

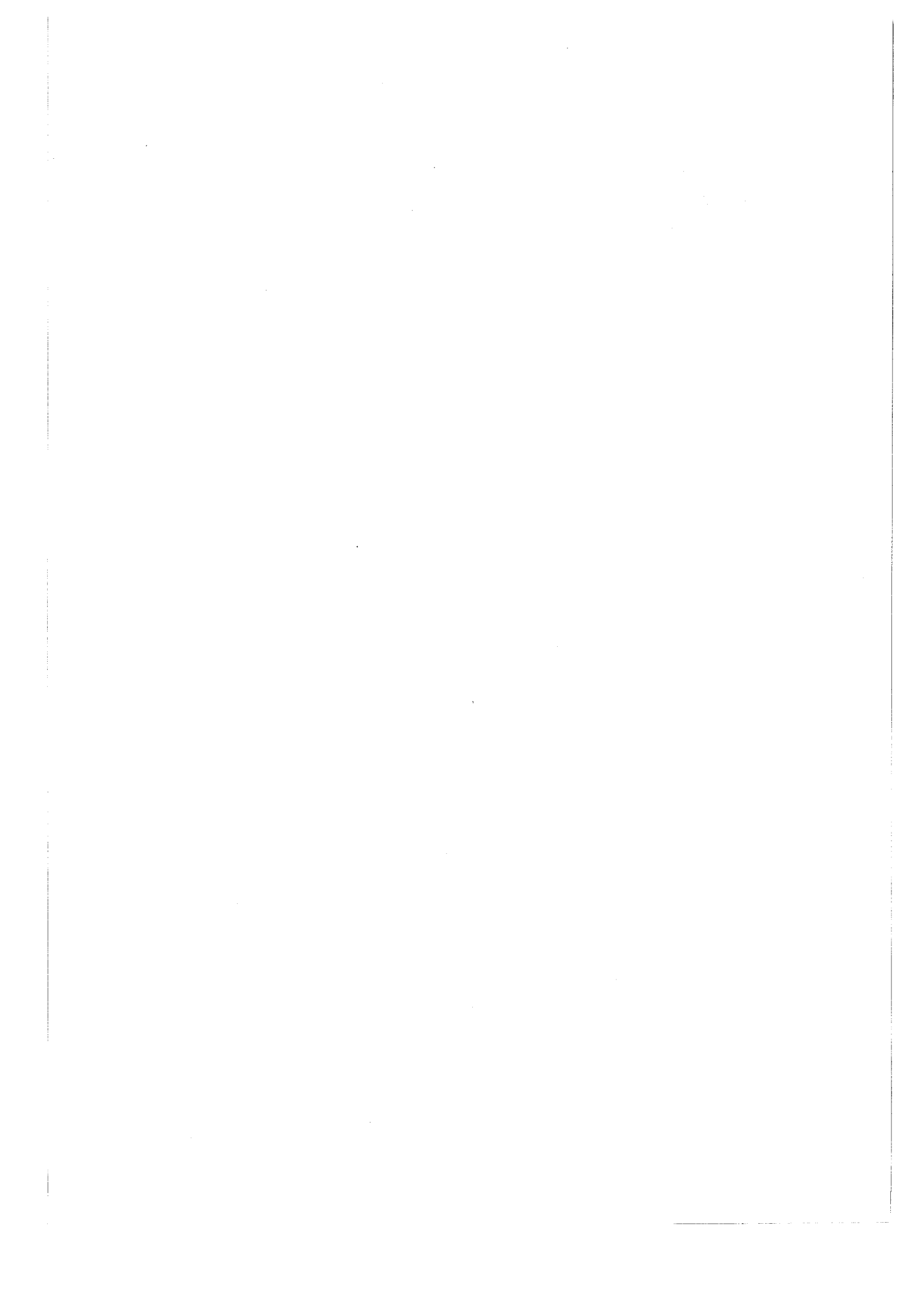


**T.M.M.O.B.  
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI  
İZMİR ŞUBESİ**

# **ÇOK KATLI YAPILAR SEMPOZYUMU**

**(21-22-23 Eylül 1989)**

**Araş. Müh. Zeynep DURUKAN  
Öğr. Üyesi İnş. Müh. Semih S. TEZCAN  
YÜKSEK BİNALARIN RÜZGAR  
VE DEPREM ANALİZİ**



# YÜKSEK BİNALARIN RÜZGAR VE DEPREM ANALİZİ

*Zeynep Durukan<sup>1</sup>, Semih S. Tezcan<sup>2</sup>*

## ÖZET

Yüksek binalar ile kule, baca ve anten direği gibi yüksek yapılar için kabul edilebilecek rüzgâr ve deprem yatay kuvvetlerinin hesaplanmasına ait yaklaşık metodlar gözden geçirilmiştir.

Önce, rüzgârın dinamik etkiyen bir yük olduğu gözönüne alınarak, yapının yüksekliğine, şekline ve arazi durumuna tabi olarak rüzgâra paralel basınç kuvvetlerinin tayini için kullanılan hesap metodları, daha sonra deprem yüklerinin tayininde Japonya'da kullanılan yönetmelik esasları ve dinamik analiz usulleri genel hatları ile incelenmiştir.

---

<sup>1</sup>*Araştırma Mühendisi, Yapı Merkezi, Çamlıca, İstanbul,*

<sup>2</sup>*İnşaat Mühendisliği öğretim üyesi, Boğaziçi Üniversitesi, Bebek, İstanbul,  
Teknik Bölüm Başkanı, Yapı Merkezi, Çamlıca, İstanbul.*

## 1. RÜZGÂR YÜKLERİ

### 1.1 Rüzgâr Hızının Üstel Kanunla Değişimi

Rüzgâr hızının yükseklikle arttığı yapılan ölçülerden anlaşılmıştır. Yer yüzündeki maniaların cins ve yoğunluğuna göre bu hız değişimi farklılık arzeder. Yer yüzünden belli bir yükseklik sonra ( $h_g$ ) rüzgârın hızı sabit kalır ki bu sabit hıza  $v_g$  = Geostrophic hız denir. Amerikan Şartnamesi (ANSI, 1972)'ye göre geostrophic hıza erişilen yükseklikler ile, yerden  $h$  yüksekliğindeki bir seviyedeki hızın değerini veren

$$v_h = v_g \left( \frac{h}{h_g} \right)^n \quad (1.1)$$

üstel formüldeki  $n$  = üs değeri Tablo 1.1 de verilmiş, ayrıca Şekil 1.1 de gösterilmiştir.

TABLO 1.1 - ANSI, 1972 DEĞERLERİ

ŞEHİR		SAYFIYE		AÇIKLIK	
$h_g$	$n$	$h_g$	$n$	$h_g$	$n$
460 m	1/3	365 m	1/4.5	275 m	1/7

Genellikle rüzgâr hızları açıklık bir yerde ve yer yüzünden  $h = 10$  m yükseklikte ölçüldüğü için, şehir içinde veya sayfiyede herhangi bir  $h$  yüksekliğindeki  $v_h$  rüzgâr hızını bulmak için önce açıklıktaki geostrophic hız  $v_{g3}$  bulunur, ondan sonra üstel formül ile herhangi bir cins zemin şartı için hız formülü yardımı ile rüzgâr hızı bulunur. Meselâ açıklıkta  $h_3 = 10$  m de ölçülen rüzgâr hızı  $v_{10,3} = 42$  m/san ise, şehir içinde ve sayfiyedeki  $h$  yüksekliğindeki rüzgâr hızları için sırası ile

$$v_{h1} = 42 \left(\frac{275}{10}\right)^{0.143} \left(\frac{h}{460}\right)^{0.333}$$

$$v_{h2} = 42 \left(\frac{275}{10}\right)^{0.143} \left(\frac{h}{365}\right)^{0.222}$$

$$v_{h3} = 42 \left(\frac{h}{10}\right)^{0.143}$$

yazılır. Çeşitli yüksekliklerde rüzgâr hızlarının  $h = 10$  m'deki ve ayrıca açıklıktaki  $h_3 = 10$  m deki hızın kaç katı olacağı Şekil 1.1 de grafik olarak gösterilmektedir.

## 1.2 Rüzgâr Hızının Logaritmik Kanunla Değişimi

Rüzgâr hızının logaritmik bir kanunla değiştiğini kabul etmek Emil Simiu (1973) tarafından ayrıntıları ile verildiği gibi çoğu kere

ölçülen hızlara daha yakın değerler vermektedir. Bu kanuna göre herhangi bir  $h$  yüksekliğindeki hız

$$v_h = \frac{u}{k} \text{Ln} (h/z_0) \quad (1.2)$$

$$k = \sqrt{K} \text{Ln} (10/z_0) \quad (1.3)$$

formülünden bulunur. Burada,  $u$  = yüzey gerilmesi,  $k$  = sürtünme katsayısı,  $z_0$  = yüzeydeki pürüz yüksekliğidir. Geostrophic rüzgâr hızı için

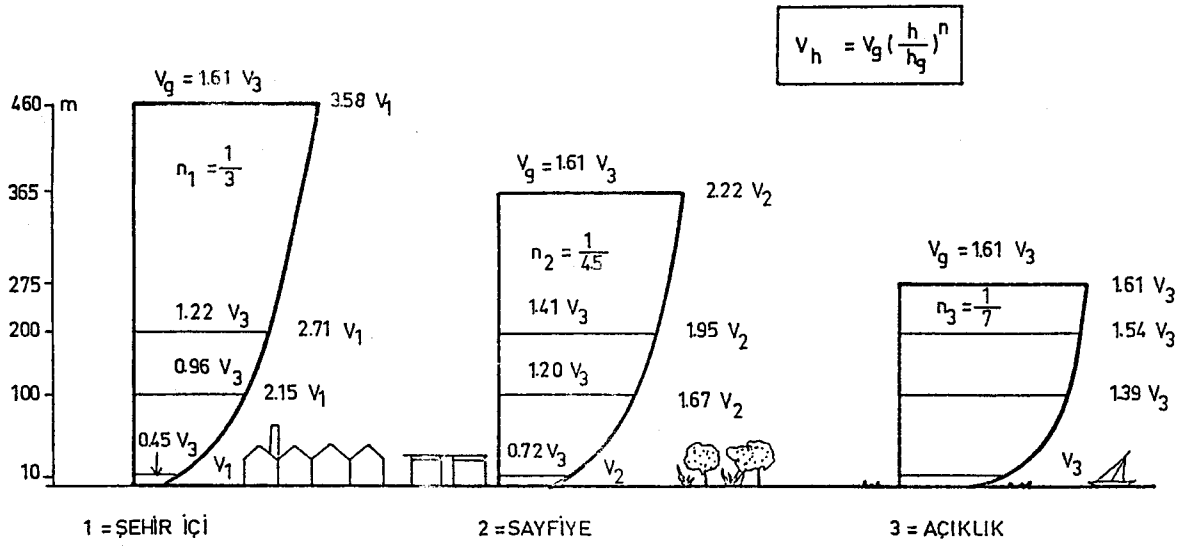
$$v_g = \frac{u}{k} \left( 20 + \left( \text{Ln} 10^4 \frac{u}{z_0} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (1.4)$$

verilmektedir. Pürüz yüksekliği  $z_0$  ile, sürtünme katsayısı  $k$ 'yı veren  $K$  sayıları Tablo 1.2 de gösterilmektedir.

Herhangi bir yüzey cinsi için 10 m'de ölçülmüş rüzgâr hızı biliniyorsa, Denklem 1.2 den

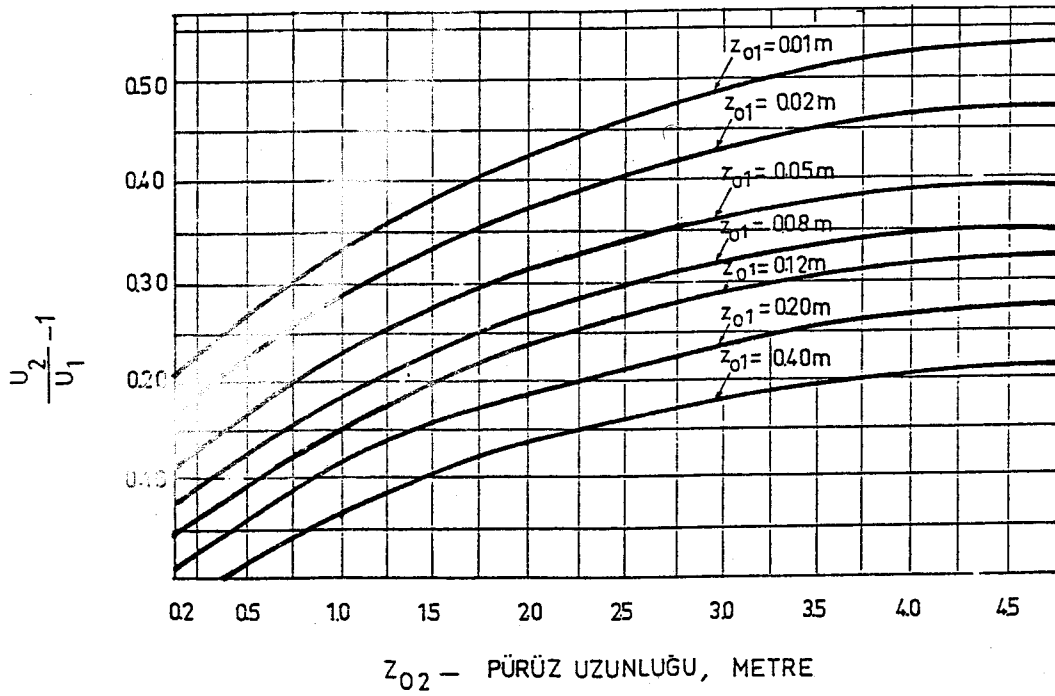
$$u = \frac{v_{10} k}{\text{Ln} (h/z_0)} \quad (1.5)$$

yüzey gerilmesi bulunur ve diğer yüksekliklerdeki hızlar yeniden Denk. 1.2 den elde edilir. Eğer 1 No.lu yüzey cinsi için  $v_{10,1}$  biliniyorsa 2 No. lu yüzey şartı için hızlar, ancak geostrophic hızın eşitliği



RÜZGAR HIZ KATLARI-ANSI, 1972

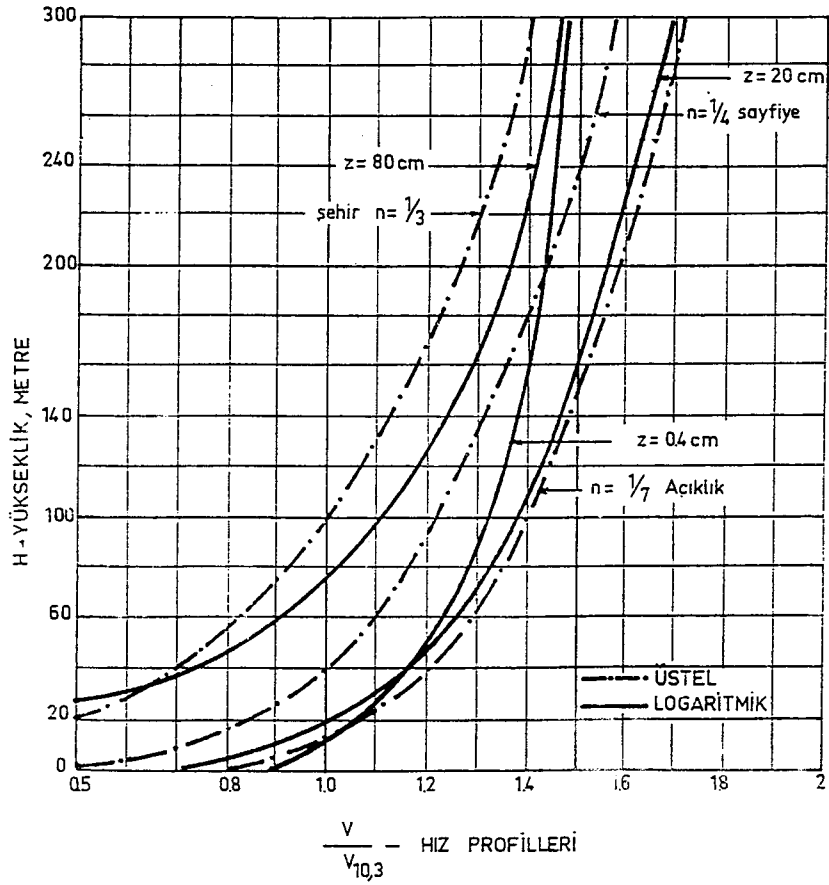
Şekil 1.1



Şekil 1.2

TABLO 1.2 - YÜZEY SÜRTÜNME KATSAYILARI

Satış Cinsi	$z_0$ - cm	$10^3 K$
Kumlu	0.01-0.1	1.2-1.9
Deniz yüzeyi $v_{10}=1.5$ m/san	0.0003	0.7
Deniz yüzeyi $v_{10} \geq 15$ m/san	0.4	2.6
Kar yüzeyi	0.1-0.6	1.9-2.9
Biçilmiş çayır	0.1-1	1.9-3.4
-----		
Alçak çalılık, otluk	1-4	3.4-5.2
Sürülü tarla	2-3	4.1-4.7
Yüksek ot, çalı	4-10	5.2-7.6
Ağaçlık	10-30	7.6-13.0
-----		
Çam ormanı (15 m)	90-100	28-30
Şehir içi	75-150	20-45



Şekil 1.3



şartı yardımı ile bulunur. En önemli bilinmeyen 2 No. lu yüzey cinsinde  $u_2 =$  yüzey gerilmesini bulmaktır. Bunun için iki alternatif metod vardır :

a) İterasyon Metodu :

Her iki yüzeyde en yukarılarda  $v_g =$  geostrophic hızın birbirine eşitliği

$$\frac{u_1}{k_1} \left( 20 + \left( \ln 10^4 \frac{u_1}{z_{o1}} \right)^2 \right)^{1/2} = \frac{u_2}{k_2} \left( 20 + \left( \ln 10^4 \frac{u_2}{z_{o2}} \right)^2 \right)^{1/2}$$

yazılır ve buradan iterasyon yardımı ile bilinmeyen  $u_2$  elde edilir.

b) Abak Yardımı ile :

Şekil 1.2 de,  $u_2/u_1$  değerleri grafik olarak verilmiştir. Bu grafikten  $u_1$  biliniyorken  $u_2$  yi elde etmek kabildir.

### 1.3 Nümerik Misal

Rüzgârın yükseklikle değişimine bir örnek olmak üzere, yüksek çalılıklarla kaplı bir açıklık arazide  $h = 10$  m de hız  $v_{10,1} = 40$  m/san olarak ölçülmüş olsun. Tablo 1.2 den interpolasyon ile

$$z_o = 0.08 \text{ m}$$

$$K = 0.0068$$

$$k = \sqrt{K} \ln(10/0.08) = 0.40$$

$$u_1 = \frac{k v_{10,1}}{\ln(10/z_o)} = \frac{0.40 \times 40}{\ln(10/0.08)} = 3.31$$

2 No.lu şehir içine tekabül eden yeni bir zemin için

$$z_0 = 0.80 \text{ m}$$

$$K = 0.022$$

$$k = \sqrt{K} \text{ Ln } (10/0.8) = 0.375$$

olsun. Şekil 1.2 yardımı ile

$$\frac{u_2}{u_1} - 1 = 0.17$$

$$u_2 = 1.17 u_1 = 1.17 \times 3.31 = 3.87$$

bulunur. 2. No.lu zeminde  $h$  yüksekliğindeki hız için, Denk. 1.2 yardımı ile

$$v_h = \frac{u}{k} \text{ Ln } (h/z_0)$$

$$v_{10} = (3.87/0.375) \text{ Ln } (10/0.80) = 26.1 \text{ m/san}$$

$$v_{100} = (3.87/0.375) \text{ Ln } (100/0.80) = 49.8 \text{ m/san}$$

$$v_{200} = (3.87/0.375) \text{ Ln } (200/0.80) = 57.0 \text{ m/san}$$

elde edilir. Üstel kanuna göre aynı yüksekliklerdeki hızlar sırası ile

$$v_{10} = 18 \text{ m/san}, v_{100} = 38.4 \text{ m/san} \text{ ve } v_{200} = 48.8 \text{ m/san} \text{ olarak}$$

bulunurdu. Üstel kanun ile logaritmik kanuna göre hız değişimlerini veren formül sonuçları mukayeseli olarak Şekil 1.3 de verilmiştir.

#### 1.4 Rüzgâr Basıncının Hesabı

Rüzgârın estiği doğrultuya dik bir yüzeye gelen ve o yüzeyin ağırlık merkezine etkileyen rüzgâr basınç kuvveti  $W$

$$W = C q_w F \quad (1.6)$$

ile hesaplanır. Burada,  $C$  = şekil katsayısı,  $q_w$  = birim alana gelen rüzgâr basıncı,  $F$  = rüzgârın çarptığı alandır. Şekil katsayıları Alman normu DIN 1055 de ayrıntıları ile, Tablo 1.3 de özetle verilmektedir. Rüzgâr basıncı, rüzgâr hızına bağlı olarak

$$q_w = (0.4 + 0.6 \mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2) q \quad (1.7)$$

$$q = \frac{1}{2} g v^2 \quad (1.8)$$

formülünden hesaplanır. Burada  $\mathcal{H}_1$  = çarpma faktörü,  $\mathcal{H}_2$  = tekrarlama faktörü,  $q$  = baz rüzgâr basıncı,  $g$  = havanın kütle yoğunluğu,  $v$  = rüzgâr hızıdır.

Havanın kütle yoğunluğu için 1/8 alınırsa

$$\begin{aligned} q &= 1.293/9.81 = 1/8 \text{ san}^2/\text{m}^4 \\ q &= v^2/16 \end{aligned} \quad (1.9)$$

bulunur. Çarpma ve tekrarlama faktörleri için

$$\phi_1 = 1 + \beta \quad (1.10)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{|\alpha^2 - 1|} (1 + \alpha^2 - 2\alpha \sin \frac{\pi}{2\alpha})^{1/2} \quad (1.11)$$

$$\phi_2 = 1 + e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad (1.12)$$

$$\alpha = T/T_w \quad \text{ve} \quad \Delta = 2\pi D \quad (1.13)$$

formülleri Rausch (1959) ve Schlaich (1966) tarafından verilmektedir. Bu formüllerde,  $T$  = yapının özel periyodu,  $T_w$  = rüzgârın titreşim periyodu (genellikle 8 saniye olarak alınır),  $\Delta$  = logaritmik dekraman,  $t$  = iki rüzgâr darbesi arasındaki zaman fasılası (genellikle 30-180 saniye alınır),  $D$  = kritik sönüm oranıdır.

Rüzgâr darbeleri genellikle Şekil 1.4'de gösterildiği gibi, bir sinüs yayının dörtte biri olarak idealize edilir ve  $t_B = 2$  saniye alınır. Böylece, rüzgâr periyodu  $T_w = 8$  saniye olarak kabul edilmiş olur. Rüzgâr darbelerinin arasında geçen zaman rüzgâr hızına ve arazinin pürüzlülüğüne bağlıdır. Genellikle, yüksek rüzgâr hızları için iki darbe arası  $t = 180$  saniye alınırsa da, daha düşük rüzgâr hızlarında bu aralığı, en gayri müsaait yük elde edecek şekilde  $t = 30$  ilâ 180 saniye arasında seçmelidir.

İstanbul ve İzmir'de ölçülen bazı maksimum rüzgâr hızları Tablo 1.4'te verilmiştir.

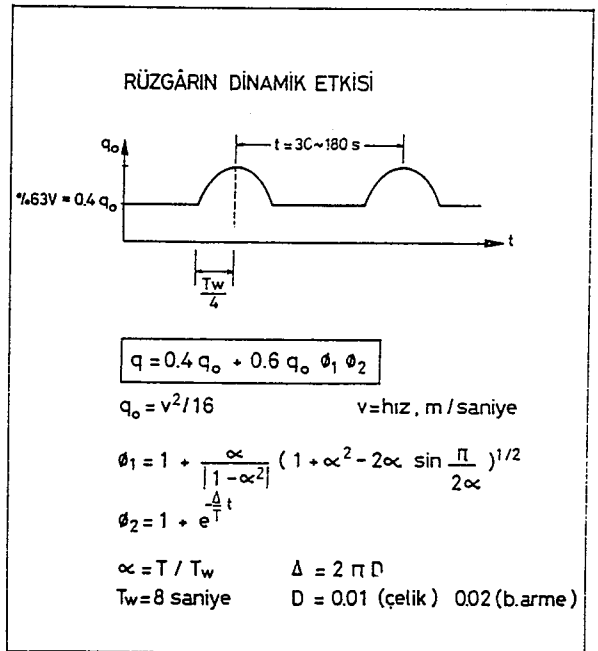
TABLO 1.3 - .ŞEKİL KATSAYILARI

YAPI CİNSİ	C
Düzlem Satırlar :	
Binalar	1.2
Kule ve yüksek binalar $H/D > 5$	1.6
Eğik Satırlar :	
Binalar	1.2 $\sin \alpha$
Yüksek binalar $H/D > 5$	1.6 $\sin \alpha$
Silindirik Satırlar :	
$d\sqrt{q} < 1$ (Halat ve teller) (*)	1.2
$d\sqrt{q} > 1$ (Baca, kuleler)	0.7
Küresel satırlar :	
$d\sqrt{q} < 1$	0.6
$d\sqrt{q} > 1$ (Su tankı)	0.35
Çelik kafes kirişler :	
Düz profil sathı (ilk sıra)	1.6
(ikinci sıra)	1.2
Eğik profil sathı (ilk sıra)	1.6 $\sin \alpha$
(ikinci sıra)	1.2 $\sin \alpha$

(\*)  $d$  = çap, metre  
 $q$  = basınç,  $kg/m^2$

TABLO 1.4 MAKSİMUM RÜZGAR HIZLARI  
 (1929-1965)

RASAT YERİ	Yön	Hız m/san	Ay	Elev. m
Güzelyalı, İzmir	SSE	31.2	Mart	25.0
Florya, İstanbul	NNW	26.4	Aralık	6.0
Göztepe, İstanbul	WSW	30.8	Mart	39.0
Kandilli, İstanbul	SSW	32.3	Şubat	152.0



Şekil 1.11 İdealleştirilmiş Rüzgâr Darbeleri:

## 2. YÜKSEK YAPILARDA DEPREM HESAPLARI

### 2.1 Türkiye Deprem Yönetmeliği<sup>(\*)</sup>

Bir yapının tabanına gelen minimum toplam deprem yatay yükü  $V$  aşağıdaki formülden hesaplanır :

$$V = CW \quad (2.1)$$

$$C = C_0 KSI \quad (2.2)$$

Burada,  $W$  = yapının toplam ağırlığı,  $C_0$  = deprem bölge katsayısı olup birinci ilâ dördüncü bölgeler için sırası ile 0.10; 0.08; 0.06 ve 0.03 tür.  $C$  katsayısı hiçbir zaman  $0.5 C_0$  dan küçük alınmaz.  $K$  = Yapı tipi katsayısı,  $I$  = önem katsayısı,  $S$  = yapı dinamik katsayısı olup, formülün nasıl hesaplanacağı Yönetmelikte ayrıntıları ile verilmiştir.

Türkiye Deprem Yönetmeliği ile bazı ülkelerin deprem yönetmeliklerinde verilen yatay yük katsayıları Şekil 2.1'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

### 2.2 JAPON DEPREM YÖNETMELİĞİ

Yüksekliği 45 metreyi geçen binaların yatay deprem yükü,  $F$ , için aşağıdaki formülasyon kullanılmaktadır :

$$F = C_1 W$$

$$C_1 = C_0 ZI$$

Burada,

$$C_0 = \text{Temel yatay yük katsayısı}$$

$$C_0 = 0.2 K \quad T < T_0 + 1.75$$

$$C_0 = 0.35 K / (T - T_0) \quad T > T_0 + 1.75$$

$$T = \text{Binanın doğal titreşim periyodu, saniye}$$

$$T_0 = \text{Zemin-yapı ilişki faktörü}$$

$$T_0 = -0.75; 0; 0.5; 0.75 \quad (\text{kaya'dan yumuşak zemine})$$

---

(\*) Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik. 9.6.1975 gün ve 15260 sayılı Resmi Gazetede yayınlanmıştır.

- $K$  = Yapı faktörü (0.9 veya 1.0)  
 $Z$  = Deprem Bölgesi faktörü (0.8, 0.9, 1.0)  
 $I$  = Önem faktörü  
 $W$  = Binanın tüm ağırlığı

Herhangi bir  $l$ 'inci kata gelen yatay kuvvet ise ;

$$f_i = C_1 \left( aW_i + bW_i \frac{W x_i}{\sum W_i x_i} \right)$$

ancak, en üst katda,  $f_t$ , gibi ek bir kuvvet daha göz önüne alınır.

$$f_t = c C_1 W$$

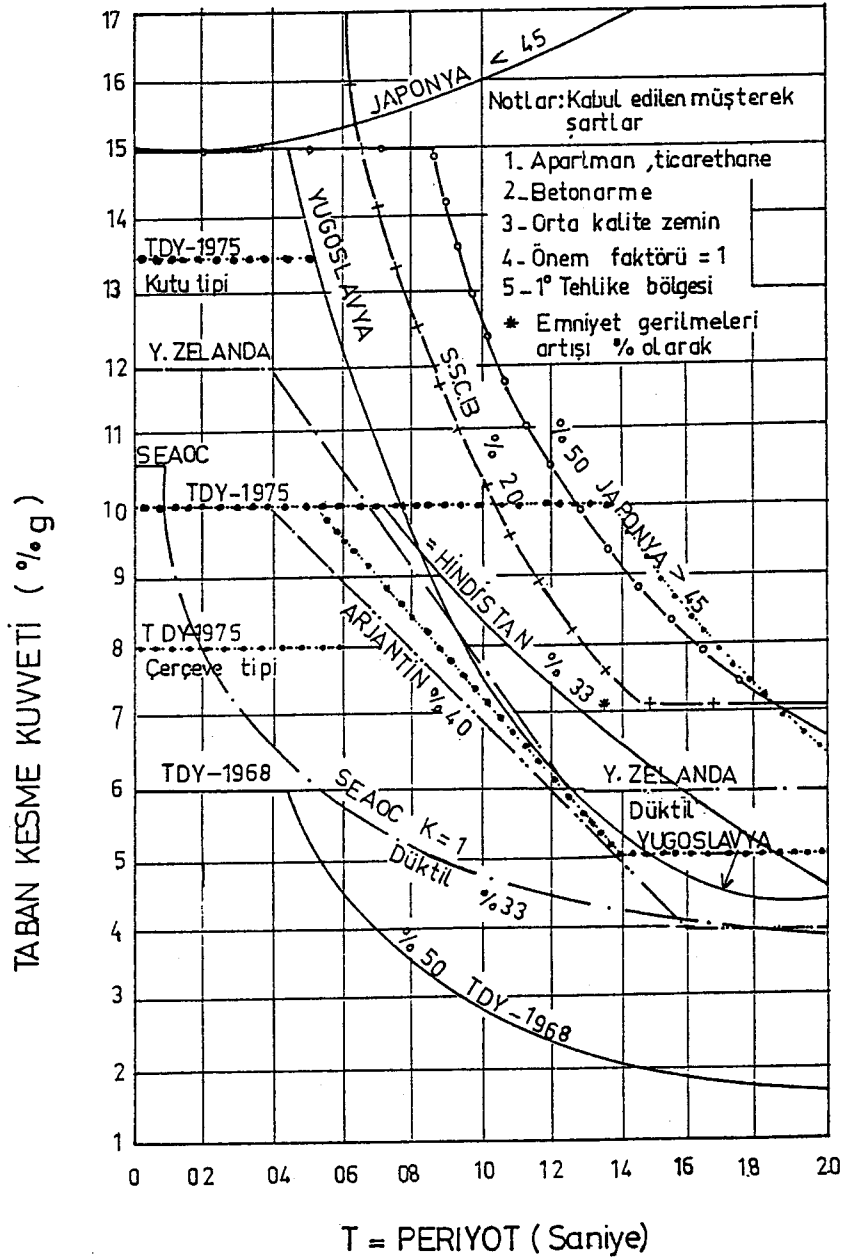
Burada,  $a$ ,  $b$  ve  $c$ , katsayıları Tablo 2.1'de verilmektedir. Ayrıca,

- $W_i$  =  $l$ 'nci katın ağırlığı  
 $x_i$  =  $l$ 'nci katın temelden yüksekliği

TABLO 2.1  $a$ ,  $b$ ,  $c$  KATSAYILARI

$T$  = PERYOT, saniye

	$T < 2$	$T \geq 2$
$a$	$1 - 0.5T$	$0$
$b$	$0.5T$	$1.2 - 0.1T$
$c$	$0$	$0.1T - 0.2$



Şekil 2.1 Yönetmelik Katsayılarının Mukayesesi

### 3. SPEKTRAL ANALİZ

#### 3.1 Hareket Denklemleri

Bir yüksek yapı dinamik analiz amacı ile, önce taşıyıcı sistem elemanlarının birleşmesinden meydana gelen matematik bir modele indirgenir. Bu matematik model, genellikle tek boyutlu çubuklardan veya iki ilâ üç boyutlu sonlu elemanlardan oluşan bir taşıyıcı sistemdir. Eldeki kompüterin kapasitesine ve yapının önemine göre, yapının kütlesi taşıyıcı sistemin düğüm noktalarında yer yer toplanmış kabul edilir. Böyle bir matematik modelin hareket denklemi için

$$(M) \{\ddot{X}\} + (C) \{\dot{X}\} + (K) \{X\} = - (M) \{q\} a(t) \quad (3.1)$$

yazılır. Burada,  $(M)$  = esas köşegeni üzerinde nokta kütlelerin bulunduğu kütle matrisi,  $\{X\}$ ,  $\{\dot{X}\}$  ve  $\{\ddot{X}\}$  = sırası ile, her kütlenin yapı temeline nazaran relatif deplasmanı, relatif hızı ve relatif ivmesi,  $(C)$  = sönüm matrisi,  $(K)$  = stifnes matrisi,  $\{q\}$  = deprem doğrultusunun, titreşim hareketinin incelendiği yapı eksen takımlarına göre doğrultu kosinüsleri,  $a(t)$  = deprem hareketinin temel tabanındaki ivme değişim değerleridir.

#### 3.2 Genelleştirilmiş Koordinatlar

Sistemin sönümsüz haldeki serbest titreşim denklemini temsil eden

$$(K) \{X\} = \omega^2 (M) \{X\} \quad (3.2)$$



ifadesinin özel değerler vektörlerini içine alan  $\phi$  matrisi kullanılarak

$$\{x\} = (\phi) \{y\} \quad (3.3)$$

ortonormal değişken dönüşümü yapılırsa her  $i$  modu için tek kütleli bir sarkacın titreşimine ait ikinci derece diferansiyel denklem elde edilir :

$$\ddot{y}_i + 2 D_i w_i \dot{y}_i + w_i^2 y_i = -g_i(t) \quad (3.4)$$

Burada,  $D_i = i$ 'inci moddaki kritik sönüm oranı,  $w_i = i$ 'inci modun açısal frekansı,  $G_i(t) = i$ 'inci modun efektif deprem hareketidir.  $\alpha_i = i$ ştirak oranı yardımı ile

$$g_i(t) = \alpha_i a(t) \quad (3.5)$$

$$\alpha_i = \frac{\{\phi\}_i^T (M) \{q\}}{\{\phi\}_i^T (M) \{\phi\}_i} \quad (3.6)$$

yazılır. Deprem hareketi bir aritmetik fonksiyona indirgenemeyen gelişigüzel bir hareket olduğu için,  $y$  deplasmanlarının zamana bağlı değerlerini çözmek üzere nümerik integrasyon metodlarından biri, meselâ en çok rağbette olan lineer ivme metodu (Biggs, 1964) kullanılabilir.

Denklem 3.5 den görüleceği üzere, zemin ivmesi her moddaki harekete  $\alpha = i$ ştirak oranı kadar etkili olur. Her moddaki deplasmanlar bulunduktan sonra Denk. 3.3 yardımı ile hakiki deplasmanlara geçilir.

### 3.3 Kareler Ortalaması

Her mod için nümerik integrasyon yapmak ve zamana bağlı deplasmanları bulduktan sonra bunları superpoze ederek hakiki deplasmanlara ve iç kuvvetlere geçmek çok zahmetli ve zaman alıcı bir operasyondur. Mühendise genellikle maksimum değerler lâzım olduğu için, her mod için deplasman ve aranan diğer bilinmeyenlerin sadece maksimum değeri bulunarak bu maksimumların belli bir ihtimal teorisine göre süperpozisyonu yapılır. Kabul edilen bir deprem hareketinin belli bir frekansdaki sarkaçta meydana getireceği deplasmanların maksimumuna, o depremin " $S_d$  = Deplasman Spektrumu" denir. Harmonik hareket kabulüne dayanılarak maksimum hız ve ivme maksimum deplasman yardımı ile yaklaşık olarak

$$S_v = w S_d \quad (3.7)$$

$$S_a = w^2 S_d \quad (3.8)$$

ilişkilerinden bulunur. Bu şekilde bulunan hız ve ivme, küçük sönüm yüzdeleri için hakiki maksimum hız ve hakiki maksimum ivmeye çok yakındır. Bu yüzden  $S_v$  ve  $S_a$  değerlerine sırası ile fiktif-spektral hız ve fiktif-spektral ivme denir. Verilen bir deprem hareketinin spektral değerleri biliniyorken, o depreme maruz bir yapının  $j$ 'inci kütlelerinin herhangi  $i$ 'inci moduna ait spektral deplasman şöyle bulunur :

$$X_{ji} = \phi_{ji} X_i S_{di} \quad (3.9)$$

Burada,  $X_{ji}$  =  $j$ 'inci kütlelerin  $i$ 'inci moduna ait deplasman,  $\phi_{ji}$  =  $i$ 'inci

özel değer vektörünün  $j$ 'inci kütleyle ait değeri,  $\alpha_i = i$ 'inci modun iştirak oranı,  $S_{di} =$  deprem hareketinin  $1$ 'inci modun periyoduna teka-bül eden spektral deplasmanıdır. Aynı kütleyle ait  $i$ 'inci mod hız, ivme ve atalet kuvvetleri için benzer şekilde

$$X_{ji} = w_i \phi_{ji} \alpha_i S_{di} \quad (3.10)$$

$$\ddot{X}_{ji} = w_i^2 \phi_{ji} \alpha_i S_{di} \quad (3.11)$$

$$F_{ji} = w_i^2 \phi_{ji} \alpha_i S_{di} m_j \quad (3.12)$$

yazılır.

Modal deplasmanlar veya modal atalet kuvvetleri yardımı ile statik yoldan modal iç kuvvetler ve iç momentlere geçilir. Modal değerlerin kareler ortalamasına "Maksimum Muhtemel Davranış" ismi verilir. Meselâ, maksimum muhtemel atalet kuvvetleri, momentler ve gerilmeler kareler ortalaması metodu ile şöyle bulunur :

$$F_j = (F_{j1}^2 + F_{j2}^2 \dots + F_{ji}^2 \dots + F_{jn}^2)^{1/2} \quad (3.13)$$

$$M_j = (M_{j1}^2 + M_{j2}^2 \dots + M_{ji}^2 \dots + M_{jn}^2)^{1/2} \quad (3.14)$$

$$\tau_j = (\tau_{j1}^2 + \tau_{j2}^2 \dots + \tau_{ji}^2 \dots + \tau_{jn}^2)^{1/2} \quad (3.15)$$

### 3.4 Bazı Deprem Spektrum Eğrileri

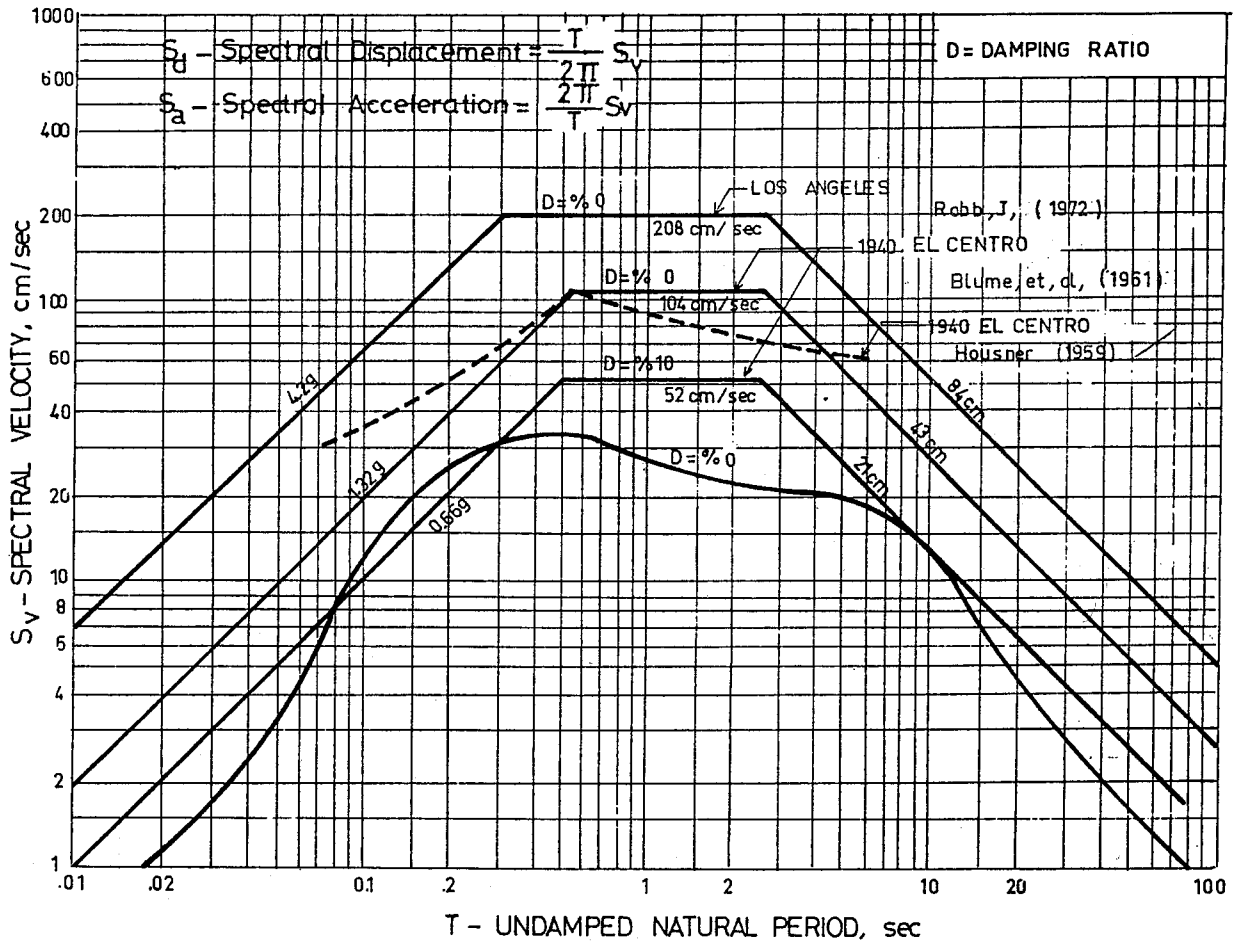
Sönüm yüzdesinin sıfır olduğu hale ait bazı idealleştirilmiş deprem fiktif-spektral hız eğrileri Şekil 3.1 de verilmiştir. Los Angeles şehir yönetmeliği için Robb (1972) tarafından teklif edilen spektrum 200 m/san'lik fiktif-spektral hız ön görmektedir ve takriben 4.2 g'lik maksimum ivmeye tekabül eder. 1940 El Centro depreminin sıfır ve on kritik sönüm yüzdeleri için spektral değerleridaha düşüktür. Çeşitli deprem ortalamalarından elde edilen diğer bir eğri de Türkiye'deki yüksek yapılar için tavsiye edilmektedir.

Bu eğriler yardımı ile, yatay eksende seçilen bir periyot değeri için düşey eksende fiktif-spektral hız okunur ve Denklem 3.7 kullanılarak spektral deplasmana geçilir.

Bir yapının, söndürmeli hale ait spektral değerini elde etmek için, söndürmesiz haldeki spektral değerini

$$H = \frac{1}{1 - 43D - 123D^2}$$

ile çarpmak (Tezcan, 1970, sayfa 291) kesin hesap yapılmayan hallerde genellikle maksada kâfidir. Burada, D = kritik sönüm oranıdır. Kritik sönüm oranları ileride Paragraf 5'de ele alınmaktadır.



Şekil 3.1

#### 4. ZAMAN TARİHÇESİ ANALİZİ

##### 4.1 Adım-adım İntegrasyon (Bir Kütle Hali)

Herhangi bir mod için hareket denklemini

$$\ddot{y} + 2D w \dot{y} + w^2 y = -g(t) \quad (4.1)$$

şeklinde yazalım. Lineer ivme kabulüne dayanarak, bir evvelki ( $i-1$ ) anındaki hız ve deplasman biliniyorken,  $i$  anındaki hız ve deplasman için

$$\dot{y}_i = \dot{y}_{i-1} + (\ddot{y}_i + \ddot{y}_{i-1}) \Delta t / 2 \quad (4.2)$$

$$y_i = y_{i-1} + \dot{y}_{i-1} \Delta t + (2\ddot{y}_{i-1} + \ddot{y}_i) \Delta t^2 / 6 \quad (4.3)$$

bulunur. Bu ifadeler hareket denkleminde yerlerine konursa

$$\ddot{y}_i = (-g_i(t) - 2DwA_{i-1} - w^2 B_{i-1}) / e \quad (4.4)$$

elde edilir. Burada,

$$e = 1 + 2Dw \Delta t / 2 + w^2 \Delta t^2 / 6 \quad (4.5)$$

$$A_{i-1} = \dot{y}_{i-1} + \ddot{y}_{i-1} \Delta t / 2 \quad (4.6)$$

$$B_{i-1} = y_{i-1} + \dot{y}_{i-1} \Delta t + \ddot{y}_{i-1} \Delta t^2 / 3 \quad (4.7)$$

İlk hızın  $v_0$  ve deplasmanın  $x_0$  olması halinde  $t_0 = 0$  için

$$\ddot{y}_0 = (-g_i(t) - 2Dwv_0 - w^2 x_0) / e \quad (4.8)$$

yazılır. Her moddaki deplasmanın zamana bağlı değişimi bilinince, toplam deplasmanlar, ya Denk. 3.3 yardımı ile cebirik olarak süperpoze olurlar veya her moddaki değerinin kareler ortalaması alınır.

#### 4.2 Adım-adım İntegrasyon (Çok Kütle Hali)

Bilhassa sönüm matrisi nümerik olarak belli olduğu zaman, sistemin davranışını adım adım integrasyonla tayin etmek için hareketin diferansiyel denklem takımını tüm olarak çözmek yoluna gidilebilir. Bu maksatla Denk. 3.1 ile verilen hareket denkleminde  $i-1$  anındaki hız ve deplasman biliniyorken  $i$ 'inci zamanda hızı ve deplasmanı bulmak için lineer ivme kabulü yapılarak

$$\dot{X}_i = \dot{X}_{i-1} + \frac{1}{2} (\ddot{X}_i + \ddot{X}_{i-1}) \Delta t \quad (4.9)$$

$$X_i = X_{i-1} + \dot{X}_{i-1} \Delta t + (2 \ddot{X}_{i-1} + \ddot{X}_i) \Delta t^2 / 6 \quad (4.10)$$

yazılırsa

$$(E) \{\ddot{X}_i\} + (C) \{\dot{X}_i\} + (K) \{X_i\} = - (M) \{q\} a(t) \quad (4.11)$$

elde edilir. Burada

$$(E) = (M) + (C) \Delta t/2 + (K) \Delta t^2/6 \quad (4.12)$$

$$\{A\}_{i-1} = \{\dot{X}_{i-1}\} + \{\ddot{X}_{i-1}\} \Delta t/2 \quad (4.13)$$

$$\{B\}_{i-1} = \{X_{i-1}\} + \{\dot{X}_{i-1}\} \Delta t + \{\ddot{X}_{i-1}\} \Delta t^2/3 \quad (4.14)$$

Herhangi  $i$ 'inci zamana ait ivme, hız ve deplasmanlar:

$$\{\ddot{X}_i\} = - (E)^{-1} \left( (M) \{q\} a_i(t) - (C) \{A\}_{i-1} - (K) \{B\}_{i-1} \right) \quad (4.15)$$

$$\{\dot{X}_i\} = \{A\}_{i-1} + \{\ddot{X}_i\} \Delta t/2 \quad (4.16)$$

$$\{X_i\} = \{B\}_{i-1} + \{\dot{X}_i\} \Delta t/6 \quad (4.17)$$

Önce  $(E)$  matrisinin tersini almakla adım adım integrasyon Denklem 4.15 ile Denklem 4.17 nin art arda uygulanmasından ibaret olur. Bu integrasyon formülleri Wilson-Clough (1962), ayrıntıları ile ve özet halinde Tezcan (1974) tarafından verilmiştir.



## 5. SÖNÜM YÜZDELERİ

### 5.1 Yapının Modal Kritik Sönüm Oranları

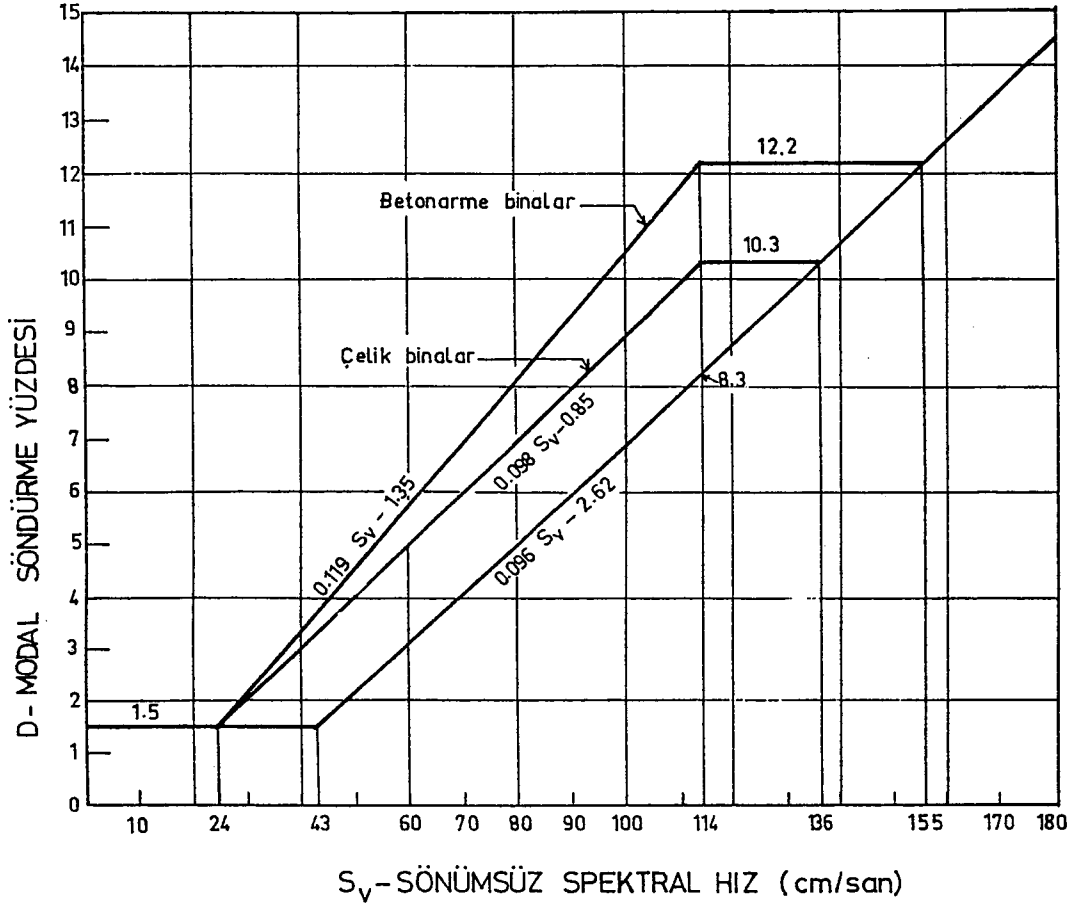
1971 San Fernando depreminde titreşim kaydı elde edilen on iki binanın incelenmesinden bulunan sonuçlara göre, çelik ve betonarme yapılar için Hart ve Vasudevan (1975) tarafından tavsiye edilen sönüm yüzdeleri Şekil 5.1 de ve Tablo 5.1 de verilmektedir. Sönüm yüzdesi

$$D = (\alpha_o + \beta_o S_v) / 100 \quad (5.1)$$

formülünden bulunur. Burada,  $S_v$  = zemin hareketinin sıfır söndürme haline ait fiktif-hız davranış spektrum değeridir. Yapının hangi moduna ait sönüm yüzdesi aranıyorsa, o modun özel periyoduna ait fiktif-hız davranış spektrum değeri kullanılır. Bazı fiktif-hız spektrum örnekleri Şekil 3.1 de verilmiştir.

TABLO 5.1 - SÖNÜM YÜZDELERİ

$S_v$ - Sönümsüz Spektral Hız (cm/san)	D - MODAL SÖNÜM YÜZDESİ			
	ÇELİK BİNALAR		BETONARME BİNALAR	
	$\alpha_o$	$\beta_o$	$\alpha_o$	$\beta_o$
0 - 24	1.5	0	1.5	0
24 - 115	-0.85	0.098	-1.35	0.119
114 - 136	10.3	0	12.2	0
136 - 155	-2.62	0.096	12.2	0
155 - 500	-2.62	0.096	-2.62	0.096



Şekil 5.1

## 5.2 Rayleigh Tipi Sönüm Matrisi :

Dinamik denklemlerde sönüm matrisi kullanılması halinde, sönüm matrisi rijitlik ve kütle matrisinin belli bir oranda süperpozisyonundan ibaret kabul edilerek

$$(C) = \alpha(M) + \beta(K) \quad (5.2)$$

yazılır. Burada,  $\alpha$  ve  $\beta$  frekansla ilgili sabitlerdir ve genelleştirilmiş koordinatlarda ilk iki modun gözönüne alınması halinde

$$C_i^* = \alpha_i M_i^* + \beta K_i^*$$

yazılır. Burada

$$C_i^* = 2 D_i w_i M_i^* \quad (5.3)$$

$$K_i^* = w_i^2 M_i^* \quad (5.4)$$

olduğu hatırlanırsa,

$$D_i = \frac{\alpha}{2w_i} + \frac{\beta w_i}{2} \quad (5.5)$$

bulunur. İlk iki mod için  $\alpha, \beta$  katsayıları

$$\alpha = \frac{2w_1 w_2 (D_2 w_1 - D_1 w_2)}{w_1^2 - w_2^2} \quad (5.6)$$

$$\beta = \frac{2 (D_1 w_1 - D_2 w_2)}{w_1^2 - w_2^2} \quad (5.7)$$

şeklinde hesaplanır. Daha yüksek modlardaki kritik sönüm oranları ise bu katsayılar yardımı ile Denk. 5.5 den bulunur.

### 5.3 Caughey (1960) Tipi Sönüm Matrisi :

Rayleigh sönüm matrisi genelleştirilerek

$$(C) = a_1 (M) + a_2 (K) + \sum_{i=3}^r a_i (S)^T \left[ (S^{-1})^T K S^{-1} \right] (S) \quad (5.8)$$

yazılır. Burada,  $S$  = kütle matrisinin üçgenleştirilmiş halidir ve Cholesky metodu ile (Tezcan, 1970)

$$(M) = (S)^T (S) \quad (5.9)$$

şeklinde elde edilir. Denklemin  $a_1, a_2, \dots, a_r$  gibi ilk  $r$  moduna ait sabitler aşağıdaki denklem takımından çözülür :

$$\begin{bmatrix} 1 & w_1^2 & w_1^4 & \dots & w_1^{2(r-1)} \\ 1 & w_2^2 & w_2^4 & \dots & w_2^{2(r-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & w_r^2 & w_r^4 & \dots & w_r^{2(r-1)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2D_1 w_1 \\ 2D_2 w_2 \\ \dots \\ 2D_r w_r \end{Bmatrix} \quad (5.10)$$

Burada, ilk yaklaşım için  $D_1 = D_2 = \dots = D_r$  değerleri için ortalama olarak  $S_v = 114$  cm/san hıza tekabül eden çelik binalarda  $D = 10.3$  ve beton binalarda  $D = 12.2$  kabul edilebilir. Sabitler bulunduktan

sonra,  $r$ 'den itibaren  $n$ 'inci moda kadar olan diğer modlardaki sönümler için

$$D_j = \frac{1}{2w_j} \sum_{i=1}^r a_i w_j^{2(i-1)} \quad (r < j \leq n)$$

Görülüyor ki, Caughey sönüm matrisi Rayleigh sönüm matrisinin genelleştirilmiş halidir. İlk iki mod yerine ilk  $r$  mod kullanılmakta, geri kalan modların sönümleri ilk  $r$  modun parametreleri yardımı ile elde edilmektedir.

## 6. ELASTO-PLASTİK DAVRANIŞ

Dinamik analiz lineer davranış kabulüne dayandığı zaman, bir çok hallerde yönetmeliğin verdiği yüklerden daha büyük deprem yükleri elde edilir. Halbuki şiddetli bir deprem halinde kesitler elâstik sınırı geçip bir miktar plâstik bölgede çalışabilirler. Taşıyıcı sistemleri deprem esnasında tamamen lineer bölgede kalıyor diye kabul etmek ekonomik olmayan sonuçlar doğurur.

Çeşitli periyotlardaki yapıların bir depreme karşı gösterdiği davranış incelenmiş ve üç temel davranış bölgesinin varlığı tesbit edilmiştir (Newmark, 1970). Küçük periyotlu yapılarda ( $T < 0.4$  saniye) yapının elâstik veya plâstik davranışına göre bulunan ivmeler arasında bir fark yoktur. Orta periyotlu yapılarda ( $0.4 < T < 2.5$ ), elâstik veya

plâstik davranışın toplam enerjisi sabittir. Uzun peryotlu yapılarda ( $2.5 < T$ ), elâstik veya plâstik davranışa göre bulunan deplasmanlar eşittir. Bu esaslara dayanarak, her üç yapı peryot bölgesinde elâstik davranış kabulüne göre yapılan hesapların, plâstik davranış halindeki deplasman ve ivmeleri bulmak için ne şekilde tashih edilmeleri gerektiğini tayin etmek mümkündür (Tezcan, 1972). Bu katsayılar Tablo 6.1 de verilmiştir.

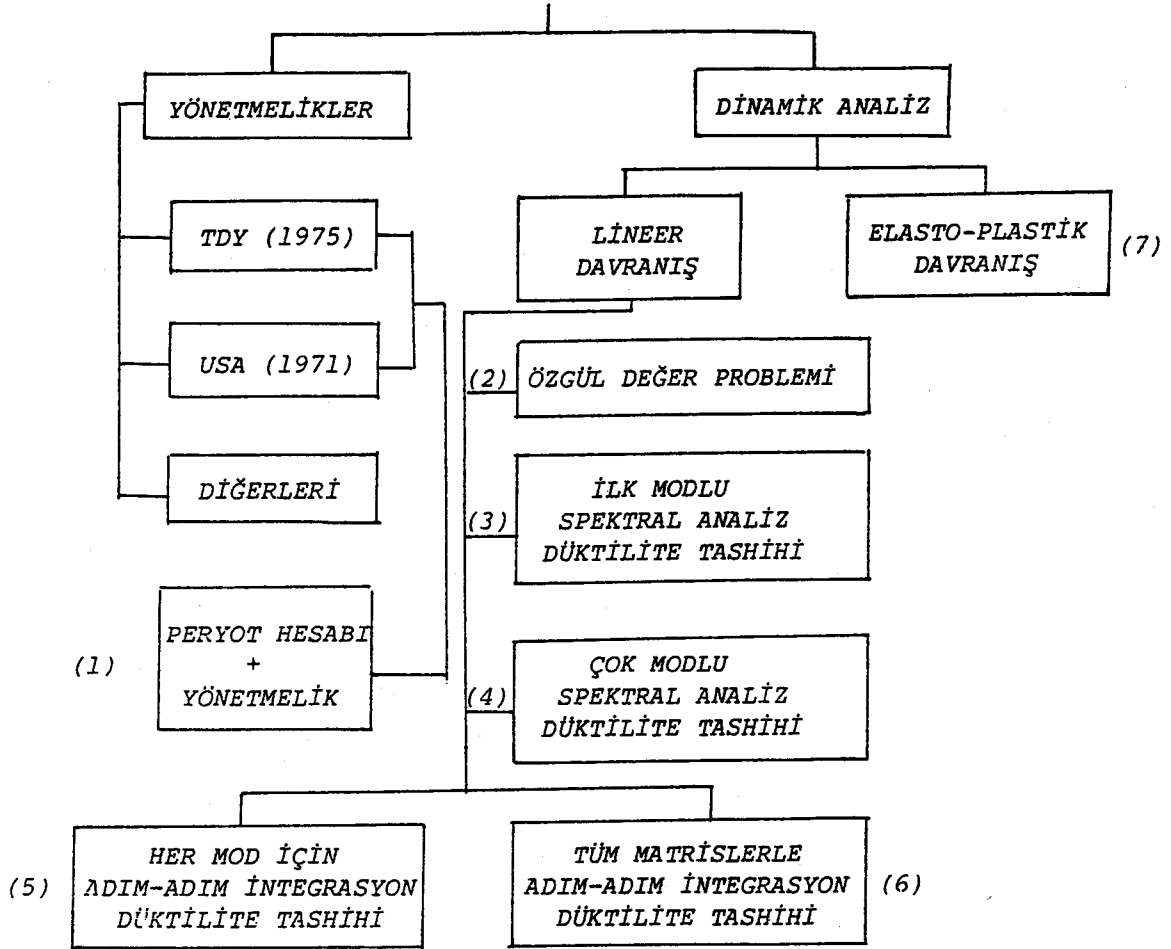
TABLO 6.1 - LİNEER VE NONLİNEER DAVRANIŞ ORANLARI (\*)

PERYOT BÖLGESİ	DEPLASMANLAR	KUVVETLER
Küçük Peryotlu $T < 0.4$	$X_P = \mu X_E$	$F_P = F_E$
Orta Peryotlu $0.4 < T < 2.5$	$X_P = \frac{\mu}{\sqrt{2\mu-1}} X_E$	$F_P = \frac{1}{\sqrt{2\mu-1}} F_E$
Uzun Peryotlu $2.5 < T$	$X_P = X_E$	$F_P = \frac{1}{\mu} F_E$

(\*)  
P = Plâstik Davranış  
E = Elâstik Davranış  
 $\mu$  = Düktilite Oranı

Ayrıca, deprem yüklerinin tayininde kullanılan çeşitli metodlar topluca Tablo 6.2 de özetlenmektedir.

TABLO 6.2 - DEPREM YÜKLERİ HESAP METODLARI



## REFERANSLAR

- Biggs, J.M. (1964), "Introduction to Structural Dynamics", McGraw-Hill Book Co., New York.
- Blume, A.J., Newmark, N.M., and Corning, L.H., (1961), "Design of Multistorey Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions", Portland Cement Association, Chicago, Ill., U.S.A.
- Caughey, T.K., (1960), "Classical Normal Modes in Damped Linear Systems", Journal of Applied Mechanics, Transactions, ASME, Vol.82, pp. 269-271.
- Emil Simiu, (1973), "Logarithmic Profiles and Design Wind Speeds", Proceedings of ASCE, Engineering Mechanics Division, Vol.99, No. EM5.
- Hart, G.C. ve Vasudevan, R., (1975), "Earthquake Design of Buildings: Damping", Proceedings of the ASCE, Vol.101, No. ST1, January 1975.
- Housner, G.W., (1959), "Behaviour of Structures During Earthquakes", Journal, Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 85, No. EM4, October, pp. 109-129.
- Newmark, N., (1970), "Current Trends in the Seismic Analysis and Design of High-Rise Structures", Earthquake Engineering, Edited by Robert L. Wiegel, Prentice Hall, Inc.
- Rausch, E. (1959), "Maschinenfundamente", 3. Aufl., Dusseldorf: VDI, Verlag.
- Rayleigh, Lord, (1945), "Theory of Sound", Vol.1, Dover Publications, Inc. London.
- Robb, J., (1972), "Proposed Los Angeles City Code", City Department of Building and Safety, Los Angeles, Calif.
- Schlaich, J., (1966), "Beitrag zur Frage der Wirkung von Windstößen auf Bauwerke", Der Bauingenieur, 41, Heft 3, p. 102-106.
- Tezcan, S. ve Durgunoğlu, T., (1975), "Jeofizik Etüdlerin Yer Seçimi Problemi ve Zemin Dinamiği Yönünden Önemi", Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, Ara Rapor No.75-11T, 1975.
- Tezcan, S., (1970), "Çubuk Sistemlerin Elektronik Hesap Makineleri ile Çözümü", İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik Hesap Merkezi Yayınları, Sayı 12, s.69.



Tezcan, S., (1974), "Toprak Barajların Deprem Analizi", Boğaziçi Üniversitesi Yayınları No. B.Ü.-74-33/001.

Tezcan, S., (1972), "Betonarme Binalarda Düktilite Şartları", Türkiye'de Deprem Sorunları Sempozyumu Tebliğleri, O.D.T.Ü. Ankara.

Wilson, E.L., and Clough, R.W., (1962), "Dynamic Response by step-by-step Matrix Analysis", Symposium on the use of Computers in Civil Engineering, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal, October.

