



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPI ÖRTÜSÜ OLARAK MÜTEKABİL ELEMANLARIN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Zehra KARAKOÇ**

**Anabilim Dalı: Mimarlık**

**HAZİRAN 2017**



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPI ÖRTÜSÜ OLARAK MÜTEKABİL ELEMANLARIN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Zehra KARAKOÇ  
(140201001)**

**Anabilim Dalı: Mimarlık**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hasan Fırat DİKER**

**Teslim Tarihi: 12 Mayıs 2017**

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 140201001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Zehra KARAKOÇ, ilgili yöneteliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YAPI ÖRTÜSÜ OLARAK MÜTEKABİL ELEMANLARIN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Hasan Fırat DİKER**      .....

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Bülent ULUENGİN**      .....

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

**Doç. Dr. İbrahim Başak DAĞGÜLÜ**      .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **12 Mayıs 2017**

**Savunma Tarihi :**      **12 Haziran 2017**

*Eşime ve anneme,*

## ÖNSÖZ

“Yapı Örtüsü Olarak Mütakabil Elemanların İncelenmesi” adlı bu çalışma Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalına Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Kısa kirişlerle geniş açıklıklar geçme sorusunun pahalı ve teknolojik sistemlere alternatif bir çözümü olarak literatürde “Reciprocal Frame Structures” veya “Nexorades” olarak geçen örgü sistemler incelenmiş ve Türk mimari literatüründe daha önce incelenmemiş ve isimlendirilmemiş olan bu konuya “elemanlar arasındaki karşılıklı bağı” nitelerek için “Mütakabil Strüktürler” adı verilmiştir.

Tez çalışmam boyunca emeklerini benden esirgemeyen değerli tez danışmanın Doç.Dr.Hasan Fırat DİKER’e; konu ile beni ilk defa tanıştıran ve yıllar geçmesine rağmen yardımlarını esirgemeyen Bochum Uygulamalı Bilimler Üniversitesi’nden hocam Prof.Dr.Michael MAAS ve arkadaşım Kai RUTTMAN’a; yapı tasarımı konusunda ufkumu genişleten konuşmaları için FSMVÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Yrd.Doç.Dr.Cenk AKSOYLAR’a; matematik alanındaki çalışmalarına yardımcı olmak için bütün imkanlarını seferber eden ve araştırmalarımın ortak olan sevgili arkadaşım Elif KARAKOÇ’a; maket çalışmaları dahilinde benimle birlikte emek harcayan FSMVÜ Mimarlık Bölümü Lisans Öğrencileri Fatma Elif UĞURLU, Şeyda IŞIK, Zeynep KARAKAŞ, Begüm ÇAĞLAR, Emir ALBAN, Oğuzhan DOYAROĞLU ve Atakan ŞENGÜLER’e teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimime başladığım günden itibaren benim için hayatı kolaylaştıran eşim Ufuk KARAKOÇ’a; eğitim ve meslek hayatında verdiği mücadele ile bana ilham veren annem Havva KESGİN’e; sevgili babam Celaleddin KESGİN’e; bu süreçte beni yüreklendiren ve destekleyen aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2017

Zehra Karakoç  
(Mimar)

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
RESİM LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xx
SUMMARY.....	xxii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Problem.....	1
1.2 Amaç.....	2
1.3 Kapsam.....	2
1.4 Yöntem.....	2
2. YAPIDA ÜST ÖRTÜNÜN TARİHÇESİ.....	3
2.1 Neolitik Dönem (M.Ö. 8000-5000).....	3
2.2 Eski Çağ (M.Ö.3500-M.S.476).....	9
2.3 Orta Çağ'dan Yakın Çağ'a.....	21
2.4 Endüstrileşmeden Günümüze.....	32
3. ÜST ÖRTÜ OLARAK MÜTEKABİL SİSTEMLER.....	47
3.1 Malzeme Çeşitliliği.....	48
3.2 Yapım Teknojilerinin Gelişimi.....	55
3.2.1 Mekânsal ve Çokyüzlü Kurguların Geliştirilmesi.....	55
3.2.2 Tasarım ve Üretim Teknolojilerinin Geliştirilmesi.....	66
3.2.3 Hareket Potansiyelinin Geliştirilmesi.....	78
4. MÜTEKABİL ELEMENLARIN STRÜKTÜR ÖZELLİKLERİ.....	86
4.1 Geometri.....	86
4.1.1 Düzlemsel Sistemler.....	90
4.1.2 Eğri Yüzeyle Sistemler.....	98
4.2 Yapım Yöntemi.....	108
4.2.1 Modül.....	108
4.2.2 Bağlantı-Birleşim-Düğüm.....	114
4.2.3 Türetme Yöntemleri.....	122
4.2.3.1 Düzgün Kirişleme.....	127
4.2.3.2 Karmaşık Kirişleme.....	131
5. DEĞERLENDİRME.....	143
5.1 Maliyet.....	143
5.2 Sürdürülebilirlik.....	148
5.3 Yapım Kolaylığı.....	151
5.4 Risk Faktörü.....	159
6. SONUÇ.....	165
KAYNAKLAR.....	168

## **KISALTMALAR**

<b>Bkz.</b>	: Bakınız
<b>cm</b>	: santimetre
<b>CUHK</b>	: Chinese University of HongKong
<b>iz.</b>	: izen
<b>km</b>	: kilometre
<b>m</b>	: metre
<b>mm</b>	: milimetre
<b>M.Ö.</b>	: Milattan Önce
<b>s.</b>	: sayfa
<b>yy</b>	: yüzyıl
<b>yk.</b>	: yaklaşık

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Neolitik dönemde bilinen yerleşimlerden bazıları .....	5
Çizelge 2.2 : Eski çağda bazı medeniyetler .....	10
Çizelge 2.3 : 5.yüzyıldan 18.yüzyıla dünyadan yapı örnekleri.....	22
Çizelge 2.4 : 18.yüzyıldan itibaren dünyadan yapı örnekleri.....	34
Çizelge 3.1 : Örgü Strüktürler [Baverel, Larsen, 2011, s:282].....	48
Çizelge 4.1 : Rijit bağlantıların strüktürün çift eğrilikli olmasına etkisinin 3.3.3.3.3.3 ve 6.6.6 örnek dizilimleri üzerinden incelenmesi.....	106
Çizelge 4.2: Çentik kullanımının avantaj ve dezavantajları [Rizzuto, Saidani ve Chilton s:129].....	116
Çizelge 4.3 : Düzgün temel çokgen dizilimlerinin mütekabil kirişleme şemasına dönüştürülmesi .....	125
Çizelge 5.1 : Yüke maruz kalan kirişlerin bağlantı noktalarının durumu A:Asılı; Ç:Çökmüş; S:Sağlam.....	162

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1</b> : Kuzey Amerika’da yaygın olarak görülen bir çukur konut örneği kesiti [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:257]. .....	3
<b>Şekil 2.2</b> : Çayönü, dikdörtgen planlı en eski yapı türü olan ızgara planlı yapıların, hafif malzemeden olan üst örtü taslak çizimi[Özdoğan, 2005, s:149].....	3
<b>Şekil 2.3</b> : Nemrik’de yapı tiplerinin gelişimi, Aurenche ve Kozłowski 1999[Bıçakçı, s:22].....	4
<b>Şekil 2.4</b> : Megalit mezar, Er-Mane, Carnac, Bretonya, Fransa, yaklaşık M.Ö.4200 [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:10] .....	6
<b>Şekil 2.5</b> : Hemidu kalıntılarında ortaya çıkan ahşap zıvanalı birleşim restitüsyonları [Zhiping, s:16].....	7
<b>Şekil 2.6</b> : Banpo’da bulunan Neolitik dikdörtgen ve dairesel planlı konut restitüsyonu(KKHCK: 1963,pp.15, 19, 24, 31) [Hsu, s:269] .....	7
<b>Şekil 2.7</b> : Bir hogan yapısı planı (çiz.A. E. Piroozfar)[Larsen, 2008, s:6].....	9
<b>Şekil 2.8</b> : Miken, Atreus’un mezar odası plan ve kesiti, M.Ö.1330[Fazio, Moffett, Wodehouse s:41].....	13
<b>Şekil 2.9</b> : Boğazköy, tapınağın kral kapısı. Kulelerle desteklenen eliptik açıklık, bindirme kemer ve yekpare taş söveden oluşur[Lloyd s:26]. .....	13
.....	14
<b>Şekil 2.10</b> : Karnak, Amon tapınağının hipostil salonun kesiti, M.Ö.1312-1301 [Lloyd, s:31].....	14
<b>Şekil 2.11</b> : Eski Nisa’daki kompleks [Lippolis, s:291] .....	16
<b>Şekil 2.12</b> : Servistan sarayının boyuna kesiti, M.S.350 [URL-4] .....	17
<b>Şekil 2.13</b> : Pantheon, kesit [Ward-Perkins s:87] .....	19
<b>Şekil 2.14</b> : Maxentius Bazilikası, M.S. 312, plan [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:121].....	19
<b>Şekil 2.15</b> : Massimo Scolari’nin Ceasar’ın köprü tanımından mülhem Vicenza’da sergilediği eserine ait çizim [URL-13].....	20
<b>Şekil 2.16</b> : Çin mimarisinde bir yapının ahşap strüktürü (Chien Kung: 1980-p:4) [Hsu s:4].....	27
<b>Şekil 2.17</b> : “Tou-kung” ahşap bindirme konsol detayı (Liang: 1984-p:10&13) [Hsu s:7].....	27
<b>Şekil 2.18</b> : Mandala örneği (çiz.A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008, s:8].....	28
<b>Şekil 2.19</b> : Villard de Honnecourt’un düzlemsel girişleme eskizi [Barnes, Folio 23r] .....	28
.....	28
<b>Şekil 2.20</b> : Çatıda Hewett tarafından tarif edilen mütekabil girişleme planı(çiz. A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008 s:9] .....	28
<b>Şekil 2.21</b> : Balıksırtı örgüyü tarifleyen Antonio da Sangallo il Giovane’ye ait çizim. (yk 1500) (Floransa, Gabinetto Uffizi, dis.n. 1330) [Pizzigoni, 2014 s:8] .....	29
<b>Şekil 2.22</b> : Leonardo da Vinci’nin düzlemsel girişleme örnekleri (çiz. A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008 s:10] .....	30

<b>Şekil 2.23</b> : Leonardo da Vinci'nin kısa kirişler problemine önerdiği köprü çözümü (çiz. A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008 s:11] .....	<b>30</b>
<b>Şekil 2.24</b> : Sebastiano Serlio'nun düzlemsel mütekabil kirişlemesi (Serlio, 1611. Fol 12r) [Houlsby s:209] .....	<b>31</b>
<b>Şekil 2.25</b> : John Wallis'in genişletilmiş strüktürü [Houlsby s:210].....	<b>31</b>
<b>Şekil 2.26</b> : Gallion'un (1734) incelemesinde sunulduğu şekilde Abeille'nin düz tonozu[Fleury s:2] .....	<b>32</b>
<b>Şekil 2.27</b> : Strüktürü oluşturan taşların görünüşü[Fleury s:2].....	<b>32</b>
<b>Şekil 2.28</b> : Mill Creek Sosyal Konut Projesi, Louis Kahn (çiz.A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008, s:15].....	<b>39</b>
<b>Şekil 3.1</b> : Gerilim bütünlüğü kompleksini oluşturan birbirine bağlı kolların (Görsel no. 15) bir araya gelişi perspektif görünüm (Görsel no. 16) [ABD Patent No:3063521] .....	<b>51</b>
<b>Şekil 3.2</b> : Betonarme döşemenin plan ve kesiti [Alman Patent No:2152580] .....	<b>52</b>
<b>Şekil 3.3</b> : Kirişlemeyi oluşturan prekast kirişin perspektif görünüşü [Alman Patent No:2152580] .....	<b>52</b>
<b>Şekil 3.4</b> : Atölyeye katılan öğrencilerin strüktür önerisi [Baverel, Boulais s:363]..	<b>54</b>
<b>Şekil 3.5</b> : Modülü oluşturan levhalar [Baverel, Boulais s:364] .....	<b>54</b>
<b>Şekil 3.6</b> : Bindirmeli kirişler şeması ile mütekabil kirişleme kurgularının kıyaslanması. Mütekabil kirişleme asimetrik olduğu halde, bindirmeli kirişlemenin simetrik olduğu görülecektir. Çizimler şematik ve ölçeksizdir[Pugnale, Sassone s:22].....	<b>57</b>
<b>Şekil 3.7</b> : Dış kaplaması olmayan A biçimli temel yapı elemanlarından oluşan strüktürün planı [ABD Patent No:4182086] .....	<b>58</b>
<b>Şekil 3.8</b> : A biçimli temel yapı elemanı [ABD Patent No:4182086] .....	<b>58</b>
<b>Şekil 3.9</b> : Düzlemsel strüktürde bir modülün perspektif görünüşü [ABD Patent No:4227358] .....	<b>59</b>
<b>Şekil 3.10</b> : Kubbeleşen strüktürde bir modülün perspektif görünüşü [ABD Patent No:4227358] .....	<b>59</b>
<b>Şekil 3.11</b> : Gerilim bütünlüğü kollarının bitişlerinde basıncın oluşturduğu dönme eğilimini gösteren diyagramlar [ABD Patent No:3063521] .....	<b>60</b>
<b>Şekil 3.12</b> : 270 çubuktan üretilen jeodezik kubbenin plan görünüşü [ABD Patent No:3063521] .....	<b>60</b>
<b>Şekil 3.13</b> : Temel ucuca birleşimin “dynamic relaxation” metodu ile mütekabil sistem modülüne dönüştürülmesi[Douthe, Baverel s:1301] .....	<b>61</b>
<b>Şekil 3.14</b> : Kare tabanlı piramidin perspektif görünüşü[Baverel, 2000 s:48] .....	<b>62</b>
<b>Şekil 3.15</b> : Final düzenleme[Baverel, 2000 s:51].....	<b>62</b>
<b>Şekil 3.16</b> : İçten ve dıştan çevreleyen kürelerin çokyüzlünün bir kenarı ile ilişkisi[Baverel, 2000 s:67] .....	<b>63</b>
<b>Şekil 3.17</b> : A elemanının P1 düzlemi üzerinde $\theta$ açısı ile döndürülmesini gösteren şekil[Baverel, 2000 s:68] .....	<b>63</b>
<b>Şekil 3.18</b> : Düzgün bir onikiyüzlünün görünüşü[Baverel, 2000, s:67] .....	<b>64</b>
<b>Şekil 3.19</b> : Final düzenleme[Baverel, 2000, s:74].....	<b>64</b>
<b>Şekil 3.20</b> : İlk sırada 5 düzgün çokyüzlü; ikinci sıradan sona kadar Arşimet' e ait 15 çokyüzlü gösterilmiştir [Baverel, 2000 s:93] .....	<b>65</b>

<b>Şekil 3.21</b> : Temel birleşim [Baverel, 2000 s:123].....	<b>66</b>
<b>Şekil 3.22</b> : Elemanların yer değiştirmesi [Baverel, 2000 s:124].....	<b>66</b>
<b>Şekil 3.23</b> : Temel ucuca birleşim [Baverel, 2000 s:167].....	<b>67</b>
<b>Şekil 3.24</b> : Birleşimin mütekabil sistem modülüne dönüştürülmesi [Baverel, 2000 s:167].....	<b>67</b>
<b>Şekil 3.25</b> : Belirlenen aralıkta kirişlerin başlangıç durumu [Baverel, Nooshin, Kuriowa, 2004 s:102].....	<b>68</b>
<b>Şekil 3.26</b> : D1, D2 ve D3 noktalarının aralık içinde rasgele seçilmesiyle oluşan ilk durum [Baverel, Nooshin, Kuriowa 2004 s:102].....	<b>68</b>
<b>Şekil 3.27</b> : Örnek formülde verilen değerlere göre Formian tarafından üretilen strüktür [Baverel, 2000 s:52].....	<b>69</b>
<b>Şekil 3.28</b> : Bir jeodezik kürenin yarısından, kenarların döndürülmesi yöntemiyle ( $\alpha:\pi/10$ açısı kadar döndürülmesiyle) elde edilen mütekabil kubbe strüktür [Brocato, Mondardini s:1788].....	<b>70</b>
<b>Şekil 3.29</b> : Wolfram Mathematica’da üretilen, Abeille’nin birleşimlerine uygun kubbenin içten ve dıştan görünüşü [Brocato, Mondardini s:1789].....	<b>71</b>
<b>Şekil 3.30</b> : Planda hücrelerin ve Delauney çizgilerinin görünüşü [Thönnissen s:99].....	<b>73</b>
<b>Şekil 3.31</b> : Oluşan mütekabil strüktürün plan görünüşü [Thönnissen s:99].....	<b>73</b>
<b>Şekil 3.32</b> : Oluşan mütekabil strüktürün perspektif görünüşü [Thönnissen s:99] ...	<b>73</b>
<b>Şekil 3.33</b> : Biçimi belirlenmiş bir diğer strüktürün perspektif görünüşü[Thönnissen, Werenfels s:370] .....	<b>74</b>
<b>Şekil 3.34</b> : Dijital aracın kullanımıyla üretilen mimari çözümlerden örnekler[Thönnissen, Werenfels s:370]. .....	<b>74</b>
<b>Şekil 3.35</b> : a–c arası mütekabil sisteme uygun bir mozaikleme üretilmesi ve tahmini bir üç boyutlu kılavuz yüzeyin üzerine haritalanması, d–f çeşitli parametrelerin interaktif biçimde değiştirilmesiyle tasarımın görünüşü üzerinde rötuş yapılması; g–i optimizasyon aracı uygulanarak aynı düzlemde ve bağlantılı çubuklar elde edilmesi. [Song ve diğ. s:115] .....	<b>76</b>
<b>Şekil 3.36</b> : Bir çubuğun üzerine tıklanarak bağlantı bilgilerinin görüntülenmesi [Song ve diğ. s:114] .....	<b>77</b>
<b>Şekil 3.37</b> : Yukarıdan aşağı mütekabil strüktürün haritalaması [Song ve diğ. s:114] .....	<b>77</b>
<b>Şekil 3.38</b> : Açık strüktürün kısmi plan görünüşü [ABD Patent No:3185164].....	<b>78</b>
<b>Şekil 3.39</b> : Strüktürün açılmadan önceki adımlardan biri [ABD Patent No:3185164] .....	<b>78</b>
<b>Şekil 3.40</b> : Kenetle bağlı çubukların bağlantı [ABD Patent No:3185164] .....	<b>79</b>
<b>Şekil 3.41</b> : Bağlantı kenetlerinden birinin perspektif görüntüsü [ABD Patent No:3185164] .....	<b>79</b>
<b>Şekil 3.42</b> : Tam olarak kurulmuş yapının perspektif görünüşü [ABD Patent No:RE31566] .....	<b>81</b>
<b>Şekil 3.43</b> : Yapının toplanmış ve yarı açık hallerini gösteren perspektif görünüşler [ABD Patent No:RE31566] .....	<b>81</b>
<b>Şekil 3.44</b> : Açılıp kapanabilen çatı, plan görünüşü [Choo ve diğ. s: 52] .....	<b>82</b>
<b>Şekil 3.45</b> : Kavisli hareket rotası, plan görünüşü [Choo ve diğ. s: 53] .....	<b>82</b>

<b>Şekil 3.46</b> : İkiye bölünmüş strüktürün açılma şeması [Saidani, Baverel, 1998a s: 144] .....	<b>83</b>
<b>Şekil 3.47</b> : Üçe bölünmüş strüktürün açılma şeması [Saidani, Baverel, 1998a s:144] .....	<b>83</b>
<b>Şekil 3.48</b> : Dörde bölünmüş strüktürün açılma şeması [Saidani, Baverel, 1998a s:144].....	<b>83</b>
<b>Şekil 3.49</b> : İkiye bölünmüş katlanabilir bir mütekabil strüktürün açık hali [Saidani, Baverel, 1998a s: 145].....	<b>83</b>
<b>Şekil 3.50</b> : Strüktürün katlanmış hali [Saidani, Baverel, 1998a s:145].....	<b>83</b>
<b>Şekil 3.51</b> : Yarım ve tam açık kıskaçla bağlı eğimli bir dilimi gösteren perspektif görünüşü [ABD Patenti No:6739098].....	<b>84</b>
<b>Şekil 3.52</b> : Katlanabilir kubbe strüktürünün perspektif görünüşü [ABD Patenti No:6739098] .....	<b>84</b>
<b>Şekil 4.1</b> : Bir mütekabil sistem modülünün planı ve geometrik parametreleri [Popovic, s:178] .....	<b>86</b>
<b>Şekil 4.2</b> : Kirişlerin kesişim noktasından geçen kesit ve geometrik parametreler [Popovic, s:178] .....	<b>86</b>
<b>Şekil 4.3</b> : $x_2$ uzunluğu ile $\theta$ açısı ve $r_1$ arasında bir bağıntı kurulabilmesi için OHB üçgeni oluşturulmuştur.....	<b>87</b>
<b>Şekil 4.4</b> : $x_1$ uzunluğu ile $r_0$ , $r_1$ ve $\theta$ arasında bir bağıntı kurulabilmesi için OHF üçgeni oluşturulmuştur.....	<b>88</b>
<b>Şekil 4.5</b> : Kesitte, eğimli kirişin oluşturduğu $BB_1F$ dik üçgeni ile, $AA_1F$ dik üçgeni arasında benzerlik vardır. ....	<b>89</b>
<b>Şekil 4.6</b> : Altlarıyla birlikte bütün sistem. (a) tek bir kiriş; (b) temel sistem modülü; (c) tamamlanmış merkez [Kohlhammer, Kotnik s:81] .....	<b>91</b>
<b>Şekil 4.7</b> : Düzlemsel mütekabil strüktür [Kohlhammer, Kotnik s:81].....	<b>91</b>
<b>Şekil 4.8</b> : Düzgün ve düzgün olmayan mütekabil sistem modül örnekleri[Kohlhammer, Kotnik s:81].....	<b>91</b>
<b>Şekil 4.9</b> : Wallis'in tipik kiriş eskizi [Houlsby, s:212] .....	<b>92</b>
<b>Şekil 4.10</b> : Houlsby'nin Wallis'in eskizi üzerinden belirlediği kiriş oranları[Houlsby, s:213] .....	<b>92</b>
<b>Şekil 4.11</b> : Daniel Gat'a ait patentin 3 numaralı görseli. Tek bir kiriş [ABD Patenti No: 4227358] .....	<b>92</b>
<b>Şekil 4.12</b> : Daniel Gat'a ait patentin 4 numaralı görseli. Temel sistem modülü [ABD Patenti No: 4227358] .....	<b>92</b>
<b>Şekil 4.13</b> : Daniel Gat'a ait patentin 12 numaralı görseli. 3 numaralı görseldeki kirişlerden oluşturulan köprü benzeri açıklık geçen düzlemsel strüktür. [ABD Patenti No: 4227358] .....	<b>93</b>
<b>Şekil 4.14</b> : Bağlantı mesafeleri eşit üç kirişli temel sistem modülü kullanılarak oluşturulan altıgensel kirişleme[Rizzuto, Saidani ve Chilton s:127] .....	<b>93</b>
<b>Şekil 4.15</b> : Bağlantı mesafeleri değişken bir temel sistem modülü kullanılarak oluşturulan sekizgen ve kareli kirişleme[Rizzuto, Saidani ve Chilton s:127] .....	<b>93</b>
<b>Şekil 4.16</b> : Sebastiano Serlio'nun açıklığı geçmede kısa kalan kirişler önerisi [Bertin, 2012 s:74] .....	<b>94</b>

<b>Şekil 4.17</b> : Bertin'in örnek kirişi (b) kirişlemede gerçekleştirilemeyen aşama (c) [Bertin, 2012 s:74] .....	<b>94</b>
<b>Şekil 4.18</b> : Bertin'in daha kısa kirişler kullanarak gerçekleştirdiği Serlio'nun önerisi [Bertin, 2012 s:75] .....	<b>94</b>
<b>Şekil 4.19</b> : CUHK'da 2000 yılında bir yaz okulunda yapılan düzlemsel strükture ait çizim [Bertin, 2003 s:153].....	<b>95</b>
<b>Şekil 4.20</b> : Üç tekrar adımı (a); kırmızı birinci, mavi ikinci, yeşil üçüncü adım. (b); döngüsel ve yayınlık tekrar adımı ilerlemesi [Kohlhammer, Kotnik s:81].....	<b>95</b>
<b>Şekil 4.21</b> : Dört kirişten oluşan temel sistem modülü[Kohlhammer, Kotnik s:83].	<b>96</b>
<b>Şekil 4.22</b> : Bir kiriş üzerinde yük dağılımını etkileyen oranlar işaretlenmiştir[Kohlhammer, Kotnik s:83]. .....	<b>96</b>
<b>Şekil 4.23</b> : Örgü içerisinde bir kirişin bağlantı noktaları [Kohlhammer, Kotnik s:84] .....	<b>97</b>
<b>Şekil 4.24</b> : Dört kirişten oluşan temel sistem modülü[Gelez, Aubry ve Vaudeville s:305].....	<b>99</b>
<b>Şekil 4.25</b> : Mütakabil çatı strüktureünün perspektif çizimi [Gelez, Aubry ve Vaudeville s:306] .....	<b>100</b>
<b>Şekil 4.26</b> : Mütakabil çatı strüktureünün görünüş çizimi [Gelez, Aubry ve Vaudeville s:306].....	<b>100</b>
<b>Şekil 4.27</b> : Konstrüksiyonun plan görünüşü [Winter, Rug s:193].....	<b>101</b>
<b>Şekil 4.28</b> : Konstrüksiyonun kısmi görünüşü, kesiti ve bağlantı detayı [Winter, Rug s:192].....	<b>101</b>
<b>Şekil 4.29</b> : Tek bir kirişe ait çizim ve kirişlemenin tabandaki bitiş detayı [Winter, Rug s:192] .....	<b>101</b>
<b>Şekil 4.30</b> : Bir hiperboloidin haritalanması[Song ve diğ. s:5] .....	<b>102</b>
<b>Şekil 4.31</b> : Bir kubbenin çeşitli kirişleme kurgularına uygun olarak haritalanması[Song ve diğ. s:8].....	<b>102</b>
<b>Şekil 4.32</b> : Köşeleri kesik yirmi yüzlünün elde edilmesinde kullanılan kiriş .....	<b>103</b>
<b>Şekil 4.33</b> : Üç kirişli rijit bağlantı [Baverel, Saidani, 1998b s:67].....	<b>104</b>
<b>Şekil 4.34</b> : Dört kirişli serbest bağlantı [Baverel, Saidani, 1998b s:67].....	<b>104</b>
<b>Şekil 4.35</b> : Kare, beşgen ve altıgenin dönme aksları [Baverel, Saidani 1998b s:67] .....	<b>105</b>
<b>Şekil 4.36</b> : Kare modül kullanılarak oluşturulmuş bir eğri yüzey görüntüsü [Tamke ve Riiber ve Jungjohann s:344].....	<b>107</b>
<b>Şekil 4.37</b> : Üç kirişten oluşan bir mütakabil sistem modülü [Baverel ve diğ, 2000, s:155].....	<b>108</b>
<b>Şekil 4.38</b> : Dört kirişten oluşan bir mütakabil sistem modülü [Baverel ve diğ, 2000, s:156].....	<b>108</b>
<b>Şekil 4.39</b> : Dört kirişli modüllerden oluşan bir mütakabil struktür [Baverel ve diğ, s:156].....	<b>109</b>
<b>Şekil 4.40</b> : Üç ve dört kirişli modüllerden oluşan mütakabil struktür [Baverel ve diğ, s:156].....	<b>109</b>
<b>Şekil 4.41</b> : Sağa ve sola doğru modüller[Baverel ve diğ, s:157].....	<b>110</b>
<b>Şekil 4.42</b> : Sağa doğru ve sola doğru modüllerden oluşmuş bir mütakabil struktür [Baverel ve diğ, s:157] .....	<b>110</b>

<b>Şekil 4.43</b> : Dört değerlikli sola doğru modüllerden oluşmuş bir mütekabil strüktür [Baverel ve diğ, s:157] .....	<b>110</b>
<b>Şekil 4.44</b> : Dört değerlikli sağa doğru modüllerden oluşmuş bir mütekabil strüktür [Baverel ve diğ, s:157] .....	<b>110</b>
<b>Şekil 4.45</b> : Yuvarlak kesitli kirişlerin bağlantı noktasından geçen kesiti gösterir şekil [Baverel, 2000 s:36] .....	<b>111</b>
<b>Şekil 4.46</b> : F kesiti [Baverel, 2000 s:37].....	<b>111</b>
<b>Şekil 4.47</b> : Kare kesitli kirişlerde eksenler arası fark [Baverel, 2000 s:39] .....	<b>111</b>
<b>Şekil 4.48</b> : Taban açısı artan kare kesitli kirişlerde eksenler arası fark artmaktadır [Baverel, 2000 s:39] .....	<b>111</b>
<b>Şekil 4.49</b> : Bir kirişin durumu [Bertin, s:23].....	<b>112</b>
<b>Şekil 4.50</b> : Kirişlerin diyagramı [Bertin, s:23] .....	<b>112</b>
<b>Şekil 4.51</b> : Bir kirişin durumu [Bertin, s:23].....	<b>113</b>
<b>Şekil 4.52</b> : Kirişlerin diyagramı[Bertin, s:23] .....	<b>113</b>
<b>Şekil 4.53</b> : Kirişlerin diyagramı [Bertin, s:23] .....	<b>114</b>
<b>Şekil 4.54</b> : Kirişlerin diyagramı [Bertin, s:23] .....	<b>114</b>
<b>Şekil 4.55</b> : Altı kirişli modülde yere basan kısımlar işaretlenmiştir[Bertin, 2012 s:29].....	<b>115</b>
<b>Şekil 4.56</b> : Üç kirişli iki modül birleştirildiğinde ortaklaşılınan kiriş diğer kirişler tarafından sıkıştırılarak asılı kalır[Bertin, 2012 s:29] .....	<b>115</b>
<b>Şekil 4.57</b> : Çok merkezli bir mütekabil strüktürün bağlantı noktasından alınan kesitte kertilmesi gereken alan taranmıştır[ Rizzuto, Larsen s:251] .....	<b>117</b>
<b>Şekil 4.58</b> : Yardımcı eleman kullanılarak yapılabilecek bağlantı çeşitleri[ Baverel, 2000 s:267].....	<b>118</b>
<b>Şekil 4.59</b> : İskele kelepçesi kullanıldığı varsayılan bir bağlantıda belirtilen P düzlemi[Baverel, 2000 s:269] .....	<b>119</b>
<b>Şekil 4.60</b> : Bağlantı noktasından kesit [Rizzuto s:11].....	<b>120</b>
<b>Şekil 4.61</b> : Bijnen' in patentli kertilmiş profilleri plan [Rizzuto, Larsen s:245]....	<b>121</b>
<b>Şekil 4.62</b> : Bijnen' in patentli kertilmiş profilleri görünüş [Rizzuto, Larsen s:245] .....	<b>121</b>
<b>Şekil 4.63</b> : E:Eleman sayısı, e:eksenler arası fark, Rijit- pin: bağlantı türü [Rizzuto, Larsen s:249].....	<b>121</b>
<b>Şekil 4.64</b> : Yedi kirişli tek merkezli dönel strüktürler [Bertin, s:25] .....	<b>122</b>
<b>Şekil 4.65</b> : Resim 4.11 'de verilen tamamlanmış merkezin kiriş eklenecek türetmeye devam edilmesi [Bertin, s:23] .....	<b>123</b>
<b>Şekil 4.66</b> : İşaretli köşede köşelerde 6 adet üçgen birleşmektedir. Dizilim; 3.3.3.3.3.3 veya 3 <sup>6</sup> şeklinde kodlanır[Grünbaum, Shephard s:229].....	<b>124</b>
<b>Şekil 4.67</b> : İşaretli köşede ve tüm köşelerde 4 adet kare birleşmektedir. Dizilim; 4.4.4.4 veya 4 <sup>4</sup> şeklinde kodlanır [Grünbaum, Shephard s:229].....	<b>124</b>
<b>Şekil 4.68</b> : İşaretli köşede ve tüm köşelerde 3 adet altıgen birleşmektedir. Dizilim; 6.6.6 veya 6 <sup>3</sup> şeklinde kodlanır [Grünbaum, Shephard s:229].....	<b>124</b>
<b>Şekil 4.69</b> : 6.6.6 diziliminin mütekabil kirişlemeye dönüşümü .....	<b>127</b>
<b>Şekil 4.70</b> : 6.3.6.3 diziliminin mütekabil kirişlemeye dönüşümü .....	<b>127</b>
<b>Şekil 4.71</b> : 6.6.6 diziliminde köşenin dönüşümü.....	<b>127</b>
<b>Şekil 4.72</b> : 6.3.6.3 diziliminde köşenin dönüşümü.....	<b>127</b>

<b>Şekil 4.73</b> : Maket çalışması için seçilen kiriş boyutları incelendiğinde kiriş boyunun (L) 4.65cm; bağlantı mesafesinin ( $\lambda$ ) 1.88cm; eksenler arası fark (e) değerinin 0 (sıfır) olduğu görülür.....	<b>128</b>
<b>Şekil 4.74</b> : Üç kirişli modül ile başlayarak, 6.3.6.3 ve 6.6.6 dizilimlerine uygun tamamlanmış merkezler elde edilmiştir. ....	<b>129</b>
<b>Şekil 4.75</b> : 3.6.3.6 diziliminde modülün çentik yerleri değiştirilerek alternatif bir örüntü oluşturulmuştur. ....	<b>129</b>
<b>Şekil 4.76</b> : 3 <sup>6</sup> diziliminin tamamlanmış merkeze dönüştürülmesi için modül haricinde kirişler eklenmelidir. Örüntü modüler değildir. ....	<b>130</b>
<b>Şekil 4.77</b> : Kare modülden oluşturulan birinci örüntü modülerdir, ikinci örüntünün ise tamamlanmış merkeze dönüştürülmesi için ilave kirişlere ihtiyacı vardır. ....	<b>130</b>
<b>Şekil 4.78</b> : Sağa ve sola doğru kare modüllerin komşu olmasıyla elde edilen örüntü .....	<b>131</b>
<b>Şekil 4.79</b> : Kural adımları [Parigi, Pugnale s:160].....	<b>132</b>
<b>Şekil 4.80</b> : İki boyutlu kuralı üçüncü boyuta taşıma adımları [Parigi, Pugnale s:162] .....	<b>133</b>
<b>Şekil 4.81</b> : Strüktürün soldan sağa doğru plan, görünüş ve perspektifi[Larsen, Lee, 2013 s:5].....	<b>135</b>
<b>Şekil 4.82</b> : İki boyutlu kirişlemenin üç boyutlu strüktüre dönüşümü [Roelofs, 2008 s:23].....	<b>136</b>
<b>Şekil 4.83</b> : Strüktürün oluşturulmasında kural adımları[Parigi, Pugnale s:165,167] .....	<b>137</b>
<b>Şekil 4.84</b> : Strüktürün oluşturulmasında kural adımları[Parigi, Pugnale s:168]....	<b>139</b>
<b>Şekil 4.85</b> : Strüktürün oluşturulmasında kural adımları[Parigi, Pugnale s:170]....	<b>140</b>
<b>Şekil 4.86</b> : Strüktürün oluşturulmasında kural adımları[Parigi, Pugnale s:173]....	<b>141</b>
<b>Şekil 5.1</b> : “Lamellandach” çatı strüktürü ile geleneksel çatıların kıyaslanması[Winter, Rug s:4].....	<b>145</b>
<b>Şekil 5.2</b> : Mütakabil kafes kirişe dönüştürülen önerinin enine kesiti[Larsen, 2015 s:5] .....	<b>151</b>
<b>Şekil 5.3</b> : Mütakabil kafes kirişe dönüştürülen önerinin boy kesiti[Larsen, 2015 s:5] .....	<b>151</b>
<b>Şekil 5.4</b> : Leonardo da Vinci'nin köprü strüktürünü taklit eden tonoz biçimli geçici barınak fikri[Larsen, Lee 2014 s:1] .....	<b>154</b>
<b>Şekil 5.5</b> : Düzlemsel elemanlardan oluşan geçici barınak fikri[Larsen, Lee 2013 s:2] .....	<b>155</b>
<b>Şekil 5.6</b> : Düzlemsel elemanlardan oluşan barınağı oluşturan parçalar[Larsen, Lee 2013 s:2] .....	<b>155</b>
<b>Şekil 5.7</b> : Dört kirişten oluşan mütakabil strüktüre yük uygulanması .....	<b>160</b>
<b>Şekil 5.8</b> : Geleneksel bir kirişlemeye yük uygulanması .....	<b>160</b>
<b>Şekil 5.9</b> : Çok merkezli bir mütakabil kirişleme örneği, işaretli bölgeye aşırı yük uygulanması planlanmıştır. ....	<b>161</b>
<b>Şekil 5.10</b> : Aynı çok merkezli kirişlemede yük uygulanmasından etkilenen bağlantı noktaları.....	<b>161</b>
<b>Şekil 5.11</b> : 3, 4 numaralı kirişler ve çevresinin durumunun incelenmesi, kırmızı oklar yük aktarımında zafiyete sebep olacak noktaları göstermektedir. ....	<b>163</b>

**Şekil 5.12 :** Çok merkezli bir diğer mütakabil kırışleme örneği, işaretli bölgeye aşırı yük uygulanması planlanmıştır. .... **164**

## RESİM LİSTESİ

### Sayfa

<b>Resim 2.1</b> : Kızılderili tipisi [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:252].....	8
<b>Resim 2.2</b> : Bir Hogan yapısı [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:258].....	8
<b>Resim 2.3</b> : Mohenjo Daro’da dar bir sokak görüntüsü ve bindirme kemerli drenaj kanalı [URL-3].....	12
<b>Resim 2.4</b> : Servistan sarayı kubbeden kare forma geçişte kullanılan tromp elemanı [URL-4].....	17
<b>Resim 2.5</b> : Augustus Kemer, Perugia, M.Ö.310. Geçidin Etrüskler tarafından yapılan alt kısmında, kapı üzerinde yarım çember kemer görülmektedir[Fazio, Moffett, Wodehouse s:107].....	18
<b>Resim 2.6</b> : Julius Caesar’ın Ren nehri üzerine kurdurduğu köprü, M.Ö. 54, Bonn Eyalet Müzesinde bulunan model [Kretschmer s:152-153].....	20
<b>Resim 2.7</b> : Aynı esere ait fotoğraf [URL-13].....	20
<b>Resim 2.8</b> : Rainbow Bridge [URL-11].....	26
<b>Resim 2.9</b> : Lincoln katedrali dernek binası [URL-12].....	28
<b>Resim 2. 10</b> : Fresklerin restorasyonu esnasında açığa çıkmış olan kubbenin balıksırtı örgüsü(solda) [Pizzigoni, 2014 s:7].....	29
<b>Resim 2.11</b> : Casa Battlo’da spiral kirişlerle oluşturulmuş tavan [URL-30].....	37
<b>Resim 2.12</b> : 1932’de Merseburg Freimfelde’ de yapılan Kreuzkapelle kilisesi çatı strüktürü[URL-40].....	38
<b>Resim 2.13</b> : Langstone Yelken Merkezi [URL-31].....	39
<b>Resim 2.14</b> : Seiwa Bunraku Kukla Tiyatrosu sergi salonu (fotoğraf Kazuhiro Ishii’ye aittir) [Larsen, 2008, s:93].....	40
<b>Resim 2. 15</b> : Seiwa Bunraku Kukla Tiyatrosu oditoryum (fotoğraf Kazuhiro Ishii’ye aittir) [Larsen, 2009, s:1873].....	40
<b>Resim 2.16</b> : Sarmal ev, çatının içten görünüşü(fotoğraf Kazuhiro Ishii’ye aittir) [Larsen, 2008, s:87].....	41
<b>Resim 2.17</b> : Sukiya Evi, misafir salonundaki mütekabil girişlemenin iç görünüşü [Larsen, 2008, s:87].....	41
<b>Resim 2.18</b> : Stonemason Müzesi, çok amaçlı salonun çatı strüktürü (Photo: Keikaku-Inc.) [Larsen, 2008, s:139].....	42
<b>Resim 2.19</b> : Yoichi Kan’ın tasarımı olan Yeni Çiftlik Evinde çatı strüktürü (Photo: Youchi Kan.) [Larsen, 2008, s:111].....	42
<b>Resim 2.20</b> : Rice Üniversitesi bambu saçak [URL-33].....	43
<b>Resim 2. 21</b> : Forest Park St. Louis Pavyonu projesi [URL-33].....	43
<b>Resim 2.22</b> : Woodland Toplanma Merkezi çatısı [Chilton, 2009, s:1883].....	43
<b>Resim 2.23</b> : Whisky Barrel Evi çatının içten görünüşü [Chilton, 2009, s:1878].....	43
<b>Resim 2.24</b> : Alvaro Siza, 2005 Serpentine Gallery Pavyonu’nda kullandığı strüktür[URL-34].....	44
<b>Resim 2.25</b> : Kreod Pavilion görünüşü(fotoğraf Ed Kingsford’a aittir)[URL-35]...	44

<b>Resim 2.26</b> : Gözlemevinin görünüşü [URL-36] .....	<b>45</b>
<b>Resim 2.27</b> : Filistin Ceriko'da yapılan çift eğrilikli tonoz biçimli mütekabil strüktür [URL-37].....	<b>45</b>
<b>Resim 3.1</b> : IBIOS'ta yapılan örgü strüktür [Weinand, Hudert, s:102].....	<b>49</b>
<b>Resim 3.2</b> : Shigeru Ban, Centre Pompidou Metz [URL-38].....	<b>49</b>
<b>Resim 3.3</b> : Vito Bertin'in kubbe maketi [Larsen, 2008, s:34] .....	<b>50</b>
<b>Resim 3.4</b> : İskele borularından yapılmış bir mütekabil girişleme modülünde, bağlantı elemanı olarak kelepçe kullanılmıştır [Baverel, Nooshin, 2007 s:282]	<b>51</b>
<b>Resim 3.5</b> : Pizzigoni'nin önerisine ait maket [Pizzigoni, 2009, s:1896] .....	<b>52</b>
<b>Resim 3.6</b> : Üç elemandan oluşan modül [Pizzigoni, 2009, s:1901].....	<b>52</b>
<b>Resim 3.7</b> : Modülün detayı [Pantazis, Gerber s:11].....	<b>53</b>
<b>Resim 3.8</b> : Strüktürün görünüşü [Pantazis, Gerber s:10].....	<b>53</b>
<b>Resim 3.9</b> : (a)Termoplastığın kesilmesi, (b)cam lifli polimerin kesilmesi, (c)Termoset sürülmesi, (d) kalıpın fırınlanması, (e) koruyucu kılıfın sökülmesi, (f) yüzeyde kuşlama yapılması, (g) strüktürün görünüşü, (h) bağlantıların görünüşü [Baverel, Boulais s:364].....	<b>54</b>
<b>Resim 3.10</b> : Baverel'in yirmiyüzlü rijit mütekabil strüktürü [Douthe, Baverel s:1298].....	<b>61</b>
<b>Resim 3.11</b> :Kubbeyi oluşturan parçaların kesilmesi. [Schwartz, Mondardiini s:207] .....	<b>71</b>
<b>Resim 3.12</b> : Kesilen EPS parçaların birleştirilmesi [Schwartz, Mondardini s:207]71	
<b>Resim 3.13</b> : Farklılaşmış örgü strüktür, deneme montajı. [Thönnissen, Werenfels s:371].....	<b>74</b>
<b>Resim 3.14</b> : Science City Pergolası, (Fotoğraf: Peter Hauser'e aittir). [Thönnissen, Werenfels s:371] .....	<b>74</b>
<b>Resim 3.15</b> : Ay'da yeşil yapı olarak teklif edilen katlanır strüktürün aşamaları [Escrig, s:10]. .....	<b>80</b>
<b>Resim 3.16</b> : Ay'da yeşil yapı olarak teklif edilen katlanır strüktürün açılmış hali [Escrig, s:10]. .....	<b>80</b>
<b>Resim 3.17</b> : Çadır iskeletini oluşturan yay biçimli mütekabil bileşenler ve gerilim kabloları. [Larsen, Lee, 2013, s:4] .....	<b>85</b>
<b>Resim 3.18</b> : Çadırın örtülmüş hali. [Larsen, Lee, 2013, s:4] .....	<b>85</b>
<b>Resim 4.1</b> : Bertin'in T kesitli giriş prensibiyle düzlemsel strüktürlerden kutu oluşturmakta kullandığı sistem modülerinden biri [Bertin, 2012 s:96] .....	<b>95</b>
<b>Resim 4.2</b> : 3.75 metre uzunluğunda, her biri 43 kg ağırlığında olan alüminyum girişlerden biri [Gelez, Aubry ve Vaudeville s:305].....	<b>99</b>
<b>Resim 4.3</b> : Lamellendach çatı konstrüksiyonuna sahip ikiz müstakil ev, Gensaer Straße 22, Menseburg, Almanya-1922 [Winter, Rug s:192] .....	<b>101</b>
<b>Resim 4.4</b> : Tez araştırmaları kapsamında elde edilen mütekabil strüktür.....	<b>103</b>
<b>Resim 4.5</b> : Üç elemandan oluşan açıklık geçen modül [Bertin, s:23].....	<b>112</b>
<b>Resim 4.6</b> : Üç elemandan oluşan konsol modül [Bertin, s:25] .....	<b>113</b>
<b>Resim 4.7</b> : İkiz açıklık geçen modül[Bertin, s:25].....	<b>114</b>
<b>Resim 4.8</b> : İkiz konsol modül [Bertin, s:25] .....	<b>114</b>

<b>Resim 4.9</b> : Popovic'in kiriş bağlantıları için kullandığı küresel eklem benzeri çalışan kelepçe [Popovic s:100] .....	<b>118</b>
<b>Resim 4.10</b> : İskele kelepçesi kullanılan bir bağlantı[Baverel, 2000 s:269] .....	<b>119</b>
<b>Resim 4.11</b> : Somun kullanılmış bir cıvatalı birleşim örneği [Rizzuto s:11] .....	<b>120</b>
<b>Resim 4.12</b> : Üç kirişli tek merkezli dönel strüktürler [Bertin, s:25] .....	<b>122</b>
<b>Resim 4.13</b> : Dört kirişli modülden elde edilmiş tamamlanmış merkez [Bertin, s:25] .....	<b>123</b>
<b>Resim 4.14</b> : Strüktürün gerçek ölçekli maket fotoğrafı[Parigi, Pugnale s:160].....	<b>133</b>
<b>Resim 4.15</b> : Strüktürün köşe birleşimleri [Parigi, Pugnale s:164] .....	<b>134</b>
<b>Resim 4.16</b> : Strüktürün gerçek ölçekli maket fotoğrafı[Parigi, Pugnale s:164].....	<b>134</b>
<b>Resim 4.17</b> : Strüktürün ölçekli maket fotoğrafı[Larsen, Lee, 2013 s:6].....	<b>135</b>
<b>Resim 4.18</b> : Strüktürün gerçek ölçekli maket fotoğrafı[Parigi, Pugnale s:167].....	<b>137</b>
<b>Resim 4.19</b> : Üç boyutlu yıldız biçimli strüktürün görünüşü [Larsen, 2008 s:30]...	<b>138</b>
<b>Resim 4.20</b> : Üç boyutlu yıldız biçimli strüktürün planı [Larsen, 2008 s:30].....	<b>138</b>
<b>Resim 4.21</b> : Farklı boyda kirişlerden oluşan pozitif ve negatif yöndeki modüllerle karmaşık kirişleme [Larsen, 2008 s:30] .....	<b>138</b>
<b>Resim 4.22</b> : Aynı boydaki kirişlerden oluşan pozitif ve negatif yöndeki modüllerle karmaşık kirişleme [Larsen, 2008 s:27] .....	<b>138</b>
<b>Resim 4.23</b> : Üç boyutlu strüktürün 1/10 ölçekli maket fotoğrafı [Parigi, Pugnale s:168].....	<b>139</b>
<b>Resim 4.24</b> : Üç boyutlu strüktürün ölçekli maket fotoğrafı [Parigi, Pugnale s:168] .....	<b>140</b>
<b>Resim 4.25</b> : Kivik Sanat Merkezi'nde bulunan mütekabil strüktür heykeli[Larsen, 2014 s:18].....	<b>142</b>
<b>Resim 4.26</b> : Kule biçimli strüktürün gerçek ölçekli maket fotoğrafı [Larsen, 2014 s:366].....	<b>142</b>
<b>Resim 5.1</b> : Merseburg'da "Lamellandach" çatılı bir konut [URL-55].....	<b>145</b>
<b>Resim 5.2</b> : Albrect Dürer Schule, Zollinger tarafından 1928'de tasarlanmış bir okul [URL-56].....	<b>145</b>
<b>Resim 5.3</b> : Jeodezik kubbe biçimli park oyuncağı[Bertin, 2012 s:29].....	<b>146</b>
<b>Resim 5.4</b> : Bağlantı detayı [Bertin, 2012 s:29] .....	<b>147</b>
<b>Resim 5.5</b> : Mütekabil strüktür prensibine göre oluşacak bağlantı .....	<b>147</b>
<b>Resim 5.6</b> : Yuva adlı konut projesi çatı kirişlemesi[URL-57].....	<b>149</b>
<b>Resim 5.7</b> : Yuva adlı konut projesinde bitmiş görüntü[URL-57].....	<b>149</b>
<b>Resim 5.8</b> : Larsen ve Lee'nin ilk önerisi[Larsen, Lee, 2014 s:3] .....	<b>150</b>
<b>Resim 5.9</b> : İskele borularından yapılmış mütekabil strüktür[Baverel, 2000 s:275].....	<b>153</b>
<b>Resim 5.10</b> : Gerçek ölçekli maket[Larsen, Lee 2013 s:2] .....	<b>156</b>
<b>Resim 5.11</b> : Mütekabil strüktür prensibine göre oluşacak bağlantı[Larsen, Lee 2013 s:3].....	<b>156</b>
<b>Resim 5.12</b> : Bibracte kazı alanında yapılan bitmiş mütekabil strüktürün görünüşü[URL-62] .....	<b>157</b>
<b>Resim 5.13</b> : Bibracte kazı alanı çatı örtüsünün zemin bağlantıları ile içten görünüşü [URL-62].....	<b>157</b>
<b>Resim 5.14</b> : Kreod Pavilion'un bitmiş görünüşü [URL-35] .....	<b>158</b>

<b>Resim 5.15 : Yapım aşaması[Larsen 2014 s:11]</b> .....	<b>159</b>
<b>Resim 5.16 : Bağlantı detayı[Larsen, 2014 s:11]</b> .....	<b>159</b>

## YAPI ÖRTÜSÜ OLARAK MÜTEKABİL ELEMANLARIN İNCELENMESİ

### ÖZET

Mütekabil elemanlar ifadesi, kısa kirişlerle geniş açıklıklar geçmekte tarih öncesi dönemlerden beri kullanılan çeşitli yapım yöntemlerini kapsar. En basit örneği kızılderili çadırlarında görülen bu sistemler, ortaçağ ve rönesans düşünürlerinin eskiz defterlerinde kendine yer edinebildiği gibi son dönemde de bir çok akademik çalışmanın konusu olmuştur.

Bu tez çalışmasının **ikinci bölümünde** konu tarihi çerçevede ele alınmıştır. Yapı tarihinin birçok döneminde karşımıza çıkan bu kurgu, çok çeşitli malzeme ve örgü kuralına uyarlanmıştır. Temelde yürütülen mantık açıklığı geçmekte kısa kalan kirişlerle kurallı bir örgü sistemi oluşturmak ve açıklığı bu örgüyle geçmektir.

**Üçüncü bölümde** teknolojinin gelişimi ile bu strüktürlerin yapım ve tasarımı arasındaki bağ incelenmiştir. Mütekabil elemanlar, her biri bir diğerini taşıyan ve bir diğeri tarafından taşınan kirişleme kurgusu ile yük aktarımını sağlayan, mimariye uyarlanmış bir örgü strüktür olarak ele alınabilir. Dijital tasarım araçlarının etkin kullanımı; eklemlerde yapılacak düzenlemeler ile hareketli strüktürler oluşturma potansiyeli ve konvansiyonel yapı malzemelerinden çeşitli kompozit malzemelerin kullanımına kadar, bu strüktürlerin yapımında rol alan teknolojik gelişmeler bu bölümde incelenmiştir.

**Dördüncü bölümde** strüktürün özellikleri açıklanmıştır. Malzeme, kiriş boyutları, bağlantı detayı, örgü kuralı gibi detaylar ortaya çıkacak formu doğrudan etkilemektedir. Bu kararların verilmesi için strüktürün geometrik ve yapısal özelliklerine hakim olmak gerekir. Bir mütekabil kirişleme tamamlanmış merkez, modül ve kirişler gibi alt hiyerarşik sistemlerden oluşur. Kiriş sayısı, cinsi, kirişlerin biraraya gelişlerinde oluşturdukları bağlantı mesafesi gibi değerlere göre bir modülün temel özellikleri belirlenir. İlerleyen aşamada örgü kuralına göre modüller veya münferit kirişler eklenerek türetme gerçekleştirilir.

Oluşturulan kirişlemede yük aktarımı için bağlantı noktalarının özelliklerinin belirlenmesi hayatidir. Kullanılan malzemeye bağlı olarak bağlantı şekilleri farklılık arzetsen bile temel özellikler değişmeyecektir. Bir bağlantı noktasında en fazla iki eleman bir araya gelecektir. Bağlantılar normal kuvvetler ile eğilme momentini iletecek fakat bir miktar dönmeye imkan vererek burulma kuvvetini iletmeyecektir.

Verimli bir tasarım yapılabilmesi için, bu sistemlerin sunduğu imkanları iyi değerlendirmek gerekir. Çokgen dizimleri temel alınarak, düzlemsel veya eğimli yüzeyler oluşturulabildiği gibi, düzgün ve yarı düzgün çokyüzlüleri temel alan kurallı üç boyutlu strüktürler de oluşturulabilir. Strüktür özelliklerinin kavranabilmesine yönelik çalışmalarda, yurtdışında hayata geçirilmiş örnekler analiz edilmiştir. Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi'nde yapılan maket çalışmalarında elde edilen düzgün çokyüzlüleri bu tez çalışmasının dördüncü bölümünde "4.1.2. Eğri Yüzeyli Sistemler" başlığı altında incelenmiştir. Aynı çalışmalarda sorgulanan tek tip kiriş kullanılarak

oluşturulabilecek düzlemsel kirişlemeler ve “4.2.3.1. Düzgün Kirişleme” başlığı altında incelenmiştir.

Mütekabil sistemler, son dönemde bilgisayar destekli tasarım ve üretim yöntemleri ile amorf biçimler, bağlantı detaylarının geliştirilmesi ile hareketli katlanabilir strüktürler oluşturma potansiyeli gibi hususlarda geliştirilmek üzere akademik çalışmalarda da ele alınmıştır.

**Beşinci bölümde** mütekabil strüktürlerin konvansiyonel yapım yöntemlerine nispetle verimliliğini kıyaslamaya yönelik yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir. 20.yüzyıl başında mütekabil strüktürler, kısa kirişlerden nitelikli işçilik gerektirmeden yapılabilmesi dolayısıyla 10-20 m arası açıklıklı konut yapılarında çatı örtü sistemi olarak önerilmiştir. Günümüzde ucuz üretim, kolay ve hızlı yapım imkanı, malzeme sürdürülebilirliği gibi özellikler bu strüktürlerin tercih sebebi olmaktadır. Ayrıca bu özellikleri, mütekabil strüktürlerin fuar yapıları, arkeolojik kazı alanı örtüsü ve afet sonrası barınak tasarımı gibi geçici yapılar için önerilmesine de sebep olmuştur. Ülkemizde yaygın olmayan konu hakkında yurtdışında yapılmış olan çalışmalar incelenerek derlenmiş, ek olarak Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi’nde yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir.

# INVESTIGATION OF RECIPROCAL FRAME STRUCTURES AS ROOFING SYSTEM

## SUMMARY

The term of “Reciprocal Frame Structures”, includes various spanning systems with short beams that have been used since pre-historic times. These structures, that their simplest example can be seen in the pit dwellings, could have taken place in the sketchbooks of medieval and renaissance philosophers as well as they have been the subject of many recent academic researchs.

In the **second chapter** of this thesis, the reciprocal frame structures are discussed from the historical aspect. This kind of assembly of the beams that are used in various time periods in architectural history, has been applied with many building materials and iteration rules. The basic sense of this structures is to interwave the short beams that are too short to span the roof; and use this resulting lattice as a roof or ceiling system.

In the **third chapter**, the connection between technology and the design and bulding techniques of this structures is investigated. The roof structure supposed to act the forces through the short beams, that supports and in return is supported by another one. Developments on construction technologies of the reciprocal frame structures are questioned in this chapter such as the use of digital design tools actively in the design process; the potential of creating mobile structures via arrangements on joints; from the conventional building materials to the use of various composite materials of today.

In the **fourth chapter**, the characteristics of these structures are explained. The details such as the material used, connection type and tesellation rules influences the final form directly. To be able to decide these details, one must have the knowledge of the geometrical and structural characteristics of the structure. A reciprocal frame structure contains sub-hierarchical systems such as components, modules and the beams. The basic characteristics of the module is defined by the number and the type of the beams, the engagement length etc. In the following stages, the iteration steps are achieved by adding single beams or modules to a basic module.

In order to transfer the forces to the outer supports in the resuting grillage, defining the characteristics of the joints are crucial. The appearance of joints differs depending on the materials use as beams, however the basic properties will be the same for any type of joints. Two elements can meet at any connection point. The axial forces and the bending moments are transferred through a node; a node allows a little rotation not to transfer any of twisting forces.

For an efficient design, the possibilities that these structures provide have to be evaluated well. It is possible to create planar or curved surfaces based on regular polygonal tiligs, as well as the three dimensional structures based on regular and

semi regular polyhedrons. The studies that aimed the comprehension of the structures characteristics the the examples realized abroad are analyzed. Additionally, the reciprocal polyhedron that obtained as a result of the studies at Fatih Sultan Mehmet Waqf University, is analyzed in the fourth chapter of this thesis, under the title of “4.1.2 Systems of Curved Surfaces”. In the same studies, a possibilities of creating different grillages by using only one type of beam is investigated and presented under the title of “4.2.3.1. Regular Grillage” .

Reciprocal structures are also investigated in the academic researchs, that focus on subjects such as creating free form structures with the help of digital computing and fabrication tools, the foldable mobile structures by developing the connections.

In the **fifth chapter** the studies that aim to compare reciprocal structures to the conventional constructing methods are evaluated. In early nineteens, reciprocal frame structures were proposed and realized as a roofing system -with a different name of “lamella roof”- for houses that have 10-20 m spanning, for the reason of lower manufacturing costs of short beams and ease of construction that requires no qualified labour. These structures are preferred for their facilities of quick and easy construction, the material sustainability etc. In addition these facilities, are the reason why reciprocal frame structures are proposed as tempory structures such; expo pavillions, shelters of archeological excavation site and shelter design for after diseaster situations. The studies abroad are analysed and compiled as well as the evaluation of the studies at Fatih Sultan Mehmet Waqf University for this uncommon subject for our country.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Problem

Yapıda, iç mekânda düşey taşıyıcılardan kaçınma isteği, tarih boyunca mimar ve tasarımcıları çeşitli yapı malzemeleri ile yenilikçi üst örtü çözümleri geliştirmeye mecbur bırakmıştır. Mimari tasarımın kapsamı, yükleri taşıyıcı sistem yardımı ile aktarılan çatılar, döşemeler ve duvarların tasarımını da içermektedir. Bu açıdan mimari ve taşıyıcı sistem tasarımı konularının birbirinden bağımsız olarak ele almak, strüktür tasarımının geri plana atılması problemini beraberinde getirecektir. Zira strüktürleri mimari olmadan hayal etmek mümkün olsa da, mimariyi strüktür olmadan hayal etmek mümkün değildir[Sandaker, Eggen ve Cruvellier s:2].

Taşıyıcı sistem tasarımında yapı malzemesinin avantaj ve dezavantajları dikkate alınmayışı, malzeme odaklı yenilikçi tasarım çözümlerinin geliştirilmesine mani olmaktadır. Yapı malzemelerinin doğasında, strüktüre sadece iki temel kuvveti iletmeye izin vermek vardır; bunlar itme ve çekmedir[Zalewsky, Allen s:7]. Sadece bu kuvvetleri ileterek ayakta kalabilmesi için, bir strüktürün geometrisinin en doğru şekilde kurgulanması gerekir.

Strüktür tasarımında geometrinin bir parametre olarak alınması konusu mütekabil sistemler özelinde ele alınacaktır. Mütekabil strüktürler olarak isimlendirilen, Türk mimari literatüründe ilk defa incelenecek olan yapım sistemi, herbiri diğerini taşıyan ve bir diğeri tarafından taşınan kirişler şemasından oluşmaktadır. Bu strüktürlerle döşeme gibi düzlemsel ya da koni, kubbe ve amorf biçimler gibi üç boyutlu kurgular oluşturmak mümkündür. Kiriş boyutları, modül ve örgü kuralı gibi konularda tasarımcı tarafından verilen kararlar strüktürün geometrisini belirleyecektir.

## **1.2 Amaç**

Mütekabil strüktürler hakkında geçmişten günümüze kadar yapılan çalışmalar ışığında strüktür özelliklerinin açıklandığı ve sistem performansının değerlendirildiği bu tez çalışmasının öncelikli amacı, ülkemizde malzeme ve strüktür odaklı tasarım anlayışının yaygınlaşmasının bu konu özelinde önünü açarak katkıda bulunmaktır.

## **1.3 Kapsam**

Bu tez çalışması yapı tarihinin en eski döneminden günümüze üst örtü çözümlerinin derlenmesiyle birlikte, “mütekabil strüktürlerin” son dönemde yaygınlaşan akademik çalışmalar ışığında malzeme, gelişen yapım teknolojileri, strüktüre dair parametreler bazında incelenmesini ve maliyet, sürdürülebilirlik, risk faktörü gibi açılardan değerlendirilmesini kapsar.

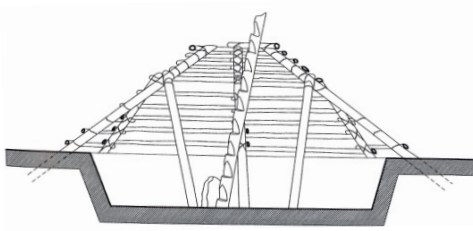
## **1.4 Yöntem**

Neolitik dönemden başlayarak, en eski yerleşimlerde görülen üst örtü çözümleri ile, Antik Çağ’dan günümüze, bilinen açıklık geçme yöntemleri yapı tarihi literatüründen araştırılmıştır. Strüktüre dair kriterlerin incelenmesinde, öncelikle konu hakkında yazılmış doktora tezleri bulunan O.P.Larsen ve O. Baverel’in çalışmalarından, daha sonra da konu hakkında yayımlanan bildiri ve makalelerden faydalanılmıştır. Mütekabil sistemlerin yapı ölçeğinde kullanımının geliştirilmesi ve çeşitli açılardan değerlendirilmesinde 20.yüzyıl başından günümüze alınmış patentler taranmıştır. Strüktürün özelliklerinin anlaşılması için akademik yayınların incelenmesinin yanında Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi’nde yürütülen maket çalışmaları da analiz edilmiştir.

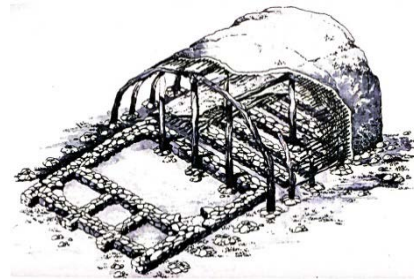
## 2. YAPIDA ÜST ÖRTÜNÜN TARİHÇESİ

### 2.1 Neolitik Dönem (M.Ö. 8000-5000<sup>1</sup>)

Başlangıcı M.Ö. 8000'lere dayanan Neolitik Dönem, insanlık tarihinde avcı toplayıcılıktan yerleşik hayata, tarım ve hayvancılığa geçilen dönemdir. Son buzul çağından sonra havaların ısınmasıyla “Neolitik Devrim” adı verilen değişim süreci yaşanmıştır. Son Paleolitik<sup>2</sup> dönem sonlarına kadar avcı-toplayıcı olarak yaşayan insan topluluklarının, dünyanın çeşitli yerlerinde farklı zamanlarda tarım topluluklarına dönüştüğü ve bu süreçte bölgesel farklılıklar gösteren yerleşme modellerinin ortaya çıktığı bildirilmektedir[Bıçakçı, s:20]. Yeme ve uyuma eylemleri, kimi zaman ilk Neolitik barınak örneklerinde olduğu gibi “tabanları toprak altına incek şekilde açılan çukurlar ve üstyapıyı destekleyen ahşap direklerle çevrili bir yapı iskeleti” [Türkcan, s:12] şeklinde bir yapıda (Şekil 2.1), kimi zaman da Çayönü'nde ızgara planlı yapılar evresinde görülen şekilde; “plan düzleminde taşıyıcı özelliği olmayan taşlarla belirlenmiş üst yapısı hafif malzemedен yapılmış mekânlarda” [Özdoğan, 2005, s:148] hayat bulmuştur(Şekil 2.2).



**Şekil 2.1 :** Kuzey Amerika'da yaygın olarak görülen bir çukur konut örneği kesiti [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:257].

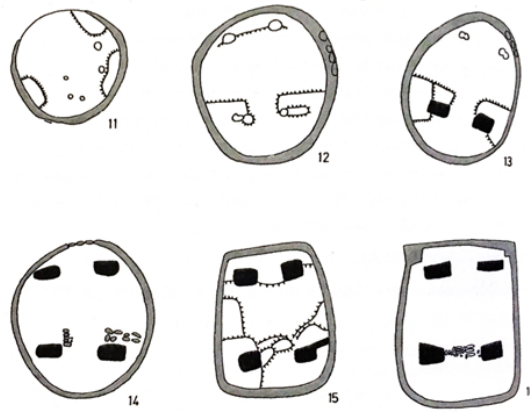


**Şekil 2.2 :** Çayönü, dikdörtgen planlı en eski yapı türü olan ızgara planlı yapıların, hafif malzemedен olan üst örtü taslak çizimi[Özdoğan, 2005, s:149].

<sup>1</sup> Çömlek öncesi neolitik (ÇÖN) A ve B evreleri,(başlangıcı yere göre değişmekle birlikte) yaklaşık M.Ö.8500-6000; Çömleklili neolitik M.Ö.6000-5000[Gates, s:29].

<sup>2</sup> Paleolitik: Eski taş dönemiyle ilgili[Hasol, s:355].

İnsanın erken dönemlerde başlayan mekân oluşturma ihtiyacı coğrafyanın elverdiği iklim şartları ve yapı malzemeleri etkisiyle şekillenmiştir. Lloyd, “taşlar üst üste dizilerek bir duvar oluşturmaya ve dik açılı kenarların imalatına imkân tanırken; kilin yoğrulabilirliği dairesel bir kurguya elverişlidir.” demektedir[Lloyd, s:17].



Şekil 2.3 : Nemrik'de<sup>3</sup> yapı tiplerinin gelişimi, Aurenche ve Kozłowski 1999[Bıçakçı, s:22].

Ceriko<sup>4</sup>, Nemrik, Jarf el Ahmar<sup>5</sup> ve Anadolu'da Çanak Çömleksiz Neolitik dönemde Çayönü<sup>6</sup> kazısında, dairesel plandan köşeli plana doğru bir değişim (Şekil 2.3) söz konusudur. Bu değişim, barınak niteliğindeki kulübenin, köşeleri, temelleri, düz damı, çatısı ve iç donanımları (destek direkleri, ocaklar, platformlar, depo alanları) olan gelişmiş bir konuta dönüşümü olarak tariflenmektedir[Türkcan, s:12].

<sup>3</sup>Nemrik: Çanak çömleksiz Neolitik döneme tarihlenen Kuzey Irak yerleşimlerindedir. Yapı tarihinde ilk defa kerpiç tuğlalar ile inşa edilmiş duvarlar burada görülür[Bıçakçı, 2005 s:21].

<sup>4</sup>Ceriko, Ürdün Vadisi ovasında yer alır, Ölüdeniz'in yaklaşık 10 km kuzeyindedir. Yaklaşık 1 hektarlık alanı kaplayan ve 21 metreye kadar yükselen büyük bir suni tümsektir. En erken kalıntılar M.Ö.8000-10000 avcı-toplayıcı döneme tarihlenmektedir. M.Ö.8000 itibarıyla Ceriko, iri dairesel bir kulenin desteklediği taş duvarla çevrelenmiş büyük ve müstahkem bir kasaba olarak karşımıza çıkmaktadır[URL-61].

<sup>5</sup>Jarf el Ahmar: Çanak çömleksiz Neolitik döneme tarihlenen Kuzey Irak yerleşimlerindedir. Aynı yerleşme içerisinde yuvarlak, oval, köşeleri yuvarlatılmış dörtgen ve köşeli planlar bir arada bulunmaktadır[Bıçakçı, 2005 s:23].

<sup>6</sup>Çayönü: Diyarbakır il sınırları içinde Yukarı Dicle vadisinde yer alan yerleşim[Özdöl, s:177]. Çanak Çömleksiz Neolitik dönemden Geç Çanak Çömlekli Neolitik döneme kadar kesintisiz tabaka silsilesi mevcuttur[Bıçakçı, 2005 s:23].

**Çizelge 2.1.** Neolitik dönemde bilinen yerleşimlerden bazıları.

Yerleşim	Bölge	Tarih
Ceriko	Filistin	M.Ö.10-8.binyıl
Göbeklitepe <sup>7</sup>	Anadolu	M.Ö.9-7.binyıl <sup>8</sup>
Çatalhöyük	Anadolu	M.Ö.6500-M.Ö.5500 <sup>9</sup>
Çayönü	Anadolu	M.Ö.8500-M.Ö.5000 <sup>10</sup>
Nemrik	Mezopotamya	M.Ö.9.binyıl-7.binyıl
Jarf el Ahmar	Mezopotamya	M.Ö.9.binyıl
Banpo	Çin	M.Ö.5.binyıl

Özdoğan, yuvarlak bir kulübe ile dörtgen planlı bir yapı arasındaki en büyük farkın çatı örtü sistemi olduğunu belirtmektedir. Üzeri sap ve çamurla kaplanan kulübelerde eğimli taşıyıcıların arası, dal ve kamışlarla sepet gibi örülerek kubbemsi biçimde yada çadır çatkısı gibi bağlandığından, yapıyı, taşıyıcı duvar ve dam gibi elemanların oluşturulması yada yağmur ve karsuyu akıtma sorunundan kurtarmaktadır. Aynı kaynakta “Bu tür bir örgü dik açılı köşe dönüşlerine de uygun olmadığı için yapı ister istemez yuvarlak yada söbemsi biçim almaktadır” denmektedir[Özdoğan, 1996, s:25].

Kalkolitik dönem başında Güneydoğu Anadolu ve Kuzey Mezopotamya’da M.Ö. 4. binyılda Halaf<sup>11</sup> kültüründe ahır, mutfak gibi yuvarlak planlı mekânların örtü sistemi olarak tolos adı verilen kerpiç bindirme kubbelerin mevcut olduğu bildirilirken[Bıçakçı, s:43], Avrupa’da aynı dönemde mezar odalarının yapımında bindirme taş konstrüksiyonun erken örnekleri gözlenmektedir. Şekil 2.4’te görülen megalit mezarda her bir sırada öncekine nispeten çıkıntı oluşturan katmanlar, harç kullanılmadan dizilmiştir[Fazio, Moffett, Wodehouse, s:11].

---

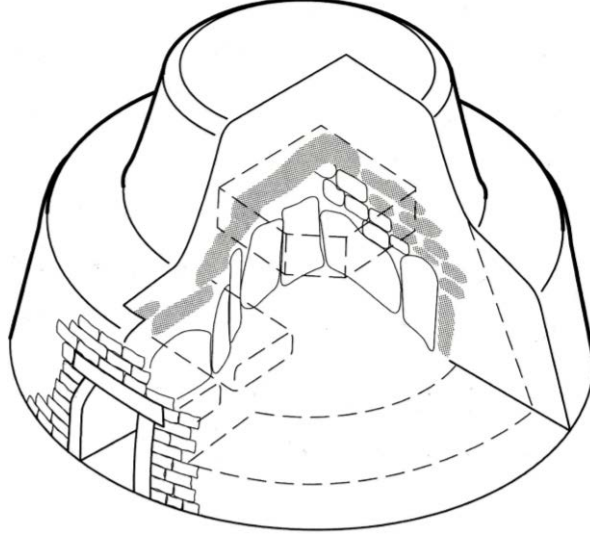
<sup>7</sup> Göbeklitepe: Şanlıurfa’nın 15 km kuzeybatısında yer alan bir Neolitik Çağ törensel merkezidir[Gates, s:57].

<sup>8</sup> Gates, s:29

<sup>9</sup> Gates, s:29

<sup>10</sup> Özdemir, 2005, s:148

<sup>11</sup> Halaf: İlk Kalkolitik döneme tarihenen Kuzey Mezopotamya’da yer alan medeniyet[Bıçakçı, s: 43]



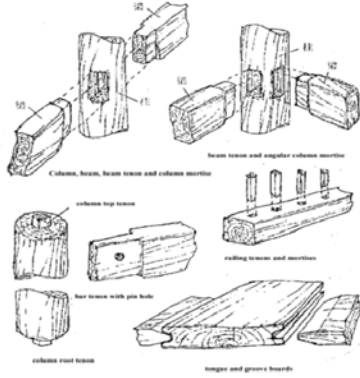
**Şekil 2.4 :** Megalit mezar, Er-Mane, Carnac, Bretonya, Fransa, yaklaşık M.Ö.4200 [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:10]

Çin, Banpo<sup>12</sup>,da bulunan M.Ö. 5. binyıla tarihlendirilen neolitik yerleşim restitüsyonunda ahşap dikmeler ile taşınan çatısı olan, köşeli ve dairesel planlı yapılar görülmektedir(Şekil 2.6). Zhiping, yine M.Ö. 5. binyıla tarihlendirilen Hemudu<sup>13</sup> arkeolojik yerleşimi kalıntılarında ahşap karkaslı bir yapı bulunduğunu bildirir. 30 m uzunluğunda ve 5-6 m genişliğinde, zemin katı ve ahşap ile desteklenmiş üst katı bulunan ahşap strüktürde kolon, kiriş ve kolon üzerinde zıvanalı birleşim ve döşeme tahtaları bulunmaktadır[Zhiping, s:1].

---

<sup>12</sup> Banpo: Çin’de Shaanxi bölgesinde, Xi’an şehrinin doğusunda yer alan arkeolojik yerleşim[URL-1]

<sup>13</sup> Hemudu: Çin, Zhejiang bölgesinde Yangtze nehrinin alçak kısımlarında bulunan arkeolojik yerleşim.[URL-2]



**Şekil 2.5 :** Hemidu kalıntılarında ortaya çıkan ahşap zıvanalı birleşim restitüsyonları [Zhiping, s:16]



**Şekil 2.6 :** Banpo’da bulunan Neolitik dikdörtgen ve dairesel planlı konut restitüsyonu(KKHCK: 1963,pp.15, 19, 24, 31) [Hsu, s:269]

Zhiping buradan sonra Çin mimarisinin, binyıllar boyunca, ahşabın ana malzeme, ahşap karkasın da ana taşıyıcı sistem olduğu konvansiyonel yapım yöntemini takip ettiğini bildirir. Çin’in sahip olduğu zengin ormanlar başta olmak üzere, Çinlilerin binyıllar boyunca bu malzeme ile çalışmalarının bir çok sebebi vardır. Esnek plan düzenlemelerine imkan tanınması, iklim koşullarına sıkı uyumu, ahşabın taşıma ve kesim sürecinde sağladığı kolaylık gibi sebepler ortaya bu bölgede ahşap karkas yapı imkanlarının keşfedilmesi ve doğal afetler karşısında mukavemet sağlayacak şekilde geliştirilmesi gibi sonuçlar çıkarmıştır[Zhiping, s:1]. Tarih boyunca duvar ve çatıların taşıyıcı karkası olarak kullanılagelen ahşabın, doğada bulunduğu boyutlarla sınırlı olması, bazı yenilikçi çözümler bulma ihtiyacını doğurmuştur. Bu açıdan kısa kirişler kullanılarak çatı ve tavan yapımı en eski teknolojilere kadar dayanmaktadır[Pizzigoni, 2009, s:1897]. En erken yapıların biçim ve görünüşleri malzeme özellikleri malzeme göz önünde tutularak dikte edilmiştir[Lloyd, s:17].

Pizzigoni, kısa kirişlerin birbirine çatılarak bir çatı strüktürü oluşturması yönteminin, Lapland<sup>14</sup> ve Kuzey Amerika’da bazı primitif topluluklar tarafından kullanıldığını bildirir[Pizzigoni, 2009, s:1898]. Amerikan yerlilerinin kullandığı, “tipi” adı verilen çadır sistemleri, Orta Asya’da “yurt çadırı<sup>15</sup>” ve Navaholarda<sup>16</sup> “hogan<sup>17</sup>” yapısı olarak çeşitlenmektedir. Kızılderili tipileri hızlı inşa edilen, taşınabilir ve tekrar kullanılabilir özelliktedirler. Di Carlo Kızılderili çadırını sadece lüzumlu olduğunda oyuna giren çeşitli bağımsız sistemlerin etkileşimini temel alan bir “hibrid sistem” olarak yorumlamıştır. Kızılderili tipisinin çubukları ana taşıyıcı görevini üstlenmektedir ve bunlar mütekabil strüktürlerin uzaktan akrabasıdır. Örtü kumaşı ise korunma sağlarken aynı zamanda strüktüre ek bir dayanım sağlamaktadır[Di Carlo, s:29].



**Resim 2.1** : Kızılderili tipi [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:252].



**Resim 2.2** : Bir Hogan yapısı [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:258]

<sup>14</sup> Lapland: Finlandiya’nın kuzeyinde, Sami ırklarının yaşadığı bir bölge[Lahti, s:284]

<sup>15</sup> Yurt Çadırı: Silindir biçimli gövde ile kubbe veya koni biçimli çatıdan oluşan çadır[Bammer, 1996 s:234].

<sup>16</sup> Navaholar: Günümüzde Kuzeybatı Arizona ve New Mexico’da 9 milyon hektarlık alana yayılmış olan yerli Amerikan kabilesi[Fazio, Moffett, Wodehouse, s:258].

<sup>17</sup> Hogan: Bazı yerli Amerikan kabileleri tarafından kullanılan toprakla sıvanmış iskeletten oluşan yapı[Fazio, Moffett, Wodehouse, s:258].

Hogan yerleşimleri ise Larsen'e göre plan düzleminde "her biri daha büyük çapta olan ve içine yerleştirildiği bir diğeri tarafından taşınan çok sayıda tekil mütekabil kafesten oluşan karmaşık bir mütekabil sisteme" benzer. Bu kurulum sebebiyle yarı düzenli olan hogan formu kubbemsi bir çatı şeklinde biçimlenmektedir. Ahşap iskeletten oluşan yapı genellikle çamur ile sıvanmıştır. Çamur, iklimlendirmede sağladığı avantajın yanısıra, yapışkan özelliği ile ahşap kirişler arasındaki bağlantıyı da stabil hale getirmektedir[Larsen, 2008, s:6].



Şekil 2.7 : Bir hogan yapısı planı (çiz.A. E. Piroozfar)[Larsen, 2008, s:6]

Neolitik Çağ'da yerleşik hayata geçen insanlar, optimal yapı tipini belirlemişler ve günümüz yapılarına benzer konut tipolojileri geliştirmişlerdir. Buna paralel olarak yapım yöntemlerindeki ilerlemeyi takiben yapılarda taşıyıcı duvar, temel, çatı sistemlerinin de alınan derslerle geliştirildiğini söylemek mümkündür[Bıçakçı, s:20].

## 2.2 Eski Çağ (M.Ö.3500-M.S.476)

Tarih öncesi çağlar ile Tarihi çağları, Sümerlerin Mezopotamya'da yaklaşık M.Ö.3500 yılında yazıyı bulması olayı birbirinden ayırır. Sümer Medeniyeti, M.Ö.4.binyılda şekillenmeye başlayan dünyanın ilk medeniyetidir. Sümer yapılarının birçoğunda kullanılan ana yapı malzemesi, çamurun kalıpta şekillendirilip, güneşte haftalarca kurumaya bırakılmasıyla elde edilen tuğladır. Ortaya çıkan tuğlanın

özellikle hava koşulları dolayısıyla aşınmaya dayanıklı olmaması sebebiyle Sümer mimarisinin büyük bir bölümü temelleriyle ya da duvarlarının alçak kısımlarıyla bilinir. Çatılar büyük açıklıklar geçemeyen hafif ahşap elemanlar veya sazlardan yapılmıştır, bu yüzden çok geniş iç mekânlar yoktur. Sümer ve Mezopotamya mimarisinde önemli yapılara hava koşullarına bağlı aşınmaya karşı ilave bir mukavemet kazandırma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Mezopotamya’da M.Ö.3.binyıl sonlarında geç Sümer<sup>18</sup> dönemi kent tapınaklarının ileri aşamaları görülmüştür. Özellikle Ziggurat adı verilen sıra sıra yükseltilmiş, suni tepe üzerinde bulunan tapınaklar, katranın bağlayıcı olarak kullanıldığı hava koşullarına dayanıklı ateş tuğlasından bir dış katmana sahiptir[Fazio, Moffett, Wodehouse, s:14-17].

**Çizelge 2.2.** Eski çağda bazı medeniyetler.

İsim	Dönem	Kurulduğu Yer
Sümer	M.Ö.4.binyıl-M.Ö.2350 <sup>19</sup>	Mezopotamya
Babil	Yaklaşık M.Ö.2000-M.Ö.539 <sup>20</sup>	Mezopotamya
Hitit	M.Ö.2.binyıl-yaklaşık M.Ö.1200 <sup>21</sup>	Anadolu
İndus Vadisi	M.Ö.2700-yaklaşık M.Ö.1700 <sup>22</sup>	Pakistan-Kuzeybatı Hindistan
Mısır	M.Ö.3000-M.Ö.700 <sup>23</sup>	Kuzeydoğu Afrika
Çin	M.Ö.1766-M.S.1912	Çin
Asur	M.Ö.1750-M.Ö.612 <sup>24</sup>	Mezopotamya
Pers <sup>25</sup>	M.Ö.730-M.S.651	İran
Yunan <sup>26</sup>	M.Ö.3000-M.Ö.323	Yunanistan
Roma <sup>27</sup>	M.Ö.6.yy-M.S.1453	İtalya

<sup>18</sup> geç (neo) Sümer: Akadların çöküşünden sonra M.Ö.2150-2000 yılları arasında politik tabiyetleriyle ilk Sümerleri andıran şehir devletleri tekrar kurulmuştur[Fazio, Moffett, Wodehouse, s:17].

<sup>19</sup> Fazio, Moffett, Wodehouse, s:14

<sup>20</sup> Gates, s:29-30

<sup>21</sup> Naumann, s: 19

<sup>22</sup> Fazio, Moffett, Wodehouse, s:63

<sup>23</sup> Gates, s:29-30

<sup>24</sup> Mansbridge, s:24

<sup>25</sup> Pers medeniyeti: M.Ö-730 549 Medler, M.Ö.550-330 Ahemenişler, M.Ö.323-63 Seleukos, M.Ö.247- M.S.224 Partlar, M.S.224-651 Sasaniler[URL-41]

<sup>26</sup> Yunan medeniyeti: Minos Krallığı, Girit M.Ö.2500-M.Ö.1184; Miken Uygarlığı: M.Ö. 1500-M.Ö.1184; Arkaik Yunan Dönemi: M.Ö.650- M.Ö.500 [Mansbridge s:30]; Klasik Yunan Dönemi: M.Ö. 480- M.Ö. 400[Gates s:339]

Mısır'da mimarlığın başlangıcı M.Ö.3.binyıla dayanmaktadır. Mimari tarz, şehirler arasındaki bağlantı oldukça zayıf olsa da Mezopotamya'daki çağdaş tuğla mimarisinden etkilenmiştir, tuğladan yapılmış olan erken mastaba yapıları bu etkinin sonucu olabilir denmektedir. Fakat M.Ö. 3.binyılın ilk yarısında, Nil nehri boyunca kumtaşı, kireç taşı ve granit gibi zengin taş ocaklarının bulunmasının da etkisiyle, taş Mısır'ın anıtsal yapıları için geleneksel yapı malzemesi haline gelmiştir. Mısır mimarisinin karakteri, Nil vadisinin jeolojik ve iklim şartlarından direkt olarak ciddi bir şekilde etkilenmiştir. Çöllerden oluşan iki paralel bariyerin arasındaki basık arazide yer alma gerçeği, Antik Mısır dünyasına, değişmeyen iklim ve Nil nehrinin taşmalarının öngörülebilir ritmi doğrultusunda bir kararlılık sağlamıştır ve Mısır'ı Eski, Orta ve Yeni Krallık dönemlerinde yöneten kralların 20 hanedanlığı<sup>28</sup> boyunca yapı stili değişmemiştir. İlk taşan Mısır mimarisi örnekleri Eski Krallığın üçüncü hanedanlığı döneminde görülmüştür. Sakkara'daki Zoser<sup>29</sup> basamaklı piramidi (M.Ö. 2750 dolayları) ve çevresine yerleştirilmiş olan yapı kompleksi, anıtsal mimari ve planlamanın ilk büyük örneklerindedir[Lloyd s:29]. Daha sonra, M.Ö.2575-2500 yılları arasında Giza<sup>30</sup>,da dördüncü hanedanın üç kralının gömülü olduğu Keops, Kefren ve Mikerinos Piramitlerinin bulunduğu kompleks yapılmıştır[Gates s:138].

İndus Vadisi Medeniyeti ise M.Ö. 3. binyıl itibariyle çeşitli bölgesel kültürlerin zenginleştirdiği antik yerleşimleriyle bilinmektedir. Medeniyet, olgun döneminde Mohenjo Daro<sup>31</sup> ve Harappa'nın<sup>32</sup> önde geldiği geniş bir alanda M.Ö. 2700 'den başlayarak yaklaşık 1000 sene hüküm sürmüştür. Ekonomisinin temeli tarım ve ticaret olan bölgede yapılarda pişmiş tuğladan bindirme kemerli drenaj kanallarının mevcut olduğu görülmektedir(Resim 2.3). Mezopotamya ve Mısır

---

<sup>27</sup> Roma Cumhuriyeti: M.Ö 509-27[Gates, s:433] İmparatorluğun tamamen yıkılışı 1453'te İstanbul'un fethi ile olmuştur.

<sup>28</sup> İlk hanedanlardan İkinci Ara Dönem sonuna kadar 17 hanedanın[Gates, s:123]; Yeni Krallık dönemi nde 18- 20. hanedanların; üçüncü ara dönemde 21-24. hanedanın; geç dönemde 25-30.hanedanların yönetiminde olduğu bildirilmiştir[Gates, s:149].

<sup>29</sup> Zoser Basamaklı Piramidi: 3.Hanedan Fivavunu Zoser(Coser)'in mezarı olarak yapılmış basamaklı piramit[Gates, s:134]

<sup>30</sup> Giza: Sakkara'nın hemen kuzeyinde yer alır[Gates, s:138].

<sup>31</sup> Mohenjo Daro: İndus ırmağına yaklaşık 5km mesafede bulunan yerleşim[Gates, s:133].

<sup>32</sup> Harappa: Pakistan'ın Pencap bölgesinde yer alan antik yerleşim[Gates, s:112].

medeniyetlerinin aksine, saraylar, kraliyet ailesine ait mezarlar ve devasa tapınak yapıları gibi güç veya zenginlik göstergesi olan yapıların bulunmadığı Mohenjo Daro'da ortaya çıkan kalıntılar şehrin, yaklaşık 40.000 nüfuslu, sokak cephesi kör, iç avluların etrafında organize edilmiş sıkışık konutlardan oluştuğunu göstermektedir. Bölgede çatı veya üst kat döşeme kirişlemesi için yeterli ahşap bulunmadığından odaların küçük boyutlarda olduğu belirtilmektedir[Fazio, Moffett, Wodehouse s:63].



**Resim 2.3 :** Mohenjo Daro'da dar bir sokak görüntüsü ve bindirme kemerli drenaj kanalı [URL-3]

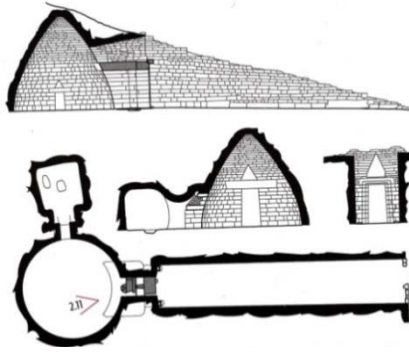
Anadolu'da M.Ö.3000 dolaylarında Tunç Çağın başlamasıyla, günümüzde geniş ölçüde tanınan yerleşmeler başlar. Bunlar maden ürünlerine geçişin, 3.binyıl süresinde, gelişimin hızlanmasında önemli bir etken olduğunu gösterirler. Alışar<sup>33</sup> ve Alacahöyük<sup>34</sup> bu dönemin odak yerleşmeleridir. Tarım ve hayvancılıkla uğraşan, yeraltı kaynaklarını aramayı ve çıkarmayı bilen ve başlarında birer kral olan küçük kent devletleri şeklinde yaşayan Anadolu'nun bu halkına proto-Hatti (Hitit öncesi) denmektedir[Naumann s:16]. Erken tarih çağlarında, 2100-1650 dolaylarında siyasi

---

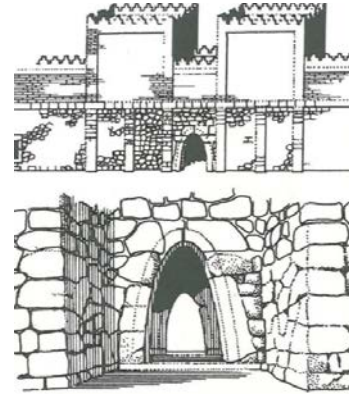
<sup>33</sup> Alışar:Yozgat'ın Sorgun ilçesi, Kadılı köyü yakınlarında konumlanan Hitit İmparatorluk dönemine ait buluntuların da mevcut olduğu M.Ö.4.binyıl ile M.Ö.1.binyıl arasına tarihlenen yerleşim[URL-43]

<sup>34</sup> Alacahöyük: Çorum ilinde yer alan, Hitit İmparatorluk dönemine ait buluntuların da mevcut olduğu yerleşim[URL-44]

yönden parçalanmış bir Orta ve Anadolu'dan bahseden Naumann[Naumann s:499], bu tarihten sonra kesintiye uğramadan Eski Hitit Çağına geçildiğini bildirir[Naumann s:502]. Eski Hitit mimarlığı Hitit öncesi kent devletlerinin yerel mimari geleneklerine dayanarak geliştirilmiştir. Hitit mimarisinde yapı tekniği olarak, büyük boyutlu taşlardan duvar yapımı, tüneller, bindirme tonozlar ve taş veya kerpiç ayaklı, ahşap destekli duvarlar karşımıza çıkmaktadır[Naumann s:504]. Boğazköy'de<sup>35</sup>, M.Ö.1360'da<sup>36</sup> yeniden kurulan Yukarı Kentte, kent duvarı üzerinde beş anıtsal kapı bulunmaktadır. Bunlardan Aslanlı Kapı, Kral Kapısı ve Batı Kapısı yapı üslubu bakımından benzerdir. Kapı boşğunun alt bölümleri tek parça duvar ayaklarından kurulmuş olup, özgün durumunda bindirme tekniğinde örülmüş taşlarla yükseltiyle parabol kemer (Şekil 2.9) oluşturmaktadır. Kuleler ve bunların iç destek duvarlarının malzemesi, kapı kemerinin bitimine kadar kireçtaşıdır[Schirmer s:21-22].



**Şekil 2.8 :** Miken, Atreus'un mezar odası plan ve kesiti, M.Ö.1330[Fazio, Moffett, Wodehouse s:41].



**Şekil 2.9 :** Boğazköy, tapınağın kral kapısı. Kulelerle desteklenen eliptik açıklık, bindirme kemer ve yekpare taş söveden oluşur[Lloyd s:26].

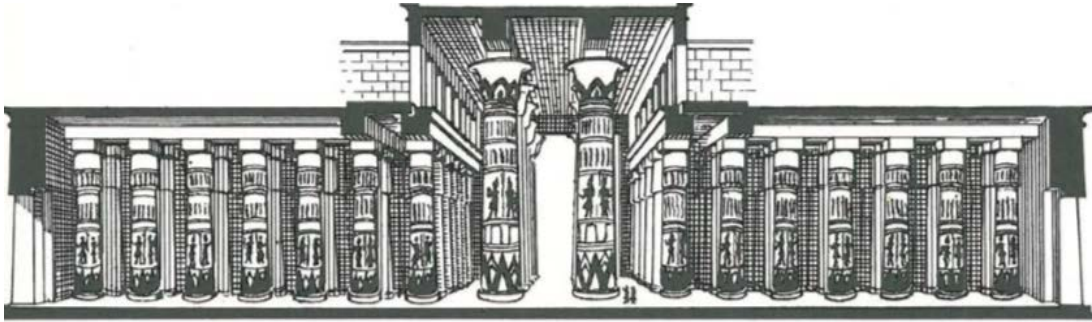
M.Ö.2.binyılda Miken Medeniyeti'ne ait ilk yerleşimler bugünkü Yunanistan'ın güneybatısında kurulmuştur. Miken Medeniyeti'nin en parlak çağı yaklaşık M.Ö.1450 yılından sonra başlamıştır[Fazio, Moffett, Wodehouse, s:39]. M.Ö.1330 yılında yapımı başladığı bildirilen Miken'deki Atreus'un hazinesi(Şekil

<sup>35</sup> Boğazköy: Çorum iline bağlı ilçe, Hitit medeniyetine başkentlik yapmıştır[URL-45].

<sup>36</sup> Lloyd, s:26

2.8), yatay olarak üstüste gelen bindirme kireç taşı bloklardan, merkezleme olmadan yapılmış bir mezar odasıdır[Mansbridge s:33].

Aynı dönemde M.Ö. 2.binyılda Mısır'da eğitim ve dinsel ritüel merkezi olarak kullanılan Karnak'taki Amon Tapınağı'nın mimarisinden bahsetmek gerekir. Orta Krallık'tan kalma tapınağının yapımı yaklaşık M.Ö.1550'lerde ve M.Ö.332'de Büyük İskender'in Mısır'ı fethine kadar sürekli eklemelerle devam etmiştir. I.Seti ve oğlu II.Ramses'in M.Ö. 1315-1235 yılları arasında yaptırdığı eklentilerden olan hipostil salon, kolon-kiriş sistemli taş konstrüksiyon örneği olarak karşımıza çıkacaktır. Çatı, 16 sırada dizili 134 kolon tarafından taşınmaktadır. Orta nef kolonları yaklaşık 21,5m yüksekliğindedir ve ışığın geçmesine imkan verir[Roth s:251].



Şekil 2.10 : Karnak, Amon tapınağının hipostil salonun kesiti, M.Ö.1312-1301 [Lloyd, s:31]

M.Ö. 525 yılından itibaren 100 sene içinde Mezopotamya, Anadolu'nun bir kısmı ve hatta Mısır'ı hakimiyeti altına alan Perslerden kalan Persepolis<sup>37</sup> şehri, Mısır'da bulunan tapınakların bir yansıması olarak hipostil salonların etkisi altındadır[Fazio, Moffett, Wodehouse s:19].

M.Ö. 2.binyıl itibariyle inşa edilmiş klasik Yunan medeniyetinden günümüze kalan eserler arasında ise bir çok tapınak sayılabilir. Saner, “Yunan mimarlığını agora<sup>38</sup>, stoa<sup>39</sup>, tiyatro, stadyum gibi açık hava buluşmalarına yönelik bir yapı çevresi

<sup>37</sup> Persepolis: I.Darius tarafından M.Ö.518 yılında kurulan ve üç Pers kralı tarafından eklemeler yapılan Pers şehri[Fazio, Moffett, Wodehouse s:19]

<sup>38</sup> Agora: Eski Yunan kentlerinde, çoğu portiklerle çevrilmiş çarşı yada toplantı alanı[Hasol, s:19]

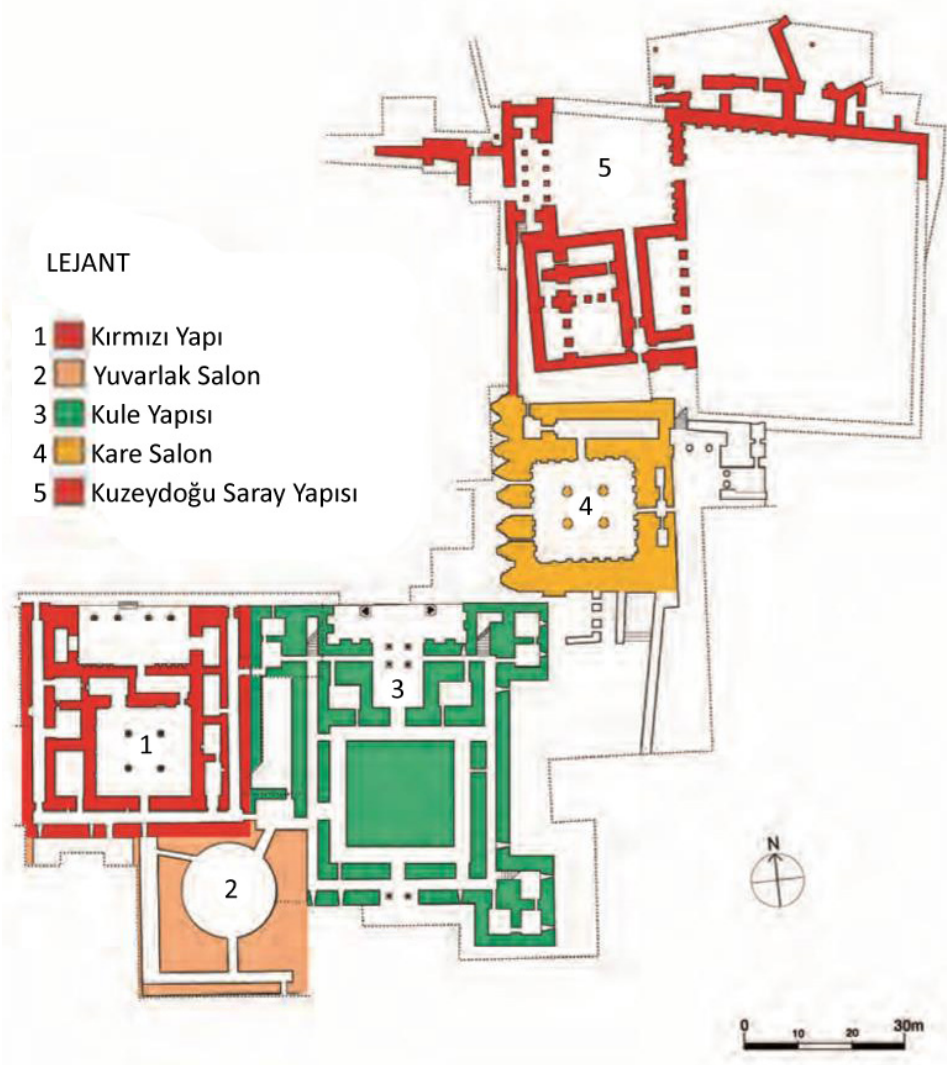
belirmektedir.Yunan tapınağı da barındırdığı tüm taş ustalığıyla, içine girilen bir mekândan çok seyredilen bir nesnedir. Buna karşılık Roma tasarımlarında vurgu açık alandan kapalı mekânlardadır. Roma mimarisinde yapı üst örtüsünün çeşitlendiği görülmektedir.” demektedir[Saner s:66]. Açıklık geçme biçimlerinin tarihsel gelişiminden bahsetmenin amaçlandığı bu bölümde söz konusu eserlerden detaylı olarak bahsedilmeyecektir.

İran kültüründe kubbe biçimlerinin değişimini konu alan makalelerinde Askhan ve Ahmad, Antik Pers mimarlığında en erken kubbe işaretinin Antik Nisa<sup>40</sup> şehrinin kazı alanında ortaya çıkan yuvarlak salonun kalıntıları olduğunu Grabar’dan aktarmışlardır(Grabar, 1963, p. 191; 2006, p. 87). Bu salonun merkezdeki 4 kolunu çevreleyen kalın duvarları ve heykelleri sergilemek için nişleri bulunmaktadır ve tepesi muhtemelen ahşap bir kubbe ile örtülüdür[Askhan ve Ahmad s:99]. Pizzigoni, aynı komplekste yapı örtüsü olarak müteakbil strüktürlere benzer konstrüksiyon prosedürleri de mevcut olduğunu ve Kare Salon’un tavan strüktürünün “kısa kirişler” şemasına göre yapıldığını belirten kanıtların Pizzetti tarafından bulunduğunu bildirmektedir[Pizzigoni, 2009 s:1898]. Şekil 2.11’de çeşitli yapım tekniklerinin kullanıldığı bu iki mekân görülecektir.

---

<sup>39</sup> Stoa: Gezinti yada toplanma alanı oluşturacak büyüklükte antik portik ya da çatılı sütun dizisi. Yolun bir yanı açıktır, orta alana bakar[Hasol, s:428]

<sup>40</sup> Eski Nisa: Türkmenistan’ın Akhal Vilayetinde bulunan Part İmparatorluğu’nun M.Ö.3.yüzyıl ile M.S.3.yüzyıl arasındaki güçlü dönemine ait erken ve önemli şehirlerden biri [URL-42]

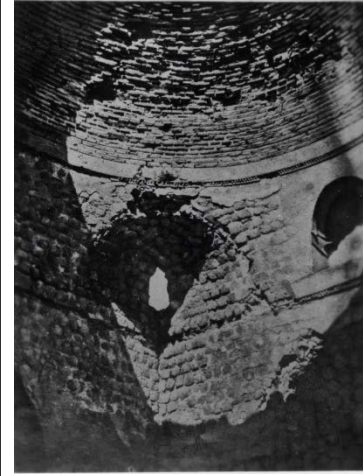
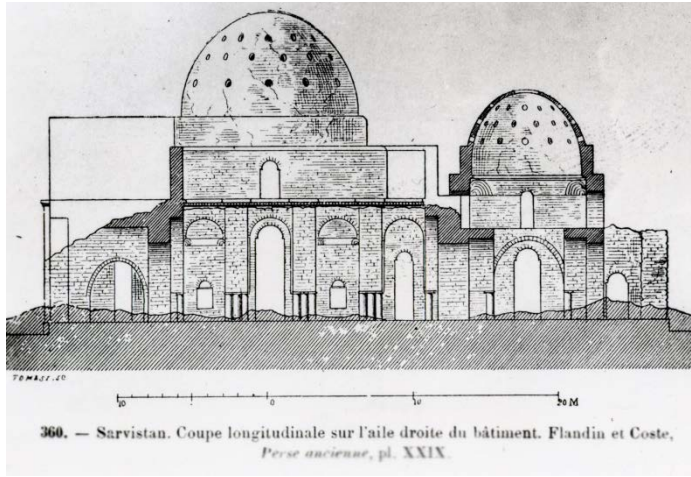


Şekil 2.11 : Eski Nisa'daki kompleks [Lippolis, s:291]

Günümüzde varlığını sürdürmeyi başaramış ikinci en eski Pers kubbesi tipinin Zerdüşt Tapınaklarında yapılan oval biçimli örnekler olduğu bildirilmiştir[Askhan ve Ahmad s:99]. Bu yapıların ana özelliği, kemerlerle bağlanan veya kubbe ile çevrili dört taşıyıcı eleman içeren kübik bir taban üzerine oturtulmuş olmalarıdır. Sasani imparatorluğu boyunca en esaslı yenilik yarı eliptik kubbelerin Servistan Sarayı<sup>41</sup> (M.S. 350) gibi yapılarda üst örtü olarak kullanılması olacaktır. Tromp elemanının en erken örnekleri bu yapılarda görülür[Askhan ve Ahmad s:99].

<sup>41</sup> Servistan Sarayı: İran'ın Servistan şehristanında bulunan Sasani dönemine tarihlendirilen, fonksiyonu üzerinde ihtilaflar bulunan yapı [Mehan, s:1].

Mansbridge ise “yapı tarihinde kare plan üzerine ilk kubbe, Pers İmparatorluğunda yapılmış ve köşelerde bindirmeli yarım kubbe kullanılarak duvarlar ile çatı arasında süreklilik sağlanmıştır.” demektedir[Mansbridge s:15].



Şekil 2.12 : Servistan sarayının boyuna kesiti, M.S.350 [URL-4]

Resim 2.4 : Servistan sarayı kubbeden kare forma geçişte kullanılan tromp elemanı [URL-4]

Yunan tarihinin arkaik ve klasik dönemi boyunca İtalya'nın güneyi ve Sicilya'da bu bölgeleri Yunan Dünyasının ayrılmaz bir parçası yapan bir çok koloni kurulmuştur. Bu dönemde kuzey ve orta İtalya'nın, aralarında en medeni olanı Etrüsklerle birlikte pek çok aşiret tarafından işgal edilmiş halde olduğu bildirilmiştir[Lloyd s:56]. Gates, M.Ö. birinci binyılın sonuna doğru Akdeniz Havzasında güç odağının batıya, Romaya kaydığını belirterek, bu yeni Roma devletinin, Güney İtalya'daki Yunan ve merkezi Etrürya'da<sup>42</sup> bulunan Etrüsklerin<sup>43</sup> kentsel kültürlerini önce ödünç aldığını ve sonra fethettiğini belirtmiştir[Gates s:409]. Roma tarihinin M.Ö.476 yılında Roma şehrinin Etrüsk krallarının işgalinden

<sup>42</sup> Etrürya: merkezi Roma'nın kuzeyinde bulunur, bugünkü Toskana[Gates, s:409,421].

<sup>43</sup> Etrüskler: Herodotos'a göre Batı Anadolu'dan göçmüş olan, Halikarnassoslu Dionysios'a göre İtalya'nın yerleşik halklarından olan kavim M.Ö. 8.yy' dan 2.yy'a kadar varlığı sürdürmüştür[Gates, s:409,421]

kurtarılmasından itibaren başladığı bildirilmektedir. Yaklaşık yüzyıl sonra bütün Etrüsk şehirleri hızla yayılan Roma cumhuriyetine dahil olmuşlardır[Lloyd s:56].

Roma mimarlığının oldukça erken döneminde öne çıkan bir uygulama ışın halinde yayılan kama biçimli taşlarla yapılmış yarım çember kemerlerdir. Bu kemerler, tuğla ve betonlu yeni konstrüksiyon sistemlerinde temel prensip olarak işlevsel bir şekilde kullanılmaya üzere Etrüsklerden Romalılar tarafından devralınmıştır[Lloyd s: 59].



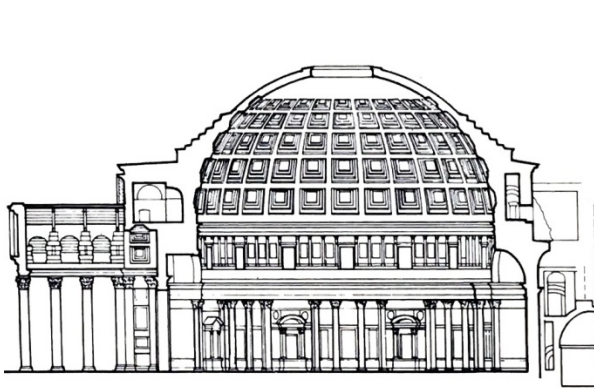
**Resim 2.5 :** Augustus Kemer, Perugia, M.Ö.310. Geçidin Etrüskler tarafından yapılan alt kısmında, kapı üzerinde yarım çember kemer görülmektedir[Fazio, Moffett, Wodehouse s:107].

Romalılar, Etrüsklerden devraldıkları kemer elamanını, boyunca uzatarak “tonoz” veya merkezi etrafında döndürerek “kubbe” gibi mekânsal elemanlar haline getirmiş ve açıklık geçme sorusuna devraldıkları mimari bilgiyi yorumlayarak çeşitli özgün cevaplar bulmuşlardır. M.Ö.3.yy’da pozolanik çimentoyla beton üretilmiştir. Bu yeni yapı malzemesi yaklaşık M.S.118-128 yılları arasında tuğla iskelet kasetli Pantheon’un kubbesinde kullanılacaktır[Fazio, Moffett, Wodehouse s:108].

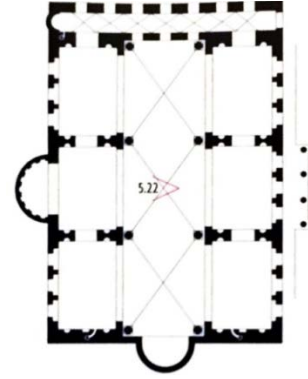
Pantheon’un yarım küre biçimli kubbesi, 43.2 metre çapı olan silindirik bir alanın üzerini kaplamaktadır[Ward-Perkins s:93]. Yarım küre biçimindeki kubbe, yarıçapa eşit yükseklikte başlamasına rağmen, dış duvarlar yükselerek (Şekil 2.13) kubbenin olduğundan sığ görünmesine sebep olmaktadır. Bu düzenlemeyle

duvarların gerilmeleri karşılayacak bir payanda görevi gördüğü belirtilmektedir[Gates s:497].

İtalya'da kısmen ayakta kalabilmiş bazilikalardan biri de yapımı M.S.313 yılından sonra tamamlanan yapı olan, Nova, Maxentius Bazilikası'dır. Nef üzerindeki üç masif çapraz tonozla örtülü kubbesi, zeminden 34,75m yüksekliktedir. Yapının yanal yükleri, her iki tarafta inşa edilen geniş sahnınlar tarafından taşınan bölmelerle hafifletilmiştir[Wheeler s:111].



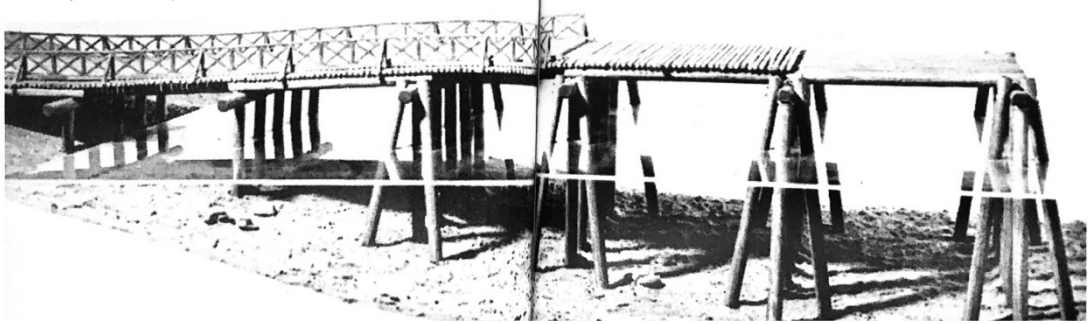
Şekil 2.13 : Pantheon, kesit [Ward-Perkins s:87]



Şekil 2.14 : Maxentius Bazilikası, M.S. 312, plan [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:121]

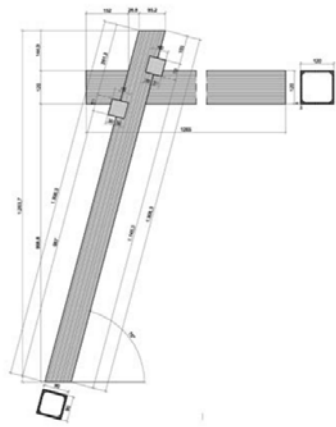
Roma döneminde İmparator Julius Caesar<sup>44</sup> tarafından Ren nehri üzerine yaptırılan bir köprü hakkında yapılmış olan tanım, konstrüksiyon için kısa kirişler kullanımına işaret etmektedir. [Pizzigoni, 2009 s:1898] Kretschmer, nehrin 400 mt genişlikte olduğu bir yerde köprü sorusunun “sıralanmış kirişler ile bağlanan payandalı bir sehpa üzerinde, kızaklı kirişlerin tuttuğu enlemesine döşeme tahtası” şeklinde cevaplandığını bildirir[Kretschmer s:153]. Resim 2.6’da görülen köprünün modeli ve yapılan tanıma dayanarak, kısa kirişler şemasına uygun yapım yönteminin, köprünün “payandalı sehpa” olarak tanımlanan bileşenlerinin yapımında kullanıldığı düşünülmektedir.

<sup>44</sup> Julius Caesar: M.Ö.100- 44 yılları arasında hüküm sürmüş Roma imparatoru[URL-46]



**Resim 2.6 :** Julius Caesar'ın Ren nehri üzerine kurdurduğu köprü, M.Ö. 54, Bonn Eyalet Müzesinde bulunan model [Kretzschmer s:152-153]

Massimo Scolari bu tanımları kullanarak köprüye ait planları çıkarmıştır. Köprünün rekonstrüksiyonu (Şekil 2.15, Resim 2.7) Vicenza'da 2002 yılında sergilenmiştir.



**Şekil 2.15 :** Massimo Scolari'nin Caesar'ın köprü tanımından mülhem Vicenza'da sergilediği eserine ait çizim [URL-13]



**Resim 2.7 :** Aynı esere ait fotoğraf [URL-13]

Antik dönemde, özellikle kemer elemanının yenilikçi kullanımı, taş, tuğla, ahşap, kerpiçten üretilen kısa ve süreksiz yapı malzemelerinin geniş açıklıkları geçmesi fikrinin gelişmesinde öncülük etmiştir. Romalılar, öncülük ettikleri yeni

mimarlığı imparatorluğun yayıldığı topraklarda<sup>45</sup> cisimleştirmişlerdir. Betonun yeni ve esnek kullanımı ile mekânı şekillendirmenin, gölge ve ışığı biçimlendirmenin yolları keşfedilmiştir[Roth, s:325].

M.S.313'te Roma'da Hristiyanlığın devletin resmi dini olarak kabul edilmesinden sonra işlevsel ve simgesel açıdan tapınmaya uygun bir yapı tipinin tasarlanması sorunu ortaya çıkmıştır. İlk olarak bazilikaların kiliseye dönüştürüldüğü bilinmektedir. İlerleyen tarihlerde Roma imparatorluğunun zayıflaması[Roth, s:334] ve 330 yılında Konstantin tarafından başkentin doğuya, bugünkü İstanbul'a taşınması gerçekleşecektir[Gates, s:549]. Roth, "Pagan İmparatorluk Roma'sının ihtişamı Bizans'ta kurulan Konstantin'in yeni hristiyan Romasına taşındı." demiştir[Roth, s:325,329].

### 2.3 Orta Çağ'dan Yakın Çağ'a

Doğu Roma imparatorluğunda kültürel ve siyasi gelişim İustinianus'un hüküm sürdüğü dönemde (527-565) doruk noktasına ulaşmıştır[Roth, s:346]. Bu dönemde İstanbul'da "yapıldığı çağdaki bazilikalardan farklı çatı örtüsü ve devasa kubbesiyle"[Diker, s:7] Ayasofya (532-537) karşımıza çıkacaktır. Kubbe yerden 36.6 metre yükseklikte bir kasnak üzerinden toplam 54.9 m'ye kadar yükselir; aktarılan basınç yükü dengeli bir piramidal görünüş oluşturan bir dizi yarım kubbe ve beşik tonoz ile aşağıya doğru iletilmektedir[Roth, s:349].

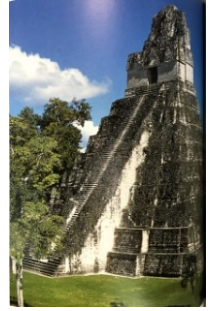

Batı Roma'nın 476 yılında çöküşünden sonra, kamu yapılarının üretimi neredeyse durma noktasına gelmiştir[Roth, s:360]. 5 ve 12.yy arasında Latin Ülkelerinin mimarlığı "Romanesk" olarak tanımlanmıştır[Hasol, s:396]. Bu dönem kiliselerinde, az pencereli kargir duvarlar, dar sahnlar, tonozlu orta nefi destekleyen yan nefler ve ağır kütleler yaygındır. Yapı üst örtüsü genellikle beşik tonoz üzeri ahşap çatı olmuştur. Bir Romanesk dönem yapısı olan St. Denis kilisesinin sonradan

---






<sup>45</sup> Roth, Roma(İtalya), Palmyra (Suriye), İskenderiye (Mısır), Timgad (Afrika), Trier (Almanya), Lizbon (Portekiz), Londra (Britanya )'yı referans etmiştir[Roth, s:325]

eklenen koro bölümünde yapı tarihinin ilk kaburga tonozu kullanılmıştır[Roth, s:399]. Böylece taşıyıcı duvarlar yerine yük aktarımını kemerlerle yaparak pencere boşluklarına izin veren hafif duvar konstrüksiyonları kullanma imkanı ortaya çıkmıştır. Kaburga tonoz örtü sistemi ilerleyen dönemlerde geliştirilerek, bina yüksekliklerinin ve açıklıklarının artmasına imkan tanıyacak sistemler olarak yorumlanmıştır. Sivri kemerler, demet sütunlar ve uçan payandaların geliştirilmesi, çatılardan veya tonozlardan dışa ve aşağıya doğru gelen itme kuvvetlerini dıştaki rijit ağırlık kulelerine aktarılmasının yapı tarihine girmesiyle daha hafif ve daha boşluklu taş iskelet sistemler uygulanmıştır[Ching, Onouye, Zuberbuhler, s:6].

**Çizelge 2.3.** 5.yüzyıldan 18.yüzyıla dünyadan yapı örnekleri

Tarih	Yer	Yapım Özelliği	Yapı	Görsel
532-7	İstanbul, Türkiye	Örtü merkez kubbe ve iki yarım kubbeden oluşmaktadır.	Ayasofya	
7.yy	Guatemala, Tikal	Taştan bindirme tekniği ile yapılmış olan piramit, öncüllerine nispetle dik olmasıyla dikkat çekmektedir	Piramit [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:264]	
782	Çin, Shanxi bölgesi	Çatı saçağı ahşap bindirme kirişlerle taşınır.	Nanchan Manastırı [URL-5] [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:84]	

**Çizelge 2.3 (devam):** 5.yüzyıldan 18.yüzyıla dünyadan yapı örnekleri

Tarih	Yer	Yapım Özelliği	Yapı	Görsel
833-988	Kurtuba, İspanya	Mihrab birimi üzerinde kaburga tonozlarla benzerlik gösteren bir tür bindirmeli kirişleme sistemi kullanılmıştır.	Kurtuba Cami [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:159]	
1056	Shanxi bölgesi, Çin	Sekizgen plana sahip ahşap yapı, yaklaşık 65m yüksekliktedir	Fogong Pagodası [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:83]	
1139-1147	Tournus, Fransa	Dış duvarlar taşıyıcıdır ve kârgir yapı olabildiğince sağırır.	Abbey Kilisesi [Fazio, Moffett, Wodehouse, s206] [URL-6]	
1062-1090	Floransa, İtalya	Ahşap kafes çatı strüktürüne sahip Romanesk dönem italyan kiliselerindendir.	S. Miniato al Monte [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:193]	
12.yy	Kamboçya	Bindirme taş tonozlardan oluşan sunak üst örtüleri mevcuttur.	Angkor Wat [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:77]	

**Çizelge 2.3 (devam):** 5.yüzyıldan 18.yüzyıla dünyadan yapı örnekleri

Tarih	Yer	Yapım Özelliği	Yapı	Görsel
1137-1140	Paris, Fransa	Kârgir Romanesk dönem kilisesinin 1140'ta yapılan koro bölümünde kaburgalı tonoz ilk defa kullanılmıştır.	St.Denis Bazilikası [Roth, s:399] [URL-7]	
1176	Erzurum, Türkiye	Kârgir yapının orta biriminin örtüsünde bindirme mukarnas dolgu kullanılmıştır. Aynı camide mihrab örtüsü ahşap bindirme kırlangıç kubbedir.	Erzurum Ulu Cami [Yavuz, s:137] [URL-8]	 
1195-1250	Bourges, Fransa	Gotik dönem özellikleri taşıyan katedralde, demet sütunlar, kaburga tonozlar, ağırlık kuleleri mevcuttur.	St. Etienne Katedrali [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:223]	
Yaklaşık 1200	Nara, Japonya	Çatı strüktüründe saçağı, mevcut bindirmeli ahşap konsol kirişler taşır.	Todayji Manastırı [Fazio, Moffett, Wodehouse, s:96]	
14.yy	Çanakkale, Türkiye	Son cemaat mahalli kubbesinde tuğladan kırlangıç kubbe mevcuttur	Behramkale Hüdavendigâr Cami [Ayverdi, s:227]	

**Çizelge 2.3 (devam):** 5.yüzyıldan 18.yüzyıla dünyadan yapı örnekleri

Tarih	Yer	Yapım Özelliği	Yapı	Görsel
1296-1436	Floransa, İtalya	Kubbenin kaburgaları balıksırtı denen bir teknikle örülmüştür. (Bkz. s:29)	Floransa Katedrali [Pizzigoni, 2014, s:1]	
1568-1575	Edirne, Türkiye	Kubbe sekiz ayak üzerine oturmaktadır. Kubbe yüksekliği yerden yaklaşık 70m'dir.	Selimiye Cami [URL-9]	
1668-1680	Torino, İtalya	Kırlangıç kubbe benzeri, bindirmeli bir örtü sistemi kullanılmıştır.(Bkz. s:54)	Guarini-Sindone Şapeli [URL-10]	

Yavuz, 13.yüzyıl başlarında Anadolu'da tuğlanın yapı malzemesi olarak, günümüze kadar varlığını sürdürmeyi başaramış yapılarda yer yer yapı örtüsünde ve iç duvarlarda kullanılmış bir malzeme olduğunu bildirmiştir. Anadolu'nun çeşitli bölgelerinde Aksaray Ulu Camisi ve Niğde Alaaddin Camisi gibi yapılarda düz tonozların geçmeli taşlarla yapılmış olması, bölgede bu malzeme ile yenilikçi örtü çözümlerinin denendiğini gösterir niteliktedir[Yavuz s:100].

9-12.yüzyıllar arasında Çin'de geliştirilen ahşap yapım yöntemlerinin arasında mütakabil kirişleme sistemlerine benzer yapım yöntemleri bulunur. Basitçe, sepet yapımında birbiriyle örülmüş bambu çubukların kullanımı geleneği daha sonra köprü gibi büyük ölçekli objelere transfer edilmiştir denebilir. Shandong'da bulunan

Rainbow Bridge'de<sup>46</sup> (Resim 2.8) kiriş serisinin mütakabil bir taşıma şemasına göre kurgulandığı görülmektedir. [Pugnale, Sassone, s:14]

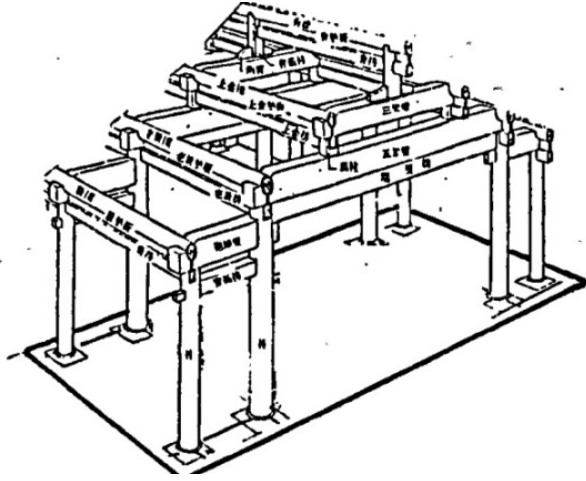


**Resim 2.8** : Rainbow Bridge [URL-11]

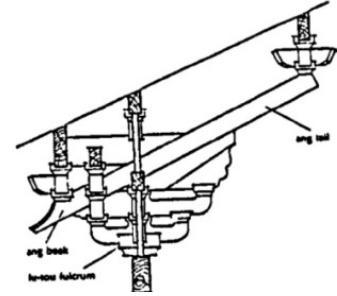
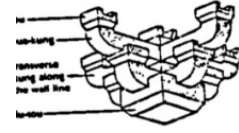
Çin'de diğer yapılarda ise ana malzeme olarak kullanılan ahşap karkas strüktür (Şekil 2.16), kendi kendine ayakta durabilen bir geometrik örgü olarak nitelenmektedir. Ahşap strüktürün altında kullanılan duvarlar bölücü ve dış etkilerden koruyucu görev almıştır, hiçbir yük taşımaz. Bu düzenleme mekân organizasyonunda esneklik sağlar. Tou-kung, (Şekil 2.17) çatı ve kolon arasında dirsek sistemi, çatı yükünü taşıyan kiriş sistemi yükü doğrudan kolonlara aktarmaktadır[Hsu s:3].

---

<sup>46</sup> Song hanedanlığı 960-1279 yılları arasında hüküm sürmüştür[Fazio, Moffett, Wodehouse s:81]



Şekil 2.16 : Çin mimarisinde bir yapının ahşap strüktürü  
(Chien Kung: 1980-p:4) [Hsu s:4]



Şekil 2.17 : “Tou-kung” ahşap  
bindirme konsol detayı  
(Liang: 1984-p:10&13)  
[Hsu s:7]

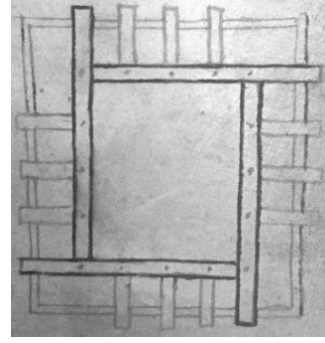
Larsen, 12.yüzyılın ikinci yarısında Japonya’da Budist keşiş Chogen’in (1121-1206) ahşap kirişleri spiral katmanlandırma tekniği ile kurduğunu Ishii’den aktarmaktadır. Bu kaynağa göre Chogen’in kullandığı teknik mütekabil sistemler ile aynıdır. Bu tapınaklarda kullanılan geometrik formlar, Budist meditasyonlarında sembol olarak kullanılan mandalaları andırmaktadır.[Larsen, 2008 s:7] Bu konu hakkında bir başka kaynakta dini bir anlamı olan Mandala<sup>47</sup> (Şekil 2.18) konseptinin mütekabil olarak taşınan elemanlardan temel dairesel “fanlar” geliştirilmesine doğrudan referans olarak alındığı ve bu çatıların Asya’da birçok Budist tapınaklarında kullanıldığı bildirilmiştir[Pugnale, Sassone, 2014 s:14].

Avrupa’da 13.yüzyılın ilk yarısında Villard de Honnecourt eskiz kitabına döşeme konstrüksiyonu için bir kirişleme kurgusu çizmiştir. Villard de Honnecourt, eskiz defterinde bu metodu “ahşap kirişler kısa olduğunda bir ev veya kulenin yapımı” olarak tarif etmektedir[Barnes s:162].

<sup>47</sup> Mandala: Hindistan kökenli dinlerde metafizik veya sembolik bakımdan meta veya mikro kozmosu gösteren şekillere verilen ad[URL-47]



**Şekil 2.18** : Mandala örneği (çiz.A. E. Piroozfar)  
[Larsen, 2008, s:8]

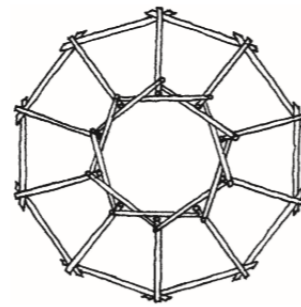


**Şekil 2.19** : Villard de Honnecourt'un düzlemsel kirişleme eskizi [Barnes, Folio 23r]

Ortaçağ'da mütekabil kirişleme örneğine rastlanan bir başka yapı ise Lincoln psikoposu Alexander tarafından 1220 ve 1235 yılları arasında tasarlanıp inşa edilen Lincoln Katedralinin dernek binasının çatısıdır. Larsen, Hewett'ten<sup>48</sup> yapının düzgün ongen tabanlı piramidal çatısında mütekabil kirişleme sistemi kullanıldığını aktarır. Bu kaynakta bildirildiğine göre, on köşeli düzgün çokgen planı kuşatan çatı iki aşamalıdır. Düzlemsel mütekabil kirişleme sistemi görülen alt kısım ile piramidal formu oluşturan üst kısım[Larsen, 2008 s:9].



**Resim 2.9** : Lincoln katedrali dernek binası  
[URL-12]



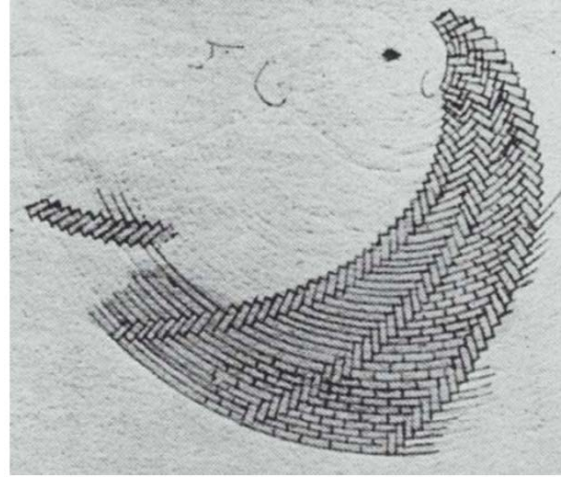
**Şekil 2.20** : Çatıda Hewett tarafından tarif edilen mütekabil kirişleme planı(çiz. A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008 s:9]

<sup>48</sup> Larsen, Hewett'in English Cathedral Carpentry adlı kitabında bu yapıyı açıkladığını bildirmiştir[Larsen, 2008 s:9]

Pizzigoni'ye göre daha sonraları mütakabil kirişleme sistemine benzer bir yapım yöntemini Brunelleschi (1377-1446) tarafından Floransa Katedrali'nin<sup>49</sup> kubbesinde kullanmıştır. Kubbe kaburgasını oluşturan tuğla dizilimi her biri bir diğerini taşıyacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.21). Bu durum, iskele ve merkezleme ihtiyaçlarını ortadan kaldırmıştır. Tuğlalarla kat kat sarmal yapan bir düzenin oluşturulmasını ihtiva eden Brunelleschiye ait bu prosedür, balıksırtı adıyla anılır[Pizzigoni, 2009 s:1898].



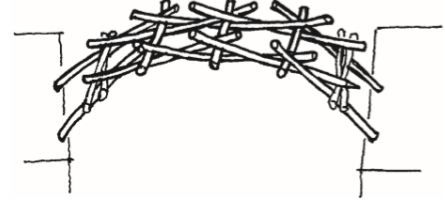
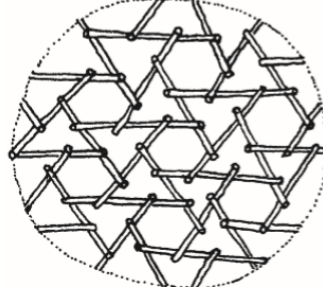
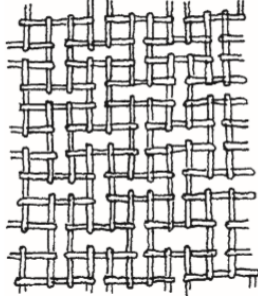
**Resim 2.10 :** Fresklerin restorasyonu esnasında açığa çıkmış olan kubbenin balıksırtı örgüsü [Pizzigoni, 2014 s:7]



**Şekil 2.21 :** Balıksırtı örgüyü tarifleyen Antonio da Sangallo il Giovane'ye ait çizim. (yk 1500) (Floransa, Gabinetto Uffizi, dis.n. 1330) [Pizzigoni, 2014 s:8]

Leonardo da Vinci (1452-1519) çeşitli düzlemsel ve üç boyutlu mütakabil kirişleme kurguları keşfetmiştir. “Codex Atlanticus”da düzenli ve düzensiz geometrik kurgularla (Şekil 2.22) açıklık geçmeye yönelik eskizleri bulunmaktadır[Pugnale, Sassone s:11]. Leonardo da Vinci aynı zamanda kısa kirişler kullanılarak oluşturulan kemer formlu köprü (Şekil 2.23) tasarımlarını da resimlemiştir. Bu kirişlerin her biri bir diğeri tarafından taşınmaktadır[Larsen, 2008 s:10-11].

<sup>49</sup> La Basilica di Santa Maria del Fiore, Floransa Katedrali



**Şekil 2.22** : Leonardo da Vinci'nin düzlemsel kirişleme örnekleri (çiz. A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008 s:10]

**Şekil 2.23** : Leonardo da Vinci'nin kısa kirişler probleminde önerdiği köprü çözümü (çiz. A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008 s:11]

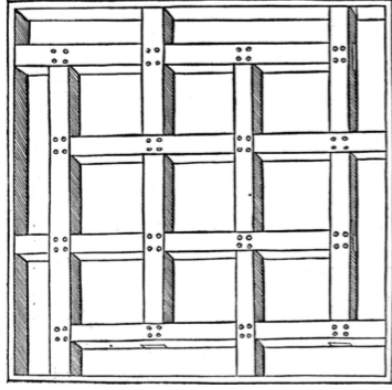
Pizzigoni, “bu tasarımlarda Leonardo kesin olarak şu sonuca varmamıza izin vermektedir; Orta Çağ’da teknik ve bilimsel bilgi yazılmamış geleneklerde yaşamıştır; usta ve mühendisler antik teknolojilere bağlı kalarak bu birikimi Rönesans’a taşımışlardır” demiştir[Pizzigoni, 2009, s:1898]. Şekil 2.22’deki düzlemsel kirişleme kurguları, “çok merkezli kirişlemeler” olarak adlandırılacaktır. Bu kurgulara ulaşmak için Bölüm 4.2.3’te (Bkz. s.124-127) izah edilen temel çokgen dizilimleri temel alınabilir.

Benzer şeklide eldeki kirişlerden daha büyük boyutlarda tavan ve çatılar yapmak sorusunun bir çözümü de Sebastiano Serlio’nun<sup>50</sup> notlarında karşımıza çıkmaktadır[Larsen, 2008 s:11]. Houlby, Serlio’nun açıklık 15 ayak genişliğindeyken eldeki kirişler 14 ayak uzunluğunda olduğunda ortaya çıkan problemi, Şekil 2.24’teki gibi çözümlediğini bildirmiştir[Houlby s:207].

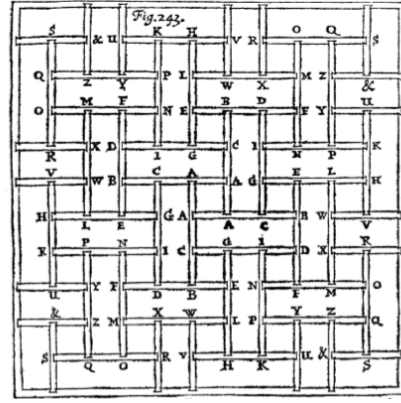
Endüstrileşme öncesi mütakabil sistemler hakkında çalışmalar yapan bir diğer Avrupalı matematikçi olan John Wallis<sup>51</sup>, eğimli ve düzlemsel kirişlemelerin (Şekil 2.25) analizlerini Opera Mathematica adlı eserinde tariflemiştir[Larsen, 2008 s:12].

<sup>50</sup> Sebastiano Serlio:1475-1554 yılları arasında yaşamış İtalyan mimar[URL-48]

<sup>51</sup> Wallis:1616-1703 yılları arasında yaşamış İngiliz matematikçi [URL-49]



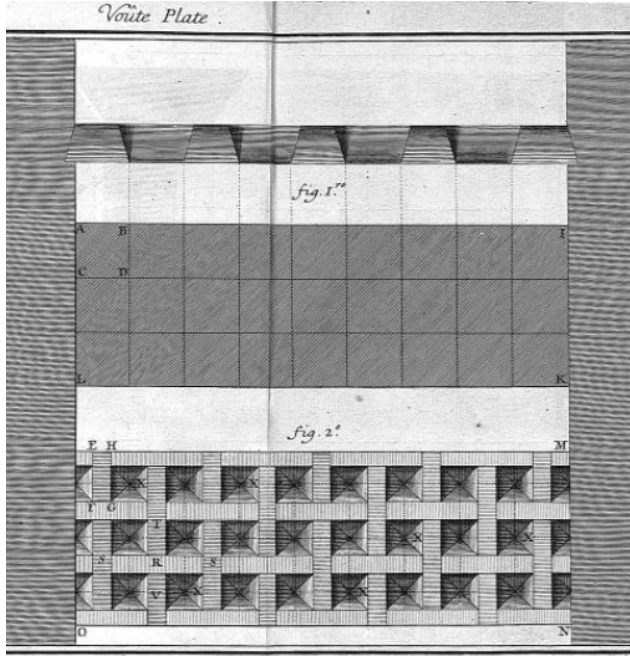
Şekil 2.24 : Sebastiano Serlio'nun düzlemsel mütakabil kirişlemesi (Serlio, 1611. Fol 12r) [Houlsby s:209]



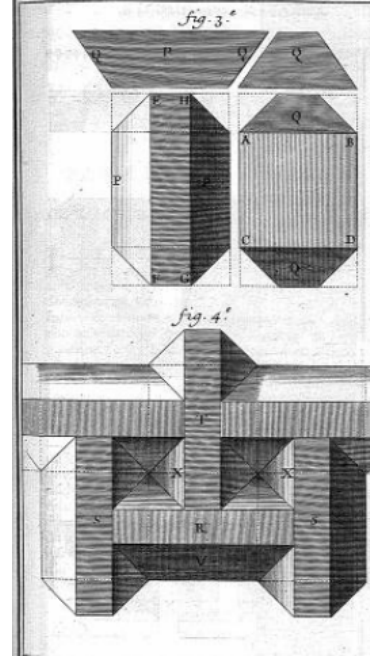
Şekil 2.25 : John Wallis'in genişletilmiş strüktürü [Houlsby s:210]

Houlsby, Wallis'in bu çalışmalarıyla: “birleşim yerlerini isimlendirerek strüktürün açık bir çizimini sunduğunu, daha sonraki analizleri kolaylaştırmak için dört katlı simetriden faydalandığını, sistemleştirilmiş uygulama için temel prensipten yola çıkarak her bir kirişin moment dengesi analizini yaptığını, aldığı sonuçlara göre strüktürdeki konsol elemanların üzerindeki yükler hakkında önemli yapısal çıkarımlara vardığını” bildirmektedir[Houlsby s:211].

Brocato ve Mondardini, 17.yy sonlarında Joseph Abeille ve Sebastian Truchet tarafından, ahşap kirişlemelerden ilham alındığı tahmin edilen düz tonozlar(Şekil 2.26) icad edildiğini bildirmiştir. Bu strüktürler, taşların basınç yoluyla yük aktarımı yapabileceği ve özel geçme şekli sayesinde normalden daha yüksek bir eğilme direncine sahip olan düzenlemesiyle, hem tonozların hem de mütakabil strüktürlerin doğasını andıran strüktürlerdir[Brocato, Mondardini s:1786].



Şekil 2.26 : Gallion'un (1734) incelemesinde sunulduğu şekilde Abeille'nin düz tonozu[Fleury s:2]



Şekil 2.27 : Strüktürü oluşturan taşların görünüşü[Fleury s:2]

Bir düz tonozun stabilitesi, standart tonozlu sistemlerle aynı itme prensibine dayanmaktadır, fakat geleneksel bir kirişte olduğunun aksine bütün kirişler kilit taşı gibi çalışmaktadır. Tonozu oluşturan taşların görünüşleri Şekil 2.27'de gösterilmiştir[Brocato, Mondardini s:1786].

## 2.4 Endüstrileşmeden Günümüze

Sanayi Devrimi, inşaat tekniğini değiştirmiştir. Taş, tuğla, ahşap gibi geleneksel malzemeler daha rasyonel bir şekilde işlenmekte ve daha kolay dağıtılmaktadır. Bunlara zamanla dökme demir, cam ve daha sonraları da çimento gibi yeni malzemeler eklenmiştir. Bilimdeki ilerlemeler, bu malzemelerin daha elverişli bir şekilde kullanılmasına ve dirençlerinin ölçümüne imkan tanımaktadır. Nüfus artışı ve iç göçler konut yapımını zorunlu kılmaktadır. Kentlerin gelişimi, daha yaygın ve durmadan artan bir donanım gerektirdiği için kamu görevleri genişlemekte ve daha büyük kamu binalarının yapımını zorunlu kılmaktadır. Sanayi ekonomisi,



fabrikalar, depolar, antrepolar, limanlar gibi yeni ve değişik yapı tiplerinin doğmasına yol açmıştır[Benevolo, s:33].

Demir ve cam eski zamanlardan beri yapı malzemesi olarak kullanılmış olsa da 18.yüzyıl sonlarında bu iki öğreye daha geniş uygulanma alanları açılacaktır. İlk gergi ve kenet gibi bütünleyici işlevler yolunda kullanılan demirin, Abraham Darby tarafından 19.yüzyılın ilk yarısında odun kömürünün yerine kok kömürüyle eritilmesi, yapılarda ana malzeme olarak kullanılmasında bir adımtadır. 1777-1779 arasında Coalbrookdale yakınındaki Severn üzerine kurulan ilk demir köprüünün 30m uzunluğundaki kemeri birbirine kenetlenmiş iki yekpare yaydan oluşmaktadır. Öte yandan cam sanayisinde 1806'da 2.50x1.70 m'lik levhalar üretilebilmiştir. Camın kullanıldığı ilk örnekler demiryolu garları ve yeni mağazaların vitrinleri olmuştur. Paxton'un 1815'te kurduğu Kristal Saray bütün bu deneyleri özetler ve büyük camlı sergi galerileri dizisini başlatır. Bu dizi 19.yüzyılın ikinci yarısı boyunca sürüp gidecektir[Benevolo, s:49].






Tuğla ve işlenmiş ahşap gibi geleneksel malzemelerin üretim ve taşınması da bu tarihlerde kolaylaşmıştır. İlerleyen tarihlerde Portland çimentosunun formüle edilmesi, "betonarme"nin icadı gibi betonun mimaride kullanılmasını teşvik eden gelişmeler olmuştur. Ayrıca elastisitenin icelenmesi, yapay plastik üretimi, çelik üretiminde ve imalat detaylarındaki gelişmeler çok çeşitli taşıyıcı formların uygulanabilir hale gelmesine imkan tanımıştır[Ching, Onouye, Zuberbuhler, s:10].

20.yüzyılda özellikle pavyon tasarımı, fuar yapıları gibi geçici yapılar bağlamında hafif, bağımsız ve esnek üç boyutlu taşıyıcı ve kendi kendini taşıyabilen formlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Çizelge 2.4'te 18.yy sonrası geliştirilen yapı tekniklerine dair örnekleri ve geçici pavyon tasarımlarından bazılarını görmek mümkündür.





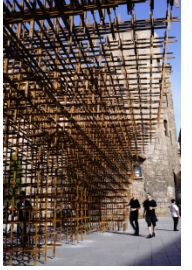
**Çizelge 2.4.** 18.yüzyıldan itibaren dünyadan yapı örnekleri

Tarih	Yer/Mimar	Yapım Özelliği	Yapı	Görsel
1777-9	Birleşik Krallık T.M.Pritchard	30 metre uzunluğundaki demir kemer, birbirine kenetlenmiş iki yekpare yaydan oluşur.	Coalbrookdale'de bulunan demir köprü [URL-14]	
1851	Londra, Birleşik Krallık John Paxton	Prefabrike dövme demir ile camdan oluşan birimler 91.974 m2 alana sahip alanı örter	Crystal Palace, Hyde Park [URL-15]	
1868	Londra, Birleşik Krallık William Barlow	Zemin seviyesinin altında kalan gergiler, makaslı kemer sisteminin dışı doğru oluşan itme kuvvetlerine karşı koymaktadır.	St.Pancras İstasyonu [URL-16]	
1896	Endüstri ve Sanat Fuarı, Nizhny Novgorod, Vladimir Shukhov.	Dünyanın ilk çelik germe yapı sistemi.	Rotonda-Pavyon [URL-17]	



**Çizelge 2.4 (devam):** 18.yüzyıldan itibaren dünyadan yapı örnekleri

Tarih	Yer/Mimar	Yapım Özelliği	Yapı	Görsel
1913	Breslau, Almanya Max Berg.	65m çapıda kubbeye sahip betonarme sistem	Jahrhunderthalle [URL-18]	
1922	Jena, Almanya Walter Bauerfeld	İkosahedron(yirmi yüzlü) formundan türetilmiş literatüre geçmiş ilk jeodezik kubbe.	Planetarium, Jena [URL-19]	
1960	Roma, İtalya Pierre Luigi Nervi	100 m çapındaki nervürlü betonarme kubbe 1960 Yaz Olimpiyatları için inşa edildi.	Palazzo Dello Sport [URL-20]	
1961	Tokyo, Japonya Kenzo Tange	Çelik halatlar iki betonarme ayak arasına gerilmiştir.	Olimpiyat Stadı [URL-21]	
1972	Münih, Almanya Frei Otto	Çelik halatlarla birleşen membranlar çok hafif ve geniş açıklıklı bir taşıyıcı sistem oluşturmaktadır	Olimpiyat Stadı [URL-22]	

**Çizelge 2.4 (devam):** 18.yüzyıldan itibaren dünyadan yapı örnekleri

Tarih	Yer/Mimar	Yapım Özelliği	Yapı	Görsel
1973	Sidney, Avustralya Jorn Utzon	Kabuk, prefabrike ve şantiyede dökülmüş beton nervürlerden oluşmaktadır.	Sidney Opera Binası[URL-23]	
2013	Barselona, İspanya Map13	Dijital olarak tasarlanmış tuğla malzemeden yapılmış örtü sistemidir	Brick-topia [URL-24]	
2013	Londra, Birleşik Krallık Sou Fujimoto	İç içe geçmiş 20mm çelik profillerle hafif ve yarı geçirgen bir strüktür oluşturulmuştur	Serpentine Gallery Pavilion 2013 [URL-25]	
2013	Rjukan, Norveç Raller Arkitekter	Strüktürü oluşturan ahşap elemanlar üç boyutlu bir grid kurgusu şeklinde bir araya gelmiştir	Rjukan Town Cabin [URL-26]	
2014	Barselona, İspanya Urbanus-La Salle	10mm kalınlıktaki birbirine geçmeli kısa bambu çubuklardan oluşturulan strüktür sökülüp tekrar yapılabilir niteliktedir.	Identity Pavilion [URL-27]	

**Çizelge 2.4 (devam):** 18.yüzyıldan itibaren dünyadan yapı örnekleri

Tarih	Yer/Mimar	Yapım Özelliği	Yapı	Görsel
2015	Milan, İtalya Wolfgang Buttress	Çeşitli boyutlardaki çubuklar, teller ve bağlantı noktaları arı kovanını taklit eden bir strüktür oluşturmaktadır	EXPO 2015 İngiltere Pavyonu [URL-28]	
2016	Hong Kong, Çin CUHK Öğrencileri	Bambu çubukların dijital üretim ile biraraya getirilmesiyle oluşturulmuş bir mekânsal strüktürdür	ZCB Bamboo Pavilion [URL-29]	

19 ve 20. yüzyıllarda kimi tasarımcılar çeşitli mütekabil sistemleri incelemişlerdir. Antoni Gaudi ve Jose Maria Jujol gibi mimarlar, birbirini destekleyen ve spiral şeklinde yükselen kirişler tasarlamışlardır. (Resim 2.11) Larsen bu strüktürlerin mütekabil sistemlerle aynı olduğunu belirtir[Larsen, 2008, s:14].



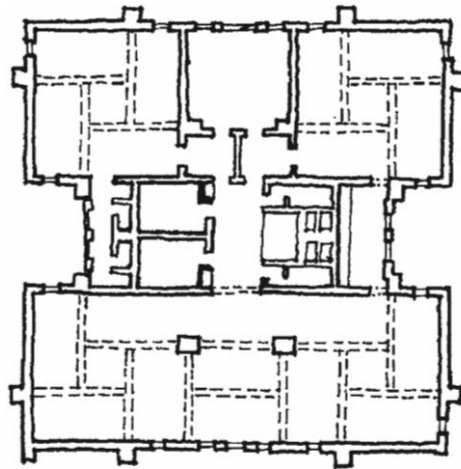
**Resim 2.11 :** Casa Battlo'da spiral kirişlerle oluşturulmuş tavan [URL-30]

Birinci Dünya Savaşı'ndan sonra Almanya'da Friedrich Zollinger tarafından konut açığını hızlı şekilde karşılayabilmek adına "Lamellendach" adı verilen kısa kirişlerden oluşturulan bir kirişleme kurgusu ile ahşap kafes kirişlere alternatif bir çatı strüktürü çözümü geliştirilmiştir[Heise, s:71].



**Resim 2.12** : 1932'de Merseburg Freimfelde' de yapılan Kreuzkapelle kilisesi çatı strüktürü[URL-40]

Larsen, 1952-1953'te Mimar Louis Kahn'ın Philadelphia'daki Mill Creek sosyal konut projesi tasarımında çok katlı binada 4 kirişli düzlemsel kirişleme kullandığını bildirmiştir. Bu konut projesinde düzlemsel kirişleme kullanmanın sağladığı temel avantaj, planda kolonları engellemek ve dolayısıyla mekânsal organizasyonu kolaylaştırmaktır. Gerçekleştirilmeyen projede 15 metrelik açıklık "Ortaçağ dörtlü düzlemsel kirişlemesi" ile geçilmiştir[Larsen, 2008, s:15].



**Şekil 2.28** : Mill Creek Sosyal Konut Projesi, Louis Kahn (çiz.A. E. Piroozfar) [Larsen, 2008, s:15]

Mütekabil strüktürlere benzer strüktür kullanan başka bir tasarım da Hampshire Country Architect's tarafından tasarlanan ve 1995 Nisan'ında inşa edilen Langstone Yelken Merkezinin çatısıdır. (Resim 2.13) Langstone Yelken Merkezi ve Leonardo'nun geçici köprülerinin her ikisi de -pratikte her iki strüktür tipinin aynı şekilde çalışması anlamına gelen- birbirine kilitlenmiş, basit taşıyıcı kirişler takımıdır[Larsen, 2008, s:15].



**Resim 2.13** : Langstone Yelken Merkezi [URL-31]

Larsen, Japonya'da örtü sistemi olarak mütekabil strüktürlerin kullanıldığı hayata geçirilmiş bir çok projeden bahseder.

Kazuhiro Ishii'ye ait Seiwa Burnaku Kukla Tiyatrosu (Resim 2.14 ve Resim 2.15), Spinning House (Resim 2.16), Sukiya Yu Evi (Resim 2.17) yapılarında mütekabil sistemler üst örtü olarak kullanılmıştır. 1992 yılında yapımı tamamlanan Seiwa Bunraku Kukla Tiyatrosu'nun sergi salonu 13 metre yükseklikte, 8 metre genişlikte ve çatısı mütekabil strüktür ile örtülü bir mekândır. 13 metre yükseklikteki uzun ve narin ahşap kolonlarda burkulmayı engellemek adına içiçe sarmal örgü yapan mütekabil kirişleme, kolon yüksekliğini ortalayacak şekilde tekrar

etmiştir[Larsen, 2008, s:92-93]. Aynı alanda bulunan bir diğer yapı olan oditoryum yapısında asma tavan oluşturacak şekilde bir düzlemsel kirişleme (Resim 2.15) kurgulanmıştır[Larsen, 2008, s:99].



**Resim 2.14** : Seiwa Bunraku Kukla Tiyatrosu sergi salonu (fotoğraf Kazuhiro Ishii'ye aittir) [Larsen, 2008, s:93]

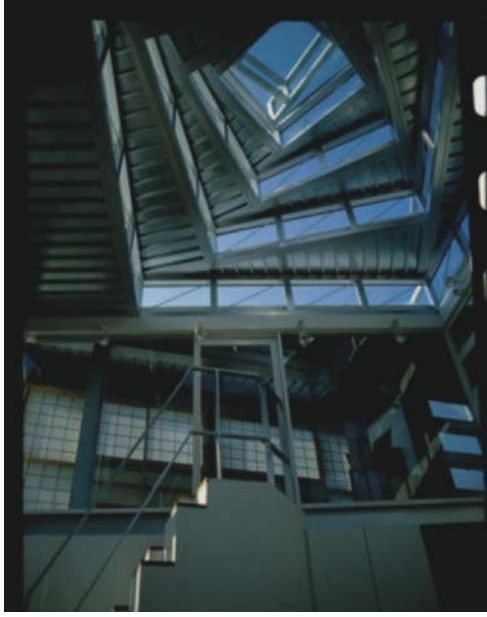


**Resim 2.15** : Seiwa Bunraku Kukla Tiyatrosu oditoryum (fotoğraf Kazuhiro Ishii'ye aittir) [Larsen, 2009, s:1873]

Larsen, Kazuhiro Ishii'nin, 1985'te Enomoto ailesi için tasarladığı Sarmal evin çatısındaki dönme etkisini Vierendeel<sup>52</sup> makasların her birini bir öncekine göre 15 derece döndürerek elde ettiğini bildirmektedir. Aynı kaynakta Ishii'nin, bu hareketin İslâm'da kainat imgesinin en erken ifadesi olarak bulunabileceğini belirttiğinden de bahsedilmektedir[Larsen, 2008 s:77]. Bahsedilen örnekler haricinde Kazuhiro Ishii'nin Yasuda ailesi için tasarladığı, 1990'da yapımı tamamlanan "Sukiya Evi"nin Yu-an adı verilen misafir ağırlama mekânını örten 7 metre

<sup>52</sup> Vierendeel kirişi:Belçikalı inşaat mühendisi Arthur Vierendeel (1852-1940) tarafından icad edilen Büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılan, yalnızca alt ve üst başlıklar ile dikmelerden oluşan taşıyıcı sistem. Kafes kirişten farklı olarak çubuklar yalnızca itme ve çekmeye değil burulmaya da çalışır[Ünal s:454].

çapındaki ahşap jeodezik kubbeyi, yatay bir şekilde üstüste binen mütekabil kirişleme sistemi desteklemektedir[Larsen, 2008 s:87].



**Resim 2.16** : Sarmal ev, çatının içten görünüşü(fotoğraf Kazuhiro Ishii'ye aittir) [Larsen, 2008, s:87]



**Resim 2.17** : Sukiya Evi, misafir salonundaki mütekabil kirişlemenin görünüşü [Larsen, 2008, s:87]

Yasufumi Kijima tarafından 1993'te tasarlanan Toyoson Duvar İşçiliği(Stonemason) Müzesi'nin iki büyük dairesel planlı mekânından biri olan çok amaçlı salon ve sergi salonunun çatı strüktürleri (Resim 2.18) çok merkezli mütekabil strüktür olarak tasarlanmıştır. Aynı kaynakta ayrıca Yoichi Kan'ın 1990'larda tasarladığı Yeni Çiftlik Evi'nin çatısında (Resim 2.19) tek merkezli bir mütekabil kirişleme kurgusundan da bahsedilmiştir[Larsen, 2008, s:111-112].

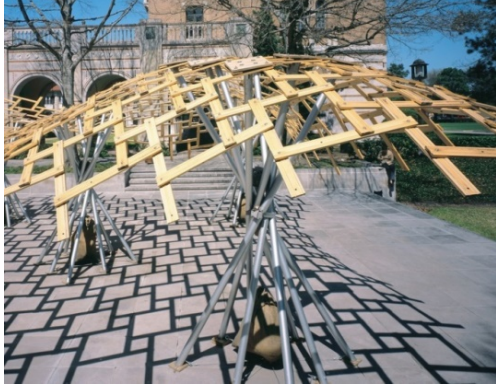


**Resim 2.18** : Stonemason Müzesi, çok amaçlı salonun çatı strüktürü (Photo: Keikaku-Inc.) [Larsen 2008, s:139]



**Resim 2.19** : Yoichi Kan'ın tasarımı olan Yeni Çiftlik Evinde çatı strüktürü (Fotoğraf: Youchi Kan)[Larsen 2008, s:111]

2002 yılında Shigeru Ban ve Cecil Balmond, Rice Üniversitesi kampüsü için, yaklaşık 11x11 metrelik alana yayılan içiçe geçmiş bambu levhalardan oluşan dalgalanan bir saçak tasarlamıştır. Shigeru-Ban Architects internet sayfasında, Rice Üniversitesinin bambu saçığının (Resim 2.20) daha büyük ölçekli ve kalıcı olan Forest Park, St Louis Pavyonu projesi (Resim 2.21) için bir prototip olarak çalışıldığı belirtilmektedir[URL-32].



**Resim 2.20** : Rice Üniversitesi bambu saçak [URL-33]



**Resim 2.21** : Forest Park St. Louis Pavyonu projesi [URL-33]

Chilton, Graham Brown tarafından tasarlanan Whisky Barrel (1990) (Resim 2.23) ve Ferryhill (1993-1994) evlerinde çatı strüktürü olarak tek merkezli mütekabil kirişleme sistemi kullanıldığını bildirir. Brown'ın 2008'de Newark yakınlarında Woodland Toplanma Merkezi'nin çatı strüktürü (Resim 2.22) için yaptığı tasarımda eş merkezli birbirine geçirilmiş iki ayrı kirişleme kurgusunun birlikte çalıştığı görülmektedir[Chilton, 2009, s:1878-1883].



**Resim 2.22** : Woodland Toplanma Merkezi çatısı [Chilton, 2009, s:1883]



**Resim 2.23** : Whisky Barrel Evi çatısının içten görünüşü [Chilton, 2009, s:1878]

Son 15 yılda pavyon tasarımlarında mütekabil strüktürler karşımıza çıkmaktadır. Alvaro Siza ve Eduardo Souto de Moura'nın Cecil Balmond ile birlikte

tasarladığı 2005 Serpentine Gallery Pavyonu'nda (Resim 2.24) Zollinger'in "Lamellandach" adını verdiği konstrüksiyon yöntemini benimsemiştir[URL-34].



**Resim 2.24 :** Alvaro Siza, 2005 Serpentine Gallery Pavyonu'nda kullandığı strüktür[URL-34]

Mütekabil strüktürlerin pavyon yapılarında strüktür olarak kullanılmasının bir başka örneği 2014'te Londra Olimpiyat Oyunları için Pavilion Architecture tarafından tasarlanan Kreod Pavilion'dur. Bölüm 5.3'te detaylı biçimde izah edilecek olan strüktürde(Resim 2.25), altıgen ve üçgenlerden oluşan bir mütekabil kirişleme kurgusu eğimli bir yüzey oluşturmaktadır[Larsen, 2014 s:11].



**Resim 2.25 :** Kreod Pavilion görünüşü(fotoğraf Ed Kingsford'a aittir)[URL-35]

Hiroshi Ambuichi ve Arup tarafından 2010'da Mount Rokko-Shidare Gözlemevi için, (Resim 2.26) yapıyı merkezden başlayarak çepeçevre saran biçimde bir mütakabil strüktür tasarlanmıştır. Strüktürde; birbirine kaynaklanmış 50mm çapındaki çelik boru kesitli profillerin altıgen ve üçgenlerle oluşturduğu kurguda boşluklar 15-20mm kalınlığında bambu çubuklardan oluşturulan başka kirişlemeler ile örülü biçimdedir[Larsen, 2014 s:9].



**Resim 2.26 :** Gözlemevinin görünüşü [URL-36]

Filistin Ceriko'da, AAU Anastas tarafından prototip olarak taş malzemeyle tasarlanan pavyonda (Resim 2.27) kirişler Abeille'nin düz tonoz kurgusundaki gibi eğimli yüzeyler oluşturacak biçimde kesilmiş ve dört yönlü bir mütakabil kirişleme kurgusuna göre bir araya gelerek kendi kendine ayakta durabilen bir strüktür oluşturmuşlardır.



**Resim 2.27 :** Filistin Ceriko'da yapılan çift eğrilikli tonoz biçimli mütakabil strüktür [URL-37]

John Chilton, Vito Bertin, Olivier Baverel, Messoud Saidani gibi akademisyenler mütakabil sistemlerle tasarım stratejileri ve strüktürlerin geliştirilmesi konusunda çalışmalar yapmaktadırlar. Larsen, tüm dünyaya yayılmış haldeki bu yapım sistemi ile çalışan herkesin kendi özgün dilleriyle katkıda bulduklarını belirtmekte ve “mütakabil sistemlerin kendi tarihindeki adım taşlarını şekillendirmekte olduklarını” eklemektedir[Larsen, 2008, s:18].

### 3. ÜST ÖRTÜ OLARAK MÜTEKABİL SİSTEMLER

Baverel, mekânsal strüktürleri 3 kategoriye ayırmıştır:

1. Mekânsal kafes sistemler; bu başlık ayırık elemanlardan oluşan uzay kafes sistemler gibi kafes strüktürleri kapsamaktadır.
2. Sürekli mekânsal sistemler, bu başlık kabuk, membran yada ana kiriş gibi elemanların olduğu strüktür örneklerini kapsamaktadır.
3. Biform<sup>53</sup> mekânsal strüktürler, bu başlık ayırık ve sürekli parçaların bir kombinasyonu olan kablolu membran sistemler gibi strüktür örneklerini kapsamaktadır. [Baverel, 2000, s:13]

Sayılan başlıklar arasından sürekli ve biform mekânsal sistemlerde strüktürü oluşturan ana eleman açıklık boyunca uzamaktadır. Bu durum “kısa kiriş örgüleriyle geniş açıklıklar geçme” prensibinin ele alındığı bu tezin konusu değildir. Mütekabil sistemler, mekânsal kafes sistemler grubuna girmektedir. Bu tip örgü strüktürlerin oluşturulmasına imkan tanıyan malzemeler ve yapım teknolojilerinin gelişimi bu bölümde incelenecektir.

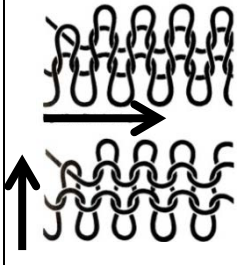
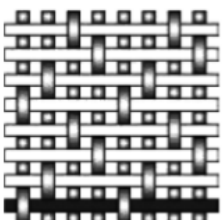
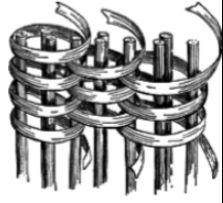
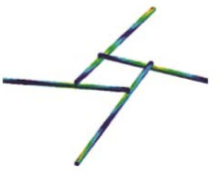
---

<sup>53</sup> Biform: İki şekilli[URL-60]

### 3.1 Malzeme Çeşitliliği

Örgü, dokuma gibi tekstile ait prensiplerin mimariye uyarlanması fikri yapım tekniklerinde yenilikçi arayışların önünü açmıştır. Baverel ve Larsen, Çizelge 3.1’de, örgü, dokuma kumaş, sepet işi ve mütekabil strüktürler gibi sistemleri, niteliklerine ve elemanların bükülmeye gösterdikleri dirence göre sınıflandırmışlardır[Baverel, Larsen s:281].

Çizelge 3.1. Örgü Strüktürler [Baverel, Larsen, s:282]

Tip	Örgü	Dokuma Kumaş	Sepet işi	Mütekabil Strüktürler
Nitelikler	Sürekli elemanlar komşularıyla bağlı haldedir	Farklı sürekli elemanlar birbirine dik veya açılı olarak geçirilir	Sürekli ve süreksiz elemanlar birbiriyle örülür	Süreksiz elemanlar birbiriyle örülür
Örnek				
Bükülme Direnci	Çok Düşük	Çok Düşük	Orta	Orta-Çok arası

Bu strüktürlerin neredeyse tamamı sabitleme olmadan sadece sürtünmeyle bir arada durmaktadır. Önerilen birinci tip, her bir elemanın yatay veya düşey komşusuna bağlı olduğu örgüdür[Baverel, Larsen, 2011, s:281]. Bir örgüde ilmekler yatay bir sırada dizilidir ve örgünün bir önceki sırasında karşılık gelen ilmeklerle bağlantılı haldedir. Bu her bir ilmeğin ayrı ayrı örgüye sabitlenmesi anlamına gelmektedir[Seiler-Baldinger s:24].

İkinci tip, saten, düz, fitilli gibi yıllardır bir çok değişik teknik geliştirilen dokuma kumaştır. Weinand ve Hudert, dokuma kumaş tekniğinde, en zayıf elemanın zaafiyet göstermesi durumunda bu elemanın yükünü komşuları taşıyacağı için strüktürün bütün olarak çökmesi tehlikesinin atlatılacağını ve bu prensibi kullanan strüktürlerin, geleneksel olanlara kıyasla daha yüksek güvenlik faktörüne sahip olacağını bildirmektedirler. Tekstil prensiplerinin yapı ölçeğine uyarlanması konusunda (Resim 3.1) Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne'ın ahşap konstrüksiyonlar laboratuvarı olan IBOIS'ta çalışmalar yapılmaktadır. Elemanların bükülmeye direnci dokuma prensibinde düşüktür fakat, IBIOS'ta yapılan çalışmalarda elemanlara örgüye imkan tanıyacak ve çökmeye mani olacak rijitlik kazandırılmıştır[Weinand, Hudert s:103].

Üçüncü tipte sepet örgüsü ele alınmıştır. Bu örneğin öncekilerle arasındaki ana fark, elemanların bükülmeye gösterdiği nispeten yüksek dirençtir. Shigeru Ban tarafından tasarlanan Metz'deki Pompidou Center (Resim 3.2) gibi ızgara kabuk (Gridshells) ve örgü desenleri bu kategoridedir[Baverel, Larsen s:281].



**Resim 3.1** : IBIOS'ta yapılan örgü strüktür [Weinand, Hudert, s:102]



**Resim 3.2** : Shigeru Ban, Centre Pompidou Metz [URL-38]

Tabloda belirtilen ilk üç tipin yapı ölçeğindeki yansıması sürekli elemanlarla olacaktır. Öte yandan mütekabil strüktürler, süreksiz mekânsal strüktürlerdir. Baverel ve Larsen, dördüncü tip olan müteabil kirişlemelerde, elemanların sert ve strüktürün tamamına nispetle kısa olma özelliğinin altını çizmişlerdir[Baverel, Larsen s:281].

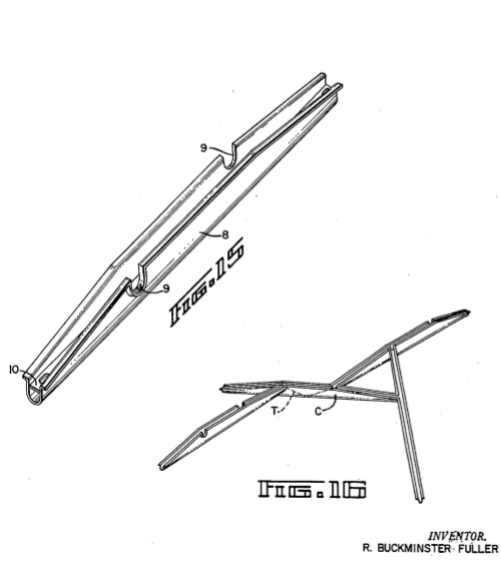
Mütekabil kirişleme kurguları, teoride, ahşap,çelik, betonarme gibi bütün temel yapı malzemelerinden üretilebilir. Larsen, bir çok mütekabil kirişleme kurgusunun genellikle 3-12 metre aralığındaki açıklıklarda uygulandığı için malzeme olarak ahşap veya lamine ahşabın tercih edildiğini bildirir. Ahşap ve bambu kullanımı günümüzde de 12 metreye kadar olan küçük ölçekli strüktürler için, bağlantı ve malzeme temini kolaylığı gibi sebeplerle devam etmektedir[Larsen, 2008 s:58].

Bambu kullanımına örnek olarak Bertin'in, 2000 yılında oluşturduğu 10 metre çapındaki kubbe maketi verilebilir. 1,5 m uzunluğunda ve 4 cm çapında bambu çubuklar kullanılmıştır. Resim 3.3'te görülen kubbe üçgen ve altıgenlerden oluşmaktadır ve elemanlar arasındaki sürtünmenin artırılması amacıyla plastik kelepçelerle bağlanmıştır[Bertin, 2012, s:64].



**Resim 3.3 :** Vito Bertin'in kubbe maketi [Larsen, 2008, s:34]

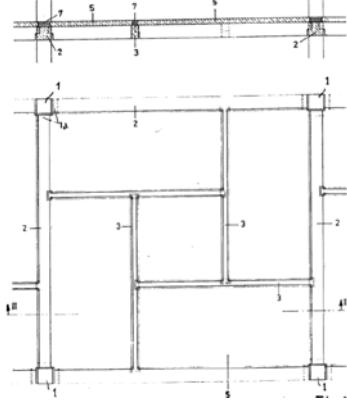
20. yy itibariyle, çelik, prekast beton gibi elemanların da mütakabil kirişleme kurgularında kullanıldığını görmek mümkündür. Çelik eleman kullanımında, elemanların yada bağlantıların tasarlanıp üretilmesi gerekir. Örneğin, Buckminster Fuller'in 1962'de patentini aldığı jeodezik kubbeyi oluşturan elemanların oluk biçimli çelik malzemeden (Şekil 3.1) üretilmesi öngörülmüştür[ABD Pantenti No:3063521]. Bu birleşim biçimi Resim 3.4'teki gibi ilave bir bağlantı elemanı kullanımı ihtiyacını ortadan kaldırmıştır.



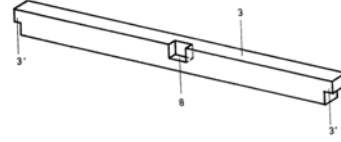
**Şekil 3.1 :** Gerilim bütünlüğü kompleksini oluşturan birbirine bağlı kollarin (Görsel no. 15) bir araya gelişi perspektif görünüm (Görsel no. 16) [ABD Pantenti No:3063521]

**Resim 3.4 :** İskele borularından yapılmış bir mütakabil sistem modülünde, bağlantı elemanı olarak kelepçe kullanılmıştır [Baverel, Nooshin, 2007 s:282]

Erwin Walle, Sigurd Prinz tarafından 17 Temmuz 1975 tarihinde alınmış patentte herbiri bir diğeri üzerine oturan prekast kirişlerin betonarme döşeme kirişlemesi oluşturulması tariflenmektedir. Larsen, prekast betonun üç boyutlu mütakabil kirişleme sistemlerinin karmaşık yapısına uygun olmayışı ve özgül ağırlığının yüksek olması dolayısıyla tercih edilmediğini bildirmektedir[Larsen, 2008 s:58].



**Şekil 3.2 :** Betonarme döşemenin plan ve kesiti [Alman Pantenti No:2152580]



**Şekil 3.3 :** Kirişlemeyi oluşturan prekast kirişin perspektif görünüşü [Alman Pantenti No:2152580]

Pizzigoni, Şangay 2010 Dünya Fuarı İtalyan Pavyonu önerisi olarak prekast beton elemanlar kullanılan bir müteakabil kirişleme sistemi (Resim 3.5 ve Resim 3.6) tasarlamıştır. Gerçek ölçekli model çelik donatı takviyeli, yüksek basınç dayanımlı beton kullanılarak, yapım ve söküme imkan verecek şekilde uygun boyutlarda ve ağırlıkta üretilmiştir. Pizzigoni, aynalı S biçimli elemanların, üstüste gelen kirişlerde, kesme kuvvetlerine karşı direnci düşürecek olan çentikleri azaltma ihtiyacı dolayısıyla ortaya çıktığını bildirmektedir[Pizzigoni, 2009, 1901].



**Resim 3.5 :** Pizzigoni'nin önerisine ait maket [Pizzigoni, 2009, s:1896]



**Resim 3.6 :** Üç elemandan oluşan modül [Pizzigoni, 2009, s:1901]

Pantazis ve Gerber, mütakabil strüktür prensibi ile yaptıkları pergolada, iki elemandan oluşan bir temel modül geliştirerek, geleneksel örneklerin dışına çıkan malzeme ve modül imkanlarını sorgulamışlardır. Geliştirilen modülde, geleneksel doğrusal elemanlar yerine, birbirini taşıyan eğimli paneller kullanılmıştır. Buradaki amacın yapısal performansı artırmak olduğu kadar daha girift şekilde gölgelenmiş bir ortam için üç boyut kazandırılmış boşluklu bir kabuk oluşturmak olduğu belirtilmiştir. Bu elemanlar arasında özel açılarla biraraya gelen çentikli bağlantı sistemi mevcuttur. Malzeme olarak bükülmüş kontrplak tercih edilmiştir[Pantazis, Gerber s:8].

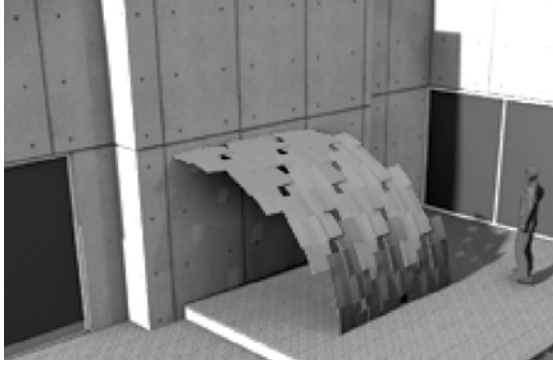


**Resim 3.7 :** Modülün detayı [Pantazis, Gerber s:11]

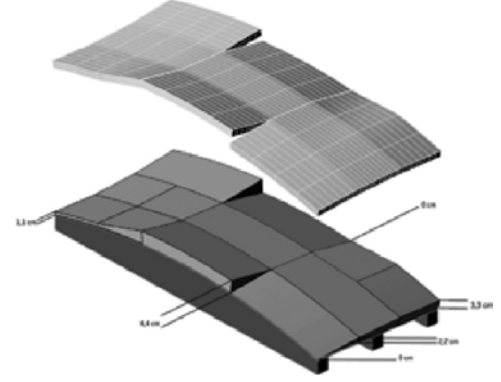


**Resim 3.8 :** Strüktürün görünüşü [Pantazis, Gerber s:10]

2011 yılı Nisan ayında *Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau*'da Grenoble Üniversitesi Mimarlık Bölümü öğrencileri ile yürütülen atölye çalışmasında sandviç paneller ile bir mütakabil strüktür oluşturmak amaçlanmıştır. Resim 3.9'da atölye çalışmasında önerilen strüktür görülmektedir. Modülü oluşturan levhaların bağlantısı için yarıklar açılması (Şekil 3.5) planlanmıştır[Baverel, Boulais s:363].

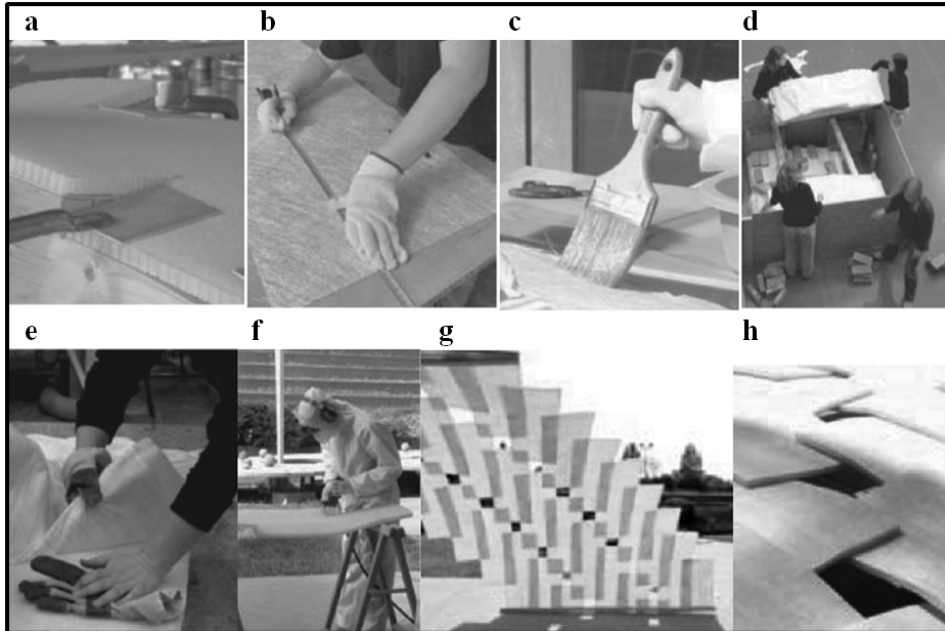


**Şekil 3.4 :** Atölyeye katılan öğrencilerin strüktür önerisi [Baverel, Boulais s:363]



**Şekil 3.5 :** Modülü oluşturan levhalar [Baverel, Boulais s:364]

Panellerin hazırlanmasında (Resim 3.9a-h); dış yüzeyde cam lifli polimer; çekirdekte ise gözenekli termoplastik kullanılmıştır. Çekirdekte kullanılan termoplastik, kalıpta şekillendirilmiş ve bir tür kompozit malzeme oluşturma tekniği kullanılarak cam lifli polimer uygulanmıştır[Baverel, Boulais s:363].



**Resim 3.9 :** (a)Termoplastiğin kesilmesi, (b)cam lifli polimerin kesilmesi, (c)Termoset sürülmesi, (d) kalıbın fırınlanması, (e) koruyucu kılıfın sökülmesi, (f) yüzeyde kumlama yapılması, (g) strüktürün görünüşü, (h) bağlantıların görünüşü [Baverel, Boulais s:364]

### 3.2 Yapım Teknojilerinin Gelişimi

Pugnale ve Sassone, “mütekabil strüktürler” konusunda yapılan çalışmaları ondört alt başlıkta toplamıştır. Bunlar şu şekildedir:

1. Mekânsal mütekabil strüktürlerin biçim ve geometrisi;
2. Çokyüzlü düzenlemeler;
3. Bu tip strüktürlerin biçim geliştirmeye yönelik süreçlerinde yazılım kullanımı ve
4. Ahşap elemanların hızlı prototipleştirilmesiyle birlikte ele alınması;
5. Bağlantı elemanlarının tasarımı ve birleşimi;
6. Strüktürel davranışın analizi;
7. Mütekabil sistemlerin hareket potansiyeli hakkında çalışmalar;
8. Malzeme ve konstrüksiyon için kesitlerin incelenmesi;
9. Düzlemsel elemanların kullanımı;
10. Projeler ve prototiplerin incelenmesi/tartışılması;
11. Mütekabil strüktürlerin öğretilmesi;
12. Mütekabil strüktürlerin tarihçesi;
13. Sanat ve heykel;
14. Leonardo'nun kirişleme kurgularını temel alan mütekabil strüktürler[Pugnale, Sassone, 2014, s:19].

#### 3.2.1 Mekânsal ve Çokyüzlü Kurguların Geliştirilmesi

Yapım teknolojilerinin gelişimi bağlamında, öncelikle yukarıda sayılan ilk iki başlık olan olarak “Mekânsal Strüktürlerin Biçim ve Geometrisi” ile “Çokyüzlü Düzenlemeler” birlikte ele alınacaktır.

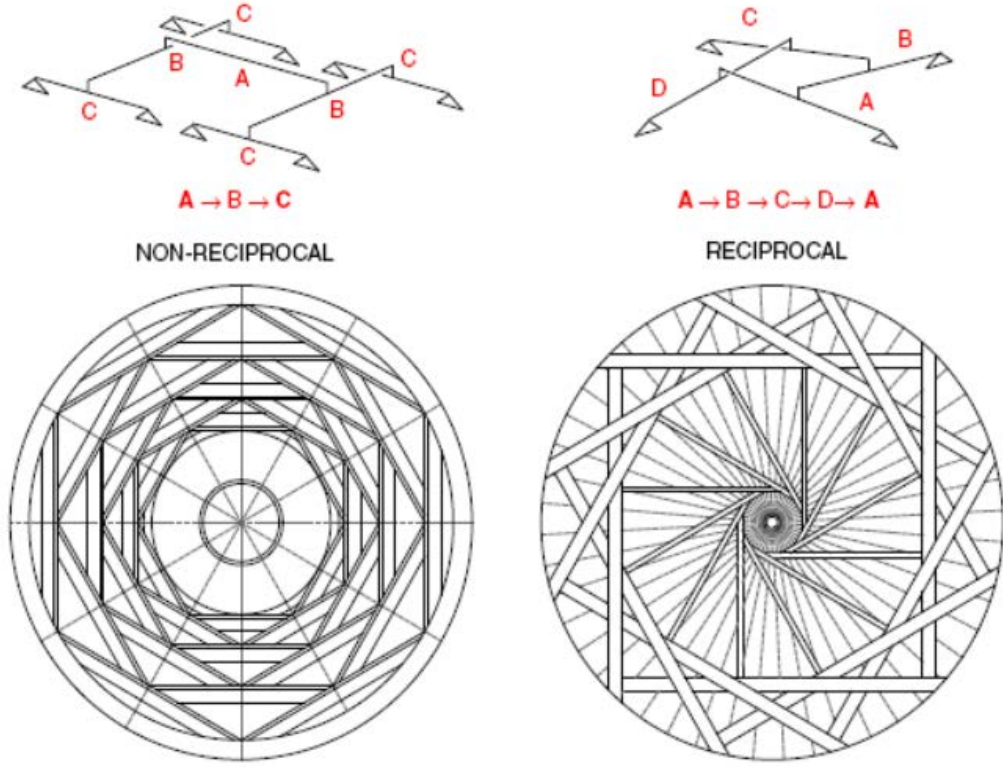
Yapı tarihinde mekânsal mütakabil kirişleme kurguları ile benzerlik gösteren ilk yapım yöntemleri bindirmeli kemer, tonozlar gibi yığıma elemanlardır. Bindirmeli kurguların tuğla ve taş örnekleri yapı tarihinin en erken dönemlerinde görülür. (Bkz.Şekil 2.4, 2.8, 2.9 ve Resim 2.3) Ahşap elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen bindirmeli örnekler, Çin (Bkz. s:27) ve Anadolu mimarisinde 12 ve 13.yüzyıl dolaylarında (Bkz. s:24, Çizelge 2.3) karşımıza çıkmaktadır.

Pugnale ve Sassone bir çok tarihi yapıda karşımıza çıkan bindirme prensibini, tek merkezli bir mütakabil strüktür prensibi ile gösterdiği benzerliğe rağmen şu iki temel strüktür davranışı sebebiyle birbirinden ayırmaktadır:

1. Bir diğer elemanı taşıma ve bir diğer eleman tarafından taşınma görevi, üstüste binmekten ayrılmalıdır. Örneğin, bindirmeli kirişlerde bağlantılar uçlardadır ve yük orta noktalara etki eder. Mütakabil elemanlarda ise, yük ve bağlantıların her ikisi de kirişlerin uçlarında olduğundan, bu noktada fonksiyonlar üstüste binmekte; taşıyıcı olma ve taşınma fonksiyonları aynı noktada meydana gelmektedir. Bu özellik aynı zamanda sadece kirişler ve iki boyutlu elemanların bir mütakabil strüktür oluşturabileceği anlamına gelir. Kirişlerle eğilme ve kesme yoluyla yükler aktarılır.

2. Bütün elemanlar taşıdığı bir diğer eleman tarafından taşınmalıdır. Yukarıda belirtildiği gibi, kusursuz biçimde simetrik bir ilişki mütakabil bir strüktürden ayrılmalıdır. Şekil 3.6'da verilen ilk diyagrama bakıldığında; A kirişi olası bir yükü alacak ilk kiriştir, C kirişi zemine basmakta ve bütün kirişlerin yükünü almaktadır ; B kirişi ise aynı zamanda taşınan ve A kirişini taşıyan kiriştir. Bu sistem mütakabil bir sistem değildir, çünkü taşıyan ve taşınanlar aynı değildir: C ve B kirişleri ayakta dururken, B kirişi, A yerine C kirişi tarafından taşınmaktadır. Yani bindirmeli strüktürler, prensipte “kapalı bir devre oluşturmak” sorusuna verdikleri cevaptan kaynaklanan farklılıklara sahiptir[Pugnale, Sassone, s:22].

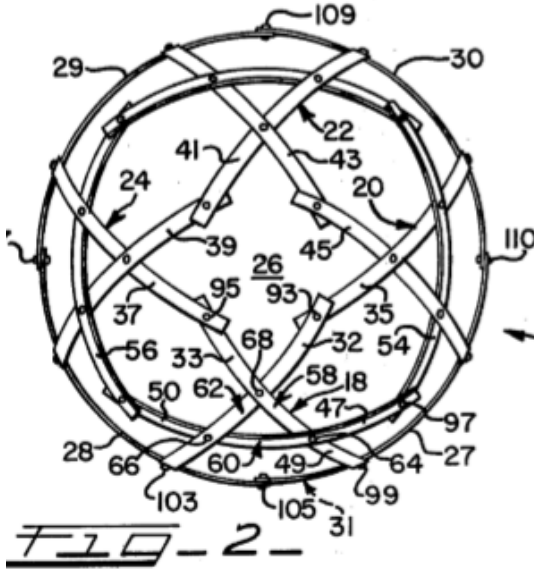
Şekil 3.4'te görülen bindirmeli kurgu ile mütakabil kirişleme kurgusunun kıyaslandığı diyagramda bindirmeli kiriş kurgusu için Guarini'nin Sindone Şapeli (Bkz. s:25, Çizelge 2.3) ile Ishii'nin Kukla Tyatrosu' nun sergi yapısının çatı kirişlemesi (Resim 2.14) örnek alınmıştır[Pugnale, Sassone s:22].



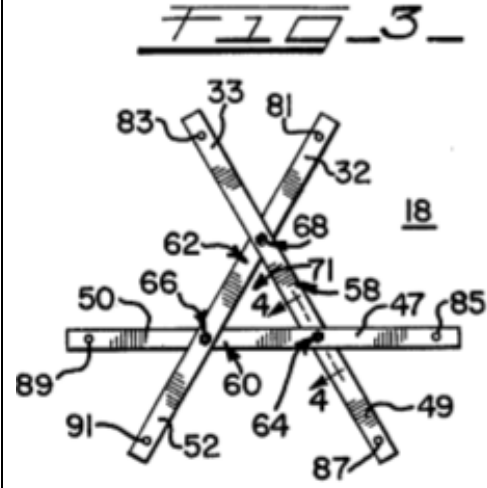
**Şekil 3.6 :** Bindirmeli kirişler şeması ile mütekabil kirişleme kurgularının kıyaslanması. Mütekabil kirişleme asimetric olduğu halde, bindirmeli kirişlemenin simetric olduğu görülecektir. Çizimler şematik ve ölçeksizdir[Pugnale, Sassone s:22].

Mütekabil strüktürler, iç mekâna katkı sağlayacak şekilde üç boyutlu ve mekânsal kirişlemeler olarak kurgulanabilirler. Bu strüktürlerin 20. yüzyıl itibariyle yapılarda kullanılmasına ilişkin örnekler bir önceki bölümde(Bkz. s:37-46) verilmiştir.

Üç boyutlu biçimlerin mütekabil kirişleme kurguları ile ele alınması konusunda Melvin Crooks'un çalışmaları mevcuttur. 8 Ocak 1980 tarihli patentte, "A şekilli" bir grup temel yapı elemanını içeren birbirine bağlı ve çeşitli biçimlerde genel bir yapı iskeleti oluşturmaya elverişli bir strüktür modeli (Şekil 3.7 ve 3.8) icad etmiştir[ABD Patenti No:4182086].



**Şekil 3.7 :** Dış kaplaması olmayan A biçimli temel yapı elemanlarından oluşan strüktürün planı [ABD Pantenti No:4182086]

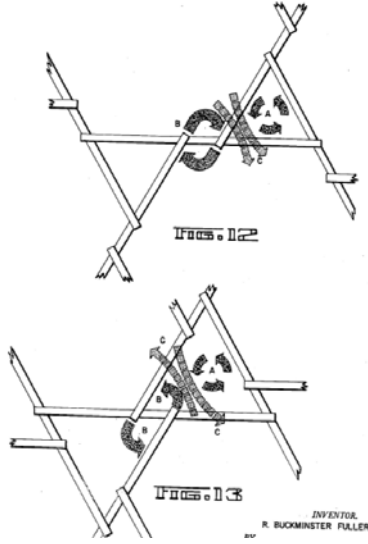


**Şekil 3.8 :** A biçimli temel yapı elemanı [ABD Pantenti No:4182086]

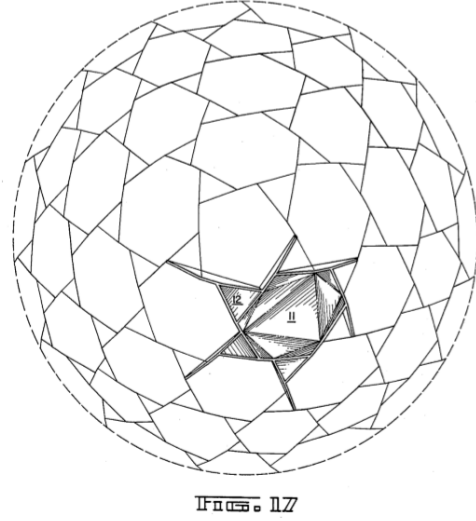
Temelde, strüktürü oluşturan modülün “A biçimli” olarak tanımlanan, açıklığın tamamına nispetle kısa kalan elemanlardan oluştuğu görülmektedir. Günümüzde bu icat; kimi araştırmacılar tarafından, bağlantı noktaları dönelir şekilde kurgulanarak hareketli strüktürler tasarlamaya yönelik çalışmalara kılavuz olmaktadır.

Mütekabil kirişlemeleri oluşturan elemanların biçim özelliklerinin düzenlenmesiyle üç boyutlu kurgular ortaya çıkarılabilir. 14 Ekim 1980 tarihli patentte Daniel Gat’ın SIGMA (Self-supporting Interlocking Grids for Multiple Applications) adını verdiği sistem, (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10) “çatı ve döşeme kirişlemelerinde kullanılmak üzere nitelikli işçilik gerektirmeyen ve standardize edilebilen, tektip prefabrike yapı elemanları” şeklinde açıklanmıştır[ABD Pantenti No:4227358].





**Şekil 3.11 :** Gerilim bütünlüğü kollarının bitişlerinde basıncın oluşturduğu dönme eğilimini gösteren diyagramlar [ABD Patenti No:3063521]



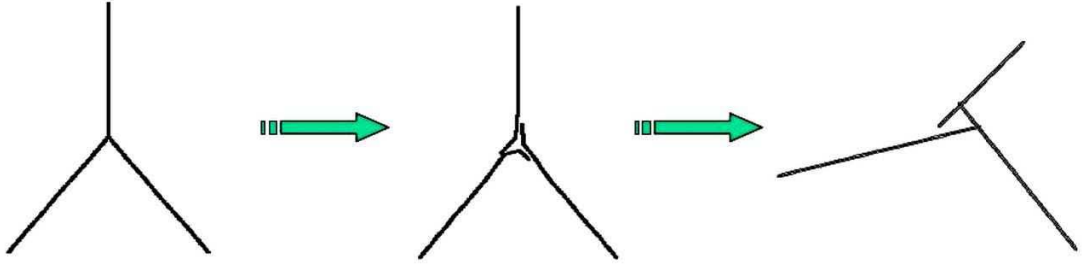
**Şekil 3.12 :** 270 çubuktan üretilen jeodezik kubbenin plan görünüşü [ABD Patenti No:3063521]

Brocato ve Mondardini, Kenner'e<sup>54</sup> göre bir jeodezik kürenin, bir çokyüzlünün kenarlarının, köşelerin üzerinde bulunduğu (dıştan çevreleyen) küre yüzeyine yansıtılmasıyla ortaya çıktığını bildirmektedir. Aynı kaynakta, bir kürenin içine çizilen düzgün bir çokyüzlüden başlayarak; çokyüzlünün kenarları merkezinden küreye doğru yansıtıldığında küresel bir ağ elde edilebildiği ve çok yüzlünün yüzeyinde yapılacak üçgenleme ile yüzey sayısı artırılarak, daha sıkı bir ağ elde edilerek daha pürüzsüz bir kürenin ortaya çıkacağı belirtilmiştir [Brocato, Mondardini, s:1787].

Baverel ve Douthe, çokyüzlü geometrik elemanların köşelerini “Dynamic Relaxation” adı verilen metotla düzgün çokgenlere dönüştürerek çok merkezli mütakabil kirişleme kurgusu ile bu düzenlemeleri eşleştirmişlerdir [Douthe, Baverel s:1299]. Bu metotla dönüşüm için farazi bir mekanik davranış kullanılmıştır:

<sup>54</sup> Kenner, H. 1976. Geodesic math and how to use it. University of California Press, Berkeley.

Başlangıçta, aynı noktada biraraya gelen birçok kirişten, bir mütakabil sistem modülü üretilecek üzere: kirişlerin uçları komşu olan kirişe, Şekil 3.13'te görüldüğü gibi istenen bağlantı mesafesi ile bağlanana kadar bükülür. Bu yeni düzenlemede statik denge şu adımdan sonra gerçekleşecektir; başlangıçta doğrusal olan çubukların içinde oluşan gerilim, strüktürün salınım yapmasına izin verildiğinde yapay bir sönümlenme gerçekleşinceye kadar hareket edecektir, böylece hareket enerjisi dağılacak ve statik dengeye ulaşılabacaktır[Douthe, Baverel s:1301].



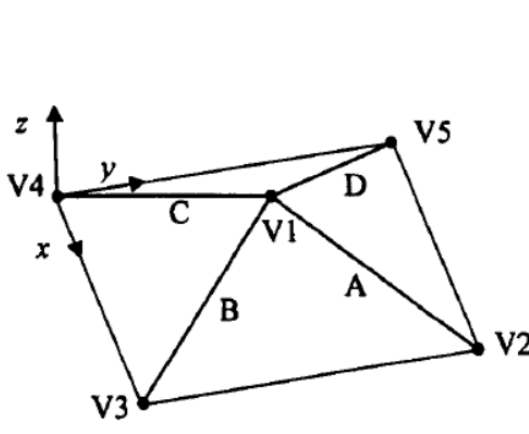
**Şekil 3.13 :** Temel ucuca birleşimin “dynamic relaxation” metodu ile mütakabil sistem modülüne dönüştürülmesi[Douthe, Baverel s:1301]



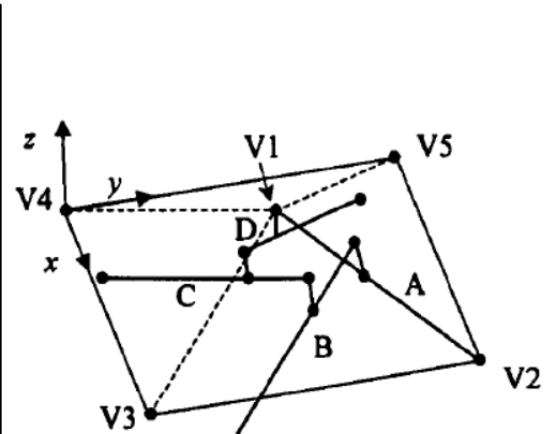
**Resim 3.10 :** Baverel'in yirmiyüzlü rijit mütakabil strüktürü [Douthe, Baverel s:1298]

Baverel, doktora tezinde, analitik geometri kullanılarak düzenli ve yarı düzenli çokyüzlülerin mütakabil strüktürlere dönüştürülmesini (Resim 3.10) “Öteleme”, “Döndürme” ve “Genişletilmiş Öteleme” olarak üç ayrı başlık altında sorgulamıştır [Baverel, 2000, s:42].

Öteleme metoduyla, Şekil 3.14’de temel bir köşe birleşimini oluşturan elemanlar Şekil 3.15’teki mütakabil sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 3.14 : Kare tabanlı piramidin perspektif görünüşü[Baverel, 2000 s:48]



Şekil 3.15 : Final düzenleme[Baverel, 2000 s:51]

Şekil 3.14’te birleşimin Şekil 3.15’teki duruma gelmesi için iki aşamadan geçmesi gerekir. İlk aşamada, A elemanı sabit kalıp; B, C ve D elemanları, orijinal pozisyonlarına paralel olarak bağlantı mesafesi miktarınca hareket ettirilmiştir. İkinci aşamada ise, binili birleşimde önem kazanacak olan, elemanın kesitinden kaynaklanacak olan “eksenler arası fark” değeri işlenmiştir. Bu aşamalardan sonra, Şekil 3.15’te görülen her bir elemanın yer değiştirmesi formülize edilebilir. Böylece oluşan mütakabil strüktürün koordinatları belirlenmiş olur[Baverel, 2000 s:44].

Baverel, Döndürme metodunu ise bir düzgün onikiyüzlü üzerinde uygulamalı olarak açıklayabilmek için, çokyüzlülere has bazı özellikleri şu şekilde açıklamıştır;

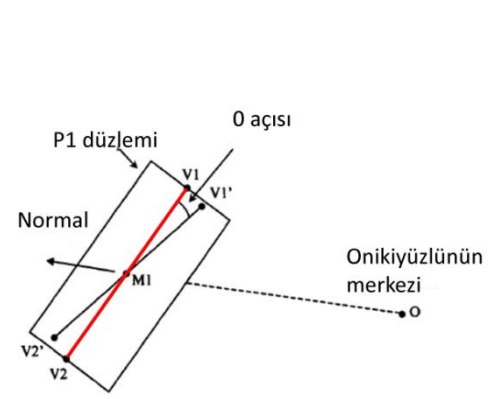
1. Bir çokyüzlünün bütün köşeleri onu dıştan çevreleyen kürenin üzerindedir. Bu kürenin yarıçapı  $R_c$  olarak adlandırılmıştır.(Şekil 3.16)

2. Bir çokyüzlünün kenarlarının orta noktaları onu içten çevreleyen küreye teğettir. Bu kürenin yarıçapı da  $R_i$  olarak adlandırılmıştır. (Şekil 3.16)

Şekil 3.16'da A elemanının içteki küreye teğet olduğu görülmektedir. Şekil 3.14'te A elemanını içinde bulandıran P1 düzlemini gösterilmiştir. P1 düzleminin normalini gösteren vektörün doğrultusu onikiyüzlünün merkezinden A elemanının orta noktası olan M1 noktasından geçmektedir [Baverel, 2000, s:67-68].



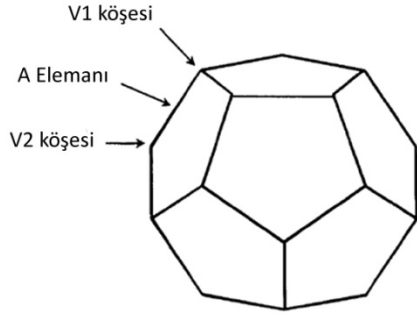
Şekil 3.16 : İçten ve dıştan çevreleyen kürelerin çokyüzlünün bir kenarı ile ilişkisi [Baverel, 2000 s:67]



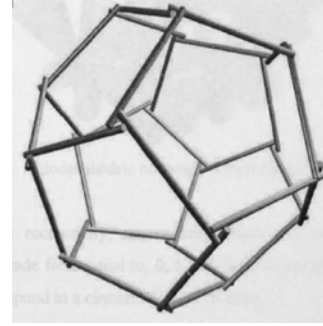
Şekil 3.17 : A elemanının P1 düzleminde M1 noktası etrafında  $\theta$  açısıyla döndürülmesini gösteren şekil [Baverel, 2000 s:68]

Döndürme metodunu kullanmak için A elemanı P1 düzleminde M1 noktası etrafında  $\theta$  açısıyla döndürülmüştür. Aynı süreç V1 köşesine bağlı diğer iki elemana da uygulanmıştır [Baverel, 2000 s:69].

V1 köşesi için tarif edilen prosedür, çokyüzlünün bütün köşelerine uygulandığında bir mütekabil strüktür elde edilmiş olur. Şekil 3.19' deki örneği karşılayan mütekabil strüktürde  $\theta$  açısı 5 derecedir; bütün elemanlar aynı uzunlukta, aynı birleşme mesafesiyle biraraya gelmiş ve üstüste geldiklerindeki eksenler arası fark aynı olacak şekilde eşit kalınlıktadır [Baverel, 2000 s:74].



**Şekil 3.18 :** Düzgün bir onikiyüzlünün görünüşü[Baverel, 2000, s:67]

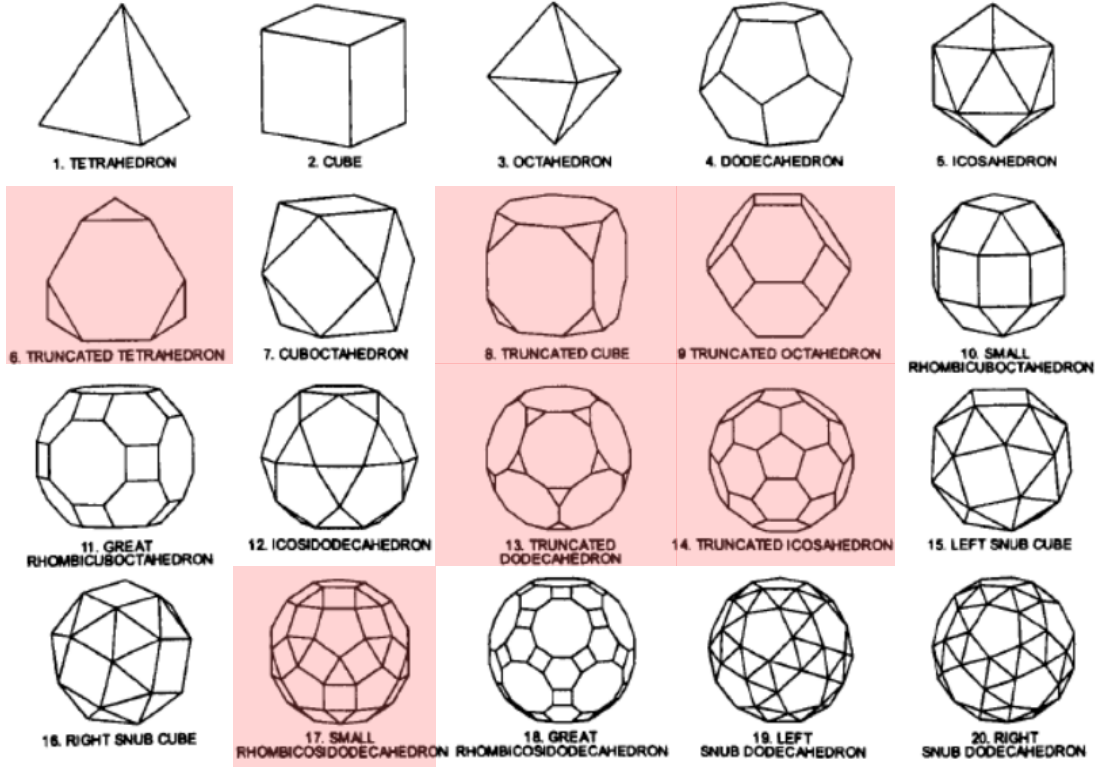


**Şekil 3.19 :** Final düzenleme[Baverel, 2000, s:74]

Baverel, yarı düzenli çokyüzlülerin mütekabil strüktürlere dönüştürülme potansiyelini de incelemiştir. Yarı düzenli çokyüzlülerin, birbirine eşit uzunlukta kenarları ve düzgün çokgenlerden oluşan yüzleri vardır. Bu çokgenler birbirinin aynı tür çokgen olmak zorunda değildir. Kepler'in<sup>55</sup> 1619 tarihli *Harmonices Mundi* adlı eserinde Arşimet'e<sup>56</sup> ait olarak anılan onbeş yarı düzenli çokyüzlü tarif edilmiştir[Baverel, 2000, s:93].

<sup>55</sup> Kepler:1571-1630 yılları arasında yaşamış Alman fizikçi[URL-50]

<sup>56</sup> Arşimet M.Ö.3.yüzyılda yaşamış Yunan matematikçi[URL-51]

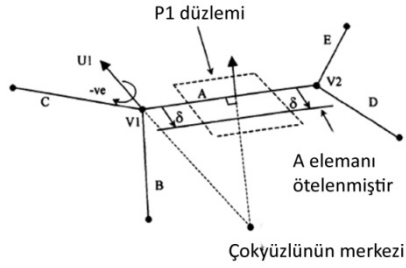


Şekil 3.20 : İlk sırada 5 düzgün çokyüzlü; ikinci sıradan sona kadar Arşimet' e ait 15 çokyüzlü gösterilmiştir [Baverel, 2000 s:93]

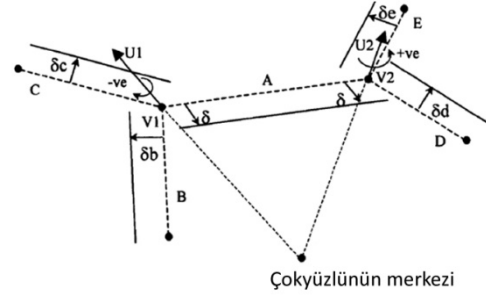
Baverel, doğrudan bir yöntem ile bu yarı-düzenli çokyüzlülerin sadece altısının mütekabil strüktür olabileceğini söylemiştir. Bunlar; köşeleri kesik dörtyüzlü (6), köşeleri kesik küp (8), köşeleri kesik sekiz yüzlü (9), köşeleri kesik oniki yüzlü (13), köşeleri kesik yirmi yüzlü (14) ve rhombicosidodecahedron<sup>57</sup> (17) [Baverel, 2000 s:93].

Baverel, Genişletilmiş Öteleme metodunda ise Şekil 3.21'teki A elemanın çokyüzlü bir düzenlemenin kenarı olduğunu ve P1 düzleminin döndürme metodundaki aynı özelliklere sahip olduğunu varsayarak; düzenlemeyi bir mütekabil strüktüre dönüştürmenin aşağıdaki şekilde olduğunu bildirmiştir.

<sup>57</sup> Rhombicosadodecahedron:30 kare, 12 beşgen, 20 üçgenden oluşan yarı düzgün çokyüzlü[URL-52]



Şekil 3.21 : Temel birleşim [Baverel, 2000 s:123]



Şekil 3.22 : Elemanların yer değiştirmesi [Baverel, 2000 s:124]

Şekil 3.22’de A elemanının  $\delta$  ile gösterilen miktarda yerdeğiştirdiği kabul edilmiştir.  $U1$  vektörünün, çokyüzlünün merkezinden gelerek  $V1$  köşesinden geçtiğini düşünelim. Öteleme miktarı olan  $\delta$ ’nın, A elemanını  $U1$  etrafında saat yönünün aksi yönde döndürerek Şekil 3.19’daki pozisyona getirmesi gerekmektedir. B, C, D ve E elemanları da aynı şekilde ötelenmelidir. B ve C elemanlarının ötelenmesi  $U1$  etrafında dönme oluşturacak şekilde A elemanının dönmesine uygun biçimde olmalıdır. Bu biçim, mevcut örnekte saat yönündedir. Öteleme miktarı, her bir eleman için dönmenin eşit tutulabilmesi adına değişken olabilir[Baverel, 2000 s:123].

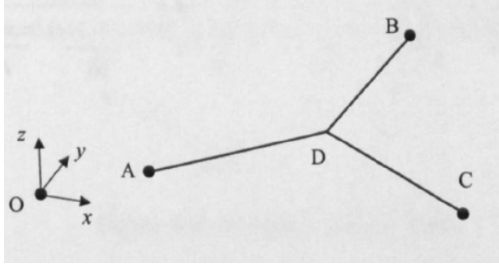
Elemanların temel birleşim biçiminden mütakabil sistem modülüne bu methodla dönüştürülmesinde kenarların her iki ucunda bulunan mütakabil sistem modüllerinde biniler saat yönü veya saat yönünün aksi yönde olacaktır. Bu durum bu yöntemi kullanmak için gerekli bir ön koşulu ortaya çıkarır. Saat yönündeki binilerin sayısı ile saat yönünün tersi yöndeki binilerin sayısı eşit olmalıdır[Baverel, 2000 s:124].

### 3.2.2 Tasarım ve Üretim Teknolojilerinin Geliştirilmesi

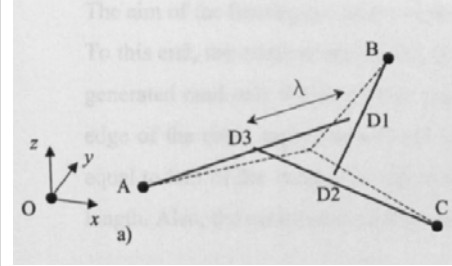
Bir düzlemin veya eğrilikli bir yüzeyin düzgün çokgenlerle bölümlendirilmesi mümkündür. Grünbaum ve Shephard, bir düzlemi boşluk ve çakışma olmaksızın kaplayan çokgen grupları oluşturulmasına öncülük eden çalışmaların Kepler

tarafından yapıldığını bildirmektedir. Aynı kaynakta “kenar kenara” yani ayırık, tek ortak noktası köşe noktalar veya birer kenar olan düzgün çokgenlerden oluşturulan mozaiklemelerin tarih öncesi çağlardan beri karşımıza çıktığı bildirilmektedir[Grünbaum, Shephard s:228]. Fakat mütekabil kirişleme sistemleri, elemanların birleşimlerinin köşe noktalarda değil; bilakis çiftler halinde bir diğerrinin üzerinde dayalı halde olduğu yapım sistemleridir. Bu süreç bir çok geometrik zorluğa neden olmaktadır.

Çeşitli yöntemlerle ucuca birleşimleri mütekabil strüktürlere dönüştürme çalışmaları incelenen Baverel, Nooshin ile yaptığı çalışmasında genetik algoritmaya dayalı bir diğerr yöntemün temel birleşimleri mütekabil kirişleme kurgularına dönüştürmeye uygun olduğunu belirtmiştir[Baverel, Nooshin, Kuriowa, 2004 s:101].



Şekil 3.23 : Temel ucuca birleşim [Baverel, 2000 s:167]

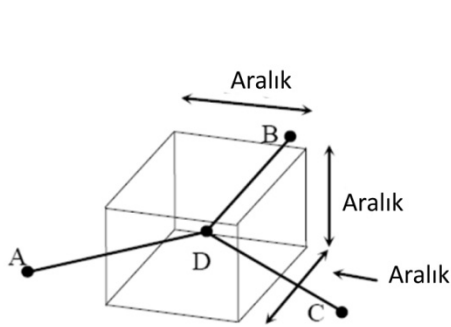


Şekil 3.24 : Birleşimin mütekabil sistem modülüne dönüştürülmesi [Baverel, 2000 s:167]

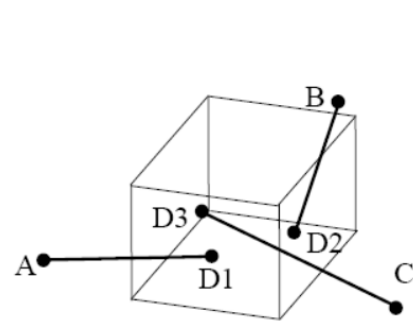
Şekil 3.23'te aynı uzunluktaki elemanlardan oluşan ucuca birleşmiş bu elemanlar topluluğu, A, B ve C noktaları sabit kalacak şekilde Şekil 3.24'teki mütekabil sistem modülüne dönüştürülmüştür. Yeni durumda D noktası, D1, D2 ve D3 noktaları olarak; AD, BD ve CD elemanları AD1, BD2 ve CD3 elemanları olarak değişecektir. Şekil 3.24'teki üç elemanın  $\lambda$  ile ifade edilen bağlantı boyutları birbirine eşittir[Baverel, 2000, s:167].

Yeni durumda oluşacak olan D1,D2 ve D3 noktalarının koordinatları genetik algoritma yöntemi süreci için birer gen ve bunların A, B ve C noktalarının koordinatları ile oluşturdukları sıralama birer kromozom olarak düşünülecektir. Bu yöntemde temel birleşimdeki D noktasını merkez alan kiriş boyunun yarısı ile

bağlantı mesafesi toplamındaki kenar uzunluğuna sahip en küçük küp hacmi (Şekil 3.25) belirlenerek aralık daraltılacaktır. Başlangıçta bu aralıkta rasgele belirlenen  $D_1, D_2$  ve  $D_3$  koordinatları (Şekil 3.26) için mümkün olan bütün ihtimallerin bir gen havuzunda toplandığı varsayılır. Kirişlerin dönüşümden sonraki boylarının eşit,  $A, B$  ve  $C$  noktalarının koordinatlarının sabit,  $D_1, D_2$  ve  $D_3$ 'ün  $D$  noktasını merkez alan bir üçgen oluşturacak olması gibi parametreler, gen havuzundan doğru genin seçilerek kromozomun oluşturulmasında rol alacaktır [Baverel, Nooshin, Kuriowa, 2004 s:102].

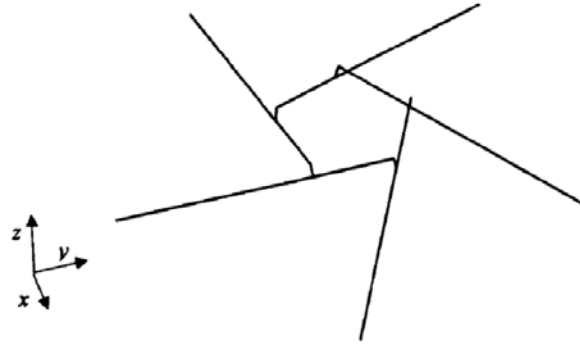
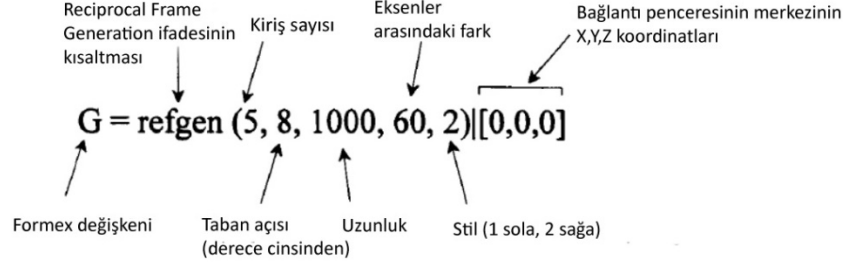


**Şekil 3.25 :** Belirlenen aralıkta kirişlerin başlangıç durumu [Baverel, Nooshin, Kuriowa, 2004 s:102]



**Şekil 3.26 :**  $D_1, D_2$  ve  $D_3$  noktalarının aralık içinde rasgele seçilmesiyle oluşan ilk durum [Baverel, Nooshin, Kuriowa 2004 s:102]

Sonraki adımlarda, biraraya gelen kirişlerin eksenlerarası fark değeri, taban açısı ve modülün sola yada sağa doğru olması gibi parametrelerin belirlenmesiyle bir mütekabil sistem modülü oluşacaktır. Baverel mütekabil sistem modüllerinin özelliklerini refgen adını verdiği bir fonksiyonda biraraya getirerek matematiksel verileri görselleştiren bir yazılımda standart fonksiyon olarak kullanmış ve strüktürlerin bitmiş görüntülerini elde etmiştir.

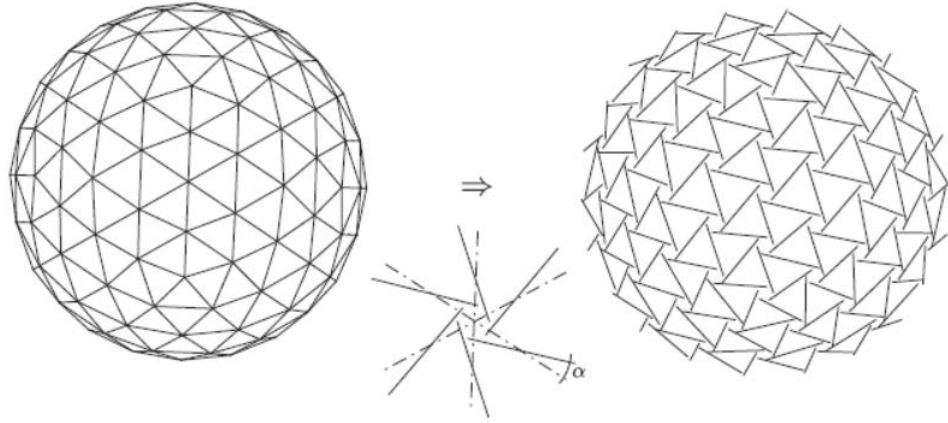


**Şekil 3.27** : Örnek formülde verilen değerlere göre Formian tarafından üretilen strüktür [Baverel, 2000 s:52]

Formüldeki değerlere göre, 5 kirişli, taban açısı 8 derece, her bir kirişin uzunluğu 1000 birim ve üstüste binen kirişlerin eksenleri arasındaki fark değeri 60 birim değerleri standart fonksiyon olarak girildiğinde Şekil 3.27'deki strüktür ortaya çıkmıştır[Baverel, 2000 s:52].

Popovic, 1996'da sunduğu doktora tezi çalışmaları kapsamında, AutoCAD programında kullanıcının kurguladığı müteakabil kirişlemenin üç boyutlu görünüşünü otomatik olarak çıkararak bir AutoLISP geliştirildiğini bildirmektedir. Kiriş sayısı, çemberin (bağlantı penceresinin) merkezi, iç çemberin (bağlantı penceresini çevreleyen) yarıçapı, kirişin toplam yüksekliği, ve kiriş boyutları gibi komut istemleriyle çalışan bu AutoLISP' in tek merkezli temel kirişleme kurgularına yönelik olduğu anlaşılmaktadır ve üç boyutlu parametrik tasarıma yönelik geliştirilen yazılımların yaygınlaşmasından sonra geliştirilmemiştir[Popovic, s:180].

Brocato ve Mondardini Abeille'nin 1699 tarihli "düz tonoz" buluşunun (Bkz. s:32) yuvarlak bir kubbeye uyarlanmasını incelemişlerdir. Geliştirdikleri prosedür sayesinde, tasarımcı tarafından belirlenen az sayıda geometrik parametre ile, bitmiş tonoz görüntüsü, kesim ve taşların düzeni için gerekli tüm bilgiler Wolfram Mathematica version 5.0<sup>58</sup> programıyla otomatik olarak üretilebilmektedir[Brocato, Mondardini s:1787].

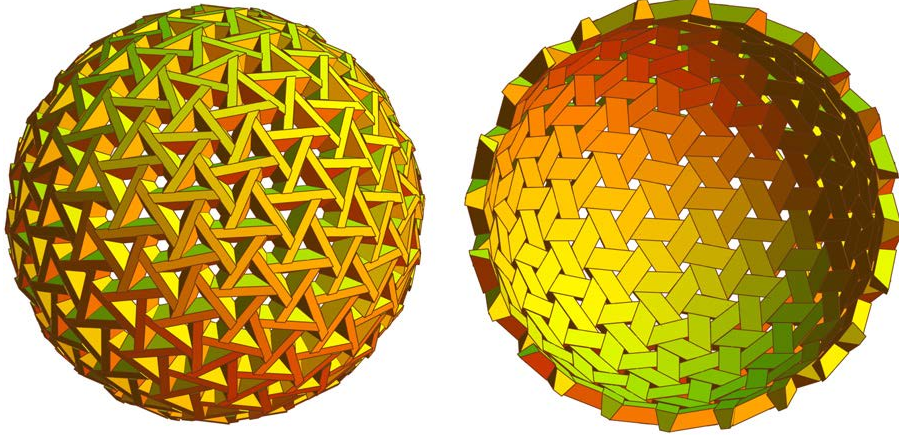


**Şekil 3.28** : Bir jeodezik kürenin yarısından, kenarların döndürülmesi yöntemiyle ( $\alpha:\pi/10$  açısı kadar döndürülmesiyle) elde edilen mütekabil kubbe strüktür [Brocato, Mondardini s:1788]

Çalışmada düzgün bir yirmiyüzlüden elde edilen jeodezik kubbenin köşe noktalarının, kenarlarının ve yüzlerinin sayısı ve koordinatlarının listesi Wolfram Mathematica tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır. Baverel'in bir önceki bölümde izah edilen döndürme metodu (Bkz. s:63) kullanılarak bütün kenarlar, orta noktalarından, kürenin merkezinden gelen normale dik olacak şekilde eşit miktarda döndürülmüş; ucuca birleşim halinde olan kenarlar, biçimleri ve yeni pozisyonlarının koordinatları bilinen birer mütekabil sistem modülüne dönüştürülmüştür[Brocato, Mondardini s:1788].

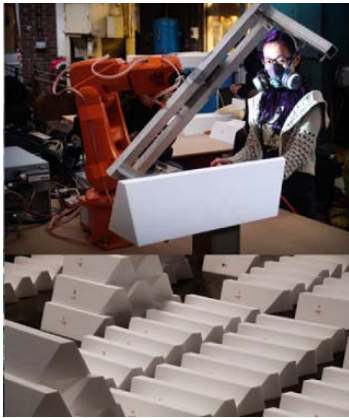
---

<sup>58</sup> Wolfram Mathematica: Teknik hesaplama yazılımı[URL-53]



**Şekil 3.29** : Wolfram Mathematica’da üretilen, Abeille’nin birleşimlerine uygun kubbenin içten ve dıştan görünüşü [Brocato, Mondardini s:1789]

Bilgisayar destekli üretimler için Mathematica sonuçları her türlü formatta dışa aktarılabilir niteliktedir. 4-8 Mart 2013’ te, University of College London, Bartlett Mimarlık Okulu’ nda Schwartz ve Mondardini tarafından 5 günlük bir workshop yürütülmüştür. Brocati ve Mondardini’nin yukarıda anlatılan tasarım süreçleri temel alınmış ve 6 eksenli kızgın tel ile kesim yapan robotik ünite kullanılarak, birleştirildiğinde 3.4 metreyi bulan EPS malzemeden Abeille’nin düz tonoz birleşimlerini temel alan bir kubbe üretilmiştir[Schwarz, Mondardini s:206].



**Resim 3.11** : Kubbeyi oluşturan parçaların kesilmesi. [Schwarz, Mondardini s:207]



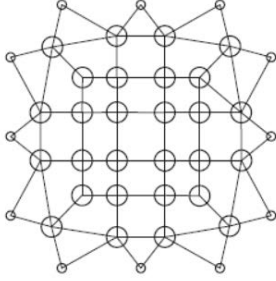
**Resim 3.12** : Kesilen EPS parçaların birleştirilmesi [Schwarz, Mondardini s:207]

Schwarz ve Mondardini, üretim sürecinin, bu örnekte kullanılan makinanın nitelikleri ve sıcak kablo kesim sürecinin sadece sünger esaslı elemanların üretimine izin vermesi dolayısıyla kısıtlandığını belirtmişlerdir[Schwarz, Mondardini, s:206]. Çalışmaya dair yayınlanan videoda EPS elemanları birarada tutmak için yapıştırıcı kullanıldığı görülmektedir[URL-54]. Halbuki Abeille strüktürün, özgül ağırlığı EPS malzemeye nispetle oldukça yüksek olan taş ile üretilmesini öngörmüştür. Eğimli birleşimler sıkışmaya neden olacak, böylece yapıştırıcı ihtiyacı ortadan kalkacak ve basınç yükü tahliye edilecektir. Schwarz ve Mondardini, elmas testerele donatılmış daha yüksek kapasiteli makinalar kullanılarak, uygulamanın taş kesimi için de mümkün olabileceğini bildirmişlerdir[Schwarz, Mondardini s:206].

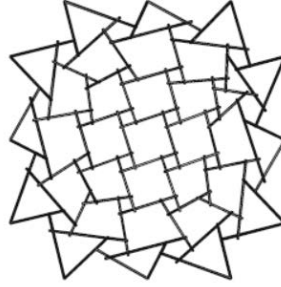
Thönnissen ve Werenfels, ETH Zürich' te Profesör Spiro ve öğrencileri ile mütekabil sistemleri kullanarak küçük ölçekli strüktürler geliştirilmesi için yürütülen workshopta, bilgisayarın tasarım ve üretim aracı olarak çeşitli rollerini de incelemişlerdir. Bu kapsamda tasarımların geliştirilmesinde anahtar rol oynayan, düzensiz mütekabil strüktürlerin güdümlü olarak üretilmesine imkân tanıyan bir Rhino-script geliştirilmiştir. Süreçte bir mütekabil strüktür hücrelerden oluşan bir yapıya sahip olarak ele alınmıştır. Bu hücrelerin özgün düzenlemesi fonksiyonel ve tasarımsal ihtiyaçlara karşılık vermek için yapılacak değişikliklere imkân tanımaktadır[Thönnissen, Werenfels s:370]. Örneğin, Şekil 3.30'da görülen büyük halkalar normal hücreleri, küçük halkalar kenar hücreleri, düz çizgiler ise Delauney<sup>59</sup> çizgilerini göstermektedir. Bu çizgi ve hücreler düzenlenebilir niteliktedir[Thönnissen s:99].

---

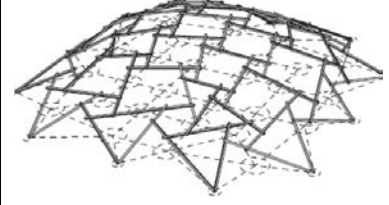
<sup>59</sup> Delauney operasyonu:Bu fonksiyon, nokta bulutlarından, kenarları en yakındaki noktaya bağlanan üçgenlere bölünmüş bir *mesh* üretmeye yarar[Thönnissen, s:95].



**Şekil 3.30** : Planda hücrelerin ve Delauney çizgilerinin görünüşü [Thönnissen s:99]



**Şekil 3.31** : Oluşan mütakabil strüktürün plan görünüşü [Thönnissen s:99]

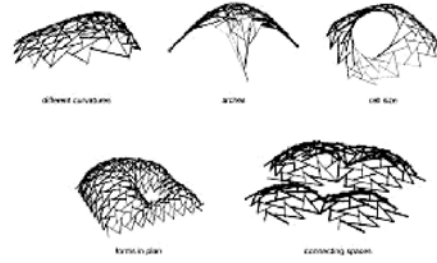


**Şekil 3.32** : Oluşan mütakabil strüktürün perspektif görünüşü [Thönnissen s:99]

Hücre tipine bağlı olarak elemanların dönme yönü ve sayısı çeşitlilik gösterebilmektedir. Hücreler planda yerleştirilmekte ve araç mekânsal olarak elemanları tekrarlayan bir süreç dâhilinde düzenlenmektedir. Bu süreçte sistemin özellikleri her bir hücrede mevcuttur. Hücrelerin tekrarlanmasıyla final form belirlenmektedir ve her bir modülü oluşturan elemanların boyutlarının ve birleşme mesafelerinin düzenlenmesi mümkündür. Aynı zamanda hücrelerden oluşan strüktürde düzensizlik gösteren elemanın diğer elemanlardan farklı olan uzunluğu da belirlenebilmektedir[Thönnissen, Werenfels, s:370].



**Şekil 3.33** : Biçimi belirlenmiş bir diğer strüktürün perspektif görünüşü[Thönnissen, Werenfels s:370]



**Şekil 3.34** : Dijital aracın kullanımıyla üretilen mimari çözümlerden örnekler[Thönnissen, Werenfels s:370].

Thönnissen ve Werenfels, bu tasarım aracının, tasarımın kapsamını genişlettiğini ve standart olmayan elemanların dijital olarak kontrol edilen üretim makineleriyle (CNC) üretimi için bilgi iletimini sağladığını belirtmektedir. Bu yöntemin statik hesaplama ve optimizasyonla entegre edilmesi de üstesinden gelinmesi gereken başka bir görevdir[Thönnissen, Werenfels, s:370].



**Resim 3.13** : Farklılaşmış örgü strüktür, deneme montajı[Thönnissen, Werenfels s:371]



**Resim 3.14** : Science City Pergolası (Fotoğraf: Peter Hauser'e aittir)[Thönnissen, Werenfels s:371]

Sonuç ürünün öngörülmesi ve bilgisayar destekli üretimler için geliştirilen bu yöntemler bazı kaynaklarda değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, Brocato ve Mondardini'nin bilgisayarlı tasarım yönteminin sadece düzgün çokyüzlülere uyarlanabilir olması, Thönnissen ve Werenfels'in yönteminin ise düzensiz

strüktürlere imkan tanımaya rağmen modül tasarımını kısıtladığı belirtilmiştir[Song ve diğ. s:111].

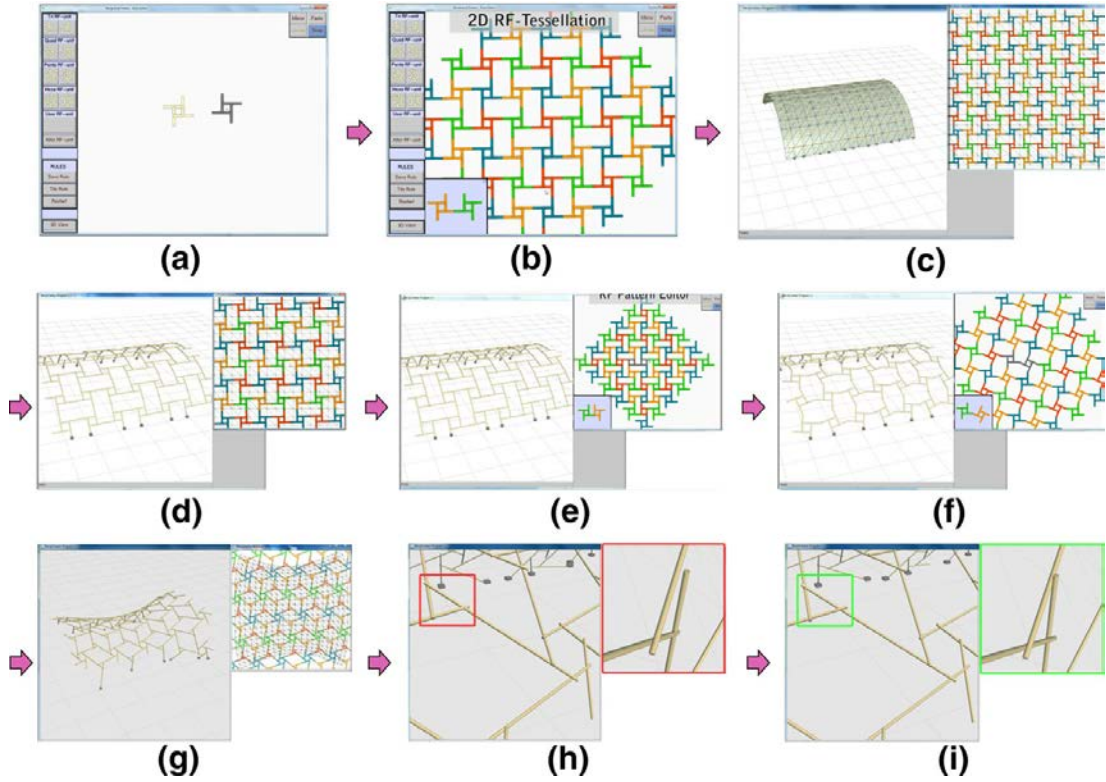
Bu ihtiyaç doğrultusunda, geniş açıklıklar için serbest formlu müteakabil strüktürler tasarlamaya imkan tanıyan bir arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüzün kullanımını şu şekilde açıklanmıştır;

“Üç ayrı işlev için tasarlanmış üç ayrı panel mevcuttur. Bunlar;

1. İki boyutlu düzlemde modül üzerinde her türlü düzenlemeye imkan tanıyan RF Pattern Editör;
2. Elde edilen mozaikleme için üç boyutlu bir kılavuz yüzey üzerine aktarıldığı RF Creator;
3. RF Fabricator' dur.

Öncelikle kullanıcı RF Pattern Editörde aynı veya farklı iki müteakabil sistem modülü seçer (Şekil 3.35a). Daha sonra kullanıcı bu modülleri çalışma düzleminde bir bağlantı kuralı tanımlayarak birbirine bağlar. RF Pattern Editör tekrarlı bir şekilde bu kuralı uygulayacak ve uygun bir iki boyutlu mozaikleme oluşturacaktır (Şekil 3.35b). Aynı zamanda, uygun bir mozaikleme için birden fazla kuralın tanımlanması ve/veya birden fazla modülün kullanılması mümkündür[Song ve diğ. s:112].

Uygun bir mozaikleme elde edildikten sonra kullanıcı RF Creator'ü açarak üç boyutlu kılavuz yüzey olarak isteğe bağlı bir OBJ modeli içeri aktarabilir. Daha sonra RF Creator, iki boyutlu müteakabil mozaikleme için kılavuz yüzeyin üzerine uygulayarak (Şekil 3.35c) otomatik olarak tahmini bir müteakabil strüktür oluşturacaktır[Song ve diğ. s:113].



**Şekil 3.35 :** a–c arası mütakabil sisteme uygun bir mozaiklemenin üretilmesi ve tahmini bir üç boyutlu kılavuz yüzeyin üzerine haritalanması, d–f çeşitli parametrelerin interaktif biçimde değiştirilmesiyle tasarımın görünüşü üzerinde rötuş yapılması; g–i optimizasyon aracı uygulanarak aynı düzlemde ve bağlantılı çubuklar elde edilmesi. [Song ve diğ. s:115]

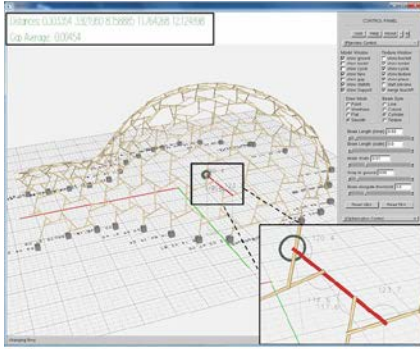
Bu aşamada kullanıcı, mozaikleme kuralında yapacağı değişikliğin üç boyutlu mütakabil strüktüre haritalanmasında interaktif bir geri dönüş alabilecektir. Örneğin iki boyutlu mozaikleme üzerinde yer değiştirme, döndürme, ölçekleme gibi kesin dönüşümler uygulamak hala mümkündür. Şekil 3.35d, Şekil 3.35c'ye kıyasla ölçeklemenin bir örneğini göstermektedir[Song ve diğ. s:114].

Strüktür tasarımına yoğunlaşılın bu aşamada kullanıcı sistem modüllerinin geometrik parametreleri üzerinde de değişiklik yapabilir veya modüllerin yönünü değiştirebilir (Şekil 3.35f). Örneğin, bağlantı kuralında bini mesafeleri dikkate alındığında sistem modüllerinin büyüklüğü, Şekil 3.35e'de Şekil 3.35d'ye nispetle azalmaktadır[Song ve diğ. s:114].

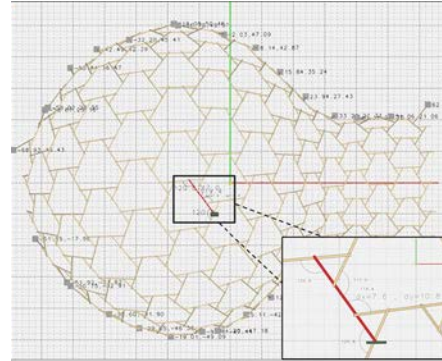
Kullanıcı strüktürün biçiminden memnun olduktan sonra (Şekil 3.35g) olası hataları düzeltmek için RF Creator' de optimizasyon araç kutusunu uygulayabilir.

Tahmini mütakabil strüktürü oluşturan çubuklar, tek noktadan temas etmek yerine boşlukta yüzüyor veya içiçe geçmiş olabilir (Şekil 3.35h). Optimizasyon araç kutusu bu gibi hataları düzeltir Şekil 3.35h'ye kıyasla çubukların önceki pozisyonları optimizasyondan önce ve sonraki durumu gözlemlenebilir[Song ve diğ. s:115].

Bir mütakabil kirişleme tasarımı yapıldıktan sonra RF Creator' den dışa aktarılan strüktürün fiziksel konstrüksiyonuna yardımcı olması için interaktif bir görselleştirme aracı olarak RF Fabricator devreye sokulabilir. Mütakabil strüktür yüklendikten sonra, RF Fabricator, geometrinin yukarıdan aşağı 2 boyutlu haritalamasını ortaya çıkaracak ve elemanların koordinatlarıyla birlikte düzlem üzerindeki yerlerini (Şekil 3.36) gösterecektir[Song ve diğ. s:113].



Şekil 3.36 : Bir çubuğun üzerine tıklanarak bağlantı bilgilerinin görüntülenmesi [Song ve diğ. s:114]



Şekil 3.37 : Yukarıdan aşağı mütakabil strüktürün haritalaması [Song ve diğ. s:114]

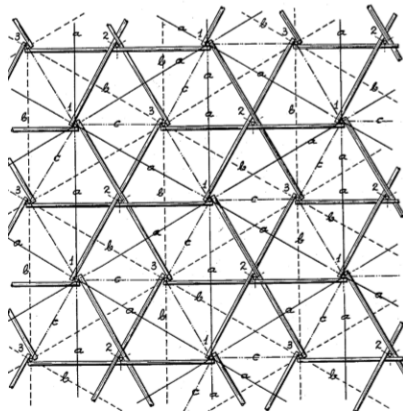
Kullanıcı aynı zamanda bir çubuğun üzerine tıklayarak onun bağlantı bilgilerini elde edebilir. Bu bilgiler, Şekil 3.37'de görüldüğü gibi çubuğun komşu çubuklarla kesişim açılarını, boyunu ve çubuk üzerindeki eklem bağlantısı pozisyonunu da içerir[Song ve diğ. s:113].

### 3.2.3 Hareket Potansiyelinin Geliştirilmesi

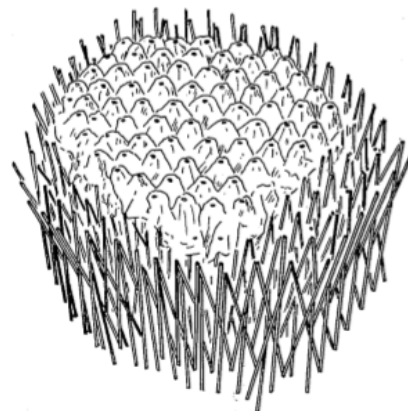
Mütekabil kirişleme kurguları bir çok tasarımcının “kendi kendine taşınan katlanabilir strüktürler” hakkındaki çalışmalarına konu olmuştur.

Pallarés, Emilio Perez Pinero'nun katlanabilir strüktür çalışmalarını derlemiştir. Bu kaynakta Pinero'nun, 1962'de şemsiye hareketini taklit ederek açılıp kapanan bir kube tasarımı önerdiği ve katlanır strüktürlerinde, bir avcı sandalyesi gibi, içeride bir düğümde bağlantı yapan üç çubuktan oluşan, basit bir modülü esas aldığı bildirilmektedir. Bu modül katlanabilmekte ve -deri oturak ile sınırlanan-maksimum boyuta açılabilir. Bir modülde, grubu strüktür olarak güçlendirmek için kontrol edilmesi gereken iki açılma açısı bulunur: biri açılma ve katlanmaya kılavuzluk eden dikey düzlemdeki açılma açısıdır; diğeri de yatay düzlemde. Bu tipte çok sayıda eleman biraraya getirildiğinde, takım tek bir modülün sahip olduğu bağımsızlığa sahip olur[Pallarés, s:42-43].

Pinero'nun 25 Mayıs 1965 tarihinde patentini aldığı üç boyutlu katlanabilir strüktürün, birbiri üzerine binen kısa kirişlerden oluşturulduğu görülür. Şekil 3.38'de açılmış hali gösterilen strüktürde b harfi ile ifade edilen gergi halatları yerine Şekil 3.39'da bir örtü kumaşı kullanılmıştır[ABD Pantenti No:3185164].

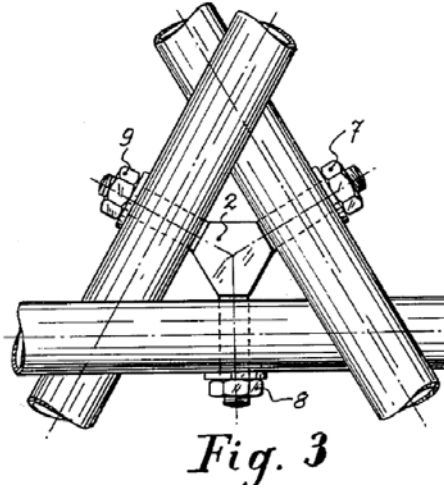


Şekil 3.38 : Açık strüktürün kısmi plan görünüşü  
[ABD Pantenti No:3185164]

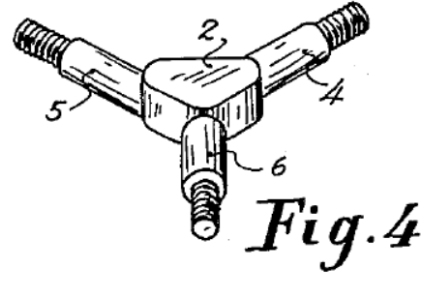


Şekil 3.39 : Strüktürün açılmadan önceki adımlardan biri [ABD Pantenti No:3185164]

Patente konu icat, esasen, dönel kenetlerle birbirine bağlı olan çubuklar sistemini kapsayan ağ biçimli katlanır üç boyutlu strüktürdür. Kenetler, açılmayla üç boyutlu alanın üzerine dağıtılmakta; kenetli birleşimlerle bir araya gelen çubuklar, taşımaya elverişli, derli toplu bir demet oluşturana kadar kolaylıkla katlanabilmektedir[ABD Patenti No:3185164].



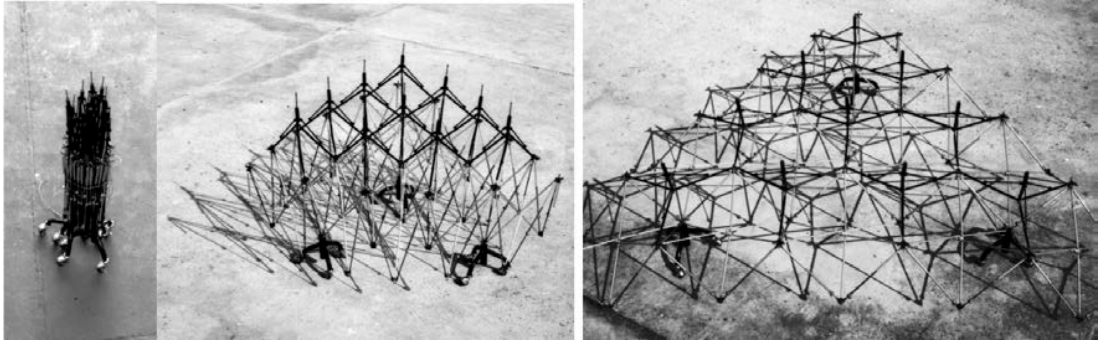
Şekil 3.40 : Kenetle bağlı çubukların bağlantı  
[ABD Patenti No:3185164]



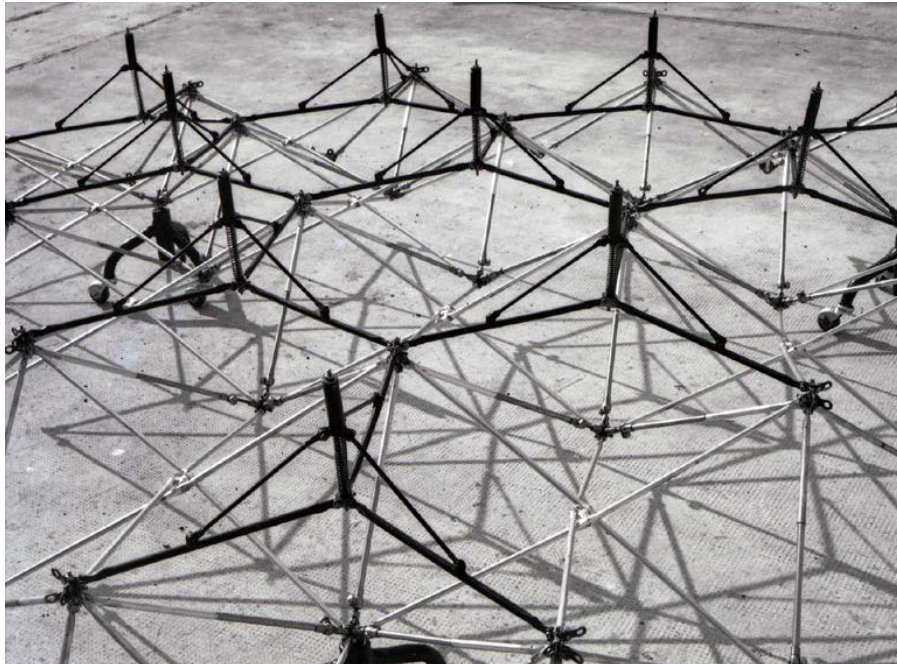
Şekil 3.41 : Bağlantı kenetlerinden birinin  
perspektif görüntüsü [ABD Patenti  
No:3185164]

Kenetler her bir çubuk üzerinde her zaman üçer tanedir, bunların ikisi uçlarda ve üçüncüsü, strüktür açık olduğundaki eğime bağlı olacak şekilde diğer ikisinden uzaklıkta ara noktadadır. Çubuklar ve bunları birleştiren kenetler, eklemeli bir bütünü oluşturur. Kenetlerde bulunan mafsallı pinlerle eşit sayıda olacak şekilde her bir çubukta üç tane oturacak yer veya oyuk vardır. Pinler paralel ve aynı düzlemde oldukları oyuklara monte edilmektedirler[ABD Patenti No:3185164].

Pallarés Pinero'nun bir çok katlanabilir kafes strüktürünü tanıttığı çalışmasında, müteakbil strüktürlerle benzerlik gösteren çalışmasından da bahsetmiştir. Pinero'nun bu tasarımı, o dönemde yaygın olan "Ay'da yeşil yapı" konseptine uygun olarak "açık strüktürün düz veya basık kubbe formunda, 32 ila 38 metre açıklıkta ve 8-9 metre yükseklikte; katlı strüktürün de uzay aracında zorluk çıkarmayacak ölçülerde, 3 metre çapında ve 2,5 metre yüksekliğinde" bir strüktür olarak geliştirmeyi planladığı bildirilmektedir (Resim 3.15 ve Resim 3.16) Pallarés NASA'ya iletilen bu teklif üzerinde daha ileri bir anlaşma yapılmadığını da eklemektedir[Pallarés, s:50].



**Resim 3.15 :** Ay'da yeşil yapı olarak teklif edilen katlanır strüktürün aşamaları [Pallarés, s:51].



**Resim 3.16 :** Ay'da yeşil yapı olarak teklif edilen katlanır strüktürün açılmış hali [Pallarés, s:51].

Bryan J. Beaulieu, 24 Nisan 1984 tarihli patentte “kurulma eğiliminde olan bir sistem oluşturmak için karşılıklı bir çift stabil ve dayanıklı kafes strüktür kullanan, istendiğinde kurulumu ve toplanması mümkün olan gelişmiş bir barınak sağlamayı amaçlandığını” bildirmektedir[ABD Patent No:RE31566]. Strüktürün omurgası Şekil 3.42 ve Şekil 3.43’te görüleceği gibi birbirine kenetli mütakabil kirişlerden oluşmaktadır.

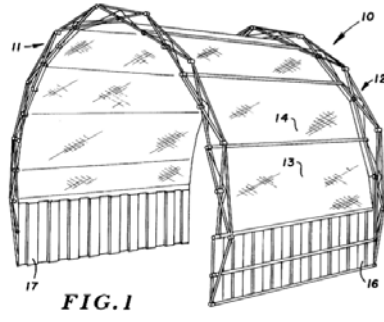


FIG. 1

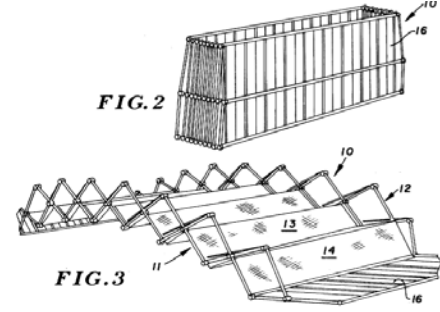


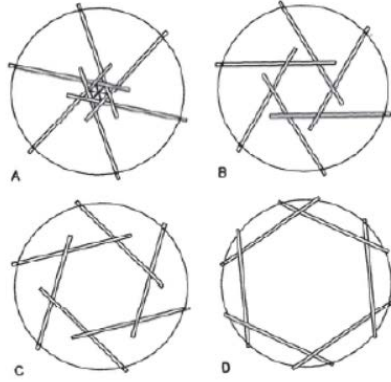
FIG. 2

FIG. 3

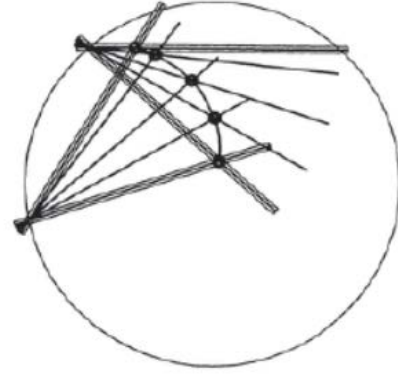
Şekil 3.42 : Tam olarak kurulmuş yapının perspektif görünüşü [ABD Patent No:RE31566]

Şekil 3.43 : Yapının toplanmış ve yarı açık hallerini gösteren perspektif görünüşler [ABD Patent No:RE31566]

Choo ve diğerleri, tek merkezli bir mütakabil strüktürün, bir kamera lensinin hareketini taklit ederek açılıp kapanması hakkında çalışmalar yapmışlardır. Çatı açılırken, her bir kiriş dış destek noktası etrafında dönerek hem kiriş düzleminde dikey olarak, hem de yatayda dış desteğe doğru hareket edecektir. Açılma ile, Şekil 3.45’te görülen kirişlerin iç destek noktaları, kavisli bir rota üzerinde dış destek noktasına doğru hareket edecektir[Choo ve diğ. s:52].



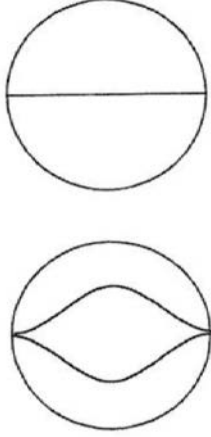
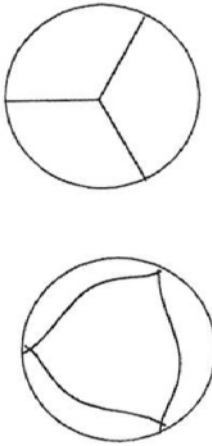
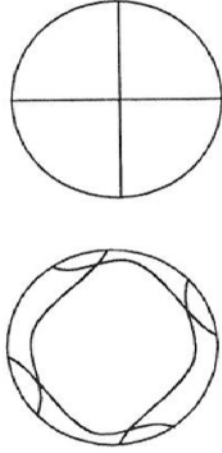
**Şekil 3.44 :** Açılıp kapanabilen çatı, plan görünüşü [Choo ve diğ. s: 52]



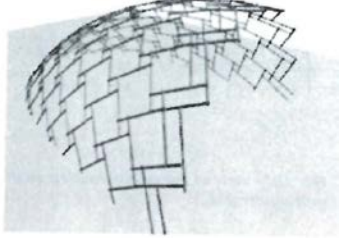
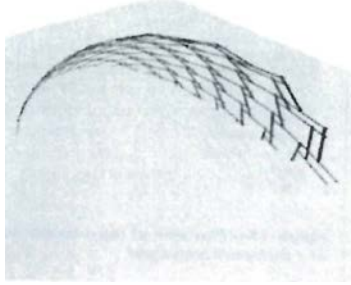
**Şekil 3.45 :** Kavisli hareket rotası, plan görünüşü [Choo ve diğ. s: 53]

Kirişler dış bağlantı noktalarına yatay ve düşey ekseninde dönmeye imkan tanıyan menteşelerle bağlanabilir. İçteki destek noktalarında, önceki kirişin taşınmasının sürekliliğine ve kirişlerin hareketine izin vermek için, yuvarlanan bir eklem kullanılması şarttır. Bu eklem herhangi bir kirişi bağlamayacak, ancak sadece iki kiriş arasında basitçe yuvarlanacak olduğuna, açılıp kapanma hareketine kılavuz olarak davrandığına ve destek noktasını sürdürdüğüne dikkat etmek gerekir[Choo ve diğ. s:52].

Saidani ve Baverel, çok merkezli mütakabil kirişleme kurgularının hareket potansiyeli üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında katlanabilme ihtimalini modül bazında inceleyerek, kubbe biçimli bir strüktürde katlanma ile ortaya çıkabilecek muhtemel detayları tartışmışlardır. Buna göre, temel modülü oluşturan elemanlar pinle bağlandığında, dönebilen fakat hareket edemeyen bağlantı oluşur. Bu bağlantı şeklinde üç kirişli düzenleme yanal ötelenmesi engellenmiş, dört kirişli düzenleme ise biçim değiştirebilir bir strüktür oluşturacaktır. Bu modüllerden oluşan mozaiklemeler de aynı özellikleri gösterecektir[Saidani, Baverel, 1998a s:143].

		
<p><b>Şekil 3.46 :</b> İkiye bölünmüş strüktürün açılma şeması [Saidani, Baverel, 1998a s: 144]</p>	<p><b>Şekil 3.47 :</b> Üçe bölünmüş strüktürün açılma şeması [Saidani, Baverel, 1998a s:144]</p>	<p><b>Şekil 3.48 :</b> Dörde bölünmüş strüktürün açılma şeması [Saidani, Baverel, 1998a s:144]</p>

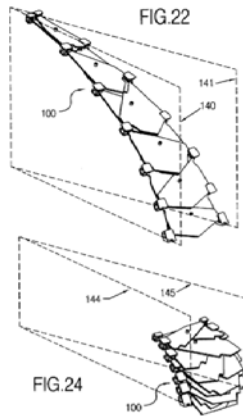
Saidani ve Baverel, kubbe benzeri bir strüktürün kamera lensi hareketine benzer bir çalışma şekliyle katlanma hareketini bir, iki, üç, dört bölümde gerçekleştirmesini incelemişlerdir(Şekil 3.46, Şekil 3.47 ve Şekil 3.48). Dört bölümde açılacak bir strüktürde dengeleme için gergi halatlarına ihtiyaç duyulacağını ve bu haliyle strüktürün Pinero'nun patentli strüktürüne benzediği bildirilmiştir[Saidani, Baverel s:144].

	
<p><b>Şekil 3.49 :</b> İkiye bölünmüş katlanabilir bir mütakabil strüktürün açık hali [Saidani, Baverel, 1998a s: 145]</p>	<p><b>Şekil 3.50 :</b> Strüktürün katlanmış hali [Saidani, Baverel, 1998a s:145]</p>

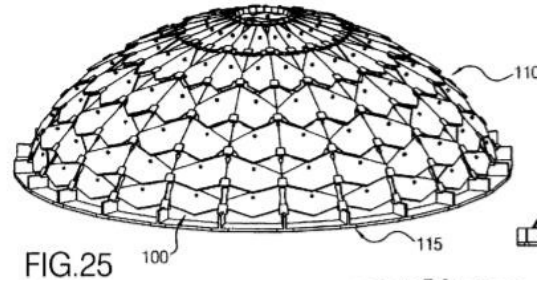
Saidani ve Baverel'in çalışmasında, düğümlerin dönebilir olduğu örgülerin kullanılması öngörülmüştür. Kare temelli bir örgüde köşegenlerden geçerek toplanma ve açılmada rol alacak gergi halatlarının kullanılması gerekmektedir. Bu halatlar, toplanma veya açılmaya bağlı olarak kısılacak ve çekmeye çalışacaktır[Saidani, Baverel, 1998a s:144].

Katlanmanın gerçekleşmesi için strüktürü oluşturan bölümler eşzamanlı olarak dönecektir. Katlanma sürecinde, strüktürün eğimi değişikliğe uğrayacak ve rüzgarın kaldırmasına karşı iyi bir sabitleme sistemine ihtiyaç duyulacaktır. Aynı zamanda temele bağlı elemanların katlanma esnasında önceden belirlenmiş bir rota dahilinde kayabilmesi gerekmektedir. Kaplama malzemesi olarak kullanılacak olan membranının strüktürün iç tarafında yer alması katlanma sürecini kolaylaştıracaktır[Saidani, Baverel, 1998a s:144].

Charles Hobermann, 25 Mayıs 2004 tarihli patentte "Birbirine bağlı panellerden oluşan katlanabilir strüktürleri" açıklamıştır. (Şekil 3.51 ve 3.52) Bu strüktürde kubbeyi oluşturan dilimlerin biraraya geliş biçimleri mütekabil strüktürlerle alakalı olmasa bile, her bir dilim birbirini taşıyan panellerden müteşekkildir. Bu panellerin karşılıklı olarak taşınması prensibi mütekabil kurgularla benzerlik göstermektedir.



**Şekil 3.51 :** Yarım ve tam açık kısıpçaıla bağılı eğimli bir dilimi gösteren perspektif görünüşü [ABD Pantenti No:6739098]



**Şekil 3.52 :** Katlanabilir kubbe strüktürünün perspektif görünüşü [ABD Pantenti No:6739098]

Larsen, “afet sonrası barınak tasarımı” konulu bir atölye çalışması sonucunda ortaya çıkan, hızlıca yapılan ve kurulup kaldırılabilen barınak tasarımları arasında hareket potansiyelinin kullanıldığı bir örneğin varlığından bahsetmektedir.(Resim 3.17 ve Resim 3.18) Leonardo da Vinci’nin geçici köprüsündeki konseptin temel alındığı bu tasarımda kısa, benzer ve yapımı kolay doğrusal elemanlarla, hızlıca toplanabilen yay biçimli mütakabil bileşenler üretilmiştir. Gerilim kabloları ile birbirine bağlı olan yaylar, bir pivot noktası etrafında ışınsal biçimde dizilmiştir ve çadır sisteminin iskeletini oluşturmaktadır[Larsen, Lee, 2013, s: 4].



**Resim 3.17:** Çadır iskeletini oluşturan yay biçimli mütakabil bileşenler ve gerilim kabloları[Larsen, Lee, 2013, s:4]



**Resim 3.18:** Çadırın örtülmüş hali[Larsen, Lee, 2013, s:4]



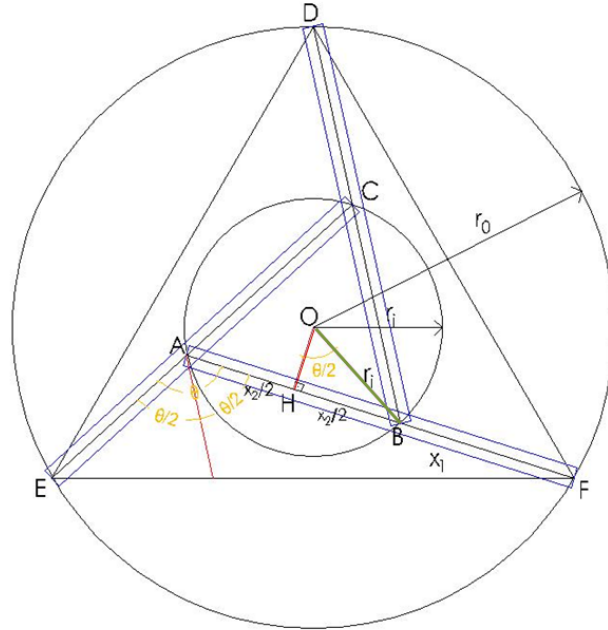
gözüken tam boyutu;  $x_1$  ve  $x_2$  kirişin dış destekten birinci kesişime kadar ve kesişimden diğer kesişime kadar olan plan düzlemindeki boylarıdır[Larsen, 2008 s:38].

$$\theta = \frac{360}{n} \quad (\text{Denklem 4.1})$$

4.1 denkleminde, bir düzgün çokgenin dış açısının  $360/\text{kenar sayısı}$  ile bulunabileceği belirtilmiştir. Şekilde görülen  $\theta$  açısı  $\{\frac{360}{3} = 120\}$  derecedir.

$$x_2 = 2r_1 \sin \frac{\theta}{2} \quad (\text{Denklem 4.2})$$

4.2 denkleminin anlaşılması için, Şekil 4.3'te çemberlerin merkezinden AF doğrusuna dik çizilerek OHB dik üçgeni oluşturulmuştur.



**Şekil 4.3 :**  $x_2$  uzunluğu ile  $\theta$  açısı ve  $r_i$  arasında bir bağıntı kurulabilmesi için OHB üçgeni oluşturulmuştur

Üçgenin köşesinden merkezine çizilen OB doğru parçası aynı zamanda açı ortayıdır ve OBH açısı  $\{\frac{60}{2} = 30\}$  derecedir. OHB dik üçgeninin iç açılarına bakıldığında 30-60-90 üçgeni olduğu görülür. OHB açısı 60 derece yani  $\{\frac{\theta}{2}\}$ 'dir.



$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{|OH|}{r_i} \quad \text{yani} \quad |OH| = \cos \frac{\theta}{2} r_i$$

Bu durumda, OHB dik üçgeninde pisagor teoremi uygulandığında şu denklem elde edilir.

$$\left\{ \cos \frac{\theta}{2} r_i \right\}^2 + \left\{ \frac{x_2}{2} + x_1 \right\}^2 = r_0^2$$

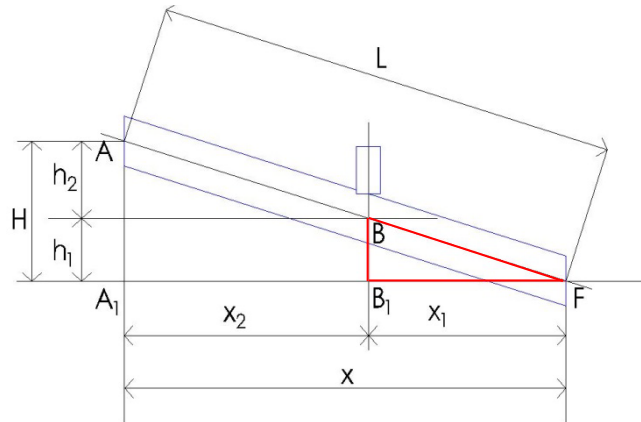
Karekök alınarak  $x_1$  yalnız bırakıldığında 4.3 denklemi elde edilmiş olur.

$$x = x_1 + x_2 \quad \text{(Denklem 4.4)}$$

4.4 denklemi kirişin plan düzleminde gözükken boyunu vermektedir.  $x_1$  ve  $x_2$  uzunlukları çember yarıçapları ve  $\theta$  cinsinden yazılabildiği gibi,  $x$  uzunluğunun bulunabilmesi için de bu bilgiler kafidir. Bu bağıntılar iç ve dış çember yarıçapları ile kiriş sayısı belirli olan bir mütakabil sistem modülünün plan düzlemindeki uzunluğunu bulmanın mümkün olduğunu göstermektedir.

$$h_1 = H \frac{x_1}{x} \quad \text{(Denklem 4.5)}$$

4.5 denkleminin anlaşılması için Şekil 4.5'te gösterilen kesitin incelenmesi gerekmektedir. Kesitte görülen  $BB_1F$  üçgeni ile  $AA_1F$  üçgeni açı-açı-açı benzerliğine sahiptir. Buradan hareketle,  $h_1$ ' in  $H$ 'a oranı,  $x_1$ 'in  $x$ 'e oranına eşittir. Denklemden  $h_1$  çekildiğinde 4.5 denklemi elde edilmiş olur.



**Şekil 4.5 :** Kesitte, eğimli kirişin oluşturduğu  $BB_1F$  dik üçgeni ile,  $AA_1F$  dik üçgeni arasında benzerlik vardır.

$$h_1 = H - h_2 \quad (\text{Denklem 4.6})$$

4.6 denklemini  $h_2$  uzunluğunu verir

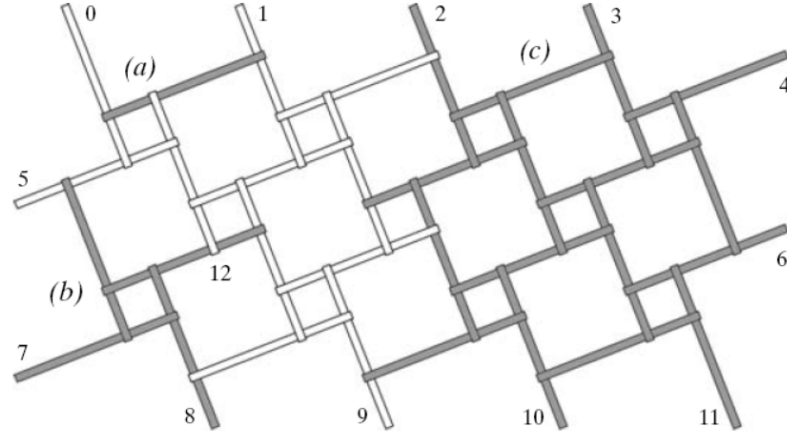
$$L = (x^2 + H^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Denklem 4.7})$$

4.7 denkleminde AA<sub>1</sub>F üçgenine pisagor teoremi uygulanarak L uzunluğu yalnız bırakılmıştır. Bu denklem kiriş boyutları ve elemanın plan düzlemindeki uzunluğu arasında bir bağıntı vermektedir. B noktasının planda gösterilen iç çember ve F noktasının planda gösterilen dış çember hizası olduğu göz önüne alındığında; 4.5, 4.6 ve 4.7 denklemlerinin plan düzleminde elde edilmiş olan uzunlukları üçüncü boyuta taşımak için kullanılacağı anlaşılmaktadır. Çok temel kararların verilmesiyle başlayan tasarım sürecinde, binili birleşime dönüşen bir strüktürde kiriş boyu, uzama miktarı gibi öngörülemeyen bilgilere bu denklemler aracılığıyla ulaşılabilir.

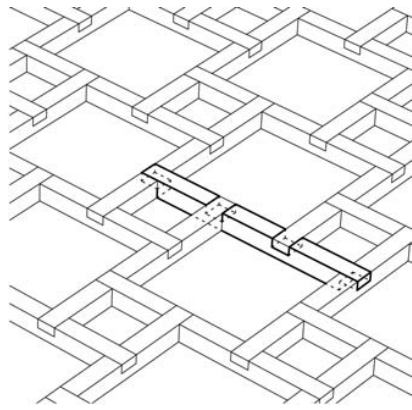
#### 4.1.1 Düzlemsel Sistemler

Bir mütekabil strüktür oluşturmak için birbirinin üzerine uzanan düz kirişler, bağlantı noktaları arasındaki yükseklik farkı sebebiyle dışa doğru eğimli bir sistem oluşturmaktadır. Bu durumda eğimin derecesi kiriş uzunluğu ile kirişlerin eksenleri arasındaki mesafe farkı ile kontrol edilebilir. Bu farkı kontrol etmek için kirişler üzerinde çentikler açılabilir. Eksenler arası farkın sıfırdan küçük olması iç bükey bir eğim oluştururken, eğimin sıfır olması ise düzlemsel bir sistem oluşturur[Kohlhammer, Kotnik s:81].

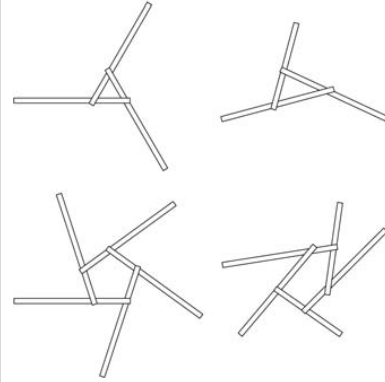
Kirişleme sistemini oluşturan elemanların niteliklerine göre, mütekabil strüktürler birbirinden ayrılabilir. Bir mütekabil strüktürü en az üç kirişten oluşan temel bileşenlerine (Şekil 4.6-b) dönüştürmek mümkün olduğu gibi, birbirine eşit kirişlerden türetme deseni genişledikçe genişleyebilen bir mütekabil kirişleme sistemi oluşturmak mümkündür[Kohlhammer, Kotnik s:81].



**Şekil 4.6 :** Altlarıyla birlikte bütün sistem. (a) tek bir kiriş; (b) temel sistem modülü; (c) tamamlanmış merkez [Kohlhammer, Kotnik s:81]

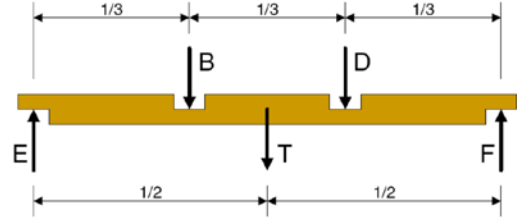
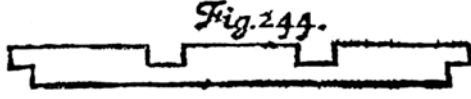


**Şekil 4.7 :** Düzlemsel mütekabil yapı [Kohlhammer, Kotnik s:81]



**Şekil 4.8 :** Düzgün ve düzgün olmayan mütekabil sistem modül örnekleri [Kohlhammer, Kotnik s:81]

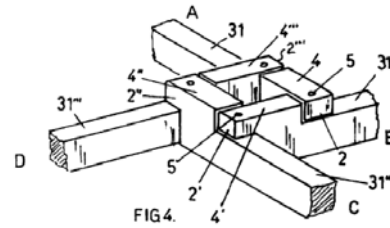
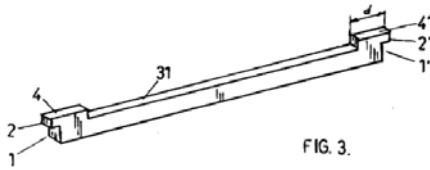
Daha önceki bölümlerde Endüstrileşme öncesinde, Villard de Honnecourt (Şekil 2.19), Sebastiano Serlio (Şekil 2.24), Leonardo da Vinci (Şekil 2.22 ve Şekil 2.23), John Wallis (Şekil 2.25) gibi tasarımcı ve düşünürlerin düzlemsel kirişlemeler hakkında çalışmalar yaptıkları bildirilmiştir. Houlby, Wallis'in düzlemsel yapıyı oluşturmak için önerdiği kiriş örneğini ve dört kirişli bir düzlemsel kirişlemenin (Şekil 2.25) bağlantı noktalarındaki yük analizlerini incelemiştir. Şekil 4.9'da Wallis'in tipik bir kiriş için yaptığı eskiz görülmektedir [Houlby, s:212].



**Şekil 4.9 :** Wallis'in tipik kiriş eskizi [Houlsby, s:212]

**Şekil 4.10 :** Houlsby'nin Wallis'in eskizi üzerinden belirlediği kiriş oranları[Houlsby, s:213]

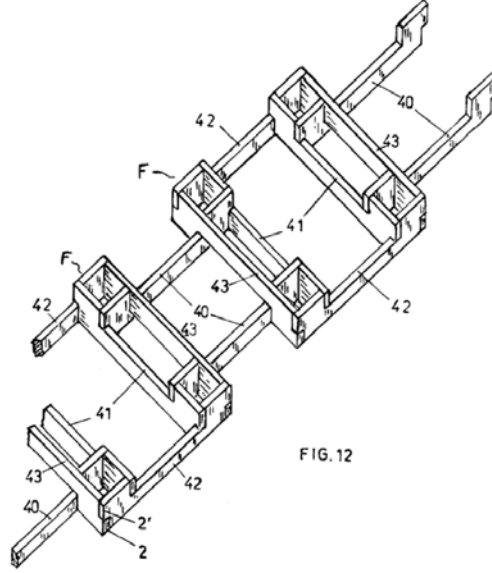
20.yüzyıl sonlarına doğru Daniel Gat'ın, birbirine kenetli elemanlar ile hem düzlemsel hem eğri yüzeyli strüktürler elde ettiği bir önceki bölümde (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10) bildirilmiştir. Rizzuto,Saidani ve Chilton, kirişler üzerinde çentik açarak düzlemsel kirişlemeler oluşturmak hakkında “üçüncü boyut olan kiriş yüksekliğini görmezden gelerek tavan ve döşeme kirişlemeleri oluşturmak” şeklinde yorumlamışlardır[Rizzuto, Saidani ve Chilton s:125].



**Şekil 4.11 :** Daniel Gat'a ait patentin 3 numaralı görseli. Tek bir kiriş [ABD Patenti No: 4227358]

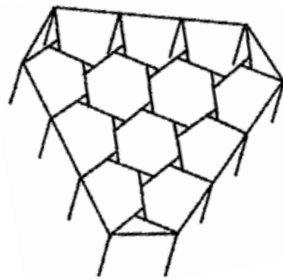
**Şekil 4.12 :** Daniel Gat'a ait patentin 4 numaralı görseli. Temel sistem modülü [ABD Patenti No: 4227358]

Gat, kirişlerin çıkıntı yüksekliğine eşit yükseklikte girintili elemanlar ile eşleştirilmesiyle düz çatı ve döşeme kirişlemelerin oluşturulabildiğini bildirmiştir[ABD Patenti No: 4227358].

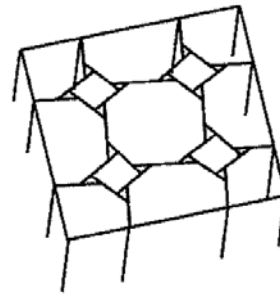


**Şekil 4.13** : Daniel Gat'a ait patentin 12 numaralı görseli. 3 numaralı görseldeki kirişlerden oluşturulan köprü benzeri açıklık geçen düzlemsel strüktür. [ABD Patenti No: 4227358]

Bir düzlemsel kirişleme sisteminin görünüşü kendisini oluşturan alt sistemlerin , kiriş boyutları, bir modülü oluşturan kiriş sayısı, bağlantı mesafesi gibi değişkenleri çeşitlendirilerek değiştirilebilir. Rizzuto, Saidani ve Chilton Şekil 4.14 ve 4.15'te çeşitli modüllerden düzlemsel strüktür örnekleri oluşturmuşlardır[Rizzuto, Saidani ve Chilton s:127].

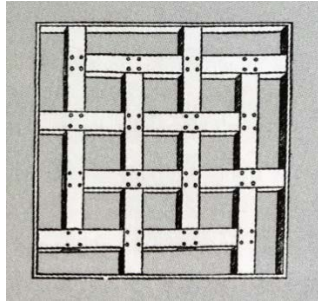


**Şekil 4.14** : Bağlantı mesafeleri eşit üç kirişli temel sistem modülü kullanılarak oluşturulan altıgensel kirişleme[Rizzuto, Saidani ve Chilton s:127]

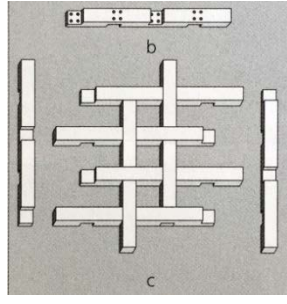


**Şekil 4.15** : Bağlantı mesafeleri değişken bir temel sistem modülü kullanılarak oluşturulan sekizgen ve kareli kirişleme[Rizzuto, Saidani ve Chilton s:127]

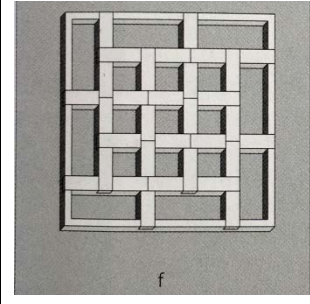
Serlio'nun önerisi (Şekil 4.16) Bertin tarafından uygulanabilirlik açısından incelenmiştir. 16. yüzyılda Serlio'nun önerdiği bu kirişlemenin gerçekleştirilmesinin mümkün olmadığı, kendisinden yaklaşık 450 sene sonra Bertin'in çalışmasıyla ispat edilmiştir. Kirişlemeyi benzer oranlardaki kirişlerle taklit etmeyi deneyen Bertin, Şekil 4.17'de c ile gösterilen son iki adımın gerçekleşmesinde kiriş bükülemeyeceği için son iki çentiğin geçirilemeyeceğini bildirmiştir. Fakat, kiriş boyları yarıya indirildiğinde, Şekil 4.18'de gösterilen aynı görünüşteki düzlemsel strüktür elde edilebilmiştir[Bertin, 2012 s:74].



**Şekil 4.16 :** Sebastiano Serlio'nun açıklığı geçmede kısa kalan kirişler önerisi [Bertin, 2012 s:74]

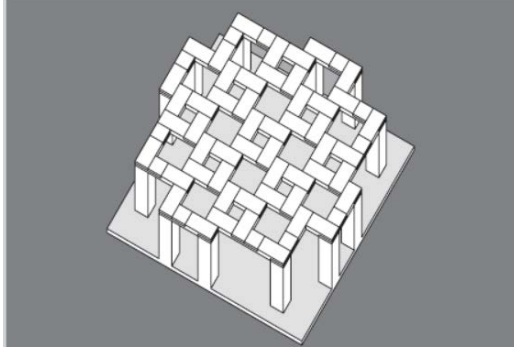


**Şekil 4.17 :** Bertin'in örnek kirişi (b) kirişlemede gerçekleştirilemeyen aşama (c) [Bertin, 2012 s:74]

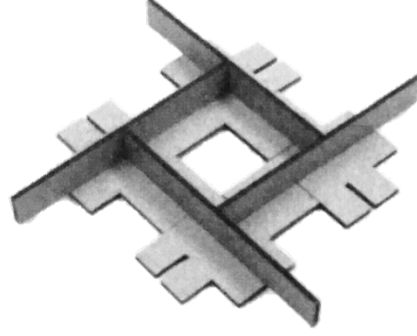


**Şekil 4.18 :** Bertin'in daha kısa kirişler kullanarak gerçekleştirdiği Serlio'nun önerisi [Bertin, 2012 s:75]

Bertin'in, düzlemsel sistemlerde kiriş kesitlerini düzenleyerek eğilmeye karşı koyabilecek strüktürler oluşturmaya yönelik yapılmış çalışmaları da bulunmaktadır. Şekil 4.19'da T kesitli kirişler kullanılarak oluşturulan bir düzlemsel strüktürün çizimi gösterilmiştir. Strüktür üst yüzeyinin artırılması mümkündür ve benzer prensipler kullanılarak yapılmış çeşitli tasarımlar mevcuttur[Bertin, 2012 s:66].

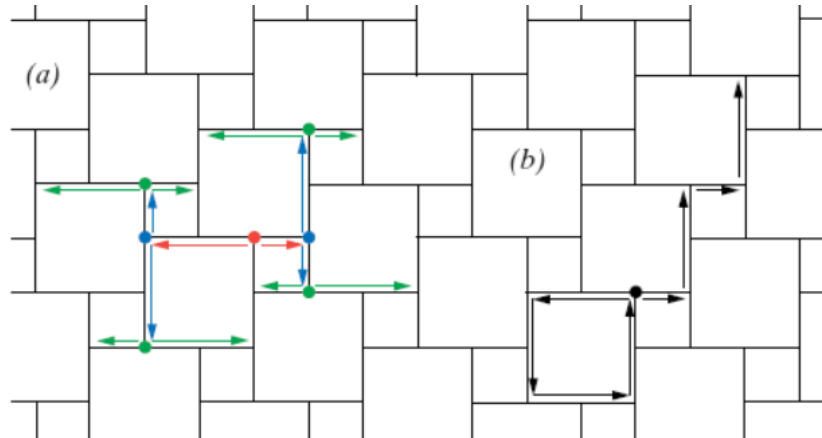


**Şekil 4.19 :** CUHK'da 2000 yılında bir yaz okulunda yapılan düzlemsel strüktüre ait çizim [Bertin, 2003 s:153]



**Resim 4.1 :** Bertin'in T kesitli kiriş prensibiyle düzlemsel strüktürlerden kutu oluşturmakta kullandığı sistem modülerinden biri [Bertin, 2012 s:96]

Düzlemsel sistemlerin yük altındaki karşılıklı etkileşimi ve davranışı Kohlhammer ve Kotnik tarafından incelenmiştir. Bir düğüm noktası üzerine uygulanan yük, strüktürün daha önce tanımlanan (Şekil 4.6) alt sistemlerinin karşılıklı etkileşiminin tekrarlanması yoluyla aktarılır. Bu adımların her birisinde kirişler statik denge durumunun bir örneğini sergiler; düğüm noktalarında oluşan mesnet tepkileri ile yük söz konusu kirişi taşıyan kirişlere pay edilir. Şekil 4.20'de yük uygulandıktan sonra ele alınan kuvvet artış adımları a ile gösterilmiştir. Bu adımlar, Şekil 4.20'de b ile gösterilen iki tip yol izlenerek analiz edilebilir [Kohlhammer, Kotnik s:81].



**Şekil 4.20 :** Üç tekrar adımı (a); kırmızı birinci, mavi ikinci, yeşil üçüncü adım. (b); dögüsel ve yaynık tekrar adımı ilerlemesi [Kohlhammer, Kotnik s:81]

Şekil 4.22'deki temel bir sistem modülü incelendiğinde; k kirişin indisi,  $K_{A,k}$  dış destek noktası ile ve  $K_{B,k}$  komşu kirişle bağlantı noktaları olduğunda;  $a_k$  ve  $b_k$  aşağıdaki denklemlerde yük aktarımında kullanılacak olan uzaklık oranları olacaktır[Kohlhammer, Kotnik s:83].

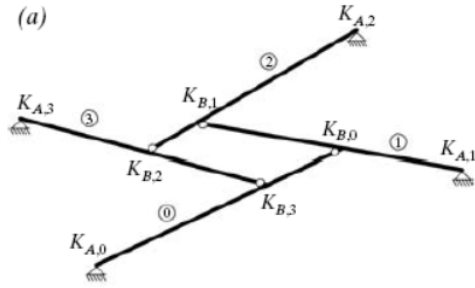
$$a_k = \frac{K_{B,k-1}K_{B,k}}{K_{A,k}K_{B,k}} \leq 1 \quad \text{yani;} \quad (\text{Denklem 4.8})$$

$$a_k = \frac{\text{bağlantı mesafesi}(\lambda)}{\text{kiriş boyu}(L)} \leq 1$$

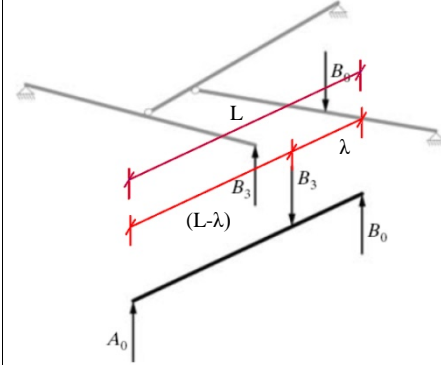
$$b_k = \frac{K_{A,k}K_{B,k-1}}{K_{A,k}K_{B,k}} \leq 1 \quad \text{yani;} \quad (\text{Denklem 4.9})$$

$$b_k = \frac{\text{kiriş boyu}-\text{bağlantı mesafesi}(L-\lambda)}{\text{kiriş boyu}(L)} \leq 1$$

$$a_k + b_k = 1 \quad (\text{Denklem 4.10})$$



Şekil 4.21 : Dört kirişten oluşan temel sistem modülü[Kohlhammer, Kotnik s:83].



Şekil 4.22 : Bir kiriş üzerinde yük dağılımını etkileyen oranlar işaretlenmiştir[Kohlhammer, Kotnik s:83].

Bu oranlar bir kirişten diğerine aktarılan yükü hesaplamakta kullanılır. Herhangi bir kiriş ele alındığında denge şartına göre, mesnet tepkileri 4.11 ve 4.12 denkleminde gösterildiği gibi bu oranlarla ters orantılı olarak oluşacaktır.

$$A_k = a_k \cdot B_{k-1} \quad \text{yani;} \quad (\text{Denklem 4.11})$$

$$A_k = \left(\frac{\lambda}{L}\right) \cdot B_{k-1}$$

$$L \cdot A_k = \lambda \cdot B_{k-1}$$

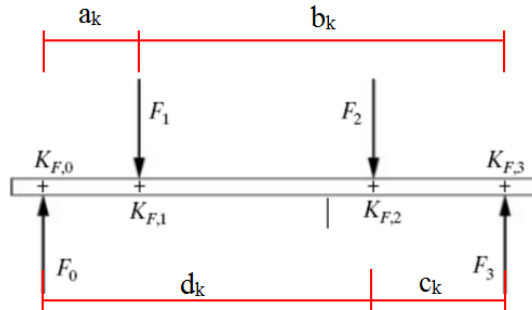
$$B_k = b_k \cdot B_{k-1} \text{ yani;}$$

(Denklem 4.12)

$$B_k = \left(\frac{L-\lambda}{L}\right) \cdot B_{k-1}$$

$$L \cdot B_k = (L - \lambda) \cdot B_{k-1}$$

Buradan hareketle, Şekil 4.23'teki  $B_0$  ve  $A_0$  kuvvetinin uygulandığı noktaya göre alınan moment ile  $A_0$  ve  $B_0$  kuvvetleri bulunur. Bu durumda bir müteakbil kirişleme sisteminde devam eden bir örgü içerisinde tek bir kiriş ele alındığında (Şekil 4.24) kuvvetlerin ortaya çıktığı dört bağlantı noktası tanımlanır. Kiriş,  $K_{F,0}$  ile  $K_{F,3}$  noktalarında komşu kiriş üzerine basmaktadır ve  $K_{F,1}$  ile  $K_{F,2}$  noktalarında diğer kirişi taşımaktadır.



Şekil 4.23 : Örgü içerisinde bir kirişin bağlantı noktaları [Kohlhammer, Kotnik s:84]

Bütün düğüm noktaları tek bir matris ile formülize edilebilir. 4.13 denklemindeki matris, yatay ve düşeyde kiriş sayısının iki katına göre kodlanmıştır. Bu, Şekil 4.23'te gösterilen  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  ve  $d_k$  oranlarının herbirinin ayrı ayrı ifade edilebilmesine imkan verir. Bağlantı mesafesi değerinin sabit tutulduğu düzgün kirişlemelerde, Şekil 4.23'te  $c_k$  ve  $d_k$  ile ifade edilen oranlar işleme katılmaz. İşleme katılmayan oranlar sıfırla gösterilir. Her bir sütun ve satırda bir kiriş işleme alınır. Bu açıdan  $A$ , yük dağılım matrisi olarak düzlemsel bir kirişleme sistemindeki geometrik koşulları simgelemektedir[Kohlhammer, Kotnik s:82].

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix}
& k_1 & k_2 & \dots & k_{n-1} & k_0 & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & a_0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & b_0 \\
0 & a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & b_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & a_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & b_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{n-1} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & b_{n-1} & 0 & 0
\end{pmatrix}$$

(Denklem 4.13)

$$A \in 2n \times 2n$$

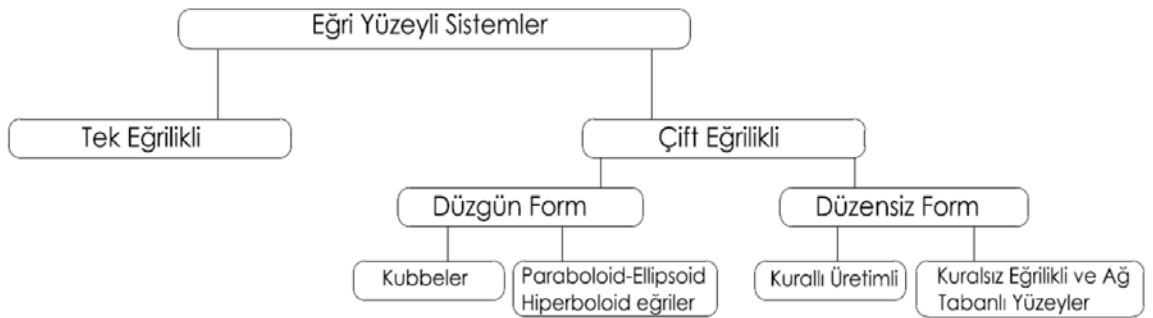
$$F_i = AF_{i-1}$$

(Denklem 4.14)

$F_i$ , gözlemlenen tekrar adımı olan  $i$ 'de bağlantı noktalarındaki bütün kuvvet artışlarını kapsamaktadır. Buna göre bu denklem tekrarın  $i$  adımındaki toplam kuvvetin  $A$  matrisinin toplamı ile bir önceki adımdaki kuvvetin çarpımıdır. Kohlhammer ve Kotnik verilen matris ve formülü örnekler üzerinde özelleştirerek tanımlanan bir düzelsel strüktür üzerinde kuvvet artış adımlarının herhangi birini formülize edebilmişlerdir[Kohlhammer, Kotnik s:82].

#### 4.1.2 Eğri Yüzeyle Sistemler

Üstüste binen elemanlardan oluşması bir mütakabil kirişleme kurgusunun çeşitli eğri yüzeyler oluşturmasına imkan vermektedir. Danz, eğri yüzeyli mütakabil sistemleri şu şekilde sınıflandırmıştır.[Danz s:8]



Şema 4.1. Danz'ın eğri yüzeyli sistemleri sınıflandırılması[Danz s:8] örnekler üzerinden yeniden yorumlanmıştır.

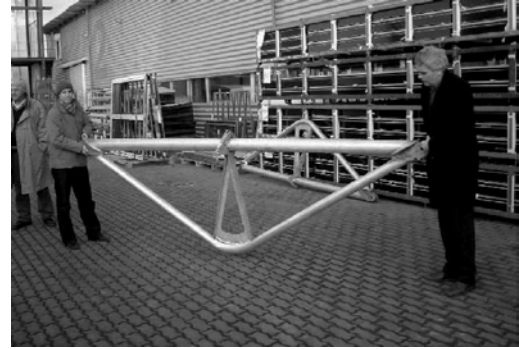
## Tek Eğrilikli Yüzeyler Oluşturan Mütakabil Strüktürler

Danz'a göre, Çin'de bulunan Rainbow Bridge (Resim 2.8) ve Leonardo da Vinci'nin köprüsü de (Şekil 2.23) tek eğrilikli mütakabil strüktürler sınıfındadır. Aynı kaynaktan tek eğrilikli mütakabil strüktürlere, parametrik tasarım araçlarının kullanıldığı fakat kirişlerin büyük ölçüde birbirinden farklı olduğu parabolik kemerlerden oluşturulan tonozlar örnek verilmiştir[Danz s:8].

Tek eğrilikli kirişlemelerde, büyük ölçüde birbirinin aynısı olan kirişlerden oluşturulan strüktür, sistemin yönelimine bağlı bir eğim almaktadır. Fransa'nın Burgonya bölgesinde bulunan Bibracte Arkeolojik kazı alanı için tasarlanan ve üretilen çatı örtüsü de başka bir tek eğrilikli mütakabil strüktür örneği, 22.5 metrelik bir açıklığı geçerek 850 m<sup>2</sup> genişliğinde bir alanı örtmektedir. Strüktür için, sistem modüllerini (Şekil 4.28) oluşturan alüminyum malzemedeki özel kirişler (Resim 4.2) tasarlandığı ve beşik tonoz biçimli eğri yüzeyi oluşturmak için kirişlere Kuzey-Güney yönündeki eğime göre açı verildiği bildirilmiştir[Gelez, Aubry ve Vaudeville s:305].



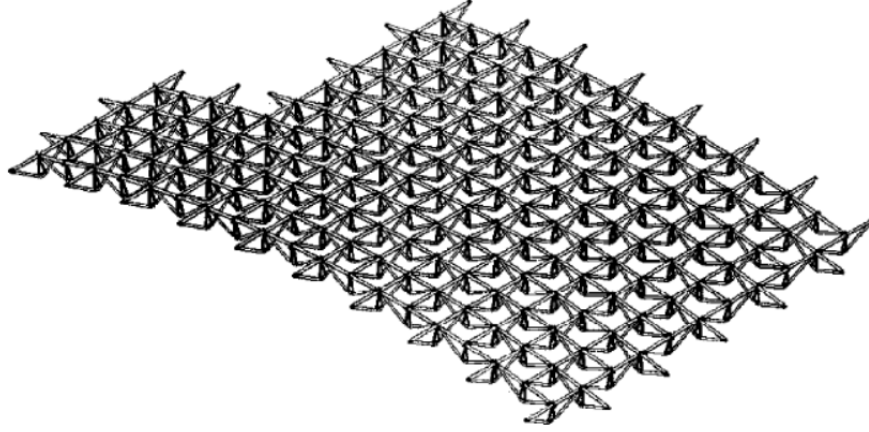
**Şekil 4.24** : Dört kirişten oluşan temel sistem modülü[Gelez, Aubry ve Vaudeville s:305]



**Resim 4.2** : 3.75 metre uzunluğunda, her biri 43 kg ağırlığında olan alüminyum kirişlerden biri [Gelez, Aubry ve Vaudeville s:305]

Mütakabil strüktürlerde üstüste binen kirişlerin eksenleri arasında fark, eğimli bir yüzey oluşturmanın başka bir yoludur. Gelez, Aubry ve Vaudeville, Bibracte Arkeolojik kazı alanı örtüsü strüktürü için üst hizadaki kirişlerin aksiyal

devamlılığını esas alan bir bağlantı sistemi seçildiğini belirtmişlerdir[Gelez, Aubry ve Vaudeville s:306].



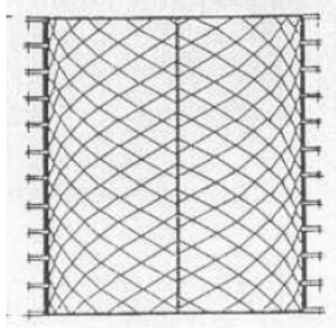
Şekil 4.25 : Mütəkabil çatı strüktürünün perspektif çizimi [Gelez, Aubry ve Vaudeville s:306]



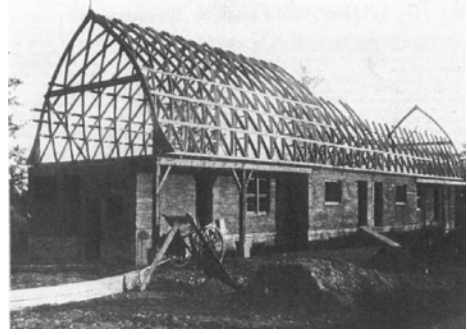
Şekil 4.26 : Mütəkabil çatı strüktürünün görünüş çizimi [Gelez, Aubry ve Vaudeville s:306]

#### a) Çift Eğrilikli Yüzeyler Oluşturan Mütəkabil Stüktürler

20.yüzyılın başlarında Zollinger'in "Lamellandach" adını verdiği patentli ahşap çatı sistemi Danz tarafından "tek eğrilikli yüzeyler" grubunda ele alınsa da [Danz s:8] elemanlar diyagonal yerleştirildiği için çift eğrilikli yüzeyli mütəkabil strüktürler grubunda incelenecektir.

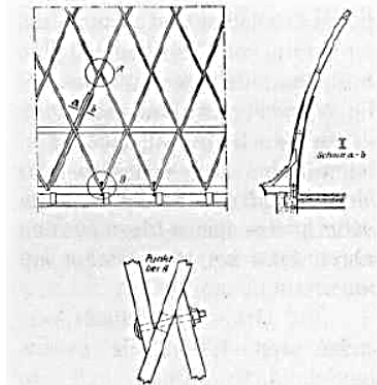


**Şekil 4.27 :** Konstrüksiyonun plan görünüşü [Winter, Rug s:193]

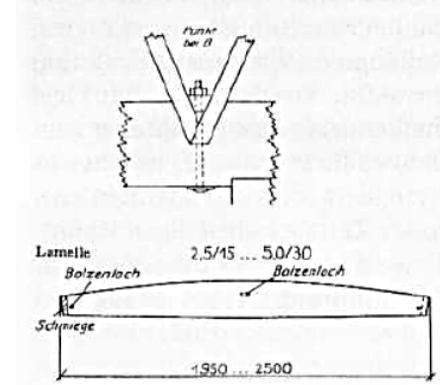


**Resim 4.3 :** Lamellendach çatı konstrüksiyonuna sahip ikiz müstakil ev, Gensaer Straße 22, Menseburg, Almanya-1922 [Winter, Rug s:192]

Detay çizimlerinden (Şekil 4.28) bağlantı mesafesinin minimum tutulduğu anlaşılan bu çatı sistemi, dönemin konvansiyonel yapım sistemlerine alternatif olarak kısa kirişler kullanılarak yüzeyin taşıyıcı olduğu bir çatı strüktürü olarak üretilmiştir. Bu yapım sisteminin daha sonra malzeme cinsi ve boyutlarında yapılacak bir takım düzenlemelerle, çeşitli yapı türleri için 14-30 metre açıklık geçebilecek şekilde geliştirildiği bildirilmektedir [Winter, Rug s:194].

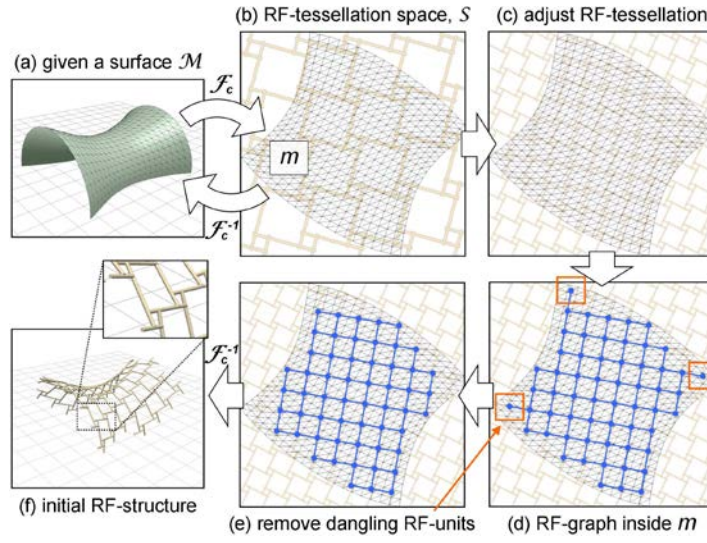


**Şekil 4.28 :** Konstrüksiyonun kısmi görünüşü, kesiti ve bağlantı detayı [Winter, Rug s:192]



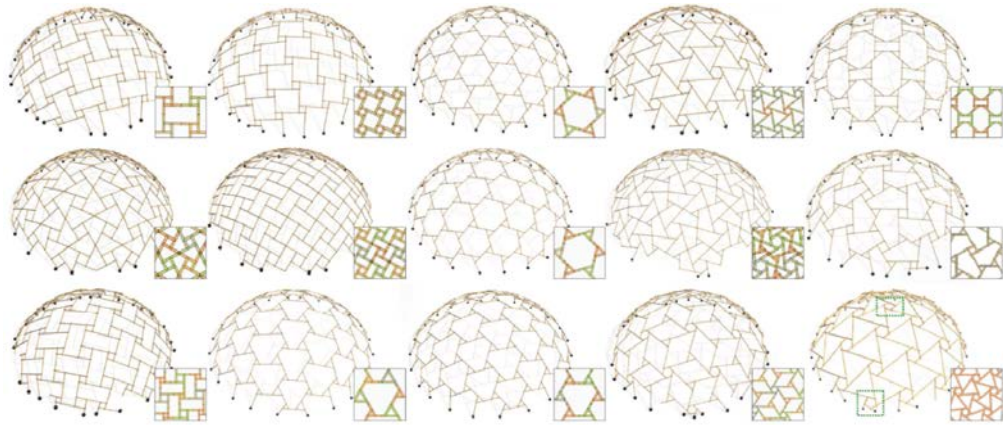
**Şekil 4.29 :** Tek bir kirişe ait çizim ve kirişlemenin tabandaki bitiş detayı [Winter, Rug s:192]

Danz, çift eğrilikli mütekabil strüktürleri tasarım yöntemine göre düzenli ve düzensiz formlar olarak ikiye ayırmıştır. Paraboloid, hiperboloid ve elipsoid gibi düzenli eğri yüzeylerin mütekabil kırışlemelere uygun hale getirilmesi, üç boyutlu yüzeyin haritalanmasıyla mümkündür[Song ve diğ. s:5].



Şekil 4.30 : Bir hiperboloidin haritalanması[Song ve diğ. s:5]

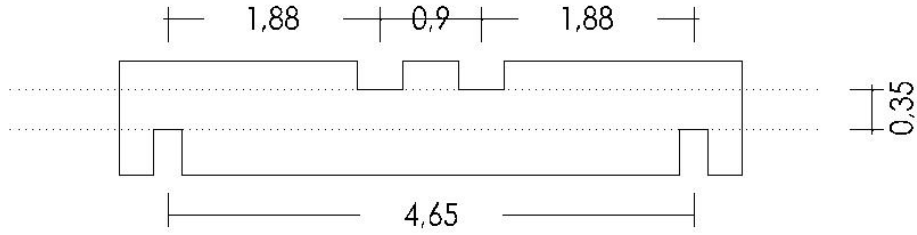
Aynı haritalama yöntemi, bir diğer düzenli çift eğrilikli form olan kubbelerin (Şekil 4.31) mütekabil strüktürlere dönüştürülmesinde kullanılır[Danz, s:84].



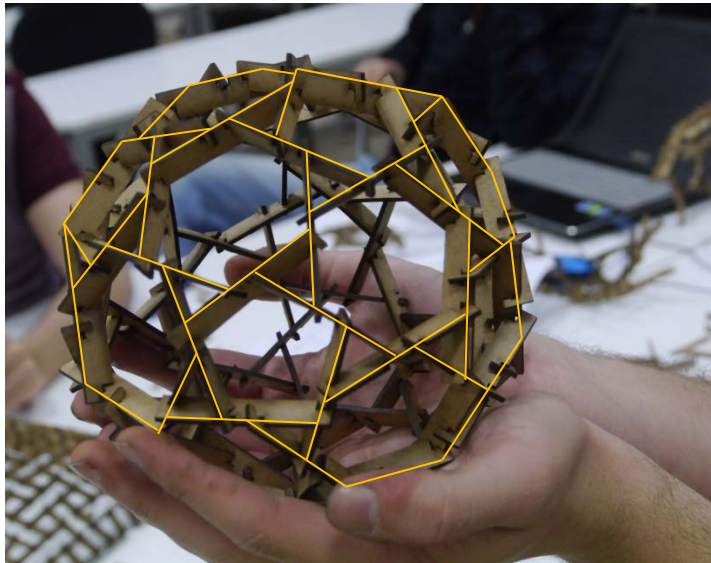
Şekil 4.31 : Bir kubbenin çeşitli kırışleme kurgularına uygun olarak haritalanması[Song ve diğ. s:8]

Küre formuna yakın bir düzgün bir çokyüzlünün yarısı alınarak, Baverel'in yöntemleri aracılığıyla (Bkz s:61-68) kubbe biçiminde bir mütekabil strüktüre dönüştürülmesi de mümkündür.

Bu tez çalışması kapsamında Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi'nde yürütülen araştırmalarda, Şekil 4.32'deki kiriş kullanılarak mütekabil strüktüre dönüştürülmüş köşeleri kesik yirmi yüzlü ya da daha yaygın ifade ile bir futbol topu (Resim 4.4) elde edilmiştir. Üçgen ve altıgenlerden oluşan modüllerin takip edildiği strüktür eksenler arası fark değeri sebebiyle beşgenler oluşturarak eğilmiştir. Bu şekilde strüktür örgüye devam edildikçe önce düzgün bir kubbe, sonra da tamamen kapanarak köşeleri kesik yirmi yüzlüye dönüşmüştür.



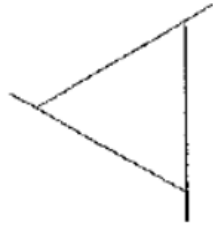
Şekil 4.32 : Köşeleri kesik yirmi yüzlünün elde edilmesinde kullanılan kiriş



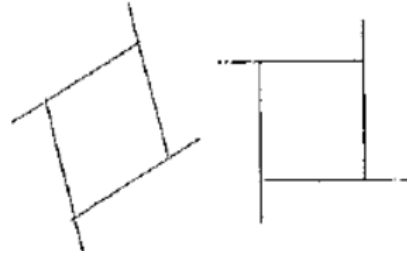
Resim 4.4: Tez araştırmaları kapsamında elde edilen mütekabil strüktür

Bu strüktür standart bir köşeleri kesik yirmi yüzlü ile aynı özellikleri taşımaktadır. 20 adet altıgenin 12 adet beşgen yüzey etrafına dizili olduğu strüktürün, bütün köşeleri üçgene dönüşmüştür. Yani köşeleri kesik yirmi yüzlüde 60 köşe olması gibi, mütakabil strüktüre dönüştürülmüş olan bu örnekte de 60 adet üçgen bulunmaktadır.

Danz'ın kurallı üretim olarak bildirdiği diğer düzensiz çift eğrilikli yüzeylerin Baverel ve Saidani'nin aşağıda tariflenen yöntemiyle oluşturulabileceği düşünülmektedir. Baverel ve Saidaniye göre çok merkezli bir mütakabil strüktürün geometrisi altlık olarak seçilen çokgen dizilimine bağlıdır ve dizimleri oluşturan köşe ve çokgenlerin yapısı strüktürün eğilebilirliğini belirler. Üretilebilecek olan mütakabil kirişleme sisteminin türü esasen temel dizilimdeki köşelere bağlıdır. Bu köşeler rijit(Şekil 4.33), yarı rijit ve serbest (Şekil 4.34) olarak üçe ayrılır[Baverel, Saidani 1998b s:67].



Şekil 4.33 : Üç kirişli rijit bağlantı [Baverel, Saidani, 1998b s:67]



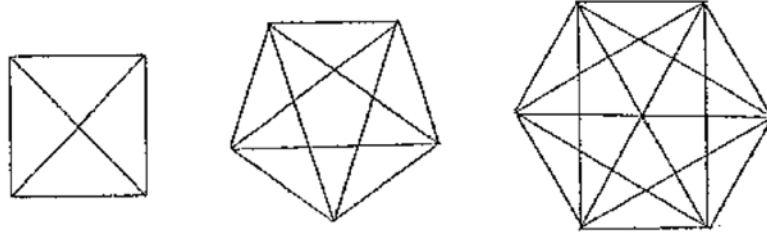
Şekil 4.34 : Dört kirişli serbest bağlantı [Baverel, Saidani, 1998b s:67]

Temel dizilimde üç elemanın birleştiği köşeler, binili birleşimde ortaya çıkan üçgen sabit olacağından “**rijit bağlantı**” olarak adlandırılmıştır. Temel çokgen dizilimlerinde rijit köşe bulunması sebebiyle bazı köşelerden sabitlenmek zorunda kalan dizilimlerde “**yarı rijit bağlantı**” adı verilen bağlantılar bulunur. Kirişleme bu sefer üçgen yüzeyi boyunca sabittir. Bu bağlantı düzenlemesi bir yada iki yönde eğilebilen strüktürler oluşturur. Dizilimde rijit köşesi bulunmayan, bütün aksları boyunca deforme edilebilen dizilimlerdeki bağlantılar “**serbest bağlantı**” olarak adlandırılmıştır. Kirişleme yüzey boyunca sabitlenmemiştir. Baverel ve Saidani bu

şekilde tanımlanan bağlantılarla nerdeyse her tür şekil oluşturulabileceğini bildirmişlerdir[Baverel, Saidani 1998b s:67].

Strüktürün geometrisi bağlantının serbestlik derecesine bağlıdır. Çok merkezli bir mütekabil kirişleme sisteminde bir köşe bir çokgendir ve üç, dört, beş yada daha çok kirişi bir arada tutabilir. Bu köşelerin tamamı çeşitli sayıda dönme aksına sahip olabilir. Dönme aksı sayısı bir çokgenin köşe sayısından,  $nv$ 'nin<sup>60</sup> köşe sayısı olduğu aşağıdaki denklem ile bulunabilir:

$$\text{Dönme aksı sayısı} = [(nv-3)nv]2 \quad (\text{Denklem 4.13})$$



Şekil 4.35 : Kare, beşgen ve altıgenin dönme aksları [Baverel, Saidani 1998b s:67]

Bu denklem ile, bir üçgenin hiç dönme aksının olmadığı, karenin iki, beşgenin beş, altıgenin dokuz ve sekizgenin yirmi tane dönme aksı olduğu bulunur.

Çift eğrilikli yüzey oluşturma kabiliyeti dizilimdeki rijit bağlantı sayısı ve bağlantı mesafesinin giriş boyuna oranı ile ilişkilidir. Örneğin Çizelge 4.1'de birbirinin “eşleniği” olan iki dizilim ele alınmıştır. Bir çokgen diziliminde bulunan çokgenlerin merkezleri birleştirildiğinde ortaya çıkan boşluksuz çokgen dizilimi o dizilimin “eşleniği” olarak isimlendirilecektir. “Eşleniği bulma” yöntemini Baverel ve Saidani “temel çokgen diziliminde üçten fazla kenarın bir araya geldiği köşelerin binili birleşime dönüştürülmesini kolaylaştırmak amacıyla” kullanmışlardır[ Saidani, Baverel, 1998b s:68].

Çizelge 4.1 incelendiğinde, birbirinin eşleniği olan iki çokgen diziliminin ( $a$  ve  $e$ ) farklı bağlantı mesafesi( $\lambda$ )/giriş boyu( $L$ ) oranlarıyla mütekabil kirişlemeye


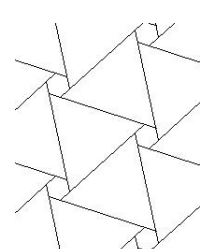
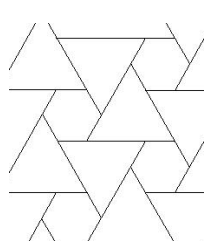
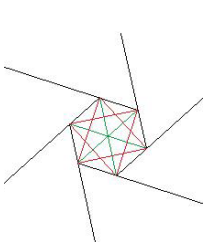
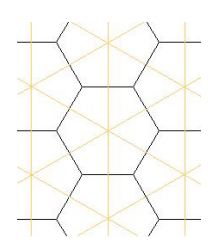
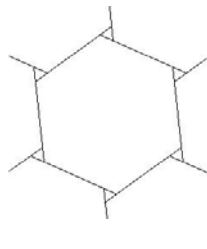
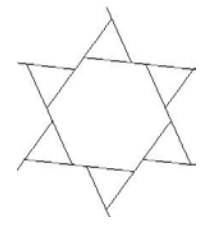
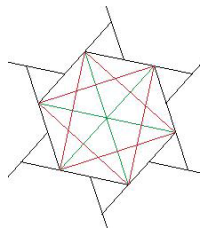
---

<sup>60</sup>  $nv$ : Number of Vertices(köşe sayısı) ifadesinin kısaltması

dönüştürülerek ( $b, c$  ve  $f, d$ ), rijit bağlantıların dönme aksları üzerindeki etkisinin ( $d$  ve  $h$ ) ele alındığı görülecektir.

**Çizelge 4.1** : Rijit bağlantıların strüktürün çift eğrilikli olmasına etkisinin 3.3.3.3.3 ve 6.6.6 örnek dizilimleri üzerinden incelenmesi

Eşlenik ■ İptal olan dönme aksları ■ Rijit köşelerden etkilenmeyen dönme aksları ■

Dizilim kodu	Temel ucucu birleşim	$\lambda/L=0.1-0.15$	$\lambda/L=0.25-0.35$	Kısıtlanan dönme aksları
$3^6$	 (a)	 (b)	 (c)	 (d)
$6^3$	 (e)	 (f)	 (g)	 (h)

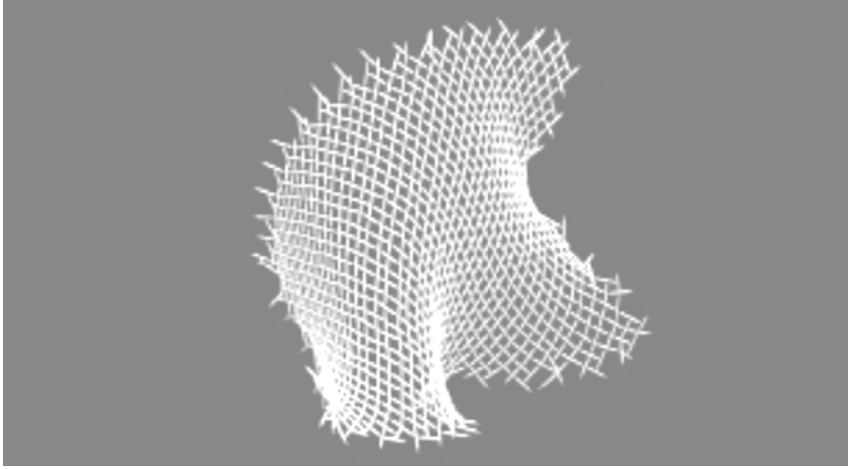
Her bir köşesinde altı adet üçgenin birleşmesini esas alan bir üçgen dizilimi olan  $3^6$  temel çokgen dizilimi (Çizelge 4.1’de a), mütakabil kirişleme sistemine dönüştürüldüğünde (Çizelge 4.1’de b ve c), oluşan altıgenlerin, rijit üçgenler tarafından kısıtlanan dönme aksları (Çizelge 4.1’de d) gösterilmiştir. Her bir köşede oluşan altıgenler, üçgen yüzeylerin rijitliğini ( $\lambda$ )/( $L$ ) oranı miktarınca azaltmıştır.

Bu dizilimin eşleniği, her köşesinde üç adet üçgenin birleşmesini esas alan altıgen dizilimi olan  $6^3$  temel çokgen dizilimidir (Çizelge 4.1’de e). Bu dizilim bir mütakabil strüktüre dönüştürüldüğünde (Çizelge 4.1 ‘de f ve g) oluşan rijit üçgenler tarafından kısıtlanan dönme aksları (Çizelge 4.1’de h) gösterilmiştir. Her bir köşede oluşan üçgenler, altıgen yüzeylerin serbestliğini ( $\lambda$ )/( $L$ ) oranı miktarınca azaltmıştır.

Baverel ve Saidani bu doğrultuda çok merkezli mütakabil kirişleme kurgularına dönüştürülebilen çokgen dizilimlerinin çok eğrilikli yüzeylere uygulanma imkanlarını sorgulamışlardır[Baverel, Saidani 1999 s:38-41].

Herhangi bir kuralsız çift eğrilikli yüzeyi “*mesh*” olarak ele alarak bir mütakabil kirişleme sistemine uygun olacak şekilde haritalama yapmak Baverel’in doktora tezinde belirttiği metodlarla (Bkz s.61-68) mümkündür. Danz, Shigeru Ban ve Cecil Balmond’un Rice Üniversitesi bahçesinde gerçekleştirdikleri pergola ve Forest Park Pavyonu projesini (Resim 2.19 ve Resim 2.20) bu gruba örnek olarak vermiştir[Danz s:84].

Tamke, Riiber ve Jungjohann, kare modülün eğri yüzeyler oluşturma imkanını incelemiş, haritalama gibi yöntemler ile üretilebilecek çeşitli eğri yüzeyler tasarlamıştır[Tamke ve Riiber ve Jungjohann s:343].



**Şekil 4.36** : Kare modül kullanılarak oluşturulmuş bir eğri yüzey görüntüsü [Tamke ve Riiber ve Jungjohann s:344]

## 4.2 Yapım Yöntemi

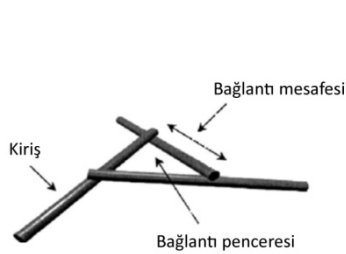
### 4.2.1 Modül

Bertin<sup>61</sup>, sistemin özelliklerini iki gruba ayırmıştır:

1. “Geometrik Özellikler”; çubukların sayısı, biçimi, ölçüleri ve birbirleriyle olan ilişkileri gibi strüktürün parametreleri olarak da görülebilen grup,
2. “Davranış Özellikleri”; yerçekimi etkisi altındaki davranışı, strüktürün yukarı doğru kavisleşmesi, açıklık geçme özelliği, elemanların uzunluğunun strüktürün geçtiği açıklıktan kısa oluşu, çubuklar haricinde bağlantı gibi ilave elemanlara ihtiyaç olmayışı gibi strüktürün nasıl çalıştığını belirleyen özellikler grubu.

#### Geometrik Özellikler:

Bir bağlantı penceresi oluşturarak bir araya gelen kirişler bir “mütekabil sistem modülü” oluştururlar. Tipik bir bağlantı penceresi Şekil 4.37’de gösterilmiştir[Baverel ve diğ. s:155].



Şekil 4.37 : Üç kirişten oluşan bir mütekabil sistem modülü [Baverel ve diğ, 2000, s:155]



Şekil 4.38 : Dört kirişten oluşan bir mütekabil sistem modülü [Baverel ve diğ, 2000, s:156]

Şekil 4.37’de görülen bağlantı penceresinin her bir kenarının uzunluğuna “bağlantı mesafesi”; bu mesafenin kirişin toplam boyuna olan oranına “bağlantı oranı” denir. Baverel ve diğerleri bu oranın tipik değerlerinin 0.1 ile 0.4 aralığında olduğunu bildirmiştir[Baverel ve diğ. s:156].

<sup>61</sup> Vito Bertin, Leverworks: One Principle Many Forms, China Architecture&Building Press, 2012, Pekin s:23

Şekil 4.39’da yer alan örneğin 4 kirişli modüllerden oluştuğu görülmektedir. Bu strüktürü oluşturan sistem modülü Şekil 4.38’de gösterilmiştir.



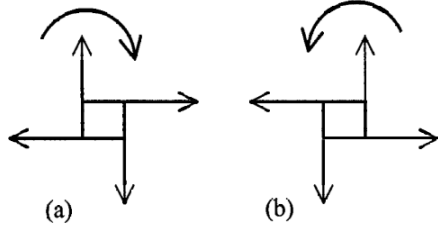
**Şekil 4.39** : Dört kirişli modüllerden oluşan bir mütekabil strüktür [Baverel ve diğ. s:156]



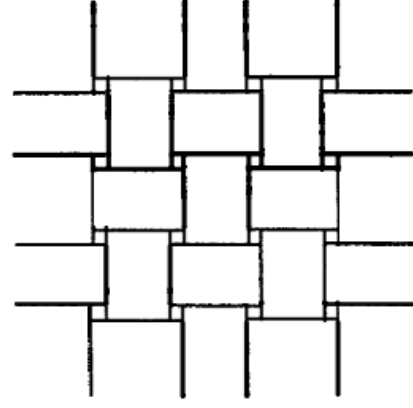
**Şekil 4.40** : Üç ve dört kirişli modüllerden oluşan mütekabil strüktür [Baverel ve diğ. s:156]

Bir modülü oluşturan kiriş sayısına o modülün “değerliği” denmiştir. Bir mütekabil strüktürü oluşturan modüllerin hepsinin aynı değerliğe sahip olması gerekmez[Baverel ve diğ. s:156]. Belirli bir üst sınır olmamakla birlikte, çok merkezli bir mütekabil strüktürün oluşturulmasında kullanılacak bir modülün değerliği minimum 3’tür[Baverel, 2000 s:38].

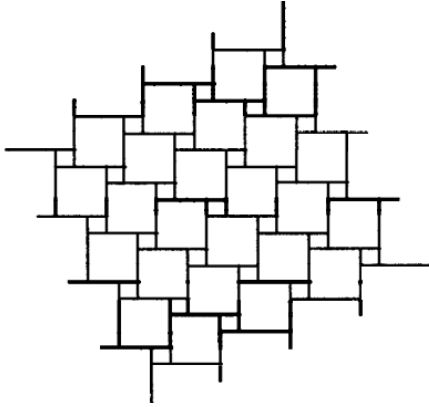
Bir mütekabil sistem modülü “sağa doğru” veya “sola doğru” olabilir. Bir modülün stili, kirişlerin dışarıya doğru yönlenecek vektörler olarak görselleştirilmesiyle belirlenir. Bir mütekabil strüktürde modüller sağa yada sola doğru veya her ikisinin kombinasyonu şeklinde olabilir[Baverel ve diğ., s:156].



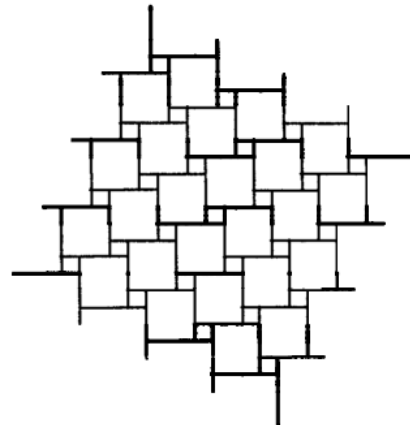
**Şekil 4.41** : Sağa ve sola doğru modüller[Baverel ve diğ, s:157]



**Şekil 4.42** : Sağa doğru ve sola doğru modüllerden oluşmuş bir mütakabil yapıdır [Baverel ve diğ, s:157]

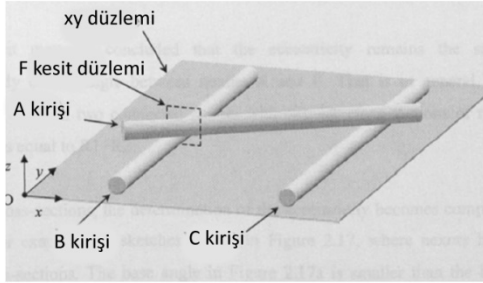


**Şekil 4.43** : Dört değerlikli sola doğru modüllerden oluşmuş bir mütakabil yapıdır [Baverel ve diğ, s:157]

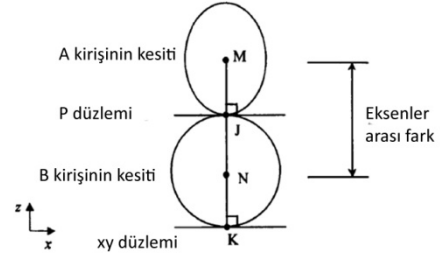


**Şekil 4.44** : Dört değerlikli sağa doğru modüllerden oluşmuş bir mütakabil yapıdır [Baverel ve diğ, s:157]

İki kiriş arasındaki bağlantı noktasından geçen kesitte elemanların merkez aksları arasındaki mesafeye “eksenler arası fark” denir, Baverel çalışmalarında bu değeri “e” ile göstermiştir [Baverel, 2000 s:36]. Eksenlerarası fark değeri düzenlemeye bağlı olarak değişiklik gösterebilir, bunun da kirişlerin boyutlandırılması, bağlantı tasarımı, üretim ve imalat aşamalarına direkt etkisi vardır[Rizzuto, Larsen s:244].

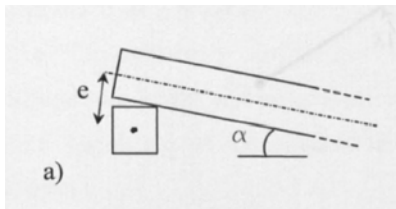


**Şekil 4.45 :** Yuvarlak kesitli kirişlerin bağlantı noktasından geçen kesiti gösterir şekil [Baverel, 2000 s:36]

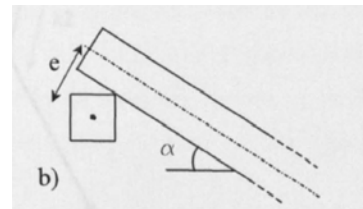


**Şekil 4.46 :** F kesiti [Baverel, 2000 s:37]

Eksenler arası fark, kirişlerin merkez akslarına dik mesafedir. Şekil 4.46’da yuvarlak kesitli kirişlerden geçen F kesitine bakıldığında; her bir kirişin merkezinden P düzlemine (P düzlemi kesişim noktasına teğet ve yer düzlemine paraleldir) dik uzaklıkların toplamı olan MN uzunluğu eksenler arası fark değerini verecektir. Genel olarak bu değer yuvarlak kesitli kirişlerde elemanların yarıçapları toplamı ile bulunabilir. Kare ve dikdörtgen kesitli elemanlar için eksenler arası farkın hesaplanması daha karmaşık bir hesap gerektirir. Şekil 4.47 ve 4.48’de gösterilen aynı boyutlu kare kesitli kirişlerin zeminle yaptıkları açı farkından dolayı farklı eksenler arası fark değerine sahip oldukları görülmektedir. Baverel bu değeri sabit tutmak için kirişler üzerinde çentikler açılması gerektiğini bildirmiştir[Baverel, 2000 s:37].



**Şekil 4.47 :** Kare kesitli kirişlerde eksenler arası fark [Baverel, 2000 s:39]



**Şekil 4.48 :** Taban açısı artan kare kesitli kirişlerde eksenler arası fark artmaktadır [Baverel, 2000 s:39]

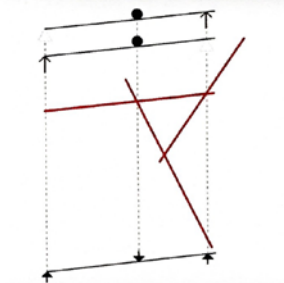
Saidani, Baverel ve Cross-Rudkin, çalışmalarında bağlantı mesafesi, kiriş boyu, kiriş çapı ve plan düzleminde kirişler arasındaki açı gibi parametreleri strüktürün ana parametreleri olarak adlandırmışlardır[Saidani, Baverel, Cross-Rudkin s:215]. Bu parametreler çeşitlendirerek sayısız modül oluşturulabilir.

### Davranış özellikleri

Bertin'in davranış özellikleri olarak tanımladığı özellikler her bir modülün özelinde bütün strüktür için geçerlidir.<sup>62</sup> Bertin, temel strüktür özelliklerini belirlemek için, her bir kirişin birbirine eşit boyda olduğu üç çubuktan oluşan bir modül kullanmıştır. Modül üç katlı döner simetriye sahiptir. Bir çubuk üzerinde, yüklerin aktarıldığı üç bağlantı noktası bulunur. Çubuğun bir ucu zemin tarafından, bir ucu ise diğer çubuk tarafından taşınmakta ve ara noktada üçüncü çubuğu taşımaktadır[Bertin, 2012 s:23].



**Resim 4.5 :** Üç elemandan oluşan açıklık geçen modül [Bertin, s:23]



**Şekil 4.49 :** Bir kirişin durumu [Bertin, s:23]



**Şekil 4.50 :** Kirişlerin diyagramı [Bertin, s:23]

Bertin bir mütakabil sistem modülünü oluşturan her bir çubuğun bir kaldıraç<sup>63</sup> gibi çalıştığını bildirmektedir. Altı klasik basit makineden biri olan kaldıraçların makas, el arabası ve cımbızın çalışma prensiplerini temel alan üç tipi vardır. Bir

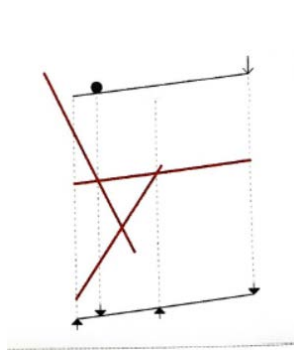
<sup>62</sup> Vito Bertin, Leverworks: One Principle Many Forms, China Architecture&Building Press, 2012, Pekin s:23

<sup>63</sup> Kaldıraç: Bir dayanak noktasının üzerinde hareket edebilen ve az kuvvet sarfıyla büyük yük kaldıran çubuk[Doğan s:586]

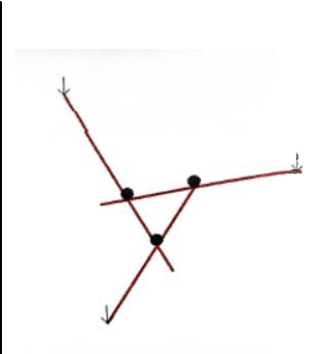
mütekabil sistem modülünü oluşturan kirişlerde, bir el arabasıyla aynı çalışma prensibi esastır. Mesnet uçtadır ve strüktür bu nokta etrafında dönebilmektedir, diğer uca kuvvet uygulanır ve yük ortada yer alır. Bertin, bu prensibin iki yönlü olarak yorumlanabileceğini bildirmiştir, yani çubuğun her iki ucu mesnet yada kuvvet olabilir. Her bir kiriş uçlarda bir diğeri tarafından taşınır ve başka bir çubuğu ara noktada taşır. Üç kiriş birbirine bağlıdır, her bir çubuğun mesneti diğeri bir çubuğa yük olmaktadır. Yerçekimi etkisi altında, çubuklar sağlam bir yüzey üzerinde dengeli olarak durabilmektedirler[Bertin, 2012 s:23].



**Resim 4.6 :** Üç elemandan oluşan konsol modül [Bertin, s:25]



**Şekil 4.51 :** Bir kirişin durumu [Bertin, s:23]

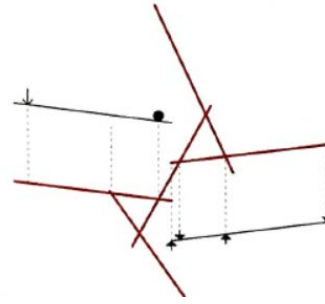


**Şekil 4.52 :** Kirişlerin diyagramı[Bertin, s:23]

Bertin, modülün baş aşağı edilmiş halini “konsol modül” olarak adlandırılmıştır. Bu şekilde bir araya gelen çubuklar, kuvvet olarak yerçekiminin kullanıldığı, mesnetin orta noktada yer aldığı ve diğeri bir çubuğun taşınan yük olduğu bir kaldıraç tipini oluştururlar. Dengelenmiş bir durumda, bütün çubuklar zemine değmekte ve yükün üçte birini aktarmaktadır[Bertin, 2012 s:25].



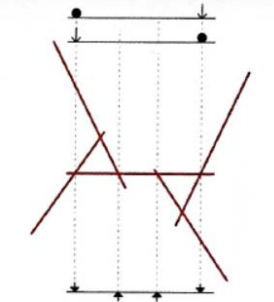
**Resim 4.7 :** İkiz açıklık geçen modül[Bertin, s:25]



**Şekil 4.53 :** Kirişlerin diyagramı [Bertin, s:23]



**Resim 4.8 :** İkiz konsol modül [Bertin, s:25]



**Şekil 4.54 :** Kirişlerin diyagramı [Bertin, s:23]

İkiz modüllerde, bir kiriş zeminden koparılmış, havada asılı durumdadır. Dört çevre kirişi bu asılı kirişi sıkıştırmaktadır, bir taraftan ikisi dışta ve diğer ikisi içtedir. Konsol ve açıklık geçen strüktürler birbirinin baş aşağı edilmiş versiyonlarıdır[Bertin, 2012 s:25].

#### 4.2.2 Bağlantı-Birleşim-Düğüm

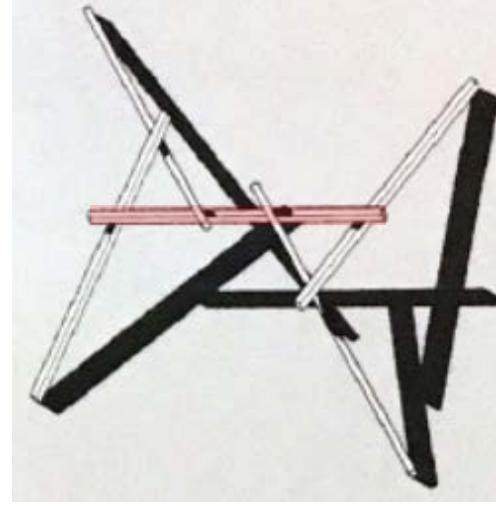
Bir mekânsal strüktür olarak ele alındığında, mütekabil strüktürleri diğer mekânsal strüktürlerden ayıran özellik bağlantı noktalarıdır. Bir jeodezik kubbenin eklemlerinde, ileri teknoloji sayesinde tek seferde 5 ila 12 eleman birbirine bağlanırken, mütekabil strüktürlerin her bir eklem yerinde sadece iki kiriş bir araya gelebilir[Saidani, Baverel, Cross-Rudkin s:215]. Bertin'e göre mütekabil

strüktürlerin kurucu prensiplerinden biri elemanların kendiliğinden bağlantılı olmasıdır. Böylece strüktür, ilave bağlantı parçalarına ihtiyaç duyulmadan, tek tipte elemanlardan oluşturulabilmektedir. Elemanların düzenlemesi bağlantıların biçimini şekillendirmektedir[Bertin, 2012 s:29].

Şekil 4.55'te gösterilen altı kirişli modülde her bir kiriş zeminden destek aldığı için Şekil 4.56'daki asılı kirişte görünür hale gelen kendi kendine bağlantı yeteneği henüz görünür değildir. Asılı kiriş uçlarda alttan, ortada üstten diğer iki kiriş arasında sıkışmıştır. Bertin, bu düzenlemeyi sert elemanlarla yapılan kısmî bir örgü sistemi olarak yorumlamıştır[Bertin, 2012 s:29]. Kohlhammer ve Kotnik, bağlantıların geliştirilmesinin direkt olarak bütün sistemin yük altındaki deformasyonunu etkilediğini belirtmişlerdir[Kohlhammer, Kotnik s:81]. Bağlantılar, yük aktarımında yapısal kararlılık sunacakları için temel bir öneme sahiptir.



**Şekil 4.55 :** Altı kirişli modülde yere basan kısımlar işaretlenmiştir[Bertin, 2012 s:29]



**Şekil 4.56 :** Üç kirişli iki modül birleştirildiğinde ortaklaşan kiriş diğer kırışler tarafından sıkıştırılarak asılı kalır[Bertin, 2012 s:29]

Bir mütেকabil strüktürü oluşturmak için, eğilme momentini karşılayabilen herhangi bir malzeme seçilebilir. Baverel'e göre en uygun elemanlar, ahşap, çelik ve alüminyumdur[Baverel, 2000 s:265]. Bağlantı tipi özelde kompleks

kompozisyonların imalat aşamasını önemli ölçüde etkileyeceğinden detaylı bir tasarım gerektirir. Elemanların bağlantı noktalarında bir araya gelişi mekanik bağlantılar olmadan, sadece basınç ve sürtünme ile yapılabilir. Abeille'nin düz tonozu (Şekil 2.26) ve Pizzigoni'nin önerisi (Resim 3.5) buna örnektir. Sürtünme kuvvetini desteklemek üzere, bağlamak veya bağlantı noktasında kirişler üzerinde çentikler açmak gibi basit bağlantı teknikleri kullanılabilir[Kohlhammer, Kotnik s:81].

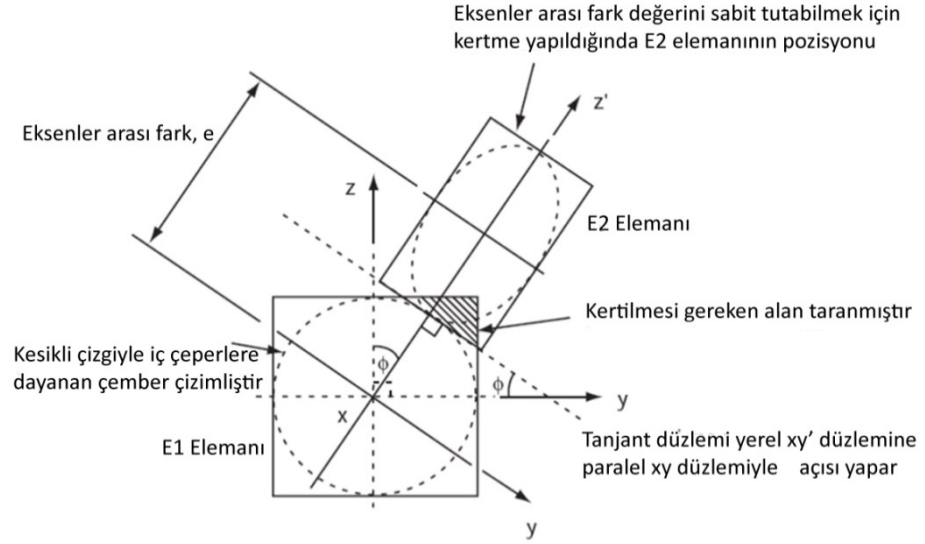
Binili birleşimlerden oluşan mütakabil kirişleme kurgularındaki temel özellik, bağlantı noktalarında elemanların merkez akslarının genellikle aynı hizada olmamasıdır. Bu noktalarda eksenler arası fark görünür haldedir ve bağlantı çözümüne katılması gerekmektedir[Rizzuto, Larsen s:244]. Pratikte herhangi bir kiriş üzerinde çentik açılarak iki veya üç boyutlu bir kurguyu oluşturmak üzere montaj yapılabilir. Çentik açılmasında her bir kiriş için parametreler yerel koordinat sistemine göre kirişin yönü dikkate alınarak belirlenmelidir[Rizzuto, Larsen s:250].

**Çizelge 4.2 :** Çentik kullanımının avantaj ve dezavantajları [Rizzuto, Saidani ve Chilton s:129].

	Avantajlar	Dezavantajlar
1	Çentiklerin atölye gibi kontrollü bir ortamda önceden açılacak olmasının, imalatta açı kontrolü ve ardışık modül ile birleştirme işlerini kolaylaştırması	Ahşabın, nem oranı düşerek hacim kaybetmesine yönelik tedbir gerektirmesi.
2	Modülün geometrisini değişmez biçimde sabitlemesi	Rastlantısal biçimler oluşturmayı kısıtlaması
3	Kelepçe gibi ilave bağlantı elemanları ile sağlanan basınç ve çekme kuvvetlerinin iletiminin çentikli birleşimlerde tek bir civata kullanımı veya civatalı çelik köşebentler ile kendiliğinden sağlanması	Kiriş üzerinde çentik kullanımının, malzeme kesitinin azaltılmasına bağlı olarak eğilmeye karşı kirişi zayıflatması

Planda birbirine dik olan eşit iki kiriş düşünüldüğünde eksenlerarası fark olan “e” değerinin, taban açısı olan “ $\alpha$ ” değerine bağlı olarak değişiklik göstereceği daha önce

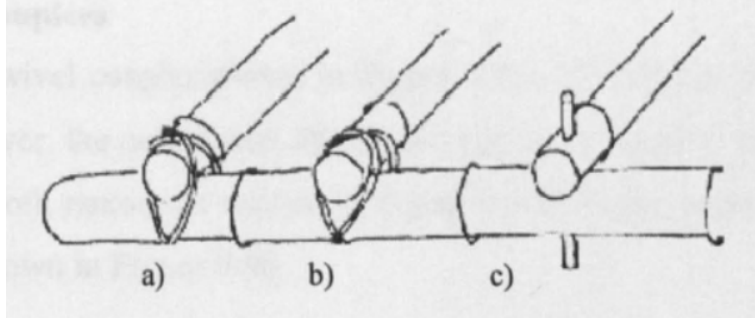
belirtilmişti(Şekil 4.47 ve Şekil 4.48). Şekil 4.57’de eksenler arası fark değerini sabit tutmak üzere kirişler üzerinde kertilmesi gereken gereken yerler gösterilmiştir.



Şekil 4.57 : Çok merkezli bir mütakabil strüktürün bağlantı noktasından alınan kesitte kertilmesi gereken alan taranmıştır[Rizzuto, Larsen s:251]

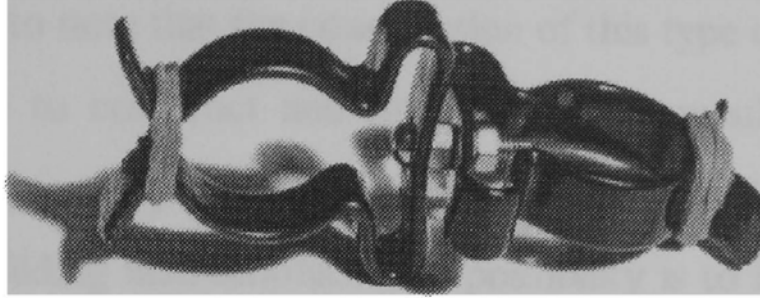
Çok merkezli bir mütakabil strüktür ele alındığında, üç boyutlu geometrinin sebep olacağı birleşik açıların her biri için eksenler arası fark değerini sabit tutacak şekilde uygun çentik belirlenmesi gerekmektedir. Bu durum imalatı karmaşıktır[Rizzuto, Larsen s:250].

Ahşap malzemelerin bağlantısı çentik açmak yerine mekanik bağlantı elemanları veya yapısal yapıştırıcılar kullanılarak da yapılabilir. Baverel, yuvarlak kesitli ahşap kirişler için Şekil 4.58(b) ve Şekil 4.58(c)de delik açılmış olan bağlantı örneklerini vermiştir. Birinci örnekteki kirişin delik olmadığı belirtilmiştir. İki ve üçüncü örneklerde kirişler arasındaki bağlantı, her iki kirişte de bulunan deliklerden geçirilen yardımcı bağlantı elemanı ile sağlanmaktadır[Baverel, 2000 s:267]. Mekanik bağlantı elemanları bağlanan elemanlarda yükü aktarma biçimine bağlı olarak iki alt grupta incelenebilir. Bunların ilki dübel tipi bağlantı elemanlarıdır; çivi, zımba, cıvata, dübeller ve vidalar bu grupta yer alır. İkinci grup ise metal köşebent gibi ara parçalı bağlantı elemanlarıdır. Bu ikinci grupta yük, elemanlar üzerinde daha geniş bir taşıyıcı alanda iletilmektedir[Rizzuto, Larsen s:250].



**Şekil 4.58** : Yardımcı eleman kullanılarak yapılabilecek bağlantı çeşitleri[ Baverel, 2000 s:267]

Yuvarlak kesitli kirişleri birbirine bağlamanın bir yolu da kelepçe kullanımıdır. Kelepçeler sürtünmeyle sıkıştırmaya dayalı yük aktarımı sağlayan bir bağlantı şeklidir. Popovic doktora tezi kapsamındaki hesaplamalar için yaptığı makette kullandığı kelepçeler için (Resim 4.9) “birbirine cıvatalı iki çelik halkadan oluşan bir çeşit küresel eklem<sup>64</sup>” ifadesini kullanmıştır[Popovic, s:99].

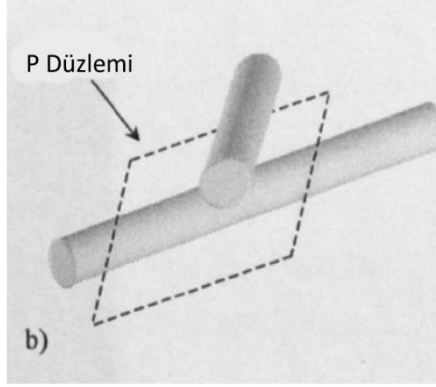


**Resim 4.9** : Popovic'in kiriş bağlantıları için kullandığı küresel eklem benzeri çalışan kelepçe [Popovic s:100]

Baverel çeşitli hesaplamalarını yaptığı mütekabil sistemlerde kiriş olarak iskele boruları ve bağlantı elemanı olarak da kelepçe kullanmıştır(Resim 4.10). Metal halkaların cıvata ile bağlı olduğu eklemler kirişlerin P düzleminde dönmesine izin vermektedir. Kirişlerin kayması sürtünmeyle engellenmiştir.

---

<sup>64</sup> Küresel eklem: Eksenleri çakışmayan veya paralel olmayan hareketli iki milin birbirine bağlanmasını sağlayan mafsal[URL-39]



**Şekil 4.59** : İskele kelepçesi kullanıldığı varsayılan bir bağlantıda belirtilen P düzlemi[Baverel, 2000 s:269]



**Resim 4.10** : İskele kelepçesi kullanılan bir bağlantı[Baverel, 2000 s:269]

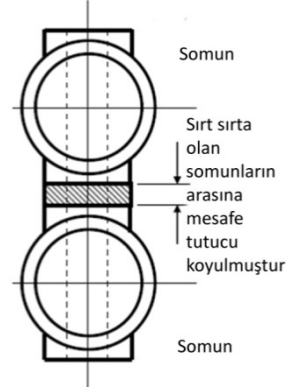
Rizzuto ve Larsen, bu kelepçelerin temel avantajının dönebilme yeteneği olduğunu; fakat sadece standart boyutlarda (48.3 mm çapında) üretilmiş iskele çubukları için kullanılabileceği için sınırlayıcı olacağını belirtmişlerdir[Rizzuto, Larsen s:247].

Baverel' in ahşap kirişler için önerdiği (Bkz. s: 120) kirişler üzerinde delik açarak yardımcı eleman kullanımıyla kirişleri birbirine bağlama yöntemini, Rizzuto<sup>65</sup> boru kesitli çelik profillere uygulamış ve bağlantı toleranslarını incelemiştir. Cıvatalı birleşimler, her iki kiriş üzerinde açılmış olan genişçe bir tolerans deliğinden cıvataların geçirilip sıkılanmasıyla yapılır. Bu delik, kirişlerin bir miktar dönmesini mümkün kılmakta ve kirişlerin strüktürü biçimlendirecek şekilde ayarlanmalarına izin vermektedir. Popovic, bu tip bağlantılarda temel eleştirinin ortasından delmenin kirişin yük taşıma kapasitesini ciddi biçimde azaltacağı yönünde olduğunu bildirmiştir[Popovic s:100].

Çok merkezli mütakabil kirişlemelerde, eksenlerarası fark değeri geometriyi belirleyen bir parametre olarak ele alındığında, bu değerini azaltmak için kerte

<sup>65</sup> Rizzuto, J. P. (2007) Rotated Mutually Supported Elements in Truncated Icosahedric Domes. *Journal of International Association for Shell and Space Structures*, 48, No.1, 3-17.

yapılması veya artırmak için mesafe tutucu elemanlar kullanılması gerekebilir. Rizzuto, köşeleri kesik yirmiyüzlüden oluşturduğu kubbe konstrüksiyonunda eksenler arası fark değerini artırmak üzere esnek bir ara eleman kullanarak (Resim 4.11) cıvata ile kirişleri bağlamıştır. Bu esnek mesafe tutucu elemanın, metal esaslı muadillerine göre kiriş yönelimindeki hataları daha başarılı şekilde elimine ettiği bildirilmiştir[Rizzuto s:11].

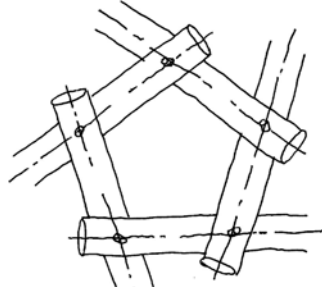


**Resim 4.11** : Somun kullanılmış bir cıvatalı birleşim örneği [Rizzuto s:11]

**Şekil 4.60** : Bağlantı noktasından kesit [Rizzuto s:11]

Boru kesitli profillerin birleşiminde bir diğer örnek ise Bijnen'in<sup>66</sup> önerisidir. Rizzuto ve Larsen, Bijnen'in jeodezik bir kubbenin yapımı için kertilmiş profilleri cıvata ile bağlamayı (Şekil 4.61 ve Şekil 4.62) önerdiğini bildirmişlerdir[Rizzuto, Larsen s:250].

<sup>66</sup> Bijnen, A. 1976 tarihli, Een geodetiese knoopkonstruktie. Octrooiraad Nederland.Terinzagelegging. Aanvrage, 7603046 No'lu patent sahibi olduğu bildirilmiştir[Larsen, Rizzuto s:245]

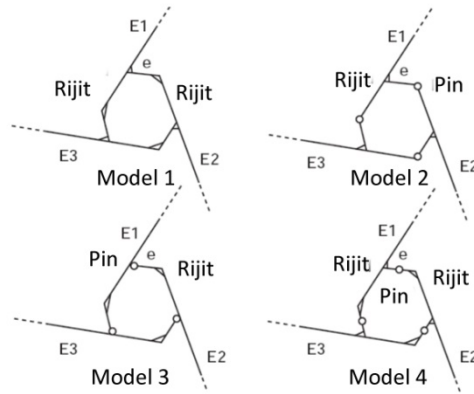


**Şekil 4.61** : Bijnen' in patentli kertilmiş profilleri plan [Rizzuto, Larsen s:245]



**Şekil 4.62** : Bijnen' in patentli kertilmiş profilleri görünüş [Rizzuto, Larsen s:245]

Rizzuto ve Larsen civatalı bağlantılarla oluşturulmuş mekânsal strüktürlerin davranışını incelemiştir. Yapılan elastik analizde Şekil 4.63'te görülen aynı elemanlarla oluşturulmuş dört çeşit bağlantı incelenmiş ve rijit bağlantının en doğru ilişki olduğu sonucuna varılmıştır[Rizzuto, Larsen s:250].



**Şekil 4.63** : E:Eleman sayısı, e:eksenler arası fark, Rijit- pin: bağlantı türü [Rizzuto, Larsen s:249]

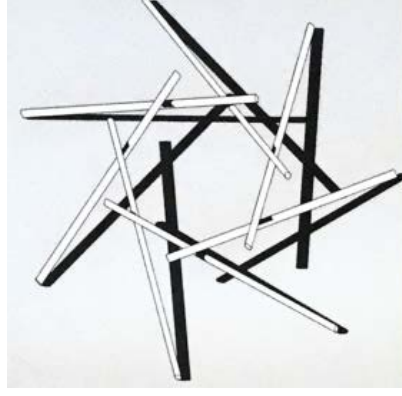
Rizzuto ve Larsen'e göre Şekil 4.63'te gösterilen bağlantılardan en iyi sonucun rijit-rijit olan tipten alınmasının sebebi, "elemanlar pinli dönebilir şekilde bağlanmış olsa bile, üç boyutlu strüktürlerde bağlantıların rijitmiş gibi davranmasıdır[Rizzuto, Larsen s:249].

### 4.2.3 Türetme Yöntemleri

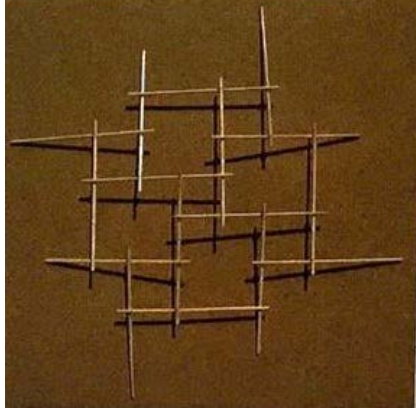
Bertin mütekabil strüktürlerin diğer bir belirleyici prensibinin elemanlar arasındaki karşılıklı (mütekabil) ilişki olduğunu belirtmiştir. Her bir eleman bir diğerini taşımakta ve bir diğeri tarafından taşınmaktadır. Bu özelliği sağlamak koşuluyla bir mütekabil strüktür geometrik açıdan çok çeşitli formlar alabilir. Şekil 4.64'teki gibi tek merkezli dönel strüktürlerde, her bir çubuk ikinci bir çubuğu taşır ve üçüncü bir çubuk tarafından taşınır [Bertin, s:27].



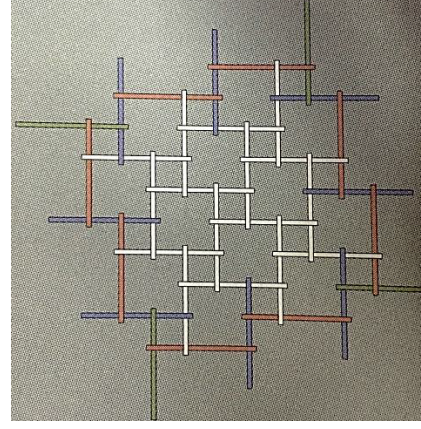
**Resim 4.12** : Üç kirişli tek merkezli dönel strüktürler [Bertin, s:25]



**Şekil 4.64** : Yedi kirişli tek merkezli dönel strüktürler [Bertin, s:25]



**Resim 4.13** : Dört kirişli modülden elde edilmiş tamamlanmış merkez [Bertin, s:25]

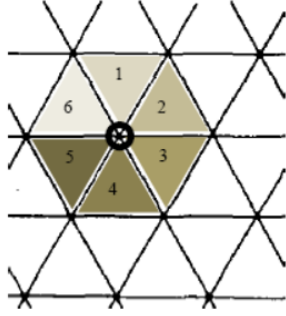


**Şekil 4.65** : Resim 4.11'de verilen tamamlanmış merkezin kiriş eklenerek türetmeye devam edilmesi [Bertin, s:23]

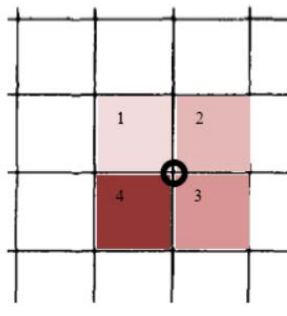
Bertin, çok merkezli bu strüktürlerde, tamamlanmış merkezin tespit edilmesinin gerektiğini bildirmiştir. Şekil 4.65'te gösterildiği gibi, merkezde, her bir çubuk uçlarında iki çubuk tarafından taşınır ve arada iki diğerini taşır. Bir merkez etrafında modüllerin çoğaltılmasıyla çok merkezli kirişleme kurgularının elde edilmesi mümkündür. Bu durumda kirişlerin davranışını takip etmek gerekir. Kiriş ekleyerek türetmede üç geçici aşama vardır, bu aşamalar Şekil 4.65'te kırmızı, yeşil ve mavi ile gösterilmiştir. Kırmızı ve mavi renk, tamamlanmamış merkezde üç çubukla ilişkili olan kirişleri; yeşil renk ise, iki çubukla ilişkili kirişleri göstermektedir. Mavi ve yeşil kirişlerin bir ucu zemin tarafından taşınmaktadır [Bertin, 2012 s:27].

Mütekabil strüktürler tek başına bir modülden ya da çeşitli modüllerin kombinasyonundan oluşabilir. Baverel, temel bir çokgen dizilimini bağlantı mesafesi ve eksenler arası fark değeri sıfır olan bir mütekabil sistem olarak ele almıştır[Baverel, 2000, s:40]. Bir mütekabil kirişleme şemasının oluşturulması, temel bir çokgen diziliminin bağlantı mesafesi ve eksenler arası fark değeri kazandırılarak dönüştürülmesini esas alır[Saidani, Baverel, 1999, s:37].

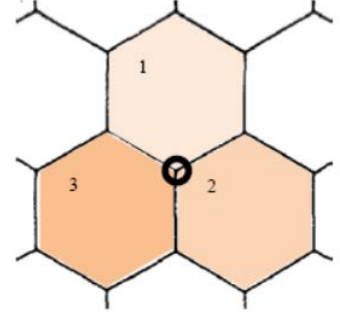
Grünbaum ve Shephard, boşluksuz bir mozaiklemenin, düzgün ve dışbükey çokgenlerden oluşturulabileceğini belirtmişlerdir. Bir çokgen dizilimini oluşturan çokgenlerin kenar sayısı olan  $n$  ile kodlayarak çokgen dizilimlerinin isimlendirilir. Örneğin Şekil 4.66’da gösterilen üçgenlerden oluşan bir dizilim, “bir köşede bir araya gelen üçgen sayısınca 3’ün yanyana” yada “3 üzeri” şeklinde yazılmasıyla kodlanır. Şekil 4.66, Şekil 4.67 ve Şekil 4.68’de bu dizilimlere örnek verilmiştir[Grünbaum, Shephard s:228-229].



**Şekil 4.66 :** İşaretli köşede köşelerde 6 adet üçgen birleşmektedir. Dizilim; 3.3.3.3.3.3 veya  $3^6$  şeklinde kodlanır[Grünbaum, Shephard s:229]



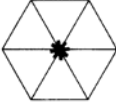
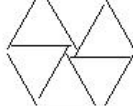

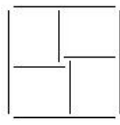
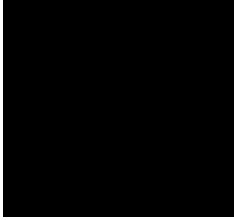
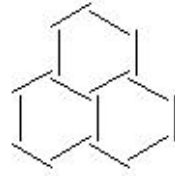

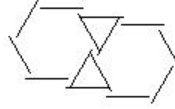

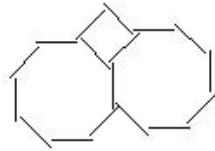
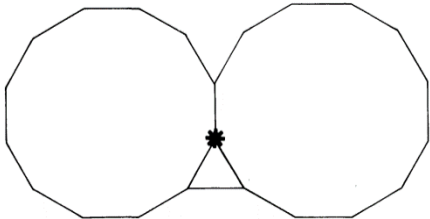
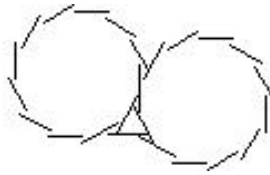
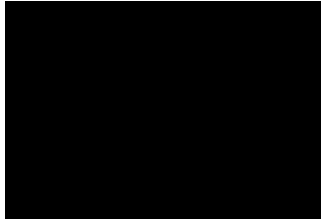
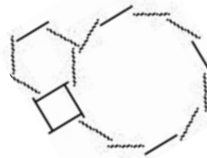
**Şekil 4.67 :** İşaretli köşede ve tüm köşelerde 4 adet kare birleşmektedir. Dizilim; 4.4.4.4 veya  $4^4$  şeklinde kodlanır [Grünbaum, Shephard s:229]




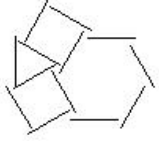
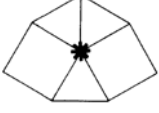
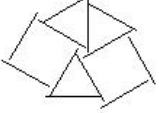
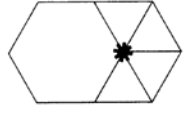
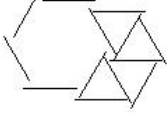
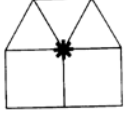
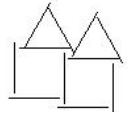
**Şekil 4.68 :** İşaretli köşede ve tüm köşelerde 3 adet altıgen birleşmektedir. Dizilim; 6.6.6 veya  $6^3$  şeklinde kodlanır [Grünbaum, Shephard s:229]

Baverel’in doktora tezinde düzgün çokyüzlülerin mütekabil strüktürlere dönüştürülmesinde belirttiği öteleme ve döndürme gibi yöntemler (bkz. s:52-56) kullanılarak çokgen dizilimlerinin mütekabil kirişleme sistemlerine dönüştürülmesi mümkündür. Çizelge 4.3’de öteleme ve döndürme yöntemleri kullanılarak düzenli çokgen dizilimleri mütekabil kirişleme şemalarına dönüştürülmüştür[Saidani, Baverel, 1998b s:69-71].

**Çizelge 4.3 :** Düzgün temel çokgen dizimlerinin mütেকabil kirişleme şemasına dönüştürülmesi

Dizilimin Kodlanışı	Temel Dizilim [Grünbaum, Shephard s:230]	Dönüştürülen Mütেকabil Kirişleme Şeması
3.3.3.3.3.3		
4.4.4.4		
6.6.6		
6.3.6.3		
8.8.4		
12.12.3		
4.6.12		

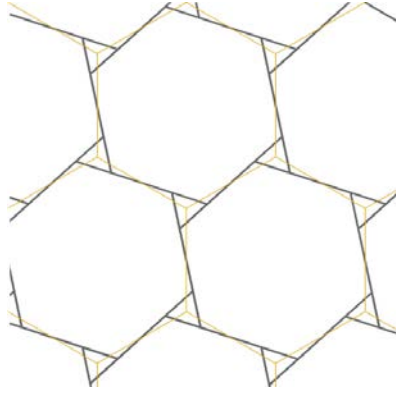
**Çizelge 4.3.(devamı)** Düzgün temel çokgen dizimlerinin mütakabil kırıtleme Şemasına dđnüşürölmesi

Dizilimin Kodlanışı	Temel Dizilim [Grünbaum, Shephard s:230]	Dđnüşürölgen Mütakabil Kırıtleme Şeması
3.4.6.4		
4.3.4.3.3		
3.3.3.3.6		
3.3.3.4.4		

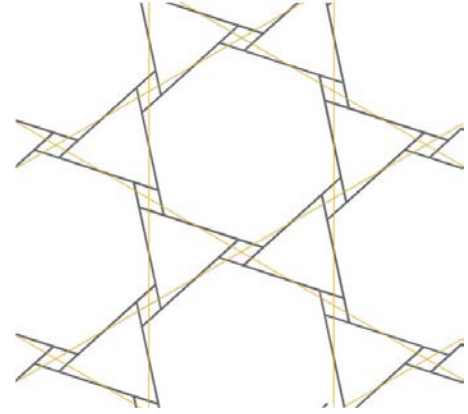
#### 4.2.3.1 Düzgün Kirişleme

Bu tez çalışmasında bir kirişlemenin oluşturulmasında tek tip kiriş kullanılan sistemler “düzgün kirişleme sistemleri” olarak isimlendirilmiştir.

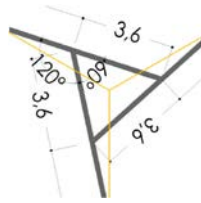
$6^3$ ,  $4^4$ ,  $3^6$  ve 6.3.6.3 çokgen dizilimleri düzgün kirişlemelere dönüştürülebilir. Ortaya çıkan, bağlantı mesafesinin kenar uzunluğu olduğu çokgenlerin iç açıları 60-90-120 gibi 360’ı tam bölen sayılar olacaktır.  $6^3$  dizilimini ele alırsak, dizilim mütakabil kirişleme kurgusuna dönüştürüldüğünde (Şekil 4.69) her köşenin bir eşkenar üçgene dönüştüğü görülecektir. Aynı şekilde 6.3.6.3 dizilimi ele alındığında bir köşede iki eşkenar üçgen ve iki düzgün altıgenin bir araya geldiği görülür. Bu dizilim dönüştürüldüğünde (Şekil 4.70) dört kenarın birleştiği bütün köşelerden 60-120-60-120 iç açlarına sahip birer paralelkenar çıkacaktır.



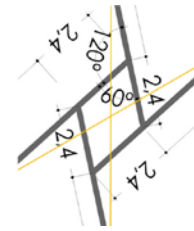
Şekil 4.69 : 6.6.6 diziliminin mütakabil kirişlemeye dönüşümü



Şekil 4.70 : 6.3.6.3 diziliminin mütakabil kirişlemeye dönüşümü

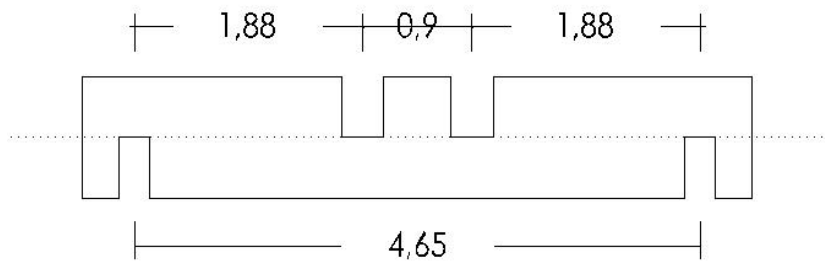


Şekil 4.71 : 6.6.6 diziliminde köşenin dönüşümü



Şekil 4.72 : 6.3.6.3 diziliminde köşenin dönüşümü

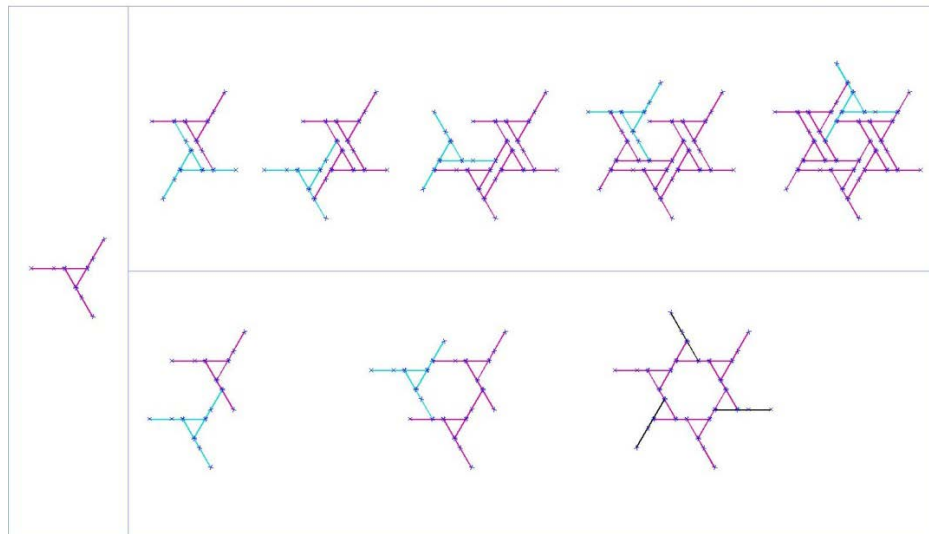
Ucuca bağlantıların binili birleşimlere dönüşmesinde oluşan bu yeni çokgenlerin çubuk boyu ve bağlantı mesafeleri birbirine eşit kirişlerden oluşturulabilmesi düzgün kirişlemelerin temel şartıdır. Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi'nde yürütülen tez araştırmaları kapsamında, 2mm kraft kartonundan kesilmiş olan Şekil 4.73'te gösterilen kiriş kullanılarak kirişlemeler oluşturulmuştur. Seçilen kirişin çentikleri açılı birleşimlere imkan tanıyacak şekilde geniş olarak açılmıştır.



**Şekil 4.73 :** Maket çalışması için seçilen kiriş boyutları incelendiğinde kiriş boyunun (L) 4.65cm; bağlantı mesafesinin ( $\lambda$ ) 1.88cm; eksenler arası fark (e) değerinin 0 (sıfır) olduğu görülür.

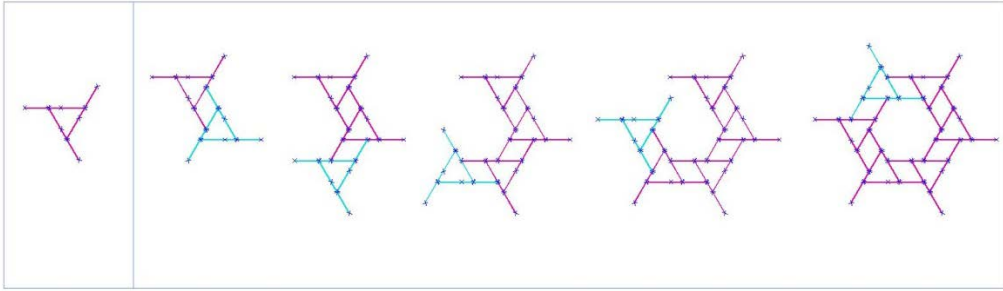
Kiriş üzerinde bulunan çentik yerleri işaretlenmiştir. Her bir kirişin kenarlarda bulunan çentiklerde bir diğer kiriş üzerine bineceği ve ortadaki çentiklerde birer diğer kirişi taşıyacağı dikkate alınmalıdır.

Şekil 4.74'e göre üç kirişli modül ile başlanan bir kirişleme iki şekilde devam edebilir.



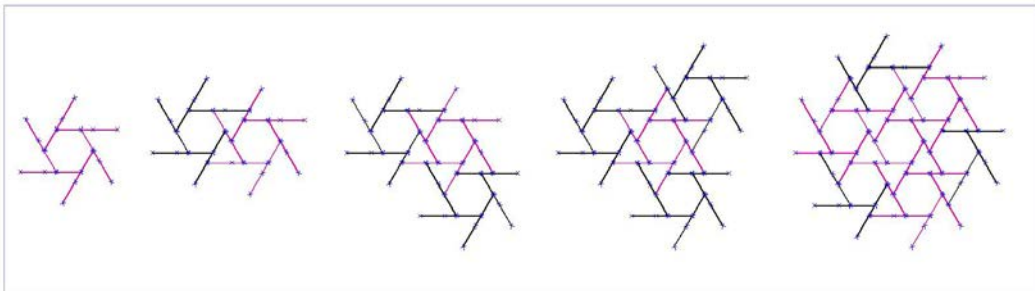
**Şekil 4.74 :** Üç kırıklı modül ile başlayarak, 6.3.6.3 ve 6.6.6 dizilimlerine uygun tamamlanmış merkezler elde edilmiştir.

İlk seçenekte iki modül arada ince uzun bir paralelkenar oluşturacak şekilde bir araya gelmektedir. Bu kural sürdürüldüğünde altıncı adımda merkezdeki altıgen ortaya çıkar ve tamamlanmış merkez oluşur. Altıgen ve üçgenler arasında paralelkenarlar oluşacak şekilde bu kırışleme binili birleşime dönüşmüş bir 6.3.6.3 dizilimidir denebilir. Altıncı adımda ortaya çıkan tamamlanmış merkezi kullanarak dönel simetri ile artan modüler bir örüntü oluşturmak mümkündür. Çentik yerleri değiştirilerek(Şekil 4.75) 3.6.3.6 düzenlemesine alternatif bir diğer örüntü de elde edilebilir.



**Şekil 4.75 :** 3.6.3.6 diziliminde modülün çentik yerleri değiştirilerek alternatif bir örüntü oluşturulmuştur.

İkinci seçenekte ise üçgen modüller ile altıgenler arasında başka bir çokgen bulunmamaktadır. Bu düzenleme  $6^3$  temel diziliminin dönüşümüdür. Üçüncü adımda merkezdeki altıgen ortaya çıkmaktadır ve tamamlanmış bir merkeze dönüştürülmesi veya örüntünün devam ettirilebilmesi için modülden bağımsız kırışler eklenmesi gerekmektedir. Bu düzenleme modüler değildir. Her iki dizilimin de eşleniği olan  $3^6$  dizilimi için de aynı durum geçerlidir. Şekil 4.76'da bu dizilimin temel modülü olan altı kırıklı modülün bir tamamlanmış merkeze dönüşümü gösterilmiştir.



**Şekil 4.76 :**  $3^6$  diziliminin tamamlanmış merkeze dönüştürülmesi için modül haricinde kırışler eklenmelidir. Örüntü modüler değildir.

Her bir adımda bir kırışi eksik birer modül, döneel simetri takip edilerek eklenmiştir. Son adımda ise ikişer kırışi eksik modüllerin eklenmesi gerekmiştir. Örüntü modüler değildir.

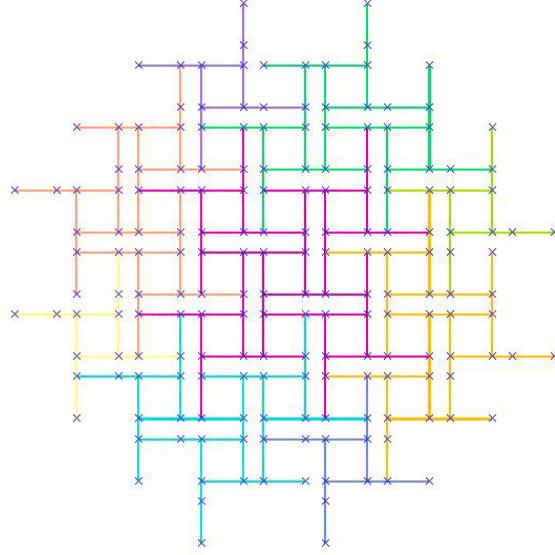
Temel sistem modülü dört kırışli olduğunda oluşturulabilecek iki kırışleme yöntemi Şekil 4.77’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.77 :** Kare modülden oluşturulan birinci örüntü modülerdir, ikinci örüntünün ise tamamlanmış merkeze dönüştürülmesi için ilave kırışlere ihtiyacı vardır.

Birinci seçenek  $4^4$  diziliminin dönüştürülmüş halidir. Modül, her adımda döneel simetri takip edilerek eklendiğinde dördüncü adımda bir tamamlanmış merkeze ulaşmak mümkündür. Tamamlanmış merkezler de ilave parça gerekmeden bir örüntüye dönüştürülebilir.

İkinci seçenekte ise sağa ve sola doğru iki modül kombin edilerek elde edilen bir örüntü vardır; tamamlanmış merkez ilave parça olmadan oluşturulamaz fakat bu boşluklar örüntü oluşturmada (Şekil 4.78) kendiliğinden tamamlanmaktadır. Bu durumda bu düzenleme modülerdir.



**Şekil 4.78** : Sağa ve sola doğru kare modüllerin komşu olmasıyla elde edilen örüntü

Çalışmalardan çıkan sonuca göre tek tip kiriş kullanılarak, temel çokgen dizilimlerinden türetilebilecek altı çeşit örüntü mevcuttur. Bu örüntüler temel sistem modülünün 360'ı tam bölen 60, 90- 120 gibi iç açılara sahip olmasını esas almaktadır.

#### **4.2.3.2 Karmaşık Kirişleme**

Düzgün kirişlemeler veya tek merkezli sistem modülleri temel alınıp, kuralın bozulmasıyla yahut sadece binili birleşim prensibine sadık kalınarak üç boyutlu strüktürler elde etmek için karmaşık kirişlemeler kurgulanabilir. Düzgün kirişlemelerden farklı olarak kiriş boyları ve bağlantı mesafeleri çeşitlilik gösterecektir.

Parigi ve Pugnale, 2011 yılında Aalborg Üniversitesi Mimarlık yüksek lisans öğrencileri ile mütekabil strüktürleri biçim özellikleri açısından ele alan bir workshop gerçekleştirmiş ve “bu kurguların çentiksiz ve aksları aynı düzlemde olmayan kirişlerle çalışmanın bir sonucu olarak doğası itibariyle sahip olduğu üç boyutlu olarak genişleme potansiyelini” incelemişlerdir[Parigi, Pugnale s:155].

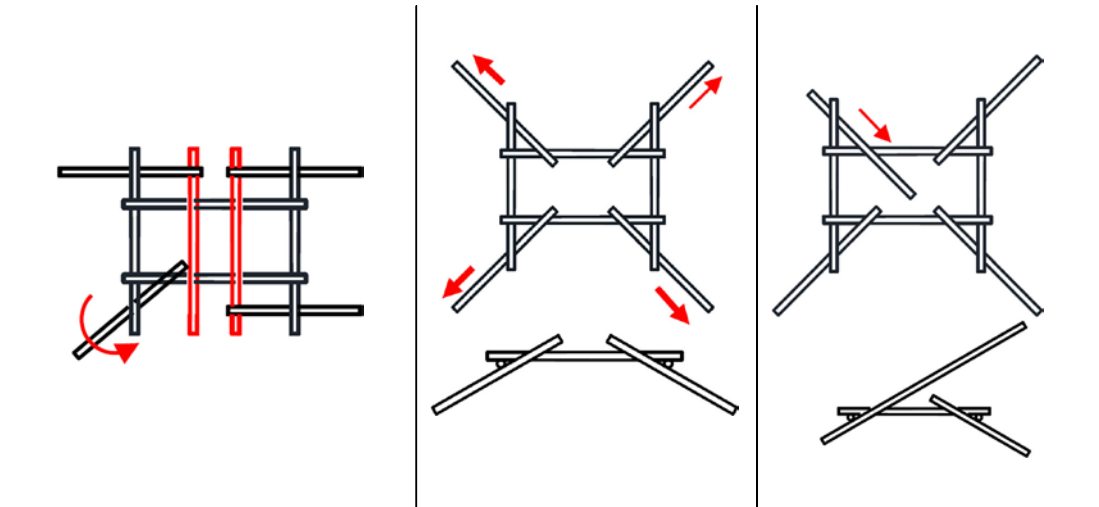
Yapılan çalışmada özgün üç boyutlu kurguların tasarımını tetiklemek için bazı kurallar belirlenmiştir;

- Strüktürler kartezyen koordinat sisteminde birden fazla yönde genişletilebilir olmalıdır

- Kurgular çokgen dizilimleri gibi oluşacak yüzeylere direkt olarak referans vermemelidir.

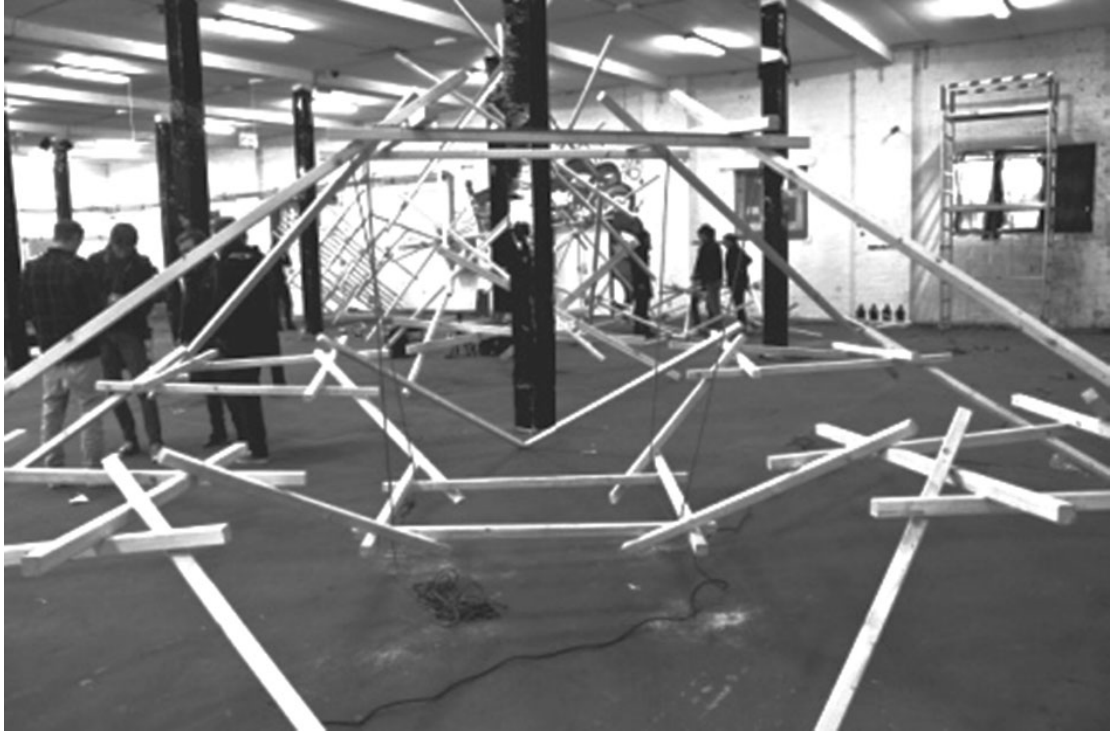
- Bağlantılar binili şekilde ve çentiksiz olmalıdır[Parigi, Pugnale s:158]. Bu bağlamda altı çeşit strüktür geliştirilmiştir.

Oluşturulan ilk strüktürün temelde enine dört boyuna altı kirişin doğrusal ve birbirini taşır şekilde dizilmesinden oluşan tek yönlü genişlemeye müsait; Leonardo da Vinci'nin köprü strüktürü (Bkz. s:30) kullanılmıştır. İlk adımda ortadaki iki enine kiriş kaldırılarak bunlarla temas halinde olan uçtaki boyuna kirişler diyagonal hale getirilmiştir. Dört yönde de aynı kural tekrar edilmiştir. Yeni temel modül iki boyuna, iki enine ve dört diyagonal kirişe dönüştürülmüştür[Parigi, Pugnale s:159].



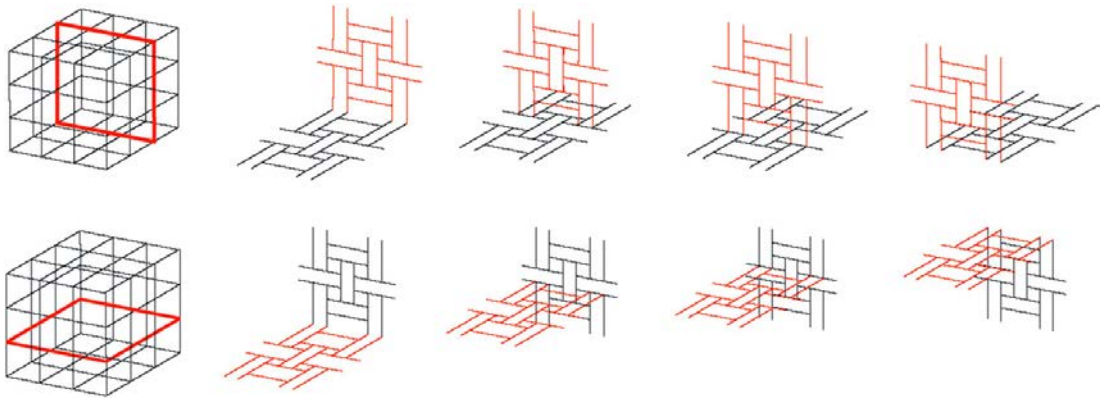
Şekil 4.79 : Kural adımları [Parigi, Pugnale s:160]

Bu dört diyagonal kiriş sayesinde strüktür dört yönde genişleyebilir; iki ve üç boyutlu diğer düzenlemelerle kombinlenebilir. Ayrıca, her bir diyagonal kiriş, farklı yüksekliklerde üç boyutlu örüntüler oluşturmayı mümkün kılacak şekilde yukarı yada aşağı doğru uzatılabilir[Parigi, Pugnale s:160].



**Resim 4.14 :** Strüktürün gerçek ölçekli maket fotoğrafı [Parigi, Pugnale s:160]

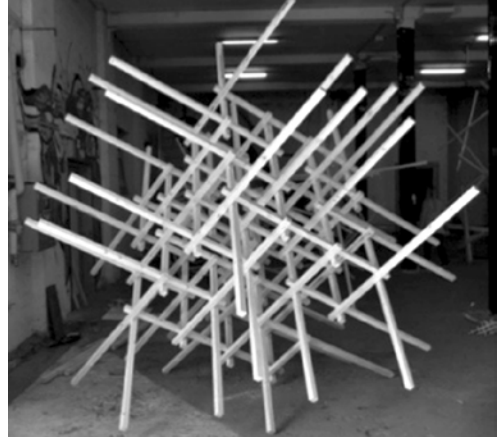
İkinci strüktür de türetme kuralı; bilinen bir iki boyutlu örüntüyü karşılığı olan üç boyutlu strüktüre dönüştürmektir. Strüktür iki boyutlu türetme kuralına bağlı kalarak her üç yönde genişletilebilmektedir.



**Şekil 4.80 :** İki boyutlu kuralı üçüncü boyuta taşıma adımları [Parigi, Pugnale s:162]



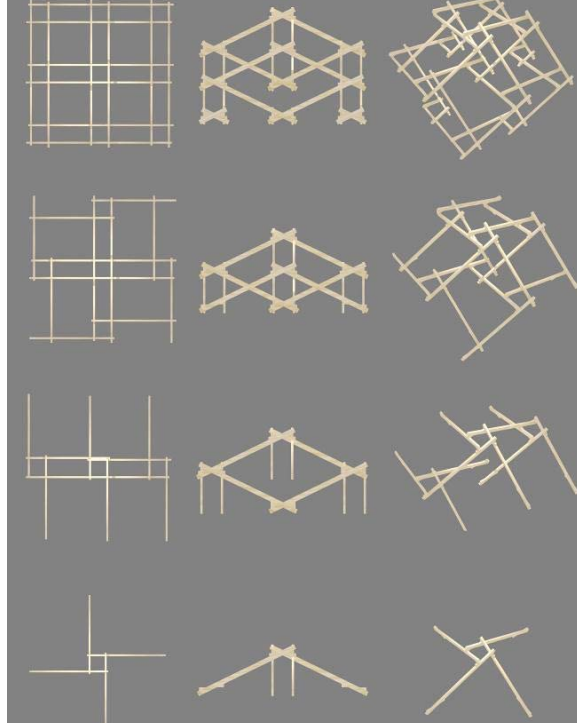
**Resim 4.15 :** Strüktürün köşe birleşimleri [Parigi, Pugnale s:164]



**Resim 4.16 :** Strüktürün gerçek ölçekli maket fotoğrafı[Parigi, Pugnale s:164]

Her üç yönden gelen dik kirişler problemi, Resim 4.15'te görülen köşe birleşimleri prensibine göre çözülmüştür[Parigi, Pugnale s:163].

Larsen ve Lee'nin de dörtgen tabanlı düzlemsel kurguları çeşitli üç boyutlu strüktürlere dönüştürmeye dair çalışmaları mevcuttur. Afete yönelik barınak tasarımı başığı altında çalışılmış olan bu strüktürün, konudan bağımsız olarak, pinli birleşimle ortaya çıkarılabilecek üç boyutlu mütekabil strüktürleri sorgulamaya yönelik özel bir çalışma olduğu belirtilmiştir[Larsen, Lee, 2013 s:5].



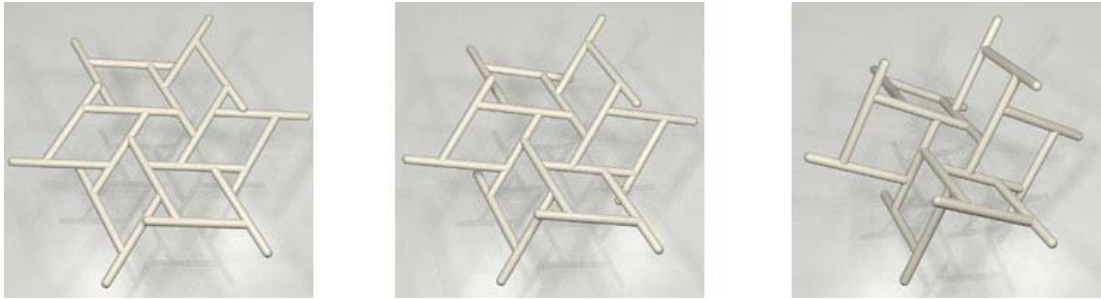
**Şekil 4.81** : Strüktürün soldan sağa doğru plan, görünüş ve perspektifi[Larsen, Lee, 2013 s:5]

Strüktürün düzlemsel kirişlemelerle benzerliği sadece plandadır. 26 derecelik açı ile bir araya gelen eğimli kirişler üç boyutlu bir strüktür oluşturmaktadır. Şekil 4.81’de gösterilen dört kirişli bir modül ile başlayan birleşimler 24 kirişli karmaşık bir kirişlemeye dönüştürülmüştür. Strüktürün düşey yönde hareket etmesi için kirişler birbiri üzerine eklenerek örüntü devam ettirilmiştir[Larsen, Lee, 2013 s:5]



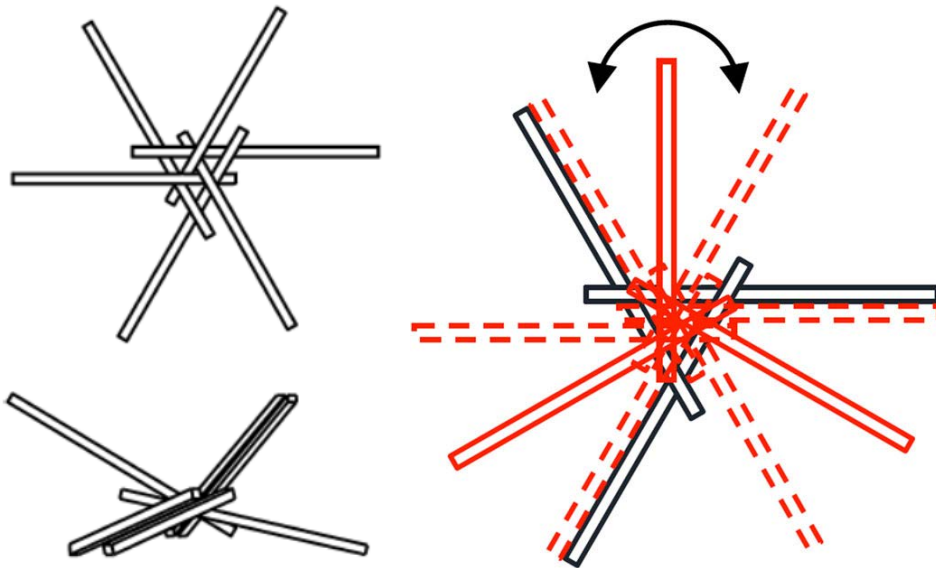
**Resim 4.17** : Strüktürün ölçekli maket fotoğrafı[Larsen, Lee, 2013 s:6]

Roelofs, Leonardo da Vinci'nin düzlemsel kirişlemelerini üç boyutlu strüktürlere dönüştürmekle ilgili çalışmalar yapmıştır. Sürecin altıgen bulunan herhangi bir düzlemsel kirişlemede, altıgeni oluşturan kirişlerden birbirine bağlantısını korumak şartıyla kirişler büküldüğünde, bu altı kirişe bağlı olan diğer kirişlerin de büküleceği görülür. Dönüşümün sonunda oluşan üç boyutlu strüktürde paralelkenarlar varlığını koruyacak, fakat üçgenler kaybolacaktır[Roelofs, 2008 s:23].

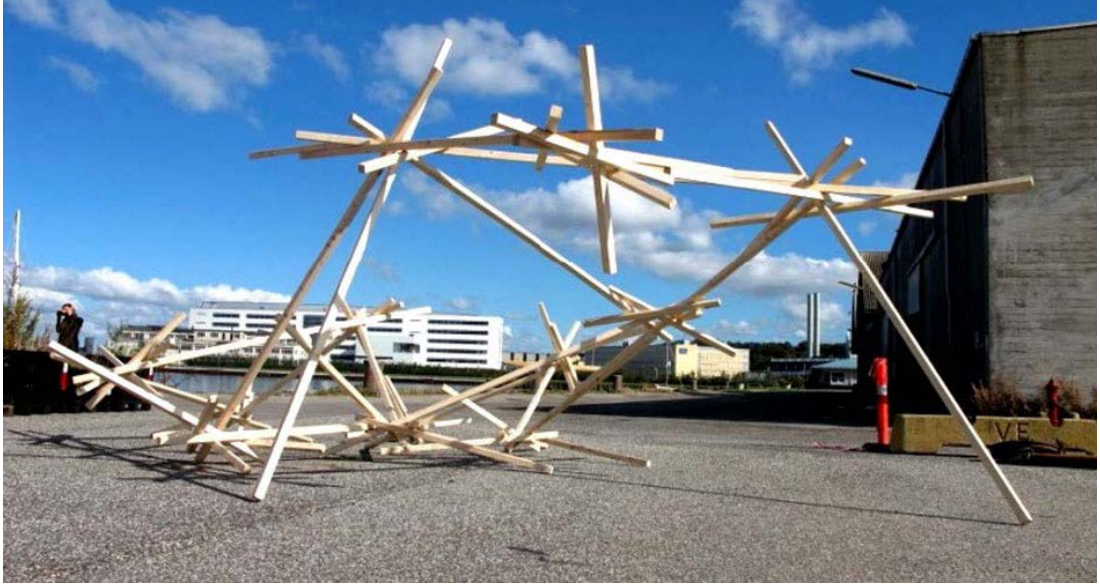


Şekil 4.82 : İki boyutlu kirişlemenin üç boyutlu strüktüre dönüşümü [Roelofs, 2008 s:23]

Parigi ve Pugnale'nin üçüncü karmaşık kirişleme kuralı pozitif ve negatif yöndeki modüllerin birbirine geçirilmesiyle elde edilir. Bu birleşimde iki modülden elde edilen bir strüktürde iki farklı bağlantı mesafesi değeri ortaya çıkacaktır[Parigi, Pugnale s:164]



**Şekil 4.83** : Strüktürün oluşturulmasında kural adımları[Parigi, Pugnale s:165,167]



**Resim 4.18** : Strüktürün gerçek ölçekli maket fotoğrafı[Parigi, Pugnale s:167]

Bu türetme kuralının potansiyeli, oluşturduğu üçü yukarıya, üçü aşağıya doğru olmak üzere altı yönde genişleme aksı tanımlayan üç boyutlu bağlantılarındadır. İçiçe geçen modüller aynı zamanda birbirine oranla döndürülebilir, böylece işaret ettikleri altı yön çeşitlilik gösterecektir[Parigi, Pugnale s:167].

Negatif ve pozitif yöndeki temel modüllerin bir araya getirilmesiyle oluşan karmaşık kirişlemeler hakkında Larsen'in de çalışmaları mevcuttur. Sheffield Üniversitesinde yürütülen workshopta maket yaparak geliştirilen modeller arasında bu kural uygulanarak elde edilen üç boyutlu yıldız biçimli strüktürler oluşturulmuştur[Larsen, 2008 s:21]



**Resim 4.19:** Üç boyutlu yıldız biçimli strüktürün görünüşü [Larsen, 2008 s:30]



**Resim 4.20:** Üç boyutlu yıldız biçimli strüktürün planı [Larsen, 2008 s:30]

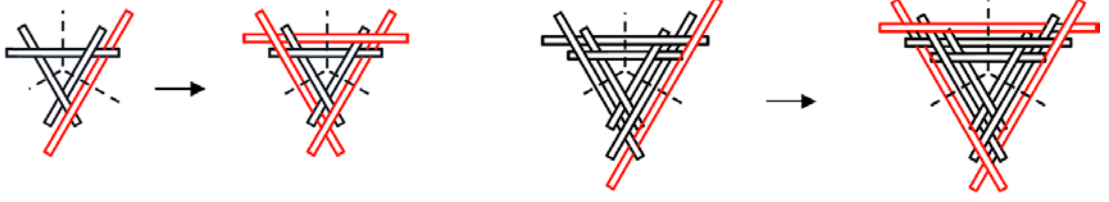


**Resim 4.21:** Farklı boyda kirişlerden oluşan pozitif ve negatif yöndeki modüllerle karmaşık kirişleme [Larsen, 2008 s:30]

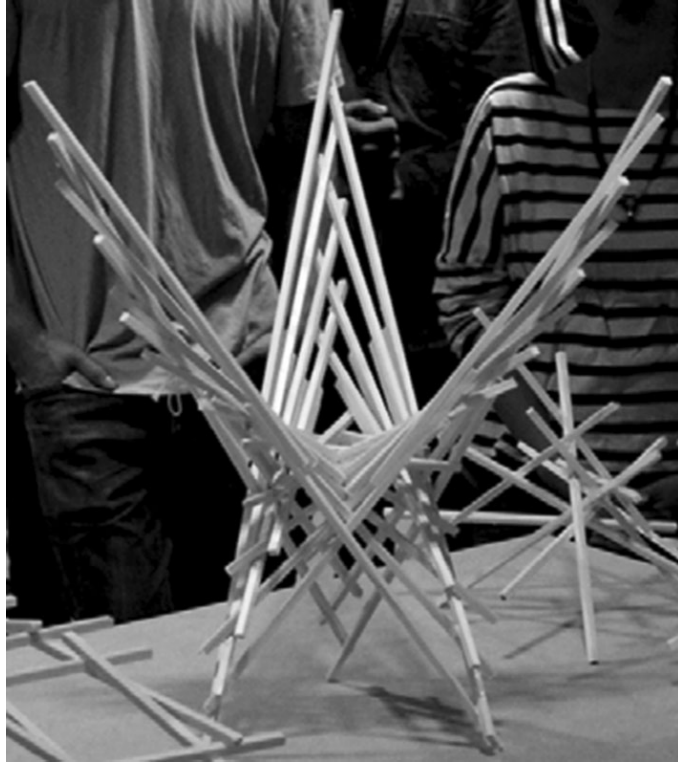


**Resim 4.22:** Aynı boydaki kirişlerden oluşan pozitif ve negatif yöndeki modüllerle karmaşık kirişleme [Larsen, 2008 s:27]

Dördüncü türetme kuralı, üç kirişten oluşan bir temel sistem modülünü, çevresinde dış katmanlar oluşturarak çoğaltmayı temel almaktadır. Yeni kirişler, istenilen forma veya fiziksel limite ulaşıncaya kadar Şekil 4.84’te görüldüğü gibi tek tek eklenir. Kiriş boylarının, daha sonraki adımlarda ekleme yapılmasına imkan verecek şekilde her adımda uzatılması gerekmektedir[Parigi, Pugnale s:168]



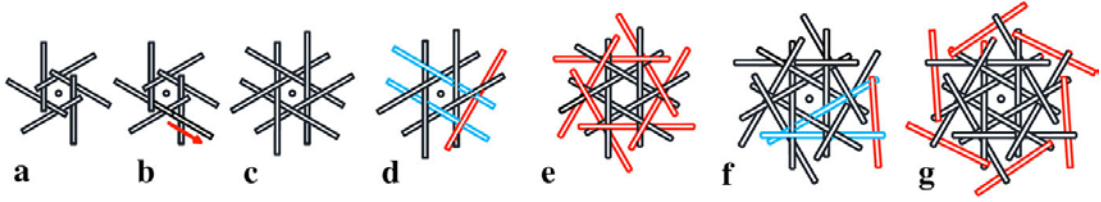
**Şekil 4.84** : Strüktürün oluşturulmasında kural adımları[Parigi, Pugnale s:168]



**Resim 4.23** : Üç boyutlu strüktürün 1/10 ölçekli maket fotoğrafı [Parigi, Pugnale s:168]

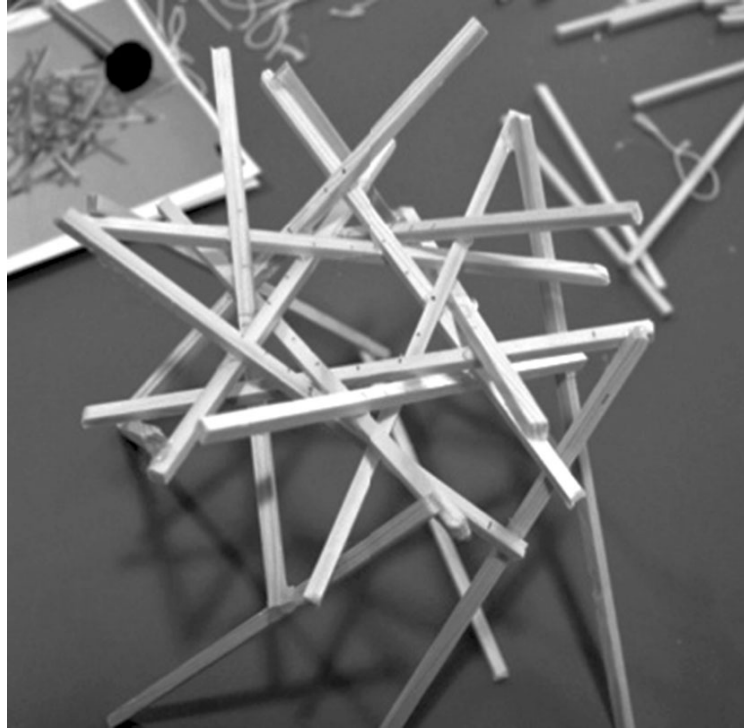
Üç kirişli modül ile başlandığında üçü aşağı ve diğer üçü de yukarı doğru olmak üzere altı genişleme doğrultusu ortaya çıkmıştır. Dört, beş yada daha fazla kirişten oluşan modüller ile başlandığında sekiz, on ve daha fazla doğrultu ortaya çıkacaktır. Finalde elde edilen strüktürün geometrisinin düzenli olması için temel alınan modülü oluşturan kirişlerin aynı boyda, aynı kalınlık ve aynı bağlantı mesafesine sahip kirişler olması gerekmektedir. Bu şekilde strüktür, her yönde aynı oranda genişleyecektir[Parigi, Pugnale s:168].

Beşinci strüktür, bağlantı noktalarından önce ve sonra her bir kirişin iki yönde uzatıldığı altı kirişli bir modülü temel almaktadır. Kuralın sonraki adımı, altı kenardan birbirine paralel olan her ikisine dik olacak yeni birer kirişin dışta bir katman oluşturacak şekilde eklenmesiyle devam edecektir[Parigi, Pugnale s:170].



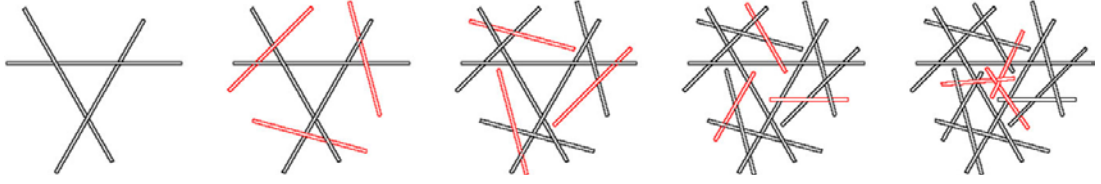
Şekil 4.85 : Strüktürün oluşturulmasında kural adımları[Parigi, Pugnale s:170]

En son sırada eklenen kirişler ilk sıradan bir kiriş tarafından taşınacak ve ikinci sıradan bir kirişi taşıyacak şekilde eklenecektir. Bu strüktür ileri aşamalarda genişlemeye imkan tanımamaktadır[Parigi, Pugnale s:170].



Resim 4.24 : Üç boyutlu strüktürün ölçekli maket fotoğrafı [Parigi, Pugnale s:168]

Altıncı tip strüktür, üç kirişten oluşan bir modülden başlayarak, her adımda üç yeni eleman eklenmesini esas almaktadır. Her bir yeni kiriş için, uç noktaların biri yere değmektedir; böylece bu üç yeni kiriş strüktürün yerle bağlantısını oluştururlar[Parigi, Pugnale s:172].



**Şekil 4.86** : Strüktürün oluşturulmasında kural adımları[Parigi, Pugnale s:173]

Şekil 4.86’da görüleceği gibi ikinci sıra başlangıç modülü ve ilk sıra arasına eklenir, Bu mantık takip edilerek, üçüncü sıranın kirişleri iki ve birinci sırada eklenen modüllerin kirişleri arasına eklenir. Bu kural ile sonsuza kadar uzatılabilecek bir kule veya kendi içinde kapanan üç boyutlu bir strüktür elde edilebilir.

Larsen, 2011 yılında öğrencileriyle yaptığı bir workshopta benzer mantıkla kule biçimli bir strüktür oluşturulduğunu ve bu strüktürün yaklaşık 6 metre uzunlukta yuvarlak kesitli ahşap kirişlerden yapılmış bir örneğinin de 2011 yılında güney İsveç’te Kivik Sanat Merkezi’nde sergilendiğini bildirmiştir[Larsen 2011 s:366].



**Resim 4.25** : Kivik Sanat Merkezi'nde bulunan mütakabil strüktür heykeli[Larsen, 2014 s:18]



**Resim 4.26** : Kule biçimli strüktürün gerçek ölçekli maket fotoğrafı [Larsen, 2014 s:366]

Larsen bu çalışmaları mütakabil strüktürlerin mantığının yeni kullanım biçimlerine uyarlanabilmesi açısından ilham verici bulduğunu belirtmiştir[Larsen, 2014 s:15].

## 5. DEĞERLENDİRME

Mütekabil strüktürler en basit haliyle düzlemsel veya eğimli olarak birbirini taşıyan elemanlardan oluşarak kapalı bir devre veya bir modül oluşturan strüktürler olarak tanımlanmıştır. Bu kurgu, yaygın olarak çatı konstrüksiyonu olarak kullanılan stabil bir geometrik düzenleme oluşturur. Elemanlar, yük aktarımını paylaşmakta ve yükü aşağıya doğru bir kolon, kiriş, çevre kirişi veya duvarlara aktarmaktadır. Bu strüktürlerin yeni icad edilmiş olmadığı açıktır. Tarih boyunca düzlemsel ve eğrilikli kurgularda, tek ve çok merkezli strüktürler olarak birçok çeşitli formda kullanılmıştır[Larsen, 2014 s:2].

Tipik olarak, basit eğimli bir mütekabil kirişlemede yükler, normal kuvvetler ve eğilme kuvvetleri yoluyla aktarılmaktadır. Larsen, mütekabil strüktürlerin, esasen normal kuvvetlerle çalışan ızgara kabuk strüktürlere göre daha az verimli olduğunu belirtmiştir[Larsen, 2014 s:2]. Buna rağmen bu strüktürlerle çalışmanın avantajları vardır.

- Bu strüktürler kısa kirişlerden oluşturulur;
- Simetrik düzenlemelerde hemen hemen bütün elemanlar ve bağlantılar birbirinin aynısıdır[Larsen, 2014 s:2].

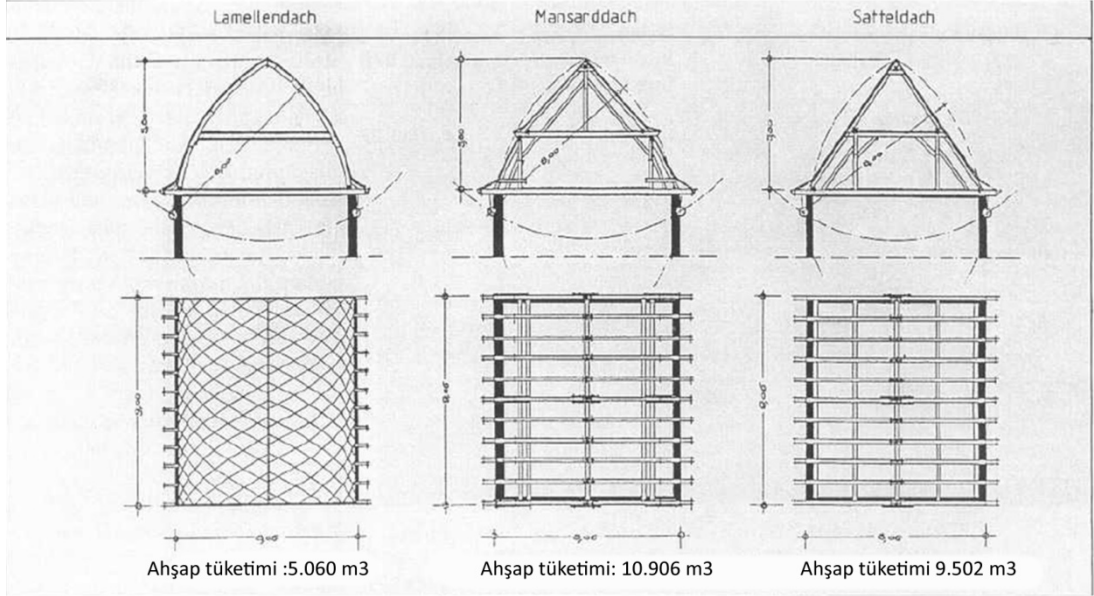
Bu avantajlar, maliyet, sürdürülebilirlik, yapım kolaylığı ve risk faktörü gibi açılardan ele alındığında, mütekabil strüktürleri benzer mekânsal strüktürlerden farklı bir noktaya taşımaktadır.

### 5.1 Maliyet

Bir mütekabil strüktür, mekânsal bir strüktür olarak ele alındığında, kısa kirişlerden elde edilen benzerlerinden bağlantı noktalarının niteliği ile ayrılacaktır. Sénéchal, Douthe ve Baverel, “mütekabil kirişleme sistemlerinde, bir çok elemanı birbirine bağlama probleminin teknolojik karmaşıklığı yerini geometrik karmaşıklığa bırakmaktadır” demektedir[Sénéchal, Douthe, Baverel, s:314]. İleri teknoloji gerektirmeyen bağlantılar ve bir çatı veya döşeme kirişlemesinin oluşturulmasında kısa kirişlerin kullanımı maliyet başlığı altında incelenecektir.

Bir çok buluş gibi, mütakabil strüktürlerin esas prensipleri de ihtiyaç dolayısıyla ortaya çıkmıştır. Alman mühendis Friedrich Zollinger (1880–1945), kısa kirişlerden mütakabil strüktür prensibine dayalı bağlantılar kullanarak geniş açıklıklar geçmeye yarayan “Lamellandach” adını verdiği sistemi Birinci Dünya Savaşı’ndan sonra geliştirmiştir[Larsen, 2014 s:5]. Heise bu çözümün avantajlarını aşağıdaki gibi listelemiştir:

- Geniş açıklıklar geçmeye elverişlidir,
- Çatının kendi taşıyıcı konstrüksiyonu üzerinde planlamaya bağlı olarak pencere veya kapı boşlukları açılabilir,
- Yapı tekniği kısa kirişlerin kullanımına yöneliktir, bu sayede çatının üretimi için yekpare mahya ve mertekler yerine kısa ve ince panellere ihtiyaç duyulacaktır
- Bu çatı sistemi sadece konutlarda değil, kamuya açık yapılar, uçak hangarları, ahır ve ambar gibi zirai yapılar, kiliselerde kullanılabilir.
- Geleneksel çatılara kıyasla %40 daha kısa sürede inşa edilebilmektedir
- Ahşap panellerin boyutları standardize edildiği için, yapıya göre özel üretim gerektirmez, çok miktarda parça ön üretimle imalata hazır halde şantiyeye getirilebilir ve gerektiğinde parça değişimi yapılabilir[Heise s:73].
- Şekil 5.1’e göre yaklaşık 8x9 m boyutlarında bir alanı örten 5 m yükseklikte bir çatı için ahşap ihtiyacı konvansiyonel kafes kirişli çatı yapım yöntemine göre %40-50 civarında azalmıştır[Winter, Rug s:4].
- Panellerin montajı kolay olduğu için özel işçilik gerektirmez, düz işçiler veya kullanıcılar imalatta rol alabilirler, Winter ve Rug’a göre 3-4 kişi 70m<sup>2</sup> bir alanın çatısını 1 günde bitirebilir[Winter, Rug s:4]. Böylece işçilik maliyetleri düşürülmüş olur,



**Şekil 5.1 :** “Lamellendach” çatı strüktürü ile geleneksel çatıların kıyaslanması[Winter, Rug s:4]

Bu çatı sistemiyle 1922 ile 1929 yılları arasında Zollinger’in imar müdürü olarak görev yaptığı Merseburg’da yapımında kullanıcıların da rol aldığı 1250 adet küçük ölçekli “sağlıklı ve ucuz” yerleşim birimi üretilmiştir[Winter, Rug s:2]



**Resim 5.1 :** Merseburg’da “Lamellendach” çatılı bir konut [URL-55]



**Resim 5.2 :** Albrecht Dürer Schule, Zollinger tarafından 1928’de tasarlanmış bir okul [URL-56]

Heise, Zollinger'in 1930'da görev yaptığı Merseburg'dan ayrılmasından sonra bu çatıların, yerini konvansiyonel yapım yöntemi olan ahşap kafesli çatı strüktürlerine bıraktığı ve bu yapım yönteminin tekrar ortaya çıkışının İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki kriz döneminde olduğunu bildirmiştir[Heise s:73]. Bu sistem, bütçenin açık verdiği savaş sonrası dönemlerde artan konut ihtiyacının karşılanmasında üretimi hızlandırmak, ucuzlatmak ve kolaylaştırmakta rol oynamıştır[Larsen, 2014 s:2].

Bağlantı kolaylığına örnek olarak bir jeodezik kubbenin yaklaşık 4-5 metre açıklık geçen bir öneği Resim 5.1'de verilmiştir. Bu strüktür bağlantı yöntemi açısından bir mütekebil strüktür ile kıyaslanacaktır.

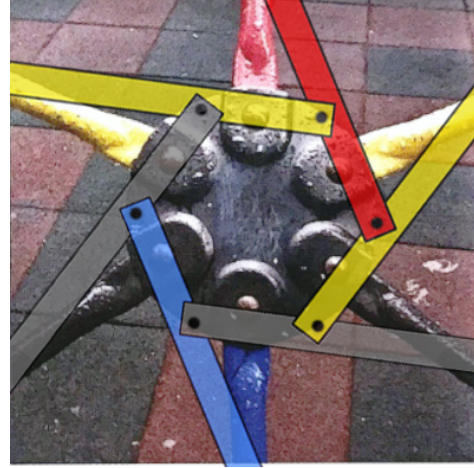


**Resim 5.3 :** Jeodezik kubbe biçimli park oyuncağı[Bertin, 2012 s:29]

Resim 5.3'te görülen jeodezik kubbeyi oluşturan bileşenler ele alındığında; çubuk, disk ve perçinler olmak üzere üç tip bileşenin her birinin özel bir fonksiyonu karşıladığı görülecektir (Resim 5.4). Çubuk biçimli elemanlar disk biçimli düğümlere perçin biçimindeki bağlayıcılarla bağlanmıştır[Bertin,2012 s:29].



**Resim 5.4 :** Bağlantı detayı [Bertin, 2012 s:29]



**Resim 5.5 :** Mütekabil yapı prensibine göre oluşacak bağlantı

Bir mütekabil yapıda birbirini taşıma eyleminin gerçekleştiği noktada sadece iki elemanın bağlanması gerekir. [Rizzuto s:3] Bu durum kullanılan bağlantı elemanının diğer mekânsal yapılara göre oldukça basit olması demektir. Eğer bu park oyuncağı bir mütekabil yapıya dönüştürülseydi; diskler aradan çıkarılarak her iki ardışık kiriş birbirine direkt olarak perçinle bağlanacaktı (Resim 5.5). Bağlantıların basitliği, işçilik ve malzeme giderlerinde düşüşe sebep olacaktır.

Bu duruma ek olarak seçilen malzemenin sürtünme katsayısına bağlı olarak bazı durumlarda tek tip elemanın bile bağlantı noktasında ortaya çıkan farklılaşmış fonksiyonları yerine getirdiği görülür. Bertin mütekabil elemanlar için, “sadece çubuklardan, ya da sadece düğümlerden, ya da sadece bağlayıcılardan oluşan yapılar” ifadesini kullanmıştır[Bertin, 2012 s:29].

Özetle, basit bir çok merkezli mütekabil yapı konstrüksiyonu, basit teknoloji kullanımıyla bir miktar nitelikli işçilik gerektirir[Rizzuto, Larsen s:244]. Bu durum, mütekabil yapılar için düşük üretim maliyetlerine sebep olacaktır.

## 5.2 Sürdürülebilirlik

Yapı endüstrisi, küresel ölçekte, kaynak tüketiminde ve karbon salınımında oynadığı büyük rol dolayısıyla sürdürülebilirlik konusunda tedbirler alınması gereken önemli bir alandır. Taipale, başta içme suyunun %12'si olmak üzere doğal kaynakların üçte birini; üretilen toplam enerjinin %25 ila %40'ını kullanan yapı sektörünün küresel karbondioksit salınımının yaklaşık %40'ına sebep olduğunu belirtmiştir[Taipale s:129]. Kentlere göçün artmasının yapılaşmayı artıracığı göz önüne alındığında şu iki madde yapı sektöründe sürdürülebilirliği belirlemektedir;

1. Sürdürülebilir kırsal ekonomiler kurarak, köylerde yaşamayı kente göre cazip hale getirecek alternatifler üretmek ve kentlerdeki yapılaşmayı yavaşlatmak,

2. Bütüncül tasarımlarla, enerjide yenilenebilir, malzemede yerel ve tekrar kullanılabilir özellikler ön plana alınarak sürdürülebilir yapılar inşa etmek.

Mütekabil strüktürlerde tercih edilen öncelikli malzeme ahşap olagelmıştır. Pantazis ve Gerber, plywood ile tasarladıkları bir çardak projesinde (Bkz. s:53), ahşap kullanımının sebeplerini açıklarken, “ahşap, endüstriyel olarak tekrar tekrar yetiştirilebildiğinden sürdürülebilir bir malzemedir ve diğer yapı malzemeleriyle kıyaslandığında nispeten ucuzdur” ifadesini kullanmış ve ahşabın lifli yapısının bir yapı malzemesi olarak avantaj olduğunu bildirmişlerdir[Pantazis, Gerber s:467]. Yapıda kısa parçalar kullanılması, herhangi bir yapının yıkımında ortaya çıkacak malzemelerin birçoğuna özgün birer bağlantı kuralı geliştirilerek mütekabil strüktür kirişi olma imkanı tanır. Örneğin; yapılardan çıkan döküm tesisat borularının dirsekleriyle birlikte kullanıldığında kendiliğinden bağlantılı “S biçimli” kirişler olarak ele alınarak mütekabil strüktürler oluşturma potansiyeli mevcuttur. Maas, geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin kullanımının, varolan kaynakların en doğrudan sürdürülebilir kullanım şekli olduğunu belirtmiş ve Hochschule Bochum'da erişilebilir kaynaklarla ilişkiyi esas alan mütekabil strüktürler hakkında iki dönemlik uygulamalı bir seçmeli ders yürütmüştür[Maas, s:1].

Mütekabil strüktürler kırsal alanda sürdürülebilir yapı konulu çeşitli projelerde tercih edilmiştir. Graham Brown,<sup>67</sup> patentini aldığı tek merkezli mütekabil strüktür ile farklı temalarla yerel halka sürdürülebilir yapım yöntemlerine dair pratikler kazandırmaya yönelik eğitim projeleri geliştirmiştir. Filistin, Haiti, Uganda gibi ülkelerde farklı temalarla uygulanan projelerde tek merkezli mütekabil strüktürler kullanılmış; ileri aşama tasarımların, bölgenin ihtiyacına göre yerel halk tarafından geliştirilmesi planlanmıştır[URL-57]. Ülkemizde, Alakır Vadisi'nde düşük maliyetli, iklime uyumlu, doğal malzemelerden sürdürülebilir bir yaşam alanı oluşturma amacıyla yapılan “Yuva” adlı konut projesinde(Resim 5.7), çatı sistemi olarak aynı tek merkezli mütekabil kirişleme sistemi (Resim 5.6) kullanılmıştır[URL-58].



**Resim 5.6** : Yuva adlı konut projesi çatı kirişlemesi[URL-57]



**Resim 5.7** : Yuva adlı konut projesinde bitmiş görüntü[URL-57]

Bu örneklerin yanısıra mütekabil strüktürlerin kompleks sorulara verdiği cevaplarla sürdürülebilir nitelik kazandığı çalışmalar da mevcuttur.

Larsen ve Lee, Danimarka'nın Glænø adasında bir ahır yapısının çatı örtüsü tasarımı olarak bir mütekabil strüktür geliştirmişlerdir. Çatı örtüsü, 16.80x30.80 metre boyutlarında, iç mekânda düşey taşıyıcı kullanılmadan, yerel malzemeyle ve

<sup>67</sup> Graham Brown'ın çalışmaları Larsen tarafından detaylı olarak incelenmiştir[Larsen, 2008 s:141].

tipik bir çiftlikte kullanılanların ötesinde bir makine kullanımı gerektirmeyecek bir konstrüksiyon çözümü getirmelidir. Bölgede yaygın olan eğilim prefabrike ahşap kafes kiriş kullanımıdır. İşveren varolan bu yaklaşıma nispetle daha sürdürülebilir öneriler beklemektedir[Larsen, Lee, 2014 s:1]. Buna göre ilk tasarım Resim 5.8’de görülen Leonardo da Vinci’nin köprü tasarımından mülhem kirişleme önerisidir.

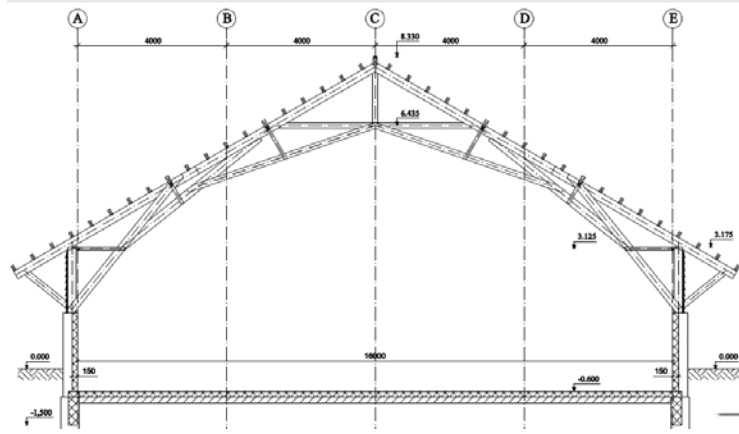


**Resim 5.8** : Larsen ve Lee’nin ilk önerisi[Larsen, Lee, 2014 s:3]

Larsen’e göre prefabrike ahşap kafes kiriş, bir mütakabil strüktüre göre ucuz ve daha hızlı bir yapım yöntemi olsa bile, baba kirişleri C24 kalitesinde olacağından ithal edilmesi, kurutulması için ısı kullanılması ve özel işçilik gerektirmesi yüzünden sürdürülebilir değildir.<sup>68</sup> İlk tasarım, yay biçimli birbirine örülü C18 ahşaptan kısa kirişlerin C24 ahşap kirişlerle bağlandığı bir çatı strüktürüdür. Bu öneride 30 derecelik çatı eğiminin verilebilmesi için ilave konstrüksiyon gerekecek ve strüktür verimliliği kafes kirişe göre oldukça düşük kalacaktır. Larsen verimlilik ve tasarım açısından kafes kirişin gerisinde kalan bu öneriye ikinci bir alternatif geliştirildiğini bildirmiştir[Larsen, Lee, 2014 s:2]

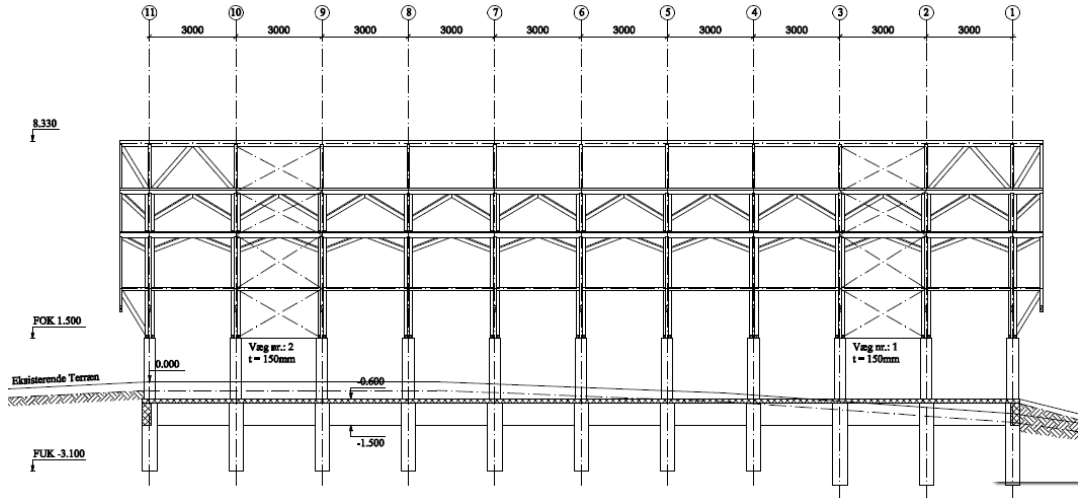
---

<sup>68</sup> EN 14081-1:2005 standardı kalite sınıflandırılmasına göre (budak ve ince çatlak boyutları vs.etkilidir) C18 üstü sınıfa giren ahşaplar C18 ve altındaki ahşaplara nispetle daha kalitelidir[URL-59].



Şekil 5.2 : Mütakabil kafes kirişe dönüştürülen önerinin enine kesiti[Larsen, 2015 s:5]

Larsen ve Lee, ikinci öneride strüktürü mütakabil prensip ile çalışan bir kafes kirişe dönüştürmüştür. Üç metrede bir yerleştirilecek olan bu kafeslerin ara mesafeleri her kafesten çıkan göğüslemelerle desteklenmiştir(Şekil 5.3).



Şekil 5.3 : Mütakabil kafes kirişe dönüştürülen önerinin boy kesiti[Larsen, 2015 s:5]

Böylece düşük kaliteli yerel malzeme ile sürdürülebilirlik kıstaslarına uygun daha gelişkin bir mütakabil strüktür çözümü geliştirilmiştir.

### 5.3 Yapım Kolaylığı

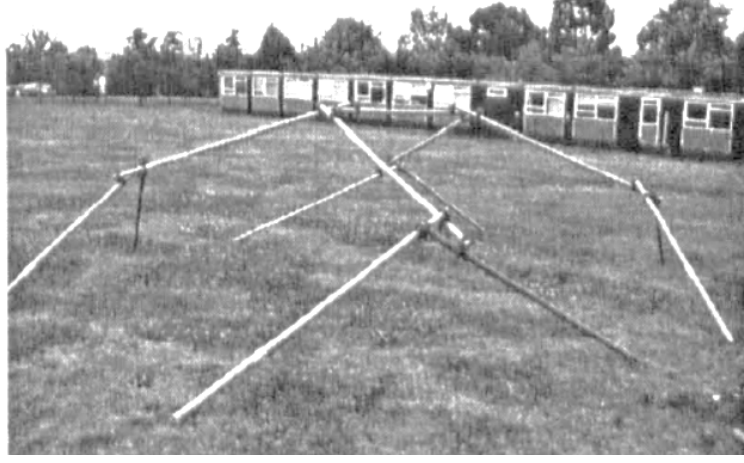
Yapım kolaylığı söz konusu olduğunda akla, kolaylıkla bir araya gelebilen modüler bir yapım sistemi olma özelliği gelecektir. Mütakabil strüktürlerde standart

kiriş ve bağlantılar kullanılması “geçici ünite” konseptini inceleyen birçok çalışmanın konusu olmuştur.

Geçici yapılarda mütekabil strüktürlerin iki tür kullanımı söz konusudur, bunlar acil durum barınağı veya sergi ve etkinliklerdir[Baverel, 2000 s:275]. Larsen yüksek lisans öğrencileri ile afet sonrası geçici barınma üniteleri tasarımına yönelik gerçekleştirdiği atölye çalışmasında, mütekabil strüktürlerin şu koşullara uygunluğunu belirtmiştir:

- Afetin gerçekleşmesinden hemen sonra imal edilmelidir
- Mümkün olan en kısa sürede kullanım imkanı sunulmalıdır
- Sadece basit el aletleri ve taşınabilir kesme makinaları kullanılmalıdır
- Hazırda erişilebilen yapı malzemeleri tercih edilmelidir
- Barınaklar imalat konusunda eğitilmemiş afetzedeler tarafından yapılabilmelidir
- Tasarım, afetin ilk etkileri geçtikten sonra ve kaynak erişim imkanı olduğunda geliştirilmeye açık olmalıdır [Larsen, Lee, 2013 s:2]

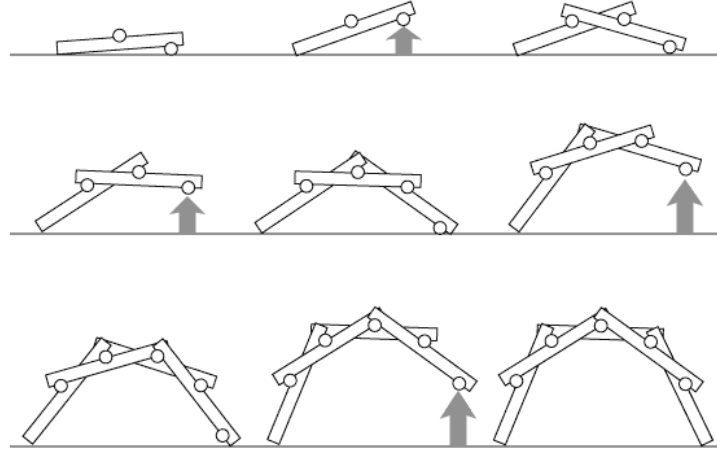
Bu tip uygulamalar için, mütekabil strüktürlerin sadece tek tip giriş ve tek tip bağlantı gerektirmesi konusunda getirdiği avantaj açıktır. Mütekabil strüktürler bütün bileşenlerinin standart olması durumunda, düşük maliyetlerle seri şekilde üretilebilirler. Aynı bağlantı tipi ve aynı giriş kullanılarak oluşturulabilecek farklı düzenlemeler daha önceki bölümlerde incelenmiştir(Bkz. s:126-130). Baverel’e göre, bir afet alanında, girişler, bağlantılar, plastik yüzey kaplaması ve yapım kılavuzunun bulunduğu paketlerin uçakla bırakılarak dağıtılması gibi çözümler geliştirilerek, afetzedelere kendi ihtiyaçlarına göre barınaklar oluşturma imkanı verilebilir[Baverel, 2000 s:275].



**Resim 5.9 :** İskele borularından yapılmış mütakabil strüktür[Baverel, 2000 s:275]

Baverel Resim 5.9'da 2.4 metrelik iskele borularından yapılmış 8x8x2.3 m ölçülerinde bir strüktürün 2 kişiyle yarım saatten az bir vakitte inşa edildiğini ve yapımda kullanılan tek gerecin İngiliz anahtarı olduğunu bildirmiştir[Baverel, 2000 s:275]. Bu tasarım hafif yapı malzemelerinden üretilme ön koşulunu da sağlamaktadır. Afet alanında sınırlı imkanların olduğu düşünüldüğünde vinç gibi makinaların tedariği kolay olmayacaktır.

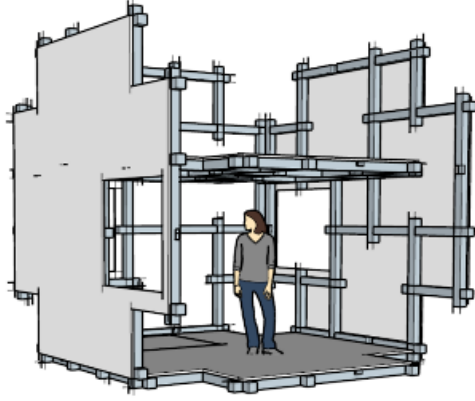
Larsen'in yürüttüğü atölye çalışmasında çeşitli biçimlerde geçici ve kalıcı barınak önerileri geliştirilmiştir. Bunlardan hareketli çadır strüktürü daha önce incelenmişti (Bkz s:85). Bir başka örnekte Leonardo da Vinci'nin geçici köprü fikri taklit edilerek eşit uzunlukta, küçük ve basit bileşenlerle tonoz biçimli bir mekân kurgusu oluşturan bir öneri geliştirmişlerdir. Bu fikirlerle, makine kullanımına ihtiyaç duyulmadan, kalifiye işçilik olmadan hızlı kurulabilen geçici acil durum üniteleri geliştirme potansiyeli çalışılmıştır[Larsen, Lee 2013 s:1].



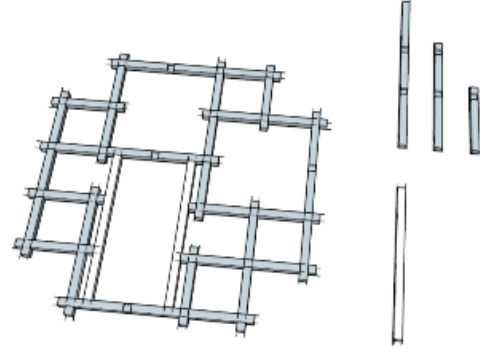
**Şekil 5.4 :** Leonardo da Vinci'nin köprü strüktürünü taklit eden tonoz biçimli geçici barınak fikri[Larsen, Lee 2014 s:1]

Mütekabil strüktürler, afet sonrası geçici barınma niteleri oluşturma potansiyelinin yanısıra hızlı üretilebilme özellikleri dolayısıyla tahribata uğramış yerleşim yerlerinin onarılmasında kalıcı yapılar olarak hızla inşa edilebilirler. Larsen ve Lee araştırmalarında, “afetzedelerin travmayı atlattıklarının en iyi yolunun muhitlerin onarımında aktif olarak rol almak olduğunu” önermiş ve geçici olarak üretilen barınma ünitelerinin daha sonra kalıcı malzemeler ile kaplanarak kalıcı yaşam koşulları sağlayabileceğini belirtmişlerdir[Larsen, Lee 2013 s:2].

Larsen ve Lee'nin bahsettiği barınak tasarımı örneklerinden birinde ise bir düzlemsel mütekabil çerçevenin, duvar, döşeme ve tavan olarak işlevlendirilmesi incelenmiştir. Elemanların boyutları bir kişinin kaldırıp taşıyabileceği ve çalışabileceği şekilde sınırlandırılmış olan küçük ahşap elemanlardan üretilen duvar, tavan ve döşemelerin küp biçimli bir barınağın üretim metodları çalışılmıştır. Yapım işinin büyük kısmı komplike malzemeler ve ağır makinaların sınırlı olduğu afet alanında yürütülecektir. Önceden kesilmiş ahşap elemanların afet alanına getirilmesi ve burada basit el aletleri ve metal bağlantılarla birleştirilmesiyle bir barınak strüktürünü oluşturmaları planlanmıştır. Bu çalışmada elemanlar birbirine lamalı ara bağlantılarla vida, cıvata-somunla sabitlenir. Bütün elemanların kesit boyutları eşittir ve bu tasarım için Şekil 5.6'da gösterilen üç çeşit eleman mevcuttur[Larsen, Lee 2013 s:2].



**Şekil 5.5 :**Düzlemsel elemanlardan oluşan geçici barınak fikri[Larsen, Lee 2013 s:2]



**Şekil 5.6 :**Düzlemsel elemanlardan oluşan barınağı oluşturan parçalar[Larsen, Lee 2013 s:2]

Küp biçimi oluşturan düzlemsel müteakabil elemanlar, başlangıçta kumaş, sac veya basit panellerle kaplanarak kapı ve pencere için gerekli boşluklar açılabilir. Larsen ve Lee, tasarım konseptinin gelecekteki gelişmeleri destekler nitelikte olduğunu belirtmiş ve bu geçici strüktürün kalıcı bir strüktüre dönüştürülmesinin kaplama malzemelerinin kalıcı malzemelerle değiştirilmesi şeklinde olacağını eklemişlerdir[Larsen, Lee 2013 s:2]. Strüktürün kısa kirişlerden oluşan modüler yapısı dolayısıyla ilerleyen zamanlarda ihtiyacı karşılayacak şekilde genişletilmesi de mümkündür.



**Resim 5. 10:** Gerçek ölçekli maket[Larsen, Lee 2013 s:2]



**Resim 5.11:** Mütakabil strüktür prensibine göre oluşacak bağlantı[Larsen, Lee 2013 s:3]

Strüktürün hızlı ve basit detaylarla oluşturulması dolayısıyla da yapımı kolay bir acil durum barınma ünitesi olarak da uygun bir çözümdür. Larsen ve Lee, gerçek ölçekli maketin yapılması, malzemenin tedarigi, ölçülerinde kesilmesi, bağlantıların hazırlanması ve yerinde imalatın tamamlanmasının toplamda iki gün aldığını bildirmiştir[Larsen, Lee 2013 s:3].

Mütakabil strüktürlerin kullanılabileceği bir diğer geçici yapı türü, arkeolojik kazı alanı örtüsü, fuar ve sergi yapıları gibi kaldırıldıktan sonra iz bırakmaması istenen yapılar olacaktır. Gelez, Aubry ve Vaudeville bir mütakabil strüktürün yerleşeceği alanda topografik ölçülerin hassas olmasına gerek olmadığını; temellerin ise bir arkeolojik kazı alanının yumuşak ve değişken olan zeminine uygun olduğunu belirtmişlerdir[Gelez, Aubry ve Vaudeville s:304]. Bu kaynağa göre Bibracte kazı alanını kaplayacak çatı örtüsü strüktürünün aşağıda belirtilen ihtiyaçları karşılaması beklenmiş ve yarışma sonucunda önerilen mütakabil strüktür seçilmiştir.

- Kazı alanını ve araştırmacıları hava koşullarından korumak;

- Bir yıl içinde birleştirilip kullanılacak ve sökülecek esnekliğe ve 10 sene boyunca kullanılacak dayanıma sahip olmak;
- 850 m<sup>2</sup> alanı örtmek ve ilerleyen zamanlarda genişletilmeye elverişli olmak;
- Kolay imal edilebilir, sökülebilir ve taşınabilir olmak;
- Kurulma, sökülme ve taşınma işlemleri kazı alanı çalışanları tarafından yapılabilecek kolaylıkta olmak;
- Kazı alanında daha sonra hiçbir iz ve hasar bırakmadan kaldırılabilir olmak[Gelez, Aubry ve Vaudeville s:304].



**Resim 5.12:** Bibracte kazı alanında yapılan bitmiş müteakabil strüktürün görünüşü[URL-62]



**Resim 5.13:** Bibracte kazı alanı çatı örtüsünün zemin bağlantıları ile içten görünüşü [URL-62]

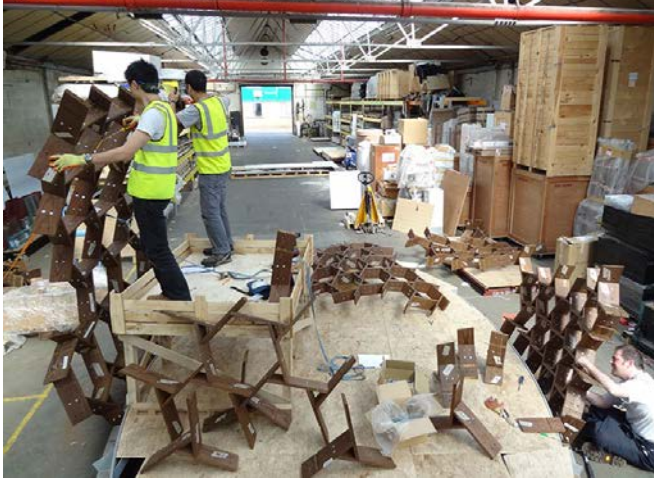
Bibracte kazı alanı örtüsü olarak tasarlanan 30 metre genişliğindeki açıklığı örten mütakabil strüktürün her iki kenarı boyunca içi hafriyat toprağı dolu olan kum torbaları asılıdır. Bu ağırlıklar çatıyı uçurma ihtimali olan rüzgar yükünü dengede tutarak temelde derine inme ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Temel sistemi, kolonlardan iletilen normal yükleri -betonarme temele izin verilmediğinden- eğilmeye dayanıklı bir zemin levhası aracılığıyla dağıtmaktadır[Gelez, Aubry ve Vaudeville s:307].

Bir başka geçici yapı türü fuar yapılarıdır. 2012 Londra Olimpiyat Oyunları için tasarlanmış olan Kreod Pavilion, Pavilion Architecture tarafından tasarlanmış ve Ramboll UK tarafından geliştirilmiştir. Başka yerlerde tekrar kullanılabilir bir geçici strüktür olarak tasarlanan yapı için imalatı kolay olan bir mütakabil strüktür geliştirilmiştir. Bu bağlantılar için Larsen, maksimum iki elemanın bir araya gelebildiğı bağlantıların montaj ve sökümde daha çok elemanın bir araya geldiğı noktasal birleşimlere nispetle kolaylık sağlayacağını belirtmiştir[Larsen, 2014 s:9].

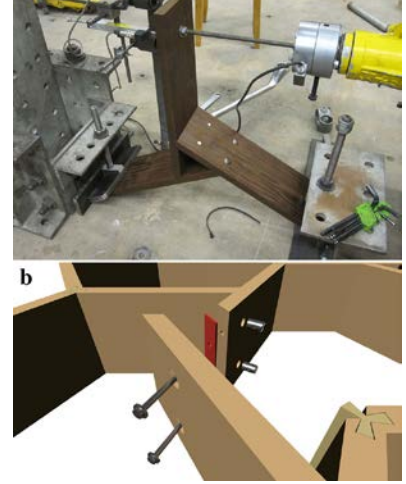


**Resim 5. 14:** Kreod Pavilion'un bitmiş görünüşü [URL-35]

Kreod Pavilion için mobilya bağlantılarına benzer hepsi birbirinin aynısı olan bağlantılar geliştirilmiştir, böylece yapım hızlı ve kolay olacaktır. Strüktür eşit boydaki elemanlarla tekrarlanan bağlantıları sayesinde kolaylıkla birleştirilip sökülebilen hafif bir mütekabil strüktür çözümü olmuştur. Bu örnek mütekabil strüktürlerin sadece ilginç mekânsal strüktürler değil, yapım kolaylığına sahip strüktürler oluşturma potansiyelinin de bir örneğidir[Larsen, 2014 s:9].



**Resim 5.15:** Yapım aşaması[Larsen 2014 s:11]



**Resim 5.16:** Bağlantı detayı[Larsen, 2014 s:11]

Kreod Pavilion, aynı biçimin verilmek istendiği ahşap bir başka strüktüre kıyasla düz elemanlarla eğik formlara ulaşabilme kolaylığını da gösterir bir örnektir. Zira ahşabın eğilmesi uzun vakit alır ve eğer dikkat edilmezse çatlaklara sebep olabilir[Larsen, 2014 s:17].

#### **5.4 Risk Faktörü**

Mütekabil strüktürlerde aşırı yüklemeye bağlı çökme riski seçilen kirişlemenin tek merkezli ve çok merkezli olmasına göre çeşitlilik göstermektedir.

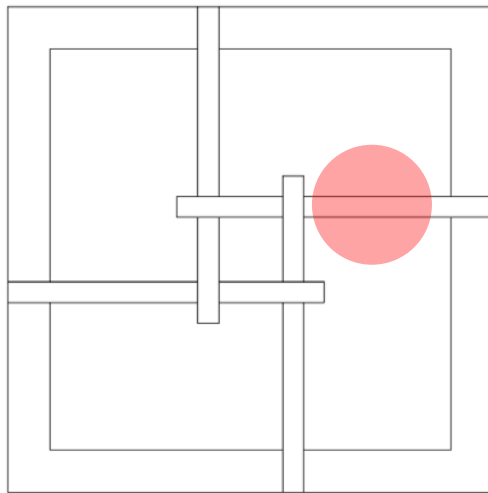
Tek merkezli mütekabil strüktür örneklerinde kirişler için “dışta bir duvar veya kiriş üzerine, içte bir diğer kiriş üzerine yaslanan üç boyutlu kirişleme” tanımı

yapılmıştır[Popovic, Chilton, Choo s:74]. Bu tipteki strüktür, temelde ana elemanların birbirine kilitlenmesine dayanır ki, kazara bir elemanın eksikliği, potansiyel olarak bütün strüktürün çöküşüne sebep olabilir[Larsen, 2014 s:17].

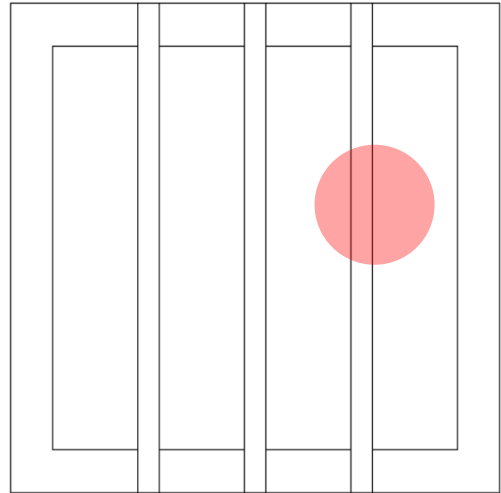
Bu verilere dayanarak, Bertin'in 10 m çapındaki bambu çubuklardan oluşturduğu kubbesinde (Bkz. s:50) aşırı yüklemeye deneyinin, hangi koşullarda “sadece lokal bir çökme yaşanıp, tüm strüktürün çökmemesi” sonucunu vereceği aşağıdaki örnekleme incelenmiştir.

Örnekleme:

Biri mütekabil strüktür olan iki ayrı düzlemsel bir kirişleme Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de ele alınmıştır. Bir mütekabil strüktürde yer alan her bir kiriş yanındaki kirişi dengelemekte ve yapısal direncin sağlanmasında hayati öneme sahiptir. Şekil 5.7'de görülen strüktüre işaretli noktadan aşırı yük uygulanarak bu kiriş kırıldığında, strüktürün “kapalı bir devre oluşturma” özelliğinin kaybolduğu görülecektir. Bir kirişin zafiyeti strüktürün büsbütün çökmesine sebep olacaktır[Garavaglia, Pizzigoni, Sgambi, Basso s:535].



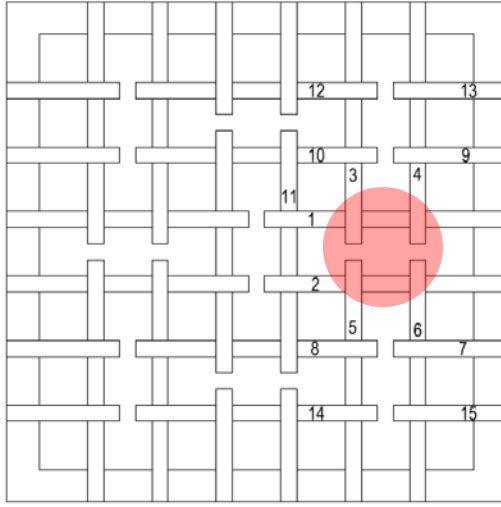
Şekil 5.7 : Dört kirişten oluşan mütekabil strüktüre yük uygulanması



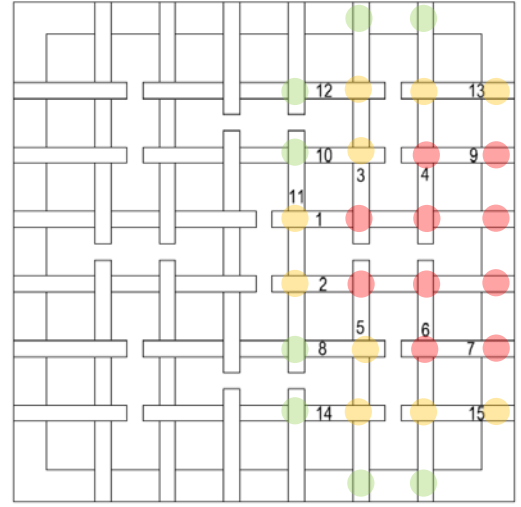
Şekil 5.8 : Geleneksel bir kirişlemeye yük uygulanması

Aynı durum, Şekil 5.8’de geleneksel yöntem için değerlendirildiğinde aynı noktaya uygulanan işaretli yükün muhatabı olduğu kirişi kırıp koparsa bile strüktürün tamamının çökmesine sebep olmadığı görülecektir. Yani, bölgesel bir zarar gördüğünde strüktürün tamamının çökmeden kalabilmesini sağlayan dayanım değeri mütakabil strüktürde, geleneksel yöntemde olduğundan daha düşüktür[Garavaglia, Pizzigoni, Sgambi, Basso s:535].

Çok merkezli mütakabil strüktürlerde ise kirişlemelerin alternatif yük aktarım yolları bulabilme ihtimali mevcuttur, bu sebeple daha stabil davranış gösterebilirler. Bertin, bambu çubuklardan yaptığı kubbeye (s:43) çöküş gerçekleşene kadar yükleme yaptığında bazı kirişlerin aşırı eğilmeden dolayı kırılıp koptuklarını, kubbe üzerinde delik açıldığını fakat kubbenin çökmediğini bildirmiştir[Bertin, 2012 s:64]



**Şekil 5.9 :** Çok merkezli bir mütakabil kirişleme örneği, işaretli bölgeye aşırı yük uygulanması planlanmıştır.



**Şekil 5.10 :** Aynı çok merkezli kirişlemede yük uygulanmasından etkilenen bağlantı noktaları

Şekil 5.9’da görülen çok merkezli mütakabil kirişlemenin işaretli noktadan uygulanan yüke maruz kaldığında strüktürün durumunu bağlantı noktaları belirleyecektir. Çökme, öncelikle taşındığı noktaların zafiyet gösterdiği kirişlerde gözlemlenecektir. Örneğin 1 ve 2 numaralı kirişlerin 3,4,5 ve 6 numaralı kirişleri

taşıdığı noktalarda çökme olduğu halde bu kirişlerin 11 numaralı kirişlere bastığı noktalarda kopmanın derecesine bağlı olarak durum asılı kalma şeklinde olabilir. Bu durumu değerlendirmek üzere Çizelge 5.1 oluşturulmuştur.

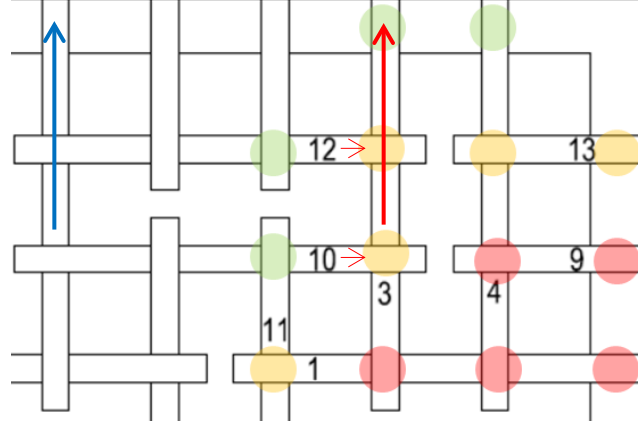
Tabloda her bir kiriş için BN1,BN2,BN3 ve BN4 adında dört bağlantı noktasının durumu gösterilmiştir. Verilen BN1 ve BN4 noktaları bahse konu kirişin diğer kiriş üzerine oturduğu noktalardır. BN2 ve BN3 noktaları ara bağlantı noktaları olacaktır. Temel kabuller şu şekildedir:

- BN1 ve BN4'ten biri veya her ikisi çökmüş, diğeri asılı ise kiriş kopar
- BN1 ve BN4'ten biri çökmüş biri sağlam ise kiriş asılı kalır
- BN2 ve BN3'ten biri veya her ikisi çökmüşse kirişin durumunu BN1 veya BN4'ün durumu belirler.
- BN2 ve BN3'ün her biri asılı veya sağlam ise kiriş sağlam kalır.

**Çizelge 5.1 :** Yüke maruz kalan kirişlerin bağlantı noktalarının durumu A:Asılı; Ç:Çökmüş; S:Sağlam

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
BN1	A	A	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç	A	Ç	A	S	A	A	A	A
BN2	Ç	Ç	A	Ç	A	Ç		S		S	A	S		S	
BN3	Ç	Ç	A	A	A	A		S		S	A	S		S	
BN4	Ç	Ç	S	S	S	S	Ç	S	Ç	S	S	S	A	S	A
DURUM	Ç	Ç	A	A	A	A	Ç	A	Ç	A	S	A	A	A	A

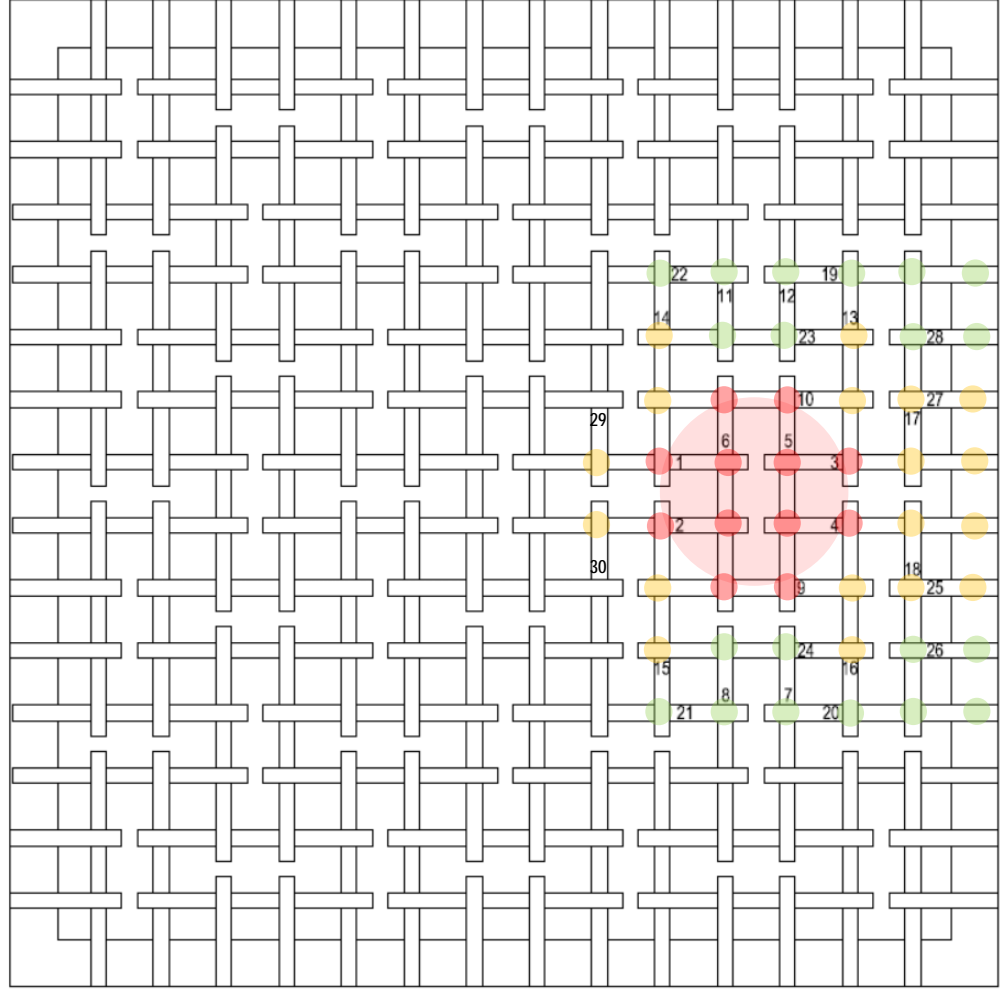
Bir kirişin taşıdığı noktalardan her ikisinin çökmesi veya birinin çöküp diğersinin asılı kalması o kirişin çökmesi için yeterlidir. İlk etapta çöken ve asılı kalan kirişlerin durumları 2-5-6-7-8-14-15 kirişlerinin simetriği olan kısım üzerinden Şekil 5.11'de ele alınmıştır.



**Şekil 5.11 :** 3, 4 numaralı kirişler ve çevresinin durumunun incelenmesi, kırmızı oklar yük aktarımında zafiyete sebep olacak noktaları göstermektedir.

İncelenen bölgede 3 numaralı kiriş 10 ve 12 numaralı kirişleri taşımaktadır. Şekil 5.11’de bu iki kirişin yükünün dış desteğe iletilmesinde izlediği muhtemel yollar gösterilmiştir. Kırmızı ok ile gösterilen yol zafiyete uğramış olduğundan bu yol izlenemeyecektir. Bu durumda 10 ve 12 numaralı kirişlerin yükü her iki bağlantı noktasına paylaştırılmış olduğundan bu kirişler asılı kalacak fakat sağlam olan bağlantı noktalarından mavi oku takip ederek yük aktarımına devam edeceklerdir. 13 numaralı kiriş, kendisinden başka hiçbir kirişi taşımadığı için 4 numaralı kirişe bağlı olarak asılı kalacak veya çökecektir.

Otuz kirişten oluşan bu yapıda tamamen kopan kirişler, yüke direkt olarak maruz kalan 1 ve 2 numaralı kirişler ile örgüye katılmayan 7 ve 9 numaralı kirişler olacaktır. 3, 4, 5, 6 numaralı kirişler kopmaya yakın şekilde askıda kalacaktır. 4 ve 6 numaralı kirişlerin durumuna bağlı olarak asılı kalan kirişler 13 ve 15 olacaktır. 8, 10, 12, 14 numaralı kirişler ise yük iletmeye devam eder şekilde asılı kalacaktır. 11 numaralı kiriş, yapıdaki diğer 16 kirişinden biri olacaktır.



**Şekil 5.12 :** Çok merkezli bir diğer mütakabil kirişleme örneği, işaretli bölgeye aşırı yük uygulanması planlanmıştır.

Şekil 5.7'deki örneğin tamamı çökerken, Şekil 5.9'daki örnekte kirişlerin yarıdan fazlasının çökmeden etkilenmediği; Şekil 5.12'de ise çöken kirişlerin strüktürün tamamına oranının çok daha düşük olduğu görülecektir. Yani, strüktürün bölgesel bir hasar yüzünden çökme riskinin kiriş sayısı arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu durum, mütakabil strüktürlerin doğasında var olan yük paylaşımını ve yüklerin yeni yollar bulabilme potansiyelini göstermektedir[Larsen, 2008 s:33] ve mütakabil strüktürleri, daha güvenli strüktürler yapmaktadır[Larsen, 2014 s:17].

## 6. SONUÇ

Strüktürün geometrisinin malzemenin kısıtlamaları doğrultusunda belirlenmesi, yapı tarihinde bir çok yeniliğin öncüsü olmuştur. Tasarım özgürlüğüne daha fazla imkan tanıyan yapı malzemelerinin yaygınlaşması, geometrinin ön planda tutulduğu strüktür tasarımlarını olduğu kadar, niteliksiz yapı üretimini de beslemiştir. Bu tez çalışmasına, mimari tasarımda biçime, malzeme ve taşıyıcı sistem davranışlarının yol göstermesi gerektiği ön kabulü ile başlandı. Tez başlığı olarak ise ülkemizde daha önce çalışılmamış, geometrik kurgunun tasarımda öncelik arz ettiği bir yapım yöntemi olan “Mütekabil Strüktürler” tercih edildi. Strüktürü oluşturan kirişler arasındaki karşılıklı bağı nitelenmek üzere bu yapım yöntemine İngilizce “Reciprocal Frame Structures” ve Latince “Nexorades” isimlerinin anlamını karşılayacak şekilde tez danışmanım Doç.Dr. Hasan Fırat Diker’in de yönlendirme ve yardımı ile “Mütekabil Elemanlar” ismi verildi.

Türk mimari literatüründe daha önce hiç çalışılmamış, bakir bir alan olan bu konu ele alınırken, mimarlık tarihinde ortaya konmuş strüktürlerin özellikleri, yapım yöntemleri ile avantaj ve dezavantajları hakkında sistemli bilgi verilmesi planlandı.

Kısa kirişlerin birbiriyle örülerek geniş açıklıkları geçecek bir dayanışma oluşturmasını esas alan sistemlerin, mimari tasarım tarihinin günümüze uzanan yolculuğunda basit bağlantılarla serbest formlu mekânsal strüktürler oluşturmaya imkan tanınması, yapım kolaylığı gibi çeşitli nedenlerle tercih edildiği tespit edildi. Mütekabil strüktürlerin konvansiyonel yapım yöntemlerine nispetle daha verimli olduğu özellikleri ön plana çıkarılması ve bir mimari tasarım nesnesi olarak yaygınlaştırılması için çalışmalara devam edilmesi gerekmektedir.

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi’nde yaklaşık 2 yıl süren atölye çalışmaları esnasında strüktürün bir çok özelliği incelenirken, elde edilen veriler, eşzamanlı olarak yurtdışında yapılmış olan akademik çalışmalar ile karşılaştırıldı. Bu şekilde somut bilgiye dönüştürülen verilerden, tez çalışmasının sistematığı içerisinde çeşitli bölümlerde çıkarımlar yapılmıştır. Bu çıkarımlardan bazıları şunlardır;

- Parametrik tasarım araçları ile eğri yüzeylere haritalama yöntemiyle uygulanan ızgaralamanın binili birleşime dönüştürülmesine dair çalışmalar mevcuttur. Atölye çalışmalarında, eksenler arası fark değeri sayesinde, çokyüzlüleri referans alan bir matematiksel kurgu dahilinde kurallı şekilde çift eğrilikli yüzeyler oluşturulabileceği tecrübe edilerek bir ayırım yapıldı. Eğri yüzeyli mütekabil strüktürlerin derlenmesi, bu çıkarım temel alınarak genişletildi.
- Çokyüzlülerin dönüştürülmesine dair tümünden gelimi benimseyen çalışmalar mevcuttur. Atölye çalışmaları esnasında tümevarım yöntemi izlendi ve örgü kuralı ve modülden başlayarak köşeleri kesik yirmi yüzlü elde edildi. Doğru kiriş ölçüleri ve doğru örgü kuralının kişiyi kurallı bir mekansal strüktür oluşturacak geometriye yönlendirdiği anlaşılmış oldu.
- Tek merkezli bir kirişleme kurgusu tercih edildiğinde, konvansiyonel yapım yöntemlerine kıyasla çökme riski daha yüksek bir kurgu elde edileceğine dair çalışmalar mevcuttur. Atölye çalışmalarında çok merkezli kurguların, strüktüre alternatif iletim yolları bulmakta sağladığı avantaj tecrübe edildi. Risk faktörünün değerlendirilmesi bu çıkarım temel alınarak genişletildi.

Yapılan atölye çalışmaları, tez danışmanım Doç. Dr. Hasan Fırat Diker'in danışmanlığında Haliç Kampüsü için bir pergola tasarımı başlığıyla sürdürüldü. Bu süreçte, herhangi bir kabuk tasarımından farklı olarak, kiriş boyu-açıklık ilişkisi, örgü kuralı, malzeme, bağlantı detayı gibi bir takım kararların verilmesini içeren kurgu süreci, birebir tecrübe edildi. Kurgu sürecinin tasarımı zorlaştırması sebebiyle bu strüktürler daha az tercih edilmiş olsa da; gelişen teknolojik tasarım enstrümanlarıyla bu zorluğun alt edilebileceği düşünülmektedir. Bu minvalde mütekabil strüktürlerin dijital tasarım ve üretim yöntemleri, çeşitli malzemelere göre geliştirilen bağlantı detaylarını konu alan bir çok akademik yayın, ileride yapılacak çalışmalara kapı aralamak amacıyla tez çalışmamızın üçüncü ve dördüncü bölümlerinde derlendi ve analiz edildi. Konu hakkında gelecekte, tasarımda malzeme etkisi, bilgisayar destekli tasarım ve robotik üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gibi

konulara dair disiplinler arası çalışmalar yapılması hedeflenmektedir.

Araştırmalarımız arasında yer almayan, fakat çalışmalar esnasında sıklıkla karşılaşılan; çok merkezli mütakabil strüktürler ile İslami geometrik desenlerin aynı kaynaktan, düzenli çokgen dizilimlerinden besleniyor olması konusu da üzerinde çalışmaya değer niteliktedir. İki boyutlu olan İslami geometrik desen kurguları, mütakabil strüktürlere dönüştürülerek üç boyutlu bir kaburga sistemi oluşturmaya imkan sunabilir. Bunun yanında Türk-İslam mimari literatüründe konu ile benzerlik gösterebilecek kurgular bulunmasının da mümkün olduğu düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Askhan, M., Ahmad Y.** (2009). Persian Domes: History, Morphology and Typologies. *Archnet- IJAR, Volume 3, Issue 3*, 98-115.
- Ayverdi, E.H.** (1989). İstanbul Mi'mari Çağının Menşei Osmanlı Mi'marisinin İlk Devri Ertuğrul, Osman, Orhan Gaaziler, Hüdavendigâr ve Yıldırım Bayezid 630-805 (1230-1402) I, *içinde*, Damla Ofset, 1989, İstanbul (s. 227)
- Bammer, A.** (1996). "Çadır ile Anadolu Evi İlişkileri". Tarihten Günümüze Anadolu'da Konut ve Yerleşme / II. Birleşmiş Milletler İnsan Yerleşimleri Konferansı(HABITAT II) 4-5 Temmuz 2005, Tarih Vakfı, İstanbul, 1996, s. 234-247
- Barnes, Jr., C.F.** (2009). The Portfolio of Villard de Honecourt (Paris, Bibliotheque nationale de France, MS FR 19093), Ashgate Publishing Ltd, 2009, Surrey
- Baverel, O., Saidani, M.** (1998) "The Multi-Reciprocal Grid System: A Self Generated Structure". International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering , Varşova, 1998, s. 66-71.
- Baverel, O.** (2000). *Nexorades: A Family of Interwoven Space Structures* (doktora tezi). Adres: <http://epubs.surrey.ac.uk/795820/1/326512.pdf>
- Baverel, O., Nooshin, H., Kuriowa, Y., Parke, G.A.R.** (2000). Nexorades. *International Journal of Space Structures, Vol.15, No.2*, 155-159.
- Baverel, O., Nooshin, H., Kuroiwa, Y.** (2004) Configuration Processing of Nexorades Using Genetic Algorithms. *Journal of the IASS Vol.45 No.2* s.99-108
- Baverel, O. ve Nooshin, H.** (2007). Nexorades Based on Regular Polyhedra. *Nexus Network Journal, 9*, 281-289.
- Baverel, O. ve Boulais, L.** (2011). Workshop "Nexorades with Composites Materials". *International Journal of Space Structures Vol. 26 No. 4* s.363-364.
- Baverel, O. ve Larsen O.P.** (2011). A Review of woven Structures with Focus on Reciprocal Systems - Nexorades. *International Journal of Space Structures, 26-4*, 281-288.
- Benevolo L.** (1981). Modern Mimarlığın Tarihi Birinci Cilt:Sanayi Devrimi, *içinde*, Çevre Yayınları, 1981, yer belirtilmemiş
- Bertin, V.** (2010). Leverworks: One Principle Many Forms, China Architecture&Building Press, 2012, Pekin
- Bıçakçı, E.** (2005). "Tarih Öncesi Devirlerde Malzeme ve Mimarlık". Geçmişten Geleceğe Anadolu'da Malzeme ve Mimarlık Sempozyum / UIA 2005

- XXII. Dünya Mimarlık Kongresi 4–5 Temmuz 2005, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul, 2006, s. 19-60
- Brocato, M. ve Mondardini, L.** (2012). A new type of stone dome based on Abeille’s bond. *International Journal of Solids and Structures*, 49, 1786-1801.
- Chilton, J.** (2009). “Development of Timber Reciprocal Frame Structures in the UK”. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures Symposium 28 September–2 October 2009, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Valencia, 2009, s. 1877-1884
- Ching, F.D.K., Onouye, B.S., Zuberbuhler, D.** (2010). “Taşıyıcı Sistemler”, Çizimlerle Taşıyıcı Sistemler, *içinde*, Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları, 2010, İstanbul, (s. 1-39)
- Choo, B.S., Couliette, P.N., Chilton, J.C.** (1994) “Retractable Roof Using Reciprocal Frame”. IABSE Symposium Report 1994, Places of Assembly and Long Span Building Structures, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Birmingham, 1994, s. 49-54
- Di Carlo, B.** (2008). The Wooden Roof of Leonardo and New Structural Research. *Nexus Network Journal*, 10, 27-38.
- Diker, H.F.** (2016). Ayasofya ve Onarımları, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Yayınları, 2016, İstanbul
- Doğan, M.** (1996). Büyük Türkçe Sözlük, *içinde*, İz Yayıncılık, 1996
- Douthe, C. ve Baverel, O.** (2009). Design of “nexorades” or “structures with mutually supporting elements” with the dynamic relaxation method. *Computers and Structures*, 87, 1296–1307.
- Fazio, M., Moffett, M., Wodehouse, L.** (2008). The World History of Architecture, *içinde*, Laurence King Publishing, 2009, London
- Fleury, F.** (2009). “Evaluation of the Perpendicular Flat Vault Inventor’s Intuitions through Large Scale Instrumented Testing”. Proceedings of the Third International Congress on Construction History, 20-24 Mayıs, University of Technology Cottbus, Brandenburg, 2009
- Gates, C.** (2015). Antik Kentler, *içinde*, Koç Üniversitesi Yayınları, 2015, İstanbul
- Garavaglia, E., Pizzigoni, A., Sgambi, L., Basso, N.** (2013) Collapse Behaviour in Reciprocal Frame Structures. *Structural Engineering and Mechanics Vol.46, No.4* s:533-547.
- Gelez, S., Aubry, S., Vaudeville, B.** (2011). Nexorade or Reciprocal Frame System Applied to the Design and Construction of a 850 m<sup>2</sup> Archaeological Shelter. *International Journal of Space Structures Vol. 26, No. 4 2011*

- Grünbaum, B., Shephard, G.C.** (1977) Tilings by Regular Polygons. *Mathematics Magazine, Vol.50, No.5s:227-247*
- Hsu, M.** (1986). *The Origins of Traditional Chinese Architecture* (doktora tezi). Adres: <https://www.era.lib.ed.ac.uk>
- Hasol, D.** (2016). Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, *içinde*, YEM Yayın, 2016, İstanbul
- Houlsby, G.T.** (2014). John Wallis and the Numerical Analysis of Structures. *Nexus Network Journal, 16*, 207-217.
- Heise, K.** (2014). Ingenieurporträt: Friedrich Reinhardt Balthasar Zollinger, Städtebauer und Konstrukteur des gewölbten Lamellendachs. db *Deutsche Bauzeitung Nr.2/04*, s.68-75.
- Hitchcock, H.R., Lloyd, S., Rice, D.T., Lynton, N., Boyd, A., Carden, A., Rawson, P., Jakobus, J.** (1963). “Ancient & Classical Architecture”, T. Coplestone (Ed.), *World Architecture an Illustrated History, içinde*, --Publishing, 1963, New York, (s. 15-81)
- Kohlhammer, T., Kotnik, T.** (2011). Systemic Behaviour of Plane Reciprocal Frame Structures. *Structural Engineering International, 1s.80-86*
- Kreztshmer F.** (2010). “XIV. Köprü Yapımı”, S. Kıran (Ed.), *Antik Roma’da Mimarlık ve Mühendislik, içinde*, Arkeoloji ve Sanat Yayınları, 2010, İstanbul, (s. 147-154)
- Lahti, E.K.** (2004). “People, Material and Environment in the North”. Proceedings of the 22nd Nordic Archaeological Conference, Oulu, 2004, s. 66-71.
- Larsen, O.P.** (2008). *Reciprocal Frame Architecture, içinde*, Elsevier Ltd, 2008, Oxford
- Larsen, O.P.** (2009). “Reciprocal Frame Architecture in Japan”. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures Symposium 28 September–2 October 2009, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Valencia, 2009, s. 1877-1884
- Larsen, O.P.** (2014). *Reciprocal Frame (RF) Structures: Real and Exploratory. Nexus Network Journal Architecture and Mathematics, içinde*, Kim Williams Books, Turin, 2014.
- Larsen, O.P., Lee, D.S.H.** (2013). “Reciprocal Frames (RFs) Used for Quick-built Deployable Emergency Shelters”. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Beyond the Limits of Man, 23-27 September, Wroclaw University of Technology, Poland, 2013.
- Larsen, O.P., Lee, D.S.H.** (2014). “Sustainable agricultural building design using locally grown Danish timber”. Third International Workshop on

Design in Civil and Environmental Engineering, August 21-23, DTU, 2014.

- Larsen, O.P.** (2015). “Sustainable High Performance Building Structures Using Low Quality Local Danish Timber”. Proceedings of the 31th International PLEA Conference, Architecture in (R)evolution. 9-11 September, Bologna, 2015.
- Lippolis, C.** (2009). Notes on Iranian Traditions in the Architecture of Parthian Nisa. *Electrum, Volume 15*, 53-70.
- Mansbridge, J.** (1967). “Ancient & Classical Architecture”, T. Copplestone (Ed.), Graphic History of World Architecture, *içinde*, 1967, London, (s. 15-81)
- Mehan, A.** (2014). “Recreation Architectural Values of Sarvestan Garden and Pavilion”. Cultural Heritage. Present Challenges and Future Perspectives, Roma, 2014
- Naumann, R.** (1975). Eski Anadolu Mimarlığı, Türk Tarih Kurumu Basımevi, 1975, Ankara
- Özdoğan, M.** (1996). “Kulübeden Konuta: Mimarlıkta İlkler”. Tarihten Günümüze Anadolu’da Konut ve Yerleşme / II. Birleşmiş Milletler İnsan Yerleşimleri Konferansı(HABITAT II) 4–5 Temmuz 2005, Tarih Vakfı, İstanbul, 1996, s. 19-30
- Özdoğan, M.** (2005). “Yeni Veriler Işığında Anadolu Mimarisinin Dünya Mimarisine Katkıları”. Geçmişten Geleceğe Anadolu’da Malzeme ve Mimarlık Sempozyum / UIA 2005 XXII. Dünya Mimarlık Kongresi 4–5 Temmuz 2005, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul, 2006, s. 145-162
- Özdöl, S.** (2011). Çanak Çömleksiz Neolitik Çağ’da Güneydoğu Anadolu’da Din ve Sosyal Yapı. *Tarih İncelemeleri Dergisi, Cilt. XXVI, No.1*, 173-199.
- Pallarés, E.F.** (2013). “Emilio Perez Pinero: Inventor of Deployability”, Paulo J. da Sousa Cruz (Ed.) Structures and Architecture Concept, Applications and Challenges, *içinde*, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 2013 Florida (s.42-57)
- Pantazis, E., Gerber, D.J.** Material Swarm Articulations, New View Reciprocal Frame Canopy. *Fabrications Vol.1, No.32* s:463-473
- Parigi, D., Pugnale, A.** (2014). Three-dimensional Reciprocal Structures: Morphology, Concepts, Generative Rules. *Nexus Network Journal*, 16, s.151-177.
- Pizzigoni, A.** (2009). “A High Fiber Reinforced Concrete Prototype for Reciprocal Structures of Demountable Building”. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures 4–

28 Eylül-2 Ekim, Universidad Politecnica de Valencia, Spain, 2009, s. 1895-1906.

- Pizzigoni, A. ve Vittorio, P.** (2014). “Herringbone, Gualandrino and Brunelleschi’s Bricks”. 9th International Masonry Conference 7–9 July 2014, University of Minho, ISISE, International Masonry Society (IMS), Guimarães, 2014,
- Popovic, O.** (1996). *Reciprocal Frame Structures* (doktora tezi). Adres: <http://eprints.nottingham.ac.uk/11494/1/320023.pdf>
- Popovic, O., Chilton, J.C., Choo, B.S.** (1996). Rapid Construction of Modular Buildings Using ‘Reciprocal Frame’. *Transactions on the Built Environment Vol.21, içinde*, WIT Press, 1996.
- Pugnale, A. ve Sassone, M.** (2014). Structural Reciprocity: Critical Overview and Promising Research/Design Issues. *Nexus Network Journal, 16*, 9-35.
- Rizzuto, J., Saidani, M., Chilton, J.C.** (2001). Polyhedral Space Structures Using Reciprocally Supported Elements of Various Cross-Sections. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS Vol.42, No:137* s.149-159.
- Rizzuto, J.P.** (2006) Rotated Mutually Supported Truncated Icosahedral Domes. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS Vol.48, No:153* s.3-17.
- Rizzuto, J.P., Larsen, O.P.** (2010) Connection Systems in Reciprocal Frames and Mutually Supported Elements Space Structure Networks. *Journal of Space Structures, Vol. 25, No.4*, 243-256.
- Roelofs, R.** (2008). Two- and Three-Dimensional Constructions Based on Leonardo Grids. *Nexus Network Journal, 10*, s.17-26.
- Roth, L.M.** (2006). “Mısır Mimarlığı”, *Mimarlığın Öyküsü, içinde*, Kabalcı Yayınevi, 2006, İstanbul, (s. 224-254)
- Saidani, M., Baverel, O.** (1998a) Retractable Multi-Reciprocal Grid Structure. *Journal of The International Association for Shell and Spatial Structures, 39, No. 3*, 141-146.
- Saidani, M., Baverel, O.** (1998b) The Multi Reciprocal Grid System: A Self Generated Structure. International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering, 30 Kasım-4 Aralık 1998, IASS, Warsaw s.66-71
- Saidani, M., Baverel, O., Cross-Rudkin, P.S.M.** (1998) Investigation into a New Type of Multi-Reciprocal Grid. *Journal of Space Structures, 13, No.4*, 215-218.

- Saidani, M., Baverel, O.** (1999) The Multi-Reciprocal Grid System. *Journal of The International Association for Shell and Spatial Structures*, 40, No. 1, 33-41.
- Sandaker, B.N., Eggen, A.P., Cruvellier, M.R.** (2011). Structural Basis of Architecture, *içinde*, Routledge, 2011, Oxon (s. 2)
- Saner, T.** (2005). “Yunan ve Roma Dönemlerinde Malzeme ve Mimarlık”. Geçmişten Geleceğe Anadolu’da Malzeme ve Mimarlık Sempozyum / UIA 2005 XXII. Dünya Mimarlık Kongresi 4–5 Temmuz 2005, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul, 2006, s. 61-78
- Schirmer, W.** (1982). Hitit Mimarlığı, *içinde*, Arkeoloji ve Sanat Yayınları, 1982, İstanbul
- Schwartz, T., Mondardini, L.** (2014). “Integrated Design and Robotized Prototyping of Abeille’s Vault”, W. McGee ve M.Ponce de Leon (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design içinde*, Springer International Publishing, 2014, İsviçre (s. 199-207)
- Seiler-Baldinger, A.** (1994). Textiles A Classification of Techniques, *içinde*, Smithsonian Institution Press, 1994, Washington (s. 23-25)
- Sénéchal, B., Douthe, C., Baverel, O.** (2011). Analytical Investigations on Elementary Nexorades. *International Journal of Space Structures Vol. 26 No. 4*, 313–320.
- Song, P., Fu, C.W., Goswami, P., Zheng, J., Mitra, N.J., Cohen-Or, D.** (2014) An Interactive Computational Design Tool for Large Reciprocal Frame Structures. *Nexus Network Journal*, 16, 109-118.
- Taipale, K.** (2012) “From Light Green to Sustainable Buildings”. State of the World 2012: Moving Toward Sustainable Prosperity, *içinde*, Worldwatch Institute, 2012
- Tamke, M., Riiber, J., Jungjohann, H.** (2010). “Generated Lamella”. Aaron Sprecher, Shai Yeshayahu, Pablo Lorenzo-Eiroa (Ed.), Proceedings of the 30th Annual conference of Association for Computer Aided Design in Architecture, *içinde*, ACADIA, 2010, New York (s.340-347)
- Thönnisen, U.** (2014) A Form-Finding Instrument for Reciprocal Structures. *Nexus Network Journal*, Vol.16, 89-107.
- Türkcan, A.U., Polat, Y., Oransay, A.B.S., Tek, T.** (2012). “Tarihöncesi Anadolu’da Paleolitik ve Neolitik Dönem”, H.S. Alanyalı (Ed.), *Anadolu Arkeolojisi, içinde*, Anadolu Üniversitesi Yayını No:2633, 2012, Eskişehir, (s. 3-20)
- Ünal, G.** (2016). Açıklamalı İngilizce>Türkçe İnşaat Mühendisliği Sözlüğü, *içinde*, YEM Yayın, 2016, İstanbul

- Wheeler M.** (2004). “Yapılar”, Roma Sanatı ve Mimarlığı, *içinde*, Homer Kitabevi ve Yayıncılık, 2004, İstanbul, (s. 86-131)
- Weinand, Y. ve Hudert, M.** (2010), Timberfabric: Applying Textile Principles on a Building Scale. *Archit Design*, 80, 102–107.
- Winter, K., Rug, W.** (1992). Innovationen im Holzbau-Die Zollinger-Bauweise. *Bautechnik* 69, Heft 4, s.190-197
- Yavuz, A.T.** (2005). “Selçuklu Döneminde Malzeme ve Mimarlık İlişkisi”. Geçmişten Geleceğe Anadolu’da Malzeme ve Mimarlık Sempozyum / UIA 2005 XXII. Dünya Mimarlık Kongresi 4–5 Temmuz 2005, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul, 2006, s. 79-142
- Zhiping, Z.** (2000). Traditional Chinese Buildings and Their Performance in Earthquake, International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, UNESCO-TC Kültür Bakanlığı-ICOMOS, İstanbul, 2000.
- Zalewsky, W., Allen, E.** (2009). Form and Forces, *içinde*, John Wiley & Sons, Inc., 2009, New Jersey (s.1-34)

**Fuller, B.** (1962) ABD Patenti, No:3063521

**Walle, E. ve Prinz S.** (1975) Alman Patenti, No:2152580

**Crooks, M.** (1980) ABD Patenti, No:4182086

**Gat, D.** (1980) ABD Patenti No:4227358

**Pinero, P.E.** (1965) ABD Patenti, No:3185164

**Beaulieu, B.J.** (1984) ABD Patenti, No: RE31566

**Hobermann, C.** (2004) ABD Patenti, No: 6739098

**Danz, C.** (2014). Reciprocal Frames, Nexorades and Lamellae: An investigation into mutually supporting structural forms. [http://dmg.be.washington.edu/reports/Reciprocal%20Frames%20\(Danz,%202014\).pdf](http://dmg.be.washington.edu/reports/Reciprocal%20Frames%20(Danz,%202014).pdf)> Erişim tarihi: 10.05.2017

**Maas, M.** (2014). Upcycling: Planung (und Bau) einer Leichtbauhalle (Experimentalbau) als Stabflechtwerkschale an der BO.2014. [http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb\\_a/Maas/Upcycling\\_Wahlfach/Aufgaben/SemesterAufgabe\\_WS2014-15\\_02.pdf](http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb_a/Maas/Upcycling_Wahlfach/Aufgaben/SemesterAufgabe_WS2014-15_02.pdf)> Erişim tarihi: 10.05.2017

**URL-1**<<http://www.ancient.eu/china/>> Erişim tarihi: 10.05.2017

- URL-2**<<http://www.global.britannica.com/place/China/Cultural-institutions#ref589716>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-3**<<http://www.harappa.com>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-4**<<http://www.archives.saltresearch.com>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-5**<[http://www.wikiwand.com/en/Nanchan\\_Temple\\_\(Wutai\)](http://www.wikiwand.com/en/Nanchan_Temple_(Wutai))> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-6**<<http://www.abbayedefontenay.com/en/discover-fontenay/the-abbey-and-its-gardens/abbey-church>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-7**<[http://www.wikiwand.com/en/Basilica\\_of\\_St\\_Denis](http://www.wikiwand.com/en/Basilica_of_St_Denis)> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-8**<<http://www.edirnevdb.gov.tr/kultur/selimiye.html>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-9**<<http://www.yenisafak.com/hayat/turkiyedeki-butun-ulu-camilerin-fotograflari-tek-albumde-2472364>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-10**<<http://www.italianways.com/guarino-guarinis-daring-domes/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-11**<<http://afe.easia.columbia.edu>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-12**<[http://www.wikiwand.com/en/Chapter\\_house](http://www.wikiwand.com/en/Chapter_house)> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-13**<<http://www.massimoscolari.it>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-14**<[http://whc.unesco.org/include/tool\\_image.cfm?id=126743&gallery=site&id\\_site=371](http://whc.unesco.org/include/tool_image.cfm?id=126743&gallery=site&id_site=371)> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-15**<<http://www.crystalpalacemuseum.org.uk/image-archive/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-16**<<http://stpancras.com/history>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-17**<[https://en.wikipedia.org/wiki/All-Russia\\_Exhibition\\_1896](https://en.wikipedia.org/wiki/All-Russia_Exhibition_1896)> Erişim tarihi: 19.04.2017
- URL-18**<[http://www.wikiwand.com/de/Jahrhunderthalle\\_\(Breslau\)](http://www.wikiwand.com/de/Jahrhunderthalle_(Breslau))> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-19**<<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46741439>>
- URL-20**<<https://structurae.net/structures/little-sports-palace>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-21**<<http://www.japan-photo.de/mod-ja19-19.html>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-22**<<https://www.flickr.com/photos/xtraphoto/16580708227>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-23**<<https://www.britannica.com/topic/Sydney-Opera-House>> Erişim tarihi: 10.05.2017

- URL-24**<<http://www.archdaily.com/444822/bricktopia-contemporary-crafts-in-eme3-festival-barcelona>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-25**<<https://www.dezeen.com/2013/06/04/serpentine-gallery-pavilion-2013-by-sou-fujimoto/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-26**<<http://www.archdaily.com/425535/rjukan-town-cabin-rallar-arkitekter>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-27**<<http://www.archdaily.com/543608/bcn-re-set-identity-pavilion-urbanus>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-28**<<http://www.archdaily.com/627728/uk-pavilion-milan-expo-2015-wolfgang-buttruss>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-29**<<https://www.dezeen.com/2016/11/22/zcb-bamboo-pavilion-students-chinese-university-of-hong-kong-world-architecture-awards-small-project/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-30**<<http://www.casabatllo.es/galerias/oficiales>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-31**<<http://www.trada.co.uk/casestudies/overview/LangstoneHarbour>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-32**<<http://www.shigerubanarchitects.com>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-33**<<http://www.dma-ny.com>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-34**<<https://www.dezeen.com/2015/11/29/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-35**<<http://www.designboom.com/architecture/kreod-pavilion-at-greenwich-peninsula-in-london-by-chun-qing-li/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-36**<<http://www.arcspace.com/features/sambuichi-architects/rokko-shidare-observatory/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-37**<<https://www.dezeen.com/2017/05/07/aau-anastas-gsa-research-laboratory-stone-pavilion-jericho-palestine/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-38**<[http://www.shigerubanarchitects.com/works/2010\\_centre-pompidou-metz/index.html](http://www.shigerubanarchitects.com/works/2010_centre-pompidou-metz/index.html)> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-39**<<https://tr.wikipedia.org/wiki/Mafsal>> Erişim tarihi: 19.04.2017
- URL-40**<<http://www.koblenger-bildungsverein.de/index.php?menuid=155&reporeid=214>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-41**<[http://www.en.wikipedia.org/wiki/Persian\\_Empire](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Persian_Empire)> Erişim tarihi: 19.04.2017
- URL-42**<<http://whc.unesco.org/en/list/1242>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-43**<<http://www.yozgatkulturturizm.gov.tr/TR,91992/alisar-hoyugu.html>> Erişim tarihi: 10.05.2017

- URL-44**<<https://www.hittitemonuments.com/alacahoyuk/index-t.html>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-45**<<http://www.kulturvarliklari.gov.tr/TR,44427/hattusa-bogazkoy---hitit-baskenti-corum.html>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-46**<[https://en.wikipedia.org/wiki/Julius\\_Caesar](https://en.wikipedia.org/wiki/Julius_Caesar)> Erişim tarihi: 19.04.2017
- URL-47**<<https://tr.wikipedia.org/wiki/Mandala>> Erişim tarihi: 19.04.2017
- URL-48**<[http://www.en.wikipedia.org/wiki/Sebastiano\\_Serlio](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Sebastiano_Serlio)> Erişim tarihi: 19.04.2017
- URL-49**<[http://www.en.wikipedia.org/wiki/John\\_Wallis](http://www.en.wikipedia.org/wiki/John_Wallis)> Erişim tarihi: 19.04.2017
- URL-50**<[http://www.en.wikipedia.org/wiki/Johannes\\_Kepler](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler)> Erişim tarihi: 19.04.2017
- URL-51**<<https://www.britannica.com/biography/Archimedes>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-52**<<http://mathworld.wolfram.com/SmallRhombicosidodecahedron.html>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-53**<<http://www.wolfram.com/mathematica/>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-54**<<https://vimeo.com/65297747>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-55**<<https://www.immonet.de/angebot/30817384>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-56**<<http://merseburg.im-bild.org/fotos/bildungseinrichtungen/albrecht-duerer-schule>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-57**<<http://peacebuildings.org/projects.html>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-58**<<https://issuu.com/alakirnehri/docs/yuva>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-59**<<http://www.nordictimber.nl/en-GB/Certificates/CE-strength-grading.aspx>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-60**<<http://tureng.com/tr/turkce-ingilizce/biform>> Erişim tarihi: 10.05.2017
- URL-61**<<http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5704/>>
- URL-62**<<http://www.tess.fr/en/projet/excavation-shelter>>

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Zehra Karakoç  
**Doğum Tarihi ve Yeri:** Ankara- 1988  
**E-posta** : zehra.karakoc@stu.fsm.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise** : 2005, Özel Nene Hatun Fen Lisesi
- **Lisans** : 2014, Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık
- **Değişim Programı** : 2011-2012, Almanya, Bochum Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Mimarlık
- **Yüksek Lisans** : 2014-2017, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mimarlık Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı

### MESLEKİ DENEYİM:

- **Ağustos 2015-Kasım 2016** : Dizayn Ofis Şefi, Haktan Yapı, Pruva 34 Projesi
- **Kasım 2014-Nisan 2015** : Mimar, Pars Yapı Denetim
- **Mayıs 2014-Kasım 2014** : Mimar, Meyap Mimarlık
- **Kasım 2013-Nisan 2014** : Mimar, HM Mimarlık
- **Ağustos 2013- Eylül 2013** : Stajyer, K2 Mimarlık ve Mühendislik
- **Ağustos 2010- Eylül 2010** : Stajyer, Sinpaş GYO, Lagün ve Akasya Projeleri