

# Yüksek Yapılardaki Rüzgar Yüklerinin Hesabı\*

## Özet

Yüksek yapıların tasarımında rüzgar yükleri göz önüne alınması gereken önemli bir faktördür. Çok yüksek ve narin yapılarda rüzgarın statik etkilerinin yanı sıra dinamik etkilerinin de hesaplara katılması gerekir. Dinamik rüzgar yüklerinin binalardaki etkisi yönetmeliklerde eşdeğer statik yük yaklaşımı kullanılarak göz önüne alınır. Eşdeğer statik yük, statik rüzgar yükünü statik ve dinamik rüzgar yüklerinden oluşan toplam deplasmana eşdeğer bir deplasman yaratacak şekilde artırarak elde edilir. Bu makalede binalardaki statik ve dinamik rüzgar yüklerinin hesabındaki ana kabuller ve yaklaşımlar verilmiş ve hesap prosedürü Eurocode şartnamesinde belirtilen yöntemle paralel olarak özetlenmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Rüzgar yükleri, Yüksek yapılar, Dinamik yükler.

## Giriş

Yüksek yapıların tasarımında rüzgar yükleri göz önüne alınması gereken önemli bir faktördür. Çok yüksek ve narin yapılarda rüzgarın statik etkilerinin yanı sıra dinamik etkilerinin de hesaplara katılması gerekir. Binaya etkileyen rüzgar yükleri statik ve dinamik yüklerin toplamı olarak yazılabilir. Statik yükten oluşacak bina yük ve deplasmanları statik analiz yöntemleri kullanarak tayin edilir. Binaya etkileyen rüzgar yüklerinin dinamik kısmı rüzgardaki türbülans zamanla gelişigüzel değişen (random) özellikler gösterdiğinden ancak istatistiksel yöntemler kullanılarak tanımlanabilir ve oluşacak bina yük ve deplasmanları Gelişigüzel Titreşimler Teorisi'ne (Random Vibration Theory) dayalı analiz yöntemleri kullanılarak yapılır.

Bu makalede binalardaki statik ve dinamik rüzgar yüklerinin hesabındaki ana kabuller ve yaklaşımlar verilmiş ve bina davranışının hesabı için kullanılan yöntem özetlenmiştir.

## Rüzgar Hızının Modellenmesi

Herhangi bir noktadaki rüzgar hızı zamanla değişmeyen (statik) ve zamanla değişen (dinamik) kısımlarının toplamı olarak aşağıdaki denklemde verildiği şekilde ifade edilir.

$$V(z,t) = V_m(z) + w(z,t) \quad (1)$$

Bu yazı, İnşaat Mühendisleri Odası 4. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu'nda sunulmuştur.

Burada  $V(z,t)$  zemin yüzeyinden ölçülen  $z$  yüksekliğinde zamanla ( $t$ ) değişen toplam rüzgar hızını göstermektedir.  $V_m(z)$  Ortalama Rüzgar Hızını gösterir ve rüzgarın statik bileşeni olarak adlandırılır.  $w(z,t)$  ise ortalama değer etrafındaki hız değişimlerini (türbülans) ifade eden dinamik rüzgar hızıdır.

### Ortalama (Statik) Rüzgar Hızı

Statik rüzgar hızı rüzgar hızının seçilen bir zaman aralığındaki ortalama değerini gösterir. Ortalam rüzgar hızının hesabında kullanılan zaman aralığı için değişik yönetmeliklerde farklı değerler kullanılmaktadır (Zhou et al., 2002). Örneğin, Amerikan ASCE-7 yönetmeliğinde 3-saniyelik ortalama değer kullanılırken Avrupa Birliği Eurocode-1 da 10 dakikalık ortalama değer kullanılır (ASCE, 2005; Eurocode 1, 2002). Ortalama değer için kullanılan zaman aralığı ne kadar az olursa bulunan ortalama rüzgar hızı da o kadar yüksek olur. Teorik olarak, ortalama için kullanılması gereken ideal zaman aralığı binanın boyutları ve en uzun doğal periyoduyla ilgilidir. Kullanılan zaman aralığının binanın en uzun doğal periyodundan uzun olması, ve bu periyotdaki türbülans dalga boylarının binanın boyutlarından büyük olması gerekir.

Yönetmeliklerde herhangi bir bölge ve yükseklikteki ortalama rüzgar hızı  $V_m(z)$  ampirik olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$V_m(z) = C_e(z) C_t V_b \quad (2)$$

Bu bağıntıda  $V_b$  Temel Rüzgar Hızı'nı,  $C_e(z)$  yükseklikle değişen Yüzey Pürüzlülük Katsayısı'nı ve  $C_t$  de Topoğrafya Katsayısı'nı göstermektedir.

Temel rüzgar hızı açık bir arazide (örneğin hava alanları gibi), yerden 10m yükseklikte herhangi bir yönde ölçülen ortalama rüzgar hızlarından 50 yılda en az bir kere aşılma olasılığına karşı gelen rüzgar hızıdır. İstanbul Atatürk Havaalanı'nda sürekli olarak 1 dakika ara ile yapılan rüzgar hızı ölçüm verilerinin analizi sonucunda ve 10-dakikalık averajları kullanarak İstanbul ve civarı için temel rüzgar hızı  $V_b = 25$  m/s olarak bulunmuştur (Kandilli, 2009).

Yüzey pürüzlülük katsayısı, rüzgarın geldiği doğrultudaki yüzey pürüzlüğünün ortalama rüzgar hızına ve hızın yükseklikle değişimine yaptığı etkileri tanımlayan bir katsayıdır. Bu katsayı aşağıdaki bağıntılarla tanımlanır:

$$\begin{aligned} z > z_{\min} \quad \text{için} \quad C_e(z) &= k_f \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad ; \quad k_f = 0.23(z_0)^{0.07} \\ z \leq z_{\min} \quad \text{için} \quad C_e(z) &= C_e(z_{\min}) \end{aligned} \quad (3)$$

Yukarıdaki bağıntılarda  $z_0$  Yüzey Pürüzlülük Uzunluğu'nu (m),  $z_{\min}$  ise yüzey pürüzlülük katsayısının sabit olduğu minimum yüksekliği (m) göstermektedir. Beş değişik arazi tipi için  $z_0$  ve  $z_{\min}$  değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1** - Yüzey pürüzlülük uzunlukları ( $z_0$ ) ve minimum yükseklikler ( $z_{\min}$ )

Arazi Tip No	Arazi Tipi	$z_0$ (m)	$z_{\min}$ (m)
0	Denize açık kıyı şeritleri	0.003	1
I	Göl çevreleri veya engebesiz düz ve geniş alanlar	0.01	1
II	Seyrek ağaçların ve yapıların olduğu ova, çayır tipi alanlar (engebe aralıkları ortalama engebe yüksekliğinin 20 katından fazla)	0.05	2
III	Köyler, banliyöler, ormanlık alanlar (engebe aralıkları ortalama engebe yüksekliğinin 20 katından az)	0.3	5
IV	Şehir merkezleri ve benzeri en az %15 oranında ortalama yüksekliği 15m ve üzeri yapılarla kaplı alanlar.	1.0	10

Topoğrafya katsayısı  $C_t$  yüzey topoğrafyasının ortalama rüzgar hızına etkisini gözönüne alan bir katsayıdır. İstanbul'daki bütün bölgeler için topoğrafya katsayısı aşağıdaki gibi alınabilir :

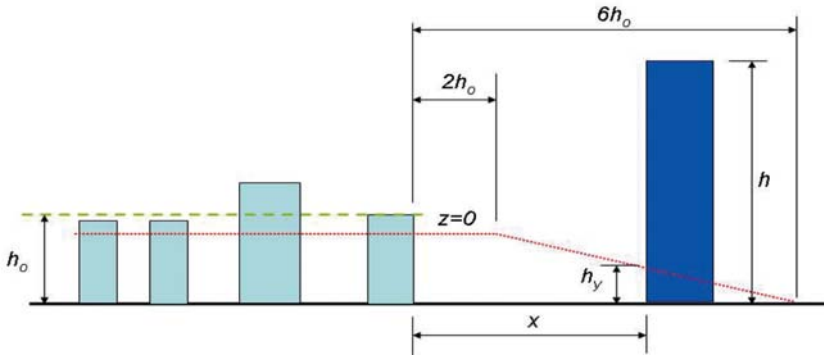
$$C_t = 1.0 + 0.001 \Delta \quad (4)$$

Bu bağıntıda  $\Delta$  bulunan noktanın metre cinsinden deniz seviyesinden olan yüksekliğini gösterir.

Şehir merkezlerinde (Tablo 1 de Arazi tipi IV) etrafı daha alçak yapılarla çevrili yüksek bir yapıya gelen rüzgar yüklerinin hesabında, rüzgarın alçak yapılar tarafından bloke edilmesinin etkisi, zemin seviyesini fiktif olarak yükselterek gözönüne alınır. Yükseltme ile ilgili kurallar aşağıdaki denklemde ve Şekil 1 de verilmiştir. Yüksek yapının rüzgar hesabı normal koşullarda yapıya etkiyen rüzgar profili ve yüklerini düşey yönde  $h_y$  kadar öteleyerek yapılır.

$$\begin{aligned} x \leq 2h_o & \text{ ise } h_y = \min[0.8h_o, 0.6h] \\ 2h_o < x < 6h_o & \text{ ise } h_y = \min[1.2h_o - 0.2x, 0.6h] \\ x \geq 6h_o & \text{ ise } h_y = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Çevre yapıların yüksekliği konusunda detaylı bilginin olmadığı durumlarda  $h_o = 15$  m alınabilir.



Şekil 1 - Çevredeki yapıların ortalama rüzgar hızı profiline etkisi

### Dinamik Rüzgar Hızı (Türbülans)

Dinamik rüzgar hızı Rüzgar Türbülansı olarak adlandırılır. Rüzgar türbülansı, ortalama değeri sıfır olan normal dağılımlı rastgele (random) süreç olarak modellenir. Türbülansın standart sapması,  $\sigma_w$ , temel rüzgar hızın cinsinden aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\sigma_w = k_r V_b \quad (6)$$

Denklemdaki katsayı  $k_r$  Denk. 3 ve Tablo 1 den alınır. Maksimum türbülans rüzgar hızı,  $W_{max}$ , standart sapmanın 3.5 katı olarak alınabilir:

$$\bar{W}_{max} = 3.5 \sigma_w \quad (7)$$

Z yüksekliğindeki maksimum toplam rüzgar hızı  $|V(z,t)|_{max}$  aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$|V(z,t)|_{max} = V_m(z) + \bar{W}_{max} \quad (8)$$

Binalara yaptığı dinamik etkinin hesabı açısından, rüzgardaki türbülansın fiziki özellikleri üç parametre ile tanımlanır: türbülans şiddeti, türbülans uzunluğu, ve türbülans güç spektrumu yoğunluk fonksiyonu.

Türbülansın şiddeti,  $I_w(z)$ , türbülansın standard sapmasının ortalama rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır ve yüksekliğe bağlı olarak aşağıdaki iki denklemden birini kullanarak hesaplanır:

$$z > z_{\min} \text{ için } I_w(z) = \frac{\sigma_w}{V_m(z)} = \frac{1}{C_t \ln(z/z_0)} \quad (9)$$

$$z \leq z_{\min} \text{ için } I_w(z) = I_w(z_{\min})$$

$z_0$  ve  $z_{\min}$  değerleri yukarıda Tablo 1'de verilmiştir.

Türbülans uzunluğu,  $L(z)$ , türbülansı yaratan rüzgar dalgalarının ortalama dalga boyunu gösterir ve yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntılardan hesaplanabilir:

$$z \geq z_{\min} \text{ için } L(z) = 300 \left( \frac{z}{200} \right)^\alpha ; \quad \alpha = 0.67 + 0.05 \ln(z_0) \quad (10)$$

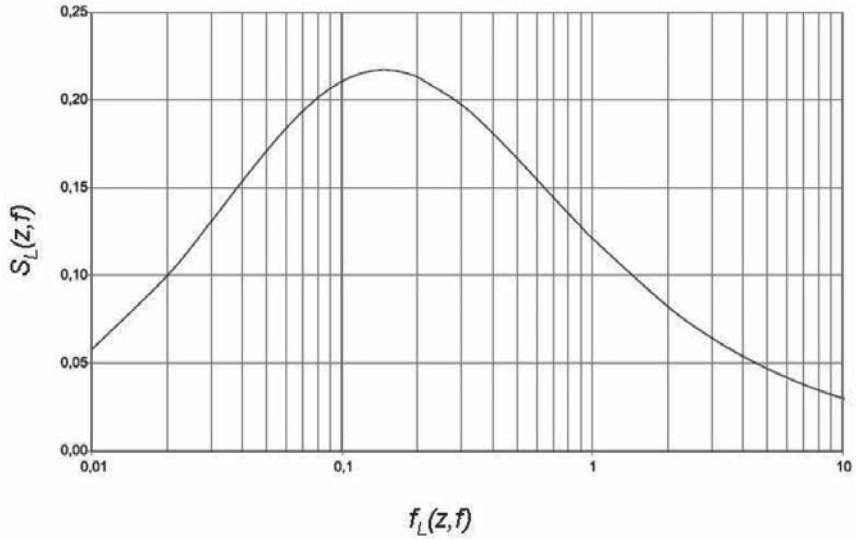
$$z < z_{\min} \text{ için } L(z) = L(z_{\min})$$

$z_0$  ve  $z_{\min}$  değerleri yukarıda Tablo 1'de verilmiştir.

Türbülans güç spektrumu yoğunluk fonksiyonu,  $S_L(z,f)$ , türbülans enerjisinin frekansla değişimini gösterir. Normalize edilmiş boyutsuz frekans,  $f_L(z,f)$ , cinsinden  $z$  yüksekliğindeki türbülans güç spektrumu yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$S_L(z,f) = \frac{6.8 f_L(z,f)}{[1 + 10.2 f_L(z,f)]^{5/3}} ; \quad f_L(z,f) = \frac{f L(z)}{V_m(z)} \quad (11)$$

Burada  $f$  frekansı (Hz) göstermektedir.  $S_L(z,f)$ 'nin  $f_L(z,f)$ 'le değişimi Şekil 2'de verilmiştir.



**Şekil 2** - Türbülans güç spektrumu yoğunluk fonksiyonunun normalize edilmiş frekansla değişimi.

## Rüzgar Basıncının Modellenmesi

Rüzgar basıncı havanın kütle yoğunluğu ve rüzgar hızının karesi ile orantılıdır. Rüzgara dik doğrultudaki düzlemde z yüksekliğindeki bir birim alana gelen maksimum rüzgar basıncı  $q_p(z)$  aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \rho |V(z,t)|_{\max}^2 \quad (12)$$

Yukarıdaki bağıntıda,  $|V(z,t)|_{\max}$  Denk.(8)'e göre z yüksekliğinde etki eden maksimum rüzgar hızını,  $\rho$  ise havanın yoğunluğunu göstermektedir ( $\rho = 1.25 \text{ N/m}^3$ ). Denk.(8) i Denk.(12)'de kullanarak ve yerine konular ve  $W_{\max} \ll V_m(z)$  dolayısıyla  $W_{\max}^2 \approx 0$  olduğu gözönüne alınır, maximum rüzgar basıncı için aşağıdaki yaklaşık bağıntı yazılabilir:

$$q_p(z) \approx \frac{1}{2} \rho V_m^2(z) + \rho V_m(z) \cdot \bar{w}_{\max} \quad (13)$$

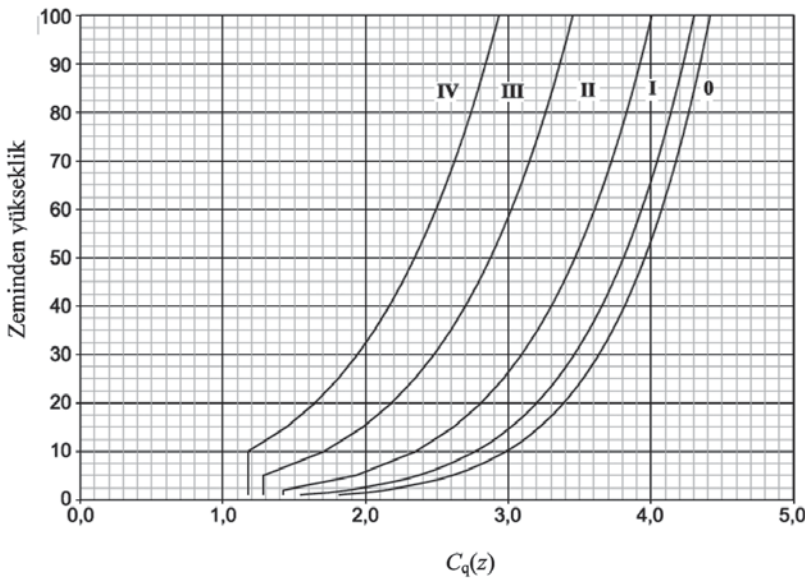
Denk.(9) ve Denk.(10)'dan yararlanılarak

$$q_p(z) \approx \frac{1}{2} \rho V_m^2(z) [1 + 7I_w(z)] \rightarrow q_p(z) \approx C_q(z) q_b \quad (14)$$

Bu bağıntıda yer alan Temel Rüzgar Basıncı  $q_b$  ve yükseklikle değişen Etkilenme Katsayısı  $C_q(z)$ , Denk.(2)'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2(z) \quad ; \quad C_q(z) = C_e^2(z) C_t^2 [1 + 7I_w(z)] \quad (15)$$

Tablo 1'de verilen beş arazi tipi için  $C_q(z)$ 'nin yükseklikle değişimi,  $C_t$  topoğrafya katsayısı 1.0 kabul edilerek, Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3 -  $C_q(z)$ 'nin yükseklikle değişimi (topoğrafya katsayısı  $C_t = 1$  alınmıştır)

## Bir Yüze Etkiyen Maksimum Rüzgar Yükü

Rüzgara dik doğrultudaki düzlemde  $z$  yüksekliğindeki bir yüze etkiyen maksimum rüzgar yükü,  $Q(z)$ , maksimum rüzgar basıncı  $q_p(z)$ 'nin yüzey alanı  $A$  ve Yüzey Basınç Katsayısı  $C_p$  ile çarpılmasıyla bulunur:

$$Q(z) = q_p(z) C_p A \quad (16)$$

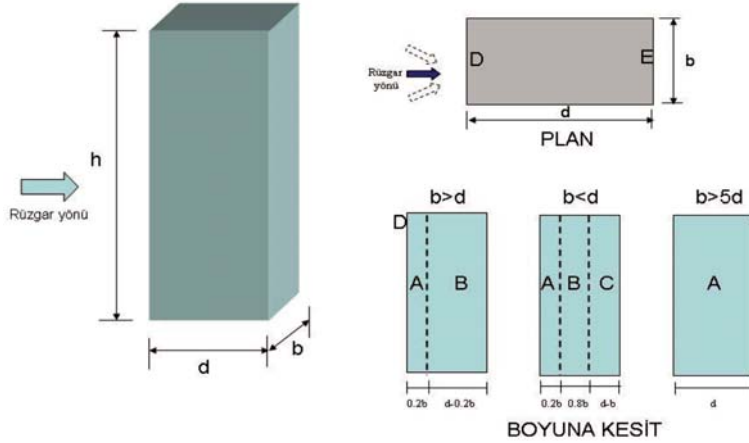
$C_p$  katsayısının değeri ve işareti yüzeyin binadaki konumuna göre (örneğin, binanın rüzgara göre ön yüzünde, arka yüzünde, yan yüzünde, çatıda, veya yapının içinde olmasına göre) değişir. Artı işaretli katsayılar yüze dik doğrultudaki basınca, eksi işaretli katsayılar ise yüze dik doğrultudaki çekmeye karşı gelir.

Binaya ve bina elemanlarına gelen rüzgar yüklerinin hesabında kullanılacak  $C_p$  katsayısının değeri rüzgara maruz yüzeyin büyüklüğüne göre değişir.  $1.0 \text{ m}^2$  veya daha küçük alanlar için  $C_{p,1}$  katsayısı,  $10.0 \text{ m}^2$  veya daha büyük alanlar için  $C_{p,10}$  katsayısı kullanılır. Aradaki alan değerlerine karşı gelen  $C_{p,A}$  değerleri logaritmik interpolasyonla aşağıdaki denklemde gösterildiği şekilde bulunur:

$$C_{p,A} = C_{p,1} - (C_{p,1} - C_{p,10}) \log_{10} A \quad (1 \text{ m}^2 \leq A \leq 10 \text{ m}^2) \quad (17)$$

Genel olarak,  $C_{p,1}$  katsayısı yapısal olmayan elemanlara ve bağlantılarına gelen rüzgar yüklerinin hesabında,  $C_{p,10}$  katsayısı ise yapının taşıyıcı sistemine gelen yüklerin hesabında kullanılır.

Örnek olarak, dikdörtgen kesitli binalar için binanın rüzgar yükleri açısından değişik bölgeleri Şekil 4'de, her bölgeye karşı gelen  $C_{p,1}$  ve  $C_{p,10}$  katsayıları ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4 - Dikdörtgen kesitli binalar için basınç katsayısı bölgeleri

Tablo 2 - Dikdörtgen kesitli binalar için basınç katsayıları

	A (yan yüz)		B (yan yüz)		C (yan yüz)		D (ön yüz)		E (arka yüz)	
	$C_{p,10}$	$C_{p,1}$	$C_{p,10}$	$C_{p,1}$	$C_{p,10}$	$C_{p,1}$	$C_{p,10}$	$C_{p,1}$	$C_{p,10}$	$C_{p,1}$
5	-1.2	-1.4	-0.8	-1.1	-0.5	-	+0.8	+1.0	-0.7	-
1	-1.2	-1.4	-0.8	-1.1	-0.5	-	+0.8	+1.0	-0.5	-

Not:  $h/d$  nin ara değerlerine karşı gelen katsayılar interpolasyonla bulunur.  $h/d > 5$  için  $h/d = 5$  değerleri kullanılabilir.

Eğimli çatılar, parapetler, tabelalar, vb. gibi diğer yapı yüzey tipleri için gerekli basınç katsayıları değişik kaynaklardan bulunabilir (örn. Eurocode 1).

## Binalara Etkiyen Rüzgar Yükleri

Binaya etkiyen rüzgar yüklerinin statik kısmı yukarıda verilen formülleri kullanarak ortalama rüzgar hızı cinsinden binanın her noktası için hesaplanabilir. Oluşacak bina yük ve deplasmanları statik analiz yöntemleri kullanarak tayin edilir. Binaya etkiyen rüzgar yüklerinin dinamik kısmı rüzgardaki türbülans zamanla gelişigüzel değişen (random) özellikler gösterdiğinden ancak istatistiki metotlar kullanılarak hesaplanmış avaraj türbülans parametreleri cinsinden tarif edilebilir. Yukarıda tarif edilen türbülans standart sapması ve türbülans güç spektrumu yoğunluk fonksiyonu bu tip parametrelerdir.

Türbülans yükü ancak istatistiki yöntemlerle tarif edilebildiği için yapının türbülansdan oluşan dinamik davranışının hesabı Gelişigüzel Titreşimler Teorisi'ne (Random Vibration Theory) dayalı analiz yöntemleri kullanılarak yapılmalıdır. Bu metotlarda binadaki herhangi bir noktaya gelen rüzgar yükünün zamanla değişiminin istatistiki özelliklerinin yanı sıra yükün bina yüzeyindeki dağılımının istatistiki özellikleri (yüzeysel korelasyonunu) da hesaplara katılır. Hesaplamalar sonunda binanın dinamik davranışının istatistiki özelliklerini gösteren parametreler elde edilir (örn. bina deplasmanının standard sapması, deplasman güç spektrumu yoğunluk fonksiyonu, deplasman korelasyon fonksiyonları gibi). Bu parametreleri kullanarak çeşitli olasılık değerleri için beklenen maksimum dinamik deplasman ve yükler hesaplanır. Konuyla ilgili detaylı teorik bilgiler ve uygulamaları literatürde bulunabilir (Safak and Foutch, 1980, 1987 ; Simiu and Scanlan, 1978).

Dinamik rüzgar yüklerinin binalardaki etkisi yönetmeliklerde eşdeğer statik yük yaklaşımı kullanılarak göz önüne alınır. Eşdeğer statik yük, statik rüzgar yükünü statik ve dinamik rüzgar yüklerinden oluşan toplam deplasmana eşdeğer bir deplasman yaratacak şekilde artırarak elde edilir. Bu artırma katsayısı türbülans faktörü (gust factor) olarak bilinir. Eşdeğer statik yükleri kullanarak binada rüzgardan oluşan toplam deplasmanlar statik analiz yöntemleri kullanılarak hesaplanır.

Binada rüzgardan oluşan titreşimlerin dinamik özelliklerinin de hesaplanması gerektiğinde (örneğin, oturanların konforunu açısından binadaki ivme değerlerinin de hesaplanması gerektiğinde) Gelişigüzel Titreşimler Teorisi yöntemlerini kullanarak detaylı dinamik analiz yapılması gerekir.

Aşağıda dikdörtgen ve daire kesitli binalara gelen rüzgar yüklerinin hesabı teorik detaylara girmeden şartnamelerde verildiği şekilde özetlenmiştir.

### Dikdörtgen-Kesitli Binalara Etkiyen Rüzgar Yükleri

Planda dikdörtgen kesitli bir binaya etkiyen toplam rüzgar yükü  $F$  aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$F = F_{ex} + F_{in} + F_{fr} \quad \text{ve}$$

$$\begin{aligned} F_{ex} &= C_s \cdot C_d \cdot \sum_{\text{yüzeysel alanı}} q_p(z_e) C_{pe} A_{ex} \\ F_{in} &= \sum_{\text{yüzeysel alanı}} q_p(z_i) C_{pi} A_{in} \\ F_{fr} &= \sum_{\text{yüzeysel alanı}} q_p(z_e) C_{fr} A_{fr} \end{aligned} \quad (18)$$

burada

$F_{ex}$  = Dış yüzeylere etkiyen yükler

$F_{in}$  = İç yüzeylere etkiyen yükler

$F_{fr}$  = Yan yüzeylere etkiyen sürtünme yükleri

$C_s$  = Yük korelasyon katsayısı

$C_d$  = Dinamik rezonans katsayısı

$q_p(z_e)$  = Dış yükseklik  $z_e$  deki maksimum basınç

$q_p(z_i)$  = İç yükseklik  $z_i$  deki maksimum basınç

$C_{pe}$  = Dış basınç katsayısı

$C_{pi}$  = İç basınç katsayısı

$C_{fr}$  = Sürtünme katsayısı

$A_{ex}$  = Referans dış yüzey alanı

$A_{in}$  = Referans iç yüzey alanı

$A_{fr}$  = Referans yan yüzey alanı  
(referans sürtünme alanı)

İç basınç katsayıları bina yüzündeki açıklıkların boyutu ve sıklığı ile değişir. Bir yüzdeki açıklıklar diğer yüzdeki açıklıkların en az iki katı veya daha fazla ise, o yüz iç basınçlar açısından binanın hakim yüzü olarak adlandırılır. Hesaplarda pencere ve kapı boşluklarının açık olacağı kabul edilir. İç basınç katsayıları açıklık oranına bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

Eğer yüzeydeki açık alanlar diğer yüzeylerdeki açık alanların toplamının en az iki katı ise:

$$C_{pi} = 0.75C_{pe}$$

Eğer yüzeydeki açık alanlar diğer yüzeylerdeki açık alanların toplamının en az üç katı ise:

$$C_{pi} = 0.90C_{pe}$$

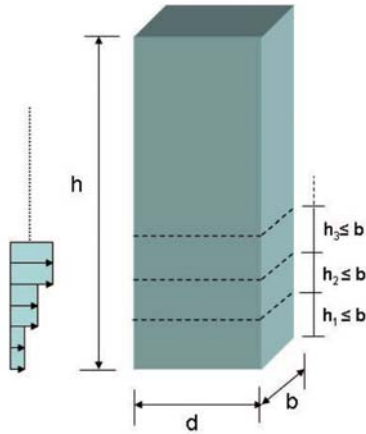
Burada  $C_{pe}$  hakim yüzdeki dış basınç katsayısını gösterir. Eğer açık alanlar değişik basınç katsayısına sahip bölgelerde ise,  $C_{pe}$  alan-ağırlıklı ortalama alınarak hesaplanır.

Duvarlar, parapetler, ve çatı yüzeyleri için sürtünme katsayıları aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$C_{fr} = 0.01$  - pürüzsüz yüzeyler için (örn., çelik, düzgün beton gibi)

$C_{fr} = 0.02$  - pürüzlü yüzeyler için (örn., düzgün olmayan beton, asfalt kaplamalı yüzeyler gibi)

$C_{fr} = 0.04$  - Çok pürüzlü yüzeyler için (örn., ondelalı çatı kaplamaları gibi)



**Şekil 5** - Rüzgar yüklerinin düşey doğrultuda değişiminin gözönüne alınması

Sürtünme yüzeyi rüzgar yönü doğrultusundaki dış yüzeylerden oluşur. Düşey duvarlar için, sürtünme alanı rüzgar yönündeki toplam düşey duvar alanıdır. Çatılar için sürtünme alanı rüzgarın geldiği taraftaki çatı kenarından (2 x ön yüz genişliği) veya (4 x çatı yüksekliği) değerlerinden küçük olan kadar uzaklaştıktan sonra geriye kalan çatı alanıdır.

Binaya gelen toplam yükleri hesaplarken bina düşey doğrultuda Şekil 5'de gösterildiği gibi dilimlere ayrılır ve her dilime gelen yükler ayrı ayrı hesaplanır. Dilimlerin yüksekliği rüzgara dik yöndeki bina genişliğinden daha fazla olmamalıdır. Yatay doğrultuda yüklerin düzgün olarak dağıldığı kabul edilecektir.

$C_s$  katsayısı ile, maksimum rüzgar yüklerinin bina yüzeyine her noktada aynı anda (tam korelasyonlu) etki etmediği gözönüne alınır.  $C_d$  katsayısı ise, dinamik rüzgar yükleri altında yapının dinamik davranışı (titreşimi) ve rezonans nedeniyle yerdeğiştirmelerde meydana gelen artışı gözönüne alır.  $C_s$  ve  $C_d$  katsayıları aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$C_s = \frac{1 + 7I_w(z_r)\sqrt{B^2}}{1 + 7I_w(z_r)} \quad ; \quad C_d = \frac{1 + 7I_w(z_r)\sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_w(z_r)\sqrt{B^2}} \quad (19)$$

veya

$$C_s C_d = \frac{1 + 7I_w(z_r)\sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_w(z_r)}$$

Yukarıdaki bağıntılarda  $z_r$  referans yüksekliği (m) (toplam yüksekliğin %60'ı olarak alınabilir;  $z_r = 0.6h$ ),  $I_w(z_r)$  referans yükseklikteki türbülans şiddetini,  $B^2$  korelasyon faktörü'nü ve  $R^2$  ise rezonans faktörü'nü göstermektedir. Yukarıdaki bağıntılar, rüzgar doğrultusundaki titreşimlere birinci modun hakim olduğu planda dikdörtgen binalar için geçerlidir. Korelasyon faktörü  $B^2$  aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:



$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \left[ \frac{b+h}{L(z_r)} \right]^{0.63}} \quad (20)$$

Bu bağıntıda, b binanın rüzgara dik doğrultudaki genişliğini (m), h binanın yüksekliğini (m),  $L(z_r)$  ise referans yükseklik  $z_r$ 'deki ( $z_r = 0.6h$ ) türbülans uzunluğunu (m) göstermektedir. Rezonans faktörü  $R^2$  aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} \cdot S_L(z_r, f_o) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) \quad (21)$$

Bu bağıntıda,  $\delta$  binanın birinci moduna karşı gelen logaritmik azalım katsayısı'nı,  $f_o$  binanın birinci doğal titreşim frekansı'nı (Hz),  $S_L(z_r, f_o)$  türbülans güç spektrumu yoğunluk fonksiyonunun  $z_r$  ve  $f_o$ 'daki değerini,  $R_h(\eta_h)$  düşey doğrultudaki aerodinamik kabul fonksiyonu'nu,  $R_b(\eta_b)$  ise yatay doğrultudaki aerodinamik kabul fonksiyonu'nu göstermektedir. Logaritmik azalım katsayısı  $\delta$ , binanın birinci moduna karşı gelen sönüm katsayısı  $\xi_o$  cinsinden aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\delta = \frac{2\pi\xi_o}{\sqrt{1-\xi_o^2}} \approx 2\pi\xi_o \quad (22)$$

Birinci modun hakim olduğu bina titreşimleri için  $R_h(\eta_h)$  ve  $R_b(\eta_b)$  fonksiyonları aşağıdaki bağıntılardan elde edilir:

$$\begin{aligned} R_h(\eta_h) &= \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) \quad ; \quad \eta_h = \frac{4.6h}{L(z_r)} f_L(z_r, f_o) \quad [ \eta_h = 0 \text{ ise } R_h(\eta_h) = 1 ] \\ R_b(\eta_b) &= \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) \quad ; \quad \eta_b = \frac{4.6b}{L(z_r)} f_L(z_r, f_o) \quad [ \eta_b = 0 \text{ ise } R_b(\eta_b) = 1 ] \end{aligned} \quad (23)$$

Yukarıdaki bağıntılarda h binanın yüksekliğini (m), b rüzgara dik doğrultudaki genişliğini (m),  $z_r$  referans yüksekliği ( $z_r = 0.6h$ ),  $f_L(z_r, f_o)$  normalize edilmiş boyutsuz frekans (Denk. 11),  $L(z_r)$  ise referans yükseklik  $z_r$ 'deki ( $z_r = 0.6h$ ) türbülans uzunluğunu (m, Denk. 10) göstermektedir.

### Dairesel-Kesitli Binalara Etkiyen Rüzgar Yükleri

Dairesel kesitli binalara etkiyen rüzgar yükleri dikdörtgen kesitli binalara etkiyen rüzgar yüklerine benzer şekilde hesaplanır. Tek fark basınç katsayısı  $C_p$  nin hesabındaki değişiktir. Dairesel kesitlerde, basınç katsayısı  $C_p$  aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$C_p = C_{p,0} \cdot \Psi_\alpha \quad (24)$$

Burada

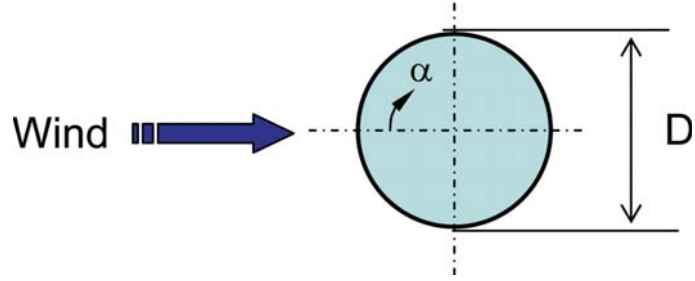
$C_{p,0}$  = End-Effect'siz basınç katsayısı

$\Psi_\alpha$  = End-Effect faktörü

End-Effect faktörü dairesel kesitte bulunulan bölgeyi tanımlayan  $\alpha$  açısına bağlıdır (Şekil 6) ve aşağıda verildiği şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \quad &: \quad \Psi_\alpha = 1 \\ \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_A \quad &: \quad \Psi_\alpha = \Psi_A + (1 - \Psi_A) \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right] \\ \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ \quad &: \quad \Psi_\alpha = \Psi_A \end{aligned} \quad (25)$$

$\alpha_{\min}$  ve  $\alpha_A$  minimum basınç ve akımın ayrılma noktalarına karşı gelen  $\alpha$  değerlerini gösterir. Bu değerler Tablo 3 de verilmiştir.



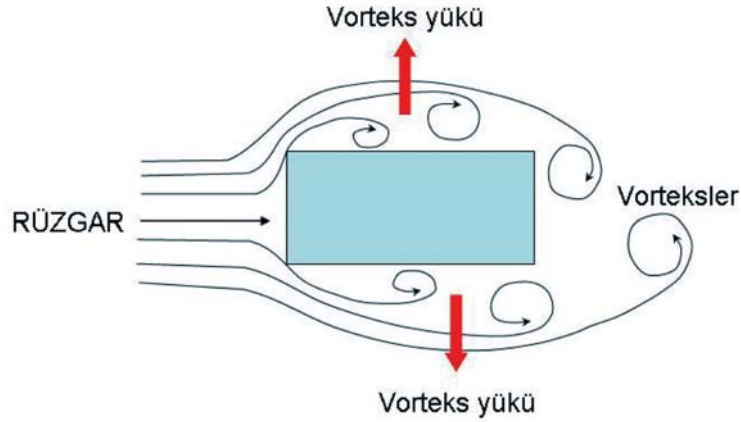
Şekil 6 - Dairesel kesitlerde rüzgar akımı.

Tablo 3 - Dairesel kesitlerde basınç dağılımını kontrol eden parametreler.

$\alpha_{min}$	$C_{p0,min}$	$\alpha_A$	$C_{p0,A}$
75	-1.5	105	-0.8

### Vorteks Titreşimleri

Rüzgarın oluşturduğu hava akımı binanın yan yüzleri etrafından geçerken Şekil 7'de şematik olarak gösterildiği türde vorteksler oluşur. Vorteksler değişken olarak (önce bir yan yüzde, sonra karşı yan yüzde) oluştuğu için vortekslerin yarattığı dinamik yükler de değişken yönlü olup rüzgar akış yönüne dik doğrultuda etkirler. Vorteks yükleri çok belirgin ve dar bir frekans bandında etkidiği için sinüzoidal bir yük olarak tanımlanabilirler.



Şekil 7 - Vorteks yüklerinin oluşumu.

Vorteks yüklerinin frekansı, binanın rüzgara dik doğrultudaki doğal frekansına yakın ise yüksek binalarda bu doğrultuda büyük genlikli titreşimler oluşabilir. Aşağıdaki durumlarda vorteks titreşimleri ihmal edilebilir:

$$\begin{aligned} h/d_{min} &< 6 \\ V_{cr} &> 1.25V_m(H) \end{aligned} \quad (26)$$

Bu bağıntılarda  $h$  binanın yüksekliğini,  $d_{min}$  rüzgara dik doğrultudaki en kısa genişliğini,  $V_m(H)$  binanın tepesindeki ortalama rüzgar hızını (m/s),  $V_{cr}$  ise aşağıda tanımlanan kritik rüzgar hızı'nı (m/s) göstermektedir.

$$V_{cr} = \frac{b f_{oy}}{S_t} \quad (27)$$

Bu bağıntıda, b rüzgarın geldiği yüzdeki genişliğini (m),  $f_{oy}$  binanın rüzgara dik doğrultudaki doğal frekansını (Hz),  $S_t$  ise Strouhal sayısını göstermektedir. Planda dairesel binalar için Strouhal sayısı 0.18 dir. Enkesiti keskin köşeli dikdörtgen yapılar için Strouhal sayısı kesitin derinlik/genişlik (d/b) oranına göre aşağıdaki Tablo 4'de verilmiştir. Ara d/b değerleri için lineer interpolasyon yapılabilir.

**Tablo 4** - Strouhal sayısının kesitin derinlik/genişlik (d/b) oranına göre değişimi

d/b	1	2	3	3.5	5	10
$S_t$	0.12	0.06	0.06	0.15	0.11	0.09

Vorteks titreşimleri rezonant tipi titreşimler olduğu için, genlikleri çok yüksek değerlere ulaşabilir. Yukarıdaki kriterler çerçevesinde vorteks olasılığı varsa, binaya vortekslerin oluşmasını önleyici aerodinamik elemanlar veya vorteks titreşimlerinin genliğini azaltıcı sönüm sistemleri eklenir.

Vorteks titreşimlerinin yaratacağı maksimum ivme ve yerdeğiştirmeler için literatürde hesap yöntemleri mevcuttur (ESDU-90036, 1990; ESDU-96030, 1996). Detaylı analiz bir uzman yardımını gerektirir.

## Rüzgar Kuyruğu Etkileri

Yüksekliğinin genişliğine oranı dört veya daha büyük ve başka bir yüksek binanın arkasında yer alan yüksek binalar, öndeki binanın rüzgar akışında yaptığı etkiler nedeniyle ilave türbülans etkilerine maruz kalırlar. Bu etki Rüzgar Kuyruğu Etkileri (Wake Buffeting) olarak adlandırılır.

Rüzgar kuyruğu etkileri aşağıdaki iki koşuldan birinin sağlandığı durumlarda ihmal edilebilir:

- İki bina arasındaki uzaklığın, öndeki binanın rüzgara dik doğrultudaki genişliğinin 25 katından daha fazla olması durumu,
- Binanın (arkadaki bina) doğal frekansının 1.0 Hz'den daha büyük olması durumu.

Aksi taktirde rüzgar kuyruğu etkileri gözönüne alınmalıdır. Çözüm için rüzgar tüneli deneyleri veya uzman tavsiyesi gerekebilir.

## Rüzgar Tüneli Deneyleri

Mimarisi, yapısal özellikleri veya konumu nedeniyle (örneğin geometrisi, yüksekliği, kesiti, kullanılan malzeme, bulunduğu mevki veya çevresindeki yapılar gibi) standard olmayan yüksek yapıların rüzgar davranışının ortaya çıkarılabilmesi için genelde rüzgar tüneli deneyleri gerekir. Bunlar arasında aşağıdaki bina tiplerini sayabiliriz:

- Çok yüksek ve düzgün olmayan en kesitlere sahip binalar.
- Çok esnek binalar (örn. tabii frekansı 1,0 Hz ün altında olan binalar).
- Vorteks titreşimlerine, kuyruk çarpmalarına, ve benzer aerodinamik stabilite problemlerine maruz olabilecek binalar.
- İçinde yaşayanları rahatsız edecek ölçüde titreşim yapması beklenen binalar.
- Yapısal sisteme ve elemanlarına gelen rüzgar yüklerinin çok daha hassas olarak hesaplanmasını gerektiren binalar.

Rüzgar tüneli deneylerinde aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır:

- Rüzgar tüneli, binanın bulunduğu bölgedeki atmosferik sınır tabakasını, yani rüzgar hızının yükseklikle değişimini modelleyebilmelidir.
- Türbülansın makro (integral) ve mikro ölçekteki uzunlukları tüneldeki modelde de sağlanmalıdır.

- c) Bina, etrafındaki yapılar ve bölgenin topoğrafyası geometrik olarak gerçekteki benzer şekilde modellenmelidir.
- d) Model binanın ve etrafındaki yapıların rüzgar doğrultusundaki projeksiyonunun alanı toplam tünel alanının %8 inden fazla olmamalıdır.
- e) Rüzgar basıncının tünel boyunca değişimi gözönüne alınmalıdır.
- f) Reynolds sayısının rüzgar basınç ve yüklerindeki etkisi en aza indirilmelidir.
- g) Deneyde kullanılan ölçme sensörleri ölçülen değerlerin gerektirdiği özelliklere ve hassasiyete sahip olmalıdır.
- h) Rüzgar yüklerinin yanı sıra binanın dinamik davranışı da ölçülecekse, dinamik davranışı kontrol eden parametreler (kütle, rijitlik, sönüm gibi) modelde gerçekçi şekilde temsil edilmelidir.

Rüzgar tüneli deneyleri yukarıda verilen bütün hesap yöntemlerine alternatif olarak kullanılabilir (ASCE, 1999).

### **Kaynaklar**

- ASCE (1999). Wind Tunnel Model Studies of Buildings and Structures, Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 67, American Society of Civil Engineers, New York.
- ASCE (2005). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE Standard, ASCE/SEI 7-05.
- ESDU 90036 (1990). Structures of non-circular cross section: Dynamic response due to vortex shedding, HIS ESDU International, London.
- ESDU 96030 (1996). Response of structures to vortex shedding: Structures of circular or polygonal section, HIS ESDU International, London
- Eurocode 1 (2002). Action on structures, prEN 1991-1-4.6:2002.
- Kandilli (2009). İstanbul Yüksek Binalar Rüzgar Yönetmeliği, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, Çengelköy, İstanbul, Ağustos 2009.
- Safak, E. and D.A. Foutch (1980). Vibration of buildings under random wind loads, Structural Research Series, SRS No. 480, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois, May 1980.
- Safak, E. and D.A. Foutch (1987). Coupled vibrations of rectangular buildings subjected to normally-incident random wind loads, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier Science Ltd., 26 (1987) pp.129-148.
- Simiu E. and R.H. Scanlan (1978). Wind Effects on Structures, John Wiley & Sons, New York.
- Zhou, Y., Kijewski, T. and Kareem, A. (2002). Along-Wind Load Effects on Tall Buildings: Comparative Study of Major International Codes and Standards, Journal of Structural Engineering, ASCE, June 2002.