme Çerçeve Strüktür</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Cephe</td><td>Cephe Tasarımı/ Müh.</td><td colspan="5">ZHA, Schlaich Bergermann Partner</td></tr>
<tr><td>Kaplama M. Üreticisi</td><td colspan="5">Qatar National Aluminium Panel Company, BESIX, Echoes.Paris</td></tr>
<tr><td>Kaplama Malzemesi</td><td colspan="5">PVC TiO_2 membran, PTFE membran, alüminyum levha</td></tr>
<tr><td>Yüzey Boyutu</td><td colspan="5">65,000 m²</td></tr>
<tr><td rowspan="3">HT</td><td>HT Tekniği</td><td colspan="5">Parametrik Tasarım</td></tr>
<tr><td>HT Araçları</td><td colspan="5">Revit, Rhinoceros 3D, Grasshopper, SCIA Engineer, Tekla Structure</td></tr>
<tr><td>Sayısal Üretim Teknikleri</td><td colspan="5">CNC boru bükme makinesi, CNC 2B kesim makinesi</td></tr>
<tr><td>YAPI GÖRSELİ</td><td colspan="6">  </td></tr>
</table>

- Genel Bilgiler

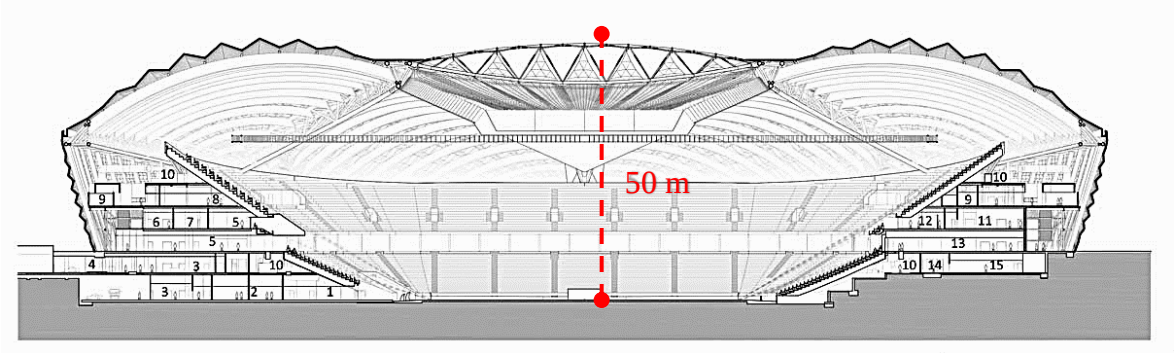
Eski adı Al Wakrah olan ve Arapçada "Güney" anlamına gelen Al Janoub Stadyumu'nun (AJS) inşasına 2014 yılında Katar'ın Al Wakrah şehrinde başlanmıştır ve 2019 yılında proje tamamlanmıştır. Stadyum, eğrisel postmodernist ve neo-fütürist bir tasarıma sahiptir. Yapının tasarımı Zaha Hadid Architects tarafından yapılmıştır. 40.000 kişilik stadyumun tasarımı yapılırken Basra Körfezi'nin akıntılarından geçen geleneksel Dhow teknelerinin yelkenlerinden ilham alınmıştır (Theodoropoulou ve Tovar, 2020; URL 32; Şekil 173). Saçakların geniş çıkıntıları, yelkenli teknelerde yaygın olarak bulunan ahşap yapıları anımsatan alüminyum şerit unsurlara sahiptir. Projenin strüktür mühendisliği Maffeis Engineering tarafından yürütülmüştür ve strüktür için gerekli olan çelik elemanlar Solb26 tarafından üretilmiştir (URL-33; URL-34).

Projede betonarme çerçeve sistem, strüktür sistemi olarak da boru şeklindeki çelik uzay kafes çelik tercih edilmiştir. Yaklaşık 50 m yüksekliğinde olan yapı, 270 m uzunluğunda ve 230 m genişliğindedir (URL-35; Şekil 174).



Şekil 173. Al Janoub Stadyumu vaziyet planı (URL-33)

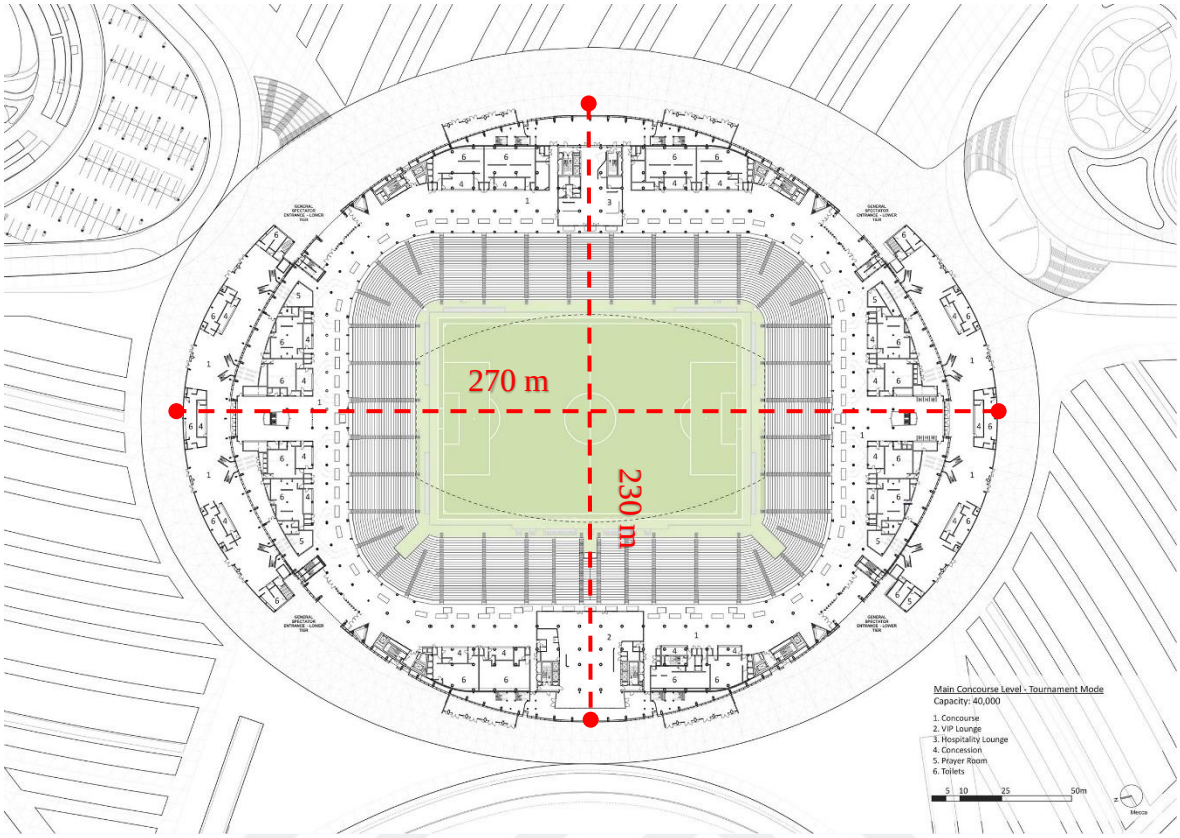
Yapı, strüktür ve örtü olmak üzere iki ana unsurdan oluşmaktadır. Stadyumun taşıyıcı sistemi betonarme sistemdir. Yapının örtüsünü taşımak ve yapının eğrisel formunu verebilmek için karmaşık bir çelik sistem kullanılmıştır (Şekil 175). Yapının kıvrımlı çatısı, her bir tarafı 3 kabuktan oluşan, iki simetrik parçadan oluşmuştur (URL-36). Bu tasarım, PTFE membran ile oluşturulmuştur. Ayrıca Schlaich Bergermann Partner tarafından tasarlanan PVC membrandan oluşan açılabilir bir çatısı vardır (URL-37). Çatı strüktüründe az miktarda GLT elemanlar da kullanılmıştır.



Şekil 174. Al Janoub Stadyumu yapı kesiti (URL-33)

Şekil 175. Al Janoub Stadyumu yapı konstrüksiyonu

Toplam 586,600 m² alana sahip projenin 126,000 m²'lik kısmını stadyum yapısı oluşturmaktadır (URL-38; Şekil 176). Oldukça büyük bir alana sahip stadyum, yaz aylarında optimum sıcaklık koşullarını oluşturabilmek için yenilikçi bir soğutma teknolojisiyle donatılmıştır.

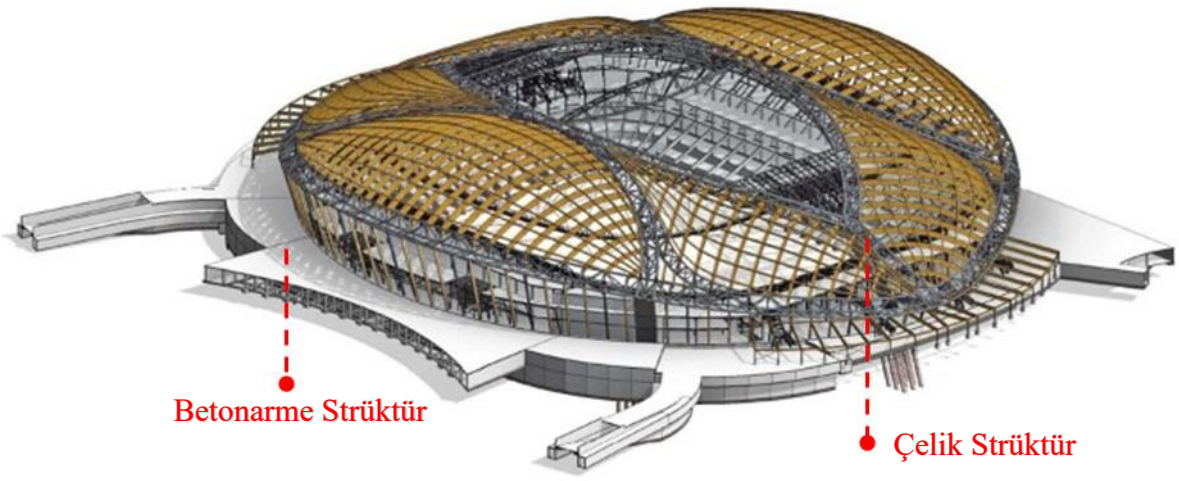


Şekil 176. Al Janoub Stadyumu zemin kat planı (URL-37)

- Strüktür Tasarımı

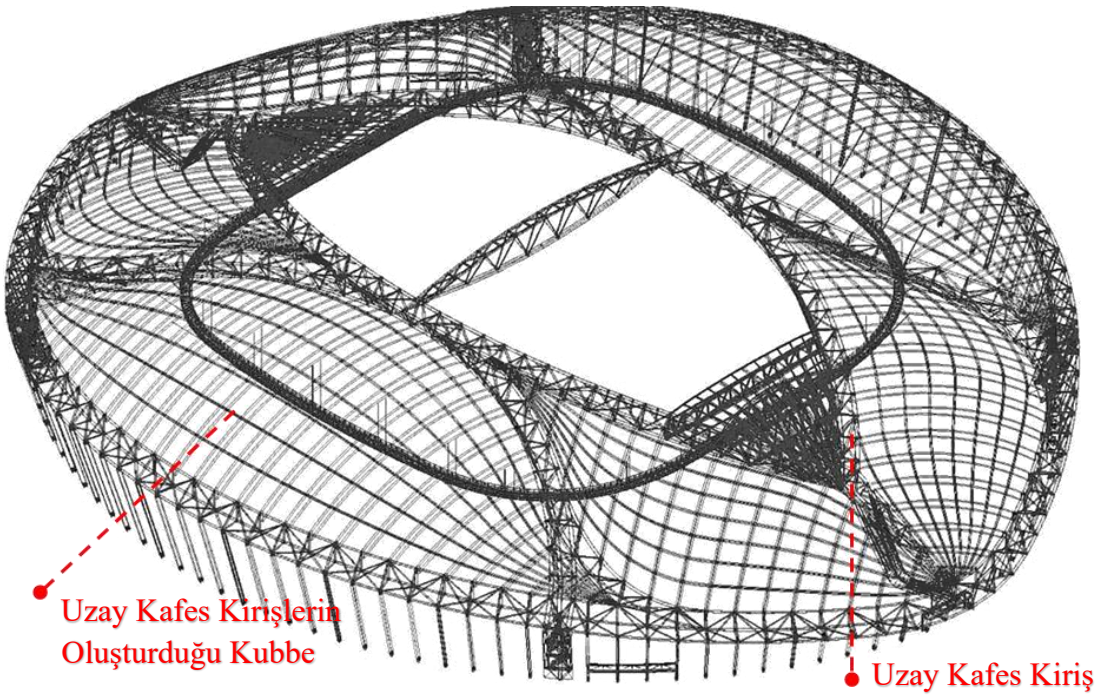
Proje esas olarak iki strüktür türünden oluşmaktadır. Bunlar; yapının temelini oluşturan betonarme çerçeve sistem ve çelik borulardan oluşan uzay kafes sistemdir. (Şekil 177) Projenin ilk aşamasında yaklaşık 460.000 m³ toprak kazılmıştır ve 28.000 m³ beton temel levhası yerleştirilmiştir (Şekil 178). Zemine yerleştirilen 84 beton kazık 1,2 metre çapında ve 19 metre derinliğindedir (Midmac ve Porr Qatar, 2015; URL-39).

Şekil 177. Betonarme temel (sol); inşaat aşaması (sağ)

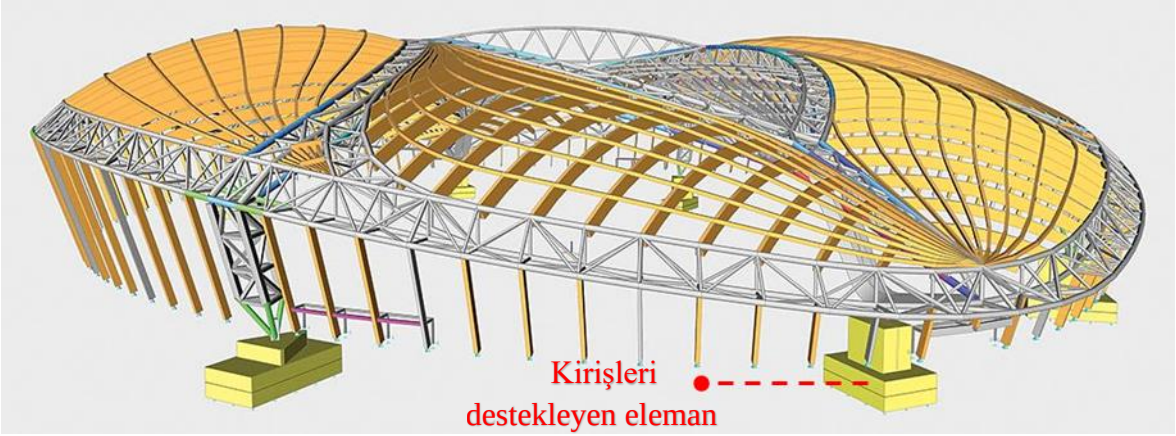


Şekil 178. Çelik ve betonarme sistem (Göppert ve Paech, 2020)

Al Janoub Stadyumu'nun iki katlı çatı strüktürü, birkaç geniş açıklıklı çelik uzay kafes kirişten oluşmuştur. Bu kemer şeklindeki çelik uzay kafes kirişler birbirinden farklı 3 kubbe oluşturmaktadır. Yapının diğer yarısı bu 3 kubbenin simetrisinden meydana gelmiştir (Şekil 179). Kemer şeklindeki kafes kirişler, uç noktalardaki çelik desteklere dayanmaktadır ve bu kirişlerin en uzunu 230 m'dir. (Göppert ve Paech, 2020; Şekil 180).



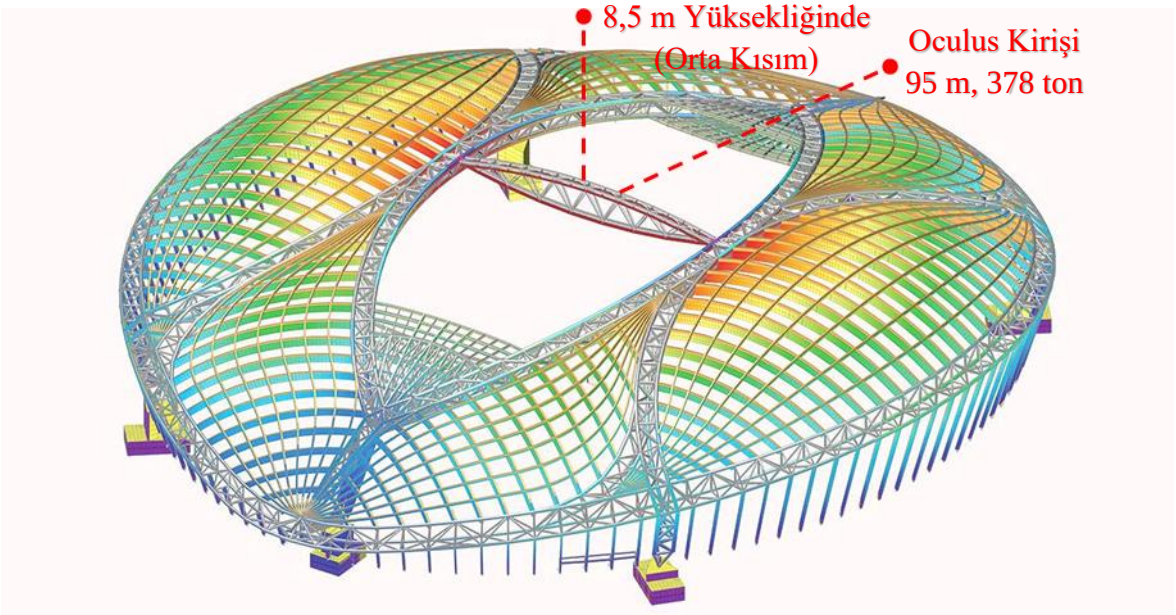
Şekil 179. Çelik uzay kafes sistem (URL-40)



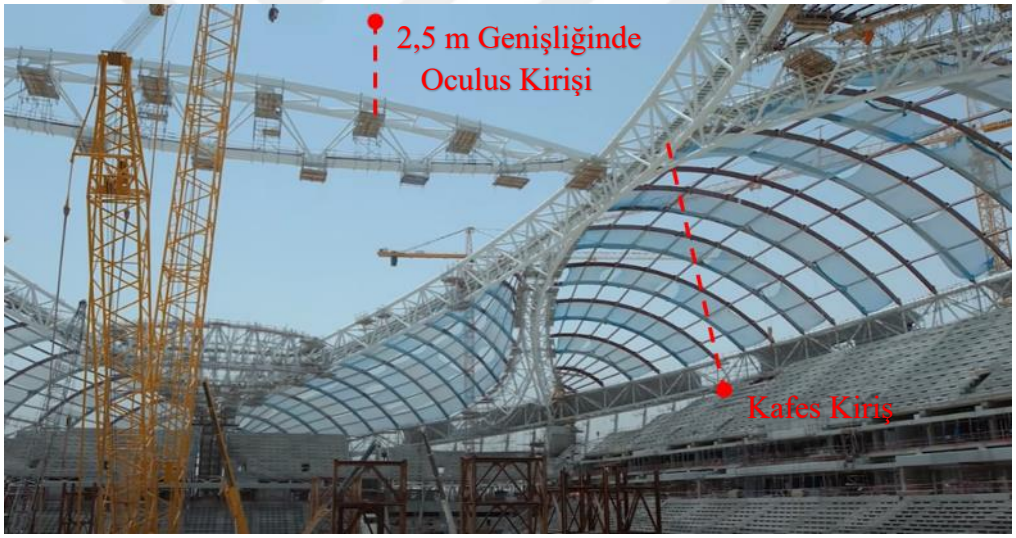
Şekil 180. Çelik uzay kafes sistem ve çelik kirişleri destekleyen elemanlar (URL-36)

Ana kemerlerin farklı yöndeki kollara ayrılması nedeniyle diyagonal eksenlerde ek destek noktaları oluşturulmuştur. Kafes kirişler hem yatay hem dikey eksende kavislidir, bu sayede saha üzerinde geniş bir çatı açıklığı oluşturulmuştur. Çevresel bir kafes kiriş, çatı kaplamasını ve ikincil çatı kabuğu yapısını desteklemektedir. Bu kiriş, kemerlerin kaymasını önler ve cephe destekleri tarafından düzenli aralıklarla desteklenir (Göppert ve Paech, 2020). Bu hafif ve rijit yapı, üzerindeki ikincil çelik yapıların ve dış kaplamanın ağırlığını destekleyen kutu profillerle birbirine bağlanmıştır.

Toplam ağırlığı 7.500 ton olan çelik yapının ortasında, mekanı bölgenin yüksek sıcaklığından korumak ve saha için gölge sağlamak amacıyla yapılan, açılıp kapanabilen bir galeri vardır. 10.800 m²'lik alana sahip bu boşluğun ortasında, yapının açılabilir çatısına erişimi sağlayan ve tüm çatıyı birbirine bağlayan, "Oculus kirişi" olarak da bilinen çelik bir uzay kafes kiriş mevcuttur. 378 ton ağırlığında ve 95 m uzunluğundaki bu kiriş, çelik çatıyı da desteklemektedir ve oyun alanını doğu-batı doğrultusunda geçmektedir (Şekil 181). Orta kısmında 8,5 m yüksekliğe ulaşan ve 2,5 m genişliğinde olan bu 3 bantlı kafes kirişin uçları, yükü doğrudan çatının ana kirişlerine aktarmaktadır. Oculus Kirişi, kirişin basınç altındaki elemanlarını rijitleştirmek için iki üst çubuk ve bir alt çubuğa sahiptir (Şekil 182). Üst çubuklar arasındaki köşegenler, yüksek kesme kuvvetlerine ek olarak burulma yüklerinin de iletilebilmesini sağlamaktadır. Ek olarak Oculus kirişinin desteklediği açılabilir çatı, bir dizi çelik kablo kullanılarak oluşturulan sistem sayesinde 30 dakika içerisinde kapatılabilmektedir (Maeg Construction, 2019).



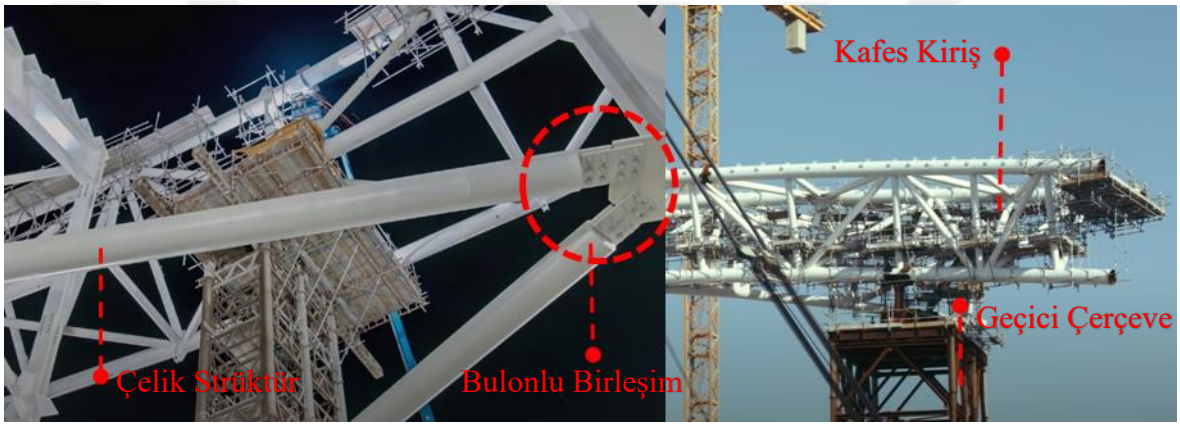
Şekil 181. Oculus kirişi ve çelik strüktür (URL-36)



Şekil 182. AJS Oculus kirişi (Maeg, 2019)

Çelik yapılar önceden monte edilerek motorlu taşıyıcılar (SPMT) aracılığıyla stadyum içine taşınmıştır (Şekil 183). Kirişler, vinçler aracılığıyla kaldırılmış ve yerinde kaynaklanarak monte edilmiştir. Bazı noktalarda bulonlu birleşim de kullanılmıştır. Başlangıçta 6 parça olan yapı, yerine kaldırılmadan önce geçici çerçeveler üzerinde inşa edilmiştir (Şekil 184). Tüm kaynak, montaj ve kurulum süreci 40 sürmüştür. Çatıyı destekleyen çelik kolonlar, İtalya'da üretilmiştir, daha sonra Katar'a gönderilmiştir (URL-40; Maeg Constrcution, 2019).

Şekil 183. Kendinden tahrikli motorlu taşıyıcı (SPMT)

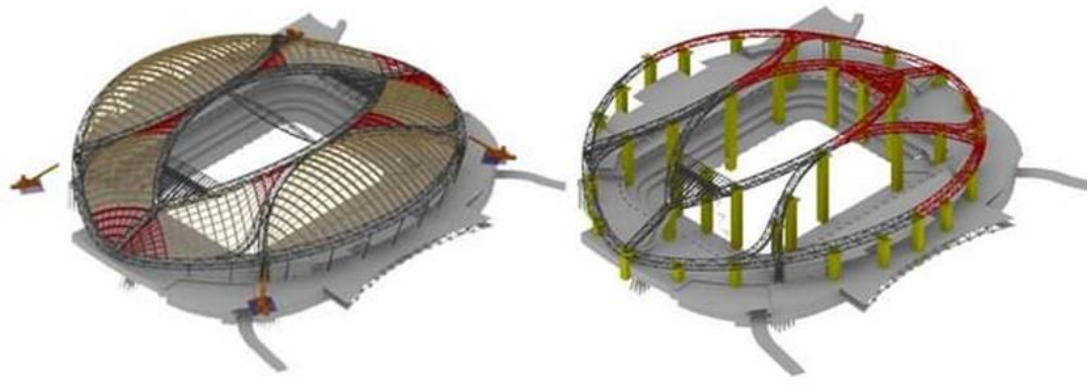


Şekil 184. Bulonlu birleşim ve geçici kuleler ile ayakta tutulan çelik kafes kiriş

- Hesaplamalı Tasarım

Al Janoub Stadyumu tasarımında Yapı Bilgi Modellemesi'ne (BIM) dayanan mühendislik ve tasarım aşaması, projenin gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Projede; hesaplamalı tasarım yöntemleri kullanılması, çelik yapının ağırlığının azaltılması, maliyet tasarrufu, yapı elemanlarının detaylı olarak tasarlanması ile kurulum hızının artırılması gibi birçok avantaj sağlamaktadır.

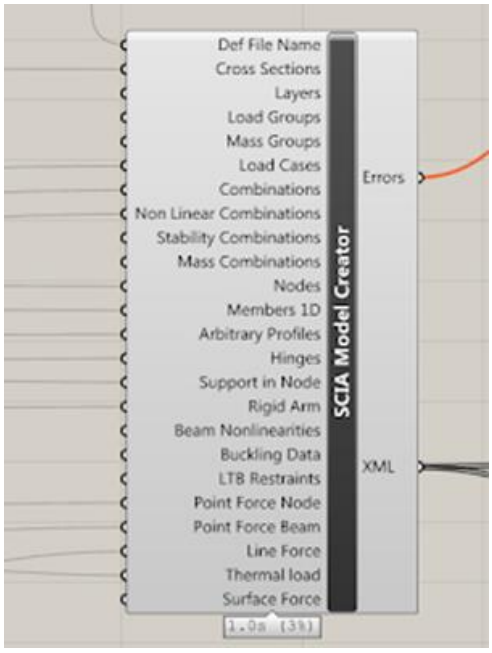
Yapının geometrisi ve biçiminin karmaşıklığı nedeniyle, hesaplamalı tasarım araçları ile üretilen 3B model bu proje için önemlidir. 2B tasarım aşamasında oluşturulan kesitler geometrinin yeterince anlaşılmasını sağlayamamıştır. Bu sebeple yapının 3B olarak modellenmesi gerekmiştir (Şekil 185).



Şekil 185. SCIA'da oluşturulmuş 3B model (URL-36)

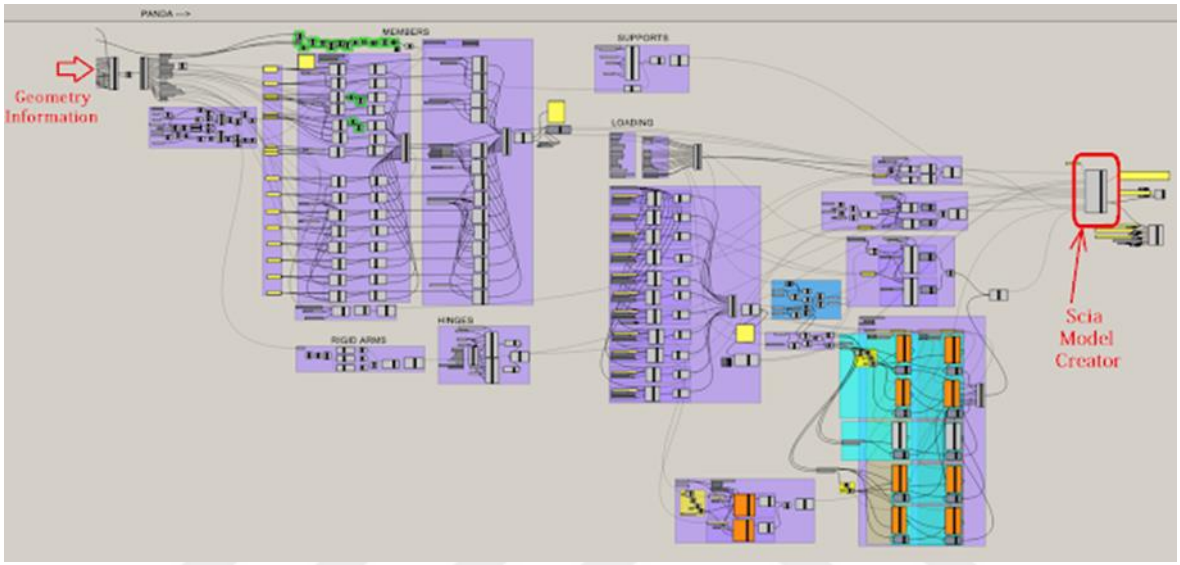
Mimari tasarımın Rhinoceros aracılığıyla yapılması ve yapısal tasarımın Revit aracılığıyla çizilmesi projenin başarılı bir şekilde yürütülmesi açısından yeterli olmamıştır. Bu sebeple Revit ile geliştirilen 3B LOD 300 model (level of details), Tekla Structures ve SCIA Engineer kullanılarak detaylandırılmıştır ve her bileşen için uygun modellenmiş bir konfigürasyon tanımlanmıştır (Besix, 2019, URL-36).

Başlangıçta Grasshopper yazılımında tanımlanan geometrideki parametrik elemanların ve düğümlerin, doğrudan SCIA'ya aktarılabilmesi için bir Grasshopper aracı kullanılmıştır (Şekil 186). Araç doğru bir şekilde kullanılırsa, herhangi bir ek parametre gerektirmeden modelin tamamı içe aktarılabilmektedir.



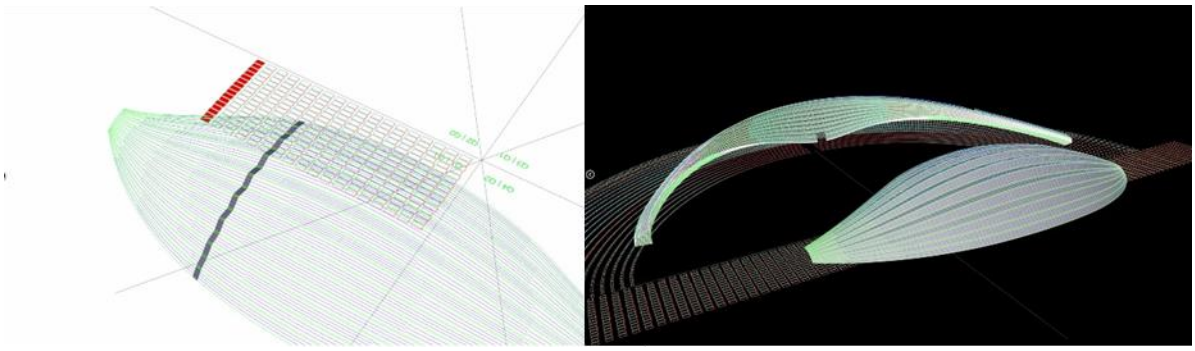
Şekil 186. Grasshopper 3B yazılımında kullanılan araç (URL-36)

Grasshopper 3B yazılımda, SCIA'ya aktarılmak üzere enine kesit, yük durumları ve kombinasyonları, uygulanan kuvvetler, menteşeler, destekler ve tasarım parametreleri de dahil olmak üzere her şey tanımlanmıştır (Şekil 187). Grasshopper'da oluşturulan modelin son adımındaki bileşen "Pandarator", SCIA'ya aktarmaya hazır olan XML dosyasını oluşturmaktadır (URL-36).



Şekil 187. Tasarımın Grasshopper yazılımında modellenmesi (URL-36)

Sonuç olarak hesaplamalı tasarım araçları kullanılarak otomatikleştirilen üretim süreci ve imalat çizimleri, CNC makineleri için gerekli olan üretim dosyalarının kolaylıkla oluşturulmasını sağlamıştır (Şekil 188).



Şekil 188. Dijital fabrikasyon için üretilen modeller

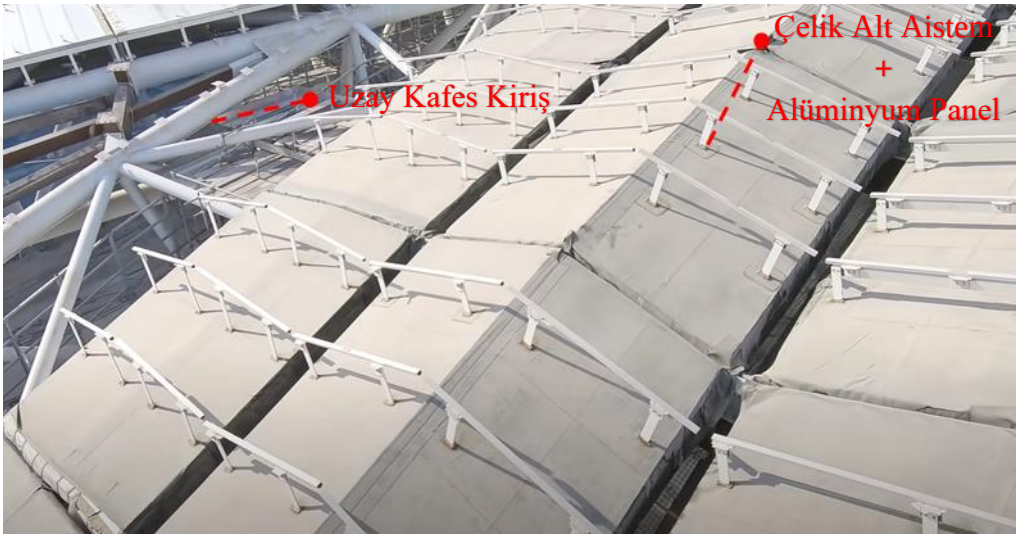
- Cephe Tasarımı

Yapı kabuğu tasarımında, kablolar ve sıcak iklim koşulları nedeniyle PTFE membran kullanılmıştır (Şekil 189, Şekil 190). Bu membranın katlamalı formu çelik kablolar yardımıyla gerdirilerek oluşturulmuştur. Aynı zamanda stadyumdaki oyuncu ve seyirci konforunu sağlamak için kullanılan bilgisayar modellemesi ve rüzgar tüneli testleri ile bina kabuğunun performansı en üst düzeye çıkarılmıştır.

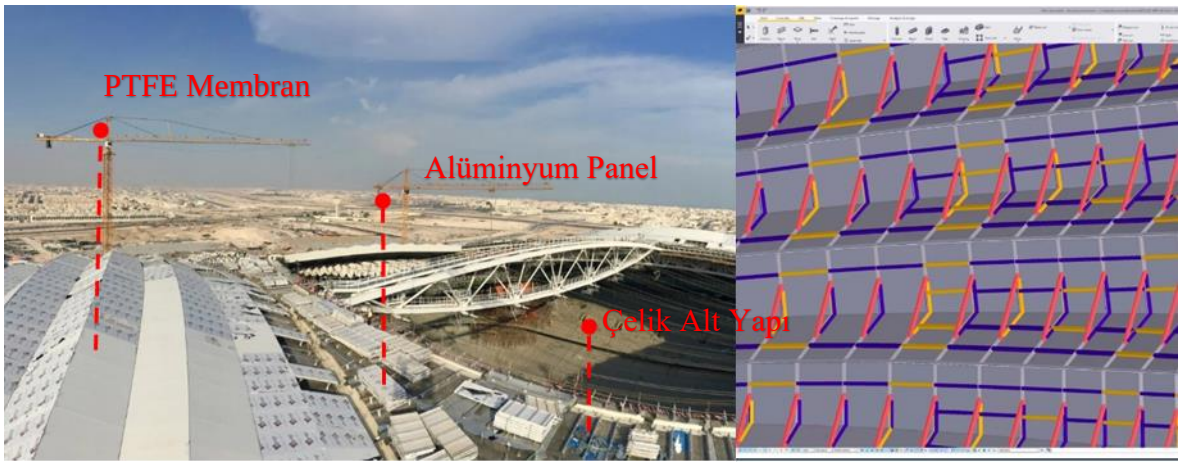
Şekil 189. PTFE membran ve çelik kablolar (URL-32)

Şekil 190. PTFE örtünün montaj aşaması

İstenilen dinamik katlama modelinin elde edilebilmesi için çelik bir alt yapı üzerinde alüminyum paneller tercih edilmiş, PTFE membran ve kablolar ise bu panellerin üzerine monte edilmiştir (Şekil 191, Şekil 192). Çelik kablolar, kıvrımların maksimum yüksekliğe ulaştığı yerde biçimi korumak için gerdirilmiştir. Kıvrımların maksimum yüksekliği 8,5 metreye kadar ulaşmaktadır. Stadyumun farklı bir özelliği, sahanın üzerinin 30 dk içerisinde kapanmasını sağlayan 10.800 m²'lik ve 92 metre uzunluğunda olan açılıp kapanabilir bir iç çatıdır. Cephe yüzeyinin toplam alanı ise 65.000 m²'dir (Göppert ve Paech, 2020; URL-35).



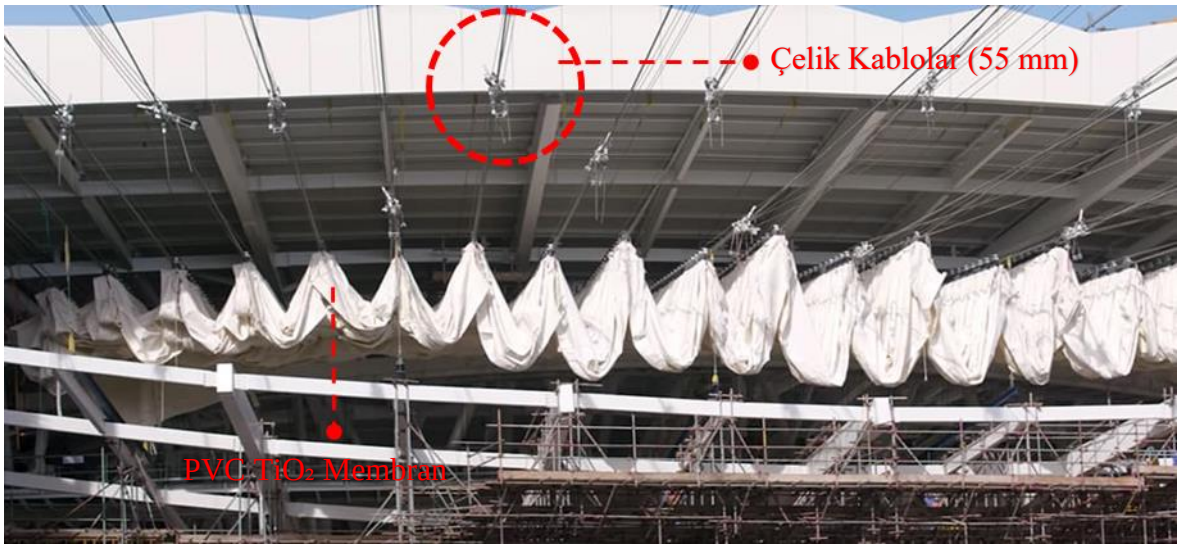
Şekil 191. Al Janoub Stadyumu ikincil çelik strüktür



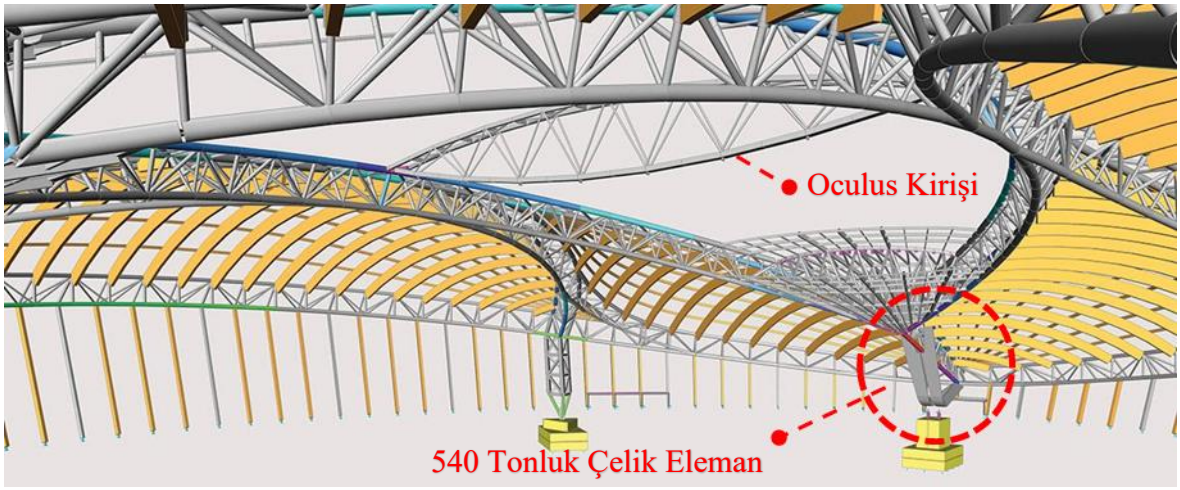
Şekil 192. Çelik alt yapı ve alüminyum paneller (sol); alüminyum panelleri tutan çelik elemanlar

İç çatının her bir yarısı için kullanılan 23 kablo, iç çatı desteği ile dış çatı arasında yelpaze şeklindeki bir düzen doğrultusunda uzanmaktadır (Şekil 193). Tam kilitli spiral

kablolar dönüşümlü olarak iç çatı desteğinin yani Oculus kirişinin üst ve alt çubuklarına bağlanmıştır ve membran çatı yüzeyinin tepe ve çukur noktalarını oluşturmaktadır. Bu spiral kablolar 55 mm kalınlığındadır. Kabloların altında; çözgü yönünde 115 kN/m, atkı yönünde 110 kN/m gerilme direncine sahip radyal olarak şekillendirilen membran düzenlenmiştir. Radyal bir şekilde uygulanan kabloların yönü katlanmış membranın şeklini tanımlamaktadır. Kıvrımların yüksekliği Oculus kirişinin ortasında maksimuma ulaşmaktadır ve dış çatı bağlantısına doğru ilerlerken yükseklik azalır. Oculus kirişi ve 540 tonluk kavisli çelik elemanlar bu iç çatıyı desteklemektedir (Göppert ve Paech, 2020; Şekil 194).

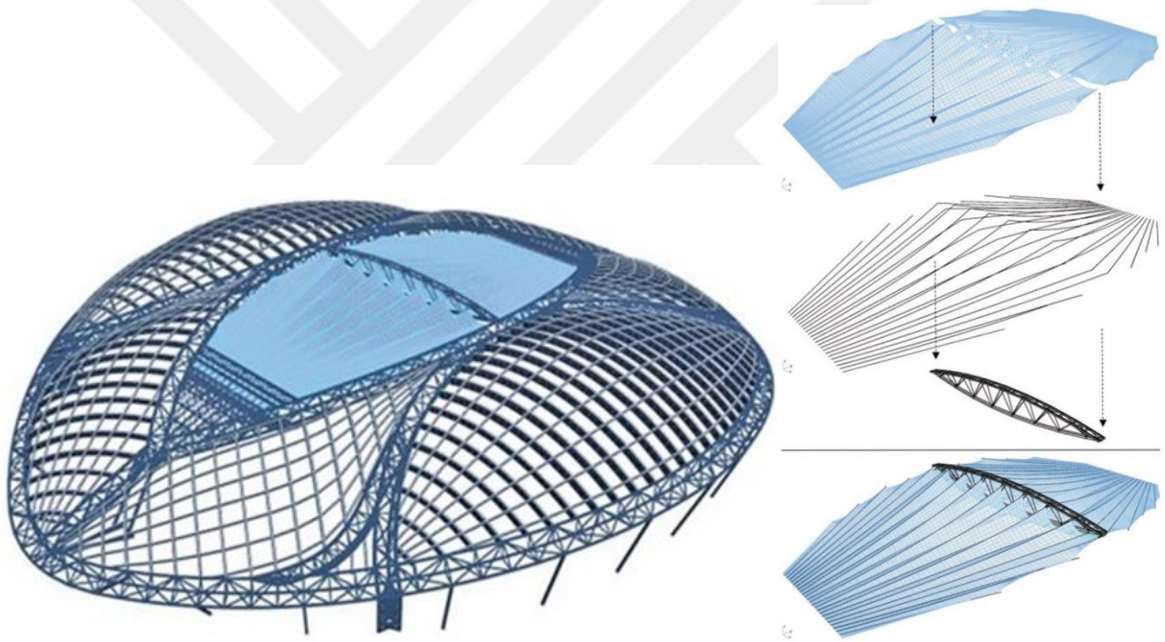


Şekil 193. PVC TiO_2 kapmalı iç çatı ve kablolar (Göppert ve Paech, 2020)



Şekil 194. Al Janoub stadyumu çelik strüktür modeli (URL-36)

İç çatıda kullanılan membran, çift taraf kaplamalı PVC TiO_2 bir örtüdür. Bu membran, her bir halat ekseninde, minimum 570 kN'a kadar kopma mukavemeti olan dikilmiş radyal kayışlarla güçlendirilmiştir. Radyal kayışlar, sürgülü taşıyıcılar ile belirli noktalarda ilgili kablolara bağlanmaktadır. İç çatıdaki membranların düşük ağırlığı nedeniyle basit bir mekanik sistemin kurulması mümkündür. Sürtünme kuvvetini mümkün olduğunca düşük tutmak için makaralı bir taşıyıcı sistem seçilmiştir. Raylı taşıyıcılar, kablolar üzerinde kayarak iç çatının kapanmasını sağlamaktadır. Dış çatı kaplaması, optimum gölgeleme ve yağış geçirmezlik elde etmek için her zaman iç çatının üzerine çıkmaktadır. İç çatının kuzey ve güney uçlarında membranın toplandığı bir bölüm bulunmaktadır. Bu noktalarda dış çatı, iç çatının yaklaşık 7 m üzerinde çıkıntı yapmaktadır. Bu, iç çatının aşırı hava koşullarında bile yeterince korunmasını sağlamaktadır (Göppert ve Paech, 2020; Şekil 195).



Şekil 195. Açılır kapanır membran çatı yapısı 3B model (Göppert ve Paech, 2020)

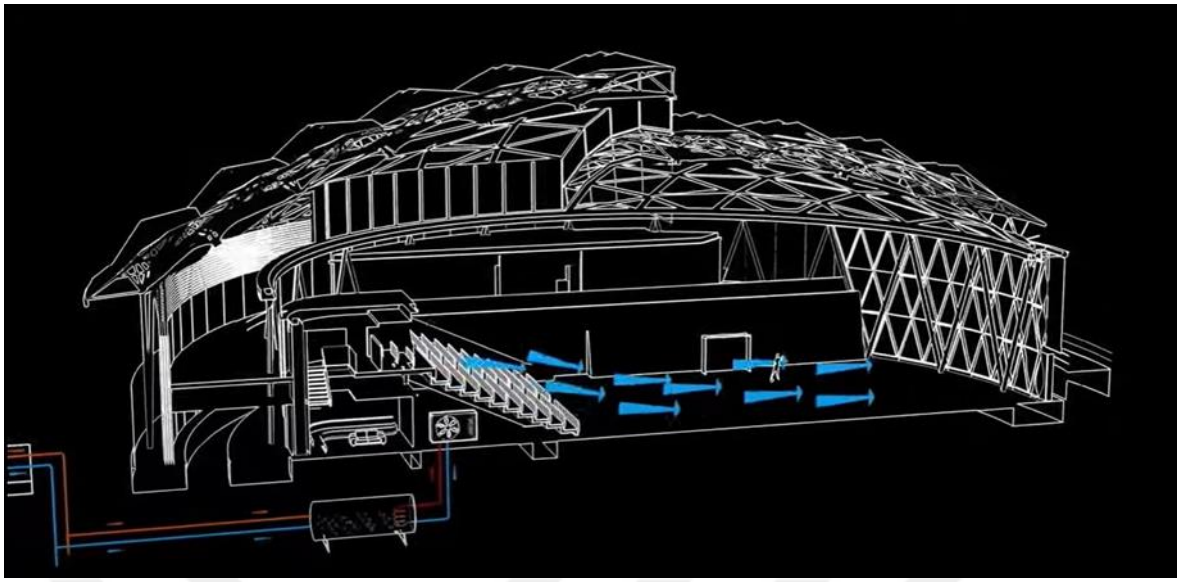
Karşılıklı duran iki membranın her biri, 332 raylı taşıyıcı ile tepe ve çukur kablolarına bağlanmaktadır. Taşıyıcılar, tamamen kilitli spiral kablolar üzerinde yağ emdirilmiş bir çeşit sentetik elyaf olan aramid bloklar aracılığıyla kaydırılır. Çatının her bir yarısı 25 vinç sistemi, yani iki ray ve 23 kablo ekseni üzerinden kaydırılır ve ön gerdirilir. Bu vinçler membran garajda yer almaktadır. İç çatı kapatıldığında vinçler, taşıyıcıları kaydırma kabloları aracılığıyla çeker. İlgili eksenlerdeki uzunlukların ve taşıyıcıların farklı olmasına rağmen membran çatı, doğru bir şekilde katlanacak biçimde ayarlanmıştır (Şekil 196).

Şekil 196. Al Janoub Stadyumu inşaat aşaması

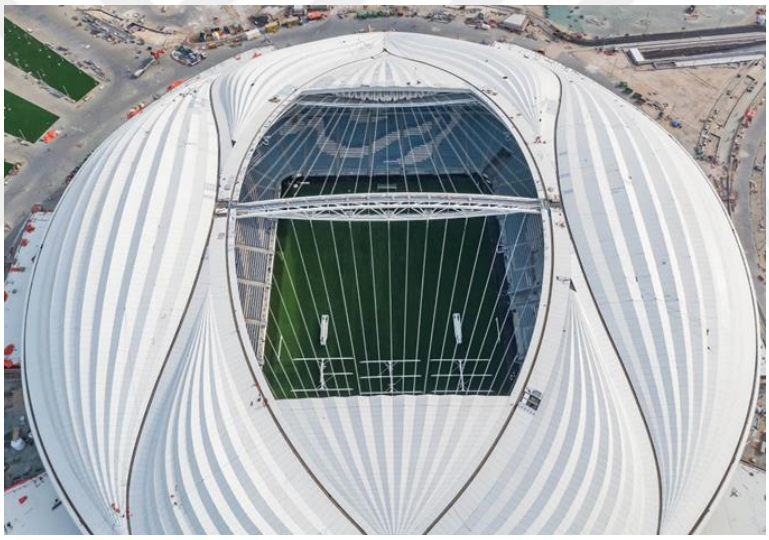
- Sürdürülebilirlik

Al Janoub Stadyumu dünyanın en sürdürülebilir stadyumları arasında yer almaktadır ve üç adet sürdürülebilirlik sertifikası almıştır. Bunlar; Küresel Sürdürülebilirlik Değerlendirme Sistemi (GSAS) Design & Building (4 yıldız), projenin inşaatı sırasında çevreyi korumaya yönelik kapsamlı çabaları takdir eden GSAS Construction Management Class A ve Enerji merkezi için Mevsimsel Enerji Verimliliği Oranı Belgesi'dir (URL-41). GSAS, ABD merkezli LEED' e benzer bir sürdürülebilirlik değerlendirme sistemidir.

Stadyumun en önemli özelliklerinden biri, yenilikçi ve enerji tasarruflu soğutma teknolojisidir (Besix, 2019; Şekil 197). Projedeki aerodinamik tasarım ve enerji geri kazanım sistemi, enerji tüketimini azaltmaktadır. Bir dizi güneş panelinden güç alan bu sistem, kısmen soğutulmuş havayı alıp sahaya geri döndüren bir hava sirkülasyonu sağlar. Ek olarak soğutulmuş havayı tribünlere dağıtan bir koltuk altı difüzör sistemi kullanır. Ayrıca, açılıp kapanabilen çatının gölgeleme sağlaması, enerji tüketimini ciddi oranda düşürmekte ve stadyumu aşırı iklim koşullarından korumaktadır (Şekil 198). Açılıp kapanabilir çatı sayesinde 50 ºC'ye varan sıcak yaz aylarında bile seyirci alanlarını 18 ºC'ye ve oyun sahasını 20 ºC'ye kadar soğutmak mümkündür. Bu sayede seyirciler ve oyuncular için gerekli konfor koşulları sağlanmış olur (URL-42, URL-43). Ek olarak stadyumun çevresinde 800 yeni ağaç ve az su tüketen bitki örtüsü, bisiklet yolları, binicilik alanları, koşu parkurları gibi geniş yeşil alanlar düzenlenmiştir.



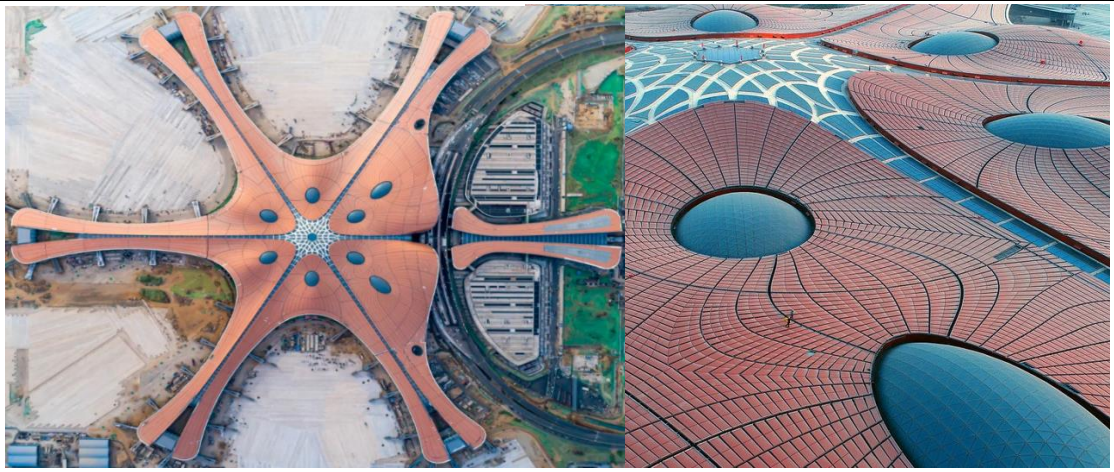
Şekil 197. Soğutma sistemi: soğuk hava akışı (URL-42)



Şekil 198. Açılıp kapanabilen çatı sistemi (URL-32)

2.2.7. Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı

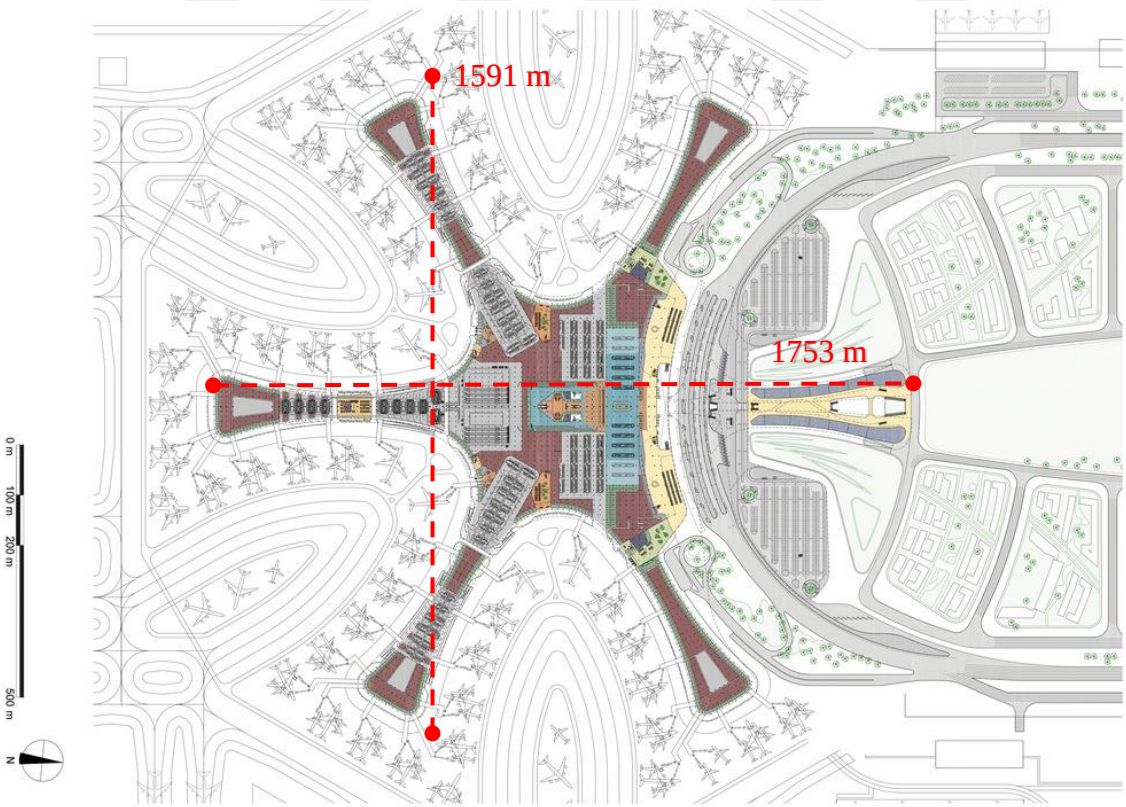
Tablo 8. Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı yapı künyesi

<table>
<tr><td rowspan="8">Kimlik</td><td>Yapı Adı</td><td colspan="5">BEIJING DAXING ULUSLARARASI HAVALİMANI
(Beijing Daxing International Airport)</td></tr>
<tr><td>Yapı Tasarımı</td><td colspan="5">Zaha Hadid Architects</td></tr>
<tr><td>Yapının Yeri</td><td colspan="5">Pekin, Çin</td></tr>
<tr><td>Yapım Yılı</td><td colspan="5">2014-2019</td></tr>
<tr><td>Yapı İşlevi</td><td colspan="5">Havalimanı</td></tr>
<tr><td>Yapı Boyutları</td><td colspan="2">Alan:
700.000 m²</td><td>Yükseklik:
49 m</td><td colspan="2">Genişlik:
1753 × 1591 m</td></tr>
<tr><td>Ödüller</td><td colspan="5">2020 A+ Awards Special Honoree Award, Outstanding Structure Award (OStrA) 2021</td></tr>
<tr><td>Maliyet</td><td colspan="5">$ 17.470.000.000</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Strüktür</td><td>Strüktür Mühendisi</td><td colspan="5">Buro Happold, ARUP, Beijing Institute of Architectural Design</td></tr>
<tr><td>Strüktür Üreticisi</td><td rowspan="3">HT</td><td colspan="4">Jiangsu Huning Steel Structure And Machinery, JINGGONG Steel Building Group</td></tr>
<tr><td>Strüktür Malzemesi</td><td>Çelik</td><td rowspan="2">TS</td><td colspan="2">Beton</td></tr>
<tr><td>Strüktür Türü</td><td>Uzay kafes strüktür</td><td colspan="2">Betonarme Çerçeve Strüktür</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Cephe</td><td>Cephe Tasarımı/ Müh.</td><td colspan="5">XinShan Curtainwall + Beijing Institute of Architectural Design (Group) Co –Complex Structure Division</td></tr>
<tr><td>Kaplama M. Üreticisi</td><td colspan="5">Tianjin NorthGlass (özel cam), CSG (cephe camı), Wonderful-Wall New Matrials (çatı paneli)</td></tr>
<tr><td>Kaplama Malzemesi</td><td colspan="5">Bronz kaplamalı alüminyum havalandırmalı panel, alüminyum örgü cam</td></tr>
<tr><td>Yüzey Boyutu</td><td colspan="5">180.000 m² (çatı) + 54.000 m² (cephe) + 28.000 m² (ışıklıklar)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">HT</td><td>HT Tekniği</td><td colspan="5">Parametrik Tasarım</td></tr>
<tr><td>HT Araçları</td><td colspan="5">Maya, Rhinoceros 3D, Grasshopper, CATIA, Revit, AutoCAD, Navisworks, AutoCAD Stingray, Revit Dynamo, Tekla Structures</td></tr>
<tr><td>Sayısal Üretim Teknikleri</td><td colspan="5">CNC boru bükme makinesi, CNC 2B kesim makinesi, CNC biçimlendirme makinesi</td></tr>
<tr><td>YAPI GÖRSELLERİ</td><td colspan="6">  </td></tr>
</table>

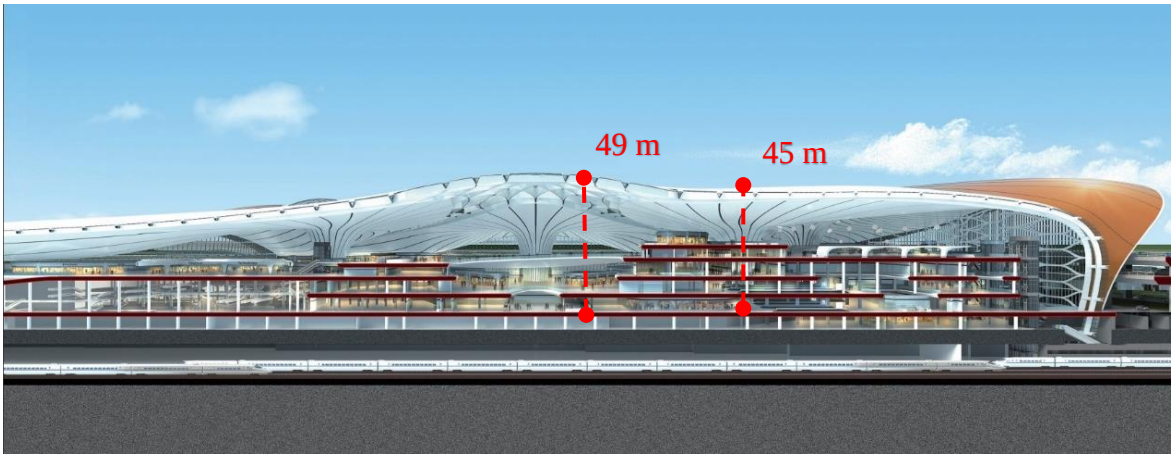
- Genel Bilgiler

Dünyanın en büyük çatı alanına sahip havalimanı olan Beijing Daxin Uluslararası Havalimanı (Beijing Daxing International Airport, BDUH), Zaha Hadid Architects tarafından tasarlanmıştır. Çin'in başkenti Pekin'de bulunan bu havalimanının inşaatına 2014 yılında başlanmış ve inşaat 2019 yılında tamamlanmıştır. BDUH'nİn strüktür mühendisliği Buro Happold, ARUP ve yerel mimarlardan oluşan Pekin Mimarlık Enstitüsü (Beijing Institute of Architectural Design) tarafından yürütülmüştür. Ayrıca yapının cephe mühendisliğini de Pekin Mimarlık Enstitüsü yapmıştır (URL-44, URL-45).

Yukarıdan bakıldığında bir deniz yıldızına benzeyen BDUH, merkezinde kolonsuz büyük bir salon ve bu alana bağlı, farklı yönlere uzanan 6 kolu içermektedir. Yapı, Kuzeyden Güneye 1.753 metre uzunluğunda, Doğudan Batıya ise yaklaşık 1.591 metre genişliğindedir. Havalimanının en uzak ucu ile merkez arasındaki mesafe 600 m kadardır. Büyük bir alanı kaplayan bu yapının toplam alanı 700.000 m²'dir. Yapının maksimum yüksekliği 49 metredir (Chen vd., 2020; Şekil 199; Şekil 200).



Şekil 199. Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı zemin kat planı (URL-45)



Şekil 200. BDUH yapı kesiti (Zhang, Meng, vd., 2019)

BDUH, çelik ve betonarme olmak üzere iki ayrı strüktür sisteminden oluşmaktadır (Şekil 201). Yapıdaki geniş açıklıkları geçebilmek ve kolonsuz mekanlar oluşturabilmek için ve hedeflenen eğrisel çatı düzenini oluşturabilmek için hiperbolik şeklindeki çelik strüktür kullanılmıştır. Gelecekte yapılanacak konfigürasyon ayarlamalarında alan esnekliği sağlamak için merkezi avluda bulunan kubbe, sadece 8 adet C sütun, 12 destek kirişi ve perde duvar ile desteklenmektedir. Yapıda kullanılan çelik miktarı Pekin Ulusal Stadyumunda kullanılan çeliğin yarısında eşittir (Mao, 2021).

Şekil 201. BDUH yapı konstrüksiyonu

Yapının düşey yüzeylerini kaplayan kısımlarında giydirme cephe sistemi, çatıdaki alüminyum paneller için ise kenet metal çatı sistemi kullanılmıştır. Yapının merkezinde bulunan büyük cam kubbe ve hava kabarcığı şeklindeki 8 adet cam çatı penceresi, aynı

zamanda koridorların ortasından geçen şerit şeklindeki ışıklıklar yapıya doğal ışık sağlamakta ve bir aydınlatma kuşağı oluşturmaktadır (Guo, Du, Gan, 2019; Men ve Shi, 2019).

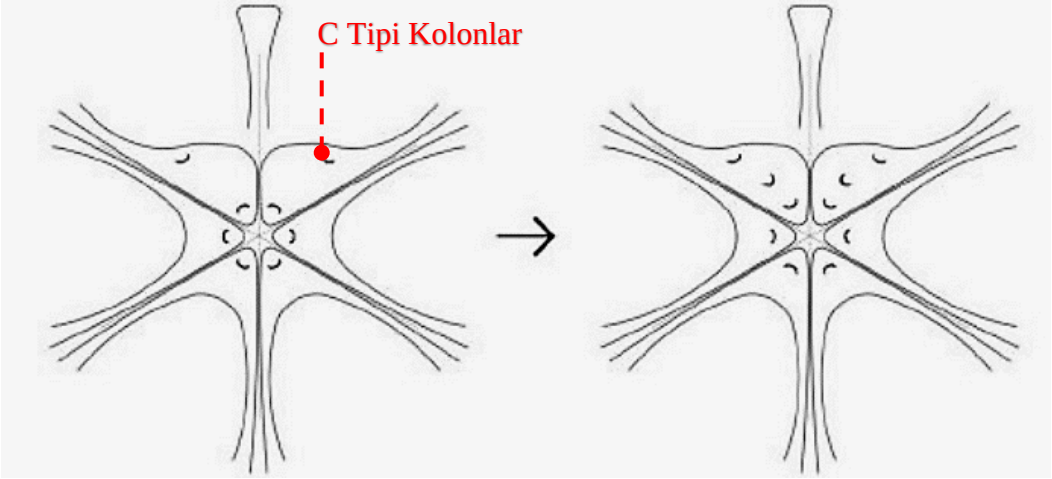
- Strüktür Tasarımı

BDUH, betonarme çerçeve strüktür ve uzay kafes strüktür olmak üzere iki farklı sistemden oluşmaktadır (URL-46; URL-47). Uzay kafes strüktür hem hiperbolik çatı yapısını oluşturmakta hem de çatının bir uzantısı olan C şeklindeki kolonlarla yükü zemine taşımaktadır. Bu karmaşık çelik strüktür, 180 metreye varan büyük açıklıkların geçilmesini sağlamakta ve bu sayede kolonsuz, kesintisiz mekanlar oluşturmaktadır (Şekil 202).

Yapının merkezinde bulunan cam kubbe bile tek başına 63.400 çelik elemandan oluşmaktadır. Yapıda kullanılan toplam çelik miktarı 55.000 tondur. Yalnız çatıda kullanılan çelik elemanların ağırlığı ise 30.000 tondur. Bu elemanların sayısı 170.000'i aşmaktadır (Huihui, 2020; Mao, 2021; Parker, 2021).

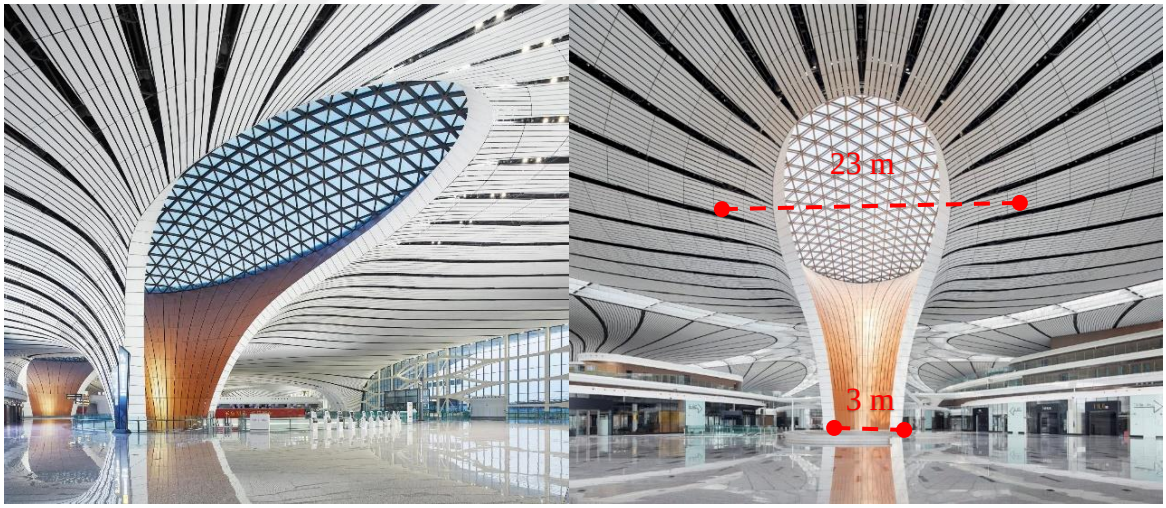
Şekil 202. BDUH betonarme ve uzay kafes strüktür (inşaat aşaması)

BDUH'nin serbest biçimli çelik çatısını taşıyan C tipi kolonların konsepti ZHA tarafından önerilmiştir. Başlangıçta içe doğru tasarlanan C şeklindeki kolonlar, iç mekandaki doğal ışık yetersizliğinden dolayı dışa doğru yönlendirilmiştir. Bunun sonucunda başlangıçta 8 adet olan bu kolonlar 10'a çıkarılmıştır (Hiuhiu, 2020; Şekil 203).



Şekil 203. C tipi kolonların yerleşimi (Huihui, 2019)

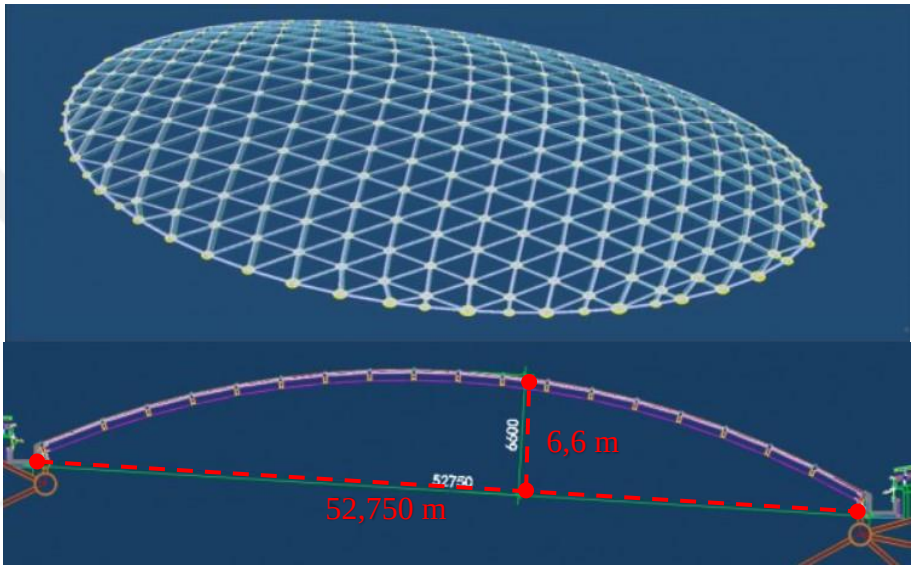
Eğrisel çelik elemanlardan oluşan kolonlar, 49 metre yüksekliğindeki hiperbolik çelik çatıyı yukarıdan aşağıya doğru yönlendirerek zemine bağlamaktadır. Çatının bir uzantısı olan C tipi kolonlar, camdan oluşan ve doğal ışığı içeriye alan bir açıklığı çevrelemektedir. Geniş bir açıklıkla başlayan bu kolonlar zemine yaklaştıkça daralmaktadır. Çelik kolonların en geniş kısmı 23 metre, en dar olan noktası ise 3 metredir (Hiuhiu, 2020; Şekil 204).



Şekil 204. C tipi kolonların görünümü (iç mekan; URL 44)

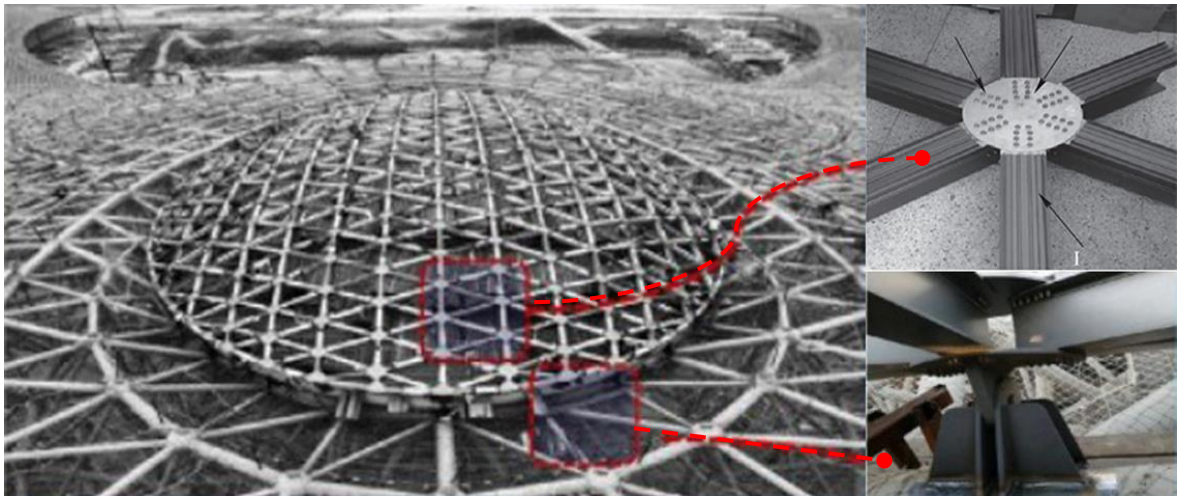
C tipi kolonların oluşturduğu bu aydınlatma pencerelerinin alanı yaklaşık 8000 m²'dir. Bir tür alüminyum bağlantı noktaları ile birleştirilen bu sistem tek katmanlı uzay kafes strüktürden oluşmaktadır. Çatıdaki kabarcık şeklindeki 8 pencere arasında en büyük cam çatı 1300 m² alana, 57,7 m uzunluğa ve 27,9 m genişliğe sahiptir. Ayrıca bu kubbenin yüksekliği 6,6 metredir (Şekil 205). Bu çelik yapıyı oluşturan çubukların iç kuvveti ve yapının

stabilitesi, yükseklik ve açıklık oranına bağlıdır. Bu oran genellikle 1/5'ten az değildir. Oran küçüldükçe çelik strüktürün stabilitesi de zayıflamaktadır. Aydınlatma çatısının bütün bileşenleri, yüksek işleme hassasiyeti ile CNC makineler tarafından üretilmiştir (Şekil 206). Geleneksel çelik bağlantılar ile karşılaştırıldığında alüminyum alaşımlı bağlantı elemanları kolay işlenebilme avantajına sahiptir. Aydınlatma çatısına ait bütün parçalar şantiyede monte edilmiştir. Bu bileşenlerin cam ile birleşim detayı Şekil 207'de gösterilmiştir (Men ve Shi, 2019; Li vd., 2022; URL-48).



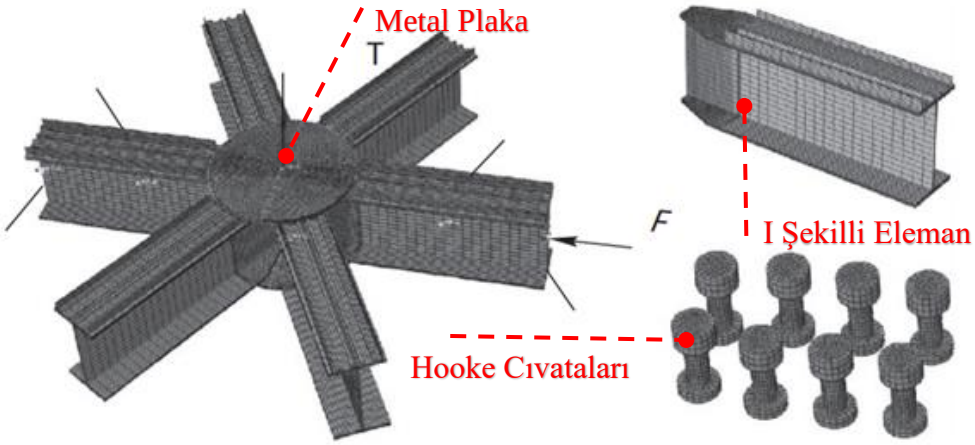
Şekil 205. Alüminyum bağlantı elemanlarına sahip aydınlatma çatısı (Zhang vd., 2020)

Şekil 206. Alüminyum bağlantı elemanları (sol); bağlantı elemanlarının üretimi (CNC, orta); elemanların montajı (sağ; Zhang vd., 2020)



Şekil 207. I şekilli alüminyum bağlantı elemanı (sol); düğüm plakası (sağ üst); çelik strüktür ile bağlantı detayı (sağ alt; Zhang vd., 2020)

Alüminyum alaşımlı malzemeler, hafifliği, yüksek mukavemeti, güçlü korozyon direnci ve iyi işleme performansının avantajları nedeniyle son yıllarda sürekli olarak kullanılmaktadır. Alüminyum, yapısı sayesinde çeşitli serbest biçimli yüzey formlarına güçlü bir şekilde uyarlanabilirliğe sahiptir. Bu özel üretimli alüminyum bağlantı elemanları üst ve alt bağlantı plakaları, I-şekilli elemanlar ve Hooke cıvatalardan oluşmaktadır (Zhang, Feng, Liu, 2020; Şekil 208).



Şekil 208. Alüminyum bağlantı elemanları (Zhang vd., 2020)

Bu elemanlar, cıvatalarla birbirine monte edilmektedir. Düğümlerdeki toplam eleman sayısı 164.000'dir. Birbirine monte edilen elemanlar kaldırılarak yerine yerleştirilmektedir. Daha sonra cam montajı yapılmaktadır (Zhang, Feng, Liu, 2020; Şekil 209). Oluşturulan

strüktür için korozyon önleyici bir işleme gerek yoktur. 50 yıldan fazla bakım gerektirmeyen malzeme sayesinde ömür boyu kendi rengini koruyabilmektedir.

Şekil 209. Alüminyum plakaların I profillere montajı (sol); montajın bitmiş hali (orta); camların alüminyum bağlantı elemanlarına montajı (sağ)

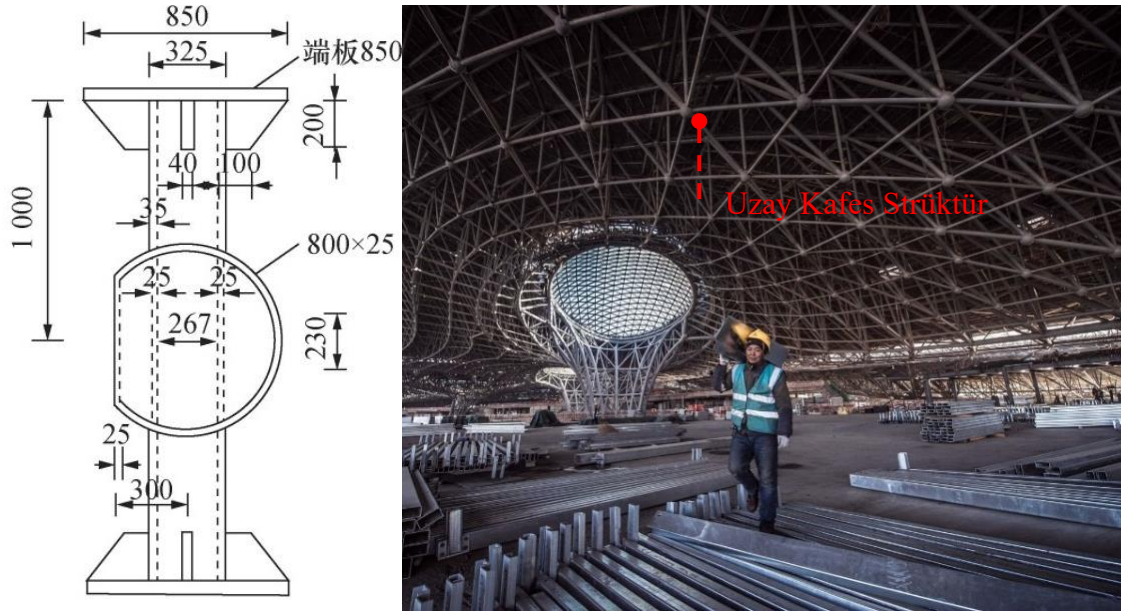
Bahsedilen strüktürün montajı; iskele, inşaat platformu, parça kaldırma ve sistemin boyutları nedeniyle oldukça zordur. Alt kattan 28 metre yükseklikte bulunan çatı pencereleri için kule tipi bir inşaat platformu kurulmuştur. Bütün yapı elemanlarının düzgün bir şekilde konumlandırılması için sürekli olarak üç boyutlu lazer tarama kullanılmıştır (Fu, Chang, Liu, 2019; Yang vd., 2020; Şekil 210).

Şekil 210. Çatı pencerelerinin montaj aşaması

Büyük çatı pencereleri, 10.000 çelik bilye ile birbirine bağlanan 60.000 çelik çubukla çerçevelenmiştir. Tüm bu elemanların boyutu ve konumu farklıdır. Bu sebeple elemanların her birine bir karekod atanmıştır. Bu karmaşık uzay kafes strüktürü oluşturabilmek için hata payının en fazla birkaç milimetre olması gerekmektedir (Chen vd., 2020; Su vd., 2018).

BDUH'nin karmaşık strüktürünü ve eğrisel çatısını oluşturan uzay kafes sistem, içi boş küresel bağlantı elemanları ve çelik borulardan oluşmaktadır. Kaynaklanarak oluşturulan bu sistemdeki küresel bağlantı elemanları, 1965 yılında Tianjin Üniversitesi'nde Profesör Liu Xiliang tarafından geliştirilmiştir. Bu küresel bağlantı elemanlarının çapı 800 mm büyüklüğünde, kalınlığı ise 25 mm'dir. Çelik boruların çapı ise 325 mm'dir (Chen vd., 2020; URL-49; Şekil 211, Şekil 212).

Şekil 211. Uzay kafes strüktür montajı (küresel düğüm noktası; Chen vd., 2020)

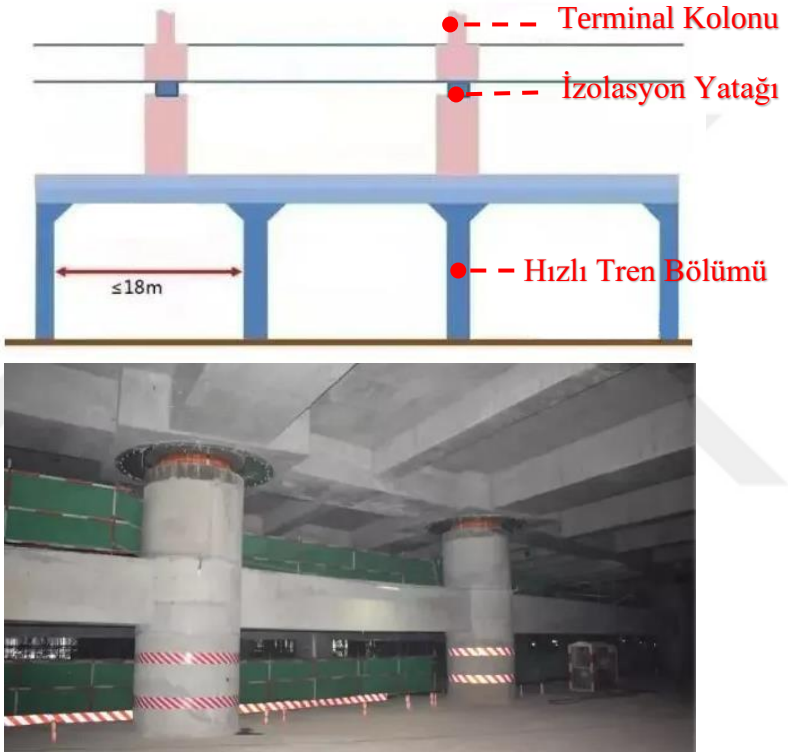


Şekil 212. Tambur şeklindeki kaynaklı içi boş küresel bağlantı elemanı (Chen vd., 2020)

Bu süreçte ARUP mühendisleri, yapısal konfigürasyon ve yapıya etki eden yükleri incelemiştir. Toplamda 420 yük kombinasyonu düşünülmüş ve 38 farklı çelik boru kesit

boyutu kullanılmıştır. Bu durum maliyeti düşürmüş ve yapının karbon ayak izini azaltmıştır (URL-49).

Ek olarak bu yapı, 8 büyüklüğündeki bir depreme dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bunu gerçekleştirebilmek için katmanlı titreşim izolasyon teknolojisi kullanılmıştır. Bahsedilen teknoloji, terminal binasının birinci katını bodrum katından tamamen ayırabilmek için birinci katın altına bir titreşim izolasyon sistemi yerleştirilmiştir (Zhang, Mu vd., 2019; Şekil 213).



Şekil 213. BDUH sismik izolasyon sistemi

- Hesaplamalı Tasarım

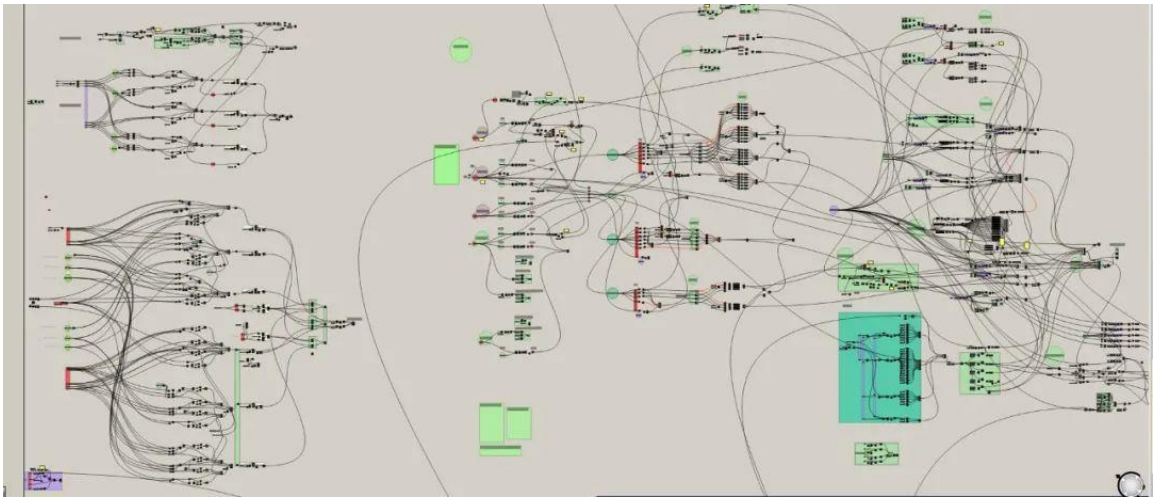
Projenin başlangıç aşamasında kapsamlı bir YBM planı oluşturulmuştur. Projeye dahil olan bütün disiplinlerin işbirlikçi bir şekilde ilerlemesini sağlamak için YBM'de kullanılacak standartlar ve yazılımlar belirlenmiştir. Tasarım üretime kadar her aşamada bir YBM lideri atanmıştır.

Yapının karmaşıklığı ve büyüklüğü göz önüne alındığında tek bir YBM aracı, tasarım hedeflerine ulaşılmasını sağlayamamıştır. Bu sebeple planlama aşamasında çok platformlu

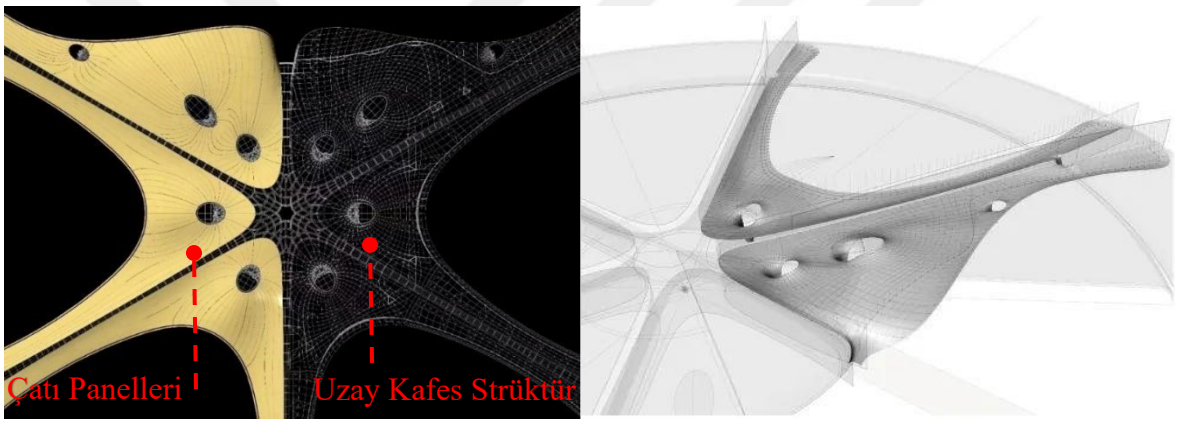
ve uygulanabilir YBM teknolojisi benimsenmiştir. Bina kabuğu ve serbest biçimli yüzeyleri tasarlayabilmek ve yönetebilmek için temel platform olarak Rhinoceros kullanılmıştır. Yapının 2B planlamasını kurgulayabilmek için geleneksel CAD yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca asansörler, çekirdek ve mekanik sistemler ve bu sistemlerin 3B olarak doğruluğunu sağlamak için Revit kullanılmıştır. Sonuç olarak, verimli bir YBM modeli ve işbirlikçi tasarım platformları aracılığıyla yüzlerce kişilik tasarım ekibi koordine edilmiş ve proje eş zamanlı olarak yürütülmüştür. Bunun sonucunda tasarım verimliliği ve doğruluk payı artımış, projenin daha kısa sürede gerçekleştirilmesi sağlanmıştır (Zhang, Meng vd., 2019; Li, Pei, 2019; Şekil 214).

Şekil 214. BDUH 3B plan modeli

Yapının Öklid dışı, serbest biçimli yüzeyini modelleyebilmek, çelik çatının konumlandırılmasını ve çatı panellerinin bölünmesini sağlayabilmek ve bu sistemlerin tam parametrik kontrolünü gerçekleştirebilmek için yüzey modelleme ve programlama aracı ve Maya yazılımı kullanılmıştır. Artan hassasiyet ile yapısal olarak hesaplanmış bir form oluşturanın yanısıra parametrik bir kontrol sağlayabilmek için Rhinoceros ve Grasshopper yazılımı tercih edilmiştir (Şekil 215). İlerleyen aşamalarda ise Revit yazılımına geçilmiştir (Zhang, Meng vd., 2019; Şekil 216).



Şekil 215. BDUH serbest biçimli çatının Grasshopper şeması (Zhang, Meng vd., 2019)



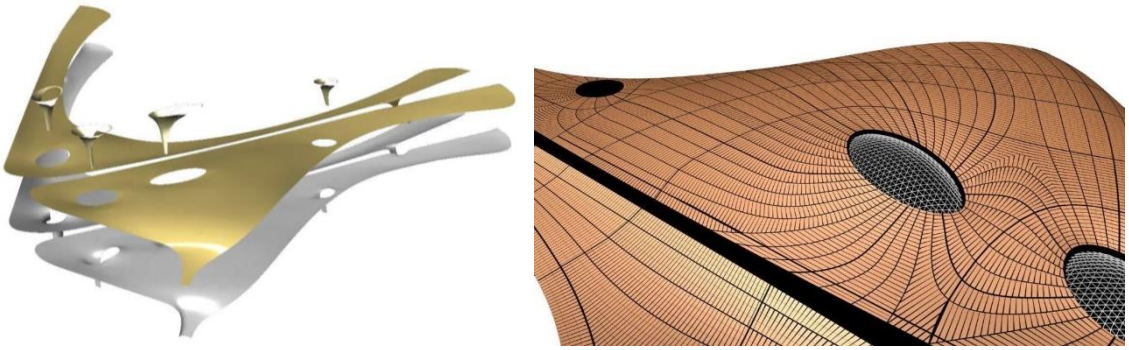
Şekil 216. Uzay kafes strüktür ve çatı panellerinin ilişkisi (sol); geometrik konumlandırma (Rhinoceros, sağ; Zhang, Meng vd., 2019)

BDUH'nin plan sisteminin YBM'si iki bölüme ayrılmıştır: ana plan sistemi ve özel sistem. Ana plan sisteminde tasarımı hızla ilerletebilmek için geleneksel mimari çizim programı olan AutoCAD, planı çeşitli sistemlerle entegre edebilmek ve daha kapsamlı bir plan oluşturabilmek için Revit tercih edilmiştir. Bununla birlikte 3B doğrulama ve analiz için Navisworks ve Stingray, yapı strüktürünü hesaplayabilmek için ise Tekla Structures kullanılmıştır (Şekil 217; Zhang, Meng vd., 2019).

Yapının karmaşık ve çift eğrilikli çatısı parametrik olarak Rhinoceros 5.0 'da modellenmiştir. Daha sonra tasarım ekibi verimli bir serbest biçimli yüzey elde edebilmek için T-Spline ile oluşturulmuş yüzeyi kullanmıştır. Bunun sebebi NURBS ile oluşturulan yüzeyin kontrol noktalarının sayıca fazla olmasıdır. T-spline yüzey, referans düzlemini oluştururken, yüzey şeklinin topolojik analizi yoluyla yapısal çizgileri en aza indirmektedir.

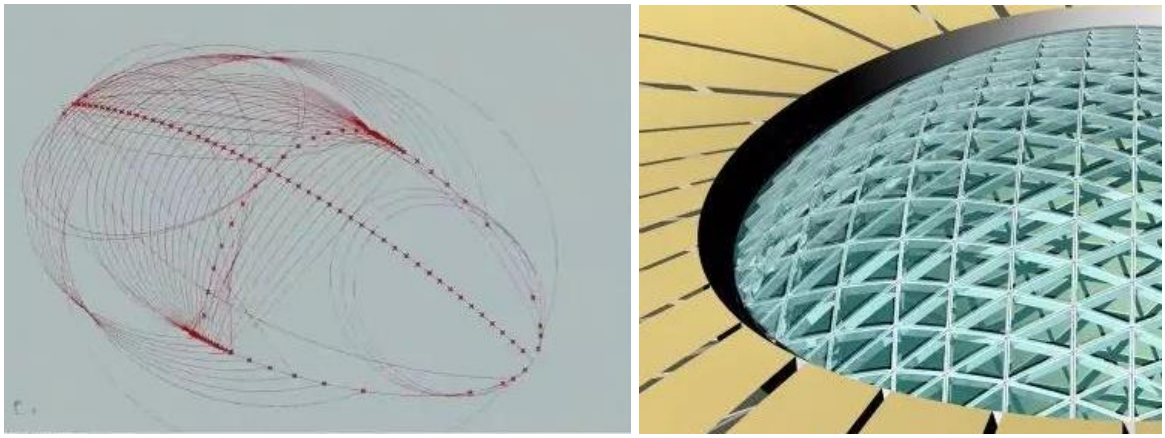
Sonuç olarak bu serbest biçimli yüzeyi oluşturabilmek için Grasshopper programında 6000'den fazla işlem ve yüzlerce ayarlanabilir parametre ile karmaşık bir mantıksal ilişki kurulmuştur (Men ve Shi, 2019; Zhang, Meng vd., 2019; Şekil 218).

Şekil 217. Kapsamlı tasarım modeli (Revit)



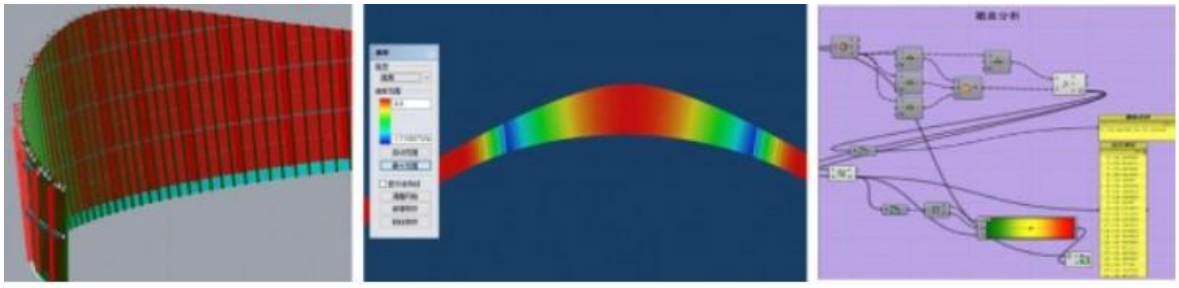
Şekil 218. Serbest biçimli yüzeyin oluşturulması (sol); çatı panellerinin hesaplamalı tasarımı (sağ; Zhang, Meng vd., 2019)

C tipi kolonların oluşturduğu çatı pencerelerinin düzgün kenarlarını oluşturabilmek ve eşit boyutlarda bölünmüş camlar elde etmek için genetik algoritma kullanılmıştır. Bu sebeple belirlenen 88 kontrol noktası ile tek tipte bölünmüş elemanlar ve aynı gerilime sahip yapısal ızgara elde edilmiştir (Şekil 219). Bir tür yapay zeka ile hesaplanan çatı pencerelerinin her bir formu 4 parametre tarafından kontrol edilmektedir. Gün ışığı alan çatının konumuna göre yapay zeka tarafından termal performans hesaplanmaktadır. Böylece gelen ışığın %60'ı elde edilir ve termal enerjinin %40'ı alınır (Zhang, Meng vd., 2019; Li vd., 2022).



Şekil 219. Çatı pencerelerinin kontrol noktası ile hesaplanarak eşit bölmelere ayrılması

Yapının eğrisel cam cephe sistemini oluşturabilmek için tüm cephe hesaplamalı tasarım araçları ile analiz edilmiştir. Eğrisel cepheyi oluşturan cam elemanların 30 mm'lik deformasyonla eğilmelerini sağlamak ve dış kuvvet kullanmanın uygulanabilirliğini doğrulamak için bir modelleme programı kullanmıştır. Hesaplama sonucunda 25 kg'lık bir dış kuvvetin camı 30 mm kadar bükebileceği ve ek gerilimin 5 Mpa olduğu ortaya çıkmıştır. Çıkan sonuçların doğruluğunu test etmek için araştırma ekibi, 1:1 ölçeğinde fiziksel bir model yaparak test etmiştir. Bunun sonucunda sonuçların, başlangıçtaki hesaplama ile uyuştuğu anlaşılmıştır (Men ve Shi, 2019; Zhang, Meng vd., 2019; Şekil 220). Ek olarak yapıyı daha güvenli, enerji tasarruflu ve verimli hale getirebilmek için hesaplamalı tasarım araçları kullanılarak rüzgar tüneli deneyi, doğal havalandırma simülasyonu, aydınlatma analizi ve hesaplaması, termal optimizasyon gibi yapı fiziği analizi gerçekleştirilmiştir (Wang vd., 2020).



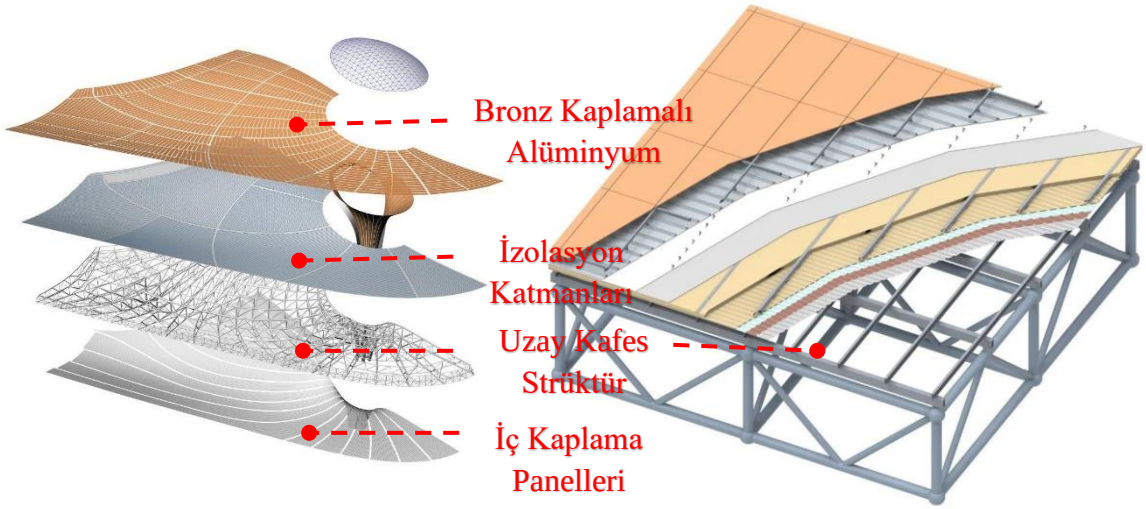
Şekil 220. Eğrisel cephenin analizi

- Cephe Tasarımı

BDUH'nin örtüsü iki farklı sistemle kaplanmıştır. Düşey cepheleri oluşturan yüzeylerde kavisli çift low-e kaplamalı temperli lamine cam giydirme cephe kullanılırken, çatıda ise bronz kaplamalı alüminyum paneller kullanılarak çift katlı metal çatı uygulanmıştır. Yapının çatısı neredeyse 290.000 m²'dir. Eğrisel cam cepheyi oluşturan giydirme cephenin alanı 54.000 m², doğal ışık sağlayan çatı pencerelerinin toplam alanı ise 28.000 m²'dir'dir (Men ve Shi, 2019; Guo vd., 2019; URL-50).

Çatıda 88.000 bronz kaplamalı alüminyum çatı paneli kullanılmıştır ve bu panellerin alanı 180.000 m²'dir. Her panelin ortalama boyutu 1.350 × 3.000 mm, derz genişliği ise 100 mm ile 700 mm arasında değişmektedir. Panellerin her biri CNC 2B kesme tekniği ile kesilmiş ve CNC biçimlendirme tekniği ile üretilmiştir (Men ve Shi, 2019; Guo vd., 2019; Şekil 221, Şekil 222).

Yapının tamamında kullanılan cam sayısı 12.800 adettir ve bu camların 8.000'den fazlası çatı için kullanılmıştır. Yapının merkezinde yer alan ve aydınlatma pencerelerinin en büyüğü olan kubbe şeklindeki merkezi çatı yaklaşık 7500 m²'dir. Bu merkezi aydınlatma çatısı yapının en yüksek noktasında yer almakta ve yaklaşık 48 metre yüksekliğindedir (Şekil 223). Bununla birlikte, merkezi çatı penceresine bağlanan şerit şeklindeki ışıklıkların alanı yaklaşık 12.000 m²'dir (Men ve Shi, 2019; Guo vd., 2019).



Şekil 221. BDUH çatı sistemi (Zhang, Meng vd., 2019)

Şekil 222. Çatı panellerinin montajı

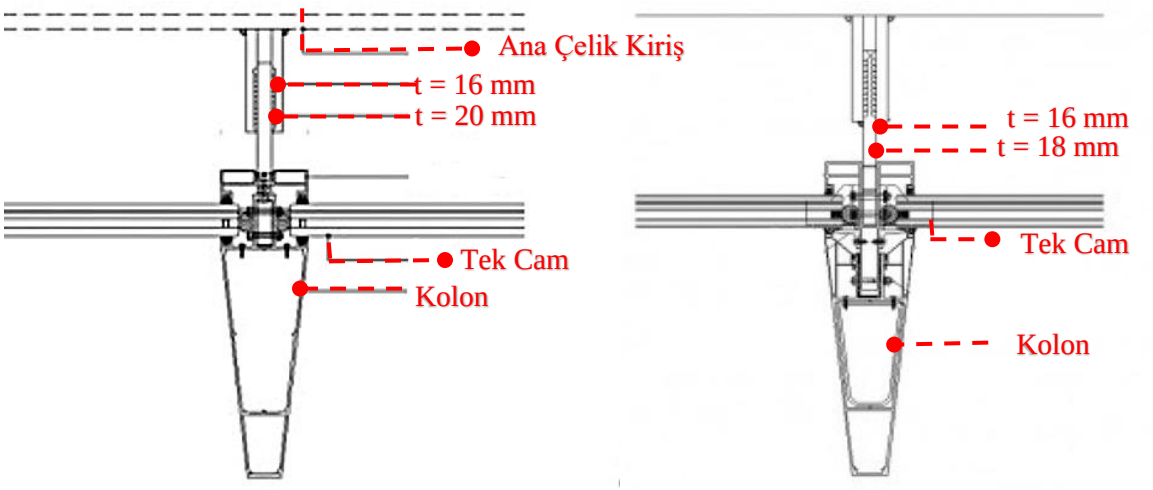
Şekil 223. Merkezi çatı aydınlatması (sol); C şekilli sütunların oluşturduğu aydınlatma çatıları (sağ)

C sütunların oluşturduğu elips şeklindeki çatı pencerelerinin alanı 8000 m²'dir. Gün ışığı alan çatı pencerelerinde alüminyum fileli cam adı verilen özel bir cam kullanılmıştır. Bahsedilen özel camlar Tianjin Northglass tarafından üretilmiştir. Bu camlar doğrudan güneş ışığından kaçınmak için yerleşik bir alüminyum ağ gölgelendirmesine sahiptir (Men ve Shi, 2019; Huihui, 2019; URL-51; Şekil 224).

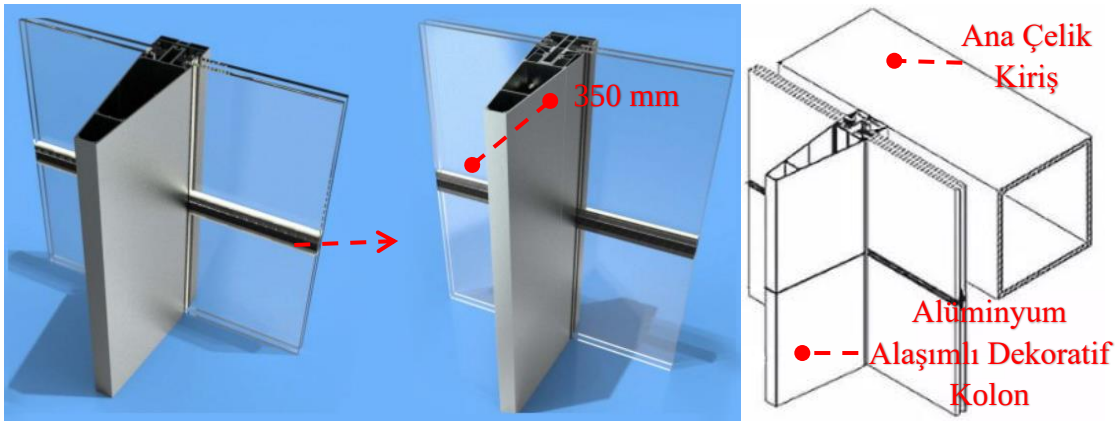
Şekil 224. Çatı pencerelerinde kullanılan alüminyum fileli cam (Huihui, 2019)

Yapının çekirdek alanının cephesindeki cam giydirme cephede kirişsiz kolon dış cephe sistemi kullanılmıştır. Bu cephe, maksimum 41,3 metre yüksekliğe sahiptir. Cam panellerin genişliği 2250 mm, yüksekliği ise 3000 mm'dir. Panellerin boyutu ve cephenin eğrisel olması nedeniyle giydirme cephe montajında birtakım zorluklar ortaya çıkmıştır. Bunun sonucunda iç tarafa yerleştirilen cam panellerin, kolonların dışına yerleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Cam giydirme cephenin taşıyıcı olmayan dekoratif kolonları, 350 mm kadar çıkıntı yapmaktadır. Bununla birlikte bu cam cephe, 9 m aralıklarla yerleştirilmiş taşıyıcı çelik kolonlarla desteklenmiştir. Cephedeki yatay çelik kirişler ise 6 m aralıklarla yerleştirilmiştir (Guo vd., 2019; Şekil 225, Şekil 226, Şekil 227).

Şekil 225. BDUH cam giydirme cephe (Guo vd., 2019)



Şekil 226. Orijinal giydirme cephe sistemi (sol); geliştirilmiş uygulama planı (sağ; Guo vd., 2019)



Şekil 227. Giydirme cephe sisteminin montaj karşılaştırması (sol); giydirme cephenin yatay çelik kirişlerle olan bağlantısı (sağ; Guo vd., 2019)

- Sürdürülebilirlik

BDUH'nin inşaat sürecinde bir dizi yeşil ve enerji tasarrufu sağlayan teknolojiler uygulanmıştır. Havalimanı şantiyesindeki işçilerin yaşam alanı ve ofis alanlarında ısıtma ve soğutmayı sağlamak için hava kaynaklı ısı pompası sistemi kullanılmıştır. Bu sistem her yıl 9 milyon kWh elektrik tasarrufu sağlamaktadır. Bu da 1.100 tondan fazla kömür tasarrufu anlamına gelmektedir. Ayrıca havalimanının inşaatı sürecinde yolların tümü güneş lambaları ile aydınlatılarak aydınlatma tasarrufu sağlanmıştır (Li vd., 2022).

Projede bir su arıtma istasyonu yapılmıştır. Arıtılan su; tuvaletler, yeşil alan için sulama vb. alanlarda kullanılmıştır. Bu tesis dakikada 500 m^3 su arıtabilmektedir. Yıllık su arıtma kapasitesi ise 180.000 m^3'tür (Liv d., 2022).

Yapının cam giydirme cephesinde kullanılan camların low-e kaplamalı olması sebebiyle hedeflenen iç mekan aydınlatması sağlanmıştır ve ortamın sıcaklık koşulları korunarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Dahası çatıda kullanılan alüminyum fileli cam ile fazla ışığın içeriye girmesi önlenmiştir (Guo vd., 2019).

Havalimanının çatısına güneş enerjisinden en az 10 Mw enerji üreten fotovoltaik modüller kurulmuştur. Yapının merkezi ısıtma sistemi, yerden ısı sağlayan ve yaklaşık 232.257 m^2'ye enerji sağlayabilen bir ısı pompası sistemini içermektedir (Li vd., 2022; URL-52).

Çatı sisteminde yer alan kar eritme, yağmur suyu toplama ve su yönetim sistemi ile 2,8 milyon m^3'e kadar yağmur suyu depolanabilmektedir. Sistem topladığı suyu sulak

alanlara, göllere ve akarsulara yönlendirerek bölgenin ısı adası etkisini azaltmaktadır (Li vd., 2022, URL-52; Şekil 228).

Şekil 228. Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı (URL-44)

2.2.8. Geleceğin Müzesi

Tablo 9. Geleceğin Müzesi yapı künyesi

Kimlik	**Yapı Adı**	**GELECEĞİN MÜZESİ** (Museum of the Future)				
	Yapı Tasarımı	Killa Design				
	Yapının Yeri	Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri				
	Yapım Yılı	2015-2022				
	Yapı İşlevi	Müze				
	Yapı Boyutları	**Alan:** 17.000 m² / 30.548 m²	**Yükseklik:** 78 m	**Genişlik:** 140 × 40 m		
	Ödüller	Tekla Middle East Awards, Best Public Project: Winner (2018), Best BIM Project: Winner (2018), Online Public Voting: Winner (2018), LEED Platin Sertifikası, WELL Sertifikası, Award of Excellence Winner - Best Tall Building Under 100m (CTBUH), AEC Excellence Award (Autodesk), International Project of the Year – New Build, Façade 2022 Design and Engineering Awards				
	Maliyet	$ 136.000.000				
Strüktür	**Strüktür Mühendisi**	Buro Happold				
	Strüktür Üreticisi	**HT**	Eversendai Engineering			
	Strüktür Malzemesi		Çelik	**TS**	Beton	
	Strüktür Türü		Uzay kafes strüktür		Betonarme Çerçeve Strüktür	
Cephe	**Cephe Tasarımı/ Müh.**	Shaun Killa				
	Kaplama M. Üreticisi	Affan Innovative Structures				
	Kaplama Malzemesi	Paslanmaz çelik kaplı GFRP panel, cam				
	Yüzey Boyutu	17,600 m²				
HT	**HT Tekniği**	Parametrik Tasarım				
	HT Araçları	Revit, Revit Dynamo, Rhinoceros 3D, Grasshopper, Trimble Connetct, Tekla Structures, BIM 360, CATIA				
	Sayısal Üretim Teknikleri	CNC boru bükme makinesi, CNC 2B kesim makinesi, CNC frezeleme makinesi				
YAPI GÖRSELLERİ						

- Genel Bilgiler

Geleneksel gökdelen formuna karşı radikal bir alternatifi temsil eden Geleceğin Müzesi (Museum of the Future, GM), Killa Design tarafından tasarlanmıştır. Yapının inşaatına 2015 yılında başlanmış ve inşaat 2022 yılında tamamlanmıştır. Dubai'de bulunan Geleceğin Müzesi'nin strüktür mühendisliğini Buro Happold yapmış, cephe mühendisliği ise Shaun Killa tarafından yönetilmiştir (URL-53, URL-54).

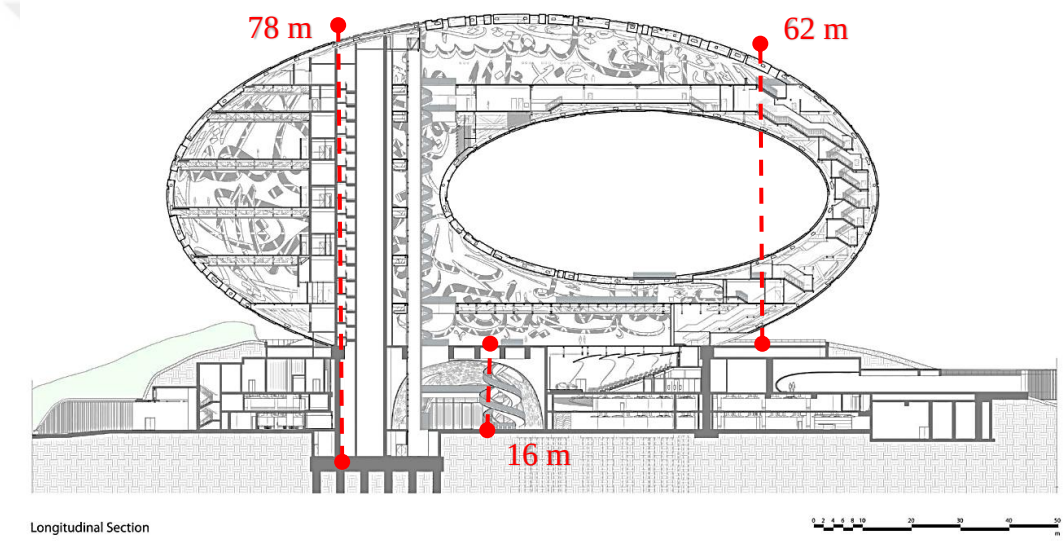
Geleceğin Müzesi, 140 metre uzunluğunda ve yaklaşık 40 metre genişliğinde karmaşık bir cephe tasarımına sahip ikonik bir yapıdır (Şekil 229). Killa Design'a göre bu tasarım yeşil bir tepe, form ve formun ortasındaki boşluk olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Cephesi Arap hat sanatıyla işlenmiş olan bu yapı, 3 katlı bir podyum (yeşil tepe) üzerinde konumlandırılmıştır. Ayrıca 6 sergi ve 1 yönetim katı ile oditoryum, satış alanları ve hizmet alanları içermektedir (Dutta, 2022; URL-55).

Şekil 229. Geleceğin Müzesi vaziyet planı (URL-53)

Yapı 7 katlıdır ve yüksekliği yaklaşık 78 metredir (Şekil 230). Bunun 16 metrelik kısmını 3 katlı podyum oluşturmaktadır. Torus biçimindeki yapının yüksekliği ise 62 metredir. Yaklaşık 1800 m² büyüklüğündeki lobi, 16 metre yüksekliğe sahiptir (Dutta, 2022).

İki farklı strüktür ile inşa edilen yapının temeli ve çekirdeği betonarme sistemden oluşmaktadır. İkinci strüktür ise betonarme strüktür ile bütünleşmiş çelik strüktürdür. Kompozit beton zemin plakaları, çelik strüktürü zemin kattan 7. kata kadar desteklemektedir (Şekil 231). Bu tasarım yaklaşımı, kolonsuz bir iç mekanın oluşturulmasını sağlamaktadır.

Proje toplamda 30.548 m² inşaat alanına sahiptir. Torus biçimindeki yapı ise 17.000 m² alan kaplamaktadır (Sudheer, 2021, URL-56). Bu Öklid dışı formun cephesinde, her biri birbirinden farklı boyut ve şekillerde olan GFRP paneller kullanılmıştır (Şekil 232; URL-53, URL-57).



Şekil 230. Geleceğin Müzesi yapı kesiti (URL-53)

Şekil 231. Geleceğin Müzesi yapı konstrüksiyonu

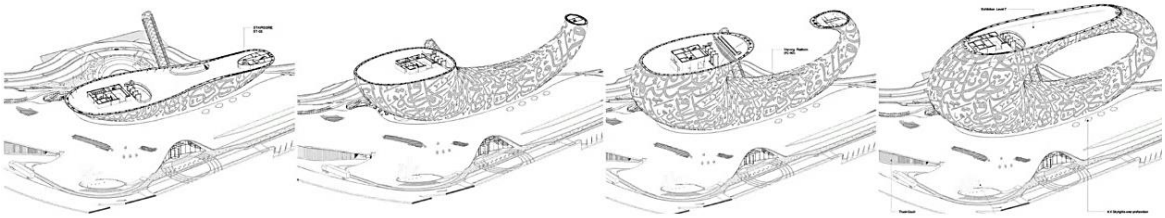
Şekil 232. Geleceğin Müzesi GFRP cephe panelleri

- Strüktür Tasarımı

Geleceğin Müzesi, binanın temelini ve çekirdeğini oluşturan betonarme çerçeve strüktür ve bu strüktür ile desteklenen çelik çapraz ızgara (diagrid) strüktür de denilen tek katmanlı uzay kafes strüktürden oluşmaktadır (Şekil 233, Şekil 234). Yapıya eğrisel formunu çelik strüktür vermektedir. Bu çelik strüktüre ait elemanlar Eversendai Engineering tarafından üretilmiştir (Sudheer, 2021).

Çelik strüktür tasarlanırken yaklaşık 20 farklı tasarım alternatifi oluşturulmuştur. Oluşturulan kombinasyonlar; maliyet, minimum malzeme kullanımı ve montaj kolaylığı açısından en verimli olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Doğru kombinasyon seçilirken düğüm noktalarının hiçbirinin pencere boşluklarına denk gelmemesine dikkat edilmiştir (URL-58).

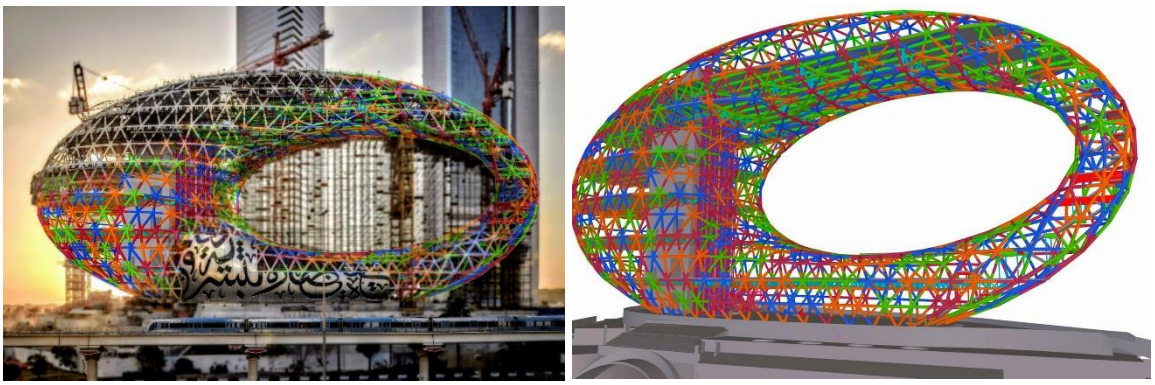
Şekil 233. Geleceğin Müzesi betonarme ve çapraz ızgara strüktür (inşaat aşaması; URL-56)



Şekil 234. Geleceğin Müzesi 3B kat planları (URL-69)

Hesaplamalı tasarım ile tasarlanan çelik strüktüre ait elemanların tek bir çapa sahip olması önemlidir. Bu sayede ürünler tedarik edilirken ürünlerin, piyasadaki ürünler arasından sipariş edilebilir olması sağlanmıştır (Sudheer, 2021).

Hesaplamalı tasarım modelindeki parametreler sayesinde bağlantı noktalarının sayısı, çelik boruların çapı ve kullanılan çeliğin toplam ağırlığı duruma göre optimize edilebilmektedir. Oluşturulan model aracılığıyla yapısal çelik imalatçısı Eversendai Engineering, montaj işlemi sırasında değişen gerilmeleri ve yükleri dikkate alarak inşaat sıralama analizini ve bağlantı tasarımını gerçekleştirmiştir. Eversendai Engineering, iş akışını daha sorunsuz hale getirmek ve karmaşık arayüz gereksinimlerini sağlamak için Tekla Structure yazılımını kullanmıştır. Bu programda çelik strüktüre ait bütün detaylar modellenerek hesaplanmıştır (Sudheer, 2021; URL-59; URL-53; Şekil 235).

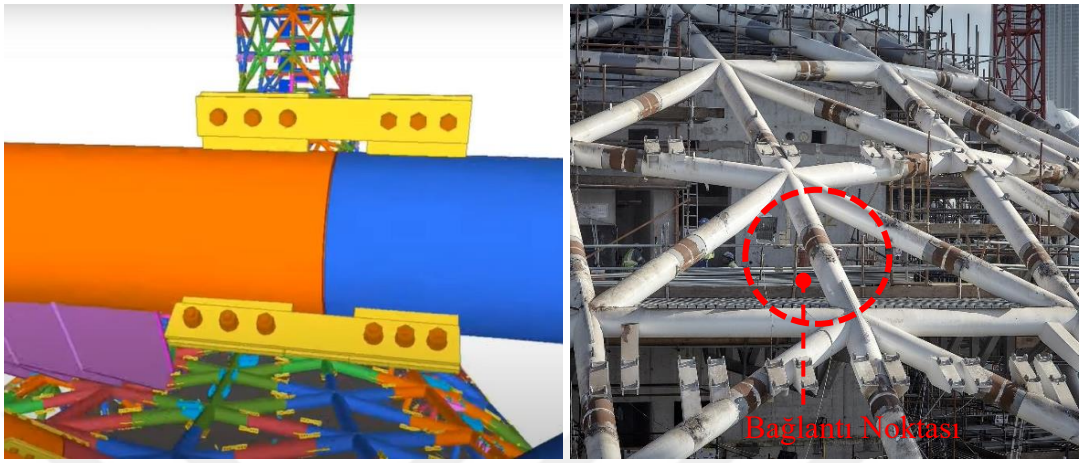


Şekil 235. Yapı strüktürünün modellenmesi (Tekla Structure; URL-59)

Çapraz çelik ızgarayı destekleyen betonarme strüktür inşa edildikten sonra çelik bileşenlerin montajı 14 ay sürmüştür. İnşaat süreci boyunca, her elemanın konumunun doğruluğu 3B lazer tarama ile kontrol edilmiştir. 3B model aracılığıyla konumları hesaplanan elemanlar, belirlenen konumlara birebir yerleştirilebilmiştir (Sudheer, 2021).

Bağlantı noktası tasarımı sırasında dikkate alınması gereken çok büyük miktarda veri ve yük kombinasyonu ortaya çıkmıştır. Veriler, düğüm noktası kaynak sırasını belirlemek

ve takviye gerekip gerekmediğini tespit etmek için analiz edilmiştir. Sonuç olarak bağlantılar bulonlu birleşim noktaları olmadan tasarlanmıştır (Sudheer, 2021; URL-60; Şekil 236).



Şekil 236. Başlangıçta planlanan birleşim detayı (Tekla Structures, sol); uygulanan birleşim tekniği (kaynaklama, sağ; URL-59)

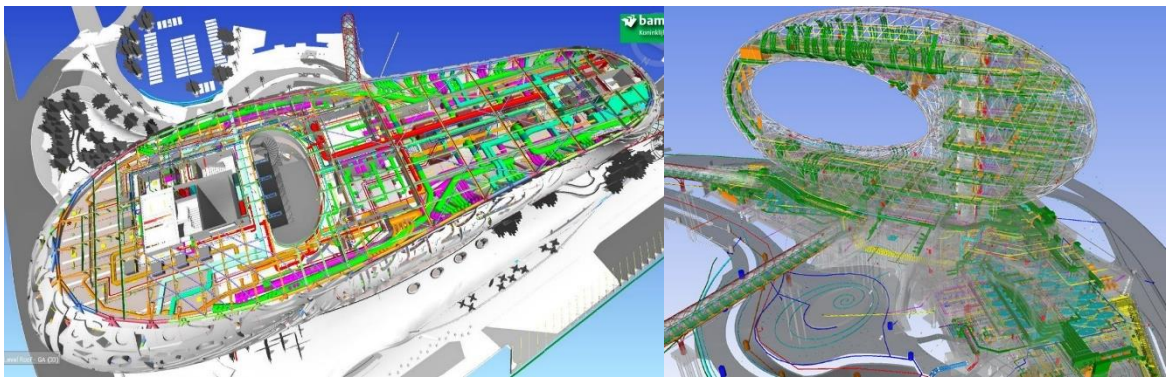
Bu karmaşık çelik strüktürde 2400 çelik boru kullanılmıştır. Çelik boruların çapı 300/400 milimetredir. Farklı uzunluklarda üretilen çelik borular birbirine kaynaklanarak yıldız şeklindeki modüller elde edilmiştir (Şekil 237). Üretilen modüller, şantiyeye getirilerek yerinde kaynaklanmış ve toplamda 1024 düğüm noktası oluşmuştur (Sudheer, 2021; Dutta, 2022; URL-61; Şekil 238).

Şekil 237. Üretilen çelik modüller (URL-59)

Şekil 238. Modüllerin üretimi (sol); modüllerin kaynaklanması (inşaat aşaması, sağ; URL-59)

- Hesaplamalı Tasarım

Torus biçimindeki GM'nin karmaşık yapısının üstesinden gelmek ve disiplinler arası iş birliğini sağlamak amacıyla bir YBM modeli oluşturulmuştur (Şekil 239). Tasarımın inşa edilebilirliğini sağlamak ve belirlenen tasarım hedeflerine ulaşmak için YBM'de 4B İnşaat Sıralama ve Görselleştirme (4B Construction Sequencing) kullanılmıştır. Tasarımdan inşaat aşamasına kadar tüm süreç Revit'te tasarlanmış ve belgelenmiştir. Revit'te tasarlanan projede herhangi bir 2B çizim yoktur ve cephe, mekanik, elektrik ve tesisat gibi bütün sistemlerin birbiri ile ilişkisi kolayca denetlenebilmektedir.

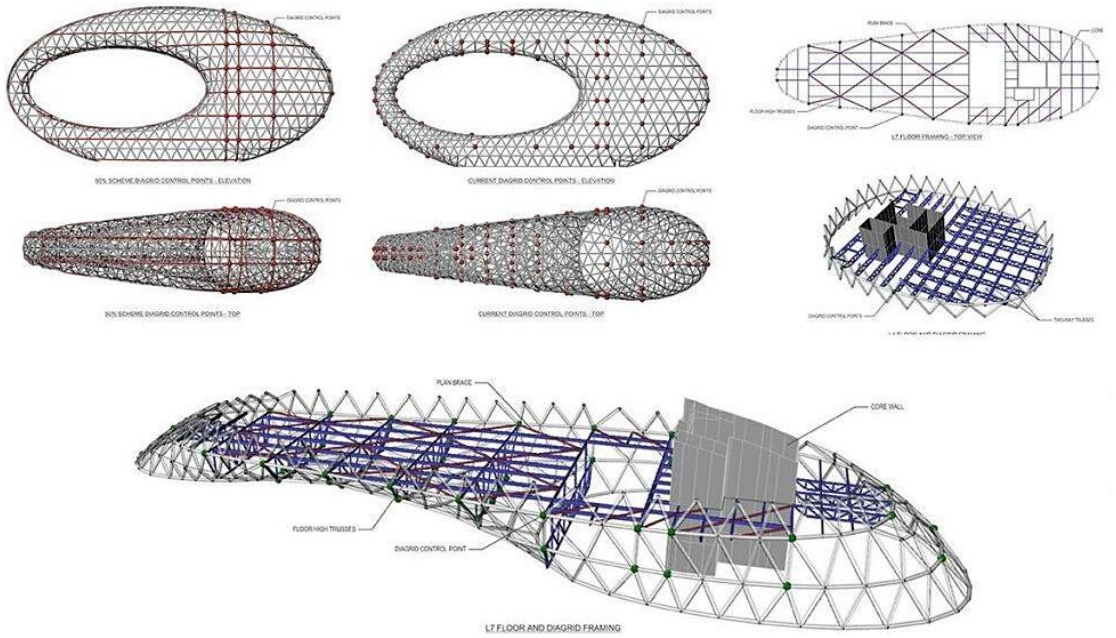


Şekil 239. Geleceğin Müzesi YBM modeli (URL-64)

4B YBM modeli sayesinde, karmaşık cephe tasarımındaki potansiyel hataların tespit edilmesi sağlanmaktadır. YBM'nin kullanılması, tüm tasarım ve inşaat sürecini daha sorunsuz ve entegre hale getirmiştir. Tüm bu sistemler arasındaki ilişkiyi tanımlamak ve çakışmaları belirlemek için Trimble Connect kullanılmıştır. Bulut tabanlı yazılımın

kullanılması, sorunların ilk tasarım aşamasında çözülmesini sağlayarak önemli ölçüde zaman ve malzeme tasarrufu sağlamıştır (Dutta, 2022; URL-58; URL-59).

Mimarlar ve mühendisler, torus şeklindeki tasarımı oluşturabilmek ve form alternatiflerini değerlendirmek amacıyla Grasshopper ve Revit Dynamo'yu içeren kendi parametrik modelleme araçlarını geliştirmişlerdir (Şekil 240). Böylece hedeflenen torus formuna ulaşılmıştır. Parametrik olarak modellenen tasarımda çapraz çelik ızgara için çok sayıda varyasyon ortaya çıkmıştır. Buro Happold bu varyasyonları sınırlandırmak ve yapı için en uygun strüktür kombinasyonunu seçmek amacıyla kendi büyüme algoritmasını yazmıştır. Modeldeki parametreler, tasarımın eş zamanlı ve sürekli olarak modifikasyonunu mümkün kılmıştır. Bunun sonucunda boru şeklindeki tüm çelik elemanlar aynı çapta tasarlanmıştır. Böylece bu elemanların üretim ve montaj aşamasında kolaylık sağlanmıştır (Dutta, 2022; URL-58; URL-59).

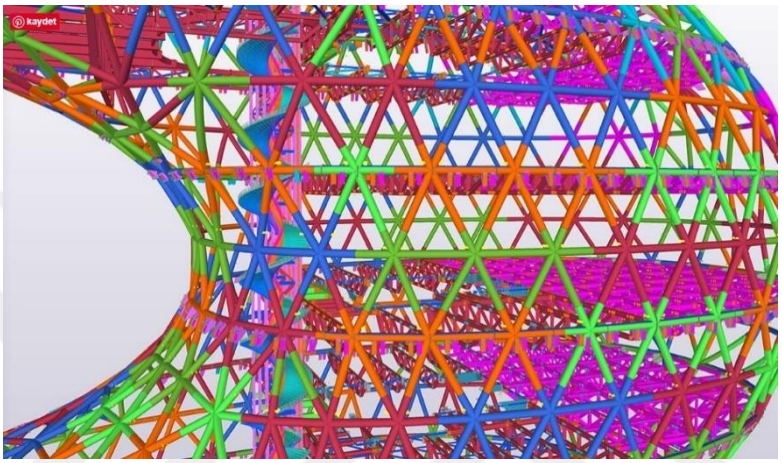


Şekil 240. Çapraz çelik ızgara strüktürün parametrik olarak modellenmesi (Buro Happold)

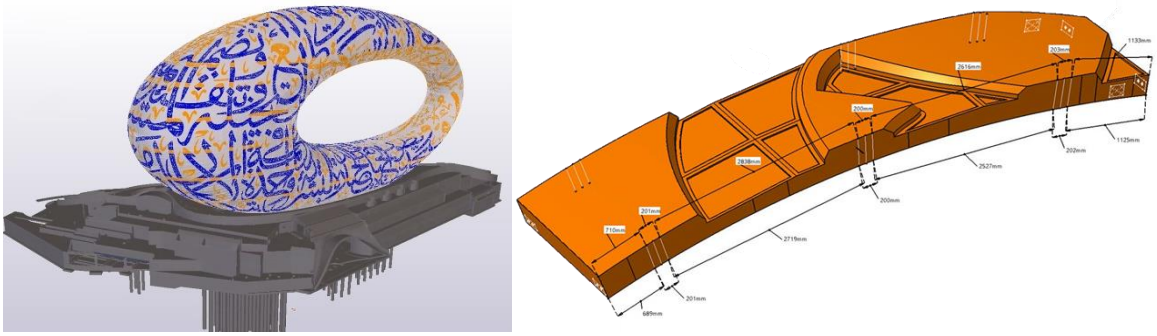
Yapı formu ve çelik strüktür tasarlanırken parametrik tasarım programı olarak Rhinoceros ve Grasshopper kullanılmıştır. Çelik strüktüre ait detaylar ve çelik modüller, Tekla Structures programında modellenmiştir (Şekil 241). Cephe, panellerin üzerindeki boşlukların 1024 adet olan çelik düğüm noktasına denk gelmemesi için 3B olarak modellenerek kontrol edilmiştir (Şekil 242). CNC makinelerde üretilmek üzere cephe

panellerinin detaylı bir modelini sağlamak amacıyla CATIA yazılımı kullanılmıştır (URL-57; URL-62).

Her biri farklı uzunluklara ve eğrilere sahip çelik boruların ve farklı biçim ve boyutlara sahip cephe panellerinin hesaplamalı tasarım olmadan doğru bir şekilde üretilmesi imkânsızdır. Dolayısıyla hesaplamalı tasarım, yapı elemanlarına ait her detayın elde edilmesini sağlayarak bu yapının inşa edilebilmesini mümkün kılmıştır (URL-62).



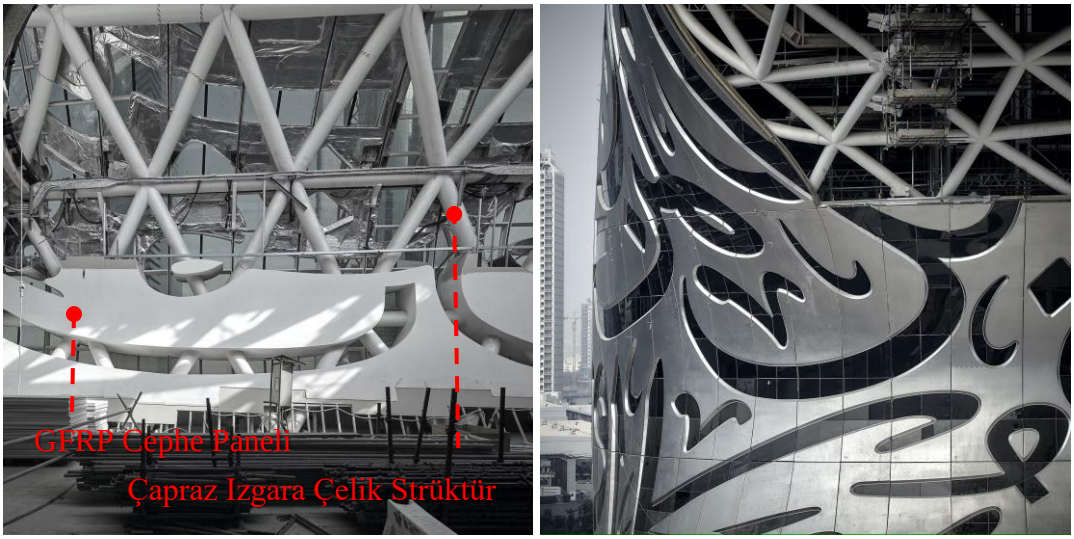
Şekil 241. Çapraz çelik ızgara strüktürün 3B modeli (Tekla Structures; URL-59)



Şekil 242. Panelleri gösteren 3B model (sol); CATIA yazılımında modellenen cephe paneli (sağ; URL-65)

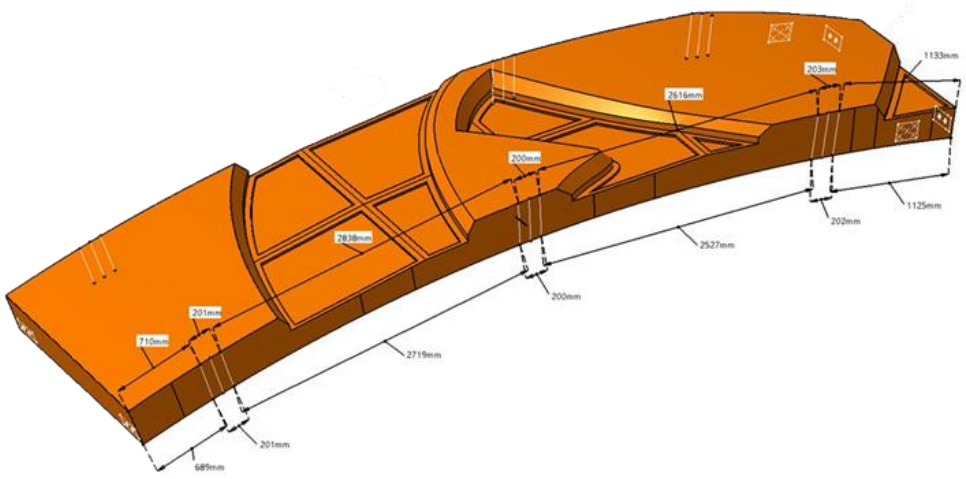
- Cephe Tasarımı

GM'nin karmaşık cephe kaplamasında paslanmaz çelik kaplı cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) kullanılmıştır. Cephede kullanılan panel sayısı 1024 adettir ve panellerin toplam alanı 17.600 m²'dir (Şekil 243). Bu cephe panelleri Affan Innovative Structures tarafından üretilmiştir (URL-53).

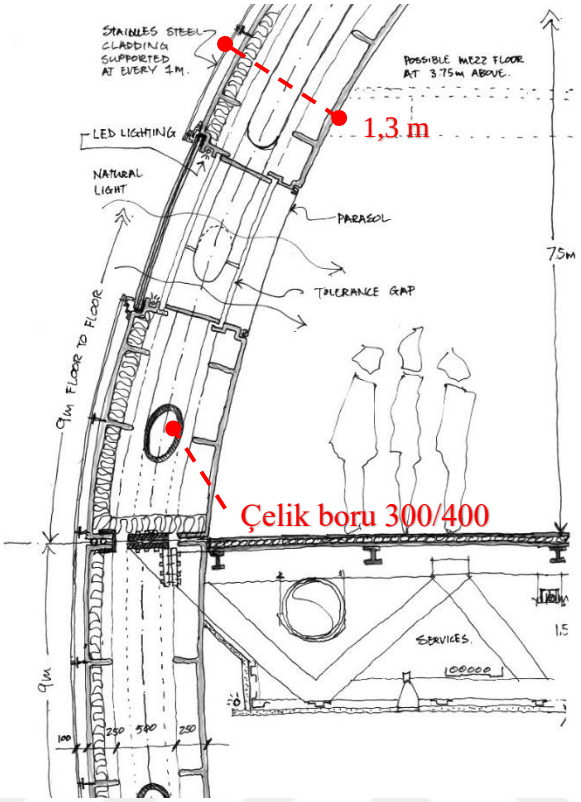


Şekil 243. GM cephe panellerinin montajı (inşaat aşaması)

Yapının çift eğrilikli ve birbirinden farklı biçimsel özelliklere sahip karmaşık bir cepheye sahip olması nedeniyle cephe panellerinin her birinin hesaplamalı tasarım araçları ile ayrıntılı olarak tasarlanmıştır (Şekil 244, Şekil 245). Hesaplamalı modelden elde edilen veriler üretici firmaya gönderilmiştir. Bu karmaşık cephe panellerinin poliüretan köpük kalıplarını oluşturmak için büyük ölçekli ve 5 eksenli CNC frezeleme makineleri kullanılmıştır. Bu kalıplar, hesaplamalı modelden alınan veriler ile frezelenerek üretilmiştir (Şekil 246). Her kalıbın CNC ile işlenmesi 12 ila 72 saat sürmüştür. En büyük kalıp; 33 metre uzunluğunda, 13 metre genişliğinde ve 2,5 metre yüksekliğindedir (Sudheer, 2021; URL-63).



Şekil 244. GM cephe paneli (CATIA; URL-65)



Şekil 245. GM cephe detayı (Buro Happold)

GFRP paneller üretilirken; 36 metre uzunluğunda, 12 metre genişliğinde ve 6 metre yüksekliğinde bir 3B baskı makinesi kullanılarak beton baskı tekniği kullanılmıştır. Kalıba yerleştirilen karışım büyük boy fırınlarda sertleştirilmiştir. Kalıptan çıkan biçim, cam ve çelik kaplama içermeyen cephe panelinin ham halidir. Ayrıca üretilen cam elyaf katkılı panellerin sehim sorunlarının olduğu kısımlarda karbon elyafı da kullanılmıştır (URL-64; URL-65; Şekil 246).

Şekil 246. Poliüretan köpük kalıpların frezelenmesi (sol); kalıba dökülen panellerin fırınlanması (sağ; URL-65)

GFRP panellerinin üzerinin kaplanması için CNC lazer kesim makinesi kullanılmıştır. Çelik kaplamanın kesilebilmesi için CNC makinesine aktarılan veriler, yine hesaplamalı modelden alınmıştır. Kesilen çelik plakalar, panellere yapıştırılmış ve mekanik bağlantı elemanları ile sabitlenmiştir (URL-63; URL-64; Şekil 247).

Şekil 247. Kalıptan çıkan GFRP paneller (sol); paslanmaz çelik kaplamanın montajı (sağ; URL-65)

Panellerin değişik biçim ve boyutlarda olan boşluklarına yerleşmesi için yaklaşık 10.000 adet cam kullanılmıştır. Birbirinden farklı biçim ve boyutta olan her bir cam, hesaplamalı modelden elde edilen boyutsal veriler ile kontrol edilen CNC su jeti kullanılarak şekillendirilmiştir. Bu camlar GFRP panelin 200 mm derinliğine monte edilmiştir (URL-64).

Panel boyutları ortalama 3 metre genişliğe ve 9 metre yüksekliğe sahiptir. Cephe kalınlığı ise 1,3 metre derinliğindedir. Bu paneller, yangın geciktirici özelliğe sahiptir. Ayrı ayrı üretilen bu parçaların birleştirilmesi ile oluşturulan sonuç ürün, 3B olarak taranmış ve panele ait model ile eşleştirilmiştir. Panel üretimi birçok aşama içerdiği için günde yalnızca 6 adet panel üretilebilmektedir. Panellerin yapıya doğru bir şekilde yerleştirilebilmesi için çok katmanlı lazer konumlandırma sistemleri kullanılmıştır (URL-61, Şekil 248).

Panel üretiminin dikkat çeken yanı, havacılık endüstrisinden alınan yöntemlerin ve programın (CATIA) kullanılmasıdır. Çelik kaplamaların GFRP panel ile verimli bir şekilde birleştirilebilmesi için uçakların karbon fiber kanatlarına paslanmaz çeliğin nasıl monte edildiği araştırılmıştır. Bu üretim sürecinin tasarlanması bir yıllık deneysel bir çalışmanın

sonucunda ortaya çıkmıştır. Ek olarak üretilen bu farklı biçimlere sahip paneller, gündüz yeterli gün ışığını içeriye alarak yeterli aydınlatmayı sağlamakta, gece ise panellere monte edilen 14 kilometrelik LED aydınlatma ile cephenin aydınlatılması sağlanmaktadır (URL-61).

Şekil 248. GFRP panellerin montajı

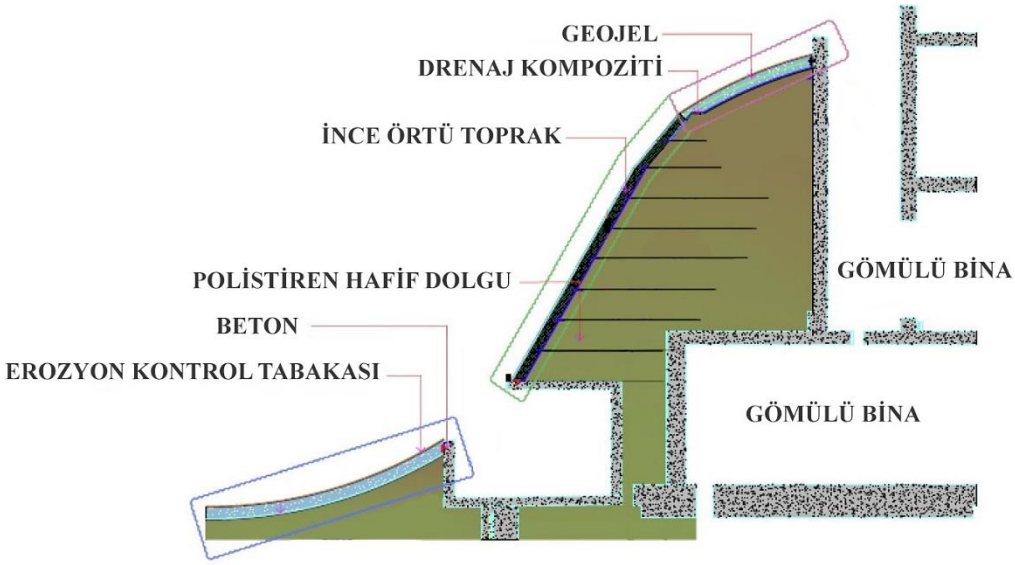
- Sürdürülebilirlik

Mimarlar ve mühendisler yapının LEED Platinyum gereksinimlerini karşılayabilmesi için bir 3B enerji modeli oluşturmuştur. Böylece su kullanımında %45 azalma ve kullanılan enerjide %25 tasarruf sağlanarak 50'den fazla sürdürülebilir tasarım kararı alınmıştır (URL-54; URL-64;Şekil 249).

Şekil 249. GM'nin yeşil çatısı

Projedeki yeşil alanın sulamasını sağlamak için lavabolardan ve tuvalet zemin süzgeçlerinden gelen atık suyu filtreleyen ve temizleyen bir sistem kullanılmıştır. Ek olarak yapının enerji ihtiyacının %30'luk kısmı uzak bir konumda bulunan fotovoltaik paneller aracılığıyla karşılanmıştır. Bu paneller 4.000 mega watt enerji üretebilmektedir (URL-54).

Güneş kazanımını ve ısı adası etkisini azaltmak için, bina alanının üçte ikisinden fazlası yeşil çatı ile kaplanmıştır. Bu yeşil çatı 100 bitki türünü barındıran bir bahçeye sahiptir (URL-66; Şekil 250).



Şekil 250. Yeşil çatı detayı (URL-66)

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu bölümde; incelenen yapılardan elde edilen bulgular, yapılan çalışmalar bölümündeki başlıklara göre tablolaştırılarak açıklanmış ve görsellerle desteklenmiştir. Bu tablolar, analizleri yapılan yapıların; yapım yeri, yapım yılı, strüktür türü ve malzemesi, strüktür elemanı biçimi, bağlantı türü ve üretim tekniği, cephe malzemesi ve üretim tekniği, hesaplamalı tasarım yöntemi, yapı tasarımında kullanılan programlar ve sürdürülebilir tasarım kararları açısından karşılaştırılabilmesine olanak tanımaktadır. Buna göre elde edilen bilgiler; genel bilgiler, strüktür sistemi, cephe sistemi, hesaplamalı tasarım ve sürdürülebilirlik olmak üzere 5 başlık altında irdelenmiştir.

3.4. Genel Bilgiler ile İlgili Bulgular ve İrdeleme

- Mimarlık Ofisleri ve Strüktür Mühendisleri

Seçilen örneklem grubundaki yapıların HAKM, DTM, CMUKM, AJS ve BDUH olmak üzere 5 adeti Zaha Hadid Architects; KADKM (Ithra), HOSM ve GM ise sırasıyla Snohetta, NBBJ ve CCDI, Killa Design tarafından tasarlanmıştır. Yapıların strüktür mühendisliği çoğunlukla Buro Happold tarafından yürütülmüş, diğer yapılarda ise ARUP ve yerel mühendislik ofisleri görevlendirilmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 10'da gösterilmiştir. Dolayısıyla büyük miktarda veri içeren karmaşık strüktür ve cephe çözümlerini gerektiren projelerde, büyük mimarlık ve mühendislik ofislerinin tercih edildiği görülmüştür. Bunun nedeni, bu ofislerin karmaşık yapıların tasarım ve üretiminde yeterli tecrübeye ve gerekli teknolojik bilgiye ve araçlara sahip olması ve projeler için düzenlenen mimari yarışmalarda öne çıkmasıdır. Ayrıca incelenen yapıların üretim sürecinde, yerel mühendisler ile iş birliği içinde çalışılmış ve bu durum, yerel mühendislerin tüm süreç boyunca projeyi takip ederek tecrübe edinmelerini sağlamıştır.

Tablo 10. Yapıların yapı tasarımını ve strüktür mühendisliğini yürüten ofisler

Yapı Adı		Yapı Tasarımı	Strüktür Mühendisi
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	Zaha Hadid Architects	AKT, Tuncel Mühendislik
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	Zaha Hadid Architects, Samoo Architects & Engineers	ARUP
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	Snøhetta	Buro Happold
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	NBBJ, CCDI	Buro Hapold, CCDI
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	Zaha Hadid Architects	Buro Happold, Beijing Architecture Design and Research Institute
6	Al Janoub Stadyumu	Zaha Hadid Architects	Echoes Paris, Maffeis Engineering, Maeg Construction
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	Zaha Hadid Achitects	Buro Happold, ARUP, Beijing Institute of Architectural Design
8	Geleceğin Müzesi	Killa Design	Buro Happold

- Yapım Yeri ve Yılı

Seçilen örneklem grubunda incelenen yapıların HOSM, CMUKM ve BDUH olmak üzere 3'ü Çin'de; KADKM (Ithra), AJS ve GM olmak üzere 3'ü Arap yarımadasında bulunmaktadır. Diğer iki yapı aşağıdaki tabloda görüldüğü üzere Güney Kore ve Azerbaycan'dadır. Bu ikonik yapıların çoğunlukla Arap yarımadası ve Çin'de bulunmasının önde gelen sebeplerinden biri, ülkelerin sahip olduğu ekonomik güçtür. Bunun yanısıra bu denli etkileyici yapıların, ülkelerin uluslararası imajına önemli bir katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bununla birlikte son yıllarda hesaplamalı tasarım ile üretilen yapıların artmakta olduğu görülmektedir (Tablo 11). Bunun nedeni, hesaplamalı tasarım teknikleri ve araçlarının kullanımının yaygınlaşması ile bu tür karmaşık yapıların tasarımının ve üretiminin daha kolay ve daha ulaşılabilir hale gelmiş olmasıdır.

Tablo 11. Yapıların yapım yeri ve yapım yılı

Yapı Adı		Yapım Yeri	Yapım Yılı
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	Bakü, Azerbaycan	2007-2012
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	Seul, Güney Kore	2007-2014
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	Dahran, Suudi Arabistan	2008-2018
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	Hangzhou, Çin	2011-2019
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	Changsha Shi, Çin	2013-2019
6	Al Janoub Stadyumu	Al Wakrah, Katar	2014-2019
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	Pekin, Çin	2014-2019
8	Geleceğin Müzesi	Dubai, Birleşil Arap Emirlikleri	2015-2022

- Yapı Maliyeti

İncelenen yapıların maliyeti 250 ila 600 milyon dolar arasında değişmektedir. Yapılarda m² başına düşen maliyet ise ortalama 5000 dolardır. Elde edilen bulgular Tablo 12'de gösterilmiştir.

Yapı maliyeti, proje içeriğine ve büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla BDUH'nin maliyeti; kara ulaşım merkezi, soğutma istasyonu gibi farklı alanlar ve sistemler içerdiğinden diğer yapılara göre yüksektir. Bununla birlikte yapılarda kullanılan strüktür ve cephe malzemesinin türü, miktarı ve üretim biçiminin de yapı maliyetini etkilediği düşünülmektedir. Ek olarak, yapı malzemelerinin yıllara göre artan veya azalan fiyatları da maliyet üstünde etkilidir. Yine de birbirinden farklı boyut ve şekildeki elemanları içeren karmaşık strüktür ve cephe sistemine sahip olan bu yapıların üretimi, aynı büyüklükteki daha basit formlu yapılara göre daha maliyetli olduğu söylenebilir.

Tablo 12. Yapıların maliyeti ve m² başına düşen maliyeti

Yapı Adı		Maliyet	M² Başına Düşen Maliyet
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	$ 250.000.000	$ 4.346
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	$ 466.000.000	$ 5.382
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	$ 400.000.000	$ 4.000
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi (Ana stadyum / Tenis Merkezi)	$ 365.000.000 / $ 155.000.000	$ 4.402 / $ 5.656
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	$ 390.000.000	$ 3.391
6	Al Janoub Stadyumu	$ 587.000.000	$ 4.658
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	$ 17.470.000.000	$ 9.705
8	Geleceğin Müzesi	$ 136.000.000	$ 4.452

3.5. Strüktür Sistemi ile İlgili Bulgular ve İrdeleme

- Strüktür Türü ve Malzemesi

Bu kısımda seçilen örneklem grubu, elde edilen bulgulara göre strüktür türü ve malzemesi açısından incelenmiş ve görsellerle desteklenerek Tablo 13'te gösterilmiştir. Taşıyıcı görevi gören ve parametrik tasarım gibi hesaplamalı teknolojiler kullanılmadan üretilen strüktürler TS (taşıyıcı strüktür), hesaplamalı tasarım ile tasarlanan ve yapıya non-lineer formunu veren strüktürler ise HT (hesaplamalı tasarım) kısaltması ile gösterilmiştir.

Bununla birlikte hem taşıyıcı görevi gören hem de hesaplamalı teknolojiler ile üretilen strüktürlerde, her iki kısaltma da mevcuttur. Ek olarak, hesaplamalı teknolojiler ile tasarlanan strüktürler, yapı kabuğundan kaynaklanan ve kar yükü gibi dış yükleri taşıyarak yükün kolonlar ve kirişler ile temele aktarılmasını sağlamaktadır. Fakat bu strüktürlerde öne çıkan özellik, strüktürün hesaplamalı teknolojiler ile tasarlanması ile yapıya non-lineer formunu vermesidir. Bu sebeple bu strüktürlerin taşıyıcı özellikleri vurgulanmamıştır.

Tablo 13. Yapıların strüktür türü ve malzemesi

Yapı Adı		STRÜKTÜR TÜRÜ VE MALZEMESİ				
		Betonarme	Çelik			
		Çerçeve Sistem (TS)	Mega Makas Sistemi (TS, HT)	Çift Katmanlı Uzay Kafes Strüktür (HT)	Tek Katmanlı Uzay Kafes Strüktür (HT)	Çapraz Izgara Strüktür (HT)
1	HAKM	●	○	●	○	○
2	DTM	●	●	●	○	○
3	KADKM	●	○	●	●	○
4	HOSM	●	○	●	○	○
5	CMUKM	●	○	●	●	○
6	AJS	●	○	●	●	○
7	BDUH	●	○	●	○	○
8	GM	●	○	○	●	●

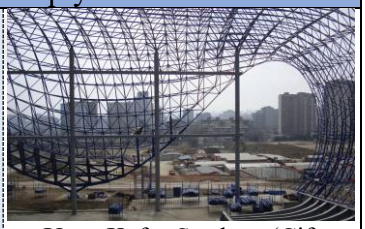
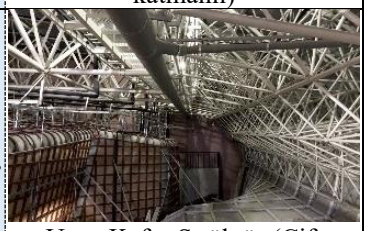
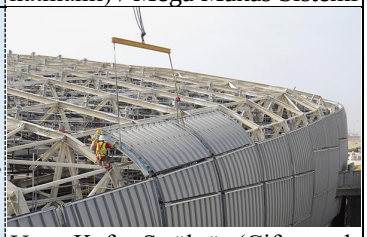
Yapılarda; betonarme çerçeve sistem, mega makas sistemi, çelik uzay kafes strüktür (tek katmanlı strüktür, çift katmanlı strüktür, çapraz ızgara strüktür) olmak üzere üç farklı sistem kullanılmıştır. Buna göre; incelenen yapılarda, taşıyıcı olarak çoğunlukla perde duvarlı betonarme çerçeve sistem tercih edilmiş, sadece Dongdaemun Tasarım Merkezi'nde konsol görevi gören ve geniş açıklık geçilmesi gereken yerlerde büyük çelik kirişler kullanılmıştır. Bu kirişler, boyutlarının oldukça büyük olması nedeniyle mega makas sistemi olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca Hangzhou Olimpik Spor Merkezi'nde uzay kafes çelik strüktürü güçlendirmek amacıyla çelik kablolar kullanılmıştır. Ayrıca BDUH'de yapıya formunu veren karmaşık çelik strüktür, eğrisel çatının içe doğru kıvrılarak devam etmesi ile kolon görevi görmektedir. Bu C şeklindeki çelik kolonlar, çatının taşıdığı yükleri temele aktardığı için yapıya formunu vermesinin yanısıra taşıyıcı özelliği de taşımaktadır.

Yapılarda taşıyıcı strüktür olarak görev alan betonarme çerçeve sistem, geleneksel yöntemler ile; mega makas sistemi ise hesaplamalı tasarım araçları ile üretilmiştir. Bunun yanısıra yapılara etki eden yükler yine yazılımlar aracılığıyla hesaplanmıştır.

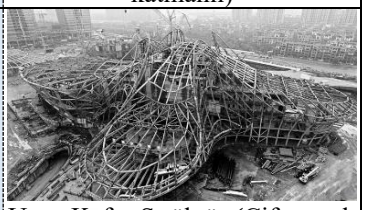
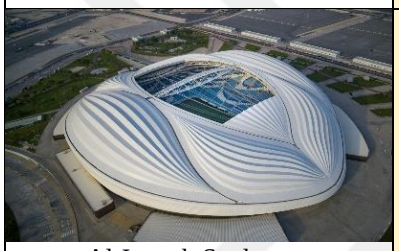
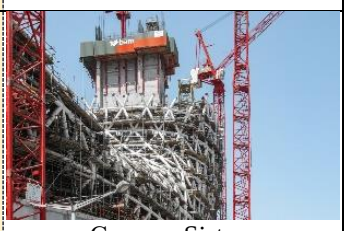
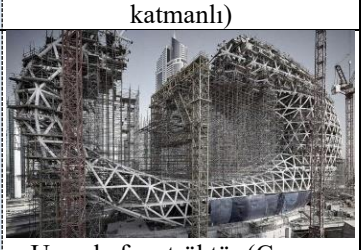
Yapılarda kullanılan bir diğer strüktür ise çelik uzay kafes strüktürdür. Bu strüktür türü, yapı kabuğunu taşıyarak yükü betonarme çerçeve sisteme aktarmakta ve yapılara non-lineer formunun verilebilmesi için gerekli alt yapıyı sağlamaktadır. Oldukça karmaşık hesaplamalar gerektiren ve binlerce farklı boyut ve şekildeki elemanlara sahip çelik uzay kafes strüktürlerin tümü hesaplamalı tasarım teknikleri (parametrik tasarım) ile elde edilmiştir. Bu sistemlerin geleneksel yöntemler ile tasarlanması neredeyse imkânsızdır.

Yapılarda kullanılan çelik strüktür, yapı formuna göre farklı şekillerde oluşturulmuştur. Seçilen örneklem grubunda HAKM, DTM, KADKM, HOSM, CMUKM, AJM ve BDUH olmak üzere 7 yapıda çift katmanlı çelik uzay kafes strüktür; KADKM, CMUKM ve AJS olmak üzere 3 yapıda çoğunlukla tek katmanlı uzay kafes strüktür; GM'de ise çapraz ızgara strüktür de denilen tek katmanlı bir çelik uzay kafes sistem tercih edilmiştir. Bu sistemler görsellerle desteklenerek Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Yapıların strüktür türü ve malzemesi (görseller ile)

Yapı Adı	**STRÜKTÜR TÜRÜ VE MALZEMESİ**			
	Taşıyıcı Görevi Gören		Yapıya Formunu Veren	
Heydar Aliyev Kültür Merkezi	Betonarme	Çerçeve Sistem	Çelik	 Uzay Kafes Strüktür (Çift katmanlı)
Dongdaemun Tasarım Merkezi	Betonarme / Çelik	Çerçeve Sistem / Mega Kafes	Çelik	 Uzay Kafes Strüktür (Çift katmanlı) / Mega Makas Sistemi
Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi (Ithra)	Betonarme	Çerçeve Sistem	Çelik	 Uzay Kafes Strüktür (Çift ve tek katmanlı)

Tablo 14'ün devamı

Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	Betonarme	Çerçeve Sistem	Çelik	Uzay Kafes Strüktür (Çift katmanlı)
Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	Betonarme	Çerçeve Sistem	Çelik	 Uzay Kafes Strüktür (Çift ve tek katmanlı)
 Al Janoub Stadyumu	Betonarme	Çerçeve Sistem	Çelik	Uzay Kafes Strüktür (Çift ve tek katmanlı)
Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	Betonarme	Çerçeve Sistem	Çelik	Uzay Kafes Strüktür (Çift katmanlı)
Geleceğin Müzesi	Betonarme	 Çerçeve Sistem	Çelik	 Uzay kafes strüktür (Çapraz Izgara Strüktür, Tek katmanlı)

İncelenen yapıların tümünde çelik uzay kafes sistemin tercih edilmesinin birincil sebebi, çok sayıda farklı şekil ve boyutlarda üretilebilen çelik elemanlar sayesinde çelik strüktürün yapının eğrisel ve sürekli yüzeyi boyunca şekil alarak yapı formunu oluşturabilmesidir. Çelik uzay kafes strüktür, bağlantı elemanlarının çok yönlü birleşimine izin vererek karmaşık bir sistemin oluşturulabilmesini sağlamaktadır. Bu sistem,

hesaplamalı tasarım ile tasarlanmakta ve her bir eleman ayrı ayrı üretilerek oluşturulmaktadır. Dolayısıyla çelik elemanların istenilen açıda eğilip bükülebilmesi ile yapı tasarımının gerektirdiği karmaşık formlar gerçekleştirilebilmektedir.

Çelik uzay kafes sistem; elektrik, sıhhi tesisat gibi diğer sistemlerin yerleşiminde de avantaj sağlamaktadır. Ayrıca hesaplamalı tasarım araçları sayesinde hesaplanan strüktürün her bir bağlantı noktası, cephe kaplamasının montaj noktaları ile uyumlu bir şekilde tasarlanabilmekte, böylece yapı kabuğunun kurulumunda kolaylık sağlanmaktadır. Bununla birlikte strüktürün cephe sistemi ile birleşiminden doğabilecek estetik sorunların oluşması önlenmektedir. Diğer sistemlere göre daha hafif ve dayanıklıdır. Sistemin hafif olması, kolonlara ve temele gelecek yüklerin azalmasını sağlamaktadır. Hiperstatik sistemler olduklarından, çelik elemanlar üzerinde herhangi bir dış kuvvetin etkisiyle oluşan bir kayıp oluşsa da sistem genel stabilitesini koruyabilmekte ve komşu elemanlara aktarılan iç kuvvetler yardımıyla yükleri taşımaya devam etmektedir. Bununla birlikte bu sistemler, büyük açıklıkların geçilmesini sağlayarak kolonsuz iç mekanların oluşturulmasına olanak tanımakta, böylece tasarım hedeflerinin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Çelik yapı elemanları veya modülleri önceden birleştirilerek parçalar halinde veya tekil olarak şantiyeye taşınabilmektedir. Bu elemanlar, numaralandırılarak önceden planlanmış montaj sıralamasına göre daha kolay ve hızlı bir şekilde monte edilebilmektedir. Bulonlar ile veya küresel birleşim elemanları ile monte edilen çelik elemanlar daha sonra sökülerek tekrar kullanılabilmektedir. Bu da maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Tüm bu avantajlara sahip olması sebebiyle çelik uzay kafes strüktür, karmaşık yapılarda ilk tercih olarak öne çıkmaktadır.

- Çelik Strüktür Elemanlarının Biçimi ve Bağlantı Türü

Bu bölümde seçilen örneklem grubundan elde edilen bilgilere göre, yapılarda kullanılan çelik strüktürü oluşturan elemanların şekilleri ve bağlantı türü ile ilgili bulgular yer almaktadır. Buna göre; analiz edilen yapılarda yapılan gözlemlere göre 4 ayrı eleman şekli tespit edilmiştir. Bunlar; boru şekilli, kutu kesitli, H veya I kesitli çelik elemanlardır. Bu analize ait bilgiler Tablo 15'te gösterilmiştir.

Tablo 15. Çelik strüktür elemanlarının biçimi

Yapı Adı		ÇELİK STRÜKTÜR ELEMAN BİÇİMİ		
		Boru Şekilli	Kutu Kesitli	H / I Kesitli
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	●	○	○
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	●	○	●
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	●	○	●
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	●	○	○
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	●	●	●
6	Al Janoub Stadyumu	●	●	○
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	●	○	○
8	Geleceğin Müzesi	●	○	○

HAKM'de kullanılan çelik uzay kafes strüktürü oluşturmak için boru şekilli elemanlar tercih edilmiştir. Uzay kafes strüktürün zeminle birleştiği yerlerde H veya I şekilli elemanlar da kullanılmış fakat bu elemanlar az miktarda olduğu için tabloya eklenmemiştir. DTM'de kullanılan uzay kafes strüktürü oluşturmak için boru şekilli elemanlar tercih edilmiştir. Ek olarak yapıda kullanılan mega makas sisteminde H/I kesitli ve kutu kesitli çelik elemanlar mevcuttur. Bu elemanlar, yapı kabuğunu taşıyan çelik strüktür sisteminin çoğunluğunu oluşturmadığından analize dahil edilmemiştir. KADKM'de kullanılan uzay kafes strüktürde boru şekilli, H veya I şekilli elemanlar mevcuttur. Boru şekilli elemanlar genellikle eğrisel pencere boşluklarının olduğu kısımlarda kullanılmıştır. HOSM'de kullanılan uzay kafes strüktürü oluşturmak için boru şekilli çelik elemanlar; CMUKM'de ise yapı için özel olarak tasarlanmış kutu kesitli ve H şekilli çelik elemanlar tercih edilmiştir. Ayrıca CMUKM'nin eğrisel formunu oluşturabilmek için boru şeklinde bir halka kiriş kullanılmıştır. AJS'de boru şekilli ve kutu kesitli elemanlar; BDUH'de ve GM'de ise boru şekilli çelik elemanlar tercih edilmiştir.

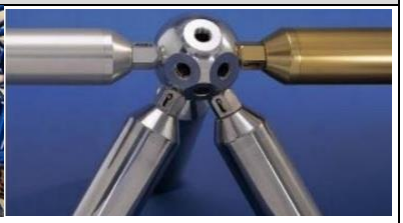
Çelik strüktür elemanlarının birleşiminde ise bulonlu birleşim, kaynaklı birleşim ve küresel düğüm noktası ile birleşim olmak üzere 3 farklı birleşim tekniği kullanılmıştır. Elde edilen bulgular Tablo 16'da gösterilmiştir.

Tablo 16. Çelik strüktürün bağlantı türü

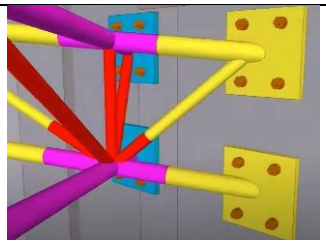
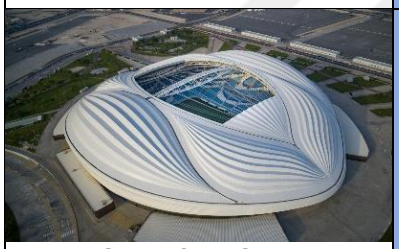
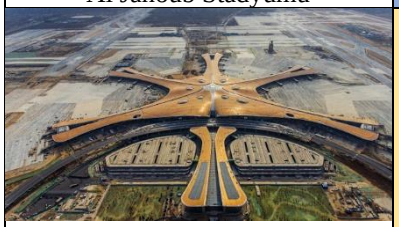
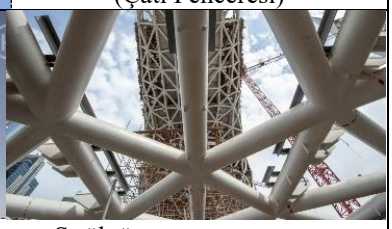
Yapı Adı		BAĞLANTI TÜRÜ		
		Bulonlu Birleşim	Kaynaklı Birleşim	Küresel Düğüm
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	○	○	●
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	●	○	●
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	●	○	○
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	○	●	○
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	●	●	○
6	Al Janoub Stadyumu	●	●	○
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	●	●	○
8	Geleceğin Müzesi	○	●	○

Tercih edilen birleşim türü strüktür elemanların boyutuna ve şekline bağlı olarak değişmektedir. Elde edilen bulgulara göre; HAKM'de sadece küresel düğüm noktası; KADKM'de sadece bulonlu birleşim kullanılmıştır. DTM'de ise her iki birleşim tekniği de mevcuttur. CMUKM, AJS ve BDUH'de bulonlu ve kaynaklı birleşimin her ikisi de tercih edilmiştir. HOSM ve GM'de ise yalnız kaynaklı birleşim tekniği uygulanmıştır. Elde edilen bulguların anlaşılabilmesi amacıyla bulgular, görsellerle desteklenerek Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17. Çelik strüktür bağlantı türü (görseller ile)

Yapı Adı	ÇELİK STRÜKTÜR BAĞLANTI TÜRÜ		
Heydar Aliyev Kültür Merkezi	Küresel Düğüm	 Uzay Kafes Strüktür	
Dongdaemun Tasarım Merkezi	Küresel Düğüm	Uzay Kafes Strüktür	Bulonlu Birleşim Mega Kiriş Sistemi

Tablo 17'nin devamı

Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi (Ithra)	Bulonlu Birleşim	 Uzay Kafes Strüktür (çift katmanlı)	
Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	Kaynaklı Birleşim	Uzay Kafes Strüktür	
Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	Bulonlu Birleşim	Uzay Kafes Strüktür	Kaynaklı Birleşim Uzay Kafes Strüktür
 Al Janoub Stadyumu	Bulonlu Birleşim	Uzay Kafes Strüktür	Kaynaklı Birleşim Uzay Kafes Strüktür
 Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	Kaynaklı Birleşim	Uzay Kafes Strüktür	Özel Birleşim (Bulon) Tek katmanlı Uzay Kafes Strüktür (Çatı Penceresi)
Geleceğin Müzesi	Kaynaklı Birleşim	 Çapraz Izgara Strüktür	

Elde edilen bilgilerin analizi sonucunda çelik strüktür elemanlarının şeklinin strüktür tasarımına göre değiştiği tespit edilmiştir. Buna göre; küresel düğüm bağlantı elemanlarının kullanıldığı projelerde boru biçimli elemanların tercih edildiği görülmüştür. Bunun nedeni küresel düğümler ile boru biçimli elemanların birbirine uyumlu bir şekilde tasarlanmış olmasıdır. Aynı zamanda bu bileşenlerden oluşan uzay kafes strüktürler, hesaplamalı bir şekilde tasarlanarak en az çelik miktarına ve en uygun kombinasyona göre üretilmektedir. Kaynaklı birleşim ise, çoğunlukla daha büyük ve modüler strüktür bileşenlerinin olduğu tasarımlarda kullanılmıştır. Örneğin, HOSM (Hangzhou Olimpik Spor Merkezi) ve BDUH'de (Beijing Daxing Uluslarası Havalimanı) tercih edilen çelik elemanların boyutları oldukça büyük olduğundan, GM'de (Geleceğin Müzesi) yer alan modül halindeki strüktür elemanları ise estetik kaygılar sebebiyle kaynaklanarak birleştirilmiştir. GM'de tercih edilen kaynaklı birleşim sayesinde bulonlu birleşim noktalarının oluşturacağı plakalar ortadan kaldırılarak strüktürün daha estetik bir şekilde oluşturulması sağlanmıştır. H ve I şekilli çelik elemanların kullanıldığı çelik sistemlerde ise elemanların şekilleri sebebiyle ve esneklik sağlaması amacıyla bulonlu birleşim tercih edilmiştir. Dolayısıyla tüm bu sistemlerdeki çelik eleman şekli ve birleşim türü; strüktür tasarımına, elemanların boyutuna ve estetik kaygılara bağlı olarak değişim gösterdiği anlaşılmıştır.

- Çelik Strüktür Elemanlarının Üretim Tekniği

Bu bölümde analiz edilen yapı örneklerinin çelik strüktür sisteminde kullanılan elemanların üretim biçimine ait bulgular yer almaktadır. Elde edilen bulgulara ait veriler Tablo 18'de gösterilmiştir.

Tablo 18. Çelik strüktür elemanların üretim tekniği

Kullanılan CNC Makine Cinsi	**HAKM**	**DTM**	**KADKM**	**HOSM**	**CMUKM**	**AJS**	**BDIUH**	**GM**
Hidrolik Pres Boru Bükme Makinesi	●	●	●	●	●	●	●	●
Ara Frekans Şekillendirme Boru Bükme Makinesi	○	○	○	●	○	○	○	○
Üç Silindirli Levha Haddeleme Makinesi	○	○	○	○	●	○	○	○
2B Plazma Kesim Makinesi	○	○	○	○	●	○	○	○

Yapılarda kullanılan çelik elemanların tümü, hesaplamalı olarak yani hesaplamalı modellerden alınan verilerin CNC makinelere aktarılması yoluyla üretilmiştir. Bu elemanlar tek tip olabileceği gibi; elemanların her biri farklı boyut, şekil ve kalınlıkta da olabilmektedir. Her bir elemana ait verinin hesaplamalı modelden alınması ile çelik elemanlar, istenilen şekil ve ölçülerde hassas bir biçimde üretilebilmektedir. Yapılan analizler sonucunda; boru şekilli elemanlara eğrisel bir form verebilmek için çoğunlukla hidrolik pres boru bükme makinesi kullanıldığı görülmüştür. HOSM'de (Hangzhou Olimpik Spor Merkezi) ise boruların yarı çapına bağlı olarak ara frekans şekillendirme boru bükme makinesi kullanılarak sıcak bükme gerçekleştirilmiştir. CMUKM'de (Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi) bulunan kutu kesitli çelik elemanları üretebilmek için levhalar ilk olarak 2B plazma kesim makinesi ile kesilmiş, daha sonra üç silindirli levha haddeleme makinesi kullanılarak her bir çelik levhaya istenilen eğrisel biçim verilmiştir.

Analizi yapılan yapıların tümünde birçok bilgisayar kontrollü sayısal üretim tekniğinin gerçekleştirildiği görülmektedir. Kullanılan CNC makinelerin cinsi; çelik elemanın boyutuna, şekline ve eğrilik yarıçapına bağlı olarak değişmektedir. Bu makinelerin, istenilen eğrilikteki çelik elemanların doğru bir şekilde elde edilebilmesindeki önemi oldukça büyüktür. Yapıların çok sayıda ve farklı biçimdeki çelik strüktür elemanı içermesi sebebiyle bu elemanların geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesinin mümkün olmadığı görülmektedir. Buna göre; non-lineer yapıların üretiminde, bilgisayar tarafından kontrol edilebilen ve istenilen eğrilik ve boyuttaki çelik elemanların üretimini hassasiyetle gerçekleştirebilecek sayısal üretim araçlarının kullanılması gereklidir.

3.6. Cephe Sistemi ile İlgili Bulgular ve İrdeleme

- Yapılarda Kullanılan Cephe Kaplama Malzemeleri

Bu bölümde analizi yapılan yapılarda kullanılan kaplama malzemelerinin türüne ait bulgular yer almaktadır. Yapıların detaylı analizi sonucunda elde edilen bulgular Tablo 19'da verilmiştir.

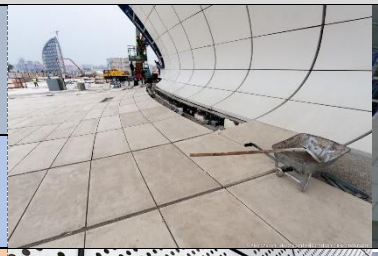
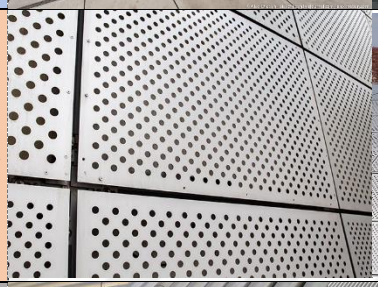
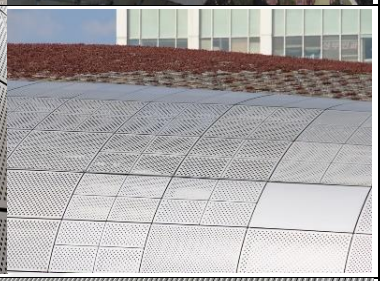
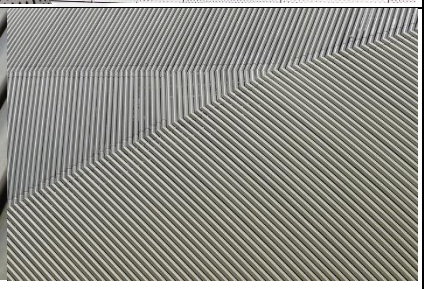
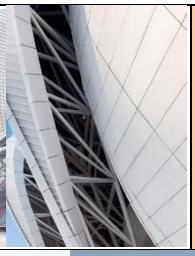
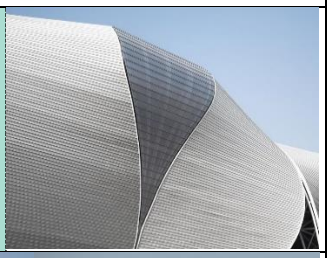
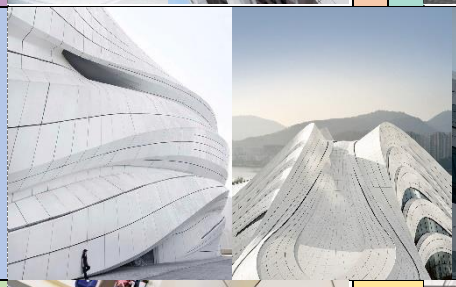
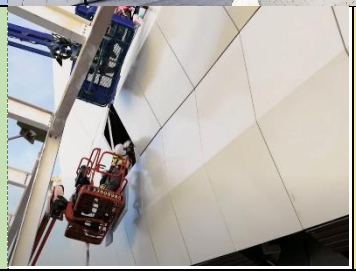
Tablo 19. Yapılarda kullanılan kaplama malzemeleri

	Yapı Adı	KAPLAMA MALZEMESİ								
		GFRP	GFRC	ETFE	PTFE	PVC Membran	Alüminyum Panel / Levha	Çelik Boru	Polikarbonat Levha	Cam
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	●	●	○	○	○	○	○	○	●
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	○	○	○	○	○	●	○	○	○
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	○	○	○	○	○	○	●	○	●
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	○	○	●	●	○	●	○	●	○
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	○	●	○	○	○	○	○	○	●
6	Al Janoub Stadyumu	○	○	○	●	●	●	○	○	○
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	○	○	○	○	○	●	○	○	●
8	Geleceğin Müzesi	●	○	○	○	○	○	○	○	●

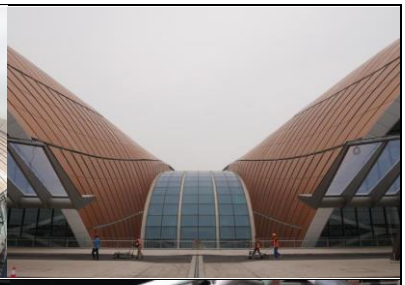
Yukarıdaki tabloda da görüldüğü üzere; yapılarda en çok GFRC, GFRP ve alüminyum panellerin tercih edildiği görülmüştür. Stadyum yapılarında ise ETFE, PTFE ve PVC membran tercih edilmiştir. Bu membranların altında perforeli ve perforesiz alüminyum levhalar kullanılmıştır. Bunun dışında kullanılan cephe kaplamaları arasında KADKM'de görüldüğü üzere paslanmaz çelik boru gibi farklı cephe malzemeleri de yer almaktadır. Ayrıca HOSM'de cama yakın bir ışık geçirgenliğine sahip plastik bir ürün olan polikarbonat levha kullanılmıştır. Bununla birlikte bazı yapılarda kaplama malzemesi olarak düz, tek ve çift eğrilikli camlar mevcuttur.

Yapılarda kullanılan camlarda genellikle solar low-e kaplamalı lamine cam tercih edilirken, BDUH'deki çatı pencerelerinde farklı bir cam tipi olan alüminyum fileli camlar kullanılmıştır. Bu tip camlar pasif gölgelendirme sağlayarak fazla ışığın içeriye alınmasını önlemektedir. Ayrıca BDUH'de uçaklardan kaynaklanan gürültüyü önlemek için gürültü önleyici camların da kullanıldığı düşünülmektedir. Buna göre; yapılarda kullanılan malzemeler, görsellerle desteklenerek Tablo 20'de gösterilmiştir.

Tablo 20. Yapılarda kullanılan kaplama malzemeleri (görseller ile)

Yapı Adı	KAPLAMA MALZEMESİ			
Heydar Aliyev Kültür Merkezi	GFRP / GFRC			
Dongdaemun Tasarım Merkezi	Alüminyum Panel			
Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi (Ithra)	Çelik Boru			
Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	PTFE / ETFE		 Alüminyum Levha	 Polikarbonat Levha
Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	GFRC			
Al Janoub Stadyumu	PTFE		PVC TiO_2	

Tablo 20'nin devamı

Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	Alüminyum Panel		
Geleceğin Müzesi	GFRP		

- Kaplama Malzemelerinin Üretim Tekniği

Bu bölümde yapılarda kullanılan kaplama malzemelerinin üretim tekniğine ait bulgulara yer verilmiştir. Seçilen yapıların analizi sonucunda elde edilen bilgilere göre; 2B üretim, çıkartmalı üretim, eklemeli üretim ve biçimlendirici üretim olmak üzere 4 farklı teknik kullanılmıştır. Elde edilen bulgular tablolaştırılarak aşağıda verilmiştir (Tablo 21).

Tablo 21. Yapılarda kullanılan kaplama malzemelerinin üretim tekniği

Yapı Adı		**ÜRETİM TEKNİĞİ**			
		2B Üretim	**Çıkartmalı Üretim**	**Eklemeli Üretim**	**Biçimlendirici Üretim**
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	○	●	○	○
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	●	○	○	●
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	○	○	○	●
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	●	○	○	●
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	○	●	○	○
6	Al Janoub Stadyumu	●	○	○	○
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	●	○	○	●
8	Geleceğin Müzesi	●	●	●	○

HAKM'de kullanılan GFRC ve GFRP, CMUKM'da kullanılan GFRC ve GM'de kullanılan GFRP panel kalıpları için CNC frezeleme tekniği kullanılmıştır. Bu ahşap panel kalıpları, eğrisel cephe panellerini elde edebilmek için 3B modellerden alınan verilerin CNC

makinelere aktarılması ile biçimlendirilmiş, ardından GFRC ve GFRP panel harçları üretilen kalıplara dökülmüştür. Bununla birlikte GM'de kullanılan GFRP panel harcı, büyük boyutlardaki bir 3B baskı makinesi ile yani eklemeli üretim tekniği kullanılarak kalıplara yerleştirilmiştir. Bu sayede tek veya çift eğrilikli cephe elemanları üretilebilmiştir.

DTM'de kullanılan alüminyum panellerin çift eğrilikli formunu oluşturmak için çok noktalı CNC streç şekillendirme makinesi, KADKM'de kullanılan paslanmaz çelik borular için ise CNC boru bükme makinesi kullanılmıştır. Bu sayede alüminyum paneller ve paslanmaz çelik borular istenilen yönde ve açıda bükülebilmiştir.

HOSM'de kullanılan ETFE ve PTFE membran ve AJS'de kullanılan PTFE membran 2B CNC kesim tekniği ile kesilmiştir. Ayrıca HOSM'de bulunan ve 2B CNC kesim makinesi ile kesilen alüminyum paneller, CNC biçimlendirme tekniği ile preslenerek şekillendirilmiştir. BDUH'de kullanılan alüminyum paneller ise yine CNC 2B kesim tekniği kullanılarak kesilmiştir. Bu panellerin CNC biçimlendirme tekniği ile biçimlendirildiği düşünülmektedir ancak kullanılan makine cinsi ile ilgili kesin bir bilgiye ulaşılamamıştır.

Hesaplamalı tasarım ve sayısal üretim teknikleri sayesinde her biri farklı şekil ve boyuta sahip olan cephe kaplama malzemeleri, istenilen ölçü ve şekillerde üretilebilmekte böylece hedeflenen non-lineer yapı formu elde edilebilmektedir. Dolayısıyla sözü edilen avantajlara ve tasarım kararlarına bağlı olmak üzere non-lineer yapılarda çoğunlukla GFRC, GFRP ve alüminyum panel gibi kaplama malzemeleri tercih edilmiştir. Aynı zamanda genellikle stadyum yapılarında kullanılan ETFE ve PTFE membran gibi malzemeler de şekil alabildikleri, istenilen boyutlarda üretilebildikleri ve hafif oldukları için; KADKM'de cephe kaplaması olarak kullanılan paslanmaz çelik borular ise büyük oranda tasarım kararlarına bağlı olarak seçilmiş fakat bu borular şekil alabilen bir malzeme olduğu için hesaplamalı bir şekilde tasarlanmakta ve üretilebilmektedir. Özetle elde edilen cephe elemanlarının, yapıların non-lineer formunu gerçekleştirebilecek şekillerde ve tanımlanan boyutlarda olması gerektiği, bu sebeple yapılarda alınan tasarım kararları dikkate alınarak sözü edilen kriterleri sağlayabilecek malzeme türlerinin seçildiği görülmüştür. Bununla birlikte, CNC üretim tekniklerinin kullanılması; hedeflenen tasarım kriterlerini sağlayabilmek, cephe kaplamlarını belirlenen şekil ve ölçülerde hassas bir biçimde üretebilmesi açısından önemlidir.

3.7. Hesaplamalı Tasarım Süreci ile İlgili Bulgular ve İrdeleme

- Hesaplamalı Tasarım Tekniği ve Araçları

Bu bölümde seçilen örneklem grubunun elde edilmesinde kullanılan hesaplamalı tasarım tekniği ve araçlarına yer verilmiştir. Buna göre; yapıların tümünde parametrik tasarım tekniğinin kullanıldığı görülmüştür. Parametrik tasarım, parametrelere bağlı olarak çalışmaktadır. Bu parametreler manipüle edilerek birden çok tasarım alternatifinin oluşturulabilmesini sağlamaktadır. Bu sayede tasarım hedeflerine en uygun tasarım kolayca elde edilebilmektedir. Dolayısıyla analizi yapılan bütün yapılarda sağladığı avantajlar sebebiyle parametrik tasarım tekniğinin tercih edildiği görülmüştür.

Yapılan analizlerde elde edilen bilgilere göre incelenen 8 projede, parametrik modellemeden yapı fiziği analizine kadar çeşitli alanlarda kullanılan 22 adet program olduğu, bu programlardan birkaçının ve program içerisinde bulunan bazı araçların incelenen yapılar için özel olarak üretildiği belirlenmiştir. Bunun dışında, yapı tasarımında kullanılan programlar arasında en çok tercih edilen hesaplamalı tasarım araçlarının sırasıyla Rhinoceros 3D, Tekla Structures, Grasshopper, CATIA ve Revit olduğu görülmüştür. Buna göre elde edilen bulgular Tablo 22'de gösterilmiştir.

Tablo 22. Kullanılan hesaplamalı tasarım araçları

	Yapı Adı	**HESAPLAMALI TASARIM ARAÇLARI**									
		Rhinoceros 3D	**Grasshopper**	**AutoCAD**	**Revit**	**CATIA**	**Tekla Structures**	**Digital Project 3D**	**Naviswork**	**Revit Dynamo**	**Diğer**
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	●	○	●	○	○	○	○	○	○	●
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	●	○	○	○	●	●	●	○	○	●
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	●	●	○	●	●	●	○	○	○	●
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	●	●	○	●	○	●	○	●	○	●
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	●	●	○	●	○	●	●	●	○	●
6	Al Janoub Stadyumu	●	●	○	●	○	●	○	○	○	●
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●
8	Geleceğin Müzesi	●	●	○	●	●	●	○	○	●	●

Bu yazılımların tercih edilme sebebi, projenin ihtiyacına göre değişmektedir. Parametrelere bağlı tasarımlar gerçekleştirilirken çoğunlukla Rhinoceros ve Grasshopper yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımlar parametrik tasarım için gerekli altyapıya sahiptir. Ayrıca bir YBM modeli oluşturabilen ve parametrik modellemeye izin veren bir yazılım olan Digital Project 3D'de kullanılan programlar arasındadır. Mimari çizimler için ise AutoCAD ve Revit kullanılmıştır. AutoCAD, karmaşık bir tasarıma sahip olan non-lineer yapıların elde edilme sürecinde yetersiz kalması sebebiyle daha basit 2B çizimler için tercih edilmiş ve plan, kesit gibi 2B mimari çizimlerin kağıt üzerinde incelenebilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Dolayısıyla AutoCAD'in yapı tasarımı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Revit ise projenin ihtiyaç duyduğu 2B çizimleri sağlarken aynı zamanda bir YBM platformudur. Böylece bütün veriler tek bir 3B model altında toplanabilmektedir. CATIA bir 3B modelleme yazılımıdır. Bu yazılım ile karmaşık cephe panelleri detaylı bir şekilde tasarlanabilmekte, yazılımdan alınan verilerin CNC makinelere aktarılması ile ürünler hassas bir şekilde işlenebilmektedir. Tekla Structures ise, çelik strüktürlerin detaylı olarak tasarlanabilmesi için tercih edilmiştir. Bu sayede çelik strüktüre ait her bir elemanın boyutu ve şekli, birleşim noktaları hatta bulon, metal plaka gibi birleşim elemanları detaylı bir şekilde tasarlanabilmektedir. Bu da çelik eleman üretiminde ve montajında hata payının azaltılmasını sağlamaktadır. Naviswork ise; yapının sıhhi tesisat, elektrik gibi diğer sistemler ile olan çakışmasının kontrol edilebilmesine imkan tanımaktadır.

Her proje farklı bir zorluk ve karmaşıklık içerdiğinden, projenin hesaplanması gereken özellikleri de değişmektedir. Bu sebeple projelerde kullanılan birden çok farklı yazılımların yanı sıra projeler için özel olarak oluşturulan yazılımlar da geliştirilmiştir. Ek olarak projelerde, aynı amaca hizmet eden yazılımların aynı projede kullanıldığı görülmüştür. Bunun sebebi, kullanılan yazılımın ihtiyaç duyulan özelliğe sahip olmaması veya verimli bir sonuç göstermemesidir. Dolayısıyla bir yazılımın sağlayamadığı kriterleri bir diğer yazılım sağlayabilmektedir.

3.8. Sürdürülebilirlik ile İlgili Bulgular ve İrdeleme

Bu bölümde incelenen yapıların sürdürülebilir tasarım kararlarına ait bulgular yer almaktadır (Tablo 23). Buna göre; her yapıda en az 3 adet sürdürülebilir tasarım kararının olduğu gözlenmiştir.

Tablo 23. Sürdürülebilirlik ile ilgili bulgular

Yapı Adı		SÜRDÜRÜLEBİLİR TASARIM KARARLARI									
		Malzeme Tasarrufu	Sürdürülebilir Malzeme	Yeşil Çatı	Su Tutan Bitki	Fotovoltaik Panel	Su Arıtma Sistemi	Yağmur Suyu Toplama	Aydınlatma Tasarrufu	Enerji Tasarrufu	Pasif Gölgelendirme
1	Heydar Aliyev Kültür Merkezi	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○
2	Dongdaemun Tasarım Merkezi	●	○	●	●	○	○	○	○	●	○
3	Kral Abdulaziz Dünya Kültür Merkezi	●	○	○	●	○	○	●	○	●	●
4	Hangzhou Olimpik Spor Merkezi	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○
5	Changsha Meixihu Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi	●	○	○	○	○	○	○	●	●	○
6	Al Janoub Stadyumu	●	○	○	●	●	○	○	○	●	○
7	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı	●	○	○	○	●	●	●	●	●	○
8	Geleceğin Müzesi	●	○	●	○	●	●	○	○	●	○

İncelenen bütün yapılar, hesaplamalı tasarım ve üretim teknikleri ile elde edildiği için bütün yapılarda malzemeden tasarruf sağlanmış ve böylece yapı üretimi gerçekleştirilirken salınan karbondioksit gazında azalma yaşanmıştır. HAKM'de kendi kendini temizleyebilme özelliği olan bir nano kaplamaya sahip ve daha az bakım ve temizlik gerektiren uzun ömürlü cephe panelleri tercih edilmiştir. DTM'de yer alan yeşil çatı kentsel ısı adası etkisini azaltmaktadır. Yeşil çatıda yer alan su tutan bitkiler sulama gereksinimini en aza indirmektedir. Bununla birlikte yapının altına kurulmuş jeotermal sistem ile enerji tasarrufu yapılmaktadır. KADKM'de ise yağmur suyu toplama sistemi ve projedeki yeşil alanlarda su tutan bitkiler kullanılarak su tasarrufu sağlanmış, cephe tasarımındaki pasif gölgelendirme ile ise fazla gün ışığı engellenerek optimum iç ortam koşulları korunmuştur. HOSM'de kullanılan membranlar kendini temizleyebilen özelliğe sahip olduğu için uzun ömürlüdür. Ek olarak projedeki yağmur suyu toplama sistemi ile su, güç tasarruflu aydınlatma sistemi ile elektrik tasarrufu sağlanmıştır. CMUKM'de güç tasarruflu aydınlatma kullanılarak fazla enerji kullanımı önlenmiştir. AJS'de yer alan enerji geri kazanım sistemi, fotovoltaik paneller, güç tasarruflu aydınlatma ile enerji tasarrufu sağlanmış, yeşil alanlarda tercih edilen su tutan bitkiler ile sulama en aza indirilmiştir. BDUH'de hava kaynaklı ısı pompası, fotovoltaik paneller ve güç tasarruflu aydınlatma sistemi kullanılarak enerji tasarrufu, su arıtma ve yağmur suyu toplama sistemi ile su tasarrufu sağlanmıştır. GM'de ise fotovoltaik paneller ile enerji tasarrufu, su arıtma sistemi ile su tasarrufu sağlanmış ve yeşil çatı ile kentsel ısı adası etkisi azaltılmıştır. Ayrıca incelenen tüm yapılarda solar low-e kaplamalı

lamine cam tercih edildiği görülmüştür. Bu camlar güneş korunumu sağlarken ortamın optimum ısı koşullarını koruyarak enerji kullanımını azaltmaktadır.

Sonuç olarak yapıların; oldukça maliyetli ve zahmetli süreçler sonucunda elde edilmesi, dolayısıyla yapıların inşa sürecinde büyük miktarda malzemenin ve enerjinin kullanımını gerektirmesi sebebiyle çevreye duyarlı yeşil yapılar olarak tasarlanması gerekmektedir. Bu sebeple her bir yapı, iyi derecede bir yeşil bina sertifikası alabilecek kriterlerde tasarlanmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bilgisayar ve dijital teknolojilerin mimarlık pratiğine dahil olmasıyla birlikte yapıların tasarım ve üretim biçimi de değişmiştir. Bu durum, yeni tasarım ve üretim tekniklerinin ortaya çıkmasına neden olmuş, bunun sonucunda pek çok karmaşık yapı üretilmeye başlanmıştır. Bu karmaşıklık kendini hem yapı formunda hem de strüktür ve cephe sisteminde göstermektedir. Geleneksel tasarım ve üretim tekniklerinin bu kompleks formların tasarım gereksinimlerini karşılayamadığı, birçok açıdan yetersiz kaldığı ve yapı üretimi için gerekli olan bilgiyi de sağlayamadığı açıktır. Bunun sebebi, böylesine karmaşık strüktür ve cephe sistemlerinin yüzlerce çizim ve hassas hesaplamalar gerektirmesi sebebiyle geleneksel yöntemler ile tasarlanmasının mümkün olmamasıdır. Mimarideki bu değişim ve dönüşümün anlaşılabilmesi ve açıkça ortaya koyulabilmesi için yapıların sadece tasarım veya strüktür gibi tek bir yönüyle değil, sürecin bütün yönleriyle detaylı olarak analiz edilmesi oldukça önemlidir. Dolayısıyla bu çalışma, hesaplamalı tasarım teknikleri ile elde edilen non-lineer yapıların tasarımından üretimine ve montajına kadar, tüm mimari sürecinin incelenmesi ile bu yapıların nasıl gerçekleştirildiğine dikkat çekmektedir.

Mimarlık disiplininin ayrılmaz bir parçası haline gelen hesaplamalı tasarım ve üretim teknikleri 90'lı yılların başında Walt Disney Konser Salonu ile öne çıkmış ve hızla yaygınlaşmıştır. Özellikle son 10 yılda yapılan non-lineer yapılardaki artış, hesaplamalı teknolojilerin mimarlık üzerindeki etkisini gözler önüne sermektedir. Bu sebeple çalışma kapsamında son 10 yılda yapılmış, mimari açıdan özgün, ödüllü ve non-lineer yapılar ele alınarak yapılar; strüktür ve cephe sistemi, hesaplamalı tasarım ve üretim tekniği, sürdürülebilir tasarım kararları başlıkları altında yapıların tüm mimari süreçleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Yapı analizlerinde tespit edilen birbirinden farklı yapı formları, strüktür elemanları ve bağlantı biçimleri, kaplama malzemeleri, hesaplamalı tasarım araçları, sayısal üretim yöntemleri ve montaj biçimleri sayesinde farklı yapı tasarım ve üretim biçimleri ortaya koyularak dijital teknolojilerin mimarlık disiplininin üzerindeki etkisi ifade edilmiştir. Yapılan analizler ve irdelemeler doğrultusunda çıkarılan sonuçlar aşağıda açıklanmıştır:

Non-lineer bir geometriye sahip karmaşık yapıların tasarımı, Öklid geometrisine sahip yapılara göre nispeten zordur. Bu yapıların sürekli ve eğrisel yüzeylerinin geometrik olarak tanımlanabilmesi karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir. Dolayısıyla bu tasarımların,

geleneksel tasarım ve geleneksel CAD sistemi olarak adlandırılan 2B dijital çizim yöntemleri ile tasarlanabilmesi neredeyse imkânsızdır. Bu zorluklar, hesaplamalı tasarım teknikleri ile aşılabilmektedir. Bununla birlikte parametrik tasarım tekniği; yapı formunun belirli değerlere bağlanıp manipüle edilerek pek çok varyasyon oluşturulabilmesi sebebiyle öne çıkmaktadır. Aynı zamanda en bilinçli tasarım kararlarının kısa bir zaman içerisinde projelendirilmesi sağlanmaktadır. Bu tekniğin, Rhinoceros 3D ve Grasshopper gibi yaygın olarak kullanılan gelişmiş yazılımlar ile gerçekleştirildiği görülmüştür.

Yapı formu oluşturulduktan sonra süreci yönetmek ve kontrol edebilmek için bir Yapı Bilgi Modellemesi modeli oluşturulmaktadır. YBM ile birçok farklı disiplinin görev aldığı mimari süreçlerin kontrol edilebilmesi; bu sayede projedeki doğruluğun, tasarım ve üretim sürecindeki verimliliğin ve hızın artırılması sağlanmaktadır. Aynı zamanda tasarım ve üretim sürecinde; strüktür, cephe veya MET (mekanik, elektrik, tesisat) tasarımını oluşturmak amacıyla Revit, Digital Project, CATIA, Tekla Structures gibi birçok farklı yazılımın da kullanıldığı görülmüştür. YBM, bu yazılımlar arasında eş zamanlı olarak otomatik bir şekilde veri paylaşımını gerçekleştirmekte ve proje üzerinde değişiklikler yapılabilmesine izin vererek sürecin doğru bir şekilde ilerlemesine önemli bir katkı sağlamaktadır.

Analiz edilen yapıların strüktür ve cephe sistemleri, sözü edilen hesaplamalı tasarım araçlarıyla tasarlanmıştır. Bu karmaşık sistemler, birbirinden farklı boyut ve biçimde olan çoğunlukla çift eğrilikli elemanlardan ve bağlantı noktalarından oluşmaktadır. Bu elemanların her birinin geleneksel yöntemlerle tasarlanması, yüzlerce çizim ve hesaplamanın yapılmasına gerektirecektir. Oysa çeşitli zorluklara rağmen bu sistemler, hesaplamalı teknolojiler ile kısa bir süre içinde tasarlanmış ve her elemana ait veri ayrı ayrı çıkarılmıştır.

Yapı üretimi sadece tasarlamaktan ibaret değildir. Tasarlanan sistemlerin doğru ve hassas bir biçimde üretilebilmesi ve monte edilmesi de sonuç mimari ürünün başarısı için oldukça önemlidir. Dolayısıyla strüktür elemanı ve cephe paneli gibi yapı elemanları, hesaplamalı yöntemler ile elde edilen verilerin bilgisayar tarafından kontrol edilen makinelere aktarılması yoluyla üretilmiştir. Bu makineler, tasarım hedefine göre ürünün istenilen biçim ve boyutlarda hassas bir şekilde oluşturulmasını ve kısa süre içerisinde imal edilmesini sağlamaktadır. Yapıyı oluşturan binlerce strüktürün veya cephe elemanının geleneksel yöntemler ile üretildiği düşünülürse, bu durumun hem malzeme hem de zaman açısından ciddi bir kayba yol açacağı açıkça söylenebilir.

Sayısal üretim teknikleri ile elde edilen her bir çelik strüktürün ve cephe elemanının hesaplamalı modele göre belirlenen kurulum sıralaması ile monte edildiği görülmüştür. Çelik elemanların birleşim noktalarının doğru bir şekilde kaynaklanması mekanik performansı ve yerinde montajı etkileyeceğinden oldukça önemlidir. Bununla birlikte hesaplamalı tasarım araçları ile gerekli analizlerin önceden yapılması yapısal güvenliği sağlamakta, olası yük sapmaları ve diğer sorunlar en aza indirilmektedir. Elbette üretim ve montaj sürecinde strüktür ve cephe sisteminin birbirinden farklı binlerce elemanını takip etmek imkânsızdır. Dolayısıyla her eleman, üzerine yerleştirilen bir çip veya kare kod ile ayırt edilmiştir. Bu veri kimlikleri sayesinde, herhangi bir strüktür veya cephe elemanının yeniden üretilmesine ihtiyaç duyulması halinde, üretim bilgileri kolaylıkla sağlanabilmekte ve eksiksiz bir şekilde üretilebilmektedir.

Yapının inşa aşaması gerçekleştirilirken oluşturulan konstrüksiyonun doğruluğunun tespit edilerek gerekli ayarlamaların yapılması gerekmektedir. Bu, 3B lazer tarama olarak adlandırılan gelişmiş teknolojilerle gerçekleştirilmiştir. Bu sayede konstrüksiyondan alınan veriler dijitalleştirilerek hesaplamalı model ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, montaj aşamasındaki hataların tespit edilerek yapı inşasının oldukça düşük hata payı ile gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Yukarıda da söz edildiği gibi böylesine karmaşık yapıların tasarımının ve üretiminin diğer yapılara göre daha zahmetli ve maliyetli olduğu ortadadır. Bu sebeple yapıların her birinde sürdürülebilir tasarım ile ilgili bazı kararlar alınmıştır. Bu kararlar, sadece yapı maliyetini düşürmekle kalmayıp yapının çevreye olan zararını da en aza indirmektedir.

Geleneksel tasarım ve üretim yöntemlerinin kullanımı halen devam etse de bu teknikler hesaplamalı teknolojilerin sağladığı avantajlara sahip değildir. Geleneksel yöntemler, karmaşık yapı sistemlerinin dolayısıyla bu sistemleri oluşturan her biri farklı boyut ve biçime sahip elemanların tasarımını sağlayamamaktadır. Ek olarak bu yöntemler ile yapı elemanlarının kısa bir süre içerisinde hassas bir şekilde üretilmesi mümkün değildir.

Hesaplamalı teknolojiler, karmaşık yapıların üretilmesinde pek çok avantaj sağlayarak bu yapıların gerçekleştirilmesini imkan tanısa da bir takım olumsuz sayılabilecek yönler de içermektedir. Bunlar;

- Sayısal üretim tekniklerinin kullanıldığı yapılarda maliyetin yükselmesi sebebiyle sözü edilen gelişmiş tekniklerin sadece yeterli bütçenin karşılandığı projelerde kullanılması,

- Karmaşık tasarımların oluşturulabilmesi için yeterli yazılım bilgisine sahip mimar ve mühendislere; yapı elemanlarının üretimini ve montajını sağlayabilecek nitelikli teknik elemanlara ihtiyaç duyulması,
- Cephe elemanlarının CNC ile üretimi geleneksel yöntemlere göre daha hızlı olsa da günlük üretim miktarının sınırlı sayıda olması,

olarak sıralanabilir. Fakat zamanla bu teknolojilerin kullanımının daha düşük maliyetli hale gelmesi ve nitelikli eleman sayısının da artması ile bu koşulların iyileştirileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak bu tez kapsamında, hesaplamalı tasarım teknikleri ile elde edilen non-lineer ve karmaşık yapıların tüm süreçleri detaylı bir şekilde incelenerek bu yapıların nasıl gerçekleştirildiği analiz edilmiştir. Böylece bu tekniklerin yapı tasarımı ve üretimi üzerindeki önemi ve etkisi anlaşılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin mimarların yanı sıra inşaat ve strüktür mühendislerine de faydalı ve yol gösterici olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte;

- Yapılarda kullanılan parametrik tasarım araçlarını karşılaştırmak amacıyla deneysel tasarım çalışmalarının gerçekleştirilmesi,
- Diğer hesaplamalı tasarım teknikleri ile elde edilen yapıların tasarım ve yapısal analizinin gerçekleştirilmesi,
- Sayısal üretim yöntemleri ile üretilen cephe panellerinin daha düşük maliyetli ve kısa süre içerisinde üretilebilme olanakları üzerinde araştırma yapılması,
- Yapılarda kullanılan kaplama malzemelerinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi,

gelecekte bu alanda çalışılabilecek konu başlıkları olarak önerilmiştir.

5. KAYNAKLAR

Abowardah, E. S. ve Ramadan, M. D. (2014). Towards Creative Architectural Concept in Arabian Contemporary Architecture, *Architectural Design Conference (ARCHDESIGN)*, İstanbul, Türkiye.

Aish, R., 2013. First Build Your Tools, *Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design*, 36-49.

Akipek, F. Ö. ve İnceoğlu, N., 2007. Bilgisayar Destekli Tasarım ve Üretim Teknolojilerinin Mimarlıktaki Kullanımları, *Megaron*, 2 (4), 237-253.

Al-Sadat, A. R. ve Abdelaal, M. S. (2020). Jeddah Science and Technology Center, *Critical Reviews*, 7 (8), 338-342.

Altunbaş, E. E. (2009). *Mimaride Evrimsel Tasarım Sistemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Arabian Profile (2022). Heydar Aliyev Centre – Azerbaijan. https://arabianprofile.com/wp-content/uploads/2022/05/APL-Heydar-Aliyev-1.pdf 10 Eylül 2022.

American Concrete Institute (2019, Ekim). Winners of the 2019 Excellence in Concrete Construction Awards. www.concrete.org/news/newsdetail.aspx?f=51721325 8 Eylül 2022.

Beilida (2019). Changsha Meixi Gölü Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi, Doğrusal Olmayan Mimari. http://www.beilida.com/help/20190618145221182.html 20 Aralık 2022.

Bekiroğlu, S. K. ve ZHA (2013). Heydar Aliyev Center.

Benkö, L. (2022). Future Potential with a Stunning Design, *UBM dergisi*. www.ubm-development.com/magazin/museum-of-the-future-dubai/ 20 Temmuz 2022.

Bertol, D., 1994. *Visualing with CAD*: *An AutoCAD Exploration of Geometric and Architectural Forms*, Springer-Verlag, New York, s. 390.

Besix (2019). *Activity Report: Al Janoub A Sustainable Stadium With State of the Art Facilities*, 110, s. 78-79. www.annualreport.besix.com/wp-content/uploads/2020/05/P11-Sports-leisure-Al-Janoub-Satdium-QAT.pdf 2 Aralık 2022.

Bos, F., Louter, C., & Nijsse, R. (Ed.), (2012). *Challenging Glass 3: Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Ios Press, 3, 121-128.

Burry, M. (1999). Paramorph, *AD Profile 139: Hypersurface Architecture II*, Academy Editions, s. 78-83.

Cache, B. (1995). *Earth Moves*, Cambridge: MIT Press.

Casini, M. (2021). Construction 4.0: Advanced Technology, *Tools and Materials for the Digital Transformation of the Construction Industry*, Woodhead Yayınları.

Chen, Z., Wen, S., Lıu, H., Wang, X., Gao, H., Wang, L., Zhu, S. (2020). Mechanical Properties of the Drum-shaped Welded Hollow Spherical Joints of the Beijing Daxing International Airport. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 60(12): 967-976.

Chin, A. (2013, Eylül). Snohetta: King Abdulaziz Center for world Culture. www.designboom.com/architecture/snohetta-king-abdulaziz-center-for-world-culture/

College of Architecture (2016). Heydar Aliyec Cultural Center, Texas A&M University. www.faculty.arch.tamu.edu/anichols/courses/applied-architectural-structures/projects-631/Files/HeydarAliyev.pdf 20 Aralık 2022.

Dunn, N., 2012. *Digital Fabrication in Architecture*, Laurence King Publishing.

Dutta, M. B. (2022). Importance of Information and Communication Technology in Construction Industry, *CSI Transactions on ICT*, 1-23.

Eigenraam, P., & Schipper, R. (2015). Concepts And Prototypes For Flexible Moulds For Production Of Double Curved Elements. *IASS Yıllık Sempozyumu*, 2015 (1), s. 1-13).

Eigensatz, M., Kilian, M., Schiftner, A., Mitra, N. J., Pottmann, H., & Pauly, M., 2010. Paneling Architectural Freeform Surfaces, *ACM SIGGRAPH 2010 Papers*, 1-10.

Elmoghazy, Z. A., Gabr, A. H. & Hawas, A. Z. (2017). Sustainability As a Generator of Creative Architectural Ideas, *First International Conference on Sustainability and the Future*.

El Shahr, M. S. (2016). Hangzhou Olimpik Spor Merkezinin Hesaplamalı Tasarımı, *BIMarabia*, 6, s.16-24. www.academia.edu/39556797/BIMarabia 7 Aralık 2022.

Fu, Y., Chang, N. Liu, Z. (2019). Steel Structure Welding Technique for Terminal Building of Beijing Daxing International Airport, *Architecture Technology*, 50 (9), 1042-4044.

Frazer, J. (1995). *Evolutionary Architecture*, Architectural Association, Londra.

Göppert, K. & Paech, C. (2020). Games in Shade the Retractable Roof for the Al Janoub Stadium in Qatar. *Stahlbau*, 89 (8), s. 715-719.

Guangen, Z., Guiwang, L., Wangdong, H. ve diğerleri (2014). Hangzhou Olimpik Sporlar Fuar Merkezi'nin Ana Stadyumu için Çelik Yapı Kanopi İşlemenin Temel Teknolojisi, *İnşaat Teknolojisi Dergisi*, 8, s. 6-9.

Guo, X., Du, Y. Gan, X. (2019). In-depth: Analysis of the Curtain Wall and Lighting Roof of the Terminal Building of Beijing Daxing International Airport, *Curtain Wall Design*, 6.

Gürsel Dino, İ. (2012). Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture, METU JFA, 29 (1), 207-224.

Huihui, L. (2020, March). The Advantages of C-Pillars in the Large Space of the Terminal: A Case Study Of Beijng Daxing International Airport Terminal, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 780, 6, s. 062035.

Januszkiewicz, K. (2016). Constructing Non-linear Shaping Envelops in Current Architecture, World Multi-disciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Plannning Symposium 2016 (WMCAUS), *Procedia Engineering*, 161, 497-502.

Januszkiewicz, K. ve Kowalski, K. G. (2020). Building Information Modeling in BIM Technology: The Role of the Parametric Model, *Architecture et Artibus*, 4, 18-41.

Jie, H. & Taiyun, H. (2013). 2. Dialogue of Architecture and Structure, *Unification of Architecture and Technology: Practice of Theater Design*, s.177-183.

Jingcheng, L. & Lıyuan, S. (2017). The Curtain Wall BIM Technology Application of Changsha Meixi Lake International Culture and Art Center, *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 9 (1).

Kara, N. (2021). *A Survey on the Emotional Responses of Users to Building Forms: Focusing on Digitally Manipulated Curvilinearity*, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent University.

Khedr, A. M. S. & Ali, M. H. (2018). Digital Design in Contemporary Architecture as a Tool Not as an Aim, *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management*, 7 (7), 7-17.

Krygiel, E. (2008). Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling, *Hoboken*, NJ: John Wiley & Sons.

Kolarevic, B., 2000. Digital Architectures, *ACADIA 2000: Eternity Infinity and Virtuality*, 251-256.

Kolarevic, B., 2000. Digital Morphogenesis and Computational Architectures, *Constructing the Digital Space: 4. Iberoamerican Congress of Digital Graphics*, SIGraDi, Rio de Janeiro, Brazil, 98-103.

Kolarevic, B., 2001. Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age, *21. Association for Computer-Aided Design in Architecture*, Bildiriler Kitabı: 268-278.

Kolarevic, B., 2001. Designing and Manufacturing Architecture in The Digital Age, *Architectural Information Management*, 5, 117-123.

Kolarevic, B., 2003. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Spon Press Taylor & Francis.

Kolarevic, B. (2013). Parametric Evolution, Inside Smart Geometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design, *AD Smart*, 1, 50-59.

Lee, G., & Kim, S., 2012. Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Facade Panels Using A New Hybrid Sheet Metal Processing Technique, *Construction Engineering and Management*, 138(11), 1322-1330.

Li, J., Duan, X., Liu, H., Lei, S., Zhang, Z. (2022). Key Technological Onnovations in the Construction of the Main Terminal Of Beijing Daxing International Airport, *Frontiers of Engineering Management*, 9 (4), 689–694.

Li, C., Li T., Pei, H., (2019). Application Of BIM Technology in Steel Structure Construction of Beijing Daxing International Airport Passenger Lounge Project, *Building Technology*, 9, 1040-1042.

Lim, J. S., & Ock, J. H., 2014. A Study on the Optimization of the Free-Form Buildings Façade Panels, *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, 19(2), 91-102.

Liyuan, S., Jingcheng, L., Huanjiang, Z. ve diğerleri (2018). Comprehensive Applicaiton of BIM Technology in the Changsha Meixi Lake International Culture and Art Center Project, *Journal of China High-Tech*, 22, s. 48-51.

Lu, S. L., Wang, S. P., & Shi, X. L. (2014). The Application of Digital Technology in the International Design Competition of Large Sports Center, *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd., 507, s. 47-52.

Lynn, Greg (1993). Architectural Curvilinearity: The Folded, the Pliant and the Supple, *Folding in Architecture*, Academy Editions, London.

Lynn, Greg (1999). *Animate Form*, Princon Architectural Press, New York.

Maeg Costruzioni, 2019. Al Janoub Stadium. https://www.maegspa.com/en/portfolio/al-janoub-stadium 9 Kasım 2022.

Mao, J. (2021, November). The Deconstructive Enlightenment of Daxing International Airport. *In 3rd International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2021)*, Atlantis Press, s. 231-236.

Men, X. ve Shi, Y., 2019. Interpreting Complexity: Digital Design of the Envelope System of Beijing Daxing International Airport, *Architectural Practice*, 10, 58-65.

Menges, A. ve Ahlquist, S. (2011). *Computational Design Thinking: Computation Design Thinking*, John Wiley & Sons.

Midmac & Porr Qatar (2015). Al Wakrah Stadium. www.boerse-social.com/static/uploads/file_526_porr_joint_venture_midmac_und_porr_qatar_mit_dem_bau_der_al_wakrah_stadiums_in_doha_beauftragt.pdf 9 Kasım 2022.

Miller, N. P. (2009). Parametric Strategies in Civic Architecture Design, *ACADIA*, s. 144-152.

Miller, N. (2010). SHIFT: Information Exchange and Collaborative Design Workflows, *ACADIA 2010 Conference: Life Information*, s. 139-144.

Miller, N. (2011). Measurement, Uncertainty, and the Dataspace, *Oz*, 33(1), s. 30-35.

Miller, N. (2011). The Hangzhou Tennis Center: A Case Study in Integrated Parametric Design, *ACADIA Regional Parametricism*, s. 141-148.

Mingguang, X. (2017). Willing to be the "Lotus Petal" of Hangzhou Olympic Sports Center, Xin Mingguan Architectural Technology. www.zhuanlan.zhihu.com/p/31258278 24 Aralık 2022.

Mitchell, W. J., 1990. Afterword: The Design Studio of the Future, *89.CAAD Futures Bildiriler Kitabı*, 479-494.

Mitchell, W. J., 1990. A New Agenda for Computer-Aided Design, *CAAD Futures Digital Proceedings*.

Naeim, M. (2015, Mart). How Computational Design Tools Were Used in Abdulaziz Center for World Culture. www.designplaygrounds.com/projects/how-computational-design-tools-were-used-in-the-abdul-aziz-center-for-world-culture/ 5 Ağustos 2022.

Naeim, M. (2015, Mayıs). Computational Tools for Design Development A Case Study of Building the Ithra Project. www.naeimdesigntechnologies.wordpress.com/2015/03/29/computation-as-a-tool-for-architectural-design-development/ 4 Ağustos 2022.

NRMCA (2022). The Graceful Defiance of the Heydar Aliyev Cultural Center. www.nrmca.org/wp-content/uploads/2022/08/Two-Page-Spread-20_-THE-GRACEFUL-DEFIANCE-OF-THE-HEYDAR-ALIYEV-CULTURAL-CENTER.pdf 15 Ocak 2023.

Oxman, R., 2006. Theory and Design in the First Digital Age, *Design Studies*, 27 (3), 229-265.

Oxman, R., 2012. Novel Concepts in Digital Design, *Computational Design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education*, IGI Global, s. 18-33.

Özlüdil, B., 2005. CAD'in Kısa Tarihi: 1950 – 2000, *Arredamento Mimarlık*, 100, 82, 80-85.

Parker, A., Project Report, Transport Facilities & Punlic Realm, *ADF*, 2 (2021).

Park, J. W., Kim, Y. B., Kim, J., & Kang, B. S., 2014. Study On Multiple Die Stretch Forming For Curved Surface Of Sheet Metal, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(11), 2429-2436.

Pazdur-Czarnowska, A. (2019). Ecological Properties of Glass Fibre Reinforced Materials Based on Architecture of Zaha Hadid, *IOP Konferans Serisi: Materials Science and Engineering*, IOP Yayınları, 471 (8).

Sanchez-Alvarez, J. (Şubat, 2009). Practical Aspects Determining The Modelling of The Space Structure for The Free-Form Envelope Enclosing Baku's Heydar Aliyev Cultural Centre, *IASS Sempozyumu*, Valencia, 1263-1274.

Sanchez, J. ve Klimke, H. (2020). Design, Analysis and Construction of Space Structures – *The Mero Legacy*, s. 61-62.

Snohetta (2008, Mayıs). King Abdulaziz Centre for World Culture. www.snohetta.com/projects/39-king-abdulaziz-centre-for-world-culture-ithra# 5 Ağustos 2022.

Su, Y., Wang, L., Duan, X., Ma, G., Wan, T. ve Tong S., (2018). Research on Unloading Technology of Steel Roof Structure for Beijing New Airport Terminal, *Architecture Technology*, 9, 954-955.

Sudheer, S. M. (2021). *Design a Museum Typology Structure on Occasion of Successful Space Mission in the UAE*, Bachelor of Architecture, Manipal Academy of Higher Education.

Sutherland, I. E. (Ocak, 1963). *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System*, Massachusetts Institute of Technology, Doktora Tezi.

Sü-Gül, Z., & Çalışkan, M. (2010). Acoustical considerations in the design of Heydar Aliyev Center Auditorium. *ISRA Sempozyumu*, s. 1-7.

Tarboush, R., & Akçay, A. Ö., 2019. Evaluation of Curvilinear Structural Systems Used by Zaha Hadid's Architecture, *Amazonia Investiga*, 8 (23), 148-161.

Teller, M. (2019, Ekim). A House fort he World, *Aramco World*, 70 (5), s. 6-21.

Theodoropoulou, I., & Tovar, J. (Eds.). (2020). *Research Companion to Language and Country Branding*, Routledge, s. 228-230.

Thomson, R. (2013). Wooden Flowers for the D1Tower in Dubai and the King Abdulaziz Center for World Culture in Saudi Arabia. *19. International Timber Construction Forum*, Garmisch-Partenkirchen Germany, 4-6 Aralık 2013, 1-11.

Thorsen, K. T. ve Greewood, R. (2010). Relying on Interdepeendencies Snohetta in the Middle East, *Architectural Design*, 92-95.

Tubielewicz-Michalczuk, M., 2019. Fences Application of the CATIA Program in Architecture and Construction, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 603 (2), s. 022014.

Veltkamp, M. (2019). Structural Optimization od Free Form Frame Structures in Early Stages of Design, *IASS Sempozyumu*, Ocak, Valencia, 1078-1089.

Yang, S., Wang, Y., Dong, W., Gao, Y. Ve Huang, S., (2020). Application of New Load-bearing Support System in Roof Construction of China Southern Airline Hangar at Beijing Daxing International Airport, *Building Construction*, 4, s. 478-480.

Wang, L., Ge, F., Wu, D. Ve diğerleri (2020). BIM Helps Beijing Daxing International Airport to Achieve Phoenix Wing Spreading, *Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 4, 92-98.

Watts, A. (2016). Complex Geometry: Heydar Aliyev Cutural Center, *Modern Construction Case Studies: Emerging Innovation in Building Techniques*, Berlin, Boston: Birkhäuser, s. 56-65.

Watts, A. (2016). *Modern Construction Case Studies: Emerging Innovation in Building Techniques*, Birkhäuser, s.110-121.

Winterstetter, T., Alkan, M., Berger, R., Watanabe, M., Toth, A. and Sobek, W. (2015), Engineering Complex Geometries – The Heydar Aliyev Centre in Baku, *Steel Construction*, 8, 65-71.

Wright, H., Heydar Aliyev Cultural Centre, Turkic Delight, s. 48-67. https://www.herbertwright.co.uk/app/download/3573470/1401%2Bbp-048-P-Baku-JM%2Bph%2BJT.pdf 15 Ocak 2023.

Zaha Hadid Architects (2020, Şubat). Changsha Meixihu International Culture and Arts Center, *OpusC Architecture & Design with Concrete*, 91, s. 18-26.

Zaha Hadid Architects (2020, Ocak). Meixihu International Culture & Arts Center, Feature: Waterfront Space, Architecture and Instalation, *Arhitectural Practice*, 1, 126-131.

Zhang, A., Mu, J., Liu, X. ve diğerleri (2019). Dynamic characteristics and multi-dimensional seismic response analysis of long span roof steel structure of Beijing Daxing International Airport Terminal Building, *Building Structure*, 14, 1-7 + 17.

Zhang, T., Meng, L., Liu, B., Zhang, Z., Wang, D., Beijing Construction Engineering Group, (2019). BIM Application in Construction of Passenger Terminal Building and

Integrated Transfer Center Project of Beijing's New International Airport, *Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 1, 39-47.

Zhang, Z. ve Luo, Y. (2017). Restoring Method for Missing Data of Spatial Structural Stress Monitoring Based on Correlation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 91, 266-277.

Zhang, Z., Feng, R. ve Liu, F., (2020). Experimental Research on the Joint used in Aluminum Alloy Glass Skylight System of Beijing Daxing International Airport, *China Civil Engineering Journal*, 53 (8), 38-44.

Zhao, H., Liu, J., Liu, M., Liu, R. & Zhang, X. (2017). Mexi Gölü Uluslararası Kültür ve Sanat Merkezi Bükme ve Burulma Çelik Yapısının Üretim Teknoloji, *Beijing Engineering Quality Management*, 1. http://www.bjgczl.com.cn/StaticPage/mulu_2250.html 7 Aralık 2022.

Zheijang Southeast Space Frame (2020). Hangzhou Olimpik Tenis Merkezi Final Salonunun Dönen ve Kapanan Çatı Yapısı. 1-12. www.m.cnass.cn/site/content/162.html 24 Aralık 2022.

Zhongtian Construction Group (2021). Hangzhou Olimpik Spor Merkezi Ana Stadyum Projesi. www.zjjzyxh.com/UploadFiles/User/2021/4/30/20210430113603413.pdf 24 Aralık 2022.

URL 1. (2023, Nisan 12). www.en.wikipedia.org/wiki/Autodesk.

URL 2. (2023, Nisan 14). www.en.wikipedia.org/wiki/Grasshopper_3D.

URL 3. (2023, Nisan 14). www.en.wikipedia.org/wiki/Topology.

URL 4. (2023, Ocak 16). www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre.

URL 5. (2023, Ocak 16). www.saffetkaya.com/portfolio/heydar-aliyev-center.

URL 6. (2023, Ocak 21). www.re-thinkingthefuture.com/case-studies/a3806-heydar-aliyev-centre-by-zaha-hadid-incredibly-ambitious-project/1.

URL 7. (2023, Ocak 21). www.theengineer.co.uk/content/in-depth/engineering-the-world-s-grandest-architectural-projects/.

URL 8. (2022, Aralık 31). https://artsandculture.google.com/story/owWRhYcMvpu2Jw

URL 9. (2022, Aralık 31). www.news.samsungcnt.com/features/engineering-construction/2017-06-the-technology-behind-seouls-landmark-dongdaemun-design-plaza/.

URL 10. (2022, Aralık 30). www.teknoring.com/news/building-information-modeling/il-bim-e-il-dongdaemun-design-plaza-di-zaha-hadid-unanalisi-del-progetto/.

URL 11. (2022, Ağustos 4). www.burohappold.com/projects/king-abdulaziz-centre-world-culture-ithra/

URL 12. (2022, Eylül 9). www.inoclad.com/index.php/en/hahn-kolb-ludwigsburg-ger-4

URL 13. (2022, Ağustos 15). www.seele.com/references/king-abdulaziz-center-for-world-culture

URL 14. (2022, Ağustos 10). www.dynobend.com/en/projects/king-abdulaziz-centre/

URL 15. (2022, Ağustos 17). www.knippershelbig.com/en/projects/king-abdulaziz-center-world-culture.

URL 16. (2022, Aralık 28). en.ccdi.com.cn/project/detail?p_id=543f494f4996192a678b4cb3

URL 17. (2022, Aralık 27). www.archdaily.com/940104/hangzhou-olympic-sports-center-nbbj

URL 18. (2023, Ocak 6). spacestructlab.org/news/news15.html

URL 19. (2023, Ocak 6). www.nbbj.com/work/hangzhou-olympic-sports-center

URL 20. (2023, Ocak 8). zhuanlan.zhihu.com/p/31258278

URL 21. (2023, Ocak 15). www.en.beijingnl.com/Item/Show.asp?m=1&d=2744

URL 22. (2023, Ocak 13). www.novelis.com/case_study/hangzhou-olympic-sports-center/

URL 23. (2023, Ocak 13). www.palram.com/project/hangzhou-sports-park-china/

URL 24. (2023, Ocak 18). www.sohu.com/a/506820281_121123819

URL 25, (2022, Aralık 24). www.zaha-hadid.com/architecture/changsha-meixihu-international-culture-art-centre/

URL 26, (2022, Aralık 27). www.archello.com/project/changsha-meixihu-int-culture-arts-centre

URL 27, (2022, Aralık 28). www.bucg.com/xwxx/qydt/20140423/5260.shtml

URL 28, (2022, Aralık 28). www.biad.com.cn/project/id/8/

URL 29, (2022, Aralık 31). www.beilida.com/help/2019060614748107.html

URL 30, (2022, Aralık 26). www.newtecnic.com/changsha-meixihu-international-culture-and-art-centre-china

URL 31, (2022, Aralık 24). www.bimbank.cn/6995.html

URL 32, (2022, Kasım 18), www.zaha-hadid.com/architecture/al-wakrah-stadium/

URL 33, (2022, Kasım 18). www.gooood.cn/al-janoub-stadium-in-al-wakrah-by-zaha-hadid-architects.htm

URL 34, (2022, Kasım 24). www.archello.com/project/al-janoub-stadium-in-al-wakrah#stories

URL 35, (2022, Kasım, 24). www.sbp.de/en/project/al-janoub-stadium/

URL 36, (2022, Kasım 24). www.scia.net/en/user-stories/al-janoub-stadium.

URL 37, (2022, Kasım 26). www.theplan.it/eng/award-2020-sportleisure/the-first-new-stadium-for-the-2022-fifa-world-cup-qatar-al-janoub-stadium-zaha-hadid-architects.

URL 38, (2022, Kasım 24). www.midmac.net/project/al-janoub-stadium-in-al-wakrah-city-main-works-and-master-plan/

URL 39, (2022, Kasım 26), www.biggestconstruction.com/al-janoub-stadium/

URL 40, (2022, Kasım 26). www.maegspa.com/en/portfolio/al-janoub-stadium

URL 41, (2022, Kasım 18). www.besixwatpac.com.au/projects/stadiums-and-venues/al-janoub-stadium#details

URL 42, (2022, Kasım 24). www.stirworld.com/see-features-fifa-arenas-al-janoub-stadium-by-zaha-hadid-architects-in-al-wakrah-qatar

URL 43, (2022, Kasım 18). www.en.wikipedia.org/wiki/Al_Janoub_Stadium#cite_note-qatar2022.qa4-25

URL 44, (2022, Temmuz 7). www.zaha-hadid.com/architecture/beijing-new-airport-terminal-building/

URL 45, (2022, Temmuz 7). www.archdaily.com/925536/beijing-daxing-international-airport-zaha-hadid-architects.

URL 46, (2022, Temmuz 7). www.burohappold.com/projects/beijing-new-airport/

URL 47, (2022, Temmuz 8). www.arup.com/news-and-events/beijings-new-mega-airport-opens

URL 48, (2022, Temmuz 11). www.cncwe.net/news/23509.html

URL 49, (2022, Temmuz 7). www.architizer.com/blog/practice/details/architectural-details-zaha-hadid-architects- beijing-daxing-airport/

URL 50, (2023, Mayıs 20). www.centerint.com/newsInfo_63.html

URL 51, (2023, Mayıs 20). www.northglass.global/News/detail/id/420.html

URL 52, (2023, Mayıs 20). www.zhuanlan.zhihu.com/p/595741647

URL 53, (2023, Mayıs 28). www.killadesign.com/portfolio/museum-of-the-future/

URL 54, (2023, Mayıs 28). www.burohappold.com/projects/museum-of-the-future/

URL 55, (2023, Mayıs 28). www.killadesign.com/news/me-architect-exploring-the-museum-of-the-future-with-shaun-killa-part-2/

URL 56, (2023, Mayıs 29). www.killadesign.com/news/ny-times-a-museum-with-a-message/.

URL 57, (2022, Temmuz 28). affan-uae.com/home/

URL 58, (2022, Temmuz 28). www.burohappold.com/articles/designing-the-diagrid-using-a-bespoke-growth-algorithm-to-deliver-museum-of-the-future/

URL 59, (2022, Temmuz 28). www.tekla.com/ae/bim-awards/museum-future

URL 60, (2022, Temmuz 29). www.constructible.trimble.com/construction-industry/how-the-new-museum-of-the-future-in-dubai-was-built

URL 61, (2022, Temmuz 22). www.bbc.com/future/article/20191028-museum-of-the-future-the-building-designed-by-an-algorithm

URL 62, (2022, Temmuz 22). www.tekla.com/resources/case-studies/how-the-museum-of-the-future-is-stretching-the-limits-of-structural-engineering

URL 63, (2022, Temmuz 21). www.nytimes.com/2022/03/27/fashion/museum-of-the-future-dubai.html

URL 64, (2022, Temmuz 28). www.cibsejournal.com/case-studies/case-study-dubais-award-winning-museum-of-the-future/

URL 65, (2022, Temmuz 29). www.compositesworld.com/articles/building-the-museum-of-the-future

URL 66, (2022, Temmuz 28). www.maccaferri.com/tr/ba%C5%9Far%C4%B1-hikayeleri/museum-of-the-future-green-coverage-and-drainage-system/

URL 67, (2022, Temmuz 21). www.youtube.com/watch?v=drdGOk4ANmI

URL 68, (2022, Temmuz 22). www.archcollege.com/archcollege/2019/09/45526.html

URL 69, (2023, Temmuz 1). www.killadesign.com/sustainability/

ÖZGEÇMİŞ

Lise eğitimini Tevfik İleri Anadolu Lisesi'nde Rize'de tamamladı. 2015 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü'nden 2019 yılında mezun olarak "mimar" unvanını aldı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı'nda Tezli Yüksek Lisans eğitimine başladı. Akademik ve mimari çalışmaların yanısıra 10 yılı aşkın süredir karakalem çalışmaları yapmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.