

84986

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ASMA KÖPRÜLER VE EĞİK ASKILI KÖPRÜLERDE KABLOLARIN İNCELENMESİ

İnş. Müh. M. Barış EKMEKYAPAR

**F.B.E.İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Tez Danışmanı: Prof. İbrahim EKİZ

İSTANBUL, 1999

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	i
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ÖNSÖZ.....	xvi
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. KABLOLU KÖPRÜLERİN GELİŞİMİ.....	1
2. KABLolar.....	49
2.1 Tek Kablonun Şekil Değiştirme Özellikleri.....	49
2.1.1 Düşey yük altındaki kablounun denklemi.....	49
2.1.2 Üniform yüke maruz yatay kablo.....	54
2.1.3 Üniform olmayan yüke maruz yatay kablo.....	56
2.1.4 Asma köprüdeki ana açıklık kablosunun sayısal uygulaması.....	63
2.1.5 Boğaziçi ve F. S. M. köprüleri ana açıklık kablolarına ait sayısal uygulamalar.....	71
2.1.6 Mesnet noktalarının yatay yerdeğiştirmesine göre eğik kablo.....	76
2.1.7 Asma köprüdeki yan açıklık kablosunun sayısal uygulaması.....	78
2.1.8 Değişik giriş kuvvetleri altında eğik kablo.....	80
2.1.9 Eğik kablounun sayısal uygulaması.....	90
2.2 Tek Kablonun Dinamik Davranışı.....	94
2.3 Kabloların Eğilmesi.....	101
3. KABLO SİSTEMLERİ.....	112
3.1 Kablo Sistemlerine Genel Bakış.....	112
3.1.1 Kablo sistemleri.....	112
3.1.2 Kablo çelik miktarı karşılaştırması.....	116
3.1.3 Kablo sisteminin stabilitesi.....	118
3.2 Asma Sistem.....	126
3.2.1 Sabit yük geometrisi.....	127
3.2.2 Kablo boyutlarının öntasarımı.....	128
3.2.3 Kablo çeliği miktarı.....	130
3.2.4 Kuledeki çelik miktarı.....	132
3.2.5 Kablo sistemi ve kulenin toplam maliyeti.....	133
3.2.6 F. S. M. köprüsünün yaklaşık maliyeti.....	134
3.2.7 Optimum kule yüksekliği.....	135
3.2.8 Yapısal sistemler.....	137
3.3 Fan Sistem.....	147
3.3.1 Ankraj kablosu.....	147

3.3.2	Kablo boyutlarının öntasarımı.....	150
3.3.3	Kablo çeliği miktarı.....	151
3.3.4	Kuledeki çelik miktarı.....	153
3.3.5	Basitleştirilmiş ifadeler.....	153
3.3.6	Kablo sistemleri ve kulelerin toplam maliyeti.....	154
3.3.7	Asma sistem ve fan sistemin karşılaştırılması.....	155
3.3.8	Eğik kuleler.....	157
3.3.9	Şekil değiştirme özellikleri.....	159
3.3.10	Yapısal sistemler.....	163
3.3.11	Sehim değişimlerinin azaltılması.....	167
3.4	Harp Sistem.....	169
3.4.1	Sabit yük geometrisi.....	173
3.4.2	Ara mesnetler.....	173
3.4.3	Kablo boyutlarının öntasarımı.....	174
3.4.4	Kablo çeliği miktarı.....	176
3.4.5	Kuledeki çelik miktarı.....	177
3.4.6	Basitleştirilmiş denklemler.....	178
3.4.7	Toplam maliyet.....	179
3.4.8	Şekil değiştirme özellikleri.....	180
3.4.9	Yapısal sistemler.....	181
3.5	Birleşik Asma ve Eğik Askılı Sistem.....	184
3.6	Kablo Ağı Sistemi.....	189
3.6.1	Kablo ağı geometrisi.....	193
3.6.2	Kablo boyutlarının öntasarımı.....	195
3.6.3	Kablo çeliği miktarı.....	195
3.6.4	Karşılaştırmalı araştırmalar.....	197
3.7	Çok Açıklıklı Kablo Sistemi.....	204
3.7.1	Kolon tipli kulelerin ayaklara sabitlenmesi.....	208
3.7.2	Üçgen kule yapıları.....	210
3.7.3	Üçgen kule yapılarındaki çelik miktarı.....	212
3.7.4	Yatay ankraj kablosu.....	217
3.7.5	Farklı çok açıklıklı eğik askılı sistemlerin sehimleri arasındaki karşılaştırma.....	220
3.8	Yanal Yükleme Altında Kablo Sistemleri.....	223
3.9	Kablo Sistemlerinin Salınımı.....	229
3.9.1	Bölgesel salınımlar.....	229
3.9.2	Genel salınımlar.....	233
KAYNAKLAR.....		244
ÖZGEÇMİŞ.....		245

SİMGE LİSTESİ

a	Kablo yatay uzunluğu
a_a	Fan sistem yan açıklık uzunluğu
a_m	Fan sistem ana açıklık uzunluğu
a_p	Üçgen kule ayaklarının genişliği
A	Kablo enkesit alanı
A_a	Asma sistem yan açıklık kablo enkesit alanı
A_m	Asma sistem ana açıklık kablo enkesit alanı
A_h	Askı enkesit alanı
A_{ac}	Ankraj kablosu enkesit alanı
$A_{sc,i}$	i 'nci eğik kablo enkesit alanı
A_{sc}	Kablo ağ sistemde eğrisel kablo enkesit alanı
$A_{sca,i}$	Yan açıklık i 'nci eğik kablo enkesit alanı
$A_{scm,i}$	Ana açıklık i 'nci eğik kablo enkesit alanı
A_{pg}	Harp sistemde kulenin, kirişle birleşme noktasındaki enkesit alanı
A_{tc}	Harp sistemde tepe kablosu enkesit alanı
b	Hareketli yük uzunluğu
b_a	Yan açıklık mesnet noktası ile rijitlik kirişi arasındaki fark
b_m	Eğrisel kablonun kirişle birleşim noktasından eğik kabloya olan yatay uzaklık
c	Eğik kablo kiriş uzunluğu
c_{ac}	Ankraj kablosu uzunluğu
c_h	Kablo uzunluğu
C_{cp}	Toplam maliyet
C_{cpo}	1/10 sehim oranına karşı gelen asma köprü maliyeti
d	Rijitlik kirişi yüksekliği
d_c	Kelepçe çapı
d_p	Kule genişliği
d_w	Tel çapı
e	Eğik kulenin kirişe mesnetlendiği nokta ile üst nokta arasındaki yatay uzunluk
e_f	Fan sistemde eksantrisite
E	Kablo elastisite modülü
E_c	Kablo elastisite modülü
F_{eq}	Eşdeğer elastisite modülü
E_p	Kule malzemesinin elastisite modülü
E_{tan}	Tanjant modülü
$f(x)$	Kablo sehim
f_2	Orta açıklıkta hareketli yükten oluşan kablo sehim
f_a	Asma sistemde yan açıklık kablo sehim
f_c	Eğik kablonun kablo yüzeyine dik sehim
f_m	Asma sistemde orta açıklık kablo sehim
f_v	Eğik kablonun düşey sehim
f_w	Orta açıklıkta sabit yükten oluşan kablo sehim
h	Kablo sistemi yüksekliği
h_s	Asma sistem yüksekliği
h_f	Fan sistem yüksekliği
h_H	Harp sistem yüksekliği
h_A	A noktasındaki asma sistem yüksekliği

h_E	E noktasındaki asma sistem yüksekliği
h_D	Asma sistemde kuleler arası yükseklik farkı
h_C	Asma sistemde orta açıklık yüksekliği
h_p	Kule yüksekliği
h_{pb}	Rijitlik kirişi altındaki kule yüksekliği
h_{pt}	Rijitlik kirişi üstündeki kule yüksekliği
h_t	Harp sistemde kule üzerinde yer alan kablounun, tepe noktasına olan uzaklığı
H	Kablo yatay kuvveti
$H(x)$	x noktasındaki kablo yatay kuvveti
H_w	Sabit yük durumunda olan kablo yatay kuvveti
H_i	Herhangi bir i durumu için kablo yatay kuvveti
H_S	Asma sistem yatay kuvveti
H_F	Fan sistem yatay kuvveti
H_H	Harp sistemi yatay kuvveti
H_m	Ana kablodaki maksimum yatay kuvvet
H_l, H_r	Üçgen kulenin tepe yatay kuvvetleri
g	Yerçekimi ivmesi
g_a	Yan açıklık kablosu mesnet noktasının, kirişe olan düşey uzaklığı
g_m	Ana açıklık kablosu orta noktasının, kirişe olan düşey uzaklığı
I_y	Eylemsizlik momenti
I_m	Kütle eylemsizlik momenti
J_c	Eylemsizlik momenti
k	Yay katsayısı
K	Eğri parametresi
l	Eğik kablo giriş uzunluğu
l_a	Ana açıklık uzunluğu
l_m, l_b	Yan açıklık uzunlukları
l_e	Yan açıklık kablosu ankraj boyu
$M(x)$	Basit mesnetli girişin eğilme momenti
M_i	Herhangi bir i durumundaki kablo eğilme momenti
M_a	Asma sistemde ana kablo eğilme momenti
M_m	Asma sistemde askı çubukları eğilme momenti
M_b	Asma sistemde rijitlik kirişi eğilme momenti
M_F	Fan sistemde (0,0) noktasının eğilme momenti
$N(x)$	Herhangi bir x noktasındaki kablo normal kuvveti
N_A, N_B	Eğik kabloda A ve B noktalarındaki normal kuvvetler
N_{cl}	Kelepçe kuvveti
N_{pb}	Asma sistemde kuleye mesnet noktasında etki eden normal kuvvet
N_{pg}	Rijitlik kirişi üzerinde kalan kulenin normal kuvveti
N_{pt}	Rijitlik kirişi altında kalan kulenin normal kuvveti
q	Yayılı yük
q_{cS}	Asma sistemde kablo çelik miktarı değişimi
Q_{cS}	Asma sistemde teorik kablo çelik miktarı
$Q_{cl'}$	Fan sistemde teorik kablo çelik miktarı
Q_{cH}	Harp sistemde teorik kablo çelik miktarı
Q_{cm}	Asma sistem ana açıklık kablosu kablo çeliği miktarı
Q_{ha}	Asma sistem yan açıklık askı çubukları kablo çeliği miktarı
Q_{ca}	Asma sistem yan açıklık kablosu kablo çeliği miktarı

Q_{hm}	Asma sistem ana açıklık askı çubukları kablo çeliği miktarı
Q_F	Fan sistemdeki toplam kablo çeliği miktarı
Q_{Fm}	Fan sistemdeki ana açıklık kablo çeliği miktarı
Q_{Fa}	Fan sistemdeki yan açıklık kablo çeliği miktarı
Q_{ac}	Ankraj kablosu çelik miktarı
Q_p	Kuledeki çelik miktarı
Q_{Hm}	Harp sistem ana açıklık kablo çeliği miktarı
Q_{Ha}	Harp sistem yan açıklık kablo çeliği miktarı
Q_{pt}	Harp sistem giriş üstü kule çelik miktarı
Q_{pt}	Harp sistem giriş altı kule çelik miktarı
Q_{tem}	Kablo ağ sistemde h_m uzunluğundaki kısmın kablo çelik miktarı
p	Hareketli yük
p_a	Yan açıklıktaki hareketli yük
p_m	Orta açıklıktaki hareketli yük
P	Tekil yük
P_{ge}	Kablonun dinamik davranışında geometrik ve elastik parametre karakteristiği
P_t	Yanal yüklemede kirişe ankraj noktasında oluşan düşey kuvvet
P_v	Yanal yüklemede kirişe ankraj noktasında oluşan yanal kuvvet
$R_H(0)$	0 noktasının kablo yatay kuvveti
$R_H(a)$	a noktasının kablo yatay kuvveti
$R_t(0)$	0 noktasının kablo düşey kuvveti
$R_t(a)$	a noktasının kablo düşey kuvveti
r_s	Kablo eyer yarıçapı
R_b, R_r	Üçgen kulenin mesnet tepkileri
$S(x)$	Basit mesnetli kirişte kesme kuvveti
s	Kablo eğrisi
s_w	Sabit yük durumundaki kablo eğrisi
s_i	Herhangi bir i durumuna ait kablo eğrisi
S	Strouhal sayısı
t	Sıcaklık
T_i	Eğik kabloda giriş kuvvetleri
T_h	Askı kuvveti
T_m	Asma sistemde maksimum ana açıklık kablo kuvveti
T_a	Asma sistemde maksimum yan açıklık kablo kuvveti
T_{ac}	Fan sistemde ankraj kablosu normal kuvveti
$T_{sc,i}$	i 'nci maksimum eğik kablo kuvveti
T_{tc}	Harp sistem tepe kablosu kuvveti
$T_{sca,i}$	Harp sistem yan açıklıkta i 'nci kablo kuvveti
$T_{scm,i}$	Harp sistem ana açıklıkta i 'nci kablo kuvveti
T_{sc}	Eğrisel kablo kuvveti
u	Birim uzunluk
u_p	Profil demiri birim fiyatı
u_c	Kablo çeliği birim fiyatı
$V(x)$	x noktasındaki kablo düşey kuvveti
V	Eğik kabloda düşey kuvvet
v	Rüzgar hızı
w	Sabit yük
w_a	Yan açıklık sabit yükü

w_m	Ana açıklık sabit yükü
w_c	Yatay kablo ağırlığı
w_n	Kablonun doğal frekansı
w_{tc}	Tepe kablosu ağırlığı
w_g	Harp sistemde giriş ağırlığı
w_v	Düşey salınım
w_t	Burulma salınımı
x, y	Koordinatlar
x_o	Kablonun x eksenini kestiği noktanın apsis değeri
ε	Elastik kablo şekil değiştirme miktarı
ε_c	Eğik kabloda şekil değiştirme miktarı
ε_{ac}	Ankraj kablosu şekil değiştirme miktarı
β	Isıl genleşme katsayısı
Δt	Sıcaklık değişimi (farkı)
Δs	Toplam kablo uzaması
Δs_w	Sabit yük durumunda toplam kablo uzaması
δ_h	Kablo mesnet noktalarının (kule tepelerinin) yatay yerdeğiştirme
δ_y	Kablo orta noktasının hareketli yükten dolayı yapacağı sehimi
δ_x	Kablo yatay yerdeğiştirme
δ	Eğik kabloda kablo uzama miktarı
δ_{xt}	Eğik kabloda yatay yerdeğiştirme
$\delta_y(x)$	Eğik kuleli yapılarda rijitlik kirişi sehimi
δ_1, δ_2	Kule tepelerinin yatay yerdeğiştirme
$\delta_{z...}$	Yanal yerdeğiştirmeler
ΔH	Üniform olmayan yüklemde kablo orta noktasının yatay yerdeğiştirme
σ	Emniyet gerilmesi
σ_i	i durumundaki kablo gerilmesi
$\sigma_{2,ex}$	Eğik kabloda maksimum eksenel rijitliği veren gerilme
$\Delta \sigma$	Gerilme farkı
σ_c	Kablo emniyet gerilmesi
σ_{hl}	Bölgesel eğilme gerilmesi
σ_{be}	Kablo bandında oluşan gerilme
σ_p	Efektif gerilme
σ_{sf}	Fiktif gerilme
σ_w	Sabit yükten oluşan gerilme
σ_{ac}	Ankraj kablosu çekme gerilmesi
σ_{pb}	Kulenin alt kısmındaki gerilme
σ_t	Sıcaklık farkından oluşan gerilme
α	0 ile 1 arasında değişen katsayı
γ_c	Kablo yoğunluğu
$\Delta \varphi$	Kablo semerindeki açısal değişim
φ_i	i 'nci eğik kablo eğimi
φ_a	Asma sistem yan açıklık kablo eğimi
φ_m	Asma sistem ana açıklık kablo eğimi
φ_{ac}	Ankraj kablosu eğimi
κ	Gerilme oranı

κ_{ac}	Fan sistemde ankraj kablosundaki min/mak gerilme oranı
λ_{be}	Etkili kablo bant uzunluğu
λ_b	Kablo bant uzunluğu
λ	Askı çubukları aralığı
λ_m	Harp sistemde ana açıklık kablo bağlantı aralıkları
λ_a	Harp sistemde yan açıklık kablo bağlantı aralıkları
μ_c	Teller arası sürtünme katsayısı
ΔM	Moment farkı



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	New York East Nehri üzerindeki Brooklyn Köprüsü.....	1
Şekil 1.2	Brooklyn Köprüsünde köprü tabliyesinden kablo sisteminin görünüşü.....	2
Şekil 1.3	East Nehri üzerindeki ikinci köprü olan Williamsburg Köprüsü.....	3
Şekil 1.4	Üstte, eski asma köprü, altta; modern asma köprü örneği.....	4
Şekil 1.5	East Nehri üzerindeki Manhattan Köprüsü.....	4
Şekil 1.6	Üstte, yük altında funiküler eğri ve kablo eğrisi; ortada, rijitlik kirişi momenti; altta, kirişin sehim.....	5
Şekil 1.7	İkinci derece teorisi ile dengede olan sistemin rijitlik kirişindeki moment ve sehim.....	6
Şekil 1.8	Hudson Nehri üzerindeki George Washington Köprüsü.....	7
Şekil 1.9	San Francisco-Oakland Körfezi Köprüsünün Batı Körfezi geçişi.....	9
Şekil 1.10	Golden Gate Köprüsü.....	10
Şekil 1.11	Birinci Tacoma Köprüsünde oluşan salınım hareketi.....	11
Şekil 1.12	Takviye sonrası aerodinamik stabilitesi artırılmış Bronx-Whitestone Köprüsü.....	12
Şekil 1.13	Yatay bağlantısı eklenmiş Golden Gate Köprüsünün rijitlik kafes kirişi.....	13
Şekil 1.14	İkinci Tacoma Köprüsü.....	14
Şekil 1.15	Steinman'ın tasarımı yaptığı Messina Boğazı Köprüsü.....	15
Şekil 1.16	Mackinac Köprüsü.....	16
Şekil 1.17	Köln-Mühlheim Köprüsünün onarımı için Dischinger'in önerdiği köprü sistemi.....	17
Şekil 1.18	Strömsund Köprüsü.....	18
Şekil 1.19	Duisburg-Ruhrort Köprüsü.....	19
Şekil 1.20	Bir rein chord Köprüsünün yapısal sistemi.....	20
Şekil 1.21	Theodor Heuss Köprüsü.....	20
Şekil 1.22	Severins Köprüsü.....	21
Şekil 1.23	Norderelbe Köprüsü.....	22
Şekil 1.24	Leverkusen Köprüsü.....	23
Şekil 1.25	Maracaibo Köprüsü.....	23
Şekil 1.26	Tancarville Köprüsü.....	24
Şekil 1.27	Forth Köprüsü.....	25
Şekil 1.28	Alt tabliyenin eklenmesinden sonra G. W. Köprüsü.....	26
Şekil 1.29	Verrazano-Narrows Köprüsü.....	26
Şekil 1.30	Tagus River Köprüsü.....	27
Şekil 1.31	Eğik kabloların eklenmesi ile oluşan Tagus River köprüsünün asma sistemi.....	27
Şekil 1.32	Yapım aşamasındaki Severn Köprüsü.....	29
Şekil 1.33	Dywidag tarafından sunulan Great Belt Köprü projesi.....	31
Şekil 1.34	Friedrich Ebert Köprüsü.....	31
Şekil 1.35	Rhine Köprüsü.....	32
Şekil 1.36	Knie Köprüsü.....	33
Şekil 1.37	Erskin Köprüsü.....	34
Şekil 1.38	Mannheim ve Ludwigshafen arasındaki köprü.....	34
Şekil 1.39	Little Belt Köprüsü.....	35

Şekil 1.40	Boğaziçi Köprüsü.....	36
Şekil 1.41	Fatih Sultan Mehmet Köprüsü.....	36
Şekil 1.42	Köhlbrand Köprüsü.....	36
Şekil 1.43	Rokko Köprüsü.....	37
Şekil 1.44	Kablo sistemi zemine ankrajlı ilk eğik askılı köprü olan İndiano Köprüsü.....	37
Şekil 1.45	Brotonne Köprüsü.....	38
Şekil 1.46	Pasco-Kennewick Köprüsü.....	39
Şekil 1.47	Parana Nehri üzerindeki köprü.....	40
Şekil 1.48	Save Nehri üzerindeki demiryolu köprüsü.....	40
Şekil 1.49	Teklif edilen Dames Point Köprüsü projesi.....	41
Şekil 1.50	Ruck-a-Chucky Köprüsü.....	42
Şekil 1.51	Humber Köprüsü.....	42
Şekil 1.52	Yapım sırasındaki birinci Tjörn Köprüsü.....	43
Şekil 1.53	Yapım sırasındaki ikinci Tjörn Köprüsü.....	44
Şekil 1.54	Kojima-Sakaide güzergahındaki Bisan Seto Köprüleri.....	44
Şekil 1.55	Hitsuishijima ve İwagurojima Köprüleri.....	45
Şekil 1.56	Yokohama Köprüsü.....	46
Şekil 1.57	Great Belt Köprüsü için 780 m ana açıklıklı eğik askılı köprü projesi.....	46
Şekil 1.58	Great Belt Köprüsü için 1416 m ana açıklıklı asma köprü projesi.....	46
Şekil 1.59	Messina Boğazı Köprüsü için dört proje.....	47
Şekil 2.1	Aynı yük ve açıklığa sahip basit mesnetli bir kiriş ve bir kablo üzerindeki kuvvet ve reaksiyonlar.....	50
Şekil 2.2	Özel kablo görünüşleri.....	50
Şekil 2.3	Düşey yüke maruz kablonun iki durumu.....	52
Şekil 2.4	Sabit yük durumunda yatay kablo.....	54
Şekil 2.5	Sabit ve üniform hareketli yük durumunda yatay kablo.....	55
Şekil 2.6	Üniform olmayan simetrik ve asimetrik hareketli yük durumu.....	57
Şekil 2.7	Sabit ve simetrik üniform olmayan hareketli yük durumundaki yatay kablo.....	58
Şekil 2.8	Sabit ve asimetrik hareketli yük durumunda yatay kablo.....	59
Şekil 2.9	Asimetrik hareketli yükte kablonun merkezindeki C noktasının yerdeğiştirmesi.....	60
Şekil 2.10	Sabit ve asimetrik hareketli yük durumda, merkezi kelepçeli yatay kablo.....	61
Şekil 2.11	Merkezi kelepçeli bir kabloda yatay kuvvetin etkisi.....	61
Şekil 2.12	Merkezi kelepçenin yatay yerdeğiştirmesi ile yatay kuvvet ilişkisi.....	63
Şekil 2.13	Tek kablo, basit mesnetli rijitlik kirişine sahip bir asma köprü ve sürekli rijitlik kirişine sahip asma köprünün sehimleri arasındaki ilişki.....	64
Şekil 2.14	Üniform yüklü kablonun sehim ve kablo eğrişiiyle ilgili parametreler.....	65
Şekil 2.15	Simetrik durumda üniform olmayan hareketli yük uzunluğu 2b olan orta açıklık sehiminin değışimi.....	66

Şekil 2.16	Uzunluğu 400 m olan ve üniform olmayan hareketli yüklü kablonun, sehim ve kablo eğrileri.....	67
Şekil 2.17	Simetrik yüklü yatay kablonun, üniform hareketli yük üniform olmayan hareketli yük durumunda orta açıklık sehimini ile sehim oranı arasındaki ilişki.....	68
Şekil 2.18	Asimetrik yüklü yatay kablonun sehim ve kablo eğrileri.....	68
Şekil 2.19	Asimetrik yüklü kablonun çeşitli sabit yük değişimlerine göre sehim eğrileri.....	69
Şekil 2.20	Merkezi kelepçeli bir kablonun yatay yerdeğiştirme ve yatay kuvvet arasındaki ilişki.....	70
Şekil 2.21	Merkezi kelepçeli, asimetrik yüklü yatay kablonun sehim eğrileri.....	70
Şekil 2.22	Üniform yüklü durumdaki Boğaziçi Köprüsü ana kablosunun kablo ve sehim eğrileri.....	71
Şekil 2.23	Üniform yüklü durumdaki F. S. M. Köprüsü ana kablosunun kablo ve sehim eğrileri.....	71
Şekil 2.24	Boğaziçi Köprüsündeki simetrik; fakat üniform olmayan hareketli yük uzunluğu ile kablo sehimini arasındaki ilişki.....	72
Şekil 2.25	F. S. M. Köprüsündeki simetrik; fakat üniform olmayan hareketli yük uzunluğu ile kablo sehimini arasındaki ilişki.....	73
Şekil 2.26	Bağlı yükleme uzunluğu 0.40 m ve üniform olmayan hareketli yük için sehim ve kablo eğrileri (Boğaziçi Köprüsü).....	73
Şekil 2.27	Bağlı yükleme uzunluğu 0.40 m ve üniform olmayan hareketli yük için sehim ve kablo eğrileri (F. S. M. Köprüsü).....	74
Şekil 2.28	Asimetrik durumda Boğaziçi Köprüsündeki sehim ve kablo eğrileri.....	74
Şekil 2.29	Asimetrik durumda F. S. M. Köprüsündeki sehim ve kablo eğrileri.....	75
Şekil 2.30	Asimetrik yüklü kablonun, sabit yük değişimlerine göre sehim eğrileri.....	75
Şekil 2.31	Asimetrik yüklü kablonun, sabit yük değişimlerine göre sehim eğrileri.....	76
Şekil 2.32	Yatay izdüşümü ve düşey izdüşümü olan eğik kablo.....	77
Şekil 2.33	Yalnız sabit yüke maruz bir eğik kablonun iki durumu; fakat yatay kuvvetin değişimi ile beraber.....	78
Şekil 2.34	Kule tepesinin yatay yerdeğiştirmesi ve relatif yatay izdüşüm arasındaki ilişki.....	79
Şekil 2.35	Kule tepesinin yatay yerdeğiştirmesi ve sabit yük şiddeti arasındaki ilişki.....	79
Şekil 2.36	Üç açıklıklı kablonun değişen yan açıklıklarıyla beraber oluşan çökme eğrileri.....	80
Şekil 2.37	Yatay izdüşümü 256 m olan bir eğik kablonun sehimini.....	81
Şekil 2.38	Bir eğik kablonun c kiriş uzunluğu ve T kiriş kuvveti.....	81
Şekil 2.39	Yatay kablonun T_1 ve T_2 kiriş kuvvetleriyle beraber iki durumu.....	82
Şekil 2.40	Eğik kablo ve eşdeğer yatay kablonun eşit şekil değiştirme özellikleri.....	84
Şekil 2.41	Kablo uzaması ve kablo gerilmesi arasındaki ilişki.....	84
Şekil 2.42	Eğik kablonun kirişe dik ve düşey sehimleri.....	85
Şekil 2.43	Gerilme değişim aralığı σ_1 - σ_2 olan eğik kablonun eşdeğer elastisite modülü.....	86

Şekil 2.44	Başlangıç gerilmesi σ_1 olan kablonun tanjant modülü.....	87
Şekil 2.45	Yatay kablo izdüşümü ve eğri parametresiyle beraber eşdeğer elastisite modülleri değişimini gösteren diyagram.....	88
Şekil 2.46	Bir eğik kablonun, gerilmesi ile kablo uzamasının değişimi.....	89
Şekil 2.47	Gerçek ve idealize edilmiş eğik kablo.....	89
Şekil 2.48	Eğik kablolar için sekant modülü veya tanjant modülü kullanılması halinde oluşan hata.....	91
Şekil 2.49	Gerilme oranı $\kappa=0.80$ ve yatay izdüşümleri 200 m, 400 m, 600 m ve 800 m olan eğik kabloların, ayrı ayrı σ_2 gerilmesi ile birim kablo uzaması arasındaki ilişki.....	92
Şekil 2.50	Gerilme oranları 0.50 ve 0.80 olan eğik kablolarla, maksimum eksenel rijitliği veren $\sigma_{2,ex}$ nin değişimi.....	93
Şekil 2.51	Eğimi $h/a=1$ ve $h/a=1/3$ olan eğik kabloların maksimum normal kuvvet yerine kiriş kuvveti kullanılması ile oluşacak hata sınırı.....	93
Şekil 2.52	Gerili tel için salınım modları.....	94
Şekil 2.53	Sehim yapmış bir kablonun enine düzlemsel salınımları.....	95
Şekil 2.54	Sehim yapmış kablonun düzlemsel salınımının modları.....	96
Şekil 2.55	Birinci dört doğal frekans için boyutsuz eğriler.....	97
Şekil 2.56	$P_{gc}=(8f/l)^3 EA/wl$ parametresinin $4\pi^2$ değerine geçişteki birinci simetrik modun değişimi.....	97
Şekil 2.57	Esnek mesnetli sehim yapmış kablonun salınım modları.....	99
Şekil 2.58	Kısa ve uzun yan açıklıklara sahip üç açıklıklı kablo için salınım modları.....	99
Şekil 2.59	Merkezi bir kelepçeye sahip üç açıklıklı kablonun salınım modları.....	100
Şekil 2.60	Asimetrik yük altındaki bir asma köprünün kablo semerinde oluşan açısal değişimi.....	101
Şekil 2.61	Eğik kablonun farklı sehimler altında kablo ucundaki açısal değişimi.....	101
Şekil 2.62	Kablo piminin izin verdiği kablo ucundaki açısal değişim.....	102
Şekil 2.63	Kablo soketi yardımıyla kablo ucunda önlenen dönme.....	102
Şekil 2.64	Kablo semeri.....	102
Şekil 2.65	Açısal değişime maruz kalan kablo.....	103
Şekil 2.66	Bir kabloda teller arasında kaymanın olduğu ve kaymanın olmadığı durumlarda gerilmelerin değişimi.....	104
Şekil 2.67	Açısal değişime maruz kalan kablo bandı.....	105
Şekil 2.68	Gerçek ve idealize edilmiş kablo bandı.....	105
Şekil 2.69	Mesnetlerin simetrik ve asimetrik dönmelerine maruz kalan merkezi kablo bandına sahip kablo.....	106
Şekil 2.70	Mesnetlerin açısal dönmelerine maruz kalan merkezi kablo bandına sahip kablo.....	107
Şekil 2.71	Hareketli yük altında bozulan asma köprü ana kablosu. Altta ise uçtaki açısal dönmelerinin ana kablo üzerindeki idealize edilmiş hali.....	108
Şekil 3.1	Üç temel kablo sistemi olan bu sistemlerde tüm elemanlar çekme gerilmesi alır.....	112
Şekil 3.2	Asma sisteminin geometrisi ve terimlendirmesi.....	113
Şekil 3.3	Askı çubuklarının, $h/l=0.10$ olan bir asma sistemde kablo çelik miktarı üzerindeki etkisi.....	114
Şekil 3.4	Fan sistemin geometrisi ve terimlendirilmesi.....	114
Şekil 3.5	Harp sistemin geometrisi ve terimlendirilmesi.....	115

Şekil 3.6	Eşit yatay kuvvete sahip asma sistem yüksekliği ve harp sistem yüksekliği arasındaki oranın değişimi.....	116
Şekil 3.7	Aynı yatay kuvvetteki üç basit kablo sistemi için Teorik kablo çeliği miktarı.....	117
Şekil 3.8	Kule yüksekliği ile kablo çelik miktarının değişimi.....	118
Şekil 3.9	Kule yüksekliğini artırarak ve yatay kablolar yerine rijitlik kirişini kullanarak fan sistemin kablo çelik miktarındaki tasarruf.....	119
Şekil 3.10	Bir asma köprünün kablo sistemi.....	119
Şekil 3.11	Bir eğik askılı köprünün kablo sistemi.....	120
Şekil 3.12	Birinci derece stabil, ikinci derece stabil ve stabil olmayan kablo sistemleri.....	121
Şekil 3.13	Fan sistem.....	121
Şekil 3.14	Kule ve eğik kablolar arasında hareketli mesnetlere sahip fan sistem.....	121
Şekil 3.15	Zemine ankrajlı asma sistem.....	122
Şekil 3.16	Harp sistem.....	122
Şekil 3.17	Yan açıklıkta ara mesnetlere sahip harp sistem.....	122
Şekil 3.18	Düsseldorf'daki Oberkasseler Köprüsü.....	123
Şekil 3.19	Simetrik iki açıklığa sahip bir eğik askılı köprünün yapısal sistemleri.....	124
Şekil 3.20	İki farklı yapı sisteminin çökmeleri arasındaki karşılaştırma.....	125
Şekil 3.21	Kısmi zemine ankrajlı eğik askılı sistemler.....	126
Şekil 3.22	Üç açıklıklı asma köprü kablo sistemi.....	127
Şekil 3.23	Maksimum askı kuvveti için yükleme durumu.....	129
Şekil 3.24	Maksimum ana kablo kuvveti için yükleme durumu.....	129
Şekil 3.25	Kule tepesi yatay dengesi.....	130
Şekil 3.26	Üç açıklıklı simetrik bir asma köprünün geometrik parametreleri.....	131
Şekil 3.27	Bir kule üzerindeki normal kuvvetlerin hareketi.....	133
Şekil 3.28	Üç açıklıklı bir asma köprünün verilen parametrelere göre bağıl maliyetinin değişimi.....	136
Şekil 3.29	Üç farklı u_c/u_p oranı için bağıl maliyetin değişimi.....	136
Şekil 3.30	Üç açıklıklı bir asma köprünün verilen parametrelere göre bağıl maliyet değişimi.....	137
Şekil 3.31	Kulelerin dışındaki yaklaşma açıklıklarından bağımsız tek açıklıklı asma köprü.....	137
Şekil 3.32	Boğaziçi Köprüsü.....	138
Şekil 3.33	Kısa yan açıklıklı üç açıklığa sahip asma köprü.....	138
Şekil 3.34	George Washington Köprüsü.....	139
Şekil 3.35	Büyük yan açıklığa sahip üç açıklıklı asma köprü.....	139
Şekil 3.36	Tagus Nehri Köprüsü.....	139
Şekil 3.37	Aşırı uzunlukta yan açıklığa sahip asma köprü.....	140
Şekil 3.38	Ankraj bloğu yakınında kafes giriş altındaki ana kablonun durumu.....	140
Şekil 3.39	Asma köprüdeki ek kuleler ve ana kablonun daha altta bulunan ankraj bloğuna kadar olan sürekliliği.....	140
Şekil 3.40	Little Belt Köprüsü.....	141
Şekil 3.41	Merkezi bir kelepçe ve ankraj bloklarından birisinde	

	sabit bir mesnede sahip olan üç açıklıklı asma köprü.....	142
Şekil 3.42	Tancarville Köprüsü.....	142
Şekil 3.43	Merkezi bir kelepçe ve kulelerin birinde sahip mesnede sahip üç açıklıklı asma köprü.....	142
Şekil 3.44	Hidrolik aracın görünümü.....	143
Şekil 3.45	Açıklık ortasındaki rijitlik kirişi ve ana kablo arasındaki ilişki.....	144
Şekil 3.46	Tagus Nehri Köprüsünde merkezi kelepçenin ana kablo ile kafes kirişin üst kirişi arasındaki bağlantısı.....	144
Şekil 3.47	Asimetrik yük altında rijitlik kirişi ve ana kablonun sehim.....	145
Şekil 3.48	Ana kablo üzerindeki kelepçe ile ve kirişe bağlanan düşey elemanın dönmesi.....	145
Şekil 3.49	Ana kablo ve rijitlik kirişi arasında eğik askılar bulunan asma köprü.....	146
Şekil 3.50	Ana kablo ve kiriş arasında askı ağı bulunan asma sistem.....	146
Şekil 3.51	Emmrich Köprüsü için teklif edilen tek kablolu köprü örneği.....	147
Şekil 3.52	Self ankrajlı asma sistem.....	147
Şekil 3.53	Fan sisteme sahip üç açıklıklı eğik askılı köprü.....	147
Şekil 3.54	Yükleme durumuna göre ankraj kablosunda oluşacak min. ve mak. çekme.....	148
Şekil 3.55	Sürekli bir sistem olarak idealize edilmiş fan sistem.....	149
Şekil 3.56	Yan-ana açıklık oranı ile hareketli-sabit yük oranı ve gerilme oranı arasındaki değişim.....	149
Şekil 3.57	Eğilme rijitliğinin I_a/I_m ve p/w arasındaki ilişkiye etkisi.....	150
Şekil 3.58	Maksimum eğik kablo kuvveti için yükleme durumu.....	151
Şekil 3.59	Maksimum ankraj kablo kuvveti için yükleme durumu.....	151
Şekil 3.60	İdealize edilmiş, $w+p$ yüküne maruz sürekli fan.....	151
Şekil 3.61	İdealize edilmiş, sürekli fanlara sahip simetrik ve üç açıklıklı köprü.....	152
Şekil 3.62	Kabloların ağırlıklarının ihmal edildiği basitleştirilmiş ifadelerin uygulamasında oluşan hata.....	154
Şekil 3.63	Üç açıklıklı asma ve fan sistem için bağıl maliyetin değişimi.....	155
Şekil 3.64	Asma ve fan sistem için kablolar ve kulelerdeki eşdeğer miktarın değişimi.....	156
Şekil 3.65	Çek Cumhuriyetindeki Danube Nehri Köprüsünün kulesi.....	157
Şekil 3.66	İdealize edilmiş, sürekli fanlı ve eğik kuleli sistem.....	158
Şekil 3.67	Yatay kule izdüşümü ile değişen kule yüksekliği ve bağıl maliyetin değişimi.....	158
Şekil 3.68	Üç açıklıklı köprüde düşey kulelerde, optimum eğikliğe sahip kuleler arasındaki karşılaştırma.....	159
Şekil 3.69	Eğik kablolarda uzamanın neden olduğu düşey sehim.....	159
Şekil 3.70	Ankraj kablosunun neden olduğu kablo sistemindeki dönme.....	160
Şekil 3.71	Ankraj kablosu ve eğik kabloların uzamasını neden olduğu açıklıktaki sehim.....	160
Şekil 3.72	Orta açıklık sehimine, eğik kablo uzaması ve ankraj kablosu uzamasının katkısı.....	161
Şekil 3.73	Bağıl kule yüksekliği ile orta açıklık sehim arasındaki değişim.....	162
Şekil 3.74	Asma ve fan sistemin sehimleri arasındaki karşılaştırma.....	163
Şekil 3.75	Büyük bir ana açıklık tarafından desteklenen fan şekilli kablo sisteminin farklı düzenlemeleri.....	164

Şekil 3.76	Bir çift fanlı ve iki çift fanlı köprüde kule malzemesi ve kablo çeliği miktarları arasındaki karşılaştırma.....	165
Şekil 3.77	Strömsund Köprüsü.....	165
Şekil 3.78	Ana açıklık fanından daha kısa bir açıklığa sahip çok kablolu sistem.....	166
Şekil 3.79	Birkaç paralel tekil halattan oluşan ankraj kablosu.....	166
Şekil 3.80	Üç tekil halattan oluşan ankraj kablosu.....	166
Şekil 3.81	Son ayağın yer değiştirmesi ile elde edilen çok kablolu simetrik fan sistem.....	167
Şekil 3.82	Faro Köprüsünün kablo sistemi.....	167
Şekil 3.83	780 m ana açıklığa sahip eğik askı köprü için planlanan sistem.....	167
Şekil 3.84	Asıl eğik kabloların sehimini azaltan ikincil kablolarla sahip fan sistem.....	168
Şekil 3.85	İkincil kablolarla desteklenen eğik kablo.....	168
Şekil 3.86	1300 m lik uzun açıklığa sahip eğik askılı köprü planı.....	169
Şekil 3.87	Harp sisteme sahip üç açıklıklı eğik askılı köprü.....	169
Şekil 3.88	Basit harp sistem.....	169
Şekil 3.89	Tekil yükün simetrik ve asimetrik şekilde yükleme durumu.....	170
Şekil 3.90	Yükleme durumu için kule veya kirişte oluşan momentler.....	170
Şekil 3.91	Değiştirilmiş harp sistemle rijit kulede oluşan moment.....	171
Şekil 3.92	Harp sistemli üç açıklıklı eğik askılı köprü.....	171
Şekil 3.93	Üç yükleme durumuna göre harp sistemde mak/min kablo kuvvetleri.....	172
Şekil 3.94	Hareketli yükte yalnız ana açıklıktaki harp sistemin şekil değiştirmesi.....	172
Şekil 3.95	Ana açıklık ve yan açıklıkta farklı sabit yük şiddetindeki harp sistem.....	173
Şekil 3.96	Harp sistemin yan açıklıkta birleşim noktalarının altındaki ara mesnetler.....	173
Şekil 3.97	Çok kablolu harp sistemde iki ara mesnetli yan açıklık.....	174
Şekil 3.98	İki yükleme durumuna göre üç açıklıklı köprünün sehimleri.....	174
Şekil 3.99	Alt eğik kablolarla maksimum kuvvet için yükleme durumu.....	175
Şekil 3.100	Rijit kirişe sahip harp sistemin tepe kablosundaki maksimum kuvvet için yükleme durumu.....	175
Şekil 3.101	Rijit kuleye sahip harp sistemin yan açıklık üst kablosundaki maksimum kuvvet için yükleme durumu.....	176
Şekil 3.102	Yan açıklığı mesnetli harp sistemin kablo kuvvetleri.....	176
Şekil 3.103	Ana açıklıkta $w+p$ yüküne ve yan açıklıkta ara Mesnetlere sahip sürekli harp sistemin idealize edilmiş şekli.....	177
Şekil 3.104	Kiriş üzerindeki kulenin enkesit alanının doğrusal değişim varsayımı.....	178
Şekil 3.105	Üç farklı kablo sistemine sahip köprülerin ilişkisi.....	179
Şekil 3.106	Üç açıklıklı köprü sistemlerinin bağıl maliyet değişimi.....	180
Şekil 3.107	Üç basit kablo sistemindeki sehimler.....	181
Şekil 3.108	Harp sistemli ilk eğik askılı köprülerin yapısal sistemi.....	181
Şekil 3.109	Rhine Köprüsü.....	182
Şekil 3.110	Yan açıklığında ara mesnetlere sahip harp sistemli köprünün yapısal sistemi.....	182
Şekil 3.111	Knier Köprüsü.....	182
Şekil 3.112	Çok kablolu harp sistem.....	183
Şekil 3.113	Dames Point Köprüsü projesi.....	183
Şekil 3.114	Değişikliğe uğramış simetrik harp.....	184

Şekil 3.115	Değişikliğe uğramış, asimetrik, ara mesnetsiz harp sistem.....	184
Şekil 3.116	Rhine Köprüsü.....	184
Şekil 3.117	Birleşik kablo sistemli bir köprünün yapısal sistemi.....	185
Şekil 3.118	Asma ve fan sistem arasında sabit yükün dağılımı.....	186
Şekil 3.119	Eğik kabloların düşey askılara iki türlü bağlantı şekli.....	186
Şekil 3.120	Köprü tabliyesinden bakıldığında Brooklyn Köprüsünün sehim yapmış eğik kabloları.....	187
Şekil 3.121	Birleşik kablo sistemi için fan uzunluğunun tayini.....	188
Şekil 3.122	Dischinger'in önerdiği kablolu köprü sistemi.....	189
Şekil 3.123	Birincil kablolarla eğrisel kabloların eklenmesi ile elde edilen kablo ağı sistemi.....	190
Şekil 3.124	Bir kablo ağı köprüsünün yapısal sistemi.....	190
Şekil 3.125	Kablo ağı ve köprüye ankrajlı eğik askılı sistemde kirişin yatay dengesi.....	191
Şekil 3.126	Rijitlik kirişindeki normal kuvvet diyagramı.....	192
Şekil 3.127	Köprüye ve zemine ankrajlı kablo ağ sisteminin ayırımı.....	192
Şekil 3.128	Kablo ağ sisteminin kule tepesindeki planı.....	193
Şekil 3.129	Kablo ağı geometrisi.....	194
Şekil 3.130	Bir eğik kablonun orta açıklıktaki uzunluğunun b_m olarak alınması.....	195
Şekil 3.131	Tepe kablosu yerine poligonal ABCD kablosunun kullanılması.....	196
Şekil 3.132	Kablo ağ sisteminde tepe kablosunun yan açıklığı.....	196
Şekil 3.133	Kablo ağ sistem, asma sistem ve eğik askılı sistem için kuleler ve kablolarla eşdeğer çelik miktarının değişimi.....	197
Şekil 3.134	Üç tip kablo destekli köprü için çelik miktarları araştırmalarının sonuçları.....	198
Şekil 3.135	Üç kablolu köprünün 2000 m açıklık için rijitlik kirişinde oluşan normal kuvvet diyagramları.....	198
Şekil 3.136	Kablolu köprüler için sehim eğrileri.....	202
Şekil 3.137	Kablolu köprüler için sehim eğrileri.....	205
Şekil 3.138	San Francisco-Oakland Köprüsünün batı bölümü.....	206
Şekil 3.139	Üç açıklıklı ve dört açıklıklı kablonun bir ana açıklığında hareketli yük altında oluşan sehimlerin karşılaştırması.....	206
Şekil 3.140	San Francisco-Oakland Köprüsü için köprü sistemleri.....	207
Şekil 3.141	Üç ve tek ana açıklığa sahip eğik askılı köprünün sehimlerinin ilişkisi.....	208
Şekil 3.142	Ankastre kuleye veya iki ayağa mesnetli fan şekilli kablo sistemi.....	209
Şekil 3.143	Zemine ankrajlı üçgen kule yapısının görünümü.....	210
Şekil 3.144	Köprüye ankrajlı sistemde kuvvetlerin hareketi.....	211
Şekil 3.145	Köprüye ankrajlı üçgen kule yapısının görünümü.....	211
Şekil 3.146	Kule yapısının sağ ayağında minimum tepki için yükleme durumu.....	212
Şekil 3.147	Çok açıklıklı asma köprüde üçgen kule yapısı.....	213
Şekil 3.148	İki asma köprü ana açıklığı arasında optimize edilmiş üçgen kule yapısı.....	214
Şekil 3.149	a_p genişliği ile kule yapısındaki çelik miktarının değişimi.....	214
Şekil 3.150	T. Fukuda tarafından araştırılan dört açıklıklı asma köprü.....	215
Şekil 3.151	Üçgen kuleye sahip çok açıklıklı ve fan sistemli eğik askılı köprü.....	215
Şekil 3.152	Kule yapısı ve kablo siseminde a_p genişliği ve h_{p1} yüksekliğine bağlı olarak değişim grafiği.....	216

Şekil 3.153	Kule yapısının genişliği ile orta açıklık sehiminin değişimi.....	217
Şekil 3.154	Kablolu köprülerde kullanılan yatay ankraj kablosu.....	217
Şekil 3.155	Çok açıklıklı asma köprüde yatay ankraj kablosu.....	218
Şekil 3.156	San Francisco-Oakland Köprüsü için incelenen sistem.....	218
Şekil 3.157	Yalnız orta açıklıkta yüklemeye maruz kalan farklı eğik askılı köprülerin sehim eğrileri.....	220
Şekil 3.158	Orta açıklığın yalnız sol tarafında yüklemeye maruz kalan farklı eğik askılı köprülerin sehim eğrileri.....	221
Şekil 3.159	Hareketli yük altında aynı maksimum sehim elde etmek üzere boyutlandırılmış dört eğik askılı köprü.....	223
Şekil 3.160	Yanal sehimler altında zemine ve köprüye ankrajlı kablo sistemleri.....	224
Şekil 3.161	Başlangıçtaki düşey kablo düzleminin dönmesinden oluşan yanal yük.....	225
Şekil 3.162	Zemine ankrajlı çok kablolu fan sistemde yanal mesnet yerine sürekli elastik mesnetin gösterimi.....	226
Şekil 3.163	Asma köprülerde yanal rüzgar yükünden oluşan moment diyagramları.....	227
Şekil 3.164	Kule tepesindeki yanal yüklerin dengesi.....	228
Şekil 3.165	Yanal P_t yükünden dolayı başlangıç düşey kablusunun dönmesi ve ötelenmesi.....	229
Şekil 3.166	Askı ve eğik kablonun bölgesel salınımı.....	230
Şekil 3.167	Çift halatlı kabloda rüzgar tarafında olmayan halatın salınımı.....	231
Şekil 3.168	Stabilize halatlarla bölgesel salınımların önlenmesi.....	232
Şekil 3.169	Bölgesel salınımları azaltan amortisörler.....	233
Şekil 3.170	Birinci simetrik modun tipik yerdeğiştirme biçimi.....	234
Şekil 3.171	Ana açıklıkta birinci simetrik modun yerdeğiştirme biçimleri.....	235
Şekil 3.172	Birinci asimetrik modun tipik yerdeğiştirme biçimleri.....	235
Şekil 3.173	Düşey ve burulma salınımlarının dinamik modeli.....	236
Şekil 3.174	İki kütleli mesnet yaylarında toplandığını gösteren dinamik model.....	236
Şekil 3.175	İki mesnet yayı arasında kütleli üniform olarak yayılı olduğu dinamik model.....	237
Şekil 3.176	Kule ayaklarında burulma rijitliği bulunmayan (a) ve bu elemanlarda burulma rijitliği bulunan (b) üç açıklıklı asma köprünün birinci simetrik burulma modunun yerdeğiştirme biçimleri.....	239
Şekil 3.177	Asma köprüde ana açıklık için yapısal sistemler.....	239
Şekil 3.178	Little Belt Köprüsünde giriş ve merkezi kelepçe arasındaki bağlantı.....	240
Şekil 3.179	Köprüde girişin kablo sisteminden bağımsız salınımı.....	241
Şekil 3.180	Merkezi bir kablo düzlemine sahip sistemde girişin burulma salınımı.....	242
Şekil 3.181	Asma köprüde enine salınımların ilk dört modu.....	242
Şekil 3.182	Çift konsollu eğik askılı köprüde enine salınım.....	243

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Üst yapının yapısal elemanları için çelik miktarının karşılaştırılması.....	200
Çizelge 3.2 Hareketli yük altında gerilme değişimleri.....	201
Çizelge 3.3 Sıcaklık değişmesi nedeni ile meydana gelen gerilmeler.....	202
Çizelge 3.4 Hareketli yük altında maksimum sehim.....	203
Çizelge 3.5 Hareketli yük altında maksimum eğim değişimi.....	204
Çizelge 3.6 Kule tepesinde meydana gelen maksimum açısal değişim.....	205
Çizelge 3.7 Şekil 3.157 ve 3.158'deki sistemler için birim uzunluğa gelen bağlı miktarlar.....	223



ÖNSÖZ

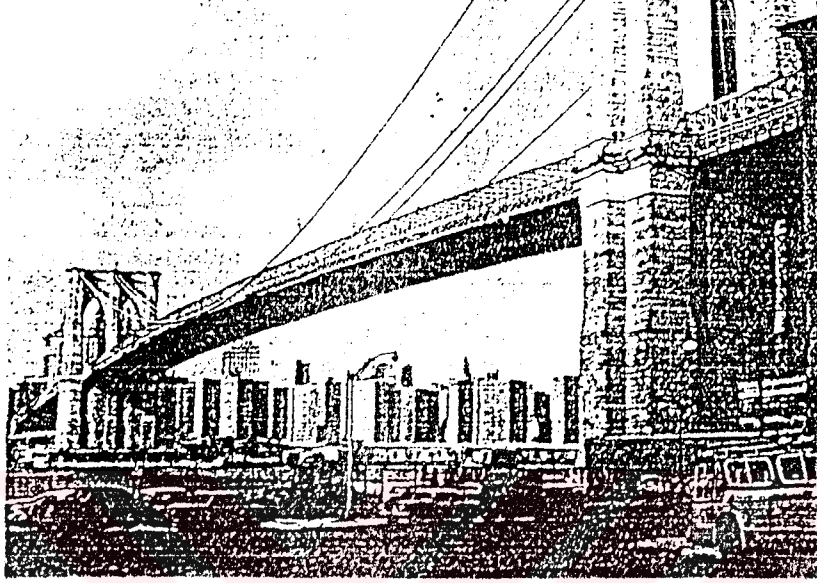
Bu tezin hazırlanmasında yardımcı olan ve her konuda bana yol gösteren Danışmanım Prof. İbrahim EKİZ'e teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmalarım sırasında büyük ilgi ve desteklerini gördüğüm sayın Prof. Dr. Tahir EKMEKYAPAR'a, İnş. Yük. Müh. Ali SARI'ya ve eşim Zir. Yük. Müh. Füsun EKMEKYAPAR'a da teşekkürü borç bilirim.



1. BÖLÜM: KABLOLU KÖPRÜLERİN GELİŞİMİ

Modern asma köprülerin ilki, New York'ta East Nehri üzerindeki Brooklyn Köprüsü olarak kabul edilmektedir (Şekil 1.1). Bu köprü 1883'de trafiğe açılmış olup, orta açıklığı 486 m. ve yan açıklıkları 286 m. olmak üzere toplam köprü uzunluğu 1058 m.'dir.



Şekil 1.1 New York East Nehri üzerindeki Brooklyn Köprüsü.

Brooklyn Köprüsü – inşaat sırasında adı East Nehri Köprüsü'ydü – çok yetenekli bir köprü tasarımcısı olan John A. Roebling'in başlıca çalışmasıdır. Bu kişi Almanya'da doğmuş ve 25 yaşında ABD'ye gitmiştir. East Nehri Köprüsü'nün yapımına başlamadan önce Roebling, çeşitli ve önemli bir çok kablolu köprülerin tasarımını yapmıştır. Bunların arasında, ana açıklığı 250 m. olan ve demiryolu taşıyan Niagara Asma Köprüsü, ana açıklığı 322 m. olan Ohio Nehri üzerindeki Cincinnati ve Covington Asma Köprüleri sayılabilir. Bu son köprü East Nehri Köprüsü'nden önce yapılan dünyadaki en büyük açıklıklı köprüdür.

Roebling'in ABD'de köprü tasarımcısı olarak çalıştığı sıralarda, Wheeling'deki Ohio Nehri üzerindeki asma köprü rüzgar etkisiyle yıkılmıştır. Bu kaza sonucu Roebling, asma köprülerin rijitliklerinin artırılmasına ilişkin araştırmalara yönelir. Tasarımını yaptığı köprülerde, önemli derecede eğilme rijitliğine sahip rijit kafes kirişler kullanır ve sisteme eğik kablolar ekler.

Aerodinamik sorununa ilişkin bu düşünce tarzı, East Nehri Köprüsü'nde tasarımcı tarafından şöyle belirtilmiştir: “ Ancak benim yapı sistemim daha önce yapılanlardan

temelde farklıdır. Ben, şiddetli rüzgarların oluşturacağı yıkıcı kuvvetlere tamamıyla karşı koyabilecek şekilde East Nehri Köprüsü'nü planladım. Taşıma gücü hesapların yanında, dikkatler büyük oranda kabloların eğik olarak yerleştirilmesine ayrılmıştır.”

Bu tanımlama, eğik askılı sistemin asma sistemden daha rijit olduğunu göstermektedir. Brooklyn Köprüsü'nün eğik kabloları yükün önemli bir kısmını taşımaktadır (Şekil 1.2). Eğik kabloları sahip sistemdeki ana kablonun eğriliği, yükün yalnızca ana kablo tarafından taşındığı sistemden daha küçük olduğu Brooklyn Köprüsü'nde görülmektedir.

Eğik askılı sistemin Brooklyn Köprüsü'ndeki etkinliği, aşağıda belirtilen noktalarda Roebling tarafından açık olarak gösterilmiştir: “Eğik kabloların tek başına taşıma gücü 15000 ton. Eğer kabloları çıkaracak olursak köprü merkezde sehim yapacak ama çökmeyecektir.”



Şekil 1.2 Brooklyn Köprüsünde köprü tabliyesinden kablo sisteminin görünüşü.

John Roebling, mühendislik kariyerine, köprü tasarımının bilimden çok hala sanat gerektiren bir sezgi ve bakış olduğu dönemde başlar. Bu durum onu, kablolu köprülerin yapısal davranışını daha geniş şekilde incelemeye zorunlu kılar. Karmaşık yapıların hesaplarında, sezgisel anlayışını da katarak yapı elemanlarına uygun boyutlar verebilmiştir.

John Roebling'den sonraki mühendisler çalışmalarını bu konuda yoğunlaştırmışlardır. Bu hesaplamalar daha kesin matematiksel modeller gerektirmiştir. Yüksek dereceden hiperstatikliğe sahip sistemler bu matematiksel modellere tabi tutulursa, içinden çıkılamayacak karışıklığa sebebiyet vereceğinden, yapıların projeleri hesaplama

kapasitelerine göre seçilmiştir. Bu da bir çok bakımdan geriye doğru bir adım olmuştur. Sonuçta Brooklyn Köprüsü'nde olduğu gibi, kablo sistemi basit hesaplamayla yerine yerleştirilmiştir.

19. yy'ın ikinci yarısındaki asma köprülerin hesabı için kullanılan teoriler, birinci derece (elastik teori) teorileri olmuştur. Bu teori, iki ve üç mafsallı rijitlik kirişine sahip asma köprülerle uğraşan 1858'deki Rankine teorisi gibidir. Bu teoride ana hedef, kablo ve rijitlik kirişi arasındaki etkileşimi gözönünde bulundurmaktır. Elastik teori, 1886 yılında Maurice Levy tarafından daha da geliştirilmiştir.

Yapının projelendirilmesinde işlem fazlalığını bir kenara bırakma eğilimi, Williamsburg Köprüsü'nde görülmektedir. Bu köprü 1903 yılında trafiğe açılmış olup, ana açıklığı 488 m.'dir (Şekil 1.3).



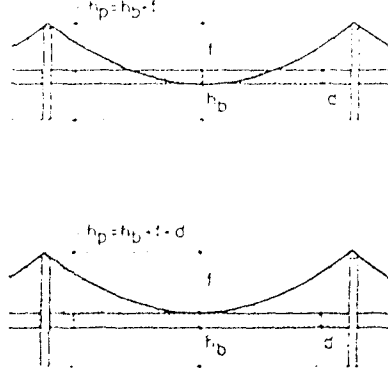
Şekil 1.3 East Nehri üzerindeki ikinci köprü olan Williamsburg Köprüsü.

Yan açıklığında asma sistem olmayan yapı sisteminin matematik modellemesi, Brooklyn Köprüsü'nde iyi sonuç vermiştir. Ayrıca kafes kiriş yüksekliği fazla olan köprülerde, açıklığın $1/40$ 'ı, yapının gerçek davranışı ile birinci derece etkilerin dikkate alındığı matematik modeli aynı sonuçları vermiştir.

Williamsburg Köprüsü, genellikle Brooklyn Köprüsü'ne göre eleştirilere sebep olmuştur. Asma köprülerin tasarımındaki genel estetiğe uymadığı söylenmiştir. Çünkü yapı biçimsiz bir kule görünümündedir. Aşırı derecede yüksek kafes kirişlere sahiptir. Köşeli ve kaba bir görünüm sergilemektedir.

Williamsburg ve Brooklyn Köprülerinin ortak özelliği, rijitlik kafes kirişi ile beraber orta açıklıktaki ana kablonun tasarımındaki benzerliktir. Her iki köprüde de kablolar kafesin üst kirişinden geçer ve ana açıklığın ortasındaki alt kirişe teğet olmaktadır. Şekil 1.4'de görüldüğü gibi, modern asma köprülerde ana kablo genellikle rijitlik kafes kirişinin

üzerine yerleştirilmektedir. Bu durum kablo eğrisinden kolayca anlaşılacağı gibi görünüş bakımından tercih nedenidir. Ayrıca modern köprülerde narin rijitlik kafes kirişi veya kirişi kullanmakla sağlanacak ekonomik kazanç, Williamsburg Köprüsü'nden daha çok olmaktadır. Çünkü bu köprüdeki kafes kiriş yüksekliği, ana kablo sehiminin yaklaşık % 25'ine eşittir.



Şekil 1.4 Üstte; eski asma köprü, altta; tercih edilen (modern) asma köprü örneği.

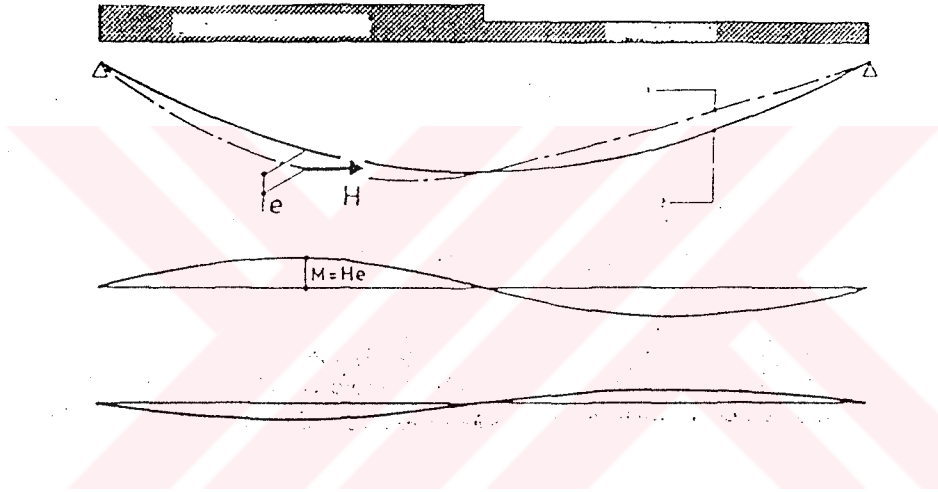
East Nehri'ni geçen üçüncü asma köprü Manhattan Köprüsü'dür. Tasarımı L. S. Moisseiff tarafından yapılmış ve 1909 yılında trafiğe açılmıştır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 East Nehri üzerindeki üçüncü köprü olan Manhattan Köprüsü.

Kablolu köprülerin gelişiminde Manhattan Köprüsü büyük önem taşımaktadır. Çünkü “Sehim Teorisi” ile analiz edilen ilk büyük asma köprüdür. Bu teori Melan tarafından Viyana’da 1888’de geliştirilmiştir. Sehim teorisi rijitlik kirişindeki eğilme momentlerinin hesabında, hareketli yük altındaki ana kablonun yer değiştirmelerini dikkate alan ikinci derece teorisidir. Böylece sabit yük geometrilili sisteme göre, sehim yapmış sistem için denge daha doğru oluşturulabilmektedir.

Sehim teorisini açıklayabilmek için, ana açıklığının sol yarısında hareketli yük etkisindeki asma köprü dikkate alınabilir. Şekil 1.6'da görüldüğü gibi, sabit yük ve hareketli yükten oluşan funiküler eğrisi, sabit yükten oluşan kablo eğrisine uygunluk göstermez. Bu nedenle de sistemde momentler oluşur. Uygulanan hareketli yük nedeniyle meydana gelen sehimlerin ihmal edilmesi yüzünden, geometrideki değişim varsayımına dayalı birinci derece teorisi ile rijitlik kirişinde oluşan momentler ($H \cdot e$) değeriyle belirtilebilir. H , yatay kuvvet (funiküler eğrisi ile ilgili) ve e 'de kablo ile funiküler eğrisi arasındaki düşey uzaklıktır. Rijitlik kirişinde meydana gelen momentler hareketli yüke sahip yarı açıklıkta pozitif, açıklığın diğer yarısında ise negatif olacaktır. Bunun anlamı, rijitlik kirişinin S şeklinde sehime maruz kalmasıdır. Bu durum Şekil 1.6'nın alt kısmında gösterilmiştir.

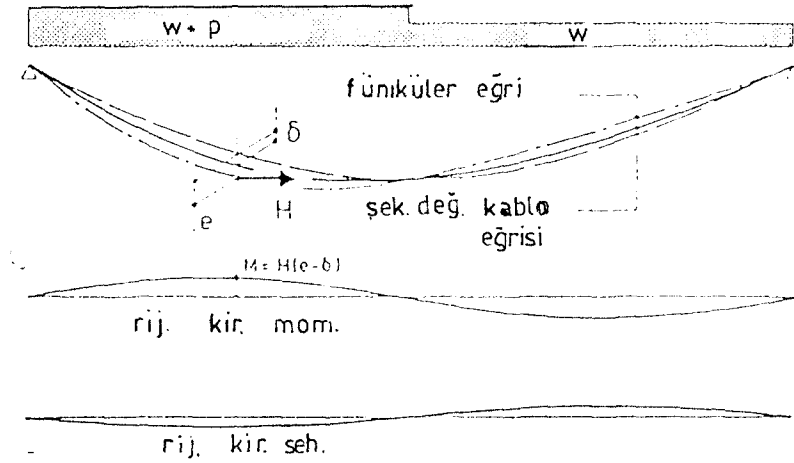


Şekil 1.6 Üstte, yük altında funiküler eğri (kesikli) ve kablo eğrisi (düz); ortada, rijitlik kirişi momenti; altta, rijitlik kirişinin sehim.

Fakat, rijitlik kirişini ana kabloya bağlayan askılar yüzünden bu sehim, ana kablonun geometrisinde bir değişikliğe yol açacaktır. Şekil 1.7'deki dolu çizgili eğri, rijitlik kirişindeki sehimin dikkate alınmasıyla oluşan kablo şeklidir. Kablonun funiküler eğrisine doğru yaklaştığı görülmektedir. Şekil değiştirmiş sistem dengede olmak zorunda olduğundan, rijitlik kirişindeki gerçek momentler, yatay H kuvvetinin, funiküler eğrisi ile yerdeğiştirmiş kablo arasındaki düşey uzaklık olan $(e - \delta)$ 'nin çarpımıyla bulunur.

Kablonun yerdeğiştirmesinde ikinci derece etkisi dikkate alındığında, rijitlik kirişindeki momentler azalacaktır. Birinci derece teorisi ile bulunan değer yarısı kadar olacaktır. Fakat genelde bir sınırlama yoktur. Eğilme rijitliği önemsiz bir asma köprüde kiriş, asimetrik yük altında, yerdeğiştirmiş kablo ve funiküler eğrisi çakışınca kadar

sehim yapacak ve sonunda ($e - \delta = 0$) yani $M = 0$ olacaktır. Nitekim funiküler eğrisi, uygulanan yükün etkisiyle düzgün ve esnek bir halat eğrisine benzemektedir.



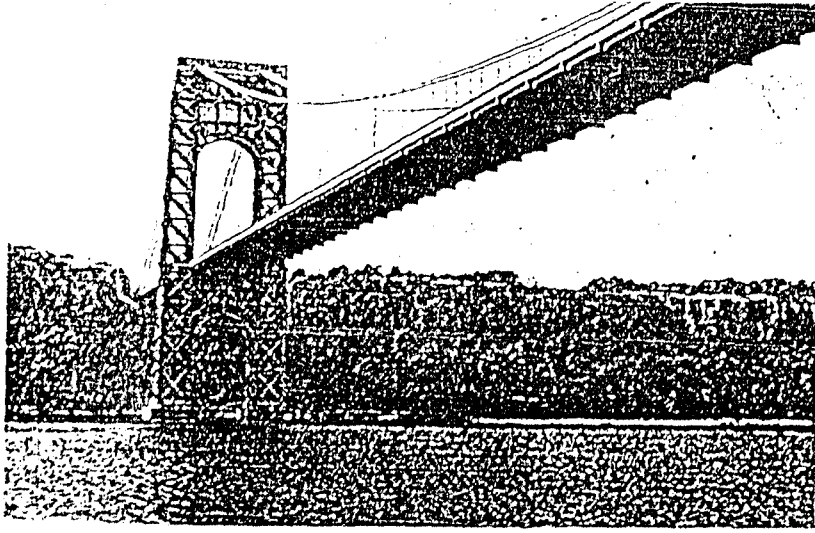
Şekil 1.7 İkinci derece teorisi ile dengede olan sistemin rijitlik kirişindeki moment ve sehim.

Hiç bir rijitlik kirişi olmadan denge sağlandığında sehim teorisi, birinci derece teorisinin tersine minimum eğilme rijitliği sağlamayacaktır. Fakat sehim teorisinin ilk uygulamalarında mühendisler, açıklık uzunluğunun $1/60 \sim 1/90$ aralığındaki rijitlik kafes kirişine minimum bir yükseklik önermişlerdir. Bu şekilde eğilme rijitliği için daha düşük bir sınır belirlenmiştir.

Sehim teorisi, ortaya atıldığı zamanlar hesaplama kapasitesi sınırlıydı. Dolayısıyla doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin çözümü, mühendis için karmaşık ve zaman alıcıdır. Sonuçta abaklar, tablolar ve düzeltme eğrileri biçiminde basitlikler getirilmiştir. Bunlar yardımıyla da daha basit elastik teori sonuçları, sehim teorisinin yaklaşık sonuçlarıyla doğrulanmıştır.

Yeni analitik yaklaşımlar yanında, Manhattan Köprüsü'nde çeşitli yapım teknikleri uygulanmıştır. Düşey çalışan vinçlerle kule dikilmesi ve kendi kendine dönen makina ile kablo sarılması bunlar arasında sayılabilir. Manhattan Köprüsü'nün açılmasından sonra, bu – köprü açıklığını biraz aşan köprüler yapılmasına karşın – 20 yıllık sürede kablolu köprülerin tasarımında çok az bir gelişme kaydedilmiştir.

1931'den sonra önceki bütün köprülerin serbest açıklığını hemen hemen ikiye katlayan, Hudson Nehri üzerindeki George Washington (G. W.) Köprüsü'dür. 1066 m. ana açıklıkla, mesnetler arası 1 km.'yi aşan ilk köprü olmuştur (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 Hudson Nehri üzerindeki George Washington Köprüsü.

O. H. Ammann tarafından tasarımı yapılan G. W. Köprüsü başlangıçta iki tabliyeli olarak düşünülmüştür. Karayolu üst tabliyede, tren yolu alt tabliyede yer almaktadır. Ancak 1920'lerin sonundaki ekonomik kriz nedeni ile orijinal proje küçültülmüş ve ilk olarak üst tabliye yapılmıştır. Böylece köprü başlangıçta, tabliye seviyesinde boyuna doğrultuda önemsiz eğilme rijitliğine sahip olması, yapıyı tamamen rijitsiz hale getirmiştir. Rijitlik kirişinin kullanılmamasına rağmen G. W. Köprüsü, ağır beton tabliyeden gelen büyük sabit yük ve sekiz şeritli trafik yolunun genişliği için yeteri kadar stabil olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca kısmi olarak küçük yan açıklıklar, ana açıklığın $1/60$ 'ından daha az bir uzunluğa sahiptir. Bu durum rijitlik kirişinin eksikliğini belirli bir derecede gidererek, kablolu sistemin etkinliğini artırmıştır.

Brooklyn, Williamsburg ve Manhattan Köprüleri gibi ilk asma köprülerde, köprünün genişliği üzerinde 4 düşey kablo düzlemi düzenlenmiştir. Bu şekilde döşeme kirişlerinin açıklıkları azaltılmış ve yükün yoldan kablo sistemine aktarılması sağlanmıştır. G. W. Köprüsü'nde kablo düzlemleri, köprü genişliğince karayolu alanı sağlamak amacıyla köprü tabliyesinin kenarlarına yerleştirilmiştir. Bu nedenle 4 kablo düzlemi uygulanmış, fakat her kenarda bir çift olarak düzenlenmiştir. Dört kablo düzleminin seçimine, büyük ölçüde kabloların bükülmesi ile ilgili olarak karar verilmiştir. Çünkü iki yerine dört kablo ile çalışma, kablo kesitlerini azaltacağından işin hızını artırmıştır. Kablo, kule ve temeller için boyutlar, alt tabliyenin daha sonra yapılmasına izin verecek şekilde seçilmiştir. Nitekim bu ekleme 1962'de yapılmıştır.

Asma köprülerin analizi işlemindeki ilginç bir gelişme, L. S. Moisseiff ve F. Leinhard'ın 1932'de sundukları “ Yatay kuvvetler etkisindeki asma köprülerin hesabı için bir teori ” de görülmektedir. Gerçekten de bu teori, ikinci derece sehim teorisinin devamı olarak kabul edilebilir. Bu teori, düşey iç düzlem yükleme için o zamana kadar ki bilgilerin geliştirilmiş halidir. Aynı zamanda yatay kuvvetleri de kapsamaktadır. Böylece rijitlik kirişinin yatay sehim nedeniyle, kablo düzlemlerinde oluşan eğim; yatay rüzgar kafes kirişlerindeki momentler ve kesme kuvvetlerinin hesabında dikkate alınmıştır.

Yeni teori, rijitlik kirişi tarafından karşılanan yatay kuvvetlerde önemli azalmaya yol açmıştır. Bu da rüzgar kirişinin narinliğini artırmıştır. Hatta rüzgar kirişi kullanmadan yatay denge sağlanmasında mümkün olmuştur.

Melan tarafından, iki boyutlu sehim teorisinin nasıl geliştirildiği daha önce açıklanmıştır. Bu, düşey doğrultudaki kirişin eğilme rijitliği için alt sınırın kaldırılmasına ilişkindir. Şimdi, sehim teorisinin üç boyutlu davranışını kapsayacak şekilde genişletilmesi ile yatay eğilme rijitliği için alt sınırında kaldırılabilceğini belirtmektedir.

1930'larda kablolu köprülerin ABD'deki büyük uygulamaları olan; George Washington Köprüsü, L. S. Moisseiff'in tasarımı olan San Francisco-Oakland Körfezi Köprüsü ve J. B. Strauss'un tasarladığı Golden Gate Köprüsü yapılmıştır.

San Francisco-Oakland Körfezi Köprüsü, Oakland'dan Yerba Buena adasına geçen ve bu adadan San Francisco'ya geçen Batı Körfezi geçişi olmak üzere iki köprüden ibarettir. Ancak, Batı Körfezi geçişi kablolu köprülerle ilgilidir.

Batı Körfezini geçen iki asma köprüyü bir ankraj bloğu ayırmaktadır (Şekil 1.9).

İki asma köprünün her biri 704 m. ana açıklığa ve 352 m. yan açıklığa sahiptir. Yan açıklıklar, ana açıklığın yarısına eşittir. Bunun nedeni, ankraj ayağına bağlı iki yan açıklığın, asma köprülerin ana açıklığı gibi düşünülmesidir. Bu nedenle ağır ankraj ayağı gereksiz gibi görülebilir.

Kablo kuvvetinin yatay bileşeni bir uçtaki ankrajdan diğer uçtaki ankraja kadar sabit olduğundan, orta ankraj ayağı gerçekten etkisizdir. Fakat hareketli yükün dış ana açıklıklardan birinde bulunması durumunda, çift köprünün bu kısmında yatay kuvvet artacaktır. Dolayısıyla ankraj ayağı, açıklıktan gelen sabit yük + hareketli yükün oluşturduğu yatay kuvvet ve sadece sabit yükün bulunduğu açıklıktan gelen yatay kuvvet arasındaki farka dayanmak zorunda kalacaktır.



Şekil 1.9 San Francisco-Oakland Körfezi Köprüsünün Batı Körfezi geçişi.

İlk araştırmalar sırasında, ankraj ayağının bulunmaması durumu incelenmiştir. Fakat bunlardan hiç biri ayrıntılı çözümler getirememiştir.

Batı Körfezi geçişi başlangıçta iki tabliyeli düşünülmüştür. Üst tabliye karayolu için, alt tabliye ise her gün işe gidip gelen insanların kullanabileceği bir tren yolu olarak planlanmıştır. Bu ağır yüke rağmen, küçük açıklıklar yüzünden, sadece iki düşey kablo düzlemi kullanılmıştır.

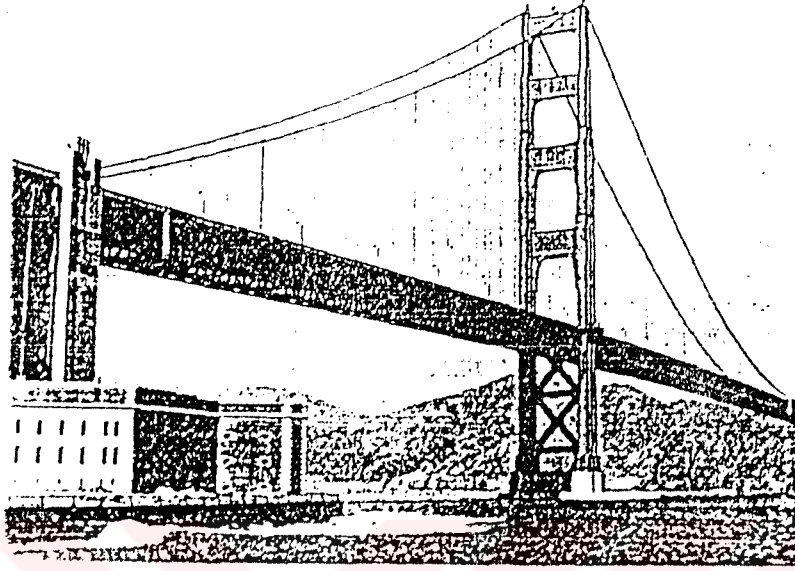
Batı Körfezi geçişindeki çift asma köprüde, en derin ayağın su yüksekliği 73 m. olması nedeniyle oluşan güçlüklerle karşı, yapı sadece üç yılda yapılmıştır. Temmuz 1933'de başlayan inşaat, Kasım 1936'da bitmiştir. Bu süre bugün bile örnek teşkil etmektedir.

Batı Körfezi geçişindeki köprünün yapım süresi ile paralel olarak başlayan Golden Gate Köprüsü'nde, Ocak 1933'de başlamış ve Mayıs 1937'de inşaat sona ermiştir.

Golden Gate Köprüsü, G. W. Köprüsü'nden %20 daha büyük olup, ana açıklığı 1280 m.'dir. Buna rağmen bu köprü -kablo çapı 910 mm. olan G. W. Köprüsü'nün 4 ana kablosuyla karşılaştırılırsa- 930 mm. çapında sadece iki ana kablodan oluşturulmuştur. Bunun başlıca nedeni, Golden Gate Köprüsü'nün tek tabliyeli yapılması ve sonraki ilaveler için bir şart koşulmamasıdır (Şekil 1.10).

Golden Gate Köprüsü'nün rijitlik kafes kirişi, yükseklik-açıklık oranı 1/168 olarak ekstrem bir narinlik göstermiştir. Rijitlik kafes kirişi üç boyutlu olup, ikisi düşey ve kablo düzlemleri altında, diğer boyut ise yatay ve köprü tabliyesinin aşağısındadır. Bu

düzenleme, kafes kiriş kesitinin önemsiz olan burulma rijitliğinden ortaya çıkmıştır. Fakat Golden Gate Köprüsünün tasarımında, aerodinamik stabilite için burulma rijitliğinin gerekliliği tam olarak anlaşılamamıştır.

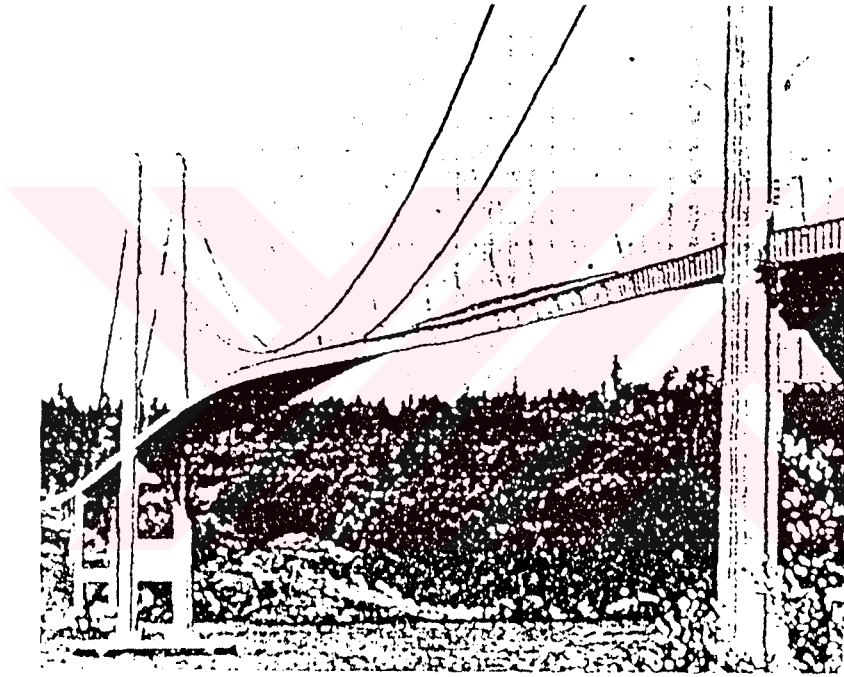


Şekil 1.10 Golden Gate Köprüsü.

Birkaç yıl sonra, Golden Gate Köprüsü'nde oluşan aşırı narinlik nedeni ile Amerikan batı sahilindeki diğer önemli asma köprü olan Tacoma Narrows Köprüsü'nün kullanımı artmıştır. Bu köprü 853 m. ana açıklık, yükseklik-açıklık oranı sadece 1/350 olan plak kirişlerden yapılan rijitlik kirişine sahiptir. Bu aşırı narinlik, tasarımcısı L. S. Moisseiff'in sehim teorisini uygulamasının gerçek bir sonucudur. Bu teori, sürekli azaltılan eğilme rijitliği ile artan bir eğilme momenti verir. Rijitlik kirişinin aşırı narinliğine rağmen köprü, hareketli yükün ve statik rüzgar basıncının etkisine karşı yeterli derecede bir güvenlik sınırına sahiptir. Küçük yükseklik-açıklık oranının yanında, genişlik-açıklık oranı 1/72'de (bu oran Golden Gate Köprüsü'nde 1/47, G. W. Köprüsü'nde 1/33) daha önceki uygulamanın dışındadır. Rüzgar kirişinin aşırı narinliği, gerçekten Moisseiff'in üç boyutlu davranışı kapsayan sehim teorisi ile sağlanmıştır. Ayrıca, Tacoma Köprüsü'nün rijitlik kirişi, yalnız bir yatay bağlantı olduğu için burulma rijitliğine sahip değildir.

Köprünün açılışından sonra, rüzgarda salınım eğilimi gözlenmiştir. İlk dört ay sonunda, enine kesitte dönme oluşmaksızın, bu salınımlar düşey doğrultuda gerçekleşmiştir. Bu salınımlar yaklaşık 1.50 m. genişliğine ulaştıktan sonra durmuştur.

Köprü hizmete girdikten birkaç ay sonra, orta açıklıktaki ana kablolar ve rijitlik kirişi arasındaki karşılıklı yerdeğiştirmeleri önleyen stabil kabloların (askı çubukları) bazılarının kopması, salınımın tipini değiştirmiştir. Salınımlar, açıklığın ortasındaki bir düğüm noktası etrafında, ana açıklığın sağ ve sol iki parça halinde asimetrik olarak hareket ederek, burulma hareketleri meydana getirmesi şeklinde olmuştur. Burulma hareketleri, açıklığın dörtte bir noktalarında, Şekil 1.11’de görüldüğü gibi, $+45^{\circ}$ ’den -45° ’ye varan eğilmelerle tehlikeli bir duruma gelmiştir. Kendi kendine oluşan bu şiddetli salınımlardan bir saat sonra, aerodinamik kuvvetlerde negatif sönüme neden olmuş ve askı çubukları da yorulmanın etkisiyle kırılmaya başlamış, rijitlik kirişinin büyük kısmı suya düşmüştür.



Şekil 1.11 Birinci Tacoma Köprüsünde oluşan salınım hareketi.

Tacoma Köprüsü’nün son salınımları sırasında, rüzgar şiddetli olmayıp 56-67 km/h’lik bir hıza sahiptir. Bu değer, köprünün tasarımında gözönüne alınan maksimum rüzgar hızının çok altındadır. Fakat, rüzgar etkisi için yapı analiz edildiğinde, sadece statik etki dikkate alınırsa köprü tamamen güvenlidir. Dolu gövdeli kirişlerin sivri köşelerinde oluşan rüzgar anaforlarının salınımı ile ortaya çıkan dinamik etkiler için hiçbir araştırma girişimi yapılmamıştır. Tasarımı aşırı narin olan yapıda, aerodinamik kararsızlık (stabil olmayan) etkisiyle bu duruma gelmiştir.

Tacoma Köprüsü'nün yıkılmasından sonra, aerodinamik etkiler, bütün asma köprülerin tasarımında önemli bir kısmı oluşturmuştur. Yapılmış asma köprüler de herhangi bir aerodinamik kararsızlık tehlikesine karşı yeniden incelenmiştir.

New York'taki Bronx-Whitestone Köprüsü incelenen köprülerden birisidir. Bu köprü O. H. Amman tarafından tasarımı yapılmış ve 1939'da trafiğe açılmıştır. Bu köprüde, yükseklik-açıklık oranı 1/209 olan dolu gövdeli kiriş bulunmaktadır.

Ayrıca Bronx-Whitestone Köprüsü'nün genişlik-açıklık oranı 1/31 olup, bu oran Golden Gate ve G. W. Köprülerinin her ikisinden de büyüktür. Dolayısıyla Bronx-Whitestone Köprüsü'nün daha güvenli olduğu söylenebilir.

Salınımlar Bronx-Whitestone Köprüsü'nde de gözlenmiş, fakat bunlar daima küçük genlikli ve yıkıcı olmayan düşey tipli olmuştur.

Bununla birlikte, 1946'da Bronx-Whitestone Köprüsü'nün takviyesine karar verilmiştir. Rijitlik kirişinin yüksekliğini iki katına çıkarmak için, Şekil 1.12'de görüldüğü gibi, dolu gövdeli kirişin üstüne bir kafes kiriş eklenmiş ve rijitlik kirişine, kule tepelerinden eğik kablolar bağlanmıştır. Böylece, salınımlara karşı mukavemeti artırmak amacı ile eğik kablolar ve asma sistem birleştirilerek, Roebling'in görüşü yeniden uygulanmıştır.



Şekil 1.12 Takviye sonrası aerodinamik stabilitesi artırılmış Bronx-Whitestone Köprüsü.

Golden Gate Köprüsü'nde de, rüzgardan kaynaklanan ve yıkıcı olmayan düşey tipli salınımlar görülmüştür. Aralık 1951'de dört saat süren şiddetli bir rüzgar sırasında, bu salınımların düşey genliği 3.30 m.'ye ulaşmış ve köprü trafiği üç saat kapatılmıştır.

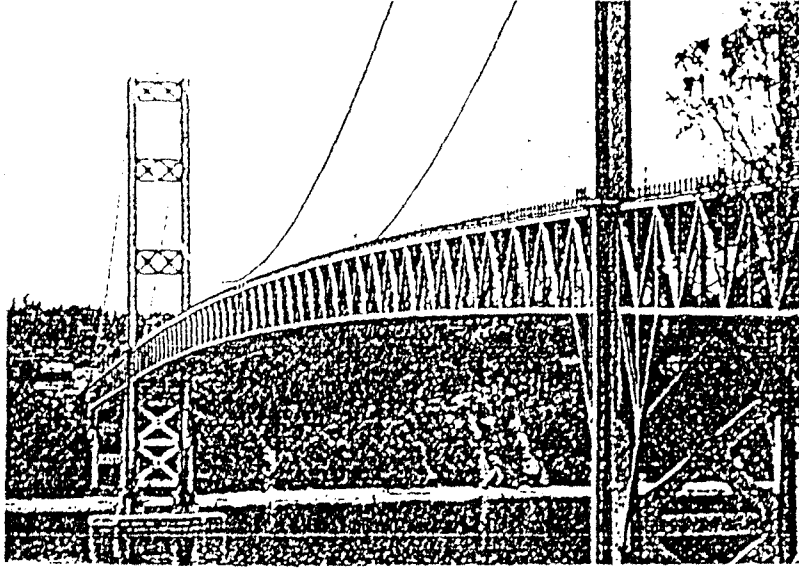
Yetersiz aerodinamik stabilitenin bu şiddetli uyarısından sonra, güvenliği artırıcı bazı önlemler alınmasına karar verilmiştir. Teorik incelemeler burulma rijitliğinin eksikliğini ortaya çıkarmıştır. Burulma rijitliğini artırmak için düşey kafes kirişler arasına yatay bir bağlantı eklenmiştir (Şekil 1.13). Böylece uzay kafes kiriş, üç düzlem kafes kirişi kapsayan açık kesitten, dört düzlem kafes kirişi kapsayan kapalı kesite dönüştürülmüştür.



Şekil 1.13 Yatay bağlantısı eklenmiş Golden Gate Köprüsünü rijitlik kafes kirişi.

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, Tacoma Narrows Köprüsü'nün yeniden yapımına karar verilmiştir. Rüzgarın oluşturacağı salınımlara dayanacak ve önemli değişiklikleri içeren bir yapı sistemi düşünülmüştür (Şekil 1.14). Böylece 2.40 m.'lik yüksek dolu gövdeli kirişlerin yerine 10 m. yükseklikte kafes kirişler yerleştirilmiştir. Genişlik 11.90 m.'den 18.30 m.'ye çıkarılmıştır. Ayrıca köprüye, salınımı sönmüleyeci farklı bazı araçlar konulmuştur.

İkinci Tacoma Köprüsü'nün boyutlarının herkesin dikkatini çekecek şekilde büyük olmasının sebebi ise, yeter derecede güvenliği sağlaması amacını taşımasıdır. Bu ise yıkılan bir yapının yeniden planlanmasında, insan doğasının temel bir özelliğini yansıtmaktadır.



Şekil 1.14 İkinci Tacoma Köprüsü.

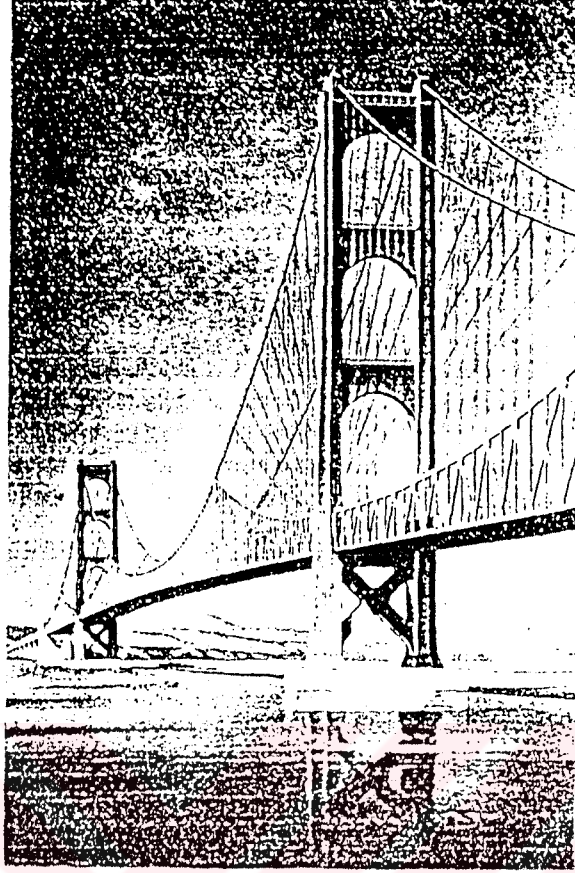
1930’larda asma köprülerin yapımındaki büyük faaliyet, yeni analitik yöntemleri de ortaya çıkarmıştır. Böylece 1938’de Hardesty ve Wessman, ana kablonun tek başına yerdeğiştirmesini başlangıçta hesaplayarak, elde edilen sonuçları içeren bir yöntem sunmuşlardır. Ancak rijitlik kirişinin varlığından ötürü, yöntemde değişikliğe gitmek zorunda kalmışlardır. Bu yöntem, ilk hesaplamalar için çok uygun olmuş, özellikle önceki yıllarda yapılan esnek kirişli köprülerde de bu uygunluk görülmüştür.

Diğer bir yöntem, F. Bleich tarafından 1940’da sunulmuştur. Bu yöntem, diferansiyel denklemlerde doğrusal olmayan terimleri çıkararak, sehim teorisinin doğrusallaştırılması esasına dayanmaktadır. Ayrıca asma köprülerin salınım özelliklerinin incelenmesi içinde uygunluğu kanıtlanmıştır. Ayrıca Tacoma Köprüsü’nün yıkılması da önemli noktaları gündeme getirmiştir.

Tacoma Köprüsü’ndeki sorun, teorik ve deneysel olarak çeşitli tasarımcılar tarafından incelenmiştir. Bu araştırmalar, gelecekte yapılacak kablolu köprülerin tasarımında önemli bir rol oynamıştır.

İkinci Dünya Savaşı’ndan sonra yeni kablolu köprülerin tasarımı ve yapımı ile savaşta hasar görmüş köprülerin onarımı hızla başlamıştır.

1950’de D. B. Steinman, Messina Boğazını geçecek bir köprü planı üzerinde çalışmaya başlamıştır. Bu köprü, 1524 m. ana açıklık ve 732 m. yan açıklıkla mevcut asma köprülerin en büyüğü olmuştur (Şekil 1.15). Messina Köprüsü, karayolu ve demiryolu trafiğini birlikte taşıyacağından büyük rijitlik gerektirmiş ve Steinman’a göre bu durum,



Şekil 1.15 Steinman'ın tasarımı yaptığı Messina Boğazı Köprüsü.

ana açıklık uzunluğunun $1/40$ 'ına -veya 38 m.- karşılık gelen bir rijitlik kafes kirişi yüksekliğine yol açmıştır. Bu ise köprüye çok hantal bir görünüş vereceğinden kafes kiriş yüksekliğinin değiştirilmesine karar verilmiştir.

Messina Köprüsü'nün hesabında, maksimum eğilme rijitliğinin bulunduğu noktalar dikkate alınarak kafes kiriş yüksekliği 13 m. ile 50 m. arasında değişmiştir. Bu noktalar, ana açıklığın dörtte bir noktaları ve yan açıklığın orta noktalarıdır.

Rijitliği daha fazla artırmak amacıyla, rijitlik kirişi ile kulelerin kesişme noktalarından ırsal olarak eğik kablolar kullanılmış ve bunlar ana kablo üzerinde sabitlenmişlerdir. Bu eğik kabloların esas görevi, asimetrik yükleme altında ana kabloların yerdeğiştirmesini azaltmaktır.

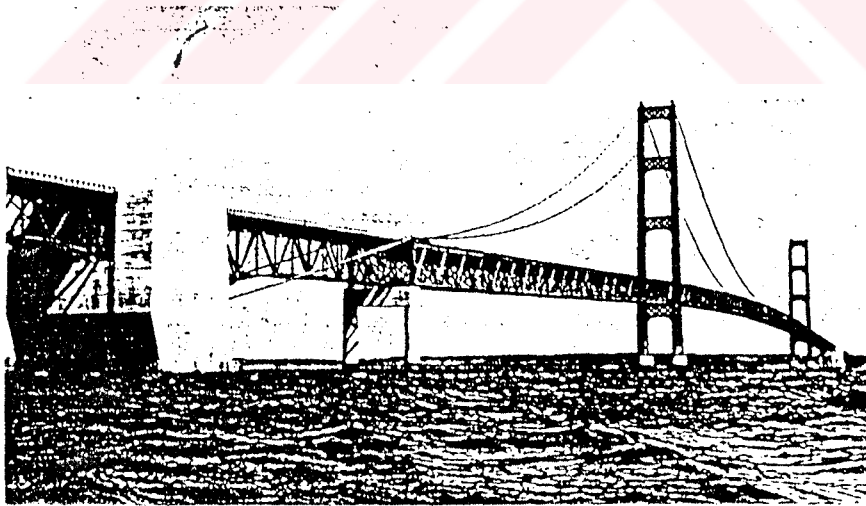
Kule tepesinden çıkan ve rijitlik kirişine sabitlenen Brooklyn Köprüsü'nün eğik kabloları ile karşılaştırıldığında; Messina Köprüsü'nün eğik kabloları ana kablo üzerindeki yükü aşağı doğru artırmaktadır. Brooklyn Köprüsü'nde ise tam aksine, eğik kablolar ile yük azaltılmıştır. Eğik kabloların yük taşıma kapasitesi bakımından Brooklyn

Köprüsü'ndeki eğik kablolar “pozitif eğik kablolar” ve Messina Köprüsü'ndeki eğik kablolar “negatif eğik kablolar” olarak bilinirler.

Messina Köprüsü'ndeki büyük yan açıklıklar ve esnek kuleler, kule tepesindeki büyük yer değiştirmelere sebep olmuş ve pozitif eğik kabloların etkinliğini azaltarak, negatif eğik kabloların uygulanmasına olanak sağlamışlardır. Brooklyn Köprüsü'nde masif (içi dolu) kuleler kullanıldığından, büyük eğilme rijitliği bulunmasına rağmen kule tepesindeki yatay yer değiştirmeler yeter derecede sınırlandırılmıştır. Aynı sınırlama, nispeten küçük yan açıklıklı köprülerde de yapılabilir. Dolayısıyla bu köprülerde pozitif eğik kablolar tercih edilebilir.

Messina Boğazı Köprüsü'nün 1950'deki projesi, hayata tam olarak geçirilemese de, bunu izleyen yıllarda bu köprü projesi, çok fazla sayıda araştırma ve çalışmalara konu olmuştur.

Savaşın sonra 1930'larda yapım aşamasına ulaşan, eşit boyutlu başlıca asma köprülerin birincisi, ABD'deki Mackinac Köprüsü'dür (Şekil 1.16). Bu köprü'nün ana açıklığı 1158 m., yan açıklıkları 549 m. ve daha önceki asma köprülerin hepsinden fazla olan toplam kablo uzunluğu 2256 m.'dir. Golden Gate Köprüsü daha büyük ana açıklığa sahip ise de, yan açıklıkları önemli derecede kısadır. Dolayısıyla bu köprü'nün toplam kablo uzunluğu 1966 m.'dir.



Şekil 1.16 Mackinac Köprüsü.

Mackinac Köprüsü tasarımcısı D. B. Steinman, bu köprü için ikinci Tacoma Köprüsü'nden de yüksek olan bir aerodinamik stabilite uygulama girişiminde bulunmuştur. Mackinac Köprüsü için ilk projedeki kritik rüzgar hızı 995 km/h olarak belirlenmiştir. Bu

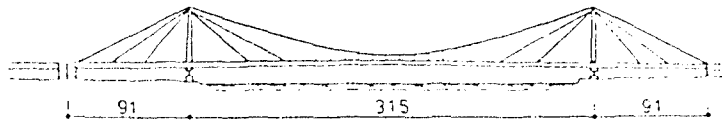
değer savaştan önce yapılan asma köprülerdeki kritik rüzgar hızından 10 kat daha fazladır. Daha sonraki projede, iki şeritli karayolunu raylı sisteme çevirmiştir. Böylece proje hesaplarına göre, rüzgar hızını artırarak sonsuza götürmüştür.

Yüksek derecede ki aerodinamik stabilitenin uygulanabilmesi, basit mesnetli rijitlik kafes kirişli ve düşey askılı geleneksel asma köprülerin aerodinamik stabilitesini etkileyen bütün parametrelerin tam anlamıyla araştırılmasıyla gerçekleşebilmiştir. Bu durumda, 11.60 m. yüksekliğe (ana açıklığın 1/100'üne karşı gelen) ve karayolu genişliğinden 6.00 m. daha fazla olan 20.70 m. genişliğe sahip rijitlik kafes kirişinde büyük boyutlar ortaya çıkmıştır.

Etkileyici bir uygulama olarak böyle kritik rüzgar hızlarına rastlanmadığından, daha küçük boyutlarda ve güvenli yapılar projelendirilmiştir.

Mackinac ve ikinci Tacoma Köprüsü, tasarımcının aşırıya kaçtığını gösterir -yarım yüzyıl önceki Williamsburg Köprüsü'nde de aynı sorun görülmüştür- ve daha sonra yapılan asma köprülerde artan narinlik, estetik gibi olgulara ters bir eğilim göstermektedir.

Eğik kablolarla asma sistemin birleştirilmesi, daha etkin yapısal sistemlerin oluşturulması Brooklyn Köprüsü'nden sonra tamamen unutulmamıştır. 1938'de Dischinger köprü ana açıklığının orta kısmını bir asma sistem ile kuleye yakın kısımlarında, kule tepesinden çıkan eğik kablolarla taşıtmayı düşünmüştür. Bu sistemin Hamburg'taki Elbe Nehri üzerindeki 750 m. ana açıklıklı kablolu köprüde uygulanması amaçlanmıştır. Savaştan sonra, Alman köprülerinin onarımı ile ilgili olarak Dischinger sistemi önerilmiş, fakat gerçekte kullanılmamıştır (Şekil 1.17). Bunun nedenlerinden birisi, yapısal davranış ve görünümle ilgili olarak sistemin süreksizliğidir.

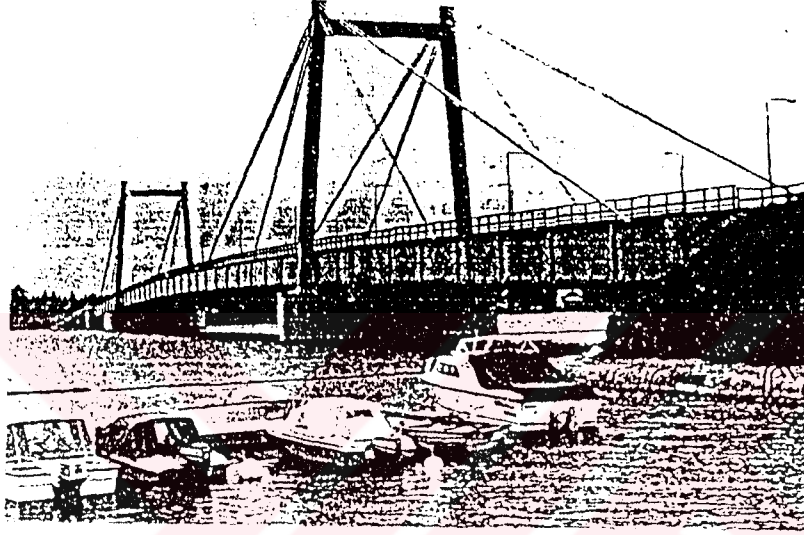


Şekil 1.17 Köln-Mühlheim Köprüsünün onarımı için Dischinger'in önerdiği köprü sistemi.

Her ne kadar Dischinger'in asma sistemle, eğik askılı sistemi birleştirerek uygulama düşüncesi yeterli ise olsada, çok daha sürekli bir düzenleme olan Roebling'in orijinal çözümünü dikkate almamıştır. Dischinger, kendi sistemiyle ilgili olarak, Roebling'in köprülerindeki eğik kabloların tamamıyla yetersiz olduğunu kanıtlandığını belirtmiştir!

Dischinger'in sisteminin gerçekte uygulanmaması, kuşkusuz eğik askılı köprülerin gündeme gelmesinde önemli etkiye sahiptir.

Eğik askılı köprü tiplerine köprü projelerinin ilk günlerinden itibaren rastlanır. Fakat birer antika olarak kabul edilebilecek bu ilk örnekler, bugünün eğik askılı köprüleri üzerinde hiç bir etki oluşturmamışlardır. İlk modern eğik askılı köprü olan ve 1956'da trafiğe açılan İsveç'teki Strömsund Köprüsü eğik askılı sistemlerin gelişmesinde büyük öneme sahiptir (Şekil 1.18).



Şekil 1.18 Strömsund Köprüsü.

Köprü, 182.60 m. ana açıklık ve 74.70 m.'lik iki yan açıklığa sahip, genel asma köprülerde kullanılan üç açıklıklı tipte bir sistemdir. Eğik kablolar, kule tepesinden çift olarak çıkan fan sisteme göre düzenlenmiştir. Kuleler, köprü tabliyesinin her iki kenarına yerleştirilmiş iki düşey kablo ile desteklenen, taşıyıcı çerçeve tipli kulelerdir. Rijitlik kirişi, iki adet dolu gövdeli kirişe sahiptir. Bunlar, eğik kabloların plak kirişlerine sabitlenebilmesine izin vermesi amacıyla kablo düzlemlerinin dışına yerleştirilmişlerdir.

Kablo kuvvetlerinin hesabına izin veren yapısal analiz tekniklerinin gelişmesi, eğik askılı köprülerde yeni bir dönem başlatmıştır. Bu teknikler, ilk kez Strömsund Köprüsü'yle beraber sistematik olarak kullanılmaya başlamıştır.

Düzlemsel bir sistem olarak Strömsund Köprüsü, sekizinci dereceden hiperstatik bir sistemdir. Yükleme simetrik ve asimetrik olarak ayırıp, yüklemenin her parçası için bilinmeyen sayısı dörde indirilmiştir. Bu sayısal çalışmalar, 1950'lerin başlarında kullanılan hesap cetveli, mekanik hesap makinalarıyla yapılabilecek sınırlar içerisindeydi.

Strömsund Köprüsünde (iki adet I şekilli dolu gövdeli kirişte) moment kolu prensibine göre, kablo düzlemindeki kuvvetlerin eğik olarak köprü tabliyesine etkimesinden ötürü önemsiz derecede burulma rijitliği bulunmaktadır. Açık olarak görülmektedir ki, Strömsund Köprüsü'nün genel yapısı, gerçek yapı ile matematiksel model arasındaki iyi bir uyum sonucu, o zaman ki mevcut hesaplama kapasitesini göstermektedir.

Strömsund Köprüsü'nün yapımı ile birlikte Rhine üzerindeki Duisburg-Ruhrort Köprüsü'nün onarımı yapılmıştır (Şekil 1.19). Her ne kadar gerçek anlamda eğik askılı köprü olmasa da, eğik askılı bir köprü ve kendine ankrajlı bir asma köprü arasındaki geçiş şeklidir. Duisburg-Ruhrort Köprüsü, Almanya'daki eğik askılı köprülerin yapımında önemli ölçüde etkili olmuştur.

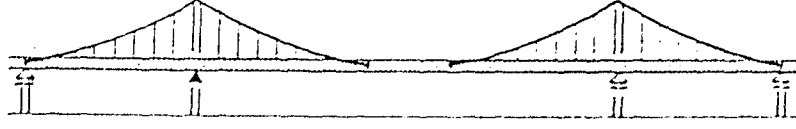


Şekil 1.19 Duisburg-Ruhrort Köprüsü.

Duisburg-Ruhrort Köprüsü'nün kablo sisteminin doğrudan çevrimi, “rein chord sistemi”dir. Bu sistemde ana kablo; yan açıklıklarda uç mesnetlerde rijitlik kirişine, orta açıklıkta ise merkeze yakın bölgede rijitlik kirişine bağlanır. Ana kablo ve rijitlik kirişi arasında, asma bir köprüde olduğu gibi düşey askılar düzenlenmiştir. Şekil 1.20’de görüleceği gibi ana kablo, rijitlik kirişini kule tepesine birleştiren eğik kablo olarak düşünülebilir. Eğik askılı köprülerin tersine, rein chord köprülerin ana kablosu, askılar ile aktarılan düşey yükleri, kule ve kirişteki ankraj noktası arasındaki bölgede taşır.

Duisburg-Ruhrort Köprüsü'nün eğik askılı köprüler üzerindeki etkisi, köprü'nün yapımı sırasında, ana açıklıkta geçici desteklere ihtiyaç duyulmasından doğmuştur. Yaklaşık 4 m. yükseklikteki rijitlik kirişi, ana kablonun ankraj noktası olan kuleden 125 m.

uzaklıktaki bölgede konsol olarak çalışamamıştır. Bu nedenle de geçici bir destekleme sistemine gerek duyulmuştur.

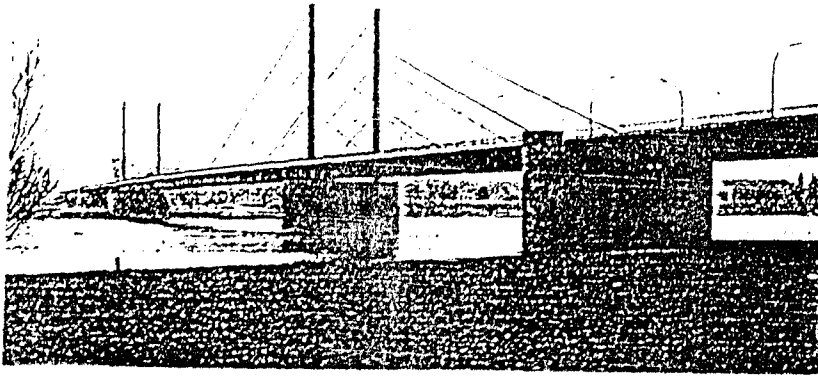


Şekil 1.20 Bir rein chord köprünün yapısal sistemi.

Bu geçici sistem, Strömsund Köprüsü'nde uygulanan benzer bir eğik askılı sistem olarak yapılmıştır. Dolayısıyla, Duisburg-Ruhrort Köprüsü, eğik askılı bir sistem olarak doğmuş, fakat bunun yerine kiriş yapısının tamamlanmasından sonra rein chord sistemi yerleştirilmiştir.

Daha sonraları, bir köprüyü tamamen eğik askılı sistem olarak yapıp, ileri de, rein chord sistemde olduğu gibi daha az etkili ve karmaşık kablo sistemiyle değiştirmenin açıkça akla uygun olmadığı görülmüştür. Duisburg-Ruhrort Köprüsü'ndeki boyutlara eşit birçok köprüde eğik askılı sistem tercih edilmiştir.

Strömsund Köprüsü'nden sonra, Düsseldorf'ta Rhine üzerine yapılan diğer eğik askılı köprü, Theodor Heuss Köprüsü'dür. Bu köprü 1957'de trafiğe açılmıştır (Şekil 1.21). Bu ikinci eğik askılı köprü, 280 m. ana açıklığa ve 108 m. yan açıklıklara sahiptir. Strömsund Köprüsü'nden büyüktür. Theodor Heuss Köprüsü, Almanya'da eğik askılı köprülerin etkileyici gelişimini başlatarak, gelecek on yıllarda çeşitli çözümlere ışık tutmuştur.

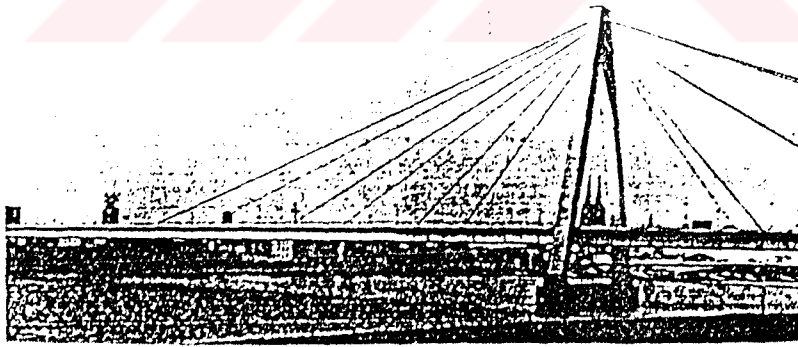


Şekil 1.21 Theodor Heuss Köprüsü.

Kablo sistemi harp şeklinde olup, farklı yüksekliklerdeki eğik kabloların paralel olarak kulelere bağlanmasıdır. Bu sistem, iki kablolu sisteme daha güzel bir görünüm

vermesi nedeniyle öncelikle seçilmiştir. Fakat harp şekilli kablo sistemi, fan sistemden yapısal olarak daha az etkili olup, bütün yük aktarımı rijitlik kirişinin (ve kulelerin) eğilme rijitliğine bağlıdır. Kuleler, rijitlik kirişi ve ana ayaklar üzerindeki yüzeyler arasındaki enine kirişlere ankastre, diğer ucu serbest olacak şekilde bağlanmıştır.

Almanya’da yapılan ikinci eğik askılı köprü Köln’deki Severins Köprüsü’dür. Şekil 1.22’de görülen bu köprü, eğik kablo düzlemleriyle, A şeklindeki kulenin birleştirilmesinin özelliklerini taşıyan ilk uygulamadır. Ayrıca, nehir kenarlarından sadece birisine yapılan kuleyle, asimetrik iki açıklıklı bir köprüdür. Severins Köprüsü’nün kablo sistemi fan şeklindedir. Bu A şeklindeki kuleyle iyi bir uyum içindedir. Rijitlik kirişinin enkesiti, köprü tabliyesini oluşturan düz çelik plakla birleştirilen iki kutu kirişli Theodor Heuss Köprüsü’ndeki kullanılanla aynıdır. Kulenin tek taraflı düzenlenmesi, rijitlik kirişinde büyük basınçlara sebep olmuştur. Normal kuvvet geniş bir kesit alanına yayılacağından, çelik tabliye kullanılması Severins Köprüsü’nde dezavantajlı olmuştur. Eğik askılı kısmın her iki ucunda, rijitlik kirişi sürekli yapılmıştır. Bu nedenle eğik askılı kısmın yapısal sistemi, düzlemsel bir sistem olarak düşünüldüğünden, statikçe belirsizliği yüksektir. Sistem tamamen asimetrik olduğundan, simetrik ve asimetrik yüklemelere ayırabilme avantajından yararlanılamamıştır.

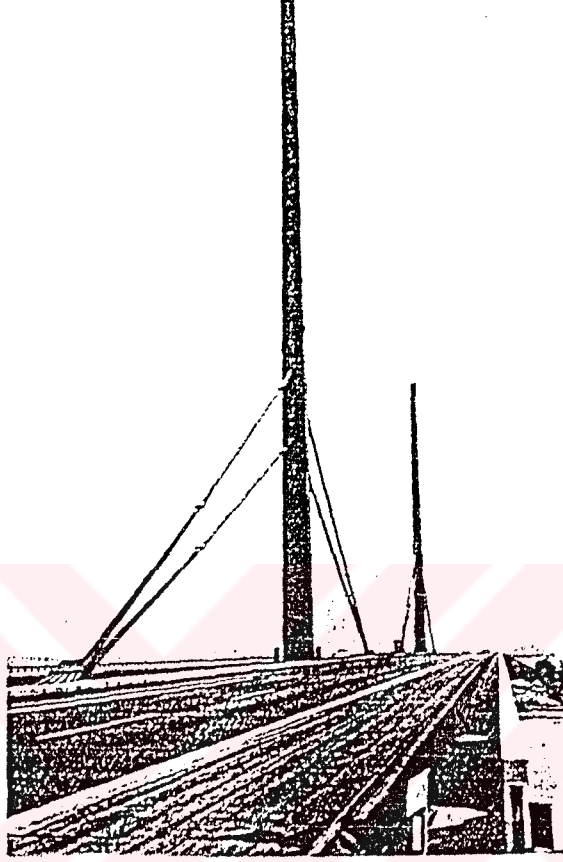


Şekil 1.22 Severins Köprüsü.

Severins Köprüsü, eğik askılı köprülerin ilklerinden bile olsa, bu tip köprülerin hala en başarılılarından birisi olarak durmaktadır. Özellikle belirlenen boyutlarıyla kulenin dizaynı ve kuleden geçen rijitlik kirişi yolu, karşılaşılan sorunlara örnek çözümdür.

Hamburg’taki Norderelbe Köprüsü, üçüncü eğik askılı Alman köprüsüdür. Bu köprü, yapısal nedenlerle gerekli olan kule yüksekliğinin iki katı yükseklikte yapılmıştır. Ana

görevi rijitlik kirişi değil de kuleyi taşımakmış gibi görünen bir kablo sistemi ile çok biçimsiz bir dizayna sahiptir (Şekil 1.23).



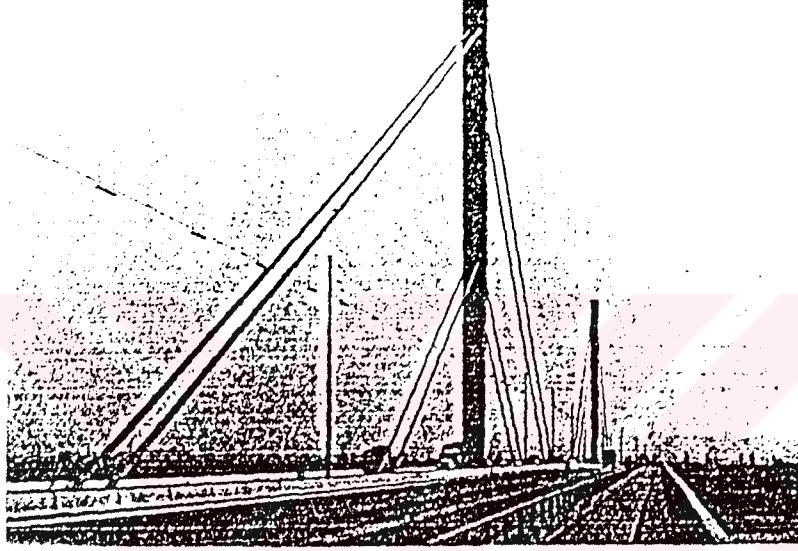
Şekil 1.23 Norderelbe Köprüsü.

Norderelbe Köprüsü, karayolu şeridinin ortasında düzenlenen tek bir kablo düzlemi sayesinde ilk eğik askılı köprü olduğundan, eğik askılı köprülerin gelişimine bir şekilde dahil edilmek zorunda kalmıştır. Bu sistem, Theodor Heuss ve Severins Köprüleri için teklif verenler tarafından da önerilmiştir. Fakat her ikisinde de çift kablo düzlemli sistemlerle yarışamamıştır.

Norderelbe Köprüsü'nden sonra uzun bir süre için Almanya'da ve diğer ülkelerde yapılan eğik askılı köprülerin büyük kısmında, tek düzlemli kablo sistemi tercih edilir olmuştur. Norderelbe Köprüsü'nde rijitlik kirişi, 7.80 m. genişlikteki kutu kirişle, kısmen daha fazla sayıdaki enine kirişlerle bağlanan ve aynı yüksekliğe sahip olan iki dış dolu gövdeli kirişten oluşmaktadır. Bu yüksek derecede bir belirsizlik verir, fakat karmaşık yapısal sistemin analizi, elastik mesnetli sürekli kirişler için uygulanan bilgisayar

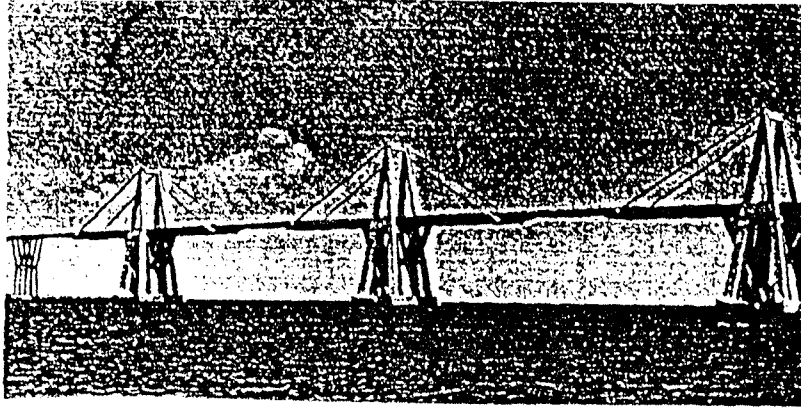
programları sayesinde kolaylaşır. Dolayısıyla, sadece düzlem kablo sistemi, el ile hesaplanıp analiz edilmek zorunda kalmıştır.

Norderelbe Köprüsü'nden sonra, Rhine üzerinde 1964 yılında Leverkusen Köprüsü açılmıştır (Şekil 1.24). Bu köprüde merkezi olarak düzenlenen aynı kablo sistemine sahiptir. Fakat buradaki kablo sistemi, her biri kuleye birleşen iki eğik kablo grubu ile harp şeklinde düzenlenmiştir. Her bir eğik kablo, yedi halat destesi içeren iki kablodan oluşmaktadır.



Şekil 1.24 Leverkusen Köprüsü.

Leverkusen Köprüsü'nün açılmasından önce, Riccardo Morandi tarafından tasarımı yapılan alışılmamış oranlardaki eğik askılı bir köprü olan Maracaibo Köprüsü 1962'de tamamlanmıştır (Şekil 1.25).



Şekil 1.25 Maracaibo Köprüsü.

Maracaibo Köprüsü, daha önceki eğik askılı köprülerden bir çok bakımdan ayrılır. Kuleler ve rijitlik kirişleri betondan yapılmış olup, eğik askılı köprülerin üst yapısının ana elemanı olarak daha önce kullanılmamıştır. Ayrıca ilk çok açıklıklı eğik askılı köprüdür.

Gemilerin Maracaibo Gölü'ne tek yönlü olarak girip çıkması için, her birisi 235 m. uzunluğunda olan 5 ana açıklıklı bir köprü yapımına karar verilmiştir. Bunların her biri, altındaki ana ayaklara asimetrik yükleri aktarmaya elverişli, üçgen kule yapısından çıkan bir çift eğik kabloyla tutulan iki adet konsol kolu içerir. Konsol uçlar arasında, küçük açıklıklar düzenlenmiştir. Kuleden, kablo mesnet noktalarına olan açıklık için, sadece bir eğik kablo grubunun kullanılması ağır kutu kiriş gerektirmiştir. Eğik askılı sistemde daha sonraki gelişmeler, eğik kabloların sayısını yavaş yavaş artırmış, böylece rijitlik kirişine sürekli bir destek verebilmek amacıyla kablo sistemi daha işler duruma getirilmiştir.

1950'li yılların sonuna kadar, asma köprüler alanında 500 m.'yi aşan ana açıklıklı başlıca köprülerin tamamı Amerikan yapımı olmuştur. Fakat 608 m. ana açıklıklı Tancarville Köprüsü'nün 1959'da açılması, Avrupa'da asma köprülerin başlangıcını belirlemiştir (Şekil 1.26).

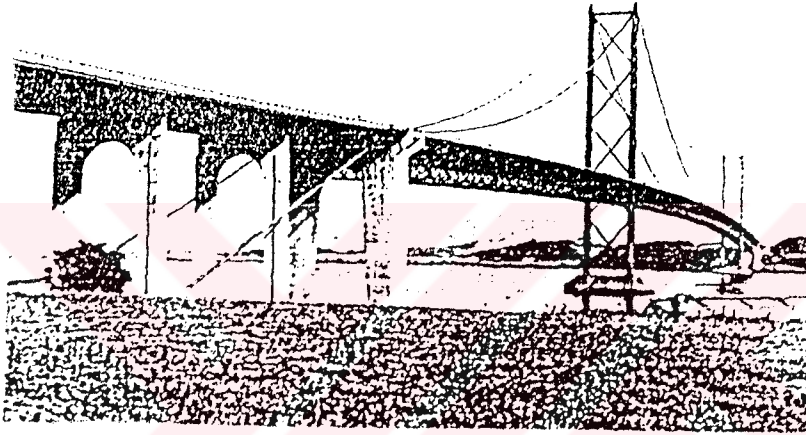


Şekil 1.26 Tancarville Köprüsü.

Fransa'daki Tancarville Köprüsü, Amerikan köprülerinde bulunmayan, bir çok yeni özellik göstermiştir. Rijitlik kafes kirişi, kulelerde sürekli yapılmış ve ana açıklıktaki kablo, orta noktada kafes kirişe bağlanmıştır. Rijitlik kafes kirişi ve ankraj blokları arasındaki sabit yüzey uygulaması, asimetrik yükleme için kablolu sistemin etkinliğini

artırmıştır. Tancarville Köprüsü'nün kuleleri betonarmeden yapılmıştır. Bu yapısal kısımda etkili olan basınç yüklerinden ötürü doğal bir seçim olarak görülebilir. Fakat, 20. yüzyılda yapılan bütün Amerikan asma köprülerinde çelik kuleler kullanılmıştır.

Tancarville Köprüsü'nden sonra, 1964 yılında İskoçya'da Firth of Forth üzerinde bir asma köprü yapılmıştır (Şekil 1.27). Bu köprünün ana açıklığı 1006 m. olup, ana açıklık bakımından dördüncü sırada yer alır ve ABD dışında 1 km.'den fazla ana açıklığa sahip bir köprüdür. Çelik kuleler ve basit mesnetli rijitlik kafes kirişi ile ana planı bakımından Tancarville Köprüsü'nden çok, Amerikan uygulamalarına yakındır. Fakat Forth Road Köprüsü, bir çok ayrıntılarında önemli yenilikler gösterir.

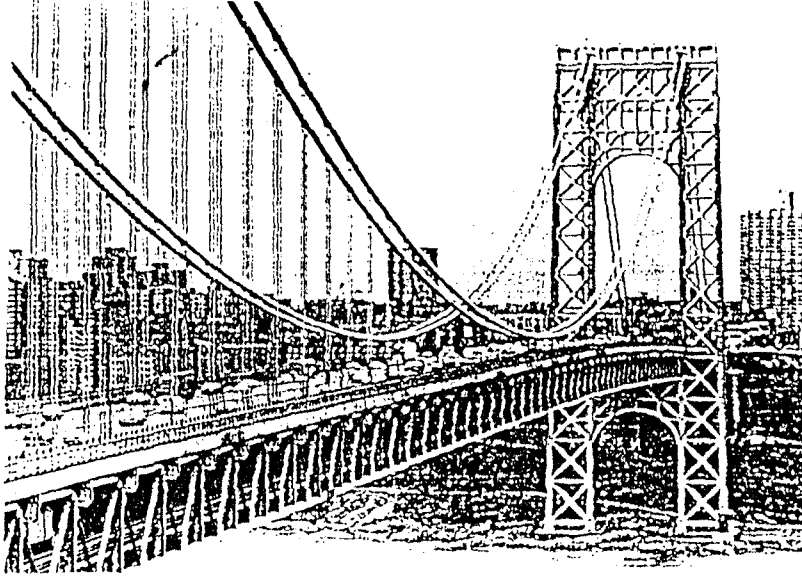


Şekil 1.27 Forth Köprüsü.

Forth Köprüsü'nün rijitlik kafes kirişinin yüksekliği, aynı dönemde Amerika'da yapılmış olan asma köprülerden biraz daha narin kafes kiriş verecek şekilde 1/120 yükseklik-açıklık oranına uygun olarak 8.40 m. seçilmiştir.

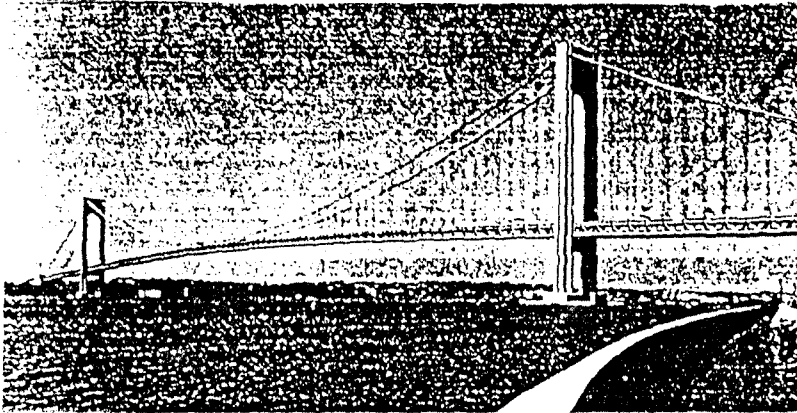
1960'ların başında G. W. Köprüsü, yapımından sonra eklenmiş bir alt tabliyeye sahiptir ve aynı zamanda alt ve üst tabliyeler arasında rijitlik kafes kirişi kullanılmıştır. Rijitlik kafes kirişinin üst kirişi ve onun köşebentleri, 1931'den bu yana köprünün orijinal yapısında zaten bulunmaktadır ve bu önlem doğal olarak kafes kirişin geriye kalan parçasının yapımını kolaylaştırmıştır. Fakat, iki tabliyenin ortaya çıkardığı tüm yük için kablo sistemi, kuleler ve bunların ankrajlarının planlanmış olması, köprünün yeniden yapımında kolaylaştırıcı etkenlerdir. Şekil 1.28'de görüldüğü gibi, G. W. Köprüsü'nün kafes kirişi, ana açıklık uzunluğunun 1/117'sine eşit olacak şekilde 9.12 m. seçilmiştir.

New York Limanı'nın girişi üzerine, New York alanındaki en geniş köprü olan Verrazano Narrows Köprüsü'nün yapımına 1960'da başlanılmıştır (Şekil 1.29). 1298 mt.



Şekil 1.28 Alt tabliyenin eklenmesinden sonra G. W. Köprüsü.

ana açıklığı ile bu köprü, Golden Gate Köprüsü'nün açıklığından yaklaşık 18 m. daha fazla bir açıklığa sahip olmasıyla dünyadaki en uzun serbest açıklığı bulunan köprüdür. G. W. ve Verrazano Köprülerinin her ikisi de O. H. Amman tarafından projelendirildiğinden, planlama ilkeleri bakımından Verrazano Köprüsü, G. W. Köprüsü'ne benzer. Böylece her iki köprüde, köprüdeki karayolu alanının her iki yanında nispeten birbirine yakın iki kablo düzlemi düzenlenmiştir. G. W. Köprüsü'nde olduğu gibi, Verrazano Köprüsü'de başlangıçta trafiği taşımak için sadece üst tabliyeye sahiptir. Fakat G. W. Köprüsü'nün aksine Verrazano Köprüsü, yapımından bu yana kurulmuş bir rijitlik kafes kirişe sahip bulunmaktadır.



Şekil 1.29 Verrazano Narrows Köprüsü.

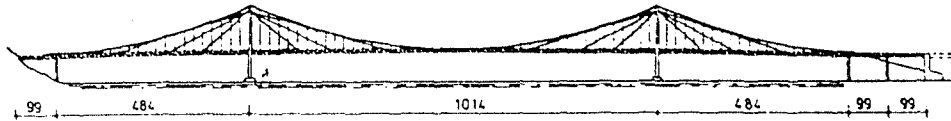
Verrazano Köprüsü'nde rijitlik kafes kirişi yüksekliği, yükseklik-açıklık oranı 1/178 olacak şekilde 7.30 m. seçilmiştir. Aynı köprünün rijitlik kafes kirişi, Golden Gate Köprüsü'nden daha narin, ikinci Tacoma ve Mackinac gibi savaş sonrası yapılanlardan ise önemli ölçüde daha narindir.

Her ne kadar Avrupa'da yapılmış ise de, Portekiz'deki Tagus River Köprüsü (Şekil 1.30), hem tasarımcıları (Steinman, Boynton, Gronquist ve London), hem de yüklenicilerin önemlileri (US Steel, American Bridge Division) Amerikan firmaları olduğundan bu köprü, asma köprü konusundaki Amerika uzmanlığının bir ürünüdür. Bununla birlikte Tagus River Köprüsü, daha önceki Amerikan uygulamasından bazı farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, başlangıçta dört şeritli bir karayolu olarak yapılmış olan köprünün rijitlik kafes kirişinin alt tabliyesine, iki demiryolunun eklenmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu ise, yalnız ana ve yan açıklıklarda değil, yan açıklıkların bitiminden itibaren yaklaşık 100 m. kadar rijitlik kafes kirişin devamını gerekli kılmıştır.



Şekil 1.30 Tagus River Köprüsü.

Tagus River Köprüsü'ne eklenen demiryolları nedeni ile kablo sistemi ve rijitlik kafes kirişinin takviye edilmesi gerekmiştir. Bu sorun, ilk asma sisteme birkaç eğik kablo eklenmesi ve bu eğik kablo kuvvetlerinin yatay bileşenlerinin alt tabliyeye iletilmesiyle çözülmüştür (Şekil 1.31).



Şekil 1.31 Eğik kabloların eklenmesi ile oluşan Tagus River Köprüsünün asma sistemi.

Asma ve eğik askılı sistemin birlikte düzenlenmesi ile dayanımı ve rijitliği artırmaya ilişkin Roebling düşüncesi, çok dikkat gerektiren bir sorunun çözümü için benimsenmiştir.

Bununla birlikte, Tagus River Köprüsü'ne eklenen eğik askılı sistem, ilk asma sistemin rijitlik kirişine sağlamış olduğu desteğe oranla, daha az destek olan birkaç eğik kabloya sahiptir.

Asma sistem ve eğik kablolu sistem arasındaki karşılıklı etkileşim nedeniyle, Tagus River Köprüsü'nün ikinci aşamasındaki gerilmelerin hesabı büyük bir analitik problem ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, elektronik bilgisayarlardaki gelişmeler, birkaç yıl öncesine kadar büyük engel oluşturan sayısal problemlerin çözümüne olanak vermektedir.

Avrupa'daki en uzun serbest açıklığa sahip köprü olan Tagus River Köprüsü, 1014 m.'lik ana açıklığı ile Forth Köprüsü'nü çok az farkla geride bırakmaktadır.

1966 yılında Tagus River Köprüsü'nün açılışıyla bağlantılı olarak International Association for Bridge Structural Engineering tarafından Lizbon'da asma köprüler konusunda bir sempozyum düzenlenmiştir. Bu sempozyumda sunulan pek çok tebliğde, statik ve dinamik analizler için elektronik bilgisayarın büyük olanaklar sunduğu belirtilmiştir. Üç yüzyıldan bu yana köprü tasarımcılarını uğraştıran sınırlı hesap kapasitesi sorunu da ortadan kalkmıştır. Doğal olarak belirsizlerin derecesinin önemi olmadan uygun yapısal sistemlerin seçimindeki serbestlik, kablolu köprülerin yeni türlerine olanak vermiştir.

Bu analitik ilerlemelerle birlikte, 1960'lar, gelecekteki kablolu köprüleri kesin bir şekilde etkileyecek bazı yeni teknikleri de getirmiştir. Bu tekniklerden biri ABD'deki Newport Köprüsü'nün yapımında, diğer bir teknik de İngiltere'de Severn Köprüsü'nün yapımında kullanılmıştır.

Ana kabloların yapımı için prefabrike paralel tel halatlarının kullanılması ilkesi, ilk kez Newport Köprüsü gibi önemli bir köprünün yapımında uygulanmıştır.

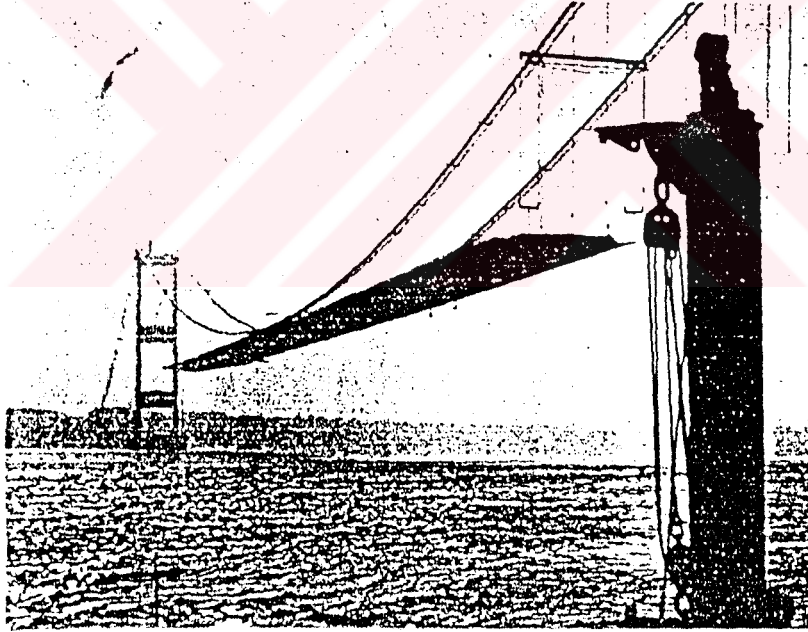
Roebing zamanından beri tüm önemli asma köprüler, inşaat sahasında gel-git metodu ile yapılmış ana kablolarla sahiptirler. Bu yöntemde, açıklığın bir tarafından diğer tarafına teller tek tek çekilir ve tüm kabloyu oluşturan bir demet haline getirilir. Her ne kadar gel-git metodu, Golden Gate, G. W. ve Mackinac gibi tanınmış köprülerin yapımında önemli olduğunu ispat etmişse de, hava koşullarına karşı duyarlılığı ve işçilik tüketimi nedeniyle sorunlara neden olabilir. Bu nedenle bir süreden beri, bir halat oluşturan çok sayıda paralel tellerin tek seferde çekileceği işlem araştırılmıştır. Çünkü bu, işlemi daha stabil yapabilir ve iş gücü gereksinimini azaltabilir.

Prefabrike halatların bir ankrajdan diğer ankraja çekilmesi ilkesi, daha küçük asma köprülerin yapımında uzun süre kullanılmıştır. Fakat bu durumlarda halatlar her zaman helezonik tel şeklindeydiler. Paralel tel halatlar kullanıldığında bitmiş kablounun özellikleri, gel-git metodundaki kablo ile aynıdır.

Newport Köprüsü'nde, her bir ana kablo 4636 telden oluşmuştur ve bir gidişte dört telin iletiildiği düşünülürse, gezici tekerleğin 1159 gidişine gereksinim vardır. Her biri 61 telden oluşan prefabrike halatlar ile bu sayı 76 olmaktadır.

Newport Köprüsü'nün yapımı sırasında paralel tel halat metodunun kullanılmasından sonra, metod daha da geliştirilerek, ilk kez Japonya'da açıklığı 712 m. olan Kanmon Köprüsü'nün yapımında kullanılmıştır.

Severn Köprüsü'nün rijitlik kirişi ve askıların projesinde yeni düşüncelerle karşı karşıya gelinmiştir (Şekil 1.32). Tacoma Köprüsü felaketi meydana gelinceye kadar, tüm önemli asma köprülerin aerodinamik stabilitesi, gerekli eğilme ve burulma rijitliğine sahip geniş kafes kirişlerle sağlanmıştır.



Şekil 1.32 Yapım aşamasında ki Severn Köprüsü.

Severn Köprüsü'nde, tasarımcı Sir Gilbert Roberts tarafından kafes kiriş yerine ilk Tacoma Köprüsü'nün 1/350 yükseklik-açıklık oranına oldukça yakın olan, 1/324 yükseklik-açıklık oranında, 3 m. yüksekliğe sahip narin kutu kiriş kullanılmıştır.

Bununla birlikte Severn Köprüsü projesinde, Tacoma Köprüsü felaketinin iki ana nedeni ortadan kaldırılmıştır: Tacoma Köprüsü'nde kullanılan keskin köşeli plak kirişlerin yerine, rüzgar tüneli testleriyle belirlenmiş aerodinamik şekilli kirişler yerleştirilmiştir ve Tacoma Köprüsü'nün önemsiz burulma rijitliği, geniş kutu kirişler kullanılarak Severn Köprüsü'nün burulma rijitliği önemli ölçüde artırılmıştır.

Aerodinamik kutu kiriş uygulaması yapım maliyetinde önemli bir tasarrufa yol açmıştır. Hem klasik kafes kiriş projesi, hem de yeni kutu kiriş projesi karşılaştırıldığında bu tasarruf açıkça görülmüştür. Yapım sırasında, kutu kirişlerin rijitlenmiş panellerinde otomatik kaynaklama yönteminin kullanılması bu tasarrufu büyük boyutlara ulaştırmaktadır.

Kutu şekilli rijitlik kirişinin büyük burulma rijitliği nedeniyle gerçek rüzgar hızlarında burulma salınımları tamamen ortadan kaldırılabilir. Ancak yine de bazı düşey salınımlar olabilir. Bu salınımların durdurulması için, kablo sistemi devreye sokularak, ana kablo ile rijitlik kirişi arasında eğik askıların kullanılmasına karar verilmiştir. Bu yolla askıları oluşturan helezonik halatların manyetik ataleti, salınımları durdurmuştur.

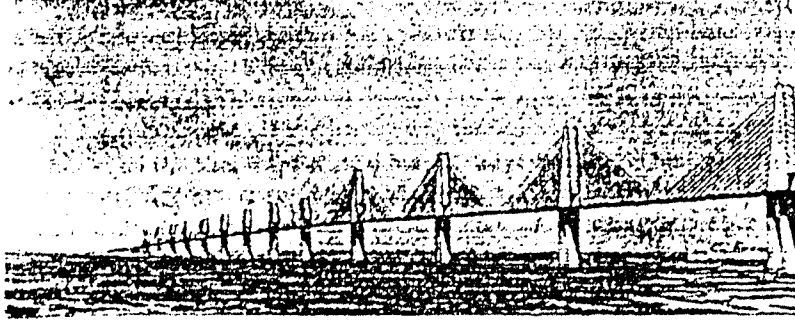
1960'ların sonlarında, alışılmamış boyutlardaki köprüler konusunda düzenlenen yarışma, asma köprü projelerindeki gelişmenin açık işaretini vermiştir.

Danimarka'da Great Belt Köprüsü için açılan yarışmada (1967) toplam 18 köprü projesi ödül almıştır. Bunların 11 tanesi, gemilerin geçtiği kanal üzerinde, kablolu ana açıklık (uzunluğu 350-600 m. arasında değişen) uygulamasına dayanmaktadır. Köprü ağır demiryolu yükü de taşıyacağından, sunulan kablolu köprü projelerinin büyük çoğunluğu sürpriz olmuştur. Genellikle, yol güzergahında oluşacak küçük açısız değişimlerin tam olarak karşılanması için kablolu köprülerin daha esnek olacağı düşünülmüştür.

Great Belt Köprüsü yarışmasında sunulan asma köprü projelerinin çoğunluğu, ya fan şeklinde, ya da harp şeklinde düzenlenmiş eğik askılı türdedir. Belki de kablolu sistem için en çarpıcı uygulama, Alman firması Dywidag tarafından hazırlanmış projedir (Şekil 1.33). Burada, yüksekliği 6 m.'yi aşan suyun üzerindeki köprünün tüm uzunluğu, uzunlukları 220-350 m. arasında değişen eğik askılı açıklıklardan oluşturulmuştur. Rijitlik kirişi, büyük bir eğilme rijitliği ile beton kulelere bağlanmış harp şekilli kablo sistemi tarafından desteklenmiş, sadece 1.0 m. kalınlığa sahip beton plak olarak yapılmıştır.

1968'den bu yana, Messina Boğazı üzerindeki köprü için açılan yarışmada bütün projeler kablolu sistemin uygulamasına ilişkindir. İlk ödül grubunda altı proje

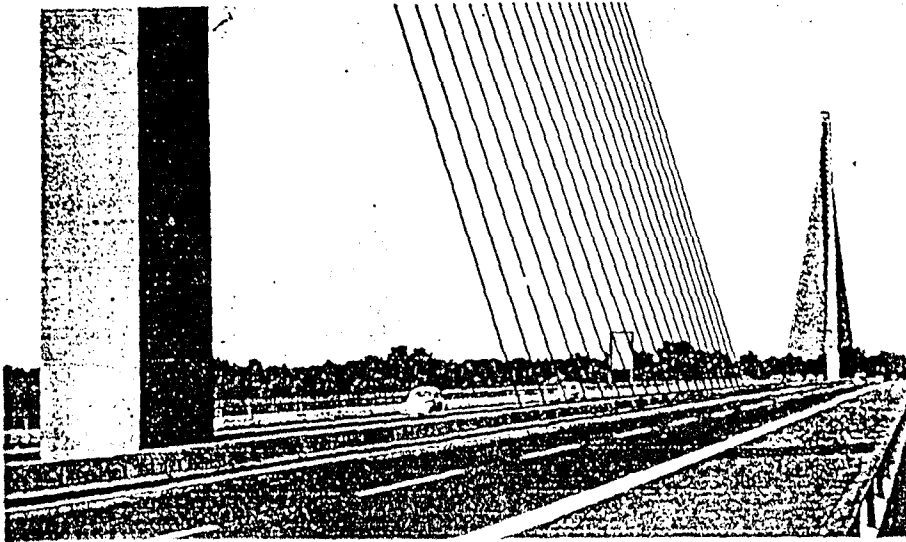
bulunmaktadır. Bu projeler, boğaz üzerindeki ana açıklıkları 1000-3000 m. arasında değişen kablolu asma köprüleri içermektedir. Ayrıca bu ödül grubunda 1300 m. açıklıklı bir eğik askılı köprü projeside bulunmaktadır.



Şekil 1.33 Dywidag tarafından sunulan Great Belt Köprüsü projesi.

Eğik askılı köprüler konusunda bilgisayar destekli analizlerdeki başarı, 1960'ların ikinci yarısında her bir eğik kablosu prefabrike halatlardan yapılmış çok kablolu sistemin gündeme gelmesine öncülük etmiştir.

Bu çok kablolu köprülerin ilki Homberg tarafından planlanmış olan Friedrich Ebert Köprüsü'dür ve Bonn'un kuzeyindeki Rhine Nehri üzerindedir (Şekil 1.34). 1967 yılında tamamlanmış bu köprüde, her biri 40 eğik kabloya sahip iki kule ve merkezi kablo sistemi bulunmaktadır. Kablo sisteminin konumuna bağlı olarak her eğik kablo, çapı 91-123 mm. arasında değişen kenetlenmiş halatlardan yapılmıştır.



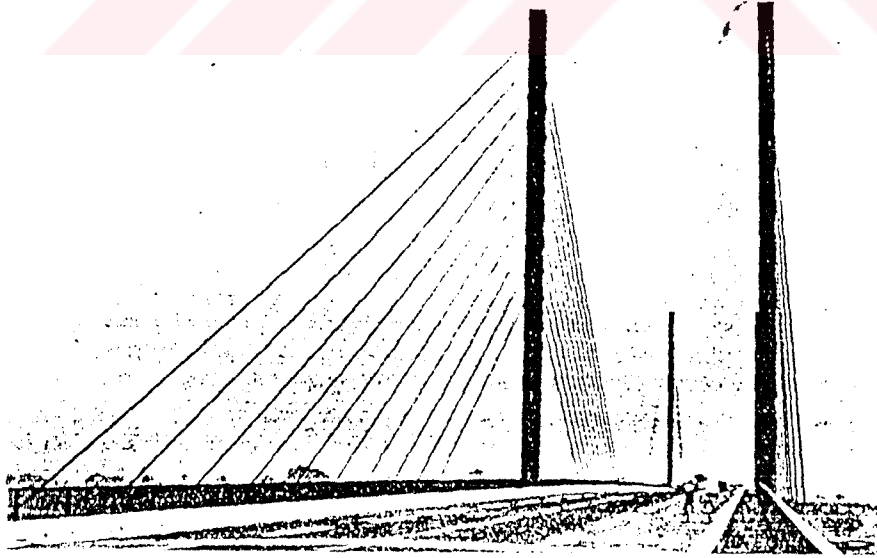
Şekil 1.34 Friedrich Ebert Köprüsü.

Çok kablolu sistemler, rijitlik kirişinin daha sürekli desteklenmesi sonucunu doğurur ve aynı zamanda her bağlantı noktasında iletilecek kablo kuvvetleri azaltılır. Kirişin bağlantı (ankraj) noktalarında yerel olarak desteklenmesi genelde ihmal edilir. Çok kablolu sistemlerde, iki bağlantı noktası arasında çok kısa uzunlukta konsol kirişler gerektiğinden yapım aşamasında üstünlükleri bulunmaktadır.

Çok kablolu sistemin üstünlüğüne karşın, eğik askılı köprülerin gündeme gelmesinden 12 yıl sonra ilk kez ortaya çıkmasının nedeni, bu sistemin yüksek derecede belirsizlik içermesidir. Toplam 80 eğik kablo içeren çok kablolu sisteme sahip Friedrich Ebert Köprüsü'nde, düzlem sistem statikçe 81'inci dereceden hiperstatiktir. Elektronik bilgisayarla çözümleme sağlıklı bir şekilde yapılabilir, fakat elle hesaplama olanaksız hale gelmektedir.

Friedrich Ebert Köprüsü'ndeki bir merkezi kablo düzlemi nedeniyle, gerekli burulma rijitliğini sağlamak için, rijitlik kirişinde daha geniş kutu kirişlerin kullanılmasını gerekli kılmıştır. Çok kablolu sistemin sürekli desteğiyle, rijitlik kirişi boyutlarının azaltılarak sağlanan üstünlük, bu köprüde başarılamamıştır.

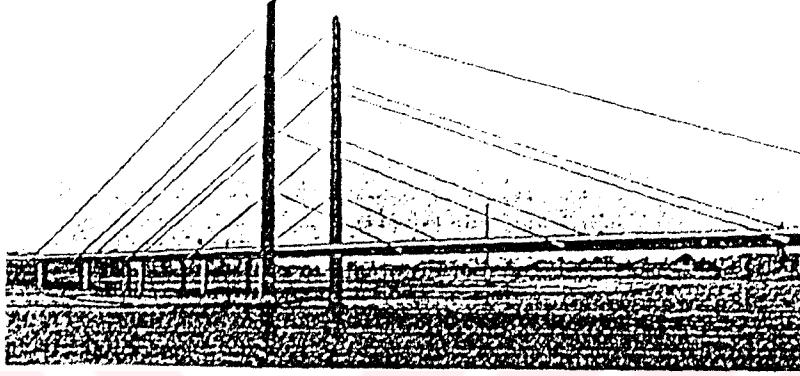
Friedrich Ebert Köprüsü ile hemen hemen aynı zamanda yapılan Rees'deki Rhine Köprüsü'nde, her biri harp şekilli çok kablolu sistemi içeren iki kablo düzlemi kullanılmıştır. Rijitlik kirişi, dolu gövdeli kirişlerden oluşmaktadır (Şekil 1.35).



Şekil 1.35 Rhine Köprüsü.

Friedrich ve Rhine Köprülerinin her ikisi de, rijitlik kirişlerinin orta açıklık ve kuleye yakın kısımlarında eğik kablolarla desteklenmemiş olmasıyla karakterize edilirler.

Dikkate değer bir eğik askılı köprü olan Knie Köprüsü, 1969'da Düsseldorf'ta trafiğe açılmıştır (Şekil 1.36). Bu köprüde kablo sistemi, paralel eğik kablolu harp şeklinde oluşturulmuştur. Fakat, önceki köprülerin aksine bu köprünün yan açıklığındaki ara mesnetler, kablo ankraj noktalarının altına yapılmıştır. Bu, burulma rijitliğine gerek olmaksızın, çok narin rijitlik kirişi kullanılmasına olanak verecek şekilde çift harp sisteminin etkinliğini artırmıştır.

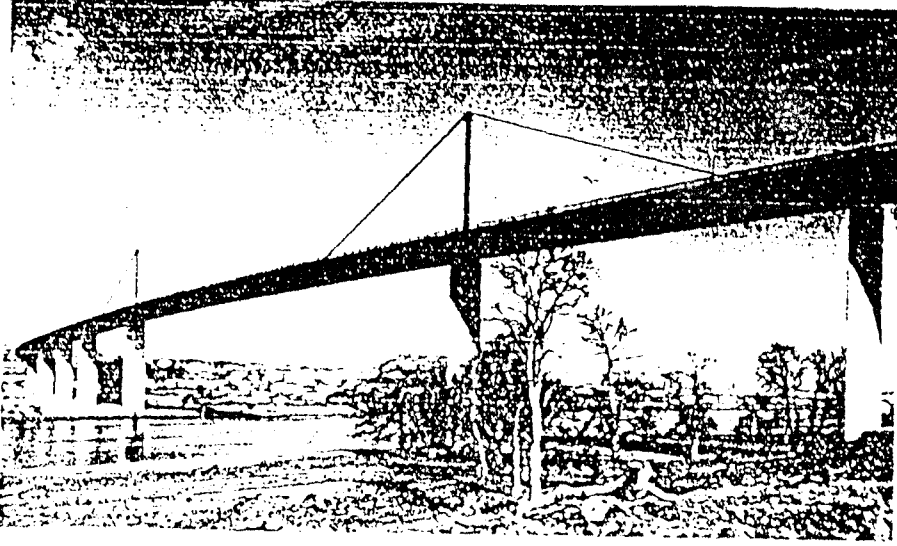


Şekil 1.36 Knie Köprüsü.

Knie Köprüsü'nde, Severn Köprüsü'ne benzer şekilde nehrin sadece bir kıyısına yerleştirilmiş kulesi bulunan ve simetrik olmayan bir plan kullanılmıştır. 114 m. kule yüksekliğine karşın, kuleyi, desteğe gerek kalmadan iki serbest direk gibi yaparak, yatay stabilite sağlanmıştır.

İskoçya'daki Erskine Köprüsü 1971'de tamamlanmıştır (Şekil 1.37). 305 m. uzunluğundaki ana açıklıkta, iki kulenin de rijitlik kirişine sadece bir eğik kabloyla bağlanması, çok kablolu sistemlerin uygulanmasına yönelik eğilimin tersi yönde bir hareket olarak kabul edilmiştir. Sonuçta rijitlik kirişi, kablo sistemi desteği olmadan 100 m.'den fazla uzatılabilmiştir. Buna karşın, rijitlik kirişi 3.05 m. yükseklikte yapılmış ve bu 3.05 m.'lik yükseklik, çok küçük aralıklarla kirişi destekleyen, pek çok eğik kabloya sahip eğik askılı köprülerde kullanılan değerle aynı büyüklüktedir. Eğik kablonun çok büyük kesit alanına sahip olarak yapılması gerektiğinden, her biri 76 mm. çapında olan 24 adet helezonik halatın kullanılması gerekli olmuştur.

Erskin Köprüsü'nde, her kuleden çıkan sadece bir tane sürekli eğik kablo olmasına karşın, yapım sırasında kuleden ana açıklıktaki kablo ankraj noktasına ilerlendiği zaman, rijitlik kirişinde oluşacak ankastre konsol momentini azaltmak amacıyla geçici iki eğik kablo kullanmak gerekli olmuştur.



Şekil 1.37 Erskin Köprüsü.

1972’de Rhine üzerinde kurulan Mannheim-Ludwigshafen Köprüsü, paralel tel halatın önemli bir eğik askılı köprüde kullanıldığı ilk uygulamadır (Şekil 1.38). Çapı 7 mm. olan ve 295 telden oluşan her bir halat, epoksi reçinesi karışımı içeren soğuk dolgu malzemesi nedeniyle yorulma mukavemeti artırılmış HiAm denilen yeni tip soketlerle ankre edilmişlerdir.



Şekil 1.38 Mannheim ve Ludwigshafen arasındaki köprü (kuzey köprüsü).

Mannheim-Ludwigshafen Köprüsünde, ana açıklıktaki rijitlik kirişi çelikten, yan açıklıktaki kirişte betondan yapılmıştır. Bu durum malzemelerin ilginç bir birleşimini

göstermektedir. Bu birleşim, yan açıklık en fazla 65 m. serbest uzunluğa sahip olduğu zaman uygun olmaktadır. Köprünün ana açıklığının serbest uzunluğu 284 m.'dir. Yan açıklıktaki sabit yükün fazla olması aslında bir avantajdır. Çünkü düşey ankraj gereksinimini azaltmaktadır.

Asma köprülerde rijitlik kirişi olarak aerodinamik kutu kirişlerin kullanılması 1970'lerde çok yaygınlaşmıştır. 1970'de Chr. Ostefeld tarafından projelendirilen Little Belt Köprüsü, Severn Köprüsü'nden sonra aerodinamik kutu kirişleri, rijitlik kirişi olarak kullanılan ikinci köprüdür (Şekil 1.39). Bununla birlikte, Little Belt Köprüsü sadece araç trafiğini taşımak için planlandığından, Severn Köprüsü'nün kenarlarındaki yan yollar Little Belt Köprüsü'nde ihmal edilmiştir.

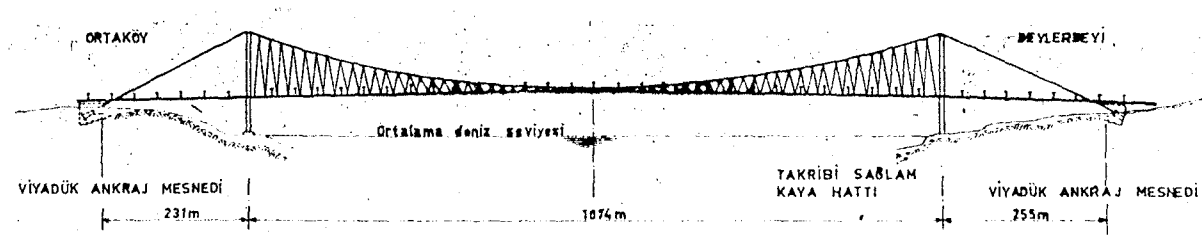


Şekil 1.39 Little Belt Köprüsü.

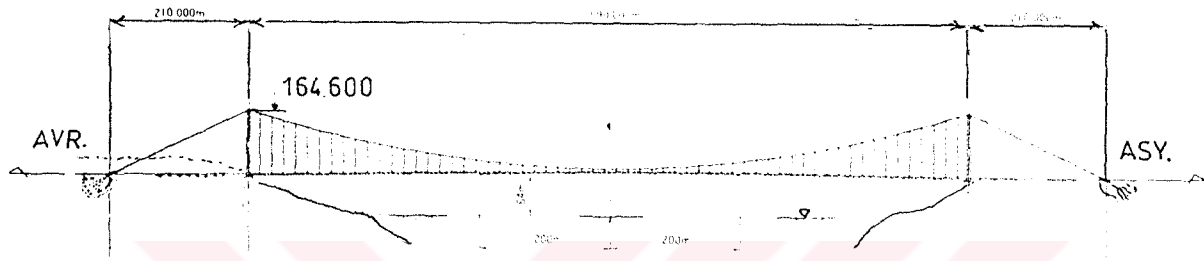
Little Belt Köprüsü'nde ana kabloların toplam uzunluğu 1500 m. olmasına karşın, daha ucuz bir çözüm olabileceği ispatlanmış olan helezonik halatlar kullanılmıştır. Severn Köprüsü için uygulanmış çözümün aksine, Little Belt'de kablo sistemi düşey askılı düzene sahiptir. Kuleler, benzer boyutlara sahip olan ve on yıl önce yapılmış Tancarville Köprüsü'nde olduğu gibi betondan yapılmıştır.

Türkiye'deki Boğaziçi ve Fatih Sultan Mehmet Köprüleri de aerodinamik kutu kirişe sahiptirler. Rijitlik kirişlerinin enkesitleri, Severn Köprüsüyle benzerlik gösterir ve her iki köprüdeki rijitlik kirişi yüksekliği 3.00 m.'dir. İki köprüdeki ana kablolar, rijitlik kirişine sırasıyla eğik ve düşey askılarla bağlanmaktadır. Ana açıklıkların uzunlukları Boğaziçi Köprüsü'nde (Şekil 1.40) 1074 m., F. S. M. Köprüsü'nde (Şekil 1.41) 1090 m.'dir. Severn

Köprüsü'nden farklı olarak, yalnızca ana açıklıkta kablolu sistemin kullanılması yapısal sistemde önemli ölçüde değişiklikler oluşturmıştır.

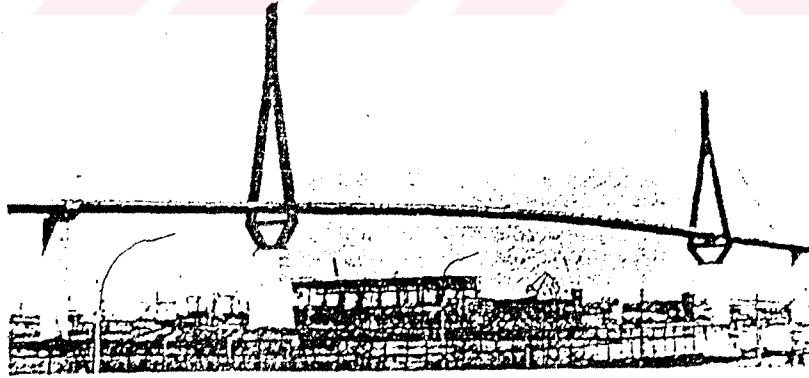


Şekil 1.40 Boğaziçi Köprüsü.



Şekil 1.41 Fatih Sultan Mehmet Köprüsü.

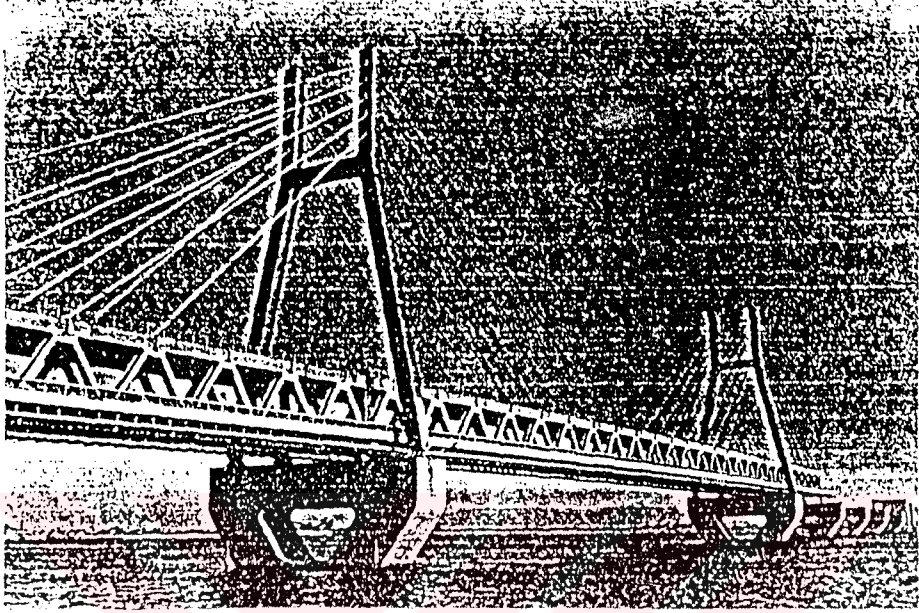
Hamburg limanındaki Köhlbrand Köprüsü, A şekilli kulelerle mesnetlenmiş, çift kablo düzlemine sahip çok kablolu sistemin ilk uygulamasıdır (Şekil 1.42). Her bir eğik kablo, çapı 54-110 mm. arasında değişen helezonik halatlardan yapılmıştır.



Şekil 1.42 Köhlbrand Köprüsü.

Köhlbrand Köprüsü'nün kablo sistemi, küçük yan açıklıklar ve değiştirilmiş fan düzeniyle yüksek verimlilikte çalışan köprülerden biridir. Bu avantaj, sadece bitmiş yapılar için değil, aynı zamanda yapım sırasında geçici desteklere veya geçici eğik kablolarla ihtiyaç duyulduğunda da üstünlükler sağlamaktadır.

İlk çift tabliyeli eğik askılı köprü olan Japonya'daki Rokko Köprüsü 1977 yılında tamamlanmıştır (Şekil 1.43). Bu köprüde, alt tabliye üzerinde düşey yükseklik, gün ışığı ve temiz hava için 8 m. yükseklikte kafes kiriş yapılmıştır. Kablo sisteminde her eğik kablo, iki tane tekil paralel telli halattan oluşmuştur.



Şekil 1.43 Rokko Köprüsü.

Rokko Köprüsü'nün yapımında, çok ağır yüklerin kaldırılmasına izin veren yüzen kreynler kullanılmıştır. Uzunluğu toplam 400 m. olan rijitlik kafes kirişi de ancak beş parça halinde yapılabilmektedir.

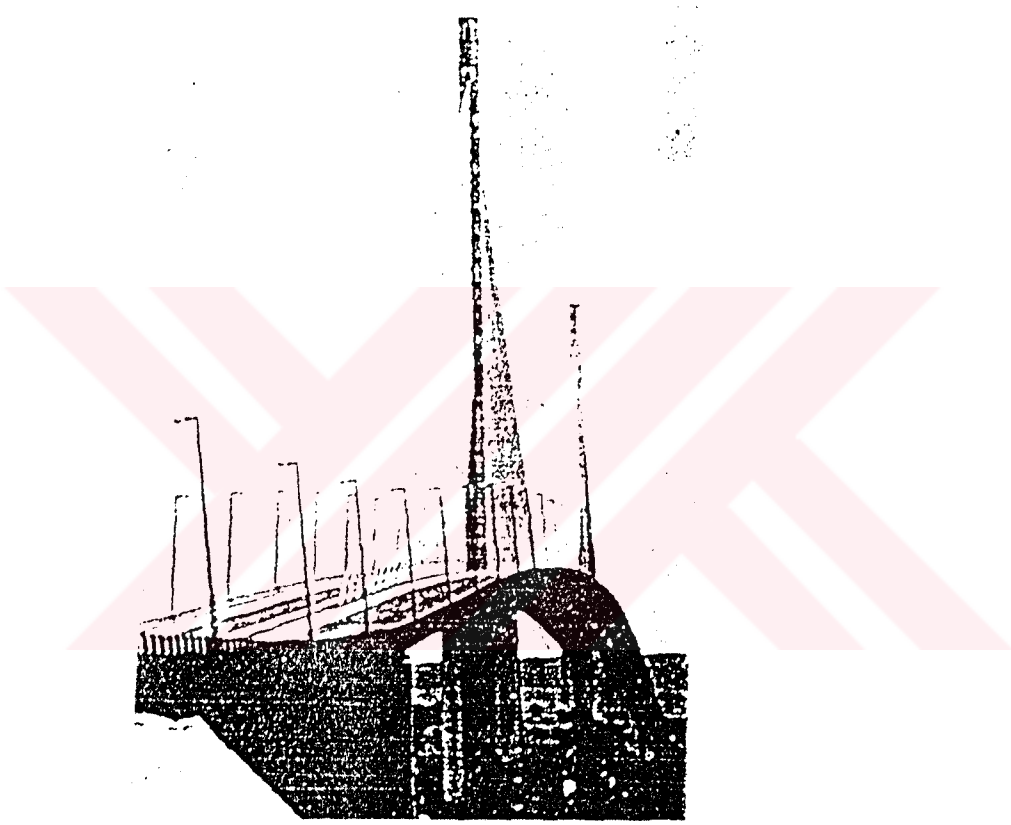
Zemine ankrajlı kablo sistemine sahip ilk önemli eğik askılı köprü, Firenze yakınında Arno Nehri üzerinde yapılan Indiano Köprüsü'dür (Şekil 1.44). F. de Miranda tarafından tasarımı yapılan köprü, 45 m. yüksekliğinde hafifçe arkaya eğilmiş olan kulelerin tepelerinden çıkan iki fan sayesinde desteklenmiş, 206 m. uzunluğunda da ana açıklığa sahiptir. Kulelerden gelen ve zemine ankrajlanan eğik kablolar, kablo kuvvetlerinin hem yatay hem de düşey bileşenlerini zemine ileten ankraj bloklarına bağlanmışlardır.



Şekil 1.44 Kablo sistemi zemine ankrajlı ilk eğik askılı köprü olan Indiano Köprüsü.

Zemine ankrajlı kablo sistemli eğik askılı köprülerin yapımına ilişkin özel sorunlar, İndiano Köprüsü'nde kuleler ve kablo sistemi eklenmeden önce rijitlik kirişi geçici ayaklar üzerinde yapılarak giderilmiştir.

Eğik askılı beton köprülerde çok kablolu sistemin uygulanması, ilk kez Fransa'da Brotonne Köprüsü'nde görülmüştür (Şekil 1.45). Burada bir merkezi kablo düzlemi, kısmen prefabrike elemanlardan yapılmış kutu şekilli rijitlik kirişiyle bir araya getirilmiştir.

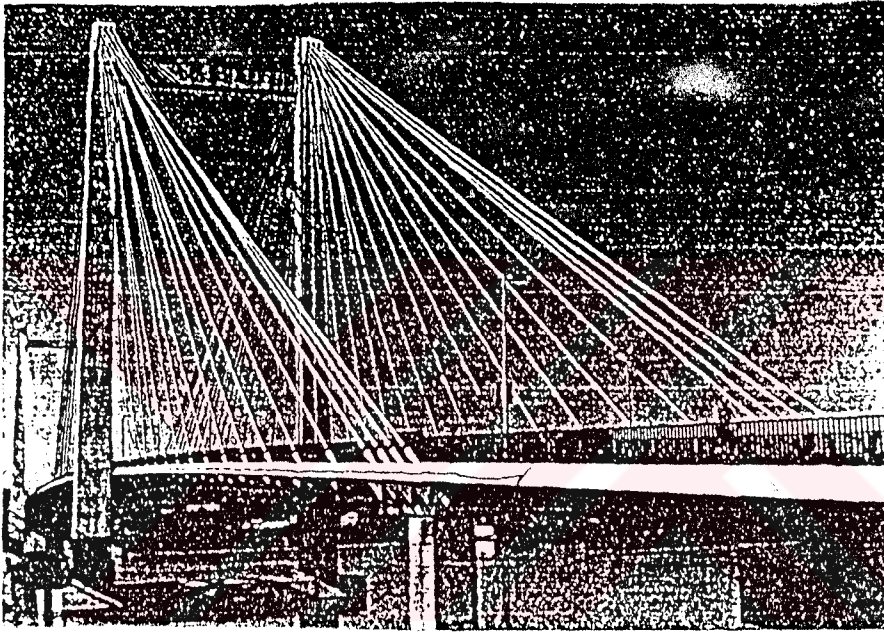


Şekil 1.45 Brotonne Köprüsü.

Eğik kablolar, ard germeli beton kirişlerde kullanılan paralel yedi telli halatlardan yapılmıştır. Korozyona karşı koruma, halatları çelik boruların içine sokarak ve sonra da harç enjekte ederek sağlanmıştır. Yedi telli halatın ankrajı, başlangıçta ard germeli beton kirişlerde kullanıldığı şekilde kama ankrajıyla yapılmıştır. Özellikle salınım yükleri için, yorulma mukavemetini artırarak sabit yük uygulamasından sonra ek ankrajda yapılmıştır.

Bu ek ankraj, kama ankrajdan uzanan bir elik boruyu epoksi reenesiyle doldurarak yapılmıştır.

Eğik askılı krlerde çok kablolu sistem uygulamasının bir rneği de, Arvid Grant Associates işbirliği ile F. Leonhardt tarafından tasarımı yapılan Pasco-Kennewick Köprüsü'dr (şekil 1.46). Burada ift kablo düzlemi, hem düşey doğrultuda, hem de burulma doğrultusunda rijitlik kirişinin etkinliğini güvenceye alan fan şeklinde dir. Paralel tel halatlardan yapılmış eğik kabloları korozyondan korumak için, polietilen boruların içine harç enjekte edilmiş ve ankrajları HiAm türünde yapılmıştır.



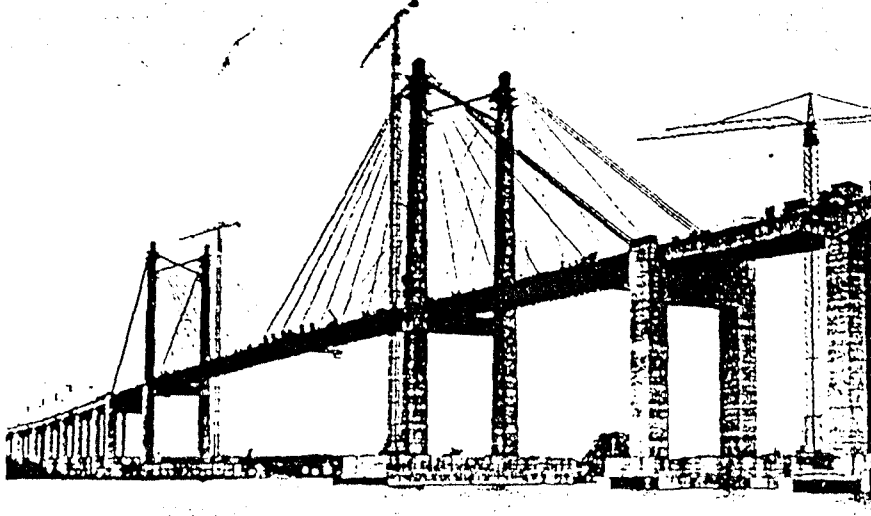
şekil 1.46 Pasco-Kennewick Köprüsü.

Rijitlik kirişi, genişliği, karayolunun genişliği kadar olan prefabrik elemanlar kullanarak parçalı yöntemle yapılmıştır. Kesit, derin nervürlü taban kirişleriyle bağlanmış içi boş üçgen kenarlı iki kiriş içerir.

Arjantin'deki Parana Nehri zerindeki ikiz köprüler, F. de Miranda, F. Leonhardt ve Techint of Buenos Aires'i içine alan bir grup tarafından tasarlanmıştır (şekil 1.47). 1978'de tamamlanmış bu köprüler, bir çok bakımdan Pasco-Kennewick Köprüsü'nün projesine benzerler. Bununla birlikte, Parana Köprülerinin rijitlik kirişleri çelikten yapılmıştır.

Parana Köprüleri, ağır demiryolu yüklerini taşımak için planlanmış ilk eğik askılı köprülerdir. Bu özellikte bazı sorunlar ortaya çıkarmıştır. Farklı şiddetteki hareketli yükler

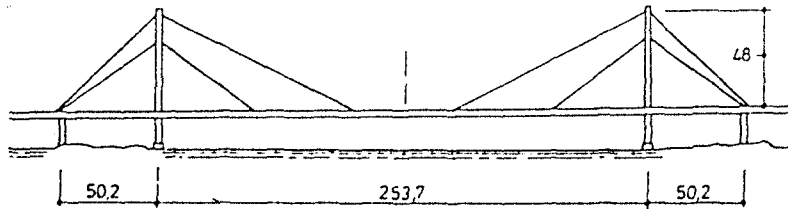
için iki düşey kablo sistemi kullanmak gerekmiştir. Bu gereklilikten dolayı, köprünün iki ucunda farklı boyutlarda eğik kablolar kullanmak gerekmiştir. Demiryolunun bulunduğu uçta, doğal olarak ağır kablolar kullanılmıştır.



Şekil 1.47 Parana nehri üzerindeki köprü.

Parana Köprülerinin eğik kabloları, eğik kablonun konumuna bağlı olarak, sayısı 103-337 arasında değişen 7 mm.'lik paralel tel halatlardan yapılmıştır. Halatların tümünde, demiryolu yükü nedeniyle köprüde oluşacak büyük yorulma mukavemetleri için HiAm bağlantıları kullanılmıştır. Parana Köprülerinin kablo sistemlerindeki etkinlik, kısa yan açıklıklı fan formundan kaynaklanmaktadır. Parana Köprülerinin kuleleri betondan yapılmıştır ve boyutları, geçici desteğe gerek göstermeden, rijitlik kirişinin iki taraflı serbest konsol oluşturmaya izin verecek şekilde seçilmiştir.

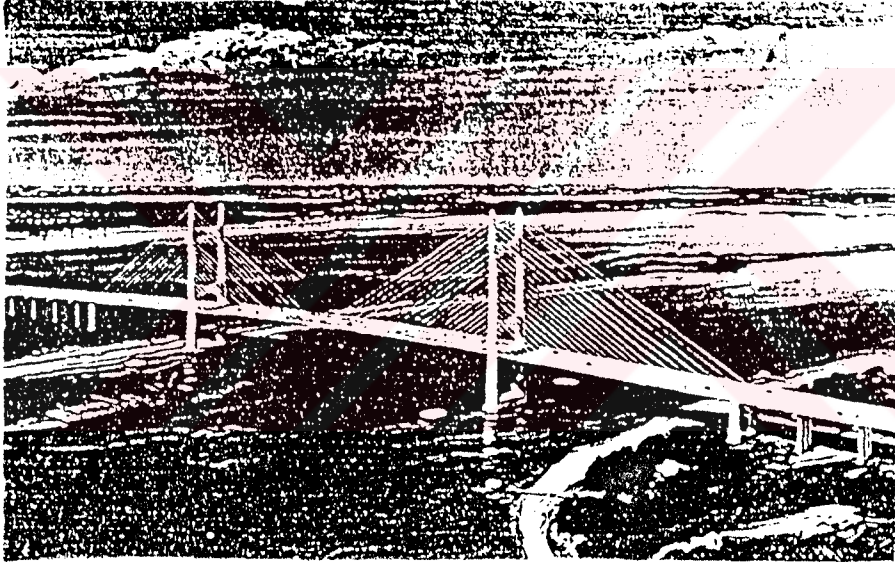
Eğik askılı köprülerin ağır demiryolu yüklerini taşıma yeteneğinin ileri bir örneği, Yugoslavya'da Save Nehri üzerine yapılmış olan demiryolu köprüsüdür (Şekil 1.48). Ana açıklığı 254 m. olan bu köprü, bir vagonu 72 kN/m olan ağır yük trenleri dahil, demiryolu olarak kullanılan iki yolu taşımaktadır.



Şekil 1.48 Save nehri üzerindeki demiryolu köprüsü.

Kablo sisteminin gerekli rijitliğini elde etmek için, yan açıklığın uzunluğu, ana açıklık uzunluğunun 0.197'si olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca ana açıklığın iki eğik kablosu da (bu köprüdeki kablo sistemi, değişiklik yapılmış harp olarak adlandırılabilir), yan açıklıktaki rijitlik kirişine aynı noktada ankraj edilmişlerdir.

Eğik askılı köprüler içinde ilginç bir gelişme, Florida'da Dames Point Köprüsü'nün tasarımında ortaya çıkmıştır (Şekil 1.49). Ana açıklığı 396 m. ve her biri 198 m. olan iki yan açıklığa sahip bu köprü'nün eğik askılı kısmı için, biri çelik, diğeri beton olmak üzere iki proje teklif edilmiştir. Daha çok uygun olduğunu kanıtlamış olan beton proje için, iki düzlemsel çok kablolu harp sistemi önerilmiştir. Büyük bir eğilme rijitliği ile eğik kabloların kulelere bağlanmasıyla, bu kablo sisteminin şekil değiştirme özellikleri önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Öyle ki, beton rijitlik kirişi, ana açıklık uzunluğunun 1/260'ına uygun olarak yapılmıştır.



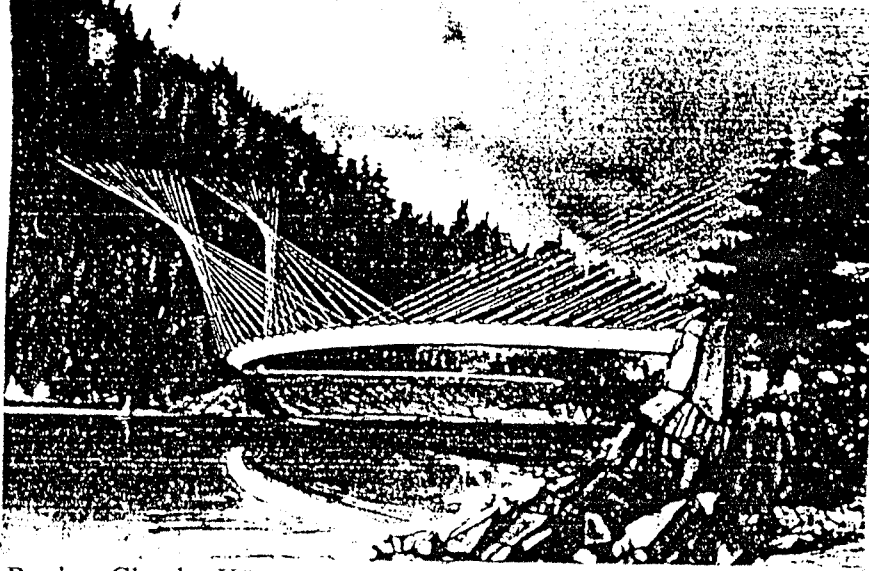
Şekil 1.49 Teklif edilen Dames Point Köprüsü projesi.

Fakat ekonomik sorunlar, planlandığı gibi ilerleyen Dames Point Köprüsü'nün yapımını önlemiştir. Yine de bu köprüdeki pek çok yenilikler, halen diğer eğik askılı köprülerin planlanmasında kullanılmaktadır.

Birleşik Devletler'de yapılması planlanan bir başka eğik askılı köprü projesi, kablolu köprülerin sunmuş olduğu olanakların daha ileri bir örneğini göstermektedir.

Ruck-a-Chucky Köprüsü'nün tasarımcısı T. Y. Lin, yatay düzlemde eğri bir rijitlik kirişi ve ayakları arasındaki açıklığı 396 m. olan (eğri uzunluğu), zemine ankrajlı bir eğik

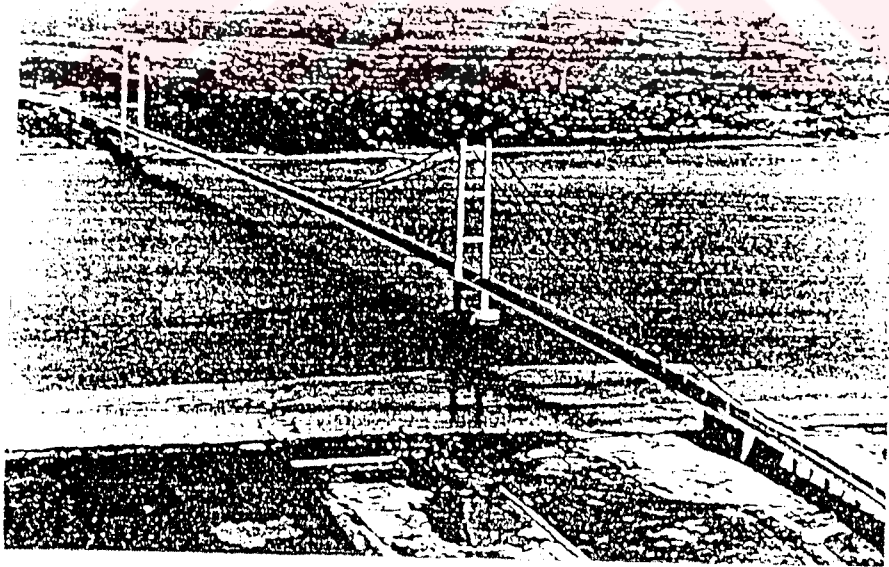
askılı köprü seçmiştir (Şekil 1.50). Tüm eğik kablolar, kirişten köprünün her iki tarafındaki yamaçlara uzatılmışlar ve ard germeli ankrajlar sayesinde kayaya mesnetlenmişlerdir.



Şekil 1.50 Ruck-a-Chucky Köprüsü.

Ruck-a-Chucky Köprüsü, topoğrafik koşullara uydurulmuş özel bir köprü olduğu için, yeni köprü projelerine uygulanabilmesi zor olmuştur.

İngiltere'deki Humber Köprüsü, 1981'de tamamlanmıştır (Şekil 1.51). Bu köprü, Verrazano Narrows Köprüsü ana açıklığını 100 m. aşarak, 1410 m. açıklığa sahip dünyadaki en uzun köprüdür.



Şekil 1.51 Humber Köprüsü.

Humber Köprüsü; aerodinamiklik, kutu şekilli rijitlik kirişi ve eğik askı çubuklarıyla, Boğaziçi ve Severn Köprülerindeki asma sisteme benzer. Bununla birlikte, Humber

Köprüsü beton kulelere, diğer iki köprü ise çelik köprü kulelere sahiptirler. Humber Köprüsü'nde nadir bir özellik, biri 280 m., diğeri 530 m. olan iki yan açıklığın arasındaki farkın büyük olmasıdır. Böyle bir asimetriklik diğer asma köprülerde bulunmamaktadır.

Humber Köprüsü'nde ana kabloların yapımında gel-git metodu kullanılmıştır. Şiddetli iklim koşulları nedeniyle, gel-git metodunun havaya karşı duyarlılığı kabloların yapım programını önemli ölçüde uzatmıştır.

Yüzyılın başından bu yana kullanılan kablolu sistemin ilkesi, yalnız bitmiş yapılara uygulanmamakta, aynı zamanda yapım aşamasındaki köprülere de geçici destek vermektedir.

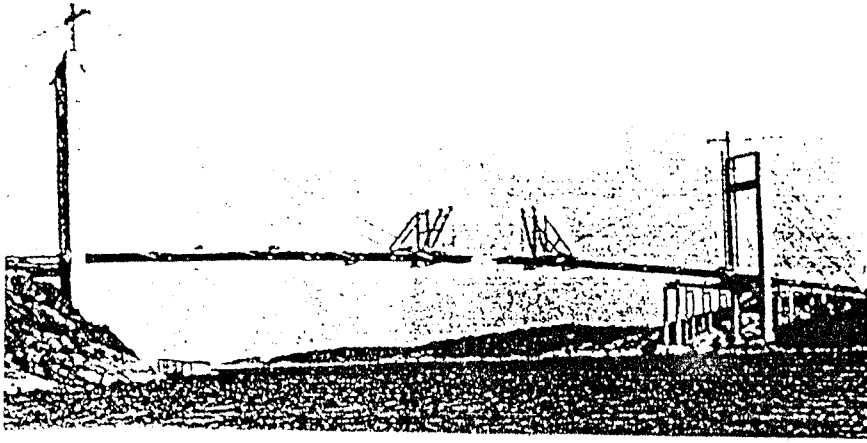
İsveç'teki ilk Tjörn Köprüsü, 280 m. açıklığa sahip çelik kemer şeklinde 1950'lerin sonunda yapılmıştır. Bununla birlikte yapım sırasında, su derinliğinin fazla oluşu ve gemilerin geçiş gereksinimi nedeniyle, asma köprüye geçici kablo sisteminin uygulanarak kemerin yapımı kararlaştırılmıştır (Şekil 1.52). Yirmi yıllık işletme süresinden sonra, bir geminin kemerlerden birine çarpması sonucu ana açıklık yıkılmıştır.



Şekil 1.52 Yapım sırasındaki birinci Tjörn Köprüsü (1959).

Gelecekte benzer bir felaketten korunmak için, Tjörn Köprüsü'nün; 366 m. ana açıklıklı, iki kulesi de zemine yerleştirilmiş eğik askılı köprü olarak yeniden yapımına karar verilmiştir (Şekil 1.53). Böylece Tjörn Köprüsü, gemilerin geçtiği sular üzerinde köprü yapılması halinde, kablolu köprülerin üstünlüğünün iyi bir örneğini oluşturur.

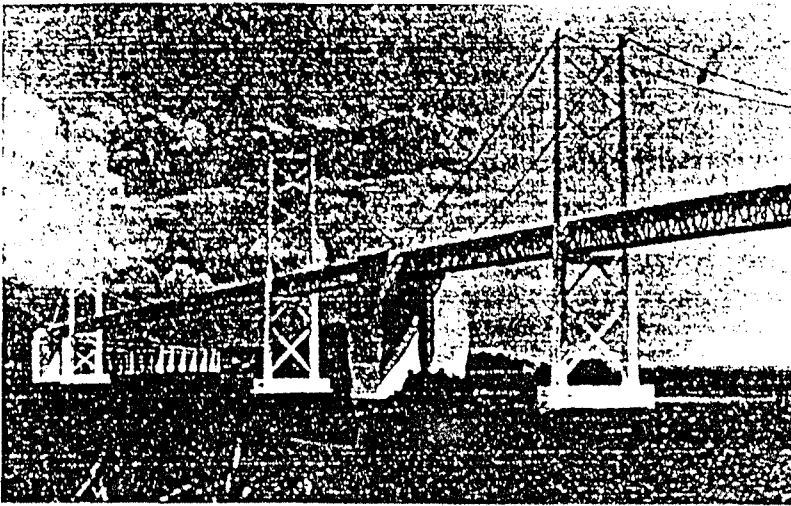
1970'lerin sonunda Japonya'da Honshu ve Shikoku adalarını birbirine bağlayan köprülerin yapımına başlanılmıştır. Dünyanın en büyük kablolu köprüleridir.



Şekil 1.53 Yapım sırasındaki ikinci Tjörn Köprüsü (1981).

Köprülerin çoğu, alt tabliyede trenler, üst tabliyede ise otomobiller olmak üzere, hem karayolu, hem de demiryolu trafiğini taşıyacaklardır. Honshu-Shikoku projesindeki geniş köprülerin (açıklıkları 500 m.'den fazla) hepsi, klasik rijitlik kafes kirişe ve düşey askılara sahip asma sistemli asma köprüler olarak yapılması planlanmıştır. Böylece Honshu ve Shikoku arasındaki asma köprülerin projesi, aslında ikinci Tacoma ve Mackinac Köprülerinde kullanılan ilkelere dayanmaktadır.

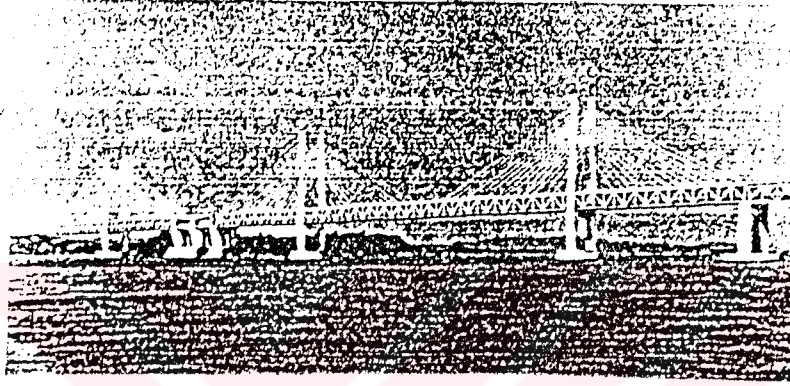
Honshu ve Shikoku arasında tamamlanacak olan ilk bağlantıda (Kojima-Sakaide güzergahı), en geniş ana açıklığın, Güney Bisan Seto Köprüsü'nde 1100 m., Kuzey Bisan Seto Köprüsü'nde ise 990 m. olarak planlanmıştır (Şekil 1.54). Bu iki köprü, üst tabliyede dört şeritli bir karayolunu, alt tabliyede ise özellikle ikisi Shinkansen olarak adlandırılan yüksek hızlı trenlerin kullanıldığı dört demiryolunu taşımaktadır.



Şekil 1.54 Kojima-Sakaide güzergahındaki Bisan Seto Köprüleri.

Aynı güzergahta, her biri 185m. – 420m. – 185 m. açıklıklara sahip ve uç uca yerleştirilmiş iki köprüyü kapsayan, çok etkileyici bir eğik askılı köprü yapısı olan Hitsuishijima ve Iwagurojima Köprüleri yapılmıştır (Şekil 1.55). Aynı güzergahtaki asma köprülerde olduğu gibi, trafik, alt tabliyede demiryolu ve üst tabliyede karayolu olacak şekilde iki seviyeli bir rijitlik kafes kirişi üzerinde akmaktadır.

Kablo sistemleri, rijitlik kafes kirişin hemen üzerinde bağlanmış, iki düşey kablo düzlemli olan ve değişiklik yapılmış fan şeklinde olmuştur. Böylece hem düşey doğrultu, hem de burulma doğrultusu için kabloların yüksek etkinliği gerçekleşmiş olmaktadır.



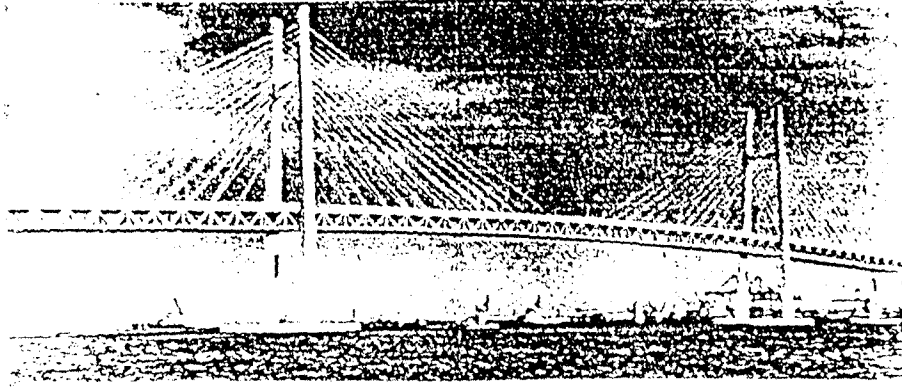
Şekil 1.55 Hitsuishijima ve Iwagurojima Köprüleri.

Hitsuishijima ve Iwagurojima Köprüleri, hem ard arda uzun açıklıklara, hem de karayolu ve demiryolundan gelen hareketli yüke maruz kalması nedeniyle, şimdiye kadar yapılmış olan en büyük eğik askılı köprü yapısıdır.

Honshu ve Shikoku arasındaki bağlantılar için yapılan köprülerden Akashi-Kaikyo Köprüsü'nün ana açıklığı 1780 m. olacak şekilde planlanmıştır. Büyük yan açıklıkları, ana açıklığın yaklaşık yarısıdır.

Diğer bir eğik askılı köprüde Yokohama Köprüsü'dür (Şekil 1.56). Bu köprü, iki tabliyesinde 12 şeritli bir yolu taşımaktadır ve eğik askılı kısmında 200 m., 400 m. ve 200 m.'lik açıklıklara sahiptir. Yokohama Köprüsü rijitlik kafes kirişinin üst kısmı, 39 m. genişliğinde ve 3 m. yüksekliğinde olacak şekilde aerodinamik kutu kirişe sahiptir. Oysa alt kiriş ve diagonal çubuklar klasik içi boş kutu kesittedir. Kafes kirişin toplam yüksekliği, ana açıklığın 1/38'ine uygun olarak 12 m.'dir.

Uzun süre tartışılmış bir başka köprü, Danimarka'daki Great Belt Köprüsü'dür. Projesi 1976-1978 döneminde bitirilmiştir. Yapıma 1979 yılında başlanması gerekirken, politik nedenlerden ötürü beş yıl ertelenmiştir.

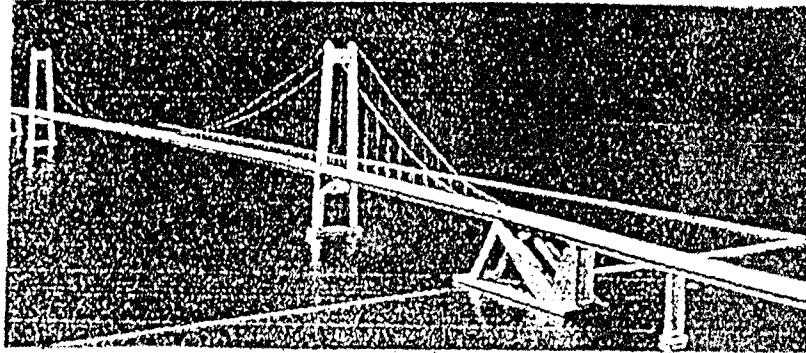


Şekil 1.56 Yokohama Köprüsü.

Great Belt Köprüsü için iki proje üzerinde çalışılmıştır. Bu projeler, 780 m. ana açıklıklı bir eğik askılı köprü (Şekil 1.57), diğeri 1416 m. ana açıklıklı asma köprüdür (Şekil 1.58). Her ne kadar pahalı olsa da, gemiler için minimum geçiş açıklığının 750 m. olması gemi trafiğinde önemli üstünlükler sağladığından, geniş asma köprü projesi daha uygun görülmüştür.



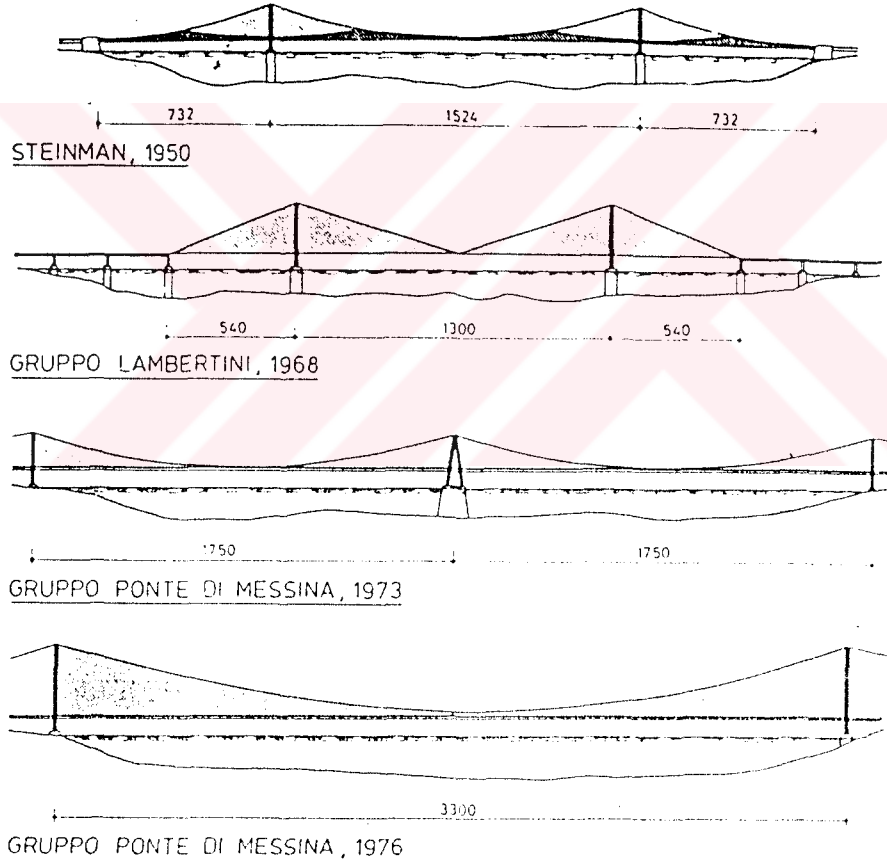
Şekil 1.57 Great Belt Köprüsü için 780 m. ana açıklıklı eğik askılı köprü projesi.



Şekil 1.58 Great Belt Köprüsü için 1416 m. ana açıklıklı asma köprü projesi.

Kablolu köprülerin her ikisi içinde rijitlik kafes kirişi aynı olup; alt tabliyede iki demiryoluna, daha geniş olan üst tabliyede altı şeritli karayoluna hizmet verecek biçimde trapez enkesitli olarak planlanmıştır.

Demiryolu trafiğini taşıyan köprüler içinde, Honshu-Shikoku bağlantı köprüleri ve Great Belt Köprüsü'nün boyutları alışılmamış boyutlardır. Bununla birlikte, Messina Boğazı üzerindeki bağlantı için, hem demiryolu, hem de karayolu trafiğini taşıyan büyük açıklığa sahip bir asma köprü üzerinde çalışılmıştır. Burada boğazın her iki kıyısına yerleştirilmiş kuleleri arasında 3300 m. ana açıklığa sahip bir asma köprü projesi uygun görülmüştür. 1950-1976 döneminde Messina Boğazı Köprüsü için üzerinde çalışılmış dikkate değer projelerden dört tanesini gösteren Şekil 1.59'de görüldüğü gibi, kabul edilen projenin en cesur görüşü temsil ettiği görülmektedir.



Şekil 1.59 Messina Boğazı Köprüsü için dört proje.

Steinman'ın üç açıklıklı asma köprü projesi, 1950'lerin başlarında teknik olanaklarla gerçekleştirilebilecek belki de ilk gerçekçi proje olmuştur.

1968'deki proje yarışmasına Gruppo Lambertini tarafından sunulan ve 1300 m. ana açıklıklı bir eğik askılı köprüyü içeren proje Şekil 1.57'de görülmektedir. Steinman'ın projesindeki iki köprü ayağına karşılık, boğazın derin kısımlarında altı köprü ayağının kurulması zorunluluğu eğik askılı köprü projesi için sakınca oluşturmaktadır.

Gruppo Ponte di Messina tarafından sunulan iki proje de Şekil 1.59'de görülmektedir. Bu projeler, açıklık boyunca rijit bir kule ile ayrılmış 1750 m. uzunluğunda iki açıklıklı ve 3300 m. uzunluğunda tek açıklıklı asma köprülerdir. Böylece boğazda kurulacak köprü ayağı sayısı sırasıyla bire, hatta sıfıra indirilebilmektedir.

Gelecekte, mevcut çelik kablolardan daha uygun mukavemet-yoğunluk oranına sahip yeni malzemelerin, büyük açıklıkların yapılabilmesini ekonomik olarak olanaklı hale getirir. Bu tür malzemelerden karbon lifleri ve camsı metaller zaten mevcuttur; fakat fiyatları asma köprülerde kullanımlarını önleyecek derecede yüksektir.



2. BÖLÜM: KABLOLAR

2.1. Tek Kablonun Şekil Değiştirme Özellikleri

Tüm kablolu köprülerin basit elemanı tek kablo formudur ve bunların şekil değiştirme özellikleri bu yapıların analizinde önemli bir rol oynar.

Genelde, başlıca yapı sistemlerinde yapılan araştırmalar göstermiştir ki, kabloların hareketi yalnız çekme mukavemetine karşı çalışan ve tamamıyla esnek teller şeklindedir. Netice olarak kablo eğrisi, yük uygulanmış kablonun funiküler eğrisi ile aynı zamanda meydana gelir.

2.1.1. Düşey yük altındaki kablonun denklemleri

Bir kablonun A ve B noktalarındaki kuvvetlerin basit ifadeleri için, aynı açıklık ve yük altındaki basit mesnetli kirişin reaksiyonları olan kesme kuvvetiyle eğilme momenti referans olarak gösterilebilir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi genel denge durumu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$R_H(0) = R_H(a) = H(x) = H(\text{sabit})$$

$$R_V(0) = R(0) - H \frac{h}{a}$$

$$R_V(a) = R(a) + H \frac{h}{a}$$

$$V(x) = S(x) + H \frac{h}{a}$$

$$N(x) = \sqrt{(H(x))^2 + V(x)^2} = H \sqrt{\left(\frac{S(x)}{H} + \frac{h}{a}\right)^2 + 1} \quad (2.1)$$

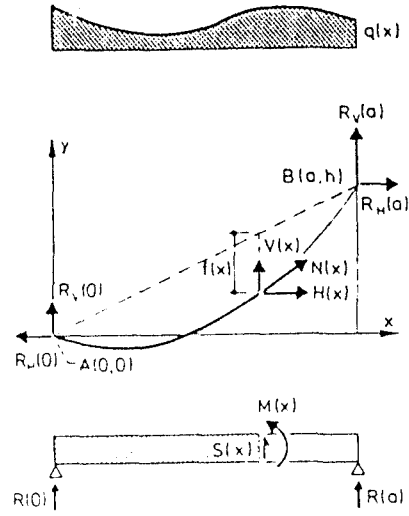
A-B kablo eğrisinin denklemi ise aşağıdaki gibidir:

$$y = -\frac{M(x)}{H} + \frac{h}{a}x \quad (2.2)$$

Burada $y = (h/a)x$, A-B doğrusunun denklemidir. Kablo eğrisinin sehim olan f $f(x)$ ise basit mesnetli kirişin $M(x)$ eğilme momenti ile ilgilidir:

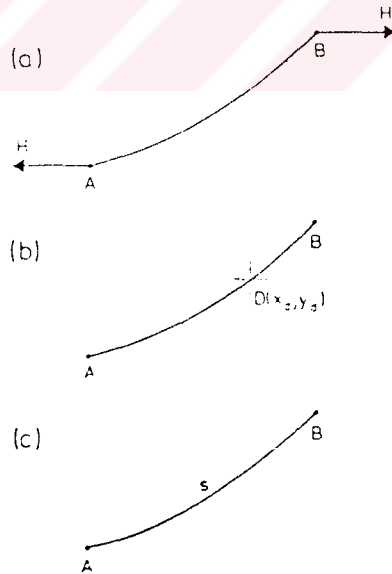
$$f(x) = -\frac{M(x)}{H} \quad (2.3)$$

Görünmektedir ki, sehim $f(x)$, yatay kuvvet H ile ters orantılı ve moment $M(x)$ ile de doğru orantılıdır.



Şekil 2.1 Aynı yük ve açıklığa sahip basit mesnetli bir kiriş ve bir kablo üzerindeki kuvvet ve reaksiyonlar.

Belirli bir yük ve mesnet şartlarına göre kablo eğrisi, yatay kuvvet H 'nin büyüklüğüne göre belirlenir. Bununla birlikte bazı durumlarda örneğin; kablo üzerindeki belli bir D noktası veya belirli bir eğri uzunluğu s için kablo eğrisi hesaplanabilir. Bu şekilde bulunan özel kablo eğrileri Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Özel kablo görünümleri: (a) yatay kuvvet durumu; (b) kablo üzerinde D noktasının bulunması; (c) eğri uzunluğu s olan kablo.

Durum (a)'da kablo eğrisi denklem (2.3)'den bulunur. Durum (b)'de ise yatay kuvvet H , koordinatları (x_d, y_d) olan belirli bir D noktasının, denklem (2.2)'de yerine konulmasıyla elde edilir:

$$H = \frac{M(X_d)}{(hx_d/a) - y_d}$$

$$y = \left(y_d - \frac{h}{a} x_d \right) \frac{M(x)}{M(x_d)} + \frac{h}{a} x \quad (2.4)$$

Durum (c) ise, belirli bir eğri uzunluğu s için, yatay kuvvet H 'nin bazı durumlarda kesin olarak bulunamadığında yerini tutan ve çok zahmetli bir haldir. Bu halde kablo eğrisi aşağıdaki şekilde hesap edilir:

$$s = \int_0^a \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx = \int_0^a \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a} - \frac{1}{H} \frac{dM}{dx} \right)^2} dx \quad (2.5)$$

denklem gösteriyor ki s , kablonun mesnet koordinatları (a, h) ve yük (M) ile beraber, H 'nin bir fonksiyonudur.

Genellikle, gerilmesiz durumdaki kablonun farklı uzaması (Δs), kablonun farklı yükler altında çalıştığını karakterize eder.

Koordinatları (x, y) olan kabloda elastik şekil değiştirme aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon(x) = \frac{N(x)}{EA} = \frac{H}{EA} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}$$

ve toplam uzama Δs ise şu hali alır:

$$\Delta s = \int_0^a \varepsilon(x) \frac{\partial s}{\partial x} dx = \frac{H}{EA} \int_0^a \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx \quad (2.6)$$

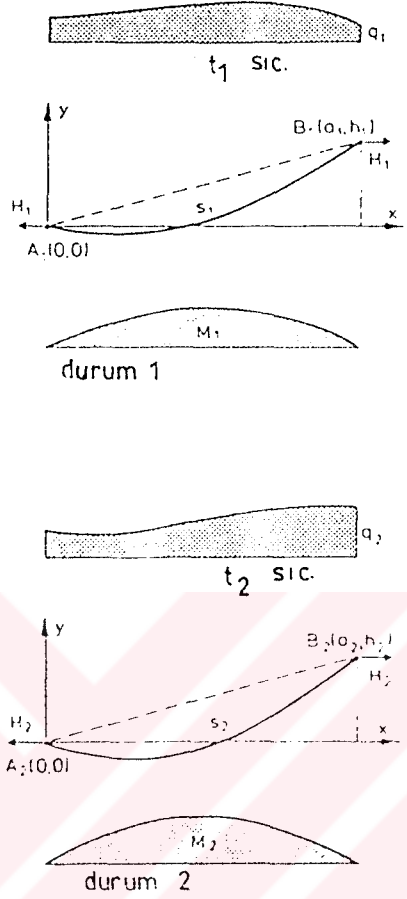
Her yük durumu özel bir kablo eğrisi oluşturur. Bir yük durumundan diğer bir yük durumuna geçiş ise değişik kablo geometrisini içerir.

Kablolu köprülerde kablo geometrisinin değişimi üç ana başlıkta toplanabilir:

- (a) yükün şiddeti veya durumunun değişimi;
- (b) mesnet şartlarının değişimi;
- (c) sıcaklık değişimi.

Kablo denklemi kurmak için Şekil 2.3'de gösterilen iki durum araştırılmıştır. Birinci durumdaki kabloda, mesnet noktaları $A_1(0,0)$ ve $B_1(a_1, h_1)$, maruz bırakılan q_1 yüküne karşı

gelen moment eğrisi M_1 ve sıcaklık t_1 'dir. İkinci durumda ise, mesnet noktaları $A_2(0,0)$ ve $B_2(a_2,h_2)$, yük q_2 'ye karşı gelen moment eğrisi M_2 ve sıcaklık t_2 'dir.



Şekil 2.3 Düşey yüke maruz bir kablonun iki durumu.

Durum 1 için eğri uzunluğu(s_1), denklem (2.5)'den hesaplanabilir:

$$s_1 = \int_0^{a_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_1}{dx} \right)^2} dx = \int_0^{a_1} \sqrt{1 + \left(\frac{h_1}{a_1} - \frac{1}{H} \frac{dM_1}{dx} \right)^2} dx \quad (2.7)$$

ve gerilmesiz durumda, t_o sıcaklığındaki toplam uzama şu formülle bulunur:

$$\Delta s_1 = \frac{H_1}{EA} \int_0^{a_1} \left[1 + \left(\frac{dy_1}{dx} \right)^2 \right] dx + \beta(t_1 - t_o) s_o \quad (2.8)$$

burada ilk terim denklem (2.6)'dan bulunur ve ikinci terimdeki $t_1 - t_o$ sıcaklık farkından oluşan uzamadır (t_o , keyfi olarak seçilen referans sıcaklığı). s_o , gerilmesiz kabloun uzunluğu (t_o sıcaklığında) ve β ise ısı genleşme katsayısıdır.

İkinci duruma karşı gelen denklemler aşağıdaki gibidir:

$$s_2 = \int_0^{a_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_2}{dx}\right)^2} dx \quad (2.9)$$

$$\Delta s_2 = \int_0^{a_2} \left[1 + \left(\frac{dy_2}{dx}\right)^2\right] dx + \beta(t_2 - t_0)s_0 \quad (2.10)$$

$s_2 - s_1 = \Delta s_2 - \Delta s_1$ gibi uygunluk şartı istenirse denklemler birbirinden çıkartılır:

$$\begin{aligned} & \int_0^{a_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_2}{dx}\right)^2} dx - \int_0^{a_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2} dx \\ &= \frac{H_2}{EA} \int_0^{a_2} \left[1 + \left(\frac{dy_2}{dx}\right)^2\right] dx - \frac{H_1}{EA} \int_0^{a_1} \left[1 + \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2\right] dx + \beta(t_2 - t_1)s_0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

$\beta(t_2 - t_1)s_0 \cong \beta t_2 s_2 - \beta t_1 s_1$ olarak alınırsa, (2.11) denklemi şöyle yazılabilir:

$$\begin{aligned} & (1 - \beta t_2) \int_0^{a_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_2}{dx}\right)^2} dx - \frac{H_2}{EA} \int_0^{a_2} \left[1 + \left(\frac{dy_2}{dx}\right)^2\right] dx \\ &= (1 - \beta t_1) \int_0^{a_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2} dx - \frac{H_1}{EA} \int_0^{a_1} \left[1 + \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2\right] dx \end{aligned} \quad (2.12)$$

veya kısaca şöyle de yazılabilir:

$$(1 - \beta t_2)s_2 - \Delta s_2 = (1 - \beta t_1)s_1 - \Delta s_1 \quad (2.13)$$

Yaklaşık olarak %80 maksimum eğimli bir kablo için (2.12) denkleminde aşağıdaki gibi bir yaklaşım düşünülebilir:

$$\int_0^{a_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2} dx \cong \int_0^{a_1} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2\right] dx = a_1 + \frac{1}{2} \int_0^{a_1} \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2 dx \quad (2.14)$$

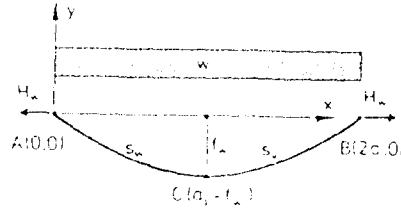
Bu yaklaşımla denklem (2.12) şu hali alır:

$$\begin{aligned} & (1 - \beta t_2 - \frac{H_2}{EA})a_2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\beta t_2 - \frac{H_2}{EA}\right) \int_0^{a_2} \left(\frac{dy_2}{dx}\right)^2 dx \\ &= (1 - \beta t_1 - \frac{H_1}{EA})a_1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\beta t_1 - \frac{H_1}{EA}\right) \int_0^{a_1} \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2 dx \end{aligned} \quad (2.15)$$

Durum 1 ve durum 2'deki bütün parametreler; a , h , q , M , H , ve t biliniirse, (2.12) veya (2.15) denklemleri kullanılarak H_2 ve durum 2'deki kablo geometrisi hesaplanabilir.

2.1.2. Üniform yüke maruz yatay kablo

Sabit yük durumunda, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi kablo eğrisi ikinci derece bir paraboldür.



Şekil 2.4 Sabit yük durumunda yatay bir kablo.

$$y = \frac{f_w}{a^2} x(x - 2a) \quad (2.16)$$

f_w , orta açıklıktaki sehimdir:

$$f_w = \frac{wa^2}{2H_w} \quad (2.17)$$

A ile C arasındaki kablo eğrisi s_w , denklem (2.5)'den hesaplanır:

$$s_w = \int_0^a \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \int_0^a \sqrt{1 + \left(\frac{2f_w}{a^2}(x-a)\right)^2} dx$$

$$\int \sqrt{1+z^2} dz = \frac{1}{2} z \sqrt{1+z^2} + \frac{1}{2} \ln \left[z + \sqrt{1+z^2} \right] \text{ olduğundan } s_w \text{ için şu sonuç elde edilir:}$$

$$s_w = a \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + 4\left(\frac{f_w}{a}\right)^2} + \frac{a}{4f_w} \ln \left\{ \sqrt{1 + 4\left(\frac{f_w}{a}\right)^2} + 2\frac{f_w}{a} \right\} \right) \quad (2.18)$$

Binominal açılımla ifade genişletilirse:

$$s_w = a \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f_w}{a}\right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{f_w}{a}\right)^4 + \frac{4}{7} \left(\frac{f_w}{a}\right)^6 - \dots \right] \quad (2.19)$$

Yaklaşık sonuç için yalnız ilk iki terim dikkate alınır:

$$s_w = a \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f_w}{a}\right)^2 \right] \quad (2.20)$$

$f_w/a \leq 0.20$ için (2.20) denkleminde bulunan eğri uzunluğu farkı, gerçek değer %1'inden daha azdır ve hatta $f_w/a = 0.50$ için gerçek değer ve yaklaşık değer arasındaki fark %1.60'dan daha azdır. Böylece kablolu köprülerin analizinde f_w/a oranı nadiren 0.20

değerini aşar. Yaklaşık ifadeler – denklem (2.20) – son hesaplamalar için bile yeterli sonuçlar verir.

Sabit yük altındaki kablonun toplam uzaması Δs_w , denklem (2.6)’dan bulunur:

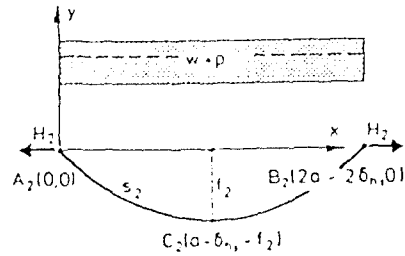
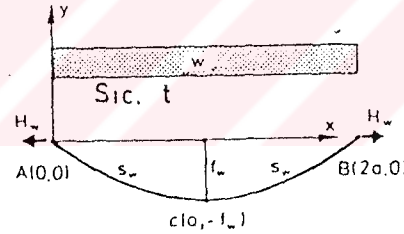
$$\Delta s_w = \frac{H_w}{EA} \int_0^a \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx \quad (2.21)$$

H_w yerine $wa^2/(2f_w)$ değerini ve dy/dx yerine de $2f_w(x-a)/a^2$ değerini yazarsak (2.21) denklemini aşağıdaki gibi olur:

$$\Delta s_w = \frac{wa^2}{EA} \left(\frac{a}{2f_w} + \frac{2f_w}{3a} \right) \quad (2.22)$$

Yatay kablo üniform bir hareketli yüke maruz kalırsa, mesnet noktalarında karşılıklı $2\delta_h$ değerinde yatay yerdeğiştirme ve Δt sıcaklık farkından dolayı Şekil 2.5’de görüldüğü gibi, denklem (2.12)’den yeni kablo geometrisi çıkarılabilir:

$$\begin{aligned} & (1 - \beta \Delta t)(a - \delta_h) \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f_2}{a - \delta_h} \right)^2 \right] - \frac{(w + p)(a - \delta_h)^2}{EA} \left(\frac{a - \delta_h}{2f_2} + \frac{2f_2}{3(a - \delta_h)} \right) \\ & = a \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 \right] - \frac{wa^2}{EA} \left(\frac{a}{2f_w} + \frac{2f_w}{3a} \right) \end{aligned} \quad (2.23)$$



Şekil 2.5 Sabit yük ve üniform hareketli yük durumunda yatay bir kablo.

δ_h 'nin a değerinin yanında küçük ve $\beta \Delta t$ değerinin de 1'den küçük olduğu kabulünden faydalanarak (2.23) denklemini yeniden düzenlenirse şu şekilde oluşur:

$$\left(\frac{f_2}{a}\right)^3 - \frac{(w+p)a}{EA}\left(\frac{f_2}{a}\right)^2 + \left[\frac{wa}{EA}\left(\frac{f_w}{a} + \frac{3a}{4f_w}\right) - \left(\frac{f_w}{a}\right)^2 - 1.5\left(\frac{\delta_h}{a} + \beta\Delta t\right)\right]\frac{f_2}{a} - \frac{3(w+p)a}{4EA} = 0 \quad (2.24)$$

Bu kübik denklemle hareketli yük durumunda ki orta açıklık f_2 sehimini hesaplanabilir. Sabit yük durumunda ise mesnet noktalarında karşılıklı $2\delta_h$ yatay yerdeğiştirmenin ve sıcaklık farkı Δt 'nin bilinmesi gerekir.

Denklem (2.24)'teki kübik denklemin kökleri kolaylıkla hesaplanır; fakat asma köprü halinde f_2 , orta açıklıktaki çökme δ_y kadar f_w 'den farklıdır. Bunun için şu formül kullanılabilir:

$$P\left(\frac{f_2}{a}\right) = P\left(\frac{f_w}{a} + \frac{\delta_y}{a}\right) \approx P\left(\frac{f_w}{a}\right) + P'\left(\frac{f_w}{a}\right)\frac{\delta_y}{a} \quad (2.25)$$

$$\frac{\delta_y}{a} = -\frac{P(f_w/a)}{P'(f_w/a)} \quad (2.26)$$

Burada $P(f_w/a)$ ve $P'(f_w/a)$ değerleri aşağıdaki gibidir:

$$P\left(\frac{f_w}{a}\right) = -\frac{pa}{EA}\left(\frac{f_w}{a}\right)^2 - 1.5\left(\frac{\delta_h}{a} + \beta\Delta t\right)\frac{f_w}{a} - \frac{3pa}{4EA}$$

ve

$$P'\left(\frac{f_w}{a}\right) = 2\left(\frac{f_w}{a}\right) - \frac{(w+2p)a}{EA}\frac{f_w}{a} - 1.5\left(\frac{\delta_h}{a} + \beta\Delta t\right) + \frac{3}{4}\frac{wa}{EA}\frac{a}{f_w}$$

Denklem (2.24)'ten bulunan f_2 ya da denklem (2.26)'dan bulunan $(f_2 - f_w + \delta_y)$ ' den sonra H_2 yatay kuvveti şu formülle hesaplanır:

$$H_2 = \frac{(w+p)a^2}{2f_2}$$

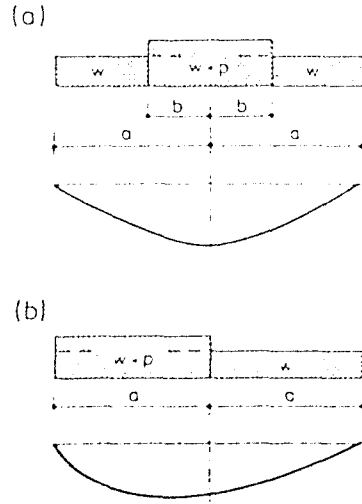
ve hareketli yüke sahip durum tamamen tanımlanmış olur.

2.1.3. Üniform olmayan yüke maruz yatay kablo

Asma köprü durumunda ana kabloda oluşan büyük çökmeler, genellikle üniform olmayan hareketli yük altında meydana gelir. Bunun sonucunda da, sabit yük kablo eğrisinden farklı şekilde funiküler eğri oluşur.

İncelenecek olan iki tip üniform olmayan hareketli yük Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Üstteki şekilde yük karakteristiği simetrik, fakat trafik yükü yalnız açıklığın orta kısmında

yayıldır; alttaki (b) ile gösterilen şekilde ise, yük asimetrik ve açıklığın bir yarısında yayılıdır.



Şekil 2.6 Üniform olmayan simetrik ve asimetrik hareketli yük durumu.

Bu iki durumda mesnetler ankastre ve sıcaklık sabit kabul edilmiştir. Üstteki (a) durumu için kablo eğrisi şöyle tanımlanmıştır:

$$y = \begin{cases} \frac{wx^2 - 2(wa + pb)x}{wa^2 + pb(2a - b)} f_2 & 0 < x < a-b \\ \frac{wx^2 - 2(wa + pb)x + p(x + b - a)^2}{wa^2 + pb(2a - b)} f_2 & a-b < x < a \end{cases} \quad (2.27)$$

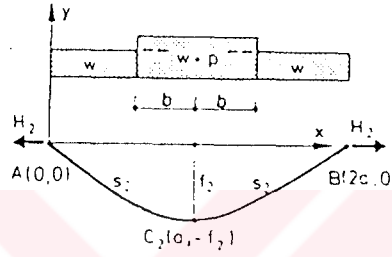
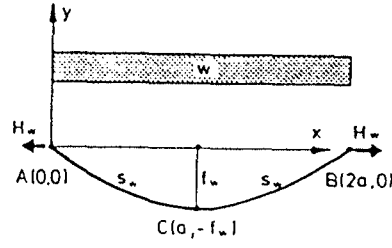
Şekil 2.7 yardımıyla kablo için konum denklemi yeniden oluşturulabilir:

$$s_2 - \Delta s_2 = s_w - \Delta s_w \quad (2.28)$$

Denklem (2.20)'deki yaklaşık sonuç denkleminde s_2 ve (2.6) denkleminde de Δs_2 hesaplanırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{1 + \frac{p}{w} \left[3 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] \frac{b}{a} + \left(\frac{p}{w} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{b}{a} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^2}{\left[1 + \frac{p}{w} \left(2 - \frac{b}{a} \right) \frac{b}{a} \right]^2} \left(\frac{f_2}{a} \right)^3 - \frac{wa}{EA} \frac{1 + \frac{p}{w} \left[3 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] \frac{b}{a} + \left(\frac{p}{w} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{b}{a} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^2}{1 + \frac{p}{w} \left(2 - \frac{b}{a} \right) \frac{b}{a}} \left(\frac{f_2}{a} \right)^2 = 0$$

$$+ \left[\frac{wa}{EA} \left(\frac{3a}{4f_w} + \frac{f_w}{a} \right) - \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 \right] \frac{f_2}{a} - \frac{3wa}{4EA} \left[1 + \frac{pb}{wa} \left(2 - \frac{b}{a} \right) \right] = 0 \quad (2.29)$$



Şekil 2.7 Sabit yük ve simetrik üniform olmayan hareketli yük durumunda yatay bir kablo. (f_2/a) katsayısının değişiminde, Δt sıcaklık değişimi ile mesnet noktalarındaki $2\delta_h$ yatay yerdeğiştirme miktarının dikkate alınması gerekir:

$$\frac{wa}{EA} \left(\frac{3a}{4f_w} + \frac{f_w}{a} \right) - \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 - 1.5 \left(\frac{\delta_h}{a} + \beta \Delta t \right)$$

Yük durumu (b) için kablo eğrisi aşağıda tanımlanmıştır:

$$y = \frac{2(w+p)x^2 - (4w+3p)ax}{(2w+p)a^2} f_2 \quad 0 \leq x \leq a$$

$$y = \frac{2wx^2 - (4w-p)ax - 2pa^2}{(2w+p)a^2} f_2 \quad a \leq x \leq 2a \quad (2.30)$$

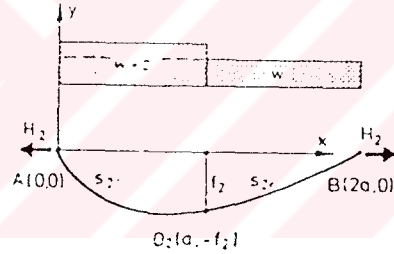
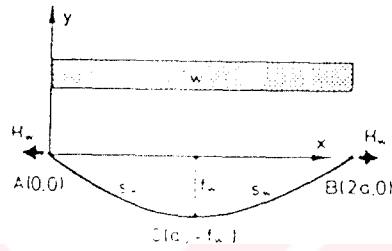
Şekil 2.8 yardımıyla, $A-D_2-B$ noktaları arasında kablo için konum denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$s_{2l} + s_{2r} - (\Delta s_{2l} + \Delta s_{2r}) = 2(s_w - \Delta s_w) \quad (2.31)$$

Denklem (2.14)'ten s_{2l} ve s_{2r} , (2.6) denkleminden de Δs_{2l} ve Δs_{2r} hesaplanırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{aligned}
& \frac{5\left(\frac{p}{w}\right)^2 + 16\frac{p}{w} + 16}{3\left(\frac{p}{w} + 2\right)^2} \left(\frac{f_2}{a}\right)^3 - \frac{wa}{2EA} \frac{5\left(\frac{p}{w}\right)^2 + 16\frac{p}{w} + 16}{3\left(\frac{p}{w} + 2\right)} \left(\frac{f_2}{a}\right)^2 \\
& + \left[\frac{wa}{EA} \left(\frac{a}{f_w} + \frac{4f_w}{3a} \right) - \frac{4}{3} \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 \right] \frac{f_2}{a} - \frac{wa}{2EA} \left(\frac{p}{w} + 2 \right) = 0
\end{aligned} \quad (2.32)$$

Buradan durum 2'nin orta açıklıktaki f_2 sehim bulunabilir, kablo geometrisi de (2.30) denklemi ile zaten verilmiştir.



Şekil 2.8 Sabit yük ve asimetrik hareketli yük durumunda yatay bir kablo.

Asimetrik yük altında orta açıklıktaki kablonun yerdeğiştirmesi yalnız δ_y düşey çökmesi ile karakterize edilemez; yatay yerdeğiştirme δ_x 'de düşünülmelidir.

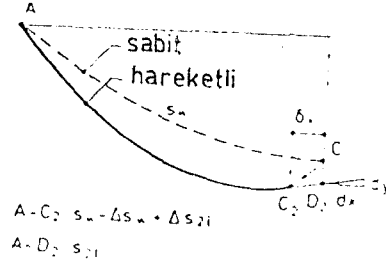
Şekil 2.9'da gösterilen bu özellikte, sabit yük durumunda bulunan kablonun merkezindeki C noktası; sabit yük + hareketli yük durumundaki C_2 noktasına hareket eder.

Yatay yerdeğiştirme δ_x için aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\delta_x = (s_{2l} - s_w + \Delta s_w - \Delta s_{2l}) \frac{1}{1 + (dy/dx)^2} \cong s_{2l} - s_w + \Delta s_w - \Delta s_{2l} \quad (2.33)$$

s_{2l} , Δs_{2l} , s_w ve Δs_w ifadeleri yerlerine yazılırsa (2.33) denklemi şu hali alır:

$$\delta_x = \left[\frac{2}{3} \left(\frac{4w^2 + 5wp + 1.75p^2}{(2w + p)^2} \right) \left(\frac{f_2}{a} \right)^2 - \frac{a}{3EA} \left(\frac{4w^2 + 5pw + 1.75p^2}{2w + p} \right) \frac{f_2}{a} + \frac{wa}{EA} \left(\frac{a}{2f_w} + \frac{2f_w}{3a} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 - \frac{a}{4EA} (2w + p) \left(\frac{a}{f_2} \right) \right] a \quad (2.34)$$



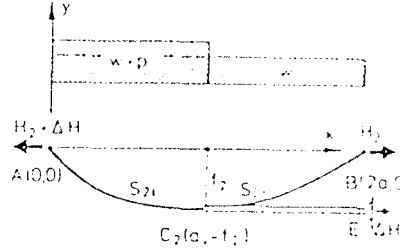
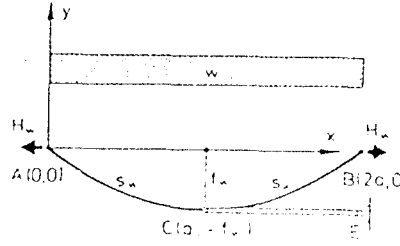
Şekil 2.9 Asimetrik hareketli yükde kablonun merkezindeki C' noktasının yerdeğiştirmesi.

Kablonun mesnet noktaları arasındaki serbest hareketinden ötürü yapılarda bu şekilde yatay yerdeğiştirme oluşur. Bununla birlikte, ankastre bir mesnetle bağlanan veya bazı hidrolik mekanizmalarla dönmesi engellenen yerde, kablonun merkezi bir kelepçe ile rijitlik kirişine bağlanması sonucu, asma köprülerde orta açıklığın yatay hareketi sınırlandırılmıştır.

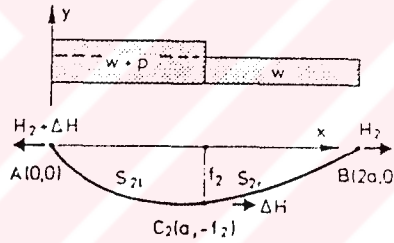
Orta açıklıktaki kablonun yatay olarak sınırlandırılmasının etkileri, Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Burada kablo merkezindeki C' noktası yatay bir elemanla E noktasına bağlanmıştır. Serbest kablonun yatay olmayan yerdeğiştirmesi orta açıklık içine sokulduğundan, bütün simetrik sistemlerde yatay eleman serbest gerilmeli olur. Asimetrik yüklemde, hareketli yüke sahip kısmın yüksüz yarı kısımdan büyük olması sebebiyle, artan yatay yük etkisinde δ_x yerdeğiştirmesi yatay eleman ile azaltılır.

Şekil 2.11'in yardımıyla hareketli yüklü durumdaki kablo eğrisi şöyle yazılabilir:

$$y = \begin{cases} \frac{2(w+p)f_2}{(2w+p)a^2 + 2\Delta Hf_2} x^2 - \frac{(4w+3p)a^2 + 2\Delta Hf_2}{(2w+p)a^2 + 2\Delta Hf_2} \left(\frac{f_2}{a} \right) x & 0 \leq x \leq a \\ \frac{2wf_2}{(2w+p)a^2 + 2\Delta Hf_2} x^2 - \frac{(4w-p)a^2 + 2\Delta Hf_2}{(2w+p)a^2 - 2\Delta Hf_2} \left(\frac{f_2}{a} \right) x - \frac{2pa^2 - 4\Delta Hf_2}{(2w+p)a^2 - \Delta Hf_2} f_2 & a \leq x \leq 2a \end{cases} \quad (2.35)$$



Şekil 2.10 Sabit yük ve asimetrik hareketli yük durumunda, merkezi kelepçeli yatay bir kablo.



Şekil 2.11 Merkezi kelepçeli bir kabloda yatay kuvvetin etkisi.

Denklem (2.30) ile mukayese yaparsak, y ve f_2 arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır. Çünkü f_2 'nin hem payda, hem de paydada yer aldığı görülür.

Konum denklemi olan $s_{21} + s_{22} - s_w = \Delta s_{21} + \Delta s_{22} - \Delta s_w$ yedinci derece bir denklem formudur:

$$C_7 \left(\frac{f_2}{a} \right)^7 + C_6 \left(\frac{f_2}{a} \right)^6 + C_5 \left(\frac{f_2}{a} \right)^5 + C_4 \left(\frac{f_2}{a} \right)^4 + C_3 \left(\frac{f_2}{a} \right)^3 + C_2 \left(\frac{f_2}{a} \right)^2 + C_1 \left(\frac{f_2}{a} \right) + C_0 = 0 \quad (2.36)$$

burada bilinmeyenler şöyledir:

$$C_7 = 192\Delta H^4$$

$$C_6 = -96 \frac{2w+p}{EA} a \Delta H^4$$

$$C_5 = 64 \left[\frac{wa}{EA} \left(3 \frac{a}{f_w} + 4 \frac{f_w}{a} \right) - 4 \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 \right] \Delta H^4 - 32 \frac{p(2w+p)}{EA} a^2 \Delta H^3 - 64(5w^2 + 12pw + p^2) a^2 \Delta H^2$$

$$C_4 = -96 \frac{2w+p}{EA} a \Delta H^4 + 32(2w+p) \frac{7w^2 + 7pw + 2p^2}{EA} a^3 \Delta H^2 - (2w+p) p a^3 \Delta H$$

$$C_3 = -32(2w+p)^2 \left[\frac{wa}{EA} \left(3 \frac{a}{f_w} + 4 \frac{f_w}{a} \right) - 4 \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 \right] a^2 \Delta H^2 + 8 \frac{p(2w+p)^3}{EA} a^4 \Delta H$$

$$+ 4(2w+p)^2 (16w^2 + 16pw + 5p^2) a^4$$

$$C_2 = 48 \frac{(2w+p)^3}{EA} a^3 \Delta H^2 - 2 \frac{(2w+p)^3}{EA} (16w^2 + 16pw + 5p^2) a^5$$

$$C_1 = 4(2w+p)^4 \left[\frac{wa}{EA} \left(3 \frac{a}{f_w} + 4 \frac{f_w}{a} \right) - 4 \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 \right] a^4$$

$$C_0 = -6 \frac{(2w+p)^5}{EA} a^5$$

Denklem (2.36)'yı çözmek için, $[(f_w/a) + (\delta_y/a)]$ toplamı (f_2/a) 'da yerine konulur ve çözüm $(\delta_y/a \ll f_w/a)$ şartına bağlı olarak yazılabilir:

$$\frac{\delta_y}{a} = - \frac{P(f_w/a)}{P'(f_w/a)} \quad (2.37)$$

Buradaki P , (2.33) denkleminin yedinci derece polinomudur. Böylece δ_y/a değeri aşağıdaki gibi olur:

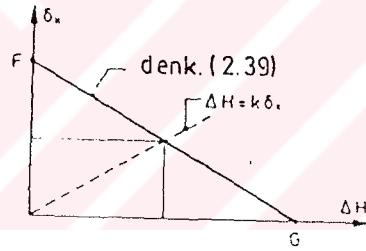
$$\frac{\delta_y}{a} = - \frac{C_7 \left(\frac{f_w}{a} \right)^7 + C_6 \left(\frac{f_w}{a} \right)^6 + C_5 \left(\frac{f_w}{a} \right)^5 + C_4 \left(\frac{f_w}{a} \right)^4 + C_3 \left(\frac{f_w}{a} \right)^3 + C_2 \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 + C_1 \left(\frac{f_w}{a} \right) + C_0}{7C_7 \left(\frac{f_w}{a} \right)^6 + 6C_6 \left(\frac{f_w}{a} \right)^5 + 5C_5 \left(\frac{f_w}{a} \right)^4 + 4C_4 \left(\frac{f_w}{a} \right)^3 + 3C_3 \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 + 2C_2 \left(\frac{f_w}{a} \right) + C_1} \quad (2.38)$$

Denklem (2.38) ile δ_y 'nin hesabından sonra, orta açıklıktaki sehim $f_2 - f_w + \delta_y$ bulunur ve kablo eğrisi (2.35) denklemi tarafından tamamen tanımlanır. s_{2l} , Δs_{2l} , s_w ve Δs_w için uygun ifadelerle beraber merkezi kelepçenin (C noktası) yatay yerdeğiştirmesi δ_x , sonradan (2.33) denklemi ile hesap edilir.

Bu tanımlamayla δ_x için şu ifade yazılabilir:

$$\begin{aligned}
\delta_x = \frac{2}{3}a & \left[\frac{7\left(\frac{p}{w}\right)^2 + 20\frac{p}{w} + 16 + 12\left(\frac{p}{w} + 2\right)\frac{\Delta H}{wa^2}f_2 + 12\left(\frac{\Delta H}{wa^2}\right)^2 f_2^2}{4\left(\frac{p}{w} + 2 + 2\frac{\Delta H}{wa^2}f_2\right)^2} \left(\frac{f_2}{a}\right)^2 \right. \\
& - \frac{wa}{EA} \frac{7\left(\frac{p}{w}\right)^2 + 20\frac{p}{w} + 16 + 12\left(\frac{p}{w} + 2\right)\frac{\Delta H}{wa^2}f_2 + 12\left(\frac{\Delta H}{wa^2}\right)^2 f_2^2}{8\left(\frac{p}{w} + 2 + 2\frac{\Delta H}{wa^2}f_2\right)} \frac{f_2}{a} \\
& \left. + \frac{wa}{EA} \left(\frac{3a}{4f_w} + \frac{f_w}{a} \right) - \left(\frac{f_w}{a} \right)^2 - \frac{3wa}{8EA} \left(\frac{p}{w} + 2 + 2\frac{\Delta H}{wa^2}f_2 \right) \frac{a}{f_2} \right] \quad (2.39)
\end{aligned}$$

ΔH 'ye karşı δ_x çizilirse bir eğri ile kesişirler ki, ΔH ekseninde G noktası ve δ_x ekseninde F noktası belirlenir; bu da Şekil 2.12'de gösterilmiştir. F noktası, yatay sınırlamanın olmadığı ($\Delta H=0$) serbest kablo durumuna karşı gelir. Aynı şekilde G ise merkezi kelepçenin orta açıklıkta sabitlendiği ($\delta_x=0$) hali gösterir. F - G eğrisi ise, genellikle bir düz çizgiye yakındır ve bir çok uygulama da eğri yerine düz çizgi kabul edilir.



Şekil 2.12 Merkezi kelepçenin δ_x yatay yerdeğiştirmesi ile yatay kuvvet ΔH ilişkisi.

Yapılardaki merkezi kelepçe yatay bir esnekliğe daima sahiptir, ki bu rijitlik kirişinin aksenal rijitliğine karşı gelir.

Yay katsayısı k , yatay kuvvet ΔH ve yerdeğiştirme δ_x arasındaki ilişki şöyledir:

$$\Delta H = k\delta_x \quad (2.40)$$

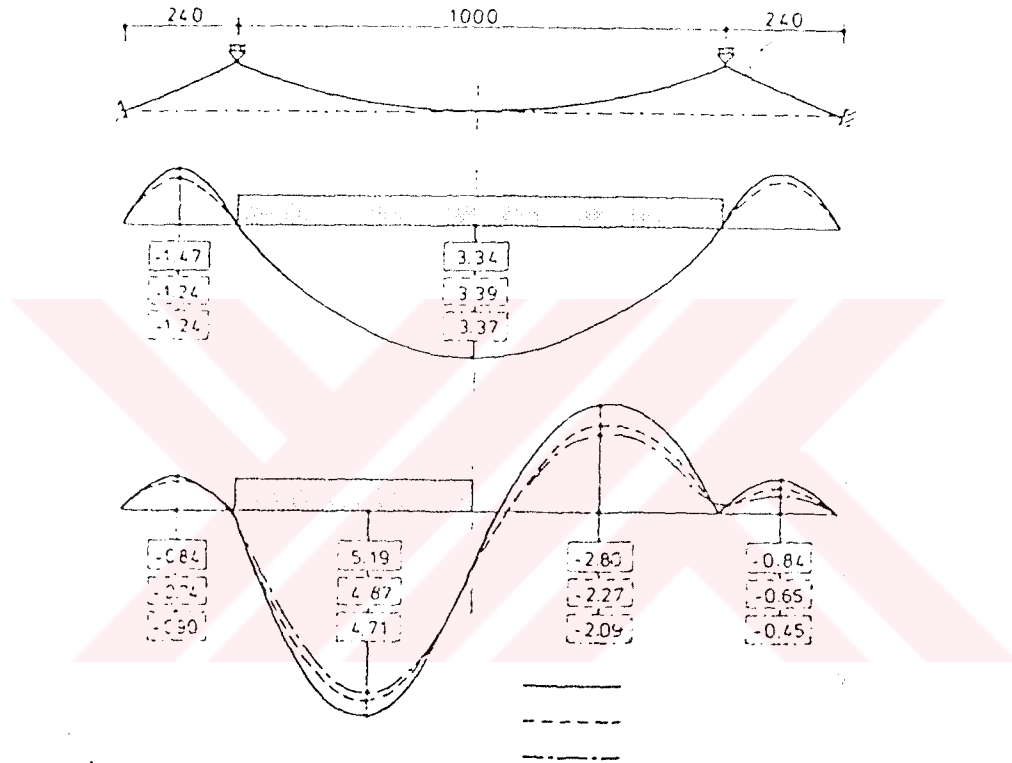
Yay katsayısı k bilinirse, denklem (2.40); (0,0) orijinden düz çizgi ile çizilebilir (Şekil 2.12'de kesikli çizgi ile gösterilmiştir). Bu doğru ile F - G eğrisi arasındaki ilişki, ΔH ve δ_x değerlerinin gerçek konumlarını gösterir.

2.1.4. Asma köprüdeki ana açıklık kablosunun sayısal uygulaması

Bu çıkarılan formüller, düşey yük altında yatay bir kablonun şekil değiştirme özelliklerinin bazı uygulamalarında kullanılmalıdır. Kablo hareketlerinin esnek bir yay gibi varsayımı

temel alınmalıdır. Fakat bunlar, bütün şekil değiştirmelerde yalnız bir dereceye kadar narin olan rijitlik kirişini etkilemekle beraber, modern asma köprülerin davranışında iyi bir görünüm arz etmektedir.

Bu özellik, Şekil 2.13'de gösterilmiştir: (1) tek kablo; (2) üç açıklıklı basit mesnetli, rijitlik kirişi ile beraber oluşturulmuş bir asma köprü ve (3) rijitlik kirişi sürekli bir asma köprü. Bunların hepsi aynı kablo boyutlarına sahiptir. Sabit yük ve hareketli yük olmak üzere aynı şiddete maruzdurlar.



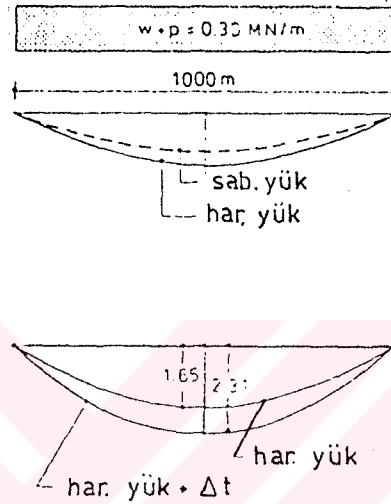
Şekil 2.13 Tek kablo, basit mesnetli rijitlik kirişine sahip bir asma köprü ve sürekli rijitlik kirişine sahip bir asma köprünün sehimleri arasındaki ilişki.

Asma köprülü sistemler için rijitlik kirişinin atalet momenti olarak 3 m.'lik kiriş kesitinin atalet momenti seçilir. Hareketli yükün ana açıklıkta tam olarak etkimesi durumunda, üç sistemin çökmeleri arasındaki fark-ana açıklıkta- önemsizdir. Oysa yan açıklığın yukarı kalkması asma köprülerde, tek kablodan daha küçüktür. Bundan dolayı kısa açıklıklarda, kirişin eğilme momenti rijitliği etkisinin çok büyük olduğu söylenebilir.

Asimetrik hareketli yük için üç sistemdeki çökmelerde büyük farklılıklar vardır. Tek kablodaki çökme çok yüksek olmakla beraber, rijitlik kirişi sürekli asma köprüde ise çok

küçük olmaktadır. Bununla birlikte, üç yapı sisteminin arasındaki önemli farklara rağmen çökme eğrilerinin genel şekilleri şaşırtıcı şekilde benzerlik gösterir.

Tüm açıklıkta üniform hareketli yüke maruz bırakılan tek kablo için orta açıklıktaki δ_y sehim, denklem (2.26)'dan bulunur. Zira sehim eğrisi görünümü Şekil 2.14'te iki tane ikinci derece parabol arasında gösterilmiştir. Maksimum açı değişimi uçlarda görülmektedir. Maksimum normal kuvvetin bulunduğu noktada en büyük kablo eğilmesi oluşur ki, bu da asma köprülerdeki en elverişsiz durumdur.

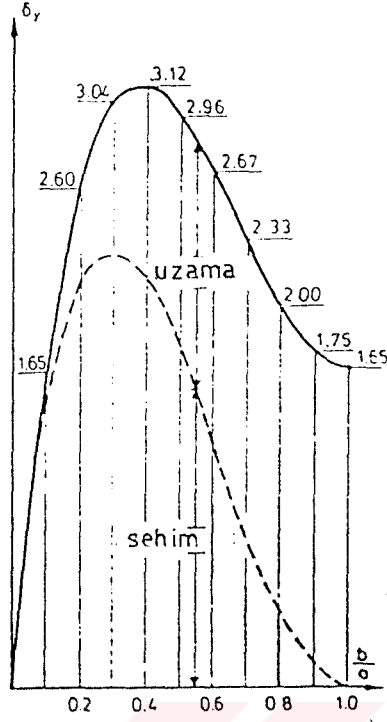


Şekil 2.14 Üniform yüklü kablonun sehim ve kablo eğrisiyle ilgili parametreler: $w=220$ kN/m, $p=80$ kN/m, $\Delta t=30$ °C, $a=500$ m, $f_w=100$ m, $E=205 \times 10^3$ MN/m², $\beta=12 \times 10^{-6}$, $\sigma=720$ MN/m², $A=0.56$ m².

Kule tepelerindeki δ_h yatay yerdeğiştirmesinin 3.70 katı δ_y düşey çökmesine eşittir. Sonuç olarak, sabit mesnetli kablonun tüm ana açıklıklarının hareketli yük altında olması durumunda, aynı büyüklükte orta açıklıktaki sehim, yatay yerdeğiştirmenin 0.45 m.'sine karşı gelir.

Üniform olmayan simetrik hareketli yük için orta açıklık çökmesi (2.29) denklemi ile bulunur.

Normal durum, Şekil 2.15'deki orta açıklık sehim δ_y ve bağlı yükleme uzunluğu b/a arasındaki ilişki ile gösterilmiştir. Ana açıklığın üzerinde yalnız merkezi %40'lık kısımda yayılı olan hareketli yük için maksimum sehim olur ve bu yükleme için sehim, bütün açıklığın üzerinde hareketli yük olması durumunun yaklaşık iki katıdır. Ayrıca üniform olmayan bu yük durumunda, açıklığın onda birlik kısmında ($b/a=0.10$) oluşan sehim, üniform yük durumundaki sehim eşittir.



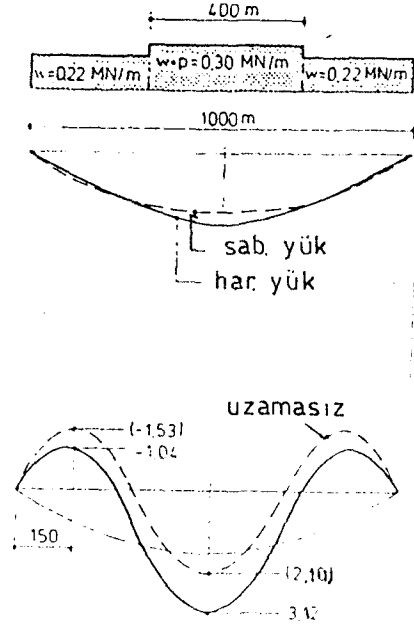
Şekil 2.15 Simetrik durumda üniform olmayan hareketli yük uzunluğu $2b$ olan orta açıklık sehimini δ_y 'nin değişimi; parametreler: $w=220$ kN/m, $p=80$ kN/m, $a=500$ m, $f_w=100$ m, $E=205 \times 10^3$ MN/m², $\sigma=720$ MN/m², $A=0.56$ m².

Uzamasız kablonun orta açıklıktaki δ_y sehim, noktalı doğruyla gösterilmiştir. Bu durumun değerleri, $(I/EA - 0)$ alınarak denklem (2.29)'dan bulunabilir.

Hareketli yük için verilen maksimum düşey sehimin ($b/a=0.40$) %33'ünü kablonun boyuna uzaması, geriye kalan %67'lik kısmını ise kablo distorsiyonu oluşturur. Tüm açıklık boyunca ($b/a=1.0$) yayılı üniform hareketli yük için sehim, bütünüyle boyuna uzamadan oluşur; uzamasız kablonun şekil değişimi olmaz.

Ana açıklığın merkezi %40'lık kısmında hareketli yüke maruz kalan kablonun yerdeğiştirmesi Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Kablo hareketi yüksüz bölgede yukarı doğru, yüklü bölgede ise aşağıya doğrudur.

Düşey sehim ise; gerçek kablo için kalın çizgiyle, uzamasız kablo içinde kesikli çizgiyle idealize edilmiştir. Bundan başka, tüm açıklık boyunca hareketli yüke maruz kablonun sehim de kesik çizgilerle gösterilmiştir. Kısmi ve toplam hareketli yükten oluşan sehimler karşılaştırıldığında, sabit yükten oluşan sehimler ile hareketli yükten oluşan füniküler eğri arasındaki farktan çok daha şiddetli olmaktadır.

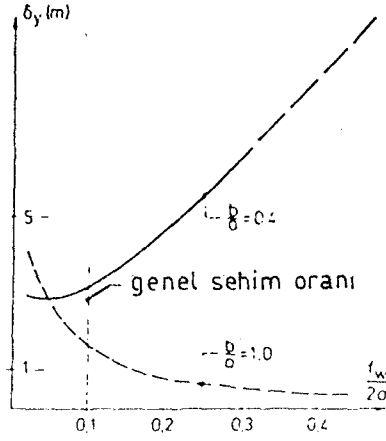


Şekil 2.16 Uzunluğu 400 m. olan ve üniform olmayan hareketli yüklü kablonun, sehim ve kablo eğrileri. Bütün parametreler şekil 2.15'deki ile aynıdır.

Şekil 2.17'de esnek kablo sehiminin etkileri ifade edilmiştir. Bu grafikte sehim oranına karşı ($f_w/2a$), orta açıklık çökmesi (δ_j) çizilmiştir. Kablo sehim oranının çok büyük olduğu durumda ($f_w/2a=0.50$), üniform hareketli yük için ($b/a=1.0$) minimum sehim oluşur. Üniform olmayan hareketli yük durumunda ise ($b/a=0.40$), açıklık boyunca sehim $1/20$ ($f_w/2a=0.05$) olduğunda, minimum sehim oluşur. Sehim oranı $f_w/2a$, yaklaşık olarak 0.10 alındığında üniform olmayan yük altında kablo sehimlerinde önemli artmalar oluşmasına karşın, genellikle bütün asma köprülerde büyük sehim oranı miktarları baz alınır.

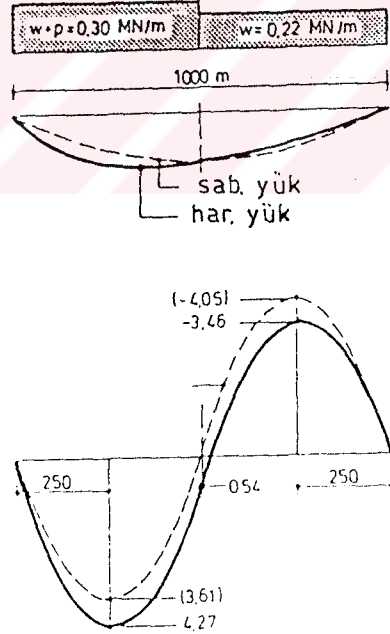
Asimetrik yük için orta açıklık sehim f_2 denklem (2.32), kablo eğrisi ise denklem (2.30) yardımıyla hesaplanır. Kablo sehimleri de, Şekil 2.18'de asimetrik hareketli yük altında gösterilmiştir. Şekil 2.16 ile karşılaştırıldığı zaman, asimetrik yüklü maksimum sehimin simetrik yüklü sehimden daha büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, asimetrik durumdaki sehimler kablonun distorsiyonu yüzünden oluşur. Bu ise toplam sehimin %80'ini oluşturur.

Şekil 2.18'de açıklığın dörtte birinde oluşan uç deplasmanları gösterilmiştir; aşağı doğru maksimum sehim, yüklü kısmın ortasında, yukarı doğru maksimum sehim de yüksüz kısmın ortasında gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Simetrik yüklü yatay kablunun, üniform hareketli yük ($b/a=1.0$) ve üniform olmayan hareketli yük durumunda ($b/a=0.40$) orta açıklık sehim (δ_y) ile sehim oranı ($f_w/2a$) arasındaki ilişki; diğer parametreler Şekil 2.15'le aynı olup, kablo alanının değişimi sehim oranına bağlı olarak şöyledir:

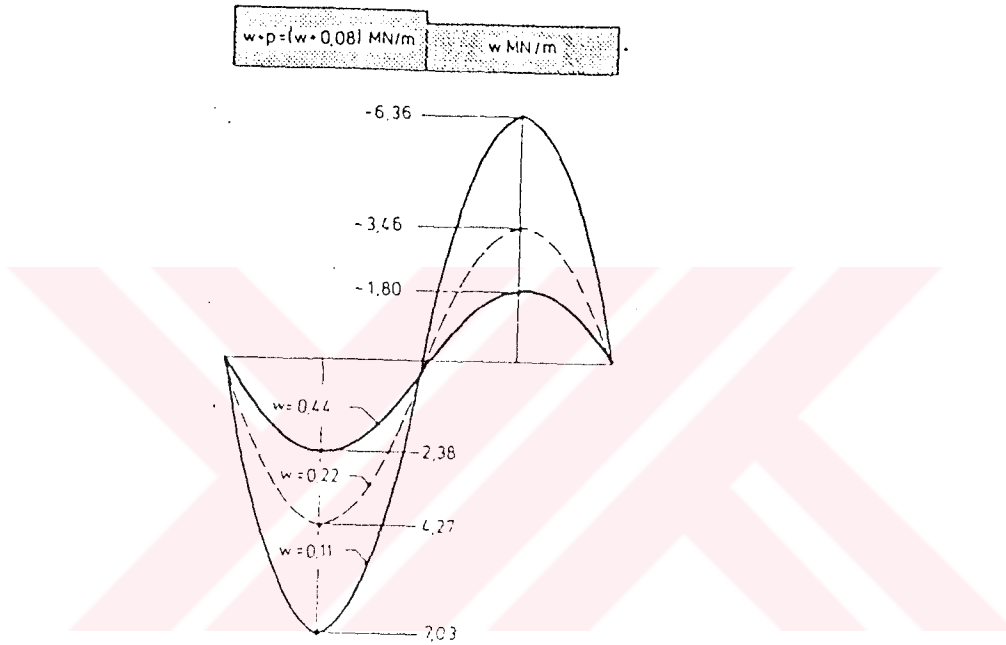
$$A = \frac{(w+p)a}{\sigma} \sqrt{\left(\frac{a}{2f_w}\right)^2}$$



Şekil 2.18 Asimetrik yüklü yatay kablunun sehim ve kablo eğrileri, parametreler Şekil 2.15'de verilmiştir.

Kablonun distorsiyonuna funiküler eğrisinin değişimleri sebep olur. Sehimler ise hareketli yük şiddeti p ile sabit yük şiddeti w arasındaki ilişkiye bağlıdır. Ayrıca p/w oranını azaltmak funiküler eğrinin şekil değişimini de azaltmaktadır.

Bu düşünceyle Şekil 2.18'deki sehim eğrisi, çift sabit yük ($w=0.44$ MN/m) ve yarım sabit yük ($w=0.11$ MN/m) sehim eğrileriyle beraber Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Bu sabit yükün stabil etkilere sahip olduğu söylenebilir. Ağır kafes kirişler ve beton tabliyelere sahip eski asma köprüler, bugünün hafif çelik kirişler ve orthotropic köprü tabliyelere sahip köprülere göre trafik yükünden daha az etkilenirler.



Şekil 2.19 Asimetrik yüklü kablonun çeşitli sabit yük değişimlerine göre sehim eğrileri; kablo alanının değişimi şekil 2.17'de, parametreler ise şekil 2.15'de verilmiştir.

Asimetrik durumda orta açıklıktaki kablonun yatay yerdeğiştirmesi δ_x , düşey sehim gibi aynı eğilimdedir. Çeşitli sabit yük şiddetlerine göre denklem (2.34)'ü baz alırsak δ_x değerleri şöyle bulunur:

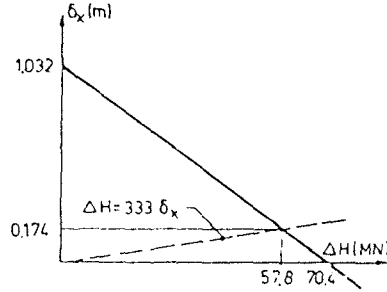
$$w = 0.11 \text{ MN/m} \quad \delta_x = 1.79 \text{ m.}$$

$$w = 0.22 \text{ MN/m} \quad \delta_x = 1.03 \text{ m.}$$

$$w = 0.44 \text{ MN/m} \quad \delta_x = 0.56 \text{ m.}$$

Asimetrik yük altında merkezi kelepçe ile mesnetlenme etkileri Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Şekil 2.12 ise normal durum altındaki incelemeler içindir. Yatay yerdeğiştirme 1.032 m. değerinden itibaren azalmaktadır. Bu değere karşı gelen durum

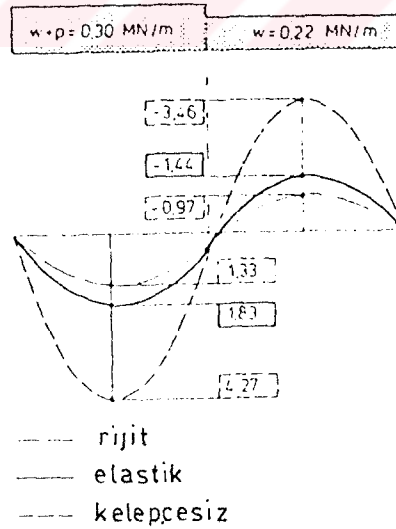
merkezi kelepçeli yatay kuvvetsiz kablodur. 70.40 MN yatay kuvvete karşıda yatay yerdeğiştirme sıfırdır. Bunlar tamamen rijit merkezi kelepçeli sistemlerde oluşmaktadır.



Şekil 2.20 Merkezi kelepçeli bir kablonun yatay yerdeğiştirme δ_x ve yatay kuvvet ΔH arasındaki ilişki; parametreler: $w=220$ kN/m, $p=80$ kN/m, $a=500$ m, $f_w=100$ m, $E=205 \times 10^3$ MN/m², $A=0.56$ m².

Şekil 2.20'deki kesikli çizgi, yay katsayısı $k = 333$ MN/m olan merkezi kelepçenin yatay mesnet koşulları, gerçekçi durumu karakterize eder. Yatay kuvvet $\Delta H = 57.80$ MN olduğunda yatay yerdeğiştirme 0.174 m. olmaktadır.

Asimetrik yüke maruz kablonun yataydaki merkezi kelepçe ile mesnetlenme etkileri Şekil 2.21'de gösterilmiştir. Çizilmiş bu üç eğri serbest kablo ($\Delta H=0$), tam mesnetlenmiş kablo ($\delta_x=0$) ve elastik mesnetli kablo ($\Delta H=333\delta_x$) şeklindedir.

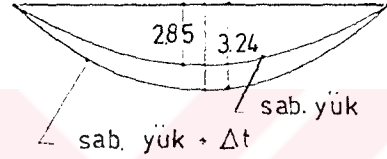
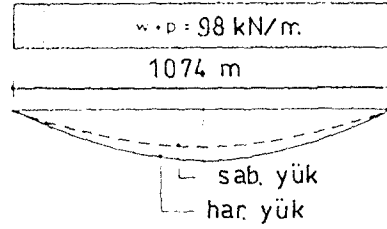


Şekil 2.21 Merkezi kelepçeli, asimetrik yüklü yatay kablonun sehim eğrileri.

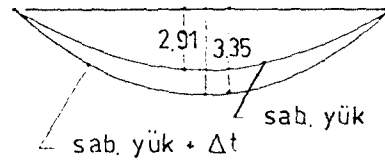
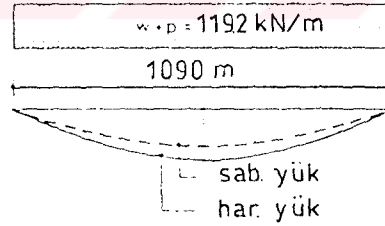
Asimetrik yük altındaki bu eğrilerde, merkezi kelepçenin yatay mesnetlenme koşulları, kablonun önemli şekil değıştirme etkilerini karakterize etmektedir.

2.1.5. Boğaziçi ve Fatih Sultan Mehmet Köprüleri ana açıklık kablolarına ait sayısal uygulamalar

Üniform yüke maruz yatay kablonun sehim değerleri denklem (2.26)'da verilmiştir. Bu denklem yardımıyla Boğaziçi ve F. S. M. Köprülerindeki bir ana kabloya gelen yüklere göre sehim değerleri bulunmuş ve Şekil 2.22 ile 2.23'de gösterilmiştir.

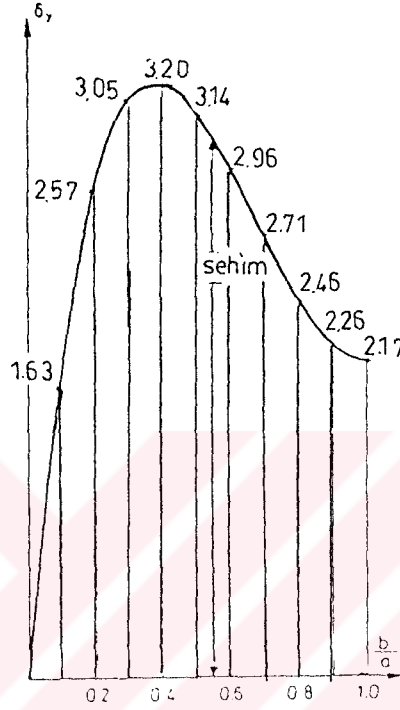


Şekil 2.22 Üniform yüklü durumdaki Boğaziçi Köprüsü ana kablusunun kablo ve sehim eğrileri: $w = 71.5 \text{ kN/m}$, $p = 26.5 \text{ kN/m}$, $a = 537 \text{ m}$, $f_w = 93 \text{ m}$, $E = 205 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$, $A = 0.205 \text{ m}^2$, $\Delta t = 15^\circ\text{C}$, $\beta = 12 \times 10^{-6}$, $\sigma = 1180 \text{ MN/m}^2$, $\Delta h = 0.15 \text{ m}$.



Şekil 2.23 Üniform yüklü durumdaki F. S. M. Köprüsü ana kablusunun kablo ve sehim eğrileri: $w = 79.2 \text{ kN/m}$, $p = 40 \text{ kN/m}$, $a = 545 \text{ m}$, $f_w = 90.8 \text{ m}$, $E = 205 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$, $A = 0.367 \text{ m}^2$, $\Delta t = 15^\circ\text{C}$, $\beta = 12 \times 10^{-6}$, $\sigma = 1180 \text{ MN/m}^2$, $\Delta h = 0.18 \text{ m}$.

Hareketli yük uzunluğu olan b değeri, rijitlik kirişi üzerinde simetrik; fakat üniform olmayan şekilde yayılı olarak bulunursa, bağıl yükleme uzunluğu (b/a) ile orta açıklık kablo sehim (δ_y) arasındaki ilişki Şekil 2.24 ve 2.25’de gösterilmiştir. Buradaki değerler denklem (2.29) yardımıyla bulunmuştur.

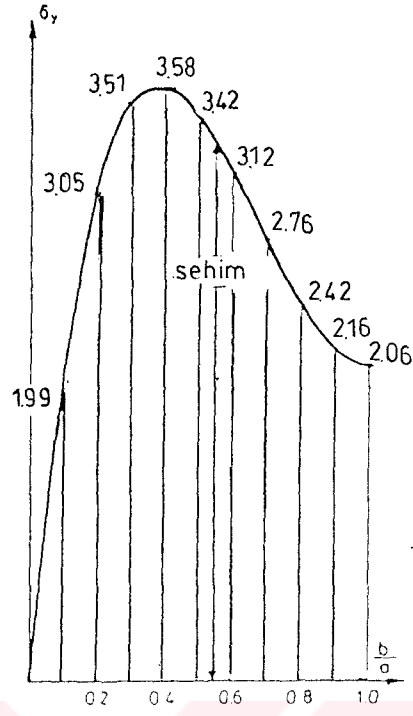


Şekil 2.24 Boğaziçi Köprüsü’ndeki simetrik; fakat üniform olmayan hareketli yük uzunluğu ile kablo sehim arasındaki ilişki. Parametreler Şekil 2.22 ile aynıdır.

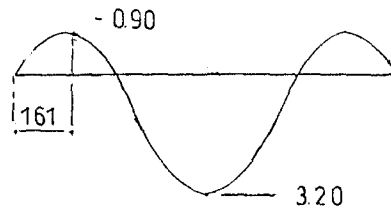
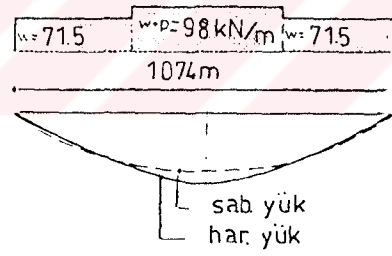
Her iki şekilden görüldüğü üzere en büyük sehimler, merkezi %40’lık kısımda yayılı olarak bulunan hareketli yükte meydana gelmiştir. Bu yükleme durumundaki kablo ve sehim eğrileri - denklem (2.27) ile - Şekil 2.26 ve 2.27’de gösterilmiştir.

Açıklığın yarısında asimetric olarak yayılı şekilde bulunan hareketli yük için sehim ve kablo eğrileri bulunmuştur. Yükleme asimetric olduğu için orta açıklık sehim denklem (2.32)’den, diğer noktadaki sehimler ise denklem (2.30)’dan bulunarak Şekil 2.28 ve 2.29’da gösterilmiştir.

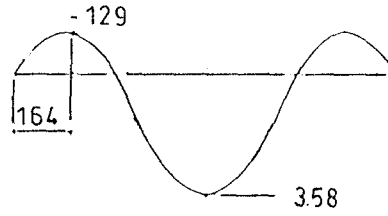
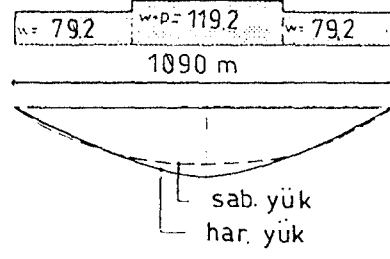
Sabit yük değiştirilerek sehimlere etkisi de incelenmiştir. Şekil 2.30 ve 2.31, değişen sabit yüke göre, sırasıyla Boğaziçi ve F. S. M. Köprülerindeki bir ana kablonun yapacağı sehimleri göstermektedir.



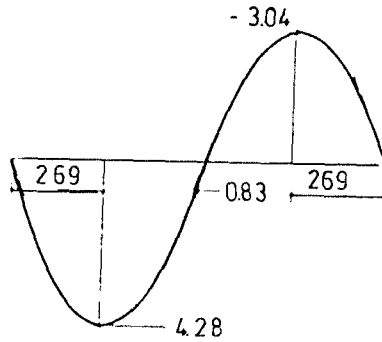
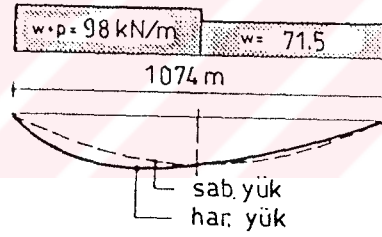
Şekil 2.25 Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'ndeki simetrik; fakat üniform olmayan hareketli yük uzunluğu ile kablo sehim arasındaki ilişki. Parametreler Şekil 2.23 ile aynıdır.



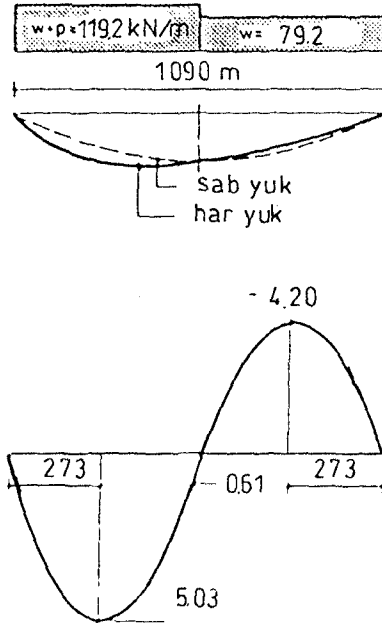
Şekil 2.26 Bağlı yükleme uzunluğu 0.40 ve üniform olmayan hareketli yük için sehim ve kablo eğrileri (Boğaziçi Köprüsü'nde).



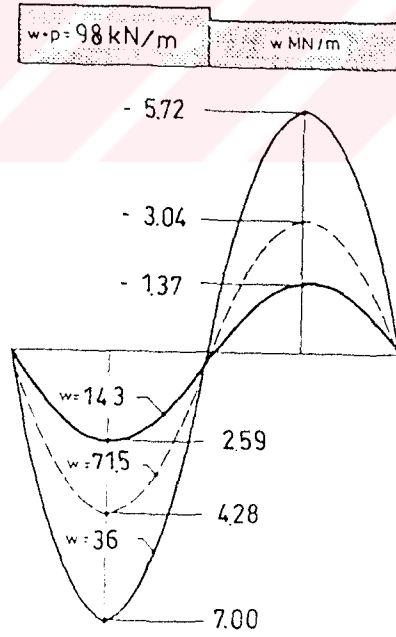
Şekil 2.27 Bağıl yükleme uzunluğu 0.40 ve üniform olmayan hareketli yük için sehim ve kablo eğrileri (F. S. M. Köprüsü'nde).



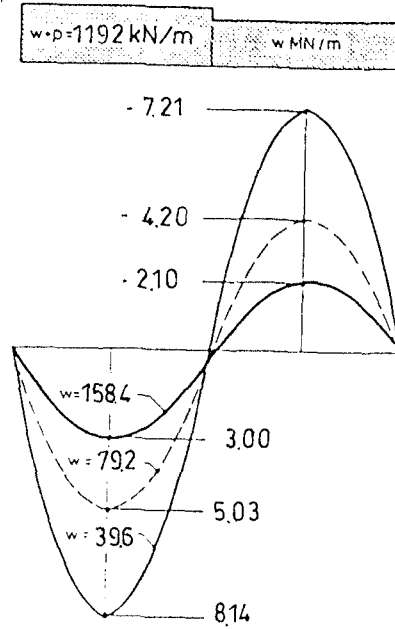
Şekil 2.28 Asimetrik durumda Boğaziçi Köprüsü'ndeki sehim ve kablo eğrileri. Parametreler Şekil 2.22 ile aynıdır.



Şekil 2.29 Asimetrik durumda F. S. M. Köprüsü'ndeki sehım ve kablo eğrileri. Parametreler Şekil 2.23 ile aynıdır.



Şekil 2.30 Asimetrik yüklü kablunun, sabit yük değişimlerine göre sehım eğrileri.



Şekil 2.31 Asimetrik yüklü kablonun, sabit yük değişimlerine göre sehim eğrileri.

Asimetrik durumda orta açıklıktaki kablonun yatay yerdeğiştirmesi denklem (2.34) yardımıyla bulunur. Aşağıda, yüklerin değişimine göre her iki köprüye ait kablolardaki yerdeğiştirmeler verilmiştir:

Boğaziçi Köprüsü

$$w = 35.75 \text{ kN/m} \quad \delta_x = 1.60 \text{ m.}$$

$$w = 71.50 \text{ kN/m} \quad \delta_x = 0.85 \text{ m.}$$

$$w = 143 \text{ kN/m} \quad \delta_x = 0.42 \text{ m.}$$

Fatih Sultan Mehmet Köprüsü

$$w = 39.60 \text{ kN/m} \quad \delta_x = 1.89 \text{ m.}$$

$$w = 79.20 \text{ kN/m} \quad \delta_x = 1.03 \text{ m.}$$

$$w = 158.40 \text{ kN/m} \quad \delta_x = 0.50 \text{ m.}$$

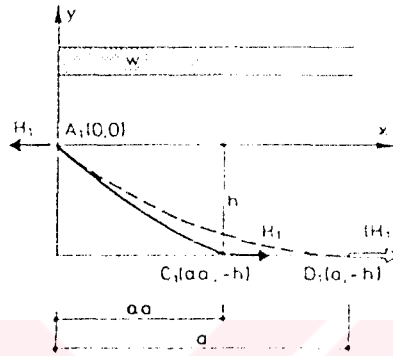
2.1.6. Mesnet noktalarının yatay yerdeğiştirmesine göre eğik kablo

Mesnet noktalarının yatay yerdeğiştirmesi, kablonun yatay yerdeğiştirmesinde önemli etkilere sahiptir.

Kablolu köprülerin kule tepelerindeki yatay yerdeğiştirme, ankraj kablusunun şekil değiştirmesinde birincil sebeptir, fakat kulenin eğilme rijitliğine etkisi önemsizdir.

Yatay mesnetlenme koşulu, yan açıklık kablosunun, yan açıklık ve ana açıklık arasındaki uzunluğun yüksek oranına bağlı olarak önerilmiştir.

Bu varsayım altında eğik kablo Şekil 2.32’de gösterilmiştir. Mesnet noktaları $A_1(0,0)$ ve $C_1(\alpha a, -h)$, yatay kuvvet H_1 ve yük ise sabit yük w ile gösterilmiştir. Mesnet noktaları arasındaki yatay uzaklık αa , aynı yayılı yük (w) son durumdaki yatay uzaklık a ve mesnet noktası altında yatay teğeti $D_1(a, -h)$ ’dir. A_1D_1 kablosu, yatay ana açıklığın yarısında aynı sabit yük ve f sehimi olarak h yüksekliği ile tarif edilmiştir.



Şekil 2.32 Yatay izdüşümü αa ve düşey izdüşümü h olan eğik kablo.

H_1 , w , h ve a arasında şu ilişki yazılabilir:

$$H_1 = \frac{w a^2}{2h} \quad (2.41)$$

A noktası yatay rijitliği hesabında, iki durum esas alınmıştır ve Şekil 2.33’de gösterilmiştir.

f_1 ve f_2 düşey sehimleriyle beraber kablo eğrisini veren denklemler aşağıdadır:

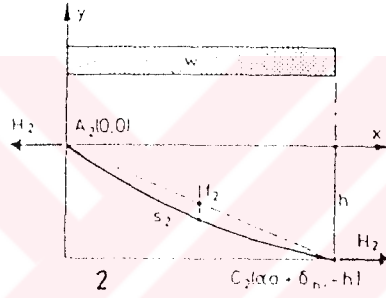
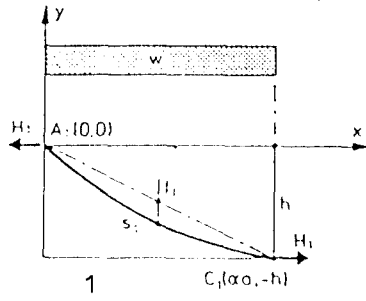
$$y = 4f_1 \left(\frac{x}{\alpha a} \right)^2 - (4f_1 + h) \frac{x}{\alpha a} \quad \text{durum 1} \quad (2.42)$$

$$y = 4f_2 \left(\frac{x}{\alpha a + \delta_h} \right)^2 - (4f_2 + h) \frac{x}{\alpha a + \delta_h} \quad \text{durum 2} \quad (2.43)$$

Şekil 2.33’ü referans alarak $A-C'$ kablosunun konum denklemi, $s_2 - s_1 = \Delta s_2 - \Delta s_1$ olarak yazılabilir. s_1 ve s_2 (2.14) denkleminde, Δs_1 ve Δs_2 ’de (2.6) denkleminde hesaplanırsa δ_h yatay yerdeğiştirmesi denklem (2.44)’deki gibi olur.

Bu ifade α ’nın küçük değerleri için kullanılamaz. ($\alpha > 1.25 h/a$) ile tanımlanan α ’nın uygun değeridir.

$$\delta_h = \frac{\left(\frac{1}{H_1} - \frac{1}{H_2} \right) \left[\frac{w^2 (\alpha \alpha)^3}{24} \left(\frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} - \frac{2}{EA} \right) + \frac{H_1 H_2}{EA} \left(\alpha \alpha + \frac{h^2}{\alpha \alpha} \right) \right]}{\frac{1}{2} + \left[1 + \frac{w^2 (\alpha \alpha)^2}{2 H_2^2} \left(\frac{h}{\alpha \alpha} \right)^2 \right] \left(\frac{1}{2} - \frac{H_2}{EA} \right)} \quad (2.44)$$



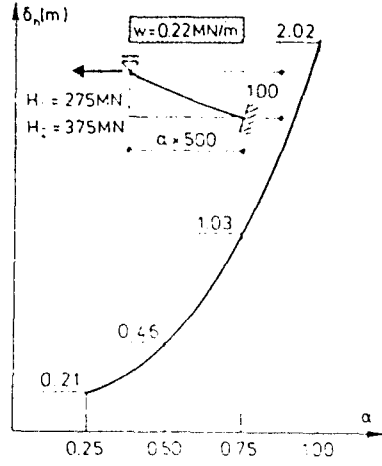
Şekil 2.33 Yalnız sabit yüke maruz bir eğik kablonun iki durumu, fakat yatay kuvvetin değişimiyle beraber.

2.1.7. Asma köprüdeki yan açıklık kablosunun sayısal uygulaması

Şekil 2.34'de kule tepesinin δ_h yatay yerdeğiştirmesiyle, yan açıklık ve yarı ana açıklık uzunlukları arasındaki α oranı ilişkisi gösterilmiştir.

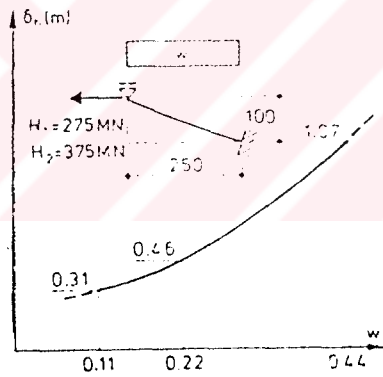
Yan açıklık uzunluğu, kule tepesinin δ_h yatay yerdeğiştirmesinde önemli etkilere sahiptir. Yan açıklık uzunluğu 500 m.'den ($\alpha=1$) 250 m.'ye ($\alpha=1/2$) inerse, δ_h 'de 2.02 m.'den 0.46 m.'ye iner. Yan açıklık üzerindeki bu güvenilir açıklamalar ışığında, kablo uzunluğuyla birlikte elastik şekil değiştirme ve sehim değişimlerinin arttığı söylenebilir.

Şekil 2.35 ise yatay yerdeğiştirmeye karşı sabit yük durumunu göstermektedir. Konsol kiriş 250 m. olduğunda, sabit yük 0.22 MN/m'den 0.44 MN/m'ye çıkarsa δ_h yerdeğiştirmesi iki katından daha fazla artmaktadır. Sabit yükün artması sonucu sehim etkilerinin çok daha fazla olacağı söylenebilir.



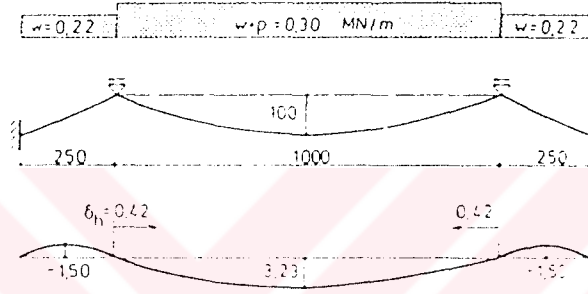
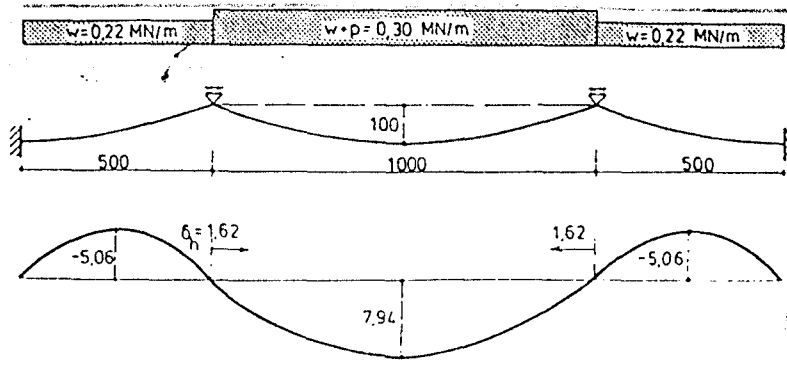
Şekil 2.34 Kule tepesinin yatay yerdeğiştirmesi δ_h ve relatif yatay izdüşüm α arasındaki ilişki. Eğri şu parametrelere göre esas alınmıştır: $w=220$ kN/m, $\alpha=500$ m, $h=100$ m, $E=205 \times 10^3$ MN/m², $\sigma=720$ MN/m², $H_1=275$ MN ve $H_2=375$ MN; kablo alanı A ise şöyle hesaplanır:

$$A = \frac{H_2}{\sigma} \sqrt{1 + \left(\frac{h}{\sigma \alpha} + \frac{w \sigma \alpha}{2 H_2} \right)^2}$$



Şekil 2.35 Kule tepesinin yatay yerdeğiştirmesi δ_h ve sabit yük şiddeti w arasındaki ilişki, parametreler şekil 2.34’te verilmiştir.

Yatay kablonun (ana açıklık kablosu) mesnet noktalarındaki yatay yerdeğiştirmesi, düşey çökmelerde önemli etkilere sahiptir. Üç açıklıklı yapıda ana açıklık çökmeleri, çok güçlü bir şekilde ana açıklık ve yan açıklığın oranlarına bağlıdır. Şekil 2.36’da görüldüğü üzere, sistemde yan açıklık uzunluğu 250 m.’den 500 m.’ye çıktığında ana açıklıktaki maksimum çökme iki katından fazla olmaktadır.



Şekil 2.36 Üç açıklıklı kablonun değişen yan açıklıklarıyla beraber oluşan çökme eğrileri.

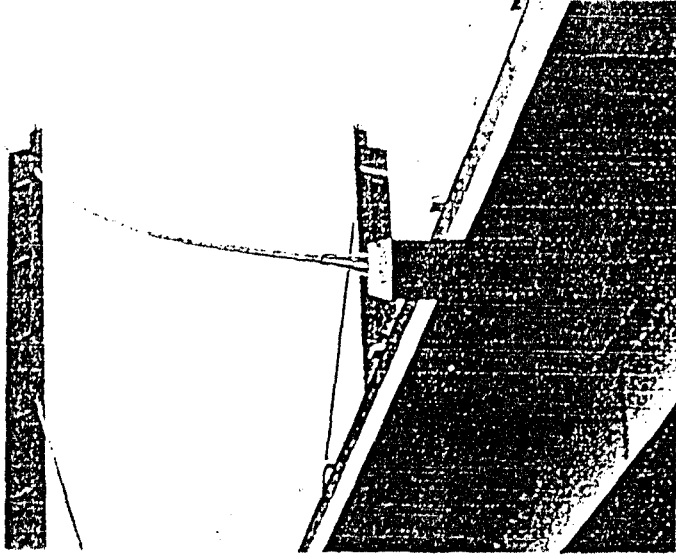
2.1.8. Değişik giriş kuvvetleri altında eğik kablo

Tek kablonun davranışı sonucu oluşan şekil değiştirme özellikleri, asma köprüdeki ana kabloda bulunan durumlarla ilgilidir. Ana kabloda dış yük, kablo boyunca sürekli ve yanal doğrultudadır.

Eğik askılı köprülerde kablolar, dış yükten dolayı eksenel çekmeye maruz kalırlar; fakat eğik kablolarda sehim tamamen kendi ağırlığından dolayı oluşur (Şekil 2.37). Bununla birlikte eğik kablolarda sehim-uzunluk oranı, asma köprüdeki ana kabloya göre çok küçük olur.

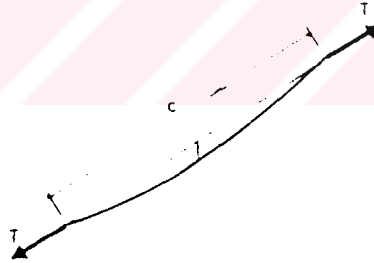
Kablo boyunca üniform yayılı sabit yük için doğru kablo eğrisi bir zincir eğrisidir; fakat tanımsız bir çok durumda yaklaşık bir parabol kullanılır.

Zincir eğrisinin görünüş araştırmalarına karşı başlangıçta parabol görünüşlü yatay eğik kablonun incelemesi yapılır (Şekil 2.39). Burada iki durum T_1 ve T_2 giriş kuvvetleri ile karakterize edilmiştir.



Şekil 2.37 Yatay izdüşümü 256 m olan bir eğik kablonun görünür sehim (Knie Köprüsü).

Eğik kablonun şekil değiştirme özellikleri, T kiriş kuvveti ve c kiriş uzunluğu arasındaki ilişkiye bağlıdır (Şekil 2.38).



Şekil 2.38 Bir eğik kablonun c kiriş uzunluğu ve T kiriş kuvveti.

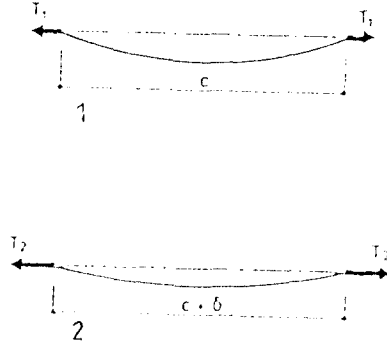
Durum 1'deki zincir eğrisinin denklemi şöyledir:

$$y = \frac{T_1}{w_c} \left[\cosh \left(\frac{w_c}{T_1} (x - 1/2 c) \right) - \cosh \left(\frac{w_c}{2T_1} \right) \right] \quad (2.45)$$

durum 2 ise:

$$y = \frac{T_2}{w_c} \left\{ \cosh \left[\frac{w_c}{T_2} \left(x - \frac{c + \delta}{2} \right) \right] - \cosh \left(\frac{w_c (c + \delta)}{2T_2} \right) \right\} \quad (2.46)$$

Denklemlerde w_c , kablo üzerinde birim boya gelen yayılı sabit yük; δ ise mesnet noktaları arasındaki uzaklığın artmasıyla artan kabloun boyuna uzamasıdır.



Şekil 2.39 Yatay kabloun T_1 ve T_2 kiriş kuvvetleriyle beraber iki durumu.

Kablo uzunlukları s_1 ve s_2 'yi veren formüller ise aşağıdaki gibidir:

$$s_1 = \int_0^c \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = 2 \frac{T_1}{w_c} \sinh\left(\frac{w_c c}{2T_1}\right) \quad (2.47)$$

$$s_2 = 2 \frac{T_2}{w_c} \sinh\left(\frac{w_c (c + \delta)}{2T_2}\right) \quad (2.48)$$

Gerilmesiz durumdaki toplam uzamalar olan Δs_1 ve Δs_2 , (2.6) denklemi yardımıyla aşağıdaki gibi olur:

$$\Delta s_1 = \frac{T_1}{EA} \int_0^c \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right] dx = \frac{T_1^2}{2EAw_c} \left[\sinh\left(\frac{w_c c}{T_1}\right) + \frac{w_c c}{T_1} \right] \quad (2.49)$$

$$\Delta s_2 = \frac{T_2^2}{2EAw_c} \left[\sinh\left(\frac{w_c c}{T_2}\right) + \frac{w_c c}{T_2} \right] \quad (2.50)$$

$c \gg \delta$ olduğu için (2.48) denklemi aşağıdaki gibi olur:

$$s_2 = 2 \frac{T_2}{w_c} \sinh\left(\frac{w_c c}{2T_2}\right) + \delta \cosh\left(\frac{w_c c}{2T_2}\right) \quad (2.51)$$

Kablo için $s_2 - s_1 = \Delta s_2 - \Delta s_1$ konum denklemi kullanılırsa, kablo uzaması δ şöyle olur:

$$\delta = \frac{(T_2 - T_1)c}{2EA} + \frac{1}{2EAw_c} \left[T_2^2 \sinh\left(\frac{w_c c}{T_2}\right) - T_1^2 \sinh\left(\frac{w_c c}{T_1}\right) \right] \cosh\left(\frac{w_c c}{2T_2}\right)$$

$$+ \frac{\frac{2}{w_c} \left[T_1 \sinh \left(\frac{w_c c}{2T_1} \right) - T_2 \sinh \left(\frac{w_c c}{2T_2} \right) \right]}{\cosh \left(\frac{w_c c}{2T_2} \right)} \quad (2.52)$$

$T_1 = A\sigma_1$, $T_2 = A\sigma_2$ ve $w = A\gamma$ değerlerini denklem (2.52)'de yerine koyarsak aşağıdaki denklemi elde ederiz:

$$\frac{\delta}{c} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)\gamma + \frac{1}{c} \left[\sigma_2^2 \sinh \left(\frac{\gamma c}{\sigma_2} \right) - \sigma_1^2 \sinh \left(\frac{\gamma c}{\sigma_1} \right) \right] + 4 \frac{E}{c} \left[\sigma_1 \sinh \left(\frac{\gamma c}{2\sigma_1} \right) - \sigma_2 \sinh \left(\frac{\gamma c}{2\sigma_2} \right) \right]}{2k\gamma \cosh \left(\frac{\gamma c}{2\sigma_2} \right)} \quad (2.53)$$

burada σ_1 durum 1'deki kablo gerilmesi, σ_2 durum 2'deki kablo gerilmesi ve γ ise kablo malzemesinin yoğunluğudur.

Denklem (2.53)'te verilen uzama ifadesinde tam zincir eğrisi görünüşü esas alınmıştır. Esas alınan δ/c parabolik şekli, (2.24) denkleminde aşağıdaki ifadelerle beraber yazılırsa, (2.54) denklemi bulunur:

$$a = \frac{c}{2}, f_w = \frac{w_c c^2}{8T_1} = \frac{\gamma c^2}{8\sigma_1}, f_2 = \frac{w_c c^2}{8T_2} = \frac{\gamma c^2}{8\sigma_2}, w = w_c = A\gamma, p = 0, \Delta t = 0$$

$$\frac{\delta}{c} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \frac{\gamma^2 c^2}{24} \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) + \frac{\gamma^2 c^2}{12E} \left(\frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma_1} \right) \quad (2.54)$$

$E \gg \sigma$ olduğundan son terimi ihmal edersek denklem şu hali alır:

$$\frac{\delta}{c} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \frac{\gamma^2 c^2}{24} \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) \quad (2.55)$$

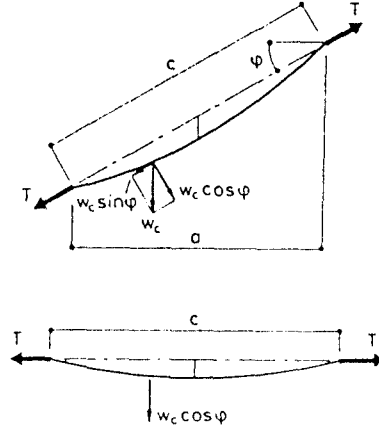
Parabol esaslı çözümün -denklem (2.55)-, tam zincir esaslı çözümünden -denklem (2.53)- daha kullanışlı olduğu görülmektedir.

Eğik kabloda yanal kuvvetin oluşturduğu sehim, $w_c \cos \varphi$ şiddetindedir ve Şekil 2.40'da gösterilmiştir. Eğik kablonun şekil değiştirme özellikleri sonuç olarak aynı c giriş uzunluğuna sahip yatay kablonun özelliklerini gösterir, fakat düşey sabit yük olarak $w_c \cos \varphi$ etki eder.

w_c yerine $w_c \cos \varphi$, c yerine de $a/\cos \varphi$ değerlerini denklem (2.55)'de yazarsak şu son hali alır:

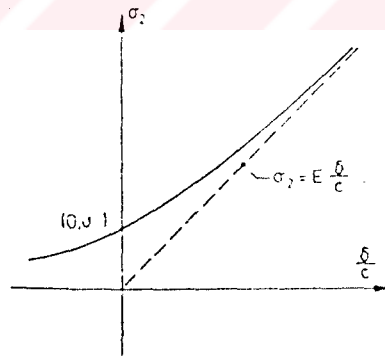
$$\frac{\delta}{c} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \frac{\gamma^2 a^2}{24} \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) \quad (2.56)$$

Bu denklemde ilk terim kablounun elastik uzamasını, ikinci terimde sehim değişimlerinin etkisini belirtir.



Şekil 2.40 Eğik kablo ve eşdeğer yatay kablonun eşit şekil değiştirme özellikleri.

Kablo uzaması δ/c ve kablo gerilmesi σ_2 arasındaki ilişki Şekil 2.41'de gösterilmiştir. Burada σ_1 gerilmesi, özellikle gerilmesiz kablounun eğri uzunluğuyla aynı kiriş uzunluğuna sahip eğik kablodaki varolan gerilmeye eşit seçilmiştir.



Şekil 2.41 Kablo uzaması δ/c ve kablo gerilmesi σ_2 arasındaki ilişki.

Denklem (2.56) tarafından tanımlanan eğri, σ_2 'nin büyük değerleri için bir asimptota yakınsar ki denklem şöyle olur:

$$\frac{\delta}{c} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} \left(= \frac{\sigma_2}{E} \right) + \frac{\gamma^2 a^2}{24\sigma_1^2} \quad (2.57)$$

Düz çubuğun gerilme-biçim değiştirme ilişkisi kablonun gerilmesiz uzunluğuyla aynıdır. Sehim, kablo gerilmesiyle ters orantılıdır. σ_2 'nin büyük değerlerinde sehim etkileri en sonda yok olmaktadır ve kablo düz çubuk gibi davranmaktadır.

Yatay eğik kablonun düşey f sehimini şu formülle hesaplanır:

$$f = \frac{w_c c^2}{8T} = \frac{\gamma c^2}{8\sigma} \quad (2.58)$$

Relatif f/c sehimini, $\gamma/8\sigma$ ve c kiriş uzunluğu ile orantılıdır.

Genellikle $\gamma/8\sigma$ değeri sabit yük durumunda 25×10^{-6} değerindedir. Relatif f/c sehimini ise kablo uzunluklarının 400 m.'den fazla olduğu zamanlarda 1/100'ün altında kalır. Ayrıca, bir eğik kabloda relatif f/c sehimini, asma köprüde ana kabloların relatif sehiminin 1/10'u civarındadır.

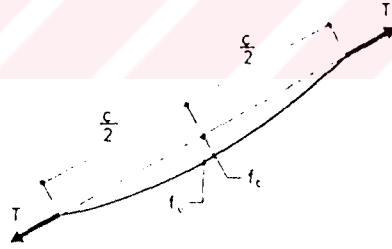
Bir eğik kabloda (Şekil 2.42) kiriş yüzeyine dik f_c sehimini veren formül şöyledir:

$$f_c = \frac{w_c c^2 \cos \varphi}{8T} = \frac{\gamma c^2}{8\sigma} \cos \varphi \quad (2.59)$$

ve düşey sehim f_v 'de şöyledir:

$$f_v = \frac{f_c}{\cos \varphi} = \frac{\gamma c^2}{8\sigma} \quad (2.60)$$

Düşey f_v sehimini eğik kablonun eğiminden bağımsızdır.



Şekil 2.42 Eğik kablonun kirişe dik f_c ve düşey f_v sehimleri.

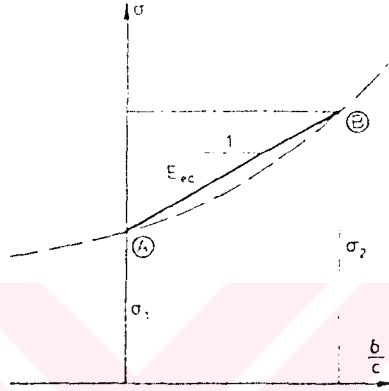
Farklı yüklemeler altında sehim değişimlerinin etkileri Şekil 2.41'de görülmektedir. Burada kuvvet ve şekil değiştirme arasında lineerlik bulunmamaktadır. Yapı analizlerinde basit metodların çoğunda lineerlik istenir. Ayrıca kuvvet-şekil değiştirme ilişkisinde de lineerlik hoş ve istenen bir durumdur. Bu yüzden aşağıdaki gibi eşdeğer bir E_{eq} elastisite modülü tanımlanır:

$$E_{eq} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\delta} c \quad (2.61)$$

Denklem (2.54)'ten δc değeri, (2.61) denkleminde yerine yazılırsa E_{eq} şu hali alır:

$$\frac{1}{E_{eq}} = \frac{1}{E} + \frac{\gamma^2 a^2}{24} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \right) \quad (2.62)$$

Denklem (2.61) ile ifade tanımlanan eşdeğer elastisite modülü olan sekant modülünün durum 1'den (A noktası) durum 2'ye (B noktası) değişimi Şekil 2.43'de gösterilmiştir. Bu sekant modülünün uygulaması çok fazla yaklaşıklık sunmaz. Başlangıç noktası A ve son nokta B arasındaki kuvvet-uzama ilişkisi bir eğriyi tanımlar.

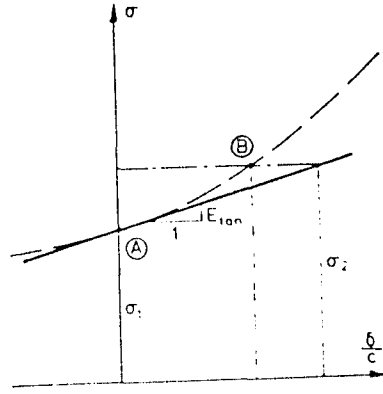


Şekil 2.43 Gerilme değişim aralığı σ_1 - σ_2 olan eğik kablonun eşdeğer elastisite modülü E_{eq} (sekant modülü).

Denklem (2.62)'den sekant modülünün hesabında her iki kablo gerilmesi σ_1 (durum 1) ve σ_2 (durum 2) önceden bilinmektedir. Bununla birlikte bir çok durumda başlangıç kısmındaki kablo gerilmesi sabit yük durumunun yerini tutar ki bu bilinir; fakat durum 2'deki gerilme (hareketli yük durumu) tekrarlama ile hesaplanır. σ_2 gerilmesi için tekrarlama işlemi çok sağlıklı sonuçlar vermez. Denklem (2.62) ile E_{eq} hesaplandığı zaman σ_2 değeri için $\sigma_1(w+p)/w$ ifadesi kullanılırsa bir çok durumda yeter derecede doğruluk sağlanır.

Eğik askılı köprülerde küçük hareketli-sabit yük oranlarında sekant modülü yerine sık sık tanjant modülü kullanılır (Şekil 2.44). (2.62) denkleminde $\sigma_2 = \sigma_1$ kullanılırsa tanjant modülü E_{tan} için şu formül elde edilir:

$$\frac{1}{E_{tan}} = \frac{1}{E} + \frac{\gamma^2 a^2}{12 \sigma_1^3} \quad (2.63)$$



Şekil 2.44 Başlangıç gerilmesi σ_1 olan kablonun E_{tan} tanjant modülü.

Genellikle, başlangıç konumundaki kablo gerilmesi bilindiğinden tanjant modülünü kullanmak sekant modülüne göre daha kolaydır. Diğer yandan büyük kablo uzunlukları ve büyük hareketli-sabit yük oranları için tanjant modülü hatalı sonuçlar verebilmektedir.

Şekil 2.45’de gösterilen diyagram, eşdeğer elastisite modülü ve yatay kablo izdüşümü arasındaki ilişkiyi gösterir. Eğri parametresi K ’nın hesabı için diyagram uygulamalarında sekant ve tanjant modülleri için aşağıdaki ifadeler kullanılır:

$$K = \frac{\gamma^2 (\sigma_1 + \sigma_2)}{24 \sigma_1^2 \sigma_2^2} E \times 10^6 \quad \text{sekant modülü için}$$

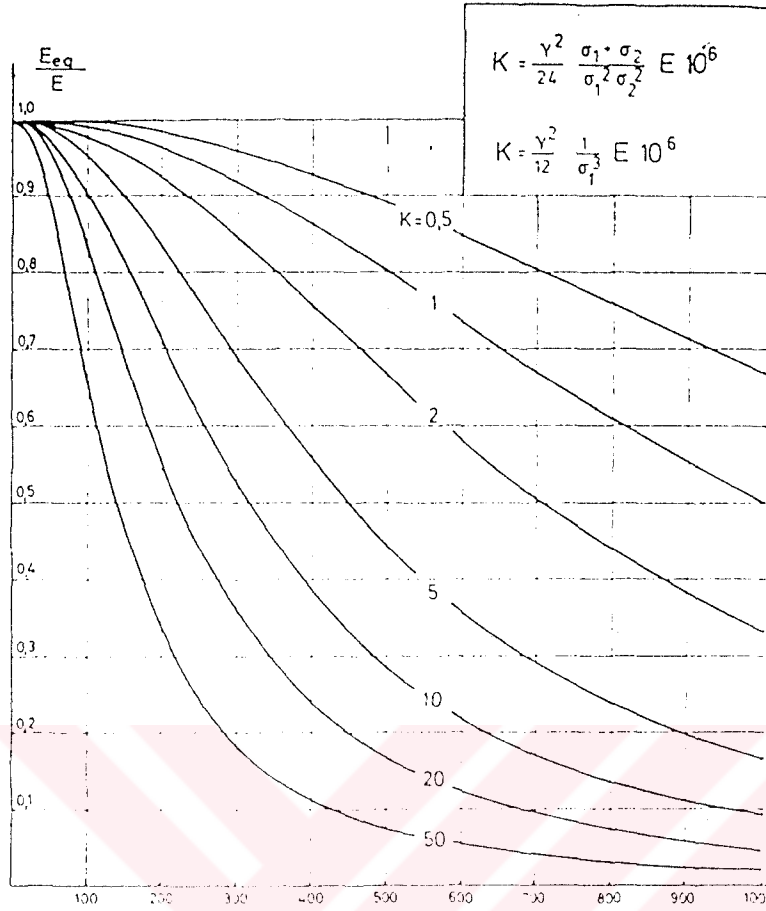
$$K = \frac{\gamma^2}{12 \sigma_1^3} E \times 10^6 \quad \text{tanjant modülü için}$$

(2.62) veya (2.63) denklemlerinde K değeri yerine konulursa, her iki uygulama içinde aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{E_{eq}}{E} = \frac{1}{1 + K a^2 \times 10^{-6}} \quad (2.64)$$

Modern paralel tel kablo için K parametresi 0.50 ile 1.00 arasında değişen değerlere sahiptir. Eğer kablo yumuşak çelikten yapılmışsa eğri parametresi artarak 20 civarında bir değere ulaşır. Kablo uzunluğunun artması ile E_{eq} , şiddetli bir indirgemeye uğrar. Nitekim $a=300$ m. ise E_{eq}/E oranı 0.96 ve K değeri 0.50; fakat oran 0.36 olduğunda $K=20$ dir.

K , gerilme seviyesinin üçüncü derecesi ile ters orantılı sonuçlar verir. Ayrıca büyük eksenel kablo rijitliği, yüksek gerilme seviyelerinde ortaya çıkar. Bununla birlikte eksenel rijitlik, elastisite modülü tarafından düzenlenmez ve gerilme seviyesi azaldığında A değeri artacağından-her ne kadar E_{eq} değeri azalsa ise de- $E_{eq}A$ çarpımı çok fazla artmaktadır.



Şekil 2.45 Yatay kablo izdüşümü a ve eğri parametresi K ile beraber eşdeğer elastisite modülleri E_{eq}/E 'nin değişimini gösteren diyagram.

Kablo biçim değiştirmesi $\varepsilon_c = \delta/c = (\sigma_2 - \sigma_1)/E_{eq}$, (2.62) denkleminde bulunur. Gerilme oranı $\sigma_1/\sigma_2 = \kappa$ cinsinden şöyle yazılabilir:

$$\varepsilon_c = \frac{\delta}{c} = \frac{1-\kappa}{E} \sigma_2 + \frac{\gamma^2 a^2}{24} \left(\frac{1}{\kappa^2} - 1 \right) \frac{1}{\sigma_2^2} \quad (2.65)$$

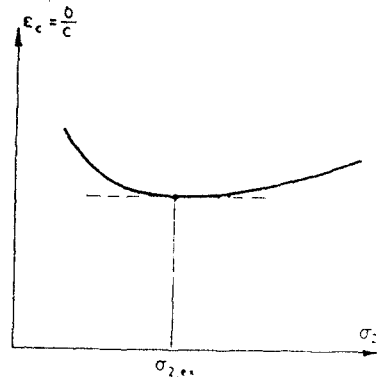
Minimum ε_c ise $\partial \varepsilon_c / \partial \sigma_2$ sıfıra eşitlenerek hesaplanır:

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial \sigma_2} = \frac{1-\kappa}{E} - \frac{\gamma^2 a^2}{12} \left(\frac{1}{\kappa^2} - 1 \right) \frac{1}{\sigma_2^3} = 0$$

maksimum eksenel rijitlik $\sigma_{2,ex}$ gerilmesiyle bulunur:

$$\sigma_{2,ex} = \sqrt[3]{\left(\frac{1}{12} \gamma^2 a^2 E \frac{1+\kappa}{\kappa^2} \right)} \quad (2.66)$$

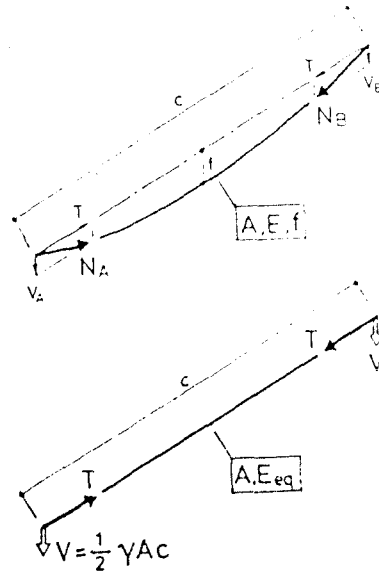
ε_c 'nin değişimi ile σ_2 gerilmesi Şekil 2.46'da gösterilmiştir.



Şekil 2.46 Bir eğik kablonun, σ_2 gerilmesi ile δ kablo uzamasının değişimi.

Bununla birlikte, genellikle düşük gerilme seviyesinin seçilmesiyle artan aksel rijitlik sayesinde kablo çelik miktarının artması yüzünden yapı çok pahalı olmaktadır. Eğer yine de düşük gerilme seviyesi seçilirse, kablolar için daha az pahalı çelikler seçmek mümkündür. Kablo kesitlerini artırarak rijitliğin artması ile ekonomik sonuçlar elde edilebilir.

Eşdeğer elastisite modülü tarafından idealize edilmiş kablo Şekil 2.47’de gösterilmiştir. Gerçek kabloda kesit alanı A , elastisite modülü E ve sehim f ; lineer elastik eleman olan idealize edilmiş kabloda kesit alanı A , fakat elastisite modülü E_{eq} ’dir. Elde edilen bu elemanda, gelenekselleşmiş yapı analiz elemanlarının tümünde olduğu gibi elastik davranış istenir.



Şekil 2.47 Gerçek ve idealize edilmiş eğik kablo.

Gerçek kablo kuvveti N , mesnet noktalarında kablo eğrisi eğimi yönünde etki eder, bileşenleri kiriş kuvveti T ve düşey kuvvet V dir. Mesnet noktalarına göre moment alarak düşey kuvvet V bulunur:

$$V = \frac{1}{2} w_c c = \frac{1}{2} \gamma A c \quad (2.67)$$

Burada $w_c c$ kablonun toplam ağırlığıdır. Her bir düşey kuvvet V , Şekil 2.47’de belirtilmiştir ve kablo ağırlığının yarısına eşittir.

İdealize edilmiş kabloda, mesnet noktalarında gerçek kablodakine eşit kiriş kuvveti T ve düşey kuvvet $V = w_c c/2$ etki ettirilir. Bu düşey kuvvetler, aynı yolla diğer sabit yükler içinde yapı sisteminin analizinde kullanılır.

Yapı sisteminin analizinden ve idealize edilmiş kablo elemanındaki T kuvvetinin hesabından sonra, gerçek kablodaki maksimum normal kuvvet kablo alanı A ’nın irdelenmesiyle bulunur.

Mesnet noktası B ’deki maksimum normal kuvvet N_B , aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$N_B = \sqrt{\left(T^2 + V^2 + 2TV \frac{h}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right)} \quad (2.68)$$

$V = \gamma A \sqrt{a^2 + h^2} / 2$ ve $A = N_B / \sigma$ değerleri yazılırsa (2.68) denklemi şöyle olur:

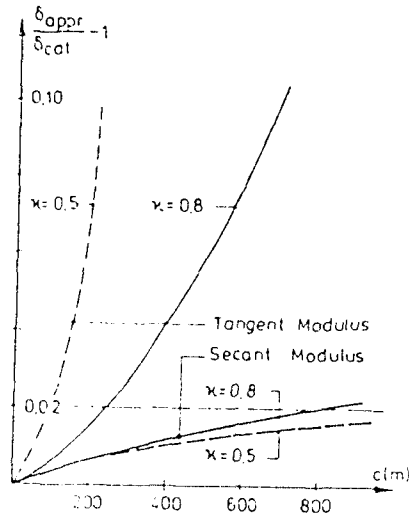
$$\frac{N_B}{T} = \left[\sqrt{\left(4 - \frac{\gamma^2}{\sigma^2} a^2 \right)} + \frac{\gamma}{\sigma} h \right] \left(2 - \frac{\gamma^2 (a^2 + h^2)}{2\sigma^2} \right)^{-1} \quad (2.69)$$

Kablo kesitinin boyutlandırılmasında N_B ’ye nazaran, T esas alınır. Ayrıca kabloların sayısal uygulamalarında düşey izdüşüm 150 m.’den fazla olduğunda da T ve N_B arasındaki fark çok küçük olmaktadır.

2.1.9. Eğik kablonun sayısal uygulaması

Yatay kablo uzunluğu değişimi ile eşdeğer elastisite modülü esas alınarak zincir eğrisi yerine yaklaşık parabol uygulamasının etkileri Şekil 2.48’de gösterilmiştir.

Belirtilen bu yaklaşık çözüm hata verir ($\delta_{yak}/\delta_{zin} \sim 1$). Burada $\delta_{yak} = (\sigma_2 - \sigma_1) \mathcal{L} / E_{eq}$ yaklaşık eşdeğer elastisite modülü esas alınan uzama, δ_{zin} ise (2.53) denkleminde esas alınan uzamadır.



Şekil 2.48 Eğik kablolar için sekant modülü veya tanjant modülü kullanılması halinde oluşan hata ($\delta_{yak}/\delta_{zin} - 1$), parametreler: $E=205 \times 10^3$ MN/m², $\gamma=0.09$ MN/m³(paslanmaya karşı koruma dahil), $\sigma_2=720$ MN/m², $\kappa=0.50$ ve 0.80 .

Sekant modülü yaklaşımında görülmektedir ki, kablo uzunluğu 300 m. üzerinde ise hata %1'in altında kalıyor. Uzunluk 750 m.'nin üzerinde ise hata %2'nin altındadır. Yalnızca kablo çeliği için elastisite modülü kullanıldığı zaman bu değer %2-3'den fazla olmaktadır. Tüm pratik uygulamalarda sekant modülü elverişlidir. Ancak yatay izdüşümü 300-400 m.'den fazla olan serbest kablolarda günlük yapılara uygun olmayan sonuçlar bulunur.

Tanjant modülü uygulamasında ise, kablo uzunluğu 96 m. olduğunda hata %2'ye ulaşmaktadır, gerilme oranı da 0.50'dir. Kablo uzunluğu 250 m. ve gerilme oranı 0.80 ise hata yine %2'dir. Tanjant modülü yaklaşımı yalnızca aşırı olmayan gerilme aralıklarıyla, aşırı olmayan kablo uzunlukları için uygulanabilir.

Farklı hareketli yükler altında kablo gerilmesi azalacağı gibi, artması durumunda da hem yüklü, hem de yüksüz durum için bir sekant modül kullanılır.

Bu durum genellikle fan şekilli kablo sistemlerinin ankraj kablolarında bulunur. Ana açıklıktaki hareketli yük, ankraj kablo gerilmesini artırırken; yan açıklıktaki hareketli yük, kablo gerilmesini azaltır.

Yatay izdüşümü $a=300$ m. olan bir ankraj kablosu için maksimum gerilme 720 MN/m², sabit yük gerilmesi 480 MN/m² ve minimum gerilme 320 MN/m² ise bulunan elastisite modülleri şöyledir:

sekant modülü, yüklü

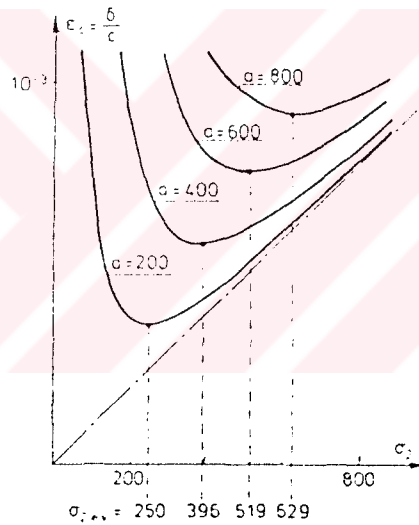
$$193 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$$

sekant modülü, yüksüz $169 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$
 tanjant modülü $184 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$

Yüklü ve yüksüz sekant modülü arasındaki fark %14'tür. Ankraj kablosu rijitliğinde tanjant modülü kullanılırsa, yüklü konumda bu fark %5'in altında; yüksüz konumda da %9'un üstünde tahmin edilir.

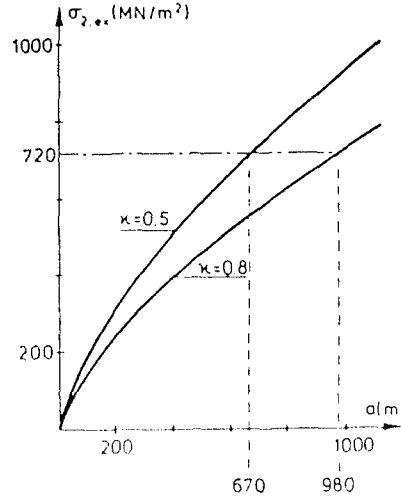
Öncelikle belirtmek gerekir ki, yüksüz durumda gerilme farkı $|\Delta\sigma| = 480 - 320 = 160 \text{ MN/m}^2$ ve yüklü durum için $|\Delta\sigma| = 720 - 480 = 240 \text{ MN/m}^2$ 'dir. Ayrıca tanjant modülü, yüklü duruma rağmen yüksüz durumda daha büyük hatalar verir.

Gerilme oranı $\sigma_1/\sigma_2 = 0.80$ ve yatay izdüşümleri 200 m., 400 m., 600 m. ve 800 m. olan, ayrı ayrı maksimum σ_2 kablo gerilmesi ile kablo birim uzama miktarı olan $\varepsilon_c = \delta/c$ 'nin değişimleri Şekil 2.49'da gösterilmiştir. Ayrıca verilen $\sigma_{2,ex}$ gerilmesiyle kablo uzunluğuna bağlı olarak maksimum eksenel rijitliğin (minimum ε_c) arttığını söylemek gerekir.



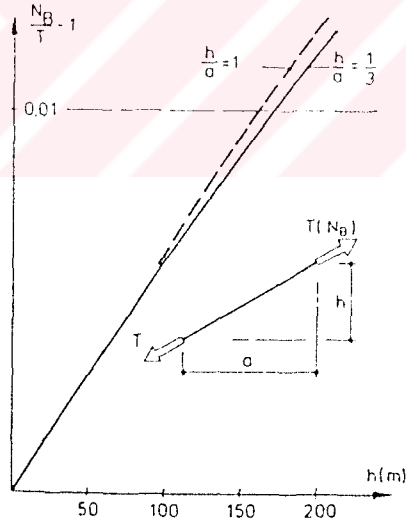
Şekil 2.49 Gerilme oranı $\kappa=0.80$ ve yatay izdüşümleri 200 m, 400 m, 600 m ve 800 m olan eğik kabloların, ayrı ayrı σ_2 gerilmesi ile birim kablo uzaması $\varepsilon_c = \delta/c$ arasındaki ilişkisi.

Bu özellik daha çok Şekil 2.50'da gösterilmiştir. Burada maksimum eksenel rijitliği veren $\sigma_{2,ex}$ gerilmesine karşı, gerilme oranı $\kappa = 0.50$ ve $\kappa = 0.80$ olan yatay kablo izdüşümü a için diyagram çizilmiştir. Bu örnekte kablolar için, yatay izdüşümü 670 m.'den az ve gerilme oranı $\kappa = 0.50$, yatay izdüşümü 980 m.'den az ve gerilme oranı $\kappa = 0.80$ olduğu durumlarda maksimum eksenel rijitliği veren $\sigma_{2,ex}$ gerilmesi, limit gerilme $\sigma_2 = 720 \text{ MN/m}^2$ 'den küçük olmaktadır.



Şekil 2.50 Gerilme oranları $\kappa = 0.50$ ve 0.80 olan eğik kablolarda, maksimum eksenel rijitliği veren $\sigma_{2,ex}$ 'nin değişimi.

Maksimum normal kuvvet N_B ve kiriş kuvveti T arasındaki oran denklem (2.69) ile tanımlanmıştır. Maksimum kablo kuvveti N_B 'nin yerine uygulamada kiriş kuvveti T kullanılırsa, oluşacak hata sınırı Şekil 2.51'de gösterilmiştir. Bu hata, sınırı düşey kablo izdüşümü h 'nin eğik kablo için $h/a=1$ ve $h/a=1/3$ değerleriyle belirtilmiştir.



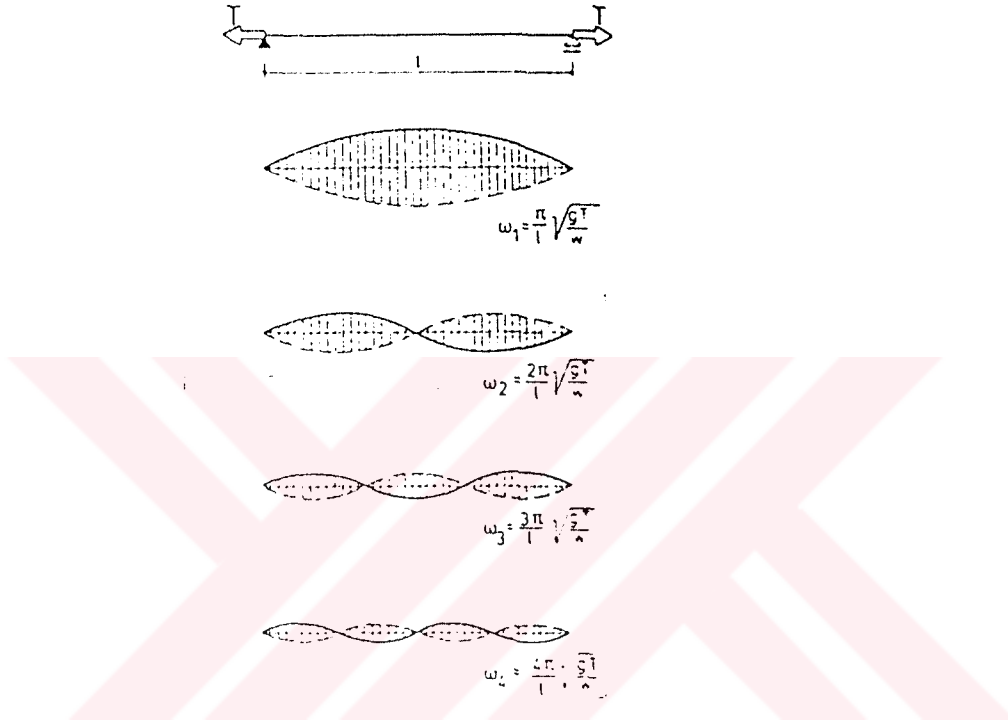
Şekil 2.51 Eğimi $h/a=1$ ve $h/a=1/3$ olan eğik kabloların maksimum normal kuvvet N_B yerine kiriş kuvveti T kullanılmasıyla oluşacak hata sınırı $(N_B/T - 1)$.

N_B ve T arasındaki fark, kablolar için düşey izdüşüm 160 m.'ye kadar %1'in altında kalır. Kablo kesitlerinin boyutlandırılmasında kule yüksekliği 150 m.'ye (rijitlik kirişinden itibaren) kadar olan kısımda kiriş kuvveti T , hesaplarda yeterli derecede esas alınabilmektedir. Çoğunlukla ana açıklığı yaklaşık 800 m. olan üç açıklıklı yapılar

kullanılır. Netice olarak, günümüzdeki eğik askılı köprülerin pratiğinde proje aşamasında giriş kuvveti T ve kablo kuvveti N arasında ayırım yapmak gerekli görülmemektedir.

2.2. Tek Kablonun Dinamik Davranışı

Yüksek gerilmeler küçük kesitlere sahip hassas tek kablolarda titreşim hareketi yapar. Sabit çekme altında uzamasız gerili telin uzunluk boyunca doğal salınımı Şekil 2.52'de karakterize edilmiştir.

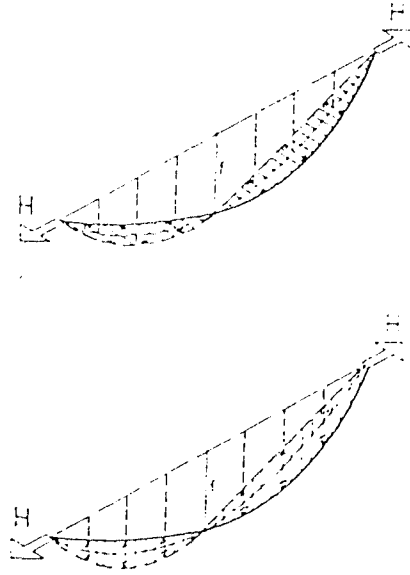


Şekil 2.52 Gerili tel için salınım modları.

En düşük dairesel frekans $w_1 = \pi/l \sqrt{gT/w}$ (g, yerçekimi ivmesi), mesnet noktaları arasında tek dalgalı olarak birinci simetrik mod için bulunur. Yüksek dereceli diğer modların w_n doğal frekansı $w_n = n w_1$ olarak hesaplanır, burada $n=1, 2, 3, \dots$ salınımdaki yarı dalgaların numaralarıdır. Simetrik modlar tek numaralarla, asimetrik modlar çift numaralar ile karakterize edilir.

Eğer kablo düşeyse gerili teli düz kablo gibi düşünebiliriz, çünkü yerçekimi kabloda bir sehim ve yatay veya eğik bir eğrilik oluşturmaktadır.

İki noktası ve f düşey sehimine sahip kabloda basit olarak iki tip salınım oluşur: kablo düzlemine dik hareket yönünde enine salınım ve düzlemsel salınım (Şekil 2.53).



Şekil 2.53 Sehim yapmış bir kabloun enine ve düzlemsel salınımları.

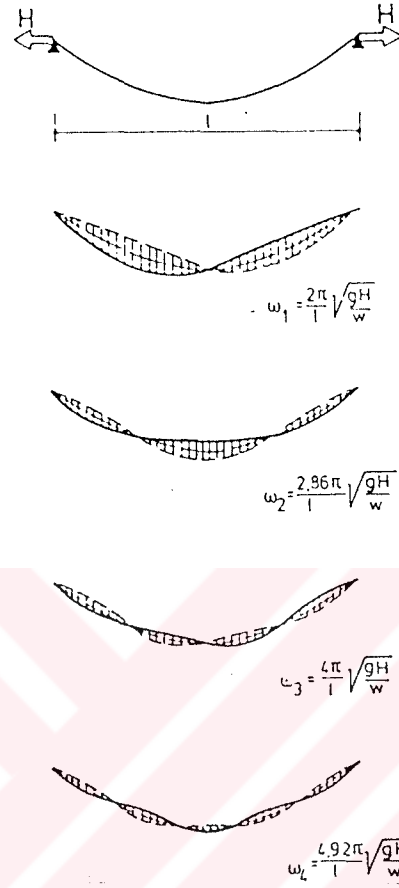
Enine salınımın doğal açısal frekansı, yatay kabloda şu yolla hesaplanır: $w_n = n\pi/l\sqrt{gH/w}$, burada $n= 1, 2, 3, \dots$ olarak değişmektedir. Sehim yapmış yatay kabloun enine salınımindaki H yatay kuvveti, gerili telin aynı doğal salınımindaki T çekmesine eşittir ($T=H$).

Sabit noktalar arasında, uzamasız yatay asılı kabloun düzlemsel salınımları Şekil 2.54'te gösterilmiştir. Gerili telin salınımı ile karşılaştırıldığında zaman ilginç bir şekilde en düşük frekans için asimetrik mod bulunmasıdır. Bu yüzden sehim yapmış kablo uzamasız ve mesnet noktaları sabit olduğunda, simetrik mod için yalnız bir yarım dalga bulunmaz.

Uzamasız varsayılan gerçek kabloun çeşitli çekme kuvvetleri için simetrik modları hatalı sonuçlar verir. Elastik kablolarda sehim arttıkça gerili teller için bulunan sonuçlar, sehim yapmış kabloların sonuçlarına doğru sürekli bir geçiş yapar (Şekil 2.55).

Apsis $P_{ge} = (8f/l)^2 EA/wl$, kabloun dinamik davranışında geometrik ve elastik parametre karakteristiklerini gösterir. P_{ge} değeri göstermektedir ki, küçük eksenel rijitliğe (EA) sahip uzun ve sığ kablolar (l uzun, δl küçük) için P_{ge} küçük sonuçlar almaktadır. P_{ge} 'nin küçük değerleri için kablo hareketi, birinci simetrik modda en düşük frekanstaki gerili tel hareketine benzer. Bununla birlikte birinci simetrik modun $P_{ge} = 4\pi^2$ için doğal frekansları, birinci asimetrik mod ile aynı olmaktadır. P_{ge} 'nin büyük değerleri içinde en düşük frekans birinci asimetrik modda bulunmaktadır. İkinci simetrik ve ikinci asimetrik

modda benzer davranış gösterir. Bununla beraber, bu modların kesim noktası ise $P_{ge}=16\pi^2$ 'dir.

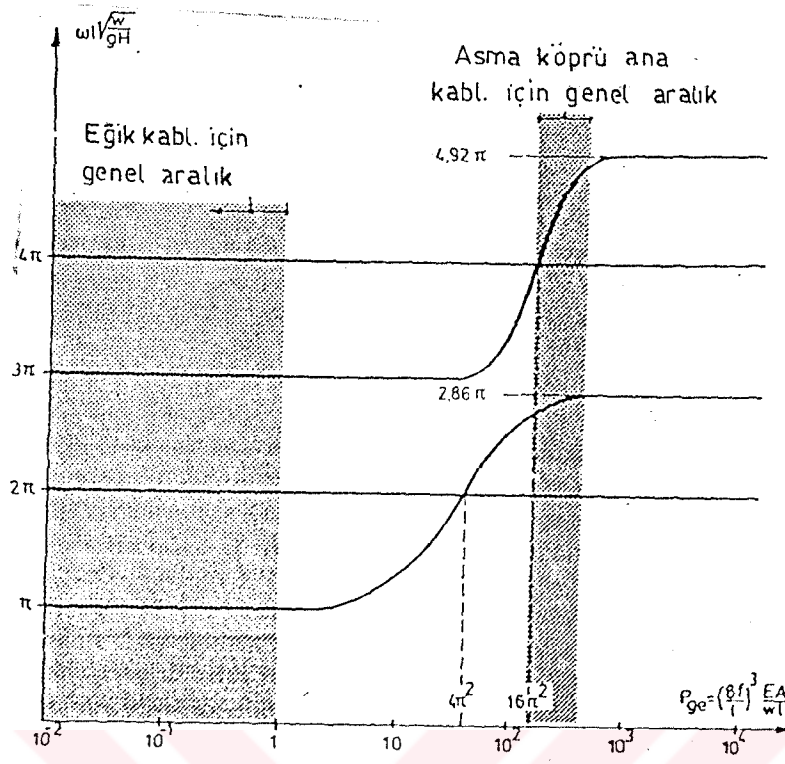


Şekil 2.54 Sehim yapmış kablonun düzlemsel salınımının modları.

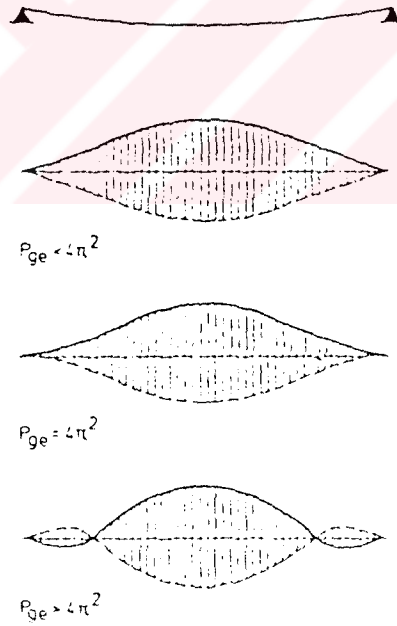
$P_{ge}=4\pi^2$ civarındaki birinci simetrik modun frekans değişimi Şekil 2.56'da gösterilmiştir.

$P_{ge} < 4\pi^2$ için birinci simetrik modda açıklık boyunca içsel düğümler oluşmamakta, mesnet noktalarında açısal değişim olmaktadır. $P_{ge} = 4\pi^2$ için birinci simetrik modda mesnet noktalarında açısal değişim yoktur. $P_{ge} > 4\pi^2$ için birinci simetrik modda mesnet noktalarının yakınında içsel iki tane düğüm noktası oluşur. P_{ge} değeri $4\pi^2$ ile $16\pi^2$ arasında kalırsa, birinci ve ikinci simetrik modlarda iki tane içsel düğüm noktası mevcuttur, fakat ikinci simetrik modun düğüm noktası mesnetlerden daha uzakta oluşur.

Asma köprü ana kablosu parametresi (P_{ge})'nin hesabı denklem (2.70)'de verilmiştir.



Şekil 2.55 Birinci dört doğal frekans için boyutsuz eğriler.



Şekil 2.56 $P_{ge} = (8f/l)^3 EA/wl$ parametresinin $4\pi^2$ değerine geçişteki birinci simetrik modun değişimi.

$$P_{ge} = 4 \frac{E}{\sigma_c} \left(1 + \frac{p}{w} \right) \left(\frac{2f_w}{a} \right)^2 \sqrt{1 + \left(\frac{2f_w}{a} \right)^2} \quad (2.70)$$

P_{ge} parametresi için en düşük sınırdaki kullanılacak değerler şöyledir: $E=170 \times 10^3$ MN/m² (sarmal halat kabloları), $\sigma_c=800$ MN/m², $p/w=0.20$, $f_w/a=0.18$; en yüksek sınırdaki kullanılacak değerler şöyledir: $E=205 \times 10^3$ MN/m² (paralel tel kabloları), $\sigma_c=700$ MN/m², $p/w=0.40$ ve $f_w/a=0.22$.

Böylece asma köprü ana kabloları için P_{ge} , şu iki aralıkta değişir:

$$140 < P_{ge} < 350 \quad (2.71)$$

Eğik kablolar için P_{ge} parametresinin hesabı şu formülle hesaplanır:

$$P_{ge} = \left(\frac{\gamma_c}{\sigma_c} \right)^3 \frac{E}{\gamma_c} \frac{a^3}{c} \quad (2.72)$$

Eğik kablolar için P_{ge} 'nin üst sınırında bulunmuş değerler şöyledir: $E=205 \times 10^3$ MN/m², $\sigma_c=700$ MN/m², $\gamma_c=0.10$ MN/m³ ve $a=c=400$ m.'dir. P_{ge} 'nin alt sınırında düşey eğik kablo için bulunan değerlerde $a=0$ 'dır. Eğik kablolarda P_{ge} 'nin aralığı şöyle olur:

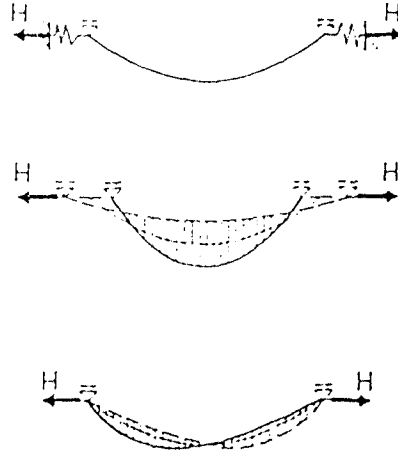
$$0 < P_{ge} < 1 \quad (2.73)$$

Şekil 2.55'de görüldüğü gibi eğik kabloların bu tipik aralıklarındaki hareketleri, düşük frekansta birinci simetrik moda sahip gerili tel gibidir. Asma köprü ana açıklık kabloları, genellikle düşük frekansta birinci asimetrik moda sahiptir. Sonuçta asma köprü kablo hareketleri daha çok uzamasız sehim yapmış kabloya benzemektedir.

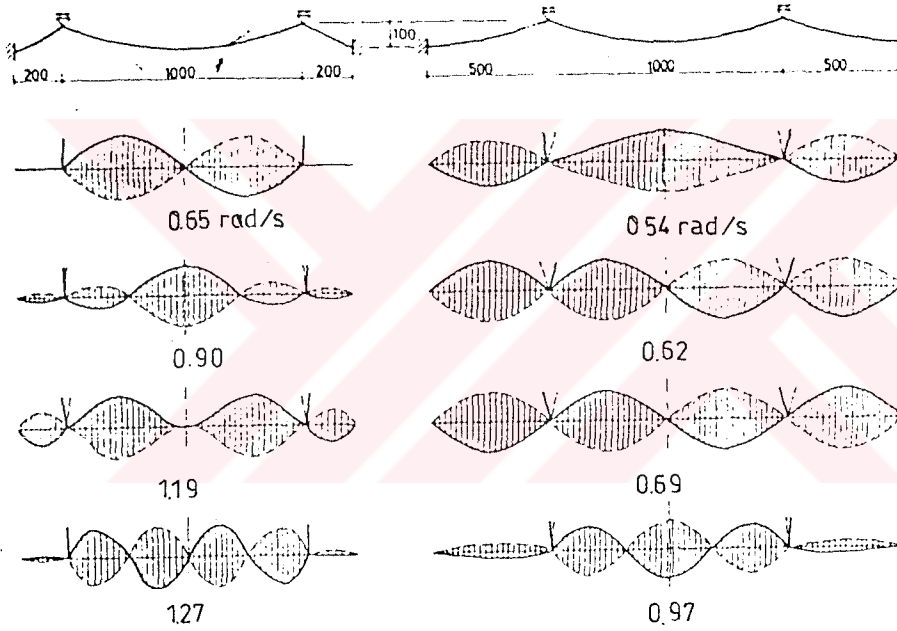
Mesnet noktaları tamamen sabit varsayılan gerçek yapılarda, Şekil 2.54'teki sehim yapmış kablonun modları gibi hesap yolu izlenirse uygulanabilir olmaz. Çünkü kule tepelerinde kesin bir yatay esneklik mevcuttur. Böylece asma köprü ana kablosunun dinamik davranışında Şekil 2.57'deki yapı sistemi dikkate alınmalıdır. Bu sistemde mesnetler yatay yaylarla karakterize edilmiştir.

Esnek mesnetli yatay kablonun modları yayların rijitliğine bağlıdır. Büyük rijitliğe sahip yaylarda modlar prensip olarak Şekil 2.54'te gösterildiği gibi, küçük frekansta birinci asimetrik mod kullanılır. Küçük rijitlikteki yayların modlarının değişimi mesnetlerin yatay hareketi ile karakterize edilen birinci simetrik mod için bulunan küçük frekansla belirlenir ve açıklıkta tek yarım dalga oluşur. Bunlar Şekil 2.57'de gösterilmiştir.

Önceden görüldüğü gibi kule tepelerinin yatay sınırlandırılması yan açıklık ile ana açıklık arasındaki orana bağlıdır. Ancak, küçük yan açıklık mesnet noktalarındaki yatay yaylarda büyük rijitliğe, büyük yan açıklıklar ise yatay yaylarda küçük rijitliğe sebep olur. Rijitlikteki bu farkın üç açıklıklı kabloya yansması Şekil 2.58'de gösterilmiştir.



Şekil 2.57 Esnek mesnetli sehim yapmış kablonun salınım modları.



Şekil 2.58 Kısa ve uzun yan açıklıklara sahip üç açıklıklı kablo için titreşim modları.

Küçük frekansta küçük yan açıklıktaki (birinci asimetrik modda) hareket, ana açıklıkta yoğunlaşmaktadır ve bu salınım modunda sabit mesnetlerin hareketi pratik olarak kule tepesinin hareketi gibidir.

Küçük yan açıklıklı üç açıklığa sahip kablonun ikinci modu simetrik olur, fakat ana açıklıkta iki düğüm noktası ve yan açıklıkta da ufak hareketlenme olur.

Büyük yan açıklıklı üç açıklığa sahip sistemde, düşük frekansta simetrik mod ve yarım dalga oluşur. Ara mesnetlerde (kule tepeleri), önemli miktarda boyuna hareket oluşur.

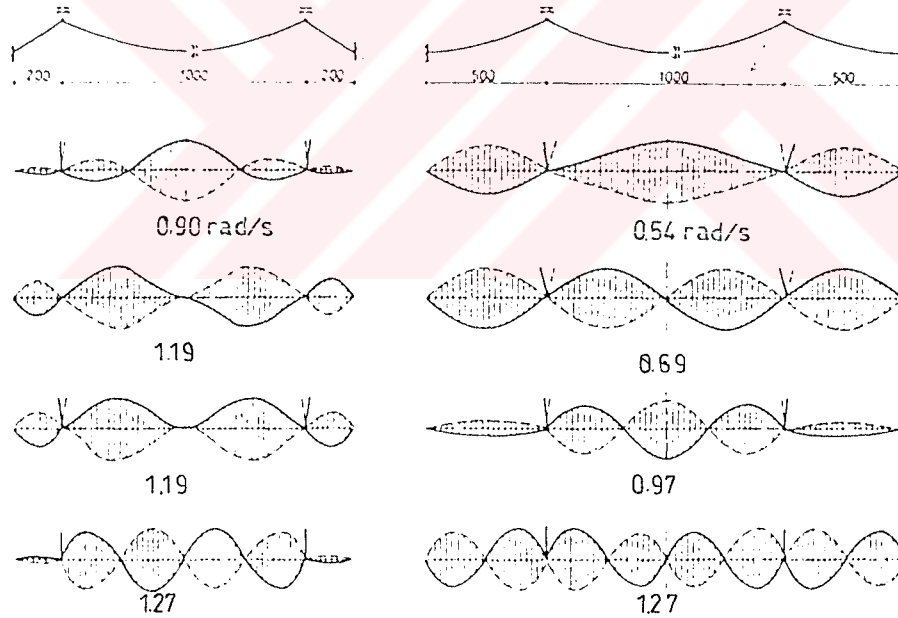
Uzun yan açıklıklı üç açıklığa sahip bu örneğin ikinci ve üçüncü modları asimetriktir ve yan açıklıklarda da hareketlenme aynı orandadır.

İkinci moddaki yan açıklık, ana açıklığın yarı kısmıyla aynı fazda salınım yapar ve ana açıklığın merkezindeki kabloda boyuna uzamalar oluşur. Üçüncü modda ise ana açıklığın yarı kısmında ve yan açıklıkta faz dışı hareket oluşur. Ana açıklığın merkezinde kablo hareketi çok küçük olmaktadır.

Ayrıca büyük yan açıklıklı sistemden kısa yan açıklıklı sisteme geçildiği zaman düşük frekans %20 artmaktadır.

Tek kablonun şekil değiştirme özelliklerinin araştırmaları sırasında görülmüştür ki, ana kablo merkezi kelepçe ile sınırlandırıldığında, ana açıklığın merkezindeki boyuna hareket asimetrik durumdaki çökmeler üzerinde önemli etkilere sahiptir.

Merkezi kelepçenin aynı etkisi kablonun dinamik davranışında da bulunmuştur. Merkezi kelepçeli üç açıklıklı kablonun doğal salınımı Şekil 2.59'da, serbest kablonun doğal salınımı ise Şekil 2.58'de gösterilmiştir.



Şekil 2.59 Merkezi bir kelepçeye sahip üç açıklıklı kablonun salınım modları.

Yan açıklığı kısa kablolar için merkezi kelepçe, düşük frekansta asimetrik değişime izin vermez. Serbest kablo ise düşük frekansta asimetrik mod vermektedir. Merkezi kelepçeli birinci mod, serbest kablonun ikinci modu ile uyuşur. Bu durumda en düşük frekansta %40'lık artış olmaktadır.

Büyük yan açıklıklı kablolar için merkezi kelepçe en düşük frekansta artış göstermez. Serbest kablonun birinci modu gibi simetriktir. Diğer yandan merkezi kelepçe serbest kablonun ikinci moduna engel olur ki, bu modda ana açıklık merkezinde büyük boyuna hareket olmaktadır. Serbest kablonun üçüncü modu (ki asimetriktir), ana açıklığın yarısında ve yan açıklıkta faz farklılığı olduğundan, ana açıklık merkezinde küçük boyuna hareketi karakterize eder. Bununla birlikte, orta açıklığın boyuna sınırlandırılması serbest kablonun üçüncü moduna etki etmez ve serbest kablonun üçüncü modu, merkezi kelepçeli kablonun ikinci modu gibi olur.

2.3. Kabloların Eğilmesi

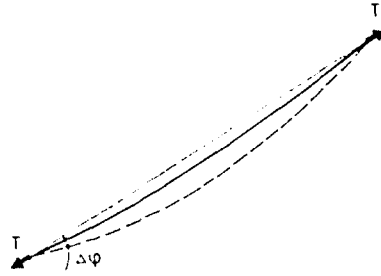
Aynı çaptaki tellerin bir araya getirilmesiyle oluşan kablolarda genellikle eğilme rijitliği dikkate alınmaz, tamamen esnek tellerin hareketi gibi düşünülebilir.

Ana yapının hesabı için esnek tellerin varsayımı pratik olarak yeterlidir, fakat yerel etkilerin hesabında kabloların eğilme rijitliği gerekli olabilir.

Sıcaklık değişimi, rüzgar yükü ve hareketli yük etkisindeki kabloların şekillerinin değişimi, kablo uçlarındaki açısal değişimler Şekil 2.60'de gösterilmiştir. Şekil 2.60'de kablo, asimetrik yük altındaki asma köprü ana kablodur. Şekil 2.61 ise eksenel kuvvete maruz eğik bir kabloyu gösterir.



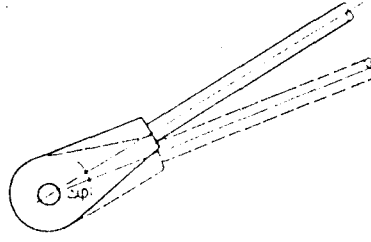
Şekil 2.60 Asimetrik yük altındaki bir asma köprünün kablo semerinde oluşan $\Delta\varphi$ açısal değişimi.



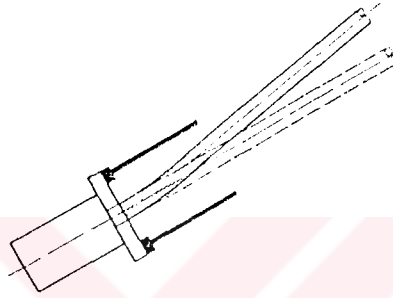
Şekil 2.61 Eğik kablonun farklı sehimler altında kablo ucundaki $\Delta\varphi$ açısal değişimi.

Kablo, uçlarından pim ile bağlı ise kablo enkesiti serbest dönme yapar (Şekil 2.62). Eğrilikten ötürü oluşan gerilmeler önemsizdir ve hesaplamada dikkate alınmaz. Fakat

kablonun rijitliği uçlarından bir soket ile sağlanmış ise kablo enkesitinde dönmeler önlenmiş ve eğrilğin değişimi kablo uçlarında yoğunlaşmıştır (Şekil 2.63).

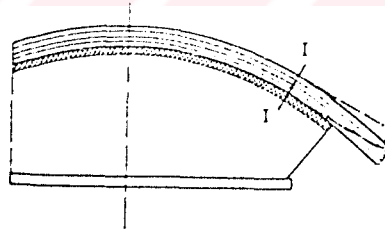


Şekil 2.62 Kablo piminin izin verdiği kablo ucundaki açısal değişim.



Şekil 2.63 Kablo soketi yardımıyla kablo ucunda önlenen dönme.

Şekil 2.64'teki dönmesi engellenmiş kesitte (I-I kesiti), eğilmiş tellerin arasındaki yüzey gerilmelerinden ötürü yükselen sürtünme tek tellerin arasındaki karşılıklı kaymayı engeller.



Şekil 2.64 Kablo semeri.

$\Delta\phi$ açısal değişime maruz kalan kablo için (Şekil 2.65) aşağıdaki ifadeler çıkarılmıştır:

$$M(x) = EJ_c \frac{d^2 y}{dx^2} = Ty \quad (2.74)$$

$$y = \Delta\varphi \sqrt{\left(\frac{EJ_c}{T}\right) \exp\left[-x \sqrt{\left(\frac{T}{EJ_c}\right)}\right]} \quad (2.75)$$

$$M(x) = Ty = \Delta\varphi \sqrt{(EJ_c T) \exp\left[-x \sqrt{\left(\frac{T}{EJ_c}\right)}\right]} \quad (2.76)$$

burada J_c kablunun atalet momentidir.

Maksimum eğilme momenti kablo sonunda oluşur ($x=0$):

$$M(0) = \Delta\varphi \sqrt{EJ_c T} \quad (2.77)$$

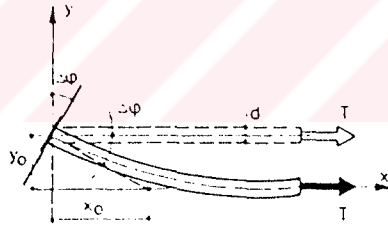
σ_{bl} bölgesel (lokal) eğilme gerilmesi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_{bl} = \frac{1}{2} d \Delta\varphi \sqrt{\left(\frac{ET}{J_c}\right)} \quad (2.78)$$

$J_c = A_c d^2 / 16$ olarak bulunan dairesel kablo kesitinin atalet momenti denklem (2.78)'de yerine yazılırsa aşağıdaki ifade bulunur:

$$\sigma_{bl} = 2 \Delta\varphi \sqrt{\left(\frac{ET}{A_c}\right)} = 2 \Delta\varphi \sqrt{E\sigma_c} \quad (2.79)$$

burada σ_c eksenel kablo gerilmesidir.



Şekil 2.65 $\Delta\varphi$ açısal değişimine maruz kalan kablo.

Denklem (2.79)'da görüldüğü gibi kablunun boyutları σ_{bl} eğilme gerilmesinde önemlidir.

Eğik bir kabloda yatay izdüşüm a ve gerilme değişimi ($\sigma_1 \rightarrow \sigma_2$) ise, kablo ucundaki $\Delta\varphi$ açısal değişimi için ifade şöyle olur:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2} \gamma a \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) \quad (2.80)$$

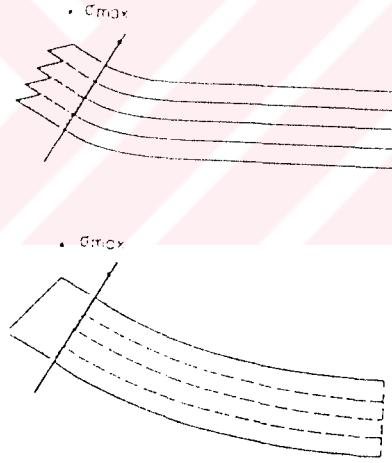
Bir kablonun yatay izdüşümü $a = 300$ m, yoğunluğu $\gamma = 0.09$ MN/m³ ve eksenel gerilme değişimi $\sigma_w = 540$ MN/m²'den $\sigma_{w,p} = 720$ MN/m²'ye olan parametreler için (2.80) denkleminde bulunan sonuç şöyledir:

$$\Delta\varphi = 6.25 \times 10^{-3}$$

Bu değer ile (2.78) denklemindeki σ_{hl} eğilme gerilmesi 152 MN/m² olur. Kablo eğilmesini hesaba kattığımızda maksimum kablo gerilmesi %20'den fazla artmaktadır.

İlk bakışta bu %20'lik artış çok önemli gözükmesede kablo eğilmesini dikkate aldığımızda, sabit yük konumundan hareketli yük konumuna geçildiğinde gerilme bölgesindeki artış 180 MN/m² den, 332 MN/m² ye çıkmaktadır. Bu farkın yorulma mukavemetinde çok etkili olduğu söylenebilir.

Aynı gerilme kablolarındaki tellerin karşılıklı serbestçe kayma hareketi yapabildiği ve teller arasında bir kayma olmadığında da artar. Zaten eğilme gerilmesi kablo boyutuna bağlı değildir (Şekil 2.66). Burada dört tel tabakasından üsttekinde serbestçe kayma durumu, alttakinde ise kaymasız durum gösterilmiştir. İkinci durumda kablo enkesitinin homojen olduğu varsayılmıştır.



Şekil 2.66 Bir kabloda teller arasında kaymanın olduğu (üst) ve kaymanın olmadığı (alt) durumlarda gerilmelerin değişimi.

Şekil 2.66'da görüldüğü üzere tellerin serbestçe hareket ettiği konumda kablo eğriliği çok küçük bir bölgede yoğunlaşmaktadır. Kablo teğetinin x eksenini kestiği nokta ile y eksenini arasındaki x_0 uzaklığı (Şekil 2.65'de gösterilen) için kullanılacak formül şöyledir:

$$x_0 = \sqrt{\left(\frac{EJ_c}{T}\right)} = \frac{d}{4} \sqrt{\left(\frac{E}{\sigma_c}\right)} \quad (2.81)$$

x_0 uzaklığı, kablo ile tel çapı arasındaki orana bağlıdır; fakat $\Delta\varphi$ açısal değişimden bağımsızdır.

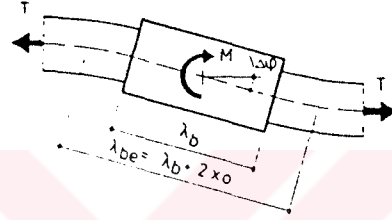
Banlı kablolarda -asma köprü ana kablolarında-, kablo distorsiyona uğradığında, eğilme gerilmeleri yüzünden oluşan sürtünme tarafından engellenen kayma ve kablo gerilmesi beraber hareket ederler.

Bir kablo bandında (Şekil 2.67), M momenti ve $\Delta\varphi$ açısal değişimi arasındaki ilişkiyi ifade eden denklem şöyledir:

$$M = T\lambda_{he}\Delta\varphi \quad (2.82)$$

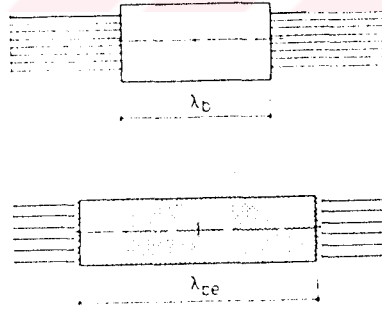
burada λ_{he} etkili kablo bant uzunluğudur:

$$\lambda_{he} = \lambda_b + 2x_0 = \lambda_b + d/2 \sqrt{E'\sigma_c} \quad (2.83)$$



Şekil 2.67 Açısal değişime maruz kalan kablo bandı.

Etkili kablo bant uzunluğu λ_{he} açısal değişimden bağımsızdır. Şekil 2.68'den görüldüğü gibi λ_{he} uzunluğunda rijit cisime mafsallı bağlantıları ile çubuklar (teller) bağlanmıştır.



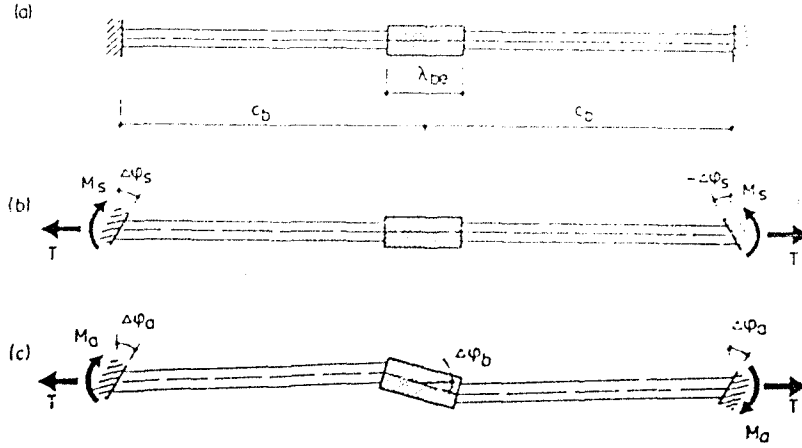
Şekil 2.68 Gerçek ve idealize edilmiş kablo bandı.

Bu model Şekil 2.69'daki sistemde gösterilmiştir. Bu sistemde kablo uzunluğu $2c_b$ ($c_b \gg \lambda_{he}$) ve bant kablonun merkezindedir.

Simetrik şekil değiştirme altındaki durum (b)'de karakterize edilmiştir. Kablo uçlarının her ikisinde de $\Delta\varphi_s$ açısal değişimi olur. Kablo bandı ise orijinal pozisyonunda kalır ve kabloda sabit M_s momenti meydana gelir:

$$M_s = \frac{EJ_c}{c_b} \Delta\varphi_s \quad (2.84)$$

burada J_c kablo enkesitinin eylemsizlik momentidir.



Şekil 2.69 Mesnetlerin simetrik ve asimetrik dönmesine maruz kalan merkezi kablo bandına sahip kablo.

Asimetrik şekil değiştirme altındaki durum ise (c)'de gösterilmiştir. Kablo uçlarındaki $\Delta\varphi_a$ açısai değişimlerinin yanında kablo bandında da $\Delta\varphi_b$ değerinde açısai dönme oluşur ve aşağıdaki ifade elde edilir:

$$2 \frac{EJ_c}{c_b} (\Delta\varphi_a - \Delta\varphi_b) = T \lambda_{be} \Delta\varphi_b \quad (2.85)$$

burada $\Delta\varphi_b$ 'yi tek bırakırsak:

$$\Delta\varphi_b = \frac{2EJ_c}{2EJ_c + T \lambda_{be} c_b} \Delta\varphi_a \quad (2.86)$$

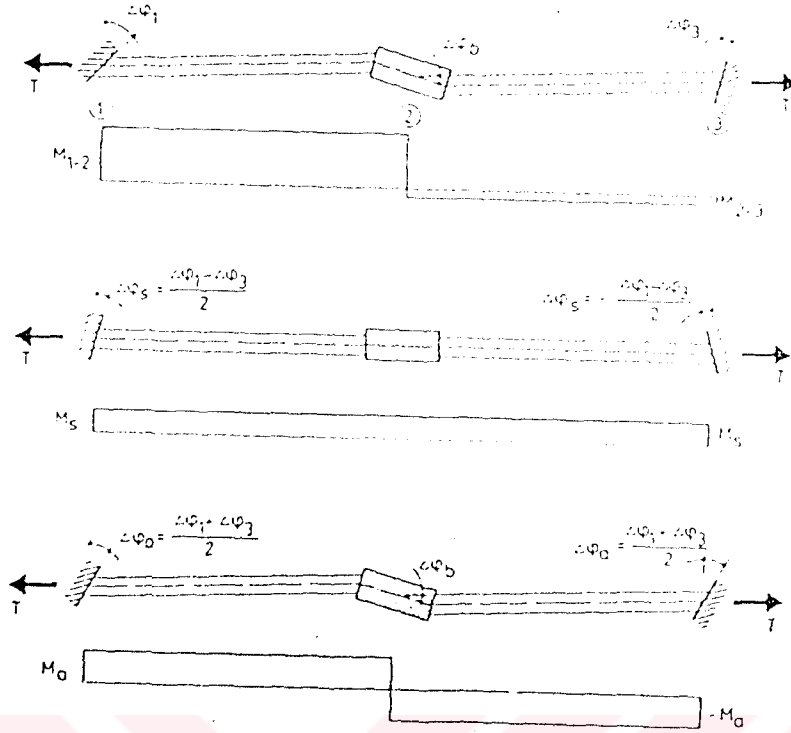
ve M_a ise:

$$M_a = \frac{2EJ_c T \lambda_{be}}{2EJ_c + T \lambda_{be} c_b} \Delta\varphi_a \quad (2.87)$$

M_a , kablo gerilmesi T 'nin fonksiyonudur (M_s ise T 'den bağımsızdır).

Merkezi bantlı kablonun genel durumunda bir uçta $\Delta\varphi_1$ ve diğer ucunda $\Delta\varphi_3$ açısai değişimlerine maruz kaldığı görülür. Simetrik ve asimetrik durum altında iki kısımda incelenirse açısai dönmeler (Şekil 2.70) şöyle olur:

$$\Delta\varphi_s = \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_3}{2} \quad \text{ve} \quad \Delta\varphi_a = \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_3}{2}$$



Şekil 2.70 Mesnetlerin $\Delta\varphi_1$ ve $\Delta\varphi_3$ açısıl dönmelerine maruz kalan merkezi kablo bandına sahip kablo.

Kablo bandındaki $\Delta\varphi_b$ açısıl değişim yalnızca asimetrik durumda hesaba katılır:

$$\Delta\varphi_b = \frac{2EJ_c}{2EJ_c + T\lambda_{be}c_b} \left(\frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_3}{2} \right) \quad (2.88)$$

Kabloların eğilme momentleri (2.83) ve (2.87) denklemlerinin birleştirilmesi ile aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$\begin{aligned} M_{1-2} &= \frac{EJ_c}{c_b} \left(\frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_3}{2} \right) + \frac{2EJ_c T\lambda_{be}}{2EJ_c + T\lambda_{be}c_b} \left(\frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_3}{2} \right) \\ &= \left(\frac{EJ_c T\lambda_{be}}{2EJ_c + T\lambda_{be}c_b} + \frac{EJ_c}{2c_b} \right) \Delta\varphi_1 + \left(\frac{EJ_c T\lambda_{be}}{2EJ_c + T\lambda_{be}c_b} - \frac{EJ_c}{2c_b} \right) \Delta\varphi_3 \end{aligned} \quad (2.89)$$

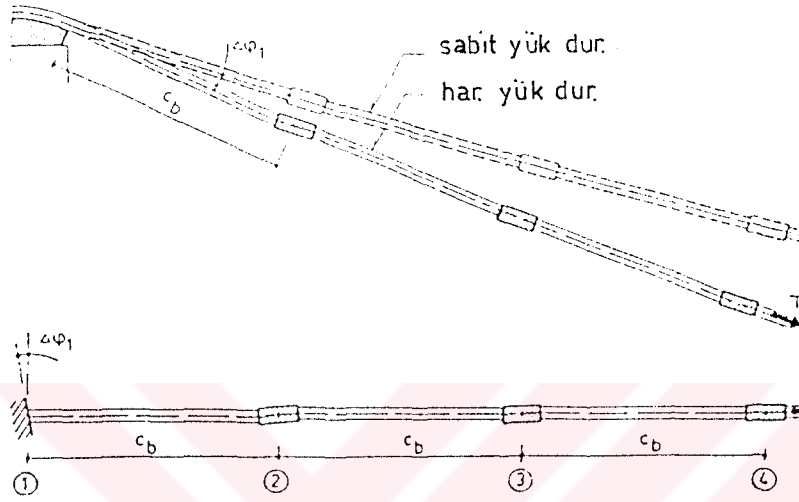
$$\begin{aligned} M_{2-3} &= \frac{EJ_c}{c_b} \left(\frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_3}{2} \right) - \frac{2EJ_c T\lambda_{be}}{2EJ_c + T\lambda_{be}c_b} \left(\frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_3}{2} \right) \\ &= \left(-\frac{EJ_c T\lambda_{be}}{2EJ_c + T\lambda_{be}c_b} + \frac{EJ_c}{2c_b} \right) \Delta\varphi_1 - \left(\frac{EJ_c T\lambda_{be}}{2EJ_c + T\lambda_{be}c_b} + \frac{EJ_c}{2c_b} \right) \Delta\varphi_3 \end{aligned} \quad (2.90)$$

M_{1-2} ve M_{2-3} momentleri Şekil 2.68'deki idealize edilmiş konumla, yalnız basit kablo bandı etkisini içine alacak şekilde hesaplanmıştır. Böylece kablo bandının dönmesinden dolayı

kablodaki toplam gerilme için denklem (2.78) veya (2.79)'dan hesaplanacak bölgesel kablo eğilmesinin de eklenmesi gerekiyor.

Asma köprüdeki ana kablonun maksimum eğilmesi, en büyük açısal değişimin olduğu kule bölgesidir.

Şekil 2.71'deki üstteki durum sabit yük konumundan hareketli yük konumuna geçişte ana kablodaki eğilmeyi gösterir.



Şekil 2.71 Hareketli yük altında bozulan asma köprü ana kablosu. Altta ise, uçtaki $\Delta\varphi_1$ açısal dönmelerinin ana kablo üzerindeki idealize edilmiş hali görülmüyor.

Bantlarla sıralanmış büyük açıklıklı köprülerin hesabında aşağıdaki idealize edilmiş şartlar esas alınır kabul edilemeyecek hatalar bulunmaz:

- (1) Kablo başlangıç konumunda düz varsayılmıştır.
- (2) Tüm kablonun bozulması (distorsiyon) yerine, kablo ucundaki $\Delta\varphi_1$ dönmesi alınabilir.
- (3) Bantların konumu eşit uzaklıklı kabul edilmiştir.

Böylece gerçek durum Şekil 2.71'de üstteki konumda ifade edilmiştir, şeklin altındaki konumla ise idealize edilmiştir.

1-2-3 kablosuna göre ve (2.88) denklemini kullanarak (2) bandındaki dönme aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2E_c J_c}{2E_c J_c + T\lambda_{pe} c_b} \left(\frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_3}{2} \right) \quad (2.91)$$

Ek olarak aşağıdaki denklemide kullanırsak:

$$\frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_2} = \frac{\Delta\varphi_2}{\Delta\varphi_3} \quad (2.92)$$

$\Delta\varphi_2$ için çıkarılan ifade şu hali alır:

$$\Delta\varphi_2 = \left\{ 1 + \frac{T\lambda_{be}c_b}{2EJ_c} - \sqrt{\left[\left(1 + \frac{T\lambda_{be}c_b}{2EJ_c} \right)^2 - 1 \right]} \right\} \Delta\varphi_1 \quad (2.93)$$

Kablo eyerinin başlangıcında hesaplanan M_{1-2} momenti şöyledir:

$$M_{1-2} = [EJ_c/c_b](\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \quad (2.94)$$

Denklem (2.93) ile bulunan $\Delta\varphi_2$ eklenirse son durum şöyle olur:

$$M_{1-2} = \left[\sqrt{\left(\frac{1}{4} T^2 \lambda_{be}^2 + EJ_c T \frac{\lambda_{be}}{c_b} \right)} - \frac{1}{2} T \lambda_{be} \right] \Delta\varphi_1 \quad (2.95)$$

(2) ve (3) numaralı kablo bantları arasında hesaplanan M_{2-3} momenti şöyledir:

$$M_{2-3} = \frac{\Delta\varphi_2}{\Delta\varphi_1} M_{1-2} \quad (2.96)$$

(2) numaralı kablo bandındaki ΔM_2 moment değişimi ise:

$$\Delta M_2 = M_{1-2} - M_{2-3} = (1 - \Delta\varphi_2/\Delta\varphi_1) M_{1-2} \quad (2.97)$$

Aşağıda gösterilenler, asma köprü ana kablosunda eğilme gerilmesi ve momente neden olan gerçekçi değerlerdir:

$$\lambda_b = 1.50 \text{ m.} \quad d_c = 0.75 \text{ m.} \quad c_b = 22 \text{ m.} \quad E = 205 \times 10^3 \text{ MN/m}^2 \quad \sigma_c = 720 \text{ MN/m}^2$$

Kablolarda %20 boşluk olduğu düşünülürse:

$$A = \pi/4(0.75)^2 \times 0.80 = 0.353 \text{ m}^2$$

$$J_c = \pi/64(0.75)^4 \times 0.80 = 12.40 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$T = A\sigma_c = 254 \text{ MN}$$

Etkili kablo bant uzunluğu λ_{be} , (2.83) denkleminde bulunur. Kablo bantlarındaki tellerin serbestçe kayabildikleri düşünülebilir ve d tel çapına (5 mm) eşit alınabilir:

$$\lambda_{be} = 1.50 + \frac{5 \times 10^{-3}}{2} \sqrt{\left(\frac{205 \times 10^3}{720} \right)} = 1.54 \text{ m}$$

$\Delta\varphi_1 = 15 \times 10^{-3}$ rad. ile denklem (2.93) kullanılırsa:

$\Delta\varphi_2 = 0.193\Delta\varphi_1 = 2.89 \times 10^{-3}$ rad. bulunur. Daha sonra (2.94) ve (2.96) denklemlerini kullanarak momentler hesaplanabilir:

$$M_{1-2} = 1.40 \text{ MNm} \quad M_{2-3} = 0.27 \text{ MNm} \quad M_{3-4} = 0.05 \text{ MNm}$$

Kablo semeri ve birinci kablo bandı arasındaki moment, kablo bandına doğrudan geçiş olduğundan sönümlenmiştir.

Kablo bandının etkisi yüzünden σ_{he} eğilme gerilmesi şöyle olur:

$$\sigma_{he} = \frac{M_{1-2} d_c}{2J_c} = 42 \text{ MN/m}^2$$

Denklem (2.79) ile bulunacak bölgesel eğilme gerilmesiyle beraber toplam gerilme hesaplanır.

Birinci kablo bandında $\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 = 2.89 \times 10^{-3}$ rad. olduğundan bölgesel eğilme gerilmesi aşağıdaki gibi olur:

$$\sigma_{bl} = 2\Delta\varphi_2 \sqrt{E\sigma_c} = 70 \text{ MN/m}^2$$

Kablo bandının dönmesinden oluşan toplam gerilme (σ_{hr}):

$$\sigma_{hr} = \sigma_{he} + \sigma_{bl} = 112 \text{ MN/m}^2$$

Kablo semerindeki bölgesel eğilme, genellikle distorsiyona maruz konumdaki eğri mesnetteki kabloya uygun bir semer uzunluğu tarafından kontrol edilir. Böylece semer yarıçapı r_s ile tellerdeki bölgesel eğilme gerilmesi şöyle hesaplanır:

$$\sigma_{bl} = E \frac{d_w}{2r_s}$$

Tipik değerler olan $d_w = 5$ mm ve $r_s = 6000$ mm için bulunan bölgesel gerilme (σ_{bl}) 85 MN/m² ve toplam gerilme (σ_{hr}) 127 MN/m²'dir.

Asma köprü ana kablolarındaki toplam eğilme gerilmesi, eğik kablonun eğilmesindeki aynı büyüklüğe sahiptir.

Kablo bandının etkisi yüzünden kablo eğilmesinin hesabında kabul edilen iki varsayım bulunur:

- (1) Teller, kablo bantlarının dış yüzeyinde serbest kaymaya sahiptir.
- (2) Teller arasındaki her kayma, kablo bantları içerisinde önlenmiştir.

Asma köprülerin ana kablolarının dış örtüsüyle teller arasındaki sürtünme kuvveti olduğundan (1). varsayımın kesin olarak geçerli olduğu söylenemez. 600 mm.'lik çapa sahip bir kablo, 0.23 MN/m²'lik kesme gerilmesine sahip 4 mm. çaplı tellerden oluşurlar. Ayrıca 1600 MN/m²'lik bir çekme gerilmesine sahip homojen malzemenin kesme gerilmesi yaklaşık olarak 920 MN/m² olduğunu söyleyebiliriz.

Eğer kablo bantlarının dış yüzeyinde kayma hareketi önlenmişse, etkili kablo bant uzunluğu λ_{he} , (2.83) denkleminden $d = 750$ mm alınarak hesaplanır:

$$\lambda_{be} = 1.50 + \frac{0.75}{2} \sqrt{\left(\frac{205 \times 10^3}{720} \right)} = 7.83m.$$

Kablo bantları arasındaki kaymanın serbest olduğu düşünölen varsayıma göre beş kat daha uzundur.

Bununla birlikte, λ_{be} değeri 1.54 m'den 7.83 m'ye yükseldiğı zaman, M_{2-3} momenti 0.27 MNm'den 0.09 MNm'ye düşmekte; M_{1-2} momenti 140 MNm'den 164 MNm'ye yükselmektedir.

Varsayım (2)'ye göre teller arasında kayma, kablo bandı üzerindeki kelepçe kuvveti ile yeter derecede önlenmiştir. Banttaki maksimum moment değışimi ise şöyle olur:

$$\max \Delta M = 1.5 \mu_c d_c N_{cl} \quad (2.97)$$

burada N_{cl} toplam kelepçe kuvveti, μ_c teller arasındaki sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısı (μ_c) 0.25'e eşit kabul edildiğinde, bant yakınındaki kablo yanal genişlemesi üzerinde kesin etkiye sahiptir. $\Delta M_2 = 1.40 - 0.27 = 1.13$ MNm ve $\mu_c = 0.25$ için bulunan kelepçe kuvveti (N_{cl}) 4.02 MN olur.

Bu kelepçe kuvveti, askı kuvveti hareketi altındaki kablo bandının önlenen kaymasıdır ve varsayım (2)'deki ifade yerine getirilmiştir. Eğer kelepçe kuvveti, moment değışimi yüzünden telde oluşan kaymadan küçük olursa hesaplama, $\Delta \varphi_1$ ve ΔM_2 arasındaki lineer ilişki varsayımı ile iki adımda olur. İlave momentler, kablo eyerinden (No1) ikinci kablo bandı (No2) boyunca sabit kalır.

3. BÖLÜM: KABLO SİSTEMLERİ

3.1. Kablo Sistemlerine Genel Bakış

Kablolu köprüler için kablo sisteminin seçiminde önemli etken, farklı kablo sistemlerinin davranış durumlarıdır. Kablo çelik miktarı da kablo sisteminin seçiminde temel bir özelliktir.

Tek bir kablonun çelik miktarı $Q_{c,1}$; uzunluk l_c ve normal kuvvet N_c ise şöyle hesaplanır:

$$Q_{c,1} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} N_c l_c \quad (3.1)$$

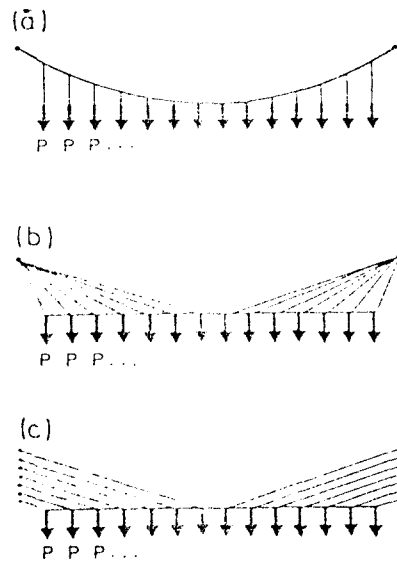
burada σ_c limit gerilme, γ_c kablo malzemesinin yoğunluğudur. n tane kablo elemanından oluşan birleşik kablo sistemi için toplam çelik miktarı da şöyle bulunur:

$$Q_c = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_c}{\sigma_c} N_{c,i} l_{c,i} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \sum_{i=1}^n N_{c,i} l_{c,i} \quad (3.2)$$

Bu toplamdaki normal kuvvet, her bir kablonun kritik yükleme durumu için maksimum normal kuvveti gösterir.

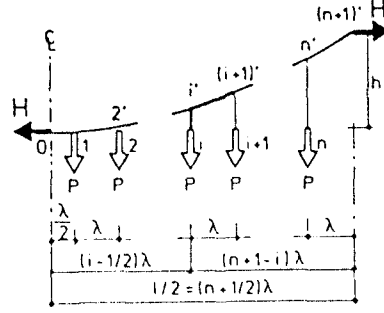
3.1.1. Kablo sistemleri

Kabul edilen üç temel kablo sistemi: (a) asma sistem; (b) fan sistem; ve (c) harp sistemidir. Şekil 3.1’de tek açıklıklı simetrik sistem olarak gösterilmektedir. Başlangıçta kablo sistemlerindeki bütün elemanların çekmeye çalıştığı kabul edilir. Eğik askılı sistemler olan (b) ve (c), yalnız eğik kabloları içermez. Bütün yük uygulama noktaları yatay bir kablo ile bağlanmıştır.



Şekil 3.1 Üç temel kablo sistemi olan bu sistemlerde tüm elemanlar çekme gerilmesi alır.

$2n$ tane P düzgün yayılı düşey yüklü asma köprülerde, askı çubukları arasındaki uzaklık $\lambda = l/(2n+1)$ olmak üzere çelik kablonun teorik miktarının hesabı, $i-i'$ askı çubukları ve $i'-(i+1)$ ana kablo elemanları miktarlarının toplamı ile elde edilir. Bunun için Şekil 3.2'deki yarı sistem kullanılır.



Şekil 3.2 Asma sistemin geometrisi ve terimlendirmesi.

Teorik kablo çelik miktarının (Q_{cs}) hesabı için kullanılacak formül şöyledir:

$$Q_{cs} = 2 \frac{\gamma_c}{\sigma_c} P \left[\frac{1}{4} n(n+1) \frac{\lambda^2}{h} + \sum_{i=1}^n \frac{i(i-1)}{n(n+1)} h + \sum_{i=1}^n \frac{n(n+1)}{2h} \left(\lambda^2 + \frac{4h^2}{n^2(n+1)^2} i^2 \right) \right] \quad (3.3)$$

burada birinci terim 0-1 kablosunun miktarını, ikinci terim askı çubuklarının miktarını ($i-i'$ nün toplamı) ve üçüncü terimde 1-($n+1$) ana kablo miktarını ($i'-(i+1)$ nün toplamı) gösterir.

Q_{cs} için aşağıdaki ifade de kullanılabilir:

$$Q_{cs} = 2nP \left(h + (n+1)(2n+1) \frac{\lambda^2}{4h} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.4)$$

veya $\lambda = l/(2n+1)$ yerine yazılırsa:

$$Q_{cs} = 2nP \left(h + \frac{n+1}{2n+1} \frac{l^2}{4h} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.5)$$

Çok fazla askı çubuklu sistemlerde Q_{cs} 'in asimptotik değeri kullanılır ($n \rightarrow \infty$ için):

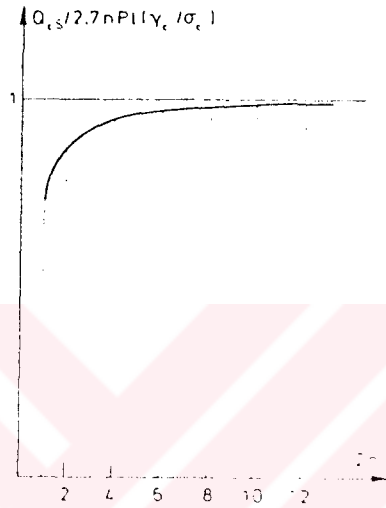
$$Q_{cs} = pl \left(h + \frac{l^2}{8h} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.6)$$

burada $p(=P/\lambda)$ birim uzunluğa gelen yüküdür.

Denklem (3.5)'de $P = p\lambda = pl/(2n+1)$ yazılarak, denklem (3.5)'deki Q_{cs} ve denklem (3.6)'daki Q_{cs} arasında kablo çelik miktarı değişimini veren bir q_{cs} oranı belirlenir:

$$q_{cs} = \frac{\frac{n}{2n+1} h + \frac{n(n+1)}{(2n+1)^2} \frac{l^2}{4h}}{h + \frac{l^2}{8h}} \quad (3.7)$$

Asma sistemde $h/l = 0.10$ için q_{cs} 'in değişimini gösteren grafik Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Bu grafikten değişimin – askı çubuklarına bağlı olarak – çok yavaş olduğu ve 10 askı çubuğu için (3.5) ve (3.6) denklemleri arasındaki Q_{cs} farkının %1.50'nin altında kaldığı görülmektedir. Pratik uygulamalarda ise asimptotik değer uygundur.

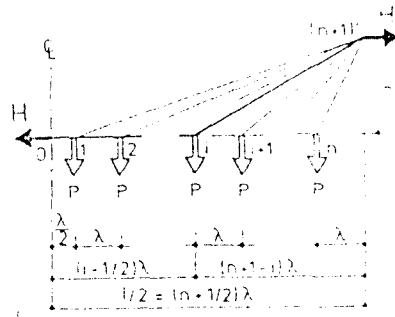


Şekil 3.3 Askı çubuklarının, $h/l = 0.10$ olan bir asma sistemde kablo çelik miktarı Q_{cs} üzerindeki etkisi ($2n$ askı çubuklarının sayısıdır).

Fan sistem için teorik miktar Q_{cf} şöyle hesaplanır (Şekil 3.4):

$$Q_{cf} = 2 \frac{\gamma_c}{\sigma_c} P \left(\sum_{i=1}^n (n-i+1)(i-1/2) \frac{\lambda^2}{h} + \sum_{i=1}^n \left[(n-i+1)^2 \lambda^2 + h^2 \right] \frac{1}{h} \right) \quad (3.8)$$

birinci terim 0 - i yatay kablo elemanlarının toplamı ve ikinci terimde $i - (n+1)$ eğik elemanların toplamıdır.



Şekil 3.4 Fan sistemin geometrisi ve terimlendirmesi.

Q_{cl} için aşağıdaki ifade de kullanılabilir:

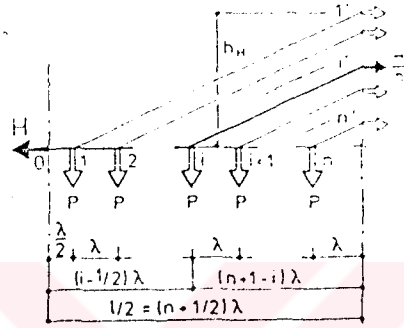
$$Q_{cl} = 2nP \left(h + (n+1)(2n+1) \frac{\lambda^2}{4h} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.9)$$

bu ifade asma sistemdeki ile aynıdır.

Şekil 3.5'deki harp sistemde teorik çelik miktarı Q_{cl} için kullanılacak ifade:

$$Q_{cl} = 2nP \left(\frac{n+1}{2n} h_H + n(n+1/2) \frac{\lambda^2}{h_H} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.10)$$

burada h_H harp sistemin yüksekliğidir.



Şekil 3.5 Harp sistemin geometrisi ve terimlendirmesi.

Harp sistemin yatay kuvveti H_H , yatay kablo parçalarının toplamından bulunur:

$$H_H = nP \frac{n\lambda}{h_H} = n^2 P \frac{\lambda}{h_H} \quad (3.11)$$

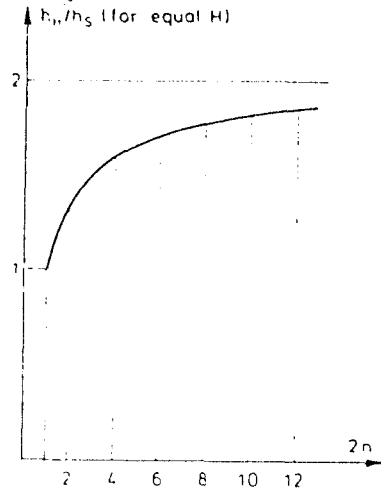
Asma sistemdeki H_S yatay kuvvetin hesabı ise:

$$H_S = \frac{n(n+1)}{2} P \frac{\lambda}{h_S} \quad (3.12)$$

Eşit yatay kuvvetteki asma ve harp sistem arasındaki h_H/h_S oranı şöyledir:

$$\frac{h_H}{h_S} = \frac{2n}{n+1} \quad (3.13)$$

Şekil 3.6'da $2n$ yükleme noktasına sahip sistemdeki h_H/h_S (aynı H yatay kuvveti için) oranının değişimi gösterilmektedir. Yükleme noktası arttıkça h_H/h_S oranı da asimptotik olarak 2'ye yaklaşmaktadır. Çok kablolu sistemlerde aynı yatay kuvvete sahip harp sistemin yüksekliği, yaklaşık olarak asma sistemin yüksekliğinin iki katıdır.



Şekil 3.6 Eşit yatay kuvvete sahip asma sistem yüksekliği h_S ve harp sistem yüksekliği h_H arasındaki oranın değişimi ($2n$, yükleme noktası sayısı = askı çubuklarının sayısı).

$h_H = 2nh_S/(n+1)$ değeri (4.10) denkleminde yerine yazılırsa harp sistem için kablo miktarı aşağıdaki gibidir:

$$Q_{cl} = 2nP \left(h_S + (n+1)(2n+1) \frac{\lambda^2}{4h_S} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.14)$$

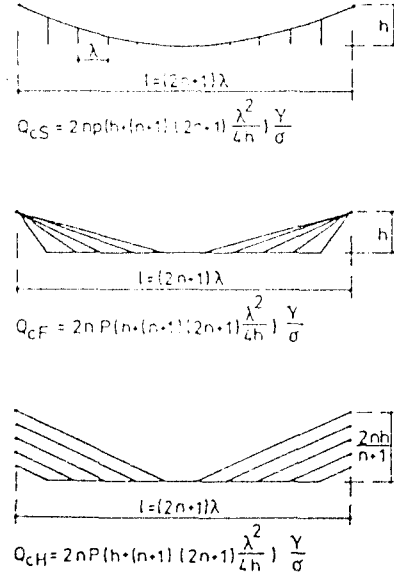
Aynı şekilde asma sistem içinde kablo miktarı bulunabilir. Bu iki denklem göstermektedir ki, aynı yatay kuvvete sahip asma sistem ve harp sistem için teorik çelik kablo miktarı aynıdır.

Şekil 3.7’de aynı yatay kuvvete sahip üç basit kablo sistemi gösterilmiştir. Asma sistem ve fan sistemin yükseklikleri eşit, harp sistemin yüksekliği ise önceden açıklandığı gibi daha fazladır. Üç kablo sistemi içinde teorik kablo çeliği miktarı aynıdır. Bu eşitlik için şu değişmez teoremi yazabiliriz: ‘Üniform yüke maruz kablo sistemlerinde (tüm kablo elemanları çekmeye çalışır) asma sistem, fan sistem ve harp sistem için aynı yatay kuvvette teorik kablo çeliği miktarı aynıdır’.

Bu teorem kablo sistemlerinin özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir halkadır. Bununla beraber, bu teorem eğik askılı köprülerin uygulamalarında kullanılamaz. Çünkü yük uygulama noktalarında yatay kablo elemanları yerine rijitlik kirişi kullanılmaktadır ve kablo çeliği miktarı yalnızca eğik kabloları içerir.

3.1.2. Kablo çelik miktarı karşılaştırması

Fan sistemi için bulunan teorik kablo çelik miktarı Q_{cFs} formülündeki ikinci terim eğik kabloların toplamını göstermektedir. Bu formül aşağıdaki gibi yazılabilir:



Şekil 3.7 Aynı yatay kuvvetteki üç basit kablo sistemi için teorik kablo çeliği miktarı.

$$Q_{cFs} = 2nP \left(h_F + \frac{1}{6} (n+1)(2n+1) \frac{\lambda^2}{h_F} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.15)$$

Modern çok kablolu sistemlerde eğik kabloların sayısı arttığından, $n \rightarrow \infty$ için asimptotik değer kullanılır:

$$Q_{cFs} = pl \left(h_F + \frac{l^2}{12h_F} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.16)$$

Aynı şekilde harp sistem için eğik kablolardaki toplam kablo çelik miktarı Q_{cHs} :

$$Q_{cHs} = 2nP \left(\frac{n+1}{2n} h_H + \frac{n(n+1)}{2} \frac{\lambda^2}{h_H} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.17)$$

eğer asimptotik değer kullanılırsa:

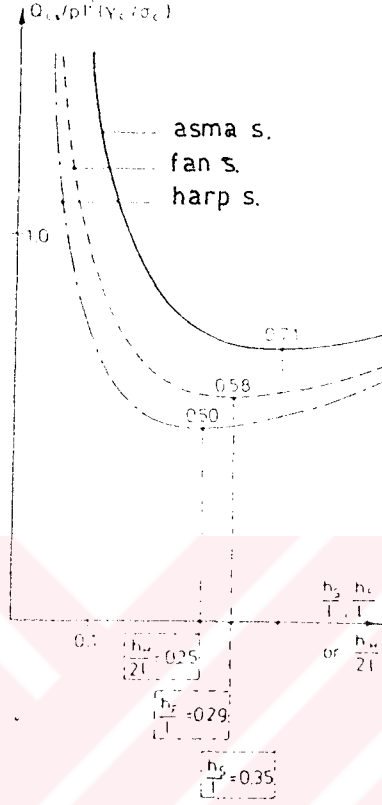
$$Q_{cHs} = pl \left(\frac{h_H}{2} + \frac{l^2}{8h_H} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.18)$$

Asma sistem için rijitlik kirişi hiçbir kablo elemanı yerine kullanılamaz ve (3.6) denkleminde bulunan kablo çelik miktarı aynen aşağıdaki gibi geçerlidir:

$$Q_{cS} = pl \left(h_S + \frac{l^2}{8h_S} \right) \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \quad (3.19)$$

Üç basit kablo sistemi için kablo çelik miktarının değişimi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Harp sistem için kablo çelik miktarı minimum, asma sistem için ise maksimum değere sahiptir. Minimum kablo çelik miktarları şekle göre şöyledir:

$h_s/l = 0.35$	asma sistem için
$h_f/l = 0.29$	fan sistem için
$h_{lf}/l = 0.50$ ($h_{lf}/2l = 0.25$)	harp sistem için



Şekil 3.8 Kule yüksekliğiyle kablo çelik miktarının değişimi.

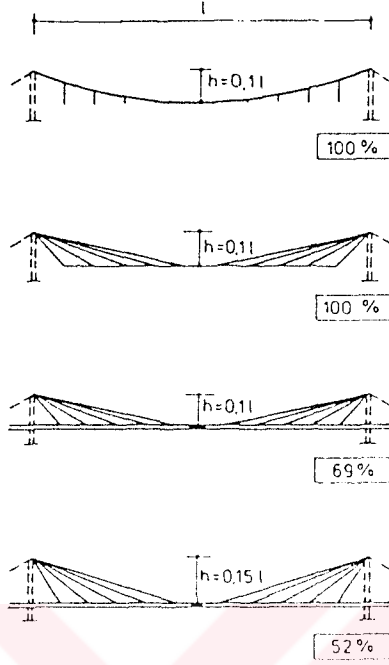
Bugünkü yapıların hesabında bulunan h/l değerleri, grafikteki h/l değerlerinden oldukça küçüktür. Asma sistemde, 0.10 civarındaki h/l değeri için rijitlik gereksinimi ihtiyacı oluşmaktadır.

Fan sistemin tipik durumu Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Aynı yükseklikte ve tüm elemanları çekmeye çalıştığı durumdaki asma sistem, fan sisteme dönüştürülürse kablo çelik miktarı aynı kalmaktadır. Fakat yatay kablo elemanlarının yerine rijitlik kirişi kullanılırsa çelik miktarı %31 azalmaktadır. Kule yüksekliği artırılır ve h/l değeri 0.15'e yükselirse çelik miktarı da %48 azalmaktadır. Bu sonuçlar bir açıklıklı basit kablo sistemleri için çıkarılmıştır.

3.1.3. Kablo sisteminin stabilitesi

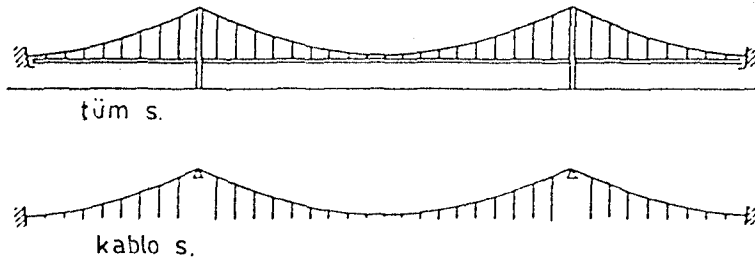
Hareketli yük etkisindeki bir kablolu köprünün rijitlik özellikleri incelendiğinde, ayrı ayrı kablo sistemi tarafından tercih edilen rijitliğin değerlendirmesi daha avantajlı olmaktadır.

Bu değerlendirme altında kablo sisteminin tanımlanması, geniş bir şekilde bu konuda incelenecektir.



Şekil 3.9 Kule yüksekliğini artırarak ve yatay kablolar yerine rijitlik kirişini kullanarak fan sistemin kablo çelik miktarındaki tasarruf.

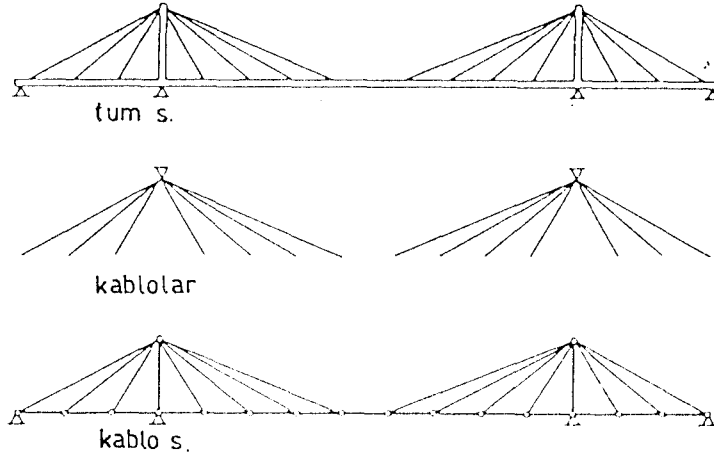
Şekil 3.10'da zemine ankrajlı asma köprü kablo sistemi gösterilmiştir. Bu sistemde yapı elemanları, ana kablo ve askılardan oluşmaktadır. Eğik askılı köprüde benzer tanımlama yapılamaz. Çünkü eğik kablolardan oluşan sistemde, düşey yöndeki ana yüke mukavemet gösteremez.



Şekil 3.10 Bir asma köprünün kablo sistemi (ana kablo + askı çubukları).

Kablo sistemi yalnızca kablolarla tarif edilemez. Sistemde kabloların ankraj noktalarında düşey ve yatay kuvvetlere karşı koyan rijitlik kirişi ve kuleleri de dikkate almak gerekir.

Bu tanımlama ile eğik askılı köprülerin kablo sistemi Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Kuleler ve rijitlik kirişinin ara kesitinde ve tüm kablo ankraj noktaları mafsallı olarak düşünülür. Rijitlik kirişi ve kulelerin karşıladığı normal kuvvet kablo sistemindedir.



Şekil 3.11 Bir eğik askılı köprünün kablo sistemi (kuleler ve rijitlik kirişinin normal kuvvet geçiş kısımları).

Kablolu köprülerde kablo sistemlerini üç gruba ayırabiliriz:

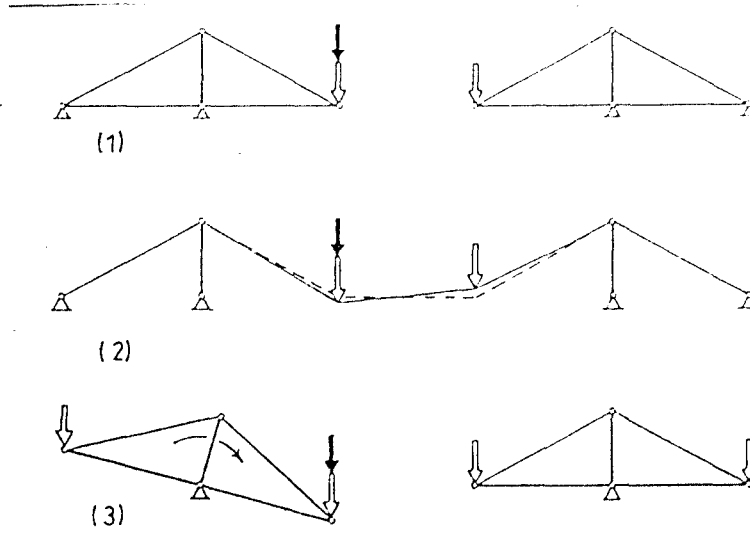
- (1) Birinci derece stabil kablo sistemi. Bu sistem dengesinde, düğüm noktalarında yerdeğiştirme olmadığı varsayımı yapılır.
- (2) İkinci derece stabil kablo sistemi. Bu sistem dengesinde, dış yükün etki ettiği düğüm noktası altında yerdeğiştirme olur.
- (3) Stabil olmayan kablo sistemi. Bu sistemde, kablo sistemi dengede bulunmamaktadır.

Kablo sistemleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

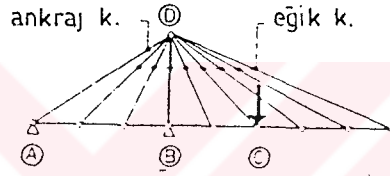
Kablolu köprülerde, kablo sistemleri arasında kullanılan fan şekilli sistem Şekil 3.13’de gösterilmiştir. Bu örnekte sistem, birinci derece stabil sistemdir. ABCD kısmi sistemi basit üçgen sistemlere ayrılmıştır ve iki mesnet noktası bulunmaktadır.

A-D kablosu, kısmi stabil sistemin bir parçasıdır ve ankraj kablosu olarak boyutlandırılır. Diğer kablolar ise eğik kablolar olarak adlandırılır.

Fan şekilli stabil sistemlerde, A-D ankraj kablosunun her yükleme durumunda çekmeye çalışması istendiğinden çok büyük uzamalara maruz kalır. AB yan açıklığı boyunca hareketli yüke maruz olursa ankraj kablosundaki çekme azalır. Tüm boyutlar hareketli yük şiddetine riayet edilmeden seçilirse, ankraj kablosu tam bir serbestlik içinde çekmeye çalışır ve bu durumda kablo sistemi stabil olmayan (labil) hale gelir.



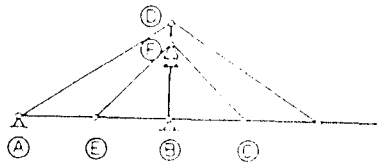
Şekil 3.12 Birinci derece stabil, ikinci derece stabil ve stabil olmayan kablo sistemleri.



Şekil 3.13 Fan sistem (birinci derece stabil).

Böylece ankraj kablolu fan şekilli kablo sistemi, ana açıklıktaki hareketli yükün etkisinden ötürü birinci derece stabil olur ve yan açıklıkta ise bu etkinin sayesinde bir sınır kuvvet oluşur. Yan açıklıkta bu yüklemenin üstündeki sınır kuvvet, fan şekilli kablo sistemini labil duruma getirir.

Fan şekilli kablo sisteminin stabilitesi, eğik kabloların kule tepesinde sabitlenmesine bağlıdır, her bir kablonun yatay kuvvet bileşeni de ankraj kablosuna aktarılır. Eğik kabloların bir kısmı kule boyunca hareketli mesnetlerle sabitlenmiş olsaydı sistem labil olacaktı. Bu durumda ki Şekil 3.14’de görülen EFCB kısmi sistemi de Şekil 3.12(c)’de ki sisteme uymaktadır.



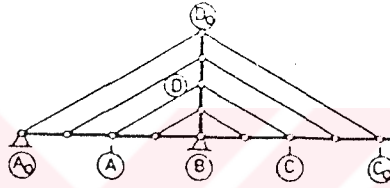
Şekil 3.14 Kule ve eğik kablolar arasında hareketli mesnetlere sahip fan sistem.

Şekil 3.15’de görülen geleneksel asma köprü kablo sistemi, ikinci derece stabil sisteme eşdeğerdir. Her noktadaki düşey yük ana kablodaki çekmeyi artırır; ama asma sistem her yükleme için ikinci derece stabil durumda kalır.



Şekil 3.15 Zemine ankrajlı asma sistem (ikinci derece stabil).

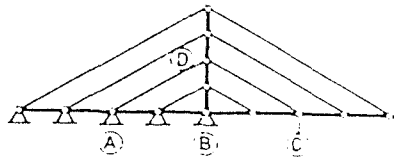
Şekil 3.16’da labil sisteme örnek olarak harp şekilli sistem gösterilmiştir. ABCD kısmi sistemi Şekil 3.12(c)’de ki basit sisteme uymaktadır. Bunun üstündeki $A_0BC_0D_0$ kısmi sistemi stabildir ve Şekil 3.12(a)’da ki basit sisteme benzemektedir.



Şekil 3.16 Harp sistem (stabil olmayan -labil- sistem).

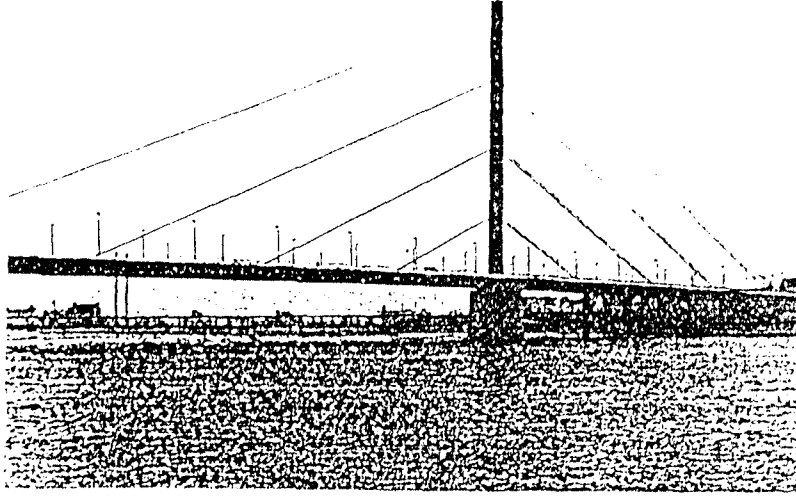
Harp şekilli sistem, oynak kablo sistemini içermez, ama tüm köprü’nün yapı sistemi ise oynaktır. Çünkü rijitlik kirişinin eğilme rijitliği ve kulelerin stabiliteye etkisi yetersiz kalmaktadır.

Harp şekilli kablo sisteminin stabilitesizlik nedeni, bu sistemin dörtgenlerden meydana gelmesidir. Yan açıklık boyunca ara mesnetler eklenerek bu sistemin stabilitesi sağlanabilir. Şekil 3.17’de görüldüğü üzere her kısmi sistem Şekil 3.12(a)’da ki basit sisteme benzemektedir. Tüm kablo sistemi birinci derece stabil sisteme dönüşmektedir.



Şekil 3.17 Yan açıklıkta ara mesnetlere sahip harp sistem.

Bir çok büyük harp şekilli kablo sisteme sahip köprülerde, yan açıklıkta ara mesnetler kullanılmıştır. Şekil 3.18’de ki Oberkasseler Köprüsü örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 3.18 Düsseldorf'da ki Oberkasseler köprüsü (yan açıklıkta ara mesnetleri bulunan harp sistem).

Tanımlanmaya çalışılan eğik kablolu köprüler, birinci derece stabil veya labil kablo sistemleridir. Sık sık küçük değişikliklerle; mesnetleri değiştirerek veya ekleyerek sistem labil halden birinci derece stabil hale getirilebilir.

Şekil 3.19'da fan şekilli kablo sistemlere sahip eğik askılı köprülerin çözümleri görülmektedir. Bütün köprü sistemleri simetrik açıklıklara sahip, kuleler ise açıklığın ortasında bulunmaktadır.

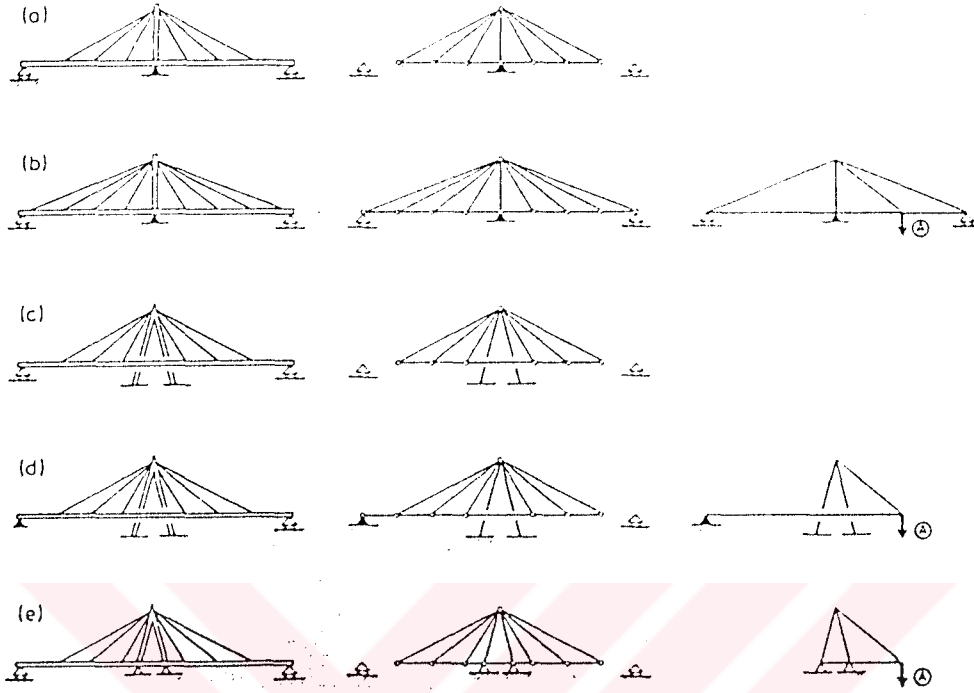
Stabil olmayan -labil- kablo sistemi (a)'da gösterilmiştir. Bu gösterimde fan sistemin tek başına stabilizeyi sağlaması mümkün değildir. Kule tepesindeki yatay hareketi önlemek için ek bağlantıya ihtiyaç vardır. İki adet ankraj kablosu ile sistem, birinci derece stabil kablo sistemine dönüştürülmüş ve bu durum (b)'de gösterilmiştir.

(a) ve (b) durumlarını karşılaştırdığımız zaman, stabilitenin ankraj kablolarıyla sağlandığını söyleyebiliriz.

Sistem (c)'de kule tepesindeki sınırlanan yatay hareket, iki ayaklı A şekilli kule yapısıyla sağlanmıştır. Bununla beraber rijitlik kirişinin iki ucundaki hareketli mesnetler ile tüm kablo sisteminin dönmesi kule tepesinde oluşur. Sonuç olarak kule tepesi ve rijitlik kirişinin yatay yönde karşılıklı olarak hareketlerinin engellenmesi, kablo sistemini stabil hale getirmektedir.

Genellikle sistem (c)'nin bir kenarı hareketli yüke maruz kalırsa ikinci derece stabil sistemde dikkat edilmesi gerekir. Sistem yeteri kadar döndüğünde hareketli ve sabit yüke

maruz açıklıkta manivela kolu azalmakta, yalnız sabit yük durumundaki açıklıkta manivela kolu artmaktadır. Yerdeğiştirmeler labil sisteme göre daha fazla olmaktadır.

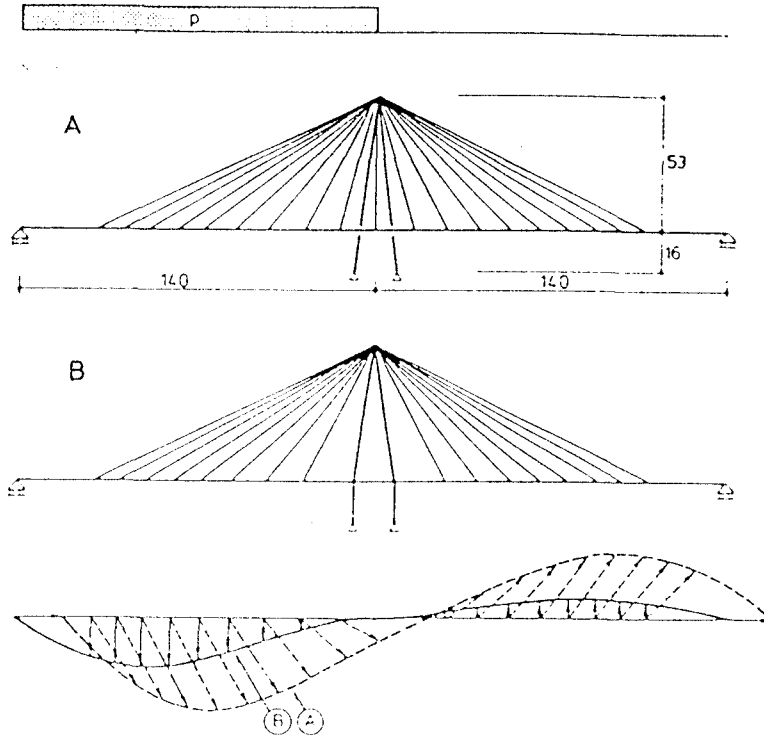


Şekil 3.19 Simetrik iki açıklığa sahip bir eğik askılı köprünün yapısal sistemleri.

Hareketli mesnetlerden birini sabit hale getirip, rijitlik kirişinin yatay hareketi engellenirse sistem (d)'yi elde edebiliriz. Bu sistem şimdi asimetric durumdadır, ayrıca sıcaklık değişmesinden dolayı oluşacak şekil değiştirmelerin yaratacağı rahatsızlık dikkate alınmalıdır. Düşey yükleme için birinci derece stabil kablo sistemi meydana gelmektedir.

Sistem (e)'de kule ayakları rijitlik kirişine mesnetlenmiştir. Rijitlik kirişi ve kule tepesinin karşılıklı hareketleri engellenmiştir. Kablo sistemi birinci derece stabil sistemdir. Sistem (e)'de yüklemeden dolayı yalnız düşey reaksiyonlar oluşurken, sistem (d)'de ise yatay reaksiyonlar oluşmaktadır.

Şekil 3.20'de sistem A ve sistem B olarak projelendirilen iki yapı mevcuttur. Her iki sistemde de kablo boyutları ve rijitlik kirişi kesitleri aynıdır. Sistem A'da ki kule ayakları doğrudan eğik kablolarla ilişkilidir ve rijitlik kirişinin, kulenin yatay ve düşey hareketini sınırlama şansı yoktur. Sistem B'de ise kule ayakları rijitlik kirişine mesnetlenmiştir ve karşılıklı yerdeğiştirmeler oluşmaz. Her iki sistemde de rijitlik kirişinin iki ucunda hareketli mesnetler vardır.



Şekil 3.20 İki farklı yapı sisteminin çökmeleri arasındaki karşılaştırma.

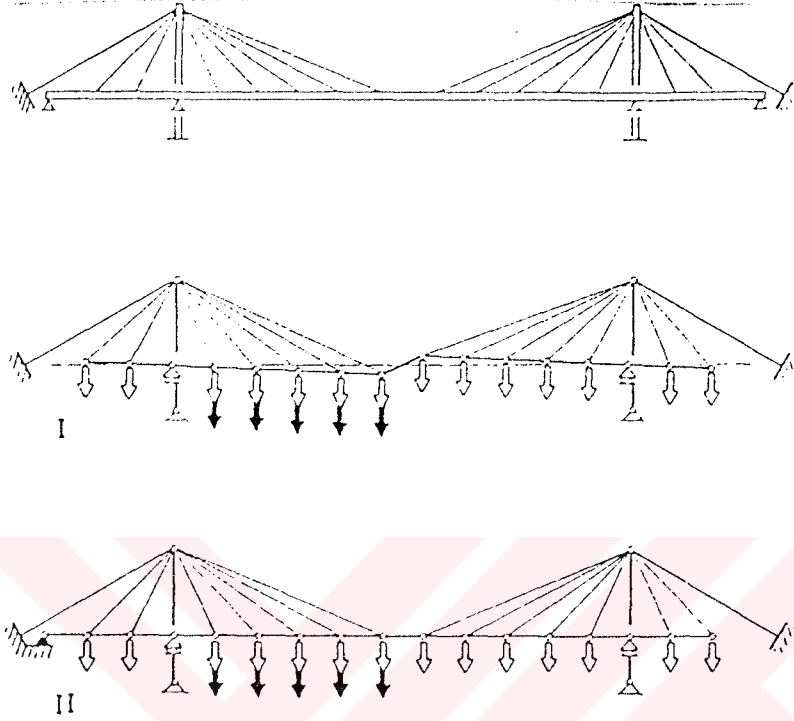
Simetrik yüklemde kule yapısının eğilmesi her iki sistemde de aynıdır; fakat asimetrik yüklemde önemli farklar olmaktadır.

Sistem A'da tüm sistemin stabilitesi, kirişin eğilme rijitliğine bağlıdır. Çünkü kablo sisteminin kendisi stabil değildir. Asimetrik yük altında rijitlik kirişinin boyuna hareketi yüksüz açıklığa doğru azalmaktadır. Ayrıca kirişin narin olması önemli eğilmelere sebep olmaktadır.

Sistem B'de rijitlik kirişi kule yapısının yatay hareketini önlemekte ve bu sayede rijitlik kirişinin eğilmesi sistem A'dan daha küçük olmaktadır. Sistem B'de rijitlik kirişinin eğilme momenti ve eğik kabloların gerilme bölgesi sistem A'dan küçük olmaktadır. Sistem B'nin kablo sistemi stabil olduğundan, hem rijitlik hem de yük kapasitesi bakımından avantajlı olduğu söylenebilir.

Önceki örneklerden bilindiği gibi ankraj kablolu sistemlerin kablo sistemi, birinci derece stabil veya stabil değildir. İkinci derece stabil kablo sistemleri genelde yüzeye ankrajlı durumda bulunur. Eğik askılı sistemde ankraj kablosu yüzeye ankrajlı olduğunda, stabilite derecesi rijitlik kirişinin mesnetlenme durumuna bağlıdır. Rijitlik kirişinin boyuna yöndeki hareketi serbest bırakılmışsa -yani kablo sistemi I-, kablo sistemi ikinci derece stabil olur. Asimetrik yük için oluşan denge durumu, kablo sistemi için aranan bir

yerdeğiştirmeye karşı gelir. Rijitlik kirişinin bir ucunda sabit mesnet olursa kablo sistemi Şekil 3.21’de görüldüğü gibi birinci derece stabil hale gelir ve kablo sistemi II olarak adlandırılır.



Şekil 3.21 Kısımlı zemine ankrajlı eğik askılı sistemler: I, ikinci derece stabil sistem; II, birinci derece stabil sistem.

Asimetrik yük durumunda birinci ve ikinci derece stabilite sistemleri için çökmeler arasında pek çok fark olduğu söylenebilir, ama simetrik durumda farklar önemsizdir.

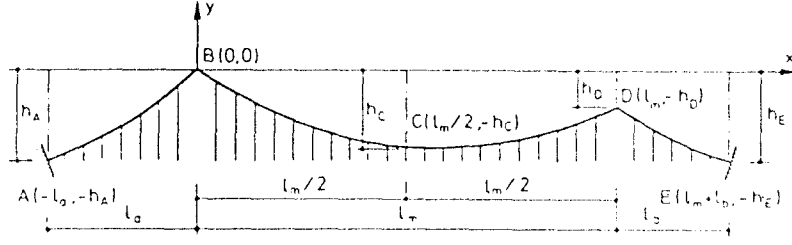
Özetle düşey yük durumlarında birinci derece stabil kablo sistemleri avantajlıdır diyebiliriz.

3.2. Asma Sistem

Zemine ankrajlı asma köprüde ana kablo, pek çok durumda ikisi ankraj bloklarında, ikisi de kulelerde olmak üzere dört noktada mesnetlenir.

Kulelerin tepesindeki mesnet noktaları çoğunlukla boyuna doğrultuda hareketli mesnetlerle en iyi şekilde tanımlanmalarına karşılık (narin kule ayaklarının yatay esnekliği nedeniyle), ankraj bloklarındaki mesnet noktalarının genellikle tamamen sabit olduğu kabul edilir.

Böylece asma köprü kablo sisteminin genel düzenlemesi Şekil 3.22’de görüldüğü gibi olur.



Şekil 3.22 Üç açıklıklı asma köprü kablo sistemi.

3.2.1. Sabit yük geometrisi

Sabit yük koşullarında kablo sisteminin geometrisi, rijitlik kirişinin ve kulelerin moment taşımadığı yani kablo eğrisinin toplam sabit yükün funiküler eğrisine benzediği varsayılarak belirlenir.

Böylece ana kablo geometrisi denklem (2.2)’ye bağlı olarak aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

$$\begin{aligned}
 y &= -\frac{M_a(x)}{H} + \frac{h_a}{l_a} x & -l_a < x < 0 \\
 y &= -\frac{M_m(x)}{H} - \frac{h_D}{l_m} x & 0 < x < l_m \\
 y &= -\frac{M_b(x)}{H} - \frac{h_D - h_E}{l_b} (x - l_m) - h_D & l_m < x < l_m + l_b
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

burada $M_a(x)$, $M_m(x)$ ve $M_b(x)$; sırasıyla ana kablo, askılar ve rijitlik kirişinin toplam sabit yükleri etkisindeki l_a , l_m ve l_b uzunluğuna sahip basit mesnetli kirişlerin eğilme momentleridir. Doğru olması için sabit yük, basit mesnetli kirişlere aynı ana kabloya uygulandığı şekilde uygulanmalıdır. Bu, rijitlik kirişi ve askıların sabit yüklerinin her bir kablo konumunda tekil kuvvetler olarak etkidiğini, ana kablo sabit yükünün ise yayılı yük olarak uygulanmasının gerektiğini belirtir. Bununla birlikte, çok yakın olarak yerleştirilmiş bir çok askı çubuklarına sahip asma köprülerde, önemli bir yanı sıra neden olmaksızın toplam sabit yükün yayılı yük olarak etkidiği varsayılabilir.

A, B, D ve E mesnet noktalarının sabitleştirilmesinden başka, köprünün genel geometrik koşulları çoğunlukla ana açıklıktaki C orta noktasının sabitleştirilmesini de zorunlu kılar.

Bu durumda yatay kuvvet H şu denklemle belirlenir:

$$H = \frac{M_m(l_m/2)}{h_c - h_D/2} \quad (3.21)$$

burada $M_m(l_m/2)$, ana açıklık ortasındaki eğilme momenti; $h_c - h_D/2$ ise açıklık ortasındaki kablo sehimidir. Sabit yük dağılımı bilindiğinde denklem (3.20) ve denklem (3.21) toplam kablo eğrisini tanımlarlar.

Bir çok durumda rijitlik kirişinin sabit yükü, köprünün boyuna doğrultusunda düzgün yayılı yük şeklindedir. Oysa kablo sisteminin birim uzunluğu için sabit yük ana açıklığın ortasında minimum, kulede maksimum değerde olmak üzere uygun bir değişim gösterir. Bu, kuleler yakınında askıların uzunluğunun artması ve ana kablonun daha fazla eğime sahip olması nedeniyledir. Bununla birlikte rijitlik kirişinin sabit yükü, kablo sisteminin sabit yükünden birkaç kat daha fazla olduğundan, sabit yük düzgün yayılı yüke çok yakındır.

3.2.2. Kablo boyutlarının öntasarımı

Bir asma köprü planlama işleminde, kablo boyutlarının öntasarım hesabını hızlı bir şekilde yapabilmek avantajlar sağlamaktadır.

Maksimum askı kuvvetinin öntasarım belirlemede, askı çubuğu yüklerinin askı aralıkları olan λ 'ya eşit miktarda rijitlik kirişi üzerinde yayılı olarak dağıldığı varsayımı esas alınır. Tekil kuvvetlerinde, d rijitlik kirişi yüksekliği olmak üzere, $30d$ uzunluğunda bir mesafede ve aynı büyüklükte üniform yayılı yük şeklinde etkidiği kabul edilir. Bundan sonraki varsayım tamamen yaklaşık bir nitelik taşımaktadır, fakat askı boyutlarının öntasarımında yeterlidir.

$30d > \lambda$ varsayılarak maksimum askı kuvveti T_h (Şekil 3.23) aşağıdaki gibi olur:

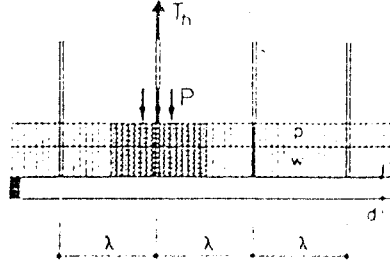
$$T_h = (w + p)\lambda + P \frac{\lambda}{30d} \quad (3.22)$$

ve askının enkesit alanı ise şöyle bulunur:

$$A_h = \frac{T_h}{\sigma_c} = \frac{(w + p + P/30d)\lambda}{\sigma_c} \quad (3.23)$$

burada σ_c kablo çeliğinin sınır (emniyet) gerilmesidir.

Ana açıklıktaki ana kablonun en büyük kuvveti T_m , rijitlik kirişinin sabit yükü ile yayılı hareketli yükün tüm açıklıkta düzgün olarak, tekil yükün ise açıklığın orta noktasında etkidiği varsayılarak bulunabilir. Öntasarım araştırmasında askıların sabit yükünün, toplam sabit yük içerisindeki payı önemsiz olduğundan genellikle ihmal edilirler.



Şekil 3.23 Maksimum askı kuvveti için yükleme durumu.

Öntasarımı daha da basitleştirmek için, w_c ana kablo sabit yükünün (kablo alanı A_m belirlenmedikçe bilinmez) yatay doğrultuda düzgün yayıldığı kabul edilir.

Kablo sisteminin sabit yüküyle ilgili basitleştirilen varsayımlar az da olsa güvensizdir; fakat bu sehim geometrisinin yerine sabit yük geometrisini kabul ederek büyük ölçüde dengelenir.

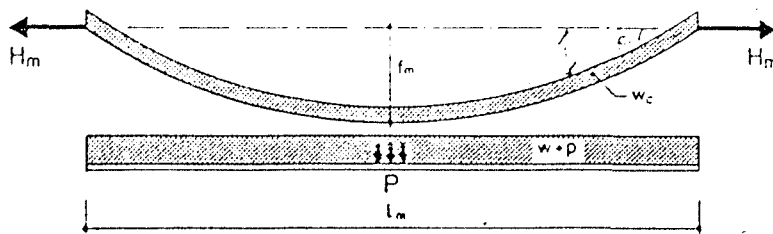
Şekil 3.24'te gösterildiği gibi bir ana kablo için maksimum yatay kuvvet H_m , aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$H_m = \frac{(w + p)l_m^2 + 2Pl_m}{8f_m} + \frac{w_c l_m^2}{8f_m} \quad (3.24)$$

ve kuledeki maksimum kablo kuvveti T_m ise şu şekildedir:

$$T_m = H_m \frac{\sqrt{(l_m^2 + 16f_m^2)}}{l_m} = [(w + p)l_m + 2P + w_c l_m] \frac{\sqrt{(l_m^2 + 16f_m^2)}}{8f_m} \quad (3.25)$$

Bu denklem, kablo eğrisinin ikinci dereceden bir parabol olduğunu kabul eden basitleştirici varsayıma dayanır.



Şekil 3.24 Maksimum ana kablo kuvveti için yükleme durumu.

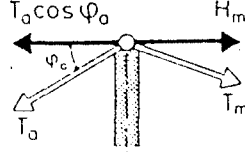
Denklem (3.25)'teki T_m 'nin yerine $A_m \sigma_c$, w_c 'nin yerine $A_m \gamma_c$ konularak kablo alanı A_m bulunabilir. Burada γ_c , kablo malzemesinin yoğunluğudur. Kablo alanı A_m :

$$A_m = \frac{[(w + p)l_m + 2P] \sqrt{(l_m^2 + 16f_m^2)}}{8\sigma_c f_m - \gamma_c l_m \sqrt{(l_m^2 + 16f_m^2)}} \quad (3.26)$$

Yan açıklık ana kablodaki maksimum normal kuvvet T_a , Şekil 3.25’de görüldüğü gibi kule tepesindeki yatay dengeden bulunur:

$$T_a = H_m / \cos \varphi_a \quad (3.27)$$

burada H_m , denklem (3.26)’daki $w_c = A_m \gamma_c$ eşitliği dikkate alınarak denklem (3.24)’te bulunan maksimum yatay kuvvettir.



Şekil 3.25 Kule tepesi yatay dengesi.

Böylece yan açıklık kablusunun öntasarım sonucu enkesit alanı A_a , aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$A_a = \frac{T_a}{\sigma_c} = \frac{H_m}{\sigma_c \cos \varphi_a} \quad (3.28)$$

3.2.3. Kablo çeliği miktarı

Şekil 3.26’da görüldüğü gibi rijitlik kirişinin ana açıklıktaki kısmı $w_m + p_m$ yayılı yükü, yan açıklıktaki kısmı ise $w_a + p_a$ yayılı yükü etkisinde olan üç açıklıklı simetrik bir asma köprünün kablo çeliği miktarı aşağıdaki işlemlerle hesap edilir.

Ana açıklık kablo eğrisi için denklem:

$$y = 4f_m \frac{x}{l_m} \left(\frac{x}{l_m} - 1 \right) \quad (3.29)$$

Yan açıklık kablo eğrisi için denklem:

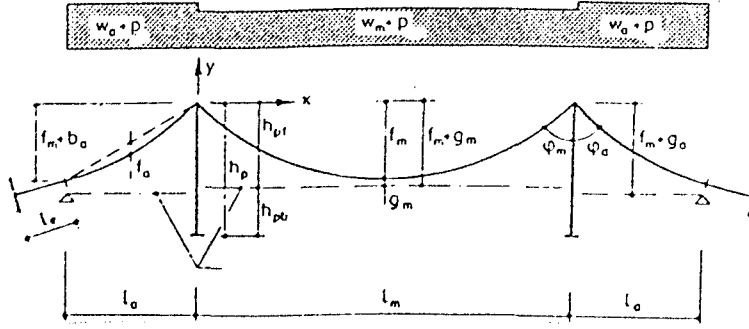
$$y = 4f_a \left(\frac{x}{l_a} \right)^2 + (4f_a + f_m + b_a) \frac{x}{l_a} \quad (3.30)$$

Ana açıklık askı çubuklarındaki kablo çeliği miktarı:

$$\begin{aligned} Q_{hm} &= \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \int_0^{l_m} (w_m + p_m) \left[f_m + g_m + 4f_m \frac{x}{l_m} \left(\frac{x}{l_m} - 1 \right) \right] dx \\ &= \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w_m + p_m) \left(g_m + \frac{f_m}{3} \right) l_m \end{aligned} \quad (3.31)$$

Ana açıklık kablolu kablo çeliği miktarı (bak. denklem (3.26)):

$$Q_{cm} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w_m + p_m) l_m^2 \frac{\sqrt{1 + 16 \left(\frac{f_m}{l_m} \right)^2}}{8 \frac{f_m}{l_m} - \frac{\gamma_c}{\sigma_c} l_m \sqrt{1 + 16 \left(\frac{f_m}{l_m} \right)^2}} \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f_m}{l_m} \right)^2 \right] \quad (3.32)$$



Şekil 3.26 Üç açıklıklı simetrik bir asma köprünün geometrik parametreleri.

Yan açıklıktaki kablo çeliği miktarını belirlemek için yatay kuvvet H (H_m) bilinmelidir. Ana açıklıkta kablo sabit yükünün düzgün yayıldığı varsayımı, yatay kuvvet H için dolaylı olarak aşağıdaki ifadeyi ortaya çıkarır:

$$H = \frac{(w_m + p_m) l_m^2 + Q_{cm} l_m}{8 f_m} \quad (3.33)$$

O zaman yan açıklık kablosunun sehimi f_a şöyle olur:

$$f_a = \frac{(w_a + p_a) l_a^2 + Q_{ca} l_a}{8 H} = \frac{(w_a + p_a) l_a + Q_{ca} l_a}{(w_m + p_m) l_m + Q_{cm} l_m} f_m$$

f_a 'nın kablo çeliği miktarı üzerinde etkisi genellikle az olduğundan, f_a için aşağıdaki yaklaşık ifade kullanılabilir:

$$f_a \cong \frac{w_a + p_a}{w_m + p_m} \left(\frac{l_a}{l_m} \right)^2 f_m \quad (3.34)$$

Her iki yan açıklık askı çubuklarındaki kablo çeliği miktarı da şöyledir:

$$\begin{aligned} Q_{ha} &= 2 \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \int_{l_a}^0 (w_a + p_a) \left[f_m + g_m + 4 f_a \left(\frac{x}{l_a} \right)^2 + (4 f_a + f_m + b_a) \frac{x}{l_a} \right] dx \\ &= \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w_a + p_a) \left(f_m - \frac{4}{3} f_a + 2 g_a - b_a \right) l_a \end{aligned} \quad (3.35)$$

Her iki yan açıklık kablosundaki kablo çeliği miktarı ise şöyledir:

$$Q_{ca} = 2 \frac{\gamma_c}{\sigma_c} H l_a \sqrt{\left[1 + \left(\frac{f_m}{l_a} + 4 \frac{f_a}{l_a} + \frac{b_a}{l_a} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f_a}{l_a} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{f_m + b_a}{l_a} \right)^2 + \frac{l_c}{l_a} \right]} \quad (3.36)$$

burada H denklem (3.33)'den, f_a ise denklem (3.34)'den bulunur.

3.2.4. Kuledeki çelik miktarı

Bir asma köprünün üst yapısını optimize ederken, rijitlik kirişinin birim uzunluğu için çelik miktarının sabit kalmasına ve bunun sonucu olarak sadece kablo sistemine uygulanacak w_a ve w_m sabit yüklerini etkilemesine karşılık, kulelerdeki çelik miktarındaki değişimin -kule yüksekliği boyunca bir değişim olabilir- gözönünde bulundurulması esastır.

Toplam çelik miktarı içinde kulelerin payının kesin olarak hesaplanması büyük ölçüde karmaşık bir iştir. Çünkü kulelerin gereksinim duyulan boyutları sadece kablodan gelen düzlem kuvvetlere bağlı olmayıp, üst yapının hemen hemen her parçasına etki ettiği gibi kulenin kendisine de etki eden rüzgar kuvvetlerine ve diğer yatay kuvvetlere de bağlıdır.

Optimizasyon işlemlerinde çelik miktarı içindeki kulelerin payı, kablo sisteminden gelen düşey kuvveti zemine aktarmada kullanılabilecek bir efektif gerilme σ_p değeri belirlemekle hesaba katılır. σ_p değerini belirlemek için, rüzgar yükü diğer düzlemsel olmayan yüklerin kulede oluşturduğu gerilmenin tahmini hesabını yapmak ve daha sonra bu gerilme değerini kulenin yapımında kullanılacak malzemenin emniyet gerilmesinden çıkarmak gerekir. Bu kule yüksekliğiyle çok az değişen bir σ_p değerine neden olacaktır; fakat optimizasyon işlemlerinde ortalama değere uygun bir sabit σ_p değerinin uygulanması yeterlidir.

Etkin bir şekilde planlanmış kule yapıları için σ_p değeri, kulede kullanılmış malzemenin basınç emniyet gerilmesinin %60 ve %80'i arasında olacaktır.

Şekil 3.27'de görülen kule için aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$N_p(\xi) + dN_p(\xi) = N_p(\xi) + \frac{\gamma_p}{\sigma_p} N_p(\xi) d\xi$$

$$N_p(\xi) = N_{p'} \exp\left(\frac{\gamma_p}{\sigma_p} \xi\right)$$

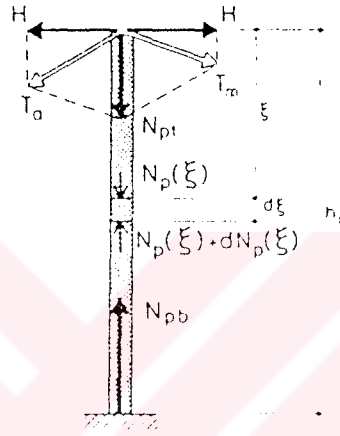
$$Q_p = N_{pb} - N_{pt} = N_{pt} \left[\exp \left(\frac{\gamma_p}{\sigma_p} h_p \right) - 1 \right] \quad (3.37)$$

burada

$$N_{pt} = H(\tan \varphi_a + \tan \varphi_m) = \frac{(w_m + p_m)l_m + Q_{cm}}{8} \left(\frac{f_m + 4f_a + b_a}{f_m} \frac{l_m}{f_m} + 4 \right)$$

böylece kuledeki çelik miktarını veren denklem (kule ayaklarının ağırlığı) şöyle olur:

$$Q_p = \frac{(w_m + p_m)l_m + Q_{cm}}{8} \left(\frac{f_m + 4f_a + b_a}{f_m} \frac{l_m}{l_a} + 4 \right) \left[\exp \left(\frac{\gamma_p}{\sigma_p} h_p \right) - 1 \right] \quad (3.38)$$



Şekil 3.27 Bir kule üzerindeki normal kuvvetlerin hareketi.

3.2.5. Kablo sistemi ve kulenin toplam maliyeti

Kablo sistemi ve kulelerin toplam maliyeti C_{cp} aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$C_{cp} = (Q_{cm} + Q_{ca} + Q_{hm} + Q_{ha})u_c + 2Q_p u_p \quad (3.39)$$

burada u_c yapılmış ve korunmuş kablo çeliğinin birim fiyatı; u_p kulelerde kullanılmış malzemenin birim fiyatıdır.

u_c ve u_p birim fiyatları, genellikle inşaat yöntemleri ve yapım işlemleriyle değişir. Ayrıca birim fiyatlar, kurulacak yapı elemanlarının konumuna bağlı olarak yapının bir parçasından diğer bir parçasına değişiklik gösterebilir. Böylece kulenin tepesine yerleştirilecek bir yapı elemanı birim fiyatının, kulenin alt kısmındaki bir elemanın birim fiyatından yüksek olabileceği anlaşılır.

Bununla birlikte, optimizasyon işlemlerinde ana boyutların son seçiminde genellikle tek başına bir yol gösterici olarak kullanılabildiğinden, u_c ve u_p birim fiyatlarının her biri - gerçekçi ortalama değerlere uygun şekilde- sabit değerler olarak belirlenebilir.

Bu birim fiyatlar arasındaki oranın önemi o kadar fazladır ki -optimizasyon işlemlerinde- mutlak değerler hakkında bilgiye gereksinim duyulmaz.

Sabit açıklık uzunluğuna sahip bir asma köprüde değişen ana parametre, ana açıklık kablosunun f_m sehimidir.

3.2.6. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yaklaşık maliyeti

Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün maliyet hesabını bulabilmek için, denklemlerde kullanılacak olan ve köprüye ait parametreleri şöyle sıralayabiliriz:

$$w \text{ (sabit yük)} = 79.20 \text{ kN/m}$$

$$w_a \text{ (yan açıklık sabit yükü)} = w_m \text{ (orta açıklık sabit yükü)} = w$$

$$p \text{ (hareketli yük)} = 40 \text{ kN/m}$$

$$p_a \text{ (yan açıklık har. yükü)} = p_m \text{ (orta açıklık har. yükü)} = p$$

$$P \text{ (tekil yük)} = 523 \text{ kN}$$

$$\lambda \text{ (askı halatları aralığı)} = 17.92 \text{ m}$$

$$d \text{ (kiriş yük.)} = 3.0 \text{ m.}$$

$$\sigma \text{ (kablo çeliği emn. ger.)} = 1180 \text{ N/mm}^2$$

$$w_c \text{ (ana kablo ölü yükü)} = 29.34 \text{ kN/m}$$

$$l_m \text{ (orta açıklık uzunluğu)} = 1090 \text{ m}$$

$$f_m \text{ (ana kablo sehim)} = 90.80 \text{ m}$$

$$\gamma_c \text{ (kablo çel. bir. ağırl.)} = 78.50 \text{ kN/m}^3$$

$$\varphi_a \text{ (yan açık. kabl. yatayla yaptığı açı)} = 26.56^\circ$$

$$g_m = g_a = b_a \text{ (orta ve yan açıklık kabloları ile kiriş arasındaki uzaklık)} = 3.0 \text{ m}$$

$$l_a \text{ (yan açıklık uzunluğu)} = 210 \text{ m}$$

$$l_e \text{ (yan açıklık kablosu ankraj boyu)} = 70 \text{ m}$$

$$h_p \text{ (kule yüks.)} = 111.10 \text{ m}$$

$$\sigma_p \text{ (efektif ger.)} = 0.80 * \sigma_{(St52)} = 1987.20 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$$

$$u_c \text{ (kablo çeliği birim fiyatı)} = 188 \times 10^5 \text{ TL/kN}$$

$$u_p \text{ (profil demiri birim fiyatı)} = 80 \times 10^5 \text{ TL/kN}$$

Denklem (3.22) ile bir askı halatı kuvveti $T_h = 2240 \text{ kN}$ bulunur.

Askı enkesit alanı (A_h) denklem (3.23) ile yaklaşık 19 cm^2 olarak bulunur. Şekil 3.24 ve 3.25’de gösterildiği gibi yatay kuvvet (H_m) 244521.63 kN ve kablo kuvveti (T_m) 257738.97 kN olarak hesaplanır. Denklem (3.26) ile kablo alanı (A_m) 0.198 m^2 bulunur. Kule tepesindeki yatay dengeden $T_a = 273371.44 \text{ kN}$ olarak hesaplanır. Denklem (3.28) ile yan açıklık kablo enkesit alanı (A_a) 0.232 m^2 bulunur.

Askı çubuklarındaki çelik miktarı (Q_{hm}) 287.54 kN, ana açıklık kablo çeliği miktarı (Q_{cm}) 16274 kN olarak bulunur.

H yatay kuvveti denklem (3.33) ile 219383 kN bulunur.

Yan açıklık kablo sehimini de (f_a) 3.37 m. olarak hesaplanır (denklem (3.34)).

Bu son iki değer ile her iki yan açıklık kablo çeliği miktarı (Q_{ca}) 9869.10 kN bulunur.

Kuledeki çelik miktarı (Q_p) 18560.19 kN olarak hesaplanır (denklem (3.38)).

Toplam maliyet (C_{cp}) ise denklem (3.39) yardımıyla yaklaşık olarak 1.29×10^{12} TL. (3148115.32 A. B. D. doları) bulunur.

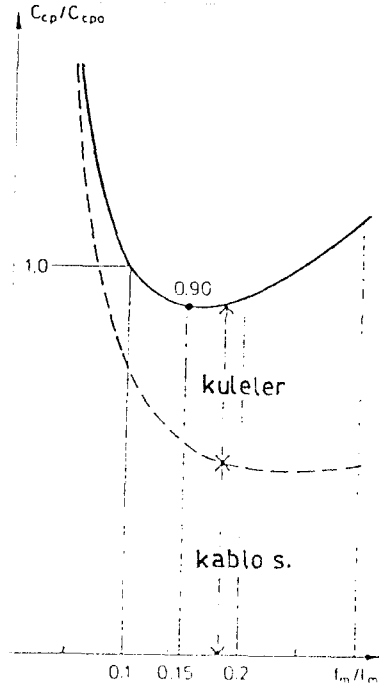
3.2.7. Optimum kule yüksekliği

Sehimin çelik miktarı üzerindeki etkisini örneklerle açıklamak için Şekil 3.28’deki grafiğe bakmak gerekir. Grafikte f_m/I_m sehim oranları için C_{cp}/C_{cp0} bağıl maliyetleri gösterilmiştir. $f_m/I_m = 0.10$ için $C_{cp}/C_{cp0} = 1.0$ olmaktadır. C_{cp0} , alışılmış 1/10 sehim oranına sahip asma köprüünün maliyetidir.

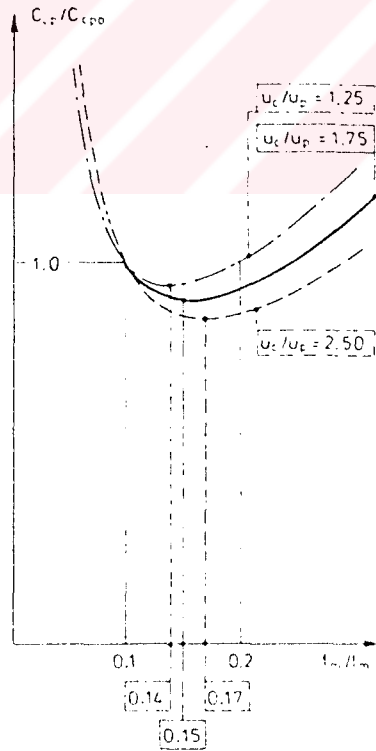
Optimumun $f_m/I_m = 0.15$ değerinde gerçekleştiğine göre bu durumda maliyetin, 0.10 sehim oranındaki maliyetten %10 daha düşük olduğu söylenebilir. Sadece kablo sistemi dikkate alınırsa optimum sınır, $f_m/I_m \cong 0.25$ ’de gerçekleşir. Buda açıkça optimizasyon işlemlerinde kulelerin hesaba katılması gerekliliğini gösterir.

Kablo malzemesinin ve kule malzemesinin birim fiyatları arasındaki oranın optimizasyonu çok az etkilediğini söyleyebilmek için Şekil 3.29’a bakmak gerekir. Burada $u_c/u_p = 1.25$, $u_c/u_p = 1.75$ (Şekil 3.28’deki gibi) ve $u_c/u_p = 2.50$ olmak üzere üç oran için C_{cp}/C_{cp0} değişimi görülmektedir. Oran, 1.25 değerinden 2.50’ye değiştiğinde f_m/I_m değeride 0.17’den 0.14’e değişmektedir. Bu aralıktaki C_{cp}/C_{cp0} değişimi çok önemsiz olmaktadır.

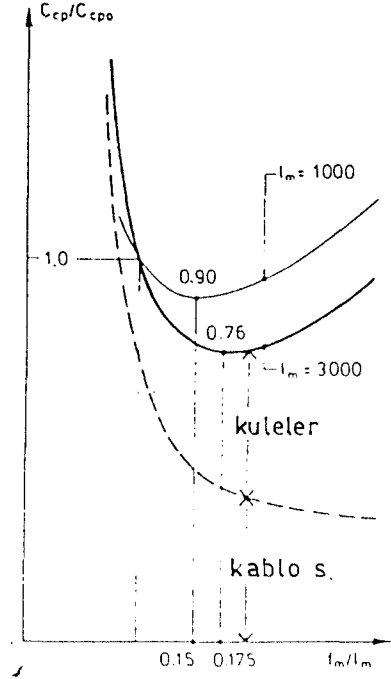
Açıklık uzunluğu artırıldığında kablonun sabit yükü gittikçe etkin duruma geçer ve optimum sınır, kablo sisteminin kendi optimumuna doğru hareket eder. 1000 m ve 3000 m ana açıklığa sahip köprüler için C_{cp}/C_{cp0} değişimini gösteren Şekil 3.30, bu özelliği örneklerle göstermiştir. 1000 m için C_{cp} ’nin minimum değeri C_{cp0} değerinin %10 altındadır ($f_m/I_m = 0.10$ için). 3000 m için minimum değerinde %24’ün altında olmaktadır ($f_m/I_m = 0.10$).



Şekil 3.28 Üç açıklıklı bir asma köprünün verilen parametrelere göre (Şekil 3.26 referans alınmıştır) C_{cp}/C_{cp0} bağıl maliyetinin değişimi: $l_a = 250$ m, $l_m = 1000$ m, $l_e = 50$ m, $b_a = g_a = g_m = 3$ m, $h_{pb} = 40$ m, $w_a = w_m = 0.20$ MN/m, $p_a = p_m = 0.08$ MN/m, $\sigma_c = 720$ MN/m², $\gamma_c = 0.08$ MN/m³, $\sigma_p = 160$ MN/m², $\gamma_p = 0.08$ MN/m³, $u_c = 1.75 u_p$.



Şekil 3.29 Üç farklı u_c/u_p oranı için C_{cp}/C_{cp0} bağıl maliyetin değişimi. Diğer parametreler şekil 3.28'deki ile aynıdır.

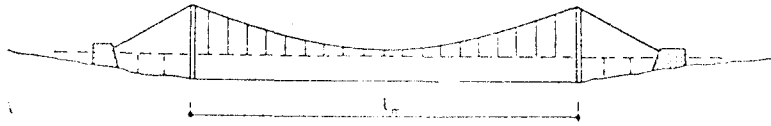


Şekil 3.30 Üç açıklıklı bir asma köprünün verilen parametrelere göre C_{cp}/C_{cpo} bağıl maliyet değişimi: $l_a = 750$ m, $l_m = 3000$ m, $l_e = 80$ m, $h_a = g_a = g_m = 5$ m, $h_{ph} = 60$ m. Yükleme ve gerilme parametreleri şekil 3.28'deki ile aynıdır.

3.2.8. Yapısal sistemler

Asma sistemlerin planlanmasını etkileyen parametrelerin incelenmesinden sonra birkaç yapısal sistemle açıklanabilir.

Şekil 3.31'de yalnız ana açıklığı kablo sistemi ile desteklenmiş, ana kablosu kulelerin tepesinden, kulelerden belirli uzaklıktaki ankraj bloklarına kadar serbest bir kablo olarak devam eden bir asma köprü görülmektedir. Böylece yan açıklıktaki bu kablolar, kule tepesini yatay yerdeğiştirmelere karşı engelleyen ankraj kabloları olarak hareket ederler.



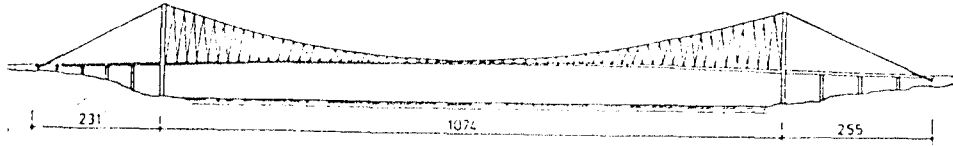
Şekil 3.31 Kulelerin dışındaki yaklaşma açıklıklarından bağımsız tek açıklıklı asma köprü.

Köprü sistemi, kuleler arasında ana kabloya askılarla mesnetlenmiş bir rijitlik kirişi içerir. Kulelerin dış tarafındaki köprü tabliyesini ise kablo sisteminden bağımsız çalışan yaklaşma açıklıkları taşır.

Kulelerin tepesi ankraj kabloları tarafından yatay doğrultuda etkili bir şekilde mesnetlenmiş olduğundan, Şekil 3.31'deki sistem genellikle elverişli şekil değiştirme

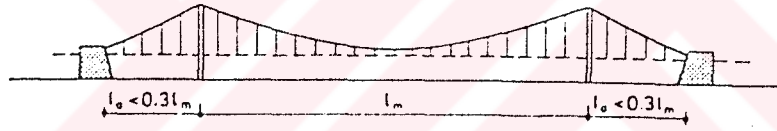
özelliklere sahip bir yapı oluşturur. Bununla birlikte, uzun ankraj bloklarına sahip büyük açıklıklı köprülerde sehim etkisi, kule tepesinin yataydaki mesnetlenme etkisinin etkinliğini azaltabilir.

Kablo sistemi olarak tek açıklığa sahip asma köprülerde iyi bir örnekte Türkiye'deki Boğaziçi Köprüsü'dür (Şekil 3.32). Burada kuleler kıyı şeridinde ve bağımsız yaklaşma açıklıklarında kara üzerine yerleştirildiğinden köprü yeri tek açıklıklı asma köprü uygulaması için özellikle çok uygun olmuştur.



Şekil 3.32 Boğaziçi Köprüsü.

Elverişli şekil değiştirme özellikleri ana açıklığın %30'undan daha az uzunlukta küçük yan açıklıkların uygulanmasıyla da elde edilebilir (Şekil 3.33). Küçük yan açıklıklı köprülerde, yan açıklık kablosunun sehim i küçük olur ve bu eksenel rijitliği olumlu yönde etkiler. Bu durum üçüncü bölümdeki Şekil 2.24'de gösterilmiştir.



Şekil 3.33 Kısa yan açıklıklı üç açıklığa sahip asma köprü.

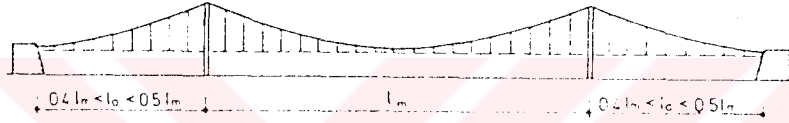
Hudson Nehri üzerindeki George Washington Köprüsü (Şekil 3.34), küçük açıklıklara sahip asma köprüünün belirgin bir örneğidir. Bu köprüde yan açıklık ile ana açıklık arasındaki oran 0.17 – 0.19 civarındadır. Küçük yan açıklıklar çoğunlukla yan açıklıkları kara veya sığ su üzerinde olan, gemilerin geçiş açıklığı gereksiniminin sadece ana açıklıkta karşılanmasının zorunlu olduğu köprülerde görülür.

Hem ana açıklığın hem de yan açıklıkların derin su üzerine yerleştirilmesinin gerekli olduğu durumlarda (Şekil 3.35), ana açıklığın %40 - %50'si kadar büyük yan açıklıklar bulunur. Kablo sisteminde oluşacak simetri nedeni ile yan açıklık ile ana açıklık arasındaki oranın 0.50 olması asma köprüye hoş bir görünüş verecektir. Diğer yandan büyük yan açıklıklar önemli ölçüde sehim yapabileceğinden, ankraj bloğundan kulenin tepesine uzanan kablonun (ankraj kablosu) kule tepesindeki yatay mesnetlenmeyi olumsuz şekilde etkiler. Daha önce Şekil 2.26'da gösterildiği gibi, bu nedenden dolayı büyük yan açıklıklar

ana açıklıklara büyük esneklikler kazandırır. Böylece büyük yan açıklıklara sahip asma köprü, estetiğin ve yapısal verimliliğin her zaman birlikte gitmediğinin iyi bir örneğini oluşturur.

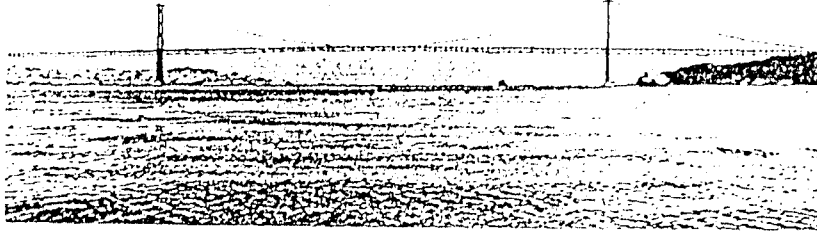


Şekil 3.34 George Washington Köprüsü.



Şekil 3.35 Büyük yan açıklığa sahip üç açıklıklı asma köprü.

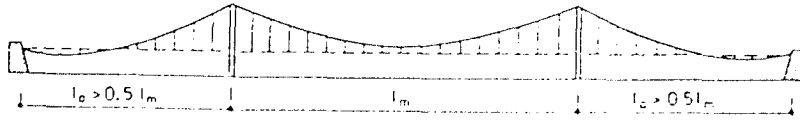
Lizbon'daki Tagus Nehri Köprüsü (Şekil 3.36), yan açıklığın ana açıklığa oranı 0.48 olacak şekilde yapılmıştır. Bu şekilde büyük yan açıklıklar seçilmesinin nedeni, ana açıklık uzunluğunu en aza indirmek ve aynı zamanda nehir içindeki ayak sayısını iki ile sınırlamak isteğidir.



Şekil 3.36 Tagus Nehri Köprüsü.

Ana açıklığın yarısından fazla bir uzunluğa sahip aşırı büyük açıklıklar Şekil 3.37'de gösterilmiş olan bir yapıyı ortaya çıkarır. Burada yan açıklıktaki kirişin altında kalan ana kabloun kısa kolonlarla rijitlik kirişine bağlanması gerekir.

Düşey askılara ve narin kulelere sahip klasik asma köprü sistemi için Şekil 3.37'de gösterilen bir sistem çok elverişsiz şekil değiştirme özellikleri ortaya çıkarır.



Şekil 3.37 Aşırı uzunlukta yan açıklığa sahip bir asma köprü.

Brooklyn Köprüsü'nde yan açıklığın ana açıklığa oranı 0.59'dur. Bundan dolayı daha dışta kalan yan açıklık bölgelerindeki rijitlik kafes kirişini desteklemek için kısa kolonların düzenlenmesi gerekli olmuştur (Şekil 3.38). Bununla birlikte, Brooklyn Köprüsü'nde aşırı büyük yan açıklıkların uygulanmasından dolayı ortaya çıkan elverişsiz şekil değiştirmeler, önemli bir eğilme rijitliğine sahip ağır kulelerin kullanılması ve asma sistemi tamamlamak için eğik kabloların uygulanması ile giderilmiştir.



Şekil 3.38 Ankraj bloğu yakınında, kafes kiriş altındaki ana kablonun durumu (Brooklyn Köprüsü).

Üç açıklıklı asma köprülerin çoğunda, ana kablolar doğrudan yan açıklıkların sonlarındaki ankraj bloklarına bağlanırlar. Bununla birlikte, bazı durumlarda kablo sistemi tarafından desteklenmiş yan açıklıkların sonlarına ek kuleler yerleştirilir ve ana kablolar zemine çok yakın yapılmış daha alttaki ankraj bloklarına kadar devam eder (Şekil 3.39).

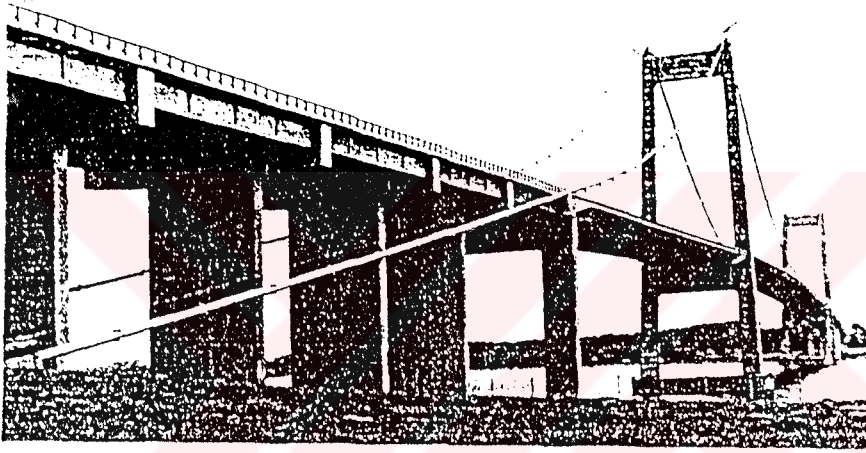


Şekil 3.39 Asma köprüdeki ek (ikincil) kuleler ve ana kablonun daha altta bulunan ankraj bloğuna kadar olan sürekliliği.

Kablo çekmesinden dolayı ankraj bloğundaki devrilme momenti önemli ölçüde azaldığından, bu düzenleme ankraj bloklarının daha ucuz olmasını sağlar. Ancak kablo uzunluğu artacağından hem kablo çeliği miktarı artacak hem de yan açıklık kabloları daha esnek olacaktır.

İkincil kulelerin dış tarafındaki köprü parçaları gemilerin geçtiği sular üzerinde olursa, Şekil 3.39'daki sistem elverişli olmaz. Çünkü köprü tabliyesinin altındaki ana kablolarla gemiler istemeyerek çarpabilirler.

Şekil 3.40'da gösterilmiş olan Little Belt Köprüsü'nde, kıyıda ağır ve hantal ankraj bloklarından sakınmak ve kil üzerindeki temel için uygun etkili bir ankraj bloğu yapısı elde etmek için ikincil kule uygulaması ve altta, zemine gömülmüş ankraj blokları seçilmiştir.



Şekil 3.40 Little Belt Köprüsü.

Tek kablounun şekil değiştirme özelliklerinin araştırılmasında, rijitlik kirişine sabit şekilde bağlanmış bir merkezi kelepçe uygulamasının, asimetrik yük altında çökmelerin azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

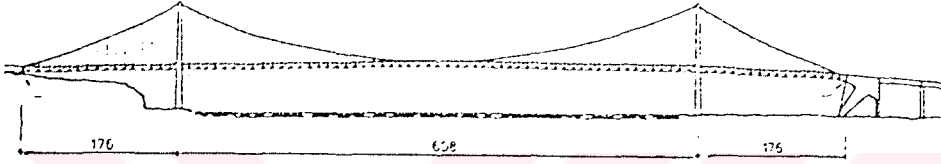
Merkezi kelepçeli üç açıklıklı bir asma köprünün kablo sistemi Şekil 3.41'de gösterildiği gibi düzenlenebilir. Burada sürekli rijitlik kirişi; sol ankraj bloğuna sabit bir mesnetle, sağ ankraj bloğuna ise boyuna doğrultuda hareketli bir mesnetle bağlanmıştır. Ana kablo ve rijitlik kirişi arasında, açıklık ortasındaki rijit bağlantı (merkezi kelepçe) nedeniyle normal kuvvetler, rijitlik kirişinin sol yarısında ortaya çıkacaktır. Böylece daha önce verilmiş tanıma uygun olarak kirişin bu kısmı kablo sisteminin bir parçası olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 3.41 Merkezi bir kelepçe ve ankraj bloklarından birisinde sabit bir mesnede sahip olan üç açıklıklı asma köprü.

Kulelerin tepesinin boyuna yerdeğiştirmelere karşı iyi bir şekilde engellendiği sistemlerde, merkezi kelepçenin en yüksek verimliliği elde edilir. Böylece merkezi kelepçe, özellikle küçük yan açıklıklara sahip asma köprülerde çekici olmaktadır.

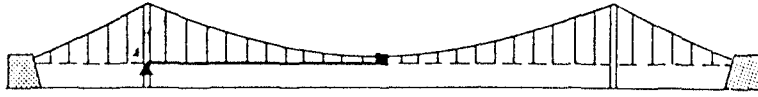
Şekil 3.41’de gösterilmiş olana benzer bir yapısal sistem ilk kez Seine nehri üzerinde bulunan Tancarville Köprüsü’nde kullanılmıştır (Şekil 3.42). Burada sabit mesnet, sağ taraftaki geniş ankraj bloğunda düzenlenmiştir.



Şekil 3.42 Tancarville Köprüsü.

Şekil 3.41’de gösterilmiş olan merkezi kelepçeye sahip yapısal sistemde, değişen hareketli yük altında oluşan boyuna doğrultudaki hareket etkili şekilde engellenmiştir. Fakat sıcaklık değişimlerinden dolayı rijitlik kirişi uzadığında veya kısaldığında, merkezi kelepçenin de boyuna hareketleri söz konusu olacaktır.

Isıl hareketler uzunlukla doğru orantılı olduğundan bu hareketlerdeki azalma, Şekil 3.43’de görüldüğü gibi, rijitlik kirişi sabit mesnedinin kuleye yerleştirilmesiyle olur. Eğilme kule ayaklarında ortaya çıkacağından, bu çözümün geçerliliği rijitlik kirişinde meydana gelebilecek yatay kuvvetlerin şiddetine bağlıdır.

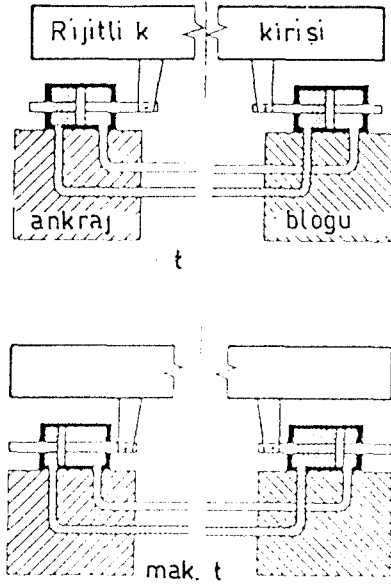


Şekil 3.43 Merkezi bir kelepçe ve kulelerin birinde sabit mesnede sahip üç açıklıklı asma köprü.

Merkezi kelepçede ısı hareketlerinin tamamen giderilmesi, boyuna doğrultuda ve rijitlik kirişi ortalayacak hidrolik araçlar kullanarak başarılabilir.

Şekil 3.44’te bir hidrolik araç şematik olarak gösterilmektedir. Şekilde belirtildiği gibi sistem, basınç borusu olarak çalışan iki yağ silindiri içerir. Kirişin iki ucunun simetrik

hareketi (sıcaklık değişimleri yüzünden) bir engelleme olmadan meydana gelir. Fakat asimetrik hareketler, silindirlerdeki yağ basınçları tarafından sınırlandırılır.



Şekil 3.44 Hidrolik aracın görünümü.

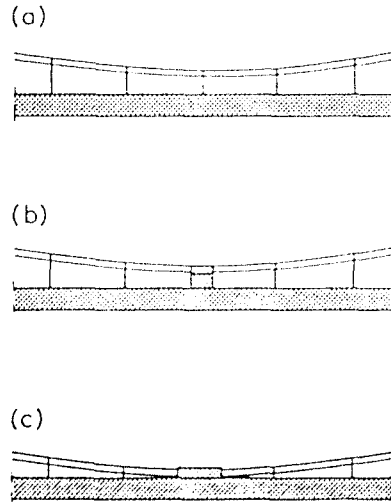
Bu basınç boruları kirişin iç kısmına yerleştirilir. Borular, bir ankraj bloğundan diğer ankraj bloğuna zeminin altında veya denizin dibinde çalıştırılabilir. Bu düzenleme yağın sıcaklığının değişmesini azaltabilir ve böylece yağ basıncındaki istenmeyen değişimler önlenmiş olur.

Açıklık ortasında ana kablo ile rijitlik kirişi arasındaki düşey uzaklık, aşağıda açıklanacağı gibi, belirli bir dereceye kadar merkezi kelepçenin etkinliğini azaltacaktır.

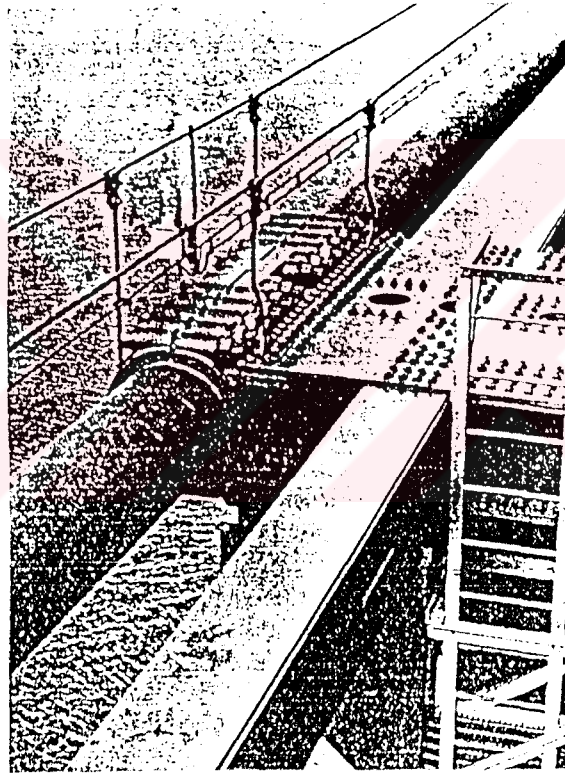
Merkezi kelepçenin bulunmadığı köprülerde, kiriş ile ana kablo arasındaki bağlantı açıklık boyunca askı çubuklarıyla kurulur. Şekil 3.45(a)'da görüldüğü gibi ana kablo çoğunlukla rijitlik kirişinden biraz uzakta tutulur.

Kablonun aynı konumu merkezi kelepçeye gerek duyulmayan durumlarda da kullanılabilir. Bu durumda merkezi askının yerini boyuna rijitliğe sahip düşey bir eleman alır (Şekil 3.45(b)). Bu düzenleme Şekil 3.181'de görüleceği gibi Little Belt Köprüsü'nde kullanılmıştır.

Son olarak, ana kablo rijitlik kirişinin üst kısmına indirilebilir. Merkezi kelepçede kirişin üst başlığına bağlanır (Şekil 3.45(c)). Tagus Nehri Köprüsü'nde ana kablo ile rijitlik kafes kirişin üst kirişi arasındaki bağlantıda bu ilke görülebilir (Şekil 3.46).

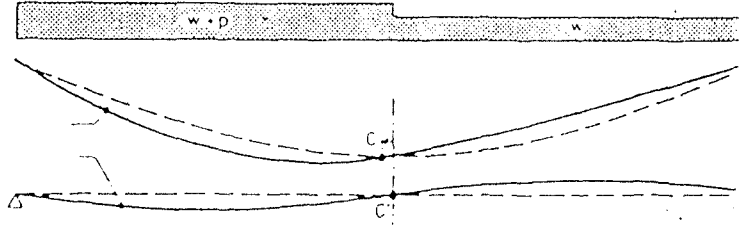


Şekil 3.45 Açıklık ortasındaki rijitlik kirişi ve ana kablo arasındaki ilişki.



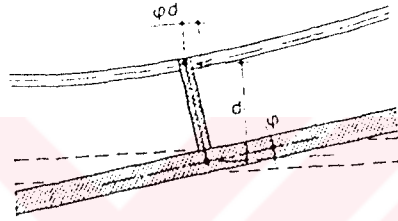
Şekil 3.46 Tagus Nehri Köprüsünde merkezi kelepçenin ana kablo ile kafes kirişin üst kirişi arasındaki bağlantısı.

Kiriş ile kablo arasındaki uzaklığın, merkezi kelepçenin verimliliği (etkinliği) üzerine etkisini araştırmak için asimetrik yük altında sehim eğrileri incelenmiştir. Şekil 3.47’de gösterildiği gibi merkezdeki kiriş tam yerinde kalarak kendi merkezi C' noktasını koruyacak fakat dönme oluşacaktır. Hareket serbestliği olduğunda, kablonun merkezi C noktası, asimetrik yük altında yüklü açıklığa doğru hareket eğilimi gösterecektir.



Şekil 3.47 Asimetrik yük altında rijitlik kirişi ve ana kablonun sehimini.

Şimdi, rijitlik kirişinin orta kısmının dönmesi nedeniyle merkezi kelepçe, kirişi kabloya bağlayan düşey elemanın uzunluğuyla orantılı olarak yatay doğrultuda hareket etmeye zorlanacaktır (Şekil 3.48). Sonuç olarak, rijitlik kirişinden ana kabloya kadar olan uzaklık arttığında, merkezi kelepçenin istenilen amaca ulaşamayacağı yani yatay hareketi engellemede verimi düşecektir.



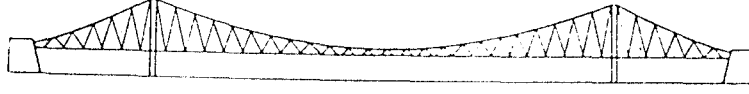
Şekil 3.48 Ana kablo üzerindeki kelepçe ile kirişe bağlanan düşey elemanın dönmesi.

Bununla birlikte merkezi kelepçe, kiriş ile ana kablo eksenleri arasındaki d düşey uzaklığının gerçekçi değerleri için (3 – 10 m. arasında) asimetrik yük altındaki rijitlik kirişi ve ana kablo arasındaki karşılıklı boyuna yerdeğiştirmelerin önlenmesinde çok etkilidir. Böylece Şekil 2.18'deki kablo için açıklığın ortasında dönme açısı $\varphi = (8.27-0.54)/250 = 0.031$ değerine ve serbest kablonun yatay yerdeğiştirmesi $\delta_x = 1.03$ m.'ye varacaktır. Sonuç olarak, d mesafesi 33 m.'ye ulaştığında, φd çarpımını da δ_x 'e eşit olacaktır. d düşey uzaklığı 3 – 10 m. arasında kaldığı sürece merkezi kelepçenin etkinliği %90 – 75 arasında kalacaktır.

Düşey askı çubuklarına sahip klasik asma sistemde, kablo sistemi kayma gerilmesi almaz. Bu nedenle dış yükün oluşturduğu kayma kuvvetlerine rijitlik kirişi veya ana kablonun yerdeğiştirmesi ile mukavemet edilir.

Şekil 3.49'da gösterildiği gibi, eğik askılar düzenleyerek bir kafes kiriş davranışı yaratılabilir ve böylece kayma kuvvetleri kablo sistemine iletilebilir. Kayma kuvvetleri genellikle askı çubuklarında hem basınç, hem de çekme ortaya çıkarmaktadır (kafes kiriş

köşegenleri gibi). Hareketli yükten oluşan kayma kuvveti, sabit yükün oluşturduğu başlangıç çekme kuvvetini aşmaması gerektiği koşulunun belirlediği bir değere ulaşabilir. Dolayısıyla askı çubuklarındaki bileşke kuvvet çekme olmak zorundadır.



Şekil 3.49 Ana kablo ve rijitlik kirişi arasında eğik askılar bulunan asma köprü.

Eğik askılı olarak yapılmış ilk önemli asma köprü İngiltere'deki Severn Köprüsü'dür. Bu sistemi uygulamanın asıl amacı, yapının sönümleme özelliklerini artırmaktır. Rüzgarın ortaya çıkardığı salınımlar sırasında kablo, rijitlik kirişine göre boyuna doğrultuda yer değiştirecek ve eğik askılar sayesinde askı kuvvetlerinin periyodik değişimi oluşacaktır. Sarmal kablolarda bulunan histerezis ile birlikte salınımları sönümleme başarılabilir.

Rijitlik kirişi ile ana kablo arasında birbirini kesen kablolar ağı şeklinde bir bağlantı düşünülmüş ve böylece kayma kuvvetlerini iletme kapasitesi daha da artırılmıştır. Normal kuvvetleri kulede iletme kapasitesinde olan sürekli bir rijitlik kirişine sahip sistem, çift konsol kafes kiriş gibi davranabilir (Şekil 3.50).

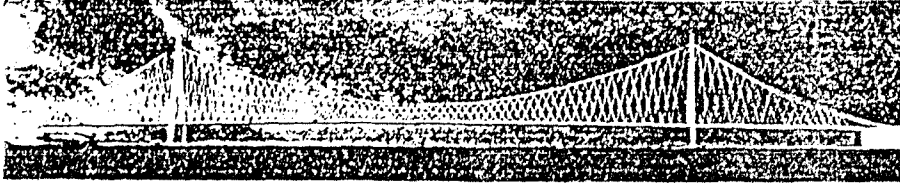


Şekil 3.50 Ana kablo ve rijitlik kirişi arasında bir askı ağı bulunan asma sistem.

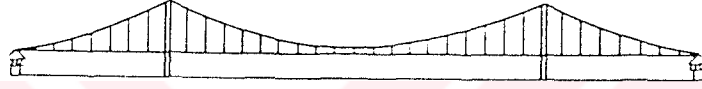
1960'lı yıllarda Leonhardt tarafından teklif edilen tek kablolu köprüde ana kablo, eğik konumdaki askılarla iki askı ağı oluşturularak rijitlik kirişine bağlanmıştır. Karayolu tabliyesi ve iki askı ağından oluşan üçgen enkesitin uygulanmasıyla yüksek derece burulma dayanımı sağlanmıştır (Şekil 3.51). Böylece rijitlik kirişi çok narin yapılabilmektedir. Tek ana kablo ve askı ağlarının kullanılması kabloyu, açıklığın ortasındaki karayolunun biraz üzerinde tutmayı gerekli kılmıştır. Verilmiş bir ana kablo sehimini nedeniyle bu durum, kule yüksekliğinin artmasına ve yan açıklık kablolarının daha dik eğimli olmasına yol açmıştır. Ayrıca, Şekil 3.50'de gösterildiği gibi askı ağına sahip bir sistem sadece düşey askılı sistemle karşılaştırıldığında kaçınılmaz olarak yapımı güçleştirir.

Tüm belli başlı asma köprüler, ana kablo kuvvetini yan açıklıkların sonlarındaki ankraj blokları ile zemine ileten, zemine ankrajlı sistem olarak yapılmışlardır. Bununla birlikte bazı küçük asma köprülerde self ankraj – iki uçta desteklenmiş – sistemi uygulanmaktadır (Şekil 3.52). İlk bakışta ankraj bloklarındaki büyük yatay kuvvetleri

ortadan kaldırdığı için çok ümit verici görünse de, rijitlik kirişindeki basınç kuvvetinin ve sabit yükün de artmasına yol açan daha büyük enkesilere gereksinim göstermesi ve yapım sırasında rijitlik kirişi yerine konuluncaya kadar ana kablonun yük etkisinde bırakılmaması dikkate alındığında self ankraj sistem çekici olmamaktadır. Bunlara self ankraj asma sistemin, self ankraj eğik askılı sisteme göre hemen hemen her açıdan daha düşük nitelikte olduğu da eklenince, self ankrajlı asma köprülerin sayısını kısıtlamıştır.



Şekil 3.51 Emmrich Köprüsü için teklif edilen tek kablolu köprü örneği.



Şekil 3.52 Self ankrajlı asma sistem.

3.3. Fan Sistem

3.3.1. Ankraj kablosu

Şekil 3.53’de gösterilen fan sistemde, kule tepesini uç mesnede bağlayan ankraj kablosu, kablo sisteminde stabilitenin sağlanmasında etkin bir role sahiptir. Ankraj kablosunu verimli bir şekilde kullanmak için, herhangi bir yükleme durumunda bu kablonun muhakkak çekmeye çalışması gerekir.

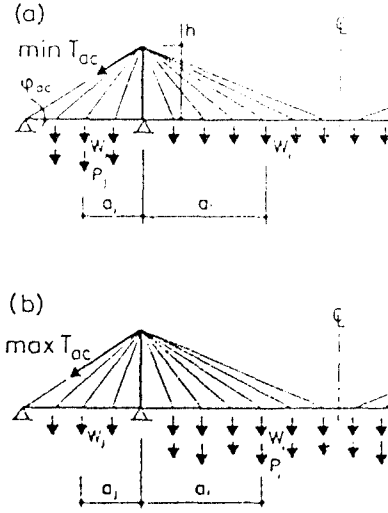


Şekil 3.53 Fan sisteme sahip üç açıklıklı eğik askılı köprü.

Ankraj kablosunda hareketli yük için minimum çekme kuvveti, Şekil 3.54(a)’da açıklandığı gibi, sadece yan açıklıklarda olur. Rijitlik kirişinin eğilme rijitliğini ihmal ederek ankraj kablosundaki minimum normal kuvvet $\min T_{ac}$ için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\min T_{ac} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i a_i - \sum_{j=1}^m (W_j + P_j) a_j}{h \cos \varphi_{ac}} \quad (3.40)$$

burada n , ana açıklığın yarısındaki yükleme noktaları sayısı ve m ise yan açıklıktaki yükleme noktaları sayısını ifade eder.



Şekil 3.54 Yükleme durumuna göre ankraj kablosunda oluşacak min. ve mak. çekme.

Şekil 3.54(b)'de görüldüğü üzere ankraj kablosundaki maksimum normal kuvvet mak. T_{ac} , yalnız ana açıklıktaki hareketli yük için oluşur ve şu denklemle hesaplanır:

$$makT_{ac} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i + P_i)a_i - \sum_{j=1}^m W_j a_j}{h \cos \varphi_{ac}} \quad (3.41)$$

Ankraj kablosundaki gerilme oranı $\kappa_{ac} = \min \sigma_{ac} / \max \sigma_{ac} = \min T_{ac} / \max T_{ac}$ şu şekilde bulunur:

$$\kappa_{ac} = \frac{\min T_{ac}}{\max T_{ac}} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i a_i - \sum_{j=1}^m (W_j + P_j)a_j}{\sum_{i=1}^n (W_i + P_i)a_i - \sum_{j=1}^m W_j a_j} \quad (3.42)$$

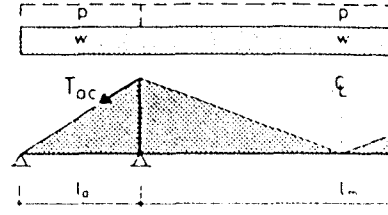
κ_{ac} 'nin özel bir değeri ve verilmiş bir ana açıklık uzunluğu için bu denklem, yan açıklık uzunluğunun bulunmasında kullanılır.

Şekil 3.55'de gösterildiği gibi düzgün yayılı yük etkisindeki sürekli bir sistem için κ_{ac} denklemi şu hali alır:

$$\kappa_{ac} = \frac{wl_m^2 - 4(w+p)l_a^2}{(w+p)l_m^2 - 4wl_a^2} \quad (3.43)$$

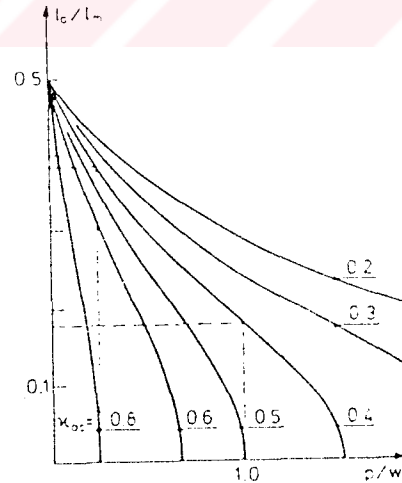
buradan yan açıklık l_a için aşağıdaki denklem elde edilir:

$$l_a = \frac{1}{2} l_m \sqrt{\left(\frac{(1 - \kappa_{ac})w - \kappa_{ac}p}{(1 - \kappa_{ac})w + p} \right)} \quad (3.44)$$



Şekil 3.55 Sürekli bir sistem olarak idealize edilmiş fan sistem.

Şekil 3.56, bir eğri parametresi olarak, l_a/l_m 'nin p/w ve κ_{ac} ile değişimini şematik şekilde göstermektedir. Bu grafikte l_a , her zaman ana açıklık uzunluğu olan l_m 'nin yarısından azdır ($l_m/l_a < 0.50$) ve l_a , hem p/w hem de κ_{ac} değerlerinin artmasıyla azalır. Tipik bir karayolu köprüsü durumuna uygun olarak $\kappa_{ac} = 0.40$ ve $p = 0.25 w$ değerleri için $l_a/l_m = 0.38$ olur. Bu durumda 0.40 gerilme oranını aşmaksızın yan açıklık uzunluğu ana açıklık uzunluğunun yaklaşık olarak %40'ına varır. Oldukça özel bir durum olarak demiryolu köprüsünde $\kappa_{ac} = 0.40$ ve $p = w$ olduğunda $l_a/l_m = 0.18$ olur. Görüldüğü gibi istenilen gerilme oranını korumak için, yan açıklık uzunluğu ana açıklık uzunluğunun beşte birinden az olmalıdır. Bu örneklerden hareketli yük şiddetinin, fan şekilli kablo sisteme sahip köprülerde ana geometrinin seçimi üzerine önemli etkisinin olduğu sonucuna varılır.

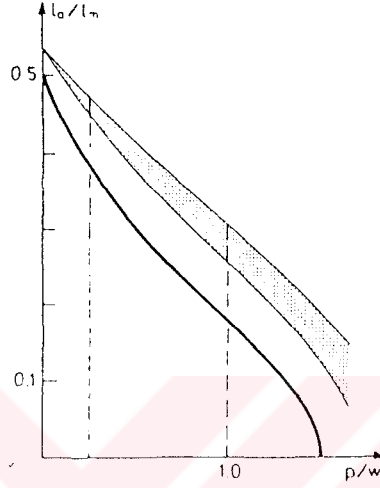


Şekil 3.56 Yan-ana açıklık oranı l_a/l_m ile hareketli-sabit yük oranı p/w ve gerilme oranı κ_{ac} arasındaki değişim.

Bununla birlikte (3.42), (3.43) ve (3.44) denklemlerinde ve Şekil 3.56'daki diyagramda, rijitlik kirişi eğilme rijitliğinin ihmal edildiği varsayımına dayandığına dikkat

edilmelidir. Kirişin eğilme rijitliği, genellikle ankraj kablosunun gerilme oranını (κ_{ac}) azaltma eğiliminde olduğundan, l_a/l_m için çıkarılmış değerler fazlaca emniyetli olmaktadır.

Bu özelliği örneklerle açıklamak amacıyla Şekil 3.57, eğilme rijitliğinin dikkate alındığı $\kappa = 0.40$ için l_a/l_m ile p/w arasındaki ilişkiyi gösteren taralı alanla birlikte $\kappa_{ac} = 0.40$ için (Şekil 3.56'dan alınmıştır) bir eğriyi gösterir. Taralı alanın genişliği, eğilme rijitliğinin alt ve üst değerleri arasındaki kısmı göstermektedir.



Şekil 3.57 Eğilme rijitliğinin l_a/l_m ve p/w arasındaki ilişkiye etkisi ($\kappa_{ac} = 0.40$ için). Koyu çizgi, eğilme rijitliğinin ihmal; gölgeli alan, eğilme rijitliğinin dikkate alındığı durum.

Eğilme rijitliğinin etkisi özellikle yüksek p/w değerleri için dikkate değer olmaktadır. Böylece eğilme rijitliği dikkate alındığında, $p/w = 1.0$ için l_a/l_m oranı yaklaşık %50 – 70 artırılmalı, $p/w = 0.25$ için ise bu sadece %20 – 25 artırılmalıdır.

3.3.2. Kablo boyutlarının öntasarımı

Eğik kabloların öntasarımı, asma köprülerin askıları için uygulanmış olan aynı varsayımlara dayandırılabilir.

Şekil 3.58'e göre eğik kablodaki çekme $T_{sc,i}$ şöyle hesaplanır:

$$T_{sc,i} \cong \left(w + p + \frac{P}{30d} \right) \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2 \sin \varphi_i} + \gamma_c A_{sc,i} \frac{a_i}{\sin \varphi_i \cos \varphi_i} \quad (3.45)$$

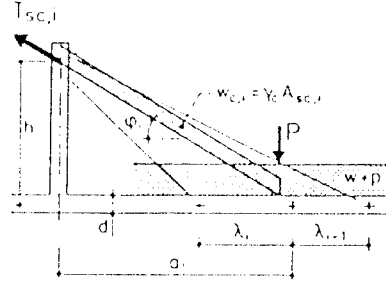
$T_{sc,i} = A_{sc,i} \sigma_c$ olarak yazarsak eğik kabloun kesit alanı için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$A_{sc,i} \cong \frac{(w + p + P/30d)(\lambda_i + \lambda_{i+1}) \cos \varphi_i}{2(\sigma_c \sin \varphi_i \cos \varphi_i - \gamma_c a_i)} \quad (3.46)$$

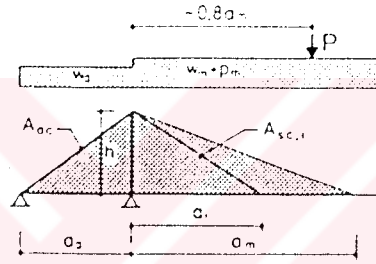
Şekil 3.59'a göre ankraj kablosunun enkesit alanı A_{ac} öntasarımda aşağıdaki gibi belirlenir:

$$A_{ac} \cong \frac{1/2(w_m + p_m)a_m^2 - 1/2w_a a_a^2 + 0.8Pa_m + 1/2\gamma_c \sum_{i=1}^n (A_{sc,i} a_i^2 / \cos \varphi_i)}{h\sigma_c \cos \varphi_{ac}} \quad (3.47)$$

burada $A_{sc,i}$ i 'nci eğik kablonun enkesit alanı (denklem (3.46) yardımıyla belirlenmiş) ve n kule ayağı ile ana açıklığın merkezi arasındaki eğik kabloların sayısını belirtir.



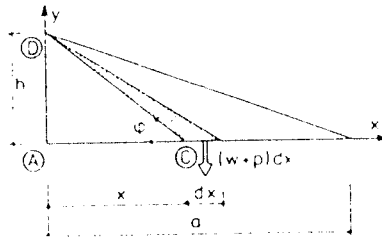
Şekil 3.58 Maksimum eğik kablo kuvveti için yükleme durumu.



Şekil 3.59 Maksimum ankraj kablo kuvveti için yükleme durumu.

3.3.3. Kablo çeliği miktarı

Fan şekilli kablo sistemli bir köprüde, kablo çeliği miktarı için denklemler elde etmek amacıyla Şekil 3.60'da gösterilen fan dikkate alınacaktır. Fan, bir sürekli sistem olarak idealize edilmiş ve $w + p$ düzgün yayılı yük etkisindedir.



Şekil 3.60 İdealize edilmiş, $w + p$ yüküne maruz sürekli fan.

D – C kablosu için kablo çeliği miktarı dQ ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$dQ \cong \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \frac{w + p}{h} \left(1 + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \frac{x^2 + h^2}{h} \right) (x^2 + h^2) dx \quad (3.48)$$

Bu denklem yardımıyla fandaki kablo çeliğinin toplam miktarını veren ifade ise şöyledir:

$$Q_F \cong \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \left[\frac{1}{5} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} a \left(\frac{a}{h} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(1 + 2 \frac{\gamma_c}{\sigma_c} h \right) \left(\frac{a}{h} \right)^3 + \left(1 + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} h \right) \frac{a}{h} \right] h^2 \quad (3.49)$$

Fanın kendi ağırlığının $A(0,0)$ noktasına göre M_F momenti şu şekilde olur:

$$M_F \cong \frac{1}{4} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \left[\frac{1}{3} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} a \left(\frac{a}{h} \right)^4 + \frac{1}{2} \left(1 + 2 \frac{\gamma_c}{\sigma_c} h \right) \left(\frac{a}{h} \right)^3 + \left(1 + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} h \right) \frac{a}{h} \right] h^2 a \quad (3.50)$$

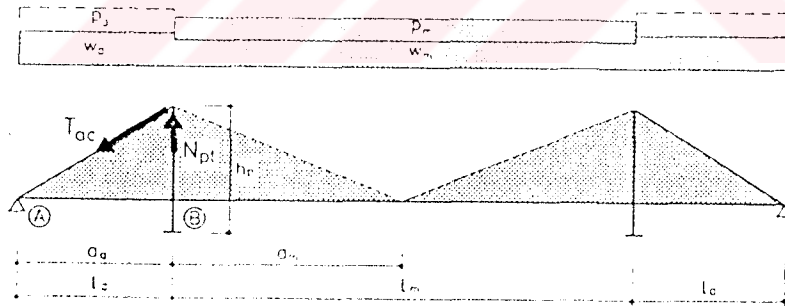
Kuleden (A noktası) fanın ağırlık merkezine olan e_F uzaklığı ise şöyle bulunur:

$$e_F = M_F / Q_F$$

1 – 3 arasında değişen a/h ve 100 m. – 500 m. arasında değişen a değerleri için e_F , $0.25a - 0.35a$ değerleri arasında kalacaktır. Rijitlik kirişinden ortaya çıkan yüke kıyasla kablunun kendi ağırlığının etkisi genelde çok az olduğundan, e_F değerini 3 olarak almak yeterli olacaktır.

Şekil 3.61’de gösterildiği gibi ana açıklıkta $w_m + p_m$ ve yan açıklıklarda $w_a + p_a$ (veya w_a) düzgün yayılı yük taşıyan, simetrik üç açıklıklı bir köprü için kablo çeliği miktarı aşağıdaki üç unsurdan oluşur:

- ana açıklık fanlarındaki kablo çeliği;
- yan açıklık fanlarındaki kablo çeliği,
- ankraj kablolarındaki kablo çeliği.



Şekil 3.61 İdealize edilmiş, sürekli fanlara sahip simetrik ve üç açıklıklı köprü.

Kablo çeliği miktarı içindeki (a) ve (b) unsurları doğrudan denklem (3.49)’dan hesaplanır:

$$Q_{Fm} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w_m + p_m) \left[\frac{1}{5} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} a_m \left(\frac{a_m}{h} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(1 + 2 \frac{\gamma_c}{\sigma_c} h \right) \left(\frac{a_m}{h} \right)^3 + \left(1 + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} h \right) \frac{a_m}{h} \right] h^2 \quad (3.51)$$

$$Q_{Fa} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w_a + p_a) \left[\frac{1}{5} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} a_a \left(\frac{a_a}{h} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(1 + 2 \frac{\gamma_c}{\sigma_c} h \right) \left(\frac{a_a}{h} \right)^3 + \left(1 + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} h \right) \frac{a_a}{h} \right] h^2 \quad (3.52)$$

(3.51) ve (3.52) denklemlerinin her biri sadece bir fandaki kablo çeliği miktarını vermektedir. Böylece simetrik üç açıklıklı bir köprü için fanlardaki toplam kablo çeliği miktarı $2Q_{Fm} + 2Q_{Fa}$ olur.

Bir ankraj kablosunun çelik miktarı şu şekilde belirlenir:

$$Q_{ac} = \gamma_c A_{ac} a_a / \cos \varphi_{ac}$$

burada A_{ac} denklem (3.47)'den alınmıştır.

$0.50\gamma_c \sum_{i=1}^n (A_{sc,i} a_i^2 / \cos \varphi_i)$ 'nin yerine $(Q_{Fm} a_m - Q_{Fa} a_a) / 3$ yazarak, ankraj kablosu çelik miktarı için aşağıdaki ifadeyi elde ederiz:

$$Q_{ac} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \left[\frac{1}{2} (w_m + p_m) a_m^2 - \frac{1}{2} w_a a_a^2 + \frac{1}{3} Q_{Fm} a_m - \frac{1}{3} Q_{Fa} a_a \right] \left(\frac{a_a}{h} + \frac{h}{a_a} \right) \quad (3.53)$$

3.3.4. Kuledeki çelik miktarı

Açıklıkları boyunca hareketli yük durumu için, kuleye tepede etkiyen maksimum normal kuvvet N_{pt} , $B(-a_a, 0)$ noktasına göre moment alınarak bulunur:

$$N_{pt} = \frac{1}{2} (w_a + p_a) a_a + \frac{1}{2} (w_m + p_m) \left[2 + a_m / a_a \right] a_m + \frac{2}{3} Q_{Fa} + Q_{Fm} \left[1 + a_m / 3 a_a \right] + \frac{1}{2} Q_{ac} \quad (3.54)$$

Kuledeki çelik miktarı denklem (3.37)'den bulunur:

$$Q_p = N_{pt} \left[\exp \left(\frac{\gamma_p}{\sigma_p} h_p \right) - 1 \right] \quad (3.55)$$

3.3.5. Basitleştirilmiş ifadeler

Makul açıklıklı köprülerde kablonun sabit yükünün kablolardaki kuvvetler içinde payı az önemli olduğundan, bu durumlarda kablo çeliği miktarını bulmak için daha önceki denklemler aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:

$$Q_{Fm} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w_m + p_m) \left(\frac{1}{3} \frac{a_m}{h} + \frac{h}{a_m} \right) a_m^2 \quad (3.56)$$

$$Q_{Fa} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w_a + p_a) \left(\frac{1}{3} \frac{a_a}{h} + \frac{h}{a_a} \right) a_a^2 \quad (3.57)$$

$$Q_{ac} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \left[(w_m + p_m) a_m^2 - w_a a_a^2 \right] \frac{a_a^2 + h^2}{a_a h} \quad (3.58)$$

$$N_{pt} = \frac{1}{2} (w_a + p_a) a_a + \frac{1}{2} (w_m + p_m) \left(2 + \frac{a_m}{a_a} \right) a_m$$

$$Q_p = \frac{1}{2}(w_a + p_a)a_a + \frac{1}{2}(w_m + p_m)\left(2 + \frac{a_m}{a_a}\right)a_m \left[\exp\left(\frac{\gamma_p}{\sigma_p}h_p\right) - 1 \right] \quad (3.59)$$

3.3.6. Kablo sistemleri ve kulelerin toplam maliyeti

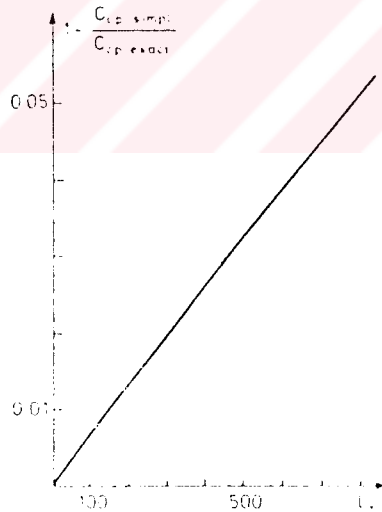
Üç açıklıklı bir köprüde, kablo sistemleri ve kulelerin toplam maliyeti aşağıdaki gibi belirlenir:

$$C_{cp} = 2(Q_{Fm} + Q_{Fa} + Q_{ca})u_c + 2Q_p u_p$$

Burada u_c yapılmış ve korunmalı kablo çeliği için birim fiyat, u_p kulelerdeki malzeme için birim fiyattır.

Asma sistemde olduğu gibi birim fiyatlar, gerçekçi ortalama değerlere uygun sabit değerler olarak belirlenmelidir.

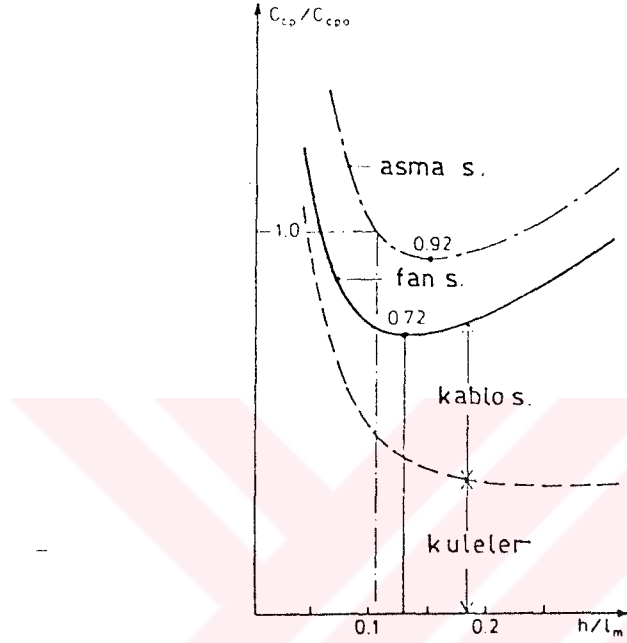
Basitleştirilmiş denklemlerin – (3.56),.....,(3.59) – ortaya çıkan hatanın boyutu Şekil 3.62’de gösterilmiştir. Burada $1 - C_{cp,basit}/C_{cp,gercek}$ olarak tanımlanan hata değerleri ordinatta, ana açıklık uzunluğu l_m apsiste olmak üzere bir grafik oluşturulmuştur. Bu grafik incelendiğinde, 450 m. ana açıklık uzunluğuna kadar hatanın %3’ün altında kaldığı ve ana açıklığı 200 – 400 m. arasında değişen makul uzunluğa sahip eğik askılı köprüler için, öntasarım işlemlerinde yaklaşık yaklaşımların yeterli olacağı görülür.



Şekil 3.62 Kabloların ağırlıklarının ihmal edildiği basitleştirilmiş ifadelerin uygulanmasında oluşan hata. Grafik için kullanılan parametreler şöyledir: $a_m = 2a_a$, $h_p = 0.5a_a + 30$, $w_a = w_m = 0.20$ MN/m, $p_a = p_m = 0.08$ MN/m, $\sigma_c = 720$ MN/m², $\gamma_c = 0.08$ MN/m³, $\sigma_p = 160$ MN/m², $\gamma_p = 0.08$ MN/m³, $u_c = 1.75 u_p$.

3.3.7. Asma sistem ve fan sistemin karşılaştırılması

Asma ve fan sistemli köprülerde gereksinim duyulan miktarları karşılaştırmak amacıyla, bağıl maliyet olan C_{cp}/C_{cp0} düşey ekseninde, bağıl yükseklik olan h/l_m yatay ekseninde alınarak bir grafik oluşturulmuştur (Şekil 3.63). Şekil 3.28'deki durumda olduğu gibi, C_{cp0} maliyeti 1/10 sehim oranına sahip asma köprüye ilişkindir.



Şekil 3.63 Üç açıklıklı asma ve fan sistem için C_{cp}/C_{cp0} bağıl maliyetinin değişimi. Her iki sistem içinde belirtilen parametreler kullanılmıştır: $l_a = a_a = 125$ m, $l_m = 2a_m = 500$ m, $h_{ph} = 30$ m, $w_a = w_m = 0.20$ MN/m, $p_a = p_m = 0.08$ MN/m, $\sigma_c = 720$ MN/m², $\gamma_c = 0.08$ MN/m³, $\sigma_p = 160$ MN/m², $\gamma_p = 0.08$ MN/m³, $u_c = 1.75 u_p$.

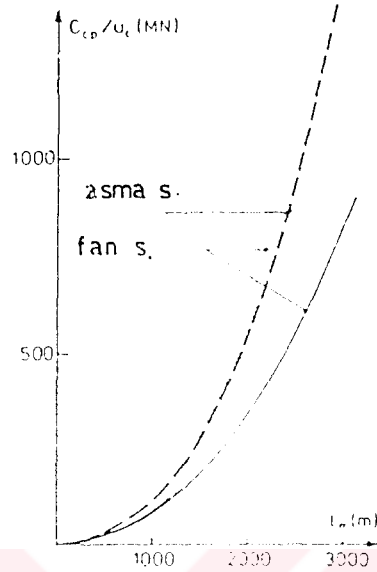
Asma sistem için ek parametreler kullanılır: $b_a = g_a = g_m = 2$ m, $l_e = 30$ m, $h_{pl} = h$, $f_m = (h - 2)$ m.

Fan sistemin minimum maliyetinin, asma sistemden biraz daha düşük h/l_m değerinde olduğu görülür (~ 0.13). Bununla birlikte, eğik askılı köprülerde rijitliğin artması, h/l_m 'nin artırılmasıyla elde edildiğinden, h/l_m değeri çoğunlukla optimum değer üzerinde seçilir. Bu, h/l_m değerinin artmasıyla rijitliğin azaldığı asma köprüdeki duruma ters bir durumdur.

Fan sistemler için bağıl yükseklik h/l_m çoğunlukla 0.15 – 0.20 arasında seçilir. Şekil 3.63'te gösterilmiş değerler göz önüne alındığında bu, kablolar ve kulelerin eşdeğer miktarında %7'ye varan bir artışa yol açabilir.

Kablolar ve kulelerin eşdeğer miktarının ana açıklıkla değişimi, asma sistem ve fan sistem için Şekil 3.64'te gösterilmiştir. Yan açıklık/ana açıklık oranı her iki sistem için

0.25 seçilmesine rağmen, asma sistem için sehim oranı 0.10 ve fan sistem için yükseklik/ana açıklık oranı 0.15 seçilmiştir.



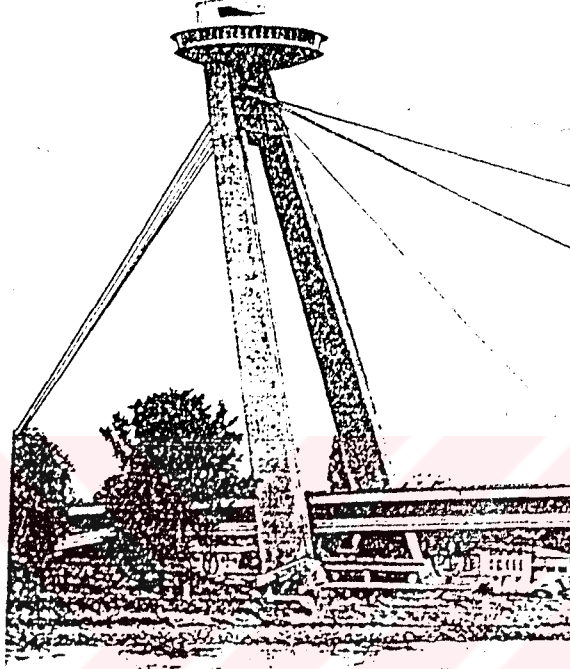
Şekil 3.64 Asma sistem (kesikli çizgi) ve fan sistem (düz çizgi, rijitlik kirişine yapılan takviye etkisinin ihmal; gölgeli alan, bu etkinin dikkate alınmış hali) için kablolar ve kulelerdeki eşdeğer miktarın $-C_{cp}/u_c$ - değişimi.

Bu varsayımlar altında, asma sistemde açıklık uzunluğu arttıkça miktarlarda hızlı bir şekilde artar. Şekil 3.64'teki eğrilerin, rijitlik kirişinden ötürü ortaya çıkan yükün, açıklığın artmasıyla değişmediği varsayımına dayandığı dikkate alınmalıdır. Asma sistem için geniş bir aralıkta şüphesiz gerçeğe uygundur. Fakat fan sistemde açıklık arttıkça, kirişteki normal kuvvetlerin artması nedeniyle kesit büyüyecektir. Bu, rijitlik kirişinde ek sabit yüke neden olur ve rijitlik kirişinden kablo sistemine iletilen birim uzunluk için, sabit yük varsayımı büyük açıklıklar için geçerliliğini yitirir. Fan sistemin asma sistemle karşılaştırılması yapıldığında, fan sistemin rijitlik kirişinde gereksinim duyulan ek çelik miktarı da dikkate alınmalıdır.

Rijitlik kirişinde enkesitlerin büyümesi nedeniyle gereksinim duyulan ek çelik miktarı, enkesitin şekline ve yapı malzemesinin dayanımına bağlıdır. Yüksek dayanımlı çelikten yapılmış kutu şekilli enkesitlere sahip eğik askılı köprülerde, Şekil 3.64'teki taralı alanla da belirtildiği gibi, kablolar, kuleler ve ek çeliği içeren eşdeğer miktarlar belirgin şekilde değişebilir.

3.3.8. Eğik kuleler

Kablolu köprülerde bulunan kuleler, büyük çoğunlukla düşey eksene sahip olacak şekilde yapılırlar. Bununla birlikte, fan şekilli eğik askılı köprüler içinde köprünün boyuna doğrultusunda eğik kulelere sahip birkaç örnek bulunabilir (Şekil 3.65).



Şekil 3.65 Çek Cumhuriyetindeki Danube Nehri Köprüsünün kulesi.

Kule eğikliğinin sistemin çelik miktarına etkisi, düşey kuleli fan sistem için açıklanana benzer bir işlemle incelenebilir.

(3.56),..., (3.59) denklemleri için basitleştirilmiş varsayımları uygulayarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

Şekil 3.66'da belirtildiği gibi, AOD (Q_{Fa}) ve DOC (Q_{Fm}) fanlarının çelik miktarı:

$$Q_{Fa} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \left(\frac{1}{3} \frac{a_a - e}{h} + \frac{h}{a_a - e} \right) (a_a - e)^2 \quad (3.60)$$

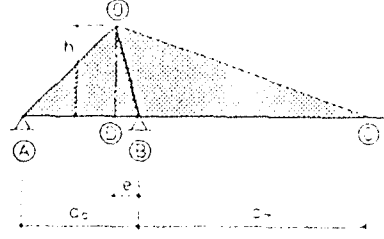
$$Q_{Fm} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \left(\frac{1}{3} \frac{a_m + e}{h} + \frac{h}{a_m + e} \right) (a_m + e)^2 \quad (3.61)$$

A – D ankraj kablosunun çelik miktarı (Q_{ac}):

$$Q_{ac} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \left[(w + p) a_m^2 - w a_a^2 \right] \frac{h^2 + (a_a - e)^2}{2 h a_a} \quad (3.62)$$

Kulenin çelik miktarı (Q_p):

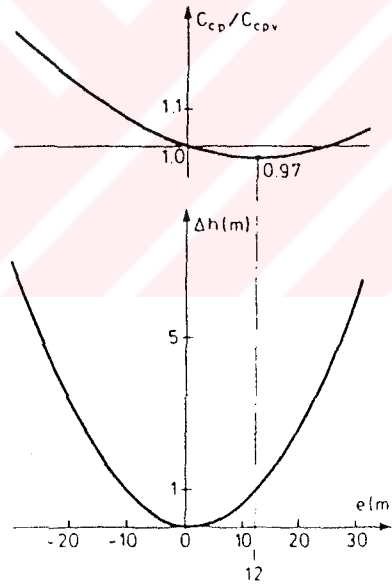
$$Q_p = \frac{\gamma_p}{\sigma_p} (w + p) \frac{(a_a + a_m)^2 (h^2 + e^2)}{2ha_a} \quad (3.63)$$



Şekil 3.66 İdealize edilmiş, sürekli fanlı ve eğik kuleli sistem.

$C_{cp}(e, h) = (Q_{fa} + Q_{fm} + Q_{ac})u_c + Q_p u_p$ denkleminde, seçilmiş bir e değeri için bulunan maliyet değerinden, $\partial C_{cp} / \partial h = 0$ eşitliği ile optimum kule yüksekliği hesaplanır ve sonradan da minimum maliyet - $C_{cp}(e, h_{opt})$ - bulunur.

Şekil 3.63'te kullanılmış geometrik ve mekanik değerler için, kule yüksekliğinin artışı $\Delta h = h_{opt, eğik} - h_{opt, düşey}$ ve bağıl maliyet C_{cp}/C_{cpv} , Şekil 3.67'de görüldüğü gibi değişecektir.

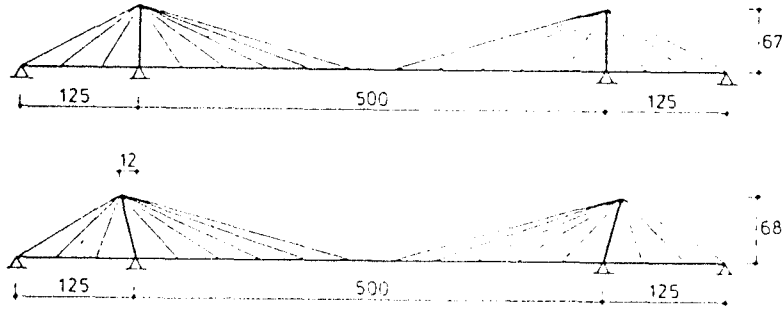


Şekil 3.67 Yatay kule izdüşümü e ile değişen kule yüksekliği Δh ve bağıl maliyet C_{cp}/C_{cpv} 'nin değişimi.

Seçilen örnekte, minimum optimum kule yüksekliğinin düşey kule için bulunduğu, oysa minimum maliyetin, Şekil 3.68'de gösterildiği gibi, tepesi yan açıklığa doğru 12 m. yer değiştirmiş bir kule için gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte, maliyet

miktarındaki azalma sadece %3 kadardır. Ancak bu tasarruf, kısım kısım yapılmış olan kuleyi, stabilize etmek için geçici destek gereksinimi nedeniyle artan maliyeti karşılamıştır.

Maliyet miktarını ciddi bir şekilde etkilemeksizin, kulenin $0^\circ - 18^\circ$ arasında değişen açıyla (yan açıklığa doğru) eğik yapılabildiğini araştırmalar göstermiştir ve bu geometrik formun seçimi kesin bir serbestlik içermektedir. Bu bağlamda, büyük ana açıklığı taşıyan kablolardan kaynaklanan çekmeye karşı dayanım gösterdikçe, arkaya doğru yaslanan bir kulenin estetik görünüm verdiği belirtilmelidir.



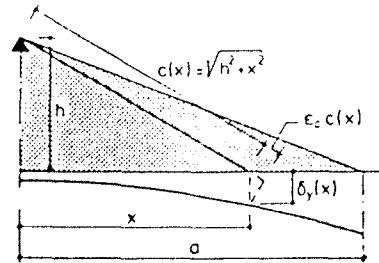
Şekil 3.68 Üç açıklıklı bir köprüde düşey kulelerle, optimum eğikliğe sahip kuleler arasındaki karşılaştırma.

3.3.9. Şekil değiştirme özellikleri

Narin rijitlik kirişli eğik askılı köprülerde, kabloların uzamasının neden olduğu tüm sistemin sehim çok büyük ölçüde olduğundan, genel sehim örnekleri sadece kabloların uzaması dikkate alınarak çıkarılabilir.

Şekil 3.69, yüksekliği h ve uzunluğu a olan bir fanı göstermektedir. Kulenin tepesinde sabit bir mesnet varsayarak düşey sehimin değişimi $\delta_y(x)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\delta_y(x) = h \left(1 + \frac{x^2}{h^2} \right) \epsilon_c \quad (3.64)$$



Şekil 3.69 Eğik kablolarda uzamanın neden olduğu düşey sehim.

Şekilde görüldüğü gibi, tüm eğik kablolardeki sabit bir ε_c şekil değiştirmesi için sehimi eğrisi, dışbükey ikinci dereceden bir parabol olacaktır. Sehimi eğrisinin asma sistem için içbükey olmasına karşılık, fan sistem için dışbükey olması ilginçtir (bak. Şekil 2.14).

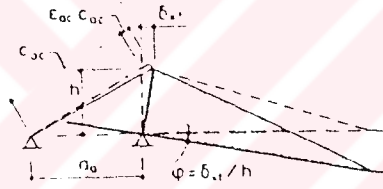
Denklem (3.64)'te belirtilen sehimi, sadece eğik kabloların uzaması nedeniyle oluşur. Bununla birlikte, kule tepesinin yatay yer değiştirmesine neden olan ankraj kablosunun uzaması da düşey sehime yardım eder.

Şekil 3.70'de belirtildiği gibi ankraj kablosunun uzaması, tüm kablo sisteminin dönmesi anlamına gelir. Dönme açısı φ şu şekilde ifade edilir:

$$\varphi = \frac{\delta_{xt}}{h} = \frac{h^2 + a_a^2}{ha_a} \varepsilon_{ac} \quad (3.65)$$

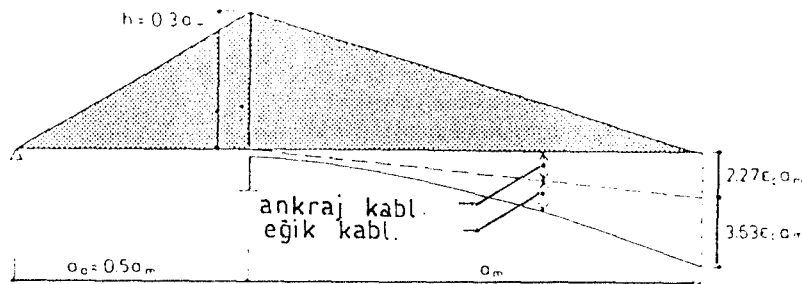
Böylece kablo uzamalarından ötürü rijitlik kirişinin toplam sehimi miktarı aşağıdaki gibi olur:

$$\delta_y(x) = h \left(1 + \frac{x^2}{h^2} \right) \varepsilon_{sc} + \frac{h^2 + a_a^2}{ha_a} x \varepsilon_{ac} \quad (3.66)$$



Şekil 3.70 Ankraj kablosunun neden olduğu kablo sistemindeki dönme.

$a_a = 0.5 a_m$, $h = 0.3 a_m$ ve $\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{ac} = \varepsilon_c$ (= sabit) olan bir fan sistem için ana açıklığın sehimi Şekil 3.71'de gösterildiği gibi olacaktır. Bu durumda ankraj kablosunun uzaması, açıklığın ortasındaki sehimin yaklaşık %40'ına neden olur.



Şekil 3.71 Ankraj kablosu ve eğik kabloların uzamasının neden olduğu açıklıktaki sehimi.

Tüm kablolardaki maksimum σ_c gerilmesinin (= emniyet gerilmesi) aynı olduğunu ve rijitlik kirişinin eğilme rijitliğini ihmal ederek, hareketli yük nedeniyle oluşan kablo şekil değiştirmeleri aşağıdaki gibi bulunabilir:

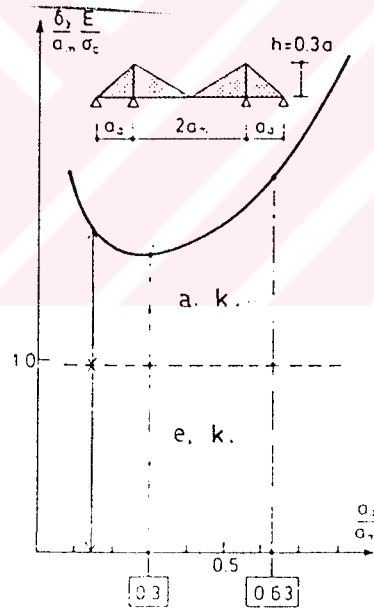
$$\varepsilon_{sc} = \frac{p}{p+w} \frac{\sigma_c}{E}$$

$$\varepsilon_{ac} = \frac{p}{w[1 - (a_a/a_m)^2] + p} \frac{\sigma_c}{E} \quad (3.67)$$

Denklem (3.67)'den elde edilen ε_{sc} ve ε_{ac} 'yi denklem (3.66)'da yerine koyarak ve $x = a_m$ kabulüyle açıklığın ortasındaki sehim $\delta_y(a_m)$ şöyle bulunur:

$$\delta_y(a_m) = \left\{ \frac{p}{p+w} h \left[1 + \left(\frac{a_m}{h} \right)^2 \right] + \frac{p}{w[1 - (a_a/a_m)^2] + p} a_m \left(\frac{h}{a_a} + \frac{a_a}{h} \right) \right\} \frac{\sigma_c}{E} \quad (3.68)$$

$h = 0.3 a_m$, $w = 0.22 \text{ MN/m}$ ve $p = 0.08 \text{ MN/m}$ alınarak açıklığın ortasındaki sehim ($\delta_y(a_m)$) ile bağıl yan açıklık (a_a/a_m) arasında bir grafiksel ilişki oluşturulmuştur (Şekil 3.72).



Şekil 3.72 Orta açıklık sehimine eğik kablo uzaması ve ankraj kablosu uzamasının katkısı.

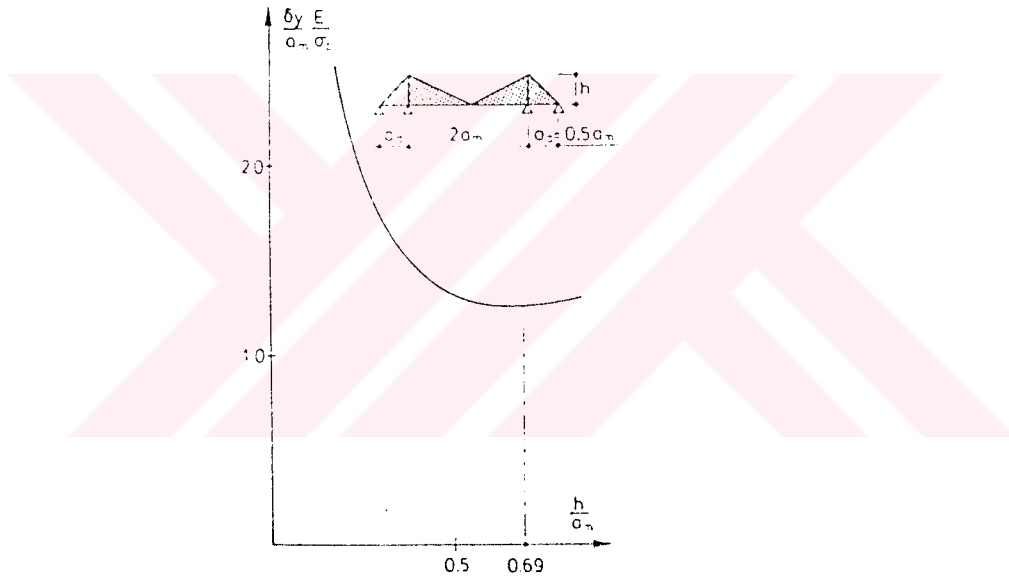
Şekil incelendiğinde, eğik kablonun uzamasından ötürü oluşan sehimin, açıklığın ortasındaki sehim içindeki payı sabit kalmasına karşılık, ankraj kablosunun uzamasından dolayı oluşan sehimin yan açıklık uzunluğuyla değiştiği görülmektedir. Verilmiş varsayımlar altında minimum sehim, ankraj kablosunun 45° 'lik eğimine uygun olarak $a_a \sim 0.3 a_m$ için olur. 0.50 üzerindeki a_a/a_m değerleri için ankraj kablosunun uzamasından ötürü

oluşan sehim hızlı bir artış gösterir. $a_a/a_m \sim 0.63$ değerinden sonra ankraj kablosunun uzamasıyla oluşan sehim, eğik kablonun uzamasıyla oluşan sehimini geçer.

Genellikle asma sistemde olduğu gibi, yan açıklık uzunluğunun fan sistemin şekil değiştirme özellikleri üzerine kesin bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Böylece rijitlik gerekli olduğunda küçük yan açıklıklar tercih edilir.

Şekil 3.72'nin ankraj kablosunun sehim etkisini içermediğine dikkat edilmelidir. Büyük açıklıklı köprülerde yan açıklıklar büyüdükçe bu etki, sehimini daha da artırma eğiliminde olabilir.

$a_a = 0.5 a_m$ olan bir sistem için açıklık ortasındaki sehimin, bağıl kule yüksekliği (h/a_m) ile değişimi Şekil 3.73'de gösterilmiştir. Minimum sehim $h/a_m = 0.69$ 'da olmaktadır. Bununla birlikte $h/a_m = 0.5$ değerindeki sehim, $h/a_m = 0.69$ değerindeki sehimden sadece %5 daha büyüktür.

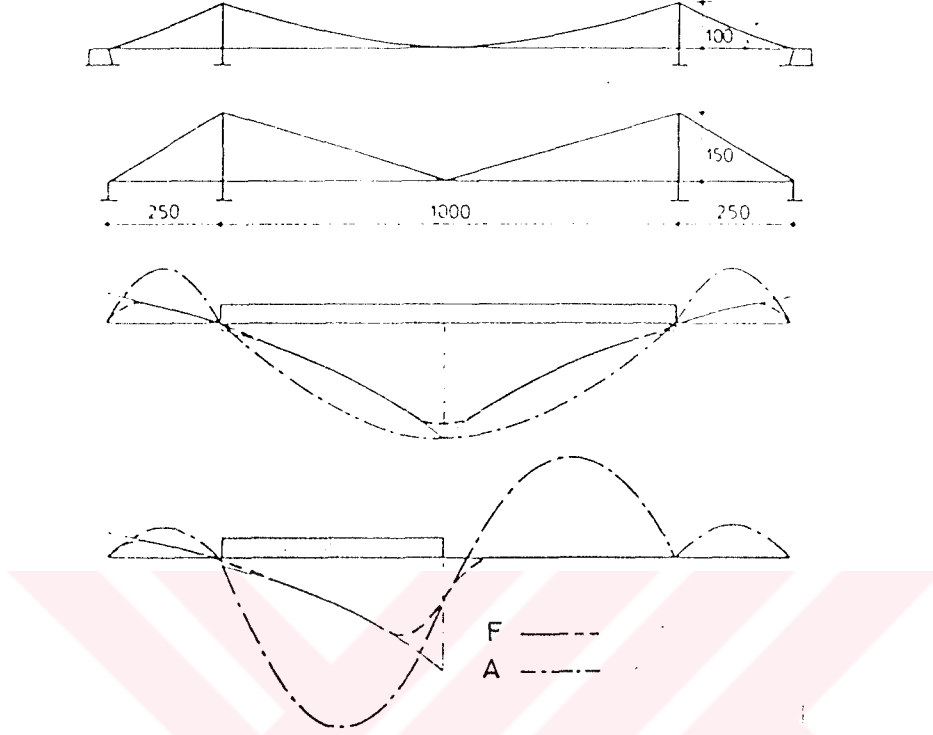


Şekil 3.73 Bağıl kule yüksekliği (h/a_m) ile orta açıklık sehimini (δ_y) arasındaki değişim.

Asma sistem ile fan sistemin şekil değiştirme özellikleri arasındaki bazı temel farklılıklar, Şekil 3.74'te örneklerle gösterilmiştir. Bu eğriler, rijitlik kirişi ve kulenin eğilme rijitliğinin ihmal edildiği ve tüm kabloların aynı maksimum gerilmeye (= emniyet gerilmesi σ_c) göre projelendiği varsayımına dayanır.

Rijitlik kirişinin eğilme rijitliği sıfır kabul edildiğinde, ana açıklıktaki hareketli yük için açıklık ortasındaki sehim pratik olarak iki sistem için aynıdır. Bununla birlikte gerçek yapılarda rijitlik kirişi, açıklığın ortasında fan sistemin sehim eğrisini kaçınılmaz olarak

yuvarlaklaştıracaktır (kesik çizgiyle gösterildiği gibi) ve bu maksimum sehimin sistemde biraz azaldığını gösterir.



Şekil 3.74 Asma ve fan sistemin sehimleri arasındaki karşılaştırma.

Yan açıklıklarda, asma sistem fan sistemden önemli ölçüde büyük bir yükselme (yukarıya sehim) gösterir.

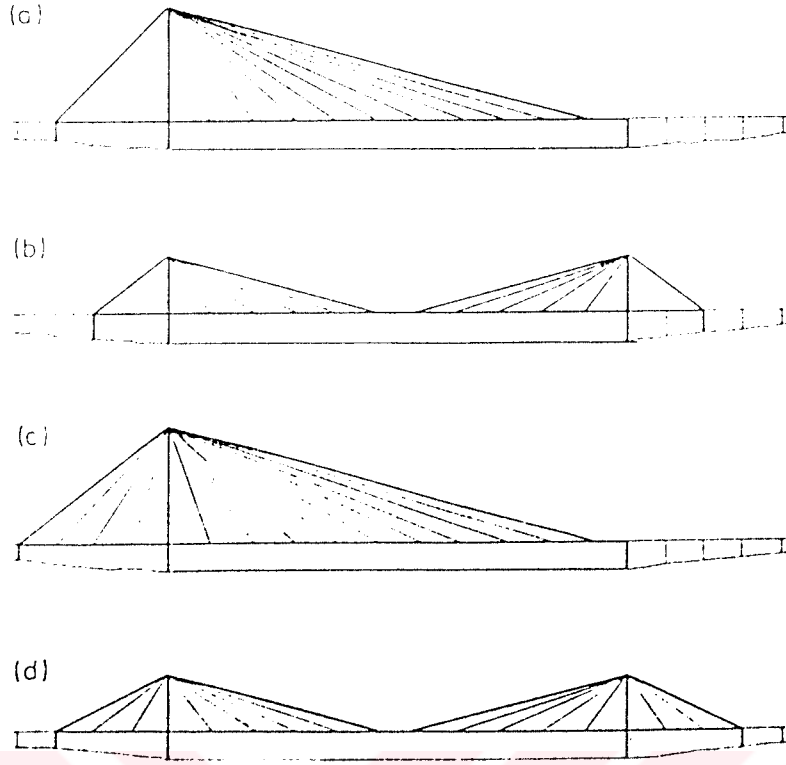
Ana açıklığın sadece bir yarısında asimetrik hareketli yük altındaki fan sistemde, yüklenmiş yarı kısmın sehim, kirişin rijitliği ihmal edildiğindeki simetrik durumla tamamen aynı olacaktır. Asimetrik hareketli yük altındaki asma sistemde, yüksüz bölgelerde dikkate değer bir yükselme olur.

Fan sistem, yüklü bölgelerde yoğunlaşmış sehimlere sahiptir. Oysa asma sistem yüksüz bölgelerde de önemli sehimler (yükselme) gösterir.

3.3.10. Yapısal sistemler

Bir ana açıklığa sahip köprülerde fan şekilli kablo sistemini düzenlemede bir çok farklı düzenlemeler Şekil 3.75’de görüldüğü gibi mevcuttur:

- (a) bir ankraj kablolu tek fan;
- (b) her biri bir ankraj kablosuna sahip iki tek fan;
- (c) bir çift fan;
- (d) iki çift fan.



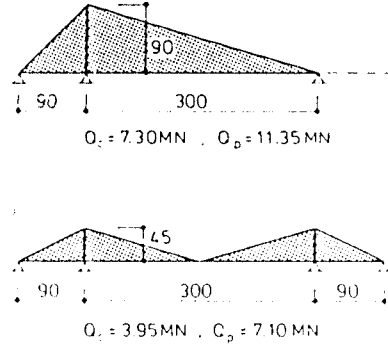
Şekil 3.75 Büyük bir ana açıklık tarafından desteklenen fan şekilli kablo sisteminin farklı düzenlemeleri.

Verilen bir durumda bu çözümlerden birini seçebilmek, köprünün yapılacağı yerdeki yerel koşullara bağlıdır. Böylece (a) ve (b) çözümleri, kuleler kadar olan yol boyunca sık aralıklarla yerleştirilmiş ayaklara sahip yaklaşma açıklıklarına gereksinim gösterir. (a) ve (c) çözümleri sağdaki ana ayağın hemen dış tarafında eğri yaklaşma rampalarının yapımına olanak verirler.

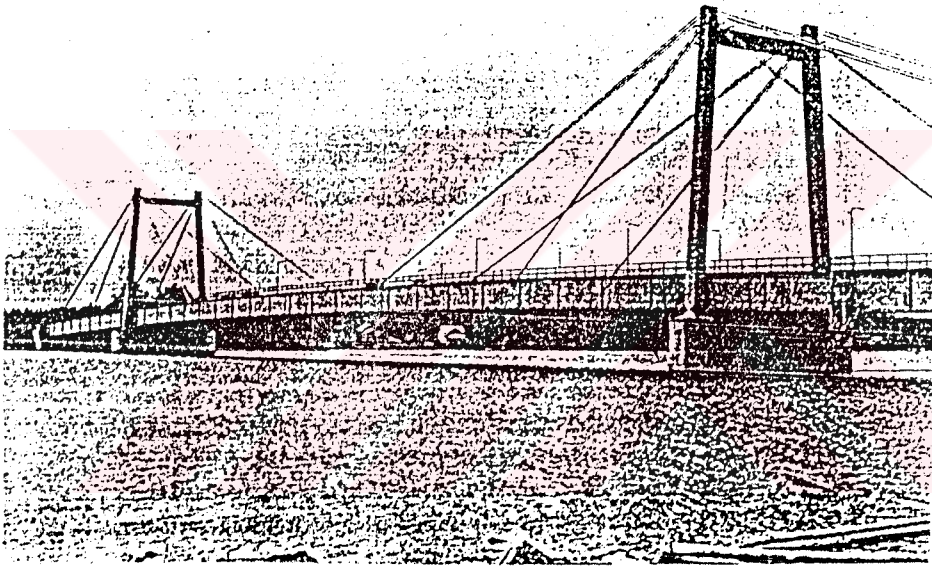
Şekil 3.76'da gösterildiği gibi, genellikle kablo çeliği ve kulelerdeki yapı çeliği (veya beton) miktarları iki çift fana sahip köprülerde minimumdur. Şekilde çelik miktarına ilişkin verilmiş olan değerler (3.50), (3.51), ve (3.55) denklemlerine göre bulunmuştur.

Örnekte verilen miktarlar incelendiğinde, iki çift fana sahip sistem sadece bir çift fana sahip sisteme dönüştürüldüğünde kablo çeliği miktarının %85 ve yapı çeliği miktarının ise %65 civarında arttığı görülür. Böylece, tek çift fan sistem çok uygun olmadıkça, genellikle iki çift fana sahip simetrik sistem tercih edilmektedir.

Şekil 3.77'de gösterilmiş olan Strömsund Köprüsü'nde olduğu gibi, fan sisteme sahip ilk eğik askılı köprülerde, çok az sayıda bir noktada toplanmış eğik kablolar kullanılmıştır.



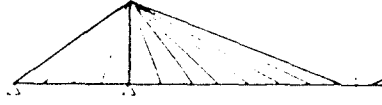
Şekil 3.76 Bir çift fanlı ve iki çift fanlı köprüde, Q_p kule malzemesi ve Q_c kablo çeliği miktarları arasındaki karşılaştırma. Bu karşılaştırmada şu parametreler kullanılmıştır: $w = 0.20 \text{ MN/m}$, $p = 0.08 \text{ MN/m}$, $\sigma_c = 720 \text{ MN/m}^2$, $\gamma_c = 0.08 \text{ MN/m}^3$, $\sigma_p = 160 \text{ MN/m}^2$, $\gamma_p = 0.08 \text{ MN/m}^3$.



Şekil 3.77 Strömsund Köprüsü.

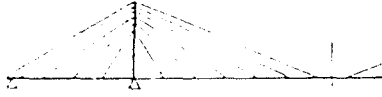
Az sayıda eğik kablolarla sahip köprülerde, kirişin büyük eğilme rijitliği yan açıklıktaki hareketli yük altındaki ankraj kablosunun çok fazla yüklenmesini önlediğinden, fanlar kuleye göre simetrik yapılabilirler. Ayrıca çok az sayıda eğik kabloya sahip köprülerde yan açıklık uzunluğu, az bir farkla ana açıklığın yarısının altında kalır.

Çok kablolu sisteme ve narin rijitlik kirişine sahip gerçek eğik askılı köprülerde, ankraj kablosunda gerekli olan minimum çekme, bütün yükleme durumlarında gerçekleşmediğinden dolayı, simetrik bir fan sistem mümkün değildir. Sonuç olarak Şekil 3.78'de görüldüğü gibi, simetrik olmayan fanlar kullanılmalıdır. Böylece bu sistemde ankraj kablosu, eğik kablolardan çok daha büyük enkesitlerde yapılmalıdır.



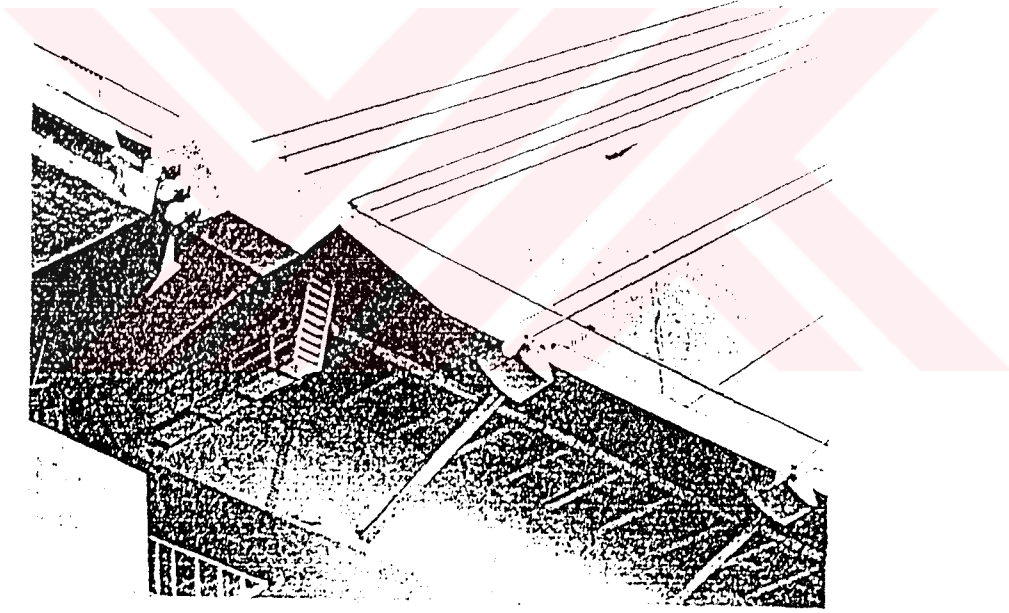
Şekil 3.78 Ana açıklık fanından daha kısa bir açıklığa sahip çok kablolu sistem.

Çok kablolu fanlarda kablo bağlantıları, kule tepesinde belirli bir uzaklık üzerine dağıtılır. Dolayısıyla sistem gerçekten değişiklik yapılmış bir fan sistem olur. Şekil 3.79’da görüldüğü gibi ankraj kablosu, çoğunlukla birkaç tekil halattan oluşmaktadır.



Şekil 3.79 Birkaç paralel tekil halattan oluşan ankraj kablosu.

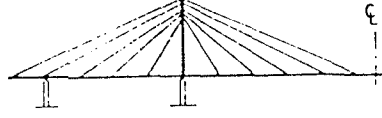
Yan açıklık/ana açıklık oranı 0.30 olan ve ankraj kablosu üç tekil halattan oluşan böyle bir düzenleme Köhlbrand Köprüsü’nde bulunmaktadır (Şekil 3.80).



Şekil 3.80 Üç tekil halattan oluşan ankraj kablosu.

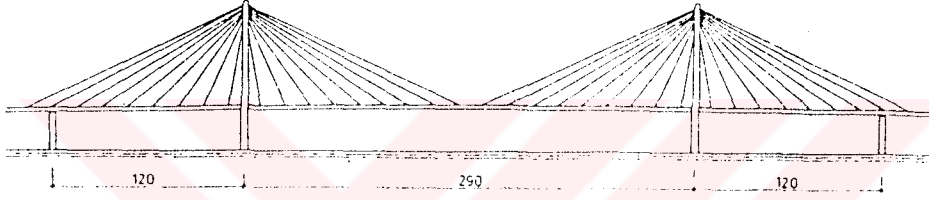
Bununla birlikte Şekil 3.81’de görüldüğü gibi son ayak, yan açıklık tepe kablosunun rijitlik kirişine bağlantı yerinden kuleye doğru yer değiştirirse, çok kablolu sistemde simetrik fan hala uygulanabilir. Bu düzenleme ile yan açıklık uzunluğunun ana açıklık uzunluğunun yarısından daha az olması sağlanır ve yan açıklık fanında en üstteki birkaç kablo, ankraj kablosu oluşturmak için çalıştırılabilir. Bununla birlikte, bu son ayağın

yakınında rijitlik kirişinin önemli yerel eğilmesine yol açar. Son ayağın üstünde ise bir yerel eğilme görülmez.



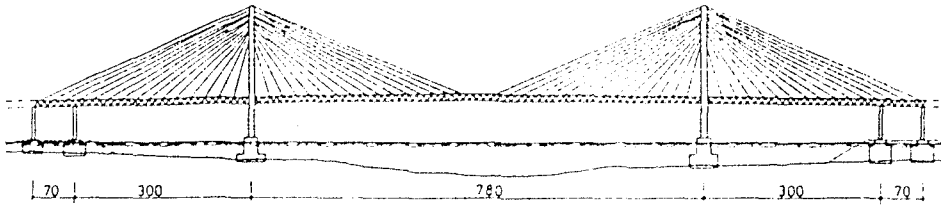
Şekil 3.81 Son ayağın yerdeğiştirmesi ile elde edilen çok kablolu simetrik fan sistem.

Son ayağı yerdeğiştirmiş simetrik çok kablolu fanlar, Danimarka'da Faro Köprüsü'nde görülür (Şekil 3.82). Burada son ayak, fanın sonundan kuleye doğru 16 m. uzaklıktaki ikinci kablonun ankraj noktasının altına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Böylece yan açıklığın dıştaki üç kablosu, ankraj kablolarını oluşturan bir parça olarak kabul edilebilir.



Şekil 3.82 Faro Köprüsünün kablo sistemi.

Danimarka'da Great Belt üzerinde 780 m. geniş ana açıklıklı eğik askılı köprü için çift son ayağa sahip simetrik fanlı sistem projelendirilmiştir (Şekil 3.83). Ağır çift tabliyeli kafes kirişle birlikte bu çift ayak, dıştaki yan açıklık tepe kablolarının bağlantısı için çok sağlam bir taban oluşturur. Ağır demiryolu yüklerini taşımak için planlanan bu köprüde böyle bir sistem zorunludur.

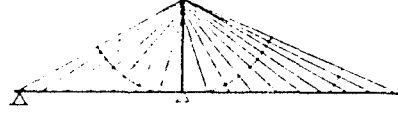


Şekil 3.83 780 m. ana açıklığa sahip eğik askılı köprü için planlanan sistem.

3.3.11 Sehim değişimlerinin azaltılması

Fan sisteme sahip eğik askılı köprüler, yatay izdüşümleri 300 – 400 m.'yi aşan eğik kablolarla gereksinim gösteren çok büyük açıklıklı olarak yapılacak olurlarsa, böyle uzun serbest kablolarla sehim etkisi nedeni ile sorunlar çıkabilir. Büyük açıklıklı köprülerde ana

kabloların sehim değişimlerini azaltmak için asıl kablo sistemine ikincil kablo sisteminin eklenmesi yarar sağlar. Bu amaçla Şekil 3.84'te gösterilmiş olan kablo sistemi geliştirilmiştir. Asıl ve ikincil kablolar arasında basit bağlantı oluşturmak için, asıl ve ikincil kablolar birbirlerine dik olacak şekilde bağlanırlar.



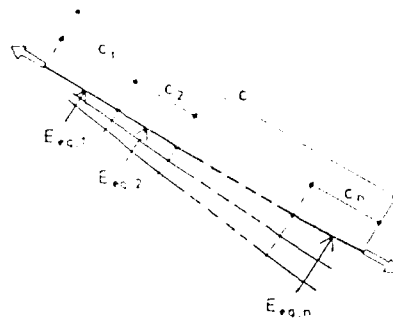
Şekil 3.84 Asıl eğik kabloların sehimini azaltan ikincil kablolara sahip fan sistem.

İkincil kabloların etkinliği hakkında fikir edinmek amacıyla bir örnek vermek gerekirse, yatay izdüşüm uzunluğu 600 m. olan bir serbest eğik kablonun sehimini (kablo parçasına dik olarak ölçülen), gerilme 540 MN/m^2 den 720 MN/m^2 ye arttığında 7.00 m.'den 5.30 m.'ye azalmaktadır. Oysa ikincil kablolara sahip bir sistem için sehim değişimi (bu kabloların elastik şekil değiştirmesi yardımıyla), 0.20 – 0.30 m. arasında sınırlandırılır.

Öntasarım çalışmalarında, ikincil kablolardan destek alan uzun bir eğik kablonun rijitliği aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\frac{c}{E_{eq}} = \frac{c_1}{E_{eq,1}} + \frac{c_2}{E_{eq,2}} + \dots + \frac{c_n}{E_{eq,n}} \quad (3.69)$$

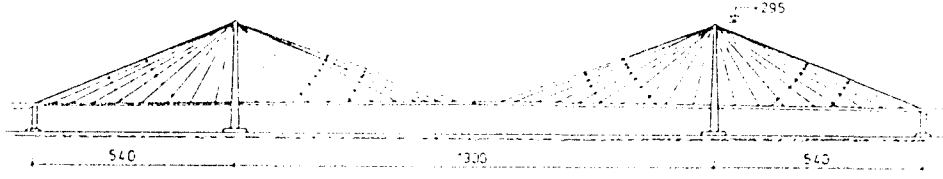
burada c , kablonun toplam kiriş uzunluğu, $c_1, c_2, \dots, c_n$ ikincil kablolarla desteklenmiş pano noktaları arasındaki kiriş uzunluklarıdır, $E_{eq,1}, E_{eq,2}, \dots, E_{eq,n}$ ise pano noktaları arasındaki kablo parçalarının eşdeğer elastisite modülleridir (Şekil 3.85).



Şekil 3.85 İkincil kablolarla desteklenen eğik kablo.

Kesin hesaplamalarda, asıl eğik kablolardan ve ikincil kablolardan oluşan bir sistem, tüm pano noktalarını bağlayan tekil kablo elemanlarından oluşmuş bir kablo ağı olarak dikkate alınmalıdır.

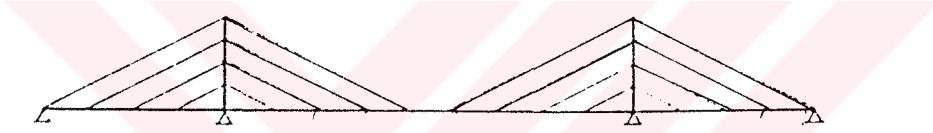
Ana kabloların sehim değişimini azaltmak için ikincil kabloların kullanılması düşüncesi ilk kez Messina Boğazı üzerine 1300 m. açıklığa sahip bir eğik askılı köprünün projelendirilmesi sırasında ortaya çıkmıştır (Şekil 3.86).



Şekil 3.86 1300 m.'lik uzun açıklığa sahip eğik askılı köprü planı.

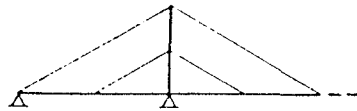
3.4. Harp Sistem

Kulelerde ve kablolu yan açıklıkların sonlarında yerleştirilmiş mesnetlere sahip bir harp sistemi, daha önceden de işaret edildiği gibi, stabil olmayan kablo sistemini içerir. Dolayısıyla dengeyi sağlamak için (Şekil 3.87) kirişin ve kulelerin eğilme rijitliği dikkate alınmalıdır.



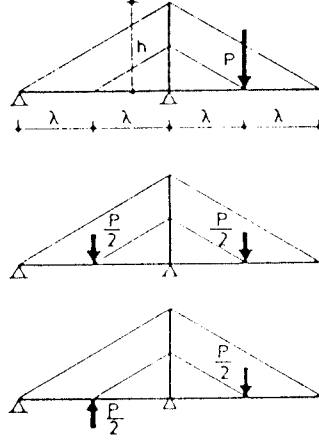
Şekil 3.87 Harp sisteme sahip üç açıklıklı eğik askılı köprü.

Harp şekilli bir kablo sistemine sahip yapıda ortaya çıkan kuvvetlerin ve momentlerin özelliklerini incelemek amacıyla, Şekil 3.88'de gösterilmiş olan basit örneğe bakmak yeterli olacaktır. Sistemin kulede ve sol uçta mesnetli, sağ uçta ise serbest olduğu düşünülmüştür. Bu sistemde üstteki eğik kablo sondaki mesnede bağlanmakla stabil duruma geçer. Stabil olmayan kablo sistemine ilişkin sorunlar ise alttaki eğik kablodadır.



Şekil 3.88 Basit harp sistem.

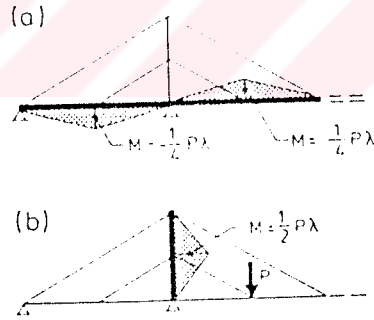
Altındaki eğik kablonun bir ucuna etkiyen tekil yük, Şekil 3.89'da görüldüğü gibi, simetrik ve asimetrik durum olarak ikiye ayrılır. Simetrik durumda alttaki eğik kablo dengededir ve bunun sonucu olarak kuvvetler kabloda çekme, kirişte basınç şeklindedir. Asimetrik durumda ise kuvvetler kaçınılmaz olarak rijitlik kirişinde veya kulede veya her ikisinde de eğilme momenti meydana getirecektir.



Şekil 3.89 Tekil yükün simetrik ve asimetrik şekilde yükleme durumu.

Kule önemsiz eğilme rijitliğine sahipse veya alttaki kablo hareketli mesnete sabitlenmişse, momentler tamamıyla rijitlik kirişinde oluşacak ve eğilme moment diyagramları Şekil 3.90(a)'da gösterildiği gibi olacaktır.

Diğer yandan kule önemli ölçüde eğilme rijitliğine sahip olacak şekilde yapılmışsa ve rijitlik kirişi narinse, Şekil 3.90(b)'de gösterildiği gibi, kulede eğilme momentleri meydana gelecektir. Yukarı doğru olan sol kuvvetin iletimi bitişik eğik kabloya basınç kuvveti şeklinde yansıyacaktır; fakat bu basınç kuvveti bu eğik kabloda yalnızca başlangıçtaki sabit yük çekme gerilmesinde bir azalmaya neden olacaktır.

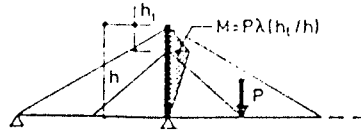


Şekil 3.90 Yükleme durumu için (Şekil 3.89) kule veya rijitlik kirişinde oluşan momentler:
(a) rijit kiriş ve narin kule;
(b) narin kiriş ve rijit kule.

Şekil 3.90 incelendiğinde, rijit kulede ortaya çıkan maksimum momentin, rijit kirişte ortaya çıkan maksimum momentin iki katı kadar olduğu görülür. Bununla birlikte, gereksinim duyulan malzemenin seçimi öncelikle moment diyagramları alanıyla belirlendiğinden ve bu alan sistem (a) için $0.5P\lambda^2$ ve sistem (b) için $0.25P\lambda h$ ($h = 0.8\lambda$ için $0.2P\lambda^2$, $h = 1.0\lambda$ için $0.25P\lambda^2$) olduğundan, sistem (b)'yi uygulamanın sistem (a)'ya göre

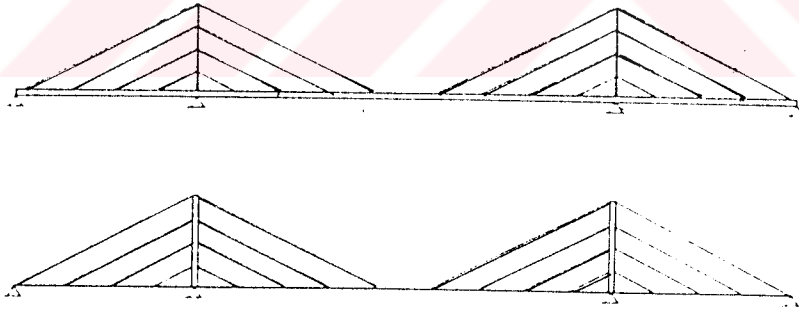
daha etkili olduğu görülür. Fakat rijitlik kirişinin daha uygun enkesitli yapılabilmesi nedeni ile tüm mesele, optimum bir çözüm belirlemek için daha ileri bir araştırmaya gereksinim duyulmasıdır.

Eğilmenin kulede olması seçimi yapılırsa, Şekil 3.91’de gösterilen değişikliğe uğramış harp sistemi uygulanarak tasarruf sağlanabilir. Burada maksimum moment $P\lambda h_t/h$ ve moment eğrisi alanı $0.5 P\lambda h_t$ olur. $h_t = h/4$ alındığında alan Şekil 3.90(b)’deki bulunan alanın yarısı olur. $h_t \rightarrow 0$ için harp sistem stabil fan sistemine dönüştüğünden, kuledeki momentinde ortadan kalkacağına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.91 Değiştirilmiş harp sistemle rijit kulede oluşan moment.

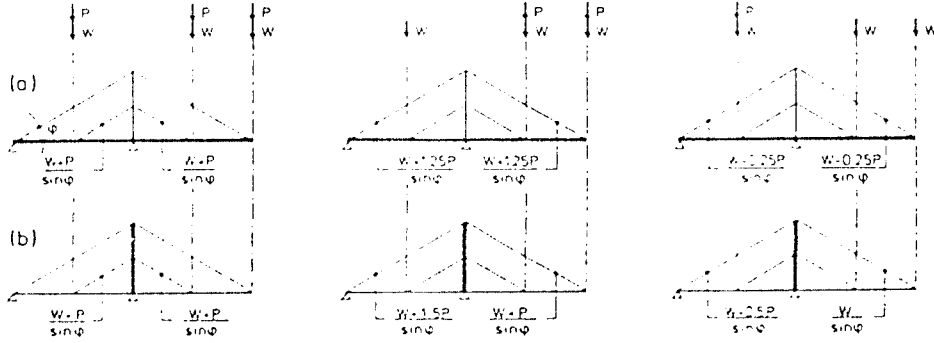
Daha önce belirtildiği gibi, harp şekilli kablo sistemli köprülerin stabilitesi başlıca iki yapısal sistemle gerçekleştirilebilir: Şekil 3.92’de görüldüğü üzere, ya rijit kiriş ve narin kule yada narin kiriş ve rijit kule uygulaması. Bu iki sistem arasında eğilme momentlerinin kiriş ve kule arasında paylaştırıldığı sonsuz sayıda ara yapısal sistemler mevcuttur. Maksimum momentler, maksimum eğilme rijitliğine sahip elemanlarda olacağından, bu paylaşım büyük ölçüde boyutların seçimini yapan projeci tarafından kararlaştırılır.



Şekil 3.92 Harp sistemli üç açıklıklı eğik askılı köprü: üstte, kirişte eğilme rijitliği önemli; altta, kulede eğilme rijitliği önemli.

İki ana yapısal sistemin moment dağılımı Şekil 3.90’da gösterilmiştir. Kablo kuvvetleri üzerindeki etkisini göstermek amacıyla Şekil 3.93’te üç yükleme durumu gösterilmiştir. Üç yükleme durumu da, kirişe kablo birleşim noktalarında etkiyen tekil yükleri içeren ekstrem kuvvetleri göstermektedir. Verilen kuvvetler, Şekil 3.90’daki

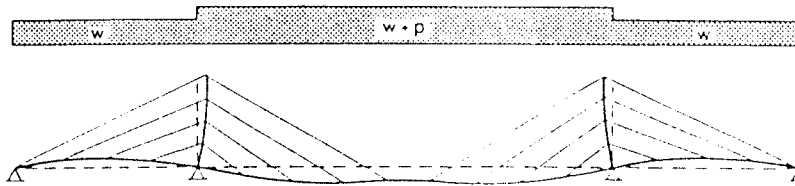
momentlerin hesaplanmasında uygulanmış olan aynı basitleştirilmiş varsayımlara dayanmaktadır.



Şekil 3.93 Üç yükleme durumuna göre harp sistemde maksimum/minimum kablo kuvvetleri: (a) rijit giriş ve narin kule; (b) narin giriş ve rijit kule.

Şekil 3.93 incelendiğinde, alttaki eğik kablodaki maksimum proje kuvvetinin seçilen yapısal sistemden bağımsız olduğu, oysa üstteki eğik kabloda ise proje kuvvetinin seçilmiş sistem tarafından etkilendiği görülür. Sistem (b)'de üstteki yan açıklık kablosu, boyuna hareketlere karşı kulenin tepesini kontrol eden bir ankraj kablosu gibi davranır. Fan sistemli köprülerdeki ankraj kablosu gibi, sistem (b)'deki ankraj kablosu da eğik kablolardan daha büyük kuvvet değişiminde kendini gösterir. Böylece hareketli yük/sabit yük oranı p/w 'nin, gerilme oranı κ ile ilgili olarak Şekil 3.56'da gösterilmiş olan benzer bir irdeleme, rijit kulelerce stabilize edilmiş harp sistemli köprüler içinde gereklidir.

Kirişin ve kulelerin eğilmesi nedeniyle, sadece ana açıklıktaki hareketli yük altındaki harp sistemin şekil değiştirmesi, açıklık ortasından ziyade, açıklığın dörtte birine yakın kısımlardaki daha büyük sehimlerle karakterize edilebilir (Şekil 3.94). Bu ana açıklığın orta kısmının, son mesnette düşey olarak sabitleştirilmiş olan üstteki eğik kablo tarafından desteklenmiş olmasındandır. Oysa tek taraflı yük altındaki alttaki eğik kablolar, yan açıklığı yukarı doğru itecek ve dolayısıyla bu ana açıklığa daha esnek bir destek verecektir. Kuleye göre dengesiz bir yük etkisinde kalan harp sistemde özel sorunların çıkacağı yukarıdaki basit sistemlerin incelenmesinden anlaşılır.



Şekil 3.94 Hareketli yükte yalnız ana açıklıktaki harp sistemin şekil değiştirmesi.

3.4.1. Sabit yük geometrisi

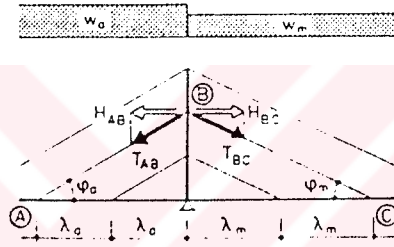
Sabit yükten kaynaklanan gereksiz eğilmeden kaçınmak amacıyla harp sisteminin sabit yük geometrisi, genellikle sabit yükün dengelendiği şekilde seçilir. Sabit bir yük için bu basit olarak, kuleye göre eğik kabloların simetrik düzenlenmesi sonucunu doğurur.

Şekil 3.95’de gösterildiği gibi, ana açıklık sabit yükü w_m ve yan açıklık sabit yükü w_a arasındaki fark için, AB eğik kablusunun yatay bileşeni H_{AB} , BC eğik kablusunun yatay bileşeni H_{BC} ’ye eşit olursa dengeleme şöyle olur:

$$w_a \lambda_a \cotan \varphi_a = w_m \lambda_m \cotan \varphi_m$$

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_m} = \sqrt{\frac{w_a}{w_m}} \quad (3.70)$$

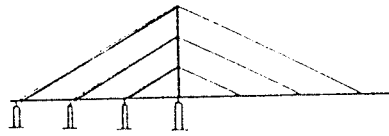
Sonuç olarak denge elde etmek için kablo birleşim noktaları arasındaki uzaklık, sabit yük şiddetinin kare köküyle ters orantılı olmalıdır.



Şekil 3.95 Ana açıklık ve yan açıklıkta farklı sabit yük şiddetindeki harp sistem.

3.4.2. Ara mesnetler

Stabil kablo sistemi olması nedeni ile harp sistemin sakıncaları, yan açıklıklardaki tüm kablo birleşim noktalarının altına ara mesnetler yerleştirilerek tamamen giderilebilir (Şekil 3.96). Şekil 3.17’de açıklandığı gibi, kablo sistemi birinci derece stabil sisteme dönüşür.

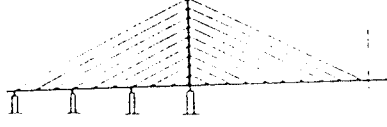


Şekil 3.96 Harp sistemin yan açıklıkta birleşim noktalarının altındaki ara mesnetler.

Desteklenmiş yan açıklıklara sahip olduğunda, dengesiz sabit yük ara mesnetler tarafından alınabildiğinden sabit yükün dengelenmesi gereksiz olur.

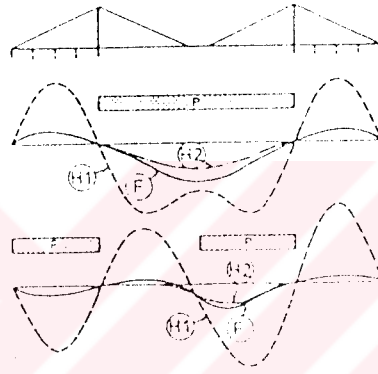
Çok kablolu harp sistem için, yan açıklıkta tüm kablo birleşim noktaları altında ara mesnetlere sahip olması uygun olmaz. Çünkü bu, çok fazla sayıda mesnedin konmasına neden olur. Bununla birlikte, zaten bir veya iki ara mesnetle (Şekil 3.97), yan açıklık

kirişinin eğilme şekil değiştirmeleri azaltılacaktır. Öyle ki, şekil değiştirme özellikleri sürekli destekli yan açıklıklara sahip sistemin şekil değiştirme özelliklerine yakın olur.



Şekil 3.97 Çok kablolu harp sistemde iki ara mesnetli yan açıklık.

Yan açıklıkları desteklemenin etkisi, Şekil 3.98'deki sehim eğrileriyle açıklanabilir. Bu eğriler, biraz aşırı narinlikteki bir rijitlik kirişini içeren modellemeye dayanır ve bu nedenle elde edilen sonuçlar gerçek yapılar için bulunanlara göre biraz abartılıdır.



Şekil 3.98 İki yükleme durumuna göre üç açıklıklı köprünün sehimleri: F, fan sistem; H1, yan açıklıkları mesnetsiz harp sistem; H2, yan açıklıkları mesnetli harp sistem.

Genellikle çok büyük sehimlerin, mesnetlenmemiş yan açıklıklara sahip harp sisteminde (sistem H1) olduğu görülür. Oysa fan sistem (sistem F) ve mesnetli yan açıklıklara sahip harp sistemin (sistem H2) her ikisi de yüksüz bölgelerde çok az ters sehimle karakterize edilirler.

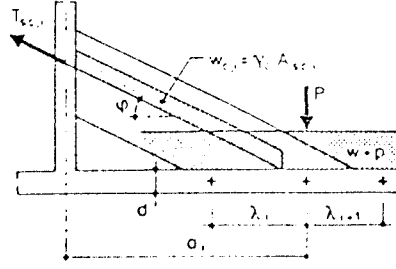
3.4.3. Kablo boyutlarının öntasarımı

Öntasarım işlemlerinde eğik kabloların enkesiti, fan sisteminde kullanılmış olan denklemlerle belirlenebilir. Böylece harpın iç tarafındaki tüm eğik kablolar (Şekil 3.99) için enkesit aşağıdaki denklemle bulunur:

$$A_{sc,i} \cong \frac{(w + p + P/30d)(\lambda_i + \lambda_{i+1}) \cos \varphi}{2(\sigma_c \sin \varphi \cos \varphi - \gamma_c a_i)} \quad (3.71)$$

bu denklem (3.46) ile aynıdır.

Şekil 3.95'de gösterildiği gibi, basitleştirilmiş modelde tepe kablosu için proje kuvvetleri, kirişin ve kulenin rijitlik özelliğine bağlı olacaktır.

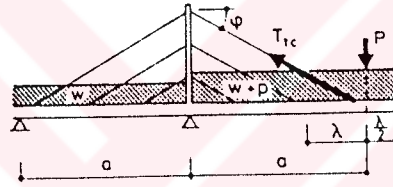


Şekil 3.99 Alt eğik kablolarda maksimum kuvvet için yükleme durumu.

Asıl eğilme rijitliğinin kirişte olduğu bir köprüde (Şekil 3.100) maksimum tepe kablosu kuvveti T_{tc} aşağıdaki denklemle bulunur:

$$T_{tc} \cong \frac{(w + p)\lambda + (1/4)pa + P}{\sin \varphi} + \gamma_c A_{tc} \frac{a}{2 \sin \varphi \cos \varphi} \quad (3.72)$$

burada A_{tc} , tepe kablusunun enkesit alanıdır.



Şekil 3.100 Rijit kirişe sahip harp sistemin tepe kablосundaki maksimum kuvvet için yükleme durumu.

$T_{tc} = A_{tc} \sigma_c$ alınarak, A_{tc} için aşağıdaki denklem yazılabilir:

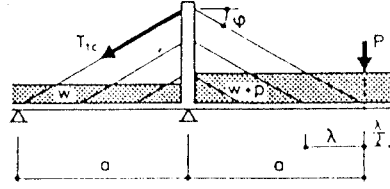
$$A_{tc} \cong \frac{(w + p)\lambda + (1/4)pa + P}{\sigma_c \sin \varphi \cos \varphi - \gamma_c a} \cos \varphi \quad (3.73)$$

Asıl eğilme rijitliğinin kulede olduğu bir köprüde (Şekil 3.101), ana açıklıktaki tepe kablosu düzenli eğik kablolar gibi dikkate alınabilir. Fakat yan açıklık tepe kablосundaki maksimum kuvvet T_{tc} aşağıdaki denklemden bulunur:

$$T_{tc} \cong \frac{(w + p)\lambda + (1/2)pa + P}{\sin \varphi} + \gamma_c A_{tc} \frac{a}{\sin \varphi \cos \varphi} \quad (3.74)$$

buradan enkesit alanı A_{tc} şöyle hesaplanır:

$$A_{tc} \cong \frac{(w + p)\lambda + (1/2)pa + P}{\sigma_c \sin \varphi \cos \varphi - \gamma_c a} \cos \varphi \quad (3.75)$$



Şekil 3.101 Rijit kuleye sahip harp sistemin yan açıklık üst kablosundaki maksimum kuvvet için yükleme durumu.

Harp sistemli ve mesnetli yan açıklıklı köprülerde ana açıklığın tüm kabloları, düzenli eğik kablolar gibi işlem görebilir ve böylece kablo boyutlarının ön tasarımında kablo enkesit alanları denklem (3.71)'den bulunur.

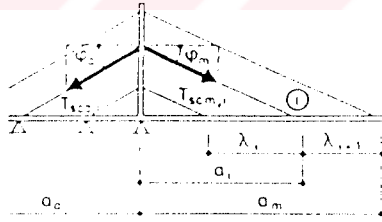
Yan açıklıktaki eğik kablolardaki kuvvetler, kulede yatay denge durumunu yazarak bulunurlar:

$$T_{sca,i} \cos \varphi_a = T_{scm,i} \cos \varphi_m$$

Şekil 3.102'deki aynı sembolleri kullanarak $A_{scm,i}$ ve $A_{sca,i}$ enkesit alanları aşağıdaki gibi olur:

$$A_{scm,i} \cong \frac{w + p + P/30d}{\sigma_c \sin \varphi_m \cos \varphi_m - \gamma_c a_i} \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2} \cos \varphi_m$$

$$A_{sca,i} \cong \frac{w + p + P/30d}{\sigma_c \sin \varphi_m \cos \varphi_m - \gamma_c a_i} \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2} \frac{\cos^2 \varphi_m}{\cos \varphi_a} \quad (3.76)$$



Şekil 3.102 Yan açıklığı mesnetli harp sistemin kablo kuvvetleri.

3.4.4. Kablo çeliği miktarı

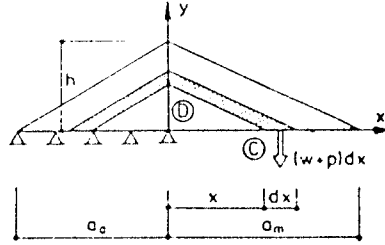
Harp şekilli kablo sistemine ve mesnetlerle desteklenmiş yan açıklıklara sahip bir köprüde kablo çeliği miktarı için denklemlere ulaşmak amacıyla, Şekil 3.103'te gösterilen sürekli sistem göz önünde bulundurulacaktır.

C – D kablosu için kablo çeliği miktarı dQ_m aşağıdaki gibi olur:

$$dQ_m \cong \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \frac{a_m^2 + h^2}{a_m h} \left(x + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \frac{a_m^2 + h^2}{h a_m} x^2 \right) dx \quad (3.77)$$

ve ana açıklık harpinin çelik miktarı da şöyle bulunur:

$$Q_{Hm} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \frac{a_m^2 + h^2}{a_m h} \left(\frac{1}{2} + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \frac{a_m^2 + h^2}{3h} \right) a_m^2 \quad (3.78)$$



Şekil 3.103 Ana açıklıkta $w+p$ yüküne ve yan açıklıkta ara mesnetlere sahip sürekli harp sistemin idealize edilmiş şekli.

Yan açıklık için denklemler ise şu şekildedir:

$$dQ_a \cong \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \frac{a_a^2 + h^2}{a_a h} \left(x + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \frac{a_a^2 + h^2}{h a_m} x^2 \right) dx \quad (3.79)$$

$$Q_{Ha} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \frac{a_a^2 + h^2}{a_a h} \left(\frac{1}{2} + \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \frac{a_a^2 + h^2}{3h} \right) a_m^2 \quad (3.80)$$

3.4.5. Kuledeki çelik miktarı

Harp sistemde kule, kirişin üzerinde kalan kule yüksekliği boyunca dağıtılmış olarak bulunan kablo sisteminden gelen kuvvetleri alır. Oysa asma ve fan sistemlerde kablo sisteminden gelen kuvvet kulenin tepesinde etki eder.

Normal gerilme tüm kesitlerde aynı olursa, harp sistemde kirişin üzerinde kalan kule değişken enkesitte yapılabilir.

Bu araştırmada, kule enkesitinin tepede sıfırdan kirişte A_{pg} değerine doğrusal olarak değiştiği yeterli bir doğrulukla varsayılabilir (Şekil 3.104). Şu halde kirişin üzerinde kalan kule kısmı için çelik miktarı Q_{pt} aşağıdaki gibi olur:

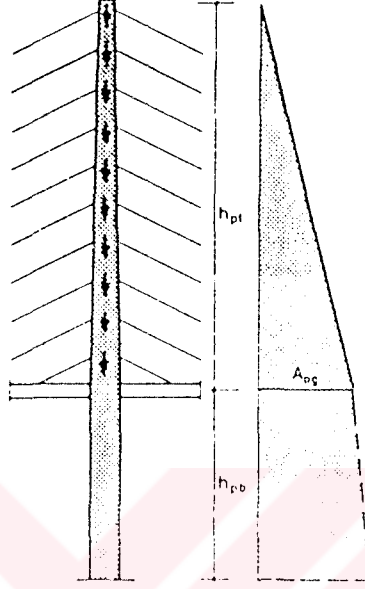
$$Q_{pt} = (1/2) \gamma_p A_{pg} h_{pt} \quad (3.81)$$

Kirişin üzerinde kalan kule kısmına etki eden kuvvetlerin düşey bileşeni şu şekilde olur:

$$N_{pg} = (w + p) a_m \frac{a_m + a_a}{a_a} + \frac{2a_a + a_m}{2a_a} Q_{Hm} + \frac{1}{2} Q_{Ha} + Q_{pt} \quad (3.82)$$

$N_{pg} = A_{pg} \sigma_p = 2 \frac{\sigma_p}{\gamma_p} \frac{Q_{pt}}{h_{pt}}$ alınırsa kirişin üzerinde kalan kule için çelik miktarı şöyle olur:

$$Q_{pt} = \frac{\gamma_p}{\sigma_p} \frac{(w + p)(a_m + a_a)a_m + (a_a + (1/2)a_m)Q_{Hm} + (1/2)a_a Q_{Ha}}{2 - (\gamma_p / \sigma_p)h_{pt}} \frac{h_{pt}}{a_a} \quad (3.83)$$



Şekil 3.104 Kiriş üzerindeki kulenin enkesit alanının doğrusal değişim varsayımı.

Kirişin altında kalan kule kısmı için normal kuvvetin değişimi sadece kulenin sabit yükü nedeniyle ve bu kısmın çelik miktarı Q_{pb} , $N_{pt} = N_{pg}$ ve $h_p = h_{pb}$ alınarak denklem (3.37) yardımıyla bulunur:

$$Q_{pb} = N_{pg} \left[\exp\left(\frac{\gamma_p}{\sigma_p}\right) - 1 \right] \quad (3.84)$$

Kuledeki toplam çelik miktarı ise şöyledir:

$$Q_p = Q_{pt} + Q_{pb} \quad (3.85)$$

3.4.6. Basitleştirilmiş denklemler

Fan sistemdeki durumda olduğu gibi, harp sistemde de kablo sisteminin ve kulenin kendi ağırlıklarının kuvvetler içindeki payı çok az bir öneme sahiptir. Böylece uygun açıklıklar için kablo sisteminin ve kulenin çelik miktarlarının bulunmasında aşağıdaki basitleştirilmiş denklemler kullanılabilir:

$$Q_{Hm} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \left(\frac{a_m}{h} + \frac{h}{a_m} \right) a_m^2 \quad (3.86)$$

$$Q_{Ha} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \left(\frac{a_a}{h} + \frac{h}{a_a} \right) a_m^2 \quad (3.87)$$

$$Q_{pt} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_p}{\sigma_p} \frac{(w + p)(a_m + a_a)a_m}{1 - (1/2)(\gamma_p / \sigma_p)h_{pt}} \frac{h_{pt}}{a_a} \quad (3.88)$$

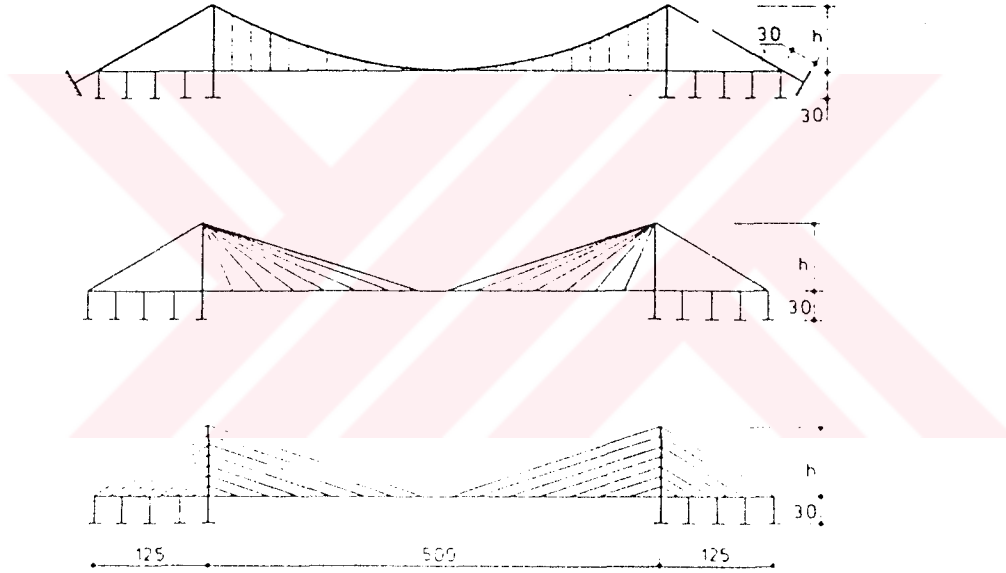
3.4.7. Toplam maliyet

Üç açıklıklı bir köprünün kablo sisteminin ve kulelerin toplam maliyeti C_{cp} aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$C_{Hcp} = 2(Q_{Hm} + Q_{Ha})u_c + 2Q_p u_p \quad (3.89)$$

Burada u_c , yapılmış ve korunmuş kablo çeliğinin birim fiyatı; u_p ise kule malzemesinin birim fiyatıdır.

Harp sistemli köprülerde gereksinim duyulan çelik miktarlarını, asma sistem ve fan sistemle karşılaştırmak amacıyla Şekil 3.105’de gösterilmiş olan örnek araştırılacaktır.

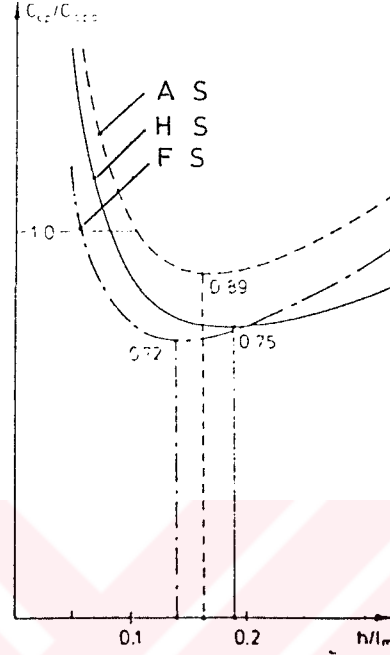


Şekil 3.105 Üç farklı kablo sistemine sahip köprülerin ilişkisi.

Görüldüğü gibi örnek olarak alınan köprü 500 m. ana açıklığa ve 125 m. yan açıklığa sahiptir. Bu, asma sistemli ve fan sistemli köprüler için sadece ana açıklığı kablolu bir çözüm ve harp sistemli köprü için ise yan açıklıklarında ara mesnetlere sahip bir çözüme götürür.

Şekil 3.108 bağıl maliyetin (C_{cp}/C_{cp0}), kirişin üzerinde kalan kule kısmının bağıl yüksekliğiyle (h/l_m) değişimi belirtilmiştir. Verilmiş varsayımlar altında kablo sistemi ve kuleler için fan sistemin minimum maliyeti verdiği; buna karşılık optimum harp sisteminin %5, optimum asma sisteminin ise %24 daha yüksek maliyet verdikleri görülmektedir.

Bununla birlikte, harp sistem ile fan sistem arasındaki fark çok küçük olduğundan, bu iki sistemden hangisinin uygun olduğuna karar verirken rijitlik kirisinin projelenmesi, yapım işlemi, kablo bağlantılarının düzenlenmesi gibi etkenlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.



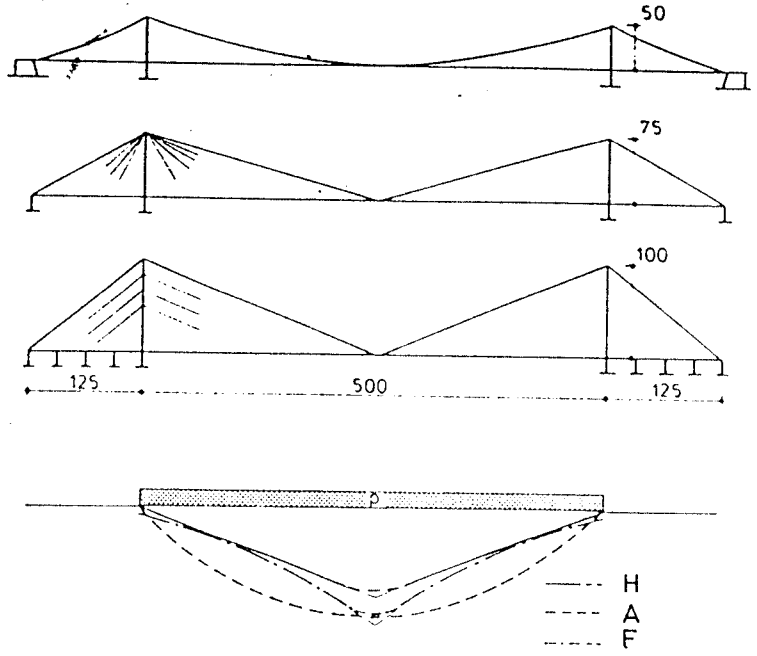
Şekil 3.106 Üç açıklıklı köprü sistemlerinin bağıl maliyet (C_{cp}/C_{opt}) değişimi (Şekil 3.105).

Şekil 3.106 incelendiğinde harp sistemde optimum kule yüksekliğinin, fan sistemdeki optimum kule yüksekliğinden yaklaşık %30 daha fazla olduğu görülür. Fan sistemde, kule yüksekliği verilen minimum maliyet değerini aştığında harp sistemde gelişmiş rijitlik özelliklerle karakterize edilir. Böylece harp sistemde bağıl yükseklik genellikle $0.20 < h/l_m < 0.25$ olacak şekilde seçilir.

3.4.8. Şekil değiştirme özellikleri

Üç esas kablo sisteminin şekil değiştirme özelliklerini göstermek amacıyla Şekil 3.107'de ana açıklığın tümünde hareketli yük altında oluşan sehim gösterilmiştir. Sehimler için, yükseklik/açıklık oranı asma sistemde $h_S/l_m = 0.10$; fan sistemde $h_F/l_m = 0.15$; harp sistemde ise $h_H/l_m = 0.20$ alınarak hesaplanmıştır.

Bu geometrik özelliklere göre, açıklık ortasındaki sehim harp sistemde minimumdur. Ayrıca asma sistemin sehim eğrisinin içbükey, fan sistemin sehim eğrisinin dışbükey ve harp sistemin sehim eğrisinin doğru olduğuna dikkat edilmelidir.



Şekil 3.107 Üç basit kablo sistemindeki sehimler.

3.4.9. Yapısal sistemler

Harp sistemle yapılmış ilk kablolu köprülerin tümü, kuleye göre simetrik olarak düzenlenmiş, az sayıda eğik kablolar ve ağır rijitlik kirişlere sahip olmalarına karşılık, kuleler genelde narindir (Şekil 3.108).

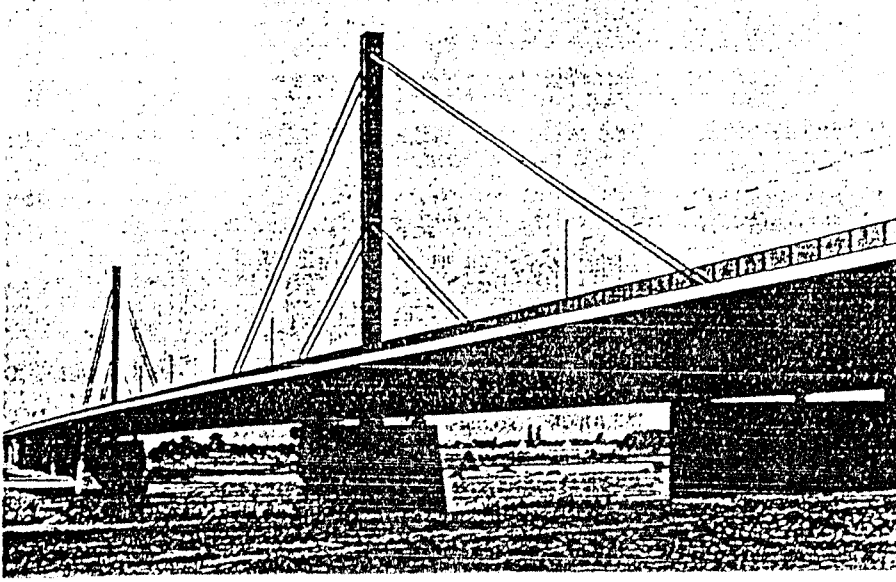


Şekil 3.108 Harp sistemli ilk eğik askılı köprülerin yapısal sistemi.

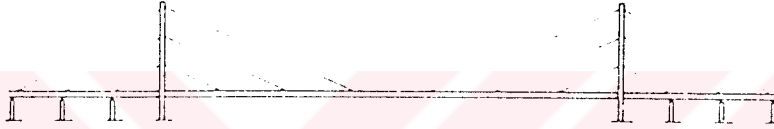
Buna örnek olarak Leverkusen'deki Rhine Köprüsü gösterilebilir (Şekil 3.109). Bu köprüde her kuleden sadece iki takım eğik kablo düzenlenmiş ve dolayısıyla 280 m. uzunluktaki ana açıklıkta sadece dört noktada kablo desteği bulunmaktadır. Böylece kirişin yüksekliği 4.20 m. yani ana açıklık uzunluğunun 1/67'si olarak seçilmiştir.

Şekil 3.110'da gösterildiği, gibi yan açıklıkta ara mesnetlere sahip köprülerde yapısal sistemin genel stabilitesi, kule ve kirişin eğilme rijitliğinden yardım alınmadan başarılır.

Bununla birlikte az sayıda ve bir noktada toplanmış eğik kablolarla sahip köprülerde, yüklerin kablo birleşim (ankraj) noktalarına iletimi nedeniyle rijitlik kirişindeki bölgesel eğilme, büyük eğilme momentleri meydana getirir. Bu durumda kiriş yüksekliğini azaltmak zor olmaktadır.

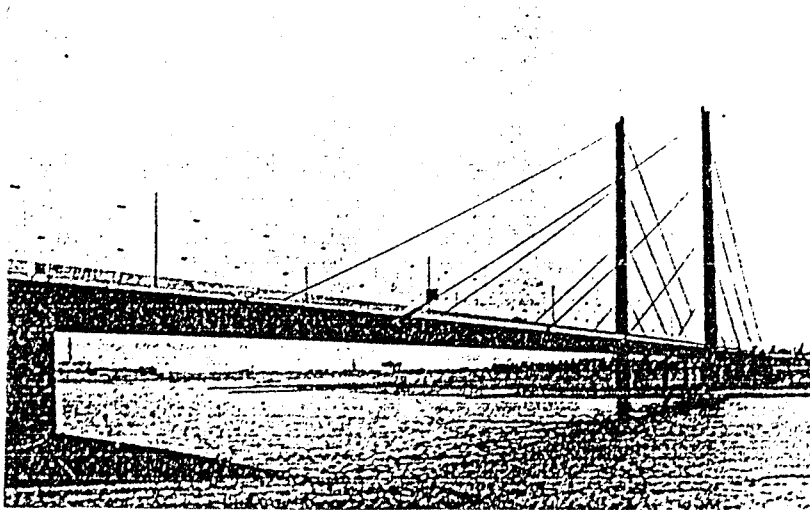


Şekil 3.109 Rhine Köprüsü.



Şekil 3.110 Yan açıklığına ara mesnetlere sahip harp sistemli köprünün yapısal sistemi.

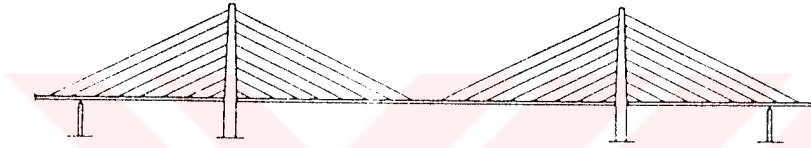
Düsseldorf'daki Knie Köprüsü'nde, ana açıklıkta kablo birleşim noktaları arasındaki uzaklık 64 m. olarak seçilmiştir ve bu ana açıklık uzunluğunun 1/100'üne eşit olan 3.20 m.'lik bir kiriş yüksekliği sonucunu doğurmuştur (Şekil 3.111). Bununla birlikte bu narinlik oranı benzer kablo sistemine sahip, fakat yan açıklıklarda ara mesnetleri olmayan köprülerde bulunan tipik 1/80 oranından sadece biraz küçüktür.



Şekil 3.111 Knie Köprüsü.

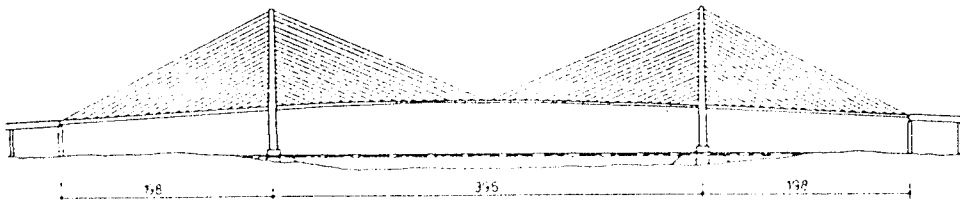
Böylece Knie Köprüsü'nde yan açıklıklarda ara mesnet bulunması durumu, kirişte önemli bir azalma sağlayamamıştır. Fakat yan açıklıktaki kablo birleşim noktaları arasındaki uzaklık, ana açıklıktaki kablo birleşim (ankraj) noktaları arasındaki açıklığın sadece %75'i olmak üzere, eğik kabloların kuleye göre simetrik olmayan şekilde düzenlenmiş olması nedeniyle yan açıklığın ek desteği ile bağlantılı diğer özellikten tamamen yararlanılmıştır.

Çok kablolu harp sistemli modern köprülerde genel stabilite, rijitlik kirişinin eğilme rijitliğine gerek göstermeden başarılabilirse, kirişin bölgesel eğilmesi çok önemsiz olur ve böylece çok narin rijitlik kiriş uygulanabilir. O zaman Şekil 3.112'de görülen önemli eğilme rijitliğine sahip ağır kuleleri bulunan sistem çekici olur. Böyle bir sistemde sabit yükü dengede tutmak için, eğik kablolar kulelere göre simetrik düzenlenmiştir.



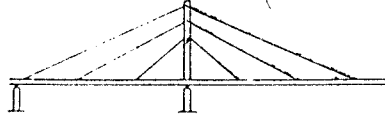
Şekil 3.112 Çok kablolu harp sistem.

Önemli eğilme rijitliğine sahip kuleleri olan çok kablolu harp sistem, Şekil 3.113'te gösterilen Florida'daki Dames Point Köprüsü için önerilmiştir. Gerçek harp sisteminde her harpteki tüm kablolar paraleldirler ve tüm eğik kablolar kirişi ve kuleyi aynı açılarda keseceklerinden, bu özellik birleşim noktalarının planlanmasında belirli üstünlükler sağlamıştır.



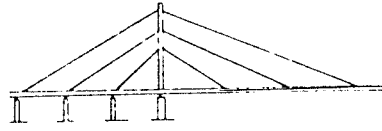
Şekil 3.113 Dames Point Köprüsü projesi.

Diğer yandan Şekil 3.114'te gösterilen değişiklik yapılmış harp sisteminin uygulanmasıyla çelik miktarlarında bazı tasarruflar sağlanabilir. İçteki eğik kablolar, gerçek bir harp sistemdeki benzer eğik kablolardan daha uygun eğime sahip olacaklardır.

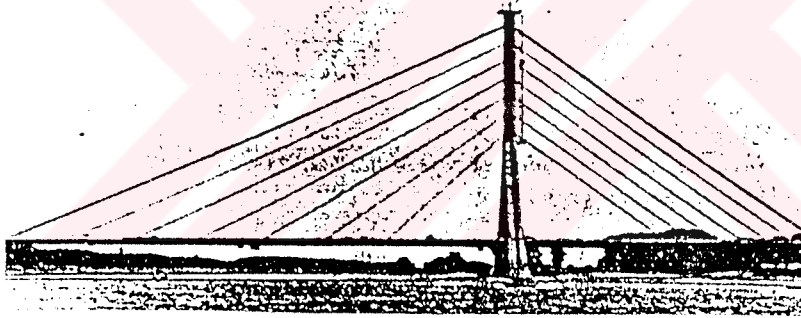


Şekil 3.114 Değişikliğe uğramış simetrik harp.

Yan açıklıklarında ara mesnetleri olmayan sistemler, değişikliğe uğramış harp sistem olarak sabit yükü dengelemek için kuleye göre simetrik düzenlenmelidir. Fakat yan açıklıkta ara mesnede sahip olmayan köprülerde asimetrik harp sistem kullanılabilir (Şekil 3.115). Şekil 3.115'deki sistem Flehe'de Rhine Köprüsü'nde uygulanmıştır (Şekil 3.116).



Şekil 3.115 Değişikliğe uğramış, asimetrik, ara mesnetsiz harp sistem.



Şekil 3.116 Rhine Köprüsü.

3.5. Birleşik Asma ve Eğik Askılı Sistem

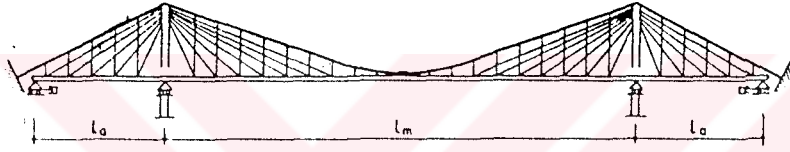
Böyle bir sistem Brooklyn Köprüsü günlerinden beri gerçek yapı için seçilmemiş ise de, kablolu köprülerin modern tarihi süreci içerisinde çeşitli zamanlarda asma sistem ile eğik askılı sistemin nasıl birlikte çalışacağı düşüncesinin var olduğu, kablolu köprülerin gelişimine ilişkin bölümde belirtilmiştir (Bölüm 1). Bununla birlikte, modern çağda da birleşik kablo sistemleri bir çok kez önerilmiştir.

Asma sistemle karşılaştırıldığında birleşik sistem aşağıdaki iki özellik nedeniyle malzeme tasarrufuna yol açmalıdır:

- (1) Eğik kablolar tarafından taşınan yük az malzemeye gereksinim gösterecektir.
- (2) Asma sistemde rijitlik gereksinimi nedeniyle oluşan sınırlamalar, birleşik sisteme uygulanmadığından daha optimum kule yüksekliği kullanılabilir.

Birleşik kablo sistemli bir köprüde, Şekil 3.117'de gösterilmiş olan sistem, aşağıdaki özellikleri içeren en uygun yapısal sistem olarak görünmektedir:

- (a) ana açıklık uzunluğunun %25 - %30'u uzunluğa sahip nispeten küçük yan açıklıklar ($0.25 < l_a/l_m < 0.30$);
- (b) sürekli rijitlik kirişi;
- (c) ankraj bloklarında merkezleme aygıtları;
- (d) açıklık ortasında rijitlik kirişi ve tepe kablosu arasında merkezi kelepçe;
- (e) bir ankraj bloğundan öteki ankraj bloğuna sürekli tepe kablosu;
- (f) tüm eğik kablolar ve tepe kablosu, kule tepesine sabitlenmiş.



Şekil 3.117 Birleşik kablo sistemli bir köprünün yapısal sistemi.

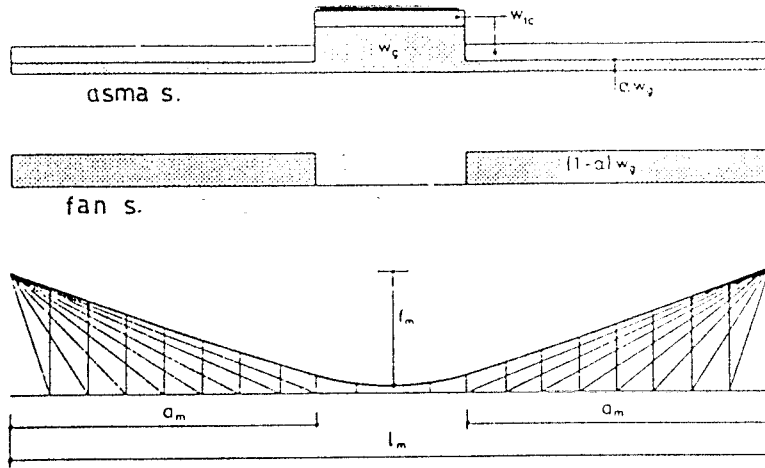
Birleşik sistemin toplam geometrisi, tepe kablosu ve eğik kabloların başlangıç eğrilerini veren sabit yük durumuyla belirlenir.

Ana açıklık için sabit yük durumu Şekil 3.118'de gösterilmiştir. Bu durum için iki parametre (fan uzunlukları a_m ve sabit yük dağılım faktörü α) özel öneme sahiptir. Sabit yük dağılım faktörü α , asma sistemin ve eğik askılı sistemin her ikisinin de mevcut olduğu bölgelerde, asma sistem tarafından taşınmış kiriş toplam sabit yükünün bir bölümüne eşittir.

Verilen a_m ve α değerleriyle kablo eğrisi denklem (3.20) yardımıyla belirlenir:

$$y = -\frac{f_m}{M_m(l_m/2)} M_m(x) \quad (3.90)$$

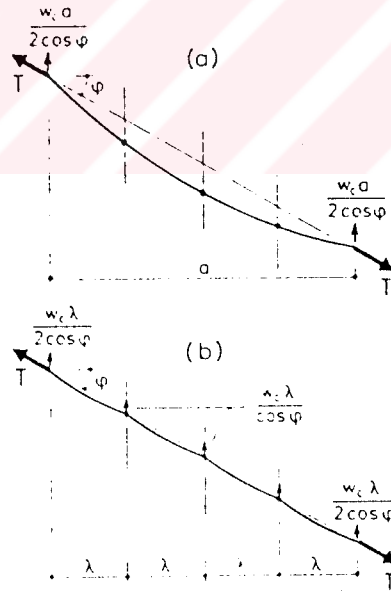
burada f_m ana kablonun sehim, $M_m(x)$ tepe kablosuna etkiyen sabit yükün moment eğrisidir. Denklem (3.90)'daki $M_m(x)$ ve $M_m(l_m/2)$ 'yi hesaplarken, kirişin sabit yükünden gelen αw_g ve w_g yükünden başka, tepe kablosu (ve askıların) kendi ağırlıklarının da dahil edilmesine dikkat edilmelidir. Sabit yük durumunda birleşik sistemin fanı, kirişten gelen $(1 - \alpha) w_g$ yükü etkisinde kalan normal fan sistemi gibi ele alınabilir.



Şekil 3.118 Asma ve fan sistem arasında sabit yükün dağılımı.

Hareketli yükün etkisine ilişkin olarak birleşik sistem uygulamasıyla kazanılabilecek üstünlüklerden birisi, tüm kesişme noktalarında düşey askılara bağlantısı nedeniyle eğik kablolardaki azaltılmış sehim değişimleridir.

Eğik kablolar ve askılar arasındaki bağlantı nedeniyle eğik kabloların sabit yük eğrisi, askılara bağlantı noktalarını yükselterek ya da alçaltarak ayarlanır. Bu durum, askılara bağlanmış bir eğik kablo için iki muhtemel form haliyle Şekil 3.119'da gösterilmiştir.

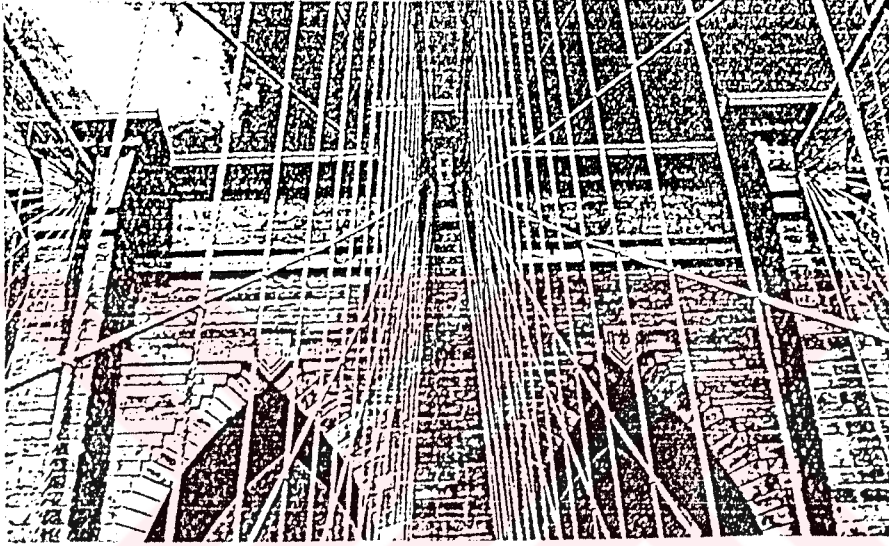


Şekil 3.119 Eğik kabloların düşey askılara iki türlü bağlantı şekli.

Form (a)'da eğik kablonun sabit yük eğrisi, serbest kabloya benzer. Dolayısıyla başlangıç durumunda tüm bağlantılar gerilmeden bağımsızdırlar. Fakat hareketli yük

etkidiğinde, bağlantılar sehimi değişimini önemli ölçüde azaltacaktır. (b) formunda, kabloun kendi ağırlığı askılar tarafından taşındığından eğik kabloun tüm bağlantıları bir doğru çizgi üzerindedir.

Hareketli yük altında tüm sistemin sehimleri karşılaştırıldığında, (a) formunun tercih edileceği görülmüştür. Bu ise, (a) formunun asma sistem ve fan sistem arasında daha iyi bir etkileşmeye neden olduğundan dolayıdır. Böylece (a) formu tercih edilmelidir ve köprü tabliyesinden kablo sistemine bakıldığı zaman, bu form Brooklyn Köprüsü'nde de kullanılmıştır (Şekil 3.120).



Şekil 3.120 Köprü tabliyesinden bakıldığında Brooklyn Köprüsü'nün sehimi yapmış eğik kabloları.

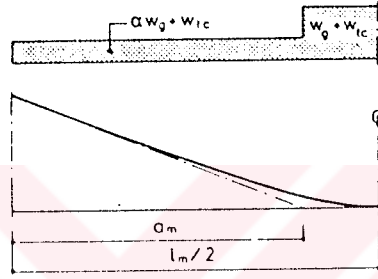
Genellikle birleşik kablo sistemli bir köprüde gereksinim duyulan çelik miktarları, asma köprüde gereksinim duyulan miktar ile fan sistemli eğik askılı bir köprüde gereksinim duyulan miktarlar arasındadır (bak. Şekil 3.63). Sabit yük dağılım faktörü değerinin azaltılmasıyla, fan sistem tarafından taşınan yük hakim konuma geçer ve çelik miktarları fan sisteminkine yaklaşır. Sonuç olarak, α değerini minimum yapmak ve a_m değerini maksimum yapmak mümkündür.

a_m değerinin maksimumu, ancak üst eğik kabloun sürekli tepe kablounun altında kalması koşuluyla elde edilir. Böylece a_m 'nin kritik değeri, tepe kablou teğetinin ve üst eğik kablo teğetinin kule tepesinde aynı olmasının açıklanmasıyla belirlenecektir. (a) formu, (b) formuna oranla eğik kablo teğetinin daha büyük bir eğimine neden olduğundan dolayı da Şekil 3.119'daki (a) formu tercih edilir.

Şekil 3.121’de görüldüğü gibi, eğik kablo sehiminin ihmal edildiği, tepe kablusunun kendi ağırlığı olan w_{tc} ’nin (yatayda ölçülmüş) sabit varsayıldığı ve açıklık ortasında rijitlik kirişi ekseninin tepe kablusu teğetiyle çakıştığı basitleştirilmiş durumda, a_m ve α arasındaki ilişki aşağıdaki gibi belirtilebilir:

$$a_m = \frac{l_m}{2} \left[1 + \sqrt{\frac{\alpha w_g + w_{tc}}{w_g + w_{tc}}} \right] \quad (3.91)$$

Bu denklemden $\alpha = 1.0$ için $a_m = l_m/4$ (parabolik asma sistem durumuna uygun), $\alpha = 0$ için (tepe kablusunun ihmal edildiği $w_{tc} \rightarrow 0$ olduğunu dolaylı anlatan) $a_m = l_m/2$ (saf fan sistem durumu) elde edilir.



Şekil 3.121 Birleşik kablo sistemi için a_m fan uzunluğunun tayini.

Gerçek bir yapıda, rijitlik kirişinin aşağı konumu ve eğik kablo sehiminin etkisi nedeniyle a_m , denklem (3.91)’de bulunandan biraz daha büyük seçilebilir.

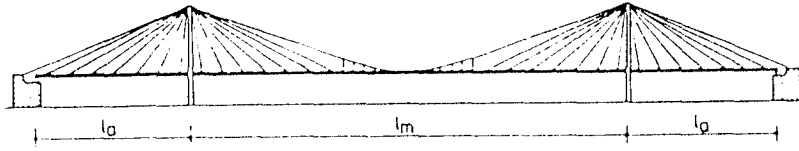
Fan sistemin malzeme tüketimi asma sistemden daha az olduğundan, α mümkün olandan küçük seçilmelidir. Bununla birlikte, tepe kablusunun enkesit alanı genellikle yapım sırasındaki yükler tarafından saptanacağından, α değeri yapım işlemi araştırmasına dayanmalıdır. Böylece rijitlik kirişi elemanlarının yapımı sırasında, yükseltme ayaklarını desteklemek için tepe kablusu kullanmak şüphesiz çok uygun olacaktır.

En kolay yapım, eğik kablolar eklenmeden önce rijitlik kirişinin tamamı tepe kablusundan asılabilirse başarılabilir. Fakat değişik yapım işlemleri bunun mümkün olmadığını ortaya koymuştur. Çünkü sonradan eğik kablolar eklendiği zaman rijitlik kirişi çok büyük eğilme değişikliklerine uğrayacaktır. Rijitlik kirişi, kulelerden uzatılırken eğik kabloların eklenmesi şeklinde ilerlemelidir. Bu yapım işlemiyle α , 0.10 kadar küçük bir değere sahip olacak şekilde seçilebilir.

3.6. Kablo Ağı Sistemi

Bu sistem, tüm yükün eğik askılı sistemle taşındığı, açıklık ortasında sadece kirişi desteklemek için asma sistemin kullanıldığı bir sistemi dolaylı olarak akla getirir.

Bu, Dischinger tarafından önerilen sisteme (Şekil 1.17) çok benzer bir sistemin ortaya çıkmasına öncülük eder. Fakat günümüzde mevcut uygulamaya uygun olarak eğik askılı köprüler içerisinde eğik kabloların daha sürekli düzenlemeleri tercih edilebilir. Dischinger tarafından önerilen sistemin çağdaş bir türü Şekil 3.122'deki gibi olabilir.



Şekil 3.122 Dischinger'in önerdiği kablolu köprü sistemi, ancak eğik askılı sistemde çok kablolu fan bulunmaktadır.

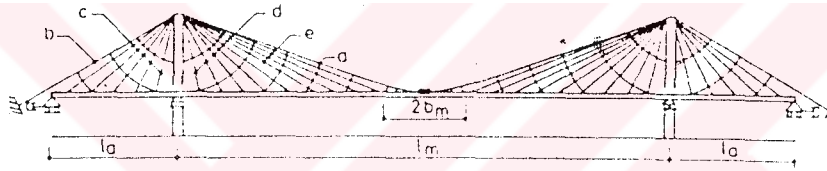
Görüleceği gibi Şekil 3.122'deki sistem, eğik kabloların bulunduğu bölgelerde askıları ihmal etmekle Şekil 3.117'deki birleşik sistem de geliştirilebilir. Bu bölgelerdeki yükün tamamen eğik askılı sistem tarafından karşılandığını dolaylı olarak akla getirir. Fakat aynı zamanda askıların diğer elverişli etkileri kaybolabilir. Özellikle bu, düşey askılara bağlandığında eğik kablolardaki azaltılmış sehim değişimlerinin etkisiyle ilgilidir. Ayrıca hem askılara hem de eğik kablolarla sahip bir sistemde, tekil kablolarda rüzgarın neden olduğu salınımlar önemli ölçüde azalacak ve belki de tamamen ortadan kalkacaktır.

Büyük açıklıklar için askılarla elde edilmiş aynı elverişli etkiyi sağlamak amacıyla, Şekil 3.122'deki birincil (asıl) kabloların ikincil kablolarla desteklenmesi yararlı gözükmemektedir. Şekil 3.123'de belirtildiği gibi, kablo bantlarında çok az sürtünmeye gereksinim duyulması nedeniyle kesişen kablolar arasında basit bağlantılar sağlamak için, ikincil kablolar bir merkezden çıkan birincil kablolarla eğrisel olarak çalıştırılabilir. Her ne kadar eğrisellik için gereksinim duyulan kablo çeliği miktarı çok az ise de (toplam çelik miktarının yaklaşık olarak sadece %1'i), eğrisel kabloların eklenmesi kablo sisteminin davranışını çok olumlu yönde etkiler. Eğrisel kablolar sadece birincil kabloların sehim değişimlerini azaltmaz, aynı zamanda kablo formundaki değişmeyi de eşitler ve böylece bitişik eğik kabloların daha düzgün aksinel rijitliğini de sağlamış olur. Eğrisel kabloların eklenmesiyle her eğik kablonun bağımsız salınımı yok edildiğinden ve tüm kablo ağının toptan salınımı çok zor oluşacağından, kablo sisteminin dinamik özellikleri de önemli ölçüde iyileşecektir.



Şekil 3.123 Birincil kablolarla eğrisel kabloların eklenmesiyle elde edilen kablo ağı sistemi.

Bir kablo ağı köprü için en uygun yapısal sistem Şekil 3.124'te gösterilmiştir. Bu sistemde rijitlik kirişi bir uçtan diğer uca sürekli ve son bağlantıda hareketli mesnetlere oturmuştur. Kulelerde hareketli mesnetler (şekilde gösterildiği gibi) veya sadece enine kuvvetlerin (rüzgar yükünden ortaya çıkan) iletilmesine izin veren mesnetler uygulanabilir. Ayrıca ankraj blokları arasında sürekli uzanan tepe kablosu, açıklığın ortasında merkezi bir kelepçe yardımıyla rijitlik kirişine bağlanmıştır. Bu merkezi kelepçe ile rijitlik kirişinin merkezlenmesi sayesinde (yani tepe kablosunun kirişin uzun eksenini boyunca ortalanması), daha sonra görüleceği gibi asimetrik yükleme altında şekil değiştirme özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir.



Şekil 3.124 Bir kablo ağı köprüsünün yapısal sistemi.

Sabit yük durumunda kablo ağı sisteminin ana kabloları, Şekil 3.124'deki kablolarla gösterildiği gibi aşağıdaki gruplara ayrılabilir:

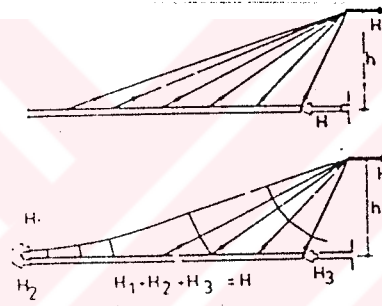
- (a) ana açıklık tepe kablosu;
- (b) yan açıklık tepe kablosu,
- (c) yan açıklık eğik kabloları;
- (d) köprüye ankranlı ana açıklık eğik kabloları;
- (e) zemine ankranlı ana açıklık eğik kabloları.

Bu kablo gruplarından (d) ve (e) arasındaki en belirgin fark, rijitlik kirişindeki normal kuvvetlerin kablo kuvvetlerinin yatay bileşenlerine karşı koyma şekline ilişkindir. (d) grubunda yatay kablo kuvveti rijitlik kirişindeki basınçla, (e) grubundaki yatay kablo kuvveti ise rijitlik kirişindeki çekmeyle dengelenir. Rijitlik kirişindeki basınç, yan açıklık eğik kablolarının yatay bileşenlerinden ortaya çıktığından, kuleye göre simetrik olarak konumlanmış ana açıklık eğik kabloları köprüye ankranlı olacaklardır. Oysa açıklık ortasında belli bir bölgedeki eğik kablolar ise zemine ankranlı olacaklardır. Bu şekilde ana

açıklığın yarısı üzerine etki eden eğik kabloların yatay bileşenleri hem kuledeki normal basınç kuvveti hem de açıklık ortasındaki normal çekme kuvvetiyle dengelenir. Kablo kuvveti yatay bileşenlerinin kirişin kuleler kısmındaki basınç kuvvetiyle dengelenmesi durumu, kendine ankrajlı fan sistemle çelişen bir durumdur.

Bu özellik, üstte eğik askılı sistem ve altta da kablo ağı sistemi olmak üzere Şekil 3.125'de gösterilmiştir. İki sistem için aynı düşey yük ve aynı yükseklik (h) bulunursa, o zaman kablo kuvvetlerinin yatay bileşenlerinin toplamı olan H yatay kuvveti iki sistem için aynı olur. Eğik askılı sistemde yatay kuvvetlerin dengesi tamamen rijitlik kirişindeki basınç kuvvetiyle sağlanır; fakat kablo ağı sistemde H kuvvetini karşılayacak üç kuvvet mevcuttur:

- (1) tepe kablodaki yatay kuvvet H_1 ;
- (2) açıklık ortasında rijitlik kirişindeki çekme kuvveti H_2 ;
- (3) kulenin bulunduğu kısımda rijitlik kirişindeki basınç kuvveti H_3 .



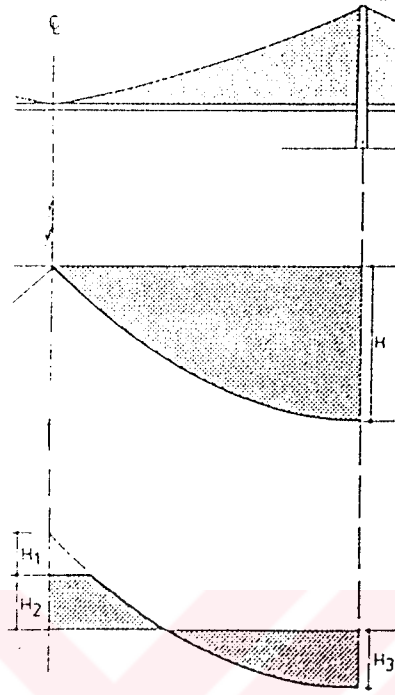
Şekil 3.125 Kablo ağı ve köprüye ankrajlı eğik askılı sistemde kirişin yatay dengesi.

Böylece eğik askılı sistem, kablo ağı sisteme dönüştüğünde sürekli aralıklı eğik askılı sistemlerde olduğu gibi rijitlik kirişine etkiyen maksimum normal kuvvet önemli ölçüde azalır (Şekil 3.126).

Kablo ağı sisteminde ana açıklık uzunluğu l_m , yan açıklık uzunluğu l_a ve açıklık ortasında mesnetlenmiş tepe kablosu uzunluğu $2b_m$ arasında belli bir oranın seçilmesiyle üç yatay bileşenin H_1 , H_2 ve H_3 bağıl büyüklükleri ayarlanabilir.

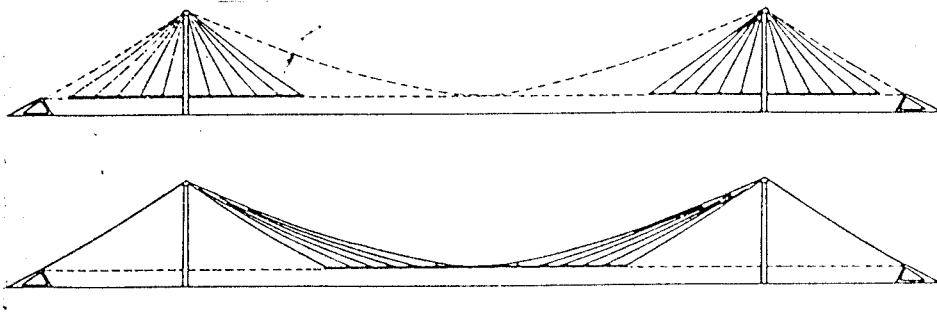
Ölü yük durumunda H_3 yan açıklık uzunluğu l_a tarafından, H_1 ise mesnetlenmiş tepe kablosu uzunluğu $2b_m$ tarafından kontrol edilir. Sürekli sistemin rijitlik kirişindeki normal kuvvetlerinin değişimi, düzgün yayılı düşey yük için ikinci dereceden bir parabol olduğundan H_1 , H_2 ve H_3 arasındaki ilişki kolayca belirlenebilir (etkili l_m , l_a ve b_m uzunluklarının belirtildiği Şekil 3.124'e bakınız). $l_a = l_m/2\sqrt{3} \sim 0.29 l_m$, $b_m = l_m(3 - \sqrt{6})/6 \sim$

0.09 l_m olarak seçildiğinde örnekte olduğu gibi $H_1 = H_2 = H_3$ olan bir sabit yük durumu ortaya çıkar.



Şekil 3.126 Rijitlik kirişindeki normal kuvvet diyagramı: üstte, köprüye ankrajlı eğik askılı sistem; altta, kablo ağ sistemi.

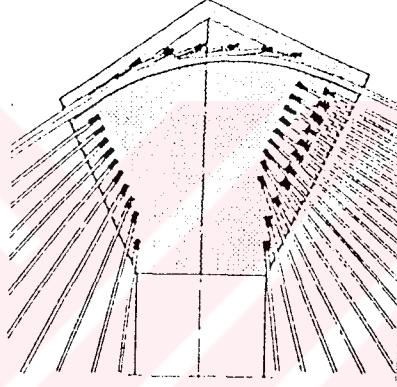
Kablo sistemin köprüye ankrajlı ve zemine ankrajlı kısımları arasındaki belirgin fark, sabit yük altındaki bir durumu gösteren Şekil 3.127'de daha ayrıntılı gösterilmiştir. Ana açıklıktaki köprüye ankrajlı ve zemine ankrajlı kablolar arasındaki geçiş noktası, genellikle sıfır normal kuvvete sahip nokta olarak tanımlanır. Hareketli yük altında normal kuvvetin sıfır olduğu noktaların konumu değişir (bak. Şekil 3.135). Böylece değişik yük koşulları altında sistemin köprüye ankrajlı ve zemine ankrajlı kısımlarının karşılıklı uzaması tüm sistemin elastik davranışıyla kontrol edilir.



Şekil 3.127 Köprüye ve zemine ankrajlı kablo ağ sisteminin ayrımı.

Kule tepesindeki yatay denge için, yan açıklık tepe kablosunda ana açıklık tepe kablosundan daha büyük bir kuvvete gereksinim duyulur. Bunun sonucu olarak tepe kablosu, ana açıklıktan kablo semeri üzerinden yan açıklığa geçince alanı önemli ölçüde artırılmalıdır. Aynı zamanda yan açıklıktan kule tepesine bağlanan eğik kablo sayısına oranla, çok daha fazla sayıda eğik kablo ana açıklıktan kule tepesine bağlanmalıdır. Bu, kule tepesinin özel projelendirilmesini gerektirir.

Şekil 3.128, eğik kabloların kablo semeri altında bağlanmasını, yan açıklık tepe kablosu ek halatlarının ise kablo semerinin üstünde bağlanmasına olanak sağlamak amacıyla, tepe kablosu için kablo semerinin oluşturulduğu bir çözümü göstermektedir. Kablo yatay bileşenlerinin zemine ankrajlı eğik kablolardan, yan açıklık tepe kablosuna geçişi genelde semer yapısının düşey düzlemindeki kayma kuvvetleriyle olur.



Şekil 3.128 Kablo ağ sisteminin kule tepesindeki planı.

3.6.1. Kablo ağı geometrisi

Kablo ağı, merkezi bir noktadan çıkan eğik kabloları (sürekli tepe kablosu dahil) rijitlik kirişine bağlayan eğrisel kablolardan oluşur. Ana açıklığın orta kısmındaki eğrisel kablolar, kuvveti rijitlik kirişinden tepe kablosuna ileten askılar olarak görev yaparlar. Ana açıklığın geri kalan kısmında ve yan açıklıklarda daha çok rijitlik veren bir görev üstlenirler.

Şekil 3.129'a göre kablo ağı geometrisi aşağıdaki şekilde belirtildiği gibi olur:

$$y = \frac{1}{2} \frac{\gamma_c}{\sigma_{sf}} (h^2 + a_i^2) \left(\frac{x}{a_i} \right)^2 - \left(\frac{1}{2} \frac{\gamma_c}{\sigma_{sf}} (h^2 + a_i^2) + h \right) \frac{x}{a_i} \quad (3.92)$$

Bu, bir merkezden çıkan eğik kablolar için denklemdir. Burada kablo eğrisinin ikinci dereceden bir parabol olduğu varsayılmıştır. γ_c korozyona karşı koruma dahil eğik kablounun yoğunluğu, σ_{sf} ise fiktif gerilmedir. Bu fiktif gerilme şöyle belirlenir:

$$F = \frac{1}{2} \frac{\gamma_c}{\sigma_{sf}} \left[4h^2 + (l_m - b_m)^2 \right]$$

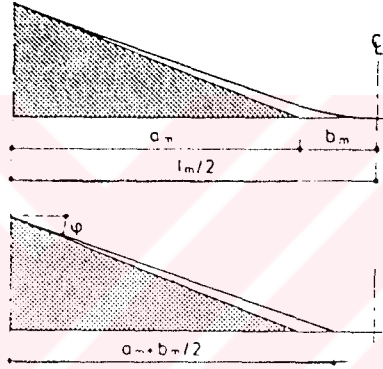
x_0 , gerçek eğrisel kablonun tepe kablosunu kestiği noktanın apsisi.

3.6.2. Kablo boyutlarının öntasarımı

Eğik kablonun öntasarımı, saf fan sistem için geliştirilmiş olan denklem (3.46)'ya benzer. Bu durumda ana açıklıktaki tepe kablosunun her bir yarısının yerini b_m uzunluğu alabilir. Şekil 3.130'da görüldüğü gibi, tepe kablosunun öntasarım enkesit alanı şöyle olur:

$$A_{tc} = \frac{(w_m + p_m)b_m + P}{h\sigma_c - \left[h^2 + (a_m + (1/2)b_m)^2 \right] \gamma_c} \sqrt{h^2 + (a_m + b_m/2)^2} \quad (3.95)$$

Burada, tepe kablosunun orta açıklıktaki $2b_m$ uzunluğunun, denklem (3.46)'da kullanılan $30d$ kuvvet dağılım uzunluğunu geçtiği kabul edilir.



Şekil 3.130 Bir eğik kablonun orta açıklıktaki uzunluğunun b_m olarak alınması.

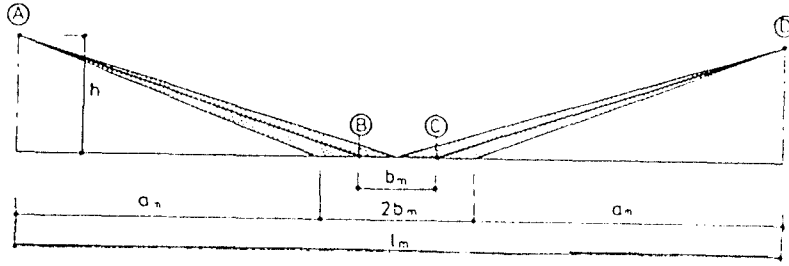
Yan açıklıktaki tepe kablosunun öntasarımı, saf fan sistemin ankraj kablosunun öntasarımında kullanılmış olan aynı denklemle (denklem (3.47)) yapılabilir.

3.6.3. Kablo çeliği miktarı

Kablo ağına sahip bir köprüde kablo çeliği miktarı, çoğunlukla fan sistemli eğik askılı köprü için geliştirilmiş olan denklemlerle bulunabilir.

Ana açıklıkta tepe kablosu, Şekil 3.131'de görüldüğü gibi, çok köşeli ABCD kablosu ile aslına benzetilebilir. Bu çok köşeli kablonun eğik kısımları, basit olarak fan sistemin taralı kısmının yerini aldığından denklem (3.51), tepe kablosunun BC yatay bölümü dışındaki kablo ağı sistemin ana açıklığının kablo çeliği miktarının iyi bir şekilde tahmin edilmesine olanak verir. Denklem (3.95) yardımıyla belirlenen tepe kablosu enkesit alanı ile birlikte açıklık ortasındaki yatay BC kısmındaki kablo çeliği miktarı için aşağıdaki denklem bulunur:

$$Q_{tem} = \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \frac{(w_m + p_m) b_m^2}{h - (\gamma_c / \partial_c) [h^2 + (a_m + (1/2) b_m)^2]} \sqrt{h^2 + (a_m + b_m / 2)^2} \quad (3.96)$$

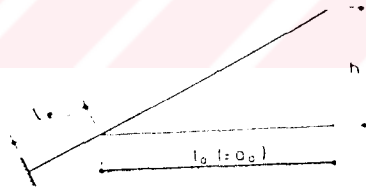


Şekil 3.131 Tepe kablosu yerine poligonal ABCD kablusunun kullanılması.

Yan açıklıkta, kablo ağı fanın kablo çeliği miktarı denklem (3.52) ile belirlenebilir. Şekil 3.132’de belirtildiği gibi, ankraj bloklarına bağlantı için gerekli olan artırılmış l_e uzunluğuna ilişkin düzeltme yapmak koşuluyla, denklem (3.53) yan açıklıktaki tepe kablosu çelik miktarının belirlenmesinde kullanılabilir.

Böylece kablo ağı sisteminin yan açıklıktaki tepe kablosu çelik miktarı aşağıdaki gibi olur:

$$Q_{ac} = \frac{1}{24} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} \left[3(w_m + p_m) l_m^2 - 12 w_a l_a^2 + 4 Q_{Fm} l_m - 8 Q_{Fa} l_a \right] \frac{\sqrt{(l_a^2 + h^2)} \sqrt{(l_a^2 + h^2)} + l_e}{l_a h} \quad (3.97)$$



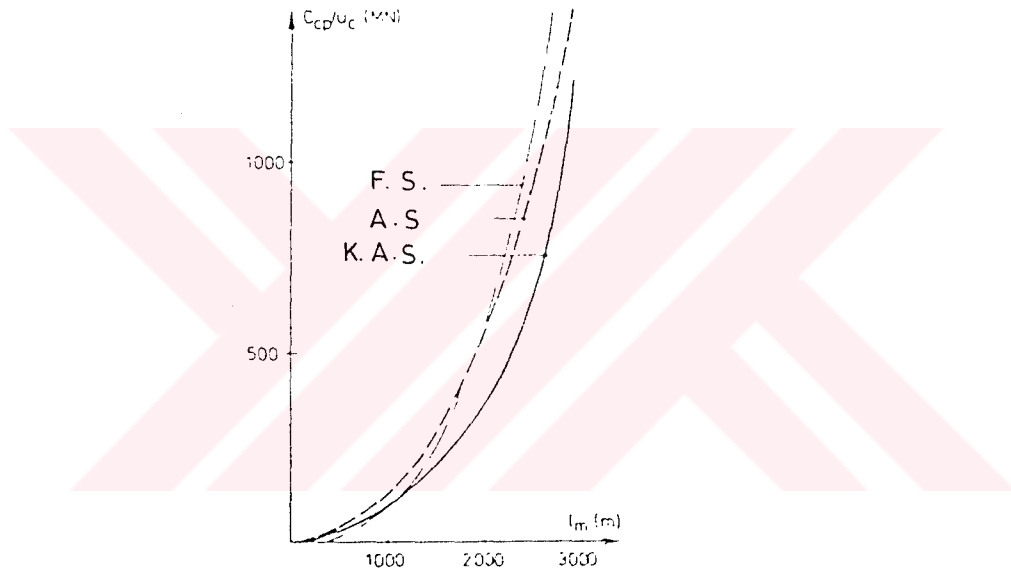
Şekil 3.132 Kablo ağ sisteminde tepe kablusunun yan açıklığı.

En sonunda eğrisel kablolar için gerekli olan çelik miktarı da eklenmelidir. Ancak bu miktar fazla bir öneme sahip olmadığından, birincil kablolar için gerekli çelik miktarına %1 eklenmekle eğrisel kabloların çelik miktarı yeterince karşılanmış olur.

Fan sistemin kablo çeliği miktarının bulunmasında kullanılan denklemler için yapılmış düzeltmeler küçük olduğundan, Şekil 3.63’teki eğri kablo ağı sistem için de örnek olabilir.

Şekil 3.133, daha önce Şekil 3.64’te verilmiş olan diyagrama bir dereceye kadar benzerlik göstermektedir. Ancak Şekil 3.133’deki diyagramda kablo ağı sisteminin çelik

miktarı da yer almaktadır. Bu diyagramda her sistem için sadece bir ortalama eğri verilmiştir. Fan ve kablo ağı sistemine ilişkin eğriler, rijitlik kirişinin normal kuvvetlere karşı koyabilmesi için kirişte gereksinim duyulan ek çelik miktarını da içerir. Çok küçük açıklıklar için fan sistemin eşdeğer çelik miktarı minimum olmaktadır. Fakat açıklık arttığında fan sistemin eşdeğer çelik miktarı, önce kablo ağı sistemin eşdeğer çelik miktarını, daha sonra da asma sistemin eşdeğer çelik miktarını aşar. Bu, normal kuvvetlere karşı koyması amacıyla rijitlik kirişinin takviye edilmesi nedeniyledir. Kablo ağı sistemin rijitlik kirişindeki maksimum normal kuvvetler, fan sistemin maksimum normal kuvvetlerinin yaklaşık üçte biri olduğundan dolayı (bak. Şekil 3.125 ve 3.126), kablo ağı sistemde rijitlik kirişin artırılmış enkesitleri her şeyden önce üç kat daha büyük açıklığa gereksinim gösterir.



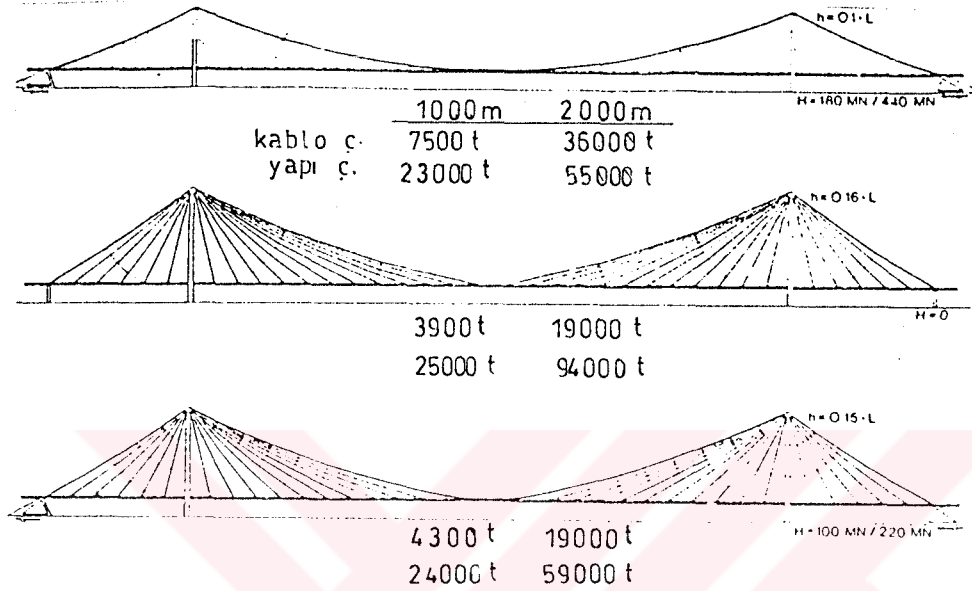
Şekil 3.133 Kablo ağ sistem (düz çizgi), asma sistem (kesikli çizgi) ve eğik askılı sistem (noktalı-kesikli çizgi) için kuleler ve kablolarda eşdeğer çelik miktarının değişimi ($C_{cp} u_c$).

3.6.4. Karşılaştırmalı araştırmalar

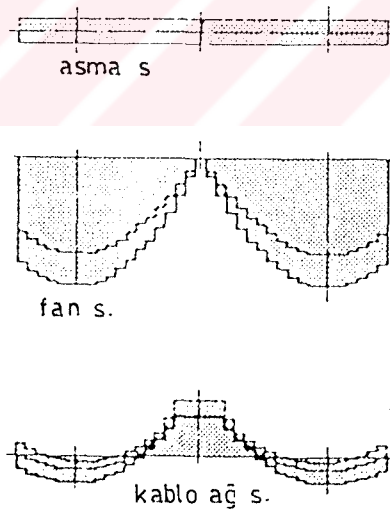
Şekil 3.133'de gösterilmiş olan özellik, üç değişik kablo sisteme (asma, fan, kablo ağı) ve iki farklı açıklığa (1000 m. ve 2000 m.) sahip köprüler içindir. Bilgisayar programıyla ayrıntılı olarak da analiz edilmiştir. Analiz hareketli yük şiddeti, malzemelerin dayanımı, rijitlik kirişinin türü v.b. bakımından eşit varsayımlara dayanmaktadır.

Gereksinim duyulan çelik miktarları konusundaki araştırmaların sonuçları Şekil 3.134'te verilmiştir. Burada belirtilmiş olan miktarlar, rijitlik kirişi ve kulelerdeki tüm kablo çeliği ve yapı çeliğini içermekte; fakat ankraj bloklarındaki çelik miktarını

içermemektedir. Görüleceği gibi, kablo ağı köprünün ve eğik askılı köprünün gereksinim duyulan kablo ve yapı çeliği miktarları 1000 m. ana açıklık için birbirine çok yakındır, fakat 2000 m. ana açıklıklı köprüde eğik askılı sistemin yapı çeliği miktarı gereksinimi, kablo ağı sistemden büyük ölçüde fazladır. Bu, Şekil 3.135'deki normal kuvvet diyagramlarında açıkça gösterildiği gibi, rijitlik kirişindeki artmış normal kuvvetler nedeniyledir.



Şekil 3.134 Üç tip kablo destekli köprü için çelik miktarları araştırmalarının sonuçları.



Şekil 3.135 Üç kablolu köprünün (Şekil 3.134) 2000 m. açıklık için rijitlik kirişinde oluşan normal kuvvet diyagramları.

Kablo ağı köprü ve asma köprü karşılaştırıldığında, kablo ağı sistemin kablo çeliği miktarında yaklaşık yarı yarıya bir azalma olmuştur ve bu azalma önemlidir. Buna karşılık kablo ağı sistemin yapı çeliği miktarında çok az bir artış gözlenmiştir. Asma ve kablo ağı

köprülerin her ikisinde aynı (minimum) kesitli rijitlik kirişler kullanıldığından, bu artış özellikle kablo ağı köprünün daha yüksek kulelerinden ileri gelmektedir.

Kablolu köprülerin ekonomisi, Çizelge 3.1’de hesaplanmış olduğu gibi yapı çeliği eşdeğer miktarı (kullanılan çeliğin yapı çeliği cinsinden miktarı) esas alınarak örneklerle açıklanmıştır. Çizelge 3.1, her grup açıklık için asma sistemin eşdeğer yapı çeliği miktarını %100 seçerek, eşdeğer yapı çeliği miktarının bağıl değerlerini de içermektedir.

Her ne kadar bağıl miktara ilişkin bu rakamlar doğrudan üst yapıların bağıl maliyetini zorunlu olarak yansıtmazlarsa da, değişik kablo sistemlerin bazı temel özelliklerinin bir göstergesi olarak alınabilir.

1000 m. ana açıklıklı yapı için eğik askılı ve kablo ağı üst yapının eşdeğer yapı çeliği miktarları birbirlerine çok yakındır. Asma köprü üst yapısı için eşdeğer miktardan %10-15 daha azdır. Eğik askılı sistem kaçınılmaz olarak sadece düşey yükleme ile en ucuz üst yapıya sahip olacağından, bu sistem özel önlemler gerektirmeden serbest konsol gibi yapılabildiği sürece şüphesiz 1000 m. ve biraz daha fazla açıklıklar için optimum çözümdür. Doğal olarak Çizelge 3.1’in elde edilmesinde bağıl birim fiyatlara bu önlemler dahil edilmemiştir. Rijitlik kirişinin genişlik/açıklık oranı, güvenli serbest bir konsol oluşturmak için yatay stabilitenin yeterli olmadığı kadar küçük ise, bu özel önlemler 1000 m.’nin altındaki ana açıklıklar için bile gerekli olabilir.

2000 m. ana açıklıkta maksimum eşdeğer yapı çeliği miktarı, eğik askılı köprünün üst yapısı için bulunur. Çünkü rijitlik kirişinin daha fazla normal kuvvetlere karşı koyabilmesi için daha fazla yapı çeliğine gereksinim duyulur. Minimum eşdeğer yapı çeliği miktarı kablo ağı sistemle elde edilir ve kablo ağı için eşdeğer yapı çeliği miktarı asma sistem için gerekli olandan yaklaşık %20 daha azdır. Kablo ağı sistemde ankraj bloklarının her birine etkiyen yatay kuvvet, asma köprünün sadece yarısı kadar olduğundan kablo ağı köprünün üst yapısında tasarruflarda beklenebilir. Böylece kablo ağı sistemin açıklıklarının artırılmasının üstünlük kazandırdığı açıktır.

Değişik yapısal sistemlerin tümü, statik yükleme altında eşit güvenlik ortaya koymak için planlanmışlardır. Bununla birlikte kablolarda yorulma nedeniyle olası bir farkı göstermek için, hareketli yük altında değişik sistemlerin farklı kısımlarında oluşan gerilme değişimleri hesaplanmış ve gerilme değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2’deki gerilme değişimlerini değerlendirirken, verilen değerlerin hareketli yük durumu için olduğu dikkate alınmalıdır. Diğer yandan çok sayıda tekrarlarla ortaya

Çizelge 3.1 Üstyapının yapısal elemanları için çelik miktarının karşılaştırılması

Açıklık ve köprü sistemi	Kablo çeliği (MN)	Yapı çeliği (MN)	Eşdeğer yapı çeliği miktarı (MN)	Oransal(%)
1000 m.				
-Asma sistem	75	230	361.25	100
-Eğik askılı sistem	39	250	318.25	88
-Kablo ağ sistemi	43	240	315.25	87
2000 m.				
-Asma sistem	360	550	1180	100
-Eğik askılı sistem	190	940	1272.5	108
-Kablo ağ sistemi	190	590	922.5	78

çıkan gerilme değişimleri Çizelge 3.2'deki değerlerin belki de %50'sinden az olmak üzere önemli ölçüde daha küçük değerlerdir.

Bunu akılda tutarak, kabloların yorulma mukavemetli bağlantılara sahip tel halatlardan yapılması koşuluyla, sistemlerin hepsinin gerilme değişimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu söylenebilir. Sadece bazı ikincil kablolar için gerilme değişimleri kablo kesitlerinin artırılmasını gerektirecek kadar büyüktürler.

+35 °C'lik sıcaklık nedeniyle oluşan gerilmeler Çizelge 3.3'de gösterilmiştir. Hareketli yük ve sıcaklık değişimi birlikte ele alındı zaman, genellikle gerilmelerde en az %5'lik bir artış kabul edilebileceğinden, sıcaklık değişiminin neden olduğu gerilmelerin sadece 35 MN/m²'nin üzerinde olanların dikkate alınması gerekir. Bu, sıcaklık değişiminin asma köprü projesini etkilemediği, kablo ağı köprüde ise sadece ankraj bloklarına bitişik ilk eğik kablo ile bir eğrisel kablonun projelenmesini etkilediği anlamına gelir. Böylece sıcaklık değişiminden ortaya çıkan gerilmeleri karşılamak için toplam kablo çeliği miktarına ek yapılması önemli değildir. Kablo kesitleri, sıcaklık değişiminin ortaya çıkardığı gerilmeleri tam olarak karşılamak için artırılabilir (izin verilebilir gerilmede %5 artış olmadan), kablo ağı sistemin toplam kablo çeliği miktarı %2'den fazla artmaz.

Yan açıklıkların eğik kablolarında sıcaklık değişiminden dolayı ortaya çıkan daha büyük gerilmelere, yan açıklıklardaki tepe kablosunun zemin ankrajlı ve eğik kabloların köprüye ankrajlı olması nedeniyle oluşan birliktelik olayı neden olur.

Çizelge 3.2 Hareketli yük altında gerilme değişimleri

	1000 m. ana açıklık		2000 m. ana açıklık	
	Gerilme sınırı (MN/m ²)		Gerilme sınırı (MN/m ²)	
	Maksimum	Ortalama	Maksimum	Ortalama
Asma sistem				
-Ana kablo, ana açıklık	177		144	
-Ana kablo, yan açıklık	175		143	
-Askılar	301(576)	248	291(414)	247
Eğik askılı sistem				
-Ankraj kablosu	281		248	
-Eğik askılar	308	242	237	188
-Eğrisel kablolar	311	281	287	281
Kablo ağı sistem				
-Üst kablo, ana açıklık	177		165	
-Üst kablo, yan açıklık	254		237	
-Eğik kablolar	281	235	291	239
-Askılar (orta açıklıkta)	228	204	258	221
-Eğrisel kablolar	393	324	412	342

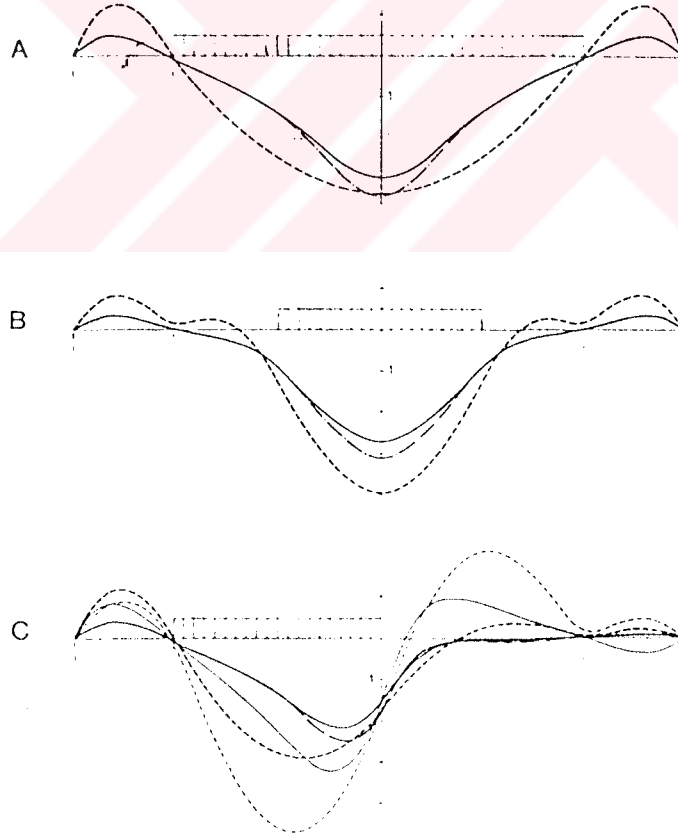
Sistemlerin şekil değiştirme özellikleri, Şekil 3.136 ve 3.137’de görüldüğü gibi üç yükleme durumunun sehim eğrileriyle açıklanmıştır.

Şekil 3.136, 1000 m. ana açıklıklı köprülerin sehim eğrilerini göstermektedir. Simetrik yükleme için açıklığın ortasında maksimum sehim asma sistemde B yükleme durumunda, eğik askılı sistemde ve kablo ağı sistemde ise A yükleme durumunda olmaktadır. Asimetrik yükleme durumu olan C’de merkezlenen (kalın çizgi) ve merkezlenmeyen (ince çizgi) sistemlere uygun olarak asma sistem ve kablo ağı sistem için iki sehim eğrisi gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde, genellikle merkezlemenin rijitlik üzerinde önemli etkiye sahip olduğu ve yine merkezlemenin bağıl etkisinin asma sistem ve kablo ağı sistem için aynı büyüklükte olduğu görülür.

Şekil 3.137, 2000 m. ana açıklıklı köprüler için sehim eğrilerini göstermektedir. Bu eğrilerin 1000 m. ana açıklıklı köprülerin sehim eğrileriyle karşılaştırıldığında, eğik askılı köprünün sehim eğrileri daha büyüktür denilebilir ve eğik askılı sistem için 2000 m. açıklığın makul açıklıktan fazla olduğunun başka bir göstergesidir.

Çizelge 3.3 Sıcaklık değişmesi nedeni ile meydana gelen gerilmeler (+35°C)

	1000 m. ana açıklık	2000 m. ana açıklık
	Gerilme (MN/m ²)	Gerilme (MN/m ²)
Asma sistem		
-Ana kablo, ana açıklık	-7	-6
-Ana kablo, yan açıklık	-8	-7
-Kule yakınındaki askılar	-13	-15
-Diğer askılar	0 ile -7	+2 ile -5
Kablo ağı sistem		
-Üst kablo, ana açıklık	-11	-10
-Üst kablo, yan açıklık	-13	-11
-Ankraj bloğundaki birinci eğik kablo	+87	+66
-Ankraj bloğundaki ikinci eğik kablo	+35	+24
-Diğer eğik kablolar	+2 ile -11	+3 ile -3
-Askılar (orta açıklıkta)	-6 ile -9	-5 ile -7
-Eğrisel kablolar	+15 ile -56	+6 ile -47



Şekil 3.136 Kablolü köprüler (Şekil 3.134) için sehim eğrileri (1000 m. ana açıklıklı).

Çizelge 3.5 Hareketli yük altında maksimum eğim değişimi

Açıklık ve köprü sistemi	Mesnedin sonunda	Kulede	Ana açıklıkta
1000 m. ana açıklık			
-Asma sistem			
merkezlenen	0.0244	0.0159	0.0175
merkezlenmeyen	0.0244	0.0197	0.0248
-Eğik askılı sistem	0.0095	0.0052	0.0170
-Kablo ağı sistem			
merkezlenen	0.0089	0.0052	0.0133
merkezlenmeyen	0.0183	0.0092	0.0304
2000 m. ana açıklık			
-Asma sistem			
merkezlenen	0.0258	0.0151	0.0161
merkezlenmeyen	0.0258	0.0179	0.0223
-Eğik askılı sistem	0.0105	0.0045	0.0256
-Kablo ağı sistem			
merkezlenen	0.0120	0.0055	0.0185
merkezlenmeyen	0.0294	0.0108	0.0462

değişiminin sadece %24'ü kadardır. Bunun yanı sıra, kablo ağı köprüünün tepe kablusunun çapı daha küçük ve kablo semerinden ilk kablo bandına kadar uzun serbest açıklığa sahip olması da, kablo eğilmesinin, kablo ağı sistemde asma sistemden daha az önemde olduğunu açıkça gösterir.

Yukarıda özetlenmiş karşılaştırmalı araştırmalar dikkate alındığında, kablo ağı sistemin uzun açıklıklı köprüler için bazı üstünlükler sağladığı görülür. Fakat, kablo ağı sistemin bakım ve incelenmesinin, alışılmış asma köprüden ve eğik askılı köprüden daha karmaşık donanımlara gereksinim gösterdiği de göz önünde bulundurulmalıdır.

3.7. Çok Açıklıklı Kablo Sistemi

Kablolu köprüler genellikle, önceki sayfalarda birçok örnekle gösterildiği gibi, üç, iki veya tek açıklıklı kablo ile yapılır. Bununla birlikte, bazı özel durumlarda yerel şartlar kablolu köprülerin üç açıklıktan fazla yapılmasını gerektirebilir. Böylesi durumlarda San Francisco-Oakland Köprüsü'nün batı bölümünde olduğu gibi, çift üç açıklıklı köprüden ibaret olabilir (Şekil 3.138). Burada merkezi ankraj ayağının her bir tarafında, klasik bir üç açıklıklı asma köprü vardır.

Çizelge 3.4 Hareketli yük altında maksimum sehimi

Açıklık ve köprü sistemi	Ana açıklık sehimi (mm)		Yan açıklık sehimi (mm)	
	Sim. yükl. (orta açıklıkta)	Asim. yükl. (açıklığın ¼ kısmında)	Aşağıya	Yukarıya
1000 m. ana açıklık				
-Asma sistem				
merkezlenen	3920	2890	1540	-1240
merkezlenmeyen	-	4710	1540	-1240
-Eğik askılı sistem	3440	2500	430	- 480
-Kablo ağı sistem				
merkezlenen	2980	2170	410	- 460
merkezlenmeyen	-	2890	870	- 940
2000 m. ana açıklık				
-Asma sistem				
merkezlenen	6650	5110	2930	-2300
merkezlenmeyen	-	7940	2930	-2300
-Eğik askılı sistem	7010	5380	730	- 950
-Kablo ağı sistem				
merkezlenen	6010	4750	1000	-1080
merkezlenmeyen	-	820	2290	-2440

Hareketli yük altındaki maksimum sehimler Çizelge 3.4'te özetlenmiştir. Merkezlenen kablo ağı köprüünün minimum sehimi gösterdiğine dikkat edilmelidir.

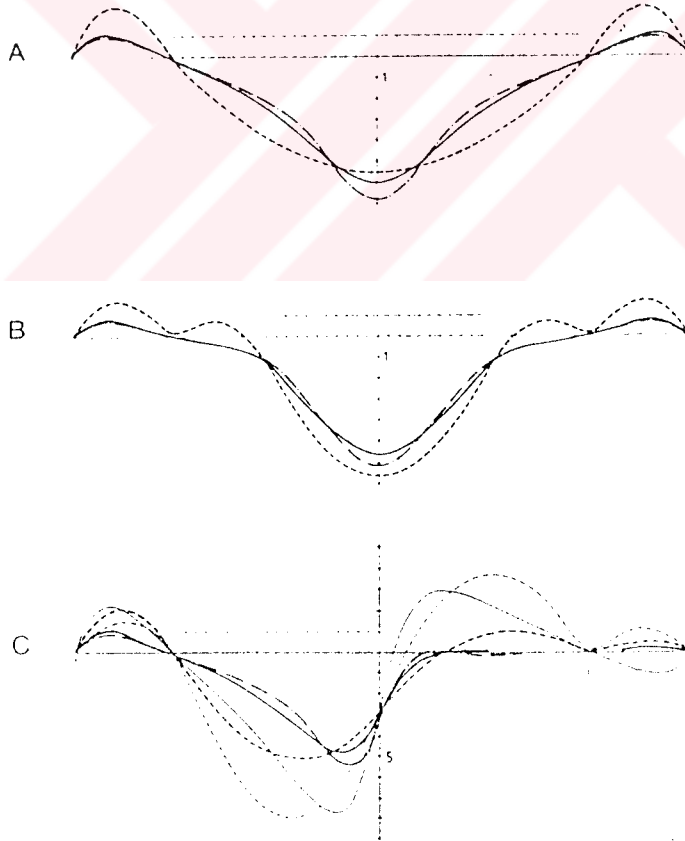
Bir başka ilginç şekil değiştirme özelliği rijitlik kirişinin boyuna profilindeki eğim değişmesidir. Çizelge 3.5'de hareketli yük altında uç mesnetteki, kuledeki ve ana açıklıktaki maksimum eğim değişimi görülmektedir. Bu bakımdan da kablo ağı sistemin diğer iki sistemden çok az üstün olduğu görülür.

Asma sistemde kule tepesinde ana kablonun açısal değişimi dikkate değer büyüklükte eğilme gerilmeleri ortaya koyar. Kablo ağı köprüünün kablo semerinde kule tepesinden geçen bir sürekli tepe kablosu da içerdiğinden, asma köprüünün ana kablosunun ve kablo ağı köprüünün tepe kablosunun açısal değişimleri arasında karşılaştırma yapılırsa, kablo eğilmesinde farklılık gösterir.

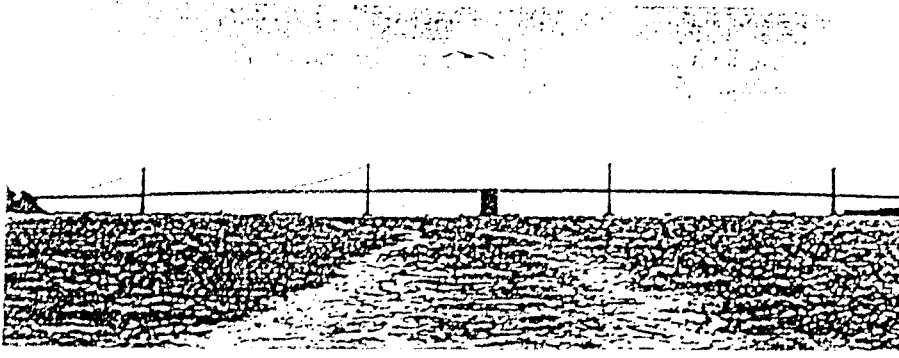
Asma köprüünün ana kablosunun ve kablo ağı köprüünün tepe kablosunun kuledeki maksimum açısal değişimi Çizelge 3.6'da verilmiştir. Merkezlenen bir sistem için kablo ağı köprüünün tepe kablosunun açısal değişimi, asma köprüünün ana kablosunun açısal

Çizelge 3.6 Kule tepesinde meydana gelen maksimum açısal değişim

Açıklık ve köprü sistemi	Ana açıklık	Yan açıklık
1000 m. ana açıklık		
-Asma sistem		
merkezlenen	0.85°	1.02°
merkezlenmeyen	1.44°	1.02°
-Kablo ağı sistemi		
merkezlenen	0.15°	0.28°
merkezlenmeyen	0.42°	0.43°
2000 m. ana açıklık		
-Asma sistem		
merkezlenen	0.80°	0.96°
merkezlenmeyen	1.30°	0.96°
-Kablo ağı sistemi		
merkezlenen	0.14°	0.25°
merkezlenmeyen	0.50°	0.50°



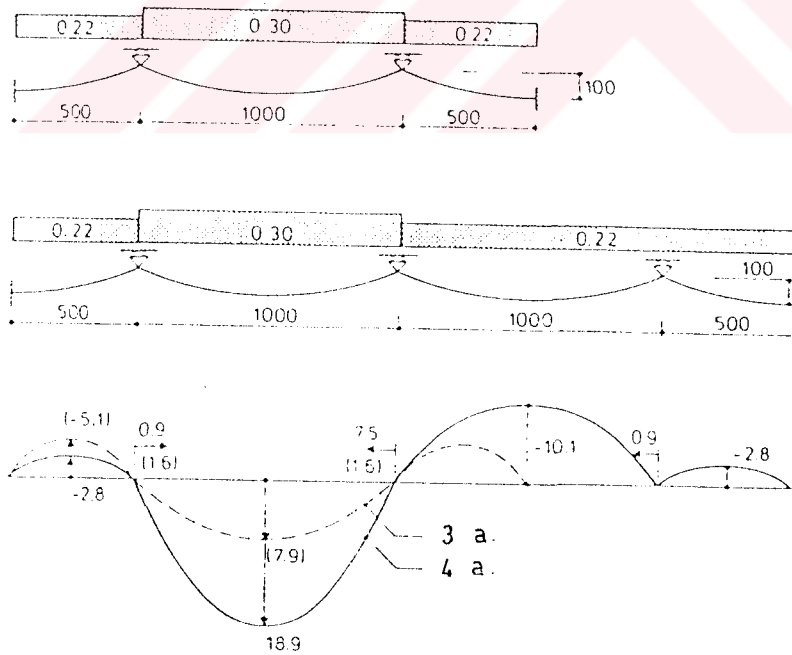
Şekil 3.137 Kablolü köprüler (Şekil 3.134) için sehim eğrileri (2000 m. ana açıklıklı).



Şekil 3.138 San Francisco-Oakland Köprüsünün batı bölümü.

Merkezi ankraj ayağı (köprünün estetiğine herhangi bir katkısı bulunmayan), iki adet üç açıklıklı köprüye göre asimetrik olarak etki eden hareketli yük için etkindir. Bununla birlikte merkezi ankraj ayağı olmasa bile dengeye ulaşılabilir. Çünkü ankraj kablo sistemi ikinci dereceden stabildir. Fakat bir açıklığa etki eden hareketli yük altında dengeye ulaşmak için gerekli olan yerdeğiştirme kabul edilemeyecek kadar büyük olur.

Bu özellik Şekil 3.139'da basit bir örnekle gösterilmiştir. Burada klasik bir üç açıklıklı kablo, iki eşdeğer büyük ana açıklığa sahip olan dört açıklıklı kablo ile karşılaştırılmaktadır.



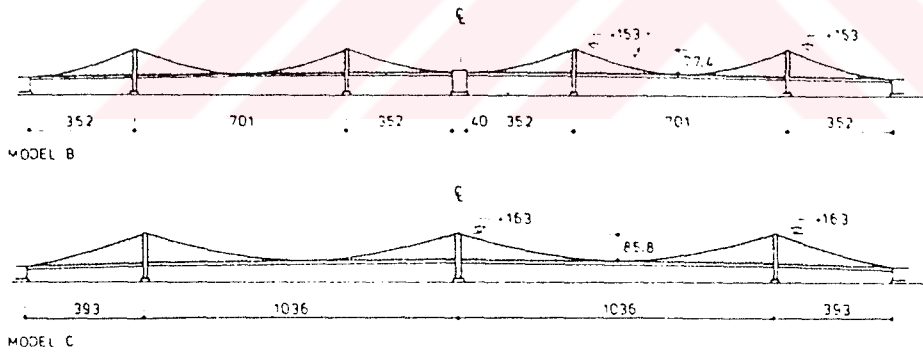
Şekil 3.139 Üç açıklıklı ve dört açıklıklı kablonun bir ana açıklığında hareketli yük altında oluşan sehimlerin karşılaştırması.

Bu özellik Şekil 2.26'daki üç açıklıklı kablo için kullanılan aynı değerleri temel alan sehimler Şekil 3.139'un alt kısmında gösterilmektedir. Dört açıklıklı kablonun maksimum sehim, üç açıklıklı kablonun sehiminin iki katından daha fazladır. Böylesi büyük sehimlerin nedeni, yatay dengeyi sağlamak için iki ana açıklık arasında merkezi mesnet bulunmamasıdır. Bu denge, hareketli yüke sahip açıklığın aşağıya doğru sehiminin %19 kadar artmasını ve eşdeğer miktarda yatay kuvvetler elde etmek için yüksüz açıklığın sehiminin %10 kadar azaltılmasını gerektirir.

19 m.'lik bir sehimin (açıklık uzunluğunun 1/53'üne eşit) kesinlikle kabul edilemez olduğu açık şekilde görülür. Büyük yan açıklığa sahip üç açıklıklı köprüde bulunan 7.9 m.'lik bir sehim bile, çoğu hallerde oldukça büyük olarak kabul edilecek ve dolayısıyla küçük yan açıklıklı çözüm tercih edilecektir. Çünkü bu maksimum sehimin önemli derecede azaltılması demektir (bak. Şekil 2.26).

Dört açıklıklı durumda büyük sehimler, merkezi mesnedin 7.5 m.'ye kadar yatay bir yer değiştirme yapmasına neden olurlar ve bu yer değiştirmenin azaltılması daha kabul edilebilir şekil değiştirmelere izin verecektir.

San Francisco-Oakland Köprüsü için hazırlık araştırmaları sırasında farklı yapısal çözümleri incelemek amacıyla model testleri yapılmıştır. Şekil 3.140 bazı karakteristik prototip boyutlarıyla birlikte modellerin ikisini göstermektedir.



Şekil 3.140 San Francisco-Oakland Köprüsü için köprü sistemleri.

B modeli gerçek köprü tipine yakinken, C modeli iki tane 1036 m. uzun ana açıklığa sahip dört açıklıklı bir çözümü göstermektedir. C modeline uyan bir sistemde iki kule ayağı ile önemli derecede tasarruf sağlanabilir ve büyük temel derinlikleri (71 m., 66 m. ve 34 m.) üzerindeki merkezi ankraj ayağı, 66 m. temel derinliğindeki bir merkezi kule ayağı ile yer değiştirebilir.

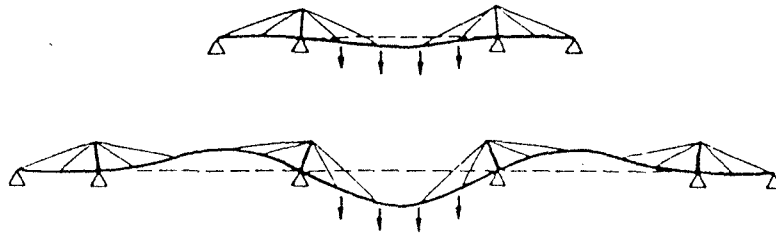
Dört açıklıklı çözümün esneklikle ilgili problemlere neden olduğu fark edildiğinden, C modelinin rijitliğini artırmak için birkaç önlem alınmıştır:

- (1) Ana açıklığın sehim oranı B modelindeki 1/9'dan C modelindeki 1/12'ye indirilir.
- (2) Rijitlik kirişinin eğilme rijitliği 2.1 kadar artırılır.
- (3) Kafes rijitliği kulelerde sürekli hale getirilir.
- (4) Kulelerin eğilme rijitliği 2.75 kadar artırılır.
- (5) Yan açıklık ile ana açıklık arasındaki oran 0.5'ten 0.38'e indirilir.
- (6) Rijitlik kirişinin ve kablo sisteminin sabit yükü %54 kadar artırılır (sistem (1) ve (2)'de alınan önlemler sayesinde boyutların büyümesi nedeniyle).

Bu önlemlere rağmen C modelindeki sehimler, B modelindeki sehimlerin iki katından daha fazla olur. Böylece bir ana açıklıktaki hareketli yük için maksimum prototip sehim B modelinde 2.9 m., fakat C modelinde 6.1 m.'dir ve yüksüz açıklıkta yükselme 5.2 m.'dir. C modelindeki merkezi kulenin yatay yer değiştirmesi 2.2 m., B modelindeki kule tepelerinde ise 0.7 m.'dir.

Kablo çeliği miktarının yaklaşık 2.7 katı kadar artmasıyla beraber, esnekliğin önemli derecede artışı dört açıklıklı çözümün hariç tutulmasına neden olmuştur.

Aynı zamanda eğik askılı sistem için, birkaç ardışık ana açıklığa sahip olan çok açıklıklı bir çözüm düzenlendiğinde de belirli problemler ortaya çıkacaktır. Çok açıklıklı eğik askılı sistem için stabil olmayan fan sistem oluşacaktır; çünkü mesnet etrafında rahatlıkla dönebilmektedirler. Dolayısıyla Şekil 3.141 beş açıklıklı bir köprü için gösterildiği gibi, bu sistemde kabul edilemez şekil değiştirmeler oluşmaktadır.



Şekil 3.141 Üç ve tek ana açıklığa sahip eğik askılı köprünün sehimlerinin ilişkisi.

3.7.1. Kolon tipli kulelerin ayaklara sabitlenmesi.

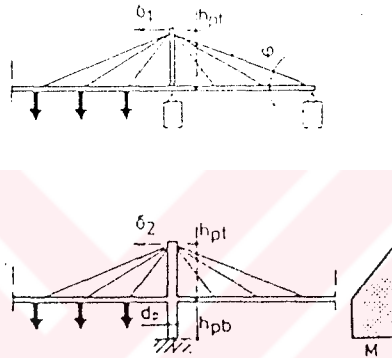
Kule tepesinin yatay hareketinde azalma, kulelerin altyapılara sabitlenmesiyle olabilir. Fakat aşağıdaki incelemede görüleceği gibi, bir ankraj kablosuna sahip sistemlerdekine eşdeğer olarak küçük yer değiştirmeler elde etmek için, çok büyük kesit alanı boyutları gerekmektedir.

Şekil 3.142’de tek taraflı yüklenen, iki eşit fan şekilli kablo sistemi gösterilmektedir. Üstteki sistem sağ uçta düşey bir mesnede ve dolayısıyla ankraj kablosuna sahiptir. Oysa alttaki sistem rijit bir kuleye bağlıdır (burada sabit kesite sahip olduğu kabul edilir). Kule tepelerinin yatay yer değiştirmesi için aşağıdaki ifadeler kullanılabilir:

$$\delta_1 = \frac{h_{pt}}{\sin \varphi \cos \varphi} \frac{\sigma_{ac}}{E_c} \quad (3.98)$$

$$\delta_2 = \frac{(2h_{pt}^2 + 6h_{pt}h_{pb} + 3h_{pb}^2)\sigma_{pb}}{(3d_p)E_p} \quad (3.99)$$

burada σ_{ac} ankraj kablosunun çekme gerilmesi; E_c kablonun elastisite modülü; σ_{pb} kulenin alt kısmındaki eğilme gerilmesi; E_p kulede kullanılan malzemenin elastisite modülüdür.



Şekil 3.142 Ankastre kuleye (altta) veya iki ayağa mesnetli (üstte) fan şekilli kablo sistemi.

Tek taraflı yükleme altında, $\delta_2 = \delta_1$ için gereken eşdeğer rijitliği aşağıdaki ifade ile sağlayabiliriz:

$$d_p = \frac{2h_{pt}^2 + 6h_{pt}h_{pb} + 3h_{pb}^2}{6h_{pt}} \frac{\sigma_{pb}}{E_p} \frac{E_c}{\sigma_{ac}} \sin 2\varphi \quad (3.100)$$

Gerçekçi değerler olan $h_{pb} = h_{pt}/2$, $\varphi = 20^\circ$ ve $E_c\sigma_{pb}/E_p\sigma = 0.5$, (3.100) denkleminde yerine yazılırsa $d_p = 0.31h_{pt}$ bulunur. 300 m. uzunluğunda ana açıklığa sahip olan bir köprü için kule yüksekliği (h_{pt}) 50 m. olacaktır. Bu köprüdeki rijit kulenin enkesiti, ankraj kablosuyla elde edilen rijitliği sağlamak için yaklaşık olarak 15 m. genişliğinde olmalıdır. İki veya üç açıklıklı bir köprüde 50 m. uzunluğundaki kulenin 2-3 m. genişliğinde olduğu düşünülürse, eksik bir ankraj kablosu için kulelerin boyutlarındaki bu artış, estetik olarak da kabul edilemeyecek durumdadır.

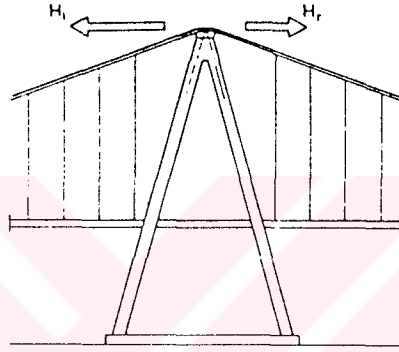
Alışılmış enkesitlere sahip olan kuleler ayaklara ankastre edilirse (sabitlenirse), kule tepelerinin yatay yer değiştirmesinde önemsiz bir azalma elde edilecektir.

3.7.2. Üçgen kule yapıları

Sabit bir kule yapısında yeterli rijitliğe ulaşmanın ve buna rağmen uygun boyutlar elde etmenin tek yolu A şekilli kulelerin kullanılmasıdır.

Ayaklara sabitlenen bir kule yapısında optimum görünüş elde etmek için, üst yapıdan (kablo sistemi ve kiriş) altyapıya kuvvetlerin geçişi sağlanmalıdır.

Eğer kablo sistemi zemine ankrajlı ve rijitlik kirişi yatayda hareketli ise (klasik asma köprülerde olduğu gibi), kule yapısı, dengelenmemiş ($H_l \neq H_r$) kuvvetini altyapıya kadar iletebilmelidir. Kule yapısının doğru şekli, Şekil 3.143’de olduğu gibi, tepede buluşan iki eğik ayağı dengelemesidir.



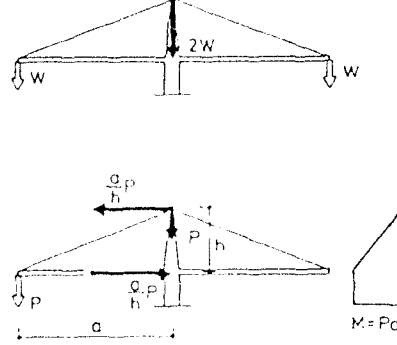
Şekil 3.143 Zemine ankrajlı üçgen kule yapısının görünümü.

Eğer kablo sistemi köprüye ankrajlı ve rijitlik kirişi kule yapısına mesnetli ise (kablo destekli köprülerde olduğu gibi), durum Şekil 3.144’te gösterildiği gibi olacaktır. Simetrik yük için kablolardaki ve rijitlik kirişindeki yatay kuvvetler dengelenecek, sadece kule tepesinde düşey bir kuvvet oluşacaktır. Bununla birlikte, tek taraflı bir yüklemede kule tepesine düşey ve yatayda kuvvet etkiyecek, diğer bir yatay yük de rijitlik kirişine etkiyecektir.

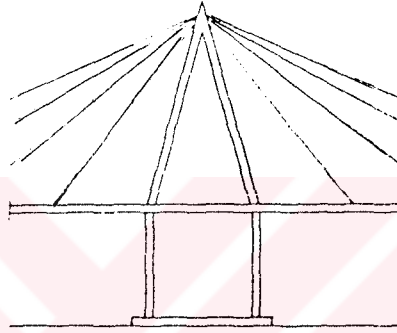
İki yatay yük eşit değerde, fakat zıt yönlerde olduğunda kule yapısındaki moment, tepedeki sıfır değerinden rijitlik kirişinde maksimum değerine ulaşacaktır. Kirişin altında moment sabit olup, maksimum değeri $M = Pa$ ’dır.

Köprüye ankrajlı kule yapısına etki eden momente göre, Şekil 3.145’de gösterilen görünüm akla uygun gözükmemektedir. Bu görünümde, tüm kule yapısına etki eden momentler, tekil elemanlarda sadece normal kuvvetlere sebep olacaktır. Aynı zamanda, yol seviyesinin altındaki düşey elemanların eğilme şekil değiştirmeleri, kule yapısının alt

kısmına belirli bir yatay esneklik verecektir. Bu özellik, köprü uzunluğu boyunca sürekli bir rijitlik kirişi uygulanmasına izin verecektir.



Şekil 3.144 Köprüye ankrajlı sistemde kuvvetlerin hareketi.



Şekil 3.145 Köprüye ankrajlı üçgen kule yapısının görünümü.

Eğer kule alt yapısında, rijitlik kirişi ile düşey ayaklar arasında hareketli mesnetler bulundurulursa, rijitlik kirişinde büyük yatay hareketler beklenir. Ayrıca böyle bir mesnetlenme durumunda, hareketli mesnetler ilk kuvvetlerin geçişini etkilemeyecektir. Kule yapısının üst ve alt kısmı arasındaki birleşimin dizaynı için, çekme kuvvetlerinde geçiş olup olmayacağını bilmesi esastır.

Şekil 3.146 kule yapısının sağ ayağında, minimum basınç oluşturan yük durumunu göstermektedir. R_r tepkisi aşağıdaki gibi bulunur:

$$R_r = w \left(a + \frac{a_p}{2} \right) + \frac{1}{2} Q_{pt} - \frac{1}{2} P \frac{a^2}{a_p} \quad (3.101)$$

burada Q_{pt} rijitlik kirişinin üstündeki kule yapısının kendi ağırlığıdır.

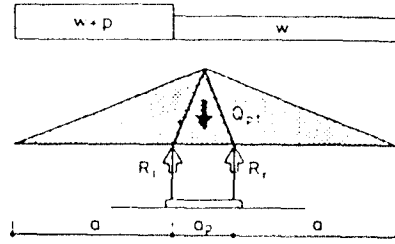
$R_r \geq 0$ için, düşey ayaklarda basınç daima mevcut olacaktır. Denklem (3.101) ile birlikte bu şart aşağıdaki ifadeyi gerektirir:

$$a_p \geq \sqrt{\left[\frac{p}{w} a^2 + \left(a + \frac{Q_{pt}}{2w} \right)^2 \right]} - a - \frac{Q_{pt}}{2w} \quad (3.102)$$

$a = 250$ m., $w = 0.20$ MN/m, $p = 0.08$ MN/m, $Q_{pt} = 10$ MN değerleri ile (3.102) denklemi şu sonucu verir:

$$a_p \geq 42 \text{ m.}$$

Gerçek bir yapıda a_p , bütün servis durumları için ayaklarda basınç oluşturan bu büyüklük değerine sahip olacak şekilde seçilir.



Şekil 3.146 Kule yapısının sağ ayağında minimum tepki için yükleme durumu.

Sabit ve hareketli yük için yukarıdaki değerler bir karayolu köprüsüne ait değerler olabilirler; fakat bir demiryolu köprüsü için olamazlar. Çünkü bir demiryolu köprüsünde hareketli yük ve sabit yük arasındaki oran çok büyük olacaktır. Karayolu köprüsü için kullanılan parametreleri demiryolu köprüsü için; $a = 250$ m., $w = 0.18$ MN/m, $p = 0.16$ MN/m, $Q_{pt} = 12$ MN olacak şekilde alırsak, denklem (3.102) yardımıyla bulunacak sonuç şöyle olacaktır:

$$a_p \geq 85 \text{ m.}$$

Bu gerçek bir yapıda ulaşılamayacak bir değerdir. Böylece bu durumda düşey ayaklar ve üst kısımların birleşimleri gerilmeyi iletmek için boyutlandırılmalıdır.

3.7.3. Üçgen kule yapılarındaki çelik miktarı

Üçgen bir kule yapısının malzeme tüketimi üzerine geometrinin etkisini incelemek için, Şekil 3.147'de gösterilen kule yapısında gerekli olan çelik miktarını veren ifadeler çıkarılacaktır. Burada kule yapısı, asma sistem tarafından desteklenen zemine ankrajlı bir sistemi göstermektedir.

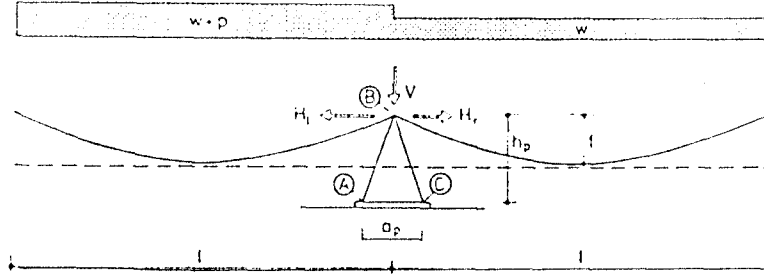
Tepeye etki eden kuvvetler aşağıdaki gibidir:

$$V = [w + (1/2)p]l$$

$$\Delta H = H_1 - H_r = p l^2 / 8f$$

bu ise kule ayaklarında, aşağıdaki denklem ile gösterilen maksimum normal kuvvet N_{mak} 'a götürür:

$$N_{mak} = \frac{V}{2} \frac{\sqrt{(h_p^2 + \frac{1}{4}a_p^2)}}{h_p} + \Delta H \frac{\sqrt{(h_p^2 + \frac{1}{4}a_p^2)}}{a_p}$$



Şekil 3.147 Çok açıklıklı asma köprüde üçgen kule yapısı.

Bu durumda kuledeki malzemenin toplam miktarı şöyle olur:

$$Q_p = \frac{\gamma_p}{\sigma_p} \left[\left(w + \frac{p}{2} \right) \frac{l}{h_p} + \frac{p}{4} \frac{l^2}{fa_p} \right] (h_p^2 + \frac{1}{4}a_p^2) \quad (3.103)$$

Çoğu durumlarda f ve h_p , kablo sistemi dikkate alınarak sabitlenecektir (örneğin yeterli rijitliğe ulaşmak için $f = l/10$) ve kule dizaynı için değişken parametre genişlik a_p olacaktır.

a_p 'nin optimum değeri $\partial Q_p / \partial a_p = 0$ ile belirlenir, bu da aşağıdaki kübik denklemi verecektir:

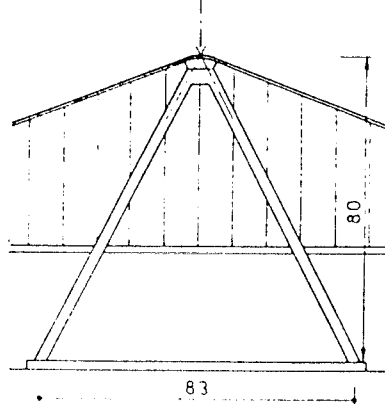
$$\left(w + \frac{p}{2} \right) \frac{l}{h_p} a_p^3 + \frac{pl^2}{8f} a_p^2 - \frac{pl^2}{2f} h_p^2 = 0 \quad (3.104)$$

Genellikle, (3.104) denklemiyle belirlenen a_p 'nin optimum değeri, çok geniş bir kule yapısı verecektir. Şekil 3.148, 80 m. yüksekliğinde ve 83 m. genişliğinde optimize edilmiş bir kule yapısını göstermektedir.

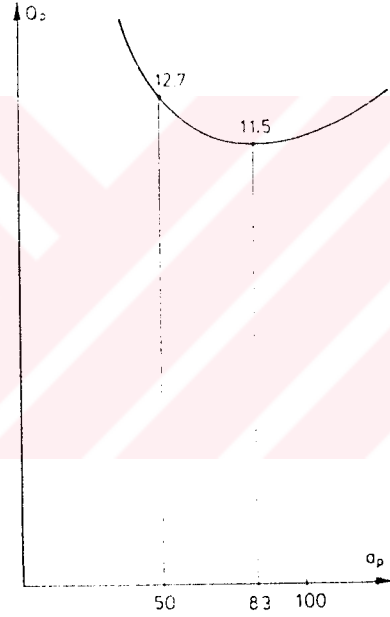
Bu, kule yapısı altındaki ayağın aşırı genişliğinden dolayı, gerçek yapıda uygun olmayacak bir değerdir. Bu çerçevede, 83 m. değerini veren hesaplamanın, yapıyı değil, sadece kule yapısının kendisini dikkate alan bir çözüm olacağı unutulmamalıdır.

Denklem (3.103)'ü temel alarak, Q_p 'nin a_p ile değişimi Şekil 3.149'da gösterilmektedir. Genelde Q_p 'nin optimumu oldukça düzdür ve bundan dolayı a_p , kulede gerekli olan miktar için kabul edilmez bir artış vermeksizin, 83 m. optimum değerinin

oldukça altında seçilebilir. Böylece, $a_p = 50$ m. ile kule büyüklüğü sadece %11 artar, bu artış yapıdaki tasarruflarla kolaylıkla karşılanabilir.



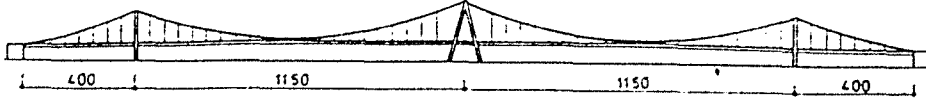
Şekil 3.148 İki asma köprü ana açıklığı arasında optimize edilmiş üçgen kule yapısı. Parametreler: $l = 500$ m., $h_p = 80$ m., $w = 0.22$ MN/m, $p = 0.08$ MN/m.



Şekil 3.149 a_p genişliğiyle kule yapısındaki çelik miktarının değişimi. Parametreler şekil 3.148'de verilen değerlerle aynıdır.

Şekil 3.150'de gösterilen dört açıklıklı bir asma köprü, 1960'lı yıllarda T. Fukuda tarafından araştırılmıştır. Merkezi üçgen kule uygulamasının sisteme mükemmel rijitlik özellikleri verdiği, böylece sadece bir ana açıklığın hareketli yük altındaki maksimum sehiminin, açıklık uzunluğunun $1/670$ 'i olan 1.79 m. olduğu görülür. Merkezi kule tepesinde tamamıyla sabit bir mesnet noktası kabul edilerek, iki açıklıklı iki köprü olarak yapının analiz edilebileceği belirlenir. Üçgen kulenin yüksek yatay rijitliği sayesinde 200 MN'luk bir kuvvet, kulenin tepesinin yatay olarak 1.0 m. yer değiştirmesine sebep

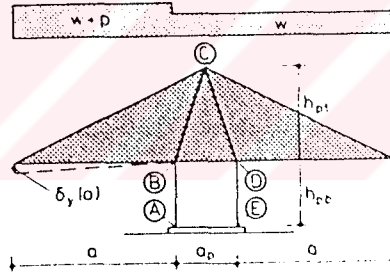
olacaktır. Oysa düşey yan açıklık kuleleri, sadece 1.0 MN'luk bir kuvvet için kule tepelerinde 1.0 m.'lik yer değiştirmeye sebebiyet verecektir.



Şekil 3.150 T. Fukuda tarafından araştırılan dört açıklıklı asma köprü.

Fukuda'nın araştırma sonuçları ile San Francisco-Oakland Köprüsü model denemelerindeki C modeli için elde edilen sonuçları karşılaştırmak ilginç olacaktır. Çünkü, her iki köprüde dört açıklıklıdır ve benzer yüklemeye sahiptirler (bak. Şekil 3.140). Üçgen merkezi kuleye sahip olan köprünün ana açıklığının, düşey merkezi kuleye sahip köprünün ana açıklığından yaklaşık %16 daha büyük olmasına rağmen; Şekil 3.150'deki sistem için maksimum sehim, Şekil 3.140'daki C modeli sistem için maksimum sehimin sadece %30'u olmaktadır. Bu açıkça çok açıklıklı köprülerde üçgen kule yapısı uygulanarak elde edilecek avantajları gösterir.

Şekil 3.151'de gösterildiği gibi, köprüye ankrajlı fan sistem için hem kiriş üzerindeki h_{pt} yüksekliği, hem de a_p genişliği kule yapısında değişken parametreler olarak seçilebilir. Çünkü rijitlik gereksinimi kablo sisteminin yüksekliğine bir sınırlama getirmez.



Şekil 3.151 Üçgen kuleye sahip çok açıklıklı ve fan sistemli eğik askılı köprü.

Şekilde verilenlerle, kule yapısının çelik miktarı için aşağıdaki ifadeler çıkarılabilir:

Tepe kısmının (BC ve CD) Q_{pt} çelik miktarı:

$$Q_{pt} = \frac{\gamma_p}{\sigma_p} \left(w(2a + a_p) + p \frac{(a + a_p)^2}{a_p} \right) \frac{h_{pt}^2 + \frac{1}{4}a_p^2}{h_{pt} - \gamma_p / \sigma_p (h_{pt}^2 + \frac{1}{4}a_p^2)} \quad (3.105)$$

ve alt kısmın (AB ve DE) Q_{pb} çelik miktarı ise:

$$Q_{pb} = \frac{\gamma_p}{\sigma_p} \left(w(2a + a_p) + p \frac{(a + a_p)^2}{a_p} \right) \frac{h_{pt} h_{pb}}{h_{pt} - \gamma_p / \sigma_p (h_{pt}^2 + \frac{1}{4}a_p^2)} \quad (3.106)$$

Böylece tüm kule yapısının toplam çelik miktarı Q şöyle olur:

$$Q_{pt} = \frac{\gamma_p}{\sigma_p} \left(w(2a + a_p) + p \frac{(a + a_p)^2}{a_p} \right) \frac{h_{pt}^2 + h_{pt}h_{ph} + \frac{1}{4}a_p^2}{h_{pt} - \gamma_p / \sigma_p (h_{pt}^2 + \frac{1}{4}a_p^2)} \quad (3.107)$$

Bir değişken olarak h_{pt} yüksekliğiyle birlikte, kablo sisteminin çelik miktarı da optimizasyon işlemine dahil edilmelidir.

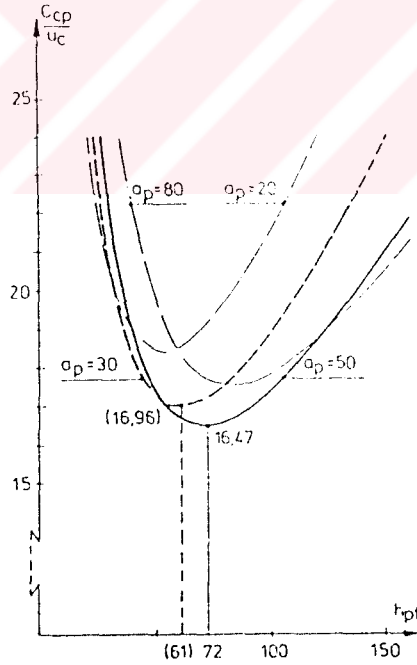
(3.56) basitleştirilmiş denklemi temel alınır, kablo çeliğinin miktarı şöyle olur:

$$Q_F = \frac{1}{2} \frac{\gamma_c}{\sigma_c} (w + p) \left(\frac{2a + a_p}{6h_{pt}} + \frac{2h_{pt}}{2a + a_p} \right) (2a + a_p)^2 \quad (3.108)$$

Kablo çeliği için u_c ve kule malzemesi için u_p birim fiyatı ile kablo sisteminin ve kule yapısının toplam fiyatı C_{cp} şu şekilde olur:

$$C_{cp} = u_c Q_F + u_p Q_p \quad (3.109)$$

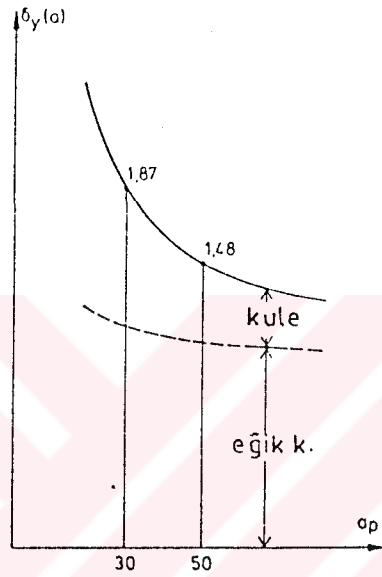
Çelik miktarının değişimi $C_{cp} u_c = (Q_F + Q_p u_p u_c)$, üst (tepe) kule kısmının a_p genişliği ve h_{pt} yüksekliğiyle birlikte Şekil 3.152'deki örnekle gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, $C_{cp} u_c$ miktarının minimum değeri $a_p = 50$ m. ve $h_{pt} = 72$ m. için bulunur. Bununla birlikte, $a_p = 50$ m. ($h_{pt} = 72$ m.) için minimum değer, mutlak minimum değerden yaklaşık olarak %3 farklıdır ve bu yapının fiyatını dikkate değer derecede etkilemeksizin belirli bir aralık içinde a_p 'nin seçilebileceğini gösterir.



Şekil 3.152 Kule yapısı ve kablo sisteminde a_p genişliği ve h_{pt} yüksekliğine bağlı olarak değişim grafiği (bak. şekil 3.151). Parametreler: $a = 250$ m, $h_{ph} = 30$ m, $w = 0.22$ MN/m, $p = 0.08$ MN/m, $\sigma_c = 720$ MN/m², $\gamma_c = 0.08$ MN/m³, $\sigma_p = 160$ MN/m², $\gamma_p = 0.08$ MN/m³.

Dolayısıyla α_p genişliğinin son seçimi; alt yapı, yerel sınır şartları (köprünün toplam uzunluğunun kabloluya oranı, açıklık gereksinimleri v.b.) ve rijitlik durumlarını dikkate alan daha ciddi bir analize dayanmaktadır.

Genel olarak rijitlik, α_p ile orta açıklık sehim δ_y 'nin değişimini (h_{pt} optimum yüksekliğe sahip sistemler için) gösteren Şekil 3.153'deki eğriyle belli olduğu gibi, maksimum α_p değerinin artmasıyla iyileşecektir. Görüldüğü gibi, maksimum orta açıklık sehim, kule genişliği 30 m.'den 50 m.'ye çıktığında %21 kadar azalmaktadır.

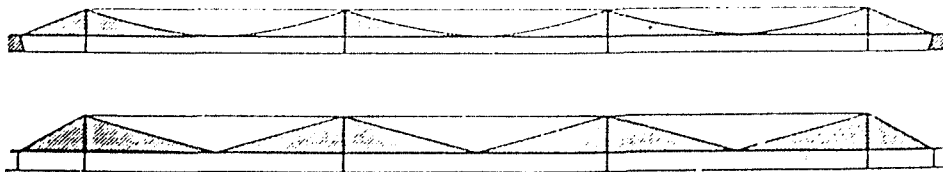


Şekil 3.153 Kule yapısının α_p genişliği ile $\delta_y(a)$ orta açıklık sehiminin değişimi.

Bununla birlikte, 125 m, 500 m. ve 125 m. açıklıklara sahip olan basit bir üç açıklıklı eğik askılı köprünün orta açıklık sehim δ_y 1.89 m. kadardır (yukarıda kullanılan aynı basitleştirmelere göre). Böylece bu sehim ile sınırlayıcı bir değer olarak α_p , mevcut örnekte 30 m. kadar düşük bir değerde seçilebilir.

3.7.4. Yatay ankraj kablosu

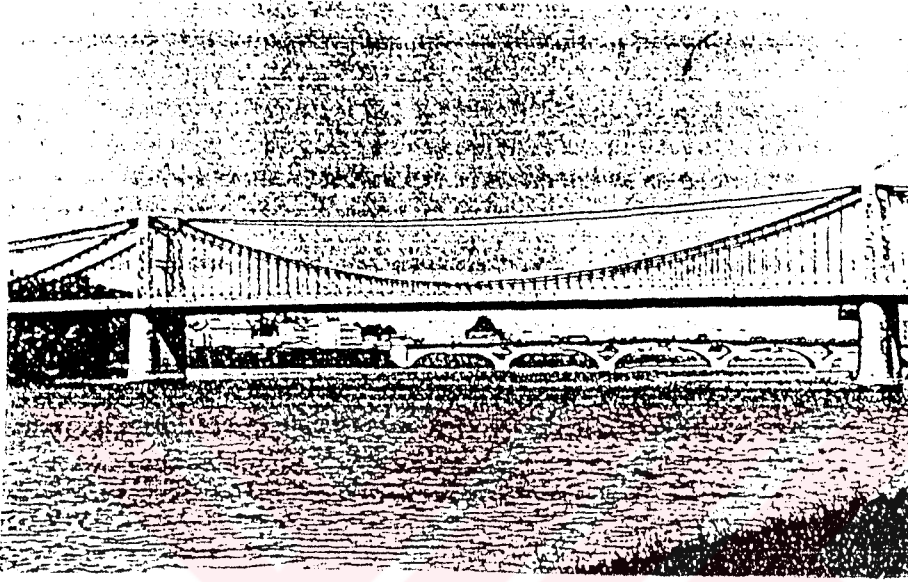
Ara kule tepelerindeki yatay yer değiştirmeleri azaltmak için diğer bir yolda, asma ve eğik askılı sistemlerde, Şekil 3.154'te gösterildiği gibi, kuleler arasına yatay ankraj kablosu eklemektir.



Şekil 3.154 Kablolu köprülerde kullanılan yatay ankraj kablosu.

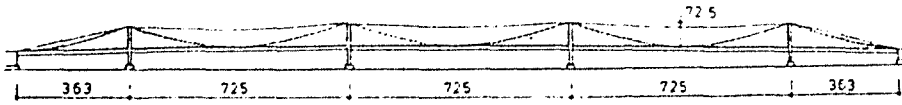
Genel olarak yatay ankraj kablosu, kablo sisteminin geri kalan bölümü olarak aynı şekilde ankre edilecektir. Böylece asma sistemin ankraj kablosu, zemine ankrajlı; eğik askılı sistemin ankraj kablosu da köprüye ankrajlı olacaktır.

Yatay ankraj kabloları 19. yüzyılda yapılan birkaç Fransız asma köprüsünde kullanılmıştır (Şekil 3.155). Bu sistem aynı zamanda merkezi ankraj ayağını önlemek amacıyla San Francisco-Oakland Köprüsü'nde de incelenmiştir.



Şekil 3.155 Çok açıklıklı asma köprüde yatay ankraj kablosu (Fransa, 19. yy).

San Francisco-Oakland Köprüsü için incelenen sistem Şekil 3.156'da görülmektedir. Eşit uzunlukta üç ana açıklık (725 m.) ve yarısı uzunlukta iki yan açıklıktan (363 m.) oluşmaktadır. Ankraj kablusunun, uzun yan açıklıklarda şekil değiştirmesini önlemek amacıyla dış kule tepelerinden ankraj bloklarına kadar devam ettiğine dikkat edilmelidir. Üç ana açıklıkta asma kabloları 1/10 sehim oranına sahiptir, oysa ortalama sıcaklıkta sabit yük durumunda ankraj kablusunun sehimini 1/50'dir. Bu, ankraj kablolarında 360 MN/m² civarında bir sabit yük gerilmesi oluşmasına neden olur.



Şekil 3.156 San Francisco-Oakland Köprüsü için incelenen sistem.

Araştırmalar, yatay ankraj kablolu sistemin, merkezi ankraj ayaklı sistemden bile daha küçük sehimler verdiğini göstermiştir (bak. Şekil 3.140, model B). Kablo çeliği miktarının ankraj kablосunu karşılamak üzere yaklaşık olarak sadece %15 artırılması

gerektiği dikkate alınır, Şekil 3.156'daki sistemin gerçekten çok avantajlı olduğu görülür. Bununla birlikte, 3.5 yılda bitirilen San Francisco-Oakland Köprüsü'nde sıkı programdan dolayı, sistem ciddi şekilde incelenememiştir. Çok hızlı bir şekilde, iyi bilinen tekniklerin kullanılarak boyutlandırmanın yapılması da anlaşılır yaklaşımdır.

Yatay ankraj kablolu bir köprünün yapımında özel sorunlardan birisi, gel-git metodu boyunca kurulacak ve çok küçük sehim oranına sahip olan uzun bir kablo ile ilgilidir.

Yatay ankraj kablosunun serbest uzunluğu, ana açıklık uzunluğuna eşit olduğundan sehim etkisi uzun açıklıklı köprülerde oldukça önemli olacaktır. San Francisco-Oakland Köprüsü'nde eşdeğer elastisite modülü (tanjant modülü) şöyle olacaktır:

$$\frac{1}{E_{tan}} = \frac{1}{E_c} + \frac{\gamma^2 a^2}{12 \sigma_1^3} = \frac{1}{205 \times 10^3} + \frac{(0.08 \times 725)^2}{12(360)^3}$$

ve böylece

$$E_{tan} = 92 \times 10^3 \text{ MN/m}^2 \text{ olur.}$$

Görülmektedir ki, sehim etkisi kablonun eksenel rijitliğini %50'den fazla azaltacaktır.

Ankraj kablosu, büyük bir eksenel rijitlik elde etmek için minimum sehim oranıyla yapılmalı ve aynı zamanda son ayaklara mesnetlenmesi gerektiğinden, sıcaklık etkisine özel dikkat gösterilmelidir.

Zemine ankrajlı sistemde, ankraj kablosundaki herhangi bir sıcaklık değişimi gerilme oluşturacaktır. Çünkü ankraj kablosu uçları, ankraj bloklarına mesnetlenmiştir. Böylece, zemine ankrajlı sistemde ankraj kablosundaki sıcaklık gerilmeleri, köprüye ankrajlı sistemdekinden daha büyük olacaktır.

Sıcaklık değişiminden dolayı maksimum gerilme σ_t şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_t = E_{eq} \beta \Delta t \quad (3.110)$$

burada β ısı genleşme katsayısı ve Δt zemine ankrajlı kablodaki sıcaklık değişimi veya köprüye ankrajlı bir kabloda kablo ile kiriş arasındaki sıcaklık farkıdır.

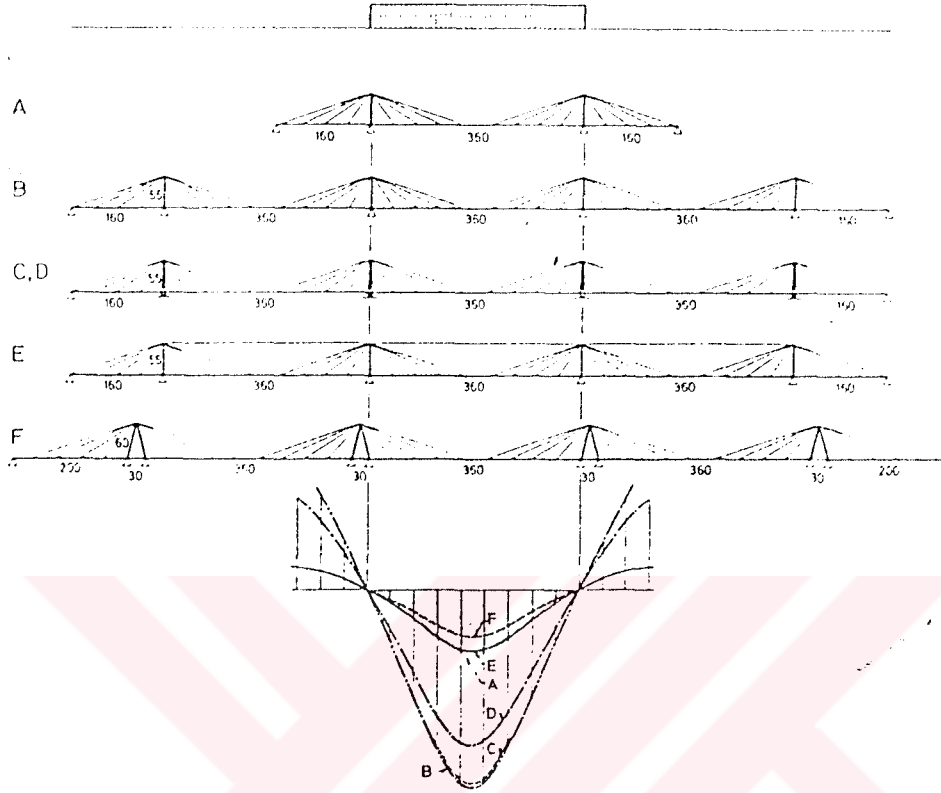
$E_{eq} = 92 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$, $\beta = 12 \times 10^{-6}$ ve $\Delta t = 25^\circ\text{C}$ (San Francisco-Oakland Köprüsü dizayn değerleri) değerleriyle (3.110) denklemi şu sonucu verir:

$$\sigma_t = 28 \text{ MN/m}^2$$

Bu gerilme, kablo emniyet gerilmesinin yaklaşık %5'i civarındadır ve bundan dolayı çok önemli değildir.

3.7.5. Farklı çok açıklıklı eğik askılı sistemlerin sehimleri arasındaki karşılaştırma

Farklı yapısal sistemlerin rijitlik özellikleri hakkında karşılaştırmalı araştırma sonuçları, Şekil 3.157 ve 3.158’de gösterilmektedir.



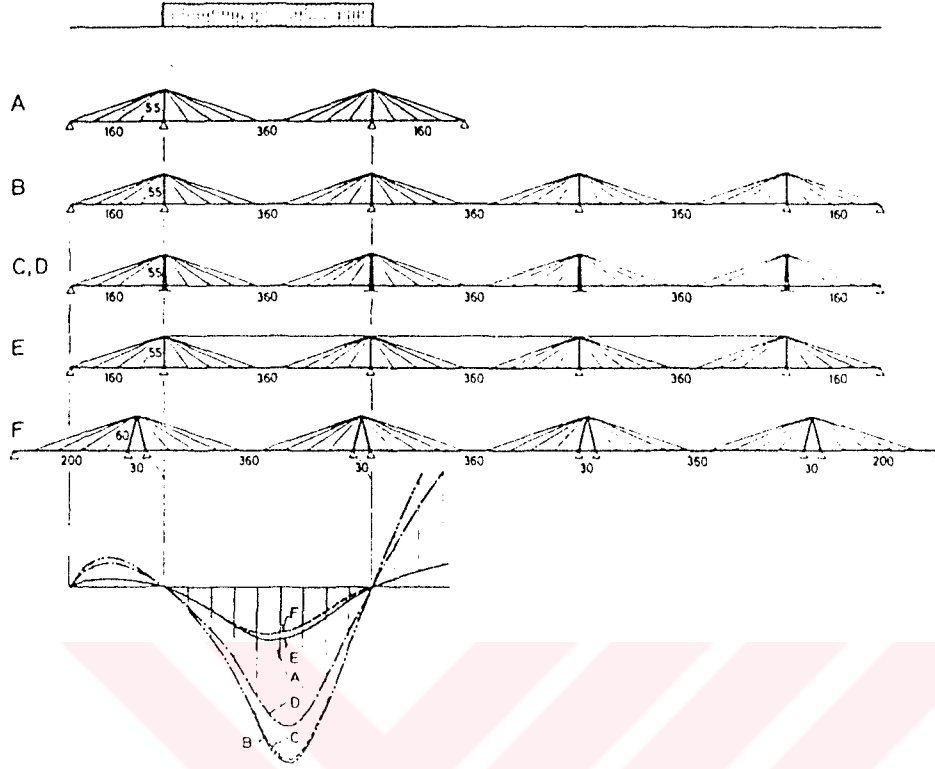
Şekil 3.157 Yalnız orta açıklıkta yüklemeye maruz kalan farklı eğik askılı köprülerin sehim eğrileri.

İncelenen sistemlerin temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir: Sistem A, fan şekilli kablo sistemli ve altyapı ile üstyapı arasındaki birleşimin mafsallı olduğu klasik üç açıklıklı bir köprüdür. Her bir elemanın boyutları ve kesit alanları, tipik Avrupa yüklemelerine karşılık gelir. Bununla birlikte, rijitlik kirişi ve kule için çelik akma dayanımı 350 MN/m^2 , kablo tellerinin kopma gerilmesi ise 1500 MN/m^2 ’dir.

Sistem B, elemanlarının boyutu ve altyapı ile üstyapı arasındaki birleşim tipine dikkat edildiğinde A sistemine benzediği söylenebilir. Karşılıklı elemanların eşit kesit özellikleri, genellikle sistemlerin kendi rijitlikleri arasında doğrudan bir karşılaştırmaya imkan verdiğini de söyleyebiliriz.

Sistem C ve D, kule ve altyapı arasındaki birleşim sabittir. Bununla birlikte, kuleler klasik kolon tiptedirler (Sistem F’nin tersine). C sisteminde kulelerin kesitsel özellikleri A

ve B sistemindeki gibidir. Fakat on kat daha büyük bir atalet momenti D sisteminin kulelerine uygulanır.



Şekil 3.158 Orta açıklığın yalnız sol tarafında yüklemeye maruz kalan farklı eğik askılı köprülerin sehim eğrileri.

Sistem E, kule tepeleri arasında daha önce tanımlanan yatay ankraj kablosu içerir. Bunun dışında B ve E sistemleri benzerdir.

Sistem F, ikişer ayakla desteklenen dört üçgen kule yapısı içerir. Bu şekilde altyapıyla etkin bir mesnetlenme elde edilir.

Sehim eğrilerinden ise aşağıdaki özellikler çıkarılabilir:

- (1) Yaygın eğilme rijitliğine sahip olan kule mesnetlenmesi, sehimleri önemli derecede azaltmaz (bak. sistem B ve C).
- (2) Mesnetlenme ve kulelerin eğilme rijitliğini on kat artırma bile sehimleri yeterli derecede azaltmaz (bak. sistem B ve C).
- (3) Kule tepeleri arasındaki yatay bir ankraj kablosu çok açıklıklı köprünün sehimini izin verilen sınıra indirecektir (sistem E).
- (4) İkişer ayaklı dört üçgen kuleye sahip köprüler izin verilir sehimler elde edilmesini mümkün kılar (sistem F).

Görüldüğü gibi, minimum sehimler F sisteminde olmaktadır. Bununla birlikte, bu sistemin sehim eğrisi, kule yapıları altındaki mesnetlerin düşey yönde tamamen rijit oldukları kabulüne dayanır. Gerçek yapılarda kuleler, genelde eksenel şekil değiştirmelerin rijitlik kirişinin sehimlerini artırma eğilimi gösterdiğinde ayak şaftına bağlanmaktadır.

Farklı sistemlerin sehimleri karşılaştırıldığında, çelik miktarları arasındaki farkları dikkate almak gerekecektir. Çizelge 3.7’de, A-B-...-F sistemleri için birim uzunluk başına bağıl miktarlar verilmiştir. Yatay ankraj kablo uygulamasının (sistem E), kablo çeliğinin birim miktarını klasik üç açıklıklı köprüye (sistem A) nazaran %48 kadar artırdığı görülür.

Üçgen kule yapıları (sistem F) uygulanarak kablo çeliği miktarı, çoğu ağır ankraj kablolarının elemine edilmesi ile %18 kadar azaltılacaktır. Diğer yandan yapısal çelik miktarı, daha büyük kesitlere sahip olan çift ayaklı kule uygulamalarından dolayı %14 kadar artar.

Çizelge 3.7’deki son sütun, baz sistem olarak kullanılan A sistemine göre (bağıl miktar = 1.00), farklı sistemler için yapı çeliğinin bağıl eşdeğer miktarını verir. Yapı çeliğinin eşdeğer miktarına ulaşmak için, kablo çeliğinin miktarı 1.75 ile çarpılır ve yapı çeliği miktarına eklenir. Böylece, Çizelge 3.7’nin son sütunu farklı sistemlerin üstyapıları için bağıl maliyet hakkında da bilgi vermektedir. E ve F sistemlerinde birim uzunluk maliyetinin aynı olduğu ve A sisteminin sadece %8-9 üzerinde olduğu görülür. E ve F sistemlerinin ortalama açıklık uzunluğunun (280 m. ve 295 m.), A sisteminin ortalama açıklık uzunluğundan (230 m.) daha fazladır.

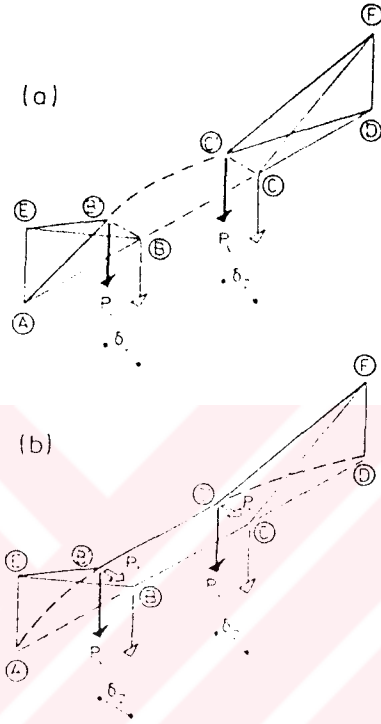
Yukarıdaki incelemelerde, rijitlik kirişinin ve kabloların ana boyutları, sistemlerin esnekliğindeki farklar arasında doğrudan bir karşılaştırmaya imkan vermesi için sabit tutulmuşlardır. Diğer bir yaklaşım ise tüm sistemlerde eşdeğer sehim gereksinimine ve karşı gelen çelik miktarlarını karşılaştırmaya dayanır.

Şekil 3.159’da bu tip karşılaştırmanın sonuçları özetlenmektedir. Temel sistem (sistem I), iki tane 80 m. yan açıklıkla desteklenmiş 280 m.’lik ana açıklığa sahip olan üç açıklıklı bir köprüdür. Diğer üç sistem, II-III-IV, sistem I’de olduğu gibi trafik yükü altında aynı maksimum sehimde elde etmek üzere boyutlandırılmışlardır. Tüm kule tepelerini bağlayan yatay ankraj kablolu beş açıklıklı köprü için (sistem II), rijitlik kirişinin ve kulelerin boyutları sabit tutulabilir. Çünkü iç fanlar, yatay kabloyla stabil duruma gelir.

Yatay kablosuz iç fanlar, kulelerin ayaklara mesnetlenmesi (sistem III) veya kirişin eğilme rijitliğinin artırılması ile stabil (kararlı) hale getirilebilir. Her iki durumda da ilgili

kuvvetinin, kablo teğetine bağlı olarak kablo düzleminde kombinasyonlara sahip olacağını söyleyebiliriz. Bununla birlikte, kablo sisteminin, dış düzlemdeki yerdeğiştirmeler altında oluşacak ikinci derece etkilerden dolayı, başlangıç kablusunda düşey yüklemeye karşı bir mukavemet gösterebilir.

Bu şekilde bir mukavemetin mevcut olup olmaması, Şekil 3.160'daki basit sistemde gösterildiği gibi kablo sisteminin mesnetlenme şartlarına bağlıdır.



Şekil 3.160 Yanal sehimler altında zemine ve köprüye ankrajlı kablo sistemleri.

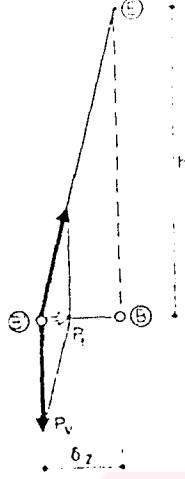
(a)'da hem AB ve CD basınç elemanlarını, hem de EB ve FC kablolarını içeren köprüye ankrajlı bir kablo sistemi gösterilmektedir. Sadece düşey yük altında rijitlik kirişi ABCD düzdür ve kablo düzlemi A, D, F ve E noktalarıyla tanımlanır. Ek yanıl yükleme altında rijitlik kirişi AB'C'D noktaları ile tanımlanan hali alacaktır. ABE ve DCF kısmi sistemleri, AE ve DF eksenleri etrafında döneceklerinden düşey kalacaklardır. Herhangi bir yatay kuvvet oluşmayacak ve kablo sistemi sonuç olarak yanıl yüklemeye karşı bir mukavemet oluşturmayacaktır.

(b)'de hem BC gerilme elemanı, hem de EB ve FC kablolarını içeren zemine ankrajlı kablo sistemi görülmektedir. Rijitlik kirişinin yanıl sehimi altında kablo düzlemi, EB'C'F şeklini alacaktır. P_v düşey yükü, enine yer değıştirmeye karşı P_t yanıl kuvvetini oluşturacaktır.

Şekil 3.161’de gösterildiği gibi, kablo düzleminin eğiminden kaynaklanan P_t yanal yükü aşağıdaki ifade ile tanımlanır:

$$P_t = \frac{\delta_z}{h} P_v \quad (3.111)$$

burada δ_z , B ve C noktalarının yanal yer değiştirmesidir.



Şekil 3.161 Başlangıçtaki düşey kablo düzleminin dönmesinden oluşan P_t yanal yükü.

Şekil 3.160’deki basit örneklerden, zemine ankrajlı kablo sisteminin yanal yüke mukavemet gösterdiği, oysa böyle bir mukavemetin köprüye ankrajlı kablo sisteminde genellikle bulunmadığı anlaşılır.

Şekil 3.162’de gösterildiği gibi, zemine ankrajlı çok kablolu bir sistemde yanal yüke karşı kablolu sistem tarafından gösterilen mukavemet, aşağıdaki denklemde tanımlanan yay sabiti k ile karakterize edilir. Yay sabiti sürekli, yanal ve elastik bir mesnet olarak kabul edilir:

$$k = w/h \quad (3.112)$$

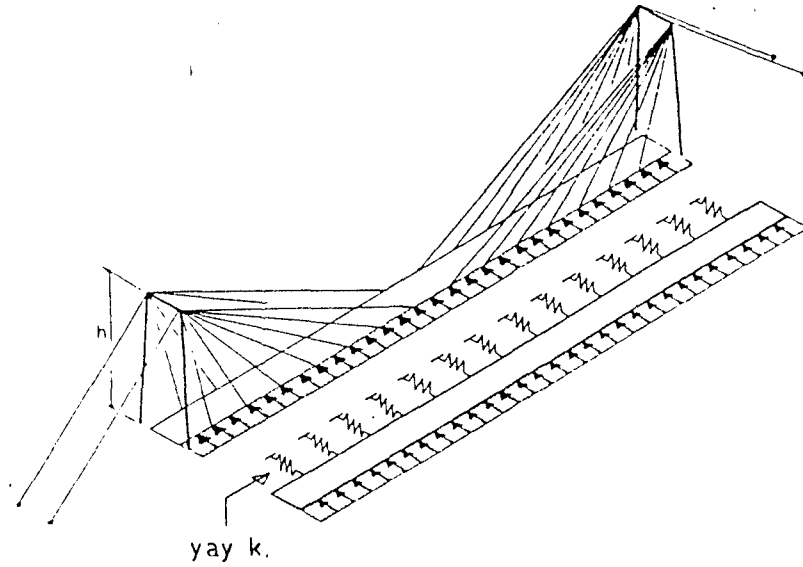
burada w birim uzunluğa gelen düşey yük, h kablo sisteminin yüksekliğidir.

Yanal yük için rijitlik kirişi; açıklık boyunca sürekli elastik mesnetler, kuleler ve ayakların sonunda rijit mesnetler olarak analiz edilebilirler.

Eğer rijitlik kirişinin düşey eksen etrafındaki eğilme rijitliği önemsiz ise, kablo kuvvetlerinin yanal bileşenleri tamamen dengeye ulaşıncaya kadar rijitlik kirişi yer değiştirecektir.

Birim uzunluk için u yanal yükü ile δ_{zc} yer değiştirmesi aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$\delta_{zc} = uh/w \quad (3.113)$$



Şekil 3.162 Zemine ankrajlı çok kablolu fan sistemde yanal mesnet yerine sürekli elastik mesnetin gösterimi.

Yanal yer değiştirme δ_{zc} 'nin, h yüksekliğiyle orantılı olduğuna dikkat edilmelidir. Bu ilişki, zemine ankrajlı kablo sisteminde, yükseklik/açıklık oranının son aşamasında dikkate alınmalıdır.

İstenen yer değiştirme δ_{zc} 'nin büyüklüğü hakkında bir fikir edinmek için, 160 kN/m ağırlığında ve 1000 m. ana açıklığa sahip, 3.0 m. yükseklikli bir rijitlik kirişi bulunan köprü ele alınacaktır. Sürtünme katsayısı $c_d = 0.6$, dinamik rüzgar yükü $q = 2 \text{ kN/m}^2$ için birim uzunluğa gelen rüzgar yükü şöyle olur:

$$u = 0.6 \times 2 \times 3 = 3.6 \text{ kN/m}$$

Kule yüksekliği 100 m. (rijitlik kirişi üstü) kabul edilirse, δ_{zc} yerdeğiştirmesi şöyle olur:

$$\delta_{zc} = (3.6/160) \times 100 = 2.25 \text{ m.}$$

Bu ana açıklık uzunluğunun sadece 1/450'sine karşı gelir ve bu büyüklük genellikle kabul edilebilir olacaktır.

Zemine ankrajlı kablo sistemli gerçek yapılarda, yanal rüzgar yükü kısmen rijitlik kirişindeki eğilme tarafından, kısmen de kablo sistemi tarafından karşılanacaktır.

Yukarıdaki örnekte, tüm rüzgar yükünün düşey eksen etrafındaki rijitlik kirişinin eğilmesi ile karşılandığı ve atalet momenti I_y 'nin gerçek değerinin 60 m^4 olduğu kabul edilirse, aşağıdaki yanal sehim değeri elde edilir:

$$\delta_{zg} = 3.7 \text{ m.}$$

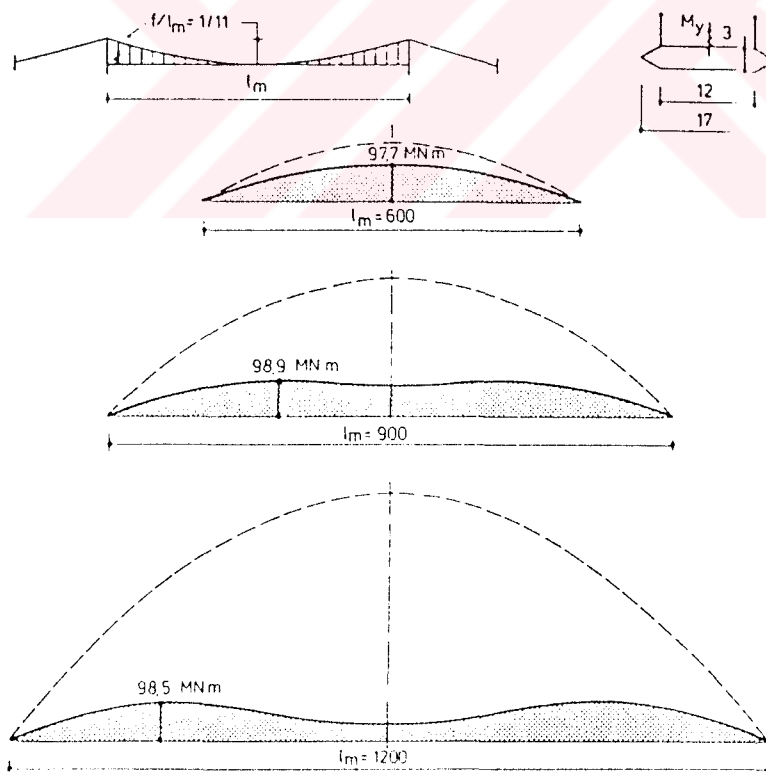
δ_{zg} 'nin δ_{zc} 'den daha büyük olması, rüzgar yükünün en büyük kısmının kablo sistemi tarafından karşılandığını gösterir.

San Francisco-Oakland Köprüsü'nün model denemeleri sırasında, rijitlik kirişinin yükseklik/açıklık oranının 1/35 gibi büyük bir değerde olmasına rağmen, rüzgar yükünün yaklaşık %30'unun kablo sistemi tarafından karşılandığı bulunmuştur.

Şekil 3.162'de gösterilen zemine ankrajlı eğik askılı sistem için tanımlanan yanal mesnedin etkisi asma köprülerde de görülür. İlk hesaplamalarda bu etki, Şekil 3.12'de verildiği gibi, aynı yay sabitine sahip olan yanal bir elastik mesnet kabulüyle dikkate alınabilir.

Son hesaplamalarda kablo sistemi ve rijitlik kirişi arasındaki rüzgar yükünün dağılımı, tüm sistemin üç boyutlu ikinci dereceden bir analizine dayanmaktadır. Bu analize kablolar ve kuleler üzerindeki rüzgar yükü de dahil edilmelidir.

Rijitlik kirişlerinde küçük yükseklik/açıklık oranı bulunan asma köprülerde, rijitlik kirişinde rüzgardan oluşan eğilme momentlerinin azaltılması oldukça fazla olabilir. Bu, Şekil 3.163'de gösterilmektedir. 17 m. toplam genişlikli, 600 m., 900m. ve 1200 m. ana açıklıklı rijitlik kirişleri için moment diyagramları verilmiştir.

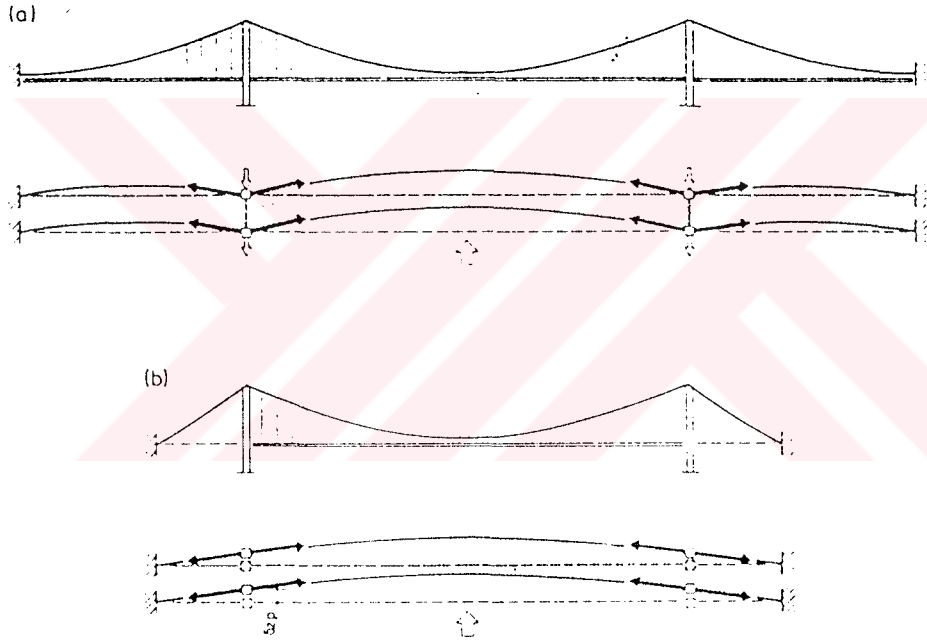


Şekil 3.163 Asma köprülerde yanal rüzgar yükünden oluşan moment diyagramları.

Eğilme momentlerinde azalmanın, açıklık arttıkça çok daha belirgin olduğu görülmektedir (yükseklik/açıklık oranı azaldıkça). 600 m.'lik açıklık için yanal rüzgar yükünden oluşan maksimum moment, kablo sisteminin etkisi dahil edildiğinde yaklaşık %40 kadar azalmaktadır. Oysa 1200 m.'lik açıklık için %85'lik bir azalma olmaktadır.

Rijitlik kirişinin boyutlandırılmasında, rüzgar yükünün bir kısmının kablo sistemi tarafından taşınması en fazla istenen durumdur. Diğer taraftan, kablo sistemi tarafından taşınan ve ana açıklıktan gelen rüzgar yükünün kulelere, oradan da köprünün temellerine iletildiği bilinmelidir.

Büyük yan açıklığa ve yanal rijit kulelere sahip köprüler için, rüzgar yükünden oluşan kuvvetler, bir düşey kiriş (kolon) olarak görev yapan kule tarafından altyapıya aktarılacaktır. Bu durum, Şekil 3.164(a)'da gösterilmektedir. Burada kule üzerindeki yanal yük, ana açıklık ve yan açıklık kablosu tarafından meydana getirilmektedir.

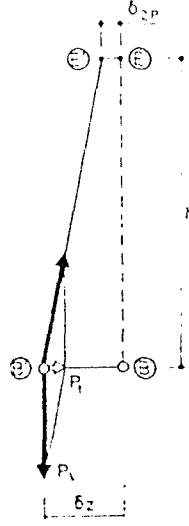


Şekil 3.164 Kule tepesindeki yanal yüklerin dengesi: (a) büyük yan açıklık ve yanal rijit kuleler; (b) küçük yan açıklık ve yanal esnek kuleler.

Diğer bir ekstrem örnek olarak, küçük yan açıklıklı ve yanal olarak esnek kulelere sahip olan bir köprü Şekil 3.164(b)'de, yan açıklığı kablosuz bir sistem için gösterilmiştir. Kule tepesinin yanal sehimini δ_{zp} ihmal edilemeyecek bir büyüklükte olması durumunda, denklem (3.111) yerine aşağıdaki ifade kullanılmalıdır (bak. Şekil 3.165).

$$P_t = \frac{\delta_z - \delta_{zp}}{h} P_v \quad (3.114)$$

Yanal δ_z sehiminin, aynı yanal kuvvete (P_t) ulaşması için δ_{zp} kadar artırılması gerektiği görülmektedir ve buda kablo sisteminden gelen yanal mesnedin etkinliğini azaltır.



Şekil 3.165 Yanal P_t yükünden dolayı başlangıç düşey kablosunun dönmesi ve ötelenmesi.

Kablo ağ sistemi gibi kısmi bir zemin ankrajına sahip olan kablo sistemlerinde, kablo sistemiyle yanal bir mesnet sadece zemin ankrajlı bölgede olacaktır (bak. Şekil 3.127). Bununla birlikte, bu bölge ana açıklığın orta bölgesini içerdiğinden, bu bölgede yanal mesnet bulunacaktır. Diğer taraftan, kablo ağ sisteminin yüksek kuleleri, kablo sistemi tarafından oluşturulan yanal mesnedin etkinliğini bir dereceye kadar azaltır.

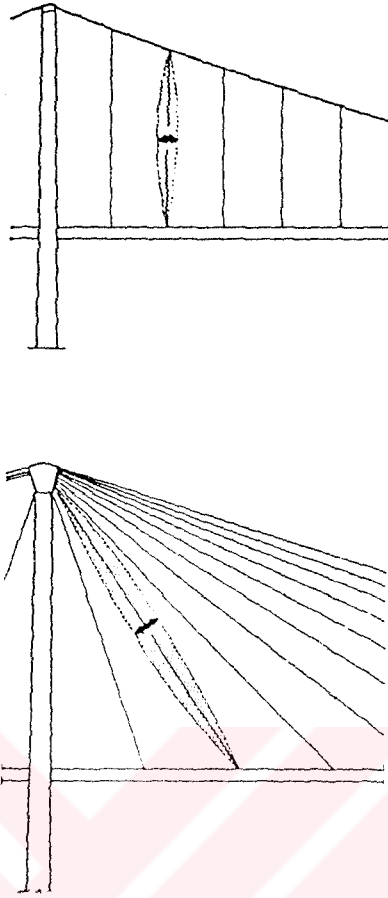
3.9. Kablo Sistemlerinin Salınımı

Yük taşıyan ana elemanlardaki yüksek gerilme seviyesiyle birlikte kablolu köprülerin esnekliği, yapıları özellikle dinamik kuvvetlerin hareketine duyarlı hale getirir.

Kablolu köprülerde oluşan salınımlar iki gruba ayrılabilir. Birincisi, hareketin birkaç kabloyla sınırlı olduğu bölgesel salınımlar, diğeri ise kablo sisteminin tümünün (rijitlik kirişi ve kule gibi bitişik elemanlar dahil) hareket halinde olduğu genel salınımlar.

3.9.1. Bölgesel salınımlar

Tekil kablolarla sınırlandırılmış bölgesel salınımlar, özellikle büyük bir serbest uzunluğa sahip narin kablolu sistemlerde ortaya çıkar. Bu tip bir salınım, Şekil 3.166'da gösterildiği gibi, uzun bir askıda veya eğik kabloda olabilir. Bölgesel salınımların modları ve frekansları, tek bir kablonun salınımı için verilmiş denklemlerden bulunabilir. Böylece, gerili teller olarak hareket eden askılar ve eğik kabloların enine salınımı için doğal dairesel frekanslar: $\omega_n = (n\pi/l) \sqrt{gT/w}$ denkleminde bulunur. Burada $n = 1, 2, 3, \dots$ olarak artar.



Şekil 3.166 Askı ve eğik kablonun bölgesel salınımı.

Bölgesel salınımların ana nedeni, rüzgarda kabloların çevresinde oluşan girdap sıçramasıdır. Böylece, girdap sıçraması nedeniyle oluşan dinamik kuvvetlerin, rüzgar doğrultusuna dik olarak etkiyeceği ve dolayısıyla eğik kabloların enine salınımı, köprünün boyuna doğrultusunda esen rüzgar sonucunda ortaya çıkacağı bilinmelidir.

Girdap sıçramasının dairesel frekansı şöyle ifade edilir:

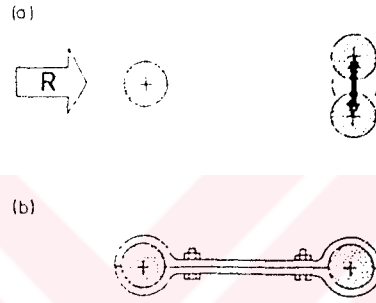
$$\omega_{vs} = 2\pi S(v/d) \quad (3.115)$$

burada v rüzgar hızı, d eğik kablonun çapı ve S Strouhal sayısıdır. S , askıların ve eğik kabloların bulunan boyutları için 0.20 olarak sabit bir değer alınabilir.

Rüzgar hızı, girdap sıçraması frekansının sistemdeki bir ya da daha fazla kablonun doğal frekansı ile uyum içinde olacağı bir değere ulaşırsa, salınımlar yüksek genlikli olur.

Böylece, asma sistemin ve çok kablolu eğik askılı sistemin her ikisinin de çeşitli uzunlukta ve çapta kablolar içerdiği, dolayısıyla tüm sistemin tekil kablolarında çok değişik doğal frekansların olduğu bilinmelidir.

İki tane tekil halattan oluşan çift halatlı kablo içeren yapılarda, bir özel etkileşim tesiri olabilir. Bu etkileşim nedeni ile rüzgar tarafında olmayan halat, rüzgar tarafında olan halata göre daha büyük salınım genliklerine maruz kalır (Şekil 3.167(a)). Rüzgar tarafında olmayan bir silindirin salınım büyüklüğü, silindirler arasındaki uzaklık silindir çapının beş katı olduğunda maksimum, iki katı olduğunda ise daha uygun bir değerde olduğu test sonuçlarından elde edilmişlerdir. Böylece çift halatlı bir kabloda, iki halat arasındaki uzaklığın minimum olması üstünlük sağlar. Bununla birlikte, rüzgar tarafındaki halatın salınımlarının, istenmeyen bir büyüklüğü testlerle belirlenmiş ise de, pek çok durumda bu etki, birkaç ara halka yardımıyla iki halatı birbirine bağlamakla kolaylıkla ortadan kaldırılabilir (Şekil 3.167(b)).



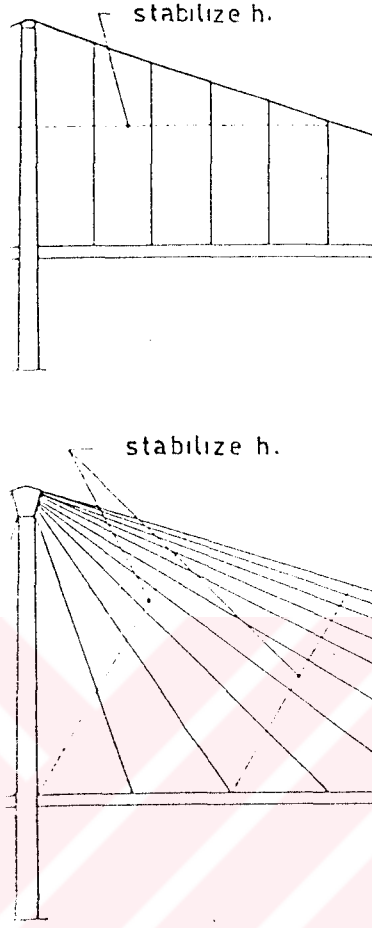
Şekil 3.167 Çift halatlı kabloda rüzgar tarafında olmayan halatın titreşimi.

Bölgesel salınımlar, köprü tabliyesi üzerinde hareket eden hareketli yük ile de oluşabilir. Özellikle, üniform dingil ağırlığına sahip uzun trenlerin geçişi durumunda, bu şekilde çok tekrarlar nedeni ile kablo kuvvetlerinin periyodik değişimi, kritik doğal frekansa sahip tekil kablolarda bölgesel salınımına yol açabilir.

Genellikle, bölgesel salınımların köprü üzerindeki trafik için herhangi bir sakınca oluşturmadığı söylenebilir ve doğrudan doğruya köprünün güvenliğini de etkilemez. Fakat büyük genlikli salınımlar sık sık olursa, titreşen kabloun eğilmesinin neden olduğu yorulma problemleri ortaya çıkabilir. Beklenmeyen bölgesel salınımlar olduğu (veya beklendiği) durumlarda, hareketleri azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak için bazı önlemler alınabilir.

Basit bir önlem, Şekil 3.168’de gösterildiği gibi, kritik kabloları stabilize halatları ile birbirine bağlamaktır. Bu stabilize halatları, birincil (asıl) kabloların çapından önemli ölçüde küçük çaplı yapılabilir ve sonuç olarak yapının görünüşünü etkilemezler. Bununla birlikte, küçük ve az sayıda stabilize halatları salınımın modunu zorunlu olarak değiştirirler

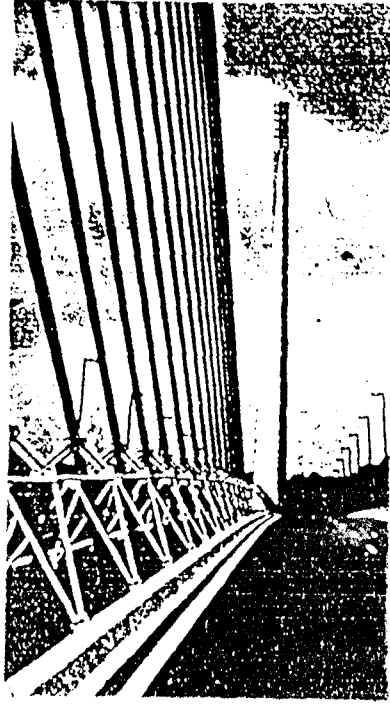
ve tek bir kablonun, bitişik kabloları etkilemeden salınım yapamaması, hareketin tek bir kabloda oluşması olasılığını ortadan kaldırır.



Şekil 3.168 Stabilize halatlarla bölgesel salınımların önlenmesi.

Fan sistemde kullanılan ikincil kablolar (Şekil 3.84) ve kablo ağılı sistemde kullanılan eğrisel kablolar (öncelikle eğik kabloların sehim değişimlerini azaltmak için eklenmiştir, Şekil 3.123), bölgesel salınımlara karşı yukarıda açıklanan stabilize halatlarının sağlamış olduğu aynı yararlı etkiyi sağlarlar.

Bölgesel salınımlar, büyük genliklerin oluşmasını önleyecek sönümleyicilerin kullanılmasıyla da önemli ölçüde azaltılabilir. Şekil 3.169, Brotonne Köprüsü'ndeki eğik kablolarla çok şiddetli salınımların görülmesinden sonra kurulmuş olan sönümleyicileri göstermektedir. Bu sönümleyiciler, otomobillerde kullanılan amortisörlere benzer şekilde yapılırlar.



Şekil 3.169 Bölgesel salınımları azaltan amortisörler.

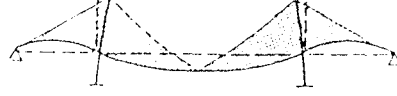
3.9.2. Genel salınımlar

Tüm kablo sistemini (rijitlik kirişi ve kulelerde dahil) içeren genel salınımlar, herhangi bir kablolu köprüde olabilir. Bu salınımlar, özellikle rüzgardan, trafikten veya depremden meydana gelir ve rijitlik kirişine etki eden kuvvetler tarafından harekete geçirilirler.

Uygun frekansları ve yer değiştirme biçimleriyle, salınımın değişik modların elde edilmesini sağlayan analiz bugün bir bilgisayarda her zaman yapılabilir. Yalnız çok küçük genlikli salınımlar ilginç olduğundan, analiz, sabit yük durumundan türetilmiş tanjant (teğet) rijitliğine karşılık gelen, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin doğrusallaştırılmasına dayandırılabilir. Köprüye ankrajlı eğik askılı köprülerde, bu basit olarak eğik kablolar için teğet (tanjant) elastisite modülünün uygulanmasını gerekli kılar. Buna karşılık yapının diğer tüm elemanlarının doğrusal elastik olduğu kabul edilir. Zemine ankrajlı sistemlerde, teğet (tanjant) rijitliğinin belirlenmesinde, bundan başka geometrik doğrusal olmama (non-lineerlik) koşulu dikkate alınmalıdır.

Simetrik şekilli üç açıklıklı klasik köprü için salınım modları, simetrik veya asimetrik olabilir. Birinci modun, örneğin en düşük frekanslı modun simetrik veya asimetrik olacağı, üç açıklıklı bir asma köprü için, Şekil 2.48 ve 2.49'da gösterildiği gibi (kablo sisteminin tipi, yan açıklık/ana açıklık oranı, mesnetlenme durumları v.b.), genel görünüşüne bağlıdır.

Bir çok durumda birinci simetrik mod, Şekil 3.170'de yerdeğiştirme biçimiyle gösterildiği gibi, düşey doğrultuda ayrı fazda salınım yapan ana açıklığa ve yan açıklıklara ve yatay doğrultuda salınım yapan kulelere sahip olmakla nitelendirilebilir.



Şekil 3.170 Birinci simetrik modun tipik yer değiştirme biçimi.

Ana açıklık için birinci simetrik mod, Şekil 3.171'de gösterildiği gibi, değişik yer değiştirme biçimleri gösterebilir. Bu biçimler, aşağıdaki sistemlerde belirgin şekilde bulunurlar:

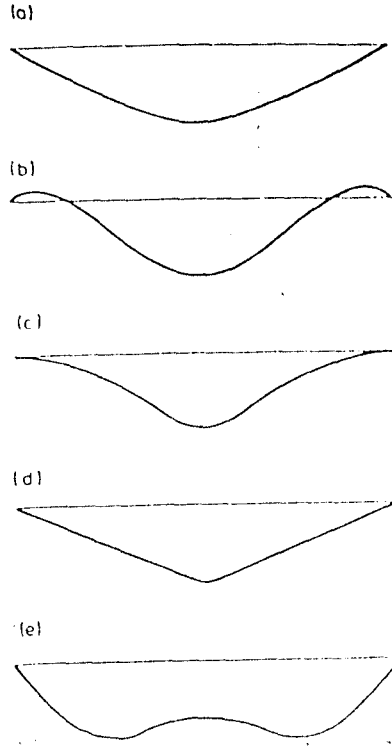
- (a) büyük yan açıklıklı asma köprü;
- (b) küçük yan açıklıklı asma köprü;
- (c) fan şekilli kablo sistemli eğik askılı köprü;
- (d) harp şekilli kablo sistemli ve desteklenmiş yan açıklıklı eğik askılı köprü;
- (e) harp şekilli kablo sistemli, desteklenmemiş yan açıklıklı, narin kuleli ve rijitlik kirişli eğik askılı köprü.

Daha önce Şekil 3.98 ve 3.107'de gösterildiği gibi, (a), (c), (d) ve (e) modları, ilgili oldukları sistemin temel şekil değiştirmelerini yansıtır.

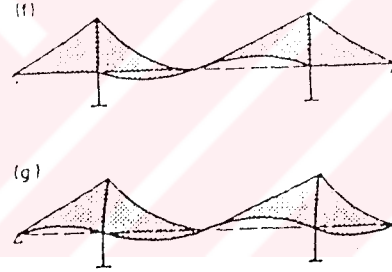
Birinci asimetrik mod, hareketin ana açıklığa hapsedilmiş olmasıyla - Şekil 3.172(f) - veya ayrı fazda salınım yapan yan açıklığa ve ana açıklığa sahip olmakla - Şekil 3.172(g) - nitelendirilebilir. Genellikle (f) ile gösterilmiş olan mod, kısa yan açıklıklara sahip ve rijitlik kirişinin basit mesnetli olduğu köprülerde görülür. Buna karşılık (g)'de gösterilmiş olan mod ise büyük yan açıklıklı ve sürekli rijitlik kirişli sistemlerde ortaya çıkar.

Köprünün, köprü tabliyesi kenarlarında rijitlik kirişine bağlanmış iki kablo düzlemi içeren çok rastlanan durumda uzaysal modlar, iki kablo sistemi salınımının fazı tarafından kuvvetli bir şekilde etkilenirler. Böylece iki kablo sistemi aynı fazda salınım yaparlarsa, rijitlik kirişinde hakim kütlenin ötelenmesi (düşey yerdeğiştirmesi) söz konusu olur. Buna karşılık iki kablo sisteminin ayrı fazda salınım yapması durumunda ise dönme ortaya çıkar.

Rijitlik kirişi ve kuleler herhangi bir eğilme veya burulma rijitliğine sahip değilse ve tüm kütle kablo düzlemlerinde toplanmışsa, o zaman düşey modun ve burulma modunun frekansları tamamen aynı olur.



Şekil 3.171 Ana açıklıkta birinci simetrik modun yer değiştirme biçimleri.



Şekil 3.172 Birinci asimetrik modun tipik yer değiştirme biçimleri.

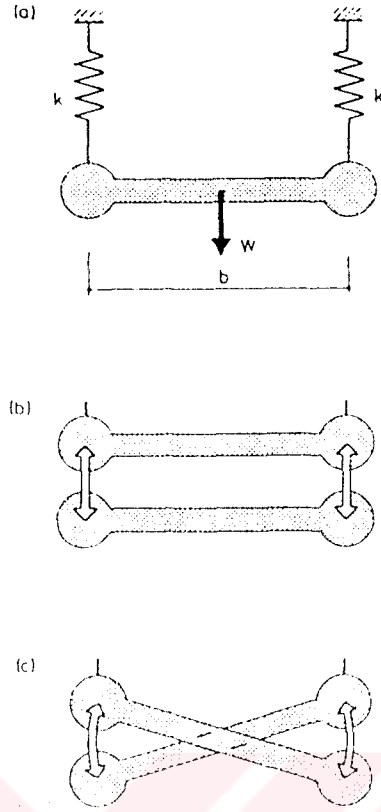
Bu özellik, her biri k yay sabitine sahip iki yay tarafından mesnetlenmiş simetrik bir kütleyi (W/g) gösteren Şekil 3.173(a)'daki basit model ile açıklanabilir. Düşey salınım olan (b)'nin frekansı aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\omega_v = \sqrt{(2kg/W)} \quad (3.116)$$

Burulma salınımı olan (c)'nin frekansı ise şöyle olur:

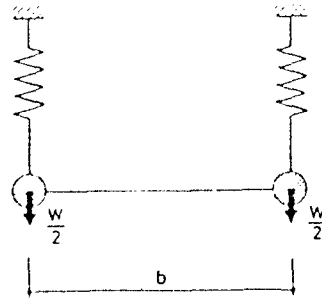
$$\omega_t = \sqrt{(c_t/I_m)} \quad (3.117)$$

burada $c_t = (1/2)kb^2$ ve I_m kütle atalet momentidir.



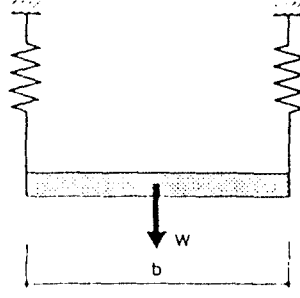
Şekil 3.173 Düşey ve burulma salınımlarının dinamik modeli.

Şekil 3.174’de gösterildiği gibi, kütle, kablo düzlemlerinde toplanmış ise kütle atalet momenti $I_m = Wb^2/4g$ olur. Bu burulma modu frekansının, (3.116)’daki değere eşit olması sonucunu doğurur ki, bu düşey mod için verilen değer aynıdır.



Şekil 3.174 İki kütlenin mesnet yaylarında toplandığını gösteren dinamik model.

Şekil 3.175’de gösterildiği gibi, kütle, b genişliği boyunca dağılmış ise kütle atalet momenti $I_m = Wb^2/12g$ ve burulma modunun frekansı $\omega_t = \sqrt{6kg/W}$ olur. Böylece, bu durumda burulma ve düşey frekansın arasındaki oran $\omega_t/\omega_v = \sqrt{3}$ olur.



Şekil 3.175 İki mesnet yayı arasında kütlenin üniform olarak yayılı olduğu dinamik model.

Gerçek yapılarda kütle dağılımı Şekil 3.174 ve 3.175’de görülen ekstrem durumlar arasındadır. Böylece kablo düzleminin altındaki kablo sisteminin sabit yükü ve ana kirişlerin veya ana kafes kirişlerin sabit yükü, Şekil 3.174’e uygun bir kütle dağılımına sahip olur. Buna karşılık köprü tabliyesinin, taban kirişlerinin ve yatay bağlantı sabit yükleri Şekil 3.175’e uygun bir kütle dağılımına sahip olur.

Rijitlik kirişi ve kulelerin eğilme ve burulma rijitlikleri ihmal edildiğinde, burulma frekansının düşey frekansa oranı 1.0 ile $\sqrt{3}$ arasında değişen bir değer olur.

Gerçek yapılar arasında eğilme ve burulma rijitliğinin önemli olmayışının kabulü, başlangıç aşamasında üst tabliyeye sahip olan George Washington Köprüsü’nün birinci asimetrik modu tarafından en iyi şekilde yerine getirilmiştir. Asimetrik modda hareket, ana açıklığa toplanmıştır (bak. Şekil 3.172(f)) ve bunun sonucu olarak önemli ölçüde eğilme ve burulma rijitliğine sahip olan kuleler, salınımın bu modu sırasında hareketsiz kalmışlardır.

Başlangıç aşamasında George Washington Köprüsü için ω/ω_c oranı, beklenen aralıkta bir değer olan 1.22’dir.

Rijitlik kirişi ve kulelerin eğilme ve burulma rijitliği dikkate alındığı zaman, doğal frekanslar genellikle artar. Fakat, genel bir eğilim olarak, burulma rijitliğinin burulma frekansı üzerindeki etkisi, eğilme rijitliğinin düşey frekans üzerindeki etkisinden daha büyüktür. Rijitlik kirişinde, kiriş yüksekliği ve düğüm uzaklığı (= yarım dalga boyu = salınım yapan kiriş parçasının açıklığı) arasındaki oran yaklaşık olarak 1/50’den küçük ise, eğilme rijitliği frekanslar üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olur. Böylece, ana açıklık uzunluğunun 1/100’üne uygun bir yüksekliğe sahip rijitlik kafes kirişli klasik asma köprülerde veya yükseklik/açıklık oranları 1/60-1/80 olan ilk yapılmış eğik askılı köprülerde, eğilme rijitliği, hem birinci simetrik modu (yan açıklığın hareketi üzerindeki engelleyici etkisi nedeniyle) hem de açıklık ortasında düğüm noktası olan asimetrik modu etkiler.

Yükseklik/açıklık oranı 1/200-1/300 arasında değişen yeni kablolu köprülerde, rijitlik kirişinin eğilme rijitliği, hem birinci simetrik hem de birinci asimetrik modlar üzerinde daha küçük bir etkiye sahiptir.

Genellikle üç açıklıklı kablolu köprülerde bulunan narin düşey kulelerde, kule tepesinde kablo sisteminin boyuna hareketine karşı çok küçük bir engelleme mevcuttur. Bu büyük ölçüde kule ayaklarındaki eksenel basıncın etkisi nedeniyledir.

Başlangıçta, rijitlik kirişinde herhangi bir önemli eğilme veya burulma rijitliği olmaksızın yapılan George Washington Köprüsü için, 1960'larda alt tabliyenin eklenmesi ile 9.12 m. yüksekliğinde ve 32.3 m. genişliğinde gerçek bir rijitlik kafes kirişi ilk kez kullanılmıştır.

9.0 m.'den daha fazla kafes yüksekliğine karşın, eğilme rijitliğinin artırılması, birinci asimetrik düşey modun dairesel frekansını artırmamıştır ($\omega_1 = 0.70$). Buna karşılık, asimetrik burulma modunun dairesel frekansını, %60'tan fazla bir artışla, $\omega_1 = 0.86$ 'dan $\omega_1 = 1.38$ 'e artırmıştır. Bu, ω_1/ω_2 oranının 1.22'den 1.97'ye değiştiğini gösterir.

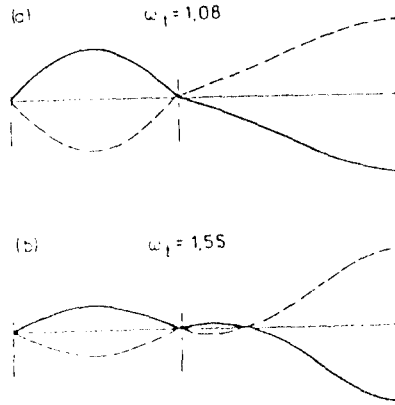
Kule ayaklarının burulma rijitliği, genellikle kulelerin tepesinin boyuna hareketleriyle birlikte tüm burulma modlarını kuvvetli bir şekilde etkiler. Böylece etkiler, birinci simetrik burulma modları için çok daha belirgindir.

Bu özellik, kule ayaklarının burulma rijitliğine sahip olmaması durumunda (a) ve kule ayaklarının gerçek burulma rijitliğine sahip olması durumunda (b), birinci simetrik burulma modunun yer değiştirme biçimlerini gösteren Şekil 3.176 ile gösterilmiştir. Şekil 3.176 incelendiğinde, ana açıklığın yer değiştirme biçiminin, düğüm noktası bulunmama durumundan, burulma rijitliği dikkate alındığında iki ana düğüm noktasına sahip olacak şekilde değiştiği görülür. Bu, kulelerin daha artmış engelleme etkisinin açık bir göstergesidir. Bu durum, dairesel frekansın $\omega_1 = 1.08$ 'den $\omega_1 = 1.55$ 'e değişmesiyle de görülmektedir.

Küçük yan açıklıklara sahip köprülerde birinci asimetrik mod, kule tepelerinin çok az yer değiştirmesiyle veya hiç yer değiştirmemesiyle karakterize edilir. Bu nedenle kule ayaklarının burulma rijitliğinin etkisi azdır.

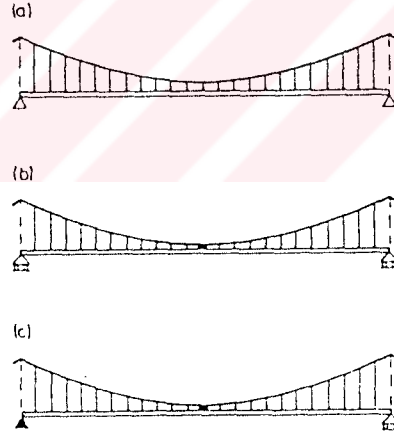
Küçük yan açıklıklara sahip asma köprülerde, açıklık ortasında ana kablo ile rijitlik kirişi arasındaki bağlantı türü ve rijitlik kirişinin mesnetlenme durumu, birinci asimetrik modu çok fazla etkiler. Bu, asimetrik salınımlar altında ana kablonun boyuna doğrultuda

hareket etmeye eğilim göstermesi nedeniyledir. Dolayısıyla açıklık ortasında bir engelleme salınımının modunu çok önemli şekilde etkilemektedir.



Şekil 3.176 Kule ayaklarında burulma rijitliği bulunmayan (a) ve bu elemanlarda burulma rijitliği bulunan (b) üç açıklıklı bir asma köprünün birinci simetrik burulma modunun yer değiştirme biçimleri.

Şekil 3.177’de ana açıklıktaki yapısal sistemin değişik düzenlemeleri görülmektedir. Sistem (a), ana açıklık boyunca ana kablo ve rijitlik kirişini bağlayan askılara sahip bir sistemi göstermektedir. Bu sistemde kablo (en azından daha küçük yerdeğiştirmeler için), rijitlik kirişine göre boyuna doğrultuda hareket etme serbestisine sahiptir.



Şekil 3.177 Bir asma köprüde ana açıklık için yapısal sistemler.

Sistem (b), ana kabloyu rijitlik kirişine bağlayan merkezi bir kelepçe ve rijitlik kirişinin sonlarında boyuna hareketli mesnetlerle karakterize edilirler. Sistem (c), aynı merkezi kelepçeye sahiptir; fakat burada rijitlik kirişi boyuna doğrultuda hareket etmez.

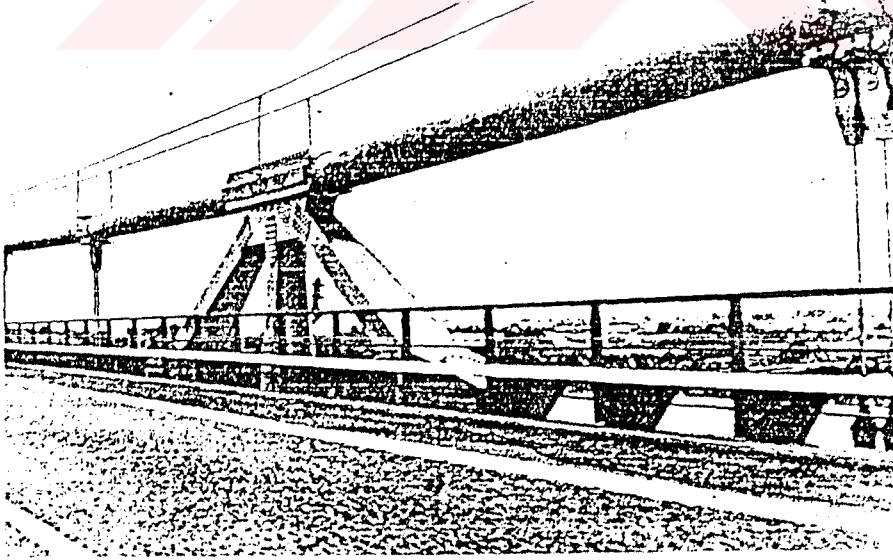
Açıklık ortasındaki ana kablonun boyuna doğrultuda hareketleri önemli ölçüde azalacağından, sistem (c)’deki düşey ve burulma asimetrik modları, merkezi kelepçe tarafından fazla etki altında kalır.

Sistem (b)'de kelepçenin, düşey ve burulma asimetric modları üzerindeki etkisi arasında kesin bir fark vardır. Bunun nedeni, düşey modda, rijitlik kirişinin kendi iki sabit mesnedi yardımıyla ana kabloyla eş zamanlı olarak hareket etmesi kaydıyla, ana kablonun açıklık ortasında boyuna doğrultuda hareket edebilmesidir. Asimetric burulma modunda ise, merkezi kelepçe hareketsiz kalacak şekilde bağlıdır. Çünkü iki kablo sistemi, rijitlik kirişini hareket ettirmede zıt davranış gösterirler. Bu nedenle, birinci asimetric burulma modu için (b) ve (c) sistemleri arasında bir fark mevcut değildir.

Bu etki, ilk Tacoma Köprüsü'nün belirlenmiş salınımlarıyla açıkça görülmüştür. Bu köprüde ana açıklık kirişi hareketli mesnetlere sahiptir (sistem (b)'deki gibi); fakat merkezi bağların yerleştirilmesiyle, ana kablo ile rijitlik kirişi arasında boyuna kuvvetleri iletebilme yeteneğine sahip bir bağlantı kurulmuştur.

Merkezi kelepçeler gibi aynı etkiyi sağlayan merkezi bağlar etkin olduğu sürece, sadece felakete yol açmayan düşey salınımlar gözlenmiştir. Fakat, merkezi bağlar oluşturan kabloların zayıflamasından sonra, salınım felakete yol açan burulma moduna dönüşmüştür.

Ana kablo ve rijitlik kirişi arasındaki açıklık ortası bağlantıyı gösteren Şekil 3.177'deki sistem (b), yakın zamanda Little Belt Köprüsü'nde uygulanmıştır (Şekil 3.178). Bu durumda, merkezi kablo kelepçesinin rijitlik kirişine, yüksek derecede dayanıma ve rijitliğe sahip bir bağlantıyla bağlandığı görülür.



Şekil 3.178 Little Belt Köprüsü'nde rijitlik kirişi ve merkezi kelepçe arasındaki bağlantı sistemi.

Asma köprüler için salınımın en kritik modlarının genel biçimi, ana kabloların uzama yeteneğinde olmadığı kabulüyle niteliksel olarak belirlenebilir. Böylece, birinci simetrik modda ana açıklık aşağıya doğru yer değiştirirken, yan açıklıklar yukarıya doğru, kule tepeleri ise içe doğru (ana açıklığa doğru) yer değiştirir. Ana açıklıkla sınırlandırılmış birinci asimetrik modda ise, ana açıklığın sol yarısının aşağıya doğru yer değiştirmesi, ana açıklığın sağ yarısının yukarıya doğru yer değiştirmesi ile eş olur. Bunun sonucu olarak, sol kuleden ana açıklık ortasına kadar ana kablonun artmış eğri uzunluğu, ana açıklık ortasından sağ kuleye kadar eğri uzunluğunun eşit azalmasıyla giderilir. Dolayısıyla toplam eğri uzunluğu değişmemiş olur.

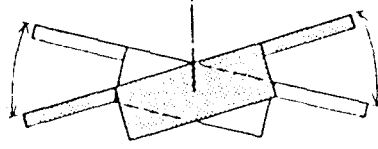
Gerçekte salınım sırasında ana kablolar da bazı şekil değiştirmeler olur. Fakat, modların, kabloların uzama yeteneğinde olmamasının kabul edilmesiyle verilmiş olan biçimleri izlemesi, salınım modlarının fiziksel olarak çok iyi tanımlanmış mod olduğunu dolaylı olarak gösterir.

Kablo sistemine sahip birinci derecede stabil eğik askılı köprülerde, kabloların uzama yeteneğinde olmadığı vasayımı, herhangi bir genel salınımın oluşmasını önler. Böylece, bu köprüler, ancak tekil kabloların uzunluğu değişirse salınım yapabilirler. Bu, genel salınımın, tekil kablolardaki bölgesel salınımla eşleşmesi için tüm eğik kablolar da bir sehim değişikliğini öne çıkarır. Bununla birlikte, tekil kabloların doğal frekanslarının, genellikle genel salınımın doğal frekansı ile uyum içinde olmaması, salınımın modunu fiziksel olarak çok karmaşık yapar. Bu genellikle, çok sayıda bölgesel salınımın, genel salınımla karşılıklı etkileşmeye girdiği, çok kablolu sisteme sahip eğik askılı köprülerde uygulanır.

Bazı kablolu köprülerde kablo sistemini harekete geçirmeden genel salınımlar olabilir. Bu, her bir kuleden çıkan sadece bir eğik kablo grubuna sahip üç açıklıklı köprünün simetrik modunu gösteren örnek Şekil 3.179 ile, sadece bir merkezi kablo düzlemi içeren köprünün burulma modunu gösteren örnek de Şekil 3.180 ile gösterilmiştir.



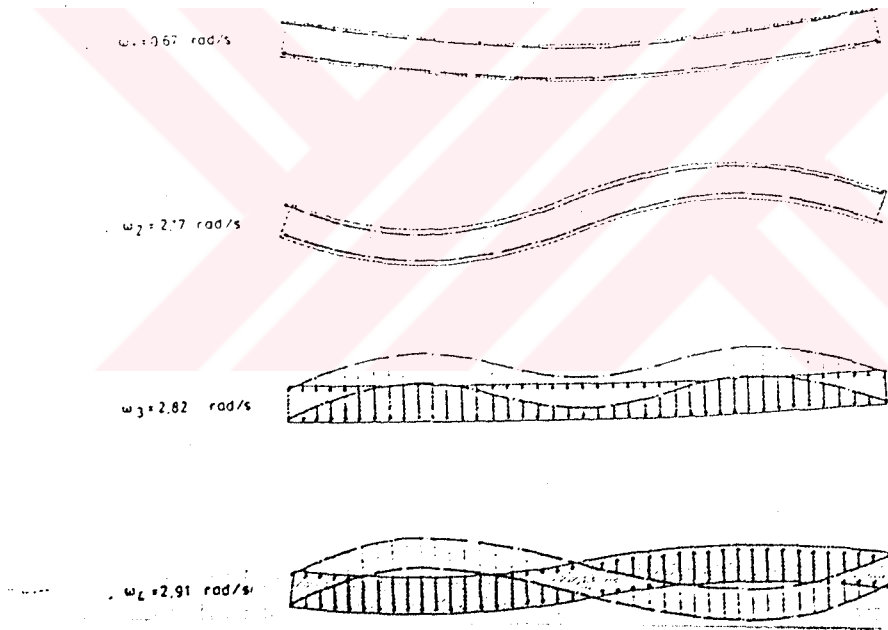
Şekil 3.179 Bir köprüde rijitlik kirişinin kablo sisteminden bağımsız salınımı.



Şekil 3.180 Merkezi bir kablo düzlemine sahip sistemde rijitlik kirişinin burulma salınımı.

Buraya kadar anlatılmış olan genel salınımların tümü, kablo düzlemlerindeki yer değiştirmelerle tanımlanırlar, fakat kablo düzlemlerine dik yer değiştirmelere yol açan enine salınımlar da olabilir. Bu tür salınımlar, genişlik/açıklık oranı küçük olan köprüler için sonucu belirleyici olabilir.

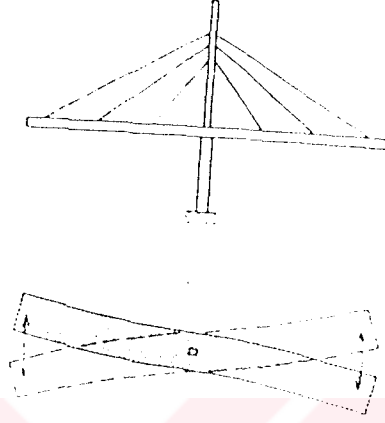
Zemine ankrajlı asma köprü için ilk dört enine mod, Şekil 3.181’de gösterilen şekilde yerdeğiştirme biçimlerine sahip olabilirler. Birinci ve ikinci modlar, aynı fazda salınım yapan rijitlik kirişi ve ana kablolarla sahip olmakla tanımlanırlar, oysa üçüncü ve dördüncü modlar rijitlik kirişi ile ayrı fazda salınım yapan kablolarla sahip olmakla tanımlanırlar.



Şekil 3.181 Bir asma köprüde enine salınımların ilk dört modu.

Genellikle enine salınımlar, birinci ve ikinci modların doğal frekansları arasındaki büyük farkla tanımlanırlar. Böylece Şekil 3.181’deki ikinci modun frekansı, birinci modun frekansının üç katından fazladır. Bu, birçok durumda birinci ve ikinci modların frekanslarının birbirinden yaklaşık %50’den az farklı olduğu düşey salınımla terstir.

Enine salınımlar, rüzgar ve deprem etkisindeki asma köprülerin analizi için önemlidir. Ayrıca, yapım sırasında konsollar ayaklardan dışarıya uzatıldığında, eğik askılı köprülerin enine modlarının araştırılmasında gerekli olur. İki tarafından serbest konsol oluşturarak yapılan eğik askılı köprüler için, özellikle kirişin enine salınımı sırasında burulma etkisinde kalan ayak gövdelerinin esnekliğinin dikkate alınması gerekir (Şekil 3.182).



Şekil 3.182 Çift konsollu eğik askılı köprüde enine salınım.

KAYNAKLAR

Gimsing, N. J., (1983), Cable Supported Bridge, John Wiley & Sons, New York.

Celasun, H., (1981), Asma Köprüler, İ. D. M. M. Akademisi Yayınları, İstanbul.

T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Md., (1988), Türkiye Cumhuriyeti'nin Fatih Sultan Mehmet Köprüsü.

Türker, A., (1995), Asma Köprülerin ve Eğik Askılı Köprülerin Yapısal Elemanlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	13.09.1971	
Doğum yeri	Erzurum	
Lise	1985-1988	Erzurum Lisesi
Lisans	1989-1993	İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Müh. Böl.
Yüksek Lisans	1996- Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı Yapı Programı
Çalıştığı kurum	1995- Devam ediyor	Trakya Üniversitesi Çorlu Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl. Araştırma Görevlisi

