

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASMA KÖPRÜLERDE PROJELENDİRME VE UYGULAMA
TEKNİKLERİNİN ÜLLEBAELT VE FATİH SULTAN MEHMET
KÖPRÜSÜ ÖRNEKLERİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mimar E. Frat İBRAHİM MOĞLU

Anabilim Dalı : MİMARLIK
Program : YAPI BİLGİSİ

MAYIS 2002

**ASMA KÖPRÜLERDE PROJELENDİRME VE UYGULAMA
TEKNİKLERİNİN LİLLEBAELT VE FATİH SULTAN MEHMET
KÖPRÜSÜ ÖRNEKLERİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
M. Murat E. Erat İBRAHİM MOĞLU
(502961215)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2002

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Bilge IŞIK (İ.T.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nesrin YARDIMCI (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Görün ARUN (Y.T.Ü.)

MAYIS 2002

ÖNSÖZ

Bu çalışmada asma köprüler projelendirme ve yapı mt ekni kleri itibarı ile incelenmiş ve ele alınan örneklerde yer alan farklılık ve benzerlikler sebep-sonuç ilişkisi içinde karşılaştırmayı yapılabilecek şekilde ele alınmıştır. Çalışmalarımda beni yönlendiren ve destekleyen değerli hocam Doç. Dr. Bilge IŞIK'a, zorlandığım zamanlarda bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan dayım Makine Yüksek Mühendisi sayın Halis YOKUŞ'a, kaynaklarının çoğunluğunun temininde bana yardımcı olan Karayolları Genel müdürlüğü, köprüler daire başkanı, İnşaat Yüksek Mühendisi sayın Mehmet BALTACI ve köprüler şube müdürü, İnşaat Yüksek Mühendisi sayın Tamer ŞAHİN'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Mayıs 2000

E. Fırat İBRAHİM MOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	2
1.2. Kapsam	3
1.3. Yöntem	4
2. KÖPRÜLERİN GELİŞİMİ	6
2.1. Köprülerin Sınıflandırılması	9
2.1.1. İlk çağ köprüleri	9
2.1.2. Ortaçağ köprüleri	9
2.1.3. Günümüz köprüleri	9
2.2. Köprülerde Genel Taşıma Prensipleri	10
2.2.1. Kriş köprüler	11
2.2.2. Keçer köprüler	14
2.2.3. Asma köprüler	18
2.2.4. Döğer köprü tipleri	24
2.2.4.1. Konsol köprü	24
2.2.4.2. Hareketli köprüler	25
2.2.4.3. Eğik askılı köprüler	26
2.3. Yapı Malzemelerinin Köprülerin Gelişimine Etkileri	28
2.3.1. Kagir malzeme	28
2.3.2. Ahşap malzeme	29
2.3.3. Çelik malzeme	29
2.3.4. Beton malzeme	30

2.4 Köprülerde Estetik Kavram	30
2.4.1. Oran ve Kontrast	31
2.4.2. Öçek ve çevre ile bütünleşme	31
2.4.3. Form ve fonksiyonellik	31
2.4.4. Düzen ve kişilik	32
2.5 Sonuç	32
3. ASMA KÖPRÜLERİN TASARIMI VE İNŞAATLARI	34
3.1. Proje Temel Esasları	34
3.1.1. Lillebaelt köprüsü proje özeti	34
3.1.2. Fatih Sultan Mehmet köprüsü proje özeti	37
3.2. Asma Köprülerde Tasarım Kriterleri	38
3.2.1. Yükler	38
3.2.1.1. Hareketsiz Yükler	39
3.2.1.2. Hareketli Yükler	39
3.2.1.3. Isı yükleri	40
3.2.1.4. Rüzgar yükleri	40
3.2.1.5. Fren yükleri.	41
3.2.1.6. Deprem yükleri	41
3.3. Sonuç	41
4. ASMA KÖPRÜLERİN ALT YAPISI	42
4.1. Temel Tipleri	43
4.1.1. Yüzeysel temeller	43
4.1.2. Kazık temeller	43
4.1.2.1. Prekast çakma kazıklar	44
4.1.2.2. Yerinde döküm çakma kazıklar	45
4.1.2.3. Yerinde döküm delme kazıklar	45
4.1.3. Kesonlar	45
4.1.4. Lillebaelt köprüsü temelleri	46
4.1.4.1. Tasarım	47
4.1.4.2. İnşaat	53
4.1.5. Fatih Sultan Mehmet köprüsü temelleri	63
4.1.5.1. Tasarım	63
4.1.5.2. İnşaat	67
4.2. Asma Köprülerde Kuleler	70
4.2.1. Lillebaelt köprüsü kuleleri	70
4.2.1.1. Betonarme kulelerin tasarımı	71
4.2.1.2. Betonarme kulelerde donatı kullanımı	73
4.2.1.3. Betonarme kulelerin inşaatı	74
4.2.2. Fatih Sultan Mehmet köprüsü kuleleri	80
4.2.2.1. Çelik kulelerin tasarımı	80
4.2.2.2. Çelik kulelerin imalatları	85
4.2.2.3. Çelik kulelerin montajları	87

4.3. Ankraj Blokları	92
4.3.1. Lillebaelt köprüsü ankraj blokları	93
4.3.1.1. Ankraj blokları fonksiyonları	95
4.3.1.2. Ankraj blokları nda stabilite	96
4.3.1.3. Ankraj blokları nın inşaatı	97
4.3.2. Fatih Sultan Mehmet köprüsü ankraj blokları	101
4.3.2.1. Ankraj blokları nın tasarımı	101
4.3.2.2. Ankraj blokları nın inşaatı	103
4.4. Sonuç	107
5. ASMA KÖPRÜLERDE ÜST YAPI	108
5.1. Ana Kablolar ve Askılar	109
5.1.1. Lillebaelt köprüsü	110
5.1.1.1. Ana kablolar	110
5.1.1.2. Ana kablolar ın mesnetlendirilmesi	113
5.1.1.3. Kenetler ve askı kabloları	117
5.1.2. Fatih Sultan Mehmet köprüsü	121
5.1.2.1. Ana kablolar	121
5.1.2.2. Ana kablolar ın mesnetlendirilmesi	124
5.1.2.3. Askı kabloları ve kenetler	124
5.2. Köprü Döşemesi	125
5.2.1. Lillebaelt köprüsü	126
5.2.1.1. Döşeme tipinin belirlenmesi	126
5.2.1.2. Sandık kirişli döşeme tasarımı	128
5.2.1.3. Askılar, mesnetler ve derzler	131
5.2.1.4. Çelik malzeme seçimi	133
5.2.1.5. Kaynak birleşimi	134
5.2.1.6. Döşeme bloklarının nişalatı	136
5.2.1.7. Yüzey işlemleri	138
5.2.2. F.S.M köprüsü döşeme işalatı	139
5.2.2.1. Döşeme tasarımı	139
5.2.2.2. Askılar, mesnetler ve derzler	141
5.2.2.3. Çelik malzeme seçimi	143
5.2.2.4. Kaynak birleşimi	143
5.2.2.5. Döşeme bloklarının nişatları	144
5.2.2.6. Yüzey işlemleri	147
5.3. Sonuç	149
6. ASMA SİSTEM MONTAJI	151
6.1. Ön Hazırlıklar	152
6.1.1. Döşeme blokları	152
6.1.1.1. Kontrol	152
6.1.1.2. Yükleme ve stoklama	154
6.1.1.3. Ana kuleller	159

6.1.1.4 Hava i yaya yolu	163
6.2 Ana kabl o mont a jı	168
6.2.1. Lillebaelt köprüsü ana kabl o mont a jı	168
6.2.1.1. Ana kabl ol arı n düzenl en mesi	171
6.2.1.2. Kenetler ve askılar	174
6.2.1.3. Kabl o se nerleri nin ayarlan ması	176
6.2.2. Fatih Sultan Mehmet köprüsü ana kabl o mont a jı	178
6.2.2.1. Ana kabl ol arı n düzenl en mesi	186
6.2.2.2. Kabl ol arı n sıkı ştırıl ması ve kenetleri n mont a jı	186
6.3 Döşe me mont a jı	188
6.3.1. Mont a j eki pmanl arı	188
6.3.1.1. Mavna	188
6.3.1.2. Döşe me vinci ve kaldır ma aparatları	190
6.3.2. Döşe me blokl arı nın kaldırıl ması.	193
6.3.2.1. Lillebaelt köprüsü	193
6.3.2.2. F.S. M köprüsü	197
6.3.3. Mont a j sonrası kaynak işle mleri	206
6.3.3.1. F.S. M köprüsü	206
6.4 Sonuç	208
7. KÖPRÜ EKİ P MANLARI	210
7.1. Okorkul uklar	210
7.2. Aydınlat ma	212
7.3. Döşe me Al tı Bakı m Pl atfor mu	212
7.4. Haval andır ma ve Nem Alıcı Tesisat	213
7.5. Geçit Tertibatları	214
7.6. Uyarı ve İletişim Siste mleri	214
7.7. Sonuç	214
8. SONUÇ	216
KAYNAKLAR	218
ÖZGEÇ Mİ Ş	221

KI SALT MALAR

mm	: Mili metre
mm²	: mili metreka
cm	: Santi metre
cm²	: Santi metreka
m	: Metre
m²	: Metreka
μ	: Mikron
kW	: Kilowatt.
Hp	: Beygir gücü
F. S. M	: Fatih Sultan Mehmet.
t/m	: Ton/ metre
t m	: Ton metre
°	: Derece
° C	: Santigrat derece
kgf	: Kilogram kuvvet
kg m	: Kilogram metre
kg/ m	: Kilogram/ metre
kg/ m²	: Kilogram/ metreka
N mm²	: Newton/ mili metreka
maks.	: Maksimum
min	: Minimum
lt	: Litre
m²/daki ka	: Metre/ daki ka
m²/sn	: Metre/ saniye
D. T. C	: Dür toleranslı cıvata
M 24	: Metrik 24 cıvata
D. Kronu	: Dani marka kronu

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Heman düzeyinde donatı çap ve miktarları	66
Tablo 4.2. Yüksek mukavemetli çivata çap ve miktarları	90
Tablo 4.3. Ankraj bloğu beton döküm sayısı ve miktarları	105
Tablo 5.1. Lillebaelt döşeme sistemi teklif tablosu	128

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2 1 : Telford'un Bristol köprüsü önerisi	7
Şekil 2 2 : For na göre açıklık mesafeleri	8
Şekil 2 3 : Doğadan esinlenen köprü formları	10
Şekil 2 4 : Kirişli köprü formuna eğilme momenti düşümleri	12
Şekil 2 5 : Dolu gövdeli kiriş köprüler	13
Şekil 2 6 : Kafes kirişli köprü tipleri	13
Şekil 2 7 : Kemer ve asma köprü çalışma prensipleri	14
Şekil 2 8 : Kagir ve betonarme kemer köprüler	15
Şekil 2 9 : Çelik kemer köprü formları	16
Şekil 2 10 : Krummbach köprüsü	17
Şekil 2 11 : Kemer köprü ana formları	17
Şekil 2 12 : Asma köprü formları	21
Şekil 2 13 : Kafes kirişli ve sandık kirişli asma köprüler	22
Şekil 2 14 : Tacoma köprüsünün çökme sonrası durumu	23
Şekil 2 15 : Severn köprüsü	23
Şekil 2 16 : Miracai boğulu köprüsü	25
Şekil 2 17 : Eğik askılı köprü formları	27
Şekil 2 18 : Hlonlar	27
Şekil 2 19 : Hlon ve döşeme ilişkisi	28
Şekil 3 1 : Lillebaelt köprüsü vaziyet planı ve görünüşü	35
Şekil 3 2 : Fatih Sultan Mehmet Köprüsü vaziyet planı ve görünüşü	37
Şekil 4 1 : Duba ile kazık çakılması	44
Şekil 4 2 : Karada keson imalat metodları	46
Şekil 4 3 : Ana kule ayağı, Jutland	47
Şekil 4 4 : Ana kule ayağı, Jutland- Betonarme sistem ve kazık planı	48
Şekil 4 5 : Temel kazık ebatları ve donatısı	50
Şekil 4 6 : Ana kule ayağının öngerilmesi	52
Şekil 4 7 : Kazık platformu ve kazık çerçevesi	55
Şekil 4 8 : Kazık çakılmasına bağlı darbe / derinlik grafiği	56
Şekil 4 9 : Keson yapımaşamaları	56
Şekil 4 10 : Geçici inşaat yerinde işlemaşamaları	58
Şekil 4 11 : Kazık temel ve taban blokları tasarımı	59
Şekil 4 12 : Funen kesonunun batardodan geçici inşaatla alınması	60
Şekil 4 13 : Basıncılı çalışma hacmi kesiti	61
Şekil 4 14 : Jutland kesonu taban beton dökümaşamaları	62
Şekil 4 15 : E S M köprüsü kule temelleri plan ve kesitleri	64
Şekil 4 16 : Temel donatı ve yüksek mukavemetli ankraj çubukları	66
Şekil 4 17 : Asya kule temeli betonlama aşamaları	69
Şekil 4 18 : Lillebaelt köprüsü ana kule kesit ve görünüşü	71
Şekil 4 19 : Kule sütunu donatı düşümü	73
Şekil 4 20 : Portal kirişler ön gerilim uygulaması	74

Şekil 4 21	: Funen kulesi betonarme i malat aşamaları	75
Şekil 4 22	: Ana kulelerin yapı mısırındaki durumu	75
Şekil 4 23	: Portal kirişlerini i malat aşamaları	77
Şekil 4 24	: Jutland kulesinin geçici olarak askıya alınması	78
Şekil 4 25	: Yan kule kesit ve görünüşü	79
Şekil 4 26	: Jutland ve Funen şantiyelerinin görünüşleri	80
Şekil 4 27	: F S M Kuleleri kesit ve görünüşleri	81
Şekil 4 28	: F S M Kule blokları yatay birleşimi	82
Şekil 4 29	: F S M Kule temelini yapısı	83
Şekil 4 30	: F S M Kule temelinde ankraj çubuğu düzenlemesi	84
Şekil 4 31	: F S M Kule bloğu geçici montajı	86
Şekil 4 32	: Asya kulesi montaj etapları	89
Şekil 4 33	: Lillebaelt köprüsü ankraj blokları plan ve kesitleri	94
Şekil 4 34	: Ankraj bloğu donatı oluşumu	96
Şekil 4 35	: Funen ankrajının ön dolgusu	97
Şekil 4 36	: Ankraj bloğu hafriyat modeli	97
Şekil 4 37	: Ankraj bloğunun tanımlanması ve beton aşamaları	98
Şekil 4 38	: Ankraj hücresi ve ankraj çubuğu oluşumları-Jutland	100
Şekil 4 39	: F S M Köprüsü ankraj blokları plan ve kesitler	102
Şekil 4 40	: F S M köprüsü ankraj blokları betonlama aşamaları	105
Şekil 4 41	: Ankraj çubukları ve bağlantı çerçevesi	106
Şekil 5 1	: Lillebaelt köprüsü ana kablo oluşumu	110
Şekil 5 2	: Ana kablo ve kablo kollarının kesitleri	111
Şekil 5 3	: 35 ton ağırlığında kablo kolusarmalı	112
Şekil 5 4	: Ana kule sekerinin i malatı	114
Şekil 5 5	: Ana kule sekeri kesit ve görünüşleri	115
Şekil 5 6	: Yan kule sekeri	116
Şekil 5 7	: Asma sistem detayı	118
Şekil 5 8	: Askı kablosu kesiti	118
Şekil 5 9	: Askı kablosu, ana kablo ve döşeme bağlantısı	120
Şekil 5 10	: F S M Köprüsü ana kablo kesiti	122
Şekil 5 11	: Ana kablounun kablo papuçlarını yerleşimi	123
Şekil 5 12	: Çelik tel birleşimi	123
Şekil 5 13	: Kule sekeri plan ve görünüşü	124
Şekil 5 14	: Severn köprüsü döşeme kesiti	126
Şekil 5 15	: Lillebaelt köprüsü kafes kirişli döşeme teklifi	127
Şekil 5 16	: Lillebaelt köprüsü sandık kirişli döşeme teklifi	127
Şekil 5 17	: 24 m uzunluğunda i kili montaj bloğu modeli	129
Şekil 5 18	: Döşeme bloğu sistem detayı modeli	130
Şekil 5 19	: Yan kule ve ana kulelerin döşeme blokları ve birleşimi	133
Şekil 5 20	: Döşeme bloklarının fabrikada üretilmesi	136
Şekil 5 21	: Döşeme bloklarının geçici montajı ve yüklenmesi	137
Şekil 5 22	: F S M Köprüsü döşeme blokları en kesiti	140
Şekil 5 23	: Rüzgar papucu ve salıncak mesnet	142
Şekil 5 24	: Çenleşme derzi	142
Şekil 5 25	: Kaynak işlemleri	144
Şekil 5 26	: Döşeme bloklarına ait panolar	145
Şekil 5 27	: Döşemelerin i malat düzeyinde montaj aşamaları	146
Şekil 6 1	: Fabrika i malatı sonrası deneysel montajı	153
Şekil 6 2	: Lillebaelt köprüsü inşaatında kullanılan navna	155

Şekil 6 3	: F S M Köprüsü inşaatında kullanılan navna	156
Şekil 6 4	: Fabrika yüklemeli namı	156
Şekil 6 5	: F S M Köprüsü döşeme bloklarının yüklem aşamaları	157
Şekil 6 6	: Lillebaelt köprüsü şantiyesi döşeme blokları stok sahası	158
Şekil 6 7	: Lillebaelt köprüsü kule tepesi vinci	160
Şekil 6 8	: F S M Köprüsü kule tepesi vinçleri	160
Şekil 6 9	: Lillebaelt köprüsü ana kule semenin montajı	161
Şekil 6 10	: Kablo navnası	163
Şekil 6 11	: Lillebaelt köprüsü havai yaya yolu detayı	164
Şekil 6 12	: Lillebaelt köprüsü havai yaya yolu ve fırtına halatları görünüşü ve planı	164
Şekil 6 13	: F S M Köprüsü havai yaya yolu plan görünüş ve detayları	165
Şekil 6 14	: Lillebaelt köprüsü enine köprüleri görünüşü	166
Şekil 6 15	: F S M köprüsü fırtına halatları	167
Şekil 6 16	: Çelik kule geri çekme sistemi	168
Şekil 6 17	: Lillebaelt köprüsü kablo kolları stok sahası	169
Şekil 6 18	: Jutland ankrajı kablo montaj düzeni ve soket arabası	169
Şekil 6 19	: Soket taşıyıcısına düzeni ve klavuz tertibatı	170
Şekil 6 20	: Funen ankrajı kablo montaj aşamaları	170
Şekil 6 21	: Termostat yerleşim düzeni	172
Şekil 6 22	: Kablo kolu yerleşim düzeni	172
Şekil 6 23	: İki kablo kolunun montaj sonrası ayarlanması	173
Şekil 6 24	: Kenet taşıyıcısı ve kenet montajı	175
Şekil 6 25	: Kenet civatalarının sıkılması ve taşıma ekipmanı	175
Şekil 6 26	: Ana kule semerinin ayarlanması	177
Şekil 6 27	: Yan kule semerinin ayarlanması	178
Şekil 6 28	: F S M Köprüsü havadan tel taşıma sistemi	179
Şekil 6 29	: Tel taşıma sistemi ekipmanları detay görünüşü	180
Şekil 6 30	: İlk hareket teçhizatı	180
Şekil 6 31	: Cerve vinci yerleşimi	181
Şekil 6 32	: Boşaltma teçhizatı	182
Şekil 6 33	: A B C Avrupa ankrajı tel montaj aşamaları	183
Şekil 6 34	: A B Asya ankrajı tel montaj aşamaları	184
Şekil 6 35	: Asya kulesi orta açıklık yönünde tel eklenmesi işlemi	185
Şekil 6 36	: Tel eklem detayı	185
Şekil 6 37	: Tel sıkıştırma sistemi	187
Şekil 6 38	: Lillebaelt köprüsü döşeme montajı sırasında navnanın sabitlenmesi	189
Şekil 6 39	: Kule tepesinde yer alan döşeme vinçleri ve kaldırma aparatı	190
Şekil 6 40	: F S M köprüsünde döşeme montaj ekipmanlarının genel düzeni	192
Şekil 6 41	: Lillebaelt köprüsü döşeme kaldırma sistemi ve bağlantı parçaları	193
Şekil 6 42	: Orta açıklıkta döşeme bloklarının kaldırılması	194
Şekil 6 43	: Montaj sürecinde kalıcı bağlantı yapılmadan blokların durumu	195
Şekil 6 44	: Yan açıklıkta döşeme bloklarının kaldırılması ve taşınması	196
Şekil 6 45	: F S M köprüsü döşeme blokları montaj düzeni	198
Şekil 6 46	: Döşeme bloklarının navnadan boşaltma işlemi	199
Şekil 6 47	: Deniz üzeri blokların montaj aşamaları	201
Şekil 6 48	: Avrupa yakası kara üzeri blokların montaj düzeni	203
Şekil 6 49	: Kara üzeri blokların yatay taşıma yöntemi ile taşınması	204
Şekil 6 50	: Uç blokların yerleştirilmesi	205

Şekil 6.51	: Genleşme derzini yerleştirilmesi.	206
Şekil 6.52	: Montaj sonrası kaynaklı birleşim sırası.	207
Şekil 7.1	: Lillebaelt ve F. S. M köprülerine ait otokorkuluklar	211
Şekil 7.2	: Döşeme altı bakım platformu	212
Şekil 7.3	: Döşeme blokları havalandırma ve nemalıcı tesisatları.	213

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, dünyada ve ülkemizde ihtiyacı oldukça artan ve kullanımı yaygınlaşan asma köprülerinin araştırılması ve önemi halen tam olarak kavranmamış olan bu sistemlerin, proje ve inşaat süreçlerinin incelenerek konuya dikkat çekebilerek ve bu sistemlerin ülkemizdeki bilgi birikimi ve teknoloji düzeyi ile konuyla araştırmalarının artırılması ile yapılabileceğini vurgulamaktır.

Tezin geniş özeti olan; amaç, kapsam ve yöntemi belirlendiği birinci bölümden sonra ikinci bölümde, köprülerin tarih içindeki gelişmeleri ve köprü tiplerinin açıklanması ile köprüler hakkında bir öngörüş oluşturabilmek amaçlanmıştır.

Üçüncü bölümde, asma köprülerinin tasarımı esasları çalışmanın esasını oluşturan Lillebaelt ve Fatih Sultan Mehmet köprüleri dikkate alınarak açıklanmıştır.

Dördüncü ve beşinci bölümlerde ise sırası ile asma köprülerde yer almakta olan alt yapı ve üst yapı sistemleri, projelendirme, inşaat ve uygulama yöntemleri ile işlem hiyerarşisine sadık kalınarak, Lillebaelt ve Fatih Sultan Mehmet köprülerinde uygulanan yöntemler, benzerlik ve farklılıkları dikkate alınarak açıklanmış, altıncı bölümde ise üst yapı sistemini oluşturan kablo ve döşeme montaj süreci, daha kapsamlı ve sistem bütünlüğü detaylı olarak açıklayabilmek amacıyla ile beşinci bölümden ayrı olarak ele alınmıştır.

Yedinci bölümde kısaca değinilen köprü ekipmanlarından sonra sonuç bölümünde, asma köprülerinin günümüzde sahip oldukları teknoloji, tasarımı ve uygulama teknikleri belirlenmiş ve ülkemizde bu konu ile ilgili eksiklikler belirtilerek konuya olan ilginin artırılması gerekliliği vurgulanmaya çalışılmıştır.

RESEARCHMENT OF THE DESIGN AND THE CONSTRUCTION TECHNIQUES OF THE SUSPENSION BRIDGES BY THE LILLEBAELT AND FATİH SULTAN MEHMET BRIDGES EXAMPLES

SUMMARY

In this thesis, according to the development and the necessities in the world

and in our country, suspension bridges has been studied by researching their design and construction techniques in order to take attention on their value and importance, and to prove that they can be successfully be design and construct in our country depending on the researches if enough can be made.

After the first section in which the large summary of the thesis is placed, in the second section the historical development and the types of the bridges have been researched

In the third section, the design basis of the contemporary suspension bridges have been researched according to the Lillebaelt and Fatih Sultan Mehmet bridges which are the basic examples of the study.

In the fourth and the fifth sections, infrastructures and superstructures of the suspension bridges are examined according to their design, manufacturing and assembling features without ruining the construction hierarchy and with stating the similarities and differences.

In the sixth section the cable and stiffening girder assembling process have been examined in order to have an extend and to provide a continuous expression, separated from the fifth section.

After the seventh section in which the equipment of the suspension bridges are examined shortly, in the last section as a conclusion of the study, the technology, the design and the construction techniques of the suspension bridges and the deficiencies in our country is determined according to the topics in order to take attention on the subject.

1. GİRİŞ

Köprü yapımı, insanlık tarihi nin başlangıcından günümüze kadar geçen süreç içinde, doğaya ve insanın hayal gücüne karşı en gözele ve dikkat çekici meydan okuma olarak belirnektedir. Köprüler ile geçilen mesafeler, sürekli artış göstermiş, insanoğlu yaratıcı hayal gücü ile kendi sınırlarını aşmış ve halen aşmaya çalışmaktadır. Tamamlanan her köprü, işlevinin yanı sıra tasarımı ve yapımcılarına, aşırı bir tatmin ve takdir duygusu aşılanmakta ve sınırları zorlayıcı çözümlere teşvik etmektedir.

Günümüzde mimarlık ve mühendisliğin bilgi ve tecrübe birikimi, fikir ve uygulama bakımından, ahenkli olarak en yoğun düzeyde modern geniş açıklıklı köprülerde görülmektedir. Yapım süreci ile alındığında, geniş açıklıklı köprüler, özellikle de geniş açıklıklı asma köprüler, diğer yapılara oranla daha zor ve karmaşık nitelikte işlemlerin bütününden oluşmaktadır. Bu süreçte kararlar daha fazla risk içermekte, bütünsel işlemler, neredeyse kusursuz ve eşgüdümlü olarak, ayrıca geniş bir önsezi ile gerçekleştirilmek zorundadır, zira hata yapılması, sıradan bir yapıya göre telafisi ve geri dönüşü zor hatta imkansız sonuçlar oluşturabilmektedir.

Köprüler; en eski ve ilkel örneklerden, en modern ve geniş açıklıklı olanlarına kadar geniş bir yelpazede ele alındığında, doğadan esinlenen; kiriş, kemer ve asma sistemler olarak 3 ana form ve bunların kombinasyonlarından oluşmaktadır. Ancak müziği oluşturan 7 ana notanın ahenkli ve çok çeşitli olarak birbirinden farklı, sayısız besteyi oluşturması gibi köprülerde 3 ana formu esas alınarak çok çeşitli konseptlerde, tasarımı ve uygulayıcıların hayal gücü ve bilgi birikimlerinin sınırlarına bağlı olarak oluşturulabilmektedirler. Bu çeşitlilik ve meydan okumayı destekleyici olarak malzeme ve montaj tekniklerinin aynı, hayal gücü ve bilgi birikimi ile bu oluşuma katkıda bulunması da, gelişimi destekleyici tamamlayıcı unsurların başında gelmektedir.

1.1. Amaç

Hızlı nüfus artışı ve buna bağlı olarak yeni yerleşim alanları, toplumsal yaşamın temel gerekliliklerinden olan ulaşım olan ihtiyacı arttırmakta ve büyük doğal engellerin yer aldığı coğrafyalarda geniş açıklıklı köprülerini inşa edilmesi, kesintisiz bir ulaşım için adeta bir zorunluluk halini almakta ve bu ihtiyaca yönelik olarak en ekonomik çözüm geçilen açıklığın mesafesinin 600- 1000 m ve daha üzerinde olması durumunda asma köprüler ile sağlanabilmektedir.

Ülkemizdeki hızlı nüfus artışı ve coğrafik koşullar bir arada incelendiğinde ve ekonomik ilerlemelere ve yatırımlara olan ihtiyaç dikkate alındığında, bu parametrelerin birbiriyle dengeli bir iletişim kurmaları için öncelikle kesintisiz ulaşım ağına olan ihtiyaç ortaya çıkmakta ve geniş açıklıkların asma sistemlerle geçilmesi olasılığı yüksek bir alternatif olarak belirlenmektedir. Halen Çanakkale Boğazı ve İzmit Körfezi'nde, ayrıca İstanbul Boğazı'na 3. asma köprüünün inşa edilmesi tartışılmakta ve kuvvetli birer olasılık olarak görülmektedir. Ancak 70 ve 80'li yılların sonlarında İstanbul Boğazı'na iki adet ve benzer nitelikte köprüünün inşa edilmiş olması ve 3 adet yeni alternatif olasılığının bulunmasına rağmen ülkemizde sahip bulunan bilgi ve tecrübe birikimi, batılı gelişmiş ülkeler ve Japonya'nın teknolojisi ile karşılaştırıldığında oldukça zayıf kalmakta ve mevcut bilgi birikimi ve tecrübenin değerlendirilmesi ve geliştirilmesi yerine, teknoloji ithal edilmesi ve var olan değerler yitirilmiştir.

Yukarıda belirtilen ihtiyaçlar ve olumsuz şartların aşılabilmesiye yönelik olarak öncelikle köprülerin özellikle de geniş açıklıklı asma köprülerinin ne olduğu, tarihsel gelişimini, tasarım ve uygulama kriterlerinin hangi özelliklere bağlı olduğunu bilmek ve incelemek, konuya genel olarak bakabilmek ve ana konseptleri ve kritik noktaları kavramak gerekmektedir.

Bu çalışmada amaç, modern anlamda günümüzde uygulanan asma köprülerinin konsept ve uygulama tekniklerinin, işlem sırasındaki hiyerarşiye sadık kalınarak incelenmesi ve sistemin bütününe hakim olabilmesi için genel hatları ile ele alınarak asma köprülerinin ne olduğu hakkında fikir verebilmektedir. Amaca yönelik olarak sistem genel hatlarıyla ele alındığından, bu anlamda teorik kavramlar ve matematiksel analizler yerine, konseptler ve karar aşamaları ile uygulamalar,

mümkün olan en geniş anlamda kaynak elde edilebilen, Dani marka’da inşa edilmiş olan Lillebaelt ve ülkemizde inşa edilmiş olan Fatih Sultan Mehmet köprüleri ile incelenecektir.

1.2 Kapsam

Bu çalışmada incelenecek ve yanıt aranacak kavramlar şunlardır:

- Köprü nedir ve tarihsel süreç içinde gelişimi nasıl olmuştur?
- Çeşitli köprü tiplerinin kullanıma amaçları ve formların geçilen açıklığa göre avantaj ve dezavantajları nelerdir?
- Formlara göre taşıma prensipleri hangi özelliklere sahiptir?
- Teknoloji ve malzeme alanındaki ilerlemeler, çeşitli köprü tiplerine nasıl anlam ve eleman düzeyinde nasıl etki etmiştir?
- Geniş açıklıklı asma köprüler gelişim sürecinde hangi aşamalardan geçmiştir?
- Asma köprülerin alt yapısının oluşturulmasında tasarım ve uygulama kriterleri nelerden oluşmaktadır ve hangi durumlarda farklılaşmaktadır?
- Asma köprülerin üst yapısının oluşturulmasında tasarım ve uygulama kriterleri nelerden kaynaklanmakta, benzerlik ve farklılıklar hangi durumlarda oluşmaktadır?
- Asma köprülerin üst yapısının inşaat ve montajı nasıl yapılmakta ve hangi işlemlerden oluşmaktadır?
- Sistemin bütünlüğüne yönelik olarak yardımcı ekipmanlar ve kullanım amaçları nelerdir?

Geniş açıklıklı asma köprüler, Lillebaelt ve F.S.M köprüleri incelendiğinde, alt yapı oluşumlarında oldukça farklı tasarım ve uygulama tekniklerine sahip olmalarının yanı sıra, üst yapı oluşumlarında oldukça benzer tasarım ve uygulamalara sahip olduğu görülmektedir.

Özellikle alt yapıda karşılaşılan farklılıklar, her iki örneğin birbirine olan avantajlarından ziyade, coğrafik ve topografik koşulların, tasarıma olan doğrudan etkisi olarak belirilmiş ve bu farklılıklar, asma köprü üst yapı sisteminin neredeyse bütün örneklerde benzer olan konseptinin oluşturulabilmesi için topografik ve

coğrafiik koşulların, asma sistemin kurulabilmesi amacı ile farklı ancak zorunlu oluşumlar dahilinde çözülmesini gerektirmiştir. Bu amaçla yönelik olarak seçilen örneklerin alt yapıları oldukça farklı tasarımı ve uygulamaları ile incelenerek kapsama dahil edilmiştir.

Asma köprülerin üst yapısı, imalat ve montaj kriterleri bakımından özellikle ana kablounun oluşumunda bir miktar farklılaşmış, ayrıca 3 açıklıklı asma sistem olan Lillebaelt ve tek açıklıklı olan F. S. M köprüleri, asma sistemi ile geçilen açıklıkların farklılıkları ile ele alınarak incelenmesi zenginleştirilmiştir.

Lillebaelt köprüsünde, geçiş tanımlayıcı bir sistem olan viyadükler, asma sistem kapsamında olmadığından açıklamalarda geniş anlamda yer almamış sadece asma sistem ile birleşim noktalarında oluşan etkileri bakımında incelemeye dahil edilmişlerdir.

1.3 Yöntem

Çalışmanın ikinci bölümünde; köprülerin tarih sürecindeki gelişmeleri incelendiğinde, köprü tasarımı ve uygulamalarının hangi sebeplere bağlı olarak günümüzdeki durumlarına ulaştıklarının yanı sıra, geniş açıklıklarda neden asma sistemin halen tek alternatif olduğu taşıma kapasitesi, tasarım kriterleri, uygulama yöntemleri ve ekonomik olarak ifade edilmesine çalışılmıştır.

Bu kavramların belirlenmesinden sonra asma köprüler; alt yapı, üst yapı ve üst yapının montajı bakımından ayrı olarak ancak inşaat hiyerarşisi ve birbirleri ile ilişkileri dikkate alınarak açıklanmıştır.

Açıklamalarda, Lillebaelt ve F. S. M köprüleri, genel de kendi içlerinde ayrı olarak ele alınmış, ancak tasarımı ve uygulamadaki farklılıklar, birbirlerine olan üst ünlüklerinin olmadığı ve içinde bulunan şartların gereği olarak tutarlı ve olması gereken en doğru çözümler olarak dikkate alınarak, başka uygulamalarda, hangi türde çözüm üretilmesi gerekebileceği vurgulanmak üzere, elde edilebilen kaynaklar yardımı ile açıklanmaya ve konu ile ilgili düşüncelerin geniş bir açıyla yaymaya çalışılmıştır.

Çalışmanın geneli ile alındığında, asma köprüler ile üretilebilecek çözümlerin, önce sistemin oluşturulması ve buna yönelik olarak pek çok farklı çözüme gidilebileceği ve gerek tasarımı gerekse uygulama yöntemi olarak sistemin gelişme ve yeniliklere açık olduğu görülebilmektedir.

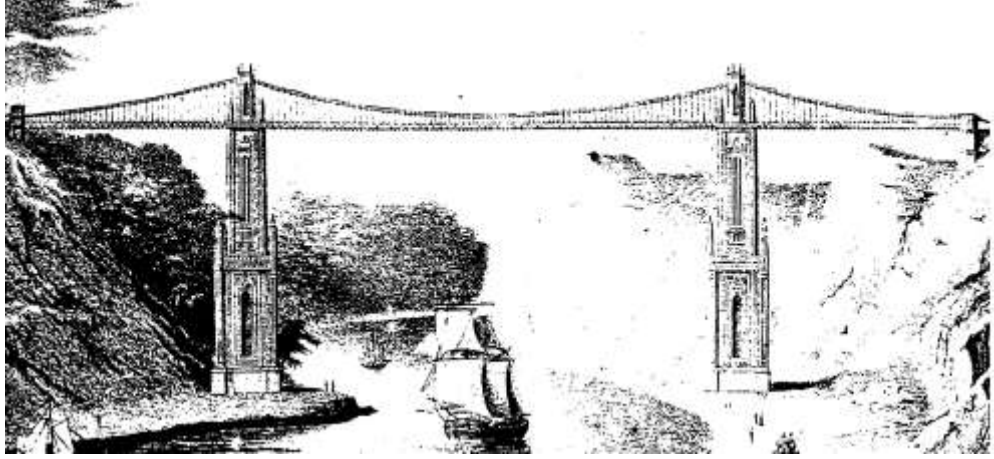
2. KÖPRÜLERİN GELİŞİMİ

Köprüler, ilk çağlardan günümüze kadar geçen süreç içinde insanlara su, vadi vs. gibi doğal engellerin aşılması için çözüm oluşturan yapılar olarak kullanılmışlardır. Başka bir deyişle köprü insanların temel ihtiyaçlarından birisi olan ulaşımı için doğal engellerin aşılmasını sağlayan bir geçittir.

Eksiksiz olarak tanımlanabilecek bir köprü, gereksiz ayrıntılardan arındırılarak, basit ve sade olarak çözülmüş olarak fonksiyonel performansa ve dengeli kütle dağılımına sahip olması, zarif görünümünün ve düzenli hatlarının yanı sıra oransal olarak çevresi ve geçilen açıklık ile uyum içinde çevresi bütünleşmiş olmalıdır [1].

Sahip olması gereken bu özelliklerden dolayı köprüler diğer tüm yapılardan ayrılmaktadırlar. Bir bina, pek çok farklı özelliği ve sistemi (ısıtma, havalandırma, taşıyıcı sistem, su tesisatı, izolasyon, kaplama vs. gibi) bünyesinde bulundurmakta ve bu sistemler eş değerli nitelikte entegre olarak bütünü oluşturumaktadırlar. Köprülerde ise sistem ve performans baskın olarak strüktüre bağlıdır ve form neredeyse tamamen taşıyıcı sistem tarafından oluşturulmuştur. Diğer yapıların bünyesinde yer alan detaylar köprülerde gereksiz eklentiler olarak değerlendirilmektedir. Form oluşumuna yönelik her detay köprünün kişiliğini zayıflatarak, estetik değerini artmasından çok azalmasına sebep olmaktadır [2] (Şekil 2.1).

İnsanlar tarih boyunca engelleri aşmak ve ulaşımı için pek çok yol kullanmış ve fikir üretmişlerdir. Köprü fikri bu konseptlerden biri olarak tekerleğin bileicadından önce karşımıza çıkmaktadır. Devrilmiş veya kesilmiş ağaç gövdeleri, küçük dereleri geçmekte kullanılan en eski ve ilkel köprüleri oluşturmuşlardır. Daha sonraları sarmaşıklardan halat yapılarak asma köprüler ve heyelanlar sonucunda kemer köprü fikirleri ortaya çıkmıştır. Bu ilkel örnekler zamanla yerlerini ahşap, taş, metal ve beton köprülere bırakmışlardır.



Şekil 2.1 Telford'un Bristol köprüsü önerisi [2]

Tarihte bilinen en eski köprü, Nî nehri üzerinde, MÖ 2650 yılında 1. Krallık döneminde yapılmıştır. Ancak herhangi bir çizim veya tasvir elde bulunmamaktadır. MÖ 783 yılında Mezopotamya'da Fırat nehri üzerinde inşa edilen köprünün detayları bulunmuştur. Bu köprü, taş ayaklar üzerinde yer alan ahşap platformdan ibaret olup, güvenlik gerekçesi ile kaldırılabilir bir özellikte inşa edilmiştir [1].

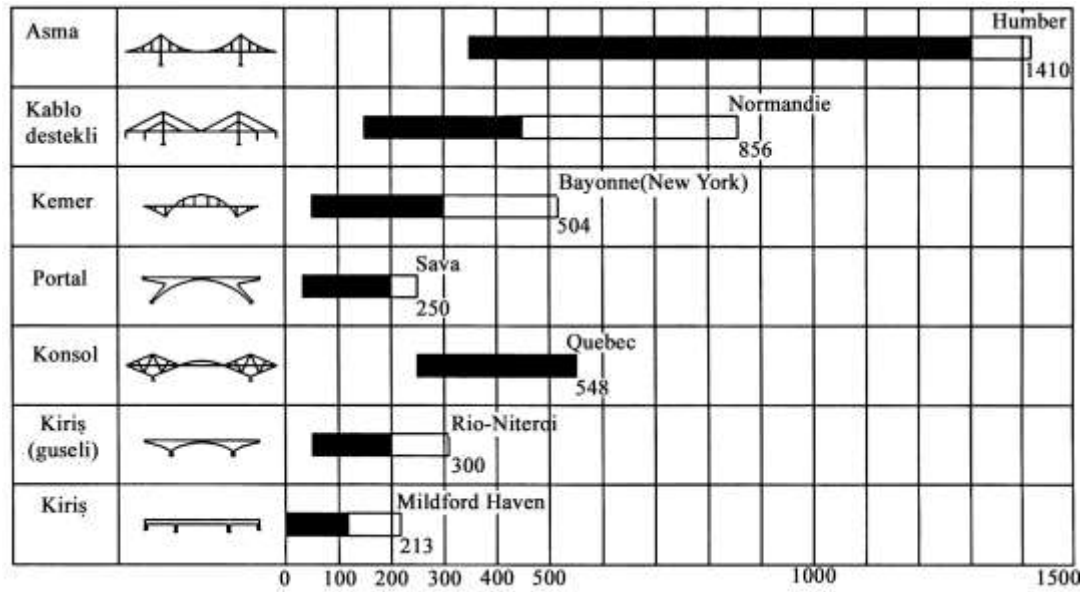
Köprülerin tarihsel gelişimi incelendiğinde, eski çağlarda köprülerin sivil yapılardan çok askeri amaçlar dikkate alınarak inşa edildiği görülmektedir. MÖ 800'lü yıllarda Herodot ve Homeros, şişirilmiş derilerin üzerine köprü inşa edildiğinden bahsetmişlerdir. MÖ 336 yılında Büyük İskender'in Hindistan seferinde benzer şekilde köprüler kullanılmıştır.

Keçer ile açıklık geçilmeye başlanması köprü yapısında önemli bir kilometre taşı olmuştur. Bu sayede, taş ve tuğla kullanımı ile birlikte daha sağlam, daha dayanıklı ve kalıcı köprüler inşa edilebilmiştir. Bu form Pers, Roma ve Mezopotamya medeniyetlerinin öncesinde bilinmemektedir. Eski çağlardan günümüze kalan tek köprü MÖ 350 yılında Babilliler döneminde inşa edilmiştir. Bu köprüde her biri 7.5 m açıklık geçen 20 keçer ile toplam 380 m açıklık geçilmiş ve köprü ayakları 8 m kalınlıkta tasarlanmıştır.

İlk asma köprüler, Yunan ve Roma dönemlerinde kullanılmışlardır. Bu köprüler aynı zamanda ilkel teleferikler olarak da tanımlanabilecek şekilde, sabit halat üzerinde yer alan bir sepetin, çekme halatı yardımı ile açıklığın iki tarafı arasında hareket ettirilmesi ile oluşturulmuş sistemler olarak düşünülmüşlerdir.

Köprü tasarımı ve yapım tekniklerinin sürekli olarak gelişmesi, taşıyıcı sistem oluşturulmasına yönelik analiz ve hesap yöntemlerinin gelişmesi ve önemlerinin kavranması ve buna paralel olarak yapı malzemelerinin, prefabrikasyon ve montaj tekniklerinin gelişimi ve kullanımı ile mümkün olmuştur [1].

Zaman içinde taş ve ahşap, yerlerini dökme ve dövme demire bırakmışlar, sonrasında ise çelik malzemenin gelişimi ile köprü yapısında yeni bir döneme başlanmıştır. Dökme demirin çekme mukavemetinin düşük olması sebebi ile bu malzemenin kullanımı sınırlı olarak kemer köprülerde olarak bulunmaktadı. Çeliğe ek olarak betonarme ve sonrasında öngerme betonu kullanımı, ortalama 200 metre için daha ekonomik çözümler getirmiştir. Betonarme ve öngerme sistemler, ortalama 400 metre açıklıklarda eğik kablolu olarak ekonomik ve uygulanabilir sistemler olmakla beraber 600 m'yi aşan açıklıklarda halente mantıklı çözümler olarak köprülerdir [2] (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Forma göre açıklık mesafeleri [7]

2.1. Köprülerin Genel Sınıflandırılması

2.1.1. İlkçağ köprüleri

- a) Askı halatları ve kayar sepet
- b) Taş köprüler
 - Doğal veya yapay yürüme taşları
 - Basit köprü ayağı veya yürüme taşlarına mesnetlenmiş taş döşemeler
 - Konsol taş döşemeler
- c) Ahşap köprüler
 - Devrilmiş ağaç gövdeleri
 - Yapay olarak yerleştirilmiş ağaç veya kütükler
 - Basit köprü ayağı veya yürüme taşlarına mesnetlendirilmiş ahşap kirişler

2.1.2. Ortaçağ köprüleri

- a) Taş köprüler
 - Doğal taş kemerler
 - Bırdırma taş kemerler
 - Kâgir kemer
 - Basit köprü ayağı üzeri ne taş döşeme
- b) Ahşap köprüler
 - Kâgir veya ahşap köprü ayağı üzeri ne ahşap kiriş
 - Ahşap konsol
- c) Dökme demir kemerler
- d) Yüzer köprüler

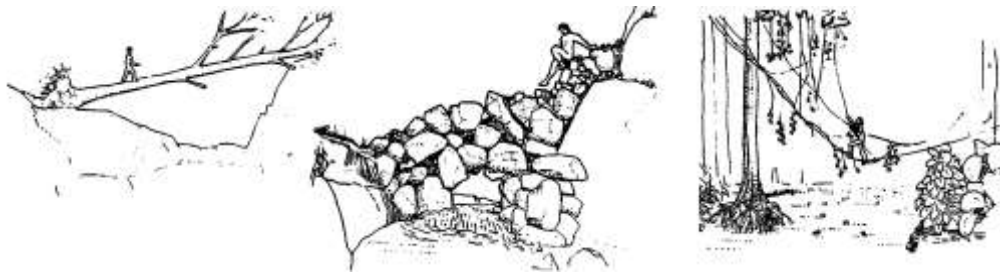
2.1.3. Günümüz köprüleri

- a) Kâgir veya betonarme kemer köprüler
- b) Betonarme veya öngermeleli kirişli köprüler
 - Konsol
 - Sürekli kirişli
 - Çerçeve sistemli
 - Basit kirişli

- c) Kompozit köprüler, sürekli veya süreksiz, çelik kiriş ve betonarme döşemeli köprüler
- d) Çelik köprüler
 - Dolu gövdeli bileşik kiriş
 - Makas
 - Dengelenmiş konsol
 - Sürekli kiriş
 - Çerçeve
 - Hareketli veya dubalı
 - Basit kirişli
 - Keçer
- e) Asma köprüler
- f) Kablo destekli köprüler

2.2 Ana köprü formları

Köprüler genel olarak kiriş, keçer ve asma sistemler olarak 3 ana strüktürel formdan oluşturulmaktadır. Her üç form asırlar boyunca geçerliliğini korumuş ve genel prensipleri sabit kalarak, teknolojik gelişmelerin yardımı ile günümüzde de kullanılmaktadır. Zamanla değişen tek şey hesap yöntemleri, inşaat teknikleri ve malzeme olmuştur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Doğadan esinlenen köprü formları [2]

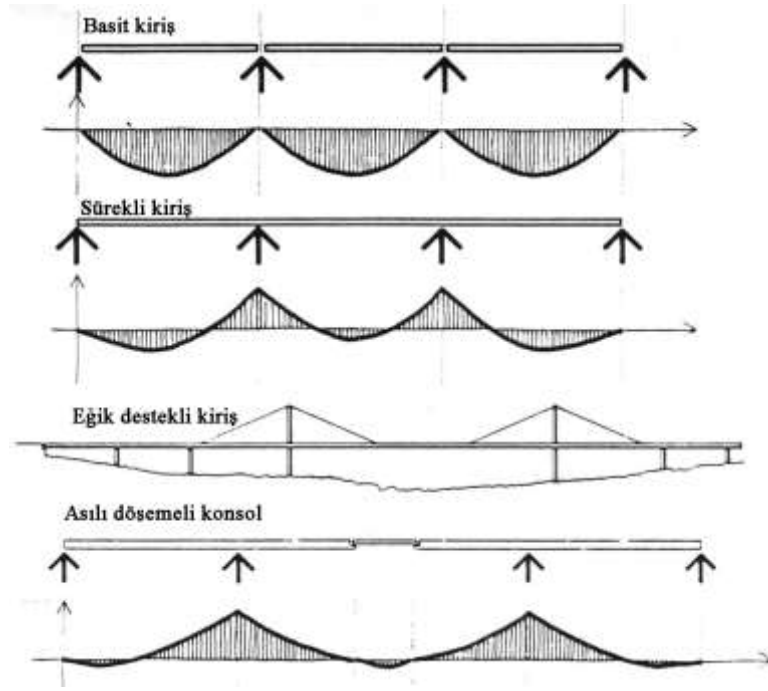
2.2.1. Kiriş Köprüler

Kirişlerin üzerindeki ilk çalışmalar ve denge yasaları Archi medes (MÖ 287-212) tarafından ele alınmıştır. Ancak sonraki devirlerde Romalıların giriş köprüler yerine kemer köprüleri tercih etmeleri sebebi ile bu konudaki araştırmalar yavaşlamış ancak Rönesans döneminde, özellikle Leonardo Da Vinci (1452-1519) tarafından tekrar üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Kirişlerin mukavemeti ile ilgili ilk tanımlamalar Galileo (1564-1642) tarafından gerçekleştirilmiştir. Galileo'nun açıkladığı yasalar[2];

- Basınca çalışan taşıyıcı elemanın mukavemeti, uzunluk ve kesit alanına bağlıdır. (Mutlak mukavemet)
- Çekmeye çalışan bir taşıyıcı elemanın mukavemeti, geçilen açıklığa bağlı olarak derinliğinin karesi ile orantılıdır. (Galileo eğilme gerili minden dolayı bütün kesitin çekmeye çalıştığını düşünmekte idi).
- Taşıyıcı sistemler çok büyük ebatlarda yapılmalıydı, zira kendi ağırlığından dolayı çökebilirlerdi.
- Ağırlığı azaltmak için boşluklu girişler kullanılmalıydı.

Galileo'dan sonra 18. Yüzyılda Robert Hooke (1635-1703) ve Mariotte (1620-1684) bu süreçte çalışmalar yapmışlardır ve eğilme momentleri üzerinde yoğunlaşmışlardır. Hooke, kuvvet ile mukavemet bağlantısını lineer olarak düşünmekte idi. Ancak daha sonra bu bağlantının yüksek gerilmelerde ve değişik malzemelerde belirli bir noktaya kadar gerçekleştiği belirlenerek Hooke yasası kısmen çürütülmüştür [2] .

Mesnet sistemlerinin gelişmesi ve çeşitlenmesi sayesinde eğilme momentlerinin dağılımlarında farklı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 2.4). Çok sayıda mesnet kullanılarak ve mesnetler arası açıklıklar azaltılarak eğilme momentlerinin azaltılabileceği tespit edilmiştir [2].



Şekil 2.4 Kirişli köprü formuna eğilme momenti oluşumları [2]

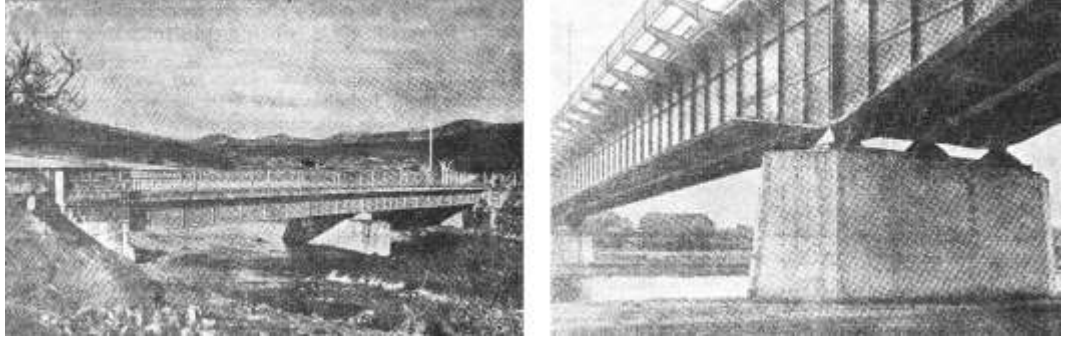
Uzun geçişler ve ağır yükler altında kirişin kendi ağırlığı önemlidir ve azaltılması gerekmektedir. Kesitten etkin olarak faydalanabilmek için malzemenin basınç ve çekme kuvvetlerinin en yoğun olduğu alt ve üst noktalarda toplanmış ve başlıklı kirişler ortaya çıkmıştır. Bu tip kirişlerin beton veya çelik malzeme kullanılarak oluşturulabilirler ancak tek başlarına kullanımları ile sınırlı çözümler getirilmesinden dolayı beton malzeme kullanıldığında donatı veya germe kabloları ile, çelik malzeme kullanıldığında ise farklı kesitte çelik profiller ve birleştirme yöntemleri kullanılarak etkin sonuçlar elde edilebilmektedir [3].

Açıklık büyüdükçe kiriş gövdesinin düşey doğrultuda uzaması ve kesitin güçlendirilmesi gerekmektedir. Fabrikada üretilen standart çelik profillerin yeterli olmadığı durumlarda farklı tip ve ebatlarda çelik profil ve levhaların biraraya getirilmesi ile alt ve üst başlıklarının arası dolu olan kirişler elde edilebilir. birleştirme yöntemi olarak önceleri perçin ve bulon sonrasında ise kaynak teknolojisini geliştiren dolu gövdeli bileşik kirişlerin geniş anlamda kullanıma olarak vermiştir [3].

Genel olarak 25-30 m açıklıklara kadar ekonomik olarak tercih edilebilirler. Bu mesafe demiryolu köprülerinde 40 m, karayolu köprülerinde 70 m açıklığa kadar çıkabilmektedir. En uzun örnek ise Dresden’de, Elbe nehri üzerinde yer alan

Kaiserbrücke köprüsüdür. Köprünün geçiş mesafesi 285 m olup maksimum gövde yüksekliği 7.4 m'tir [3].

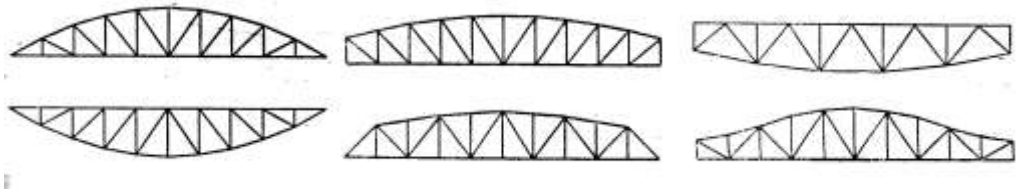
Dolu gövdeli kirişlerin bakım ve işletme maliyetleri düşüktür ancak geçilen açıklığın artmasına bağlı olarak ölü yüklerinin ve rüzgar yüklerine karşı yüzey alanının artması en önemli dezavantajlarından [2] (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Dolu gövdeli kiriş köprüler [3]

Kirişli köprülerde, geniş açıklıklar geçilirken malden tasarruf sağlanması ve ağırlığın azaltılması için daha etkin bir yöntem olan kafes kirişler kullanılmaktadır. Kafes kirişler alt başlık, üst başlık ve örgü çubuklarından oluşturulurlar [1].

Çubukların birleştiği noktalar düğüm noktaları olarak adlandırılırlar. Kaynak, bulon veya perçinle birleştirilirler. Kuvvetler düğüm noktasına etkilendiği zaman bütün çubuklar basınç ve çekme gerilmelerine karşı çalışırlar [3] (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Kafes kirişli köprü tipleri [3]

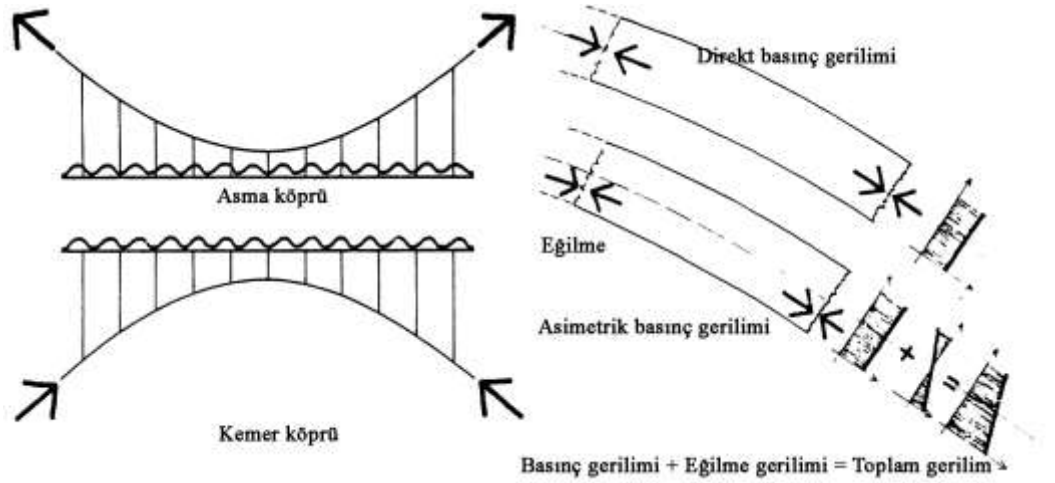
Kafes kirişler, çok mesnetli olarak hazırlanabilirler. Dolu gövdeli kirişlerde yer alan kurallar, kafes kirişlerde de geçerlidir. Açıklıklar büyüdükçe ve hareketli yükler arttıkça kafes sisteminde artan kuvvetlerin karşılanması için örgü çubukların kesitleri büyümeye başlar. Çok mesnetli ve mafsallı Gerber kafes kirişleri, dolu gövdeli kirişler ile aynı mantık çerçevesinde ele alınmaktadır [3].

Kiriş köprüler, günümüzde tek başlarına geniş açıklıklarda yeterli olmadıkları için ke­mer, asma ve diğer köprü tiplerinde ikinci bir sistem olarak yer almaktadırlar. Günümüzde; kiriş köprülerde, malzeme genel olarak çelik olmakla beraber betonarme ve son yıllardaki gelişimi ile öngerme­li beton olabilir [1].

2.2.2 Ke­mer köprüler

Ke­mer, taşıyıcı sistemin form ile ifade edildiği etkileyici bir köprü tipidir. Ke­mer köprülerde sistem sadece temellerin üzerine yük aktarır, aynı zamanda ke­merin geometrisine bağlı olarak temelleri dışa doğru itmeye çalışır. Bu sebeple ke­mer ayaklarında karşı kuvvet oluşturmak için ağır bloklara veya direnç noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır [2].

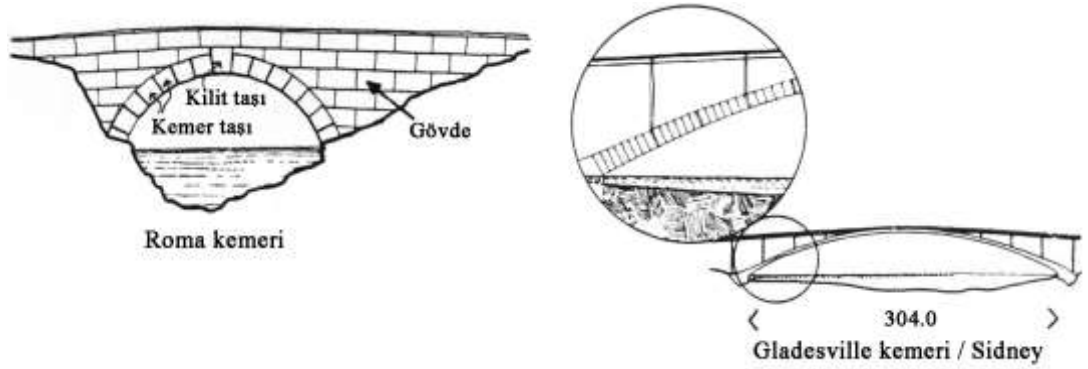
Ke­mer köprülerde basınç kuvvetlerine karşı çalışma prensibi vardır. Basınç yükleri eğrisel bir eksen den­geli olarak iletilir. Bu sistemde çekme gerilmeleri oluşumuna izin verilmez (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Ke­mer ve asma köprü çalışma prensipleri [2]

İlk ke­mer köprüler kâgır olarak taş ve/veya tuğladan inşa edilmiştir. Ancak kâgır duvarlar gibi inşa edilmeleri genellikle mümkün olmadığından kalıp ve iskele kullanımı gerekebilir, başka bir tanımla taşıyıcı sistem tanımlanana kadar desteklenmesi söz konusudur. En son kilit taşı yerleştirilmesinden sonra sistem dengesini sağlar ve kalıp alınabilir [4].

İlk kâgir kemer köprülerin binlerce yıl önce Mezopotamya ve Mısır'da inşa edildiği bilinmektedir. Ancak asıl gelişim Roma döneminde kaydedilmiştir (Antik Yunan'da geometrik hesaplar oldukça geliştiği halde kemer formu hesap edilememekteydi) [1]. Yiğme olarak uygulanan kemer köprülerde iki kıyı arasında ilk olarak kilit taşı ve kemer taşından kemer yapılmakta sonrasında ise yol seviyesine kadar dolgu duvarı inşa edilerek sistem tamamlanmaktaydı [2] (Şekil 2.8).



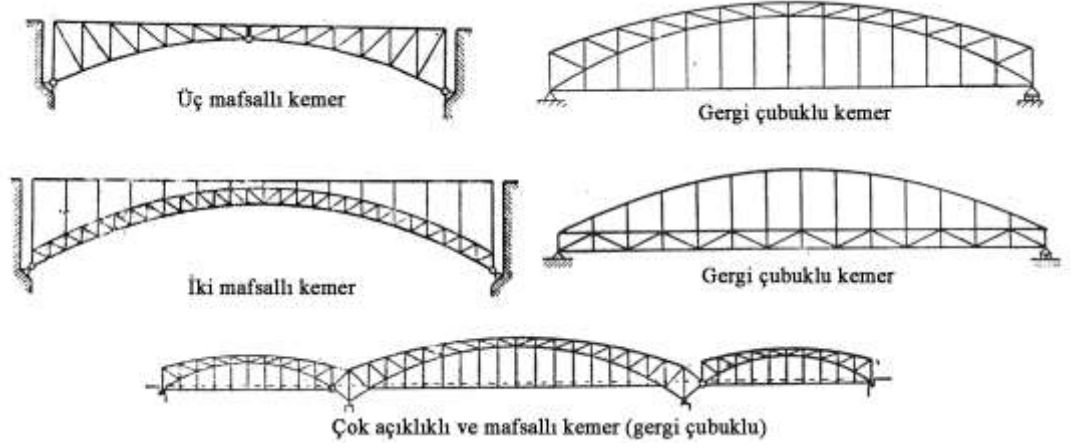
Şekil 2.8 Kâgir ve betonarme kemer köprüleri [2]

18. yüzyılda Avrupa'da kemer köprüleri yaygınlaşmıştır. İlk ciddi örnekler İsviçre'de Grubenmann kardeşler tarafından gerçekleştirilmiştir. Grubenmann kardeşler 1755-66 yılları arasında zamanının oldukça ilerisinde olan ve sırasıyla 61 m ve 73 m ve iki açıklıklı olarak 120 m açıklık geçen 3 adet köprü inşa etmişlerdir. Bu köprüleri inşa edilmenden önce model testleri uygulanmıştır. Benzer gelişmeler 19. yüzyılda Amerika'da da yer almış ve bu teknik ile pek çok örnek yapılmıştır. Ahşap kemer olarak en uzun açıklık 1812 yılında Schuylkill nehri üzerinde inşa edilen Colossus köprüsü ile geçilmiş ve 104 metrelik açıklığa ulaşılmıştır [1].

Ahşap kemerlerin yanı sıra kâgir kemerler de gelişimine devam etmiş ve Roma sonrası 300 yıl içinde gelişiminin zirvesine ulaşmıştır. Bu süreçte matematik ve hesaplama teknikleri gelişmiş ve 18. yüzyılda taşıyıcı sistemler tümüyle hesap formleri esas alınarak tasarlanmıştır.

18. ve 19. yüzyıllarda demir ve çelik malzemenin gelişimi ile ucuz, dayanıklı ve hızlı sonuçlar elde edilmesi sonucunda kâgir kemer yerini çelik kemere bırakmıştır. Dökme demirden yapılan ilk örneklerde, bu malzemenin gevrek olması sebebiyle

taşıma prensibi, kâgir sistemin benzeri olarak uygulanmıştır. İlk uygulama 1779 yılında İngiltere’de yapılmış olan Severn köprüsüdür. Bu köprüde 53 m açıklık geçilmiş ve 5 yarımdaire şeklinde dökme demirden sistem kurulmuş olup, toplam ağırlığı 378 tondur. Bu köprü halen kullanılmaktadır. Dökme demir zaman yerini çeliğe bırakmıştır [2].



Şekil 2.9 Çelik kemer köprü formları [3]

Çelik kemeler uygulamaları bakımından eleman düzeyinde dolu gövdeli veya kafes gövdeli olarak ile benzer kurallar ile uygulanabilmektedir. Sistem olarak ise çift mafsallı ve 3 mafsallı olarak tasarlanabilirler [3] (Şekil 2.9).

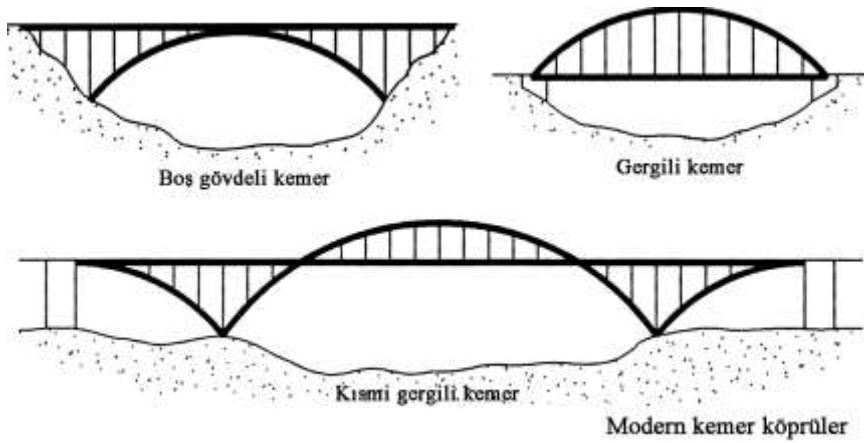
20. yüzyılda betonun gelişimi ve yaygınlaşması ile kemer köprülerde bu malzemenin kullanılması söz konusu olmuştur. İlk örneklerde donatısız olarak kullanılan beton, gelişmeler sonucunda donatılı olarak uygulanmıştır ve daha etkin çözümler bulunmuştur. En uzun betonarme kemer köprü 1943 yılında İsveç’te 264 m açıklık geçilen Sando köprüsüdür. Betonarme kemelerde gövde kısa açıklıklarda masif olarak uygulanabilse de, boşluklu gövde büyük açıklıklar için kullanılmış (ancak günümüzde kesin geçerliliğini yitirmiş olan) bir sistemdir (Şekil 2.17)[5].



Şekil 2 10 Krummbach köprüsü [5]

Ke mer köprüle rin genelinde aç ıklık ve ke mer yüksekli ğ i oranı $1/9$ ile $1/12$ arasında fonksiyonel ve estetik olarak idealize edilmiştir. Ke mer konstrüksiyon yüksekli ğ i ise dolu gövdeli ke merde $1/50$, kafes kirişli ke merde ise $1/25$ olarak kabul edil mektedir [3].

Ke mer for munun günümüzde 300 metreden geniş açıklıklarda popülaritesi ve ekono mîk değeri azalmış bulunmaktadır [1] (Şekil 2 11).



Şekil 2 11 Ke mer köprü ana for mları [2]

2.2.3 Asma köprüler

Asma sistemlerde, sürekliliği olan bir ana taşıyıcı kablunun üzerinden sarkıtılan askı kabloları ile döşemenin (köprü tabliyesi) taşınması söz konusudur. Askılar arası mesafenin, açıklığa göre oldukça kısa düzenlenebilmesi sayesinde döşemenin ağırlığı diğer sistemlere göre oldukça hafif olusturulabilmektedir. Kablo çekmeye çalışan bir elemandır, taşıma kapasitesi diğer tüm yapı malzemelerinden daha yüksektir ve ekonomik olarak daha uygundur. Daha önce açıklandığı gibi asma sistemler yeni bir uygulama yöntemi değildir ancak geniş açıklıklarda kullanılabilirleri özellikle batıda endüstri devrimi sonrasında demir ve çeliğin gelişmesi sayesinde gerçekleştirilebilmiştir [2].

Asma sistemlerin sürekliliğini sağlanabilmesi için ana taşıyıcı kabloların güvenli bir şekilde geçilen açıklığın iki yakasına bağlanmaları gerekir. Eski sistemlerde sarımsak veya benzeri halatları geçilen açıklığın kısa ve taşınan yüklerin hafif olması sebebi ile sağlam bir ağaç gövdesine bağlanması yeterli olmaktadır. Günümüzde ise mesafe ve yüklerin eski sistemlere karşılaştırılamayacak kadar artmış olması kablo uçlarının özel inşaat teknikleri kullanılarak bağlanması başka bir deyişle ankrajlanması gerekmektedir. Kabloların güvenli bir biçimde ankrajlanması için sahilde geçişin yer aldığı eksen üzerinde doğal veya yapay ankraj bloklarının yer alması gerekmektedir. Doğal ankraj bloğu sağlam bir kaya forasyonuna doğrudan ankraj işlemi uygulanarak elde edilebilir. Bu uygulama çoğu zaman mevcut olmadığından sağlanık ve topografik şartlara uygun yapay ağırlıklar beton kullanılarak inşa edilerek ankraj bloğu oluşturulmaktadır [1].

Asma köprüleri diğer köprülerden ayıran en önemli yapı elemanları kablolarıdır ve günümüzde tümüyle yüksek çekme mukavemetli çelik tellerden oluşturulmuşlardır. Çelik malzeme genel olarak ele alındığında çelik tel, diğer çelik elemanlardan çekme mukavemeti bakımından ortalama 5 kat daha dayanıklıdır. Sıradan bir çelik eleman ortalama 2800 kg/cm² çekme mukavemetine sahip olduğu halde çelik teller 17,000 kg/cm² çekme mukavemetine sahiptirler. Teller ortalama 5 mm kalınlıkta olup, bu ebatlarda bir eleman 3.25 ton taşıma kapasitesine sahiptir[6].

Köprü kabloları çok farklı şekilde hazırlanabilirler. 20. yüzyılın başında inşa edilen köprülerde ana kablolar binlerce teli paralel olarak döşendiği en sonrakı kabloları ile

uygulanmaktadı. Örneğin Kaliforniya Golden Gate köprüsüne ait ana kablolar bu şekilde hazırlanmıştır. Ana kabloyu oluşturan her kablo 92.5 mm çapında olup 27,572 adet çeliktel kullanılarak oluşturulmuştur [2].

1930'lerden beri kullanılan yöntemde ise paralel tellerin şantiyede hazırlanması yerine kablo kollarının tel halatlar olarak bir araya getirilmesi söz konusu olmuştur. Her kablo kolunda teller spiral şeklinde bükülür ve halat haline getirilir. Bu yöntem ile uygulamada fabrikasyon yöntemi kullanılarak hız ve kalite artmıştır [1].

Asma köprülerde en dikkat çekici elemanlar kulelerdir. Bu sebeple sadece taşıyıcı eleman olarak değil aynı zamanda estetik yönleri de dikkate alınarak projelendirilmeleri gereklidir. Kuleler 20. yüzyılın başlangıcına kadar kâğıt olarak yapılmakla beraber günümüzde ekonomik ve taşıyıcılık bakımından çelik veya betonarme olarak uygulanmaktadır.

İlk geniş açıklı asma köprülere örnek olarak Brooklyn köprüsü ele alınabilir. Bu köprü çelik kabloların ve pnömatik kesonların ilk kullanıldığı köprüdür. Dökme demir yerine çelik yapı elemanları yine ilk olarak bu köprüde kullanılmıştır. Brooklyn köprüsünün ana kablосunu oluşturan teller tek tek korozyona karşı galvanizlenmiş ve her biri 400 mm kalınlıkta 4 ana kablосun tamlanması 26 ay sürmüştür. Kablo montajı işleminde lastiksiz bisiklet tekerine benzeyen bir kablo arabası kullanılmış ve her seferde iki adet tel çekilmiştir.

1931 yılında tamlanan G Washington köprüsü 1061 m açıklık geçilen ve halen en ağır asma köprüdür. Kuleler, Brooklyn köprüsünün aksine kâğıt olarak değil maliyet, konstrüksiyonu hafifletmek ve estetik görünüm bakımından çelik olarak uygulanmıştır. Batı yakasında ankraj işleminin için uygun bazalt kaya kütlesi sayesinde, kayanın için huni şeklinde ve 48 m uzunlukta 2 adet tünel açılmış ve ankraj işlemin tamlanmıştır. Doğu yakasında ise ankrajlama işlemin için beton ankraj bloğu yapılması gerekmektedir. Bu noktada yer alan ankraj blokları 61x88 mebatlarında ve 49 m yükseklikte kütle betonu ile hazırlanmışlardır. Beton şantiyede hazırlanmış ve döküm konveyör hattı ile gerçekleştirilmiştir.

Doğu yakasındaki temeller karada kuru zeminde inşa edilmiş ancak Batıda yer alan New Jersey ayağı, su altında yapılmıştır. Ayakların temel alanı 27x26 mebatlarında

olup su altında 24 m derinlikte yer almıştır. Su altındaki temelleri yapmak için zamanın en büyük batardoları kullanılmıştır. Temel inşaatı sırasında ilk olarak tarak dubaları ile deniz taban kotunun 14 m yüksekliğinden 24 derinlikte iki adet temel çukuru açılmıştır. Çukurlara 3 m aralıkta 2 sıra palplanş çakılmış ve arasına beton dökülmüştür. Batardonun hazırlanmasından sonra dış yüzeyde oluşan bu basıncı na karşı içeriden ahşap destekler yerleştirilerek temeller kâgir olarak inşa edilmiştir [1].

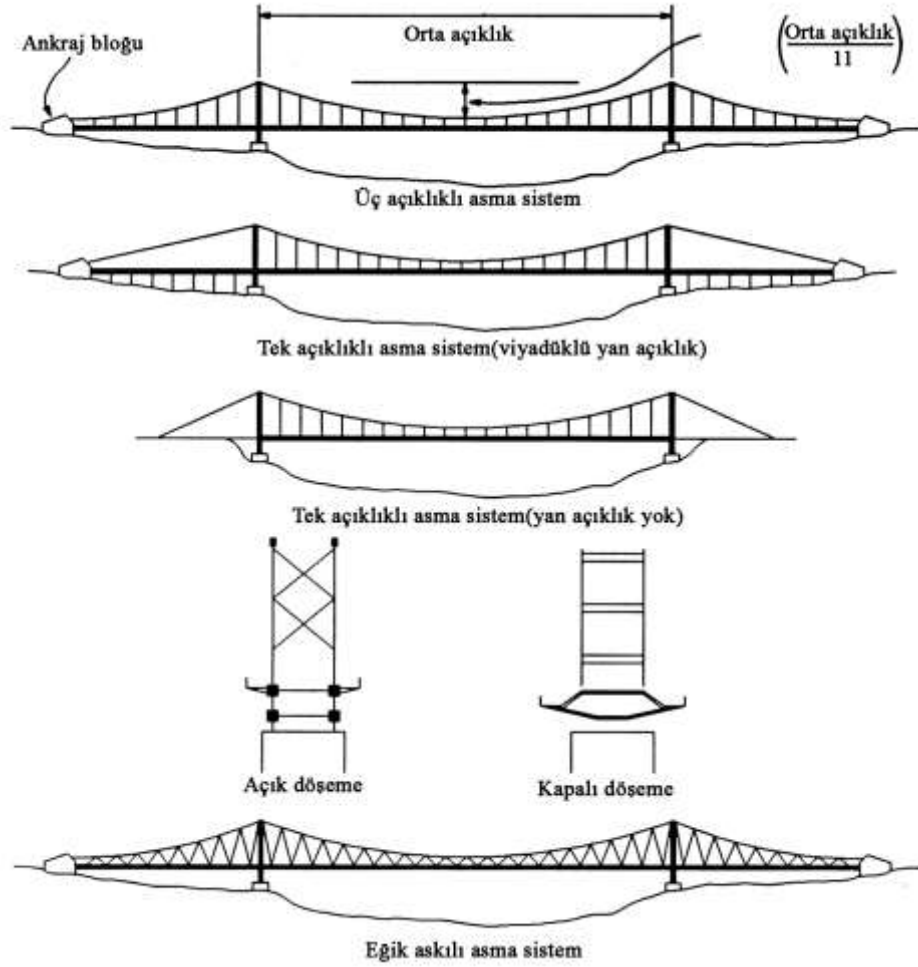
Köprü ayaklarından sonra kuleler inşa edilmiştir. Her biri 20,000 ton ağırlığında olan çelik kuleler perçinle birleştirilmiş ve vinç kullanılarak monte edilmişlerdir. Toplam 194 m yükseklikte olan kuleler için 16 adet büyük kolon hazırlanmış ve kule montajından 1,000,000'dan fazla sıcak perçin pnömatik çekiciler yardım ile uygulanmıştır [7]. Her biri 180 ton ağırlığında olan portal kirişlerin kule sütunlarının arasına monte edilmesi ile kablo montajına başlanmıştır.

Kabloların bünyesinde yer alan çelik tellerin toplam uzunlukları 171,200 km'dir, başka bir tanımlama ile ekvatorun uzunluğunda 4 kat fazladır. Ana kabloların çapları 915 mm olup her ana kablo 1.6 km uzunluğundadır. Ankrajlar arasında kablo döşenmesi işleminde saatte 106 km hızında kablo arabaları kullanılmıştır. Ana kabloyu oluşturan her kablo için 434 defa tel çekilmiş ve 61 kabloda toplam 26,474 adet çelik tel kullanılmıştır. Kablo montajından sonra nispeten daha kısa ve kolay bir işlemle askı kabloları ve döşeme montajı tamamlanmıştır.

1937 yılında benzer şekilde 1280 m uzunluğunda olan San Francisco Golden Gate köprüsü tamamlanmış ve benzer teknikler kullanılarak inşa edilmiştir. Bu köprüde kulelerin yüksekliği 227 m ana kablo çapı ise 924 mm olarak belirlenmiş, 2738 m uzunluğunda her ana kabloda toplam 27,572 adet galvanizli çelik tel kullanılmıştır [1].

Yukarıdaki açıklamalarda yer alan örneklerde görüldüğü gibi açıklığın artması yapı elemanlarının ebatlarını arttırmış, aynı zamanda ısıdan kaynaklanan deformasyonların ve genleşmelerin de artmasına sebep olmuştur. Örneğin, Golden Gate köprüsünde sıcak havalarda; kablolar da 4.87 m döşemede ise 2 m uzağa gerçekleşmektedir [7].

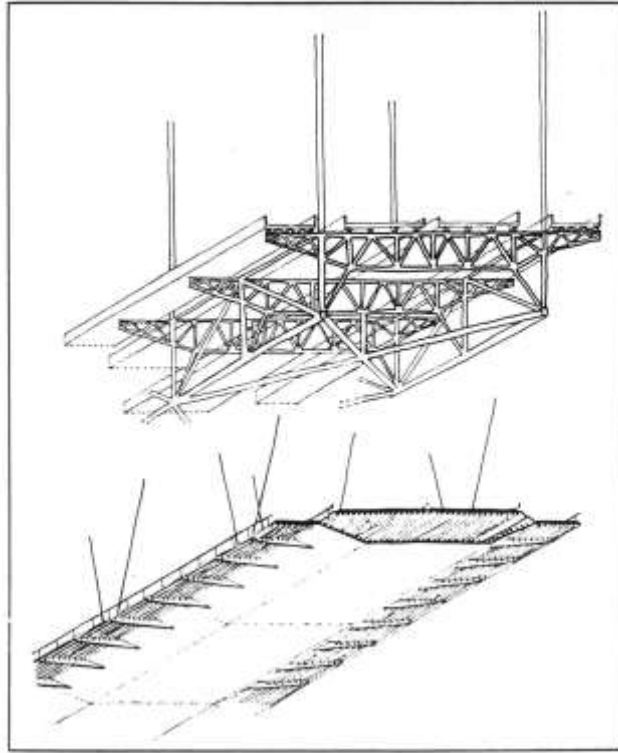
Asma köprü döşemesinde oluşan “dengeli yük dağılımı” gövdenin parabolik bir şekil almasını sağlar. Genel olarak yan açıklıklar orta açıklığın $1/3$ ’ü ile sınırlandırılırlar. Kablolardaki zincir eğrisi veya serbest eğrisellik orta açıklığı kule yüksekliğine oranı ile oluşturulmaktadır. Kemer forminun düşey yönde simetrisi olması kuralı hatırlanacak olursa bu oran $1/9$ ve $1/12$ arasında değişmektedir. Asma köprüler 3 açıklıkta askılı, orta açıklıkta askılı ve yan açıklıkta askı olarak oluşturulabilirler. Askılar ise bu oluşum içinde eğik veya dik olabildikleri halde, eğik olan sistem günümüzde pek tercih edilmemektedir [7] (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Asma köprü formları [7]

Asılı döşeme açıklığının büyüklüğü dikkate alındığında hafif ve ince olmalıdır. Bu hafiflik ve incelik aynı zamanda döşemenin estetik bakımdan kendisi ve çevresiyle daha anlamlı ve çekici olarak bütünleşmesini sağlamaktadır. İlk örneklerde döşemeler dolu gövdeli kiriş veya kafes kiriş olarak uygulanmış, ancak Tacoma köprüsünün çökmesinden sonra sandık kirişli kesitlerin kullanımı neredeyse

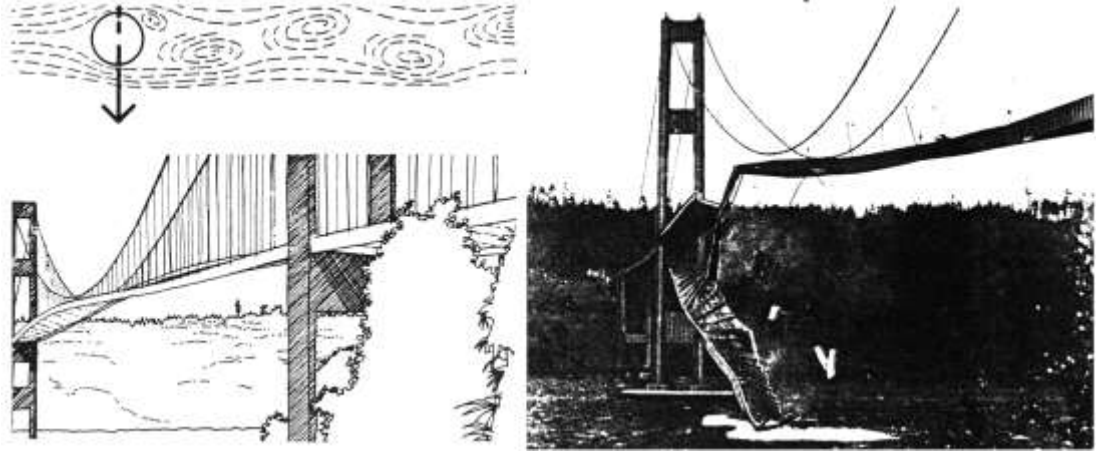
değişmez bir kural olmuştur [2] (Şekil 2.13). Sandık kirişli döşeme hava akımlarının oluşturduğu yatay kuvvetlere karşı daha etkin bir mukavemet sağlamaktadır. Kafes sistem ve dolu gövdeli sistemlerde döşemenin altında oluşan hava girdaplarına engel olunarak stabilite arttırılmaktadır. Sandık kiriş sisteminde döşeme konstrüksiyonunda oluşan hava girdapları engellenmiş olsa da rüzgar yüklerinin etkisi tam olarak azaltılamamış ve salınımın devamı sonucunda rezonans ile karşılaşmıştır. Devam eden aerodinamik çalışmalar ile sandık kirişli döşemenin uç kısımları konileştirilerek uçak kanadına benzer şekilde kesit oluşturulmuş ve aerodinamik stabilite maksimum düzeyde sağlanabilmektedir [7].



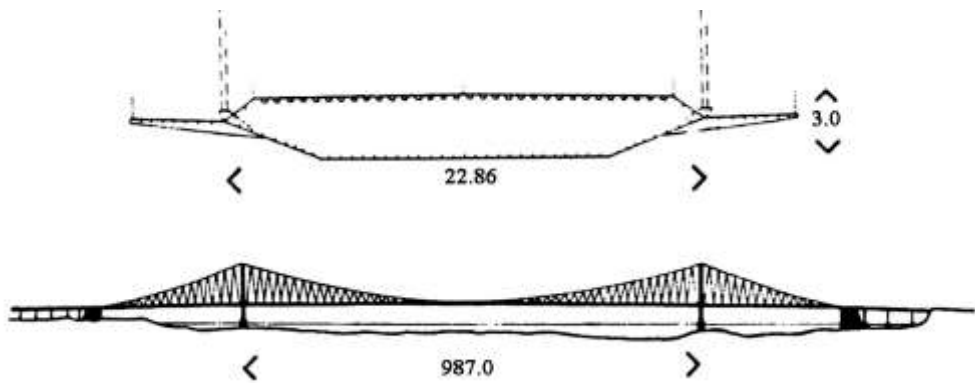
Şekil 2.13 Kafes kirişli ve sandık kirişli asma köprüler [2]

Tacoma köprüsü taşıyıcı sistemin ve aerodinamik dengenin sağlanamadığı bir örnektir ve asma köprülerin tasarım ve uygulamaya kriterlerinin tekrar gözden geçirilmesine sebep olmuştur. Köprü 1 Temmuz 1940 yılında trafiğe açılmış olup 850 m orta açıklığı ile zamanın en uzun 3. Köprüsü durumunda idi. Döşeme dolu gövdeli bileşik kirişlerden yapılmış olup 2.4 m'lik konstrüksiyon yüksekliğine sahipti ve askı kabloları 12 maralık ile yerleştirilmiş bulunmaktaydı. Konstrüksiyon yüksekliğinin açıklığa oranı 1/50 ile 1/100 arası sınırında kalması gerektiği halde Tacoma köprüsünde bu oran 1/350 olarak yer almıştır [1]. Döşemenin kabul edilen

sınırlarının çok üzerinde inceleme sebebi ile köprünün tanımlandığı günden itibaren döşemede düşey yönde salınım ve burulma gerilmeleri gözlenmiştir. Döşemenin elemanları arasında oluşan hava girdapları konstrüksiyon zayıflığına eklenece yapı nın taşıyıcılık bakımından güvenliği ciddi bir şekilde azalmıştır. Köprü hizmete açıldıktan 4 ay sonra rüzgar hızının 56 ve 70 km arasında değiştiği bir günde döşeme üzerinde 8 m'lik düşey salınım ve 45 derecelik burkulmalar oluşmuş ve döşeme ikiye ayrılarak çökmüştür (Şekil 2.14). Tacoma köprüsünden çıkarılan sonuçlar üzerinde döşemenin aerodinamikliği gözden geçirilmiş ve 1000 metre açıklık geçilen Severn köprüsünde döşeme ilk olarak aerodinamik kurallar çerçevesinde sandık kirişler ile uygulanmıştır [2] (Şekil 2.15).



Şekil 2.14 Tacoma köprüsünün çökme sonrası durumu [2]



Şekil 2.15 Severn köprüsü [2]

2.2.4 Diğer köprü tipleri

Kiriş, kemer ve asma köprülerin zamanla gelişmeleri ve birarada kullanılmaları ile daha farklı köprü tipleri tasarlanmış ve uygulanmıştır. Bu köprülerin en bilinen örnekleri; konsol köprüler, hareketli köprüler ve eğik askılı köprülerdir.

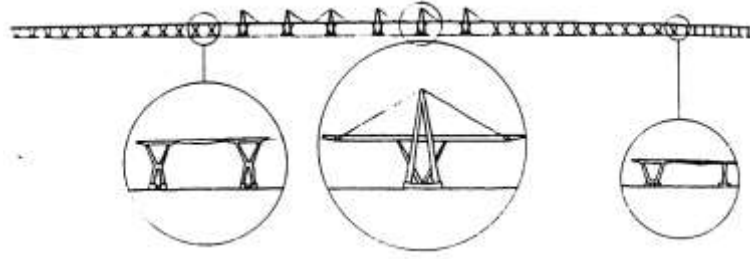
2.2.4.1. Konsol köprüler

Konsol köprüler açıklığın iki ucunda yer alan köprü ayaklarına, ankastre olarak mesnetlenen konsol kirişlerin veya döşeme elemanlarının uzatılması ile oluşturulmaktadır. İki konsol uç noktalarından rijit olarak birleştirilmeler ve araya göreceli olarak daha kısa olan bir kiriş veya döşeme bloğu yerleştirilerek sistem tanımlanır. Konsol uçları arasında yer alan döşeme aslı döşeme adı verilir [2].

İlk konsol köprüler ahşap kirişlerle yapılmakla beraber günümüzde çelik ve betonarme sistemler tercih edilmektedir. Konsol köprülerin yapısında, sistem hesaplanan değerlerde yük dağılımına sahip olup dengesini buluna kadar geçici destekler veya iskeleler ile takviye edilmeleri gerekmektedir. Ancak su derinliğinin fazla olması, suda buzlanma etkileri veya topografik şartların uygun olması durumunda geçici destek elemanlarının kurulması mevcut imkanlarla her zaman mümkün olamamaktadır [1].

Yapıda karşılaşılan bu tip engelleri aşmak için kademeli konsol yapım metodu geliştirilmiştir. Bu teknikte konsol döşeme bölümlere ayrılarak ve eş zamanlı olarak konsolun uzadığı mesnetten itibaren çelik veya öngerme prekast elemanların uç uca eklenmesi ile yapılır ve alt noktadan desteklenmeye gerek kalmaz [1].

İlk konsol köprü 1857'de Alanya'da Mırmır nehri üzerinde inşa edilmiş ve 129 m açıklık geçilmiştir. 1950'li yıllardan sonra kademeli yapım metodu uygulanmaya başlanmıştır. Bu sistem etkin olarak kullanıldığı en önemli köprülerden birisi 1966 yılında Venezuela'da tamamlanan Miracai bo Gölü köprüsüdür [2] (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Mıracai bo gölü köprüsü [2]

2.2.4.2 Hareketli köprüler

Nehir, körfez gibi deniz trafiğinin engellenmesi gereken durumlarda eğer döşenmiş yükseltilerek yeterli klerans sağlanamıyor ise köprülerin hareketli veya geçici olarak yapılması gerekmektedir. Farklı tiplerde uygulanabilen bu çözümler genel olarak 4 ana başlıkta sınıflandırılmaktadır. Bunlar, döner (çekme) köprüler, kaldırma köprüler, asansörlü köprüler ve dubalı köprülerdir.

Çekme köprüler; hareketlerini yatay ekseninde, sabit bir pivot üzerinde yaparlar. Dönme hareketi kendinden itmeli veya römorkör gibi sisteme ait olmayan yardımcı bir araç ile gerçekleştirilmektedir. 1930'lerden sonra popülaritelerini yitmişlerdir.

Kaldırma köprüler; dikey ekseninde hareket eden, 1 veya 2 kanattan oluşturulabilen kapak benzeri sistemlerdir. Çekme köprülere göre daha hızlı hareket edebildiklerinden daha etkin sistemlerdir. Tek kanatlı en uzun örnek 79 m kanat açıklığı ile Chicago'da inşa edilmiş olan St. Charles Demiryolu köprüsüdür. Çift kanatlı olarak uygulanan en uzun kaldırma köprü ise toplam 102 m kanat uzunluğunda yapılmış olan Michigan gölü üzerinde bulunan Sainte Ste Marie köprüsüdür.

Asansörlü köprüler ise deniz trafiğine uygun aralıkta oluşturulan hareketli bölümün dikey ekseninde sabit hareket etmesi ile yapılmaktadır. En belirgin özelliği asansör sisteminin üzerinde yer aldığı kulelerdir ve kule yüksekliği deniz trafiğinde seyir yapan gemilerin yüksekliği ile sınırlıdır.

Dubalı köprülerin geçmişi günümüzden 3000 yıl öncesine kadar ulaşmaktadır. Bu tip köprüler daha çok askeri amaçlara yönelik olarak kullanılmakta ve sadece acil durumlarda geçici olarak yapılmaktadır. Dubalı köprülerde sistem hava dolu duba,

lastik şişme bot gibi elemanların yanyana getirilerek sabitlenmesi ve geçişin iki yakasına bağlanması sonucunda oluşturulmakta ve dubalar arası mesafeler geçiş yapması muhtemel yüklerin ağırlığına göre değişmektedir [1].

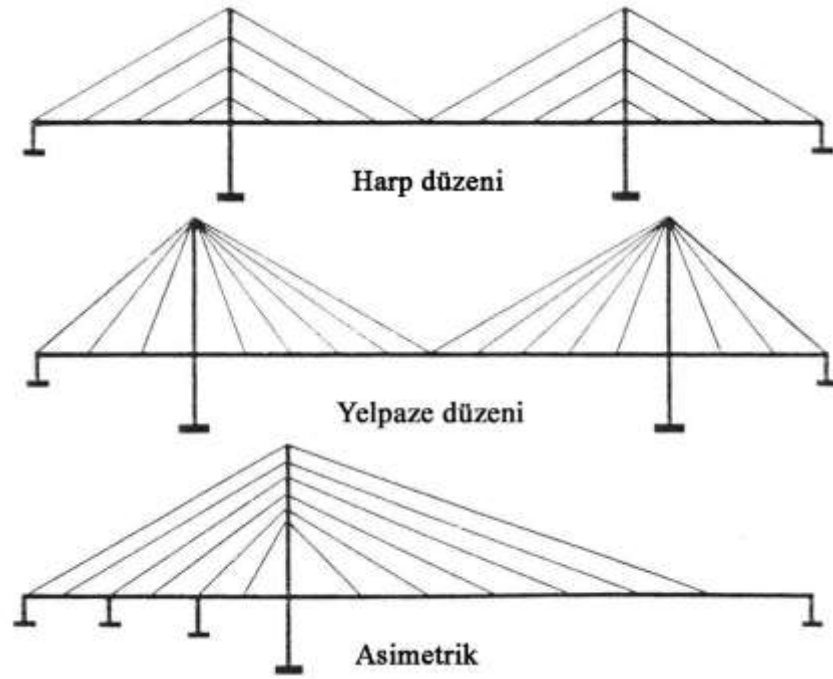
2.2.4.3 Eğik askılı köprüler

Köprü döşemesinin ana kablolar aracılığı olmadan doğrudan kulelere asılması yöntemi ile inşa edilen köprü tipi eğik askılı köprü olarak sınıflandırılmaktadır. Bu formkonsol ve asma köprü tekniğinin biraraya getirilmesi ile oluşturulmuş en yeni köprü tipi olarak bilinmektedir.

Taşıyıcı sistemde yer alan kablolar kendinden ankrajlı olması sebebi ile oldukça dengeli bir yapıya sahiptir, ancak döşeme tasarlanırken kabloların oluşturulduğu yatay bileşke kuvvetlerden kaynaklanan eksen yükleri dikkate alınmalıdır. Asma köprülere göre yapımsüreleri, kablo ve döşeme bloklarının aynı anda yapılması dikkate alındığında daha kısadır [1].

Bu tip köprülerde kablolar, kule tepesinden ve dar bir düzlemde yelpaze şeklinde veya kulelerin boylarında paralel olarak harp şeklinde oluşturulabilirler. Zamanla bu formlara yarı-harp ve asimetrik kablo düzenleri de eklenmiştir [7] (Şekil 2.17). Yelpaze düzeni az kablounun kullanımı gerekli ise uygulanabilir ve pylonların (köprü ayağı) eğilme etkilerini azaltabilmektedir. Ancak yakın noktalardan ankraj yapılması sebebi ile kule tepelerinde ankraj işleminde zorluklarla karşılaşılabilir. Harp formu ise ortalama 4-5 kablodan fazlasının kullanımı gerekli ise uygundur. Ortalama 150 m'den fazla açıklıklarda kablo sayısının artması sebebi ile harp formu daha uygun olarak kabul edilmektedir. Harp formunda döşeme üzerindeki yük dağılımları daha düzgün ve dengeli olarak sağlanabilmektedir. Kablo aralıkları her iki sistemde de taşınacak yükler ve kullanım amacına yönelik olarak 8 ile 25 m arasında değişebilir [8].

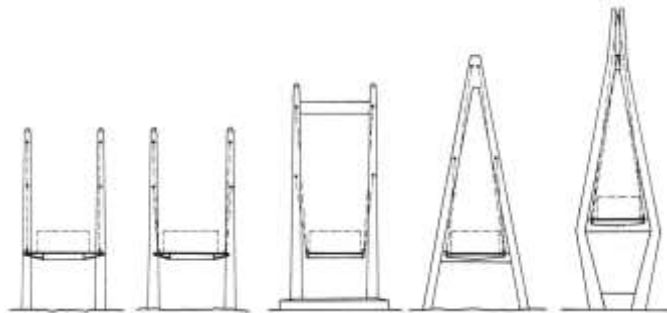
Eğik askılı köprülerde döşeme; sandık kirişli ortotropik, öngerme veya kompozit olarak uygulanmaktadır. Ancak sandık kirişli çözüm 250 m üzerindeki açıklıklarda tek çözüm olarak kabul edilmekte ve genel olarak daha çok tercih edilmektedir. Döşeme tipi ve kabloların düzeni ile eğik askılı köprüler, asma köprülere göre aerodinamik stabilite ve burulma rijitliği bakımından daha dayanıklı



Şekil 2 17 Eğik askılı köprü formları [8]

olup bu sayede döşeme daha narin yapıda inşa edilebilmektedir. Ayrıca bu özelliklerden dolayı yatay yüklere karşı stabilite sağlanması için portal kirişlere de gerek kalmaktadır. Ancak eğik askılı köprülerin geçiş mesafelerinin mevcut teknolojileri ile ortalama 400 mile sınırlı olması gözden kaçmamalıdır [1].

Eğik askılı köprülerde kuleler düşey eksene dik olarak yapılabildikleri gibi strüktüre yönelik araştırmalar sonucunda eğik olarak A şeklinde tasarlanan pylonların uzun geçişlerde kule yüksekliğinin artması doğrultusunda daha dayanıklı oldukları belirlenmiştir. Deniz trafiği bakımından döşemenin yüksekte kalması gerektiğinde yükseltilmiş A şeklindeki pylonlar, içe doğru kıvrılarak daha küçük ebatlı temelleri üzerinde yer alabilmektedir [8] (Şekil 2 18).



Şekil 2 18 Pylonlar [8]

Döşemeler genel olarak iki düzlemli kablolar aracılığı ile taşınmakta ve daha ince kesitli çözümler sağlanabilmektedir. Tek düzlemli kablolar kullanımı ile de döşeme taşınabilmekte ancak burulma rijitliğinin sağlanabilmesi için döşeme kesiti kalınlaşmaktadır [2] (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Pilon ve döşeme ilişkisi [2]

Geçişlerde 3 açıklık kullanılması durumunda yan açıklıklar, orta açıklığında $1/3$ oranı ile sınırlandırılmaktadır ve bu sayede uç noktalarda bulunan kablolar da oluşan gerilme kuvvetleri sistemin dengesini bozmayacak limitler altında kalabilirler. Geçişler daha kısa açıklıklarda simetrik veya asimetrik olarak tek kule yardımı ile de gerçekleştirilebilmektedir. Eğik askılı sistemlerde farklı çözümler bulunması diğer sistemlere göre daha çeşitlidir [1].

2.3. Yapı Malzemelerinin Köprülerin Gelişimine Etkileri

Köprülerde geleneksel olarak kullanılan malzemeler 19. yüzyıl başlangıcına kadar kâgır ve ahşap olarak kalmıştır. 19. yüzyılda çelik, 20. yüzyılda beton ve betonarme sistemler, 20. yüzyılın ikinci yarısından sonra ile öngerme sistemlerinin gelişimi ile kullanılan formların zenginleşmesinde hem de daha ekonomik olarak uzun açıklıkların geçilebilmesine olanak vermiştir.

2.3.1. Kâgır malzemeler

Taş, köprülerde kullanılan en eski malzemedir. Doğal bir malzeme olması farklı bir estetik değer taşıması karşın çekme mukavemetinin düşük olmasının yanında ağır ve pahalı bir malzeme olması sebebi ile günümüzde tümüyle terk edilmiş bir sistemdir [1].

2.3.2 Ahşap malzeme

Ahşap, taş ile mukayese edildiğinde, çekme, basınç ve kesme kuvvetlerine optimum düzeyde dengeli bir mukavemet gösterebilmektedir. Ancak doğal şartlara ve atmosferik etkilere dayanımının az olması en önemli eksikliği dir. Günümüz teknolojilerinde koruma önlemlerinin alınması, çelik bağlantı elemanları ile takviye edilmesi veya tutkalı ahşap yöntemleri ile geçiş mesafesinin artırılması bile köprülerde ve özellikle uzun açıklıklarda kullanılması na olanak vermektedir [4].

2.3.3 Çelik malzeme

Çelik ağırlığı na göre mukavemeti oldukça yüksek bir malzemedir. Köprülerde, özellikle uzun açıklık geçişlerinde yatay, düşey ve askı elemanı olarak kolayca sisteme adapte olabilmektedir. Diğer tüm yapı malzemelerinin kırılganlıklarının aksine çelik sünekliği olan bir malzemedir. Çeliğin akma ve kırılma değerleri arasında oldukça geniş bir aralık bulunmaktadır. Ayrıca çelik malzemenin çekme ve basınç mukavemetleri eşittir. Normal bir inşaat çeliğinde basınç ve çekme mukavemeti 2800 kg/cm^2 değerinde olup, ortalama standartlarda hazırlanan betona göre basınç mukavemeti 10 kat, çekme mukavemeti ise 100 kat fazladır [1].

Geniş açıklıklı köprülerde mukavemetleri $3700\text{-}7000 \text{ kg/cm}^2$ arasında değişebilen yüksek mukavemeti çelik malzeme kullanılmaktadır. Bu nitelikteki çelik malzemenin tek kusuru sünekliğinin az olmasıdır ve bu özellik tasarımı ve uygulama sırasında göz ardı edilmelidir [7].

Yapı elemanı olarak kullanılan çelik malzeme, et kalınlığı $6\text{-}80 \text{ mm}$ arasında değişen sac levhalar ve farklı kesit (I, T, L, U, O) ve ebatlarda üretilen profil olarak oluşmaktadır. Bu malzemelerin yanında askı kablolarında kullanılan çelik çok yüksek mukavemetli olarak üretilmekte ve çekme mukavemetleri $15,000\text{-}17,000 \text{ kg/cm}^2$ arasında taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde oluşturulmaktadır. Bu sayede kesit boyları ve hareketsiz yüklerde önemli oranlarda azalma sağlanmaktadır. Çeliğin yamı sıra perçin ve bulon tekniklerinin üzerinde kaynak teknolojisinin ilerlemesi bileşik kesitlerde çok farklı tip ve ebatla elemanın birarada kullanımı güvenlik faktörlerini arttırarak katkıda bulunmuştur. Çelik malzemenin en önemli dezavantajları korozyona karşı sürekli bakım gerektirmesi ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetini kaybetmesidir [7].

2.3.4 Beton

Yapı malzemesi olarak betonun tanımını özetlemek gerekirse; beton yeterli ölçülerde agrega, çimento ve suyun biraraya getirilmesi sonucunda elde edilen karışımın kalıplara dökülmesi ve katılaşması ile elde edilen yapay bir taştır. Karışım sonrasındaki betonun oluşumu hidrasyon adı verilen oldukça karmaşık bir kimyasal reaksiyon süreci sırasında gerçekleşir. Hidrasyon katılaşma sonrasında devam eden bir süreç olup, kaliteli bir beton elde edilmesi için katılaşma sonrasında da hesaplar dahilinde belirli bir süre bakım kürleme ve kontrolü gerekmektedir. Çünkü priz alan betonda inşaat hatası olması durumunda takviye yapılması çelik malzemede olduğu gibi kolay değildir. Betonun en önemli avantajlarından birisi istenilen forma göre şekil verilebilmesi ve doğal şartlara karşı dayanımının yüksek olmasıdır [9].

Beton basınç mukavemeti bakımından etkin bir malzemedir, ancak çelik çubuklarla birlikte takviye edilerek çekme mukavemeti artırılabilir ve daha kapsamlı olarak kullanılabilir. Daha gelişmiş sistemler ise öngerme ve yakın zamanda kullanım yaygınlaşmaya başlayan arduerme yöntemleridir. Bu sayede çekme mukavemeti normal bir betonarme sisteme göre daha fazla artırılarak taşıyıcı sistem daha hafif ve daha dayanıklı yapılabilir [1].

Köprü inşaatlarında üst yapı betonarme olmasa bile beton malzeme temel, ankraj bloğu gibi yapılarda kullanılarak günümüz köprülerinde vazgeçilmez bir yapı elemanı olarak kabul edilmekte ayrıca kullanılabilirliği ölçüde uygulama, malzeme ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır.

2.4 Köprülerde Estetik Kavram

Estetik kavramlar, göreceli olarak değişmekle beraber genel olarak güzellik ve çekiciliğin niteliği olarak tanımlanabilir ve bu tanımlama köprülerde aynen geçerlidir.

Bazı görüşlere göre köprüler sadece fonksiyonel olarak mükemmel olmalıdır. Ancak bu düşünce ile günlük hayatımıza yön verdiğimizimiz düşünülür ise içinde yaşanılan evi, hatta çevreyi sadece bir barınak veya ihtiyaçlarımızın karşılandığı bir makiye olarak görmemiz gerekmektedir. Köprülerin yaşadığımız çevrede yer alan, dikkat çekici ve

büyük yapılar olduğu kabul edildiğinde estetik görünümün, fonksiyonellik ve eşdeğerli olarak ele alınması nın bir zorunluluk olduğu kabul edilmiştir.

Köprülerde estetik kavram, abartılı ve fonksiyonu olmayan süsleme ve bezemeler yerine, çevresi ile bütünleşmiş ve geçilen açıklığa uygun ve oranlı strüktürel form olarak değerlendirilmiştir. Gerektiğinde ışık ve gölge oyunları, zarif ve narin ebatlı yapı elemanları, derinlik, ölçek hatta renk kavramları estetik değerin artırılmasına amaçlı olarak kullanılmasıdır [1].

2.4.1. Oran ve kontrast

Köprüleri oluşturan taşıyıcı sistemin oranlı olması estetik değer bakımından en önemli unsur olarak kabul edilmektedir. Yunanlıların güzelliği idealize etmesi ile önemli kavranmıştır. Taşıyıcı sistemin oranlı olması özellikle sistemin kendi içinde dengeli olarak tasarlanmasının ve yapı elemanlarının en uygun ebatlarda amaçlı olarak kullanılması sonucuna bağlıdır.

Kontrast ise yapı elemanlarının diğerlerinden ayrılması ve vurgulanabilmesi bakımından önemlidir. Bu amaçla yönelik olarak yataylık veya düşeyliğin baskın olması, malzemenin rengi veya dokusu, elemanların büyüklükleri kontrast oluşturmak amacıyla kullanılabilir.

2.4.2. Ölçek ve çevre ile bütünleşme

Ölçek yapının kendi içinde sahip olduğu uyumun çevresi ile birlikte oran ve kontrast kavramlarının birbirini dengelemesi sonucunda ortaya çıkan bir kavramdır. Bu durumun belirli bir standardı olmayan yapının niteliklerinin yanı sıra iklim coğrafya ve kültüre bağlı olarak değişebilir. Örneğin bir metropolde kütlenin baskın bir kişilikte vurgulanması istenebilirken, doğal güzelliği var olan bir bölgede daha basit ve iddiası az olan formlar tercih edilebilir.

2.4.3. Form ve fonksiyonellik

Köprülerde form ve fonksiyonellik kavramları diğer yapılar dantümlü ayrılarak ele alınmalıdır. Köprülerde form ve fonksiyon çekişmesi yoktur. Aksine fonksiyon değeri arttıkça formun estetik değeri de artmaktadır. Gereksiz eklentiler ve bezemelerin kullanılması sonucunda inşa edilen 20. yüzyıl köprüleri önceki

örneklerle karşılaştırma yapıldıklarında genel kanı olarak daha estetik ve çekiçi bulunmaktadırlar [1].

2.4.4 Düzen ve kişilik

Estetik kavramların sonucunda ortaya çıkan düzen, köprülerin kişiliğini ortaya çıkartan bir sonuçtur. Yatay ve düşey çizgilerin uzanımını kontrol ederek elverişli çözümlerin elde edilmesi düzen kavramı ile açıklanabilmektedir. Simetri veya asimetri, tekrar sonucu oluşan ritmiyle monotonluğa sebep olmadan beklentilere göre fazla baskın olan veya aksine baskın olmayan örnekler yapılabilir. Düzen sonucu oluşan kişilik farklı kullanıcıların üzerinde bıraktığı ortak etki olarak tanımlanmaktadır. Sadeleştirme bu etkiyi olumlu olarak artırma yönünde büyük katkısı vardır. En karışık teknik çözümlerin bile sanatsal bir yaklaşımla çözülmesi, kişilikli bir yapının oluşturulması için anahtar bir kavramdır. Köprülerin sadece günümüz için değil aynı zamanda geleceği yönelik yapılar olarak düşünülmesi bir zorunluluktur [10].

2.5 Sonuç

Köprüler, tarih sürecinin başlangıcından günümüze kadar geçen süreç içinde insanların doğal engelleri aşması ve ilişki kurmalarına olarak sağlayan yapılar olarak karışımza çıkmaktadırlar. Köprülerin gelişim süreci; kiriş, kemer ve asma sistemlerden oluşan 3 ana form etrafında; hesap yöntemi, malzeme ve montaj tekniklerinin teknolojik gelişimi ile birlikte, eleman ve sistem düzeyinde, özellikle 19. yüzyıldan başlamak üzere oldukça hızlı olarak ilerlemeler kaydetmiş ve günümüzdeki durumunu almıştır.

Köprü sistemlerinin gelişimine teknolojik gelişmelerin yanı sıra, sosyo-ekonomik sebeplerden kaynaklanan ihtiyaçların zorlayıcı etkisi olmuş, bu sebeple daha geniş açıklıklarının geçilmesi, ekonomik yöntemler dahilinde, bilgi ve tecrübe birikimi zorlanarak, sürekli daha geniş açıklıklar geçilmeye ve bu sebeple, geleneksel yığma sistemler terk edilerek, betonarme, öngerme beton ve çelik sistemleri tek başlarına veya birarada kullanımı söz konusu olmuştur.

Bu noktada geline en ileri nokta geniş açıklıklı asma sistemler olmuş, Tacoma köprüsünün çökmesinden sonra araştırmalar yoğunlaştırılarak sistem sandık kirişli ve ortotropik döşemeli olarak günümüzdeki halini almış ve halen popülaritesini sürdürmektedir.

Geçilen açıklık büyüdükçe, inşaat ve montaj kriterleri zorlaşmakta, hesaplara sistemin bünyesinde oluşan ölü ve hareketlere yüklere ek olarak, rüzgar ve ısıl genişleme yükleri de dahil olmaktadır ve hassasiyet artmaktadır.

Yapının büyümesinin başka bir etkisi de estetik kavramlar üzerinde olmuş ve köprülerde ağırlıklı işlev olan fonksiyonelliğe ek olarak formun estetiği ön plana çıkmış, ister yoğun yerleşimli bir metropolde, isterse doğal güzelliği olan bir bölgede olsun, estetik kavram; sadelik niteliğinde fonksiyon ile eşdeğerde ve formun vazgeçilmez bir ögesi olarak belirmiştir.

3. ASMA KÖPRÜLERİN TASARIMI VE İNŞAATLARI

Asma köprüler kullanılan teknoloji geçiş mesafesi ve uygulama teknikleri bakımından en gelişmiş ve en uzun açıklık geçilebilen sistemlerdir. Özellikle su altı temellerinin çok derin seviyelerde yer alması ve bu sebeple ekonomik bakımından uygulanması veya ana köprü ayaklarının aşırı yükselmesi ve uygulamalarının mümkün olmadığı 600 m'den fazla açıklıklarda asma köprüler halen tek alternatif olarak kullanılmaktadır. Asma köprülerin taşıyıcılık bakımından en büyük avantajları ise çekme mukavemeti sıradan çelik malzemeye göre 5 kat fazla olan çelik kabloların ana taşıyıcı sistemin esasını oluşturması ve çelik kabloların ağırlıklarının taşıma kapasitelerine oranla çok düşük kalmasıdır [1].

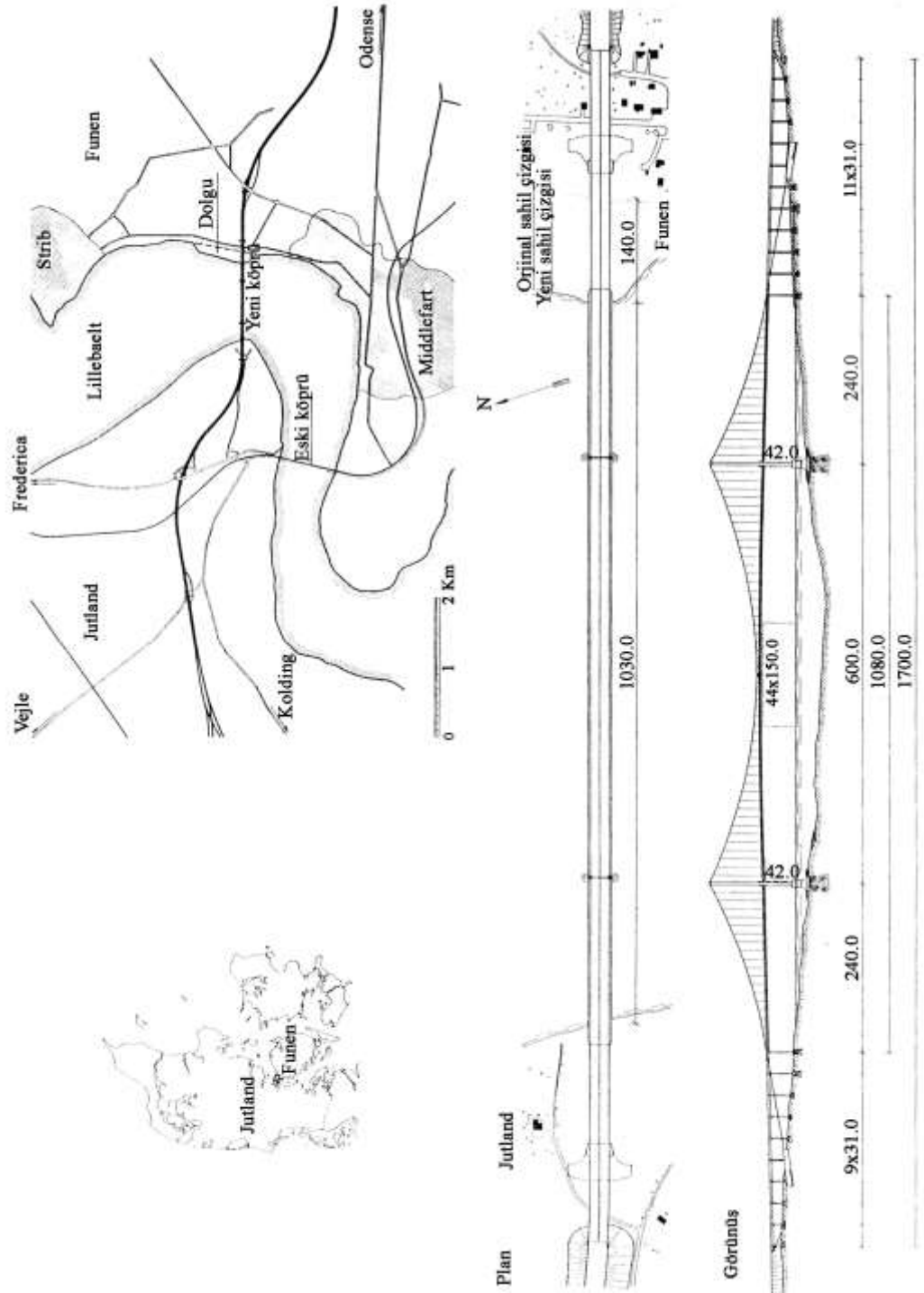
Daha önce bölüm 2'de genel özellikleri ve tarihsel gelişimi bakımından incelenen asma köprülerin tasarım ve yapım süreçleri; mevcut bulunan kaynakların; Danimarka'da 1970'lerin başında tamamlanan Lillebaelt köprüsü ve ülkemizde 1990'ların başlarında tamamlanan Fatih Sultan Mehmet köprüleri hakkında daha geniş kapsamlı bilgi içermesi bakımından bu köprüler referans verilerek incelenecektir.

3.1. Proje Temel Esasları

3.1.1. Lillebaelt köprüsü (proje özeti)

Lillebaelt köprüsü Danimarka'da Jutland ve Funen sahilleri arasında asma sistemle oluşturulmuş olan bir karayolu köprüsüdür (Şekil 3.1). Geçiş mesafesi asıl olarak 1200 m uzunluğunda olup, Funen sahilinde inşa edilen yapay yarımada ile geçiş mesafesi 1000 m uzunluğa indirgenebilmiştir. Lillebaelt köprüsünde topografik şartların etkisi sonucunda 3 açıklıklı ve her açıklığı asma sistemiyle kurulan tipte bir köprü inşa edilmiştir [7] ve yan açıklıkların sahil ile bağlantısı her iki sahilde de viyadükler inşa edilerek tamamlanmıştır. Viyadükler ile asma sisteminin birleşimi, rijitlik farkından kaynaklanabilecek farklı deformasyonların sistem bütünlüğüne

zarar vermesi bakımından alt noktadan mafsalı yan kuleler kullanılarak çözülmüştür.



Şekil 3.1 Lillebaelt köprüsü vaziyet plan ve görünüşü [11]

Asma sistem oluşumunda, iki ana kule arasında yer alan orta açıklık 600 m yan açıklıklar ise her biri 240 m uzunluğunda olup, asma sistemin toplam uzunluğu 1080 m olmuştur. Üç açıklıklı asma sistem kulelerin yüksekliğini azaltarak zemine

aktarılabak yükün azaltılması a macı ile terci h edil miştir. Yan açıklıkları n t ü müyle viyadük olarak yapılabaması ise, sahildeki zemin taşı na kapasitesini n düşükl üğü sebebi ile ekonomik bir çözü m oluşturulan ması, yapı m süreci ni n uzaması ve topografik şartlardan dolayı viyadüklerin bu bölünde su seviyesinde bulunması sebebi ile terci h edil me miştir.

Üç açıklıklı as na köprülerde, ana kablolar yan kulelerin üzerinden geçerek ankraj bloklarına ulaş makt a olup, yan kuleler ve ankraj bloğu arasında eğik destek kabl osu olarak görev yap maktadırlar. Ankraj blokları, yan kulelerin 180 m gerisinde ve zemin seviyesi ni n altında yer al mışlardır.

Ana kuleler betonar ne olarak inşa edil mişler ve deniz seviyesi ni n 118 m yukarısına kadar uzatıl mışlardır. Kulelerin üzerinde yer aldığı köprü ayakları pratikte birbirlerine eşit büyükl ükte tasarlanmış olup, su seviyesi ni n ortalama 20 m altına kadar uzan maktadırlar. Pnömatik keson olarak hazırlanan köprü ayakları, 45-49 m arasında değışen derinlikte çakılan betonar ne kazıklar üzerinde yer al maktadırlar.

Ana kablolar kule üzerinde yer alan kablo se nnerlerine ot ur makt a olup, orta açıklıkta kabloların oluşturduğu zincir eğrisi ni n yüksekli ği 67 m dir ve orta açıklığa oranı 1/9 olarak tasarlan mıştır.

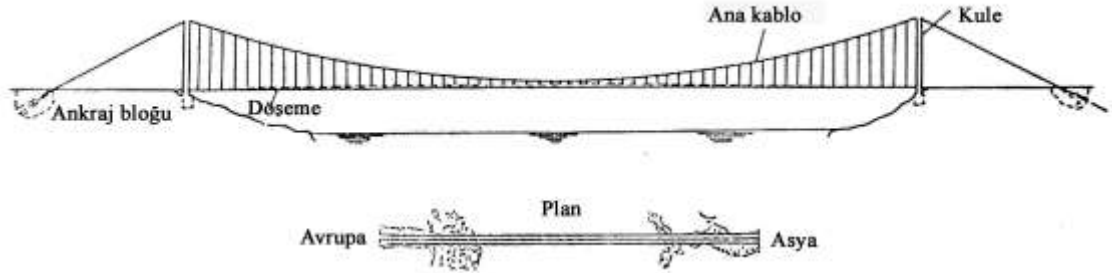
Köprü döşemesi sandık kiriş olarak inşa edil miş ve konstrüksiyon yüksekli ği 3 m dir. Ana kule ve yan kulelerde, geçiş ekseninde yatay hareketlere olanak ver mek için genleş me derzleri oluşturul muştur.

As na sistemin uç noktalarında, karada inşa edil miş olan viyadükler ve yan kuleler yer al mıştır. Viyadükler as na yapı ve sahil arasında kalan yolu düzgün bir seviyede birleştir nek a macı ile tasarlan mışlardır. 279 m uzunluğunda Jutland ve 341 m uzunluğunda oluşturulan Funen viyadükleri ile geçiş uzunluğu toplamda 1700 m ye ulaş mıştır.

Lillebaelt köprüsünün projelendir me ve yapı m aşaması 1965-70 yılları arasında tamamlan mıştır. Yapı mda toplam 88,000 m³ beton, 13,000 ton çelik ve 4,200 ton çelik kablo kullanı l mıştır [11].

3.1.2 Fatih Sultan Mehmet köprüsü (proje özeti)

F. S. M köprüsü İstanbul boğazında Avrupa ve Asya kıtaları arasında asma sistem olarak inşa edilmiştir. Yapılış amacı 1. Boğaz köprüsünün yükünü hafifletmek ve transit geçişlerde öncelikli olarak kullanımı kapsamaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Fatih Sultan Mehmet Köprüsü vazi yet planı ve görünüşü [12]

F. S. M köprüsü geçiş açıklığı 1090 m uzunluğundadır. Su üstü geçiş yüksekliği 64 m'dir. Asma sistemi yan açıklık olmadan, tek açıklıklı olarak tasarlanmıştır. Bu duruma topografik şartlar ve her iki sahildeki yerleşim özellikleri sonucunda karar verilmiştir. Geçişin uçlarında yamaçların dik olması, yan açıklıklara, asma veya viyadüklü sistem olarak ihtiyaç gerektirmezdir. Köprü ayaklarının altında yer alan zeminin kaya oluşumu içerisinde yer alması ek önlemler alınmasını gerektirmediğinden kule temelleri ve ankrj bloklarının yapısına olanak vermiştir. Tek açıklıklı sistem sayesinde, geçişin tek aralıkta 1090 m olduğu göz önüne alındığında ekonomik bakımdan oldukça tasarruf sağlanmıştır.

Ana kablolar, kule tepelerini aşarak ve devamında geri destek görevi yaparak doğrudan ankrj bloklarına bağlanmıştır.

Kulelerin yer aldığı zeminin, yamaçta kaya tabakası üzerinde olması ve deprem analizleri sonucunda çelik olarak inşa edilmesi uygun görülmüştür. Kule temelleri Lillebaelt köprüsüne oranla, karada uygulandıklarından daha basit bir şekilde uygulanmışlar ve çelik kulelerin alt kısımları, taban kısmından 5 m yüksekliğe kadar temel betonuna gömülmüştür.

Döşemeler ise 3 metre konstrüksiyon yüksekliğine sahip olan sandık kiriş yöntemi ile oluşturulmuştur. Lillebaelt köprüsünden farkı her iki uçta 2.8 m'inde yaya yolları bulunmasıdır.

F. S. M köprüsünü projelendirme ve yapım aşaması 1985-90 yılları arasında tamamlanmıştır. Yapıda toplam 132,000 m³ beton, 22,000 ton çelik ve 10,250 ton çelik kablo kullanılmıştır [12].

3.2 Asma Köprülerde Tasarım Kriterleri

Asma köprülerde oluşan hareketli ve hareketsiz yükler, döşeme tarafından askılara, askılar tarafından ana kablolar, ana kablolar tarafından ankraj bloklarına iletilmekte ve ankraj bloklarında oluşan sürtünme ve basınç kuvvetleri ile zemine aktarılmaktadır. Ana kabloların kulelerde yön değiştirilmesi, düşey yönde reaksiyon oluşturarak yüklerin bir kısmını köprü ayakları sayesinde zemine aktarılmasını sağlamaktadır. Üç açıklıklı asma sistemlerde yan kulelerde aynı durum oluşmaktadır.

Kabloların kule tepelerine mesnetlenmelerinden dolayı kablolarında oluşan yükler, bu noktalarda gerili oluşmasına sebep olmaktadır. Bu yükler montaj sırasında veya köprü tamamlandıktan sonra trafik, ısı genleşmeler gibi sebeplerden kaynaklanmakta olup, kulelerde eğilme momentleri oluşturmaktadır.

Köprü döşemesinde ise fren yükleri ve ısı farklarından dolayı yatay hareket ve genleşmeler oluşmaktadır. Özellikle ısı genleşmeler büyük önem kazanmaktadır. Lillebaelt köprüsünde, geçiş ekseninde oluşan genleşmeler yan açıklıkta, merkeze doğru 350 mm sahile doğru ise 250 mm olarak belirlenmiştir. Bu deformasyonlar merkez açıklıkta ± 750 mm'ye kadar çıkabilmektedir [11]. F. S. M köprüsünde de benzer deformasyonlar geçiş açıklığında ± 1000 mm olarak oluşmaktadır [12].

Köprü döşemesinin diğer görevi ise yatayda oluşan rüzgar yüklerine mukavemet göstererek kutu kesitli döşemenin uçlarında bulunan rüzgar mesnetleri yardımı ile bu yükleri kulelere iletilmektedir.

3.2.1. Yükler

Tasarımda dikkate alınması gereken yükler taşıyıcı sistemin oluşturduğu hareketsiz veya ölü yükler, trafikten kaynaklanan hareketli yükler olarak hesaplara katılmakla beraber ısı genleşmeler ve rüzgar yükleri de dikkate alınmak zorundadır. Bu

hesaplar yapılırken daha önce uygulanan, benzer veya farklı coğrafya ve iklim koşullarında yer alan örneklerini incelendiğinde büyük fayda vardır [2]. Beklenen yükler, rüzgar yükü ve deprem yüklerine karışması ile 1.2, 1.25 ve 1.3 değerinde ortalama güvenlik katsayıları hesap değerlerine eklenmelidir [12].

3.2.1.1. Hareketsiz yükler

Hareketsiz yükler sistemin kendi ağırlığı ve kalıcı etkisi olan sabit yüklerden oluşmaktadır. Hareketsiz yükler hesaplanırken, köprünün işletme sürecinde oluşabilecek değişiklikler ve eklenmeler dikkate alınarak ağırlığın alt ve üst limitleri belirlenmelidir. Hesap yapılırken ilk olarak ana kablolar, askılar ve kule yükleri değerlendirilmeli ve döşeme ağırlığı ile süperpoze edilmelidirler. Döşemenin kesiti son halini; tamamlanmış sistemin etkin yük hesaplarının tamamlanmasından sonra almıştır. En elverişsiz yüklenme durumunda taşıma kapasitesi belirlenmektedir. Bu yük Lillebaelt köprüsünde 19.4 ton [11], F.S.M köprüsünde ise 16.1 ton kapasitesindedir [12].

3.2.1.2. Hareketli yükler

Hareketli yükler genel olarak trafik yükleri olarak değerlendirilmektedir. Ülkeler standartlarının yerine mevcut durumu ve gelecekteki artışlara göre ele alınması daha doğru olarak kabul edilmektedir. Standart olarak daha evrensel olması sebebiyle Amerikan veya İngiliz standartları benimsenmekle beraber; farklı ülkelerde mevcut durum ile karşılaştırılarak kabul edilmeleri gereklidir.

Lillebaelt köprüsü örnek alınırsa, şerit yükleri ortalama trafik yüklerine bağlı olarak standart ve sabit bir değer belirlenmiş ve ağır araç trafiğine olanak verecek şekilde birtakım kabuller yapılmıştır.

Lillebaelt köprüsündeki trafik yükleri [11];

- Bir şeritteki trafik yükü 0.8 t/m ve bir yöndeki toplam yük 2.4 t/m olarak alınmıştır. Bu değerler trafiğin ani olarak durması olasılığına karşı belirlenmiştir. Aksi halde normal şerit yükü 0.5 t/m olarak kabul edilecektir.
- 72 ton ağırlığında 3 akslı bir araç, bir şeritten darbe yükleri dahil olacak şekilde geçebilmektedir. Ayrıca trafik akışına kısıtlamalar getirilerek 150-

200 ton ağırlığında olan araçlar mevcut yük dağılımlarına göre geçiş yapabilir.

3.2.1.3 Isı etkisi

Isı etkisi, özellikle çelik yapı elemanları ve kablolar bakımından dikkate alınması zorunlu bir etkidir. Ortalama sıcaklık Lillebaelt köprüsünde 18°C F. S. M köprüsünde ise 20°C olarak kabul edilmiştir. Lillebaelt köprüsünde çelik üst yapı elemanları $+45$ ve -20 derece arasında değişen sıcaklıklara maruz kalabilecekleri esasına göre $\pm 35^{\circ}\text{C}$ değerinde ısı değişikliklerine göre tasarımı yapılmış, ayrıca mesnet ve birleşim noktalarında bu değerler $\pm 40^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir [11].

F. S. M köprüsünde ise sıcaklık değişimi $\pm 30^{\circ}\text{C}$ arasında kabul edilmiş ve ayrıca kule dış plakası yüzeyinde güneş ve gölge durumuna göre ortalama 15°C fark olacağı kabul edilmiştir [12].

3.2.1.4 Rüzgar yükü

Köprüye etkileyen mevcut rüzgar yükleri, köprünün bulunduğu bölge, iklim şartları ve daha önce uygulanan standart rüzgar yükü değerlerinin kombinasyonu olarak belirlenmelidir ve sabit değer olarak hesaplara katılmalıdır. Özellikle inşaat öncesi yapılan ölçümler, rüzgar yüklerinin belirlenmesi konusunda önemlidir. Bu ölçümlerde maksimum rüzgar hızı köprünün düşey eksen boyunca özellikle de, döşeme kotu ve kule üst noktası arasında her 10 m'lik periyotlar ile gözlenmelidir. Vadi ve benzeri topografyalarda bu durum rüzgar koridoru ve şiddetli türbülans oluşumları dolayısıyla daha da önem kazanmaktadır [13].

Lillebaelt köprüsünde, trafik yüklerinin dahil edildiği hesaplarda rüzgar basıncı 250 kg/m^2 ve trafik yüklerinin dahil olduğu hesaplarda 150 kg/m^2 olarak kabul edilmiştir. Rüzgar yükleri sadece taşınanmış olan taşıyıcı sisteme değil aynı zamanda inşaat sırasında, özellikle döşeme montajı sırasında da önem kazanmakta ve dikkate alınmadığı durumlarda tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Rüzgar yükleri ister yapı ister servis esnasında olsun köprünün yatay ve düşey tüm elemanlarını ilgilendirmektedir. Yapı elemanlarına ortalama 3 metre yükseklikte trafik şeridi, araçların üzerine etkileyen rüzgar yükü olarak dahil edilmelidir [11].

3.2.1.5 Fren yükleri

Köprü üzerinde oluşabilecek fren yükleri, ani fren ve ağır araç trafiğine ve dengesiz yüklenme hesapları dahilinde belirlenmelidir ve genişleme derzleri arasında oluşabilecek en elverişsiz durumlar dikkate alınmalıdır. Yapılan hesaplar mesnetler, bağlantılar ve bariyerler de güvenlik ve yüksek mukavemet ilkelerine göre uygulanmalıdır. Lillebaelt köprüsünde fren yükü maksimum değeri 100 ton olarak kabul edilmiştir [11].

3.2.1.6 Deprem yükleri

F. S. M köprüsünde deprem yükleri, köprünün geçiş ekseninde ve bu eksene dik yönde hesaba katılmış, yatay deprem katsayısı 0.1, dikey deprem katsayısı ise 0.55 olarak tasarıda yer almıştır. İlave olarak, her yapı elemanı titreşi mözelliğine göre, “Boğaz köprüsünün deprem mukavemeti için gerekli şartnameye uygun olarak tekrar ele alınmıştır[12]. Lillebaelt köprüsü, depremuşağı üzerinde yer aldığından, bu duruma yönelik bir kriter dikkate alınmıştır [11].

3.3 Sonuç

Asma köprülerinin 600 m üzerindeki geçişlerde halen tek alternatif olması, Lillebaelt ve F. S. M köprülerinde kullanılmalarını gerektirmiştir. Topografik ve coğrafik şartlardan dolayı, Lillebaelt köprüsü, kule temelleri su altında olacak şekilde ve üç açıklıklı asma sistemolarak ve özellikle alt yapı bakımından daha fazla ve karmaşık işlemlere maruz kalmış, F. S. M köprüsü ise bu bakımdan daha rahat gerçekleştirilmiş olup, kuleler arası orta açıklığın daha geniş olmasından dolayı, ana kablunun oluşumunda, daha kompleks bir yöntem kullanılmak zorunda kalmıştır.

Tasarım ve uygulamalarda yer alan hesaplara yönelik parametreler, sistem ve coğrafyaya bağlı iklim şartlarına göre farklılaşmış, ayrıca F. S. M köprüsünde bu hesaplara depremyükleri de eklenmiştir. Katsayılar değişik olsa da, aynı başlıklar altında, depremyükü haricinde, her iki örnekte de benzer düşünce ile ele alınmıştır.

4. ASMA KÖPRÜLERİN ALT YAPISI

Köprü alt yapısı, köprü üst yapısı olan yolun taşıtılmasını sağlayan bölümlerin ortak adıdır. Genel olarak temelleri ve mesnetleri ile birlikte kenar ve orta ayakları kapsamakla beraber, asma köprülerde alt yapı kavramına kule ve ankraj bloklarını da dahil etmek gereklidir.

Alt yapının en alt seviyesinde bulunan temeller diğer köprülerde olduğu gibi asma köprülerde de yüzeysel ve derin temeller olarak oluşturulabilmektedir.

Yüzeysel temeller; genel olarak açık hafriyat sonrasında yapılmaktadırlar. Tekil, sürekli, radye ve kütleli olarak hazırlanabilirler.

Derin temeller ise daha kapsamlı ve karmaşık bir üretim sürecine sahiptirler. Karada kütleli olarak derin seviyeli temeller olarak uygulanabildikleri gibi su altında genel olarak kazık ve/veya kesonlar ile oluşturulabilmektedirler [1].

Kazıklar, beton, çelik veya ahşaptan imal edilen büyük ölçekli çiviler olarak tanımlanabilirler. Zeminine doğrudan çakma veya açılan deliklere yerleştirme yöntemi ile uygulanabilirler. Kesitleri kare, dikdörtgen dairesel veya I-kesitli olabilir[2].

Kesonlar ise su seviyesinin altında yer alarak temellerde kullanılmaktadırlar. Kuru havuz veya karada; kısmen veya bir bütün halinde imal edilerek açılan temele batırılırlar. Tek başlarına köprü ayaklarına mesnet oluşturabildikleri gibi zeminin taşıma kapasitesinin düşük olması durumunda kazıklar ile birlikte kullanılabilirler. İçlerine kısmen veya tamamen yapılan beton dolgu sonrasında, su seviyesine kadar olan üst başlıklarına köprü kuleleri inşa edilebilecek şekilde hazırlanırlar [1].

4.1. Temel Tipleri

4.1.1. Yüzeysel temeller (Açık temeller)

Köprü inşaatlarında yüzeysel temellerin uygulanabilmesi zeminin taşıma kapasitesini zemin verdiği durumlarda yapılabilir. Düşük kapasiteli zeminlerde geniş oturumu olarak zemin emiyet gerilmesi sınırlarını aşmadan yapılabilirler. Yüzeysel temeller açık, sürekli, bileşik veya radye temel olarak köprü inşaatlarında yer alabilirler. Ancak asma köprülerde yüklerin ağırlığı sebebi ile normalden çok daha büyük ebatlarda kütleyle sahip olarak yapılmaktadırlar. Örneğin F. S. M köprüsünde temel ebatları temel papucunda 18x14 m ebatlarında ve yüksekliği ortalama 5 m kule kolonu olarak ise 9x10 m ebatlarında ve yüksekliği zemin kotuna göre 8-19.5 m yüksekliğinde değişen tekil temeller kullanılmıştır [12].

Açık temellerin uygulama kriterleri aşağıdaki gibidir;

- Temel tipi ve ebatları taşıyıcı sistemin düzenine zemin taşıma kapasitesine bağlıdır.
- Bitişik durumda bulunan temellerin arasında, hesaplamalar ve zemin durumuna göre mesafe bırakılmalı ve ek basınç gerilimi oluşmaması için temeller üst üste yerleştirilmemelidir.
- Drainaj, izolasyon gibi koruyucu önlemler yağışlardan önce tamamlanmalıdır.
- Özellikle elastik zeminlerde, kazık çakılardan çözüm getirilebiliyorsa, yükün yayılması için radye temeller tercih edilmelidir.
- Zemin su seviyesinin yüksek olduğu uygulamalarda su seviyesini düşürmek amacıyla, temel alt kotundan düşük seviyede çukur veya kuyu açılarak su seviyesi düşürülmelidir [1].

4.1.2. Kazık temeller

Zemin taşıma kapasitesinin düşük olması ve sağlam zeminin çok derinde olması durumunda kazık temeller tercih edilmektedir. Kazıklar sayesinde karada ve su altında fazla hafriyat yapılmadan ve temel ebatları daha küçük tutularak, daha yüksek seviyede köprü ayaklarına mesnet oluşturulabilmektedir [2].

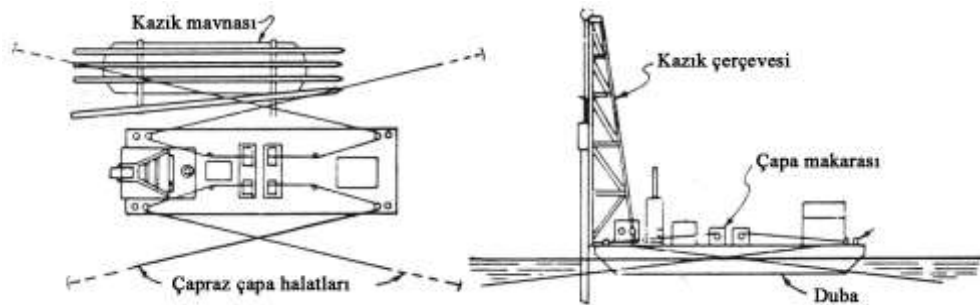
Kazık tipleri, ebatları ve derinlikleri zemin koşulları ve köprü üst yapısına bağlı olarak değişmektedir. Köprü inşaatlarında kazık kullanmanın ön koşullarından birisi de ortalama 40 m derinlikten sonra hafriyatın emniyet için şevlendirilmesi de söz konusu olduğunda teknik ve ekonomik bakımdan uygun olmasıdır. Ayrıca kazıkların oturduğu zeminin yeterli düzeyde sağlanması da gereklidir.

Kazıklar uygulanmalarına göre çakma veya delme kazıklar olarak 2 ana gruba ayrılmaktadırlar. Malzeme olarak ahşap, çelik, yerinde döküm beton ve prekast kazıklar kullanılabilir. Ancak en çok tercih edilen kazıklar korozyona ve doğal etkilere karşı betonarme ve prekast kazıklardır [2].

4.1.2.1. Prekast çakma kazıklar

Prekast çakma kazıkların kullanılmaları, özellikle inşaat sürati ve kalitesi bakımından tercih edilmektedir. Beton kalitesi ve donatı montajı doğru olarak yapılabilir, inşaat hataları en aza indirgenmektedir. Ebatlarından dolayı daha hafif ve taşınabilir olmaları sebebi ile su seviyesinin altında kalan uygulamalarda, kolaylık sağlanmaktadır. Ayrıca eğik olarak çakılabilirleri sayesinde yatay yüklere karşı temel mukavemeti artırılabilirler [1].

Prekast çakma kazıkların dezavantajları ise 30 metreden fazla derinliklerde ve çok sert kaya tabakalarında uygulanma olanaklarının zor olmasıdır. Ayrıca kazık kesitlerinin küçük olması ile (ortalama 50x50 cm) yük taşıma kapasiteleri düşüktür (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Döşeme ile kazık çakılması

4.1.2.2 Yeri nde dökü m kazı kl ar

Yerinde dökü m kazı kl ar 50 m üzerinde derinliklere ve sert ze mnlere uygulanabil mektedirler. Ebatları prekast çakma kazı klardan daha büyük (maks. 100x100 cm) olabil mekte ve taşı ma kapasiteleri nispeten daha yüksek ol maktadır.

Yerinde dökü m çakma kazı kl arın en önemli dezavantajları ise beton dökü m yüksekli ğinin aşıl ması dolayısıyla segregasyon oluşumu ve donatının montaj ve beton dökü mü sırasında ho mjenli ğinin bozularak mukave meti olumsuz yönde etkile mesi dir. Ayrıca mantolama yapı lmadan dökülen kazı klarda, kıs mî toprak akması veya şerbetin sızması gibi durumlar oluşabil mektedir. Ayrıca kazı k çapının 100 cm nin altında ol ması sebebi ile taşı ma kapasitesi sınırlıdır [1].

4.1.2.3 Yeri nde dökü m del me kazı kl ar

Bu tip kazı kl arın en önemli avantajları, çok derin seviyelere ulaşılabil mesi dir. Kazı k çapı, çakma kazı klara oranla daha fazla oluşturulabil mekte ve taşı ma kapasitesi arttırılabil mektedir. Bu sayede kazı k adedi azaltılabil mekte ve yapı msüreci hızlı ve ekono mik olarak ta mamlanabil mektedir. Ayrıca sert ze mnlere kolaylıkla uygulanabil mektedir.

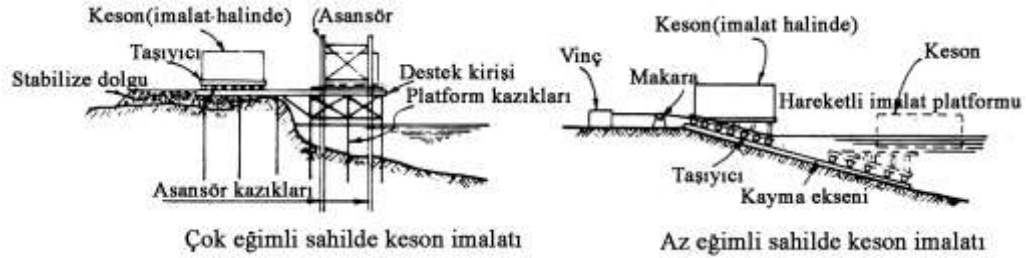
Beton ve donatıda karşılaşılan olumsuzluklar yerinde dökü m çakma kazı kl ar ile aynı ol makla beraber kazı kl arı taşı ma kapasitelerinde önemli bir etken olan yüzey sürtünme mukave meti del me yöntemi nden dolayı azal makt a, ayrıca ekipman maliyeti art maktadır [1].

4.1.3 Kesonlar

Kesonlar akıntı nın yoğun ol du ğu su üst ü geçişlerde tercih edilen bir temel tipi dir. Ze minin zayıf ol ması durumunda kazı kl ar ile birlikte kullanılabilirler. Şiddetli akıntıların ol du ğu su altı temellerinde devril me, sürüklen me, aşındırma etkilerine karşı masif bir alt yapı oluşturul ması amacı na yönelik olarak uygulan maktadırlar [1].

Kesonlar karada veya yüzer havuzlarda inşa edilerek, köprü ayaklarının düşey eksenine taşındıktan sonra batınırlarak hazırlan maktadırlar. Yapı mdan önce akıntı yönü ve şiddeti, ze min koşulları, deniz taban kotu ve bu noktada oluş an dış basınç, kesonun çekil me rotasında su derinli ği, mevsimsel su seviyesi ve gelgitler, so ğuk iklimlerde buzlanma etkisinden dolayı oluş an basınç yükleri gibi çok yönlü

araştırmalar sonucunda projelendirme ve uygulama yapılabilir mektedir. Ayrıca zeminin sirtünme ve taşıma kapasitesi testleri de bu araştırmalar dahilinde yer almaktadır [15] (Şekil 4.2).

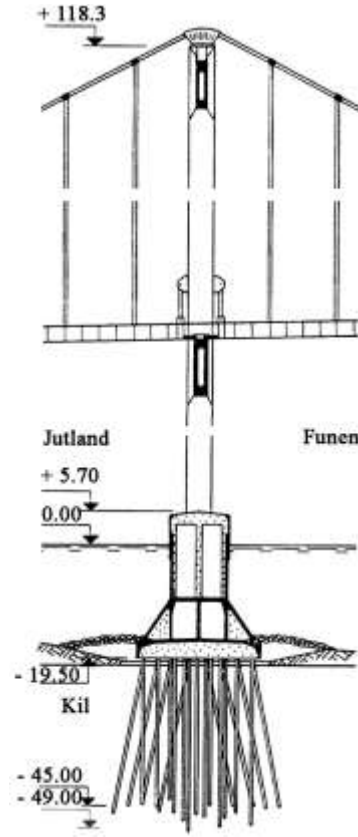


Şekil 4.2 Karada keson imalat yöntemleri [1]

Akıntı şiddetinin yoğun olması durumunda, özellikle batırma işlemi öncesinde yapay saptırıcı engeller kullanımı gerekebilir mektedir. Bu engel genellikle akıntı yönünde bent inşaa edilmesi veya kırma taş dolgu ile duşturulabilir mektedir [1].

4.1.4 Lillebaelt köprüsü temelleri

Bu bölümde köprü temelleri, kapsamlı ve farklı tekniklerin birarada kullanılması dikkate alınarak Lillebaelt köprüsü örneği ile keson ve kazıkların birlikte uygulanması bakımından açıklanacaktır (Şekil 4.3).



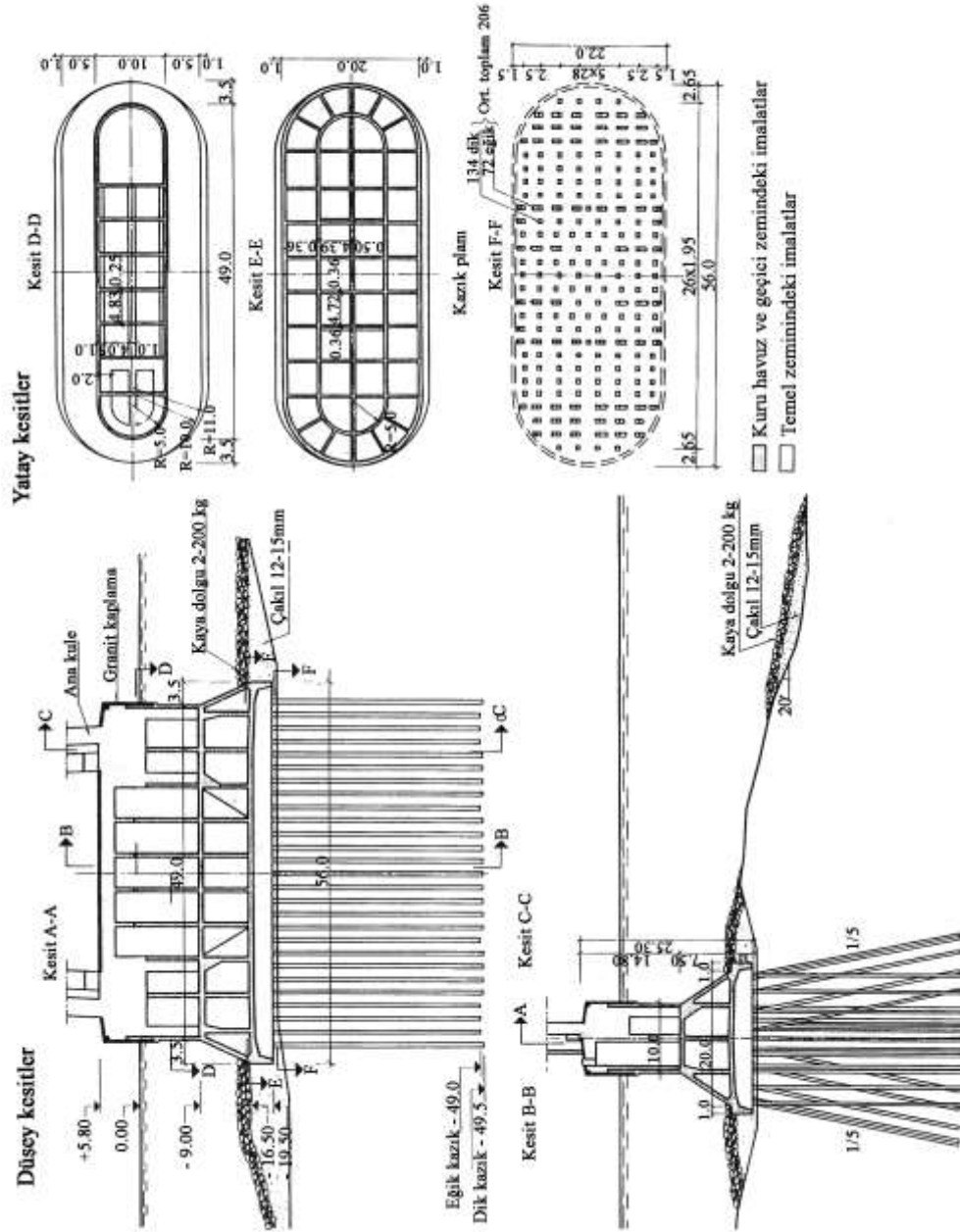
Şekil 4.3 Ana kule ayağı, Jutland [11]

4.1.4.1. Tasarım (Kazılar)

Ana kule temelleri, prekast çakma kazılar üzerine betonarme keson olarak tasarlanmıştır. Kazılar, zeminin kil tabakası üzerinde yer alması zorunluluğundan dolayı, temelin kararlı ve stabil olarak yerleştirilebilmesi amacıyla yönelik olarak kullanılmıştır. Kazı üzerinde yer alan kesonlar 3 ana etaptan tasarlanmıştır. İlk etap karada inşa edilmiş, sonrasında inşaat süreci dikeye alınarak daha sıkı olan deniz tabanında geçici inşaat alanına çekilerek tasarlanmış, son etapta ise kule ekseninde batırılarak kazılara basınçlı hava hücresiyle beton dökülmesi yöntemiyle kazılara bağlanmıştır [11].

- **Zemin Şartları**

Kule temelleri, pratikte aynı ebatlarda tasarlanmıştır. Jutland ayağı sahil den 200 m açıklıkta yer almaktadır. Bu noktada deniz taban seviyesi -17.5 m derinlikte olup kuzeye doğru 1/10 oranında eğimlidir. Zemin -20 m derinliğe kadar kil, kum ve çakıl dan oluşmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Ana kule ayağı, Jutland-Betonar ne sistemi ve kazık planı [11]

Funen ayağı ise sahil den 360 m açıklıktadır. Ancak bu mesafe, stok sahası için yapılan dolgu ile 220 m'treye indirgenmiştir. Mevcut deniz taban seviyesi bu yakada -15 m derinlikte olup batıya doğru 1/10 oranında eğimlidir. Temelin oturması gereken kil tabakası -24 m derinliktedir [11].

Ön projelerde taban seviyesinin -20 m kotunda olması öngörülmüş ancak bu seviyeler, kesin projelerde Jutland ayağında -19.5 m ve Funen ayağında -18.7 m olarak netleştirilmiştir [14].

- **Temel kazıkları**

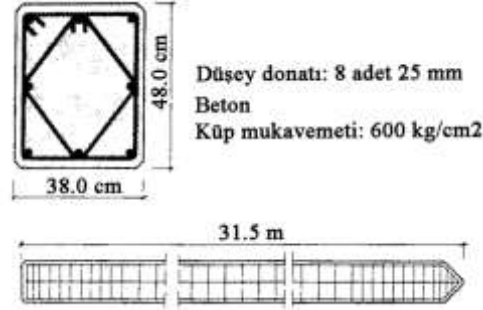
Köprü ayaklarının kil zeminine oturmasından dolayı kazıkların tipleri, ebatları ve derinlikleri oldukça detaylı olarak hesaplanmış ve bu amaçla yönelik çok sayıda deney yapılmıştır. Deneme amacıyla yönelik olarak her iki sahilde test alanları oluşturulmuştur ve uygulanan testlerde, çeşitli derinliklere kazık çakılarak çelik ve prekast beton çakma kazıklar denenmiştir [16].

Kazık çakılması deneylerinde, test kazıklarına, her iki sahilde birer adet olmak üzere 300 ton kapasiteli hidrolik şahmerdan ile basınç uygulanmıştır. Test sonuçlarında kazık yüzeyi ve kil tabakası arasında oluşan aderans; betonarme kazıklarda 14 t/m^2 , çelik kazıklarda ise 10 t/m^2 olarak tespit edilmiştir [14]. Fiziksel dayanımlarının yanı sıra ekonomik olmaları betonarme kazıkların genel olarak tercih edilmesine sebep olmaktadır. Ancak çakma işleminde oluşan boşluklar kazıkların üzerinde yatay yük oluşturmakta ve kil gibi yumuşak tabakaların mukavemetini azaltmaktadır. Bu sebeple projelendirme sırasında oluşması beklenen boşlukların minimum seviyede tutulması gereklidir [1].

Bu amaçla yönelik olarak en etkin alınabilecek önlemleri mukavemet değerini azaltmadan kazıkların kazık sayısını olabildiğinde azaltmak ve basınç mukavemetlerini arttırmaktır. Lillebaelt köprüsünde beton küp mukavemetleri, çalışmalar sonucunda 600 kg/cm^2 olarak belirlenmiş ve beton mukavemeti öngermele beton seviyesine göre derinleştirilmiştir. Testler sonucunda bu fiziksel özelliklere sahip kazıkların hasarsız olmaları gözlemlenmiştir. Kazıkların sayısının azaltılması ekonomik bakımdan da oldukça avantajlıdır [14].

Kesonların altında hazırlanan kazıklar prekast olarak $38 \times 48 \text{ cm}$ ebatlarında ve 31.5 m boyunda imal edilmiş olup her kazıkta 8 adet $\varnothing 25 \text{ mm}$ nervürlü demir kullanılmıştır. Hazırlanan projede her kule ayağında 206 adet kazık kullanılması ve bu kazıkların -46 ve -49 m seviyesi arasında çakılmaları öngörülmüştür. Yine yapılan hesapların sonucu olarak yatay yüklere mukavemetin ve burulma rijitliğinin

arttırılması amacıyla ile her kule ayağında toplam 72 adet kazığın geçiş ekseninde eğik olarak çakılmasına karar verilmiştir. Kazıklar 1/5 eğimle çakılmıştır [16](Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Temel kazık ebatları ve donatısı [11]

Köprü ayaklarının geçiş eksenine dik olarak yerleştirilmesi sonucunda kısa ekseninde yüksek oranda rijitlik sağlandığından bu ekseninde eğik kazık çakılmasına gerek kalmıştır.

Uygulama sırasında, proje değerlerinden çok az oranda sapma olmuştur. Uygulama sonucunda Jutland ayağında 211 adet kazık çakılmıştır. (136 adet dik, 75 adet eğik), Funen ayağında ise bu sayı 220 adet olmuştur (144 adet dik, 76 adet eğik). Jutland tarafında kazık seviyeleri uygulama sonucunda -45 ve -49 metre derinlikte, Funen tarafında ise bu seviyeler -44 ve -49 metreler arasında kalmıştır. Her iki kule ayağında da kazık seviyeleri % 70 oranında -45 ve -46 metre derinlikte uygulanmıştır. Kazıkların aralıkları her iki ekseninde 1.95 ve 2.8 m arasında değişen mesafelerde oluşturulmuştur [11].

Kazıklar, ortalama 200 ton (100 kg/cm^2) basınç yüküne mukavemet gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Bu anlamda her temelde toplam ölü yük ortalama 41,000 ton olarak oluşmuştur. Toplam ölü yüklerin açılım yapıldığında 14,000 ton köprü ayaklarından, 13,000 ton betonarme kulelerden ve 13,000 ton asma yapıdan kaynaklandığı görülmektedir.

Ölü yüklere ek olarak, coğrafik ve iklimsel şartlardan dolayı kışın suyun donmasından dolayı kazıklara ek basınç kuvveti etkietmekte ve teorik olarak her kazığa 5-10 t/ m arasında değişen basınç kuvveti oluşmaktadır. Hareketli ve yatay

yükler, ölü yüklerle eklendiğinde her kazığa etki eden basınç yükünün maksimum 350 ton/kazık olduğu hesaplanmıştır[14].

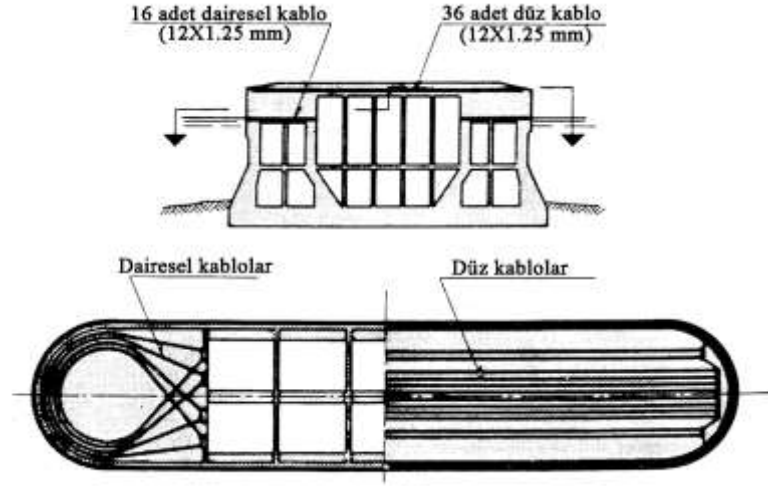
Her kule ayağında, kazık imalatlarında 1200 m³ beton ve 270 ton donatı kullanılmıştır.

- **Kesonlar**

Köprü ayaklarında kullanılan kesonlar betonarme olarak inşa edilen, kenarları akıntı etkilerine karşı yarı m daire olarak şekillendirilmiş ve iç hacimleri hücrelere bölünmüş olan dikdörtgen prizmalardır. Üst noktadan su seviyesinin -9 m kotuna kadar olan bölüm 10 m genişliktedir. Bu seviyeden daha derine inildikçe genişlik artmakta ve tabanda 22 m'ye ulaşmaktadır. Uzunluk ise aynı seviyeler dik kate alındığında minimum 49 ve maksimum 56 m olmaktadır. Tabanda yer alan basınçlı hava hücresinin yüksekliği 2.8 m olarak belirlenmiştir.

Hücrel olarak inşa edilen iç hacim çalışma alanı ve -9 m kotunda yer alan döşemeler ile yatay eksen ve perde duvarlar ile düşey eksen de desteklenmektedir. Duvar kalınlıkları iç hacimde -9 m kotuna 25 cm bu kotun altında ise 36 cm olarak belirlenmiştir. Dış duvar kalınlıkları ise 1-2 m arasında değişmektedir.

Ana kulelerden gelen yükler 6-7 m kalınlıkta olan ve kesonun üst noktasında yer alan betonarme bloklar tarafından aktarılmaktadır. Bloklar, kule sütunlarının eksenlerine ve kesonların dairesel kenarlarının üzerinde yer almıştır. Blokların mukavemetlerini arttırmak için her blokta 16 adet (12x1.25 cm) ve dairesel biçimde yerleştirilmiş öngerme kablosu, blok tabanına yerleştirilerek ek takviye yapılmıştır. Öngerme işlemi blokların üst noktalarında da uygulanmış ve 36 adet (12x1.25 cm) kablo düz olarak yerleştirilmiştir (Şekil 4.6). Öngerme işlemi ana kule sütunlarından kaynaklanan basınç gerilmeleri dik kate alınarak hesaplanmış ve uygulanmıştır. Bu anlamda kesonlar, üst bölümde çekme, alt bölümde basınç gerilmelerine karşı mukavemet gösteren bir kiriş olarak görev yapmaktadır [11].



Şekil 4.6 Ana kule ayağı nın öngerili mi [11]

Keson i malatlarında 10,800 m³ beton, 1150 ton donatı ve 20 ton öngerme kabl osu kullanı lmıştır.

- **Ze m i nde aş ın m a tedbi rleri**

Köprü ayakları nın çevresinde ze m i n i n aş ın m a s ı n ı engelle n e k a m a c ı i l e dolgu yapı lm ıştır. Projenin başlangı ç sürecinde, dolgunun iki tabaka halinde yapı l m a s ı öngör ü l mü ş t ü r. Alt tabakada dane ağı r l ı ğ 2-15 kg arasında de ğ i ş e n ve ortalama kalı n l ı ğ 0.5 m olan iri ç a k ı l , üst tabakada ise dane ağı r l ı ğ 10-200 kg arasında de ğ i ş e n ve ortalama kalı n l ı ğ 1 m olan kaya tabakası ol u ş t u r u l m a s ı planlanm ıştır.

Kesin projede ise ç a k ı l tabakası 4-16 mm arasında standartlaşt ır ı l m ı ş , üst tabakada ise 2-200 kg arasında ağı r l ı ğ a sahip olan iri ç a k ı l ve kaya karış ı m ı kullanı lm ıştır. Aş ı n m a tabakası, ayakları n alt noktalarında, temel yan dolguları n kapsayacak şekilde, ortalama 5 m yüksekli ğ i nde ve akı ntı yönünde 30 m akı ntı ya d i k do ğ r u l t u d a ise 15 m m e s a f e i l e kesonun çevresi nde ol u ş t u r u l m u ş t u r.

Aş ı n m a koru m a s ı n ı n yanı sıra, Jutland aya ğ ı nda ze m i ndeki eğ i m den dolayı olası bir heyelan ı önle n e k a m a c ı i l e köprü aya ğ ı n ı n 70 m doğusuna do ğ r u , 60 m geni ş l i ğ i nde ve ortalama 3.5 m yükseklikte ta ş dolgu 20° aç ı i l e uygulanm ıştır. Dolgu toplam 4200 m² alana sahip olup balast görevi yapmaktadır. Aş ı n m a ve balast uygul a m a s ı i ç i n toplam 9000 ton dolgu yapı lm ıştır.

4.1.4.2 İnşaat

Temel inşaatı sırasında diptarınası sonrasında, belirli bir sıraya göre aşağıda yer alan işlemler gerçekleştirilmiştir.

- Kazık çakılması
- Kuru havuz üzerinde kesonun ön yapımı
- Kesonun geçici inşaat zeminine çekilmesi
- Geçici inşaat zemininde kalan imalatların tamamlanması
- Taban bloklarının oluşturulması
- Final pozisyonuna çekilerek, taban blokları üzerinde batırma işlemi
- Kazıklar ve kesonun, basınçlı hava hücresine beton dolgu yapılarak birleştirilmesi.
- Üst tabaka betonunun dökülmesi ve germe işlemi sonrası kesonun imalatının tamamlanması.

Bu işlemlerin başlangıcında, deniz tabanında -20 m derinliğe kadar diptarayıcısı tarafından hafriyat yapılmıştır. Hafriyat 1 ay sürmüş ve sonuçta Jutland ayağında 10,800 m³ ve Funen ayağında 27,800 m³ hafriyat çıkartılmıştır [11].

• Kazık çakılması

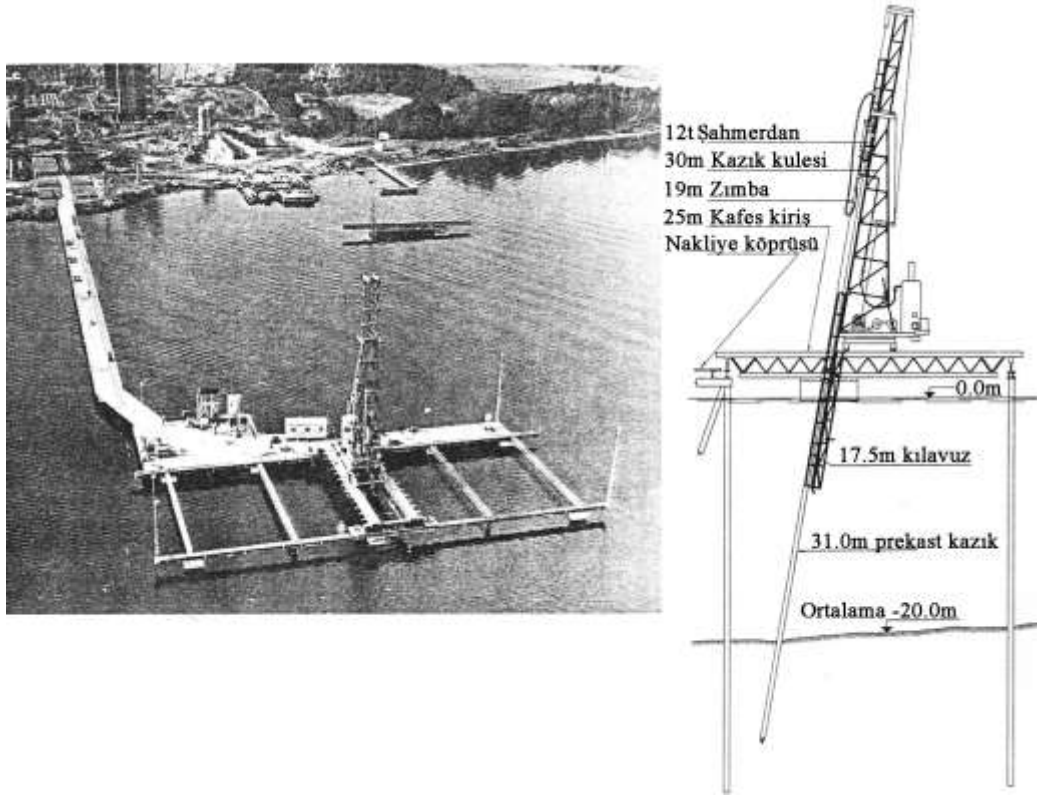
Temel inşaatında kullanılan kazıklar, üzerinde 12 ton darbe gücüne sahip olan ve 30 m yükseklikte kazık kulesi hidrolik şahmerdan ile çakılmışlardır. Her darbeye ortalama 80-90 cm itme gerçekleştirilmiştir. Kazık kulesi, kafes sistem olarak hazırlanmış olup, düşey ekseninde dönebilen ve eğilim oluşturulabilecek bir düzene sahiptir [16].

Kazık kulesi ve şahmerdan tarafından oluşturulan mekanizma, birbirleriyle bağlantılı, çelik kazık ve kafes kirişlerden oluşan 5 adet çerçeve ile inşa edilmiş olan platformun üzerinde yer almıştır. Her iki yatay ekseninde yerleştirilen ray sistemi ile, mekanizma temelinde her noktasına ulaşabilecek şekilde hareket kabiliyetine sahip hale getirilmiştir. Bu sayede kazık noktaları kolaylıkla belirlenmiş ve imalat süreci kısaltılmıştır. Kazık platformu sahil arası bağlantı, 200 m uzunlukta olan ve platforma benzer şekilde inşa edilen nakliye platformu ile sağlanmış ve nakliye işlemi platformüne kurulan raylı vagon sistemi ile gerçekleştirilmiştir [11].

Kazık i malatları sahildeki prekast sahasında yapılmıştır ve bütün kazıklar standart ebatlarda ve standart malzeme ile üretilmişlerdir. Her beton dökümü için 18 adet kalıp hazırlanmış ve kalıp malzemesi olarak plywood kullanılmıştır ve iki hafta süreyle su ile kür yapılmıştır. Kalıptan alınan kazıklar stok sahasına nakledilerek, bu bölgede ilk iki hafta ıslak kür uygulanmış, sonrasında ise iki hafta açık havada bekletildikten sonra kazıklar çakma işlemine hazır duruma getirilmişlerdir.

Beton işleminde hızlı priz alabilen çimento kullanılmış ve çimento dozu 425 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Akışlanlaştırıcı olarak çimento dozuna göre %2.66 oranında pozzolit kullanılmış ve su çimento oranı bu sayede 0.4-0.45 arasında tutulabilmektedir. Hızlı priz alna sonucunda beton küp mukavemetleri ilk 4 gün sonunda 560 kg/cm^2 , 14. gün sonunda 690 kg/cm^2 ve 28. gün sonunda 750 kg/cm^2 olarak oluşmuştur. Uygulanan kürleme, özenli ve hassas i malat sayesinde proje değeri olan 600 kg/cm^2 basınç mukavemeti aşılmıştır. Eşit ebata sahip her kazık için 5.8 m^3 beton kullanılmış ve her kazık 14 ton ağırlığa ulaşmıştır [17].

İ malat sonrası platforma taşınan kazıklar, kazık kulesine yerleştirilerek şahmerdan tarafından çakılmışlardır. Yerleştirme sırasında, sivri uç aşağı gelecek şekilde işlem yapılmış ve kazık kendi ağırlığı ile zemine ortalama 1 m gömülmüştür. Kazık kulesinde, çakma işlemi başlamadan önce kazık başlarına, kılavuzluk a macı ile 19 m uzunlukta ve 9.2 ton ağırlığında çelik zımba yerleştirilmiştir. Kazıkbaşı ve zımba arasında ise kazıkta plastik deformasyonları önlemek a macı ile 20 cm kalınlığında ahşaptakoz kullanılmıştır. Çelik zımba önger neli çelik borular ile oluşturulmuştur. Zımbanın kazıkbaşı ile birleştiği alt noktada, zımbanın kazığı kavraması a macı ile 1.5 m derinlikte başlık bulunmaktadı (Şekil 4.7).

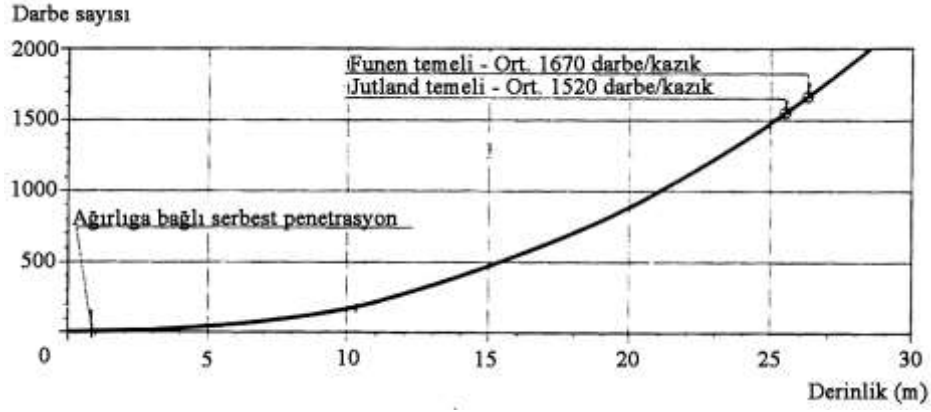


Şekil 4.7 Kazık platformu ve kazık çerçevesi [11]

Çakma işlemi, kazık başları deniz tabanından 1-2 m yukarıda kalana kadar kesintisiz olarak devam etmiştir. Kazıkların işlem sırasında hasar görmemesi için oldukça dikkat gösterilmiş ve deneysel kazılarında elde edilen sınırlamalar zorlanmamıştır. Günde 24 saat çalışılarak, her iki köprü ayağında günde ortalama 2-3 adet kazık çakılabilmiştir [16].

Bir kazığın çakılması için toplam olarak Funen ayağında ortalama 1520, Jutland ayağında ise ortalama 1670 darbe uygulanması gerekmiştir. Çakma işleminde darbe sayısı derinliğe bağlı olarak artmaktadır ve bu durum önemli sapmalara sebep olduğundan her iki köprü ayağında da aynıdır (Şekil 4.8).

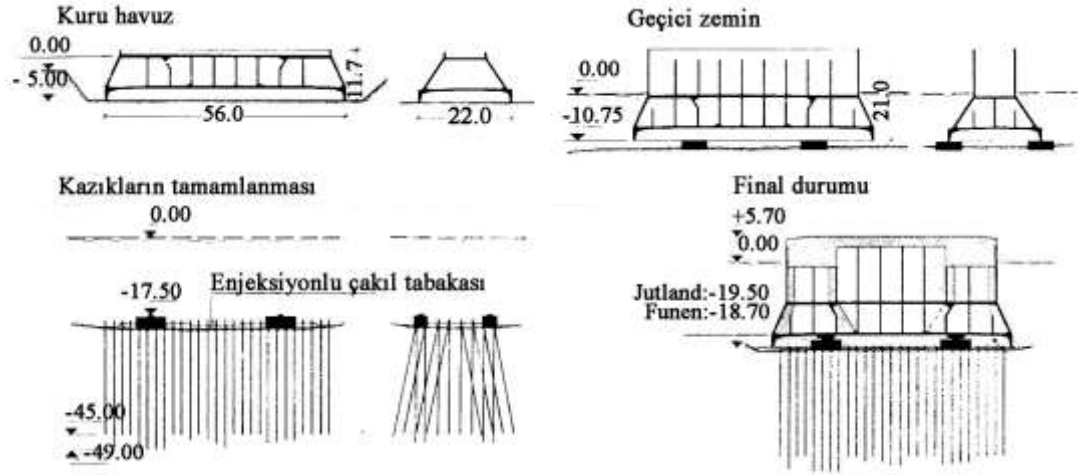
Kazık uygulaması sırasında birkaç uygulama hariç hasar oluşmamıştır. Hasarlı kazıkların yerine ise yenileri çakılmıştır. Kazık başlarının durumu kamera ve dalgıçlar tarafından kontrol edilmiştir [14].



Şekil 4.8 Kazık çakıl masına bağlı darbe / derinlik grafiği [14]

• Kesonlar

Kesonların yapılaşması Şekil 4.9'da görülmektedir. (Şekil 4.9)



Şekil 4.9 Keson yapılaşmaları [11]

a) Kuru havuzda yer alan işlemler

Kesonların suya indirilme işlemleri kazık üzerinde kaydırma veya kuru havuzlarda yüzdürme olarak yapılabilir. Lillebaelt köprüsünde kesonların büyüklüğü sebebiyle uygulamada kısım kuru havuzda yapılmıştır. Sahilde zemin kotu ve eğim olması sebebiyle kuru havuz tekniği tercih edilmiştir. Kuru havuz, merkez şantiye ve stok sahasına yakınlığı sebebiyle Jutland sahilinde hazırlanmış ve ilk olarak Jutland kesonunun inşaatı başlamıştır.

Havuz zeminini, kesonun yüzdürebilmesi esası dikkate alınarak deniz seviyesinden -5 m kotuna kadar olan derinliğe oluşturulmuştur. Bu amaçla yönelik olarak geniş çaplı bir

hafriyat çalışması yapılmıştır. Kuru havuzun deniz tarafında batard o inşa edilmiş ve zeminden sızan suya karşı önlem olarak kuyular açılmış ve drenaj çalışması yapılmıştır. Kesonun alt ucunda yer alan si vri kenarlar, beton yastıklarının üzerinde yer alarak zemin ile ilişkileri kesilmiştir. Keson i malatının kuru havuzda tamamlanan evresinde, en alt seviyede yer alan si vri kenarlardan başlanarak, basınçlı hava hücresi ve ara döşeme kapsayacak şekilde 11.7 m yüksekliğinde yer alan kısım tamamlanmıştır [11].

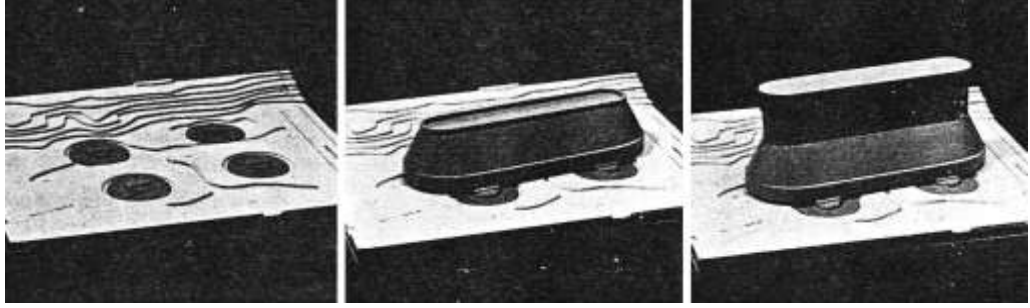
Keson i malatlarında kullanılması öngörülen betonun 28 günlük küp mukavemeti hesaplarda 350 kg/cm^2 olarak belirlenmiştir. Ancak uygulamada bu değer 500 kg/cm^2 üzerinde olmuştur. Malzeme olarak 300 kg/m^3 dozunda portland çimentosu kullanılmış ve akışkanlaştırıcı olarak % 2.66 oranında pozzolit eklenmiştir. Su çimento oranı ise 0.4-0.45 oranında tutulmuştur [17].

b) Kesonun geçici inşaat zeminine çekilmesi

Kuru havuzun maliyetinin fazla olması sebebiyle Funen ayağı için ayrıca bir kuru havuz hazırlanmış ve Jutland kesonu, diğer kesonun i malatının başlayabilmesi için, ağırlığı ve batma seviyesi de göz önüne alınarak geçici inşaat alanına çekilmiştir ve keson üzerinde kalan imalatlar üst bloklar dahil olacak şekilde tamamlanmıştır.

Geçici inşaat alanı Jutland sahiliinden 80 m açıkta ve deniz seviyesinden -10.75 m derinlikte bulunmaktadır. Kuru havuz boşaltılmadan önce, kesonun dengelenmesi ve yüzdürülmesini kolaylaştırmak için kesonun her iki yanına toplam 6 adet çelik duba bağlanmıştır ve ek olarak 1080 ton kaldırma kuvveti elde edilmiştir. Kuru havuz, su ile doldurulduğu sırada kesonun tabanında bulunan basınçlı hava hücresine hava doldurularak ek 2500 ton kaldırma kuvveti elde edilmiştir. Tamamlanan kısımları 5500 ton olan keson, kuru havuzdan çıkartılarak, 8 adet palamar ile bağlanmış olduğu halde, geçici inşaat alanına çekilmiştir. Palamarların bir ucu sahildeki ankrajlara, diğer uç ise kesonun üzerinde yer alan çekici vinçlere bağlanmıştır. 40 mm çapında 6 adet çelik halat palamar olarak kullanılmış, akıntının sürüklenme tehlikesine karşı 60 mm çapında 2 adet palamar ise akıntı eksenine dik kate alınarak çapraz şekilde, güvenlik amacıyla ile sisteme dahil edilmiştir [11]. Bu sayede keson 0.6-0.8 m/s'n hızla sahip akıntıda güvenle çekilebilmiş ve akıntıda oluşabilecek ani değişimlere karşı süreklilik sağlanarak önem alınmıştır [15].

Geçici inşaat zemininde hafriyatın tamamlanmasından sonra dairesel bir geometriye sahip olan 4 adet beton blok oluşturulmuştur. Her bloğun üzerinde, kesonun mesnetlendirilmesi amacıyla 4 adet beton kaid, üst yüzeylerinde darbe emici ahşap takozlar bulunmak üzere yerleştirilmiştir. Basınçlı hava hücresindeki havanın boşaltılması ve kesonun yanında bulunan dubalara su pompalanması ile, beton blokların üzerinde kesonun seviyesi düşürülmüş ve son ayarlamalardan sonra kesonun iç hacmine, beton kaidelerin üzerine oturmasına yetecek ölçüde ilave su pompalanarak, geçici zemin taşıma işlemi tamamlanmıştır [11] (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Geçici inşaat yerinde işlemleri [11]

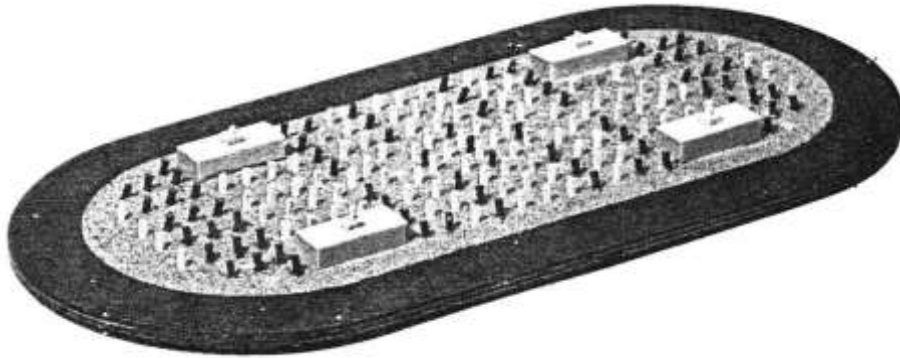
c) Taban bloklarının oluşturulması

Taban blokları, model deneyleri esas alınarak tasarlanmıştır. Deneyler sonucunda kesonların akıntı sebebiyle, enine ve çapraz eksenlerde oluşan ve büyüklüğü 600-800 t on arasında değişen yatay kuvvetlerin etkisi altında kalabileceği belirlenmiştir. Bu sebeple yapı m sırasında kazıklar ve keson arasında beton dökülmeden önce taban blokları oluşturularak yatay kuvvetlere karşı mukavemetin artırılmasına karar verilmiştir [11].

Deney üretimlerinden sonra, her kesonun zeminine, deniz tabanında beton dökülerek 7x3.2 m ebatlarında ve 2 m yükseklikte, geçici inşaat zeminde yer alan beton kaidere benzer bir düşünce ile, 4 adet betonarme blok inşa edilmiştir. Bloklar yatay yükler altında kayma etkisini indirmek için kesonların alt kenar noktalarına bitişik olarak ve her biri 8 adet düşey kazık üzerinde yer alacak şekilde oluşturulmuştur. Taban blokları tamamlanmadan önce, üzerine oturacakları kazıkların çevresine yüksek dozlu çimento şerbeti ile enjeksiyon yapılmıştır. Bu işlemler her taban bloğu için 18x19 m ebatlarında bir alanda ve toplam 64 kazık kapsayacak şekilde uygulanmıştır. Su altında beton dökümü colcrete metodu ile

gerçekleştirilmiştir ve 0.8-1 m yüksekliğinde ve her köprü ayağında 600 m³ enjeksiyon yapılarak tamamlanmıştır. Yapılan testler sonucunda agrega olarak kırma taş tercih edilmiş ve su çimento oranı 1/1 olarak belirlenmiştir. Bunların sonucu olarak beton silindirik mukavemeti 260 kg/cm² olan karışım elde edilmiştir.[16] Benzer yöntem ve değerler geçici inşaat zemininde bulunan taban blokları ve beton yastıklarda da uygulanmıştır.

Beton bloklar, kesonun batırılması ve hava hücresinde betonlama işlemi tamamlandıktan sonra kadar olan süreçte, yatayda, akıntı yüklerine karşı çelik ankraj çubukları ile desteklenmişlerdir. Taban bloklarının üzerinde yer alan beton kaideler, her bir 1300 ton basınç mukavemetine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Hava hücresinin tavanında, her biri taban bloklarını karşılayacak şekilde hidrolik pistonlu krikolar yerleştirilmiştir. Bu krikolar sayesinde kesonun taban blokları üzerinde, beton dökülmeden önce yatay ve düşey eksenlerde düz bir seviyede kalabilmesi için ayarlama işlemleri yapılabilir. Taban bloklarının tamamlanmasından sonra zemin kesonun batırılmasına uygun bir hale getirilmiştir [11] (Şekil 4.11).



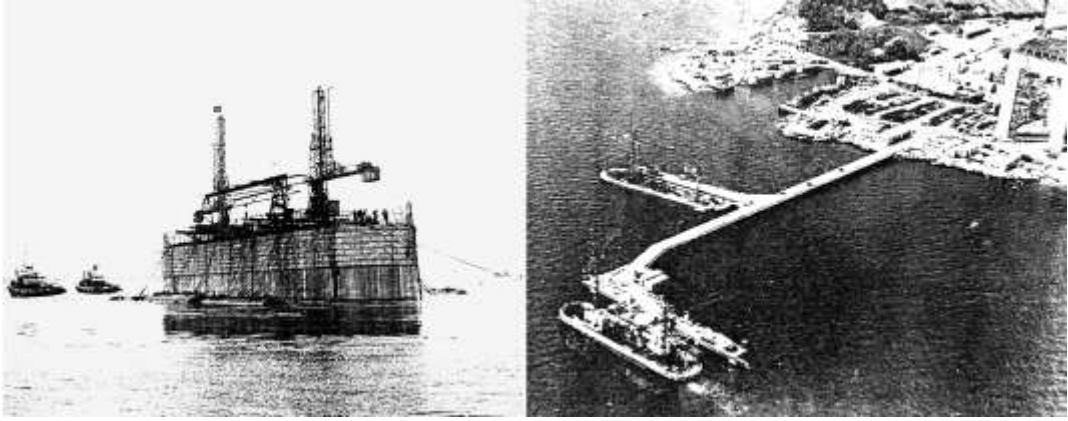
Şekil 4.11 Kazık temel ve taban blokları tasarımı [11]

d) Kesonların köprü ayaklarına taşınması

Su altındaki temel ve zemin çalışmaları tamamlandıktan sonra geçici inşaat alanında tamamlanan keson 8.500 ton ağırlığa ulaşmış ve temel zeminine batırılmak üzere taşınmaya hazır hale gelmiştir.

Jutland kesonu temele yakın olması sebebi ile kuru havuzdan, geçici inşaat alanına çekilmesine benzer bir yöntemle taşınmıştır.

Funen kesonu ise, karşı sahilde bulunması sebebiyle mesafenin uzak ve akıntının geçişin ortalarına doğru şiddetli olması sebebiyle Jutland kesonuna benzer bir yöntemle, vinç yardımıyla çekme işlemi pratik olduktan uzaklaşmıştır ve römorkör yardımıyla çekilmiştir. Buna rağmen Funen kesonunun çekilmesi sırasında şiddetli akıntı sebebiyle problem çıkmış ve keson taşıınması gereken noktadan 700 m kuzeye doğru sürüklenmiş ve Jutland sahiline geri çekilmiştir. Akıntı şiddeti takip edilmiş ve uygun bir zamanda ikinci bir deneme sonrasında işlembaşarı ile tamamlanmıştır ve keson Jutland kesonuna benzer bir sistemle yatay ve çapraz palamallarla yardımıyla köprü ayaklarının üzerinde batırılmıştır (Şekil 4 12).



Şekil 4 12 Funen kesonunun batardodan geçici inşaat alanına alınması [11]

Kesonların batırılmaları sırasında yatay eksende hata oranı 10 cm olarak öngörülmüştür. Eksen kontrolleri, sahilde bulunan ölçüm istasyonları tarafından yapılmıştır. Kontroller sırasında her iki yatay eksende oluşan sapma düzeyinin, öngörülenin çok altında, 1-2 cm olarak oluştuğu saptanmıştır. Batırma işlemi her keson için 1300 ton su kullanılmıştır ve kesonlar benzer yöntemlerle batırılmıştır. Kesonların taşıınması ve batırılmaları sırasında geçici inşaat alanına çekme sırasında kullanılan yöntem çelik dubalar ve hava hücresine basınçlı hava pompalanması ile aynen uygulanmıştır. Ayrıca kazı işlerinde kullanılan nakliye ve kazı platformları bazı eklentiler ile geçici ve nihai pozisyonlarda kesonlara malzeme ve ekipman temininde kullanılmışlardır [11].

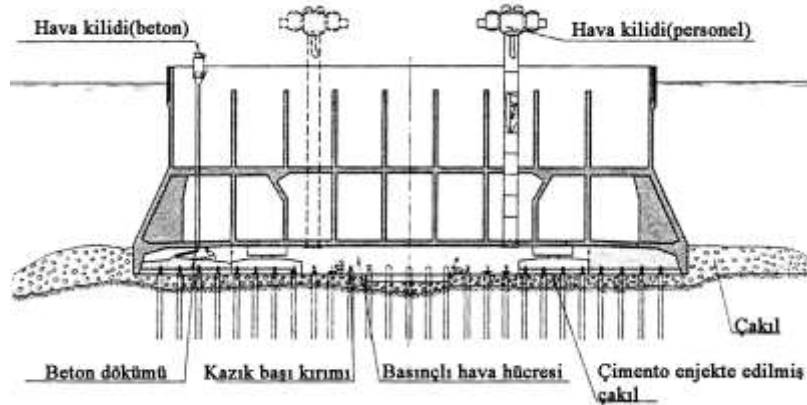
e) Batırma işleri

Kesonun taban bloğu üzerine yerleştirilmesi sonrasında batırma işleminde kullanılan 1300 ton suya ek olarak 3500 ton su ilave olarak balast görevi yapmak üzere

ponpalanmıştır. Kesonun iç hacminde yer alan su balastı, beton dökümü sırasında kademeli olarak azaltılarak, beton ağırlığı ile dengelenmiştir. Çalışma hacmine hava pompalandığında yeniden su balastı ile dengeleme yapılmıştır. Bu işlemler, keson tabanında beton işlemi devam ettiği süre boyunca karşılıklı olarak devam etmiş ve balast ağırlığı ortalama 1500 ton seviyesinde sabitlenmiştir.

Keson batırıldıktan sonra, tabanda yer alan hava hücresi den su tahliyesi yapılmış ve bu bölümde çalışmalar devam etmiştir. Malzeme, ekipman ve personelin ulaşım için kesonun üst noktasından, hava hücresine uzayan iki adet hava kiliği ve menholler ile oluşan bir ulaşım sistemi kullanılmıştır.

Tabanda yer alan hava hücresine beton dökümü sırasında 20 cm'lik çelik borular kullanılmış ve betonlama işlemi 24 farklı noktadan gerçekleştirilmiştir. Beton borularının üst noktalarında 650 lt hacminde hava kiliği kullanılmış ve beton dökümü sırasında kullanılan her boruya sıra ile yerleştirilmiştir.

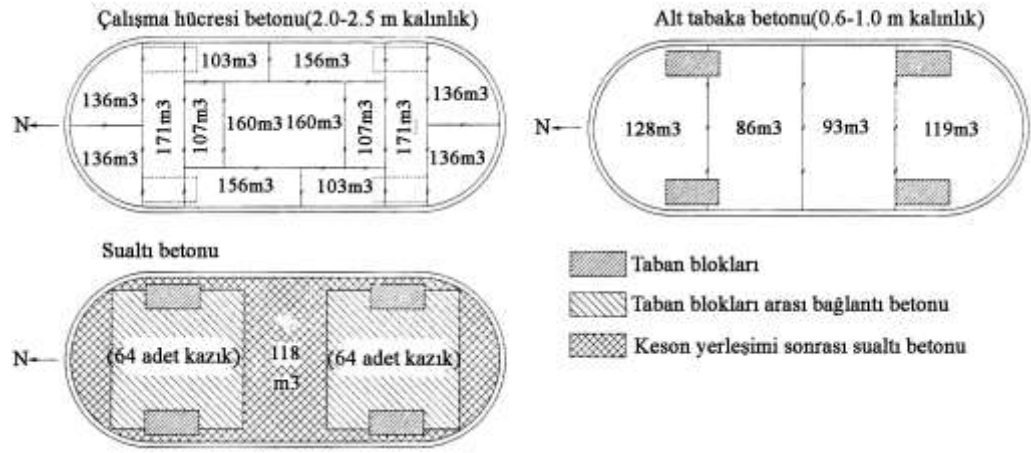


Şekil 4.13 Basınçlı çalışma hacmi kesiti [11]

Hava hücresinde yer alan ilk çalışma, tavan ve duvarların çamur ve artık maddelerden temizlenmesi olmuştur. Temizlik işlemini takiben kazık başları kırılarak donatı açığa çıkarılmış ve yatay donatı yerleştirilerek kazıklar tabanda birbirleri ile bağlanmışlardır [11] (Şekil 4.13).

Her hava hücresinde toplam 2400 m³ beton dökülmüştür. İlk olarak derinliği 0.6-1 m arasında değişen ve kazık başları ve yatay donatının bulunduğu alt tabaka betonu 4 aşamada tamamlanmıştır. (Şekil 4.14) Bu bölümde çimento 300 kg/m³ dozunda standart portland çimentosu olarak uygulanmıştır. 28 günlük küp mukavemeti 350

kg/cm² proje değerinin üzerinde oluşarak 470 kg/cm² değerine ulaşmıştır. Su/çimento oranı ise ortalama 0.45 olarak belirlenmiştir [17].



Şekil 4.14 Jutland kesonu taban beton döküm aşamaları [17]

Donatılı alt tabakanın üzerinde kalan kısım ise dolgu macı ile kütle betonu olarak dökülmüştür. Kütle betonu hacimleri birbirinden farklı 13 bölüme ayrılmış ve her dökümde 100-300 m³ arasında değişen miktarda beton dökülmüştür. Kütle betonunda ortalama 230 kg/cm² dozunda çimento kullanılmış ve 28 günlük küp mukavemeti 300 kg/cm² proje değerinin üzerinde oluşarak 370 kg/cm² değerine ulaşmıştır. Kütle betonunda da akışkanlaştırıcı olarak çimento dozajının % 2.66 oranında pozzolit kullanılmıştır. Kütle betonunun yüksek hacminden dolayı hidrasyon ısısı önem kazanmıştır. Beton dozajı, hidrasyon ısısını düşürebilmek amacıyla düşük tutulmuştur. Beton ısısı, ilk olarak dökülen Jutland ayağında, ilk üç gün sonunda döküm ısısı olan 17-20 °C den 50-52 °C ye yükselmiştir. Jutland kesonunda ısısının yükselmesi nin önemli sebeplerinden birisi kütle betonunun ağustos ayında dökülmesi ve hava sıcaklığının 25-30 °C arasında olmasıdır. Funen ayağında ise işlem ortamısının ortalama 15 °C olduğu sonbahar aylarında gerçekleştirilmiş ve çimento 250 kg/m³ dozunda uygulanmıştır [11].

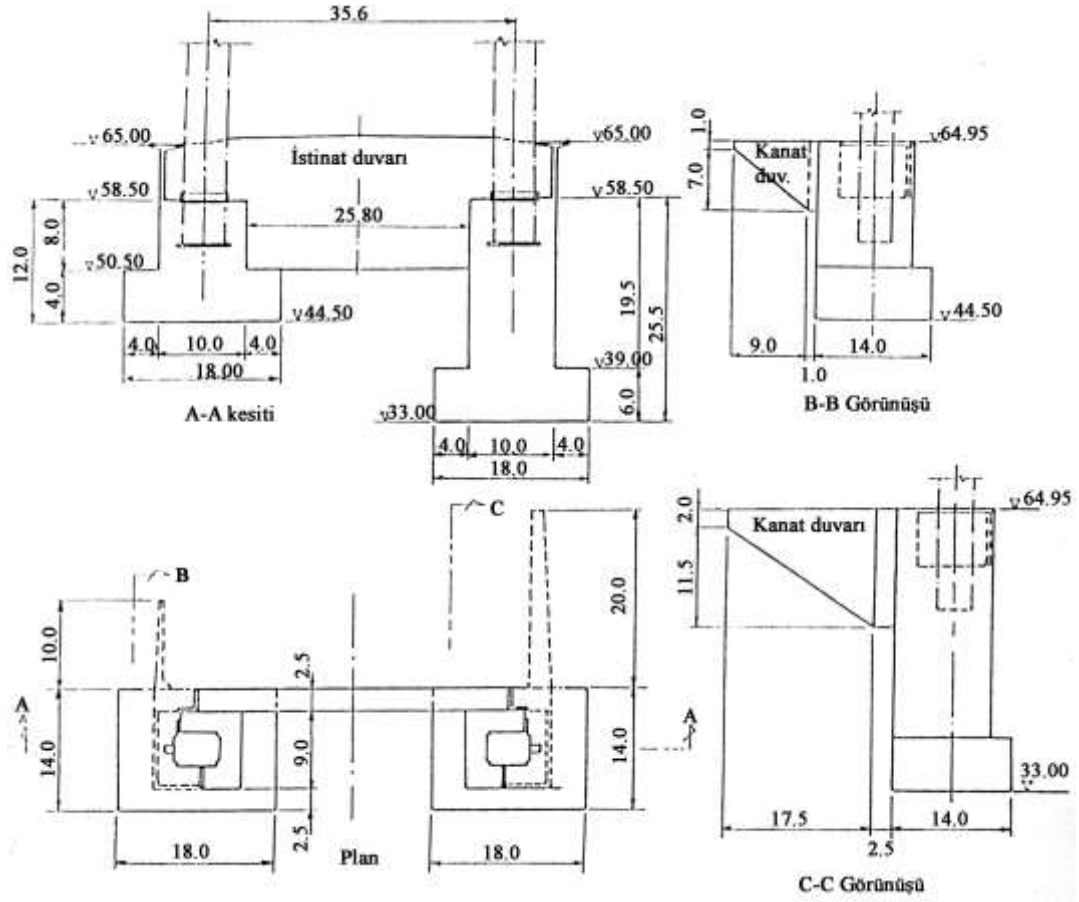
Kütle betonunun 20-80 cm arasında değişen üst tabakasına tavanda bulunan donatılarının deransı bakımından, alt tabaka ile aynı dozda çimento kullanılarak beton dökülmüş ancak boşlukların azaltılması amacıyla %2.66 oranında pozzolit ile beton akışkanlığı artırılmıştır. Kütle betonu tamamlandıktan sonra tavan ile arada kalan ince tabakaya çimento şerbeti uygulanarak hava hücresiindeki beton işleri tamamlanmıştır [17].

Keson dış duvarları, kuru havuz ve geçici inşaat zemininde 35 cm olarak hazırlanmış, temel zeminlerde ise yan duvarlarda 1 m ve dairesel uçlarda 2 m olarak tamamlanmıştır. Kullanılan beton niteliği kuru havuz ve geçici zeminde kullanılan özelliklerin aynıdır. Duvarların kalınlaştırılmasından sonra ise her kesonda üst noktalarda ana kulelerin desteklenmesi amacıyla beton bloklar öngerme olarak inşa edilerek keson imalatı tamamlanmıştır [11].

4.1.5 F S M köprüsü temelleri

4.1.5.1 Tasarım

F. S M köprüsüne ait temeller, asma sistem üzerinden gelen hareketli ve hareketsiz yükler ile düşey yönde, deprem rüzgar ve fren yüklerinden oluşan yatay kuvvetler ve momentlerin yanı sıra montaj sırasında sistemin dengesini bozma eğilimindeki kuvvetlere karşı kayma ve devrilme dengeleri de dikkate alınarak tasarlanmıştır. Kule temelleri, zemin emniyet gerilmesinin yeterli olması ile ana kaya kütesine yerleştirilen iki ayrı dikdörtgen beton bloklar olarak tasarlanmıştır. Kule temelleri, planda 18x14 m ebatlarında, 6 m yüksekliğinde temel bloğu ve bu bloğun üzerinde 6x10 m boyutlarında değişken yükseklikte kolonlar ile kulelerin etrafındaki parapet ve kanat duvarından oluşmuştur. Temel blokları birbirlerine istinat duvarı ile bağlıdır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 F. S. M köprüsü kule temelleri plan ve kesitleri [18]

Çelik kulelerin taban panolarının yaklaşık 5 m'lik bölümleri kule temeli, kolon betonuna gömülmüştür. Dikey kuvvetler taban panolarının dış plakaları ve makas plakalarına kaynaklanmış 100x22 mm ebatlarında çok sayıda aderans saplamaları ile kulelerden betona aktarılmıştır. Her kule ayağında, montaj sırasında oluşan döndürme kuvvetlerinin yol açtığı kaldırma etkisine karşı yüksek mukavemetli ankraj çubukları kullanılmıştır.

Zemin basıncı ve denge durumları temel kotlarının farklılıkları dikkate alınarak değerlendirilmiş, ayrıca hesaplamalar tanımlanmış köprünün yanı sıra montaj yükleri temellerin asimetrisine göre hesaplara katılmıştır. Montaj sırasındaki yüklemelere, depremanalizleri yansıtılmıştır [18].

- **Depremanalizi**

E. S. M köprüsü depre m kuşağ ında ol duğ u iç in, depremanalizi hesaplanıl arda yer al mıştır ve hesaplanıl ar hem geçiş ekseninde boyuna, hem de enine yönlerde yapılmıştır[12].

Boyuna yönde sis nık katsayılar ağırlık merkezinde 0.11 olarak alınmış, ayrıca sı ğ temelin tepe noktas ında bu katsayı 0.17, derin temelin tepe noktas ı ile istinat ve kanat duvarlarında 0.23 olarak kabul edilmiş, bu duruma istinat ve kanat duvarlarının ağırlık merkezleri ile derin temelin tepe noktas ının ol dukça yakın ol ması ve temel ile ankastre ol maları sebebi ile karar verilmiştir.

Enine yönde ise, her iki temel istinat duvarı ile birarada değ erlendirilmiş, kule temelleri ağırlık merkezinde 0.1, istinat ve kanat duvarlarında 0.18 olarak sis nık katsayılar kabul edilmiştir [18].

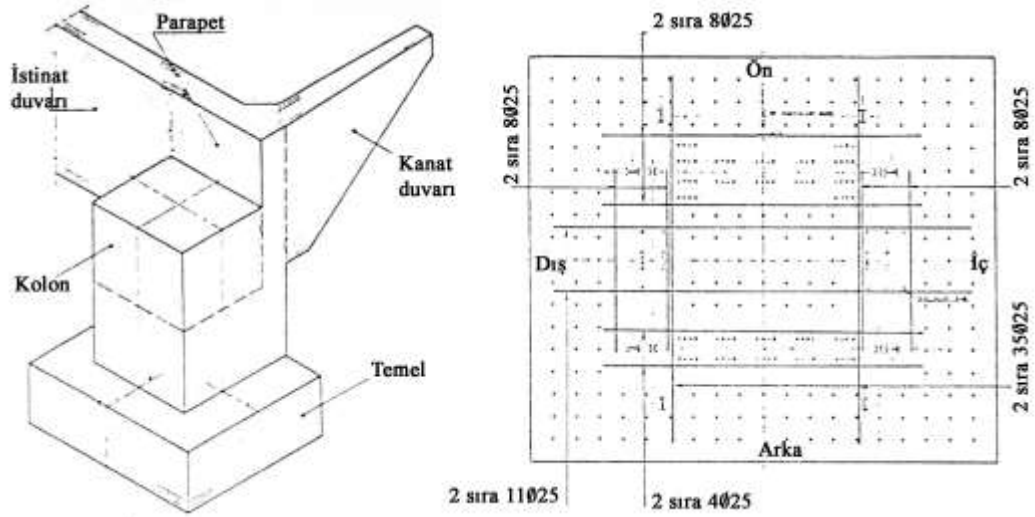
- **Denge ve zemin basıncı analizleri**

Yüklen e hesapları derin ve sı ğ temellerde enine ve geçiş eksenlerinde ayrı olarak ele alınmıştır. İlave olarak montaj sırasında ortaya çı kan yüklen eler kul elerin serbest dur ması, montaj öncesi gerili m uygulanarak geriye çekil neleri ve döş em e montajı tanımlanmış ancak mafsallı bağlantılar tanımlanma mış olarak değ erlendirilmiştir.

Derin kule temellerinde geçiş eksen ve enine eksenlerde zemin basıncı sırası ile maksimum 2.69 t/m^2 ve 2.14 t/m^2 olarak belirlenmiştir. Montaj sırasında ise bu değ erler yine sırası ile 1.92 t/m^2 ile 0.59 t/m^2 değ erleri ile dikkate alınmıştır. Sı ğ temellerde ise geçiş eksen ve enine eksenlerde tanımlanmış sist emi ç in ol uşt urul an zemin emi yet geril neleri, sırasıyla 2.03 t/m^2 ve 1.84 t/m^2 , montaj sırasında ise aynı sıra ile 1.39 t/m^2 ve 1.40 t/m^2 olarak dikkate alınmıştır [18].

- **Donatı tasarımı**

Donatı tasarımı; ana donatının yanı sıra; betona gö mül ü ankraj çubukları, aderans sapmaları bağlantısı için gerekli donatı ve çekme kuvvetlerine karşı yatay kayma donatısı olarak yapılmıştır (Ş ekil 4.16).



Şekil 4.16 Temel donatısı ve yüksek mukavemetli ankraj çubukları [18]

Tablo 4.1. Herman düzeyinde temel donatı çap ve miktarları

Eleman		Doğrultu	Yüklem	Aralık (mm)	Donatı (mm)
Temel	A	Boyuna	Deprem	150	1 sıra Ø32
	B	Enine		300	2 sıra Ø32
				150	3 sıra Ø32
Kolon	C	Boyuna	Deprem+geri çekme	150	1 sıra Ø32
	D	Enine		150	1 sıra Ø32
Parapet	E	Ön	Montaj	150	2 sıra Ø32
	F	Arka		150	2 sıra Ø32
İstinat Duvarı	G	Üst merkez	Deprem	150	2 sıra Ø32 (ön)
				150	1 sıra Ø32 (arka)
	H	Üst uç	Deprem	150	2 sıra Ø32 (ön)
				150	2 sıra Ø32 (arka)
Kanat Duvarı	I	Alt merkez	Sürekli toprak basıncı	150	3 sıra Ø32 (ön)
				150	1 sıra Ø32 (arka)
	J	Alt uç	Sürekli toprak basıncı	150	2 sıra Ø32 (ön)
				150	2 sıra Ø32 (arka)
Kanat Duvarı	K	İç kenar	Deprem + montaj	150	2 sıra Ø32 (sabit uç)
				150	1 sıra Ø32 (serbest uç)
	L	Dış kenar	Deprem + montaj	300	1 sıra Ø32

Betona gömülü ankraj çubukları 200 mm ve 500 mm üstünde iki sıralı olarak oluşturulmuştur.

Kayna bağlantıları takviyesi 165 N mm²'lik emniyet gerilmesi için 4 sıra, 150 mm aralıkla yerleştirilmiş 32 mm çapında donatı ile oluşturulmuştur. Yatay kayna donatısı ise 4 sıra, 200 mm aralık ile 16 mm çapında donatı ile oluşturulmuştur [18].

4.1.5.2 İnşaat

F. S. M köprüsüne ait temeller, üzerinde yer aldıkları zeminin taşıma kapasitesinin yüksek olması ve kara üzerinde yer alması sebebi ile, Lillebaelt köprüsü gibi su altında veya zayıf zemin üzerinde inşa edilen köprülere oranla daha az ve basit işlemler ile inşa edilebilmiş, kazık çakılması veya çok geniş ebatlar ile yükün yayılması gibi önlemlere gerek kalmıştır.

İnşa süreci hafriyat ve beton işlemleri yapılarak gerçekleştirilmiştir.

- **Hafriyat**

Hafriyat işlemi organik toprağın kazısını takip eden yumuşak ve sert kaya kazıları ile tamamlanmış, özellikle derin temellerde dinamit kullanılmıştır. Avrupa yakasında 8350 m³, Asya yakasında ise 7500 m³ ile toplamda yaklaşık 15,850 m³ hafriyat yapılmıştır.

Avrupa yakasında derin temeli olan kuzey kule hafriyatı 33 m kotuna kadar tam kesit ve kaya forasyonuna uygun olarak 21.4 m kotuna kadar kademeli olarak devam etmiştir. Bu temeli mevcut zemin durumuna göre proje değerinden 3.5 m derinleştirme gerekmiştir. Bu durum sonucunda temel yüksekliğinin sabit bırakılarak kolon yüksekliği 3.5 m arttırılmış ve donatı hesapları yeniden gözden geçirilmiş ve revizyon yapılmıştır.

Güney tarafında hafriyat 44 m derinliğinde tam kesit, 41.5 m derinliğe kadar kademeli olarak yapılmıştır.

Asya yakasında, zemin problemi ortaya çıkmış ve derin temeli 33 m sığ temeli ise 43.5 m kotunda, proje değerlerinden önemli bir sapma olmadan hafriyat tamamlanmıştır. Ancak sığ temeli ayağında yer alan faya karşı önlem olarak 3.5 m ve 2.5 m genişliğinde 2 kademeli hendek oluşturulmuştur [18].

- **Bet on dökül mesi**

Bet on işleminde kullanılacak bet on miktarı; 200 m³ grobet on ve 16,000 m³ bet on olarak hesaplanmış, ancak derin kazı ile bu miktara yaklaşık 1000 m³ daha ilave edilmiştir. Her iki yakada birer bet on pompası ve 5 m³ kapasiteli mikserler kullanılmıştır.

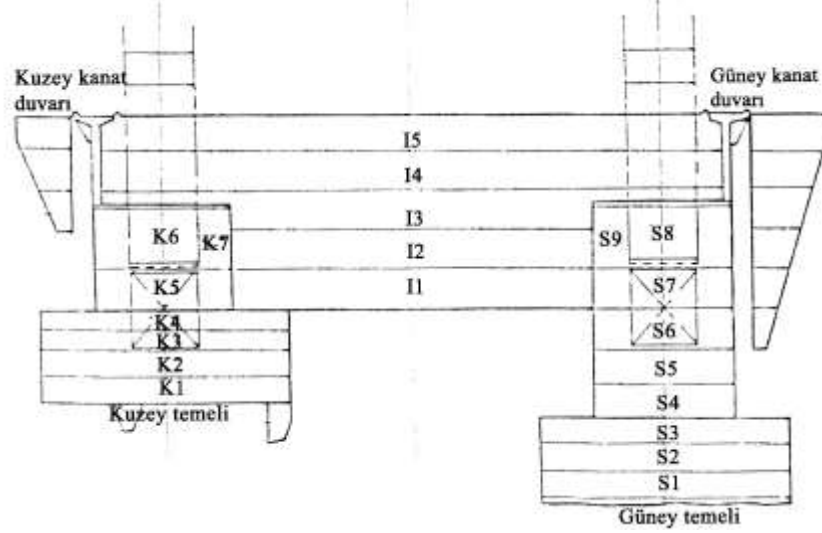
Her iki yakada bet on işlemini aşağıdaki gibi önerilmiş, ancak hafriyattaki gecikme ve kule montajına erken başlanması için bu süreç kısmen değiştirilmiştir.

- Grobet on
- Ankraj çubuklarının alt seviyesi olan 48 m kotuna kadar 1. kade me bet onu
- Kule taban panosu alt seviyesi olan 53.35 m kotuna kadar 2. kade me bet onu
- 42.50 m kotuna kadar dolgu
- İstinat ve kanat duvarları ile 3. kade me bet onu
- Kule taban panoları montajı
- 58.25 kotuna kadar (bet on üst kotunun 25 c m aşağısı) 4. kade me bet onu
- 5. kade me bet onu, parapet ve istinat duvarı üstü

Yukarıda sıralanan işlemlerde kule panosu montajı 2. Kade me bet onundan hemen sonra, 3. kade me bet onu başlanmadan yapılmıştır. Bu sayede kule montajı ve takip eden süreç kısaltılmıştır. Sonrasında bet onlama 4. kade me ile devam edilmiştir. 4. kade me de dış panoların altına 8 slı nıplı bet on 35 c m kalınlığında dökül müş ve plakamın altını tam dol durması için iyice sıkıştırılmıştır. Daha sonra kulelerini içi fil hortumu ile bet onlanmıştır. Son olarak kulelerin dışında kalan kısmı 58.25 m kotuna kadar tamamlanmıştır.

3. aşamayı oluşturan istinat duvarı ve kanat duvarları, en üst katman hariç bet onlanmıştır. 5. aşamada tamamlanması düşünülen kulenin etrafındaki parapet ve 3. aşamada yer alan kolon üst kotu üzerindeki bölümler döşeme montajının tamamlanmasından sonra bitirilmiştir. Döşeme montajı sonrasında bet onlama işlemini istinat duvarı son tabaka bet onları, parapet ve kanat duvarları ile tamamlanmış. Bu süreçte genişleme derzi mesnetleri yerleştirilmiştir.

Betonlama aşamaları, Avrupa yakasındaki ilave betonlar hariç, her iki yakada da önemli sapmalar olmaksızın gerçekleştirilmiştir. Kademeler kendi içinde etaplara ayrılmışlar ve bu etapların toplamında; Avrupa yakası kuzey ayakta 5430 m³, güney ayakta 3038 m³, istinat duvarında 1511 m³, kanat duvarında 516 m³ olmak üzere 10,425 m³ beton dökülmüştür.



Şekil 4 17 Asya kule temel betonlama aşamaları [18]

Asya yakasında aynı işlem ve sıra dikkate alındığında; 3250 m³, 3948 m³, 1333 m³, 1087 m³ ile toplam 9598 m³ beton dökülmüştür (Şekil 4 17).

Temel betonlarında alt kule bloğunun yanı sıra, üst yapıya yönelik olarak bazı ankraj parçaları da temel ve istinat duvarlarına yerleştirilmiştir.

Temellerde, kule kolonlarına; ayarlama işleri için U- kancalar, fırtına halatı ankrajı, uç blok mesneti ankrajları, kriko mesnetleri; istinat duvarında ise; dikey gergi halatı ankrajı, kaldırma aparatı, yön değiştirme halatı ankrajı, rüzgar papucu ankrajı ve genişleme derzi için çerçeveler yerleştirilmiştir. Ayrıca kulelerin bağlanması için 50 mm çapında yüksek mukavemetli ankraj çubukları, öngerme sırasında aderans sağlanmaları amacıyla ile alt tarafta ankraj plakası ve somunu, üst tarafta irtibat elemanları ile birlikte sarılmışlardır.

Kule temellerinde kullanılan betonun 3, 7 ve 28 günlük küp mukavemetleri sırası ile 230 kg/cm², 290 kg/cm² ve 275 kg/cm² olmuştur [18].

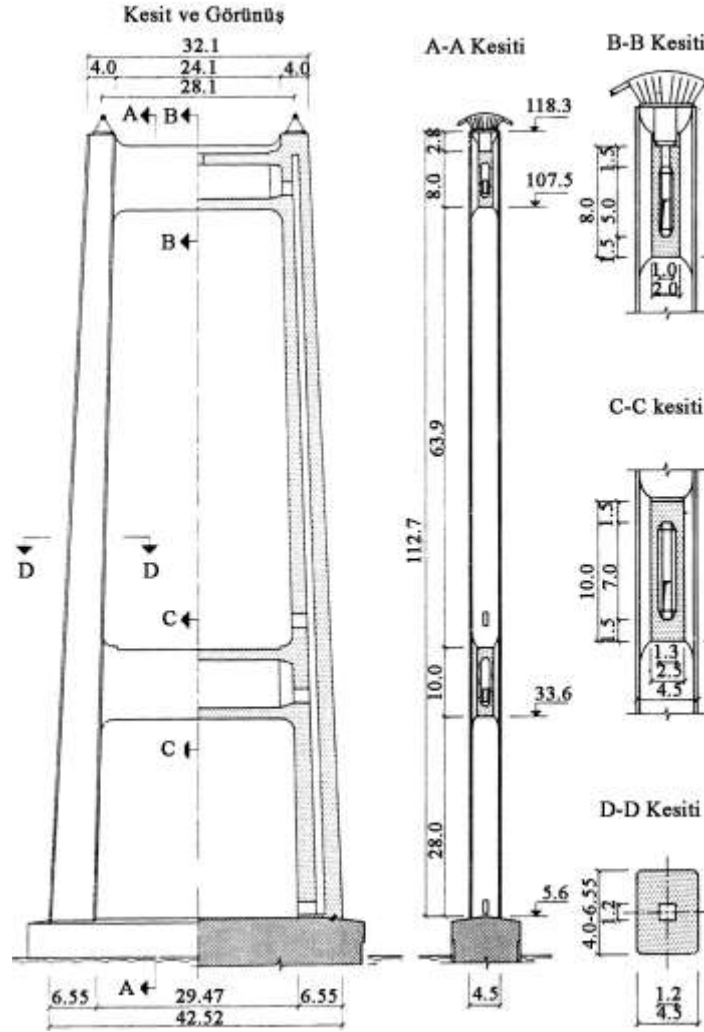
4.2 Asma Köprülerinde Kuleler

Asma köprülerde kuleler en dikkat çekici taşıyıcı elemanları oluşturmaktadır. Ana kulelerin görevlerini; döşemenin mesnetlendirilmesi, ana kabloların merkez ve eğersasma sisteme ile oluşturuluyor ise yan açıklıkta mesnetlendirilmesi ve ana kabloların taşıyıcı sistemi için gerekli olan eğrisel geometrik formunun sağlanması ve ana kablolar tarafından ankraj bloklarına aktarılan yüklerin bir kısmının kule temellerine aktararak ankraj bloklarında oluşan gerilmelerin azaltılması olarak genel biçimde sayabiliriz.

Ana kuleler 20. yy'dan önce kâğır olarak inşa edilmele beraber, 20. yy'dan sonra teknolojik ilerlemeler sayesinde çelik ve betonarme olarak uygulanmaktadır ve bu iki sistem günümüzde halen ekonomik ve teknik koşullar doğrultusunda tercihli olarak kullanılabilir mektedir [1]. Bu bölümde ekonomik ve teknik koşullara göre seçilmiş olan kuleler; betonarme olarak inşa edilen Lillebaelt ve çelik olarak inşa edilen F. S. M köprüleri incelenerek anlatılacaktır.

4.2.1. Lillebaelt köprüsü kuleleri

Lillebaelt köprüsüne ait kuleler ekonomik olması sebebiyle betonarme olarak inşa edilmişlerdir. Projelendirme sürecinde yapılan karşılaştırmalarda, betonarme kulelerin yaklaşık 14,000 ton, çelik kulelerin ise 1500-2000 ton ağırlığında olacağı hesaplanmış, ancak yapılan maliyet hesaplarında betonarme kulelerin 8 milyon D Kronu çelik kulelerin ise 11 milyon D Kronu olarak hesaplanması sonucunda, çelik kule alternatifinden vazgeçilmiştir. Kule temellerinin karşılaştırılması sonucunda da temeller ve kule maliyetinin Lillebaelt geçişinde betonarme sistem tercihinin avantajlı olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4 18 Lillebaelt köprüsü ana kule kesit ve görünüşü [11]

4.2.1.1. Betonarme kulelerin tasarımı

Kulelerin öncelikli işlevleri; kendi yükleri ve kablolardan gelen ölü ve hareketli yükleri güvenli bir şekilde köprü ayaklarına iletmektir. Bu yüklere ek olarak yatay rüzgar yükleri de kuleler tarafından aktarılması gereken yüklere eklenmektedir [1].

Kule üzerine gelen tüm yükler öncelikle kule tepesinde yer alan kablo sekmeleri ve döşeme kotunda, alt portal kirişlerde bulunan rüzgar mesnetleri (salıncak mesnet) üzerine etki etmektedirler. Bu elemanlar ilerleyen bölümlerde ana kablo ve askı kabloları bölümünde açıklanacaktır.

Lillebaelt köprüsünde her iki kulede eşit ağırlık ve büyüklükte tasarlanmış olup kule yükseklikleri, kesonun su üzerinde yer alan 5.6 m'lik üst bölümü ile birlikte toplam

118.3 m yüksekliktedir. Kule sütunları yatay rüzgar yükleri dikkate alınarak düşey ekseninde, yukarı yönde köprü geçiş eksenine doğru 1/28.5 oranında eğilendirilmiştir. Bu sebeple kule sütunları keson ile mesnetlendirilen alt noktada 6.5 m eninde olup bu ebat en tepede 118.3 m kotunda 4 m uzunluğa kadar daralmaktadır. Geçiş eksenindeki ebat ise 4.5 m olup sabittir. Kule tepesinde ana kabloların yer aldığı orta akslar 28.2 m genişliktedir. Bu mesafe aynı zamanda ana kabloların aralıklarına eşittir.

Ana kuleler, köprü ayaklarında, kesonların üzerinde bulunan öngerme betonar blokta bloklar üzerinde yer almaktadırlar. Geçiş ekseninde, kablolar üzerinde oluşan hareketli yük ve ısı genleşmelerden oluşan hareketlere mukavemet gösterecek şekilde tasarlanmışlardır ve esneyebilme özelliğine sahiptirler. Bu esneme, maksimum değerinde, orta açıklığa doğru 65 cm yan açıklığa doğru 45 cm olabilir. Kule sütunları, bu aşırı uzamalar dikkate alınarak minimum ölçülerde ebatlandırılmıştır. Esnek ve mukavemeti yüksek bir sonuç için sütunlar içi boş kesitli olarak tasarlanmıştır.

Kule sütunlarında oluşturulan şaft 1.2x1.2 ebatlarında olup, sütunların alt noktasında, kule tepelerinin üst noktalarının 3.2 m altında kadar kesintisiz olarak devam etmektedir. Taşıyıcılık bakımından oluşturulan şaft aynı zamanda düşey sirkülasyonun sağlanması ve bu amaçla oluşturulan asansör ve merdivenlerin yerleştirilmesi amacıyla içinde kullanılmışlardır.

Döşemenin altında yer alan alt ve kule tepesinde yer alan üst portal kirişler kulelerin yatay ekseninde bağlanmasını ve bu ekseninde oluşan kuvvetlere karşı birlikte çalışmasını sağlamak amacıyla oluşturulmuşlardır. Aynı zamanda içlerinde yer alan geçitler sayesinde bulundukları noktalarda iki kule arasında geçit görevi yapmaktadırlar.

Üst portal kirişin statik olarak aktif kesiti 8 m yükseklikte ve 2 m genişliğindedir ve boyu toplam 24 m uzunluğundadır. İçi boş kesitli olarak tasarlanan üst portal kirişin boşluğu 5 m yükseklikte ve 1 m genişliğindedir.

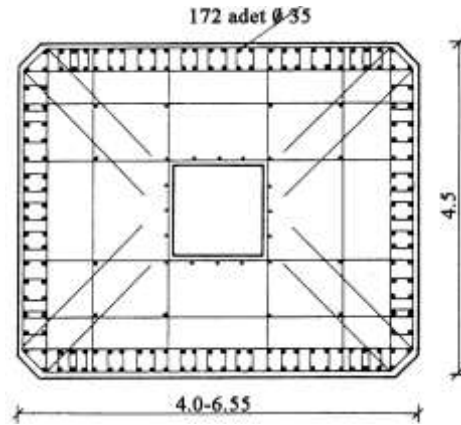
Alt portal kiriş, üzerine köprü döşemesinin mesnetlendirilmesinden dolayı daha büyük ebatlarda tasarlanmıştır. Statik olarak aktif kesit 10 m yükseklikte, 22.5 m

eninde ve toplam uzunluğu 28 m'dir. Kesit içinde yer alan boşluk 7x1.3 m ebatlarındadır.

Alt portal kiriş köprü ayağından 28 m yükseklikte olup, alt ve üst portal kirişler arası mesafe 64 m'dir. Dengeli yük dağılımı sağlanabilmesi ve kesit alanının birleşim noktalarında büyütülmesi için, portal kiriş ve kule birleşimlerinde kiriş uçları eğriselleştirilmiştir. Yapım sırasında her ana kulede, kule sütunları ve portal kirişler için toplam 5800 m³ beton kullanılmıştır [11].

4.2.1.2 Betonarme kulelerde donatı kullanımı

Kuleleri oluşturan sütunlar, eksenlerde oluşabilecek yüklerin oluşturacağı çekme gerilmelerine karşı demir donatı ile takviye edilmişlerdir. Donatı olarak 35 mm çapında nervürlü demir kullanılmış ve donatılar çekme gerilmelerinin en yoğun olduğu dış yüzeyde yoğunlaşmışlardır. Sütunları alt noktalarından itibaren 50 m yüksekliğe kadar 320 adet ve bu seviyeden itibaren kule tepesine kadar 172 adet düşey donatı çift sıra olarak kullanılmıştır [11] (Şekil 4.19).

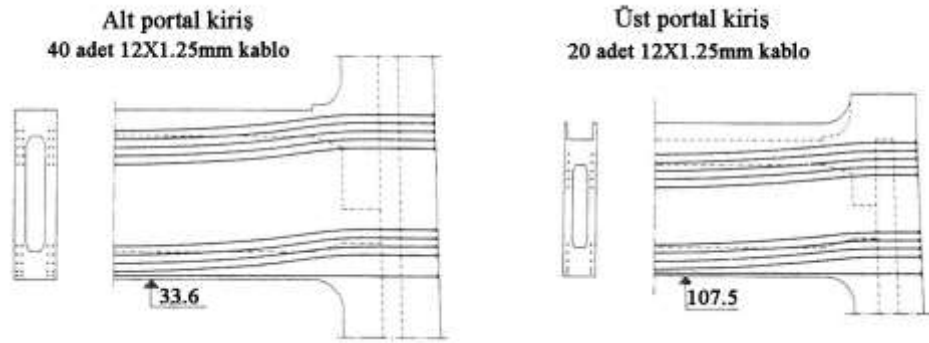


Şekil 4.19 Kule sütunu donatı oluşumu [11]

Köprü ayağında oluşan basınç yükü, ölü yükler dikkate alındığında 45 kg/cm olarak oluşmuştur. Ölü yüklere trafik yükleri eklendiğinde bu yük 105 kg/cm², rüzgar yükleri eklendiğinde ise toplam yük 150 kg/cm² olarak hesaplanmıştır.

Portal kirişler, genişlikleri ve taşıyıcı özellikleri dikkate alınarak öngerme olarak inşa edilmişlerdir. Alt portal kirişte 40 adet, üst portal kirişte ise 20 adet öngerme kablosu ile desteklenmektedir. Her kablo 12 adet ve 1.2 cm kalınlığında çelik tel kullanılarak mal edilmiştir (Şekil 4.20). Portal kirişlere uygulanan öngerilme işlemi, kule sütunlarında farklı sapmalar gösterebilecek düşey ekseninde oluşan burulma

gerilimlerini ve yatay ekseninde oluşan eğilme momentlerini engellemek amacıyla ile uygulanmıştır. Öngerme işlemlerinin başka bir fonksiyonu ise portal kirişlerin uzun eksenlerinde oluşan differensiyal seğimi engellemektir. Differansiyal seğimsadece sistemin tanımlanmasından sonra değil aynı zamanda asma sistem montajı veya asimetrik trafik yüklerden de kaynaklanabilmektedir. Lillebaelt köprüsünde hesaplanan maksimum eğilme momenti üst portal kirişte 50 kg/cm^2 , alt portal kirişte ise 60 kg/cm^2 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.20 Portal kirişler ön gerilim uygulaması [11]

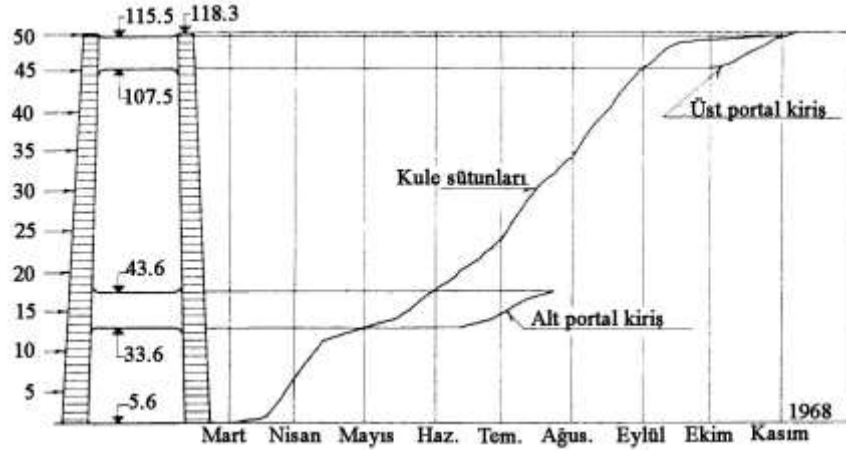
Ana kulelerde toplam olarak kullanılan donatı miktarı; 900 ton nervürlü demir, 500 ton düz demir ve 40 ton öngerme kablo olarak uygulanmıştır [11].

4.2.1.3 Betonarme kule inşaatı

Lillebaelt köprüsünde kule inşaatları, aynı tekniklerle uygulanmış, inşaat Jutland kulesinde 11 ay, Funen kulesinde ise 9 ay sürmüş ve her iki kulede eş zamanlı olarak tamamlanmışlardır.

- **Kule sütunları**

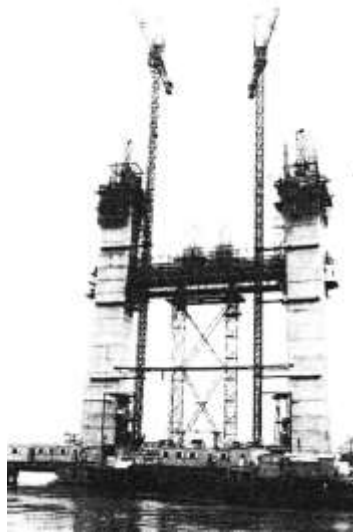
Betonarme kule inşaatında tıranır kalıpte kniği kullanılmıştır [20]. Kalıpyüksekliği 2.32 m olarak belirlenmiş olup, 50 dökümsonunda 118.3 m yüksekliğe ulaşılmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 Funen kulesi betonarme inşaat aşamaları [21]

Her kule sütununda uygulanan beton dökümünde, kesit daralması sonucunda kullanılan beton miktarı 63 m^3 olarak başlamış ve kule tepesinde bu miktar 39 m^3 hacmine azalarak tamamlanmıştır. Tırmanır kalıbın sütunlara bağlanması yüksek mukavemeti çelik ankrajlar ile sağlanmıştır. Lillebaelt köprüsü, kule inşaatında kullanılan ankrajlar 106 cm uzunluğunda ve 20 ton taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde oluşturulmuşlardır. Ankraj çapı 3/4'dir [20].

Kalıp kurulumu, her aşamada 2-3 gün sürmüştür. Kalıp montajında, malzeme ve ekipmanın taşınması amacıyla ile her sütuna paralel olarak kurulan 1'er adet 3.5 ton kaldırma kapasiteli kule vinç kurulmuştur. Beton miktarının az ve sabit hat için ekonomik olması sebebiyle beton dökümünde 1 m^3 kapasiteli beton kovası kullanılmıştır. Beton kazı inşaatı sırasında kurulmuş olan nakliye iskelesi üzerinden kurulan sabit hat üzerinden taşınmıştır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Ana kulelerin yapılmışlarındaki durumu [11]

Kullanılan betonun 28 günlük küp mukavemeti projelerde 450 kg/cm^2 olarak belirlenmiş, ancak uygulamada bu değer ortalama 540 kg/cm^2 olarak saptanmıştır. Çimento malzemesi olarak portland çimentosu 310 kg/m^3 dozaj ile kullanılmış ve akışkanlaştırıcı olarak çimento dozajının % 2.66 oranında pozzolit eklenmiştir. Maksimum agrega boyutu 55 mm olarak belirlenmiştir. Su/çimento oranı 0.40-0.45 arasında kabul edilmiştir [17].

Çimento dozajı, hidrasyon ısısının düşürülebilmesi amacıyla ile 310 kg/m^3 seviyesinde tutulduğu halde, Lillebaelt köprüsü inşaat sürecinde en yüksek hidrasyon ısısı kule inşaatlarında gözlemlenmiştir. Deneme üretimi sonunda elde edilen bu sonuçlara dayanılarak hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla ile agrega ıslatılmış ve karışımına buz eklenmiştir. Bu çalışmaların sonucu olarak beton karışım sıcaklığı döküm öncesinde $10-12^\circ \text{C}$ seviyesinde tutularak hidrasyon ısısı ortalama 54°C ile sınırlandırılabilmiştir. Kulelerin rüzgar etkisine açık olmaları, bu sebeple yüksek hidrasyon ısısı oluşumu ve rüzgar sebepleriyle çatlaklarına engel olunabilmesi amacıyla ile hidrasyon ve kürlenme işleri sürekli gözlenerek kontrol altında tutulmuştur [11].

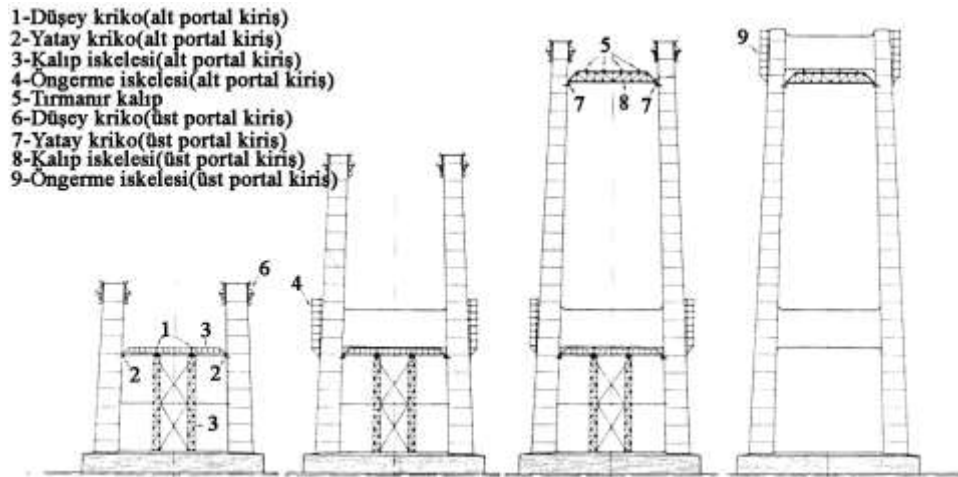
Beton basınç mukavemetleri 7 ve 28 günlük testlere ek olarak dökümün yapıldığı 1. gün boyunca 16, 20 ve 24 saatlik küp mukavemetleri ölçülerek kontroller sıklaştırılmıştır. Bu süreçte ortalama değerler 16. saatte 22 kg/cm^2 , 20. saatte 53 kg/cm^2 ve 24. saatte 84 kg/cm^2 olarak ölçülmüştür. 7 ve 28 günlük basınç mukavemetleri ise sırası ile 470 kg/cm^2 ve 540 kg/cm^2 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca 38. saat sonunda ilave bir ölçüm yapılarak ankrajların 20 ton taşıma kapasitesine uygun olan beton mukavemeti test edilmiş ve ortalama 180 kg/cm^2 mukavemet ulaşılan betonda kalıp montajı devam edebilmiştir [17].

• Portal kirişler

Kuleleri yatayda birbirine bağlayan portal kirişler, kuleler ile aynı anda inmal edilememişlerdir. Bu durumdan kaynaklanan soğuk derz etkisini ortadan kaldırmak için demir donatının yanı sıra ön gerilmeli kabloları kullanılmıştır. Ayrıca kulelerin portal kirişle bağlantı noktalarında, kule üzerinde girinti bırakılarak portal kirişlerinin mesnetlendirilmesi ile donatı ve beton aderansı na katkıda bulunulmuştur.

Portal kirişler kalıp ve iskele kurularak yerinde döküm metodu ile oluşturulmuşlardır. Alt portal kiriş kalıbı köprü üzerine kurulan 2 adet kalıp iskelesi ve kule yüzeyinde bulunan ankrajlara mesnetlendirilmiştir. Kot ayarları ise iskele ve ankrajlar üzerinde yer alan hidrolik krikolar kullanılarak yapılabilir. Kulelerin yapımları sırasında, portal kirişler tamamlanana kadar geçen süreçte, kuleler arasında yatay bağlantı elemanı bulunmamasından dolayı, kulelerin içe doğru birkaç santi metre eğilimleri söz konusu olabileğinden, kule üzerinde yer alan hidrolik krikolar kullanılarak hafifçe dışa doğru itilmesi ile düşey eksen ayarları yapılabilir. Beton dökümü sırasında asıl önemli olan elemanlar ise kulelerin arasında bulunan kalıp iskeleleridir. Üst portal kiriş kalıbı ise, yüksekliğin iskele kurulumunu pratikte zorlaştırmasından dolayı kuleler üzerinde alt portal kirişlere benzer şekilde kullanılan ankrajlar ve kalıbın altında yer alan kafes kiriş ile oluşturulmuştur. Yatayda kulelerin dışa doğru itilmesinin yanı sıra kot ayarları da kule üzerinde mesnetlenen hidrolik krikolar ile yapılmıştır (Şekil 4.23).

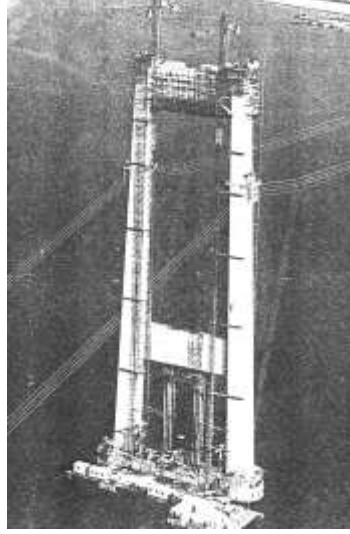
Portal kirişlerde kullanılan betonun niteliği kuleler ile aynıdır. Alt portal kiriş betonu mobil beton pompası ile dökülebileği halde üst portal kiriş kule vinç kullanılarak beton kovası ile dökülmüştür [11].



Şekil 4.23 Portal kirişlerinin inşaat aşamaları [11]

- **Kulelerin geçici olarak askıya alınması**

Asma köprülerde, kule inşaatlarının tamamlanmasına yakın bir süreçte kulelerin geçiş ekseninde, ana kablolar tarafından desteklenerek henüz dengeli bir yapıya sahip olmalarından dolayı, geçici olarak birbirleri ve sahildeki ankraj blokları arasında bağlanmaları ve dengelenmeleri gerekmektedir. Bu işlem özellikle Lillebaelt köprüsü gibi eleman düzeyinde yüksek kulelere sahip köprülerde zorunlu olarak uygulanmaktadır.



Şekil 4.24 Jutland kulesinin geçici olarak askıya alınması [11]

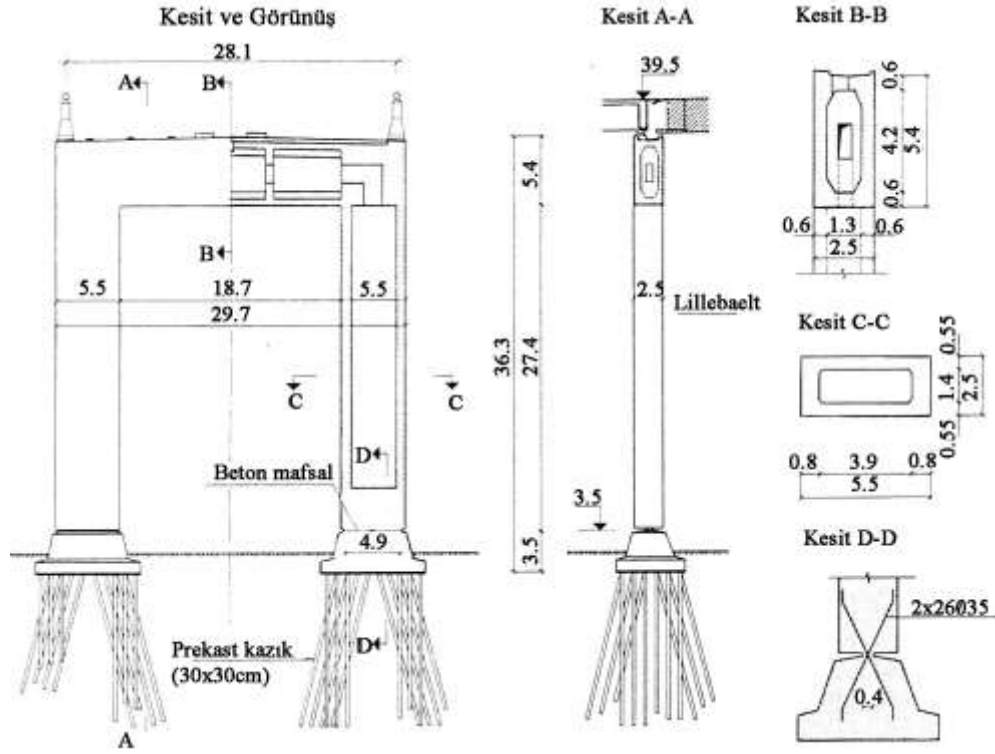
Lillebaelt köprüsünde her kule sütunu 4 adet 51 mm çapında destek kablolu kullanılarak + 85 m kotundan itibaren bağlanmıştır. Bu işlem yapılan hesaplar sonucunda henüz beton işleminin tamamlanmasına 20 m bulunduğu halde gerçekleştirilmiştir. Destek kabloları, ana kablo işlemleri tamamlanana kadar görevlerini sürdürmüştür[11] (Şekil 4.24).

- **Yan kuleler**

Yan kuleler; asma sisteminin 3 açıklık tarafından oluşturulduğu sistemlerde, sahil ile asma sisteminin arasında viyadük ile bağlantı kurulması neticesinde, birbirinden farklı rijitliğe sahip olan iki sistemin, farklı salınımlarında birbirlerine ve sistemin bütününe zarar vermemeleri amacıyla inşa edilmektedirler. Yan kulelerin diğer bir görevi de, yan açıklıklara ait döşemeye ve ana kabloları mesnet oluşturmalarıdır.

Köprü sisteminde yer alan viyadük ve asma köprü sistemine bağlı olarak çelik veya betonarme olarak uygulanabilirler.

Lillebaelt köprüsünde yan kuleler, geçiş eksenini ile aynı doğrultuda salınım yapabilen rijit betonarme çerçeveler olarak inşa edilmişlerdir. Geçiş eksenine dik doğrultuda sabit olan yapı, salınımın, sütunlar ve üzerinde yer aldıkları mesnetler arasında mafsal oluşturulması ile yapılmaktadır (Şekil 4.25).



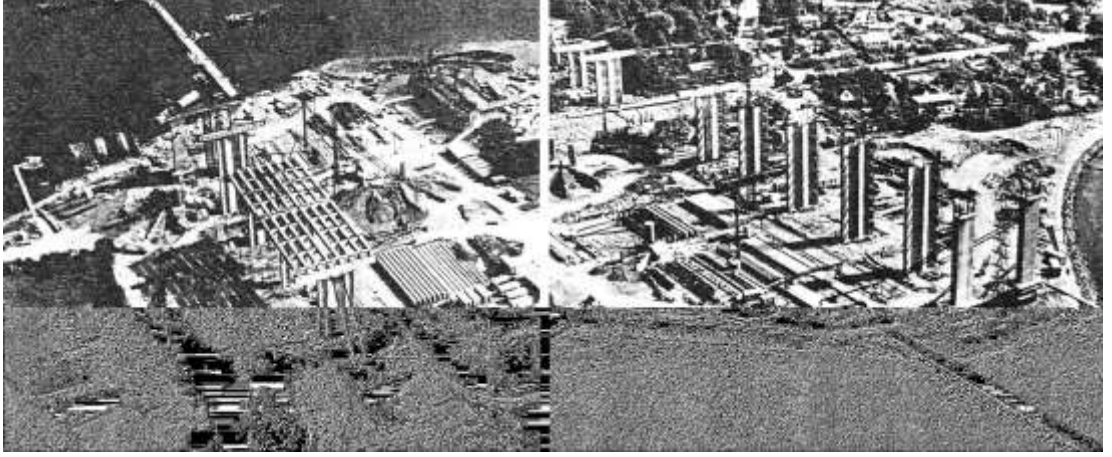
Şekil 4.25 Yan kule kesit ve görünüşü [11]

Mafsalların beton yüzeyi 1.9 m^2 olup donatı olarak her mafsalda 52 adet 35 mm çapında nervürlü demir, çift sıra olarak uygulanmıştır. Mafsallarda oluşan gerilim ortalama 100 kg/cm^2 ve maks. salınım $\pm 4 \times 10^{-3}$ radyan olarak belirlenmiştir.

Yan kule sütunları içi boş kesitli olarak tasarlanmış ve iç boşluk mafsal noktasından 3.5 m yukarıda başlayarak, portal kirişe kadar kesintisiz olarak devam etmiştir. Uygulama sırasında, ana kuleler ile benzer nitelikte kayar kalıp kullanılmış ve dökülen beton nitelik olarak ana kuleler ile aynı özelliklere sahip olarak hazırlanmıştır.

Beton dökümü sırasında, mafsallar ahşap kama ve takozlar ile sabitlenmişler, sütunlar ortalama 9-10 m yüksekliğe ulaştığında ise mafsalda oluşturulan destekler

sökülerek, beton işleminin devam ettiği süre boyunca sistem kafes kirişli payandalar ile desteklenmiştir. Payandalar destek görevlerini ana kablo montajı tamamlandıktan sonra kadar geçen süreç içinde devam ettirmişlerdir. (Şekil 4.26) Yan kulelerin üst noktalarında bulunan portal kirişler, ana kulelerde yer alan alt portal kirişe benzer şekilde inşa edilmişlerdir. Yan kuleler portal kirişinde de aynı niteliklerde öngerme uygulanmıştır. Beton kalitesi ve kalıp sistemi de aynıdır [11].



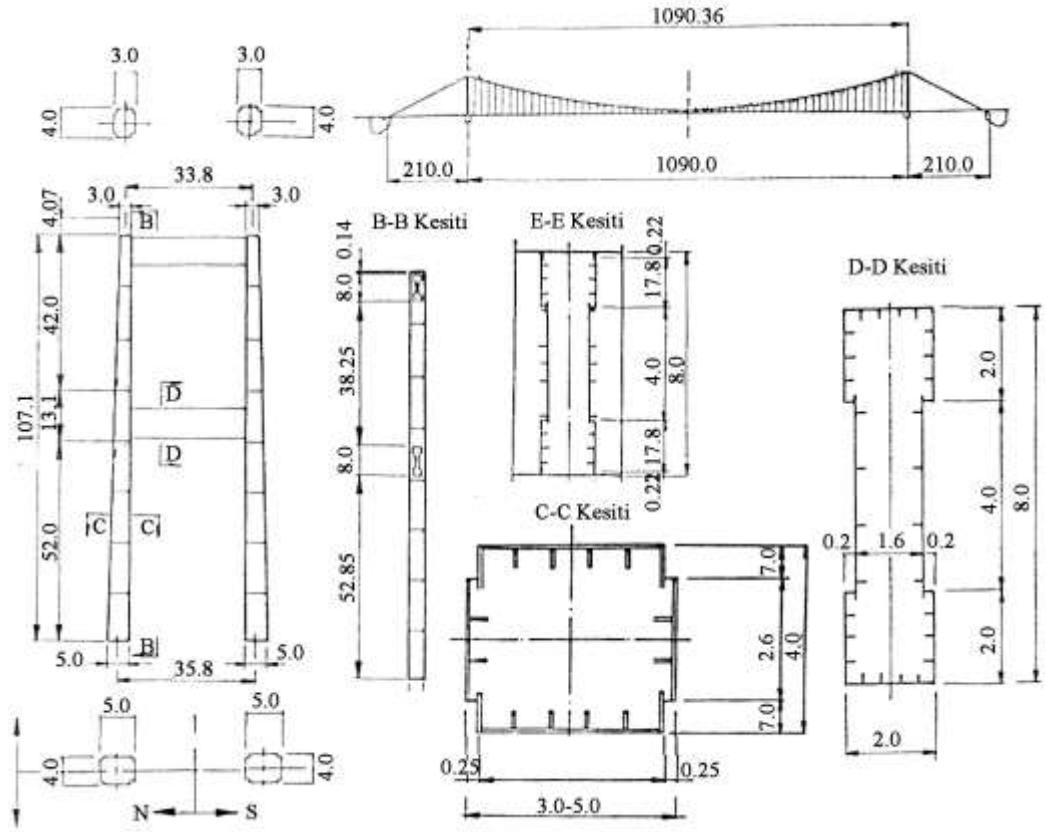
Şekil 4.26 Jutland ve Funen şantiyelerinin görünüşleri [11]

4.2.2. F. S. M köprüsü kuleleri

F. S. M köprüsünün her iki kulesi de çelik malzeme kullanılarak inşa edilmiştir. Her kulede toplam 3410 t on çelik kullanılmıştır. Kulelerin çelikten yapılmalarını başlıca sebepleri inşaat kalitesinin kontrolünün yanı sıra zemine az yük aktarılması ve yan açıklığın bulunmamasından dolayı montaj işleminin kolay yapılabilmesi olmuştur. Topografik şartlardan dolayı kulelerin döşeme alt kolunda devam etmesi ise maliyet ve inşaat sürecine ayrıca katkıda bulunmuştur.

4.2.2.1. Çelik kulelerin tasarımı

F. S. M köprüsünün kuleleri, iki sütun ve iki portal kirişten oluşturulmuştur. Malzeme farkı ve proje değerleri dikkate alınmadığında çelik kulelerin taşıyıcı sistemi, betonarme kulelerden farklı değildir. Bu anlamda taşıyıcı sistemi içinde aldıkları görev Lillebaelt köprüsü ile aynıdır. Fark, geçilen açıklık ve döşeme genişliğinden dolayı daha fazla yük oluşması ve topografik ve zemin koşullarının temel, köprü ayakları ve kulelerin tasarımını farklılaştırmasıdır (Şekil 4.27).



Şekil 4 27 F. S. M. Kuleleri kesit ve görünüşleri [12]

F. S. M köprüsü, kuleleri ya maçlarda yer al m asından dolayı ze m inde aşırı yük oluşturul m ası öncelikli sebep olarak çelikten i mal edilmişlerdir. Kule yüksekli ğ inin 107 m ol m asından dolayı betonar n e kulelerin ze m ine aktarılabilecek yükün betonar n e sistem seçil d ğ inde çeli ğ e göre çok daha fazla olacağı, 118.3 m yüksekli ğ e sahip olan Lillebaelt köprüsü örnek alınd ı ğ ında daha i yi anlaşıl m aktadır. As m a sistemin doğrudan sahile bağlanması ise ağır tonajlı mal ze m e ve ekip m anın taşın m asını kolaylaştırmış ve bu durum sadece kule inşaatını de ğ il aynı za m anda di ğ er inşaat etaplarını da olumlu yönde etkilemiştir. F. S. M köprüsünün taşıyıcı sistemi bir bütün olarak ele alınd ı ğ ında topografik şartlardan dolayı maliyetlerin, Lillebaelt köprüsü ve di ğ er as m a köprülerinin ço ğ una göre oldukça avantajlı ol du ğ u ve bu duruma en olumlu katkı nın kulelerin, topografik şartlar uygun etüt edilerek olabilecek en doğru noktalara yerleştiril m esi ol du ğ unu söyleyebiliriz.

Ta m kapasite ile yükle m e yapıld ı ğ ında her kule süt unu, kablo se m erinden yaklaşık 20,000 tonluk basınç kuvveti al m aktadır. Kuleler, montaj sırasında kullanılacak vinci n kaldır m a kapasitesi ve çelik levhaların en yüksek boyutları, nakliye, montaj

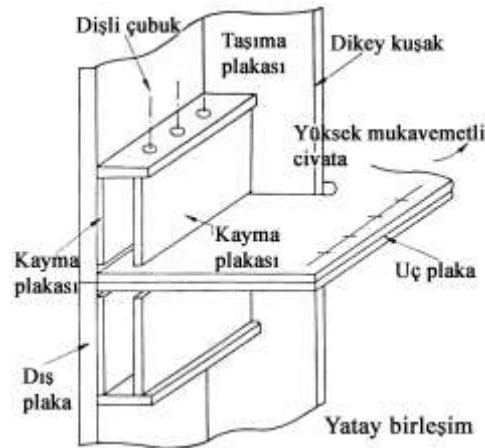
süresi ve montaj hatalarının özellikle düşey ekseninde dikey durumu dikleştirilerek azaltılması amacıyla ile bloklara ayrılmıştır. Tüm bu etkenlerini incelenmesi sonucunda en uygun blok sayısı her kule sütunu için 8 adet olarak belirlenmiştir [12].

Kule sütunu kesiti, her birinde dış plaka, dikey kuşaklar ve kenarlarda köşebentlerden oluşan dört adet panodan oluşmaktadır. Tüm düşey birleşimler panonun iç kısmında oluşturulmuştur. Üst ve alt uç kısımlar sıkı toleranslı, orta kısımlar ise yüksek mukavemetli civatalarla bağlanmışlardır. Sıkı toleranslı civatalar fabrikada yapılan geçici montaj sonrasında şantiyede montaj öncesinde yeniden kontrol edilmişlerdir. Yüksek mukavemetli civatalar kesme kuvvetinin iletilmesinde görev yapmaktadırlar. Civata ve delik çapları 0.13 mm tolerans ile oluşturulmuştur [19].

- **Kule bloklarının birleşimleri**

- a) Yatay birleşimler

Kule bloklarının birleşimleri, üst pano ile alt pano doğrudan dış plaka uçlarının birleştirilmesi ve düşey ekseninde oluşan basınç kuvvetlerinin aktarılması esasına göre oluşturulmuştur. Uç yüzeylerin % 100 temasına sahip olan düşey kuşaklar, dişli çubuk adı verilen yüksek gerilimli civatalar ile eğilme ve kesme kuvvetlerine mukavemet göstermektedir [12] (Şekil 4.28).



Şekil 4.28 F S M Kule blokları yatay birleşimi [12]

b) Dışli çubukların düzenlenmesi

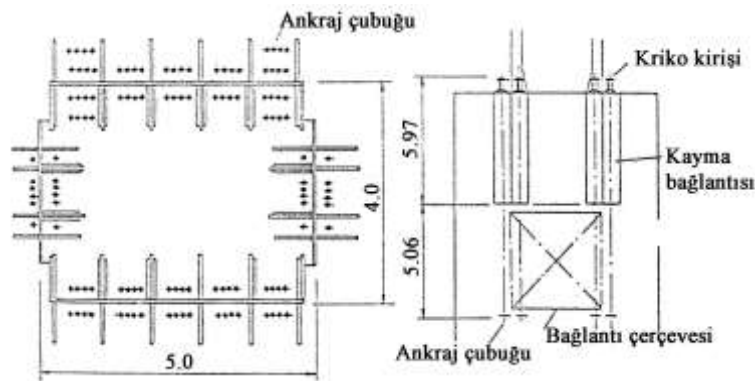
Dışli çubukların kullanım amaçları aşağıda sıralanmıştır.

- Kablo monte edildiğinde, orta açıklığa doğru 820 mm eğilen kulelerin geri çekilmesi sırasında oluşan gerilmelere mukavemet gösterilmesi
- Köprünün geçiş eksen ve bu eksene dik yönde oluşan rüzgar kuvvetlerine mukavemet gösterilmesi
- Deprem yükleri
- Kule sütunlarının güneş ve gölgede kalan kısımlarında 15 ° C'lik ısı farklarından dolayı oluşan ısı genleşmelerine karşı mukavemet gösterilmesi.

G vata deliği 60 mm çapında oluşturulmuştur. G vatalar dışli çubukların eksen kuvvet noktaları ve kulenin düşey eksenleri arasında eksantrikliğin azaltılması amacıyla bir grup yerine, tek sıra olarak yerleştirilmiştir [12].

c) Kule taban bloğu

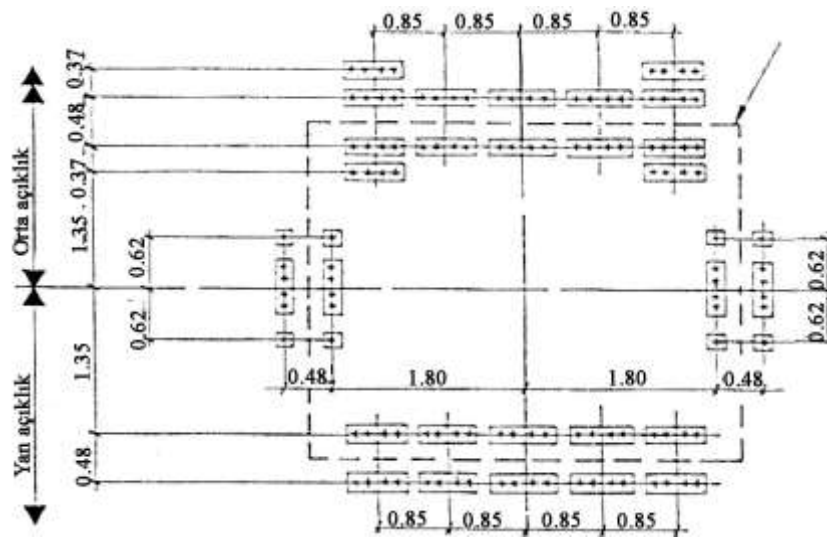
Taban bloğu 9x10 m ebatlarında oluşturulan beton temelini içine 5 m gömülmüştür. Temel ile bloğun bağlantısı kayma plakaları ve aderans çubukları tarafından oluşturulan kayma bağlantıları ile birlikte çalışmaktadır. Beton temel ile taban bloğu kompozit bir yapı oluşturarak kuleden gelen düşey kuvvetleri temele iletmişlerdir. Ayrıca taban bloğu ankraj çubuklarına uygulanan öngerilme ile beton temel ile kompoze olmuş, montaj ve köprünün tamamlanması sonrasında dış kuvvetler tarafından oluşturulan eğilme momenti ve kesme kuvvetlerini temele aktarmışlardır (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 Kule temelinin yapısı [12]

d) Ankr aj çubukl arı

F. S. M köprüsünde kullanılan ankraj çubukları, St 52 sınıfı yüksek mukavemetli çelikten imal edilmiş ve 50 mm çapa sahip bağlantı çubuklarıdır. Ankraj çubukları na uygulanan öngerilme 140 ton olarak belirlenmiştir. Bu değer kablo montajı sonrasında, taban bloğunun ve temel in kule tepesinde oluşan dönme momentine karşı beraber çalışmasını olanak vermesi dikkate alınarak hesaplanmıştır [12](Şekil 4. 30).



Şekil 4.30 Kul e temelinde ankraj çubuğu düzenl e mesi.

- **Port al k i ri ş**

F. S. Mköprüsünde, kulelerde yer alan portal kirişlerini taşıyıcı sistemde üstlendiği görev, betonarme olarak inşa edilen Lillebaelt köprüsü ile aynıdır. Ancak çelik olarak üretilmeleri, kulelerde olduğu gibi farklılıklar oluşturmaktadır. F. S. Mköprüsü portal kirişi, sütunlarda olduğu gibi dış plaka yatay kuşaklar ve köşebentlerden oluşturulmuş çelik panolardan imal edilmiştir. Panoların birleşimleri kulelerde olduğu gibi, estetik görünüş ve işçilik göz önüne alınarak kiriş kesitinin içinde oluşturulmuştur. Portal kirişlerin boyu 30 m uzunluğunda olup, iki bloğa ayrılarak imal edilmişlerdir [12].

4.2.2.2 Çelik kulelerinin imalatları

F. S. M köprüsünde bulunan çelik kuleler iki katlı portal tipinde başlıklı bir yapıdır. İki kulenin toplam 6280 ton ağırlığına sahiptir. Yapı olarak temellere aktarılan düşey kuvvet; kuleleri oluşturan gövde plakaları ve düşey kuşaklar tarafından iletilmektedir. Kesme kuvveti ise kule bloklarının alt ve üst noktalarında, uç plakalar üzerinde yer alan yüksek mukavemetli cıvatalar ile aktarılmaktadır. Montaj sırasındaki eğilme momentleri gergi çubukları ile karşılanmaktadır [12].

Blokların tüm bağlantıları, kutu kesiti ni iç tarafında bulunmaktadır. Bu durum kule dışında yapılan çalışmalar en alt seviyeye indirgeyerek güvenlik, estetik ve süreç bakımından olumlu katkı sağlamıştır.

Malzeme olarak 10-75 mm arası et kalınlığında ve St 37 sınıfı çelik plakalar ve profiller kullanılmıştır [19].

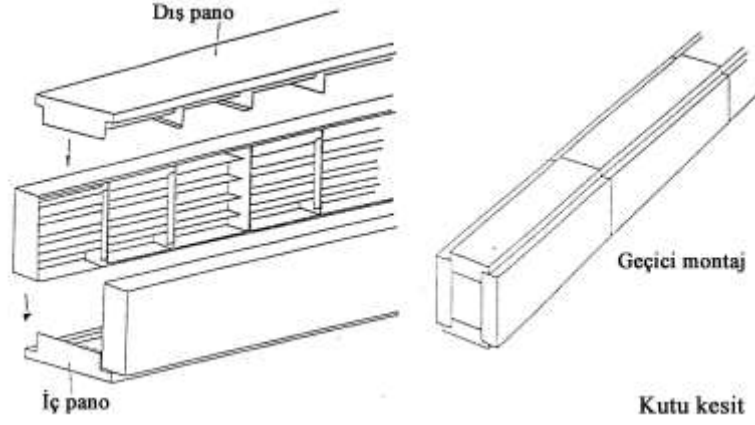
- **Kaynak işleri**

F. S. M köprüsünde kullanılan çelik malzeme Japon Endüstri standartlarına (J.I.S) uygun olarak kullanıldığından dolayı, kaynak malzemeleri de aynı standarda göre seçilmiştir.

Kaynak işlemlerinde kullanılan yöntemler; elektrot, gazaltı ve tozaltı olarak 3 gruba ayrılmış. Elektrot kaynağı geçici işlemlerde tercih edilirken dikey kuşakların gövde plakası (dış plaka) ile birleştirilmesinde, kaynak kalitesi ve iş verimini arttırmak amacıyla gazaltı kaynağı tercih edilmiştir. Tozaltı kaynağı ise tam penetrasyon ve iyi görünümü için köşe birleşiminde kullanılmıştır [19].

- **İmalat ve geçici montaj**

Dikey kuşaklar gövde plakalarına kaynaklanarak panolar oluşturulmuş ve sonrasında panolar çatılarak sırası ile yatay kuşaklar, uç plakalar ve kanat plakaları kaynaklanmıştır (Şekil 4.31).



Şekil 4.31 Kule bloğu geçici montajı [19]

İmalatları tamamlanan panolar birleştirilerek kule blokları oluşturulmuş ve uç yüzeyleri düzeltilmiştir. Uç yüzeylerin düzeltilmesinden sonra bloklar biraraya getirilerek birbirlerine olan uyumları kontrol edilmiştir. Geçici montaj işlemleri aşağıdaki gibidir.

- Montaj tezgahının hazırlanması
- Alt panonun yerleştirilmesi
- Yatay kuşakların montajı
- Sağ ve sol panoların yerleştirilmesi
- Üst panonun yerleştirilmesi
- Alıştırma ve civatalama
- Uç yüzeylerinin işlenmesi
- Panoların bir araya getirilmesi
- Alıştırma ve civatalama
- Aşmanların takılması
- Kontrol
- Demontaj
- Raspa ve boya
- Sevkiyat

Benzer işlemler portal kirişlerde uygulanmıştır. İki blok olarak hazırlanan portal kirişler, alın kaynağı ile tek blok haline getirilmiştir. Portal kirişler

tanımlandıktan sonra her iki yanlarında bulunan kule blokları ile geçici montaj ve uyum kontrolü yapılmıştır [19].

- **Uç yüzey işlenmesi ve kontrolü**

Uç yüzey düzeltmeleri, her blokta yer alan 4 panonun birleştirilmesi sonrasında yapılmıştır. Düzeltme işlerinde 1 mikrometre okuma yapabilen ölçü aletleri kullanılmış ve tespit edilen hatalar freze ile işlenmiştir. İşlem yapılan blok titreşiminden dolayı pürüz oluşması için nengeneler ile bağlanmıştır.[19]

Panolar kaynak işlemini takiben gerilimleri alındıktan sonra tek tek mar kalınmıştır. Boy farkının asgari ölçüde tutulabilmesi için toleranslar ± 1 mm olarak kabul edilmiştir [12].

- **Kontrolller**

Kontrolller Japon standartlarına göre yapılmıştır.

Malzeme kontrolünde, imalatçı belgesine ek olarak malzeme üzerinde eğilme, çekme ve darbe deneyleri yapılmıştır. Kaynak kontrollerinde portal giriş ve kule panolarında ultrasonik deney yapılmıştır. Parçaların uyumu geçici montajda yapılmış, montaj sonrasında yapılan boya işlemlerinde gözleme dayalı olarak kullanılmış, yüzey pürüzlülüğü ve kurulum kalınlığı ölçülmüştür. Parçalarda miktar kontrolü yapılarak, imalatlar montaja hazır hale getirilmiştir [19].

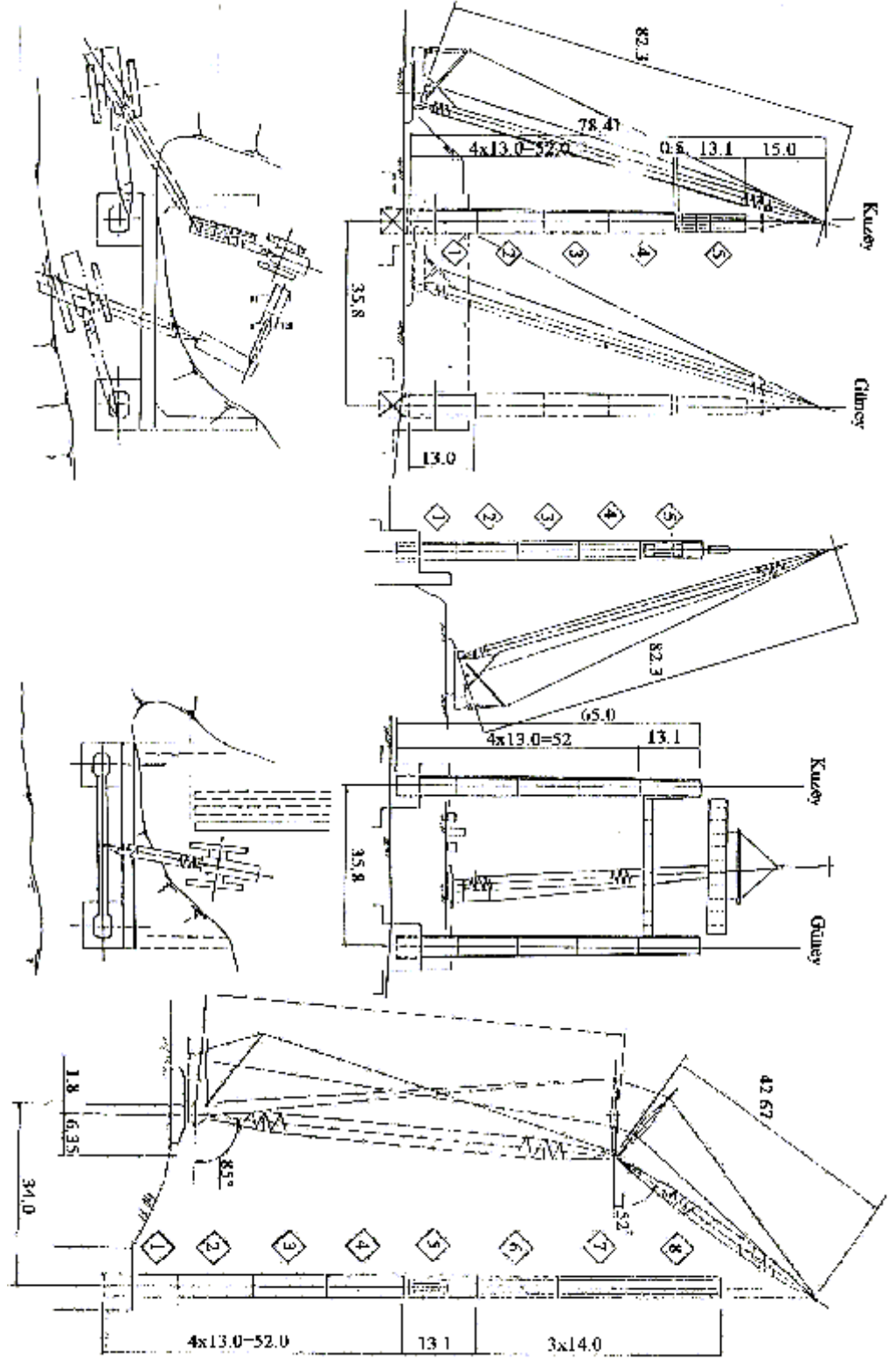
4.2.2.3 Çelik kulelerin montajı

F. S. M köprüsünde kuleler, tepe üstlerinde yer almaktadır. Kulelerin karada olmaları, kule bloklarının ağır tip paletli vinçler ile montajına olanak vermiştir. Montaj sırasında Avrupa kulesinde 650 ton kapasiteli vinç kullanılabilmiş ve bu vinç hiç yer değiştirmeden bütün montaj işlemini tamamlamıştır. Asya kulesinde ise arazi de bulunan olumsuz şartlardan dolayı 450 tonluk vinç kullanılmış ve vinçin kapasitesinin düşük olmasından dolayı, montaj işleminde yer değişiklikleri zorunlu olmuştur.

Asya kulesinde, montajı 5. kadeşine kadar kule merkezine 52.5 m uzaklıkta kalınamış, 6. kadeşeden sonra vinç kulesinin yanına çekilebilmiştir. 7. kadeşeden sonra her iki vinçe ilave bmontakılmıştır [19].

Her kule, 64 kule panosu, 6 portal kiriş bloğu, 4 kule seneri bloğu ve 42 yatay bağlantı (diyafram) panosundan oluşmuştur ve her kulede 27,740 adet yüksek mukavemetli cıvata, 350 gergi çubuğu ve hassas birleşim yapılabilmesi için 578 dar toleranslı cıvata kullanılmıştır [12].

Asya ve Avrupa kule montajları şekil 4.32’de gösterilmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.32 Asya kulesi montaj etapları [19]

- **Montaj kademeleri**

Kulelerin düşey ve yatay bağlantılarında öncelikle dar toleranslı cıvatalar (D T C) kullanılmıştır. Montaj sırasında özellikle 1. kademe bloğunun üst yüzey düzlemi çok yüksek hassaslıkta kontrol edilmiştir. Panoların montajında uygulanan ana işlemler aşağıdaki gibidir.

- Üst D T C nin takılması ve sıkılması
- Alt D T C nin takılması ve sıkılması
- Rüzgar pınları ve geçici cıvataların takılması

1. kademe montajından sonra 5. kademeye kadar kule montajı kesintisiz olarak devam etmiş, 5. kademeden sonra alt portal kiriş montajı tamamlanandan sonra kule montajı devam etmiş ve kule montajı tamamlanandan sonra üst portal kiriş monte edilerek ana kule inşaatı tamamlanmıştır [19].

- **Yüksek mukavemetli cıvataların sıkılması**

Kulelerin sürtünmeli birleşim yüzeylerinde kullanılan yüksek mukavemetli cıvatalar, M 24 ve M 27 çap ve F8T özelliğindedir. Ebat ve adetler aşağıdaki tabloda sıralanmıştır.

Tablo 4.2 Yüksek mukavemetli cıvata ebat ve miktarları

Tip	Çelik Kalitesi	Ebat (mm)	Bir kulede kullanılan	İki kule toplam
Yüksek Mukavemetli Cıvata	F8T	M24 x 75	1480 adet	2960 adet
		M24 x 80	4792	9584
		M24 x 85	1760	3520
		M24 x 90	6755	13510
		M24 x 110	168	336
		M24 x 125	6848	13696
		M24 x 130	1028	2056
		M24 x 175	240	480
		M27 x 85	2208	4416
		M27 x 165	672	1344
Toplam			27740 adet	55480 adet

a) Sıkıştırma yöntemi

Yüksek mukavemetli cıvatalar, somun döndürme yöntemi ile sıkıştırılmışlardır. Somun döndürme yöntemi, sıkma tabancasının somunu otomatik olarak belirli bir açı ile döndürmesidir. Bu sayede somunun dönme açısı göz ile kontrol edilebilir ve toplam çalışma süresi kısalmaktadır.

Cıvata sıkıştırılması sırası ile; kalibrasyon, cıvata takılması, geçici sıkma, markalama, son sıkma, dönüş açısı kontrolü işlemleri ile yapılmaktadır.

Kalibrasyon işlemi sıkma tabancalarının dönme açılarının kontrol edilmesidir ve montaj başlanmadan önce yapılmıştır. Her kule montajında 20'şer adet tabanca kullanılmış ve 180 °C dönme açısına göre ayarlanmıştır.

Cıvatalar somunlar düşey ekseninde yukarıda ve yatay ekseninde kesiti içinde kalacak şekilde takılmışlardır.

Kulelerde paneller öncelikle geçici cıvatalar ile bağlanmışlardır ve montaj anahtarları kullanılarak elle sıkılmışlardır. Portal kirişlerin yer aldığı 5. ve 8. kademelerde cıvata sayısının çok olması sebebiyle (400 cıvata/blok), darbeli anahtar kullanılmıştır. Geçici sıkma işleminde uygulanan tork, el anahtarına denk 1000-2000 kgm arasında belirlenmiştir.

Cıvataların boş dönmesini ve somun dönüş açısını kontrol etmek amacıyla somun ve pullar beyaz boya ile markalanmıştır.

Son sıkımda, dönüş açısı bütün somunlar için asgari 180° dönme açısı oluşturacak şekilde uygulanmıştır. Yüzeylerin cıvata eksenine dik olmaları gerekmektedir ve ekseninde oluşabilecek eğlik 1/20 oranında sınırlandırılmıştır. Cıvata çapı 8 mm veya boyu 20 cm'den küçük ise 1/2 tur (180°), bu ebatların üzerinde olan çap ve uzunluklar için ise 2/3 tur (240°) dönme uygulanmıştır. Her iki plaka yüzeyi de cıvata eksenine 1/20 oranında eğik olması durumunda bütün cıvata boyları için 3/4 tur (270°) dönme uygulanması gerekmektedir. Toleranslar $\pm 30^\circ$ ile sınırlandırılmıştır [19].

b) Dişli çubuklara öngerili muygulanması

60 mm çapında bir dişli çubuğa alt portal kirişe kadar 50 ton, bu noktadan sonra ise 30 ton öngerme uygulanmıştır. Bu işlem çoğunlukla krikö, kısmen de anahtar ve çekici ile uygulanmıştır.

• Eksen kontrolleri

Kule eksenlerinin kontrolü için en önemli hususlar, üzerine yerleştirildiği düzlemin durumu, yükseklik ve dikeylik ve bütün bu hususlar 1. kademelin temelinde yerleştirilmesine bağlıdır. Sonraki bloklar, fabrikada geçici montaj ile kontrol edilmişlerdir. Montajda dar toleranslı civatalar kullanıldığı için işlem hassas olarak gerçekleştirilebilir.

1. kade me kule bloğunda hassas ölçüm yapabilen elektronik ni vo kullanılmıştır ve blok üzerinde 12 noktadan ölçüm alınmıştır. Ayrıca ölçümler sütunlar arasında da sürekli olarak yapılmıştır [19].

• Ankraj çubuklarına gerili muygulanması

Montajın tamamlanmasından sonra, kule tepe noktasından 840 mm geri çekilerek gerili m uygulanmıştır. Bu işlem kablo montajı sırasında kule tabanında 1600 t m dönme momenti oluşacağı hesaplanarak uygulanmıştır. Bu yüklere ek olarak yatay yüklerde hesaba katılmış ve bu yüklerin oluşturacağı dönme momenti, montaj sırasında oluşacak momentin yarısı olarak belirlenmiştir. Kule 1. kade me blokları montajı ve betonu tamlandıktan sonra, beton mukavemeti proje değerine ulaştığında ve kablo montajı başlandıktan önce ankraj çubuklarına gerili m uygulanmıştır ve gerili m miktarı her çubuk için 140 ton olarak belirlenmiştir. Uygulamada hidrolik krikö kullanılmıştır [19].

4.3. Ankraj Blokları

Ankraj blokları, ana kulelerin gerisinde oluşturulan ve ana kablo uçlarının bağlandığı mesnetlerdir. Ankraj bloklarının ebatları, kablolar tarafından aktarılan yüklerin toplamına, tipleri ise topografik ve zemin şartlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Sağlam zeminlerde ağırlık tipinde, daha küçük ve derin ebatlarda ağırlık tipinde

hazırlanabildikleri gibi, taşıyıcılık özelliği daha düşük zeminlerde geniş ve daha az yüksekliğe sahip olarak sürtünme tipinde uygulanabilirler.

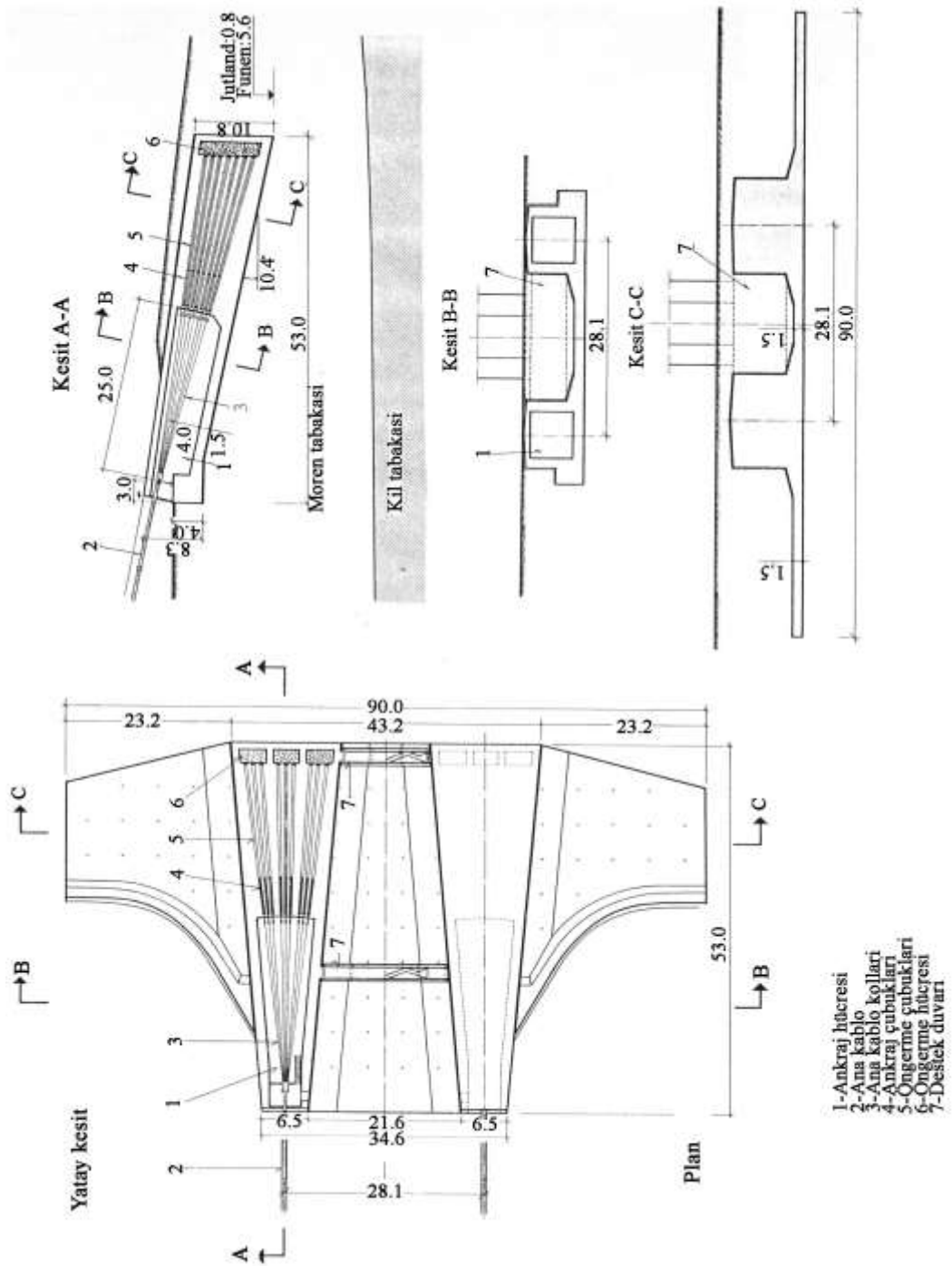
Ankraj bloklarının içlerinde, kabloların ve ankrajların yer aldığı ankraj hücreleri bulunmaktadır. Ankraj hücrelerinde, ana kablolar, kollara ayrılarak, belirli bir geometrik düzen içinde ve farklı noktalardan ankraj bloğuna bağlanmaktadır.

Ankraj blokları genel olarak iki ana kablonun bağlandığı tek hacimli yapılardır. Zemin durumuna göre geçişin bir ucunda birer ankraj hücreli iki ayrı blok olarak yapılabilirler de, blokların yatayda bağlanarak birlikte hareket etmeleri daha doğru bir çözüm olarak kabul edilmektedir.

Bu bölümde farklı çözümler ile oluşturulan Lillebaelt ve F. S. Mköprüleri ayrı olarak incelenecektir.

4.3.1. Lillebaelt köprüsü ankraj blokları

Köprüye ait ana kablolar, yan kulelerin 180 mgerisinde, tamamen zemin seviyesinin altında yer alan betonarme bloklara ankrajlanmışlardır. (Şekil 4.33) Ankraj blokları her sahilde 1 adet olarak inşa edilmiş olup, iki ana kablo aynı bloğa bağlanmıştır. Bloğun donatılı olarak hazırlanan temeli 1.5 m kalınlıkta olup 90x53 m ebatlarına sahiptir. Kayma etkisine karşı blok temelinde, kule tarafında 4 m yüksekliğinde alın beton oluşturulmuştur. Blok üzerinde ana kablolar için oluşturulan 2 adet ankraj yuvası bulunmaktadır. Ankraj yuvaları, öngermeli beton ile desteklenmişlerdir. Ankraj yuvalarında rutubet engelleyici önlem olarak nemalıcı cihazlar kullanılmıştır.



Şekil 4.33 Lilebaelt köprüsü ankraj blokları plan ve kesitleri [11]

Ankraj bloğu bütün olarak incelendiğinde, sürtünme mukavemetini arttırmak için yatayda 10° açı ve 3300 m^2 taban alanı oluşturularak tasarlanmıştır. Ankraj bloklarının girişlerinde, ana kabloyu oluşturan 61 kablo kol, yelpaze biçiminde açılarak ankraj yuvasının masif, öngerme li arka bölümüne bağlanmıştır.

Ankraj blokları ta n a n l a n d ı ğ ı n d a , ü s t v e y a n k ı s ı n l a r ı n a z e m i n k o t u n d a n i t i b a r e n % 100 p r o k t o r s ı k ı ş m a s ı s a ğ l a n a c a k Ő e k i l d e d o l g u y a p ı l m ı Ő v e m i k t a r o l a r a k 5.000 m³ s t a b i l i z e d o l g u y a p ı l m ı Ő t ı r .

Her b l o k t a 13,500 m³ b e t o n , 800 t o n Ő e l i k v e 80 t o n ö n ğ e r n e k a b l o s u k u l l a n ı l m ı Ő t ı r . L i l l e b a e l t k ö p r ü s ü a n k r a j b l o k l a r ı , z e m i n t a Ő ı n a k a p a s i t e s i v e t o p o g r a f i k k o Ő u l l a r d a n d o l a y ı s ü r t ü n n e t i p i n d e i n Ő a e d i l m i Ő l e r d i r [11] .

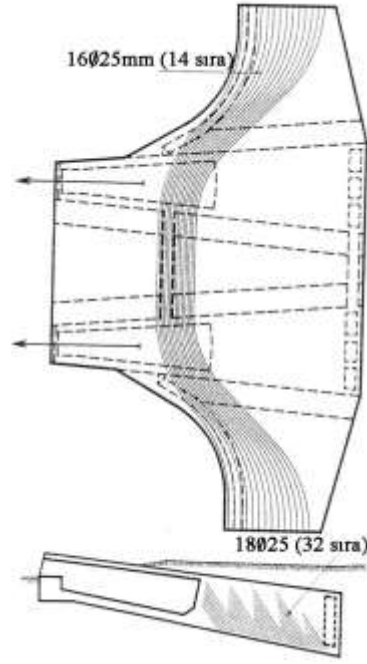
4.3.1.1. Ankraj b l o k l a r ı n ı n f o n k s i y o n l a r ı

Lillebaelt köprüsünde, ana kabl ol ar d a n a n k r a j b l o k l a r ı n a a k t a r ı l a n y ü k l e r s ı r a s ı i l e 2200 t o n a n a k a b l o v e a s k ı l a r d a n , 11,400 t o n d ö Ő e n e y ü k l e r i n d e n v e 3200 t o n ı s ı l g e n e Ő m e v e h a r e k e t l i y ü k l e r d e n o l m a k ü z e r e t o p l a m 16,800 t o n g e r i l i m o l u Ő t u r m a k t a d ı r . B u d e ğ e r i n s o n u c u o l a r a k , h e r k a b l o k o l u , a n k r a j b l o ğ u n a y a k l a Ő k 150 t o n y ü k l e m e y a p m a k t a d ı r .

Kabl ol ar , i Ő y ü z e y l e r i n d e Ő i n k o d o l g u o l a n s o k e t l e r e , s o k e t l e r i s e 95 m m Ő a p ı n d a Ő e l i k a n k r a j Ő u b u k l a r ı n a b a ğ l a n m ı Ő l a r d ı r . A n k r a j Ő u b u k l a r ı 7.50 m b o y u n d a o l u p , 5.2 m u z u n l u ğ u n d a a n k r a j b l o k l a r ı n ı n i Ő i n d e g ö m ü l m ü Ő l e r d i r . A n k r a j Ő u b u k l a r ı y ü k s e k m u k a v e n e t l i Ő e l i k t e n i n a l e d i l m i Ő o l u p h e r k a b l o k o l u i Ő i n i k i a d e t Ő u b u k k u l l a n ı l m ı Ő t ı r . A n k r a j b l o k l a r ı n ı n m u k a v e n e t i n i a r t t ı r m a k i Ő i n 26 m m Ő a p ı n d a 252 a d e t v e 32 m m Ő a p ı n d a 126 a d e t k a b l o i l e ö n ğ e r i l i m u y g u l a n m ı Ő t ı r . Ö n ğ e r n e k a b l o l a r ı a n k r a j b l o ğ u n u n a r k a s ı n d a y e r a l a n ö n ğ e r n e h ü c r e s i i l e a n k r a j h ü c r e s i a r a s ı n a y e r l e Ő t i r i l m i Ő t ı r . K a b l o l a r a t o p l a m d a 14,000 t o n g e r i l i m u y g u l a n a r a k , a n k r a j b l o ğ u n d a 10 k g / c m² i l a v e m u k a v e n e t s a ğ l a n m ı Ő t ı r .

A n a k a b l o l a r d a n a n k r a j b l o k l a r ı n a a k t a r ı l a n y ü k l e r , a n k r a j b l o ğ u t a b a n ı n d a k e s n e k u v v e t i o l u Ő t u r m ı Ő v e b u e t k i y e k a r Ő ı t a b a n d a n a n k r a j b l o ğ u n u n i Ő i n e d o ğ r u e ğ i k o l a r a k y e r l e Ő t i r i l e n 576 a d e t 25 m m Ő a p ı n d a n e r v ü r l ü d e m i r k u l l a n ı l m ı Ő t ı r .

A n a k a b l o l a r d a n y ü k a k t a r ı l ı r k e n a n k r a j b l o ğ u n u n t e m e l i d i Ő k Ő e k l i n d e b i r k i r i Ő g i b i Ő a l ı Ő m a k t a d ı r . K a b l o l a r d a n g e l e n Ő e k m e k u v v e t i n e m u k a v e n e t e d e b i l m e k i Ő i n , b l o ğ u n i Ő i n d e b u k u v v e t l e r i d i k e k s e n d e 224 a d e t 25 m m Ő a p ı n d a n e r v ü r l ü d e m i r k u l l a n ı l m ı Ő t ı r . D o n a t ı l a r , h e r b i r i n d e 16 d e m i r b u l u n a n 14 s ı r a h a l i n d e y e r l e Ő t i r i l m i Ő t ı r [11] (Ő e k i l 4.34).

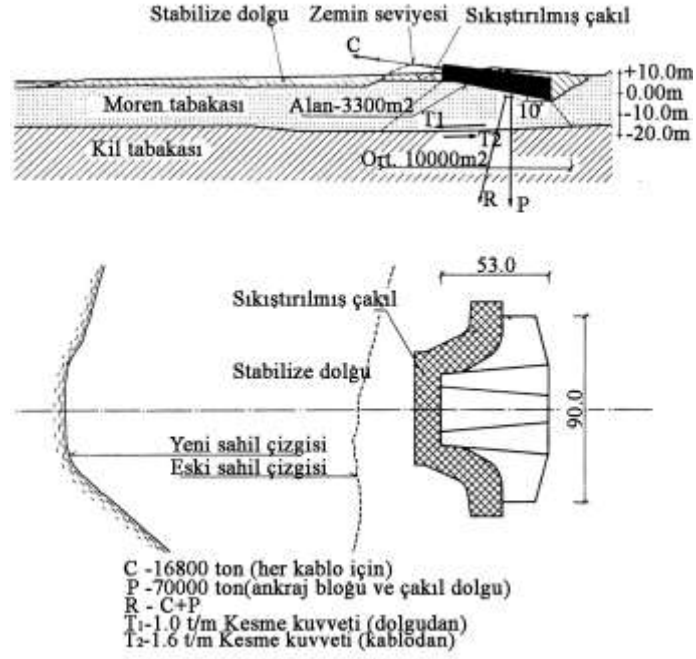


Şekil 4.34 Ankraj bloğu donatı durumu [11]

4.3.1.2 Ankraj bloklarında stabilite

Ankraj bloğuna etki eden kuvvetler, kablolardan aktarılan gerilmelerin yanı sıra bloğun ölü ağırlığını ve dolgu ağırlığını kapsamaktadır. Bu kuvvetlerin bileşkesi zemine yaklaşık olarak dik bir açı ile aktarılmaktadır. Ankraj bloğu zemininde oluşan sürtünme kuvveti, ankraj hücrelerini altında 27 t/m^2 , kenar ve orta bölgelerde ise 2.2 t/m^2 olarak oluşmaktadır. Temel ağırlığı ise aynı bölgelerde dikte alındığında $14-18 \text{ t/m}^2$ olarak değişmektedir ve en elverişsiz yükleme durumlarında sürtünme katsayısı 2 olarak kabul edilmiştir [21].

Projelendirme sırasında, blokların önünden sahil şeridine kadar stabilize dolgu yapılmasına ve bu sayede blokların geçiş ekseninde sahile doğru hareket etmesini engellemek adına katkıda bulunulmasına karar verilmiştir. Ancak ön dolgu hesaplarında, oluşturulması gereken sürtünme katsayısını azaltacak yönde dikte alınmamıştır. Yapılan dolgu zeminine ilave olarak ortalama 1 t/m^2 basınç uygulanmış ve kabloların oluşturduğu 1.6 t/m^2 çekme kuvvetinin etkisini azaltmıştır. Ankraj blokları $14-24 \text{ m}$ kalınlıkta olan ve bünyesinde çoğunlukla çakıl bulunan moren kaya tabakasına ve altta bulunan kil tabakasına oturmaktadır [11] (Şekil 4.35).

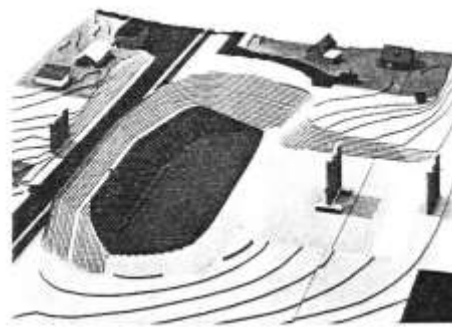


Şekil 4.35 Funen ankrajının ön dolgusu [11]

4.3.1.3 Ankraj Blokları İnşaatı

- **Hafriyat**

Ankraj blokları yapımında, her ankraj bloğu için 65,000 m³ hafriyat yapılmıştır. Hafriyat sırasında kazı şevleri yeteri kadar stabil olduğu için herhangi bir önlem alınmasına gerek kalmamıştır. Temel kotunda kazı çalışması hassas olarak yapılmış ve homojen seviyeli bir yüzey elde edilmiştir. Zeminin sıkı bir özelliğe olmasından dolayı 1 tonluk el silindrileri yüzey sıkıştırılmasında yeterli olmuş ve sonrasında 10 cm grobeton dökülmüştür [11] (Şekil 4.36).



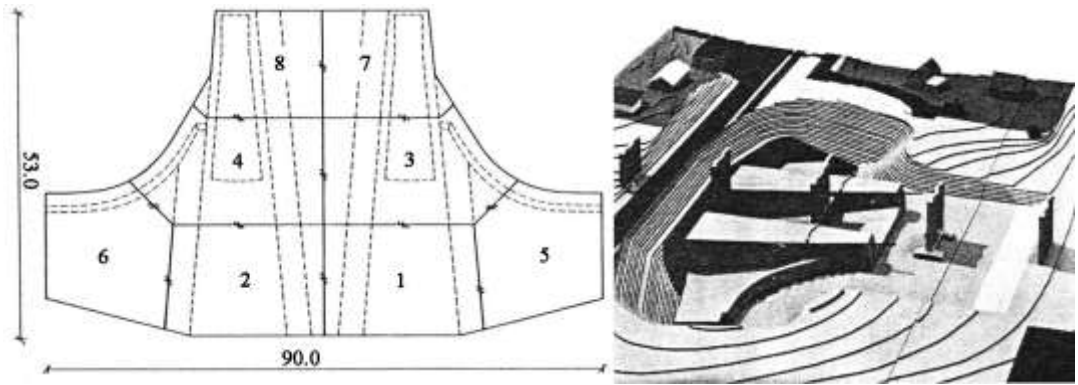
Şekil 4.36 Ankraj bloğu hafriyat modellemesi

Ze min testlerinde, geniş hafriyat sonrasında, kaya tabakasının altında bulunan kil tabakasının, üzerindeki baskının azalması ve su ile temas sırasında genişlebileceği öngörülmüştür. Jeoteknik araştırmalar sonucunda sadece Funen sahilinde hafriyat sonrasında ze min su seviyesinin düşürülmesine karar verilmiştir. Bu sahilde ze min suyuna +1 m seviyesinde rastlanılmıştır. Su seviyesini düşürmek için, zeminde 20 m derinlikte 5 adet kuyu açılmıştır. Açılan kuyuların her biri 18 m³/saat kapasitesindedir [21].

- **Beton**

a) Taban bloğu

Ankraj bloklarının beton işleri iki ana gruba ayrılarak tanımlanmıştır. İlk olarak taban bloğu tanımlanmış ve 350-500 m² arasında değişen alan, alanlara 600-900 m³ arasında değişen miktarda beton dökülmüştür. Taban bloğu toplam 8 aşamada tanımlanmıştır. Taban bloğu ortalama 1.5 m kalınlıkta ve toplam 3.300 m² alana sahiptir [11] (Şekil 4.37).



Şekil 4.37 Ankraj bloğunun tanımlanması ve beton aşamaları [11]

Taban blokları beton işlerinde kullanılan çimento dozu 260-275 kg/m³ olarak projelendirilmiştir. Projelerde maksimum dane büyüklüğü 50 mm olarak kabul edilmiş ancak 20 cm pompa çapı dikkate alınarak bu ebat 32 mm olarak sınırlandırılmıştır. Akışkanlaştırıcı olarak çimento dozunun %2.66 oranında pozzolit kullanılmış, su/çimento oranı 0.40-0.45 oranında belirlenmiştir. Taban bloklarının geniş bir alana yayılması, yüksek hidrostasyon ısı oluşumuna sebep olmaktadır. Bu sebeple agrega ıslatılmış ve beton içine soğutucu tesisat yerleştirilmiştir. Soğutma

işlemi sırasında oluşabilecek çekme gerilimleri alt temel tabakasına bağlı olduğundan beton dökümü anolara ayrılmış ve belirli bir sıralama ile beton dökülmüştür. Öncelikle ankraj bloklarının altında yer alan kısımlar, sonrasında ise dış kısımlara beton dökülerek taban bloğu betonu tamamlanmıştır. Bu sayede potansiyel çekme gerilimleri 5 kg/cm^2 değerine indirgenmiştir ve bu gerilimden dolayı oluşabilecek olası hareketler engellenmiştir. Soğutma işlemi sırasında hidrotasyon ısı 15°C den 50°C ye çıkmış ve ortalama 35°C ısı yükselmesi olmuştur. Uygulanan dozaj ve koruma önlemleri ile ortalama 300 kg/cm^2 olarak belirlenen beton mukavemeti ortalama 420 kg/cm^2 seviyesinde elde edilmiştir [17].

b) Ankraj hücreleri

Taban bloğu üzerinde yer alan ankraj blokları, ankraj hücreleri hariç tutulduğunda her biri 3300 m^2 taban alanına ve 8 m yüksekliğe sahiptir. Bu bölümde beton dozajı hidrotasyon ısını azaltmaya yönelik olarak daha da düşürülmüş ve bu duruma pompa ile dökümü imkanı vermediği için sabit konveyör hattı kullanılarak beton dökümü yapılmıştır [11].

Beton dozu 230 kg/m^3 olarak belirlenmiş, pompa kullanılması sebebiyle maksimum magrega ebatı 50 mm olarak uygulanmıştır. Akışkanlaştırıcı olarak %5.32 oranında pozzolit kullanılmış ve su/çimento oranı $0.40-0.45$ olarak belirlenmiştir. Beton mukavemeti taban bloğunda olduğu gibi 300 kg/cm^2 olarak belirlenmiş ve uygulama sonucunda $410-420 \text{ kg/cm}^2$ mukavemet elde edilmiştir. Hidrotasyon ısına karşı, taban bloğu ile benzer şekilde agrega ıslatılarak ve soğutucu tesisat kullanılarak önlenilmiştir. Soğutma işleminde borular 1.5 inç çapında ve ortalama $1.2-1.4 \text{ m}$ aralıklı yatay ve düşey eksenlerde yerleştirilmişlerdir ve kür bir hafta süre ile uygulanmıştır. Hidrotasyon ısı bu sayede, taban bloğunda olduğu gibi $15-20^\circ \text{C}$ seviyesinden $50-55^\circ \text{C}$ düzeyine çıkmış ve ısı artışı ortalama 35°C olarak oluşmuştur.

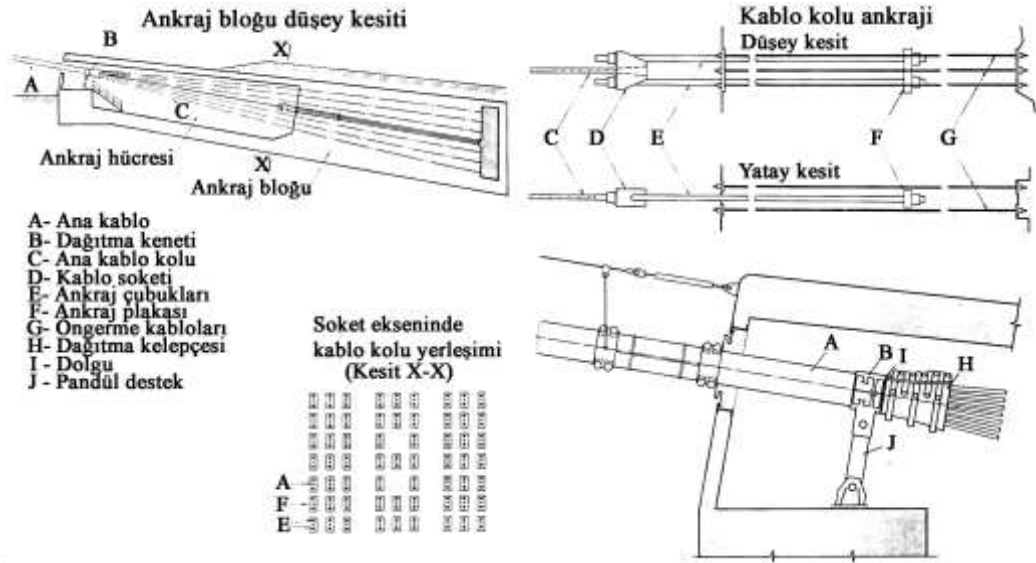
Ankraj bloklarının beton işlemi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiş ve her aşamada 1700 m^3 beton dökülmüştür. Ankraj hücrelerinin üst döşemeleri ise ara kablo montajı tamamlandıktan sonra yapılmış ve uygulamada 300 kg/m^3 dozlu beton kullanılarak üretilen prekast kirişler kullanılmıştır. Beton mukavemeti 350 kg/cm^2 olarak belirlendiği halde 550 kg/cm^2 mukavemetli sonuç elde edilmiştir [17].

c) Donatı, ankraj çubukları

Ankraj bloklarında yer alan donatı ve ankraj çubuklarının ebatları yükseklikleri sebebiyle geçiş eksenini ile aynı doğrultuda yerleştirilen ve beton içinde kalan çelik çerçeve sistemler yardımıyla desteklenmişlerdir. Çelik çerçeveler 20x19 ebatlarına ve 9 m yüksekliğe sahip olan ağır çelik konstrüksiyonlardır.

Ankraj çubukları bu desteklerin üzerine optik ölçüm aletleri kullanılarak yerleştirilmiş ve hata payı 0,0005 radyan olarak kabul edilmiştir[11]. Donatı ebatları, proje değerlerine uyularak uygulanmıştır.

Ankraj çubuklarını, kablo ve ankraj hücresi arasında bağlayan, 3'er adet gergi çubuğuna, ankraj çubuğunda gerekli olan gerilimin 1/3'ü uygulanarak, germe işlemi yapılmıştır. Germe işlemi, ardgerme olarak yapılmış ve ana kablo montajından önce tamamlanmıştır (Şekil 4.38).



Şekil 4.38 Ankraj hücresi ve ankraj çubuğu oluşumları-Jutland [11]

d) Dolgu

Ankraj blokları, zemine tamamen gömülmesi olarak projelendirilmiş ve bu amaçla, yan ve üst bölümlere stabilize dolgu yapılmıştır. Bu işlere ek olarak sürtünme kuvvetini arttırmak için, bloğun ön tarafından sahile kadar dolgu yapılmıştır. Yan ve üst dolgular 50 cm tabakalar halinde ve 5 tonluk vibrasyonlu keçi ayaklı silindir kullanılarak, ön dolgu ise sıkışma amacı ile 20 cm tabakalar halinde 5 tonluk

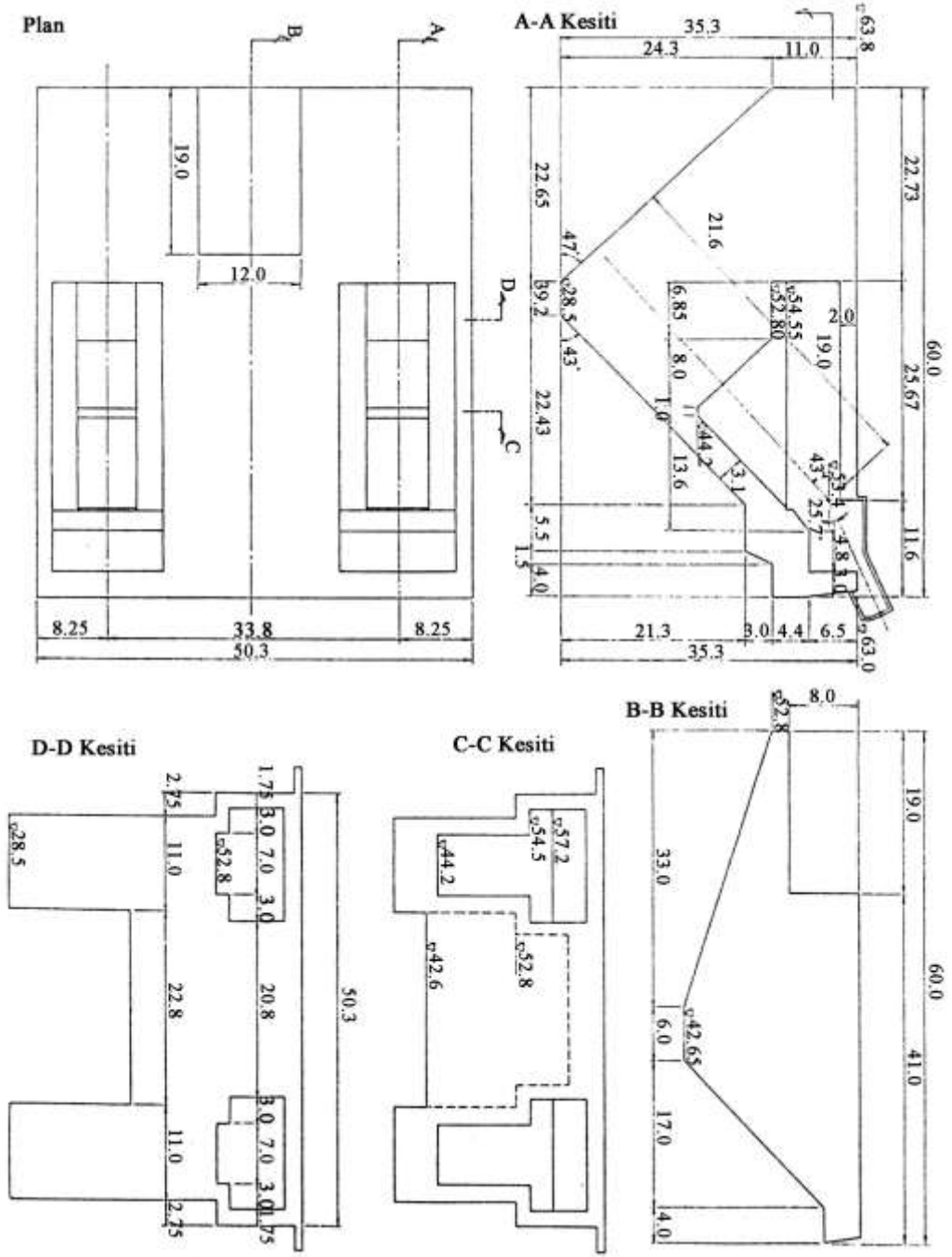
vi brasyonlu silindir kullanılmıştır. Tüm dolgularda % 100 proktor sıkışması elde edilmiştir [11].

4.3.2 F S Mköprüsü ankraj blokları

4.3.2.1 F S Mköprüsü ankraj blokları tasarımı

F. S Mköprüsü ankraj blokları, ana kulelerin arkasında, kulelere 200 m mesafede yapılmış ve tamamen gömülüşlerdir. F. S Mköprüsü ankraj blokları, ana kuleler gibi sağlam zemin üzerinde yer almışlar ve bu sebeple ağırlık tipinde inşa edilmişlerdir. Ankraj blokları, Avrupa yakasında Hsarüstü, Asya yakasında ise Kavacık tepesinde yer almaktadır. Her iki bölgede de zemin, sıkı, sert ve mukavemetli kireç taşı formasyonu özelliğindedir. Her iki yakada bu formasyon 30-40°'lik açı ile boğaz yönüne doğru eğilmiştir.

Ankraj blokları, ayrı olarak tasarlanmış ve aralarında bağlantı kirişi görevi yapan daha küçük ebatlarda oluşturulmuş merkez blok ile bağlanmışlardır. Ankraj blokları yatayda, ön bölümde 12 m genişlikten arka bölümde 16.5 m'ye doğru genişleyen ve yol kotundan aşağıya doğru 40 m ön tarafta 43°, arka tarafta 47° açı ile daralan ve zeminde kaya tabasına oturan, masif beton yapılarıdır. Her ankraj bloğunda 1 adet ankraj hücresi bulunmaktadır [12] (Şekil 4.39).



Şekil 4 39 F S M Köprüsü ankraj blokları plan ve kesitler [18]

Ankraj çubukları her ana kablodan yaklaşık 25.67°'lik eğimle gelen 28,750 tonluk kuvveti karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.

Ankraj blokları, merkez bloğun ekleneşi ile planda 50x60 m genişlikte bir yüzeye oturmaktadır. Böylece her ankraj bloğu, 1 merkez bloğu, 2 hücre çukuru ve 2 dağıtım bloğu olmak üzere 5 ana bölüme ayrılmıştır.

Ana kablo ankraj hücrelerinin ön tarafında yer alan dağıtım seherine mesnetlenerek, ana kablo bünyesinde bulunan 35 kablo ankraj hücrelerinin önünde bulunan çelik dağıtım seherinden, ankraj bloğuna dağıtılmış ve hücre çukuru yüzeyindeki ankrajlara bağlanmışlardır.

Ankraj hücrelerinin üstleri öngerme beton kirişler ve üzerlerine dökülen beton ile kapatılmış ve bu işleme kablo montajı tamamlandıktan sonra yapılmıştır.

Yapı mısirasında Asya ankrajında toplam 66,000 m³, Avrupa ankrajında ise 64,000 m³ hafriyat yapılmıştır. Kullanılan toplam beton hacmi ise Avrupa yakasında 45,000, Asya yakasında ise 47,000 olarak tasarlanmıştır.

F. S. M köprüsünde ankraj çubuklarına herhangi bir öngerme uygulanmış ve sistem hafif çelik konstrüksiyondan imal edilen bağlantı çerçeveleri ve her ankraj noktası için 4 adet çubuk olmak üzere, ankraj hücresi ve ankraj bloğu tabanına, uçlarında çelik plakalar olmak üzere yerleştirilmişlerdir. Ankraj çubuklarının boyları ortalama 20 m uzunluktadır [18].

4.3.2.2 Ankraj Bloklarının İnşaatları

F. S. M ankraj blokları ağırlıktıpiinde olup, gerek üzerine uygulanan yükler, gerek ise fonksiyonları bakımından Lillebaelt köprüsü örneğine göre daha büyük yapılardır. Bloklara herhangi bir gerilim uygulanmış ve sistem olarak daha basit kurulmuşlardır. Ancak ebat ve derinliğin artması ve zeminin kaya olması, özellikle hafriyat çalışmasını daha karmaşık ve zor olmasına sebep olmuştur.

• Hafriyat

Hafriyat çalışması hemen hemen eş zamanlı olarak başlamış ve eş zamanlı olarak tamamlanmış ve çalışma ortalama 6.5 ay sürmüştür.

Zemindeki kaya oluşumlarından dolayı hafriyatın tüm aşamalarda dinamit kullanılmıştır. Hafriyat 4 aşamada tamamlanmıştır.

İlk aşamada üst yüzeyde bulunan serbest toprak kazısından sonra klasik hafriyat makineleri ile başlamıştır. Patlayıcı yuvaları paletli delicilerle açılmıştır. Patlayıcı

delikleri ilk 6 m derinlikte 32 cm sonrasında ise 52 cm çapında açılmıştır. 1. aşama hafriyatı bloğun arka tarafında 10 m ve en derin bölüm olan ortada 20 m derinliğe kadar devam etmiştir. Ankrajın orta bölümünün arkasına makinelerin ulaşım için ilave hafriyat yapılmıştır.

2. aşamada hücre bölümlerine devam edilmiş ve bloğun arkasına doğru 37 m derinliğe patlayıcı kullanımı ve benzer yükleme yöntemleri ile inilmiştir. 3. ve 4. aşamalarda ise bloğun taban kotuna ulaşılmıştır. 3. ve 4. aşamalarda derinliğin artmasından dolayı Asya tarafından 450 ton, Avrupa tarafından 650 ton kapasiteli universal tipte ekskavatör yükleme macı ile kullanılmıştır.

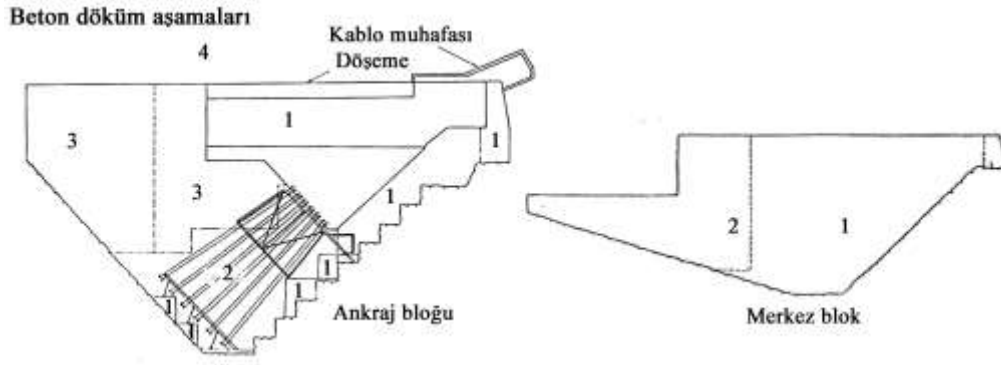
Derin hafriyat olması sebebiyle zaman zaman her iki yakada alınan önlemlere rağmen toprak kayması olmuştur [18].

- **Beton**

Beton işleri, hafriyatın bitimini takiben başlamıştır. Betonun kalıpsız olarak dökülmesi ve toprak kaymalarından dolayı, toplam miktar Avrupa yakasında 54,000 m³ ve Asya yakasında 58,000 m³ olarak gerçekleşmiştir.

Beton dökümü öncelikle, kablo montajının erken başlayabilmesi için ankraj hücresi duvarları ve ankraj bağlantı çerçevelerinin bulunduğu bölgelerden başlamış ve 17,000 m³ 1. aşama betonu dökülmüştür.

Bu bölümün sonrasında havai kablo çekiminin başlaması için gerekli olan 2. aşama betonu, 10,000 m³ hacminde uygulanmıştır. Kablo montajına olanak verilmesi ile 3. aşama betonu ile kütle betonu tanımlanmış ve kablo montajı bittikten sonra ankraj hücresi tamamı ve kablo muhafazasının oluşturduğu 4. aşama betonu dökülmüştür (Şekil 4.40).



Şekil 4.40 F.S.M köprüsü ankraj blokları betonlama aşamaları [18]

4. aşamada tanımlanan beton dökümü, azami 3 m döküm yüksekliğine sahip olan 132 alt aşamada tanımlanmıştır. İki yakada da benzer durum geçerlidir.

Tablo 4.3. Ankraj bloğu beton döküm sayısı ve miktarları

Bölüm	Döküm Sayısı	Ortalama Beton Miktarı (m ³)
Ön duvar	8	2000
Hücre alt duvarı	18	2300
Hücre kenar duvarı	28	3600
Orta bölge	7	5350
Ankraj çubuğu bölümü	15	7750
Ankraj hücre çukuru	30	13000
Ankraj hücre arkası	24	12000
Hücre tavanı ve kablo muhafazası	2	1000
TOPLAM	132	47000

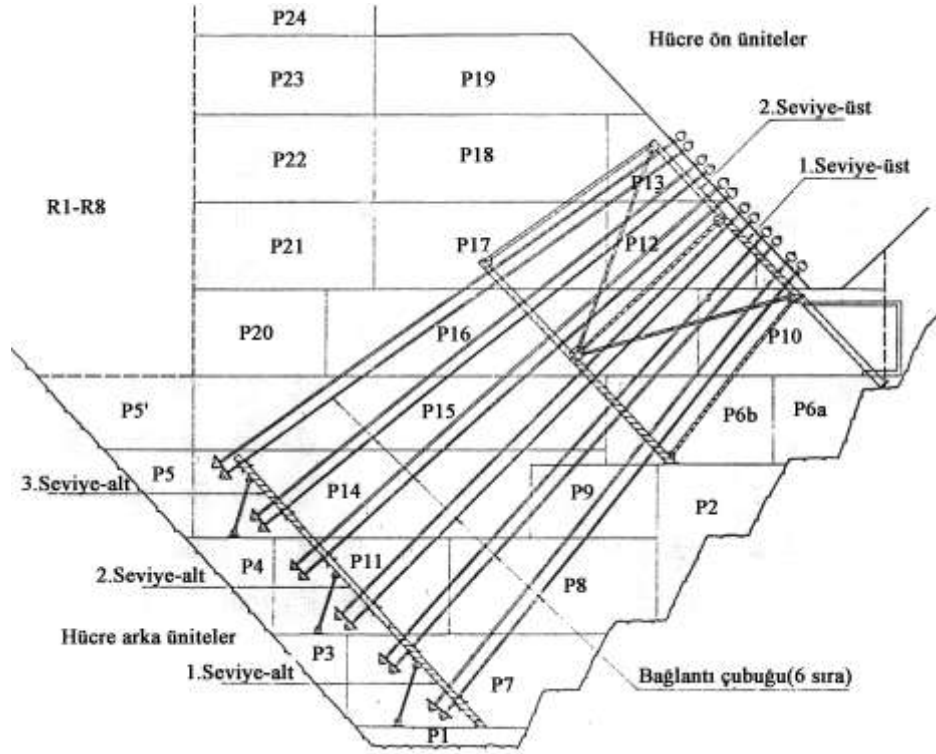
Tablodaki beton miktarı ilave betonlar ile ortalama 9000 m³ daha artmıştır. Beton işlemleri sırasında ankraj çubukları da bağlanmıştır ve işlemler beton dökümü yapılacak bölümlere uygun olarak yerleştirilmiş ve sabitlenmişlerdir (Tablo 4.3).

Ankraj bloklarında kullanılan betonda çimento dozajı 360-480 kg/ m³ arasında belirlenmiştir. 7 günlük beton küp mukavemeti Asya bloğunda 278 kg/cm², Avrupa bloğunda 282 kg/cm²; 28 günlük küp mukavemeti ise Asya bloğunda 373 kg/cm², Avrupa bloğunda ise 367 kg/cm² olarak elde edilmiştir. Beton dökümü hava sıcaklığı 5-32 °C arasında olduğunda önerilir, bu değerler aşıldığında ise önlem alınarak

sürekli bir şekilde dökülmüştür. Kırılma, sıcak havalarda su, soğuk havalarda ise camyünü şilte ile kaplanarak yapılmıştır [18].

- **Ankraj çubukları**

Ana kablodan gelen çekme kuvvetini, ankraj bloğuna aktarmak için kullanılan ankraj sistemi; bağlantı çerçevesi, ankraj çubukları, ankraj plakaları, kılavuz plakalarından oluşmaktadır (Şekil 4.41).



Şekil 4.41 Ankraj çubukları ve bağlantı çerçevesi [18]

Bağlantı çerçevesi oldukça hafif olarak şantiyede imal edilmiştir. Ankraj çubukları, temizlendikten sonra 6 m'lik bölümaderans için bırakılarak, bitümlerle sıvandktan sonra naylon bant ile spiral şeklinde bindirilmesi olarak sarılmıştır. Daha sonra ankraj çubuklarının 4 adedi ankraj plakaları ve somunları ile beraber 2 maralıklı bağlantı çerçevesine bağlanmıştır. Montaj metodu aşağıdaki gibidir.

1. Aşamı:

- Bağlantı çerçevesi ayaklarının P1 ve P2 bölümlerine gömülecek ankraj parçalarının montajı
- 1. seviye ön üst ve arka alt bölümlerinin montajı ve sabitlenmesi
- Kılavuz ve ankraj plakaları montajı
- P7, P8, P9, P6 ve P10 bölümlerinin betonlanması

Alt iki sırayı kapsayan 1. aşamadan sonra, 3-4 ve 5-6. sıraların montajı benzer şekilde yapılmıştır [18].

4.4 Sonuç

Asma köprülerde alt yapı kavramı, üst yapı olarak tanımlanan asma sistemin, taşıması gereken yükleri zemine güvenli bir şekilde aktarmasına aracı olan sistemler bütünü olarak tanımlanmakta ve topografik koşulların yanı sıra zemin koşullarına bağlı olarak, oldukça farklı konbinasyonlar oluşturulabilmektedir.

Özellikle F.S.M köprüsü gibi yüksek taşıma mukavemetine sahip zeminde oluşturulabilen köprülerde, alt yapı sistemi dahilinde yer alan kule temelleri ve ankraj blokları, sistemin oluşturduğu yükler dik kate alındığında daha basit bir şekilde oluşturulabilmekte ancak Lillebaelt köprüsü örneğinde olduğu gibi, düşük taşıma kapasiteli veya su altında yer alan alt yapı elemanlarının gerekliliği durumunda, sistemin sağlam bir yapıya kavuşması için oldukça fazla sayıda işlemin, çok hassas düzeyde önlemlenerek, ekonomik ve zaman yönünden uzun süren bir süreç içinde oluşturulması kaçınılmazdır.

Kuleler ise aynı sistem için betonarme veya çelik kullanımı ile eşdeğer bir geometride oluşturulmak zorunluluğunun yanında, ekonomik ve taşıyıcılık bakımından, montaj ve zemin taşıma kapasitesine de bağlı olarak oluşturulabilmektedir.

Alt yapı kavramı, aslında sadece asma köprüler için değil, aynı zamanda diğer köprü tipleri içinde, benzer şartlara bağlı olarak çeşitlilik göstermekte ve aynı amaca yönelik olarak üst yapının, farklı topografik ve jeolojik etkenler altında güvenli oluşturulmasını sağlamaya yönelik olarak inşa edilmektedir.

5. AS MA KÖPRÜLERDE ÜST YAPI

As ma köprülerde üst yapı, genel olarak kablo ve döşeme sistemleri ile bu sistemlerde kullanılan makine ve ekipmanları kapsamaktadır [11].

As ma köprüleri oluşturan taşıyıcı sistemi ilk uygulamalardan günümüze kadar geçen süreçte genel olarak ele alındığında pek fazla değişmemiştir, ancak kablo ve döşemeler eleman düzeyinde gelişme göstermiş, özellikle döşeme tasarımı Tacoma köprüsü felaketinden sonra tümüyle değişmiş ve aerodinamik bakımdan ele alınarak sandık kirişli döşeme tipi, kesit geometrisi genişliğe bağlı olarak değişik olsa bile, genel anlamda benzer düşünce ile neredeyse standartlaşmış ve ortotropik döşemeli sandık kiriş modeli oluşmuştur [1].

Farklı bir tanımlama yapmak gerekir ise, günümüzde inşa edilen as ma köprülerde; topografik ve coğrafi etkenler altında, yapı elemanı, malzeme ve yapı mnet oduna göre farklı biçimlerde oluşturulan alt yapının aksine üst yapı elemanları, malzeme ve yapı mnet odu bakımından he men he men aynıdır. Üst yapıda farklılık genel olarak geçiş mesafesi, sistem bünyesinde oluşan yükler ve kullanılan malzemenin niteliği olarak farklılaşabilmektedir. Bu kavramlara ek olarak inşaat mnet odu incelendiğinde, yapı mteknigi, makine ve ekipmanları; genel olarak aynı olduğu ve farklılıkların kapasite ve adet olarak olduğu ancak farklılıklardan daha fazla ortak nokta olduğu görülmektedir.

Bu bölümde as ma köprülerinin kablo, döşeme ve yardımcı makine ve ekipmanları; yapı elemanları olarak malzeme ve imalat bakımından incelenecek, as ma sistemlerinin montajı ise, bu elemanlar bir bütün halinde ele alınarak bir sonraki bölümde incelenecektir.

Açıklamalarda Lillebaelt ve F. S. M köprüleri örnek olarak alınacaktır.

5.1. Ana kablo ve askılar

Asma köprülerde ana kablolar, ankraj blokları arasında yer alan ve çekme mukavemeti normal inşaat çeliğine göre 5-6 kat daha fazla olan yapı elemanlarıdır. Kablolar asma sistemleri, diğer sistemlerden ayrı bir rol oynayan en önemli unsur olarak dikkat çekmekte ve yüksek taşıma kapasiteleri ile geçiş mesafesi dikkate alındığından diğer bütün köprü sistemlerine göre daha ekonomik ve hızlı sonuçlar oluşturmaktadırlar.

Asma sistemlerde kullanılan taşıyıcı ana kablolar, kuleler arasında eğrisel, kule ile mesnetlendirildikleri ankraj blokları arasında ise eğik destek veya payanda şeklinde oluşturularak döşemeyi taşırlar. Orta açıklıktaki kavisin açıklığa oranı $1/9$ ile $1/12$ arasında oluşturulabilmektedir [11].

Geniş açıklıklı asma köprülerde kullanılan kablolar, 20. yüzyılın ilk yarısına kadar geçen sürede genel olarak iki şekilde üretilmekte idi.

Birinci yöntemde ana kablolar şantiyede bükülen ve birbirine paralel olarak yerleştirilen çelik tellerden oluşturulmaktadır. Bu yöntem modern anlamda kullanılan ilk yöntem olmasına rağmen 600 m açıklıklarda uygulanabilmektedir.

İkinci yöntemde ise fabrikada üretilmiş kablo kollarının kullanımı söz konusudur. Ancak bu yöntemde üretilen kabloların boyu çok sınırlı olmakta ve 600 m'den fazla olan geçişlerde üretilmeleri ve montajları mümkün olmamaktadır [1].

1960'lı yıllarda her iki yöntemin bir sentezi yapılarak, çelik teller ile ara kablolar fabrikada oluşturulmuş ve ilk uygulamaya 1969 yılında Amerika'da Newport köprüsünde uygulanmış ve bu yöntemle 488 m açıklık geçilen köprüde 1380 mana kablo oluşturulmuştur [2]. Bu yöntemi inceleyenekte olan Lillebaelt köprüsünde de uygulanmıştır.

Asma köprü sisteminin diğer köprülerden, özellikle de kablo destekli köprülerden ayıran bir yapı elemanı ise askı kablolarıdır.

Döşemenin, ana kablolar tarafından taşınması, klasik bir yöntemle ana kablolar dan sarkıtılan askı kabloları ile sağlanmaktadır. Askılar değişik formlara sahip olarak oluşturulabilmektedirler. Bu formların başlıcaları, düşey askılı kablo kafesi, ilave

destek kablolu eğik askılı veya düşey askılı olarak uygulanabilmekte ve günümüzde ekonomik, taşıyıcılık ve uygulama kolaylığı sebebiyle düşey askı sistemi tercih edilmektedir.

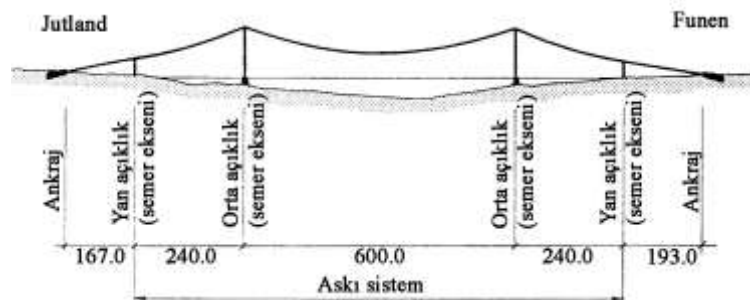
Askı kabloları, sayıları ve bulundukları yer bakımından taşıyıcı sistem ve döşeme bloklarının ebatlarına bağlı olarak oluşturulmaktadır. Kablo uçlarında bağlı elemanı olarak soketler ve ana kablo ile bağlantı için kablo kenetleri kullanılmaktadır [11].

5.1.1. Lillebaelt köprüsü

5.1.1.1. Ana kablolar

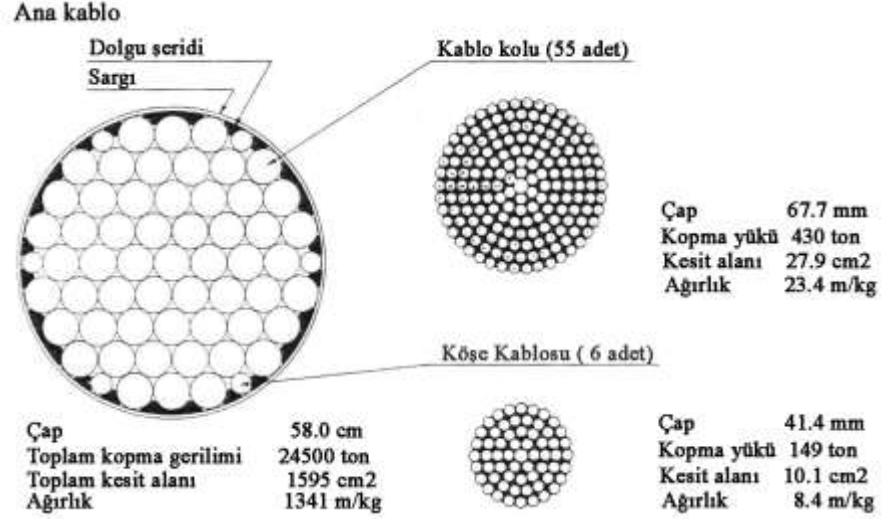
Lillebaelt köprüsünde asma sistem 3 açıklıklı olarak tasarlanmıştır. Ana kablolar sırası ile orta açıklıktan başlayarak ana kule, yan kule ve ankraj blokları arasında yer almıştır. Ana kablolar yan kule ve ankraj blokları arasında askı görevi yapmadıklarından, destek kablolu olarak, sabit bir eğim ile ankraj bloklarına bağlanmıştır. Orta açıklıkta, kablolarla oluşan kavis, kule tepesinden 66.7 m derinliğinde ve orta açıklığa oranı 1/9 olarak oluşmuştur. Kablolar geçiş ekseninde orta akslarından 28.1 m aralıkla yerleştirilmiştir.

Daha önce belirtildiği gibi, asma köprülerde kablounun imalatı ve montaj süreci ve montaj tekniği, proje ve uygulama üzerinde doğrudan etkilidir. Lillebaelt köprüsünde orta açıklık 600 m yan açıklıklar toplam 480 m ve yan açıklık ile ankraj bloğu arası toplam 360 m uzunlukta ve iki ankraj bloğu arası 1440 m olup, kavislerle beraber kablo uzunluğu 1493 m'dir. Bu uzunlukta oluşması gereken kablo ise Newport köprüsünde kullanılan teknik ile gerçekleştirilmiştir ve havadan kablo kolunu taşıma yöntemi ile ana kablolar oluşturulmuştur [11] (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Lillebaelt köprüsü ana kablo oluşumu [11]

Lillebaelt köprüsünde kabloların toplam ağırlığı 4000 ton olarak belirlenmiştir. Kablo kesitli incelendiğinde (Şekil 5.2) her ana kabloda 61 adet kablo teli yer almıştır. Ana kablolar toplamda 55 adet 68.7 mm çapında ve 6 adet 41.4 mm çapında kablo kolları ile oluşturulmuşlardır. 41 mm olan 6 kablo, köşe kablolu olarak adlandırılmış olup daha dolu ve homojen bir kesit oluşumu için kullanılmışlardır.



Şekil 5.2 Ana kablo ve kablo kollarının kesitleri [11]

Kablo kolları; 4.6 mm çapında sıcak galvaniz ile kaplanmış, yuvarlak kesitli çelik tel kullanılarak oluşturulmuşlardır. Galvaniz işleminde %99 saf derecede çinko kullanılmıştır. Tel çapları ± 0.01 tolerans ile mal edilmişlerdir.

Çelik teller ve üretilim sonrasında laboratuvarda 10 aşamalı yükleme testleri uygulanarak maksimum yüklemenin %10-50 arasındaki değerler uygulanmış ve elastisite modülünün mevcut sınırlar arasında kalması onaylanmıştır. Gerilim testlerine ek olarak sargı, çinko kaplanmanın homojenliği ve ağırlığı kontrol edilmiştir.

Kablolar da montaja yönelik markalama işlemleri ve tam boy kesimleri oluşacak gerilim uygulanması ile yapılmış ve sistemin yükleme sırasında etkisi altında kalacağı ölü yükler dikkate alınmıştır. Bu etkenlerin yanı sıra markalama işleri akşam saatlerinde, ısınn dengelendiği zamanlarda, ortalama sıcaklık $+10^{\circ}\text{C}$ olması

durumunda yapılmış ve bu sayede ısı gerilmelerden dolayı uzama ve kısalma etkileri ve sapmalardan kaçınılmıştır.

Kabloların çekme gerilimi 1580 t/cm² olarak belirlenmiş olup, ölü yükler altında ve ankraj noktaları arasında toplam elastik deformasyon ortalama 4 m olarak hesaplanmıştır. Endüstriyel üretim sayesinde kalite ve standart parametrelerine ulaşılmış, deneyler sayesinde hareketli yüklerinde dahil olduğu tam yüklemeye değerleri altında kabloların davranışları incelenmiş ve kullanım aşamasında beklenmeyen plastik ve elastik deformasyonlardan kaçınılmıştır. Bu sebeple kabloların gerilme mukavemetleri %25 oranında arttırılmıştır.

Kablo kolları, uçlarında ankraj soketleri olduğu halde fabrikada büyük makaralar üzerinde sarılarak şantiyede stoklanmışlardır (Şekil 5.3). Her makara 35 ton ağırlığında olup, stok sahası Jutland sahilinde, ankraj bloğunun hemen üzerinde yer almıştır. Kablo kolları, çekici vinçler yardımı ile kedi yolunun üzerinden döşenerek, yatay bileşenler halinde kablo demetine eklenerek ana kabloyu oluşturmuşlardır. Kablo kollarını oluşturan çelik teller, bir arada bükülerek, uçları pahlandırılmış şekilde soketlerini içinde daralarak ilerleyen boşluklara yerleştirilmiş ve boşluklar % 99 saflıkta çinko ile doldurulmuştur. Ankraj soketi maksimum çekme geriliminin % 50'si uygulanarak test edilmiş ve uygun sonuçlar alınmıştır.



Şekil 5.3 35 ton ağırlığında kablo kolu sarılması.

Ana kablo montajında uygulanan son işlem ise, kenetlerin bağlandığı bölüm hariçinde, ana kablo üzerinde tam dairesel kesit elde edilmesi ve kablo kollarının dış etkilere karşı korunumunu arttırmak için kablonun dış yüzeylerine ilk olarak yumuşak çinko dolgu şentleri halinde, girintilere uygulanmış ve sonrasında ise sıcak

galvaniz ile kaplanmış 3.8 mm çapında çelik tel ana kablolarla sarılarak ana kablo işleri tanımlanmıştır.

Ana kablolar 58 m çapında olup, her bir ana kablo 9300 ton yük taşıma kapasitesine mukavemet gösterebilecek şekilde tasarlanmıştır. Ana kablo üzerinde oluşan yüklerin %80'ni ölü yüklerden, %20'si ise hareketli yüklerden kaynaklanmaktadır. Ana kabloların etkin maksimum mukavemetleri güvenlik kat sayıları ile birlikte 24,500 ton olarak oluşturulmuştur.

Gerek kablo montajı, gerek ise döşeme montajı sırasında optik ve geometrik ölçümler yapılarak ana kablo üzerinde oluşan tüm deformasyonlar gözlenmiş ve sınırlamaların altında kalınmasına özen gösterilmiştir. Deformasyonlar özellikle montajın başlangıcında, ilk döşeme blokları asılırken oluşmuş, bu sırada sistemin kararlı yapısı tanımlanmadığından moment etkisi artmış ancak devam eden süreçte bu etki azaltmış, kablolarındaki gerilmeler ise artmıştır [11].

5.1.1.2 Ana kabloların mesnetlendirilmesi

Lillebaelt köprüsü 3 açıklıklı asma sistem ile oluşturulduğundan kabloların mesnetlendirilmesi hem ana kule, hem de yan kule üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ankraj bloklarında mesnetlendirme daha önce bölüm 4.3.'de ele alındığı için bu bölümde incelenmeyecektir.

- **Ana kuleler**

Ana kablolar; ana kulelerin tepe noktalarında her biri 40 ton ağırlığında olan ve tek parça halinde çelik dökümden imal edilen kablo seherlerine mesnetlendirilmişlerdir.

Ana kule seherleri, uzun ekseninde 6.0 m yarıçapta olan eğrisel kesitli elemanlardır. Kısa ekseninde oluşturan kesitte ise kabloların yerleştirildiği U-şeklinde oluk yer almaktadır. Her seher, kabloların aktaracağı maksimum 8000 ton basınç gerilimine mukavemet edecek kapasitede tasarlanmıştır. Uzun ekseninde oluğun sahip olduğu eğrisel geometri sayesinde ana kablolarla yüklemeye dolaylı kesme kuvveti oluşmadan, tüm yük dengeli bir biçimde aktarılabilir.

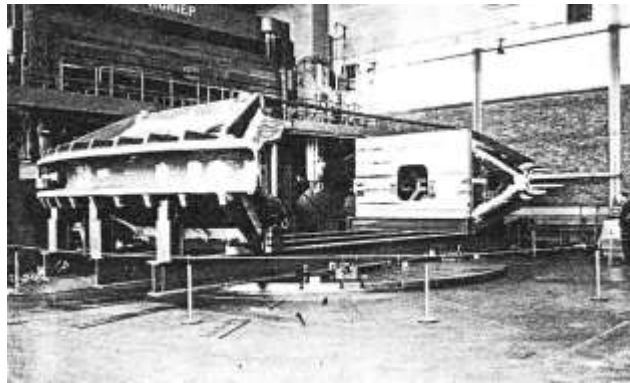
Seher oluğunun iç yüzeyi, ana kabloların tel sarılı dış yüzeyi ile temas etmektedir ve oluğun iç yüzeyi yükleme sırasındaki basınç gerilmelerinden kaynaklanabilecek

plastik deformasyonları daha da azaltmak amacıyla ile yumuşak özellikli çinko ile kaplanarak ek önlenmiştir.

Sevner oluşu iki adet eğik levha ile gövde plakasına bağlanmıştır. Bu bağlantı sırasında rijitliği arttırmak için dik ekseninde nervürlü bir destek uygulanmıştır. Gövde plakası ise kule tepesine ankrajlanmış taban plakası üzerinde yer almaktadır. Taban plakası ve sevner arasında yerleştirilen dairesel kesitli mat esnek bir geçiş sağlayarak, geçiş ekseninde oluşabilecek yatay hareketlerin, kule tepesi ve sevner birleşiminde zorlayıcı etkilerini indirmektedir. Ayrıca sevrin gerek orta gerek ise yan açıklık tarafından yuvarlak kesitli boşluklar bırakılarak, daha sonra geçici olarak gerekebilecek kablo desteklerinin döşeme ve kule tepesi arasında uygulanmasına olanak verilmiştir.

Sevnerler, özellikle kablo oluşunun proje değerlerinden sapmaması amacıyla ile 12 m genişliğinde torna tezgahında işlenmişlerdir. Hata payı %0.1 olarak kabul edilmiştir. Sevrin döküm kaynak ve kaplama işlerini takiben darbeli ve ses dalgası, Xışını ve manyetik akı yöntemleri ile darbesiz testler uygulanarak kalite kontrolü yapılmıştır (Şekil 5.4).

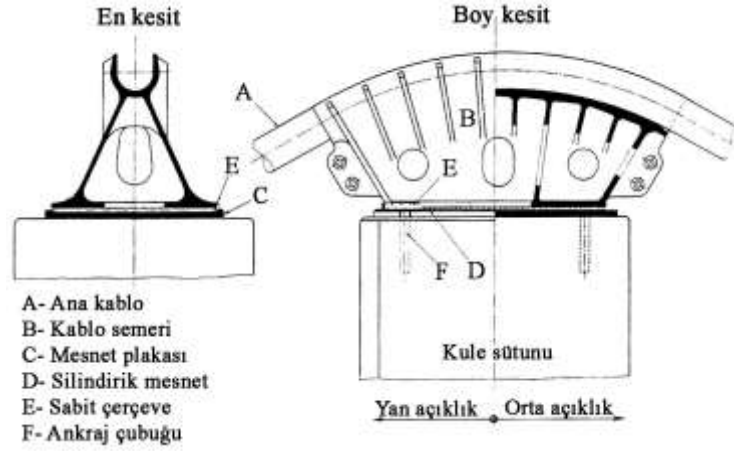
Lillebaelt köprüsünde kule sevrlerinin geçiş ekseninde yer alan kesit geometrisi, kabloların gerek orta, gerek ise yan açıklıktan kule tepesine geliş açılarından dolayı simetriktir.



Şekil 5.4 Ana kule sevrinin imalatı [11]

Gövde plakası, kule tepesine ankrajlanmış 100 mm kalınlıkta taban plakaları üzerinde mesnetlenmiştir. Dairesel mat ile uzun ekseninde esneklik sağlanmış ve

semeri nsabitlenmesi a macı ile taban plakası üzerinde ağır köşebentler kullanılmış ve boşluklara yüksek aderanslı çiment o şerbeti ile dolgu yapılmıştır (Şekil 5.5).

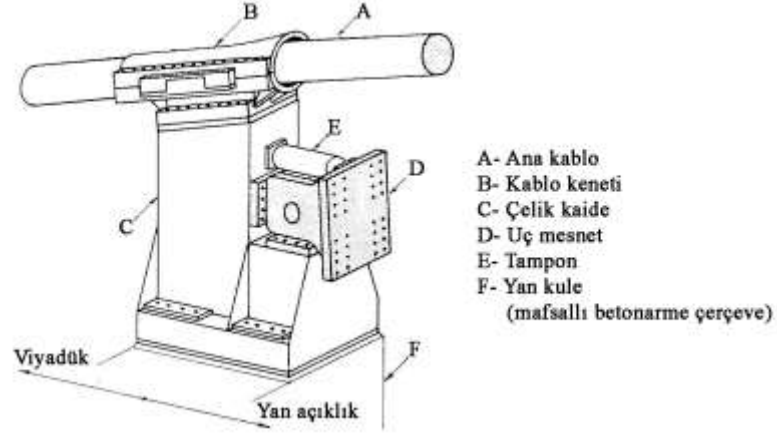


Şekil 5.5 Ana kule semeri kesit ve görünüşleri [11]

Ta ma nlanma mış olan köprüde ana kule se merleri ile, ana kablolar üzerinde geçiş eksenini boyunca oluşabilecek bütün yüklem e ve hareketler, gerek kul eler gerek ise ana kablolar üzeri nde sisteme zarar ver meden aktarılabilmışlerdir. Kule tepesinde maksim umesne me hareketi, merkez açıklığı doğru 650 mm yan açıklığı doğru ise 500 mm olabil mekte ve esne meye sebep olan gerili nler indirgen mekte dirler [11].

• Yan kule se meri

Lillebaelt köprüsünün yan açıklıklarının n asma sisteminde oluşturul ması sebebi yle bu noktalarda bul unan ve daha alçak sevi yede bul unan yan kul elerin üzeri nde de kablo se merleri bul unmakta ve ana kablolar a mesnet oluşt ur maktadırlar. Yan kule üzeri nde yer alan kablo se merleri, ana kule se meri nde oluşan yatay ve düşey yüklem lerin ileti minden farklı olarak daha ziyade ana kablo üzeri nde oluşan yatay yüklerin aktarıl masını ve alt uçlarında yer alan maf sallar sayesinde geçiş ekseninde tepe noktasından 18 mm hareket edebilen yan kul elerin salın mlarını toleranslar i çinde tutabil mek a macı ile oluşturul maktadırlar. Özetlemek gerekirse yan kule se merleri, yan kule üzeri nde sabitlenmiş uzun kablo kenetleri olarak tasarlanmış olup, yatay yüklerin sistemin dengesini boz madan aktarıl ması a macına yönelik olarak görev yap maktadırlar. Ayrıca kısm en düşey yükleri de aktar maktadırlar (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Yan kule serisi [11]

Yan kule serileri, kule tepesine rijit şekilde ankrajlanmış, çelik taban plakaları üzerine mesnetlenmişlerdir. Seriler üzerinde oluşan yatay yükler, yan açıklığın bitişiğinde yer alan viyadüklerin, yan kule portal kirişine mesnetlenmesi sebebiyle oluşan sürtünme kuvvetlerinden oluşmaktadır. Bu yüklemeye ek olarak kabloların sıcaklık etkisi ile deformasyonu, rüzgar yükleri, fren yükleri de yatay yük olarak etkilidir.

Yan açıklıkta yer alan döşeme blokları kablolarla daha elastik olarak bağlanmış olup, bu bölgede döşeme ve kablolar arasındaki hareketlilik, viyadüklerin ve kabloların geçiş eksenine doğrultusundaki geometrik formlarından dolayı değişken ve standart olmayan şartlardan kaynaklanabildiği için bağlantılarda esnekliğin önemi artmış ve hareket sınırları daha toleranslı belirlenmiştir. Örneğin viyadük sütunları veya döşemesi tarafından ana kabloların bir tanesinin gölgelenmesi durumunda, kablolar arasındaki boşlukların 40-60 mm arasında oluşabileceği hesaplanmış, dolayısıyla sistemin bütünlüğünü zorlayacak ve fonksiyonel düzensizlik oluşturabilecek gerilmelerin oluşabileceği öngörülmüştür. Bu sebeple kablo kenetleri ve mesnetleri bu duruma yeterli mukavemet gösterebilecek ve viyadük ile yan açıklığa alt döşemelerin farklı çalışmalarına uygun nitelikte elastik özellikte tasarlanmışlardır.

Kablo kenetleri yatay ekseninde, merkezden ikiye ayrılmış elemanlar ile oluşturulmuş ve sistem kablo ile kenet arasında oluşabilecek 300 ton sürtünme kuvvetini aktarabilecek nitelikte yüksek mukavemetli cıvatalar ile kule tepesine bağlanmıştır. Kenetlerin üst bölümünde oluşabilecek yatay yükler alt bölüme anahtar kilit şeklinde

birleştirilerek sisteme esneklik kazandırmak amacı ile kenetlenme etkisi indirgenmiştir [11].

5.1.1.3 Kenetler ve askı kabloları

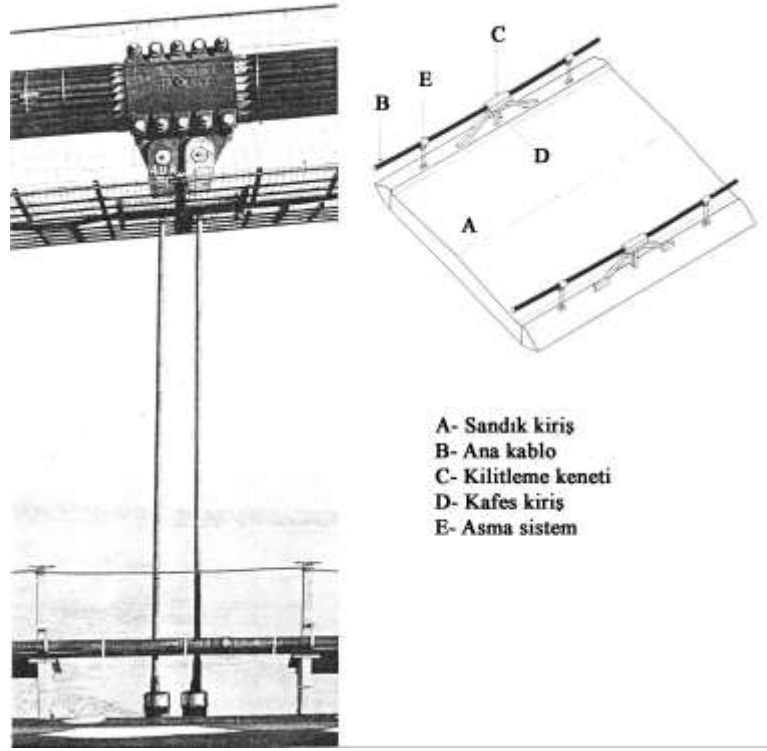
Lillebaelt köprüsünde döşemenin kablolarla asılması, fonksiyonellik ve uygulamaya kolaylığı düşünülerek düşey ekseninde dik olarak sarkan askı kabloları ile gerçekleştirilmiştir.

Projenin başlangıcında asma sistemi oluşturmak için düşey askılar ile beraber, kablo kafesli, ilave destek kablo ve eğik askılı farklı olasılıklar incelenmiş ve her sistem bağımsız olarak hesaplama ve deneyler yapılarak değerlendirilmiştir [11].

Araştırmalar sonucunda, ortalama düzeyde dengeli bir taşıyıcı sistem elde edilmesi için sistemin bünyesinde oluşan dahili kuvvet gerilmelerini indirgenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Ancak bu durum esnekliğin ön plana çıktığı asma köprülerde taşıyıcı sistem sürekli değişen ısı genleşmeler, trafik ve rüzgar yükleri dikkate alındığında oldukça sakıncalı sonuçlar oluşturabilmekte ve sonuç olarak sistemi oluşturan elemanlarda malzeme yorgunluğu görülebilmektedir. Bunlara ek olarak geçiş eksenine dik olan yatay ekseninde rüzgar kuvvetlerine karşı gelen askı sistemin, basit homojen ve yüzey alanı bakımından en alt seviyede olması gerekmektedir.

Bu araştırma ve gözlemlere dayanılarak, düşey askı sistemi, taşıyıcılık, esneklik, ekonomik ve uygulanabilirlik bakımından en uygun sistem olarak tercih edilmiştir [22].

Askı kablolarının aralıklarını belirlenirken döşeme bloklarının ebatları ve sahip oldukları ağırlıklarda önem kazanmaktadır. Lillebaelt köprüsünde askı kabloları, orta aksları göz önüne alınarak tek kenete bağlı ve 12 m aralıkla yerleştirilmiş kablo çiftlerinden oluşturulmuşlardır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Asma sistemin detayı [11]

Askı kabloları 52.6 mm çapında olup, 250 ton taşıma kapasitesine sahiptirler. Kesitin içinde yer alan kablolar dairesel kesitli olup, dış yüzeydeki kablo ise bükülmüş profil tel den oluşturulmuştur. Kabloların kopma mukavemeti 155 kg/mm^2 olarak belirlenmiş olup, her askı noktasında bulunan iki askı kablusunun kopma mukavemeti 500 ton'dur. Askı kablusunu oluşturan bütün çelik teller, iç kısımda sıcak, dış kısımda ise elektro galvaniz ile kaplanmış ve eksiş olarak tek parça olarak üretilmişlerdir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Askı kablusu kesiti [11]

Her askı kablusu 3.5 güvenlik katsayısı ile 250 ton kopma gerilimine sahip olacak şekilde tasarlanmış ve bu durum kullanımlarında olan köprüde aynı anda bir veya

iki askı kablusunun değiştirilmesi durumunda, tehlike oluşmaması ve trafiğin aksaması amacıyla oluşturulmuştur.

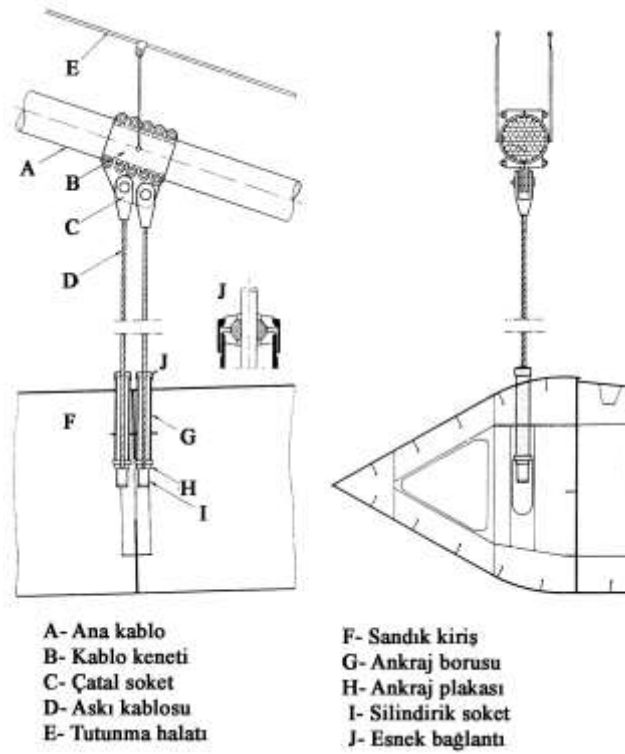
Ana kablolar da olduğu gibi askı kablolarına da ön gerilim uygulanmış ve kablo uçları, dökme çelikten soketlere $\pm 1-3$ mm tolerans ile bağlanmış ve kalan boşluklara çinko dolgu yapılmıştır. Teller soketin içine yeknesak olarak dağılmış ve soket yüzeyine temas ettirilmiştir. Askı halatları her biri 8 uzun kablounun gerekli boyutlarda kesilmesi ile oluşturulmuş ve her uzun kablodan alınan iki örnek ile soketler bağlı olduğu halde kalite ve mukavemet testleri yapılmıştır. Kablo boyları ± 6 mm'ye kadar toleranslıdır.

Askı kablolarının alt bağlantı noktaları, döşemenin iç kısımlarında, sandık kirişe bağlı çelik ankraj tüplerine sabitlenerek oluşturulmuştur. Tüplerin alt kısımlarında kablo uçlarına ankraj plakaları bağlanmış ve seviyeleri ± 100 mm tolerans ile oluşturulmuştur. Bakım ve yenileme çalışmalarında sökme ve montaj işlemleri dikkate alınarak silindirik soketler yivli deliklere yerleştirilmişlerdir. Kabloları çevreleyen çelik boruların döşeme kesiti içinde kalan bölümleri, manşon görevi yaparak üst kısımdan sıkıştırılmış ve olası ikinci derece yatay yüklerin sonucunda oluşabilecek olası darbe etkileri indirgenmiştir.

Askı kablolarının üst noktaları ise, ana kabloya bağlandıkları noktalar olup, kenetler üzerindeki mafsal ile bağlantı yapılmıştır. Askı kabloların üst soketleri, çatal soket olarak tasarlanmış ve kenetlerin altından sarkan askı plakalarına eksen üzerinde hareketi sağlayarak moment etkisini kaldıran pimler aracılığıyla bağlanmışlardır.

Asıl yükler, ana kablolar, dökme çelikten imal edilen kablo kenetleri ile aktarılmaktadır. Kenetler, düşey ekseninde simetrik olarak ayrılmış, iki parçalı ve kablo çapına uygun ebatlarda, dairesel iç kesitli elemanlar olup, yüksek mukavemetli çıvıların sıkılması ile sabitlenmişlerdir. Çıvıların sıkılması sonucunda kenetini iç yüzeylerinde oluşan sürtünme kuvveti sayesinde, kablardan kenetlere etki eden bileşke kuvvet karşılanmaktadır. Kablounun eğriselliğinden dolayı oluşan açı, dolayısıyla da bileşke kuvvet sabit kalmakta ve gerekli sürtünme kuvveti, kenet boyu uzatılarak sağlanmaktadır. Başka bir tanımla ile kenet boyu kablounun eğimi ile doğru orantılıdır. Kenet ve kablo arasında dairesel basıncı dengeli bir şekilde iletmek amacıyla ile döküm ile oluşturulmuş çinko şeritler ile kaplanmıştır, bu

sayede aynı zamanda kabloların deformasyonu engellenmiş ve kesit geometrisi bozulmamıştır [11] (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 Askı kablosu, ana kablo ve döşeme bağlantısı

Kablo kenetlerinin geometrileri ve sürtünme kat sayılarının kontrol edilmesi amacıyla üretilmiş 5 m uzunluğa kablo üzerinde hidrolik kriko ile çekme deneyi yapılmıştır. Test sonuçlarında sürtünme katsayısı boylama yüklerinde 0.20'den fazla olarak belirlenmiş ve bunun sonucunda civatalarda tüm yükleme sırasında olması gereken kesme kuvvetinin %60 oranına denk geldiği görülmüştür. Hesaplamalarda ise sürtünme katsayısı 0.12 olarak hesaplanmıştır. Şantiyede uygulanan testlerde bu katsayının daha da arttığı görülmüştür. Deneme gerilmelerinde yaklaşık 1200 kg/cm² çekme kuvveti uygulanmıştır [22].

Kenetlerin sabitlenmesi, tüm civataların hidrolik kriko ile eş zamanlı olarak sıkılması ile yapılmıştır. Döşeme bloklarının montajı sonrasında civatalardaki sıkışma kontrolleri tekrar yapılmıştır.

5.1.2 Fatih Sultan Mehmet köprüsü

5.1.2.1 Ana kablolar

F. S. M köprüsünde oluşturulan aski sistem tek açıklıklı olarak tasarlanmıştır. Ana kablolar orta açıklıktan başlayarak kule ve sonrasında ankraj bloklarına bağlanmıştır. Yan açıklık olmadığından dolayı kulelerden sonra kabloların devam eden bölümü eğik olarak ankraj bloğuna kadar devam etmiştir [12].

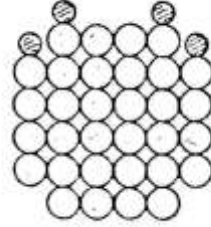
Orta açıklıkta kablo kavisi 97 m derinliğindedir ve açıklığa oranı 1/11'dir. Ana kablolar geçiş ekseninde 33.8 maralıklı yerleştirilmişlerdir. Ana kablo uzunluğu iki ankraj bloğu arasında yaklaşık 2150 m ve geçiş mesafesi 1090 m'dir. Geçiş mesafesi ve ana kablo uzunluğunun artması ile ana kablo çapı da artmıştır. Bu durum ana kabloların bileşenleri olan kablo kollarına yansımış ve fabrikasyon yöntemleri ile üretim ve montaj zorlaşmıştır. Bu sebeple geleneksel yöntem olan havadan tel taşıması yöntemi tercih edilmiş ve tel çekimi ayarlamalarının uzun kablo boyunda daha kontrollü yapılabilmesi için düşük gerilim altında yapılmıştır. Özetle kablo kolları, şantiyede çelik tellerin tek tek yerleştirilmesi ile ürünün şantiyede uygulanması değil, üretimin şantiyede yapılması şeklinde oluşturulmasıdır. Bu sebeple ana kablo yapım sürecinde uygulamalar çok hassas bir şekilde yapılması zorunda kalmış ve hassasiyeti sağlayabilmek için tellere montaj sırasında düşük gerilim uygulanmış ve asıl gerilim işlemi çelik tellerin montajı sonrasında yapılmıştır.

Ana kabloları oluşturan kablo kollarının geometrik yerleşimleri ve düzenlilikleri taşıyıcılık bakımından olduğu kadar montajda da doğru uygulamaya bakımından önemlidir. Özellikle havadan tel taşıma tekniğinde, işlemsizliği ve çalışılan alan darlığı ve ana kablolar da olduğu gibi kablo kollarının da geometrik düzenlerinin önemli olması dikkate alındığında bu durum daha da önem kazanmaktadır. Geometrik düzenin diğer faydaları ise, montaj sırasında kablo kolları arasında hava sirkülasyonu oluşumuna olanak sağlayarak ani sıcaklık farklarında daha uyumlu davranış göstermeyi sağlama ayrıca sehim mayarına yönelik gerilim işlemleri daha hassas olarak kontrol edilebilmesidir [23].

F. S. M köprüsünde kablo kolları, 36 adet olarak belirlenmiştir. Bunlardan 32 adedi asıl, 4 adedi ise ilave kablo koludur. Ana kablolar da kullanılan çelik tel çapı 5.38 mm'dir. Ana kablo çapı ise orta açıklıkta 764 mm, yan açıklıkta ise 790 mm

çapındadır. [12] (Şekil 5.10) Çaptaki 26 mm fark ana kabl onun sıkıştırıl ma derecesi ve buna bağı lı olarak oluş an iç boşluk m i ktarı ndan kaynaklan maktadır. Ort al a m a boşluk oranı % 20' dir. Sıkıştır m a iş le m i 300 tonluk hidrolik krika ile, ön sıkıştır m a da 5 m son sıkıştır m a da ise 1 maralıkla yapı l mıştır [23].

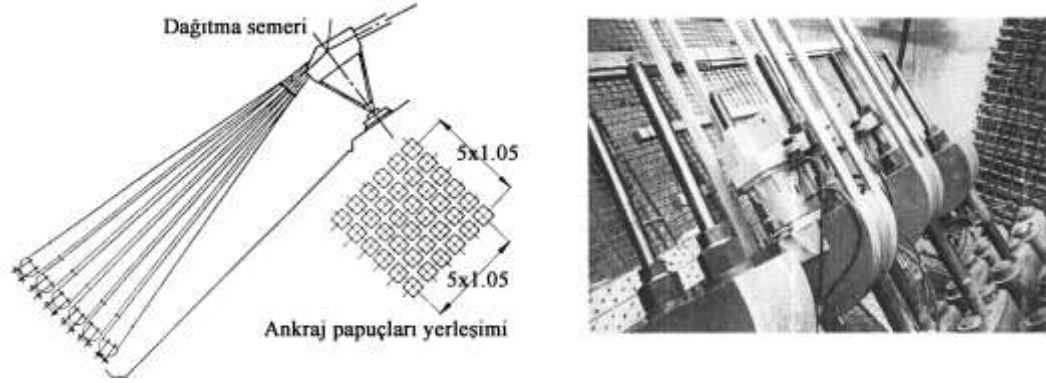
32 + 4 Kablo kolu
Tel çapı 5.38 mm



Şekil 5.10 F. S. M Köprüsü ana kabl o kesiti [12]

Kabl olar ın topl a mağı rlı ğı, askı kabl oları ile birlikte 6820 ton olarak hesaplan mıştır. Çek me gerili mleri ise 5.38 mm çapında çelik teller i ç i n 1570-1770 kg/ mm² olarak ve $\pm$ % 0.01 tolerans ile belirlenmiştir. Tellere uygulanan deneme gerili m i ise 1180 kg/ mm² olarak belirlenmiştir. Çelik tel asi d i k, baz i k veya elektrik yönt e m i ile elde edilen çelik m al z e m e den i m al edil m i ş, çeki m i ş l e n i t a m a n l a n d ı k t a n s o n r a m i n i m u m % 98.5 saflıkta ç i n k o e r i y i ğ i ile sıcak daldır m a yönt e m i ile galvaniz kaplan mıştır. Ç i n k o kapla m a en az 275 g/ m³ kütleye sahi p ol a c a k ş e k i l d e ol u ş t u r u l m u ş ve aderans özelli ğ i yüksek tut ul m u ş t u r [27].

Kabl olar fabrikasyon yönt e m i ile i m a l edil m e d i k l e r i i ç i n ankrajlara bağ l a m a iş l e m i doğrudan soket bağ l a n t ı s ı ile yapı l m a ş t ı r. Ankrajla m a iş l e m i başlangıc ı ndan kabl olar ilk olarak dağı tı m a s e m e r i n e m e s n e t l e n m i ş, buradan ankraj bloğunun arka duvarında yer alan ve kabl o papucu olarak adlandırılan ankraj ele m a n l a r ı n a bağ l a n m ı ş l a r d ı r. Bağ l a n t ı, kabl o papuçları n n arka böl ü m l e r i n d e yer alan ol u k l a r ı n çevresinden çelik teller in montaj sıras ı n a göre merkezden yanlara doğru aç ı l a r a k, sarıl m a s ı ile yapı l m ı ş t ı r (Şekil 5.11).

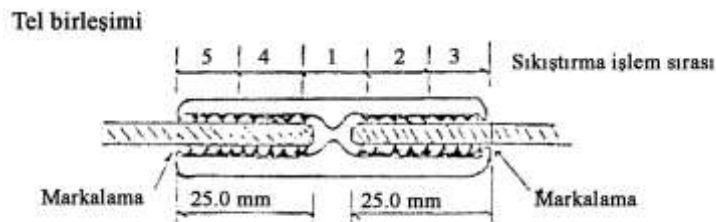


Şekil 5.11 Ana kablunun kablo papuçlarına yerleşimi [23]

Ankrajlar noktalarında yer alan kablo papuçlarında uygulanan işlemlerden anlaşılacağı gibi, kablolar, Lillebaelt köprüsünün aksine uçları kesilerek doğrudan soketlere girerek değil, havadan çekilen çelik tellerin kablo kolları için ankraj hücrelerinde oluşturulan kablo papuçlarına mesnetlenerek, her iki yakada bu elemanların arasında sarılması ile oluşturulmuştur.

Ana kablolarda oluşan etkin maksimum yüklem gerilimleri, güvenlik katsayıları ile birlikte 51.000 ton olarak hesaplanmıştır. Kablolarda yer alan direkt gerilim 700 kg/mm^2 olarak belirlenmiştir. Güvenlik katsayıları montaj için 1.25, tamamlanmış ve trafiğe açılmış sistemde ise 1.33 olarak kabul edilmiştir.

Çelik tel sarılmasında, makara üzerinde sarılı telin tükenmesi durumunda ek yapılarak bağlanmışlardır. Bu durumlarda tel geçici olarak yaya yolu üzerinde bağlanmış ve markalanmış sonrasında ise tel ek parçasına yerleştirilerek hidrolik krikolar ile preslenmiştir. Bu noktada çekme mukavemeti, normal telin güvenlik katsayıları ile sahip olması gereken mukavemetin en az % 98.5'i olacak şekilde oluşturulmuştur [23] (Şekil 5.12).



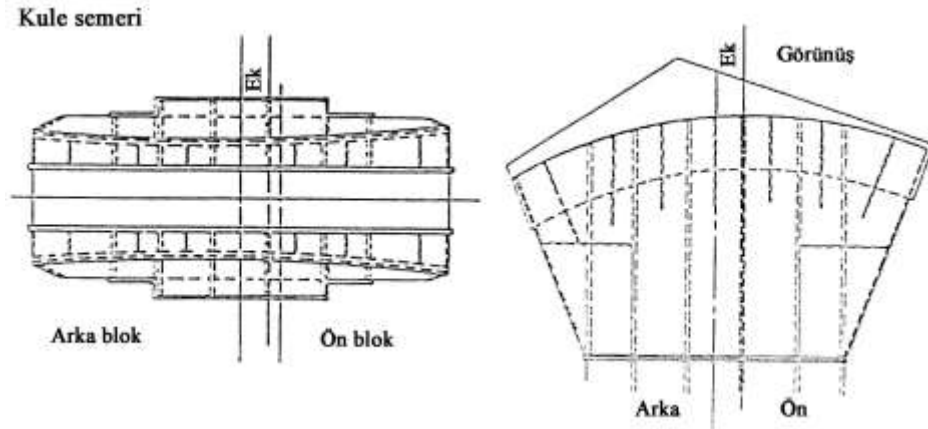
Şekil 5.12 Çelik tel birleşimi [23]

5.1.2.2 Ana kabloların mesnetlendirilmesi

F. S. Mköprüsünde mesnetlendirilme kule tepesi ve ankraj hücrelerinde yapılmıştır. Bölüm 4.3. de incelendiği için ankraj bloklarında mesnetlendirme bu bölümde incelenmeyecektir.

• Kuleler

Ana kabloların kulelerde mesnetlenmesi, asma köprülerde ortak bir eleman olan kablo seherleri aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. F. S. Mköprüsünde seherler tümüyle çelik levhalardan üretilmiş olup, malzeme ebat ve standartları yük iletiminin aynı bünyede sağlanabilmesi bakımından kule panoları ile aynıdır. Üretim şekli farklı olsa da montaj ve çalışma prensipleri Lillebaelt köprüsü ile benzer özelliktedir. Ayrıca kablo açısının yan açıklıkta değişmesi sebebiyle kablo seherinin uzun eksendeki kesiti asimetriktir. Her kablo seheri 20,000 ton'dan fazla yükü iletmek üzere tasarlanmışlardır [12] (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 Kule seheri plan ve görünüşü [12]

5.1.2.3 Aski kabloları ve kenetler

Aski kablolarının seçimi Lillebaelt köprüsündekine benzer sebepler ile düşey ekseninde dik ve her kablo keneline iki aski kablosu bağlanması şeklinde uygun görülmüştür.

Aski kabloları, çekirdekte bağımsız bir tel halat etrafında 6 kol halinde galvanizli çeliktelden dış çapı 79 mm olacak şekilde oluşturulmuştur. Her kablo kolu 38 mm çapındadır. Aski halatlarının her biri 363 ton taşıma kapasitesine sahiptir ve eksi,

tek parça olarak üretilmişlerdir. Kablo kollarının uzunlukları ± 4 mm tolerans ile üretilmişlerdir.

Askı kablolarının döşeme ve ana kablo bağlantıları Lillebaelt köprüsü ile aynı olup, bu sisteme ek olarak her askı noktasına, döşeme bloklarının ağrlık merkezi nde fazladan bir ankraj pimi eklenmiş, bu pimi hem montajda hem da olası bir askı kablolu yenilenmesi nde kullanılmak üzere oluşturulmuştur.

Askı kablolarının, ana kablo üzerindeki mesnetlendikleri kenetlerde Lillebaelt köprüsü ile benzer bir mantık ile tasarlanmış, farklı olarak kenetler yatay eksen de si metrik olarak oluşturulmuşlardır. Kablo üzerinde sıkılma işlemi de benzer şekli de eş zamanlı olarak yapılmıştır [23].

5.2 Köprü Döşemesi

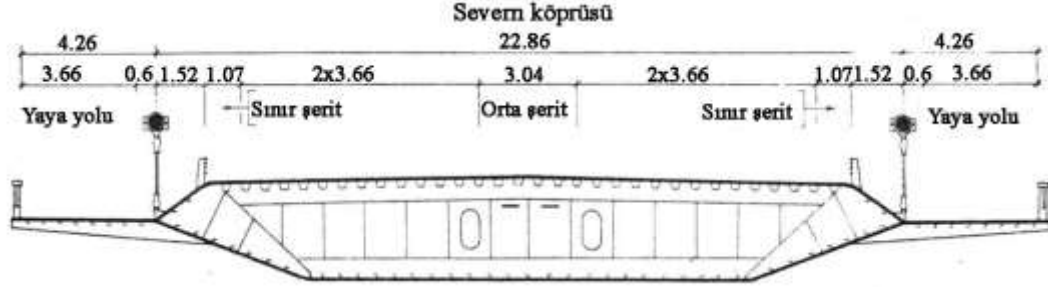
Asma köprülerde döşeme, diğer köprü tiplerinde olduğu gibi köprülerin kuruluş a macını gerçekleştiren trafik ve yaya ulaşımının gerçekleştirildiği bölümdür.

Diğer köprü sistemleri ile karşılaştırıldığında, asma köprü döşemeleri daha narin görünümlü ve daha hafif elemanlardır. Bu zellik geçilen açıklıkların diğer sistemlere göre daha fazla olması ve dolayısıyla döşemenin sağlamlığının artması ve hafiflemesi gereği dikkate alındığında bir zorunluluktur. Amaca yönelik olarak; hesaplama, malzeme, üretim ve uygulama tekniklerini de gelişmesini de etkisi ile elik malzemenin kullanımı sayesinde ihtiyaç duyulan hafiflik ve mukavemet birarada sağlanabilmıştır [1].

Geniş açıklıklı asma sistemlerinin ilk örneklerinde, dolu gövdeli veya kafes kirişler ile oluşturulan döşemeler Tacoma köprüsünün çökmesi nden sonra yeniden gözden geirilmişler ve bu sayede tasarımı parametrelerinde aerodinamik etkenlerin önemi dikkate alınmış ve yapı elemanı olarak elik malzeme daha farklı şekilde kullanılmıştır [2].

Her iki amaca yönelik olarak, yassı hava akımı çizgilerine uygun ve içi boş kutu kesitli olarak tasarlanan, konstrüksiyon yüksekliği kafes veya dolu gövdeli kirişe göre ortalama %50 daha az olan, ayrıca dış yüzeyleri tamamen kapalı ve st tarafta

bulunan taşıt yolu ortotropik plak olarak tasarlanan döşeme tipi, ilk Severn köprüsünde (Şekil 5.14) uygulanmış ve günümüzde mevcut hemen hemen tüm örneklerde yer almıştır. Bu döşeme tipi sandık kirişli veya ortotropik plaklı sandık kiriş olarak da anılmaktadır [24].



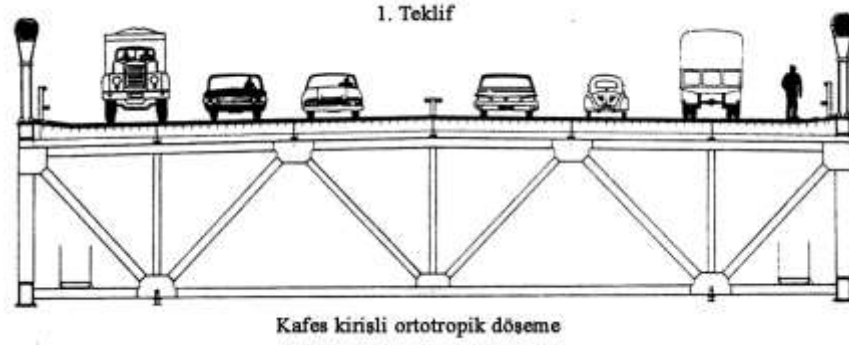
Şekil 5.14 Severn köprüsü döşeme kesiti [22]

Sandık kiriş yönteminde; az sayıda ve standart çelik plakaların yatay ekseninde, her iki yönde yerleştirilmesi ile döşemeler oluşturulmaktadır. Kesit her noktada sabit olup, dış yüzeyleri tamamen ve rijit olarak çelik plakalar ile kaplı olması sayesinde yatay ve dikey yönde oluşan kesme, eğilme ve burkulma gerilmelerine karşı, konstrüksiyon yüksekliği azalmış olduğu halde mukavemet bakımından daha etkin bir yapıya sahiptir. Ayrıca inşaat ve bakım göz önüne alındığında daha ekonomik bir sistemdir. Sandık kirişlerin ilk uygulamaları, hafiflik, sağlamlık ve fabrikasyon avantajları sebebiyle kafes kirişli sistemlere destek olarak ilave edilmişler ve Severn köprüsünde bir bütün halinde kullanılmışlardır [11].

5.2.1. Lillebaelt köprüsü

5.2.1.1. Döşeme tipinin belirlenmesi

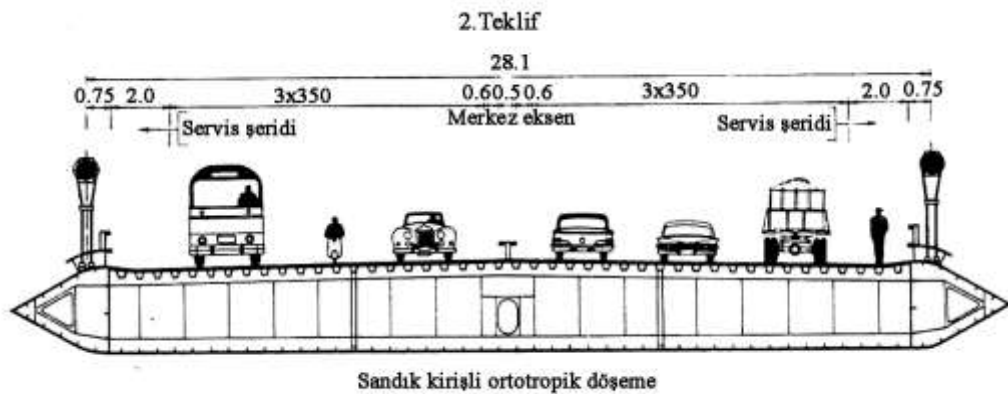
Lillebaelt köprüsü hazırlanırken en önemli problemlerden birisi köprü döşemesinin tasarlanması olmuştur. 1941 yılında yaşanan Tacoma trajedisinden sonra dolu gövdeli kiriş ile döşeme yapılması tümüyle terk edilmiş ve önemli asma köprüler kafes kirişli döşeme ile oluşturulmuştur. Doğal olarak Lillebaelt köprüsünde kafes kirişli döşeme tipi de incelenmiştir [11] (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 Lillebaelt köprüsü kafes kirişli döşeme teklifi [22]

Kafes kirişlerin yanı sıra, son yıllarda geniş kesitli sandık kirişlerle uygulamaları teknikleri kullanılmaya başlanmış ve bu sistem sürekli gelişmeye devam etmiştir. Sandık kirişler, et kalınlığı az, çelik plakaların hafif panel duvar olarak kullanıldığı, burulma rijitliği mukavemeti son derece yüksek yapı elemanları olarak dikkat çekmişler ve araştırmalar bu sistem üzerinde yoğunlaşmıştır. Lillebaelt köprüsünde bu sistem henüz çok tanınmadığı için kafes kirişli ve sandık kirişli sistemler eşit ve tarafsız olarak değerlendirilmiştir. Her iki projede de yol yüzeyi hafif çelik konstrüksiyon ile ortotropik döşeme plağı olarak oluşturulmuş ve kirişin rijitliğini destekleyecek şekilde tasarlanmıştır [22] (Şekil 5.16).

Kafes kirişli döşemede, konstrüksiyon yüksekliği orta açıklığın 1/100'ü olarak boyutlandırılmıştır ve yükseklik miktarı 6 m'dir. Sandık kirişli alternatifte ise bu oran 1/200 ve konstrüksiyon yüksekliği 3 m olarak oluşturulmuştur. Kesitin inceliği aerodinamik bakımdan da üstünlüğü ortaya koymuştur.



Şekil 5.16 Lillebaelt köprüsü sandık kirişli döşeme teklifi [22]

İki sistemin maliyet analizleri yapıldığında sandık kirişli alternatifin %20 oranında daha ucuz olduğu görülmüştür. Sandık kirişte kullanılan çelik miktarı, kafes sisteme göre sadece %8 daha düşüktür ve diğer taşıyıcı elemanlarda (kablolar, mesnetler, yol plağı vs.) dikkat çekici farklar oluşmamıştır. Maliyet farkı malzeme miktarına ek olarak i malat ve montaj tekniklerinin avantajları ve süreç bakımından oluşmuştur. Sandık kirişlerinin malatlarında fabri kasyon yöntemi etkin olarak kullanılmış ve bu sayede daha rasyonel bir çalışma yapılarak şantiyede montaj işlemleri, elemanların üretimi kalitesi ve uyumu sayesinde daha az sorun yaşanarak, daha süratli olarak gerçekleştirilmiştir. Sandık kirişler bakım ve işletme açısından bakıldığında da kafes kirişlere göre daha avantajlıdır ve ince kesitleri ile daha estetik bir görünüm sergilemektedirler [11] (Tablo 5.1).

Tablo 5.1. Lillebaelt köprüsü döşeme sistemi teklif tablosu

Teklif	Sandık kiriş/ milyon D Kronu	Kafes kiriş/ milyon D Kronu	Fiyat Oran Kafes k/Sandık k
1	97.4	116.2	+19.4
2	100.4	119.1	+18.7
3	102.9	127.2	+23.6
4	106.3	126.1	+18.5

5.2.1.2 Sandık kirişli döşeme tasarımı

Lillebaelt köprüsünde kullanılan sandık kirişli sistem kesiti 3 m derinlikte ve 33 m eninde düz bir kesite sahiptir. Sistem geçiş ekseninde süreklilik halinde uzatılmış ve sadece ana kulelerde kesintiye uğramıştır. Kulelerde yatay yüklerden kaynaklanan hareketlerden dolayı salıncak mesnetler ve genleşme derzleri bulunmaktadır.

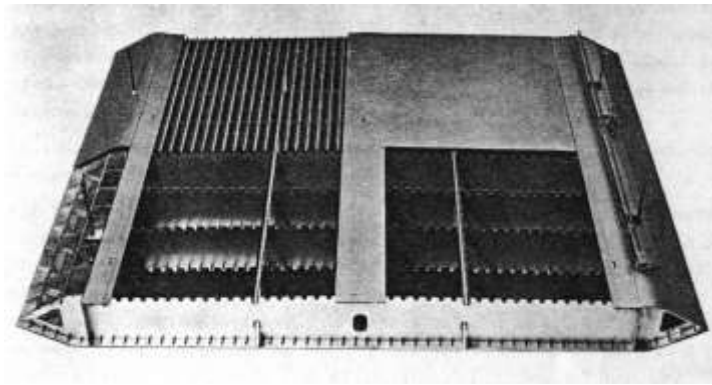
Sandık kirişlerinin yapısında az sayıda standart eleman kullanılmış ve bu elemanların köprünün toplam boyunda sabit bir kesit oluşturmak üzere bir araya getirilmesi amaçlanmıştır.

Döşemenin dış kaplaması, taşıyıcı sandık kiriş ile birarada oluşturularak sistem bir bütün halinde değerlendirilmiş, plak benzeri taşıyıcı eleman elde edilmiştir. bu oluşuma çelik sandviç adı verilmiş, bu sayede yatay ve düşey eksenlerde oluşan kuvvetlerin etkileri, ek desteklere olan ihtiyaç en alt seviyeye indirgenerek dış kabuk tarafından da desteklenmiştir. Kesit içinde yer alan elemanlar, ağ şeklinde

oluşturulmuş geniş bir ızgara düzeninde, alt ve üst bölümlerde benzer nitelikte biraraya getirilmişlerdir. Bu sayede yük aktarımı; ince ve geniş flanşlar sayesinde noktasal kuvvet oluşumları için ek önlem alınmadan, güvenli ve ekonomik bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir. Yük dağılımındaki bu avantajlar ile hesaplarda kabul edilenden daha ağır yüklerin (150-200 t) taşınabilmesi mümkün olmuştur [11].

Döşeme aerodinamik bakımdan ele alındığında, kesitin incelenmesi yanında, alt ve üst plakaların kavislendirildiği ve uç kısımlarının konikleşerek, eğrisel kanat şeklini aldığı görülebilir. Bu sayede düzgün ve köşesiz bir kesit elde edilmiş ve rüzgar yüklerine karşı stabilite arttırılmıştır. Rüzgar yüklerinin oluşturduğu rezonans etkisi %91 düzeyinde azaltılabilir. Bu oran, uçlarda konikleşme olma durumuyla ancak %43 oranında indirgenebilir [24].

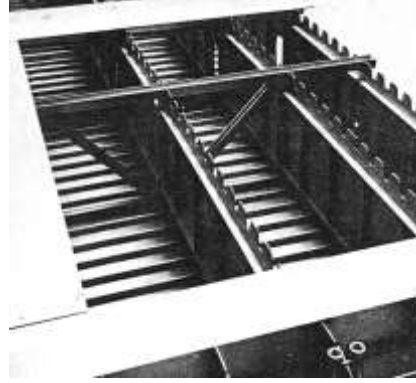
Yüzey kaplamaları, her yönde çelik levhalar ile yapılmış ve kesit tümüyle kapatılmıştır. Yan ve alt yüzey kaplamaları; uzun ekseninde diyafram kirişi üzerinde yer alan taşıyıcı profillere 9 mm kalınlığında sac levhaların bağlanması ile oluşturulmuşlardır. Taşıyıcı profiller, geçiş eksenini boyunca yerleştirilen, 12 mm kalınlıkta, köşebent elemanlardır. Bu profiller diyafram kirişi üzerinde kesitlerine uygun olarak açılan oyuklara yerleştirilmiş ve kaynakla bağlanmışlardır. Bu sadece hemdöşeme üzerinde gelen yükler dengeli olarak aktarılacak, hemde dış yüzeylerde oluşan kuvvetlere karşı kaplama ve kiriş arasında etkin bir birleşim oluşturularak stabilite arttırılmıştır (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 24 m uzunluğunda ikili montaj bloğu modeli [11]

Kaplama ve sandık kirişi ek olarak, geçiş eksenini boyunca, eksenisi netrisine uygun ve 9 maralıkla paralel olarak kafes kirişler eklenmiştir. Kafes kirişler; uzun ekseninde

sandık kiriş ve yüzey kaplamalarının arasında, sabit ve düzgün rijitlik oluşturulması amacıyla tasarlanmışlar ve hafiflik bakımından dolu gövdeli çelik levhalar tercih edilmişlerdir. Rijitliğin kafes kirişler ile pekiştirilmesi özellikle döşeme kaplamasında olası deformasyonları engellemiş ve asfalt kaplamada oluşabilecek uzunlamasına çatlaklara karşı önlem oluşturmuştur. Kafes kirişler sandık kiriş sisteminde sadece taşıyıcı ve destekleyici rol üstlenmişlerdir [11] (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 Döşeme bloğu sistem detayı modeli [11]

Sandık kirişte kullanılan enine kirişler, diyafram kirişi olarak iletilmektedir. Diyaframlar 8 mm kalınlıkta sacdan, yekpare dolu gövdeli elemanlar olarak tasarlanmışlar ve geçiş eksenine dik olarak 3 maralıklı yerleştirilmişlerdir. Diyafram kirişlerinin rijitliğini arttırmak amacıyla, tek yüzeylerinden yatay ve düşey olarak yerleştirilen ve diyaframkirişi et kalınlığı ile aynı kalınlıkta çelik şeritler ile takviye edilmişlerdir. Bu şeritler, yatay ve düşey eksenlerinde fiziksel olarak birleştirilmişler ve bu sayede bölgesel gerilmelerin oluşturduğu esnek deformasyonların, birleşim noktalarında oluşturabileceği sakıncalardan kaçınılmıştır ve ımalatlar kısmen sadeleştirilmiştir. Butakviyeye ek olarak uç kısımlarda yer alan noktalarda 12 mm kalınlıkta sac kullanılmış ve askı sistemine yük aktarım uygun ve güvenli olarak sağlanmıştır. Diyaframkirişleri birbirlerine kafes kiriş ve döşeme plakları ile bağlanmışlardır. Sandık kirişleri iç hacimlerinde bakım kontrol yapılabilmesi amacıyla döşeme ve diyaframkirişi üzerinde menholler bırakılmıştır.

Döşemenin üst kısmında yer alan plak, üzerinde taşıt yolunun bulunması sebebiyle yan ve alt plaklardan daha farklı şekilde, mukavemeti artırıcı yönde tedbirler alınarak inşa edilmiştir. Taşıt yolu plağı, ortotropik plak olarak adlandırılmaktadır. Ortotropik plak yapısında, döşeme kaplaması 12 mm kalınlıkta sac levhalardan ımal

edilmiş olup, 6 mm kalınlıkta, geçiş ekseri ile aynı doğrultuda 60 c mara ile paralel olarak yerleştirilmiş ve 3 m aralıkla diyafram kirişlerine mesnetlenmiş trapez kesitli profiller üzerine oturmaktadır. Profiller ise, kesitlerine uygun olarak diyafram kirişlerine açılan oyuklara oturmaktadır. şt plağın çalışma prensibi alt plak ile benzer niteliktedir [11].

Geniş açıklıklı sistemlerde, çeşitli tip ve ebatlarda kullanılan elik malzenenin, özellikle burulma rijitliğini arttırıcı yönde kullanılmaları, klasik anlamda, elik profillerle oluşturulan kafes kiriş ve benzeri döşeme sistemlerinin popülaritelerini ortadan kaldırmış ve döşeme tipi olarak ortotropik plaklı sandık kiriş modeli, geniş açıklıklı köprülerde önemli sayılabilecek farklılıklara sahip olmakla beraber neredeyse standart bir zmolmuştur. Taşıyıcı sistem olarak şt nl öğünün yanı sıra, bu tip döşemelerin tasarım ve üretiminin rasyonel olarak fabrikasyon sürecinden geçmeleri, elemanın düzeyinde sadeleşme ve standartlaşması ile modern uygulama teknikleri üretime adapte olmuştur. Bu sayede hız ve kalite artmış, aynı zamanda tasarım ve uygulamanın karşılıklı etkileşini ile taşıma kapasitesi ve rijitlik bakımından ştn panel sistemleri ile malzeme ve işçilikten tasarruf edilmiş, klasik anlamda üretilen ve panel sisteme göre daha ağır ve dayanıksız olan profillere bağlılılık azalmış ve taşıyıcı sistem hafiflemiştir. Ayrıca fabrikasyon üretim ile daha modern kaynak makineleri kullanılan kaynak malzemesini ekonomik olarak kullanabilmeleri ve işçilik gi derlerini azaltarak sratlı i malat kabiliyetleri ile sisteme dahil olmuşlardır.

5.2.1.3. Askılar, mesnetler ve derzler

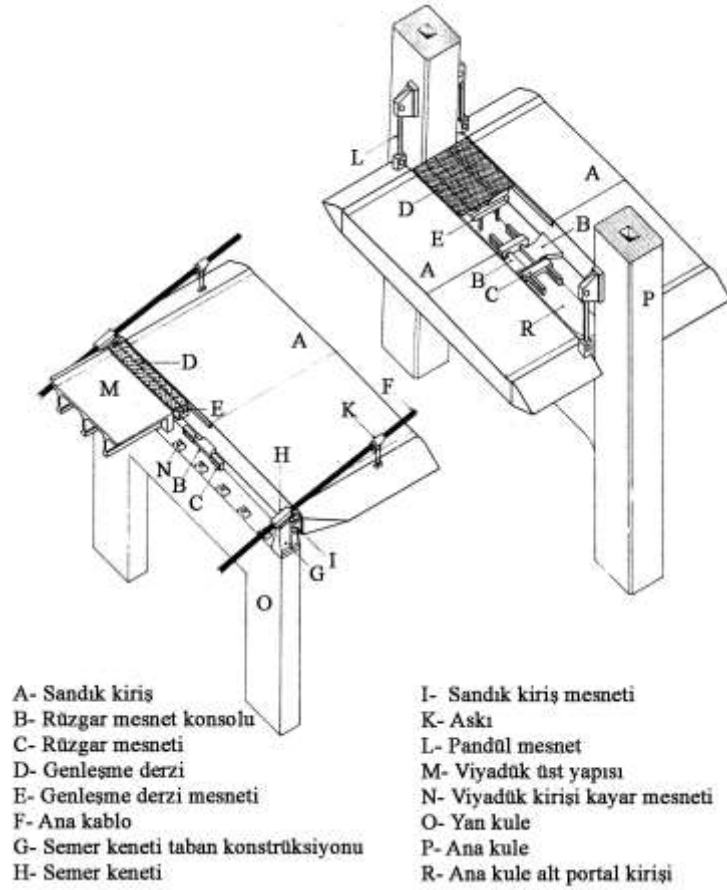
Lillebaelt köprüsüne ait döşeme, 12 m aralıkla yerleştirilen askı kabloları ile taşıtılmakta olup, her askı noktasında iki adet kablo yer almıştır. Askı kablolarının döşemeye bağlandıkları alt uçları, diyafram kirişinin ucunda ve 12 mm kalınlıkta elik plakanın her iki yüzünde si netrik olarak yerleştirilen ankraj borularına mesnetlenmiş, ayrıca bu borular, diyafram üzerinde ek plakalar ile takviye edilmişlerdir.

Döşeme ana kulelerde kesintiye uğramış ve bu noktalarda alt portal kirişe ankrajlanmış ve döşemenin geçiş yönünde hareket etmesine izin veren salıncak mesnetler üzerine döşeme oturtulmuştur. Lillebaelt köprüsünde döşeme yan açıklığın biti minde yer alan kulelerde son bularak bu noktalarda üzerinde darbe emici yay ve

tanponlar bulunan ve rüzgar mesnetler gibi yatay yönde hareket olanağı sağlayan mafsal ve kayar mesnetler ile desteklenmişlerdir. Yan kuleler üzerinde geçiş eksenini boyunca izin verilen hareket ± 4 cm ile sınırlandırılmıştır. Döşemenin yanı sıra yan açıklıkta kablolar da, yatay salınımını izin verilmesi ile yan kule üzerinde sabitlenmiş kabloların sınırlar dahilinde salınım yapabilmesi ve döşeme ile kablo arasında birleşim noktalarında sistemi zorlayacak kuvvetlerin en alt seviyeye indirgenmesini sağlamıştır.

Döşemeye etki eden yatay rüzgar kuvvetleri, alt portal kiriş üzerinde yer alan rüzgar mesnetlerine aktarılırlar. Yük aktarımı, döşemenin taban seviyesinde yer alan konsol bina dirneleri ile oluşturulmaktadır.

Taşıt yolunun sürekliliği bakımından, yan ve orta açıklık döşemelerinin arasında eklem olarak genişleme derzleri kullanılmıştır. Rüzgar mesnetleri gibi genişleme derzleri de alt portal kiriş üzerinde yer almış ve orta açıklıkta ± 750 mm, yan açıklıkta ise ± 350 mm maksimum yatay harekete olanak verilmesi esasına göre oluşturulmuşlardır. Genleşme derzleri, orta açıklıkta alt portal kirişe, yan açıklıkta ise benzer şekilde ve salınım etkisinin azlığından dolayı daha küçük ebatlarda yan kule portal kirişe ankrajlanmışlardır [11] (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 Yan kule ve ana kulelerin döşeme blokları ve birleşimi [11]

5.2.1.4 Çelik malzeme seçimi

Lillebaelt köprüsü döşemesi; sandık kirişler, alt ve yan kısımlardaki kaplamalar ve destek plakaları St 37 çelik malzeme (maksimum mukavemet 37 kg/mm^2 , maksimum akma sınırı 24 kg/mm^2) kullanılarak üst kaplama ve kaplama altındaki boylam trapez kirişler ise St 52 çelik malzemeli (maksimum mukavemet 52 kg/mm^2 , maksimum akma sınırı 36 kg/mm^2) kullanılarak imal edilmiştir.

Malzeme seçimine etki eden faktör, diğer elemanlarda olduğu gibi döşemeye etki eden yüklerdir. Döşemeyi taşıyan kablo sistemi, döşemenin bünyesinde ve döşeme üzerinde oluşan yükleri lokal bir karakterde taşımaktadır. Döşeme ise kendi üzerinde oluşan rüzgar ve trafik yüklerini taşımaktadır. Ancak pratikte yatay yükler oluştuga zaman döşeme ve kablolar bir bütün halinde oluşan kuvvetlere ve moment etkilerine karşı mukavemet göstermelidir. Kablolar taşıyıcılık görevlerini optimum rijitlik ve

döşeme üzerinden dengeli yük aktarım sayesinde yapabilmektedirler. Bu bağlamda döşeme, üzerinde oluşan yüklere karşı, rijit ve dengeli bir yapıya sahip olmalıdır.

Taşıyıcı sistemin sahip olması gereken rijitlik ve dengeli yük dağılımı, kesiti oluşturan konstrüksiyon yüksekliği ve malzemeler ile doğrudan ilişkilidir. Sandık kirişli narin sistemlerde, konstrüksiyon yüksekliği diğer sistemlerin neredeyse yarısı olduğu ve kullanılan malzeme daha az olduğu halde, oluşan gerilim daha az gerçekleşmektedir.

Dengeli yük dağıtım sayesinde, sandık kirişler üzerinde yer alan gövde alanının artmasının gerilimler üzerinde baskın bir rolü oynamıştır. Ayrıca rijitliğin artması, tepki olarak gerilimlerin artması sonucunu oluşturmaktadır ve bu kavramın optimize edilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak plakaların inceltmesi ve daha düşük dayanımı çelik (St 37) sandık kirişlerde kullanılabilirlikte ve rüzgar yüklerine karşı stabilite gövde alanının azaltılması, dolayısıyla konstrüksiyon yüksekliğinin düşürülmesi ile daha etkin olarak sağlanabilmektedir [22].

Konstrüksiyon yüksekliğinin azaltılması, aynı zamanda flanbj etkisini de azaltmış ve bu sayede çelik levhalar daha ince kalınlıkta kullanılabilirlerdir. Sandık kirişte, çelik plakaların incelmeleri tolerans problemlerini ortaya çıkarmış ancak St 52 çelik ile oluşturulan kafes kirişler ile bu problem aşılmıştır. Ortotropik üst döşeme panolarında da gerek üst plak, gerek ise trapez kesitli kirişlerde St 52 çelik trafik yükleri dikkate alınarak tercih edilmiştir.

Lillebaelt köprüsünde; ortotropik üst döşeme ve kafes kirişlerde toplam 4200 ton (St 52), sandık kiriş, alt ve yan kaplamalarda ise 8000 ton çelik (St 37) kullanılarak toplam 12,200 ton çelik malzeme kullanılmıştır [11].

5.2.1.5 Kaynak birleşimleri

Döşeme imalatlarında, ince çelik plakaların kullanılması sebebiyle, kaynak kullanımı tasarımı ve uygulamaların en uygun biçimde araştırılması ve kaynağın oluşturduğu sırt etkisi ve birleştirme kapasitesini optimize edilmesini gerektirir. Kaynaklı birleşimlerde yarı ve tam otomatik kaynak makinelerini etkin olarak

kullanılabilirliği, tasarımda sadeleştirme ve sürekliliğin dikkate alınması sayesinde gerçekleştirilebilmiştir.

Üst pano kaplama ve taşıyıcılarından ayrı olarak, sandık giriş ve kaplamalarda 4 mm kalınlıkta şerit kaynak kullanılmıştır. Diyafram girişlerde, ebatların büyük ve tek parçalı olması sebebiyle rijitliğin optimalitasyonu ve ısıl deformasyonların indirgenebilmesi bakımından kaynak kalınlığı 3.5 mm'ye düşürülmüştür.

Aski ankrajları, diyafram ve trapez giriş birleşimleri ve geçiş ekseninde kafes girişlerin birleşimlerinde ise, yüklerin eksenlerde kesişmesi ve yük dinamiğinin arttığı bölgelerde, çift taraflı alıncaynağı kullanımı, aynı kaynak kalınlığı ile zorunlu olmuştur [7].

Araç yolu kaplamasında, ilk etapta statik yükler bakımından, döşeme elemanlarının oluşturduğu lokal gerilmeler dikkate alınmış, trafik yükleri ise dinamik etkileri ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak burkulma rijitliğine sahip üst plaka ve trapez girişleri için uygulanması gereken kaynaklar aynı zamanda diyafram girişleri arasında kalan üst döşeme panolarında eğilme momentlerine mukavemet göstermek zorundadır. Eğilme momentleri, araç geçişi sırasında tekerleklerin kaplama ile temas etmeleri sırasında, özellikle ağır vasıta geçişlerinde oluşmaktadır. Bu durumda kaynaklarda zamanla esilme ve yorgunluk görülebilmektedir. Bu sebeple trapez giriş ve üst döşeme levhaları tek taraflı V-şeklinde alıncaynak ile bağlanmıştır.

Lillebaelt köprüsü projesi hazırlıklarında trapez girişlerde kullanılması öngörülen kaynak tipi ve uygulama teknikleri ile ilgili yeterli veri bulunmaması sebebiyle deneme uygulamaları yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Deneylerde el kaynağının yanı sıra otomatik kaynak makineleri de kullanılmıştır. Hazırlanan panel 6x18 m'lik eni ne şeritler halinde kesilmiş, el ve otomatik olarak kaynaklanan bölümlere ayrı ayrı test edilmişlerdir.

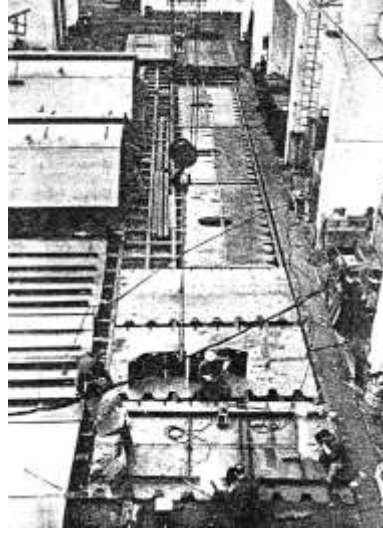
Test sonuçlarında, hesap yükünün 6 katı yüklenme yapılmış ve otomatik kaynak makinesi ile yüklenme ve kaynak yorgunluğu bakımından daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. testlerden elde edilen başka bir sonuç ise, statik yük altında aşırı yüklenme sırasında, döşeme plağı bir düzlem olarak davranış göstermiş ve taşıyıcı sistemi beklentilerin çok üstünde desteklemiştir. Benzer durum dinamik yükler altında da kararlı bir yapı oluşumu ile gözlemlenmiştir[11].

5.2.1.6 Döşeme bloklarının imalatları

Sandık kirişler 12 m uzunlukta ve 33 m tam genişlikte, bloklar halinde imal edilmişlerdir. Bloklar orta açıklıkta 51 adet, yan açıklarda ise 40 adet olarak üretilmişlerdir.

İmalatlar fabrikada montaj hattında yapılmış ve imalat sürecinin sonunda bütün kontroller yapılarak, kaldırılmaya hazır şekilde şantiyeye nakledilmişlerdir.

Kaynak süreci ve imalat prosedürü, sistemi standartlaştırabilmek bakımından eksiksiz olarak planlanmıştır, işleme hassasiyeti ve toleranslardan fazla sapmaya izin verilmemiştir. Üst pano, alt pano, yan pano ve diyaframkirişleri fabrikada ayrı ayrı imal edildikten sonra birbirlerine monte edilmişlerdir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20 Döşeme bloklarının fabrikada üretilmesi [11]

Blokların imalatlarından sonra fabrikada deneme montajı yapılmış ve birleşim noktalarının uyumları ve geometrik şekilleri kontrol edilmiştir. tüm bloklar kapalı alanda boyanmış ve iki bloğu aynı anda taşıyabilecek katamaran tipi mavnalı şantiyede oluşturulan stok sahasına çekilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 Döşeme bloklarının geçici montajı ve yüklenmesi [11]

Şantiyede hazırlanan stok sahasında döşeme blokları, 2 bloğun yan yana getirilerek yatayda birleştirilmesi ile toplam 24 m uzunlukta ve 270 t on ağırlığında tek blok haline getirilmiş ve askı halatlarına montaj, ikili blok düzeninde gerçekleştirilmiştir. Döşeme bloklarının son işlemleri; özellikle iki blok oluşturma ve blokların birbirlerine bağlanması bakımından, şantiye stok sahasında bitirilmiştir. Blokların birleşimi, flanş oluşturma, kesiti oluşturan dış yüzey plakaları, kafes kiriş ve sağlamlaştırıcı ek çelik plakalar ve alt ve üst panolarda kullanılan çelik levha ve trapez kirişlerin, iki blok arasında sistemin sürekliliğini sağlayacak şekilde biraraya getirilmesi ve kaynaklanması ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinin birbirine engellenmesi için 0.5 m aralıkla biraraya getirilen iki blok, önce dış yüzey levhaları sonra trapez kirişler kaynaklanarak birleştirilmişlerdir. İkili blok işlemleri, 90 adet birleşim yapılarak tamamlanmıştır. Bu noktalarda tahribatsız kontroller yapılmış ve 400' den fazla röntgen kontrolü ile alın kaynaklar kontrol edilmiştir. Şerit kaynakları ise manyetik partikül metodu ile kontrol edilmişlerdir.

Toleranslar montaja yönelik fonksiyonel ihtiyaçlar ve mukavemet dikkate alınarak belirlenmiştir.

Döşeme imalatında kullanılan çelik levhalar, tamamlanmış köprüdeki durumları esas alınarak, 4x4 ebatlarında bir alanda, temas yüzeylerinde 5 mm sapma ile kabul edilmişlerdir. Hedef edilmesi gereken düzensizlik sayesinde paneller arasında basınç yüklerinin altında oluşabilecek sistematik deformasyonlar ve eksantriklik indirgenebilmektedir. Özellikle üst plakalarda oluşabilecek sapmaların belirli limitler

dahilinde oluşturulmaları, standart dışı yüzey kalınlıklarına imkan vermayarak, asfalt kaplama için düzgün bir yüzey oluşturmaktadır.

Toleransların en fazla önem kazandığı noktalar, sandık kirişi oluşturan elemanların kaynak birleşimleri dir. Bu noktalarda tolerans tanımlanmış, proje ve üretim prosedürü eş değerli olarak uygulanmıştır. Sıcaklık deformasyonlarının indirgenmesi için kaynak boyları, dış panolarda 60 mm sandık kiriş elemanlarında 120 mm ile sınırlandırılmıştır. Dış yüzey plakalarında sapmalar daha toleranslı olup toplam ebatlarda 8 mm'e kadar kabul edilmiştir. İmalatta toleranslara uyulabilmesi için panolar yatay ve düşey aparatlar ile desteklenmişlerdir [11].

5.2.1.7. Yüzey işlemleri

- **Koruyucu işlemleri**

Döşeme sistemini oluşturan tüm çelik elemanlar, paslanmaya karşı uygun nitelikli boya kullanılarak kaplanmışlardır. Bu uygulamaya özel bir önem gösterilerek ve yüksek kaliteli malzeme kullanılarak kullanımsüreci boyunca koruma sağlanması ve bakım masraflarının azaltılması amaçlanmıştır.

Döşeme konstrüksiyonunda 1 ton çelik malzeme için ortalama 22 m² alan boyanmıştır. Toplamda 260,000 m² yüzey boyanmış, bu yüzeylerin %17'si dış, %83'ü iç yüzey olarak gerçekleştirilmiştir.

Dış yüzeylerde kumlama işlemi ile temizleme yapıldıktan sonra 2 komponentli epoksi-çinko bazlı boya ile astarlama yapılmış, sonrasında ise toplam 3 kat alkali esaslı boya işlemi uygulanmıştır. Boya kalınlığı toplam 150 µ olarak belirlenmiştir.

İç yüzeylerde ve sandık kiriş elemanlarında ise kırmızı kurşun-üretan boya ile astarlama yapılmış ve 175-195 µ kalınlığında asfalt boya ile yüzey kaplaması uygulanmıştır. İlave tedbir olarak kesitin yüzeylerinde oluşabilecek rutubet ve yoğunlaşma etkilerinin boyaya, dolayısıyla taşıyıcı sisteme zarar vermesini engellemek amacıyla nem malı ve havalandırma tesisatı kurulmuştur.

Yüzey işlemlerinin çoğu kapalı ortamda yapılmış ve imalat sürecinin bir parçası olarak değerlendirilmiştir. Alt ve yan paneller montaj öncesinde otomatik kumlama

yöntemi ile temizlenmiş ve astarlanmışlardır. Döşeme bloklarının diğer bölümleri ise kısmen imalat sonrasında fabrikada, kısmen de nakliye sırasında boyanmışlardır. Boyama süreci, iç yüzey boyamasının yanı sıra dış yüzeylerin son kat boyaları, genel boya tamiratları ve üst kısımda yer alan yol plağının geçici koruma işlemlerinin tamamlanması ile son bulmuştur. Eksik kalan işlemler ve tamiratlar kısmen şantiye stok sahasında, kısmen de blokların kaldırma ve montaj işlemlerinden sonra tamamlanmıştır [11].

Boyama işlemlerinde kalite kontrol testleri, fiziksel ve kimyasal olarak yapılmış, boya kalitesi laboratuvarında sürekli ölçülmüş, kalınlık testi permascope ile kontrol edilmiş ve göz muayenesi ve olası eksiklikler şantiyede kontrol edilmiştir.

- **Taşıt yolu kaplaması**

Köprünün üst bölümünde yer alan karayolu döşemesi 29,000 m² alana sahiptir ve üzerine 55 mm kalınlıkta asfalt kaplama uygulanmıştır. Kaplama yapılmadan önce koruyucu astar dahil olmak üzere tüm yüzey kir, çamur, yağ gibi kaplamaya zarar verecek veya aderansı azaltacak etkilere arındırılmıştır. Asfalt kaplama öncesi uygulanan koruma işlemlerinde 6 µ astar ve 75 µ çinko kaplama uygulanmıştır ve asfaltlama öncesi herhangi bir paslanma oluşmamıştır.

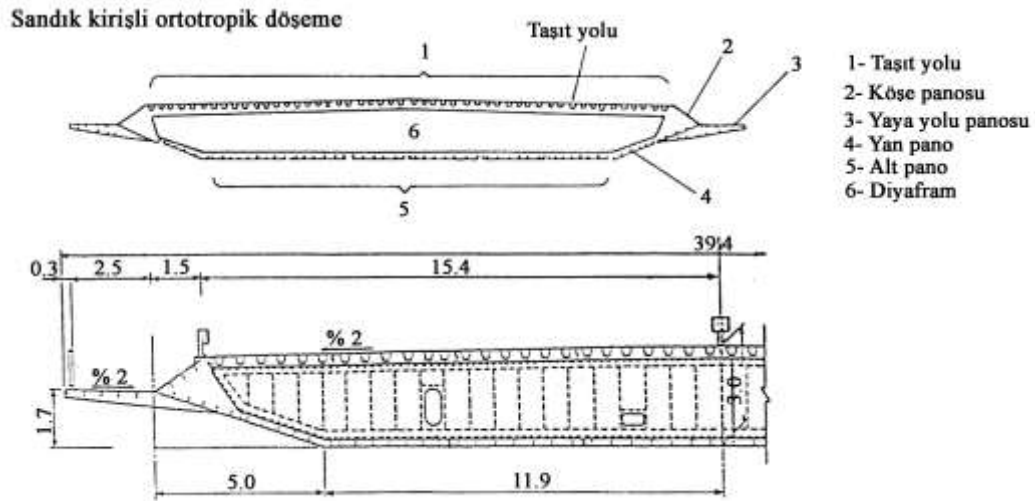
Temizlik işlemlerinden sonra binder olarak 4.2 lt/m² bostik ve 3-5 mm kalınlığında izolasyon a macı ile mastik uygulanmıştır. Bu işlemlerden sonra ise 20 mm alt ve 30 mm kalınlığında üst tabaka olmak üzere mastik asfalt kaplama uygulanarak taşıt yolu kaplaması tamamlanmıştır [11].

5.2.2. F S M köprüsü döşeme imalatları

5.2.2.1. Döşeme tasarımı

Severn köprüsünde ilk defa uygulanan sandık kirişli döşeme modeli zaman içinde sürekli gelişim göstermiş ve güvenilirliğini ve ekonomik avantajlarını ispatlamıştır.

1. Boğaz köprüsünde de uygulanan bu model ile F. S. M köprüsünde diğer döşeme tipleri araştırılmış ve sandık kirişli döşeme tipi sistem olarak kabul edilerek geçiş mesafesi ve taşıtılması gereken yüklere göre boyutlandırılmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.22 F. S. M. Köprüsü döşeme blokları en kesiti [12]

F. S. M köprüsüne ait döşeme, sandık kiriş ve yol döşemesi bakımından genel olarak incelendiğinde Lillebaelt köprüsü ile büyük oranda benzerdir. Farklılığı dış ve geliş yönlerinde 4' er şerit bulunması ve bu sebeple, kesit eninin uzaması ve uç kısımlarda yaya yollarının yer almasıdır. Bu farklılık bir sistemi ana hatlarıyla değiştirilmemiş, sadece döşemenin ölü ağırlığı ve buna bağlı olarak oluşan diğer yükleri, nicelik bakımından arttırmıştır [12]. Bu sebeple tasarımı, malat ve montaj kriterleri her iki örnekte de birbirine denk ve düşünce olarak aynıdır.

Sandık kirişli ve ortotropik döşemeli asma köprüler sadece Lillebaelt veya F. S. M köprüleri olarak değil, genel olarak tüm örnekler incelendiğinde de aynı benzerlikler ve ortak noktalar çoğunluktadır. Sandık kiriş elemanlarında ana yükü taşıyan diyafram kirişleri 8-10 mm (F. S. M – 8 mm) et kalınlığında, çelik levhalar ise et kalınlığı diyafram kirişinden daha ince olmak üzere 8-12 mm arasındadır. (F. S. M- 12 mm). Ortotropik plak ise 12-15 mm kalınlıkta üst plaka (F. S. M – 14 mm) ve 6 mm et kalınlığında (F. S. M – 6 mm) ile oluşturulmakta ve trapez kirişler, orta eksenlerinde 60 cm aralıkla yerleştirilmektedir. Alt ve yan panolar ise 8-10 mm kalınlıkta plakalar (F. S. M – 10 mm) ve 200-220 x 60-120 ebatlarında asimetrik köşebent profiller ile oluşturulmaktadır [7].

F. S. M köprüsüne ait döşemeler, yaya yolu ile birlikte 39.4 m genişlik ve 3 m yüksekliğinde konstrüksiyon yüksekliğine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Döşeme blokları ise 17.92 m boyunda toplam 62 parçadan oluşmaktadır. İmalatları standartlaştırabilmek için tüm bloklar eşit ebatlarda üretilmişlerdir. Her bloğun

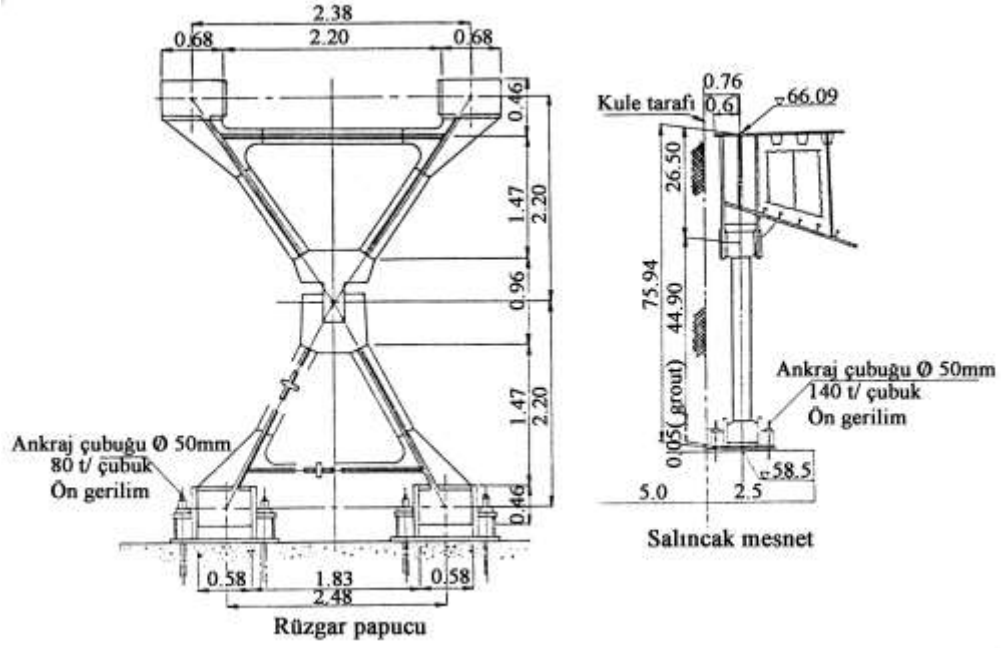
ağırlığı tek başına 250 ton olarak oluşmuştur. Diyafram kirişleri ise 4.50 m aralıklarla yerleştirilmişler [12], ancak aralıklarının Lillebaelt köprüsüne göre daha fazla olması, konstrüksiyon yüksekliği etkilememiş, üst plaka kalınlığı bir miktar artmıştır.

5.2.2.2 Askılar, mesnetler, derzler

Askı halatları, düşey ekseninde dik ve i kili kol halinde, orta eksenleri esas alındığında 17.92 m aralıklı ve Lillebaelt köprüsünde olduğu gibi döşeme bloklarının si nnetri eksenlerinde (ağırlık merkezi) yerleştirilmişlerdir. Bağlantı noktaları diyafram kirişinin ucunda yer almış, bağlantı pimleri Lillebaelt köprüsünden farklı olarak oluşturulmuş ve takviye edilmiş ve 2 pim deliği yerine bakı m sırasında askıların yenilenmelerini hızlı ve daha güvenli gerçekleştirebilmek amacıyla 3 pim deliği, ortada olan boş kal mak üzere bırakılmıştır. Askı halat uzunlukları eksantrik olarak oluşturulan pimlerin 5 mm'ye kadar tolerans ver meleri haricinde sabit olarak oluşturulmuşlardır [25].

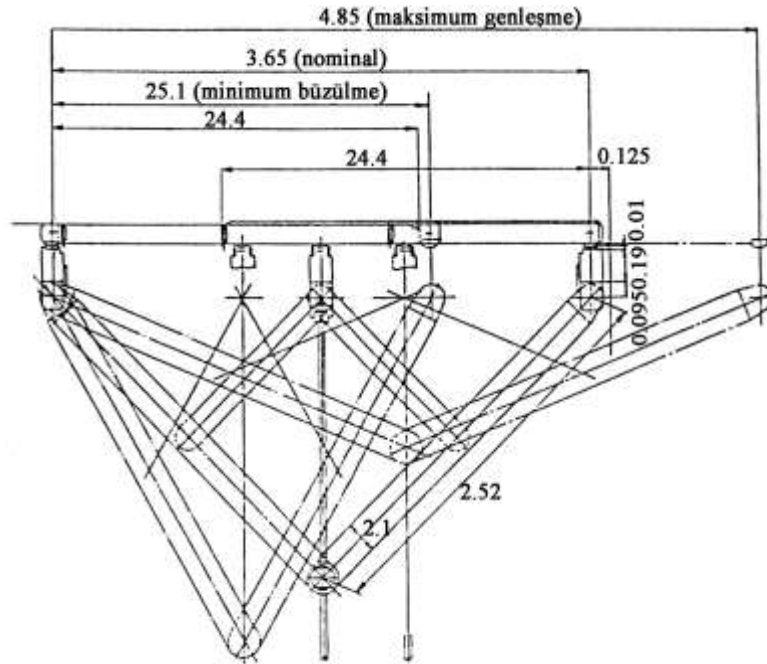
Döşeme ile askı bağlantıları, kabl onun alt ucunda yer alan ankraj plakası yerine, ana kablo ile benzer şekilde pim ile bağlanmış ve bu sayede geçiş ekseni doğrultusunda oluşabilecek yatay yüklerin askı kabl olarına zarar ver mesi engellenmiş ve Lillebaelt köprüsünde oluşturulan ek önlemlere gerek kalmamıştır.

Döşeme, kulelerin alt noktalarında son bulmuş ve beton temel üzerinde ankrajlanmış salıncak mesnet ve rüzgar mesnetleri üzerine oturtulmuştur. Geçiş ekseni doğrultusunda oluşan hareketler salıncak mesnet, bu eksene dik doğrultuda oluşan rüzgar kuvvetlerinden kaynaklanan hareketler ise rüzgar mesnetleri tarafından karşılanmaktadır (Şekil 5.23).



Şekil 5.23 Rüzgar papucu ve salıncak mesnet [12]

Taşıt yolunun sürekliliğini sağlamak amacıyla döşemenin bitiş noktası ile devam eden yolu birleştirmek amacıyla genişleme derzleri kullanılmıştır. Genleşme derzleri parmak tipinde olup, + 1070 / - 1000 mm yatay harekete olanak tanımaktadır [12] (Şekil 5.24).



Şekil 5.24 Genleşme derzi [12]

5.2.2.3 Çelik malzeme seçimi

Benzer sistemler olmalarından dolayı F. S. M köprüsü döşemesi, Lillebaelt köprüsü ile aynı özelliklere sahiptir. Ancak, konstrüksiyon yüksekliği haricinde döşemeyi oluşturan blokların ve dolayısıyla döşemenin ebatlarının büyümesi, döşeme uçlarına yaya yolu eklenmesi, bunlara ek olarak diyafram kiriş ve askı kablolarının mesafelerinin artması, çelik malzeme seçiminde sadece ortotropik üst plağın ve trapez kirişlerin değil, sistemi oluşturan tüm elemanların St 50 sınıfı (50 kg/ mm^2 mukavemet, 37 kg/ mm^2 akma sınırı) çelik malzeme kullanılmış, standartlar Lillebaelt ve 1. Boğaziçi köprüsüne ağırlıklı olarak kullanılan İngiliz standartlarının yerine Japon standartlarına göre belirlenmiştir. ancak amaç olarak malzeme et kalınlığı azaltılmaya ve standart ebat ve kalitede malzeme kullanılması amaçlanmıştır.

F. S. M köprüsüne ait döşeme i malatlarında tamam St 50 çelikten imal edilmiş, toplamda 15,360 ton çelik malzeme kullanılmıştır.

5.2.2.4 Kaynak birleşimleri

Döşeme i malatları ve montajında tüm birleşimler kaynak ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemleri; fabrikada köşe, alt ve üst panolar ile diyaframkirişlerinin eleman düzeyindeki i malatlarının fabrikada, blokların oluşturulması bakımından şantiyede, montaj sonrası blokların birleştirilmesi bakımından montaj sonrası olmak üzere 3 farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Her aşamada i malat aşamalarının kullanılması olanak verdiği ölçüde tam otomatik ve yarı otomatik kaynak makineleri kullanılmış, bu makinelerin kullanımının mümkün olmadığı noktalarda el kaynağı kullanımı zorunlu olmuştur.

Fabrika i malatlarında, trapez kiriş ile üst plaka i malatlarında kaynak kalınlığı 6.5 mm olarak belirlenmiştir. Bu noktalarda kaynak ağzı açılardan otomatik sistem kullanılmıştır. Alt tarafta yer alan köşebentler ise aynı yöntemle kaynaklanmış, ısı deformasyonlarını indirmek için kaynak kalınlığı 5 mm'ye indirgenmiş ve tek taraflı açık kaynağı uygulanmıştır.

Şantiye i malatları, açık havada ön i malattan sonra şantiyeye nakledilen panoların i malat tezgahlarında birleştirilmesi ve blokların tamamlanması ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sırasında kaynak kalınlığı 5 mm olarak belirlenmiş

ve geçici olarak teğel kaynakları kullanılmıştır. Teğel kaynak aralıkları 300 mm veya daha kısa tutulmuş, dikey boyları ise 75 mm veya daha uzun, diyaframlarda özel tedbir olarak 150 mm yapılmış, sonrasında ise panolar tek taraflı toz altı kaynağı ile 5 mm kalınlığında alın kaynağı uygulanmıştır. (Teğel kaynakları, asıl kaynak işlemleri öncesinde panoların geçici olarak biraraya getirilmesi amacıyla uygulanmış olup, ısı deformasyonlarını indirmek için tek taraflı ve kullanıldığı bölüme göre minimum boy ve kalınlıkta uygulanmıştır. Teğel kaynak kalınlığı 2.5 mm'dir. Teğel kaynak, el kaynağı yöntemi ile uygulanmıştır.

Diyafram kirişlerinin alt ve üst panolara bağlanmaları el kaynağı ile gerçekleştirilmiş ve çift taraflı olarak 5 mm alın kaynağı, el kaynağı yöntemi ile uygulanmıştır. Yük dinamiğinin artmış olduğu ve farklı tipte panoların birleştiği tüm bölümlerde kaynak işlemleri benzer şekilde uygulanmıştır. Döşeme üzerinde oluşan yükler farklılaşmış olsa da F. S. M köprüsünde uygulanan kaynak uygulamalar nitelik ve uygulama prensibi bakımından, benzer nitelikte kuvvetlerin etkisi altında kalınmaları sebebiyle benzer şekilde uygulanmışlardır [25] (Şekil 5.25).



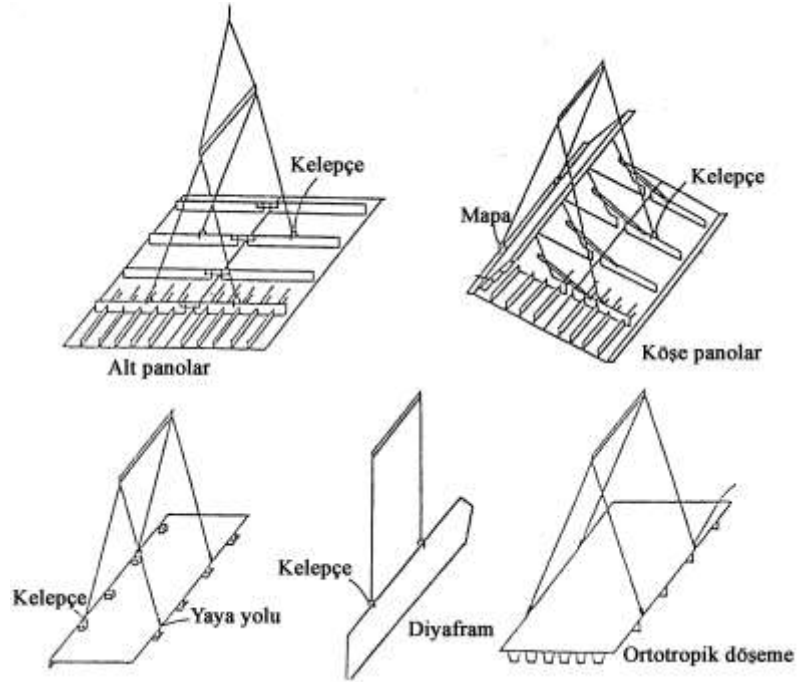
Şekil 5.25 Kaynak işlemleri [25]

5.2.2.5 Döşeme bloklarını ni malatları

F. S. M köprüsü döşemesi, geçiş eksen yönünde 62 bloğa ayrılmıştır. Standart olarak aynı ebatlarda üretilmiş olan bloklar sadece salıncak ve rüzgar mesnetlerinin yer

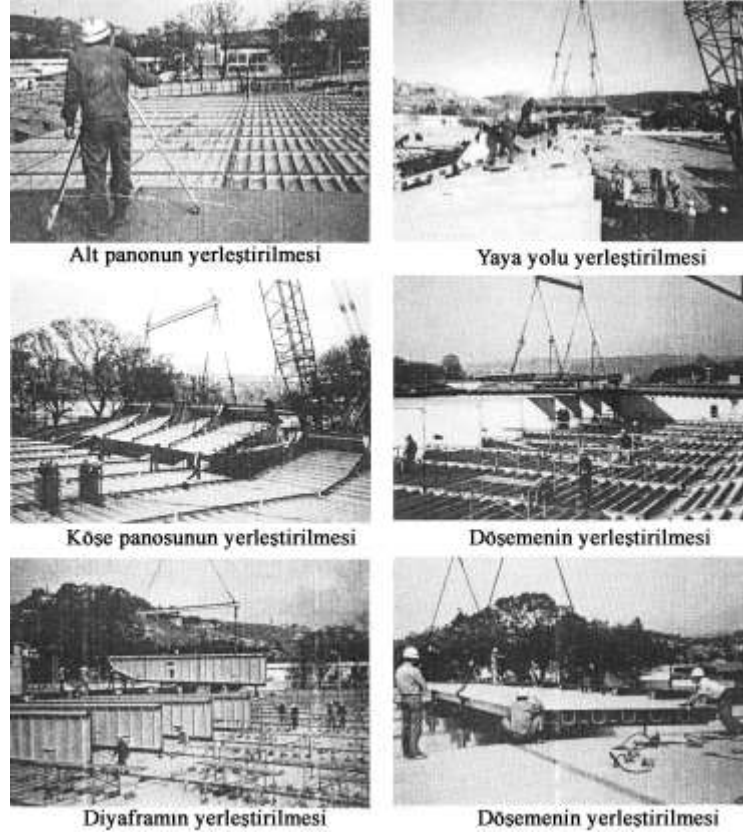
aldığı uç bloklarda farklı kesitlere sahiptir. Her blok üst pano, köşe panosu, alt pano ve diyafram panosu olarak 28 parçadan oluşmuştur. 62 bloğun tamamlanması için toplam 1750 pano Japonya’da üretilerek Türkiye’ye nakledilmiştir [12].

Panoların birleştirilerek blokların tamamlanması işlemleri ise şantiyede açık sahada tamamlanmıştır. Panolar, şantiyede naklieleri sonrasında kontrol edilerek teslim alınmıştır (Şekil 5.26). Bu işlemlerde özellikle hassasiyet kontrolleri ayrı ayrı ve birbiriyle ilişkili tümpanoların ebatları gözden geçirilmiştir [25].



Şekil 5.26 Döşeme bloklarına ait panolar [25]

Döşeme bloğu malatları aşağıdaki işlem hiyerarşisine göre yerleştirilmiştir (Şekil 5.27).



Şekil 5.27 Döşemelerini malat düzeyinde montaj aşamaları [25]

- Alt pano
- Köşe panoları
- Diyafram kirişleri
- Yaya yolu
- Üst pano

Alt pano yerleştirilirken orta bölümden dışlara doğru işlem yapılmış ve tüm elemanların uygunlukları tekrar kontrol edilerek, birleştirme tamamlanmıştır.

Köşe panoları, alt panoların kenarlarına, montaj tezgahının eğimli kenarlarına oturtulmuş, bu panoların uçlarına ise yaya yolu panoları geçici teğel kaynağı ile bağlanmıştır.

Alt panolar, eş zamanlı iki taraflı olarak otomatik yöntemle tozaltı kaynağı ile birleştirilmiş, sonrasında ise diyaframlar alt panoya geçici olarak cıvatalanmıştır.

Diyafram ile köşe panoları krikolo ile birbirine alıştırıldıktan sonra üst pano yerleştirilmiştir.

Üst panoların montajları da, alt pano gibi merkezden, dışa doğru gerçekleşmiş, bağlantılar geçici cıvatalar ile yapılmış ve köşe panoları ile alıştırma işlemleri tamamlanmıştır. Alıştırma ve ayarlama işlemleri sonrasında bombe kontrolleri yapılmış, sonrasında ise döşeme ve yaya yolu panoları toz altı kaynağı ile birleştirilmiştir. (Asıl kaynak işlemleri öncesi teğel kaynaklar uygulanmıştır)

Bu işlemler sonrasında diyafram kirişleri alt, kenar ve üst panolara kaynaklanarak aski sisteme montaj için gerekli geçici adaptasyon parçalarının kaynaklanmasından sonra bloklara son bombe kontrolleri yapılarak, inalatlar tamamlanmıştır [25]. İnalat süreci bakımından da F.S.M ve Lillebaelt köprüleri benzerdir.

5.2.2.6 Yüzey İşlemleri

• Koruyucu İşlemler

Döşeme sistemini oluşturan tüm çelik elemanlar paslanmaya karşı boyanarak korunmuşlardır. Seçilen boya ve uygulanan yöntemler iklim şartlarına uygun nitelikte olup, kullanım süreci boyunca tam koruma sağlanması göz önüne alınarak uygulanmıştır.

Döşemenin dış yüzeylerine atölyede 0.92 kg/m², şantiyede 0.276 kg/m² boya uygulanarak yaklaşık 1.2 kg/m² boya toplam 300 µ kalınlıkta uygulanmıştır.

İç yüzeylerdeki boya işleminde ise, 0.481 kg/m² boya uygulanarak 180 µ kalınlık oluşturulmuştur. Bu miktarlara astar uygulaması da dahildir.

Döşeme bünyesinde; dış yüzeylerde 60,466m², iç yüzeylerde 176,184 m² boya işlemleri gerçekleştirilmiş, üst plakada ise asfalt kaplama öncesi 39,097 m² yüzey çinko esaslı kaplama ile geçici olarak korunmuştur. Yüzeylerin hazırlanmasında kumlama yapılarak, boya penetrasyonunu engelleyici veya hasar verici oluşumlar engellenmiştir.

Dış yüzey boyanma işlemleri, atölyede 5, şantiyede 2 kat olmak üzere 7 kat uygulanmıştır.

Atölyede yer alan işlemleri inorganik çinko astar ile (15 µ) uygulanmış sonrasında ise 50 µ kalınlıkta 2. astar aynı nitelikte malzeme ile oluşturulmuştur. Astar sonrasında, epoksi reçineli alt kat boya 3 aşamada sırası ile; 0.062, 0.186, 0.186 kg/ m² tüketimi ile 20 µ, 60 µ, 60µ kalınlıkta uygulanmıştır. Atölyede uygulanan son kat ise epoksi esaslı boya ile 0.16 kg/ m² ve 50 µ olarak gerçekleştirilmiştir.

Şantiyede ise hasarlı bölgeler kumlandıktan sonra klorinatlı lastik boya ile 0.144 kg/ m² miktarında, 30 µ kalınlıkta ara kat ve aynı esaslı boya ile 0.132 kg/ m² tüketimi ile 30 µ kalınlıkta son kat boya ile dış yüzey boyası tamamlanmıştır.

İç yüzeylerde ise yüzey hazırlıkları aynı kumlama işlemleri uygulanmak üzere, inorganik zengin çinko astar ile 0.080 kg/ m² ve 15 µ kalınlıkta 1. astar, ve aynı özellikte 2 kat 0.193 kg/ m² ve 90 µ kalınlıkta uygulanarak iç yüzeylerin boyası tamamlanmıştır.

Yüzey tanımatları ve rötuşlar atölye, şantiye ve montaj sürecinde, ihtiyaç olan tüm durumlarda aynı nitelikte uygulanmıştır. Boya kalitesi sürekli kontrol edilmiş kalite kontrol için kimyasal analizler ve fiziksel kalınlık kontrolleri yapılmıştır. Boya karışımı viskonetre ve gözle kontrol ile ölçülmüş, ayrıca uygulamada çevresel şartlar, (ısı, nem yoğunluğu) termometre ve higrometreler ile gözlenmiştir. Kalınlıklar ıslak ve kuru boya üzerinde yapılmıştır. Kuru film elektromanyetik kalınlık ölçer ile kontrol edilmiştir.

Yüzey kontrolleri ise paslanma, pürüzlülük ve temizlik olarak ele alınmış, gaz muayenesinin yanı sıra pürüzlük nastarı ve seloteyp testleri de uygulanmıştır.

Ortotropik plağın üst yüzeyi ise asfalt kaplama ve izolasyon öncesi koruma tedbiri olarak, metal raspa sonrası sıcak çinko püskürtme yöntemi ile uygulanmış (75µ), tek kat asitle aşındırılmış astar boya uygulanmış ve asfalt kaplama öncesinde temizlenmiştir. Boya; 0.050 kg/ m² tüketimi ile 7 µ kalınlıkta uygulanmıştır [26].

Döşemede uygulanan astar ve boya işlemleri, tamamen aynı olarak ana kulelerini iç ve dış yüzeylerinde de uygulanmıştır.

- **Taşıt Yolu Kaplaması**

Köprü döşemesine ait üst yüzeyler; toplam 39,000 m² alan oluşturmaktadır. Mevcut yüzey, 33,650 m² taşıt yolu ile 5350 m² yaya yolunu kapsamaktadır.

Taşıt yolu üzerine toplam 38 mm kalınlığında kaplama kalınlığı oluşturulmuştur. Yüzey kaplama işlerinde öncelikle, imalat sonrası koruma işlemleri için uygulanan 75 µ çinko kaplama ve 7 µ astar temizlenmiştir ve temizleme işlemi sonrasında herhangi bir paslanma oluşumu gerçekleşmemiştir.

Temizlik işlemlerinden sonra 4.6 kg/ m² olarak elminatör, yapışkan astar olarak uygulanmıştır. Yapışkan astar tabakası üzerine 2.6 kg/ m² elminatör püskürtülerek izolasyon yapılmıştır.

Elminatör izolasyon tabakası ile mastik asfalt arasında bağlantıyı arttırmak için elminatör yapıştırıcı 0.2 kg/ m² sürülerek uygulanmıştır.

Son tabaka olarak %10.4 asfalt çimentosu ve agregası olarak %85 kalsiyum karbonat içeren kalıncı mal edilmiştir. İnce agregada 75 µ – 2,36 mm kaba agregası 14 mm nominal boyutlu olarak belirlenmiştir. İzolasyon tabakası dahil olarak kaplama kalınlığı ±3 mm tolerans ile 38 mm olarak belirlenmiştir. Yaya yolu kaplaması ise yapışkan astar ve izolasyon sonrasında ortalama dane boyutu 3 mm çapında agregası ile, taşıt yolunda kullanılan nitelikte mastik asfalt dolgu ile toplam 6 mm kalınlıkta kaplama kalınlığı elde edilmiştir [27].

5.3 Sonuç

Asma köprülere ait üst yapı sistemleri, alt yapının aksine daha standart ve belirli ortak özelliklere sahip elemanlardan oluşmaktadır. Benzerlikler elemanın düzeyinin yanı sıra tasarım hesap ve montaj yönünden de oldukça benzerlikler göstermektedir. Tacoma köprüsünün çökmesinden sonra sandık kirişli ve ortotropik plaklı döşeme sistemleri adeta değişmez bir kural olarak geniş açıklıklı asma köprülerde yer almış, bu konudaki farklılıklar daha ziyade sistemin kendisi ve üzerindeki yüklere bağlı olarak, çelik malzeme ebatları ve kaynak kalınlıklarında belirmiş, ayrıca döşeme kenarlarında yaya yolu kullanımı ve aerodinamik etkiler sonucunda kesit

geometrisinde bir takım farklılıklar sistemin bütününe değiştirecek ölçüde yer almıştır.

Üst yapıda asıl belirgin farklılık alt yapının bağlı olduğu zemin durumu, topografya gibi etkenler sebebiyle de bağlı olarak, geçişin asma sistemle geçilen açıklığının sayısı ve buna bağlı olarak eleman ve sistem düzeyinde oluşan geometridir. Ayrıca açıklık mesafesine bağlı olarak ana kablo oluşumu, ortalama 1500 m uzunluğa kadar fabrika ürettiği kablo kolları ile oluşturulabildiği gibi, daha uzun kablo boyunun gerekli olduğu durumlarda, kablo kollarının, ankraj blokları arasında çelik teller ile şantiyede hazırlanarak ana kabloların oluşturulması söz konusu olabilmektedir.

Üst yapı bünyesinde yer alan yüzey koruma önlemleri de hemen hemen standart prosedür ve buna bağlı uygulamalardan oluşmaktadır.

6. AS MA SİSTE M MONTAJI

Çelik üst yapı elemanları; asma yapının büt ününü oluşturan ana kablolar, askı kabloları, kablo se merleri, kablo kenetleri ve döşeme bloklarının belirli teknik kurallar ve hiyerarşik montaj uygulamaları çerçevesinde bir araya getirilerek, asma köprü sistemini oluşturmaktadırlar.

Ortotropik döşeme ve sandık kirişli döşeme tipinin neredeyse standart bir model oluşt urması, geniş açıklıklı asma köprülerde i malatlarının yanı sıra montaj tekniklerini de oldukça benzer işlemlerden oluşmasına sebep olmaktadır. Daha önce yer alan bölümlerde de açıklandığı gibi farklılıklar asıl olarak spesifik anlamda, yapı elemanlarının ebatları ve oluşturdıkları yüklerde kısmen oluşabilmekte ancak sistemin büt ünü dolayısıyla montajı farklı örnekler ele alındığında farklılıklardan çok daha fazla ortak nokta, genel anlamıyla, bulunmaktadır.

Bu bölümde yer alacak açıklamalarda, montaja yönelik ve montaj sırasında tekrarlayan işlemlerden örnekler seçilerek, uygulanan işlemler uygulama kronolojisine uygun olarak üst yapı elemanlarının inşa süreçleri anlatılacaktır. Uygulamada ele alınacak örnekler önceki bölümlerde olduğu gibi Lillebaelt ve F. S. M köprüleri olacak, ancak gerek Lillebaelt köprüsünün 3 açıklı sistem olarak biraz daha kompleks bir örnek olması, gerekse her iki köprünün orta açıklıklarında yer alan işlemlerin oldukça benzer olması sebebi ile açıklamalar daha yoğun olarak Lillebaelt köprüsü hakkında olacak ancak F. S. M köprüsü ile benzerlik ve farklılıklar da açıklamalara en geniş anlamda dahil edilecektir.

6.1. Ön Hazırlıklar

6.1.1. Döşeme Blokları

Lillebaelt köprüsünde döşeme blokları 12 m boyunda ve tam kesit olarak imal edilmiş yapı elemanlarıdır. İmal edildikleri fabrikadan, şantiye stok sahasına 200 km boyunca römorkörler tarafından çekilen mavnalar ile taşınmışlardır [11].

F. S. M köprüsünde de benzer şekilde, 17.92 m boyunda ve tam kesit olarak imalat yapılmış ve nakliye yine döşeme bloklarını taşıma aacıyla üretilmiş mavnalar ile yapılmıştır. Tek farkı, döşeme bloğu panelleri şantiyede birleştirilmiş ve döşeme bloğu nakliye mesafesi daha kısa olmuştur [12].

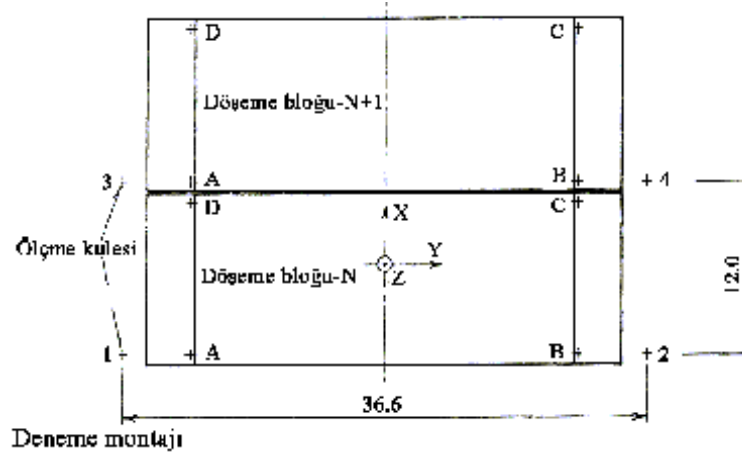
6.1.1.1. Kontrol

Lillebaelt köprüsünde, orta açıklık 600 m uzunluğunda olup, toplam 51 adet döşeme bloğundan oluşmaktadır. Yan açıklıklar ise her biri 240 m uzunluğunda olup, iki yan açıklıkta toplam 40 adet bloktan oluşmaktadır. Bu açıklamaların montaj açısından farklı bir tanıma ise, blokların arasında yaklaşık 90 adet eklem ve birleştirme anlamına gelmektedir. Montaj sırasında eksik veya hatalı olarak yapılabilecek en küçük işlem bile, sistemin bütününe uygulama ve kullanım süreçlerinde zarar verebilir. Bu sebeple kontroller gerek imalat sürecinde, gerekse fabrika stok sahasında, nakliye öncesinde belirlenen toleranslar dahilinde yapılmıştır.

Döşeme blokları, birbiriyle bağlantılı blokların, dene montajında ikili olarak bir araya getirilerek aşağıdaki ebat kontrolleri yapıldıktan sonra nakledilmişlerdir.

x = Köprü geçiş eksen	A_x = geçiş eksen uzunluk deformasyonu
y = yatay enine eksen	Q_y = enine eksende nakasma deformasyonu
z = düşey eksen	Q_z = düşey eksende nakasma deformasyonu
θ_x = boğme deformasyonu	
θ_y = düşey eksende açı hatası	
θ_z = yatay eksende açı hatası	

Yukarıdaki tanımlamalarda da görüldüğü gibi, boyut kontrolleri 3 boyutlu olarak, blokların kendi bünyelerinde ve her iki taraflarında yer alan komşu bloklarla beraber değerlendirilerek gerçekleştirilmiştir. Kontrol işlemlerinde kullanılan optik ölçüm aletleri, sabit noktada, kulelerin üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Fabrika inalatı sonrası deneme montajı [28]

Geçici montajda N ve N+1 numaralı döşeme blokları, hidrolik kriko lar ile seviyeleri eşitlenerek bir araya getirilmiş ve geçici birleşim aparatları ve civatalar kullanılarak sabitlenmişlerdir. Bu sayede boyut kontrolleri ile birlikte deneme montajları gerçekleştirilerek uyumluluk kontrolleri de yapılmıştır. Bu işlemlerde aynı zamanda, sandık girişini içinde ve yüzey kaplamalarında, 16 adet ısı algılayıcısı yerleştirilerek, ısı farklılıkları ve bu sebeple oluşan ısı deformasyonları da optik ölçümler ile takip edilebilmiştir.

Optik ölçüm aletleri, deneme montaj hattında, blokların köşe noktalarına denk gelecek şekilde yerleştirilmiş, ve standart olarak belirlenen noktalarda okunma yaparak, önce blokların seviye ayarları sonrasında ise deformasyon kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler öncelikle 10° C sıcaklıkta yapılmış, daha sonra günün farklı saatlerinde, değişen ısı farklılıklarında ölçüm alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Bu ölçüler dikkate alınarak nakliye sonrasında, şantiye stok sahasında da aynı şekilde, son kontroller yapılmıştır [28].

F. S. M köprüsünde de bu işlemler benzer şekilde yapılmıştır ancak blokları oluşturan panoların şantiyede bir araya getirilmelerinden dolayı, boyut kontrolleri ve geçici montaj bu süreç içinde yer almıştır. Ayrıcaısı deforasyonları için kabul eden sabit sıcaklıkli koşulları dikkate alınarak 16° C olarak belirlenmiştir [25].

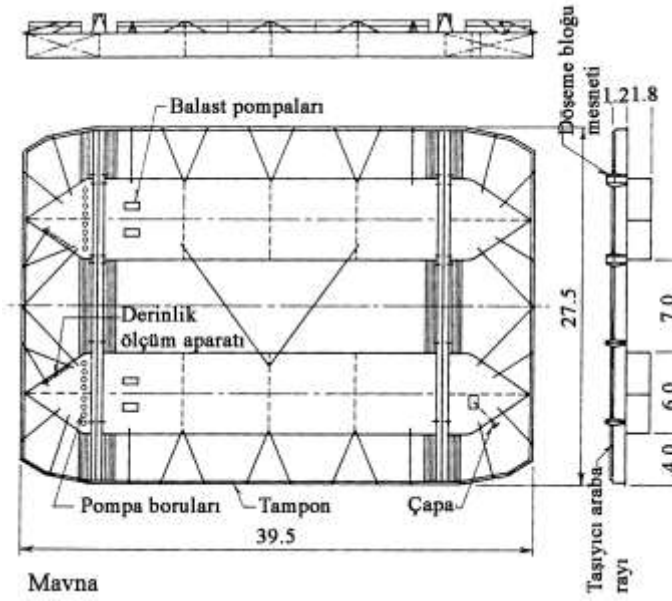
6.1.1.2 Yükleme ve stoklama

- Mavna

Mavnalar, asma köprülerde döşeme bloklarının nakliye ve montajı için hazırlanan yüzer dubalardır. Mavnaların imalatları, taşınmak zorunda olan yükler dikkate alınarak güvenlik ve etkinlik kazanabilmeleri için hesaplama ve deneyler sonucunda gerçekleştirilmektedirler. Hesaplarda taşıma kapasiteleri, yükleme sonucu suya batma, seyir sürati ile nakliye ve montaj sırasında karşılaşılabilecek akıntılar, genel hatları ile tasarımı parametrelerini oluşturmaktadır [11].

Lillebaelt köprüsünde mavna yükleme sırasında 1.05 m batmaktadır. Bu miktar yükleme yapıldığı zaman 0.40 m olup yükü batma miktarı 0.65 m'dir. Boş mavna 170 ton ağırlığında olup, iki bloğun aynı anda taşınması esasına göre yaklaşık 280 ton taşıma kapasitesine sahiptir. Mavna römorkör tarafından çekilerek hareket etmektedir. Mavna dengeli olması bakımından kataran tiptedir [28].

Lillebaelt köprüsünde, kullanılan mavna maksimum 1.8 m/s akıntı hızına göre tasarlanmış ve akıntıya karşı 2.5 m/saat hızında çekilmiştir. Su seviyesi ise en düşük -145 cm en yüksek +95 cm arasında belirlenmiştir [15]. Rüzgar hızı ise 4 yıllık gözlem sonuçları karşılaştırıldığında 4-12 m/saat olarak belirlenmiş, bu değerler sadece mavnanın imalatı değil, montaj sırasındaki durumuna da yansıtılmıştır [13] (Şekil 6.2).



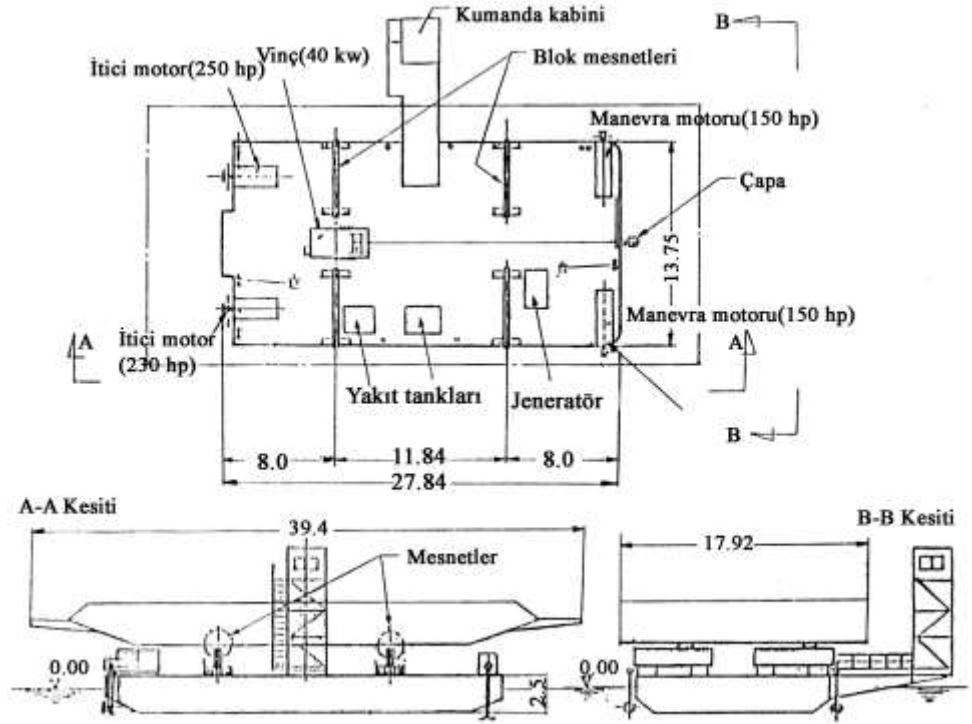
Şekil 6.2 Lillebaelt köprüsü inşaatında kullanılan mavna [28]

F. S. M köprüsünde kullanılan mavna da yaklaşık olarak 250 ton yük taşıma kapasitesine sahiptir. Lillebaelt köprüsündeki mavnadan farkı ise esas olarak kendinden hareket kabiliyetine sahip olmasıdır. İleri-geri hareket 230 ve 250 hp'lik, iki adet, manevra ise iki adet 150 hp'lik pervaneli motorlar ile sağlanmıştır. Yük halinde batma miktarı 1.5 m, yüksek batma miktarı ise 0.87 m olup, aradaki fark yaklaşık olarak 0.63 m'dir. Mavna hızı, ortalama 2.5 m/saat akıntı hızına karşı, 4.5 m/saat olarak belirlenmiştir [26] (Şekil 6.3).

Her iki örnekte yer alan mavnaların seviyeleri, yükleme ve boşaltma işlemlerinde li man su seviyesi dikkate alınarak balastlar yardımı ile ayarlanabilmektedir.

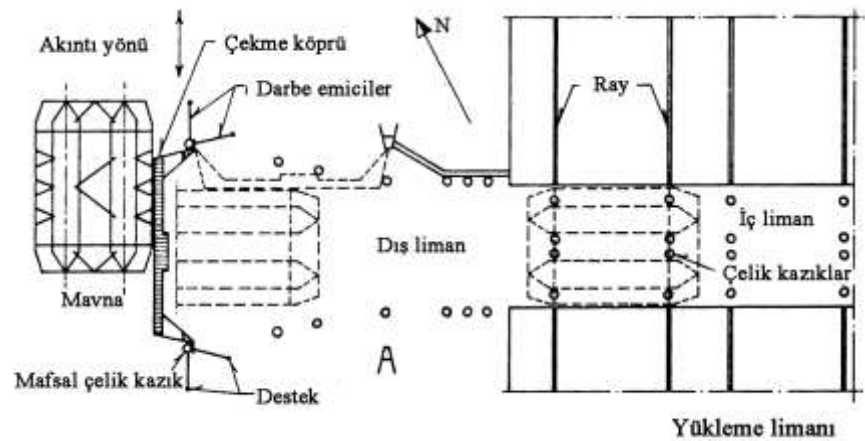
- **Şantiye yükleme limanı**

Lillebaelt köprüsünde, yükleme limanı, mavnanın güvenli ve etkin olarak yükleme ve boşaltma yapabilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Akıntı hızının yüksek olması ve mavnanın kendi başına hareket kabiliyeti olması nedeniyle yükleme limanı, stok sahasına girinti yapılarak oluşturulmuş ve mavna döner köprüye bağlanarak yükleme ve boşaltma yapılabilmesi için li mana çekilebilmiştir.



Şekil 6.3 F.S.M Köprüsü inşaatında kullanılan mavnalı [25]

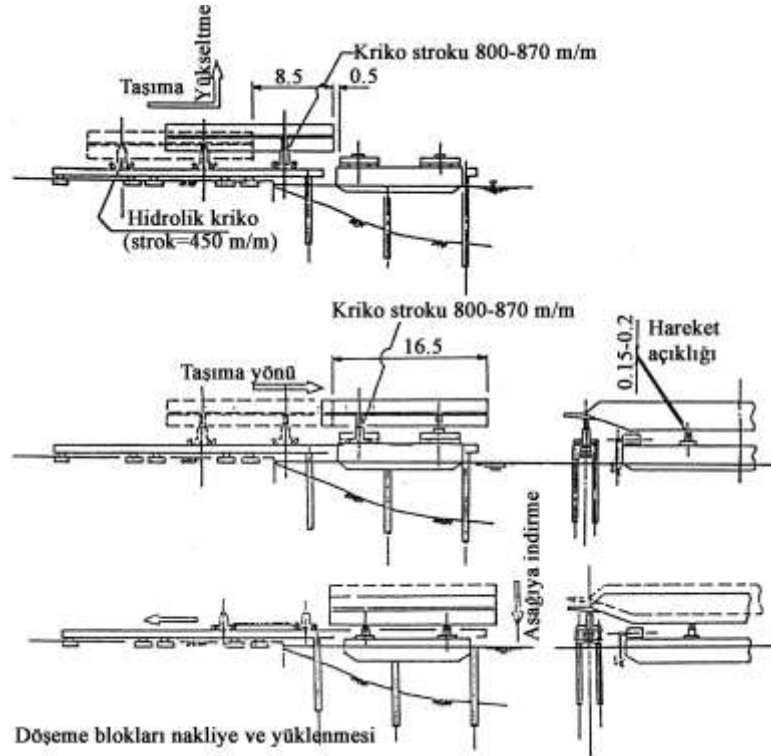
Mavnalı liman alındıktan sonra, balastlara su pompalanarak, liman içinde ve stok sahasında nakliye için oluşturulan rayların eksenleri ile aynı doğrultuda çakılmış çelik kazıkların üzerine mesnetlenmiştir. Ray sistemi mavnalı üzerinde kısa eksende deva metmiş ve bu sayede bloklar herhangi bir kaldırma işlemi uygulanmadan, yatay hareket ile mavnalı üzerine yerleştirilebilir ve boşaltılabilirlerdir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Fabrika yükleme limanı [28]

Yükleme ve boşaltma işlemleri raylı sistem üzerinde yer alan taşıma arabaları ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 4 adet kendinden hareket kabiliyetine sahip taşıyıcı araba, hareket eksenine dik yönde ikili olarak birbirine bağlanarak oluşturulmuşlardır ve toplam iki bloğun birleşmesi ile toplam 280 ton yük taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Taşıyıcı arabalar 4 m'daki kare süratle sahip olup, üzerlerinde döşeme bloklarının düşey seviyelerinin ayarlanabilmesi için, her noktada 2 adet olmak üzere toplam 8 hidrolik krikoye yer almıştır. Tek noktadaki krikonun 75'er ton kapasite ile 150 ton kaldırma kapasitesine sahiptir. Tek noktaya uzun süre etkiyen yük emniyet katsayıları ile 100 ton, dengesiz yüklemelerden dolayı kısa süreli etkiyen yük ise 120 ton olarak hesaplanmıştır [28].

F. S. M köprüsü yüklemeli namı da benzer şekilde mavnanın yanaşması ve yüklemeye a macı ile oluşturulmuştur. Farklılık olarak yüklemeli namı, akıntı hızının daha düşük olduğu bir noktada yer aldığından, stok sahasının içi yerine doğrudan sahilde oluşturulmuştur. Bu oluşumda mavnanın kendinden hareket kabiliyeti olması da etkindir. Mavna, benzer şekilde çelik kazıklar üzerine mesnetlenmiş ve yüklemeye raylı sistem ve taşıyıcı arabalar ile yapılabilir [25] (Şekil 6.5).

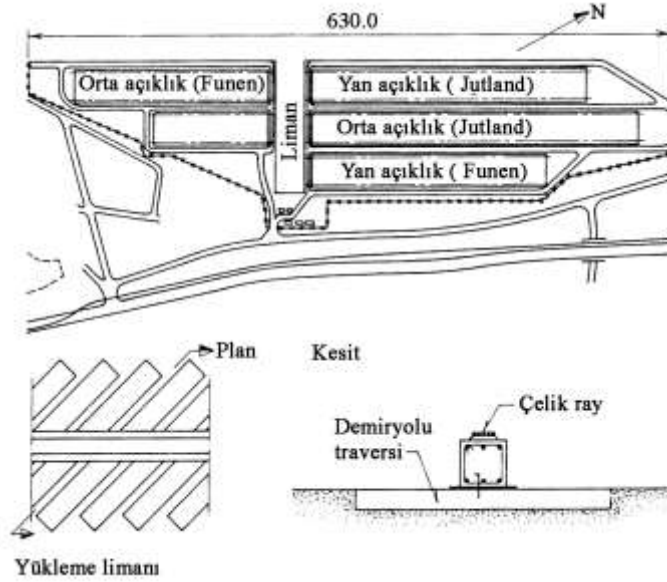


Şekil 6.5 F. S. M Köprüsü döşeme bloklarının yüklemeye aşamaları [25]

Taşıyıcı arabalar 5 m'daki hızında ve 4 ayrı noktada emniyet katsayıları ile birlikte kısa süreli 120 ton, uzun süreli 70 ton taşıma kapasiteli olarak toplam 250 ton ağırlığında bloğu taşıyabilecek şekilde oluşturulmuşlardır.

- Şantiye stok sahası

Lillebaelt köprüsünde stok sahası; Funen sahiliinde, +1.45 m kotunda maksimum su seviyesinin +1 m üzerinde oluşturulan yapay yarı mada üzerinde 65 dönüm alana sahip olacak şekilde oluşturulmuştur (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Lillebaelt köprüsü şantiyesi döşeme blokları stok sahası [28]

Stok sahasında, 12 m'lik 2 döşeme bloğu kalıcı olarak birleştirilmiş ve montaja hazır hale getirilmiştir. Bu işlem birleştirme sonucunda oluşan 280 ton ağırlığında iki döşeme bloğunun montaj sırasında emniyetli olarak kaldırılacağı ve montaj sırasında oluşabilecek dengesiz yüklemelere asma sistemin mukavemet gösterebileceği esasına göre uygulanmış ve döşeme montajı sırasında yer alacak kaldırma işleminden %50 oranında tasarruf edilmiştir [28].

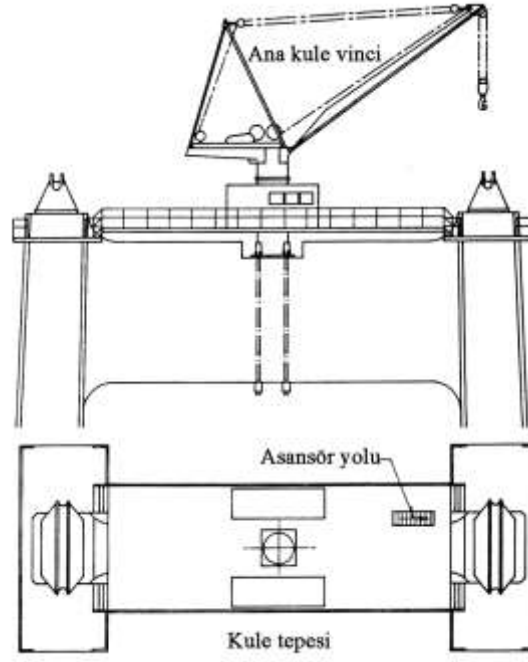
F. S. M köprüsünün stok sahası da benzer şekilde, ve blokların montaj sırasına uygun olarak oluşturulmuştur. Stok sahasında 250 t ağırlığında her blok için son işlemler tamamlanmış ve kaldırma işlemi için mavnaya yükleme yapılmıştır. Stok sahası Asya yakasında, Küçüksu bölgesinde oluşturulmuş ve 65 dönümlü alana sahiptir [26].

6.1.1.3 Ana Kuleler

Geniş açıklıklı asma köprülerin kablo ve döşeme montajlarından önce kule tepelerinde bir dizi çalışma yapmak gerekmektedir. Bu çalışmalar genel olarak montaja yönelik makine ve ekipmanların yerleştirilmesi ve kule senarlerinin montajı ve ayarlanması kapsmaktadır.

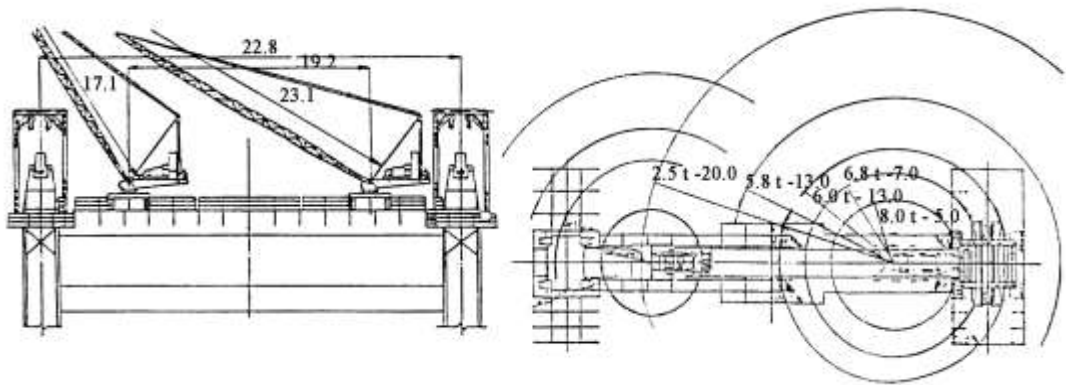
- **Makine-Ekipman**

Lillebaelt köprüsüne ait ana kuleleri tepelerine, ilk olarak birer adet vinç ve çalışma platformu kurulmuştur. Vinç sayesinde, kablo ve döşeme sistemine ait vinçler ve diğer ekipmanlar kurulabilmiş, ayrıca havai yaya yolu sistemi ve montaja yönelik diğer havai hatlar (fırtına halatı, çekme halatı, geri dönüş halatı, enine köprüler vs.) montaj öncesinde hazırlanabilmektedir. Lillebaelt köprüsünde kullanılan vinçler, aynı özellikte olup, kule senari üzerinde, 15 m açıklıkta 50 ton yük kaldırma kapasitesine sahiptirler. Vinçler ve çalışma platformu üst portal giriş üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 Lillabaelt köprüsü kule tepesi vinci [28]

Aynı amaçla yönelik olarak F. S. M köprüsünde de kule üstlerine vinç kurulmuş ancak bu vinçler, her kule üstüne 2'şer adet olarak toplam 4 adettir. Her kulde vinçler, taraflara yarıçapı 23 ve 17 m olarak oluşturulmuşlardır. F. S. M köprüsünde vinç sayısının fazla olmasının en önemli sebebi havadan tel taşıma yönteminin oluşturduğu işlemler ve buna bağlı olarak artan ekipman ihtiyacıdır [23] (Şekil 6.8).



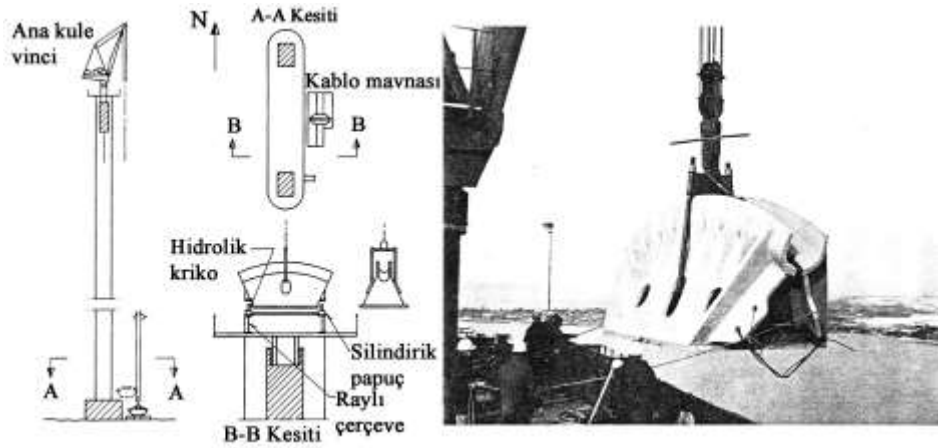
Şekil 6.8 F. S. M Köprüsü kule tepesi vinçleri [23]

- **Kablo se n e r l e r i**

Lillebaelt köprüsünde, çalışma platfor mu ve vinç kurul masından sonra yapılan ilk işle m kule tepesinde kablo se n e r i ankrajları nın bağ lanması için eksik bırakılan betonun ta n a m l a n m a s ı ve sonrasında kablo se n e r i n i n yerle ş t i r i l m e s i d i r .

Ankrajlar, kule tepesinde, son 1 m yüksekliğinde betonun içinde yer al m ı ş l a r d ı r . Ankraj plakaları, 5x3 m ebatlarında ve 90 mm kalınlıktadır ve 0.3 mm tolerans ile yerle ş t i r i l m i ş l e r d i r ve Beton içine gö m ü l ü ankraj çubukları ile sabitlenmişlerdir. Son işle m olarak taban plakası nın altına, daha önce bırakılan 3 c m boşluğu dol dur mak üzere yüksek aderanslı ve esnek özellikle ç i m e n t o ş e r b e t i enjeksiyonu yapılmıştır [11].

Taban plakası nın oluşt urul masından sonra, stok sahasında bul unan kablo se n e r l e r i , kablo m a v n a s ı ile kule ayaklarına nakledildikten sonra, tepe vinci ile ankraj plakaları üzerine yerle ş t i r i l m i ş t i r . Kal d ı r m a işle m i , 45 t on ağırlı ğ nda se n e r i n düşey salı n m ı nı dengelemek a m a c ı ile oldukça yavaş gerçekleştiril mi ş ve montaj işle m i her se n e r için yaklaşık 1 saat sür müşt ü r [28] (Şekil 6 9).



Şekil 6 9 Lillebaelt köprüsü ana kule se n e n montajı [28]

Se n e r l e r i n yanı sıra kule tepelerine, kablo montajına yönelik olarak çelik çerçeveler yerle ş t i r i l m i ş t i r . Çerçevelerin üst noktalarında, kablo kolları nın ankraj blokları arasında çekil m e s i sırasında, hareket kabiliyeti kazandıran makara sistemleri ve krikolar monte edilmiştir. Makaralar, kablo kollarına kılavuzluk edebil m e s i ,

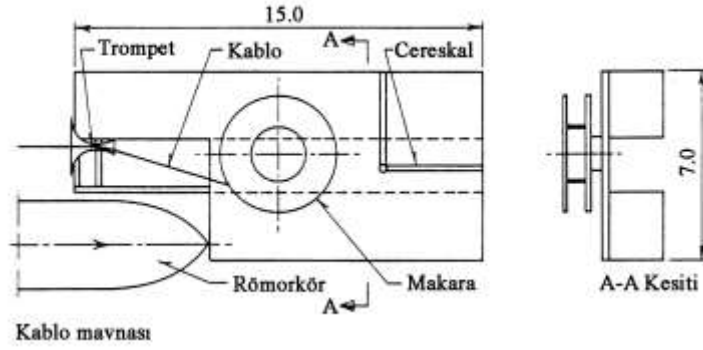
dolayısıyla kablo montajının daha etkin ve hızlı gerçekleştirilmesi amacıyla oluşturulmuştur.

Betonarme kulelerin yeteri kadar esnek olmaları sebebi ile, kule kesiti veya ankrajlarda, montaj sırasında veya köprünün kullanımı sırasında herhangi bir yüklemenden dolayı gerilimleri azaltmak amacıyla, kablolardan gelen yükü ilk karşılayan eleman olan kablo sekerinde önlem alınmış ve taban plakası ve seker arasında dairesel kesitli mat yerleştirilmiştir. kablo sekeri montaj sırasında ilk olarak, herbiri 20 ton itme kapasiteli hidrolik kriko üzerine oturtulmuş, daha sonra dengeli bir şekilde mat üzerine mesnetlendirilmiştir [28].

F. S. M köprüsüne ait kablo sekerleri de aynı amaçla oluşturulmuşlar ve kule tepesine vinç ile monte edilmişlerdir. Seker montajı, çelik kule montajının devamı olarak gerçekleştirilmiş ve kara üzerinde yer alan ve kule bloklarında kullanılan vinçler ile iki parçalı olarak monte edilmiştir. F. S. M köprüsünde, çelik kulelerin nispeten daha esnek yapıları ile kablo sekeri bir arada çalışabilmişler ve Lillebaelt köprüsünde yer alan işlenir ve tedbirlere ihtiyaç duyulmamıştır [19].

- **Kablo mavnası**

Kablo mavnası, başta askı kabloları olmak üzere, kablo sekerleri, ve döşeme montajına yönelik olarak kullanılan ve havai yaya yolu üzerinden ulaştırılması mümkün olan makine, ekipman ve malzemenin taşınması amacıyla geliştirilmiş, döşeme bloğu mavnasına oranla oldukça küçük ebatlarda tasarlanmış bir dabadır. Mavna asimetrik katamaran tipindedir ve römorkör tarafından çekilmektedir. Asimetrik oluşundaki amaç, kısa olan bölüme römorkörün bağlanarak, mavna ile bir bütün halinde hareket edebilmesidir. Kablo mavnası taşıması gereken en ağır yük kablo sekerleri olmuş ve tasarımı yükleri bu elemana göre dikkate alınmıştır [28] (Şekil 6.10).



Şekil 6.10 Kablo mavnası [28]

F. S. M köprüsünde kablo seherlerini karada monte edilmesi ve askı kablolarının döşeme blokları ile monte edilmesi sayesinde kablo mavnası kullanılmamıştır.

6.1.1.4 Havai yaya yolu sistemi

Lillebaelt köprüsünde yer alan havai yaya yolu, kablo ve döşeme montajı süresince personel ve teçhizata güvenli ve kolay bir şekilde geçiş imkanı vermek üzere, ara kabloların 1 maltında ve iki ankraj noktası arasında 1500 m uzunlukta döşenmiştir.

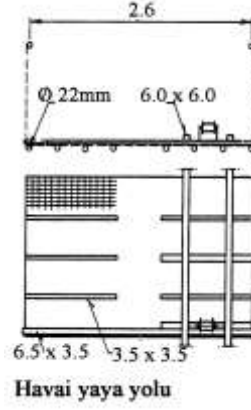
Havai yaya yolu sistemi aşağıdaki sistemlerin bir bütünüdür.

- Havai yaya yolu döşemesi
- Havai yaya yolu halatı
- Koruluk halatı
- Fırtına ve askı halatı
- Enine servis köprüleri

• Havai yaya yolu döşemesi

a) Lillebaelt köprüsünde yer alan havai yaya yolu döşemesi 2.6 m genişlikte olup, yaya yolu döşemesini taşıyan ve alt tarafta bulunan 8 ve yanlarda bulunan iki adet tutunma halatı ile 22 mm kablodan oluşan 10 kablolu sistemdir. Kablolar üzerinde yer alan döşeme 5x10 cm ahşap kirişlerin, adım mesafesine göre 50 cm aralıklarla yerleştirilmesi ve tel kafes üzerine bağlanmaları ile tamamlanmıştır. Tel kafesi

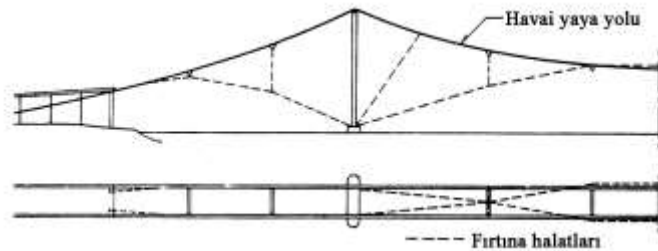
oluşturan çelik teller 3.5 mm kalınlıkta olup, 50 m uzunlukta yer alan tel kafes, 20 cm bindirme ile eklenmiş ve yaya yolunun tam genişliğinde imal edilmiştir. Ahşap kirişler döşeme üzerinde yer alan kılavuz makaraları eksenlerinde 10x10 cm olarak oluşturulmuşlardır [28] (Şekil 6.11).



Şekil 6.11 Lillabael köprüsü havai yaya yolu detayı [28]

b) Kablo lar, orta açıklıkta, kablo se merlerine, yan açıklıkta ise, yan kule se meri ve ankraj bloğuna ankrajlanmışlardır. Kablo lar orta açıklıkta, iki kule arasında kablo mavnası ile çekilmiş ve tepe vinçleri ile kaldırılarak ankrajlara bağlanmışlardır. Yan açıklıkta ise, ana kule ve ankraj blokları arasında, ankraj bloklarından itibaren traktör ile çekilmişler ve yine tepe vinci ile yukarı kaldırılarak kule tepesindeki ankrajlara bağlanmışlardır.

Döşemeler ise şantiyede hazırlanmış ve sarılarak kablo mavnası ile kule ayaklarına taşınmışlar ve vinç ile çalışma platformu üzerine alınmışlardır. Bu noktadan sonra hem orta, hem de yan açıklık tarafına doğru parçalar halinde, tepe vinci ve ankraj blokları üzerinde yer alan çekici vinçler ile kaydırılarak uç uca eklenmişlerdir [28] (Şekil 6.12).



Şekil 6.12 Lillabael köprüsü havai yaya yolu ve fırtına halatları görünüşü ve planı [28]

c) F. S. M köprüsü havai yaya yolu da benzer şekilde oluşturulmuştur. Sistem iki ankraj noktasında 1500 m uzunlukta olup, 27 mm çapında ve her kablo ekseninde 10 adet kablo ile oluşturulmuşlardır. Yaya yolu 3.2 m genişliktedir. Kابلar iki yaka arasından geçirilen kılavuz halatı yardımı ile çekilmişler ve kılavuz halatı hariçinde hiçbir kablo için deniz üzerinden nakliye yöntemi kullanılmamıştır. Kablo uçları; kule tepesinde, seherin üzerinde yer alan ve ana kablo montajında kullanılmak üzere hazırlanan çelik çerçeve sistemine dahil edilen kirişe, karada ise ankraj bloklarının üzerinde yer alan ankraj bloklarına bağlanmıştır.

Döşemeler, Lillebaelt köprüsü ile aynı şekilde hazırlanmış ve rulo halinde tepe vinçleri ile kule tepesine alınarak, çekici halatlar yardımı ile ve uç uca eklenerek yerleştirilmişlerdir [23] (Şekil 6.13).



Şekil 6.13 F. S. M Köprüsü havai yaya yolu plan, görünüş ve detayları [23]

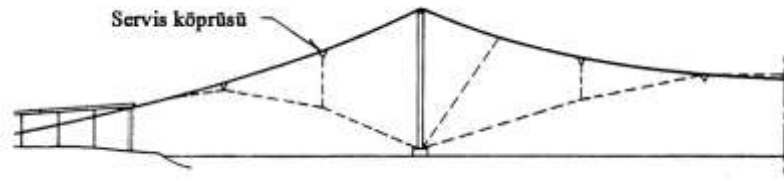
- **Fırtına halatları ve enine servis köprüleri**

- a) Lillebaelt köprüsü

Fırtına halatları, Lillebaelt köprüsünde, çapraz olarak kule ayakları ve karşı kule tepesi arasında oluşturulmuşlardır. Fırtına halatlarının işlevi kablo taşıma sistemine (tramvay halatı) ve havai yaya yolunun bağlanarak, rüzgar yükleri altında yatay hareketini önlemek ve tramvay halatına destek sağlayarak, kablo çekilmesi sırasında mesnet oluşturmaktır. Fırtına halatları, 30 m/s rüzgar yüklerine göre hesaplanmış ve servis köprülerinin (enine köprü) havai yaya yolu ile birleşim noktalarında sisteme bağlanmıştır. Orta açıklıkta ek olarak, eğik şekilde, ana kule ile 1. orta açıklık

servis köprüsü arasında havai yaya yoluna bağlanmışlardır. Fırtına halatı çapı, havai yaya yolu kabloları ile aynı kalınlıkta, 22 mm olarak belirlenmiştir.

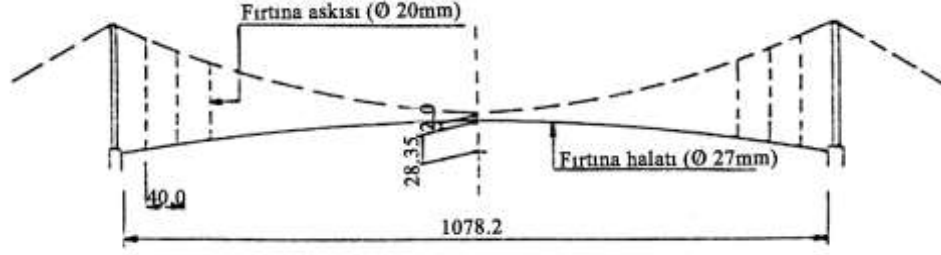
Servis köprüleri her açıklıkta, açıklığın si metrisine uygun olarak eşit aralıkta yerleştirilmişlerdir. Orta açıklıkta 4, yan açıklıklarda 2'şer adet olmak üzere toplam 8 adet servis köprüsü kullanılmıştır. Servis köprüleri şantiyede, çelik konstrüksiyondan imal edilmişlerdir. İmalat sonrasında kablo mavnası ile kule ayağına nakledilmişler, daha sonra tepe vinçleri ile kaldırılarak, havai yaya yoluna bağlanmışlar ve, yaya yolu döşemesi ile birlikte çekilmişlerdir [28] (Şekil 6.14).



Şekil 6.14 Lillebaelt köprüsü enine köprüleri görünüşü [28]

b) F. S. M köprüsü

F. S. M köprüsünde kullanılan fırtına halatları, aynı amaçla ancak daha farklı olarak oluşturulmuşlardır. Fırtına halatları, bu köprüde, sadece köprü temelleri üzerinde oluşturulan ankraj noktaları arasında oluşturulmuşlar, eşit aralık ve açıklık si metri eksenine uygun olarak 25 noktadan, fırtına askı halatları ile havai yaya yoluna bağlanmışlardır. Fırtına halatı ve askıları, havai yaya yolu üzerinden taşınmışlar ve ters seçilmişler, orta açıklığın merkez noktasında, havai yaya yolu ile arada askı kablosu olmaksızın birleştirilmişlerdir. Sistem 45.5 m/s'n rüzgar hızına göre tasarlanmıştır. F. S. M köprüsünde daha fazla askı noktasının kurulmasının en büyük sebebi, rüzgar yükünün yanı sıra geçiş açıklığının fazla olmasıdır. Fırtına halatı, havai yaya yolu halatı ile aynı çapta (27 mm) ve fırtına askıları 20 mm olarak belirlenmiştir [23] (Şekil 6.15).



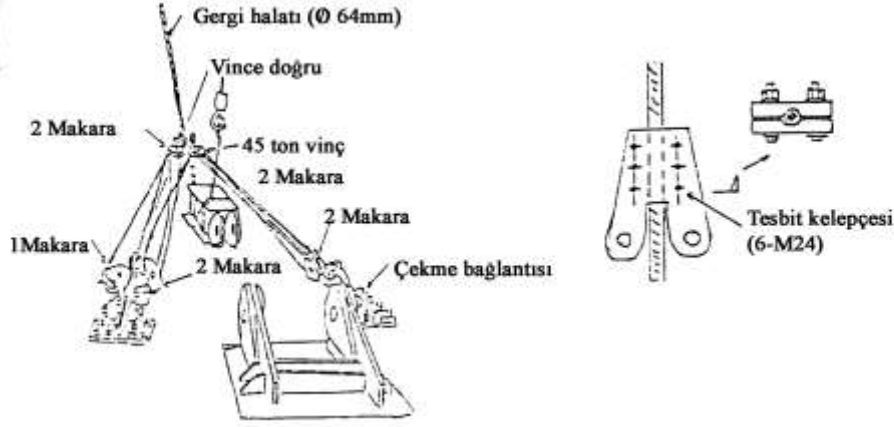
Şekil 6.15 F.S.M köprüsü fırtına halatları [23]

Servis köprüleri ile Lillebaelt köprüsü ile oldukça benzer şekilde inşaat ve monte edilmişler, fark sadece kara üzerinden tepesine aktarılan işlemi olmuştur.

- **Kulelerin geçici olarak askıya alınması**

Montaj öncesinde geçici askı işlemleri çelik ve betonarme köprü kulelerinde montaj sırasında oluşan yükler altında davranışlarından dolayı daha farklıdır. Betonarme köprülere ait örnek daha önce bölüm 4.2’de anlatıldığından, bu bölümde sadece çelik malzeme kullanılan F.S.M köprüsünden bahsedilecektir.

F.S.M köprüsünde kablo montajı sırasında, sistem dengesini bulana kadar kulelere, kara tarafı yönünde gerili uygulanmış ve bu amaçla geri çekme ve aşağı çekme halatları, her kulede 2’şer adet olmak üzere, toplam 8 adet geri çekme, ve 8 adet aşağı geri çekme halatı üst portal kiriş ile ankraj bloğu arasında monte edilmişlerdir. Geri çekme halatı, portal kiriş üzerinde mafsallı, ankraj bloğu üzerinde ise sabit soketle bağlanmışlardır. Aşağı yönde geri çekme halatı ise geri çekme halatı üzerine takılmış metal elemana pınlanmışdır. Geri çekme halatı 64 mm aşağı yönde geri çekme halatı ise 34 mm çapında oluşturulmuşlardır [23] (Şekil 6.16).



Şekil 6.16 Çelik kule geri çekme sistemi [23]

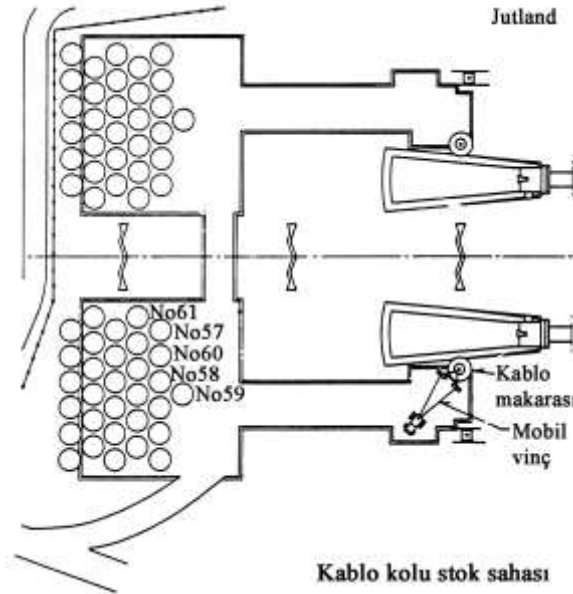
6.2 Ana kablo montajı

Ana kablolar 4. bölümde daha önce anlatıldığı gibi, kesit içinde yer alan ara kabloların bir araya gelerek, ankraj bloklarına bağlanmaları ve kule tepelerine mesnetlenmeleri ile oluşturulmaktadır. Her iki yöntemde de elde edilen ana kablo, aynı amaçla yönelik olarak asma sistemi üzerinde görev yapmakta, ancak imalat ve montaj yöntemleri, kısmen farklılaşmaktadır.

6.2.1 Lillebaelt köprüsü ana kablo montajı

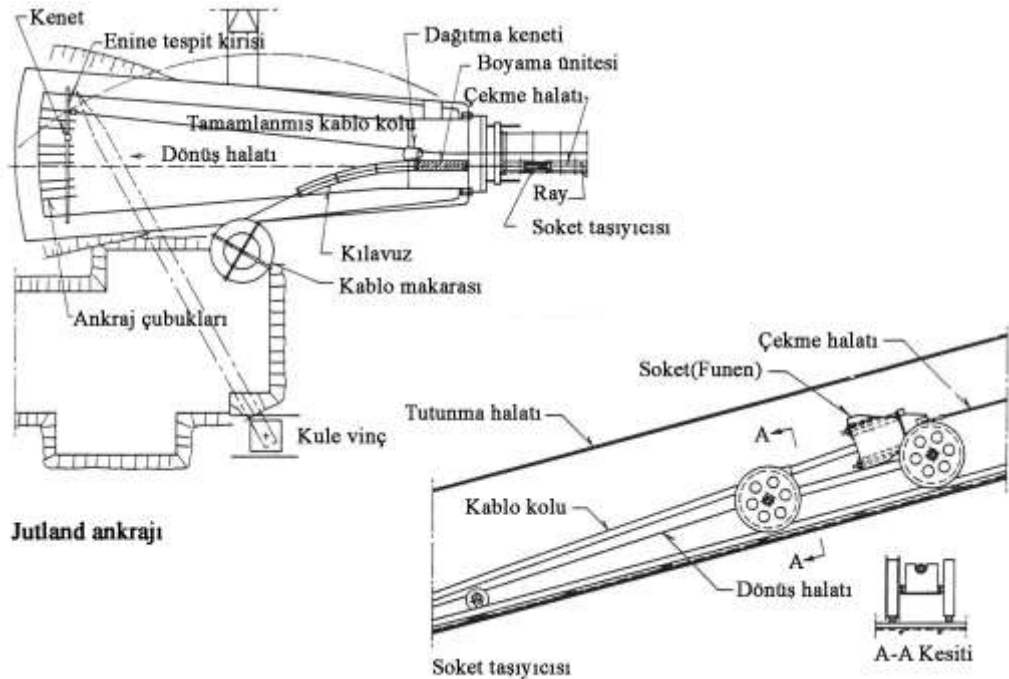
Ana kablolar, her birinde 6 köşe kablo olmak üzere 61 kablo kolundan oluşmaktadır. Ana kablolar iki ankraj bloğu arasında toplam 1.5 km uzunluktadır. Kablo kolları uçlarında dökme çelik soketler ile birlikte ve oluşumlarını sağlayan çelik tellere ek yapılmadan, tek parçalı olarak imal edilmişlerdir. Her kablo kolu nakliye, stoklama ve montaj işlemi dikkate alınarak, makara üzerinde sarılmışlardır. Kablo makaralarının şantiyede yükleme ve nakliyesi 45 ton kapasiteli mobil vinç ile gerçekleştirilmiştir.

Kablo montajı, stok sahasının yer aldığı Jutland sahiliinden başlayarak Funen sahiline doğru gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.17).



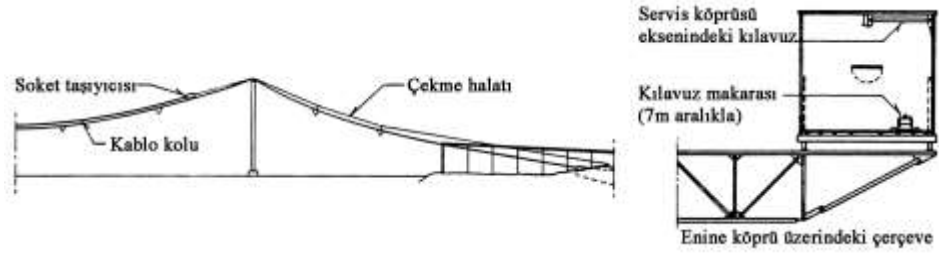
Şekil 6.17 Lillebaelt köprüsü kablo kolları stok sahası [28]

Kablo montajına yönelik işlemler stok sahasından alınan kablo makarasının makara çözücüyeye yerleştirilmesi olmuştur. Sonrasında ise Funen kıyısına yönelenerek serbest soket, çekme kablo su ile tepe vinçine bağlanır ve makaranın bir miktar çözülmesi ile kablo montaj yatağına yerleştirilir ve aynı hat üzerinde bulunan boyama ünitesi ne alınır ve boyanan kablo mobil vinç yardımı ile havai yaya yolu üzerinde bulunan soket taşıyıcısına yerleştirilir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18 Jutland ankrası kablo montaj düzeni ve soket arabası [28]

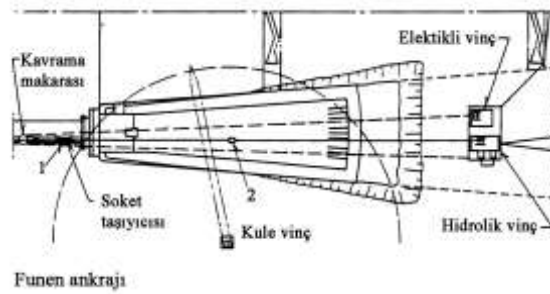
Soket taşıyıcısının eksenı boyunca, havai yayayolu üzerinde, servis köprüleri de dahil olacak şekilde 7 m aralıkla sabit kılavuz makaraları yer almıştır. Bu makaralar sayesinde soket taşıyıcılarına ait çekme ve dönüş kabloları, düz bir eksende hareket edebilirlerdir. Kılavuz makaralarının her iki tarafında ve havai yayayolu üzerinde yer alan 6.25x6.25 cm ebatlarında paralel raylar ise hareket eksenı boyunca taşıma aparatlarına kılavuzluk etmişlerdir. Taşıma işleminde sabit hat ve kılavuzlar üzerinde zorluk yaşanması durumunda, enine köprü ve yayayolu birleşim noktasında, çerçeve tepesinde bulunan sabit makaralar kullanılabilir (Şekil 6.19).



Şekil 6.19 Soket taşıyıcısına düzeni ve kılavuz tertibatı [28]

Kablo çekme işlemi Funen sahiliinde yer alan hidrolik vinçler ile yapılmaktadır ve bu vinçler kablounun 0.5-0.8 m/s hız ile çekilmesini sağlamaktadır. Soketin Funen sahiline ulaşmasından sonra taşıyıcının geri çekilmesi, üzerinde yük olmadığından daha zayıf çekme kapasiteli (16 ton) elektrikli vinçler ile yapılmaktadır. Çekme halatı 16 mm geri çekme halatı ise 10 mm kablo ile oluşturulmuştur.

Soket taşıyıcısı, hareket ekseninin bitiminde 1. pozisyona (1) ulaştığında çekme işlemi durdurulur, soket taşıyıcıdan ayrılır ve Funen sahili, ankrage bloğu üzerinde yer alan kule vinç ile 2 pozisyona (2) taşınır (Şekil 6.20).



Şekil 6.20 Funen ankrage kablo montaj aşamaları [28]

Bu işleme beraber eş zamanlı olarak Jutland sahilinde benzer işlemler uygulanarak, soket ankraj bloğuna, üzerinde kablo kasnağı (en geniş) yer alan kenetlere bağlanır. Bağlantı öncesinde, kablo makarası üzerinde az miktarda kalan kablo, makaradan çözülerek, kul evi niç ile ankraj hücresi nin arkasında yer alan ankraj noktasına taşınır.

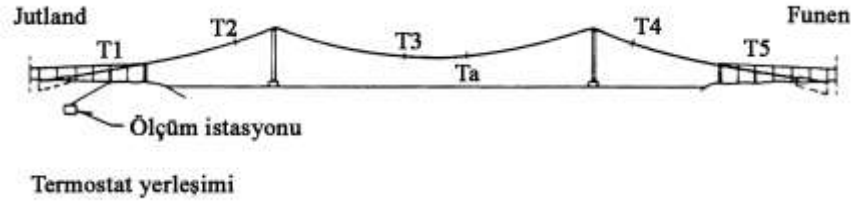
Bu noktada bağlantı tamamlandığı sırada, Funen sahilinde bulunan soket benzer işleme, ankraj bloğuna bağlanmıştır. Kablo kolunun uzunluk ayarları yapılmadan önce, ana kule ve yan kule se merleri ile viyadüklerin üzerindeki geçici mesnetlerde kabloların geometrik düzenleri tamamlanmıştır.

Kablo kollarına, Jutland ve Funen sahilleri arasında 40 ton kapasiteli elektrikli vinçler kullanılarak gerilim uygulanmış ve uzunluk ayarları yapılmıştır. Bu işlem sonucunda, hesaplanan uzunluğa sahip olan kablolar, Funen sahilinde ankrajlar üzerinde bulunan kenet cıvataları tam sıklıkla kablo kol u montajı tamamlanmış olur. Boş soket taşıyıcısı, daha sonra tekrar Jutland sahiline çekilerek işlem aynı şekilde, diğer kablo kolları içinde devam etmektedir. Lillebaelt köprüsünde günde ortalama 5-7 adet kablo çekilebilmiştir [28].

6.2.1.1 Ana kabloların düzenlenmesi

- **Termosta t düzeneği**

Ana kabloların proje değerlerine göre uygun uzunlukta oluşturulabilmeleri için bünyelerinde oluşan ısı farklarından kaynaklanan boy deformasyonlarının ayarlanma işle mi sonuna kadar takip edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla her ana kablo ekseninde 5 adet olacak şekilde, toplam 10 adet kontrol noktası oluşturulmuştur. Her kontrol noktasında önceden yerleştirilmiş ve mevcutta yerleştirilmekte olan kablo koluna monte edilen 2 adet termosta t (T_n) kullanılmıştır. Ana kulelerin ortasına 1 adet, kablolar dan bağımsız termosta t (T_a) yerleştirilerek hava sıcaklığı takip edilmiştir [28] (Şekil 6.21).

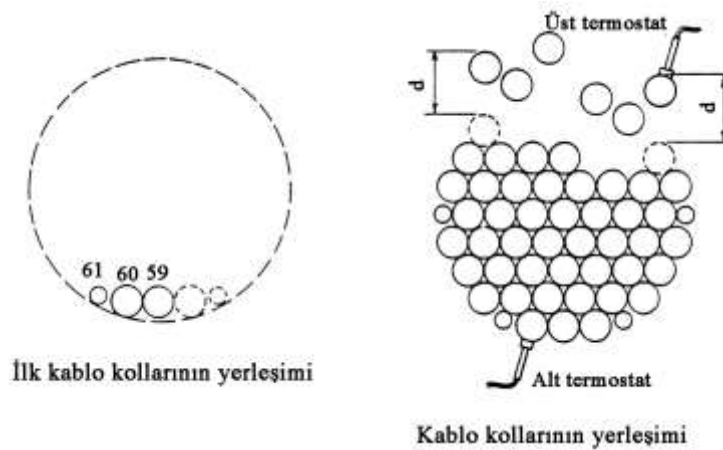


Şekil 6 21 Ter mostat yerleşimi düzeni [28]

- **Kablo kollarının düzenlenmesi ve ayarlanması**

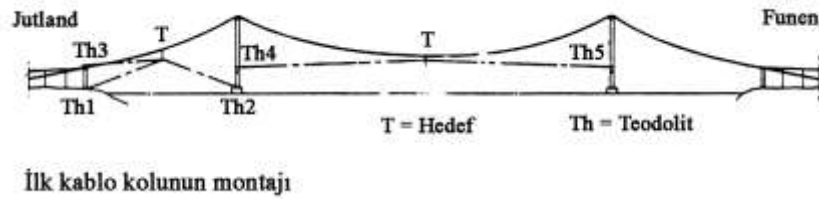
Tanımlanmış olan ana kabloların 2 kriteretamolarak uygun olması gerekmektedir. İlk olarak kablo kollarının, ana kabloda olması gereken geometrik bütünlüğünün sağlanması gerekmektedir. İkinci olarak ise yan ve orta açıklıkta oluşan kablo boylarının, proje değerlerinden sapmadan doğru olarak ayarlanması ve gerek döşeme montajı, gerekse köprünün kullanıldığı süreç içinde yük dağılımının eşit ve dengeli bir şekilde oluşturulmasıdır. Montaj sırasında bu kriterler farklı işlemler olarak ele alınmıştır.

Ana kablolar oluşturulurken, ilk olarak alt kısmında yer alan kablo kolları çekilmiş ve ilk olarak orta ekseninde yer alan 59 numaralı kablo kol u si natri ekseni oluşturmak üzere monte edilmiştir. Diğer kablolar ise sırası ile bu kablounun her iki yanında ve daha sonra üst bölümlerde, si natri ekseni dikkate alınarak montaj tanımlanmıştır (Şekil 6 22).



Şekil 6 22 Kablo kol u yerleşimi düzeni [28]

Kablo montajında ilk olarak montajı tamamlanan 59 numaralı kablo oldukça önemlidir. Bu kablo si metri eksenini oluşturmamasının yanı sıra, diğer kablolar referans oluşturarak bütün uzunluk ve seği mayarları bu kablo üzerinde yapılmıştır. Bu amaçla yönelik olarak yan ve orta açıklığının orta noktalarına jalonlar yerleştirilmiş ve bu noktalara göre uzunluk ayarları kontrol edilmiştir. Orta açıklıkta si metri eksenini, fabrikada belirlenmiş ve markalanmıştır. Bu sebeple orta açıklıkta, 4 ve 5 numaralı istasyonlarda sadece seği mayarlanması yapılmış, yan açıklıkta ise 1 ve 2 numaralı istasyonlarda orta noktalar bulunmuş ve 3 numaralı istasyonda sehim ayarı yapılmıştır (Şekil 6.23).



Şekil 6.23 İlk kablo kolunun montaj sonrası ayarlanması [28]

Uygulama sırasında 59 no.lu kablunun olması gereken uzunluktan daha kısa olduğu belirlenmiş ve ankraj civataları karşılıklı olarak gevşetilerek merkez noktada si metri sağlanacak şekilde kablo tam uzunlukta ve proje değerinden sapma olmaksızın ayarlanmıştır. İlk olarak hazırlanan bu kablo bu sayede diğer kabloların montajına esas oluşturmuş ve bu kablolar daha hızlı ve doğru olarak monte edilebilmişlerdir. 59 no.lu kablo hariçinde diğer tüm kablolar, montaj sırasında oluşabilecek seğim ve uzamalar dikkate alınarak, tam yüklem altında oluşacak son durumlarından, her iki yönde 50 mm'leri alınmak üzere gerili uygulanmış ve sehimazaltılmıştır.

Kabloların uzunluk ve seğim ayarları, gündüz güneş ışığı altında değişken sıcaklıklarda oluşan farklı deformasyonlardan kaçınmak için kablo ve ortası si metrinin dengelendiği ve doğrudan güneş ışığının etkili olmadığı akşam saatlerinde tamamlanmıştır. Bu işlemler her iki kablo kolunda sıra ile, gün aşırı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar ısı dengesinin olduğu, gece 23:00'te başlamıştır.

Gece çalışmasında ilk olarak termostatlardan takip edilen ölçümlerin değerlendirilmesi ve ısı dengesinin kurulmasının tespiti yapılmıştır. Denge olduğu zaman seğim sapmaları (Δd) belirlenerek ölçme istasyonlarına bildirilmiştir.

Ölçümler her kablo için ayrı olarak tespit edilmiştir. Değerlendirme mevcutta ayar yapılmış ve montajı tamamlanmış kablolar ile, ayar yapılmakta olan kablolaraki sıcaklıklar, ayrı olarak kontrol edilmesi dikkate alınarak yapılmıştır.

Ölçümler sonucu belirlenen saptırma standart yöntem ve katsayılar ile hesaplanmış ve uygulamaya dahil edilmiştir. Örneğin bir kablo kolunun orta açıklıkta yer alan bölümü, olması gereken noktadan 147 mm daha yüksek ise, düşey ekseninde oluşan bu fark 0.226 katsayısı ile çarpılarak, elde edilen 39 mm'lik değer yatay eksenindeki gerekli uzamaı belirtmektedir. Kablonun alçakta kalması ise kısalma anlamına gelmektedir. Benzer hesaplar farklı katsayılar ile yan açıklıklarda da yapılmıştır. Hesaplanan uzama veya kısalma değerlerine bağlı olarak ankraj noktalarında civatalar gevşetilmiş, hidrolik vinçler ile ayarlama yapılmış ve daha sonra işlem tamamlanmış anda ankrajlar tekrar sıkılarak sabitleştirilmiştir [28].

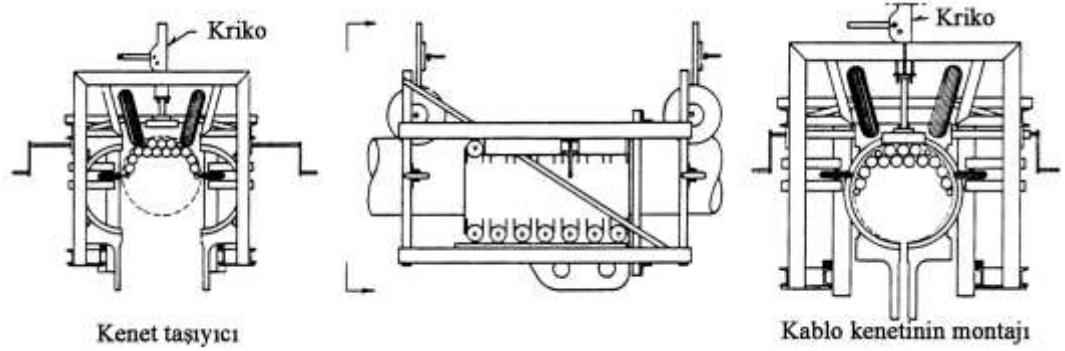
6.2.1.2 Kenetler ve askılar

Ana kablo montajının tamamlanmasını takip eden işlem olarak, askı kablolarına mesnet oluşturulması amacı ile kablo kenetleri, ana kablolar üzerinde, döşeme bloklarında oluşturulan ankraj noktalarını karşılayacak şekilde belirlenen noktalara yerleştirilmişlerdir.

Kenet boyu, kablo eğimine bağlı olarak oluşan bileşke kuvvetin değişken olması sebebiyle yeterli sürtünme kuvvetinin oluşturulabilmesi için farklı olarak 3 tip olarak imal edilmiş ve her tipte 5-7 sıra arasında değişen civatalar ile sıkılarak kablo üzerinde sabitlenmişlerdir. En büyük ebatlı kenet 1.2 ton ağırlığa sahiptir. Kenetler, geçiş eksenine boyunca 12 m aralıklarla ve bu ekseninde maksimum 5 mm tolerans ile yerleştirilmişlerdir.

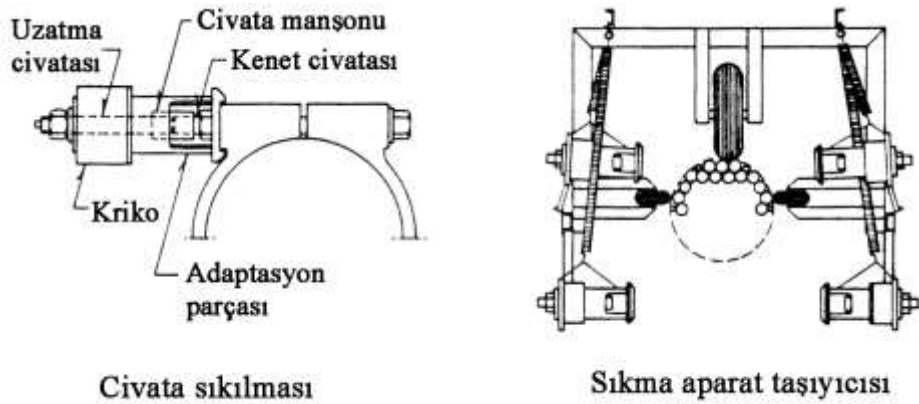
Kenetler, kablo mavnası ile kule ayağına nakledilmiş ve bu noktadan sonra tepesini ile ana kablolar üzerinde hareket edebilen kenet taşıyıcılarına yerleştirilmişlerdir. Kenet arabaları kule tepesinde, çalışma platformu üzerine mesnetlenen ve aynı zamanda döşeme montajında da kullanılmak üzere hazırlanan 40 ton kapasiteli elektrikli vinçler ve bu vinçlere bağlanan çekici ve itici halatlar ile belirlenen noktalara çekilmişlerdir. Kenetler, taşıyıcılara iki parça halinde yüklenmiş ve

bağlantı noktalarında el krikosu ile yukarıda kaldırılarak seviye ayarı yapıldıktan sonra cıvatalar ile bağlanmırlardır (Şekil 6.24).



Şekil 6.24 Kenet taşıyıcı ve kenet montajı [28]

Kenetlerde yer alan cıvatalar, her birisi 120 ton gerilime sahip olacak şekilde eş zamanlı olarak sıkılmışlardır. Sıkma aparatları, kenet taşıyıcılarından ayrı olarak tasarlanmış ve benzer şekilde ana kablo üzerinde vinçler ve çekme kabloları yardımı ile hareket ettirilmişlerdir. Sıkma aparatları, en büyük kenet üzerindeki 14 cıvatayı sıkabilecek şekilde 14 adet krikonun donatılmışlardır. Kablo nun değışen eğimini dikke alınarak, sıkma aparatlarının kenet ile aynı ekseninde bağlanabilmeleri için, aparat ve krikolar arasına yay yerleştirilerek esneklik sağlanmıştır. Kenet bağlantıları, döşeme montajının tamamlanmasından sonra kontrol edilmiş ve gevşeyen cıvatalar aynı yöntemle yeniden sıkılmışlardır [28] (Şekil 6.25).



Şekil 6.25 Kenet cıvatalarının sıkılması ve taşıma ekipmanı [28]

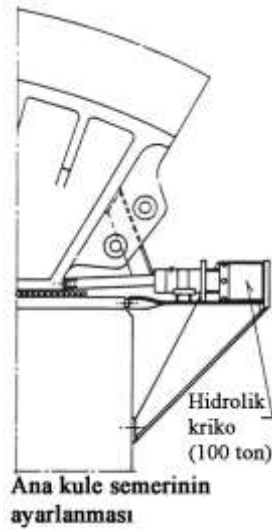
6.2.1.3 Kablo se n e r l e r i n i n a y a r l a n m a s ı

- **Ana k u l e**

Ana k u l e ü z e r i n d e y e r a l a n k a b l o s e n e r l e r i , a n a k a b l o l a r ı n y a t a y e k s e n d e d e n g e l i b i r Ő e k i l d e o l u Ő t u r u l m a s ı n ı v e Ő e k i l a l m a s ı n ı s a ğ l a m a k v e k a b l o l a r ı n m e s n e t l e n d i k l e r i s ı r a d a o l u Ő a n k e s n e g e r i l i n l e r i n i i n d i r g e n e k a n a c ı i l e o l u Ő t u r u l m ı Ő l a r d ı r [11].

T a m a n l a n m ı Ő b i r k ö p r ü d e , a n a k a b l o l a r , s e n e r l e r a r a s ı n d a , ü z e r l e r i n d e o l u Ő a n y ü k l e r s e b e b i i l e p a r a b o l i k b i r Ő e k i l o l u Ő t u r m a k t a d ı r l a r . A n c a k m o n t a j s ı r a s ı n d a , a s m a s i s t e m i n d e n g e b a k ı m a n d a n h e n ü z k a r a r l ı b i r d u r u m o l u Ő t u r m a s ı s e b e b i i l e k a b l o l a r ü z e r i n d e e l a s t i k u z a m a d e f o r m a s y o n l a r ı o l u Ő m a k t a d ı r . H e s a p l a m a l a r s o n u c u n d a m o n t a j s ı r a s ı n d a k a b l o l a r d a , e n e l v e r i Ő s i z y ü k l e n e d u r u m u n d a y a k l a Ő k 2 m ' d e n f a z l a u z a m a o l a c a ğ ı b e l i r l e n m i Ő v e b u s e b e p l e s e n e r l e r , k u l e l e r a r a s ı n d a k a r Ő ı l ı k l ı o l a r a k 1 m s a h ı l y ö n ü n e d o ğ r u g e ç i Ő e k s e n i d o ğ r u t u s u n d a g e r i ç e k i l m i Ő l e r d i r .

A y r ı c a d ö Ő e n e m o n t a j ı n ı n b a Ő l a n ğ ı c ı n d a , i l k k a l d ı r m a i Ő l e m i n i n o r t a a c ı k l ı ğ ı n m e r k e z i n d e n i t i b a r e n b a Ő l a n a s ı v e a s m a s i s t e m i n h e n ü z t a m d e n g e l i d u r u m u o l u Ő m a s ı n d a n d o l a y ı , a n a k u l e l e r d e o l d u k ç a y ü k s e k e ğ i l n e m o m e n t l e r i o l u Ő m ı Ő v e k u l e l e r o r t a a c ı k l ı ğ a d o ğ r u e ğ i l m i Ő l e r d i r . H e s a p l a r d a e ğ i l n e d e f o r m a s y o n u m a k s i m u m 0.5 m o l a r a k b e l i r l e n m i Ő t i r . İ l k b l o k d i ğ e r b l o k l a r ı n y a r ı s ı b ü y ü k l ü ğ ü n d e , 12 m u z u n l u k t a o l d u ğ u h a l d e h e r b i r k u l e n i n 0.3 m d ö Ő e n e v i n c i i s e h e r b i r k u l e n i n 0.15 m e ğ i l n e s i n e s e b e p o l m ı Ő l a r d ı r . B u d e f o r m a s y o n l a r , b i r k u l e i ç i n t o p l a m 0.45 m e k g e r i l i m o l u Ő t u r m ı Ő v e k u l e l e r , m o n t a j ı n b a Ő l a n ğ ı c ı n d a e k o l a r a k 0.2 m k a r a t a r a f ı n a d o ğ r u i t i l m i Ő l e r d i r . S e n e r l e r i n g e ç i Ő e k s e n i n d e k i h a r e k e t l e r i 400 t o n i t n e k a p a s i t e s i n e s a h ı p h i d r o l i k k r i k o l a r , v e i Ő l e m i k o l a y l a Ő t ı r a n , s e n e r i l e t a b a n p l a k a s ı a r a s ı n a y e r l e Ő t i r i l e n s i l i n d i r i k a l t ı k l a r i l e s a ğ l a n m ı Ő t ı r . M o n t a j s ı r a s ı n d a o l u Ő a n d e f o r m a s y o n l a r , i l e r l e y e n e t a p l a r d a , s i s t e m d e n g e l e n d i k ç e a z a l m ı Ő v e b e n z e r Ő e k i l d e ö n l e m a l ı n m ı Ő t ı r [28] (Ő e k i l 6.26).



Şekil 6.26 Ana kule sekerinin ayarlanması [28]

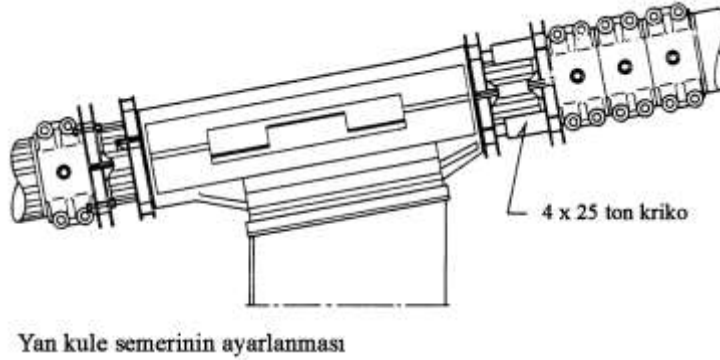
- **Yan kuleler**

Yan kulelere, alt kısımlarında mafsal oluşturularak, üst noktada, geçiş eksenini ile aynı doğrultuda hareket kabiliyeti sağlanmıştır. Myadükler, yan açıklık ile birleştikleri yan kule portal girişinde, bu harekete uyum sağlanmaları bakımından hareketli mesnetler üzerinde oturmaktadırlar. Yan kulelerin düşey eksenindeki dengeleri, montajları tanımlandığı andan itibaren ana kablolar tarafından sağlanmaktadır.

Ana kablo tanımlandığı zaman, yan kule sekerindeki civatalar, kenetleri bağlayan mekanizma ile eş zamanlı olarak sıkılmalıdır. Döşeme montajı sırasında, yan kule sekerlerinde de, ana kule sekerinde olduğu gibi, orta açıklığa doğru hareket oluşmuştur. Bu elastik deformasyonlar; ankraj blokları, ankraj bloğu ile yan kule arasında eğik olarak oluşturulan ve yan açıklıktaki eğik olarak yer alan kabloların bölümlerinde kısmen farklı olarak beliren oluşumların bileşimleri olarak belirmiştir [11].

Yan kulelerin, alt noktalarında betonarme mafsallarının bulunmasından dolayı, yan kule tepesindeki maksimum hareket 0.25 mm olarak belirlenmiş, ve ana kulelerde daha fazla oluşan deformasyonların, bu toleransı aşmaması için, kablolar gerilim uygulanması amacıyla ile, her yan kule sekerine, ana kuleler yönünde 4x100 ton kapasiteli hidrolik krikolar ile ayarlamalar yapılmıştır. Krikolar, gevşeyen kablo

semerine mukavemet edebilmek amacıyla ile 3 adet geçici kenet ile desteklenmişlerdir [28] (Şekil 6.27).



Şekil 6.27 Yan kule seherinin ayarlanması [28]

6.2.2 F. S. M köprüsü ana kablo montajı

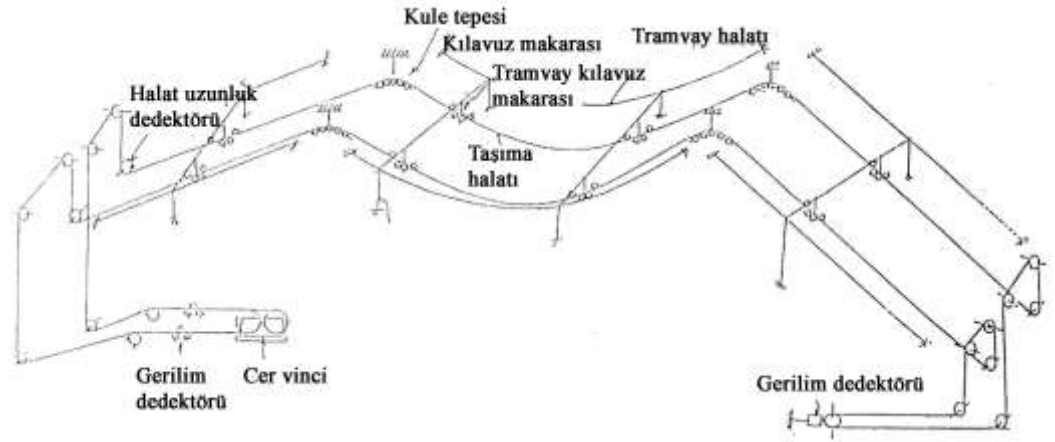
F. S. M köprüsü ana kabloları, 36 adet kablo kolu ile oluşturulmuştur. Ana kablolar, havadan tel taşınması yöntemi ile, ankraj bloklarında yer alan kablo pabuçlarına mesnetilmesi ile oluşturulmuştur. Bu yöntem Lillebaelt ve benzeri köprülerde uygulanan, imal edilmiş kablo kolunun montajından farklı olarak, kablo kollarının bünyesinde yer alan kabloların asma sistem üzerinde imal edilmeleri olarak da tanımlanabilir.

Havadan tel taşıma yöntemi, genel olarak hazır kablo kollarının montajına benzetilebilir, asıl fark her kablo kolunda yer alan çelik tellerin kablo kolunun kesit geometrisine uygun olarak, ayrı ayrı oluşturulmasıdır. Her kablo kolunda ortalama 500 adet çelik tel bulunması ve bu tellerin çekilmelerinin yanı sıra, geometrik düzenleri; gerilim uzunluk ve sehim mayarları ve mesnet noktalarına (kablo seheri, kablo pabucu vs) bağlantıların ayrı ayrı yapılması, ayrıca tellere eklenmesi oldukça fazla sayıda işlemin ve kontrol parametresinin bir arada ele alınmasını gerektirmektedir. Tüm bu oluşumlar değerlendirilirken, F. S. M köprüsü veya bu yöntemle ana kabloları oluşturulan diğer köprülerle, kablo montajına yönelik işlemlerin aynı zamanda bir imalat olduğu ve imalatların fabrikasyon kalitesi ne sahip olması gerekliliği mutlaka dikkate alınmalıdır. Havadan tel taşıma yöntemi, hazır kablo kolu montajına göre daha karmaşık bir işlemdir, ancak kablo boyunun imalat ve montaj bakımından zor ve ekonomik açıdan olumsuz olduğu ortalama kablo

uzunluğu 1500 m üzerinde olması gereken durumlarda bu yöntem çoğu zaman bir zorunluluktur [23].

- **Havadan tel taşıma sistemi**

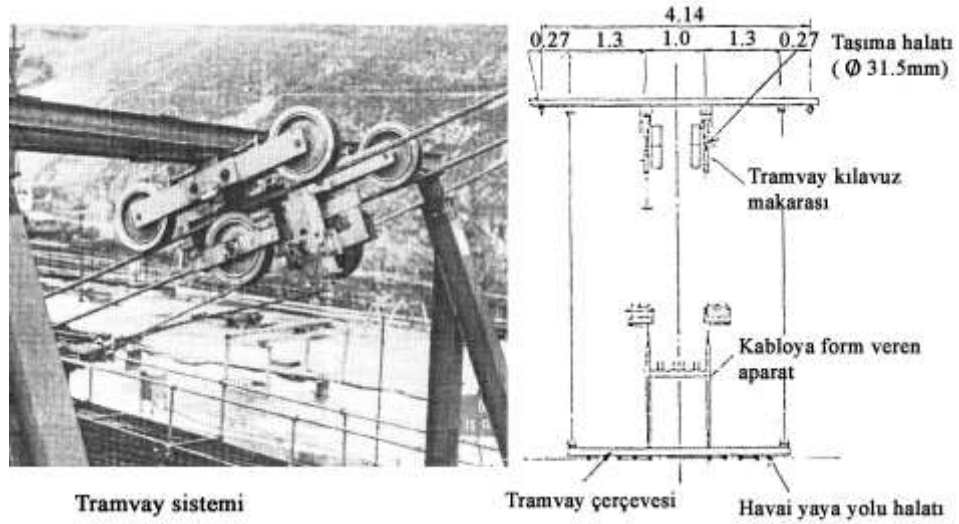
Bu taşıma sisteminde, çekilmekte olan 5.38 mm kalınlığa sahip elik tel sırası ile; kablo pabucundan dağıtım seherine, kule seherine, karşı kule seherine, karşı dağıtım seherine ve karşı kablo pabucuna taşınmaktadır. Sistemi oluşturan teçhizat aşağıdaki gibidir (Şekil 6.28).



Şekil 6.28 F. S. M. Köprüsü havadan tel taşıma sistemi [23]

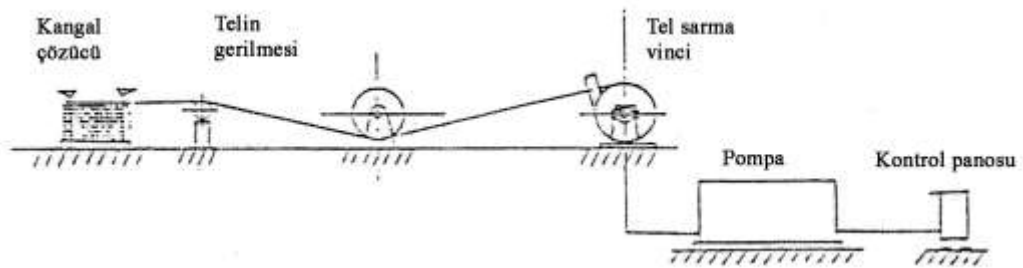
- Tramvay halatı ve kılavuz makaraları
- Taşıma halatı
- Cer vinci
- Yatay çekme makarası
- Gerilim dedektörleri

Tel taşıma sistemi, havai yaya yolu üzerinde kurulmuştur. Tramvay halatı ve kılavuz makaraları, teli çekmek için kullanılan taşıma halatının bağlandığı aparatlar olarak tanımlanmış ve havai yaya yolu üzerinde kurulmuşlardır. Tramvay halatı 45 mm çapında elik halattan imal edilmişlerdir. Kılavuz makaraları ise kule tepesinde ve tramvay kılavuz makaraları olarak havai yaya yolu üzerinde, yan ve orta açıklıklarda, tramvay girişinin üzerinde 20 maralıkla oluşturulmuşlardır. Taşıma halatı ise sürekli bir halat olarak uzun bir birleşimle eklenmiş ve iki ankraj bloğu üzerinde sürekli dönerek, kablo tellerinin kablo pabuçları arasında sarılmasını sağlayan halattır. Taşıma halatı çapı 31.5 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 6.29).



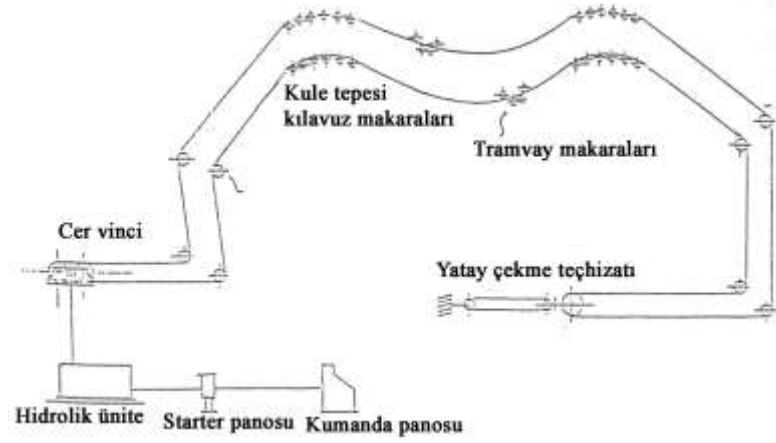
Şekil 6 29 Tel taşıma sistemi ekipmanları detay görünüşü [23]

Havadan tel taşıma öncesinde, çelik teller, şantiyeye nakledildikleri makaradan çözülerek, öngerili m altında yeniden sarılmışlardır. Tel sarma teçhizatı, kangal çözücü, tel germe makarası ve tel sarma vinci den oluşurulmuştur. Çözücü makara sarma vinci ile hareket etmektedir. Tel germe makarası ise teldeki boşluğun azaltılması ve telin sarma vinci üzerinde düzgün sarılması amacıyla kullanılmıştır. Germe makarası ile çelik tellere 60- 100 kgf arasında gerili uygulanmaktadır. Sarma vinci ise asıl olarak telin sarılması ve kangal çözücünün boşaltılması amacıyla oluşturulmuştur. Kaskak çapı y vli sarma işle m i ç i n 2130 mm olarak belirlenmiştir. Sarma hız ı ortalama 9 m/sn' dir (Şekil 6 30).



Şekil 6 30 İlk hareket teçhizatı [23]

Sarma işle m i ta n a m l andıktan sonra, çelik tel taşıma halatına bağlanmı ş ve tel taşıma işle m i başla mıştır. Taşıma teçhizat ı başlıca; ger vinci, çözücü teçhizat ve taşıma sisteminden oluşmuştur (Şekil 6 31).



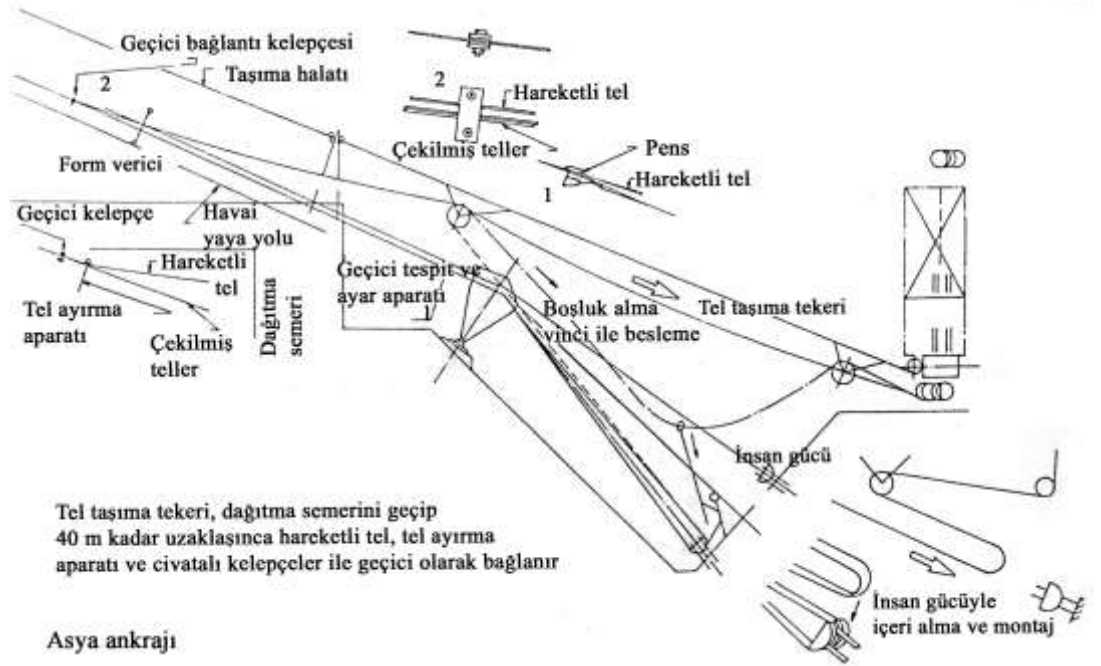
Şekil 6.31 Cer vinci yerleşimi [23]

Cer vinci, sürtünme etkisini arttıran yivlere sahip iki kasnaklı bir vinç olup taşıma halatının iki ankraj hücresi arasında tutularak hareket ettirilmesi sağlanmak amacıyla kurulmuştur. Yatay çekme teçhizatı ise cer vinciye karşılık olarak Avrupa yakasında kurulmuş ve halatın gerilimini sabit tutmak amacıyla kullanılmıştır.

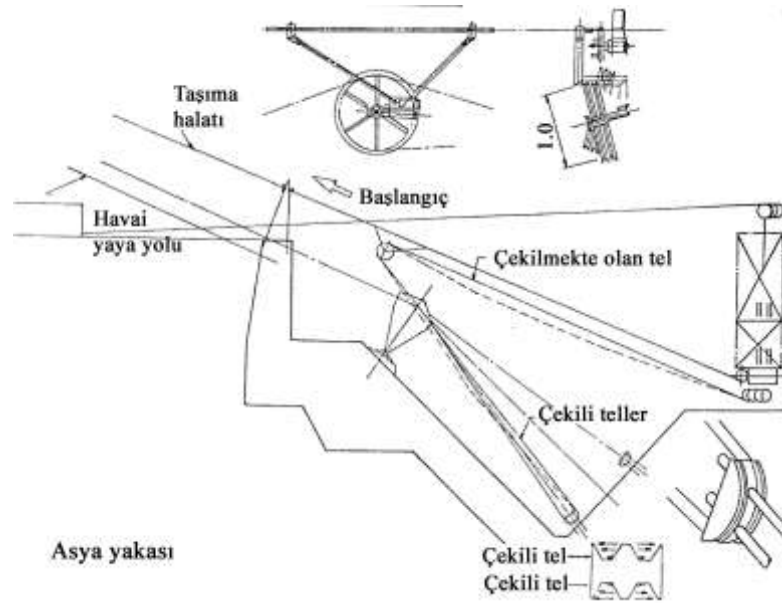
Cer vinci kasnak çapı 1100 mm olup, oluşturduğu halat hızı 4-5 m/sn olarak belirlenmiştir. Telin cer vinciye giriş ve çıkış gerilimleri, telin gerilimine göre değişmektedir. 50-300 kgf arasında gerilime sahip telin, giriş gerilimi 5.1 – 3.9 t, çıkış gerilimi ise 9.7 – 11.2 t arasında olmaktadır.

Boşaltma aygıtı ise, taşıma halatını beslemek amacıyla tasarlanmıştır. Aygıt, cer vinci'nin çalışması ile otomatik olarak hareket alır ve ankraj hücresinin gerisinde yer alan karşı ağırlık kulesinden sürekli gerilim alarak bu kuleler üzerindeki makaralar ile tel gerilimi sürekli sabit bir değerde tutulur. Boşaltıcı vinç 50-350 kgf ankraj gerilimine bağlı olarak 7 ile 10 m/sn hızla sahiptir.

Boşluk alma teçhizatı ise, teli taşıyıcı makaraya bağlamak veya çözmek için kullanılan teçhizattır. Asya ve Avrupa yakalarında 1'er adet olarak yerleştirilen teçhizatlar ile tel hidrolik silindirin torku ile yakalanarak, hidrolik vinç ile hareket ettirilir. Boşluk alma sırasında cer vinci çalıştırılmaz. Boşluk alma teçhizatı, 0.4 m/sn tel hızı oluşturmak ve teli ileri ve geri yönde 20 m hareket ettirme kabiliyetine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır [23] (Şekil 6.32).



(A)



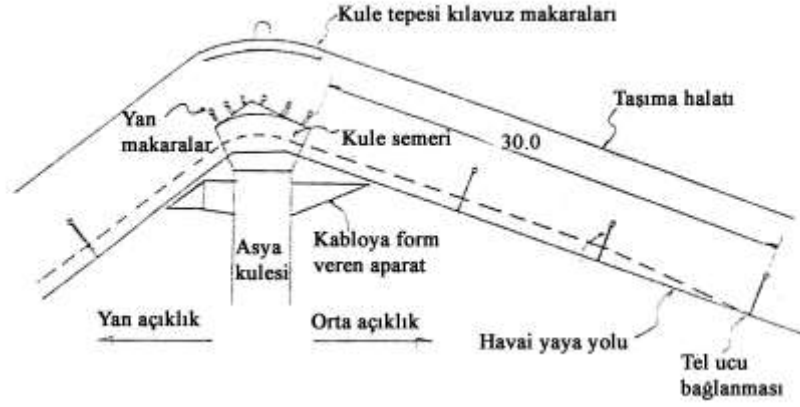
(B)

Şekil 6 34 A B Asya ankrayı tel montaj aşamaları [23]

c) Kule tepeleri

Kule tepesinde yapılan başlıca işler, se mer de tellerin birbiri nden ayrıl ması ve çekilen telin geçici olarak çatılması ndan ibarettir. Teller mani vela ile düzeltilmiş ve geçici

olarak kelepçelenmiştir. Tellerin geçici olarak çatılmaları orta açıklık tarafında yapılmıştır (Şekil 6.35).



Şekil 6.35 Asya kulesi orta açıklık yönünde tel eklenmesi işlemi [23]

Telin bitmesi durumunda, tel çözücüden boşaltılarak, ankraj bloğundan başlamak üzere kule tepesini aşarak, havai yaya yolu üzerindeki yatay kirişe geçici olarak bağlanır. Telin ucu, kule semerinden en az 30 mileride mevcutta döşenmekte olan kablo koluna geçici olarak bağlandıktan sonra tel gerilim kontrolü yapılır ve markalanır. İlave telin çözücüye yüklenmesi ile bu telin ucu taşıyıcı ile geçici olarak bağlanan telin ucuna getirilir, her iki telin ucu, birbirleri ile çakışana kadar çekilir ve uçlar kesilerek ek parçası ile birleştirilir (Şekil 6.36).



Şekil 6.36 Tel eklemeye detayı [23]

Teller asıl olarak semer ve kablo pabuçlarında birleştirilmişlerdir. Bu amaçla yönelik olarak ilk işlemin tel yakalayıcı ile geçici olarak çatılması ve çekilen tellerin çakışma ve kesim yerleri markalanmasıdır. Daha sonra tel ankraj hücresi içinde kablo pabucu veya kule semerinde kesilir. Ancak birleşme işleminin mesnet noktalarının

tamüzerinde ol maması için bu noktalardan en az 1 mileride bağlantı yapılmıştır. Kesilen tel boşluk al m makarası ile birleşim yerine kadar çekilir, her iki tel ucu taşlanarak markalanır ve ek parçası içine yerleştirilir. Birleşim parçası hidrolik kriko ile preslenerek tel eki tamamlanır. Teller birleşim parçasına her iki taraftan 25 mm sokularak bağlantı yapılmaktadır. Bağlantı işleminden sonra sehim kontrolü yapılır [23].

6.2.2.1 Ana kabloların düzenlenmesi

F. S. M köprüsüne ait kabloların düzenlenmeleri ve kontrol kriterleri, Lillebaelt köprüsü ile oldukça benzerdir. Geometrik uygunluk, montaj sırası, ısı defor masyonları ile sehim kontrol ve ayarları da aynı düşünce ile yapılmıştır. Farklı olarak, tellerin ayrı ayrı çekilmesi nedeniyle dolayı, tellerin birbirine karış maması a macı ile havai yaya yolu üzerinde yer alan kabloya form veren aparatlar tarak dişli takoz ile donatılmıştır. Tarak dişli takozlar ile yükseklik ayarları da yapılabilmiş ve kablo sehim mayarlanmıştır.

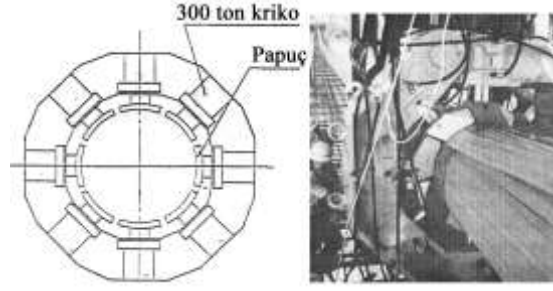
Termostatlar, orta açıklıkta ve her kablo ekseninde 3 adet, yanlarda ise 1'er adet olmak üzere, toplam 10 adettir. Sehim mayarları, Lillebaelt köprüsünde olduğu gibi kablo ve hava sıcaklığı dengelendiği zamanlarda yapılmış ve bu işlemler için kule tepesi ve kablo pabuçlarına yerleştirilen hidrolik kriko lar kullanılmıştır. Kabloların uzunluk ayarları, çelik tel montaj işlemlerinde tamamlanmış olduğundan oluşturulan kablo kollarında uzunluk ayarları fazla önem kazanmamış ve asıl dikkat ısı defor masyonları ve sehim ayarına verilmiştir.

6.2.2.2 Kabloların sıkıştırılması ve kenet montajı

Lillebaelt köprüsündeki işlemlere ek olarak, F. S. M köprüsü kabloları, havadan tel taşıma yöntemiyle oluşturuldukları için, ana kablolar, montaj işleminde sonra sıkılmışlardır ve kablo kolları arasında oluşan boşluklar azaltılarak kesit çapı proje değerlerine getirilmiş ve orta açıklıkta 764 mm yanlarda ise 790 mm ana kablo çapı elde edilmiştir.

Sıkıştırma işlemi ön ve son sıkıştırma olarak 2 aşamada tamamlanmıştır. Ön sıkıştırma işleminde kabloların etrafına, plastik kaplı tel halatlar sarılmış ve gevşek

kablo kolları tahtatok makla dövülmüştür. Son sıkıştırma işleminde ise, her ana kablo ekseninde 2 adet olmak üzere, 4 adet hidrolik sıkıştırma makinası kullanılmıştır. Sıkıştırma makinası herbiri 300 t kapasiteli 8 adet krika ile donatılmıştır. Ön sıkıştırma işlemi 5 m son sıkıştırma işlemi ise 1 m aralıkla yapılmıştır. İşlem ilk olarak orta açıklık merkezinden kulelere doğru, sonrasında ise ankraj hücrelerinden, kulelere doğru gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.37).



Şekil 6.37 Tel sıkıştırma sistemi [23]

Sıkıştırma işleminden sonra, hava sıcaklığı ile kablo sıcaklığının dengelendiği durumda, kenet yerleri markalanmıştır. Markalama işleminden sonra kenetler monte edilmiş ve montaj işlemi, sıkıştırma işleminde olduğu gibi orta açıklığın merkezinden başlamak üzere, kulelere doğru gerçekleştirilmiştir. Kenetler, tramvay halatına yüklenerek, bağlanacakları noktalara taşınmışlardır. Cıvatalar 440 kg/cm² hidrolik basınç altında sıkılmışlardır. Kenetlerin yatay simetri ekseninden iki parçalı olarak ihal edilmelerinden dolayı, düşey ekseninde cıvataların çekme kapasiteleri dönmüş, ve bu anlamda 700 kg/cm² hidrolik basınç altında, çekme kuvveti uygulanmıştır. Asma yapı montajı sonrası gevşeyen cıvatalar tekrar sıkılmışlardır.

Kablo seherleri, kule tepelerine rijit olarak bağlanmışlar ve, kule tepesinde geçiş eksenini boyunca oluşan eğilme deformasyonları, ana kulelere gerili m uygulanarak geriye çekilmeleri ile dengelenmişlerdir. Geri çekme sistemi her kule içini ki adet 64 mm çapında geri çekme, ve bunlara bağlı 34 mm çapında düşey geri çekme halatı ile oluşturulmuşlardır. Bu amaçla her kabloya yaklaşık 30 t çekme gerili m uygulayabilecek kapasitede elektrikli vinç bağlanmış ve geri çekme işlemi gerek kablo montajı, gerekse döşeme montajı sırasında, hesap değerlerine göre gerçekleştirilmiştir [23].

6.3 Döşeme montajı

Asma köprü inşaatlarında, asma sistemin oluşumundaki son süreç, döşeme bloklarının montajının tamamlanmasıdır. Döşeme bloklarının montajı genel olarak iki ayrı kriterde gerçekleştirilmektedir ve işlemler geniş açıklıklı asma köprülerde her ne kadar standarttır. İlk olarak deniz üzerindeki bloklar merkezden yanlara doğru, sonrasında ise kara üzerindeki bloklar, kenarlardan merkeze doğru yatay eksenle taşınarak birleştirilirler.

Daha önceki bölümlerde incelenen Lillebaelt ve F. S. M köprülerinde asma sistemin yan açıklıkta farklı olduğu halde, montaj prosedürü oldukça benzerdir. Bu sebeple montaj süreci açıklanırken, her iki köprüde bir arada ele alınacaktır.

Döşeme montajı her iki köprüde de stok sahasında kontrol ve montaja yönelik aparatların yerleştirilmesi sonrasında başlamıştır. Lillebaelt köprüsünde 12 m uzunluğunda iki blok, kalıcı olarak birleştirilmiş ve 24 m uzunluğunda tam kesit boyunda, montaj aparatları ile birlikte 280 t ağırlığında bloklar oluşturulmuştur. F. S. M köprüsünde ise döşeme blokları 17.92 m uzunluğunda ve tam kesit boyunda, montaj aparatları ile birlikte 250 t ağırlığında bloklardır. Blok ebatları ve ağırlığı sebebiyle blokların, Lillebaelt örneğinde olduğu gibi ikili olarak bir araya getirilmelerine gereksinim vardır.

6.3.1. Montaj ekipmanları

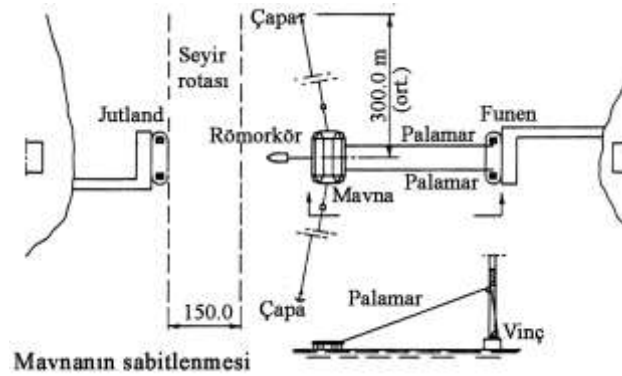
6.3.1.1 Mavnalar

Lillebaelt köprüsünde, döşeme bloklarının şantiyeye nakliyesinde kullanılan mavnalar, üzerinde eklentiler ve değişiklikler yapılarak montaj işleminde kullanılmıştır. Bu anlamda mavnaların üzerine iki adet elektrikli vinç ve bu vinçlere enerji sağlamak amacıyla 1 adet dizel jeneratör eklenmiştir. Mavna üzerindeki vinçler stok sahasındaki döşeme bloklarının mavnaya üzerine çekilmesinde, taşıyıcı arabalara destek amacıyla kullanılmışlardır [28]. Bu durum benzer şekilde F. S. M köprüsü montajında kullanılan mavnada da mevcuttur. İki mavna arasındaki en önemli farklılık, F. S. M köprüsünde kullanılan mavnaların, kendi başına hareket kabiliyetine

sahip olmasıdır. Yükleme işlemini için seviyesi düşürülen mavnalar, daha sonra su tahliyesini takiben kaldırma noktasına hareket etmişlerdir [25].

Lillebaelt köprüsünde döşeme montajı, orta açıklığın merkezinden başlamıştır ve montaj sırasında deniz trafiğini naksa maraması için Jutland ayağında 150 m genişlikte, seyir hattı bırakılmıştır. Bu durumun en önemli sebebi, mavnanın kendinden hareket kabiliyeti olması ve demir atmanın yanısıra geçiş eksenini doğrultusunda bağlanması gerekmektedir [28].

Döşeme blokları montaja yönelik olarak kaldırılmadan önce, mavnanın kaldırma ekseninde dik olarak pozisyon alması gerekmektedir. Bu işleme çapa ve palamarlar ile gerçekleştirilmiştir. Çapalar, geçiş eksenine dik yönde ve simetrik olarak atılmış, palamarlar ise kara yönünde, portal kirişin altındaki makaradan geçerek, köprü ayağındaki vinçe, orta açıklık yönünde ise römorköre bağlanmış ve bu şekilde mavnaya, kaldırma ekseninde sabitlenmiştir. Döşeme montajının devam eden işlemlerinde, seyir rotası, orta açıklığın merkezine kaydırılmıştır. Mavnanın, karşı koyması gereken akıntı hızı maksimum 2 m/sn olarak belirlenmiş ve bağlantılar, mavnanın yüklü ağırlığı dikkate alınarak hesaplanmışlardır (Şekil 6.38).



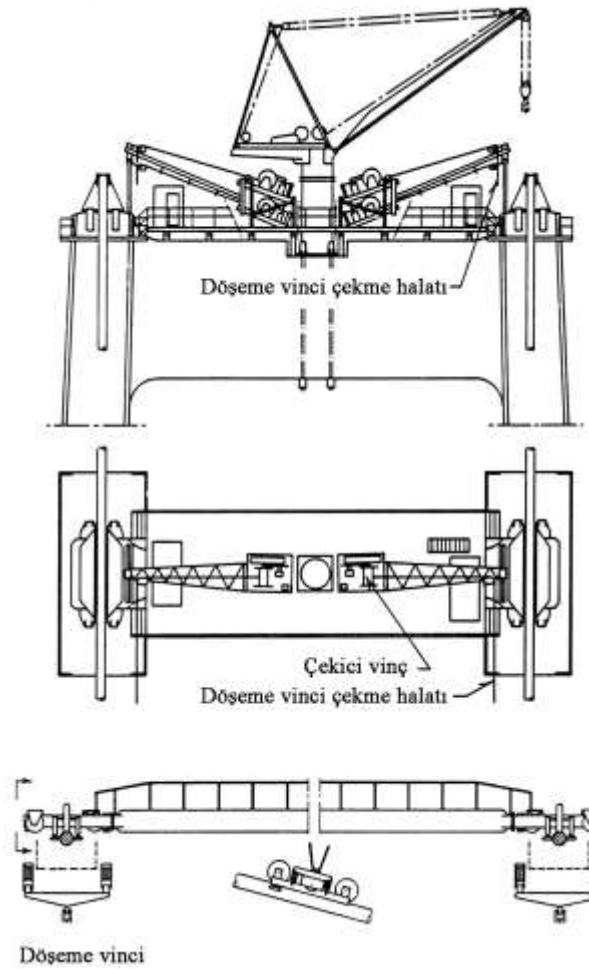
Şekil 6.38 Lillebaelt köprüsü döşeme montajı sırasında mavnanın sabitlenmesi [28]

F. S. M köprüsünde ise mavnanın hareket ve manevra motorları ile donatılması sebebi ile nakliye ve kaldırma ekseninde ayarlanma işlemleri daha hızlı ve etkin olarak tamamlanabilmektedir. Akıntının daha değişken ve düşeyde çift yönlü oluşundan dolayı, ilk 10 kaldırma işlemlerinden sonra tek çapa ile sabitleme yöntemiinden vazgeçilmiş ve daha güvenli olarak demir atmadan durma yöntemi uygulanmıştır. Bu sayede dip

akıntı ile çapının sürüklenmesi ortadan kaldırılmıştır. Akıntı hızı 1.3 m/sn olarak belirlenmiş ve hesaplara yansıtılmıştır [25].

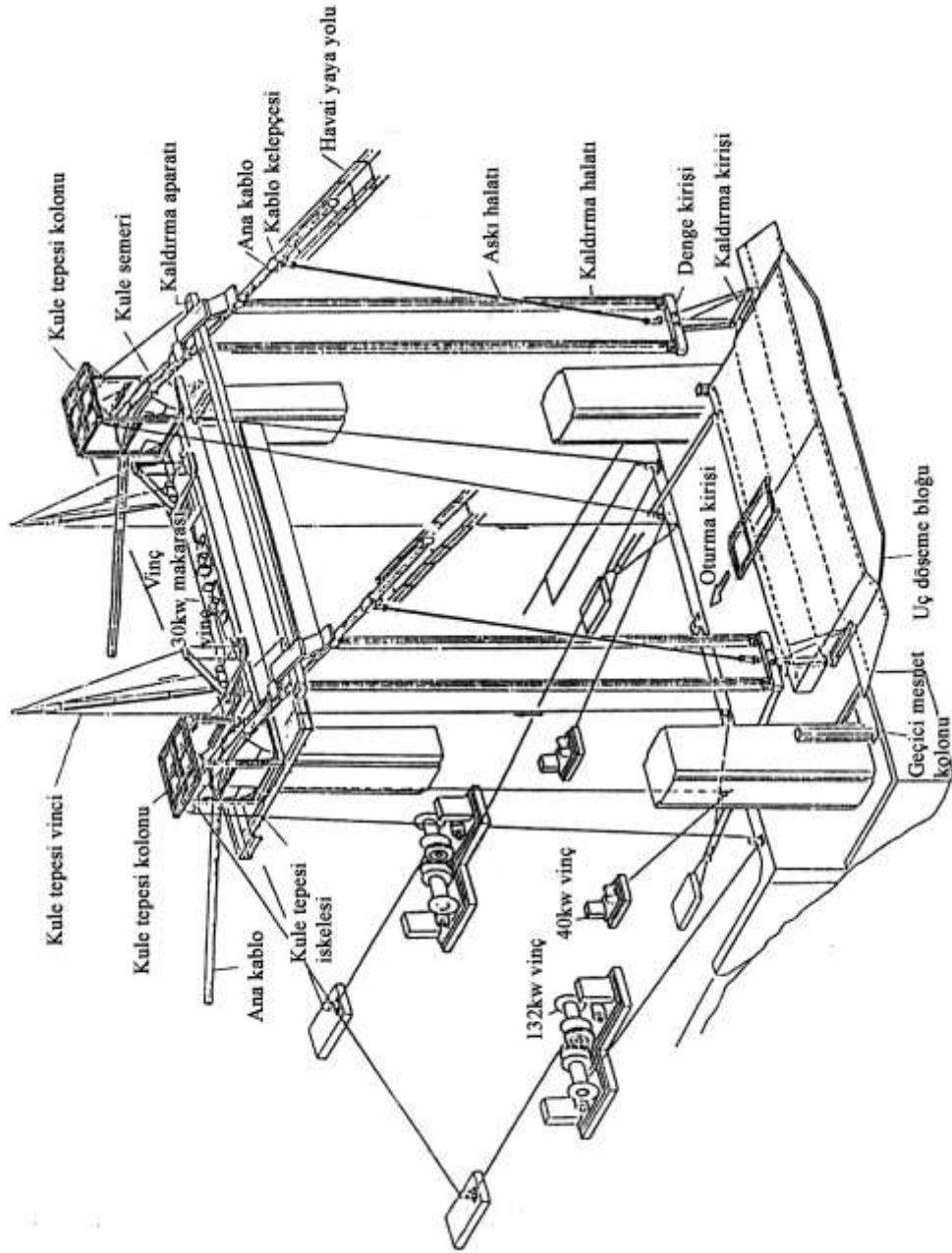
6.3.1.2 Döşeme vinçleri ve kaldırma aparatları

Lillebaelt köprüsünde kullanılan döşeme vinçlerinin hareket edebilmesi ve blokları kaldırabilmesi amacıyla kule tepelerine 4'er adet vinç kurulmuş ve toplam 300 ton kaldırma kapasitesi oluşturulmuştur. Taşıyıcı kablolar 36 mm çapında olup, kule seheri üzerinde oluşturulan kılavuz hattından geçerek havai yaya yolu üzerinden ilerlemiş ve döşeme vinçlerine ulaşmışlardır. Lillebaelt köprüsünde iki adet döşeme vinci kullanılmış ve kablo üzerinde kauçuk tekerler yardımı ile hareket etmişlerdir. Döşeme vinçleri ana kablolar arasında kafes giriş ile bağlanmışlardır. İkili bloklar, her iki döşeme vinci kullanılarak kaldırılmışlardır [28] (Şekil 6.39).



Şekil 6.39 Kule tepesinde yer alan döşeme vinçleri ve kaldırma aparatı [28]

F. S. M köprüsünde de benzer şekilde sistem kurulmuştur. Ancak, döşeme vinçleri, yan açıklığın olaması sebebi ile kule tepesi yerine ankraj bloğunun üzerine yerleştirilmiş ve yük aktarımı için kule tepesine makara yerleştirilmiştir. Döşeme vinçleri, her iki sahilde birer adet 132 kW vinç ve kule tepesinde, kablo sekeri ile aynı düşey ekseninde asma noktası ile oluşturulmuşlardır. Sistem iki adet döşeme vinçinden oluşmuş ancak, her döşeme vinçini orta açıklığın merkez ekseninden her iki tarafında, kendi bölgesine ait blokları kaldırmak üzere ayrı olarak kullanılmışlardır. Kaldırma işleminde 32 mm çapında kablo kullanılmıştır (Şekil 6.40).

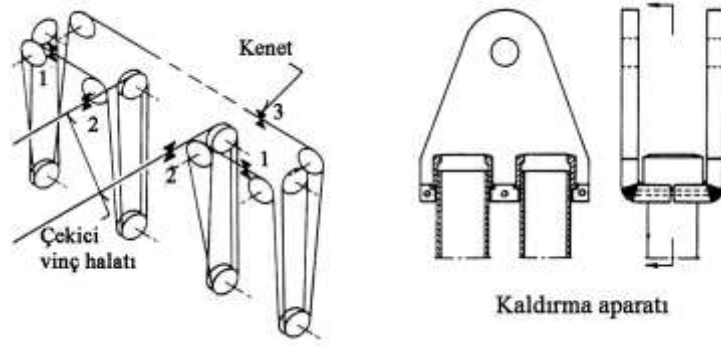


Döşeme ekipmanları genel düzenlenmesi

Şekil 6.40 F.S.M köprüsünde döşeme montaj ekipmanlarının genel düzeni [25]

Her iki köprüde de, kablo montajına yönelik olarak kullanılan makine ve ekipman, servis köprüleri de dahil olmak üzere, döşeme vinçleri tarafından, döşeme montajı başlandıktan sonra sökülür. Döşeme montajına yönelik olarak sadece havai yaya yolu sökülür. (F.S.M köprüsünde, ankraj blokları ve kule arasında yer alan havai yaya yolu, bu bölümde döşeme montajı yapıldığından dolayı sökülür, sadece orta açıklıkta kuleler arasındaki bölüm bırakılır) [25].

Lillebaelt köprüsünde kullanılan kaldırma aparatları, kafes kirişler üzerinde oluşturulan makara sistemi ile donatılmışlardır. Kaldırma sırasında döşeme vinçleri kablo kenetleri üzerinde mesnetlenmiş ve yatay yönde olası bir kayma hareketine karşı sabitlenmiştir. Ana kule üzerinde yer alan vinçlerden uzatılan kablo, önce döşeme vinçlerine ulaştırılmış, ardından makara sistemine dahil edilerek, hem döşeme vinçlerinin yatay hareketi, hem de kaldırma aparatlarının düşey hareketleri sürekli bir kablo sistemi ile çözülmüştür. Bu sayede, kule veya döşeme vinçi üzerinde, ilave kaldırma vinçi kullanılmadan sistem oluşturulmuştur. Kullanılan kablo 2 km uzunluğundadır. Kaldırma aparatları üzerinde yer alan 1 no.lu kenet, kablo seheri üzerinde döşeme vinçlerini sabitlemek, 2 no.lu kenet kablounun sehim ve kayma ayarı, 3 no.lu kenet ise işlemi sırasında, kablouyu, herhangi bir ana kablo kenetinde sabit tutabilmek amacıyla kullanılmıştır [28] (Şekil 6.41).



Şekil 6.41 Lillebaelt köprüsü döşeme kaldırma sistemi ve bağlantı parçaları [28]

F. S. M köprüsünde kullanılan kaldırma aparatı ve makara sistemi benzer niteliktedir.

6.3.2 Döşeme bloklarının kaldırılması

6.3.2.1 Lillebaelt köprüsü

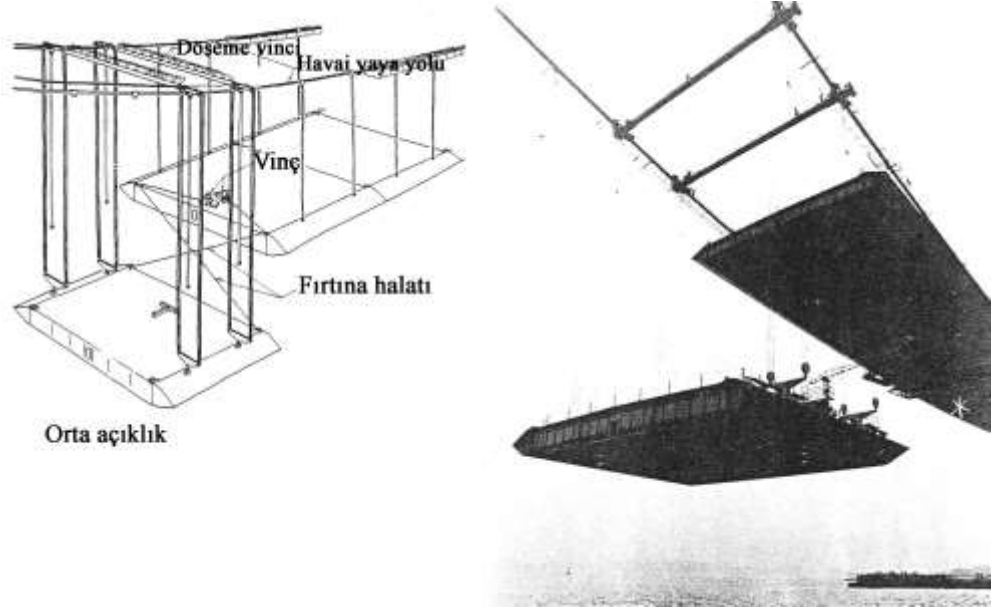
- Orta açıklık

Döşeme montajı orta açıklığın merkezinden başlayarak sıra ile her iki kuleye doğru döşeme bloklarının kaldırılması ve birleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak monte edilen blok, kulelerde oluşan eğilme momentlerini azaltmak için, orta açıklığın merkeziindeki ilk 3 blok 12 m uzunluğunda tek blok olarak asılmıştır.

İlk blok asıldığı sırada, ana kabloların seviyeleri 3.3 m düşmüş ve navna 0.5 m yükselmiştir. Bu sebeple kaldırma mesafesi 3.8 m azalmış ve işlem 40 dakikada tamamlanmıştır. Montajın devam eden aşamalarında sistem dengeli bir yapıya ulaştıkça kablo sehi mleri azalmıştır. 12 m uzunlukta 3 bloğun montajından sonra, ikili bloklar monte edilmiş ve orta açıklıktaki tüm bloklar düşey kaldırma yöntemi ile biraraya getirilmiştir.

Orta açıklıkta yer alan bloklara ulaşma sadece havai yaya yolu ile sağlanabildiğinden, blokları birleştirmek amacıyla kullanılan makine, ekipman ve malzemeler, başka ilk blok olmak üzere, stok sahasında döşeme bloklarına yüklenmiştir. İlk blokla beraber kaldırılan iki adet elektrikli vinç ile, rüzgar yüklerine karşı fırtına halat sistemi kurulmuştur. Montaj sırasında kaldırılan blokların yatay seviyeleri ise, su terazisi ile takip edilmiştir (Şekil 6.42).



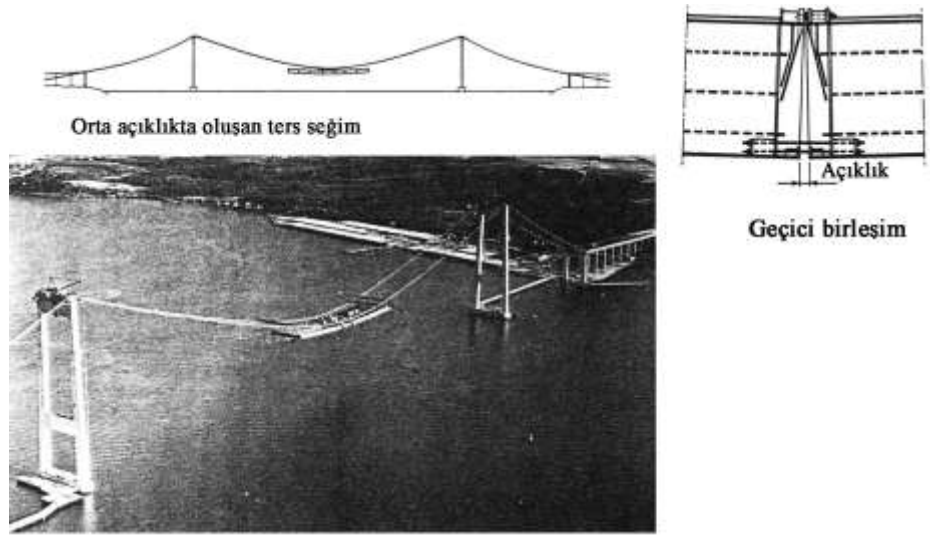
Şekil 6.42 Orta açıklıkta döşeme bloklarının kaldırılması [28]

Kaldırma işlemi sonrasında, bloklar, imalatları sırasında yerleştirilen ve deneme montajlarında da kullanılan birleşim elemanlarının civatalı birleşimler yapılarak yatay ve düşey eksenlerde, proje değerlerine uygun şekilde bir araya getirilmiştir.

Bu sayede, montaj sonrasında kaynakla yapılan kalıcı birleşimler daha kolay ve toleranslar dahilinde yapılabilmiştir.

Geçici bağlantılar, üst bölümde, yatay ekseninde oluşan kesme kuvvetlerine dayanabilecek kapasitede yüksek mukavemetli cıvatalar ile sağlanmıştır. Alt bölümde ise, bağlantı noktalarında, oluşan çekme kuvvetine karşı, ikili çekme çubukları ile birleştirilmiştir. Geçici bağlantılar ile montaj tamamlanıp, sistem dengesine kavuşana kadar, döşeme bünyesinde oluşan iç gerilmelere mukavemet elde edilmiş ve bloklar arasında bütünlük sağlanmıştır.

Orta açıklıkta, geçici bağlantıların, asıl olarak üst bölümde oluşturulmalarından dolayı, ters yönde kavis oluşmuştur. Bu sebeple döşeme blokları alt bölümlerinden tam olarak birleştirilememişler ve alt kısımlarında boşluk oluşmuştur. Montajın devam eden aşamalarında, hesaplamalar dahilinde, ek sıkma uygulanarak boşluklar azaltılmıştır (Şekil 6.43).

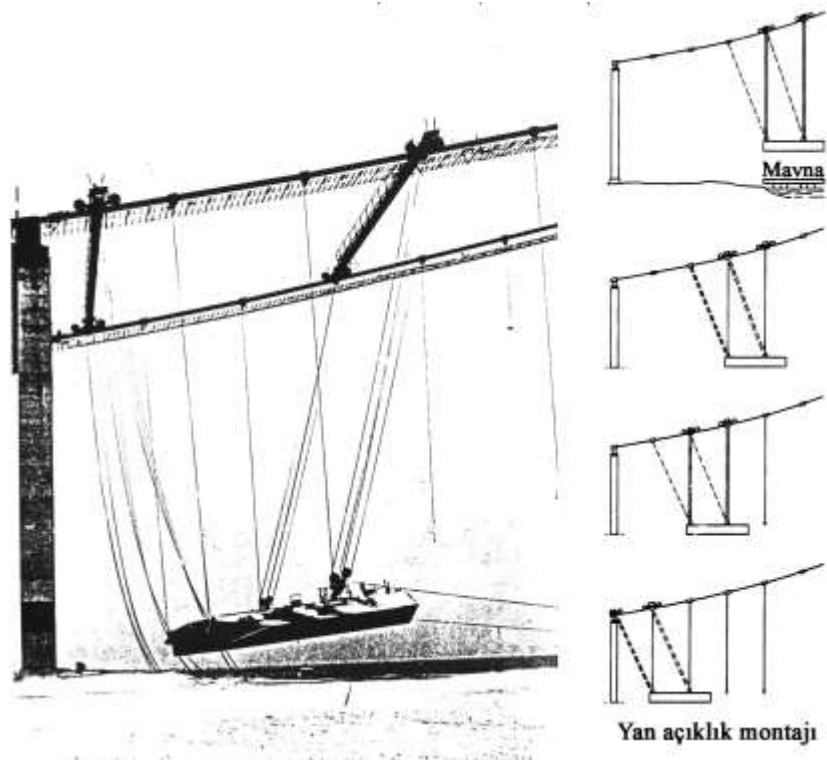


Şekil 6.43 Montaj sürecinde kalıcı bağlantı yapılmadan blokların durumu

Orta açıklıkta, montaj henüz tamamlanmadan ve montajı tamamlanan kısım henüz 200 m uzunluğa ulaşmış durumda, yan açıklıklarda, ana kabluyu zorlayacak oranda gerilim oluşmuş ve kulelerin üzerinde oluşan eğilme momentleri sınır değerlerine ulaşmıştır. Bu sebepten dolayı, yan açıklıkların, yan kule tarafında yer alan 24 m uzunluğunda iki uç blok karşılıklı olarak monte edilmiş ve sistem dengelenmiştir. Orta açıklıkta ki montaj bu işlemden sonra tamamlanmıştır [28].

- **Yan açıklıklar**

Lillebaelt köprüsünde yan açıklıkların, büyük kısmının karada olması ve mavnanın sahile belirli mesafeye kadar yanaşabilmesi sebebi ile yan açıklıklarda orta açıklıkta uygulanan düşey kaldırma tekniği, yatay taşıma yöntemi ile bir arada kullanılmıştır. Bu yöntemde, döşeme bloğu mavnaya iletilerek köprü ayaklarından 50 m uzaklıkta sabitlenmiş ve bu noktalarda döşeme vinçleri ile kaldırılmış ve bu nokta üzerinde, düşey ekseninde yer alan askılara geçici olarak asılmışlardır. Daha sonra askılar, yan kuleye doğru birer kenet atlayarak yeniden geçici olarak bağlanmışlar ve bu sırada askı kablolarının oluşturduğu eğiklikten dolayı hafifçe gerilmişlerdir. Bu sayede yatay ekseninde bir çekme kuvveti oluşmuş ve döşeme vinçlerindeki halatın gevşetilmesi ile döşeme blokları yan kuleye doğru 12 m mesafesinde yatay bir hareket ile ilerletilmişlerdir. Daha sonra döşeme vinçleri aynı yönde 24 m ilerletilmişler ve aynı işlem döşeme bloğunun asılma noktasına kadar devam etmiştir. Aynı işlem mavnanın düşey kaldırma yapabilmediği ve ana kule tarafında kalan son iki blok hariçinde, yan açıklıkta yer alan bütün döşeme bloklarına uygulanmıştır [28] (Şekil 6.44).



Şekil 6.44 Yan açıklıkta döşeme bloklarının kaldırılması ve taşınması [28]

6.3.2.2 F. S. M. Köprüsü

F. S. M. köprüsüne ait döşeme blokları, sistem tek açıklıklı olduğu halde her iki sahilde yaklaşık 450 m uzunluğunda bölüm kara üzerinde yer almış ve döşeme montajı bu haliyle, Lillebaelt köprüsünün 3 açıklıklı sistemine benzer şekilde yapılmıştır.

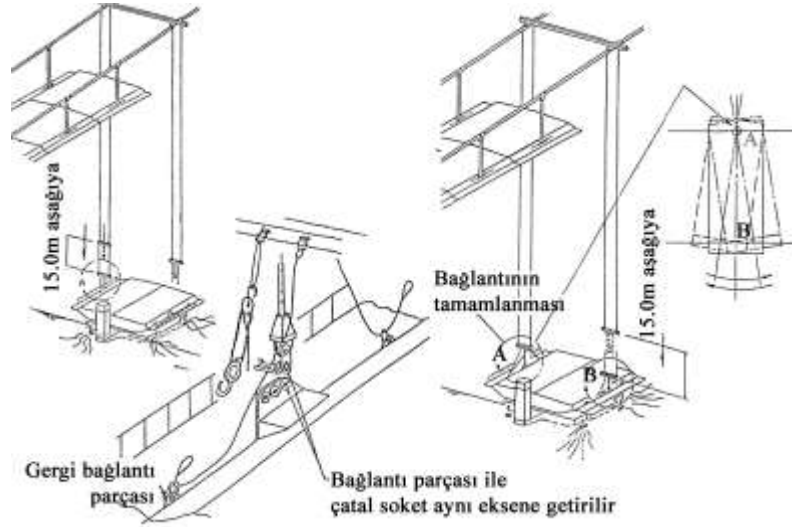
Deniz üzerinde yer alan yaklaşık 650 m uzunluğunda 36 blok, orta açıklığın merkezine doğru simetrik olarak yerleştirilmiştir. Kara üzerindeki blokların montajına kulelerden itibaren başlanmış ve hemen hemen simetrik olarak merkez eksene doğru tamamlanmışlardır.

Deniz üzerindeki bölüm düşey kaldırma yöntemi ile monte edilmiş, kara üzerinde ise düşey kaldırma ve yatay taşıma metodu uygulanmıştır. F. S. M. köprüsünde kullanılan kaldırma aparatı iki adet olduğu halde, kaldırma işlemi merkez eksenin her iki tarafında birer adet kaldırma aparatı ile gerçekleştirilmiş ve bloklar ağırlık merkezlerine denk gelecek şekilde iki noktadan bağlı olmalarından dolayı, montaj ve geçici bileşimlerde bloğu dengelemek üzere karşı ağırlık oluşturulmuştur. Kaldırma aparatı iki askı noktasına sahip olup, askılar Lillebaelt köprüsünde olduğu gibi iki vinç makarasına bağlı olup, 132 kw gücünde elektrikli vinç ile donatılmışlardır. Merkezde yer alan ilk 3 blok rijit, diğer bloklar ise serbest olarak birleştirilmişlerdir. Montaj sırasına göre bu bloklar 31, 32 ve 30 no.lu bloklardır. Her iki sahilde kuleden itibaren, salınım yöntemi ile monte edilen son bloklar, 13. bloklar olmuş ve döşemenin kapanması sırasında gereken geri çekme yaklaşık 50 cm olmuştur [25] (Şekil 6.45).

- **Merkez Bloklar**

Merkez bloklar, açıklığının si metri ekseninde, merkez blok olarak 31 ve yanında yer alan 30 ve 32 no.lu bloklardır.

31 no.lu blok ilk monte edilen blok olup, kuleler üzerinde oluşturduğu eğilme momenti oldukça yüksektir. Döşeme bloğu mavnaya ile kaldırma noktasında sabitlendikten sonra askı kaldırma aparatının kancası indirilmiştir ve ayarlamaların yapılabilmesi amacıyla geçici olarak deniz seviyesinden 20 m yukarıda tutulmuştur. Mavnanın tam olarak yatay eksenlerde ayarlanması ve son kontrollerin tamamlanmasından sonra, aparatın pimi, blok üzerindeki kaldırma aparatlarına takılmıştır. Kaldırma aparatı kablosu yavaşça sarılarak her iki kabloun gerilmesi dengelenmiştir. Bu sırada ankraj bloğu üzerinde mesnetlenen 132 kW vinç, kule tepesindeki makara; ve bağlantı noktasındaki tüm civatalar kontrol edilmiş ve kaldırma işlemi başlatılmıştır. Kaldırma aparatlarına yüklenme yapıldığı zaman, mavnaya bloğun altından çekilmiştir (Şekil 6.46).



Şekil 6.46 Döşeme bloklarının mavnadan boşaltma işlemi [25]

Kaldırma işlemi tamamlandığında, blok yükünün daha etkin dağıtılabilmesi için, her noktada ikişer tane olmak üzere her döşeme bloğunda dört adet askı halatı bulunmaktadır. Askı halatları bağlanırken özel bir alete gerek duyulmamış, pim yuvası ile aynı konuma geldikten sonra bağlantı el ile yapılmıştır. 31 no.lu bloğun ağırlık merkezi askı halatı bağlantı noktası ile çakıştığından, kaldırma askı halatının bağlantı noktası, ağırlık merkezinden 780 mm kaydırılmıştır. Bu sebeple bağlantı

noktasının aksi yönünde, bloğun ucuna karşı ağırlık uygulanarak denge sağlanmıştır. Bu ağırlık, askı halatı bağlantıları yapıldıktan sonra bu halatlara yüklenmesi yapıldığında, karşı ağırlığın yeri değiştirilmiştir. (Karşı ağırlık olarak 4 t ağırlığında vinçli forklift kullanılmıştır). Son olarak 30 ve 32 no.lu bloklar ile bağlantı yapılana kadar geçen sürede bloğun dengesini korumak amacıyla ile askı noktasının her iki yanında yer alan diyaframlara, önceden yerleştirilen geçici bağlantı parçaları aracılığı ile 4 adet 20 t kapasiteli cereskal bağlanmış ve kaldırma aparatı ile her teke 2 t gerili uygulanarak 31 no.lu blok montajı tamamlanmıştır.

Daha sonra kaldırılan 32 no.lu bloğun montaj aşamaları, askı halatı piminin yerleştirilmesine kadar, 31 no.lu blok ile aynıdır. Farklı olarak dengenin sağlanması amacıyla ile, bu blokta kullanılan cereskal, 31 no.lu bloğun aksi yönünde tek taraflı olarak oluşturulmuştur ve 31 no.lu blok yönünde, dik olarak asılan askı halatının, eğik halata göre daha avantajlı olantısına kapasitesinden faydalanılmıştır. Kaldırma aparatı yükünü yavaşça bırakırken bloğun eğimini kontrol edilerek karşı ağırlık hareket ettirilmiştir. Yükleme ve dengeleme işlemlerinden sonra blok adaptasyon parçaları civatalar ile bağlanmış ve 31 no.lu bloğa bağlı cereskala aşırı gerilim etkisini engellemek amacıyla ile karşı ağırlık birleşim eksenine taşınmıştır. Blok birleşimi sonrasında döşemeler arası boşluk yaklaşık 40 mm olarak oluşmuştur. Alt adaptasyon parçası da sıkıldıktan sonra 32 ve 31 no.lu döşemeler, rijit bağlantı yapılması için çift taraflı teğel kaynağı ile 8 uzunlukta kaynaklanılmışlardır. 31 ve 32 no.lu blokların montajında her iki döşeme vinci aynı anda kullanılmış ve rijit bağlantılar tamamlanana kadar sistemi desteklemişlerdir.

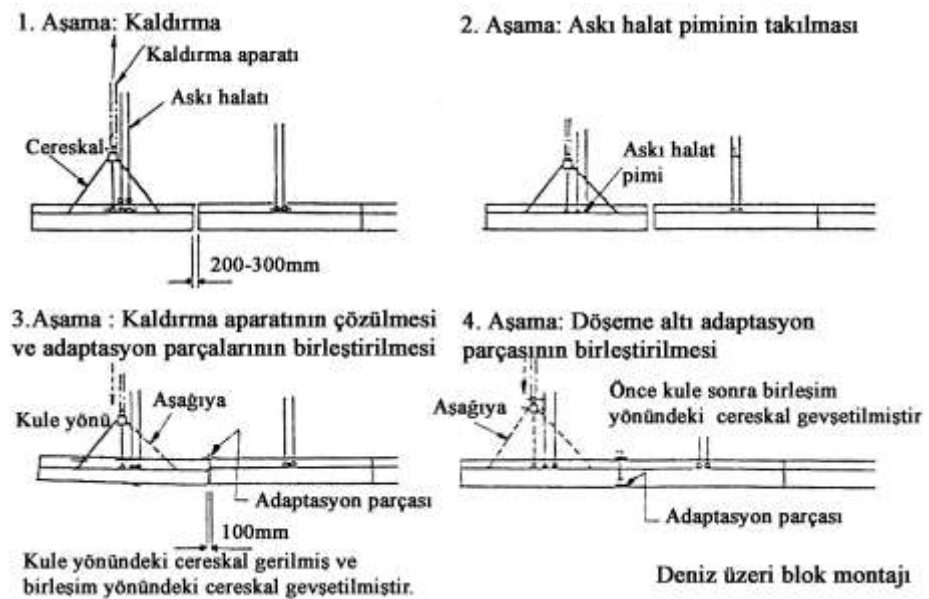
30 no.lu blok, önceki blokların tamamlanması ile daha kolay bir şekilde tamamlanmıştır. 31 no.lu blok üzerindeki kaldırma aparatı yer değiştirmiş ve bu bloğu kaldırmıştır. 30 no.lu blokta kaldırma ve montaj prosedürü 32 no.lu blokla aynı olup, önceki bloklar arasında rijit bağlantı sağlandığından, eğilme momenti etkisi daha azalmış ve karşı ağırlık kullanılmamıştır [25].

- **Deniz üzerindeki standart bloklar**

Mavnalı, düşey kaldırma yapılabileceği mesafeye kadar yanaştırılmış ve 14 ve 53 no.lu bloklar arasında yer alan 36 blok aynı yöntemle monte edilmiştir. Bloklar, bu aralıkta, merkez bloklar hariç, esnek olarak birleştirilmişlerdir. Blokların kaldırma

aparatına asılma noktaları ve ağırlık merkezleri çakışktır. Bloklar kaldırıldıktan sonra, sırasıyla askı halatı pimi takılmış, adaptasyon parçaları birleştirilmiş ve kaldırma aparatının yükü askı halatına aktarılmıştır.

Kaldırılan blok ile, daha önce monte edilmiş blok arasında ortalama 200-300 mm açıklık kalmış, bu açıklık bloğun yükü askı halatlarına iletilirken azalmıştır. Birleşme aşamasında, blok ağırlık merkezinden 780 mm kaydırılmış olan kaldırma aparatı yükü bırakırken, blok birleşme ekseninin aksi yönüne eğilmeye çalışacağı sebebi ile, kule tarafındaki eğimli halata bağlı cereskal gerdirilmiş ve blok birleşimi tarafındaki cereskal gevşetilerek adaptasyon parçaları aynı hizaya getirilmiştir ve üst bölümde yer alan adaptasyon parçaları yüksek mukavemetli cıvatalar ile sıkıştırılmışlardır. Kaldırma aparatının yükü boşaltılırken kule tarafındaki cereskal gevşetilmiş ve tahliye alt yüzeyindeki adaptasyon parçaları aynı şekilde birleştirilmiştir. Kaldırma aparatında oluşan yük askı halatına tamamen aktarıldıktan sonra pimi çıkartılmış ve sonraki montaj yerine taşınmıştır [25] (Şekil 6.47).



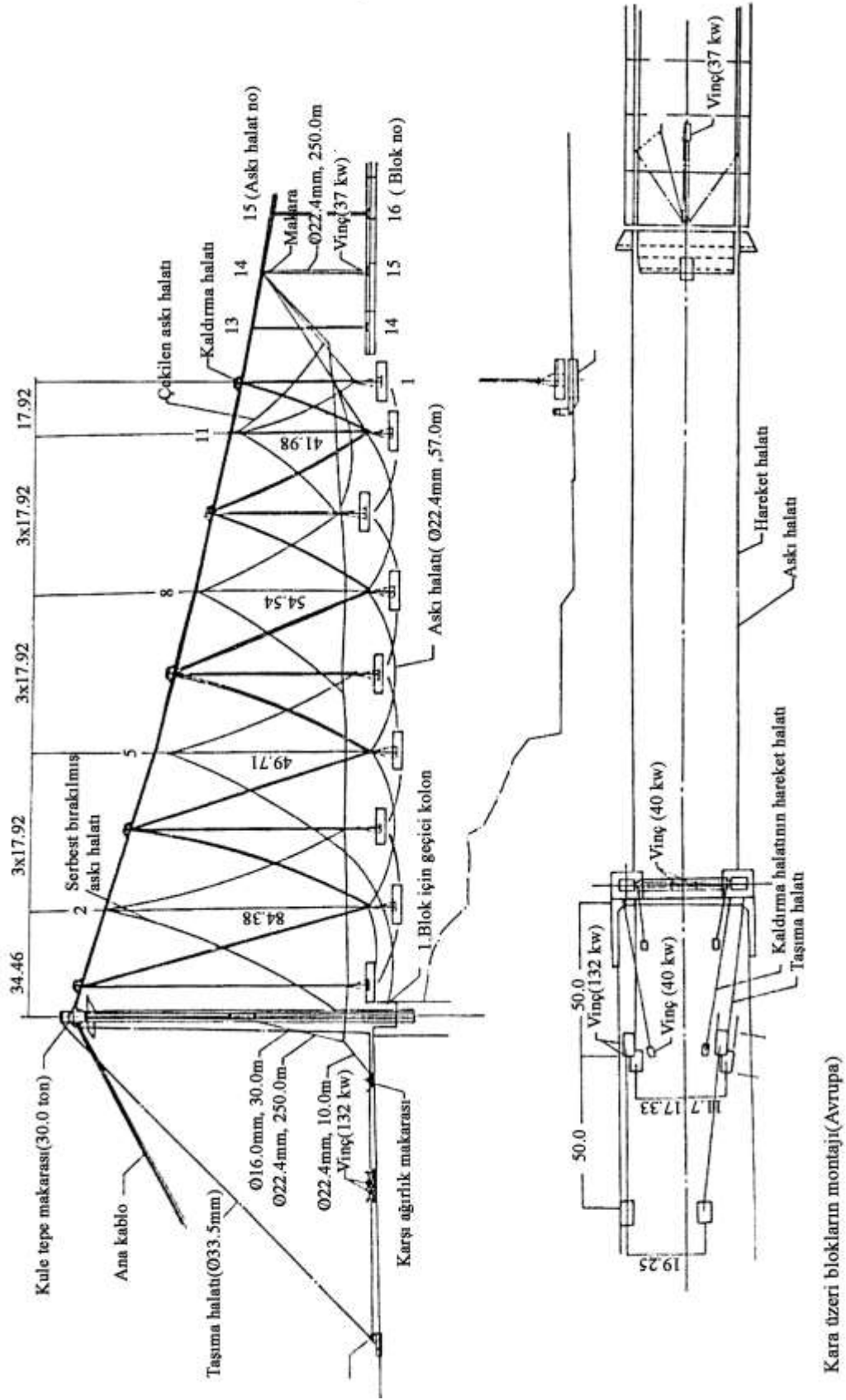
Şekil 6.47 Deniz üzeri blokların montaj aşamaları [25]

- **Kara üzerindeki standart bloklar**

Deniz üzerindeki blokların montajı tanımlandıktan sonra, kara üzerindeki bloklar tanımlanmıştır. Montaj işlemi özetle, mavnadan düşey kaldırma, askı ve taşıma halatlarıyla yatay eksende taşıma şeklinde uygulanmıştır. Askı halatları, 3 sıratlanmak üzere montaja dahil edilmiş ve sırası ile Avrupa yakasında; 2, 5, 8 ve 11 nolu askılar ile Asya yakasında 3, 6 ve 9 nolu askılar monte edilerek yatay taşıma işleminde kullanılmışlardır.

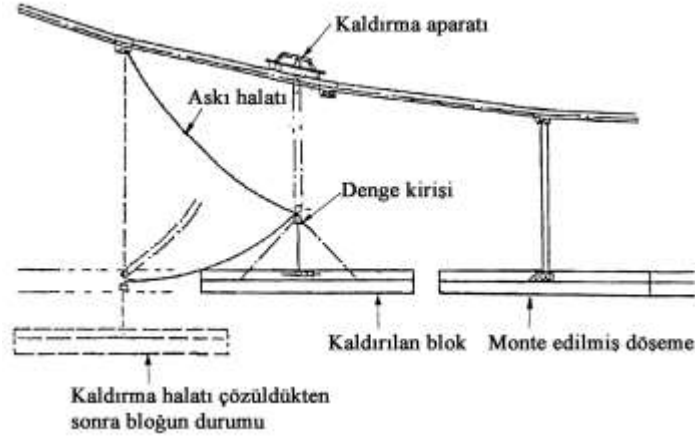
Blokların yatay eksende hareketini sağlayan çekme (salınım) halatı, 22.4 mm çapında olup, askı halatlarının arasına, döşeme seviyesinin üzerinden bağlanmış ve 3 askı halatı aralığı mesafesinde (53.76 m aralıkla), mevcutta monte edilen askı halatlarına bağlanmıştır. Bu halat çekmenin yanı sıra askı halatlarına kılavuzluk etmiştir. Çekme halatının uçları, montajı tanımlanan döşeme üzerinde 37 kw sahilde ise 30 k Welektrikli vinçlere bağlanmıştır ve bu şekilde geçiş eksenini boyunca her iki yönde hareket sağlanmıştır.

Döşeme blokları, deniz üzerindeki bloklarda aynı yöntemle kaldırılmış ancak montajı tanımlanan blok ile 2 m mesafe bırakılmıştır. (Avrupa yakasında 14., Asya yakasında 49. bloklar) [25] (Şekil 6.48).



Şekil 6.48 Avrupa yakası kara üzeri blokların montaj düzeni [25]

Kaldırılan blok ilk olarak döşeme kotunun 5 m altında durdurulmuş ve monte edilen blokların üzerinde yer alan vinç ile çekilen çekme halatına bağlı olan askı halatı, bloğun üzerine getirilmiştir. Daha sonra blok, döşeme kotuna kaldırılmış ve kaldırma aparatına ait denge kirişi pi nlerle askı halatına bağlanmıştır. Daha sonra kaldırma aparatı, yükü yavaşça bırakarak, askı halatına tam yükleme yapılmıştır (Şekil 6.49).



Şekil 6.49 Kara üzeri blokların yatay taşıma yöntemi ile taşınması [25]

Yük askı halatına iletildikten sonra, kaldırma aparatının yükü, telin gerilimi 1 tona indirgenene kadar azaltılmış ve kaldırma aparatı serbest bırakılmıştır. Daha sonra aparat ankraj bloğunun üzerinde yer alan 40 kw vinç ile 54 m çekilmiş ve yeni konumuna ulaşmıştır. Bu konumda kaldırma aparatını tekrar bloğa bağlanmış ve kaldırma aparatına tekrar gerilim verilerek askı halatlarının yükü alınmış ve aparata tam yükleme yapılmıştır. Bu sayede blok üzerinde çekme kuvveti oluşmuş ve blok yeni konumuna taşınabilmiştir [25].

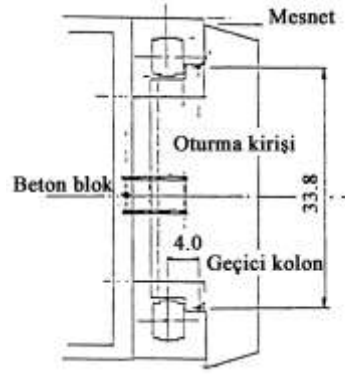
• Uç blokların yerleştirilmesi

Uç blokların, geçiş ekseninde başlangıç ve bitiş blokları (1 ve 62 no.lu bloklar) olup, askı halatları ile taşınmaktadır. Her iki blok, kara üzerinde ilk monte edilen bloklardır.

Uç blokların montajında ilk olarak, geçici mesnetler yerleştirilmiştir. Bu mesnetler, kulelerin bitişiğinde geçici kolon ve oturma kirişini destekleyen ve kulelerin ortasında yer alan geçici montaj mesnetleridir. Bloğun kaldırılması ve taşınmasında standart prosedür uygulanmıştır. Kaldırma aparatı kulelere en yakın mesafeye kadar

yaklaşmış, buna rağmen uç blokların oturma konumuna gelebilmesi ve kule temelindeki oturma kirişine yerleştirilebilmesi için 6 myatay çekme gerekmiştir. Bu işlem için karadaki karşı ağırlık makarası kullanılmış ve makaraya bağlı halat kule tepesi vinci ile çekilmiştir.

Çekilme işleminde, eğik halata bağlı cereskal ile eğik olarak duran bloğu taşıyan kaldırma aparatı, bloğu geçici mesnetlere yüklenmek amacıyla yavaş yavaş alçaltılmıştır. Bu işlemlerden sonra blok 3 mesnette dengelenmiş olup, salıncak mesnetler ile bağlantı yapılmıştır [25] (Şekil 6.50).

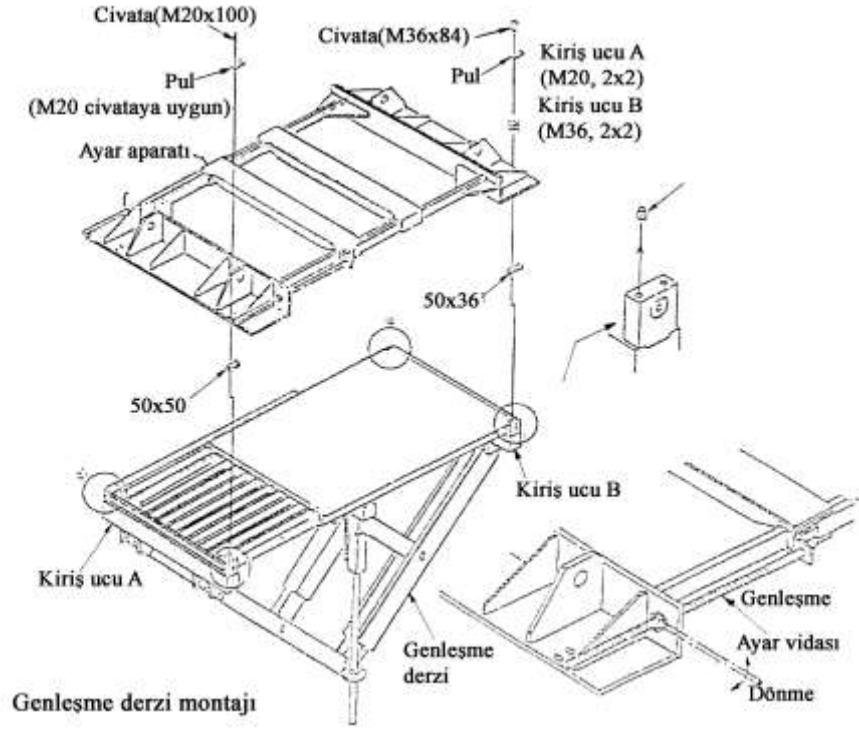


Şekil 6.50 Uç blokların yerleştirilmesi [25]

- **Genleşme derzi montajı**

Döşeme bloklarının montajının tamamlanmasından sonra, her iki yakada genleşme derzleri yerleştirilmiştir. Genleşme derzi, her yaka için 5 ton ağırlığında 18 elemandan oluşmuştur.

Montaj sırasında, açıklıkları ayarlayan bir aparat, aynı zamanda ana gövdenin, vince bağlanacağı bir kiriş olarak görev yapmıştır. Montaj sırasında derz olması gerekenden 60 mm daha kısa olacak şekilde ayarlanmıştır. Derz bloğu, geçici olarak mesnetlenmiş ve sırası ile, ilk olarak döşeme bloğuna, daha sonra genişletilerek köprü temelindeki nafsallara bağlanmıştır [25] (Şekil 6.51).



Şekil 6.51 Genleşme derzinin yerleştirilmesi [25]

6.3.3 Montaj sonrası kaynak işlemleri

Döşeme bloklarının montaj sonrasında rijit olarak birleştirilmesi, imalatlarda olduğu gibi kaynak işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak uygulaması, sandık kiriş ile oluşturan günümüz asma köprülerinde, oldukça benzer işlemler ile uygulanmakta, farklılık yatay ve düşey yüklere karşı mukavemet sağlanabilmesi ve çelik elemanların ebatlarından dolayı kaynak kalınlığı ve birleşimde kullanılan çelik malzemenin ebatlarında oluşmaktadır.

Lillebaelt köprüsünde uygulanan montaj sonrası kaynak işlemleri ile ilgili dokümanların içeriklerinin yeteri kadar detaylı olması, ancak uygulanan prosedürün, ana hatlarıyla, F.S.M köprüsüne oldukça benzerlik göstermesi sebebiyle bu bölümde sadece F.S.M köprüsünde yer alan uygulamadan bahsedilecektir.

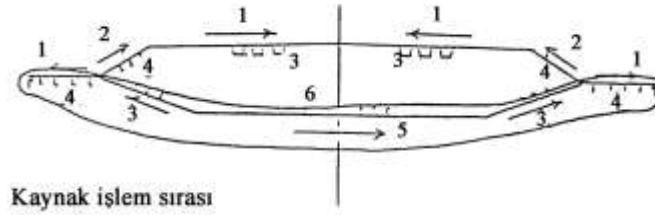
6.3.3.1 F.S.M köprüsü

Montajı tamamlanan 62 bloğun tamamı kaynak uygulaması ile birleştirilmiştir. Kaynak uygulaması, merkez blokların rijitleştirilmesi hariçinde, deniz üzerinde yer

alan 36 bloğun montajı tamamlandıktan sonra tüm dış plakalar ve takviye elemanları (üst kısmında boyuna trapez kiriş, alt kısmında boyuna alt kuşak); aşamalı olarak kaynaklanmıştır. Alt plakaların kaynak işlerinde boya platformarı kullanılmıştır.

Deniz üzerindeki bloklar tamamlandığında, döşeme ters yönde eğrisellik kazandığından dolayı, bu durumu gidermek için alt adaptasyon elemanları sıkılmış ve kaynak işlemleri ilk aşamada merkezden her iki yöne doğru birer blok atlayarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynak işlemleri sırası ile; önce üst plaka ve yaya yolunun üst bölümünden başlamış, devamında ise alt plaka, alt eğimli plaka ile beraber kaynaklandıktan sonra, eş zamanlı olarak iki blok arasında, üst döşemeye ait boylam trapez kirişlerde yer alan işlemler gerçekleştirilmiştir. Son olarak yaya yolu döşemesi altı kaynaklanmış ve, alt panolara ait boylam kuşakların birleştirilmesi ile montaj sonrası kaynak işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 6.52).



Şekil 6.52 Montaj sonrası kaynaklı birleşim sırası [25]

Kaynak işlemlerinde en yoğun çalışmalar üst ve alt bölümlerde gerçekleştirilmiştir. Üst bölümde öncelikle kaynak ağzları kontrol edilmiş ve bloklar arasında adaptasyon parçalarının ayarlanması ile açılma sapması olmaksızın, açıklık 2 mm olarak belirlenmiş ve -2 mm ile +5 mm arasında tolerans verilmiştir.

Kontroller sonrasında 100 mm uzunluğunda teğel kaynak, 200 mm aralıkla blokların asıl kaynak işlemi öncesinde sabitlemesi amacıyla uygulanmış ve üst adaptasyon parçaları kesilerek alınmıştır. Kaynak ağzlarının temizlenmesi ile tek taraflı toz altı kaynağı, plaka kalınlığında 14 mm olarak uygulanmıştır. Üst plakada kaynak boyu her iki yönde 2 x 15.4 molarak gerçekleştirilmiştir.

Üst plakamın tanımlanmasından sonra alt plaka, boya platformları üzerinden tam otomatik gaz altı kaynağı ile üst plaka ile aynı kalınlıkta ve toleranslarda birleştirilmiştir. Teğel kaynağı da aynı nitelikte uygulanmıştır. Alt plakada kaynak boyu 23.8 m uzunluğundadır.

Yaya yolu döşemesinde toz altı kaynağı, üst plaka ile aynı yöntemle uygulanmış ve her iki uçta toplam 3.6 m kaynak yapılmıştır. Alt plakada kaynak kalınlığı toplam 10.6 m olarak oluşmuştur. Sandık kirişin uç kısımlarında yer alan alt ve üst eğimli plakalar ise gaz altı kaynağı ile birleştirilmiş ve kaynak kalınlığı üst eğimde 12-14 mm alt eğimde ise 12 mm olarak uygulanmıştır. Kaynaklar, üst ve alt panolarda olduğu gibi V- şeklinde tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak uzunluğu üst eğimde 2×1.8 m alt eğimde ise 2×5.3 m'dir. Üst eğimde açıklık 5 mm olarak ve $+3$ mm ile -2 mm arasında tolerans ile ve alt eğimde ise $6 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ tolerans ile belirlenmiştir.

Sandık kirişin içinde yer alan üst ve alt boylam kuşaklar ise el kaynağı ile tanımlanmıştır. Üst kısımda yer alan trapez kirişler tek taraflı olarak 8 mm kalınlık ve 6 mm açıklık ile $\pm 2 \text{ mm}$ tolerans dahilinde tanımlanmış, alt boylam kirişlerde ise alın kaynağı uygulanmış ve kaynak genişliği 7 mm olarak belirlenmiştir. Üst boylam kirişlerinde kaynak boyu her parça için 2.2 m ve alt boylam kirişlerde 1.5 m olarak uygulanmıştır.

Montaj sonrası yapılan tüm kontroller, tahriatsız olarak göz ve röntgen yöntemi ile gerçekleştirilmiştir [25].

6.4 Sonuç

Asma köprülerde, üst yapının montajı, farklı uygulamalar örnekleri incelendiğinde, inşaat prosedüründe olduğu gibi oldukça benzerlikler göstermektedir. Bu durum özellikle döşeme montajında; geçilen açıklık mesafesine ve tek veya çok açıklıklı asma sistemlerde dikkate değer bir farklılık olmaksızın, kara veya deniz üzeri blokların montajında, kaldırılan yükün niceliği göz ardı edildiğinde hemen hemen aynıdır.

Asıl farklılık ana kablunun oluşumunda belirmekte, ve ana kablo ebatlarının özellikle kablo boyu bakımından fabrikasyon yöntemi ile oluşturulması durumunda, F. S. M köprüsünde olduğu gibi, havadan tel taşıma yöntemi uygulanmakta ve ana kablunun tamlanması ve ayarlanması süreci daha karışık ve fazla işlemler bütününe bağlı olarak gerçekleştirilmektedir.

Ana kablunun dışında, montaj sürecinin genelinde dikkat çekiçi en önemli farklılıklar ise asma köprünün yer aldığı topografik ve coğrafik koşullar olmakta, özellikle montaja yönelik makine ve ekipmanların kurulmasında ve işlemlerin standartlaştırılıp azaltılmasında, F. S. M köprüsü örneğinde yer alan koşulların var olması uygulamayı oldukça kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, gerek kablo gerekse döşeme bloklarının sahip olduğu ebat ve kütle montaja yönelik makine ve ekipmanların kapasite ve oluşumlarını belirleyici unsurlar olarak önem kazanmakta, inşaat alanında yer alan, rüzgar, akıntı şiddeti ve iklimsel koşullarda, sistemin geneline etki eden unsurlar olarak dikkate alınmalıdır.

7. KÖPRÜ EKİPMANLARI

Asma köprüler, oldukça büyük ebatlı yapılar olmalarından ve sürekli olarak bakım gerektirilerinden dolayı; trafik, bakım ve onarım ve işletmeye yönelik olarak bir takım ekipmanlara sahip olacak şekilde donatılmışlardır. Bu ekipmanlar, köprünün periyodik kontrollerinin yanı sıra beklenmeyen acil durumlarda veya köprünün güvenliğini için zorunlu olarak sisteme dahil edilmişlerdir.

Trafik ekipmanları sadece karayolu seyri için değil, aynı zamanda hava ve deniz ulaşımında uyarı ve yol gösterici ekipmanları kapsamaktadır. Trafik ekipmanları aşağıdaki gibidir [11].

- Geçiş eksenı boyunca yan ve orta şeritte otokorkuluklar
- Kaygan zemin ve rüzgar işaret ve sinyalizasyon sistemleri
- Ana kule aydınlatmaları
- Deniz ulaşımına yönelik uyarı ve aydınlatma sistemleri ile, sis sireni
- Ana kuleler üzerinde hava-trafik kaz ışıkları
- Kara trafiğine yönelik aydınlatma sistemleri

Bakım ve onarıma yönelik ekipmanlar ise aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

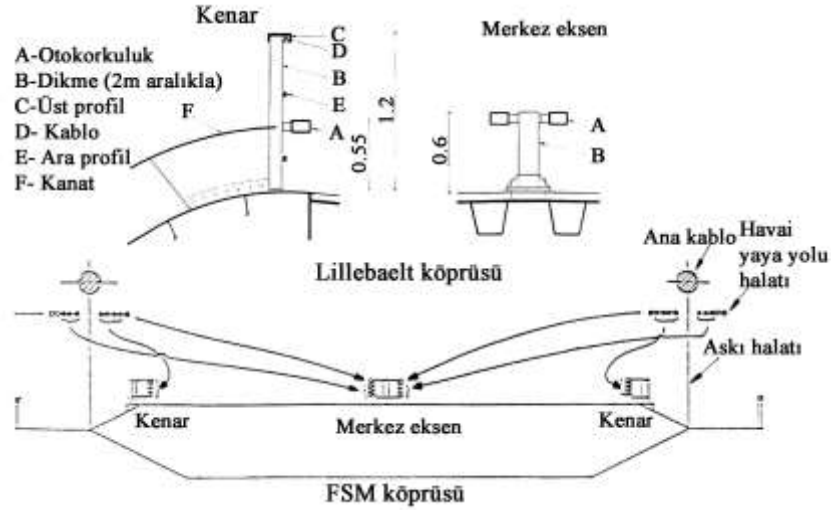
- Döşeme altındaki bakım platformu
- Düşey ve yatay sirkülasyon sistemleri
- Döşeme ve ankraj hücrelerinde havalandırma ve nemalıcı tesisata yönelik ekipman (Kulelerin çelik malzemeden imal edilmelerine bağlı olarak bu tesisat kulelere de yerleştirilebilmektedir).
- Elektrik tesisat ve ekipmanı (bu ekipmanlar, yukarıda sıralanan teçhizatın yanı sıra buzlanmaya karşı rezistans tesisatlarını da kapsamaktadır).

7.1. Otokorkuluklar

Asma köprülerde otokorkuluklar, yollar da güvenlik ortada ise güvenliğin yanı sıra geliş-gidiş yönlerindeki taşıt eksenlerini ayırıcı görev üstlenmektedir.

Otokorkuluklar, tüm kategori deki araçlara yönelik olarak, uç bölümde araçların denize uçmasını, orta bölümde ise aksi yönde akan trafiğe yönelik tehlikeyi önlemek amacıyla uygulanmışlardır. Otokorkuluklar, orta ve yan bölümlerde standart elemanlardan oluşturularak, dikeylere yatay eksenlerde bağlanmış rijit profiller ile oluşturulabildikleri gibi, özellikle son 20-25 yıldan beri uygulamalar, daha esnek ve gerilim mukavemeti yüksek çelik kablolar ile gerçekleştirilmektedir.

Bu anlamda Lillebaelt köprüsü daha eski bir uygulama olarak değerlendirildiğinde otokorkuluklar yüksek mukavemetli, 100 x 150 mm ebatlarında çelik profiller ile yapılmış[11], F. S. M köprüsünde ise çelik kablolar kullanılmıştır. F. S. M köprüsünde otokorkuluk halatları, havai yaya yoluna ait toplam 20 çelik kablonun 16 adedi kullanılarak oluşturulmuşlardır [25](Şekil 7.1).



Şekil 7.1 Lillebaelt ve F. S. M köprülerine ait otokorkuluklar [11] [25]

Lillebaelt köprüsünde, otokorkuluk sistemi, yan taraflarda tutamak profilini içinde 26 mm çapında kablo ile desteklenmiş ve kabloya 15 ton gerilim uygulanmıştır. Kablo 100 m aralıkla döşemeye bağlanmıştır. F. S. M köprüsünde her kabloya 20 t gerilim uygulanmıştır.

7.2 Aydınlatma

Asma köprülerde aydınlatma; trafik bakımından güvenlik artırıcı bir etkidir. Ana kulelerin aydınlatması sadece karayolunu kullanan araçlara değil aynı zamanda hava ve deniz araçlarına da kılavuzluk etmektedir. Taşıt yolu da aynı amaçla aydınlatılmıştır. Aydınlatma sistemleri dolaylı veya doğrudan estetik değeri de artırmaktadırlar [11].

7.3 Döşeme altı bakım platformu

Asma köprülerin her açıklığına bir adet monte edilerek üzere, döşeme altına bakım ve onarım yapmak amacıyla ile yaklaşık 2-3 m genişliğinde, bakım platformları kullanılmaktadır. Platformlar çelik plakalar ile inşaat edilmekte ve kapalı döşeme kesitinin alt bölümüne uygun formda ve döşemenin tam genişliğine denk uzunlukta oluşturulmaktadır. Genel olarak döşemenin uç kesimlerine mesnetlenmekte ve ray sistemi ile, bir arada oluşturulan pnömatik sistemler ile hareket etmektedirler. Benzer şekilde oluşturulan bu elemanlar, Lillebaelt köprüsünde her açıklıkta 1 adet olmak üzere toplam 3 adet [11], FSM köprüsünde tek açıklık olması sebebi ile toplam 1 adettir [25] (Şekil 7.2).



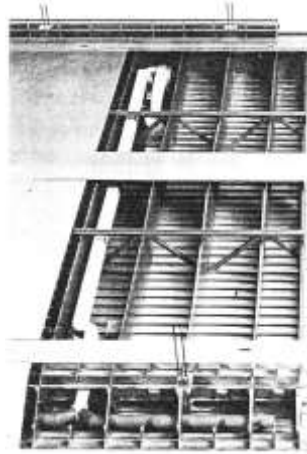
Şekil 7.2 Döşeme altı bakım platformu [11]

7.4 Havalandırma ve nem alıcı tesisat

Korzyon oluşumlarına karşı ek önlem olarak çelikten imal edilen ve kapalı hacimlere sahip olan döşeme ve kuleler ile ankraj bloklarında nem alıcı ve havalandırma tesisatları kurulabilmektedir.

Döşeme ve kulelerde önlem sadece boya ile alınabilmekte, ancak ankraj hücrelerinde, çelik kablolar ve mesnetlendikleri ankrajlarıntamirat ve onarımlarının oldukça zor ve riskli olması bakımından bu sistemler zorunlu olarak uygulanmaktadır. Çelik konstrüksiyon kesitlerde de oldukça faydalı olan bu sistemler, sadece koruma amaçlı olarak değil aynı zamanda periyodik bakımda ortama temiz hava sağlayarak, boya veya kaynak işleminde kaynaklanan zehirli gazların atılmasına da olanak sağlamaktadırlar.

Örneğin Lillebaelt köprüsünde 200,000 m²'den fazla boyalı yüzey vardır ve yüzey korunması için alınan önlemler dahilinde oluşturulan tesisat saatte 13,000 m³ hava sirkülasyonu sağlamakta ve nispi nem oranı %40 seviyesinde tutulmakta ve bu sayede hem bakım giderleri azalmakta, hem de döşeme sisteminin kullanım süresi uzatılabilmektedir [11] (Şekil 7.3).



Şekil 7.3 Döşeme blokları havalandırma ve nem alıcı tesisatları [11]

Benzer amaçlarla ve daha küçük ebatlarda tesisatlar ankraj hücrelerine yerleştirilmiştir. Bu hacimlerde oluşturulan sistemler herbiri 900 m³/saat kapasiteye sahip olan ve 24 saatte 80 kg su taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde Lillebaelt

köprüsünde oluşturulmuştur [11]. Aynı amaçla F.S.M köprüsünde de benzer nitelikte bir sistem vardır.

7.5 Geçit tertibatları

Modern anlamda inşa edilen tüm asma köprülerde; kuleler, döşemeler, ankraj blokları ve sisteme dahil ise köprü ayaklarına mesnet oluşturan kesonlar, yatay ve düşey sirkülasyon amacı ile merdiven, geçit ve asansörler ile donatılmışlardır.

Döşemelere ulaşım mesnetlendikleri portal giriş veya temel bloğu üzerinden veya döşeme üzerinde yer alan menhollerden yapılabilir. Sandık girişinin bünyesinde yer alan hacimler ise, diyafram üzerinde bırakılan boşluklar ile sağlanmaktadır.

Ana kulelerde, düşey sirkülasyon ise kule sütunlarından birisinde asansör diğeri merdiven ile sağlanmakta, sütunlar arasında geçiş ise, üst portal girişin tepesi ve içinden, alt portal giriş içinden gerçekleştirilmektedir. Betonarme veya çelikten imal edilen kulelerin içleri ise düşey sirkülasyona olanak verecek şekilde şaft olarak kullanılmaktadır.

Ana kablolar da ulaşım ise, her iki yanda tutunma halatları yerleştirilerek üzere direkt olarak ana kablunun üzerinden sağlanmaktadır [11].

7.6 Uyarı ve iletişim sistemi

Sistem içinde oluşturulan tüm uyarı, mekanik ve elektrikli tesisat ve ekipmanlar, bakım işletme ekiplerine bağlı olarak 24 saat takip edilmekte ve iletişimi çintelsiz ve sabit telefon hatları kullanılmaktadır. Özellikle uyarı ve aydınlatma sistemleri başta olmak üzere, herhangi bir güç kesintisi veya arıza durumunda yedek sistemler ve jeneratörler devreye girilmekte ve sistemler sürekli çalışır durumda tutulmaktadır [11].

7.7 Sonuç

Asma köprülerde yer alan makine ve ekipmanlar, gerek montaj sırasında gerekse kullanım sürecinde, yapının bünyesinde yer alan ve sistemin korunmasına ve

güvenliğine yönelik olan elemanlardır. Göreceli olarak çelik malzemenin kulelerde kullanımının yanı sıra, ana kablo, askı ve döşeme sistemlerinin çelikten imal edilmeleri, sürekli olarak kontrol, bakım ve onarım gerektirmekte, bu sebeple, kapasite ve nicelik bakımından değişebilse de, nitelik yönünden benzer ekipmanlar koruma ve bakımamacı ile sürekli aktif durumda kullanılmak zorundadır. Bakım yönelik ekipmanların yanı sıra güvenlik ve ikaz sistemi, köprü üzerinde yer alan kara trafiğine ek olarak deniz ve hava trafiğinin güvenliği içinde oldukça önemli görev yapmaktadır.

8. SONUÇ

Köprüler, insanlığın sürdürmekte olduğu gelişimin temel ihtiyaçlarından birisi olan ulaşım süreklilik katmaya yönelik yapılar olup, kullanımlarındaki zorunluluk ve geçilmesi gereken mesafeler günümüzde oldukça büyük boyutlara ulaşmıştır. Bu gerekliliklerden dolayı köprüler üzerindeki araştırmalar, taşıyıcı sistemin kurulumu, malzeme ve yapı malzemeleriyle ilgili olarak oldukça hızla devam etmektedir.

Köprülerin, tasarım ve uygulamaya yönelik olarak ulaştığı en uç sınır asma köprülerde görülmektedir. Asma köprüler, 600 m ve üzerindeki geçişlerde özellikle ekonomik yönden halen en ekonomik çözümü oluşturmakta olup, bu konuda dünyada ve ülkemizde uygulanan pek çok örnek bulunmakta ve uygulanması düşünülen çok sayıda proje üzerinde çalışılmaktadır. Sadece ülkemizi ele alırsak, İzmit körfezi ve Çanakkale boğazına birer adet, İstanbul boğazına ise 3. Köprü'nün yapılması tartışılmakta ve gelecekte muhtemel olarak yapımları söz konusu olabilecek durumdadır.

Köprüler, diğer yapılardan farklı olarak, sistem performans ve estetik değerleri bakımından yapısal forma bağlı olarak karşımıza çıkmakta ve bu özellikleri ebatlarının oldukça büyüdüğü asma köprülerde en belirgin halini almaktadır.

Yapısal form ve buna bağlı olarak eleman düzeyinde ebatların büyümesi özellikle yapı tekniği bakımından diğer yapılar, hatta diğer köprülerden daha karmaşık işlemler bütünü oluşturmakta, bu sebepten dolayı proje, inşaat ve montaj bakımından farklı disiplinler arasında en yüksek düzeyde işbirliği gerektirmekte, ve hata oranlarının en düşük seviyede olması sebebiyle gerek proje ve uygulamada gerekse uygulama sonrasında yüksek bilgi birikimi ve hassasiyet ortaya konulması zorunlu olmaktadır.

Asma köprüler genel olarak incelendiğinde, proje ve uygulama bakımından alt yapı ve üst yapı olarak iki ana başlık altında yer almaktadır. Alt yapı sistemleri, temeller, ankraj blokları, kuleler olarak 3 başlıkta oluşmakta, ancak bu sistemler özellikle

jeolojik ve topografik koşullara bağlı olarak çeşitlilik göstermekte olup, i mal at süreci ve ekonomik durumu olan etkilerinden dolayı oldukça detaylı olarak proje sürecinde ele alınmak zorundadır.

Üst yapı sistemleri ise kablolar ve döşeme sistemleri olarak 2 başlık altında toplanmakta ve farklı uygulamalar incelendiğinde, açıklığa bağlı olarak değişebilen ebat farklılıkları gözardı edildiği takdirde, sistem olarak ana hatları itibarı ile oldukça benzerlikler göstermektedir. En belirgin farklılık ana kabloların oluşturulmasında belirmekte ve açıklığın artması ile ekonomik ve/veya teknik sebeplerden dolayı fabrikasyon üretimi ile elde edilemeyen kablo kolları, ankraj blokları arasında çelik tellerin sarılması ile oluşturulmakta, bu durum gerek sistemin oluşumunda, i mal at yöntemi, eleman ve ekipman düzeyinde biraz daha farklı ve karmaşık bir süreç gerektirmekte, ancak i malat sonrası elde edilen ana kablo ve oluşumunu sağlayan kablo kolları, fabrikasyon tekniklerine uygun kalite ve performansına sahip olmaktadır.

Asma köprüler, gerek tasarımı gerekse uygulamaya bakımdan bütün yapı sistemleri içinde en ileri teknolojiyi bünyesinde barındırmakta olan yapılar olup, halen ülkemizde bu konu üzerinde yeteri kadar ilerleme sağlanamıştır. Konu üzerinde çalışmalar çeşitli üniversiteler ve Karayolları genel müdürlüğü gibi devlet kuruluşları ile sınırlı kalmakta, i malat ve uygulamaya bakımdan bu sınırların, özel sektörde yer alan proje ve yüklenici firmalar bünyesine taşınarak genişletilmesi ve yapı sektörümüzün uluslararası düzeye gelebilmesi, teknolojinin ithali yerine üretimi ve ihracına yönelik olarak, en ileri teknolojilere sahip olan bu yapılar üzerinde daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Rai na, V. K.**, 1988. Concrete Bridge Practice – Construction, Maintenance and Rehabilitation, Tata McGraw Hill, Yeni Delhi.
- [2] **Becket, D** ,1969, Great Buildings of the World – Bridges.
- [3] **Peynircioğlu, H.**, 1958, Köprüler, Glt III, Çelik Köprüler, İ. T. Ü Teknik Okulu Yayınları / İstanbul
- [4] **Peynircioğlu, H.**, 1951, Köprüler, Glt I – II, Ahşap ve Kagir Köprüler, İ. T. Ü Teknik Okulu Yayınları/İstanbul
- [5] **Cerver, E A.**, Arco Colour/The matic Architecture, New Bridges, 6-7, 47-56
- [6] **Aeberhard ve diğ.**, 1984, VSL Stay Cables for Cable Stayed Bridges, VSL International LTD Bern, İsviçre. 1-7
- [7] **Owens, G W, Knowles, P. R.**, 1992, Steel Designers Manual, Cambridge University Press, İngiltere
- [8] **Walter, R.**, 1988, Cable Stayed Bridges, Thomas Telford Ltd, Londra. 21-35, 58-62, 82-91
- [9] **Postacıoğlu, B.**, 1987, Beton Glt II, Agregalar ve Beton, İstanbul. 308-312
- [10] **Sharp, D.**, 1994, Santiago Calatrava, Londra. 8-10
- [11] **Ostenfeld, C.**, 1970, Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 3, Design and Construction of the Bridge, Kopenhag
- [12] **Anonim** Ishikavajima – Harima Heavy Industries Co., Ltd Mitsubishi Heavy Industries Ltd, NKK Corporation, Glt 1, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü İnşaatı, Proje Özeti ve Tasarım

- [13] **Jensen M**, 1970, Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 13, Wind Measurements, Kopenhag
- [14] **Ostenfeld C, Jensen J.J**, 1970, Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 4, Pile Foundations for Bridge Piers in Deep Water, Kopenhag
- [15] **Ostenfeld C, Vefling G**, 1970. Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 2, Site Investigations and Observations in the Construction Period, Kopenhag
- [16] **Ostenfeld C, Vefling G**, 1970. Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 5, Pile Driving and Pile Load Tests in the Test Areas and Under Caissons, Kopenhag
- [17] **Fronsdén A G, Jensen J. J.**, 1970, Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 7, Concrete Qualities and Concreting Problems for Selected Parts of the Bridge, Kopenhag
- [18] **Anonim** Ishikawajima – Harima Heavy Industries – Co. Ltd, Mitsubishi Heavy Industries Ltd, NKK Corporation, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü İnşaatı, Glt 2, Kule Temelleri ve Ankrajlar
- [19] **Anonim** Ishikawajima – Harima Heavy Industries – Co. Ltd, Mitsubishi Heavy Industries Ltd, NKK Corporation, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü İnşaatı, Glt 3, Kuleler
- [20] **Anonim** 2002, Peri Kalıp Kataloğu, Peri Klettergerüste KGF 240 ve KG 180.
- [21] **Fronsdén A G**, 1970, Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 6, Friction Tests – Concrete Against Earth Performed at the Building site, Kopenhag
- [22] **Ostenfeld C, Jensen J. J.**, 1970, Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 1, The Sketch Proposals for the New Bridge, Kopenhag
- [23] **Anonim** Ishikawajima – Harima Heavy Industries – Co. Ltd, Mitsubishi Heavy Industries Ltd, NKK Corporation, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü İnşaatı, Glt 4, Kablo işleri

- [24] **Fronsen A G**, 1970, Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 9, Wind Stability of Suspension Bridges and Application of the Theory of Thin Airfoils Kopenhagen
- [25] **Anonim** Ishikawajima – Harima Heavy Industries – Co. Ltd, Mitsubishi Heavy Industries Ltd, NKK Corporation, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü İnşaatı, Glt 5, Asma Yapı
- [26] **Anonim** Ishikawajima – Harima Heavy Industries – Co. Ltd, Mitsubishi Heavy Industries Ltd, NKK Corporation, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü İnşaatı, Glt 6, Korumucu İşlem
- [27] **Anonim** Ishikawajima – Harima Heavy Industries – Co. Ltd, Mitsubishi Heavy Industries Ltd, NKK Corporation, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü İnşaatı, Glt 7, Tabliye ve Kaplama İşleri
- [28] **Ostenfeld C, Frandsen A G**, 1970, Motorway Bridge Across Lillebaelt, Glt 12, Erection of the Steel Superstructure, Kopenhagen

ÖZGEÇMİŞ

F. Fırat İbrahimoğlu 1972 yılında Ankara’da doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini T. E. D. Ankara Koleji’nde (1978-1990), yüksek öğrenimini İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi’nde yaptı (1991-1996).

Mesleki etkinlikleri kapsamında;

1996-1997 yılları arasında Metiş A.Ş. Sedat Kent Villaları ve Braas Çatı Sistemleri Fabrikası şantiyelerinde saha mühendisi ve şantiye şefi olarak,

1998-1999 yılları arasında Tepe- Akfen- Ma Konsorsiyumu Atatürk Havalimanı Yeni Dış Hatlar Terminali ve çok katlı otopark şantiyelerinde saha mühendisi ve Apron altı yapı grup şefi yardımcısı olarak,

2000-2001 yıllarında Ereğli Demirçelik ve MGH Holding Kocaeli Üniversitesi Merkez kampüs şantiyelerinde şantiye şefi olarak çalıştı.