

Hat Tasarımında Kullanılan Temel Yapısal Faktörlerin Diğer Ülke Sistemlerinde Kullanılan Kriterler ile Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi

Ercüment ÖZDEMİRCİ¹, Mete UZAR¹, Cengiz ESER¹, Selahattin ERTÜRK¹, Serhat NAZLİ²,
Dilek GÜRSU³, Eray BARAN⁴

¹Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)

ercument.ozdemirci@teias.gov.tr; mete.uzar@teias.gov.tr; cengiz.eser@teias.gov.tr; selahattin.erturk@teias.gov.tr

²MİTAŞ Industry

snazli@mitasindustry.com

³Teknik Danışman

dkgursu@outlook.com

⁴Orta Doğu Teknik Üniversitesi

erayb@metu.edu.tr

Özet

Bu makaleye konu olan çalışma CIGRE Türkiye B2.01 Çalışma Grubunca yürütülmektedir.

Çalışmaların başlatılmasında Adapazarı - İstanbul arasında yer alan 400 kV hatların 30 Aralık 2016 tarihinde şiddetli rüzgar ve buz yüküne bağlı olarak ciddi zararlar görmesi ve buna bağlı olarak İstanbul başta olmak üzere bölgede yer alan tüketicilere yansıyan uzun süreli elektrik kesintileri etkili olmuştur.

Bu çalışmada; Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğinde yer alan enerji nakil hatları tasarım kriterleri, ASCE 74 (Guidelines for the Electrical Transmission Line Structural Loading) ve EN 50341-1-2012 (Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV) standartları ile karşılaştırılmıştır. Bu dokümanlar yapısal tasarım için benimsenen yaklaşım ve kullanılan yükleme durumları dikkate alınarak incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Enerji Nakil Hatları, Tasarım Kriterleri

Abstract

The study summarized in this article is being conducted by Cigre Turkey B2.01 Working Group.

The 400 kV power lines between Adapazarı and Istanbul were severely damaged due to heavy wind and ice

loading on December 30th 2016 resulting in long-term power outages in the region.

In this study; power transmission line design criteria available in Electricity High Voltage Structures Regulation Document have been compared with ASCE 74 (Guidelines for the Electrical Transmission Line Structural Loading) and EN 50341-1-2012 (Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV) Standards. These documents were reviewed in terms of the structural design approach adopted for support structures as well as the loading conditions to consider.

Keywords: Power transmission lines, Design criteria

1. Giriş

Ülkemizde kullanılan enerji nakil hatları tasarımında kullanılan temel yapısal faktörlerin dayanağı Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğidir. Bu yönetmelik 21 Kasım 1978 tarihinde yayımlanmış ve ardından 30 Kasım 2000 tarihinde revize edilmiştir. 1978 yılında belirlenmiş enerji nakit hatları tasarım kriterlerinde bugüne kadar önemli bir değişiklik yapılmamıştır. Ülkemiz Buz Yüğü Haritasında da 40 yıla yakın bir süredir herhangi bir yenilemeye gidilmemiştir.

Dünyada yaşanan iklimsel değişiklikler enerji nakil hatlarında uygulanan yapısal tasarım kriterleri ve yükleme durumlarının yeniden ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu tür yapılar in ülkemizde uygulamakta olduğumuz tasarım kriterlerinin değerlendirilmesinin en

hızlı ve etkin yolu, diğer ülkelerde hali hazırda uygulanan kriter ve uluslararası normlar ile yapılacak bir karşılaştırma analizidir. Bu amaca yönelik olarak CIGRE Türkiye B2.01 Çalışma Grubu tarafından yürütülmekte olan çalışma kapsamında elde edilen bilgiler bu makalede sunulmaktadır.

2. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği ve TEİAŞ Yük Şartnamesi

Enerji nakil hatlarındaki buz ve rüzgar yükü hesaplamaları ile ilgili temel hususlar Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğinde yer almaktadır. İletim hatları yapısal tasarım hesaplarında kullanılan gerekli ayrıntılı hususlar 154 ve 380 kV yük şartnamelerinde yer almaktadır. Ülkemizde hattın önem seviyesi ayrımı yapılmaksızın yapısal tasarım için 1.8 güvenlik katsayısı kullanılması dikkat çeken en temel prensiptir.

2.1. Rüzgar Yükü Hesaplamaları

Yönetmelikte rüzgar kuvveti hesaplamasında 200 metrenin üzerinde ve altındaki rüzgar açıklıkları için iki ayrı hesaplama mevcuttur.

200 m'ye kadar olan rüzgar açıklıkları için;
 $W=c.p.d.a_w$ (kg)

200 m'den büyük rüzgar açıklıkları için;
 $W=c.p.d.(80+0.6a_w)$ (kg)
ifadeleri kullanılarak rüzgar yükleri hesaplanmaktadır.

Burada;

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

p : Dinamik rüzgar basıncı(kg/m²) ($p=v^2/16$)

v : rüzgar hızı (m/s)

a_w : varsayılan rüzgar açıklığı

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

Şartnamede buz üzerine rüzgar yükü aşağıdaki gibi formülize edilmektedir.

Buz yoğunluğu 0,6 kg/dm³ varsayılarak ve,

d : Çıplak tel çapı (mm)

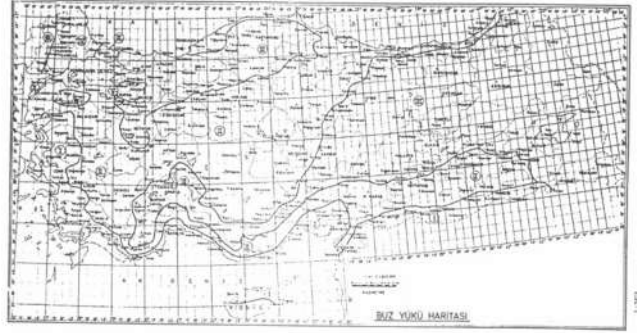
q : buz yükü (kg/m) olmak üzere

$$d_b = (d^2 + 2122 \cdot q)^{0.5}$$

formülünden bulunacak olan (mm) biriminde d_b buzlu tel çapı gözönüne alınacak ve bütün bölgelerde $p=20$ kg/m², $c=1$ değerleri kullanılarak, yukarıda tanımlanan rüzgar kuvveti hesaplama formülüne göre, kg/m olarak buzlu tel üzerine etki eden w_q birim rüzgar yükü hesaplanacaktır.

2.2. Buz Yükü Hesaplamaları

Buz yükü ortama göre çeşitli katsayılarla ve buna bağlı ağırlık hesaplanarak dikkate alınmaktadır. Yönetmelik ekinde yer alan ve aşağıda gösterilen Buz Yükü Haritasına göre katsayılar belirlenmektedir. Bu haritaya göre Türkiye'de toplam beş buz bölgesi bulunmakta ve bu bölgeler için Tablo-1'de gösterilen buz yükü katsayısı değerleri tanımlanmaktadır.



Şekil 1. Türkiye Buz Yükü Haritası

Yönetmelik özel koşullar gereği Tablo-1'de belirtilenden daha yüksek buz yükü oluştuğu bilinen veya beklenen yerlerde daha büyük katsayı kullanımına izin vermekte ve buz yoğunluğunun 0,6 kg/dm³ alınacağı belirtilmektedir.

Tablo 1. Buz Yükü Katsayıları

Bölge No.	Buz yükü katsayısı k	Buz yükü kg/m	Ortam sıcaklığı (°C)	
			En düşük	En yüksek
1	0	0	-10	50
2	0.2	0,2√d	-15	45
3	0.3	0,3√d	-25	40
4	0.5	0,5√d	-30	40
5	1.2	1,2√d	-30	40

3. ASCE 74 – Elektrik İletim Hatları Yapısal Yükleme Kılavuzu

ASCE 74 dökümanı "American Society of Civil Engineers" tarafından hazırlanan, enerji nakil hattı direklerinin yük hesaplarının yapılabilmesi için alınan kriterlerin, metodların sunulduğu ve referans değerlerin listelendiği kullanım kılavuzudur. Rüzgâr ve buz yükü değerlerinin Amerika için verilmesine rağmen bu döküman dünyada pek çok ülkenin elektrik idaresi tarafından referans olarak alınmaktadır.

3.1. Tasarım Felsefesi

Bu standarda göre yapısal tasarım istatistiksel bir yaklaşımla yapılmaktadır. Nominal olarak belirlenmiş dayanım ve yük etkisi değerleri istatistiksel veriler kullanılarak tasarımda kullanılacak değerlere dönüştürülmektedir. Hattı oluşturan yapıların ve

elemanların gerçek dayanımlarının nominal olarak hesaplanmış dayanımlardan daha düşük olma ihtimali dikkate alınmaktadır. Benzer şekilde, işletme ömrü boyunca hattaki yapılara etkiyecek yükler belirlenirken de istatistiksel bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu nedenle, hattın yapısal tasarımında Yük ve Dayanım Katsayıları Tasarım (LRFD) yöntemi temel alınmaktadır.

Hattı etkiyecek rüzgar ve buz yükleri dikkate alınarak toplam beş farklı güvenilirlik seviyesi tanımlanmaktadır. Bu güvenilirlik seviyelerinin tanımlanması için "Görece Güvenilirlik Faktörü (RRF)" olarak adlandırılan bir parametre kullanılmaktadır ve bu faktörün değeri 0.5, 1, 2, 4 ve 8 olarak belirtilmektedir. Bu yaklaşımda, hattı oluşturan yapıların veya bu yapıları oluşturan elemanların 50 yıllık tekerrür süresine sahip bir yüklem altında göçme durumuna ulaşması olasılığı temel olarak kabul edilmektedir. Hattın yapısal tasarımında kullanılacak rüzgar ve buz yüklemelerinin tekerrür süresi artırılarak Görece Güvenilirlik Faktörünün değeri artırılabilir. Yukarıda bahsedilen Görece Güvenilirlik Faktörü değerlerine karşılık olarak rüzgar ve buz yükleri için 25, 50, 100, 200 ve 400 yıllık tekerrür süreleri belirlenmiştir. Farklı Görece Güvenilirlik Faktörü değerlerine karşılık gelen yük tekerrür süreleri ile yükün 50 yıllık süre içerisinde aşılma olasılıkları Tablo-2'de belirtilmektedir. Görüldüğü üzere, Görece Güvenilirlik Faktörünün değeri artırılarak hattın güvenilirlik seviyesi yükseltilebilmektedir. Bu durumda, hat daha yüksek tekerrür süresine sahip yüklerle karşı tasarlanmakta, veya farklı bir ifade ile, hattın tasarımında kullanılan yüklerin 50 yıllık süre içerisinde aşılma olasılığı azalmaktadır. Elbette bu şekilde güvenilirliğin artırılması sonucunda hattın maliyeti de artmaktadır. Bu nedenle, hattın güvenilirlik seviyesi belirlenirken ekonomik etkenler de önemli bir parametre olmaktadır.

Tablo 2. Güvenilirlik Faktörü Sınıflandırması

Görece Güvenilirlik Faktörü	Yük Tekerrür Süresi (Yıl)	Yükün 50 Yıllık Süre İçerisinde Aşılma Olasılığı
0.5	25	0.87
1	50	0.64
2	100	0.39
4	200	0.22
8	400	0.12

3.2. Tasarım Girdileri

Rüzgar ve buz yüklerinin belirlenmesi amacıyla Görece Güvenilirlik Faktörünün değerinin 1 olduğu duruma karşılık gelen tekerrür süresi 50 yıl olarak kabul edilmiş ve Amerika Birleşik Devletlerinde bu tekerrür süresine karşılık gelen rüzgar hızı ve buz kalınlığı değerlerini gösteren haritalar standartta verilmiştir. Hattın yapılacağı

bölgede lokal olarak belirlenmiş rüzgar ve buz yükü değerlerinin bulunması durumunda bu değerlerin kullanılması, ancak lokal değerlerin bulunmaması durumunda haritalarda belirtilen değerlerin kullanılması tavsiye edilmiştir.

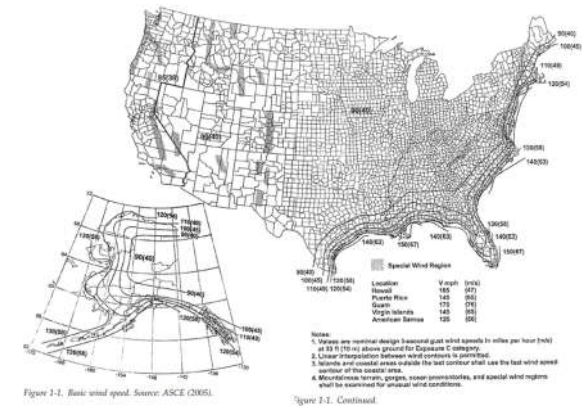
Rüzgar haritasında belirtilen rüzgar hızı değerleri yerden 10 metre yükseklikteki 3 saniyelik rüzgar hızı değerlerini temsil etmektedir. Haritada toplam 8 rüzgar hızı seviyesi gösterilmekte ve rüzgar hızı değerleri 136 km/saat ile 240 km/saat arasında değişmektedir.

Buz haritasında belirtilen buz kalınlığı değerleri yine yerden 10 metre yükseklikte oluşacak "şeffaf buz" kalınlığını temsil etmektedir. Haritada gösterilen buz kalınlığı değerleri 6.35 mm'lik artışlarla sıfır ile 38.1 mm arasında değişmektedir.

Hat için belirlenen önem seviyesine göre Görece Güvenilirlik Faktörünün değeri 0.5, 1, 2, 4 veya 8 olarak belirlenir ve buna göre 50 yıllık tekerrür süresine göre belirlenmiş rüzgar hızı ve buz kalınlığı değerleri ilgili tablolarda belirtilen değerlerle çarpılarak tasarımda kullanılacak değerler elde edilir.

Tasarımda kullanılacak rüzgar hızı ve buz kalınlığının belirlenmesi için kullanılacak prosedür aşağıda özetlenmektedir:

Bölgeye göre rüzgar hızı değeri aşağıda verilen harita üzerinde seçilir.



Şekil 2. ABD Rüzgar Hızı Haritası

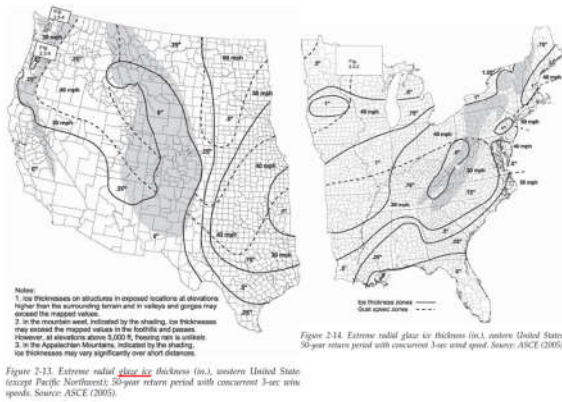
Önceden bahsedildiği üzere, haritada gösterilen değerler 50 yıl tekerrür süresine karşılık gelmektedir. Hat için belirlenmiş Görece Güvenilirlik Faktörü (RRF) değerine göre Tablo-3'den bir Rüzgar Yükü Faktörü (γ_w) belirlenir ve 50 yıl tekerrür süresi için belirlenmiş rüzgar yükü değeri bu faktör ile çarpılarak tasarımda kullanılacak değer belirlenir. Görüldüğü üzere, 50, 100, 200 ve 400 yıl tekerrür süreleri için rüzgar yükü faktörleri sırasıyla 1.00, 1.15, 1.30 ve 1.45 olarak belirtilmiştir.

Tablo 3. Yük Faktörü Katsayıları

Table 1-1. Load Factors, γ_w , to Adjust Relative Reliability from 50-Year RP Extreme Wind Load Design

Relative Reliability Factor (RRF)	Load Return Period, RP (years)	Probability that the Load Is Exceeded in 50 Years = $1 - (1 - 1/RP)^{50}$	Wind Load Factor, γ_w
0.5	25	0.87	0.85
1	50	0.64	1.00
2	100	0.39	1.15
4	200	0.22	1.30
8	400	0.12	1.45

Bölgeye göre buz kalınlığı değeri ve eşzamanlı olarak kullanılacak rüzgar hızı değeri aşağıda verilen harita üzerinden seçilir.



Şekil 3. ABD Buz Yükü Haritası

Hat için belirlenmiş Görece Güvenilirlik Faktörü değerine göre Tablo-4' den bir Buz Kalınlığı Faktörü (γ_i) belirlenir ve 50 yıl tekerrür süresi için belirlenmiş buz kalınlığı değeri bu faktör ile çarpılarak tasarımda kullanılacak değer belirlenir. Görüldüğü üzere, 50, 100, 200 ve 400 yıl tekerrür süreleri için buz kalınlığı faktörleri sırasıyla 1.00, 1.25, 1.50 ve 1.85 olarak belirtilmiştir. Benzer şekilde, buz yükü ile birlikte dikkate alınması gerekli rüzgar yükünün belirlenmesi için Tablo-4' den belirlenen Eşzamanlı Rüzgar Yükü Faktörü (γ_w) kullanılır.

Tablo 4. Buz Yükü Faktörü Katsayıları

Table 1-2. Factors γ_i and Corresponding γ_w to Adjust Relative Reliability from 50-Year Extreme Uniform Ice Thickness and Concurrent Wind Load Design

Relative Reliability Factor (RRF)	Load Return Period, RP (years)	Ice Thickness Factor, γ_i	Concurrent Wind Load Factor, γ_w
0.5	25	0.80	1.0
1	50	1.00	1.0
2	100	1.25	1.0
4	200	1.50	1.0
8	400	1.85	1.0

3.3. Tasarım Koşulları

Hat tasarımında dikkate alınması gereken yük durumları şu şekildedir:

- Meteorolojik koşullar:
 - Rüzgar yükü
 - Hem iletkenlere hem de direğe etkimekte
 - Herhangi bir açıdan etkimekte
 - Yüksek şiddetli rüzgar yükü
 - Rüzgar hızları 300 km/saat seviyesine ulaşabilir
 - Kasırga veya hortum gibi lokal hava olayları sonucunda oluşur
 - İletkenlere değil, yalnızca direk üzerine etki ettiği düşünülür
 - Tasarımda kullanılacak rüzgar hızı değeri ile ilgili kesin bilgi verilmemektedir; hattın önem seviyesi, gerekli güvenilirlik seviyesi ve ekonomi dikkate alınarak karar verilmesi gerekir.
 - Buz ve eşzamanlı rüzgar yükü
 - Buz ile birlikte düşürülmüş rüzgar hızı (18 km/saat – 96 km/saat) dikkate alınır
 - İletken etrafında oluşacak buzdan dolayı düşey kuvvet ve daha büyük rüzgar alanından dolayı ilave yatay kuvvet oluşur
 - Direk üzerinde buzlanmadan dolayı düşey kuvvet ve rüzgar alanı artışı genellikle dikkate alınmaz
 - Dengelenmemiş buz yükü
 - İletkenler üzerinde eşit olmayan buz oluşumunun yarattığı dengelenmemiş kuvvet durumu dikkate alınmalıdır
- Arıza önleme durumları:
 - Tel kopması
 - Tel kopması durumunda domino şeklinde oluşacak çok sayıda direğin göçmesinin engellenmesi için kullanılacak bazı yöntemler belirtilmiştir Bunlar: (1) bütün direklerin yatay yüklere karşı tasarlanması, (2) belirli aralıklarla domino göçmesini durduracak kuvvetli direklerin kullanılması, (3)

“kayar” veya “serbest bırakır” tip iletken tutucuların kullanılması

- Deprem (özellikle talep edilmesi durumunda)
- Yapım ve bakım yükleri:
 - Tel çekimi
 - İletkenlerin çekilmesi sırasında oluşacak gergi kuvveti için yük katsayısı 1.5’dir
 - Çalışan yükleri
 - Direklerin montajı sırasında işçi+ekipman ağırlığı olarak 100 kg’lık kuvvetin yatay elemanlara etkidiği düşünülmelidir (yük katsayısı 1.5)
- Yasal yükler:
 - NES (National Electrical Safety Code) uyarınca uygulanmak zorunda olunan yükler

3.4. Rüzgar Yükü Hesabı

Rüzgar kuvvetinin hesabı için aşağıdaki ifadeler kullanılmaktadır:

$$F = \gamma_w Q K_z K_{zt} (V_{50})^2 G C_f A \quad (2-1a)$$

$$F = Q K_z K_{zt} (V_{RP})^2 G C_f A \quad (2-1b)$$

F : tasarımda kullanılacak rüzgar kuvveti

γ_w : seçilen tekerrür süresine göre tablodan elde edilen rüzgar yük faktörü

V_{50} : rüzgar haritasından elde edilen 3 saniyedeki rüzgar tasarım hızı

K_z : referans yüksekliğe (genelde yerden 10 m) göre yapının yükseklik artışı oranında hesaplanan, değişik yüzey durumuna göre değişiklik gösteren katsayı

K_{zt} : topografik yüzey şekline göre değişen katsayı

Q : rüzgar hızı ve basıncı arasındaki ilişkiyi belirten numerik katsayı

G : rüzgara maruz kalan şekle göre değişen rüzgar yüzey katsayısı (iletken, izolator, boru ya da kafes sisteme göre değişiklik göstermektedir)

C_f : rüzgar yükü katsayısı

A : rüzgara maruz kalan yüzey alanı

3.5. Buz Yükü Hesabı

Buz haritasından seçilen buz kalınlığı kullanılarak aşağıdaki ifadelerle göre buz yükü hesaplanır:

$$I_z = I \left(\frac{z}{33} \right)^{0.10} \quad 0 \text{ ft} < z < 900 \text{ ft} \quad (2-15)$$

$$I_z = I \left(\frac{z}{10} \right)^{0.10} \quad 0 \text{ m} < z < 275 \text{ m}$$

$$W_i = 0.0282(d + I_z) I_z \quad (2-16b)$$

I_z : tasarımda kullanılacak buz kalınlığı

I : haritadan belirlenmiş ve tekerrür süresine göre modifiye edilmiş buz kalınlığı

z : zemin seviyesinden yükseklik

W_i : buz ağırlığı

d : iletken çapı

İletken ve direklerde çeşitli formlarda (şeffaf buz, bulut buzlanması, ıslak kar, kırağı) buz oluşumu gerçekleşebilir. Bu buz oluşumları farklı yoğunluklara sahiptir. Buz kalınlığı haritası ve yukarıda verilen buz yükü ifadeleri 900 kg/m³ yoğunluğa sahip şeffaf buz için geçerlidir.

Buz kalınlığı ve ağırlığı kullanılarak, buz ve rüzgar altında sehim gerilme sonrasında da yük hesapları yapılır.

3.6. Sehim-Gerilme Hesapları

Tek açıklık dikkate alınarak, direğin tasarımı için gerekli olan gerilmeler ve ardından sehim hesaplanır. Bu yöntem “Ruling Span” yöntemi olarak adlandırılır. “Ruling span” metodu, iletken konsollara post izolator ile bağlandığında, toprak teli taşıyıcı direklerde sabit “rigid” aparat ile bağlandığında ya da askı izolatorün boyu çok kısa olup, hat yönünde serbest salınım yapmadığı durumlarda doğru/sağlıklı sonuç vermeyebilir. Bu durumlarda, her bir bölüm (durdurucudan durdurucuya) ayrı ayrı ya da nihayet direğinden nihayet direğine tüm hat analizi yapılabilir.

4. EN 50341-1-2012 (Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV) standardı

EN 50341-1 dökümanı Avrupa ülkelerinde enerji nakil hatlarının tasarımında kullanılan yönetmeliktir. Bu yönetmelikte tasarım ile ilgili genel kurallar açıklanmış, ancak tasarımda kullanılacak buz kalınlığı ve rüzgar hızı gibi spesifik değerler verilmemiştir. Bu tür bilgiler her ülke tarafından oluşturulan ulusal eklerde verilmektedir.

4.1. Tasarım Felsefesi

Hat tasarımı “Güvenilirlik (reliability)”, “Emniyet (security)”, ve “Güvenlik (safety)” olmak üzere üç farklı seviyede ele alınmaktadır. Güvenilirlik kriteri için hattın işletme ömrü boyunca üzerine etkiyecek yük etkilerine karşı koyabilecek yeterli güvenilirlik ve ekonomi seviyelerine sahip olması; emniyet kriteri için hattın işletme ömrü boyunca oluşabilecek domino tipi geçmelerin (aşamalı göçme) engellenecek şekilde tasarlanmış olması; güvenlik kriteri için ise hattın yapım ve bakım aşamalarında oluşabilecek yaralanma ve can kayıplarının engellenecek şekilde tasarlanmış olması amaçlanmaktadır.

Hat tasarımında kullanılmak üzere üç farklı güvenilirlik seviyesi tanımlanmaktadır. Tablo-5’de belirtildiği üzere, Güvenilirlik Seviyesinin 1 olması durumu tasarımdaki referans durumdur ve 50 yıl tekrerrür süreli meteorolojik etkilere karşılık gelmektedir. Güvenilirlik Seviyesinin 2 ve 3 olması durumları ise sırasıyla 150 ve 500 yıllık tekrerrür sürelerine karşılık gelmektedir.

Tablo 5. Güvenilirlik Seviyeleri

Güvenilirlik Seviyesi	Meteorolojik Etkilerin Tekerrür Süresi (Yıl)
1	50
2	150
3	500

Tasarımda kullanılacak yük etkileri “kalıcı etkiler”, “değişken etkiler” ve “kazara oluşan etkiler” olarak üç gruba ayrılmıştır. Genel olarak kalıcı etkiler zati ağırlığı; değişken etkiler rüzgar, buz ve sıcaklığı; kazara oluşan etkiler ise tel kopmasını temsil etmektedir. Hattın yapısal tasarımında Yük ve Dayanım Katsayıları Tasarım yöntemi (LRFD) temel alınmaktadır. Bu yaklaşımda hattı oluşturan yapıların ve bu yapıları oluşturan elemanların tahmin edilen dayanımları olasılıksal etkileri temsil edecek belirli katsayılarla azaltılmakta, hat üzerine etkimesi muhtemel yük etkileri ise uygulanacak güvenilirlik seviyesine uygun olarak belirli katsayılarla artırılmaktadır.

4.2. Rüzgar Yükünün Hesaplanması

Öncelikle zeminden 10 metre yükseklikte ve 10 dakikalık ortalama değeri temsil eden bir “temel rüzgar hızı” değeri belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer ulusal ekler

tarafından verilmektedir. Örneğin, Finlandiya ulusal ekinde 76 km/saat ve 90 km/saat olmak üzere iki temel rüzgar hızı seviyesi; Almanya ulusal ekinde 88 km/saat, 100 km/saat ve 115 km/saat olmak üzere üç temel rüzgar hızı seviyesi; Norveç ulusal ekinde 79 km/saat ile 108 km/saat arasında değişen dokuz temel rüzgar hızı seviyesi verilmektedir. Bu temel rüzgar hızı değerleri, ilgili katsayılarla çarpılarak tasarımda kullanılacak rüzgar hızına aşağıda verilen ifade ile dönüştürülmektedir:

$$V_h(h) = V_{b,0} c_{dir} c_o k_r \ln(h / z_o)$$

V_h : tasarımda kullanılacak rüzgar hızı

h : yükseklik

$V_{b,0}$: temel rüzgar hızı

c_{dir} : rüzgar doğrultusu faktörü

c_o : arazinin topografik yapısı ile ilgili katsayı

k_r : arazinin yüzey özellikleri ile ilgili katsayı

z_o : yüzey pürüzlülüğü uzunluk değeri

Rüzgar basıncının hesabı için aşağıdaki ifadeler kullanılmaktadır:

$$q_h(h) = \frac{1}{2} \rho V_h^2(h)$$

$$q_p(h) = [1 + 7 I_v(h)] q_h(h)$$

q_h : ortalama rüzgar basıncı

q_p : tepe rüzgar basıncı

ρ : hava yoğunluğu

I_v : türbülans etkisi ile ilgili değer

Tasarımda kullanılacak rüzgar kuvveti ise şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Q_{wx} = q_p(h) G_x C_x A_x$$

Q_{wx} : tasarımda kullanılacak rüzgar kuvveti

G_x : Rüzgar yükü hesaplanan elemanın yüzey özellikleri ile ilgili katsayı

C_x : Rüzgar yükü hesaplanan elemanın şekli ile ilgili katsayı

A_x : Rüzgar yükü hesaplanan elemanın alanı

Farklı güvenilirlik seviyelerinde kullanılacak rüzgar hızı ve rüzgar kuvvetinin modifiye edilmesi için kullanılacak katsayılar aşağıdaki tabloda gösterilmektedir. 50 yıllık rüzgar referans durum kabul edildiğinde, 150 yıllık rüzgarın hızı 1.09 katsayısı ile artırılmakta (rüzgar kuvveti bu oranın karesi ile artmaktadır), yük katsayısı ise 1.2 olarak verilmektedir. 500 yıl tekrerrür süresi için rüzgar hızı 1.18 katsayısı ile artırılmakta ve 1.4 yük katsayısı kullanılmaktadır. Tablo-6’da gösterilen “düşük şiddetli rüzgar” durumu ise raporun sonraki bölümlerinde anlatılan rüzgar+buz durumunda kullanılmaktadır.

Tablo 6. Güvenilirlik Seviyelerine göre Rüzgar Hızı Katsayıları ve Yük Faktörleri

Güvenilirlik Seviyesi	Rüzgar Hızı Tekerrür Süresi (Yıl)	Rüzgar Hızı Katsayısı	Yük Faktörü
Düşük şiddetli rüzgar	3	0.76	0.4
1	50	1.00	1.0
2	150	1.09	1.2
3	500	1.18	1.4

4.3. Buz Yükünün Hesaplanması

Buz yükünün değerinin hesaplanması ile ilgili EN 50341-1 dökümanında spesifik bir bilgi verilmemektedir.

Almanya ulusal ekinde iletkenler için aşağıda belirtilen üç buz yükü değeri belirtilmektedir (direkler için buz yükünün dikkate alınmasının gerekmediği belirtilmektedir):

- birinci bölge için : $5 + 0.1d$ (N/m)
- ikinci bölge için : $10 + 0.2d$ (N/m)
- üçüncü bölge için : $20 + 0.4d$ (N/m)

d : iletken çapı (mm)

Finlandiya ulusal ekinde iletkenler için yüksekliğe bağlı olarak aşağıda belirtilen buz yükü değerleri verilmektedir (direkler için buz yükünün dikkate alınmasının gerekmediği belirtilmektedir):

- 0 – 50 m yükseklik için : 10 N/m
- 50 m – 100 m yükseklik için : 25 N/m
- 100 m – 200 m yükseklik için : 50 N/m
- >200 m yükseklik için : 75 N/m

Norveç ulusal ekinde, bulunulan bölgeye ve yüksekliğe bağlı olarak 20 N/m ile 50 N/m arasında değişen buz yükü değerleri belirtilmektedir.

Farklı güvenilirlik seviyelerinde kullanılacak buz yüklerinin modifiye edilmesi için kullanılacak katsayılar aşağıdaki tabloda gösterilmektedir. 50 yıllık buzlanma referans durum kabul edildiğinde, 150 yıllık buz yükü 1.23 katsayısı ile arttırılmakta, yük katsayısı ise 1.25 olarak verilmektedir. 500 yıl tekerrür süresi için buz yükü 1.49 katsayısı ile arttırılmakta ve 1.5 yük katsayısı kullanılmaktadır. Tablo-7’de gösterilen “düşük şiddetli buz” durumu ise raporun sonraki bölümlerinde anlatılan rüzgar+buz durumunda kullanılmaktadır.

Tablo 7. Güvenilirlik Seviyelerine göre Buz Yükü Katsayıları ve Yük Faktörleri

Güvenilirlik Seviyesi	Buz Yükü Tekerrür Süresi (Yıl)	Buz Yükü Katsayısı	Yük Faktörü
Düşük şiddetli buz	3	0.37	0.35
1	50	1.00	1.0
2	150	1.23	1.25
3	500	1.49	1.5

4.4. Rüzgar ve Buz Yüklerinin Birlikte Bulunması Durumu

İletkenler üzerinde rüzgar ve buz yüklerinin birlikte bulunması aşağıdaki iki durumda incelenmektedir:

i. Yüksek şiddetli (düşük ihtimalli) buz yükü ile birlikte düşük şiddetli (yüksek ihtimalli) rüzgar hızı:

Bu durumda, buz yükü olarak önceki bölümlerde bahsedilen ulusal eklerde belirtilen 50, 150 veya 500 yıllık tekerrür sürelerine sahip olabilen buz yükü değerleri kullanılmaktadır. Rüzgar için ise sıklıkla oluşabilecek 3 yıllık tekerrür süresine sahip hız değeri kullanılmaktadır. Tablo-6’da görüldüğü üzere, 3 yıllık rüzgar hızı, referans olarak kabul edilen 50 yıllık rüzgar hızının 0.76 katsayısı ile azaltılmış değeridir (rüzgar kuvveti bu değerinin karesi ile azalmaktadır). Ayrıca bu düşük şiddetli rüzgar 0.4 yük faktörü ile birlikte kullanılmaktadır.

ii. Düşük şiddetli (yüksek ihtimalli) buz yükü ile birlikte yüksek şiddetli (düşük ihtimalli) rüzgar hızı:

Bu durumda, rüzgar hızı olarak önceki bölümlerde bahsedilen ulusal eklerde belirtilen 50, 150 veya 500 yıllık tekerrür sürelerine sahip olabilen rüzgar değerleri kullanılmaktadır. Buz için ise sıklıkla oluşabilecek 3 yıllık tekerrür süresine sahip buz yükü değeri kullanılmaktadır. Tablo-7’de görüldüğü üzere, 3 yıllık buz yükü referans olarak kabul edilen 50 yıllık buz yükünün 0.37 katsayısı ile azaltılmış değeridir. Ayrıca bu düşük şiddetli buz yükü 0.35 yük faktörü ile birlikte kullanılmaktadır.

Buz ile kaplanmış iletkene etkiyecek rüzgar yükünün hesaplanmasında kullanılacak buz çapının belirlenmesi için dört farklı buzlanma çeşidi (şeffaf,buz, ıslak kar, yumuşak kırağı, sert kırağı) dikkate alınmaktadır.

4.5. Yükleme Durumları

Hat tasarımında dikkate alınması gerekli olan yükleme durumları Tablo-8’de özetlenmektedir.

5. Sonuçlar

Tablo 8. Dikkate Alınması Gerekli Yükleme Durumları

Yükleme	Detaylar
Rüzgar yükü	Herhagi bir açıdan uygulanmakta
Buz yükü	Dengeli buzlanma
	Hatta dik yönde eğilme yaratacak dengeli buzlanma
	Hat yönünde eğilme yaratacak dengesiz buzlanma
	Burulma yaratacak dengesiz buzlanma
Rüzgar + buz	
Sıcaklık ^a	Rüzgar veya buz olmadan minimum sıcaklık
	Maximum rüzgar durumunda ortalama sıcaklık
	Minimum sıcaklık ve düşük şiddetli rüzgar
	Buzlanma ile birlikte 0° veya daha düşük bir sıcaklık
	Rüzgar + buzlanma ile ortalama sıcaklık
Güvenlik yükleri	Hat yönündeki yükler
	Burulma yükleri
Emniyet yükleri	

^aKullanılacak sıcaklık değerleri ulusal eklelerde belirtilmektedir. Örneğin, Finlandiya üç farklı bölgeye bölünmüş ve bu bölgeler için minimum sıcaklık değerleri Güvenilirlik Seviyesi-1 için -40° ile -50° arasında, Güvenilirlik Seviyesi-2 için -45° ile -55° arasında, Güvenilirlik Seviyesi-3 için -50° ile -60° arasında verilmektedir. Norveç için minimum sıcaklık değerinin -60°den daha yüksek olamayacağı belirtilmiştir.

Yukarıdaki tabloda belirtilen yükleme durumlarına ilave olarak tel kopması durumunun dikkate alındığı “güvenlik yüklemesi” ve yapım ve bakım durumunun dikkate alındığı “emniyet yüklemesinin” de düşünülmesi gerektiği belirtilmektedir. Yatay düzlemlerle 30 dereceden daha az açısı bulunan elemanların merkezine 100 kg’lık kuvvetin etki ettiği düşünülmelidir. Bütün Güvenilirlik Seviyeleri için yük katsayısı güvenlik yüklemesi durumunda 1.0, emniyet yüklemesi durumunda ise 1.5 alınmalıdır.

Bu çalışmada; ASCE 74 (Guidelines for the Electrical Transmission Line Structural Loading) ve EN 50341-1-2012 (Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV) standartlarında belirtilen enerji nakil hattı tasarımında kullanılan temel yapısal faktörler özetlenmiştir. Bu sayede, benzer amaçla uzun yıllardır ülkemizde kullanılmakta olan tasarım yaklaşımları, uluslararası alanda yaygın olarak kullanılmakta olan bu standartlarla karşılaştırılmıştır.

İncelenen her iki standartta yer alan ve ülkemizde uygulanan kriterler ile farklılık ve benzerlik gösteren temel ilkeler aşağıdaki gibidir;

ASCE 74 ve EN 50341-1-2012 dökümanları ile Türkiye’de kullanılmakta olan tasarım yaklaşımının farklılık gösteren yanları:

1. Belirli sabit katsayı ve kriterler yerine olasılık metoduna göre yüklerin hesaplanması.
2. Sabit rüzgar basıncı yerine genel olarak bir rüzgar haritasının dikkate alınması.
3. Sabit bir güvenlik katsayısı kullanılmayıp, tasarım yapılacak hattın önemine ve tasarımda dikkate alınacak meteorolojik olayların tekrür süresine göre farklı seviyelerin dikkate alınması.
4. Buz üzerine rüzgar yükünün sadece 380 kV direklerin tasarımında değil tüm gerilim seviyeleri için uygulanması.
5. Rüzgar basıncı hesaplanırken topografik yüzeyin dikkate alınması.
6. Ortama göre değişen ekstrem rüzgarın mümkün olan tüm açılarda ve yapıların yüksekliğine göre artan değerlerde hesaplanması.
7. Buz yükünün ortama göre çeşitli kalınlıklarda dikkate alınması.

ASCE 74 ve EN 50341-1-2012 dökümanları ile Türkiye’de kullanılmakta olan tasarım yaklaşımının benzer yanları:

1. Buz yükü haritasının dikkate alınmıyor olması.
2. Sehim-gerilme hesaplarının “Ruling Span” metoduna göre yapıyor olması.

Bu raporda tasarımda uygulanan temel ilkeler ve parametre karşılaştırmalarına yer verilmiştir. Bu parametreler çerçevesinde ülkemizde halen kullanılan enerji nakil hattı direklerinin tasarımlarına ait karşılaştırmalı yük hesapları ayrı bir çalışma konusu olacaktır.

Karşılaştırmalı yük hesapları doğrultusunda, tasarım için uzun yıllardır uygulanmakta olan kriterlerin yeniden ele alınması önerilmektedir. Güncellenecek buz yükü haritası ve oluşturulacak rüzgar yükü haritası yapılacak çalışmaların önemli iki girdisi olacaktır. Bütün bu çalışmalar çerçevesinde güvenilirlik seviyesi prensibi ile iletim sistemimizin daha güvenli ve ekonomik tasarım ve işletimini mümkün kılacak EN 50341-1-2012 standardının Türkiye eki oluşturulabilecektir.

6. Kaynaklar

- [1] *Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği*
- [2] *ASCE 74 (Guidelines for the Electrical Transmission Line Structural Loading)*
- [3] *EN 50341-1-2012 (Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV)*