

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ İLETİM HATTI KULELERİNİN RÜZGAR,
BUZ VE DEPREM YÜKÜ ALTINDA DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatıma Zehra ŞAHİN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MEKANİK
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Zeki ÖZCAN

Ocak 2022

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ İLETİM HATTI KULELERİNİN RÜZGAR,
BUZ VE DEPREM YÜKÜ ALTINDA DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatıma Zehra ŞAHİN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MEKANİK

Bu tez .../.../2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Ad SOYAD
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Ad SOYAD
Üye

Dr. Öğr. Üyesi
Ad SOYAD
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Fatıma Zehra ŞAHİN

01/2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Zeki ÖZCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince bana yardımcı olan değerli meslektaşım Kadir ÇELİK'e teşekkürü borç bilirim.

Başta ailem olmak üzere bu yolculukta manevi desteğini esirgemeyen herkese teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Kafes Sistemler	2
1.2. Enerji Nakil Hatlarında Hasar Sebepleri	4
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ	6
BÖLÜM 3.	
ENERJİ İLETİM KULELERİ	13
3.1. Kullanılan Malzemeye Göre Kule	13
3.1.1. Çelik kule	13
3.1.2. Beton Kule	14
3.1.3. Ahşap kuleler	15
3.2. Kulelerin Gerilim Büyüklüğüne Göre Sınıflandırılması	16
3.2.1. Alçak ve orta gerilimde kullanılan kuleler	16
3.2.2. Yüksek gerilimde kullanılan kuleler	16
3.2.3. Çok yüksek gerilimde kullanılan kuleler	16

BÖLÜM 4.

YÜK ŞARTNAMELERİ	18
4.1. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği (EKAT)	18
4.1.1. Düşey kuvvetler	18
4.1.1.1. Buz yükü	19
4.1.2. Yatay kuvvetler	21
4.1.2.1. Rüzgar yükü	21
4.1.2.2. Buzlu iletken e etk eden rüzgar yükü	22
4.2. ASCE 74: Elektrik İletim Hatları Yapısal Yükleme Kılavuzu (2016)	23
4.2.1. Yü k kriterleri	23
4.2.2. Atmosferik yü kler	23
4.2.3. Atmosferik yü kler için ortalama tekrarlama aralıkları	24
4.2.4. Rüzgar yükü	24
4.2.4.1. Hava yoğunluk katsayısı (Q)	25
4.2.4.2. Temel rüzgar hızı (V_{MRI})	26
4.2.4.3. Rüzgar basıncı etki sınıfları	27
4.2.4.4. Rüzgar basıncı etki sınıfı katsayısı (K_z)	30
4.2.4.5. Etkili yükseklik (z_h)	30
4.2.4.6. Fırtına faktörü (G)	30
4.2.4.7. Kuvvet katsayısı (C_f)	32
4.2.4.8. Topoğrafya faktörü (K_{zt})	33
4.2.5. Eşzamanlı rüzgar ve buz yükü	34
4.2.6. İletken üzerindeki buz yükü	35

BÖLÜM 5.

TASARIM ŞARTNAMELERİ	36
5.1. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapıma Dair Kurallar	36
5.1.1. Tasarımda temel ilkeler	36
5.1.1.1. Yü k ve dayanım katsayıları ile tasarım (YDKT)	36
5.1.1.2. Güvenlik katsayıları ile tasarım (GKT)	37
5.1.2. Eleman enkesit özellikleri	38
5.1.2.1. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesit parçaları	38

5.1.3. Eksenel çekme etkisindeki elemanlar.....	39
5.1.3.1. Narinlik oranı	40
5.1.3.2. Etkin enkesit alanı	40
5.1.3.3. Çekme Kuvveti Dayanımı	40
5.1.4. Eksenel basınç etkisindeki elemanlar.....	42
5.1.4.1. Basınç kuvveti dayanımı	42
5.1.4.2. Karakteristik basınç kuvveti dayanımı	43
5.1.4.3. Eğilmeli Burkulma Sınır Durumu	44
5.2. ASCE 10 97: Çelik Kafes İletim Yapılarının Tasarımı (2000)	44
5.2.1. Kapsam	45
5.2.2. Eleman tasarımı.....	45
5.2.2.1. Narinlik oranı	45
5.2.2.2. Enkesit Özellikleri.....	45
5.2.3. Tasarım basınç dayanımı	46
5.2.4. Basınç elemanları	47
5.2.4.1. Maksimum w/t oranı	47
5.2.4.2. Narin kesit basınç dayanımı.....	47
5.2.5. Çekme elemanları.....	48
5.2.5.1. Tasarım çekme gerilmesi	48

BÖLÜM 6.

SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	49
6.1. Yüksek Gerilimli Elektrik Kulesi Modeli	49
6.2. Mod Biçimleri.....	52
6.3. Kuleye Etki Eden Yükler.....	53
6.3.1. Elektrik kuvvetli akım tesisleri yönetmeliği ve ASCE 74 yönetmeliği yük hesabında yaklaşım farklılıkları	53
6.3.2. EKAT yönetmeliğine göre rüzgar yükü hesabı	55
6.3.3. EKAT yönetmeliğine göre buz yükü hesabı	56
6.3.4. ASCE 74 yük şartnamesine göre rüzgar yükü hesabı	57
6.3.5. ASCE 74 yük şartnamesine göre buz yükü hesabı	58
6.4. Sayısal Analizler	59

6.4.1. Türkiye Çelik Yapılar Hesap ve Tasarımına Göre Analiz.....	59
6.4.2. ASCE 10 97 çelik kafes iletim yapılarının tasarımına göre analiz	62
6.4.3. Rüzgar etkisi altında buzlu iletken kopması.....	63
6.4.3.1. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik etkisi altında buzlu iletken kopması.....	65
6.4.3.2. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına paralel etkisi altında buzlu iletken kopması.....	69
6.4.4. Rüzgarsız durumda buzlu iletken kopması.....	73
6.4.5. Deprem etkisi altında kule davranışı	73
6.5. Analizlerin Yorum ve Karşılaştırılması	75

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR.....	82
---------------	----

KAYNAKLAR	84
-----------------	----

ÖZGEÇMİŞ.....	87
---------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Rüzgar yönüne dik düzlemdeki alan
a	: Şiddetli rüzgar için güç yasası katsayısı
a_g	: Ortalama iletken açıklığı
a_w	: Rüzgar açıklığı
B_t	: Kule üzerindeki arka plan rüzgar yüküne karşılık gelen boyutsuz tepki terimi
B_w	: İletken üzerindeki arka plan rüzgar yüküne karşılık gelen boyutsuz tepki terimi
c	: Dinamik rüzgar basıncı katsayısı
c_{exp}	: Maruz kalmaya dayalı türbülans yoğunluğu sabiti
C_f	: Kuvvet katsayısı
d	: Çıplak iletken çapı
d_b	: Buzlu iletken çapı
F	: Rüzgar Kuvveti
G	: Fırtına Faktörü
G_i	: İletken ağırlığı (kg)
G_t	: Kule fırtına faktörü
G_w	: İletken fırtına faktörü
I_z	: Kulenin veya iletkenin etkin yüksekliğinde türbülans yoğunluğu
K_z	: Rüzgar basıncına maruz kalma katsayısı

K_{zt}	: Topografik faktör
L_s	: Türbülansın integral uzunluk ölçeği
p	: Dinamik rüzgar basıncı
p_0	: İletken çizgisel ağırlığı (kg/m)
q	: Buz yükü
Q	: Hava yoğunluğu katsayısı
Q_i	: Buz kalınlığını ağırlığa dönüştürmek için sabit
S	: Tellerin (iletkenler ve topraklama telleri) tasarım rüzgar açıklığı (ft)
t_{MRI}	: Nominal buz kalınlığı
t_z	: z yüksekliğindeki tasarım buz kalınlığı
v	: Rüzgar hızı
V_{100}	: 100 yıllık MRI için 3 saniyelik şiddetli rüzgar hızı
V_{MRI}	: Seçili MRI'lar için 3 saniyelik şiddetli rüzgar hızı (m/s)
W	: Rüzgar yükü
W_i	: Buz yükü
z	: Zeminden yükseklik
z_h	: Etkili yükseklik
z_g	: Gradyan yükseklik

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 2B kafes sistem	3
Şekil 1.2. 3B kafes sistem	3
Şekil 1.3. Rüzgardan kaynaklı hasar gören kule	4
Şekil 1.4. İletken buzlanması	4
Şekil 1.5. Buz yükü kaynaklı hasar gören kule	5
Şekil 1.6. Hasar gören kule	5
Şekil 3.1. Boru, A ve kafes kuleler	14
Şekil 3.2. Yüksek gerilimli kafes kuleler	14
Şekil 3.3. Beton kule tipleri.....	15
Şekil 3.4. Ahşap kule tipleri	15
Şekil 3.5. Çok yüksek gerilim kulesi	17
Şekil 3.6. Çok yüksek gerilim kulesi	17
Şekil 4.1. İletken açıklığı	18
Şekil 4.2. Şekil Buz yükü haritası.....	20
Şekil 4.3. 100 yıllık MRI için temel rüzgar hızı haritası.....	26
Şekil 4.4. 100 yıllık MRI için temel rüzgar hızı haritası.....	27
Şekil 4.5. B tipi etki sınıfı arazisi	28
Şekil 4.6. C tipi etki sınıfı arazisi	29
Şekil 4.7. D tipi etki sınıfı arazisi	29
Şekil 4.8. Kule için fırtına faktörü.....	31
Şekil 4.9. Etki sınıfı B için iletken fırtına faktörü	31
Şekil 4.10. Etki sınıfı C için iletken fırtına faktörü	31
Şekil 4.11. Etki sınıfı D için iletken fırtına faktörü	32
Şekil 4.12. Dikdörtgen plan kesitli kule için kuvvet katsayısı	33
Şekil 4.13. Üçgen plan kesitli kule için kuvvet katsayısı.....	33
Şekil 4.14. Buz kalınlığı haritası	34

Şekil 5.1. Enkesit tipleri	46
Şekil 5.2. Kesit w ve t uzunlukları.....	47
Şekil 6.1. Kule sonlu eleman modeli	50
Şekil 6.2. Kule elemanları	51
Şekil 6.3. Kule ve travers en kesitleri	51
Şekil 6.4. X ve Y yönündeki 1.mod şekilleri.....	52
Şekil 6.5. X ve Y yönündeki 2.mod şekilleri.....	53
Şekil 6.6. İletim hattına dik yöndeki rüzgar etkisi altında dayanımı aşan elemanlar	60
Şekil 6.7. İletim hattına dik yöndeki rüzgar etkisi altında dayanımı aşan elemanlar	61
Şekil 6.8. İletim hattına dik yöndeki rüzgar etkisi altında dayanımı aşan elemanlar	62
Şekil 6.9. İletim hattına dik yöndeki rüzgar etkisi altında dayanımı aşan elemanlar	63
Şekil 6.10. İletken kopma durumları	64
Şekil 6.11. İletken geometrik özellikleri	64
Şekil 6.12. İletken kablo kuvvetleri.....	65
Şekil 6.13. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik etkisi altında buzlu iletken kopması durumunda yer değiştirmeler.....	66
Şekil 6.14. Buzlu iletkenli ve iletim hattına dik rüzgâr etkisindeki kule analizi.....	66
Şekil 6.15. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik etkisi altında L50x6 kesitli elemanlar	67
Şekil 6.16. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik etkisi altında L60x5 kesitli elemanlar	67
Şekil 6.17. Ana çapraz elemanlar	69
Şekil 6.18. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına paralel etkisi altında buzlu iletken kopması durumunda yer değiştirmeler.....	70
Şekil 6.19. Buzlu iletkenli ve iletim hattına paralel rüzgâr etkisindeki kule analizi	70
Şekil 6.20. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına paralel etkisi altında L50x6 kesitli elemanlar	71

Şekil 6.21. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına paralel etkisi altında L60x5 kesitli elemanlar	71
Şekil 6.22. 1999 Marmara depremi Kocaeli istasyonuna ait ivme kaydı	73
Şekil 6.23. Deprem etkisi altında yer değiştirmeler	74
Şekil 6.24. L60x5 kesitli elemanlar	74
Şekil 6.25. L50X6 elemanına ait yük karşılaştırması	76
Şekil 6.26. L60x5 elemanına ait yük karşılaştırması	76
Şekil 6.27. L70x5 elemanına ait yük karşılaştırması	77
Şekil 6.28. P/Pc oranları.....	77
Şekil 6.29. L50x6 eleman için eksenel yük değişimi	78
Şekil 6.30. L60x5 eleman için eksenel yük değişimi	79
Şekil 6.31. 2L90x6 eleman için eksenel yük değişimi.....	79
Şekil 6.32. 2L75x5 eleman için eksenel yük değişimi.....	79

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Buz yükü katsayıları	19
Tablo 4.2. Dinamik rüzgar basıncı katsayısı	22
Tablo 4.3. Dinamik rüzgar basıncı.....	22
Tablo 4.4. Çeşitli MRI değerleri için aşılma olasılıkları	24
Tablo 4.5. Rüzgar basıncı etki sınıfı katsayısı (K_z)	30
Tablo 4.6. C_f katsayısı.....	32
Tablo 5.1. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesit parçaları için genişlik/kalınlık oranları	38
Tablo 5.2 Gerilme düzensizliği etki katsayısı [ÇYTHYK, 2018]	40
Tablo 6.1. Kule elemanlarının kesit ve malzeme türleri	50
Tablo 6.2. Meteoroloji Genel Müdürlüğüne ait rüzgar sınıflandırması	54
Tablo 6.3. EKAT Rüzgar Kuvvetleri.....	55
Tablo 6.4. ASCE 74 Rüzgar yükü.....	58
Tablo 6.5. Buzlu İletkenlere gelen rüzgar yükü.....	59
Tablo 6.6. İletim hattına dik yönde rüzgar etkisi altında kule elemanlarının P/Pc oranları	60
Tablo 6.7. İletim hattına paralel yönde rüzgar etkisi altında kule elemanlarının P/Pc oranları	61
Tablo 6.8. İletim hattına dik yönde esen 12 m/s hız için elemanların P/Pc oranları	61
Tablo 6.9. İletim hattına dik yönde rüzgar etkisi altında kule elemanlarının P/Pc oranları	62
Tablo 6.10. İletim hattına dik yönde rüzgar etkisi altında kule elemanlarının P/Pc oranları	63
Tablo 6.11. İletim hattına dik yönde esen 13,5 m/s hız için elemanların P/Pc oranları	63
Tablo 6.12. +6.3 m yüksekliğindeki elemanların yük durumları	68

Tablo 6.13. +8.9 m yüksekliğindeki elemanların yük durumlar.....	68
Tablo 6.14. Ana çapraz elemanlarda yük durumları	69
Tablo 6.15. +6.3 m yüksekliğindeki elemanların yük durumları	72
Tablo 6.16. +8.9 m yüksekliğindeki elemanların yük durumları	72
Tablo 6.17. Rüzgarsız durumda iletken kopmasının oluşturduğu yükler	73
Tablo 6.18. Deprem yükü altında 6.3 m kotundaki elemanlarda oluşan yükle	75
Tablo 6.19.Yük kombinasyonları	78
Tablo 6.20. Narinlik oranları	81



ÖZET

Anahtar kelimeler: Enerji nakil hatları, kafes kule, sonlu eleman modeli, rüzgar yükü, buz yükü, deprem yükü, iletken kopması

Bu çalışmada mevcut bir yüksek gerilimli elektrik kulesi modellenerek rüzgar, buz ve deprem etkisi altında davranışı incelenmiştir. Kuleye etkiyecek olan rüzgar ve buz yükü ülkemizde kullanılan Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) yönetmeliği ile Amerika’da kullanılmakta olan ASCE 74 (Elektrik İletim Hatları Yapısal Yükleme Kılavuzu)’e göre hesaplanmıştır. Analiz yaparken ülkemiz için Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları, Amerika için ASCE 10 97 (Çelik Kafes İletim Yapılarının Tasarımı) yönetmeliği dikkate alınmıştır. Tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde kafes sistemler hakkında genel bilgi ve elektrik kulelerinin hasar alma sebeplerinden, ikinci bölümde konu hakkında yapılan çalışmalardan, üçüncü bölümde elektrik kulesi özelliklerinden, dördüncü bölümde kullanılan yük yönetmeliklerinden, beşinci bölümde kullanılan tasarım şartnamelerinden, altıncı bölümde yapılan sayısal çalışmalar ve son bölümde sonuçlar sunulmuştur. Yapılan çalışma ile elektrik kulesi tasarımında, tasarımı yöneten yüklerin rüzgar ve buz yükü olduğu, deprem yükünün yapıda tehlike oluşturmadığı, iletken kopmasına bağlı yük dengesinin bozulmasının elemanlarda meydana getirdiği yük artışlarının yapı stabilitesini bozarak hasar almasına sebep olduğu, ülkemizde kullanılan yük ve tasarım yönetmeliklerinin eksiklikleri, modeli kurulan mevcut elektrik kulesine ait tasarım eksikleri sunulmuştur.

BEHAVIOR OF POWER TRANSMISSION LINE TOWERS UNDER WIND, ICE AND EARTHQUAKE LOAD

SUMMARY

Keywords: Energy transmission systems, lattice tower, finite element model, wind load, earthquake load, conductor rupture

In this study, a sample high voltage electricity tower is modeled and its behavior under wind, ice and earthquake loads is investigated. The wind and ice load that will affect the tower has been calculated according to the Power Plants (EKAT) regulation used in our country and ASCE 74 (Electric Transmission Lines Structural Loading Guide) used in the USA. While analyzing, the Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures for our country and ASCE 10 97 (Design of Steel Lattice Transmission Structures) regulation for the USA were taken into account. The thesis consists of seven chapters. In the first part, general information about the lattice systems and the causes of damage to the electric towers, in the second part the studies on the subject, in the third part the characteristics of the electric tower, the load guides used in the fourth part, the design guides used in the fifth part, the comparisons and the studies in the sixth part and the results in the last part are presented. According to the study, in the electrical tower design, the loads that govern the design are wind and ice loads, earthquake loads do not pose a danger to the structure, the load increases caused by the deterioration of the load balance due to conductor rupture in the elements disrupt the stability of the structure and cause it to be damaged, the deficiencies of the load and design guides used in our country, and the design deficiencies of the existing electricity tower with the model are presented.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine olan ihtiyaç teknolojinin hızla gelişmesiyle giderek artmıştır ve üretilen enerjinin daha verimli iletilmesini gündeme getirmiştir. Elektrik enerjisini üreten santraller genellikle tüketim merkezlerinin çok uzağında kurulmaktadır. Üretilen elektrik enerjisi yüksek gerilimli iletim hatlarıyla şehir merkezlerine veya sanayi bölgelerine ulaştırılmakta ve gerilimleri düşürülerek dağıtılmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimi kadar, üretilen enerjinin mümkün olduğunca kayıpsız ve güvenli bir şekilde kullanıcılara iletimi de önemli süreçlerden birisi olmaktadır. Bu nedenle iletim ve dağıtım sistemlerindeki hat kayıplarını en aza indirilmesi, elektrik enerjisi sistemlerinin verimli şekilde işletilmesi Dünya’da olduğu gibi ülkemizde de gittikçe önem kazanmaktadır (<http://ee.tek.firat.edu.tr>).

Enerji endüstrisinde, yaygın olarak kullanılan çelik kafes kuleler enerji iletim hatlarının önemli bir parçasıdır. Bu kulelerin tasarımı taşıdıkları enerji miktarına, bulundukları dağ, deniz, şehir gibi coğrafi konumlarına ve rüzgar, kar, buz gibi iklimsel faktörlere bağlı olarak yapılmaktadır. Ancak bazen alınan tüm önlemlere rağmen birçok farklı nedene bağlı olarak, kulelerin hasar görmesinden dolayı elektrik kesintisi yaşanması günlük yaşamı olumsuz etkilemekte hatta durma noktasına getirebilmektedir. Özellikle sanayi bölgelerinde olan kesintiler ekonomiyi kötü etkilemektedir. Dünya üzerinde olduğu gibi ülkemizde de kötü hava koşullarına bağlı olarak hasar gören kulelerden kaynaklı elektrik kesintileri yaşanmaktadır.

Bu tez kapsamında 380 kV gerilime sahip kare tabanlı, taban alanı 10,5 m × 10,5 m yüksekliği 55,8 m çelik kafes sistemde bir elektrik kulesinin rüzgar, buz ve deprem yükleri etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

1.1. Kafes Sistemler

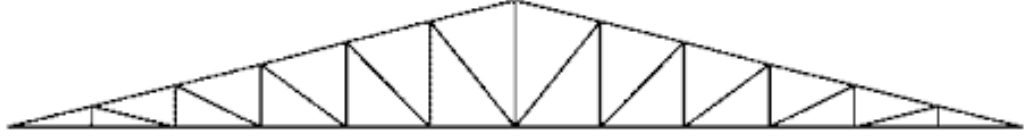
Uzay taşıyıcı sistemler, kabuk kavramından başlayarak incelenebilirler. II. Dünya Savaşı'ndan önceki yıllarda küresel ve silindirik kabuk türündeki kubbeler, büyük alanları kolonsuz olarak geçmekte kullanılan en iyi sistem olmuştur. Son yüzyıldır başka sistemler de bu amacı gerçekleştirmek için kullanılmaktadır özellikle 20. yüzyılda inşa edilmiş olan tren istasyonları incelenirse, çelik sistemlerin büyük açıklıkları geçmede elverişliliği kolayca gözlenebilmektedir. Özellikle eğri eksenli kafes kiriş türünde çelik kemerler sayılabilir. Ayrıca endüstri yapıları ve köprüler için çelik kafes kirişler, geniş açıklıkları geçmede en etkili yapı sistemi olmuştur. Sonraki yıllarda yapı mühendisliğinin uygulamalı mekanik ile girişimi sonucu, yerleşmiş sistemlerin dışında da seçenekler bulabileceği ortaya çıkmıştır. Böylece, kiriş plak-kabuk sistem dizisinden, kiriş-ızgara-uzay kafes sistem dizisine geçiş sağlanmıştır (A. Çöne,2001).

Kafes sistemler inşaat mühendisliği uygulamalarında geniş bir alanda kullanılmaktadır. Yaygın kafes sistemler arasında ızgaralar, çatı yapıları, kubbeler ve iletim kuleleri önemli yer tutmaktadır. Kafes sistemler, üzerine etki eden yükleri güvenli bir şekilde aktarmak için sadece eksenel yük aktaran doğru eksenli çubuklar ve çubukları birleştiren düğüm noktalarından oluşan iki boyutlu (2B) (Şekil 1.1.) ve üç boyutlu (3B) (Şekil 1.2.) sistemlerdir. Geniş açıklıkları geçmek için dolu gövdeli çubuklar kullanıldığında büyük kesit alanları nedeniyle taşıyıcı sistem ağırlığı artmakta, buna bağlı olarak da ekonomik olmaktan çıkmaktadırlar. Köprü ve çatı makası gibi mühendislik yapılarında kafes sistemlerin tercih edilmesinin nedeni sistemlerin diğer yapı elemanlarına göre daha narin kesitlere sahip taşıyıcı elemanlar olmalarıdır. Bu tür taşıyıcı sistemler, yüksek yük taşıma kapasitesi, düşük öz ağırlık, buna bağlı olarak ekonomik çözümler üreten, hızlı imalat ve inşaat gerektiren durumlar için ideal olmaktadır. Bu nedenle kafes kuleler, elektrik iletimi ve dağıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır.

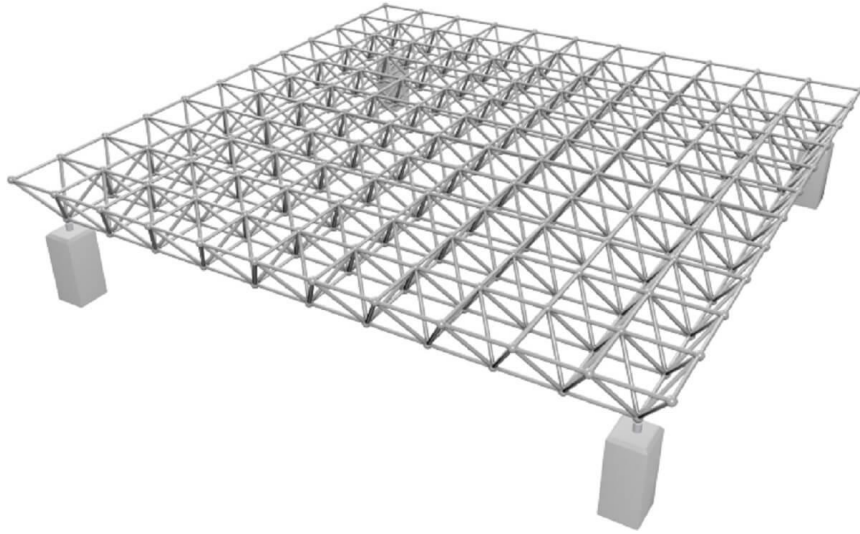
İletim hatları boyunca çok sayıda kule kullanıldığı için güvenli ve ekonomik tasarım yapması gerekmektedir. Bu yüzden, enerji nakil kulelerinin mümkün olduğu kadar az kesit türü ve basit geometriler kullanılarak düzenlenmesi önemli bir konudur.

Tipik kuleler, tüm yüzlerinde aynı çapraz örgüleri olan kare tabanlı olarak düzenlenmiş kafes taşıyıcı sistemlerdir. Kuleler, 15-200 metre yüksekliğinde ve 200-600 metre açıklıklar arasında uzanan iletim hatlarını taşımaktadır. İletim kuleleri taşıyıcı sistemleri genellikle, birbirine dışmerkez olarak bağlanan ince cidarlı köşebent kesitli çubuklar kullanılarak inşa edilmektedirler.

Mevcut tasarım yönetmeliklerine göre, iletim kulelerinin tasarımında rüzgar şiddeti ve buzlu iletkenlerden kaynaklanan yükler dikkate alınmaktadır. Deprem yükü genellikle tasarımda dikkate alınmamaktadır.



Şekil 1.1. 2B kafes sistem



Şekil 1.2. 3B kafes sistem

1.2. Enerji Nakil Hatlarında Hasar Sebepleri

Dünyada birçok nedene bağlı olarak elektrik kulelerinde hasarlar meydana gelmektedir. Yapılan araştırmalar, enerji nakil hatlarının iklim şartlarından dolayı aşırı yüklere maruz kalarak dizayn yüklerinin aşılması ile hasar aldığını göstermektedir. Kasırga, fırtına gibi şiddetli rüzgarlar (Şekil 1.3.) veya iletken buzlanmasına bağlı olarak bir yönde oluşan iletken kopmasının oluşturduğu dengesiz yüklenme kulelerin hasar almasına ve çökmesine sebep olmaktadır. (Şekil 1.4.).



Şekil 1.3. Rüzgardan kaynaklı hasar gören kule (Mahmoud ve ark, 2016)



Şekil 1.4. İletken buzlanması



Şekil 1.5. Buz yükü kaynaklı hasar gören kule (Chen ve ark. 2018)

Aşırı yüklenmenin yanı sıra kule konfigürasyonuna, malzeme kalitesine, kullanılan profil kesitine ve bağlantı elemanlarına bağlı olarak hasar oluşabilmektedir. Şekil 1.6.'da gevrek davranış gösteren malzeme kullanılmasından dolayı hasar almış bir kule gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Hasar gören kule (Klinger ve ark. 2011).

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzde elektrik enerjisi tüm insanlık için çok önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle enerji üretimi ve iletiminde herhangi bir aksaklık olması hayatı olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle enerji iletimini sağlayan çelik kulelerin hasar alma nedenleri önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu bölümde yakın geçmişte yapılan araştırmalar, teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Savory ve ark. (2000), kasırga ve mikro patlama olaylarını baz alarak şiddetli rüzgar altında kule davranışını incelemek amacıyla 9,1x9,1 m kare tabanlı, 50,5 m yüksekliğinde bir enerji nakil hattı kulesi modellemişlerdir. Kasırga ve mikro patlama olaylarını zamana bağlı ölçeklendirip kule elamanlarına gelen yük değişimlerini sunmuşlardır. Kule göçmesinde kasırga daha etkili olurken mikro patlamaların etkisi daha düşük çıkmıştır.

Okamura ve ark. (2003), dağlık bir alandaki rüzgar karakterini ve enerji iletim kulesinin rüzgar altındaki davranışını belirlemek amacıyla Japonya’da dağlık arazide bulunan iletim hattına ait bir kuleye ölçüm cihazları yerleştirerek rüzgar ölçümü yapmışlardır. Kulenin tepe noktasındaki rüzgar hızının rüzgarın etki ettiği açıya göre ve türbülans faktörüne bağlı olarak değişimini belirlemişlerdir. Ölçüm yapılan kule ortada kalacak şekilde iletim hattını üç kule ve iki açıklıklı olarak modelleyerek kulenin rüzgar etkisi altındaki davranışını incelemişlerdir. Kule elamanlarının ortalama dayanımı rüzgar hızı yasasıyla orantılı çıkmıştır.

Silva ve ark. (2005), kafes sistemlerin sadece eksenel yük aldıkları kabul edilmesine rağmen gerçekte kafes kulelerde ciddi moment alan elemanların olması nedeniyle enerji nakil kuleleri ve telekomünikasyon kulelerinde kullanılan tüm elemanlarının mafsallı bağlı kabul eden klasik kafes sistem tasarımına alternatif olarak üç farklı

tasarım önermişlerdir. Birinci yöntemde tüm elemanları eksenel kuvvet alan kafes elemanlar olarak modellemişlerdir. İkinci yöntemde tüm elemanları üç yönde eksenel kuvvet ve moment alacak şekilde kiriş olarak modellemişlerdir. Son olarak diğer iki yöntemi birleştiren üçüncü bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde ana taşıyıcı sistem ikinci yöntemdeki kiriş elemanlar gibi, çapraz elemanlar birinci yöntemdeki kafes elemanlar gibi modellenmiştir. Analizler 40 m ve 75 m yüksekliğinde iki kafes kule için üç farklı yöntem kullanılarak yapı davranışları incelenmiştir. İkinci yöntem daha en avantajlı yöntem çıkmıştır.

Albermani ve ark. (2007) eleman sünekliğinin, geometrik sünekliğin ve malzeme sünekliğinin dikkate alındığı bir sonlu eleman modeli kurarak kule davranışını incelemişlerdir. Bağlantı rijitliğinin etkisi, ikincil taşıyıcı elemanların (çapraz elemanların) etkisi, çapraz elemanlarının konfigürasyonlarının sisteme etkisi araştırılmıştır. Ana elemanların birleşimlerinin rijit olması sistemin taşıyabileceği maksimum yükü %59,9 arttırdığı görülmüştür. İkincil elemanların eksenel yüklerinin düşük olmasına rağmen ana taşıyıcı elemanların etkili boyunu düşürerek burkulma kapasitesine önemli derecede katkı sağladıkları tespit edilmiştir. İkincil elemanların dahil edilmediği analizde sistemin güvensiz olduğu görülmüştür. Ayrıca çapraz elemanlarının konfigürasyonunun burkulma kapasitesine etki ettiği görülmüştür.

Moon ve ark. (2009), rüzgar yükü etkisi altındaki göçme modunu değerlendirmek amacıyla mevcut bir iletim kulesinin gövdesinden belirli bir bölümünü yarı ölçekli modelleyerek deneysel ve sayısal analiz yapıp karşılaştırmışlardır. Tasarım yükü altında ayak elemanlarda oluşan eksenel kuvvetler sayısal analizle hesaplanan, izin verilen burkulma yüklerinin %80-90'ına ulaşmıştır. Çapraz elemanlarda oluşan eksenel kuvvetler, burkulma yüklerinin %13'ünden daha az çıkmıştır bu nedenle iletim kulesine ilave çaprazların eklenmesinin kulenin rijitliğini ve/veya dayanımını arttırmak için önemli bir etken olmadığı gözlenmiştir.

Rao ve ark. (2011), farklı göçme durumuna sahip 800 kV, 400 kV, 220 kV'lık üç farklı enerji iletim kulesinin sonlu eleman modelini ve tam ölçekli test prototipini kurup analiz sonuçları ile test sonuçlarını ASCE, IS (Indian Standart) ve BS (British Standart)

standartlarına göre karşılaştırmışlardır. ASCE standardının ön gördüğü eleman kapasiteleri deneysel sonuçlardan daima büyük çıktığı görülmüştür. Çapraz elemanlarda İngiliz standardının hesapladığı kapasite deneysel sonuçlara en yakın değeri vermiştir.

Klinger ve ark. (2011), Almanya'nın Münsterland bölgesinde 2005'te güçlü rüzgarlar ve aşırı kar yağışı nedeniyle hasar alan 82 elektrik kulesinin yıkılma sebeplerini araştırmışlardır. Kulelerin inşa edildiği ve yıkıldığı yıllara ait şartnamelerin yeterliliği incelenmiştir. Kule elemanlarının malzeme testleri yapılmış ve bazı elemanların gevrek davranışa sahip Thomas çeliğinden yapıldığı ortaya çıkartılmıştır. Kulelerin inşası sırasında mevcut tasarım kodları incelendiğinde iletken kablolarının üzerindeki kar yüklerinin o zamanki tasarım yüklerini aştığı görülmüştür. İletim hattının rüzgarın estiği yöne dik olmasının kablo etrafında buz birikimine sebep olduğu bu yüzden hasar oluştuğu görülmüştür.

Mara ve ark. (2013), bir enerji nakil kulesine etki eden farklı şiddetteki rüzgarların 0°'den 90°'ye kadar 10°'lik artım ile rüzgar etki yönlerini değiştirerek doğrusal olmayan statik itme analizi ile kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde etmişlerdir. 50°'lik rüzgar yönü tüm rüzgar tipleri için en düşük akma dayanımı oluştururken 0° rüzgar yönü (yani iletim hattına dik etki eden) en büyük akma dayanımını oluşturmuştur.

Tian ve ark (2013), tarafından Çin'in Liaoning eyaletinde bulunan taban genişliği 9,36 m yüksekliği 53,9 m 500 kV'lık bir elektrik kulesinin 3 farklı deprem kaydı altında aşamalı göçme durumu araştırılmıştır. İncelenen yapıda sadece ana ayak ve ana çaprazlar ABAQUS yazılım programında modellenmiştir. Tüm elemanların iki ucunda üç yönde ötelenme ve dönme rijitliği serbest bırakılmıştır. El Centro, Kobe ve Northridge deprem kayıtları etkisi altında incelenen yapıda ilk akma dayanımını aşan elemanın hangi yükseklikte ve kaçınıcı saniyede olduğu incelenmiştir. Deprem kayıtlarının kulenin iletim hattına dik ve paralel olarak 2 farklı şekilde etki ettirilmesinin farklı göçme durumu oluşturduğu gözlenmiştir.

Tian ve ark (2014), Rüzgar etkisi altındaki kule hasarlarını araştırılmıştır. 53,9 m yüksekliğinde bir kule modelleyerek Kaimal spektrumu ve harmoni süperpozisyonu metodları kullanılarak zaman tanım alanında rüzgar etkisini incelemişlerdir. Rüzgar kuvvetinin 0° , 45° ve 90° açılarla etki ettiği kabul edilerek kulenin dinamik davranışı ve göçme mekanizması incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, kulenin 45° açıyla gelen rüzgarla daha fazla hasar aldığı görülmüştür.

Eslamlou ve ark (2015), 400 kV'luk bir enerji nakil kulesinin kademeli çökme analizini yaparak yapısal duyarlılığı ve kritik bölgelerini belirlemişlerdir. Basınç elemanlarının burkulma olasılığını ve kesit sünekliği dikkate alınarak kulenin sayısal modellemesi ve doğrusal olmayan dinamik analizi yapılmıştır. İlk olarak, aşamalı çökme analizi gerçekleştirilir ve sonuçlar rapor edilir. Daha sonra, bu analizin sonuçları doğrultusunda farklı çökme senaryoları düşünülerek eleman çıkarımının etkisi ve talep-kapasite ilişkileri incelenmiştir. Bu sayede kullanım ömrü boyunca yapıda oluşabilecek risk öngörümü sağlanmış ve hasar alma durumunda güçlendirme önerileri sunulmuştur.

Mahmoud ve ark. (2016), Ocak 2010'da gerçekleşen yoğun rüzgar nedeniyle Mısır'ın Aswan kentinde hasar alan 81 elektrik kulesi üzerine çalışmışlardır. Rüzgar hızı saatte 200 km'ye ulaşmış ve bu da 193 kg/m^2 basınç oluşturmuştur. Bu basınç değerinin dizayn yükünü aştığı görülmüştür. Farklı tipteki yıkılan 2 elektrik kulesinin sonlu eleman modeli kurularak aşırı rüzgar yükleri etkisi altında doğrusal olmayan statik itme analizi yapılmıştır, kapasite eğrileri ve göçme modları incelenmiştir. Analiz sonuçları ile aşırı rüzgar yükleri altında ortaya çıkan göçme durumlarının birbiri ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Zheng ve ark. (2017), deprem etkisi altında enerji nakil hattı kulesinin göçme durumlarını incelemek amacıyla 122 m ve 22 m yüksekliğinde iki kule modellemişlerdir. Kule elemanlarının en büyük dayanım, kopma dayanımı ve burkulma dayanımı gibi farklı dayanım kaybetme durumlarına göre ve farklı yer hareketleri altında analizleri yapılarak göçme durumları karşılaştırılmıştır.

Elemanların burkulma dayanımlarına göre yapılan analizin daha gerçek sonuçlar verdiği ve farklı yer hareketlerinin farklı göçme durumları oluşturduğu görülmüştür.

Li ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada birbirine iletken ile bağlı 2 kuleden oluşan bir iletim hattı modellemiştir. Biriken buz nedeniyle iletken kopmasının sebep olduğu hasarlar araştırılmıştır. Doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yapılarak yük-yer değiştirme eğrileri ile göçme modları incelenmiştir. Buz yükünden dolayı meydana gelen iletken kopmasının göçmeyi hızlandırdığı görülmüştür.

Hernandez ve ark (2017), Şiddetli rüzgar yükü altında iletim kulelerinin göçme mekanizmaları ve kapasite durumları araştırılmıştır. Meksika da yaygın olarak kullanılan 400 kV'lık 2 elektrik kulesi modellenmiştir. Kulelerden ilkinin taban genişliği 5,12 m diğerinin 5,92 m ve yükseklikleri sırasıyla 42,68 m ve 52,53 m'dir. Farklı ülkelere ait 6 adet rüzgar standartına göre statik itme analizi yapılmıştır. Elemanlar da meydana gelen yük-eğrilik ilişkisine, kulelerin yük- deformasyon ilişkisi, göçme mekanizmaları ve süneklik kapasiteleri araştırılmıştır.

Chen ve ark (2018), 2005 ve 2008 yılında meydana gelen kar fırtınalarında Çin iletim hatları ciddi hasar almıştır. Bu çalışmada ANSYS yazılım programı kullanarak birbirine iletkenle bağlı taban açıklığı 9,4 m ve yüksekliği 53,5 m olan 3 kulenin sonlu eleman modeli kurulmuştur. Kule ve iletkenlerin düzenli buzlanması, düzensiz buzlanması durumu ve rüzgar etkisi araştırılmıştır. Düzenli buzlanma etkisi altında kule açıklığı azaldıkça burkulmaya neden olan buz kalınlığı azalmıştır. Düzensiz buzlanma etkisi atında düzensizlik katsayısı arttıkça burkulmaya neden olan buz kalınlığında ani düşüş olduğu ve rüzgar hızı arttıkça burkulmaya neden olan buz kalınlığının azaldığı görülmüştür.

Taş (2019), tarafından telekomünikasyon kule yapıların deprem, rüzgâr gibi dinamik etkiler altındaki davranışları incelenmiştir. 36 m, 60 m ve 84 m yüksekliklerinde çelik kule yapıları ele alınmıştır. Kulelerin çaprazlarının konfigürasyonlarının değişiminin etkisi karşılaştırılmıştır.

Tarakçı (2019), yüksekliği 50 metre, 4 ayaklı, kare geometrili, DX tipi çelik kafes kullanılan bir GSM kulesi modelleyerek rüzgar etkisi altındaki davranışını incelemiştir. Kuleye etkileyen olan rüzgâr yükü, ASCE 7-16 ve TS498 yönetmeliklerine göre hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Kule elemanlarında oluşabilecek hasarların kulenin taşıyıcı elemanlarının dayanım seviyesine etkisi araştırılmıştır. Kulenin rüzgâr yükü altında, belli yüksekliklerinden çapraz elemanlarının taşıma gücünü kaybettiği düşünülerek kuleden alınması durumunda, bazı çubuk elemanlar taşıma kapasitelerini büyük oranda aştığı ve kulenin güvensiz duruma geldiği gözlenmiştir. Kuledeki çapraz elemanlarının birinin bile görevini yerine getirememesi durumunun kulenin taşıma gücünü önemli derecede etkilediği görülmüştür.

Tian ve ark. (2020), şiddetli rüzgar yükü altında kule davranışını incelemek için kare tabanlı 87,3 m yüksekliğinde tam ölçekli bir enerji nakil hattı kulesinin deneysel analizini yapmışlardır. Kule elemanlarının farklı dayanım kaybetme durumlarına göre (akma dayanımı, maksimum dayanım, kopma dayanımı ve burkulma dayanımı) kulenin sonlu eleman modelini kurup deney sonuçları ile analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kule göçmesinin ana sebebinin rüzgarın 60° 'den etki etmesinin ayak elemanlarda maksimum dayanımının %127 'si kadar kuvvet oluşturmamasından kaynaklı ayaklarda meydana gelen burkulmaların olduğu görülmüştür. Burkulma dayanımına göre yapılan analiz sonucu diğer dayanım kaybetme durumlarına göre daha gerçek sonucu verdiği görülmüştür.

Fu ve ark. (2020), yağmur ve rüzgar yükünden bileşke yük elde ederek bu yük altındaki enerji nakil hattı kulesinde oluşan kırılma yüzeylerini incelemişlerdir. Rüzgarın etki açılarını da dikkate alarak karşılaştırma yapmışlardır. Göçmeye neden olan rüzgar hızı yağmur yoğunluğu arttıkça azalmıştır. Rüzgar hızının yağmur yoğunluğuna oranla yapıda daha etkin olmasına karşın düşük yoğunlukta olan yağmurun yapıda ani kırılmalar oluşturduğu görülmüştür. İletim hattına dik etki eden 90° 'lik rüzgar yapıyı en fazla zorlayan yük durumu çıkmıştır.

Zhang ve ark. (2020), enerji nakil hattı kulesinin mod biçimleri ve doğal frekansları üzerindeki kule- iletken bileşke etkisini incelemek amacıyla 30.4 m yüksekliğindeki

bir kulenin sonlu eleman modelini kurmuşlardır. İletken açıklığının, iki yöndeki iletken açıklıklarının oranının ve iletkenlerin yükseklik farklarının kulenin ve iletim hattının mod biçimleri ve doğal frekansları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kule ve iletim hattının hatta dik yöndeki mod biçimleri arasında önemli bir fark oluşmadığını ancak iletken etsinin %10 kule frekansını azalttığı görülmüştür. Hatta paralel yönde iletken etkisinin yapı frekansını iletken açıklığı ve iletkenler arasındaki yükseklik farkı azaldıkça arttırmıştır.

Gao ve ark. (2020), bir iletim hattında iletkenlerinden buz dökülmesinin yapı göçmesine etkilerini incelemek amacıyla 50,6 m yüksekliğinde 500 kV'lık çatal tipi kule üç kuleden ve açıklık mesafesi 350 m olan iki açıklıktan oluşan iletim hattı modellemişlerdir. İletken üzerinde biriken buzun kütlesinin etkisi hattın rijitliğinden daha etkili çıkmıştır. İlettim hattı ve kule gövdesi karşılaştığında buz birikmesi çapraz elemanları daha fazla etkilemiştir. İletken boyunca düzenli buz dökülmesi ve açıklık ortasında buz dökülmesi iletken uçlarında meydana gelen buz dökülmesine daha olumsuz sonuç vermiştir. Çatal tipli kulenin V şeklindeki bölgesi en kritik bölge çıkmıştır.

BÖLÜM 3. ENERJİ İLETİM KULELERİ

Enerji iletim kuleleri, elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında kullanılan, iletkenleri nakledilen enerjinin özelliklerine göre belirli yükseklikte ve aralıklar ile nakletmekte kullanılan, kar, buz, rüzgâr ve deprem gibi yüklere maruz kalan mühendislik yapılarıdır. Enerji nakil kuleleri, kullanılan malzemeye göre, kullanım yerlerine göre ve hattın gerilim büyüklüğüne göre sınıflandırılır.

3.1. Kullanılan Malzemeye Göre Kule

3.1.1. Çelik kule

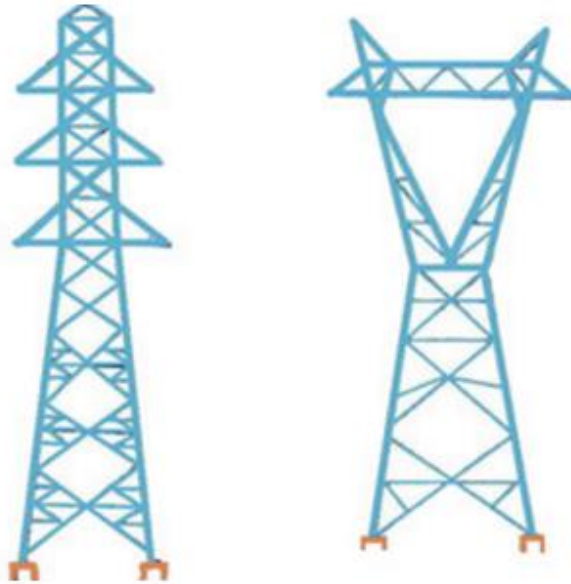
Çelik kuleler genellikle yüksek ve çok yüksek gerilim hatlarında kullanılan kare tabanlı, dört cephesi çapraz elemanlarla örülü kafes sistemlerden oluşan yapılardır.

Çelik kuleler, ahşap kulelere oranla uzun ömürlü, beton kulelere göre de daha hafif olurken bakım ve işletme masrafları ahşap ve beton kulelere göre daha maliyetli olmaktadır. İletkenlerin her tip düzenlenme şekline uygun olmasının yanı sıra herhangi bir sebeple meydana gelebilen kule arızalarının tamir edilmesi de ahşap ve beton kulelere oranla kolay olmaktadır. (MEB, Elektrik Elektronik Teknolojisi, 2011).

Boru kuleler, A ve kafes kuleler (Şekil 3.1., Şekil 3.2.) başlıca çelik kule tipleridir.



Şekil 3.1. Boru, A ve kafes kuleler



Şekil 3.2. Yüksek gerilimli kafes kuleler

3.1.2. Beton Kule

Alçak ve orta gerilimde kullanılan beton kuleler, çelik donatılar veya çelik tel ile donatılmış normal ve yüksek dayanımlı betondan üretilen yapı elemanlarıdır.

Betonarme kulelerin çelik kulelere göre en büyük avantajı iklim şartlarından ve özellikle sanayi bölgelerindeki zararlı gaz ve buharlardan az etkilenmesi ve kullanılan

yapı çeliği miktarının işlevdeki çelik kulelere göre %60 az kullanılarak çelik malzemeden tasarruf sağlamasıdır (MEB, Elektrik Elektronik Teknolojisi, 2011).

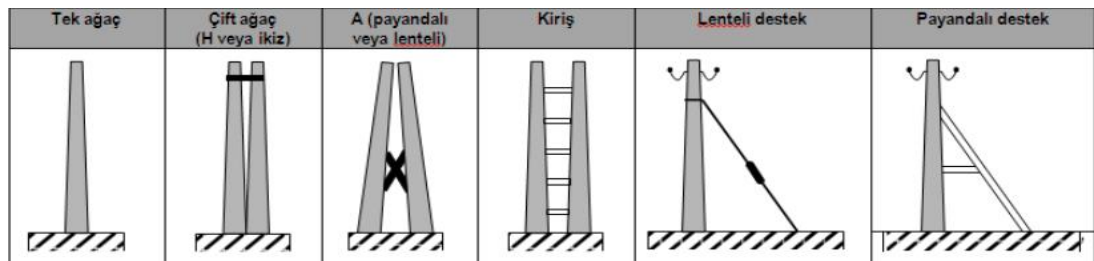


Şekil 3.3. Beton kule tipleri

3.1.3. Ahşap kuleler

Ahşap kuleler, alçak ve orta gerilimli iletim ve dağıtım hava hatlarında kullanılan mekanik dayanımları az olan köknar, ardıç, karaçam gibi ağaçlardan üretilen yapılardır. Hava şartlarından olumsuz etkilendikleri için ahşap kulelere bakır sülfat emdirilmek, emprenye yapmak veya katranlamak gibi özel işlemler uygulanmaktadır. (MEB, Elektrik Elektronik Teknolojisi, 2011).

Ahşap kuleler düzenleme şekillerine göre, tek ahşap kuleler, çift ahşap kuleler (ikiz veya H), A kuleler, payandalı kuleler, kirişli kuleler ve lenteli kuleler (gergi telli) olarak sınıflandırılmaktadır. (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Ahşap kule tipleri

3.2. Kulelerin Gerilim Büyüklüğüne Göre Sınıflandırılması

3.2.1. Alçak ve orta gerilimde kullanılan kuleler

Alçak gerilim kuleleri; ahşaptan, çelikten veya betondan yapılabilen 1kV'a kadar enerji taşıyabilen kulelerdir.

Orta gerilim kuleleri; 1kV- 34,5 kV arasında enerji taşıyabilen, boyları 9 m-25 m arasında değişen ve ahşap beton ve çelik malzemedan üretilebilen kulelerdir. Günümüzde en çok kullanılan orta gerilim kuleleri beton ve çelik kuleler olurken ahşap kuleler acil durumlar için kullanılmaktadır. Daha sonra yerine beton ya da çelik kule yerleştirilmektedir.

Bazı durumlarda aynı kulede hem alçak gerilim hattı hem de orta gerilim hattı bulunabilmektedir. (MEB, Elektrik Elektronik Teknolojisi, 2011).

3.2.2. Yüksek gerilimde kullanılan kuleler

Yüksek gerilimde kullanılan kuleler, 34,5kV- 154kV arasında enerji taşıyan ve sadece çelik kafes sistemden oluşan kulelerdir. Çelik kulelerin ortam şartlarından etkilenmemeleri için belirli zamanlarda yenilenmesi gereken boya ve koruyucu tabakalar sürülür. Bu yapılarda kullanılan çelik profiller ortalama 6 metrelik boylarda imal edilip bulon ile birbirine bağlanmaktadır (MEB, Elektrik Elektronik Teknolojisi, 2011).

3.2.3. Çok yüksek gerilimde kullanılan kuleler

Çok yüksek gerilimde kullanılan kuleler (Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.), 154 kV- 380kV arasında enerji taşıyan ve yüksek gerilimli kulelerden tek farkı taşıdıkları enerji miktarı olan sadece çelik kafes sistemden oluşan kulelerdir (MEB, Elektrik Elektronik Teknolojisi, 2011).



Şekil 3.5. Çok yüksek gerilim kulesi



Şekil 3.6. Çok yüksek gerilim kulesi

BÖLÜM 4. YÜK ŞARTNAMESİ

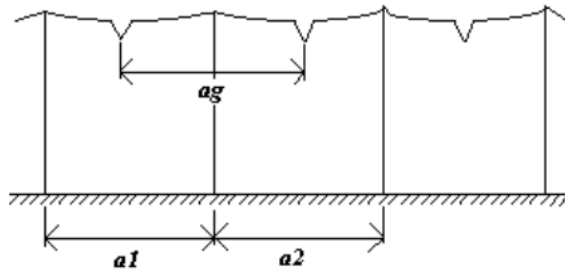
4.1. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği (EKAT)

Enerji nakil hatlarındaki buz ve rüzgar yükü hesaplamaları ile ilgili temel ilkeler Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğinde yer almaktadır. İletim hatları mukavemet hesaplarında kullanılan gerekli ayrıntılı hususlar 154 ve 380 kV yük şartnamelerinde yer almaktadır.

4.1.1. Düşey kuvvetler

Düşey kuvvetler, kule ve travers ağırlıkları ile izolator, iletken donanımı ve aşağıda belirtilen ek yüklerden oluşmaktadır. Tek telli ya da örgülü iletkenler için $k\sqrt{d}$ (kg/m)'lik bir buz yükü kabul edilmektedir. Burada d (mm) olarak iletken çapını, (k) bölgelere göre değişen bir katsayıyı ifade etmektedir. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğine (EKAT) göre kule ve traverslerde buz yükü olmadığı varsayılmaktadır. Montaj yükü, iletkenin konsol ya da traverse bağlandığı yerde 100 kg olarak alınmaktadır.

Şekil 4.1.'de gösterilen iletken açıklığı denklem 4.1'de yerine koyularak iletken ağırlığı hesaplanmaktadır. (Bayrak, 2008).



Şekil 4.1. İletken açıklığı (Bayrak, 2008)

$$G_i = p_0 \cdot a_g \text{ (kg)} \quad (4.1)$$

p_0 : iletken ağırlığı (kg/m)

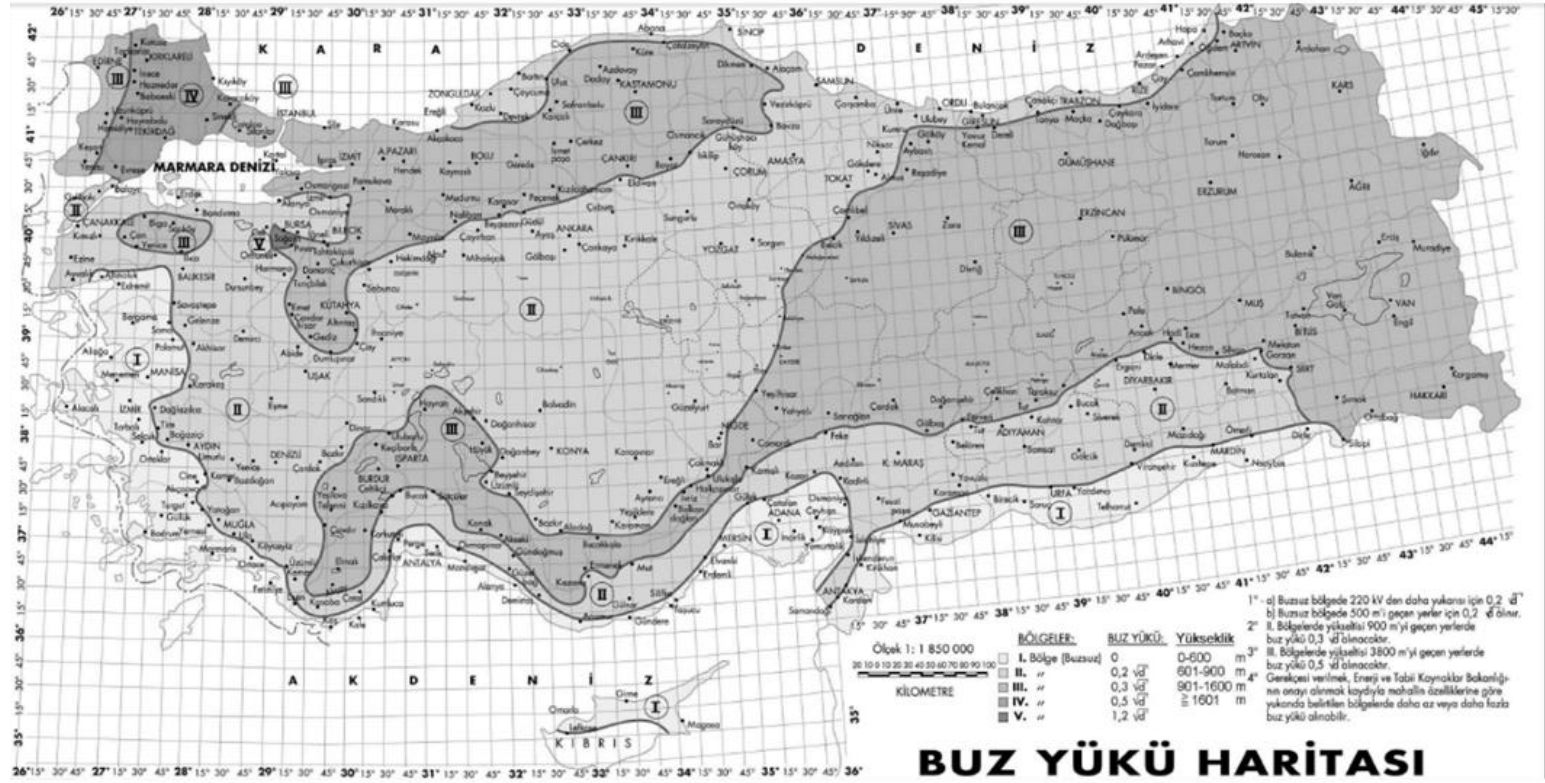
4.1.1.1. Buz yükü

Buz yükü bölgelere göre verilen katsayılardan hesaplanmaktadır. Yönetmelik ekinde yer alan Buz Yükü Haritasına (Şekil 4.2.) göre katsayılar belirlenmektedir. Bu haritaya göre Türkiye’de toplam beş buz bölgesi bulunmakta ve bu bölgeler için Tablo 4.1.’de gösterilen buz yükü katsayısı değerleri tanımlanmıştır (EKAT, 2019).

Yönetmelik özel koşullar gereği tabloda belirtilenden daha yüksek buz yükü olduğu bilinen veya beklenen yerlerde daha büyük katsayı kullanımına izin vermekte ve buz yoğunluğunun $0,6 \text{ kg/dm}^3$ alınacağı belirtilmektedir.

Tablo 4.1. Buz yükü katsayıları [EKAT,2019]

Bölge No	Buz Yük Katsayısı (k)	Buz Yükü (kg/m)	Ortam Sıcaklığı (°C)	
			En Düşük	En Yüksek
1	0	0	-10	50
2	0,2	$0.2 \sqrt{d}$	-15	45
3	0,3	$0.3 \sqrt{d}$	-25	40
4	0,4	$0.4 \sqrt{d}$	-30	40
5	0,5	$0.5 \sqrt{d}$	-30	40



Şekil 4.2. Şekil Buz yükü haritası (<https://www.ekolekspertiz.com.tr>)

4.1.2. Yatay kuvvetler

4.1.2.1. Rüzgar yükü

Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğine göre rüzgar kuvvetlerinin belirlenmesinde 200 metrenin üzerinde ve altındaki rüzgar açıklıkları (iki kule arasındaki mesafe) için iki ayrı denklem mevcuttur (EKAT, 2019).

200 m'ye kadar olan rüzgar açıklıkları için;

$$W = c. p. d. a_w \text{ (kg)} \quad (4.2)$$

200 m'den büyük rüzgar açıklıkları için;

$$W = c. p. d. (80 + 0,6. a_w) \text{ (kg)} \quad (4.3)$$

Kule elemanlarına etki eden rüzgar kuvveti (Bayrak, 2008);

$$W = c. p. A \text{ (kg)} \quad (4.4)$$

Burada;

c: Rüzgarın etkisinde olan elemanın biçimine, büyüklüğüne bağlı dinamik rüzgar basıncı katsayısı

p: $v^2/16$ Dinamik rüzgar basıncı (kg/m^2)

v: Rüzgar hızı (m/s)

a_w : Rüzgâr açıklığı (m)

d: Örgülü ya da tek telli iletken çapı (m)

A: Rüzgarın etki ettiği yüzey alan (m^2)

ifade etmektedir.

Rüzgarın etkisinde olan elemanın biçimine, büyüklüğüne bağlı dinamik rüzgar basıncı katsayısı Tablo 4.2.'de, yüksekliğe bağlı olarak değişen dinamik rüzgar basıncı Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Dinamik rüzgar basıncı katsayısı [EKAT,2019]

No	Rüzgarın Etkisinde Bulunan Ögeler	c
1	Çelik profilden yapılmış tek yüzlü kafesler	1,6
2	Çelik profilden yapılmış kare yada dikdörtgen kesitli kafesler	2,8
3	Borulardan yapılmış tek yüzlü kafesler	1,2
4	Borulardan yapılmış kare yada dikdörtgen kesitli kafesler	2,1
5	Daire kesitli ahşap, beton ve çelik boru direkler	0,7
6	Altıgen ve sekizgen kesitli çelik boru ve beton direkler	1
7	Çapı 12.5 mm ye kadar olan iletkenler	1,2
8	Çapı 12.5 mm ile 15.8 mm e kadar olan iletkenler	1,1
9	Çapı 15.8 mm den büyük olan iletkenler	1

Tablo 4.3. Dinamik rüzgar basıncı [EKAT,2019]

Arazi üzerindeki yükseklik	Dinamik rüzgar basıncı (p)	
	Direkler, traversler, izolatörler	İletkenler
m	kg/m ²	
0-15	55	44*
15-40	70	53
40-100	90	68
100-150	115	86
150-200	125	95

*Uzun aralıklı hatlarda bu değer 53 kg/m² alınmaktadır.

4.1.2.2. Buzlu iletkene etki eden rüzgar yükü

Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğine göre buzlu rüzgar kuvvetlerinin belirlenmesi için aşağıdaki bağıntı verilmiştir. Burada; ddd_{bbb} , mm olarak buzlu iletken

çapını, d, mm olarak çıplak iletken çapını, q, kg/m olarak buz yükünü göstermektedir. Buz yoğunluğu 0,6 kg/dm³ kabul edilmiştir (EKAT, 2019).

$$d_b = (d + 2122 \cdot q)^{1/2} \quad (4.5)$$

Denklem 4.5'te hesaplanan mm boyutunda buzlu iletken çapı (d_b) ile bütün bölgelerde $p = 20 \text{ kg/m}^2$ ve $c = 1$ değerleri alınarak kg/m biriminde buzlu iletken için birim rüzgar yükü hesaplanmaktadır (EKAT, 2019).

4.2. ASCE 74: Elektrik İletim Hatları Yapısal Yükleme Kılavuzu (2016)

ASCE (The American Society of Civil Engineers), Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği, Yapı Mühendisliği Enstitüsü Elektrik İletim Yapıları Yapısal Yükleme Komitesi tarafından enerji nakil hatlarının düzenlenmesi için hazırlanmıştır. Standart 1984, 1991 ve 2010 yıllarında üç defa yayınlanmış, son olarak güncel 4. baskısı 2016 yılında yayınlanmıştır.

4.2.1. Yük kriterleri

İletim hatları yapısal destek sistemi ve iletken kablo sistemi olarak iki kısımdan meydana gelmektedir. Birlikte hareket eden büyük bir sistem olmalarına rağmen iki farklı sistem olarak dikkate alınmaktadır. Kuleler, direkler ve temellerden oluşan yapısal destek sisteminin ana görevi buz yükü dahil olmak üzere iletkenlerden izolatörlerden ve diğer tüm donanımdan gelen yükü ve iletkenlere gelen rüzgar yükünü de taşımaktadır. Kablo sistemi ise iletkenler, topraklama iletkenleri ve izolatör gibi tüm donanım ve bileşenlerinden meydana gelmektedir. İletim hatlarında esas yük yapıya gelen hortum gibi şiddetli rüzgarlar dışında iletkenlere gelen yüklerden oluşmaktadır. Yapısal sistem düşük maliyetle büyük düşey yükleri taşıyabiliyorken aynı sistem iletkenlerde oluşan olağan dışı veya beklenmedik bir durumda yetersiz kalabilmektedir. İletken sisteminde meydana gelen basit bir kopma kontrol edilmesi zor zincirleme bir soruna yol açmakta ve genellikle yıkım ile sonuçlanmaktadır.

4.2.2. Atmosferik yükler

Yönetmeliğin bu bölümü enerji iletim hatları ve iletkenler üzerindeki atmosfer ile ilgili yükleri tartışmaktadır. Yükler, rüzgarla veya rüzgarla eşzamanlı buz olarak adlandırılan bir buz ve rüzgar kombinasyonu olarak ele alınmaktadır. Sıcaklık, atmosferik basınç ve yerel topografya, rüzgar ve buz ile ilgili yüklerin büyüklüğünü belirler. Yönetmelikte verilen rüzgar yükü bağıntıları mühendislik alanında halihazırda kullanılan mevcut bilgilerden geliştirilmiştir ve yeterli performans seviyeleri ile sonuçlanan tasarım için pratik yöntemler sunulmuştur.

4.2.3. Atmosferik yükler için ortalama tekraralama aralıkları

Hava olaylarının aşırı değerleri belli sürelerde tekrar eder ve bunada tekraralama periyodu denilmektedir. Bu yönetmelikte Ortalama Tekrarlama Aralıkları MRI (Mean Recurrence Intervals) olarak ifade edilir. MRI analizi, hava olayının meydana gelme olasılığının zaman içinde değişmediğini ve geçmiş olaylardan bağımsız olduğunu varsaymaktadır. Denklem 4.6, N yıllık bir süre boyunca belirli bir MRI'ya karşılık gelen seviyeyi aşma olasılığını hesaplamak için kullanılmaktadır (ASCE 74,2016).

$$N = \left[1 - \left(1 - \frac{1}{MRI} \right)^N \right] \quad (4.6)$$

Tablo 4.4.'de 50 yıllık bir süre boyunca çeşitli MRI değerlerinin bir veya daha fazla kez aşılma olasılığı gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Çeşitli MRI değerleri için aşılma olasılıkları [ASCE 74,2016]

	MRI	MRI yükünün herhangi bir yılda aşılma olasılığı (%)	MRI yükünün 50 yılda en az bir kez aşılma olasılığı (%)	MRI yükünün 100 yılda en az bir kez aşılma olasılığı (%)
Geçici veya acil durum restorasyonu, servis kontrolleri	10	10	99	99
Geçici veya acil durum restorasyonu, servis kontrolleri	25	4	87	89
Tarihsel olarak kullanılan MRI	50	2	64	87
Önerilen MRI	100	1	39	63
Yüksek Güvenilirlik	200	0,5	22	39
Yüksek Güvenilirlik	300	0,3	15	28
Yüksek Güvenilirlik	400	0,25	12	22
Yüksek Güvenilirlik	500	0,2	10	18
Yüksek Güvenilirlik	700	0,14	7	13

4.2.4. Rüzgar yükü

Enerji iletim hatlarına etkiyen rüzgar yükü denklem 4.7 a ve b de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. (ASCE 74, 2016).

$$F = Q \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot (V_{100})^2 G \cdot C_f \cdot A(N) \quad (4.7)$$

$$F = Q \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot (V_{MRI})^2 G \cdot C_f \cdot A(N) \quad (4.8)$$

Burada;

- F : Aksi belirtilmedikçe rüzgar yönündeki rüzgar kuvveti (N)
 G : Fırtına faktörü
 C_f : Kuvvet katsayısı
 A : Rüzgar yönüne dik düzlemdeki alan (m²)
 Q : Hava yoğunluğu katsayısı
 K_z : Rüzgar basıncına maruz kalma katsayısı
 K_{zt} : Topografik faktör
 V₁₀₀ : 100 yıllık MRI için 3 saniyelik şiddetli rüzgar hızı (m/s)
 V_{MRI} : Seçili MRI'lar için 3 saniyelik şiddetli rüzgar hızı (m/s)

göstermektedir.

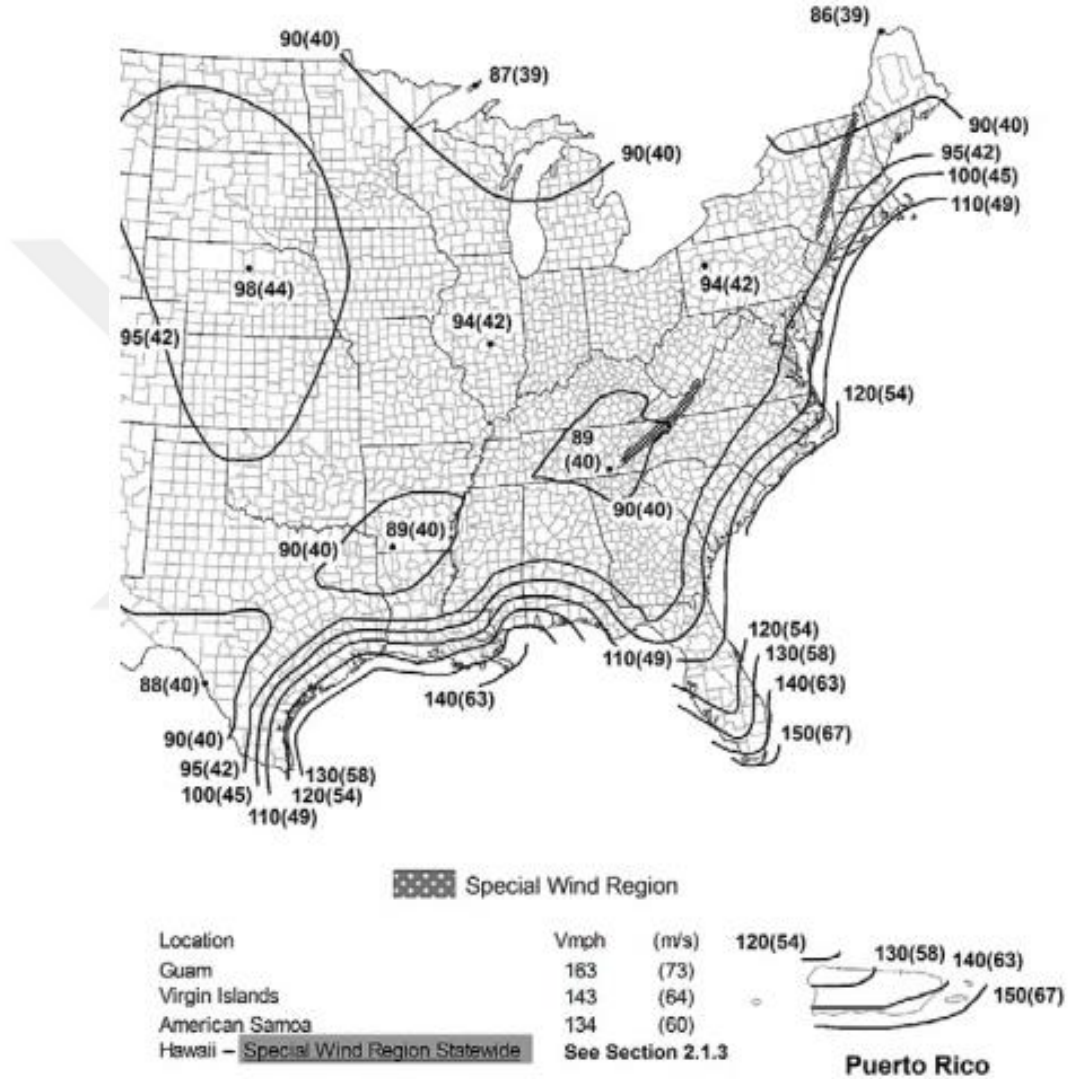
4.2.4.1. Hava yoğunluk katsayısı (Q)

Hava yoğunluk katsayısı Q, hareket eden havanın kinetik enerjisini potansiyel basınç enerjisine dönüştürmek için tanımlanmıştır. Rüzgar hızı (m / s) ve basınç (Pa) için $Q = 0,613$ önerilmektedir.

Q'nun nominal değeri, standart bir atmosfer için havanın özgül ağırlığını yansıtmaktadır. Yüksek rakımlarda hat yükseltme / yeniden derecelendirme gibi bazı durumlarda, sıcaklığın ve yüksekliğin (atmosferik basınç) Q değeri üzerindeki etkileri dikkate alınmaktadır. Özel bir tasarım uygulaması için hava yoğunluğu katsayısının yeni bir değerini doğrulamak için yeterli meteorolojik veri mevcut olması gerekmektedir.

4.2.4.2. Temel rüzgar hızı (V_{MRI})

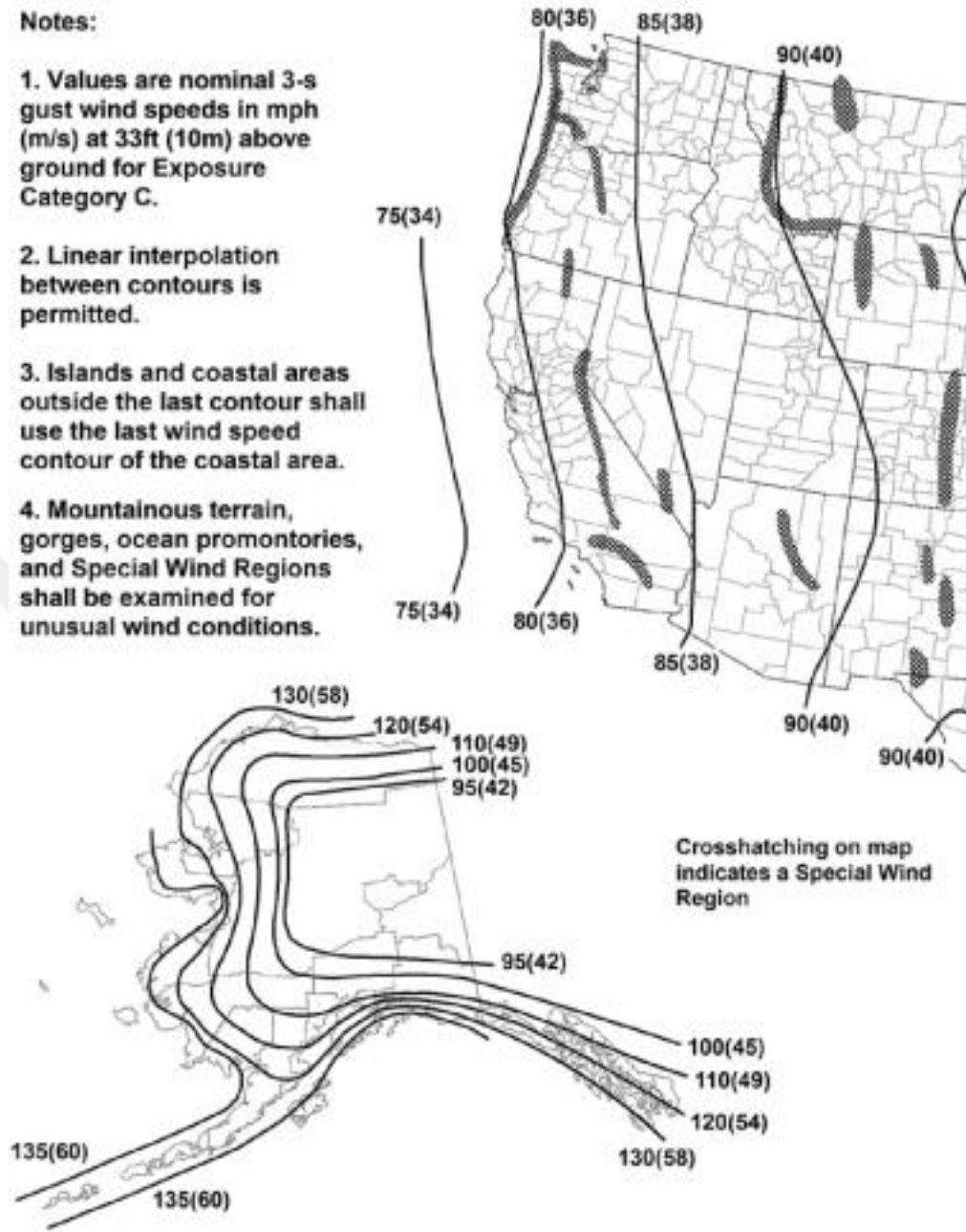
Amerika Birleşik Devletleri'nde temel rüzgar hızı, açık ülke arazisinde yerden 10 m (33 ft) yüksekte 3 saniyelik sert rüzgar hızıdır (Bölüm 4.2.4.3'de tanımlandığı gibi Etki Sınıfı C). Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de bölgelere göre rüzgar hızları verilmiştir.



Şekil 4.3. 100 yıllık MRI için temel rüzgar hızı haritası (ASCE 74, 2016)

Notes:

1. Values are nominal 3-s gust wind speeds in mph (m/s) at 33ft (10m) above ground for Exposure Category C.
2. Linear interpolation between contours is permitted.
3. Islands and coastal areas outside the last contour shall use the last wind speed contour of the coastal area.
4. Mountainous terrain, gorges, ocean promontories, and Special Wind Regions shall be examined for unusual wind conditions.



Şekil 4.4. 100 yıllık MRI için temel rüzgar hızı haritası (ASCE 74,2016)

4.2.4.3. Rüzgar basıncı etki sınıfları

Dünya yüzeyi ile sürtünme nedeniyle rüzgar hızının yüksekliğe göre değiştiği kabul edilmektedir. Çeşitli zemin pürüzlülüğüne bağlı olarak üç tane (B, C, D) rüzgar basıncı etki sınıfı bulunmaktadır.

İletim hatları için önerilen etki sınıfı C'dir.

- B Tipi Etki Sınıfı

Bu etki sınıfı kentsel ve banliyö arazisi, yoğun ağaçlık alanlar veya tek katlı konutlar veya daha büyük boyutlara sahip çok sayıda, yakın aralıklı engellerin bulunduğu arazi olarak sınıflandırılmaktadır. Etki sınıfı B'nin arazine ait tipik bir görünüm Şekil 4.5.'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. B tipi etki sınıfı arazisi (ASCE 74,2016)

- C Tipi Etki Sınıfı

Bu etki sınıfı, yüksekliği 30 ft'den (9.1 m) az olan dağınık engellere sahip açık arazi olarak tanımlanmaktadır. Bu kategori düz, açık kırları, çiftlikleri ve otlakları içermektedir.

Etki sınıfı C arazisinin tipik bir görünümü Şekil 4.6.'ta gösterilmektedir. Bu maruz kalma kategorisi, arazinin diğer maruz kalma kategorilerinin (B, D) tanımlarına uymadığı durumlarda kullanılmaktadır. Ayrıca, bu sınıfın, çoğu rüzgar hızı ölçümünün kaydedildiği havaalanı arazisini temsil ettiği unutulmamalıdır.



Şekil 4.6. C tipi etki sınıfı arazisi (ASCE 74,2016)

- D Tipi Etki Sınıfı

5000 ft (1524 m) veya iletim yapısının yüksekliğinin 20 katı kadarından büyük olan mesafe içinde açık su üzerinden doğrudan rüzgar akışına maruz kalan, engelsiz alanlar olarak tanımlanmaktadır. ASCE 7-16 rüzgar hızı haritasının kasırga kıyı şeridi boyunca etki sınıfı D kullanılmaktadır ve tipik bir görünümü Şekil 4.7.'de gösterilmektedir. Kıyı şeritleri, büyük gölleri ve Kaliforniya, Oregon, Washington ve Alaska'nın kıyı bölgelerini içermektedir. Etki sınıfı D yalnızca doğrudan su kütlelerine ve kıyı sahillerine maruz kalan yapılar için geçerlidir.



Şekil 4.7. D tipi etki sınıfı arazisi[ASCE 74,2016]

4.2.4.4. Rüzgar basıncı etki sınıfı katsayısı (KK_{zz})

Rüzgar basıncı etki sınıfı katsayısı, kule yüksekliği arttıkça artan rüzgar basıncını ifade eden katsayıdır. Etki sınıflarına göre değişimi Tablo 4.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Rüzgar basıncı etki sınıfı katsayısı (K_z) [ASCE 74,2016]

Etkili yükseklik z_h (ft)	Rüzgar basıncı maruz kalma katsayısı (K_z)		
	B	C	D
0-33	0,72	1	1,18
40	0,76	1,04	1,22
50	0,81	1,09	1,27
60	0,85	1,14	1,31
70	0,89	1,17	1,35
80	0,93	1,21	1,38
90	0,96	1,24	1,41
100	0,99	1,27	1,43
120	1,04	1,32	1,48
140	1,09	1,36	1,52
160	1,13	1,40	1,55
180	1,17	1,43	1,59
200	1,2	1,46	1,62

4.2.4.5. Etkili yükseklik (z_h)

Etkili yükseklik, z_h , teorik olarak zemin seviyesinden rüzgar yükünün basınç merkezine olan yüksekliktir.

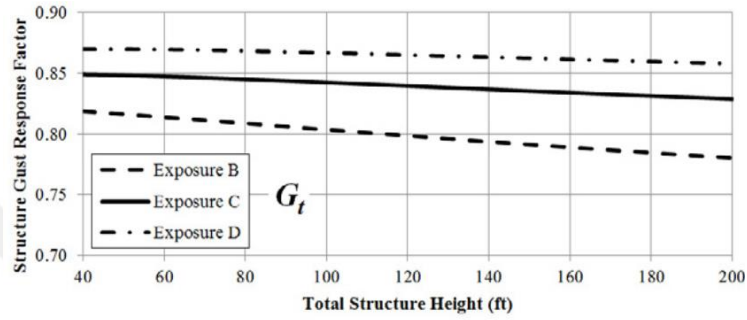
Eşzamanlı rüzgar ve buza maruz kalan bir iletken ve topraklama kablosunun etkin yüksekliği, tellerin ve izolatörlerin kopmasından etkilenmektedir. Bununla birlikte, yapısal tasarım amacıyla, tüm tel bağlantılarının etkin yükseklikleri yaklaşık olarak zeminden yapıya bağlandığı yere olan yüksekliği düşünülmektedir.

4.2.4.6. Fırtına faktörü (G)

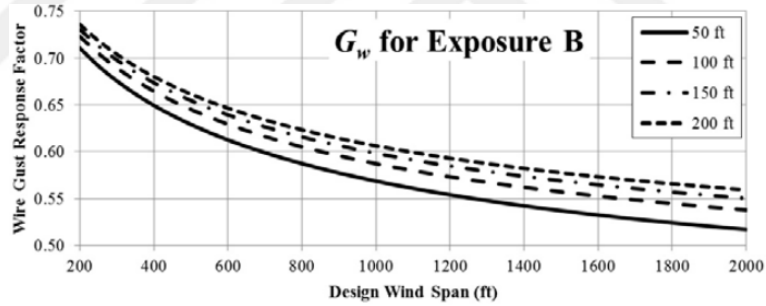
Fırtına faktörü, dinamik etkileri ve iletim hattı bileşenlerinin rüzgar tepkisi üzerindeki rüzgarların korelasyonunu açıklamaktadır. Rüzgarların genellikle iletim yapıları arasındaki tellerin tüm açıklığını kaplamadığı ve rüzgar yükünün hesaplanmasına rüzgarın geometrik kapsamını yansıtan bir miktar azaltmanın dahil edilmesi gerektiği

kabul edilmektedir. Hem dinamik etkiler hem de korelasyon, Davenport (1979) tarafından geliştirilen sert tepki denklemlerine dahil edilmektedir.

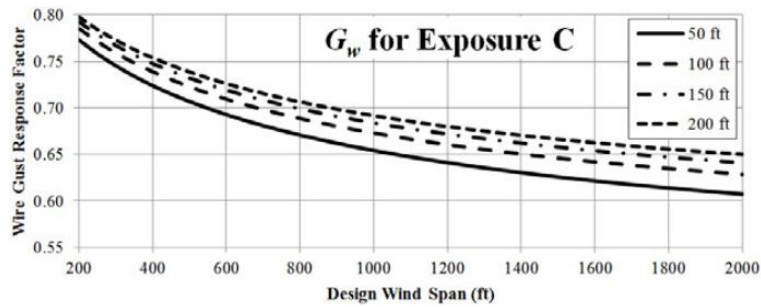
Kule için fırtına faktörünün kule yüksekliğine bağlı olarak değişimi Şekil 4.8.'de gösterilmektedir. İletkenler için fırtına faktörü iletken uzunluğuna ve bulunduğu yüksekliğine bağlı olarak değişimi Şekil 4.9. ve Şekil 4.11.'de gösterilmektedir.



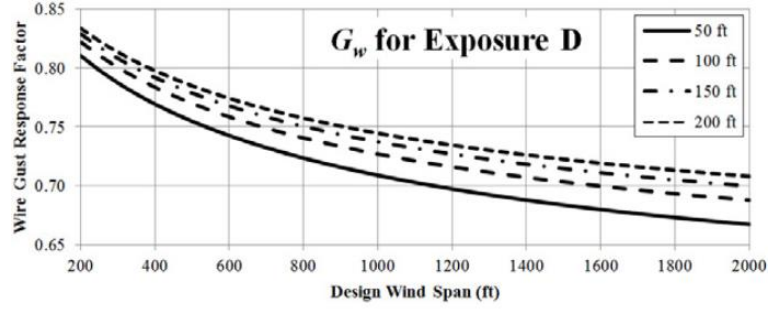
Şekil 4.8. Kule için fırtına faktörü (ASCE 74,2016)



Şekil 4.9. Etki sınıfı B için iletken fırtına faktörü (ASCE 74,2016)



Şekil 4.10. Etki sınıfı C için iletken fırtına faktörü (ASCE 74,2016)



Şekil 4.11. Etki sınıfı D için iletken fırtına faktörü (ASCE 74,2016)

4.2.4.7. Kuvvet katsayısı (C_f)

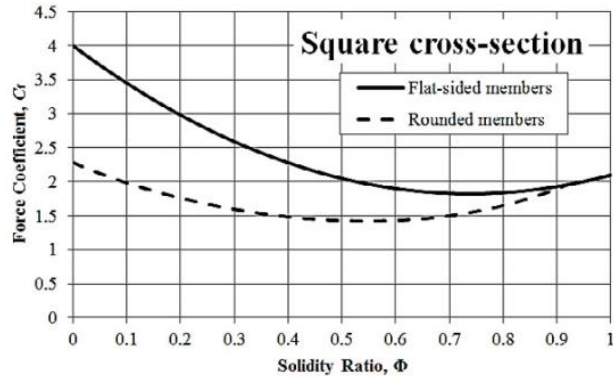
Rüzgar kuvveti denklemindeki kuvvet katsayısı, C_f , eleman özelliklerinin (örneğin şekil, boyut, doluluk, rüzgara göre yönelim, yüzey pürüzlülüğü) kuvvet üzerindeki etkilerini açıklamaktadır. Kuvvet katsayısı, birim alan başına ortaya çıkan kuvvetin rüzgar yönünde uygulanan rüzgar basıncına oranıdır. Ayrıca sürüklenme katsayısı, basınç katsayısı veya şekil faktörü olarak da adlandırılmaktadır.

Tablo 4.6. C_f katsayısı [ASCE 74,2016]

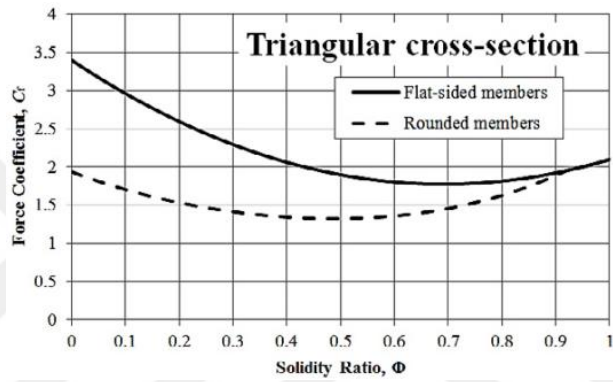
Kule En Kesiti	C_f
Dikdörtgensel :	$4\epsilon^2 - 5,9\epsilon + 4$
Üçgensel :	$3,4\epsilon^2 - 4,7\epsilon + 3,4$
ϵ : doluluk oranı, katı alanın tüm yüzeye oranı	

Rüzgar kuvveti ölçümlerine dayalı daha tanımlayıcı veriler mevcut olmadığı sürece (örneğin rüzgar tüneli testi), tekli veya demetlenmiş iletkenler ve topraklama kabloları için $C_f = 1$ önerilir. Daha küçük tel boyutları tipik olarak daha yüksek bir kuvvet katsayısına sahip olmaktadır.

Kafes kuleler için kuvvet katsayısı bu kılavuzda, kare kesitli ve üçgen kesitli (plan görünümünde) yapılar için kuvvet katsayılarının, tasarımı diğer gereksinimler gerektirmedikçe ASCE 7-16'dan belirlenmesi önerilmektedir. İlgili kuvvet katsayıları, ASCE 7-16'dan elde edildiği gibi Tablo 4.6. ve Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'de gösterilmektedir. Bu kuvvet katsayıları, rüzgarın etki ettiği elemanları ve karşı yüzde kalan elemanları da hesaba katmaktadır. Bu nedenle, kuvvet katsayıları yalnızca bir kule yüzünün öngörülen alanıyla çarpılmaktadır.



Şekil 4.12. Dikdörtgen plan kesitli kule için kuvvet katsayısı (ASCE 74,2016)



Şekil 4.13. Üçgen plan kesitli kule için kuvvet katsayısı (ASCE 74,2016)

4.2.4.8. Topoğrafya faktörü (K_{zt})

Topoğrafyadaki ani değişimleri (tepeler, keskin yamaçlar vb.) dikkate alan katsayıdır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır. Aksi durumunda bu değer 1 alınır (ASCE 74,2016).

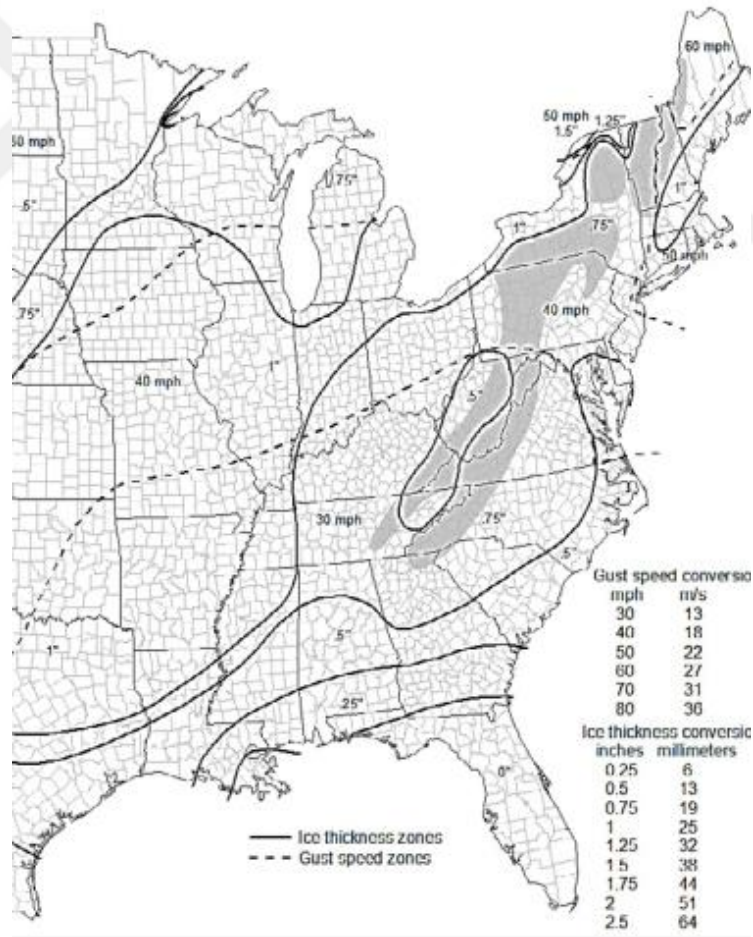
$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (4.9)$$

K_1 , K_2 , K_3 topoğrafyaya bağlı değişen değerlerdir.

4.2.5. Eşzamanlı rüzgar ve buz yükü

Bir enerji iletim hattında buz birikmesi, genellikle tasarımı belirleyen yük kriteridir. Yapısal sisteme önemli düşey yükler yüklemesinin yanı sıra, iletkenler üzerindeki buz birikmesi, rüzgara maruz kalan alanı büyütür ve kuvvet katsayısını etkilemektedir.

İletkenler üzerindeki buzlanma sonucunda ortaya çıkan yük, çıplak iletkene göre önemli ölçüde daha büyük gerilmelere neden olmaktadır. Meteorolojik veriler ve araştırmalar (ASCE 1982), Birleşik Devletler'in çoğunda iletim yapısı tasarımlarının yük kriterlerine eşzamanlı buz ve rüzgar yüklerini dahil edilmesini zorunlu kılmaktadır.



Şekil 4.14. Buz kalınlığı haritası (ASCE 74,2016)

Yerel tarihsel buzlanma verilerinin bulunmadığı alanlarda Şekil 4.14.'te verilen buz haritası bazı sınırlamalarla kullanılabilir. Bu haritalar, Amerika Birleşik Devletleri ve Alaska kıtası için yerden 33 ft (10 m) yükseklikte eşzamanlı 3 saniyelik sert rüzgar hızları ile donmuş yağmur suyu nedeniyle 100 yıllık MRI buz kalınlıklarını göstermektedir. Haritalanan buz kalınlıkları ve rüzgar hızları etki sınıfı C'yi temel alır, ancak etki sınıfı B ve D için de kullanılmaktadır. Bir iletken üzerinde biriken buz miktarı, iletken yüksekliğindeki rüzgar hızına doğrudan bağlıdır. İletkenin zeminden yüksekliğine göre tasarım buz kalınlığı t_z denklem 4.9'dan elde edilmektedir (ASCE 74,2016).

$$t_z = t_{MRI} \left(\frac{z}{10} \right)^{0,10} \quad 0 \text{ m} < z < 275 \text{ m} \quad (4.10)$$

Burada;

t_{MRI} : Nominal buz kalınlığı
 t_z : z yüksekliğindeki tasarım buz kalınlığı
 Z : zeminden yükseklik (m)

4.2.6. İletken üzerindeki buz yükü

Buz yoğunluğu $\rho_i = 56$ pcf kullanılarak, bir iletken üzerindeki doğrusal buz yükü aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$W_i = Q_i(d + t_z)t_z \quad (4.11)$$

Burada;

W_i : Buz yükü (N/m)
 Q_i : Buz kalınlığını ağırlığa dönüştürmek için katsayı (0,0282)
 d : Çıplak tel çapı (mm)

BÖLÜM 5. TASARIM ŞARTNAMESLERİ

Çalışmanın bu bölümünde “Türkiye Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları” ve “ASCE 10 97: Çelik Kafes İletim Yapılarının Tasarımı Kuralları” yönetmeliklerinin esasları verilerek karşılaştırılması yapılmıştır.

5.1. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapıma Dair Kurallar

Bu yönetmelik, yapısal çelik ve çelik – betonarme kompozit yapı elemanlarının ve yapı sistemlerinin, kullanım amaçlarına uygun olarak, yeterli bir güvenlikle tasarımına ve yapımına ilişkin yöntem, kural ve koşulları belirtilmektedir.

5.1.1. Tasarımda temel ilkeler

Çelik yapı elemanlarının ve birleşimlerin tasarımı Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) veya Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) yaklaşımlarından biri uygulanarak gerçekleştirilmektedir.

Bu tez kapsamında Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) yöntemi benimsenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

5.1.1.1. Yük ve dayanım katsayıları ile tasarım (YDKT)

Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT), tüm yapısal elemanlar için, tasarım dayanımı, ϕR_n nin bu tasarım yöntemi için öngörülen ve YDKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım, R_u , değerine eşit veya daha büyük olması prensibine dayanmaktadır.

Bu koşul denklem 5.1’de verildiği gibi formüle edilmiştir. (ÇYTHYK, 2018).

$$R_u \leq \phi R_n \quad (5.1)$$

Burada;

R_u : YDKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım

R_n : Karakteristik dayanım.

ϕ : Dayanım katsayısı.

ϕR_n : Tasarım dayanımı.

5.1.1.2. Güvenlik katsayıları ile tasarım (GKT)

Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT), tüm yapısal elemanlar için, güvenli dayanım, R_n/Ω nın bu tasarım yöntemi için öngörülen ve GKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım, R_a , değerine eşit veya daha büyük olması prensibine dayanmaktadır.

Bu koşul denklem 5.2’de verildiği gibi formüle edilmiştir. (ÇYTHYK, 2018).

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \quad (5.2)$$

Burada;

R_a : GKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım.

R_n : Karakteristik dayanım.

Ω : Güvenlik katsayısı.

$\frac{R_n}{\Omega}$: Güvenli dayanım.

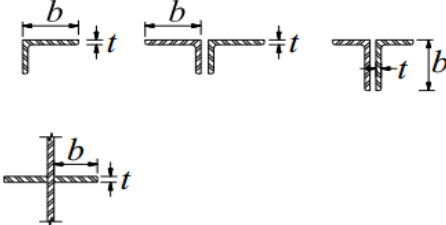
5.1.2. Eleman enkesit özellikleri

5.1.2.1. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesit parçaları

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesitler, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, narin ve narin olmayan enkesitler olarak ikiye ayrılmaktadır. Hiçbir enkesit parçasının genişlik (çap) / kalınlık oranı, λ 'nın Tablo 5.1.'de verilen λ_r sınır değerini aşmadığı (narin enkesit parçası bulunmayan) enkesitler narin olmayan enkesit ve en az bir enkesit parçasının genişlik (çap) / kalınlık oranının λ_r sınır değerini aştığı enkesitler ise narin enkesit olarak sınıflandırılmaktadır (ÇYTHYK, 2018).

Bu tez kapsamında kullanılan profillere ait narinlik sınır durumu (ÇYTHYK, Bölüm 5) aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.1. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesit parçaları için genişlik / kalınlık oranları [ÇYTHYK, 2018]

Genişlik/Kalınlık Oranı (λ)	Genişlik/Kalınlık Oranı Sınır Değeri (λ_r)	Enkesit
b/t	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

5.1.2.1.1. Kayıpsız ve net enkesit alanları

ÇYTHYK, Bölüm 5'te elemanın kayıpsız enkesit alanı, A_g , yerel burkulma nedeniyle etkin olmayan enkesit parçalarının veya açılan delikler nedeniyle oluşan kayıpların göz önüne alınmadığı toplam enkesit alanı olarak tanımlanmaktadır.

Net (kayıplı) enkesit alanı, A_n , elemanın kırılma çizgisi üzerinde yer alan bulon deliklerinin veya konstrüktif nedenlerden dolayı oluşan kesit kayıplarının çıkarılması ile elde edilen net alan olarak tanımlanmaktadır.

Çekme ve kesme kuvveti etkisindeki elemanların kırılma çizgisi üzerindeki net enkesit alanı hesabında, delik açılırken delik çevresindeki çelik malzemenin hasar görme olasılığı göz önüne alınarak, karakteristik delik çapından 2 mm daha büyük olarak alınan etkin delik çapı, d_e , kullanılmaktadır. Şaşırtmalı veya şaşırtmalı olmayan delikler için, kırılma çizgisi boyunca net alan denklem 5.3 ile belirlenmektedir (ÇYTHYK, 2018).

$$A_n = A_g - \sum d_e t + \sum \frac{s^2 t}{4g} \quad (5.3)$$

Burada;

- A_n : Net (kayıplı) enkesit alanı.
- A_g : Toplam (kayıpsız) enkesit alanı
- d_e : Etkin delik çapı
- d_h : Karakteristik bulon deliği çapı
- s : Ardışık iki deliğin merkezleri arasında, kuvvet doğrultusundaki aralık.
- t : Eleman kalınlığı.
- g : Ardışık iki deliğin merkezleri arasında, kuvvete dik doğrultudaki aralık

Boru veya kutu enkesitlerde, bazı kaynaklı birleşimler için yapılan kesimler nedeniyle net (kayıplı) alan, kesim işlemiyle çıkarılan genişlik ve eleman tasarım et kalınlığının çarpımı ile belirlenen alanın boru veya kutu elemanın toplam enkesit alanından çıkarılması ile elde edilmektedir.

5.1.3. Eksenel çekme etkisindeki elemanlar

ÇYTHYK Bölüm 7’de verilen eksenel çekme kuvveti etkisindeki elemanların tasarımı bu bölümde belirtilen kurallara göre yapılmaktadır.

5.1.3.1. Narinlik oranı

Çekme kuvveti etkisindeki elemanlarda stabilite bir tasarım kriteri olmamasına karşın, bu tür elemanlarda narinlik oranı, $L/i \leq 300$ olmaktadır. Ancak, bu sınır çelik kablolar ve miller için geçerli olmamaktadır.

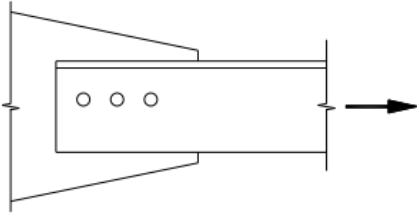
5.1.3.2. Etkin enkesit alanı

Çekme elemanının birleşim bölgesine tüm enkesit parçalarıyla bulonlu veya kaynaklı olarak bağlanmadığı durumda, gerilme yayılımındaki düzensizliğin hesaba katıldığı etkin net enkesit alanı, A_e , denklem 5.4 ile hesaplanmaktadır (ÇYTHYK, 2018).

$$A_e = U \cdot A_n \quad (5.4)$$

Burada, gerilme düzensizliği etki katsayısı, U , çekme elemanlarının tipik bulonlu ve kaynaklı birleşimleri için, Tablo 5.2.'de verilmektedir. Bu katsayının minimum değeri, boru ve kutu enkesitli elemanlar hariç olmak üzere, birleşen enkesit parçalarının toplam alanının, elemanın kayıpsız enkesit alanına oranı olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 5.2 Gerilme düzensizliği etki katsayısı [ÇYTHYK, 2018]

Tek ve çift korniyer	Kuvvet doğrultusunda bir sırada 4 veya daha fazla bulon bulunan birleşim	$U = 0.80$	
	Kuvvet doğrultusunda bir sırada 2 veya 3 bulon bulunan birleşim	$U = 0.60$	

5.1.3.3. Çekme Kuvveti Dayanımı

Tasarım çekme kuvveti dayanımı, $\phi_t T_n$, (YDKT) veya güvenli çekme kuvveti dayanımı, T_n / Ω_t , (GKT), aksenal çekme kuvveti etkisindeki elemanın, akma sınır durumu, kırılma sınır durumu ve blok kırılma sınır durumlarına göre hesaplanacak dayanımların en küçüğü olarak alınmaktadır.

Çekme elemanlarında akma sınır durumu için karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n , kayıpsız enkesit alanı kullanılarak denklem 5.5 ile hesaplanmaktadır (ÇYTHYK, 2018).

$$T_n = F_y A_g \quad (5.5)$$

Tasarım çekme kuvveti dayanımı, ϕT_n , (YDKT) veya güvenli çekme kuvveti dayanımı, T_n/Ω_t , (GKT) (ÇYTHYK, 2018).

$$\phi_t = 0.90 \text{ (YDKT)} \quad \Omega_t = 1.67 \text{ (GKT)}$$

alınarak belirlenmektedir.

5.1.3.3.1. Kırılma Sınır Durumu

Çekme elemanlarında kırılma sınır durumu için, karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n , etkin net enkesit alanı kullanılarak denklem 5.6 ile hesaplanmaktadır (ÇYTHYK, 2018).

$$T_n = F_u A_e \quad (5.6)$$

Tasarım çekme kuvveti dayanımı, ϕT_n , (YDKT) veya güvenli çekme kuvveti dayanımı, T_n/Ω_t , (GKT),

$$\phi_t = 0.75 \text{ (YDKT)} \quad \Omega_t = 2.00 \text{ (GKT)}$$

alınarak belirlenmektedir.

Burada;

A_e : Etkin net enkesit alanı.

- A_g : Kayıpsız enkesit alanı.
 F_y : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi
 F_u : Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı

Dairesel veya oval dolgu kaynaklı birleşimlerin, dairesel veya oval delikler içerisinde teşkil edilen köşe kaynaklı birleşimlerin veya konstrüktif kesim işleminin uygulandığı köşe kaynaklı birleşimlerin kullanıldığı çekme elemanlarının kırılma sınır durumunda etkin net enkesit alanı esas alınmaktadır.

5.1.4. Eksenel basınç etkisindeki elemanlar

ÇYTHYK Bölüm 8’de verilen Eksenel (enkesit ağırlık merkezine uygulanan) basınç kuvveti etkisindeki elemanların tasarımı bu bölümde belirtilen kurallara göre yapılmaktadır.

Narinlik Oranları;

Basınç elemanlarında burkulma boyu ($L_c = KL$) kullanılarak hesaplanan narinlik oranı, $L_c/i \leq 200$ olmaktadır (ÇYTHYK,2018).

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

- L_c : Eleman burkulma boyu (=KL).
 i : Atalet yarıçapı
 K : Burkulma boyu katsayısı.
 L : Desteklenen noktalar arasında kalan eleman uzunluğu.

5.1.4.1. Basınç kuvveti dayanımı

Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı, P_n , eksenel basınç etkisindeki elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında eğilmeli burkulma, burulmalı

burkulma ve/veya eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumlarına göre hesaplanacak dayanımların en küçüğü olarak alınmaktadır.

Tasarım basınç kuvveti dayanımı, $\phi_c P_n$, (YDKT) veya güvenli basınç kuvveti dayanımı, P_n/Ω_c , (GKT) tüm basınç elemanlarında,

$$\phi_p = 0.90 \text{ (YDKT)} \quad \Omega_p = 1.67 \text{ (GKT)}$$

olmak üzere, bu bölümde tanımlanan kurallara uygun olarak hesaplanmaktadır.

5.1.4.2. Karakteristik basınç kuvveti dayanımı

Narin olmayan enkesitli (Tablo 5.1.'e göre narin enkesit parçası içermeyen) elemanların aksenal basınç kuvveti altındaki karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımı, P_n , denklem 5.7 ile hesaplanmaktadır.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (5.7)$$

Burada, kritik burkulma gerilmesi, F_{cr} , denklem 5.8 veya denklem 5.9 ile elde edilmektedir (ÇYTHYK, 2018).

$$\frac{L_c}{i} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ veya } \left(\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25 \right) \text{ için } F_{cr} = [0.658^{\frac{F_y}{F_e}}] F_y \quad (5.8)$$

$$\frac{L_c}{i} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ veya } \left(\frac{F_y}{F_e} > 2.25 \right) \text{ için } F_{cr} = 0.877 F_e \quad (5.9)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_g : Kayıpsız enkesit alanı

F_e : Elastik burkulma gerilmesi

F_y : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi

F_{cr} : Kritik burkulma gerilmesi

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve/veya eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumları için elastik burkulma gerilmesi, F_e , aşağıda verilen esaslara göre belirlenmektedir.

5.1.4.3. Eğilmeli Burkulma Sınır Durumu

Bu sınır durum, en kesit özelliklerinden bağımsız olarak, tüm basınç elemanlarında dikkate alınacaktır. Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç dayanımı, denklem 5.7 ile hesaplanmaktadır.

Buna göre, denklem 5.8 veya denklem 5.9'daki elastik burkulma gerilmesi, F_e , denklem 5.10 ile hesaplanmaktadır (ÇYTHYK, 2018).

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_e}{i}\right)^2} \quad (5.10)$$

5.2. ASCE 10 97: Çelik Kafes İletim Yapılarının Tasarımı (2000)

İlk kez 1971 de Amerika İnşaat Mühendisleri Topluluğu (ASCE) tarafından yayınlanan Guide for Design of Steel Transmission Towers, Manuals, and Reports on Engineering Practice—No. 52. adlı kılavuz, Amerika ve dünya genelinde çelik kafes iletim yapılarının tasarımının temelini oluşturmaktadır.

1988 de yayınlanan bu kılavuzun 2.baskısı, bu standarta (ASCE 10 97) kaynaklık etmiştir. 1991 de ASCE 10 97 ilk kez basılmıştır. 2000 yılında yapılan güncellemelerle son halini almıştır.

Bu bölümde verilen bilgiler ASCE 10 97 Bölüm 3'te bulunmaktadır.

5.2.1. Kapsam

Bu yönetmelik, elektrik iletim yapılarının tasarım, imalat ve yapı elemanlarının kontrolü için gerekli şartları içerir. Bu kontroller sıcak ve soğuk olarak haddelenmiş çelik profiller için geçerli olmaktadır.

5.2.2. Eleman tasarımı

5.2.2.1. Narinlik oranı

Basınç gerilmesi altındaki elemanların narinlik oranların eleman kullanım yerine göre değişmektedir. Bu bağlamda ayaklar için denklem 5.19, diğer yapı elemanları için denklem 5.20 verilmektedir. Burkulma boyunu azaltmak amacıyla kullanılan örgü elemanları için narinlik sınırı denklem 5.21 sadece çekmeye çalışan elemanların narinlik sınırı denklem 5.22’de verilmektedir. (ASCE 10-97, 2000).

$$L/r \leq 150 \quad (5.19)$$

$$KL/r \leq 200 \quad (5.20)$$

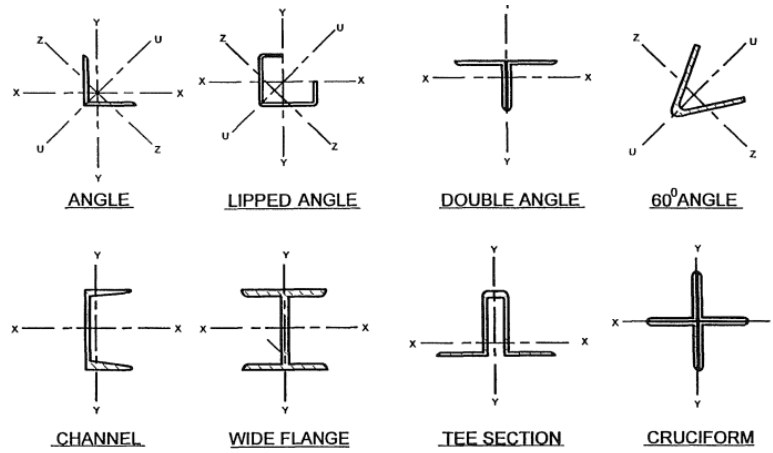
$$KL/r \leq 200 \quad (5.21)$$

$$300 \leq L/r \leq 500 \quad (5.22)$$

5.2.2.2. Enkesit Özellikleri

En kesit alanı, atalet momenti ve atalet yarıçapı gibi kesit özellikleri brüt alan için hesaplanır. Azaltılmış en kesit veya net en kesit ölçüleri kesit narinliği hesaplanırken dikkate alınmaktadır (ASCE 10-97, 2000).

Tipik en kesitler Şekil 5.1.’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Enkesit tipleri (ÇYTHYK, 2018)

5.2.3. Tasarım basınç dayanımı

Eksenel basınç etkisi altındaki elemanların tasarım basınç gerilmesi, F_a , aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır (ASCE 10-97, 2000).

$$F_a = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y \quad \frac{KL}{r} \leq C_c \quad (5.23)$$

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad \frac{KL}{r} > C_c \quad (5.24)$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \quad (5.25)$$

Burada;

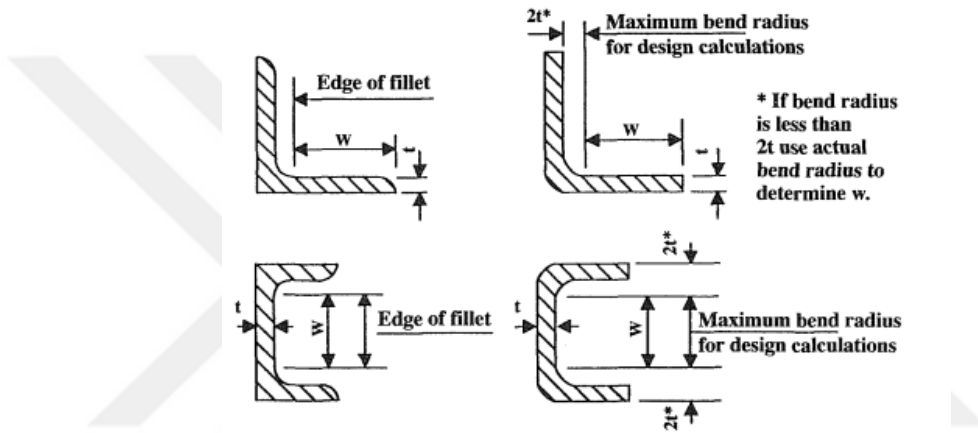
- F_y : Akma Gerilmesi
- E : Elastikite Modülü
- K : Efektif boy katsayısı
- L : Elaman boyu
- r : Atalet yarıçapı

5.2.4. Basınç elemanları

Bu bölümde anlatılanlar profil kolları 90° açılı yapan kesitler için geçerli olmaktadır.

5.2.4.1. Maksimum w/t oranı

Şekil 5.2.'de w ve t uzunlukları gösterilen profillerin w/t oranı için $w/t \leq 25$ 'dir (ASCE 10-97, 2000).



Şekil 5.2. Kesit w ve t uzunlukları (ÇYTHYK, 2018)

5.2.4.2. Narin kesit basınç dayanımı

Eğer w/t oranı denklem 5.27'de belirtilen sınırı aşarsa F_a basınç dayanımı yerine F_{cr} basınç dayanımı hesabı yapılmaktadır (ASCE 10-97, 2000).

$$\left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = \frac{80\psi}{\sqrt{F_y}} \quad (5.27)$$

$$F_{cr} = \left[1,677 - 0,677 \frac{w/t}{(w/t)_{lim}}\right] F_y \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{144\psi}{\sqrt{F_y}} \quad (5.28)$$

$$F_{cr} = \frac{0,0332\pi^2 E}{(w/t)^2} \quad \frac{144\psi}{\sqrt{F_y}} \geq \frac{w}{t} \quad (5.29)$$

Burada F_y 'nin birimi Mpa ve $\psi = 2.62$ alınmaktadır.

5.2.5. Çekme elemanları

5.2.5.1. Tasarım çekme gerilmesi

Çekme gerilmesi F_t , net enkesit (A_n) üzerindeki akma dayanımıdır (F_y).

$$F_t = F_y A_n \quad (5.37)$$

Kablo elemanlarda tasarım çekme gerilmesi kablonun minimum kopma dayanımının 0.65'ini aşmamalıdır (ASCE 10-97, 2000).

BÖLÜM 6. SAYISAL ÇALIŞMALAR

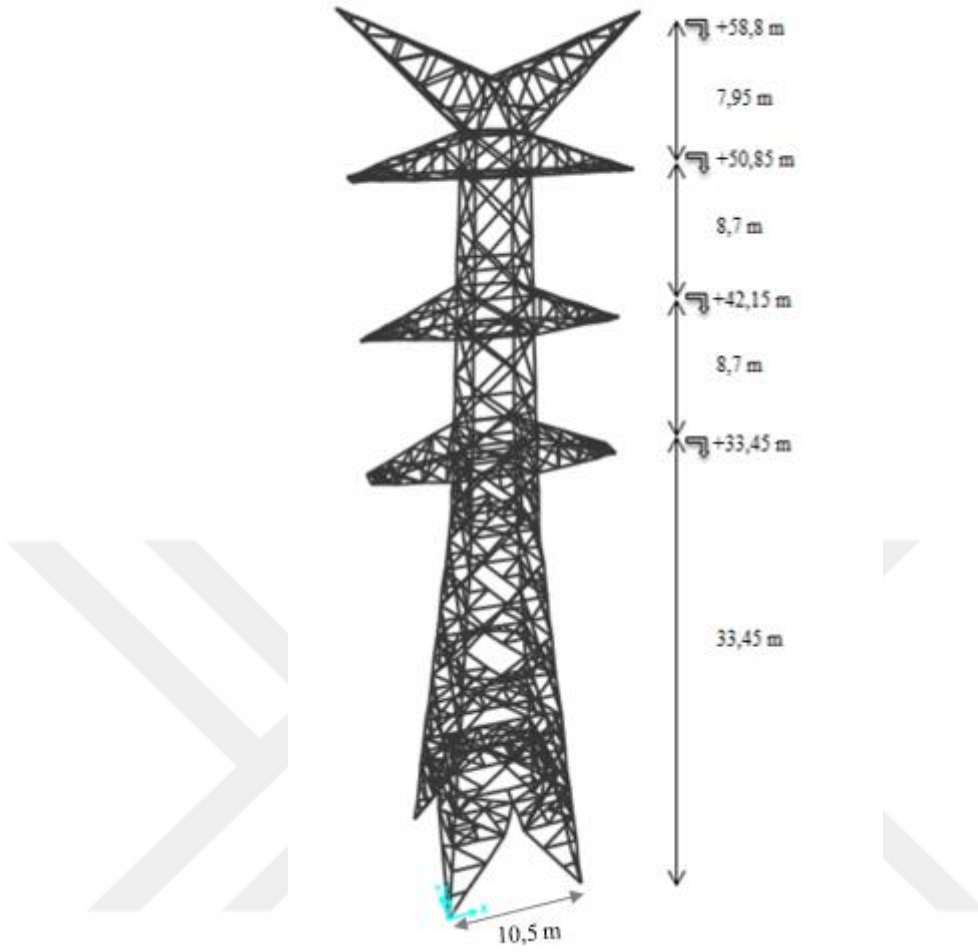
Bu bölümde projesi TEİAŞ'dan alınan mevcut bir çelik kafes yüksek gerilim kulesinin sonlu eleman modeli kurulup rüzgar buz ve deprem yükü altında davranışı incelenmiştir.

Analizler ilk olarak ülkemiz ve Amerikan şartnamelerine uygun olarak iki farklı şekilde yapıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın devamında Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) yönetmeliği ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları baz alınarak farklı yük durumlarına göre analizler yapıp karşılaştırılmıştır.

6.1. Yüksek Gerilimli Elektrik Kulesi Modeli

Bu tez çalışmasında 58,8 m yüksekliğinde, ayak açıklığı 10,5 m olan kare tabanlı mevcut bir yüksek gerilim (380 kV) kulesi incelenmiştir. Yapının davranışını belirlemek için SAP2000 yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. (Şekil 6.1.). Sonlu eleman modeli 1704 adet çubuk eleman ve 657 adet düğüm noktası ile teşkil edilmiştir ve elemanların sınır değerleri mafsalsal olarak tanımlanmıştır ve kulenin 3.derece kar bölgesinde olduğu kabul edilmiştir.

Yapının 33,45 m, 42,15 m ve 50,85 m yüksekliklerinde iletkenlerin bağlı olduğu traversler bulunmaktadır. Her traversin sağından ve solundan iki taraftan olmak üzere toplam 4 iletken hattı bağlanmaktadır. Her bir iletken hattı üç adet iletken kablodan meydana gelen demetten oluşmaktadır. 58,8 m yükseklikte bulunan topraklama kulesinin sağında ve solunda olmak üzere iki topraklama kablosu bulunmaktadır. İki kule arasındaki rüzgar açıklığı yani iletken boyu 400 m alınmıştır. İletken çapı 30 mm ağırlığı 2,5 kg/m alınırken topraklama kablosunun çapı 15 mm ağırlığı 0,625 kg/m alınmıştır.



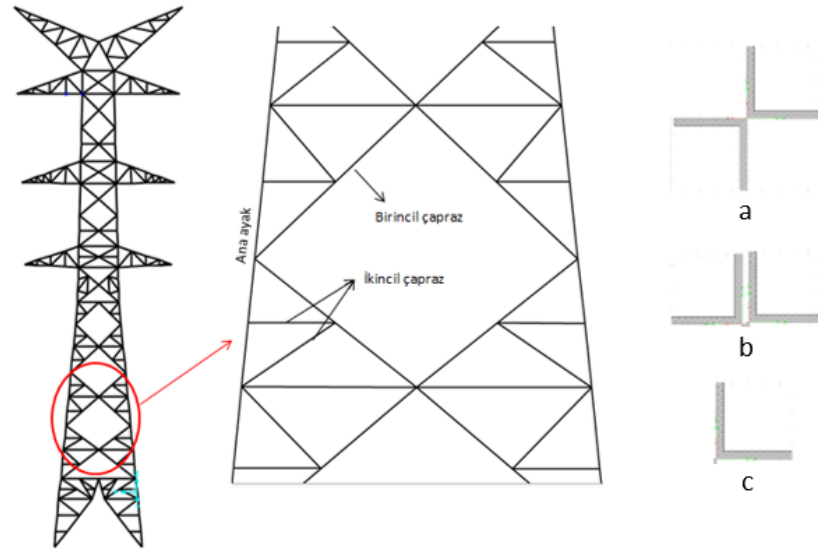
Şekil 6.1. Kule sonlu eleman modeli

Tablo 6.1. Kule elemanlarının kesit ve malzeme türleri

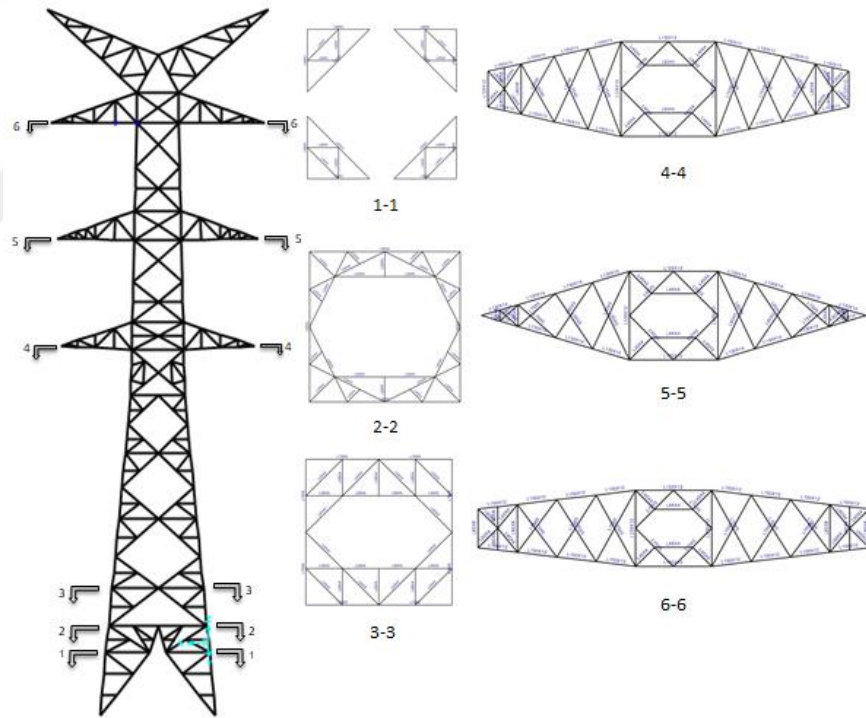
	En Küçük Kesit	En Büyük Kesit	Malzeme
Ayaklar	2L 180X18	2L 180X18	S275
Kirişler	L50X4	2L110X7	S275-S235
Birincil Çaprazlar	2L90X6	2L130X12	S275
İkincil Çaprazlar	L45X4	L55X5	S235

Şekil 6.2.'de ayak (a), kiriş (b) ve çapraz (c) elemanlara ait en kesitler gösterilmiştir.

Tablo 6.1.'de kule elemanlarına ait kesit ve malzeme bilgisi verilmiştir.



Şekil 6.2. Kule elemanları



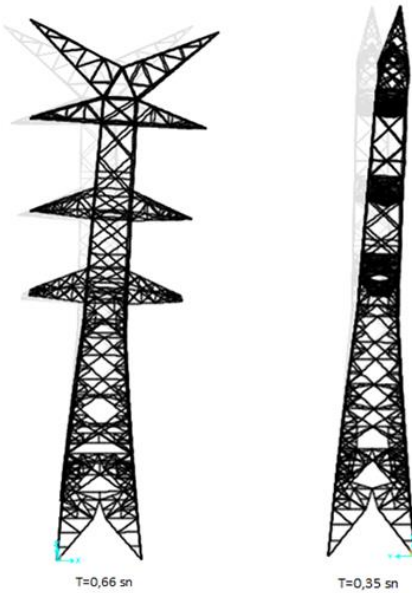
Şekil 6.3. Kule ve travers en kesitleri

Şekil 6.3.'de kule ve travers kesitleri verilmiştir.

6.2. Mod Biçimleri

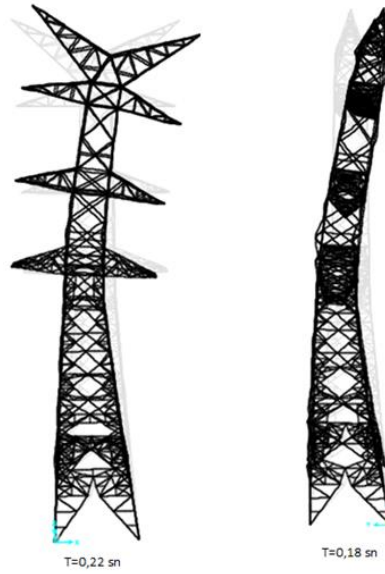
Enerji iletim kuleleri, iletim hatlarını taşıdığı, iletkenlerle birbirlerine bağlı oldukları için dinamik davranışları hat doğrultusunda ve hatta dik doğrultuda birbirinden farklıdır. Kulenin serbest titreşim periyodu iletkene dik doğrultuda daha büyük iken, hatta paralel doğrultuda daha küçüktür. Bunun sebebi bir iletim hattı boyunca çok sayıda kulenin birbirine bağlı olmasıdır.

Kulenin iletkenlere paralel yöndeki (y yönünde) davranışını gerçeğe uygun davranışını modellemek için SAP2000 modelinde, iletkenlerin transverslere bağlandığı noktalara yaylar tanımlanmıştır.



Şekil 6.4. X ve Y yönündeki 1.mod şekilleri

Kulenin birinci serbest titreşim periyodu $T_1=0.66$ sn, (iletim hattına dik doğrultuda) ikinci serbest titreşim periyodu ise $T_2=0,35$ sn olarak (iletim hattına paralel doğrultuda) hesaplanmıştır. (Şekil 6.4). Yine üçüncü serbest titreşim periyodu $T_3=0.22$ sn, (iletim hattına dik doğrultuda) dördüncü serbest titreşim periyodu ise $T_4=0,18$ sn olarak (iletim hattına paralel doğrultuda) hesaplanmıştır. (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. X ve Y yönündeki 2.mod şekilleri

6.3. Kuleye Etki Eden Yükler

Bu bölümde Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) Yönetmeliği ve ASCE 74: Elektrik İletim Hatları Yapısal Yükleme Kılavuzuna göre rüzgar ve buz yüküne göre hesap esasları verilmiştir.

6.3.1. Elektrik kuvvetli akım tesisleri yönetmeliği ve ASCE 74 yönetmeliği yük hesabında yaklaşım farklılıkları

Her iki yönetmeliğe ait rüzgar yükü hesapları incelendiğinde Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği (EKAT) yönetmeliğinin ASCE 74 yönetmeliğine göre daha genel bir yaklaşımla hazırlandığı gözlenmiştir.

EKAT'a ait yönetmelikte en belirgin farklılık kulelerin bulunduğu bölgeye ait yerel bir rüzgar hızının dikkate alınmamasıdır. Rüzgar hızı dinamik rüzgar basıncının (p) içine dahil edilmiştir. Yönetmeliğe göre rüzgar basıncı, rüzgar hızına bağlı olarak $p = v^2/16$ bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bölüm 4 de bulunan Tablo 4.3.'de dinamik rüzgar basıncının kule yüksekliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bu tabloda kule zemininden 15 m'e yüksekliğe kadar dinamik rüzgar basıncı 55 kg/m^2 yukarıdaki

bağıntıda yerine koyulduğunda rüzgar hızı yaklaşık 30 m/s çıkmıştır. Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne ait rüzgar hızına bağlı rüzgar şiddeti tanımına göre (Tablo 6.2.) 30 m/s'lik rüzgar hızı çok şiddetli fırtınayı ifade etmektedir.

Tablo 6.2. Meteoroloji Genel Müdürlüğüne ait rüzgar sınıflandırması

Rüzgar Şiddeti	Rüzgar Hızı
Kuvvetli Rüzgar	10.8 - 17.1 m/s (39-61 km/sa)
Fırtına	17.2 - 20.7 m/s (62-74 km/sa)
Kuvvetli Fırtına	20.8 - 24.4 m/s (75-88 km/sa)
Tam Fırtına	24.5 - 28.4 m/s (89-102 km/sa)
Çok Şiddetli Fırtına	28.5 - 32.5 m/s (103-117 km/sa)

Bu hız değeri Türkiye'de bölge ayrımı yapılmaksızın kullanılırken ASCE 74 yönetmeliğinde rüzgar hızı değeri için çeşitli bölgelerde yerden 10 m yükseklikte esen rüzgar hızı ölçümü yapılarak rüzgar hızı haritası oluşturulmuştur. Aynı rüzgar hızına sahip bölgelerde kulenin şehir merkezine yakın olması ya da açık arazi alanlarında bulunması gibi farklı pürüzlülük yüzeylerinin rüzgar hızına yaptığı sürtünme etkisi dikkate alınmıştır ve rüzgar basıncı etki katsayısı (K_z) geliştirilmiştir. Bu değer yönetmelikte verilen 3 farklı (B, C, D) etki bölgesi için verilmiştir. Bunun yanı sıra topoğrafya şekillerinin (tepeler, vadiler) rüzgar hızı üzerindeki etkileri dikkate alınarak topoğrafya katsayısı (K_{zt}) geliştirilmiştir.

EKAT yönetmeliği kule plan kesit türünü ve kullanılan elemanların en kesit şekillerinin rüzgar akışı üzerindeki etkisini düşünerek dinamik rüzgar basıncı katsayısı (c) geliştirmiştir. ASCE 74 yönetmeliğinde de bu etkilere ek olarak kafes kulenin rüzgarın etkisinde kalan cephesinin doluluk oranı (ϵ) dikkate alınıp kuvvet katsayısı (C_f) oluşturulmuştur. Bu değer üç farklı etki bölgesine (B, C, D) göre değişmektedir.

Buz yükü hesabında EKAT yönetmeliği buzlanma derecesine göre Türkiye'yi 5 bölgeye ayırarak bir buz yükü haritası oluşturmuştur. Bu haritaya göre her bölge için buzlanma katsayısı vererek çıplak tel çapına bağlı yük hesabı yapmıştır. ASCE 74 yönetmeliği rüzgar haritasında olduğu gibi çeşitli bölgelerde yerden 10 m yükseklikteki donmuş yağmur suyu kalınlıklarından oluşan buz haritası oluşturmuştur. Haritada bulunan buz kalınlıkları iletkenin bulunduğu yüksekliğe bağlı olan bir bağıntı

ile tasarım buz kalınlığına çevrilmektedir. Buz yükü, tasarım buz kalınlığı ve çıplak iletken çapına bağlı bir bağıntı ile hesaplanmaktadır.

6.3.2. EKAT yönetmeliği göre rüzgar yükü hesabı

Bölüm 4.1 verilen bağıntılardan kuleye gelen rüzgar yükü hesaplanmıştır. Tablo 4.2.'de dinamik rüzgar basıncı katsayısı, c , kare tabanlı kafes kule için 2.8 verilmiştir. Tablo 4.3.'de dinamik rüzgar basıncı, p , kulenin yüksekliğine göre değişmektedir. Denklem 6.1 kullanılarak, rüzgar basıncına bağlı olarak rüzgar kuvvetlerinin kule yüksekliğince değişimi hesaplanmıştır.

$$W = c \cdot p \cdot A \text{ (kg)} \quad (6.1)$$

A: Rüzgarın etki ettiği yüzey alan

Tablo 6.3.'de dinamik rüzgar basıncına bağlı olarak değişen rüzgar kuvvetleri verilmiştir.

Tablo 6.3. EKAT Rüzgar Kuvvetleri

Kule Yüksekliği (m)	Dinamik Rüzgar Basıncı (p)	W (kg)
0-15	55	154.A
15-40	70	196.A
40-100	90	252.A

EKAT Yönetmeliğine göre rüzgar yükü sadece rüzgarın etki ettiği cephedeki kule elemanlarına etki etmektedir. Kule elemanlarının üzerindeki kar yükü ihmal edilirken iletkenlere gelen rüzgar yükü buzlu yüzeye gelen rüzgar yükü olarak hesaplanmaktadır.

Bölüm 4 de anlatıldığı gibi öncelikle buzlu iletken çapı, d_b , hesap edilir. Buz yükü, q , Tablo 4.1.'de verildiği gibi kar bölgelerine göre değişmektedir. Kulenin 3.derece buz bölgesinde olduğu için buz yükü ve buzlu iletken çapı aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmıştır.

3. derece buz bölgesi için buz yükü $q = 0.3\sqrt{d}$ ve çıplak tel çapı $d=30$ mm aşağıdaki denklemde yerine yazılarak buzlu iletken çapı hesap edilmiştir.

$$q = 0,3\sqrt{d} = 1,64 \text{ kg/m}^2 \quad (6.2)$$

$$d_b = (d + 2122 \cdot q)^{1/2} \quad d_b \cong 60 \text{ mm} \quad (6.3)$$

Hesap edilen buzlu iletken çapı kablolar için verilen aşağıdaki rüzgar kuvveti denkleminde d yerine koyulmuştur. Yönetmelik buzlu rüzgar yükünü Tüm bölgeler için $c=1$ ve $p=20$ kg/m² olarak belirlemiştir. İki kule arası rüzgar açıklığı, $a_w = 400$ m'dir.

$$W = c \cdot p \cdot d \cdot (80 + 0,6 \cdot a_w) \text{ (kg)} \quad (6.4)$$

$$W = 384 \text{ kg} = 3,84 \text{ kN}$$

6.3.3. EKAT yönetmeliğine göre buz yükü hesabı

Yönetmeliğe göre buz yükünün sadece iletkenlerde dikkate alınacağı, taşıyıcı kule elemanlarında buzlanmanın dikkate alınmayacağı öngörülmüştür. Taşıyıcı kule 3. derece buz bölgesindedir ve buz yükü 1,64 kg/m'dir. İletken üzerine yayılı olarak etki eden bu yük iletken açıklığı ile çarpılarak toplamı bulunmuş ve tekil yük olarak travers uçlarına etki ettirilmiştir.

$$G_{buz} = 3.1,64.400 = 1968 \text{ kg} \quad (6.5)$$

$$G_{iletk.} = 3.2,5.400 = 3000 \text{ kg} \quad (6.6)$$

$$G_{buz} + G_{iletk.} = 4968 \text{ kg} = 49,68 \text{ kN}$$

Kulede her bir iletim hattı 3 adet iletkenle oluşan bir iletim demetiyle sağlandığı için bulunan ağırlığın 3 katı alınmıştır. Bunun yanında iletkenlerin kendi ağırlıkları da hesap edilerek aynı şekilde düşey yük olarak verilmiştir.

6.3.4. ASCE 74 yük şartnamesine göre rüzgar yükü hesabı

Bölüm 4.2 de verilen denklem 4.6.a kullanılarak rüzgar yükü aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmıştır.

$$F = Q \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot (V_{100})^2 G \cdot C_f \cdot A \text{ (N)} \quad (6.7)$$

Burada hava yoğunluk katsayısı, Q , hızın m/s birimi için 0,613'dür. Topoğrafya faktörü (K_{zt}) ve fırtına faktörü (G) 1 kabul edilmiştir. Kuvvet katsayısı (C_f) rüzgarın etki ettiği cephenin doluluk oranına göre değişmektedir. Kare tabanlı kuleler için C_f Tablo 4.8.'de verilen aşağıdaki denklem ile hesaplanır. İletkenler için C_f değeri 1 kabul edilmektedir.

$$\text{Dikdörtgen kuleler: } C_f = 4\varepsilon^2 - 5,9\varepsilon + 4 \quad (6.8)$$

Kule doluluk oranı ε : 0.2 denklemde yerine koyulduğunda C_f değeri 2,98 olarak hesaplanmıştır.

Rüzgar hızı (V_{100}) ve rüzgar basıncı maruz kalma faktörü (K_z) kulenin bulunduğu arazi özelliklerine değişkenlik göstermektedir. Bu tez kapsamında modellenen kulenin açık arazi de bulunduğu kabul edilmiştir bu nedenle Bölüm 4.2 de anlatılan etki sınıflarından C sınıfına göre hesap yapılmıştır.

Rüzgar basıncı maruz kalma faktörü (K_z), Bölüm 4 de Tablo 4.6.'da verildiği gibi yüksekliğe ve etki sınıfına göre değişkenlik göstermektedir.

Rüzgar hızı (V_{100}), bölgelere değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle ASCE tarafından hazırlanan haritalardan yararlanılmaktadır (Bölüm 4). Ancak bu çalışmada

aynı hava şartları altındaki kulenin davranışı incelendiği için EKAT'ın kabul ettiği hız, yani 30 m/s lik rüzgar hızı kabul edilmiştir.

Yukarıda anlatılan tüm değerler denklem 4.6.a'da yerine koyularak kule elemanlarına bağlı rüzgar kuvveti A'ya bağlı olarak bulunmuştur. (Tablo 6.4.).

Tablo 6.4. ASCE 74 Rüzgar yükü

Etkili yükseklik z_h (m)	Rüzgar basıncı maruz kalma katsayısı (K_z)	Rüzgar Kuvveti $W(kN)$
0-9,9	1	1,644. A
12	1,04	1,71.A
15	1,09	1,79.A
18	1,14	1,87.A
21	1,17	1,92.A
24	1,21	1,99.A
27	1,24	2,03.A
30	1,27	2,08.A
36	1,32	2,17.A
42	1,36	2,23.A
48	1,40	2,30.A
54	1,43	2,35.A
60	1,46	2,40.A

A: Rüzgarın etki ettiği yüzey alan (m^2)

6.3.5. ASCE 74 yük şartnamesine göre buz yükü hesabı

İletkenlerde biriken buz kalınlığı iletkenin bulunduğu yükseklikteki rüzgar hızına ve kulenin bulunduğu bölgede yerden 10 m yükseklikteki nominal buz kalınlığına bağlıdır. ASCE tarafından bölgelere ait buz kalınlığı için haritalar hazırlanmıştır (Şekil 4.14.).

Nominal buz kalınlığına bağlı olarak iletkenin bulunduğu yükseklikteki tasarım buz kalınlığı denklem 4.16 kullanılarak hesaplanmıştır. Ancak rüzgar hesabında olduğu gibi aynı hava koşullarını sağlamak adına EKAT'a göre iletken üzerinde biriken buz kalınlığı (30) kullanılmıştır.

Tasarım buz kalınlığını (t_z), 15 mm olarak denklem 4.15 ile iletken üzerindeki buz ağırlığı hesaplanmıştır.

$$W_i = Q_i \cdot (d + t_z) \cdot t_z \quad (6.9)$$

$$W_i = 0,0282 \cdot (30 + 15) \cdot 15 = 19 \text{ N/m} \quad (6.10)$$

19 N/m çıkan buz ağırlığı iletken sayısı ve rüzgar açıklığı ile çarpılarak 22,8 kN elde edilmiştir ve üzerine 30 kN iletken ağırlığı eklenerek 52,8 kN buzlu iletken ağırlığı hesaplanmıştır.

Buz birikmiş iletken üzerine gelen rüzgar yükü hesabı için denklem 4.6.a da rüzgarın etki ettiği alan (A) hesabı yapılırken buzlu iletken çapı (60 mm) kullanılmıştır. İletkenlere gelen rüzgar yükü Tablo 6.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.5. Buzlu İletkenlere gelen rüzgar yükü

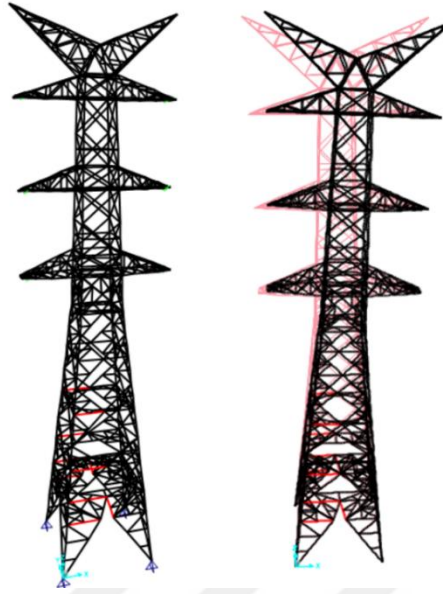
Etkili yükseklik zh (m)	Rüzgar basıncı maruz kalma katsayısı (Kz)	Rüzgar Kuvveti W (kN)
33,45	1,30	17,2
42,15	1,36	18,0
50,85	1,40	18,5
58,8 (Top.İletk.)	1,44	9,5

6.4. Sonlu Eleman Çalışması

Bu bölümde kuleye etkiyen rüzgar ve buz yükü hesabında ülkemiz için Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) yönetmeliği Amerika için ASCE 74 yönetmeliği kullanılarak tasarım şartları ülkemiz için Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Amerika için ASCE 10-97 yönetmeliği dikkate alınarak analizler yapıp karşılaştırılmıştır.

6.4.1. Türkiye Çelik Yapılar Hesap ve Tasarımına Göre Analiz

Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğine göre buz ve rüzgar yükü etkisi altında olan kulenin Türkiye Çelik Yapılar Hesap ve Tasarım şartlarına göre eleman davranışları incelenmiştir. Rüzgarın iletim hattına dik (x) yönde olduğu durumda dayanım kapasitesini aşan elemanlar Şekil 6.6.'da kırmızı renkte gösterilmiştir.



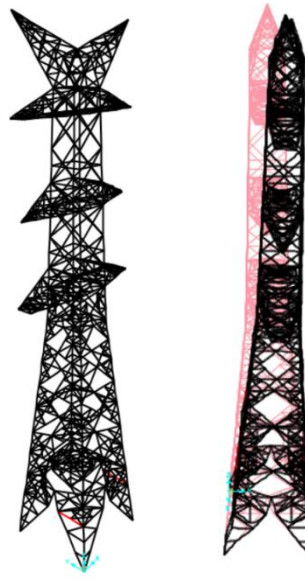
Şekil 6.6. İletim hattına dik yöndeki rüzgar etkisi altında dayanımı aşan elemanlar

Bu elemanlara gelen yükler ve elemanların taşıma kapasiteleri Tablo 6.6.'de verilmiştir. Rüzgarın iletim hattına paralel (y) yönde olduğu durumda dayanım kapasitesini aşan elemanlar Şekil 6.7.'de kırmızı renkte gösterilmiştir. Bu elemanlara gelen yükler ve elemanların taşıma kapasiteleri Tablo 6.7.'de verilmiştir.

Kuleler birbirlerine hat boyunca iletken kablo ile bağlı oldukları için iletim hattına paralel yöndeki davranış daha rijit olmaktadır. Bu nedenle kulenin iletim hattına dik yöndeki tepe yer değişimi 250 mm iken paralel yöndeki tepe yer değişimi 8 mm olmuştur.

Tablo 6.6. İletim hattına dik yönde rüzgar etkisi altında kule elemanlarının P/Pc oranları

h(m)	Eleman Kesiti	Yük (P) kN	Kapasite (Pc) kN	Oran (P/Pc)
8,9 m	L50X6	108,195	17,727	6,1
6,3 m	L60X5	45,512	8,272	5,5
12,5 m	L70X5	46,338	12,454	3,7



Şekil 6.7. İletim hattına dik yöndeki rüzgar etkisi altında dayanımı aşan elemanlar

Tablo 6.7. İletim hattına paralel yönde rüzgar etkisi altında kule elemanlarının P/Pc oranları

h(m)	Eleman Kesiti	Yük (P) kN	Kapasite (Pc) kN	Oran (P/Pc)
8,9 m	L50X6	16,85	17,727	0,94
6,3 m	L60X5	9,47	8,27	1,14
12,5 m	L70X5	9,60	12,45	0,77

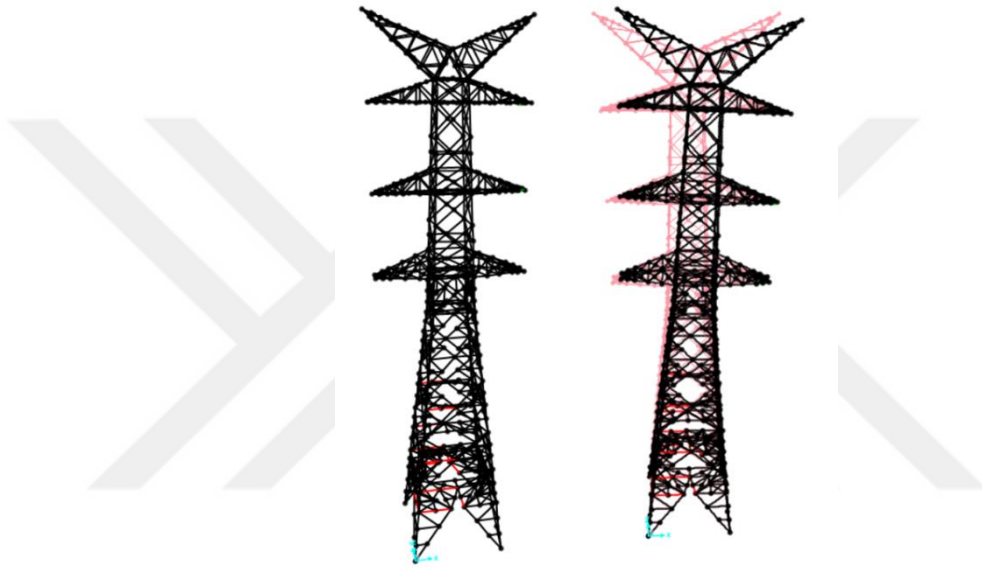
Elektrik kuvvetli akım tesisleri yönetmeliğinde rüzgar hızı 30 m/s kabul edilerek rüzgar yükü hesabı yapılmaktadır. Ancak bu hız değeri şiddetli fırtına sınıfına girmektedir ve buda nadir karşılaşılan bir durumdur bu nedenle kapasite dayanımını aşan ilk elemanın hangi hız değerinde olduğunu tespit etmek için rüzgar yükü azaltılmıştır ve 12 m /s'lik rüzgar hızı altında kulenin 8.9 m yüksekliğinde bulunan L50x6 kesitli yatay taşıyıcı elemanının dayanımı aşan ilk eleman olmuştur. İletim hattına dik yönde esen 12 m/s hız için elemanların yük/kapasite oranları Tablo 6.8.'de verilmiştir.

Tablo 6.8. İletim hattına dik yönde esen 12 m/s hız için elemanların P/Pc oranları

h (m)	Eleman Kesiti	Yük (P) kN	Kapasite (Pc) kN	Oran (P/Pc)
8,9 m	L50X6	18,03	17,727	1,017
6,3 m	L60X5	7,607	8,272	0,920
12,5m	L70X5	7,731	12,454	0,621

6.4.2. ASCE 10 97 çelik kafes iletim yapılarının tasarımına göre analiz

ASCE 74: Elektrik İletim Hatları Yapısal Yükleme Kılavuzu göre buz ve rüzgar yükü etkisi altında olan kulenin ASCE 10 97: Çelik Kafes İletim Yapılarının Tasarımı şartlarına göre eleman davranışları incelenmiştir. Rüzgarın iletim hattına dik (x) yönde olduğu durumda dayanım kapasitesini aşan elemanlar Şekil 6.8.'de kırmızı renkte gösterilmiştir.



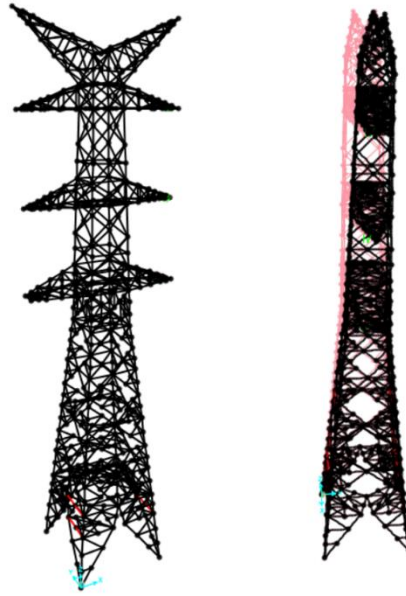
Şekil 6.8. İletim hattına dik yöndeki rüzgar etkisi altında dayanımı aşan elemanlar

Bu elemanlara gelen yükler ve elemanların taşıma kapasiteleri Tablo 6.9.'da verilmiştir. Rüzgarın iletim hattına paralel (y) yönde olduğu durumda dayanım kapasitesini aşan elemanlar Şekil 6.9.'da kırmızı renkte gösterilmiştir. Bu elemanlara gelen yükler ve elemanların taşıma kapasiteleri Tablo 6.10.'da verilmiştir.

Tablo 6.9. İletim hattına dik yönde rüzgar etkisi altında kule elemanlarının P/Pc oranları

h(m)	Eleman Kesiti	Yük (P) kN	Kapasite (Pc) kN	Oran (P/Pc)
8,9 m	L50X6	114,48	22,46	5,10
6,3 m	L60X5	48,76	10,48	4,65
12,5 m	L70X5	49,90	15,78	3,16

Kulenin iletim hattına dik yöndeki tepe yer değişimi 24 mm iken paralel yöndeki tepe yer değişimi 7 mm olmuştur.



Şekil 6.9. İletim hattına dik yöndeki rüzgar etkisi altında dayanımı aşan elemanlar

Tablo 6.10. İletim hattına dik yönde rüzgar etkisi altında kule elemanlarının P/Pc oranları

h (m)	Eleman Kesiti	Yük (P) kN	Kapasite (Pc) kN	Oran (P/Pc)
8,9 m	L50X6	17,0	22,46	0,77
6,3 m	L60X5	10,01	10,48	0,95
12,5 m	L70X5	9,67	15,779	0,612

Kapasite dayanımını aşan ilk elemanın hangi hız değerinde olduğunu tespit etmek için rüzgar yükü azaltılmıştır ve 13,5 m /s'lik rüzgar hızı altında kulenin 8.9 m yüksekliğinde bulunan L50x6 kesitli yatay taşıyıcı eleman dayanımı aşan ilk eleman olmuştur. İletim hattına dik yönde esen 13,5 m/s hız için elemanların yük/kapasite oranları Tablo 6.11.'de verilmiştir.

Tablo 6.11. İletim hattına dik yönde esen 13,5 m/s hız için elemanların P/Pc oranları

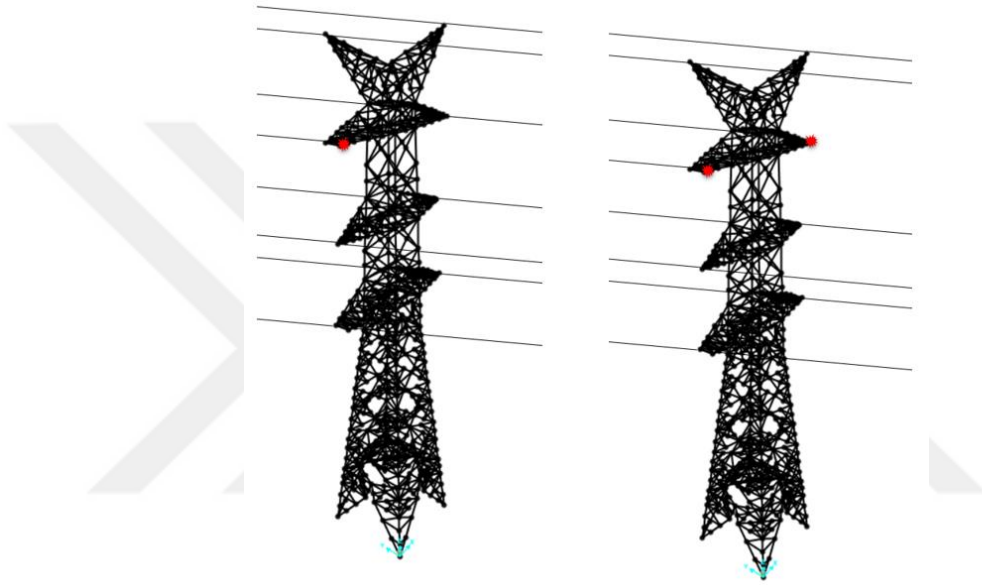
h (m)	Eleman Kesiti	Yük (P) kN	Kapasite (Pc) kN	Oran (P/Pc)
8,9 m	L50X6	23,66	22,46	1,053
6,3 m	L60X5	10,048	10,48	0,96
12,5 m	L70X5	10,288	15,78	0,65

6.4.3. Rüzgar etkisi altında buzlu iletken kopması

Bu bölümde Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğine göre buz ve rüzgar yükü etkisi altındaki kulede buz birikmesi sebebi ile iletken kopmasının, kule elemanlarında

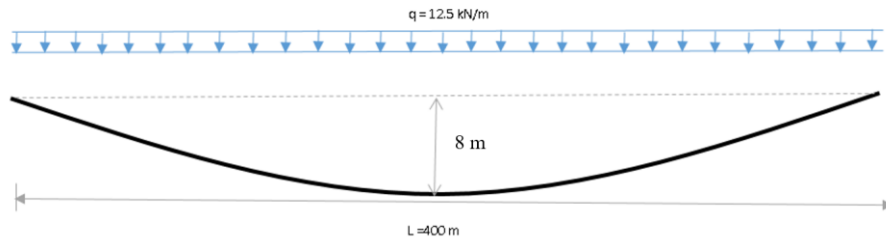
oluşturduğu yük dağılımının Türkiye Çelik Yapılar Hesap ve Tasarım şartlarına göre elemanların dayanım kapasitelerini aşma durumları incelenmiştir. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik ve paralel etkisi ayrı ayrı dikkate alınmıştır.

Hava şartlarından dolayı iletkenlerde oluşan buzlanma sebebiyle iletken kopması meydana gelmektedir. Olumsuz durumlar düşünülerek oluşturulan iki farklı iletken kopma senaryosu Şekil 6.10.'da gösterilmiştir.



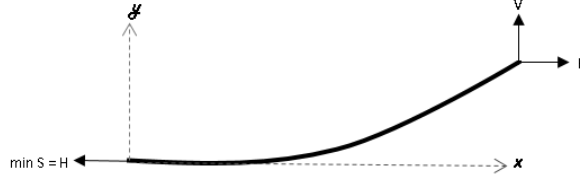
Şekil 6.10. İletken kopma durumları

İletkenlerin kuleye bağlandıkları noktada iletken ve buz ağırlığından dolayı yatay ve düşey kuvvetler oluşmaktadır. İletken kopması halinde bu yükler o noktadan kalkmaktadır ve yük dengesi bozulmaktadır.



Şekil 6.11. İletken geometrik özellikleri

Şekil 6.11.'de EKAT'a göre hesap edilen buz ve iletken ağırlığından oluşan yayılı yük ve iletkene ait geometrik ölçüler verilmiştir.



Şekil 6.12. İletken kablo kuvvetleri

$$y = \frac{q}{2H} x^2 \quad (6.11)$$

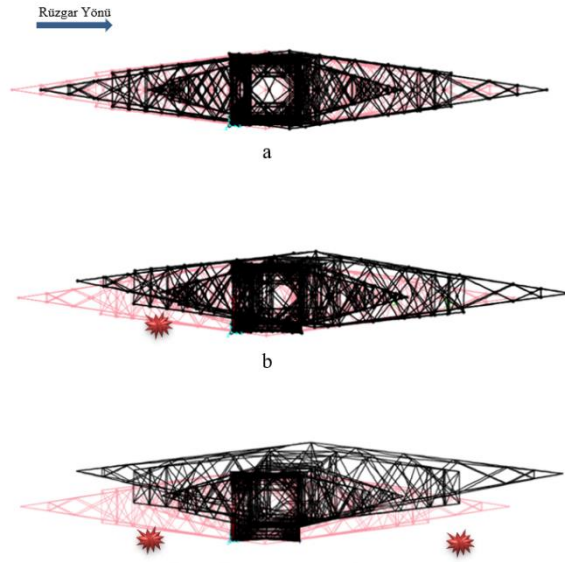
$$V = \frac{qL}{2} \quad (6.12)$$

İletkende meydana gelen çekme kuvveti (S), kuleye bağlandığı noktada yatay (H) ve düşey (V) oluşturmaktadır (Şekil 6.12.). Denklem 6.4 yayılı yük (q) 0,125 kN/m, sehim mesafesi (y) 8, iletken uzunluğu (x) 200 m yerine yazılarak yatay kuvvet değeri (H) 310 kN, denklem 6.5'de q ve L değerleri yerine yazıldığında düşey kuvvet (V) 25 kN olarak bulunmuştur.

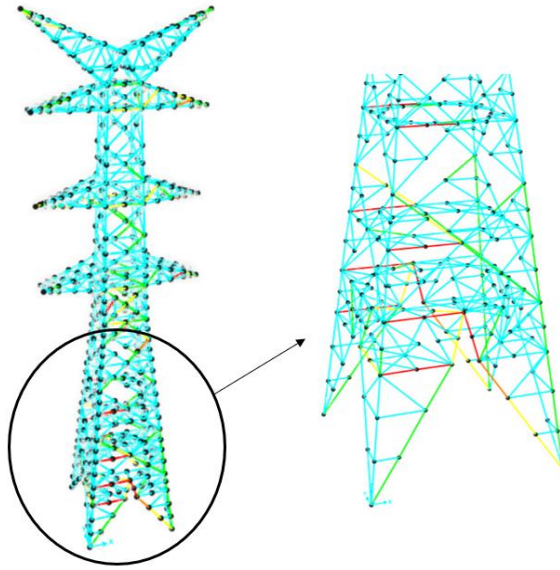
6.4.3.1. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik etkisi altında buzlu iletken kopması

Rüzgarın iletim hattına dik etkisi altında Şekil 6.10.'da gösterilen iki tipte iletken kopması durumunda kule elemanlarında meydana gelen yük değişimleri incelenmiştir.

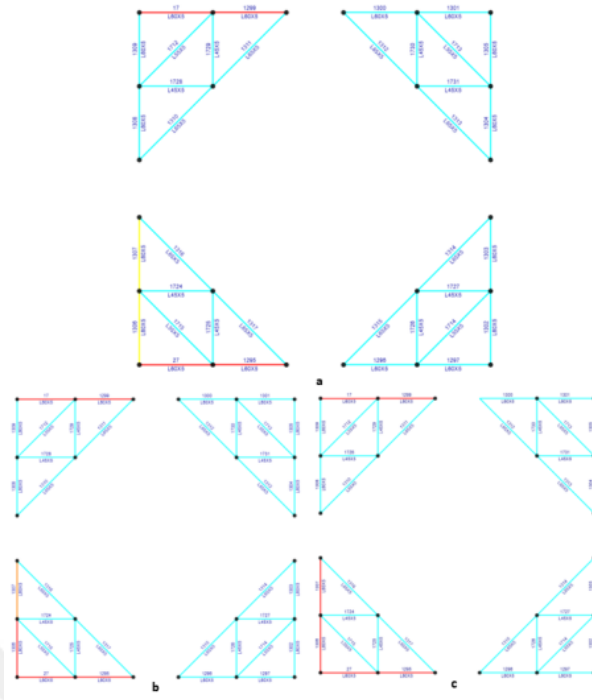
Şekil 6.13.'de yer değiştirme biçimleri gösterilmiştir. İletken kopma durumu yokken rüzgar yönünde 19,18 cm (Şekil 6.18.a.), tek taraflı iletken kopması durumunda rüzgar yönünde 22,2 cm olurken iletkenin koptuğu yönde 20,3 cm yer değiştirme olmuştur (Şekil 6.13.b.). Çift taraftan iletken kopması durumunda rüzgar yönünde 19,24 cm, iletkenin koptuğu yönde 32,36 cm yer değiştirme olmuştur (Şekil 6.13.c.).



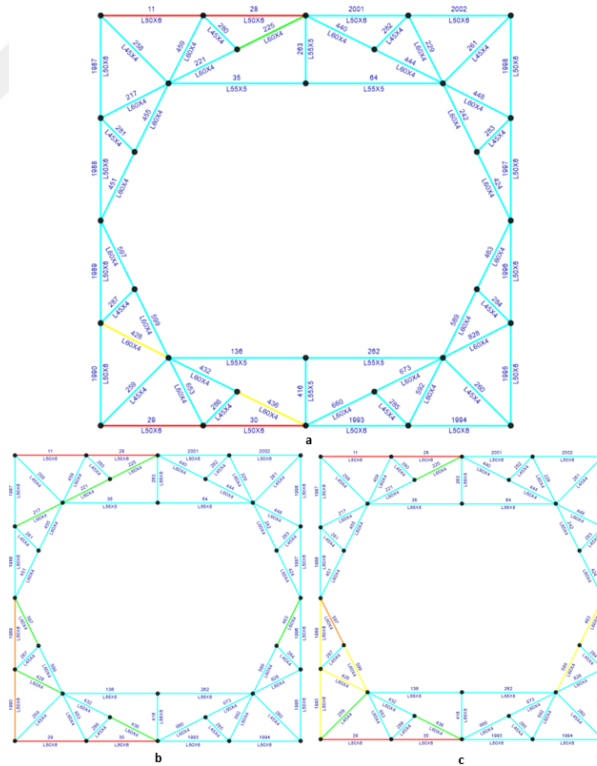
Şekil 6.13. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik etkisi altında buzlu iletken kopması durumunda yer değiştirmeler



Şekil 6.14. Buzlu iletkenli ve iletim hattına dik rüzgâr etkisindeki kule analizi



Şekil 6.15. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik etkisi altında L50x6 kesitli elemanlar



Şekil 6.16. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına dik etkisi altında L60x5 kesitli elemanlar

Yapılan analizler sonuçta kulede dayanım kapasitesini aşan elemanlar 6,3 m ve 8,9 m (Şekil 6.15. ve Şekil 6.16.) kotunda bulunan elemanlar ile Şekil 6.17.'de gösterilen ana çapraz elemanlar olmuştur.

Şekil 6.15 ve Şekil 6.16.'da verilen kule elemanları iletkenlerin sürekli olması (kopma yok) durumunda "a", tek taraflı iletken kopması olması durumunda "b", çift taraflı iletken kopması olması durumunda "c" harfleri ile gösterilmiştir.

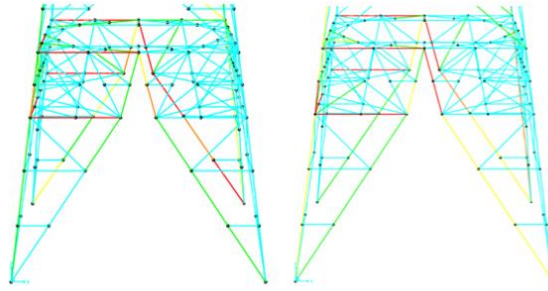
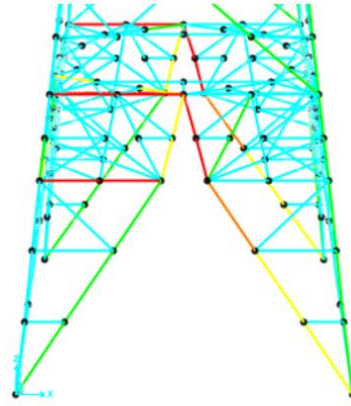
İletkenlerin sürekli olduğu ilk durum için etki eden yüke P_0 , tek taraflı iletken kopması halinde etki eden yüke P_1 , çift taraftan iletken kopması halinde etki eden yüke P_2 denilerek elemanlara gelen yükler ve kapasiteleri Tablo 6.12. ve Tablo 6.13. ile verilmiştir.

Tablo 6.12. +6.3 m yüksekliğindeki elemanların yük durumları

Eleman No	Eleman Kesiti	Yük (P_0) kN	Yük (P_1) kN	Yük (P_2) kN	Kapasite (Pc) kN
17	L60X5	-45,48	-45,44	-45,34	10,48
27	L60X5	-52,34	-52,12	-55,80	10,48
1295	L60X5	-52,26	-52,04	-55,71	10,48
1299	L60X5	-45,52	-45,47	-45,38	10,48
1306	L60X5	-5,26	-9,05	-11,26	10,48
1307	L60X5	-5,18	-8,97	-11,18	10,48

Tablo 6.13. +8.9 m yüksekliğindeki elemanların yük durumları

Eleman No	Eleman Kesiti	Yük (P_0) kN	Yük (P_1) kN	Yük (P_2) kN	Kapasite (Pc) kN
428	L60X4	-1,22	-0,97	-1,48	4,18
432	L60X4	-1,66	-1,08	-1,36	4,18
436	L60X4	-1,75	-1,16	-1,46	4,18
463	L60X4	-0,48	-0,97	-1,59	4,18
589	L60X4	-0,50	-1,00	-1,60	4,18
597	L60X4	-0,70	-1,00	-1,13	4,18
599	L60X4	-1,10	-0,97	-1,10	4,18
653	L60X4	1,36	1,08	1,54	4,18
1989	L50X6	-3,07	-21,99	-7,47	17,73
1990	L50X6	-3,67	-22,70	-8,22	17,73
11	L50X6	-108	-121,79	-106,93	17,73
28	L50X6	-107,44	-121,40	-106,62	17,73
29	L50X6	-105,55	-87,00	-101,52	17,73
30	L50X6	-105,21	-86,70	-101,19	17,73



Şekil 6.17. Ana çapraz elemanlar

Tablo 6.14. Ana çapraz elemanlarda yük durumları

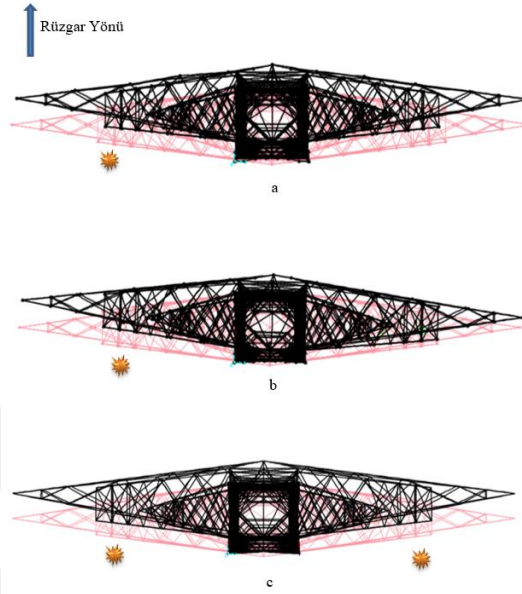
Eleman No	Eleman Kesiti	Yük (P_0) kN	Yük (P_1) kN	Yük (P_2) kN	Kapasite (P_c) kN
96	2L90X6/10	-252,55	-187,00	-239,53	320,48
161	2L90X6/10	-253,08	-187,50	-239,80	320,48
165	2L90X6/10	-253,64	-187,80	-240,00	320,48
378	2L90X6/10	-259,65	-309,14	-253,40	320,48
380	2L90X6/10	-259,10	-309,60	-253,80	320,48
384	2L90X6/10	-258,57	-308,06	-254,00	320,48
1786	2L75X5/10	-267,26	-197,90	-253,90	251,36
1787	2L75X5/10	-267,15	-198,10	-253,88	251,36
1790	2L75X5/10	-273,63	-326,43	-267,60	251,36
1791	2L75X5/10	-273,51	-326,57	-267,50	251,36

6.4.3.2. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına paralel etkisi altında buzlu iletken kopması

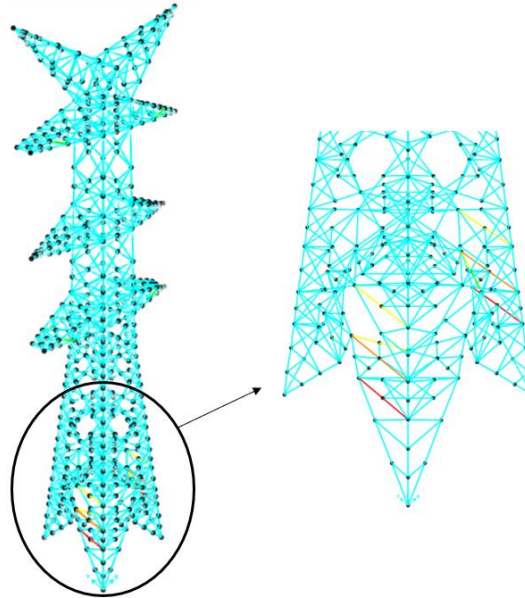
Rüzgarın iletim hattına paralel etkisi altında Şekil 6.10. da gösterilen iki tipte iletken kopması durumunda kule elemanlarında meydana gelen yük değişimleri incelenmiştir.

Şekil 6.18.'de yer değiştirme biçimleri gösterilmiştir. Burada rüzgar yönü iletken kopmasından oluşan yer değişmeyi desteklemektedir. İletken kopma durumu yokken

rüzgar yönünde 0,86 cm (Şekil 6.18.a.), tek taraflı iletken kopması durumunda rüzgar yönünde 22,57 cm olurken diğer yönde 0,37 cm yer değiştirme olmuştur (Şekil 6.18.b.). Çift taraftan iletken kopması durumunda rüzgar yönünde 35,8 cm, diğer yönde 0.86 cm yer değiştirme olmuştur (Şekil 6.18.c.).



Şekil 6.18. Rüzgar kuvvetinin iletim hattına paralel etkisi altında buzlu iletken kopması durumunda yer değiştirmeler



Şekil 6.19. Buzlu iletkenli ve iletim hattına paralel rüzgâr etkisindeki kule analizi

Yapılan analizler sonuçta kulede dayanım kapasitesini aşan elemanlar bir önceki bölümde olduğu gibi 6,3 m ve 8,9 m (Şekil 6.20. ve Şekil 6.21.) kotunda bulunan elemanlarda olmuştur.

Şekil 6.20. ve Şekil 6.21.'de 'da verilen kule elemanları iletkenlerin sürekli olması (kopma yok) durumunda "a", tek taraflı iletken kopması olması durumunda "b", çift taraflı iletken kopması olması durumunda "c" harfleri ile gösterilmiştir.

İletkenlerin sürekli olduğu ilk durum için etki eden yüke P_0 , tek taraflı iletken kopması halinde etki eden yüke P_1 , çift taraftan iletken kopması halinde etki eden yüke P_2 denilerek elemanlara gelen yükler ve basınç kapasiteleri (P_c) Tablo 6.15. ve Tablo 6.16. ile verilmiştir.

Tablo 6.15. +6.3 m yüksekliğindeki elemanların yük durumları

Eleman No	Eleman Kesiti	Yük (P_0) kN	Yük (P_1) kN	Yük (P_2) kN	Kapasite (P_c) kN
1302	L60X5	-9,45	-9,62	-9,95	10,48
1303	L60X5	-9,26	-9,42	-9,75	10,48
1306	L60X5	-9,11	-13,70	-16,74	10,48
1307	L60X5	-9,04	-13,62	-16,66	10,48

Tablo 6.16. +8.9 m yüksekliğindeki elemanların yük durumları

Eleman No	Eleman Kesiti	Yük (P_0) kN	Yük (P_1) kN	Yük (P_2) kN	Kapasite (P_c) kN
259	L45X4	-2,84	-4,22	-5,48	9,64
260	L45X4	-2,63	-4,12	-5,40	9,64
136	L55X5	-2,67	-4,38	-5,90	11,12
262	L55X5	-2,57	-4,21	-5,90	11,12
463	L60X4	-2,54	-3,47	-4,18	4,184
589	L60X4	-2,54	-3,48	-4,18	4,184
592	L60X4	-0,36	0,11	-0,20	4,184
597	L60X4	-2,72	-3,92	-4,22	4,184
599	L60X4	-2,69	-3,88	-4,19	4,184
653	L60X4	-0,40	-0,66	-0,12	4,184
1989	L50X6	-16,60	-37,76	-22,87	17,27
1990	L50X6	-16,78	-38,16	-23,32	17,27
1993	L50X6	0,98	-17,90	1,94	17,27
1994	L50X6	0,57	-18,44	1,43	17,27
1995	L50X6	-16,66	-1,93	-21,99	17,27
1996	L50X6	-16,58	-1,85	-21,71	17,27

6.4.4. Rüzgarsız durumda buzlu iletken kopması

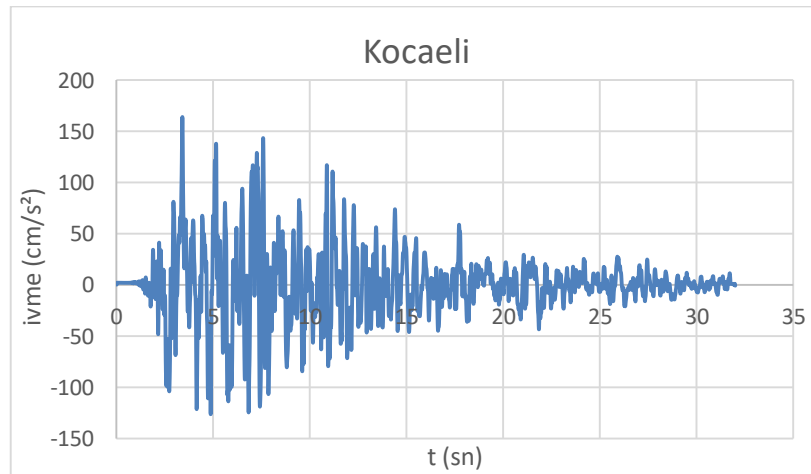
Bölüm 6.4.3 de anlatılan iletken kopma durumları dikkate alınarak rüzgar etkisinin olmadığı sadece buzlanma nedeniyle iletken kopmasının elemanlarda meydana getirdiği yükler Tablo 6.17.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.17. Rüzgarsız durumda iletken kopmasının oluşturduğu yükler

Eleman Kesiti	Eleman Doğrultusu	Yük (P_0) kN	Yük (P_1) kN	Yük (P_2) kN
L50x6	X yönünde	-0,6	9,18	0,86
L50x6	Y yönünde	-0,57	-12,21	-9,78
L60x5	X yönünde	0,31	-0,07	-4,11
L60x5	Y yönünde	0,23	-1,98	-2,25
2L90x6	X yönünde	-0,87	31,66	0,33
2L90x6	Y yönünde	-0,39	34,44	1,03
2L75x5	X yönünde	-0,79	-13,47	39,05
2L75x5	Y yönünde	-0,43	-13,53	42,02

6.4.5. Deprem etkisi altında kule davranışı

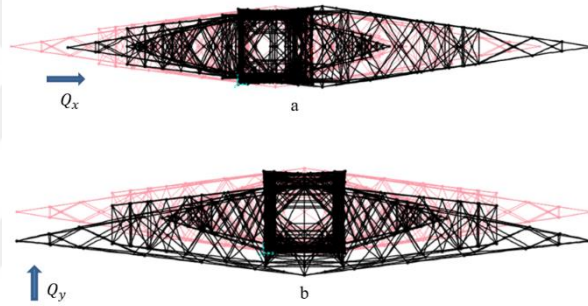
Bu bölümde elektrik kulesinin deprem etkisi altında davranışını incelemek amacıyla kuleye 1999 Marmara depreminin Kocaeli istasyonuna ait Şekil 6.22.'de gösterilen deprem titreşimi etki ettirilmiştir.



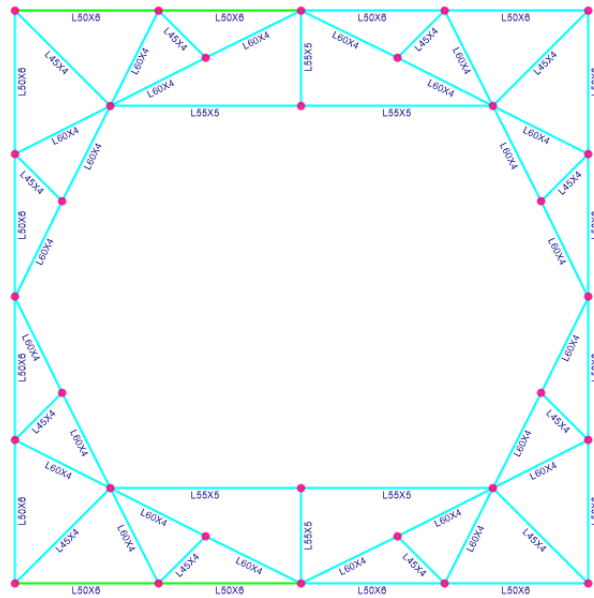
Şekil 6.22. 1999 Marmara depremi Kocaeli istasyonuna ait ivme kaydı

Tarihsel süreçte enerji iletim kuleleri deprem altında iyi bir performans sergilemişlerdir bu nedenle deprem yükleri elektrik kulesi tasarımında tasarımı yöneten yük durumu olmamıştır(ASCE 74, 2016).

Deprem titreşimi kuleye x ve y yönünde verilerek kule tepe noktası deplasmanına ve elemanlarda oluşan yüklenme durumları incelenmiştir. Deprem x yönünde verilmesi kule tepe noktasında deprem yönünde 6.63 cm, depremin y yönünde verilmesi deprem yönünde 4 cm yer değiştirmesi oluşturmuştur (Şekil 6.23.). Yapılan analiz sonucunda kule elemanlarında kapasite aşımı gözlenmemiştir. Kapasite yüküne en çok yaklaşan elemanlar Şekil 6.24.'de gösterilen 8.9 m kotundaki L50x6 kesitli elemanlardır. Tablo 6.18.'de bu elemanlara gelen yükler gösterilmiştir.



Şekil 6.23. Deprem etkisi altında yer değiştirmeler



Şekil 6.24. L60x5 kesitli elemanlar

Tablo 6.18. Deprem yükü altında 6.3 m kotundaki elemanlarda oluşan yükle

X yönündeki elemanlar			Y yönündeki elemanlar			Kapasite
Eleman No	Eleman Kesiti	P_{Qx}	Eleman No	Eleman Kesiti	P_{Qy}	
1993	L50X6	-8,314	1987	L50X6	-7,547	17,73
1994	L50X6	-8,243	1988	L50X6	-7,928	17,73
2001	L50X6	-7,977	1989	L50X6	-6,704	17,73
2002	L50X6	-7,878	1990	L50X6	-6,505	17,73
11	L50X6	-10,445	1995	L50X6	-6,552	17,73
28	L50X6	-10,586	1996	L50X6	-6,827	17,73
29	L50X6	-10,345	1997	L50X6	-8,335	17,73
30	L50X6	-10,507	1998	L50X6	-8,079	17,73

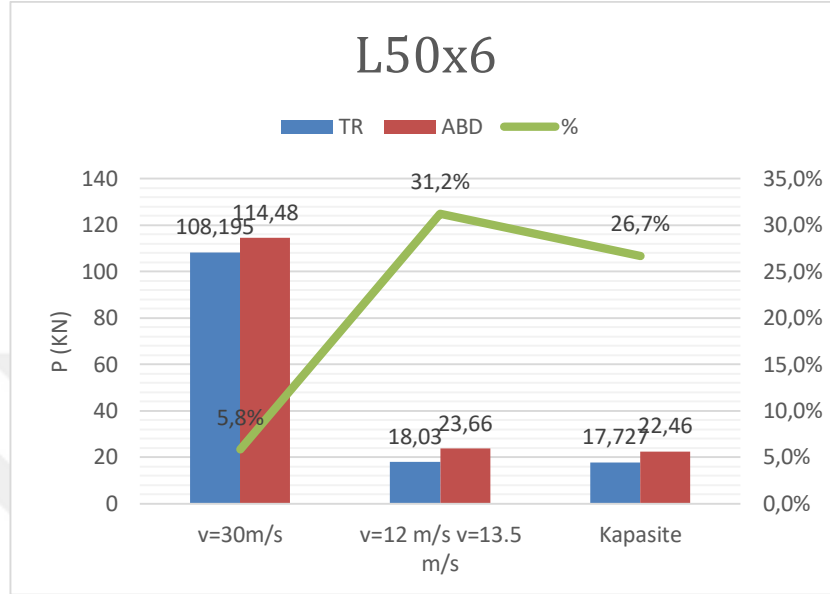
6.5. Analizlerin Yorum ve Karşılaştırılması

Bu bölümde, bölüm 6.4 de yapılan analizler sonucunda elemanlarda oluşan eksenel kuvvetlerin yorum ve karşılaştırılması yapılmıştır.

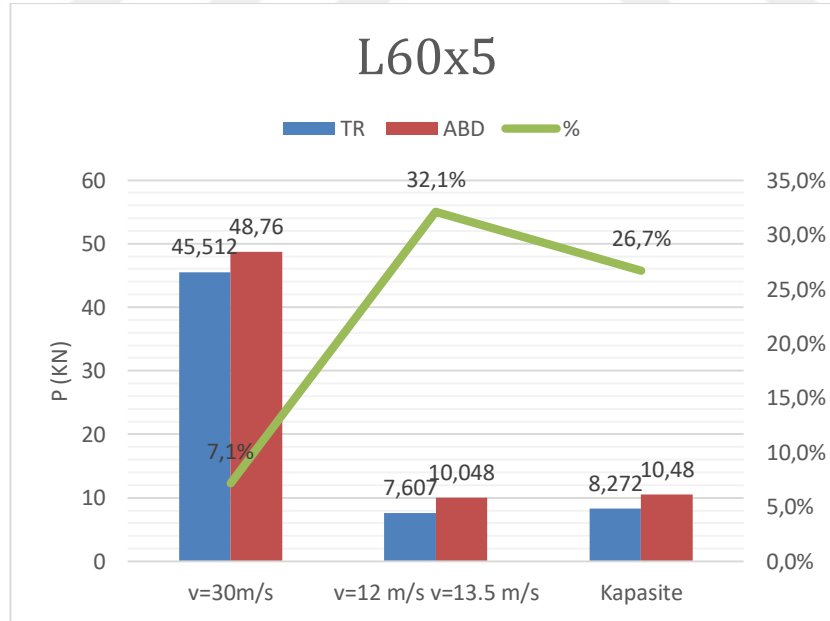
İlk olarak ülkemiz ve Amerika için yük ve tasarım şartlarına uygun olarak yapılan analizlerde bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 6.25. ve Şekil 6.29. arasında rüzgarın iletim hattında dik ve buzlu iletken yükünün olduğu durumda taşıma kapasitelerini aşan L50x6, L60x5 ve L70x5 kesitli elemanların iki ülke için elamana gelen yük ve taşıma kapasitelerini karşılaştırmalı olarak grafiklerle verilmiştir.

Ülkemizde yönetmelik gereği kabul edilen rüzgar hızı 30 m/s için elemanlara gelen yükler arasında ortalama %6 civarında fark çıkmıştır. Her eleman için yükler arasındaki oranın değişme sebebi elemanların bulundukları yüksekliğe bağlı rüzgar basıncı katsayısının iki yönetmeliğe göre farklı olmasıdır. Türk yönetmeliğine göre rüzgar hızının 12 m/s, Amerikan yönetmeliğine göre rüzgar hızının 13.5 m/s'ye ulaşmasına kadar elemanlar güvenle taşınmaktadır. Bu hız değerlerine göre elemanlarda oluşan yükler arasında ortalama %32 fark çıkmıştır. Amerikan yük yönetmeliği elemanlara daha fazla yük etki ettirerek daha güvenli tarafta kalırken Türk yönetmeliği %26,7 oranında daha düşük taşıma kapasitesine sahip olarak daha güvenli tarafta kalmıştır.

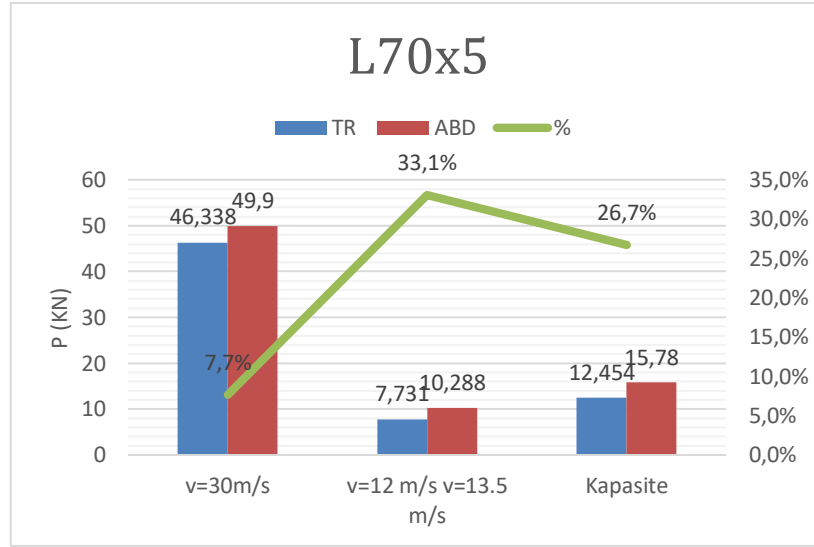
Sonuç olarak Şekil 6.29.'de gösterilen yük/kapasite oranlarına bakılarak elemanların Türk yönetmeliklerine göre dayanma kapasitesi Amerikan yönetmeliklerine göre dayanma kapasitesinin %20 daha fazla olduğu görülmüştür.



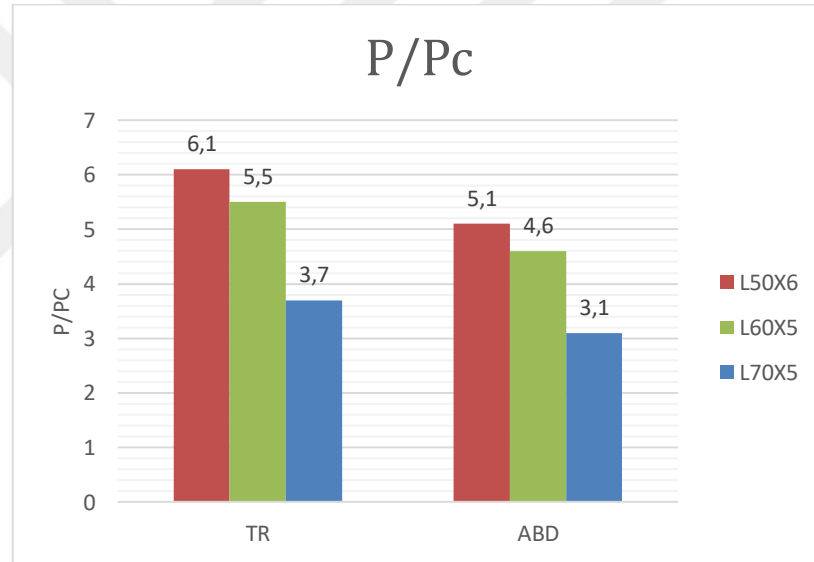
Şekil 6.25. L50X6 elemanına ait yük karşılaştırması



Şekil 6.26. L60x5 elemanına ait yük karşılaştırması



Şekil 6.27. L70x5 elemanına ait yük karşılaştırması



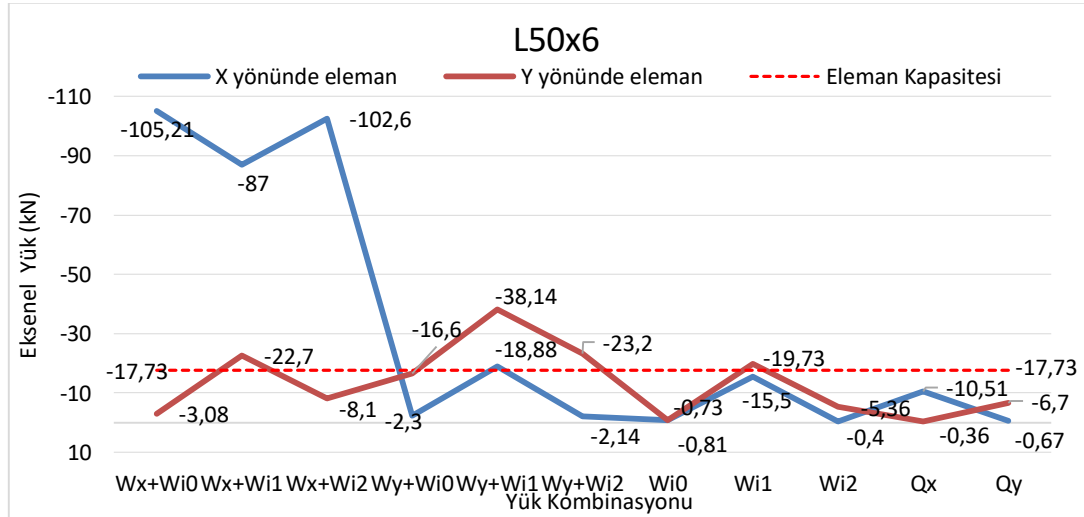
Şekil 6.28. P/Pc oranları

Daha sonra Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri yönetmeliği ve Çelik Yapıların Tasarım Hesap Yapım esasları baz alınarak analizlere devam edilmiştir. Farklı yük durumlarına göre yapılan analizler sonucunda tasarım dayanımına en çok yaklaşan ve dayanımı aşan elemanların 6.3 m yüksekliğindeki L50x6, 8.9 m yüksekliğindeki L60x5, 0-8.9 m arasındaki 2L75x5 ve 2L90x6 birincil çapraz elemanlar olduğu görülmüştür. Şekil 6.30.-33.'de bu elemanlarda farklı yük kombinasyonları için meydana gelen eksenel kuvvetlerin grafikleri verilmiştir. Bu grafikler Tablo 6.19.'da ifade edilen 11 farklı yük kombinasyonu için hesaplanmıştır

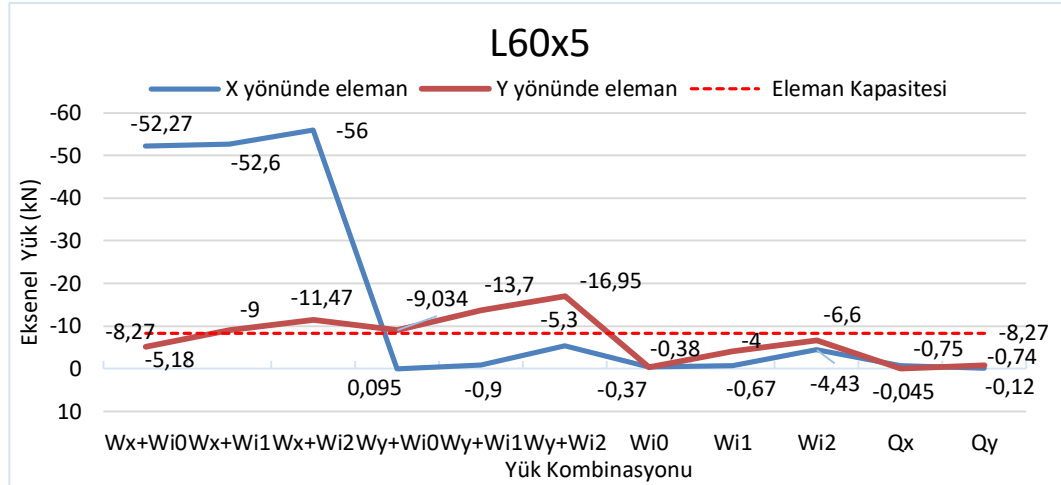
Tablo 6.19.Yük kombinasyonları

Kombinasyon İsmi	Tanım
W_x+W_{i0}	X yönünde rüzgar yükü + Buzlu iletken
W_x+W_{i1}	X yönünde rüzgar yükü+ Tek taraftan buzlu iletken kopması
W_x+W_{i2}	X yönünde rüzgar yükü+ Çift taraftan buzlu iletken kopması
W_y+W_{i0}	Y yönünde rüzgar yükü+ Buzlu iletken
W_y+W_{i1}	Y yönünde rüzgar yükü+ Tek taraftan buzlu iletken kopması
W_y+W_{i2}	Y yönünde rüzgar yükü+ Çift taraftan buzlu iletken kopması
W_{i0}	Rüzgarsız buzlu iletken yükü
W_{i1}	Rüzgarsız tek taraftan buzlu iletken kopması
W_{i2}	Rüzgarsız çift taraftan buzlu iletken kopması
Q_x	X yönünde deprem
Q_y	Y yönünde deprem

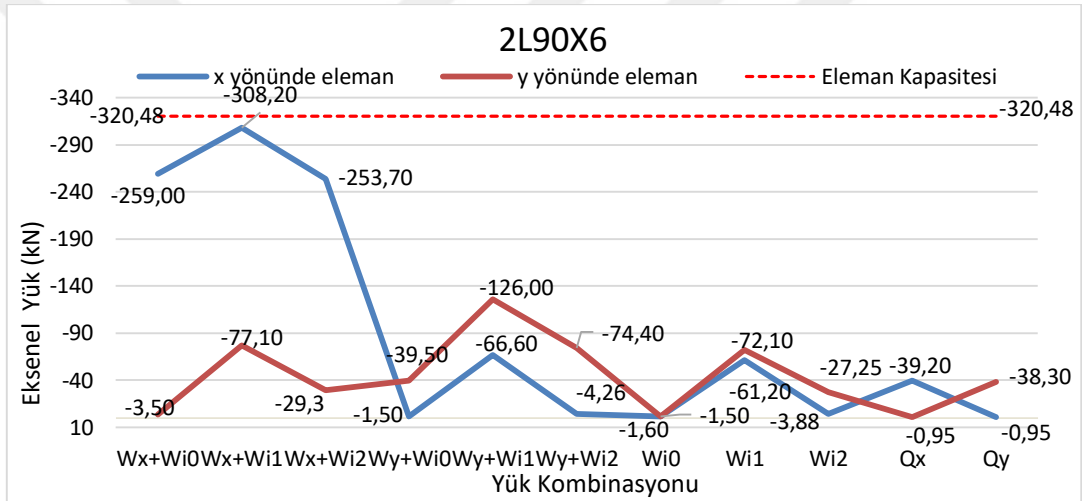
Rüzgar kuvvetleri iletim hattına dik (x yönü) ve paralel (y yönü) olarak etki ettirilmiştir. Elemanlar, en büyük eksenel kuvvetlerini rüzgar yükünün eleman eksenine paralel etki ettiği durumda almıştır. Tüm kombinasyonların sonucunda elemanlarda oluşan en büyük eksenel yük iletim hattına dik gelen rüzgar yüküne eş zamanlı buzlu iletken yükü olması durumu çıkmıştır. İletim hattı boyunca kulelerin birbirlerine iletken tellerle bağlı olması iletim hattına paralel olan yüklere karşı direnç oluşturmaktadır bu nedenle hatta paralel elemanların (y) en büyük eksenel yük değeri rüzgarın hatta dik elemanlarının (x) en büyük eksenel yük değerine göre düşük çıkmıştır.



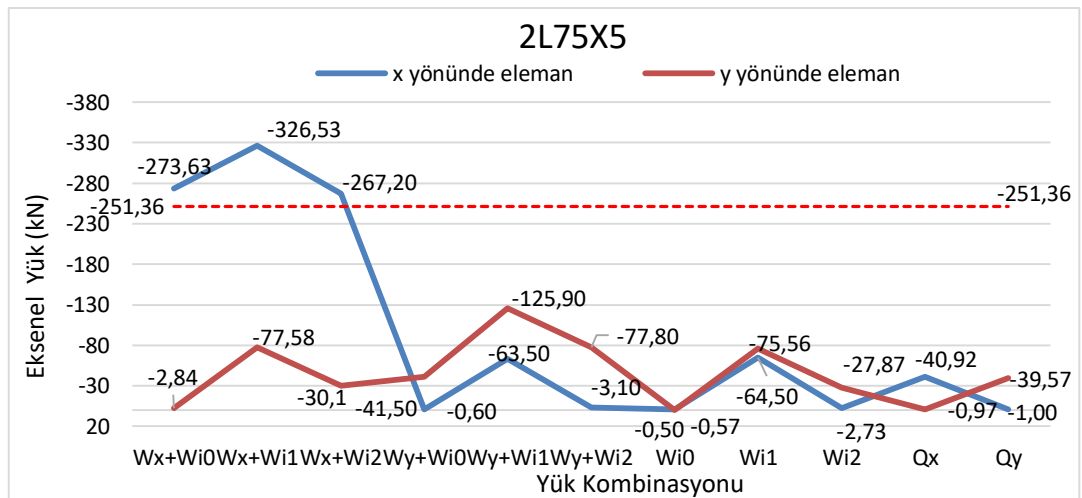
Şekil 6.29. L50x6 eleman için eksenel yük değişimi



Şekil 6.30. L60x5 eleman için eksenel yük değişimi



Şekil 6.31. 2L90x6 eleman için eksenel yük değişimi



Şekil 6.32. 2L75x5 eleman için eksenel yük değişimi

Buz yüküne eş zamanlı iletim hattına dik rüzgar yükü kuleyi en çok zorlayan durum olmasının yanın da L50x6 ve L60x5 elemanlarında buz yüküne eş zamanlı iletim hattına paralel etki eden rüzgar yükünde de oluşan kuvvetlerin eleman kapasitelerini aştığı görülmüştür.

Buzlu iletken kopması iletim hattı yönünde olduğu için y yönündeki elemanlarda ani yük artımına sebep olurken x yönündeki elemanlara gelen yükün azalmasına ve buna bağlı olarak bu elemanlara bağlı çapraz elemanlarda yük artmasına neden olmuştur. Ayrıca iletken kopması, kule de yüklenme durumunu değiştirerek basınç yükü alan elemanın çekme yükü almasına ya da çekme yükü alan elemanın basınç yükü almasına neden olmuştur.

Rüzgarın olmadığı sadece buz yükünün olduğu durumlarda elemanlara gelen yüklerin kapasite dayanımından düşük çıktığı ve güvenli tarafta kaldığı görülmüştür.

Kule tasarımında deprem yükleri çok küçük değerler aldığı için yönetmeliklerde tasarımı yöneten yük olarak değerlendirilmemektedir. Fakat bu çalışmada kuleye x ve y yönünde deprem yükü etki ettirilerek elemanlara gelen yükler rüzgar ve buz yükü ile karşılaştırılmıştır. Kule de yatay taşıyıcı olarak kullanılan L50x6 ve L60x5 elemanlarına gelen deprem yükleri tüm kombinasyonlar arasında en küçük kuvvet çıkarken çapraz eleman olarak kullanılan 2L90x6 ve 2L75x5 elemanlarında deprem yükleri rüzgarsız durumda meydana gelen buzlu iletken kopma durumlarına yakın değerler çıkmıştır.

X yönündeki elemanlar iletken dik rüzgar ve eş zamanlı buzlu iletken yükü altında en büyük değerleri alırken y yönündeki elemanlar iletim hattına paralel tek taraftan buzlu iletken kopması durumunda en büyük değerleri almıştır.

L50x6 elemanında oluşan en büyük eksenel yük x yönünde taşıma kapasitesinin 5,9 katını, y yönünde 2,15 katını almıştır. L60x5 elemanında oluşan en büyük eksenel yük x yönünde taşıma kapasitesinin 6,77 katını, y yönünde 2,05 katını almıştır.

2L75x5 elemanında oluşan en büyük eksenel yük x yönünde taşıma kapasitesinin 1,30 katını, y yönünde 0,50 katını almıştır. 2L90x6 elemanında oluşan en büyük eksenel yük x yönünde taşıma kapasitesinin 0,96 katını, y yönünde 0,39 katını almıştır. Tablo 6.19.'da kapasite dayanımına en çok yaklaşan basınç elemanlarına ait narinlik oranları verilmiştir.

Tablo 6.20. Narinlik oranları

Eleman	KL	r	KL/r	KL/r<200 (ÇYTHYK)	KL/r<150 (ASCE 10 97)
L50x6	2,17	0,009	241,44	Narin	Narin
L60x5	3,86	0,011	350,91	Narin	Narin
L70x5	3,98	0,013	306,15	Narin	Narin
2L75x5	1,36	0,023	59,086	Uygun	Uygun
2L90x6	2,59	0,028	92,464	Uygun	Uygun

L50x6, L60x5 ve L70x5 en kesitli basınç elemanları Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları ve ASCE 10-97 yönetmeliğine narinlik sınırını aşmaktadır. Ana taşıyıcı olarak kullanılan bu elemanların, kulede sadece burkulma boyunu azaltmak için kullanılan örgü elemanlar ile aynı kesite sahip olduğu görülmüştür.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında enerji nakil hattı kulelerinin rüzgar, buz ve deprem yükü altında davranışını belirlemek amacıyla 380 kV'lık mevcut bir elektrik kulesi modellenmiştir. Analizler ülkemiz ve Amerikan şartnamelerine uygun olarak iki farklı şekilde yapıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Kuleye etkiyen rüzgar ve buz yükü hesabında ülkemiz için Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) yönetmeliği Amerika için ASCE 74 yönetmeliği kullanılmıştır. Tasarım şartları ülkemiz için Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına göre Amerika için ASCE 10-97 yönetmeliğine göre belirlenmiştir.

Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği (EKAT) yönetmeliğinin ASCE 74 yönetmeliğine göre daha genel bir yaklaşımla hazırlandığı gözlenmiştir. Rüzgar hesabı sonuçlarının birbirine yakın olmasının sebebi EKAT yönetmeliğinin kabul ettiği yerel hız değerini ASCE 74 de rüzgar hesabında rüzgar hızı haritasına bakılmaksızın kabul edilmesi ve aynı şekilde ülkemizde hesaba katılmayan topoğrafya, rakım gibi parametrelerin ASCE 74 içinde hesaba katılmaması olduğu değerlendirilmiştir. EKAT yönetmeliği en olumsuz duruma bağlı olarak daha genel kabullere göre yük analizleri öngörürken ASCE 74 yönetmeliği daha fazla parametreyi yük analizlerine dahil etmektedir. Bunun sonucunda EKAT yönetmeliğine göre olumsuz koşullarda bulunmayan kulelere gelen tasarım yüklerinin büyük olması yapılan tasarımı ekonomik olmaktan çıkarmaktadır.

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları ile ASCE 10-97 şartnamesinin tasarım kriterlerinde eksenel basınç dayanımını hesabının aynı sonuç verdiği görülmüştür. Hesaplarda bulunan farklılığın ana sebebi Çelik Yapıların Tasarım,

Hesap ve Yapım Esasları yönetmeliğinde dayanımı azaltan katsayılar kullanarak güvenli tarafta kalmasıdır.

Amerikan yük yönetmeliği elemanlara daha fazla yük etki ettirerek daha güvenli tarafta kalırken Türk yönetmeliği daha düşük taşıma kapasitesine sahip olarak daha güvenli tarafta kalmıştır. Sonuç olarak yük/kapasite oranlarına bakılarak elemanların Türk yönetmeliklerine göre dayanma kapasitesi Amerikan yönetmeliklerine göre dayanma kapasitesinin daha fazla olduğu görülmüştür.

Elektrik kuvvetli akım tesisleri yönetmeliğinde rüzgar hızı 30 m/s kabul edilerek rüzgar yükü hesabı yapılmaktadır. Ancak bu hız değeri Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne ait rüzgar hızına bağlı rüzgar şiddeti tanımına göre şiddetli fırtına sınıfına girmektedir ve buda nadir karşılaşılan bir durumdur bu nedenle kapasite dayanımını aşan ilk elemanın hangi hız değerinde olduğunu tespit etmek için rüzgar yükü azaltılmıştır ve iki yönetmeliğe göre dayanımı aşan ilk eleman kuvvetli rüzgar sınıfına giren 10,8- 17,1 m/s arasında çıkmıştır.

Yapılan çalışmada iletim hattına dik etki eden yüklerin kule tasarımında daha etkili olduğu görülmüştür. Tüm kombinasyonların sonucunda elemanlarda oluşan en büyük eksenel yük iletim hattına dik gelen rüzgar yüküne eş zamanlı buzlu iletken yükü olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Kulenin 6,3 m, 8,9 m ve 12,5 m yüksekliklerinde bulunan sırasıyla L60x5, L50x6 ve L70x5 ana taşıyıcı elemanlarının kesitlerinin yetersiz olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

KAYNAKLAR

- ASCE 7-16, 2016. Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers, Virginia.
- ASCE 10-97, 2000. Design of Latticed Steel Transmission Structures. American Society of Civil Engineers, Virginia, 20191-4400.
- ASCE-74, Asce Manuals And Reports On Engineering Practice No. 74, 2016. Guidelines for electrical transmission line structural loading. American Society of Civil Engineers, Virginia, 20191-4382.
- Bayrak, 2008. Enerji İletimi Ders Notları. Elazığ Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü.
- C. Klinger, M. Mehdianpour, D. Klingbeil, D. Bettge, R. Häcker, W. Baer, 2011. Failure analysis on collapsed towers of overhead electrical lines in the region Münsterland. Engineering Failure Analysis 18 1873–1883.
- C. Preeti and K. Jagan Mohan, 2013. Analysis of Transmission Towers with Different Configurations. Jordan Journal of Civil Engineering vol 7, No. 4.
- Çöne, A.Ş. 2001. Prefabrike Düzlem Çelik Uzay Sistemlerde Yapı Geometrisindeki Değişimin Çelik Malzeme Giderine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- ÇYTHYK, 2018. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapıma Dair Kurallar. Çevre Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Edgar Tapia Hernández, Santiago de Jesús Ibarra-González, 2017. Inelastic response of transmission towers under intense wind. 6th Structural Engineers World Congress November.
- Eric Savory, Gerard A.R. Parke, Mostafa Zeinoddini, Norman Toy, Peter Disney, 2000. Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower. Engineering Structures 23 (2001) 365–375
- Eslamlou Soheil Dadras, Behrouz Asgarian, 2015. Determining critical areas of transmission towers due to sudden removal of members. Case Studies in Engineering Failure Analysis 9, 138-148.
- EKAT, 2000. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği, Ankara.

- Elektrik Elektronik Teknolojisi, 2011. Direktör. Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara.
- Xing Fu, Hong-Nan Li, Gang Li, Zhi-Qian Dong, (2020). Fragility analysis of a transmission tower under combined wind and rain loads. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 199, 1044098.
- G.H.Mahmoud, B.S.Tork, S.A.EL-Beshlawy, 2016. Structural Capacity and Failure Mechanisms of Transmission Towers under High Intensity Wind Loading. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 13, 25-33.
- Hua-Dong Zheng, Jian Fan, Xiao-Hong Long, (2017). Analysis of the seismic collapse of a high-rise power transmission tower structure. *Journal of Constructional Steel Research*, 134, 180-193.
- J.G.S. da Silva, P.C.G. da S. Vellasco, S.A.L. de Andrade, M.I.R. de Oliveira, (2005). Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers. *Journal of Constructional Steel Research* 61, 1108–1134.
- Jia-Xiang Li, Hong-Nan Li and Xing Fu, 2017. Stability and Dynamic Analyses of Transmission Tower-Line Systems Subjected to Conductor Breaking. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* vol. 17, 1771013.
- Junqi Chen, Qingjun Xian and Peng Zhang, 2019. Buckling Analysis of Transmission Tower Considering Ice Load. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 473.
- Li Pengyuna, Lin Jiedong, Nie Minga, Zhong Wanli, Huang Anguo, 2012. Dynamic Response of Power Transmission Towers under Wind Load. 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems, 1124-1131.
- Li Tian, Ruisheng Ma, Wenming Wang and Lei Wang. 2013. Progressive Collapse Analysis of Power Transmission Tower Under Earthquake Excitation. *The Open Civil Engineering Journal*, 164-169.
- Li Tian, Haiyang Pan, Ruisheng Ma,, Lijuan Zhang, Zhengwei Liu, (2020). Full-scale test and numerical failure analysis of a latticed steel tubular transmission tower. *Engineering Structures* 208, 109919.
- N. Prasad Rao, G. M. Samuel Knight, S. Seetharaman, N. Lakshmanan, Nagesh R. Iyer, (2011). Failure Analysis of Transmission Line Towers. *American Society of Civil Engineers*, 1943-5509.0000161.
- Omurtag, M. 2007. Mühendisler için Mekanik Statik ve Mukavemet, 2.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 610
- Qianjin Shu, Guanglin Yuan, Zhaohui Huang, Sheng Ye, 2016. The behaviour of the power transmission tower subjected to horizontal support's movements. September 2016 *Engineering Structures* 123, 166-180.

- Qing Zhang, Xing Fu, Liang Ren, Ziguang Jia, (2020). Modal parameters of a transmission tower considering the coupling effects between the tower and lines. *Engineering Structures* 220, 110947.
- Shan Gao, Cong Zeng, Linqiang Zhou, Xiaohua Liu, Bingyin Gao, (2020). Numerical analysis of the dynamic effects of wine-cup shape power transmission tower-line system under ice-shedding. *Structures* 24, 1-12.
- Tarakçı, F.2019. Kafes tipi çelik kule yapılarının rüzgar etkisindeki davranışlarının incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Taş, H.2019. Çelik Telekomünikasyon Kule Yapılarının Yapısal Davranışlarının İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- T.G. Mara, H.P. Hong, (2013). Effect of wind direction on the response and capacity surface of a transmission tower. *Engineering Structures*, 493-501.
- Toshinaga Okamura, Takeshi Ohkuma, Eijiro Hongo, Hajime Okada, 2003. Wind response analysis of a transmission tower in a mountainous area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 53–63.
- Wenjiang Kang, F. Albermani, S. Kitipornchai and Heung-Fai Lam, 2007. Modeling And Analysis Of Lattice Towers With More Accurate Models. *Advanced Steel Construction*, vol. 3, 565-582.
- <http://ee.tek.firat.edu.tr/sites/ee.tek.firat.edu.tr/enerjisistemleridersnotu.pdf>. Erişim Tarihi:18.03.2021
- <https://www.ekolekspertiz.com.tr/enerji-nakil-hatlarinda-olusan-buz-yuku>. Erişim Tarihi:05.04.2021

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatıma Zehra ŞAHİN

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği	2017
Lise	Düzce Arsal Anadolu Lisesi	2013

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2021-Halen	Sakarya Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2017-2018	Üç Yiğit Çelik Sanayi ve Endüstriyel Yapılar	Proje Mühendisi