GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE DÜNYA'DA VE TÜRKİYE'DE PNÖMATİK SİSTEMLERİN İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yasemin BAL

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE DÜNYA'DA VE TÜRKİYE'DE PNÖMATİK SİSTEMLERİN İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yasemin BAL
0000-0003-0876-813X

Prof. Dr. Filiz ŞENKAL SEZER
(Danışman)
0000-0002-8376-5177

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE DÜNYA'DA VE TÜRKİYE'DE PNÖMATİK SİSTEMLERİN İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yasemin BAL

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Filiz ŞENKAL SEZER

İnsanoğlunun varoluşundan günümüze kadar çağlar boyunca sürekli barınacak bir mekan aramıştır. Doğada kendiliğinden olan yerleri kullanarak başlayan bu çaba ilerleyen süreçlerde yeni yapılar üretme hedefiyle mimari arayışların oluşmasına zemin hazırlamıştır. Eski çağlarından Endüstri Devrimi'ne kadar geçen süre boyunca doğada kendiliğinden olan barınaklar veya geleneksel malzemelerle inşa edilen ilkel taşıyıcı sistemler kullanılmıştır. Endüstri Devrimi sayesinde insanların ihtiyaçlarına cevap verecek yeni malzemeler, teknik bilgi donanımı, bilim ve teknoloji uygulanabilir hale gelmiştir. Paralel olarak artan nüfusu geniş hacimlerde daha az malzeme kullanarak ekonomik şekilde barındırabilme hedefleri çağdaş taşıyıcı sistemleri doğurmuştur. Mimari açıdan birçok avantaja sahip olan çağdaş taşıyıcı sistemler, Dünya'da ve Türkiye'de çeşitli strüktürler geliştirilerek uygulanmaya başlamıştır. Çağdaş taşıyıcı sistemler; yüzey aktif sistemler, uzay kafes sistemler, kablolu sistemler ve asma-germe (membran) sistemler olmak üzere dört başlık altında incelenmiştir. Asma-germe sistemlerin alt başlığı olan kapalı hacimli membranlar yani pnömatik (şişme) sistemler çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır. Pnömatik sistemlerin mimaride taşıyıcı, yardımcı yapı elemanı veya kalıp elemanı olarak kullanımının çok sayıda uygulanmış örneği olmasına rağmen Türkiye'de az sayıda örnek ve yazınsal çalışma mevcuttur. Bu durumun tespiti ve incelenmesi amacıyla pnömatik sistemler çalışma konusu olarak seçilmiştir.

Tezin giriş bölümünde araştırmanın amacı, yöntemi ve kapsamı hakkında bilgi verilmektedir. Kuramsal temeller ve kaynak araştırması kısmında çağdaş taşıyıcı sistemler ve pnömatik strüktürler hakkında tarihsel süreç içerisinde gelişimleri, yapısal özellikleri ve sınıflandırmaları hakkında bilgi verilmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde belirlenen pnömatik (şişme) sistemleri inceleme ölçütleri ve seçilen pnömatik sistemli yapı örnekleri açıklanmıştır. Bulgular bölümünde seçilen pnömatik yapı örnekleri belirlenen parametrelere göre değerlendirilmiştir. Mimaride pnömatik sistemlerin kullanımının sağladığı avantaj ve dezavantajlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pnömatik sistem, şişme yapı, taşıyıcı, taşıyıcı sistem, membran.
2022, ii + 200 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EXAMINATION AND EVALUATION OF PNEUMATIC SYSTEMS IN THE WORLD AND IN TURKEY FROM PAST TO PRESENT

Yasemin BAL

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Architecture

Supervisor: Prof. Dr. Filiz ŞENKAL SEZER

Throughout the ages peoples always sought place to shelter. This effort, which started by using places that are spontaneous in nature, paved the way for formation architectural searches with aim of producing new structures. From ancient times to Industrial Revolution, spontaneous shelters or primitive structures built with traditional materials were used. Thanks to this; new materials, technical knowledge, science and technology that will meet needs of people have become applicable. The goals of accommodating the increasing population in large volumes economical way by using less material have resulted in modern structures. Contemporary structures, which have many architectural advantages, have started to be applied by developing various structures in the world and Turkey. Pneumatic-inflatable systems, which are the subtitles of suspension-tension (membrane) systems, constitute the main subject of the study. Although there are many applied examples the use of pneumatic systems as carrier, auxiliary structural or formwork element in architecture; there are few examples and literary studies in Turkey. Pneumatic systems were chosen as the subject of study for determine-examine this situation.

Introduction part of the thesis, given about purpose, method and scope of the research. Theoretical foundations and resource research, information is given about contemporary and pneumatic structures; development, structural features and classifications in historical process. Material and method, determined pneumatic (inflatable) systems examination criteria and the selected pneumatic system structure examples are explained. Findings section, the selected pneumatic structure samples were evaluated according to determined parameters. The advantages and disadvantages the use of pneumatic systems in architecture are discussed.

Key words: Pneumatic system, inflatable structure, structure, carrier system, membrane.
2022, ii + 200 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans sürecim boyunca bilgi birikimini ve tecrübelerini paylaşan, bana her daim destek olan, yardımını esirgemeyen ve akademik gelişimime katkıda bulunan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Filiz ŞENKAL SEZER'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımda her daim yanımda olan, kendilerinden önce beni düşünen, bugünlere gelmemi sağlayan, aldığım her kararda ve çıktığım her yolda beni gönülden destekleyen çok sevdiğim canlarım; annem Hülya BAL ve babam Hakan BAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yasemin BAL
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
ABSTRACT vii
TEŞEKKÜR viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ i
1. GİRİŞ 1
1.1. Problemin Tanımı 3
1.2. Çalışmanın Amacı 4
1.3. Çalışmanın Kapsamı 4
1.4. Çalışmanın Yöntemi 5
1.5. Literatür Özeti 5
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 8
2.1. Taşıyıcı Sistem Tanımı 8
2.2. Taşıyıcı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi 15
2.3. Taşıyıcı Sistemlerin Sınıflandırılması 24
2.4. Geniş Açıklıklı Çağdaş Taşıyıcı Sistemler ve Sınıflandırılması 32
2.5. Membran Sistemlerin Tarihçesi ve Sınıflandırılması 45
2.6. Pnömatik (Şişme) Sistemler 51
2.6.1. Pnömatik (Şişme) Sistemlerin Tarihçesi 57
2.6.2. Pnömatik (Şişme) Sistemlerin Sınıflandırılması 68
3. MATERYAL ve YÖNTEM: PNÖMATİK (ŞİŞME) SİSTEMLERİ İNCELEME ÖLÇÜTLERİ VE ÖRNEK YAPILAR 80
3.1. Pnömatik (Şişme) Sistemleri İnceleme Ölçütleri 80
3.1.1. Kullanım Alanı (İşlevsel Açıdan) 80
3.1.2. Taşıyıcı Sistem 97
3.1.3. Plastik-Polimer Esaslı Membran Malzeme 106
3.1.4. Şişme Süresi, Sürekliliği ve Maddesi 111
3.1.5. Yapıya Özel Yerinde Geliştirilen Sistemler 113
3.2. Seçilen Pnömatik (Şişme) Sistemi Yapı Örnekleri 114
3.2.1. Ark Nova 114
3.2.2. Ontario Pavilion 119
3.2.3. Münich Allianz Arena 126
3.2.4. Beijing Water Cube 133
3.2.5. Media -TIC 141
3.2.6. Eden Project 146
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 154
4.1. Seçilen Pnömatik (Şişme) Sistemli Yapı Örneklerinin Pnömatik (Şişme) Taşıyıcı Sistemleri İnceleme Ölçütleri Açısından Değerlendirilmesi 154
4.2. Pnömatik (Şişme) Taşıyıcı Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları 162
5.SONUÇ 170
KAYNAKLAR 173
ÖZGEÇMİŞ 200

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
CO_2	Karbondioksit
SiO_4	Silikat
m	Metre
mm	Milimetre
kg	Kilogram
kg/cm	Kilogram bölü santimetre
kg/m^2	Kilogram bölü metrekare
kgf/m^2	Kilogram kuvvet bölü metrekare
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
Pa	Pascal
U	Isıl Geçirgenlik Katsayısı
W/m^2K	Watt bölü metrekare kelvin
µ	Mikron
µm	Mikrometre
±	Eksiği veya fazlası
°	Derece
%	Yüzde
g/m^2	Gram bölü metrekare

Kısaltmalar	Açıklama
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ARTIC	Anaheim Regional Transportation
ASU	Arizona State University
CAD	Computer Aided Design
CNIT	Center of New Industries Technologies
Co.	Company
Covid	Koronavirüs
CURA	Connected Units for Respiratory Ailments
DIN	Deutsches Istitut für Normung
EN ISO	Europeane Norm International Organization for Standardization
EPDM	Etilenpropilendienemonomer
ETFE	Etilentetrafloroetilen
EXPO	Exposition
FC	Football Club
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
ICD	Institute for Computational Design and Construction
ILMH	Inflatable Lunar and Mars Habitation
ITKE	Institute for Building Structures and Structural Design
LED	Light Emitting Diode
MERO	acronym of MEngeringhausen ROhrbauweise
MÖ.	Milattan Önce
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PEIU	Portable Epidemiological Isolation Unit

PTFE	Politetrafloroetilen-Teflon
PVC	Polivinil klorür
PVDF	Polivinilidenflorit
PVF	Polivinil Florür
TSV	Turnund und Sportverein(igung)
USA	United States of America
vb.	ve benzeri
vd.	ve diğerleri
VIP	Very Important Person
YÖK	Yükseköğretim Kurulu

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	İnsanoğlunun doğada bulunan malzemeler ve alanlar ile oluşturduğu ilk barınak örnekleri……..…...	15
Şekil 2.2.	Menhir, dolmen, kromlek, tümülüs ve Göbeklitepe…….....…..	18
Şekil 2.3.	Çağdaş taşıyıcı sistem örnekleri…….....…	24
Şekil 2.4.	Frei Otto taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması……..	26
Şekil 2.5.	Basel tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması……..….	29
Şekil 2.6.	Türkçü tarafından taşıyıcı sistemlerin formlar ile birlikte sınıflandırması……..……...……...…	30
Şekil 2.7.	Tarihi süreçte yelkenli gemilerden esinlenerek yapılarda kumaşların kullanımı, Roma kolezyum örneği…….....……	46
Şekil 2.8.	Tarihi süreçte ilkel çadırların ortaya çıkışı ve farklı coğrafyalardaki örnekleri……..…….....…	47
Şekil 2.9.	Kumaş çadır sistemlerin toplanma amacıyla gösteri ve sirk fonksiyonlu yapılarda kullanımı……..…….……	48
Şekil 2.10.	1967 ve 1970 EXPO Dünya Sergileri membran ve pnömatik yapı örnekleri…….....	49
Şekil 2.11.	Günümüzde membran taşıyıcı sistem örnekleri……...…	49
Şekil 2.12.	Açık membran sistem örnekleri……	51
Şekil 2.13.	Pnömatik taşıyıcı sistemlerde özel detaylandırılmış açıklıklar, kapı ve zemin ankrajı……...…….…	55
Şekil 2.14.	Pnömatik taşıyıcı sistemlerde özel detaylandırılmış hava desteği, fanlar ve kapılar……...……	56
Şekil 2.15.	Pnömatik sistemlerde membran malzeme ile zemin birleşimi ve beton, kum torbası, prekast elemanlar, doğrudan sabitlenme detayları.	56
Şekil 2.16.	Pnömatik sistemlerin balon ve mimarlıkta ilk defa kullanımı….....	58
Şekil 2.17.	Pnömatik sistemlerin çevre kirliliğine yönelik ütopik ve kişisel projelerde kullanımı…….....	58
Şekil 2.18.	II. Dünya Savaşı esnasında, ilk Radome kubbelerinde ve geliştirilmiş Radome kubbelerinde pnömatik sistemlerin kullanımı……....	59
Şekil 2.19.	Şehirleri kapsayan pnömatik sistemli kubbeler ile geliştirilen fikir projeleri.....	60
Şekil 2.20.	"Utopie" dergisi ve "Dyodon" sergisi…….....	61
Şekil 2.21.	Atoms for Peace Pavilion plan ve kesit çizimleri ile görselleri…...….	62
Şekil 2.22.	ABD Pavyonu plan ve kesit çizimleri ile görseli…….....	63
Şekil 2.23.	Fuji Pavyonu plan ve kesit çizimleri ile görseli…….....	64
Şekil 2.24.	Yüzen Tiyatro yapısı plan ve kesit çizimleri ile görseli……..	64
Şekil 2.25.	Metal Folyolu Pnömatik Kubbe plan ve kesit çizimleri ile şişirilme aşamaları……...……..……	65
Şekil 2.26.	Pnömatik sistemlerin spor yapılarının çatılarında kullanımı Tokyo Big-Egg Dome ve Roman Arena…….....…….	66
Şekil 2.27.	Pnömatik sistemlerin temel iki ana grupta sınıflandırılması….....	68
Şekil 2.28.	Pnömatik sistemlerin hava kirişleri, hava holü, yastık ve vakum olarak dört grupta sınıflandırılması…….....……	69
Şekil 3.1.	Pnömatik sistemde uygulanmış mobilya örnekleri…….....	81
Şekil 3.2.	Pnömatik sistemli kişisel barınaklar…….....	81
Şekil 3.3.	Pnömatik strüktürlerin sergi elemanı olarak kullanımı…….....	82

Şekil 3.4. Pnömatik strüktürlerin geçmişten günümüze toplanma mekanı olarak kullanımı……..……..... 83
Şekil 3.5. Pnömatik strüktürlerin toplanma alanı olarak yapı cephesi, yeşil alan ve sokakta kullanımı ……..…….... 84
Şekil 3.6. Pnömatik strüktürlerin eğlence ve sergi alanı olarak kullanımı..... 84
Şekil 3.7. Pnömatik strüktürlerin eğlence, sosyalleşme, bir araya gelme, sanatsal faaliyet veya sergi mekanları olarak kullanımı…….... 85
Şekil 3.8. Pnömatik strüktürlerin gezici yapılarda ve örtü elemanı olarak kullanımı..... 86
Şekil 3.9. Pnömatik strüktürlerin Covid-19 pandemisi bağlamında acil durum yapısı olarak kullanımı…….....……..… 87
Şekil 3.10. Pnömatik strüktürlerin uzay yapılarında kullanımı…….....… 88
Şekil 3.11. Pnömatik sistemli fikir projeleri…….....…….....…… 89
Şekil 3.12. Pnömatik sistemlerin tarihi yapıda kullanımı …….... 90
Şekil 3.13. Pnömatik sistemlerin otel, müze ve ofis yapılarında kullanımı.....… 90
Şekil 3.14. Pnömatik sistemlerin ulaşım yapılarında kullanımı…….....…..… 91
Şekil 3.15. Pnömatik sistemlerin stadyum ve spor yapılarında kullanımı..... 92
Şekil 3.16. Pnömatik sistemlerin organik formlu yapılarda ve çatı örtüsünde kullanımı……..…….....…..... 92
Şekil 3.17. Pnömatik sistemlerin çok katlı yapılarda cephe kaplaması olarak kullanımı…….....……..…… 93
Şekil 3.18. Pnömatik sistemlerin spor yapılarında geçici olarak kullanımı.....…. 94
Şekil 3.19. Pnömatik sistemlerin duvar yüzeylerinde kullanımı…….....…..... 95
Şekil 3.20. Pnömatik sistemlerin kalıp olarak kullanımı……..... 96
Şekil 3.21. Pnömatik sistemlerin baraj savaklarında ve yeraltı ulaşım tünellerinde kullanımı…….....……..… 96
Şekil 3.22. Pnömatik sistemlerin enerji ve havalandırma sistemleri ile kullanımı.. 97
Şekil 3.23. Tensegrity temel ve küre modülü ile Buckminster Fuller……..... 100
Şekil 3.24. Kenneth Snelson tarafından inşa edilen tensegrity yapılar ve Needle Tower……..… 100
Şekil 3.25. Tensegrity taşıyıcılı yapı örnekleri……...……..…… 101
Şekil 3.26. Pnömatik tüplü tensegrity sistem örnekleri……...…....…… 102
Şekil 3.27. Pnömatik tüplü tensegrity sistemlerin köprü ve çatıda uygulama örnekleri……...…… 103
Şekil 3.28. Kinetik pnömatik sistem ve yapı örnekleri……..…… 105
Şekil 3.29. Ark Nova ilk eskizleri……...…… 115
Şekil 3.30. Matsushima, Tokyo ve Sendai şehirlerinde Ark Nova'nın şişirilmiş hali..... 116
Şekil 3.31. Ark Nova tasarımı ve üç boyutlu programlar ile hesaplanması…..….. 116
Şekil 3.32. Ark Nova şişirilme aşamaları ve iç mekanı……..……..…… 117
Şekil 3.33. Ark Nova şişirilme aşamaları ve iç mekan tüp yapısı……..…. 117
Şekil 3.34. Ark Nova pnömatik sistemli yapısı…….....… 118
Şekil 3.35. Ontario Pavilion yapısı……...…....…… 120
Şekil 3.36. Ontario Pavilion plan ve kesitleri…....…….....……..……..…… 121
Şekil 3.37. Ontario Pavilion CAD yüzey modeli ve hesaplamaları....……...… 121
Şekil 3.38. Ontario Pavilion membran iskelet tüpleri ve uygulanmış hali…..…… 122
Şekil 3.39. Ontario Pavilion'un gece pembe renkte aydınlatılmış hali..…....…… 123
Şekil 3.40. Ontario Pavilion zemin birleşim detayları…….....…… 124

Şekil 3.41. Ontario Pavilion şişme aşamaları……..…… 125
Şekil 3.42. Münich Allianz Arena vaziyet planı, otopark ve peyzaj alanı……..… 127
Şekil 3.43. Münich Allianz Arena cephesi ve iç alanı……...…… 128
Şekil 3.44. Münich Allianz Arena planı ve fonksiyonları gösteren kesiti……..… 128
Şekil 3.45. Münich Allianz Arena pnömatik çatı sistemi ve açılıp kapanabilen güneş koruyucu tenteler…….……..…… 129
Şekil 3.46. Münich Allianz Arena cephesi çelik strüktür üzerine uygulanan membran yüzeyler ve pnömatik sistemin inşa aşamaları…...……. 130
Şekil 3.47. Münich Allianz Arena gündüz hali ve gece cephe aydınlatması…..… 131
Şekil 3.48. Münich Allianz Arena pnömatik sistem detayları…….....…..… 132
Şekil 3.49. Beijing Water Cube cephesi, günümüzde kullanımı ve iç mekanı..…. 134
Şekil 3.50. Beijing Water Cube ve Bird Nest Stadium…….....…… 135
Şekil 3.51. Beijing Water Cube cephe sisteminin tasarlanması ve uygulaması….. 136
Şekil 3.52. Beijing Water Cube pnömatik cephe sistemi…….....…… 138
Şekil 3.53. Beijing Water Cube cephesinin çeşitli renklerde aydınlatılmış hali..... 140
Şekil 3.54. Media-TIC yapısı……..……..…… 142
Şekil 3.55. Media-TIC yapısı cephesi ve tasarımı……..….....…… 143
Şekil 3.56. Media-TIC yapı yoğunluğu ve cephe detayı…….....…….. 143
Şekil 3.57. Media-TIC çelik kafes taşıyıcı sistemi……..…….....… 144
Şekil 3.58. Media-TIC çelik kafes ve pnömatik cephe sistemi detayları…....…... 145
Şekil 3.59. Eden Project yapısı, kesiti, iç mekan görselleri ve aydınlatılmış hali... 147
Şekil 3.60. Eden Project uzay kafes taşıyıcıları ve sistem detayları……...….. 149
Şekil 3.61. Eden Project uzay kafes taşıyıcıları ile pnömatik sistem detayları...… 151
Şekil 3.62. Eden Project pnömatik sistem detayları ve uygulaması…...…...……. 153

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	Geçmişten günümüze taşıyıcı sistemlerin doğada ve canlılardan esinlenerek geliştirilen mimari yapı örnekleri…….	11
Çizelge 2.2.	Paleolitik dönemden neolitik döneme geçişte insan yaşamı ve barınaklar.....	17
Çizelge 2.3.	Yığma sistemin farklı coğrafyalarda uygulanmış malzeme ve yapı örneği…….…….....……	18
Çizelge 2.4.	Geleneksel taşıyıcı sistemlerden olan lentolu sistemlerde, kemer-tonoz ve kubbe sistemlerde ve iskelet (karkas) sistemlerde kullanılan malzeme ile yapı örnekleri…….....…...	20
Çizelge 2.5.	Endüstri Devrimi öncesi ve sonrası kullanılan malzemeler ve yapı örnekleri…….....……	22
Çizelge 2.6.	Oymael tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması……...……	25
Çizelge 2.7.	Say tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması…….....……	25
Çizelge 2.8.	Engel tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması…...….....….	27
Çizelge 2.9.	Türkçü tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması…….....	30
Çizelge 2.10.	Geçmişten günümüze taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması…...….	31
Çizelge 2.11.	Geniş açıklıklı çağdaş taşıyıcı sistemler genel sınıflandırması.....	34
Çizelge 2.12.	Geniş açıklıklı çağdaş taşıyıcı sistemlerin malzeme, taşıyıcı eleman, aktif kuvvet ve en ince kalınlık parametrelerine göre karşılaştırılması…..……	36
Çizelge 2.13.	Yüzey aktif taşıyıcı sistemler……...……..……	37
Çizelge 2.14.	Uzay kafes taşıyıcı sistemler…….....……..……	39
Çizelge 2.15.	Kablolu taşıyıcı sistemler…….....…...……..……...……	41
Çizelge 2.16.	Tarihteki çadırlardan gelişerek günümüzde uygulanan membran sistemlere benzerliği Alman Çadırı Pavonu ve Han Çadırı örnekleri.....	44
Çizelge 2.17.	Membran sistemler…….....……..……	45
Çizelge 2.18.	Membran taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması.....…	50
Çizelge 2.19.	Tarihsel süreç içerisinde pnömatik sistemlerin ortaya çıkışı……	52
Çizelge 2.20.	Pnömatik sistemlerin taşıyıcı, yardımcı taşıyıcı ve kalıp elemanı olarak kullanım alanları……..…….....…..……	54
Çizelge 2.21.	Pnömatik sistemlerin tarihsel gelişim süreci……..…….	67
Çizelge 2.22.	Erol tarafından pnömatik taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması.....	70
Çizelge 2.23.	Engel tarafından pnömatik taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması….	71
Çizelge 2.24.	Türkçü tarafından pnömatik taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması...	72
Çizelge 2.25.	Sumovki ve Lanchester tarafından pnömatik taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması……...……	73
Çizelge 2.26.	Pnömatik sistemlerin sınıflandırılması……..….....…	74
Çizelge 2.27.	Tek cidarlı pnömatik sistemler ve çift cidarlı pnömatik sistemlerin karşılaştırılması……...…	77
Çizelge 2.28.	Pnömatik sistemi etkileyen yapısal ve çevresel unsurlar…...…….	78
Çizelge 3.1.	Pnömatik sistemlerde kullanılan membran malzemelerin sınıflandırılması……...……..	109
Çizelge 3.2.	Ark Nova yapısı genel tanıtımı…….……....….	114
Çizelge 3.3.	Ontario Pavilion yapısı genel tanıtımı…….....…….	119

Çizelge 3.4. Münich Allianz Arena yapısı genel tanıtımı……..…..…...… 126
Çizelge 3.5. Beijing Water Cube yapısı genel tanıtımı…...……...…… 133
Çizelge 3.6. Media-TIC yapısı genel tanıtımı……...……..…… 141
Çizelge 3.7. Eden Project yapısı genel tanıtımı…….…….....…...……..… 146
Çizelge 4.1. Seçilen yapı örneklerinin pnömatik taşıyıcı sistemleri inceleme ölçütleri açısından değerlendirilmesi……..… 160
Çizelge 4.1. Seçilen yapı örneklerinin pnömatik taşıyıcı sistemleri inceleme ölçütleri açısından değerlendirilmesi (devam)…….....…. 161

1. GİRİŞ

Tarihi süreç boyunca eski taş çağlarından günümüze kadar insan yaşamı mimarlığın oluşmasında ve gelişmesinde etkilidir. İnsanoğlunun varlığı doğal çevreleri şekillendirmek ve daha sonraları yapılı çevreler oluşturma çabası sonucunda mimari sistemler ortaya çıkmaktadır. Eski çağlarda doğal çevrede barınma ve korunma hedefleriyle üzeri örtülü mekan arayışında olan insanlık, bulunan yeni gelişmeleri mimaride uygulamasıyla taşıyıcı sistemleri var etmeye başlamıştır. Bu nedenle taşıyıcı sistemler insan ve mimari ile paralel olarak birbirleriyle doğrudan bağlantılıdır. İnsan hayatında bilim ve teknolojide yaşanan her türlü gelişme mimari unsurları etkilemektedir. Mimari taşıyıcı sistemlerde insan hayatında yaşanan kültürel, toplumsal ve teknik tüm gelişmelerin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Tüm bu unsurların etkilerine ek olarak mimari eserlerin ortaya çıkışının temeli taşıyıcı sistemlerdir.

Mimaride taşıyıcı sistemler insanoğlunun tüm bilgi, teknik ve teknolojik birikiminin yapılarda doğrudan kullanımının bir yansımasıdır. Bu nedenle çağlar boyunca strüktürler insan hayatının, toplumsal ve kültürel özelliklerinin, bilgi birikiminin, kullanılabilen alet, makine, malzeme ve ekipmanların bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Tüm yeteneklerini ve gelişmişlik düzeylerini barınma için gerçekleştirdiği yapılarda kullanan insanoğlu, daha sonraları taşıyıcı sistemleri geleneksel sistemlerden yola çıkarak geliştirmiş ve günümüz yapım sistemlerine kadar ulaştırmıştır. Eski çağlarda korunma ve barınma ihtiyaçları için yapılar üreten toplumlar; form, sanat, mimarlık, malzeme ve yapım yöntemleri ile taşıyıcı sistemleri farklı bir boyutta ele almaya başlamıştır.

Mimari taşıyıcı sistemler eski çağlardan günümüze mimarinin temel unsurlarından birisidir. Doğada her canlının koruma ve barınma içgüdüsü ile doğal çevrede yaşamını devam ettirebilmesi amacıyla coğrafi koşullara da uyum sağlayarak geliştirdiği evrensel bir gerçek olan yuva yapmak temel ihtiyaçtır. Eski çağlarda insanın doğada sığındığı mağaraları bırakarak daha sağlam ve konforlu yeni barınacak yerler inşa etmesi mimarlığın doğuşudur. İnsanın ilkel ilk yuvaları ise taşıyıcı sistemlerin kurgulanması ve mimari açıdan geliştirilmesi ile oluşmaktadır. Paleolitik devirde (MÖ. 7000) avcı toplayıcı insanın mağaralarının yerini neolitik devirde (MÖ. 6800) köy benzeri yerleşik

yaşam süren ve tarım yapan toplumların ilkel barınakları almıştır. Zaman içerisinde teknik bilgi ve donanımın gelişmesi her medeniyetin kendine ait mimari üslupta ihtiyaca yönelik yapılar ortaya koymasına zemin oluşturmuştur (Erol, 1997). Eski çağlarda doğada var olan mağara, höyük, ağaç kovuklarından oluşan barınaklar geleneksel malzeme ve kas gücü ile ilk ilkel spontane taşıyıcı sistemleri oluştururken Endüstri Devrimi mimari strüktürlerin milat noktası olmuştur. Endüstri Devrimi'ne kadar geçen süreç boyunca oyma sistemler, yığma strüktürler ve iskelet (karkas) sistemler kullanılmıştır. Uzun yüzyıllar boyunca süregelen geleneksel taşıyıcı sistemler Endüstri Devrimi'nden günümüze kadar olan sürede gelişen malzeme, teknoloji ve teknik bilgi ile farklı strüktürlerin ortaya çıkmasına zemin oluşturmuştur.

Tarihsel devirler süresince taşıyıcı sistemler rüzgar, yağmur ve güneş gibi doğal faktörlerden korunma amacıyla inşa edilirken daha sonraları çağdaş mimarlıkta yüksekliklerin artması, açıklıkların genişlemesi ve daha karmaşık oluşumların mimaride uygulanmaya çalışılmasına doğru gelişerek evrimleşmiştir (Ching, Onouye, Zuberbuhler, 2017). Endüstri Devrimi sonrasında ortaya çıkan yeni ihtiyaçlar, nüfus artışı, toplumların gelişmesi, teknolojinin ilerlemesi, mimari teknik bilgi ve donanımın artması gibi tüm insan faaliyetlerinin ve üretimlerinin doğrudan mimariye yansıması yeni yapım teknolojilerinin dolayısıyla da farklı taşıyıcı sistemlerin ortaya çıkması ile sonuçlanmıştır. Çağdaş taşıyıcı sistemlerin ortaya çıkışı bu sayede mümkün hale gelmiştir. Çağdaş taşıyıcı sistemler, toplumun ortaya çıkan gereksinimlerini teknoloji, gelişen malzeme ve makine gücü ile en ekonomik şekilde sağlamayı hedefleyen yeni mimari prensiplerin geliştirildiği strüktürlerdir.

Endüstri Devrimi ile birlikte geleneksel yöntemlerden yola çıkan ancak çok daha geniş açıklıkların yeni teknolojide geliştirilen malzeme, teknik, form ve strüktürde geçildiği çağdaş yapım sistemleri ortaya çıkmıştır. Çağdaş yapım sistemlerinin çalışma kapsamında belirlenen dört ana grubu olan yüzey aktif sistemler, uzay kafes sistemler, kablolu sistemler ve asma-germe (membran) sistemler sanayide yaşanan gelişmeler sonucunda mimari açıdan uygulanabilir hale gelmiştir. Membran sistemlerin makineleşme ve plastik-polimer esaslı malzemenin mimaride kullanılmaya başlanması ile birlikte basınçlandırılarak kullanılması asma- germe (membran) sistemlerin bir alt

grubu olan kapalı hacimli membran sistemleri yani pnömatik (şişme) sistemlerin temellerini oluşturmuştur.

Pnömatik sistemler plastik-polimer esaslı membran malzemenin hava destekli sistemler aracılığıyla basınçlandırılarak mimari bir mekan oluşturan sistemlerdir. Pnömatik sistemler özelliklerine göre mimarlıkta örtü, spor salonları, stadyum, köprü, tarihi yapılara ek, acil durum yapıları, taşıyıcı eleman, cephe kaplama sistemi, sergi salonları, afet sonrası barınak, konut, kalabalık buluşma mekanları, kafe, müze gibi çeşitli fonksiyonlarda tasarlanmış yapılarda ana veya yardımcı yapı elemanı olarak kullanılabilmektedir. Membran malzeme ve yapısal özelliklerine göre sınıflandırılan pnömatikler mimari açıdan yeni geliştirilen daha az malzeme ile daha geniş açıklıkların ekonomik olarak geçilmesinin hedeflendiği güncel strüktürlerden birisidir. Pnömatik sistemlerin yalın şişme taşıyıcı strüktür olarak uygulanmasına ek tensegrity veya kinetik (hareketli) strüktürlerle de kombinasyonlu olarak kullanılabilmektedir.

Dünya çapında günümüzde pnömatik strüktürlerin varyasyonlarının tasarlanmış ve uygulanmış birçok örneği mevcuttur. Dünya'da pnömatik sistemler sağladığı avantajlar ile mimaride yaygın bir şekilde kullanılıyor olsa da ülkemizde daha az sayıda uygulanan örneğinin görülmesi ve yazınsal olarak çalışma sayısının az olması nedeniyle çalışma kapsamında pnömatik sistemler incelenmiştir. Pnömatik sistemlerin ana niteliklerine göre tez kapsamında belirlenen işlevsel açıdan kullanım alanları, taşıyıcı sistem, membran malzeme, şişme süresi, sürekliliği ve şişirme malzemesi ile yapıya özel yerinde geliştirilen sistemler parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Mikro veya makro ölçekli yapılarda çeşitli işlevlerde kullanılan pnömatik sistemlerin yapısal özellikleri sayesinde sağladığı olumlu veya olumsuz yönler ortaya çıkartılmıştır.

1.1. Problemin Tanımı

Pnömatik sistemler Endüstri Devrim'i sonucunda ortaya çıkan çağdaş taşıyıcı sistemlerin, asma-germe (membran) sistemlerinin bir alt grubudur. Pnömatik strüktürler ilk örneklerinden günümüze pek çok gelişme göstermiştir. Günümüz anlamında kullanılan pnömatik sistemler hakkında dünyada yazınsal ve uygulama açısından çok sayıda çalışma

olmasına rağmen Türkiye bağlamında az sayıda yazılı kaynak ve örnek yapı bulunmaktadır. Bu nedenle pnömatik strüktürlerin Türkiye'de daha az uygulama alanı olması ve pratiğe geçirilmemesi problem olarak tespit edilmiştir. Bu durumun tespiti ve değerlendirilmesi amacıyla çağdaş yapım sistemleri içerisinde az sıklıkta incelenen ve uygulanan pnömatik sistemler çalışma konusu olarak seçilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Pnömatik sistemler; membran malzemenin katı, sıvı veya gaz bir madde ile basınçlandırılması sonucu taşıyıcı hale gelen strüktürlerdir. Bu sistemler; hafif, ekonomik, büyük açıklıklar geçebilme, ekleme-çıkarma işlemlerinin kolaylığı, form çeşitliliği, tekrar kullanılabilme, pratiklik, kısa yapım süresi, afet ve acil durumlarda kullanım, çeşitli malzeme kombinasyonları ile uygulanabilme gibi avantajlara sahiptir. Mimari açıdan çok çeşitli işlevde yapıda uygulanabilen pnömatik strüktürler, ana taşıyıcı eleman, yardımcı taşıyıcı eleman veya kalıp elemanı olarak kullanılabilmektedir. Bu bağlamda yazınsal çalışmanın az bulunduğu ancak pek çok uygulama ve çalışmanın yapıldığı pnömatik sistemlerin tanımlanması, gelişim süreci, sınıflandırılması, geçmişten günümüze yapı veya yapı elemanı olarak kullanım örneklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Buna ek olarak ülkemizde pnömatik taşıyıcı sistemlerin hem yazınsal hem de uygulama açısından daha yaygın olarak kullanımının gündeme getirilmesi hedeflenmektedir.

1.3. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma kapsamında tarihsel süreç içerisinde Endüstri Devrimi ile birlikte ortaya çıkan çağdaş taşıyıcı sistemler başlığı altında asma-germe (membran) sistemlerin bir grubu olan pnömatik (şişme) taşıyıcı sistemler incelenmiştir. Bu inceleme bağlamında belirlenen parametreleri üzerinden işlevsel açıdan kullanım alanları, taşıyıcı sistem, membran malzeme, şişme süresi, sürekliliği ve şişirme malzemesi ile yapıya özel yerinde geliştirilen sistemler başlıkları altında Ark Nova, Ontario Pavilion, Münich Allianz Arena, Beijing Su Küpü, Media-TIC ve Eden Project örneklerini kapsamaktadır.

1.4. Çalışmanın Yöntemi

Pnömatik sistemler hakkında dünyada ve ülkemizde yapılmış yazınsal çalışmalar incelenerek bu strüktürler hakkında tanımlanması, yapısal özellikleri, tarihsel süreç içerisindeki gelişimi, sınıflandırılması, uygulama alanlarına göre örnek yapıların değerlendirilmesi ortaya konmuştur. Pnömatik sistemlerin değerlendirilme parametreleri işlevsel açıdan kullanım alanları, taşıyıcı sistem, membran malzeme, şişme süresi, sürekliliği ve şişirme malzemesi ile yapıya özel yerinde geliştirilen sistemler başlıkları altında farklı niteliklerde belirlenen Ark Nova, Ontario Pavilion, Münich Allianz Arena, Beijing Su Küpü, Media-TIC ve Eden Project örnekleri incelenmiştir. Belirlenen örnek yapılarda pnömatik strüktürlerin kullanım fonksiyonuna göre sağladığı olumlu ve olumsuz yönler değerlendirilmiştir. Pnömatik taşıyıcı sistemlerin mimaride kullanımı sonucunda ortaya çıkan avantajlı ve dezavantajlı yönlerine ulaşılmıştır.

1.5. Literatür Özeti

Geniş açıklıklı çağdaş yapım sistemlerinin alt başlıkları olan yüzey aktif sistemler (kabuklar), uzay kafes sistemler, kablolu istemler ve asma-germe sistemler ile alt başlığı olan membran sistemler başlıkları altında birçok tez çalışması mevcuttur. Ulusal YÖK Tez Merkezi bağlamında çağdaş yapım sistemleri ile ilgili taranan araştırmalar sonucunda en çok uzay kafes sistem ve yüzey aktif sistem olan kabuklar hakkında yapılmış tez çalışmalarına ulaşılmıştır. Membran sistemler ile ilgili yapılmış tez çalışmalarında ise en çok incelenen konu malzemedir. Yeni membran malzemelerinin üretimi, geliştirilmesi ve uygulanması ile ilgili kimya, inşaat mühendisliği ve makine mühendisliğinde yapılan tez çalışmaları da mevcuttur. Membran sistemlerin alt grubu olan pnömatik (şişme) sistemlerin doğrudan ana konu olarak incelendiği üç adet tez mevcuttur. 1986 yılında Gürsu, “Afet Bölgelerinde Geçici Şişme Yapılar için Tasarım Kriterleri” başlıklı tez çalışmasında şişme sistemlerin davranışsal analizi ve deprem sonrası barınma için çözüm önerisi olarak getirmektedir. Ayrıca tez çalışması pnömatik yapıların tasarım ve uygulama kriterlerine yönelik önerileri de içermektedir. 2001 yılında Diker, “Deprem Sonrası Kurulacak Portatif Acil Yapı Türlerinin Çift Tabakalı Yüksek Basınçlı Pnömatik Konstrüksiyonlarla Oluşturulmasında Yapısal Elverişlilik Kriterlerinin Belirlenmesi”

başlıklı tez çalışmasında deprem sonrası barınma sorunlarını tespit etmek ve çözüm geliştirmeye yönelik olarak çift cidarlı bir pnömatik sistem önermiştir. Bu bağlamda pnömatik (şişme) sistemler başlığı altında deprem sonrası barınma ve pnömatik sistemlerin yapısal özellikleri araştırılmıştır. 2019 yılında Eryılmaz, "Söylemsel Bir Disiplin Olarak Mimarlık: Radikal Avangardın Şişirilebilir Mekanları" isimli tez çalışması avangart mimarlar tarafından 1960'lı yılların sonlarından 1970'li yılların başına kadar ortaya koyduğu şişirilebilir yani pnömatik mimari üretimleri kapsamaktadır. Teknolojik gelişmeler ile toplumsal alanda yaşanan sosyal, politik ve kültürel değişimlerle birlikte mimarlığın gelenekselden koparak avangart şişirilebilen mekanlara dönüşümü incelenmiştir. Sonuç olarak pnömatik sistemlerin doğrudan ana konu olarak çalışıldığı üç adet teze ulaşılmıştır.

Pnömatik sistemler hakkında doğrudan bahseden bu üç teze ek olarak pnömatik sistemlerden tez içerisinde bir bölüm olarak incelenmiş tezlerde mevcuttur. Bahadır (1997), "Büyük Açıklıklı Yapılarda Taşıyıcı Sistemler" adlı tezinde şişme sistemler başlığı altında pnömatik sistemlere bir paragraf olarak değinmiştir. Say (1998), "Çağdaş Yapılarda Strüktür-Biçim İlişkisi" isimli tez çalışmasında bir bölümde pnömatik sistemler, tarihçesi, tek ve çift cidarlı pnömatik strüktürler olarak özellikleri, sınıflandırılması ve uygulanmış pnömatik sistem örneklerini incelemiştir. Yıldırım (2003), "Taşıyıcı Sistem Seçimine Yönelik Çok Ölçütlü Bir Yaklaşım" adlı çalışmasında taşıyıcı sistemler içerisinde bulunan membran taşıyıcı sistemlerin kapalı hacimli grubu olan pnömatik (şişirme) sistemlerden ve pnömatiklerin tek-çift katmalı olarak gruplandırılmasını anlatmıştır. Gündoğ (2012), "Çağdaş Strüktür Sistemlerinin Mimarlığa Etkileri" tezinde mimaride kullanılan strüktür sistemleri içerisinde pnömatik sistemler ve yapı elemanları hakkında kısa bir bölümde bahsetmiştir. Erdem (2012), "Ay Yapılarının Yapım Sistemlerinin Araştırılması" tez çalışmasında ay ortamında kullanılabilecek yapım sistemleri içerisinde şişme sistemleri de önermiştir. Aynı zamanda ay yapıları olarak pnömatik sistemlerin uygulandığı kurtarma balonları, NASA Şişme Ay Habitatı, MoonBase 2 ve SinterHab gibi örnekler ortaya konmuştur. Alioğlu (2018), "Tekstil Esaslı Malzemelerin Mimaride Kabuk Tasarımında Kullanımı ve Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi" isimli tez çalışmasında membran malzemenin uygulanabildiği sistemler içerisinde pnömatik sistemler hakkında bilgi

vermiştir. Buna ek olarak membran malzeme ile üretilen pnömatik strüktürlere örnekler vermiştir. Dağılgan (2019), “Geniş Açıklıkların Örtülmesinde Kullanılan Taşıyıcı Sistem Seçimi İçin Bir Model Önerisi” tezinde geniş açıklıkların geçilmesinde kullanılabilir kapalı membran sistemler olarak şişme sistemleri çağdaş strüktürler başlığı altınca incelemiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Taşıyıcı Sistem Tanımı

Tarih öncesi devirlerde doğada kendiliğinden var olan alanları barınak olarak kullanan insan eski çağlardan itibaren çevresini şekillendirerek yeni ortamlar yaratmıştır. Yapay çevreler ve yeni hacimler oluşturma çabası mimarlık sanatının temelidir. İnsanoğlunun içerisinde yaşamını sürdürmeyi hedeflediği, çevresel ve iklimsel faktörlerden korunduğu, barınak olarak kullandığı doğada bulunan malzemeleri taşıyıcı olarak kas gücü aracılığı ile kurgulanması ile ortaya çıkan üç boyutlu mekanlar mimari taşıyıcı sistemlerin başlangıcıdır.

Geçmişten günümüze insan varoluşundan itibaren yaşamını sürdürebilmek için hem korunma, yemek ve güvenlik gibi fiziksel ihtiyaçlarını karşılayabilmek hem de hayvanlar, kötü iklim koşulları ve doğal afetlere karşı hayatta kalabilmek ve bir kabuk altında sığınabilmek için barınaklara ihtiyaç duymuştur. Eski çağlarda doğada kendiliğinden bulunan mağara, höyük ve ağaç kovuklarında barınırken daha sonraları yaşanan teknik gelişmeler ile birlikte farklı malzemeler kullanılarak yaşanabilir mekanlar inşa etmeye başlanmıştır. Bu durumda uygulanan taşıyıcı sistemler gelişerek günümüzdeki sistemlerin temellerini oluşturmuştur (Özat, 2014). Mimari yapının ayakta durmasını, hacim oluşturmasını ve bir mekana dönüşmesini sağlayan aynı zamanda korunma ve barınma amaçlarını gerçekleştiren temel unsur taşıyıcı sistemdir. Taşıyıcı sistemin birçok tanımı olmasına karşın ana hedefi insanın içerisinde yaşamasına elverişli ve insanın yaşamının bir yansıması olan, kendisi ile çevresel yükleri güvenli şekilde taşıyan sınırları belirli üç boyutlu kurgu, taşıyıcı, strüktür sonucu ortaya çıkan yapıdır.

İnsan yaşamının bir yansıması olan taşıyıcı sistem eski çağlarda da günümüzde de tüm bilgi birikiminin yansıtıldığı bir olgudur. İnsanlığın gelişmişlik düzeyinin, tüm bilgi birikiminin ve imkanlarının vücut bulmuş hali taşıyıcı sistemdir. Çünkü strüktürel sistemler ihtiyaçlara yönelik olarak uygulandığı dönemde bilinen malzemenin imkanlar dahilinde kurgulanması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Viollet-le-Duc (1875), strüktür kavramını “sosyal ihtiyaçlar ile dönemin teknolojik kültürü arasında gerilimden ortaya

çıkan sonuç" olarak tanımlamaktadır. Duc'a göre, ortaya çıkan mimari ürün tüm bu gerilimin unsurlarını taşımaktadır. İnsanlar için doğadaki imkanların yetersizliği sonucunda kendi yapımı ile ortaya çıkan içerisinde yaşanan kabuk, Taş Çağı'nın karanlıklarında başlayan taşıyıcı sistemlerin ilk örnekleridir. Zamanın ilerlemesi ile birlikte toplum halinde yaşayan insanlara farklı fonksiyonlarda özellikler sunan yapılar; meydan, sokak ve mahalle gibi yeni kentsel öğeleri yani daha büyük organizasyondaki yerleşmeleri oluşturmaktadır (Kuban,1992). Dolayısıyla değişen insanın aynası olan mimari, taşıyıcı sistemlerin hangi kriterlere göre gelişeceğini veya nasıl uygulanacağını da belirlemektedir.

Özetle insanlığın doğal çevrede mağaralarda başlayan yaşamı daha sonraları barınak arayışı ile doğal çevrenin şekillendirilmesiyle sonuç bulmuştur. Çünkü her canlı doğada yaşamını sürdürebilmek için barınacak bir mekana ihtiyaç duymaktadır. Çevresel faktörler ile doğrudan ilişkili olan insanın yapay çevreyi düzenleme, imar etme ve farklı özellikli olarak oluşturma çabası kendi yarattığı yapıları ortaya çıkarmaktadır (Oymael, 2015). Doğal çevreye müdahalelerde bulunan ve yeni oluşumlar yaratan insan, mimari açıdan yapı kavramını doğurmuştur. Her bir yapı için ortamın koşullarına, teknik donanıma, teknolojik gelişmişliğe, kültürel ihtiyaçlara, çevresel faktörlere ve toplumsal yapıya göre yeni bir taşıyıcı sistem gerektirmektedir. Bu nedenle toplumlar çağlar boyunca her yapı faaliyeti için kendi yaşamına ve ihtiyaçlarına en uygun taşıyıcı sistem arayışında olmuştur ve geliştirilen her unsuru mimaride deneyimleyerek uygulamıştır. Dolayısıyla mimari taşıyıcı sistemler insan hayatının doğrudan bir yansımasıdır.

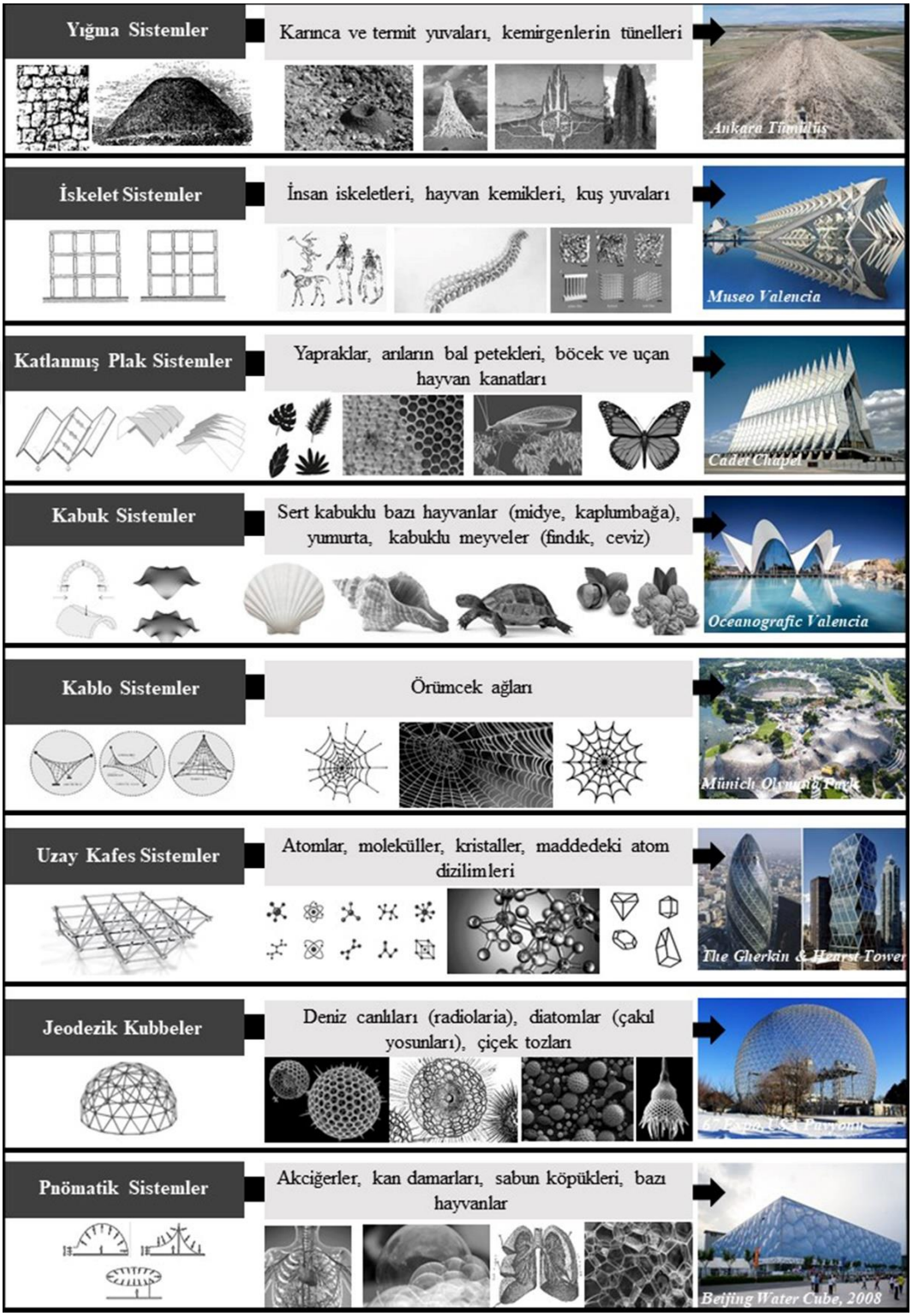
Taşıyıcı sistemler inşa edilerek oluşturulan sadece bir hacim, boşluk veya form değildir. Aynı zamanda taşıyıcı sistemden yani ortaya çıkan mimari eserden beklenen belirli unsurlar vardır. Üzerine etkiyen yükleri, elemanlarının taşıyıcılığını geçmeyerek güvenle şekilde taşımak ile zemine aktarmak üzere tasarlanmış ve inşa edilmiş dengeli yapı taşıyıcı sistemdir. Bu sistemi sağlamak amacı ile birçok farklı özellikteki taşıyıcı sistem çağlar boyunca insanlar tarafından malzeme, birleşim kurgusu ve uygulama yöntemleri gibi değişken unsurlarda deneyimlenmiştir. Tarih öncesinden günümüze ahşap, taş ve kerpiçten kas gücü kullanılarak korunma amacı ile inşa edilen ilk basit barınaklardan; günümüzde beton, cam ve çelik gibi malzemelerden inşa edilen strüktürlere kadar olan

süreçte taşıyıcı sistemlerin gelişimi ancak rüzgar, yerçekimi ve deprem gibi çevresel kuvvetlere karşı dayanıklı olanların kalıcı olması ile sonuçlanmıştır. Yeni arayışlar ile geliştirilen taşıyıcı sistemler; malzeme, teknoloji, bilimsel, toplumsal ve kültürel gelişmelere göre uygulanan taşıyıcılar yapım hatalarından kazanılan tecrübeler, elverişlilik ve verimlilik gibi unsurlara göre iyileştirilmiştir (Ching, Onouye, Zuberbuhler, 2017). Böylelikle yüzyıllar süresince mimari taşıyıcı sistemler insanlar tarafından sürekli deneyimlenerek kazanılan tecrübeler sonucunda günümüzde yeni malzeme, teknik bilgi ve teknoloji sayesinde daha nitelikli olarak geliştirilebilmiştir.

Yerin üzerindeki tüm nesneler insan tarafından yapay form oluşturmada görev alan evrensel kütlenin bir parçasıdır. Biçimi olan her nesnenin de bütünlük ve denge sağlamayı hedefleyen bir yapısı vardır. Biçim ve yapı arasındaki en temel ilişki, yer üstündeki bütün ve sabit nesnelerdir. Yapı, yerçekiminin bir sonucu olarak doğal etkilerle ve kuvvetlerle ilişkili olarak ortaya çıkmaktadır. Mimari kütlenin uzamsal bir form (bir boşluk ve / veya bir açıklık) içindeki uygulaması sonucu ortaya çıkan mimari kütle, mimaride kuvvetleri taşıyan - alan ve ileten mimari kütlenin yapısının bir ürünüdür. Mimari alan (boşluklar ve açıklıklar) ile yapı (yapısal katı) arasında belirgin bir etkileşimi temsil eden yapı sistemleri, mimari bir mekan yaratmak amacıyla yapı elemanlarının (veya bütün bir yapı elemanının) oluşturduğu bütünlerdir. Yapı sistemleri için birincil ilham ve bilgi kaynağı ise doğadır. Doğadan esinlenerek oluşturulan mimari strüktürlerin kuvveti zemine iletilebilmesi ve güvenli ortam oluşturabilmesi için belirli bir miktarda malzeme ile oluşturulmuş kurgusal sistemleri sağlaması gerekmektedir (Radoev, 2019).

Tüm bu taşıyıcı sistem arayışları bağlamında gelişen mimari sistemler paralelinde ilham alınan ve taklit edilerek gerçekleştirilmeye çalışılan formlar çevrede bulunan doğa ve canlılardır (Çizelge 2.1). Doğada bulunan malzemelerden yapılan barınaklardan günümüzün en güncel yapım sistemlerine kadar olan süreçte insan, daima doğada var olan form ve yapılardan esinlenmiştir. Hayvanlardan, hayvan yuvalarından, maddesel formlar ve doğadaki formlardan ilham alınarak strüktürel sistemleri taklit yoluyla oluşturmuşlardır. Geçmişten günümüze kurgulanan taşıyıcı sistemler genellikle doğadaki formların yapay olarak oluşturulma çabasının mimariye bir yansımasıdır.

Çizelge 2.1. Geçmişten günümüze taşıyıcı sistemlerin doğadan ve canlılardan esinlenerek geliştirilen mimari yapı örnekleri (Türkçü, 2003 esinlenerek yazar tarafından hazırlanmıştır, görsel kaynakları URL 1- URL 47 arası)



Taşıyıcı sistemin kelime kökeninin gelişimi ise Latincede “Struere” sözcüğünden ortaya çıkan strüktür yani taşıyıcı sistem, inşa etmek anlamına gelmektedir. Türkçe’de “yapı” kelimesine tekabül eden strüktür “konstruktion/construction” yani inşaat, inşa ve yapım faaliyetlerine karşılık gelmektedir. Yapı kelimesinin ise her türlü mimarlık yapıtı olarak inşa edilmiş şey ya da unsur olarak çeşitli tanımları bulunmaktadır. Strüktür ile yapı kelimeleri farklı dillerdeki anlamdaş sözcüklerdir. Strüktür “yığılarak, bir araya getirilerek oluşmuş bir ürünü” ifade ederken, mimarlıkta “taşıyıcı” olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle anlamdaş strüktürel sistemler ve taşıyıcı sistemler, uzayda kendiliğinden veya yapay olarak var olan her türlü oluşum olarak tanımlanmaktadır. Ancak mimari açıdan strüktür yani taşıyıcı parçaların bütün ile ilişki kurarak ve birbirlerinin etkileyerek bütün içinde anlam kazanmasıdır. Örneğin; uzay kafes sistemlerde bir tek çubuk parça veya eleman iken tüm sistem bir strüktür yani taşıyıcıdır. Özetle mimari anlamda taşıyıcı sistemin tanımı: “Üzerine etki eden yükleri belli yerlere aktarıp, öngörülen statik dengeyi sağlamak ve sürdürmek amacıyla taşıyıcı elemanların oluşturduğu sistematik bütün o yapının taşıyıcı sistemidir.” Mimarlıkta strüktürün ana amacı yük taşımak ve kuvvet açısından önceden planlanan dengeyi kurmaktır (Türkçü, 2003).

Doğada her şeyin yapısı gereği bir taşıyıcısı, strüktürü vardır. “Ev, makine, ağaç veya canlılar gibi katı maddesel biçimlerin varoluşuna katkıda bulunan elemanlardan en önemlisi strüktürdür. Maddesel form strüktürsüz var olamaz. Biçimin devamlılığı sağlanmazsa iç organizmalar işlevlerini kaybeder. O nedenle maddesel strüktürsüz organizma olamaz, canlı veya cansız (Engel, 1968). ” ifade edildiği üzere her oluşumun var olmasındaki ana etmen onun taşıyıcı bütünü, ayakta tutan elemanları yani strüktürüdür. Mimari açıdan taşıyıcı sistemi kurgulanmayan mekanlar bir hacim oluşturamadığı gibi iç organizasyonları önemsiz kılmaktadır. Bu nedenle Engel’in de belirttiği gibi bir yapının en önemli unsuru taşıyıcı sistemi, strüktürüdür.

Parçalardan oluşan strüktür her elemanın birleşerek bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya kaynak oluşturmaktadır. Picon (2003), taşıyıcı sistemlerin doğal yapısında strüktürün parça ve malzemelerin bir araya getirilmesi ile görülebilir olduğunu, bu bir araya gelme durumunun ise strüktür sayesinde imkanlı hale geldiğini savunmaktadır. Sekler (1965);

binaya etki eden yükleri taşıyan soyut sistemi dinamik olan bir strüktür, bu sistemin malzemeler ve kuvvetler aracılığıyla inşa edilmiş halini ise statik olan yapı/construction olarak tanımlamaktadır. Bu bağlamda her bir parçanın veya malzemenin bir araya gelerek kuvvetleri belirli prensiplerde taşıdığı strüktürel sistemler, yaşam ve insan ile birlikte yapılara dönüşmektedir.

Yapısal yüklerin etkin olduğu kendi ağırlıkları ile üzerine etkiyen yükleri taşıyarak emniyetli bir şekilde zemine aktaran elemanlar topluluğuna taşıyıcı sistem denir. Örtü ile taşıcılar arasında statik denge kuran sistem aynı zamanda taşıyıcı sistem yani strüktürdür. Mimar; yapının fonksiyonuna, kullanıcıya, maliyetlerine ve yapının formuna göre en doğru taşıyıcı sistemi belirlemelidir. Uygun malzeme ile amaca hizmet eden bir biçimlendirilme ile tasarlanması gereken yapıyı ayakta tutan sisteme strüktür, malzeme ve elemanların değişik yollarla bir araya getirilmesine konstrüksiyon denilmektedir. Taşıyıcı sistemlerin gelişmesi de malzeme ve konstrüksiyon yöntemlerindeki gelişmeye paralel olarak ilerlemektedir. Aynı zamanda insanın sahip olduğu teknik bilgi birikimi strüktür ve konstrüksiyonun sınırlarını belirlemektedir. Toplumsal gelişmeler ile tekniğin ilerlemesi hem mevcut malzeme ve strüktürlerin daha elverişli hale gelmesini hem de yeni malzeme ve strüktürlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Erol, 1997).

İnsan aracılığıyla oluşturulan her yapı çeşitli doğa kaynaklı (sismik, meteorolojik ve yerçekimi kuvvetleri) ve insan kaynaklı yükleri yapım yöntemleri, malzeme ve ebatlarına göre doğru şekilde taşıyıp zemine aktaran yapısal unsurların her biri; taşıyıcı sistemin bileşenleridir. Yapıyı oluşturan tüm bu bileşenler taşıma, yapıyı oluşturma, yapının kullanımına göre iç mekanının şekillendirilmesi hususlarında mimariyi belirleyen ana elemandır. Taşıyıcı sistemin temel amacı oluşturulan mimari eserin kullanım amacına yönelik olarak bir mekanın sınırlarını belirlemek, hacim oluşturmak ve üzerini örtmektir (Özşen, Yamantürk, 1991). Bu nedenle farklı amaçlarda kullanılan yapılarda; malzeme, kültürel özellikler, coğrafya, iklimsel özellikler ve yapım şekli unsurlarına göre değişik taşıyıcılar kurgulamayı gerektirmektedir. Her sistem her yerde uygulanamaz ve her kullanıcı veya mimar her taşıyıcı elemandan verimli bir çözüm sağlayamayabilir. Dolayısıyla ihtiyaçlara cevap veren taşıyıcı sistemlerin sürekli gelişen ve değişen bir dinamizme sahip olduğu söylenebilmektedir.

Bir yapının tasarımdan uygulamaya kadar olan süreci boyunca hesaplanarak planlanan yapının yük taşıyan elemanlarının tamamına strüktür denir. Mimari bir yapı ölü ve hareketli yüklere maruz kalmaktadır. Bu yükler çevresel olarak rüzgar, deprem, su veya yapının kendi ağırlığı, insanlar, yapının içerisindeki unsurların ve malzemelerin yükleri gibi yüklerdir. Bu yükleri taşıyarak yapıyı ayakta tutan ana iskelet yani yapının taşıyıcı sistemi kullanılacak olan malzemeye yönelik olarak birleştirilme şekline, uygulama tekniğine ve biçimine göre oluşturulmaktadır. Bu nedenle her malzemenin özelliklerine göre farklı taşıyıcı sistem kurguları ortaya çıkmaktadır. Taşıyıcı sistem doğrudan yapının özeliklerini belirleyen ana unsurdur. Bir yapıda optimum konfor koşullarının sağlanarak insan hayatının sürdürülebilmesi, yapının ihtiyaçlara karşılık vermesi, uygun malzemeler ile taşıyıcı sisteminin inşa edilmesi ve uygun yapım yöntemlerinin kullanılması sonucunda sağlanabilmektedir.

MÖ. 1. yüzyılda yaşamış olan Romalı mimar Vitruvius'un 'De Architectura' adlı kitabında bir yapıdan beklenen özellikleri firmitas (sağlamlık), utilitas (kullanışlılık) ve venustas (güzellik) olarak ele almıştır. Mimari bir yapıda olması gereken unsurları sağlamlık, işlevsellik, estetiklik kıstaslarından yola çıkarak günümüzde ekonomiklik ve yapısal özellikler ile taşıyıcı sisteme uygun malzeme kullanımı unsurları da eklenmiştir (Oymael, 2015). Bu bağlamda sağlamlık yapının taşıyıcı sistemine işaret etmektedir. Bir yapının sahip olması gereken bu üç temel etmen ölü ve hareketli yüklere ve ihtiyaca göre şekillenebilen taşıyıcı sistem, fonksiyonel olarak kullanılabilirlik ve bunlara göre daha görece olan estetikliktir.

Mimari faaliyetlerde bir hedef güdülerek ortaya konulan ve belirli unsurları sağlaması gereken strüktürler, milattan öncesi devirlerde Vitruvius'un da dikkat çektiği üzere yapının taşıyıcı sistemi, yapıyı ayakta tutan en önemli unsurlarındandır. Sadece sanatsal bir üretim olmayan mimari aynı zamanda kullanıcı açısından da strüktürel olarak işlevsel ve uygulanabilir bir hacim yaratmaktadır. Günümüzde bu mimari oluşumlar esnasında bir strüktürden beklenen istenilen ihtiyaca yönelik olarak daha az malzeme ve enerji tüketerek ekonomik şekilde inşa edilebilen etkin bir taşıyıcı sistemdir. Bu nedenle mimar yapının fonksiyonu, amacı, biçimi, iç mekanı, kullanıcısı, malzeme, teknik, teknolojik imkanları ve uygulanmasına yönelik olarak yapı ile doğru taşıyıcı sistemi

bağdaştırmalıdır (Türkçü, 2003). Eski çağlardan günümüze yaşanan toplumsal, kültürel ve teknolojik gelişmeler mimariye yansıtılarak en ideal taşıyıcı sistem aranmıştır. Çağlar boyunca uygulanan birçok taşıyıcı sistemden optimum koşulları en verimli şekilde karşılayanları gelişerek günümüze kadar ulaşmıştır. Tarihsel devirler süresince bir mimari eserin tüm bileşenleri, kullanıcısı yani insan ile strüktürel sisteminin uyumu o eserin her dönem yaşamasına ve kalıcılığına da olanak tanımaktadır.

2.2. Taşıyıcı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

Eski çağlarda ilkel insanlar doğada kendiliğinden bulunan mağara, höyük veya ağaç kovuklarında veya ağaç, taş, hayvansal ürünler ile ilk barınakları oluşturmuşlardır (Şekil 2.1). Barınma ihtiyacı tarımın bulunması ve yerleşik hayata geçilmesi ile birlikte günümüzdeki taşıyıcı sistemlerin de temelini oluşturmuştur. Taşıyıcı sistemlerin başlangıç noktası insanın içgüdüsel olarak veya doğadaki formları taklit ederek oluşturduğu barınaklardır. İnsanoğlunun iklimsel faktörlerden, çevresel koşullardan, hemcinslerinden, vahşi hayvanlardan korunma ve barınma çabası yeni taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Bulundukları topluluğa, insan yaşamına, coğrafyanın özelliklerine, malzeme imkanlarına ve iklim şartlarına göre ortaya çıkarak gelişen ilk barınaklar yine bulundukları yere ait olan ortamın özelliklerine göre farklılaşmıştır. İlk başlarda korunma amacıyla oluşturulan barınaklar daha sonraları kültürel bir ihtiyaç ve yönelimle gelişmişlik seviyesine göre toplumsal üsluplarla gerçekleşmeye başlamıştır.



Şekil 2.1. İnsanoğlunun doğada bulunan malzemeler ve alanlar ile oluşturduğu ilk barınak örnekleri (URL 48, URL 49, URL 50, URL 51)

İnsan doğaya ve çevresel faktörlere karşı zayıf olan yapısı gereği bu sert koşullara karşı direnmek amacıyla daima taşıyıcı sistemler ile ilgilenmiştir. Hayvan ve hemcinslerinin saldırılarına; güneş, kar, fırtına, yağmur gibi çevresel zorluklara; yerçekimi, rüzgar ve deprem gibi doğa kuvvetlerine karşı korunma, barınma ve mahremiyet amacıyla insanlık sürekli olarak taşıyıcı sistemleri kurgulamıştır. Çevresinde kendiliğinden var olan alanları ilk barınaklar olarak kullandıktan sonra yaşanan gelişmeler ile birlikte doğaya hakim olmaya başlayan insan, oluşturduğu barınakları kültürel yaşamın ve özel hayatın bir yansıması haline getirmiştir. Yerçekimi kuvvetlerine karşı gelecek taşıyıcı bir düzen yani strüktürel sistem kurgulayan insan çevresel, toplumsal ve kültürel bağlamda kendi uygarlık düzeyini de karşılayan yapay bir ortam geliştirme arzusundadır. Bu durum geliştirilen alet ve edevatları, örneğin gemi yelkenleri gibi başka işlerde kullanılan elemanların, yapay ortamın üst örtüsü yani taşıyıcı sistemi olarak kurgulanması ile sonuçlanmaktadır. Aynı zamanda insanoğlunun sürekli olarak daha iyi ve doğruyu kendi sınırlarını aşarak arama çabası da taşıyıcı sistemlerin gelişmesinde büyük bir etken olmuştur (Türkçü, 2003).

İnsanlar doğada bulunan spontane olarak ortaya çıkan ilk barınakları geliştirerek kendi oluşturdukları mekansal hacimleri yeni malzemeler ve teknik yöntemler ile inşa etmeye başlamışlardır. Eski çağlarda insan ilk başta etrafında doğada halihazırda olan veya kendisi şekillendirerek oluşturduğu ahşaptan çatılmış ve postlar ile örtülmüş çadır, oyuk, mağara ve ağaç höyüklerinde barınmaktadır. Gelişen ve değişen insanoğlu doğanın ihtiyaçlarına cevap vermemesi nedeniyle ilerleyen zamanlarda üretimi hedefleyerek farklı mimari arayışlar içerisine girmiştir. Mimari strüktürlerin ilk örneklerini veren bu dönem, daha sonraları malzemenin işlenmesi ve teknik bilginin artması ile birlikte farklı uygarlıklarda gelişerek günümüz taşıyıcı sistemlerinin oluşumunun ilk adımıdır.

Tarihi devirler boyunca taşıyıcı sistemlerin yavaş bir şekilde gelişmesi, insan teknik bilgisinin ve teknolojisinin malzeme, yapım yöntemleri ile uygulamaları açısından sınırlılığından kaynaklanmaktadır (Özşen ve Yamantürk, 1991). İnsan yarattığı teknolojiler ile bunları mimaride uygulayarak mimari taşıyıcı sistemlerin oluşumunu sağlamıştır. Yaşamını, tüm bilgi birikimini ve teknolojisini doğrudan mimari eserlere yansıtan insanoğlu; oluşturulan yapıların gelişmişlik düzeyini belirlemektedir. İnsan

mimarlık ara kesitinin şeffaf oluşu bir mimari eserden o mekanı kullanan insan hayatı hakkında bilgi edinebilme imkanı sunmaktadır. Bu nedenle farklı coğrafyalarda belirli toplumsal normlara göre hareket eden insanlar önceleri çevrelerindeki doğal çevreyi şekillendiren daha sonraları ise kendi imkanları ile yapay çevreyi oluşturan bir mimari anlayışı ortaya koymuştur.

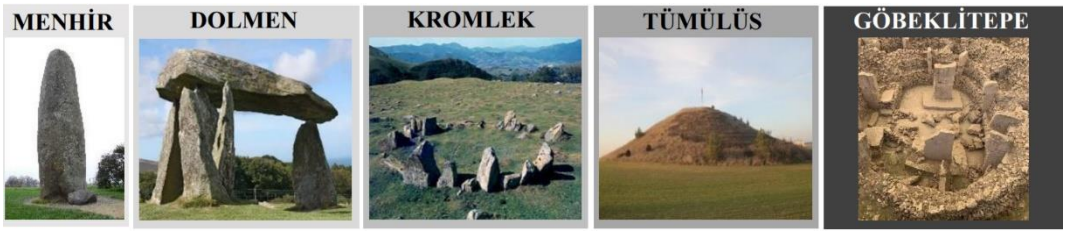
Paleolitik dönemde avcı ve toplayıcı olan toplum göçebe bir hayat sürmektedir. Doğada kendiliğinden bulunan yapıları veya çevredeki malzemeler ile inşa edilen barınaklar kullanılmaktadır. Tarım faaliyetlerinin başlaması sonucunda insanlar yerleşik hayata geçmiştir. Paleolitik dönemden neolitik döneme geçişi temsil eden yerleşik hayata geçilmesi yaşanılan çevreyi, taşıyıcı sistemlerin gelişimini, mimari etkinlikleri ve yapıları doğrudan etkilemiştir (Çizelge 2.2). Bu durum spontane sistemlerden yığma sistemlere geçişini oluşturmaktadır. Tarım ile yerleşik yaşamın başlaması sonucunda insanoğlu yeni çevrelerini inşa etmeye ve malzemeleri işlemeye başlamıştır. Mimarinin ilk yapılaşmaları olarak kabul edilen düzenlenmiş yapılı çevreler yerleşik hayata geçiş ile ortaya çıkmıştır.

Çizelge 2.2. Paleolitik dönemden neolitik döneme geçişte insan yaşamı ve barınaklar (URL 52, URL 53)

PALEOLİTİK DÖNEM	NEOLİTİK DÖNEM
2,5 milyon yıl- MÖ. 12000	**MÖ. 9000-MÖ. 5500**
Avcı toplayıcı toplum konar-göçer yaşam sürmektedir. İlkel barınaklar doğada kendiliğinden bulunan unsurlardır. 	Tarım faaliyetlerinin başlamasıyla yerleşik hayata geçilmiştir. Mimarinin ilk adımı olan insanın inşa ettiği barınaklar ortaya çıkmıştır. 

Eski çağlarda doğada kolay ulaşılabilen, işlenebilen ve çok sayıda bulunabilen taş yapıların temel elemanı olmuştur. Tek sivri taşı dikme ile oluşturulan menhir, etrafındaki taşları sütun ve yassı elemanlar olarak kullanıldığı dolmenler, tapınak olduğu düşünülen ve taşların belirli düzende dizilimi ile oluşan kromlek ve toprak tepeciklerinin mezar olarak kullanımı ile oluşan tümülüs (höyük) tarih öncesi devirlerde en eski

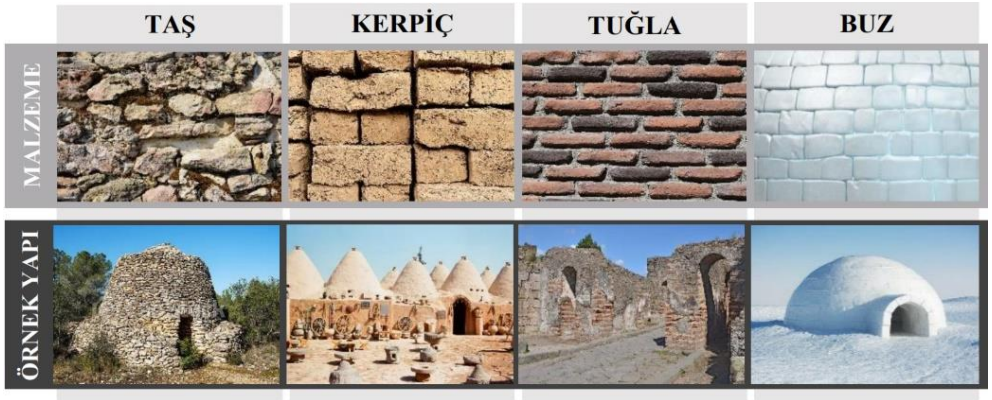
yapılaşmalardır. Türkiye'de Şanlıurfa sınırları içerisinde bulunan Göbeklitepe, dikilitaşların T biçiminde yerleştirilmiş dairesel planlı olarak inşa edildiği tarih öncesi devirlerde bilinen en eski yapı olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Menhir, dolmen, kromlek, tümülüs ve Göbeklitepe (URL 54, URL 55, URL 56; Şenkal Sezer, 2022)

Etrafta bulunan taş, toprak veya ahşap malzemeleri üst üste düzenlenerek yığma yapım sistemleri uygulanmaya başlamıştır. Yığma sistemler yapı elemanlarının üst üste birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır ve tüm elemanlar birbirleriyle bağlantılı olarak yük aktarımını sağlamaktadır. Daha sonraları ise etrafında bulunan malzemeleri işleyerek topraktan elde edilen tuğla veya kerpiç gibi malzemeler ile yığma yapılar inşa edilmiştir. Bir coğrafyada toprak ürünleri ile elde edilen tuğla kerpiç mevcut iken dünyanın bir diğer ucunda Eskimolar etraflarında bulunan kar ve buz yapı malzemesi olarak kullanılarak iglolar inşa edilmiştir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Yığma sistemin farklı coğrafyalarda uygulanmış malzeme ve yapı örneği (URL 57, URL 58, URL 59, URL 60, URL 61, URL 62, URL 63, URL 64)

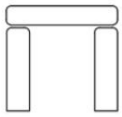
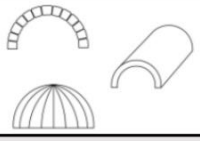
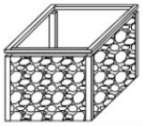
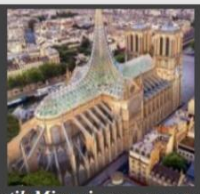
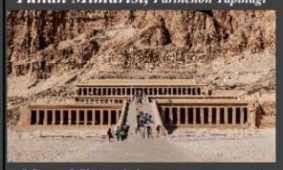


Doğada bulunan malzemelerden ağaç, kerpiç vb. üretilen yapılar barınak ve mezar yapıları; sanat veya anıtsal nitelikler gözetmeden barınma hedefiyle inşa edilen primitif sanat eserlerini ve yapıları kapsayan dönemdir. İlerleyen zaman ile birlikte devlet ve sitelerin gelişmesi aynı zamanda da üretilen yapı ile eserlerde sanatsal hedeflerin olduğu döneme geçilmektedir. Arkaik dönem olarak adlandırılan yeni üslup, medeniyetlerin gelişmesi ile yeni fonksiyonlarda anıtsal yapılar ve sanat eserlerinin de ortaya çıktığı dönemdir (Turani, 1992). Tarih devirlerinde ortaya çıkan ilk strüktürler ise lentolu sistemler (Mısır mimarisi, Yunan mimarisi), kemer-tonoz-kubbe sistemler (Roma mimarisi, Selçuklu mimarisi, Rönesans) ve iskelet sistemler (Gotik mimari) strüktürel sistemlerini kapsamaktadır (Gökçe, 1977).

Medeniyetlerin gelişmesi, nüfusun artması ve toplumsal iş bölümünün oluşmaya başlaması ile birlikte ihtiyaç duyulan mekan kavramı farklılaşmaya başlamıştır. Lentolu sistemler Mısır ve Yunan mimarisinin gelişen kolon-kiriş sistemleri, taş veya ahşap malzemenin doğal sınırları ve yük aktarımı ile ortaya çıkan düşey taşıyıcı olan kolon ve duvarların basit kirişler aracılığı ile geçildiği yapılarını doğurmuştur. Bu nedenle geçilen açıklıkla kullanılan malzemenin doğal olarak getirdiği kısıtlamalar üretilen yapıları sınırlanmıştır. Daha büyük yapı elemanları olarak kullanılan malzemeler kapalı ve rijit olan kütlesel yapıları ortaya çıkarmıştır. Uygarlığın ilerlemesi ve malzemenin işlenebilmesi ile daha küçük bileşenler kullanılarak daha geniş açıklıkları geçebilen kemer, tonoz ve kubbe gibi farklı yapı elemanları ortaya çıkmıştır. Büyük yapılar ortaya çıkararak farklı doğrultulu düşey ve yanal yüzey elemanlarının birleştirilmesine olanak sağlayan yeni taşıyıcı elemanlar Roma, Selçuklu, Osmanlı ve Bizans'tan Endüstri Devrine kadar inşa edilen yapıların tipik taşıyıcı sistemi olarak kullanılmıştır. Düşey ve yatay doğrultuda olan mimari taşıyıcı sistemlere eğrisel formlar eklenmiştir. Basınç kuvvetlerinin ana yük aktarım prensibi olan yığma sistemler; taş, tuğla, kerpiç gibi malzemelerden inşa edilerek düşey doğrultudaki tüm yapısal elemanların taşıyıcı olduğu strüktürlerdir. Yığma sistemlerden sonra iskelet sistemlerinin gelişmesi yatay ve düşey taşıyıcı elemanlar ile dolgu elemanlarını ortaya çıkarmıştır. Günümüzün kolon-kiriş sisteminin ilk örnekleri olan ağaç dallarından çatılarak yapılmış kerpiç veya çamur ile doldurulmuş kulübeler iskelet-karkas sistemlerin ilk örnekleridir. İskelet-karkas sistemler yığma sistemlerin aksine taşıyıcı ve dolgu elemanlarından oluşmaktadır. İskelet-karkas

sistemler yükleri birbirine aktararak taşıyıcı olan iskelet, mekanı bölme veya kapatma amacıyla eklenen dolgu elemanları ve birleşiminde mesnet noktalarından oluşmaktadır. Daha sonraları gelişen yapım sistemlerinde birçok yapıda iskelet sistemler üç boyutlu kapalı bir şekilde yükü aktararak ahşap, çelik, betonarme malzemeler ile inşa edilerek taşıyıcı olarak kullanılmıştır (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. Geleneksel taşıyıcı sistemlerden olan lentolu sistemlerde, kemer-tonoz ve kubbe sistemlerde ve iskelet (karkas) sistemlerde kullanılan malzeme ile yapı örnekleri (URL 65, URL 66, URL 67, URL 68, URL 69)

	LENTOLU SİSTEMLER	KEMER-TONOZ-KUBBE SİSTEMLERİ	İSKELET (KARKAS) SİSTEMLER
FORM			
MALZEME	*Yekpare büyük modüllü düşey ve yatay doğrultuda taşlar*	*Küçük taşlar ile eğrisel elemanlar*	*Düşey dikey ahşap-taş taşıyıcı ve kerpiç-tuğla-taş dolgu elemanları*
ÖRNEK YAPI	 *Yunan Mimarisi, Parthenon Tapınağı*	 *Roma Mimarisi, Pantheon Tapınağı*	 *Gotik Mimari, Notrae Dame Katedrali*
	 *Mısır Mimarisi, Hatshepsut Tapınağı*	 *Osmanlı Mimarisi, Ayasofya*	 *Gotik Mimari, Milano Katedrali*

Mezopotamya, Mısır, Yunan, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlıya kadar uzanan medeniyetler boyunca yaşanılan çevre, toplumsal öğeler, iklim şartları ve sosyal yaşantı durumu çerçevesinde mimari taşıyıcı sistemler ihtiyaçlara cevap verecek şekilde kurgulanmıştır. Mezopotamya mimarisinde kullanılan kerpiçten Roma mimarisindeki dökme betona kadar bulunan ve uygulanan tüm yapı malzemeleri form, geçilen açıklık, plan şemaları, kütle, mimari üslup ve yapı elemanları açısından taşıyıcı sistemlere ana unsur olarak yansımıştır. Roma mimarisinde kullanılan beton, Joseph Aspdin'in 1824'te Portland çimentosunu geliştirmesi ve daha sonraları çelikle beraber betonarme

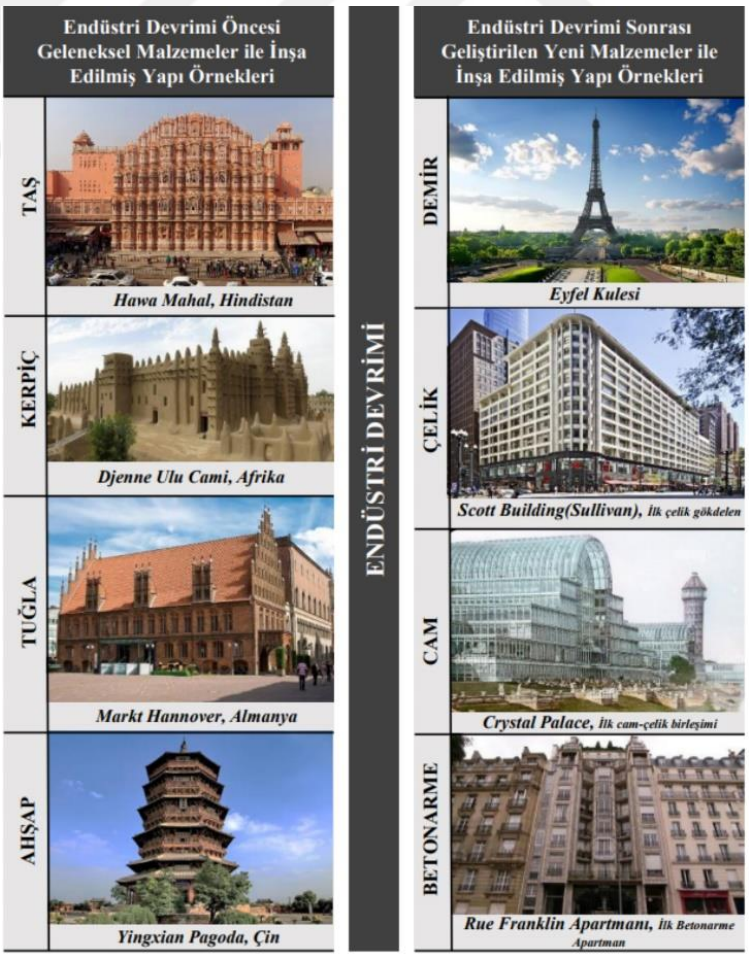
sistemlerde uygulaması ile birlikte günümüz anlamında yapılarda kullanılabilir hale gelmiştir. Beton malzemesinin gelişimi örneğinde görüldüğü üzere, Endüstri Devrimi'nin milat olduğu yaşanan tüm teknolojik gelişmeler var olan malzemelerin geliştirilmesini ya da yeni malzemelerin üretilmesini sağlamıştır. Bu sayede taşıyıcı sistemlerin de değişimi ve gelişimi gerçekleşmiştir.

Endüstri devrimi öncesinde yüzyıllar boyu birbirini taklit ederek geliştirilen mimari sitemler taş, ahşap gibi geleneksel malzemeler ve insan gücü ile uygulanmıştır. Ancak 18. yüzyılda İngiltere'de başlayan Endüstri Devrimi'nin etkisi ile birlikte farklı taşıyıcı sistemler geliştirilmeye başlanmıştır. Endüstri Devrimi raylı sistemlerin artan uygulaması ile taşımacılık, makineleşme, artan iş hacmi ve üretim ile toplumsal, sosyo-ekonomik ve kültürel açıdan insan hayatının doğrudan değişmesine neden olmuştur. Yaşanan bu değişimler sonucunda yeni mimari mekanlara, yeni fonksiyonlarda yapılara ve yeni taşıyıcı sistemlere ihtiyaç duyulmuştur. 1700'lü yıllarda Endüstri Devrimi sonucunda gelişen sanayinin etkileriyle teknolojik, teknik imkanlar ve toplumsal açıdan nüfus artışı, kentleşme ile birlikte ortaya çıkan yeni gereksinimler, taşıyıcı sistemleri ve dolayısıyla mimari mekanları da değiştirmeye başlamıştır. Ortaya çıkan yapı malzemeleri ile geliştirilen teknolojiler harmanlanarak insanoğlunun yeni mekanları daha geniş açıklıklar geçmeyi hedeflemiştir.

Geleneksel mimarideki kütlesel olan ağır yapı elemanlarının yerini yeni yapı malzemeleri ve yapım teknolojileri ile üretilebilen daha hafif taşıyıcı sistemler almıştır. Endüstri devrimine kadar olan süreçte yapılarda taş, ahşap ve toprak gibi doğal malzemeler kullanılmıştır. Teknoloji ve bilimdeki ilerlemelerle birlikte araştırmalar ve hesaplamalar hız kazanarak daha kolay bir hale gelmiştir. Bu sayede geleneksel malzemelere ek olarak geliştirilen yeni malzemeler ve yapım teknikleri taşıyıcı sistemlere uygulanarak daha geniş açıklıkları yeni strüktürler ile kurgulanabilir hale gelmiştir. Demir MÖ. 1700'lü yıllarda Hititler tarafından bulunmasına rağmen ancak Endüstri Devrimi ile birlikte çok miktarda seri bir şekilde üretilerek yapısal taşıyıcı eleman halinde kullanılabilir olmuştur. 1851 yılında Crystal Palace Londra'da, dövme demir çerçeveler ve camın birlikte kullanılarak 91 974 m² alanın üzerinin örtüldüğü geleneksel yöntemler ile geçilemeyecek büyük açıklıkların geçildiği ilk örnektir.

Sanayileşen toplumda nüfus ve iş gücü hacmi artmıştır. Dolayısıyla daha fazla yapı ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Gelişen taşıyıcı sistemler sayesinde de apartmanlar ve gökdelenler yeni yapı malzemeleri ile birlikte inşa edilebilir hale gelmiştir. Düşey aksta yükselen kentler; anıtsal yapılar, konut, sanayi ve iş merkezleri olarak farklı fonksiyonlarda yapıları çeşitli mimari stiller, taşıyıcı sistemler ve malzemeler ile içeren büyük organizasyonlara dönüşmüştür. Endüstri devrimi ile birlikte bulunan veya geliştirilen malzemeler mimari taşıyıcı sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Cam, demir, demirdeki karbon miktarının azaltılması ile elde edilen çelik, beton ile birlikte çeliğin kullanılması ile betonarme ve kalıp sistemleri gibi yeni malzemelerin mimaride kullanılabilmesi sonucunda daha şeffaf, geniş açıklıklı ve geçirgen yapılar ortaya çıkmıştır (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5. Endüstri Devrimi öncesi ve sonrası kullanılan malzemeler ve yapı örnekleri (URL 70, URL 71, URL 72, URL 73, URL 74, URL 75, URL 76, URL 77)



Joseph-Louis Lambort'un 1848'de betonarmeyi icadı ile birlikte monolitik olarak çalışan kapalı yük aktarım sistemi apartmanlarda kolay biçimde farklı yerlerde uygulanabilme ve şekil verilebilme avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca bu dönemde çok katlı yapıların daha hafif olması hedeflenerek geliştirilen çelik iskelet sistemler yapılarda taşıyıcı sistem olarak uygulanmıştır. Konut yapılarının bu evrimsel süreci gelişen teknolojilerin ve hayat koşullarının doğrudan mimari yapılara yansıdığının bir göstergesidir. Mühendislik ve mimarlık ara kesitindeki geliştirilen tüm malzeme, yapım sistemleri ve taşıyıcı sistemler konstrüksiyon ile sanat kesişiminde forma ve dolayısıyla da insan yaşamına yansımaktadır.

Endüstri devrimi etkisinde makineleşme sonucunda toplumda nüfus artışı ve yükselen yaşam standartları ihtiyaçlara karşılık veren seri üretim ile karşılanabilir hale gelmiştir. Makineleşme etkisinde ortaya çıkan farklı meslek grupları toplum içerisinde iş bölümü ve uzmanlaşma ile sonuç bulmuş, üretim faaliyetleri artış göstermiştir. Gelişen ekonomiler ve hızlı kentleşme; enerji problemleri, çevre kirliliği ve konut açığının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Mimaride geleneksel yöntemlerin ihtiyaca cevap vermemesi ile birlikte kısmen veya tamamen yerinde üretilen prefabrik sistemler taşıyıcı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yatırım, üretim, nakliye, montaj, işçilik ve inşaat süresi gibi üretim sürecindeki giderlerin en aza indirgenmesi hedeflenerek hazır elemanların tamamının veya bir kısmının fabrikalarda üretildiği prefabrik sistemlerin ya da yerinde dökme beton sistemlerin kullanılması yaygınlaşmıştır.

20. yüzyılda ortaya çıkan çağdaş yapım sistemleri yeni malzemeler, bilim ve teknoloji ile birlikte yeni yapım sistemlerini ve mimari eserleri doğurmuştur (Şekil 2.3). Daha az malzeme ile kolonsuz daha geniş açıklıkların geçilmesi hedeflenerek çekme kuvvetlerine çalışan daha hafif sistemler yeni taşıyıcı sistemler olarak ortaya çıkmıştır. Çağdaş yapım sistemlerinin uygulandığı dönemde kullanılan taşıyıcı elemanların hem fonksiyonellik hem de sanat unsuru olarak mimari açıdan sergilenmesi de hedeflenmektedir. Çağdaş taşıyıcı sistemler kendi içerisinde geliştirildiği süre boyunca ilk başlarda daha kalın en kesitte iken daha sonraları gelişmeler ile birlikte daha ince en kesitte ve daha geniş açıklıklarda uygulanabilir hale gelmiştir.



Şekil 2.3. Çağdaş taşıyıcı sistem örnekleri (URL 78, URL 79, URL 80, URL 81, URL 82, URL 83, URL 84, URL 85)

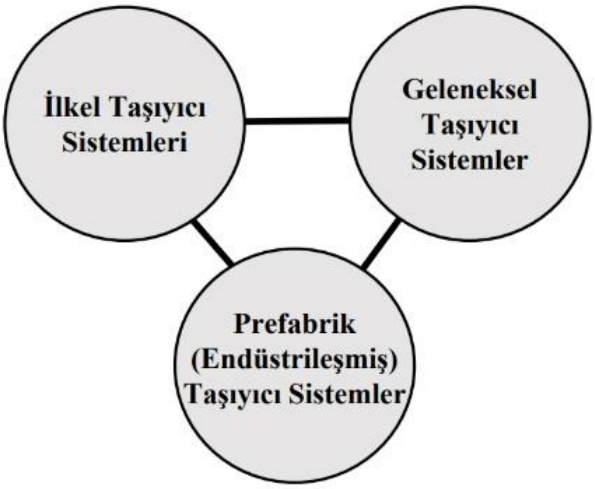
2.3. Taşıyıcı Sistemlerin Sınıflandırılması

Tarihi çağlar boyunca birçok taşıyıcı sistem insanlar ve mimarlar tarafından uygulanmış ve denenmiştir. Bazı taşıyıcı sistemler verimli bir şekilde kullanılarak günümüze kadar gelebilirken, bazıları da istenilen koşulları sağlayamadıklarından unutulup uygulanmamışlardır. Bu denli çok sayıda taşıyıcı sistemin mevcut olması farklı kişiler tarafından belirli kıstaslara göre sınıflandırmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Zamana, yaşanan gelişmelere, yük aktarım prensiplerine veya formlarına yönelik olarak taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılmalarından bazıları tablo ve şekiller aracılığıyla incelenmiştir. Taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılmasına öneri olarak da ayrıca bir tablo geliştirilmiştir.

Oymael yapım sistemlerini ilkel taşıyıcı sistemler, geleneksel taşıyıcı sistemler ve prefabrik (endüstrileşmiş) taşıyıcı sistemler olmak üzere üç ana başlıkta ele almıştır (Çizelge 2.6). İlkel taşıyıcı sistemler çevrede bulunan malzemeler ile bilimsel yöntemlere dayanmadan inşa edilen sistemlerdir. Geleneksel taşıyıcı sistemler ise geleneksel malzemeler ile insan gücüne dayalı olarak yerinde inşa edilen strüktürlerdir. Zaman, kalite ve işçilik problemlerinin sıklıkla görülmesi geleneksel yapım sistemlerinin dezavantajlarındandır. Teknoloji ve bilimin gelişmesi ile birlikte bu problemlere çözüm getiren makine gücünden yararlanarak yerinde veya kısmen yerinde üretilen

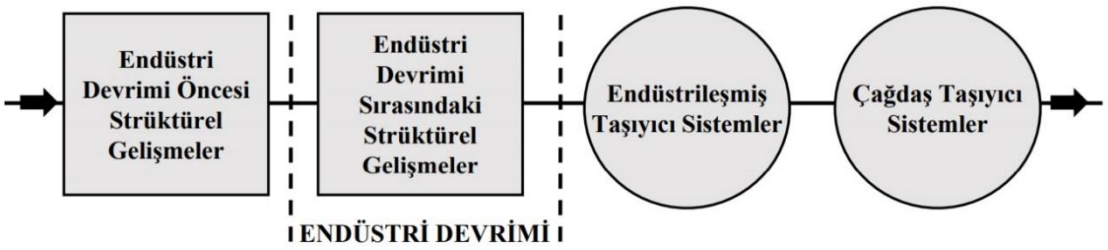
endüstrileşmiş taşıyıcı sistemler; kolon, kiriş, döşeme ve duvar gibi yapı elemanlarının inşaat alanında hızlı bir şekilde montajı sayesinde uygulanabilir hale gelmiştir (Oymael, 2015).

Çizelge 2.6. Oymael tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması (Oymael, 2015 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)

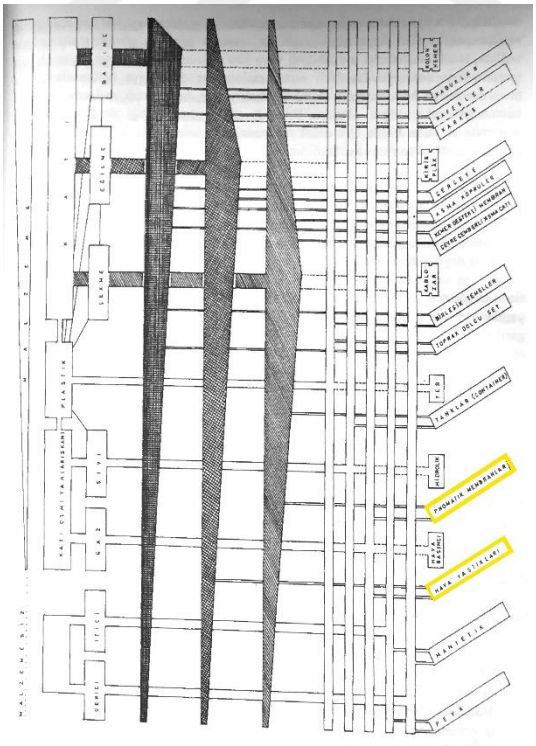


Say (1998), yapım sistemlerini üç temel döneme ayırarak incelemiştir. Çizelge 2.7'de gösterildiği üzere; taşıyıcı sistemler insanoğlunun varoluşundan Endüstri Devrimi'ne kadar olan süreç, Endüstri Devrimi sırasındaki yaşanan gelişmeler ve endüstrileşme ile beraber ortaya çıkan çağdaş yapım sistemleri olarak bölünmüştür. Tarihsel süreç içerisinde gelişen taşıyıcı sistemler başlıklar altında incelenmiştir. Taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılmasında endüstri devriminin büyük etkilerinin olması sonucunda çağdaş yapım sistemlerinin ortaya çıkması başlangıç noktası olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.7. Say tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması (Say, 1998 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)



Frei Otto (1970), taşıyıcı sistemleri kuvvet aktarımının temel elemanının madde ve dolayısıyla malzeme olmasının ışığında; malzeme türleri (kagir, ahşap, beton, çelik vb.) ve malzemelerin fiziksel özelliklerine göre katı, akışkan (sıvı, gaz) ve plastik (katı ile akışkan arası malzemeler) olmak üzere iki kıstas üzerinden sınıflandırmıştır (Şekil 2.4). Basınç, çekme ve eğilme kuvvetlerinin strüktürel açıdan birleşiminde malzemelerin yük altında verdiği tepkilere göre incelemiştir. Malzeme tanımlanması ve farklılaşması, gerilme kuvvetlerinin türü, strüktür sistemleri, taşıyıcı elemanlar, örnekler ve bu unsurların birbirleri ile ilişkileri grafiksel olarak Otto tarafından bir çizelge haline getirilmiştir. Bu sınıflandırmanın birçok olumlu yanı olmasına karşın bazı hususlarda eksik kalmaktadır. Örneğin her sistemin sadece basınç veya çekmeye çalışması, farklı malzemelerin bir arada kullanılması, malzemelerin iki farklı gruba da dahil olması gibi faktörler bu sınıflandırmanın yetersiz taraflarıdır. Taşıyıcı sistemlerin olanaklarını genel bakışta anlatabilen bu sınıflandırma yatay ve düşey kesişimler ile taşıyıcı sistemlerin malzeme, form ve strüktür elverişliliklerini göstermektedir. Bu sınıflandırma içerisinde pnömatik sistemler hava basıncı ile taşıyıcı hale gelen pnömatik membranlar ve hava yastıkları olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2.4. Frei Otto taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması (Türkçü, 2009,s. 41)

Engel' in (2013) sınıflandırmasına çağdaş yapım sistemleri kütle etken (bulk active) strüktür sistemleri, yüzey etken (surface aktive) strüktür sistemleri, biçim etken (form active) strüktür sistemleri, vektör aktif (vector active) strüktür sistemleri ve düşey (dikey) strüktür sistemleri olmak üzere beş ana başlıkta incelemiştir (Çizelge 2.8). Bu şekilde ayrılmasının nedeni taşıyıcı sistemlerin yükü aktarma biçimlerine göre incelenmesidir. Her grupta uygulanan strüktürler farklı yapı malzemeleri ile kurgulanabilir.

Çizelge 2.8. Engel tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması (Engel, 2013 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)

Kütle Etken (Bulk Active) Strüktür Sistemleri	**a) Yığma Sistemler** **b) İskelet (Karkas) Sistemler** • Betonarme Karkas Sistemler • Faklı Malzemelerden Oluşan Yüzeyli ve Düzlem Elemanlı Karkas Sistemler
Yüzey Etken (Surface Active) Strüktür Sistemleri	**a) Katlanmış Plaklar** **b) Kabuklar** • Tek Eğrilikli Kabuklar • Çift Eğrilikli Kabuklar - Eş Eğrilikli - Ters Eğrilikli - Kombinasyonlar - Serbest Formlar
Biçim Etken (Form Active) Strüktür Sistemleri	**a) Kablo Sistemler** **b) Çadır Sistemler** **c) Kemer Destekli Sistemler** **d) Pnömatik Sistemler** • Tek Cidarlı • Çift Cidarlı
Vektör Etken (Vector Active) Strüktür Sistemleri	**a) Ahşap Makaslar** **b) Düzlem ve Eğri Kafes Kirişler** **c) Betonarme Kafes Kirişler** **d) Düzlem Yüzeyli Uzay Kafes Sistemler** **e) Eğri Yüzeyli Uzay Kafes Sistemler**
Düşey (Dikey) Strüktür Sistemleri	**a) Düşey Taşıyıcı Elemanlar (Çekirdek)** **b) Yatay Taşıyıcı Elemanlar (Döşeme veya kat plakları)** • Çizgisel (Tekil elemanlar, Kirişler) • Düzlemsel (Döşeme ya da Tavan Plakları) • Hacimsel (Tam veya Kısmen Kapalı Hücreler)

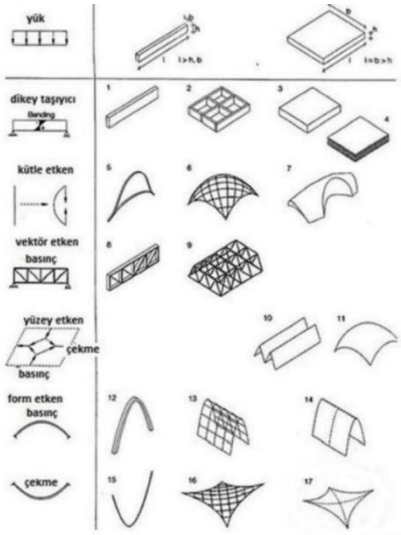
Kütle etken (bulk active) taşıyıcı sistemler, taşıyıcı sistem kurgusunda en önemli etkenin kütle olduğu strüktürlerdir. Daha çok basınç kuvvetlerinin hakim olduğu, kütlesel olarak ağır, bütüncül, masif, rijit ve malzemeyi verimsiz kullanan strüktürlerdir. Taşıyıcı sistemler arasında ağırlıklarına kıyasla en az yükü taşıyabilen sistemler olduklarından etkinlik düzeyleri düşüktür. Betonarme, taş, kagir ve ahşap gibi malzemeler kütle etken strüktürlerde kullanılabilmektedir.

Yüzey etken (surface active) taşıyıcı sistemler, taşıma ya da örtme amaçları ile kütle etken strüktürlere göre kalınlıkları daha az olarak basınç, çekme ve eğilme kuvvetlerinin bir arada bulunduğu yüzeylerin doğrusal veya eğrisel formlarda kurgulanması ile oluşmaktadır. Plastik-polimer esaslı malzemeler, metal levhalar ve betonarme gibi yapı malzemelerinin belirli bir formda üretilmesi ile oluşan kabuk benzeri yüzeylerin ana taşıyıcı olduğu sistemler yüzey etken strüktürlerde kullanılabilmektedir.

Biçim etken (form active) taşıyıcı sistemleri ise belirli yükler altındaki malzemenin kendiliğinden form alması ile oluşmaktadır, bu sayede biçim ana taşıyıcı husustur. Çekme kuvvetlerinin daha etkin olduğu bu strüktürler, yerçekimi ve yapısal yüklerin altında sarkma sonucu biçimlenmektedir. Membran veya kablolar gibi kullanılan malzemelerin çekme kuvvetleri etkisi altında dengelenmesi ile oluşturulan genellikle eğrisel geometrilerdeki strüktürlerdir. Membran yüzeyinin katı, sıvı veya gaz bir madde ile basınçlandırılarak dayanıklı hale geldiği pnömatik sistemler kazandıkları biçim sayesinde yapısal ve çevresel yükleri taşımaktadır. Bu nedenle pnömatik sistemlerinde dahil olduğu biçim etken strüktürler tek cidarlı ve çift cidarlı olarak iki ana grupta incelenmektedir.

Vektör aktif (vector active) taşıyıcı sistemler, yatay veya düşey yüklerin vektörel olarak sistem içerisinde aktarılarak taşımanın gerçekleştiği strüktürlerdir. Çubuk elemanlar, çubuk elemanları bir araya getiren düğüm noktaları ve mafsallar aracılığı ile oluşturulan uzaysal çubuk sistemleridir. Uzay kafes sistemlerde bazı elemanlar basınç kuvvetlerine, bazıları ise çekme kuvvetlerine çalışırlar. Ahşap makas sistemler, çelik uzay kafes sistemler düzlemsel veya eğrisel olarak bir araya gelen çubuk ve birleşim parçalarından oluşan strüktürlerdir. Düşey (dikey) taşıyıcı sistemler ise birbirleri üzerine sıralanarak bir araya gelen yatay elemanlar ile bu elemanları düşey doğrultuda taşıyarak bir araya getiren çekirdekten oluşan yüksek katlı strüktürlerdir.

Basel (2011), Engel'in çalışmasına benzer olarak yük aktarım prensibi ve kalınlıklara göre bir sınıflandırma yapmıştır. Dikey taşıyıcı sistemler, kütle etken sistemler, vektör etken sistemler, yüzey etken sistemler, basınç ve çekme kuvvetlerine göre ayrılan form etken sistemler olmak üzere altı grubu (Şekil 2.5) kendi içerisinde en, boy ve yükseklik oranlarına göre gruplandırmıştır.



Şekil 2.5. Basel tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması (Basel, 2011)

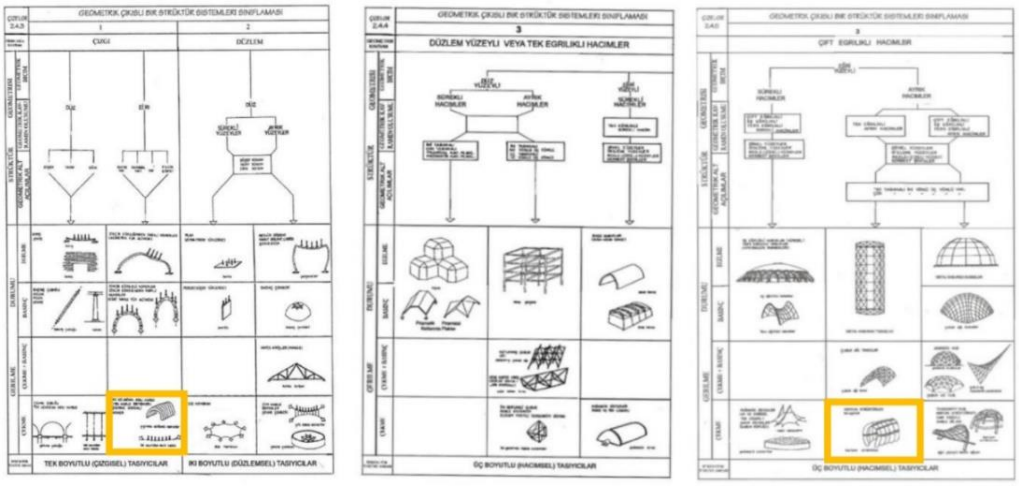
Türkçü, (2003) taşıyıcı sistemleri yığma sistemler, iskelet (karkas) sistemler ve yüzeysel taşıyıcı sistemler olmak üzere yük taşıyan elemanların birleşimlerine göre sınıflandırmıştır (Çizelge 2.9). Yığma sistemler; taş, tuğla ve kerpiç gibi kagir malzemelerin düşey ve yatay elemanlarda üst üste birleştirilmesi ile basınç kuvvetlerinin etkin olduğu sistemlerdir. Yığma sistemlerde her yapı elemanı yük taşıma görevindedir. Yüksek basınç dayanımı ve düşük çekme dayanımı nedeniyle taş gibi malzemeler yığma sistemlerde ilk başlarda daha dar açıklıklar, küçük hacimler ve kalın en kesitte yapı elemanlarına neden olmaktadır. Yunan ve Mısır gibi devirlerde yığma taş strüktürler daha kalın taşıyıcı elemanlar ile daha dar açıklıklar sunmaktadır. Daha sonraları kilise ve cami gibi farklı fonksiyonlardaki yapılarda ihtiyaçlara yönelik olarak taşın üst üste yığılırken geniş açıklıkları geçmesi için kemer, tonoz ve kubbe gibi yapı elemanları geliştirilerek yığma sistemlerin en ileri noktasına ulaşılmıştır. İskelet (karkas) sistemler; düşey ve yatay doğrultuda ana taşıyıcı elemanlarda oluşan iskelet sistem ve bölümlendirme amacıyla farklı malzemelerin kullanılabildiği dolgu elemanlarının birleşiminden oluşmaktadır. Mimaride yeni olan kolon, kiriş, plak, levha ve döşeme gibi yapısal taşıyıcı elemanlar betonarme, çelik ve ahşap taşıyıcılar ile hem basınç hem de çekme kuvvetlerine çalışan bu sistemi kurgulanabilir hale gelmiştir. Bu sayede çok katlı yapılar, daha geniş açıklıklar, yığma sistemlere göre daha az malzeme kullanımı, cam gibi malzemeler ile taşıyıcı olmayan yüzeylerin kaplanması ile daha şeffaf yapılar mimaride uygulanabilir hale

gelmiştir. Çevremizde gördüğümüz betonarme apartmanlar ve çelik uzay kafes sistemler bu sınıflandırmada iskelet (karkas) sistemler başlığı altındadır. Yüzeysel taşıyıcı sistemler ise yüklerin yüzeyler aracılığıyla daha çok çekme kuvvetlerinin etkin olduğu, katlanmış düz plak yüzeylerin ya da eğrisel geometrilerin bir araya getirildiği sistemlerdir.

Çizelge 2.9. Türkçü tarafından taşıyıcı sistemlerin sınıflandırması (Türkçü, 2003 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)



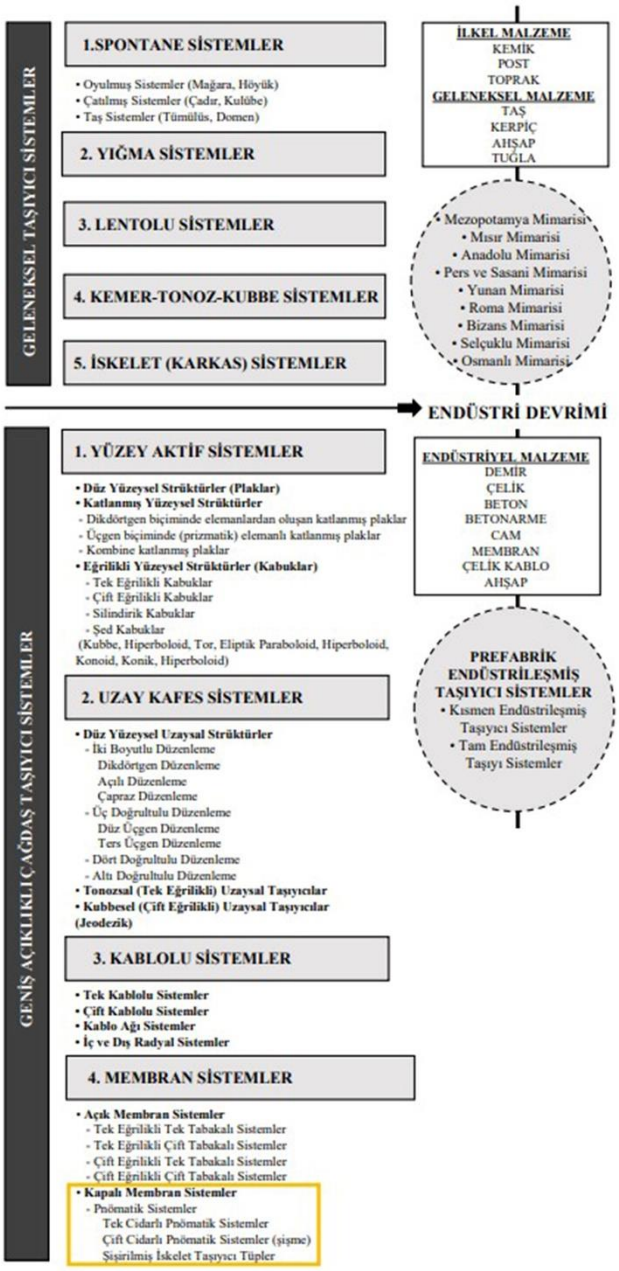
Yığma sistemler, iskelet (karkas) sistemler ve yüzeysel taşıyıcı sistemler olarak yapılan genel sınıflandırmadan yola çıkarak Türkçü'nün taşıyıcı sistemleri daha detaylı olarak incelediği bir sınıflandırma daha mevcuttur. Çizgi, düzlem ve hacim geometrilerine, gerilme durumunu oluşturan basınç ve çekme kuvvetlerine dayanan detaylı bir sınıflandırmadır (Şekil 2.6). Bu sınıflandırmada pnömatik sistemler gerilme kuvvetleri grubunda çizgisel ve çift eğrilikli olarak incelenmiştir.



Şekil 2.6. Türkçü tarafından taşıyıcı sistemlerin formlar ile birlikte sınıflandırması (Türkçü, 2003, s. 59-62)

Çağlar boyunca geliştirilerek günümüze dek gelen taşıyıcı sistemler, farklı ölçütlere göre sınıflandırılmaktadır. Çağdaş taşıyıcı sistemlerin de yer aldığı geçmişten günümüze çoğu taşıyıcı sistemi kapsayan bu sınıflandırmalar aynı zamanda strüktürler hakkında bilgi vermektedir. Bu sınıflandırmalardan yola çıkarak oluşturulan Çizelge 2.10 gösterilmiştir. Genellikle biçim, malzeme, kuvvet taşıma prensipleri veya zaman kavramına göre gruplara ayrılan strüktürlerin en güncel örnekleri çağdaş taşıyıcı sistemlerdir.

Çizelge 2.10. Geçmişten günümüze taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması



2.4. Geniş Açıklıklı Çağdaş Taşıyıcı Sistemler ve Sınıflandırılması

Çağdaş yapım sistemleri, Endüstri Devrimi sonucu gelişen yeni teknik ve teknolojik donanım ile birlikte 20. yüzyılda ortaya çıkmıştır. Çağdaş taşıyıcı sistemler strüktürel açıdan ise genellikle tarih öncesi devirlerde inşa edilen ilk taşıyıcıların yeni teknolojiler sayesinde yeniden kurgulanabilmesi sonucunda geliştirilmiştir. Türkçü (2003), insanların ilkel şekilde inşa ettikleri doğayı taklit eden ilk barınakların taşıyıcı sistem ilkeleri açısından günümüz anlamındaki strüktürlerle genellikle aynı prensiplere dayandığını belirtmektedir. Örneğin; yığma sistemler mağara ve piramitlerden, iskelet (karkas) sistemler ahşap kamış, dallar ve tomruklardan yapılan çatma kulübelerden, membran sistemler ise çadırlardan esinlenerek kurgulanmıştır. Dolayısıyla, geleneksel yapım yöntemleri incelendiğinde insanların içgüdüsel olarak ortaya koydukları taşıyıcı sistemlerden yola çıkarak çağdaş strüktürlerin temelleri atılmıştır.

Bir strüktürden beklenen fonksiyonel uygunluk, sağlamlık (denge, stabilite, dayanıklılık-mukavemet), ekonomiklik ve estetik gibi unsurların çağdaş taşıyıcı sistemler aracılığı ile yapılarda geliştirilmesi hedeflenmiştir. Yapı malzemesinin, bağlayıcı elemanların, uygulama sistemlerinin ve teknik ekipmanların gelişmesi çağdaş taşıyıcı sistemlerin uygulanabilir olmasını sağlamıştır. Geleneksel mimaride kullanılan doğadan toplanan malzemeler taş, ahşap, kerpiç kas gücü ile üretilip yapılarda denge prensiplerine göre uygulanırken; Endüstri Devrimi'nin etkileriyle betonarme, çelik, demir, plastik, alüminyum, öngerilmeli beton gibi ortaya çıkan yeni malzemeler makineler ile statik hedefler güdülerek yapılarda uygulanan sistemler haline gelmiştir (Erol, 1997).

Endüstri Devrimi ile birlikte teknolojik olanaklar ve toplumsal gereksinimler çağdaş yapım sistemlerinin gereken ihtiyaca çözüm olması amacıyla gelişmesine zemin hazırlamıştır. Çağdaş strüktürler; günümüze dek bilinen taşıyıcı sistemlerden detay, malzeme, statik durum, yük taşıma prensipleri açısından farklı olan ve daha büyük açıklıkları daha az malzeme ile ekonomik şekilde geçmeye çalışan sistemlerdir. Bu sistemlerin olanaklı olması toplumun sanayi etkisi ile mimaride imkanlarının artmasından ve bilgide uzmanlaşmadan kaynaklanmaktadır. Örneğin; bilgisayarların kullanımı ile bilgilerin işlenmesinin ve hesaplanmasının kolaylaşması, yeni yapı malzemelerinin

teknolojik açıdan daha çok miktarda ve seri üretimi (plastik-polimer esaslı membranlar, çelik kablo ve halatlar), yeni yapım fikirleri ve yöntemlerinin (membran malzemenin kabuklarda kullanılması, beton ve çeliğin bir arada kullanımı ile betonarmenin geliştirilmesi) mimaride kullanılması çağdaş taşıyıcı sistemlerin gelişmesine olanak tanımıştır. Basınçlandırılmış membran ile geliştirilen pnömatik sistemler ve çok doğrultulu uzay kafeslerin etkin bir biçimde hesaplanarak uygulanabilir olması ancak yaşanan teknolojik gelişmeler ışığında mümkün olabilmektedir. Aynı zamanda değişen yaşam standartları ile yeni ve farklı fonksiyondaki yapılar, nüfus artışı ile çok sayıda yeni konut ve yeni yapı türlerine ihtiyaçlar, hızlı kentleşme, daha büyük açıklıklar ve geniş hacimlere ihtiyaç duyulması da çağdaş strüktürlerin uygulanmasını zorunlu kılmıştır (Türkçü, 2003). Bu nedenle çağdaş taşıyıcı sistemler, daha az malzeme ile daha geniş hacimleri kolonsuz olarak geçmeyi hedefleyen ve ortaya çıkan yeni ihtiyaçlara yönelik teknolojik gelişmelerin ışığında uygulanan güncel sistemler haline gelmiştir.

Toplumsal ve teknolojik gelişmelerin yanı sıra Buckminster Fuller, Le Ricolais, Frei Otto gibi strüktür tasarımına odaklanan mimar ve tasarımcılar doğadaki unsurlardan etkilenerek analiz ile yeni sentez yöntemleri kullanarak çağdaş taşıyıcı sistemlerin gelişmesinde etkin rol oynamışlardır (Bayülgen, 1999). Aynı zamanda bilgisayar ve dijital yazılımlarında makineleşme ile gelişmesi mimaride daha karmaşık olan çağdaş strüktürlerin hesaplanmasında kolaylık sağlamıştır. Mimarların yeni fikirleri ve çabaları, dijital ve makine olanaklarıyla birleşerek yeni çağdaş strüktürlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır.

Çağdaş taşıyıcı sistemler, kendi içerisindeki gelişme süreci boyunca insan ve teknoloji ara kesitinde mimariye yansımıştır. Malzemenin geliştirilmesi, yeni malzemelerin bulunması, yeni malzemelerin daha uzun ömürlü ve seri üretilebilmesi, farklı strüktürlerin kurgulanması, yeni strüktürlerin geliştirilmesi, var olan taşıyıcı sistemin yeni imkanlar ile yeniden oluşturulması, yeni uygulama sistemlerinin ortaya çıkması gibi yaşanan gelişmeler ışığında çağdaş taşıyıcı sistemler kendi içerisinde de gelişerek farklılaşmıştır. Bu nedenle de birbirlerine göre farklı özellikler gösteren çağdaş taşıyıcı sistemler birçok mimar tarafından da belirli kıstaslara göre sınıflandırılarak incelenmiştir.

Geniş açıklıklı çağdaş taşıyıcı sistemler yapısal özellikleri, malzeme ve yük aktarım prensiplerine göre belirlenen nitelikler üzerinden çalışma kapsamında sınıflandırılarak incelenmiştir. Çalışma bağlamında incelenen farklı sınıflandırma yöntemlerinden yola çıkarak bu çalışma kapsamında çağdaş taşıyıcı sistemler dört ana başlık altında incelenecektir. Geniş açıklıklı çağdaş taşıyıcı sistemler yüzey aktif sistemler, uzay kafes sistemler, kablolu sistemler ve asma-germe sistemler olarak gruplandırılmıştır (Çizelge 2.11).

Çizelge 2.11. Geniş açıklıklı çağdaş taşıyıcı sistemler genel sınıflandırması



Yüzey aktif sistemler daha geniş açıklıkları daha ince en kesitteki çelik, betonarme ve ahşap ile geçen sistemlerdir. Bu malzemeler ile oluşturulan düz plakların paralel veya katlanarak birleştirilmesi ya da eğrisel olarak oluşturulan kabukların tek, çift veya daha fazla doğrultuda birleştirilmesiyle oluşturulan yüzeylerin taşıyıcı olarak çalıştığı sistemlerdir.

Uzay kafes sistemlerde ise çekme ve basınç kuvvetlerine çalışan ve farklı geometrilerde bir araya getirilebilen ahşap ve çelik çubuk elemanları ortaya çıkmıştır. Düz (iki-üç-dört-altı doğrultulu, üçgen-dörtgen-açılı), tek eğrilikli (tonozsal) ve çift eğrilikli (kubbesel) formlarda bir araya gelen çubuk elemanlardan oluşan uzay kafes sistemlerde birleşim detayları önem kazanmaya başlamaktadır. Daha sonraları Buckminster Fuller tarafında ortaya çıkan tensegrity sisteminin de temellerini uzay kafes sistemler oluşturmaktadır. Endüstrinin gelişmesi ve farklı malzemeleri ortaya çıkarması mimari açıdan da farklı etkilerin gelişmesine neden olmuştur.

Çelik kablo ve halatların sanayi ile ortaya çıkması ve köprülerde kullanılması yapılarda da taşıyıcı eleman olarak kullanılması fikrini doğurmuştur. Kablolu sistemler olarak bilinen, çelik kablo ve halatların taşıyıcı sistem içerisinde çekme kuvvetini karşılayan eleman olarak kullanılması sonucu tek-çift kablolu, kablo ağı veya iç dış kablolu radyal sistemleri kablo elemanlar ile oluşturan kablolu sistemler ortaya çıkmıştır. Kablolar aracılığı ile taşınan yapısal ve çevresel yükler zemine aktarılmaktadır. Kablo gibi ince elemanların kullanılması daha hafif strüktürlerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Kablolu sistemlerden yola çıkarak ve membran türevi malzemelerin endüstriyel olarak üretilebilir olması ile birlikte membran sistemler geliştirilmiştir. Kullanılan ip ve halat ile çekmeye çalışan, ahşap veya kemiklerden oluşan çubuk elemanlar ile basınca çalışan, postlar veya örtüler ile kapatılan yüzeylerden oluşan çadırlar günümüzün membran sistemlerine yapısal olarak ışık tutmaktadır. Dolayısı ile doğada hazır olarak bulunan malzemelerden yapılan çadırlar; insanoğlunun teknolojik, teknik ve mühendislik açılardan gelişerek farklı malzemeler ile uygulanabilen, toplumsal ihtiyaçlara cevap verebilen ve geniş açıklıklar geçebilen membran sistemlerin temellerini oluşturmaktadır. Plastik-polimer esaslı malzemelerin hammadde olarak kullanılıp işlenebilmesi ile birlikte örtü elemanı olan membran, çekme kuvvetlerine çalışarak mimari bir hacim ve dolayısıyla mekan oluşturmaktadır. Tek ve çift eğrilikli, tek ve çift tabakalı asma-germe ve tek ve çift cidarlı pnömatik sistemler olarak bir araya gelen membran yüzeyler daha az malzeme kullanan daha ince en kesitte olan tekrar ve kolay uygulanabilen bir taşıyıcı sistem olarak ortaya çıkmıştır.

Özetle çağdaş taşıyıcı sistemlerin gelişim aşamaları teknoloji ve malzeme sistemlerinin ilerlemesi ile paralel olarak gerçekleşmiştir. Ortaya çıkan ve bulunan yeni malzemelerin yapım yöntemlerindeki gelişmeler ile yapılara uygulanması sonucunda mimari strüktürler oluşmuştur. Çizelge 2.12'de görüldüğü üzere ortalama 1900'lü yıllarda ortaya çıkan çağdaş strüktürler; çelik, betonarme, çelik kablo ve halatlar ile membran malzemeler ile büyük açıklıkları geleneksel yapım sistemlerine göre çok ince en kesitteki yapı elemanları ile geçebilmektedir. Çağdaş strüktürlerde basınç kuvvetlerine göre çekme kuvvetleri daha aktif bir hale gelmiştir (Çizelge 2.12).

Çizelge 2.12. Geniş açıklıklı çağdaş taşıyıcı sistemlerin malzeme, taşıyıcı eleman, aktif kuvvet ve en ince kalınlık parametrelerine göre karşılaştırılması

	GENİŞ AÇIKLIKLI ÇAĞDAŞ TAŞIYICI SİSTEMLER			
	1. YÜZEY AKTİF SİSTEMLER	2. UZAY KAFES SİSTEMLER	3. KABLOLU SİSTEMLER	4. MEMBRAN SİSTEMLER
BAŞLANGIÇ TARİHİ	1920'li yıllar	1890'lı yıllar	1950'li yıllar	1950'li yıllar
MALZEME	• Çelik • Beton • Betonarme *(Uygulamada Ahşap veya Şişme Kalıplar)*	• Çelik (en yaygın) • *Alüminyum* • *Ahşap*	• Çelik Kablo ve Halatlar • *Betonarme, çelik vb. yüzeyler*	• Plastik-Polimer Esaslı Membran • *Çelik* • *Çelik Kablo ve Halatlar*
TAŞIYICI YAPI ELEMANLARI	Çelik donatılar ile desteklenmiş beton ile elde edilen betonarme yüzeyler	Çelik çubuklar ve çelik düğüm noktalarından elde edilen geometriler	Çelik kablo ve halatlar ile taşınan çizgisel elemanlar	Çelik dikme, kablo veya halatlar ile desteklenebilen ya da basınçlandırılmış membran yüzeyler
AKTİF KUVVET	Çekme ve Basınç Kuvvetleri	Çekme ve Basınç Kuvvetleri	Çekme Kuvvetleri	Çekme Kuvvetleri
EN İNCE KALINLIK	**6 cm** *(CNIT binası 6 cm betonarme kabuk ile 218 metre açıklık, 5 metre yükseklik)*	*Çelik çubuk profillerden oluşan kiriş kalınlılarına göre en kesit değişmektedir.*	*Kablo kalınlıkları aracılığı ile taşınan yüzeylerin kalınlıklarına göre en kesit değişmektedir.*	**0,5 cm** *(Mimari membran tekstil malzemenim en ince kalınlığı)*

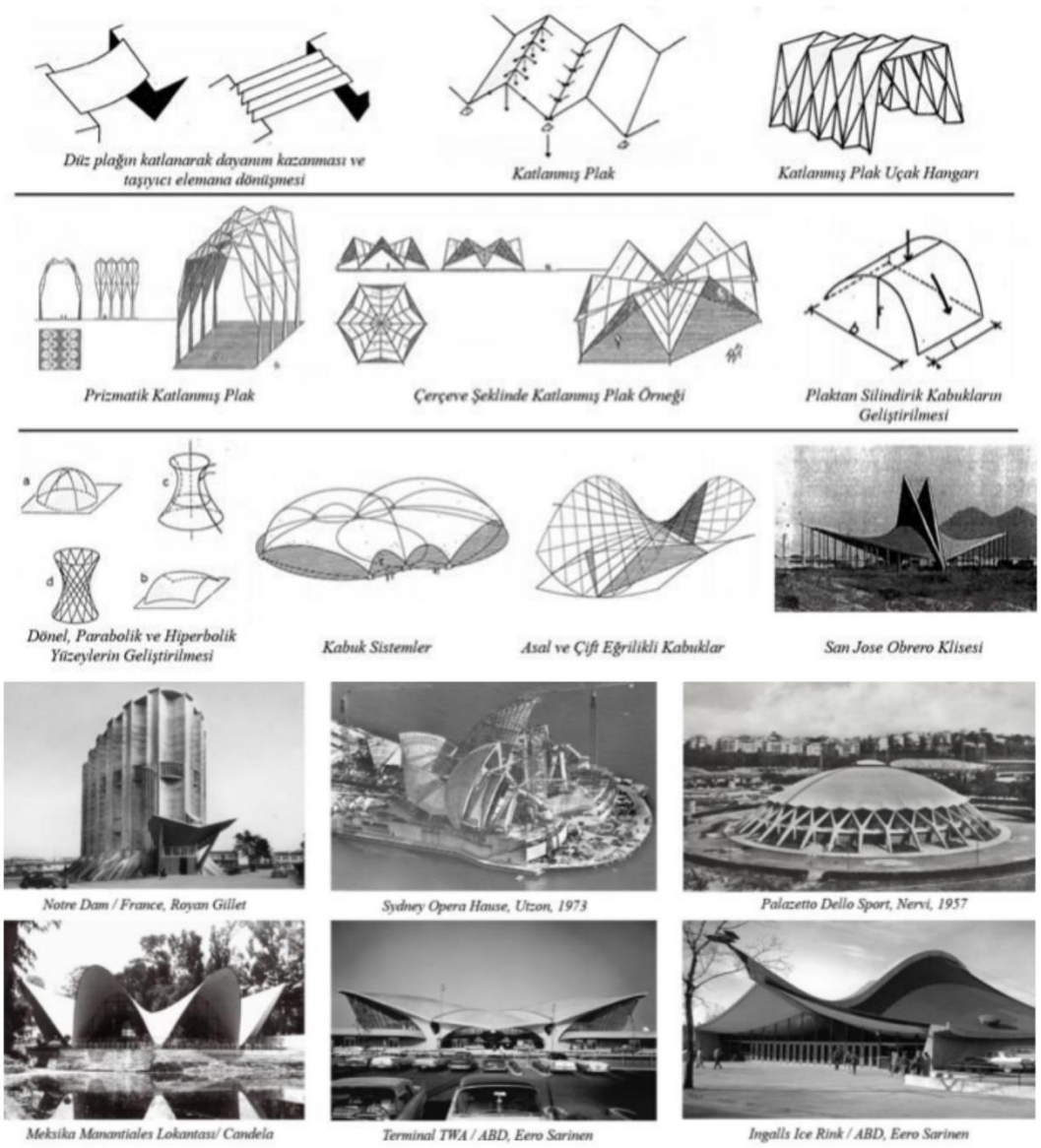
a) Yüzey Aktif Sistemler

20. yüzyılda bilimsel ve teknolojik gelişmeler ile beton çelik birleşiminden ortaya çıkan betonarmenin şekillendirilerek farklı yüzeysel formlar aracılığıyla yükleri taşıdığı strüktürlerdir. Yüzeylerin plak olarak düz halde katlanarak yapısal ve çevresel yüklere karşı daha dayanımlı hale getirildiği veya eğrisel olarak semer biçimli yüzeylerin kabuk formunda uygulandığı sistemlerdir. Bu sayede klasikleşmiş betonarme döşemelerden farklılaşan yeni plaklar daha az malzeme ile daha geniş açıklıkları kolonsuz olarak geçebilir hale gelmiştir. Yüzey aktif sistemler, plak ve kabuklardan oluşan bütüncül form aracılığı ile taşıyıcı sistemin kurgulandığı strüktürlerdir. Dolayısıyla taşıyıcı olan her yapı elemanı doğrudan tüm mimari strüktürün formunu belirlemektedir.

Demirdeki karbon sayısının azaltılmasıyla elde edilen çelik ile betonun bir araya gelmesi ile ortaya çıkan betonarme, yüzey aktif sistemlerde kullanılarak ince en kesitteki plak ve kabuklarda kullanılmıştır. Çelik, alüminyum ve ahşapta yüzey aktif sistemlerde

betonarme ile birlikte kullanılan başlıca malzemelerdir (Say, 1998). Düz yüzeylerin farklı doğrultularda katlanarak dayanım kazandığı plaklar; silindirik, tek-çift eğrilikli, şed, dönel yüzeyli, hiperboloid ve konoid kabuklar olarak birleştiği çeşitli geometrik strüktürler ile yüzey aktif sistemleri oluşturmaktadır (Çizelge 2.13). Bu yüzeyler rijit bir biçimde geniş açıklıkları ince en kesitli malzemeler ile geçebilmektedir.

Çizelge 2.13. Yüzey aktif taşıyıcı sistemler (Engel, 2013 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır) ve örnek yapılar (URL 86, URL 87, URL 88, URL 89, URL 90, URL 91)



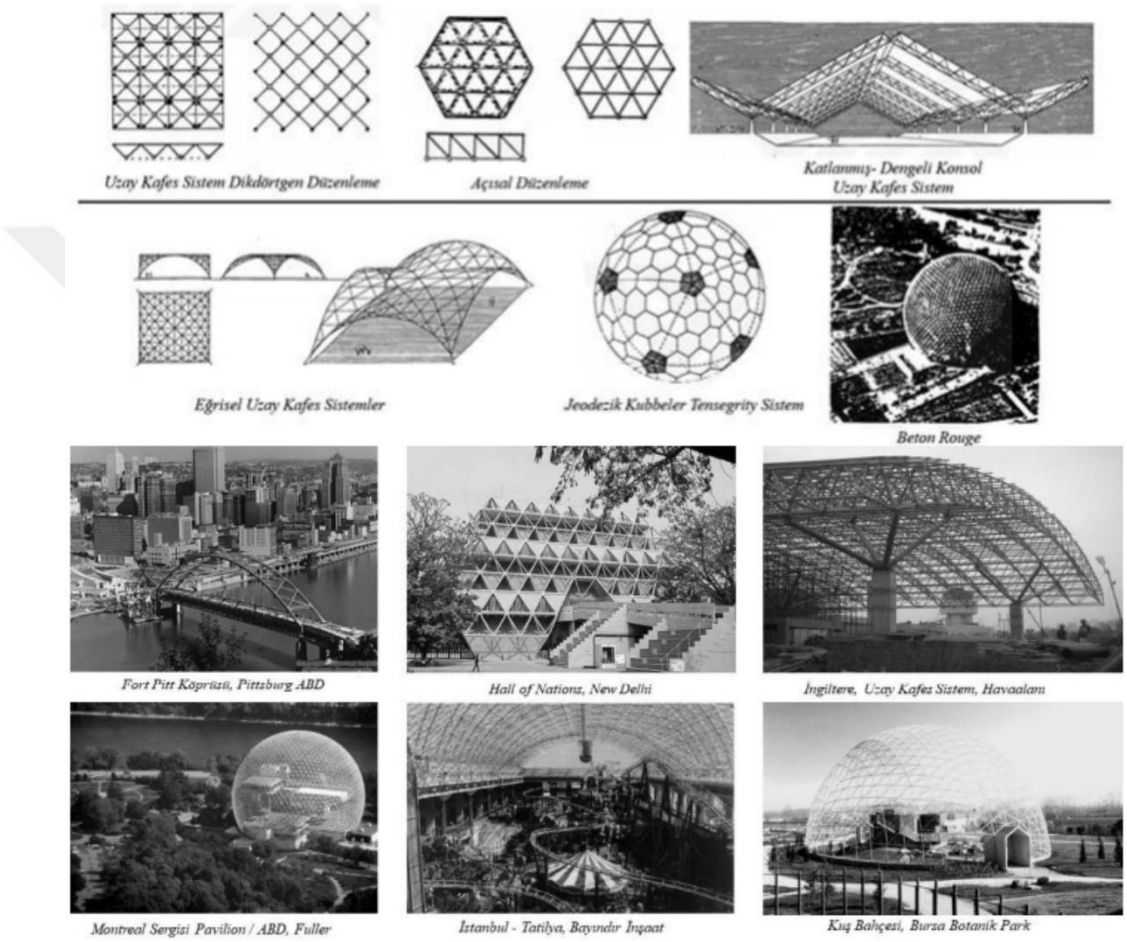
b) Uzay Kafes Sistemler

Uzay kafes sistemler, demir ve çelik yapılarının Endüstri Devrimi ile yaygınlaşması ve teknik gelişmeler sonucunda çeliğin işlenebilmesi sayesinde 18. ve 19. yüzyıllarda ortaya çıkmıştır. Demir yolları, köprü, kule gibi yapılarda sanayi toplumlarında yaygın kullanılan demir, karbon sayısının azalması ve işlenmesiyle çeliğin gelişmesini sağlamıştır. Aynı zamanda sanayileşme ve seri üretim ile çelikten farklı ürünlerin elde edilmesi mimarlıkta çeliğin taşıyıcı bir yapı elemanı olarak kullanılmasına olanak tanımıştır. Çelik çubuk ve birleşim elemanlarının üç boyutlu olarak bir araya getirildiği ilk mimari taşıyıcı sistem uzay kafes sistemlerdir. Hasol (1999), uzay kafes sistemleri "Çok geniş açıklıkları örtmek üzere yapılan, bütün elemanları birbirlerine bağlı olup, her doğrultuda bir bütün halinde çalışan üç boyutlu kafes" olarak tanımlamıştır.

Basınç ve çekme kuvvetlerine çalışan birbirlerine özel detaylandırılmış düğüm noktaları ile bağlanarak etkisi altında oldukları yükleri iki doğrultuda mesnetlere aktaran üç boyutlu taşıyıcı çubuklar sistemine uzay kafes sistemler denir. Altı çubuk eleman ve dört düğüm noktasından oluşan geometri (tetrahedron) uzay kafes sistemlerin birim elemanıdır ve yeni çubuk elemanlar eklenerek kolay bir biçimde büyütülebilmektedir (Özşen, Yamantürk, 1991). Çekme ve basınç kuvvetlerini tüm parçalarıyla birlikte karşıladığı uzay kafes sistemler bir bütün halinde çalışmaktadır. Çok sayıda çubuk ve birleşim parçasından oluşmasından ve her elemanın yük aktarımına katılmasından dolayı mafsallı düğüm noktaları özel olarak detaylandırılmaktadır. Parçalardan oluşması sayesinde prefabrik olarak yerinde üretilebilmesi, sökülüp tekrar kurulabilmesi, geleneksel taşıyıcı sistemlere göre daha hafif olması ve daha geniş açıklıkların ekonomik olarak geçilebilmesi gibi imkanlar sunmaktadır. Sağladığı olumlu yönler sayesinde günümüzde halen yaygın olarak kullanılan strüktürlerdir. Alışveriş merkezi, sanayi yapıları, dini yapılar, stadyum ve spor yapıları gibi farklı fonksiyondaki geniş hacimlerde fazladan düşey taşıyıcı eleman olmadan uygulanabilen taşıyıcı sistemlerdir. Uzay kafes sistemlerde yaygın olarak kullanılan çelik, yangın dayanımının zayıf olması nedeniyle kompozit malzemeler ile desteklenerek, galvenize edilerek veya moleküler olarak güçlendirilerek günümüz yapılarında kullanılmaktadır. Çamlıbel (1982) belirttiği üzere uzay kafes sistemlerde yaygın olarak kullanılan malzeme çeliktir. Ancak çelik yerine

nokta detaylar içeren ahşapta kullanılabilir olmasına karşın büyük kuvvetler aktarılamayacağından dolayı geniş açıklıklı uzay kafes taşıyıcılar için ahşap uygun bir yapı malzemesi değildir.

Çizelge 2.14. Uzay kafes taşıyıcı sistemler (Engel, 2013 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır) ve örnek yapılar (URL 92, URL 93, URL 94, URL 95, URL 96, URL 97)



Uzay kafes sistemler, birçok farklı yapı elemanının bir araya geldiği bütünsel bir kuvvet dengesindedir. Çubuk, mesnet, düğüm noktası, temeller, örtü ve yardımcı elemanların değişik form ile kombinasyonda birleşmesi uzay kafes sistemin oluşumunun temelidir. Mero, oktaplatte, sdc, space deck, triodetic, moduspan, unistrut vb. adlandırılan düğüm noktası ve modül tasarımları mevcuttur. Üç boyutlu olarak çubuk elemanlarının üçgen piramit, kübik, dörtyüzlü, altıgen, sekizyüzlü geometrilerde kurgulanmasını sağlamaktadır. Birleşim detayı ve mesnet noktalarındaki düğüm elemanlarının sayesinde

düz, katlanmış plak, eğrisel tonoz ve kubbe formlarında uzay kafes sistemler uygulanabilmektedir (Vural, 2000). Farklı doğrultular ve sayılarda birleşimlerinden ortaya çıkan geometrilere göre uzay kafes sistemler sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.14). Düzlemsel olarak üç boyutlu plaklar, daha sonraları eğrisel kafes sistemler, tonoz ve kubbelere kadar gelişmiştir. Buckminster Fuller, en güncel uzay kafes sistemi olan jeodezik kubbeleri ve "tensegrity" kavramını çubuk, kablo ve birleşim elemanları ile en hafif şekilde oluşturmuştur.

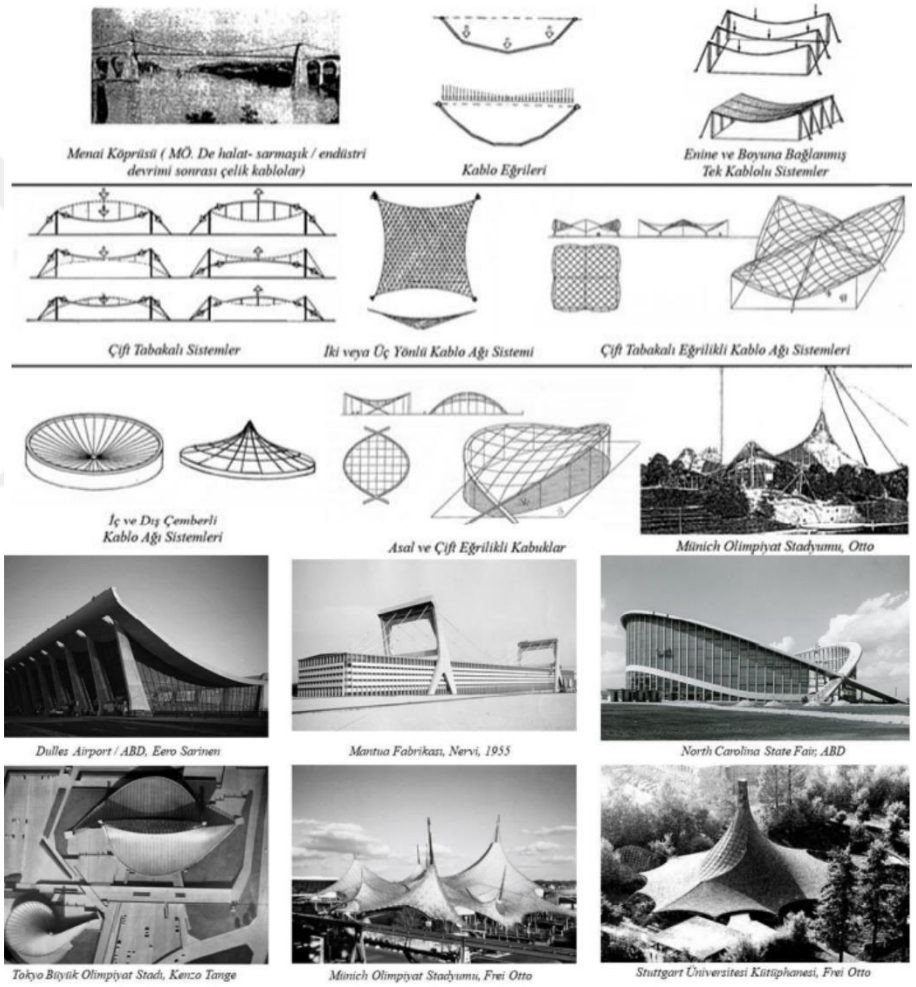
c) Kablolu Sistemler

Tarihsel süreç içerisinde kablolu sistemler mimaride ilk defa köprülerde uygulanmıştır. Geleneksel yığma kemerli taş köprülerden yola çıkarak Endüsti Devrimi ile birlikte demirden çeliğin, çelikten de kablo ve halatların elde edilmesiyle kablolu strüktürler uygulanabilir hale gelmiştir. Daha ince en kesitlerde, az malzeme ile geniş açıklıklar kablolar aracılığıyla geçilebilmektedir. Menai Köprüsü kabloların kullanıldığı Galler'de Thomas Telford tarafından tasarlanarak uygulanan, 176 m açıklık ile ilk ve önemli kablolu asma köprü yapılarındandır. İstanbul boğaz köprüsü ise ülkemizdeki ilk örnekleri görülen kablolu sistem örneklerindendir. Büyük açıklıklı ve kolon gerektirmeyen bütüncül mekanlar için farklı fonksiyonlardaki yapılarda kabloların kullanıldığı çok sayıda yapı uygulaması mevcuttur. Ülkemizde de kullanımı yaygınlaşan bu sistemler geleneksel yapım sistemlerine göre mimarlara daha fazla olanak sağlamaktadır. Taş, ahşap, betonarme gibi malzemeler kullanılarak inşa edilen geleneksel yapım yöntemlerinde rüzgar, kar, deprem, yağmur gibi dış yükler, düşey-yatay taşıyıcı elemanların ölü yükleri ve mesnet noktalarında yaşanan yapısal sorunlardan dolayı kısa açıklıkların geçildiği, geniş olmayan iç mekana sahip yapılar ortaya çıkmaktadır.

Kablolu sistemler, yükün kablolar aracılığıyla taşındığı sadece çekme kuvvetlerinin ankraj noktalarındaki çekme elemanları aracılığıyla zemine aktarımının sağlandığı strüktürlerdir. Kablolu strüktürler; hafiflik, burkulma sorununun olmaması, esnek ve bükülebilir dayanıklı kablolar ile farklı form ve geniş açıklıklarda uygulanabilir olmaları açısından avantaja sahiptir. Kablolu taşıyıcı sistemler; kablo, asılma noktaları, düğüm noktaları, kenar elemanları, destek elemanları, ankrajlar, kabloların bitişleri ve ağ gözleri

gibi taşıyıcı yapı elemanlarından oluşmaktadır (Türkçü, 1997). Kablolu strüktürler; kabloların tek veya çift kablo birleşimleri, kablo ağı kurguları, iç ve dış çemberli (radyal) kablo ağları; sistemin temel elemanı olan çelik kabloların form kazanmasına göre sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.15).

Çizelge 2.15. Kablolu taşıyıcı sistemler (Engel, 2013 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır) ve örnek yapılar (URL 98, URL 99, URL 100, URL 101, URL 102, URL 103)



Basınç ve çekme kuvvetlerine çalışan geleneksel sistemlere ve uzay kafes sistemlere aksi olarak gerçekleştirilen, kablolar ile çeliğin burkulma sorununu ve kiriş kalınlıklarını çözerek çekme kuvvetlerine çalışan bu yeni sistemler, farklı fonksiyonlardaki büyük açıklıklar geçilen yapılarda serbest iç mekan düzeninin kurgulanabilir olmasına imkan

sağlamıştır. Yapısal yükler ile dış yükler; mesnet noktalarının, taşıyıcı elemanların ve temellerin büyüyerek kalınlaşmasına dolayısıyla da yapı elemanlarının daha kalın en kesitte olmasına neden olmaktadır. Ancak çelik kabloların kullanılması ile birlikte yapılar; ince en kesite sahip yapı elemanlarından oluşan, hafif, daha az malzeme kullanan dolayısıyla ekonomik, çeliğin burkulma problemlerine çözüm sağlayan ve geniş açıklıkları kolonsuz şekilde geçebilen bir hale gelmiştir. Bu avantajlara ek olarak rijitlik problemleri, asimetrik yükler karşısında yapının tepki yükler oluşturarak yer değiştirmesi, kalifiye elemanlar ile bu işte uzmanlaşmış kişiler tarafından inşa edilebilir olması ve ankrajının bazı durumlarda zor olması gibi dezavantajlara da sahiptir (Günsoy, Kendik, Anıl, 1979).

d) Asma-Germe Sistemler

Endüstri devrimi sonucunda geliştirilen çelik kablo ve halatlar çekme kuvvetlerini karşılamak amacıyla mimaride ilk olarak köprülerde kullanılmıştır. Daha sonra farklı yapılarda da uygulanabilen kablolu sistemler plastik ve polimer esaslı malzemelerin mimaride kullanılmaya başlanması ile membran sistemleri doğurmuştur. Örtü malzemesi olan plastik ve polimer esaslı malzemenin yüzeysel olarak kablolar gibi çekme kuvvetlerine çalışması prensibi ile asma-germe sistemlerde taşıyıcı elemanlar kurgulanmaktadır. Kablolar çizgisel olarak yükleri aktarırken membran yüzeysel olarak yük aktarımını gerçekleştirse de ana prensipte benzer bir çalışma sistemi bulunmaktadır. Bu nedenle kablolu sistemler asma-germe bir alt başlığı ile membran sistemlerin temelini oluşturmaktadır.

Pnömatik sistemlerinde içinde yer aldığı membran sistemler, eski çağlardaki çadırların yeni malzeme ve yapım teknikleri ile uygulanmış halidir. Sarmaşık, halat, örme ip, hasır örgü, deri, post ve bambu gibi doğada bulunan malzemeler ile milattan önce devirlerde görülen ilk çadırlar barınak olarak kullanılmaktadır. İlk çadırlardan esinlenerek geliştirilen yeni membran taşıyıcı sistemler ise strüktürel kurgu açısından ilk çadır örneklerinden çok farklı bir sisteme sahip değildir. Endüstri Devrimi ile gelişen teknik ve teknoloji ile birlikte plastik-polimer esaslı malzemelerin mimaride günümüz anlamında yapılarda kullanılması 20. yüzyıla kadar dayanmaktadır.

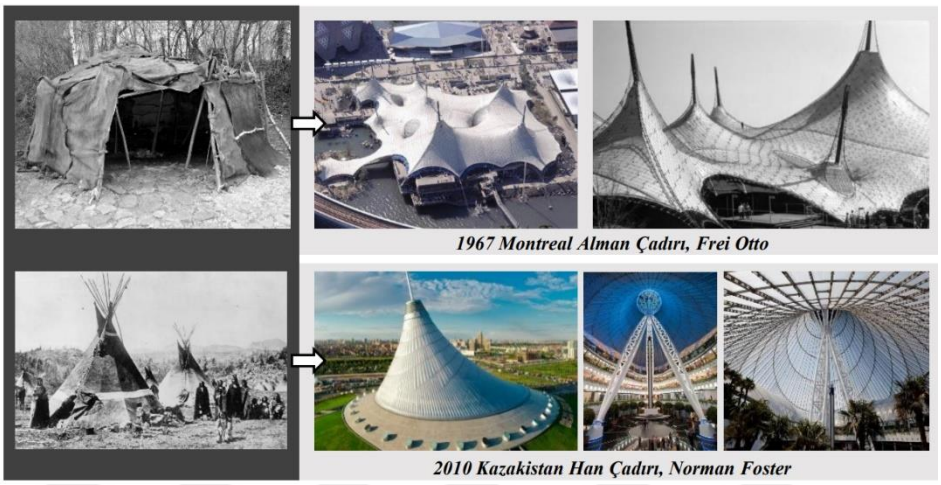
Teknolojik gelişmeler sonucunda membran malzeme; yapılarda taşıyıcı, örtü elemanı ve çekme kuvvetlerine çalışan esnek bir yüzey olarak mimari yapılarda kullanılabilir hale gelmiştir. Ağır yapılar yerine hafif membran malzeme, daha büyük açıklıkları ihtiyaçlara yönelik olarak geçebilmektedir. Bu da yeni malzemelerin geliştirilmesi ve üretilebilmesi sonucunda olmaktadır (Schmitz, 1995). Bu sistemlerde kullanılan ana malzeme olan esnek membran, birçok farklı formda üretilebilir. Membran malzemenin yapısal özellikleri sayesinde, geleneksel strüktürler ile geçilemeyecek büyük açıklıklar en ince en kesitte örtülebilir hale gelmektedir.

Plastik veya dokuma örtüler ve kablolar kullanılarak oluşturulan ağırlığı az, sadece çekme kuvvetlerine çalışan membran strüktürler, germe kuvvetinin etkisi ile taşıyıcılık özelliği kazanmaktadır (Dansık, 1999). Her sistemin olumlu ve olumsuz yönleri olduğu gibi membran sistemler de kayma ve eğilme etkilerine, rüzgar gibi değişken yanal yüklere karşı dayanıksızlardır. Bu nedenle ön gerilmeli olarak, dikey taşıyıcı elemanlar ile desteklenerek ya da kablolar ile güçlendirilerek kullanılabilmektedir. Taşıyıcı düşey elemanların membran örtünün içinde, dışında veya iç ve dışta beraber bulunduğu yüksek noktalı, dalgalı ve çukur yüzeyli olarak membran örtüler biçimlenmektedir.

İnsanlık tarihinde ortaya çıkan ve günümüzde halen bazı göçebe kavimlerin kullanmaya devam ettiği çadırlar ile 1967 Montreal Dünya Fuarı Almanya Pavyonu'nun membran sistemi arasındaki ana ilkeler benzer özelliktedir. Çekmeye çalışan gerilime sahip yüzeyde hayvan postu yerine membran, yüzeyi geren ve basınç kuvvetini zemine aktaran dikmeler ile pilonlar, tüm kuvvetlerin zemine aktarımını sağlayan ve yüzeyin zemin ile bağlantısını kuran ankraj elemanları ile kamalar fonksiyon olarak aynı prensipte çalışmaktadır. Bu sayede ilk çadırların günümüz anlamında asma-germe bir alt başlığı ile membran sistemlerin temelini oluşturduğunu söylemek mümkündür. Ancak günümüzde gelişen bilgi birikimi, teknik, teknolojik donanımlar ile membran sistemler ek taşıyıcıya gereksinim duymayan, mekanı bölmeyen ve geniş açıklıklar geçebilen bir hale gelmiştir. Çevresel koşullar açısından yüklere daha dayanıklı hale getirilmişlerdir. Uzun ömürlü malzemeler sayesinde yeni üretim, yapım ve uygulama yöntemleri uygulanarak daha avantajlı özellikler kazanmıştır (Türkçü, 2003). Günümüzde dayanım kazanarak membran sistemler Alman Pavyonu örneğinde görüldüğü gibi geçmişteki formlardan

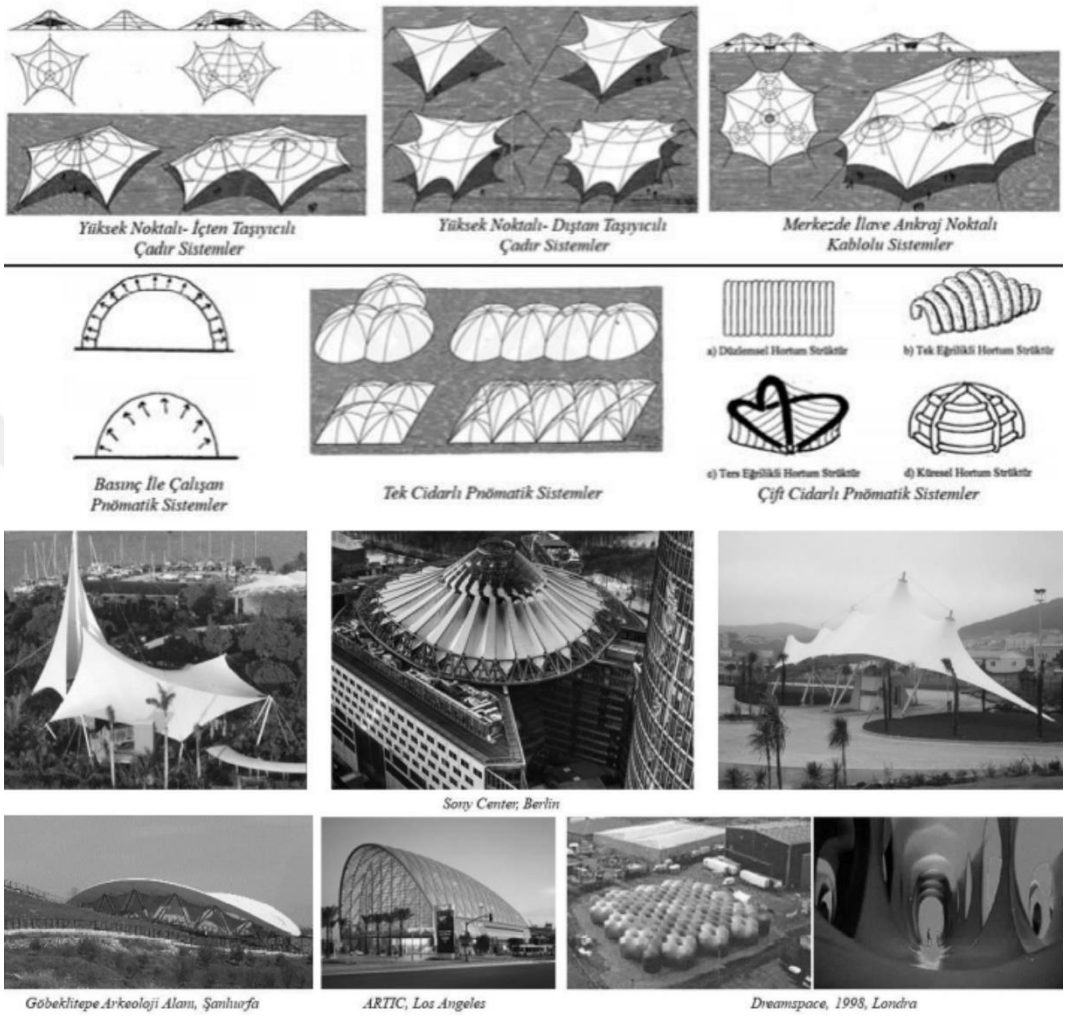
esinlenilerek uygulanmaktadır. Tek taşıyıcılı ilkel çadırlardan ilham alarak günümüzde alışveriş merkezi fonksiyonunda kullanılan Han Çadır'ı örneği de verilebilmektedir (Çizelge 2.16).

Çizelge 2.16. Tarihteki çadırlardan gelişerek günümüzde uygulanan membran sistemlere benzerliği Alman Çadırı Pavonu ve Han Çadırı örnekleri (URL 104, URL 105, URL 106, URL 107,URL 108)



Membran yüzey malzeme olarak tek başına değil dikme (pilon ve kolon), kemer, kablo ağları (çekme ve basınç çemberleri) ve çerçeve gibi destekleyici taşıyıcı elemanlar yardımıyla taşıyıcı özellik kazanmaktadır. Asılma noktaları, düğüm noktaları, ankraj noktaları, kenar elemanları, destek elemanları, ağ gözleri ve kablolar; taşıyıcı elemanlar ile desteklenmiş membran malzemenin birleşim yerlerindeki detayları oluşturan yapı elemanlarıdır (Özat, 2014). Bu nedenle membran strüktürler; çelik gibi malzemelerden oluşan destek elemanlar, destek elemanların yerine özgü olarak tasarlanması, özel birleşim detaylandırmaları, konu hakkında teknik bilgi sahibi olan kişiler tarafından kurulma gibi ihtiyaçlara sahiptir. Bu olumsuz özelliklerin aksine kolay kurulum ve üretim, az malzeme kullanımı, nakliye ücretlerinin az olması, hafiflik, kurulup sökülerek tekrar kullanılabilme, büyük hacimleri örtebilme, mevcut olan yapılara büyük zarar vermeden ek olarak kurgulanabilmesi gibi olumlu yönlere sahiptir. Bu nedenle membran sistemler dünyada yaygın olarak kullanılan strüktürlerdir. Membran sistemler çok çeşitli formlarda uygulanabilmesi sayesinde açık veya kapalı membranlar olarak örtü, taşıyıcı yapı, cephe kaplama elemanı olarak kullanılabilmektedir (Çizelge 2.17).

Çizelge 2.17. Membran sistemler (Engel, 2013 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır) ve örnek yapılar (URL 109, URL 110, URL 111, URL 112, URL 113; Şenkal Sezer, 2022)



2.5. Membran Sistemlerin Tarihçesi ve Sınıflandırılması

Sarmaşık, asma ya da örme ipler ve halatlar gibi doğal malzemelerle farklı coğrafyalarda aynı zaman diliminde çadır formlarının uygulanması, tarih öncesi devirlerde ortaya çıkan insanoğlunun barınmak için kullandığı en ilkel ve eski strüktürlerdir. Paleolitik döneme MÖ. 10 000'e kadar uzanan ilkel çadırlar, destek elemanları olan ahşaplar ve üzerini örten hayvan derisi, hayvan kıl örgüsü, hasır gibi yüzeysel elemanlardan oluşmaktadır (Gezer, 2009). Kolay taşınıp tekrar kurulabilmesinden dolayı göçebe toplumlar tarafından sıklıkla kullanılan çadırlar; bulunulan coğrafya, iklim, toplum vb. özelliklere göre farklı form,

malzeme ve planda uygulanmıştır. Günümüzde halen bazı topluluklar tarafından kullanılan çadırlar; geçmişte Asya, Afgan, Amerikan, Mısır, Anadolu toplumlarında sıklıkla barınma amacıyla kullanılmıştır. İlk zamanlarda uzun süreler boyunca barınma amacı ile kullanılan çadırlar daha sonraları askeri, eğlence ve toplanma yapılarında kullanılır hale gelmiştir.

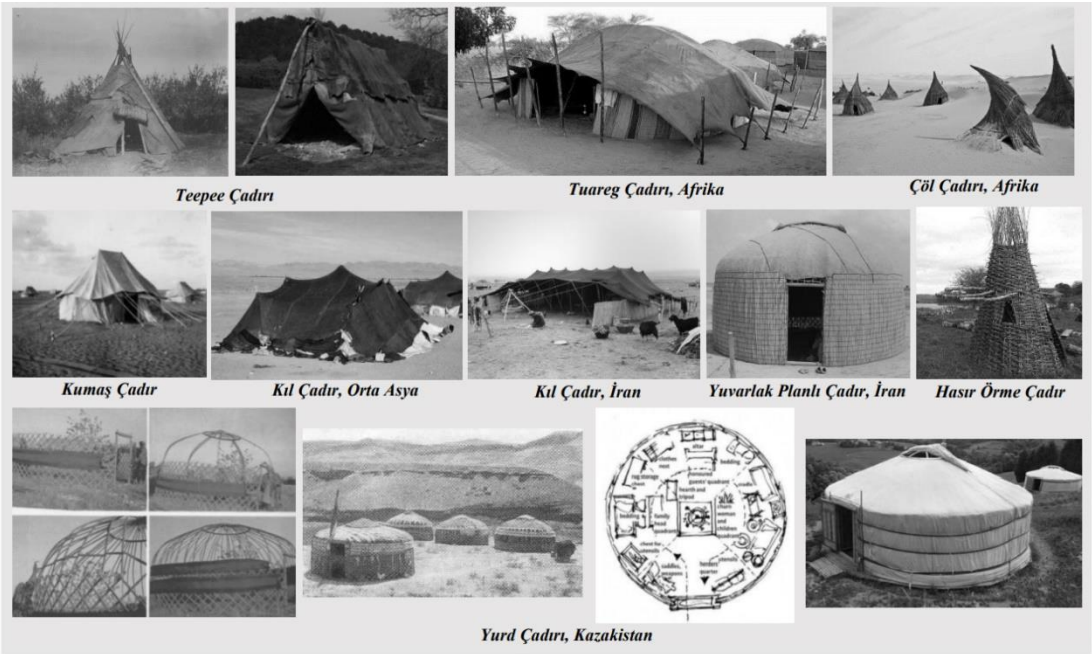
Roma döneminde gemilerin yelkenlerinden esinlenerek yapılan, kolezyum, arena ve tiyatroların üzerine gerilmiş halatlar ve bezlerle örten sistemler, asma-germe (membran) sistemlerin kurgusal olarak benzediği geçmişte kullanılan ilk strüktürlerdir. Aynı zamanda dünyanın farklı yerlerinde ılıman iklimli bölgelerde de benzer sistemlerin sokakların üzerlerinde örtü olarak kullanıldığı bilinmektedir (Özat, 2014). Roma döneminde görülen örneklere ek olarak Osmanlı savaş gemilerinde yer alan yelken ve örtülerin kullanımı mimaride kumaş benzeri yüzeysel ürünlerin yapı elemanı olarak uygulanmasına esin kaynağı olmuştur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Tarihi süreçte yelkenli gemilerden esinlenerek yapılarda kumaşların kullanımı, Roma kolezyum örneği (URL 114, URL 115)

Çadır, tarih öncesi devirlerde yerleşik hayata henüz geçmemiş olan kavimlerde kurulup sökülebilecek, kolay taşınabilen ve farklı boy-biçimde gereksinimlere göre oluşturulan meskenlerdir. Çadırlar tarih boyunca coğrafya ve topluluklara göre taşıyıcı sistem, malzeme, form ve fonksiyon açısından farklı özellikler göstererek inşa edilmiştir. Mezopotamya'da uzun kamışları eğerek kemer formlu; yukarı kutup bölgelerinde deri, ağaç kabukları ve uzun sırıklar ile koni şekilli; Arap toplumlarında dikdörtgen kazıklar ve yün kumaşlar; Afrika'da hasır örgüler ile yarım daire formlu; Kazak ve Kırgızlarda

Orta Asya'da kubbeli ve yuvarlak formlu örneklerinde görüldüğü üzere çadır çok yönlü olarak kullanılabilmektedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Tarihi süreçte ilkel çadırların ortaya çıkışı ve farklı coğrafyalardaki örnekleri (URL 116, URL 117, URL 118, URL 119, URL 120, URL 121, URL 122, URL 123, URL 124, URL 125, URL 126; Gezer, 2009)

Osmanlı döneminde kullanılan çadırlar, konar-göçer bir hayat süren Türklerden kalma oluşumlardan otağı adı verilen çadırlara kadar uzanmaktadır. Basit bir sisteme sahip, çatılarak oluşturulan ve doğada bulunan malzemelerden meydana gelen ilk Türk basit kara çadırları tarihsel süreç içerisinde Osmanlı döneminde farklı form ve fonksiyonda kullanılarak süslü bir sanata dönüşen otağlara kadar erişmiştir (Onuk, 2005).

Barınma amacıyla kullanılan otağı, Osmanlı döneminde savaşlarda kullanılması ve sefer dönüşlerinde yerinde bırakılması sonucunda ise 18. yüzyılda Avrupa'da çadırların yaygınlaşmasına sebep olmuştur (Gezer, 2009). Bu sayede yaygın kullanıma ulaşan çadırlar zaman içerisinde nüfus artışına paralel olarak gelişme göstermiştir. Ortaya çıkan yeni ihtiyaçlara yönelik çadır sistemler, geniş açıklıklarda ve toplanma-eğlence fonksiyonlu yapılarda kullanılmaya başlanmıştır.

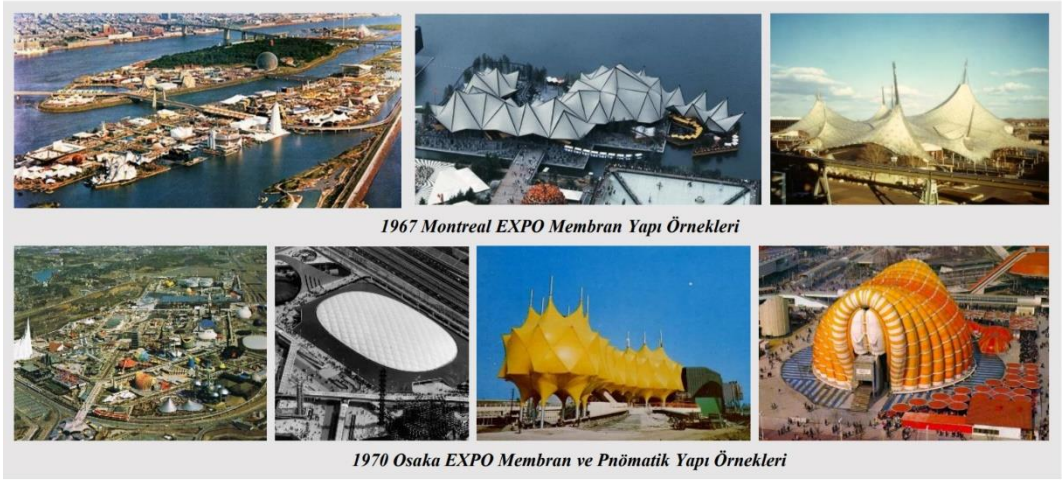
Çadırların günümüz anlamda daha yaygın kullanımı ise 19. yüzyılda sirk, eğlence binaları ve sergilerde ortaya çıkmaktadır. Endüstri Devrimi'nin etkileri teknik, teknolojik ve bilimsel gelişmeler ile birlikte membran malzemesinin yeni özellikler kazanarak dayanımlı hale gelmesini sağlamıştır. Güçlenen malzeme ve gelişen sistemler ile membran malzemenin üretiminin artması, çağdaş strüktürlerde uygulanmaya daha elverişli hale gelmesi ve yaygın kullanımını sağlamıştır. Böylelikle nüfus artışı sonucunda ortaya çıkan geniş açıklıklı ve büyük hacimli mekanlara ihtiyaç duyulması membran strüktürlerin gelişmesinin temellerini oluşturmaktadır. İlk çadır yapıları kumaştan üzeri örtülen gösteri ve sirk merkezleridir (Şekil 2.9).



Barnum Gösteri Çadırı, 1870, ABD *Müzik Sirki, 1949, ABD*

Şekil 2.9. Kumaş çadır sistemlerin toplanma amacıyla gösteri ve sirk fonksiyonlu yapılarda kullanımı (URL 127)

1967 Montreal EXPO ve 1970 Japonya Osaka EXPO'da sergilendiği üzere toplumlar yeni bir taşıyıcı sistem olan membran strüktürleri geliştirmek ve daha üretilebilir hale getirmek amacıyla denemelerde bulunmuştur (Şekil 2.10). Mimar ve mühendisler tarafından geliştirilmesi hedeflenen membran strüktürlerden birçok örneğin bulunduğu dünya sergileri membran ve pnömatik sistemlerin kullanımını ivmelendirerek yaygın şekilde uygulanmasında önemli bir noktadır. Çeşitli taşıyıcı sistemlerle birlikte birçok formda uygulanan membran sistemler EXPO sergileri aracılığı ile topluma sunulmuştur. 20. yüzyılda ise yapım sistemleri, teknik bilgi ve teknoloji açısından hem membran malzemesinin daha uzun ömürlü, yüksek dayanımlı, teflon ile kendini temizleyebilir olması gibi özelliklerde geliştirilmesi hem de yapım sistemlerinin ilerlemesi sonucunda strüktürel açıdan daha dayanımlı üretilebilir hale gelmiştir.



Şekil 2.10. 1967 ve 1970 EXPO Dünya Sergileri membran ve pnömatik yapı örnekleri (URL 128, URL 129, URL 130, URL 131, URL 132)

Günümüzde asma-germe bir alt başlığı ile membran sistemler; fonksiyon, coğrafya, yük aktarımı, uygulama, yapım yöntemi, taşıyıcı kurgusu, basınçlandırarak elde edilen pnömatik sistemler, membran ile birlikte kullanılan diğer malzemeler, düğüm ve mesnet noktaları gibi hususlarda farklılaşarak mimarlıkta birçok özelliğe sahip olarak uygulanmaktadır (Şekil 2.11).

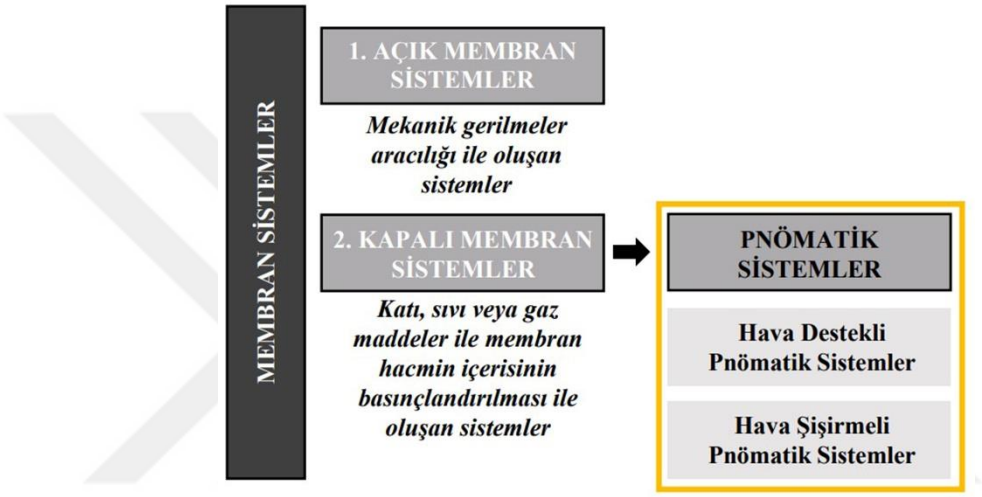


Şekil 2.11. Günümüzde membran taşıyıcı sistem örnekleri (URL 133, URL 134, URL 135)

Membran sistemlerin farklı değişkenlikte özellikleri olması sayesinde mimaride birçok form ve fonksiyonda uygulanabilmektedir. Bu nedenle belirli kıstaslarda gruplandırılmış ve başlıklar altında sınıflandırılmışlardır. Membran sistemlerin sınıflandırılmaları açısından bakıldığında ise asma-germe sistemler altında membran strüktürler iki grupta incelenmektedir. Membran sistemler açık hacimli membranlar olan çadırlar ve kapalı

hacimli membranlar yani pnömatik sistemler olmak üzere, açık ve kapalı membran sistemler olarak iki ana gruba ayrılarak incelenmektedir. Açık membran sistemler mekanik gerilme sonucunda oluşan taşıyıcı sistemlerdir. Kapalı membran sistemler ise katı, sıvı, gaz ve genellikle hava destekli veya şişirmeli pnömatik sistemleri kapsamaktadır (Çizelge 2.18).

Çizelge 2.18. Membran taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması (Güney, 2013 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)



a) Açık Membran Sistemler: Açık membran sistemler örtü görevindeki membran malzemenin yapı elemanları aracılığı ile veya kendiliğinden taşınarak biçimlendirilmesi sonucunda oluşmaktadır. Membran yüzeyinin dış yükler ve yapısal yükünü taşıması için farklı yapı elemanları aracılığıyla desteklenmesi gerekmektedir. Asma elemanları, birleşim detayları, düğüm noktaları, taşıyıcı dikmeler, çelik kablolar, çelik halatlar veya kablo ağlarından oluşan yapı elemanları ile desteklenerek membran örtünün taşıyıcılığı ve geçilen açıklık arttırılmaktadır. Membran yüzeylerin en az bir adet basınç kuvvetlerini karşılayan dikme, kemer, duvar veya yetersiz gelen durumlarda kablo ağları ile desteklenmesi sonucuna oluşan öngerilmeli sistemlerdir. Bu sayede yapısal ve çevresel yüklerin membran yüzeylerden basınç elemanına ve oradan da zemine aktarılması ile taşıyıcı sistem oluşturulmaktadır. Stadyum, spor salonu, konser salonu, çatı örtüsü gibi geniş açıklıklı yapılarda uygulanan açık membran sistemlerde kablo ağı taşıyıcı bir iskelet olarak kullanılmaktadır. Nokta destekli (askı kabloları, pilon, dikme), kemer destekli,

kenar kablolu, kiriş/çerçeve destekli (makaslar, çerçeveler, düz kirişler, eğri kirişler), iç ya da dış çemberli veya kombinasyonlu olarak açık membran sistemlerde öngerilme veren destek elemanları kullanılmaktadır (Erol, 1997).



Şekil 2.12. Açık membran sistem örnekleri (URL 136, URL 137, URL 138, URL 139, URL 140, URL 141, URL 142)

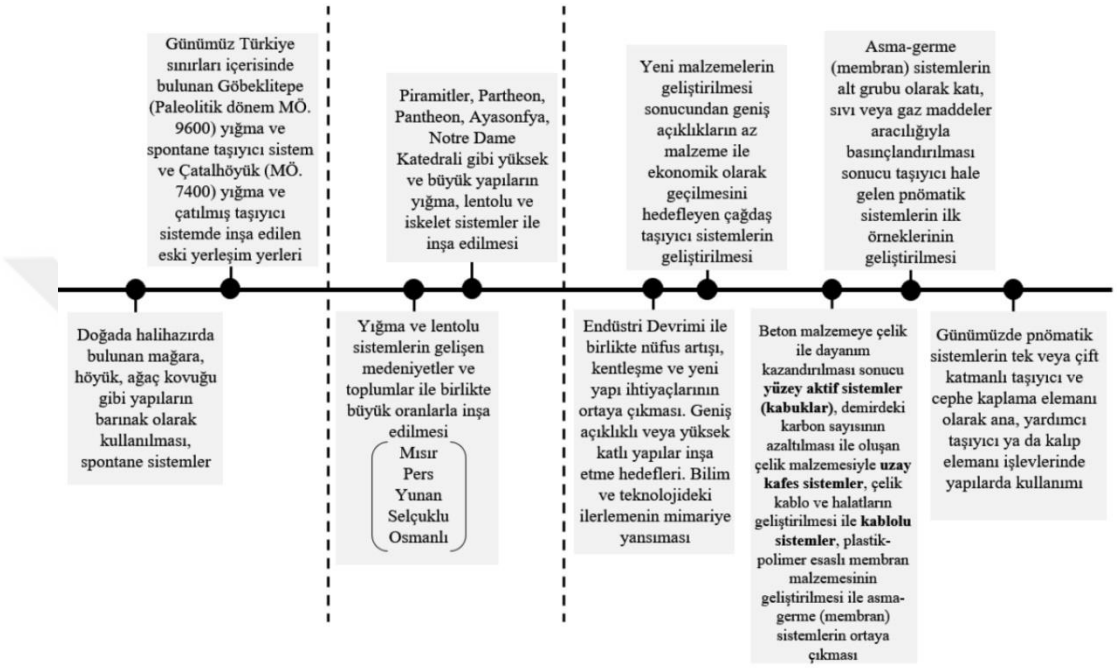
b) Kapalı Membran (Pnömatik-Şişme) Sistemler: Kapalı membran sistemler yani pnömatik sistemler, açık membran sistemlerin aksine iç ve dış mekan arasında basınç farklılıklarının oluşturulması ile taşımanın yapıldığı kapalı bir hacim oluşturan strüktürlerdir. Pnömatik strüktürlerde basınçlandırma katı, sıvı veya gaz maddeler aracılığı ile yapılabilmektedir. En yaygın kullanım ise hava pompaların ve hava destekli fanların kullanılmasıdır. Kendi içerisinde hava sistemi, basınç durumu, katman sayısı, geometrisi veya malzeme kullanımına göre başlıklara ayrılmaktadır. Kapalı membran (pnömatik-şişme) sistemler hakkında detaylı bilgi ve yapı örnekleri sonraki bölümlerde detaylı şekilde verilecektir.

2.6. Pnömatik (Şişme) Sistemler

Tarih öncesi devirlerden günümüze kadar olan süreçte insanoğlu doğada halihazırda bulunan alanları barınak olarak kullanmıştır. Bilinen ilk yerleşim yerlerinden olan Göbeklitepe ve Çatalhöyük ile taşıyıcı sistemlerin ortaya çıkışı medeniyetler ile birlikte gelişim göstermiştir. Endüstri Devrimi'ne kadar olan süreçte yığma, lentolu ve iskelet

taşıyıcı sistemler kullanılmıştır. Endüstri Devrimi ile birlikte ortaya çıkan çağdaş taşıyıcı sistemler içerisinde membran sistemler grubunda olan pnömatik strüktürler yeni malzeme, teknoloji ve bilimin ilerlemesi ile birlikte geliştirilmiştir (Çizelge 2.19).

Çizelge 2.19. Tarihsel süreç içerisinde pnömatik sistemlerin ortaya çıkışı



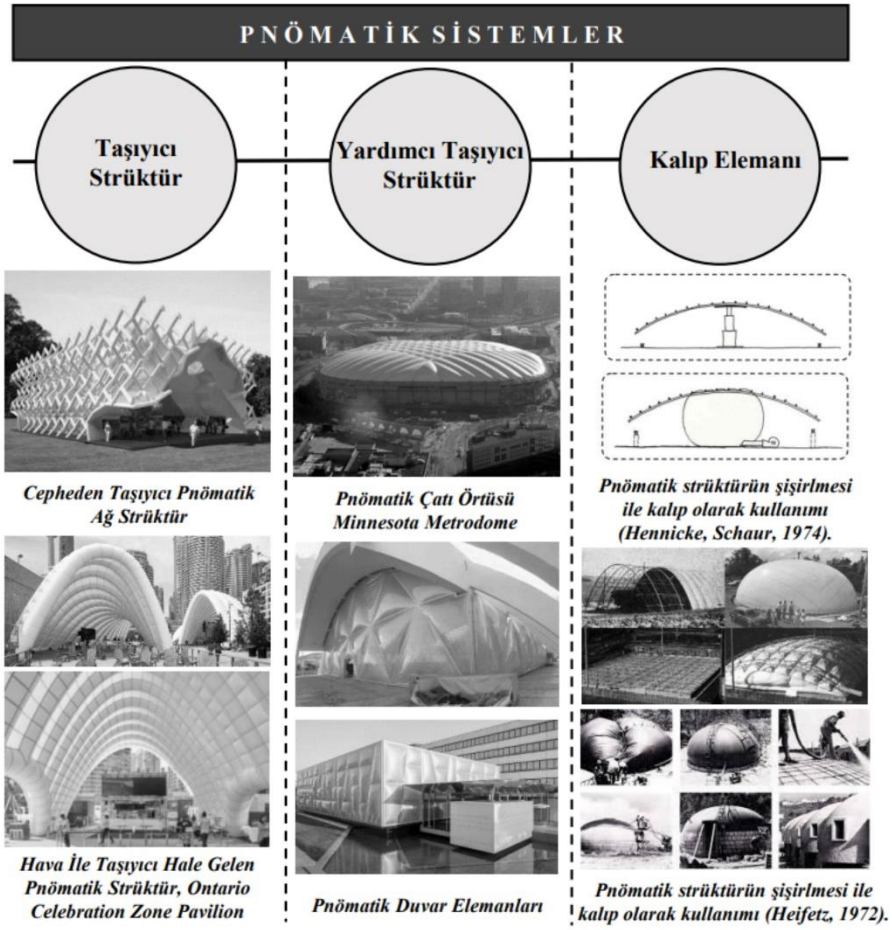
20. yüzyılın başlarında kullanılan zeplinler pnömatik sistemlerin insanlık tarihindeki ilk örnekleridir. Pnömatik sistemler kapalı hacimli membran sistemler ve şişme strüktürler olarak da adlandırılmaktadır. İnsanlar ve hayvanlar gibi yaşayan strüktürlerin temel yapı taşı hücrelerdir. Bu nedenle tüm canlı hücreleri de pnömatik özelliktedir. Dışı çeperle kaplı olan ve içerisindeki madde sayesinde hacimlenerek form kazanan hücre pnömatik bir yapıdadır. Pnömatik ilkelere göre çalışan milyonlarca hücre bir araya gelerek kan damarları, akciğerler, bağırsaklar ve mide gibi pnömatik yapıları oluşturmaktadır. Aynı zamanda hayvanlarda, doğada ve ince kabuklu meyvelerde de iç alandaki maddenin basıncı ile biçim alan pnömatik örnekler de mevcuttur. Tüm bu yapılarda kabuk alındığında ya da içerisindeki madde boşaltıldığında şekil kaybı olmaktadır ve kabuk kendini taşıyamaz hale gelmektedir (Türkçü, 2003). Bu nedenle pnömatik sistemlerde hacim ve basınç veren iç madde ile kabuk en önemli yapısal elemandır. Doğadaki ve canlılardaki örneklerden yola çıkarak taklit yolu ile geliştirilen pnömatik sistemlerin

mimari eserlerde görülmesi ancak teknolojik imkanların gelişmesi sonucunda gözlemlenmektedir.

Pnömatik kelimesi havanın solunması anlamına gelen Yunanca “pneuma” kelimesinden türetilmiştir. Hava ile dolu veya basınçlı hava nedeniyle işler hale gelen herhangi bir şey anlamına gelmektedir (Jamil, 2005). Pnömatik sistemlerin esas modelleri Rudolph Trostel tarafından geliştirilmiştir (Otto, 1970). Pnömatik sistemler ilk başta sabun köpüğünden esinlenerek geliştirilen gaz, köpük, sıvı veya artık malzeme ile de basınçlandırılabilmesine rağmen en yaygın kullanılan gaz olarak havayla olanlarıdır (Anonim, 1997). Pnömatik yani şişme sistemler yapısal bütünlüğün sağlanması amacıyla hava basıncını kullanan, dış ile iç arasında basınç farkını kullanarak sabit hale getirilmiş dengeli yapılar ya da binalardır (Marcipar, Onate, Canet, 2005). İçerisindeki hava ile taşıyıcı hale gelen membran aynı zamanda çevresel koşullardan da etkilenmektedir. Isı değişimi, rüzgar, güneş veya yağışlar pnömatik sistemlerin basıncını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle pnömatik sistemli yapılarda basınç kontrolü sağlayan sistemler ile strüktürel devamlılık sağlanmaktadır. Bu nedenle pnömatik sistemler daima yaşayan, hareketli ve canlı strüktürlerdir.

Pnömatik strüktürlerin temel prensibi iç ve dış hacimler arasında basınç farkının oluşturulması sonucunda öngerilmeli şekilde membran yüzeyinin taşıyıcı hale gelmesidir. Basınç farkının oluşturulduğu yapı bölümüne göre sınıflandırılan pnömatikler mimaride farklı alanlarda kullanılabilmektedir. Mimarlıkta uygulanan pnömatik sistemler; taşıyıcı strüktür, yardımcı strüktür elemanı ve kalıp elemanı olarak kullanılmaktadır (Çizelge 2.20). Taşıyıcı ve yardımcı strüktürler tek veya çift tabakalı membranın basınçlandırılarak mimari bir mekan oluşturduğu pnömatik sistemlerdir. Taşıyıcı olarak kullanılan pnömatik sistemler yapının ana sistemini oluşturmaktadır. Duvar, çatı, örtü, cephe gibi yapı elemanlarında uygulanan pnömatik sistemler ise yardımcı taşıyıcı strüktürler grubunu oluşturmaktadır. Jeodezik kubbe, betonarme kabuk gibi yapıların inşasında Binishell tekniğinde pnömatik şişme sistemlerin kullanımı sayesinde eğrisel formlar üretilebilmektedir. Şişirilen pnömatik yapı betonarme gibi bir sistemin uygulanması sonrasında söndürülerek kalıp elemanı olarak kullanılabilmektedir.

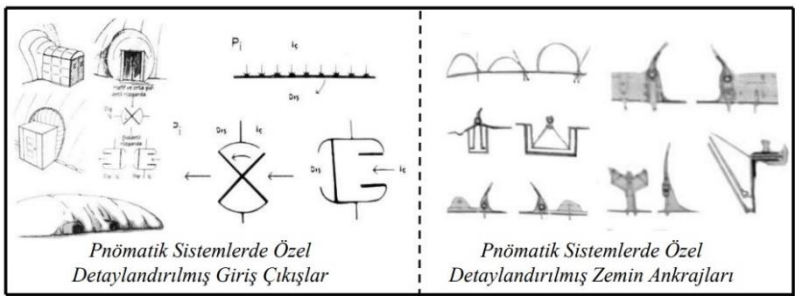
Çizelge 2.20. Pnömatik sistemlerin taşıyıcı, yardımcı taşıyıcı ve kalıp elemanı olarak kullanım alanları (URL 143, URL 144, URL 145, URL 146, URL 147)



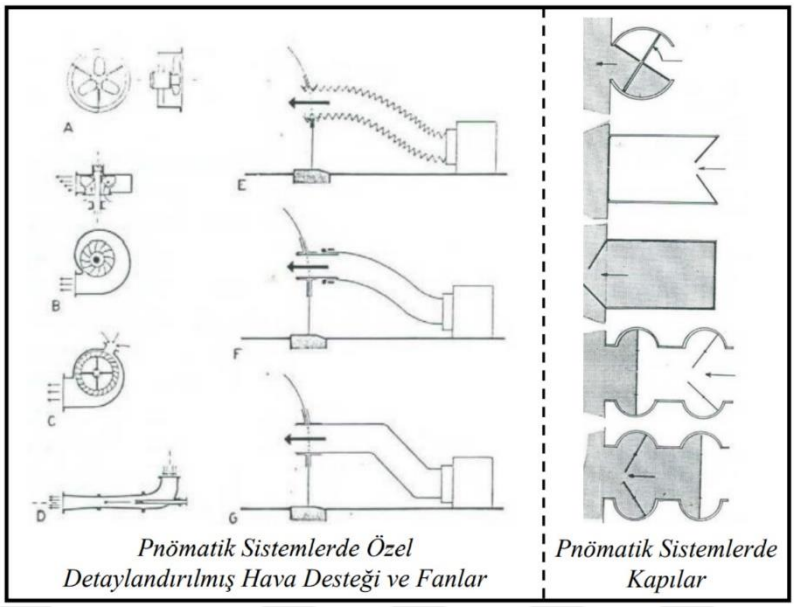
Pnömatik (şişme) sistemlerde genellikle fanlar aracılığı ile sağlanan hava yük taşıyıcı eleman olarak kullanılmaktadır. Sürekli, belirli aralıklarla veya tek seferliğine sağlanan havanın sistemin ana taşıyıcı bileşeni olmasından dolayı yapıya ek olarak fan merkezlerinin düzenlenmesi gerekmektedir. Hava destekli olan bu sistemler Özşen ve Yamantürk tarafından tümüyle şişilen ve hava yastığı şeklinde şişirilen sistemler olarak iki grupta sınıflandırılmıştır. Tümüyle şişirilen sistemler, ölü ve hareketli yüklerin pozitif hava basıncı ile esnek membran malzemenin tamamıyla şişirilmesi ile elde edilmektedir. Hava ile basınçlandırılan iç alan insanın kullandığı mimari mekandır. Membran malzeme iç mekanın üzerini örterken aynı zamanda yapısal yükleri de taşıyan elemandır. İç mekanın tamamen hava ile basınçlandırılmasıyla oluşan tümüyle şişirilen sistemlerde girişler ve fan merkezleri hava kaçırmayacak şekilde özel olarak tasarlanmalıdır. Hava yastığı şeklinde şişme sistemler ise yastık olarak adlandırılan membranın fanlar

yardımıyla iç hava basıncında şişirilmesi ile elde edilir. Dolayısıyla pozitif basınç altında olan iç mekan değil membranın iç yüzey alanının kendisidir. Bu nedenle sürekli olarak hava desteğine ihtiyaç duymayan hava yastığı şeklinde şişme sistemler, özel tasarlanmış girişlere veya açıklıklara ihtiyaç duymamaktadır. Çekme kuvvetlerine çalışan membran yüzeyler doğrudan veya kolon gibi ek elemanlar ile zemine sabitlenmektedir. Buna ek olarak pnömatik sistemlerin sürekli hava desteği ile çalışan bir yapısının olması hava desteği kesildiğinde veya membran yüzeyinde herhangi bir hava kaçağının olması durumunda tehlike oluşturduğu sorunlarını beraberinde getirebilir. Ancak membran sistemlerin hafif olması nedeniyle çok yavaş gerçekleşen ve hatta bazen günlerce sürebilen sönme olayı hiçbir hayati tehlike oluşturmaz (Özşen, Yamantürk, 1991).

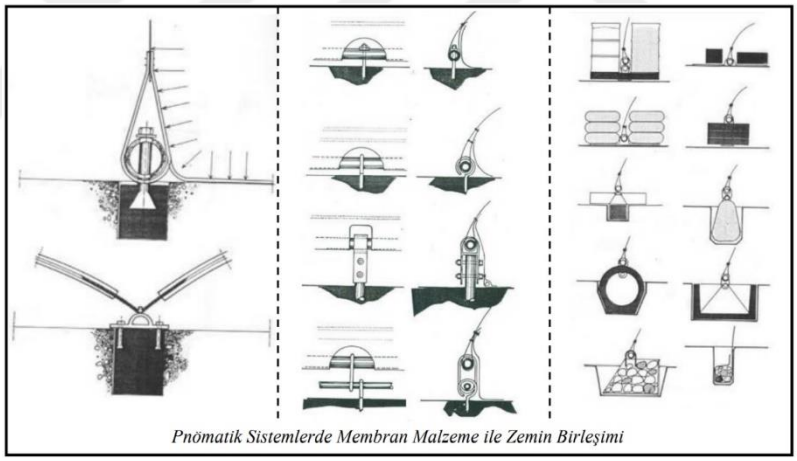
Pnömatik sistemler sadece membran malzemeden oluşturulmuş gibi görünmektedir. Ancak pnömatik strüktürler; membranın zemine, birbirine veya destek elemanlarına ait birleşim yerleri ile kapı, pencere gibi açıklıklara özel olarak detaylandırılmış birçok malzeme ve sistemden oluşmaktadır. İç mekandaki hava kontrolünü sağlamak amacıyla özellikle tek cidarlı pnömatik sistemlerde döner kapı veya çift kapılı rüzgarlıklar ve ankraj elemanları kullanılmaktadır (Şekil 2.13, Şekil 2.14). Ankraj noktaları olarak adlandırılan birleşim yerleri pnömatik sistemlerde iç basıncın korunması ile izolasyon ve dış yüklerin emniyetli şekilde zemine aktarılması açısından hem statik hem de yalıtım özelliklerine sahiptir. Ankraj noktaları her yapıya ve yapının farklı yerine özel olarak tasarlandığından malzemesi, ebatı ile özellikleri değişkenlik göstermektedir (Şekil 2.15). Membran ile birlikte çelik malzemeden oluşturulan ankrajlar yapının tamamını etkileyen çekme kuvvetlerini karşılayıp zemine aktaran mesnetlerdeki taşıyıcı yapı elemanları olmaktadır.



Şekil 2.13. Pnömatik taşıyıcı sistemlerde özel detaylandırılmış açıklıklar, kapı ve zemin ankrajı (Türkçü, 1997, s. 92-97; Erol, 1997, s. 216)



Şekil 2.14. Pnömatik taşıyıcı sistemlerde özel detaylandırılmış hava desteği, fanlar ve kapılar (Gürsu, 1986, s.138 ve 147)



Şekil 2.15. Pnömatik sistemlerde membran malzeme ile zemin birleşimi ve beton, kum torbası, prekast elemanlar, doğrudan sabitlenme detayları (Gürsu, 1986, s. 129, 130, 132)

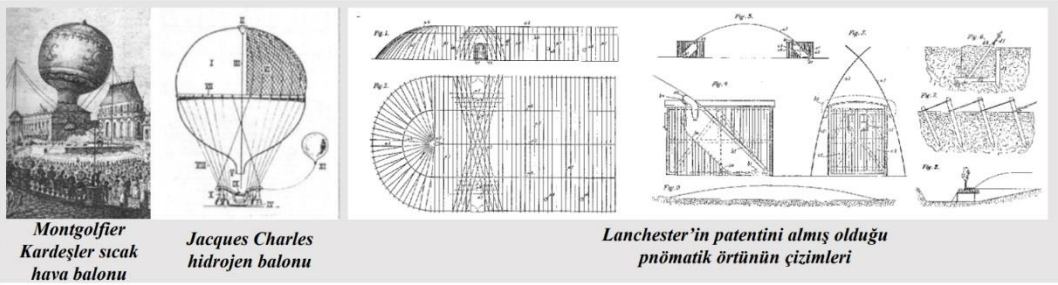
Pnömatik sistemlerin yapısal özellikleri olarak genellikle tek hacimden oluşması, membran gibi ince en kesitte bir yüzey ile örtülmesi ve hava sirkülasyonunun bulunması nedeniyle kullanıcı açısından konfor koşullarının optimum seviyede olması gerekmektedir. Konfor koşullarının optimum düzeyde en ekonomik şekilde tutulması pnömatik strüktürlerin kullanımını verimli hale getirmektedir. İç basınç, iç ortam hava kalitesi, su yalıtımı, ısı izolasyonu, görsel ve akustik konfor koşulları açısından daha

küçük hacimli pnömatik sistemler daha verimli ve ekonomiktir. Pnömatik sistemler, hava desteği ve optimum konfor koşullarının sağlanabilmesi için belirli oranlarda enerji tüketmektedir. Bu nedenle pnömatik sistemlerde yıllık enerji tüketimi hesaplanarak uygulama önerilmektedir (Drüsedau, Dickson, Hennicke, 1983). Günümüzde enerji sistemlerinin, teknolojinin, ısıtma ve soğutma sistemlerinin gelişmesi ile pnömatik strüktürlerin daha verimli şekilde optimum konfor koşullarında ekonomik olarak uygulanabilmesini sağlamaktadır.

Geçmişten itibaren süregelen pnömatik yapıların Endüstri Devrimi sonrasında membran malzemenin geliştirilmesi, teknik bilginin, teknolojinin, enerji sistemlerinin ilerlemesi gibi yaşanan gelişmeler ile birlikte strüktürel olarak mimaride kullanımı yaygınlaşmıştır. Pnömatik sistemler günümüzde konser, sergi salonu, stadyum, spor salonları, tarihi yapılara ek olarak, konut, geçici yapılar, afet sonrası barınma yapıları, müze, çok katlı yapılarda cephe, sergi elemanları, taşıyıcı strüktür, kolon-duvar gibi yapı elemanları, uzay yapıları, kalıp elemanı gibi mimaride taşıyıcı strüktürler, destek elemanları ve yapı elemanları olarak birçok kullanım alanına sahiptir.

2.6.1. Pnömatik (Şişme) Sistemlerin Tarihçesi

Pnömatik sistemler üzerine ilk deneyler sıcak hava balonları üzerine yapılmıştır. 1709 yılında Lizbon'da Brezilyalı Bartolomeu de Gusmão öncü bir deney gerçekleştirmiştir. 18. yüzyılın sonunda Montgolfier kardeşler 11 metre çapında keten ve kağıttan yapılmış sıcak hava balonu inşa etmişlerdir. Aynı yıllarda hidrojen balonun zeplinlerde kullanımının Alexandre Cesar Charles tarafından bulunmuştur (Herzog, 1977; Forster, 1994). İnsanlık tarihinde 17. ve 18. yüzyılda uçuş deneylerinde bireysel yapılan çalışmalara ek olarak kullanılan Çinlilerin kağıttan veya hafif sık dokumalı kumaştan elde ettiği balon, zeplin, sıcak hava destekli şişme sistemler pnömatik strüktürlerin temelleridir. 20. yüzyılda gaz destekli hava gemileri ve zeplinler kullanılmıştır. II. Dünya Savaşı ile naylon gibi sentetik elyafların geliştirilmesi ve gelişmiş kaplama teknikleri ile pnömatik binalar ortaya çıkmıştır (URL 148). Pnömatik taşıyıcı sistemlerin mimarlıkta ilk kullanımı ise 1918 Frederick Wiiliam Lanchester'in çalışmalarının patentini alması ile gerçekleşmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Pnömatik sistemlerin balon ve mimarlıkta ilk defa kullanımı (Herzog, 1977)

1900'lü yıllarda artan nüfus ve çevresel problemlerin çözümü olarak mimari izole alanlar tasarlanmıştır. İzolasyon amacıyla New York şehrini tamamen kapsayacak ütopik ada olan "Oasis" veya kişisel olarak giyilen "Fly Head" fikirleri oraya çıkmıştır. 1967 yılında "Ballon für Zwei" projesi Haus Rucker şirketi tarafından "Apollogasse 3" binasının cephesine pencereden çıkılabilecek şekilde konumlandırılmıştır. Sokak içerisine açılan tek katmanlı pnömatik plastik yapı 3,5 metre çapında bir küredir (Şekil 2.17). "Gelbes Herz" (Sarı Yürek), 1968 yılında PVC esaslı malzemeden tasarlanan üç şişme halkadan girilerek iç mekana açılan pnömatik yapıdır. İç mekanda iki kişi barınabilmektedir. İnsanların hissedebileceği şekilde olan söndürme ve şişirme işlemlerini sürekli olarak gerçekleştirmesi nedeniyle pnömatik sistem nabız atışına benzetilmektedir (Beşlioğlu, 2008; Başar, 2014). Böylelikle plastik esaslı pnömatik kubbeler tüm şehri kapsayarak toplumsal, birkaç kişinin sığabileceği veya giyilebilen bireysel elemanlar olarak insan hayatına girmiştir.



Şekil 2.17. Pnömatik sistemlerin çevre kirliliğine yönelik ütopik ve kişisel projelerde kullanımı (URL 149)

Dünya Savaşı sırasında plastik esaslı naylon malzemesinin icadı ile pnömatik sistemler askeri ve acil durum yapılarında kullanılmaya başlanmıştır (Topham, 2002). Walter Bird ve ekibinin kurduğu "Birdair Structures" tarafından 1948 yılında "Radome" isimli mekanik teçhizat koruyucu radar kubbeleri ortalama 15 metre çapında çeşitli yerlerde pnömatik sistemde inşa edilmiştir (Şekil 2.18). Aynı şirket pnömatik strüktürleri 1960'lı yıllarda depo, spor tesisleri ve yüzme havuzları için örtü sistemi olarak kullanmıştır. Benzer inşaat faaliyetleri gösteren şirketler Avrupa ve Japonya'da kurularak yaygınlaşmıştır (Chi, Pauletti, 2005).

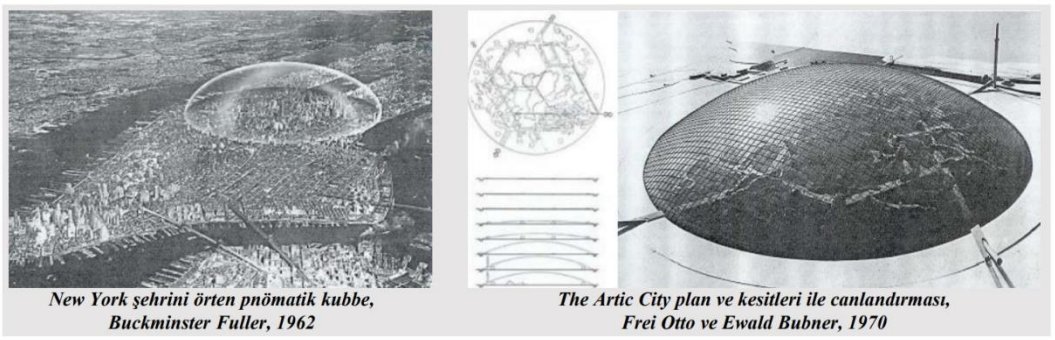


Şekil 2.18. II. Dünya Savaşı esnasında, ilk Radome kubbelerinde (Topham, 2002) ve geliştirilmiş Radome kubbelerinde pnömatik sistemlerin kullanımı (Forster, 1994)

Pnömatik sistemler fanlar ile desteklenen şişirilmiş hacmin taşıyıcı olduğu ve 500 metre eninde ve birkaç kilometre boyunda inşa edilebilir olan strüktürlerdir. Endüstri Devrimi sonucu teknik bilgi, teknolojik donanımın gelişmesi, makineleşme ve membran malzemenin yapılarda basınçlandırılarak kullanılması ile günümüz anlamda pnömatik (şişme) strüktürlerin ilk örnekleri görülmüştür. 1959 yılından sonra mimarların da ilgisini çekmeye başlayan bu sistemler hava doldurulmuş elips formlu bir çatı olarak Carl Koch tarafından Boston Sanat Tiyatro Merkezi'nde ilk defa uygulanmıştır (Erol, 1997).

Pnömatik taşıyıcı sistemler Dünya Savaşları'nın etkileriyle mimaride ilk ortaya çıktıkları dönemlerde büyük ölçülerde askeri, hangar, depolama ve acil durum yapılarında kullanılmıştır. Mimaride pnömatik strüktürlerin en çok uygulandığı dönem ise 1960 ve 1970'li yıllardır. Pnömatik strüktürler ortaya çıktığı dönemde halkı büyüleyen ve dikkatini çeken sistemlerdir. Pnömatik strüktürlerin de dahil olduğu gerilim sistemler eski ve spontane olarak gelişen yapısal sistemler olmasına rağmen ortaya çıktığı dönemde modern bir olgudur. Doğrusal olmayan hesaplamalar, yüksek mukavemet gerektiren karmaşık malzemeler, yeni sentetik malzemeler, yapım teknikleri ve teorileri açısından

gelişimin sağlanabilmesine paralel olarak 1960 ve 1970'li yıllarda pnömatik taşıyıcı sistem örnekleri mimaride uygulanmıştır (Chi, Pauletti, 2005). Günümüz mimarisi anlamında asma-germe gerilim yapıları ve pnömatik sistemler üzerinde çalışmalar yapan Frei Otto çeşitli yayınlar, tasarımlar ve projeler yapmıştır. Buckminster Fuller uzay kafes sistemler, jeodezik kubbeler ve pnömatik sistemler üzerine çalışmalar yapmıştır. New York Dome, Manhattan Dome, The Artic City ve Montreal Biosphere gibi alanları pnömatik kubbeler ile toz, kirlilik ve egzoz gazlarından arınmış izole bir alan yaratma amacıyla geliştirilen ütopik tasarımlardır (Şekil 2.19). Bu proje ile Fuller, savaş sonrası artan nüfus ve çevre kirliliğinden korunmayı amaçlamaktadır. Dante Bini'nin "Binishell" metodu ile pnömatik strüktürleri betonarme kabuk yapılarda kullanım sistemi geliştirmiştir. Bu çalışmalar sayesinde pnömatik taşıyıcı sistem uygulamalarının yaygınlaşmasını sağlamıştır.



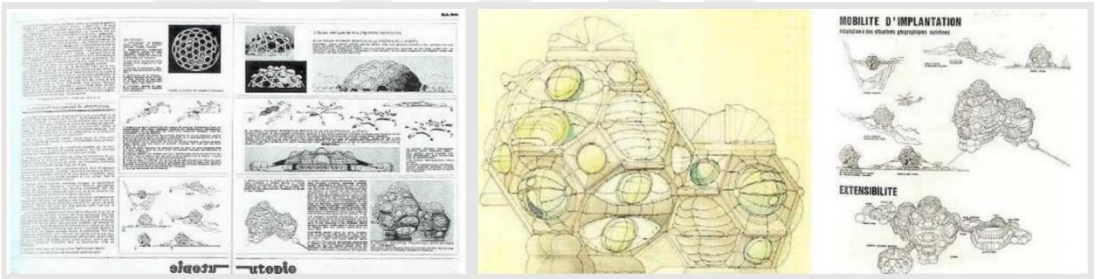
New York şehrini örten pnömatik kubbe, Buckminster Fuller, 1962

The Artic City plan ve kesitleri ile canlandırması, Frei Otto ve Ewald Bubner, 1970

Şekil 2.19. Şehirleri kapsayan pnömatik sistemli kubbeler ile geliştirilen fikir projeleri (Herzog, 1977)

Frei Otto' nun "Tensile Structures" isimli gerilme yapılarını anlatan kitabı 1962 yılında yayınlanmıştır. Pnömatik yapılar hakkında bilgi veren kitap pnömatik strüktürler için analitik bir temel oluşturulmasını sağlamıştır. Böylelikle geleneksel yapım sistemlerinin aksine gelişen yenilikçi pnömatik strüktürler mimaride ortaya çıkmaya başlamıştır (Otto, 1962). 1960'lı yıllarda Avrupa'da Le Corbusier'in mevcut modernist ilkeleri ile uyuşmayan, monotonluğu reddeden radikal mimari anlayışlar doğmuştur. Böylelikle geleneksel mimari kavramların tam aksi olan pnömatik şişirilebilir formlar ortaya çıkmıştır (Topham, 2002). Fransız toplumunun günlük yaşamı ve şehircilik anlayışına yönelik olarak Paris'te, mimarlık öğrencileri Jean Aubert, Jean-Paul Jungmann ve

Antoine Stince ile sosyolog Jean Baudrillard'ın da aralarında bulunduğu ekip tarafından "Utopie" isimli fütüristik mimari yayınlar yapmışlardır. "Utopie" grubu; Buckminster Fuller, ordunun teknolojik araştırmaları, popüler kültür ve çizgi romanlardan esinlenerek yeni yapı görselleri ve fikirleri ortaya çıkartmışlardır. Bu sayede 1960'ların bitiminde savaş sonrası Avrupa toplumunun ataletin ve sabitliğin aksine hareketli, yüzen ve geçici yapılar için pnömatik sistemleri gündeme getirerek önermişlerdir (Dessauce, 1999). Biçimci şehirciliğin eleştirildiği "Utopie" dergisinin ardından, 1968 yılında Musée d´Art Moderne de la Ville of Paris'te mimarları etkileyen "Structures Gonfables" sergisi Avrupa, Amerika ve Japonya'dan tasarımcıların katılımıyla düzenlenmiştir. Sergideki "Dyodon" çalışması pnömatik (şişirilmiş) formlar üzerinde estetik çalışmaları ve membran desenleme ve yapılandırma işlemlerinde çeşitliliği ortaya çıkartmıştır (Herzog, 1977). Böylelikle pnömatik sistemler "Utopie" gibi dergi yayınlarında ve "Dyodon" gibi sergilerde gündeme getirilen ve incelenen bir konu haline gelmiştir (Şekil 2.20).



Utopie Dergisi yayınları, 1967

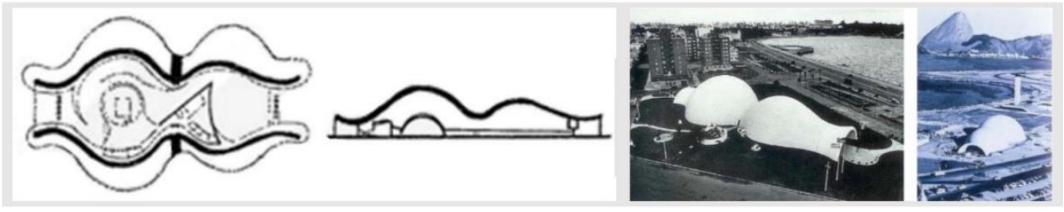
Dyodon – Habitation Pneumatique Experimentale, Paul Jungmann, 1967

Şekil 2.20. "Utopie" dergisi (Dessauce, 1999) ve "Dyodon" sergisi (Topham, 2002)

1960'lı yılların sonlarında Archigram, Haus-Rucker-Co, Coop Himmelb(l)au ve Ant Farm gibi sanat ve tasarım grupları hızla inşa edilebilir ve maddi açıdan ekonomik pnömatik sistemlerin kullanımını önermiştir. Pnömatik strüktürlerle oluşturulan mekanların kullanımını teşvik etmiştir (Krauel, 2013). Bu dönemde mimaride çok yeni olan pnömatik strüktürlerin tanıtılması, geliştirilmesi ile teknik bilgi birikiminin oluşması amacıyla Herzog tarafından hazırlanan teknik el kitabı (Herzog, 1976) ve IASS (Hava Destekli Strüktürler için Öneriler) (Tsuboi, 1985) tavsiyelerden oluşan el kitabı gibi yayınlar yapılmıştır. Şişirilebilir yapılar hakkında bilgileri keşfetmeye ve yaymaya yönelik bu girişimler pnömatik taşıyıcı sistemin birçok yerde uygulanabilen bir yapı

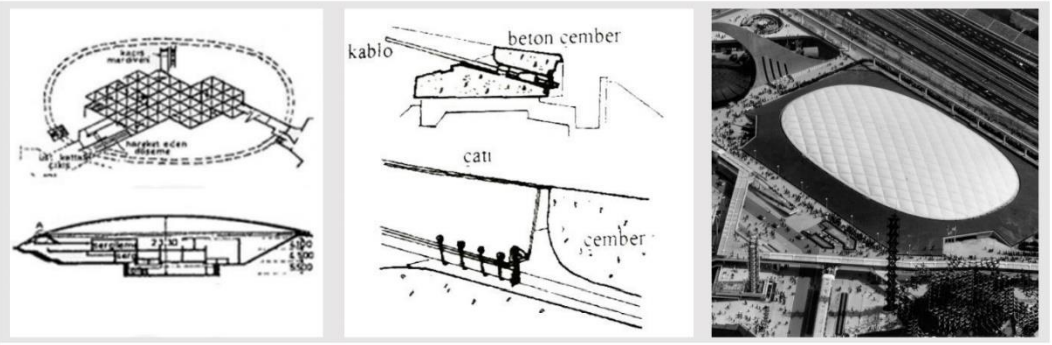
teknolojisi olmasını sağlamıştır (Dessi-Olive, Case, Kolıner, Teja Meda, Putman, 2019). Böylelikle malzeme, tasarım ve üretimdeki gelişmeler paralelinde uygulama alanı artan pnömatik sistemler bu dönemde EXPO olarak adlandırılan birçok dünya sergisinde uygulanmıştır.

Pnömatik sistemlerin taşınabilirlik, kısa sürede inşa edilme, geçicilik gibi yapısal nitelikleri gezici sergiler ve dünya sergileri (EXPO) için ilham kaynağı olmuştur. Victor Lundy tarafından tasarlanan ve Birdair'in inşa ettiği "Atoms for Peace Pavilion", Orta ve Güney Amerika'yı dolaşan ABD Atom Enerjisi Komisyonu'nun sergisini barındırmıştır (Şekil 2.21). Geçici sergilerde pnömatik sistemler yüksek sismik hareketlilik ve düşük toprak kalitesi nedeniyle Osaka'daki dünya sergisi 1970 EXPO'da birçok yapıda uygulanmıştır (Chi, Pauletti, 2005). 90 metre uzunluk, 38 metre genişlik ve en çok 15 metre yükseklikte olan çift cidarlı pnömatik sistemin en kesiti 1,2 metredir. İki katman arasının basınçlandırılması ve hava boşluğu ısı yalıtımı sağlanmaktadır. Bu sayede sergi yapısının iç mekanının ısınma giderleri azalmaktadır. Hem iki membran tabaka arasının hem de iç mekanın basınçlandırıldığı nadir örneklerdendir. İç mekanda basınç olması nedeniyle giriş ve çıkışlarda hava kontrolünü sağlamak amacıyla döner kapılar eklenmiştir. Vinil kaplı naylon örtü malzemesi delinme, yırtılma, aşınma gibi bir durumda tamamen sönmemesi için sekiz ayrı birimden meydana gelmektedir. 12 kişilik ekip ile 3-4 gün içerisinde yerine monte edilebilen yapı, 30 dakikalık şişirme süresi sonucunda kullanıma hazır hale gelmektedir (Türkçü, 1997). Böylelikle gezici yapılara uygun, küçük hacimlerde taşınabilen ve kısa sürede kullanıma hazır hale gelen bir yapı için pnömatik sistem kolaylıkla uygulanabilmektedir.



Şekil 2.21. Atoms for Peace Pavilion plan ve kesit çizimleri (Türkçü, 1997, s. 108) ile görselleri (Topham, 2002)

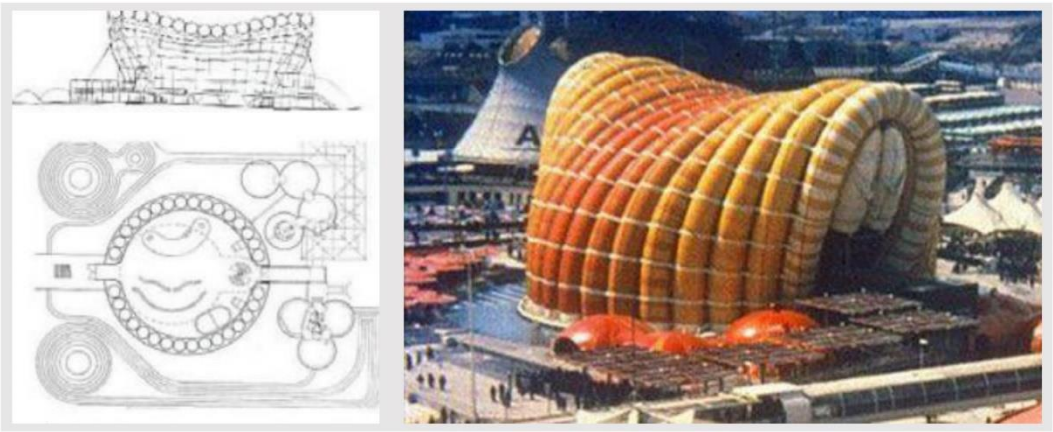
1970 Osaka EXPO'su kapsamında, "ABD Pavyonu" Davis Brody, David Geiger ve Walter Bird tarafından oval planlı, takviye kabloları ile desteklenmiş (142 metre uzunluk, 83 metre genişlik ve 6,1 metre sarkma), düşük aerodinamik profilli çatı olarak pnömatik sistemde geliştirilmiştir (Chi, Pauletti, 2005) (Şekil 2.22). 10 000 m²'lik alanı örten membran örtü sistemi örme elyaf lifleri ile vinil kaplamadan üretilmiştir. Yapıya dışarıdan bakıldığında sadece ortalama 9 m yükseklikteki pnömatik çatı görülmektedir. Bunun nedeni kazılarak inşa edilen betonarme sürekli temelin en üst noktalarından 38-56 milimetre çaplı kabloların ankrajlanmasıdır. Çatı sisteminin metrekarede ağırlığı 1.2 kg/m²'dir. Böylelikle geleneksel sistemlere göre pnömatik sistemlerin hafifliği proje ile ön plana çıkarılmıştır. Pnömatik sistemin basıncı 4 ana ve 2 yedek kompresör aracılığı ile su kullanılarak 200 mm'de sabitlenmiştir (Türkçü, 1997).



Şekil 2.22. ABD Pavyonu plan ve kesit çizimleri (Türkçü, 1997, s. 272) ile görseli (URL 150)

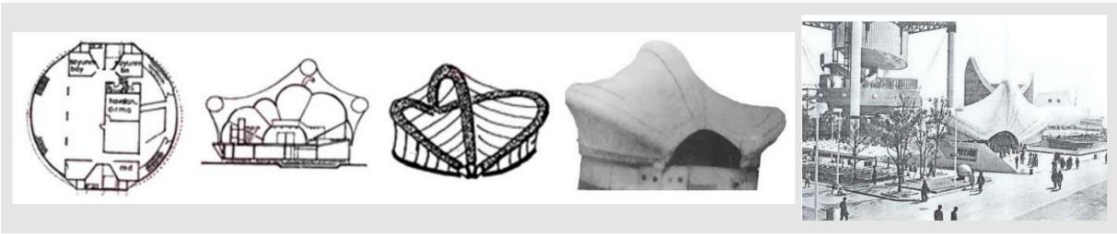
"Fuji Pavyonu" ise mimar Yutaka Murata ile mühendis Mamoru Kawaguchi tarafından 16 şişirilmiş kemerden pnömatik taşıyıcı sistemde tasarlanmıştır (Chi, Pauletti, 2005) (Şekil 2.23). Bu kemerler 78 metre uzunluğunda ve 40 metre çapındaki hortumların 50 metre çapındaki dairesel plan üzerinde iki nokta arasında mesnetlenerek konumlandırılmıştır. Semer biçimli görünüm, eşit uzunluktaki hortumların plan üzerinde geçtiği farklı açıklıklar ile geometrik olarak birbirine benzemeyen kemerler sayesinde elde edilmiştir. Oluşan membran yüzeyler kemer eksenine dik bina ekseni boyunca rijitlik hedefleri için kablolar ile desteklenmiştir. Yapının statik etkilere ve yanal yüklere karşı dayanıklı olması için tokalı geniş şeritler kullanılarak tüm yapı ve hortumlar bütünleştirilmiştir. Pnömatik sistem tüplerin içerisinin basınçlandırılması ile

oluştuğundan dolayı iç mekanda basınç ve giriş-çıkışlarda hava kontrolü yoktur. Yapı cephesinde ışık alacak açıklık olmadığından doğal aydınlatma yapı içlerine doğru yüksek oranda azalmaktadır (Türkçü, 1997).



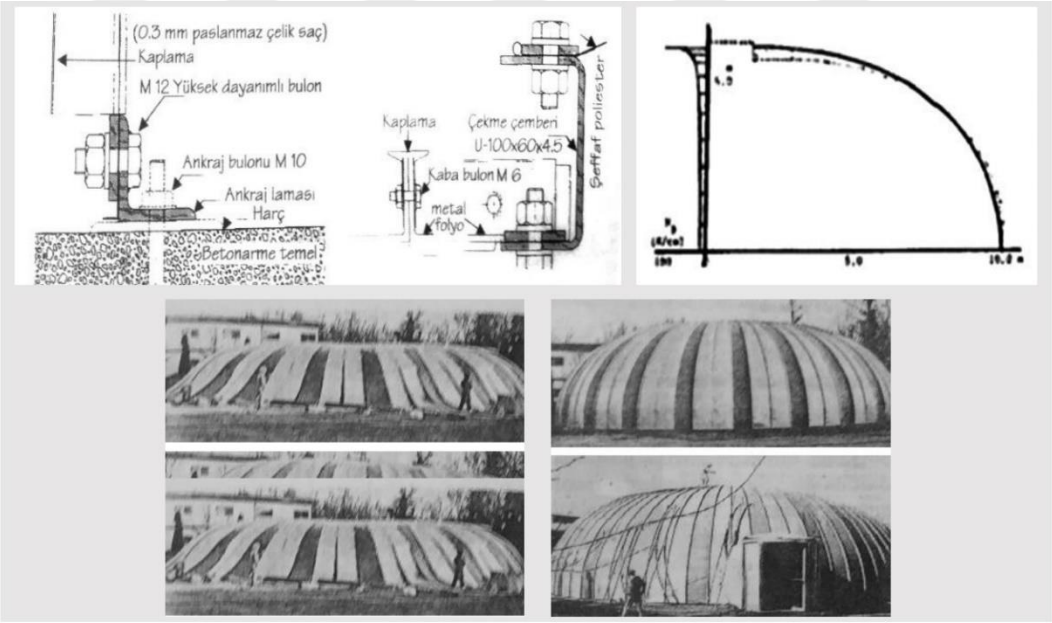
Şekil 2.23. Fuji Pavyonu plan ve kesit çizimleri (Herzog, 1997) ile görseli (URL 151)

"Fuji Pavyonu" ekibi tarafından gerçekleştirilen bir diğer proje ise "Yüzen Tiyatro" yapısıdır. Tek katmanlı bir zar ile birbirine bağlanan örtü ve yüksek basınçlı şişirilmiş üç kaburga kiriş tüpten oluşmaktadır (Herzog, 1977). Tüpler ile örtü olan iki membran tabakasının arasındaki boşluk kullanılarak hava desteği ile basınç farkı oluşturulmaktadır. Çevresel değişikliklere yönelik olarak örneğin rüzgar şiddetinin artması gibi durumlarda iç basınç arttırılarak yapının istikrarlı kalması sağlanmaktadır. Toplam 1 000 m²'lik alan örten pnömatik sistemin taban alanı 600 m²'dir ve çelik iskeletli bir bottur (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Yüzen Tiyatro yapısı plan ve kesit çizimleri (Türkçü, 2003, s. 277) ile görseli (Herzog, 1997)

Mamoru Kawaguchi tarafından tasarlanan “Metal Folyolu Kubbe” projesi, pnömatik sistemli bir yapının fiziksel problemlere ve yangına karşı dayanıklı hale getirilmesi hedefleri ile çelik-alüminyum alaşımlarından üretilen metalik folyolar ile kaplanmıştır (Şekil 2.25). Metal folyolar her yönde birbiri ile kaynaklanarak yük aktarımı, bütünlük ve dayanım sağlamaktadır. Pnömatik kubbe ve silindir kesişimi formun üst noktasında birleşen 72 metal şerit kaplama, alt kenarlarından çelik bulonlar ile betonarme sürekli temele sabitlenmiştir. Uzun kenar boyunca dayanımsız olan metal şeritlerin yük taşıyabilir olması için 20 metre çapındaki kubbe 5 991 metre yükseklikte olabilecek en basık pnömatik biçimde tasarlanmıştır. Membran 0,3 milimetre kalınlıkta metal şeritler ile kaplanırken ışık alabilir hale getirmek için 200 µ kalınlıkta şeffaf polyester folyo eklenmiştir (Türkçü, 1997). İncelenen örnek yapıları da kapsayan EXPO dünya sergileri sayesinde pnömatik yapı uygulamaları daha da popülerlik kazanarak mimarlar tarafından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Aynı zamanda toplumlar, mimarlar ya da tasarımcılar en güncel çağdaş taşıyıcı sistemleri EXPO ve fuarlarda sergileyerek mimarlıktaki gelişmişlik düzeylerini ön plana çıkarmayı hedeflemektedir.



Şekil 2.25. Metal Folyolu Pnömatik Kubbe plan ve kesit çizimleri (Türkçü, 1997, s. 104) ile şişirilme aşamaları (Türkçü, 2003, s. 270)

EXPO sergilerinden esinlenerek 1974 ve 1984 yılları arasında David Geiger, ABD ve Kanada'da Michigan (1975), Vancouver Amfitiyatrosu (1983) ve Minneapolis Metrodome (1982) gibi kablo ile güçlendirilmiş membran kullanarak stadyumlar geliştirmiştir. Her biri 40 000 m²'den fazla alanı 60 000 kişinin üzerinde kapasiteyle pnömatik sistemde çatı kaplamaları ile inşa edilmiştir. Pnömatik strüktürlerin kullanımı yapı maliyetlerini düşünmesine rağmen kar ve yağmur gibi birikme olayları açısından olumsuz nitelikler sergilemiştir. Bu duruma yönelik olarak Kajima Corporation tarafından tasarlanan "Tokyo Big-Egg Dome" ve "Akita Sky Metrodome" gibi pnömatik yapılar daha yüksek iç basınç, kabloların sıklaştırılması ve daha kalın profil sistemlerin kullanımı ile çözüm sağlamıştır (Forster, 1994). Pnömatik sistemlerin çevresel yüklere karşı dayanım sağlamasına ek olarak tarihi yapılarda kullanımının örnekleri mevcuttur. Nîmes Roman Arena yapısında kullanılan pnömatik lens herhangi bir değişiklik yapılmadan hafif strüktürde ve en az ankraj noktası ile uygulanabilmesini sağlamıştır (Şekil 2.26). 2000'li yıllarda ise toplumsal eğlence, spor ve sergi alanlarında kullanılan pnömatikler; renk, hafiflik, taşınabilirlik, parlak dokular ve estetik özelliklerde tasarlanmıştır.

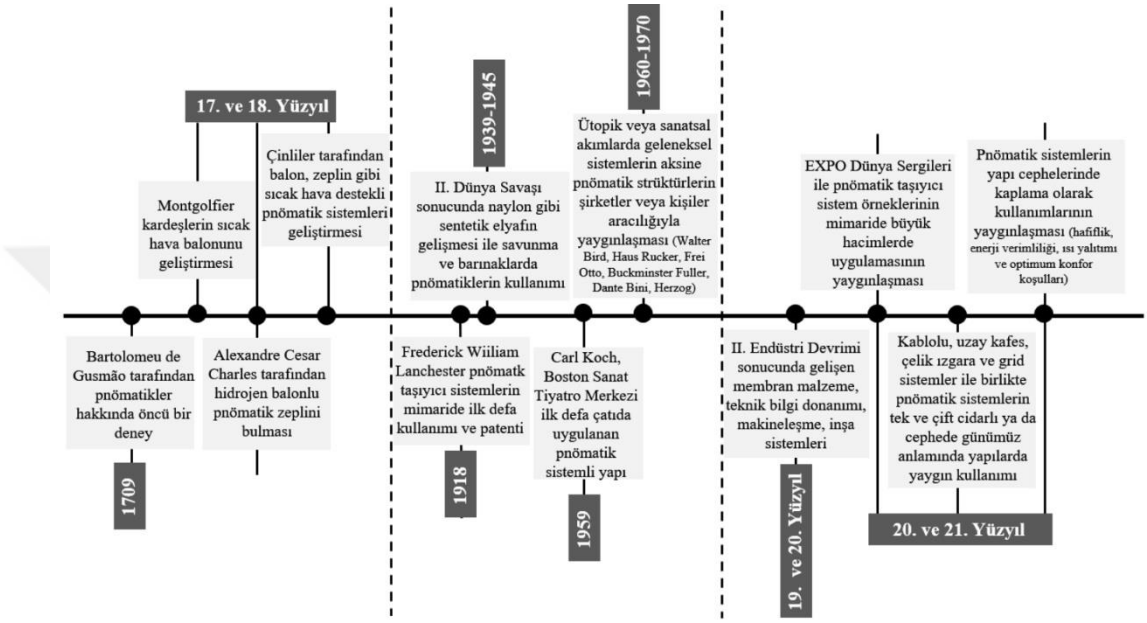


Şekil 2.26. Pnömatik sistemlerin spor yapılarının çatılarında kullanımı Tokyo Big-Egg Dome (Forster,1994) ve Roman Arena (Sclaich, 1994)

Sonuç olarak pnömatik sistemler 17. ve 18. yüzyıllarda yapılan ilk deneyler ve çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. 1900'lü yıllarda savaşlar, sanayileşme, nüfus artışı, kentleşme ve çevre kirliliği etkisinde geliştirilen plastik malzemelerin kullanımı ile geliştirilmiştir. Bu dönemde pnömatik strüktürler daha çok askeri sistemler, kişisel mekanlar ve ütopik projelerde uygulanmıştır. II. Endüstri Devrimi ile birlikte gelişen membran malzeme ve mimari sistemler günümüz anlamında pnömatik sistemlerin

kullanılabiliğini sağlamıştır. Mimari mekanlarda kullanımı EXPO sergileri ile yaygınlaşan pnömatik strüktürler, çeşitli taşıyıcı sistem kombinasyonları ile birçok fonksiyonda inşa edilebilir hale gelmiştir (Çizelge 2.21).

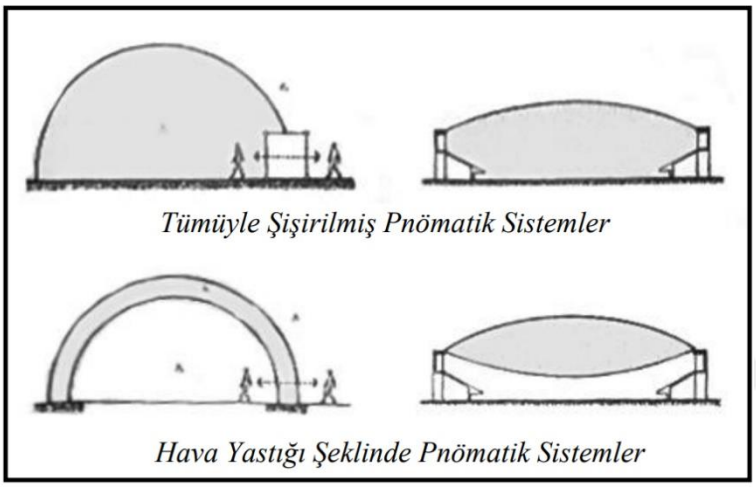
Çizelge 2.21. Pnömatik sistemlerin tarihsel gelişim süreci



Pnömatik sistemlerin günümüz anlamında mimaride uygulamaları biçimi ve kararlılığı basınç farklılığı oluşturarak gaz, sıvı, selüloz veya granüllü maddelerin dolgu olarak kullanımı aracılığıyla sağlamaktadır (Nader, 2019). Mimari ve inşaatta, 20. ve 21. yüzyılın başlarında pnömatik yapılar yaygın olarak kullanılmıştır (Gomez-González, Neila, Monjo, 2011). Günümüzde pnömatik taşıyıcı sistemler geniş açıklıklı, kalıcı veya geçici çeşitli birçok işlevde mimari yapıda kullanılmaktadır. Sadece pnömatik taşıyıcı sistem olarak değil aynı zamanda uzay kafes, betonarme, çelik ızgara sistemler veya kablo gibi taşıyıcı sistemler ile birlikte de kullanılabilmektedir. Çeşitli taşıyıcı sistemler ile inşa edilen yapılara ek çatı, cephe kaplama elemanı veya duvar gibi işlevlerde kullanılabilmektedir. Bunlara ek olarak pnömatik sistemler köprü, acil durum yapıları, müze, sergi salonları, stadyum, spor salonları, tarihi yapılara ek, konut, uzay yapıları gibi pek çok fonksiyondaki yapıda uygulanabilmektedir.

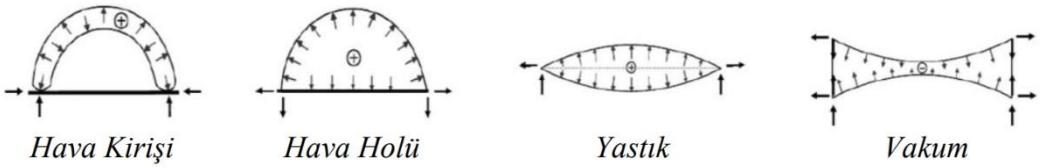
2.6.2. Pnömatik (Şişme) Sistemlerin Sınıflandırılması

Pnömatik strüktürlerin oluşum şekilleri, geometrileri, membran tabaka sayıları, formları, hava desteği ve basınç durumlarına göre geçmişten günümüze birçok şekilde sınıflandırma sistemi mevcuttur. En genel sınıflandırma Şekil 2.27'de görüldüğü üzere pnömatik taşıyıcı sistemler temel özellikleri bağlamında hava ile desteklenerek pozitif bir basınç alanının oluşturulduğu tek cidarlı sistemler ve iki membran tabaka arasının hava yastığı şeklinde şişirilmesi ile oluşan çift cidarlı sistemler olmak üzere iki grupta yapılmaktadır.



Şekil 2.27. Pnömatik sistemlerin temel iki ana grupta sınıflandırılması (Özşen ve Yamantürk, 1991, s. 81)

Membran yüzeyine uygulanan hava basıncı sonucunda kapalı bir alan oluşturan ve membran yüzeyin mimari ya da mühendislik bir tasarım kazandığı hava destekli yapılar pnömatik sistemlerdir. Membran malzemenin basınç ile atmosfer basıncının eşit olduğu durumlarda yapı zar yüzeyi kararsız bir halde olmaktadır. Ancak membran malzeme yüzeyindeki hava basıncının atmosfer basıncından yüksek olduğu durumda yapı zar yüzeyinde oluşan çekme gerilimi dış yüklere ve yapısal kuvvetlere dayanıklı yapısal nitelik kazanmaktadır. Membran yüzeydeki taşıyıcılık basınçla ilgili olduğu kadar yapının şekil ve geometrisine de bağlıdır (A Sciences, 2017). Bu bağlamda pnömatik sistemler hava kirişleri, hava holü, yastık ve vakum olarak dört grupta incelenebilmektedir (Şekil 2.28).



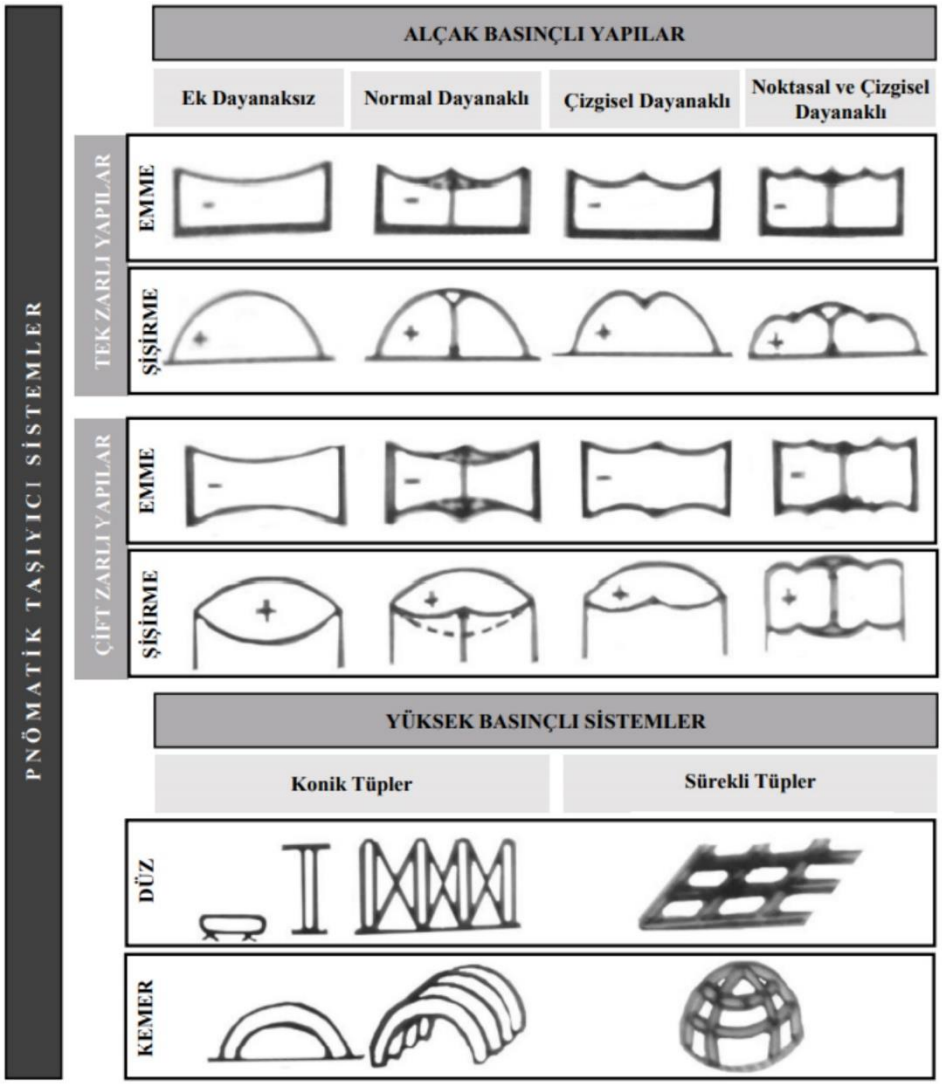
Şekil 2.28. Pnömatik sistemlerin hava kirişleri, hava holü, yastık ve vakum olarak dört grupta sınıflandırılması (Knippers, Cremers, Gabler ve Lienhard, 2011)

Hava kirişleri pozitif basınçlı, silindirik veya silindir formdan türetilen, tek veya iki boyutlu taşıyıcı elemanlardır. Çelik halatlar ile desteklenebilen bu kirişler yan yana çeşitli geometrilerde bir araya getirilerek mimaride kullanılabilmektedir. Hava holü hava basıncı ile hacim kazandırılan alanın membran yüzey ile sınırlandırılması ile oluşmaktadır. Genellikle tek katmandan oluşan membranlarda iç mekanın basıncı dış hava basıncından daha yüksektir. Bu iç basınç kullanım alanında bulunan insanları rahatsız etmeyecek düzeydedir. Düzenli olarak hava desteği alan bu sistem iç basıncı kaybetmemek için özel detaylandırılmış kapılar ile düzenlenmiştir. İki veya daha fazla katmandan oluşan yastıklar, kenarlarından herhangi bir taşıyıcı konstrüksiyona sabitlenerek oluşturulmaktadır. Çatı, cephe gibi yapı elamanlarını kaplama amacıyla kullanılmaktadırlar. Yastık sistemlerde pnömatik birimin içerisi pozitif basınç altındadır. Yastığın tam tersi prensibinde negatif basınç altında çalışan vakum ise membran katmanlar arasındaki havanın vakumlanması ile oluşturulmaktadır (Dhumad, 2021).

Erol (1997), pnömatik sistemleri basınç durumu ile oluşan emme şişirme kuvvetleri, membran tabaka sayısı, taşıyıcı destek elemanı ve biçimlenme kıstaslarına göre incelenmektedir (Çizelge 2.22). Alçak basınçlı pnömatik yapılarda tek ve çift tabakalı yapıların emme şişirme kuvvetleri etkisi ile ek dayanaksız, normal, çizgisel ve hem noktasal hem çizgisel dayanaklı olarak dört kıstasa göre gruplandırmaktadır. Yüksek basınçlı pnömatik yapıları ise düz ve kemer formlarında konik tüpler ve sürekli tüpler olarak sınıflandırmaktadır. Böylelikle pnömatik sistemlerin basınç durumunun strüktürün fiziksel çalışma prensibini ve geometrik açıdan formunu doğrudan etkilediği söylenebilmektedir. Alçak basınç altındaki pnömatik yapıların negatif ve pozitif basınç altında olduğu geniş açıklıklı durumlarda membran yüzeyindeki sarkma nedeniyle normal dayanaklı (dikme-kolon), çizgisel dayanaklı (kablo), noktasal ve çizgisel

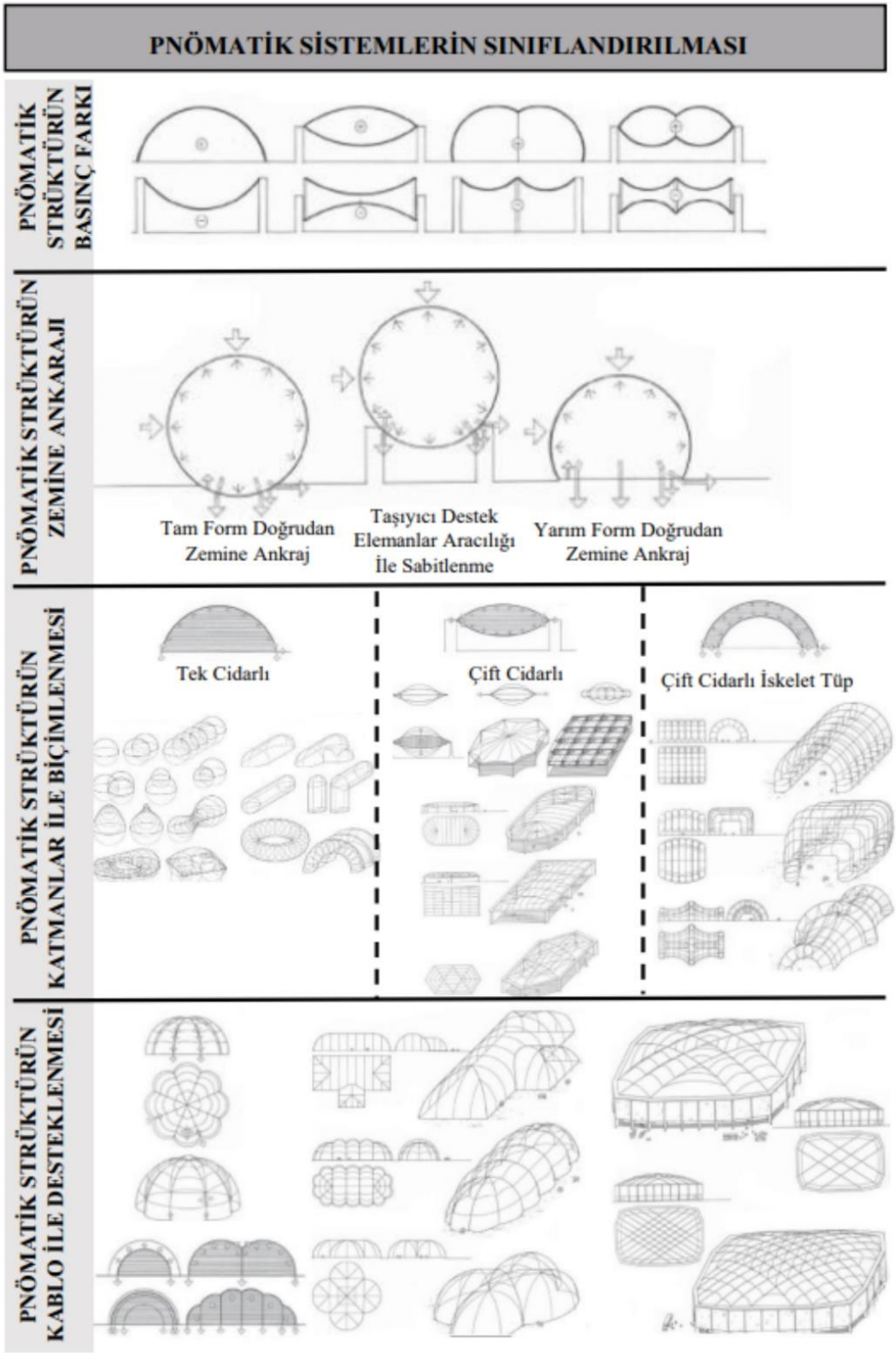
dayanaklı (hem dikme hem kablo) olarak desteklenmektedir. Tek veya çift zarlı olarak alçak basınç altındaki pnömatikler, emme ve şişirme kuvvetleri etkisinde form almaktadır. Yüksek basınçlı pnömatik strüktürler ise şişirme sonucunda membran malzemeye verilen düz veya kemer biçimini almaktadır.

Çizelge 2.22. Erol tarafından pnömatik taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması (Erol, 1997, s. 213 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)



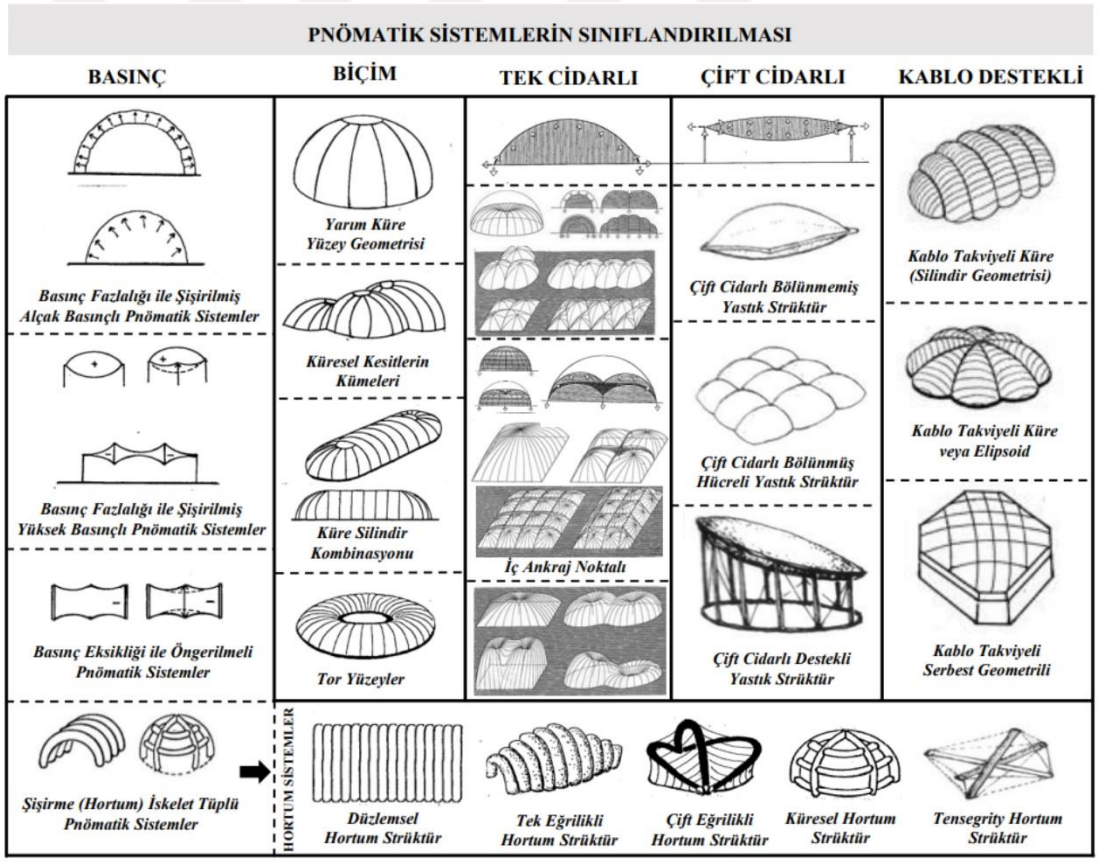
Engel (2013) pnömatik taşıyıcı sistemleri negatif pozitif basınç farkı, zemine sabitlenme şekli, tek cidarlı-çift cidarlı-iskelet tüpler olarak biçimlerine göre ve kablo destekli strüktürler ile birlikte incelemektedir (Çizelge 2.23).

Çizelge 2.23. Engel tarafından pnömatik taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması (Engel, 2013, s. 97-117 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)



Türkçü (1997), pnömatik taşıyıcı sistemleri basınç, biçim, tek cidarlı, çift cidarlı ve kablo destekli olmak üzere beş ana grupta incelemektedir (Çizelge 2.24). Basınca göre basınç fazlalığı ile şişirilen alçak basınçlılar, basınç fazlalığı ile şişirilen yüksek basınçlılar, basınç eksikliği ile öngerilmeliler ve şişirme (hortum) iskelet tüplüler olarak gruplandırılmıştır. İskelet (hortum) tüplü pnömatik sistemler ise düzlemsel, tek veya çift eğrilikli, küresel ve tensegrity hortum strüktürlerden oluşmaktadır. Aynı zamanda biçimsel açıdan küre, silindir, tor; membran malzemenin katmanlarına göre tek ve çift cidarlı; kablo taşıyıcı desteği ile silindir, küre, elipsoid ve serbest geometrili olarak alt başlıklarda incelenmektedir.

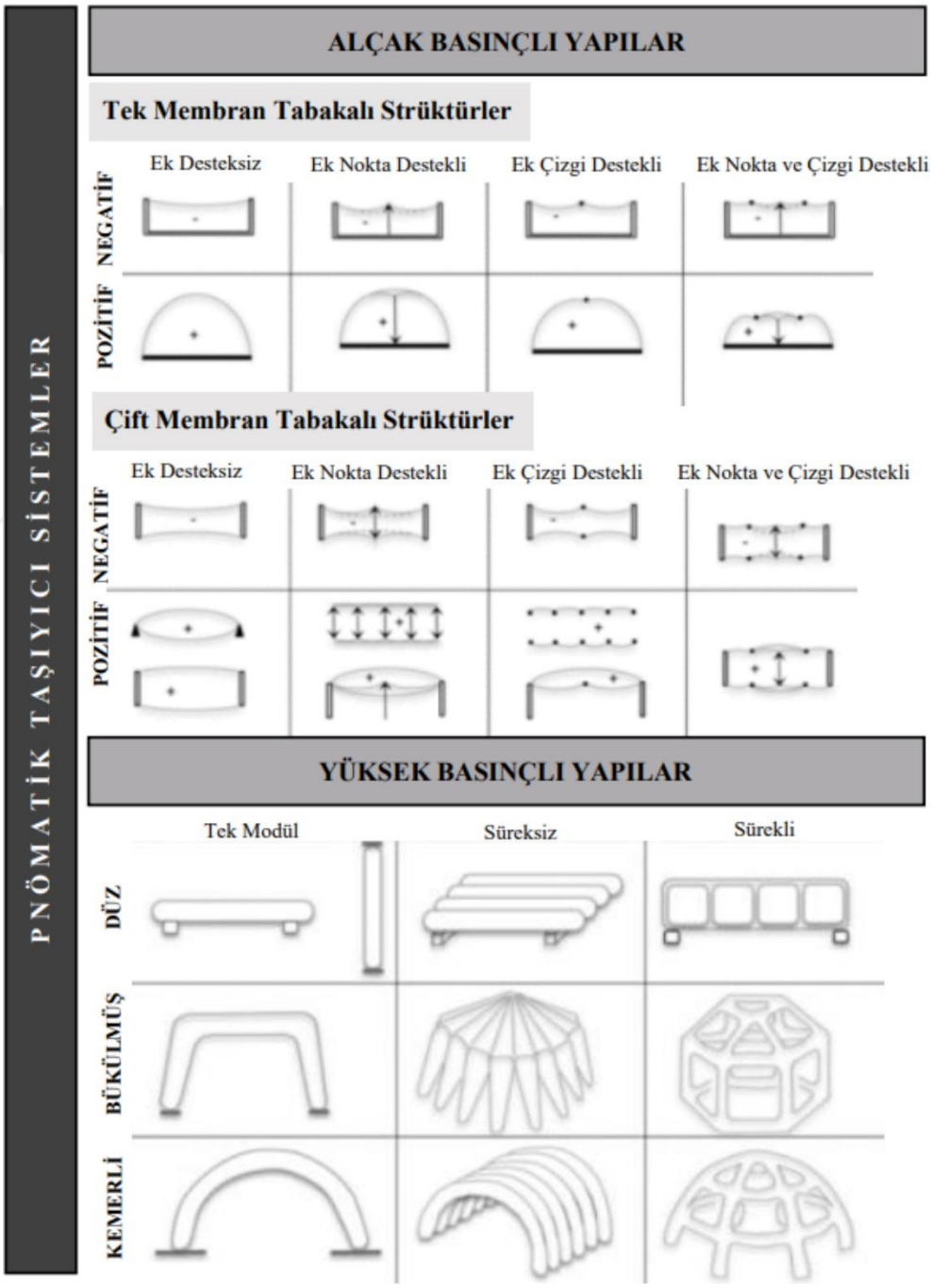
Çizelge 2.24. Türkçü tarafından pnömatik taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması (Türkçü, 1997, s. 87-95 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)



Sumovki ve Lanchester (2005) benzer bir sınıflandırma ile alçak ve yüksek basınca göre tek ve çift cidarlı membranları negatif ve pozitif basınç altında destek elemanlarına göre biçimlenmesini gruplandırarak sınıflandırmıştır (Çizelge 2.25). Alçak basınçlı tek ve çift

tabakalı membran strüktürler ek dayanaksız, nokta, çizgi ve hem nokta hem çizgi dayanaklı olarak incelenirken yüksek basınçlılar düz, bükülmüş ve kemer biçimlerde modül, süreksiz ve süreksiz olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.25. Sumovki ve Lanchester tarafından pnömatik taşıyıcı sistemlerin sınıflandırılması (Sumovki ve Lanchester, 2005 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)



Geçmişten günümüze pnömatik sistemlerin sınıflandırmaları mevcuttur. Bu sınıflandırmalarda görüldüğü üzere katman sayısı, basınç, destek elemanı ve biçim ana sınıflandırma ölçütlerini oluşturmaktadır. İncelenen sınıflandırmalardan yola çıkarak oluşturulan pnömatik sistemler hakkında bir sınıflandırma yapılmıştır (Çizelge 2.26). Katman sayısı, hava destek sistemi, basınç farkı başlıklarına ek olarak mimari kullanım yeri, geometrik katmanlar, taşıyıcı eleman ve biçimlerine göre gruplandırmalar eklenerek pnömatik sistemler altı ana grupta incelenmiştir. Katman sayısı, hava sistemi ve basınç farkı açısından değişik isimlerde incelenen ancak aynı nitelikte olan pnömatik strüktür grupları belirtilmiştir.

Çizelge 2.26. Pnömatik sistemlerin sınıflandırılması

PNÖMATİK TAŞIYICI SİSTEMLER

1. KATMAN SAYISINA GÖRE PNÖMATİK SİSTEMLER	2. HAVA SİSTEMİNE GÖRE PNÖMATİK SİSTEMLER	3. BASINÇ FARKINA GÖRE PNÖMATİK SİSTEMLER
a) Tek Cidarlı Pnömatik Sistemler	**a) Sürekli Hava Destekli Pnömatik Sistemler (şişirme-basınç fazlalığı)**	**a) Alçak Basınçlı (200 kgf/m²) Pnömatik Sistemler**
b) Çift Cidarlı Pnömatik Sistemler - Şişirilmiş İskelet Tüpler	**b) Hava Destekli Pnömatik Sistemler (emme-basınç azlığı)**	**b) Yüksek Basınçlı (2000-70000 kgf/m²) Pnömatik Sistemler**

3. MİMARİDE KULLANIMINA PNÖMATİK SİSTEMLER

a) Esas Taşıyıcı Strüktürel Sistem
b) Yardımcı Taşıyıcı Strüktürel Sistem
c) Kalıp Elemanı
d) Cephe Kaplama Sistemleri

4. GEOMETRİK KATMANLARINA PNÖMATİK SİSTEMLER

a) Tek Boyutlu Pnömatikler
b) İki Boyutlu Pnömatikler
- Yüzeysel Yastıklar
- Şişirme Hacimli Hücreler

5. TAŞIYICI ELEMANINA GÖRE PNÖMATİK SİSTEMLER

a) Saf (Yalın) Pnömatik Sistemler
b) İçeriden Dikme (Kolon) Destekli
c) Dışarıdan Dikme (Kolon) Destekli
d) Kablo veya Kablo Ağı Takviyeli
(Paralel-Radyal Tek veya Çift Tabakalı)
e) Tensegrity Strüktür ile Destekli
f) Kinetik Strüktür ile Destekli

6. BİÇİMLERİNE GÖRE PNÖMATİK SİSTEMLER

► **Alçak Basınçlı Pnömatik Sistemlerde Biçim**
• Saf Pnömatikler
a) Küre Geometrisi (Yarım Küre)
b) Küresel Kesitlerin Geometrileri
c) Silindir Geometrileri
d) Silindir ve Küre Kombinasyonu
e) Tor Yüzeyi
• Kablo Destekli Pnömatikler
a) Kablo Takviyeli Küre (Silindir Geometrisi)
b) Kablo Takviyeli Küre veya Elipsoid
c) Kablo Destekli Serbest Geometri
► **Yüksek Basınçlı Pnömatik Sistemlerde Biçim**
• Saf Pnömatikler
a) Lineer / Doğrusal (Hortum) Geometri
- Düzlemsel Hortum Pnömatik Strüktür
- Tek Eğrilikli Hortum Pnömatik Strüktür
- Ters Eğrilikli Hortum Pnömatik Strüktür
- Küresel Hortum Pnömatik Strüktür
b) Yüzeysel (Yastık) Geometri
c) Hacimsel (Hücre) Geometrisi
► **Kablo Destekli Pnömatikler**
Kablo destekli çift idarlı membranlar, Tensegrity kullanılarak geliştirilmiş pnömatik strüktürler.

Pnömatik sistemler biçim, geometri, katman, basınç, hava desteği, taşıyıcı destek strüktürler, yapılarda kullanım yeri vb. birçok hususta sınıflandırılmaktadır. Ancak pnömatik strüktürler membran tabakaların hava ile basınçlandırılarak oluşmasından dolayı genellikle katman sayısına ve hava desteğine göre sınıflandırılmaktadır. Aynı pnömatik strüktürler farklı başlıklar altında da incelenebilmektedir. Örneğin tek cidarlı pnömatik sistemler aynı zamanda sürekli hava destekli alçak basınçlı iken çift cidarlı pnömatik sistemler yüksek basınçlı olarak da adlandırılmaktadır.

Mimarlıkta kullanılan membran strüktürler geometrileri belirli sınırlar içerisinde sabitlenmiş biçimlerin öngerilmeli şekilde elde edilebildiği sistemlerdir. Öngerilmeli membranlar, iç basınçsız ters iki eğrilikli antiklastik (semer) yüzeyleri ve eş eğrilikli küreler temel formlarında uygulanmaktadır. Pnömatik sistemler için basınç, kuvvet, form, katman, malzeme vb. kıstaslara göre çeşitli sınıflandırmalar yapılmaktadır. Alçak basınçlı (200 kgf/m²) pnömatik sistemler ve yüksek basınçlı (2000-70 000 kgf/m²) pnömatik sistemler olarak iki grupta incelenebilmektedir. Aynı zamanda taşıyıcı eleman desteğine göre saf pnömatikler ve kablo takviyeli pnömatikler olarak da gruplandırılmaktadır. (Türkçü, 1997). Özetle öngerilmenin katı, sıvı veya gaz madde ile basınçlandırılan membranlar olan pnömatikler genellikle tek cidarlı ve çift cidarlı olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir.

Tek cidarlı pnömatik sistemler (alçak basınçlı pnömatik sistemler ve hava destekli pnömatik sistemler), iç hacimde basınçlandırılan hava ile ayakta durarak yapısal ve çevresel yükleri zemine aktaran strüktürlerdir. İç basıncın sağlanması, belirli bir düzeyde sabit tutulması eksenel ve radyal-santrüfujlu fanlı hava pompaları aracılığıyla sağlanmaktadır. Pnömatik sistemlerin temel prensibinin hava sirkülasyonu olmasına rağmen büyük hacimli yapıları örtmesinden dolayı hava akımı kullanıcı tarafından hissedilmemektedir. İç mekandaki hava sürekli tazelenerek temiz hava verilmektedir. Tek katmanlı membran yüzeylerin içerisine hava basılması ile oluşan bu sistemlerin yerden kopmaya ve uçmaya meyilli olmasından dolayı zemine sabitlenmesi gerekmektedir. Tek cidarlı pnömatik sistemler, membran malzemenin birleşim noktalarında ve zemin ile membran arasındaki ek yerlerinde hava kaçağı olmaması hedeflenerek tasarlanmalıdır.

Hava basıncının belirli dengede tutulması amacıyla tek cidarlı pnömatik sistemlerde özel detaylandırılmış kapılar ve açıklıklar olmalıdır (Erol, 1997).

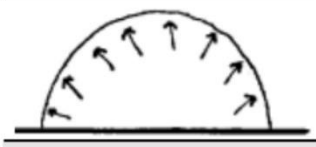
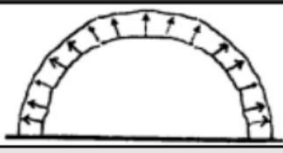
Doğadaki tüm yapılarda olduğu gibi pnömatik strüktürlerde de minimum yüzeyde en dayanımlı form olan küreye yönelmektedir. Alçak basınçlı yani tek cidarlı pnömatik sistemler küre, silindir, küre kesitleri, koni, elipsoit, tor, dönel yüzeyler ve tek-çift eğrili serbest formlarda kurgulanabilmektedir. Membran malzemenin hava desteği ile şişirilmesinden dolayı gereğinden çok büyümesini engellemek veya taşıyıcı özelliği arttırmak amacıyla pnömatik sistemlere kablo destekleri yapılmaktadır. Kablo takviyeli membran ile küre, silindir, elipsoit veya serbest formlu pnömatik strüktürler tasarlanabilmektedir. (Türkçü, 1997).

Çift cidarlı pnömatik sistemler (yüksek basınçlı pnömatik sistemler ve şişirme pnömatik sistemler), iki tabaka halinde bulunan membran malzemenin iç yüzeylerinin kapalı olarak basınçlandırılması ile oluşan strüktürlerdir. Tek cidarlı sistemler gibi sürekli hava desteğine ihtiyaç duymayan belirli aralıklarda seyrek olarak şişirilen ve bu nedenle özel detaylandırılmış giriş-çıkış-açıklıklara ihtiyaç duymamaktadır. Kendi başına taşıyıcı hale gelen membran yüzey, şişirme sonucunda kesme ve dikiş aşamasında belirlenen formu almaktadır. Çift cidarlı pnömatikler kendi formlarında şişmeleri nedeniyle tek cidarlılara göre zeminden daha kopuk olarak biçim alan strüktürlerdir. Pnömatik sistemler doğrusal, yastık veya hücre modülleri kullanılarak düzlemsel, eğrilikli, kubbesel formlar ve kombinasyonları ile biçim almaktadır. Pnömatik sistemler aynı zamanda taşıyıcı özelliklerinin arttırılması, doğrudan taşıyıcı eleman eklenmesi, geniş açıklıklar geçilmesi, membrana dayanım kazandırılması veya form verilmesi gibi amaçlar ile çelik kablolar aracılığıyla desteklenmektedir. Bu bağlamda kablo ve membran tüplerin bir arada kullanılabildiği Buckminster Fuller'in tensegrity sistemi kurgulanabilmektedir.

Tek ve çift pnömatik sistemler yapısal olarak membran malzemenin basınçlandırılarak oluşmasına rağmen yapısal özellikler açısından birçok farklılık göstermektedir. Tek cidarlı pnömatik sistemlerde iç mekan basınçlandırıldığından dolayı sürekli hava desteği gerekmektedir. Bu nedenle hava kontrolünün daha zor olduğu tek cidarlı pnömatik strüktürlerde özel detaylandırılmış kapı-pencere ve zemin ankraj noktaları gerekmektedir.

Tek cidarlı pnömatik sistemlerde insanın bulunduğu iç hacim bütünüyle basınçlandırılırken çift cidarlı pnömatik sistemlerde iki membran yüzeyin arası basınçlandırılmaktadır. Bu nedenle tek cidarlı pnömatik sistemlerde sönme olayı tüm hacimde gerçekleşirken çift cidarlılarda belirli modülde gerçekleşmektedir. Bu nedenle çift cidarlı pnömatik sistemlerde membran yüzeyde meydana gelen delik, yırtılma veya aşınma durumu yerinde onarıma daha müsaittir. Ayrıca çift cidarlı pnömatik sistemler tek cidarlılar gibi özel detaylandırılmış kapı-pencere, zemine ankraj veya sürekli hava desteği gerektirmemektedir (Çizelge 2.27).

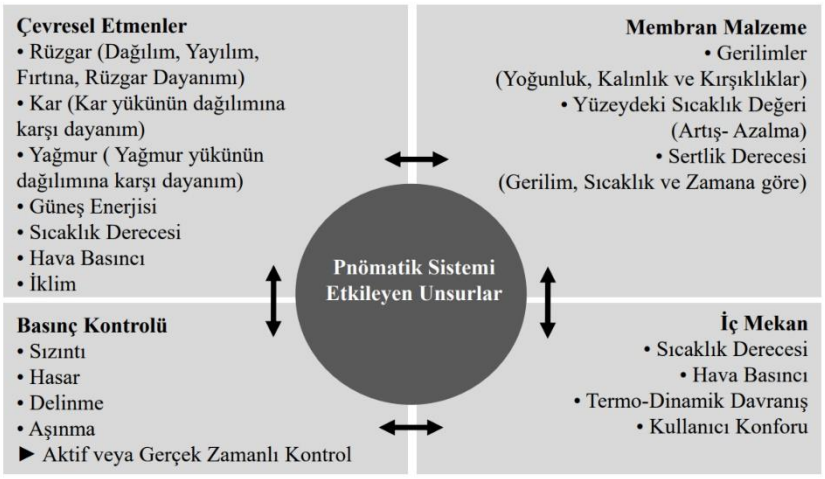
Çizelge 2.27. Tek cidarlı pnömatik sistemler ve çift cidarlı pnömatik sistemlerin karşılaştırılması

TEK CİDARLI PNÖMATİK SİSTEMLER	ÇİFT CİDARLI PNÖMATİK SİSTEMLER
	
Sürekli Hava Desteği	Hava Destekli
Basınç Fazlalığı-Şişirme	Basınç Azlığı-Emme
Alçak Basınçlı	Yüksek Basınçlı
Özel Detaylandırılmış Açıklıklar Gerekir (Kapı, Pencere)	Özel Detaylandırılmış Açıklıklar Gerekmez (Kapı, Pencere)
İç Mekan Hacim Olarak Basınçlandırılır	İki Membran Yüzey Arası Basınçlandırılır
Zemine Ankraj Gerekir	Zeminden Daha Kopuktur
Sönme Olayı Tüm Hacimde Gerçekleşir	Sönme Olayı Sadece İki Cidar Arasındaki Modülde Gerçekleşir
İnsanın Bulunduğu Hacim Basınçlandırılmıştır	İnsanın Bulunduğu Hacim Basınçlandırılmamıştır
Membran Malzemede Delik, Yırtılma, Aşınma Durumunda Sökülerek Yeniden Onarılır	Membran Malzemede Delik, Yırtılma, Aşınma Durumunda Yerinde Onarılır
Sürekli Hava Desteği Gereken ve Gerektirmeyen Durumlar Vardır	Sürekli Hava Desteği Gerektirmez
İç Mekan Hava Kalitesi Açısından İyidir	Isı Yalıtımı Açısından İyidir

Pnömatik sistemler sınıflandırılmalarda da belirtildiği üzere taşıyıcı olduğu durumlarda tek veya çift cidarlı olarak mimaride iki ana strüktürde uygulanmaktadır. Ancak günümüzde yapı komplekslerinin çok büyük yüzeylerde olan cephelerini örtmek amacıyla kaplama sistemi olarak da kullanılmaktadır. Buna ek olarak pnömatik strüktürlerin çeşitli sayıda katmanlarda yapı cephelerine uygulanması; enerji verimliliği, ısı yalıtımı, akustik, aydınlatma, yağmur suyun toplanarak yeniden kullanımı, ışık geçirgenliği, hafiflik, kolay taşınma ile uygulama gibi unsurlarda verimlilik ve iyileştirilmiş çözümler sunmaktadır.

Pnömatik sistemlerin mimaride uygulanması sonucunda en verimli çözümleri üretebilmesi için bağlı olduğu parametrelerin optimum düzeyde sağlanması ve tasarımdan uygulama aşamasına kadar değerlendirilmesi gerekmektedir. Yapısal açıdan strüktürün sürekliliği ve yük taşıma kapasitesi için basınç kontrolü ve membran malzemenin yoğunluk, kalınlık, sertlik nitelikleri belirlenmektedir. Yapısal özelliklerine ek olarak çevresel unsurlarda pnömatik sistemleri doğrudan etkilemektedir. Pnömatik sistemler genellikle hava basıncı ile şişirilerek şekillendiklerinden dolayı rüzgar, kar, yağmur, güneş, sıcaklık, hava basıncı ve iklim gibi çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Yapı yüzeyini ve taşıyıcı sistemini etkileyen bu faktörlerin iç mekana yansıyan sıcaklık, basınç ve termo-dinamik davranışı da kullanıcı konforunu ve memnuniyetini etkilemektedir (Çizelge 2.28).

Çizelge 2.28. Pnömatik sistemi etkileyen yapısal ve çevresel unsurlar (Bögle, Schlaich ve Hartz, 2009 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)



Özetle pnömatik sistemler yapısal ve çevresel faktörler açısından doğrudan birbiri ile ilişkilidir. Bir pnömatik sistemin strüktürü çevresel unsurlar ile birlikte cidar sayısı, basınç durumu, geometrisi, hava destek sistemi ve formunu etkilemektedir. Birbiri ile sıkı ilişkili bu parametreler, tasarım aşamasından uygulamaya kadar olan süreçte ve kullanım aşamasında pnömatik sistemin verimliliğini belirlemektedir. Tüm bu etmenler ile birlikte tasarlanan pnömatik sistemler; yapı içerisindeki insan yaşamını, optimum konfor koşularını (ısıl, görsel, işitsel) ve dolayısıyla da kullanıcı memnuniyetini doğrudan etkilemektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM: PNÖMATİK (ŞİŞME) SİSTEMLERİ İNCELEME ÖLÇÜTLERİ VE ÖRNEK YAPILAR

Pnömatik taşıyıcı sistemler günümüzde birçok mimari yapıda kullanılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde pnömatik (şişme) sistemleri inceleme ölçütleri ve seçilen çeşitli fonksiyonlardaki pnömatik sistemlerin kullanıldığı yapı örnekleri anlatılmaktadır.

3.1. Pnömatik (Şişme) Sistemleri İnceleme Ölçütleri

Pnömatik sistemler yapısal açıdan çok sayıda form ve fonksiyonda tasarlanabilmektedir. Pnömatik strüktüre sahip olan her yapı kendine ait özellikler içermektedir. Dolayısıyla pnömatik sistemli bir yapının niteliklerinin belirlenebilmesi amacı ile çalışmanın bu bölümünde inceleme ölçütleri geliştirilmiştir. Kullanım alanı (işlevsel açıdan); taşıyıcı sistem; plastik-polimer esaslı membran malzeme; şişme süresi, sürekliliği ve maddesi ile yapıya özel yerinde geliştirilen sistemler belirlenen beş adet inceleme ölçütüdür.

3.1.1. Kullanım Alanı (İşlevsel Açıdan)

Pnömatik (şişme) sistemler membran malzemenin ve taşıyıcının esnekliği sayesinde sınırsız biçim, ebat ve strüktürde inşa edilebilmektedir. Pnömatik sistemler ek olarak dikme, kablo ve çerçeve gibi destek taşıyıcı elemanlar ya da diğer taşıyıcı sistemler ile birlikte de uygulanabilmektedir. Pnömatik strüktürler mimari yapılarda tek başına taşıyıcı sistem, yardımcı taşıyıcı olarak yapı elemanları (çatı, duvar, kolon vb.), başka taşıyıcı sistemler ile birlikte cephe elemanı veya kalıp elemanı olarak da kullanılmaktadır. Kısa ömürlü geçici yapılardan büyük stadyum, spor salonları veya yüksek katlı yapıların cephelerine kadar birçok uygulama alanı mevcuttur. Sağladığı bu imkanlar sayesinde pnömatik strüktürler mimaride çok çeşitli işlevlerde kullanılabilmektedir. Bu bağlamda pnömatik sistemlerin; mobilya, kişisel barınma alanı, sanat ögeleri, toplanma ve eğlence mekanları, sergi elemanları (pavilion), acil durum yapıları, aşırı uç koşullara yönelik uzay yapıları, ütopik fikir projeleri, tarihi yapılara ek, otel, müze, ofis, terminal, stadyum, alışveriş merkezi, çok katlı yapı cepheleri, yüzme veya tenis gibi spor alanları için örtü, yapı elemanı açısından duvar, kalıp, baraj kontrol elemanı, tünel kalıp elemanı ve enerji sistemleriyle birlikte çeşitli işlevlerdeki örnekleri ile kullanım alanları incelenecektir.

Pnömatik sistemler yapılarda kullanılabildiği gibi iç mekanda koltuk, sandalye, puf gibi mobilya elemanlarında da kullanılabilmektedir. İstenildiği durumda şişirilerek kullanıma hazır hale getirilen elemanlar söndürülerek küçük hacimlerde saklanabilmektedir. Membran malzemenin birçok renk, geçirgenlik ve dokuda uygulanabilmesi sayesinde mobilyalarda pnömatik sistemlerin kullanımı estetik tasarımlar sunabilmektedir (Şekil 3.1). Bu sayede mimarlara çeşitli tarz ve üsluplarda şişme mobilya tasarlama imkanı sunulmaktadır.



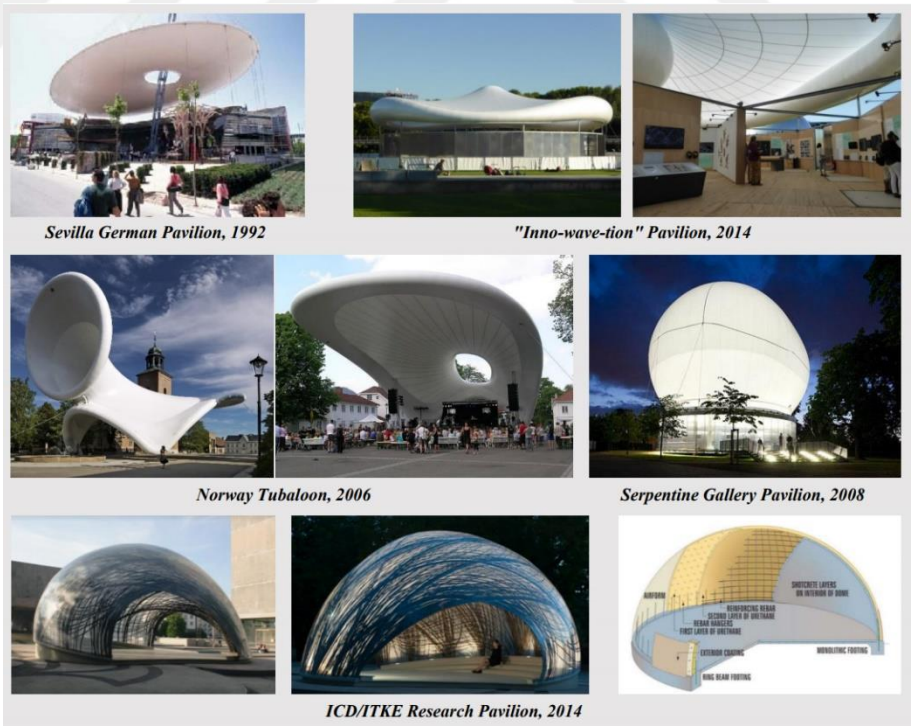
Şekil 3.1. Pnömatik sistemde uygulanmış mobilya örnekleri (Krauel, 2013, s. 32-33)

Pnömatik sistemler aynı zamanda kişisel alanlar yaratmak için de kullanılabilmektedir. Söndürülerek çantalarda küçük hacimlerde taşınmaları ve hafifliği sayesinde istenilen yere kolay şekilde kurulabilmektedir. “Cloud” ve “Cocoon” proje örneklerinde görüldüğü üzere kişi kendi barınak alanını kolaylıkla dakikalar içerisinde uygulayarak kullanıma hazır hale getirebilmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Pnömatik sistemli kişisel barınaklar (Krauel, 2013, s. 260-261-271)

Pnömatik taşıyıcı yapı sistemleri mimaride birçok form, renk, boyut, malzeme ve ek taşıyıcı eleman kurgusunda uygulanabilmektedir. Bu sayede mimari ve sanatsal açıdan nesnelerin tasarımına imkan sağlamaktadır. Böylelikle dünyanın çeşitli yerlerinde gerçekleştirilen sergi elemanı veya "pavilion" olarak adlandırılan yapılarda pnömatik strüktürler kullanılabilmektedir. 1992 yılında Sevilla'da "German Pavilion" yapısı dikme ve kablo destekleri ile çift cidarlı pnömatik bir lens olarak inşa edilmiştir. "Inno-wave-tion Pavilion" ve "Tubaloon" örneklerinde ise şişme kenar dolgu elemanlar ve kablo destekli olarak çatı ve sanatsal nesne tasarımında pnömatik strüktürler kullanılmıştır. Rem Koolhaas tarafından tasarlanan "Serpentine Gallery Pavilion" ise cam ve çelik taşıyıcı sistem üzerine oturtulmuş, kablolar aracılığıyla sabitlenmiş tek katmanlı pnömatik balon strüktürdür. Yapıda beyaz membran ışık geçirgenliği kullanılarak aydınlatılmaktadır. "ICD/ITKE Research Pavilion" yapısında kablolar ile doku kazandırılan şeffaf membran malzeme kullanılarak inşa edilmiştir. Bu sayede membran malzemenin iki katmanı arasındaki basınçlandırılan alana estetik açıdan ek çizgisel malzemeler ile doku kazandırılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Pnömatik strüktürlerin sergi elemanı olarak kullanımı (URL 152, URL 153, URL 154, URL 155, URL 156, URL 157; Doerstelmann, Knippers, Koslowski, 2015)

Pnömatik sistemlerin mimaride toplanma alanları ve sergi elemanlarında kullanımı 1950'li yıllara dayanmaktadır. Frank Lloyd Wright'ın 1957 yılında tasarladığı "Fiberthin Air House" projesi insanların toplanarak vakit geçirmeleri için mavi, kırmızı, sarı ve beyaz gibi renklerde tek katmanlı membrandan oluşan pnömatik kubbelerdir. Benzer özelliklerde "Pamplona Encounters" projesi bir meydana kurulmuştur. İnsanların toplanmaları, vakit geçirmeleri, bir araya gelerek sosyalleşmeleri için tasarlanan "Hielotrón", "Pressostatic" ve "Burbuja Manchega" projeleri pnömatik kubbe ve tünellerin kombinasyonları ile oluşan tek katmanlı pnömatik strüktürlerdir. Basınçlandırılan iç mekan kullanıcıya sınırlı ve tanımlı bir alan sunmaktadır (Şekil 3.4). Membran malzemenin nitelikleri sayesinde renkli veya şeffaf özellikler pnömatik yapıya kazandırılabilmektedir.



Şekil 3.4. Pnömatik strüktürlerin geçmişten günümüze toplanma mekanı olarak kullanımı (URL 158, URL 159, URL 160, URL 161)

Günümüzde pnömatik strüktürler toplanma alanı olarak yapı cephelerinde, açık alanlarda, yeşillik alanlarda ve sokaklarda kullanılmaktadır. Birim olarak geliştirilen sistem belirli bir konumda insanlar için sosyalleşme ve toplanma mekanı olabilmektedir. "Salzburg Balkonbiennale" örneğinde görüldüğü üzere bir kafenin mevsimsel olarak kapanması için kullanılabilmektedir. Yeşil alanlarda "Modern Tea House" ve sokaklarda "Berlin Flower Pot" projelerindeki gibi pnömatik sistemler uygulanabilmektedir (Şekil 3.5). Aynı zamanda kullanılan membran malzemenin çeşitli renk ve dokularda olması bu mekanları ilgi çekici hale getirmektedir.



Şekil 3.5. Pnömatik strüktürlerin toplanma alanı olarak yapı cephesi, yeşil alan ve sokakta kullanımı (URL 162, URL 163; Krauel, 2013, s. 177)

Pnömatik strüktürlerde kullanılan membran malzemenin çok çeşitli renk ve dokuya sahip olması nedeniyle kendi yapılarının da sergilenecek mekanlar haline gelmesini sağlamaktadır. "Kiss The Frog", "Dreamspace" ve "Archipelago" şişme sistem örneklerinde görüldüğü üzere (Şekil 3.6), renkli yapılar eğlence ve sergi alanları olarak uygulanmaktadır. Kısa sürede şişirilmeleri ve kolay taşınabilmeleri sayesinde gezici yapılar olarak kent içerisindeki meydanlar ya da yeşil alanlar gibi farklı konumlarda da inşa edilebilen strüktürlerdir.



Şekil 3.6. Pnömatik strüktürlerin eğlence ve sergi alanı olarak kullanımı (URL 164, URL 165, URL 166, URL 167)

Pnömatik sistemlerin kent içerisindeki meydanlar ya da yeşil alanlarda kullanımının "Loud Shadows", "Air Mountain Pavilion", "Medusa", "Air Forrest", "Skum Pavilion" ve "The Drift Pavilion" diğer örnekleridir. Böylelikle eğlence, sosyalleşme, bir araya gelme, sanatsal faaliyet veya sergi mekanları olarak pnömatik strüktürler

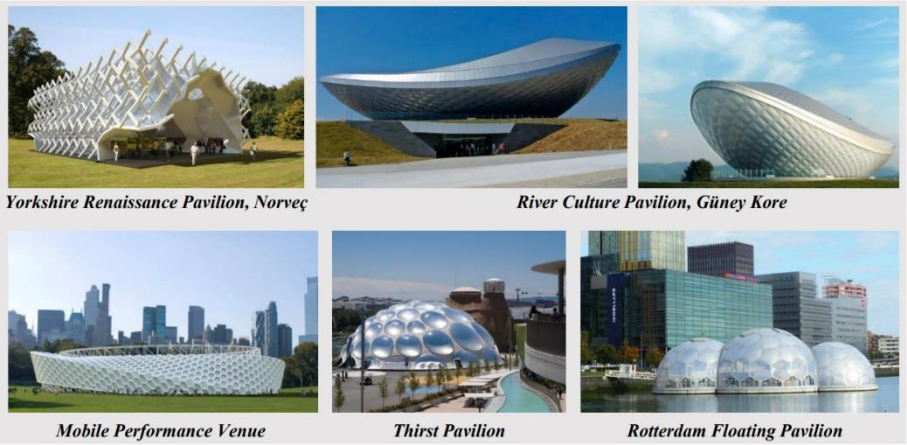
kullanılabilmektedir. Tek cidarı, çift cidarlı, örtü ya da iskelet tüplü olarak şişirilmeleri yapıya hem taşıyıcı hem de form açısından nitelikler kazandırmaktadır. Bu sayede Şekil 3.7'de görüldüğü üzere renk, şeffaflık ve form açısından çok çeşitli pnömatik yapı örnekleri uygulanabilmektedir.



Şekil 3.7. Pnömatik strüktürlerin eğlence, sosyalleşme, bir araya gelme, sanatsal faaliyet veya sergi mekanları olarak kullanımı (URL 168, URL 169, URL 170, URL 171; Krauel, 2013, s. 185-219)

Pnömatik sistemler "Yorkshire Renaissance Pavilion" ve "Mobile Performance Venue" örneklerinde görüldüğü gibi gezici yapılarda taşıyıcı tüp iskelet strüktürler olarak da tasarlanmaktadır. Hava ile basınçlandırılan iskelet tüpler istikrarlı hale gelerek kullanılmak istenilen yerde taşıyıcı sistem haline gelmektedir. Pnömatik yapının söndürülerek küçük hacimlerde taşınması, hızlı ve kolay kurulumu gezici yapılarda kullanıma elverişli olmasını sağlamaktadır. Pnömatik sistemler aynı zamanda yapılarda örtü elemanı olarak da kullanılabilmektedir. "River Culture Pavilion" örneğinde olduğu gibi yapı pnömatik sistemli kablo destekti strüktür ile kaplanmıştır. "Rotterdam Floating Pavilion" örneğinde kullanılan pnömatik strüktür geodezik kubbeler üzerine giydirilerek örtü olarak uygulanmıştır. Yüzen bir yapı olması nedeniyle hafiflik hedeflenerek pnömatik sistem tercih edilmiştir. Taşıyıcı çelik strüktür üzerine membran malzeme

sabitlenerek hava ile basınçlandırılmıştır. Pnömatik sistemler incelenen örneklerde de görüldüğü gibi genellikle hava ile basınçlandırılmaktadır. Ancak pnömatik strüktürler katı, sıvı ve gaz gibi başka birçok madde ile şişirilebilmektedir. Bunun bir örneği tuzlu su çözeltisi ile pnömatik hücrelerin basınçlandırılması sonucunda taşıyıcı hale gelen çift cidarlı "Thirst Pavilion" yapısıdır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Pnömatik strüktürlerin gezici yapılarda ve örtü elemanı olarak kullanımı (URL 172, URL 173, URL 174, URL 175, URL 176)

Pnömatik taşıyıcı sistemler hafiflik, kolay kurulum, tekrar kullanılabilme, taşınabilme ve sökülüp küçük hacimlerde nakliye edilebilme gibi yapısal özellikleri sayesinde acil durum yapılarında kullanıma elverişli strüktürlerdir. Deprem ve sel gibi doğal afetlerde, savaş ve göç durumlarında mültecilerin barınmasında ve 2019 yılı itibariyle etkili olan Covid-19 küresel salgını gibi zamanlarda pnömatik sistemler acil durum yapıları kullanılabilmektedir. Özellikle günümüzde Covid-19 pandemisi ile sağlık hizmetleri için sahra hastaneleri, izolasyon birimleri, karantina alanları ve salgın tedbirlerine yönelik günlük kullanım yapıları gündeme gelmiştir. Bu yapılar tamamen pnömatik taşıyıcı sistemli veya başka yapı elemanları ile birlikte çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. MMW Mimarlık tarafından 2020 yılında tasarlanan acil durum hastanesi gemi konteynerlerinin tek cidarlı pnömatik sistemde inşa edilmiş koridorlar ile bağlanması sonucunda inşa edilmiştir. Sahra hastanesi veya bağımsız sağlık hizmeti vermek üzere tasarlanan sistem ihtiyaç duyulan alanda kısa sürede inşa edilerek kullanıma hazır hale gelmektedir. PEIU (Portable Epidemiological Isolation Unit) tek cidarlı şeffaf PVC membrandan üretilmiş

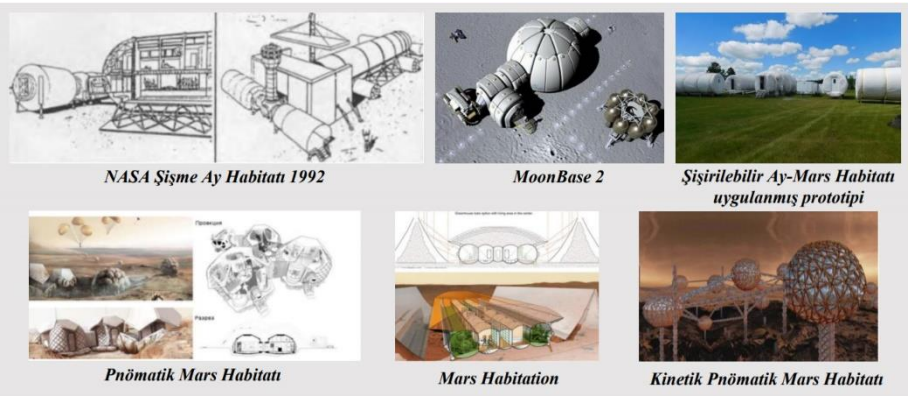
kablo ve dikiş destekli kubbelerden oluşan ve silindirik tüneller aracılığıyla bağlanan izolasyon birimleridir. CURA Koronavirüs Tedavi Merkezi, konteyner birimlere eklenen çift cidarı pnömatik sistemli sirkülasyon elemanlarından oluşan modüler sistemli sağlık yapısıdır. Mevcut hastaneye ek veya sahra hastanesi olarak kullanılabilmektedir. Covid-19 pandemi süreci boyunca ortaya çıkan sağlık hizmetlerindeki yetersizliklere yönelik geliştirilen yapılara ek olarak toplumsal hayatta psikolojik gereksinimleri de gidermek için yeni yapı tipolojileri ortaya çıkmıştır. Toplumsal alanda salgın koşullarına uygun bir araya gelebilme ve sosyalleşme imkanı sağlayan bireysel yapı örnekleri de geliştirilmiştir. Örneğin üniversite öğrencileri tarafından tasarlanan sosyal mesafe, hijyen ve kişisel kullanım alanı sunan çadır, çift cidarlı pnömatik sistemde tasarlanmıştır. Sırt çantasında küçük bir hava pompası ile birlikte taşınarak istenilen konumda dakikalar içerisinde kurulabilmektedir. Bu sayede pandemi sürecinde toplumsal alanda bireysel mekanlar ile sosyalleşebilme imkanı sağlanmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Pnömatik strüktürlerin Covid-19 pandemisi bağlamında acil durum yapısı olarak kullanımı (URL 177, URL 178, URL 179; Manrique, Pérez, Calonge ve Quin, 2020)

Pnömatik taşıyıcı sistemler aşırı uç koşullara yönelik olarak kullanıma elverişlidir. Özellikle pnömatik sistemlerin kullanımı dünyadan uzaya giden araçlar içerisinde küçük hacimlerde, hafif şekilde taşınabilmesi, gidilen noktanın niteliklerine göre dayanım kazandırılabilmesi ve kolay kurulumu sayesinde uzay yapılarında tercih edilen

strüktürlerdir. Bu bağlamda uzay yapılarında pnömatik sistemlerin projeleri kapsamında kullanım örnekleri mevcuttur. 1992 yılında NASA Şişme Ay Habitatı mimar Kriss Kennedy ve ekibi tarafından şişme ve metal yüzeysel taşıyıcılar ile birlikte silindirik formda tasarlanmıştır. Modüler olarak geliştirilen sistem ihtiyaca bağlı olarak yatay-çizgisel açıdan büyüyebilmektedir. MoonBase 2, 2007 yılında Arturo Vittori ve Andreas Vogler tarafından ay yüzeyinde dört astronotun altı ay yaşamını sürdürmesi için tasarlanan kubbe ve silindirik formlu uzay yapısıdır. Pnömatik sistemli yapının uzay koşullarında dayanımı için membran malzeme ile birlikte regolit kullanılmıştır. Mars yüzeyinde yaşanabilir bir habitat tasarımı olan ve "Space Nomad" olarak adlandırılan proje Macaristan Debrecen Üniversitesi'nden Gábor Bihari, Pneumocell Co. ve Thomas Herzig tarafından geliştirilmiştir. Pnömatik sistemli yapının dış çeperi üç katmanlı ve gazla doldurulmuştur. Böylelikle iç mekanda yüksek-düşük sıcaklık, kum fırtınaları, rüzgarlar ve atmosferik etkiler gibi çevresel koşullardan korunarak yaşamın sürdürülebildiği bir mekan oluşturulmaktadır (URL 180). ILMH (Şişirilebilir Ay ve Mars Habitatı); prototipi inşa edilen, öğrenciler tarafından NASA destekli Mars'ta insan kolonisi kurma ve sürdürme amaçları ile geliştirilmiş araştırma projesidir. İnsanların yaşayacağı, eşyaların depolanacağı, onarım veya bakım yapılacağı, atölye birimleri ve bitki yetiştirileceği beş ayrı pnömatik birimden oluşan sistem insan yaşamını aşırı koşullarda sürdürülebilir hale getirme hedefleri ile planlanmıştır (URL 181). Aynı zamanda pnömatik strüktürlerin kinetik elemanlarla çevresel koşullara uyum sağlayabilen uzay yapıları olarak tasarlanmış fikir projeleri de mevcuttur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Pnömatik strüktürlerin uzay yapılarında kullanımı (URL 182, URL 183, URL 184, URL 185; Kronenburg, 1995; Ağrıbaş, 2020)

Pnömatik sistemleri günümüzde halen farklı kullanım alanları araştırılan ve çeşitli sistemlerle birlikte geliştirilmesi hedeflenen strüktürlerdir. Bu bağlamda uzay yapıları gibi ütopik veya fikir projeleri sürekli olarak tasarlanmaktadır. "Inflation Tower", gökdelen olarak inşa edilen yapı cephesini pnömatik tüpler ile basınçlandırmayı hedefleyen bir projedir. EXPO 2020 Dubai için tasarlanan "Spain Pavilion" ise sarı renkli beş adet pnömatik tüp aracılığıyla örtülen kanopi yapısıdır. Yeme-içme, gezme, oturma, galeri, yarı açık mekanlar ve alışveriş mekanlarını kapsamaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Pnömatik sistemli fikir projeleri (URL 186, URL 187)

Pnömatik sistemler aynı zamanda montaj elemanlarının azlığı, kurulup sökülebilmeleri ve küçük hacimlerde yerinde şişirilmeleri nedeniyle tarihi yapılara ek olarak kullanılabilmektedir. Pnömatik strüktür çelik elemanlar ile yapılara belirli noktalardan sabitlenmektedir. Böylelikle mevcut tarihi bir yapıya zarar vermeden uygulanma ve kullanım ömrü sonunda yapıya zarar vermeden sökülebilmektedir. "Children Day Care Center" projesinde mevcut kütlesel iki yapı arasına örtü elemanı olarak pnömatik sistem uygulanmıştır. Mevcut yapılara zarar verilmeden noktasal çelik yapı elemanları ile pnömatik strüktür ankraj edilmiştir. Tarihi kolezyum olan "Nimes Arena" yapısının mevsimsel olarak çatı ile örtülmesi ve gölgelenmesi pnömatik strüktür sağlanmıştır. Aynı zamanda pnömatik membran yapı kullanılmadığında kolezyumun üst katlarındaki odada saklanarak ihtiyaç halinde şişirilebilmektedir. Çift cidarlı membran malzemenin basınçlandırılması ile taşıyıcı hale gelen sistem belirli noktalarda kablo ve dikme elemanları kullanılarak desteklenmektedir. Böylelikle sarkma engellenerek geniş açıklıklar pnömatik sistemler ile geçilebilmektedir. "Grand Palais Monumenta" projesinde ise Anish Kapoor tarafından tasarlanan mor renkli pnömatik yapı mevcut tarihi yapının avlusunda şişirilerek sergi salonu haline getirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Pnömatik sistemlerin tarihi yapıda kullanımı (URL 188, URL 189, URL 190)

Pnömatik sistemler aynı zamanda otel, müze ve ofis fonksiyonlu binalarda taşıyıcı veya yardımcı yapı elemanı olarak kullanılabilen strüktürlerdir. "Hotel Burbuja" tek cidarlı şeffaf ve beyaz membran kubbelerden oluşan pnömatik sistemli bir otel yapısıdır. "In Orbit Museum" kişisel tek cidarlı pnömatik yapılar ile gezilebilen bir müzedir. Mevcut yapıya ek olarak tasarlanan "Bubble" müze yapısı ise galeriden yükselen mavi renkli pnömatik yapı ile birlikte tasarlanmıştır. Ofis yapılarında pnömatik sistemlerin kullanımı ise çift katmanlı tamamen şişme "Microcity Sales Office" ve cephe kaplaması olarak "La Miroiterie Reklam Merkezi" örneklerinde gösterilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Pnömatik sistemlerin otel, müze ve ofis yapılarında kullanımı (URL 191, URL 192, URL 193, URL 194, URL 195)

Pnömatik sistemler geniş açıklıkları ve büyük hacimleri iç mekanda ek taşıyıcı olmadan geçebilmektedir. Bu sayede Budapeşte Havaalanı uçak hangarı örneğinde görüldüğü üzere çift cidarlı pnömatik strüktürler 4 000 m² alanı örtebilmektedir. Ulaşım yapıları istasyonları ya da terminallerde kullanılan pnömatik strüktürler kolonsuz bütüncül bir iç hacim sunmaktadır. Avusturya Kayak Merkezi İstasyonu, zorlu iklim koşullarına yönelik yalıtım sağlaması amacıyla pnömatik örtü ile kaplanmıştır. Aynı zamanda inşa edilen betonarme veya çelik yapıların üzerini örtmek için pnömatik strüktürlerin kullanımı Heathrow Havaalanı Merkez Otobüs Terminali örneğinde görülmektedir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Pnömatik sistemlerin ulaşım yapılarında kullanımı (URL 196, URL 197, URL 198)

Pnömatik sistemler geniş açıklıkları örtebilmeleri ve başka sistemler ile kombinasyonlu kullanılabilmeleri sayesinde stadyum yapılarında da sıklıkla uygulanmaktadır. "Madrid Bull Area" çatı örtüsü, kenar noktalardan çelik dikmeler ve çelik kablolar ile desteklenen çift cidarlı lens formlu pnömatik yapıdır. "Mineapolis Metrodome" ve "Tokyo Dome" stadyum yapıları betonarme yapım sistemi ile inşa edilmiştir. Kablolar aracılığı desteklenene beyaz renkli membran malzeme geniş açıklıklı spor yapılarının üzerini kolonsuz bir şekilde geçebilmektedir. Aynı zamanda membran malzemenin kısmi geçirgenliği sayesinde iç mekana doğal gün ışığı sağlanmaktadır. Münich Olimpiyat Parkı'nda bulunan "Lifting Lens" ise belirli bir alanı örtmek amacı ile iki katmanlı pnömatik sistemden oluşmaktadır. Alt membran yüzeyi sarkma problemlerinin giderilmesi için kablolar ile desteklenmiştir. Lens formlu yapı, iki gergi noktasında bulunan ve kablolarında ulaştığı kolonlar aracılığı ile taşınmaktadır (Şekil 3.15).



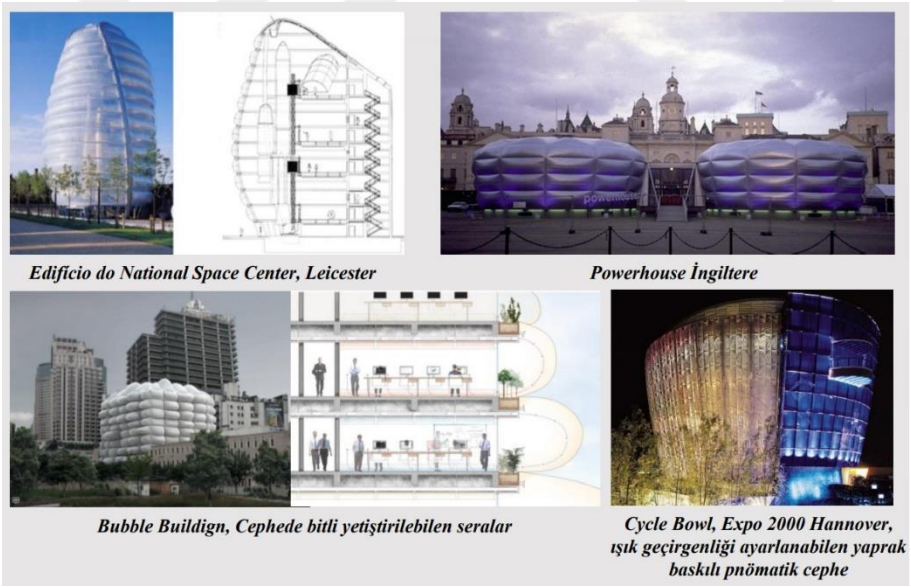
Şekil 3.15. Pnömatik sistemlerin stadyum ve spor yapılarında kullanımı (URL 199, URL 200, URL 201; Moritz, 2000-2020)

"12th World Orchids Konferans Merkezi", "L35Vitam Park" ve "Aquamunda France" örneklerinde görüldüğü gibi pnömatik sistemler tüm yapı üzerinde silindirik, kubbe veya organik formu olarak uygulanabilmektedir. "Oxigeno Alışveriş Merkezi" ve "Lilienthalhaus" örneklerinde şeffaf membran malzeme kablo destekleri ile kullanılmıştır. İç mekana doğal aydınlatma ve ışık geçirgenliği saylayan çatı örtü elemanıdır. "Leisure Shopping Complex" çelik strüktür üzerine sabitlenmiş çift cidarlı pnömatik çatı örtüsüne sahip bir alışveriş merkezidir (Şekil 3.16). Pnömatik sistemler tek veya çift cidarlı olarak kablo destekleri ile geniş açıklıklı betonarme ya da çelik taşıyıcılı yapıların çatı örtüsünde inşa edilebilmektedir.



Şekil 3.16. Pnömatik sistemlerin organik formlu yapılarda ve çatı örtüsünde kullanımı (URL 202, URL 203, URL 204, URL 205, URL 206, URL 207)

Pnömatik sistemler taşıyıcı olarak kullanılmakla beraber yüksek katlı yapılarda cephe kaplama elemanı olarak da kullanılabilmektedir. Hafif ve katmanlı olması durumu, şişirme maddesi ve kaplama membran malzemenin özelliklerine göre çeşitli form ve fonksiyonda uygulanmaktadır. Pnömatik sistemlerin cephede kullanımının estetik açıdan oluşturduğu görsel tasarıma ek olarak enerji verimliliği, aydınlatma, güneş kontrolü, ısıl konfor ve ışık geçirgenliği gibi hususlarda da yapıya nitelik kazandırabilmektedir. Çok katlı "Edifício do National Space Center" yapısı, şeffaf membran silindirik yatay tüpler ile kaplanarak oluşturulan cephe ile tasarlanmıştır. "Bubble Building", Şanghay'da ikonik heykelimsi bir yapı oluşturmak amacı ile 2013 yılında tasarlanmıştır. Pnömatik sistemli cephede oluşan beyaz membran hava yastık sistemi ile kaplanmıştır. Şişme cephe sistemi sayesinde kullanılan mekanlar ile cephe dış yüzeyi arasında mikro sera olarak tanımlanan bir alan ortaya çıkmıştır. Bitkilendirilen bu bölge sayesinde yalıtım, iç mekan sıcaklığının korunması, havalandırma, oksijen desteği ve enerji verimliliği gibi unsurlar yapıya kazandırılmıştır. "Powerhouse" ve "Cycle Bowl" örneklerinde ise yapı cephesi pnömatik sistem ile basınçlandırılarak oluşturulmuştur. Membran malzeme sayesinde tasarlanan desen, renk ve doku yapı yüzeyine yansıtılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Pnömatik sistemlerin çok katlı yapılarda cephe kaplaması olarak kullanımı (URL 208, URL 209, URL 210, URL 211)

Pnömatik sistemler spor yapılarının geçici olarak kapatılması ve örtülmesi için de kullanılmaktadır. “Wallacepark Tenis Kortu” örneğinde görüldüğü üzere kablolar ile iki yönde desteklenen pnömatik beyaz membran yapı tenis kortlarının üzerini örtmektedir. Türkiye, Bursa’da “Yenigün Spor Tesisleri Balon Kort” yapısında da mevsimsel olarak tek cidarlı pnömatik sistemde inşa edilmiştir. Kış mevsiminde şişirilerek kapatılan alan sıcak yaz mevsimlerinde söndürülerek kapatılmaktadır. Bu sayede yapı tekrarlı olarak kullanılabilmektedir. Yine Türkiye, Bursa’da “Umurbey Yüzme Havuzu” ve “Mihraplı Yüzme Havuzu” örneklerinde geçici olarak uygulanmış tek cidarlı pnömatik sistem örnekleri görülmektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Pnömatik sistemlerin spor yapılarında geçici olarak kullanımı (URL 212; Bal, 2022)

Mimaride pnömatik strüktürler, taşıyıcı sistem olarak kullanımlarına ek olarak yapı elemanı olarak da kullanılabilmektedir. Düz veya organik formlu yüzeylerde duvar elemanı olarak pnömatik sistemlerin uygulandığı birçok örnek mevcuttur. Açık ofis planında iç mekanın bölümlendirilebilmesi için şişme ve sönme hareketleri ile kinetik yapılı pnömatik duvar yüzeyleri geliştirilmiştir. Betonarme bir yapıda duvar dolgusu olarak tuğla veya taş yerine şişme strüktürler uygulanabilmektedir. Böylelikle söndürülüp şişirilerek, iç mekan bölünerek veya birleştirilerek düzenlenebilen esnek bir plan şemasına sahip olabilmektedir. Pnömatik duvar yüzeyleri membran tabaka şişirilerek elde edilebildiği gibi çerçeveler aracılığı ile de taşınabilmektedir. Tüm yapı duvar yüzeylerinin pnömatik sistemli tasarlandığı “Tiny House” ve kolonların da duvarlarla birlikte pnömatik nitelikte olduğu “Exhibition Hall” örnekleri Şekil 3.19’da görülmektedir.

Pnömatik sistemler duvar yüzeylerindeki uygulamalarda genellikle sürekli hava desteği gerektirmemesi amacıyla çift cidarlı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.19. Pnömatik sistemlerin duvar yüzeylerinde kullanımı (URL 213, URL 214, URL 215, URL 216, URL 217)

Mimaride pnömatik strüktürler, taşıyıcı, yardımcı ve kalıp elemanı olarak işlevsel açıdan üç ana grupta kullanılmaktadır. Pnömatik strüktürlerin betonarme yapıların kalıp elemanı olarak kullanım sistemine "Binishell Metodu" denilmektedir. Dante Bini tarafından geliştirilen bu kalıp yöntemi betonarme sistemde yapılar inşa edilirken pnömatik (şişme) kalıp elemanlarının kullanımını kapsamaktadır. Betonarme kubbesel konut yapıları için pnömatik kalıplar kullanılmaktadır. Şişirilen membran yüzey üzerine dökülen beton pnömatik sistemin formunu almaktadır. Böylelikle betonarme yapılara çeşitli yüzey dokuları, açıklıklar ve organik biçimler verilebilmektedir. "Bubble House" örneğinde görüldüğü üzere pnömatik kalıp üzerine döşenen çelik donatılar üzerine beton püskürtülerek uygulanmaktadır. Kuruyan betonarme yüzey içerisinden pnömatik kalıp söndürülerek alınmaktadır. Bu sayede pnömatik kalıp tekrarlı olarak kullanılabilmektedir (Şekil 3.20).



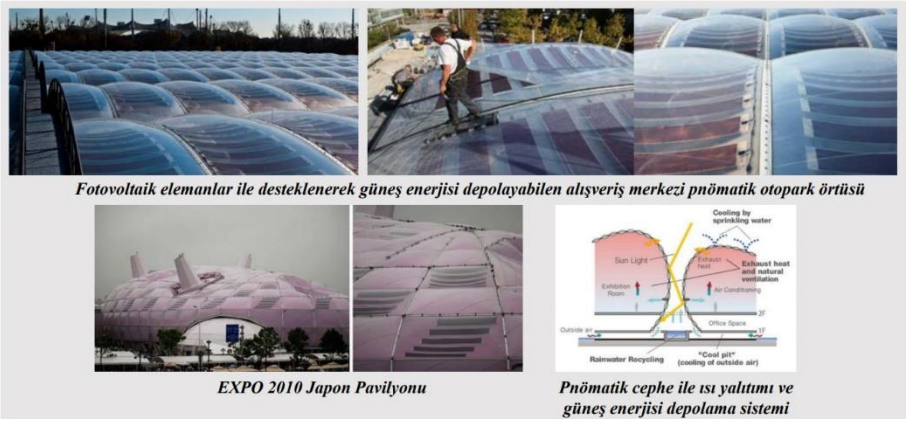
Şekil 3.20. Pnömatik sistemlerin kalıp olarak kullanımı (URL 218; Heifetz, 1972)

Pnömatik sistemlerin mimaride kullanım alanlarına ek olarak mühendislik bilimlerinde de uygulamaları mevcuttur. Barajlarda su kontrolü için şişirilebilir savaklar ve kanatlı savaklar pnömatik yapıda inşa edilebilmektedir. Bu sayede istenilen durumda barajdaki suyun akması veya durdurulması sağlanabilmektedir. Nikaryo Kamikawara Barajı, Japonya Tama Nehri ve Ina Nehri, ABD Hudson Nehri üzerindeki Curtis Barajı ve Mississippi Nehri üzerindeki Highgate Barajı'nda uygulanan pnömatik savak örnekleri Şekil 3.21' gösterilmiştir. Pnömatik sistemler aynı zamanda yeraltı ulaşım tünelleri kazılışı esnasında güvenlik ve toprak tabakaların tutulması amaçları ile kullanılmaktadır. Pnömatik tüp eleman tünel boyunca şişirme ve söndürme işlemleri tekrarlanarak kaydırılmaktadır ve defalarca kez kullanılabilmektedir.



Şekil 3.21. Pnömatik sistemlerin baraj savaklarında ve yeraltı ulaşım tünellerinde kullanımı (Gebhardt, 2019; Martinez, Davalos, Barbero, Sosa, Huebsch, Means, Banta, Thompson, 2012)

Günümüzde ise pnömatik sistemler yapısal özellikleri ile birlikte geliştirilebilen enerji verimliliği hususlarında güçlendirilerek yapılarda uygulanmaya çalışılmaktadır. Pnömatik yapı cephe yüzeylerinde alışveriş merkezi pnömatik otopark örtüsü örneğinde olduğu gibi fotovoltaik paneller ile güneş enerjisi depolanabilen sistemler geliştirilmektedir. Pnömatik yapının pasif tasarım elemanları ile ısı yalıtımı, gölgeleme, akustik, ışık geçirgenliği, aydınlatma ve havalandırma gibi unsurları verimli şekilde sağlayabilmesi hedeflenmektedir. EXPO 2010 "Japon Pavilion" örneğinde olduğu gibi yapı tasarımı ile ısı yalıtımı, enerji verimliliği ve havalandırma sistemi pnömatik yapı yüzeyi ile sağlanmaktadır (Şekil 2.22).



Şekil 3.22. Pnömatik sistemlerin enerji ve havalandırma sistemleri ile kullanımı (URL 219, URL 220, URL 221)

3.1.2. Taşıyıcı Sistem

Pnömatik strüktürler membran tabakaların genellikle hava ile basınçlandırılması sonucunda taşıyıcı bir sistem haline gelmektedir. Pnömatik strüktürlerde hava destekli membran sistem tek başına taşıyıcı olarak kullanılabilmektedir. Geniş açıklıkların, büyük hacimlerin, kar vb. yüklerin, topoğrafyanın neden olduğu zorluklar; form veya estetik amaçlarla pnömatik strüktürlere ek olarak çeşitli taşıyıcı elemanların kullanımını gerektirmektedir. Bunlar içten veya dıştan destekli kolonlar ile kablolar, tensegrity strüktürler ve hareketli kinetik sistemlerdir. Pnömatik sistemler strüktürel olarak desteklenerek taşıyıcılık, dayanıklılık, daha geniş açıklık, hareketlilik, estetik gibi yapısal ve biçimsel özellikler kazanmaktadır.

a) Doğrudan Pnömatik Taşıyıcılı Strüktürler

Pnömatik sistemler tek veya iki membran tabakasının iç hacminin katı, sıvı veya gaz olmak üzere genellikle hava ile basınçlandırılması sonucu taşıyıcı özellik kazanan strüktürlerdir. Pnömatik strüktür yapının ana yük taşıyıcı elemanıdır. Mimaride pnömatik strüktürlerin kullanım yeri, işlevi, biçimi, yük durumu, geçilecek hacmin büyüklüğü gibi yapısal özellikler ve uygulanacağı yerin iklimsel ya da çevresel özellikleri doğrultusunda pnömatik taşıyıcı sistemin özelliği seçilmektedir. Doğrudan pnömatik taşıyıcılı olan strüktürlerde tüm bu unsurlar, hava destekli fanlar aracılığı ile öngerilmeli hale gelen membran yüzeyler ile taşınarak zemine aktarılmaktadır. Tek cidarlı alçak basınçlı, çift cidarlı yüksek basınçlı veya iskelet tüpler ile oluşturulmuş hava destekli pnömatik sistemler ile kurgulanan küre, silindir, kesik küre, küre silindir kesişimi, kemerli formlar, tor yüzeyler ve serbest formlarda uygulanabilmektedir. Sadece pnömatik özelliklerin kullanılarak oluşturulduğu strüktürler tek başına bir yapının olarak mimaride kullanılmaktadır.

b) Kablo veya Dikme Destekli Pnömatik Strüktürler

Doğrudan pnömatik taşıyıcılı strüktürlerin yetersiz geldiği veya örtülecek hacmin çok büyük olduğu durumlarda kablo veya dikme destekli pnömatik (şişme) strüktürler uygulanmaktadır. Pnömatik strüktürlerde tek veya çift tabakalı membran örtünün içten veya dıştan çelik veya ahşap dikme (kolon) elmanı ile desteklenmesi ve tek, çift veya çelik kablo ağı sistemleri ile güçlendirilmesidir. Bu durumda yapısal açıdan membran malzeme yırtılmaya karşı dayanımlı, geniş açıklıklar geçebilir, sarkma eğrisi azalmış ve daha fazla yük taşıyabilir hale gelmektedir. Dışarıdan asma veya içeriden destekleme yöntemleri ile kullanılan dikme veya kablolar pnömatik strüktürlerde yeni formları ve fonksiyonları ortaya çıkarmaktadır. Bu sayede klasik geometriler haricinde esnek membran malzeme ile sınırsız formda geniş açıklıklar kolonsuz olarak geçilebilmektedir. Sadece pnömatik özelliklerin olduğu yapılara ek dikme ve kablo destekleri ile birlikte mimaride tek yapının tüm taşıyıcısı; çatı, duvar, örtü ve kolon gibi yapı elemanları olarak kullanılabilmektedir.

c) Çerçeve Taşıyıcılı Pnömatik Strüktürler

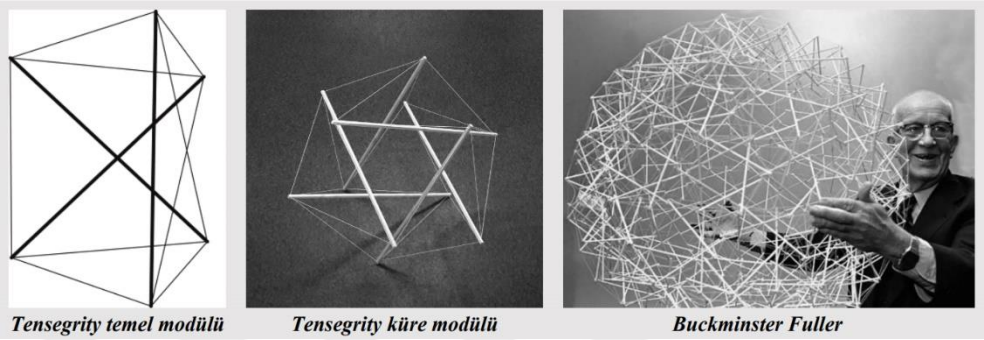
Pnömatik sistemlerin çeşitli formlardaki çerçeveler aracılığı ile biçimlendirilmesi ve aynı zamanda taşıyıcı özelliklerinin çerçevelerden destek alarak kendi içerisinde basınçlandırılan hücreler haline gelmesini sağlayan strüktürlerdir. Çelik, alüminyum veya ahşap malzemeler ile oluşturulan çerçeveler membran malzemenin gerilmesi ve arada kalan kısmın basınçlandırılması ile oluşmaktadır. Tek veya çift katmanlı olarak uygulanabilen çerçeve ile destekli pnömatik sistemler yapının cephe sistemlerinin ve çatı sistemlerinin oluşturulmasında mimaride kullanılabilmektedir. Ana taşıyıcı eleman basınçlandırılmış pnömatik strüktürler değil çerçevelerdir.

Büyük alanları kapsayan yapılarda cephe yüzeyinde kullanılacak olan pnömatik sistemler genellikle kurgulanan taşıyıcı sisteme adapte edilerek oluşturulmaktadır. Böylelikle taşıyıcı olmayan pnömatik kaplama taşıyıcı elemana göre dikdörtgen, eşkenar dörtgen, silindir veya çubuk formlar kazanmaktadır. Yapı cephesinde inşa edilen uzay kafes, çelik ve ahşap ızgara, alüminyum kafes gibi strüktürlere sonradan gerilme ile birimler halinde eklenen membranın basınçlandırılması sonucunda meydana gelmektedir. Basınçlandırma için gerekli olan hava, argon veya nitrojen gibi madde geliştirilen ek bir makine sistemi ile pnömatik birimlere ulaştırılmaktadır. Bu sayede dayanımlı hale gelen pnömatik cephe sistemi oluşmaktadır.

d) Tensegrity Taşıyıcılı Pnömatik Strüktürler

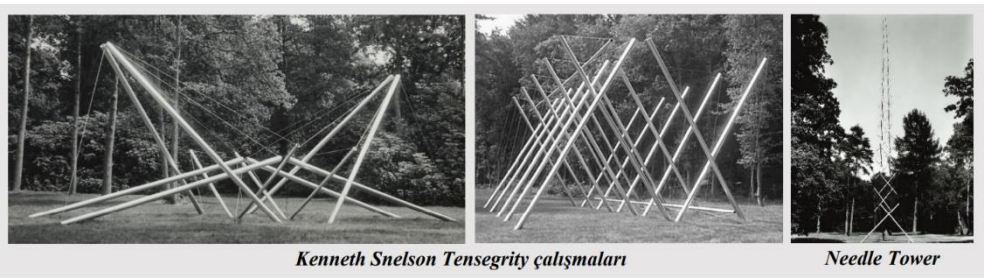
Tensegrity (tension+integrity=çekme+bütünlük) kavramı, 1960'lı yıllarda Buckminster Fuller tarafından patenti alınmış basınç ve çekme elemanlarının dengeli bir bütün olarak çalıştığı sistemlerdir. Fuller, tensegrity strüktürleri "gerilim okyanusu içindeki basınç adaları" olarak tanımlamaktadır (Fuller, 1961). Tensegrity sistemler; birbiri ile devamlılıkta olan kablolar, kesişimde olmayan belirli açılarda kurgulanan çubuklar ve düğüm noktalarındaki birleşim elemanlarından oluşmaktadır. Bu sayede sistem taşıdığı yüke oranla oldukça hafif, ince ve az sayıda yapı elemanından meydana gelmektedir. Yapısal ve çevresel yüklerin sistem içerisinde basınç, çekme ve gerilme kuvvetleri ile düzgün akışı tensegrity strüktürü dengede tutmaktadır. Çubuk elemanlarının kullanım

adedine, tabakasına ve birleşim geometrilerine göre birim modellerin oluşturulduğu tensegrity strüktürler; düzlemsel, dikey, kablo ağı, kemer ve kubbe formlarında olabilmektedir (Şekil 3.23). Tensegrity strüktürler günümüzde farklı bilim dallarında mimaride taşıyıcı sistem, mobilya, uzay yapısı; mühendislikte robotik yapılarda; tıpta robotik düzenlenmiş organ, robotik ameliyat donanımları; sanatta sergi elemanı gibi fonksiyonlarda kullanılmaktadır.



Şekil 3.23. Tensegrity temel ve küre modülü ile Buckminster Fuller (URL 222, URL 223, URL 224)

Tensegrity sistemlerin özdeş üç sıkıştırma desteği ve dokuz germe kablosundan oluşan birimi ana modül olarak kabul eden Kenneth Snelson tarafından 1948 yılında inşa edilen "X-Column" heykeli ilk tensegrity yapı olarak kabul edilmektedir (Motro, 2003). Kenneth Snelson tarafından tasarlanan "Needle Tower" tensegrity temel modülde inşa edilmiştir (Şekil 3.24). Basınç kuvvetlerini taşıyan kablolar ve çekme kuvvetlerini taşıyan çelik kablolardan oluşan sistem 18 metre yüksekliktedir.



Şekil 3.24. Kenneth Snelson tarafından inşa edilen tensegrity yapılar ve Needle Tower (URL 225)

Tensegrity sistemler geliştirildikleri ilk zamandan günümüze mimaride kullanım alanları artmıştır. Hafif ağırlıklar ve az malzeme ile geniş açıklıkların geçilebilmesi tensegrity strüktürlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Kurilpa Köprüsü, tensegrtiy taşıyıcı elemanlardan oluşmaktadır. Çelik dikmeler, çelik köprü tabliyesi, prekast beton döşemeler ve çelik kablolar ile inşa edilmiştir. Avustralya'daki Brisbane Nehri üzerinde bulunan köprü bisiklet ve yaya geçişlerini kapsamaktadır. Atlanta'da 1992 yılında inşa edilen ancak günümüzde yıkılmış olan "Georgio Dome" tensegrity sistemde geniş açıklıklı stadyum yapısını örten çatı strüktüründen meydana gelmektedir (Şekil 3.25). Böylelikle tensegrity sistemler mimaride taşıyıcı veya çatı, örtü, kubbe, gibi yardımcı elemanlar olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.25. Tensegrity taşıyıcılı yapı örnekleri (URL 226, URL 227)

20. yüzyılda ortaya çıkan pnömatik sistemler ve tensegrity strüktürler eş zamanlı olarak geliştirilmemesine veya malzeme ile taşıma stratejilerinde farklı olmasına rağmen her ikisi de maddeyi bir gerilim durumundaki başka bir maddenin içinde sıkıştırma durumu yarattığı için benzer kavramlar olarak kabul edilmektedir (Motro, 2003). Çubuk ve kablolardan oluşan ağ sisteminin hava destekli membran malzeme ile birlikte kurgulanması ile pnömatik tensegrity sistemler ortaya çıkmıştır (Şekil 3.26). Pnömatik tensegrity sistemli bir yapı elemanı; membran malzemenin tüp halinde şişirilmesi sayesinde basınç kuvvetlerini taşıması, tüplerin iki ucuna çelik kabloların sabitlenebileceği mekanizmaların yerleştirilmesi ve gergi amacıyla çelik kabloların çekme kuvvetlerini karşılamasından oluşmaktadır. Oluşturulan modüller birbirleri ile birleştirilerek büyük yapı sistemlerini oluşturabilmektedir. Geleneksel yapım sistemlerine göre hafif ve az malzemeden oluşan pnömatik tensegrity sistemler mimaride kolon, çatı örtüsü ve köprü gibi çeşitli işlevlerde kullanılabilmektedir.



Şekil 3.26. Pnömatik tüplü tensegrity sistem örnekleri (Dessi-Olive, Case, Kolmer, Teja Meda, Putman, 2019; Martens, Tschuppik, 2006, s. 466)

Tensegrity ve pnömatik strüktürler birbirleri ile birlikte kullanıldıklarında, pnömatik sistemlerin taşıyıcılık açısından daha geniş açıklıkları geçebildiği ve daha çok yük taşıyabildiği ortaya çıkmıştır. Böylelikle pnömatik özellikteki bir yapıya eklenen çubuk ve kablo elemanları ile tensegrity taşıyıcı destekli pnömatik (şişme) sistemler meydana gelmektedir. Tensegrity pnömatik strüktürler güncel yapım sistemleri olarak henüz çok yaygın uygulama alanına sahip olmamakla birlikte çok az malzeme kullanarak geniş açıklıkların kolonsuz geçilebilmesini sağlamaktadır. Pnömatik sistem ve tensegrity ağ kurgusu bir araya gelerek yükleri taşımaktadır. Pnömatik membran tüp yapının kablo ve çubuklar ile tensegrity sistemi kullanılarak güçlendirilmesi sayesinde köprülerde kullanılabilmektedir. Lanslevillard, Fransa'da 2005 yılında inşa edilen pnömatik tüplerden oluşan köprü yapısı tensegrity destekli strüktürel sistem sayesinde 52 metre açıklık geçmektedir. Kış sezonu boyunca kayak sporcularının geçişini ve ulaşımını sağlamaktadır. Köprü yapılarına ek olarak çatı sistemlerinde de uygulanabilen pnömatik tensegrity sistemler, ince en kesitte yük taşıma kapasitesi arttırılan pnömatik tüp membran malzemeden oluşmaktadır. Membran malzemenin ışık geçirgen niteliğe sahip olması sayesinde gece çeşitli renklerde aydınlatılabilmektedir (Şekil 3.27). Tensegrity destekli pnömatik strüktürler mimaride tekil yapı, cephe elemanı, yapı elemanları (çatı, duvar, kolon) gibi farklı işlevlerde kullanılabilmektedir.



Şekil 3.27. Pnömatik tüplü tensegrity sistemlerin köprü ve çatıda uygulama örnekleri (URL 228, URL 229; Lunchsinger, Pedretti, Reinhard, 2004 s. 141-148)

e) Kinetik Taşıyıcılı Pnömatik Strüktürler

İnsanoğlu, tarih süresince sürekli değişen ihtiyaç ve koşullara göre yapı üretmeyi hedeflemektedir. Günümüzde teknoloji, malzeme bilimi, teknik bilgi donanımı, dijital ve imalat teknolojilerinin gelişimi ile birlikte sabit yapılara alternatif olarak hareketli, açılıp kapanabilen, konum değiştirebilen kinetik özelliklere sahip yapılar ortaya çıkmıştır. Acil durum yapılarında, afet sonrası geçici yapılarda kolay ve hızlı kurulum; sergi ve fuar gibi yapılarda taşınabilme ve esneklik nitelikleri sayesinde etkili şekilde kullanılabilen kinetik sistemler sabit yapılara kıyasla pek çok avantaj sağlamaktadır. Şekil değiştirebilen, işlevsel açıdan dönüşebilen ve iklimsel değişikliklere adapte olabilen hareketli mimari öğelerin ilk örnekleri 1960'lı yıllarda ortaya çıkmıştır. Kinetik mimari örneklerinin günümüzde artan talebi ve yaygın uygulama örnekleri uyum sağlayabilme, işlevsel açıdan kullanım kolaylığı, dönüşebilme, çevreye uyum sağlayabilme veya sabit yapılara göre şekilsel farklılığı nedeniyledir (Bakbak, Özakça, Göğüş, 2015).

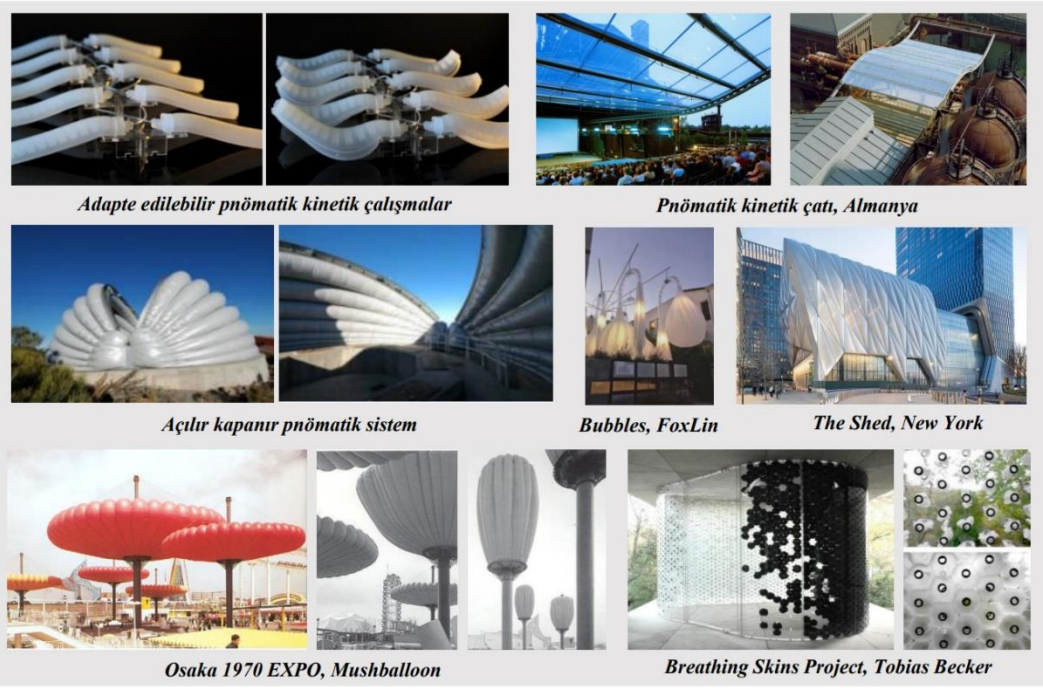
Kinetik kavramı mimarlıkta çeşitli adaptasyonlar geliştirebilen, değişip dönüşebilen ve bir durumdan başka hale geçebilen dinamik yapıları ifade etmektedir (Barozzi, Lienhard, Zanelli, Monticelli, 2016). Geleneksel mimarlık örneklerinin durağan özellikleri günümüz toplumsal, teknoloji koşullarında yetersiz gelmesi ve kinetik işlevler kazandırılarak hafif, esnek, farklı bağlam ve amaçlarda verimli yapıları teknolojik öğeler

ile tasarlamaktır (Fox, Yeh, 2000). Görsellik ve işlevsellik sağlayan kinetik sistemler kayma, yayılma ve katlanma dönüşümlerini gerçekleştirebilmektedir (Werner, 2013). Mühendislik ve mimarlık ara kesitinde yer alan teknolojik makinelerin yapılara adapte edilerek yapının tamamının, yapı elemanlarından birisinin veya bir kısmının fiziksel olarak açılma-kapanma, gerilme, daralma-genişleme, toplanma, yuvarlanma, kayma, katlanma, dönme gibi hareketleri yapabilen veya yer değiştirme özelliğine sahip olarak kurgulandığı strüktürlerdir. Taşıyıcı özellikte olabildikleri gibi yapı elemanının sadece hareketini sağlayan mekanizma olarak da kurgulanabilmektedir. Pnömatik sistemler ile kurgulanan kinetik öğeler membran malzeme ile birlikte tüm yapının veya bir yapı elemanının hareketli olmasını sağlayabilmektedir.

Su, organ, canlı ve hücre gibi varlıklardan yola çıkarak tasarlanan pnömatik sistemler yaşayan ve hareketli bir yapıya sahiptir. Bu nedenle çevresel koşullara uyum sağlama konusunda durağan unsurların yetersiz kaldığı durumlarda sürekliliği sağlayabilmek amacıyla hareketli adaptasyonlar pnömatik sistemlere uygulanmaktadır. Pnömatik strüktürler sökülüp tekrar kurulma, kolay taşınma ve yerinde şişirilme gibi yapısal özelliklerinden dolayı kendiliğinden hareketli özelliklere sahip olan sistemlerdir. Kinetik mimarlık kapsamında Korkmaz (2004); değişken konuma sahip kinetik yapıları (portatif, konumu değiştirilebilir ve sökülebilir) ve değişken geometriye ve harekete sahip yapılar (rijit ve esnek formlu) olarak iki grupta incelemiştir. Bu nedenle pnömatik sistemler kendiliğinden kinetik özelliklere sahip olan strüktürledir. Buna ek olarak makine destekleri ile pnömatik strüktürlerde yapının tamamına ya da çatı, örtü, cephe elemanları, gölgeleme elemanları vb. yapısal unsurlardan birisine kinetik özellikler kazandırılabilmektedir. Bu sayede yapı hem mimari açıdan hem de kullanıcı açısından çeşitli özelliklerde tasarlanabilir, ışık ve ses gibi fiziksel koşullara, iklimsel değişmelere ve kullanıcı ihtiyaçlarına uyum sağlayabilir hale gelmektedir.

Pnömatik sistemlerde kinetik mekanizmaların kullanımı sonucu ortaya çıkan hareket tipolojileri yapı geometrisi ve tasarımı ile doğrudan ilişkilidir. Membran yüzeylerin havayla şişirilmesi sonucu oluşan pnömatik yapılar paralel, merkezi, dairesel ve çevresel yönde toplanma, yuvarlanma, kayma, dönme, şişme ve sönme hareketleri sonucunda kinetik nitelikler kazanmaktadır. Yapı herhangi bir mekanizma yardımı ile veya doğrudan

pnömatik özellikleri sayesinde şişme ve sönme yöntemleri sayesinde hareket edebilmektedir. Şekil 3.28'de kinetik pnömatik sistem örnekleri incelenmiştir. Adapte edilebilir pnömatik kinetik kol çalışmaları mekanik sistemler ile pnömatik tüplerin hareket ettirilebildiği ve mimaride çeşitli işlevlere uyarlanabilen strüktürlerdir. Pnömatik kinetik çatı örneği, pnömatik sistemli yapı elemanının kayma hareketi sonucunda kinetik bir özelliğe sahiptir. Pnömatik sistemli yapı örneğinde makine sistemleri sayesinde dairesel açılma ve kapanma ile birikme hareketlerini kazanmıştır. "Bubbles" ve "Mushballoon" projeleri pnömatik sistemin şişmesi ve sönmesi ile birlikte hareketli hale gelmektedir. "Mushballoon" Osaka 1970 EXPO kapsamında inşa edilmiş 30 metre çapında açılıp kapanabilen şemsiye modüllerinden oluşmaktadır. "The Shed" yapısı ise raylar üzerinde kayan çerçeve sistemin pnömatik membran yüzeyler ile kaplanmasından oluşmaktadır. "Breathing Skins Project" ise yapı cephesinde insan derisine benzetilen pnömatik gözenekler, şişme ve sönme hareketi sonucunda yapıya girecek olan ışık miktarını, havalandırmayı, gölgelemeyi ve görünürlüğü belirlemektedir.



Şekil 3.28. Kinetik pnömatik sistem ve yapı örnekleri (URL 230, URL 231, URL 232, URL 233; Melendez, Gannon, Jacobson-Weaver, Toulkeridou, 2014, s. 433, Schlaich, 2003, s. 102; Krauel, 2013, s. 243)

Kinetik sistemler ile membran malzemeden oluşan hava destekli pnömatik sistemlerin birlikte kullanımı sonucunda kinetik taşıyıcı destekli pnömatik (şişme) sistemler oluşmaktadır. Kinetik sistem ve pnömatik sistem bir araya gelerek yük taşıma işlemini gerçekleştirmektedir. Kinetik pnömatik yapıların tamamı, bir kısmı veya yapı elemanlarından sadece biri kinetik özelliklere sahip olarak tasarlanabilmektedir. Pnömatik strüktürlere kinetik özellikler yapıya eklenen hareketli kinetik elemanlar veya pnömatik membran öğeleri basınç farkları ile oluşturulan hareketi ile sağlanabilmektedir. Kinetik elemanlar ile kurgulanan pnömatik taşıyıcı sistemler tekil yapı, yapı elemanları (duvar, kolon, çatı), başka taşıyıcı sistem ile inşa edilen yapıya ek olarak cephe elemanı olarak mimaride kullanılabilmektedir.

3.1.3. Plastik-Polimer Esaslı Membran Malzeme

İnsan eli ile yapılmış olan her mimari eserin ana maddesi malzemelerdir. Bu malzemelerin bazıları doğadan direkt elde edilerek veya işleyerek kullanılmaktadır. Bazıları ise ancak teknik ve teknolojik ilerlemeler ile imal edilebilir hale gelmektedir. Çok sayıda malzeme doğada mevcut halde bulunabilirken birçok yapı malzemesi de insan eli ile üretilebilmektedir. Türkçü (2003), insanların yapılarda kullandıkları doğal veya yapay, endüstriyel yöntemler ile işlenmiş ve üretilmiş malzemeleri; biçim, ekonomiklik, üretim süreci, zaman, uygulanabilirlik, yapının tasarımı ve taşıyıcı sistemi doğrudan etkileyen ana husus olarak değerlendirmektedir.

Taşıyıcı sistemin ve yapım yönteminin esas belirleyicisi yapı malzemesidir. Oluşturulan yapının taşıyıcı sistem elemanları seçilen malzemenin özelliklerine göre oluşturulmaktadır. Bu durumda taşıyıcı sistemin form, açıklık, kuvvetlerin dengesi ve yapı elemanlarının en kesitlerinin belirlenmesi kullanılan malzemeye bağlıdır. Kerpiç, tuğla, beton sadece basınç kuvvetlerine; polimer-plastik, tekstil ürünü kumaşlar, kablolar, metal levhalar sadece çekme kuvvetlerine; alüminyum, çelik ve ahşap gibi malzemeler ise hem basınç hem de çekme kuvvetlerine çalışmaktadır (Özşen, Yamantürk, 1991). Dolayısıyla basınç ve çekme kuvvetlerinin etkisinde olacak olan her yapı elemanının malzemesi yapının taşıyıcı sistemini etkileyen ve oluşumunda ana rol üstlenen unsurdur. Tarih boyunca kullanılan malzemelerin güçlendirilmesi ve farklı malzemelerin

geliştirilmesi ile her malzemenin elverişli olduğu ayrı bir taşıyıcı sistem kurgusu mimarlar tarafından tasarlanmıştır. Sonuç olarak kullanılan malzeme ile taşıyıcı sistem birbirine nedensellik ilişkisi ile doğrudan bağlıdır.

Tekstil malzemeleri eski çağlardan günümüze mimaride kullanılan yapı malzemelerindendir. Günümüzde sentetik lifler ile birlikte geliştirilen membran malzeme mimaride birçok işlevde kullanım alanına sahiptir. Plastik-polimer esaslı membran malzeme; esneklik ve mukavemet, ağırlık, kısa süre ve kolaylıkla teşkil etme, yıkıcı etkilere karşı dayanıklılık, şekil ve görünüş açısından estetik unsurları yapıya kazandırmaktadır. Yapıyı örten bir yapı elemanının çelik, beton veya tuğla gibi malzemeler yerine membran kumaştan oluşması 30 kat daha hafif olmasını sağlamaktadır. Böylelikle düşen maliyet, kısa ve kolay inşa süreci, sökülüp başka yere tekrar uygulanabilme gibi olanaklar sunmaktadır. Mimaride kullanılacak olan membran malzeme bu özelliklere ek olarak rüzgar, kar, fırtına, deprem, güneş ışığı, asit yağmuru, bozunma gibi iklimsel-çevresel faktörlere ve yükler altında deformasyon, yangına karşı dayanıklılık, ısı yalıtımı, ses izolasyonu gibi koşullara karşı geliştirilmiş olmalıdır. Bu nedenle plastik-polimer esaslı malzemelerden üretilen mimari membranların bu tür koşullara karşı dayanıklı hale getirilmesi zaman içerisinde örgü sistemlerinin ve çeşitli kimyasallar ile kaplanma yöntemlerinin geliştirilmesi ile sağlanmıştır (Varan, Durur, 2014). Böylelikle yapılarda kullanılan mimari membran malzeme güçlendirilerek farklı fonksiyonlarda uygulanabilir hale gelmiştir.

Membran malzeme; homojen membranlar, örgü (dokuma) membranlar ve ikisinin bir arada kullanıldığı homojen/örgü membranlar kombinasyonu olarak üç grupta incelenir (Çizelge 3.1). Homojen membranlar, her noktada ve yönde aynı özellikleri gösteren deformasyon davranışları ve çekmeye karşı dirençleri farklı yönlerde değişmeyen izotop membranlardır. Homojen membranlar, plastik tabakalar ve metal folyolar olarak iki alt grupta sınıflandırılır. Plastik tabakalar, membran tabakalar olarak fabrikada üretilmektedir. Birbirlerine yapıştırma veya kaynak yolu ile birleştirilmektedir. Şeffaf, hava ve su geçirmeyen (geçirimsiz) özelliktedirler ve örgü membranlara oranla dirençleri azdır. Güneş, nem, ısı gibi çevresel faktörlere karşı dayanımlarının az olmasından dolayı plastik tabakaların ömürleri az olmaktadır. Renklendirme, lif ekleme, kaplama gibi

güçlendirmeler ile daha dayanıklı hale gelebilmektedir. Plastik folyolar aynı zamanda yangına karşı dirençsizdir. Geçirimsiz özellikte olmaları nedeniyle basınçlandırılarak sistemin oluşturulduğu pnömatik strüktürler için uygun bir membran malzeme grubudur. PVC, polietilen, poliester, neopren, polyamid, PVF folyolar, polipropilen vb. malzemeler homojen izotrop plastik membranlardır. Metalik folyolar, ince alüminyum, çelik ve paslanmaz çelik gibi metal sacların yerinde yapıştırma, kaynak, dikiş ile birleştirilmesi ile elde edilen güçlendirilmiş membranlardır. Dayanımının yüksek olması nedeniyle pnömatik strüktürlerde ve uzun ömürlü yapılarda kullanımları uygundur. Metal sacların kırılma ve buruşma sorunlarından dolayı nakliyeleri plastik membranlara göre zordur. Örgü (dokuma) membranlar; plastik ipliklerin farklı malzemelerden elde edilerek çeşitli dokuma yöntemleri ile bir araya getirilmesinden oluşan anizotrop ve homojen membranlara göre daha esnek nitelikteki membranlardır. İpliklerin örülmesi ile elde edildiklerinden daha kolay kir ve pislik tutabilmelerine karşın çekme direnci homojen membranlara göre daha fazladır. Uzun ömürlüdürler ve yırtılma dayanımları yüksektir. Homojen membranlara göre hava geçirimsizlikleri fazla olduğundan pnömatik strüktürlerde yüzeylerin kaplanmasını zorlaştırmaktadır (Türkçü, 1997).

Membran strüktürlerin alt grubu olan pnömatik sistemlerde kullanılabilir olan örgü (dokuma) membran malzeme iplik dokuma maddesine göre organik (doğal) lifli membranlar, sentetik (yapay) lifli membranlar ve mineral kökenli membranlar olmak üzere üç alt grubu bulunmaktadır (Say, 1998). Bitki, hayvan kılları, yaprak, ağaç, pamuk, keten, ipek böceği kozası vb. gibi doğal kökenli malzemeler kullanılarak dokunmuş organik (doğal) lifli membranlar, selüloz kökenli ve albümin kökenli iki alt başlığa ayrılmaktadır. Kimya endüstrisinin gelişmesi ile birlikte membran malzemelerin yapay yollarla elde edildiği örnekleri mevcuttur. Bunlar poliamid ipliğinden örülen perlon, naylon; polyvinilen ipliğinden örülen rhovil; polyester ipliğinden örülen dacron, diolen, terilen, trevira; polyakrilnitril ipliğinden örülen dralon, orlon ve redonu kapsayan sentetik (yapay) membranlardır. Örgü membranlar arasında taşıyıcı sistemlerde en çok kullanılan sentetik (yapay) membranlar; PVC, parafine batırma, plastik kaplama, teflon, bitüm, hostaflon, plexigum, polytetrafloreetilen (PTFE) gibi malzemeler ile kaplanarak veya kaplanmadan önce cam elyafı, metal tellerle takviye edilerek fiziksel dış etkilere karşı korunumlu hale getirilmektedir. Mineral lifli membranlar ise seramik, cam elyaf, asbest

kökenli iplikler ile dokunan yaygın olarak kullanılmayan membranlardır. Homojen ve örgü membranların kombinasyonu plastik dokumaların ip ya da tel ile bir araya getirilmesinden oluşan ve her iki grubunda geçirimsizlik, çekmeye dayanım, izotrop çalışma gibi olumlu yönlerini barındıran membranlardır (Türkçü, 1997).

Çizelge 3.1. Pnömatik sistemlerde kullanılan membran malzemelerin sınıflandırılması (Türkçü, 1997 kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır)

1. HOMOJEN MEMBRANLAR	2. ÖRGÜ (DOKUMA) MEMBRANLAR	3. HOMOJEN VE ÖRGÜ KOMBİNASYONLU MEMBRANLAR
a) Plastik Tabakalar • Polietilen, polyester, neopren, polyamid, PVF folyolar, polipropilen, polyvinylclorid (PVC), politetrafloretilen (PTFE), sentetik kauçuk, EthylenTetraFluoroEthylen (ETFE). **b) Metal Folyolar** • Alüminyum, çelik ve paslanmaz çelik gibi metal saclar ile güçlendirilmiş membranlardır.	**a) Organik (Doğal) Lifli Membranlar** • Selüloz Kökenli • Albümin Kökenli **b) Sentetik (Yapay) Lifli Membranlar** • Poliamid ipliğinden örülen: Perlon, Naylon • Polyvinilen ipliğinden örülen: Rhovil • Polyester ipliğinden örülen: Dacron, Diolen, Terilen, Trevira • Polyakrilnitril ipliğinden örülen: Dralon, Orlon, Redon **c) Mineral Kökenli Membranlar** • Seramik, cam elyaf, asbest kökenli iplikler ile dokunan mineral lifli membranlardır.	• Homojen ve örgü membranların kombinasyonu plastik dokumaların ip ya da tel ile bir araya getirilmesinden oluşan ve her iki grubun özelliklerini gösteren membranlardır.

Pnömatik (şişme) sistemlerin ana malzemesi plastik-polimer esaslı membranlardır. Membran malzemeler; kauçuk, silikon, polietilen, poliüretan, politetrafloretilen (PTFE), PVC, PVC esaslı folyeler, neopren, poliamid-polyester, polivinylideneflüoride (PVDF), cam elyaflı dokumalar, teflon, çelik ya da alüminyum levhalar gibi farklı bileşenleri kaplama olarak içeren ağ dokumasına sahip mimariye yönelik üretilen tekstil ürünü kumaşlardır. Membranların bu tip malzemeler ile kaplanması sayesinde mimaride daha büyük açıklıkları ortalama 50-150 metre geçebilir hale getirmiştir (Özşen, Yamantürk, 1991).

Günümüzde pnömatik sistemlerde PVC (polivinilklorür), PTFE (politetrafloroetilen) ve ETFE (etilentetrafloroetilen) en yaygın kullanım alanına sahip olan membran malzeme türleridir. PVC; diğer membran malzemelere göre daha düşük maliyetli, yüksek mukavemet ve hafif, 15 veya 20 yıl ömürlü, alev geciktirici niteliktedir. PVC membranın

en dayanıksız olduğu husus güneş ışığı radyasyonudur. Malzemenin bozulmasına, kirletici maddeler yaymasına ve renk değişikliğine yol açmaktadır. PTFE; diğer membran türlerine göre daha çevre dostu iyileştirmelere sahiptir. 35 yıla kadar ulaşan kullanım ömrü vardır. Burkulmaya karşı dirençli, esnemeye karşı dayanıklı ve yanıcı olmayan bir membran olan PTFE; flor polimer kaplama ile birlikte kullanıldığında kirlenmeye karşı da dayanıklı hale gelmektedir. ETFE ise tek veya çift cidarlı pnömatik sistemlerde en yaygın kullanılan membran malzeme türüdür. Yaklaşık 0,2 mm kalınlıkta dahi kullanılabilmesi geleneksel yapım sistemlerine göre pek çok avantaj sağlamaktadır. Cam malzemeye göre güneş ışığı geçirgenliği daha yüksektir. Bu sayede güneş ısısını depolama veya yansıtma nitelikleri ile yapı yüzeylerinde kullanılabilmektedir. Yapısal kuvvetler etkisinde izotropik özellikler göstermektedir. Yangın karşısında davranış olarak kolay alev almaz olarak derecelendirilmiştir (Macieira, Guedes, 2017).

Membran sistemlerin bir grubu olan kapalı hacimli membran sistemler yani pnömatikler, gerdirilmiş membran örtülerden meydana gelmektedir. Membran malzeme ilk çıktığı dönemden günümüze kadar olan süreçte de gelişim göstererek zayıf noktaları teknolojik imkanlarla geliştirilmiştir. Teknik bilginin gelişimi ile membran malzemeler sentetik elyaf ve cam elyaf içeren lifler ile üretilmiştir. Aynı zamanda membran örtünün su, kirlenme, rüzgar, delinme, güneş vb. dış etkilere karşı dayanıklı hale gelmesi için sentetik vinly, teflon, silikon, hypalon, neopren gibi malzemeler ile kaplanıp güçlendirilerek daha uzun ömürlü ve dayanımlı hale gelmesi sağlanmıştır (Geiger, 1989).

Pnömatik sistemlerde kullanılan membran malzemenin yapısal açıdan belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Yırtılma direnci (300 kg/5 cm), kalınlık (0,7-1,5 mm), ağırlık (0,7 kg/m²) olarak belirlenen teknik nitelikler pnömatik bir strüktürde kullanılacak olan membran malzemenin sağlaması gereken minimum koşullardır. Buna ek olarak pnömatik sistemlerde kullanılan membran malzeme; izotrop çekme dayanımı, yırtılmaya karşı dayanım, paketleme ve nakliyat sürecinde kolaylık, uzun ömürlü, yangın ve çevresel faktörlere karşı korumalı olmalıdır (Türkçü, 1997). Pnömatik sistemlerde “vinyl” kaplı plastik-polimer esaslı malzemeler; ısı ile birleştirme, yapıştırma, mekanik, yüksek frekansla birleştirme veya dikme yöntemleri ile elde edilir (Erol, 1997). Buna ek olarak

pnömatik strüktürlerde farklı renk, doku, doğal aydınlatma, ısı ve ışık geçirgenliği gibi niteliklerini doğrudan yapıya yansıtabilmektedir.

Mimarlıkta pnömatik strüktürlerde kullanılacak olan membran malzemenin yapılarda güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için belirli ölçütleri karşılaması gerekmektedir. The Membrane Structures Association of Japan (1996), mimari yapılarda kullanılan membran plastik-polimer esaslı malzemeye göre A, B ve C olmak üzere sınıflandırmaktadır. Bu bağlamda membran malzemenin ağırlık, çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve lif doğrultularına göre yönetmelik ve standartlar aracılığıyla denetlenmektedir. Membran malzemenin standartlara göre çekme dayanımı en az 20 kg/cm (EN ISO 1421), yırtılma dayanımı 10 mm genişlik ve 10 kg ağırlığında bir membranda en az %15 (DIN 53 363), atkı yönü eğilmemiş lifleri barındırarak 90° (±2° toleransla) olmalıdır.

Membran malzemenin yapay ya da mineral liflerle üretilmesi, yapay malzemeler ile kaplanması, daha dayanıklı, kaliteli hale gelmesi, paslanmaya karşı dirençli çelik kablolar ile desteklenmesi, dijital açıdan bilgisayar aracılığıyla hesaplanma, form ve kalıp kesim işlemlerinin yapılması strüktürel açıdan gelişmiş uygulama imkanları sunmaktadır (Morgül, 2006). Membran malzemenin nitelik, teknolojik, üretim ve uygulama alanlarındaki ilerlemesi pnömatik sistemlerin ana yapı malzemesi olmasından dolayı pnömatik strüktürlerin gelişimiyle paraleldir. ETFE ve PTFE ve kaplamalar günümüzde pnömatik yapılarda en yaygın kullanılan membran ürünleridir. Pnömatik sistemlerde yapısal nitelikler açısından gelişmiş membran malzemesi kullanılarak daha uzun ömürlü, dış yüklere ve çevresel faktörlere karşı dayanımlı, iklimsel faktörlere uyumlu olmasını sağlamaktadır.

3.1.4. Şişme Süresi, Sürekliliği ve Maddesi

Pnömatik sistemlerde ana taşıyıcı eleman membranın şişirilmesini sağlayan maddedir. Argon, nitrojen veya hava gibi gazlar; sıvı veya katı maddeler pnömatik sistemlerde basınçlandırmayı sağlamaktadır. Ancak hem ekonomik hem de kolay ulaşılabilir olması nedeniyle en çok kullanılan madde havadır. Hava fanlar aracılığı ile belirli aralıklarda pnömatik yapıların taşıyıcılığını desteklemektedir. Tek cidarlı pnömatik yapılarda bir

membran tabakasının bütün iç hacmi hava ile taşıyıcı hale getirilmektedir. Bu nedenle ilk şişirme işleminden sonra bazı yapılarda sürekli bazılarında ise belirli zaman aralıklarında hava desteği yapılmaktadır. Hava desteğinin düzenli aralıklar ile yapılması sayesinde yapının biçimi korunmaktadır. Hava desteği kesilse bile yapılarda ani sönme olayı gerçekleşmemektedir. Bu sayede güvenlik ile ilgili bir sorun oluşmamaktadır. Çift cidarlı ve iskelet hücreli pnömatik sistemlerde ise iki membran tabaka arasında fanlar aracılığı ile hava şişirilmektedir. Kapalı membran modül kendiliğinden taşıyıcı hale gelmektedir ve bu nedenle sürekli hava desteği gerekmemektedir. Bazı ısıl değişmeler, iklimsel faktörler ve güneşten kaynaklı hafif sönme durumlarında pnömatik yapının biçimini sürdürebilmesi amacıyla hava desteği sağlanmaktadır. Hava desteğinin kesilmesi durumunda uzun süre formunu koruyabilen çift cidarlı ve iskelet tüplü pnömatik strüktürler, bir modülün sönmesi durumunda yerinde onarılabilmektedir. Pnömatik sistemlerin yapı cephelerinde kaplama elemanı olarak kullanıldığı örneklerde ise seçilen basınçlandırma maddesi iç mekanın ısıl koşullarını, ısı yalıtımını ve güneş geçirgenliğini etkilemektedir. Bu sebeple daha yoğun gazların kullanımı enerji verimliliği ve optimum ısıl konfor koşullarını sağlayabilmektedir. Cephede pnömatik kaplama elemanlarının kullanıldığı yapılarda genellikle her modül için ayrı basınçlandırma sistemi oluşturulmaktadır. Yapı genelinde bir noktaya konumlandırılan fan ve pompa sitemi pnömatik birim elemanlarının belirli basınçta tutulmasını ve devamlılığı sağlamaktadır. Buna ek olarak pnömatik birimlerdeki basınç seviyesinin optimum düzeyde tutulması için birim içerisine sensörler yerleştirilebilmektedir.

Pnömatik strüktürlerin ana taşıyıcı elemanının hava olması nedeniyle hava destekli fanlara geçici veya sürekli olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Pnömatik strüktürlerin ilk kurulumu sistemin hava ile doldurulması sonucunda geleneksel taşıyıcı sistemlere kıyasla çok kısa sürede gerçekleştirilmektedir. Saatler veya günler içerisinde inşa edilebilen pnömatik taşıyıcı sistemler ilk kurulumdan sonra da hava desteğine ihtiyaç duyabilmektedir. Bu nedenle tek ya da çift cidarlı tamamen pnömatik taşıyıcı sistemler ve pnömatik cephe sistemlerinde sönme, delinme, basınç değişikliği, iklimsel değişiklikler nedeniyle bozulmalar gibi durumlara yönelik olarak şişirme maddesi desteği sağlayabilecek bir sistem de geliştirilmelidir.

3.1.5. Yapıya Özel Yerinde Geliştirilen Sistemler

Pnömatik taşıyıcı sistemlerin mimaride çok çeşitli kullanım ve uygulama alanı mevcuttur. Sınırsız form ve özellikte tasarlanıp üretebilen pnömatik yapılar genellikle kendine özgü nitelikler göstermektedir. Geleneksel taşıyıcı sistemlerde klasik yöntemler ile detay ve çözümler üretilebilmektedir. Bunun aksine pnömatik sistemlerde her yapı kendi özelinde değerlendirilerek taşıyıcı sistemin çalışma prensipleri, yapı elemanlarının uygulama ve tasarım metotları, enerji temin sistemi, zemine ve birbirleri ile ankrajı gibi hususlarda yerinde geliştirilen sistem detayları ve çözümler gerektirmektedir. Bir pnömatik yapıda uygulanan detay çözümü başka bir yapıda uygulanmayabilmektedir. Bu nedenle pnömatik sistemin bütüncü bir yaklaşım ile tasarımdan uygulamaya kadar planlaması, sistemin çalışma prensiplerine uygun yapısal detayları ve çözümleri geliştirilmelidir.

Tek cidarlı, çift cidarlı ve cephe kaplama elemanı olarak kullanılan pnömatik strüktürlerde özel sistem detayları yapı ile birlikte tasarlanmaktadır. Tek ve çift cidarlı pnömatik sistemlerde yapının zemin ile birleşim noktaları, kendi içerisindeki membran yüzeylerin birleşimleri, başka bir taşıyıcı sistem elemanı (uzay kafes, kablo, dikme elemanları gibi) ile birleşim sistemi ve eğer var ise mevcut bir yapıya birleşim detayları da yapı tasarımı ile birlikte geliştirilmektedir. Membran yapının yumuşak veya sert zemine sabitlenecek olması; membran malzemenin dikiş, mekanik veya ısı ile birleştirilmesi; hava destek sisteminin fan ve pompalarının membran ile birleşim yerleri gibi hususlar bu detayların farklılaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle her yapı kendine ait birleşim detayları içermektedir. Cephede kaplama olarak kullanılan pnömatik sistemlerde ısıl, görsel, akustik konfor koşullarının optimum seviyede olması ve enerji verimliliği sağlanması için özel sistemler geliştirilmektedir. Cephedeki pnömatik strüktürün ısıl birikiminin iç mekana aktarılması, şişirme maddesi ile iç mekana girecek olan ışık miktarının ayarlanması, geçirgenlik sayesinde aydınlatma sistemlerinin verimli hale getirilmesi, su toplama sistemleri ile ikincil su kullanımı sağlanması, membran malzemenin renk-geçirgenlik özellikleri ile görsel etkisi, membran malzemenin yansıtıcılık düzeyi ile akustik etki oluşturulması gibi tüm nitelikleri yapı özelinde tasarlanmaktadır. Bu sayede her yapıya ihtiyaca göre çeşitli özellikler kazandırılabilmektedir.

3.2. Seçilen Pnömatik (Şişme) Sistemli Yapı Örnekleri

Bu bölümde seçilen örnek yapıların tanıtılması amaçlanmıştır. Ark Nova, Ontario Pavilion, Münich Allianz Arena, Baijing Water Cube, Media-TIC ve Eden Project yapıları seçilmiştir. Yapılar seçilirken belirlenen inceleme ölçütleri açısından farklılaşması ve mimaride çeşitli fonksiyonlarda kullanılması hedeflenmiştir. Seçilen altı adet yapının mimari açıdan nitelikleri tanıtılmıştır.

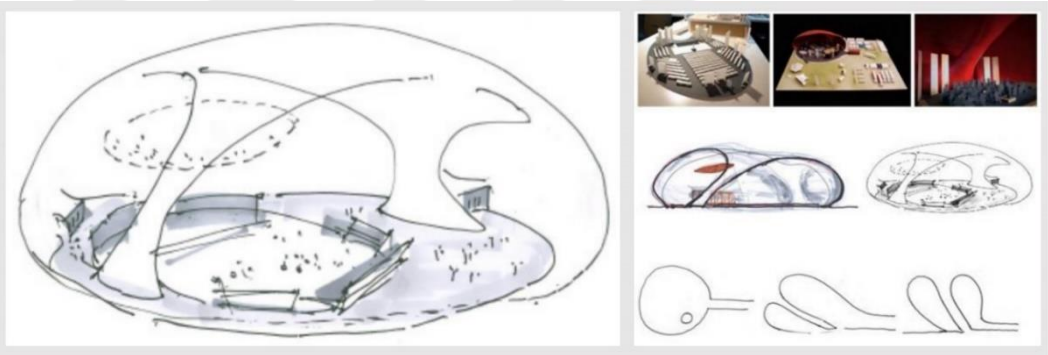
3.2.1. Ark Nova

Ark Nova tek cidarlı pnömatik sistemli gezici bir konser salonu yapısıdır. 2013 yılında Arata Isozaki ve Anish Kapoor tarafından tasarlanarak Japonya'da inşa edilmiştir. Genel tanıtım amacı ile Ark Nova yapısı hakkındaki bilgiler Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Ark Nova yapısı genel tanıtımı

	ARK NOVA
Yapım Yılı	2013
Mimar	Arata Isozaki ile heykeltıraş Anish Kapoor
Yer	Japonya (Matsushima, Miyagi, Fukushima, Tokyo)
İşlev	Konser Salonu
Kullanım Durumu	Geçici Yapı, çeşitli şehirlerde 2013, 2014, 2015 ve 2017'de yıllar süresince kulanım
Tasarım Fikri	Japonya'da yaşanan deprem ve tsunaminin ardından sanat amaçlı insanları bir araya getiren temsili Nuh'un Gemisi
Yapı Ölçüleri	30 metre en, 36 metre uzunluk en çok 18 metre yükseklik
Yapı Alanı	680 m²
Kişi Kapasitesi	500 kişi
Pnömatik Yüzey Alanı	2 000 m² yüzey alanı, şişirilmiş hacim 9 000 m³
İnşa Süresi	Kamyon gibi bir araç ile taşınabilen yapı inşa edileceği alanda birkaç gün içerisinde şişirilerek kurulabilmektedir.

Büyük Doğu Japonya Depremi ve Tsunamisi, 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'da meydana gelmiştir. İnsan yaşamını doğrudan etkileyerek büyük tahribatlara neden olmuştur. Deprem ve tsunaminin olumsuz etkileri mimari yaklaşımlar üzerinde inşa edilen yapılarda yeni anlayışların uygulanmasına zemin hazırlamıştır. Bu bağlamda Avrupa'nın önde gelen müzik festivallerinden biri olan Lucerne Festivali'nin Japonya, Matsushima'da gerçekleştirilmesi üzere yeni bir yapı ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Japonya'nın felaketten etkilenen Kuzeydoğu bölgesindeki çeşitli yerleri gezerek sahne performanslarına ev sahipliği yapması hedeflenen yapı mimar Arata Isozaki ve heykeltıraş Anish Kapoor tarafından tasarlanmıştır (Şekil 3.29). Ark Nova, ilk defa 2013 yılında konser salonu olarak kullanılmıştır. Yapım sistemi sayesinde Ark Nova çeşitli yerlerde ve tarihlerde defalarca kullanılmış 500 kişilik mobil bir konser salonudur (Announcing Lucerne Festival Ark Nova, 2013).



Şekil 3.29. Ark Nova ilk eskizleri (Announcing Lucerne Festival Ark Nova, 2013)

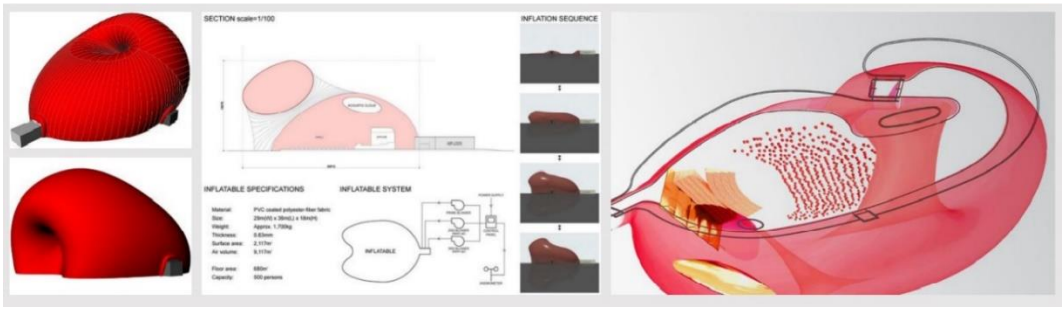
Büyük deprem ve tsunaminin hemen ardından inşa edilen Ark Nova, Nuh'un Gemisi'ndeki gibi büyük sel efsanesinin gemi ile kurtuluşuna gönderme olarak felaketten sonra toparlanma sembolü haline gelmesi amacıyla tasarlanmıştır. Yapı "Ark" Nuh'un Gemisi, "Nova" ise yeni anlamında kullanılarak "Yeni Gemi yani Ark Nova" olarak isimlendirilmiştir. Ark Nova yapısı ile kültür ve ruhun uzun vadeli yeniden inşası perspektifinden müzik ve çeşitli sanatlarla dolu seyahat alanı temsil edilmiştir. Afet bölgelerini Japon folklorist Shinobu Orikuchi'nin belirttiği "marebito" yani kutsal konuk olarak ziyaret etme, gezici olarak gittiği yerlere aynı sanatta ve dinde olduğu gibi bayram getirme ve bunun sonucunda toplumu canlandırma konsepti ile planlanmıştır (Announcing Lucerne Festival Ark Nova, 2013).

Japonya'da Matsushima 2013, Miyagi 2014, Fukushima 2015, Tokyo 2017; kentlerinde ve yıllarında kurularak kullanılmıştır (The Pritzker Architecture Prize Image Book, 2019). Söndürülerek bir yerden başka bir yere küçük hacimlerde taşınabilir bir yapı olması sayesinde çeşitli kentlerde tekrarlı olarak uygulanmıştır. Şekil 3.30'da Matsushima, Tokyo ve Sendai'de Ark Nova'nın şişirilmiş hali görülmektedir.



Şekil 3.30. Matsushima, Tokyo ve Sendai şehirlerinde Ark Nova'nın şişirilmiş hali (The Pritzker Architecture Prize Image Book, 2019)

Mühendislik birimleriyle doğrudan çalışma ile yapının gerilim sistemi şişirilebilir yüzeyin karmaşık biçimine yönelik olarak hesaplanmıştır. Tasarım sürecinden uygulamaya kadar mühendis, mimar ve sanatçı bir arada çalışarak tasarlanmıştır. Üç boyutlu dijital yazılım programları kullanılarak yapının formu canlandırılmıştır (Şekil 3.31). Bu sayede membran malzemenin yüzey alanı, birleşim yerleri, hacmi ve taşıyıcılığı yapı inşa edilmeden önce belirlenerek hesaplanmıştır. Buna ek olarak yapının taşınacağı sistem ve hava destek ünitesi (fanlar ve pompa) yapı tasarımı ile eş zamanlı olarak geliştirilmiştir.



Şekil 3.31. Ark Nova tasarımı ve üç boyutlu programlar ile hesaplanması (URL 235)

Sahne ve ses ekipmanları ile donatılmış, küre benzeri yapı PVC kaplı polyester mor renkli membran malzemenin hava ile şişirilmesi aracılığıyla taşıyıcı hale gelmektedir. Şişirilebilir pnömatik sistemli yapı söndürülerek başka yere taşınabilen esnek membran malzeme ve demonte ekipmanlar ile üretilmiştir. Bu sayede bir kamyon aracılığı ile nakliye edilerek istenilen alanda kolaylıkla kullanılabilen gezici bir yapıdır (URL 234). İç mekan, ekipmanın düzenine bağlı olarak orkestralardan oda müziğine, cazdan gösteri sanatlarına veya sergilere kadar çeşitli etkinlikleri barındırabilen çok aşamalı bir formatta kesintisiz tek bir mekandır. Orkestra performansı sırasında 500 kişilik kapasitede olan salon; 30 metre eninde, 36 metre uzunluğunda ve maksimum 18 metre yükseklikte biçimlenmiştir (Announcing Lucerne Festival Ark Nova, 2013) (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Ark Nova şişirilme aşamaları ve iç mekanı (URL 236, URL 237)

Yapının giriş ve çıkış detaylandırmaları (acil durumlara da yönelik olarak) demirleme sistemleri ve çözümleri fizibilite çalışmaları sonucunda geliştirilmiştir. Farklı iklimsel hava koşullarına dayanabilen, gezebilen ve hafif Ark Nova'nın şişirilebilir pnömatik germe sistemli olarak inşa edilebilmesi için form olarak toroidal şekli verilmiştir. Toroidal şekli kendi içine dönerek iç kısımda çapraz tüp oluşturmaktadır ve gökyüzü ile yapının görsel kesişimini sağlamaktadır (URL 235) (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Ark Nova şişirilme aşamaları ve iç mekan tüp yapısı (URL 234)

Aynı zamanda tüp akustik sistemi destekleyerek sesin değiştirilmesi, ayarlanması, yansıtılması veya emilmesine imkan oluşturmaktadır. PVC polyester esaslı membran kabuk yaklaşık 2 000 m² yüzey alanına sahip iken 0,63 milimetre kalınlığında ve 1 700 kilogram ağırlığındadır. Membran yüzeyin renk tonu sanatçının seçimi ile dışarıdan opak mor ve içeriden yarı saydam pembe-kırmızı olarak belirlenmiştir. Yapının kendiliğinden sergilediği görsel deneyim yüzeyin yarı saydamlığı ve ışık oyunları ile organik bir değişim sunmaktadır. Konser salonu şişirilme ile hacim kazandığında ortalama 9 000 m³ hacme sahip olmaktadır. İçeride, büyük bir sahne için 680 m²'lik bir alan ve esnek düzenlemede yaklaşık 500 koltuk bulunmaktadır. Oditoryum koltukları, daha önce Matsushima Zuiganji Tapınağı yakınında yetişen, ancak felaket tarafından yerinden edilmiş olan eski sedir ağaçlarından elde edilen ahşaptan yapılmıştır. İç mekandaki eşyalar, koltuklar ve akustik reflektörler bu ağaç malzemenin yeniden kazandırılarak kullanımından oluşmaktadır (URL 235) (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. Ark Nova pnömatik sistemli yapısı (URL 236)

Ark Nova şişme konser salonu olarak tek cidarlı pnömatik sistemde inşa edilmiştir. Tek cidarlı pnömatik sistem olmasından dolayı giriş ve çıkışlar ile yere sabitlenme sistemlerinde özel detaylandırmalar gerektirmektedir. Aynı zamanda hava ile sağlanan insanın bulunduğu iç mekandaki basınç ile taşıyıcı hale gelen membran yüzeyin formunu koruyabilmesi için sürekli hava kontrolü ve hava desteğine ihtiyaç durmaktadır. Bu nedenle mekanik hava destekli pompalar yapı ile adapte şekilde tasarlanmıştır. Pnömatik

sistemde geliştirilen sistem hafifliği, nakliye kolaylığı, sökülüp tekrar kullanılabilirliği, kolay kurulumu, iç dış mekan görsel etkileri gibi faktörlerde membran malzeme doğrudan etkilidir.

3.2.2. Ontario Pavilion

Ontario Pavilion çift cidarlı pnömatik sistemli geçici bir eğlence, yeme-içme, performans ve konser yapısıdır. 2015 yılında Hariri Pontarini Architects tarafından tasarlanarak Amerika'da inşa edilmiştir. Genel tanıtım amacı ile Ontario Pavilion yapısı hakkındaki bilgiler Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Ontario Pavilion yapısı genel tanıtımı

	ONTARIO PAVILION
Yapım Yılı	2015
Mimar	Hariri Pontarini Architects (HPA)
Yer	Amerika (Toronto)
İşlev	Eğlence, yeme-içme, performans ve konser alanı
Kullanım Durumu	Geçici Yapı, 38 gün kullanım
Tasarım Fikri	Semer eğer formlu akışkan, organik ve parçalı, her alandan insan geçişine izin veren form
Yapı Ölçüleri	60 metre uzunluk, 17-18 metre genişlik ve ortalama 15 metre yükseklik
Yapı Alanı	1 200 m²
Kişi Kapasitesi	1 500 kişi
Pnömatik Yüzey Alanı	13 000 m² yüzey alanı
İnşa Süresi	Membranın kesme, kaynakla birleştirme ve diğer elemanlar aracılığıyla yerinde montajını kapsayan toplam 10 hafta, 72 saat içerisinde yerinde kurulum

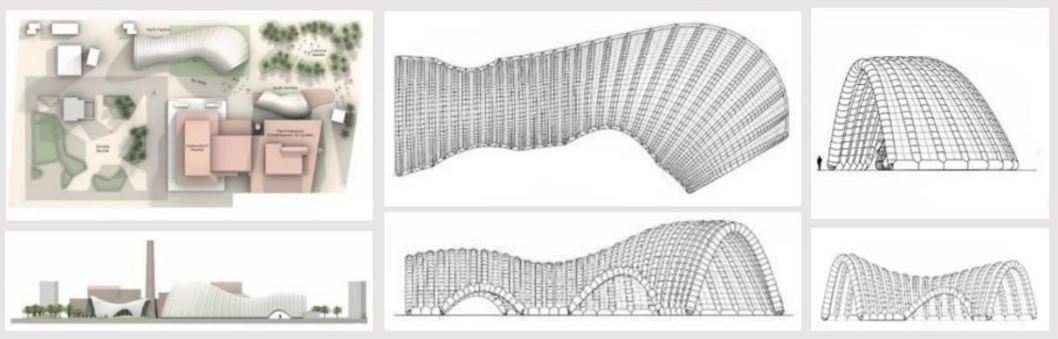
Hariri Pontarini Architects (HPA) tarafından Toronto'daki şenliklerin bir parçası olarak geçici bir pavyon tasarlanmıştır. Ontario gölü yakınında halka açık bir parkta, Pan Amerikan Oyunları'nın gerçekleştirilmesi için tasarlanan yapı 38 gün boyunca park

içerisinde kurulu kalmıştır. 1 200 m² alan örten yapı 2015 yılında inşa edilmiştir (URL 238). HPA danışman mühendis olarak Thornton Tomasetti, yerel mühendis olarak Blackwell ve üretici olarak Tectoniks'ten oluşan proje ekibi tarafından bir hafta içerisinde inşa edilen yapı; zip-line gibi eğlence birimleri, yeme-içme bölgeleri ve iki performans alanından oluşmaktadır. Kapitone biçimli pnömatik yapılı tüp kemerlerden inşa edilen Ontario Pavilion 60 metre uzunlukta, 17-18 metre genişlikte ve 15 metre yüksekliğindedir (Şekil 3.35). Sürekli tekrar eden 1,2-1,6 metre çapındaki tüp kemerler aracılığıyla geliştirilen çeşitli formlar mimari ifade şekli, ihtiyaç programı ve rüzgar-yerçekimi yükleri gibi unsurlara göre belirlenmiştir. Geliştirilen kabuk formlar, 3 boyutlu dijital modeller üzerinden temeli temsil eden sınırlar, direnci temsil eden kemerlerden oluşan tonozların yerçekimi ve rüzgar gibi yüklere davranışı, şişirme basıncı ve toplam yüksekliği belirten yüzey sertliğine göre analiz edilmiştir. Ayrıca rüzgar ve yerçekimi ana yük faktörlerine ek olarak yapının işlevi dolayısıyla afiş ve aydınlatma gibi noktasal yüklere karşıda hesaplamalar yapılmıştır. Kemerlerin belirli bir örgü biçiminde bir araya getirilmesi ile oluşan pnömatik sistemli şişirme yapı, tonoz ve kubbelerden oluşmaktadır. Analizler sonucunda belirlenen yapı formu yüzeysel olarak detaylandırılmış ve daha sonra inşa edilmiştir (Jungjohann, Woodington, 2016).



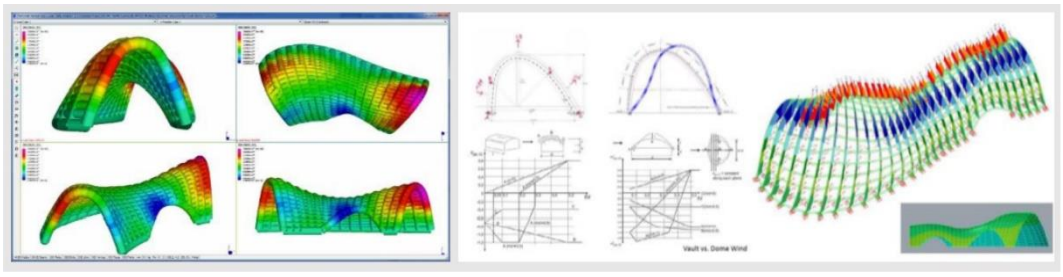
Şekil 3.35. Ontario Pavilion yapısı (URL 238)

Ontario Pavilion'un park içerisinde konumunu gösteren vaziyet planı ve yapı plan ile kesitleri Şekil 3.36'da gösterilmektedir.



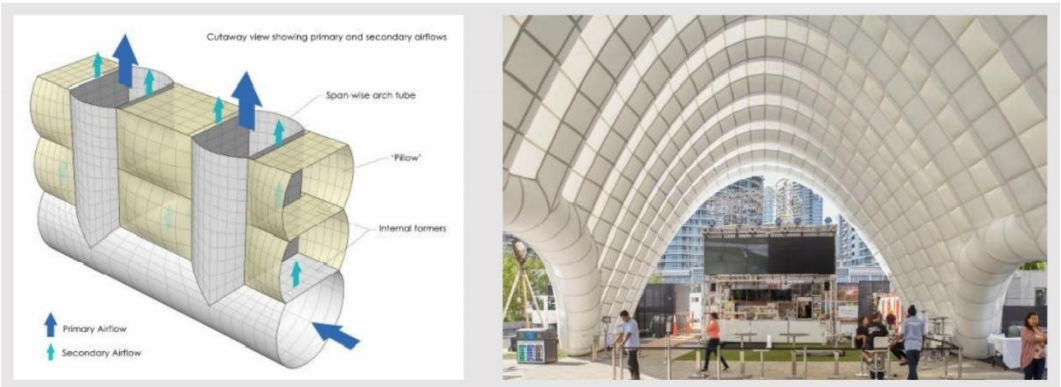
Şekil 3.36. Ontario Pavilion plan ve kesitleri (URL 238)

İnce, hafif, akıcı ve organik olan Ontario Pavilion, form açısından yapılan çift cidarlı pnömatik tüpleri herhangi bir tekrarı veya aynası olmaksızın tamamen asimetrik olarak tasarlanmıştır. Kısa sürede tasarlanması, üretilmesi ve inşa edilebilmesi için oluşturulan her bir yapı için CAD yüzey modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.37). Geliştirilen dijital yazılım aracılığıyla tüm yapının üç boyutlu modeli ve uygulama şeması ile iki boyutlu membran kesim modeli kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Her bir pnömatik tüp kemerin kimlik numarası, konumu, hizalama işaret yerleri, dikiş payları ve temel tespit yeri model sayesinde çok sayıda birbirinden farklı bileşenin üretimini kontrol etmek, her birinin boyutsal olarak doğru olmasını ve doğru sırada monte edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede tasarımdan üretime etkili bir planlama ve kontrol sistemi de sağlanmaktadır (URL 238).



Şekil 3.37. Ontario Pavilion CAD yüzey modeli ve hesaplamaları (URL 238; Jungjohann, Woodington, 2016)

Pnömatik sistemlerde kullanılan ince ve esnek membran malzemenin şişirme sonucuyla basınç oluşmaktadır. Basınç kuvvetleri sayesinde öngerilmeli hale gelen sistemde düzlem içerisinde ortaya çıkan sıkıştırma yüklerinin kaldırılması gerekmektedir. Şişirme yapıda her noktada aynı düzeyde olacağından sınırlayıcı unsur malzeme mukavemetini aşacak çekme yükleri oluşturmadan en büyük sıkıştırma yüklerini ortadan kaldıracak basınç düzeyini sağlamaktır. Yapının kuvvetlerinin seviyesini doğru şekilde hesaplamak ve uygulamak için "Sonlu Elemanlar Analizi" kullanılmıştır. Geliştirilen teknik şişirilmiş bir kirişi eşdeğer bükülme rijitliğine sahip bir kirişle eşitlemektir. Eğilme rijitliği verileri, çeşitli çaplarda ve iç basınçlarda şişirilmiş kirişlerin yük/sehim testleri sonucunda belirlenmiştir. Aynı zamanda membran tüplerin yapısı, hava sistemi ve yüzey biçimlenmesi de hesaplanmıştır (Şekil 3.38). Bu veri sayesinde yapının inşası sonrasında oluşabilecek sapmaların doğru bir şekilde tahmin edilmesi için sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Modelin analizi, iç hava basıncının tüm basınç yüklerini ortadan kaldırmak için yeterli olduğunu ve malzeme mukavemetinin hiçbir noktada aşılmadığını kontrol etmek için membran yüklerinin hesaplanabileceği yapılarda mevcut olan maksimum eğilme momentleri de hesaplanabilir hale gelmiştir (URL 238). Sonuç olarak model üzerinden yapının analiz edilmesi hızlı şekilde optimizasyon, tasarım, form belirleme, üretim ve inşa imkanını sağlamıştır.



Şekil 3.38. Ontario Pavilion membran iskelet tüpleri ve uygulanmış hali (URL 238)

Ontario Pavilion'un belirlenen formundan sonra malzeme seçimi yüzeyin yapısını, sertliğini, dayanımını ve ortotropik davranışını etkilemektedir. İki tür yangın geciktirici mimari tekstil seçilmiştir. Kemerler için beyaz ve opak, iç aydınlatmada ışık etkileri

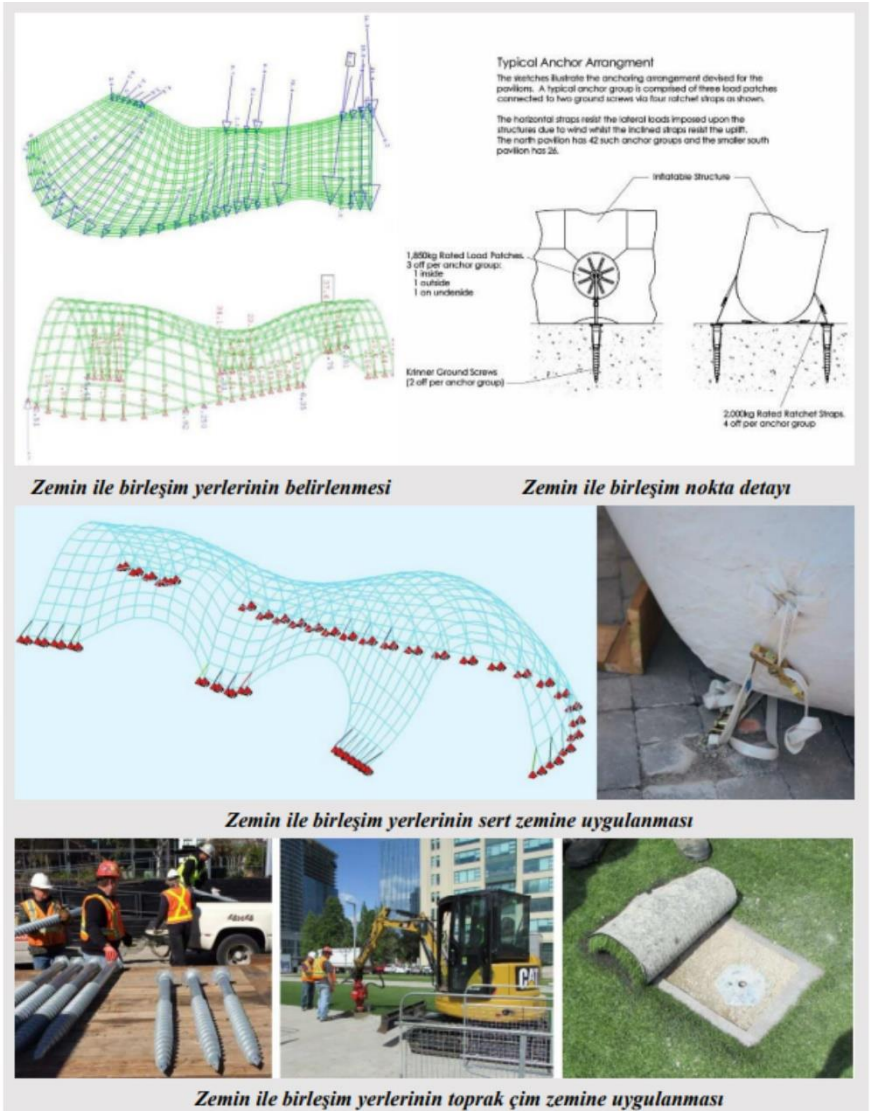
oluşturmak için yastıklarda yarı saydam membran kullanılmıştır (URL 238). Yapının ana malzemesi olan PVC membranın form doğrultusunda kesme ve sıcak hava kaynağı ile birleştirme işlemleri 10 hafta içerisinde gerçekleştirilmiştir. Membran malzemenin kaynaklı dikişlerinin hava sızdırmazlığı yapısal bütünlük açısından kontrol edilmektedir. İngiltere'de üretilen membran nakliye konteynerleri aracılığıyla Toronto'da uygulanacak alana ulaştırılmıştır. Gündüzleri parlak beyaz renkte görülen yapı geceleri iç ve dış mekanda aydınlatmalar aracılığıyla çeşitli renklerde ışıklandırılmıştır (Jungjohann, Woodington, 2016) (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. Ontario Pavilion'un gece pembe renkte aydınlatılmış hali (URL 238)

Yapı geleneksel mimari sistemlerin aksine basit bir temel sistemine sahiptir. Rüzgar, yerçekimi ve noktasal yükleri zemine aktaran ve aynı zamanda yapının sabitlenmesini sağlayan özel detaylandırılmış birleşimler kullanılmaktadır. "Sonlu Elemanlar Analizi" hesaplamaları ile ortaya çıkan 200 tonun üzerinde bir kombine tutma kapasitesine sahip geçici topraklama vidaları ve sabitleme sistemi geliştirilmiştir. 200 tonun üzerinde tutma kapasitesine sahip olması gereken yük noktaları sayesinde yapı fazladan hiçbir taşıyıcı sistem ya da donanıma ihtiyaç duymadan ayakta durabilir hale gelmektedir (URL 238). Temel tasarımı, ankraj noktalarının dağılımını belirlemek için her rüzgar yönünden gelen en kötü tepkileri ve çeşitli temel sertlik durumlarını dikkate alarak tasarlanmıştır. Yumuşak pnömatik yapı ile sert zemin arasındaki bağlantıda yüklerin yoğunlaşma durumuna göre kuvvetlerin aktarımını sağlayan ve tek noktada değil dağıtarak zemine aktaran çeşitli sertliklerde yay içeren ankraj noktaları geliştirilmiştir. Ankraj noktalarına

hem yapıyı hem de zemini bağlanmak için temel yama detayı ve istenen davranışa izin veren bir kayış bağlantısı tasarlanmıştır (Jungjohann, Woodington, 2016). Her bir temel yama elemanı için gereken minimum kopma yükü 1 850 kilogramdır. Radyal yük bantlarına bağlı merkezi paslanmaz çelik yük halkaları ile 800 mm çapında dairesel yük yamaları tasarlanmıştır. Bu yapı elemanları şişirilebilir malzemeyle aynı malzemeden yapılmış bir destek diskine dikilmektedir. Daha sonra yapısal bir yapıştırıcı kullanılarak yapıya tümüyle sabitlenmektedir (URL 238). Beton blok parça üzerine vidalar ile 60 noktada sabitlenen temel yapısı; gizli görünüm, hafiflik, kurulum ve söküm kolaylığı sağlamaktadır (Şekil 3.40).



Şekil 3.40. Ontario Pavilion zemin birleşim detayları (Jungjohann, Woodington, 2016)

Tasarım, form bulma, malzeme temini ve uygulama ekibinin oluşturulması sonucunda Ontario Pavilion'un inşa süreci başlamıştır. Park içerisinde bulunan suni çim alanda kurulumu belirlenen noktalara zemin vidaları ekskavatörün koluna takılan özel bir matkap aracılığıyla sabitlenmiştir. Temelin yerleştirilmesinden sonra pnömatik ana yapı 36 saatlik bir süreçte şişirilerek şeklini almıştır (Şekil 3.41). İlk şişirme evresinde sabit bir iç hava basıncına ulaşmak için birden fazla kompresör kullanılmıştır. Kurulum aşamasından zaman zaman hava desteği gerektiği durumlarda kullanılmak üzere birkaç hava destek fanı bırakılmıştır. Güneş ve iklimsel faktörlerin veya delinme, yırtılma ve aşınma gibi durumların yapıyı etkilediği durumlarda hava desteği gerektirmesine rağmen yapı ilk formunu uzun süre korumaktadır (Jungjohann, Woodington, 2016).



Şekil 3.41. Ontario Pavilion şişme aşamaları (Jungjohann, Woodington, 2016)

Yapı içerisinde bulunan her bölgenin kendi ait bağımsız şişirme ünitesi vardır, böylece bir bölge içinde aşırı hasar olması durumunda kalan bölümler etkilenmez ve hasarlı bölgeyi destekleyecek yeterli güce sahiptir. Buna ek olarak güneş ışınları nedeniyle yapının aşırı basınç kazanması sonucunda normal seviyedeki basınca ulaşana kadar havanın kaçmasına izin vermek amacıyla elektrikli tahliye vanaları açılmaktadır (URL 238). Böylelikle çift cidarlı pnömatik iskelet tüplerden oluşan Ontario Pavilion yapısı kullanım süresi boyunca sabit bir basınç altında tutulabilmektedir. Membran yüzeyler içerisindeki basıncın sabit tutulması sayesinde yapı formunun dayanımı ve sürekliliği sağlanmaktadır.

3.2.3. Münich Allianz Arena

Münich Allianz Arena cephe kaplaması olarak pnömatik sistemin kullanıldığı kalıcı bir stadyum yapısıdır. 2004 yılında Jacques Herzog ve Pierre de Meuron tarafından tasarlanarak Almanya'da inşa edilmiştir. Genel tanıtım amacı ile Münich Allianz Arena yapısı hakkındaki bilgiler Çizelge 3.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.4. Münich Allianz Arena yapısı genel tanıtımı

	MUNICH ALLIANZ ARENA
Yapım Yılı	2004
Mimar	Jacques Herzog ve Pierre de Meuron
Yer	Almanya (Munih)
İşlev	Stadyum
Kullanım Durumu	Kalıcı Yapı
Tasarım Fikri	Roma dönemi monolitik Kolezyum yapılarından esinlenilmiştir.
Yapı Ölçüleri	258 metre uzunluk, 227 metre en, 50 metre yükseklik, 840 metre yapı çevresi
Yapı Alanı	37 600 m²
Kişi Kapasitesi	66 000 kişi
Pnömatik Yüzey Alanı	147 000 m² pnömatik cephe yüzey alanı
İnşa Süresi	21 Ekim 2002'de başlanan yapı 30 Mayıs 2005'te ortalama 3 yıl sürede inşa edilmiştir.

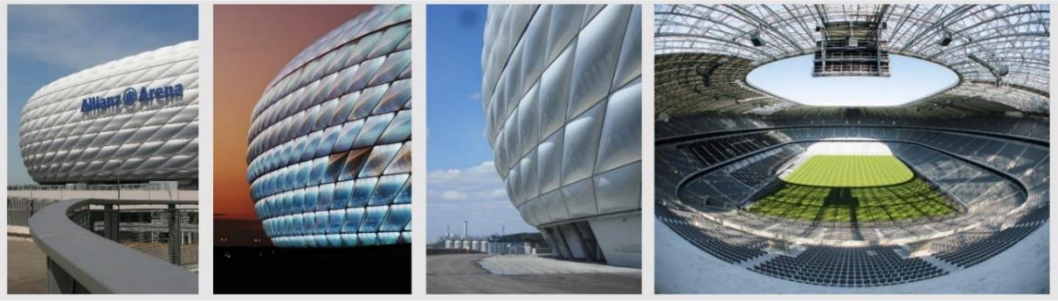
İsviçreli mimarlar Jacques Herzog ve Pierre de Meuron tarafından tasarlanan 2004 yılında Almanya'nın Münich şehrinin kuzeydoğusunda inşası tamamlanan Allianz Arena Stadyumu 2006 yılında Dünya Kupası maçlarına ev sahipliği yapmıştır. FC Bayern München ve TSV 1860 München olmak üzere iki takım tarafından kullanımı paylaşılan stadyum yapısı 66 000 kişilik kapasiteye sahiptir. Şehrin ana otoyolları üzerine konumlandırılmış stadyum yapısı insan ve araç sirkülasyonunun kolaylıkla sağlanması için demiryolu, otobüs, kişisel araç, yaya ulaşımı ile park yerleri özel olarak

tasarlanmıştır. Toplu taşıma veya kişisel olarak yapıya ulaşan tüm insanlar bina önü meydanında geniş çimenli alanlar ile iç içe geçen kavisli yollarda toplanmaktadır. Allianz Arena farklı ulaşım sistemleri ile toplanan sporcuların, personelin, basının, halkın, VIP'nin, güvenliğin yedi farklı seviyede fonksiyonel dağılımını sağlayan sirkülasyon şeması ve plana sahiptir. Münich Allianz Arena 11 000 araçlık otoparka sahiptir. Yapı önündeki meydanda bulunan teraslamalar ile oluşturulan meydan alanındaki boşluklar otoparkların hava sirkülasyonunu ve araçların yaydığı kirletici gazların dışarı atılması için geliştirilmiştir (Gonçalves, 2017) (Şekil 3.42).



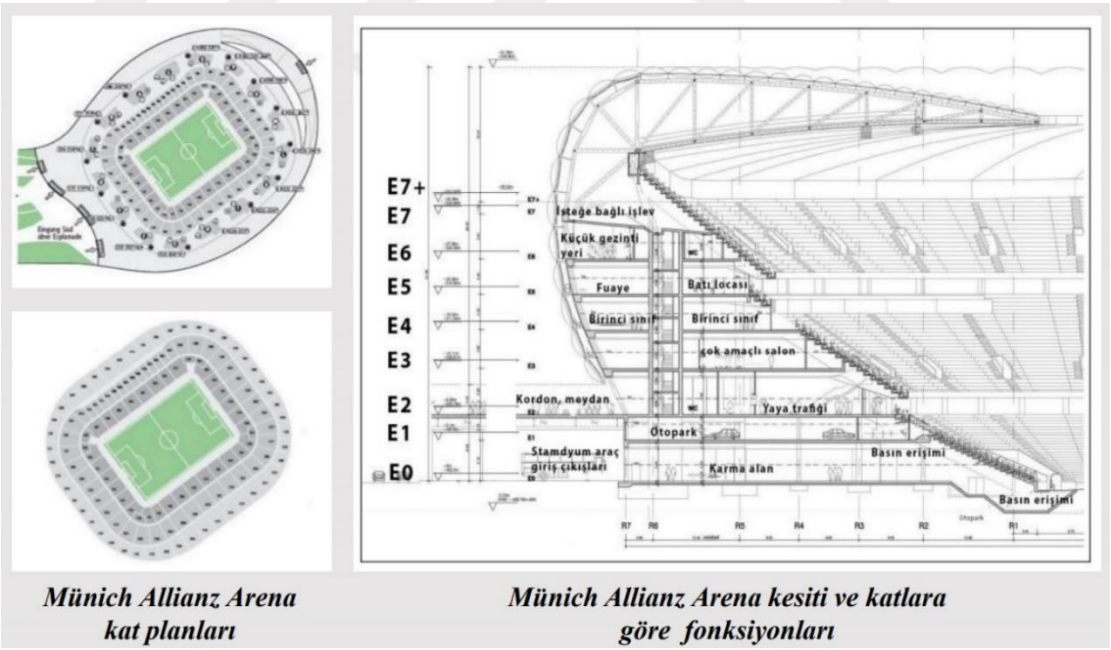
Şekil 3.42. Münich Allianz Arena vaziyet planı, otopark ve peyzaj alanı (URL 239; Gonçalves, 2017)

Münich Allianz Arena Kolezyum'a atıfta bulunarak tasarlanmış monolitik bir forma sahiptir. Anıtsal bir izlenimi olan yapının homojen cephe elemanlarından oluşturulan yuvarlak blok biçimi pnömatik yastılar sayesinde yüzme ve dalgalanma hissi uyandırmaktadır. Yapı betonarme, çelik ve membran sistemlerin birbirleri ile kombinasyonlu olarak kullanımı sonucunda inşa edilmiştir. Temel ve zemin kotlarda betonarme taşıyıcılar, çelik çatı ve cephe sistemleri ve üzerinde pnömatik membran yüzeylerden oluşmaktadır (Şekil 3.43). Stadyumun saha alanına ek olarak bilet ofisleri, gastronomi ve eğlence alanları, hatıra müzesi, çocuk oyun alanları, restoranlar, satış ofisleri, ofisler, kulüp satış mağazaları, konferans salonları, basın alanları, kafe, yönetim birimleri, sporcu alanları gibi çeşitli fonksiyondaki birimler ile birlikte 37 600 metrekarelik alana inşa edilmiştir. Kullanıcı odaklı olarak tasarlanan sirkülasyon şemaları ve planlamalara ek olarak güvenliği sağlamak amacıyla bilgisayar destekli tahliye rotaları oluşturulmuştur. Bu sayede 15 dakika içerisinde tüm yapının tahliyesi sağlanabilmektedir (Gonçalves, 2017).



Şekil 3.43. Münich Allianz Arena cephesi ve iç alanı (URL 240)

Münich Allianz Arena spor kompleksi belirtildiği üzere yapısal olarak yedi farklı kotta işlevsel açıdan farklılaşmaktadır. E0 ve E1 iki zemin seviyesindeki sporcuların otobüs gelişini ve taraftarların araçlarının park alanlarını içeren bölgedir. E2 olarak adlandırılan tüm birimlerden toplanan insanların geliş katı yürüme alanları ve ıslak hacimleri içeren ortak kottur. E3 çok amaçlı salon, E4 ise VIP mekanları kapsamaktadır. E5 kotunda localar, gezinti alanları, fuaye bulunurken E7 isteğe bağlı olarak fonksiyon kazandırılabilen mekanlardan oluşmaktadır (Varol, 2021) (Şekil 3.44).



Şekil 3.44. Münich Allianz Arena planı ve fonksiyonları gösteren kesiti (Gonçalves, 2017; Varol, 2021)

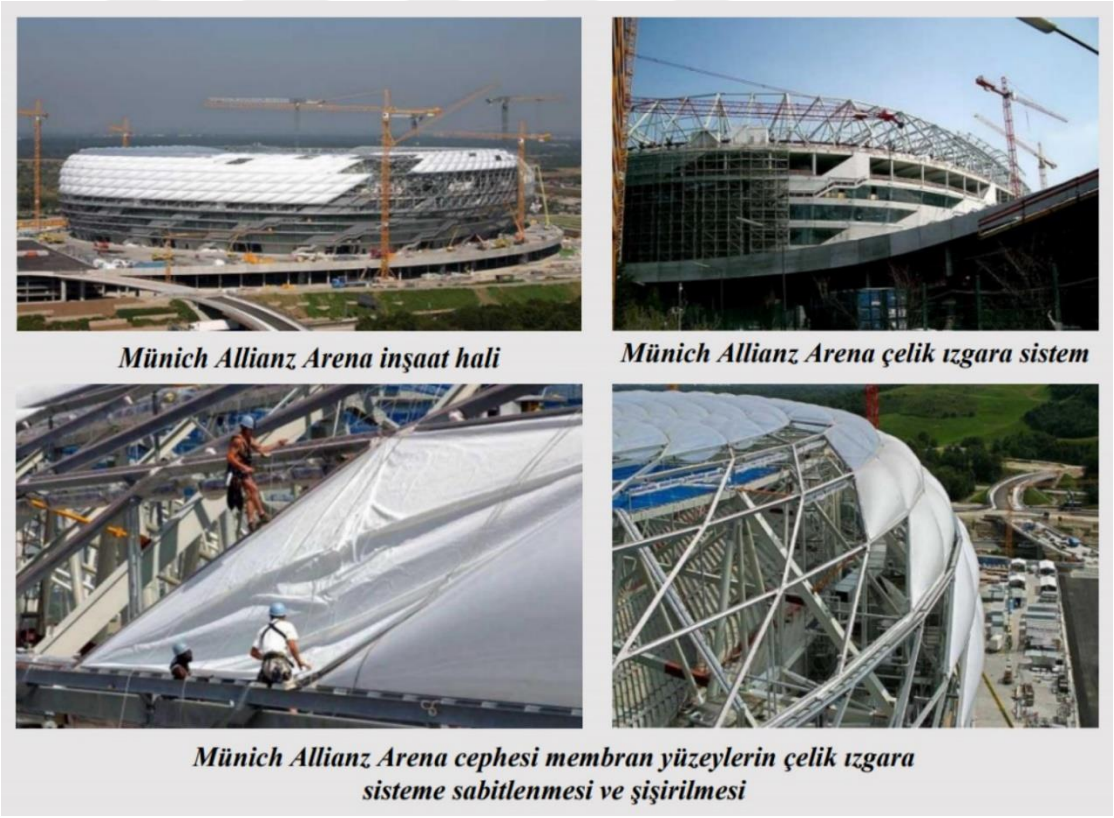
Münich Allianz Arena cephesi ve çatısı çelik taşıyıcılar üzerine uygulanmış pnömatik sistemde modüllerden inşa edilmiştir. İç mekanda, ışık geçirgen olan pnömatik çatı sistemine yönelik seyirci oturma alanlarının üzerinde ise gerektiğinde açılıp kapanabilen güneş koruyucu tenteler tasarlanmıştır (Şekil 3.45). ETFE membran malzemenin çatıda ve cephede %93 oranda şeffaflık sağlayarak kullanılması kullanıcılar açısından ışık geçirgenliği ve doğal çim saha için gerekli koşulları sağlamaktadır (Le Cuyer, 2008). Bu sayede hem sporcular hem de izleyiciler için optimum ışık seviyesinin ayarlanması pasif yapısal önlemler ile tasarım aşamasında sağlanmaktadır.



Şekil 3.45. Münich Allianz Arena pnömatik çatı sistemi ve açılıp kapanabilen güneş koruyucu tenteler (URL 241; Gonçalves, 2017)

Taşıyıcı sistem açısından 350 adet beton kolon ile desteklenen yapıda ortalama 200 000 metreküp beton malzeme kullanılmıştır. Betonarme sistem ile inşa edilen yapı 65 metrelik konsol çatı ve cephe sistemi ile birleştirilmiştir. Zeminden çatıya ulaşan çelik ızgara sistem ile bu ızgaralara bağlı elmas şekilli 2 milimetre kalınlığında ETFE membran zar kabuk sistemden oluşmaktadır (Şekil 3.46). ETFE membran, meteorlar ve uçak parçaları gibi nihai olarak gökten düşen nesnelere, yangına, kar, rüzgar ve yağmur gibi olumsuz hava koşullarına karşı elastik ve çekme testleri yapılarak geliştirilmiştir. 55 metrelik cephe manuel olarak monte edilen 2 874 pnömatik (şişme) modül panellerden meydana gelmektedir. Toplamda 147 000 m² alanda uygulanan pnömatik sistemin membran kalınlığı dış folyoda 200 ile 250 µm arasında iken iç folyoda 150 ile 250 µm arasında değişmektedir. Pnömatik sistemli yastık iç basınçları tüm stad yapısının her köşesinde üç üfleyici birim, iki üfleyici fan ve bir üfleme odasından (istasyon) oluşmaktadır. Her pnömatik birim çatıda 300 Pa, cephede 450 Pa iç hava basıncında sahip olması için hava

borularından oluşan dallanmış bir sistem aracılığıyla desteklenmektedir. Seçilen membran malzeme %98 yarı saydam niteliktedir ve bu sayede hem stadyum dışarısından doğal ışığın saha alanına ulaşmasını hem de maçı bulunan takım veya ülkelere göre renk değiştirebilir özellikte olmasını sağlamıştır. Diğer stadyumlardaki gibi periyodik olarak değişim gerektirmeyen membran malzemeden geliştirilmiş ortalama 35 metrekarelik şeffaf pnömatik yastıklardan oluşmaktadır. Pnömatik cephe sistemi, membran malzemenin çelik kafes strüktüre montajından sonra yapının üst kısmına yerleştirilen hava pompaları aracılığıyla borular vasıtasıyla şişirilmesi ve fanlar sayesinde paneller içerisindeki havanın sabit bit basınçta tutulması ile oluşturulur. Mimarların tasarım seçimleri üzerine aydınlatma, her pnömatik panelin ışıklarının ayrı ayrı açılıp kapatılabilmesi ya da farklı renkler verilebilmesi amacıyla 25 000 adet floresan lamba ve bilgisayar destekli sistem ile sağlanmıştır. (Gonçalves, 2017).



Şekil 3.46. Münich Allianz Arena cephesi çelik strüktür üzerine uygulanan membran yüzeyler ve pnömatik sistemin inşa aşamaları (URL 239; Gonçalves, 2017)

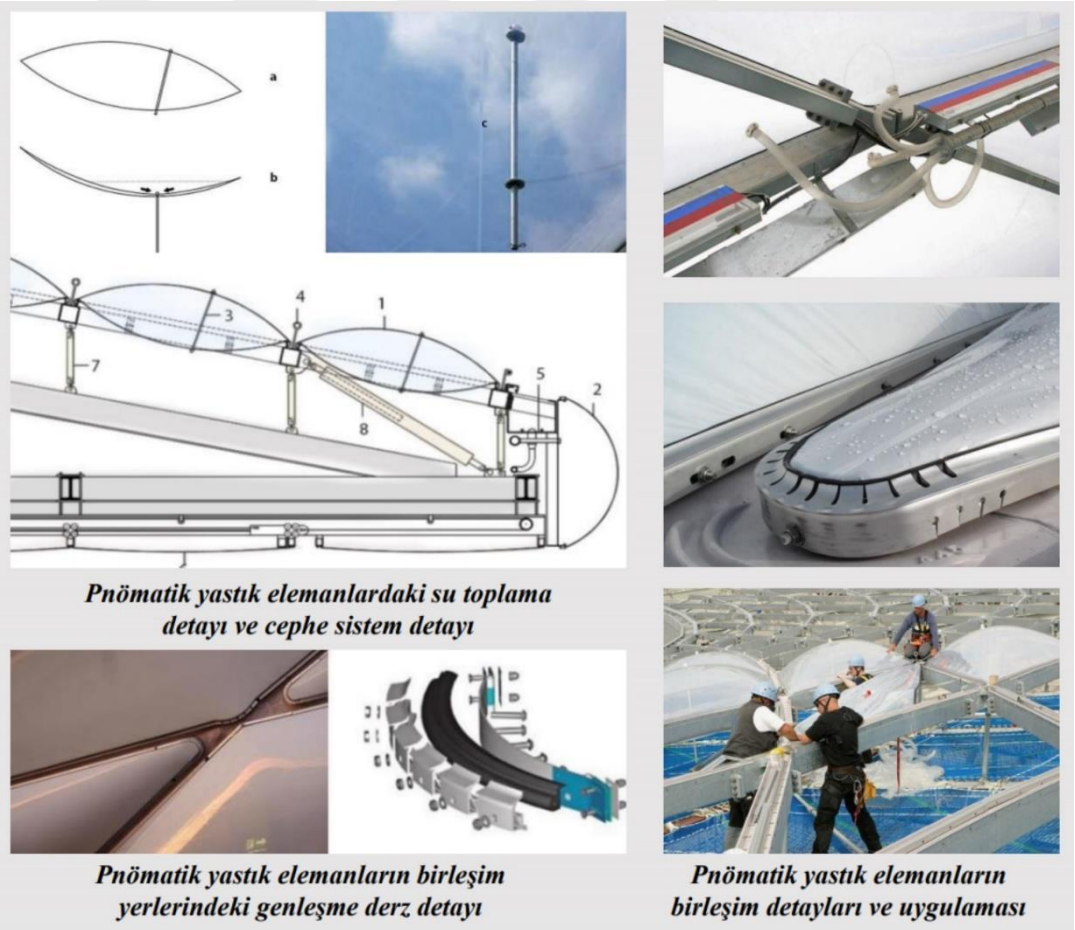
Dijital yöntemlerle renklendirilen pnömatik cephe üç renkli (beyaz, mavi ve kırmızı monokromatik veya çift renkli) olarak her yastıkta 4 adet LED lambalar ile ışıklandırılmaktadır. Böylelikle yapı cephesi modülleri birbirinden bağımsız olarak istenilen her renkte aydınlatılabilmektedir (Şekil 3.47). Geleneksel cephe aydınlatma sistemlerine göre %60 enerji ve 362 ton CO2 tasarrufu sağlamaktadır. Aynı zamanda dakikalar içerisinde renk değiştirebilen yapı sportif etkinlikler için bir gösteri sunmaktadır (3M™ Dyneon™ Fluoropolymers, 2014).



Şekil 3.47. Münich Allianz Arena gündüz hali ve gece cephe aydınlatması (URL 239, URL 242, URL 243; Gonçalves, 2017)

ETFE malzemenin plastik-polimer esaslı olması nedeniyle yapılarda kullanımının yangın ve vandalist durumlara karşı davranış açısından önemlidir. ETFE malzeme yangın esnasında alev yürütmez niteliktedir. Münich Allianz Arena'da yangın durumlarında duman tahliyesi ve havalandırma için açılabilir yastık elemanlar planlanmıştır. Geleneksel cephe sistemlerine göre oldukça düşük olan bakım maliyetine sahiptir. Ayrıca uzun süre içerisinde kesici ya da delici bir aletle kasıtlı olarak zarar verilmediği sürece hasar görme olasılığı düşük bir sistemdir. Münich Allianz Arena 65 metrelik konsol çatısı nedeniyle kar ve yağmur gibi yağış durumlarına yönelik olarak da geliştirilmiş bir sistem gerektirmektedir. Yoğun yağış durumunda kar veya suyun tahliye borularında aksaklıklara neden olması ETFE yastıklar ile havalandırma kanalları arasındaki ilişkiyi de etkilemektedir. Sızdırmazlık halkalarının gevşemesi ve dolayısıyla pnömatik

yastıklarda hava kaybı durumu ortaya çıkmaktadır. Yastık elemanlarda sönme durumunda gerçekleşecek su birikimi ve göllenmeyi engellemek amacıyla çatıda bulunan 1 900 pnömatik birime üst katmana sabitlenen ve alt katmanda sızdırmazlık halkası içerisinden geçen yastık drenaj sistemi eklenmiştir. Sensörler yardımıyla algılanan, düzenlenen ve denetlenen yastık içi basınçlarının uç koşullarda düşmesi durumunda belirlenen sabit basınç değerinde tutulabilmesi için nadiren kullanılan bir sistemdir. Ayrıca pnömatik yastık sisteminin sıcaklık ve iklimsel koşullarda değişimine yönelik hem sabitlendikleri çelik sistemde hem de genleşme derzleri ile çözümlenmiştir. Bu sayede değişim koşullarında derzlerin açılıp kapanması membran tabakasının zarar görmesini engellemektedir. Yaylı çelik plaka ve EPDM adı verilen elastomer tutma tertibatı ile çevrelenmiş eşkenar dörtgen birimler için genleşme veya büzülme durumlarında esneyebilen bir detay sistemi tasarlanmıştır (Varol, 2021) (Şekil 3.48).



Şekil 3.48. Münich Allianz Arena pnömatik sistem detayları (URL 244; Moritz, 2010)

3.2.4. Beijing Water Cube

Beijing Water Cube cephe kaplaması olarak pnömatik sistemin kullanıldığı kalıcı bir su sporları merkezi yapısıdır. 2008 yılında Chris Bosse ve Rob Leslie Carter tarafından tasarlanarak Çin'de inşa edilmiştir. Genel tanıtım amacı ile Beijing Water Cube yapısı hakkındaki bilgiler Çizelge 3.5'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Beijing Water Cube yapısı genel tanıtımı

	BEIJING WATER CUBE
Yapım Yılı	2008
Mimar	Chris Bosse ve Rob Leslie Carter
Yer	Çin (Beijing)
İşlev	Olimpik Su Sporları Merkezi
Kullanım Durumu	Kalıcı Yapı
Tasarım Fikri	Bird Nest Stadyum'u karşısında ying-yang karşıtlığını temsilen sade ve küp formlu; su sporları için baloncuk cephe
Yapı Ölçüleri	177 metrelik kare taban alanı ve 31 metre yükseklik
Yapı Alanı	31 500 m²
Kişi Kapasitesi	20 000 kişi
Pnömatik Yüzey Alanı	100 000 m² pnömatik cephe yüzey alanı
İnşa Süresi	24 Aralık 2003'te başlayan proje 1 Ocak 2008'de ortalama 3 yıl sürede inşa edilmiştir.

2008 Pekin Olimpiyatları için inşa edilen spor kompleksi Beijing Water Cube, su sporlarına hizmet vermek için 20 000 kişi kapasiteli olarak Beijing'de inşa edilmiştir. "Box of Bubble" olarak da nitelendirilen yapı; Çin Devlet İnşaat ve Mühendislik Şirketi, PTW Architects ve Arup'tan oluşan birimler ile yarışma yoluyla tasarlanıp uygulanmıştır. Projeninin mimarları Chris Bosse ve Rob Leslie Carter, yapının su sporları merkezi olmasına ve dolayısıyla yılın büyük bir bölümünde ısıtma problemleri ve teknik sorunlara

çözüm geliştirmeyi hedeflemiştir. Bu nedenle doğal ışığı doğruda iç mekana aktaran, şeffaf yalıtımlı bir sera olarak yapının inşa edilmesine karar verilmiştir. Teflon ile destekli şeffaf ETFE membran malzemesinin çelik kafes sistem ile birlikte basınçlandırılarak pnömatik sistemde kullanımı hem yalıtım hem de estetik öğeler katarak Beijing Water Cube yapısını ortaya çıkmıştır. Kare planlı kütlesel yapı tüm cepheyi çepeçevre saran pnömatik sistemli yastık hücrelerden meydana gelmektedir (Arup, 2007). Olimpiyat oyunları için yapılan Beijing Water Cube, günümüzde su oyun alanları ve yüzme havuzları içeren bir eğlence merkezi olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.49).



Şekil 3.49. Beijing Water Cube cephesi, günümüzde kullanımı ve iç mekanı (URL 245, URL 246, URL 247)

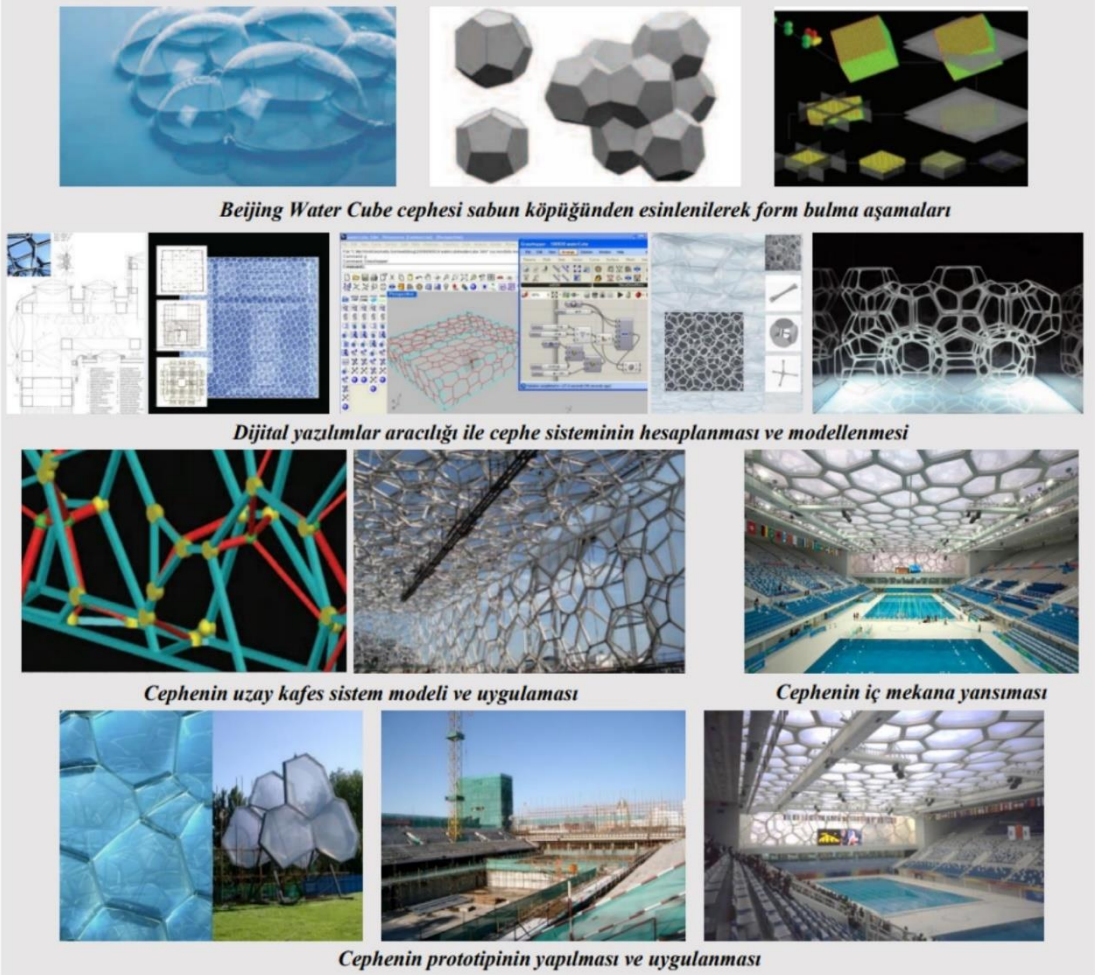
Pekin Olimpiyatları için spor yapılarının bulunduğu alanda inşa edilecek olan Beijing Water Cube yapısının karşısında inşa edilmiş olan "Bird Nest Stadium" yer almaktadır. Çin kültürüne yönelik olarak "ying-yang" karşıtlığı belirtmek üzere stadyumun kırmızısına karşı mavi, kareye karşı yuvarlak, ateşe karşı su, dünyaya karşı cennet ve erkeğe karşı kadını temsil etmektedir (Zou, Leslie-Carter, 2010). Kuş Yuvası Olimpiyat Stadı'nın karmaşık formuna karşın Beijing Water Cube, küp şekilli konseptte su ve insan ilişkisini anlatan sakinliği ve dinginliği yansıtmaktadır (Şekil 3.50).



Şekil 3.50. Beijing Water Cube ve Bird Nest Stadium (URL 248, URL 249, URL 250; Carfrae, 2007)

Pnömatik hücre formlarının ilk tasarım aşamasında düzenli dairesel silindirik panellerden oluşturulması planlanmıştır. Ancak oluşturulan silindirlerin dikey ve yatay doğrultuda kusursuz kesişmemeleri nedeniyle doğadan esinlenerek organik kristalize baloncuk formları uygulanmasına karar verilmiştir. Hücrelerin düzensiz gibi görünmesi ve en az malzeme kullanılarak çözümlenebilmesi için geçmişten günümüze yapılmış biçim çalışmaları değerlendirilmiştir. 19. yüzyılın sonlarında Lord Kelvin'in geliştirdiği 14

kenarlı “Kelvin” şekli (tetrakaidecahedron), Belçikalı bilim adamı Plateau tarafından sabun köpüğü üzerinden 109,4 derecelik dört yüzlü formu tasarım üzerinde denenmiştir. Ancak istenilen görsel etkiyi ve ekonomikliği sağlayamayan bu hücre biçimlerinden sonra 1993 yılında geliştirilen Profesör Denis Weaire ve asistanı Dr. Robert Phelan tarafından “Weaire Phelan Foam” olarak adlandırılan biçimin yapıda kullanılmasına karar verilmiştir. Tam düzenliliğe rağmen rastgele görünmesi ve Kelvin'den yüzde iki daha verimli bir çözüm olması nedeniyle seçilen bu form 177 metrelik kare ve 31 metrelik yükseklikteki tüm kompleksin büyük bir geometrik yapboza dönüşen cephesine uygulanmıştır. Sonuç olarak bir dizi sabun köpüğü geometrisine dayalı, baloncuklara benzeyen plastik yastıklarla kaplı bir yapı ortaya çıkmıştır (Arup, 2007) (Şekil 3.51).

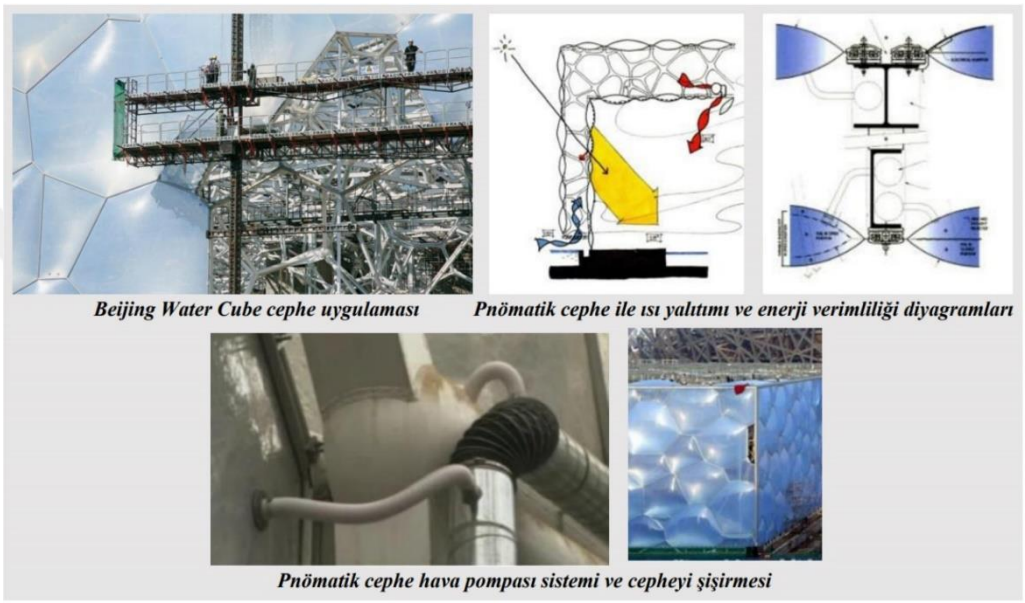


Şekil 3.51. Beijing Water Cube cephe sisteminin tasarlanması ve uygulaması (URL 248, URL 251; Carfrae, 2007)

22 000 adet çelik boru, 12 000 düğüm elemanı ve 4 000 farklı kaplama panelinden oluşan Beijing Water Cube bilgisayar destekli tasarım modelleme sistemi kullanılarak hesaplanmıştır. Hücre elemanları belirlenen "Weaire Phelan Foam" geometrisinde %75'i 14 ve geri kalanı 12 yüzeyde fakat tümü aynı hacimde olarak geliştirilmiştir. Yapısal optimizasyon süreci, tüm çelik yapı elemanlarını ve bağlantılarını boyutlandırarak özel olarak yazılmış bir komut dosyası elde etmiştir. Yapısal analiz çelik çerçeve modelini üç boyutlu CAD modeline dönüştürmüştür. İnşaat çizimleri, yapı elemanları, malzemeler ve uygulama programları üç boyutlu modelden otomatik olarak üretilmiştir. Tasarım aşamasının sonunda, bina boyutunda veya şeklinde büyük bir değişiklik yapılması durumunda yepyeni yapının oluşturulması için bir haftadan az sürecek bir sistem geliştirilmiştir. Yapının uygulama aşamasında fabrikasyon olarak üretilen her iki uçta küresel düğüm elemanlarına kaynaklanan dairesel borulardan oluşmuş çelik kafes sistem çatıda 7 ve duvarda 15 farklı boyutta pnömatik baloncuk hücre panelden inşa edilmiştir. Pnömatik sistemli hücre elemanları; 0,2 mm kalınlıktaki, kendini temizleyebilen, sert, dayanıklı, daha fazla gün ışığının girişini sağlayan ve plastik esaslı ETFE'den oluşturulmuştur. Membran malzemenin hava pompası ile şişirilmesi sonucu büyük mesafeleri geçebilen kaplama paneline dönüştürülmesi sağlanmıştır. Her pnömatik hücrenin içerisi sabit bir basınçta tutulmaktadır ve sürekli olarak hava desteği gerektirmemektedir. Ayrıca yapı bağlamında camdan daha iyi bir seçenek olarak görülen ETFE'nin kullanımı sonucu yalıtımlı sera fikri gerçekleştirilmiştir (Arup, 2007).

Ortalama 3 500 adet şişirilebilir pnömatik yastık için büyük bir enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ancak bu sistem minimum elektrik gücü tüketerek hava pompası ve fanlar aracılığıyla ortalama 100 000 m² şişirilmiş alan, 18 bölgeye ayrılarak desteklenmektedir. Ayrıca bir birimde gerçekleşen sönme veya şişme durumu o birime özel sistem ile dengelenmektedir (A.I.A. 2004). Her bir yastık formunun içerisinde 200 Pa'lık basınç içermesi sayesinde güneş ışınları, rüzgar, iklimsel faktörler ve kar gibi yağış durumlarında yapı uygun koşulları sağlayabilmektedir. Pnömatik yastık birimler içerisindeki basıncın sabit bir düzeyde tutulması için sensörler yerleştirilmiştir. Bu sayede sürekli olarak kontrol edilen basınç durumu ile yapı bütünlüğü korunmaktadır. Membran malzemede aşınma, yırtılma, delinme gibi olayların gerçekleştiği zaman yerinde onarım yapılabilmektedir (National Geographic, 2015). Beijing Water Cube yapısının çatı

sisteminde 4 katmanlı, duvar elemanlarında ise 3 katmanlı olarak kullanılan ETFE, toplamda 100.000 m² yüzey alanını örtmektedir (Şekil 3.52). Cephede 3,6 metre, çatıda 7,2 metre en kesitte uygulanan ETFE yastıklar aynı zamanda iç mekanda üstün bir akustik ortam yaratmaktadır. ETFE cephe yapının sismik performansını iyileştiren, kendini temizleyebilen, yalıtım saylayan, şeffaf olması sebebiyle güneş ışınlarının doğrudan yapıya ulaşmasını sağlayan ve geri dönüştürülebilir (Varol 2021).



Şekil 3.52. Beijing Water Cube pnömatik cephe sistemi (URL 252; Carfrae, 2007; National Geographic, 2015)

Pnömatik sistemli şeffaf yastıkların kullanımı sayesinde sera etkisi ile pasif olarak yapının enerji tüketimi %30 oranında azaltılmaktadır. Yapıya yüksek düzeyde gün ışığının girmesi ile havuz ve yapının ısınması, kütlesel olarak ısı depolanması sayesinde sistem; binaya etkin bir negatif U değeri veya net bir enerji kazanımı sağlamaktadır. Cephede kullanılan membran malzemenin saydam ve yarı saydam modüllerde çeşitli olarak tasarlanması sayesinde yapının gölgeleme, yazın ve kışın iklimsel özelliklere göre sabit ısı sağlama, havuz suyu sıcaklıklarının (eğlence havuzu 30 derece, yarışma havuzu 28 derece) sabit tutulması, iç mekan hava ısısının ortalama 23 derece civarında sabit tutulması hedefleri gerçekleştirmiştir (Arup, 2007).

Yapının kullanıcı açısından optimum konfor koşullarını gerçekleştirebilmesi için iklimlendirme, ısıl konfor ve iç mekan hava kalitesini en ideal düzeyde sağlamalıdır. Bu sebeple akıllı bina olarak inşa edilen Beijing Water Cube, iç mekan ısısını ve havasını dengeleyici pasif ve aktif sistemler ile tasarlanmıştır. Yapının şeffaf membran malzeme kullanması ısıl konfor açısından pasif bir önlem iken mekanik havalandırma sistemleri ile aktif önlemler alınmıştır. Hem korozyonu önlemek hem de hava hareketlerinin korunması amacıyla yapı çevresine havalandırma sistemleri eklenmiştir. Bu sayede yapının iç mekanında kullanılmayan yüksek alanlar kış ve yaz aylarında şartlandırılmış havanın insanların bulunduğu alt tabakada kalması sağlanmaktadır. Ayrıca seyirci alanları sadece gerekli olduğu durumda yalnızca etkinlikler esnasında açılan koltuk altı besleme sistemi ile iklimlendirilmektedir. Havanın bu şekilde bütüncül iç mekanda tabakalaşması ve ihtiyaç duyulan alanların iklimlendirilmesi sayesinde yapının genel enerji tüketimini de azaltmaya yardımcı olmaktadır (Arup, 2007).

Teknolojinin gelişmesi ve bilgisayar kullanımı ile birlikte akıllı mimari sistemde inşa edilmiş bir yapı olan Beijing Water Cube akıllı mimari sistemler içermesi bağlamında; akıllı bileşenler olan malzeme, cephe, taşıyıcı sistem ve mekanik sistemlerin yapıda kullanımını kapsamaktadır. Akıllı malzeme kullanımı ETFE membranın dış cephede ve Latıcrete 9 235'in havuz gibi ıslak alanlarda su yalıtım membranı olarak bozulmadan, koku yapmadan, kırılmadan iç mekanlarda kullanımı sayesinde sağlanmaktadır (Saad, El Azm, 2017). Pnömatik membran yastıkların kullanımı, yapı üzerine düşen güneş ışınlarının %20'sinin güneş panelleri aracılığıyla hava veya havuz suyunu ısıtmada kullanımı (Gonchar, 2008) ve ETFE yastıkların iki membran katmanı arasında depolanan enerjinin paneller aracılığıyla kışın kapalı-yazın düşük veya yüksek seviyede açık olarak kontrol edilebilmesi (Chen, 2012) sağlanmıştır. Bu sayede yapıya özel akıllı bir cephe sistemi geliştirilmiştir. Akıllı taşıyıcı sistem açısından ise kullanılan pnömatik sistem ile iç mekanın konfor koşullarının sağlanması; 3D modellemeler, yükleme ile optimizasyon programları, CAD yazılımları ve dijital program desteklerinin yapıda tasarım aşamasından uygulamaya kadar kullanımı yapının verimli bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır. Yapı bağlamında kullanılan akıllı mekanik sistemler; iklimlendirme (HVAC) sistemlerin bölgesel olarak ihtiyaç durumunda kullanımı, erişim kartı ve elektronik biletler ile giriş-çıkışların sınırlandıran ve bazı bölgelere girişlerin engelleyici

sistemler, yangın dayanımı için kullanılan sistemler, kendi kendine yeterli su sistemi, güvenlik sistemi, iletişim sistemi ve aydınlatma sistemini kapsamaktadır (Saad, El Azm, 2017). Yapı cephesindeki her pnömatik yastık biriminin içerisine entegre edilen LED aydınlatma yardımıyla yapı cephesi istenilen renk ve sürede dönüştürülebilmektedir (Şekil 3.53). Bu sayede Beijing Water Cube yapısının sabit bir görüntüsü olmadığı ve her rengi yansıtabileceği belirtilmektedir.



Şekil 3.53. Beijing Water Cube cephesinin çeşitli renklerde aydınlatılmış hali (URL 253, URL 254)

Beijing Water Cube için geliştirilen cephe sistemi iklimsel koşullara göre dönüştürülerek kullanılabilmektedir. Yüzeylere eklenen havalandırma kapakları mevsim geçişlerinde temiz hava takviyesi için hem iç hem dış yüzeyde açık olarak bırakılmaktadır. Dış mekandan alınan temiz hava cephedeki pnömatik yastıklar içerisinde depolanırken ısınmaktadır ve daha sonra fanlar aracılığıyla iç mekana verilmektedir. Sıcak ve nemli yaz aylarında ise iç yüzeydeki kapaklar kapalı tutulmaktadır. Soğuk kış aylarında ise yapının ısıl kayıplarının engellenmesi amacıyla iç ve dış yüzeydeki kapaklar kapatılmaktadır (Sert, 2016). Böylelikle kapaklar yardımıyla sıcaklık ve nem unsurlarına göre yapı içerisindeki ısı seviyesi belirli düzeyde tutulabilmektedir.

Çelik ve plastik esaslı malzemenin yoğun kullanımı yapının yangına karşı dayanıksız olmasına yol açabilmektedir. Bu malzemelerin 20 000 kişi kapasiteli bir yapıda emniyetli bir şekilde kullanımı için yangındaki performansı, olası yangın senaryoları ve güvenlik açısından sonuçları hakkında çalışmalar yapılmıştır. ETFE'nin erime noktası 270 derecedir ve malzemenin yangın esnasındaki özelliği ısı karşısında büzüşmesidir. Böylece etkin bir şekilde kendi kendini havalandırması ve dumanın binadan dışarı çıkmasına izin veren bir malzemedir (Arup, 2007). Bilgisayar yazılımı kullanılarak

yapıya ek sprinkler sistemler ve duman tahliye sistemleri eklenmiştir. Ayrıca bu tedbirlere ek olarak giriş-çıkış yolları, kapı ebatları, sirkülasyon elemanları yangın ve estetik kaygılar ile özel olarak tasarlanmıştır. Yapının kendi kendine yetebilen su sistemi, dış yüzey ve çatıda ETFE yastıkların yılda 10 000 ton yağmur suyunu toplaması sayesinde ortaya çıkmaktadır. Toplanan suyun %80'i geri dönüştürülerek yeniden kullanılmaktadır. Yapının su tüketimi ve tedarik sistemine bağımlılığı azaltılmaktadır (Gonchar, 2008).

3.2.5. Media-TIC

Media-TIC cephe kaplaması olarak pnömatik sistemin kullanıldığı kalıcı bir kültürel merkez ve ofis yapısıdır. 2010 yılında Enric Ruiz Geli tarafından tasarlanarak İspanya'da inşa edilmiştir. Genel tanıtım amacı ile Media-TIC yapısı hakkındaki bilgiler Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. Media-TIC yapısı genel tanıtımı

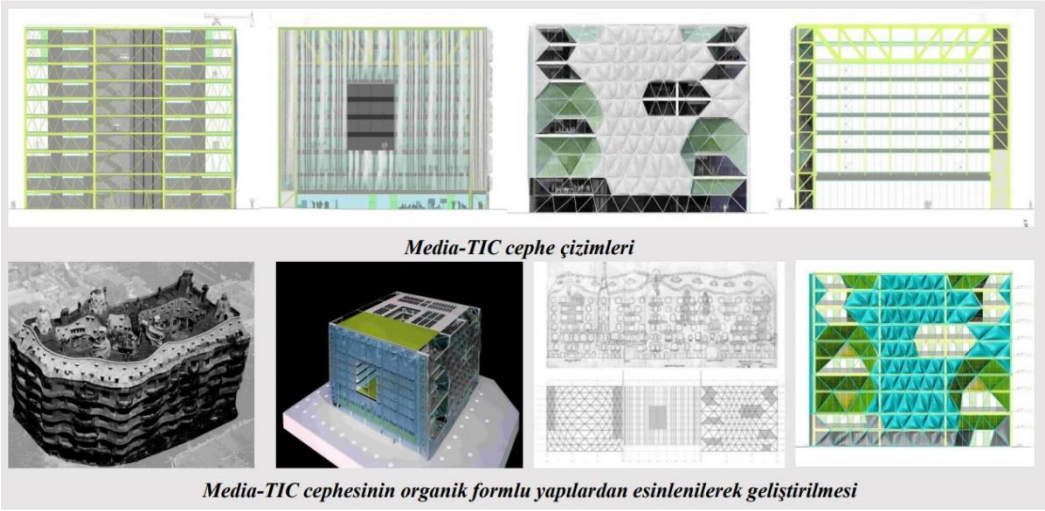
	MEDIA-TIC
Yapım Yılı	2010
Mimar	Enric Ruiz Geli
Yer	İspanya (Barselona)
İşlev	Bilimsel, teknolojik ve kültürel merkez; ofisler; sergi salonları
Kullanım Durumu	Kalıcı Yapı
Tasarım Fikri	1900-1950 yılları arasında endüstriyel devrim etkisinde inşa edilen katedrallerden esinlenerek yapılmış yeni dijital merkez
Yapı Ölçüleri	Zemin kotta 36 metre en ve 44 metre derinlik, 38 metre yükseklik
Yapı Alanı	23 104 m² (8 katlı)
Kişi Kapasitesi	2 418 kişi
Pnömatik Yüzey Alanı	2 500 m² pnömatik cephe yüzey alanı
İnşa Süresi	Tasarımına 2007 yılında başlanmıştır ve Eylül 2010'da kullanıma açılan yapı ortalama 3 yılda inşa edilmiştir.

Enric Ruiz Geli tarafından Barcelona, İspanya'da bilgi-iletişim teknolojileri dünyasındaki işletmeler ve kurumlar ile medya ve görsel-işitsel sektörler için bir iletişim merkezi ve buluşma noktası olmak üzere tasarlanmıştır (Şekil 3.54). Bilişim ve iletişim teknolojileri ofislerini, kamuya açık sergi mekanlarını barındıran yapı; yeni fikirlerin tasarlandığı, hayata geçirildiği ve sergilendiği bir merkezdir. Teknoloji amaçlı çalışan yatırımcıları, kullanıcıları ve mucitleri bir araya getiren ortak bir mekandır (URL 255).



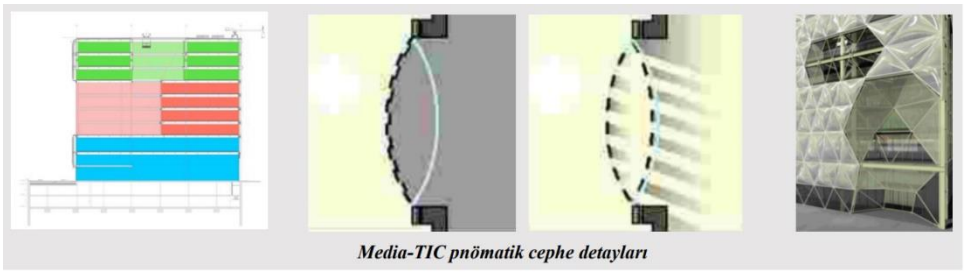
Şekil 3.54. Media-TIC yapısı (URL 255)

Restoran, ofis, iletişim merkezi gibi işlevlerde kullanılmak üzere geliştirilen yapı bilimsel, teknolojik ve kültürel merkez oluşturmayı hedeflemektedir. Bölgede dijital şirketlerin varlığı adına kentsel dönüşüm projesi bağlamında tasarlanan Media-TIC, 1900-1950 yılları arasında yaşanan endüstriyel devrim esnasında inşa edilen katedrallerden ve organik yapılardan esinlenerek inşa edilmiştir. Benzer olarak günümüzde dijital devrim hedefleri ile mimari yapı; yeni malzemelerin, bağlantıların ve taşıyıcıların kullanıldığı teknolojik sistemleri içermektedir. Dolayısıyla Media-TIC yazılımlar aracılığıyla belirli bir süreçte geliştirilen dijital mimaridir (URL 256). Yapı cephesi birbiri ile eş dört yüzeyden oluşmaktadır (Şekil 3.55). Media-TIC cephesinde pnömatik sistemde kaplama uygulanmıştır. Her cephe için güneşlenme süresi ve ışın miktarı dikkate alınarak pnömatik tüp formu ve şişirme maddesi belirlenmiştir.



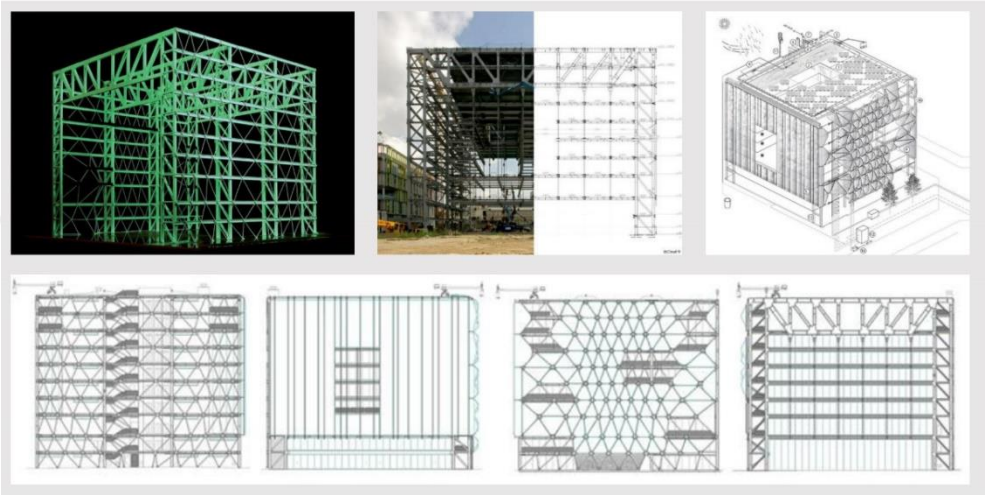
Şekil 3.55. Media-TIC yapısı cephesi ve tasarımı (URL 256)

Media-TIC yapısının teması mimarinin enerjiyi kullanımı ile dijitallik arasındaki yeni dengeli ilişki kurmasıdır. 38 metre yüksekliğindeki 8 katlı yapı farklı yoğunluklarda kullanımı hedefleyen üç bölüme ayrılmıştır. Toplamda 23 104 m² kullanım alanı ve 2 418 kişi doluluk kapasitesine sahiptir. Yapıdaki yoğunluk seviyeleri taşıyıcı sistem, fonksiyon ve kullanıcı doluluğuna göre belirlenmiştir. Yoğunluk seviyelerine fonksiyonel açıdan bakıldığında sıfır yoğunluklu alan giriş katında bulunan halka açık sergi alanı, lobi, resepsiyon ve restoranı kapsamaktadır. Düşük yoğunluklu alanlar ise 300 kişilik oditoryum ve ofis birimlerini kapsayan birinci kattır. Yüksek yoğunluklu üst katlar ise ofisler, ıslak hacimler, çatı terası ve avlu gibi işlevlerde yoğun kullanımı belirtmektedir (URL 257). Yapı içerisine alınacak olan ışık miktarı ise cephedeki pnömatik yastık elemanlarının geçirgenliği değiştirilerek sağlanmaktadır. Böylelikle yapı, yapı cephesi ve iç mekanı arasında bir bağ oluşturulmaktadır (Şekil 3.56).



Şekil 3.56. Media-TIC yapı yoğunluğu ve cephe detayı (URL 256)

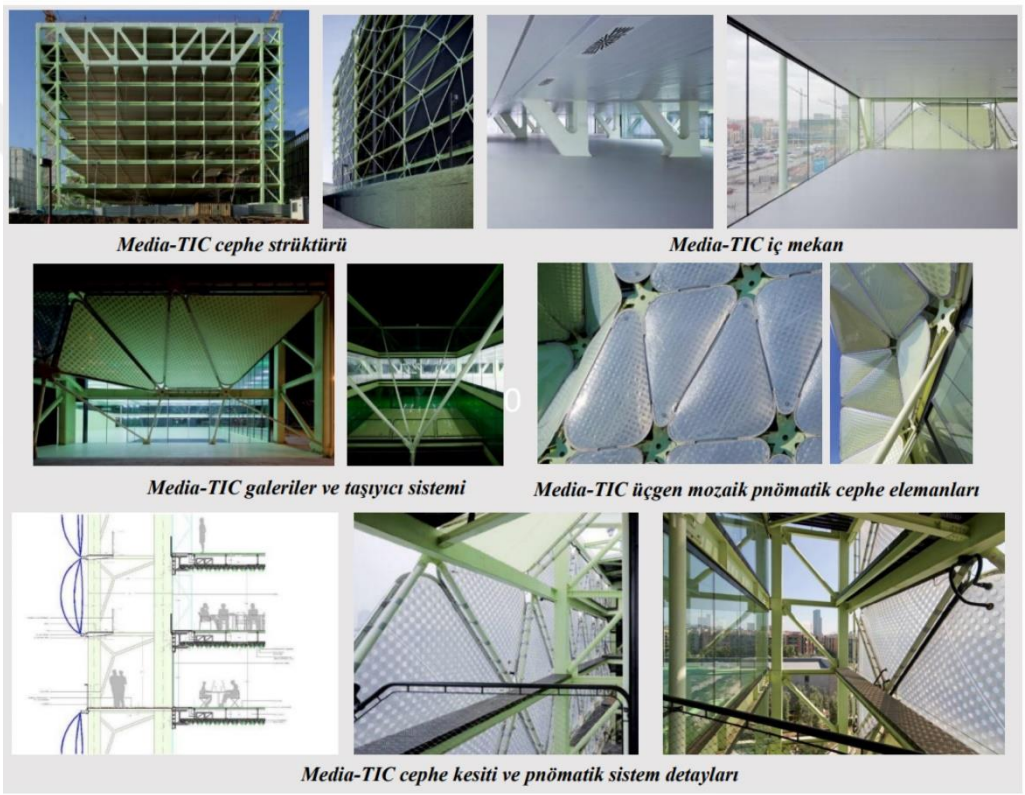
Media-TIC 14,25 metre aralıklı 4 rijit, çapraz çerçeveden oluşan çerçeve tipi 7 ve 8 kesitli dövme metal kirişlerden yapılmış çelik kafes bir yapıdan oluşmaktadır (Şekil 3.57). Kirişler aracılığıyla oluşturulan strüktürel her çerçeve, yüklerini rijit destek merkezleri olan galerilere aktarmaktadır. Bu taşıyıcı öğelerin her biri farklı yapısal yoğunluğa sahip bir alanı tanımlamaktadır. Yapıdaki yoğunluk seviyelerine taşıyıcı sistem açısından bakıldığında ise sıfır yoğunluk, zemin katta halka açık olan 36x44 metrelik boş tarihi bir alanı temsil etmektedir. Düşük yoğunluk, en yüksek seviyede esneklik sağlayan en az boyuttaki yapısal elemanlarla (destek kirişleri) geçilen ofis katlarını belirtmektedir. Böylelikle yapı, farklı işlevlerde kullanımları ve çeşitli kullanıcıları ayırmayı mümkün kılmaktadır. Yüksek yoğunluk ise daha küçük ve esnek olmayan alanlar olan galerileri temsil etmektedir. Taşıyıcı sistemin destek merkezi olan alan; yapı içerisindeki iletişim, kurulum, ıslak hacimler, çatı terasları ve avluları kapsamaktadır (URL 256).



Şekil 3.57. Media-TIC çelik kafes taşıyıcı sistemi (URL 255)

Media-TIC projesinin cephesi, karmaşık bir sistemin dijital yapı ve bilgi inşası temsil edilerek oluşturulabilir hale getirilen ve inşa edilebilir olmasını sağlayan çağdaş bir yapıdır. ETFE membran malzeme kullanılarak geliştirilen pnömatik cephe 2 500 m² alanı kapsamaktadır. Yapıda kullanılan malzemeler ve cephe sistemi sayesinde %20 enerji tasarrufu gerçekleştirerek ekolojik verimlilik sağlamaktadır. Güneş ışınlarını filtreleme (%85) , az malzeme kullanımı, yoğunluk (350 g/m²), hafiflik, şeffaflık-renk, kir tutmayan yüzey, kolay temizlik, elastisite ve form açısından çeşitlilik sağlayan ETFE membran

cephe; pnömatik hava odalarından oluşmaktadır. Pnömatik (şişirilebilir) hava odalarından oluşan cephe, hem ısı yalıtımı hem de gölgeleme sağlamaktadır. Yapı cephesinin şişirilmesi 3 katman aracılığıyla gerçekleştirilmektedir ve şişirilen katmanlar bir diyafram konfigürasyonuyla iç mekanı doğrudan etkilemektedir. Birinci katmanın şişirilmesi ile şeffaf ve saydam bir etki oluşturmaktadır. İkinci ve üçüncü katmanlar hava ile şişirildiğinde birleşerek gölgelik haline gelmektedir. Bu sayede mekanizmalarla değil sadece hava hareketleri ile tüm yapının cephesi ihtiyaçlar doğrultusunda enerji açısından verimli bir şekilde düzenlenebilmektedir (URL 256) (Şekil 3.58).



Şekil 3.58. Media-TIC çelik kafes ve pnömatik cephe sistemi detayları (URL 255)

Media-TIC yapısında cepheler güneş ışınlarının gelme süresi ve etkilerine göre düzenlenmiştir. Kuzeydoğu cephesi sabahları günde yaklaşık 3 saat güneş almaktadır. Mevcut cephe sistemi haricinde güneş koruma sistemi kullanılmayan bu cephede panel tipi panjurlar uygulanmıştır. Güneydoğu cephesi günde ortalama 6 saat güneş ışığı almaktadır. Bu cepheye yönelik olarak pnömatik sistemli 3 katmanlı sabit basınç ve değişken hava sirkülasyonlu ETFE membran hava odacıkları kurgulanmıştır. Güneybatı

cephesinde ise günde ortalama 6 saat güneş ışığına yönelik nitrojen ile doldurulmuş 2 katmanlı ETFE mercek biçimli odacıklar geliştirilmiştir. Bu durumda güneş filtresi oluşturmak için odacıklar içerisindeki parçacıkların yoğunlukları kullanılmaktadır (URL 256). Sonuç olarak Media-TIC yapısının tüm cepheleri güneş ışınlarını çeşitli yollarla filtreleyerek ısı yalıtımı ve ışık kontrolü sağlayan konkav ve konveks üçgen biçimli pnömatik hücrelerden oluşan bir sistemdir. Tüm sistem otomatik sensörler aracılığıyla sabit bir dengede tutulmaktadır.

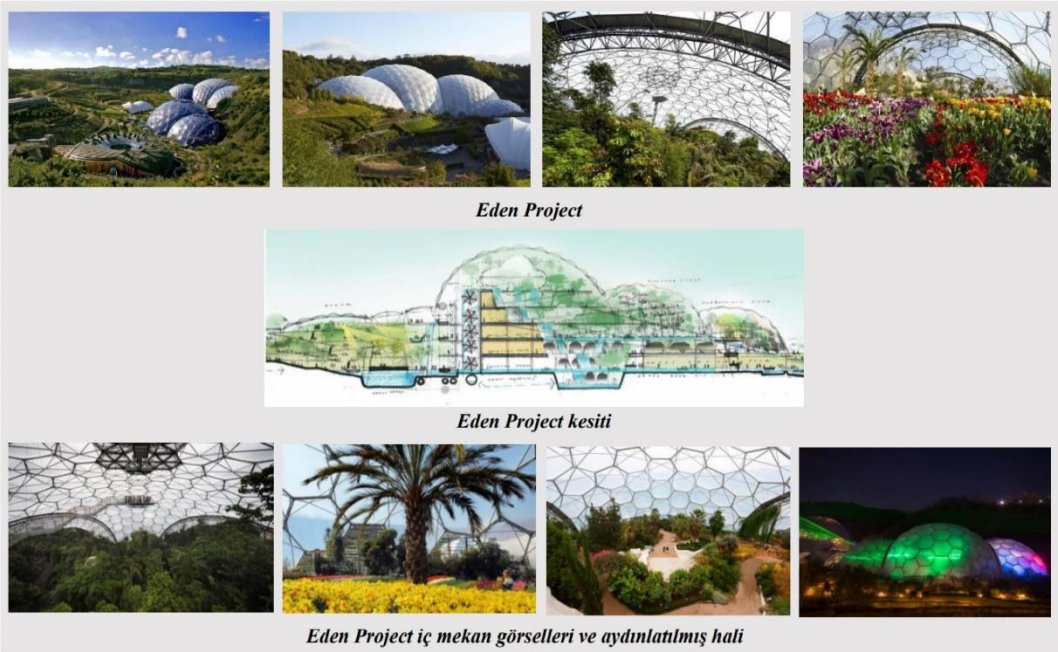
3.2.6. Eden Project

Eden Project cephe kaplaması olarak pnömatik sistemin kullanıldığı kalıcı bir sera yapısıdır. 2001 yılında Nicholas Grimshaw tarafından tasarlanarak İngiltere'de inşa edilmiştir. Genel tanıtım amacı ile Eden Project yapısı hakkındaki bilgiler Çizelge 3.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.7. Eden Project yapısı genel tanıtımı

	EDEN PROJECT
Yapım Yılı	2001
Mimar	Nicholas Grimshaw
Yer	İngiltere (Cornwall)
İşlev	İklimlendirilmiş botanik bahçeleri ve seralar
Kullanım Durumu	Kalıcı Yapı
Tasarım Fikri	Kil çukurunun yeniden kazandırılarak özel bitkilerin yetişebileceği yapay bir sera ortamı yaratmak
Yapı Ölçüleri	56-125-150 metre çapında, 35-55 metre serbest yükseklikte çeşitli ebatlarda kubbelerden oluşmaktadır.
Yapı Alanı	15 Hektar (Açık ve kapalı yapıları kapsayan oturan alan)
Kişi Kapasitesi	Ortalama 6 500 kişi
Pnömatik Yüzey Alanı	39 540 m² pnömatik cephe yüzey alanı
İnşa Süresi	2,5 yılda inşa edilen yapı 17 Mart 2001 yılında halk ziyaretine açılmıştır.

Tim Smit tarafından keşfedilen izole bir kil çukurunun, geri kazandırılmış endüstriyel çorak bir araziden ekolojik proje geliştirilmesi fikri ile Eden Projesi ortaya çıkmıştır. Temel amacı sürdürülebilirlik ve ekonomiklik olan projenin sadece salt bir mimari ile değil projenin hikayesine katkıda bulunan bir mimaride tasarlanması hedeflenmiştir. Bu nedenle küresel geometrilerin verimliliği bağlamında maksimum hacim için minimum yüzey alanı, jeodezik yapısal geometrilerin doğal verimliliği ile birleştirilerek ekonomik strateji olarak belirlenmiştir. (Kirkland, Grimshaw, 2004). St. Austell'de bulunan eğimli arazide eski bir maden ocağı üzerine inşa edilmiştir. Bitki örtüsü barındıran yapı (biyom) olarak tasarlanan Eden Project (Şekil 3.59), yılda ortalama iki milyon ziyaretçi ağırlamaktadır (Le Cuyer, 2008). Projenin barındırdığı işlev açısından mimari özellikleri belirlenerek tasarlanmıştır.



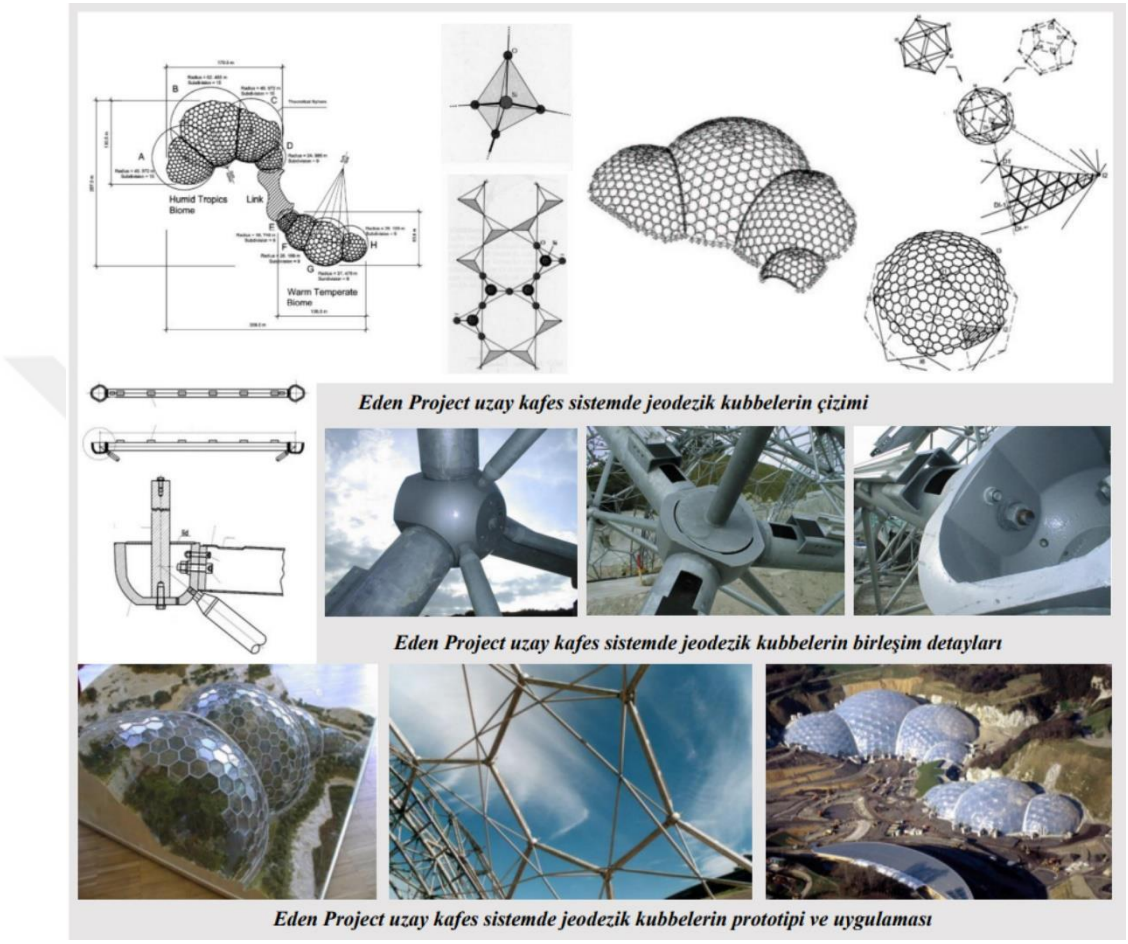
Şekil 3.59. Eden Project yapısı, kesiti, iç mekan görselleri ve aydınlatılmış hali (URL 258, URL 259)

Eden Projesi 2001 yılında Nicholas Grimshaw tarafından İngiltere'nin güneybatısında bulunan Cornwall'da 15 hektarlık açık alanda tasarlanmıştır. İki sera kubbesi olarak tasarlanan yapı modern Garden of Eden tipik bitki örtüsü ile dünyanın farklı iklim bölgelerini bir araya getirmektedir. İnşa edildiği dönemde İngiliz basını tarafından dünyanın sekizinci harikası olarak adlandırılan Eden Projesi, birçok kişi tarafından

ziyaret edilen yapay iklimsel ortamlı sera fonksiyonunda bir yapıdır. Kompleks dış alan, ziyaretçi merkezi, hediyelik eşya dükkanları, restoran ve sergiler gibi çeşitli işlevleri de barındırmaktadır. İklimsel bölgeleri barındıran ana yapı yani kubbeler ise üç bölümden oluşmaktadır. Birincisi Nemli Tropik Biyomlar (HTB); Batı Afrika, Malezya veya Oceanic gibi dünyanın alt bölümünden gelen bitkiler sergilenmektedir. HTB; A, B, C ve D olmak üzere dört kubbeden oluşmaktadır. Bu kubbelerden en büyüğü olan B, 125 metre çapında ve 55 metre serbest yüksekliktedir. Böylece büyük orman ağaçlarının bile büyümesi için yeterli alan sağlamaktadır. Ayrıca bitkilerin büyümesinin doğrudan güneş ışığına bağlı olmasından dolayı mimarlar tarafından en fazla ışık alacak şekilde konumlandırılmıştır. İkincisi Ilık Sıcaklık Biyomunu (WTB); E, F, G ve H olmak üzere dört kubbeden yaklaşık 150 metre iç uzunluğunda, 56 metre genişlikte ve 35 metre yükseklikte tasarlanmıştır. Afrika, Kaliforniya ve Akdeniz Bölgesi gibi sıcak iklimlerin kuru tipik bitkileri sergilenmektedir. HTB tipi biyomlara göre daha az sıcaklık ve nem barındırmaktadır. Bu nedenle yapılar neredeyse dışarıdan görünmeyecek şekilde çim çatı ile kaplanmıştır. Kubbeler birbirlerine ile bağlanmaktadır ve bu bağlantılar aynı zamanda ziyaretçi girişi, restoran gibi alanlarında bulunduğu alandır (Knebel, Sanchez-Alvarez, Zimmermann, 2001).

Geometrik olarak tasarımlardan sonra nihai çelik yapının hesabı üç boyutlu bilgisayar modeli üzerinden hesaplanmıştır. Statik analiz programı sayesinde inşa edilecek olan alandaki ılıman iklim özellikleri, kar-yağmur yükü, sıcaklık, rüzgar kuvvetleri ve yapısal yükleri belirlenmiştir. Böylelikle yapıda oluşabilecek sorunlara yönelik bazı pnömatik yastıklara kablo destekleri eklenmiştir. Sıcaklık artışı her yönde genleşmeye ve yağışların su birikimine neden olmasına rağmen pnömatik yastıkların büyük değişimler göstermemesi sayesinde yapı herhangi bir genleşme derzi olmadan inşa edilmiştir. Eden Projesi'nin kubbe yapıları geçtiği en geniş açıklık 100 metre olan çelik uzay kafes sistemden oluşmaktadır. Geliştirilen uzay kafes sistem; çelik çubuk elemanları, birleşim elemanları, kirişler, düğüm noktaları (MERO) ve destek noktalarından oluşmaktadır. Korozyon koruması için tüm çelik elemanlar sıcak daldırma yöntemi ile galvanize edilmiştir. Kemerler yapı içerisinde diagonal olarak konumlandırılır ve yapı cephesinden estetik görünümü etkilememesi amacıyla görünmemektedir. 858 metre uzunluğundaki 2 metre genişlikte ve 1,5 metre yükseklikteki temele, 187 adet destek noktası elemanı

ankraj cıvataları ile birlikte yapının zemine sabitlenmesi için kullanılmıştır. Yanal yükler için ise kesme blokları yapı temeline eklenmiştir (Knebel, Sanchez-Alvarez, Zimmermann, 2001) (Şekil 3.60).



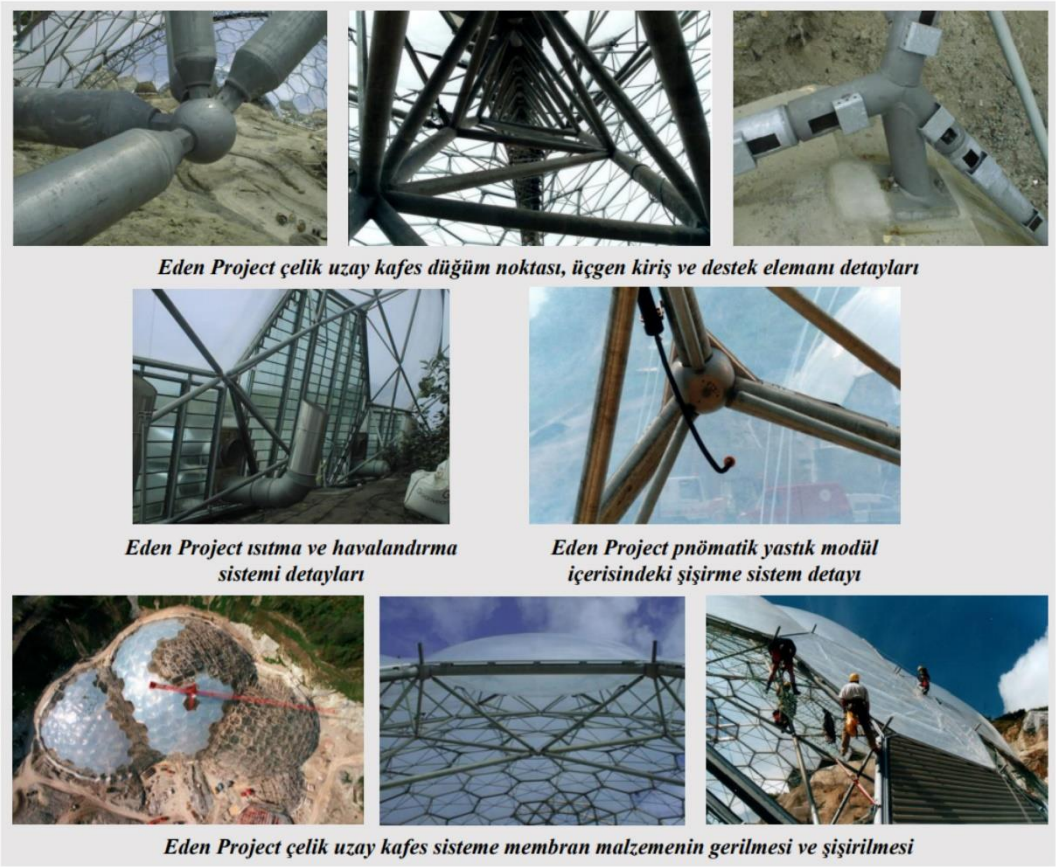
Şekil 3.60. Eden Project uzay kafes taşıyıcıları ve sistem detayları (URL 260; Knebel, Sanchez-Alvarez, Zimmermann, 2001)

Yapı uzay kafes sistemden oluşan çelik yapı ile pnömatik membran sistemin birleşmesinden oluşmaktadır. Hızlı montaj, hafif ve ince en kesitte olan yapı karışık geometrilerde ekonomik olarak üretilebilmektedir. Kubbesel yapılardan oluşan Eden Projesi, formu sayesinde topoğrafyaya kolay uyum sağlayarak zemin yüzeyine yerleştirilebilmektedir. Eden Projesi, Buckminster Fuller tarafından geliştirilmiş olan jeodezik kubbelerin biçim, yapı ve simetri özelliklerine sahiptir. Jeodezik küresel ağlardan oluşan çizgisel çubuk elemanların her yüzeyde iki noktayı en kısa mesafede

kesiştirildiği sayısız birleşimden oluşmaktadır. Dodecahedron, ikosahedron veya polihedron gibi çokyüzlülerin mozaikleşmiş kürenin yüzeyine belirlenen şekilde projelendirme ve haritalama ile bir jeodezik ağ geometrisi kurgulanmaktadır. Eden Projesi'nde kubbelerin ağ yapısı, aralarında belirli bir yarıçap ya da derinlik farkı bulunan iki eş merkezli küresel sistemdir. İç ve dış ağlar, köşegen çizgileri ile birbirine bağlanır ve bu sayede üç boyutlu çift katmanlı taşıyıcı bir sistem haline gelmektedir. Kubbeler "Hex-Net" olarak adlandırılan altıgen dış ağ ve "Tri-Hex-Net" adı verilen üçgen ile altıgenlerden oluşan iç ağdan meydana gelmektedir. Altıgenleri tolere edilebilir fabrikasyon ve kurulum sapmaları içinde olabildiğince düzlem olarak elde etmek için özel bir algoritma geliştirilmiştir. Bu durum bir kenar uzunluğu 5,20 metre kadar olabilen en büyük altıgenin ortalama düzleminden 60 milimetre uzaklıkta olabileceği anlamına gelmektedir. Ortaya çıkan uzay kafes sistem ağ, doğadaki silikat (SiO4) gibi mineral moleküllerini anımsatan kristal oluşuma benzemektedir. Bu sayede en az malzeme tüketimi, ekonomiklik ve enerji verimliliği sağlamaya imkan tanımaktadır (Knebel, Sanchez-Alvarez, Zimmermann, 2001).

Buckminster Fuller'ın çalışmalarından esinlenerek oluşturulan jeodezik kubbe kabuk pnömatik sistemli hava yastıkları ile 5-11 metre çap aralığında değişen altıgen çelik strüktürler ile birleştirilmesi gerekmektedir (Le Cuyer, 2008). Ancak jeodezik kubbelerin altıgenlerden oluşan yüzeyleri tek düzlemde değildir. Seçilen pnömatik sistemli yüzey kaplamasının plansız katlanma ve kırışıklık olamadan kolaylıkla uygulanabilmesi için altıgenlerden oluşan yüzeyin düzlemsel olması gerekmektedir. 39 540 m² yüzey alanına sahip kubbelerin yapı elemanları, küçük cam alanlar yerine güneş enerjisini daha çok iç mekana aktarabilen geniş altıgen şeffaf membran pnömatik sistemden oluşmaktadır. Üç tabakalı ETFE teflon folyo kaplı yastıklar 50-200 µm arası kalınlıkta ve 1,5 m genişliğinde kaplama sistemi olarak uygulanmıştır. Pnömatik kaplama sistemi hafif, şeffaf ve hava dolgulu üç boyutlu folyo minderlerden meydana gelmektedir. Bu sayede camın aksine düşük ağırlıklı, daha fazla gün ışınını geçiren ve ısı yalıtımı sağlamaktadır. Sistemin üç katmanlı olması sayesinde üst ve alt tabaka yastığı oluşturup yükleri taşırken aralarındaki ek bir katman, sıcaklık yalıtımını arttırma ve hava sızıntısı durumunda yastık içi alanı bölme işlevine sahiptir. Yerel rüzgar emişinin yüksek olduğu bölgelerde, minderlerin dış yüzeyi iki kat folyo kullanılarak güçlendirilmiştir. Pnömatik yastıklar

uzay kafes sistemin üst yüzeyinde bulunan kiriş üzerindeki alüminyum çerçeve üzerine takılmaktadır. 800'den fazla altıgen hava yastığı, kesilerek inşa alanına getirilip yerinde kaynaklanarak uygulanmıştır. Şişirme ise her yastık için olması gereken iç basıncı (ortalama 300 Pa) sağlamak için özel olarak geliştirilen hava besleme sistemi sayesinde olmaktadır (Şekil 3.61).



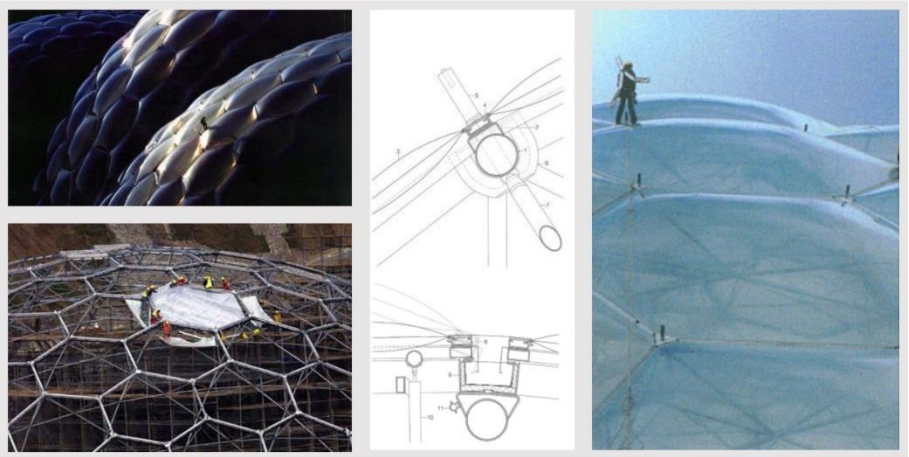
Şekil 3.61. Eden Project uzay kafes taşıyıcıları ile pnömatik sistem detayları (Knebel, Sanchez-Alvarez, Zimmermann, 2001)

Şişirilmiş yastığın maksimum yüksekliği, maksimum açıklığın yaklaşık %10 ila 15'i kadardır. Ayrıca birleşim yeri olan kubbeler arasındaki oluk konstrüksiyonu, izolasyonlu alüminyum parçalardan yapılmıştır ve dıştan folyo ile kaplanmıştır. Bu sayede yağmur suyu depolanarak biyomların içindeki bitkiler için kullanılmaktadır (Knebel, Sanchez-Alvarez, Zimmermann, 2001). Cam kaplama yerine teflon kaplı ETFE membran malzemenin kullanımı sayesinde düşük frekanslı ultraviyole ışığın daha fazla nüfuz

etmesine izin verir, daha iyi termal yalıtım sağlar ve çift camlı cam panellerin %1'inden daha az ağırlığa sahip bir sistem geliştirilmiştir (Kirkland, Grimshaw, 2004).

Pnömatik sistemli yastıklardan oluşan yapının iç mekandaki bitkilerin yetiştirilebilmesi amacıyla belirli ısıl konfor koşullarını ve yalıtımı sağlaması gerekmektedir. Yapılarda ısı iletkenliğinin ölçülebilmesi için hesaplanan U değeri Eden Projesi'nin organik formu nedeniyle karmaşık ve zorlu yollarla belirlenmiştir. Yaklaşık 2,7 W/m^2K olarak belirlenen U değeri, ampirik test (sıcak kutu deneyi) ve teorik analiz (sonlu elemanlar analizi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği) ile kombinasyonlu bir şekilde hesaplanmıştır. Bu sayede yapıda kullanılacak olan malzeme kalınlıkları ve hacimleri ısıl performanslara göre belirlenmiştir (Barnes, Dickson, Happold, 2000).

Kubbelerin içinde tropik iklim koşullarını sağlamak için özel bir havalandırma sistemi geliştirilmiştir. Toplamda 8 adet kubbeden oluşan yapının her birinin üzerinde üst beşgeni çevreleyen 5 adet altıgen modül uzaktan kumanda ile çalıştırılarak açılabilir şekilde tasarlanmıştır. Cam bölmeler ile kaplanan bu altıgen birimler hava girişini düzenlemek amacıyla kubbelerin kenarlarına yerleştirilmiştir. İç mekan ısısının belirli seviyede tutulması için ısıtıcılar gerekli zamanlarda kubbelerin içerisine sıcak hava üflemektedir. Kubbelerdeki havalandırma açıklıklarına ek olarak her kubbenin bakım ve sadece acil çıkışlar için bazı kapıları vardır. Bu kapılar ziyaretçiler için değildir, ziyaretçiler erişim için yalnızca bağlantı yollarını kullanmaktadır (Kirkland, Grimshaw, 2004). Eden Projesi'nin ETFE hava yastıklarının iç mekan ile etkileşimine ek olarak çevresel yükler karşısında da dayanıklı olması gerekmektedir. Bu yastıklar yüksek seviyedeki rüzgarlara karşı en dış katmandaki folyo kaplamanın kalınlaştırılması ve şişirilerek basıncın arttırılması ya da kar yüküne karşı en iç katmandaki membranın bombe oranının %15 arttırılması ile dayanımlı hale getirilmektedir. Yastıkların şişirilerek dayanım kazandırılması durumunda artan kalınlığa yönelik dış membran tabakasının arası vakumlu iki folyo ile kaplanması ile sağlanmaktadır (Sırkıntı, 2012). Böylelikle yastıkların kalınlığı, şekli, folyo sayısı, katman sayısı, şişkinliği, basıncı ve konumu her birimin taşıması gereken yük oranına göre ayarlanmaktadır (Şekil 3.62).



Şekil 3.62. Eden Project pnömatik sistem detayları ve uygulaması (URL 261; Kırkland, Grimshaw, 2004)

Eden Projesi'nin çelik konstrüksiyonu kemerler ve destek noktaları hariç, Almanya'da Wuerzburg'a yakın MERO atölyesinde üretilmiştir. MERO kirişlerinin ve düğümlerinin üretimi, bilgisayar destekli bir makine kullanılarak yapılmıştır. Üretilen her yapı elemanı düğüm, tasarım, üretim ve montaj aşamasında da aynı kalan bir numaraya sahiptir. Böylelikle yerinde kaynak ile yapının inşasında kolaylık sağlamaktadır. Yapının montaj aşamasında kurulan iskele ile yerde birleştirilen altıgen birimler kule vinçler ile kaldırılarak yerine monte edilmektedir. Çelik yapının montajı yapıldıktan sonra iskele kaldırılarak ETFE yastıkların montajı ve biyom içerisindeki zemin çalışmaları eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Her iki yılda bir genel kontrol ile çelik yapı 30 yıl bakım gerektirmeyecek şekilde tasarlanmıştır (Kirkland, Grimshaw, 2004).

Sonuç olarak Eden Projesi doğal bitki faunaları ile insanlar arasında ilişki kuran bir yapı kompleksidir. En az malzeme ile en verimli şekilde tasarlanma hedefleri ile ortaya çıkan yapı formu ve malzemeleri hafiflik, nakliye ve montaj kolaylığı, inşa sürecinde daha az araç ve ekipmanın kullanımı ve dolayısıyla enerji verimliliği ile düşük karbon ayak izi olmasını sağlamıştır. Uzay kafes sistem ve pnömatik sistemin bir arada kullanımı mimarinin sadece bir yapı olmasından öte yalıtım, şeffaflık, form, estetik gibi tüm alanlarda mantık ve fikir olarak da birleşimini sağlamıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde seçilen pnömatik Ark Nova, Ontario Pavilion, Münich Allianz Arena, Beijing Water Cube, Media-TIC ve Eden Project yapı örnekleri belirlenen kullanım alanı (işlevsel açıdan), taşıyıcı sistem, plastik-polimer esaslı membran malzeme, şişme süresi, sürekliliği ve maddesi ile yapıya özel yerinde geliştirilen sistemler inceleme ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. İncelenen örnekler ve yapılan araştırmalar bağlamında pnömatik yapıların mimaride kullanımları sonucu sağladıkları avantajlı ve dezavantajlı yönler ortaya konulmuştur.

4.1. Seçilen Pnömatik (Şişme) Sistemli Yapı Örneklerinin Pnömatik (Şişme) Taşıyıcı Sistemleri İnceleme Ölçütleri Açısından Değerlendirilmesi

a) Kullanım Alanı (İşlev) Açısından Seçilen Örnek Yapıları Değerlendirme: Günümüzde pnömatik sistemler mimaride taşıyıcı ve yardımcı yapı elemanı olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Pnömatik strüktürlerin yapısal özellikleri sayesinde gezici, geçici veya kalıcı yapılarda birçok işlevlerde uygulanabilir olmalarını sağlamaktadır. Kullanım alanı yani yapının işlevi açısından seçilen örnekler üzerinden değerlendirilir ise Ark Nova yapısı pnömatik sistemde inşa edilmesi sayesinde hafif, tekrar kullanılabilen, küçük hacimlerde kolay taşınabilen ve hızlı inşa edilebilen bir yapıdır. Bu nitelikleri sayesinde geçici ve aynı zamanda gezici konser salonu olarak kullanılabilmektedir. Pnömatik strüktür açısından benzer yapısal özelliklere sahip olan Ontario Pavilion yapısı da geçici eğlence ve etkinlik merkezi olarak uygulanabilmektedir. Pnömatik sistemlerin taşıyıcı olarak kullanımına ek olarak cephe kaplama elemanı olarak kullanım durumu ise yine hafiflik, kolay uygulama ve taşınma özelliklerini sunmaktadır. Cephe kaplaması olarak uygulanan pnömatik strüktürler birçok işlevdeki yapı yüzeyinde kullanılabilmektedir. Münich Allianz Arena örneğinde stadyum, Beijing Water Cube yapı örneğinde su sporları merkezi, Media-TIC yapısında ofis ve kültürel merkez, Eden Project örneğinde ise biyomların üzerini örten cephe elemanı olarak uygulanan çeşitli formlarda pnömatik sistemli hücreler uygulanmıştır. Pnömatik sistemlerin cephede kullanıldığı durumlarda taşıyıcı başka bir strüktürün kullanılması gerekmektedir. Böylelikle pnömatik sistemler mimaride hem yapısal hem de işlevsel açıdan birçok farklı kullanım alanına sahip olduğu söylenebilmektedir.

b) Taşıyıcı Sistem Açısından Seçilen Örnek Yapıları Değerlendirme: Pnömatik sistemler bir yapının tamamen ana taşıyıcı sistemi veya yapı elemanlarından birisinde kullanılabilen çok yönlü strüktürlerdir. Bu nedenle seçilen yapı örneklerini belirlenen taşıyıcı sistem parametresi bağlamında değerlendirmek gerekir ise Ark Nova ve Ontario Pavilion yapıları tamamen pnömatik taşıyıcı sistem; Münich Allianz Arena, Beijing Water Cube, Media-TIC ve Eden Project yapılarında pnömatik sistemli cephe kaplama elemanı yani yardımcı strüktür olarak uygulanmıştır. Ark Nova örneğinde taşıyıcı pnömatik sistem tek cidarlı ve alçak basınçlıdır. Ontario Pavilion yapısında ise çift cidarlı ve yüksek basınçlı iskelet tüplü pnömatik sistem kullanılmıştır. Bu nedenle iki örnek yapısal açıdan tamamen pnömatik taşıyıcılı olmalarına rağmen bazı özellikleri açısından farklılaşmaktadır. Bunlar; kapı ve açıklıklarda özel detaylandırmalar, hava desteğinin sürekliliği, membran katman sayısı ve zemin ankraj sistemleridir. Münich Allianz Arena örneğinde ise betonarme taşıyıcı üzerine giydirme çelik kafes sistem inşa edilmiştir. Çelik kafes sistemin eşkenar dörtgen formunu alan iki katmanlı membran yüzeyleri cephe kaplaması olarak sabitlenmiştir ve şişirilerek pnömatik hale getirilmiştir. Beijing Water Cube yapısında ise çelik kafes sistem üzerine yapı yüzeyinde uygulanmış üç katmanlı pnömatik cephe kaplaması kullanılmıştır. Media-TIC yapı örneğinde çelik kafes sistem üzerine inşa edilen pnömatik kaplama; cephenin güneş alma süresi ve durumuna göre iki veya üç katmanlı olarak tasarlanmıştır. Eden Project örneğinde ise çelik uzay kefes sistem üzerine altıgen formlu pnömatik yastık birimler kullanılarak kaplanmıştır. İki katmanlı olarak uygulanan membran malzeme yüzeylerinin sera etkisi yaratması beklenerek tasarlanmıştır. Bu sayede pnömatik sistemlerin cephe kaplama elemanı olarak kullanımında uygulanan ana taşıyıcı strüktürün şeklini alması, iç mekandaki fonksiyona göre farklı katmanlarda kullanılması ve böylelikle iç mekan konfor koşullarını doğrudan etkilediği söylenebilmektedir.

c) Membran Malzeme Açısından Seçilen Örnek Yapıları Değerlendirme: Pnömatik sistemlerin taşıyıcı veya yardımcı yapı elemanı olarak kullanılması durumlarında her daim ana malzeme mebranlardır. Membran malzemeler ısıl geçirgenlik, renk, kuvvetlere dayanım, yırtılmaya karşı direnç, yoğunluk, kalınlık, ışık geçirgenliği, yansıtıcılık, yük dağıtımı, nem iletimi, basınç dayanımı gibi yapısal ve estetik nitelikler açısından çok çeşitlidir. Bu nedenle pnömatik bir sistemin temel malzemesi olan membran yapı

fonksiyonu ve yapıda kullanım yeri unsurlarına göre tasarım aşamasında belirlenmelidir. Mimaride birçok plastik-polimer esaslı membran kumaş olmasına rağmen pnömatik sistemlerde en yaygın olarak uygulanan PVC ve ETFE'dir. PVC membran türü Ark Nova ve Ontario Pavilion örneklerinde görüldüğü üzere genellikle tamamen taşıyıcı pnömatik sistemlerde kullanılmaktadır. Ark Nova yapısında dışardan opak mor ve iç mekandan yarı saydam pembe-kırmızı renkleri verilebilir iken Ontario Pavilion beyaz renkte üretilen membrandan inşa edilmiştir. ETFE membran türü ise Münich Allianz Arena, Beijing Water Cube, Media-TIC ve Eden Project örneklerinde görüldüğü üzere çeşitli renk, doku ve geçirgenlikte genellikle cephe kaplama sistemlerinde uygulanmaktadır. Münich Allianz Arena'da beyaz ve yarı geçirgen, Beijing Water Cube yapısında açık mavi ve yarı geçirgen, Eden Project örneğinde ise şeffaf membran malzeme seçilmiştir. Ayrıca membran yüzeylere çeşitli maddeler ile kaplamalar yapılarak belirli açılardan daha gelişmiş özellikler de kazandırılabilmektedir. Örneğin Beijing Water Cube yapısında uygulana teflon kaplama cephe yüzeyinin kir tutmasını engellemektedir. Böylelikle kullanılan membran malzeme hem estetik hem de yapısal özellikler açısından yapıyı doğrudan etkilemektedir.

d) Şişirme Süresi, Sürekliliği ve Maddesi Açısından Seçilen Örnek Yapıları Değerlendirme: Pnömatik sistemler membran yüzeylerin herhangi bir katı, sıvı veya gaz madde ile basınçlandırılması sonucunda taşıyıcı hale gelmesinden oluşmaktadır. Bu nedenle şişirme maddesi yapının taşıyıcılığını, ısı ve ışık geçirgenliğini etkilemektedir. Pnömatik yapılarda genellikle en kolay ulaşılabilir gaz madde olan hava kullanılmaktadır. Hava maddesi fanlar ve pompalar aracılığıyla yapıdaki basınçlandırılacak alana ulaştırılmaktadır. Ark Nova ve Ontario Pavilion yapıları hava ile basınçlandırılmış pnömatik strüktür örnekleridir. Ancak hava ile basınçlandırılan bu yapıların pnömatik strüktür açısından farklılaşmaları hava destek sisteminin sürekli veya sürekli olamaması durumunu belirlemektedir. Tek cidarlı olan Ark Nova yapısı sürekli hava desteğine ihtiyaç duyuyor iken Ontario Pavilion ilk şişirmeden sonra sürekli hava desteğine ihtiyaç duymamaktadır. Hava ile şişirilen pnömatik strüktürler sadece tamamen taşıyıcı pnömatik sistemlerde değil Münich Allianz Arena, Beijing Water Cube ve Eden Project örneklerinde görüldüğü üzere cephe kaplama elemanlarında da kullanılabilmektedir. Cephe kaplaması olarak uygulanan pnömatik sistemlerin basınçlandırma maddesi

havadan başka gazlar da olabilmektedir. Seçilen gaz nitrojen madde Media-TIC örneğinde görüldüğü üzere iç mekana girecek olan ışık miktarını, ısı geçirgenliğini, gölge miktarını ve ısıl yalıtımı belirleyerek optimum konfor koşullarını sağlamaktadır. Pnömatik sistemlerin cephe kaplaması olarak kullanıldığı durumlarda genellikle iki veya üç katmanlı olmaları sebebiyle sürekli basınç maddesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Sadece iklimsel özelliklerin (sıcaklık, güneş radyasyonu, rüzgar, yağış) değişmesi veya membran yüzeylerde bir açıklık oluşması (delinme, yırtılma, aşınma) sonucu sönme durumlarında basınç maddesi desteği sağlanmaktadır. Ayrıca pnömatik sistemlerin cephe kaplaması olarak kullanıldığı durumlarda her pnömatik modül için ayrı bir basınç maddesi destek sistemi, fanları, pompaları ve basınç durumunu ölçecek sensör sistemleri geliştirilmektedir. Böylelikle tüm yapı yüzeyi belirli bir basınç düzeyinde tutulabilmektedir. Pnömatik sistemlerin şişirilme süreleri tamamen taşıyıcı oldukları durumda yapı inşa süresini belirlemektedir. Genellikle tasarım aşamasında belirlenen membran yüzey fabrikalarda üretilerek kesilmiş parçalar halinde inşaat alanına getirilmektedir. Yerinde dikiş, ısıl birleşim veya mekanik sistemler ile birleştirilen membran malzemenin şişirilmesi sonucunda inşa süresi tamamlanmaktadır. Ark Nova ve Ontario Pavilion yapı örnekleri tamamen pnömatik taşıyıcılı olmaları nedeniyle birkaç gün süren şişirme işlemi sonucunda kullanıma hazır hale gelmektedir. Münich Allianz Arena, Beijing Water Cube, Media-TIC ve Eden Project yapı örneklerinde ise cephede kullanılan pnömatik sistemler diğer taşıyıcı yapıya uygulanma ve şişirilme işlemi sonucunda oluşturulmaktadır. Böylelikle pnömatik sistemlerin membran yüzeylerin üretilmesi, birleştirilmesi veya yapı yüzeyine uygulanması ve son olarak şişirilmesi sonucunda inşa sürecinin tamamlandığı söylenebilmektedir.

e) Yapıya Özel Yerinde Geliştirlen Sistemler Açısından Seçilen Örnek Yapıları Değerlendirme: Her pnömatik yapı kendine ait yapısal özelliklere sahiptir. Bu nedenle her yapı için özel sistemler ve çözümler tasarlanmalıdır. Bu bağlamda belirlenen inceleme ölçütlerinden yapıya özel yerinde geliştirilen sistemler parametresi değerlendirilecektir. Tamamen pnömatik taşıyıcılı olan Ark Nova yapısı bir taşıyıcı araç yardımıyla söndürülerek bir yerden başka yere kolaylıkla taşınabilmektedir. Tek cidarlı olması nedeniyle giriş ve çıkışlar hava kontrolü sağlamak amacıyla özel olarak detaylandırılmıştır. Yapının merkezde zemine bağlanmasını sağlayan tüp sayesinde iç

mekan akustiği ayarlanmıştır. Taşıyıcı araç içerisinde hava fan destek ünitesi ile yapıya sürekli hava desteği sağlanabilmektedir. Tüm bu unsurların sağlanabilmesi için yapıya özel sistemler geliştirilmiştir. Yine tamamen pnömatik taşıyıcılı olan Ontario Pavilion örneğinde membran yüzeylerin kesme ve birleştirme planları, zemine ankraj noktalarında özel geliştirilmiş beton eleman ve vidalar, yapının hasar alma durumunda tamamen sönmemesi için membran malzemenin hücrelerden oluşması, yapının güneş veya sıcaklık gibi etkenler ile aşırı şişmesi durumundan elektrikli tahliye vanaları tasarım aşamasında belirlenen yapıya özel detaylardır. Yapıda kullanılan orta düzeyde geçirgen membran malzeme sayesinde ışık ve çeşitli renkteki aydınlatmaları uygulanabilmektedir. Böylelikle yapının tasarım sürecinden, inşasına ve hatta kullanım aşaması boyunca her detayı planlanmıştır. Pnömatik sistemin cephe kaplaması olarak kullanıldığı Münich Allianz Arena örneğinde cephede kullanılan pnömatik yastık hücrelerin basıncının sabit tutulması için her modüle ayrı olarak ulaşabilen ve kontrol edebilen hava destek sistemi, fanlar ve pompalar geliştirilmiştir. Her bir pnömatik birim içerisinde ayrı ayrı aydınlatmanın kontrolünü sağlayan sistem sayesinde yapı cephesi istenilen renkte aydınlatılabilmektedir. Aydınlatmada kullanılan LED lambalar sayesinde %60 enerji ve 362 ton CO2 tasarrufu sağlanmaktadır. Böylelikle yapı enerji verimliliğine yönelik çözümler içermektedir. Pnömatik birimleri kaplayan ETFE alev yürütmez niteliktedir ve yangın durumuna karşı duman tahliyesi ile havalandırma için açılabilir yastık elemanlar tasarlanmıştır. ETFE pnömatik birimler aracılığıyla yağış durumunda kar veya yağmur suyunun kanallar ile toplanmasını, depolanması ve kullanılmasını sağlamaktadır. Çevresel ve iklimsel faktörlere göre cephede genleşme derzleri ile pnömatik birimler birleştirilmiştir. Bu sayede genleşme veya büzülme durumlarında esneyebilmektedir. Pnömatik sistemin cephe kaplaması olarak kullanıldığı Beijing Water Cube örneğinde yapı cephesinde kullanılan pnömatik sistem sayesinde ısı yalıtımı sağlanmaktadır. Bir sera gibi tasarlanan yapı içerisinde bulunan havuzların ve iç mekanın ısıl derecesi belirli seviyede ek bir enerji kaynağı kullanmadan tutulabilmektedir. Yapı gerekli durumlarda bölgesel olarak iklimlendirilmektedir ve kendi cephesini temizleyebilmektedir. Her yastık birimi içerisindeki basınç özel fan ve pompalardan oluşan bir sistem ile sabit tutulmaktadır. Böylelikle membran malzemede aşınma, yırtılma, delinme gibi olayların gerçekleştiği zaman yerinde onarım yapılabilmektedir. Cephede membran malzeme kullanılması sayesinde %30 enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Erişim kartı ve elektronik

biletler ile giriş-çıkışların sınırlandıran ve bazı bölgelere girişlerin engelleyici sistemler, yangın dayanımı için kullanılan sistemler, kendi kendine yeterli su sistemi, güvenlik sistemi, iletişim sistemi ve aydınlatma sistemi yapıya özel olarak geliştirilmiştir. İç mekan havalandırması cephedeki kapaklar sayesinde manuel olarak sağlanmaktadır. ETFE yastıkların yılda 10 000 ton yağmur suyunu toplanmaktadır ve toplanan suyun %80'i geri dönüştürülerek yeniden kullanılmaktadır. Pnömatik sistemin cephe kaplaması olarak kullanıldığı Media-TIC örneğinde yapıda kullanılan malzemeler ve cephe sistemi sayesinde %20 enerji tasarrufu gerçekleştirerek ekolojik verimlilik sağlamaktadır. Seçilen membran malzeme sayesinde güneş ışınlarını filtreleme (%85) , az malzeme kullanımı, yoğunluk (350 g/m²), hafiflik, şeffaflık-renk, kir tutmayan yüzey, kolay temizlik, elastisite ve form açısından çeşitlilik sağlamaktadır. Pnömatik cephe elemanlarındaki şişirme durumunun kontrolü ile ısı yalıtımı, gölgeleme ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Çeşitli cephelerde kullanılan iki veya üç katmanlı pnömatik yapı güneş filtresi ve ısı kontrolü sağlamaktadır. Buna ek olarak tüm sistem sıcaklık, basınç ve nem oranı gibi faktörleri ölçen ve sabit tutan sensörler ile dengelenmektedir. Pnömatik sistemin cephe kaplaması olarak kullanıldığı Eden Project örneğinde ise yastıklardan oluşan yapının iç mekandaki bitkilerin yetiştirilebilmesi amacıyla belirli ısıl konfor koşullarını ve ısı yalıtımını sağlamaktadır. Jeodezik kubbelerin içerisinde belirli iklim koşullarının sağlanması için açılabilir havalandırma modülleri eklenmiştir. Pnömatik birimler şişirildiğinde dayanım kazanması amacıyla iki membran tabaka arası vakumlu iki adet folyo ile kaplanmıştır. Pnömatik sistemlerin tamamen taşıyıcı olarak kullanıldığı Ark Nova ve Ontario Pavilion yapı örneklerinde görüldüğü üzere enerji verimliliğine yönelik önlemler yok denecek kadar azdır. Ancak pnömatik sistemlerin cephe kaplaması olarak kullanıldığı Münich Allianz Arena, Beijing Water Cube, Media-TIC ve Eden Project yapı örneklerinde görüldüğü üzere ısı yalıtımı ve enerji verimliliğine yönelik alınmış önlemler mevcuttur. Sonuç olarak pnömatik sistemin kullanıldığı her yapıda kendisine özel olarak geliştirilen sistemler, birleşim detayları, enerji verimliliği unsurlarını veya konfor koşullarını kapsamaktadır.

Seçilen Ark Nova, Ontario Pavilion, Münich Allianz Arena, Beijing Water Cube, Media-TIC ve Eden Project yapı örneklerinin; belirlenen kullanım alanı (işlevsel açıdan), taşıyıcı sistem, plastik-polimer esaslı membran malzeme, şişme süresi, sürekliliği ve maddesi ile

yapıya özel yerinde geliştirilen sistemler ölçütleri açısından incelemeleri ve değerlendirilmeleri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Seçilen yapı örneklerinin pnömatik taşıyıcı sistemleri inceleme ölçütleri açısından değerlendirilmesi

ARK NOVA	**Kullanım Alanı**	Geçici konser salonu
	Taşıyıcı Sistem	Tamamen pnömatik taşıyıcı sistemli olan yapı tek cidarlı, alçak basınçlı pnömatik sistemler grubundadır.
	Malzeme	PVC kaplı polyester membran, dış mekanda opak mor iç mekanda ise yarı saydam pembe-kırmızı renktedir.
	Şişme Süresi, Sürekliliği Maddesi	Hava destekli yapı birkaç gün içerisinde kullanıma hazır hale gelebilmektedir. Sürekli veya aralıklarla kontrollü olarak hava desteğine ihtiyaç duymaktadır.
	Yapıya Özel Yerinde Geliştirilen Sistemler	• Yapı bir taşıyıcı araç yardımıyla söndürülerek bir yerden başka yere kolaylıkla taşınabilmektedir. • Giriş ve çıkışlar hava kontrolü sağlamak amacıyla özel olarak detaylandırılmıştır. • Yapının merkezde zemine bağlanmasını sağlayan tüp sayesinde iç mekan akustiği ayarlanmıştır. • Taşıyıcı araç içerisinde hava fan destek ünitesi ile yapıya sürekli hava desteği sağlanabilmektedir.
ONTARIO PAVILION	**Kullanım Alanı**	Geçici eğlence ve etkinlik merkezi
	Taşıyıcı Sistem	Tamamen pnömatik taşıyıcı sistemli olan yapı çift cidarlı, iskelet tüplü yüksek basınçlı pnömatik sistemler grubundadır.
	Malzeme	PVC membran yapı genelinde beyaz renkte uygulanmıştır.
	Şişme Süresi, Sürekliliği Maddesi	Hava destekli yapı 36 saat içerisinde kullanıma hazır hale gelebilmektedir. Sürekli hava desteğine ihtiyaç duymamaktadır.
	Yapıya Özel Yerinde Geliştirilen Sistemler	• Membran yastık iskelet tüpleri dijital programlar ile hesaplanarak uygulanmıştır. CAD yüzeyleri ile membran kesme ve birleştirme planları hazırlanmıştır. • Zemine ankraj noktalarında özel geliştirilmiş beton eleman ve vidalar kullanılmıştır. • Membran malzemenin hücrelerden oluşması sayesinde hasar alması durumunda tüm yapı sönmeyecek şekilde tasarlanmıştır. • Yapının güneş veya sıcaklık gibi etkenler ile aşırı şişmesi durumundan elektrikli tahliye vanaları kullanılmıştır. • Yapıda kullanılan orta düzeyde geçirgen membran malzeme sayesinde ışık ve çeşitli renkteki aydınlatmaları uygulanabilmektedir.
MUNICH ALLIANZ ARENA	**Kullanım Alanı**	Stadyum
	Taşıyıcı Sistem	Betonarme taşıyıcı üzerine giydirme çelik kafes sisteme cephe kaplaması olarak iki katmanlı uygulanan pnömatik sistem
	Malzeme	ETFE membran yüzeylerden oluşan pnömatik cephe kaplaması normalde beyaz olan yarı ışık geçirgen bir yapıdadır.
	Şişme Süresi, Sürekliliği Maddesi	Cephede kullanılan modüller hava ile şişirilmektedir. Otomatik sensörler aracılığıyla hava desteği veya eksiltilmesi yapılan sistem belirli bir basınçta tutulmaktadır. Sürekli hava desteği gerektirmemektedir.
	Yapıya Özel Yerinde Geliştirilen Sistemler	• Cephede kullanılan pnömatik yastık hücrelerin basıncının sabit tutulması için her modüle ayrı olarak ulaşabilen ve kontrol edebilen hava destek sistemi, fanlar ve pompalar geliştirilmiştir. • Her bir pnömatik birim içerisinde ayrı ayrı aydınlatmanın kontrolünü sağlayan sistem geliştirilmiştir. Bu sayede yapı cephesi istenilen renkte aydınlatılabilmektedir. • Aydınlatmada kullanılan LED lambalar sayesinde %60 enerji ve 362 ton CO_2 tasarrufu sağlanmaktadır. Böylelikle enerji verimliliğine yönelik çözümler içermektedir. • Her bir pnömatik birimi kaplayan ETFE alev yürütmez niteliktedir ve yangın durumuna karşı duman tahliyesi ile havalandırma için açılabilir yastık elemanlar tasarlanmıştır. • ETFE pnömatik birimler aracılığıyla yağış durumunda kar veya yağmur suyunun kanallar ile toplanmasını, depolanması ve kullanılmasını sağlamaktadır. • Çevresel ve iklimsel faktörlere göre cephede genleşme derzleri ile pnömatik birimler birleştirilmiştir. Bu sayede genleşme veya büzülme durumlarında esneyebilmektedir.

Çizelge 4.1. Seçilen yapı örneklerinin pnömatik taşıyıcı sistemleri inceleme ölçütleri açısından değerlendirilmesi (devam)

BEIJING WATER CUBE	**Kullanım Alanı**	Yüzme ve su sporları için spor kompleksi
	Taşıyıcı Sistem	Çelik kafes sistem üzerine uygulanmış cephe kaplaması olarak üç katmanlı pnömatik taşıyıcı sistem
	Malzeme	Teflon kaplamalı açık mavi ve yarı geçirgen ETFE membran malzemeden oluşmaktadır.
	Şişme Süresi, Sürekliliği Maddesi	Cephede kullanılan modüller hava ile şişirilmektedir. Otomatik sensörler aracılığıyla hava desteği veya eksiltilmesi yapılan sistem belirli bir basınçta tutulmaktadır. Sürekli hava desteği gerektirmemektedir.
	Yapıya Özel Yerinde Geliştirilen Sistemler	• Yapı cephesinde kullanılan pnömatik sistem sayesinde ısı yalıtımı sağlanmaktadır. Bir sera gibi tasarlanan yapı içerisinde bulunan havuzların ve iç mekanın ısıl derecesi belirli seviyede ek bir enerji kaynağı kullanmadan tutulabilmektedir. Yapı gerekli durumlarda bölgesel olarak iklimlendirilmektedir. • CAD modelleri aracılığıyla yapısal analiz yapılarak çelik çerçeve ve pnömatik yastık sistemleri tasarlanmıştır. • Yapı kendi cephesini temizleyebilmektedir. • Her yastık birimi içerisindeki basınç özel fan ve pompalardan oluşan bir sistem ile sabit tutulmaktadır. • Membran malzemede aşınma, yırtılma, delinme gibi olayların gerçekleştiği zaman yerinde onarım yapılabilmektedir. • Cephede membran malzeme kullanılması sayesinde %30 enerji tasarrufu sağlanmaktadır. • Erişim kartı ve elektronik biletler ile giriş-çıkışların sınırlandıran ve bazı bölgelere girişlerin engelleyici sistemler, yangın dayanımı için kullanılan sistemler, kendi kendine yeterli su sistemi, güvenlik sistemi, iletişim sistemi ve aydınlatma sistemini içermektedir. • Cephedeki kapaklar sayesinde havalandırma sağlanmaktadır. • ETFE yastıkların yılda 10 000 ton yağmur suyunu toplanmaktadır ve toplanan suyun %80'i geri dönüştürülerek yeniden kullanılmaktadır.
MEDIA-TIC	**Kullanım Alanı**	Ofis ve sergi birimlerinden oluşan iletişim ve buluşma merkezi
	Taşıyıcı Sistem	Çelik kafes sistem üzerine uygulanmış cephe kaplaması olarak cephe yönelimine göre iki ve üç katmanlı pnömatik taşıyıcı sistem
	Malzeme	ETFE membran
	Şişme Süresi, Sürekliliği Maddesi	Sürekli olarak şişirme gerektirmeyen yapı nitrojen ile doldurulmuş cephelerden oluşmaktadır.
	Yapıya Özel Yerinde Geliştirilen Sistemler	• Yapıda kullanılan malzemeler ve cephe sistemi sayesinde %20 enerji tasarrufu gerçekleştirerek ekolojik verimlilik sağlamaktadır. • Güneş ışınlarını filtreleme (%85) , az malzeme kullanımı, yoğunluk (350 g/m²), hafiflik, şeffaflık-renk, kir tutmayan yüzey, kolay temizlik, elastisite ve form açısından çeşitlilik sağlamaktadır. • Pnömatik cephe elemanlarındaki şişirme durumunun kontrolü ile ısı yalıtımı, gölgeleme ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. • Çeşitli cephelerde kullanılan iki veya üç katmanlı pnömatik yapı güneş filtresi ve ısı kontrolü sağlamaktadır. • Tüm sistem sıcaklık, basınç ve nem oranı gibi faktörleri ölçen ve sabit tutan sensörler ile dengelenmektedir.
EDEN PROJECT	**Kullanım Alanı**	Ziyaretçi kabul eden ve bitki örtüsü barındıran bir yapı (biyom)
	Taşıyıcı Sistem	Çelik uzay kafes sistem üzerine uygulanmış cephe kaplaması olarak iki katmanlı pnömatik taşıyıcı sistem
	Malzeme	ETFE membran yüzeylerden oluşan pnömatik cephe kaplaması şeffaf bir yapıdadır.
	Şişme Süresi, Sürekliliği Maddesi	Cephede kullanılan modüller hava ile şişirilmektedir. Otomatik sensörler aracılığıyla hava desteği veya eksiltilmesi yapılan sistem belirli bir basınçta tutulmaktadır. Sürekli hava desteği gerektirmemektedir.
	Yapıya Özel Yerinde Geliştirilen Sistemler	• Pnömatik sistemli yastıklardan oluşan yapının iç mekandaki bitkilerin yetiştirilebilmesi amacıyla belirli ısıl konfor koşullarını ve ısı yalıtımını sağlamaktadır. • Jeodezik kubbelerin içerisinde belirli iklim koşullarının sağlanması için açılabilir modüller eklenmiştir. • Pnömatik birimler şişirildiğinde dayanım kazanması amacıyla iki membran tabaka arası vakumlu iki adet folyo ile kaplanmıştır.

Seçilen yapı örneklerinin belirlenen ölçütler ışığında değerlendirilmesi ile pnömatik sistemin uygulanacağı bir yapının kullanım alanı yani fonksiyonu; taşıyıcı sistem kurgusu (tamamen pnömatik taşıyıcı veya başka taşıyıcı sistem üzerine uygulanmış yardımcı yapı elemanı); seçilen membran malzemesi ile teknik açıdan nitelikleri; pnömatik sistemin şişme süresi, sürekliliği ve maddesi; yapıya özel yerinde geliştirilen sistemler; iç mekan konfor koşulları (ısıl, görsel, akustik) ve yapının enerji verimliliği birbiri ile doğrudan ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu ilişkisel düzen pnömatik sistemli bir yapının tasarım aşamasından uygulanması ve kullanımına kadar planlanmaktadır.

4.2. Pnömatik (Şişme) Taşıyıcı Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları

Pnömatik sistemlerin mimaride taşıyıcı veya yardımcı yapı elemanı olarak kullanılması hem sistemin kendi özellikleri hem de kullanıcı ve uygulama boyutunda bazı olumlu ve olumsuz yönleri barındırmaktadır. Bu bağlamda pnömatik taşıyıcı sistemlerin niteliklerine bağlı olarak sağladığı avantajlar ve ortaya çıkan dezavantajlar çalışmanın bu bölümünde açıklanmıştır.

a) Pnömatik (Şişme) Taşıyıcı Sistemlerin Avantajları: Mimaride pnömatik sistemlerin kullanımı sonucunda sağladığı olası avantajlı yönler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

• Pnömatik sistemler mimaride taşıyıcı yapı, yardımcı yapı elemanı veya kalıp elemanı olarak kullanılabilmektedir.
• Pnömatik şişme strüktürler esnek form ve çeşitli hacimlerde uygulanabilmesinden dolayı yaygın kullanım alanına sahiptir. Pnömatik strüktürler acil durum barınakları, uzay yapıları, geçici yapılar, köprü, taşıyıcı yapı elemanları, sergi salonları, müze, yüksek kaplı yapılarda cephe elemanları, stadyum, spor salonları, kinetik cephe elemanları, konut, konser salonu, tarihi yapılara ek, kalıp elemanı gibi birçok işlevlerde kullanılabilmektedir.
• Isı ve ışık geçirgenliği, yansıtıcılık, şeffaflık, renk, esnek form ve konfor koşulları açısından membran malzemenin özellikleri yapıya kazandırılarak pnömatik sistemlerde kullanılabilmektedir.

• Membran malzemesinin basınçlandırılması ile elde edilen pnömatik strüktürler; ana malzeme olan membran sayesinde istenilen formda, ışık geçirgenliğinde ve renkte sınırsız sayıda varyasyonda üretilebilmektedir. Bu sayede estetik açıdan da sanatsal öğelerinin ağır bastığı mimari yapılar da ortaya konabilmektedir.

• Pnömatik sistemler farklı coğrafyalarda iklim koşullarına yönelik olarak yerel özelliklere göre uygun hesaplamalar ve basınçlandırma ile optimum koşullarda uygulanabilmektedir.

• İnşa edilecek yapının fonksiyonuna bağlı olarak istenilen hacimde üretilen membranın basınçlandırılması ile düşey taşıyıcı kolonlar olmadan bütüncül iç mekanlar oluşturulabilmektedir.

• Hacim kazandırılmış membranlardan oluşan pnömatik sistemler geleneksel sistemler ile aşılamayacak geniş açıklıkları geçebilmektedir.

• Pnömatik sistemlerde mevcut strüktüre ekleme veya çıkartma işlemleri modüler kurgular ile yapılabilir hale gelmektedir.

• Esnek özellikli membran malzemeden üretilen pnömatik strüktürlerin stadyum, spor salonu, sergi salonları, müze, endüstri yapıları, kafe, müze, otel, festival yapıları, afet sonrası barınma gibi farklı fonksiyonlardaki yapılarla birlikte kullanımı da yaygındır. Uzay kafes sistemler ve çelik ızgara sistemler gibi diğer taşıyıcı sistemlere adapte olabilmeleri sayesinde uygulama alanları geniştir.

• Pnömatik sistemler doğal afetler veya salgın hastalıklar gibi acil durumlarda kullanım için kolay kurulma, portatif olma ve küçük hacimlerde kolay nakliye nitelikleri nedeniyle elverişlidir.

• Pnömatik sistemlerin esas malzemesi membran ve basınçlandırılmış hava olması nedeniyle oldukça hafiftir.

• Pnömatik sistemlerin ana malzemesi olan membran, plastik-polimer esaslıdır. Bu sayede geri dönüştürülebilmektedir.

• Pnömatik strüktürlerde tek veya çift cidarlı olarak kullanılan membran, tabaka halinde ince bir yüzey olması nedeniyle ekonomiktir.

• Membran malzemenin basınçlandırılarak kullanılması sayesinde pnömatik sistemler sökülüp takılabilen, söndürülüp taşınabilen, tekrar tekrar kullanılabilen portatif sistemlerdir. Bu sayede mimaride afet sonrası barınma, gezici konser-spor salonları gibi tekrar kullanım gerektiren geçici veya gezici yapılarda kolaylıkla kullanılabilmektedir.

• Pnömatik sistemler plakalar halinde üretilen membran ve birleşim elemanlarından oluşmaktadır. Bu sayede kolaylıkla kurulumlarının yapılacağı alana taşınabilmektedir. Taşınan yapı malzemesi hacimsel olarak küçük olduğundan nakliye ücretleri düşüktür.
• Pnömatik strüktürler birçok taşıyıcı sisteme göre (geleneksel sistemler, kabuklar, uzay kafes sistemler vb.) çok daha kısa sürede inşa edilebilmektedir. Bazı pnömatik yapıların yerinde inşası birkaç günde gerçekleşebilmektedir.
• Dijital destekli tasarım yöntemleri ile inşa alanına bütün halde veya kesilmiş parçalı dilimler halinde gelen membran dikiş, yapıştırma, mekanik birleşim veya ısıtma ile yerinde birleştirilebilmektedir. Bu durum aynı zamanda yapının kullanımı esnasında oluşacak delik, yırtık veya yıpranmaların yerinde onarılabilmesini sağlamaktadır. Membran malzeme sayesinde hasar durumunda onarım kolay olabilmektedir.
• Günümüzde yaygın kullanılan taşıyıcı sistemlerde gereksinim duyulan temel için kazma ve hafriyat gibi aşamaları pnömatik sistemler yapım sürecinde barındırmamaktadır. Dolayısıyla bu tür kazı, hafriyat veya toprak nakliyesi gibi maliyetlerde yapı inşaat sürecinden eksilmektedir.
• Membran malzemenin basınçlandırılması ile oluşmasından dolayı hava kaybı pnömatik yapının sönmesine neden olabilir. Ancak sönme durumu bazen günler alabilecek uzun sürelerde gerçekleşeceği için hayati bir güvenlik sorunu oluşturmaz. Ayrıca pnömatikler deprem gibi afet durumunda hafif olmaları ve yapısal yüklerinin az olması nedeniyle diğer yapılara göre daha az tehlikelidir. Tek cidarlı sistemlerde sönme durumu çift cidarlılara göre daha hızlıdır. Bu durum çift cidarlı pnömatik strüktürlerde iki membran tabaka arasında basınçlandırılma ve membranın bölümlendirilmesi ile tüm sistemin tamamen değil bir parçasının sönmesi sağlanarak çözümlenmiştir. Cephe kaplaması olarak kullanılan pnömatik sistemlerde ise sönme, delinme veya aşınama tek modülde gerçekleşeceğinden yerinde onarılabilmektedir.
• Pnömatik sistemlerde bulunan hava desteği sağlayan fan sistemlerinin sadece hava pompalaması yerine iklimlendirme özelliği kazandırılarak sıcak veya soğuk hava desteği iç mekan ısıl konforunun optimum seviyede tutulmasını sağlayabilmektedir. Çift cidarlı pnömatik strüktürlerde iki membran tabakasının hava ile desteklenmesi ile ısıl konfor koşulları yapısal olarak optimum seviyede tutulabilmektedir. Ancak bu durum strüktürel yapı tasarlanırken planlanmalıdır. Çünkü hava doğrudan pnömatik sistemin taşıyıcılığına etki etmektedir.

• Pnömatik sistemlerin membran malzemesinin yapısal özellikleri (geçirgenlik, çekme dayanımı, yırtılma dayanımı vb.), kaplamalar aracılığıyla iklimsel faktörlere dayanıklı hale getirilmesi, kirliliğe karşı koruyucu tabakalar ile kapanması gibi gelişmeler pnömatik yapıların günümüzde daha uzun ömürlü olabilmesini sağlamaktadır.

• Pnömatik sistemlerin hava destekli olması dolayısıyla özellikle tek cidarlı pnömatik strüktürlerde sürekli hava sirkülasyonundan kaynaklı olarak iç mekan hava kalitesi optimum düzeyde sağlanabilmektedir. İç mekandaki havanın sürekli yenilenmesi ve ventilasyonu ile iç mekana temiz hava takviyesi yapılabilmektedir.

• Pnömatik sistemlerde seçilen membran malzemenin ışık geçirgenliğinin düzeyi tasarım aşamasında planlanabilmektedir. Bu sayede büyük hacimli mekanlar olmasına rağmen aydınlık düzeyi yüksek olabilmektedir. Dolayısıyla aydınlatma maliyetleri düşüktür.

• Aydınlatma elemanlarının pnömatik strüktürlerin iç mekanına sabitlenememesi durumunda dışarıdan yapıya ışık desteği sağlanması örneğin sergi ve konser salonlarında uygulanarak oluşan gölge ve aydınlık alanlar sayesinde sanatsal değerde estetik mekanlar kurgulanabilmektedir.

• Cephe kaplaması olarak kullanılan pnömatik yastık sistemler içerisine yerleştirilen aydınlatma sistemleri cephenin istenilen süre ve renklerde aydınlatılabilmesini sağlamaktadır. Bu durum geleneksel aydınlatma sistemlerine göre daha aktif ve ekonomiktir. Bu sayede aynı zamanda enerji tasarrufu da sağlanabilmektedir.

• Cephe kaplaması olarak kullanılan pnömatik yastıklar şişirme ve söndürme ile basınç farklılığı yaratarak yapının çevresel koşullara özellikle deprem ve rüzgar gibi yanal yükler için yönelik dayanım kazanmasını sağlamaktadır. Ayrıca yapının iklimsel koşullardan olan hava sıcaklığı, yağışlar ve nem oranı gibi parametrelere uyum sağlamasını kolaylaştırmaktadır. Bu sayede yapı cephesi değişken koşullarda biçimini koruyabilir ve sürdürülebilir hale gelmektedir.

• Pnömatik yastıkların cephede kaplama olarak kullanımı membran katmanları sayesinde sera etkisi oluşturarak yapılarda pasif önlemler ile ısı yalıtımı sağlamaktadır. Isı birikimi ya da yastık içerisinde bulunan havanın ısı seviyesinin artması ve iç mekana aktarılması sayesinde yapının ısı kontrolü sağlanmaktadır.

• Cephede kullanılan pnömatik yastık kaplamaları genellikle hava ile doldurulmaktadır. Ancak argon, azot ve nitrojen gibi başka gaz maddeler ile de basınçlandırılabilmektedir. Bu durumda dolgu maddesinin yoğunluk değişimi iç mekana girecek olan ışık düzeyini

de etkilemektedir ve gölgeleme sağlayabilmektedir. Aynı zamanda yapının yönlenişi veya baktığı yöne göre de cephelere çeşitli ışık geçirgenliği özellikleri kazandırılarak güneş ışığı kontrolü sağlanabilmektedir.

• Yapılarda su kontrolü açısından cephe veya çatıda uygulanan pnömatik yastık sistemler su birikimini sağlayıp çeşitli yollarla toplanan suyu yapıda kullanıma kazandırabilmektedir.

• Cephede kullanılan pnömatik yastık kaplamaları ısı yalıtımı, az malzeme kullanımı, hafiflik, nakliye miktarının azlığı, ışık geçirgenliği, su kontrolü, aydınlatma ve havalandırma gibi unsurlar açısından enerji tasarrufu ve düşük karbon ayak izi sağlamaktadır.

• Pnömatik yastık kaplamaları cephede uygulanan çelik ızgara sistem, uzay kafes sistem, alüminyum kafes sistem gibi çeşitli taşıyıcılara üçgen, altıgen, eşkenar dörtgen veya serbest geometri gibi çeşitli modül formlarda uygulanabilmektedir. Bu sayede birim pnömatik hücre tasarımı açısından sayısız iki veya üç boyutlu seçenek sunmaktadır.

• Pnömatik yastık kaplamaları cephede modüler olarak uygulanması bazı birimlerin açılıp kapanabilir şekilde kurgulanması iç mekana temiz hava takviyesi ve havalandırma sağlamaktadır.

• Cephede pnömatik yastık kaplama sisteminin yapılarda membran malzeme ile birlikte kullanımı sayesinde yapı yüzeyi temizliğini kendi kendisine yapabilir ve kir tutmaz hale gelebilmektedir. Seçilen membran kaplama malzemesi ile de çeşitli nitelikler kazanabilmektedir. Bu sayede cam gibi şeffaf yüzeyler yerine membranların kullanımı bakım kolaylığı sağlamaktadır.

• Membran malzemenin plastik-polimer esaslı olması nedeniyle yanıcı olmasına karşın yapılarda cephe kaplamasında pnömatik sistemde ETFE türünün kullanımı; alevi taşımaması, kendi içinde yanması, yanan yerden yapı içerisinden duman tahliyesinin sağlanması ve yangın sonrasında belirli bir alanda olan yanmış birimlerin yerinde onarılabilmesi açısından olumlu özellikler sağlamaktadır.

• Cephede kullanılan pnömatik yastıkların hava destek sistemi modüler birimler üzerinde düzenlenebilmektedir. Bu sayede gerekli konumlardaki pnömatik hücreler istenilen basınç düzeyinde ayarlanabilmektedir.

• Pnömatik taşıyıcı sistemler tümüyle şişirilmiş tek veya çift cidarlı kalıcı- geçici ya da cephe elemanı olarak birçok kullanım alanına sahiptir. Cephe elemanı olarak ise farklı taşıyıcı sistemler ile kombinasyonlu olarak uygulanabilmektedir.

b) Pnömatik (Şişme) Taşıyıcı Sistemlerin Dezavantajları: Mimaride pnömatik sistemlerin kullanımı sonucunda sağladığı olası dezavantajlı yönler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

• Pnömatik sistemlerin yerinde inşa süresinin kısa olmasına karşın dijital destekli tasarımlar, hesaplamalar, yük dayanımı, membran malzemenin üretimi gibi hususlar zaman alabilmektedir.
• Tasarım, üretim ve montaj aşamalarında konu hakkında bilgi sahibi uzman kişiler tarafından pnömatik strüktürler mimari yapılarda kullanılabilmektedir.
• Plastik-polimer esaslı membran malzeme pnömatik strüktürlerin temel yapı malzemesidir. Bu nedenle malzemeye erişim, üretim veya nakliye yapının uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir.
• Pnömatik sistemlerde havanın fanlar aracılığı ile sağlanıp basınçlandırılarak kullanılmasından dolayı sürekli veya aralıklı olarak enerji desteğine ihtiyaç duyulmaktadır. Güç temini, enerji desteği ve çevresel açıdan olumsuz olarak görülebilen pnömatik sistemler, günümüz membran teknolojileri ile daha verimli koşullarda üretilebilir ve uygulanabilir hale gelmiştir. Fotovoltaik membranlar gibi kendi enerjisini güneş veya rüzgar kaynakları ile üretebilen pnömatik sistemler mevcuttur.
• Pnömatik strüktürler düz veya eğrisel birçok formda üretilebilmektedir. Eğrilikli yüzeylerde iç mekanda yansıma nedeniyle akustik açıdan değerlendirilerek tasarlanması gerekmektedir. Akustik kontrolün yapı formu, ses tutucu elemanlar, geometrik süreksizlik ya da bütüncül mekanlarda ses odak merkezinin yerinin doğru seçilmesi ile sağlanması gerekmektedir.
• Pnömatik sistemlerde her yapı kendi özelinde tasarlanarak uygulanmaktadır. Bu nedenle her pnömatik yapı kendisine ait olarak geliştirilen sistem detayları ve çözümler gerektirmektedir.
• Pnömatik sistemler her araziye uygun olarak inşa edilemeyebilir.

• Tek cidarlı pnömatik sistemlerin iç hacmi tamamen basınçlandırıldığından dolayı kapı, pencere gibi açıklıklara özel detaylandırılmış yapı elemanları eklenmelidir.

• Tek cidarlı pnömatik sistemlerde (çift cidarlılara göre daha fazla) zeminden kopmaya meyilli olan yapının zemine ankraj ile sabitlenmesi gerekmektedir. Bu sabitlenme noktaları yapı sistemi özelinde geliştirilerek tasarlanmaktadır.

• Tek cidarlı pnömatik strüktürlerde membran yüzey hava desteği ile şişirilmesinden dolayı tabaka halindedir açıklıklara izin vermemektedir. Ancak bu durum çift cidarlı pnömatik sistemlerde geliştirilen tasarımlar ile ortadan kaldırılmıştır.

• Tek cidarlı pnömatik sistemlerde iç mekan bütüncül olarak basınçlandırılması ısı kontrolü açısından problemlere neden olabilmektedir. Isı yalıtımı için membran malzemenin seçimi ve özel detaylandırılmış kapılar çözüm olabilmektedir. Çift cidarlı pnömatik strüktürlerde ise iki membran tabakanın arası basınçlandırıldığından ısı kontrolü tek cidarlı pnömatik strüktürlere göre daha kolaydır.

• Sıcak ve ılıman iklimli bölgelerde pnömatik strüktürlerin iç mekanı ısı konforu açısından optimum düzeyde tutulamayabilir. Bu durumda membran yüzeyin dışardan sulanması soğutma amaçlı çözüm olabilmektedir. Ancak pnömatik sistemlerin hava destekli fanlarının iklimlendirme niteliği kazandırılarak fiziksel koşullara göre tasarlanması iç mekan ısıl konforunu en iyi düzeyde tutulmasını sağlamaktadır.

• Pnömatik strüktürlerde aydınlatma elemanları alışılagelmiş şekilde doğrudan tavana sabitlenemeyebilir. Tavana sabitlenmiş örnekleri olsa da bu durumun sağlanamadığı zamanlarda varsa düşey taşıyıcı elemanlara, yapı içerisindeki taşıyıcı birleşim noktalarına veya membran malzemesinin ışık geçirgenliği kullanılarak yapı dışarısından aydınlatma sağlanabilmektedir.

• Cephe kaplaması olarak kullanılan pnömatik yastık sistemlerin iklimsel, rüzgar, güneş ve sıcaklık koşullarına yönelik dayanımları tasarım aşamasında hesaplanmalıdır. Yapı uygulama sonrasında kontrol edilebilir hava destek sistemi ile yastık içi basınçları düzenlenebilmelidir. Pnömatik kaplama sistemlerine özgü yapısal detaylandırmalar geliştirilmektedir. Bu nedenle bu tür durumlarda sistem geliştirme açısından uzun süreçler gerektirebilmektedir.

• Cephe kaplaması olarak kullanılan pnömatik yastık sistemlerde kar-yağmur gibi yağış durumları yastık üzerinde su birikimi ve göllenme gibi olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle tasarım aşamasında tahliye veya direnaj sistemleri

pnömatik yastıklar ile birlikte tasarlanmalıdır. Yapısal özelliklere göre sistem detayları geliştirilmelidir.

• Pnömatik yastık sistemlerin cephede kullanımının ortaya çıkarabileceği olumsuz durumlara yönelik özel detay çözümlemeleri gerektirmesi yapının tasarım aşamasında alanında uzman kişiler ile uzun çalışma ve deney süreçleri gerektirmektedir.

5. SONUÇ

Pnömatik sistemler uçan balon ve zeplinler ile birlikte insan yaşamına dahil olmuştur. Mimaride kullanımı ise yapılan çalışmalar ve geliştirilen sistemler doğrultusunda nüfus artışı, kentleşme ve çevre kirliliğine yönelik küçük yapılarda başlamıştır. Endüstri Devrimi sonucunda geliştirilen yeni malzemeler, yapım sistemleri ve makineler sayesinde ilerleyen teknoloji mimariye yansımıştır. Mimarlık hakkındaki teknik bilgi donanımının artması ve yapıların inşası sonucunda kazanılan tecrübeler ile taşıyıcı sistemler geliştirilmiştir. Dönemin büyük açıklıklı, geniş hacimli mekan ihtiyaçlarına cevap veren az malzeme ve ekonomiklik niteliklerini barındıran çağdaş yapım sistemleri böylelikle ortaya çıkmıştır. Bu durum bağlamında çağdaş yapım sistemlerinden olan yüzey aktif sistemler (kabuklar), uzay kafes sistemler, kablolu sistemler ve asma-germe (membran) sistemler; tarihsel süreç içerisinde geliştirilmiştir. Plastik-polimer esaslı membran malzemenin geliştirilebilir olması ve seri üretimi sayesinde asma-germe (membran) sistem uygulamaları yaygınlaşmıştır. Pnömatik sistemlerinde içerisinde bulunduğu bu çağdaş taşıyıcı sistem grubu, membran malzemenin geliştirilen nitelikleri ile birlikte mimaride daha etkili bir şekilde kullanılabilmiştir. Böylelikle pnömatik sistemlerin mimaride günümüz yapılarında uygulanabilmesi sağlanmıştır.

Pnömatik sistemlerin ilk uygulamalarından gelişmiş örneklerine kadar bakıldığında ise günümüzde daha kompleks sistemler ile birlikte uygulandıkları gözlemlenmiştir. Dünya çapında pnömatik sistemlerin uygulandığı büyük hacimli ve çok sayıda kullanıcı içeren yapı örneklerinde makine sistemleri ile birlikte inşa edildiği birçok yapı örneği mevcuttur. Ayrıca tez çalışması kapsamında incelenen pnömatik sistemli yapı örneklerinden yola çıkarak pnömatik strüktürlerin tamamen taşıyıcı sistem olarak kullanımı yerine yardımcı yapı elemanı olarak cephelerde kullanımının daha verimli nitelikler ortaya koyduğu sonucuna ulaşılmıştır. Pnömatik sistemlerin enerji verimliliği, yağmur suyu depolama ve yapıda ikincil su kullanımı, konfor koşulları (ısıl, görsel, akustik), ısı yalıtımı ve düşük karbon ayak izi açısından geliştirilmiş mekanik sistemler ile birlikte kullanımı sayesinde gelecekte yaygın bir yapım sistemi olacağı düşünülmektedir.

Bu nedenle yapılan tez çalışmasının Türkiye'de az sayıda yazınsal çalışmanın olduğu pnömatik sistemler hakkında detaylı bilgi içeren, pnömatik sistemlerin niteliklerini detaylı bir şekilde açıklandığı, sınıflandırılma ve yapısal özelliklerinin anlatıldığı örnek yapıları da içeren bir çalışma olması hedeflenmiştir.

Tez çalışması kapsamında taşıyıcı sistemlerin tanımlanması, ortaya çıkışı, tarihsel süreç içerisindeki gelişimi ve sınıflandırılmaları detaylı olarak incelenmiştir. Çağdaş taşıyıcı sistemlerin ortaya çıkışı ve alt gruplandırmaları ile günümüzde mimaride uygulanan en güncel strüktürler tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır. Çağdaş taşıyıcı sistemlerden asma-germe (membran) sistemler grubuna dahil olan pnömatik sistemler ise yazınsal ve yapı örneği açısından Türkiye'de az çalışma olması nedeniyle çalışma konusu olarak seçilmiştir. Pnömatik sistemlerin taşıyıcı yapıları, kullanım alanları, malzeme uygulamaları, şişirilme prensipleri ve yapılara özel geliştirilen sistemler hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Buna ek olarak pnömatik strüktürlerin sınıflandırılması, türleri, birbirleri ile farklı ve aynı yönleri incelenerek mimaride kullanımları sonucunda sağladıkları avantajlı ve olası dezavantajlı yönleri irdelenmiştir.

Pnömatik sistemler hakkında yapılmış çalışmalar derlenerek pnömatik sistemlerin tarihsel süreç içerisindeki gelişimleri, yapılarda kullanım alanına göre sınıflandırılmaları, uygulanmış veya tasarlanmış yapı örnekleri, çevresel faktörler ya da yapısal unsurlara göre davranış biçimleri, başka taşıyıcı sistemler ile birlikte kombinasyonlu kullanım şekilleri ve çağdaş taşıyıcı sistemler içerisindeki yeri ortaya konmuştur. Böylelikle pnömatik sistemler hakkında yapılmış yazınsal çalışmaların ve uygulanmış yapı örneklerinin yapısal özellikleri ile birlikte aktarıldığı bir tez çalışması olması hedeflenmiştir.

Pnömatik sistemler mimaride taşıyıcı, yardımcı yapı elemanı ve kalıp elemanı olarak çok çeşitli işlevlerde kullanılabilmektedir. Bu nedenle birçok yapı örneği olan pnömatik sistemler dünyada yaygın bir uygulama alanına sahiptir. Bu tez çalışması kapsamında aktarılan örneklerde görüldüğü üzere pnömatik sistemler pek çok yapıda çeşitli form ve fonksiyonda inşa edilmiştir. Ancak bu yaygın uygulama alanına rağmen Türkiye'de henüz çok yeni bir yapım sistemidir. Geçmişte hiç uygulanmış örneği bulunmamasına

rağmen günümüzde Türkiye'de küçük hacimlerde geçici yapılarda uygulanmış örnekleri mevcuttur. Membran malzemenin ulaşılabilirliği, üretimi, daha ekonomik hale gelmesi, alanında uzman kişilerin yetiştirilmesi ve uygulama pratiklerinin arttırılması ile pnömatik sistemlerin Türkiye'de mimaride kullanımının arttırılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Ağırbaş, A. (2020). Pneumatic Structure with Kinetic Sub-system: A Proposal for Extraterrestrial Life. XXIV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics Medellín, Colombia, s. 404.

A.I.A., (2004). Beijing National Swimming Centre China. American Institute of Architects, Building Information Model (BIM) Awards Competition, USA.

A Sciences, (2017). Tensile Membrane Structures. s. 1-50.

Alioğlu, T. (2018). Tekstil Esaslı Malzemelerin Mimaride Kabuk Tasarımında Kullanımı ve Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, İstanbul.

Announcing Lucerne Festival Ark Nova, (2013). Matsushima, Date: Tuesday, March 5, 2013 Venue: Swiss Residence, The 1st Press Conference, Ark Nova Executive Committee, www.arknova.com/matsushima/en/index.html (erişim tarihi: 22.04.2022)

Anonim, (1997). Eczacıbaşı Sanat Ansiklopedisi. Yem Yayınları, İstanbul.

Arup, (2007). Box of Bubbles: Visualization of the Entrance to the Water Cube-The China National Aquatic Centre. INGENIA Issue 33, China, s. 44-51.

Bahadır, Ş. S. (1997). Büyük Açıklıklı Yapılarda Taşıyıcı Sistemler. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, İstanbul.

Bakbak, D., Özakça, M., Göğüş, M. T. (2015). İnşaat Mühendisliğinde Hareketli Membran Yapılar için Tasarım Metodolojisinin Geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 31, no 1, s. 73-86.

Bal, Y. (2022). Kişisel fotoğraf albümü, Umurbey Yüzme Havuzu, Mihraplı Yüzme Havuzu, Yenigün Spor Tesisleri Balon Kort, Bursa, 2022.

Barnes, M., Dickson, M., Happold, E. (2000). Widespan Roof Structures. International Symposium on Widespan Enclosures. London: T. Telford.

Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., Monticelli, C. (2016). The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture. Procedia Engineering (155), s. 277.

Basel, B. (2011). Construction Manual for Polymers + Membranes. Münih: Uluslararası Mimarlık Enstitüsü Yayınları.

Başar, E. (2014). Kentsel Mekan Bileşenleri Olarak: Beden, Devinim ve Performans. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, Ankara.

Bayülgen, C. (1999). Çağdaş Strüktür Sistemleri. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi Matbaası, İstanbul.

Beşlioğlu, B. (2008). The Programmatic Experimentation in The Work of Gordon Matta-Clark. *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bögle, A., Schlaich, M., Hartz, C. (2009). Pneumatic Structures in Motion. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures Symposium (IASS), Valencia.

Chen, Y. (2012). Creating A New Image Beijing: Beyond The Olympic City. Real Estate Research Quarterly.

Chi, J. Y., Pauletti, R. M. O. (2005). An Outline of The Evolution of Pneumatic Structures. Conference: In II Simposio Latinoamericano de Tensoestructuras, Caracas.

Ching, F. D. K., Onouye, B. S., Zuberbuhler, D. (2017). Çizimlerle Taşıyıcı Sistemler/Şemalar, Sistemler ve Tasarım.YEM Yayınları, 2. Baskı, ISBN:978-605-4793-02-0.

Çamlıbel, N. (1982). Mimarlıkta Çağdaş Taşıyıcı Sistemler. Birsen Kitabevi Yayınları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Dağılgan, S. (2019). Geniş Açıklıkların Örtülmesinde Kullanılan Taşıyıcı Sistem Seçimi için Bir Model Önerisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, Adana.

Dansık, F. (1999). Force Density Method and Configuration Processing. *Doktora Tezi*, Space Structures Research Centre Department of Civil Engineering University of Surrey.

Dessauce, M. (1999). The Inflatable Moment: Pneumatic and Protest in ´68. Princeton Architectural Press. New York.

Dessi-Olive, J., Case, J., Kolıner, M., Teja Meda, V., Putman, C. (2019). Deployable Tensegrity Structures Using Pneumatic Compression Members. 6th International Conference on Architecture and the Built Environment, Havana, Cuba.

Dhumad, A. K. (2021). The Impact of Using The Pneumatic Structures on The Sustainability of Iraqi Cities During Religious Event. INTCSET 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1094 (2021) 012094. IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/1094/1/012094

Doerstelmann, M., Knippers, J., Koslowski, V. (2015). ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15, Fibre Placement on a Pneumatic Body Based on a Water Spider Web. Architectural Design, vol. 85, no. 5, http://www.monolithic.org/topics/ domes, s. 60–65.

Drüsedau, H., Dickson, M., Hennicke, J. (1983). IL-15 Lufthallenhandbuch-Air Hall Handbook for Lightweight Stuructures. Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart.

Engel, H. (2013). Structure Systems. Hatje Cantz Yayınları, 5. Baskı, Almanya.
Erdem, N. S. (2012). Ay Yapılarının Yapım Sistemlerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, İzmir.

Erol, A. İ. (1997). Yapılarda Taşıyıcı Sistemler. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.

Eryılmaz, E. B. (2019). Söylemsel Bir Disiplin Olarak Mimarlık: Radikal Avangardın Şişirilebilir Mekanları. *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, Ankara.

Forster, B. (1994). Cable and Membrane Roofs–A Historical Survey. Structural Engineering Review, no 6 (3/4), s. 145–174.

Fox, M. A., Yeh, B. P. (2000). Intelligent Kinetic Systems in Architecture. Managing Interactions in Smart Environments, Springer, London, s. 92.

Fuller, R. B. (1961). Tensegrity. Portfolio and Art News Annual, No.4, http://www.rwgrayprojects.com/rbfnotes/fpapers/tensegrity/tenseg01.html (erişim tarihi: 24.05.2022)

Gebhardt, M. (2019). Schlauchwehre International-PIANC-Arbeitsgruppe Inflatable Structures. Bundesanstalt für Wasserbau Kolloquium Hydraulik der Wasserbauwerke, Neues aus Praxis und Forschung.

Geiger, D. (1989). Membrane Structure, Encylopedia of Architecture –Desing. Engineering & Construction, New York: J. Wiley.

Gezer, H. (2009). Mekan Örtüsü Tekstil Malzemesi. TC Maltepe Üniversitesi Yayınları, 1. Baskı, İstanbul.

Gómez-González, A., Neila, J., Monjo, J. (2011). Pneumatic Skins in Architecture. Sustainable Trends in Low Positive Pressure Inflatable Systems. Procedia Engineering, 21, 125-132. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.1995.

Gonchar, J. (2008). Inside Beijing's Big Box of Blue Bubbles. Architectural Record, Manhattan, USA.

Gonçalves, A. (2017). Case Study: Munich Allianz Arena Stadium. https://aga.arq.br/wp-content/uploads/2017/05/2017_02_ENG_Case-study-MunichAllianz-Arena-Stadium_GONCALVES.pdf (erişim tarihi: 22.04.2022)

Gökçe, G. (1977). Başlangıçtan Günümüze Mimaride Strüktür. YAPI Dergisi (23), https://yapidergisi.com/zaman-tuneli-baslangictan-gunumuze-mimaride-struktur/ (erişim tarihi: 24.05.2022)

Gündoğ, G. (2007). Çağdaş Strüktür Sistemlerinin Mimarlığa Etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, Kayseri.

Güney, D. (2013). Asma Germe Sistemlerin Sınıflandırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Günsoy, O., Kendik, M., Anıl, K. (1979). Asma Sistemler. İstanbul Devlet Güzel Sanatlar Akademisi, İstanbul, s. 1-3.

Hasol, D. (1999). Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü. YEM Yayınevi, s. 476.

Heifetz, H. (1972). Domecrete Building System (Israel). Bauen + Wohnen = Construction + Habitation = Building + Home, Internationale Zeitschrift, vol. 26, no. 6, s. 262-263.

Hennicke, J., Schaur, E. (1974). Gitterschalen – Gridshells, Mitteilungen des Instituts für leichte Flägentrachwerke (IL). Universität Stuttgart, Almanya.

Herzog, T. (1976). Pneumatic Structures: A Handbook of Inflatable Architecture. Oxford University Press, New York, USA.

Herzog, T. (1977). Pneumatic Structures : A Handbook for the Architect and Engineer– Crosby Lockwood Staples. 1. Baskı, İngiltere.

Jamil, R. (2005). Study and Adaptability of Pneumatic Structures. Civil Engineering, Advisor: Zahid Tauqeer, vol 13.

Jungjohann, H., Woodington, W. (2016). Ontario Celebration Zone Pavilion: A Large Pneumatic Structure. International Symposium on Novel Structural Skins: Improving Sustainability and Efficiency Through New Structural Textile Materials and Designs, Procedia Engineering 155 (2016) 507 – 515. Ss: 507-515. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.054

Kirkland, D., Grimshaw, N. (2004). Chapter 4 A Process-Oriented Architecture, Innovation in Architecture. Edited by Alan J.Brookes and Dominique Poole, Londan and New York, Spon Press, ISBN 0-415-24133-2, s. 72-80.

Knebel, K., Sanchez-Alvarez, L., Zimmermann S. (2001). The Eden Project- Design, Fabrication and Assembly of the Largest Greenhouse of the World. https://www.researchgate.net/publication/294617101_The_Eden_Project_-_Design_fabrication_and_assembly_of_the_largest_greenhouse_of_the_world (erişim tarihi: 24.05.2022)

Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., Lienhard, J. (2011). Construction manual for Polymers+ Membranes, Materials. Semi-Finished Products, form Finding and Design, Birkhäuser.

Korkmaz, K. (2004). An Analytical Study of the Design Potentials in Kinetic Architecture. *Doktora Tezi*, İzmir İleri teknoloji Enstitüsü, İzmir.

Krauel, J. (2013). Inflatable: Art, Architecture & Design. Links Books Press, Barcelona, Spain.

Kronenburg, R. (1995). Houses in Motion: The Genesis, History and Development of the Portable Building. NASA Inflatable Mars Habitation 1992. 1. Baskı, 119. Great Britain, Wiley Academy.

Kuban, D.(1992). Tarihsel Perspektif İçinde Mimarlığın Kurumsal Sözlüğüne Giriş. Mimar Sinan Üniversitesi Yayınları, 4. Baskı, İstanbul.

Le Cuyer, A. (2008). ETFE Technology and Design. Birkhauser Yayınevi.

Luchsinger, R.H., Pedretti, M., Reinhard, A. (2004). Pressure Induced Stability: From Pneumatic Structures to Tensairity. Journal of Bionics Engineering, 1(3), s. 141–148.

Macieira, M., Guedes, J. M. (2017). Architectural Membranes on Building's Functional Refurbishment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 264 (2017) 012005 doi:10.1088/1757-899X/264/1/012005 IOP Publishing, ICBMM 2017.

Manrique, C. A. N., Pérez, A. L. P., Calonge, H. G. R., Quin, C. A. C. (2020). Portable Epidemiological Isolation Unit Ephemeral Architecture for Covid-19 Emergency. Strategic Design Research Journal, vol 13, s. 401-417.

Marcipar, J., Onate, E., Canet, J. M. (2005). Experiences in the Design Analysis and Construction of Low Pressure Inflatable Structures. Textile Composites and Inflatable Structures, vol (3), s. 241-257.

Martens, B., Tschuppik, W. M. (2006). Exploring the Design and Fabrication of Inflatables, The Taming of the Shrew. ACADIA 2006: Synthetic Landscapes Digital Exchange, Works in Progress, s. 466.

Martinez, X., Davalos, J., Barbero, E. J., Sosa, E. M., Huebsch, W., Means, K., Banta, L., Thompson, G. J. (2012). Inflatable Plug for Threat Mitigation in Transportation Tunnels. Proceedings of Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) Conference, May, Baltimore.

Melendez, F., Gannon, M., Jacobson-Weaver, Z., Toulkeridou, V. (2014). Adaptive Pneumatic Frameworks. Acadia 2014 Design Agency, Temporal Agency, s. 433.

Morgül, İ. E. (2006). Çadır Sistem Membran Kalıplarındaki Fire Oranının Yüzey Belirlenmesine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, İstanbul.

Moritz, K. (2000-2022). Kişisel fotoğraf albümü, Lifting Lens Münich Olimpiyat Parkı.

Moritz, K. (2010). Foils and Membranes Allianz Arena, Munich: Design Aspects of ETFE Foil Cushions. Foil and Membranes, Innovative Design and Construction, s. 41-54.

Motro, R. (2003). Tensegrity: Structural Systems for the Future. Kogan Page Ltd. London, UK.

Nader, C. (2019). Arquitectura Alternativa Sostenible (Alternative Sustainable Architecture). Bogotá. Ediciones Unisalle.

National Geographic, (2015). Beijing Water Cube. September, https://www.youtube.com/watch?v=R66X3nroTC8

Onuk, T. (2005). Osmanlı Çadır Sanatı (XVII-XIX. Yüzyıl). Atatürk Kültür Merkezi Başkanlığı Yayınları, Atatürk Yüksek Kurumu, Atatürk Kültür Merkezi Yayını:329, Bilimsel Araştırmalar Dizisi: 9, ISBN: 975-16-1786-3, İLESAM: 2005.06.Y.0143-323, s. 13-16.

Otto, F. (1962). Tensile Structures. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Otto, F. (1970). F..Otto: Shells and Membranes. Genetics Sychology Monograps, Berlin.

Oymael, S. (2015). Yapı Bilgisi I. İstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İstanbul, s. 1-11.

Özat, S. (2014). Geniş Açıklıkların Geçilmesinde Membran Sistemlerin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, İzmir.

Özşen, E. G., Yamantürk, E. (1991). Taşıyıcı Sistem Tasarımı. Birsen Yayınevi, İstanbul, ISBN: 975-511-058-5.

Picon, A. (2003). Architecture, Science, Technology and the Vitual Realm. In: A. Picon, A. Ponte (Eds.), Architecture and the Sciences Exchanging Methaphors, Princeton Architectural Press, New York, s. 292-313.

Radoev, K. (2019). A Periodic Table of Architectural Structures. IXth Internatıonal Scientific Conference on Archıtecture and Civil Engineering Arcive, Varna, Bulgaria.

Saad, B. S., El Azm, F. M. A. (2017). Towards Novel and Appropriate Smart Buildings "Beijing Water Cube". International Journal of Environmental Science, Volume 2, ISSN: 2367-8941, s. 13-22.

Say, F. N. (1998). Çağdaş Yapılarda Strüktür Biçim İlişkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, Balıkesir.

Schmitz, G. (1995). Course Material for Architecture. Department of Architecture, School of Architecture and Planing, State University, New York.

Schlaich, J. (1994). The Air-Inflated Roof Over The Roman Amphitheatre at Nîmes. Structural Engineering Review, no 6 (3/4), s. 203–214.

Schlaich, M. (2003). Further Engineering Structures for The Urban Habitat and Infrastructure. Proceedings IABSE Symposium, Shanghai, s. 102.

Sekler, E. F. (1965). Structure, Construction and Tectonics. In: G. Kepes (Eds.), Structure in Art and Science, New York: George Brazillier, s. 89-95.

Sert, F.Y. (2016). Çatı ve Cephe Sistemlerinde ETFE Kaplamalarının Kullanımı. 8. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.

Sırkıntı, H. (2012). Sürdürülebilirlik Kapsamında Yeşil Yapım Uygulamaları Ve Leed Sertifika Sistemine Öneriler. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, İstanbul.

Sumovki, J. A., Lanchester, E. F. W. (2005). A Brief History of Pneumatic Structures. https://documents.pub/document/a63-a-brief-history-of-pneumatic-structures-osaka1970-exposure-on-pneumatic-structures.html (erişim tarihi: 12.05.2022)

Şenkal Sezer, F. (2022). Kişisel fotoğraf albümü, Göbeklitepe.

The Membrane Structures Association of Japan, (1996). Technical Standards for Specicific Membrane Structure Buildings.

The Pritzker Architecture Prize Image Book, (2019). Laureate Arata Isozaki Japan, Sponsored by The Hyatt Foundation, Lucerne Festival Ark Nova (designed by Anish Kapoor and Arata Isozaki), Miyagi (2011-2013, 2014), Japan, Fukushima (2015), Tokyo (2017).

Topham, S. (2002). Blow Up. Prestel - Verlag, Munich.

Tsuboi, Y. et al. (1985). IASS Recommendations for Air-Supported Structures. International Association for Shell and Spatial Structures. Madrid, Spain.

Turani, A. (1992). Dünya Sanat Tarihi, Remzi Kitapevi.

Türkçü, H. Ç. (1997). Çekmeye Çalışan Taşıyıcı Sistemler. Eylül Yayınları, İzmir.

Türkçü, H. Ç. (2003). Çağdaş Taşıyıcı Sistemler. Birsen Yayınevi, İzmir.

Türkçü, H. Ç. (2009). Çağdaş Taşıyıcı Sistemler. Birsen Yayınevi, 2. Baskı, İzmir.

URL 1 Taş yığma duvar, https://www.gittigidiyor.com/yapi-market-tamirat/16-5m2-moderno-2500-2-yerli-duvar-kagidi-yigma-tas-krem_pdp_424105306 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 2 Tümülüs, https://www.canstockphoto.com/tumulus-at-silbury-hill-wiltshire-7339025.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 3 Karınca yuvası, https://www.bestepebloggers.com/derin-in-karinca-yuvasi-hakkindaki-dusunceleri/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 4 Böcek yuvası, https://www.mynet.com/bu-inanilmaz-sey-kaya-degil-bir-bocegin-yuvasi-190101055009 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 5 Termit türü karınca yuvası, https://onedio.com/haber/simdiye-kadar-gormediginiz-12-termit-gokdeleni-353085 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 6 Ankara Tümülüs yapısı, https://www.trthaber.com/haber/kultur-sanat/antik-dunyanin-gizemli-yapilari-tumulusler-426212.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 7 İskelet sistem çizim şeması, https://www.yedigun.com/tasiyici-sistemler (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 8 İnsan iskelet sistemi, https://www.kindpng.com/imgv/iomhJo_bones-skeleton-vector-png-human-and-animal-skeleton (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 9 İnsan omurgası, https://www.acibadem.com.tr/hayat/omurga-fitiklari-ve-cerrahisi-nedir (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 10 Dokulardan esinlenilerek geliştirilen iskelet sistemler, https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-trabecular-bone-architectures-with-corresponding-micromolded-PU-structures_fig1_226749197 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 11 Museo Valencia, https://www.inexhibit.com/mymuseum/museo-de-las-ciencias-valencia (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 12 Katlanmış plak sistemler çizim şeması, https://www.researchgate.net/figure/Threefold-Load-bearing-Action-of-a-Folded-Plate-Folded-plate-structures-combine_fig6_283079349 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 13 Katlanmış plak sistemler çizimi, https://www.comunidadvidaygracia.org/plate-structure (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 14 Çeşitli ağaç türlerine ait yapraklar, https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/leaves-set-vector-32139689 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 15 Bal peteği, https://www.britannica.com/science/honeycomb-biology (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 16 Kanatlı böcek görseli, https://friendsoftheearth.eu/publication/insect-atlas-facts-and-figures-about-friends-and-foes-in-farming/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 17 Kelebek kanatları, https://www.collinsdictionary.com/ko/dictionary/english/butterfly (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 18 Cadet Chapel, https://www.skyscrapercity.com/threads/modern-churches-around-the-world.1839550 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 19 Kabuk sistemler tonozsal çizimi, https://www.mdpi.com/2075-5309/9/5/127/htm (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 20 Kabuk sistemler çizimi, http://www.adopt.kr/aresearch/shell.htm (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 21 Deniz kabuğu, https://turkish.alibaba.com/product-detail/Beautifulc-Sea-shell-from-Viet-nam-50039207763.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 22 Deniz minaresi, https://www.worldatlas.com/articles/why-do-you-hear-the-ocean-in-a-seashell.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 23 Kahverengi kaplumbağa, https://www.shutterstock.com/tr/search/brown+turtle (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 24 Kabuklu yemiş fındık ve ceviz, https://www.bikonuda.com/gunde-5-tane-ceviz-ya-da-findik-yerseniz-ne-olur (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 25 Oceanografic Valencia, https://tr.pinterest.com/pin/249598004326936557 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 26 Kablo sistemler çizimi, https://www.archdaily.com/887462/tensile-structures-how-do-they-work-and-what-are-the-different-types/5a45c5b7b22e38b707000169-tensile-structures-how-do-they-work-and-what-are-the-different-types-photo (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 27 Örümcek ağı, https://create.vista.com/tr/unlimited/stock-vectors/17416749/stock-vector-vector-spider-web-dark-background (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 28 Örümcek ağı, https://www.birgun.net/haber/orumcek-aginin-celikten-saglam-olmasinin-nedeni-arastirildi-238073 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 29 Örümcek ağı, https://urun.n11.com/arma-sticker/orumcek-agi-sticker-P369076843 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 30 Frei Otto tarafından tasarlanan Münich olimpiyat stadyumu, https://de.wikipedia.org/wiki/Frei_Otto (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 31 Uzay kafes sistemler üç boyutlu gösterimi, http://www.uzayform.com/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 32 Moleküller, https://www.istockphoto.com/tr/ill%C3%BCstrasyon/molecule (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 33 Molekül yapısı, https://www.tech-worm.com/molekul-nedir-molekullerin-ozellikleri-nelerdir/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 34 Kristallerin geometrisi, https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/set-of-geometric-crystals-geometric-shapes-vector-17121077 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 35 The Gherkin ve Hearst Tower, https://architizer.com/blog/inspiration/collections/diagrid/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 36 Geodezik kubbe, https://turkish.alibaba.com/g/geodesic-dome-for-space-frame.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 37 Deniz canlıları (radiolaria), https://www.nkfu.com/isinlilar-radiolaria-hakkinda-bilgi.7/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 38 Deniz canlıları (radiolaria), https://ucmp.berkeley.edu/protista/radiolaria/radmm.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 39 Çiçek tozu polenleri, https://evrimagaci.org/palinoloji-nedir-polenlerden-kriminolojiye-uzanan-bir-bilim-dali-7776 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 40 Deniz canlıları (radiolaria), https://www.radiolaria.org/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 41 67 Montreal EXPO USA Pavyonu, https://untappedcities.com/2013/02/08/quirky-buildings-montreal-expo-67/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 42 Pnömatik sistemler çizimi, https://www.semanticscholar.org/paper/Some-issues-on-the-design-and-analysis-of-pneumatic-Pauletti/c8748732c378735df80282f82bb972be5f8a6a03 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 43 İnsan vücudunda damarlar ve dolaşım sistemi, https://www.verywellhealth.com/pulmonary-vein-anatomy-4588173 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 44 Sabun köpüğü, https://www.hurriyet.com.tr/gundem/sabun-kopugu-neden-beyaz-olur-40461067 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 45 Akciğer, https://www.wikidoc.org/index.php/Lung (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 46 Sabun köpüğü, https://www.muhendisbeyinler.net/sabun-kopugu-ve-matematik/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 47 Beijing Water Cube, https://www.dcrainmaker.com/2013/06/swimming-beijing-watercube.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 48 Ağaç parçalarından yığma barınak, https://www.crystalinks.com/earlyshelters.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 49 Mağara oyuğu, yeraltı taş oyma barınaklar, hayvan kemiklerinden barınak, http://sheltertwc.weebly.com/history-and-evolution.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 50 Taş yığma barınak, http://sheltertwc.weebly.com/history-and-evolution.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 51 Ağaç dallarından çatılmış çadır, https://www.hippopx.com/tr/native-american-tribal-dance-powwow-culture-primitive-history-270473 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 52 Paleolitik dönem insan yaşamı, https://kulturelcisi.com/paleolitik-donem/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 53 Neolitik dönem insan yaşamı, https://postarkeo.com/anadolu-arkeolojisi/neolitik-donem-anadolu-yerlesim-yerleri (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 54 Menhir ve kromlek, https://www.arthipo.com/artblog/sanat-tarihi/tarih-oncesi-devirlerde-sanat.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 55 Dolmen, https://delphipages.live/tr/felsefe-ve-din/antik-dinler-ve-mitoloji/dolmen (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 56 Tümülüs, http://www.kirklarelienvanteri.gov.tr/sitler.php?id=336 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 57 Taş duvar, https://www.istockphoto.com/tr/foto%C4%9Fraf/t%C3%BCrkiye-nin-antik-kentinde-duvarc%C4%B1l%C4%B1k-ta%C5%9F-duvar-do%C4%9Fal-ta%C5%9F-arka-plan-gm1162250059-318726519 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 58 Yığma taş barınak, https://www.canstockphoto.com/dry-stone-shelter-in-catalonia-spain-76886074.html (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 59 Kerpiç duvar, https://insapedia.com/kerpic-nedir-kerpic-kullanim-alanlari-ve-yapi-elemanlari/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 60 Kerpiç evler, https://www.ensonhaber.com/galeri/doga-dostu-kerpic-evler (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 61 Tuğla duvar, https://3dduvardizayn.com/yigma-tugla/ (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 62 Yığma tuğla barınak, https://brickarchitecture.com/about-brick/why-brick/the-history-of-bricks-brickmaking (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 63 Kesme buzdan yığma duvar, https://cz.pinterest.com/pin/241013017536960515/?amp_client_id=CLIENT_ID(_)&mweb_unauth_id=&simplified=true (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 64 İglo yapısı, https://evrimagaci.org/iglo-nedir-arktik-bolgesinde-yasayanlarin-yaptiklari-buzdan-evler-bir-insani-gercekten-isitabilir-mi-8926 (erişim tarihi: 28.03.2022)

URL 65 Yunan mimarisi Parthenon Tapınağı, https://tr.wikipedia.org/wiki/Partenon (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 66 Mısır mimarisi Hatshepsut Tapınağı, https://tr.astelus.com/M%C4%B1s%C4%B1r-simge-yap%C4%B1lar%C4%B1/Hatshepsut-tap%C4%B1na%C4%9F%C4%B1-lento-mimarisinin-bir-%C3%B6rne%C4%9Fi/ (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 67 Roma mimarisi Pantheon Tapınağı, http://arkeogezi.blogspot.com/2018/06/pantheon-tum-tanrlar-icin-bir-tapnak.html (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 68 Gotik mimari üslupta Notre Dame Katedrali, https://www.neoldu.com/notre-dame-katedrali-ozellikleri-ve-hikayesi-hakkinda-bilgi-33352h.htm (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 69 Gotik mimari üslupta Milano Katedrali, https://en.wikipedia.org/wiki/Milan_Cathedral (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 70 Hindistan Hawa Mahal, https://en.wikipedia.org/wiki/Hawa_Mahal (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 71 Afrika Dijenne Ulu Cami, https://www.dunyadinleri.com/tr-TR/haberler/islami-haberler/oku_afrikanin-kerpic-sarayi-djenne-ulu-cami (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 72 Almanya Markt Hannover, https://www.hannover.de/Kultur-Freizeit/Freizeit-Sport/Echt-hann%C3%B6versch/Das-Neue-Rathaus-im-Detail/Zur-Geschichte-des-Neuen-Rathauses/Vorgeschichte-Vom-Alten-zum-Neuen-Rathaus (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 73 Çin Yingxian Pagoda, https://www.intechopen.com/chapters/53126 (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 74 Fransa Eyfel Kulesi, https://cunkubaskasenyok.com/ogren/parisin-simgesi-demir-kule-eyfel-kulesinin-hikayesi/ (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 75 Scott Building, https://www.metalocus.es/en/news/louis-sullivan-and-chicago-school-carson-pirie-scott-and-company-building (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 76 Crystal Palace, https://www.alamy.com/the-crystal-palace-a-cast-iron-and-plate-glass-structure-originally-built-in-hyde-park-london-to-house-the-great-exhibition-of-1851-more-than-14000-exhibitors-from-around-the-world-gathered-in-its-990000-square-foot-92000-m2-exhibition-space-to-display-examples-of-technology-developed-in-the-industrial-revolution-designed-by-joseph-paxton-the-great-exhibition-building-was-1851-feet-564-m-long-with-an-interior-height-of-128-feet-39-m-1-it-was-three-times-larger-than-the-size-of-st-pauls-cathedral-it-was-moved-to-penge-peak-in-south-london-in-1854-but-burnt-down-in-1936-image221462427.html (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 77 Rue Franklin Apartmanı, https://tr.pinterest.com/pin/283797213988216696/ (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 78 Berlin Das Tempodrom, https://structurae.net/en/structures/tempodrom (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 79 Beijing Phoenix Media Center, https://www.theengineeringcommunity.org/phoenix-international-media-center-beijing-china/ (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 80 ABD Milwaukee Art Museum, https://www.archdaily.com/531290/spotlight-santiago-calatrava (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 81 İspanya Tenerife Auditorium, https://www.peri.id/projects/cultural-buildings/auditorio-de-tenerife.html (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 82 Fransa Centre Pompidou Metz, https://www.blelorraine.fr/2021/05/le-centre-pompidou-metz-pour-faire-rayonner-art-contemporain-en-lorraine/ (erişim tarihi: 29.03.2022)

URL 83 Beijing CCTV Headquarters, https://www.skyscrapercenter.com/building/cctv-headquarters/1068 (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 84 Durban Moses Mabhida Stadium, https://www.reddit.com/r/stadiumporn/comments/qcog0r/moses_mabhida_stadium_durban_south_africa/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 85 Çin Jiashao Bridge, https://www.reduper.com/industry/traffic/bridge/sea-bridge/jiashao-bridge/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 86 Fransa Notre Dam Kilisesi, http://astudejaoublie.blogspot.com/search/label/*Gillet%20(Guillaume) (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 87 Sydney Opera House, https://tr.pinterest.com/pin/28429041383684682/(erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 88 Palazetto Dello Sport, https://theforeignarchitect.com/blog/pier-luigi-nervi-in-rome/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 89 Meksika Manantiales Lokantası, http://mimdap.org/2012/10/thiirlethmith-beton-esasly-10-thaheser-bina/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 90 ABD Terminal TWA, https://www.mcmdaily.com/gallery/stoller-gallery/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 91 ABD Ingalls Ice Rink, https://worldarchitecture.org/architecture-news/cgfnp/eero_saarinen_the_architect_who_saw_the_future_documentary_will_be_on_air_on_pbs_december_27th.html (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 92 ABD Pittsburg Fort Pitt Köprüsü, https://historicpittsburgh.org/islandora/object/pitt:MSP285.B008.F18.I02 (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 93 New Delhi Hall of Nations, https://aarchtrove.com/tag/landmark/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 94 İngiltere uzay kafes sistem havaalanı, https://hindustanalcoxlimited.wordpress.com/page/3/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 95 ABD Montreal Sergisi Pavyonu, https://www.mcmdaily.com/gallery/bucky-gallery-3/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 96 İstanbul Tatilya, http://www.demta.com/info/tatilya_tr.htm (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 97 Bursa Botanik Park Kuş Bahçesi, https://uskon.com/tr/bursa-hayvanat-bahcesi-su-kuslari-kafesi-tek-cidarli-eliptik-kubbe/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 98 ABD Dulles Airport, https://v3.arkitera.com/v1/gununsorusu/2002/07/27.htm (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 99 Mantua Fabrikası, https://www.atlasofplaces.com/architecture/cartiera-burgo/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 100 ABD North Carolina State Fair, https://www.ncstatefair.org/2021/Newsroom/History.htm (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 101 Tokyo Büyük Olimpiyat Stadı, https://fr.wikiarquitectura.com/gimansio_tokio_3-2/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 102 Almanya Münich Olimpiyat Stadyumu, https://www.arkitera.com/haber/pritzker-odulunun-bu-yilki-sahibi-frei-otto-oldu/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 103 Stuttgart Üniversitesi Kütüphanesi, https://www.re-thinkingthefuture.com/know-your-architects/a1772-10-things-you-did-not-know-about-frei-otto/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 104 Çadır, https://www.turas.tv/2018/07/a-brief-history-of-tents/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 105 1967 Montreal Alman Çadırı, https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-German-Pavilion-para-a-Expo67_fig2_311211077 (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 106 1967 Montreal Alman Çadırı, https://aehistory.wordpress.com/1967/04/04/1967-west-german-pavilion-roof-montreal-canada/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 107 Kazakistan Han Çadırı, https://nezirogluinsaat.com/proje/han-cadiri/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 108 Kazakistan Han Çadırı, http://arcemuhendislik.com/blog/portfolio/han-cadiri-astana-eglence-merkezi/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 109 Membran strüktür örneği, https://medium.com/@royaltensilestructure01/tensile-structures-provide-a-top-level-weather-protection-for-outdoors-2192e201fad4 (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 110 Berlin Sony Center, https://www.bloglovin.com/@kilsanblog/sony-center (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 111 Membran strüktür örneği, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Tensile_structures (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 112 ABD ARTIC yapısı, https://www.hok.com/projects/view/anaheim-regional-transportation-intermodal-center/ (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 113 Londra Dreamspace, https://www.researchgate.net/figure/Dreamspace-IV-Maurice-Agis-1998-Agis_fig6_228655700 (erişim tarihi: 02.04.2022)

URL 114 Kumaştan yelkenlileri olan gemi görselleri, http://teknolojivetasarim.org/upload/icatlar/Yelkenli_Gemilerin_Tarihcesi.pdf (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 115 Roma kolezyumu kumaş örtü sistemi canlandırması, https://www.atouchofrome.com/colosseum.html (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 116 Tepee çadırı, https://www.wisconsinhistory.org/?dsNav=Ny%3ATrue%2CRo%3A20%2CN%3A4294963828-4294955414&dsNavOnly=Ntk%3AP_CollectionName%7CJones%2C+

William +A%7C3%7C%2CN%3A1136&dsRecordDetails=R%3AIM29350 (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 117 Afrika Tuareng çadırı, https://lotusbelle.co.uk/blog/a-brief-history-of-camping-and-glamping/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 118 Afrika çöl çadırı, https://africandesertcrafts.com/adventures-in-mali/the-biggest-music-festival-in-africa-le-festival-au-desert-mali/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 119 Kumaş çadır, https://tr.pinterest.com/christianizabay/north-african-architecture_-tuareg_-libya/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 120 Orta Asya kıl çadır, https://www.ww2online.org/image/tent-among-group-tents-north-africa-1942-43 (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 121 İran kıl çadırı, https://amtheomusings.wordpress.com/2008/12/26/the-holder-of-the-keys-the-central-peg/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 122 İran yuvarlak planlı çadır, https://iranicaonline.org/articles/tents-cador-ii (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 123 Hasır örme çadır canlandırması, https://tr.pinterest.com/pin/361413938828253655/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 124 Kazakistan Yurd çadırı, Britten, N. (2009), http://www.solarpedia.com/13/318/3992/yurt_floor_plan.html (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 125 Kazakistan Yurd çadırı planı, Oliver, P. (2010), http://www.soloripedia.com/13/318/36 92/yurt_floor_plan.html (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 126 Kazakistan Yurd çadırı örneği, http://www.qaraqalpaq.com/yurthistory.html (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 127 ABD Barnum gösteri çadırı ve müzik sirki, https://unrememberedhistory.com/tag/circus-tents/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 128 1967 Montreal EXPO genel görünüm, https://www.parcjeandrapeau.com/en/expo-67-universal-exposition-montreal/ (erişim tarihi: 17.05.2022)

URL 129 EXPO 67 beyaz membran yapı örneği, https://www.musee-mccord.qc.ca/fr/expositions/incontournable-expo-67/ (erişim tarihi: 17.05.2022)

URL 130 EXPO 67 Alman Pavyonu, https://www.ribapix.com/West-German-Pavilion-Expo-67-Montreal_RIBA17962 (erişim tarihi: 17.05.2022)

URL 131 1970 Osaka EXPO genel görünüm, sarı membran yapı örneği, şişme tüplü pnömatik pavyon örneği, http://www.bubblemania.fr/en/exposition-universelle-70-suita-osaka-japon/ (erişim tarihi: 17.05.2022)

URL 132 Osaka EXPO 70 ABD Pavyonu, https://www.parcjeandrapeau.com/en/expo-67-universal-exposition-montreal/ (erişim tarihi: 17.05.2022)

URL 133 Arizona ASU Campus, https://www.archdaily.com/31562/skysong-at-asu-campus-ftl-design-engineering-studio (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 134 İngiltere Millenium Dome, https://www.webbaviation.co.uk/aerial/picture.php?/30763 (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 135 Şangay EXPO 2010 sergisi, https://www.archdaily.com/57749/shanghai-2010-boulevard-knippers-helbig (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 136 Denver Havaalanı, https://www.uncovercolorado.com/transportation/denver-international-airport-den/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 137 Cidde Havaalanı, https://www.archdaily.com/777599/ad-classics-hajj-terminal-king-abdulaziz-airport-som (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 138 Londra Basketbol Arena, https://en.wikipedia.org/wiki/Basketball_Arena_(London) (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 139 Canary Wharf İstasyonu, https://www.wooddays.eu/hr/architecture/projekt/detail/crossrail-station-canary-wharf-londongb/index.html (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 140 Japonya Hakuryu Kubbesi, https://structurae.net/en/structures/hakuryu-dome (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 141 Bakü Crystal Hall, https://www.dezeen.com/2013/10/17/baku-crystal-hall-stadium-in-azerbaijan-by-gmp-architekten/ (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 142 Stuttgart Gottlieb Stadyumu, https://structurae.net/en/media/1950-gottlieb-daimler-stadium-in-stuttgart (erişim tarihi: 31.03.2022)

URL 143 Cepheden taşıyıcı pnömatik ağ strüktür, https://www.researchgate.net/figure/The-effects-of-pneumatic-structures-in-nature-on-the-buildings-structural-formation_fig3_273903352 (erişim tarihi: 06.04.2022)

URL 144 Hava ile taşıyıcı hale gelen pnömatik strüktür, Ontario Celebration Zone Pavilion, https://www.archdaily.com/775880/ontario-celebration-zone-pavilion-tectoniks/562951c8e58eceb4c400000f-ontario-celebration-zone-pavilion-tectoniks-photo?next_project=no (erişim tarihi: 06.04.2022)

URL 145 Pnömatik çatı örtüsü Minnesota Metrodome, https://www.cantensile.com/silk-screened-tensioned-auditorium-exterior-wall-etfe-fabric-structure_p94.html (erişim tarihi: 06.04.2022)

URL 146 Pnömatik duvar elemanları, https://sites.google.com/site/ae390pneumaticstructuralsystem/contemporary-examples (erişim tarihi: 06.04.2022)

URL 147 Pnömatik cephe elemanları, https://www.researchgate.net/figure/Top-left-Ctesiphon-shell-catenary-frames-during-the-initial-application-of-the-fabric_fig1_285634047 (erişim tarihi: 06.04.2022)

URL 148 https://redskyshelters.com/the-history-of-tensile-architecture/#:~:text=Tensile%20structures%20are%20one%20of,fabric%20canopies%20using%20tent%20technology (erişim tarihi: 19.05.2022)

URL 149 Palmtree Island (Oasis) projesi, Haus-Rucker-Co tarafından tasarlanan Fly Head ve Ballon für Zwei, https://cup2013.wordpress.com/tag/superstudio/ (erişim tarihi: 02.05.2022)

URL 150 ABD Pavyonu görseli, https://hiddenarchitecture.net/united-states-pavilion-osaka-70/ (erişim tarihi: 02.05.2022)

URL 151 Fuji Pavyonu, https://www.archpaper.com/2015/06/relive-glory-1970-osaka-expo-complete-space-frames-metabolism-inflatables-geodesic-domes/ (erişim tarihi: 02.05.2022)

URL 152 Sevilla German Pavilion, https://site.exposeeum.de/expo2000/geschichte/detail.php?wa_id=19&lang=1&s_typ=28 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 153 “Inno-wave-tion” Pavilion, https://www.tensinet.com/index.php/about/members-of-tensinet?view=project&id=4633 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 154 Norway Tubaloon, https://snohetta.com/projects/58-tubaloon-kongsberg-jazz-festival (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 155 Norway Tubaloon saçak görseli, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kongsberg_Tubaloon.jpg (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 156 Serpentine Gallery Pavilion, https://www.dailyicon.net/2008/08/serpentine-gallery-pavilion-by-rem-koolhaas/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 157 ICD/ITKE Research Pavilion, https://www.archdaily.com/770516/icd-itke-research-pavilion-2014-15-icd-itke-university-of-stuttgart (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 158 Hielotrón ve Pomplona Encounters yapıları, https://www.mascontext.com/tag/pneumatic/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 159 Pressostatic, https://www.archdaily.com/catalog/us/products/22135/tensile-architecture-pressostaticinflatables-lastra-y-zorrilla?ad_source=search&ad_medium=search_result_all (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 160 Barbuja Manchega, https://divisare.com/projects/150799-plastique-fantastique-burbuja-manchega (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 161 Fibertin Air House, https://franklloydwright.org/frank-lloyd-wrights-inflatable-architecture-experiment/ (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 162 Modern Tea House, https://www.archilovers.com/projects/123223/modern-tea-house.html (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 163 Berlin Flower Pot, http://www.giardinosonoro.com/?avada_portfolio=karl-marx-bonsai-berlin (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 164 Kiss The Frog, http://magicofarchitecture.blogspot.com/2013/11/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 165 Dreamspace dıştan görünümü, https://artpublicsphere.wordpress.com/2015/07/19/dreamspace-v-a-complicated-history-in-the-public-sphere/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 166 Dreamspace iç mekan, https://enochliew.tumblr.com/post/8166166428 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 167 Archipelago, https://www.researchgate.net/figure/Archipelago-Alan-Parkinson-Architects-of-Air-Topham-2002_fig7_228655700 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 168 Loud Shadows, https://www.archdaily.com/873541/loud-shadows-plastique-fantastique/593f76e6e58ece96bd0003a2-loud-shadows-plastique-fantastique-photo?next_project=no (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 169 Air Mountain Pavilion, https://arquitecturaviva.com/works/air-mountain-inflatable-pavilion (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 170 Skum Pavilion, https://www.project-curiosity.com/project/skum-pavilion-design-big-bjarke-ingels-group (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 171 The Drift Pavilion, https://www.dezeen.com/2012/12/09/drift-by-snarkitecture-at-design-miami/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 172 Yorkshire Renaissance Pavilion, https://inhabitat.com/yorkshire-renaissance-pavilion-by-various-architects/attachment/19603/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 173 River Culture Pavilion, https://taiyo-europe.com/?taiyo-portfolio=river-culture-pavilion-the-arc (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 174 Mobile Performance Venue, https://www.archdaily.com/4333/mobile-performance-venue-various-architects (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 175 Thirst Pavilion, https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4413 (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 176 Rotterdam Floating Pavilion, https://inhabitat.com/rotterdams-floating-pavilion-is-an-experimental-climate-proof-development/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 177 MMW Pnömatik Sahra Hastanesi, https://archello.com/story/78074/attachments/photos-videos/1 (erişim tarihi: 08.05.2022)

URL 178 Pneumatic Tent, https://www.daniels.utoronto.ca/news/2020/06/25/daniels-students-tackle-pandemic-related-projects-funding-u-t-covid-19-student (erişim tarihi: 08.05.2022)

URL 179 CURA Acil Durum Hastanesi uygulanmış hali, https://carloratti.com/project/cura/ (erişim tarihi: 08.05.2022)

URL 180 https://spacesettlementprogress.com/a-simple-inflatable-mars-habitat/ (erişim tarihi: 09.05.2022)

URL 181 http://blogs.und.edu/und-today/2017/07/space-station-on-the-move/ (erişim tarihi: 09.05.2022)

URL 182 Moonbase 2, http://www.technovelgy.com/ct/Science-Fiction-News.asp?NewsNum=1785 (erişim tarihi: 08.05.2022)

URL 183 Şişirilebilir Ay-Mars Habitatı uygulanmış prototipi, http://blogs.und.edu/und-today/2017/07/space-station-on-the-move/ (erişim tarihi: 09.05.2022)

URL 184 Pnömatik Mars Habitatı, https://www.dezeen.com/2015/09/25/foster-partners-concept-3d-printed-mars-habitat-robots-regolith/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 185 Mars Habitation, https://spacesettlementprogress.com/a-simple-inflatable-mars-habitat/ (erişim tarihi: 09.05.2022)

URL 186 Inflation Tower, Abu Dhabi, https://www.evolo.us/inflation-tower-a-pneumatic-skyscraper-for-abu-dhabi-becky-lam/ (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 187 EXPO 2020 Dubai, Spain Pavilion, https://www.archdaily.com/903067/selgascano-plus-frpo-to-design-inflatable-canopy-for-spains-expo-2020-national-pavilion?ad_medium=gallery (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 188 Children Day Care Center, http://www.enob.info/en/refurbishment/projects/details/childrens-day-care-centre-in-wismar/ (erişim tarihi: 09.05.2022)

URL 189 Nimes Arena, https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=3764 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 190 Grand Palais Monumeta, https://publicdelivery.org/anish-kapoor-leviathan/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 191 Hotel Burbuja, https://www.telegraph.co.uk/travel/hotels/galleries/best-bubble-hotels-lodges-in-the-world/campera-hotel-burbuja-mexico/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 192 In Orbit Museum, https://www.archdaily.com/394622/in-orbit-installation-tomas-saraceno (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 193 Bubble: Hirshhorn Museum and Sculpture Garden, http://www.tillotsondesign.com/hirshhorn-inflatable-pavilion (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 194 Microcity Sales Office, https://www.designrulz.com/design/2013/10/microcity-sales-office-by-mossine-partners-moscow-rusia/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 195 La Miroiterie Reklam Merkezi, https://www.subtilitas.site/post/158645909684/brauen-waelchli-architectes-la-miroiterie (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 196 Budapeşte Havaalanı uçak hangarı, https://www.traveldailynews.com/post/budapest-airport-opens-inflatable-hangar-63408 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 197 Avusturya Kayak Merkezi İstasyonu, https://www.ski-nordique.net/webcam-soelden-toutes-les-webcams-de-soelden.6150225-145439.html (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 198 Heathrow Havaalanı Merkez Otobüs Terminali, https://en.wikipedia.org/wiki/Heathrow_Central_bus_station (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 199 Madrid Bull Area, https://www.sbp.de/en/project/roof-bullfight-arena-vista-alegre/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 200 Mineapolis Metrodome, https://www.wired.com/2010/12/video-metrodome-roof-collapses/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 201 Tokyo Dome, https://structurae.net/en/media/61284-tokyo-dome (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 202 12th World Orchids Konferans Merkezi, https://kawa-struc.com/mukougaoka/?ref=langen (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 203 L35Vitam Park, https://www.world-architects.com/pt/projects/view/vitamparc (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 204 Aquamunda France, https://www.archdaily.com/92368/aquamundo-center-parcs-moselle-artur-architectes-mandataire?ad_source=search&ad_medium=projects_tab (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 205 Oxigeno Alışveriş Merkezi, San Francisco, https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4642 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 206 Lilienthalhaus, Braunschweig, https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4655 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 207 Leisure Shopping Complex, Lyon, https://seele.com/references/lyon-confluence-shopping-leisure-complex (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 208 Edificio do National Space Center, Leicester, Nicholas Grimshaw (2004), http://www.grimshaw-architects.com (erişim tarihi: 09.05.2022)

URL 209 Powerhouse, İngiltere, https://nigelcoates.com/projects/project/powerhouse (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 210 Bubble Building, https://www.archdaily.com/437560/bubble-building-3gatti-architecture-studio/52585986e8e44e67bf000861-bubble-building-3gatti-architecture-studio-elevation-schemes (erişim tarihi: 09.05.2022)

URL 211 Cycle Bowl, https://www.atelier-brueckner.com/en/projects/cyclebowl (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 212 Wallacepark Tenis Kortu, https://rocklyn.co.uk/recent-projects/wallace-park-indoor-tennis-centre (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 213 Açık ofis planları için uygulanabilir şişirilme sayesinde açılıp kapanabilen kinetik pnömatik duvar, https://www.nytimes.com/2021/04/30/technology/google-back-to-office-workers.html (erişim tarihi: 20.05.2022)

URL 214 Betonarme yapı için pnömatik dolgu duvar, https://www.archpaper.com/2018/10/state-of-inflatable-architecture/ (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 215 İç mekanda çerçeve ile taşınan bölücü pnömatik duvar, https://www.ferret.com.au/product/%E9%88%A5%E5%A9%ADnflatable-walls-from-giant-inflatables-industrial/ (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 216 Pnömatik Tiny House, https://www.thecoolist.com/10-pop-up-housing-concepts-urban-housing/ (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 217 Exhibition Hall, https://www.tensinet.com/index.php/projects-database/projects?view=project&id=3753 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 218 Bubble Houses, İsrail, https://www.fluxmagazine.com/bubble-houses-architecture-book/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 219 Fotovoltaik elemanlar ile desteklenerek güneş enerjisi depolayabilen alışveriş merkezi pnömatik otopark örtüsü, https://www.bauforumstahl.de/carport-abfallwirtschaftsbetrieb-in-muenchen (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 220 EXPO 2010 Japon Pavilion, https://www.researchgate.net/figure/Japan-Pavilion-in-Expo-2010-with-a-Si-flexible-PV-integrated-double-layered-PV-membrane_fig2_327775892 (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 221 EXPO 2010 Japon Pavilion yapısı pnömatik cephe ile ısı yalıtımı ve güneş enerjisi depolama sistemi, https://inhabitat.com/japan-pavilion-is-a-solar-energy-generating-purple-silkworm-island/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 222 Tensegrity temel modülü, https://www.researchgate.net/figure/A-scheme-of-a-basic-tensegrity-module-triangular-prism_fig1_257725196 (erişim tarihi: 10.05.2022)

URL 223 Tensegrity küre modülü, https://www.pixelandtimber.com/consilience (erişim tarihi: 10.05.2022)

URL 224 Buckminster Fuller, https://www.archdaily.com/893555/tensegrity-structures-what-they-are-and-what-they-can-be (erişim tarihi: 10.05.2022)

URL 225 Kenneth Snelson tarafından inşa edilen tensegrity yapılar ve Needle Tower, https://krollermuller.nl/en/kenneth-snelson-needle-tower (erişim tarihi: 10.05.2022)

URL 226 Kurilpa Köprüsü, http://shenzhentenspressionstructure.blogspot.com/2011/02/some-famous-tenspression-tensegrity.html (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 227 Georgia Dome, https://evrimagaci.org/insaat-sistemlerinde-tensegrity-cekgertumle-modeli-geleneksel-yapi-metotlari-cagimiza-nasil-uyarlaniyor-9109 (erişim tarihi: 10.05.2022)

URL 228 Tensegrity destekli pnömatik tüp taşıyıcı dayanımı ve köprülerde kullanımı, https://www.tensairitysolutions.com/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 229 Tensegrity destekli pnömatik tüp taşıyıcılı köprü, Lanslevillard, Fransa ve Tensegrity destekli pnömatik tüp taşıyıcılı otopark çatısı ve aydınlatması, İsviçre, https://www.tensairitysolutions.com/applications/ (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 230 Açılır kapanır pnömatik sistem, https://www.canobbio.com/ (erişim tarihi: 11.05.2022)

URL 231 The Shed, https://www.architecturalrecord.com/articles/14044-the-shed-by-diller-scofidio-renfro-with-rockwell-group (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 232 Osaka 1970 EXPO, Mushballoon, https://www.tensinet.com/index.php/projects-database/companies?view=project&id=3839 (erişim tarihi: 10.05.2022)

URL 233 Breathing Skins Project, Tobias Becker, https://www.archdaily.com/789230/let-your-building-to-breathe-with-this-pneumatic-facade-technology (erişim tarihi: 03.04.2022)

URL 234 https://www.cnet.com/culture/ark-nova-blow-up-concert-hall-inflates-in-japan/ (erişim tarihi: 22.04.2022)

URL 235 Ark Nova tasarımı ve üç boyutlu programlar ile hesaplanması, https://www.aerotrope.com/what-we-do/art/ark-nova.html (erişim tarihi: 22.04.2022)

URL 236 Ark Nova şişirilme aşamaları, https://archello.com/project/ark-nova (erişim tarihi: 22.04.2022)

URL 237 Ark Nova'nın şişirilerek kullanıma hazır hale gelmesi, https://www.dezeen.com/2013/09/26/ark-nova-by-arata-isozaki-and-anish-kapoor-completes/ (erişim tarihi: 22.04.2022)

URL 238 https://www.archdaily.com/775880/ontario-celebration-zone-pavilion-tectoniks (erişim tarihi: 28.04.2022)

URL 239 Münich Allianz Arena otopark ve peyzaj alanı, Münich Allianz Arena inşaat hali, Münich Allianz Arena renkli aydınlatılmış cephesi, https://allianz-arena.com/en/arena (erişim tarihi: 23.04.2022)

URL 240 Münich Allianz Arena cephesi ve iç alanı, https://www.archilovers.com/projects/62339/allianz-arena-gallery?443153 (erişim tarihi: 23.04.2022)

URL 241 Münich Allianz Arena ETFE yastık kaplama çatı, https://tr.pinterest.com/pin/813322013925600111/ (erişim tarihi: 23.05.2022)

URL 242 Münich Allianz Arena tek renkli aydınlatma, https://www.transfermarkt.com.tr/fc-bayern-munchen/stadion/verein/27 (erişim tarihi: 23.04.2022)

URL 243 Münich Allianz Arena karışık renklerde aydınlatma, https://www.eurosport.com.tr/futbol/almanya-ligi-1/2012-2013/almanya-ligi-allianz-arena-yapiliyor_sto3761677/story.shtml (erişim tarihi: 23.04.2022)

URL 244 Münich Allianz Arena pnömatik sistem detayları, Temme Obermeier GmbH: Maintenance of ETFE cushions and inner ceiling (to-experts.com) (erişim tarihi: 30.04.2022)

URL 245 Beijing Water Cube iç ve dış mekan görselleri, https://www.l-a-v-a.net/projects/beijing-watercube/ (erişim tarihi: 01.05.2022)

URL 246 Beijing Water Cube aquapark, https://www.npr.org/2012/07/10/156368611/chinas-post-olympic-woe-how-to-fill-an-empty-nest (erişim tarihi: 01.05.2022)

URL 247 Beijing Water Cube eğlence havuzu, https://www.reddit.com/r/woahdude/comments/2px842/the_watercube_from_the_2008_beijing_olympics/ (erişim tarihi: 23.04.2022)

URL 248 Beijing Water Cube, cephenin prototipinin yapılması ve uygulanması, https://structurae.net/en/structures/beijing-national-aquatics-center (erişim tarihi: 23.04.2022)

URL 249 Beijing Olimpiyat yapıları alanı, http://www.chinadaily.com.cn/travel/2017-05/15/content_29353095_8.htm (erişim tarihi: 01.05.2022)

URL 250 Beijing Water Cube ve Bird Nest Stadium ateş ve su tezatlık konsepti, https://www.beijinglayovertour.com/forbidden-city-olympic-green-layover-tour/ (erişim tarihi: 01.05.2022)

URL 251 Dijital yazılımlar aracılığı ile cephe sisteminin hesaplanması ve modellenmesi, MORE ABOUT: National Aquatics Center (Watercube) – Beijing, China | moreAEdesign (wordpress.com) (erişim tarihi: 01.05.2022)

URL 252 Beijing Water Cube cephe uygulaması, “Watercube” – National Swimming Centre in Beijing - DETAIL inspiration (erişim tarihi: 01.05.2022)

URL 253 Beijing Water Cube tek renkli aydınlatma, https://agc-asiapacific.com/directory/beijing-national-aquatics-center/ (erişim tarihi: 23.04.2022)

URL 254 Beijing Water Cube karışık renkli aydınlatma, Beijing Water Cube iki renkli aydınlatma, https://news.cgtn.com/news/3d4d544e344d7a4d/share_p.html (erişim tarihi: 23.04.2022)

URL 255 https://www.arkitektuel.com/media-tic/ (erişim tarihi: 27.04.2022)

URL 256 Media TIC Building, May 2007, https://www.abitare.it/wp-content/uploads/2010/01/PresentacionMEDIA-TIC_web_EN-1.pdf (erişim tarihi: 27.04.2022)

URL 257 https://www.designbuild-network.com/projects/media-tic/#:~:text=Media%2DTIC%20programme,occupancy%20capacity%20for%202%2C418%20people (erişim tarihi: 12.05.2022)

URL 258 Eden Project, https://www.visitcornwall.com/things-to-do/attractions/south-coast/st-austell/eden-project (erişim tarihi: 30.04.2022)

URL 259 Eden Project kesiti, Eden Project iç mekan görselleri ve aydınlatılmış hali, https://edition.cnn.com/2017/11/15/world/gallery/eden-project-biomes-global/index.html (erişim tarihi: 30.04.2022)

URL 260 Eden Project uzay kafes taşıyıcıları ve sistem detayları, https://www.edenproject.com/visit (erişim tarihi: 30.04.2022)

URL 261 Eden Project pnömatik sistem detayları ve uygulaması, Eden Project near St Austell | Buildingskins's Blog (wordpress.com) (erişim tarihi: 01.05.2022)

Varan, N. Y., Durur, G. (2014). İnşaat Tekstilleri ve Yeni Uygulamalar. TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası, UCTEA The Chamber Of Textile Engineers, Tekstil ve MühendisThe Journal Of Textiles and Engineers, Sayı 68, s. 14-16.

Varol, O. İ. (2021). Günümüz Mimarisinde Kullanılan ETFE Örtü Sistemleri ve Uygulama Örneklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, İstanbul.

Viollet-le-Duc, E.E. (2015). 19. Yüzyılda Gotik Üslup Üzerine. Janus Yayıncılık, İstanbul.

Vural, N. (2000). Uzay Kafes Strüktür Sistemleri ve Türkiye'deki Uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, Trabzon.

Yıldırım, M. G. (2003). Taşıyıcı Sistem Seçimine Yönelik Çok Ölçütlü Bir Yaklaşım. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, İstanbul.

Zou, P. X. W., Leslie-Carter, R. (2010). Lessons Learned From Managing The Design of The 'Water Cube' National Swimming Centre for the Beijing 2008 Olympic Games. Earthscan, Architectural Engineering and Design Management, vol. 6, no. 3, s. 175-188.

Werner, C. D. M. (2013). Transformable and Transportable Architecture: Analysis of Buildings Components and Strategies for Project Design. *Yüksek Lisans Tezi*, Katolonya Politeknik Üniversitesi.

3M™ Dyneon™ Fluoropolymers (2014). Membrane Architecture.