

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN TASARIMI

ÖZDEN M. VARDAR ÖZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANABİLİM DALI
MİMARLIK BÖLÜMÜ**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ZEHRA CANAN GİRĞİN**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN TASARIMI

Özden Mükerrerem VARDAR ÖZ tarafından hazırlanan tez çalışması 30.08.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Zehra Canan GİRGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Zehra Canan GİRGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Deniz GÜNEY

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç. Dr. Ercan YÜKSEL

İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi'nde gerçekleştirilen bu Yüksek Lisans Tezi, tek tabakalı uzay kafes sistem tipleri, kullanılan malzemeler ile birleşimleri ve taşıyıcı sistem konularındaki çalışmaları kapsamaktadır. Bu çalışma ile aynı zamanda, geniş açıklıklı tasarımda tek tabakalı uzay kafes sistem tasarımının Türkiye'de her yönü ile anlaşılması, yönlendirilmesi, tasarımcıların yetişmesi amaçlanmıştır.

Bu tezi tamamlamam konusunda büyük özveriyle bana destek olan ve yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Z. Canan GİRĞİN'e teşekkürü bir borç bilirim. Proje kapsamında yaptığı ayrıntılı statik analizler ile araştırmalarına katkıda bulunan İnşaat Müh. Erkin DURAN'a emeklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Her konuda bana destek veren ve yanımda olan eşim Timur ÖZ'e, tüm hayatım boyunca emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen babam Müeddin VARDAR, annem Sadiye VARDAR'a, kardeşlerim; Gönül SCHARA ve eşi Bill SCHARA, Ayşegül SÖNMEZ ve eşi Berkant SÖNMEZ ve Nurcan VARDAR'a, eğitim hayatımı destekleyen babam Erdoğan ÖZ ve annem Gülten ÖZ'e yürekten teşekkür ederim.

Proje kapsamında yaptığım üç boyutlu görsel çalışmalarda her türlü bilgisini paylaşan, İnşaat Müh. Halil ÖZHAN'a, bu zorlu çalışma sürecimde beni varlıklarıyla mutlu eden arkadaşlarım, Neşe ATASOY, Zeynep İSLAM, Sait ŞENGÜLER, Seher ÇAKO, Betül ORTAÇ, Aslı AYGİN ve Kadriye OSKAY'a ve tezimi hazırlarken gösterdikleri anlayış için, ikidesign group mimarlık firması'na çok teşekkür ederim.

Ağustos, 2012

Özden M. VARDAR ÖZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	X
ŞEKİL LİSTESİ.....	Xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xviii
ÖZET	xix
ABSTRACT	xxi
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür özeti.....	1
1.2 Tezin amacı	2
1.3 Bulgular	3
BÖLÜM 2.....	4
UZAY KAFES SİSTEMLER	4
2.1 Uzay kafes sistemler	4
2.2 Tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemlerin karşılaştırılması.....	6
2.3 Tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemlerin yapım yöntemleri	10
2.3.1 Element yöntemi	10
2.3.2 Blok yöntemi.....	11
2.3.3 Kaldırma yöntemi 1	12
2.3.4 Kaldırma yöntemi 2	13
2.3.5 Kayma yöntemi.....	14
BÖLÜM 3.....	15
TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLER	15

3.1	Tarihçe	15
3.2	Tek tabakalı uzay kafes sistem ile tasarlanan formlar	22
3.2.1	Silindirik kabuk (tonoz) sistemler	23
3.2.1.1	Tek tabakalı silindirik kabuk sistemler	24
3.2.2	Kubbe sistemler	26
3.2.2.1	Tek tabakalı kubbe sistemler	26
3.2.2.2	Kubbe sistemler ve geometrik parametreler	34
3.2.3	Karma sistemler	37
3.2.3.1	Hiperbolik paraboloid sistemler	38
BÖLÜM 4		42
TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN ÇELİK MALZEME İLE OLUŞTURULMASI		42
4.1	Tarihçe	42
4.2	Çelik malzeme ve özellikleri	44
4.3	Tek tabakalı çelik uzay kafes sistemlerde birleşim sistemleri	45
4.3.1	Ek levhalı birleşimler	47
4.3.1.1	SBP-1 birleşimi	47
4.3.1.2	SBP-2 birleşimi	48
4.3.1.3	SBP-3 birleşimi	49
4.3.1.4	HEFI-1 birleşimi	50
4.3.1.5	POLO-1 birleşimi	51
4.3.2	Uçtan ekli birleşimler	52
4.3.2.1	SBP-4 birleşimi	52
4.3.2.2	WABI-1 birleşimi	53
4.3.2.3	OCTA-1 birleşimi	53
4.3.2.4	MERO-PLUS birleşimleri	54
4.4	Bazı birleşim sistemleri üzerine deneysel ve teorik çalışmalar	60
4.5	Tek tabakalı çelik uzay kafes sistemlerde mesnet birleşimleri	65
4.6	Tek tabakalı çelik uzay kafes sistemler ve stabilite	67
4.6.1	Tek tabakalı çelik silindirik kabuklar	68
4.6.2	Tek tabakalı çelik silindirik kubbeler	70
4.6.2.1	Yükler	74
4.7	Tek tabakalı uzay kafes sistem ile tasarlanmış kubbe sistem projesi	74
4.7.1	Genel	74
4.7.2	Proje verileri	76
BÖLÜM 5		87
TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN AHŞAP MALZEME İLE OLUŞTURULMASI		87
5.1	Tarihçe	87
5.2	Ahşap malzeme ve özellikleri	91
5.2.1	Ahşap birleşimler	91
5.2.2	Tabakalı kompozit ahşap elemanlar	94
5.3	Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemler	97
5.3.1	Tek tabakalı ahşap silindirik kabuk sistemler	97

5.3.2	Tek tabakalı ahşap kubbe sistemler	98
5.3.3	Tek tabakalı ahşap hiperbolik paraboloid sistemler	100
5.3.4	Tek tabakalı ahşap serbest formlu sistemler (gridshell)	101
5.4	Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemlerde birleşimler	105
5.5	Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistem örnekleri	107
BÖLÜM 6		113
TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN ALÜMİNYUM MALZEME İLE OLUŞTURULMASI		113
6.1	Tarihçe	113
6.2	Alüminyum malzeme ve özellikleri	115
6.3	Tek tabakalı uzay kafes sistem kurulumu	117
6.4	Tek tabakalı alüminyum uzay kafes sistemlerde birleşimler	119
6.5	Tek tabakalı alüminyum uzay kafes sistem yapım yöntemleri	121
6.6	Tek tabakalı alüminyum uzay kafes sistem örneği	122
BÖLÜM 7		123
TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERDE KULLANILAN ÖRTÜLER		123
7.1	Membran örtüler	123
7.1.1	PVC türü membranlar	124
7.1.2	PTFE türü membranlar	125
7.1.3	ETFE türü membranlar	126
7.1.4	ePTFE türü membranlar	127
7.2	Cam örtüler	128
7.2.1	Çift cam üniteler	128
7.2.2	Güneş ışıınımı kontrol camları	129
7.2.3	Low-E camlar	129
7.3	Plastik esaslı malzemeler	130
7.3.1	PVC levhalar	130
7.3.2	Polikarbonat levhalar	131
7.3.3	Cam elyaf takviyeli polyester levhalar (CTP)	131
7.4	Metal esaslı malzemeler	132
7.4.1	Alüminyum levhalar	132
7.4.2	Galvanizli sac levhalar	132
7.5	Ahşap çatı altı kaplamaları	133
7.5.1	OSB	133
BÖLÜM 8		134
SONUÇ VE ÖNERİLER		134
KAYNAKLAR		137
EKLER		155

ÇİFT TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLER	155
EK-1.1 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin özellikleri	155
EK-1.2 Tür ve geometri.....	156
EK-1.2.1 Kare ve üçgen tabanlı piramit modüllü çift tabakalı uzay kafes sistemler.....	156
EK-1.3 Tasarım parametreleri	158
EK-1.4 Ters sehim ve eğim	159
EK-1.5 Mesnetlenme biçimleri.....	160
EK-1.5.1 Mesnet birleşimleri.....	161
EK-1.6 Temeller ve çatı kaplama elemanları.....	163
EK-1.7 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin düğüm noktası çözümleri.....	164
EK-1.7.1 Parçalı sistemler	165
EK-1.7.1.1 Mero birleşim sistemi	165
EK-1.7.1.2 SDC birleşim sistemi.....	166
EK-1.7.1.3 Wachsmann ve Smith birleşim sistemi	167
EK-1.7.1.4 Orona SEO birleşim sistemi.....	168
EK-1.7.1.5 Nodus birleşim sistemi.....	169
EK-1.7.1.6 Octatube ve Tuball birleşim sistemleri	169
EK-1.7.1.7 Bowl birleşim sistemi (NK tipi).....	171
EK-1.7.1.8 NS uzay kafes birleşim sistemi	172
EK-1.7.1.9 Triodetic birleşim sistemi.....	172
EK-1.7.1.10 Unistrut birleşim sistemi.....	173
EK-1.7.2 Çubuk elemanlı sistemler	173
EK-1.7.2.1 Harley birleşim sistemi.....	173
EK-1.7.2.2 Mai Sky birleşim sistemi	174
EK-1.7.2.3 Catrus birleşim sistemi.....	174
EK-1.7.3 Modüler sistemler	175
EK-1.7.3.1 Unibat modülü	175
EK-1.7.3.2 Space Deck modülü.....	175
EK-1.7.3.3 Pyramitec modülü.....	176
EK-1.7.3.4 Temcor alüminyum modülü	176
EK-1.7.3.5 Murj-3D modülü	177
ÖZGEÇMİŞ.....	179

SİMGE LİSTESİ

ϕ	Kubbe sistemlerde nervürler arası açı
2ϕ	Kubbe sistemlerde iki nervür arasında plandaki açı
a	Kubbe sistemlerde çember sayısı
A	Kubbe sistemlerde çubuk alanı
A_o	Etkin yer ivme katsayısı
B	Çift tabakalı uzay kafes sistemlerde kısa açıklık
d	Derinlik
D	Kubbe sistemlerde açıklık (Kubbe çapı)
D_p	Dairesel plaka genişliği
D_t	Dairesel plaka kesit kalınlığı
E	Elastisite modülü
F	Toplam uygulanan kuvvet
F_b	Bulon yükü
h	Kubbe yüksekliği
H	Silindirik kabuk sistemlerde yükseklik
I	Atalet momenti
I	Silindirik kabuk sistemlerde boyuna doğrultuda mesnetler arası mesafe
i_{min}	Minimum atalet yarıçapı
K	Eğrilik
L	Çift tabakalı uzay kafes sistemlerde uzunlamasına açıklık
L_e	Burkulma boyu
m	Kubbe sistemlerde mesnet sayısı
M	Moment
n	Kubbe sistemlerde nervür sayısı
N	Normal kuvvet
P	Burkulma yükü
$P_{1,5}$	1,5 mm değerine karşı gelen yük değeri
P_b	Birleşimin kırılma yükü
P_{em}	Emniyetle taşınabilen kuvvet
P_k	Kırılmaya karşı gelen normal kuvvet
r	Silindirik kabuk sistemlerde açıklığı geçen eğriliğin yarıçapı

S	Silindirik kabuk sistemlerde açıklık
T	Kesme kuvveti
t	Yoğunluk
α	Sistemlerin tepe noktasındaki çubuk elemanlar arasındaki açı
β	Düğüm noktasının normali ile çubuk eleman normali arasındaki açı
δ	Yerdeğiştirme
θ	Düğüm noktasında birleşen iki komşu çubuk eleman arasındaki açı
θ_0	Kubbe sistemlerde, iki çubuk arasındaki toplam açı
λ	Narinlik derecesi
σ	Gerilme
φ	Kubbenin tepe noktası ile kenar mesneti arasındaki toplam açı

KISALTMA LİSTESİ

ANSYS	Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Programı
BSC	British Steel Corporation
CNC	Computer Numerical Controlled
DIN	Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
ePTFE	Expanded-poly-tetra-fluoro-ethylene
ETFE	Etilen-tetra-florür-etilen
HEFI	Helmut Fischer tarafından tasarlanan düğüm noktası
HP	Hiperbolik Paraboloid
LSL	Laminated Strand Lumber (Tabakalanmış Şerit Kereste)
LVL	Laminated Veneer Lumber (Tabakalanmış Kaplama Ahşap)
MERO	Mengerinhausen Rohrbausweise
MEUS	Department of Mechanical Engineering at the University of Southampton
MT	Malzeme tüketimi
NSC	Nippon Steel Corporation
OCTA	Octatube tarafından tasarlanan düğüm noktası
OSB	Oriented Strand Board (Yonga Levha)
POLO	Polonyi tarafından tasarlanan düğüm noktası
PSL	Paralled Strand Lumber (Paralel Şerit Kereste)
PTFE	Poly-tetra-fluoro-ethylene
PVC	Polivinil Klorür
SAP2000	Integrated Software for Structural Analysis and Design
WABI	Waagner-Biro tarafından tasarlanan düğüm noktası

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kare planda düzlem kafes kirişli çerçeve sistem ve çift tabakalı uzay kafes sistemin karşılaştırılması.....	5
Şekil 2.2 Dairesel planda kubbe formunun radyal doğrultuda kemerler ve tek tabakalı uzay kafes sistem ile düzenlenmesi.....	5
Şekil 2.3 (a) Milan Trade Fair, İtalya, (b) Jacop Javits Convention Center, ABD	6
Şekil 2.4 (a) Çift (b) Tek tabakalı uzay kafes sistem mafsallı birleşim detayı.....	7
Şekil 2.5 Mesnet sayısı 4 ve yüksekliği 10 m olan tek ve çift tabakalı silindirik kabuk sistemler	8
Şekil 2.6 Element yöntemi	10
Şekil 2.7 Imperial War Museum, London, UK	11
Şekil 2.8 Blok yöntemi.....	11
Şekil 2.9 Blok yöntemi.....	11
Şekil 2.10 Merkezde kule yardımıyla kaldırma yöntemi	12
Şekil 2.11 Hidrolik sistem ile kaldırma yöntemi.....	12
Şekil 2.12 Henry Kaiser's Hilton Hawaiian Village, Osaka Maritime Museum	12
Şekil 2.13 Üç mafsallı kubbe sistemin yapımı	13
Şekil 2.14 Blowing Bubbles, Scunthorpe, İngiltere	13
Şekil 2.15 Amundsen-Scott South Pole Station, Antartika	13
Şekil 2.16 Kaldırma yöntemi 2	14
Şekil 2.17 Kayma yöntemi.....	14
Şekil 3.1 Bambu ile tasarlanmış yapım sistemleri.....	15
Şekil 3.2 Bambu ile tasarlanan çerçeve sistemler.....	16
Şekil 3.3 Bambu ile tasarlanan çatı	16
Şekil 3.4 Tek tabakalı sistemlere geçiş aşamaları	16
Şekil 3.5 Bourse to Commerce yapısı, Paris	17
Şekil 3.6 Diagrid formlu Exhibit Pavillion, Rusya.....	17
Şekil 3.7 Gaudi'nin çekme deneyi ve asılı zincir modeli.....	18
Şekil 3.8 Zeiss Planetarium	18
Şekil 3.9 Houston Astrodome	18
Şekil 3.10 (a) Mero sistem (b) Mero Plus birleşim sistemi	19
Şekil 3.11 (a) Valencia Oceanographic, (b) Sydney Opera House, (c) CNIT Paris , (d) Palazzetto dello Sport	19
Şekil 3.12 Heinz Isler'in form bulma yöntemi ile tasarladığı kabuklar.....	19
Şekil 3.13 Heinz Isler'in kabuk formu bulma tasarımları ve deneysel çalışması.....	20

Şekil 3.14 Biosfer, Kanada (Fuller,1967) ve taşıyıcı sistem detayı	20
Şekil 3.15 Bugis Junction (Singapur, 1996)	21
Şekil 3.16 DZ Bank (Berlin, 2001)	21
Şekil 3.17 Osaka Maritime Museum (Japonya, 2001)	21
Şekil 3.18 Faculty of Law, Cambridge, İngiltere (silindirik kabuk) (b) Nagoya Dome, Japonya (kubbe) (c) Steel Tower,Moscow (hiperbolik paraboloid)	22
Şekil 3.19 Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin çelik, ahşap ve alüminyum malzeme ile tasarlanması	22
Şekil 3.20 Kemer enkesit tipine göre eğilme momenti dağılımı	23
Şekil 3.21 Kemerlerde boyuna yönde gerilme yayılımı	23
Şekil 3.22 Kısa ve uzun silindirik kabuk gösterimi	24
Şekil 3.23 V ve N kiriş gösterimi	24
Şekil 3.24 Çift çaprazlı silindirik kabuk	25
Şekil 3.25 Lamella silindirik kabuk çeşitleri	25
Şekil 3.26 Üç doğrultuda çubuk elemanlı silindirik kabuk	25
Şekil 3.27 Yarım küre kubbe gerilme bölgeleri ile basık kubbede yatay mesnet tepkilerine karşı önlemler	26
Şekil 3.28 Kubbe çeşitleri	27
Şekil 3.29 Halle au Blé (Paris) ve Jahrhunderthalle (Almanya) yapıları	27
Şekil 3.30 Noble Planetarium, 1952, Teksas	28
Şekil 3.31 Bell's Sports Centre, 1966, İngiltere	28
Şekil 3.32 Rodos Palace Hotel, Rhone, 1973, Yunanistan.....	28
Şekil 3.33 Lederer Dome (Pavilion Z), 1959, Çekoslovakya	29
Şekil 3.34 The Budapest Industrial Fair, 1961, Macaristan	29
Şekil 3.35 The Astrodome, 1965, Houston, A.B.D	30
Şekil 3.36 Frederick High School, 1925, Oklahoma, USA.....	30
Şekil 3.37 Platonik üçboyutlular ve Archimedean üçboyutluların gösterimi	31
Şekil 3.38 Fuller'in geliştirdiği jeodezik bölümlenmeler	31
Şekil 3.39 Jeodezik kubbe çeşitleri.....	32
Şekil 3.40 Kaiser Aluminum Dome, 1957, Hawaii	33
Şekil 3.41 Aviodome at Schipol Airport, 1971, İngiltere	33
Şekil 3.42 Kubbe sistemin parametreleri	34
Şekil 3.43 Kubbe sistemde iki çubuğun birleşim bölgesi, düşey yük ve 2θ açısı.....	35
Şekil 3.44 100 x 30 m ve 100 x 10 m boyutlarındaki iki kubbenin nervür ve çember sayılarının belirlenmesi	35
Şekil 3.45 Sidney Exhibition Center yapısı, nervür ve çember sayısının belirlenmesi....	36
Şekil 3.46 Silindirik yüzeylerin kesişme ve birleşimleri ile bazı kesik kubbe tipleri	37
Şekil 3.47 Tipik silindirik kabuk + yarım kubbe sistem düzenlemesi	37
Şekil 3.48 National Sports and Culture Centre d'Coque, Lüksemburg	37
Şekil 3.49 Joensuu Arena - Wooden Multipurpose Hall, Finlandiya (2004)	38
Şekil 3.50 Dos Hermanas Velodrome, Seville, İspanya (2002)	38
Şekil 3.51 Brühl Sports Center, İsviçre (1982).....	38
Şekil 3.52 Badi Brugg, İsviçre (1981)	38
Şekil 3.53 Hiperbolik paraboloid sistemler	39
Şekil 3.54 Water Tower, Polibino, Rusya, 1896	39

Şekil 3.55 Cosmic Rays Laboratory yapısı, 1951, Meksika	39
Şekil 3.56 Kare hiperbolik paraboloid sistemler ve kombinasyonları.....	40
Şekil 3.57 Üçgen hiperbolik paraboloid sistem ve kombinasyonu	40
Şekil 3.58 Dönel HP sistemler	41
Şekil 3.59 Shukhov Radio Tower, 1920, Rusya	41
Şekil 4.1 Coalbrookdale Köprüsü, İngiltere	42
Şekil 4.2 Garabit Viyadüğü, Fransa, 1884	43
Şekil 4.3 Fichtebunker (Gasometer Dome) Berlin, Almanya	43
Şekil 4.4 (a) Hyatt Cancun, (b) Hulhumale dome, (c) Spruce Goose dome.	44
Şekil 4.5 (a) Narinliği düşük, (b) Narinliği yüksek çelik elemanın yükler altındaki davranışı.....	45
Şekil 4.6 Faculty of Law, Cambridge, İngiltere (silindirik kabuk) (b) Nagoya Dome, Japonya (kubbe) (c) Steel Tower, Moscow (hiperbolik paraboloid)	46
Şekil 4.7 Düğüm noktasındaki θ , α ve β açıları	46
Şekil 4.8 Ek levhalı birleşim türlerine örnekler	47
Şekil 4.9 SBP-1 düğüm noktası.....	48
Şekil 4.10 Hamburg History Museum ve çatı taşıyıcı sistem detayı	48
Şekil 4.11 SBP-2 düğüm noktası.....	49
Şekil 4.12 Berlin Central Station ve çatı detayı	49
Şekil 4.13 SBP-3 düğüm noktası.....	50
Şekil 4.14 DZ Bank ve çatı detayı, Berlin	50
Şekil 4.15 HEFI-1 Düğüm noktası	50
Şekil 4.16 Hippo Houses ve çatı detayı, Berlin.....	51
Şekil 4.17 POLO-1 düğüm noktası.....	51
Şekil 4.18 Cologne Train Station	51
Şekil 4.19 SBP-4 düğüm noktası.....	52
Şekil 4.20 Annexe German Historical Museum ve çatı detayı, Berlin	52
Şekil 4.21 WABI-1 düğüm noktası.....	53
Şekil 4.22 British Museum ve çatı detayı, Londra	53
Şekil 4.23 OCTA-1 düğüm noktası.....	54
Şekil 4.24 Fietsappel, Bicycle Apple yapısı ve detayı, Netherlands	54
Şekil 4.25 MERO-1 düğüm noktası.....	55
Şekil 4.26 The Mirana Hotel, Casino, Las Vegas	55
Şekil 4.27 MERO-2 birleşimi	56
Şekil 4.28 Bugis Junction, Singapur.....	56
Şekil 4.29 MERO-3 (TK Tipi) düğüm noktası	56
Şekil 4.30 MERO-4 düğüm noktası.....	57
Şekil 4.31 New Milano Fair, İtalya.....	57
Şekil 4.32 Düşey açılarının adaptasyonu.....	59
Şekil 4.33 Yatay açılarının adaptasyonu.....	59
Şekil 4.34 Dönme açılarının adaptasyonu.....	59
Şekil 4.35 Eksenel Kuvvet Aktarımı	60
Şekil 4.36 Eğilme Momenti Aktarımı	60
Şekil 4.37 The hippopotami house yapısında kullanılan HEFI-1 birleşimi	61
Şekil 4.38 HEFI-1 birleşimi yükleme ve mesnet koşulları şematik çizimi.....	61

Şekil 4.39 Deneysel yük-yerdeğiştirme eğrisi	62
Şekil 4.40 Uygulanan toplam yük düzeyinde bulon yükü düzeyi ve sonlu eleman yöntemi ile (ANSYS) bulonda gerilme yayılımı	62
Şekil 4.41 DZ Bank yapısının taşıyıcı sisteminde kullanılmış SBP-3 birleşimi.....	63
Şekil 4.42 SBP-3 birleşimi yükleme ve mesnet koşulları şematik çizimi	63
Şekil 4.43 Çubuk, bulon ve dairesel plakanın gerilme-şekildeğiştirme diyagramı.....	64
Şekil 4.44 Yük-yerdeğiştirme eğrisi ve SBP-3 düğüm noktasında kuvvet gösterimi	64
Şekil 4.45 Göçme durumunda kiriş ucundaki (a) deformasyon (b) gerilme yayılımı	65
Şekil 4.46 Bulon yükleri ve göçme durumu gerilme karşılaştırması	65
Şekil 4.47 Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan bazı mesnet detayları.....	67
Şekil 4.48 Tek tabakalı kısa silindirik kabukların I/S oranlarına göre burkulma yükü ve yerdeğiştirme değişimi	68
Şekil 4.49 Tek tabakalı kısa silindirik kabuk sistemlerin H/S oranlarına göre burkulma yükü ve yerdeğiştirme değişimi.....	69
Şekil 4.50 Farklı çubuk dizilim ve yerlerinin tek tabakalı kısa silindirik kabuk burkulma yüküne etkisi.....	69
Şekil 4.51 (a) Çubuk (b) Düğüm noktası (c) Sistem burkulması tipleri.....	70
Şekil 4.52 Kubbe burkulmasında burkulma yükü için kritik durumlar	70
Şekil 4.53 50 m açıklıklı kubbede basıklık ve kusurlu montajın boyutsuz göçme yükü faktörüne etkisi	71
Şekil 4.54 Yükseklik / açıklık oranı 1/8 olan nervürlü kubbenin burkulma davranışı	72
Şekil 4.55 Yükseklik / açıklık oranı 1/8 olan schwedler kubbe çeşitlerinde görülen farklı burkulma davranışları.....	72
Şekil 4.56 Yükseklik / açıklık oranı 1/8 olan lamella kubbenin burkulma davranışı	72
Şekil 4.57 Yükseklik / açıklık oranı 1/5 olan lamella kubbenin burkulma davranışı	72
Şekil 4.58 Yükseklik / açıklık oranı 1/8 olan jeodezik kubbenin burkulma davranışı.....	73
Şekil 4.59 Daire, elips ya da parabol kubbelerin, açıklık ve yüksekliğe göre ağırlık ve düşey yerdeğiştirme değişimleri	73
Şekil 4.60 Kubbe yükseklik ve çapına göre değişen rüzgâr yükleri	74
Şekil 4.61 Açıklığı 100 m, yüksekliği 32 m olan diamatik kubbenin 3D tasarımı	75
Şekil 4.62 Açıklığı 100 m, yüksekliği 16 m olan diamatik kubbenin 3D tasarımı	75
Şekil 4.63 Açıklığı 100 m, yüksekliği 16 m olan jeodezik kubbenin 3D tasarımı	75
Şekil 4.64 SAP2000 ile modellenmiş h: 32 ve 16 m'lik diamatik kubbeler ile h: 16 m'lik jeodezik kubbe	78
Şekil 4.65 SAP2000 ile h: 32 m'lik diamatik kubbede yükleme durumları	79
Şekil 4.66 SAP2000 ile h: 32 m'lik diamatik kubbede oransal boyutlar.....	80
Şekil 4.67 SAP 2000 ile h: 32 m'lik diamatik kubbede mesnet tepkileri.....	80
Şekil 4.68 İki farklı kubbe tipi ve yükseklik için N diyagramlarıve en büyük değerleri ...	81
Şekil 4.69 İki farklı kubbe tipi ve yükseklik için M diyagramları ile en büyük M,T değerleri	82
Şekil 4.70 İki farklı kubbe tipi ve yükseklik için yerdeğiştirme durumları ve değerleri...	83
Şekil 4.71 (a) Açıklığı 100 m, yüksekliği 32 m olan diamatik kubbe (b) Açıklığı 100 m, yüksekliği 16 m olan diamatik kubbe ve (c) Açıklığı 100 m, yüksekliği 16 m olan jeodezik kubbenin 3D modelleme ile perspektif görünüşleri	86
Şekil 4.72 Kubbe sistemlere ETFE tipi membran örtü modellemesi.....	86

Şekil 5.1 (a) Orta Çağa ait Leigh Court Barn (1325) (b) Tipik ahşap birleşimleri.....	87
Şekil 5.2 Demir birleşimli ahşap çatılar	88
Şekil 5.3 De L’Orme’nin geliştirdiği ahşap kompozit eleman ve kemer sistemi	88
Şekil 5.4 A.R. Emy tarafından inşa edilen büyük salon yapısı	89
Şekil 5.5 Zollinger’in lamella sistemi ve birleşimler	89
Şekil 5.6 Hounslow East Station, 2002, İngiltere	90
Şekil 5.7 Pala Livorno Arena, 2003, İtalya	90
Şekil 5.8 Napier Üniversitesi, 2003, İskoçya	90
Şekil 5.9 Nem etkisinden dolayı oluşan ahşap yarıkları	91
Şekil 5.10 Ahşap birleşim tipleri.....	92
Şekil 5.11 Ahşap birleşim elemanları	92
Şekil 5.12 Birleşimin yük taşıma kapasitesinin hesabı	93
Şekil 5.13 Çeşitli birleşimlerde Pem değerinin deney ile belirlenmesi	93
Şekil 5.14 Tacoma Dome (a), Superior Dome (b).....	95
Şekil 5.15 Tabakalı ahşap kompozitin yapım aşamaları.....	95
Şekil 5.16 Geniş açıklıklı yapılarda kullanılan tabakalı kompozitler.....	96
Şekil 5.17 Tabakalı ahşap kompozitlerin ekonomik açıdan karşılaştırılması	97
Şekil 5.18 (a) Silindirik kabuk, (b) Kubbe ve (c) Hiperbolik paraboloid sistem	97
Şekil 5.19 Portcullis House, 2001	98
Şekil 5.20 Herbert Museum and Art Galery, 2009.....	98
Şekil 5.21 Radial Rib Dome	99
Şekil 5.22 (a) Sports Dome (Nervürlü kubbe), (b) Superior Dome (Jeodezik kubbe),(c) Southall Gurdwara (Schwedler kubbe)	99
Şekil 5.23 Las Arenas bullring (glulam), Pyramid Meet Dome (glulam)	99
Şekil 5.24 Hiperbolik paraboloid sistemde bir yüzeyin kesme kuvveti aktarımı	100
Şekil 5.25 Düzlem yüzeyden meydana gelen hiperbolik formların simülasyonu	100
Şekil 5.26 Hiperbolik paraboloid sistem kurulumu (a)	101
Şekil 5.27 (a) Düzlem ızgara form, (b) Deforme edilmiş eşkenar dörtgen formu.....	101
Şekil 5.28 Multihalle Mannheim Yapısı, 1975.....	101
Şekil 5.29 (a) Weald & Downland gridshell yapısı, (b) Savill Garden Yapısı	102
Şekil 5.30 Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistem ve Rhyno programı yapım yöntemi .	103
Şekil 5.31 Küre yöntemi	103
Şekil 5.32 Sistemin dairelerin kesişimi ile oluşturulması	104
Şekil 5.33 Sistemin eğrilik analiz sonuçları ve nihai formun oluşturulması	104
Şekil 5.34 Sistemin fiziksel ve bilgisayar modeli kesitleri.....	105
Şekil 6.1 U.S. Botanic Garden Conservatory	113
Şekil 6.2 Alcoa Building	114
Şekil 6.3 Des Moines Botanical Center yapısı	114
Şekil 6.4 41 m açıklıklı Amundsen–Scott South Pole Station.....	114
Şekil 6.5 Limestone Blending Facility yapısı.....	115
Şekil 6.6 Çelik ve Alüminyum’un gerilme-şekildeğiştirme diyagramı	116
Şekil 6.7 Alüminyum jeodezik kubbe gösterimi	117
Şekil 6.8 Tipik alüminyum çubuk eleman ve mesnet birleşim detayı.....	117
Şekil 6.9 Tek tabakalı alüminyum kubbe birleşim detayı	117
Şekil 6.10 Kubbe sisteme eşit dağılmış düşey yük gösterimi.....	118

Şekil 6.11 β açısının hesabı ve kubbe sistemin mesnet noktası	118
Şekil 6.12 Analizi yapılacak çubuk elemanların gösterimi ve analitik değerleri	119
Şekil 6.13 I profilli birleşim tipi.....	119
Şekil 6.14 Spruce Goose dome	120
Şekil 6.15 Kutu profilli birleşim tipi	120
Şekil 6.16 Arched Entrance Canopy	120
Şekil 6.17 Kule ile kaldırma yöntemi	121
Şekil 6.18 Vinç ile kaldırma yöntemi	121
Şekil 7.1 (a) Nizhy Novgorod Fair yapısı (b) Olympic Games yapısı	123
Şekil 7.2 PVC türü membran	124
Şekil 7.3 Transworld Dome Stadium (Edward Jones Dome).....	125
Şekil 7.4 PTFE türü membran.....	125
Şekil 7.5 The Final Stage Stadium	126
Şekil 7.6 ETFE türü membran.....	127
Şekil 7.7 Bird's Nest National Stadium yapısı.....	127
Şekil 7.8 ePTFE türü membran.....	127
Şekil 7.9 Shanghai Expo Boulevard yapısı	128
Şekil 7.10 Westfield London - Glazed Roof, London,2008.....	129
Şekil 7.11 Mansueto Library, Chicago, USA,2011	129
Şekil 7.12 Low-E camların çalışma prensibi	130
Şekil 7.13 Yas Hotel, Abu Dhabi, United Arab Emirates	130
Şekil 7.14 Polikarbonat levha ve çatı örnekleri.....	131
Şekil 7.15 CTB levha ve çatı örneği	132
Şekil 7.16 Alüminyum taşıyıcı sistemi ve levha gösterimi	132
Şekil 7.17 The Weald and Downland Gridshell	133
Şekil 7.18 Herbert Art Gallery & Museum	133
Şekil EK-1.1 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin ana elemanları	155
Şekil EK-1.2 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerde modüller	156
Şekil EK-1.3 Derinlik ve Modül	158
Şekil EK-1.4 Uygun açıklık / derinlik oranları	159
Şekil EK-1.5 Ters sehim çeşitleri.....	159
Şekil EK-1.6 Sisteme eğim verme şekilleri	160
Şekil EK-1.7 Çoklu kolon yöntemi	160
Şekil EK-1.8 Üç taraftan mesnetlenme biçimi.....	160
Şekil EK-1.9 Mesnet türleri	161
Şekil EK-1.10 Doğru ve yanlış yükleme gösterimi	161
Şekil EK-1.11 Çift tabakalı uzay kafes sistemin yere, kolona,duvara mesnetlenmesi ..	162
Şekil EK-1.12 Mesnet tipleri	162
Şekil EK-1.13 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin çatı ve temel çeşitleri gösterimi	163
Şekil EK-1.14 Membran uygulama detayı	163
Şekil EK-1.15 Membran uygulama detayı	164
Şekil EK-1.16 Alüminyum ve ahşap çatı kaplaması uygulama detayı	164
Şekil EK-1.17 Mero sistem	165
Şekil EK-1.18 Mero sistem birleşim çeşitleri	166
Şekil EK-1.19 ANZ Stadium, 1999, Singapur.....	166

Şekil EK-1.20 SDC sistemi	167
Şekil EK-1.21 Wachsmann ve Smith birleşim sistemi birinci, ikinci ve üçüncü evreler	167
Şekil EK-1.22 Wachsmann ve Smith birleşim sistemi detayları	167
Şekil EK-1.23 Aircraft Hangars, 1941, A.B.D	168
Şekil EK-1.24 Orona SEO birleşim sistemi	168
Şekil EK-1.25 Sant Jordi Sports Palace, 1992, Barselona	168
Şekil EK-1.26 Nodus birleşim detayı, National Exhibition Centre, 1970, İngiltere	169
Şekil EK-1.27 Octotube birleşim sistemi montaj örnekleri	170
Şekil EK-1.28 Tuball birleşim sistemi detayı.....	170
Şekil EK-1.29 Bowl birleşim sistemi detayı	171
Şekil EK-1.30 Singapore Arts Center, Bowl birleşim sistemi detayı, Singapur.....	171
Şekil EK-1.31 Bowl birleşim detayı, Eden Projesi, İngiltere	171
Şekil EK-1.32 NS Uzay Kafes birleşim detayı	172
Şekil EK-1.33 Triodetic birleşim detayı.....	172
Şekil EK-1.34 Unistrut birleşim sistemi	173
Şekil EK-1.35 Harley Birleşim Sistemi.....	173
Şekil EK-1.36 Mai Sky birleşim detayı	174
Şekil EK-1.37 Catrus birleşim sisteminin alt ve üst noktalardaki birleşim detayları	174
Şekil EK-1.38 Unibat modülü detayı	175
Şekil EK-1.39 Space Deck modülü ve birleşim detayı	175
Şekil EK-1.40 Hyatt Otel, Birmingham	176
Şekil EK-1.41 Pyramitec modülü ve birleşim detayı	176
Şekil EK-1.42 Temcor Alüminyum birleşim detayı	177
Şekil EK-1.43 Murj-3D sistem detayı.....	178

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Mero birleşim sistemleri.....	7
Çizelge 2.2 Tek ve çift tabakalı silindirik kabuk sistemlerin açıklığa göre ağırlık ve maliyet değişimi	9
Çizelge 4.1 Mero birleşim sistemlerinin serbest yüzeylerde düğüm noktalarının uygulanabilirliği.....	58
Çizelge 4.2 Yük bileşenleri.....	77
Çizelge 4.3 Kubbelerde kesit boyutları	85
Çizelge 5.1 Bazı tek tabakalı uzay kafes sistemler ve birleşim detayları.....	105
Çizelge 5.2 Sport Hall, Charlottenburg (Berlin).....	107
Çizelge 5.3 Tacoma Dome, ABD	108
Çizelge 5.4 EXPO 2000, Almanya	109
Çizelge 5.5 Multihalle Mannheim Sergi Salonu, Almanya	110
Çizelge 5.6 Weald and Downland Open Air Museum, İngiltere	111
Çizelge 5.7 Savill Garden, İngiltere.....	112
Çizelge 6.1 Yapısal çeliklerin karşılaştırılması	115
Çizelge 6.2 Alüminyum alaşımlarının özellikleri.....	116
Çizelge 6.3 The South Pole Dome, Antartika	122
Çizelge 7.1 PVC türü membranların özellikleri	124
Çizelge 7.2 PTFE türü membranların özellikleri	125
Çizelge 7.3 ETFE türü membranların özellikleri	126
Çizelge EK-1.1 Kare ve üçgen piramit modüllü çift tabakalı uzay kafes sistemler	157
Çizelge EK-1.2 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin çeşit seçimi	158

TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLER

Özden M. VARDAR ÖZ

Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zehra Canan GİRĞİN

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin ilk formları insanların barınma ihtiyacına yönelik 2000 yıl önce ortaya çıkmasına karşılık, asıl gelişimi 19.yy'ın ikinci yarısından sonra demirden çeliğe geçilerek ekonomik üretim koşullarının sağlanması ve masif ahşap yerine tutkallı tabakalı ahşabın ortaya çıkması ile olmuştur. Günümüzde, geliştirilmiş birleşim ve formları ile özellikle spor tesisi, konferans salonu, kültür merkezi gibi geniş açıklıklı alanlarda veya estetik çatı sistemleri olarak düzenlenmektedir. Daha az geniş açıklıklar için ekonomik ve hafif çözüm sunan çift tabakalı uzay kafes sistemler, hesap ve yapım kolaylığı nedeni ile daha sık tercih edilmektedir. Ancak geniş açıklıklarda, ekonomikliğini kaybetmesi ve çok estetik olmayan görünümü nedeniyle tek tabakalı uzay kafes sistemler önemli bir alternatif haline gelmiştir. Çelik, ahşap ve alüminyum malzeme kullanılarak; silindirik kabuk (tonoz), kubbe, hiperbolik paraboloid ve serbest formu sistemlere uygun yeni birleşim tipleri geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, tek tabakalı uzay kafes sistemler; tarihçesi, uygulanan formlar, birleşimler ve mesnet detayları ile dünyadan örnekler verilerek incelenmiş; ayrıca bir projenin SAP2000 ile hesabı yapılarak, form ve yükseklik/açıklık açısından kesit tesirleri, yerdeğiştirmeler ve yapı ağırlıkları karşılaştırılmış, üç boyutlu modellemesi yapılmıştır.

Çalışmanın Birinci bölümünde; tezin kısa özeti ve amacı verilmiştir.

İkinci Bölümde; tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemlerin genel, farklı ve ortak özelliklerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü Bölümde; tek tabakalı uzay kafes sistemlerin tarihsel gelişimi ele alınmış; silindirik kabuk, kubbe ve hiperbolik paraboloid sistemlerin tipleri, özellikleri ve tasarımda dikkat edilecek temel özellikler vurgulanmıştır.

Dördüncü Bölümde; demirden çeliğe gelişim, çeliğin tek tabakalı uzay kafes sistemlerde uygulanması tarihsel açıdan incelenmiş, üç boyutlu modelleme ile günümüzün çelik birleşim sistemleri ve mesnet çözümleri ile seçilen iki birleşim sistemi üzerindeki araştırmaların sonuçları aktarılmıştır. Tonoz ve kubbe tipi yapıların form ve stabilite özellikleri de bu bölümde incelenmiştir. Ayrıca seçilen iki ayrı form ve yükseklik/açıklık oranı için proje üretilmiş, SAP2000 programı ile; kesit tesirleri, yerdeğiştirmeler ve ağırlıklar hesaplanmış, ayrıca üç boyutlu modellemesi yapılmıştır.

Beşinci Bölümde; ahşap malzemenin gelişimi, uygulanan birleşimler ve tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanımı incelenmiştir. Ayrıca ahşap ile oluşturulmuş en bilinen yapı örnekleri hakkında bilgi verilmiştir.

Altıncı Bölümde; alüminyum malzemenin gelişimi, çelik ile karşılaştırması ve tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanımı; örnekleri ve birleşim detayları ile birlikte aktarılmıştır.

Yedinci Bölümde; geniş açıklı sistemlerde kullanılan örtü malzemeleri ve özellikleri detaylı olarak ele alınmıştır.

Ekler Bölümünde, çift tabakalı uzay kafes sistemler ve birleşim sistemleri tanımlanmıştır.

ABSTRACT

DESIGN OF LATTICED SHELL STRUCTURES

Özden M. VARDAR ÖZ

Department of Architecture MSc Programme

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Zehra Canan GİRĞİN

Although the primary forms of lattice shell structures (grid shell or single-layer space frame) appeared 2000 years before with the aim of sheltering, the main development occurred after the second half of 19th century by the successful and economical transition from iron to steel and the development of laminated composite timber instead of massive wood. Nowadays, the developed forms together with enhanced connections are used in wide span areas like sport center, cultural center, conference hall or in aesthetic roof systems. Double-layer space frame presents economical solutions as well as high analysis and construction rate for moderate span areas. But the single-layer space frame became a more important alternative to produce economical and aesthetic solutions in wide span areas. Development of technology enables the new forms of barrel vault, dome, hyperbolic paraboloid and freeform systems by using steel, timber and aluminium.

The purpose of thesis is to demonstrate the lattice shell structures with their historical development, materials, forms, connection details and construction techniques. In addition; a lattice shell structure project is analysed via SAP 2000 and internal forces, displacements, sizes of structural elements and weights are determined for two different forms and height to span ratios. The form is illustrated by 3D modelling.

The First Chapter presents the purpose and scope of this study.

In the Second Chapter; general features of space frames are emphasized; common and different features of single and double layer space frame systems are compared.

The development, forms (cylindrical vault, dome, free forms, hyperboloid paraboloid) and technical properties of lattice shell structures are discussed in the Third Chapter.

Through the Fourth Chapter; from iron to steel development and utilization in lattice shells in the past are investigated. The developed connections as well as experimental and theoretical studies on two connection types are emphasized by using 3D modelling. The stability of forms are examined. A lattice shell structure project is also analysed via SAP2000 for two different forms and height to span ratios. In addition 3D modelling of this project is applied.

In the Fifth Chapter; the development of laminated composites, properties and usage in lattice shell structures are explained and some sample buildings are focused.

The Sixth Chapter accounts for the development and technical properties of aluminium compared with steel and the utilization in lattice shell structures. Connection details are given in detail.

Seventh Chapter covers the roofing materials and their properties of wide-span areas.

In the Appendices; system and connection types of double-layer space frame systems are indicated.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür özeti

Tek tabakalı uzay kafes sistem, yapının geometrisine bağlı olarak özel birleşim sistemlerinin kullanıldığı; silindirik kabuk (tonoz), kubbe, hiperbolik paraboloid ve serbest formlar oluşturulabilen, hafif ve estetik bir sistem türüdür. Uygun malzeme seçimi ve formun yanında, dikkatli tasarlanmış ve uygulanmış birleşimler ile 200 m açıklık geçilebilmektedir. Bu çalışmada, malzeme ve forma göre tek tabakalı uzay kafes sistemler, birleşimleri ve yapım yöntemleri ile birlikte, dünyadan örnekler verilerek incelenmiştir.

Eekhout, M. (1989) [244], uzay kafes sistemin mimarlık içindeki yeri, genel ilkeleri ve çalışma prensiplerini anlatmıştır.

Lan, T. T. (1999) [1], çift tabakalı ve tek tabakalı uzay kafes sistemlerin genel ilkelerini tanımlamıştır.

Hwang, K.J. (2010) [6] ve Makowski, Z. S. [113], tek tabakalı uzay kafes sistemlerde birleşim sistemlerini tanımlamış ve kullanım alanları ile ilgili örneklerle yer vermiştir.

Stephan, S., Sanchez-Alvarez J. ve Knebel, K. [91], serbest formlu tek tabakalı uzay kafes sistemlerin genel ilkelerini, örnekler üzerinden anlatmıştır.

Bradshaw, R., Campbell, D., Gargari, M., Mirmiran, A. ve Tripeny, P. (2002) [45], tek tabakalı uzay kafes sistemlerin tarihi ve geleceği ile ilgili detaylı çalışmalarda bulunmuşlardır.

Schlaich, J. ve Bergermann, R. (2003) [95], [93], hafif taşıyıcı sistemlerin tasarım ilkelerini ortaya koymuştur.

Gioncu, V. (1995) [126], tek tabakalı kubbe sistemlerin burkulma analizleri üzerine çalışmalar yapmıştır.

Odabaşı, Y. (1992) [144], ahşap ve çelik malzemenin, uzay kafes sistemlerde kullanımına yönelik çalışmalara yer vermiştir.

Mengeloğlu, F. ve Kurt, R. (2004) [252], yapıda kullanılan ahşap malzemelerin çalışma prensipleri ve kullanım alanlarını açıklamıştır.

Lopez, A.E. (1997) [250], alüminyum malzemenin uzay kafes sistemlerde kullanımına yönelik araştırmaları ele almıştır.

Supartono, FX., Zhongli, L., Xiujiang, W. [193] ve Robinson, L.A. [209], tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan membran örtüler üzerinde çalışmalar yapmış ve örnekler üzerinden açıklanmıştır.

Bu araştırma, yukarıda belirtilen kaynaklar ışığında, tek tabakalı uzay kafes sistem tipleri, kullanılan malzemeler ile birleşimleri ve taşıyıcı sistem konularındaki çalışmaları kapsamaktadır.

1.2 Tezin amacı

Tek tabakalı uzay kafes sistem teşkilinde, çelik ve ahşap en çok kullanılan iki malzemedir. Geniş açıklıklarda çift tabakalı uzay kafes sistemlerden daha estetik, daha ekonomik ve hafif bir sistem olmasına rağmen, Türkiye’de, ancak çok bilinen ve basit formlar ile nadiren uygulama alanı bulmaktadır. Geniş açıklıklı tasarımda tek tabakalı uzay kafes sisteme yönelilmesi, tasarımcıların yetişmesi, birleşim sistemleri ve özel montaj tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Anılan amaçla, bu çalışmada, kullanılan malzemeler, sistemin alabildiği formlar ve stabilitesi ile dünyadaki uygulamaları, birleşim teknikleri ve montajı konusunda detaylı bir araştırma yapılmıştır. Ayrıca proje bazında farklı iki form ve yükseklik/açıklık oranları için boyutlandırma gerçekleştirilmiştir.

1.3 Bulgular

Bu araştırmada, tek tabakalı uzay kafes sistem ile çift tabakalı uzay kafes sistemler, davranış ve birleşimler açısından karşılaştırılmış, geniş açıklıklarda tek tabakalı sistemlerin malzeme gideri olarak daha ekonomik, hafif ve daha estetik çözüm verdiği görölmüştür. Çeliğin yanında ahşap ve alüminyumun da tek tabakalı sistemlerde başarı ile kullanıldığı görölmüştür. Asimetrik yükler söz konusu olduğunda daha stabil ve ekonomik tasarım için lamella, jeodezik ve üç doğrultuda düzenlenmiş formlar uygun olmaktadır. Uygun birleşimlerin kullanılması ve montaj aşamasının itinalı biçimde yapılması gerekmektedir. Analizler, optimum tasarım parametreleri elde edilecek biçimde dikkatle yapılmalıdır.

BÖLÜM 2

UZAY KAFES SİSTEMLER

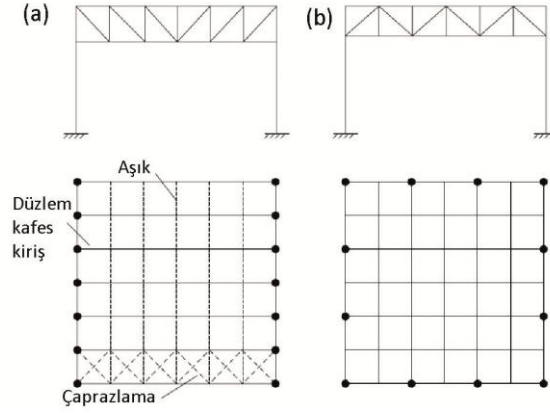
2.1 Uzak kafes sistemler

Uzak kafes sistemler son yarım yüzyılda dünya çapında ilgi gören yapım sistemleri haline gelmiştir. Bu sistemler, ışılandırma kolaylığı, ekonomik ve hızlı yapım tekniklerinden dolayı tercih edilmektedir. Spor alanlarında, sergi mekanlarında, ulaşım terminallerinde, havalimanı hangarlarında, atölyelerde ve sanayi yapılarında geniş çaplı olarak kullanılmaktadır. Yalnızca geniş açıklık çatı sistemlerinde değil, döşemelerde ve dış duvarlarda da kullanılmaktadır.

Uzak kafes sistemler, düz ya da eğrisel yüzeylerden oluşan ve çubuk elemanları ağısı bir düzende olan, üzerine gelen yükleri üç boyutta çubuk elemanlara dağıtan, yük taşıma mekanizması kendi bünyesinde olan ve tek boyutlu elemanlardan (çubuk) oluşan genellikle hiperstatik yapı sistemleridir. Uzak kafes sistem; piramit, kabuk, kubbe ve silindirik yapılar gibi mimari çözüm olarak çok farklı alternatifler sunduğu için, günümüzde en çok tercih edilen yapı sistemlerinden biri olmuştur.

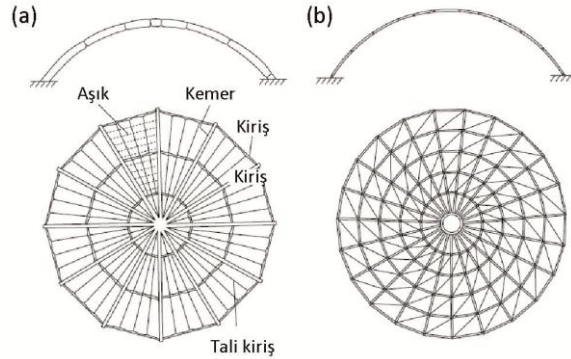
Sistemin en önemli özelliği, gelen yükü tüm çubuk elemanlarına eşit biçimde dağıtabilmesidir. Örneğin, Şekil 2.1.a'daki kare planda; çerçeve sistem tek doğrultuda ve düzlem kafes kirişler ile tasarlanmıştır. Her bir çerçeve, düzlemi içinde gelen yükleri bir diğlerinden bağımsız olarak temele aktarmaktadır. Düzlemine dik rijitlik ise aşıklar ve stabilite çaprazları ile sağlanmaktadır. Şekil 2.1.b'deki sistem iki doğrultuda, çift

tabakalı uzay kafes çerçeve sistem olarak düzenlemiştir. Tüm sistem tek parça olarak, bütünlük biçimde çalışır.



Şekil 2.1 Kare planda düzlem kafes kirişli çerçeve sistem (a) ve çift tabakalı uzay kafes sistemin (b) karşılaştırılması [1]

Dairesel planda kubbe tasarımı diğer bir örnek olarak verilebilir. Çubuk elemanlarla radyal olarak düzenlenen kemerler ve stabilitesi için birleşimleri Şekil 2.2.a'da verilmiştir. Şekil 2.2.b'de ise, kubbenin tek tabakalı uzay kafes sistem ile tasarlanmış tipik bir formu görülmektedir. Bu sistemde de uzay kafes sistem bütünlük olarak çalışmaktadır.



Şekil 2.2 Dairesel planda kubbe formunun radyal doğrultuda kemerler (a) ve tek tabakalı uzay kafes sistem (b) ile düzenlenmesi [1]

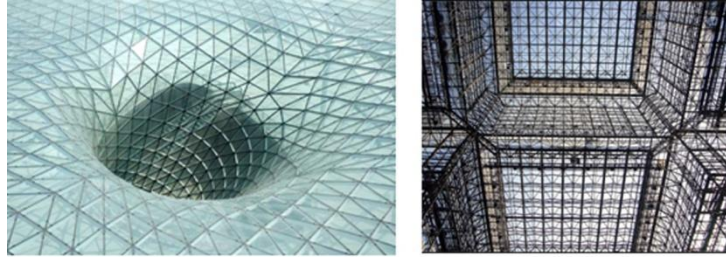
Düzlem sistemler ile uzay kafes sistemler arasındaki fark, yüklerin aktarım sırası ve işleyiştir. Düzlem kafes sistemde, yük önce aşıklara oradan da her bir çerçeveye geldikten sonra temele iletilmektedir. Yük, hafif elemanlardan taşıyıcı ağır elemanlara doğru ilerlemektedir. Uzay kafes sistemlerdeki yük aktarımında ise herhangi bir sıralama yoktur. Üç boyutlu sistem bir bütün ve tek parça gibi çalışmaktadır [1].

2.2 Tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemlerin karşılaştırılması

Çift ve tek tabakalı uzay kafes sistemlerin özellikleri aşağıda karşılaştırılmıştır.

- Form ve estetik

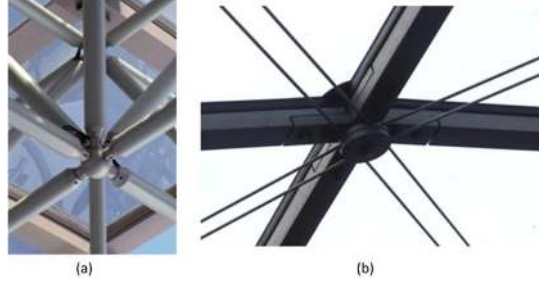
Tek tabakalı uzay kafes sistemleri, çift tabakalı uzay kafes sistemlerden ayıran en önemli fark formlarıdır. Tek tabakalı uzay kafes sistemler ile değişik formlarda amorf biçimler de oluşturulabilirken; çift tabakalı uzay kafes sistemler, sınırlı bir yüzeyde şekillenmektedir (Şekil 2.3). Tek tabakalı uzay kafes sistem, görsel olarak farklılık yaratırken, çift tabakalı uzay kafes sistemlerin modülleri ve derinlikleri göz yoran bir yoğunluğa sahiptir ve çok estetik formlar elde edilememektedir.



Şekil 2.3 (a) Milan Trade Fair, İtalya [2], (b) Jacop Javits Convention Center, ABD [3]

- Rijitlik ve birleşimler

Tek tabakalı uzay kafes sistemler geniş açıklıklarda rijit, bazı kısa açıklıklarda mafsallı birleşimli yapılırken, çift tabakalı sistemde yaygın olarak mafsallı birleşim uygulanmaktadır (Ayrıca Bkz. EK-1.7) (Şekil 2.4). Geniş açıklıklı tek tabakalı uzay kafes sistemlerde birleşimler ve çubuk elemanlar, çift tabakalı sistemlerden farklı olarak, eğilme momenti ve kesme kuvvetine karşı da çalışmaktadır. Bu sebepten, birleşimler buna uygun biçimde tasarlanmalıdır. Rijitlik açısından ise, tek tabakalı uzay kafes sistemler, çift tabakalı olanlardan farklı olarak, bölgesel burkulmaya eğilimlidir; bu nedenle yükseklik/açıklık oranı az olmamalıdır.

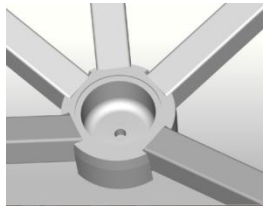
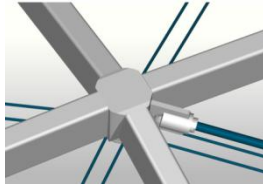
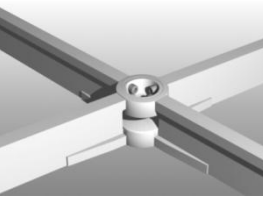


Şekil 2.4 (a) Çift (b) Tek tabakalı uzay kafes sistem mafsallı birleşim detayı [4], [5]

Mero sistem, asıl olarak çift tabakalı uzay kafes sistemler için geliştirilmiş olsa da, Mero Plus sistemlerin geliştirilmesi ile (1994, Almanya), tek tabakalı uzay kafes sistem (düzgün ve amorf formlar) tasarımı da mümkün olmuştur. Mero sistemlerin tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemlerde uygulanan tipleri topluca Çizelge 2.1'de verilmiştir [6] (Ayrıca Bkz. Bölüm 4.3 ve EK-1.7).

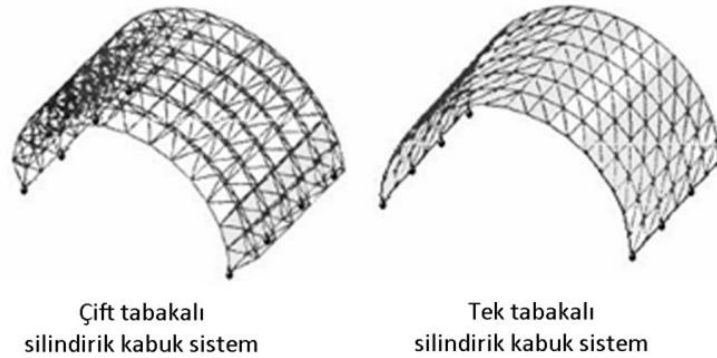
Çizelge 2.1 Mero birleşim sistemleri [6]

KK-Ball mero birleşim sistemi - Yükler düğüm noktasına uygulanır. - Çift tabakalı sistemlerde uygulanır. - Mafsallı birleşimdir. - Tasarıma esneklik sağlamaktadır.	
NK-Bowl mero birleşim sistemi - Çift tabakalı sistemlerde uygulanır. - Mafsallı birleşimdir. - Alt başlığı Ball birleşim sistemindeki gibidir. - Düz ve eğrilikli sistemlerde kullanılır.	
Mero -1 (ZK Tipi) birleşim sistemi - Üçgen ya da serbest formlarda tek tabakalı olarak kullanılır. - Eğilmeye dayanıklıdır. - Kısa ve orta açıklıklı eğrisel yüzeylerde kullanılır.	

Mero-3 (TK Tipi) birleşim sistemi - Üçgen yüzeyli geometrilerde tek tabakalı olarak kullanılır. - Mafsallı birleşimdir. - Kısa açıklıklı ve eğrilikli yüzeylerde kullanılır.	
Mero-2 (BK Tipi) birleşim sistemi - Tek ve çift tabakalı olarak uygulanır. - Tek bulon ile birleşmektedir.	
Mero-4 birleşim sistemi - Tek tabakalı sistemlerde kullanılır. - Mafsallı birleşimdir. - Eğrilikli ve serbest yüzeylerde uygulanır.	

- Hafiflik

Açıklığa bağlı olarak incelendiğinde, örneğin bir silindirik kabuk için (Şekil 2.5); tek tabakalı uzay kafes sistemler, 30 m'den sonra çift tabakalı olanlardan daha hafiftir (Çizelge 2.2). Sistem ağırlığının azalması, daha küçük kesit boyutları ve deprem yüklerinin azalması anlamına gelir.



Şekil 2.5 Mesnet sayısı 4 ve yüksekliği 10 m olan tek ve çift tabakalı silindirik kabuk sistemler (Çift tabakalı sistem için mafsallı Mero birleşim tipi seçilmiştir) [7]

Çizelge 2.2 Tek ve çift tabakalı silindirik kabuk sistemlerin açıklığa göre ağırlık ve maliyet değişimi [7]

AÇIKLIK		20 m	25 m	30 m	35 m	40 m	45 m
Tek Tabakalı Sistem	kg	2542	2618	2725	2872	3030	3180
	Maliyet ¹	2.22	2.28	2.37	2.52	2.64	2.77
Çift Tabakalı Sistem	kg	1570	1855	2153	2927	4077	5361
	Maliyet	1.38	1.62	1.88	2.55	3.55	4.67

- Maliyet

Her iki sistemde de standart modüller kullanılır. Birleşim tipi montaj kolaylığı açısından önemli bir parametredir. Örneğin, Şekil 2.5'deki silindirik bir kabuk için, 30 m'den sonra tek tabakalı uzay kafes sistemlerin daha az maliyetli (Çizelge 2.2) olduğu görülmektedir.

- İmalat ve montaj kolaylığı

Çift tabakalı uzay kafes sistemler, genellikle standart formlarda üretilir; atölyede imalat ve yerinde montaj kolaylığı mevcuttur. Ayrıca bulonlu, pimli birleşim kullanılan tiplerin sökülüp başka bir yerde yeniden kurulması mümkündür. Tek tabakalı uzay kafes sistem modülleri doğru tasarlandığında (aynı modül büyüklüğü kullanarak) imalat ve montaj kolaylığı yaratmaktadır. Her ikisinde de kaynaklı birleşim uygulanırsa, başka bir yerde yeniden kurulması mümkün değildir.

- Tesisat yerleşiminde kolaylık ve görsellik

Çift tabakalı uzay kafes sistemlerde, üst ve alt tabakalar arası çapraz elemanlar arasından mekanik ve elektrik tesisatları ve havalandırma kanalları kolaylıkla geçirilirken, tek tabakalı uzay kafes sistemlerde bu mümkün değildir. Fakat ışıklandırma ve çatıda saydamlık yaratmak gibi estetik avantajı bulunmaktadır.

¹ Maliyet birimleri 1 - 5 arasında olup, çalışma bu değerler arasında karşılaştırılmıştır.

- Yangın Dayanımı

Her iki sistemin yangına dayanıklı olması için, geniş alanda yangın önlemi alınması (püskürtme, plaka kaplama, prefabrik kaplama, kabaran boya, beton ile doldurma, su ile doldurma yöntemleri) maliyeti ve tamamlanma süresini arttırmaktadır.

2.3 Tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemlerin yapım yöntemleri

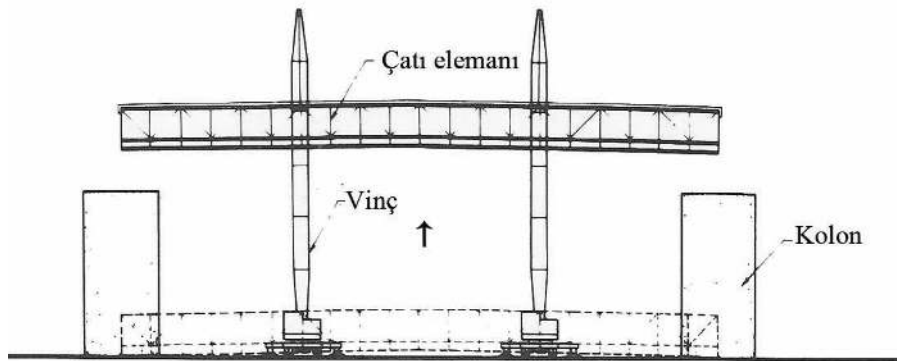
Sistemin yapım yöntemi, güvenlik, kalite, yapım hızı ve yapım maliyeti gibi istenilen özellikler doğrultusunda oluşmaktadır. Bu yöntem, sistemin yük aktarımlarının davranışları ve yapım detaylarına göre değişim göstermektedir.

Yapım yöntemleri uygulanırken; sistemin türü ve büyüklüğü, arsa büyüklüğü, ulaşım kolaylığı, çevresindeki diğer işlerle ilişkisi ve ekonomik olması, çalışma güvenliği ve hava şartları göz önüne alınmalıdır [8].

Tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemlerin genel yapım yöntemleri; element yöntemi, blok yöntemi, kaldırma yöntemi 1, kaldırma yöntemi 2 ve kayma yöntemidir [9], [10], [8].

2.3.1 Element yöntemi

Bu yöntemde, taşıyıcı sistem elemanlarını boyutlarına göre ayrılır ve vinç ile kaldırılır. Son birleştirme işlemleri yapıldıktan sonra kaplama gibi ince işler yapılır (Şekil 2.6) [8].



Şekil 2.6 Element yöntemi [8]

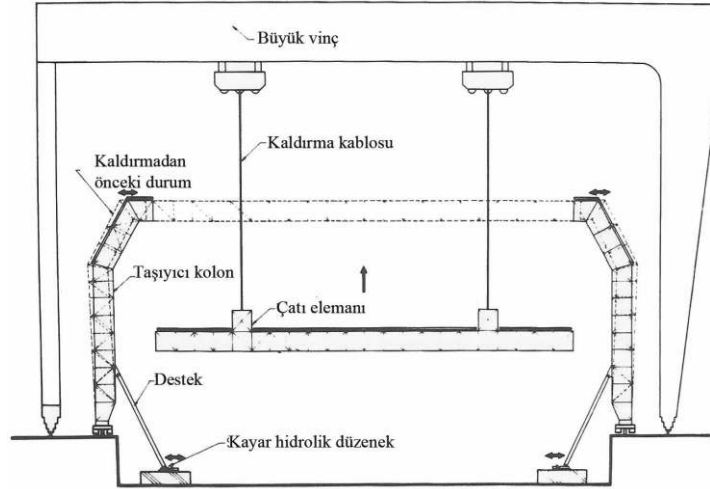
Silindirik kabuk sistemler vinç ile kaldırma yöntemi kullanılarak çelik, betonarme kolon ya da BA duvar üzerine oturtulur ve mesnetleme yapılır (Şekil 2.7).



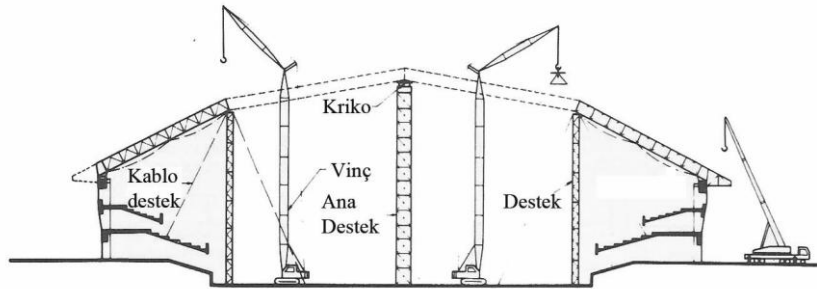
Şekil 2.7 Imperial War Museum, London, UK [11]

2.3.2 Blok yöntemi

Taşıyıcı sistem elemanlarının yerde montajı bittikten sonra bloklar halinde boyutlarına göre ayrılıp, büyük vinç ve kayıcı hidrolik düzenekler yardımıyla kaldırılması ile oluşur (Şekil 2.8 ve Şekil 2.9) [8].



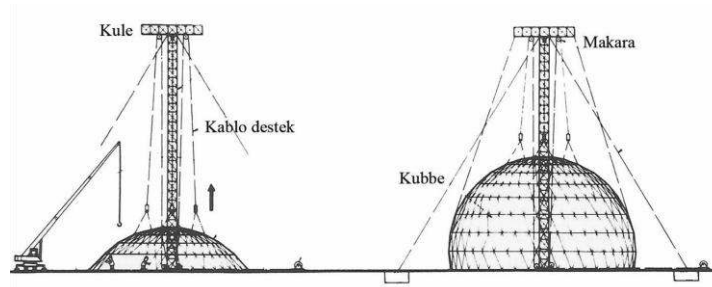
Şekil 2.8 Blok yöntemi [8]



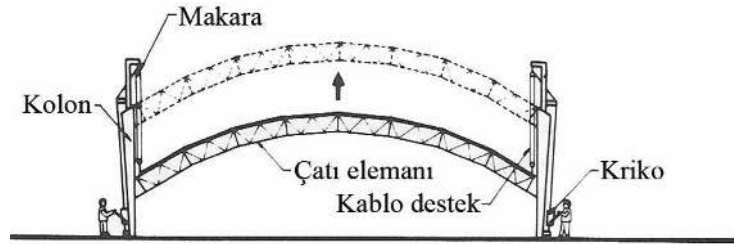
Şekil 2.9 Blok yöntemi [8]

2.3.3 Kaldırma yöntemi 1

Taşıyıcı sistem elemanlarının yerde montajı bittikten sonra merkezde bir kule yardımıyla (Şekil 2.10) ya da sistemin iki tarafından makaralı hidrolik sistemlerle (Şekil 2.11) kaldırılması ile oluşur. Kaldırılan sistem elemanlarının son montajı havada yapılır. Bu sistem, blok ve çubuk elemanlara bölündüğünde rijitliği ve yük taşıma kapasitesi değişmeyen, iki yönde dik ızgara sistemler, dikine kare piramit modüllü çift tabakalı uzay kafes ve bunların boşluklu olanları gibi sistemlerde uygulanmaktadır [9], [8].



Şekil 2.10 Merkezde kule yardımıyla kaldırma yöntemi [8]



Şekil 2.11 Hidrolik sistem ile kaldırma yöntemi [8]

İlk alüminyum kubbe örneklerinden biri olan Henry Kaiser's Hilton Hawaiian Village yapısı bu tür yapım yöntemi örneklerindendir. Vinç ile yapı alanına getirilip montajı yapılan bir diğer yapı örneği ise Osaka Maritime Museum yapısıdır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Henry Kaiser's Hilton Hawaiian Village, Honolulu [12], Osaka Maritime Museum, Japonya [13]

Tek tabakalı kubbe sistemlerin mafsallı ya da rijit olma durumlarına göre farklı yapım yöntemleri vardır. Üç mafsallı kubbe sistemler vinç yardımı ile sahaya getirildikten sonra kriko ile kaldırılır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Üç mafsallı kubbe sistemin yapımı [14]

Tek tabakalı ahşap kubbe sistem olarak tasarlanmış Blowing Bubbles Sports Centre ve alüminyum çubuk elemanlı kubbe sistem ile yapılmış South Pole Station yapısında, sistem montajı yerde yapılıp, kriko yardımıyla yükseltilmiş ve nihai birleşimler yapılmıştır (Şekil 2.14 ve 2.15).



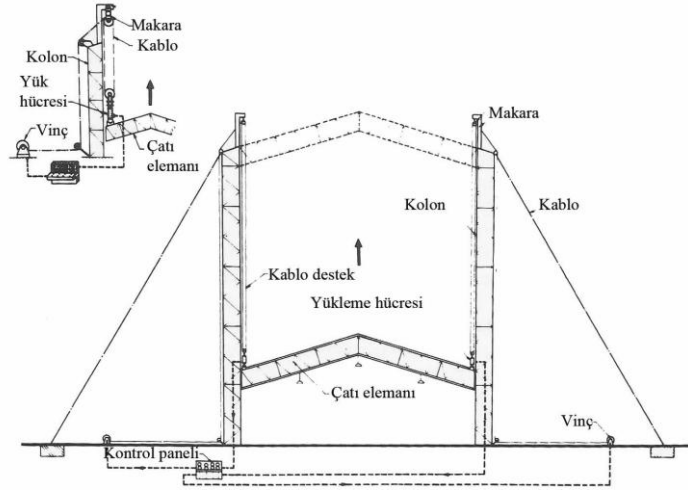
Şekil 2.14 Blowing Bubbles, Scunthorpe, İngiltere [15]



Şekil 2.15 Amundsen-Scott South Pole Station, Antartika [16]

2.3.4 Kaldırma yöntemi 2

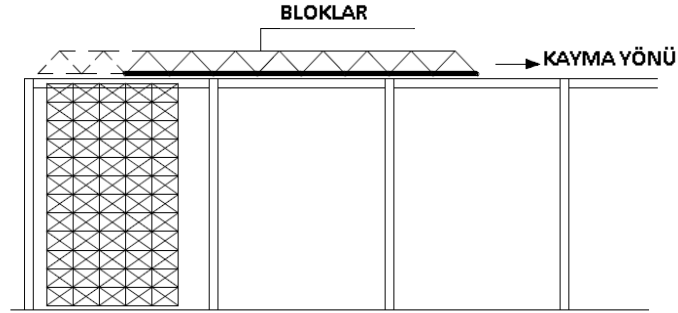
Taşıyıcı sistem elemanlarının yerde montajı ve son birleşimleri bittikten sonra merkezde bir kule yardımıyla ya da sistemin iki tarafından makaralı hidrolik sistemlerle kaldırılması ile oluşur (Şekil 2.16) [8].



Şekil 2.16 Kaldırma yöntemi 2 [8]

2.3.5 Kayma yöntemi

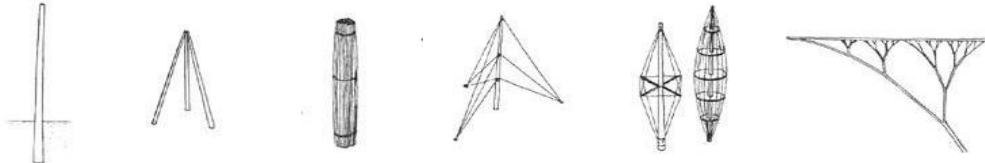
Yapının tüm çevresine kayar sistem kurulduktan sonra, ayrılmış çubuk elemanlar bu raylı sistem ile bir araya getirilir. Havaya kaldırılacak eleman olmadığından hem iskele yapımından hem de zamandan tasarruf edilerek sistem kurgulanmaktadır. Bu tarz yöntem ile tüm dikine ızgara sistemler inşa edilebilmektedir. Bu yöntem yalnızca çift tabakalı sistemlerde uygulanmaktadır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 Kayma yöntemi [10]

TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLER**3.1 Tarihçe**

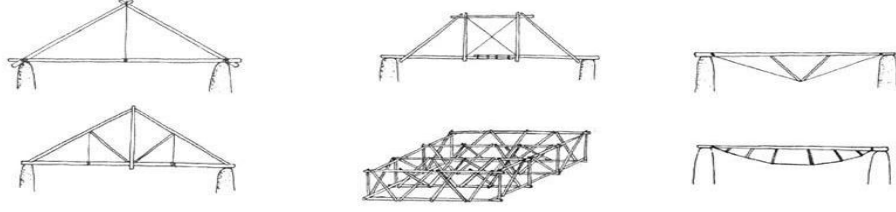
Tek tabakalı uzay kafes sistemin ortaya çıkışı bambu malzemesinin kullanımıyla başlamıştır. Asya, Güney Amerika ve Afrika’da bambu üretimi yapıldığından bu yana, bambu, yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (M.Ö 206). Şekil 3.1’de görülen düz çubuk eleman, yere bağlandığı zaman farklı şekillerde düzenlenebilmektedir. Doğrusal bir çubuğa gelen yüklerden dolayı çubuk elemanlar eğilme momentine karşı, üç doğrultuda desteklenmeye başlanmıştır. Bu destekler sayesinde yere minimum düzeyde birleşim ile de rijitlik sağlandığı bulunmuştur. Takiben, ilave rijitlik ve dayanım için demet halinde çubuk eleman kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır. Basitten karmaşığa doğru mesnetlenme tiplerinin geliştirilmesi sonucunda yük taşıma kapasiteleri gittikçe artmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Bambu ile tasarlanmış yapı sistemleri [17]

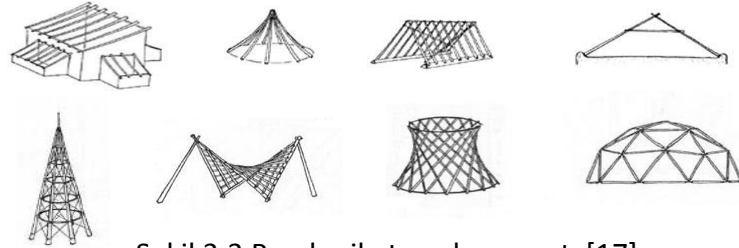
Bambu askılı ve destekli çerçeve sistemler, özellikle köprülerin yapımında kullanılmaya başlamıştır. Bu uygulamada çubuk elemanlar, iki mesnet üzerine oturtulduktan sonra destek kirişlere bağlanır ve bu kirişlerde üçgenler oluşturacak şekilde çerçevenin tepe noktasında birleştirilir. Rijitlik, düşey bir çubuk eleman ilavesi ile sağlanır. Zamanla bu

sistemi güçlendirmek ve daha geniş açıklık geçebilmek için başka çubuk elemanlarda ilave edilmiştir (Şekil 3.2).



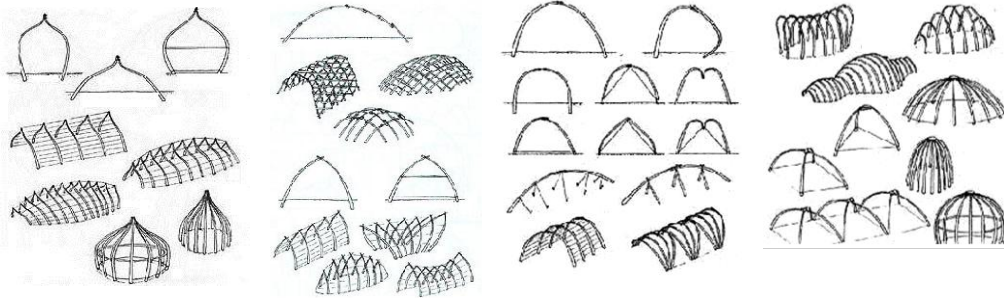
Şekil 3.2 Bambu ile tasarlanan çerçeve sistemler [17]

Eğimli çatılar, çubuk elemanların sistem üzerinde iki yönde belirli açılarda tepe noktasında birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Daha geniş açıklıklarda, sisteme sehim ve eğilmeyi önleyen mertekler eklenmiştir. Kule meydana getirmek için, çapraz çubuk elemanların takviyesi ile tüm sistem tepe noktasında birleşmektedir. Bu birleşim düşey yüklerin etkisini en aza indirmekte ve yanal rijitlik sağlamaktadır. Günümüzün uzay kafes formunda eğrilikli yüzeyleri (hiperbolik paraboloid yüzeyler, jeodezik kubbeler, vb.) de düz çubuk elemanların en ideal çalışma formlarında birleştirilmesi ile geliştirilmiştir (Şekil 3.3).



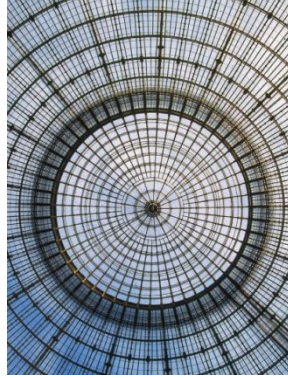
Şekil 3.3 Bambu ile tasarlanan çatı [17]

Çerçevelerdeki eğilme etkisini azaltan tasarım arayışları ile, uzun çubuk eleman ve ip kullanımına başlanmıştır. Bu sayede daha geniş açıklık ve alan elde edilmiştir (**M.Ö 256**) (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Tek tabakalı sistemlere geçiş aşamaları [17]

Demir ve daha sonra çeliğin taşıyıcı sistemde kullanımına **19.yy.**da geçilmiştir. İlk dökme demir tek tabakalı nervürlü kubbe sistem olan 37 m çapındaki Bourse to Commerce yapısı, **1806-1811**'de F.J. Belanger ve F.Brunet tarafından tasarlanmıştır (Şekil 3.5) [18].



Şekil 3.5 Bourse to Commerce yapısı, Paris [19]

1874'de J.W.Schwedler, kendi ismini verdiği kubbe biçimini Berlin'in gaz ihtiyacını karşılamak üzere tasarladığı dört gaz deposunda uygulamıştır (Fichtebunker, Gasometer Dome bunlardan ikincisidir (Ayrıca Bkz. Bölüm 4.1).

V.G.Shukhov, **1897'de**, genişliği 38.40 m, yüksekliği 73 m ve pozitif eğrilikli olan Exhibit Pavillion yapısını tasarlamıştır (Şekil 3.6) [20]. Günümüzün diagrid yapı formunun ilk örneği olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3.6 Diagrid formu Exhibit Pavillion, Rusya [21]

20.yy'ın başlarında, asılı zincir modelini kullanan Antonio Gaudi, üç boyutlu tasarımın öncülerindendir (Şekil 3.7). Bu dönemde, tabakalı ahşap ile birlikte organik tutkallar geliştirildiğinden ahşap malzemenin daha yaygın kullanımı da söz konusudur.



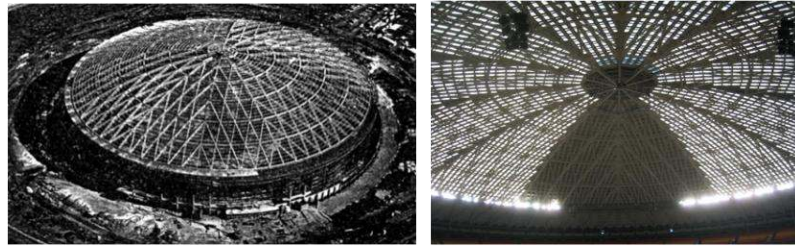
Şekil 3.7 Gaudi'nin çekme deneyi ve asılı zincir modeli [22]

Alman mühendis W.Bauersfeld jeodezik kubbenin tasarımcısıdır (**1922**). Bauersfeld 'in tasarımı olan ilk jeodezik kubbe Zeiss Planetarium (Almanya), Dyckerhoff ve Widmann firması tarafından (**1926**) hayata geçirilmiştir (Şekil 3.8). Buckminster Fuller 20 yıl sonra bu tasarımı yeniden keşfedip, popüler hale getirmiştir [23].



Şekil 3.8 Zeiss Planetarium [24]

Zollinger (**1906**), lamella sistemi geliştirerek ilk olarak ahşap silindirik kabuk sistemlerde uygulamış, daha sonra H.Junkers çelik lamella sistemin patentini almıştır (Almanya, **1925**). Wilson, Morris, Crane ve Anderson, 82 m açıklığındaki Houston Astrodome'u (**1965**) çelik lamella kubbe olarak tasarlamıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Houston Astrodome [25], [26]

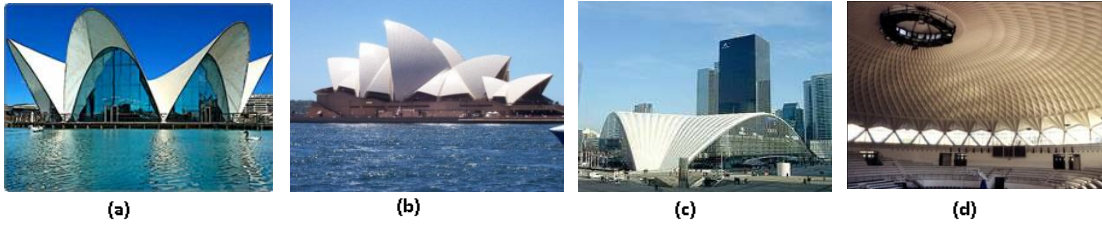
Dr.Ing. Max Mengerhausen, **1943** yılında çift tabakalı uzay sistemler için Mero birleşim sistemini geliştirmiştir (Şekil 3.10.a). Geniş açıklık geçmek için en uygun, ekonomik ve hızlı montaja imkân sağlayan yöntemlerden birisidir. **1994**'de, MERO GmbH firması Almanya'da tek tabakalı uzay kafes sistemler için Mero-Plus sistemlerini geliştirmiştir (Şekil 3.10.b) [27].



Şekil 3.10 (a) Mero sistem (b) Mero Plus birleşim sistemi [28], [29]

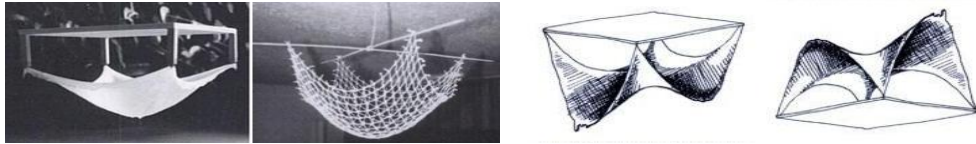
Teknolojinin gelişimi ile birlikte, farklı malzemeler ile geniş açıklık geçilmeye başlanmıştır. 1950'lerden bu yana, mimar ve mühendisler bu konuda araştırmalarını sürdürmüştür.

20. yy ortalarında, basınç ve çekmeye çalışan betonarme kabuklar tasarıma katılmıştır. E. Torroja, F.Candela, H.Isler, P.L. Nervi, O.Arup ve N. Esquillan betonarme kabuk sistemi dünya üzerinde yaygınlaştıran isimlerdir (Şekil 3.11).



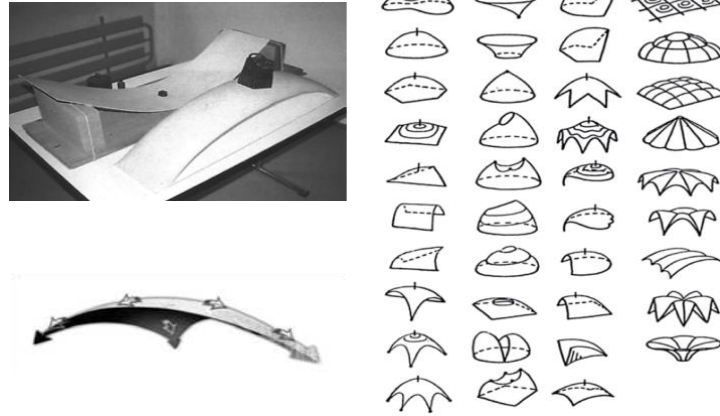
Şekil 3.11 (a) Valencia Oceanographic (Candela, 2002) (b) Sydney Opera House (Arup, 1973) (c) CNIT Paris (Esquillan, 1958) (d) Palazzetto dello Sport (Nervi, 1957) [30], [31]

Heinz Isler, **1950**'li yıllarda minimum kalınlıklı kabuk sistemin öncülerindendir. Isler, düşey yükler altında eğrisel plastik yüzeyin yük taşıma kapasitesinin, düz plastik yüzeye kıyasla 30 kat arttığını, betonarme silindirik kabuk sistemlerin basınca çok iyi çalıştığını ve çekmeye karşı zayıf olduğunu deneysel bir çalışmayla göstermiştir (Şekil 3.12 ve Şekil 3.13) [32], [33].



Şekil 3.12 Heinz Isler'in form bulma yöntemi ile tasarladığı kabuklar [34]

Frei Otto, hafif ağırlıklı taşıyıcı sistem araştırmalarında, bambunun hem doğal hem de hafif olduğunu, bu nedenle tek tabakalı sistemlerde kullanılabildiğini göstermiştir [35].



Şekil 3.13 Heinz Isler'in kabuk formu bulma tasarımları ve deneysel çalışması [34], [36]

1958'de Buckminster Fuller, jeodezik kubbenin tasarımcısıdır (Şekil 3.14). Küre formunda, çift tabakalı olarak geliştirdiği geniş açıklıklı ve rijit sistem, tek tabakalı jeodezik formun yaygınlaşmasına da olanak sağlamıştır.



Şekil 3.14 Biosfer, Kanada (Fuller, 1967) ve taşıyıcı sistem detayı [37], [38]

Alman mimar Frei Otto, hafif taşıyıcı sistemler (kablolu ve membran sistemler) üzerinde çalışmış ve diğer tüm sistemlerin yapımına da öncülük etmiştir (Stuttgart Üniversitesi, **1964**).

1970'li yıllarda da tek tabakalı uzay kafes sistemlerin alüminyum malzeme ile yapılması yaygınlaşmıştır (Ayrıca Bkz. Bölüm 6.1).

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, geliştirilen Matris Deplasman Yöntemi ve Sonlu Eleman Yöntemi; hızlı ve yüksek kapasiteli kişisel bilgisayarların da geliştirilmesi ile geniş açıklıklı sistemlerin çok daha hızlı ve ekonomik biçimde çözülmesini mümkün hale getirmiştir.

1988'de J.Schlaich ve H.Schober, paslanmaz çelik ve cam kullanarak dörtgen birimlerden oluşan pozitif eğrilikli tek tabakalı uzay kafes sistemin tasarlamıştır.

180 m uzunluk ve 15 m genişliğindeki Bugis Junction yapısı (1996, Singapur), silindirik kabuk olarak çözülmüştür (Şekil 3.15).



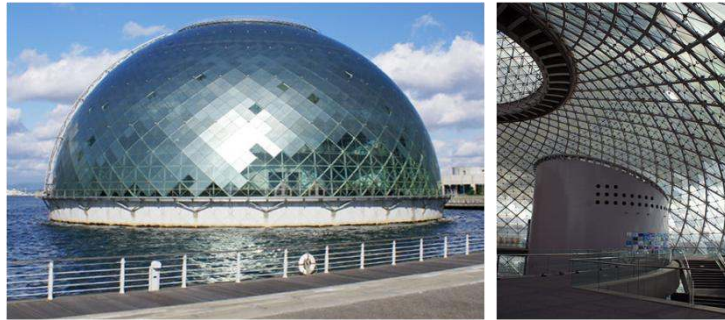
Şekil 3.15 Bugis Junction (Singapur, 1996) [39], [40]

20.yy'ın sonlarında, bilgisayar kontrollü biçimlendirme sistemi (CNC) geliştirildikten sonra bu alanda çok geniş uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknoloji ile, serbest formlu yüzeylerde cam malzemenin kullanılması yaygın hale gelmiştir. Frank Gehry tarafından tasarlanan, DZ Bank'ın (Berlin) çatı sistemi, paslanmaz çelik ve cam kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 DZ Bank (Berlin, 2001) [41], [42]

2001 yılında yapımı tamamlanmış olan Osaka Maritime Museum, 72 m açıklık ve 32 m yüksekliğinde olup, paslanmaz çelik çubuk eleman üzeri çift katlı cam ile kaplanmıştır. Kubbe, ölü yükler, kar yükü ve sismik yüklere karşı en iyi şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.17) [43].



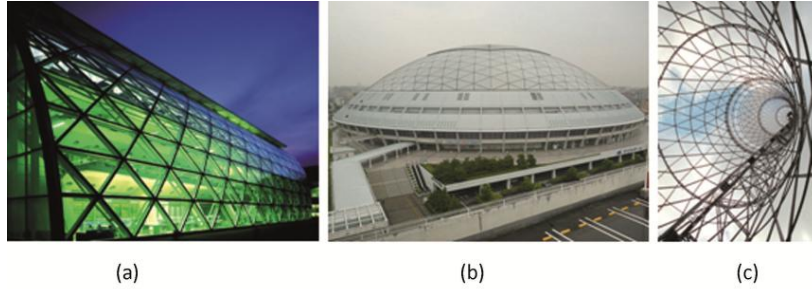
Şekil 3.17 Osaka Maritime Museum (Japonya, 2001) [44]

Alüminyum ve ahşap tek tabakalı uzay kafes sistemlerin tarihçesi ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 5.1 ve Bölüm 6.1'de verilmiştir.

3.2 Tek tabakalı uzay kafes sistem ile tasarlanan formlar

Çerçeve sistemlerde, döşemelerden kirişlere gelen yükler, kolonlara oradan da temele iletilir. Tek tabakalı uzay kafes sistem ise, rijitliğini geometrik formunun eğriselliğinden alır, tüm elemanlar aynı düzeyde taşıyıcıdır. Son dönemde, ışıklandırma, çatıda saydamlık yaratmak ve estetik avantajının yanında, malzeme tasarrufu nedeniyle de yaygın kullanılmaktadır. Silindirik kabuk (tonoz) sistemler; küresel ve eliptik kubbeler ile hiperbolik paraboloid sistemler olarak üç ana grupta incelenir (Şekil 3.18).

Çelik ve alüminyumdan yapılmış birleşim çözümlerinde, dayanım ve estetik göz önüne alınarak farklı şekillerde tasarımlar yapılmıştır (Şekil 3.19). Ahşap ise, tabakalı kompozit olarak genellikle dikdörtgen ya da kare kesitlerde oluşturulup, çelik birleşim parçaları yardımıyla sisteme uygulanmaktadır [45].



Şekil 3.18 Faculty of Law, Cambridge, İngiltere (silindirik kabuk) (b) Nagoya Dome, Japonya (kubbe) (c) Steel Tower, Moscow (hiperbolik paraboloid) [46], [44]



Şekil 3.19 Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin çelik, ahşap ve alüminyum malzeme ile tasarlanması [47], [48], [49]

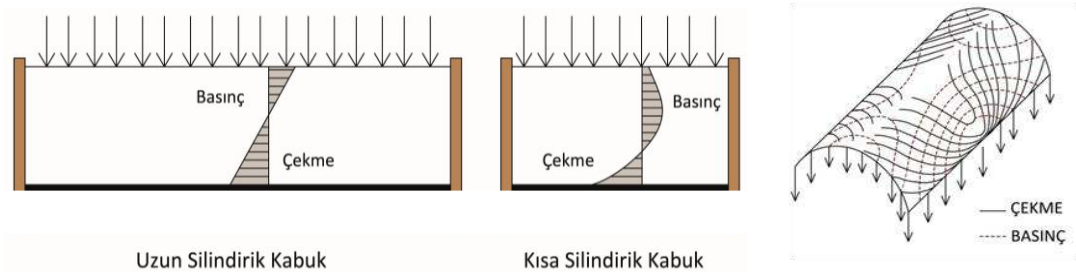
3.2.1 Silindirik kabuk (tonoz) sistemler

Silindirik kabuk sistemler, çubuk elemanların silindirik bir yüzeyde bir araya gelmesiyle oluşan sıfır eğrilikli sistemlerdir. Sistemin eğriliği, düşey doğrultudaki yerdeğiştirmeyi engeller. Enkesit kemer formunda olup, parabol, elips ya da daire yayı biçiminde olabilir. Basınç gerilmeleri etkindir, eğilme momenti; kemerin formuna ve yüklemenin çeşidine bağlı olarak değişkendir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Kemer enkesit tipine göre eğilme momenti dağılımı

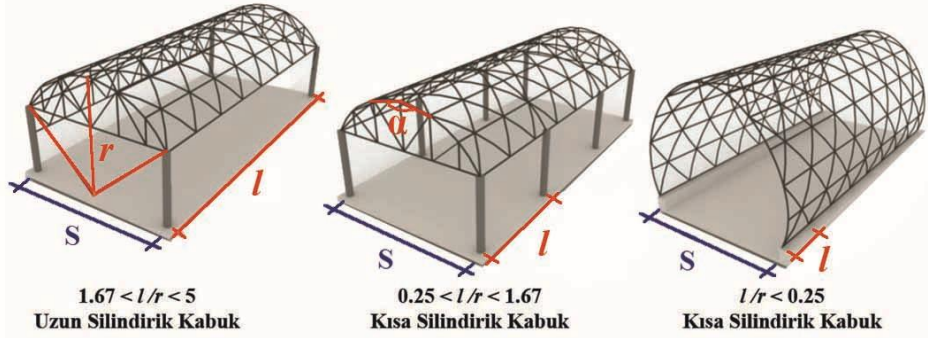
Silindirik kabukların taşıyıcı sistem davranışlarını; sistemin tipi, uzunluk/açıklık (l/S) oranı, yükseklik/açıklık oranı (H/S), kullanılan malzeme, üzerine etkiyen kar ve rüzgar yükleri ile mesnet birleşim tipi etkiler. l , boyuna yönde mesnetler arasındaki mesafe (aralık), r ise açıklığı geçen eğrinin yarıçapı olmak üzere; uzun silindirik kabuk sistemlerde ($1.67 < l/r < 5$) üniform yükler altında ve $l/r > 3$ durumu için kiriş davranışı geçerlidir. Tepe noktalarında basınç gerilmesi ve mesnete yakın bölgelerde ise çekme gerilmesi oluşur. Kısa silindirik kabuk sistemlerde ($0.25 < l/r < 1.67$) ise, yüksek kiriş benzeri, boyuna yönde de kemer davranışı hakimdir. Üst lifteki basınç gerilmeleri kabuğun ortalarına doğru iner ve gerilme yayılımı artık lineer değildir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Kemerlerde boyuna yönde gerilme yayılımı

3.2.1.1 Tek tabakalı silindirik kabuk sistemler

Tek tabakalı silindirik kabuk sistemler, bir kemerin kendi düzleminde çaprazları boyunca tekrarlanması ile elde edilir. Boyuna yöndeki mesnetlenme durumuna göre tek tabakalı silindirik kabuk sistemlerin kuruluş biçimi Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Sistem stabilitesi açısından tepe noktasındaki çubuk elemanların açıları $\alpha \leq 170^\circ$ olması gereklidir (Şekil 3.22).

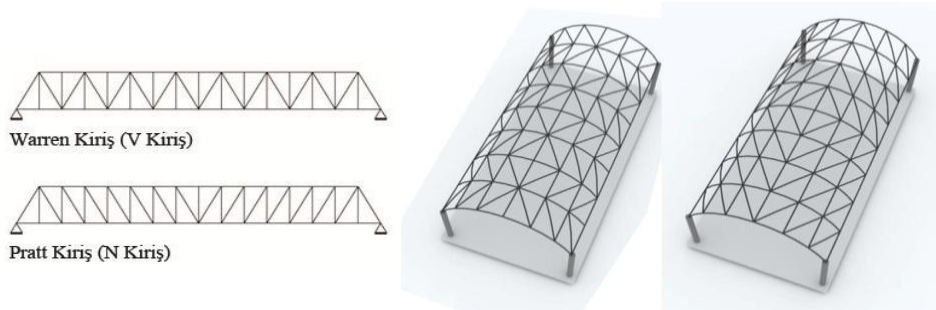


Şekil 3.22 Kısa ve uzun silindirik kabuk gösterimi

Tek tabakalı silindirik kabuk sistem çeşitleri şunlardır [1]:

- V (Warren) kirişli
- N (Pratt) kirişli
- Üç doğrultuda çubuk elemanlı
- Çift çaprazlı
- Lamella tipi

V (Warren) ve N (Pratt) kirişli silindirik kabuklar, birleşim noktaları eğri üzerinde tiplerin tekrarlanması sonucu meydana gelmektedir (Şekil 3.23).



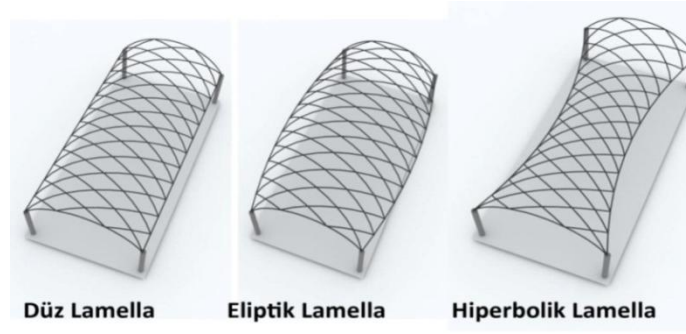
Şekil 3.23 V ve N kiriş gösterimi

Çift çaprazlı silindirik kabuklar, çubuk elemanların aralarına çift yönde çapraz çubukların konulmasıyla elde edilmektedir (Şekil 3.24).



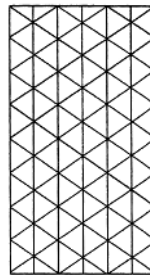
Şekil 3.24 Çift çaprazlı silindirik kabuk

Lamella silindirik kabuklarda, çubuk elemanlar, eşkenar dörtgen biçiminde ve baklava düzeninde dizilir ve standart ölçülerde üretilir (Şekil 3.25). Günümüzde genelde ahşap malzeme kullanılarak üretilirken, son yıllarda çelik malzeme kullanılarak yapılmış lamella silindirik kabuk çeşitleri de mevcuttur.



Şekil 3.25 Lamella silindirik kabuk çeşitleri [50]

Üç doğrultuda çubuk elemanlı silindirik kabuklar, büyük asimetrik yükler söz konusu olduğunda yer değiştirmeyi azaltmak ve taşıyıcı sistemin rijitliğini arttırmak için lamella sisteme uzunlamasına yönde aşıkların yerleştirilmesi ile tasarlanmıştır (Şekil 3.26).

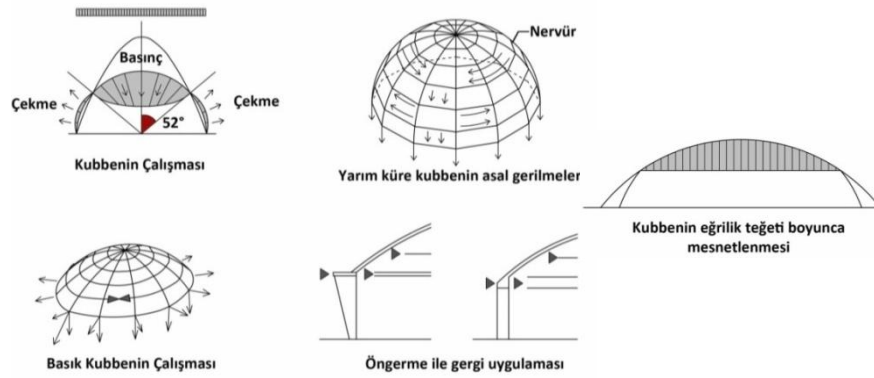


Şekil 3.26 Üç doğrultuda çubuk elemanlı silindirik kabuk [1]

3.2.2 Kubbe sistemler

Kubbeler, mimarlıkta kullanılan en eski yapısal formlarındandır. Minimum yüzeyde maksimum alan ve ekonomik malzeme kullanımı sağlayan pozitif eğrilikli ($K > 0$) taşıyıcı sistemlerdir. İnce kalınlıklı kubbe sistemlerde, üniform yük durumu için, teğeti doğrultusunda birleşim (mesnet birleşimi de uygunsa), eğilme momenti ve kesme kuvvetinin oluşmadığı kabul edilir. Üniform düşey yükler altında (Şekil 3.27);

- Yarım küre kubbenin meridyen gerilmeleri her yerde basınç iken, paralel gerilmeleri kubbe tepesinde basınç, eteğinde çekmeye çalışmaktadır. Basınç gerilmesinin çekmeye dönüştüğü sıfır gerilme hattı, merkezden geçen düşey eksen ile 52° açı yapar.
- Basık kubbede (örnek: küre kapağı) basınç gerilmeleri hakimdir ancak yatay mesnet tepkisi ve sistemde kesit tesirleri daha fazla olduğundan önlem alınması gerekir.

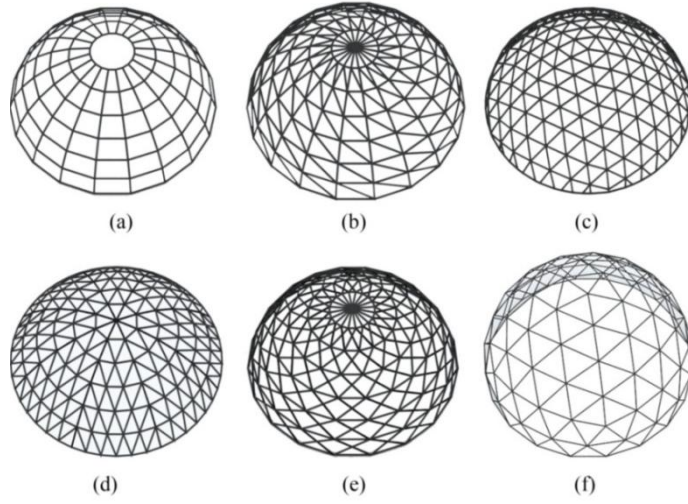


Şekil 3.27 Yarım küre kubbe gerilme bölgeleri ile basık kubbede yatay mesnet tepkilerine karşı önlemler

3.2.2.1 Tek tabakalı kubbe sistemler

Bu sistemlerde plan yalnızca daire şeklinde değil, kare, üçgen, çokgen, gibi formlarda da olabilmekte ve üzeri kubbe sistemle geçilebilmektedir [51]. Kubbe formları, küresel, parabolik ya da eliptik olarak şekillenmektedir. Kubbeler,

1. Nervürlü Kubbe (a),
2. Schwedler Kubbe (b),
3. Üç Doğrultuda Çaprazlı Kubbe (c),
4. Lamella Kubbe (d- Diamatik Lamella, e- Nervürlü Lamella),
5. Jeodezik Kubbe (f) olmak üzere beş çeşittir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Kubbe çeşitleri [52]

Nervürlü kubbeler, tarihi dini yapıların kubbelerinde de uygulanmış (örneğin Ayasofya, **M.S 562**) en eski kubbe tipidir, ancak bu tür yapılarda rijitliği sağlayan ara çemberler genellikle yoktur.

Halle au Blé yapısında (Bourse de commerce, Paris, **1808**) cam ve metal (dövme demir) ilk defa birlikte kullanılmıştır. Max Berg tarafından Breslau’da (Almanya) (1913-1931, Wrocław, Polonya) tasarlanan Jahrhunderthalle yapısı, ilk betonarme nervürlü kubbe örneğidir. Yapı 65 m genişliğinde olup, beş çemberli ve 32 nervürlüdür (Şekil 3.29) [53].



Şekil 3.29 Halle au Blé (Paris) ve Jahrhunderthalle (Almanya) yapıları [54], [55]

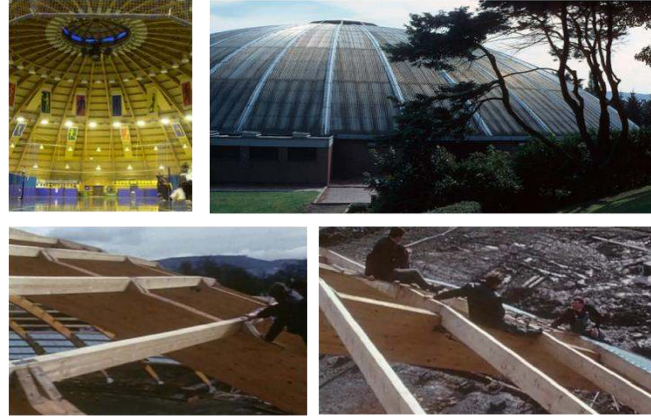
Günümüzde nervürlü kubbelerin ön üretimi ile, imalat ve montaj açısından kolaylık sağlanmaktadır. Bu tip nervürlü kubbeler rijit birleşimli yapılmalıdır [52].

1952’de Legorretta & Legorretta ve Gideon-Toalm Fort Worth tarafından tasarlanan, 15 m açıklıklı Noble Planetarium çelik nervürlü kubbe örneklerindendir (Şekil 3.30) [56].



Şekil 3.30 Noble Planetarium, 1952, Teksas [56], [57]

İngiltere'nin en büyük kubbelerinden biri olan, 67 m açıklıklı Bell's Sports Centre, en iyi ahşap kubbe örneklerinden birisidir, 35 m uzunluğunda çubuk elemanlar ile oluşturulmuş kubbe 36 nervürlüdür (Şekil 3.31) [8].



Şekil 3.31 Bell's Sports Centre, 1966, İngiltere [58], [59], [60]

En iyi alüminyum nervürlü kubbe örneklerinden biri, Yunanistan'daki 61 m açıklıklı Rodos Palace Otelidir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 Rodos Palace Hotel, Rhone, 1973, Yunanistan [61], [62]

Schwedler kubbe, ismini J.W.Schwedler'den (Almanya, **1863**) alan kubbe, radyal doğrultuda (meridyen) düzenlenmiş elemanlar, çemberler ve çapraz yönde rijitliği sağlayan elemanlardan oluşur. Çapraz elemanlar, oluşan ikizkenar yamuk gözler içinde tek veya iki yönde düzenlenir. Birleşim noktaları mafsallı kabul edilir.

Bilgisayar teknolojilerinin olmadığı dönemde, sistemi elle çözmek mümkün olduğu için, önemli bir kullanım alanı bulmuştur. Çubuk elemanlarda normal kuvvete ilave olarak eğilme ve burulma momenti de mevcuttur [1]. Schwedler kubbeler, nervürlü kubbeler gibi prefabrikasyona uygundur bu sebepten yapım aşamasında kolaylık getirmektedir [63], [8]. 1876'da, J.W. Schwedler'in Berlin'de tasarladığı, 56 m genişlik ve 21 m yüksekliğindeki Fichtebunker, ilk çelik Schwedler kubbe örneklerindendir (Ayrıca Bkz. Bölüm 4.1) [64], [65].

Üç doğrultuda çaprazlı kubbelerde, asimetrik yükler altında dahi kuvvetler üniform dağılır [1]. Üç doğrultuda çaprazlı sistemler, kare, dikdörtgen, daire, üçgen ve altıgen planlı kubbesel formları geçmek için en uygun sistemdir [63].

Prof. Lederer tarafından Çekoslovakya'da tasarlanmış olan Lederer Dome, 93.5 m çapında ve 19 m yüksekliğinde olan üç doğrultuda çaprazlı kubbe örneklerindendir (Şekil 3.33) [8].



Şekil 3.33 Lederer Dome (Pavilion Z), 1959, Çekoslovakya [8], [66]

1961 yılında Dr. Istvan Kadar tarafından tasarlanmış olan The Budapest Industrial Fair, alüminyum malzeme ile yapılmış üç doğrultuda çaprazlı kubbe örneklerindendir (Şekil 3.34) [8].



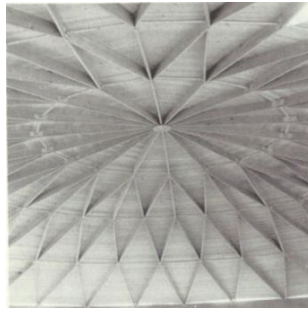
Şekil 3.34 The Budapest Industrial Fair, 1961, Macaristan [8]

Lamella kubbeler, 1906'da F.Zollinger tarafından Almanya'da, sonrasında Dr. G.R.Kiewit (1925) tarafından A.B.D'de geliştirilmiştir [8]. İki doğrultuda çapraz çubuk elemanların eşkenar dörtgen oluşturacak biçimde kesiştirilmesiyle meydana gelir. Lamella kubbelerin çubuk elemanları birbirine paralel ve çapraz olmak üzere iki biçimde düzenlenir. Paralel olan lamella kubbeler, genellikle 6 ya da 8'e bölünerek eşkenar dörtgen içinde eşit bölümlere ayrılmasıyla oluşturulur, A.B.D'de çok kullanılan bir türdür, Kiewitt kubbe de denilmektedir. Diğeri ise farklı büyüklüklerde eşkenar dörtgenler oluşturacak biçimde çapraz çubukların kubbenin tepe bölgesindeki basınç çemberine birleştirilmesiyle oluşmaktadır [1]. Lamella kubbelerin en önemli özelliği, sismik yükler ve rüzgâr etkilerine karşı iyi bir yapısal davranış göstermesidir [63], [8].

En iyi paralel lamella kubbe örneği, Dr. Kiewitt tarafından geliştirilen döneminin en geniş açıklıklı yapısı olan Houston Astrodome'dur. 217 m açıklığında ve 63.4 m yüksekliğinde olan kubbe, kesit yüksekliği 1.5 m olan çelik elemanlardan oluşmaktadır (Şekil 3.35) [8]. Ahşap malzeme kullanılarak yapılan lamella kubbe örneği ise, 30.5 m açıklıklı Frederick High School yapısıdır (Şekil 3.36).



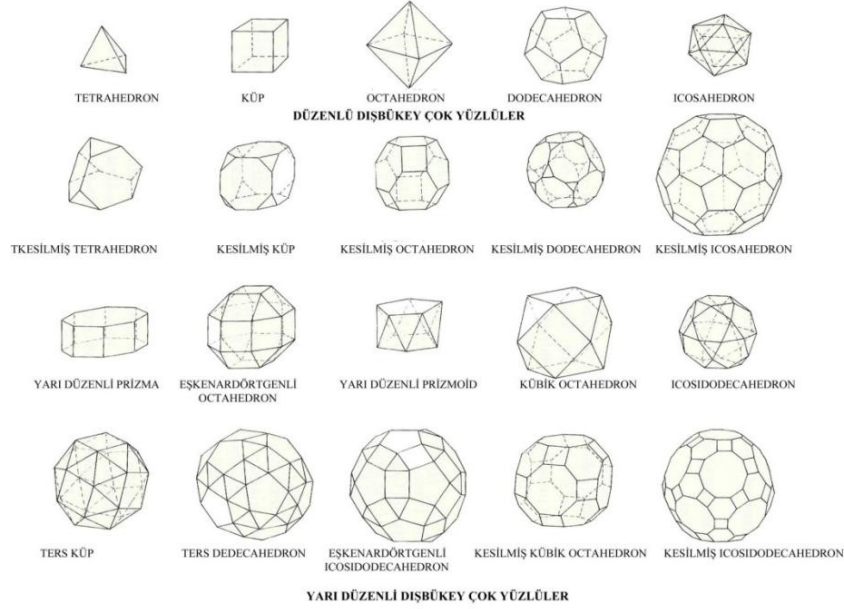
Şekil 3.35 The Astrodome, 1965, Houston, A.B.D [67], [68]



Şekil 3.36 Frederick High School, 1925, Oklahoma, USA [8]

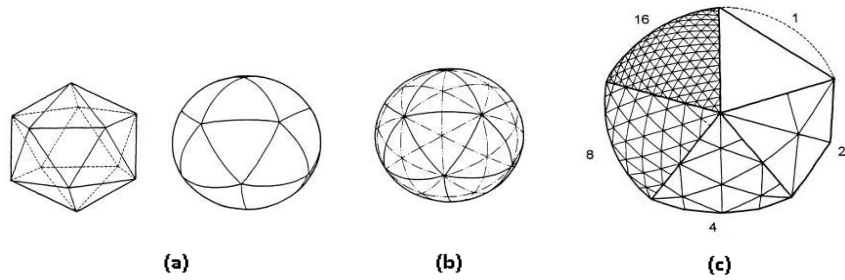
Jeodezik kubbe, 1954 yılında Buckminster Fuller tarafından geliştirilmiştir [8]. Jeodezik kubbeler, küre biçimindeki yüzeyde eşit üçgenlerin oluşturulmasıyla meydana gelmektedir. Bilinen beş adet düzgün çok yüzlü vardır ve bunların tüm uzunlukları birbirine eşittir. Bunlar; dört yüzlü çokgen (tetrahedron), küp, sekiz yüzlü çokgen

(octahedron), oniki yüzlü çokgen (dodecahedron) ve yirmi yüzlü çokgen (icosahedron) dir. Bu çok yüzlüler "platonik üç boyutlular" ismini alır. Geniş açıklıklarda, 15 çeşit çok yüzlüden oluşan "Archimedean üç boyutlular" kullanılır (Şekil 3.37) [8].



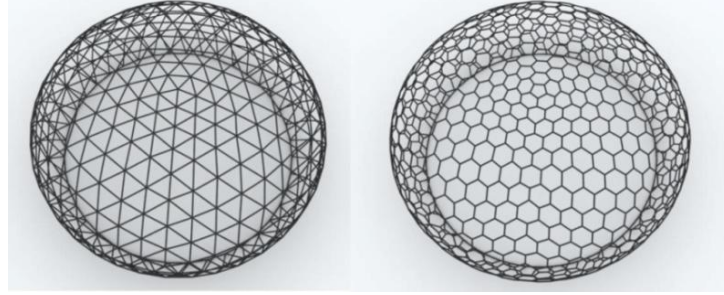
Şekil 3.37 Platonik üç boyutlular (Düzenli dışbükey çokyüzlüler) ve Archimedean üç boyutluların (Yarı düzenli dışbükey çokyüzlüler) gösterimi [8]

1954 yılında Fuller'in özgün jeodezik kubbesi ile bu tartışmalar son bulduktan sonra, son 20 yıldır platonik üç boyutlulardan meydana gelen archimedean üç boyutlular ile oluşturululan jeodezik kubbeler tartışılmaktadır. Bu jeodezik kubbeye, 20 adet ikizkenar üçgen birleştirilerek bir yüzey oluşturulur. Bu üçgenler küre formatına getirilir (Şekil 3.38.a) ve 6 eşit üçgene bölünür (Şekil 3.38.b), 15 adet küre bir araya gelerek jeodezik formu meydana getirir. Kubbe çevresinde eğri yüzeylerin meydana gelmesi için üçgenler çoğaltılarak işlem devam eder, 16 eş parçaya bölündüğünde istenen form ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.38.c) [1].



Şekil 3.38 Fuller'in geliştirdiği jeodezik bölümlenmeler [52]

Jeodezik kubbeler üçgenlerden oluştuğu gibi altıgen olarak da meydana gelmektedir [52]. Kubbe yüzeyini oluşturan elemanlar, bulonlu birleştirildiği zaman üçgen bölümlenmiş yüzeylerin, kesme kuvveti ve eğilme momenti dayanımı artarken, dörtgen bölümlenmelerde, ek rüzgâr bağlantıları ve rijit birleşimler gereklidir. Yüzeydeki beşgen ve altıgen yüzeyler içinde de ilave çapraz bağlantı yapılmalıdır (Şekil 3.39) [69].



Şekil 3.39 Jeodezik kubbe çeşitleri

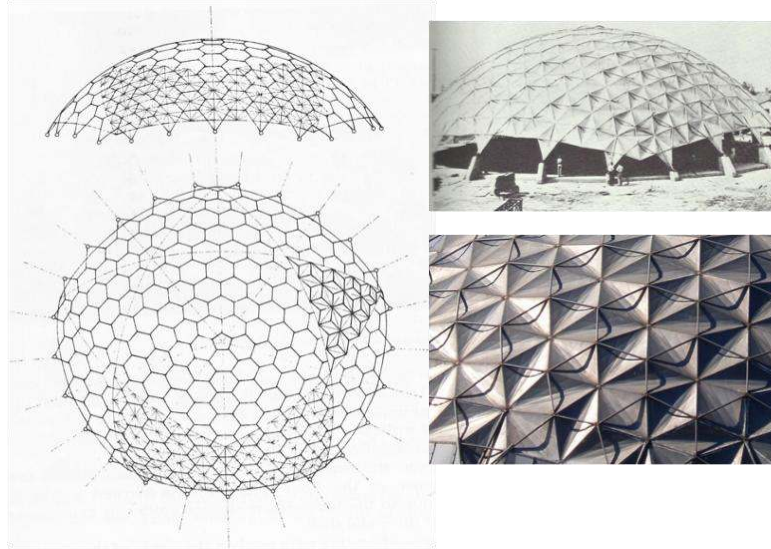
Jeodezik kubbelerin avantajları;

- Konvansiyonel yöntemler ile yapılmış kubbelerle göre daha hafiftir.
- Deprem, kar ve rüzgâr gibi yüklere karşı alışlagelmiş yöntemler ile çözülmüş kubbelerle oranla, daha yüksek dayanım gösterir.
- Sahip olduğu yüzey alanı göz önüne alındığında, aynı yüzey alanına sahip değişik türden yapılara göre en fazla hacmi kaplar.
- Stok sahası ya da endüstriyel tesislerde kullanımı söz konusu olduğunda, taşınabilir ya da geliştirilebilir olması avantaj sağlar.
- Montaj süresi, özel bağlantı elemanları ile hızlıca kurulduğundan daha kısadır.
- En ideal akustik yapı formudur [70].

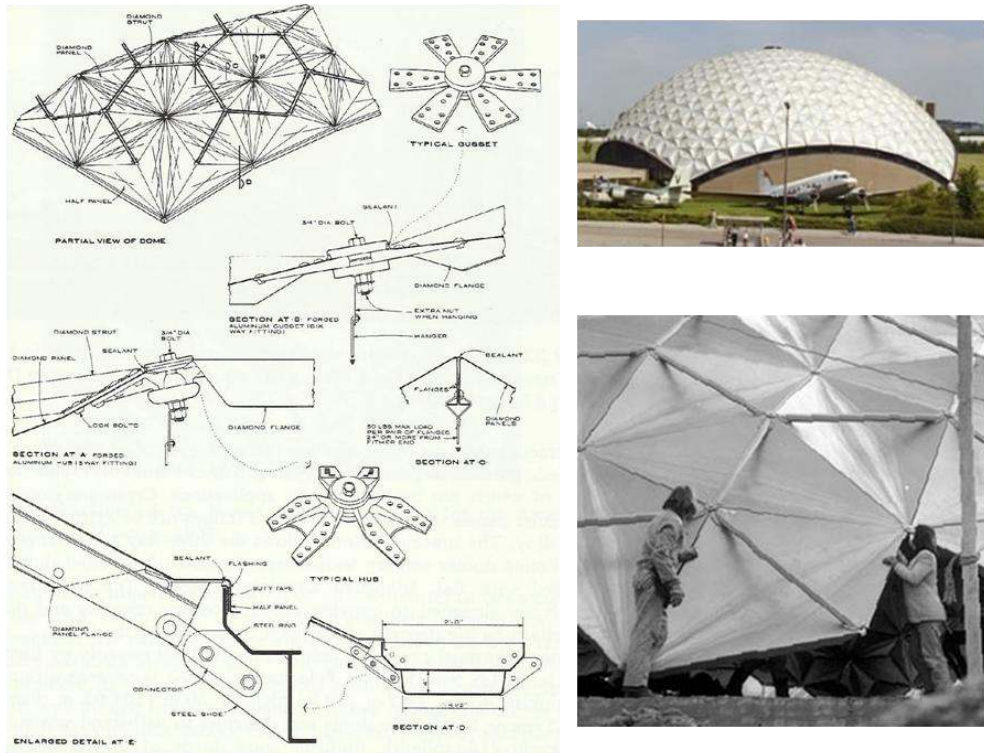
Buna karşılık tek tabakalı jeodezik kubbeler, diğer tek tabakalı kubbe tipleri ile karşılaştırıldığında, çapı 60 m'yi geçmeyen açıklıklıklar tasarlanabilir, aksi takdirde çift tabakalı olarak tasarlanması gereklidir [1].

Fuller'in öğrencisi D.Richter, Fuller'in jeodezik bölümlenmelerinden yola çıkarak, tek tabakalı jeodezik kubbeyi (stress-skin geodesic dome) geliştirmiştir. Kaiser Aluminum Dome, bu sistem ile yapılmış en iyi kubbe örneğidir (Hawaii, 1957). Sistem, 44.2 m genişliğinde ve 15.1 m yüksekliğinde olup, ortalama genişliği 3.5 m x 2.1 m olan, 575

adet alüminyum panel ile oluşturulmuştur[8]. Çepeçevre eğrisel formlu betonarme perdeye 25 adet noktadan mesnetlenmiştir (Şekil 3.40). 1971’de Richter, aynı jeodezik kubbe ile 60 m açıklığında olan Aviodome at Schipol Airport yapısını tasarlamıştır (Şekil 3.41) [8]. McGranahan Messenger Architects tarafından tasarlanan, 160 m açıklığında ve 46 m yüksekliğinde olan Tacoma Dome (1983) en iyi ahşap jeodezik kubbe örneğidir (Ayrıca Bkz. Bölüm 5.5 ve Çizelge 5.3).



Şekil 3.40 Kaiser Aluminum Dome, 1957, Hawaii [8], [71]

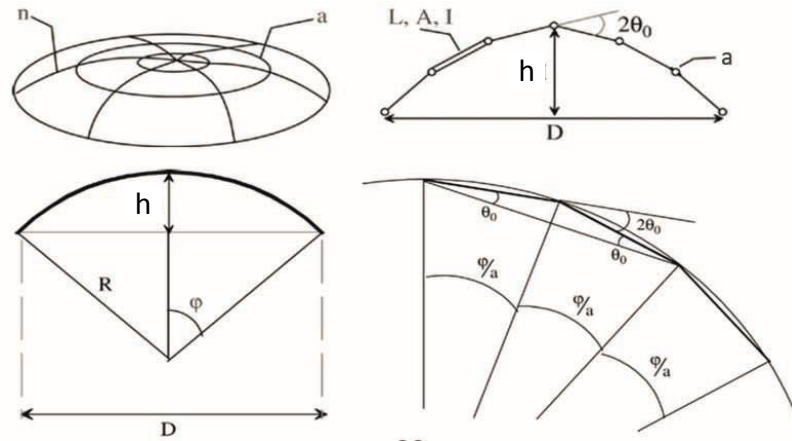


Şekil 3.41 Aviodome at Schipol Airport, 1971, İngiltere [8], [72]

3.2.2.2 Kubbe sistemler ve geometrik parametreler

Tek tabakalı kubbe sistem ile ilgili temel geometrik parametreler şunlardır (Şekil 3.42):

- Yükseklik (h) ve açıklık (D),
- Nervür sayısı (n) ve çember sayısı (a),
- Nervürler arası açı (ϕ)
- Çubukların alan (A) ve atalet momenti (I) büyüklükleri



Şekil 3.42 Kubbe sistemin parametreleri [73]

Kubbenin tepe noktası ile kenar mesnet arasındaki toplam açı (ϕ), kubbenin açıklık/yükseklik (D/h) oranına bağlıdır (Şekil 3.42).

$$D = 2R \sin \phi \quad (3.1)$$

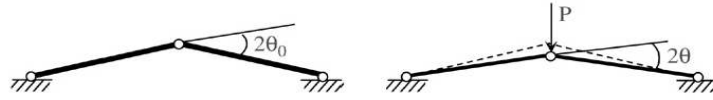
ve toplam açı (ϕ) ;

$$\tan \phi = \frac{4D/h}{(D/h)^2 - 4} \quad (3.2)$$

ile bulunur. Toplam açı (ϕ), ϕ/a 'lık eşit açılarla bölünerek çember adedi ve yerleri belirlenir. İki çember (iki çubuk) arasındaki θ_0 açısı,

$$\theta_0 = \phi / 2a \quad (3.3)$$

bağıntısı ile belirlenir.

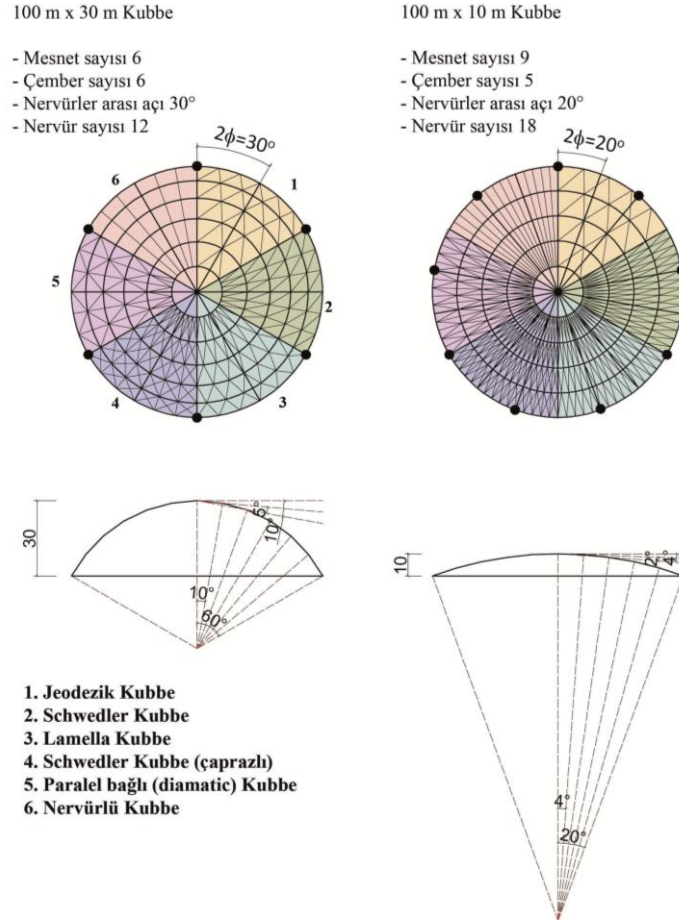


Şekil 3.43 Kubbe sistemde iki çubuğun birleşim bölgesi, düşey yük ve 2θ açısı [73]

Mesnetlenmiş iki nervür arasında plandaki açı (2ϕ), m mesnet sayısı olmak üzere,

$$2\phi = \frac{360}{m} \quad (3.4)$$

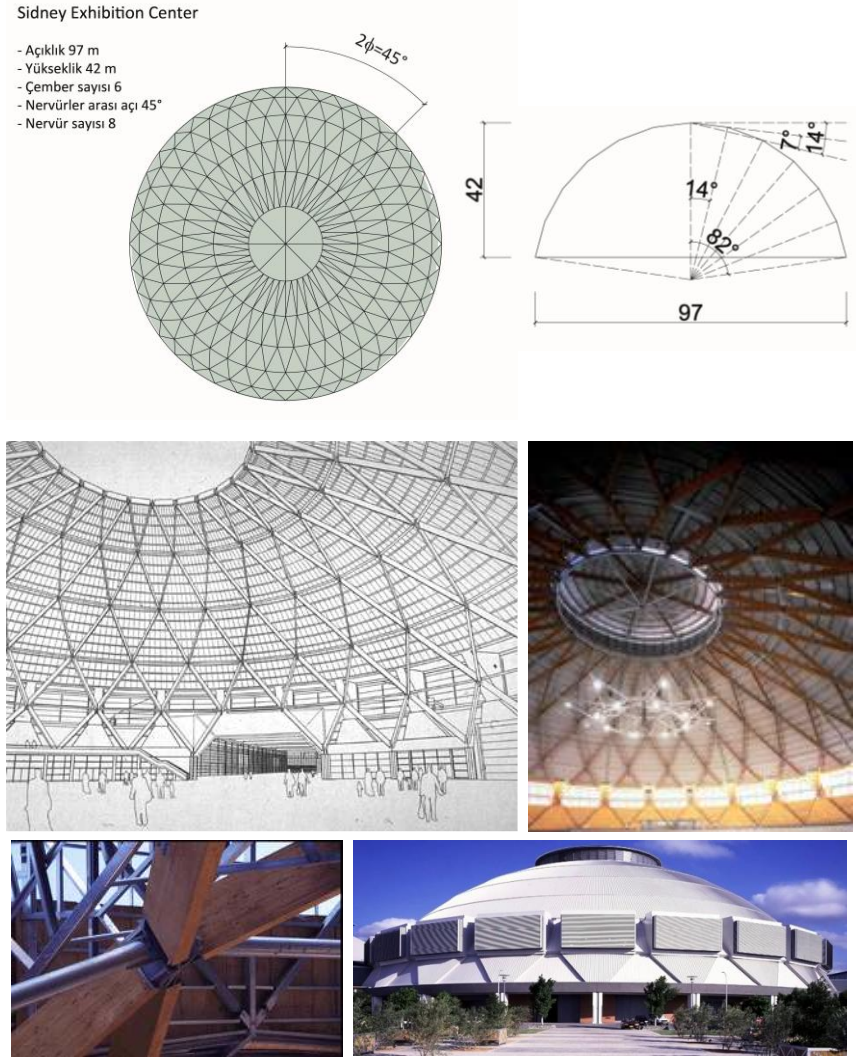
bağıntısı ile belirlenir. 2ϕ (Şekil 3.43), ϕ ve ϕ/a açıları; Şekil 3.44'de iki farklı yükseklikli yapı planı üzerinde değişen tek tabakalı sistem formuna göre örneklenmiştir.



Şekil 3.44 100 x 30 m ve 100 x 10 m boyutlarındaki iki kubbenin nervür¹, çember sayısının belirlenmesi

¹Not: 1 numaralı jeodezik kubbe gösteriminde, nervüre gerek yoktur. Şekil 3.44'de çizilen nervür, sayıların gösterimi içindir.

1998 yılında Ancher, Mortlock ve Wooley tarafından Homebush Bay, Sidney’de tasarlanan, 97 m genişliğinde ve 42 m yüksekliğinde, nervür sayısının (n) 8 ve çember sayısının (a) 6 olduğu lamella tipi kubbe ile tasarlanmış Sidney Exhibition Center yapısı çalışma kapsamında ele alındığında, ϕ açısının 82° , ϕ/a açısının 14° ve nervürler arası açının (2ϕ) 45° olduğu belirlenmiştir. 3.4 denklemi sonucunda; nervür sayısının ve buna bağlı olan çember sayısının doğru olduğu görülmektedir (Şekil 3.45).

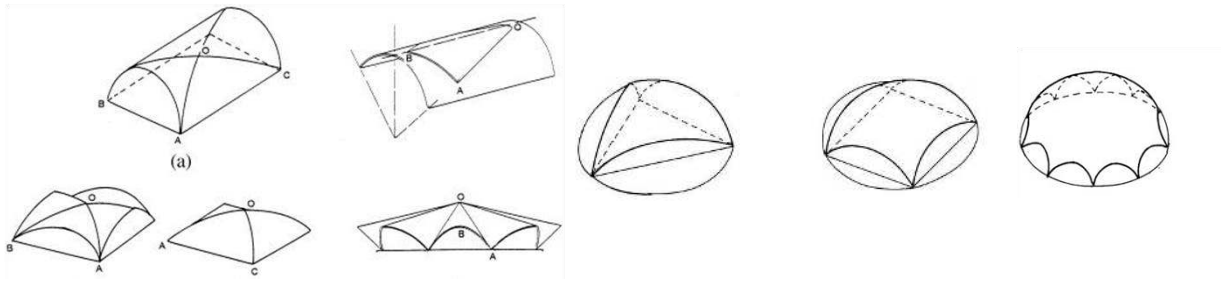


Şekil 3.45 Sidney Exhibition Center yapısı, nervür ve çember sayısının belirlenmesi [74], [75]

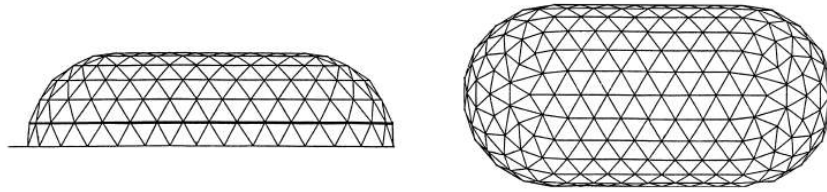
Kubbelerde stabilite konusu, incelenen çelik örnekler bazında ele alındığı için Bölüm 4’te aktarılacaktır.

3.2.3 Karma sistemler

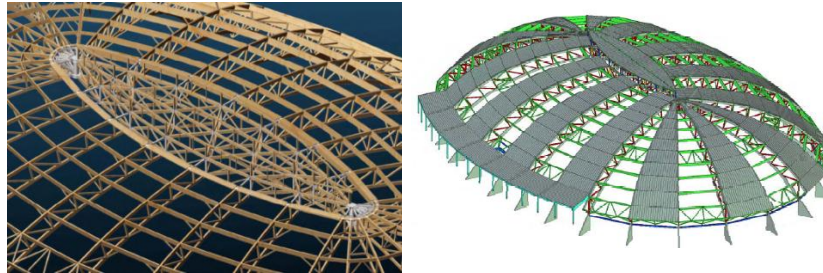
Silindirik kabukların kesiştirilmesi, kesik kubbeler veya silindirik kabuk + yarım kubbe sistem düzenlemeleri ile yeni sistemler meydana getirilmiştir (Şekil 3.46 ve Şekil 3.47). 95 m yüksekliğindeki National Sports and Culture Centre d'Coque yapısı glulam ahşap ile yapılmış silindirik yüzeyli sistem (Şekil 3.48), 110 x 40 m yüksekliğindeki Dos Hermanas Velodrome yapısı çelik malzeme ile yapılmış silindirik yüzeyli sistem (Şekil 3.49), 150 x 110 m uzunluğunda ve 31 m yüksekliğindeki Joensuu Arena - Wooden Multipurpose yapısı, LVL ahşap (Ayrıca Bkz. Bölüm 5.2.2) ile yapılmış silindirik yüzeyli sistem (Şekil 3.50), 48 m açıklığındaki Brühl Sports Center yapısı (Şekil 3.51) ve 35 m açıklığındaki Badi Brugg yapısı (Şekil 3.52) karma sistemler ile tasarlanmış örneklerdendir.



Şekil 3.46 Silindirik yüzeylerin kesişme ve birleşimleri ile bazı kesik kubbe tipleri [1]



Şekil 3.47 Tipik silindirik kabuk + yarım kubbe sistem düzenlemesi [1]



Şekil 3.48 National Sports and Culture Centre d'Coque, Lüksemburg [76], [77]



Şekil 3.49 Joensuu Arena - Wooden Multipurpose Hall, Finlandiya (2004) [78]



Şekil 3.50 Dos Hermanas Velodrome, Seville, İspanya (2002) [76], [77]



Şekil 3.51 Brühl Sports Center, İsviçre (1982) [79]

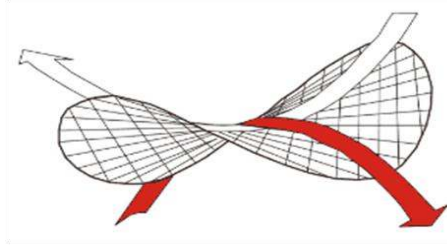


Şekil 3.52 Badi Brugg, İsviçre (1981) [79]

3.2.3.1 Hiperbolik paraboloid sistemler

Hiperbolik paraboloid (hipar, HP) sistemler, negatif eğrilikli sistemler olup, ($K < 0$) eşkenar dörtgen bir planda, ters eğrilikli iki çizginin kesişmesi ve kaydırılması ile oluşur. İnce kubbe yüzeyler meridyenleri boyunca yalnızca basınca çalışırken, HP sistemler, bir doğrultuda basınca çalışırken, dik doğrultuda çekmeye çalışmaktadır. Ters eğriliklerin

bir arada kullanılması sisteme önemli bir rijitlik kazandırmaktadır (Şekil 3.53). HP sistemler, dikdörtgen ve eliptik planlarda da kullanılabilir.



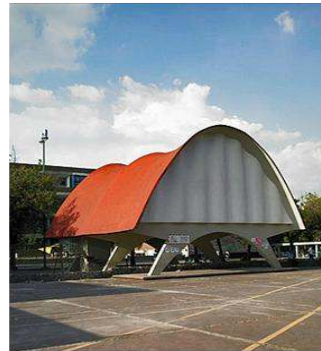
Şekil 3.53 Hiperbolik paraboloid sistemler [80]

HP sistemleri ilk tasarlayan kişi 1850'li yıllarda V.G.Shukhov'dur. 37 m yüksekliğindeki Water Tower dünyanın ilk HP formda mühendislik yapısıdır (Şekil 3.54).



Şekil 3.54 Water Tower, Polibino, Rusya, 1896

Felix Candela, betonarme malzemeyi kullanarak, HP sistemlerde uygulayan, tasarımın öncülerindendir (1950). Candela'nın HP sistem ile tasarladığı ilk yapı, 4 cm kalınlığında, betonarme, Cosmic Rays Laboratory yapısıdır [81] (Şekil 3.55).



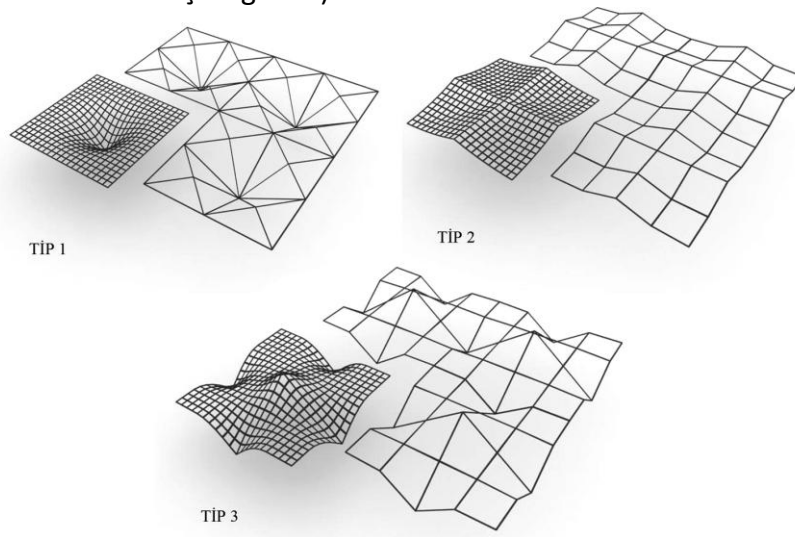
Şekil 3.55 Cosmic Rays Laboratory yapısı, 1951, Meksika [81]

Hiperbolik paraboloid sistem kombinasyonları,

- Kare HP sistemler,
- Üçgen HP sistemler,
- Dönel HP sistemlerdir.

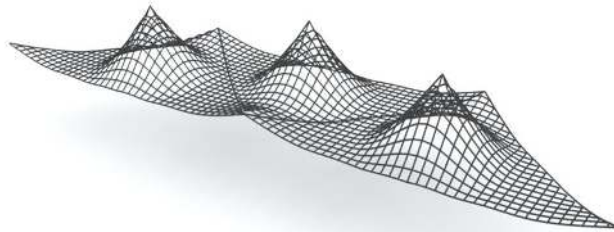
Kare HP sistemler, üç tipte belirtilebilir. 1.tip HP sistemde, kenar noktaları sabit iken, tepe noktasının aşağıda olduğu, 2. tip, kenar noktaları sabit iken, x ve y aksı boyunca tepe noktasının yukarıda olduğu, 3. tip ise, hem kenarların hem de tepe noktasının eğimli olduğu sistemdir (Şekil 3.56).

2. tip ve tek tabakalı uzay kafes sistem olarak tasarlanmış en iyi HP sistem örneği, Thomas Herzog tarafından tasarlanmış EXPO 2000 yapısıdır (Hannover, Almanya) (Ayrıca Bkz. Bölüm 5.5 ve Çizelge 5.4).



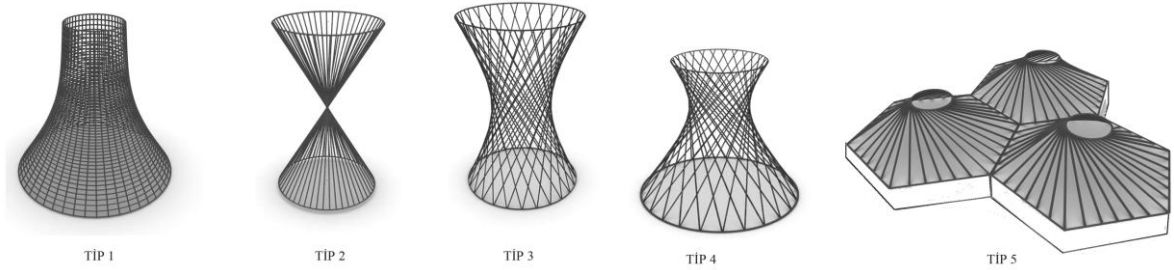
Şekil 3.56 Kare hiperbolik paraboloid sistemler ve kombinasyonları

Üçgen HP sistemler, ikizkenar bir üçgenin ağırlık merkezinin yükseldiği ve kenarlarının da merkeze nazaran daha az bir yükseklikte olduğu sistemlerdir. Üçgen HP sistemlerin tepe noktasına ışıklık açılarak da kullanılmış örnekleri mevcuttur (Şekil 3.57).



Şekil 3.57 Üçgen hiperbolik paraboloid sistem ve kombinasyonu

Dönel HP sistemler, 5 türden meydana gelir fakat her bir tür, kendi içinde de farklılıklar oluşturabilir. 1. tip dönel sistemde, radyal eğriliklerin alt ve üstte olmak üzere 2 çember ile birleştirilir. 2. tip, silindir bir formun 360° döndürülmesiyle, 3. tip, silindir bir formun orta noktasından döndürülmesiyle, 4.tip, silindirin üst noktasından döndürülmesiyle ve 5. tip, altıgen planlı sistemin tepe noktasının döndürülmesiyle meydana gelir (Şekil 3.58).



Şekil 3.58 Dönel HP sistemler

Shukhov'un 1896'da tasarladığı 37 m yüksekliğindeki Water Tower, tip 4 (Şekil 3.58) ve 1920 yılında Rusya'da tasarladığı, 40 m çap ve 160 m yüksekliğindeki, Shukhov Radio Tower, tip 3 ile tasarlanmış tek tabakalı çelik yapı örneklerindendir (Şekil 3.59) [83].



Şekil 3.59 Shukhov Radio Tower, 1920, Rusya [83]

TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN ÇELİK MALZEME İLE OLUŞTURULMASI

4.1 Tarihçe

18.yy.'da İngiltere'de ham demirin yüksek fırında kok kömürü, demirin yapıda kullanımına imkan sağlamıştır. Böylece dökme demir (font) eritilmesi ve seri üretimi endüstriyel devrimde önemli bir rol oynamıştır. Yüksek karbon içeriği nedeni ile, dökme demirin basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise düşüktür. Dökme demirin kullanıldığı ilk önemli mühendislik yapısı, Abraham Darby III tarafından inşa edilen Coalbrookdale Köprüsü'dür (**1779**) (Severn Nehri, İngiltere) (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Coalbrookdale Köprüsü, İngiltere [84]

Dökme demire kıyasla daha düşük karbon içeriği nedeni ile sünek dövme demir, yüzyıllarca yapı harici metal üretiminde (kılıç, nal, tren rayı, çivi vb.) kullanılmıştır. Henry Cort, daha az kükürt, cüruf ve karbonlu dövme demir üretilen pudralama

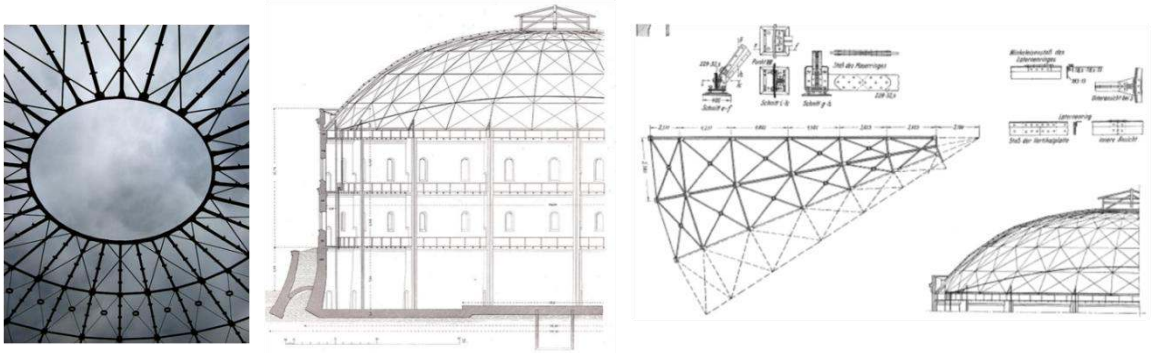
yöntemini geliştirerek (1783), iyi kalitede dövme çeliğin seri üretimini mümkün kılmıştır.

1787'li yıllarda dövme çelik kullanılarak geniş açıklıklı, kafes ana kirişli köprüler inşa edilmeye başlamıştır. 1884'de tamamlanan ve G.Eiffel'in tasarımı olan, en uzun açıklığı 165 m ve toplam açıklığı 565 m olan Garabit Viadüğü iyi örneklerden biridir. (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Garabit Viyadüğü, Fransa, 1884 [85]

19.yy.'ın ikinci yarısında Bessemer yöntemi (1855) ile başlayarak çeliğin ekonomik ve seri üretimi başlamıştır. Çeliğin tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanımı ise 19. yy'ın sonlarında başlamıştır. 1876 yılında J.W.Schwedler'in tasarladığı, açıklığı 56 m ve yüksekliği 21 m olan Fichtebunker (Gasometer Dome) aynı zamanda Schwedler kubbenin ilk tasarımlarından biridir (Şekil 4.3) [64], [65].



Şekil 4.3 Fichtebunker (Gasometer Dome) Berlin, Almanya [64], [86]

Ahşap için geliştirilen lamella sisteminin (1906, Zollinger), çeliğe uyarlanması (1925, H.Junkers) ve Diamatik, Kiewitt kubbe (1925, Dr. G.R.Kiewit) tipinde geniş bir kullanım alanı bulması, jeodezik sistemlerin ortaya çıkması (1954, Buckminster Fuller), üç yönde ızgara sistemlerin geliştirilmesi ve serbest formların kullanılmaya başlaması ile,

günümüzde, çeliğin tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanımı yaygın uygulama alanı bulmuştur (Şekil 4.4).



(a)

(b)

(c)

Şekil 4.4 (a) Hyatt Cancun, Mexico, 2010 (37 m çapında lamella kubbe) [87], (b) Hulhumale dome, Maldivler, 2006 (30 m çapında, jeodezik kubbe) [88], (c) Spruce Goose dome, 1982, ABD (126 m çapında diamatik kubbe) [89].

4.2 Çelik malzeme ve özellikleri

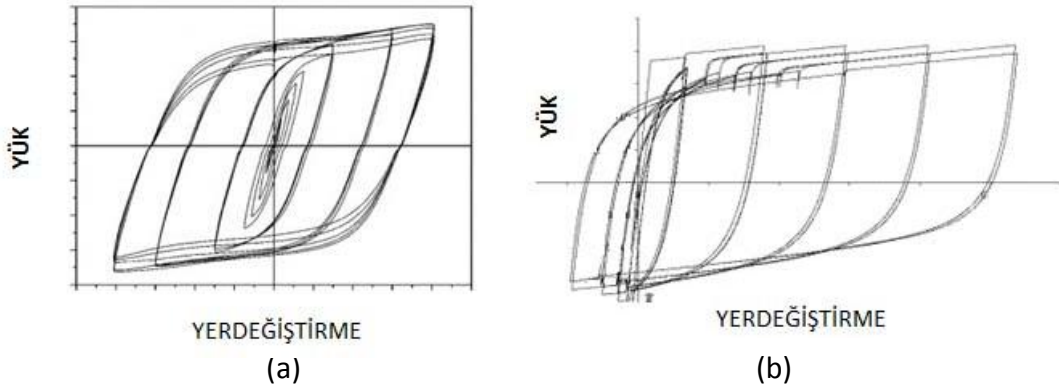
Çelik, demir ve çok az miktarda (%0.2-2.1) karbon alaşımıdır. Çeliğin en önemli özelliklerinden biri ısıtılmalara karşı duyarlı oluşudur. Çelik, bu ısıtılmalarda sonucunda; istenen mekanik ve fiziksel özellik, elektriksel özellik, korozyon ve yüksek sıcaklığa dayanım özelliklerine kavuşur. Çelik malzemenin avantajları şunlardır:

- Homojen ve izotrop bir malzemedir, mekanik özellikleri herhangi bir doğrultu boyunca değişmez.
- Dayanımı ve elastisite modülü ($E=210$ GPa) diğer malzemelere oranla çok yüksektir. Daha az ve ince kesitli elemanlar ile yapı ağırlığı azalır. Zayıf zeminler için optimum çözüm sunar.
- Burkulmanın söz konusu olmadığı durumda basınç dayanımı, çekme dayanımına eşittir (Şekil 4.5.a).
- Sünek bir malzemedir, deprem yükleri etkisinde doğrusal olmayan büyük şekilde değişimler yapabilir (Şekil 4.5).

- Elemanlar büyük ölçüde atölyede hazırlanır ve şantiyede montajı yapılır. Bu bakımdan inşa süresi kısadır, ayrıca hava koşullarından neredeyse bağımsızdır.
- Çelik yapılarda takviye ve taşıyıcı elemanların değiştirilmesi daha kolaydır.
- Bulonlu çelik yapılar başka bir yerde yeniden kurulabilir.

Çelik malzemenin maliyet arttırıcı dezavantajları şunlardır :

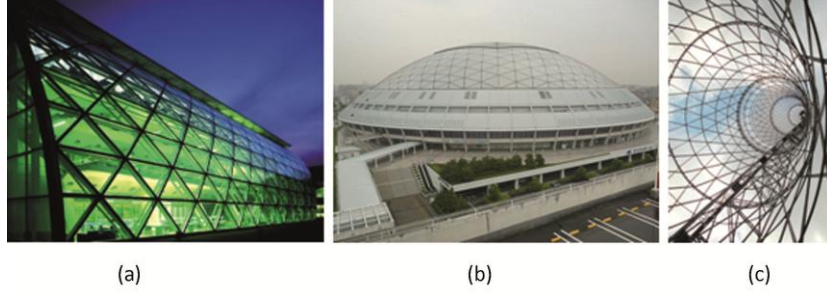
- Narin kesit özellikleri nedeni ile burkulmaya karşı hassas bir malzemedir, sünek davranış için basınç altında narinlik ($\lambda = L_e / i_{min}$) sınırlaması gereklidir (Şekil 4.5.b).
- Yüksek sıcaklıklarda mekanik büyüklüklerini hızla kaybeder, bu nedenle mutlaka yangına karşı korunması gereklidir.
- Korozyona karşı boyama veya korozyona dayanıklı çelik kullanımı gereklidir. Hem korozyon hem de yangına karşı önlem olarak püskürtme beton ile kaplanması veya kompozit beton eleman tasarımı uygun çözümlerdir.
- Ses ve ısıyı iyi iletir, yalıtım gerekebilir. Özellikle soğuk iklimlerdeki geniş açıklıklı yapılarda ısınma giderleri artar.



Şekil 4.5 (a) Narinliği düşük, (b) Narinliği yüksek çelik elemanın yükler altındaki davranışı [90]

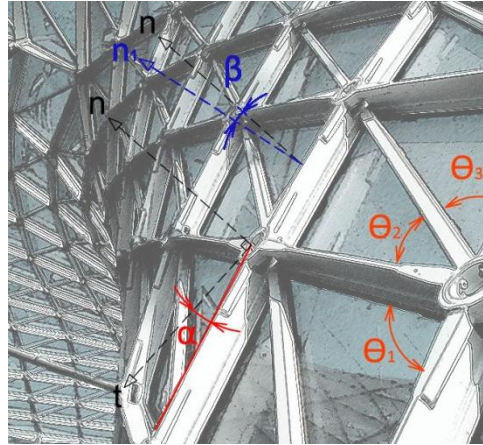
4.3 Tek tabakalı çelik uzay kafes sistemlerde birleşim sistemleri

Çelik malzemenin kullanıldığı uzay kafes sistemlerin çoğu, yüksek dayanımlı, hafif, çelik boru ya da kutu profiller ile oluşturulmuştur. Dayanım ve estetik göz önüne alınarak farklı şekillerde tasarımlar yapılmaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Faculty of Law, Cambridge, İngiltere (silindirik kabuk) (b) Nagoya Dome, Japonya (kubbe) (c) Steel Tower, Moscow (hiperbolik paraboloid) [44], [46]

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin yapım sistemleri incelendiğinde, farklı birleşim sistemleri ve açısal çözümlerler dikkati çekmektedir. Birleşimlere noktasal olarak bakıldığında, yüzeyin eğriliği (K) ve ağ (ızgara sistem) yapısına bağlı olarak, tasarımda dikkate alınacak üç tip açı (θ , α , β) mevcuttur. Söz konusu açılar en genel olarak, *serbest form*lu tek tabakalı uzay kafes tasarımı esas alınarak aktarılacaktır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Düğüm noktasındaki θ , α ve β açıları

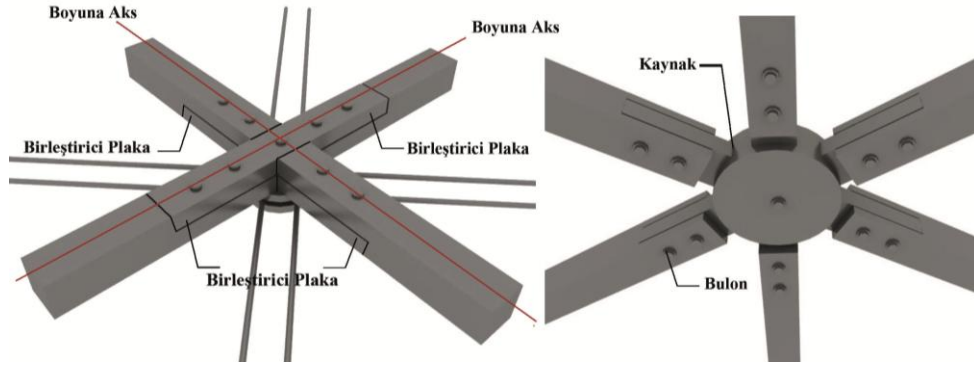
- θ açısı, düğüm noktasına birleşen iki komşu çubuk eleman arasındaki açıdır, ızgara yapısına bağlıdır. Üçgen modülasyonlu sistemdeki θ açısı, kare olana kıyasla daha küçüktür.
- α açısı, düğüm noktasının teğetinden ona birleşen çubuğun kenarına ölçülen düşey açıdır. Eğrilik azaldıkça ($K=1/r$), α açısı da azalır.
- β açısı, düğüm noktasının normali ile çubuk elemanın normali arasındaki açıdır.

Genel olarak bakıldığında, tek tabakalı uzay sistemlerde kullanılan birleşimleri sınıflandırmak ve çeşitlerini incelemek çok zordur. Çünkü geometrik özellikleri farklı

olan çok fazla yüzey bulunmaktadır, bunlar için üretilecek çok fazla birleşim detayı bulunmaktadır. Geniş açıklıklarda rijit, bazı kısa açıklıklarda ise mafsallı birleşim uygun ve ekonomik çözümler sunmaktadır. Rijit birleşimli sistemlerde; birleşimler ve çubuk elemanlar, eğilme momenti ve kesme kuvvetine de çalışmaktadır, birleşimler buna uygun biçimde tasarlanmalıdır. Kuvvetlerin aktarımı açısından bakıldığında, uçtan ekli birleşimler, ek levhali birleşimlere göre ve yüklerin aktarımı açısından daha iyi performans göstermektedir.

4.3.1 Ek levhali birleşimler

Ek levhali birleşimler; birleşim ve çubuk eleman arasında, çubukların boyuna yönde eklenen plakalar ve ara temas yüzeyindeki kayma gerilmelerini aktaracak bulonlar veya kaynak ile oluşturulur. Söz konusu birleşimler ile ilgili ilk temel kurallar, Almanya'da S. Bergermann ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (1988) [6], [91], [92]. Beş çeşit ek levhali birleşim yöntemi mevcuttur (SBP-1, SBP-2, SBP-3, HEFI-1 ve POLO-1). Tipik iki örnek Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Ek levhali birleşim türlerine örnekler

4.3.1.1 SBP-1 birleşimi

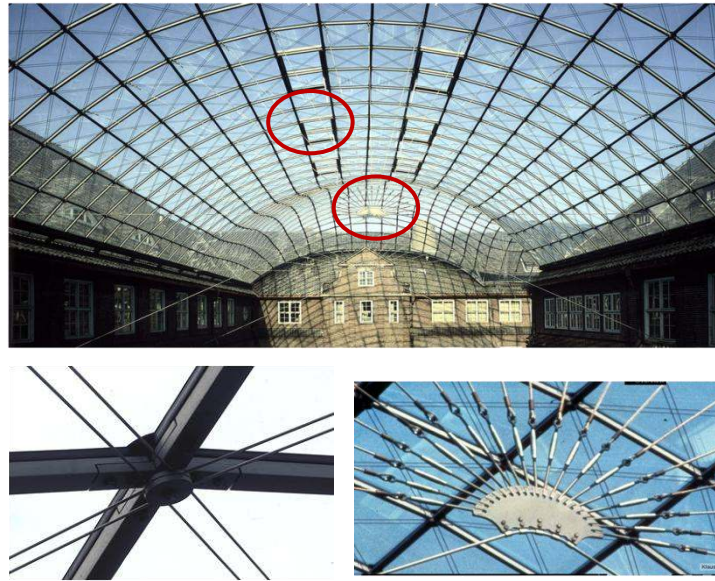
SBP-1 birleşiminde çubuk elemanlar, her iki tarafta ek levhalar ve en az ikişer bulon ile karşılıklı, tek taraftan birleştirilir. Birleşimin alt tarafında ise, iki adet disk ve diyagonal olarak düzenlenen kablolar ile onları tutan kelepçe mevcuttur. Tüm bileşenler bir bulon ile merkezde birleştirilir (Şekil 4.9) . Merkezdeki bulon, birleşen çubuklar arasındaki açıyı (θ); plakalar ise, düşey açının (α) ayarlanmasını sağlar. Ancak dönme açısında (β) esneklik yoktur. Bu birleşimin, kesit kalınlığı az ve tek ara yüzey (temas yüzeyi)

bulunduğundan, birleşim mafsallı olarak kabul edilebilir. Rijitlik diyagonal doğrultudaki kablolar ile sağlanır [91].



Şekil 4.9 SBP-1 düğüm noktası

SBP-1 birleşim ile tasarlanan en iyi örneklerden biri, Hamburg History Museum yapısının çatı taşıyıcı sistemidir (Şekil 4.10) [93], [94], [95].



Şekil 4.10 Hamburg History Museum ve çatı taşıyıcı sistem detayı [96], [5]

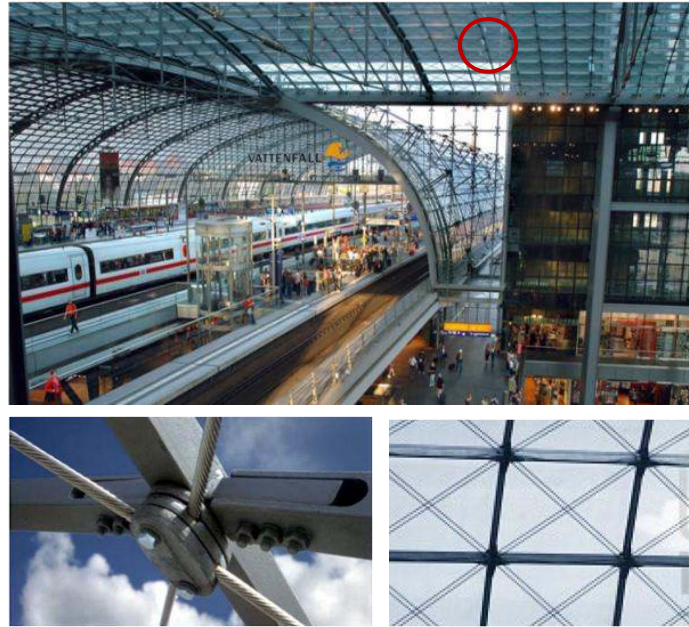
4.3.1.2 SBP-2 birleşimi

SBP-1'den farklı olarak birleşimde çift temas yüzeyi mevcuttur. Çubuk elemanlar, çatalı birleşen ek levhaları ve en az ikişer bulon ile karşılıklı birleştirilir. Birleşimin alt tarafında ise, üç adet disk ve diyagonal olarak düzenlenen kablo-kelepçe sistemi mevcuttur (Şekil 4.11). Açılabilirlik düzeyleri SBP-1 deki gibidir. Birleşim, ortalama düzeyde eğilme momentlerini aktarabilir [91], [97].



Şekil 4.11 SBP-2 düğüm noktası

SBP-2 birleşimi kullanılarak tasarlanmış yapı örneklerinden biri de Berlin Central Station yapısının çatı taşıyıcı sistemidir (Şekil 4.12) [97].

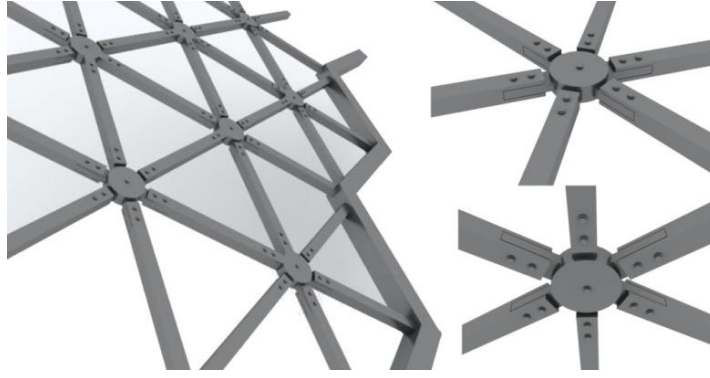


Şekil 4.12 Berlin Central Station ve çatı detayı [98],[99]

4.3.1.3 SBP-3 birleşimi

SBP-3 birleşimi S.Bergermann tarafından geliştirilmiştir (1996). Bu birleşimde, çatallı birleşimi sağlayacak masif plakalar mevcuttur. Çubuk elemanlar, iki ya da daha fazla bulon ile sisteme çatallı birleşir (Şekil 4.13) . Çatal birleşimli plakalar, birleşen çubuklar arasındaki açının (θ), düşey açının (α) ve dönme açısının (β) ayarlanmasını sağlar. Birleşim, eğilme momentlerini aktarır [95], [100].

SBP-3 Birleşimi DZ Bank yapısının çatı taşıyıcı sisteminde kullanılmıştır (Şekil 4.14).



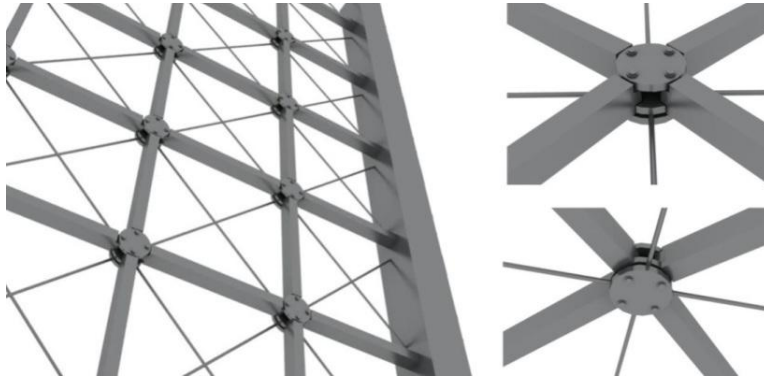
Şekil 4.13 SBP-3 düğüm noktası



Şekil 4.14 DZ Bank ve çatı detayı, Berlin [42]

4.3.1.4 HEFI-1 birleşimi

HEFI-1 birleşimi, Helmut Fischer tarafından Almanya’da geliştirilmiştir (1999). Birleşim iki adet dairesel plakadan meydana gelir. Bu plaka üzerinde çubuk elemanların birleşeceği kablo destekli dairesel yiv mevcuttur. Çubuk eleman ve dairesel plakadan oluşan dişi ve erkek birleşim, bulonlar ile sabitleştirilerek sisteme yerleştirilir (Şekil 4.15). Dairesel plaka üzerindeki bulonlar, birleşen çubuklar arasındaki açığı (θ); dairesel plakalar ise, düşey açının (α) ayarlanmasını sağlar. Dönme açısı (β), sistemin geometrisine bağlı olarak ayarlanır. Rijitlik, çubuk elemanlara 45° açıda yer alan kablolar ile sağlanır. Birleşim, eğilme momentlerini aktarabilir [101], [95].



Şekil 4.15 HEFI-1 Düğüm noktası [91]

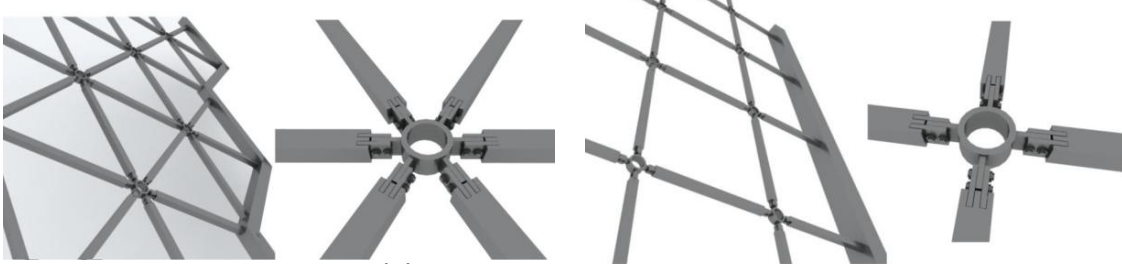
HEFI-1 birleşimi Berlin’de Hippo Houses yapısı çatı taşıyıcı sisteminde kullanılmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Hippo Houses ve çatı detayı, Berlin [102]

4.3.1.5 POLO-1 birleşimi

POLO-1 birleşimi, Polonyi ve Fink tarafından Almanya’da geliştirilmiştir. Birleşimde, içi boş silindirik ya da prizmatik çelik boru ve üzerinde boruya kaynaklı altı adet düşey plaka yer almaktadır. Çubuk elemanlar, plakalara iki ya da daha fazla bulon ile çatallı birleşim ile bağlanır. İsteğe bağlı olarak bu çatallı birleşim kulplu birleşim olarak da yapılabilir. (Şekil 4.17) . İçi boş çelik boruya bağlı plakalar, birleşen çubuklar arasındaki açığı (θ); bulonlar ise, düşey açının (α) ayarlanmasını sağlar. Dönme açısı (β), sistemin geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Bu sistemde önemli eğilme momenti aktarımı mümkündür [103].



Şekil 4.17 POLO–1 düğüm noktası

POLO-1 birleşimi Cologne Train Station yapısının çatı taşıyıcı sisteminde kullanılmıştır (Şekil 4.18).



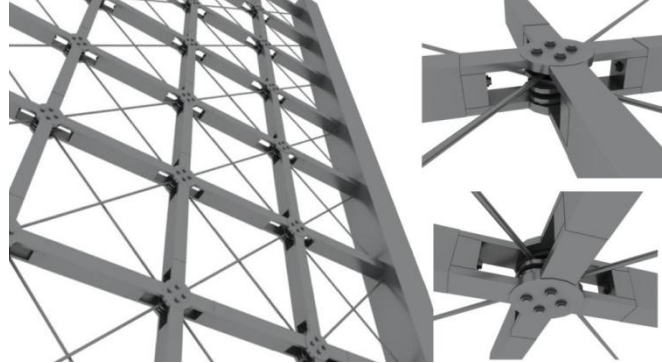
Şekil 4.18 Cologne Train Station [104]

4.3.2 Uçtan ekli birleşimler

Uçtan ekli birleşimler, birleşim ve çubuk eleman arasında, çubukların boyuna yönde eklenen plakalar ve ara temas yüzeyindeki kayma gerilmelerini aktaracak bulonlar veya kaynak ile oluşturulur [95]. Yedi çeşit uçtan ekli birleşim yöntemi bulunmaktadır (SBP-4, WABI-1, OCTA-1, MERO-1, MERO-2, MERO-3 ve MERO-4).

4.3.2.1 SBP-4 birleşimi

SBP-4 birleşimi, Schlaich Bergermann tarafından Almanya’da geliştirilmiştir. Birleşim, birbirine kaynaklanmış iki adet dairesel plaka ve çubuk elemanları uç uca kaynaklandığı dört adet plakadan meydana gelir. Yapım aşamasında, yapı elemanları sisteme bulonlu olarak birleştirilir. Dairesel plaka arasındaki boşluk içinde, dört adet bulon ile kablo destekli kelepçe, sistemin en üst noktasına bağlanır (Şekil 4.19) . Dairesel plaka üzerine kaynaklı plakalar, birleşen çubuklar arasındaki açığı (θ) ve düşey açının (α) ayarlanmasını sağlar. Dönme açısı (β), sistemin geometrisine bağlı olarak ayarlanır. Sistem büyük eğilme momenti aktarabilir [95].



Şekil 4.19 SBP-4 düğüm noktası

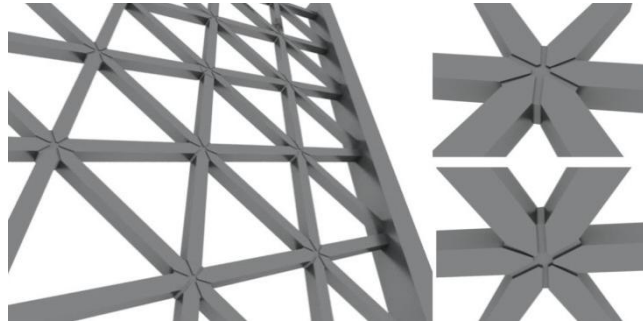
SBP-4 Birleşimi, Annexe German Historical Museum yapısının çatı taşıyıcı sisteminde kullanılmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 Annexe German Historical Museum ve çatı detayı, Berlin [105], [106]

4.3.2.2 WABI-1 birleşimi

WABI-1 birleşimi, Waagner-Biro tarafından Avusturya’da geliştirilmiştir. Sistem beş ya da altı koldan oluşur. Çubuk elemanlarının uçtan ekli birleşim yüzeyleri, çift açığa sahiptir ve bunlar kalın plakayı kesmektedir. Merkezdeki kalın plaka, çubuk elemanlarının kesit yüksekliğinden daha azdır. Üst ve alt yüzeyler kenar kaynaklı birleştirilirken, kenar yüzeyler uç uca kaynaklı birleştirilir (Şekil 4.21) . Birleşen çubuklar arasındaki açı (θ), düşey açı (α) ve dönme açısı (β), kaynaklama yöntemi ile sistemin geometrisine bağlı olarak ayarlanır. Birleşim, büyük eğilme momentlerini aktarabilir [107], [108]. Proje kapsamında oluşturulan kubbe sistemlerde WABI-1 birleşim sistemi kullanılmıştır.



Şekil 4.21 WABI-1 düğüm noktası

WABI-1 Birleşimi, Londra’daki British Museum yapısının çatı taşıyıcı sisteminde kullanılmıştır (Şekil 4.22).

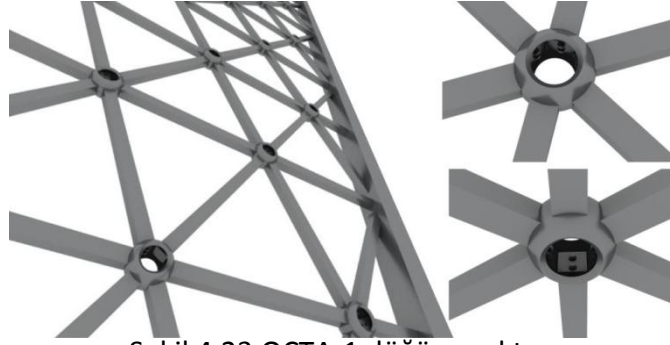


Şekil 4.22 British Museum ve çatı detayı, Londra [109], [110]

4.3.2.3 OCTA-1 birleşimi

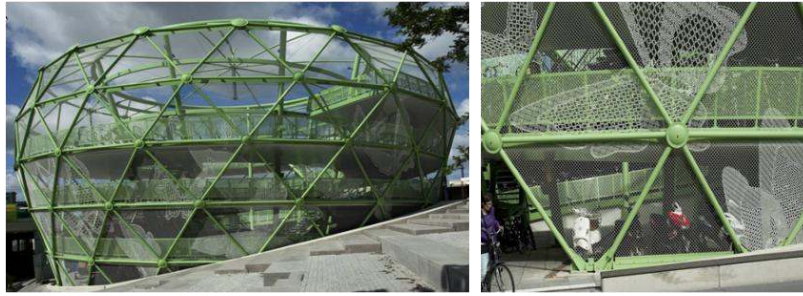
OCTA-1 birleşimi, Octatube Space Structures BV firması tarafından Hollanda’da geliştirilmiştir. Birleşim, alt ve üst tarafı kesilmiş küre kullanılarak yapılmıştır. Yapı elemanları iç kısmı oyuk küreye iki adet bulon ile birleştirilir (Şekil 4.23). Birleşen

çubuklar arasındaki açı (θ), düşey açı (α) ve dönme açısı (β), bulonlar ile ayarlanır. Birleşim, eğilme momentlerini aktarabilir [111].



Şekil 4.23 OCTA-1 düğüm noktası

OCTA-1 Birleşimi, Netherlands'daki Fietsappel yapısının çatı taşıyıcı sisteminde kullanılmıştır (Şekil 4.24) [112].



Şekil 4.24 Fietsappel, Bicycle Apple yapısı ve detayı, Netherlands [112]

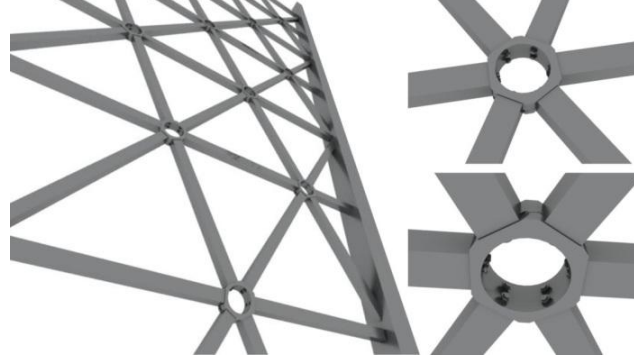
4.3.2.4 MERO-PLUS birleşimleri

MERO GmbH firması 1994 yılında Almanya'da tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan Mero-Plus sistemlerini geliştirmiştir [27]. MERO sistemleri çift tabakalı uzay kafes sistemler için mafsallı olarak geliştirilmesine rağmen, tek tabakalı uzay kafes sistemlere özel bu sistemlerde eksenel kuvvetlerin yanında oluşan eğilme momentlerini de aktarabilmek amacı ile yeniden tasarlanmıştır [113].

MERO-1 birleşimi (ZK tipi)

Mero-Plus sistemlerinden biri olan MERO-1 birleşim sistemi, içi boş silindir şeklindedir. Çubuk elemanları boşluklu silindirin iç tarafından iki adet bulon ile birleşir (Şekil 4.25). Birleşen çubuklar arasındaki açı (θ), düşey açı (α) ve dönme açısı (β), bulonlar ile ayarlanır [91]. Düşey açılar (α), 30°- 100°, yatay açılar (θ) ise 0° - 10° arasında

yerleştirilir. Bu sistem, tek tabakalı sistemlerde rijit birleşim için kullanılmaktadır [1]. MERO-1 birleşim sistemi, eğilme momenti aktaran bir birleşimdir [27].



Şekil 4.25 MERO-1 düğüm noktası

ZK tipi birleşimi, Las Vegas'taki The Mirana Hotel, Casino yapısının çatı taşıyıcı sisteminde kullanılmıştır (Şekil 4.26).

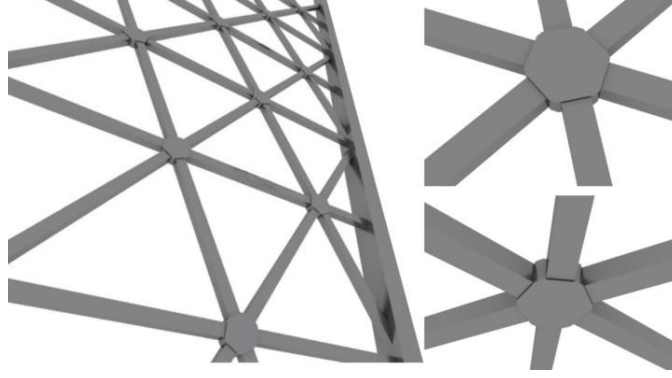


Şekil 4.26 The Mirana Hotel, Casino, Las Vegas [114]

MERO-2 birleşimi (BK tipi)

Diğer Mero-Plus sistemlerinden birisi de MERO-2 birleşimidir. Çubuk elemanlar, bir ya da iki bulon ile kalın kütleye içeriden birleştirilir, fakat istenildiği takdirde sisteme kaynaklı olarak da birleşebilir. θ , α ve β açıları, bulonlar ile ayarlanır [27]. Düşey açılar (α) 70° - 120° arasında, yatay açılar (θ) ise, 10° ile sisteme yerleştirilir. Bu sistem, tek ya da çift eğrilikli sistemlerde kaynaklı ya da bulonlu olarak birleştirilebilir. MERO-2 sistemi basit geometriye sahip, kısa açıklık geçilmek istenen yapılarda daha çok tercih edilmektedir (Şekil 4.27) [1]. MERO-1 sisteminde olduğu gibi eğilme momenti aktaran sistemdir [91]. Kaynaklı uçtan ekli tipi, büyük eğilme momentleri aktarabilir.

MERO-2 sistemi ile tasarlanmış yapı örneklerinden biri, Bugis Junction yapısıdır (Şekil 4.28).



Şekil 4.27 MERO-2 birleşimi

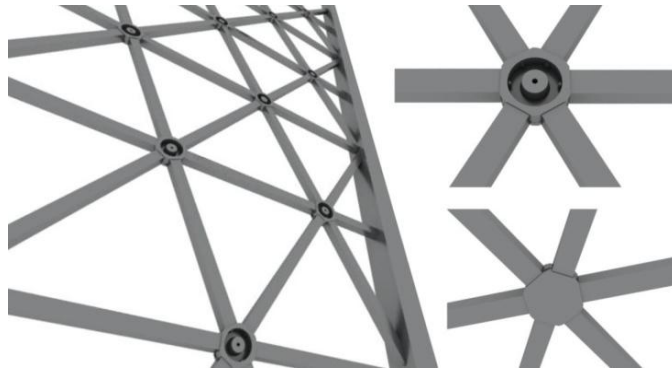


Şekil 4.28 Bugis Junction, Singapur [114]

MERO-3 birleşimi (TK tipi)

MERO-3 birleşimi, alt tarafı kapalı silindirden meydana gelir. Çubuk elemanlar, yalnızca bir adet bulon ile düğüm noktasına bağlanır (Şekil 4.29) . θ , α ve β açıları, bulonlar ile ayarlanır [115]. Düşey açılar (α), 30° - 80° , yatay açılar, (θ) 0° - 10° arasında yerleşmektedir. Bu sistem tek tabakalı uzay kafes sistemlerde, mafsallı birleşim için uygundur [1]. Eğilme kapasitesi diğer Mero birleşim tiplerine göre daha azdır [91].

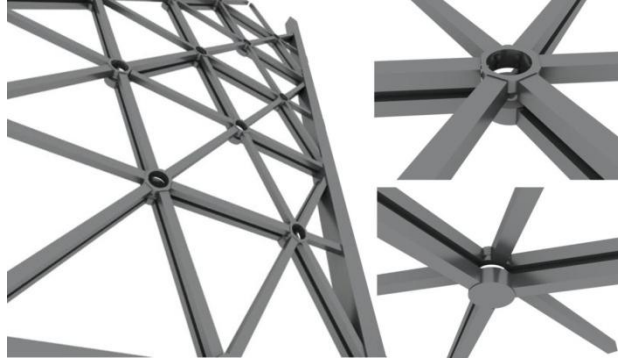
TK tipi birleşim sistemi çoğunlukla çift tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan NK tipi birleşim sistemiyle kullanılmaktadır (Ayrıca Bkz. EK-1.7.1.7).



Şekil 4.29 MERO-3 (TK Tipi) düğüm noktası

MERO-4 birleşimi

MERO-4 birleşimi, serbest formlu çatı taşıyıcı sistemleri için İtalya'da geliştirilmiştir [116]. İki katlı bir birleşimdir. Birincisi, sistemin üstündeki çubuk elemanları, diğeri ise sistemin altındaki çubuk elemanlarının birleşimi için oluşturulmuştur. Yapı elemanları sisteme bulonlu ya da kaynaklı olarak birleştirilir (Şekil 4.30). θ , α ve β açıları, sistemin geometrisine bağlı olarak ayarlanır. MERO-4 birleşimin diğeri türü, iki farklı düğüm noktası arasına kablo destekli kelepçelerle birleştirme yöntemidir. Kablo kelepçeler merkezde bir adet bulon ile sistemin üst noktasında birleştirilir [91]. Kaynaklı birleştirilen tipi büyük eğilme momentleri aktarabilir. MERO-4 sistemi kullanarak tasarlanmış yapı örneklerinden biri, İtalya'daki New Milano Fair yapısıdır (Şekil 4.31).



Şekil 4.30 MERO-4 düğüm noktası



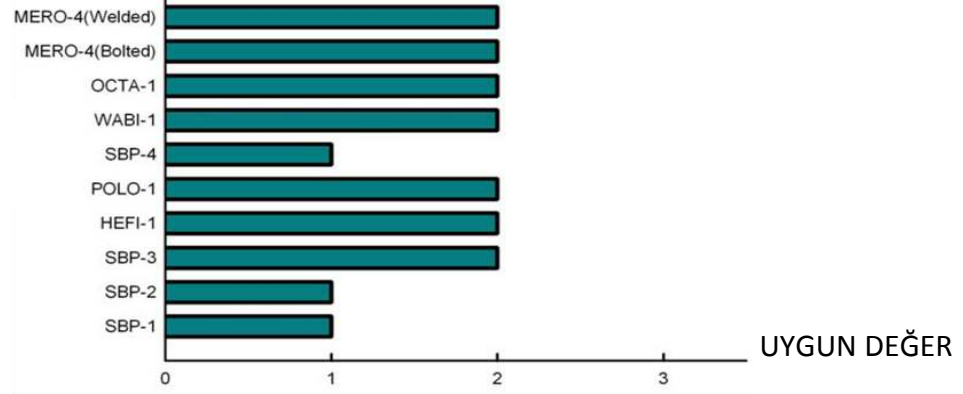
Şekil 4.31 New Milano Fair, İtalya [117], [118]

Birleşim sistemlerinin uygunluk düzeyi Çizelge 4.1'de topluca verilmiştir.

Çizelge 4.1 Mero birleşim sistemleri serbest yüzeylerde düğüm noktalarının uygulanabilirliği [91]

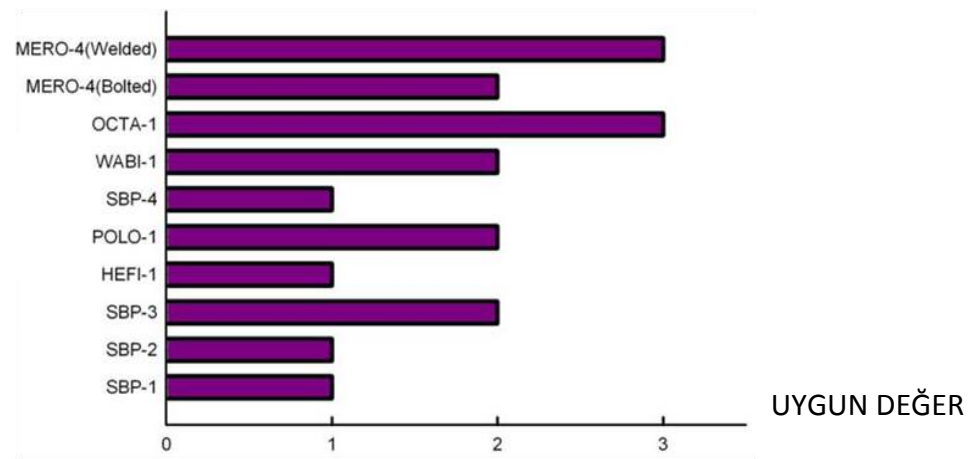
Birleşim Sistemi		Açıların Yerleşimi			Kuvvet Aktarımı	Uygulama Sınırları	
Tür	Birleşim	Yatay Açı θ	Düşey Açı α	Dönme Açı β	Normal Kuvvet	Eğilme Momenti	Yapı Türü
SBP-1	Bulonlu Ek levhalı	+	+	0	+	0	GU-YU
SBP-2	Bulonlu Ek levhalı	+	+	0	++	+	GU-YU
SBP-3	Bulonlu Ek levhalı	++	++	++	++	++	GUD-YUD
HEFI-1	Bulonlu Ek levhalı	++	+	+	++	++	GU-YU
POLO-1	Bulonlu Ek levhalı	++	++	++	++	++	GUD-YUD
SBP-4	Kaynaklı Uçtan Ekli	+	+	0	+++	+++	GU-YUD
WABI-1	Kaynaklı Uçtan Ekli	++	++	+	+++	+++	GUD-YUD
OCTA-1	Bulonlu Uçtan Ekli	++	+++	++	++	++	GUD-YUD
MERO-1	Bulonlu Uçtan Ekli	++	++	+	++	++	GU-YUD
MERO-2	Bulonlu Uçtan Ekli	++	+++	++	++	++	GUD-YU
	Kaynaklı Uçtan Ekli	++	+++	++	+++	+++	GUD-YUD
MERO-3	Bulonlu Uçtan Ekli	++	++	++	++	+	GUD-YU
	Kaynaklı Uçtan Ekli	++	+++	++	++	++	GUD-YUD
MERO-4	Bulonlu Uçtan Ekli	++	++	+	++	++	GUD-YUD
	Kaynaklı Uçtan Ekli	++	+++	++	+++	+++	GUD-YUD
0 : Sınırlı Uyum + : Orta düzey Uyum ++ : İyi Uyum +++ : Mükemmel Uyum GU: Geometrik olarak uygun hale getirilmiş yüzeyler GUD: Geometrik olarak uygun hale getirilmemiş yüzeyler YU: Yapısal olarak uygun hale getirilmiş yüzeyler YUD: Yapısal olarak uygun hale getirilmemiş yüzeyler							

BİRLEŞİM TİPİ



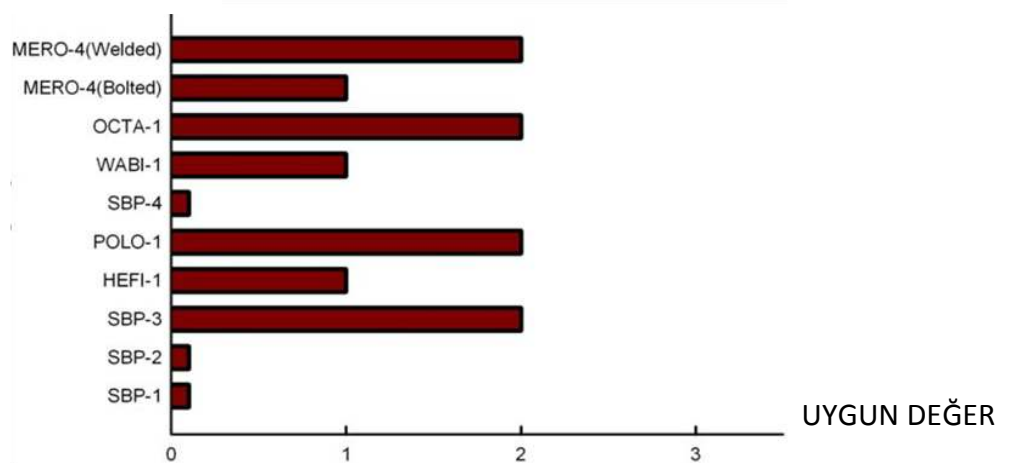
Şekil 4.32 Düşey açılarının adaptasyonu [91]

BİRLEŞİM TİPİ



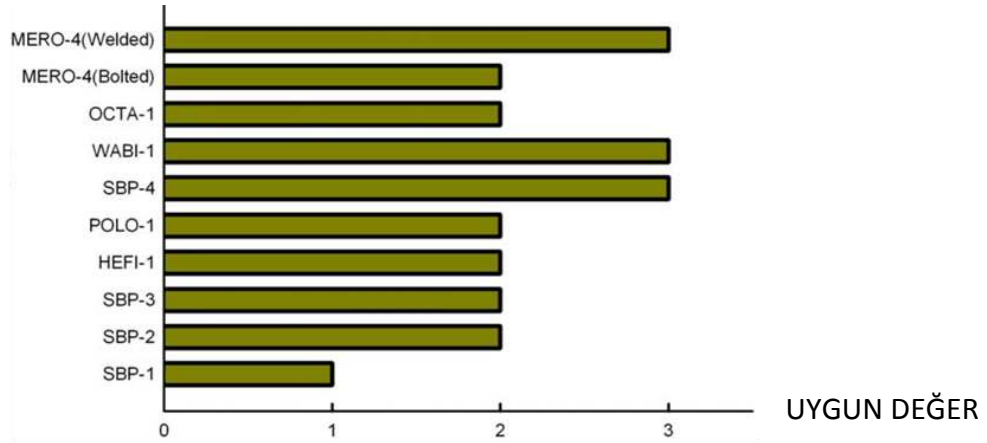
Şekil 4.33 Yatay açılarının adaptasyonu [91]

BİRLEŞİM TİPİ



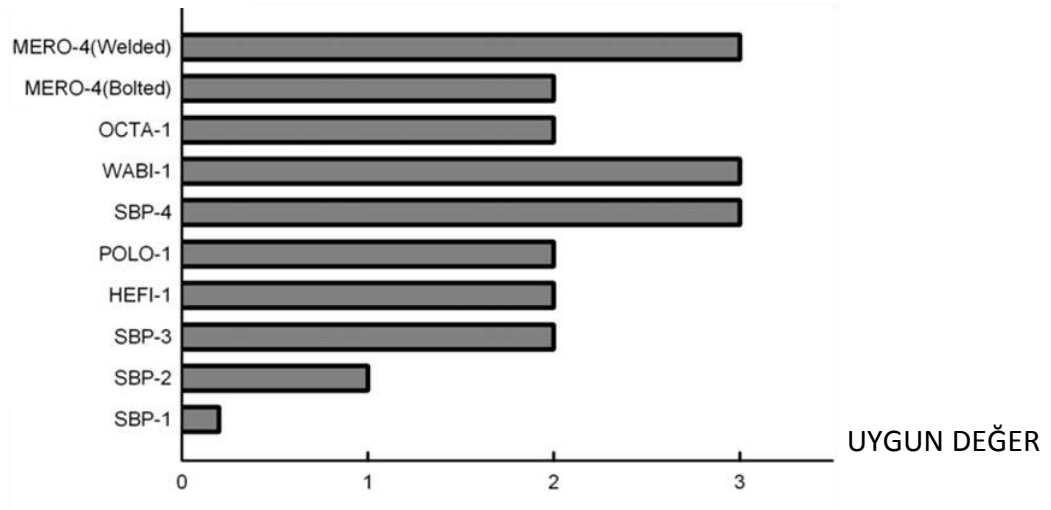
Şekil 4.34 Dönme açıları'nın adaptasyonu [91]

BİRLEŞİM TİPİ



Şekil 4.35 Eksenel Kuvvet Aktarımı [91]

BİRLEŞİM TİPİ



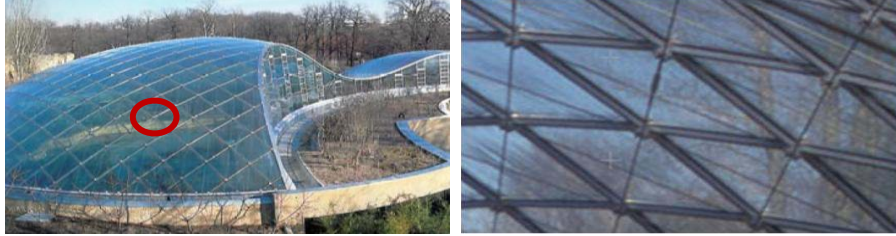
Şekil 4.36 Eğilme Momenti Aktarımı [91]

4.4 Bazı birleşim sistemleri üzerine deneysel ve teorik çalışmalar

HEFI-1 ve SBP-3 birleşimleri üzerinde iki deneysel ve teorik çalışma gerçekleştirilmiştir [6]. İki çalışmada aşağıdaki ortak özellikler dikkate alınmıştır:

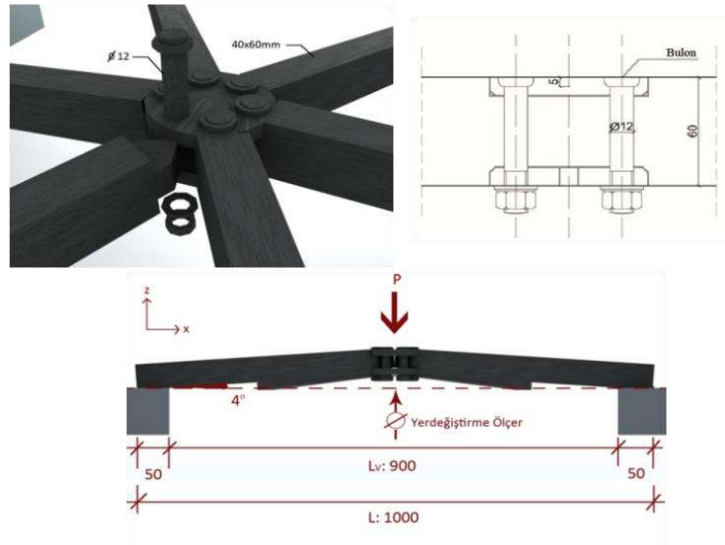
Birleşimde gömme, silindir başlıklı bulonlar kullanılmıştır, bulon ile delik arasındaki boşluk 0.1 mm'dir. Çeliğin poisson oranı 0.3 alınmıştır. Dairesel plakalar ile çubuk elemanlar arasındaki sürtünme katsayısı ve bulon yüzeyi ile bulon deliği arasındaki sürtünme katsayısı 0.3 olarak tanımlanmıştır.

HEFI-1 birleşimi (Bölüm 4.3.1.4), Berlin Hayvanat Bahçesi'ndeki bir yerleşim birimi çatı sisteminin birleşimleri bazında deneysel olarak incelenmiş (1993) ve daha sonra araştırma amaçlı olarak sonlu elemanlar ile modellenmiştir (Şekil 4.37) (ANSYS, 2009) [119], [6].



Şekil 4.37 The hippopotami house yapısında kullanılan HEFI-1 birleşimi [102], [95]

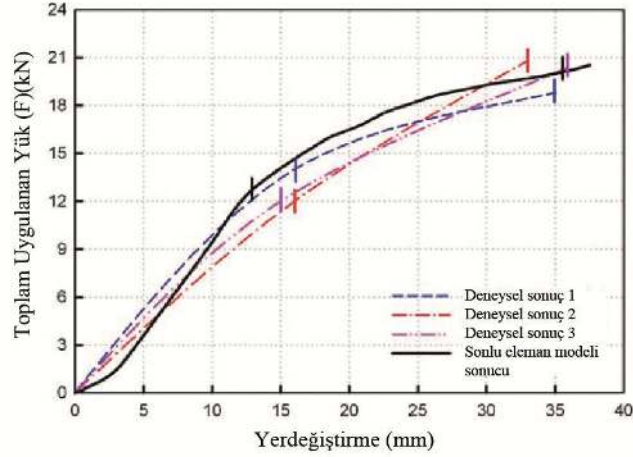
40x60 mm kutu kesitli, 500 mm uzunluğunda altı adet çubuğun iki dairesel plaka ($D_t=10$ mm, $D_p=100$ mm) ile yıldız biçimli HEFI-1 tipi düğüm noktasına birleşim detayı şematik olarak Şekil 4.38'de verilmiştir. Orta nokta ile mesnet arasında 4° eğim farkı mevcuttur (Şekil 4.38).



Şekil 4.38 HEFI-1 birleşimi yükleme ve mesnet koşulları şematik çizimi [6]

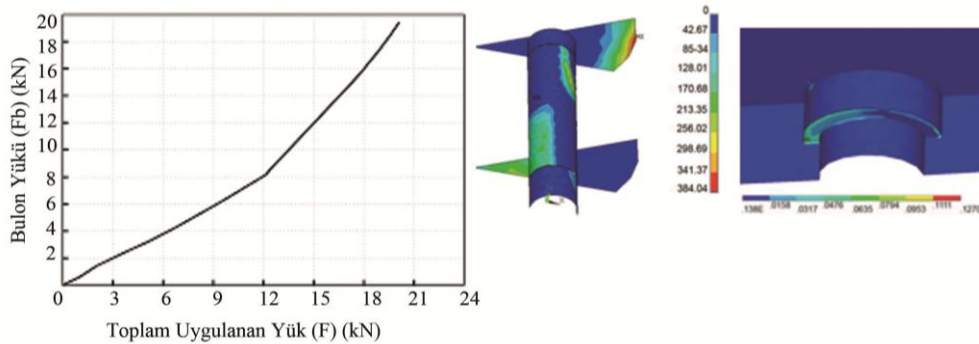
Birleşimde DIN EN ISO 4762 10.9 sınıfı M12 bulonu (gömme, silindir başlıklı) kullanılmıştır. Çubuk elemanlar ve dairesel plaka DIN EN 10025'a göre boyutlandırılmıştır (akma dayanımı 355 MPa). Çeliğin elastisite modülü 210 GPa, tüm bileşenlerin gerilme-şekildeğiştirme diyagramı doğrusal elastik-pekleşen plastik olarak tanımlanmıştır.

Yüksek dayanımlı bulonun şekildeğiştirme kapasitesi (% 5-6), plakadan (% 25-30) çok daha düşüktür. Bulonda olası göçme durumları çekme kırılması, bulon veya somunun sökülmesidir. Tasarımda somun sökülmesi, bulonda çekme kırılması oluşmadan meydana gelmeyecek şekilde planlanmıştır. Deney sonuçlarına göre yük-yerdeğiştirme eğrisi, göçme yükünün %50'sine kadar lineer-elastik davranış göstermiştir (Şekil 4.39).



Şekil 4.39 Deneyel yük-yerdeğiştirme eğrisi [6]¹

Bulon maksimum gerilme düzeyine ulaştığında (1000 MPa), çubuk uç kısmı ve dairesel plakadaki gerilme düzeyi, maks. gerilme sınırlarına (sırası ile 423 ve 587 MPa) çok yakın gerçekleşmiştir (Şekil 4.40). Bulon dayanımı maks. düzeye ulaştığında, çubuk uç bölgesindeki maksimum plastik şekildeğiştirme düzeyi % 13 olup, dairesel plakada göçme başlangıcına karşı gelir. Dairesel plakalar ile çubuklar arasında yük aktarımı bulonların kayma dayanımı ile gerçekleşmektedir. Bu deney ve teorik analizlerde, ayrıca, dairesel plakaların dayanımı ve kuvvetlerin aktarılmasındaki önemini ortaya konulmuştur.



Şekil 4.40 Uygulanan toplam yük düzeyinde bulon yükü düzeyi ve sonlu eleman yöntemi ile (ANSYS) bulonda gerilme yayılımı [6]

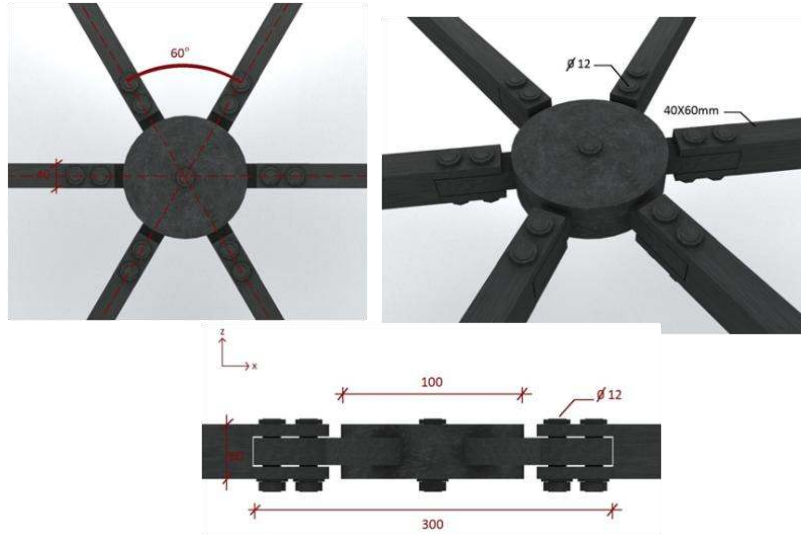
¹Not: [6] kaynağında söz konusu 3 deneyin farklılıkları üzerine ayrıntılı bilgi verilmemiştir.

SBP-3 birleşimi, DZ Bank'ın (1996, Berlin) çatı taşıyıcı sisteminde kullanılmıştır. Düğüm noktası deneysel olarak incelenmiş ve daha sonra araştırma amaçlı olarak sonlu elemanlar ile modellenmiştir (Şekil 4.41) (ANSYS, 2009) [91].



Şekil 4.41 DZ Bank yapısının taşıyıcı sisteminde kullanılmış SBP-3 birleşimi [119]

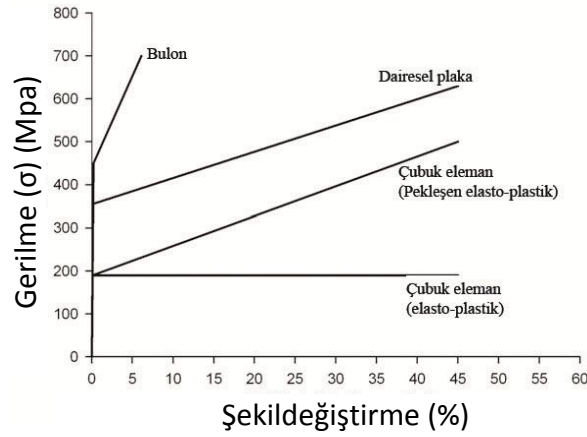
40x60 mm kutu kesitli, 1300 mm uzunluğunda altı adet çubuğun dairesel plaka ($D_p=100$ mm) ile SBP-3 tipi düğüm noktasına birleşim detayı şematik olarak şekil 4.42'de verilmiştir. Çubuk elemanlar sisteme 60° açı ile birleşmektedir [6].



Şekil 4.42 SBP-3 birleşimi yükleme ve mesnet koşulları şematik çizimi

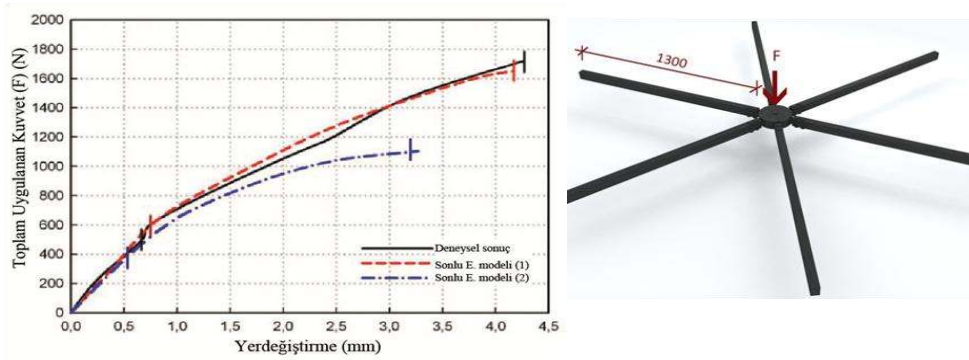
Birleşim elemanı malzemesi, bulonlar ve birleşen çubuklar paslanmaz çelik olarak seçilmiştir. Akma dayanımlar sırası ile 355, 450¹ ve 190 MPa'dır. Birleşimde A4-70 (DIN EN ISO 3506-1) M12 tipi paslanmaz çelik bulon (gömme, silindir başlıklı) kullanılmıştır, maks. dayanım düzeyi 700 MPa'dır. Çubuk elemanlar ve dairesel plakalar DIN EN 10088-1'e göre boyutlandırılmış, elastisite modülü 200 GPa olarak tanımlanmıştır [120].

¹%0.2 şekildeğiştirme düzeyine karşı gelen gerilmedir.



Şekil 4.43 Çubuk, bulon ve dairesel plakanın gerilme-şekildeğiştirme diyagramı [119]

Şekil 4.44'te görüldüğü gibi, kuvvet, düğüm noktasının ortasına uygulanmıştır, hareketli mesnete olan mesafe 1300 mm'dir. Çubuk elemanlar için, elasto plastik (1 modeli) ve pekleşen elasto plastik (2 modeli) olmak üzere iki tip davranış esas alınmıştır [120]. Paslanmaz çeliğin belirgin biçimde pekleşme özelliği mevcuttur.

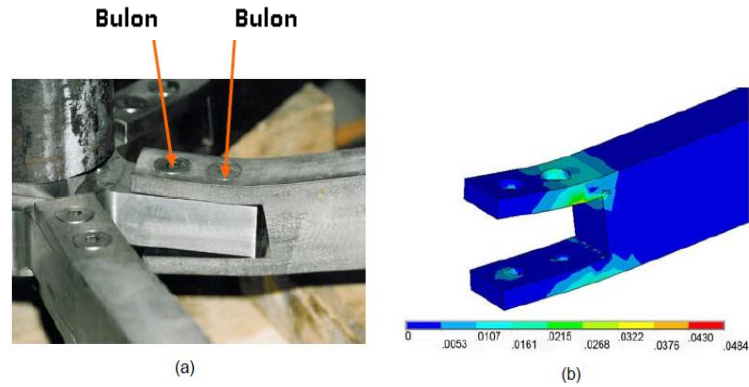


Şekil 4.44 Yük-yerdeğiştirme eğrisi ve SBP-3 düğüm noktasında kuvvet gösterimi¹ [6]

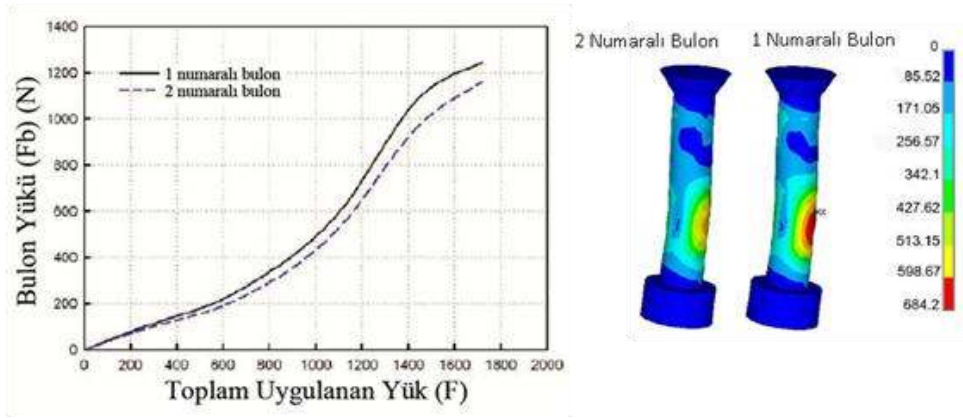
Elasto plastik davranış kabulü ile elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrisi, beklendiği gibi, pekleşen elasto plastik malzeme kabulüne göre daha düşük rijitlik ve yük taşıma kapasitesine sahiptir. Çünkü pekleşen elasto plastik malzemede dayanım artmaya devam ederken, diğerinde çelik dayanımı plato bölgesine varmıştır. Göçme, önce çubukların uçlarındaki plastik mafsall oluşumu (Şekil 4.45), takiben bulonların çekme ve kayma gerilmeleri etkisi ile maks. dayanımına ulaşması ile oluşur. Bulonlar 700 MPa'lık maks. dayanım düzeyine ulaştığında, şekildeğiştirme %5 ile maks. düzeyindedir [6]. Şekil 4.46'da toplam uygulanan yük ve iki bulondaki yük artışı gösterilmiştir. 1 nolu

¹Sonlu E. modeli 1: Pekleşen elasto plastik malzeme, Sonlu E. modeli 2: Elasto plastik malzeme

bulon, 2 nolu bulona kıyasla daha fazla zorlanmıştır. Şekil 4.46'da bulonların sürtünme yüzeyi boyunca gerilmelerdeki değişim görülmektedir.



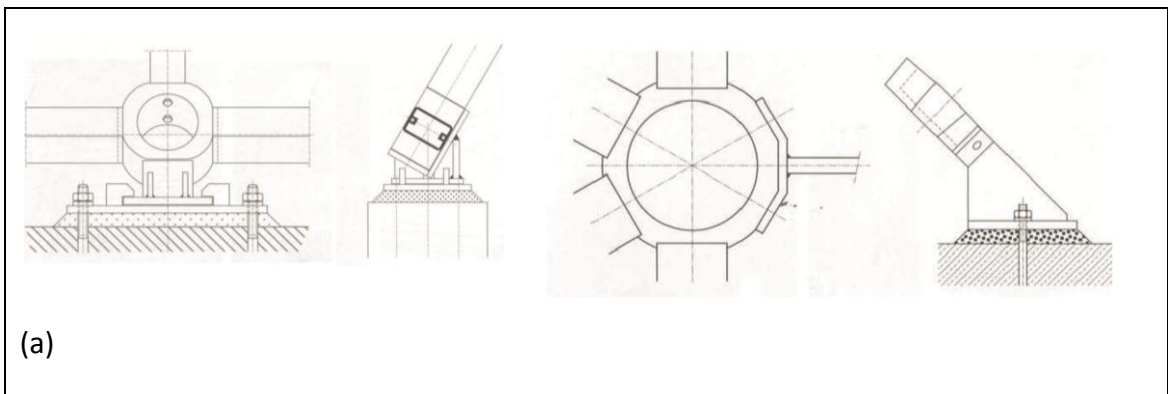
Şekil 4.45 Göçme durumunda kiriş ucundaki (a) deformasyon (b) gerilme yayılımı (Toplam yük 1670 N) [6]

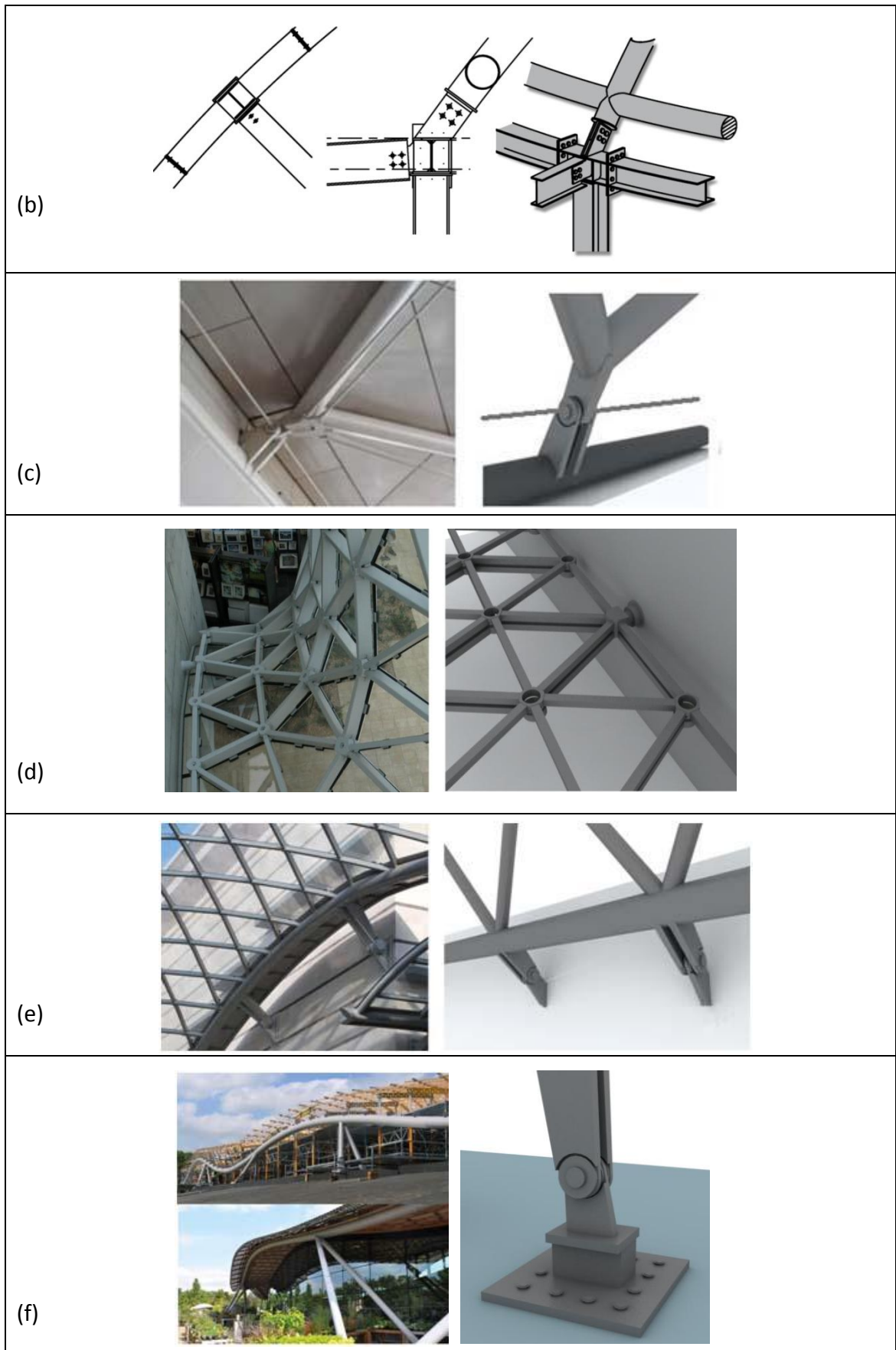


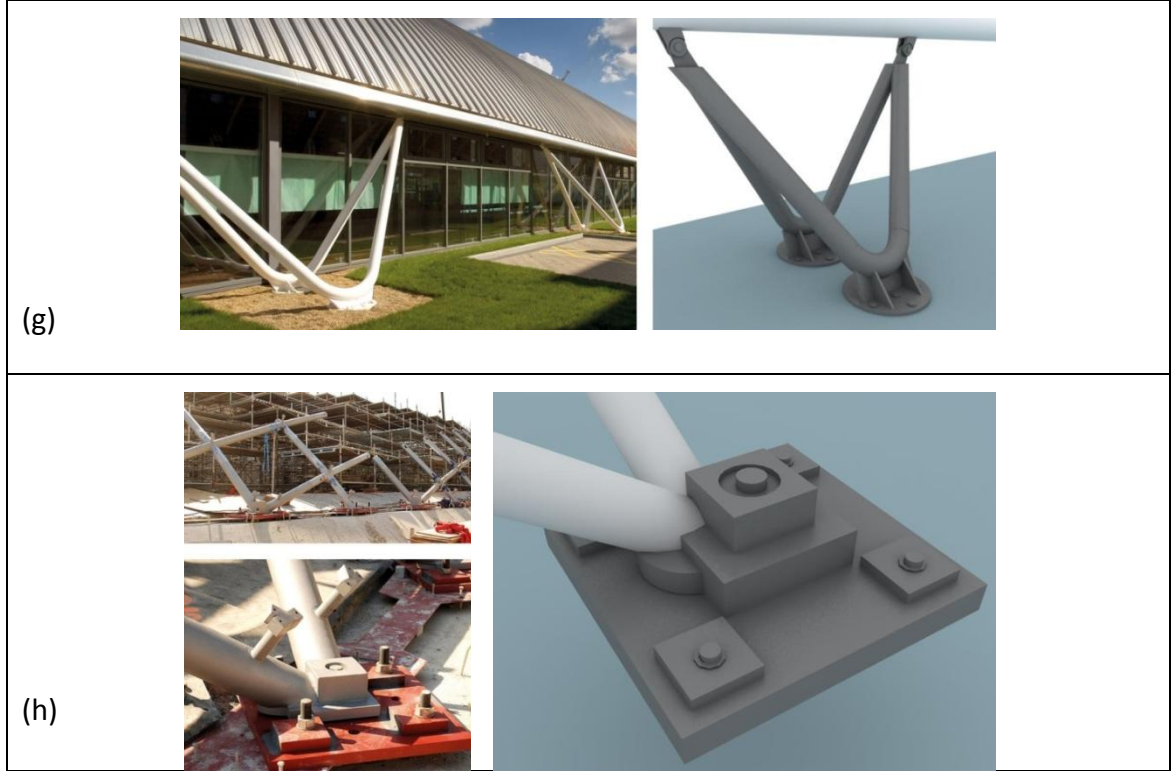
Şekil 4.46 Bulon yükleri ve göçme durumu gerilme karşılaştırması (Von Mises) [6]

4.5 Tek tabakalı çelik uzay kafes sistemlerde mesnet birleşimleri

Şekil 4.47'de tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan bazı mesnet detayları görülmektedir.







Şekil 4.47 Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan bazı mesnet detayları

(a)- Mero sistem detayları, (b)- Serdivan Belediyesi Hizmet Binası kubbe mesnet detayı, (c)- Atatürk Havalimanı çatı örtüsü detayı, (d)- Milan Fair mesnet detayı, (e)- Cabot Circus çatı detayı (f)- Savill Garden mesnet detayı, (g)- Silindirik kabuk mesnet detayı, (h)- Mansueto Library mesnet detayı [121], [114], [122], [123], [124]

4.6 Tek tabakalı çelik uzay kafes sistemler ve stabilite

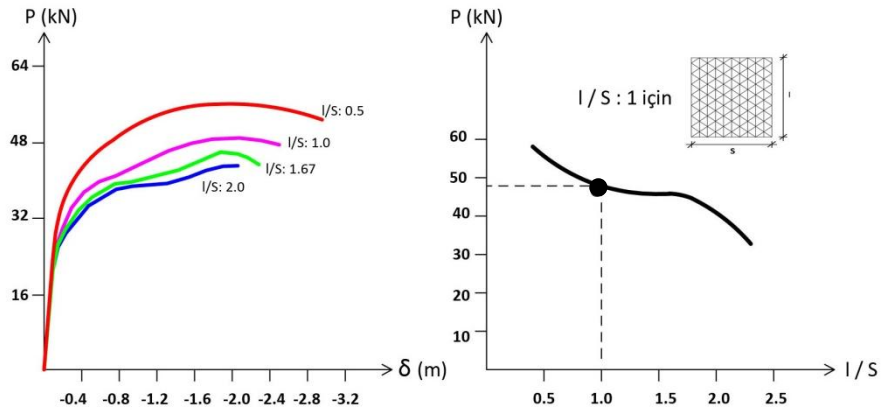
Tek tabakalı uzay kafes sistemler, doğru eksenli çekme ve basınç çubuklarından oluşur. Basınç elemanları burkulmaya kadar, çekme elemanları akma gerilmesine kadar doğrusal elastik davranış gösterir. Basınç elemanlarındaki gerilme düzeyi, ani burkulma riskine karşı , akma gerilmesi düzeyinin yarısından az olmalıdır [45]. Çekme elemanları ve birleşimleri çatlak/kopma oluşmadan akma gerilmesine ulaşabilmelidir. Geometrik açıdan doğrusal olmayan davranış, malzeme açısından doğrusal olmayan davranış veya iki bakımdan da doğrusal olmayan davranış dikkate alınabilir.

Çeliğin kullanıldığı tek tabakalı silindirik kabuklar ve kubbe sistemler üzerine yapılmış araştırmaların sonuçları Bölüm 4.6.1 ve 4.6.2’de aktarılacaktır.

4.6.1 Tek tabakalı çelik silindirik kabuklar

Tek tabakalı çelik silindirik kabuklarda, genel olarak, yükseklik/açıklık oranı (H/S) $1/3$ - $1/6$ düzeyindedir, ancak uzunlamasına yönde çeşitli aralıklarla mesnet düzenlenirse bu oran arttırılabilir. Aralık mesafesi > 25 m ise çift tabakalı yapılması ekonomik açıdan tercih edilmektedir [1].

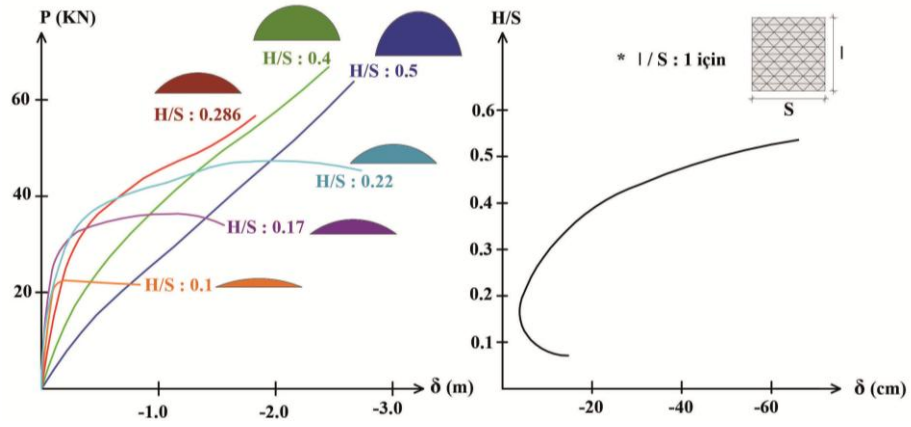
Açıklığı (S) 18 m, H/S oranı 0.22 olan tek tabakalı kısa silindirik kabuk sistemde ($0.25 < l/r < 1.67$) (Ayrıca Bkz. Bölüm 3.2.1.1). I/S oranı ile burkulma yükünün (P) değişimi incelendiğinde [125], boyuna yönde uzunluk azaldıkça, (özellikle $I/S \leq 1.0$ için) burkulma yükü artmaktadır. Diğer bir deyişle, boyuna yöndeki uzunluğun açıklığa kıyasla artması burkulma yükünü azaltmaktadır. $I/S \leq 1.0$ ve $I/S \geq \sim 1.7$ için azalma hızı yüksektir (Şekil 4.48).



Şekil 4.48 Tek tabakalı kısa silindirik kabukların I/S oranlarına göre burkulma yükü ve yerdeğiştirme değişimi [125]

(Çizimler tez kapsamında yeniden üretilmiştir)

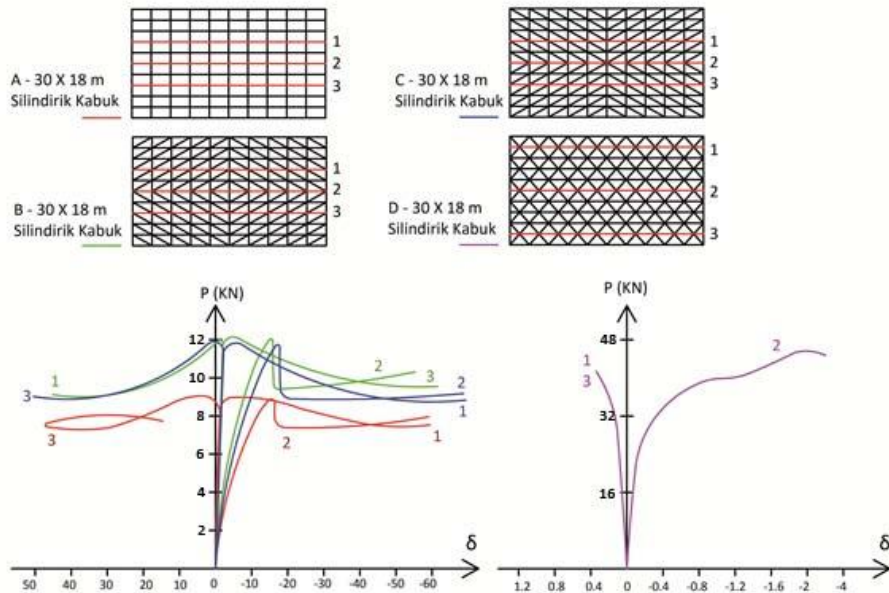
Aynı örneğin, 2.8 kN/m^2 yayılı yük altında burkulma yükü değişimi, farklı yükseklikler için incelendiğinde ($l=S=18 \text{ m}$); H/S oranı arttıkça burkulma yükünün arttığı (Şekil 4.49), yükseklik/açıklık oranı (H/S) ≥ 0.286 'dan itibaren ise, burkulma sorunu ortadan kalktığı ancak azalan rijitlik nedeni ile düşey yerdeğiştirmeler gittikçe arttığı görülmüştür. Kritik H/S oranı ~ 0.17 'dir. Bu düzeyde maks. normal kuvvet, min. eğilme momenti, maks. rijitlik nedeni ile minimum ağırlık ve maliyetli tasarım söz konusudur. Sonuç olarak, H/S oranının 0.3 'ü aşmaması önerilmektedir.



Şekil 4.49 Tek tabakalı kısa silindirik kabuk sistemlerin H/S oranlarına göre burkulma yükü ve yerdeğiştirme değişimi [125]

(Çizimler tez kapsamında yeniden üretilmiştir)

Söz konusu örneğin burkulma yükü farklı çubuk dizilimleri için incelendiğinde, ($S=18$ m, $L=30$ m, $H/S=0.22$) A tipi basit ızgara dizilimin en düşük burkulma yükünü ($P=9$ kN) verdiği Şekil 4.50’de görülmektedir [125]. Çaprazların tek yönde düzenlendiği B ve C tiplerinde ise yapının ağırlık maliyeti A’ya kıyasla % 70 daha fazla olmasına rağmen, burkulma yükünde sadece küçük bir artış ($P=12$ kN) mevcuttur. Oysa çaprazların iki doğrultuda düzenlendiği D tipinde, A’ya kıyasla % 60 maliyet artışı ile burkulma yükü 4.9 kat yüksektir ($P \sim 44$ kN) (Şekil 4.50).

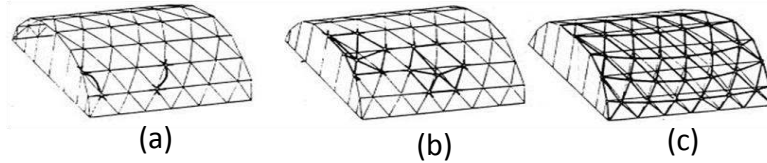


Şekil 4.50 Farklı çubuk dizilim ve yerlerinin tek tabakalı kısa silindirik kabuk burkulma yüküne etkisi [125]

4.6.2 Tek tabakalı çelik silindirik kubbeler

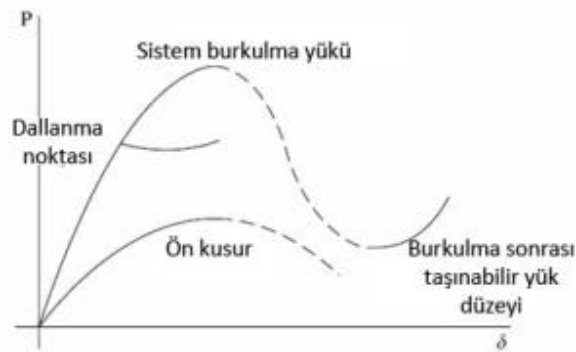
Tek tabakalı kubbe sistemde üç tip burkulma durumu söz konusudur:

- Çubuk eleman burkulması: Çubuk elemanların yeterli eğilme rijitliği olmalıdır, aksi takdirde bir elemanın burkulması sistemin göçmesi olarak tanımlanır (Şekil 4.51.a).
- Düğüm noktası burkulması (lokal burkulma): Bir düğüm noktasında çok sayıda çubuk birleşir ve kesitlerin düğüm noktasının rijitliği yetersiz olursa, etkiyen eksenel kuvvetlerden dolayı o düğüm noktasında, (diğerlerine kıyasla) artan yerdeğiştirmeler sonucu yapının stabilitesini olumsuz yönde etkileyen vurgu stabilitesi (*bifurcation*) problemi ortaya çıkar ve düğüm noktası içeri yönde hareketlenerek yeni denge konumuna gelir (Şekil 4.51.b).
- Çember burkulması: Bir çember, rijitliğin az olduğu durumda, birleşen elemanları ve tüm düğüm noktaları ile birlikte burkulabilir.
- Sistem burkulması: Rijitlik azlığı nedeni ile yapının genelinde düğüm noktalarında burkulma oluşur (Şekil 4.51.c). [126].



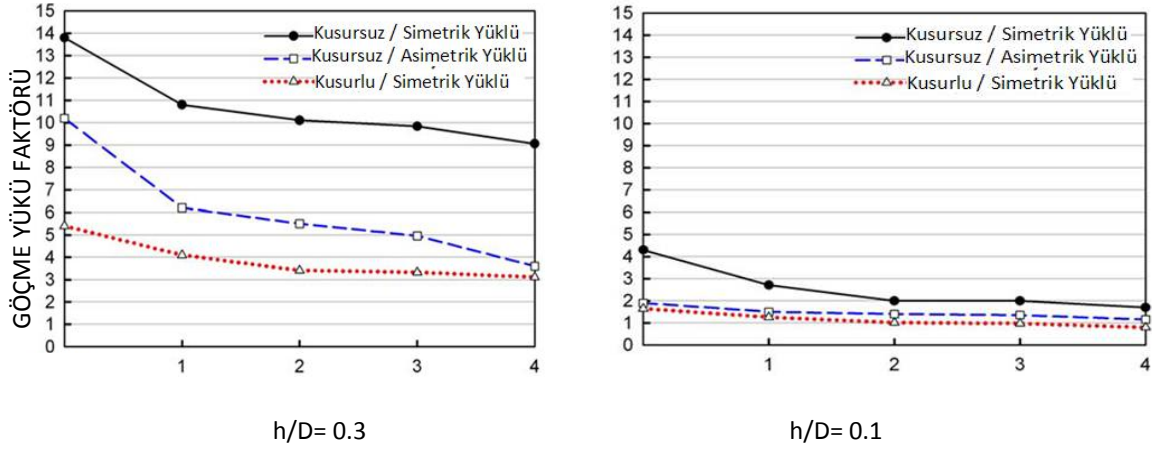
Şekil 4.51 (a) Çubuk (b) Düğüm noktası (c) Sistem burkulması tipleri [1].

Kubbelerde montaj sırasındaki olası konumlama hatalarından kaynaklanacak ön kusurlar (*imperfection*), kubbe burkulma yükünü % 50'ye varan ölçüde azaltabilir; bu nedenle kibbenin doğru montajı, dikkat edilmesi gereken konuların başında gelmektedir (Şekil 4.52).



Şekil 4.52 Kubbe burkulmasında burkulma yükü için kritik durumlar [1]

Ön kusurlar özellikle asimetrik yükleme durumlarında (rüzgar ve kar yükü) önem kazanmakta, göçme yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Kubbenin çok basık olması da yük taşıma kapasitesinde büyük azalmaya neden olmaktadır (Şekil 4.53).



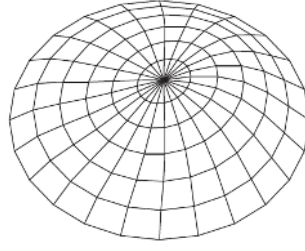
Şekil 4.53 50 m açıklıklı kubbeye basınlık ve kusurlu montajın boyutsuz göçme yükü faktörüne etkisi [6]

Ayrıca düğüm noktasındaki birleşimin tipi, rijitliği ile birleşim montajında kusur olup olmaması da kubbenin taşıma kapasitesini büyük ölçüde etkiler.

Bunun dışında, örneğin lamella tipi bir kubbe sistemde, burkulma yükünü etkileyen en önemli iki parametre, çember sayısı ve yüklerin tekil (üniform) olması durumudur [73]. Her çemberi aynı narinliğe sahip 20-60 m açıklıklı lamella bir kubbeye sistem burkulmasına neden olacak yük düzeyi, çember sayısı arttıkça hızla artmaktadır. İncelenen 20-60 m açıklık için 6 çemberden itibaren kubbenin burkulma olasılığı pratik olarak ortadan kalkmaktadır. Düğüm noktalarının rijit ve mafsallı olmasının burkulma yüküne etkisi ise, bu açıklık aralığı için, % 10-15 düzeyinde kalmaktadır.

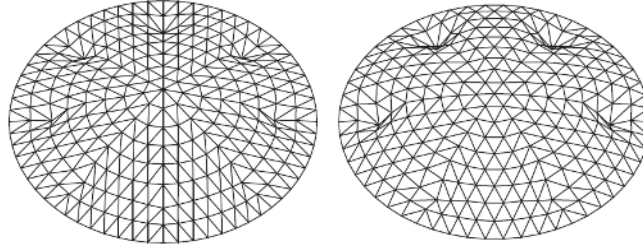
Kubbe tipi ve basınlık oranına göre burkulma olgusu şu şekilde izlenir [127]:

- Yükseklik / açıklık oranı $1/7 - 1/8$ olan nervürlü kubbelerde diyagonal çubuk elemanların olmamasından dolayı, sistem, burkulmadan önce elastik kalır ve nervürlü kubbeye dönme burkulması görülür (Şekil 4.54).



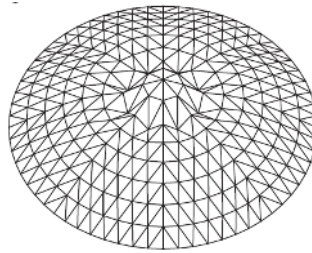
Şekil 4.54 Yükseklik / açıklık oranı 1/8 olan nervürlü kubbenin burkulma davranışı [127]

- Yükseklik / açıklık oranı 1/7 - 1/8 olan schwedler kubbelerinde burkulma, sistemin herhangi bir yerinde gerçekleşir ve burkulmanın görüldüğü çubuk elemanlarda çukurlar meydana gelir (Şekil 4.55).

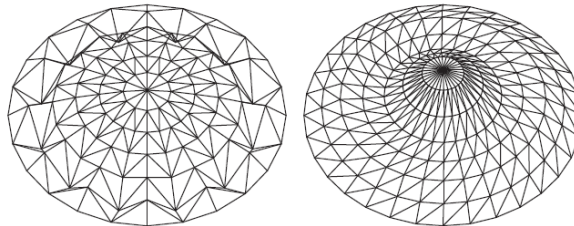


Şekil 4.55 Yükseklik / açıklık oranı 1/8 olan schwedler kubbe çeşitlerinde görülen farklı burkulma davranışları [127]

- Yükseklik / açıklık oranı 1/7-1/8 olan lamella kubbelerde burkulma genellikle alttan üçüncü ana çubuk elemanlarda meydana gelirken, oran 1/5-1/6 olduğunda burkulma tepe noktasından sonra ikinci ana çubuklarda meydana gelir (Şekil 4.56 ve Şekil 4.57).

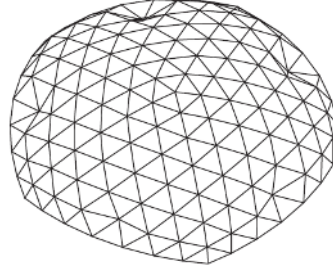


Şekil 4.56 Yükseklik / açıklık oranı 1/8 olan lamella kubbenin burkulma davranışı [127]



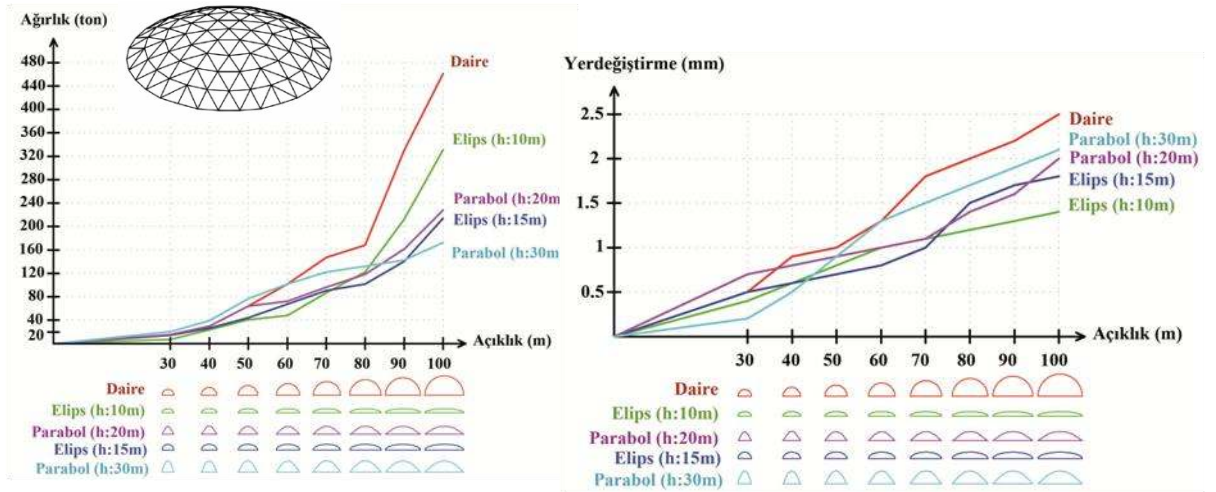
Şekil 4.57 Yükseklik / açıklık oranı 1/5 olan lamella kubbenin burkulma davranışı [127]

Yükseklik / açıklık oranı 1/7-1/8 olan jeodezik kubbelerde burkulma, lamella kubbede olduğu gibi genellikle alttan üçüncü ana çubuk elemanlarda meydana gelir (Şekil 4.58) [127].



Şekil 4.58 Yükseklik / açıklık oranı 1/8 olan jeodezik kubbenin burkulma davranışı [127]

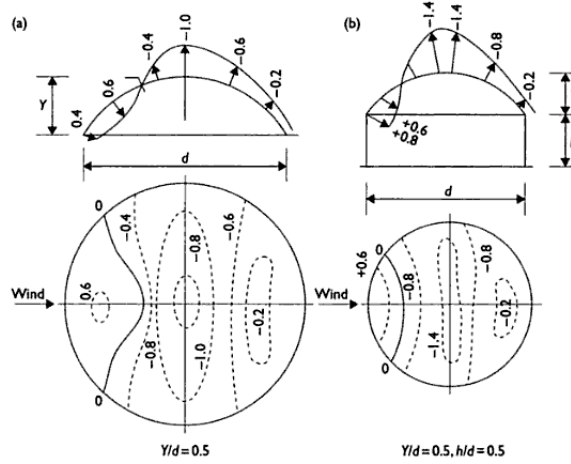
Ekonomik tasarım açısından, açıklığa en uygun kubbe enkesidi seçilmelidir. Bir analizde [128]; daire, elips (h:10 m ve 15 m) ve parabol (h:20 m ve 30 m) tipi kubbe için açıklık-ağırlık-yükseklik ilişkisi incelendiğinde (Şekil 4.59), 100 m açıklık için en ekonomik tasarımın 30 m yüksekliği olan parabol ile gerçekleştiği görülmektedir. Daire için açıklığın artması, kesit boyutlarını, dolayısı ile sistem ağırlığını arttırmaktadır. Daire formdan sonra en olumsuz form basık elips sistemdir. 80 m'den sonra (daireden sonra) en büyük kesit tesirlerini vermektedir, ancak bu karşılık tepe noktasında en düşük düşey yerdeğiştirmeyi de bu form oluşturmaktadır.



Şekil 4.59 Daire, elips ya da parabol kubbelerin, açıklık ve yüksekliğe göre ağırlık ve düşey yerdeğiştirme değişimleri [128]

4.6.2.1 Yükler

Ölü yükler, $0.5-1.2 \text{ kN/m}^2$ arasında olup [129], kubbenin çeşidi ve üzerindeki çatı örtüsü malzemesine göre değişkenlik gösterir ve kubbenin yük yüzeyine eşit şekilde etki eder. Rüzgâr yükü, kubbenin yerden yüksekliği ve çapına bağlı olarak değişir (Şekil 4.60). Kubbede rüzgarın doğrudan etkidiği tarafta, küçük bir alan basınca çalışırken büyük bölümünde çekmeye çalışır, asimetrik yük yayılımı söz konusudur.



Şekil 4.60 Kubbe yükseklik ve çapına göre değişen rüzgar yükleri [129]

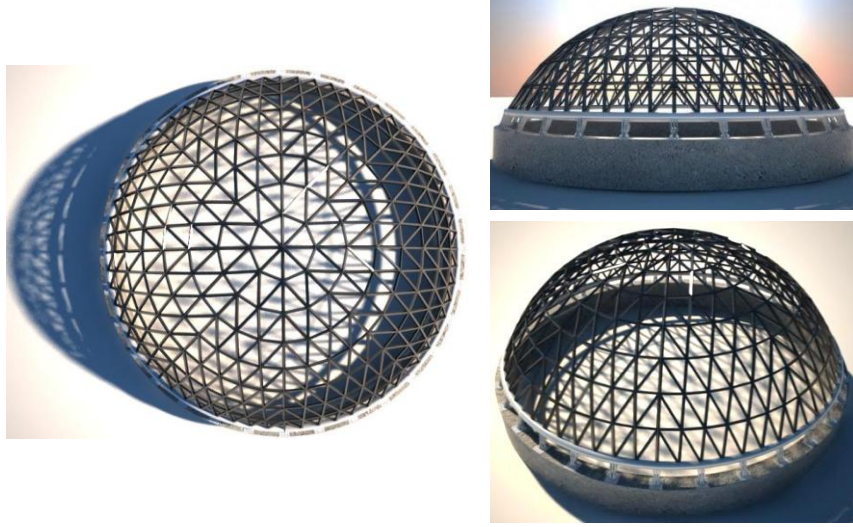
4.7 Tek tabakalı uzay kafes sistem ile tasarlanmış kubbe sistem projesi

4.7.1 Genel

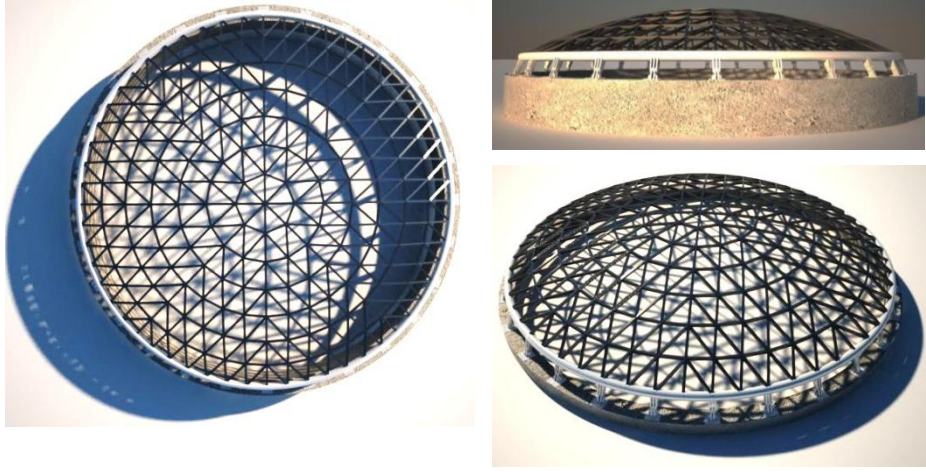
Tez kapsamında SAP2000 V14 programı ile yapısal analizler¹ SAP2000 V14 programı [130] ile gerçekleştirilmiş, açıklığı 100 m olan bir kubbe sistem, iki farklı tip (Diamatik ve jeodezik) ve yükseklik/açıklık oranı için (0.32 ve 0.16) çözülmüştür (Şekil 4.64). Kubbe sistemin üç boyutlu modeli 3D Max programı ile oluşturulmuştur (Şekil 4.61, Şekil 4.62 ve Şekil 4.63).

Projede, tek tabakalı uzay kafes sistemin birleşim tiplerinden biri olan, WABI-1 düğüm noktası kullanılmıştır (Ayrıca Bkz. Bölüm 4.3.2.2). Kubbe sistemin çubuk elemanları kutu profil seçilmiş olup, kaynaklı birleşmektedir. Çekme çemberi çepeçevre betonarme temele mesnetlenmektedir. Örtü malzemesi olarak, ETFE tipi membran örtü kullanılmıştır (Şekil 4.71 ve Şekil 4.72).

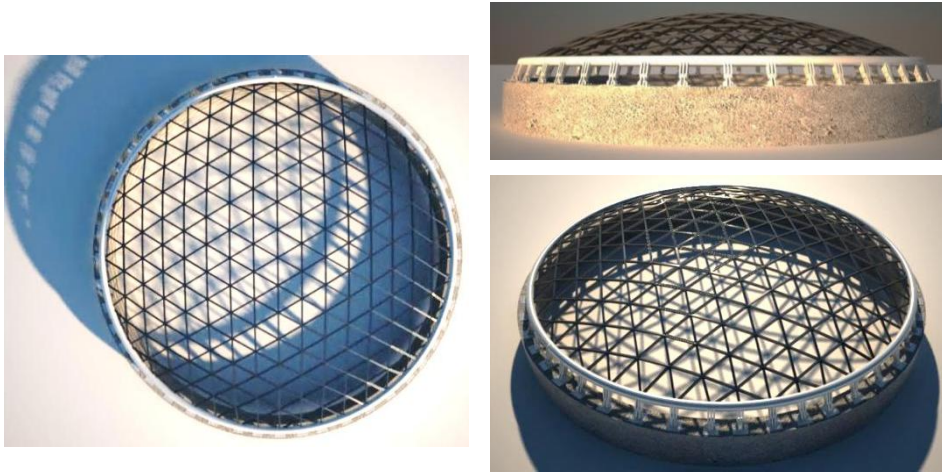
¹ SAP2000 ile yapılan hesaplar inşaat mühendisi tarafından gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.61 Açıklığı 100 m, yüksekliği 32 m olan diamatik kubbenin 3D tasarımı



Şekil 4.62 Açıklığı 100 m, yüksekliği 16 m olan diamatik kubbenin 3D tasarımı



Şekil 4.63 Açıklığı 100 m, yüksekliği 16 m olan jeodezik kubbenin 3D tasarımı

4.7.2 Proje verileri

SAP 2000 [130] analizinde kullanılacak olan veriler aşağıda tanımlanmıştır.

Proje verileri

Etkin yer ivme katsayısı.....	$A_0 = 0.40$
Bina önem katsayısı.....	$I = 1.2$
Spektrum karakteristik periyotları.....	Z_1 ($T_A = 0.15$ s ve $T_B = 0.40$ s)
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı.....	5
Hareketli yük katılım katsayısı.....	0.80

Malzeme özellikleri

Malzeme.....	St 52 Yapı Çeliği
Akma Sınırı.....	360 MPa
Emniyet gerilmesi.....	240 MPa
Kayma emniyet gerilmesi.....	144 MPa
Elastisite Modülü.....	210 GPa
Poisson sayısı.....	0.3
Kayma Modülü.....	81 GPa
Isıl genleşme katsayısı.....	1.2×10^{-5}

Yük analizi

Çatı Kaplaması, Tesisat.....	10 kg/m^2
Hareketli yük.....	200 kg/m^2
Kar yükü.....	100 kg/m^2
Rüzgar yükü.....	80 kg/m^2

SAP2000 V14 programı [130] ile hesap için, Türkiye’de yönetmeliklere en uygun olarak, emniyet gerilmeleri yöntemi için AISC-ASD89 şartnamesi seçilmiştir. Ayrıca deprem hesapları, model analiz yöntemi ile SAP2000 V14’te yapılmış ve kuvvetler sisteme aktarılmıştır.

Yük bileşenleri

Yapı sisteminin düşey yükler ile yatay deprem ve rüzgar kuvvetleri altında analizi ile elde edilen iç kuvvetler, Deprem Yönetmeliği 2007 Madde 2.7.5 ve TS 648 Çelik Yapılar Standardına uygun olarak, aşağıdaki şekilde birleştirilecektir¹.

Çizelge 4.2 Yük bileşenleri

DSL	DLWX-
DL	DLWY+
DL	DLWY-
DSL.5WX+	DSLEX+0.3EY+
DSL.5WX-	DSLEX-0.3EY-
DSL.5WY+	DSLEY+0.3EX+
DSL.5WY-	DSLEY-0.3EX-
DSLLWX-	DSLEY-0.3EX+
DSRLWX+	0.9DEX+0.3EY+
D.5SLWY-	0.9DEX-0.3EY-
D.5SLWY+	0.9DEY+0.3EX+
DLEX+0.3EY+	0.9DEY-0.3EX-
DLEX-0.3EY-	0.9DEX+0.3EY-
DLEY+0.3EX+	0.9DEX-0.3EY+
DLEY-0.3EX-	0.9DEY+0.3EX-
DLEX+0.3EY-	0.9DEY-0.3EX+
DLEX-0.3EY+	0.9DWX+
DLEY+0.3EX-	0.9DWX-
DLEY-0.3EX+	0.9DWY+
DLWX+	0.9DWY-

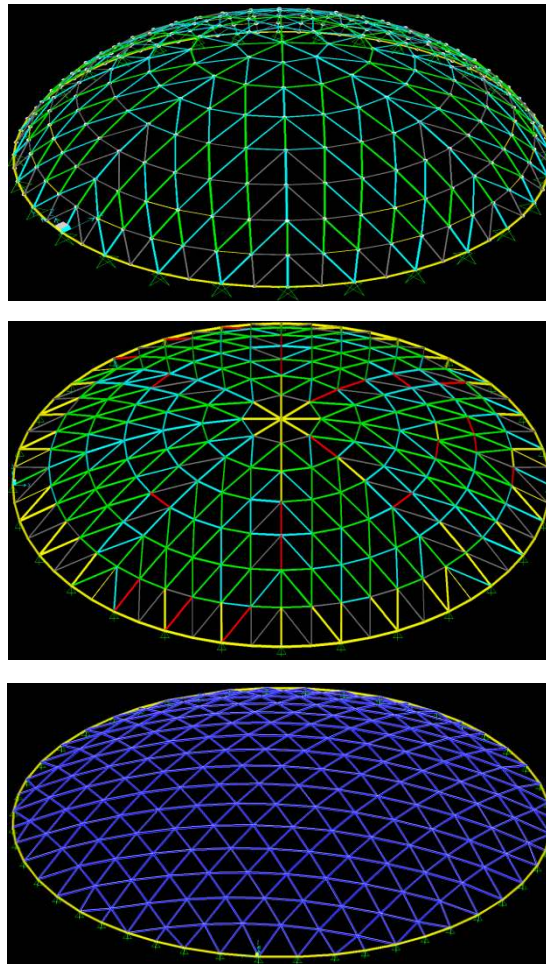
Belirtilen kombinasyonlara göre SAP2000 [130] ile yapılan analizler sonucunda en elverişsiz yükleme durumu DLEX-0.3EY+ olarak belirlenmiştir. Yapıda gerilme ve sehim kontrolleri bu yükleme durumu için yapılmıştır. DSLLWX- gibi rüzgar yüklemelerinin bulunduğu kombinasyonlarda ise, en elverişsiz yükleme değerlerinden daha az kuvvetler oluştuğu gözlenmiştir.

SAP2000 V14 programında çelik için Emniyet Gerilmeleri Yöntemine göre analiz ve ön boyutlandırma yapılabilmektedir. Ülkemizde kullanılan yönetmeliğe en yakın olan AISC-

¹ G: Sabit (ölü) yükler, Q : Hareketli yükler; EX, EY : x ve y doğrultusundaki deprem yükleri; WX, WY : x ve y doğrultusundaki rüzgar yükleri

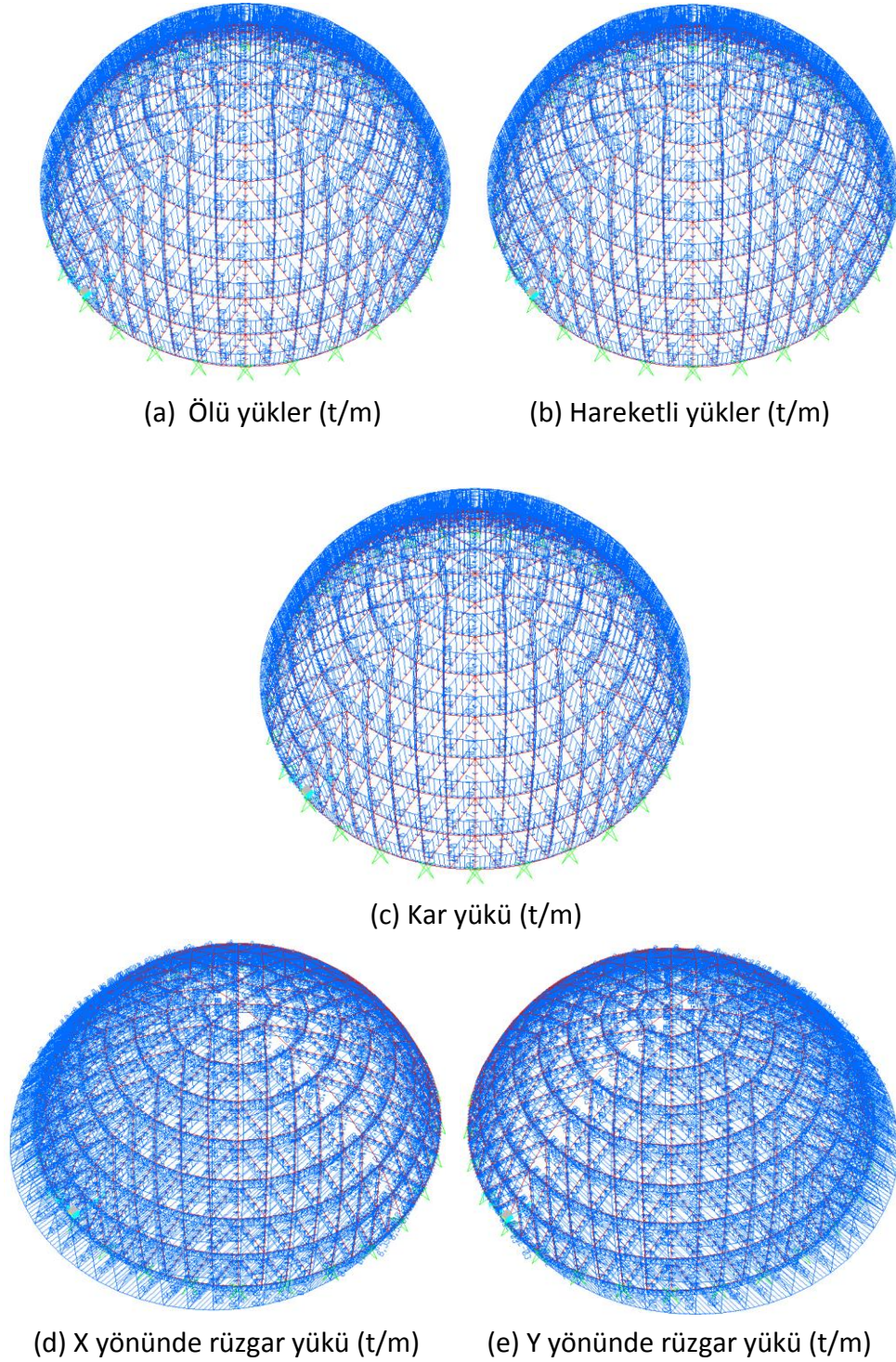
ASD89 yönetmeliği seçilmiştir. SAP2000 V14 programından [130] alınan diyagramlar grafikler halinde tariflenmiştir.

Deprem Yönetmeliği Madde 4.2.4'e göre yönetmeliğin gerekli gördüğü yerlerde, çelik yapı elemanlarının ve birleşim detaylarını tasarımında, arttırılmış deprem yüklemeleri göz önüne alınmıştır. Arttırılmış deprem yüklemelerinde, deprem etkilerinden oluşan iç kuvvetler Ω_0 büyütme katsayılarıyla çarpılarak arttırılmaktadır. Tablo 4.2'ye göre süreklilik düzeyi normal çerçeveler için büyütme katsayısı $\Omega_0=2.0$ değerini almaktadır. TS 648 Çelik Yapılar Standardında ve Deprem Yönetmeliği Madde 4.2.3.5'e göre Emniyet Gerilmeleri Yöntemi'ne göre kesit hesaplarında, birleşim ve ekler dışında, emniyet gerilmeleri düşey yük+rüzgar yüklemeleri için %15, düşey+deprem yüklemeleri için %33 arttırılacaktır.

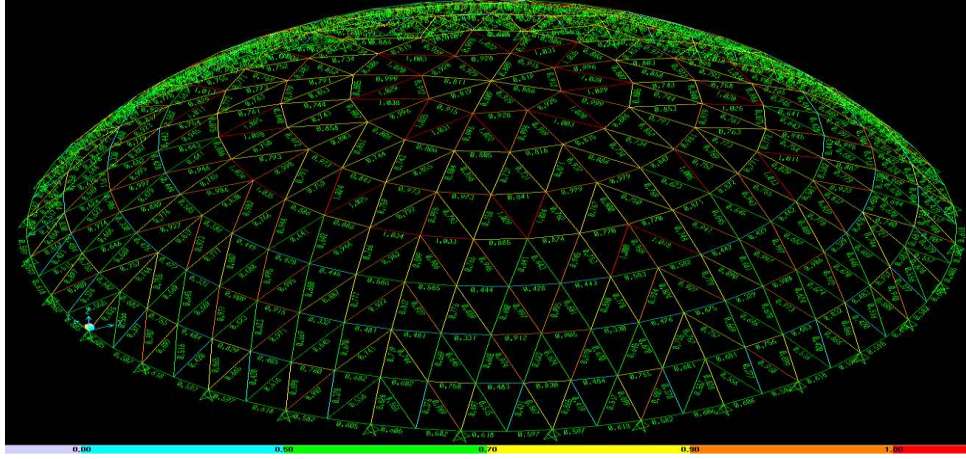


Şekil 4.64 SAP2000 ile modellenmiş h: 32 ve 16 m'lik diamatik kubbeler ile h: 16 m'lik jeodezik kubbe

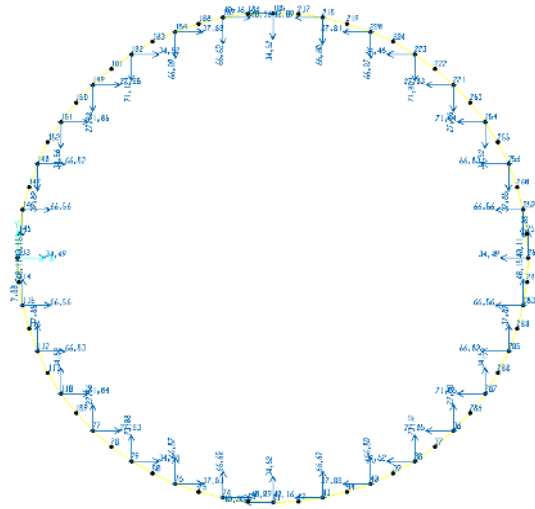
Deprem Yönetmeliğine göre tanımlanmış tipik yükleme bileşenleri h: 32 m'lik diamatik kubbe üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4.65). Aynı kubbe için en elverişsiz DLEX-0.3EY+ yüklemesine ait boyutsal oranlar ve mesnet tepkileri ise Şekil 4.66 ve 4.67'de verilmiştir.



Şekil 4.65 SAP2000 ile h: 32 m'lik diamatik kubbede yükleme durumları



Şekil 4.66 SAP2000 ile h: 32 m'lik diamatik kubbeye oransal boyutlar

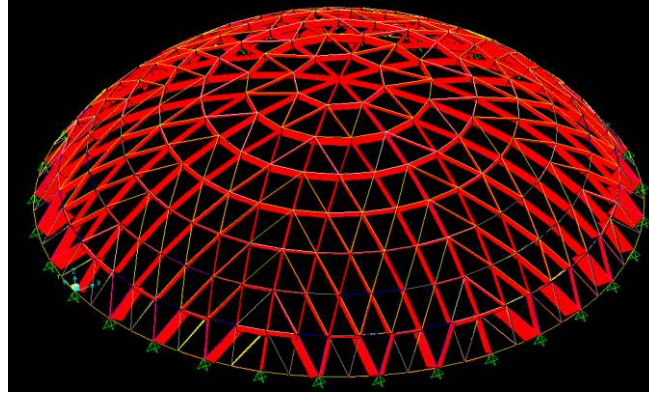


Şekil 4.67 SAP 2000 ile h: 32 m'lik diamatik kubbeye mesnet tepkileri

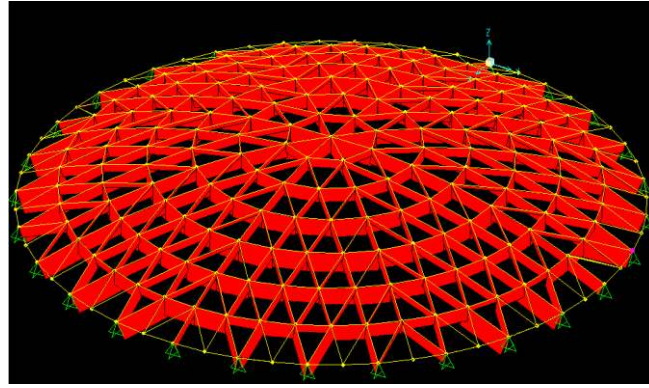
Üç kubbenin, en elverişsiz yükleme durumu DLEX-0.3EY+ için kesit tesiri diyagramları

Şekil 4.68 ve 4.69'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Analizlerde basınç tipi eksenel

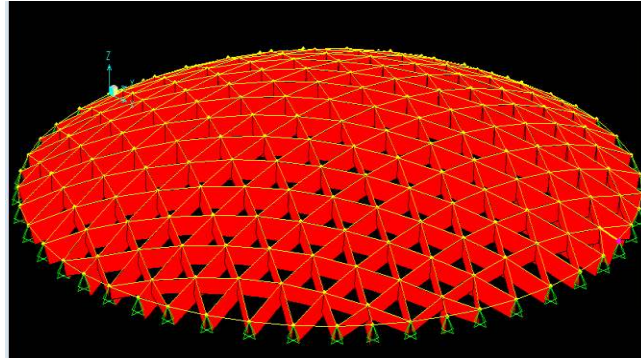
kuvvetlerin 2. mertebe etkisi dikkate alınmıştır.



(a) h: 32 m'lik diamatik kubbede normal kuvvet değişimi
[N_{maks} = 894.3 kN, basınç]

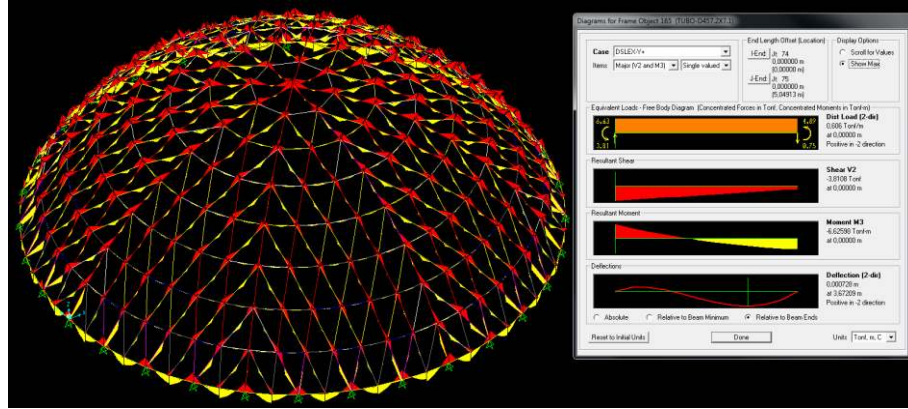


(b) h: 16 m'lik diamatik kubbede normal kuvvet değişimi
[N_{maks} = 1207.8 kN, basınç]

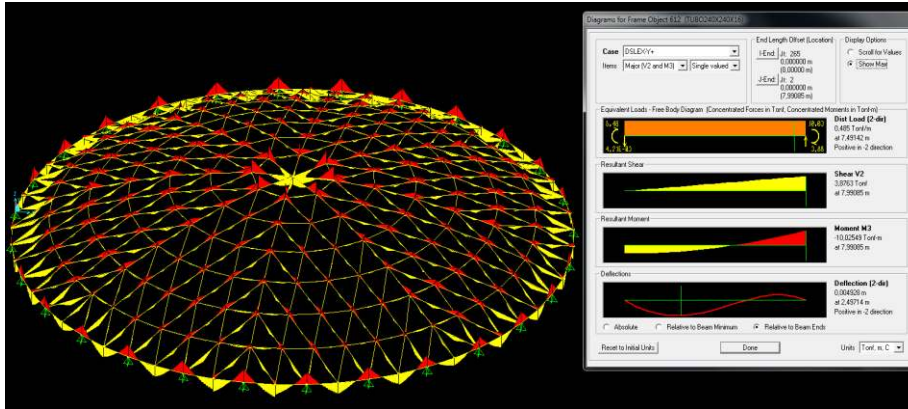


(c) h: 16 m'lik jeodezik kubbede normal kuvvet değişimi
[N_{maks} = 796.6 kN, basınç]

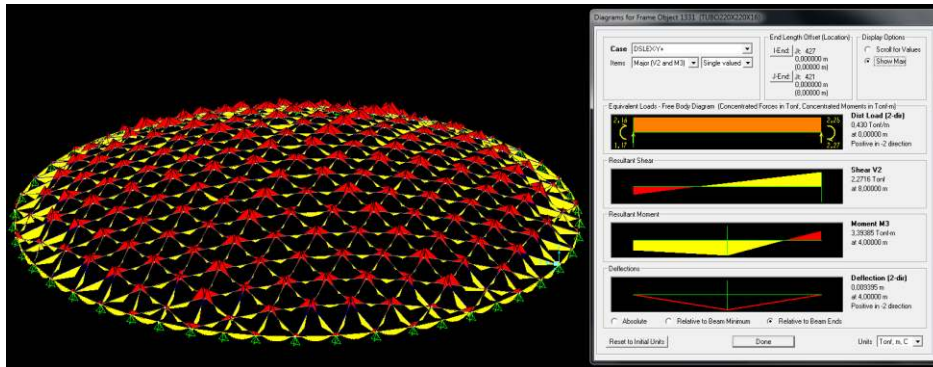
şekil 4.68 İki farklı kubbe tipi ve yükseklik için N diyagramları (DLEX-0.3EY+)
ve en büyük değerleri



(a) h: 32 m'lik diamatik kubbede eğilme momenti değişimi
[$M_{\min} = -66.1$ kNm, $T_{\min} = -38.1$ kN]



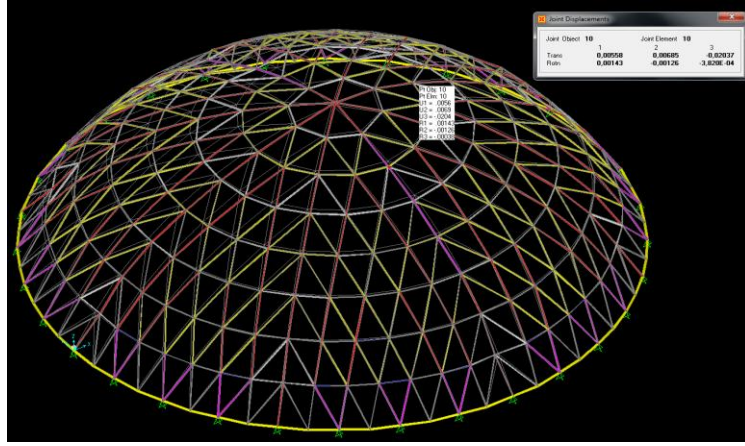
(b) h: 16 m'lik diamatik kubbede eğilme momenti değişimi
[$M_{\min} = -100.3$ kNm, $T_{\max} = 38.8$ kN]



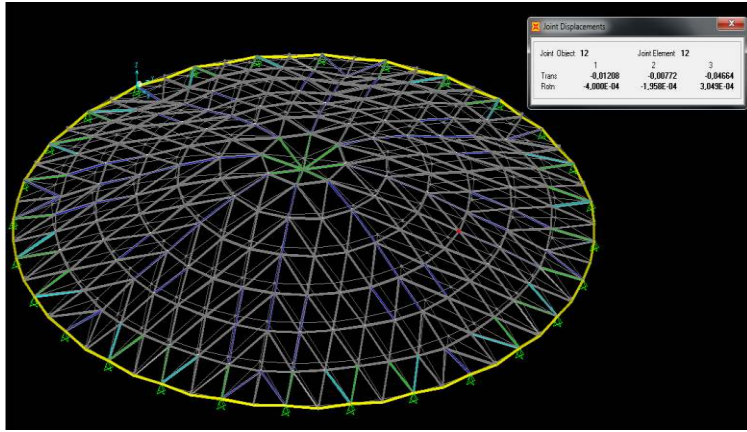
(c) h: 16 m'lik jeodezik kubbede eğilme momenti değişimi
[$M_{\max} = 33.9$ kNm, $T_{\max} = 22.7$ kN]

Şekil 4.69 İki farklı kubbe tipi ve yükseklik için M diyagramları (DLEX-0.3EY+) ile en büyük M,T değerleri

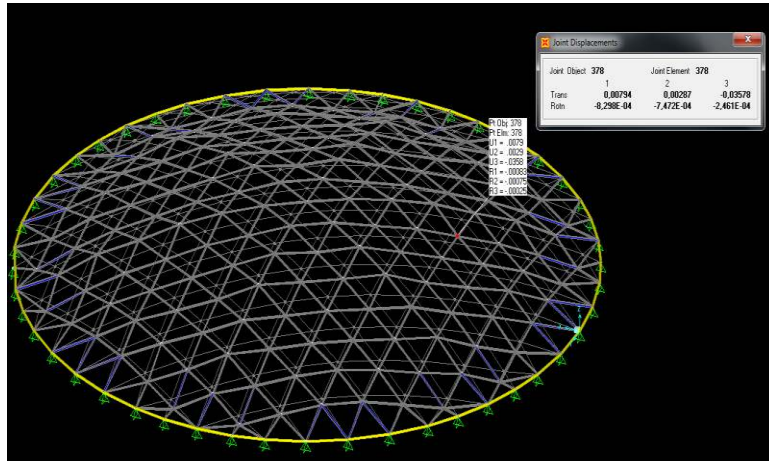
Sözkonusu üç kubbe analizi için en elverişsiz yerdeğiştirmeler ve bunlara ait yükleme durumları ise Şekil 4.70'de verilmiştir.



(a) h: 32 m'lik diamatik kubbede yerdeğiştirme durumu ($\delta z_{maks}=2.1$ cm DSLLWX-)



(b) h: 16 m'lik diamatik kubbede yerdeğiştirme durumu ($\delta z_{maks}=4.7$ cm DSLEX+Y+)



(c) h: 16 m'lik jeodezik kubbede yerdeğiştirme durumu ($\delta z_{maks}=3.6$ cm DSLEY-X-)

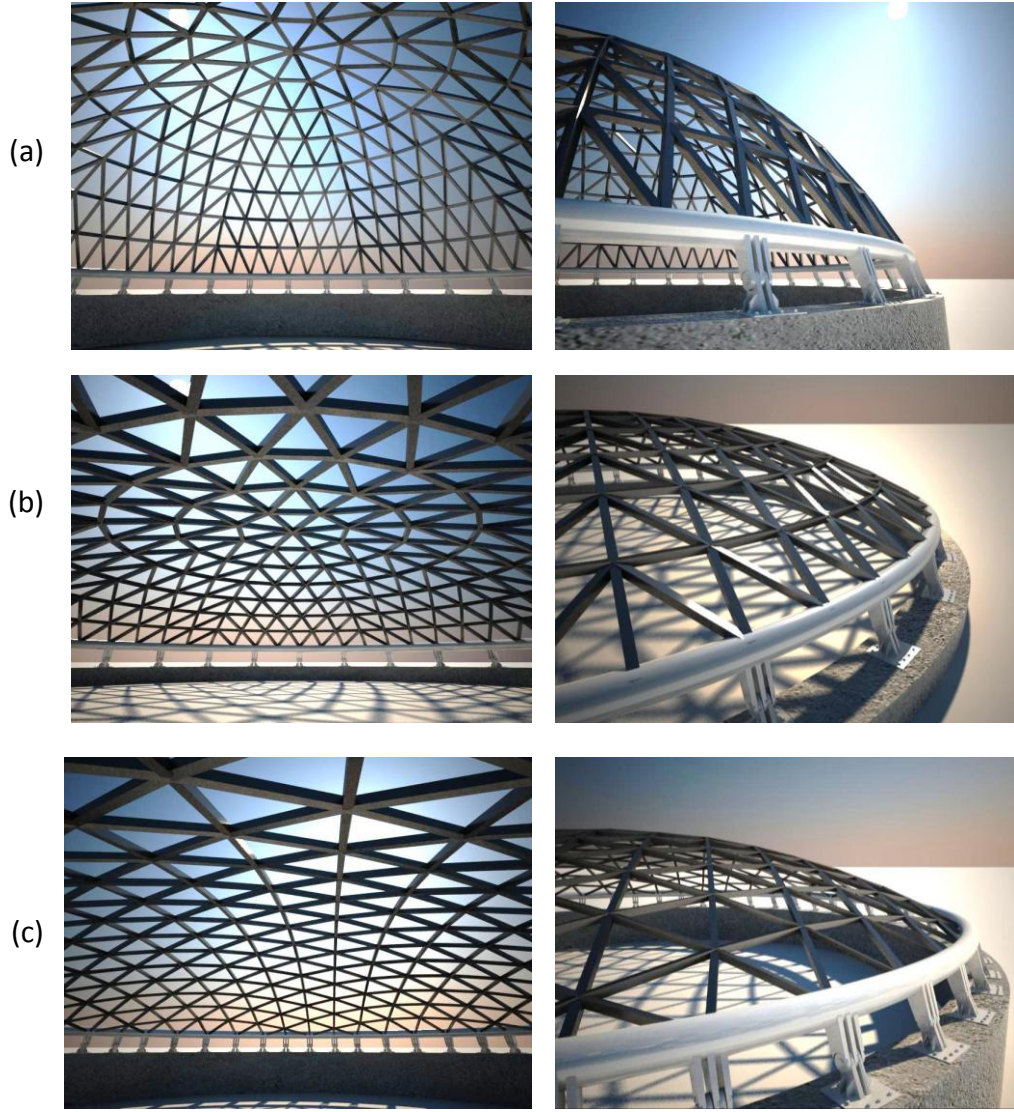
Şekil 4.70 İki farklı kubbe tipi ve yükseklik için yerdeğiştirme durumları ve değerleri

Analizlerde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

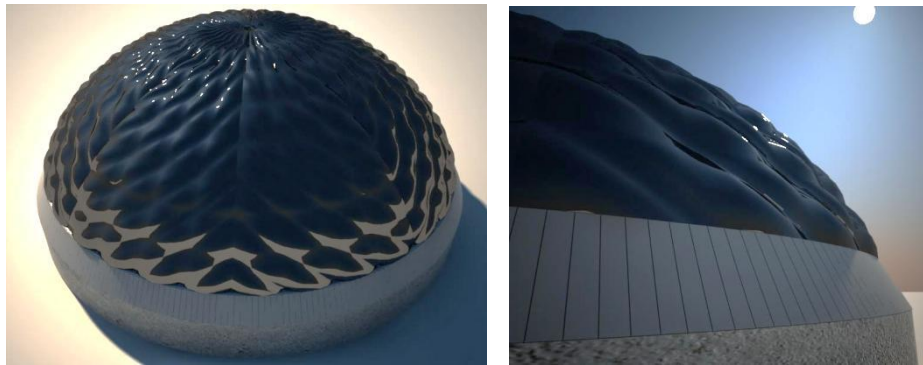
- En elverişsiz yükleme durumu, ölü yük+hareketli yük - x doğrultusunda deprem + $0.3 \cdot y$ doğrultusunda deprem durumudur. Ancak rüzgar etkisinin daha fazla olduğı durumlarda rüzgarlı kombinasyonun da en elverişsiz yükleme durumu olması mümkündür.
- Hakim periyotlar açısından, h: 32 m'lik diamatik kubbede $T_1=0.557$ sn, h: 16 m'lik diamatik kubbede $T_1=0.566$ sn, h: 16 m'lik jeodezik kubbede ise $T_1= 0.5$ sn'dir.
- Yapıda normal kuvvetler hakimdir, moment ve kesme kuvveti normal kuvvete kıyasla çok düşüktür. Basıklık arttıkça normal kuvvetler artmaktadır. En büyük kesit tesirleri artan basıklığın da etkisi ile 16 m'lik diamatik kubbede oluşmaktadır. Aynı basıklık düzeyi için jeodezik kubbede diamatik kubbeye göre kesit tesirleri daha az olup, daha düşük yerdeğıştirmeler ve daha ekonomik tasarım sözkonusudur.
- Tüm kubbelerde farklı yükleme biçimlerinden oluşan maks. düşey yerdeğıştirmeler, $L/300$ tahkikini sağlamaktadır.
- Kubbelerin tasarımında birleşim biçimi dikkate alınarak kutu profiller kullanılmışsa da (Çizelge 4.3), uygun birleşim sistemleri ile boru profil olarak boyutlandırılması en ekonomik kubbe tasarımını verecektir. Çekme çemberi tüm kubbelerde sabit ve büyük kesitli boru profil (D457.2X7.1) olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.3 Kubbelerde kesit boyutları

100*32 m Diamatik kubbe kesit özellikleri				
Kesit	Tip	Adet	Toplam Uzunluk (m)	Ağırlık
D457.2X7.1	Çubuk	64	323.14	25.47
140X140X8	Çubuk	134	932.80	30.93
160X80X8	Çubuk	40	216.37	6.09
200X140X8	Çubuk	50	291.39	11.86
200X200X16	Çubuk	168	1364.04	126.14
220X220X16	Çubuk	56	473.55	48.55
260X130X8	Çubuk	64	553.87	26.02
280X140X8	Çubuk	64	497.31	25.23
300X150X8	Çubuk	160	135999618.00	74.13
			Toplam Ağırlık	374.42 tf
100*16 m Diamatik kubbe kesit özellikleri				
D457.2X7.1	Çubuk	56	339.00	26.72
140X140X8	Çubuk	12	106.52	3.53
200X200X16	Çubuk	432	3378.67	312.44
220X220X16	Çubuk	68	560.86	57.50
240X240X16	Çubuk	32	261.94	29.49
280X280X16	Çubuk	16	144.92	19.23
			Toplam Ağırlık	448.90 tf
100*16 m Jeodezik kubbe kesit özellikleri				
D457.2X7.1	Çubuk	47	339.00	26.70
200X200X16	Çubuk	492	3803.33	351.71
220X220X16	Çubuk	42	349.84	35.87
			Toplam Ağırlık	414.27 tf



Şekil 4.71 (a) Açıklığı 100 m, yüksekliği 32 m olan diamatik kubbe (b) Açıklığı 100 m, yüksekliği 16 m olan diamatik kubbe ve (c) Açıklığı 100 m, yüksekliği 16 m olan jeodezik kubbenin 3D modelleme ile perspektif görüşleri

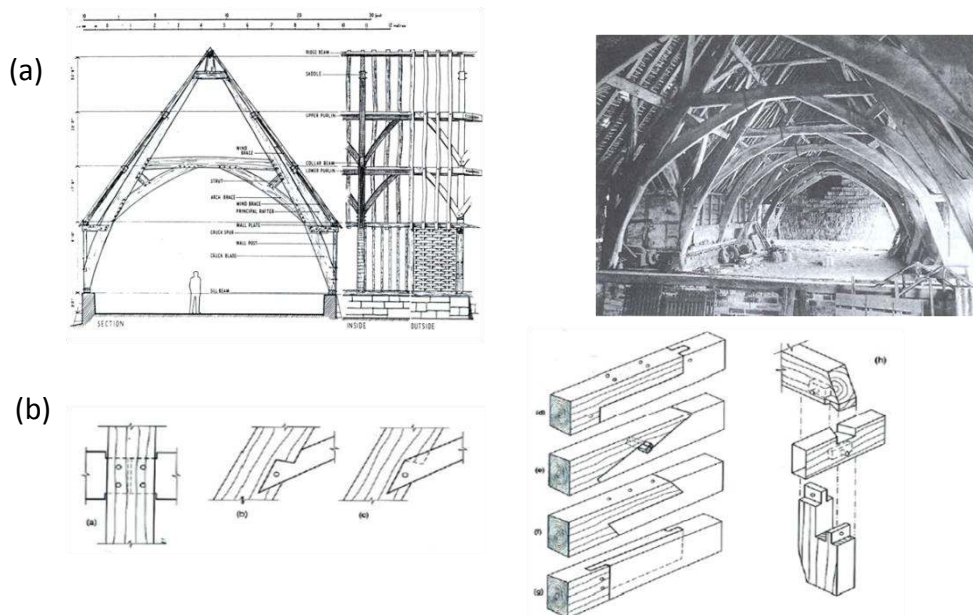


Şekil 4.72 Kubbe sistemlere ETFE tipi membran örtü modellemesi

TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN AHŞAP MALZEME İLE OLUŞTURULMASI

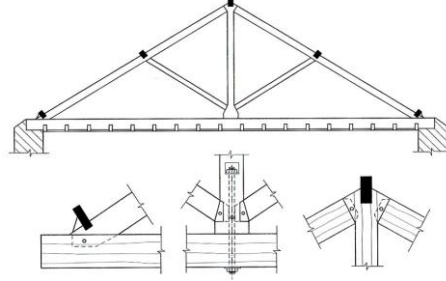
5.1 Tarihçe

Ahşap malzemenin kullanımı 14000 yıl öncesine dayanır. **Orta çağda (MS 476-1453)** ahşap, yapım için ana malzeme olarak kullanılırdı. Ahşap, çatı ve çerçeve yapılar için kullanılan evrensel bir malzemedir. Orta çağda en çok kullanılan ahşap birleşim teknikleri ve en eski ahşap yapı örneklerinden biri olan Leigh Court Barn (**1325**) şekil 5.1’de verilmiştir. [131].



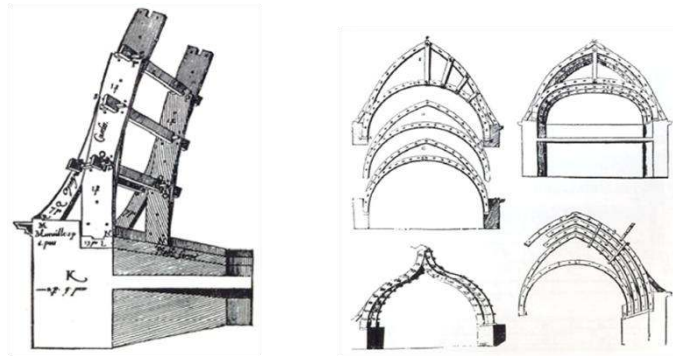
Şekil 5.1 (a) Orta Çağa ait Leigh Court Barn (1325) (b) Tipik ahşap birleşimleri [131]

Erken modern çağda (15-18.yy) rönesans ile birlikte Yunan ve Roma yapılarında görülen farklı bir üslup ortaya çıkmıştır. Demir birleşimlerin kullanıldığı, tuğla duvara mesnetlenen ahşap çatı sistemleri geliştirilmiş ve bunlar bir döşeme ile gizlenmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Demir birleşimli ahşap çatılar [132]

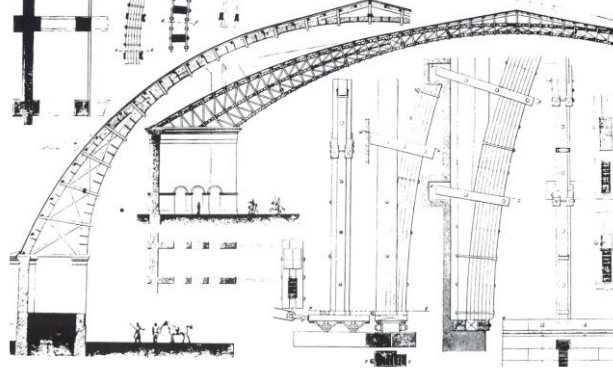
Fransız mimar de L'Orme, geniş açıklıklı ahşap kemer sistemleri geliştirmiş, ayrıca **1561**'de ilk ahşap kompozit elemanı tasarlamıştır (Şekil 5.3). Sonrasında 60 m'ye kadar açıklık geçebilen kubbe sistem tasarlamıştır. Geliştirdiği sistem; zaman alıcı olması, kısa elemanlar ve düşük rijitlikli birleşimlerden oluşmasına rağmen, 19. yy.'a kadar kullanılmıştır. **1783**'de 41 m açıklıklı kubbesi ile Halle au Blé (Fransa), L'Orme'nin yöntemi ile inşa edilmiş zamanın en geniş açıklıklı kubbesidir (Şekil 5.4).



Şekil 5.3 De L'Orme'nin geliştirdiği ahşap kompozit eleman ve kemer sistemi [133]

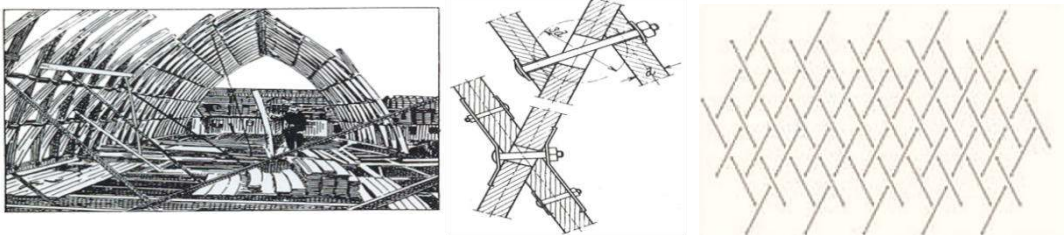
19.yy.'da sanayinin gelişmesi ile birlikte geniş açıklıklı yapı ihtiyacı artmış, daha büyük kesitli kirişler üretilmiştir. Bu değişikliklere paralel olarak dövme demirin geliştirilmesiyle ahşap sistemlerde, çekme dayanımı yüksek demir birleşimler daha fazla kullanılmaya başlamıştır. Çivi ve bulonların da seri ve ekonomik üretimi ahşap sistemleri geliştirmiştir [132]. Çeliğin gelişimi, onunla rekabet eden ahşapta, tabakalı kompozit ahşap tekniğinin gelişimini sağlamıştır. Kısa masif ahşap elemanlar yerine

tabakalı ahşap kullanarak daha uzun ve yüksek dayanımlı ahşap kesitler elde edilmiştir. İlk tabakalı ahşap, köprü yapımında kullanılmıştır. A.R. Emy, 40 m açıklık geçebilen De L'Orme'nin kemer sistemini, tabakalı ahşap ile 100 m'ye uyarlamıştır (Şekil 5.4) [133].



Şekil 5.4 A.R. Emy tarafından inşa edilen büyük salon yapısı [133]

20. yy'da, daha büyük açıklıklara ihtiyaç duyulmuştur. Bu dönemde, ilk defa üç boyutta yük transferi yapan tek tabakalı uzay kafes sistemlerin (grid shell) gelişimi görülmektedir. 19. yy'ın ikinci yarısında teknolojinin gelişimi ile çelik sektörü hızla büyümüş ve demirin yerini almıştır. F. Zollinger, De L'Orme'nin kompozit eleman modelini geliştirerek üç boyutlu çerçeve sisteme uyarlamıştır. Elmas biçimli, dörtgen ızgara formu lamella tipi uzay kafes sistemin yaratıcısıdır (**1904**) (Şekil 5.5). Ancak tasarladığı bulonlu birleşimin moment taşıma kapasitesi çok az olduğundan başarı ile uygulanamamıştır. Birleşim sorunu daha sonra Almanya'da çözülmüştür [133].



Şekil 5.5 Zollinger'in lamella sistemi ve birleşimler [133], [134]

20.yy'ın başında organik tutkallar geliştirildi ancak nem dayanımları yoktu. **1930**'lu yıllarda nem dayanımlı, ancak ısı kürü gerektiren inorganik fenol-formaldehit, **1940**'larda da, daha büyük kesitlerin üretimini mümkün kılan ve oda sıcaklığında dayanım kazanabilen üre-formaldehit tutkal geliştirildi. **1950**'den itibaren günümüzün tabakalı kompozit kirişleri yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Son 20 yılda

bilgisayarlı üretim teknikleri ve birleşim sistemlerindeki gelişmeler, ağaçtan üstün verimli yararlanmayı, yüksek kaliteli ve hızlı üretimleri mümkün kılmıştır [132].

Thomas Herzog tarafından tasarlanan EXPO 2000 (Hannover) yapısı ahşap tek tabakalı uzay kafes sistemle tasarlanmış hiperbolik paraboloid sistemlerin en iyi örneklerindendir (Ayrıca Bkz. Bölüm 5.5 ve Çizelge 5.4).

2002 yılında, Acanthus Lawrence ve Wrightson tarafından tasarlanan 22 m x 18 m boyutlarındaki Hounslow East Station, ahşap lamella kesik tonoz örneklerindendir (Şekil 5.6).

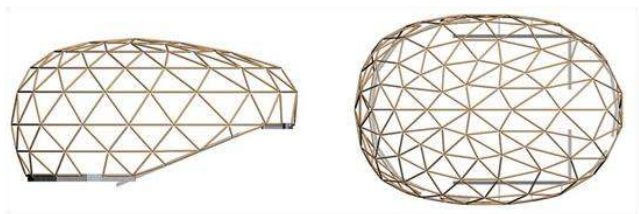


Şekil 5.6 Hounslow East Station, 2002, İngiltere [135]

2003'de glulam kullanılarak 109 m açıklık ve 33 m yüksekliğindeki nervürlü ahşap kubbe örneklerinden biri olan Pala Livorno Arena (Şekil 5.7) ve elips formu kubbe sistem olan Napier Üniversitesi, ahşabın gününüzde kullanılan örneklerinden bazılarıdır (Şekil 5.8).



Şekil 5.7 Pala Livorno Arena, 2003, İtalya [136]

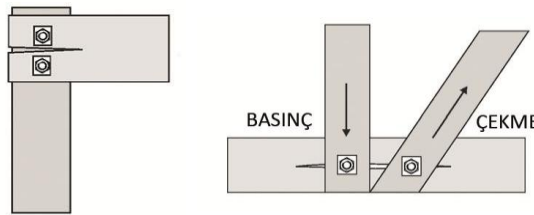


Şekil 5.8 Napier Üniversitesi, 2003, İskoçya [137], [138]

5.2 Ahşap malzeme ve özellikleri

Ahşap malzemenin; hafifliği, üretimi ve işlenmesi için az enerji istemesi, tekrar kullanılabilirliği, yangın dayanımı, montaj kolaylığı, düşük ısı iletkenliği, çeliğe yakın dayanım/yoğunluk ve elastisite modülü/yoğunluk oranları, bölgesel kesit artışlarının kolay üretilebilirliği ve amorf formların rahatlıkla oluşturulabilmesi, özellikle geniş açıklıklı sistemlerde onu vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir. Masif ahşabın yangın dayanımı da betonarme ve çelikten üstündür. Ahşap yapılar yangına 30-90 dakika dayanabilecek şekilde tasarlanabilmektedir. Oysa yangın koruması olmayan çelik elemanlar, genleşme katsayısının yüksekliği nedeniyle, sıcaklığı 700°C olduğunda ortam sıcaklığına göre dayanımı % 23'e, 800°C'de dayanımı % 11 ve 900°C da % 6'ya düşer ve yaklaşık 1500°C sıcaklıkta erir [139].

Ahşabın olumlu üstünlüklerine karşın, dezavantajları da bulunmaktadır. Nemi alınmamış ve emprenye işlemi uygulanmamış ahşap, nem etkisi ile şişerek çatlar (Şekil 5.9), bu nedenle ahşap % 7-12 nem düzeyine kadar kurutulmalı ve emprenye uygulanmalıdır. Ahşabın dayanımı lifleri doğrultusunda olduğundan (kesme kuvveti hariç) yükleme şekli, her zaman lif doğrultusunda normal gerilme yaratacak biçimde olmalıdır (2. sınıf masif çamda basınç emniyet gerilmesi lif doğrultusunda 8.5 MPa iken, liflere dik doğrultuda sadece 2 MPa'dır). Bu özellik ek yerlerinin teşkilinde de dikkate alınmalıdır.

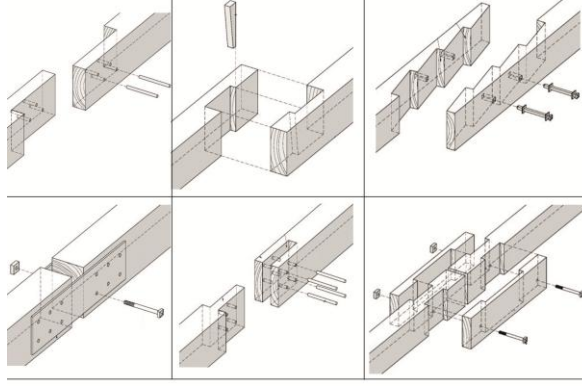


Şekil 5.9 Nem etkisinden dolayı oluşan ahşap yarıkları [140]

5.2.1 Ahşap birleşimler

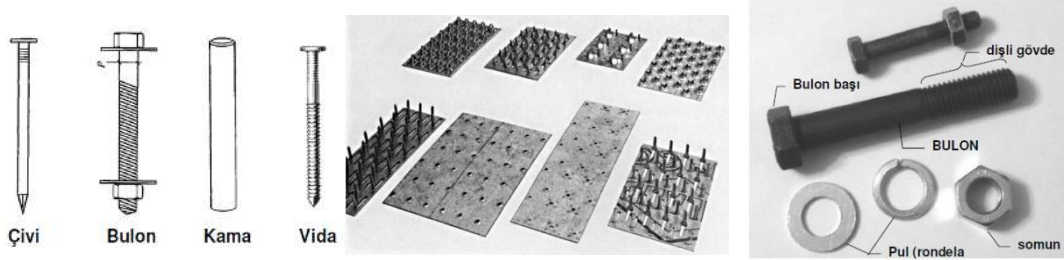
Ahşap birleşim sistemleri; yapının yükleri, geometrisi, yapım tekniğine bağlı olarak değişir. Yapı yükleri az olan yapılarda çivi ve ek levha takviyeli sistemler kullanılırken, ağır yüklü ve geniş açıklıklı sistemlerde, çelik takviye ve bulonlu birleşim gerektirir.

Ahşabın birleşim detaylarını etkileyen etmenlerin başında, nem ve buna bağlı olarak detaydaki değişimler gelmektedir. Birleşim bölgelerinde olası nem sorununa karşı tekil bağlantılara kıyasla daha geniş alan kaplayan birleşim elemanları seçilmelidir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Ahşap birleşim tipleri [141]

Ahşabın kesme dayanımının (6.5-15 Mpa), eğilmede çekme elastik limit dayanım düzeyinden (40-80 MPa) 5-8 kat daha düşük olması nedeniyle birleşimde rijitlik sorunu ortaya çıkar [142]. Bu sorun birleşim bölgesinin bağlantı elemanları ile güçlendirilmesi (ek levha takviyesi, bulon ya da çivili birleşim) ile çözümlenir [140], [143]. Birleşimde kullanılacak elemanlar; çivi, dübel, vida, kama, bulon, tutkal, dişli halka birleştiricileri, metal plaka birleştiricileri, tescilli ve patentli birleşim elemanlarıdır (Şekil 5.11).

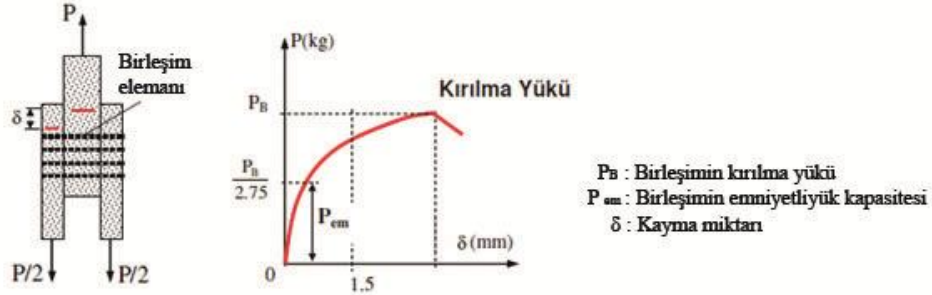


Şekil 5.11 Ahşap birleşim elemanları [144]

Birleşimin emniyetle taşıyabileceği normal kuvvet, çekme deneyi (Şekil 5.12) ile belirlenir [145];

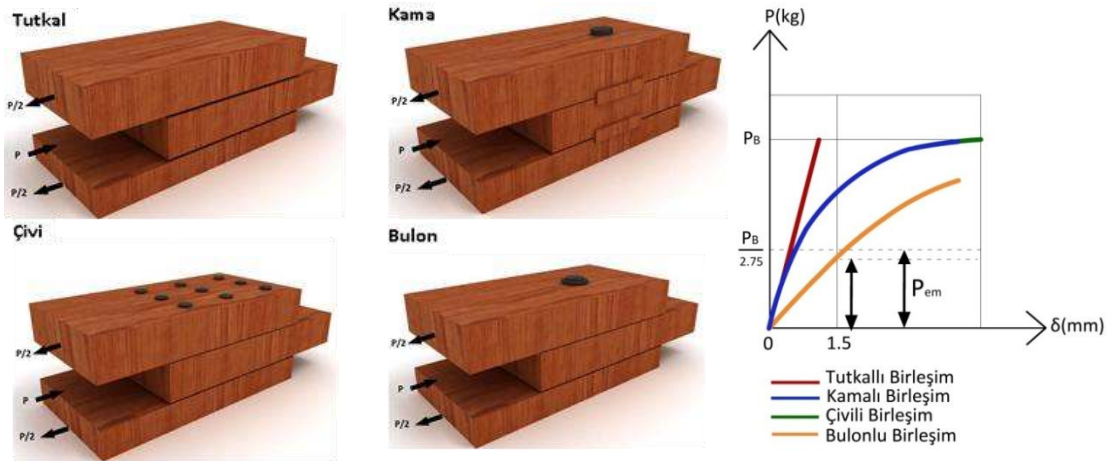
- Çekme deneyinde, kırılmaya karşı gelen normal kuvvet düzeyi (P_k) belirlenir ve emniyet katsayısına (2.75) bölünür ($P_k/2.75$).
- Deney sırasında ahşap elemanların birbirine göre 1.5 mm yerdeğiştirme (kayma) miktarına (δ) karşı gelen normal kuvvet düzeyi ($P_{1.5}$) belirlenir.

- $(P_k/2.75)$ ile $P_{1.5}$, hangisi daha düşük ise, birleşimin emniyetle taşıyabileceği kuvvet olarak o kabul edilir. Birleşen eleman sayısına bölünerek, elemanın emniyetle taşıyabileceği kuvvet düzeyi (P_{em}) belirlenir. Ayrıca tutkal için P_{em} , 1 cm^2 'de emniyetle taşınan kuvvet düzeyidir.



Şekil 5.12 Birleşimin yük taşıma kapasitesinin hesabı [145]

Aşağıda farklı birleşim araçları ile üretilen bir birleşimin kayma testi sonuçları görülmektedir [146]. Buna göre tutkal, kamalı birleşim ve bulonlu birleşim birlikte kullanılmamalıdır, zira birleşimlerin yük-yerdeğiştirme ilişkisi birbirinden çok farklıdır. Tutkal çok rijit olup, doğrusal elastik davranış göstermektedir. Kamalı ve çivili birleşim ise önce doğrusal elastik daha sonra doğrusal olmayan davranış göstermektedir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 Çeşitli birleşimlerde P_{em} değerinin deney ile belirlenmesi

(Çizimler tez kapsamında yeniden çizilmiştir)

Ahşap düğüm noktası ve mesnet birleşimi yapılırken birleşimin nemden uzak olması için drenaj ve havalandırma sağlanması, korozyona dayanıklı birleşim elemanları kullanılması ve bulonlara koruma kapakları düzenlenmesi, betona doğrudan temastan kaçınılması bunun yerine çelik levha ya da boşluk bırakılmasına dikkat edilmelidir.

Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemlerde birleşim detaylarına ait bazı örnekler Bölüm 5.4'te verilmiştir.

5.2.2 Tabakalı kompozit ahşap elemanlar

Tabakalı ahşap kompozit elemanların ortaya çıkışındaki nedenler kaynak temin biçimi ve üretim tekniklerindeki değişimler, çevresel koşulları dikkate alma, yüksek kaliteli malzeme ihtiyacı ve endüstriyel standartlardaki değişimler olarak özetlenebilir [147]. Günümüzde tabakalı kompozit ahşap, masif ahşabın kusurlarından arındırılarak kullanılması ve diğer avantajları¹ nedeni ile, geniş açıklıklı yapı sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Buna karşılık masif ahşaba kıyasla bazı dezavantaj özellikleri² de sözkonusu olabilir. Kusursuz odun levhalarından istenen boyutlarda eleman üretimi, farklı kalitelerde odun levhalarının kesitin farklı konumlarında uygulanabilme esnekliği; eğrisel, değişken kesitli ve estetik formların üretilebilmesi nedenleri ile geniş açıklıklı uygulamalarda çeliğe önemli bir alternatif haline gelmiştir. Günümüzde ahşap tabakalı kompozit elemanlarla 150 m açıklığı geçebilen kubbe yapılar yapılabilmektedir (Şekil 5.14).

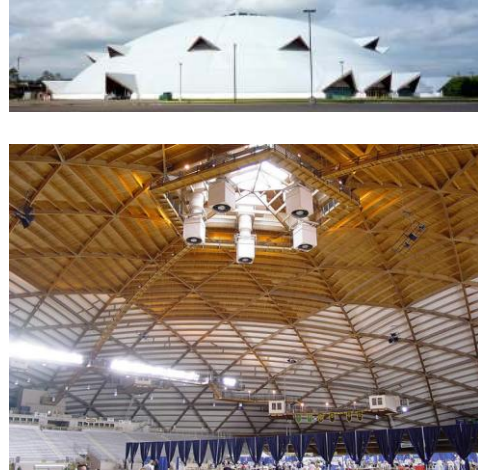
1

- Masif ahşap; yıllık halka yönüne, budak boyutu, yeri ve kusurlara farklılıklar gösterir. Tabakalı ahşapta böyle bir sorun yoktur, homojendir.
- Nem etkisiyle burkulma, çarpılma ve çukurlaşma gibi kusurların oluşumu masif ahşaba oranla çok daha azdır, yüksek derecede boyutsal sabitlik sağlanır.
- Dayanım kriterlerine göre enkesit boyunca değişen mekanik büyüklüğe sahip ahşap tabakaları kullanılabilir, bu da ahşabın ekonomik kullanımına imkan sağlar.
- Daha üniform dayanım ve rijitlik elde edilebilir.
- Eğrisel boykesit değişimi kolaylıkla mümkündür.
- Hızlı montaj yapılabilir, zayıf zemin koşulları için ideal bir yapı malzemesidir, bakım masrafları düşüktür [251].

² Tabakalı ahşabın üretim ve kullanımını, ekonomik faktörler (üretim yatırımı, kalifiye işçi ve maaş) etkileyebilir. Ayrıca üretimdeki yapıştırma safhası büyük dikkat isteyip, gelişmiş üretim tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır [252].



(a)



(b)

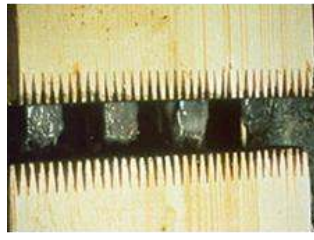
Şekil 5.14 Tacoma Dome (a), Superior Dome (b) [133], [148]

Tabakalı ahşapta kullanılan odunun yapısı, yüzey pürüzlülüğü, pres basıncı, presleme süresi ve kullanılan tutkalın teknik özellikleri odunun yapışma dayanımı üzerinde etkilidir.

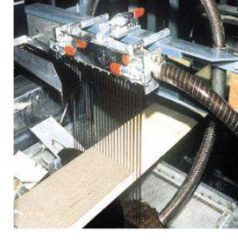
Tabakalı kompozitlerin üretimi Şekil 5.15'te gösterilmektedir.



Ahşabın seçilmesi



Tabakaların uç uca eklenmesi



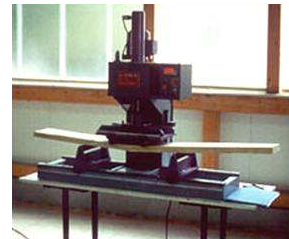
Bağlayıcıların uygulanması



Kalıplama-Presleme



Bitirme işlemleri



Dayanım testi



Ön montaj



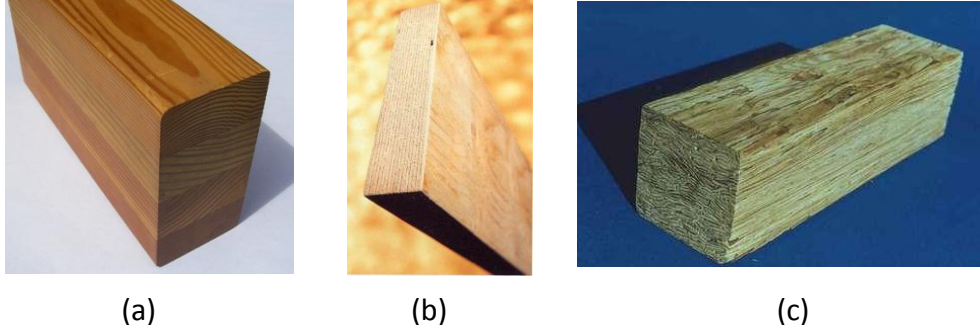
Nakliye



Montaj

Şekil 5.15 Tabakalı ahşap kompozitin yapım aşamaları [149]

Geniş açıklıklı tek tabakalı uzay kafes sistemlerde Glulam, LVL ve PSL tipi tabakalı kompozitler kullanılmaktadır (Şekil 5.16). Üretimlerinde, çam, köknar ve ladin gibi yumuşak ağaç odunları kullanılır.



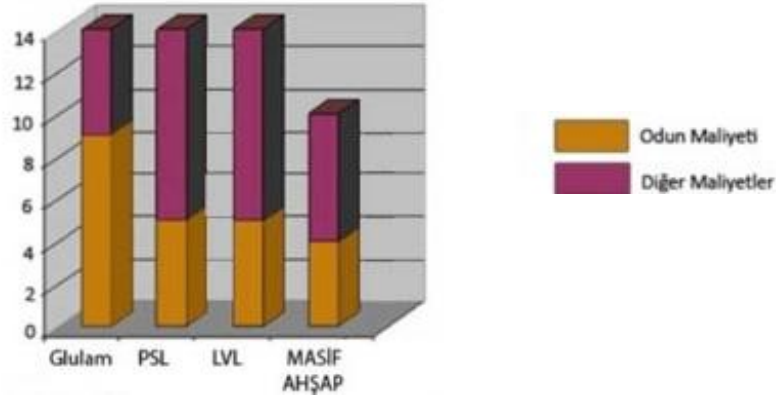
Şekil 5.16 Geniş açıklıklı yapılarda kullanılan tabakalı kompozitler (a) Glulam, (b) LVL, (c) PSL [150], [151], [152]

Glulam (Tabakalı Tutkallı Ahşap): Odun lamellerinin lifleri birbirine paralel olacak şekilde yapıştırılmasıyla elde edilen yapı elemanıdır. En eski mühendislik ürünü ağaç malzemelerden biridir, üretimi ve kullanımı 19. yy'da başlamıştır. Tabaka uzunluğu 1.5-5 m aralığında olup, tabaka kalınlığı ise; düz kompozit eleman üretiminde 40-50 mm, eğrisel eleman üretiminde ise, 20-30 mm olarak uygulanır. Elemanlar 16-20 m uzunlukta üretilebilmektedir (Şekil 5.16.a) [153].

LVL (Tabakalanmış Kaplama Ahşap): Kaplamaların lif yönünde birbirlerine paralel olarak sıralanarak yapıştırılmasıyla oluşur. Farklı kalitelerdeki kaplamalar enkesitte farklı bölgelerde kullanarak amaca uygun malzeme elde edilir. Kullanılan en yaygın uzunluk 14-20 m aralığındadır. Tabaka kalınlığı 2.5-4.8 mm aralığında olup, 60 cm yüksekliğe kadar standart kesitler üretilebilir (Şekil 5.16.b) [154]

PSL (Paralel Şerit Kereste): Kaplama şeritlerin son ürünün boyuna paralel olarak yerleştirilerek, sıcaklık ve basınç altında preslenmesiyle kereste formu verilmiş bir oluşum olarak tanımlamaktadır. 3 mm kalınlık ve 19-24 mm genişliğinde kesilmiş en az 0.6 m uzunlukta şerit kaplamalardan üretilir. Bu sayede, eleman uzunluğu 20 m'ye kadar ulaşabilir [155], [156], [157]. Üretim sürecinde kontraplak ve LVL üretiminden arta kalan malzemelerden de yararlanılabilir, genellikle geniş açıklıklarda kolon malzemesi olarak kullanılmaktadır (Şekil 5.16.c).

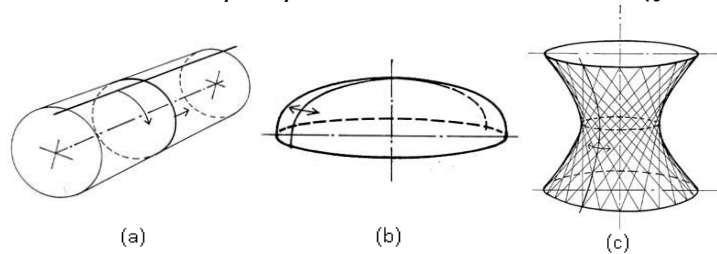
Mühendislik ürünü ahşapların ekonomik açıdan karşılaştırılması Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Bu maliyet analizinde; hızlı büyüyen, az bilinen ve küçük çaplı ağaç malzemelerin değerlendirilmesi ve diğer maliyetler olarak nitelendirilen; tutkal maliyeti, işçilik, üretim süreci, amortisman, enerji tüketim, v.b gibi nedenler büyük ölçüde etki etmektedir. Tabakalı tutkallı ahşap yapımında odun maliyeti maksimum, diğer maliyetler minimum iken, PSL ve LVL yapımında diğer maliyetler ön plandadır.



Şekil 5.17 Tabakalı ahşap kompozitlerin ekonomik açıdan karşılaştırılması [157]

5.3 Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemler

Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemler; silindirik kabuk (tonoz), kubbe, hiperbolik paraboloid ve serbest formu yüzeyler olarak sınıflandırılabilir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 (a) Silindirik kabuk, (b) Kubbe ve (c) Hiperbolik paraboloid sistem

Bu bölümde sözkonusu sistemlerin tabakalı ahşap kompozit elemanlar kullanılarak oluşturulması anlatılacaktır.

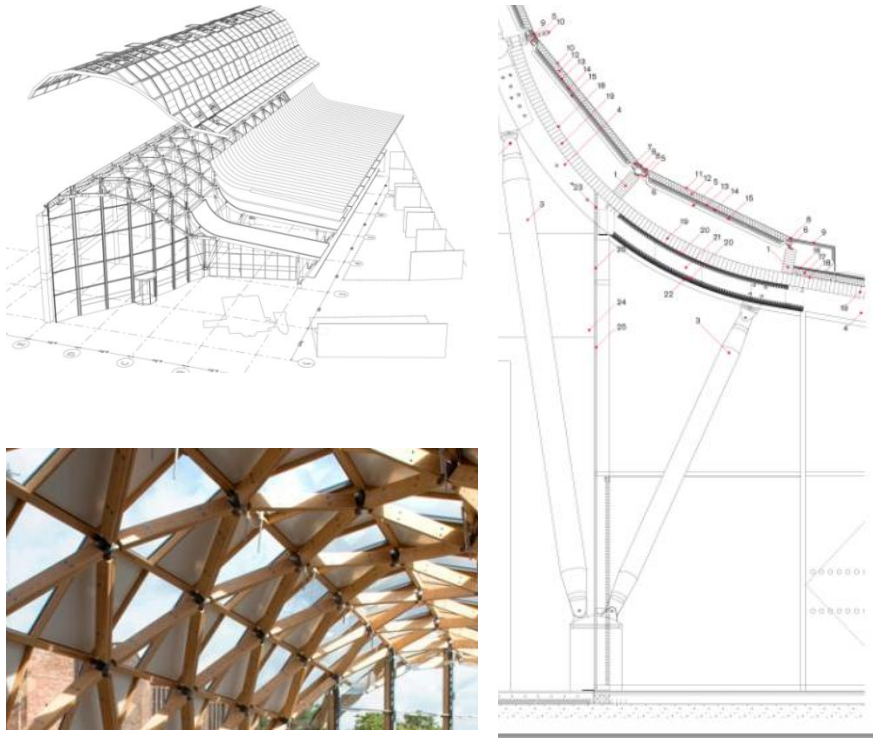
5.3.1 Tek tabakalı ahşap silindirik kabuk sistemler

1904 yılında Zollinger’in lamella sistemi geliştirmesinden sonra önemli ahşap silindirik kabuk uygulamaları yapılmıştır. 54 m uzunluk ve 32 m genişliğindeki Sport Hall (Berlin) (Bölüm 5.5 ve Çizelge 5.2), 54 m uzunluk ve 32 m genişliğindeki Portcullis House (Şekil 5.19) ve 9.60 m uzunluk ve 3.75 m genişliğindeki Herbert Museum and Art Galery

yapısı (Şekil 5.20) glulam kullanılmış, lamella tipi tek tabakalı ahşap silindirik kabuk örneklerindendir.



Şekil 5.19 Portcullis House, 2001 (Glulam ahşap) [74]



Şekil 5.20 Herbert Museum and Art Galery, 2009 (Glulam ahşap) [158]

5.3.2 Tek tabakalı ahşap kubbe sistemler

Ahşap kubbe sistemler, en eski yapı formlarındandır. Özellikle nervürlü kubbeler (Ayrıca Bkz. Bölüm 3.2.3.1), uç mafsallı kemerlerden meydana getirilerek yapıldı (Şekil 5.21). Nervürlü kubbelerin tepe noktalarındaki birleşim sorunları ve çatı kaplamasını taşımakta zorlanması dezavantaj özellikleriydi.



Şekil 5.21 Radial Rib Dome [82].

Ahşap malzeme, jeodezik kubbenin geliştirilmesiyle daha çok kullanım alanı bulmuştur. Tabakalı kompozit ahşap elemanların kullanıldığı kubbeler ile 200 m'ye kadar açıklık geçilebilmektedir (Şekil 5.23). Ahşap kompozitlerin kullanıldığı en yaygın kubbe türleri, nervürlü, schwedler ve jeodezik kubbelerdir (Şekil 5.22). Glulam elemanlar ile oluşturulan Tacoma Dome dünyanın en geniş açıklıklı (160 m) kubbesidir (Ayrıca Bkz. Bölüm 5.5 ve Çizelge 5.3).



(a)

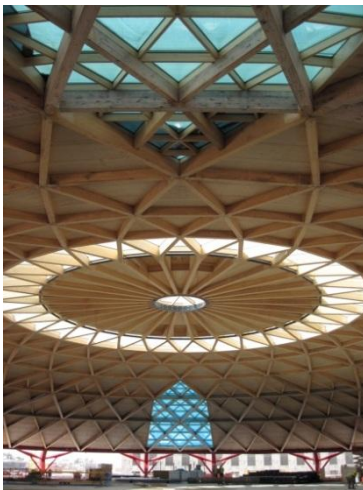


(b)



(c)

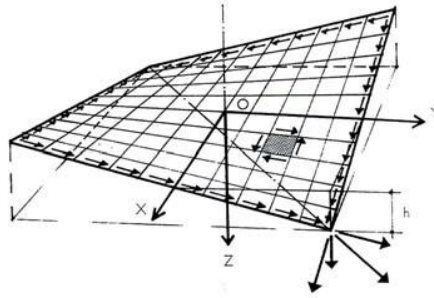
Şekil 5.22 (a) Sports Dome (Nervürlü kubbe) [159], (b) Superior Dome (Jeodezik kubbe) [160],(c) Southall Gurdwara (Schwedler kubbe) [161]



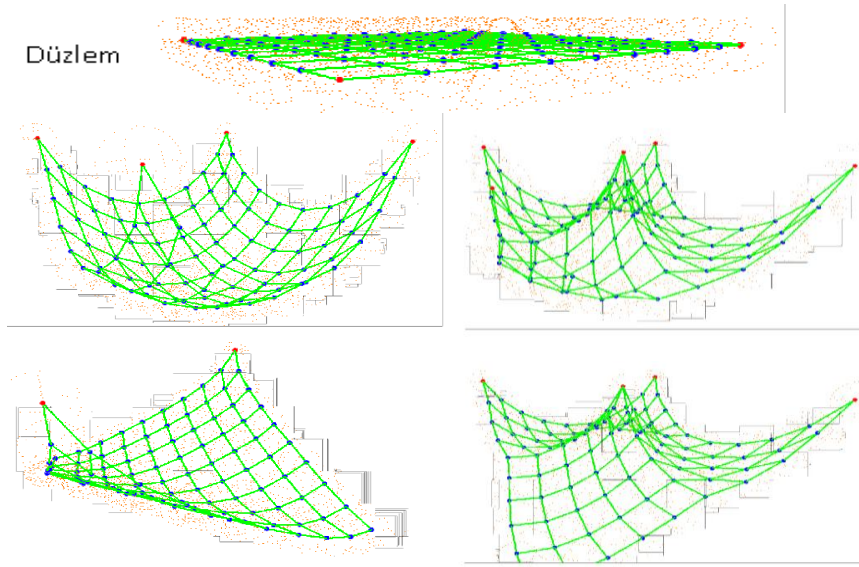
Şekil 5.23 Las Arenas bullring (glulam) (Barcelona) [162], Pyramid Meet Dome (glulam) (İngiltere) [163]

5.3.3 Tek tabakalı ahşap hiperbolik paraboloid sistemler

Hiperbolik paraboloid sistemlerde ahşap malzemenin kullanımı, şekil alabilme özelliğinden dolayı kolaydır. Hiperbolik bir yüzeyde her ΔA 'lık alanda oluşan kesme kuvvetleri kendi köşe noktalarına ve buradan hiperbolik yüzeyin köşe noktalarına gönderilir. Kesme kuvveti, köşe noktalarından kolonlara yada mesnete ulaşır (Şekil 5.24) (Ayrıca Bkz. Bölüm 3.2.3.1). Zincir modeli kullanılarak hiperbolik bir yüzeyin oluşum simülasyonu Şekil 5.25'te gösterilmiştir. Kırmızı noktalar mesnet yerlerini, mavi noktalar ise düğüm noktalarını göstermektedir. Sistemin ahşap malzeme ile kurulumu bu gösterilen noktalarda düğüm noktası ve mesnet birleşimleri yapılarak oluşturulur. Farklı hiperbolik eğriliklere sahip iki yapıya ait ahşap sistem kurulumu Şekil 5.26.a'daki gibidir.



Şekil 5.24 Hiperbolik paraboloid sistemde bir yüzeyin kesme kuvveti aktarımı [82]



Şekil 5.25 Düzlem yüzeyden meydana gelen hiperbolik formların simülasyonu [164]

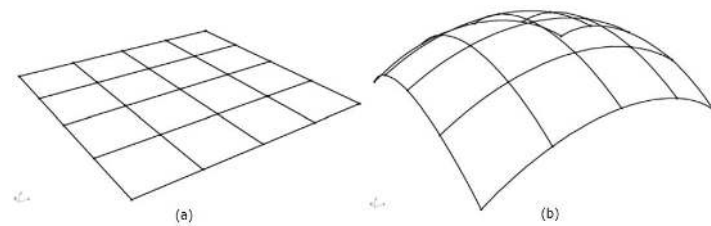


Şekil 5.26 Hiperbolik paraboloid sistem kuruluşu (a) Hill Holt Woodland Centre ve (b) Gillespie Hyperbole [137]

Expo 2000 yapısı en iyi ahşap hiperbolik paraboloid sistem örneklerindendir (Ayrıca Bkz. Bölüm 5.5 ve Çizelge 5.4).

5.3.4 Tek tabakalı ahşap serbest formlu sistemler (gridshell)

Serbest formlu yapı sistemlerinde de kullanılan ahşap, diğer sistemlere göre daha karmaşık bir yapım sistemi kurgusuna sahiptir. Formun geometrik özelliklerinin bilinmesi ve ızgara sistemdeki düğüm noktalarının eşit aralıklı düzenlenmesi gerekmektedir [82]. İki yönde çaprazlamasına düzenlenen bu sistem ile farklı formlar oluşturulabilmektedir. Sistem, uzun ve ince kesitli ahşap çubukların (çıtaların) mafsallı birleştiği, eşkenar dörtgen yüzeylerin deforme edilerek, köşegenlerde mesnetlenmesi sonucunda meydana gelir (Şekil 5.27 ve Şekil 5.28).



Şekil 5.27 (a) Düzlem ızgara form, (b) Deforme edilmiş eşkenar dörtgen formu [82]



Şekil 5.28 Multihalle Mannheim Yapısı, 1975 [165]

Sistemin statik analizi, moment kapasitesi ve gerilme hesapları nihai eğriliğe göre yapılır. Sisteme özellikle kurulum aşamasında önemli düzeyde etkiyen iki yöndeki eğilme momenti, burulma momenti ve kesme kuvvetine göre statik hesabı ve gerilme analizleri, nihai eğrilik dikkate alınarak yapılmalıdır. Sistemin kurulumu sırasında maksimuma ulaşan gerilmeleri emniyetle taşıdığı gösterilmelidir. Kurulum sonrası gerilme düzeyi zamanla % 50 oranında azalır (relaxation) [166].

Geometri seçiminin zorluğu, karmaşık tasarım aşamaları ve işçilik maliyeti nedeniyle, ancak serbest formların günümüzde popüler hale gelmesiyle kullanımı artmıştır. Bunun en iyi örnekleri, 2002 de yapılan Weald and Downland yapısı (Şekil 5.29.a) ve 2006 da yapılan Savill Garden yapısıdır (Şekil 5.29.b).



(a)

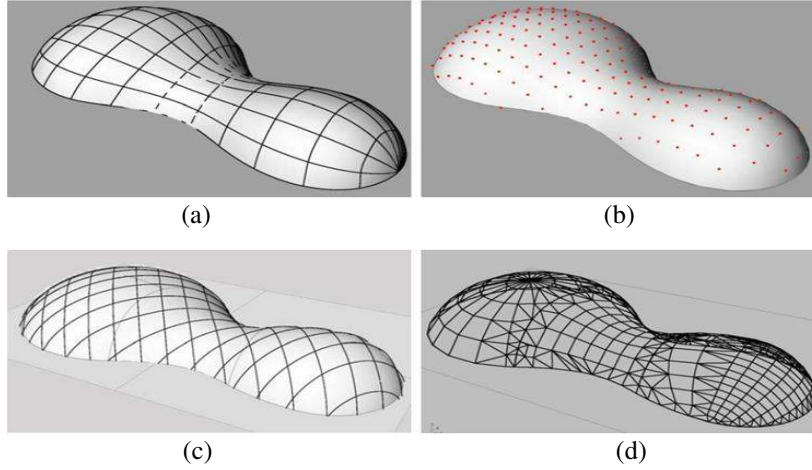


(b)

Şekil 5.29 (a) Weald & Downland gridshell yapısı [82], (b) Savill Garden Yapısı [123]

Malzemenin eğilme davranışına bağlı geometrik şekli önceden bilinmediği için, tasarım modelinin tahmini ilerlemesi inşaat yapımı sırasında zorluklara neden olmaktadır. Bu problemin çözülmesi için önerilen, birleşim noktaları arasında eşit uzaklık sağlama yöntemidir [82]. Rhino bilgisayar programında bu yöntemin aşamaları (Şekil 5.30);

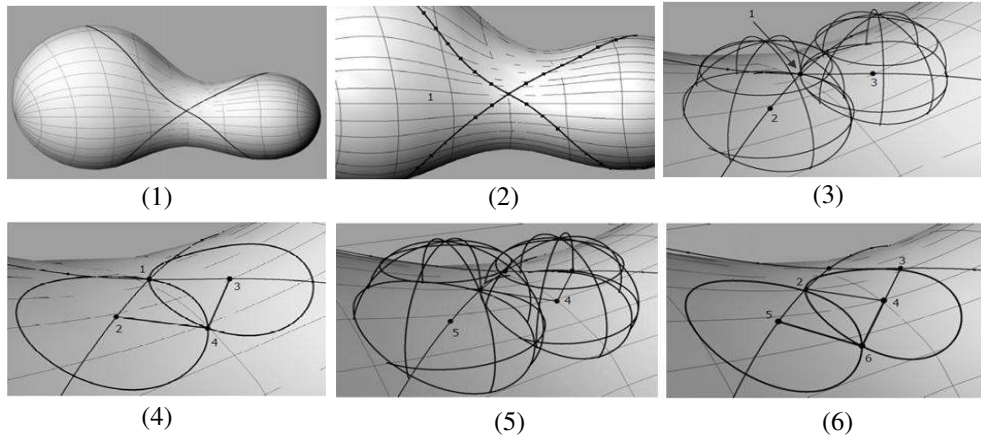
- UV koordinatlarındaki noktalar (a),
- Z yönündeki nokta izdüşümü (b),
- Çizgi izdüşümü (c),
- Poligonlar içinde yüzeyin üçgen birimli modelde gösterilmesidir (d) [82].



Şekil 5.30 Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistem ve Rhyno programı yapım yöntemi [82]

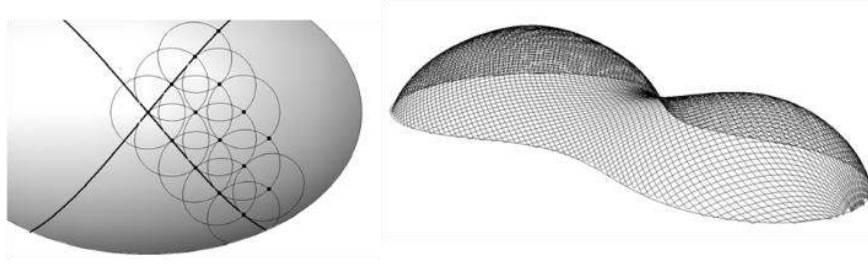
Sistem küre metodu kullanılarak oluşturulmaktadır. Bunun için oluşturulacak adımlar (Şekil 5.31);

1. Bölümlerin oluşturulması (1),
2. Bölümlerin aynı uzunlukta bölünmesi (2),
3. İki yardımcı küre ile kesişimlerin bulunması (3),
4. Kesişim noktalarının yerleşimi (4),
5. 5. ve 4. noktaların meydana gelmesi (5),
6. Kesişmiş eğriler ile 6. noktanın bulunmasıdır (6) [82].



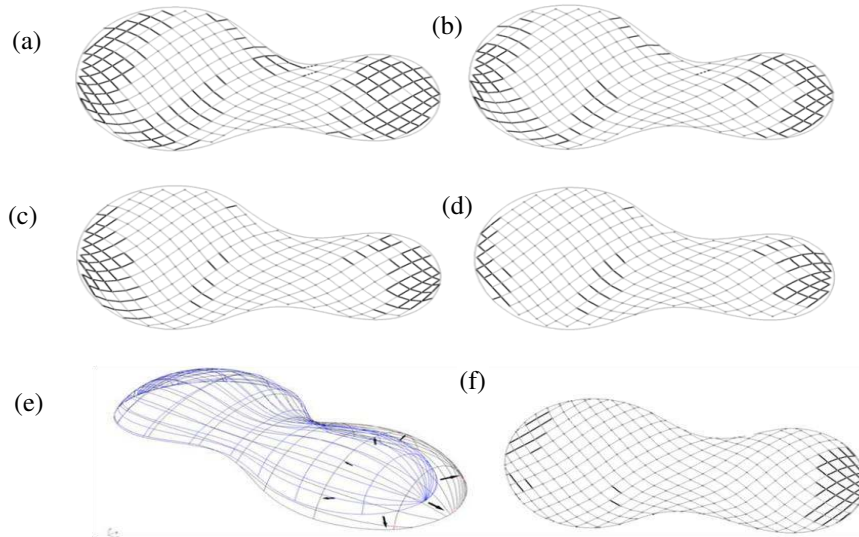
Şekil 5.31 Küre yöntemi [82]

Küre yöntemi ile oluşturulan sistem şekline göre hücreler, daireler ile kademe kademe oluşturulur (Şekil 5.32).



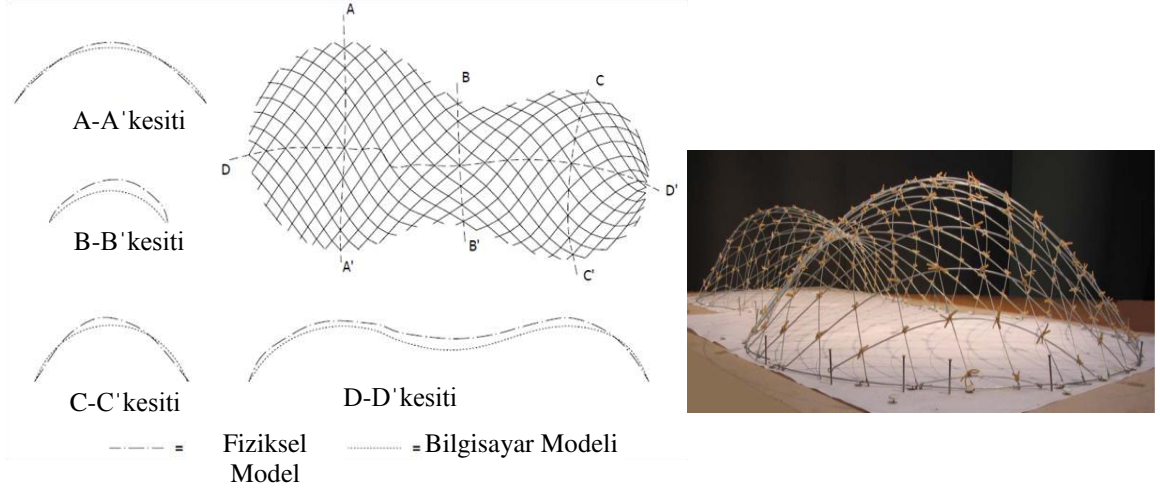
Şekil 5.32 Sistemin dairelerin kesişimi ile oluşturulması [82]

Sistem formu elde edildikten sonra, eğrilik analizleri yapılır. Şekil 5.33.a' da 2.5 m kenarlı dörtgen birimlerden oluşan bir model görülmektedir. Koyu ve nokta nokta çizgilerin olduğu kısımlarda mak. eğrilik dolayısı ile eğilme momenti ve burulma gerilme sınırları aşılmıştır. Bu durumda çözüm olarak eğriliğin azaltılması, daha büyük dayanımlı yüksek kesit seçimi, daha küçük dörtgen birim seçimi alternatifleri denenebilir (Şekil 5.33).



Şekil 5.33 Sistemin eğrilik analiz sonuçları ve nihai formun oluşturulması [82]

Sanal ortamda modellemeden sonra, fiziksel modeli hazırlanır ancak kubbe yükseklikleri ve eğrilikler bilgisayar modeli ile tamamen aynı olmayacaktır (Şekil 5.34) [82]. Nihai forma karar verilmeden önce bilgisayar analizlerinin tekrarlanması gereklidir. Bu nedenle uygulamada önce fiziksel modelin hazırlanması, daha sonra bilgisayar modelinin oluşturulması tercih edilebilir.

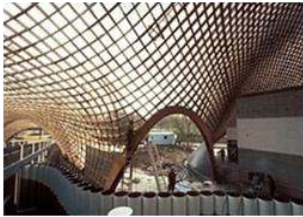


Şekil 5.34 Sistemin fiziksel ve bilgisayar modeli kesitleri [82]

5.4 Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemlerde birleşimler

Uzay kafes sistemlerde sistem geometrisine göre değişen bazı birleşim elemanları Çizelge 5.1’de yer almaktadır. Dünyada tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemlerin çeşitli formlarda uygulama örnekleri ise Bölüm 5.5’te verilmiştir.

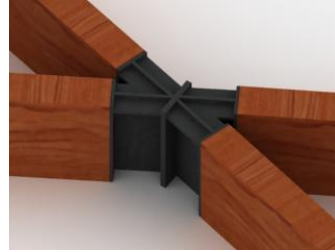
Çizelge 5.1 Bazı tek tabakalı uzay kafes sistemler ve birleşim detayları [133], [161] [167], [168]

YAPI	BİRLEŞİM TİPİ
Multihalle Mannheim 	
Weald and Downland Open Air Museum 	

Tacoma Dome



Sydney Showground Dome



Gurdwara Southall Temple



5.5 Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistem örnekleri

Çizelge 5.2 Sport Hall, Charlottenburg (Berlin) [133], [169]

Yapı Bilgileri

Sport Hall yapısı, Charlottenburg'da (Berlin), Neuenegg, R. Gut, R. Meuli ve Minusio tarafından tasarlanmıştır (2000).

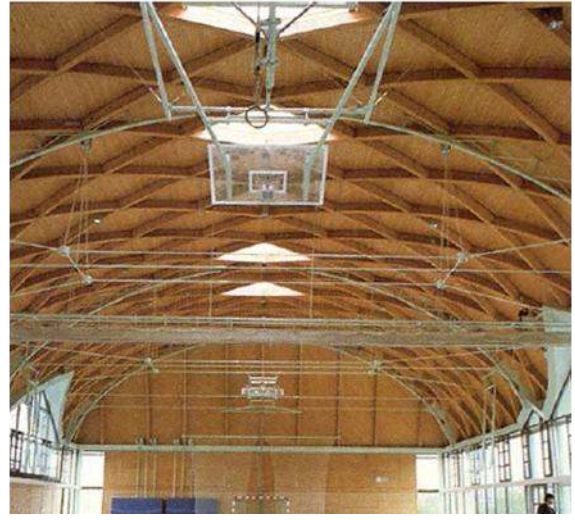
Alanı 1728 m² olan spor yapısı, tek tabakalı ahşap silindirik kabuk sistem ile tasarlanmıştır.

Yapının boyuna uzunluğu 54 m, genişliği 32 m ve yüksekliği 9 m'dir.

Çubuk eleman uzunluğu 2 m olan tabakalı kompozit ahşap elemanların düğüm noktaları çelik plakalar ve bulonlar ile rijit birleşimlidir (A). Lamella tipi silindirik kabuk sistemin üzerine paralel, tali ahşap çıtalar eklenerek rijitlik arttırılmıştır.

Sistem, dairesel öngermeli beton kirişe mafsallı olarak oturtulmuştur.

Sistemin montajı, yerinde yapım yöntemi ile sağlanmıştır (B).



(B)



(A)



Çizelge 5.3 Tacoma Dome, ABD [74], [170]

Yapı Bilgileri

Tacoma Dome (1983), McGranahan Messenger Architects tarafından A.B.D’de tasarlanmıştır.

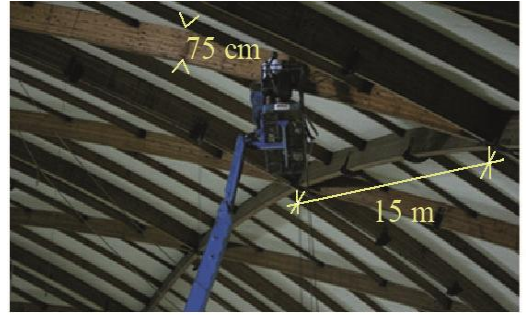
Alanı 20500 m² olan yapının çapı 161 m, yüksekliği 46 m olan spor yapısı, tek tabakalı kubbe sistem kullanılarak tasarlanmıştır.

Eleman uzunluğu 15 m olan sistemin glulam eleman boyutları, 17-22 cm x 75 cm’dir (A). Altıgen ve üçgen ızgara kombinasyonlu kubbe sistemin düğüm noktalarında, ahşap elemanlar çelik merkezli bağlantı elemanlarına bulon ile birleştirilmiştir (B). Sistem, dairesel öngermeli beton kirişe oturtulmuştur.

Sistemin montajı, vinç ile kaldırılarak yerinde yapım yöntemi ile sağlanmıştır (C).



(A)



(B)



(C)



Çizelge 5.4 EXPO 2000, Almanya [82], [171], [172], [173], [174]

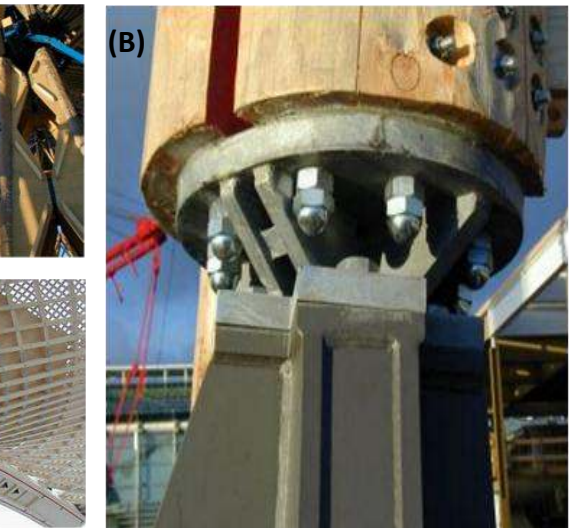
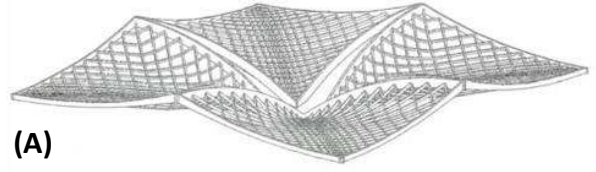
Yapı Bilgileri

EXPO 2000 yapısı (Hannover), 1999 yılında Thomas Herzog tarafından Almanya’da tasarlanmıştır.

Yapı, tek tabakalı hiperbolik paraboloid sistem ile tasarlanmıştır. Taşıyıcı sistem boyutları 39 x 39 m, yüksekliği 18 m ve konsol uzunluğu 19 m’dir.

33 mm kalınlığındaki LVL ahşap kesitleri 30x160 mm ve sistem kiriş kesitleri, 22x110-22x145 mm’dir. Sistemin düğüm noktaları çelik plaka destekli olup bulonlar ile birleştirilmiştir (A). Sistemin çelik plakalı mesnet bölgesi, bulonlar ile temele birleştirilmiştir (B).

Sistemin montajı, vinç ile kaldırılarak yerinde yapım yöntemi ile sağlanmıştır (C).



Çizelge 5.5 Multihalle Mannheim Sergi Salonu, Almanya [167], [175], [176]

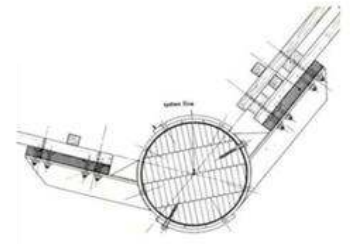
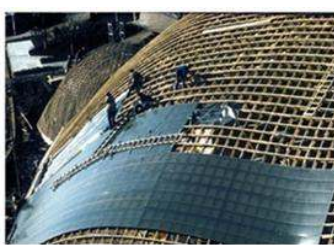
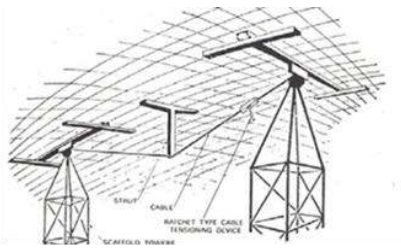
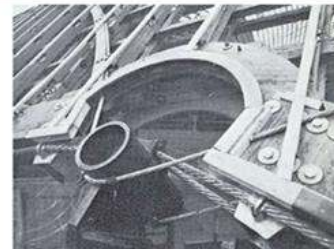
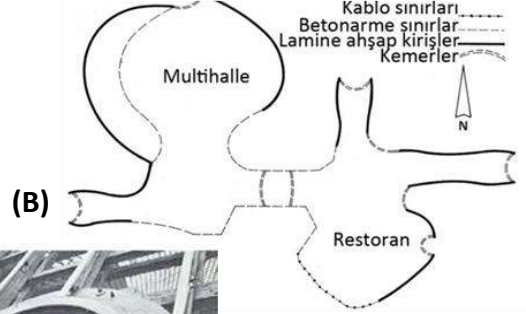
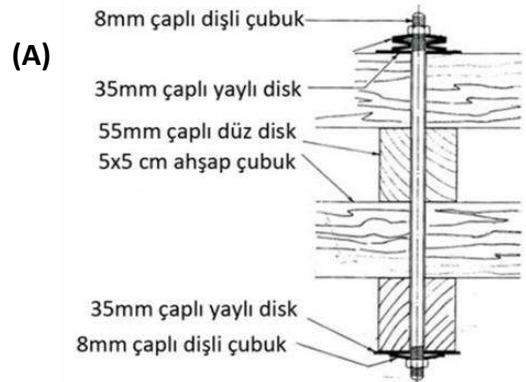
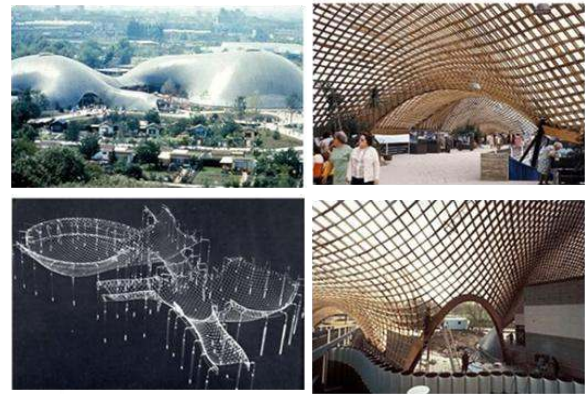
Yapı Bilgileri

Multihalle Mannheim Sergi Salonu, 1975 yılında Frei Otto ve Ove Arup tarafından Almanya'da tasarlanmıştır.

Yapı alanı 3600 m² olan sergi salonu tek tabakalı serbest formlu sistem olarak tasarlanmıştır.

Yapının uzunlamasına açıklığı 85 m olup, parmak birleşimli ahşap çubuk eleman kesitleri, 5 x 5 x 50 cm'dir (A). Çubuk elemanlar bir bulon ile mafsallı birleştirilir. Taşıyıcı sisteme ek olarak kablo ve tabakalı ahşap kiriş eklenerek stabilite sağlanmıştır. Yapının mesnet birleşimi, betonarme temel üzerine çelik levha ve kablo destekli birleşim ile sağlanmıştır (B).

Sistemin montajı, vinç ile kaldırma yöntemi ve asansör iskele kuleleri ile yapılmıştır (C).



Çizelge 5.6 Weald and Downland Open Air Museum, İngiltere [133], [177]

Yapı Bilgileri

Weald and Downland Open Air Museum 2002 yılında, Edward Cullian Architect, Buro Happold Engineers ve Green Oak Firm firmaları tarafından İngiltere’de tasarlanmıştır.

Müze yapısı, tek tabakalı serbest formlu sistem olarak tasarlanmıştır.

Yapının uzunlamasına açıklığı 48 m, yüksekliği 7-10 m ‘dir. Parmak birleşimli ahşap çubuk eleman kesitleri, 5 x 3.5 cm’dir (A). Çubuk elemanların düğüm noktaları, çelik levha takviyeli sistem ile mafsallı olarak birleştirilir.

Sistemin montajı, yerde itme ve çekme yapıp, kriko ile istenen şekle getirme yöntemi ile yapılmıştır (B) (47x25 m uzunluğundaki sistem 96 ve 84° açılı birimlerden oluşmaktadır).



(B)



(A)



Çizelge 5.7 Savill Garden, İngiltere [82], [178]

Yapı Bilgileri

Savill Garden yapısı 2006 yılında Glenn Howells Architects tarafından İngiltere’de tasarlanmıştır.

Yapı, tek tabakalı serbest formlu sistem olarak tasarlanmıştır.

Yapı uzunluğu, 98 x 28 m olup, yüksekliği 4.5-8.5 m’dir. Parmak birleşimli lamine ahşap çubuk eleman kesitleri, 8 x 5 cm olup, çaprazlama çubuklarının boyutları, 8 x 12 x 30 cm’dir. Taşıyıcı sistem, kenar kısımlarında çapı 40 cm olan çelik boru kirişe, oradan da ters V tipinde kolonlara mesnetlenmektedir (A).

Yapının düğüm noktaları ve mesnet birleşimleri çelik levha takviyeli olup, bulon ile birleştirilmiştir.

Sistemin montajı, vinç ile kaldırma yöntemi kullanılarak yapılmıştır (B).



(B)



TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERİN ALÜMİNYUM MALZEME İLE OLUŞTURULMASI

6.1 Tarihçe

Alüminyumun endüstriyel çapta üretimi, 1886 yılında ABD’de Charles Martin Hall ve Fransa’da Paul T. Heroult’un elektroliz yöntemi ile başlamıştır. Bu, günümüzde halen kullanılan yöntem olduğundan, 1886 yılı alüminyum endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilir. 1886 yılında Werner Von Siemens’in dinamoyu keşfi ve 1892 yılında K. Bayer’in, boksitten alüminyum eldesini sağlayan Bayer prosesini bulması ile alüminyumun endüstriyel çapta üretimi çok kolaylaşmış ve bu en genç metal, demir çelikten sonra dünyada en çok kullanılan ikinci metal olmuştur. Alüminyumun yapıda kullanımına **1930**'lu yıllarda başlanmış; **1950**'li yıllarda kalıplama tekniği ile geniş kullanım alanı bulmuştur. Lord ve Burnham'ın tasarladığı Botanic Garden Conservatory (1930, ABD) ilk alüminyum yapı örneklerinden birisidir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 U.S. Botanic Garden Conservatory [179]

Wallace Harrison ve Max Abramovitz'in tasarladığı, Alcoa Building yapısı da alüminyumun cephe kaplaması olarak kullanıldığı ilk örneklerdendir (Pittsburg, ABD, 1952) (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Alcoa Building [180], [181]

1970 li yıllarda tek tabakalı uzay kafes sistemlerin alüminyum malzeme ile yapılması yaygınlaşmıştır; bunlara Des Moines Botanical Center yapısı (ABD, 1979) (Şekil 6.3), 41.6 m açıklıklı Amundsen-Scott South Pole Station kubbesi (Antartika,1975) (Şekil 6.4). 81 m açıklıklı Limestone Blending Facility yapısı (Mojave, CA, 1990) (Şekil 6.5) örnek verilebilir.

Alüminyum malzeme günümüzde en çok, fabrika yapılarında kullanım alanı bulmaktadır.



Şekil 6.3 Des Moines Botanical Center yapısı [182]



Şekil 6.4 41 m açıklıklı Amundsen-Scott South Pole Station [183]



Şekil 6.5 Limestone Blending Facility yapısı [183]

6.2 Alüminyum malzeme ve özellikleri

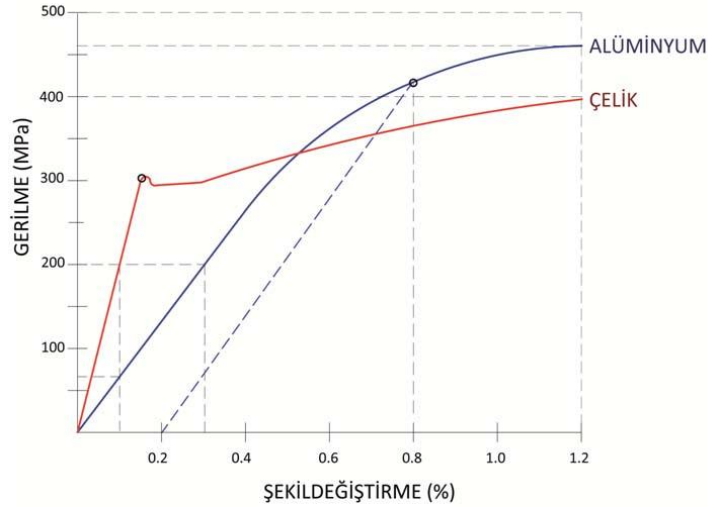
Alüminyum malzeme; enerji tasarrufu sağlayan, fabrikasyon kolaylığı ve yeniden kullanılabilirliği olan, alaşımlı olarak yüksek dayanım özelliği, düşük yoğunluğu, hafifliği, korozyon dayanımı, kolay işlenebilirlik ve yüksek yansımaya özelliğinden dolayı çelikten sonra yapıda büyük ölçüde kullanım alanı bulmuştur. Çelikten farklı olarak, çok ince ve değişik formlarda üretilebilir, ancak çelikten 4 kat daha pahalı bir malzemedir.

Alüminyumun elastisite modülü çeliğin üçte biri düzeyindedir, bu da yapı tasarımında çeliğe kıyasla üç kat daha fazla yerdeğiştirme anlamına gelir (örneğin, kolon tasarımı için uygun bir malzeme değildir). Buna karşılık, alaşımlı alüminyumun çeliğe eşdeğer akma dayanımı söz konusudur. Çeliğe kıyasla yüksek çekme dayanım/ağırlık oranı, alüminyumu geniş açıklıklı tek tabakalı uzay kafes sistemler için çok uygun bir malzeme yapmıştır. Çelik ve alüminyumun özellikleri Çizelge 6.1’de topluca verilmiştir.

Çizelge 6.1 Yapısal çeliklerin karşılaştırılması [184]

ÖZELLİK	ALÜMİNYUM 6061-T6	KARBON ÇELİĞİ A36	PASLANMAZ ÇELİK 304
Şekil Alma	Çok iyi	Pratik değil	Sınırlı
Kaynaklama	İyi (dayanım arttırılmalı)	İyi (dayanımda azalma görülmez)	İyi
Korozyon Dayanımı	İyi	Orta	Çok iyi
Akma Dayanımı (MPa)	240	250 – 340	300
Elastisite Modülü (GPa)	69	210	193
Maks. uzama şekildeğiştirmesi (%)	8 – 10	20	30
Yoğunluk (t/m ³)	2.69	7.82	7.85
Akma dayanımı / Ağırlık oranı	2.8	1 – 1.14	1.2
Ağırlığa göre fiyatı (\$/kg)	2.65	0.66	3.08

Alüminyumun gerilme-şekildeğiştirme diyagramında belirli bir akma gerilmesi söz konusu değildir (Şekil 6.6). Maks. uzama şekildeğiştirmesi de çeliğin yarısı düzeyindedir, dolayısı ile sünekliliğin istendiği deprem etkin tasarım için çok uygun değildir.



Şekil 6.6 Çelik ve Alüminyum'un gerilme-şekildeğiştirme diyagramı [185]

Yapıda kullanılacak alüminyum, alaşım çeşidine göre seçilmelidir. Alaşımsız alüminyumun kopma dayanımı 90 MPa iken; alaşıma çinko, bakır, magnezyum ve krom eklendiğinde bu değer 550 MPa değerine ulaşır [184], [186].

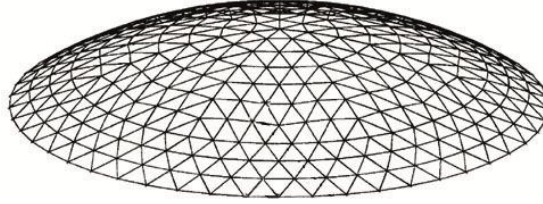
Alüminyum alaşımları; korozyon, dayanım ve ısıt işlem uygulanabilirlik özelliklerine göre Çizelge 6.2'de verilmiştir. 7xxx ve özellikle 6xxx türü alüminyum alaşımları yapıda taşıyıcı sistem ve diğer yapısal elemanlarda; 3xxx oluklar, cephe ve çatı örtüsünde kullanılır.

Çizelge 6.2 Alüminyum alaşımlarının özellikleri [184], [186]

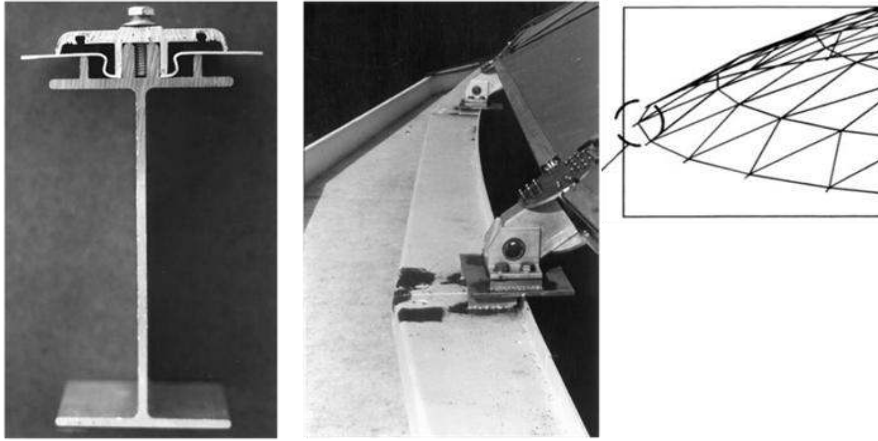
Tür	Element Alaşımı	Görelî Korozyon Dayanımı	Görelî Dayanım	Isıl İşlem
1xxx	Yok	Mükemmel	Orta	Uygulanamaz
2xxx	Bakır	Orta	Mükemmel	Uygulanır
3xxx	Manganez	İyi	Orta	Uygulanamaz
4xxx	Silikon	-	-	Yüzdesine bağlı
5xxx	Magnezyum	İyi	İyi	Uygulanamaz
6xxx	Magnezyum + Silikon	İyi	İyi	Uygulanır
7xxx	Çinko	Orta	Mükemmel	Uygulanır

6.3 Tek tabakalı uzay kafes sistem kurulumu

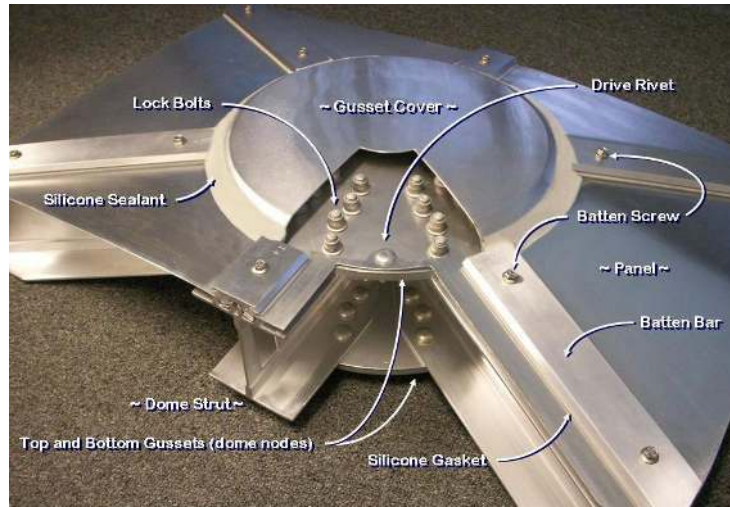
Bu bölümde tipik bir kubbe kurulumu, detayları ile birlikte gösterilmiştir. 60 m açıklık geçen jeodezik kubbe, 15-20 cm yükseklikte 6061-T6 Alüminyum I profili çubuk elemanlar ile oluşturulmuştur (Şekil 6.8 ve Şekil 6.9). Kubbenin mafsallı birleşimli mesnet noktasında eğimi 33.72° dir. Sistem 1000 adet rijit düğüm noktasından oluşmaktadır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 Alüminyum jeodezik kubbe gösterimi

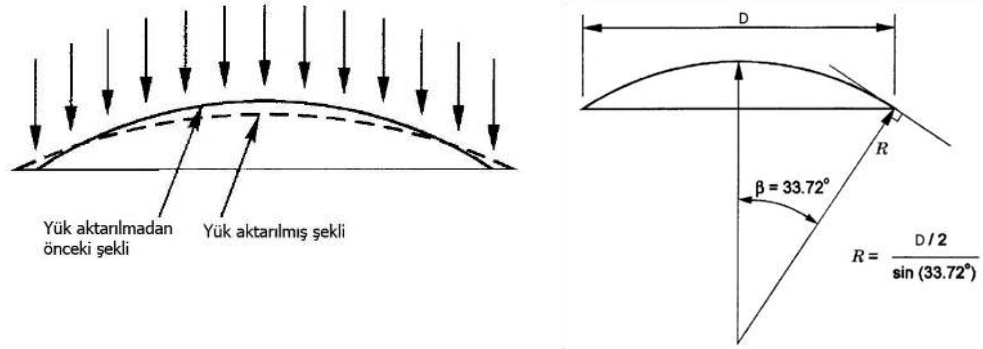


Şekil 6.8 Tipik alüminyum çubuk eleman ve mesnet birleşim detayı [184]

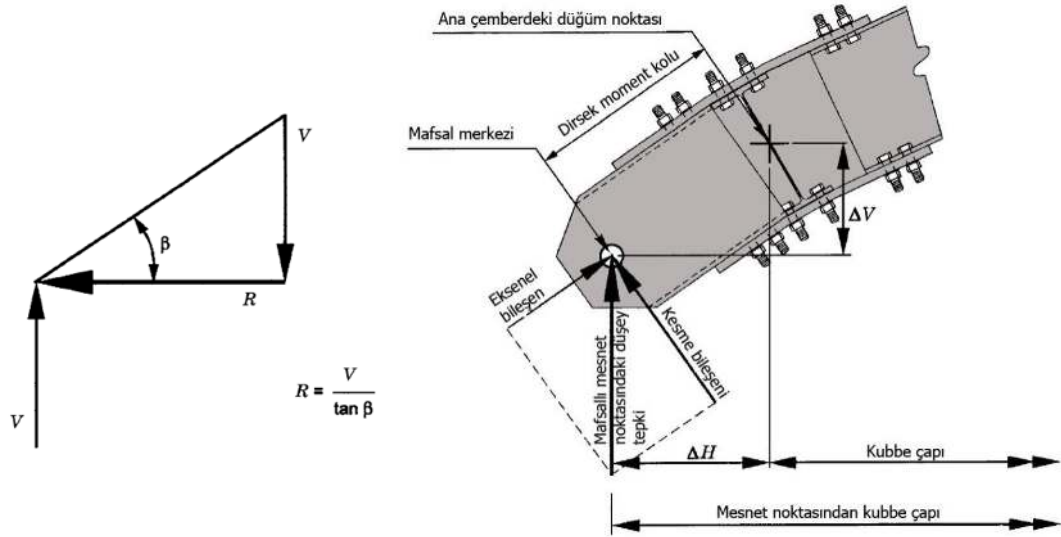


Şekil 6.9 Tek tabakalı alüminyum kubbe birleşim detayı [187]

Sistem davranışı olarak, düşey yük altında (örneğin, kar yükü), kubbe eğilmeye başlar (Şekil 6.10). Sistemin en alt çemberi büyük ölçüde çekmeye çalışır. Mesnetteki kubbe eğiminin hesaplanma biçimi Şekil 6.11’de tanımlanmıştır.



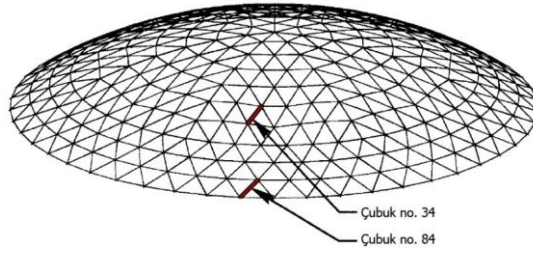
Şekil 6.10 Kubbe sisteme eşit dağılmış düşey yük gösterimi [184]



Şekil 6.11 β açısının hesabı ve kubbe sistemin mesnet noktası [184]

Mesnet noktasındaki kubbe çapı (60.3 m) ile kubbe çapı (60.7 m) arasındaki fark Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

Oluşturulan model üzerine 147 kg/m² kar yükü ve 2102 kg/m² ölü yük etkilendiğinde seçilen iki çubuk elemanda oluşan moment ve kuvvetler Şekil 6.12’de verilmiştir.



	Çubuk no. 34 (L: 3.43 m)	Çubuk no. 84 (L: 3.20 m)
M		
N	95 - 97	100 - 102

Şekil 6.12 Analizi yapılacak çubuk elemanların gösterimi ve analitik değerleri [184]

Üst çemberlerde; açıklıkta pozitif, uçlara doğru negatif moment mevcut iken, mesnet bölgesinde; büyük pozitif eğilme momentleri oluşmaktadır. Mesnet bölgesinde, çubuğun üst başlığı lokal burkulma açısından kritiktir.

6.4 Tek tabakalı alüminyum uzay kafes sistemlerde birleşimler

Alüminyum malzeme ile oluşturulmuş tek tabakalı uzay kafes sistemlerde en çok kullanılan düğüm noktası tipi, I profil kullanılarak oluşturulmuş çubuk elemanların iki dairesel plaka birleştirilmesiyle meydana gelir (Şekil 6.13). Bu sistem, çift eğrilikli, elips, dairesel ve kare planlı kubbe sistemlerde kullanılır [188].



Şekil 6.13 I profilli birleşim tipi [188]

R. Duell ve Associates tarafından tasarlanmış, 126 m çapında olan Spruce Goose dome yapısı, I profilli düğüm noktasıyla tasarlanmış ve alüminyum malzeme ile en geniş açıklık geçen jeodezik kubbe örneklerindendir (1982, Long Beach, ABD) (şekil 6.14) [189].



şekil 6.14 Spruce Goose dome [89]

Diğr bir birleşim tipi, maksimum 90 m açıklık geçebilen kutu profilli düğüm noktasıdır (şekil 6.15). Bu sistem ile serbest formlu tek tabakalı uzay kafes sistemler oluşturulabilir [188].



şekil 6.15 Kutu profilli birleşim tipi [188]

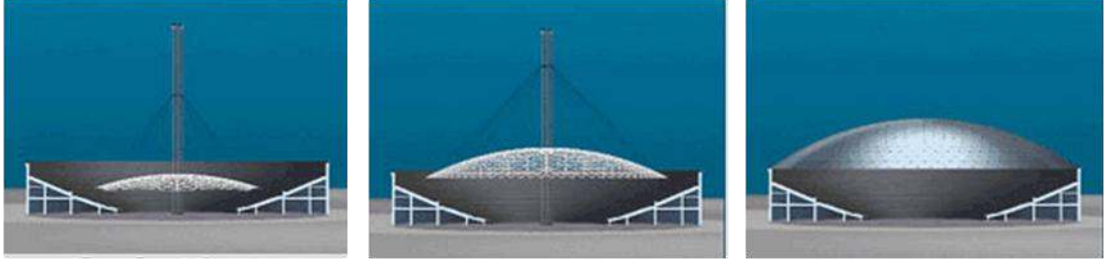
9 m genişliğindeki Arched Entrance Canopy (ABD) giriş saçağı kutu profil ile yapılmıştır (şekil 6.16).



şekil 6.16 Arched Entrance Canopy [190]

6.5 Tek tabakalı alüminyum uzay kafes sistem yapım yöntemleri

Alüminyum kubbelerin en çok kullanılan yapım yöntemlerinden biri, kule ile kaldırma yöntemidir. Yerde montajı yapılan sistemin, merkezde bir kule yardımı ile kaldırılmasıyla oluşur (Şekil 6.17).



Şekil 6.17 Kule ile kaldırma yöntemi [187]

Bir diğer yapım yöntemi, vinç yardımıyla kaldırma yöntemidir. Montajı yerde yapılan sistem elemanlarının vinç yardımı ile havada montajı gerçekleşir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18 Vinç ile kaldırma yöntemi [191]

6.6 Tek tabakalı alüminyum uzay kafes sistem örneği

Çizelge 6.3 The South Pole Dome, Antartika [47], [183], [187], [192]

Yapı Bilgileri

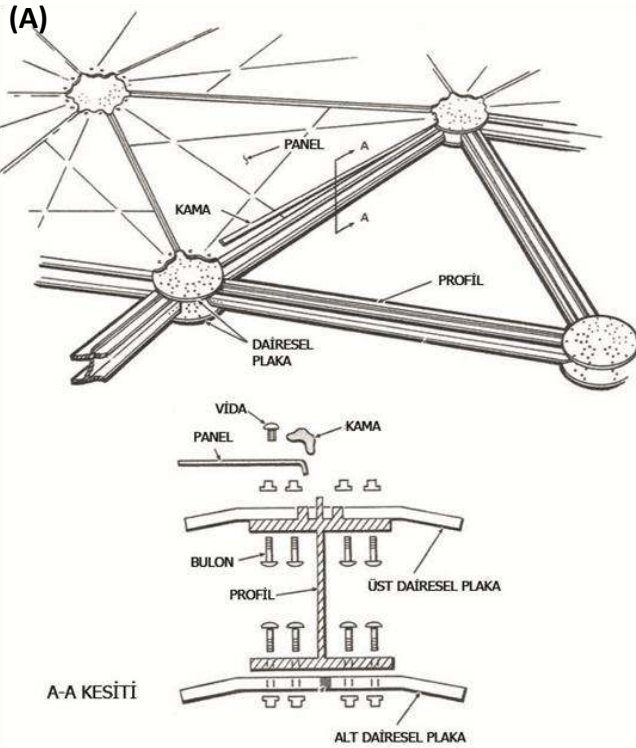
The South Pole Dome yapısı, 1973 yılında TEMCOR firması tarafından Antartika'da tasarlanmıştır.

Alüminyum malzeme kullanılarak tasarlanan yapı, jeodezik kubbe tipindedir.

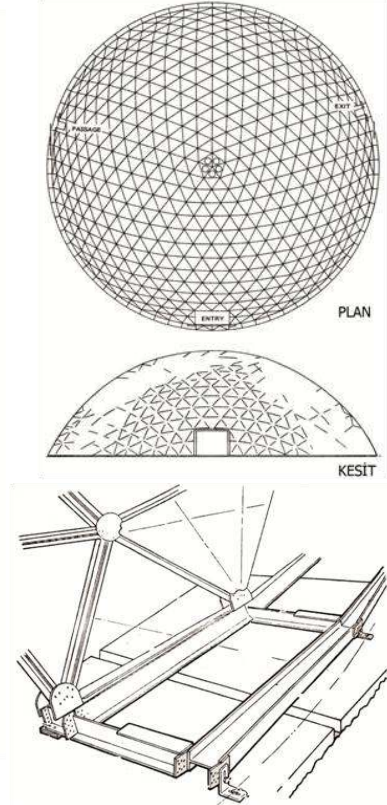
Yapı genişlik 50 m ve yükseklik 16 m'dir. 3 m uzunluğundaki alüminyum çubuk elemanlarda, 152 mm I profil ve 35 cm çapında dairesel alüminyum plakalar kullanılmıştır (6061-T.6) (A).

Düğüm noktaları ve mesnet bölgelerinde bulunlu birleşim uygulanmıştır (B).

Yapı montajında, kule ve vinç ile kaldırma yöntemi kullanılmıştır(C).



(B)



TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLERDE KULLANILAN ÖRTÜLER

7.1 Membran örtüler

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan örtüler, 20. yy'ın ortalarında geliştirilmiştir. İnce ve esnek yüzeyler (membran) yükleri çekme gerilmeleri ile taşımaktadır. PVC, PTFE ve ETFE gibi sistem örtüleri, yükleri; kablolar, çelik kolonlar ya da kafes sistemlere aktarmaktadır.

Membran malzemelerdeki ilk başarılı yapı Rus mühendis Vladimir Shukhov'un 1896'da tasarladığı Nizhy Novgorod Fair yapısıdır (Şekil 7.1.a). Yapı 27000 m² olup, çelik kirişler üzerine oturtulmuştur [193]. 1972 yılında da Frei Otto Summer Olympic Games (Munih) yapısını membran malzeme ile geçmiştir (Şekil 7.1.b).



(a)



(b)

Şekil 7.1 (a) Nizhy Novgorod Fair yapısı (b) Olympic Games yapısı [194], [195]

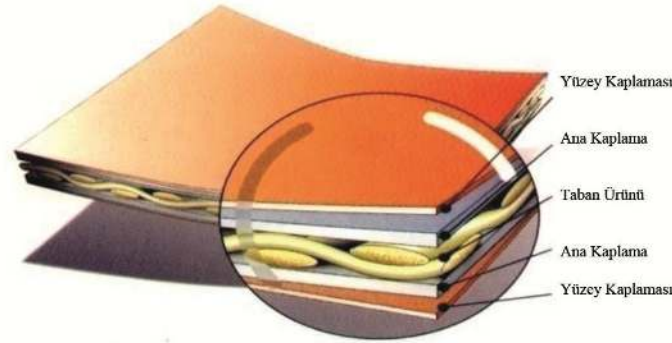
Membran malzemelerin; dayanımı yüksek, kendini temizleyebilen, ses ve ısı izolasyonlu ve yanıcılık özelliği düşük olmalıdır.

7.1.1 PVC türü membranlar

PVC (poli-vinil-klorür) türü membranlar poliamid polyester ya da polivinil gibi yüksek dayanımlı elyaf malzemeden oluşmaktadır (Şekil 7.2). Bu tür membran örtülere, kendini temizlemesi ve dayanıklılığının arttırması için dış yüzeyine poli-vinil-di-florür (PVDF) ya da akrilik uygulanması önerilmektedir. 182° sıcaklığa kadar dayanıklıdır [193], [196].

Çizelge 7.1 PVC türü membranların özellikleri [197], [198], [199], [200], [201]

Özellik	Birim	Değer
Ömrü	-	20 yıl
Genişlik	m	2
Kalınlık	mm	0.5 – 1.14
UV Korunumu	%	90
Saydamlık	%	5.5 - 12
Çekme Dayanımı	MPa	7(esnek) - 62(rijit)
Akma Dayanımı	MPa	16 - 19
Uzama Şekildeğiştirmesi	%	24 - 145
Eğilme Dayanımı	MPa	24 - 84
Yangın Dayanımı	-	B1 ¹ (DIN 4102) ²



Şekil 7.2 PVC türü membran [193]

1995 yılında yapımı tamamlanan Transworld Dome Stadium (Edward Jones Dome) yapısının örtüsü PVC türü membran ile kapatılmıştır (Şekil 7.3).

¹B1: Zor alev alan malzeme sınıfıdır.

²DIN 4102: Yapı malzemelerini yangına dayanımına göre sınıflandırır.



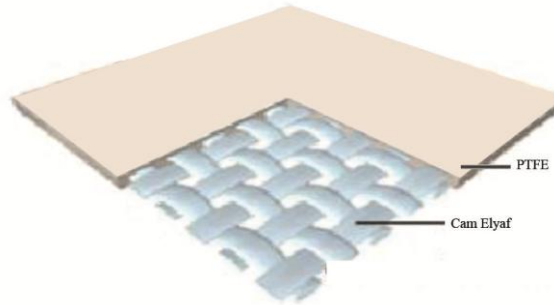
Şekil 7.3 Transworld Dome Stadium (Edward Jones Dome) [202]

7.1.2 PTFE türü membranlar

PTFE (poly-tetra-fluoro-ethylene) türü membranlar, cam elyaf üzeri poli-tetra-florüretilenden (PTFE) oluşmaktadır (Şekil 7.4). Üzerine PVC malzemede olduğu gibi ek bir ürün gerektirmez, fakat PVC'den daha pahalı bir malzemedir. -200° ile + 260° ısıya dayanıklıdır [193], [203].

Çizelge 7.2 PTFE türü membranların özellikleri [198], [199], [204], [205], [206]

Özellik	Birim	Değer
Ömrü	-	30 yıl
Genişlik	m	5
Kalınlık	mm	0.3 – 1
UV Korunumu	%	100
Saydamlık	%	10 - 12
Çekme Dayanımı	MPa	10 - 43
Akma Dayanımı	MPa	9 - 30
Uzama Şekildeğiştirmesi	%	50 - 650
Kayma Dayanımı	MPa	5
Yangın Dayanımı	-	A2 ¹ (DIN 4102)



Şekil 7.4 PTFE türü membran [193]

¹A2: Yanıcı olmayan malzeme sınıfıdır.

2009 yılında inşası tamamlanan The Final Stage Stadium yapısı çatı örtüsü PTFE esaslı membran ile örtülmüştür (Şekil 7.5).



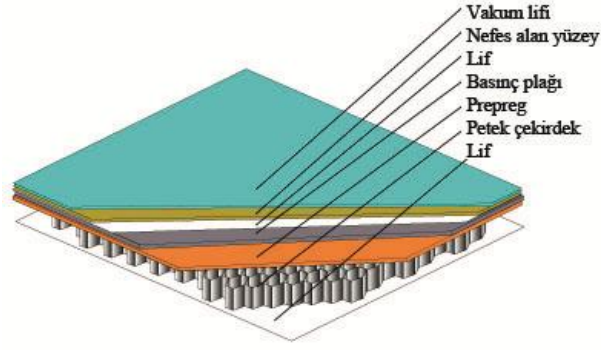
Şekil 7.5 The Final Stage Stadium [207]

7.1.3 ETFE türü membranlar

ETFE (etilen-tetra-florür-etilen) türü membranlar (Şekil 7.6), diğer iki membran malzemelerine göre saydamlığı fazla olmasına rağmen dayanıklılığı da bir o kadara azdır. Bu sebeple kablolu asma germe sistemlerde kullanılması önerilmez [193]. ETFE, elastik ve plastik malzemelerde olan yüksek polimerli kimyasal maddeden oluştuğu için PTFE membran malzemesine göre daha sınırlı elastikiyete sahiptir bu sebepten tek tabakalı uzay kafes sistemlerde daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca ETFE membran elemanları daha komplekstir bu sebepten hiperbolik yüzeylerde rahatlıkla kullanılmaktadır [208].

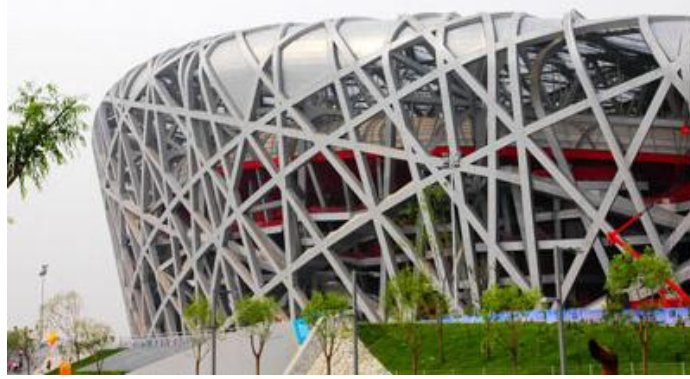
Çizelge 7.3 ETFE türü membranların özellikleri [198], [209], [210]

Özellik	Birim	Değer
Ömrü	-	+30 yıl
Genişlik	m	2
Kalınlık	mm	0.012 – 0.5
UV Korunumu	%	100
Saydamlık	%	7.5
Çekme Dayanımı	MPa	50
Akma Dayanımı	MPa	21 - 23
Uzama Şekildeğiştirmesi	%	600
Yırtılma Dayanımı	N/mm	500
Yangın Dayanımı	-	B1 (DIN 4102)



Şekil 7.6 ETFE türü membran [211]

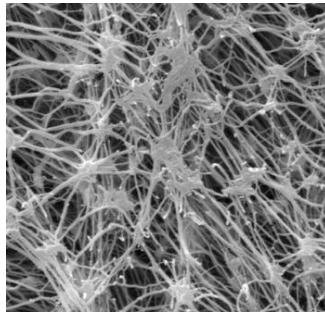
ETFE türü membran, 185-127 m açıklıklı Bird's Nest National Stadium yapısında kullanılmıştır (Şekil 7.7).



Şekil 7.7 Bird's Nest National Stadium yapısı [208]

7.1.4 ePTFE türü membranlar

ePTFE (expanded poly-tetra-fluoro-ethylene) türü membranlar (Şekil 7.8), saf PTFE malzemesinden meydana gelmektedir. ePTFE baz kumaş olarak genişletilmiş ve PTFE ile kaplanmıştır. Daha esnek ve sürdürülebilir bir malzeme olduğundan geri dönüştürülebilmesi mümkündür [193]. 0.01 – 0.4 mm kalınlığında, 3 - 12 m genişliğinde üretimi bulunmaktadır. Saydamlık oranı % 40'tır [198], [212], [213].



Şekil 7.8 ePTFE türü membran [214]

100 m açıklıklı Shanghai Expo Boulevard yapısı çatı örtüsünde ePTFE türü membran malzeme kullanılmıştır (Şekil 7.9).



Şekil 7.9 Shanghai Expo Boulevard yapısı [215]

7.2 Cam örtüler

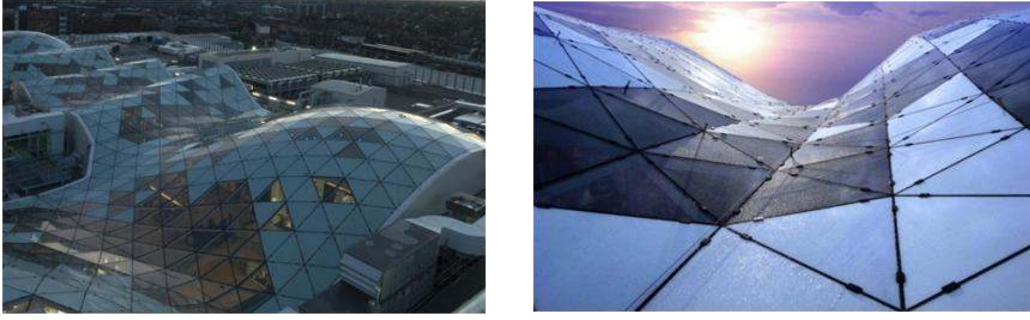
Camlar, yüksek ısıda bile yüksek bir ağırlığa sahip sıvılar olup, normal ısıda kristalleşmeden katılaştan, katı cisimlerin mekanik özellikleri yanında sıvı cisimlerin özelliklerini de gösteren inorganik esaslı bir silikat sistemidir. Camın ana maddesi saydamlık özelliğini sağlayan, amorf bünye içinde erimiş ve dağılmış durumda bulunan SiO₂ (Silisyum Dioksit) dir. Saydamlık, geçen ışığın gelen ışığa oranı olup camlarda % 80-98'dir. Bu nedenle cam, henüz en saydam plastikten daha yüksek bir saydamlığa sahiptir.

Cam örtülerin mekânı iyi aydınlatma gibi büyük bir yararı olmakla beraber, çabuk kırılmak ve ısıyı iyi korumamak ve kirlenince temizlenmesinin güç olması gibi bazı sakıncaları vardır [216].

7.2.1 Çift cam üniteler

Çift cam üniteler, arasına ortam basıncına uygun olarak kuru hava veya gazlar doldurularak yalıtım camı haline getirilmiş camlardır. Renksiz, renkli, güneş ve ısı kontrol kaplamalı, lamine, temperli ve emaye cam panolarla oluşturulabilir [217].

16.600 m² çatı alanına sahip, Westfield London - Glazed Roof yapısında çift camlı üniteler kullanılmıştır (Şekil 7.10).



Şekil 7.10 Westfield London - Glazed Roof, London,2008 [218]

7.2.2 Güneş ışıınımlı kontrol camları

Bu tür camlar, güneş ışıınımlarının etkili olduğu bölgelerde konfor koşullarını sağlamaktadır. Güneş kontrol camlarıyla güneş enerjisinin içeri girmesi kontrol edilerek iklimlendirme giderlerinin azaltılması ve konfor düzeyinin artırılması sağlanır. Üretim yöntemlerine göre güneş kontrol camlarına farklı özellikler kazandırılabilir. Bu camlar renkli ve yansıtıcı camlar olmak üzere iki türdür. Renkli camlar, camın bünyesine katılan metal oksitler yardımıyla cam kütesinin renklendirilmesi sonucu elde edilirler. Yansıtıcı camlarda yansıtma özelliği, cam yüzeyinin metal ve metal oksitlerle kaplanmasıyla elde edilmektedir [217].

Çatı alanı 2800 m² olan, Mansueto Library yapısında güneş ışıınımlı kontrol cam malzemesi kullanılmıştır (Şekil 7.11).

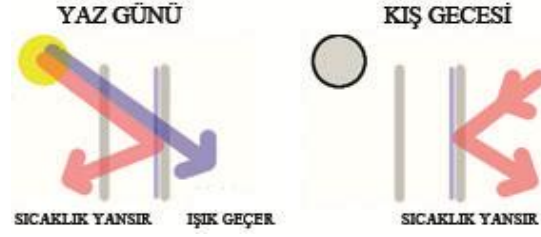


Şekil 7.11 Mansueto Library, Chicago, USA,2011 [218]

7.2.3 Low-E camlar

Low-E camlar, düşük yayımlımlı camlar olarak adlandırılmaktadır. Low-E kaplamalar, renkli ve ışıık yansıtıcı olmadığından yer aldığı camın optik özelliklerini değıştirmez. Isınan bütün nesneler enfraruj ısıtıcılar gibi ışıınımlı yoluyla dışa ısı verir (Şekil 7.12). Low-E kaplamalı camlar, ısı kaybını tek cama göre ortalama %69, standart yalıtım camına

göre %36 oranında azaltır. Ortam ısısının dengeli dağılımını sağlayarak soğuk günlerde ortam içine bakan cam yüzeylerdeki terlemeleri önler [217].



Şekil 7.12 Low-E camların çalışma prensibi [219]

Yapımı 2009 yılında biten Yas Hotel yapısının çatı örtüsünde 5800 adet üçgen kesitli Low-E tipi cam türü kullanılmıştır (Şekil 7.13).



Şekil 7.13 Yas Hotel, Abu Dhabi, United Arab Emirates [220]

7.3 Plastik esaslı malzemeler

7.3.1 PVC levhalar

Işık geçirgen çatı örtü malzemesi olarak kullanılan PVC, polivinilklorür polimerlerinin sıkıştırılması ya da basınç altında ısıtılmasıyla ince film tabakaları haline getirilmesi sonucunda oluşan, termoplastik bir malzemedir. Işık geçirgenliği polikarbonat ve akriliklere göre düşük olan PVC'ler; düz, ondüle ve trapezoidal kesitli olarak üretilmektedir. PVC'lerin çarpmaya karşı dayanımları cama ve akriliğe oranla daha iyi, polikarbonata göre daha kötü özellik göstermektedir [216].

7.3.2 Polikarbonat levhalar

Polikarbonat levhalar, ışık geçirimli çatı örtü malzemesi olarak kullanılan çapraz bağlı molekül yapısına sahip polikarbonat reçinesi esaslı malzemelerdir (Şekil 7.14). Polikarbonat örtülerin darbe dayanımları cama göre 200, akrilik levhalar göre sekiz kat fazladır. Çift cama eşdeğer ısı geçirgenliğine sahip olduğundan, ısıtma giderlerinde %50'ye varan tasarruf sağlanabilir. Malzemenin; işleme kolaylığı, bükülebilme, basit el aletleri ile kesilebilme, delinebilme özellikleri ve hafifliğinden dolayı montajı kolaydır. Bronz, opak, şeffaf olabildikleri gibi mavi, yeşil gibi özel renklerde de üretilebilir. Renk ve kalınlığa bağlı olarak %90'a varan ışık geçirgenliğine sahiptir.

Polikarbonat levhalar kullanılarak camla yapılması mümkün olmayan estetik ve dairesel formlar oluşturulabilir. Malzeme yüksek ısıda erir fakat alev almaz, yangının yayılmasını önler [215].



Şekil 7.14 Polikarbonat levha ve çatı örnekleri [221], [222]

7.3.3 Cam elyaf takviyeli polyester levhalar (CTP)

Cam elyafı ile takviye edilerek fiziksel dayanımı artırılmış, doymamış polyesterden oluşan kompozit bir malzemedir (Şekil 7.15) [114]. Düz ve ondüveli levhalar şeklinde olan CTP levhaların üretiminde cam lifi ve polyester reçinesi kullanılmaktadır [223]. Uygulamada tek başına kullanılabildiği gibi alüminyum, ondüline, galvanizli ve boyalı sac ile poliüretanlı çift kat sandviç sistem çatı örtülerinde de uygulanabilmektedir. Yüzey yaşlanmasına engel olmak için levhanın üst yüzeyine kaplanan özel film sayesinde uzun yıllar yüzeyde yıpranma ve renk değişikliği olmamaktadır [216]. Korozyondan etkilenmez, işleme kolaylığı vardır. Yanıcı olması olumsuz yanıdır [224].

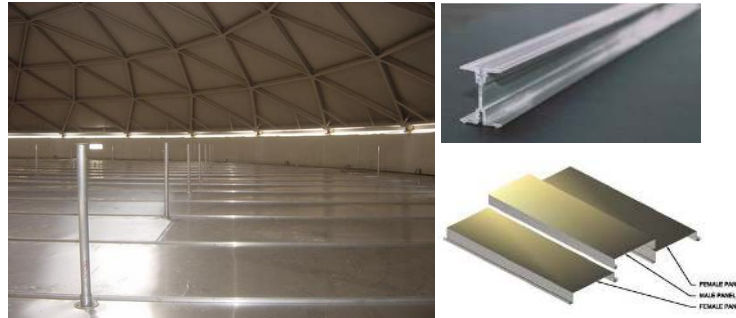


Şekil 7.15 CTB levha ve çatı örneği [225]

7.4 Metal esaslı malzemeler

7.4.1 Alüminyum levhalar

Alüminyum kompoze çatı kaplama levhaları, özel profil verilmiş bir dış yüzey, ortada genellikle poliüretan köpüğü tabakası ve yapı tarafındaki yüzeyde de metal levhadan oluşmaktadır (Şekil 7.16). Üretim olanakları dolayısıyla bu çatı örtü malzemeleri belirli bir genişlikte olmak kaydıyla değişik boylarda üretilmektedir. Tek tabakadan oluşan çatı kaplama levhalarına oranla; dayanımı daha yüksek, ısı yalıtım özelliği olan, özellikle fabrika, imalathane gibi büyük açıklıklı yapıların çok az ekle örtülmesine olanak veren bu malzemeler, bu tür yapılarda ortaya çıkabilen çatıların iç yüzeylerindeki yoğuşma oluşumunu da büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır [223].



Şekil 7.16 Alüminyum taşıyıcı sistemi ve levha gösterimi [226]

7.4.2 Galvanizli saç levhalar

Galvanizli saç levhalar; eğimli yüzeylerde kullanılan, kırılabilirliği olmayan ve çeşitli profillerde üretilen çatı malzemesidir. Isı izolasyonu açısından sandviç detaylandırılmaya gidilebilir, ancak bu tür detaylandırmalarda ısı köprüleri önlenememektedir. Ses yutuculuğu yoktur. Montaj esnasında delinen malzeme, çinkosu kalmadığından korozyona açık hale gelmektedir [224].

7.5 Ahşap çatı altı kaplamaları

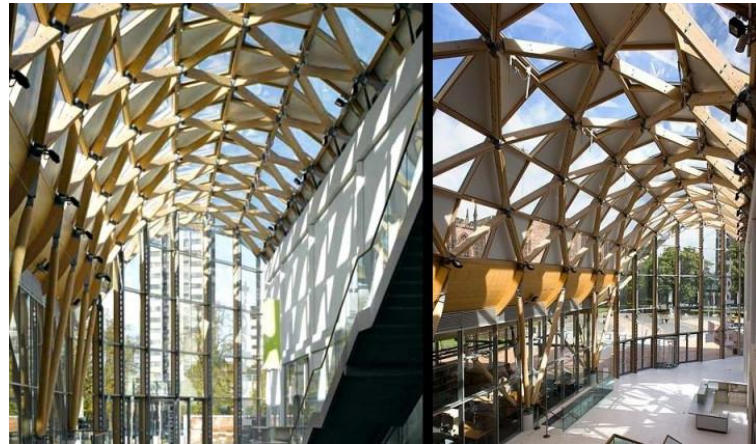
7.5.1 OSB (Oriented Strand Board)

OSB fırınlanmış ahşabın yongalanması ve bu parçaların yapıştırıcı ile preslenmiş plaka ürün haline getirilmesidir. Suya ve neme son derece dayanıklıdır. Levha şeklinde boy lu boyunca ahşap yongası ve talaş birbirine paralel yayılmak suretiyle ve her katman birbirine şaşırtmalı düzenlenerek, son katman ile ilk katmanın yönleri aynı olması koşulu ile elde edilir. Taşınması ve nakliyesi kolaydır. Yapı güvenliğini artırır. Dekoratif tir, taban ve tavan kaplamasına elverişlidir. Neme, böceklenmeye ve küfe dayanıklıdır. Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde ahşap taşıyıcı sistemi bağlayıcı olarak kullanılırlar.

Bilinen en iyi ahşap çatı altı kaplaması ile oluşturulmuş örnekler The Weald and Downland Gridshell ve Herbert Art Gallery & Museum yapılarıdır (Şekil 7.17 ve Şekil 7.18).



Şekil 7.17 The Weald and Downland Gridshell [277]



Şekil 7.18 Herbert Art Gallery & Museum [228]

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarihi, insanların barınma ihtiyacının doğmasıyla başlayan ve teknolojinin gelişimi ile günümüzde 200 m'ye kadar açıklık geçebilen tek tabakalı uzay kafes sistemler, uygun tasarım ve mühendislik analizleri ile; estetik, işlevsel olarak daha esnek ve kullanışlı olması istenilen; spor alanları, kültür merkezi, sergi alanları, konferans salonu vb. yapılarda kullanılabilecek bir yapım sistemidir. Değişik formlarda amorf biçimler oluşturulabilir, 30 m'den sonra çift tabakalı olanlardan daha az maliyetli ve hafiftir, hafiflik özelliği sayesinde sisteme etkileyen deprem yüklerinin azalmasını sağlar, sistem modülleri doğru tasarlandığında (aynı modül büyüklüğü kullanarak) imalat ve montaj kolaylığı yaratır, ayrıca ışıklandırma ve çatıda saydamlık yaratmak gibi estetik avantajı bulunmaktadır.

Çeliğin kullanıldığı silindirik kabuk sistemlerde, dik yöndeki aralık > 25 m ise çift tabakalı sistem uygulaması ekonomik açıdan tercih edilmektedir. Tek tabakalı sistemde boyuna yöndeki uzunluğun açıklığa kıyasla artması burkulma yükünü azaltmaktadır. Açıklık/boyuna uzunluk oranının 1 olması durumu için, burkulma açısından yükseklik / açıklık oranının 0.3'ü aşmaması önerilmektedir. Diyagonal çubukların çift yönde düzenlenmesi basit ızgara sisteme göre burkulma yükünü sadece % 60 ek maliyetle 5 kat arttırmaktadır.

Tek tabakalı çelik kubbe sistemlerde; form, yükseklik/açıklık oranı, birleşim sistemi, nervür ve çember sayısının yapının rijitliği üzerinde doğrudan önemli bir etkisi vardır. Çember sayısı yeterli olmalıdır; örneğin, her çemberi aynı narinliğe sahip lamella

bir kubbede 20-60 m açıklık için 6 çemberden itibaren kubbenin burkulma olasılığı ortadan kalkmaktadır. Basınç elemanlarındaki gerilme düzeyi, ani burkulma riskine karşı, akma gerilmesi düzeyinin yarısından az olmalıdır. Çekme elemanları ve birleşimleri çatlak/kopma oluşmadan akma gerilmesine ulaşabilmelidir. Geometrik açıdan doğrusal olmayan davranış, malzeme açısından doğrusal olmayan davranış veya iki bakımdan da doğrusal olmayan davranış dikkate alınabilir. Formun basıklaşması kesit tesirlerinde artışın yanında özellikle lokal stabilite problemine neden olabilmektedir. Ayrıca sistem, montaj sırasında konumlanma hatalarına da çok duyarlıdır. Özellikle asimetrik yükleme durumlarında (rüzgar, kar) burkulma yükünde % 70'e varan azalmalar söz konusudur.

Diamantik bir kubbede 90-100 m açıklık için en ekonomik tasarım, 30 m yüksekliği olan parabol ile gerçekleştirilmektedir. Daire form 60 m'den itibaren ekonomik değildir, basık elips form en ağır ikinci formdur.

Tek tabakalı uzay kafes sistemler, çift tabakalı sistemlerden farklı olarak, eğilme momenti ve kesme kuvvetine karşı da çalışmaktadır; birleşimler buna uygun biçimde tasarlanmalıdır. Kuvvetlerin aktarımı açısından bakıldığında, uçtan ekli birleşimler, ek levhalı birleşimlere göre daha iyi performans göstermektedir. Çelik ile tasarlanan geniş açıklıklı kubbe benzeri formlarda yüksek moment aktarma kapasitesi ile MERO-4 (kaynaklı), WABI-1, SBP-4 en uygun birleşim sistemleridir. Serbest formlu tek tabakalı uzay kafes sistemler için ise, MERO-4 (kaynaklı) ve OCTA-1 tipi birleşim sistemleri gerek dönme açıları gerekse kesit tesiri aktarma kapasitesi nedeni ile en uygun çözümleri vermektedir. Nitekim New Milano Fair MERO-4 ile tasarlanmıştır.

Bulonlu birleşim sistemlerinde (örneğin; HEFI-1 ve SBP-3 üzerinde deneysel ve teorik araştırmalar yapılmıştır) bulon dayanımı çubuk elemanlardan yüksek, ancak şekil değiştirme kapasitesi düşüktür (% 5). Bu nedenle, önce çubuk uçlarında plastik mafsallık bölgesi oluşması, takiben bulonların çekme ve kayma gerilmeleri etkisi ile maks. dayanıma ulaşarak sistemin göçmesi esas alınmaktadır. Bu aşamaya kadar bulonda sökülme ve çekme kırılması olmamalıdır. Ayrıca, kuvvetlerin aktarılmasında önemli bir faktör olan dairesel plakalar, çubuk elemanlardan 1.5-2 kat daha yüksek dayanım ve benzer şekil değiştirme özelliklerine (% 25-30) sahip olmalıdır.

Ahşap serbest formlu sistemlerde kurulum aşamasında sistem önemli düzeyde iki yönde eğilme momenti, burulma momenti ve kesme kuvveti etkisine maruzdur. Statik hesap ve gerilme analizleri, montajdaki nihai eğrilik ve maks. gerilmeler dikkate alınarak yapılmalıdır. Kurulum sonrası gerilme düzeyi zamanla % 50 oranında azalır.

Kubbede rüzgarın doğrudan etkidiği tarafta, küçük bir alan basınca çalışırken büyük bölümünde çekmeye çalışır, asimetrik yük yayılımı söz konusudur. Asimetrik yüklere karşı çift yönde çapraz çubuklar ekonomik ve rijit çözüm sağlar.

Tez kapsamında açıklığı 100 m olan bir kubbe sistem, Diamatik ve jeodezik formda 0.32 ve 0.16 yükseklik/açıklık oranları için, SAP2000 V14 programı ile çözülmüş ve 3D Max programı ile üç boyutlu görünümüleri tasarlanmıştır. Statik analizlerden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır :

- En elverişsiz yükleme durumu ölü yük+hareketli yük+x doğrultusunda deprem+0.3*y doğrultusunda deprem durumudur. Ancak rüzgar etkisinin daha fazla olduğu durumlarda rüzgarlı kombinasyonun da en elverişsiz yükleme durumu olması mümkündür.

- İncelenen kubbelerin hakim periyot aralığı 0.50 - 0.57 sn'dir.

- Yapıda normal kuvvetler hakimdir, moment ve kesme kuvveti normal kuvvete kıyasla çok düşüktür. Basıklık arttıkça normal kuvvetler artmaktadır. Aynı basıklık düzeyi için jeodezik kubbedeki kesit tesirleri diamatik kubbeye göre daha az olup, daha düşük yerdeğiştirmeler ve daha ekonomik tasarım söz konusudur.

- Kubbelerin tasarımında kutu profiller kullanılmıştır, uygun birleşim sistemleri ile boru profil olarak boyutlandırılması en ekonomik kubbe tasarımını verecektir.

Tek tabakalı uzay kafes sistemler gerek kubbe, gerekse serbest formları ile bugün ve gelecekte en etkileyici ve estetik taşıyıcı sistem formları arasında yerini koruyacaktır. Türkiyede bu gelişmelerden geri kalmamalı, tek tabakalı uzay kafes sistemlerin tasarımı, birleşim sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Lan, T.T., (1999). Space Frame Structures, CRC Press LLC.
- [2] Tek tabakalı serbest formlu yapı örneği hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.cumbu.com/new-trade-fair-milan-by-massimiliano-e-doriana-fuksas/new-trade-fair-milan-by-massimiliano-e-doriana-fuksas-image-2>, 20 Haziran 2012.
- [3] Çift tabakalı çelik uzay kafes sistemler hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickrriver.com/photos/ggnyc/2382354414/>, 8 Mayıs 2012.
- [4] Çift tabakalı uzay kafes sistem düğüm noktası ile ilgili bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, http://www.habiter-autrement.org/08.minimaliste/11_min.htm, 29 Mart 2012.
- [5] Sbp resmi web sitesi, Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistem Birleşim Sistemleri, <http://www.sbp.de>, 5 Şubat 2012.
- [6] Hwang, K.J., (2010). Advanced Investigations of Grid Spatial Structures Considering Various Connection Systems, itke 31, 16.
- [7] Savaşır, K., (1999). Silindir Yüzeyle Uzay Kafes Sistemlerde Yükseklik ve Geçilen Açıklık Bakımından Tek ve Çift Tabakalı Sistemlerin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [8] Makowski, Z.S., (1984). Analysis, Design and Construction Braced Domes, Nichols Publishing company, Newyork.
- [9] Nilka resmi web sitesi, Uzay Kafes Sistem Yapım Yöntemleri, http://www.nilka.gr/erection1_eng.htm, 11 Mayıs 2012.
- [10] Tek ve Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin düğüm noktaları hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu resmi web sitesi, <http://www.nilka.gr/>, 26 Haziran 2012.
- [11] Tek tabakalı silindirik kabuk sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/esdep/master/wg16/I0200.htm>, 6 Temmuz 2012.

- [12] So-cal-arch-history, Uzay kafes sistemin gelişimi hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu resmi web sitesi, <http://so-cal-arch-history.com/archives/2609>, 13 Kasım 2011.
- [13] Arup, O., Osaka Maritime Museum Yapı Detayları, [http://www.arup.com/Projects/Osaka Maritime Museum/Osaka Maritime Museum_detail_1.aspx](http://www.arup.com/Projects/Osaka_Maritime_Museum/Osaka_Maritime_Museum_detail_1.aspx), 22 Mayıs 2012.
- [14] Kubbe sistemlerin çalışma prensiplerini anlatan web sitesi, <http://www.frameandform.com/images/2011/02/Esquema-Pantadome-Recortada-262x280.jpg>, 27 Mayıs 2012.
- [15] Construction Manager, Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistem yapım yöntemleri ile ilgili bilgi içeren resmi web sitesi, <http://construction-manager.co.uk/features/blowing-bubbles/>, 3 Aralık 2011.
- [16] National Science Foundation Office of Polar Programs, Alüminyum Kubbeler, <http://photolibrary.usap.gov/Portscripts/PortWeb.dll?query&field1=Filename&op1=matches&value=DOMEDECONSTRUCTION1.JPG&catalog=Antarctica&template=USAPgovMidThumbs>, 15 Nisan 2012.
- [17] Kramer, V., (1985). IL 31 Bambus, Stuttgart.
- [18] Ayers, A., (2004). The Architecture of Paris, London.
- [19] Tek tabakalı kubbe sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.lonelyplanet.com/travelblogs/462/15611/Lady+in+Leeds?destId=359107>, 26 Nisan 2012.
- [20] Beckh, M. ve Barthel R., (2009). "The First Doubly Curved Gridshell Structure-Shukovs Building Fort He Plate Rolling Workshop in Vyska", Proceedings Of The Third International Congress On Construction History, Cottbus.
- [21] Structurae resmi web sitesi, <http://en.structurae.de/index.cfm>, 7 Nisan 2012.
- [22] Uzay kafes sistemin kurulumu hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://memetician.livejournal.com/201202.html>, 5 Aralık 2011.
- [23] Geodesic Dome Info, resmi web sitesi, <http://geodesicdome.info/index.php/walther-bauersfeld>, 20 Ocak 2012.
- [24] Uzay kafes sistem tarihçesi hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://www.tu-cottbus.de/projekte/de/great-engineers/ingenieure/dischinger-franz-anton-1887-1953/biografie.html>, 2 Ocak 2012.
- [25] Columbia University, Kubbe sistemler hakkında bilgilerin olduğu resmi web sitesi, <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/HOUSTON/lam-6.jpg>, 25 Mart 2012.
- [26] Wikipedia, Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örneği hakkında bilgilerin olduğu web sitesi, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Astrodome_\(Houston\)_Skylights.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Astrodome_(Houston)_Skylights.jpg), 14 Aralık 2011.

- [27] Kraus, P., (1994). MERO GmbH, Patent 42 24 663 C2, German Patent Office, Munich, Germany.
- [28] Moser, T., (2010). "Rotational Stiffness of Single-Bolt Sleeve Connections", Stuttgart.
- [29] Verlag, B., Uzak Kafes Sistemlerin Kurulumu, <http://www.bauwerk-verlag.de/baulexikon/index.shtml?RAUMFACHWERK.HTM>, 4 Ocak 2012.
- [30] Tek tabakalı kabuk sistemler hakkında fotoğrafların olduğu paylaşım sitesi, <http://www.valencia-cityguide.com/tourist-attractions/museums/l-oceanografic.html>, 20 Aralık 2011.
- [31] Kabuk sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, www.fecavalille2009.com, 25 Ocak 2012.
- [32] Dimdic, M., (2011). Structural Optimization of Grid Shells Based on Genetic Algorithms, Stuttgart.
- [33] Kilian, A., (2004). "Linking Hanging Chain Models to Fabrication", Cambridge, USA.
- [34] Kabuk sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu paylaşım sitesi, <http://livemodern.com/designblogs/d375ce8510a3a11886a8362cb82e354f>, 4 Mart 2012.
- [35] Xiaobing, Y., (2007). Bamboo Structural and Cultural, China.
- [36] Chilton, J. ve Isler, H., (2000). Engineer's Contribution to Architecture, Thomas Telford Ltd.
- [37] Tek ve Çift tabakalı uzay kafes sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, http://www.historiasztuki.com.pl/72_ARCHWSP_2-eng.html, 30 Mart 2012.
- [38] Çift tabakalı uzay kafes sistem örneği hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickr.com/photos/45707362@N00/5614945677/>, 12 Ocak 2012.
- [39] Bulenda, T., Mühlbauer, S. ve Simon, M., (2005). "Stability of Parabolical Grid Shells Over Elliptical Floor Bases", Germany.
- [40] Çeşitli konularda fotoğrafların olduğu paylaşım sitesi, <http://alicesg.blogspot.com/2010/04/bugis-junction.html>, 21 Ocak 2012.
- [41] Mayer, T., DZ Bank, http://thomasmayerarchive.de/details.php?image_id=27240&l=deutsch, 8 Ocak 2012.
- [42] Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örnekleri hakkında fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://mrzenit2000.blogspot.com/2009/05/frank-o-gehrs-dz-bank-building.html>, 8 Temmuz 2012.
- [43] Arup, O., Osaka Maritime Museum, http://www.arup.com/Projects/Osaka_Maritime_Museum.aspx, 22 Mayıs 2012.

- [44] Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örnekleri hakkında fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=678936&page=2>, 9 Nisan 2012.
- [45] Bradshaw, R., Campbell, D., Gargari, M., Mirmiran, A. ve Triperny, P.T., (2002). "Special Structures: Past, Present, and Future", Journal of Structural Engineering, June 2002, 691-709.
- [46] Foster, N., Gridshell Structure, <http://www.fosterandpartners.com/Projects/0541/Default.aspx>, 16 Mayıs 2012.
- [47] Tek tabakalı alüminyum kubbe sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.southpolestation.com/trivia/history/dome/dome1.html>, 26 Aralık 2011.
- [48] Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2011/01/alnwick-garden-pavilion.html>, 5 Şubat 2012.
- [49] Çift tabakalı çelik uzay kafes sistemler hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickrriver.com/photos/i-dave/tags/italia/>, 8 Mayıs 2012.
- [50] Haring, H., (2008). Lamella Roof, <http://ncodon.com/2008/11/03/haring/>, 1 Temmuz 2012.
- [51] Wenzel, F., (1978). Uzay Kafes Taşıyıcılar, İTÜ Mimarlık Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- [52] Unis School of Enginnering, Single Layer Space Frame System, <http://www3.surrey.ac.uk/eng/research/ems/ssrc/intro.htm>, 25 Mart 2012.
- [53] Sanat ve mimarlık alanlarında bilgi ve paylaşımları içeren web sitesi, <http://arch-tour.blogspot.com/2009/03/period-18801920.html>, 2 Şubat 2012.
- [54] Wikipedia, Tek tabakalı çelik uzay kafes sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, http://fr.wikipedia.org/wiki/Bourse_de_commerce_de_Paris, 25 Mayıs 2012.
- [55] Nervürlü kubbe sistemler hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickr.com/photos/klaasfotocollectie/4893308067/>, 21 Haziran 2012.
- [56] İnşaat ve mimarlık alanlarında bilgi ve paylaşımları içeren web sitesi, <http://civilconstructionandengineering.blogspot.com/2010/10/three-stunning-structures-combine-to.html>, 1 Nisan 2012.
- [57] Kubbe sistemler ile ilgili fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://www.blooloop.com/PressReleases/Special-Venue-Media-Visual-Acuity-plans-technology-with-architecture-for-Noble-Planetarium-Fort-Worth/2069>, 5 Mart 2012.
- [58] Tek tabakalı nervürlü kubbe sistem hakkında fotoğrafın yer aldığı web sitesi, <http://www.roadslesstraveledbykatie.com/2011/05/let-games-begin.html>, 29 Temmuz 2012.

- [59] Tek tabakalı çelik kubbe sistemler hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickr.com/photos/thedouglascampbellshow/5095372690/>, 5 Mayıs 2012.
- [60] Tek tabakalı ahşap kubbe sistem yapım aşamalarını gösteren video destekli web sitesi, <http://www.sabsonline.com/DisplayItem.aspx?itemid=00000046>, 21 Haziran 2012.
- [61] Tek tabakalı çelik nervürlü kubbe örneği fotoğrafının yer aldığı web sitesi, http://www.panoramio.com/photo_explorer#view=photo&position=1&with_photo_id=28089755&order=date_desc&user=3777672, 7 Temmuz 2012.
- [62] Tek tabakalı çelik nervürlü kubbe örneği hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.lux-hotels.com/gr/rodos-palace/gallery.php>, 4 Mart 2012.
- [63] Çöne, A.Ş., (2001). Prefabrike Düzlem Çelik Uzay Sistemlerde Yapı Geometrisindeki Değişimin Çelik Malzeme Giderine Etkisi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [64] Wikipedia, Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örneği hakkında bilgilerin olduğu web sitesi, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Berlin_Gasometer_Fichtestrasse_Schnitt_ZfB.jpg, 15 Aralık 2011.
- [65] Tek tabakalı çelik kubbe sistemler hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickr.com/photos/21604182@N04/4965479652/>, 5 Mayıs 2012.
- [66] Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.anc-d.u-fukui.ac.jp/~ishikawa/years/1950-1960/Structural%20Systems-Countries/Axial%20Force/Europe/1959-s.f-CZE/PavilionZ,ExhibitionGrounds.htm>, 18 Nisan 2012.
- [67] Tek tabakalı çelik kubbe sistem örneği ve detaylarına ait bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://www.ballparksofbaseball.com/past/Astrodome.htm>, 23 Mayıs 2012.
- [68] Tek tabakalı kubbe sistemler ile ilgili bilgilerin olduğu web sitesi, <http://www.crawfishboxes.com/2009/10/21/1092782/remembering-the-astrodome>, 26 Nisan 2012.
- [69] Vural, N., (2000). Uzay Kafes Sistemleri ve Türkiye'deki Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, KATÜ, Trabzon.
- [70] Mimarlık haberleri, makaleler, bildiriler ve fotoğrafların olduğu web sitesi, http://www.raf.com.tr/urun_1695_icoso-systems-jeodezik-kubbe-ve-serbest-yuzey-cozumleri.html, 15 Temmuz 2012.
- [71] Tek tabakalı alüminyum yapı örneği hakkında fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.sandiegoreader.com/photos/galleries/palomar-college/5396/>, 29 Mayıs 2012.

- [72] Tek tabakalı alüminyum uzay kafes sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://popupcity.net/2010/11/for-sale-buckminster-fuller-dome/>, 1 Nisan 2012.
- [73] L'opez, A., Puente, I. ve Serna, M.A., (2001). "Direct Evaluation of The Buckling Loads of Semi-Rigidly Jointed Single-Layer Latticed Domes under Symmetric Loading", Science Direct, Institute of Civil Engineering, Tecnun, University of Navarra, Manuel de Lardizabal 13, San Sebastian, Spain.
- [74] Altunkaya, P., (2007). Tutkallı Tabakalanmış Ahşap Strüktür Sistemlerin Mimaride Kullanım Olanakları, Yüksek Lisans Tezi, KATÜ, Trabzon.
- [75] Tek tabakalı ahşap kubbe sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.amwarchitects.com.au/projects/special-and-complex-projects/ras-exhibition-halls.php>, 25 Nisan 2012.
- [76] Tek tabakalı uzay kafes sistem örnekleri hakkında fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=678936&page=4>, 26 Mayıs 2012.
- [77] Hiperbolik paraboloid sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.buildingbutler.com/bd/Roger-Taillibert/Luxembourg/d'Coque-National-Sports-and-Cultural-Centre/6747>, 27 Mayıs 2012.
- [78] Hiperbolik paraboloid sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.trefokus.no%2Fdocument%2FRecent%20large%20scale%20wooden%20buildings%20in%20Finland%20jUpZq.pdf.file&ei=kYM2UODOlvdN4Q4Ti4YCwDQ&usg=AFQjCNE4bTbjwIFCdH0m4DjgrJcX93QUqg&sig2=k78p2WziBpiRYSrDM8BzXw>, 28 Mayıs 2012.
- [79] Hiperbolik paraboloid sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, http://anengineersaspect.blogspot.com/2009_10_01_archive.html, 27 Mayıs 2012.
- [80] Candela, F., (2008). The Hiperbolic Paraboloid, <http://mcis2.princeton.edu/candela/paraboloid.html>, 26 Kasım 2011.
- [81] Candela, F., (2008). Cosmic Rays Laboratory, <http://mcis2.princeton.edu/candela/cosmicrays.html#>, 25 Kasım 2011.
- [82] Toussaint, M.H., (2007). "A Design Tool for Timber Gridshells", The Development of a Grid Generation Tool, Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering and Geosciences Section of Structural and Building Engineering Structural Design Lab, Master of Science in Civil Engineering.
- [83] Hiperbolik paraboloid sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, http://www.thefullwiki.org/Shukhov_Tower, 15 Aralık 2011.

- [84] Özhenekçi, D., YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Çelik Yapılar I Ders Notları, http://www.yildiz.edu.tr/~devrimo/Devrim_Ozhendekci_Celik1_Ders-Notu-1.pdf, 2 Mayıs 2012.
- [85] Demir ve çelik malzeme hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Garabit.jpg>, 15 Nisan 2012.
- [86] Kurrer, K., (2008). The History of The theory of Structures, From Arch Analysis to Computational Mechanics, Berlin, Germany.
- [87] Çelik kubbe sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://www.geometrica.com/en/architectural/glass-cladding>, 10 Ağustos 2012.
- [88] Çelik kubbe sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://www.flickr.com/photos/geometricainc/6514181191/in/photostream/>, 10 Ağustos 2012.
- [89] Tek tabakalı alüminyum kubbe sistemlerle ilgili bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.cardcow.com/98553/spruce-goose-long-beach-california/>, 9 Nisan 2012.
- [90] Çelik malzeme hakkında bilgi ve grafiklerin bulunduğu web sitesi, <http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/2447.htm>, 15 Nisan 2012.
- [91] Stephan, S., Sanchez, J., ve Knebel, K., (2004). "Reticulated Structures On Free-Form Surfaces", MERO GmbH & Co. KG, 5-6, Germany.
- [92] Schlaich, J. ve Bergermann, R., (1988). Patent Application DE 37 15 228 A1, German patent Office, Munich, Germany.
- [93] Schlaich, J. ve Schober, H., (1996). "Glass-Covered Grid-Shells", Structural Engineering International, 6: 88-90.
- [94] Schober, H. (2002). Geometrie Prinzipien für wirtschaftliche und effiziente Schalentragerwerk, Bautechnik 79, Issue 1, Germany.
- [95] Schlaich, J. ve Bergermann, R., (2003). Light Structures, Germany.
- [96] Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örneğine ait detayların bulunduğu web sitesi, <http://www.gmp-architekten.de/>, 12 Mayıs 2012.
- [97] Schlaich, J., Schober, H. ve Knippers, J., (1999). Bahnsteigüberdachung Fernbahnhof Berlin Spandau, Stahlbau 68, Issue 12, Germany.
- [98] Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örneğine ait detayların bulunduğu web sitesi, <http://www.sbp.de/en>, 13 Mayıs 2012.
- [99] Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örneğine ait detayların bulunduğu web sitesi, <http://www.123rf.com/>, 13 Mayıs 2012.
- [100] Krewinkel, H., (1998). Pariser Platz 3 in Berlin, Glas – Architektur und Technik, Issue 6, Germany.
- [101] Knaack, U., (1998). Konstruktiver Glasbau, R. Müller Verlag, Köln, Germany.

- [102] Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örneğine ait detayların bulunduğu web sitesi, <http://www.okalux.de/en/references/all/okatherm/hippopotamus-house-in-berlind.html>, 13 Mayıs 2012.
- [103] Wörzberger, R., (1988). Neue konstruktive Details, Arcus 3 Vom Sinn des Details, R. Müller Verlag, Köln, Germany.
- [104] Mimarlık haberleri, yapılar ve yapılara ait bilgilerin yer aldığı web sitesi, http://tracyahunt.com/germany_2004.htm, 15 Mart 2012.
- [105] Covering City Space, Tek tabakalı çelik uzay kafes sistem yapı fotoğrafı içeren resmi web sitesi, <http://coveredstreet.wordpress.com/2010/04/18/german-historical-museum-berlin/>, 10 Kasım 2011.
- [106] Tek tabakalı uzay kafes system örneği ve detaylarına ait bilgi ve fotoğrafların yer aldığı resmi web sitesi, <http://www.viewpictures.co.uk/Details.aspx?ID=93209&TypeID=1>, 15 Nisan 2012.
- [107] Anderson, R., (2000). "The Great Court and The British Museum", The British Museum Press, London, U.K.
- [108] Sischka, J., Brown, S., Handel, E. ve Zenker, G., (2001). Die Überdachung des Great Court im British Museum in London, Stahlbau 70, Issue 7, Germany.
- [109] Wikipedia, Tek tabakalı uzay kafes sistem yapı örneği hakkında bilgilerin olduğu web sitesi, http://en.wikipedia.org/wiki/British_Museum, 10 Aralık 2011.
- [110] Tek tabakalı çelik kubbe sistemler hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickr.com/photos/liamdonnelly/3622160504/>, 5 Mayıs 2012.
- [111] Ramaswamy, G.S., Eekhout, M. ve Suresh, G.R., (2002). Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames, Thomas Telford Ltd., London, U.K.
- [112] Tek tabakalı uzay kafes sistem birleşim tipi hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.kuiper.nl/index.php?section=Projects&id=299>, 15 Nisan 2012.
- [113] Makowski, Z.S., (2002). "Development of Jointing Systems for Modular Prefabricated Steel Space Structures", Proceedings of the International Symposium for Light weight Structures in Civil Engineering (LSCE), Warsaw, Poland, 17-40.
- [114] MERO, Uzay Kafes Sistemler resmi web sitesi, <http://www.mero.com.sg/systems.html>, 8 Mayıs 2012.
- [115] MERO GmbH, (2003), MERO-Raumfachwerk, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-10, DIBt – German Institute for Civil Engineering, Berlin, Germany.
- [116] Schober, H., Keurschner, K. ve Jungjohann, H., (2004). "Neue Messe Mailand-Netzstruktur und Tragverhalten einer Freiformfläche", Stahlbau 73, Heft 8, 541-551.

- [117] Çift tabakalı çelik uzay kafes sistemler hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickrriver.com/photos/i-dave/tags/italia/>, 8 Mayıs 2012.
- [118] Mimoa, modern architecture, resmi web sitesi, <http://mimoa.eu/projects/Italy/Milan/New%20Trade%20Fair>, 3 Mart 2012.
- [119] Fischer, H., (1993). Experimentelle Tragfaehigkeitsuntersuchungen an Sternfoermigen Geschraubten Stabknoten, Bericht Nr.
- [120] Bouchaïr, A., Averseng, J. ve Abidelah, A., (2008) "Analysis of the Behaviour of Stainless Steel Bolted Connections", Journal of Constructional Steel Research, 64(1), 1264-1274.
- [121] Mimarlık haberleri, makaleler, bildiriler ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://archpaper.com/news/articles.asp?id=5380>, 12 Ocak 2012.
- [122] Norwich University, Tek tabakalı serbest formlu sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu resmi web sitesi, <http://www.norwich.edu/voices/lisaschrenk/2012/04/09/florida-45/>, 15 Nisan 2012.
- [123] Gridshell hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, http://www.fourthdoor.org/annular/?page_id=453, 17 Mayıs 2012.
- [124] Mimarlık haberleri, makaleler, bildiriler ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.architectureserved.com/gallery/Cabot-Circus-Roof-Design/619816>, 12 Ocak 2012.
- [125] Parke, G. ve Howard, C., (1993). Space Structures, London, Thomas Telford.
- [126] Gioncu, V., (1995). "Buckling of Reticulated Shells State of The Art", International Journal of Space Structures, 10:1–46.
- [127] Fan, F., Cao, Z., Shen, S., (2011). "Elasto-Plastic Stability of Single-Layer Reticulated Shells Thin-Walled Structures", School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, China.
- [128] Soykan, K., (2007). Çelik Uzay Kubbe Sistemlerin Ağırlıkça Optimum Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [129] Al Nageim, H. ve Macginney, T.J., (2005). Steel Structures, Third Edition, USA.
- [130] SAP2000 (2010) "VersionV14, Analysis Reference Manual." Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.
- [131] Horn, C.W., (1973). "The Cruck-Built Barn of Leigh Court, Worcestershire, England", in Yeomans, D. (ed.) 1999, The Development of Timber as a Structural Material, Ashgate Publishing Limited, Hampshire, 1-25.
- [132] Ross, P., (2002). Appraisal and Repair of Timber Structures, Thomas Telford Publishing, London.
- [133] Müller, C., (2000). Laminated Timber Construction, Birkhäuser, Basel, Berlin, Boston.

- [134] Ceccato, C., Hesselgren, L., Pauly, M., Potmann, H. ve Wallner, J., (2010). Advances in Architectural Geometry 2010, Holzhausen Druck GmbH, Vienna, Austria.
- [135] Tek tabakalı ahşap silindirik kabuk sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://research.ttlchiltern.co.uk/pif294/tdk/case%20studies/hounslow%20east%20timber%20lamella%20roof%20structure/01%20small.htm>, 11 Şubat 2012.
- [136] Holzbau, Tek tabakalı ahşap kubbe sistem yapı örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı resmi web sitesi, <http://www.holzbau.rubner.com/en/progetti/dettagli/palalivorno-2.html>, 12 Mayıs 2012.
- [137] Westmuckett Hawkes resmi web sitesi, Tek Tabakalı Sistem Örnekleri, <http://www.westmucketthawkes.com/portfolio/>, 16 Mayıs 2012.
- [138] Tek tabakalı ahşap sistem örneği hakkında fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.conceptdrawing.co.uk/DataImages/ImagesPage/NapierUniversityRender.jpg>, 15 Aralık 2011.
- [139] Dwaikat, M. ve Fike, R., (2010). High Temperature Properties of Steel for Fire Resistance Modeling of Structures, Venkatesh Kodur, F. ASCE, Journal Of Materials in Civil Engineering, ASCE.
- [140] Connections in Timber Structures, (2006), <http://staff.fit.ac.cy/eng.ma/BATECH08/Connections.pdf>, 29 Mayıs 2012.
- [141] United States Department of Transportation Federal Highway Administration, Ahşap Birleşim Sistemleri, <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/04098/14.cfm>, 21 Haziran 2012.
- [142] Ahşap malzemenin mekanik özellikleri hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, http://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d_1789.html, 19 Nisan 2012.
- [143] Hıraoğlu, E.E., (2007). Ahşap ve Makas Sistemlerin Malzeme ve Sistem Özelliklerinin İncelenmesi, Bir Örnek Yapı Üzerinde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [144] Odabaşı, Y., (1992). Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- [145] Türker, K., Ahşap Birleşim Sistemleri, http://w3.balikesir.edu.tr/~kturker/files/Download/ACY-I_hafta_2.pdf, 31 Mart 2012.
- [146] Türker, K., (2010). "Ahşap ve Çelik Yapılar Ders Notları", Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, <http://w3.balikesir.edu.tr/~kturker/default.htm>, 12 Ocak 2012.

- [147] Kurt, R., Mengeloğlu, F. ve Bektaş, İ., (2003). "The Introduction Of Engineered Wood Products (EWPs) For The Earthquake Resistant Building Construction in Turkey", Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs 2003.
- [148] Tek tabakalı uzay kafes sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı paylaşım sitesi, <http://mosinnagant.net/finland/FinnishInternationalGrandFestival.htm>, 20 Ocak 2012.
- [149] Tutkallı tabakalanmış ahşap teknolojisi hakkında bilgilerin olduğu paylaşım sitesi, <http://www.darsane.com/showthread.php?108652-Tutkallı-tabakalanmış-ahşap-teknolojisi-nedir>, 21 Haziran 2012.
- [150] Ahşap malzemeler hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://www.panabodehomes.com/buildingproducts/>, 15 Nisan 2012.
- [151] Yapıda kullanılan ahşaplar hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://evstudio.info/field-drilling-holes-in-laminated-veneer-lvl-beams/>, 15 Nisan 2012.
- [152] Yapıda kullanılan ahşaplar hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://www.trada.co.uk/techinfo/library/view/3B8B8E98-9D09-43BD-9177-32B952B5C3CC/Timber+composites/ar01s02.html>, 15 Nisan 2012.
- [153] Yılmaz, D., (2011). Ahşap kompozit Elmanlarla Oluşturulmuş Geniş Açıklıklı Sistemlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [154] Yapıda kullanılan ahşaplar hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-5607/FAPC-163web.pdf%20%5b353>, 15 Nisan 2012.
- [155] Nelson, S., (1997). "Structural Composite Lumber. Engineered Wood Products: A Guide for Specifiers, Designers and Users", Edited by Stephen Smulski, PFS Research Foundation, Madison, WI., 147-172.
- [156] Hernandez, R., Moody, R. ve Liu, Y., (1999). "Glued Structural Members 11-2 From Forest Products Laboratory Wood handbook Wood as an engineering material", Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 463.
- [157] Russell, A.E., (2003). Effects of Strand Geometry on Selected Properties of Longstrand Lumber Structural Composite Made from Northeastern Hardwoods, a Thesis The Graduate School The University of Maine, USA.
- [158] Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.architectsjournal.co.uk/buildings/building-design/working-detail-herbert-museum-and-art-gallery-by-pringle-richards-sharratt-architects/5214162.article>, 25 Mayıs 2012.
- [159] Yapıda kullanılan ahşaplar hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://tukangarsitek.blogspot.com/2010/12/structural-materials-timber.html>, 17 Nisan 2012.

- [160] Şenol, D., (2001). Büyük Açıklıklı Mekanların Tutkallı Tabakalanmış Ahşap Sistemler ile Geçilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [161] Tek tabakalı ahşap kubbe sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.cowleytimberwork.co.uk/Geodesic.html>, 27 Mart 2012.
- [162] Ahşabın yapıda kullanımı hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://www.theconstructionindex.co.uk/news/view/finnforest-merks-ring-beam-solution-is-a-bulls-eye-in-barcelona>, 18 Nisan 2012.
- [163] Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.rmdkwikformnews.co.uk/pyramid-meets-dome-at-scunthorpe-leisure-centre/>, 25 Mayıs 2012.
- [164] Hiperbolik paraboloid sistemlerin kurulumu hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, [http://www.gmelin.li/PhD/category/parametric design/](http://www.gmelin.li/PhD/category/parametric%20design/), 25 Mayıs 2012.
- [165] Gridshell yapı örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.proholz.at/zuschnitt/19/gitterschale-mannheim.htm>, 10 Temmuz 2012.
- [166] Blass, H.J. Aune, P., Choo, B.S., Görlacher, R., Griffiths, D.R., Hilson, B.O. ve Steck, G., (1995). "Timber Engineering Step 1: Basis Of Design, Material Properties, Structural Components and Joints", Centrum Hout, Almere.
- [167] Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemler (grid shell) hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://icd.uni-stuttgart.de/?cat=44>, 23 Ocak 2012.
- [168] Kabuk sistem örnekleri hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.sydneyshowground.com.au/news/newsletter/septemberoctober2008.html>, 26 Ocak 2012.
- [169] Department of Structural Design and Timber Engineering, resmi web sitesi, http://www.architectura.net/bldgs/445/index_en.html, 20 Mayıs 2012.
- [170] Tacoma Dome resmi web sitesi, [http://davfal.powweb.com/museum/StarsCards/tacoma dome.htm](http://davfal.powweb.com/museum/StarsCards/tacoma_dome.htm), 5 Nisan 2012.
- [171] Pestman, J.H., (1965). Vormgeving in Hout, C.A. Spin en Zoon N.V., Amsterdam.
- [172] Hiperbolik paraboloid sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.krusi.com/Expo2000.html>, 8 Nisan 2012.
- [173] Şenay, A., (1996). Ahşap Lamine Taşıyıcı Elemanların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Araştırmalar, Doktora Tezi, İ.Ü, F.B.E., İstanbul.
- [174] Norbert, B., Alan, M. ve Johannes, N., (2005). "The "EXPO-roof" in Hanover - A New Dimension for Ripped Shells in Timber".
- [175] Gridshell yapı örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.smdarq.net/?p=1102>, 5 Haziran 2012.

- [176] Burkhardt, B., (1978). IL13: Multihalle Mannheim, Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart.
- [177] Gridshell yapıları hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.greenoakcarpentry.co.uk/public-projects/weald-and-downland-gridshell-building/>, 27 Mart 2012.
- [178] Harris, R. ve Kelly, O., (2002). The Structural Engineering of the Downland Gridshell İn Parke, G.A.R. & Disney, P., Space Structures, 5(1), Thomas Telford, London.
- [179] Alüminyum malzemenin tarihte kullanımı hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, www.aecom.com, 23 Mayıs 2012.
- [180] Alüminyum malzeme hakkında fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.panoramio.com/photo/41391894>, 7 Haziran 2012.
- [181] Washington Üniversitesi Kütüphanesi, Alüminyum malzeme hakkında fotoğrafların bulunduğu resmi web sitesi, http://content.lib.washington.edu/cdm4/item_viewer.php?CISOROOT=/buildings&CISOPTR=11278, 10 Mayıs 2012.
- [182] Tek tabakalı kubbe sistemler hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, http://www.gardenvisit.com/garden/des_moinen_botanical_garden, 28 Nisan 2012.
- [183] Tek tabakalı alüminyum kubbe sistem örneği hakkında fotoğrafın yer aldığı web sitesi, http://www.reiki.org/globalhealing/SouthPole/New%20Folder/Science%20Station%20at%20the_B.jpg, 10 Haziran 2012.
- [184] Kissell, J.R. ve Ferry, R.L., (2002). Aluminum Structures, A Guide to Their Specifications and Design, Second Edition, Canada, USA.
- [185] Çelik ve Alüminyum malzeme özellikleri hakkında grafiğin yer aldığı web sitesi, <http://www.boatdesign.net/forums/attachments/metal-boat-building/55051d1300338786-grinding-welds-stress-strain.jpg>, 21 Mayıs 2012.
- [186] Olive, G., (2008). Aluminum Structures, P.E. Larson Engineering, St. Louis, MO.
- [187] Temcor resmi web sitesi, Alüminyum Uzay Kafes Sistemler, http://www.temcorrollwell.com/dome_construction.html, 23 Mayıs 2012.
- [188] Alüminyum kubbe sistemler ile ilgili bilgi ve fotoğrafların yer aldığı resmi web sitesi, www.conservatek.com, 15 Nisan 2012.
- [189] Mäkeläinen, P., ve Hassinen, P., (1999). "Light-Weight Steel and Aluminium Structures: Fourth International Conference on Steel and Aluminium Structures", ICSAS'99.
- [190] Mimarlıkta kullanılan sistemler ile ilgili bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, http://vitragessystems.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=16:slide-2, 10 Mart 2012.

- [191] Tek tabakalı alüminyum kubbe sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.southpolestation.com/0910/10photos3.html>, 26 Aralık 2011.
- [192] National Science Foundation Office of Polar Programs, Alüminyum kubbe detayı, <http://antarcticsun.usap.gov/features/contentHandler.cfm?id=1988>, 23 Ocak 2012.
- [193] Supartono, F., Zhongli, L. ve Xiujiang, W., (2011). "Membrane Structure a Modern and Aesthetic Structural System", Seminar dan Pameran HAKI, Konstruksi Indonesia Melangkah ke Masa Depan.
- [194] Wikipedia, tek tabakalı uzay kafes sistemin tarihçesi hakkında bilgilerin olduğu web sitesi, http://en.wikipedia.org/wiki/All-Russia_Exhibition_1896, 9 Aralık 2011.
- [195] Mimarlık ve sistemlerle ilgili bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://sustainable2010.blogspot.com/p/sites.html>, 4 Mayıs 2012.
- [196] Bayülgen, C., (1999). Çağdaş Stüktür Sistemleri, İstanbul.
- [197] Membran malzemeler hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://www.celpi.com/membran.htm>, 27 Şubat 2012.
- [198] Membran özellikleri hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, http://www.bestfromchina.com/featured_partners/membrane_structure/Membrane_Structure_Material.html, 17 Ocak 2012.
- [199] Membran malzemeler hakkında bilgilerin yer aldığı resmi web sitesi, <http://www.verseidag.de/>, 25 Mayıs 2012.
- [200] Özkan, E., (1997). "Mechanical Performance of New and Naturally Weathered Bituminous and Synthetic Single Ply Roofing Membranes", Istanbul Technical University, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roofing Technology, 242.
- [201] PVC Membran mekanik özellikleri hakkında bilgilerin bulunduğu web sitesi, <http://www.texwire.us/cablewire/pvcproperties.html>, 4 Şubat 2012.
- [202] Bi State, resmi web sitesi, <http://bi-stateroof.com/projects.php>, 10 Nisan 2012.
- [203] Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan örtü malzemeleri hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://makmax.com.au/membrane/etfe>, 22 Şubat 2012.
- [204] Zubir, A.N. ve Ahmad, Z.I., (2002). "Effect Of Sintering Temperature on the Morphology and Mechanical Properties of PTFE Membranes as a Base Substrate for Proton Exchange Membrane", Songklanakarin J. Sci. Technol. 24(1), Membrane Sci. &Tech.
- [205] Kablo destekli yapılarda kullanılan membran malzemeler hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu resmi web sitesi, <http://www.birdair.com/tensilearchitecture/PTFE.aspx>, 11 Haziran 2012.

- [206] Bearing Works, PTFE membran mekanik özellikleri, http://www.bearingworks.com/content_files/pdf/retainers/PTFE%20datasheet.pdf, 16 Ocak 2012.
- [207] PTFE membran örtünün kullanıldığı yapı hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://2010stadiumwatch.blogspot.com/2009/02/final-stages.html>, 14 Şubat 2012.
- [208] Membran malzeme kullanım hakkında fotoğrafların yer aldığı web sitesi, http://www.chinadaily.com.cn/youanda/2008-07/31/content_6894357_2.htm, 20 Mayıs 2012.
- [209] Robinson, L.A., (2004). "Structural Opportunities of ETFE", S.B., Civil Engineering Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [210] Architekten Landrell resmi web sitesi, ETFE Membrane, <http://www.ribaproductselector.com/Docs/5/00435/external/COL1400435.pdf>, 27 Temmuz 2012.
- [211] Tek tabakalı uzay kafes sistem örtü malzemeleri hakkında bilgilerin olduğu web sitesi, <http://stoprocks.com/funding/etfe-membrane&page=5>, 23 Mayıs 2012.
- [212] Wikol, M., Hartmann, B., Brendle, J., Crane, M., Beuscher, U., Brake, J. ve Shickel, T., (2008). Expanded Polytetrafluoroethylene Membranes and Their Applications, W. L. Gore & Associates, Inc. Newark, Delaware, USA.
- [213] Membranlar hakkında bilgilerin olduğu web sitesi, <http://www.freepatentsonline.com/y2010/0006497.html>, 26 Nisan 2012.
- [214] Membran örtü malzemeleri hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://ymmvreviews.com/knowledge/waterproofbreathable-jackets-the-deets/>, 10 Aralık 2012.
- [215] Tek tabakalı serbest formlu yapı örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.designboom.com/weblog/cat/9/view/10205/knippers-helbig-expo-boulevard-shanghai.html>, 22 Haziran 2012.
- [216] Parlak, N., (1998). Uzay Kafes Sistem ve Örtü Elemanları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.
- [217] Erdem, H., (2003). Metal Çerçevesi Cam Giydirmeye Cephe Sistemleri ve Geçirimsizlik Çözümleri Üzerine Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Trabzon.
- [218] Güneş ışınım kontrol camları hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı web sitesi, <http://www.seele.com>, 12 Nisan 2012.
- [219] Low-E camları çalışma prensibi hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, <http://www.explainthatstuff.com/how-low-e-heat-reflective-windows-work.html>, 4 Temmuz 2012.
- [220] Redchalksketch, Tek tabakalı uzay kafes sistem ile tasarlanmış yapı örneğine ait bilgi ve fotoğraflar içeren resmi web sitesi, <http://redchalksketch.wordpress.com/2011/06/20/yas-hotel-asymptote/>, 14 Nisan 2012.

- [221] Tek tabakalı uzay kafes sistem örtü malzemeleri hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı resmi web sitesi, <http://www.dnc.com.tr/referans.asp>, 23 Haziran 2012.
- [222] Örtü malzemeleri hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı resmi web sitesi, <http://www.yapikatalogu.com/Urunler/polikarbonat-levha-119879.html>, 12 Ocak 2012.
- [223] Ersoy, H.Y., (2001). Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları, İstanbul.
- [224] Dizayn Araştırma Grubu, (1991). "Uzay Kafes Sistemlerde Örtü Gereçleri", Dizayn Konstrüksiyon Dergisi, 83:28-33.
- [225] Örtü malzemeleri hakkında bilgi ve fotoğrafların yer aldığı resmi web sitesi, <http://www.yapikatalogu.com/Urunler/c-t-p-cam-elyaf-takviyeli-plastik-levha-11679.html>, 12 Ocak 2012.
- [226] Alüminyum malzemeler hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, http://www.hmttank.com/Products_Floating%20Roofs_Aluminator%20RC.htm, 3 Nisan 2012.
- [227] Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistemler (grid shell) hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://inhabitat.com/undulating-downland-gridshell-in-england-is-a-self-supporting-structure-built-from-local-oak/olympus-digital-camera-76/?extend=1>, 24 Ocak 2012.
- [228] Tek tabakalı ahşap uzay kafes sistem örneği hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://www.topboxdesign.com/herbert-art-gallery-museum-by-pringle-richards-sharratt-united-kingdom/>, 12 Mayıs 2012.
- [229] Çift tabakalı uzay kafes sistem detayları hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://www.tetrasteel.com/eng/projects/malpensa.html>, 5 Nisan 2012.
- [230] Daniel, A.C., (2003). Floor and Roof Systems, Section 8, Principal, LZA Technology Thornton-Tomasetti Engineers, New York.
- [231] Ayhün, E., (2006). Uzay Kafes Sistemlerin Farklı Bölge Koşullarında Davranışlarının İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Proje Çözümleri, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [232] Özbahar, E., (2007). Tek Eğrilikli Uzay Kafes Sistemlerin Optimum Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [233] Borrego, J., (1968). Space Grid Structures; Skeletal Frameworks and Stressed-Skin Systems, The Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, London, England.
- [234] Yüksek Çelik Konstrüksiyon resmi web sitesi, <http://www.yuksekelik.com/uzaykafessistemleri.htm>, 8 Nisan 2012.

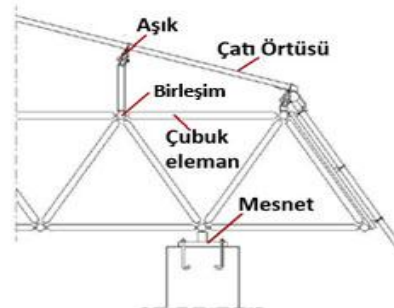
- [235] Bardell, N. S., Brown, D., Shearn, P. D., Turner, D. P., Longbourn, J.R. ve Traxson, R. J., (1997) "The Development of MURJ-3D: A Modular, Universal, Re-Configurable Joint for 3-D Space Frame Applications", Proceedings Of International Journal Of Space Structures, 12(2), 89-107.
- [236] Chilton, J., (2000). Space Grid Structures, Architectural Press, Oxford, England.
- [237] Hiroyuki, T., (1994). Space Structure Forms and Systems, M. Phill Thesis, University of Surrey, Guildford, ch.4.
- [238] ANZ Stadium, resmi web sitesi, <http://www.anzstadium.com.au/AboutUs/SchoolProjects.aspx>, 19 Mart 2012.
- [239] BVN Architecture, ANZ Stadium, resmi web sitesi, http://www.bvn.com.au/projects/anz_stadium.html?OpenDocument&idx=Index&pcat=A&tpl=ext, 13 Nisan 2012.
- [240] Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin tarihi ve birleşim sistemleri hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, <http://miscellaneous-pics.blogspot.com/2010/10/konrad-wachsmann.html>, 5 Kasım 2011.
- [241] Tek tabakalı silindirik kabuk sistem yapı örneği hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.flickr.com/photos/montannito/4164850282/>, 6 Mayıs 2012.
- [242] Uzay kafes sistem yapı örnekleri hakkında bilgi ve fotoğrafların bulunduğu web sitesi, http://www.tatasteelconstruction.com/en/reference/teaching_resources/architectural_studio_reference/design/space_grid_structures/examples_of_space_grids/, 15 Ocak 2012.
- [243] Kawaguchi, M., (1988). Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, A review of the recent development of steel space structure in Japan.
- [244] Eekhout, M., Ramaswamy, G.S., Suresh, G.R., (2002). Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames, ASCE Press, Thomas Telford Publishing, London.
- [245] Tek tabakalı uzay kafes sistem örneği hakkında fotoğrafların olduğu web sitesi, <http://www.mountainsofttravelphotos.com/Singapore/200507%20Singapore/Singapore/slides/Singapore%2002%2002%20Swissotel%20view%20of%20Esplanade.html>, 10 Mayıs 2012.
- [246] Klimke, H., Sanchez, J., Vasiliu, M., Stuehler, W. ve Kaspar, C., (2002). "The Envelopes of the Arts Centre in Singapore, Proceedings of the 5th International Conference on Space Structures", Surrey, GB.
- [247] Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin birleşim detayları hakkında bilgi ve fotoğrafların olduğu web sitesi, http://m.wikitravel.org/en/Eden_project, 14 Aralık 2011.
- [248] Tek tabakalı uzay kafes sistem örneği hakkında bilgi, fotoğraf ve paylaşımların yer aldığı web sitesi, www.edenproject.com, 25 Şubat 2012.

- [249] Uzay kafes sistem hakkında bilgilerin yer aldığı web sitesi, http://www.tatasteelconstruction.com/en/reference/teaching_resources/architectural_studio_reference/design/space_grid_structures/brief_history_development_system/, 15 Ocak 2012.
- [250] Lopez, A.E., (1997). "Recent Advanced in Aluminium Clear Span Structural Systems", Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Singapore, 517-525.
- [251] Akgül, T., Apay, A. ve Sarıbiyık, M., (2009). "Ahşap Birleşim Bölgelerinin Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerle Güçlendirilmesi", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- [252] Mengeloğlu, F. ve Kurt, R., (2004). "Mühendislik Ürünü Ağaç Malzemeler Tabakalanmış Kaplama Kereste (TAK) ve Tabakalanmış Ağaç Malzeme (TAM)", KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi 7(1).

ÇİFT TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLER

EK-1.1 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin özellikleri

Paralel iki düz ya da eğrisel yüzeyin diagonal elemanlar ile genellikle mafsallı olarak birleştirildiği sistemlerdir. Sistem, düşey ve yatay yükleri (deprem ve rüzgâr) emniyetle taşıyabilmelidir. Düğüm noktalarından çubuk elemanlara aktarılan noktasal yükler ile elemanlarda sadece normal kuvvet oluşmakta, çekme ve basınç kuvvetlerine göre boyutlandırma yapılmaktadır. Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin ana elemanları, çubuklar, birleşim elemanları, mesnetler, aşık ve örtü elemanlarıdır (Şekil EK-1.1). Açıklıkta üst tabaka çubukları basınca, alt tabaka çubukları çekmeye çalışır. Diagonal elemanların seçiminde ise dikkat edilmesi gereken en önemli konu, boyu uzun olan elemanların çekmeye, kısa elemanların ise basınca çalıştırılma gerekliliğidir.



Şekil EK-1.1 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin ana elemanları [229]

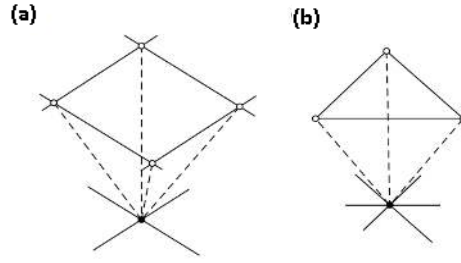
Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin tasarımında; açıklık, plan, yükler, iki tabaka arası mesafe, modül boyutları, mesnetlerin yerleri ve biçimi, kaplama boyutları, mimari ve

fonksiyonel gereksinimler; eğrilikli sistemlerde ilave olarak, eğrilik geometrisi ve yükseklik / açıklık oranı, estetik görünüm dikkat edilmesi gerekli unsurlardır.

EK-1.2 Tür ve geometri

Paralel iki düz yüzeyin arasında, düşeyde elemanların bu sisteme üst ve alt noktalarından yerleştirilmesiyle meydana gelen sistemlerdir. İki temel modül söz konusudur. Bunlar;

- Kare tabanlı piramit modülü (Şekil EK-1.2.a),
- Üçgen tabanlı piramit modülüdür (Şekil EK-1.2.b)



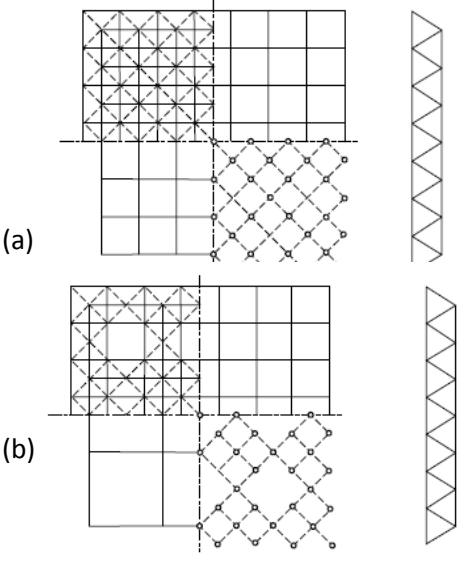
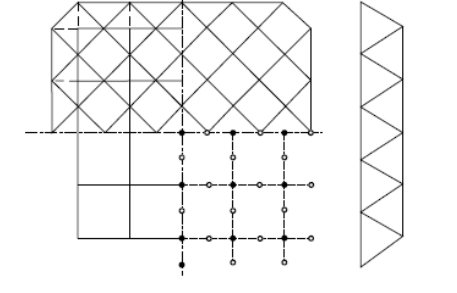
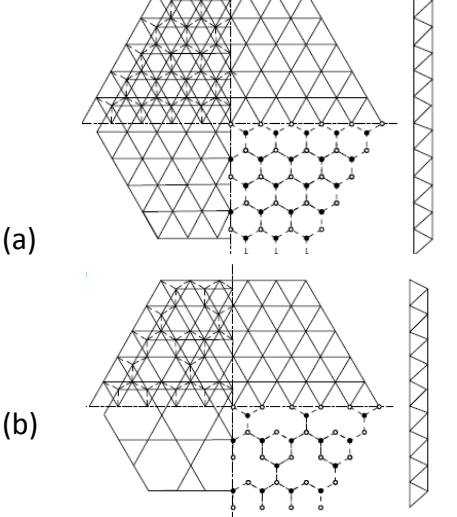
Şekil EK-1.2 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerde modüller [1]

Söz konusu modüllerin kullanıldığı çift tabakalı uzay kafes sistemler Çizelge EK-1.1’de verilmiştir.

EK-1.2.1 Kare ve üçgen tabanlı piramit modüllü çift tabakalı uzay kafes sistemler

Tip seçiminde önemli faktörlerden birisi de kullanılacak çeliğin ağırlığıdır. Birleşim tipleri ve elemanları farklı fiyat aralığına sahiptir. Çelik tüketimi ile ilgili karşılaştırma yapıldığında, dikdörtgen planda ve çevresi boyunca konulacak mesnetler açısından bakıldığında, çok çeşitli çift tabakalı sistem çözümleri mevcut olduğu görülmektedir. Uzun açıklık/kısa açıklık oranı (L/B), çift tabakalı uzay kafes sistem tipolojisini etkilemektedir. Çizelge EK-1.2’de tüm sistemlerin seçim aralıkları verilmektedir.

Çizelge EK-1.1 Kare ve üçgen piramit modüllü çift tabakalı uzay kafes sistemler

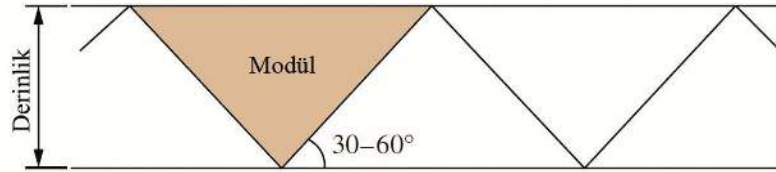
TİP 1 Üst tabakadaki kare piramidin çubukları 45° açı ile alt tabakaya bağlanırsa tüm elemanların uzunluğu aynı olmaktadır. Bu da prefabrikasyon yapımında en çok istenen özelliklerdendir. Dolu (a) ve boşluklu (b) olmak üzere iki tipi mevcuttur. Boşluklu tip; estetik görünüm, ışılandırma ve galeri boşluğu yaratma amacı ile bazı bölümlerdeki kare piramit modülün kaldırılması ile oluşturulur.	
TİP 2 Kare piramitli çift tabakalı uzay kafes sistemlerden tek farkı, modüllerin köşegen doğrultusunda dizilmesidir. Bu sayede daha az eleman tek bir düğüm noktasına bağlanmaktadır. Altı eleman tepe noktasında, sekiz eleman da alt noktasında birleşmektedir.	
TİP 3 Tepe ve alt noktalarında üçgen piramitlerin olduğu ve bunların tek bir noktada birleştirildiği sistemlerdir. Eğer çift tabakalı uzay kafes derinliği, kiriş uzunluğunun $\sqrt{2/3}$ üne eşit ise, tüm elemanların boyları aynı olmaktadır. Bu da prefabrikasyon açısından istenilen bir özelliktir. Tip 1'deki gerekçeler ile boşluklu olarak tasarlanabilir.	

Çizelge EK-1.2 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin çeşit seçimi [1]

Plan Çeşidi	Mesnetlenme Biçimi	Uygun Sistem Tipi
Kare, dikdörtgen (L/B: 1 - 1.5)	Çevresi boyunca mesnetli	1 ve 2
Dikdörtgen (L/B: 1.5 - 2)	Çevresi boyunca mesnetli	1
Kare, dikdörtgen	Ortadan mesnetli	1
Kare, dikdörtgen	Ortadan ve çevresi boyunca mesnetli	1 ve 2
Daire, üçgen, altıgen vs.	Çevresi boyunca mesnetli	3

EK-1.3 Tasarım parametreleri

Çift tabakalı uzay kafes sistem kurgulanırken öncelikle sistemin modülüne ve derinliğine karar verilmelidir. Derinlik, alt ve üst tabaka arasındaki mesafedir. Modül, iki düğüm noktası arasındaki mesafedir (Şekil EK-1.3). Çatının tasarımında ve ekonomik açıdan bakıldığında bu iki parametre sistem için çok önemlidir. Modül derinliği, açıklığın % 4-8 'i kadar olmalıdır [230]. Modül ve derinlikte kurgulanan açılar 30-60° arasında olmalıdır (Şekil EK-1.3).



Şekil EK-1.3 Derinlik ve Modül

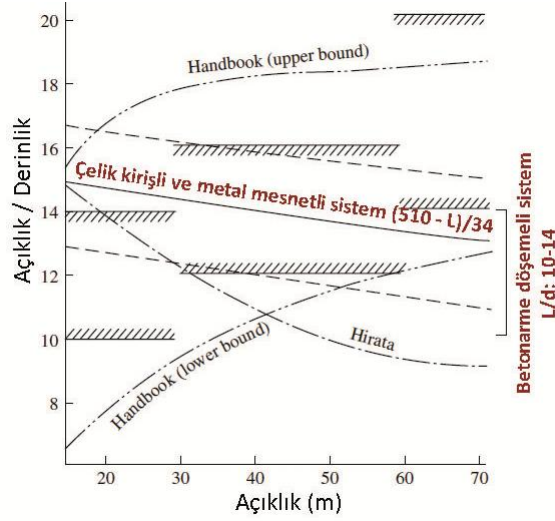
Araştırmalara göre, çift tabakalı uzay kafes sistemlerin ortama açıklık / derinlik oranı 12.5-25'tir. Uygun açıklık/derinlik oranı, maliyetin %3 optimumu içinde olan sistem formülü,

$$L/d = 10 - 14$$

Betonarme döşemeli çatı sistemi

$$L/d = \frac{510 - L}{34}$$

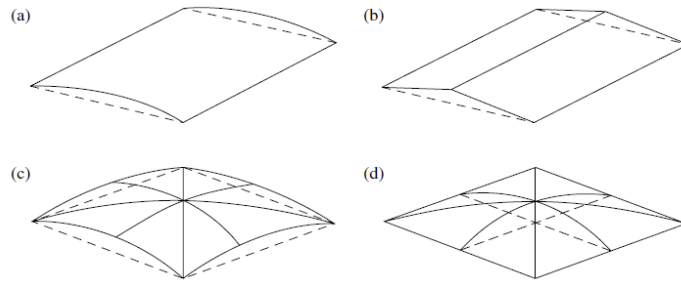
Çelik kirişli ve metal mesnetli çatı sistemi



Şekil EK-1.4 Uygun açıklık / derinlik oranları [1]

EK-1.4 Ters sehim ve eğim

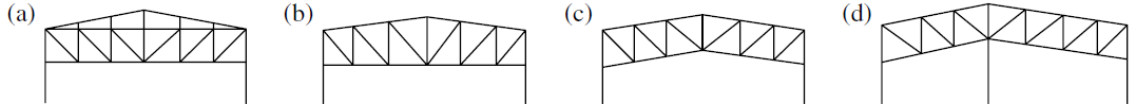
Çift tabakalı uzay kafes sistemlerde, sehim için genellikle önlem alınması gerekli değildir, sehimin açıklığının 1/300'ünden küçük olması gerekir. Ancak silindirik kabuk (a), kırma çatı (b) ya da kubbe (c) biçimli formlarda bazen ters sehim vermek gerekli olabilir (Şekil EK-1.5).



Şekil EK-1.5 Ters sehim çeşitleri [1]

Diğer taraftan sistemi ağır yağış şartlarından korumak için eğim verilebilmektedir, fakat bu bazen yetersiz kalmaktadır. Sisteme eğim,

- a) Sistemin tepedeki düğüm noktalarına farklı yüksekliklerde kolonlar koymak,
- b) Değişen ızgara derinliği vermek,
- c) Tüm ızgara sisteme eğim vermek,

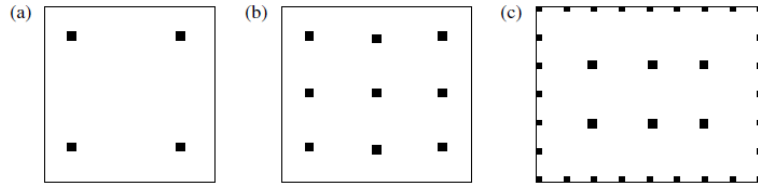


Şekil EK-1.6 Sisteme eğim verme şekilleri [1]

EK-1.5 Mesnetlenme biçimleri

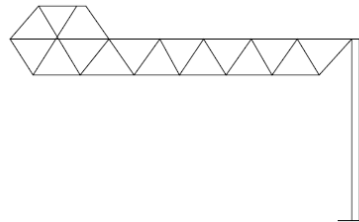
İdeal çift tabakalı uzay kafes sistemler; çevresi boyunca mesnetli kare, dairesel ya da diğer çok köşeli şekillerdir. Mesnetleme biçimleri,

1. Çevresi boyunca mesnet: Çevresi boyunca doğrudan kolonlara oturma, çevresel giriş ile kolonlara oturma veya dış duvarlara mesnetlenme, en geniş kullanım alanına sahip mesnetlenme biçimleridir. Bu şekilde, kafes derinliği azaltılabilmektedir.
2. Çoklu kolon ile mesnet: Spor alanları gibi yerlerde kullanılan, bir plan ortasında dört kolon ile mesnetlenmiş (Şekil EK-1.7.a) sistemler çoklu kolon sisteminin çeşitlerindendir. Ayrıca iç açıklığın 1/3'ünü geçmeyecek biçimde konsol oluşturulabilir. Çoklu çalışma alanları vb. işlevi olan yerlerde, bir plan ortasında kolonlara mesnetlenme (Şekil EK-1.7.b) ya da çoklu kolonlar + dış duvarlar + dış kolonlara mesnetlenme (Şekil EK-1.7.c) biçimleri kullanılmaktadır.



Şekil EK-1.7 Çoklu kolon yöntemi [1]

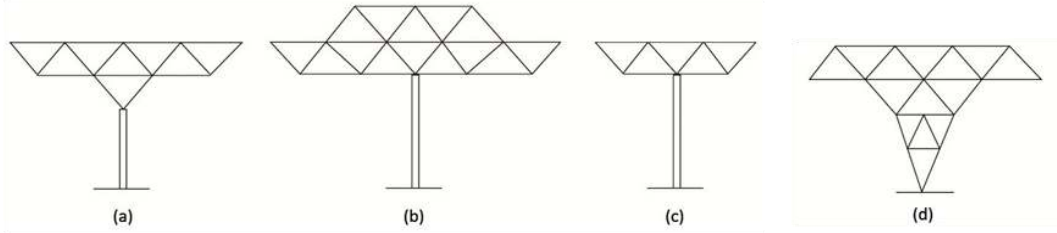
3. Çevresi boyunca üç kenardan mesnetli, bir kenardan mesnetsiz: Uçak hangarları gibi yapılarda uygulanır. Sehim azaltmak açısından uç kısımda üç tabakalı tabakalı uzay kafes sistem uygulanabilir. (Şekil EK-1.8). Kesitler veya kafes derinliği artar.



Şekil EK-1.8 Uç taraftan mesnetlenme biçimi [1]

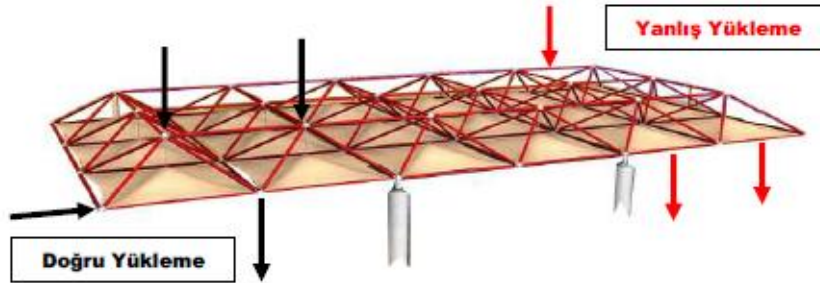
EK-1.5.1 Mesnet birleşimleri

Bazı durumlarda kolona mesnetlenme biçimi, yüklerin fazla olması ve estetik nedenlerle yük aktarımı ters bir piramit ile kurgulanabilmektedir (Şekil EK-1.9.a). Çatıda ışıklık kurgulanması durumunda kolon üzerinde çift modül uygulanabilir (Şekil EK-1.9.b). Yüklerin fazla olmadığı ve birleşen çok fazla sayıda çubuk bulunmaması durumunda doğrudan kolona mesnetleme uygulanabilir (Şekil EK-1.9.c). Yüklerin ağır, geçilen açıklığın fazla olması durumunda estetik nedenlerle piramit kolon tasarlanabilir (Şekil EK-1.9.d). Böylece kolona gelen yükler temele kademeli olarak aktarılır.



Şekil EK-1.9 Mesnet türleri [1]

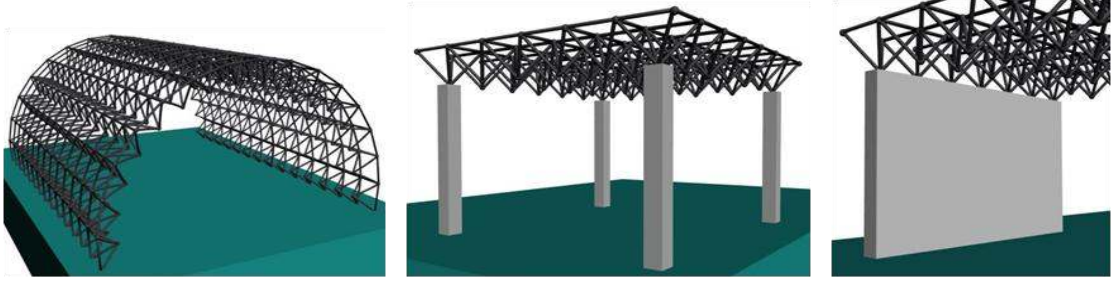
Çift tabakalı uzay kafes çatıların hesaplarında yükler düğüm noktalarından aktarılır. Kesitler, sadece eksenel yük alacak şekilde boyutlandırılır (Şekil EK-1.10).



Şekil EK-1.10 Doğru ve yanlış yükleme gösterimi [231]

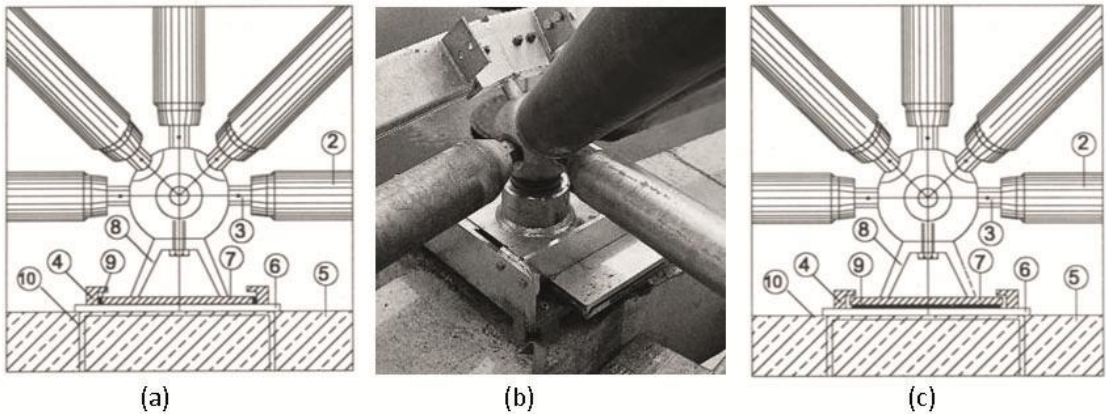
Çift tabakalı uzay kafes sistemler, doğrudan temele oturtulabildiği gibi betonarme, çelik uzay kafes kolona veya yan destek duvarlarına mesnetlenmesi ile de meydana gelebilmektedir (Şekil EK-1.11). Uzay kafes sistemlerin zemine mesnetlenme durumları birleşim çeşitlerine göre değişiklik gösterse de temel mesnetlenme kuralları Şekil EK-1.12'deki gibidir. Şekil EK-1.12.a, b ve c basit bir birleşim olan düz çelik plaka ve ankraj bulonları ile sabitlemeden oluşmaktadır. Elastomer tabanlı sistem (Şekil EK-1.12.d) ise, kesme kuvvetlerinin deformasyonuna karşı sistemi koruyan, hem farklı açılarda mesnet

oluşturmaya hem de yatayda sınırlı hareket etmesi sayesinde deprem kuvvetlerine karşı oluşturulmuş yeni bir sistemdir [1].



Şekil EK-1.11 Çift tabakalı uzay kafes sistemin yere, kolona ve duvara mesnetlenmesi

Çift tabakalı uzay kafes sistemler; sabit mesnet (Şekil EK-1.12.a), ısı etkisinden dolayı genişleyen çubuk elemanlarda kullanılan tek yönde kayıcı mesnet (Şekil EK-1.12.b) ve çift yönde kayıcı mesnet (Şekil EK-1.12.c) olmak üzere üç şekilde zemine mesnetlenir. Sabit mesnet kullanılarak yapılan çift tabakalı sistemlerin tepe noktalarında büyük yanıl yerdeğıştirmeler oluşacağından genellikle kayıcı mesnet tercih edilmektedir. Mesnetler, sistemin genel stabilitesini sağlarken ısı değışimi ve buna benzer nedenlerden oluşacak hareketleri en aza indirecek şekilde St 37 veya St 52 malzemeden oluşturulabilir. Bunu sağlayabilmek için taşıyıcı levhalar teflonlu veya teflonsuz seçilir (Şekil EK-1.12) [232], [233].

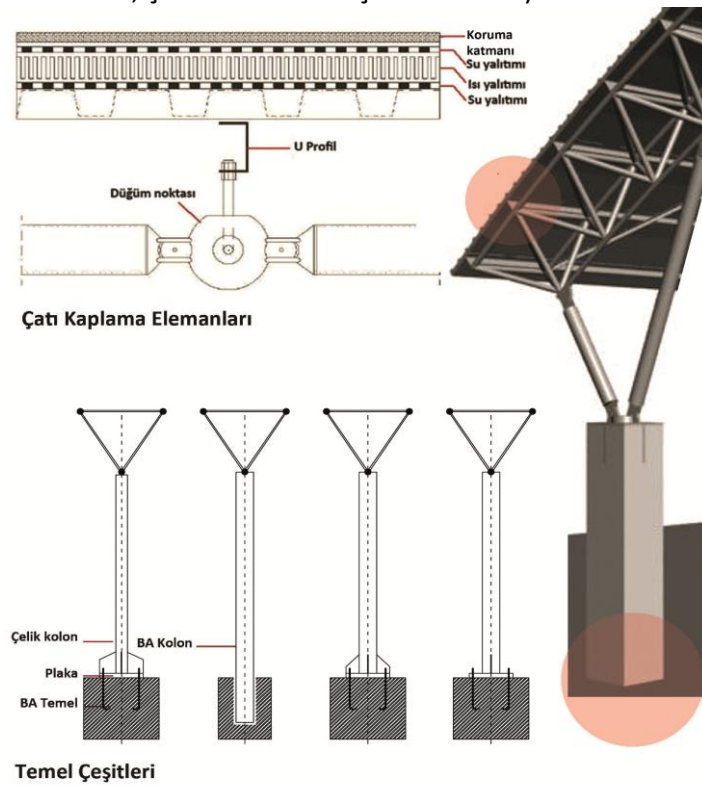


Şekil EK-1.12 Mesnet tipleri - 1- Uzay Sistem Küresi, 2- Uzay Sistem Elemanı, 3-Somun, 4- Mesnet tutucu latalar, 5- Betonarme kolon, 6- Ankraj plakası, 7- Taşıyıcı levha, 8- Konik, 9- Teflon, 10- Ankraj çubuğu. [233], [234]

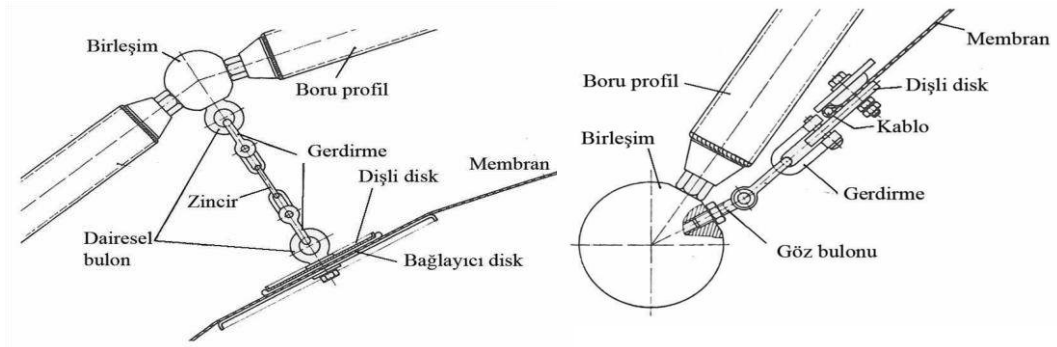
EK-1.6 Temeller ve çatı kaplama elemanları

Mesnetlenme; betonarme temele çelik ya da betonarme kolonun klasik biçimde çelik plakalar ve ankraj bulonları ile temele birleşimi ya da soket temel biçiminde oluşturulur (Şekil EK-1.13).

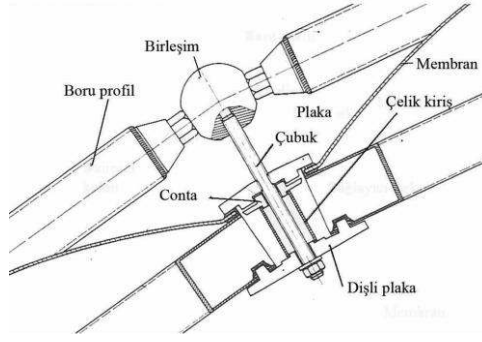
Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin çatı kaplama elemanlarında genellikle alüminyum veya plastik oluklu levhalar, oluklu saç levhalar, dayanıklı cam levhalar kullanılmaktadır. Isı ve su yalıtımı için ise membran ve polikarbon esaslı şeffaf çatı kaplamaları kullanılabilir (Şekil EK-1.14, Şekil EK-1.15 ve Şekil EK-1.16).



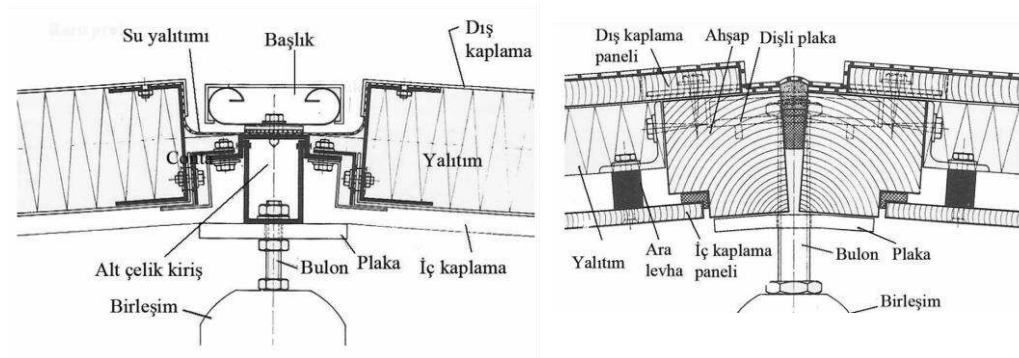
Şekil EK-1.13 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin çatı ve temel çeşitleri gösterimi



Şekil EK-1.14 Membran uygulama detayı [8]



Şekil EK-1.15 Membran uygulama detayı [8]



Şekil EK-1.16 Alüminyum ve ahşap çatı kaplaması uygulama detayı [8]

EK-1.7 Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin düğüm noktası çözümleri

Çift tabakalı uzay kafes sistemlerin tasarımda en çok özen gösterilmesi gereken düğüm noktaları, birden fazla çubuğu birbirine bağlayan ve sistemin bütün halinde çalışmasını sağlayan birleşim elemanlarıdır. Çift tabakalı uzay kafes sistemler yapım tekniklerine göre üç gruba ayrılır [1], [233], [113], [235], [111], [236]. Bunlar;

1. Parçalı sistemler,

- Küresel formlu birleşim sistemleri
 - Dolu gövdeli (Mero birleşim sistemleri, SDC birleşim sistemi, Wachsmann ve Smith birleşim sistemi ve Orona Seo sistemi)
 - Boşluklu gövdeli (Nodus birleşim sistemi, Octatube ve Tuball birleşim sistemleri, Bowl birleşim sistemi ve NS uzay kafes birleşim sistemi)

- Silindirik formlu birleşim sistemleri (Triodetic birleşim sistemi)
- Plakalı birleşim sistemleri (Unistrut birleşim sistemi)

2. Çubuk elemanlı sistemler (Harley Sistemi, Mai Sky Sistemi ve Catrus sistemi)

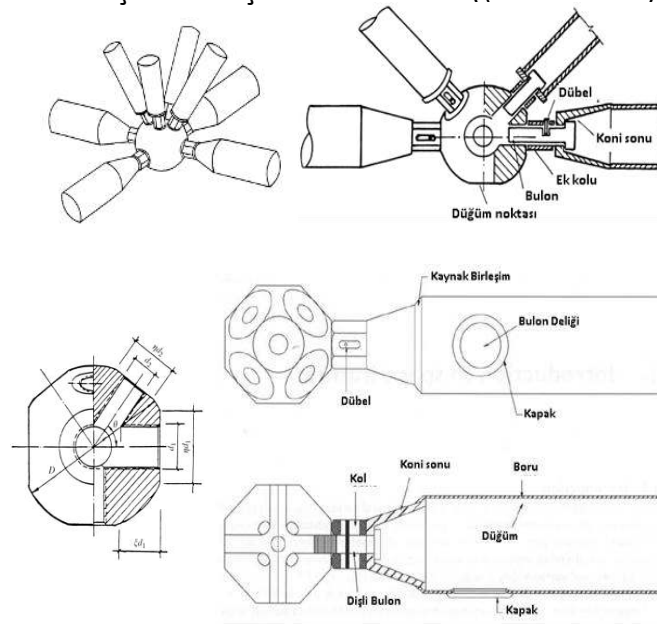
3. Modüler sistemlerdir (Unibat birleşim sistemi, Space Deck birleşim sistemi, Pyramitec birleşim sistemi, Temcor alüminyum birleşim sistemi ve Murj-3D birleşim sistemi) [1], [233], [113], [235], [111], [236].

Tüm sistemlerin ortak özelliği; eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşmaması için dış yüklerin sadece düğüm noktalarına uygulanması ve düğüm noktasına birleşen bütün elemanların ağırlık merkezi uzantılarının ilgili düğüm noktasının merkezinde tek bir noktada çakışması gerekliliğidir.

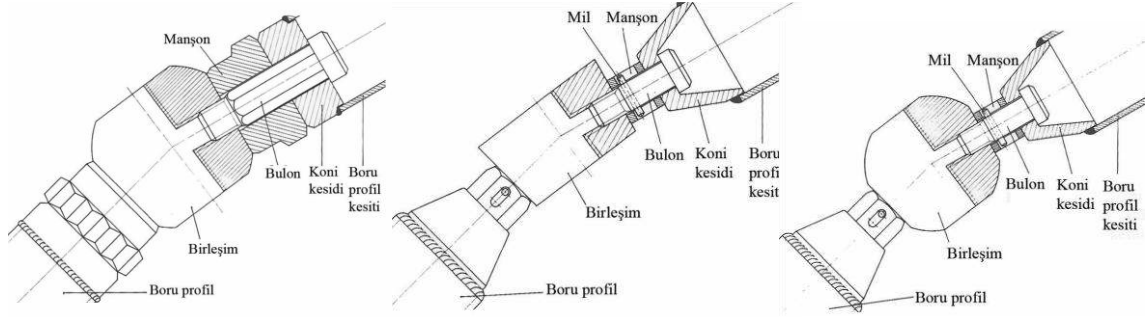
EK-1.7.1 Parçalı sistemler

EK-1.7.1.1 Mero birleşim sistemi

Mero sistemi Dr. Mengerhousen tarafından geliştirilmiştir (1942, Almanya). Sistem üzerinde en fazla 18 delik bulunan içi dolu küreler ile boru enkesitli çubuklardan oluşmaktadır (Şekil EK-1.17). Tipik mero sistem modülü, çubukların yatay ile yaptığı açıları 30-60° olan kare piramittir. Çubuk çapı, çubuk boyunun 25'te biri mertebesinde olup maks. çubuk boyu 6 m'dir. Çubukların uçlarında hareketli bir bulon ve bunun üzerinde de bir somun ve manşon bulunur. Manşonun döndürülmesi suretiyle bulonun ucu dışarı çıkartılır. Manşon ve bulon birlikte döndürülerek düğüm noktasına sabitlenir. Manşon boru ucuna sıkıştırılarak işlem tamamlanır (Şekil EK-1.18).



Şekil EK-1.17 Mero sistem [1], [237]



Şekil EK-1.18 Mero sistem birleşim çeşitleri [8]

Mero sistem, asıl olarak çift tabakalı uzay kafes sistemler için geliştirilmiştir. Fakat tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılmak üzere Mero Plus Sistemlerin gelişmesiyle, amorf yapıdaki çatı sistemleri için de kullanılan bir düğüm noktası olmuştur [1]. Mero sistemi söküp başka bir yerde kullanmak mümkündür. Estetiktir, düğüm noktaları küçük ve düzgün, montajı kolaydır.

295 m genişliğinde ve 58 m yüksekliğindeki ANZ Stadium yapısı Mero sistemle tasarlanmış en iyi yapı örneklerinden biridir (Şekil EK-1.19) [238].

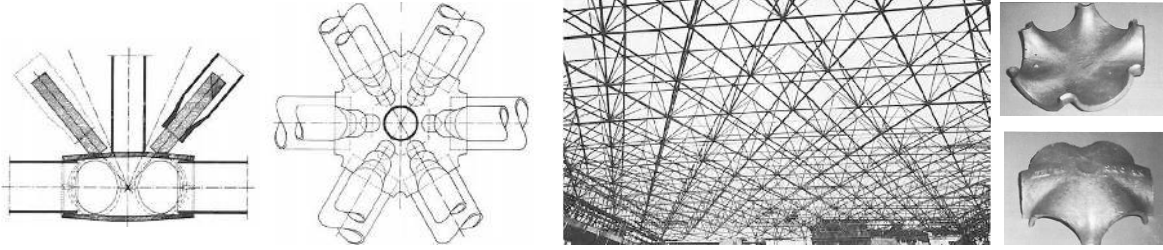


Şekil EK-1.19 ANZ Stadium, 1999, Singapur [239]

EK-1.7.1.2 SDC birleşim sistemi

SDC birleşim sistemi, M.S. du Chateau tarafından geliştirilmiştir (1970, Fransa). Sistem, altı dairesel boşluk oluşturan kaynaklı iki adet dökümden meydana gelir. Bu iki dökümün birleştirilmesiyle oluşan boşluklara altı adet tüp kaynaklı olarak birleştirilir. Sisteme maksimum 13 adet yapı elemanı eklenebilmektedir (Şekil EK-1.20) [113]. Bu sistem özellikle kubbe ve tonoz gibi geniş açıklıklı eğrisel yapılarda başarıyla uygulanır. Çubuk boylarının ayarlanabilme kolaylığı, çubukların düğüm noktalarında oynatılabilmeleri nedeniyle küçük açı değişimleri yapılabilmesi, dolayısıyla eğri

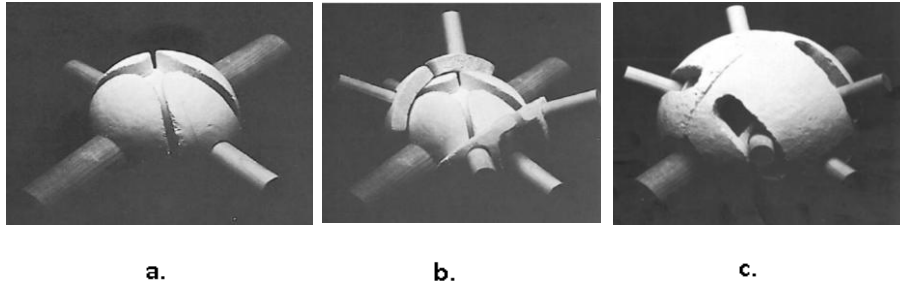
yüzeylerin kurulabilmesi, kolay yapılan kaynak işlemleri, güzel görünüm ve büyük rijitlik bu düğüm noktasının olumlu yanlarıdır [232]. Ancak bu düğüm noktasını sökmek zordur ve sadece üç doğrultulu düzenlemelere uygundur.



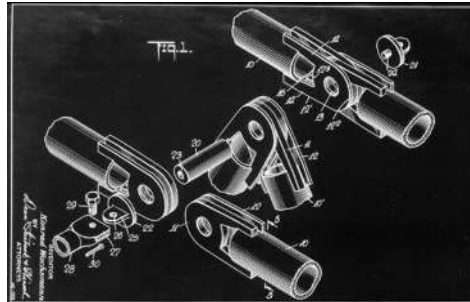
Şekil EK-1.20 SDC sistemi [233]

EK-1.7.1.3 Wachsmann ve Smith birleşim sistemi

Wachsmann ve Smith, üç boyutlu birleşim sistemini 1968 yılında ABD’de geliştirmiştir. Birleşim, 1/4 küre parçalarından meydana gelmektedir. Tüm elemanlar çelik kürenin merkezinde birleşmektedir (Şekil EK-1.21.a). 2. aşamada aynı sisteme yarım küre katmanları eklendikten sonra, sisteme farklı açılarda yapı elemanları eklenebilmektedir (Şekil EK-1.21.b). 3. evrede yeni katman eklenerek sistem tamamlanır, elemanlar 75° açı ile dönebilir (Şekil EK-1.21.c) [235].

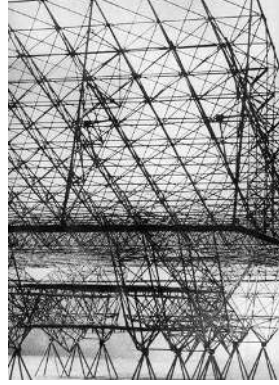


Şekil EK-1.21 Wachsmann ve Smith birleşim sistemi birinci, ikinci ve üçüncü evreler [235]



Şekil EK-1.22 Wachsmann ve Smith birleşim sistemi detayları [240]

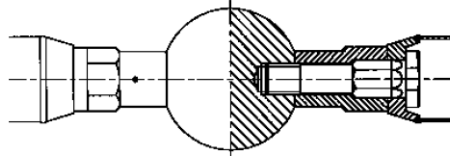
Amerikan Hava Kuvvetleri hangarı, K.Wachsmann tarafından tasarlanmıştır (Şekil EK-1.23).



Şekil EK-1.23 Aircraft Hangars, 1941, A.B.D [240]

EK-1.7.1.4 Orona SEO birleşim sistemi

Orona SEO birleşim sistemi, Orona S. Coop. tarafından geliştirilmiştir (1980, İspanya). Küresel formlu birleşim sisteminde, çelik boru profil merkezden bulon ile sabitlendikten sonra çubuk elemanların konik uçları çelik küreye kaynaklı birleştirilir. Çubuk elemanların açısı çelik kürenin çapına bağlı olarak arttırılabilir (Şekil EK-1.24) [236].



Şekil EK-1.24 Orona SEO birleşim sistemi [236]

28 m x 106 m genişliğinde ve 21 m yüksekliğinde olan Sant Jordi Sports Palace yapısı Orona SEO birleşim sistemi kullanılarak yapılmış yapı örneklerindendir (Şekil EK-1.25) [236].

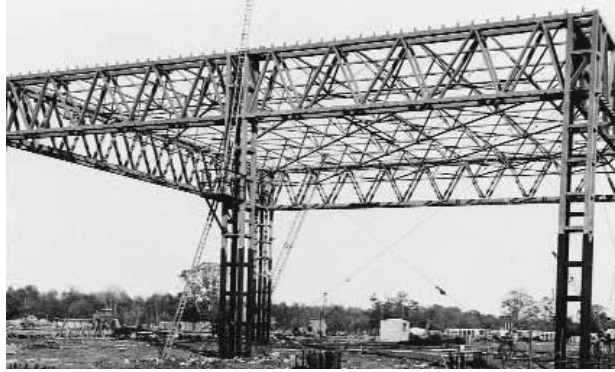
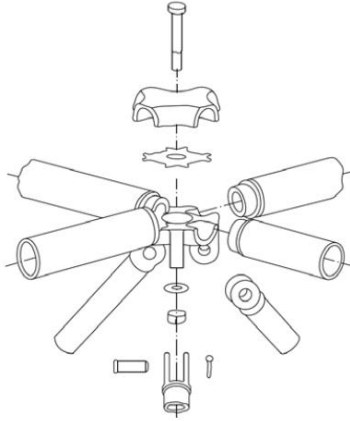


Şekil EK-1.25 Sant Jordi Sports Palace, 1992, Barselona [241]

EK-1.7.1.5 Nodus birleşim sistemi

Nodus sistemi British Steel Corporation tarafından geliştirilmiştir (1972, İngiltere). Mekanik birleşim sisteminin tipik bir örneğidir. Düğüm noktasının ortasındaki sistem ikiye ayrılmış olup, tüm elemanlar yüksek dayanımlı bulonlar ile birbirine bağlanmaktadır. Bulon başlığı, altıgen girintilere sahiptir. Bu girintiler sayesinde, yapı elemanları sisteme bağlanırken tam bir birleşim oluşmaktadır. İkiye ayrılmış sistemde kulplar bulunur. Köşegen yapı elemanları bu kulpların yardımı ile sisteme 45° açıyla birleşir. Yatay çubuk elemanları sisteme uçtan kaynakla birleştirilir (Şekil EK-1.26) [113].

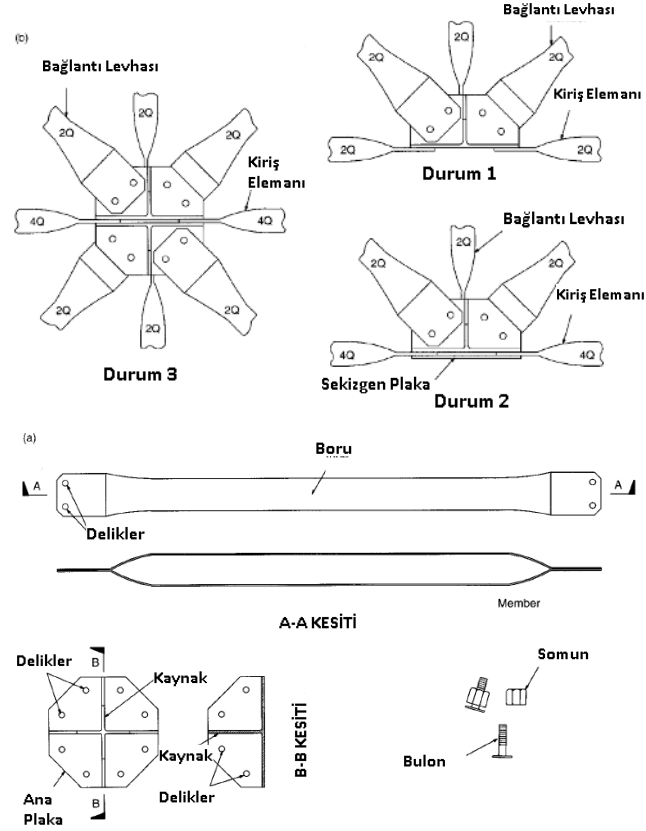
Prefabrikasyon olarak üretilir, montajı ve sökülmesi kolaydır, estetikdir. Çubuk boyu ayarının zor olması ve uzun kaynak işlemleri sistemin olumsuz özellikleri olarak göze çarpmaktadır [232]. 108 m x 90 m açıklığında olan National Exhibition Centre yapısı, Nodus sistemle yapılmış yapı örneklerindendir (Şekil EK-1.26) [242].



Şekil EK-1.26 Nodus birleşim detayı [113], [243], National Exhibition Centre, 1970, İngiltere [236]

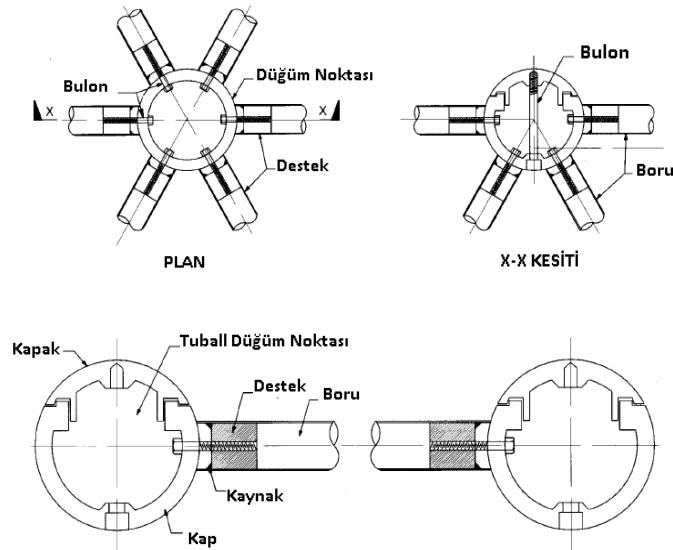
EK-1.7.1.6 Octatube ve Tuball birleşim sistemleri

Octatube birleşim sistemi Dr. I.M. Eekhout tarafından geliştirilmiştir (1973, Hollanda). Sistem, karşılıklı kaynaklanmış yarı-sekizgen plakalardan oluşan sekizgen tabandan meydana gelir. Uçları delik açılmış plaka birleşimli boru elemanlar, düğüm noktasında bir araya gelir ve yüksek dayanımlı bulonlar ile birbirine bağlanır (Şekil EK-1.27) [244].



Şekil EK-1.27 Octotube birleşim sistemi montaj örnekleri [237]

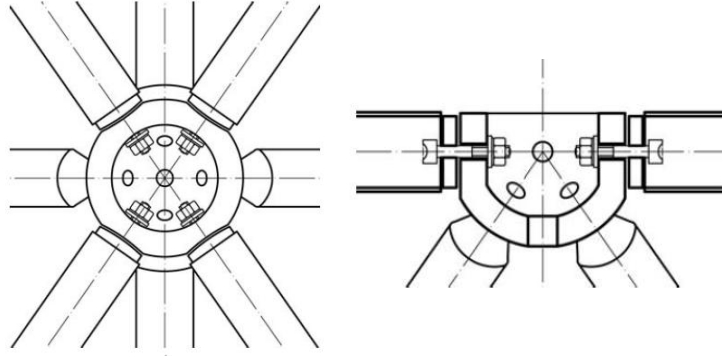
Tuball birleşim sistemi de Eekhout tarafından geliştirilmiştir (1984). İçi boşluklu küreden meydana gelmektedir, kürenin dörtte biri kapaktan, gerisi içi boşluklu kaptan oluşmaktadır. Eleman, uç kısmından kaynaklı kare ya da daire kesitli birleşim parçası ile düğüm noktasına yüksek dayanımlı bulon ile bağlanmaktadır (Şekil EK-1.28). Diğer sistemlere göre daha hafif ve daha ekonomiktir [91].



Şekil EK-1.28 Tuball birleşim sistemi detayı [111]

EK-1.7.1.7 Bowl birleşim sistemi (NK tipi)

Bowl birleşim sistemi, MERO GmbH tarafından geliştirilmiştir (1994, Almanya). Tepe noktasındaki elemanlar kutu (kare, dikdörtgen) kesitli olabilmektedir. Birleşim, olası kayma (makaslama) gerilmeleri için de uygundur. Bu birleşim sistemi; düzensiz planlı ve piramit şekilli çift tabakalı uzay kafes sistem tasarımında kullanılmaktadır (Şekil EK-1.29) [1].



Şekil EK-1.29 Bowl birleşim sistemi detayı [1]

Singapur'daki tiyatro yapısı (Şekil EK-1.30) ve İngiltere'deki Eden projesinde (Şekil EK-1.31) Bowl birleşim sistemi kullanılmıştır.



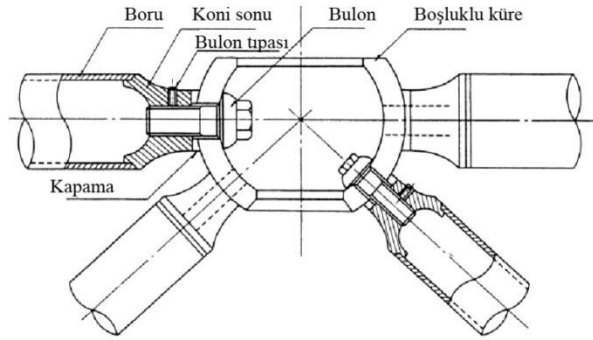
Şekil EK-1.30 Singapore Arts Center, Bowl birleşim sistemi detayı, Singapur [245], [246]



Şekil EK-1.31 Bowl birleşim detayı, Eden Projesi, İngiltere [247], [248]

EK-1.7.1.8 NS uzay kafes birleşim sistemi

Japonya’da yapılmış olan Expo’70 yapısının çatı örtüsü için tasarlanmış NS uzay kafes birleşim sistemi, 1970 yılında NSC¹ tarafından geliştirilmiştir. Birleşim, altı boşluklu kalın, kesik küre biçimindedir. Elemanlar bu küre üzerinde, boşluklu alt bölümden bulon ile birleştirilir ve kaynaklanır. Elemanlar sisteme her yönden birleştirilebilir, birleşimin eğilme dayanımı mevcuttur (Şekil EK-1.32) [1].



Şekil EK-1.32 NS Uzay Kafes birleşim detayı [113], [1]

EK-1.7.1.9 Triodetic birleşim sistemi

Triodetic sistem, S.Fentiman tarafından geliştirilmiştir (1960, Kanada). Sistem, merkezde alüminyum dişli kama kanalları ve bunlara eklenen elemanlardan oluşmaktadır (Şekil EK-1.33). Çelik malzemedan üretilebilir, fakat korozyona karşı iyi davranış gösteren alüminyum ya da paslanmaz çelik malzeme daha çok tercih edilmektedir [113]. Bulon veya kaynak gerektirmemesi, düğüm noktalarının yüksek dayanımlı olması, üretim, montaj ve söküm kolaylığı sistemin olumlu yönleridir. Ancak montaj yapılırken büyük hassasiyet gerektirir [232].



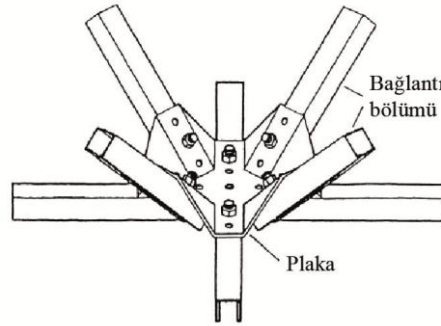
Şekil EK-1.33 Triodetic birleşim detayı [233], [237]

¹ NSC : Nippon Steel Corporation.

EK-1.7.1.10 Unistrut birleşim sistemi

C.W. Attwood tarafından geliştirilmiştir (1955, University of Michigan). Alt, üst tabakaları ve köşegenleri eşit uzunlukta olan dikmelerle oluşturulan ekonomik bir sistemdir. Sistem tek bir bulon ile preslenmiş çelik levha ile birbirine bağlanmaktadır (Şekil EK-1.34) [113]. Montajı ve sökülmesi kolaydır, bütün parçalar tekrar kullanılabilir. Hazır modüller kullanma olanağı vardır, montaj bitiminden sonra takviye edilebilir.

Düğüm noktalarının zayıf dayanımlı olması, çubuk boylarının ayarlanamaması, estetik olmayan görünümü sistemin olumsuz yanlarıdır. Ayrıca statik olarak daha elverişsiz olan U profilleri ve daha fazla malzemenin kullanımı maliyetin artmasına neden olmaktadır [232].



Şekil EK-1.34 Unistrut birleşim sistemi [1], [233]

EK-1.7.2 Çubuk elemanlı sistemler

EK-1.7.2.1 Harley birleşim sistemi

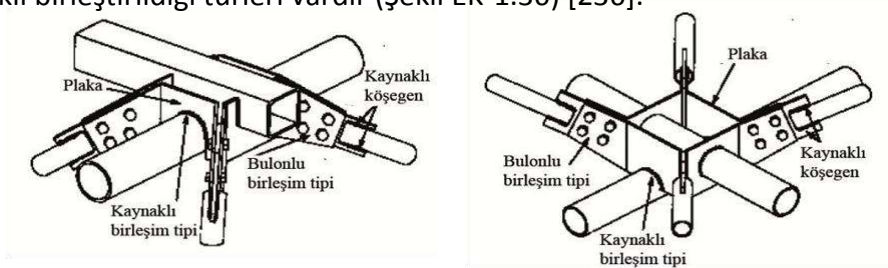
Conder Group tarafından geliştirilmiştir (1989, Avusturya). Harley birleşim sistemini diğer sistemlerden ayıran en temel özellik, çubuk elemanların soğukta şekillendirilmiş olması ve standart uzunluğun 12.5 m olmasıdır. Standart uzunluğu sayesinde, düğüm noktasından itibaren köşegen eleman olarak da kullanılabilir (Şekil EK-1.35) [236].



Şekil EK-1.35 Harley Birleşim Sistemi [236]

EK-1.7.2.2 Mai Sky birleşim sistemi

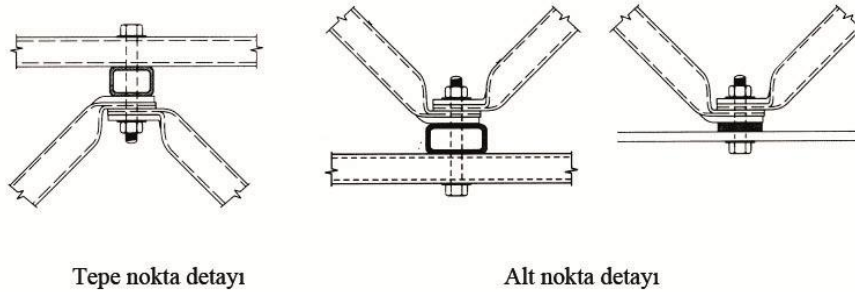
Sky Mai firması¹ tarafından geliştirilmiştir (1940, ABD). Sistemin üst ve alt tarafı kare ya da dikdörtgen planlı olup, çubuk elemanlar istenilen açıda yerleştirildikten sonra çelik plakalara birleştirilir. Genellikle kare ya da dairesel kesitli çubuk elemanlar kullanılır. Köşegenler genellikle kaynaklı birleşimli tercih edilir, fakat çubuk elemanların bulonlu ve kaynaklı birleştirildiği türleri vardır (Şekil EK-1.36) [236].



Şekil EK-1.36 Mai Sky birleşim detayı [236]

EK-1.7.2.3 Catrus birleşim sistemi

Catrus birleşim sistemi, Dr Ahmed El-Sheikh, tarafından geliştirilmiştir (1940, Dundee Üniversitesi, İskoçya). Pahalı geleneksel taşıyıcı sistemlere alternatif, ekonomik bir taşıyıcı sistem oluşturmak için tasarlanmıştır. Yüksek dayanımlı, hafif ve yapımı kolay olması istenen sistemin, tepe noktasında dikdörtgen kesitli çubuk elemanlar, dairesel kesitli köşegen elemanlar ve alt noktasında düz çelik levha kullanılmıştır. Alt ve üst çubuk elemanlar sisteme bulonlu birleşir. Tepe noktasındaki çubuk elemanlar (basınç bölgesi) kısa ve geniş kesitli olup diğer çubuk elemanlara bulonlu birleşir. Alt noktadaki elemanlar sisteme, kenetli, geçmeli ya da düz plaka kullanılarak yerleştirilir (Şekil EK-1.37) [236].



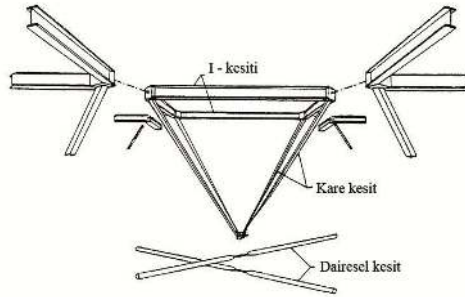
Şekil EK-1.37 Catrus birleşim sisteminin alt ve üst noktalardaki birleşim detayları [236]

¹ Sky Mai firması: Fabricated Structural Metal Manufacturing.

EK-1.7.3 Modüler sistemler

EK-1.7.3.1 Unibat modülü

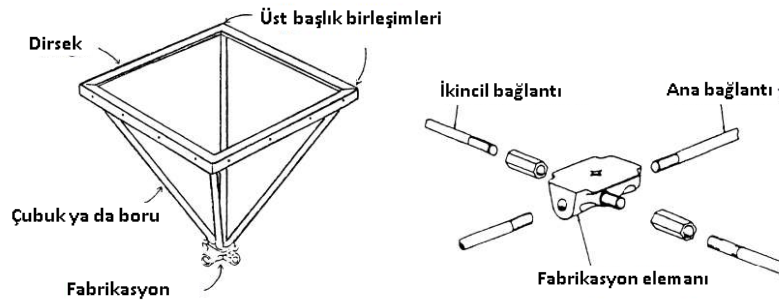
Unibat modülü, Stéphane du Château tarafından geliştirilmiştir (1962, Fransa). Sistem, köşelerinden yüksek dayanımlı bulonlar ile birleştirilmiş modüler piramitlerden meydana gelir. Sistemin alt tabakası, tek bir düşey bulon ile piramitlere birleştirilmiş ve düğüm noktalarında düzleşen tüp elemanlarından oluşmaktadır (Şekil EK-1.38) [113]. Sistem, standart boyutları olmadığı gibi prefabrike de üretilmemektedir [6].



Şekil EK-1.38 Unibat modülü detayı [113]

EK-1.7.3.2 Space Deck modülü

Space Deck modülü, sanayi yapılarında uygulanmak üzere, Denings of Chard tarafından geliştirilmiştir (1950, İngiltere). Modül, kare tabanlı piramit şeklinde olup; üst kısımdan bulonlar, alt kısımdan ise yüksek dayanımlı çelik bağlantı elemanları ile birleşim sağlanır. En küçük modül derinliği 0.75 m olup, açıklığa göre 2 m'ye kadar artabilir (1.2 m derinlik için geçilebilecek açıklık maks. 40 m'dir) (Şekil EK-1.39) [6]. Birmingham'daki Hyatt otel çatısı bu sistemle tasarlanmış kırma çatı örneklerinden birisidir (Şekil EK-1.40).



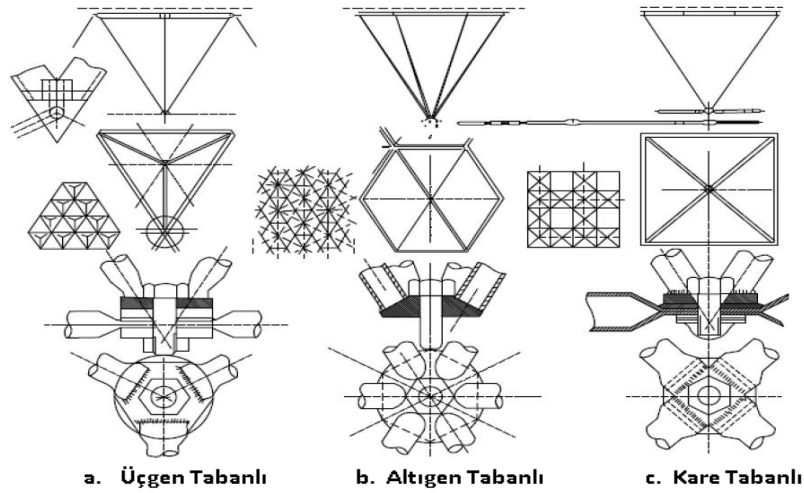
Şekil EK-1.39 Space Deck modülü ve birleşim detayı [243], [233], [1]



Şekil EK-1.40 Hyatt Otel, Birmingham [249]

EK-1.7.3.3 Pyramitec modülü

Space Deck modülünden sonra; M.S. Du Chateau, birleşim detayları farklı olan Pyramitec modülünü geliştirmiştir (1960, Fransa), ön üretimli piramit modüllerden oluşmaktadır. Çelik borular ve kablolar, ayarlanabilir şekilde düğüm noktasına kaynak ile birleştirilir. Space Deck modülü kare tabanlı iken, Pyramitec sistemler üçgen ya da altıgen tabanlı da olabilmektedir (Şekil EK-1.41) [233].



Şekil EK-1.41 Pyramitec modülü ve birleşim detayı [113]

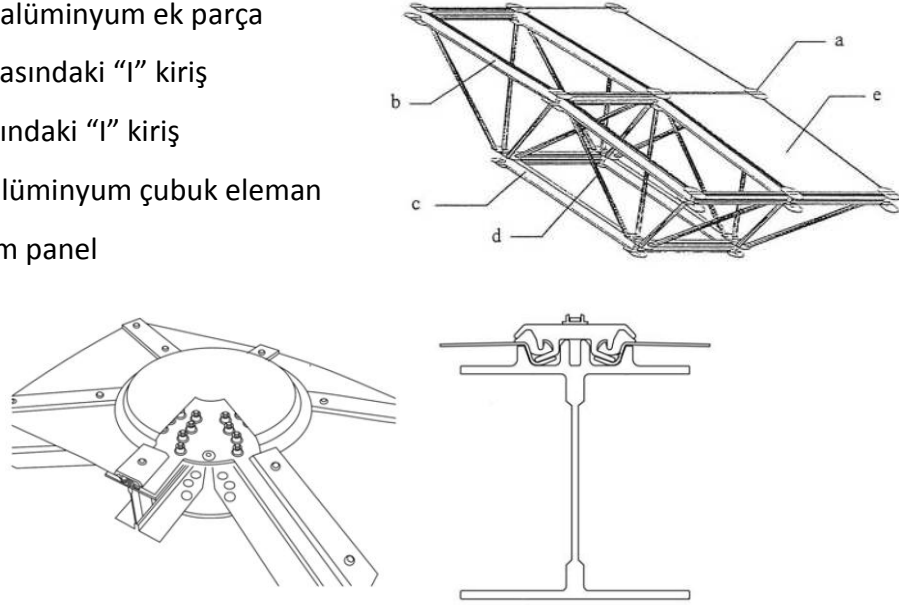
EK-1.7.3.4 Temcor alüminyum modülü

Temcor firması, alüminyum¹ taşıyıcı sistem yapımının öncülerindendir, kendi modül ve birleşim sistemini geliştirmiştir (1964, ABD). Moment aktaran düğüm noktalı birleşim

¹ Alüminyum, korozyona dayanıklılık, kolay üretilebilirlik ve çeliğe yakın yüksek çekme dayanımı (alaşımli alüminyum çekme dayanımı 700 MPa, çelik çekme dayanımı, 500-1100 MPa) avantajlarına sahiptir.

sisteminde kiriş elemanlar I profildir. Profillerin üstüne eğilme rijitliği olmayan paneller birleştirilmektedir, bu paneller aynı zamanda modüldeki üst başlıkların yanal burkulmaya karşı dayanımını sağlar (Şekil EK-1.42). Modül aşağıdaki elemanlardan oluşur:

- a. Kurulmuş alüminyum ek parça
- b. Tepe noktasındaki "I" kiriş
- c. Alt noktasındaki "I" kiriş
- d. Köşegen alüminyum çubuk eleman
- e. Alüminyum panel



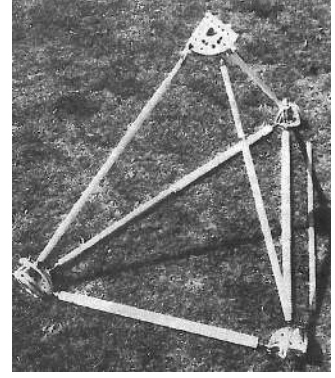
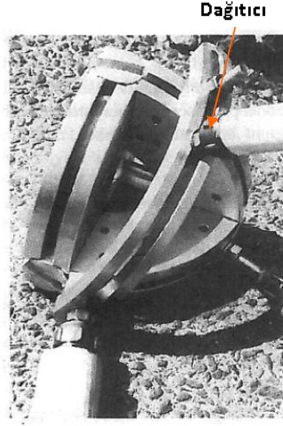
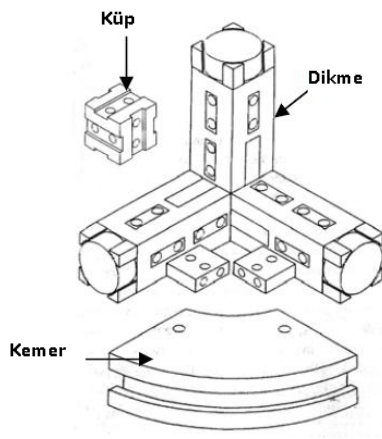
Şekil EK-1.42 Temcor Alüminyum birleşim detayı [250]

Alüminyum sistemle yapılmış yapı örnekleri Bölüm 6'da verilmiştir.

EK-1.7.3.5 Murj-3D modülü

Sistem, MEUS¹ tarafından geliştirilmiştir (1996, İngiltere). Sistem, dört ana elemandan oluşmaktadır bunlar; küp, kolon, kemer ve dağıtıcıdır. Çekme ve basınç yüklerini göndermek amacıyla birleşim sistemi iki vida yardımıyla küp'e bağlanır ve istenilen dağıtıcılar bu sisteme eklenir. Bu sayede yapı elemanı istediği noktada sabitlenip boyutlandırılır (Şekil EK-1.43) [235].

¹MEUS: Department of Mechanical Engineering at the University of Southampton.



Şekil EK-1.43 Murj-3D sistem detayı [235]

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Özden Mükerrerem VARDAR ÖZ
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1986 Fatih
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ozdenvardaroz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Mimarlık	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Mimarlık	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen	Sağmalcılar Lisesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010-2012	ikidesigngroup	Mimar
2008-2010	Akropol Bilgisayar Mühendislik	Mimar