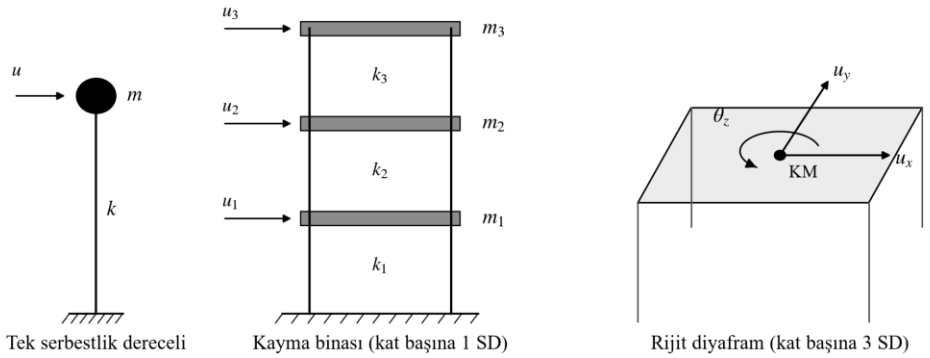
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği · Bölüm 4

Dayanıma Göre Tasarımda, Deprem Yükleri Altında Doğrusal Hesap Esasları

Çok serbestlik dereceli davranıştan tasarıma esas iç kuvvetlere: hesabın adım adım uygulanışı

Teknik eğitim sunumu · 150 dakika

Yük. Müh. Abdullah KARAÇÖP



Sunumun akışı

	Konu	Slaytlar
1	Çok serbestlik dereceli sistemlerin temel davranışı	3–21
2	Modal kütle ve etkin kütle oranı	22–38
3	Modların deprem davranışına katkısı	39–51
4	Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi	52–60
5	Mod Birleştirme Yöntemi	61–68
6	Zaman tanım alanında hesap	69–81
7	Yapısal sistemler	82–92
8	Bir binanın deprem analizine mühendislik yaklaşımı	93–94
9	Uygulama: 6 katlı betonarme bina	95–135

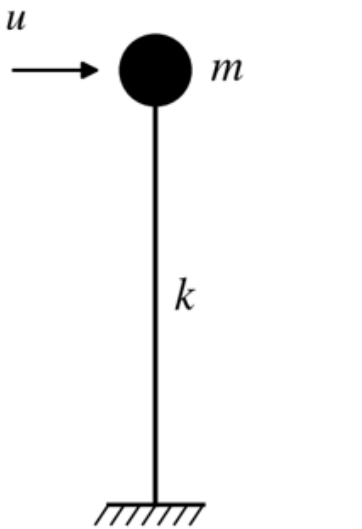
1

Çok serbestlik dereceli sistemlerin temel davranışı

Serbestlik dereceleri · Hareket denklemi · Serbest titreşim · Mod şekilleri · Ortogonellik (Diklik)

Serbestlik Dereceleri

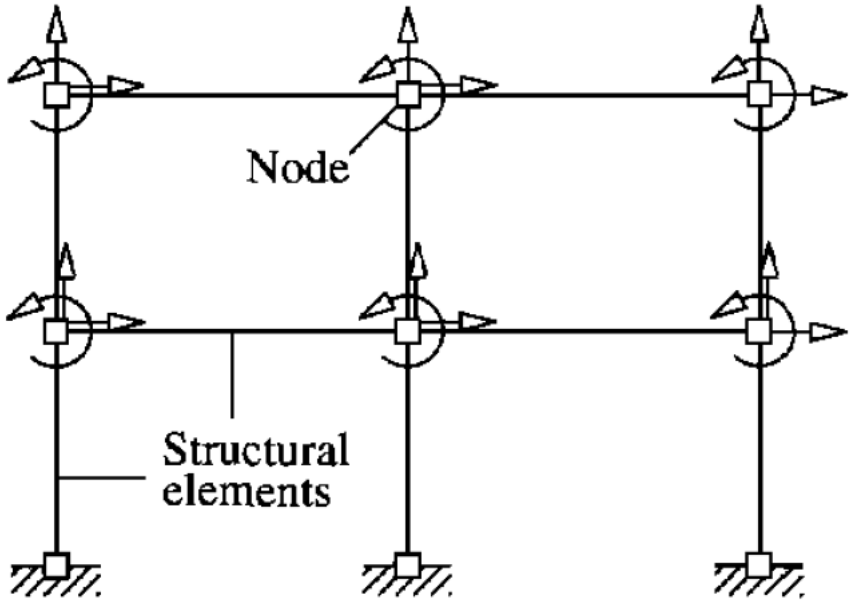
- Tek Serbestlik Dereceli Sistem



Tek serbestlik dereceli

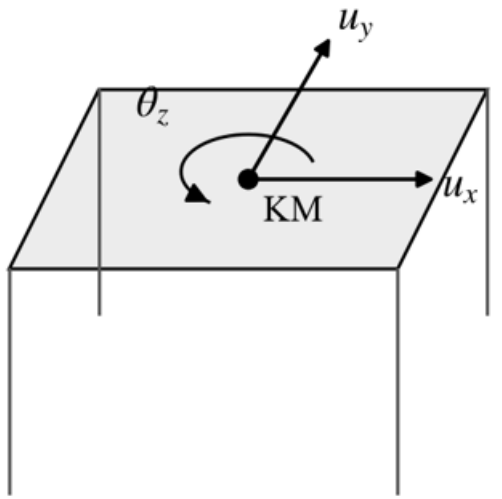
- Düğüm noktası deplasmanları ve dönmeleri

Düzlemde düğüm başına **3**, uzayda **6** serbestlik



- Düğüm noktası deplasmanları ve dönmeleri

Rijit döşeme : kat başına $\mathbf{u_x}$, $\mathbf{u_y}$, $\mathbf{\theta_z}$ (N katta 3N)



Rijit diyafram (kat başına 3 SD)

Kütle Modellemesi

- Çok serbestlik dereceli sistemlerde kütle matrisindeki eleman sayısı rijit diyafram etkisi dikkate alınarak kat başına üç serbestlik derecesine indirgenebilir.
- Rijit Diyafram → kütle merkezinde üç serbestlik derecesi: u_x,u_y,u_θ
- Esnek Diyafram → kütleler her bir düğüm noktasına o düğüm noktasına karşılık gelen alanla doğru orantılı verilir.

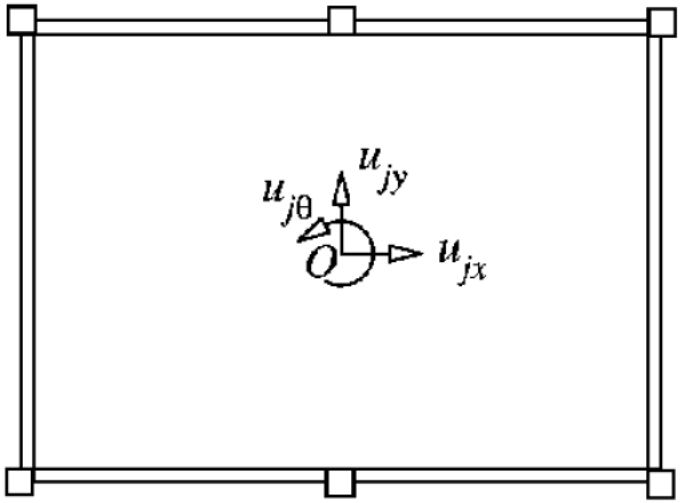


Figure 9.2.7 Degrees of freedom for in-plane-rigid floor diaphragm with distributed mass.

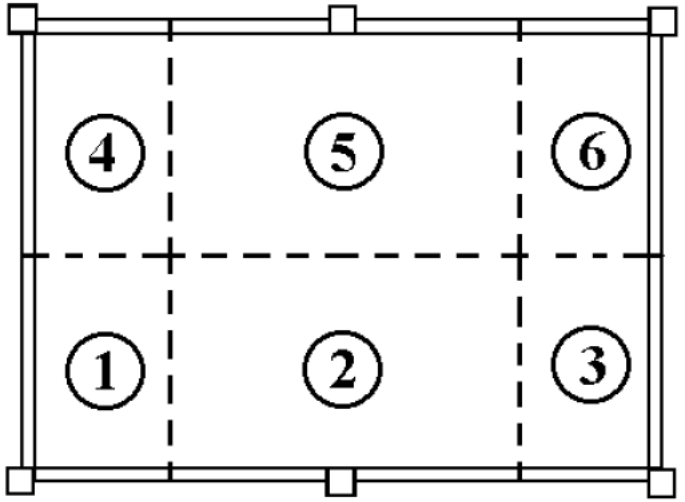
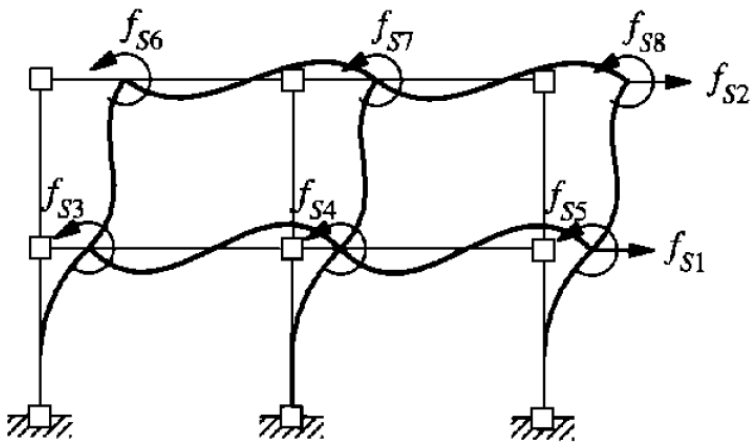


Figure 9.2.8 Tributary areas for distributing diaphragm mass to nodes.

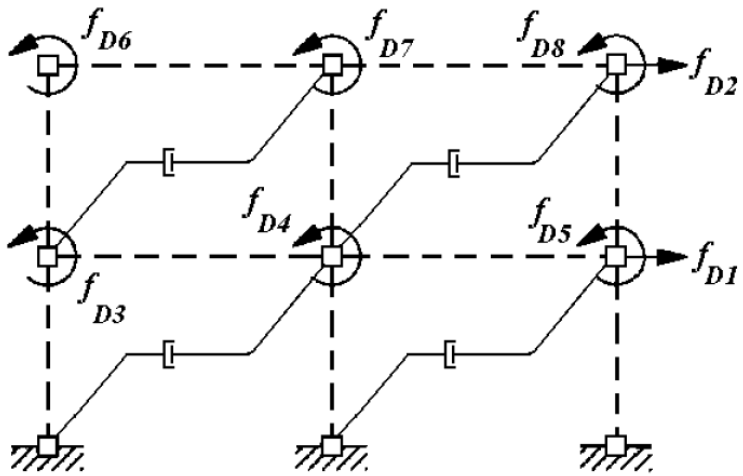
Elastik, Sönüm ve Eylemsizlik Kuvvetleri



$$[f_S] = [k]\{u\}$$

$$f_{Si} = k_{i1}u_1 + k_{i2}u_2 + \ldots + k_{ij}u_j + \ldots + k_{iN}u_N$$

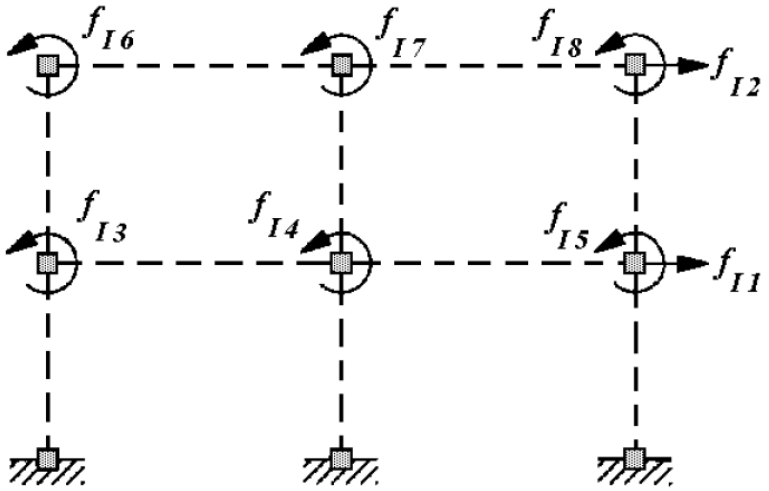
$$\begin{bmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \\ \vdots \\ f_{SN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1j} & \cdots & k_{1N} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2j} & \cdots & k_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ k_{N1} & k_{N2} & \cdots & k_{Nj} & \cdots & k_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{Bmatrix}$$



$$[f_D] = [c]\{\dot{u}\}$$

$$f_{Di} = c_{i1}\dot{u}_1 + c_{i2}\dot{u}_2 + \ldots + c_{ij}\dot{u}_j + \ldots + c_{iN}\dot{u}_N$$

$$\begin{bmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \\ \vdots \\ f_{DN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1j} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2j} & \cdots & c_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & c_{Nj} & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \vdots \\ \dot{u}_N \end{Bmatrix}$$



$$[f_I] = [m]\{\ddot{u}\}$$

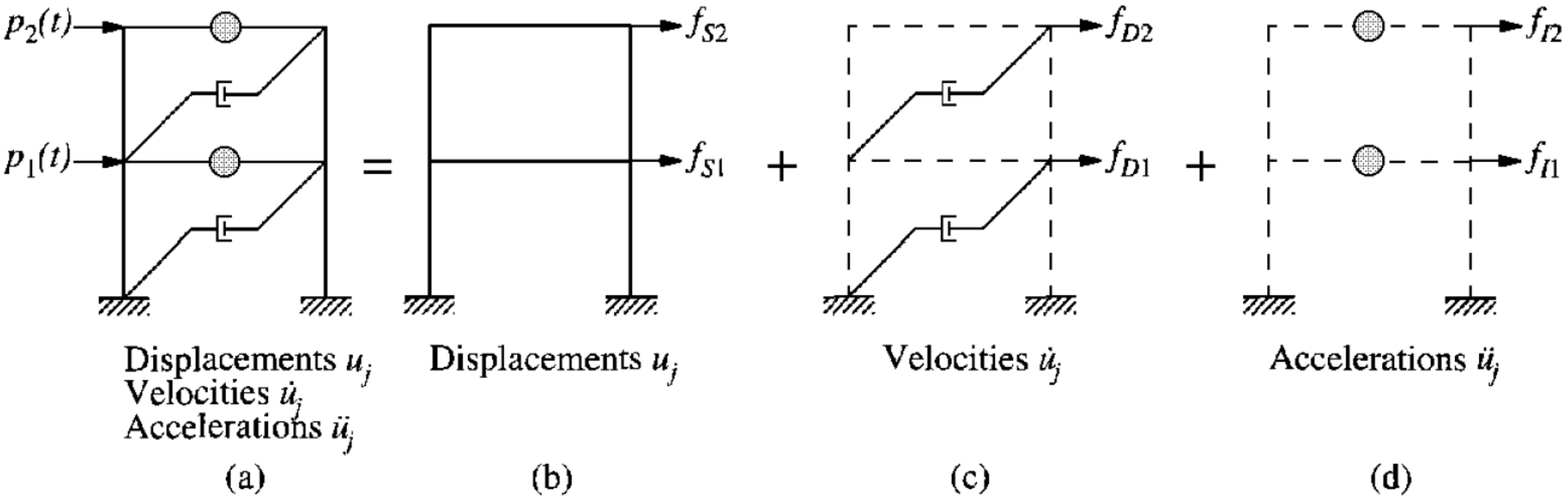
$$f_{Ii} = m_{i1}\ddot{u}_1 + m_{i2}\ddot{u}_2 + \ldots + m_{ij}\ddot{u}_j + \ldots + m_{iN}\ddot{u}_N$$

$$\begin{bmatrix} f_{I1} \\ f_{I2} \\ \vdots \\ f_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1j} & \cdots & m_{1N} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2j} & \cdots & m_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{N1} & m_{N2} & \cdots & m_{Nj} & \cdots & m_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \vdots \\ \ddot{u}_N \end{Bmatrix}$$

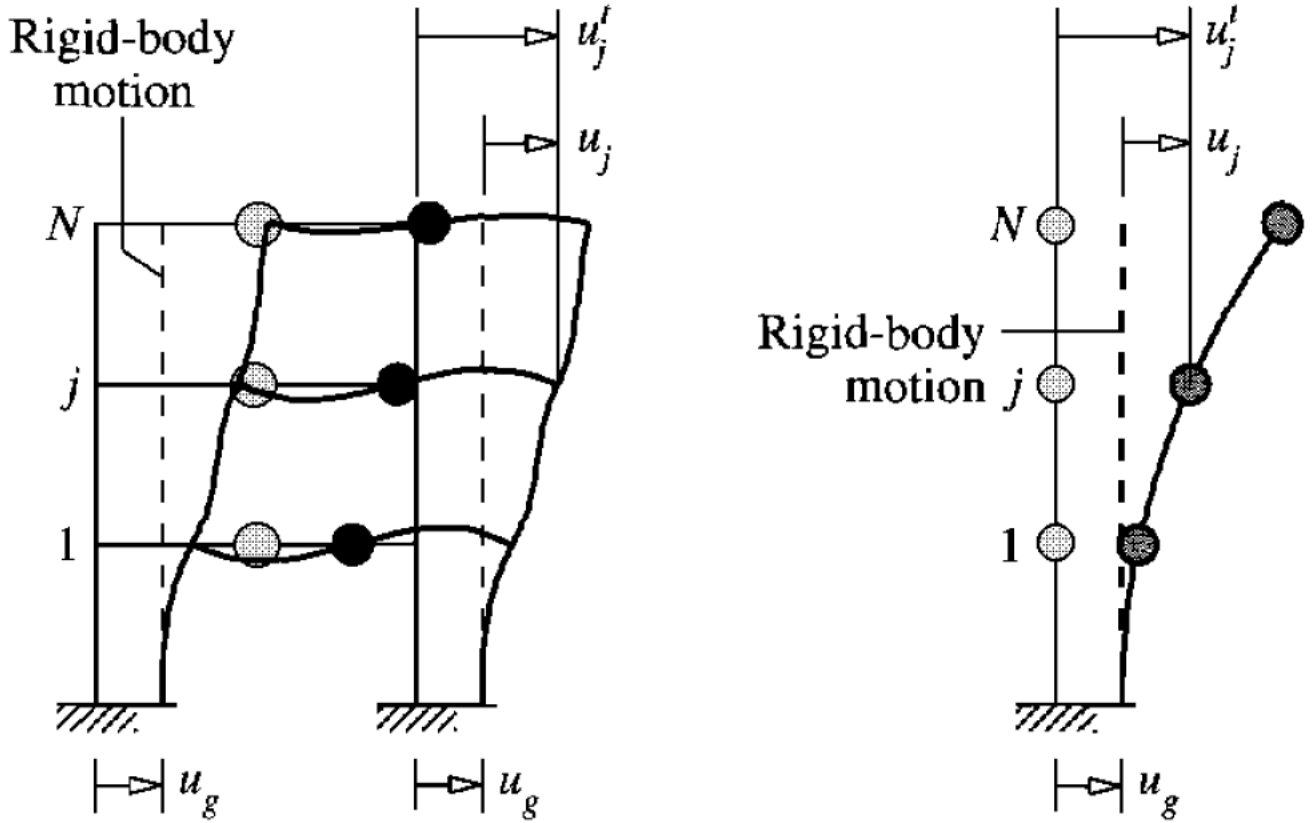
Hareket denklemi

$$\{f_I(t)\}+\{f_D(t)\}+\{f_S(t)\}=\{p(t)\}$$

$$[m]\{\ddot{u}\}+[c]\{\dot{u}\}+[k]\{u\}=\{p(t)\}$$



Hareket Denklemi: Yer Hareketi



Yer deplasmanı $\boldsymbol{u_g}$

Toplam deplasman $\boldsymbol{u_j^t}$

Yapı ile zemin arasında rölatif deplasman $\boldsymbol{u_j}$

$$\{u_j^t(t)\} = \{u_j(t)\} + u_g(t)\{1\}$$

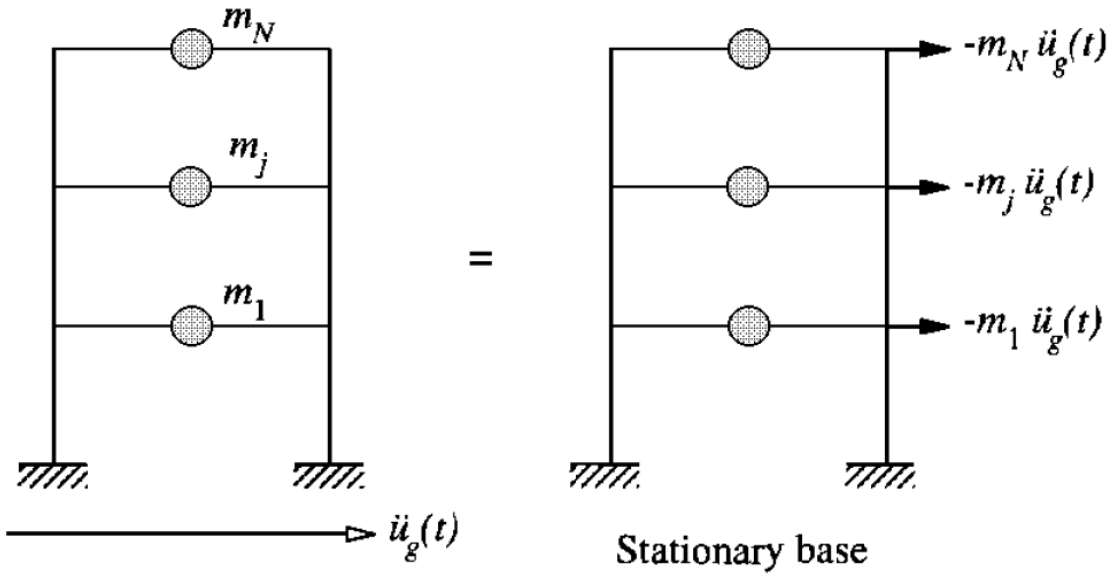
Hareket Denklemi: Yer Hareketi

- Yer hareketi sırasında dinamik kuvvetlerin toplamı sıfırdır → $\{p(t)\} = 0$

$$\{f_I(t)\} + \{f_D(t)\} + \{f_S(t)\} = \{0\}$$

$$[m]\{\ddot{u}^t\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{0\} \qquad \{u_j^t(t)\} = \{u_j(t)\} + u_g(t)\{1\}$$

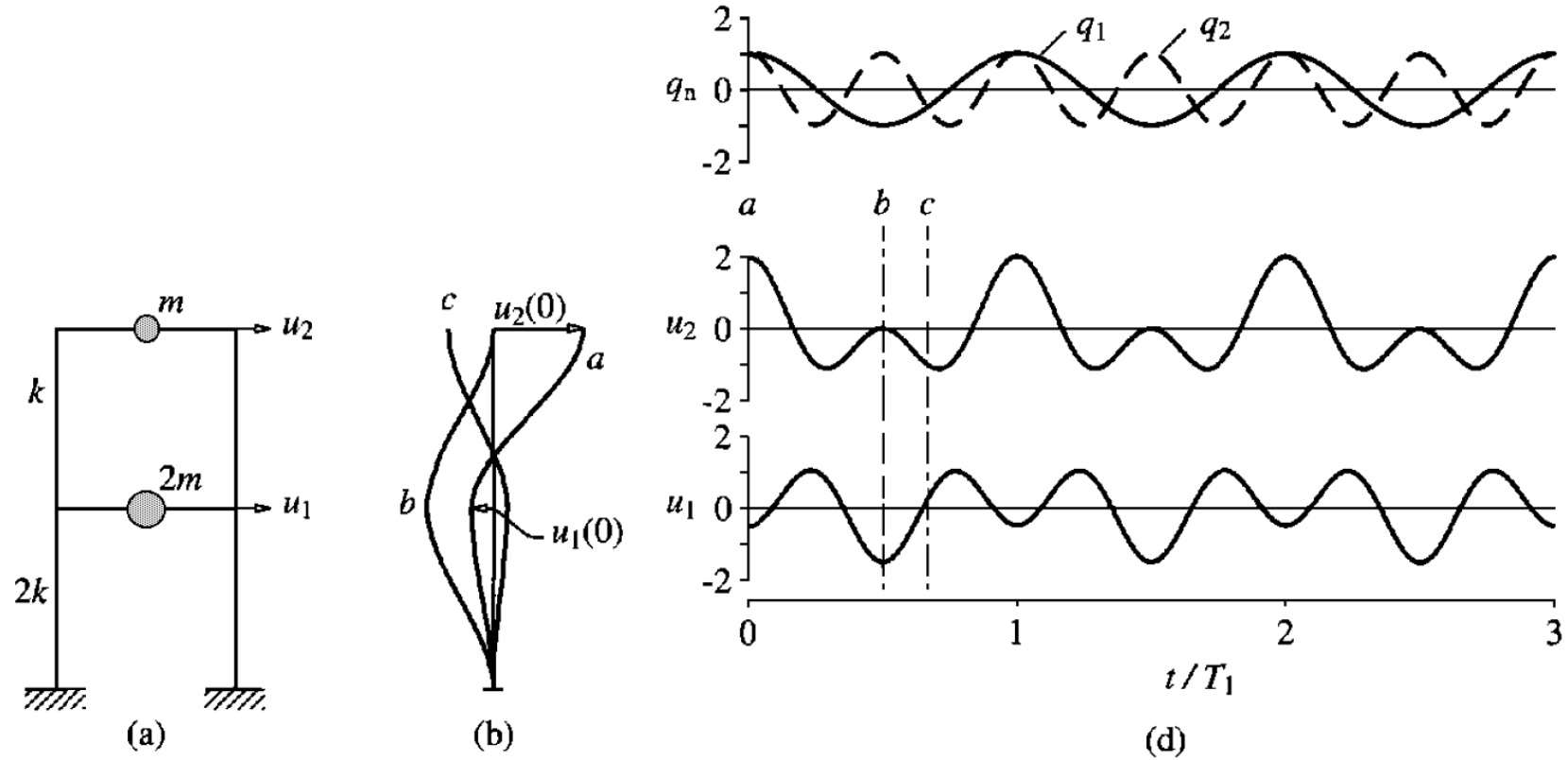
$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -[m]\{1\}\ddot{u}_g(t)$$



$$\{p_{eff}(t)\} = -[m]\{1\}\ddot{u}_g(t)$$

Sönümsüz serbest titreşim

- Hareket Denklemi: $[m]\{\ddot{u}\}+[k]\{u\}=\{0\}$
- Ön Şartlar: $\{u\}=\{u(0)\}$ $\{\dot{u}\}=\{\dot{u}(0)\}$

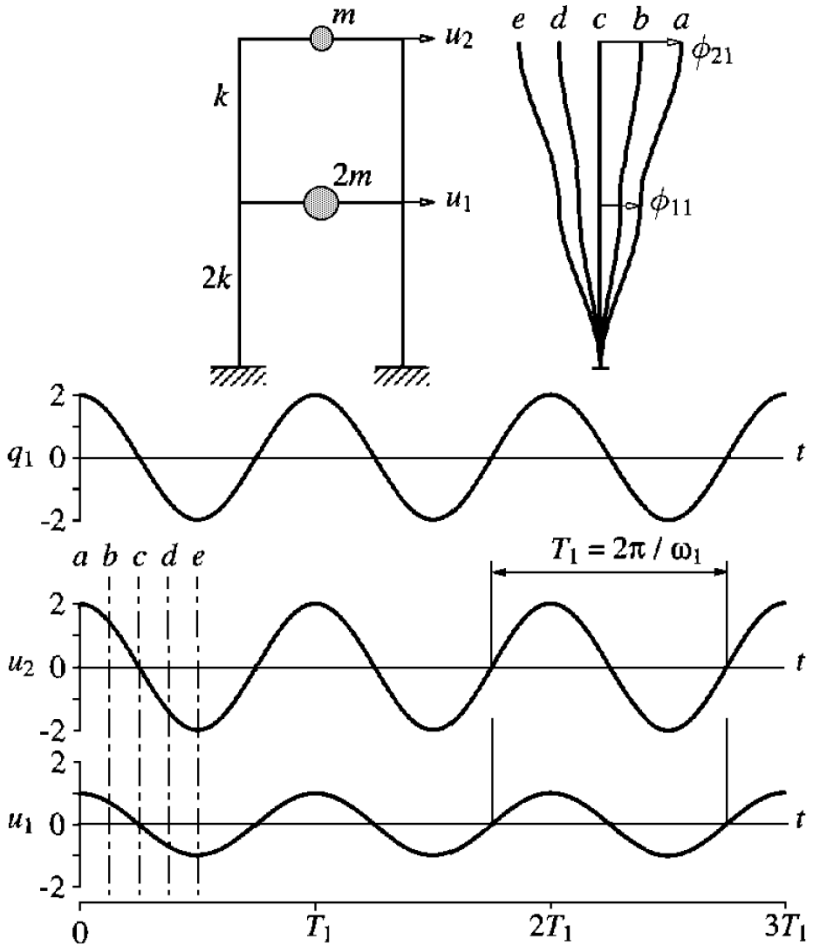


  - Hareket harmonik değildir
  - Yapının deforme olmuş şekli zaman ile değişir

Modal Deformasyonlar

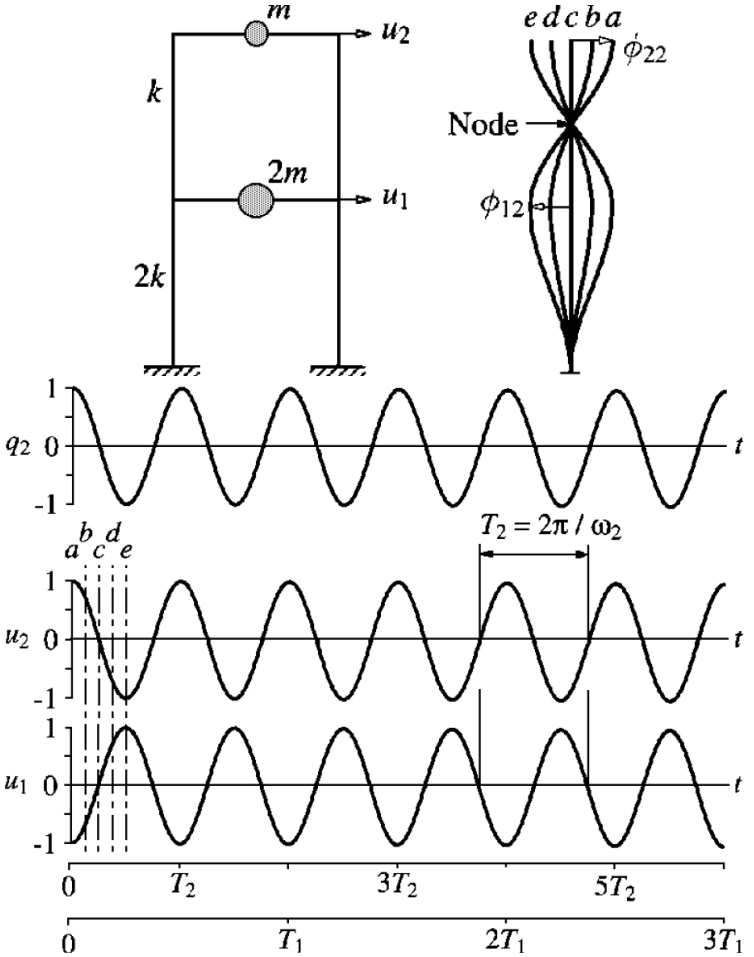
Yapının ilk titreşim modu için (Birinci Mod Şekli $\{\Phi\}_1$)

- Titreşim harmoniktir.
- Yapının deforme olmuş şekli zaman ile değişmez



Yapının ikinci titreşim modu için (İkinci Mod Şekli $\{\Phi\}_2$)

- Titreşim harmoniktir.
- Yapının deforme olmuş şekli zaman ile değişmez



Doğal Titreşim Modları : Özdeğer Problemi

- N. Moda ait deformasyon : $\{u(t)\}_n = q_n(t)\{\phi\}_n$
  - Deforme olmuş şekil (zaman ile değişmez): $\{\phi\}_n$
  - Deformasyonun zamanla değişimini basit harmonik fonksiyon ile tanımlarsak: $q_n(t) = (A_n \cos\omega_n t + B_n \sin\omega_n t)$

$$\underbrace{\{u(t)\}_n = \{\phi\}_n (A_n \cos\omega_n t + B_n \sin\omega_n t) \qquad [m]\{\ddot{u}\} + [k]\{u\} = \{0\}}$$

$$\left[-\omega_n^2 [m]\{\phi\}_n + [k]\{\phi\}_n\right] q_n(t) = \{0\}$$

$$[k]\{\phi\}_n = \omega_n^2 [m]\{\phi\}_n \Rightarrow \det\left([k] - \omega_n^2 [m]\right) = 0$$

$$q_n(t) = 0$$

Doğal Tireşim Modları : Özdeğer Problemi

- Özdeğer Modları

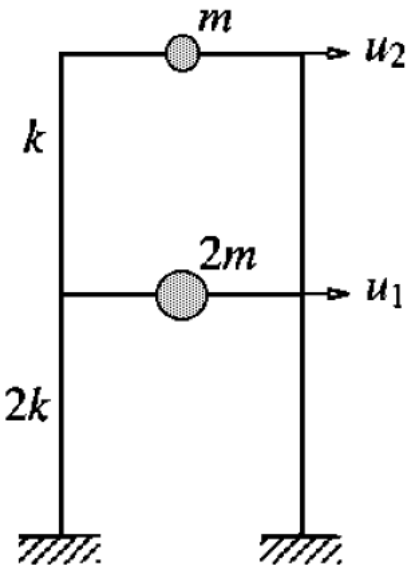
$$[\Phi] = \left\{ \{\phi\}_1 \ \cdots \ \{\phi\}_n \right\} = \begin{bmatrix} \{\phi\}_{11} & \cdots & \{\phi\}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \{\phi\}_{N1} & \cdots & \{\phi\}_{NN} \end{bmatrix}$$

- Özdeğerler

$$\left[\Omega^2\right] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \omega_N^2 \end{bmatrix}$$

- Özdeğer Problemi

$$[k][\Phi] = [m][\Phi]\left[\Omega^2\right]$$



2 katlı örnek (alt kat 2m, 2k; üst kat m, k):

$$\mathbf{M} = \text{diag}(2m,\ m) \qquad k_{11} = 3k, \quad k_{12} = k_{21} = -k, \quad k_{22} = k$$

$$(3k - 2m\omega^2)(k - m\omega^2) - k^2 = 2m^2\omega^4 - 5km\,\omega^2 + 2k^2 = 0$$

$$\omega_1^2 = \frac{k}{2m} \quad \boldsymbol{\phi}_1 = \begin{Bmatrix} 1/2 \\ 1 \end{Bmatrix} \qquad \omega_2^2 = \frac{2k}{m} \quad \boldsymbol{\phi}_2 = \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

Modların Ortogonalliği (Dikliği)

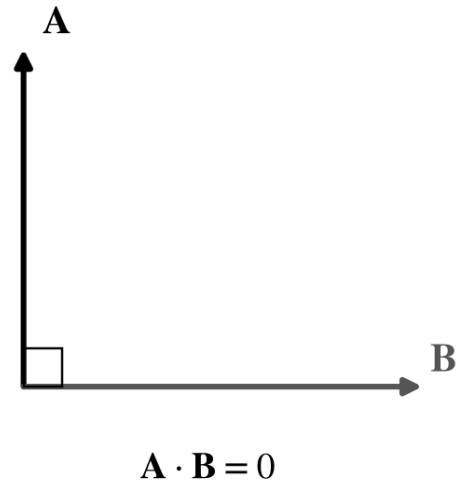
- Özdeğer Problemi: $[k]\{\phi\}_n = \omega_n^2 [m]\{\phi\}_n$
- Denklemin her iki tarafını da $\{\phi\}_r^T$ n≠r ile çarparsak

$$\{\phi\}_r^T [k]\{\phi\}_n = \omega_n^2 \{\phi\}_r^T [m]\{\phi\}_n \quad \& \quad \{\phi\}_n^T [k]\{\phi\}_r = \omega_r^2 \{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_r$$

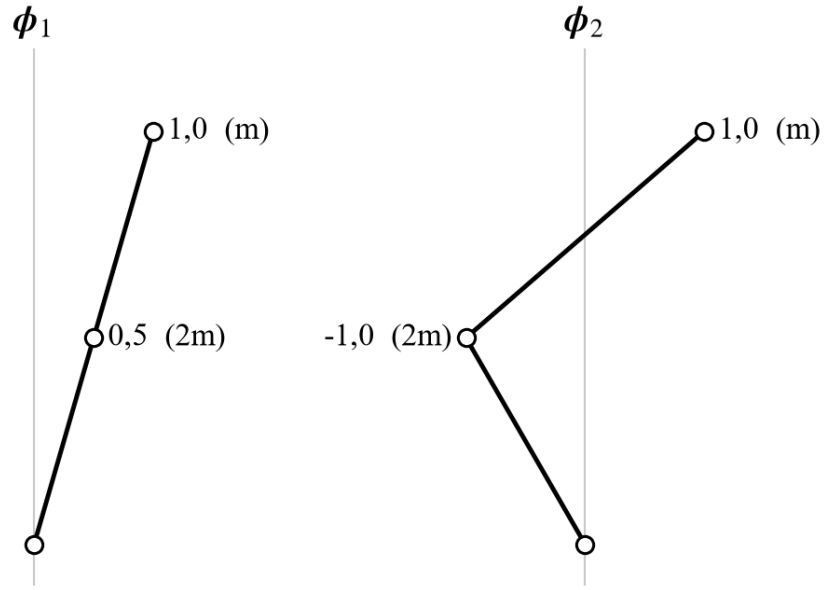
- ➢ Matris cebirinde çarpımın transpozesi $(ABC)^T=C^TB^TA^T$ $\left(\{\phi\}_r^T [k]\{\phi\}_n\right)^T = \{\phi\}_n^T [k]^T \{\phi\}_r = \{\phi\}_n^T [k]\{\phi\}_r$
- ➢ simetrik matrisin transpozu kendisine eşittir.
- ➢ Skalerin transpozu yine kendisine eşittir. $\{\phi\}_r^T [k]\{\phi\}_n$ skaler olduğundan $\{\phi\}_r^T [k]\{\phi\}_n = \{\phi\}_n^T [k]\{\phi\}_r$

- İki denklem birbirinden çıkarılırsa $\left(\omega_n^2 - \omega_r^2\right)\{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_r = 0$
- $\omega_n^2 \neq \omega_r^2$ için $\{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_r = 0$ olmalıdır.
- Çok serbestlik dereceli sistemlerde, yapıya ait farklı titreşim mod şekilleri, sistemin kütle [M] ve rijitlik [K] matrislerine göre birbirine diktir. Yapı serbest titreşim yaparken herhangi bir *n*. modda meydana gelen titreşim ve enerji, *r*. modu kesinlikle etkilemez.

Dikliğin fiziksel anlamı



$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = 0$$



$$\boldsymbol{\phi}_1^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_2 = (2m)(1/2)(-1) + (m)(1)(1) = -m + m = 0$$

- Bir modun eylemsizlik kuvvetleri öbür modun yerdeğiştirmesinde **iş yapmaz**: modlar arasında enerji geçmez
- Hareket denklemleri **ayrışır**: her mod bir tek serbestlikli sistem olur

Modal Terimler ile Deplasman Tanımı / Modal Koordinatlar

- Deplasman değerleri N adet bağımsız vektör için şu şekilde ifade edilir:

$$\{u\} = \sum_{r=1}^{N} \{\phi\}_r q_r = [\Phi]\{q\}$$ $\boldsymbol{q_r}$:Modal Koordinatlar (r. modun yerdeğiştirmedeki payı)

- Denklemin her iki tarafını da $\{\phi\}_n^T [m]$ çarparsak

$$\{\phi\}_n^T [m]\{u\} = \sum_{r=1}^{N} \{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_r q_r$$

- r=n dışındaki bütün terimler "0" a eşittir.

$$\{\phi\}_n^T [m]\{u\} = \{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_n q_n$$

- Modal Koordinatlar bu durumda :

$$q_n = \frac{\{\phi\}_n^T [m]\{u\}}{\{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_n} = \frac{\{\phi\}_n^T [m]\{u\}}{M_n}$$

$$\{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_n = M_n$$ Modal Kütle

Sönümsüz serbest titreşim / Hareket Denkleminin Çözümü

- Hareket Denklemi: $[m]\{\ddot{u}\}+[k]\{u\}=\{0\}$ Başlangıç Şartları: $\{u\}=\{u(0)\}$ $\{\dot{u}\}=\{\dot{u}(0)\}$

$$\left([k]-\omega_n^2[m]\right)\{\phi\}_n=\{0\}\Rightarrow\omega_n,\phi_n \qquad \{u(t)\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n q_n(t) \qquad q_n(t)=\left(A_n\cos\omega_n t+B_n\sin\omega_n t\right)$$

- Genel Çözüm, Deplasman $\{u(t)\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n\left(A_n\cos\omega_n t+B_n\sin\omega_n t\right)$
- Hız Vektörü $\{\dot{u}(t)\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n\omega_n\left(-A_n\sin\omega_n t+B_n\cos\omega_n t\right)$
- t=0 anında başlangıç değerleri $\{u(0)\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n A_n$ $\{\dot{u}(0)\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n\omega_n B_n$
- t=0 anında modal koordinat olarak $\{u(0)\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n q_n(0)$ $\{\dot{u}(0)\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n\dot{q}_n(0)$

Sönümsüz serbest titreşim / Hareket Denkleminin Çözümü

- Modal Koordinatlar: $q_n(0) = \dfrac{\{\phi\}_n^T [m]\{u(0)\}}{M_n}$ $\dot{q}_n(0) = \dfrac{\{\phi\}_n^T [m]\{\dot{u}(0)\}}{M_n}$

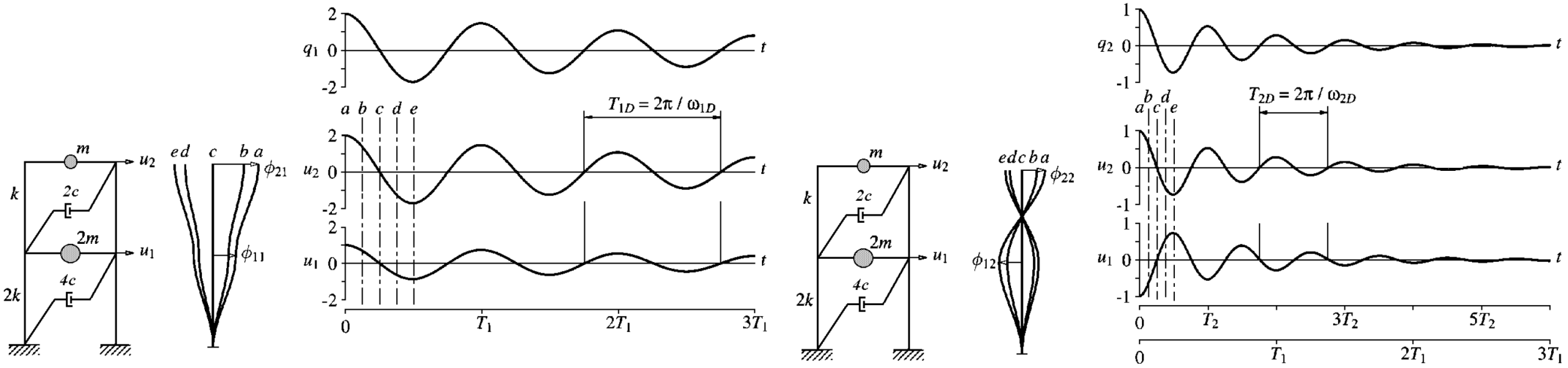
- Bu durumda $\boldsymbol{A_n}$ ve $\boldsymbol{B_n}$ değerleri $A_n = q_n(0)$ $B_n = \dot{q}_n(0) / \omega_n$

- Bu değerleri genel çözümde yerine koyarsak $\{u(t)\} = \sum_{n=1}^{N} \{\phi\}_n \left(A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t \right)$

$$\{u(t)\} = \sum_{n=1}^{N} \{\phi\}_n \left(q_n(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{q}_n(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t \right)$$

Sönümlü serbest titreşim / Hareket Denkleminin Çözümü

- Sönümlü çok serbestlik dereceli sistemlerin doğal titreşim periyotları sönümsüz sistemler ile aynıdır.
- Deplasmanlar sönümsüz sistemler ile benzerlik gösterir, fakat titreşim genlikleri sönüm etkisi ile zaman ile azalım gösterir.



Sönümlü serbest titreşim / Hareket Denkleminin Çözümü

- Her doğal titreşim modu için hareket denklemi modal koordinatlar cinsinden

$$[m]\{\ddot{u}\}+[c]\{\dot{u}\}+[k]\{u\}=0 \qquad \{u\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n q_n=[\Phi]\{q\}$$

$$\sum_{n=1}^{N}[m]\{\phi\}_n \ddot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}[c]\{\phi\}_n \dot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}[k]\{\phi\}_n q_n(t)=0 \quad \{\phi\}_n^T \text{ ile çarparsak}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[m]\{\phi\}_n \ddot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[c]\{\phi\}_n \dot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[k]\{\phi\}_n q_n(t)=0$$

$$M_n \qquad C_n \qquad K_n$$

$$\Rightarrow \quad M_n\ddot{q}_n+C_n\dot{q}_n+K_n q_n=0$$

- Denklem $\boldsymbol{M_n}$ 'ye bölünmesi sonucu $\ddot{q}_n+2\xi_n\omega_n\dot{q}_n+\omega_n^2 q_n=0 \qquad \xi_n=\dfrac{C_n}{2M_n\omega_n}$

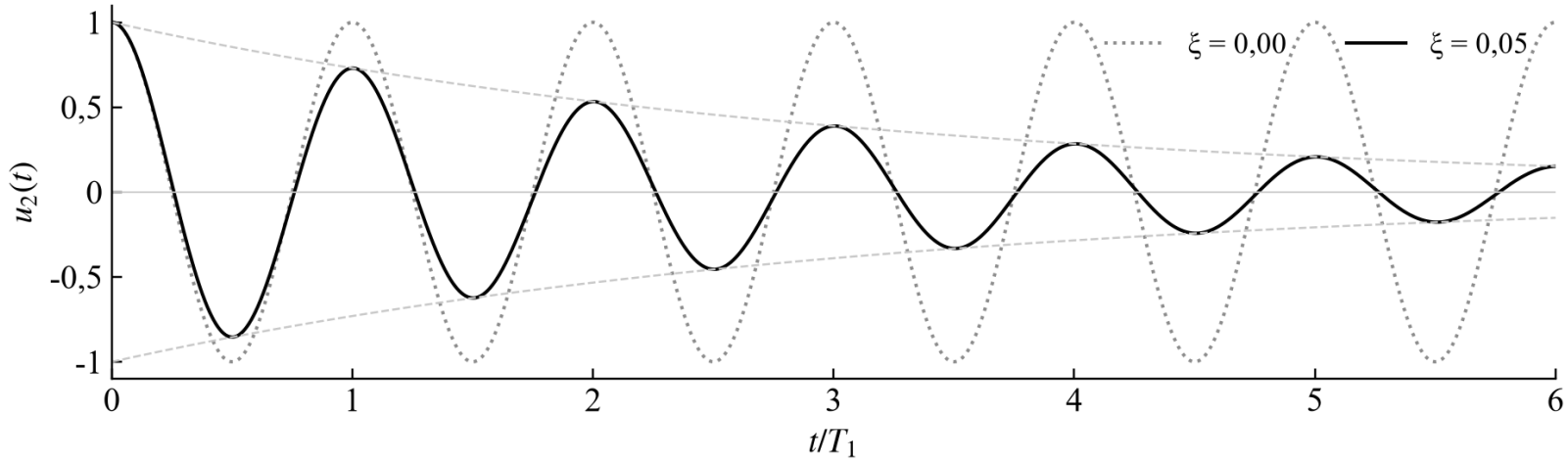
$$\omega_{nD}=\omega_n\sqrt{1-\xi_n^2} \qquad q_n(t)=e^{-\xi_n\omega_n t}\left[q_n(0)\cos\omega_{nD}t+\frac{\dot{q}_n(0)+\xi_n\omega_n q_n(0)}{\omega_{nD}}\sin\omega_{nD}t\right]$$

$$\{u(t)\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n e^{-\xi_n\omega_n t}\left(q_n(0)\cos\omega_{nD}t+\frac{\dot{q}_n(0)+\xi_n\omega_n q_n(0)}{\omega_{nD}}\sin\omega_{nD}t\right)$$

Sönümlü serbest titreşim / Hareket Denkleminin Çözümü

$$M_n\ddot{q}_n + C_n\dot{q}_n + K_n q_n = 0 \;\Rightarrow\; \ddot{q}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = 0 \qquad \xi_n = \frac{C_n}{2M_n\omega_n}$$

$$q_n(t) = e^{-\xi_n\omega_n t}\left[q_n(0)\cos\omega_{nD}t + \frac{\dot{q}_n(0) + \xi_n\omega_n q_n(0)}{\omega_{nD}}\sin\omega_{nD}t\right] \qquad \omega_{nD} = \omega_n\sqrt{1-\xi_n^2}$$



Frekans pratikte değişmez, **genlik üstel azalır**; tasarım spektrumu ξ = %5 için her periyotta bir sonraki genlik bir öncekinin yaklaşık %73'üne düşer. Genliğin başlangıç genliğinin yaklaşık %1'ine gelmesi için yaklaşık 14-15 çevrim yapması gerekir. Örneğin 1sn periyotlu bir sistemde 15 saniyede genlik ilk genliğin %1'i kadardır.

$$\frac{u_n}{u_{n+1}} = e^{\frac{2\pi\xi_n}{\sqrt{1-\xi_n^2}}} \quad \xi_n = \%5 \Rightarrow \frac{u_n}{u_{n+1}} = e^{0.3142} \approx 1.369$$

$$\frac{u_0}{u_n} = e^{n\times\frac{2\pi\xi_n}{\sqrt{1-\xi_n^2}}},\; 100 = e^{n\times 0.3142},\; \ln(100) \approx n\times 0.3142$$

$$4.605 \approx n\times 0.3142 \Rightarrow n \approx 14.65$$

2

Modal kütle ve etkin kütle oranı

Modal denklemler · Deprem yükünün modlara ayrışması · Katkı çarpanı · Modal kütle · Etkin modal kütle

Dinamik Yükler Altında ÇSDS Hareket Denklemi

- Dinamik yükler altında çok serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemi

$$[m]\{\ddot{u}\}+[c]\{\dot{u}\}+[k]\{u\}=\{p(t)\}, \qquad \text{Deplasman} \Rightarrow \{u\}=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n q_n=[\Phi]\{q\}$$

$$\sum_{n=1}^{N}[m]\{\phi\}_n \ddot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}[c]\{\phi\}_n \dot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}[k]\{\phi\}_n q_n(t)=\{p(t)\}$$

$\{\phi\}_n^T$ ile çarpıp, modların ortogonalliği göz önüne alındığında; $\{\phi\}_n^T[m]\{\phi\}_n=M_n$ Modal Kütle

$$\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[m]\{\phi\}_n \ddot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[c]\{\phi\}_n \dot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[k]\{\phi\}_n q_n(t)=\{\phi\}_n^T\{p(t)\}$$

M_n C_n K_n $P_n(t)$

$$M_n\ddot{q}_n(t)+C_n\dot{q}_n(t)+K_n q_n(t)=P_n(t)$$

- Denklemin her iki tarafını da $\boldsymbol{M_n}$'ye bölersek; $$\ddot{q}_n+2\xi_n\omega_n\dot{q}_n+\omega_n^2 q_n=\frac{P_n(t)}{M_n}$$

- Sistem n adet diferansiyel denklemden n adet bağımsız denkleme dönüşür.
  Kütle matrisinin tahmini gerekmez. Her bir mod tek serbestlik dereceli bir sistem gibi çözülebilir

Dinamik Yükler Altında ÇSDS Hareket Denklemi

- Dinamik yükler altında çok serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemi

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{P_n(t)}{M_n}$$

N. modun toplam deplasmana katkısı

$$\{u(t)\}_n = \{\phi\}_n q_n(t)$$

Toplam Deplasman

$$\{u(t)\} = \sum_{n=1}^{N}\{u(t)\}_n = \sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n q_n(t)$$

- Yukarıda detayları verilen yöntem **Modal Analiz** (Mod Süperpozisyonu Yöntemi) diye adlandırılır. Sadece **klasik sönüm** altında **doğrusal sistemlere** uygulanabilir.
- Deplasmanlar hesaplandıktan sonra eleman kesit tesirleri 2 şekilde elde edilir;

1) Her bir moda ait deplasmanlar hesaplanır ve bu deplasmanlara karşılık gelen iç kuvvetler hesaplanır. Elemanlara ait toplam kesit tesirleri her bir moda ait kuvvetlerin toplamından elde edilir.

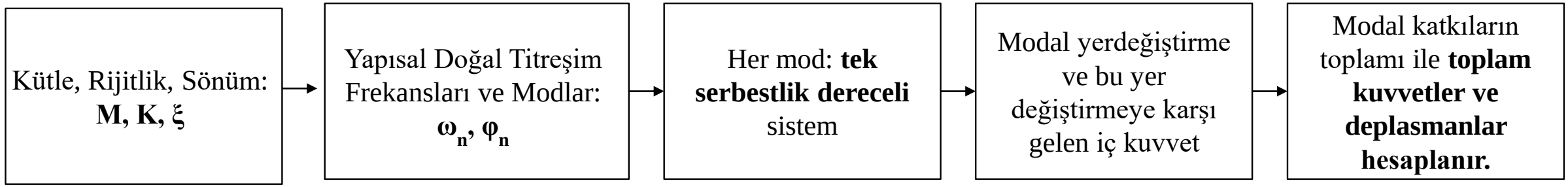
$$r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t)$$

2) Her bir moda ait **eşdeğer statik** kuvvetler hesaplanır.

$$\{f(t)\}_n = [k]\{u(t)\}_n = \omega_n^2[m]\{u(t)\}_n = \omega_n^2[m]\{\phi\}_n q_n(t)$$

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t)$$

Modal Analiz: Adımlar / Özet



$$[m]\{\ddot{u}\}+[c]\{\dot{u}\}+[k]\{u\}=\{p(t)\}$$

$$\left([k]-\omega_n^2[m]\right)\{\phi\}_n=\{0\}\Rightarrow \omega_n,\phi_n$$

$$\ddot{q}_n+2\xi_n\omega_n\dot{q}_n+\omega_n^2 q_n=\frac{P_n(t)}{M_n}$$

$$\{u(t)\}=\sum_{n=1}^{N}\{u(t)\}_n=\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n\, q_n(t)$$

$$r(t)=\sum_{n=1}^{N} r_n(t)$$

Modal Analiz ile Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketinin Çözümü

- Çok serbestlik dereceli bir sistemin kuvvetli yer hareketi altında hareket denklemi :

$$[m]\{\ddot{u}\}+[c]\{\dot{u}\}+[k]\{u\}=\{p_{eff}(t)\} \qquad \{p_{eff}(t)\}=-[m]\{1\}\ddot{u}_g(t)$$

$$\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[m]\{\phi\}_n\ddot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[c]\{\phi\}_n\dot{q}_n(t)+\sum_{n=1}^{N}\{\phi\}_n^T[k]\{\phi\}_n q_n(t)=-\{\phi\}_n^T[m]\{1\}\ddot{u}_g(t)$$

M_n C_n K_n L_n

- Modal Kütle: Yapının toplam kütlesinin o moda ait şekil vektörüne göre ne kadarının ‘katıldığı’ veya o modun kütle büyüklüğünü temsil eder.

$$M_n=\{\phi\}_n^T[m]\{\phi\}_n=\sum_{j=1}^{N}m_j\phi_{jn}^2$$

- Denklemin her iki tarafını da $\boldsymbol{M_n}$’ye bölersek;

$$\ddot{q}_n(t)+2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t)+\omega_n^2 q_n(t)=-\left(\frac{L_n}{M_n}\right)\ddot{u}_g(t)$$

Modal Analiz ile Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketinin Çözümü

- **Modal Deprem Katılım Faktörü**: $L_n = \{\phi\}_n^T [m]\{1\} = \sum_{j=1}^{N} m_j \phi_{jn}$
- **s vektörü (uzaysal dağılım vektörü)** $\{s\} = [m]\{1\} = \sum_{r=1}^{N} \{s\}_r = \sum_{r=1}^{N} \Gamma_r [m]\{\phi\}_r$
- **Modal Katkı Çarpanı / Modal Katılım Faktörü**: n'inci titreşim modunun deprem yer hareketine ne ölçüde katıldığını belirleyen katsayıdır. Yapıdan bağımsız olan deprem ivmesini, o moda özel bir etki kuvvetine dönüştürür. Bu değer tamamen yapının kütle dağılımı ile mod şeklinin uzaydaki uyumuna bağlıdır. Yapının eleman uç kuvvetleriyle veya yer değiştirmeleriyle ilgilenmez, sadece modu tetikler.

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} = \frac{\{\phi\}_n^T [m]\{1\}}{\{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_n}$$

- Eğer bir modun Modal Katkı Çarpanı değeri büyükse, deprem yer hareketi o modu çok fazla uyarır ve yapı o mod şekline göre şiddetle sallanır. Eğer Modal Katkı Çarpanı değeri sıfıra yakınsa deprem o modu neredeyse hiç tetiklemez.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t)$$

Modal Analiz ile Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketinin Çözümü

$$\ddot{q}_n(t) + 2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t)$$

- Tek serbestlik dereceli sistem çözümüne benzetebilmek için denklemin sağındaki Modal Katılım Faktörü'nden kurtulmamız gerekiyor.

$$q_n(t) = \Gamma_n D_n(t) \qquad \Rightarrow \qquad \ddot{D}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{D}_n + \omega_n^2 D_n = -\ddot{u}_g(t)$$

- N'inci modun toplam deplasmana katılımı: $\{u(t)\}_n = \{\phi\}_n q_n(t) = \Gamma_n \{\phi\}_n D_n(t)$

$$\{f(t)\}_n = [k]\{u(t)\}_n \longleftrightarrow \{f(t)\}_n = \omega_n^2 [m]\Gamma_n \{\phi\}_n D_n(t) \longrightarrow \{f(t)\}_n = \{s\}_n A_n(t)$$

$$[k]\{\phi\}_n = \omega_n^2 [m]\{\phi\}_n \qquad \{s\}_n = \Gamma_n [m]\{\phi\}_n \qquad A_n(t) = \omega_n^2 D_n(t)$$

- N inci mod katılımı : $r_n(t) = r_n^{st} A_n(t)$
- Tüm modların toplam katılımı

$$\{u(t)\} = \sum_{n=1}^{N} \{u(t)\}_n = \sum_{n=1}^{N} \Gamma_n \{\phi\}_n D_n(t) \qquad r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n^{st} A_n(t)$$

Deprem yükünün modlara ayrışması

$$[k] = k\begin{bmatrix} 3 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad [m] = m\begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{k}{2m}} \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{2k}{m}} \quad \phi_1 = \begin{Bmatrix} 1/2 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \phi_2 = \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

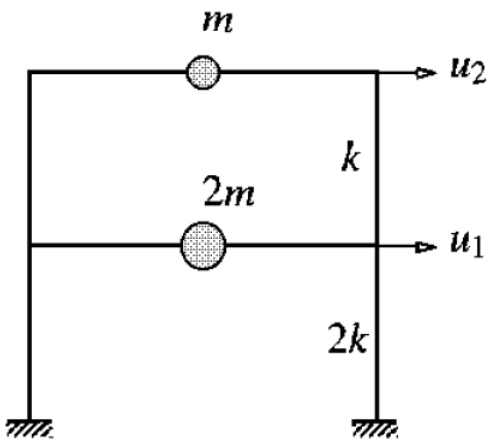
1. mode $M_1 = 2m\left(\frac{1}{2}\right)^2 + m(1)^2 = 3m/2 \quad L_1 = 2m\left(\frac{1}{2}\right) + m(1) = 2m \quad \Gamma_1 = L_1/M_1 = 4/3$

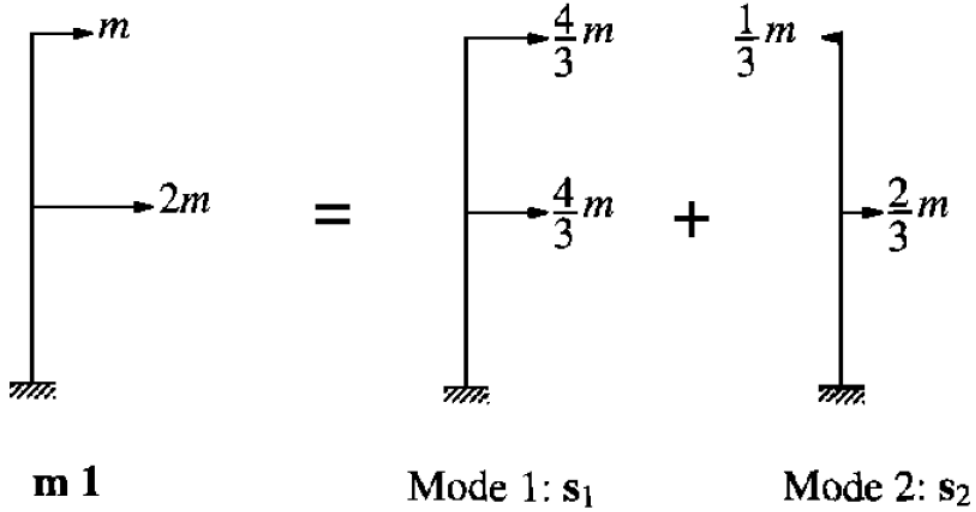
2. mode $M_2 = 3m \quad L_2 = -m \quad \Gamma_2 = L_2/M_2 = -1/3$

$$\{s\} = \sum_{r=1}^{N} \Gamma_r [m]\{\phi\}_r$$

$$\mathbf{s}_1 = \frac{4}{3}m\begin{bmatrix} 2 & \\ & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \\ 1 \end{Bmatrix} = \frac{4}{3}m\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{s}_2 = -\frac{1}{3}m\begin{bmatrix} 2 & \\ & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix} = -\frac{1}{3}m\begin{Bmatrix} -2 \\ 1 \end{Bmatrix}$$





m 1 Mode 1: $\mathbf{s}_1$ Mode 2: $\mathbf{s}_2$

Efektif Modal Kütle / modal participating mass ratios

- n'inci moda ait eşdeğer statik kuvvet, s vektörü, Modal kütle, Modal katılım faktörü,

$$\{f(t)\}_n = \{s\}_n A_n(t) \quad \{s\}_n = \Gamma_n [m]\{\phi\}_n$$

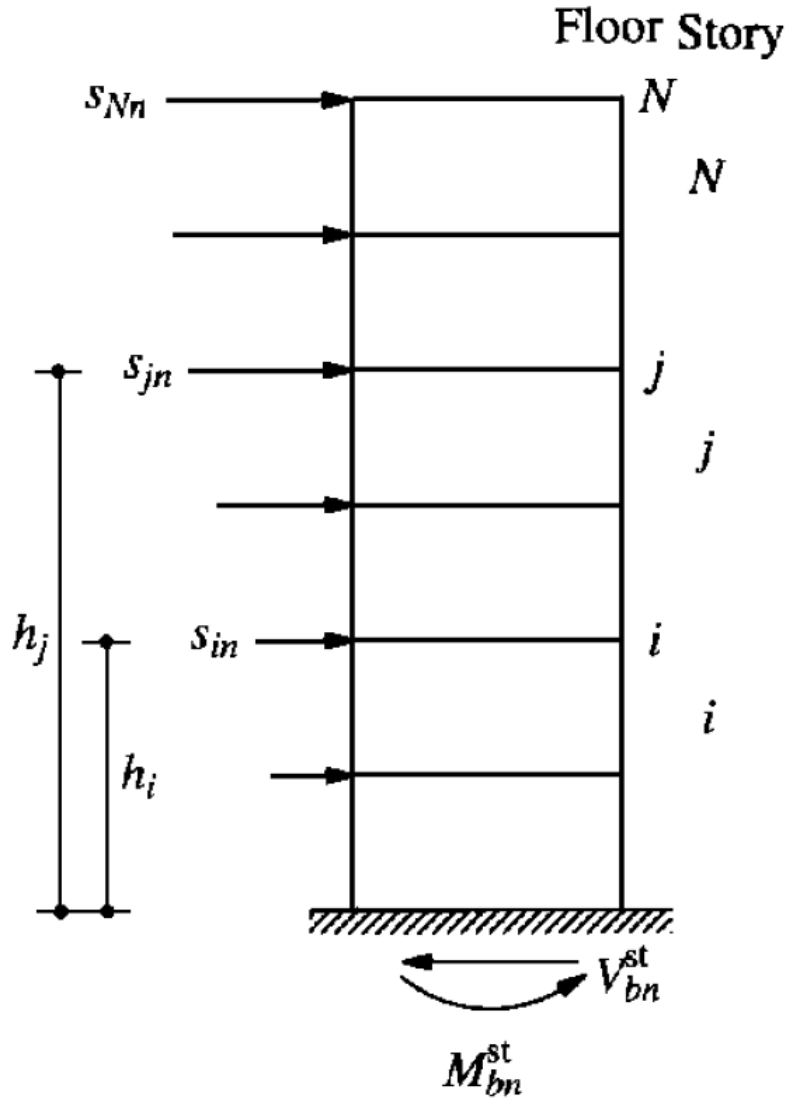
$$M_n = \{\phi\}_n^T [m]\{\phi\}_n \quad L_n = \{\phi\}_n^T [m]\{1\} \qquad \Gamma_n = \frac{L_n}{M_n}$$

- n'inci modun, j'inci kattaki ait eşdeğer statik kuvvet, s vektörü, kütle, Modal katılım faktörü,

$$f(t)_{jn} = s_{jn} A_n(t) \qquad s_{jn} = \Gamma_n m_j \phi_{jn}$$

$$M_n = \sum_{j=1}^{N} m_j \phi_{jn}^2 \qquad L_n = \sum_{j=1}^{N} m_j \phi_{jn}$$

- Herhangi bir çözüm: $r_n(t) = r_n^{st} A_n(t)$
- Taban Kesme Kuvveti $V_{bn}^{st} = \sum_{j=1}^{N} s_{jn} = \Gamma_n \sum_{j=1}^{N} m_j \phi_{jn} = \Gamma_n L_n = M_n^*$
- Efektif Modal Kütle $V_{bn}^{st} = M_n^* \qquad V_{bn}(t) = V_{bn}^{st} A_n(t) = M_n^* A_n(t)$



Efektif Modal Kütle / modal participating mass ratios

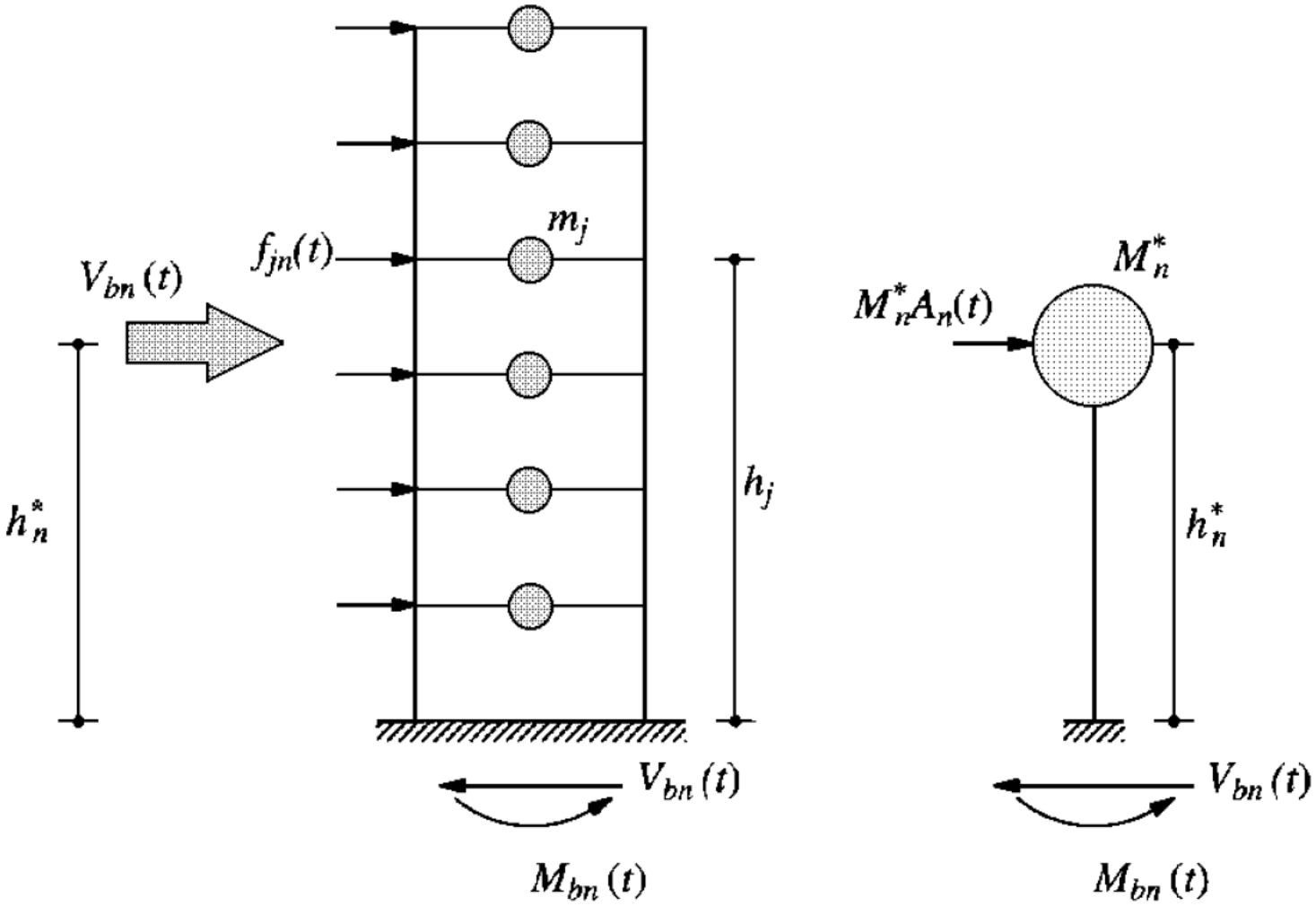
- Tek serbestlik dereceli sistemlerde :

$$V_b(t) = mA_n(t)$$

- Çok serbestlik dereceli sistemlerde toplam kütlenin efektif bir kısmı taban kesme kuvvetlerini oluşturur.

- Efektif kütlelerin n moddaki toplamı toplam kütleyi verir:

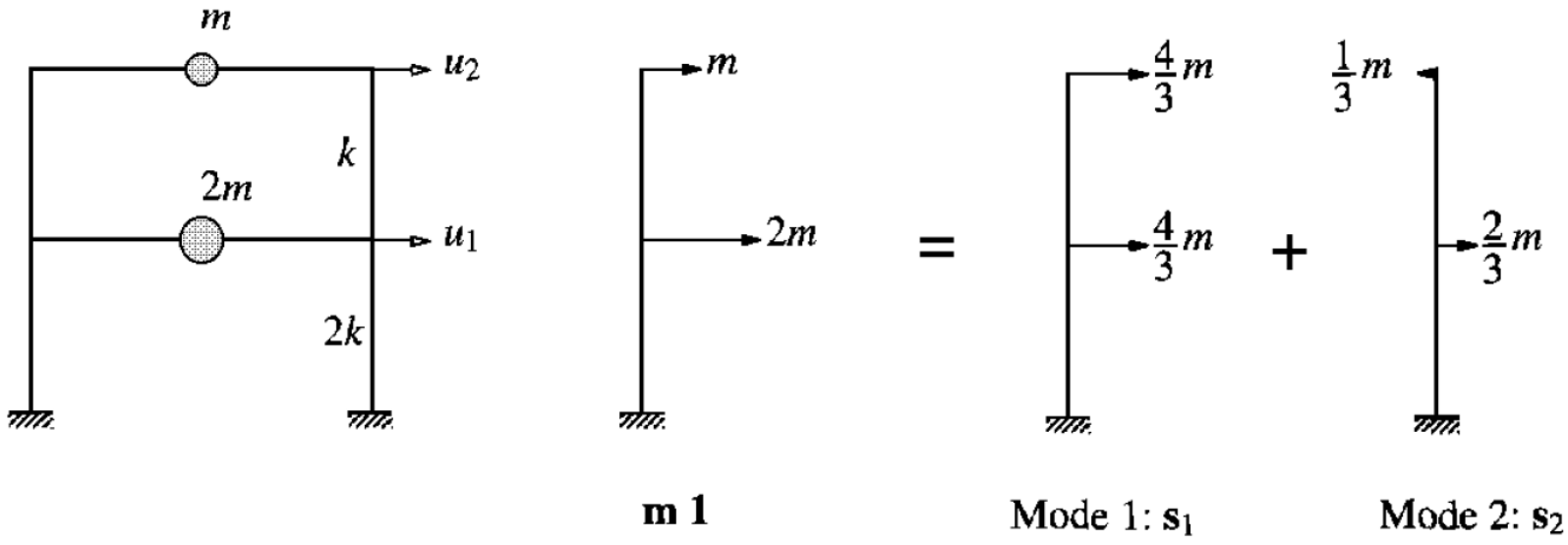
$$M_n^* = \frac{L_n^2}{M_n} \qquad \sum_{n=1}^{N} M_n^* = \sum_{j=1}^{N} m_j$$



Deprem yükünün modlara ayrışması

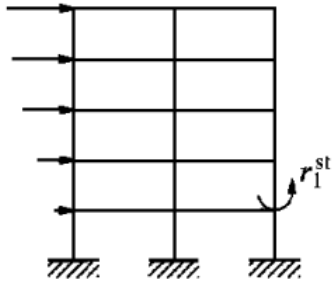
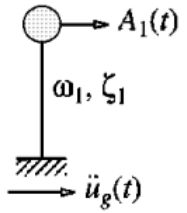
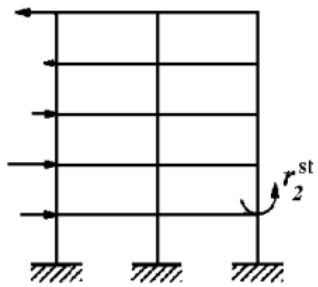
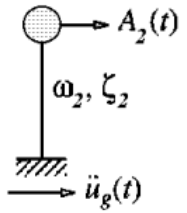
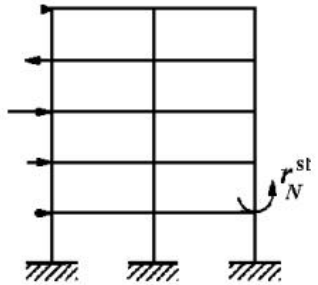
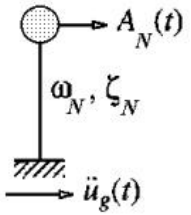
1.mode $M_1 = 2m\left(\frac{1}{2}\right)^2 + m(1)^2 = 3m/2 \quad L_1 = 2m\left(\frac{1}{2}\right) + m(1) = 2m \quad \Gamma_1 = L_1/M_1 = 4/3$

2.mode $M_2 = 3m \quad L_2 = -m \quad \Gamma_2 = L_2/M_2 = -1/3$



$$M_1^* = \frac{(2m)^2}{1{,}5m} = \frac{8}{3}m \ (\%88{,}9) \qquad M_2^* = \frac{(-m)^2}{3m} = \frac{1}{3}m \ (\%11{,}1) \qquad M_1^* + M_2^* = 3m$$

Modal Analiz ile Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketinin Çözümü

Mode	Static Analysis of Structure	Dynamic Analysis of SDF System	Modal Contribution to Dynamic Response
1	Forces $\mathbf{s}_1$ 		$r_1(t) = r_1^{st} A_1(t)$
2	Forces $\mathbf{s}_2$ 		$r_2(t) = r_2^{st} A_2(t)$
N	Forces $\mathbf{s}_N$ 		$r_N(t) = r_N^{st} A_N(t)$
Total response			$r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t)$

Modal Analiz / Tepki Spektrumu Analizi

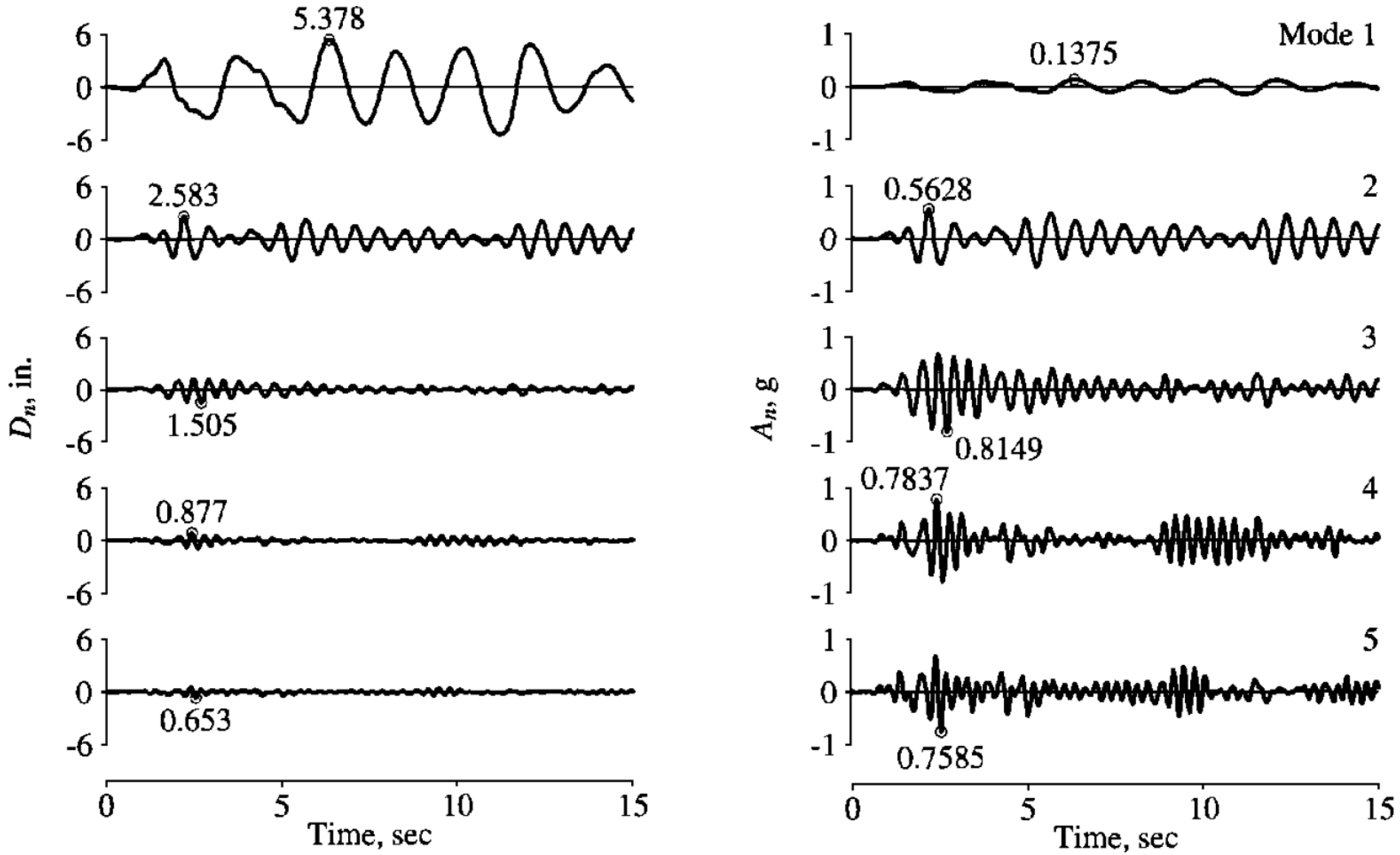
- Modal Analiz : Zaman Tanım Alanında Çözüm

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n^{st} A_n(t)$$

- Spektral Analiz : Maksimum kuvvetlerin ve deplasmanların direkt olarak belirlenmesi
- $A_n = A(T_n, \xi_n)$ işareti her zaman pozitif dolayısıyla r_{n0} ve r_n^{st} aynı işaretlidir.

$$r_{n0} = r_n^{st} A_n$$

Modal Analiz / Tepki Spektrumu Analizi



Maksimum Modal Tepkilerin Kombinasyonu

- Üst Üste Toplam (AbsSum):

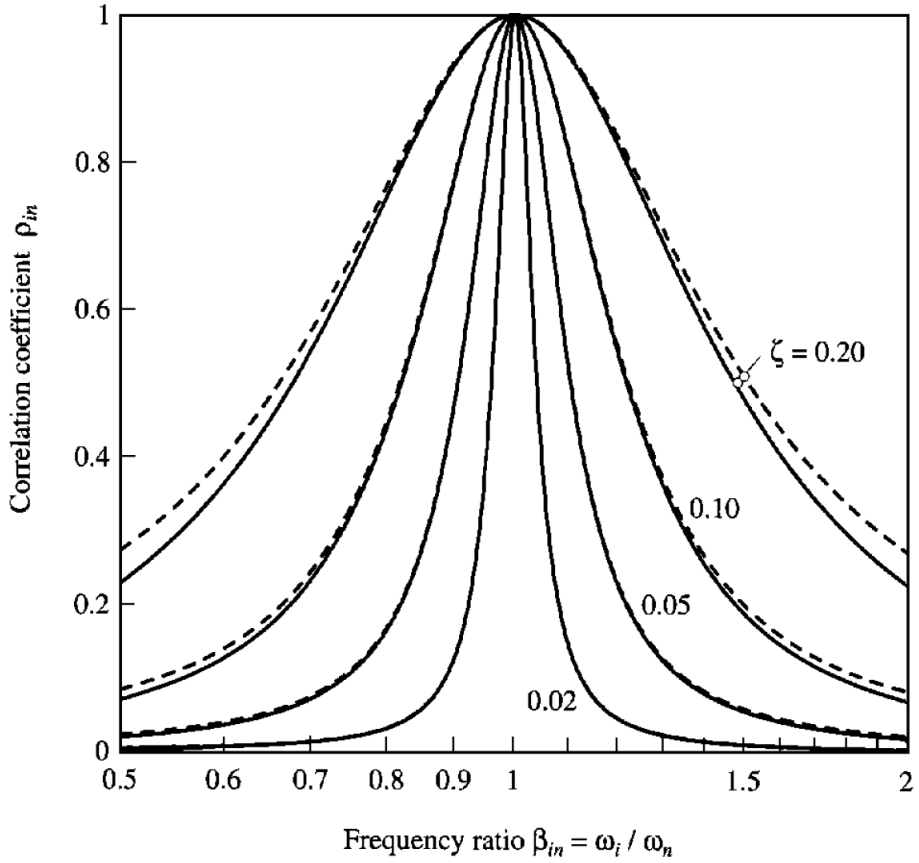
$$r_0 \le \sum_{n=1}^{N} |r_{n0}|$$

- Karelerinin Toplamının Kare Kökü (SRSS)

$$r_0 \approx \sqrt{\sum_{n=1}^{N} r_{n0}^2}$$

- Complete Quadratic Combination

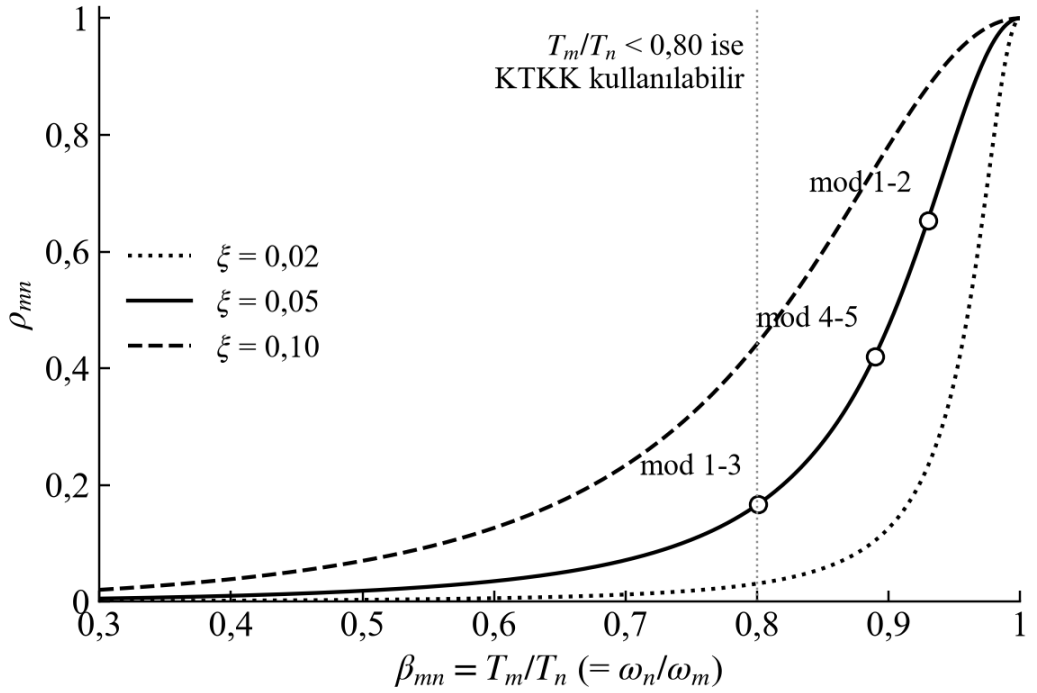
$$r_0 \approx \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{n=1}^{N} \rho_{in} r_{i0} r_{n0}} \qquad r_0 \approx \sqrt{\sum_{n=1}^{N} r_{n0}^2 + \underbrace{\sum_{i=1}^{N}\sum_{n=1}^{N} \rho_{in} r_{i0} r_{n0}}_{i \neq n}}$$



Modal en büyük değerlerin birleştirilmesi

$$r_0 \le \sum_n |r_{n0}| \qquad r_0 \approx \sqrt{\sum_n r_{n0}^2} \qquad r_0 \approx \sqrt{\sum_i \sum_n \rho_{in}\, r_{i0}\, r_{n0}}$$

- **Mutlak toplam:** üst sınır, gereksiz güvenli
- **KTKK (SRSS):** modlar bağımsız; periyotlar uzaksa yeterli
- **TKB (CQC):** yakın periyotlu modların korelasyonu ρ ile
- $T_m/T_n < 0{,}80$ ise ρ küçük, iki kural yakın



ÇSDS'de Sönüm

- Kütle Orantılı: $[c] = a_0[m]$ $C_n = \{\phi\}_n^T [c]\{\phi\}_n = \{\phi\}_n^T a_0[m]\{\phi\}_n = a_0 M_n$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n\omega_n} = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_n} \Rightarrow a_0 = 2\xi_n\omega_n$$

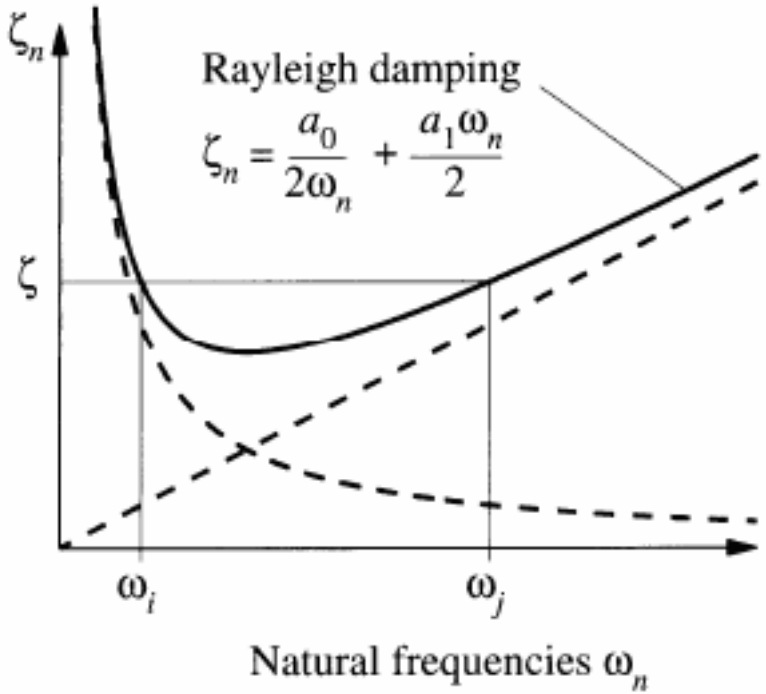
- Rijitlik Orantılı: $[c] = a_1[k]$ $C_n = \{\phi\}_n^T [c]\{\phi\}_n = \{\phi\}_n^T a_1[k]\{\phi\}_n = a_1 K_n = a_1\omega_n^2 M_n$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n\omega_n} = \frac{a_1}{2}\omega_n \Rightarrow a_1 = \frac{2\xi_n}{\omega_n}$$

- Rayleigh Modeli: $[c] = a_0[m] + a_1[k]$

$$\xi_n = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2}\omega_n$$

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad a_0 = \xi\frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \xi\frac{2}{\omega_i + \omega_j}$$



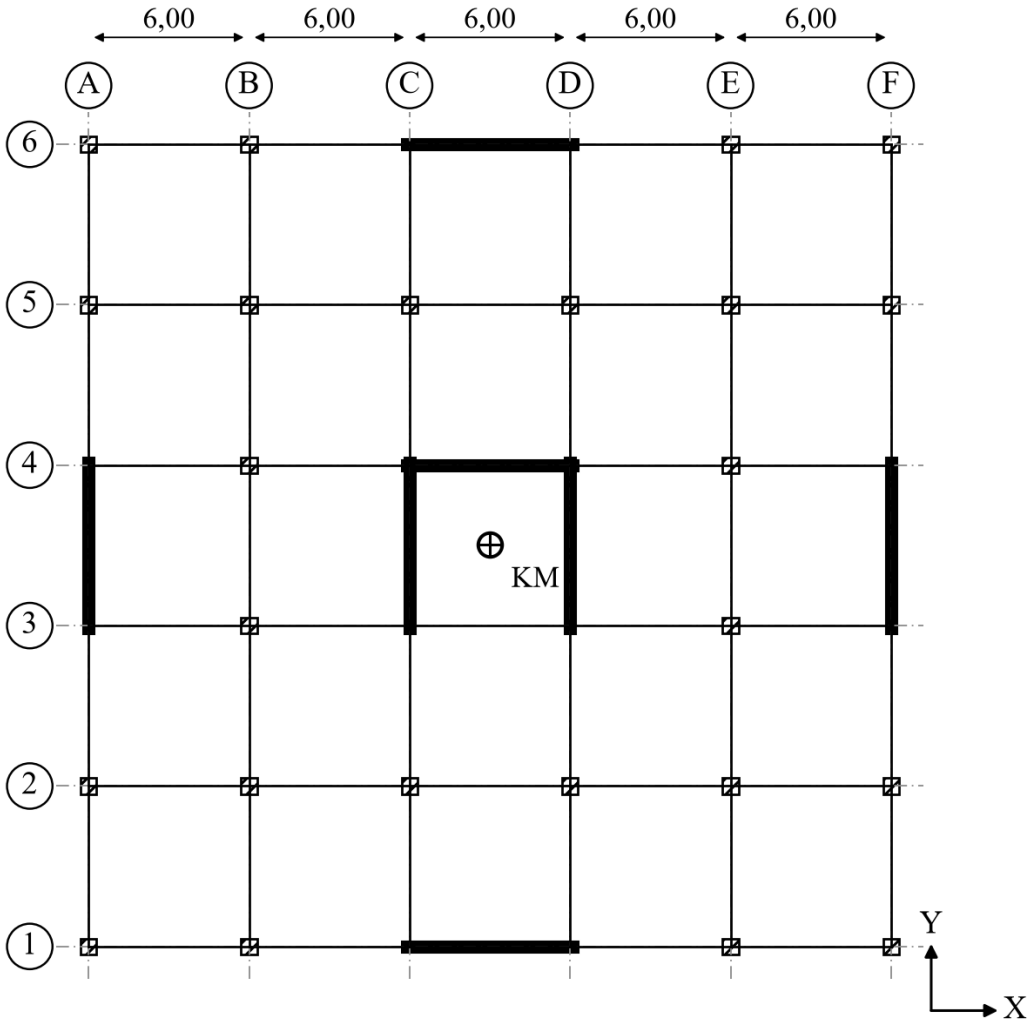
3

Modların deprem davranışına katkısı

Birinci modun önemi · Kat sayısı ve modlar

Bu bölümün örneği: aynı planlı 1–20 katlı bina serisi

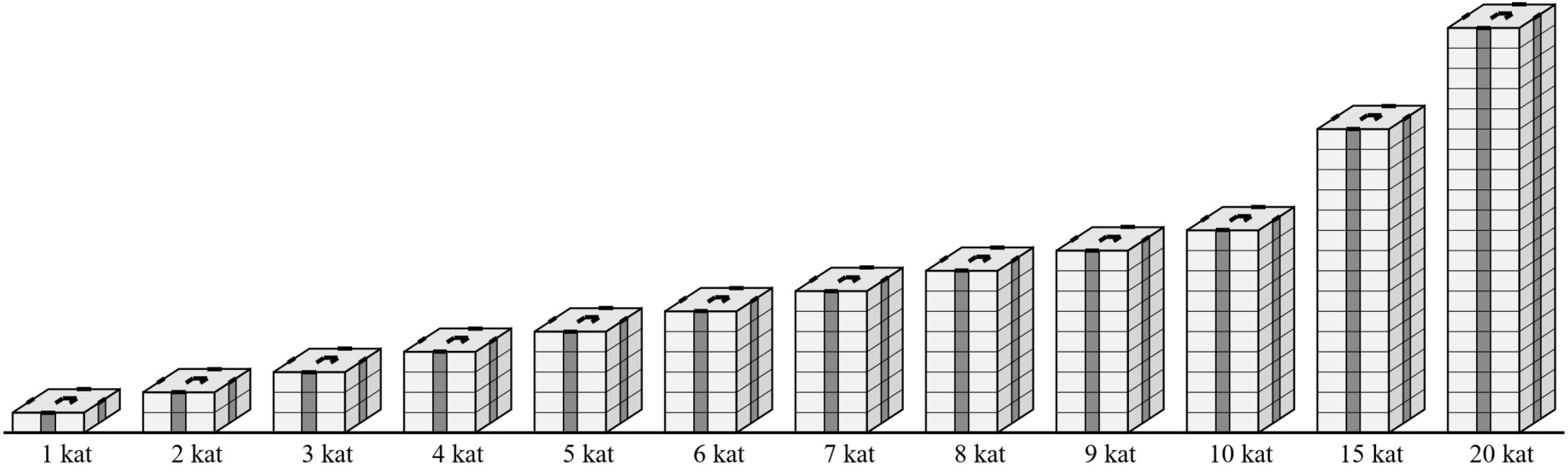
ETABS 22



Veri	Değer
Plan	30 × 30 m; 6,00 m açıklık, A–F ve 1–6
Kat yüksekliği	3,0 m
Kolon / kiriş	60/60 / 40/50
Perde	40 cm; X: 1, 4, 6 aksları; Y: A, C, D, F aksları
Döşeme	17 cm, rijit diyafram
Kat kütlesi	1064,9 t (normal), 967,6 t (çatı)
Modeller	1, 2, 3, ..., 10, 15 ve 20 kat (ETABS 22)
Serbestlik	Kat başına 3: u_x, u_y, θ_z

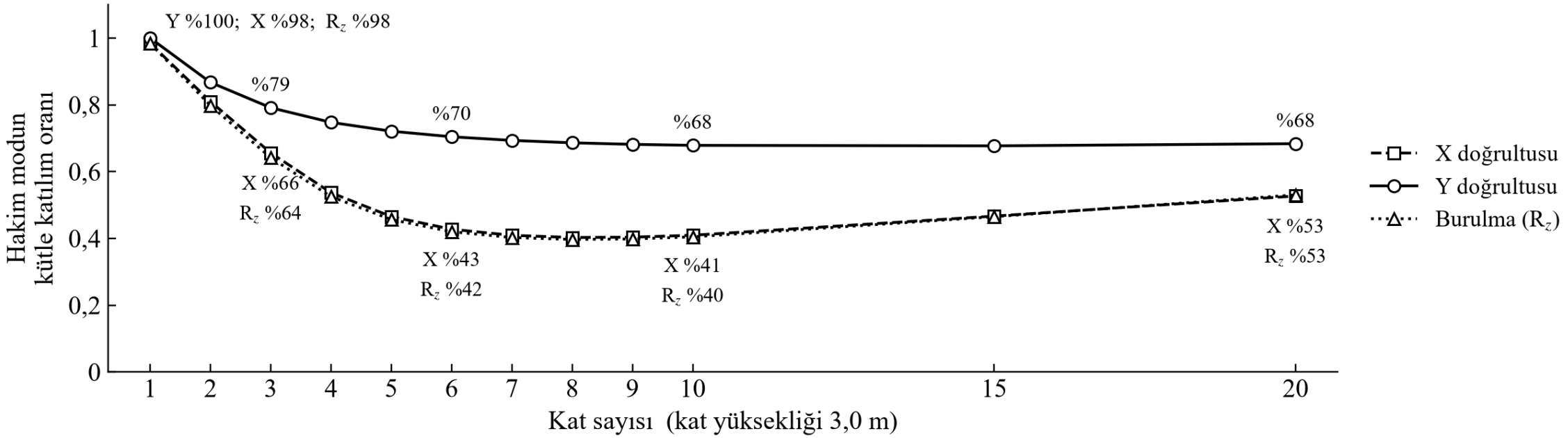
Y perdeleri simetrik → **saf öteleme modları**
X perdeleri simetrik değil → **X modları burulmayla bağlaşık**

Aynı plan, 1'den 20 kata: periyot nasıl değişir?



Kat sayısı	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**15**	**20**
X: T (s)	0,036	0,072	0,121	0,182	0,253	0,333	0,420	0,512	0,608	0,708	1,249	1,841
X: kütle	%98	%81	%66	%54	%47	%43	%41	%40	%40	%41	%47	%53
Y: T (s)	0,031	0,064	0,109	0,166	0,234	0,311	0,396	0,487	0,584	0,685	1,239	1,848
Y: kütle	%100	%87	%79	%75	%72	%70	%69	%69	%68	%68	%68	%68

Kat sayısı arttıkça hakim modun payı azalır

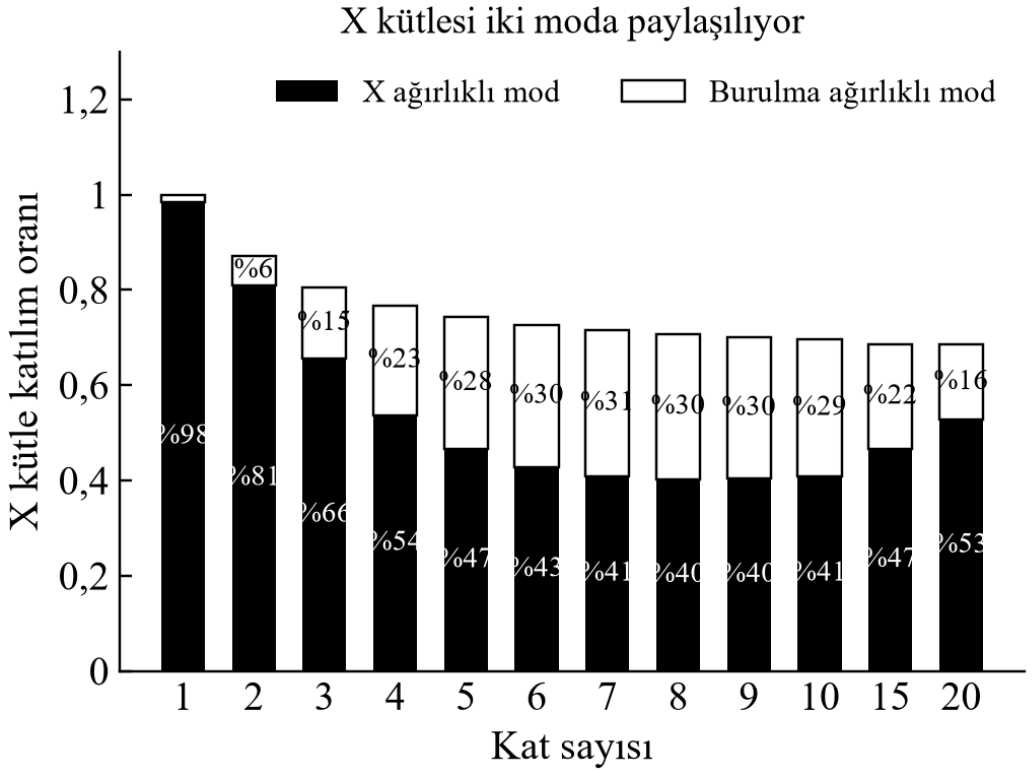


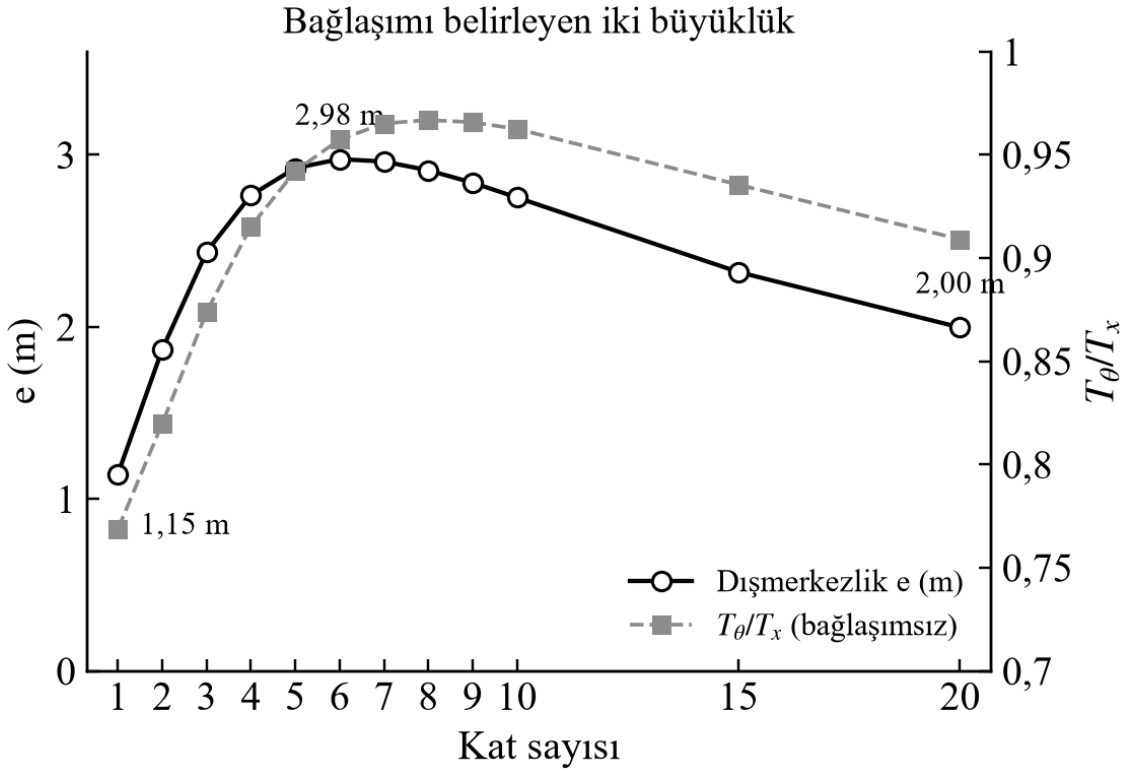
Kat	Mod	T (s)	X payı
1	1	0,036	%98
2	1	0,072	%81
3	1	0,121	%66
6	1	0,333	%43
10	1	0,708	%41
20	2	1,841	%53

Kat	Mod	T (s)	Y payı
1	2	0,031	%100
2	2	0,064	%87
3	2	0,109	%79
6	2	0,311	%70
10	2	0,685	%68
20	1	1,848	%68

Kat	Mod	T (s)	R_z payı
1	3	0,027	%98
2	3	0,058	%80
3	3	0,098	%64
6	3	0,267	%42
10	3	0,574	%40
20	3	1,539	%53

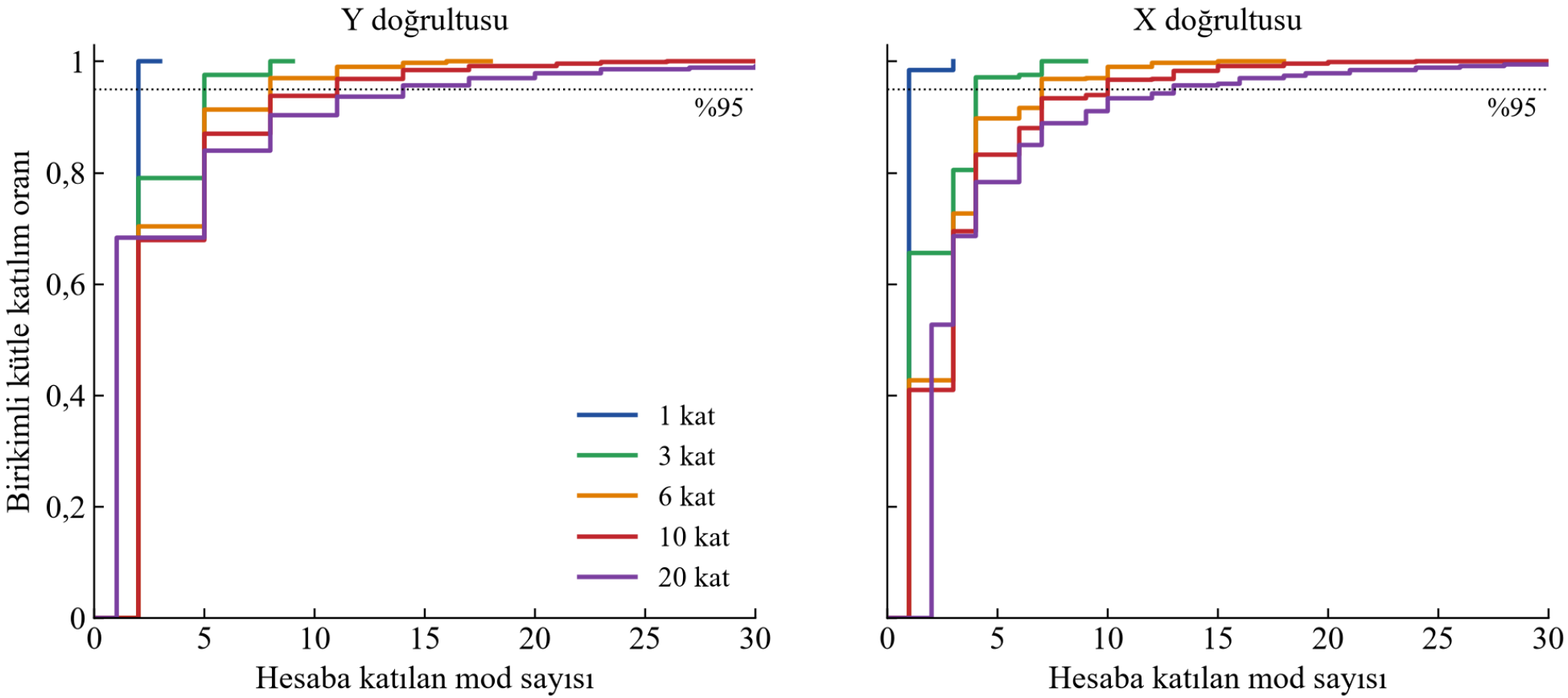
X ve Burulma modu payı neden 8–9 kattan sonra artıyor?





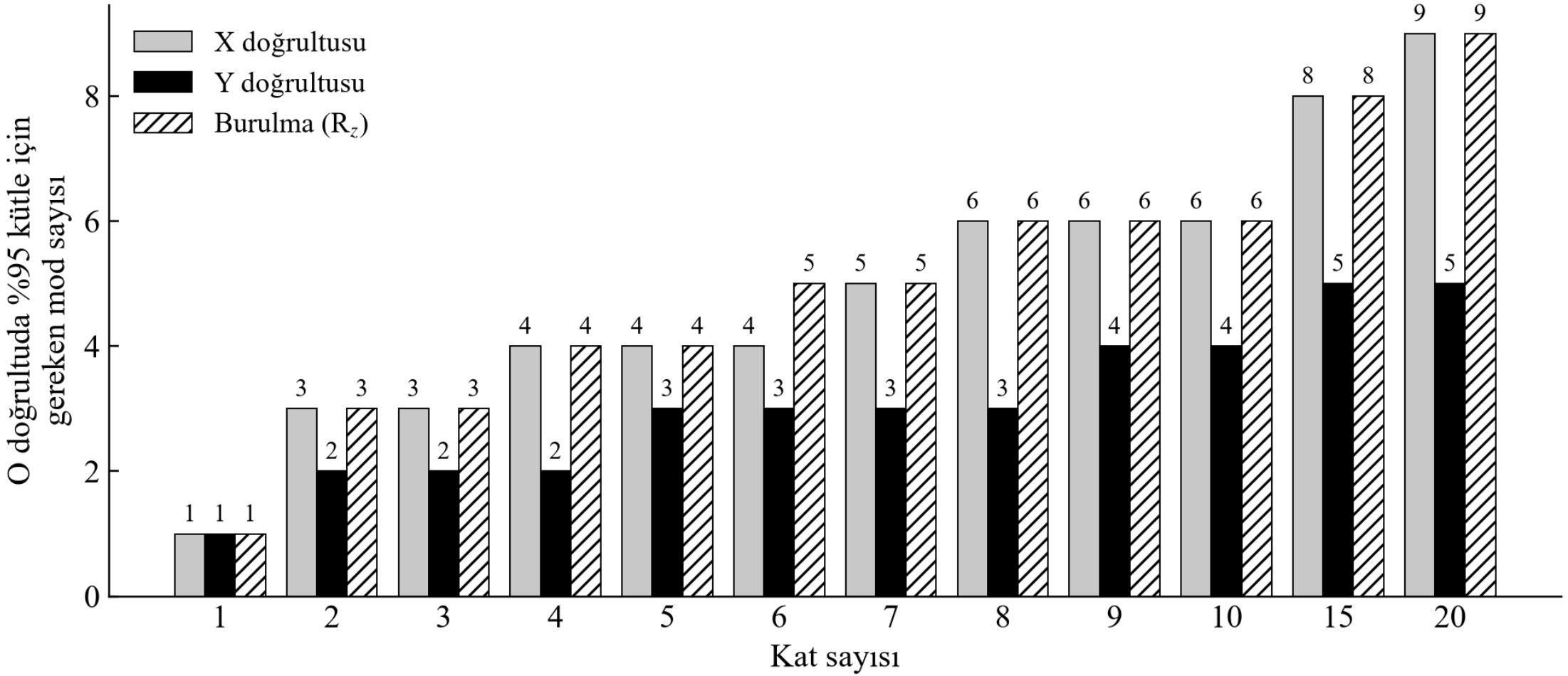
- X doğrultusu ötelenme ve burulma ağırlıklı modun toplam X payı, Y'deki gibi yavaşça azalıyor (3 katta %80, 20 katta %69); değişen, iki mod arasındaki **paylaşım**
- Bağlaşımı **dışmerkezlik 'e'** ve bağlaşımsız $\mathbf{T_\theta/T_x}$ oranının 1'e yakınlığı belirler; ikisi de 6–9 katta en elverişsiz
- Yükseldikçe simetrik çerçevelerin rijitlik payı artar, rijitlik merkezi kütle merkezine yaklaşır (e: 2,98 → 2,00 m): modlar ayrışır

Toplam kütle kaç modda toplanır?

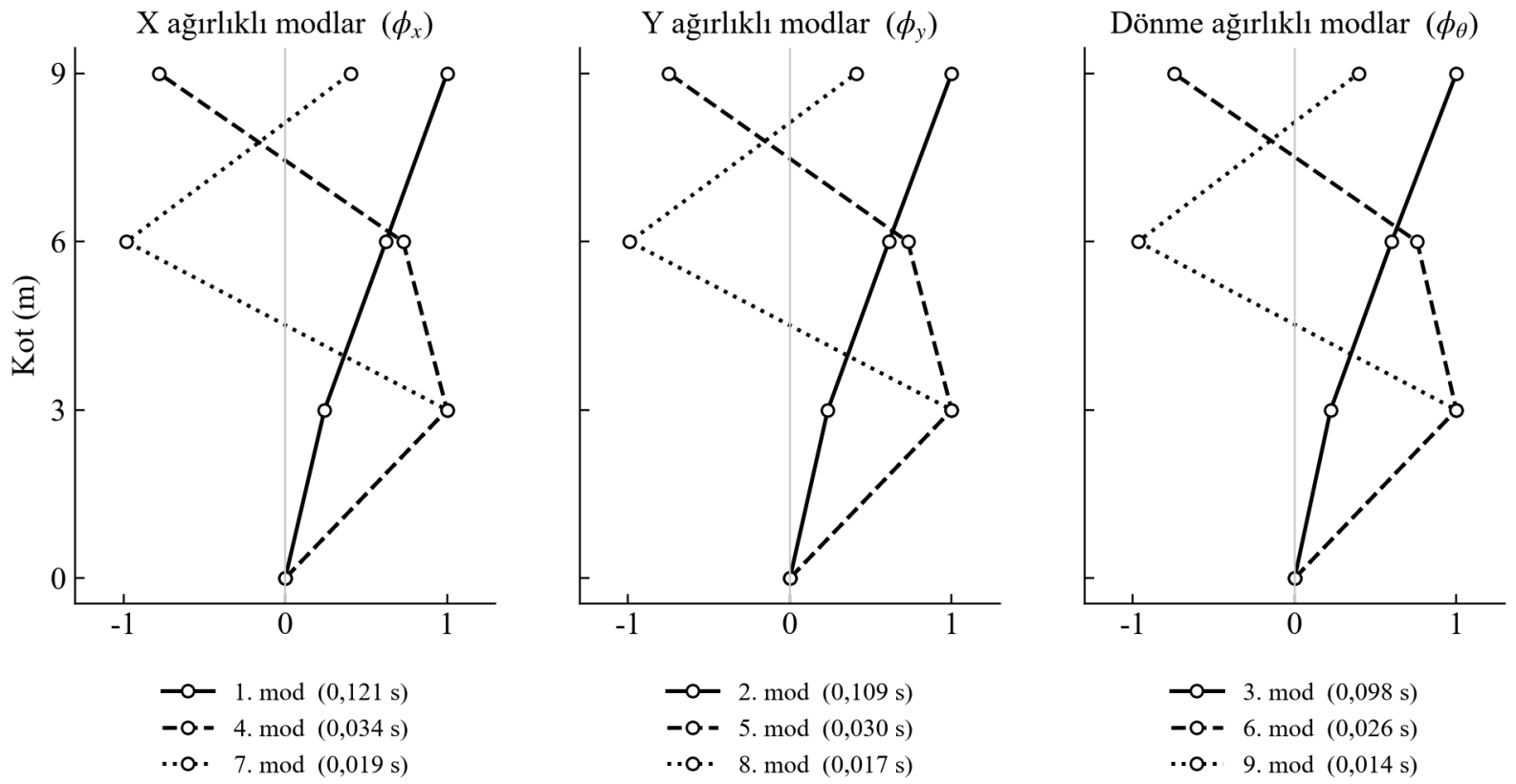


Periyot sırasıyla çözülmesi gereken mod sayısı (iki doğrultunun büyüğü): 1 kat → 2; 3 kat → 5; 6 kat → 8; 10 kat → 11; 20 kat → 14

Neden tek moda göre hesap yapılmaz?



3 katlı model: mod şekilleri

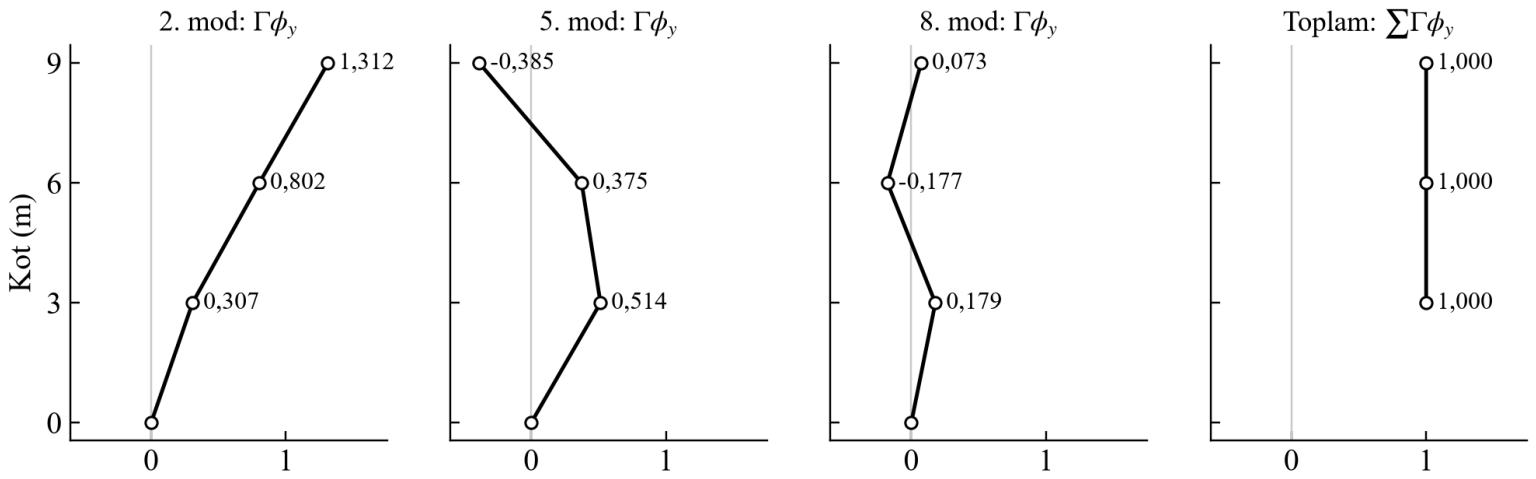


Mod	T (s)	X	Y	R_z
1	0,121	%65,6	–	%13,7
2	0,109	–	%79,1	–
3	0,098	%14,9	–	%64,1
4	0,034	%16,7	–	%0,7
5	0,030	–	%18,5	–
6	0,026	%0,4	–	%18,9
7	0,019	%2,4	–	–
8	0,017	–	%2,3	–
9	0,014	–	–	%2,5

Modal yerdeğiştirme şekli Γφ

$$\boldsymbol{\iota} = \sum_n \Gamma_n \boldsymbol{\phi}_n \qquad \mathbf{u}_n(t) = \Gamma_n \boldsymbol{\phi}_n D_n(t)$$

Mod	T (s)	Γ_y	$\Gamma\varphi_{y1}$	$\Gamma\varphi_{y2}$	$\Gamma\varphi_{y3}$
2	0,109	−49,51	0,307	0,802	1,312
5	0,030	−23,96	0,514	0,375	−0,385
8	0,017	8,51	0,179	−0,177	0,073
Toplam			**1,000**	**1,000**	**1,000**



Γ ve φ ETABS ölçeğinde ($\varphi^T M \varphi = 1$); Γφ çarpımı ölçekten bağımsızdır.

Özdeğer (eigen) analizi ve Ritz analizi

	Özdeğer (eigen) analizi	**Ritz analizi**
Çözdüğü	$(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})\,\boldsymbol{\varphi} = 0$	Deprem yükü biçiminden üretilen vektörler
Başlangıç	Yükten bağımsız	$\mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\,\boldsymbol{\iota}$ (X ve Y ivme yükü)
Sonuç	Gerçek titreşim modları, periyot sırasıyla	İlk vektörler gerçek mod; sonrakiler sayısal
Kütle katılımı	Yavaş birikir; burulma modları da çıkar	Hızlı birikir; yükün uyarmadığı modları atlar
Hesap	Turlar hâlinde tekrar (yinelemeli)	Tekrarsız; daha hızlı
Ne için	Modların yorumu: periyot, şekil, burulma	Yük doğrultusundaki tepki

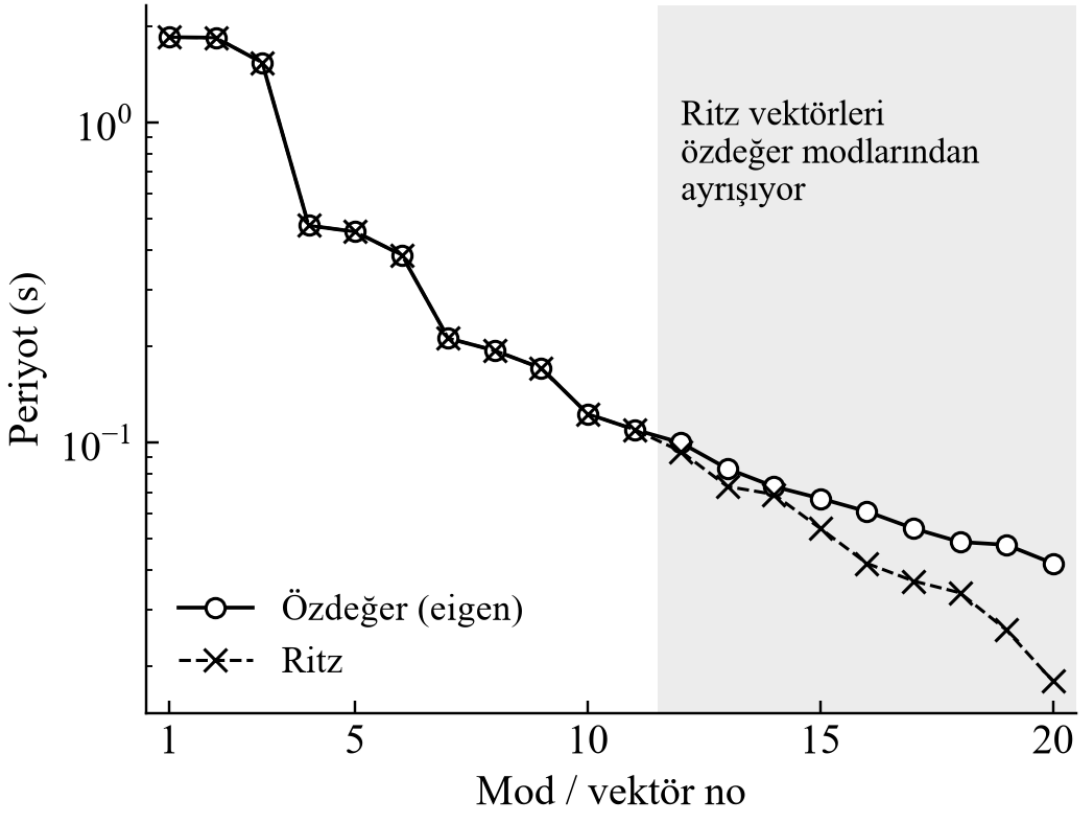
20 katlı bina	**%95 için**	**%99 için**
Özdeğer: mod sayısı (X / Y)	13 / 14	26 / 30
Ritz: vektör sayısı (X / Y)	14 / 13	17 / 19

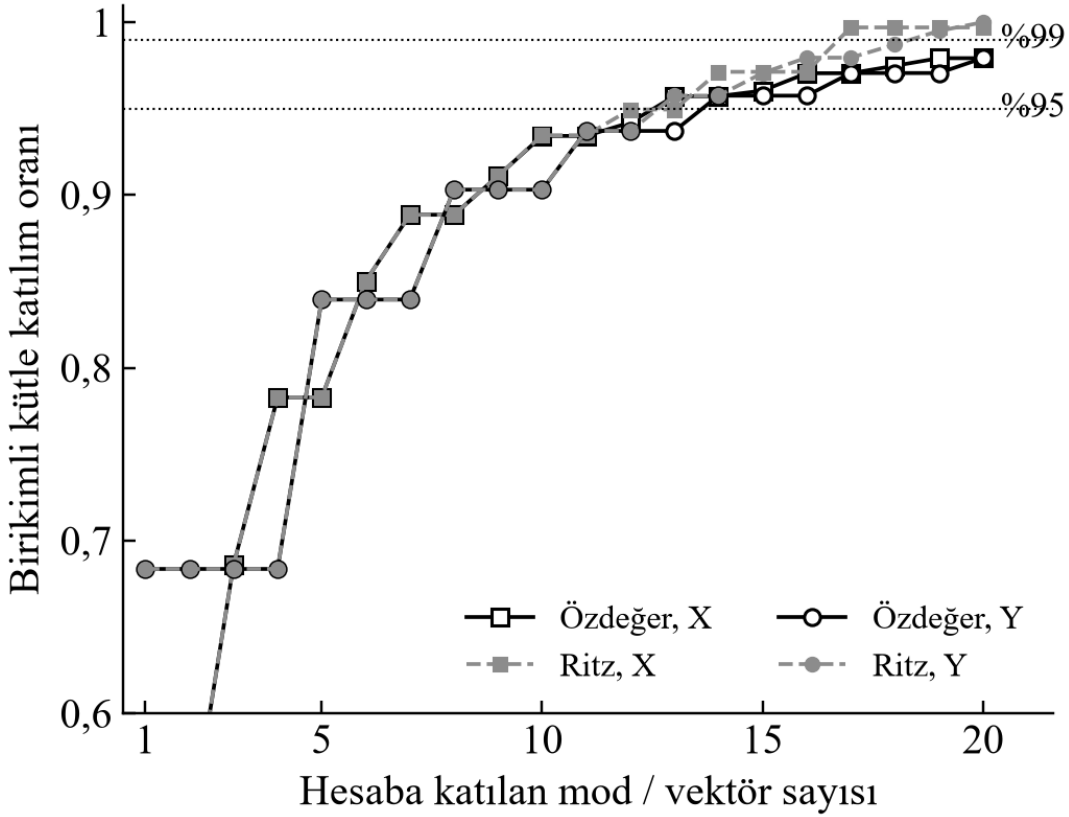
Mod sayısı: her doğrultuda **%95** (4.8.1.2)

Ritz'te %95 kolay sağlanır; ama yalnız **ilk vektörler** gerçek mod

Modları yorumlarken **özdeğer** çözümüne bakın

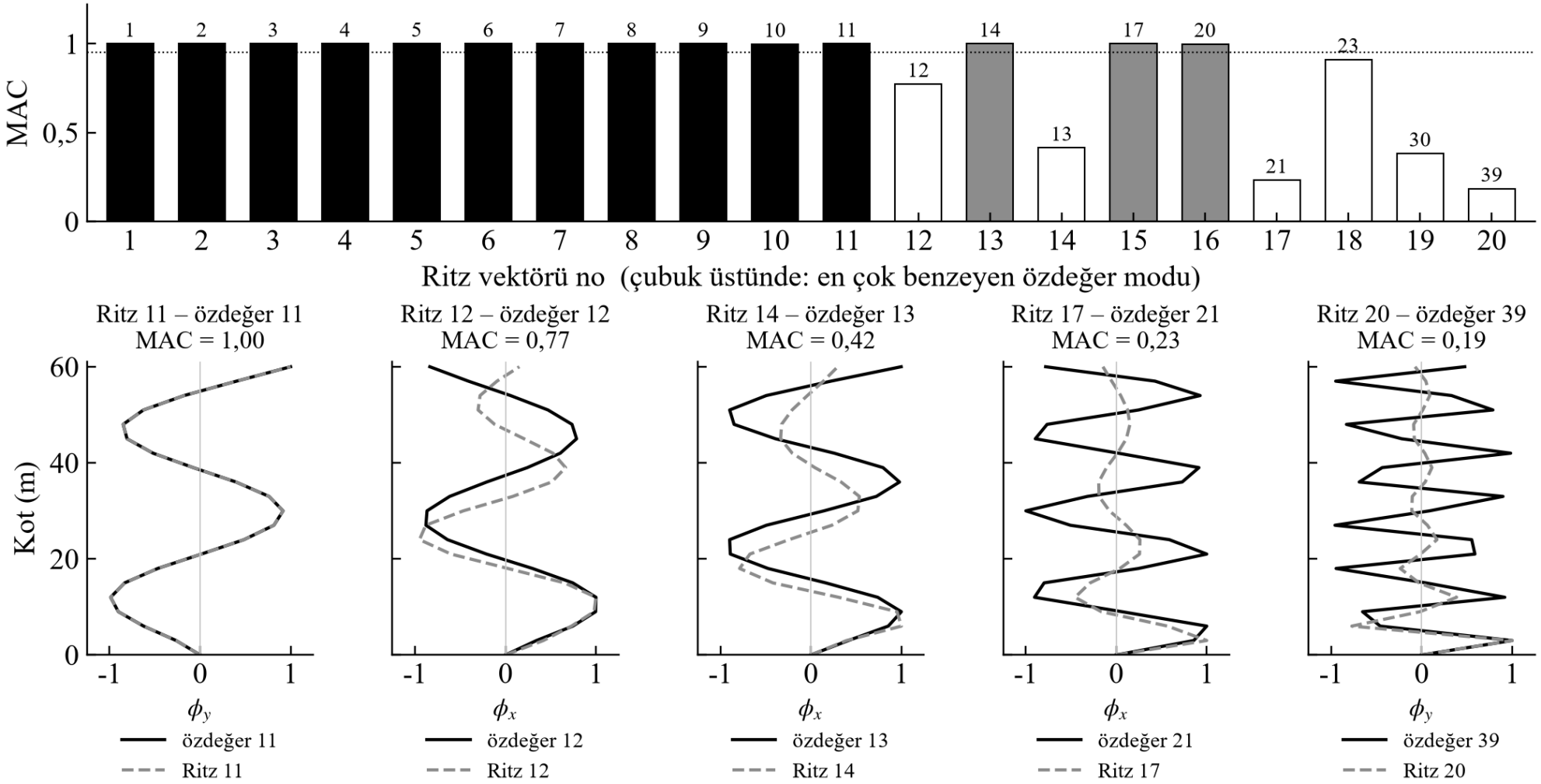
20 katlı bina: ilk 20 mod, periyot ve kütle katılımı





İlk **11** vektör özdeğer modlarıyla aynı. 20 vektörde Ritz: X %99,7, Y %100,0; özdeğer (20 mod): X %97,9, Y %97,9

Mod şekilleri: Ritz vektörleri nerede ayrışıyor?



MAC: kütle ağırlıklı mod benzerlik ölçütü (1 = aynı biçim). Siyah: aynı numaralı modla aynı; gri: gerçek mod, numarası kaymış; beyaz: gerçek moda karşılık gelmiyor.

Yüksek modlar ne zaman önemlidir?

Büyüklük	Belirleyici modlar	Pratik sonuç
Tepe yerdeğiştirmesi, göreli öteleme	Ağırlıkla 1. mod	EDY ile modal sonuç yakın çıkar
Taban kesme kuvveti	1. mod + 2. öteleme modu	Perdeli binada %20-40 katkı
Üst kat kesmeleri ve ivmeleri	Yüksek modlar	ΔF_N bu etkinin kaba karşılığı
Perde kesme kuvveti	Yüksek modlar	Bölüm 7'de dinamik büyütme

- Yüksek mod etkisi artar: **yükseklik** arttıkça, **perde** ağırlığı arttıkça, düşeyde düzensizlik oldukça
- Birinci periyot tasarım spektrumunun genellikle köşe periyodundan sonra azalan koldayken, yüksek modlar genellikle platoda kalır: ivmeleri daha büyüktür

4

Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi /TBDY 2018 - 4.7

Temel prensip · uygulama sınırları · hakim periyot · taban kesme kuvveti · katlara dağıtım · burulma

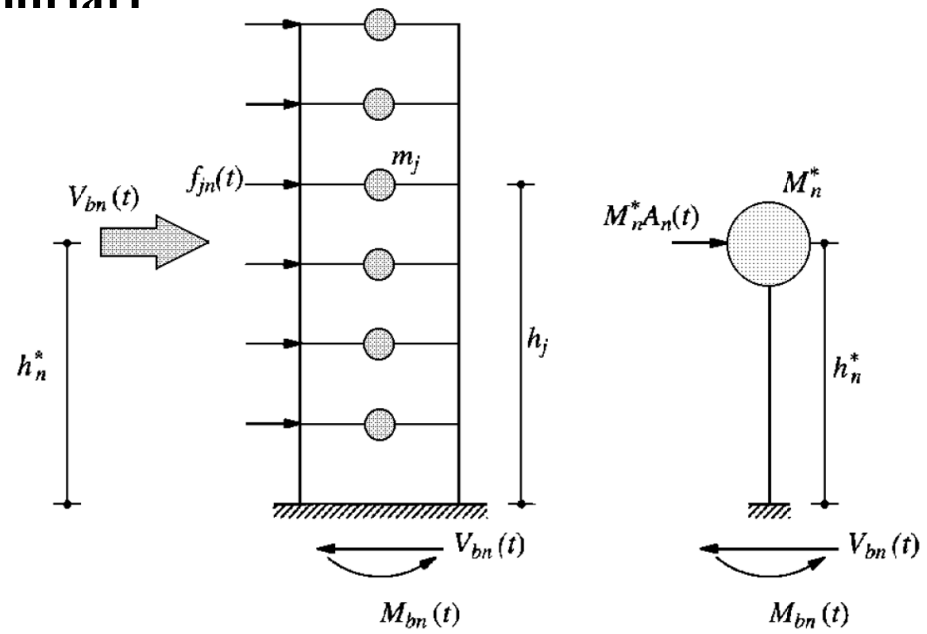
Yöntemin Temel Esasları

- Davranış **birinci (hakim) modla** temsil edilir
- Bütün kütle T_p'ye karşı gelen ivmeyle çarpılarak taban kesme kuvveti elde edilir:

$V_{tE} = m_t\, S_{aR}(T_p)\, g \geq 0.04\, m_t\, I\, S_{DS}\, g$ (etkin kütle yerine toplam kütle: güvenli taraf)

- Katlara dağıtım **ters üçgen** (birinci mod şekline uygun)
- Tepe kuvveti ΔF_N: yüksek modların üst katlardaki etkisinin kaba karşılığı
- Varsayımlar düzenli, görece alçak binalarda geçerli → **TBDY Tablo 4.4 sınırları**

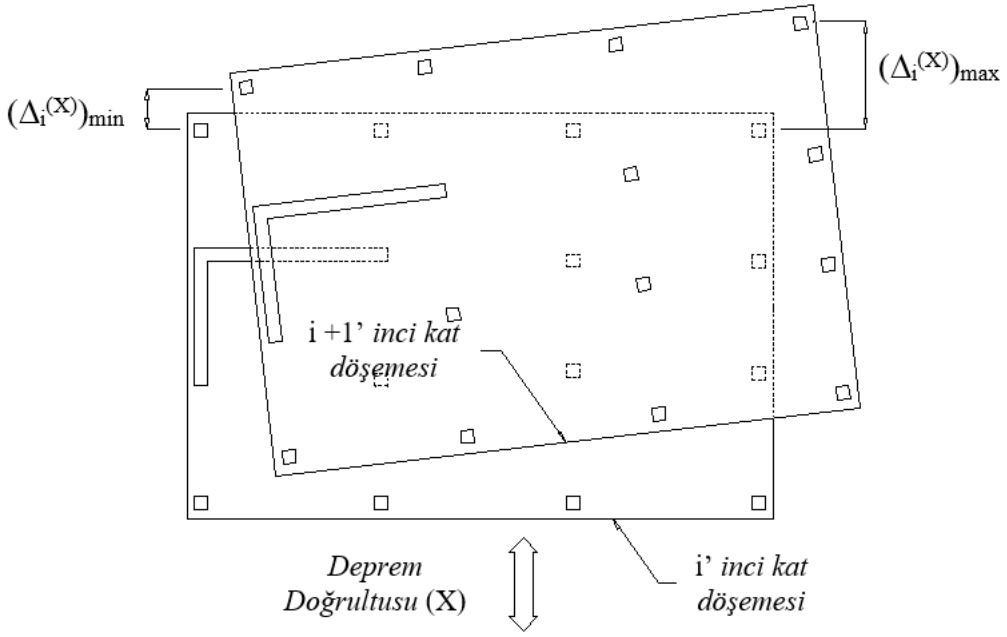
Bina Türü	**İzin Verilen** Bina Yükseklik Sınıfı	
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a, 4, 4a
Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2.0$ koşulunu sağladığı ve ayrıca **B2** türü düzensizliğinin olmadığı binalar	BYS ≥ 4	BYS ≥ 5
Diğer tüm binalar	BYS ≥ 5	BYS ≥ 6



- **B2 – Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat):**

Yöntemin Temel Esasları

A – PLANDA DÜZENSİZLİK DURUMLARI	İlgili Maddeler
A1 – Burulma Düzensizliği: Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük göreli kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama göreli ötelemeye oranını ifade eden *Burulma Düzensizliği Katsayısı* η_{bi} 'nin 1.2'den büyük olması durumu (**Şekil 3.1**). $[\eta_{bi} = (\Delta_i^{(X)})_{max} / (\Delta_i^{(X)})_{ort} > 1.2]$. *Göreli kat ötelemelerinin hesabı,* ± %5 *ek dışmerkezlik etkileri de gözönüne alınarak,* **4.7***'ye göre yapılacaktır.*	**3.6.2.1**
B – DÜŞEYDE DÜZENSİZLİK DURUMLARI	İlgili Maddeler
B2 – Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat): Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, bodrum katlar dışında, herhangi bir i'inci kattaki ortalama göreli kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama göreli kat ötelemesi oranına bölünmesi ile tanımlanan *Rijitlik Düzensizliği Katsayısı* η_{ki} 'nin 2.0'den fazla olması durumu. $(\sum A_e)_i = (\sum A_w)_i + (\sum A_g)_i + (0.15 \sum A_k)_i$ veya $\eta_{ki} = (\Delta_i^{(X)} / h_i)_{ort} / (\Delta_{i-1}^{(X)} / h_{i-1})_{ort} > 2.0]$ *Göreli kat ötelemelerinin hesabı,* ± %5 *ek dışmerkezlik etkileri de gözönüne alınarak* **4.7***'ye göre yapılacaktır.*	**3.6.2.1**



Döşemelerin kendi düzlemleri içinde rijit diyafram olarak çalışmaları durumunda
$(\Delta_i^{(X)})_{ort} = 1/2\ [(\Delta_i^{(X)})_{max} + (\Delta_i^{(X)})_{min}]$
Burulma düzensizliği katsayısı: $\eta_{bi} = (\Delta_i^{(X)})_{max} / (\Delta_i^{(X)})_{ort}$
Burulma düzensizliği durumu: $\eta_{bi} > 1.2$

Toplam Eşdeğer Deprem Yükünün Belirlenmesi

- Binanın tümüne etkiyen *toplam eşdeğer deprem yükü* (*taban kesme kuvveti*), $V_{tE}^{(X)}$

$$V_{tE}^{(X)} = m_t \, S_{aR}(T_p^{(X)}) \geq 0.04 m_t \, I \, S_{DS} \, g$$

- m_t : Binanın toplam kütlesine karşı gelmektedir: $m_t = \sum_{i=1}^{N} m_i$
- $S_{aR}(T_p^{(X)})$ gözönüne alınan (X) deprem doğrultusunda binanın hakim doğal titreşim periyodu $T_p^{(X)}$ gözönüne alınarak *Azaltılmış Tasarım Spektral İvmesi*'ni göstermektedir.
- S_{DS} **:***kısa periyot* için tanımlanan *tasarım spektral ivme katsayısı*'dır.
- I: Bina önem katsayısı, g:yer çekimi ivmesi
- *Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi*'nin uygulandığı tüm binalarda gözönüne alınan deprem doğrultusunda binanın hakim doğal titreşim periyodunu ifade eden $T_p^{(X)}$, daha kesin bir hesap yapılmadıkça, **TBDY Denk.(4.26)** ile hesaplanacaktır

$$T_p^{(X)} = 2\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} m_i \, d_{fi}^{(X)2}}{\sum_{i=1}^{N} F_{fi}^{(X)} d_{fi}^{(X)}} \right)^{1/2} \leq 1.4 T_{pA} \qquad T_{pA} = C_t \, H_N^{3/4}$$

- H_N:Binanın bodrum katlarının üstündeki ***üst bölüm***'ünün toplam yüksekliği [m]
- Taşıyıcı sistemi **sadece** betonarme çerçevelerden oluşan binalarda C_t**=0.1**, çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda C_t**=0.08**, diğer tüm binalarda, C_t**=0.07** alınacaktır.

Toplam Eşdeğer Deprem Yükünün Belirlenmesi

- Taşıyıcı sistemi **sadece** betonarme çerçevelerden oluşan binalarda C_t**=0.1**, çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda C_t**=0.08**, diğer tüm binalarda, C_t**=0.07** alınacaktır.

$$T_p^{(X)} = 2\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} m_i \, d_{fi}^{(X)2}}{\sum_{i=1}^{N} F_{fi}^{(X)} d_{fi}^{(X)}} \right)^{1/2} \leq 1.4 T_{pA} \qquad T_{pA} = C_t \, H_N^{3/4}$$

- Deprem etkilerinin tamamının betonarme perdeler tarafından karşılandığı binalarda;

$$C_t = \frac{0.1}{\sqrt{A_t}} \leq 0.07 \quad A_t = \sum_j A_{wj} \left[0.2 + \left(\frac{\ell_{wj}}{H_N} \right)^2 \right] \leq \sum_j A_{wj}$$

A_{wj}=j'inci perdenin gövde enkesit alanı [m^2]

l_{wj}=j'inci perdenin planda uzunluğu [m]

- DTS = 1, 1a, 2, 2a ve BYS ≥ 6 olan binalarda ve DTS = 3, 3a, 4, 4a olan tüm binalarda hakim doğal titreşim periyodu, doğrudan ampirik T_{pA} periyodu olarak alınabilir ($T_p \cong T_{pA}$).

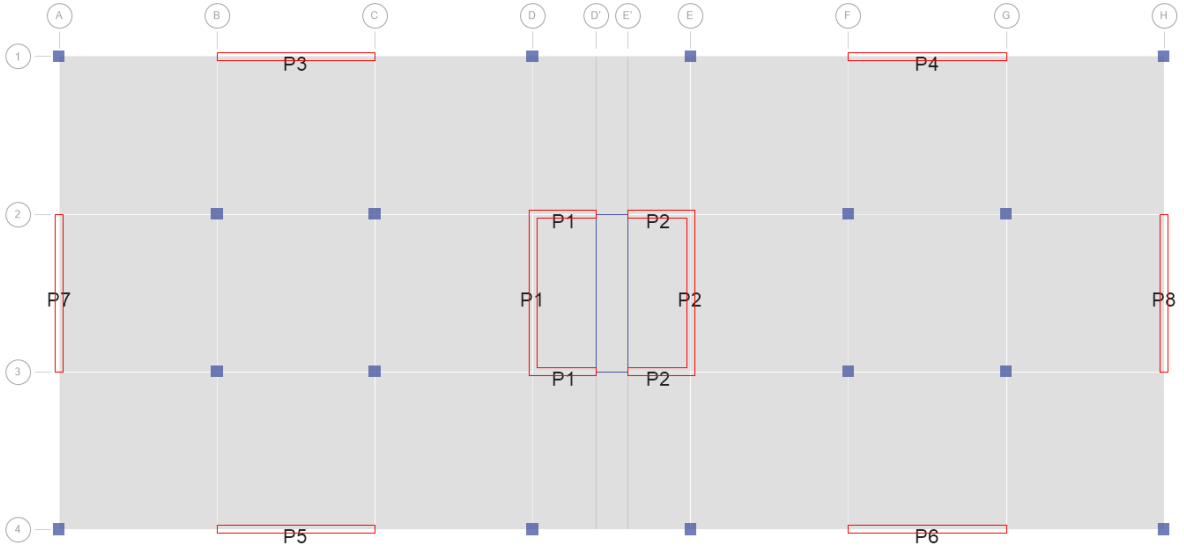
Ampirik Periyot T_{PA}

- Taşıyıcı sistemi **sadece** betonarme çerçevelerden oluşan binalarda C_t**=0.1**, çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda C_t**=0.08**, diğer tüm binalarda, C_t**=0.07** alınacaktır.
- Deprem etkilerinin tamamının betonarme perdeler tarafından karşılandığı binalarda;

$$C_t = \frac{0.1}{\sqrt{A_t}} \le 0.07 \qquad A_t = \sum_j A_{wj}\left[0.2 + \left(\frac{\ell_{wj}}{H_N}\right)^2\right] \le \sum_j A_{wj}$$

A_{wj}=j'inci perdenin gövde enkesit alanı [m^2]

l_{wj}=j'inci perdenin planda uzunluğu [m]



Perde İsmi	X-X Doğrultusu			Perde İsmi	Y-Y Doğrultusu		
	$A_{wj,x}$	$l_{wj,x}$	$A_{tj,x}$		$A_{wj,y}$	$l_{wj,y}$	$A_{tj,y}$
P1	5.12	16	1.73	P1	3.2	8	0.75
P2				P2	3.2	8	0.75
P3	3.20	8	0.75	P3	-	-	-
P4	3.20	8	0.75	P4	-	-	-
P5	3.20	8	0.75	P5	-	-	-
P6	3.20	8	0.75	P6	-	-	-
P7	-	-	-	P7	3.20	8	0.75
P8	-	-	-	P8	3.20	8	0.75
$\Sigma A_{w,x}$	17.9	$A_{t,x}$	4.7	$\Sigma A_{w,y}$	12.8	$A_{t,y}$	3.0
		$C_{t,x}$	0.0460			$C_{t,y}$	0.0577
		$T_{pA,x}$	0.77			$T_{pA,y}$	0.97

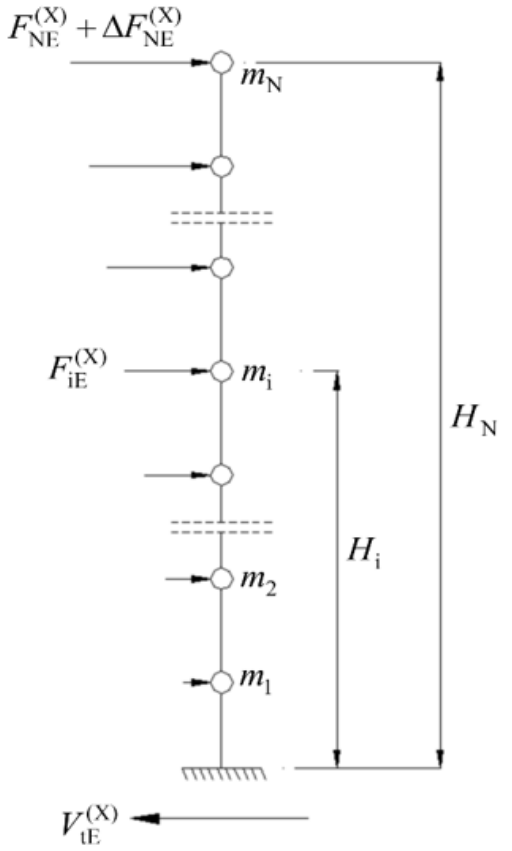
$$T_{p,x} \le 1.4 \times T_{pA,x} = 1.4 \times 0.77 = 1.08 \qquad T_{p,y} \le 1.4 \times T_{pA,y} = 1.4 \times 0.97 = 1.36$$

Katlara Etkiyen Eşdeğer Deprem Yüklerinin Belirlenmesi

$$V_{tE}^{(X)} = m_t\, S_{aR}(T_p^{(X)}) \geq 0.04 m_t\, I\, S_{DS}\, g \qquad V_{tE}^{(X)} = \Delta F_{NE}^{(X)} + \sum_{i=1}^{N} F_{iE}^{(X)}$$

- Binanın *N*'inci katına (tepesine) etkiyen *ek eşdeğer deprem yükü* $\Delta F_{NE}^{(X)} = 0.0075\, N V_{tE}^{(X)}$
- Toplam eşdeğer deprem yükünü $\Delta F_{NE}^{(X)}$ dışında geri kalan kısmı, *N*'inci kat dahil olmak üzere, bina katlarına

$$F_{iE}^{(X)} = (V_{tE}^{(X)} - \Delta F_{NE}^{(X)}) \frac{m_i H_i}{\sum_{j=1}^{N} m_j H_j}$$



Katlara Etkiyen Eşdeğer Deprem Yüklerinin Belirlenmesi

❖ **Rijit Diyafram** kabulü yapıldıysa;

- Deprem yer hareketinin binaya etkisinde ve taşıyıcı sistemin rijitlik ve kütle dağılımındaki olası belirsizlikleri gözönüne almak üzere *ek dışmerkezlik etkisi* tanımlanmalıdır. Kat kütle merkezine (*ana düğüm noktası*) etkiyen yatay deprem yükleri, gözönüne alınan deprem doğrultusuna dik doğrultudaki kat boyutunun +%5'i ve –%5'i kadar kaydırılacak ve bu durumlar için de ayrıca deprem hesabı yapılacaktır. Kat kütle merkezine (*ana düğüm noktası*) etkiyen eşdeğer deprem yükü $F_{iE}^{(X)}$, *ek dışmerkezlik etkisi* (e) ile çarpılarak, *ek kat burulma momenti*'nin gözönüne alınması uygundur.

$$M_{ib}^{(X)} = F_{iE}^{(X)} e$$

❖ **Rijit Diyafram** kabulü yapıl**ma**dıysa; ilerleyen slaytlarda Mod Birleştirme Yönteminde değinilecek.

- Binanın herhangi bir i'inci katında **A1** türü düzensizliğin bulunması durumunda, $1.2 < \eta_{bi} \le 2.0$ olmak koşulu ile, bu katta uygulanan ±%5 ek dışmerkezlik, **her iki deprem doğrultusu** için D_{bi} katsayısı ile çarpılarak büyütülecektir.

$$D_{bi} = \left(\frac{\eta_{bi}}{1.2} \right)^2$$

Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ile Bodrumlu Binaların Hesabı

- Dıştan rijit perdelerle çevrelenen bodrumların bulunduğu binalarda, binanın üst bölümü ve bodrumlu alt bölümü birarada *ortak tek bir taşıyıcı sistem* olarak modellenecektir. Bu tür binaların eşdeğer deprem yükü yöntemi ile deprem hesabında *iki yükleme durumlu* hesap yöntemi kullanılabilir.
- İlk yükleme durumunda *ortak tek taşıyıcı sistem* modelinde üst yapının kat kütleleri ile hesaplanan eşdeğer deprem yükleri sadece *üst bölüm*'e etki ettirilir.
- İkinci yükleme durumunda, yine *ortak tek taşıyıcı sistem* modelinde sadece *alt bölüm*'deki bodrum katlarının kütleleri, T=0 konularak elde edilen azaltılmış spektral ivme $S_{aR}(0)$ ile çarpılarak bu katlara etkiyen yaklaşık eşdeğer deprem yükleri hesaplanır.

Hesapta *alt bölüm* (bodrum) için *deprem yükü azaltma katsayısı* $(R_a)_{alt} = D_{alt} = 1.5$ kullanılacaktır. İkinci yükleme durumu için yapılan hesap sonucunda, *alt bölüm*'deki *azaltılmış iç kuvvetler* elde edilir.

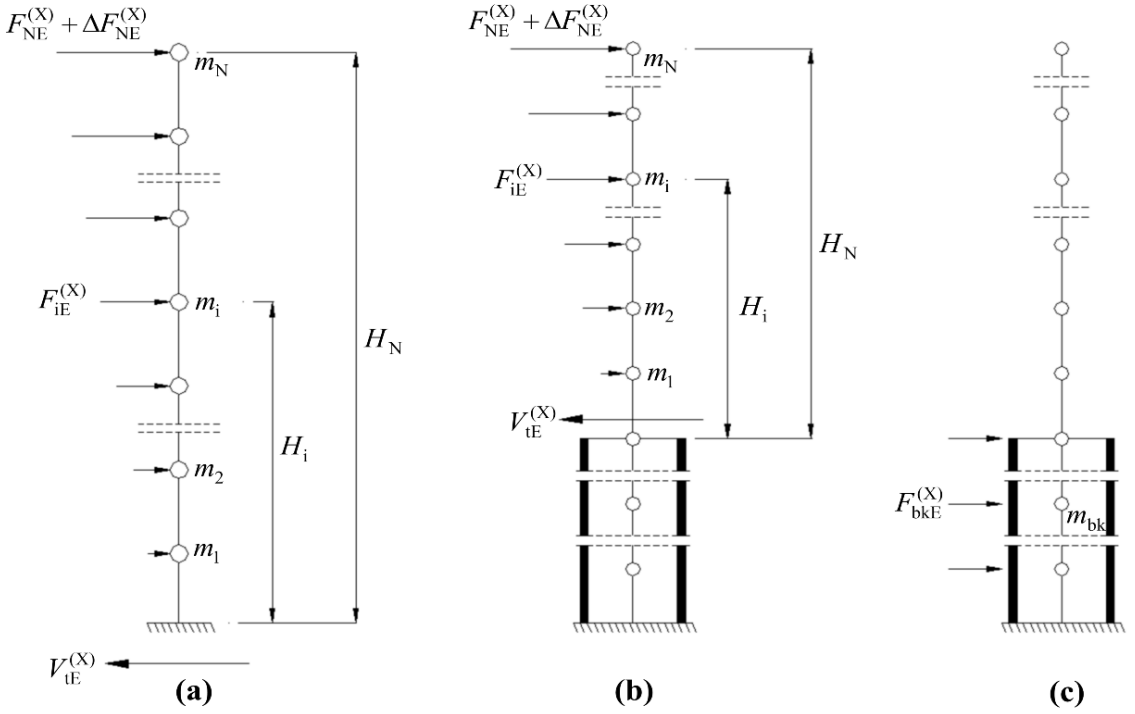
$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D\right)\frac{T}{T_B}$$

$$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)}$$

$$T = 0 \Rightarrow R_a(0) = D$$

$$T = 0 \Rightarrow S_{aR}(0) = \frac{S_{ae}(0)}{R_a(0)} = \frac{\text{PGA}}{1.5}$$

$$D = D_{alt} = 1.5 \Rightarrow R_a(0) = 1.5$$



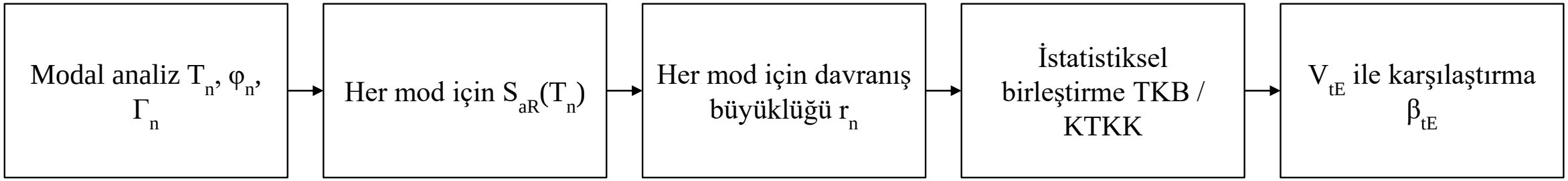
5

Mod Birleştirme Yöntemi

Modal analiz · Yeterli mod sayısı · KTKK ve TKB · V_{tE} taban kesme kuvveti ölçeklendirmesi

Yöntemin Mantığı

- *Mod Birleştirme Yöntemi*'nde, verilen bir deprem doğrultusunda *deprem tasarım spektrumu*'ndan yararlanılarak gözönüne alınan her bir titreşim modunda davranış büyüklüklerinin en büyük değerleri modal hesap yöntemi ile hesaplanır. Yeteri kadar titreşim modu için hesaplanan, ancak eşzamanlı olmayan *enbüyük modal davranış büyüklükleri* daha sonra istatistiksel olarak birleştirilerek *enbüyük davranış büyüklükleri*'nin yaklaşık değerleri elde edilir.



- Modal en büyük değerler **aynı anda oluşmaz**; doğrudan toplanmaz
- Birleştirme **her davranış büyüklüğü için ayrı** yapılır: moment, kesme, yerdeğiştirme, öteleme
- Birleştirilmiş büyüklüğün **işareti yoktur**; tasarımda ± alınır
- Yeterli mod sayısı için %95 kuralı

Yeterli Mod Sayısı ve Modların Birleştirilmesi

- Modal hesap yöntemlerinde, hesaba katılması gereken *yeterli titreşim modu sayısı*, YM, (X) ve (Y) deprem doğrultularında her bir mod için hesaplanan *taban kesme kuvveti modal etkin kütleleri*'nin toplamının bina toplam kütlesinin %95'inden daha az olmaması kuralına göre belirlenecektir. Ancak katkısı %3'ten büyük olan bütün modlar gözönüne alınacaktır.

$$\sum_{n=1}^{YM} m_{txn}^{(X)} \geq 0.95 m_t \quad ; \quad \sum_{n=1}^{YM} m_{tyn}^{(Y)} \geq 0.95 m_t$$

- Davranış büyüklüklerinin *her biri için ayrı ayrı uygulanmak üzere*, her bir titreşim modu için hesaplanan ve eşzamanlı olmayan enbüyük modal katkılar, aşağıda açıklandığı üzere istatistiksel olarak birleştirilecektir:

- En genel mod birleştirme kuralı olarak *Tam Karesel Birleştirme **(TKB)** Kuralı* **(CQC)**

$$r_{max}^{(X)} = \sqrt{\sum_{m=1}^{YM}\sum_{n=1}^{YM} r_{m,max}^{(X)}\ \rho_{mn}\ r_{n,max}^{(X)}}$$

ρ_{mn} bu tipik m'inci ve n'inci titreşim modlarına ait *çapraz korelasyon katsayısı*'nı göstermektedir

$$\rho_{mn} = \frac{8\sqrt{\xi_m \xi_n}(\beta_{mn}\xi_n + \xi_m)\beta_{mn}^{3/2}}{(1-\beta_{mn}^2)^2 + 4\xi_m\xi_n\beta_{mn}(1+\beta_{mn}^2) + 4(\xi_m^2+\xi_n^2)\beta_{mn}^2} \quad ; \quad \beta_{mn} = \frac{T_m}{T_n} \qquad \rho_{mn} = \frac{8\xi^2(1+\beta_{mn})\beta_{mn}^{3/2}}{(1-\beta_{mn}^2)^2 + 4\xi^2\beta_{mn}(1+\beta_{mn})^2} \qquad (\xi_m = \xi_n = \xi)$$

- *Karelerin Toplamının Karekökü **(KTKK)** Kuralı* **(SRSS)** ($\beta_{mn} < 0.8$ koşulunun sağlanması durumunda kullanılabilir)

$$r_{max}^{(X)} = \sqrt{\sum_{n=1}^{YM} (r_{n,max}^{(X)})^2}$$

Bu birleştirme kuralı $\rho_{mn} = 0$ $(m \neq n)$ ve $\rho_{mn} = 1$ $(m = n)$ alınması özel durumuna karşı gelmektedir.

Eşdeğer Taban Kesme Kuvvetine Göre Büyütme

- Herhangi bir (X) deprem doğrultusu için $V_{tx}^{(X)} < \gamma_E V_{tE}^{(X)}$ olması durumunda, modal hesap yöntemi ile elde edilen tüm azaltılmış iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri, **Denk.(4.31)** ile verilen *eşdeğer taban kesme kuvveti büyütme katsayısı* $\beta_{tE}^{(X)}$ ile çarpılarak büyütülecektir.

$$\beta_{tE}^{(X)} = \frac{\gamma_E V_{tE}^{(X)}}{V_{tx}^{(X)}} \geq 1$$

(a) **A1**, **B2** veya **B3** türü düzensizliklerden en az birinin binada bulunması durumunda $\gamma_E = 0.90$ alınacaktır.

(b) Düzensizliklerden hiçbirinin binada bulunmaması durumunda $\gamma_E = 0.80$ alınacaktır.

Dıştan rijit perdelerle çevrelenen bodrumların bulunduğu binalarda *eşdeğer taban kesme kuvveti büyütme katsayısı*, sadece binanın bodrum katlarının üstündeki ***üst bölüm*** için hesaplanacaktır.

A – PLANDA DÜZENSİZLİK DURUMLARI	İlgili Maddeler
A1 – Burulma Düzensizliği: Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük göreli kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama göreli ötelemeye oranını ifade eden *Burulma Düzensizliği Katsayısı* η_{bi} 'nin 1.2'den büyük olması durumu (**Şekil 3.1**). $[\eta_{bi} = (\Delta_i^{(X)})_{max} / (\Delta_i^{(X)})_{ort} > 1.2]$. *Göreli kat ötelemelerinin hesabı,* ± %5 *ek dışmerkezlik etkileri de gözönüne alınarak,* **4.7***'ye göre yapılacaktır.*	**3.6.2.1**
B – DÜŞEYDE DÜZENSİZLİK DURUMLARI	İlgili Maddeler
B2 – Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat): Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, bodrum katlar dışında, herhangi bir i'inci kattaki ortalama göreli kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama göreli kat ötelemesi oranına bölünmesi ile tanımlanan *Rijitlik Düzensizliği Katsayısı* η_{ki} 'nin 2.0'den fazla olması durumu. $(\sum A_e)_i = (\sum A_w)_i + (\sum A_g)_i + (0.15 \sum A_k)_i$ veya $\eta_{ki} = (\Delta_i^{(X)}/h_i)_{ort} / (\Delta_{i-1}^{(X)}/h_{i-1})_{ort} > 2.0]$ *Göreli kat ötelemelerinin hesabı,* ± %5 *ek dışmerkezlik etkileri de gözönüne alınarak* **4.7***'ye göre yapılacaktır.*	**3.6.2.1**
B3 – Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği: Taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının (kolon veya perdelerin) bazı katlarda kaldırılarak kirişlerin veya guseli kolonların üstüne veya ucuna oturtulması, ya da üst kattaki perdelerin altta kolonlara oturtulması durumu **(Şekil 3.4)**.	**3.6.2.4**

Modal Analizde Ek Dışmerkezliğin Gözönüne Alınması

❖ **Rijit Diyafram** kabulü yapıldıysa;

- Deprem hesabının modal yöntemlerle yapılması durumunda modelleme kolaylığı bakımından deprem yükünün kaydırılması yerine, kat kütle merkezinde (*ana düğüm noktası*) tanımlanan *kat kütlesi* m_i ile birlikte, *kat kütle eylemsizlik momenti* $m_{i\theta}$ *'ya,* $\Delta m_{i\theta}$ artımının eklenmesi uygundur.

$$\Delta m_{i\theta} = m_i e^2$$

❖ **Rijit Diyafram** kabulü yapıl**ma**dıysa;

- Kat döşemelerinin kendi düzlemleri içindeki yerdeğiştirmelere ilişkin serbestlik derecelerini içermek üzere iki boyutlu *levha* (*membran*) sonlu elemanlar ile modellenmesi durumunda,

(a) Oluşturulan bu modelle, **dışmerkezlik etkisi olmaksızın**, deprem hesabı yapılacak, döşemelerde ve döşemeler dışındaki taşıyıcı sistem elemanlarında iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler elde edilecektir. **Döşemeler için elde edilen büyüklükler döşeme tasarımında gözönüne alınacaktır.**

(b) Dış merkezlik etkisinin gözönüne alınabilmesi için düzlem içi sonlu eleman serbestlik dereceleri için *rijit diyafram* varsayımı yapılacak ve kat kütle merkezleri kaydırılacaktır. Ek dışmerkezliğin **döşemeler ve kirişler dışındaki** taşıyıcı sistem elemanlarına etkisinin belirlenmesi için rijit diyafram modellemesini esas alan **ikinci bir deprem hesabı** yapılacaktır.

(c) Döşemeler ve kirişler dışındaki taşıyıcı sistem elemanları için tasarıma esas iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler **(a)** ve **(b)**'de elde edilenlerin **zarfı** (elverişsiz olanları) olarak belirlenecektir.

Modal Hesap Yöntemleri ile Bodrumlu Binaların Hesabı

- Dıştan rijit perdelerle çevrelenen bodrumların bulunduğu binalarda, binanın üst bölümü ve bodrumlu alt bölümü birarada ortak bir taşıyıcı sistem olarak modellenecektir. Bodrumlu binaların modal hesap yöntemleri ile doğrusal deprem hesabı için uygulanabilen yaklaşık *iki yükleme durumlu hesap yaklaşımı*'nda, binanın üst bölümü ve bodrumlu alt bölümü birarada tek bir taşıyıcı sistem olarak modellenir, ancak *üst bölüm* ile *alt bölüm*'ün birbirlerine çok uzak modlarda titreşmeleri nedeni ile deprem hesabı *iki yükleme durumu* olarak ayrı ayrı yapılır:

➢ Hesabın ilk yükleme durumunda, *ortak tek taşıyıcı sistem* modelinde sadece *üst bölüm*'ün kütleleri gözönüne alınarak modal hesap yapılır. Bu durumda yeterli titreşim modu sayısı, sadece *üst bölüm*'ün toplam kütlesi esas alınarak hesaplanan *etkin kütle katılım oranları*'na göre belirlenecektir. Birinci yükleme durumunda, hem *üst bölüm*'de, hem de *alt bölüm*'de *azaltılmış iç kuvvetler* elde edilir.

$$\text{TBDY 2018 Tablo 4.1} \rightarrow R_{\text{üst}}, D_{\text{üst}}$$

➢ Hesabın ikinci yükleme durumunda, *ortak tek taşıyıcı sistem* modelinde sadece *alt bölüm*'ün kütleleri gözönüne alınarak analiz yapılır. Bu durumda yeterli titreşim modu sayısı, sadece *alt bölüm*'ün toplam kütlesi esas alınarak hesaplanan *etkin kütle katılım oranları*'na göre belirlenecektir.

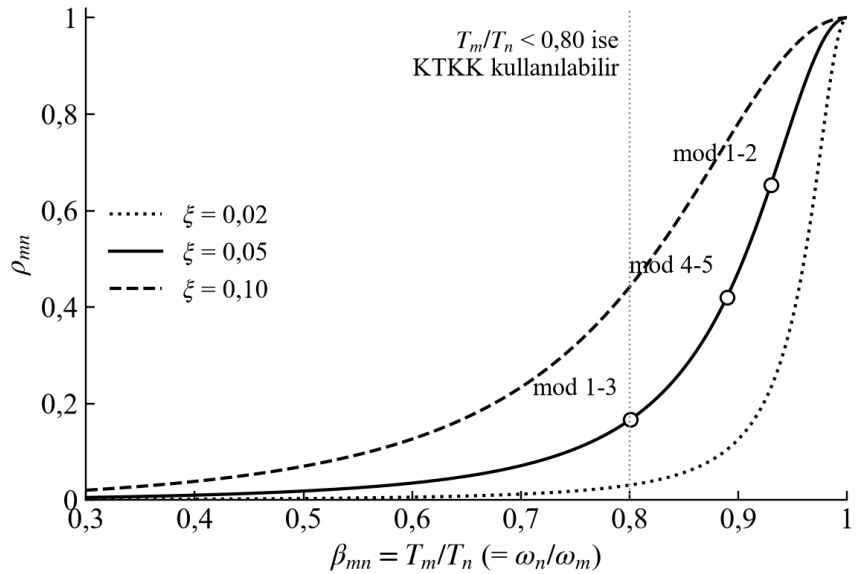
$$(R_{\text{alt}}/I)=2.5 \qquad D_{\text{alt}}=1.5$$

KTKK ve TKB birleştirme kuralları

$$r_{max} = \sqrt{\sum_n r_n^2} \qquad r_{max} = \sqrt{\sum_m \sum_n r_m \, \rho_{mn} \, r_n}$$

$$\rho_{mn} = \frac{8\,\xi^2(1+\beta_{mn})\beta_{mn}^{3/2}}{\left(1-\beta_{mn}^2\right)^2 + 4\,\xi^2\beta_{mn}(1+\beta_{mn})^2} \qquad \beta_{mn} = \frac{\omega_n}{\omega_m}$$

- Genel kural: **TKB** (Tam Karesel Birleştirme)
- Bütün modlarda $T_m/T_n < 0{,}80$ ise KTKK kullanılabilir



Mod Birleştirme: sık yapılan hatalar

Hata	Doğrusu
KTKK'yı her durumda kullanmak	TKB; KTKK yalnız bütün $T_m/T_n < 0{,}80$ ise
Birleştirilmiş kat kuvvetlerinden iç kuvvet hesaplamak	Her büyüklük modda hesaplanır, sonra birleştirilir
Ötelemeyi birleştirilmiş yerdeğiştirmelerin farkından almak	Modal ötelemeler birleştirilir
β_{tE}'yi yalnız iç kuvvetlere uygulamak	İç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler birlikte
γ_E'yi düzensizlikten bağımsız 0,80 almak	A1, B2 veya B3 varsa 0,90
Ek dışmerkezliği modal hesapta unutmak	Kütleyi kaydır veya $\Delta m_\theta = m\, e^2$ ekle
Mod sayısını %95'ten önce kesmek	%95 ve %3 kuralı, iki doğrultunun büyüğü

6

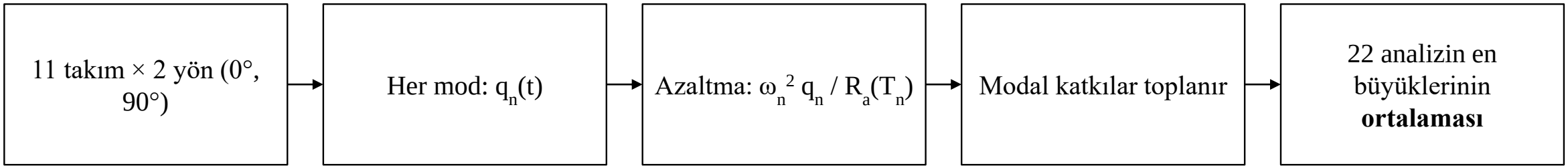
Zaman tanım alanında hesap yöntemleri

Kayıt seçimi ve ölçekleme · modal ve doğrudan çözüm · sönüm ·

Modal denklemler ve azaltma

$$\ddot{q}_n + 2\,\xi_n\,\omega_n\,\dot{q}_n + \omega_n^2\,q_n = -(\Gamma_{xn}\,\ddot{u}_{gx} + \Gamma_{yn}\,\ddot{u}_{gy})$$

$$a_{Rn}(t) = \frac{\omega_n^2\,q_n(t)}{R_a(T_n)} \qquad r(t) = \sum_n r_n(t)$$



- Kayıtlar 90° döndürülerek hesap tekrarlanır: **en az 22 analiz**
- Tasarım değeri: en büyük mutlak değerlerin **ortalaması**
- V_{tE}'ye göre büyütme bu yöntemde de geçerli
- Hesapta esas alınacak zaman artımı $T_n/10$'dan büyük olmayacaktır.

Zaman Tanım Alanında Mod Toplama Yöntemi

	Mod Birleştirme (4.8.2)	**Mod Toplama (4.8.3)**
Deprem girdisi	Tasarım spektrumu	En az 11 kayıt takımı
Modal tepki	En büyük değer (spektrumdan)	Zamana bağlı $q_n(t)$
Modların birleştirilmesi	TKB / KTKK (istatistiksel)	Doğrudan toplam (eş zamanlı)
Doğrultu birleştirmesi	%100 + %30	Gerekmez; iki bileşen birlikte
Azaltma	$R_a(T_n)$	$R_a(T_n)$
Sonuç	Tek değer	22 analizin en büyüklerinin ortalaması
V_{tE} ile büyütme	Evet	Evet

Zaman Tanım Alanında Mod Toplama Yöntemi

- *Mod Toplama Yöntemi*'nde, depremin eşzamanlı olarak birbirine dik iki yatay doğrultuda etkidiğinin gözönüne alınması durumunda, her bir titreşim moduna ait modal davranış büyüklükleri *zaman tanım alanında modal hesap yöntemi* ile hesaplanır. Yeteri kadar titreşim modu için hesaplanan *eşzamanlı modal davranış büyüklükleri* daha sonra zaman tanım alanında doğrudan toplanarak *davranış büyüklüklerinin zamana göre değişimi* ve tasarımda esas alınmak üzere *enbüyük değerleri* elde edilir.
- *Mod Toplama Yöntemi*'nde:

(a) Mod katkıları doğrudan zaman tanım alanında toplandığından istatistiksel mod birleştirme kurallarının uygulanmasına gerek kalmamaktadır.

(b) Aynı anda birbirine dik yatay yer hareketi bileşenlerinin gözönüne alınabilmesi nedeniyle yaklaşık *doğrultu birleştirmesi* kurallarının uygulanmasına da gerek kalmamaktadır.

- *Zaman tanım alanında Mod Toplama Yöntemi* ile yapılacak doğrusal hesaplarda en az 11 deprem yer hareketi takımı kullanılacaktır. Birbirine dik yatay iki doğrultudaki ivme kayıtları taşıyıcı sistemin (X) ve (Y) asal eksenleri doğrultusunda aynı anda birlikte etki ettirilecektir. Daha sonra ivme kayıtlarının eksenleri 90^o döndürülerek hesap tekrarlanacaktır. Hesaplarda kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi TBDY 2018 madde **2.5**'e göre yapılacaktır.
- Davranış büyüklükleri, yapılan en az $2 \times 11 = 22$ hesabın her birinden elde edilecek sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak bulunacaktır.

Deprem Kayıtlarının Seçimi

- Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu **deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları** dikkate alınarak yapılacaktır. Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtlar kullanılacaktır. Sahaya özel deprem tehlikesine en fazla katkıda bulunan depremlere ait büyüklük ve fay uzaklığı bilgilerinin belirlenmesi için *deprem tehlikesi ayrıştırma* işleminden yararlanılabilir.

- Yeterli sayı veya nitelikte deprem kaydı seçiminin yapılamadığı durumlarda, zaman tanım alanında benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bu tür kayıtların kullanılması durumunda, binanın bulunduğu sahanın sismik kaynak, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri göz önüne alınacaktır. Benzeştirme için kullanılacak model parametrelerinin, söz konusu bölgede meydana gelmiş depremlerde kaydedilmiş gerçek deprem kayıtları ile uyumlu olduğu gösterilecektir.

- Bir veya iki boyutlu hesap için seçilecek *deprem kayıtları*'nın ve üç boyutlu hesap için seçilecek *deprem kaydı takımları*'nın sayısı en az onbir olacaktır. Aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı üçü geçmeyecektir.

Basit Ölçeklendirme

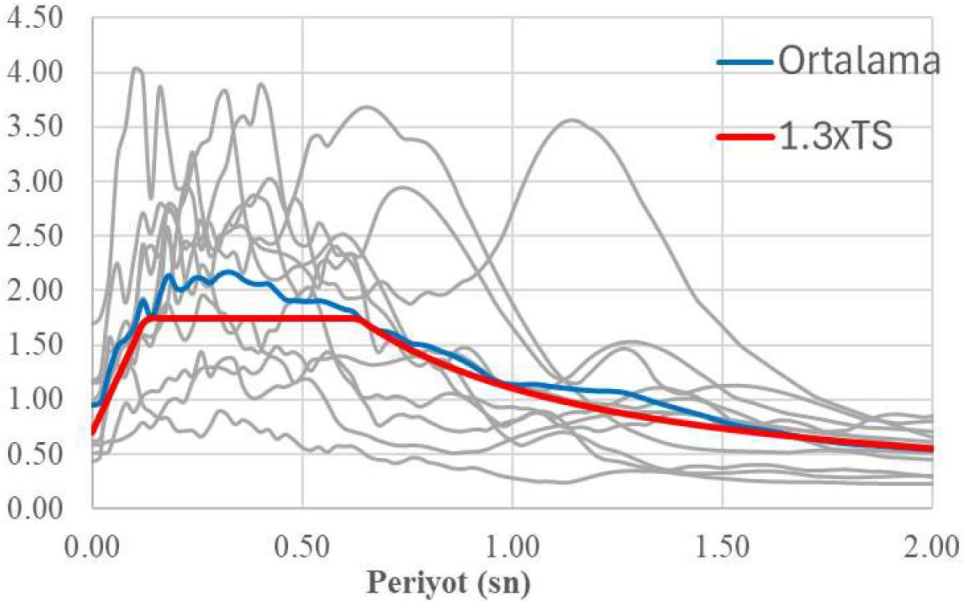
Zemin davranış analizleri dışında, zaman tanım alanında hesapta kullanılacak deprem yer hareketleri, seçilen deprem kayıtlarından *basit ölçeklendirme* yöntemi ile aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

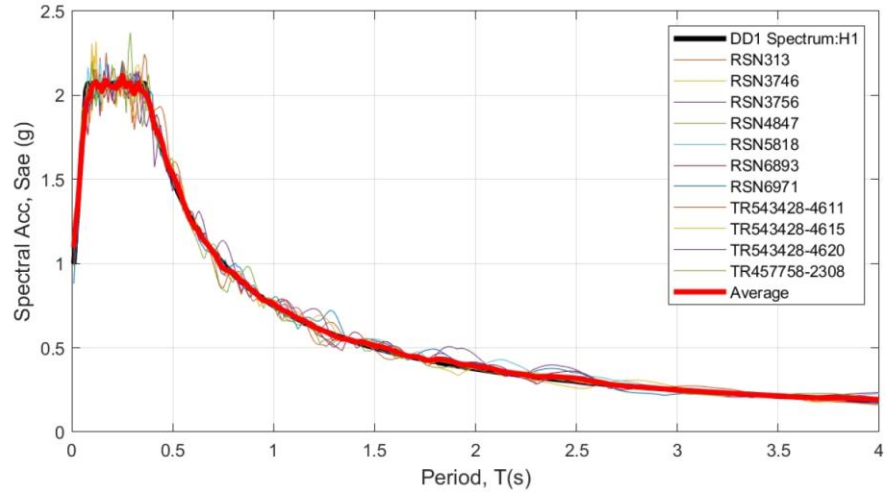
- Bir veya iki boyutlu hesap için seçilen tüm kayıtlara ait spektrumların ortalamasının $0.2T_P$ ve $1.5T_P$ periyotları arasındaki genliklerinin tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması kuralına göre, deprem yer hareketlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir.
- Üç boyutlu hesap için seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilecektir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_P$ ve $1.5T_P$ periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir. Her iki yatay bileşenin ölçeklendirilmesi aynı ölçek katsayıları ile yapılacaktır.
- Mevcut deprem verileri ile bina özelliklerinin gerekli kılması ve sahaya özel deprem yer hareketi spektrumu belirlenmesi durumunda, binanın belirli sayıda titreşim periyodu ile ilişkilendirilen *koşullandırılmış ortalama spektrumlar*'dan yararlanılarak, deprem kayıtlarının analiz sonuçlarında daha az saçılmayı sağlayacak şekilde seçilerek ölçeklendirilmesi yoluna gidilebilir.

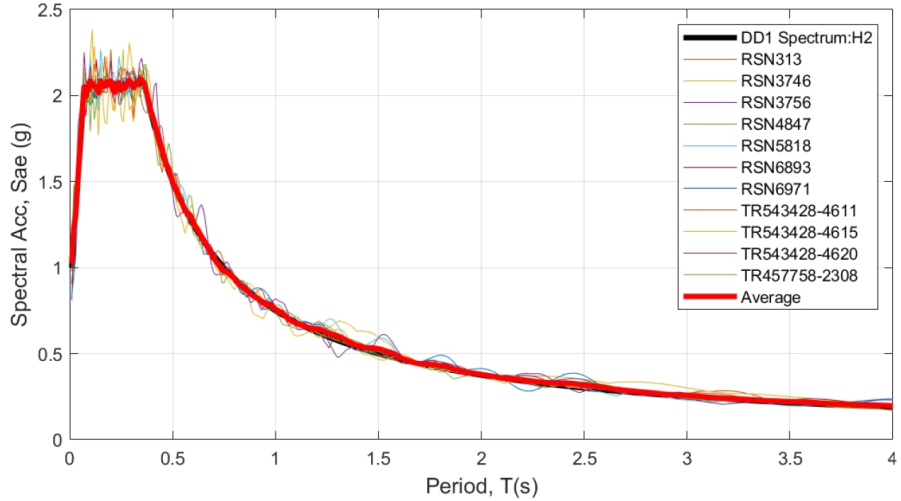
Spektral Uyuşum

Zemin davranış analizlerinde veya zaman tanım alanında yapılacak diğer hesaplarda kullanılmak üzere deprem yer hareketleri, seçilen deprem kayıtlarının tasarım spektrumuna *spektral uyuşum* sağlanacak şekilde dönüştürülmesi ile de elde edilebilir. Dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından daha küçük olmayacaktır.

Basit Ölçeklendirme !!!







Zaman Tanım Alanında Mod Toplama / Direkt İntegrasyon

- Mod Toplama

$$\ddot{q}_n(t)+2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t)+\omega_n^2 q_n(t)=-\left(\frac{L_n}{M_n}\right)\ddot{u}_g(t) \qquad \ddot{q}_n(t)+2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t)+\omega_n^2 q_n(t)=-\Gamma_n\ddot{u}_g(t)$$

$$q_n(t)=\Gamma_n D_n(t) \qquad \Rightarrow \qquad \ddot{D}_n+2\xi_n\omega_n\dot{D}_n+\omega_n^2 D_n=-\ddot{u}_g(t)$$

$$\{u(t)\}_n=\{\phi\}_n q_n(t)=\Gamma_n\{\phi\}_n D_n(t)$$

- Direkt İntegrasyon

$$[m]\{\ddot{u}\}+[c]\{\dot{u}\}+[k]\{u\}=\{p_{eff}(t)\} \qquad \{p_{eff}(t)\}=-[m]\{1\}\ddot{u}_g(t)$$

- Açık (Explicit)

Açık yöntemlerde, t + Δt anındaki (gelecekteki) bilinmeyen değerler, sadece t ve daha önceki bilinen zaman adımlarındaki değerler kullanılarak doğrudan hesaplanır. Denklem sistemi çözmeye (matris tersi almaya) gerek kalmaz.

➢ Merkezi Farklar Yöntemi (Central Difference Method)

Avantajı, denklem takımı çözümü gerektirmediği için adım başına hesaplama yükü çok düşüktür.
Dezavantajı, koşullu kararlıdır (conditionally stable) Çözümün ıraksamaması için seçilen zaman adımının (Δt), sistemin en yüksek doğal frekansına bağlı kritik bir değerden küçük olması şarttır. Bu yüzden genellikle çok küçük zaman adımları gerektirir (örneğin patlama ve çarpışma analizleri)

Zaman Tanım Alanında Mod Toplama / Direkt İntegrasyon

- Kapalı (Implicit)

Kapalı yöntemlerde, $t + \Delta t$ anındaki bilinmeyenleri hesaplamak için yine $t + \Delta t$ anındaki ivme veya hız değerine ihtiyaç duyulur. Bu durum, her zaman adımında bir denklem sisteminin (matris çözümünün) eş zamanlı olarak çözülmesini zorunlu kılar.

- Newmark-β: Yapısal dinamikte en yaygın kullanılan yöntemdir.

Ortalama İvme Yöntemi ($\gamma=0.5$, $\beta=0.25$) yöntem koşulsuz kararlıdır. Δt çok büyük olursa çözüm patlamaz ama doğruluk azalır.

Lineer İvme Yöntemi ($\gamma=0.5$, $\beta=1/6$) yöntem koşullu kararlıdır.

- Wilson- θ Yöntemi: Newmark yönteminin bir modifikasyonudur. İvmenin $t + \theta\,\Delta t$ anında kadar ($\theta \geq 1$) doğrusal değiştiğini varsayar. $\theta \geq 1.37$ seçildiğinde yöntem koşulsuz kararlı hale gelir.
- HHT-α (Hilber-Hughes-Taylor) Yöntemi:Newmark yöntemine benzer ancak yüksek frekanslı sayısal gürültüleri (analitik olarak önemsiz ama sayısal olarak kararsızlık yaratan yüksek frekanslı salınımları) sönümlemek için denkleme yapay bir sayısal sönüm (α) ekler. İkinci mertebe doğruluğu ve koşulsuz kararlılığı koruyarak çözümler üretir.

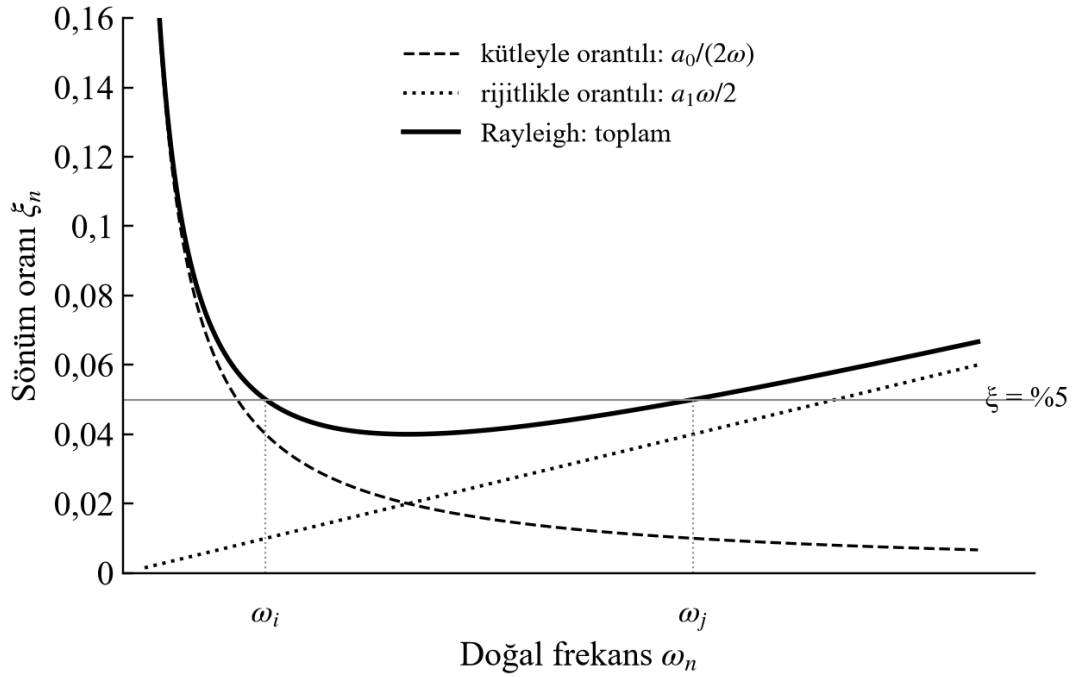
Modal ve doğrudan çözüm; sönüm matrisi

Madde 4.5.1.3, EK 4B.3

$$\mathbf{C} = a_0\,\mathbf{M} + a_1\,\mathbf{K} \qquad \xi_n = \frac{a_0}{2\,\omega_n} + \frac{a_1\,\omega_n}{2}$$

$$a_0 = \xi\,\frac{2\,\omega_i\,\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \qquad a_1 = \xi\,\frac{2}{\omega_i + \omega_j}$$

- **Modal (mod toplama):** her moda doğrudan ξ = %5
- **Doğrudan integrasyon:** sönüm matrisi gerekir; genellikle Rayleigh
- İki modda %5; aralığın dışında sönüm **büyür**, yüksek modlar bastırılır



ÇSDS'de Sönüm

- Kütle Orantılı: $[c] = a_0[m]$ $C_n = \{\phi\}_n^T [c]\{\phi\}_n = \{\phi\}_n^T a_0[m]\{\phi\}_n = a_0 M_n$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n\omega_n} = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_n} \Rightarrow a_0 = 2\xi_n\omega_n$$

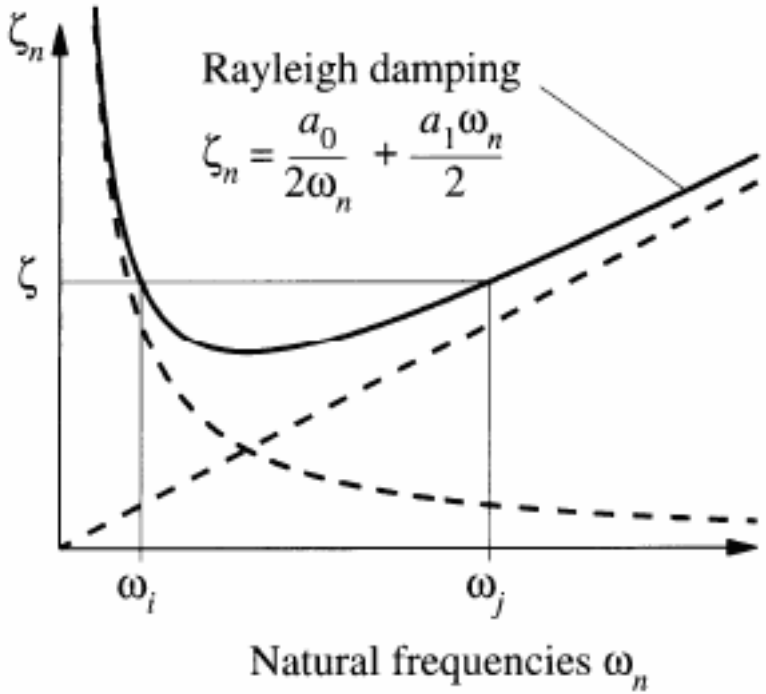
- Rijitlik Orantılı: $[c] = a_1[k]$ $C_n = \{\phi\}_n^T [c]\{\phi\}_n = \{\phi\}_n^T a_1[k]\{\phi\}_n = a_1 K_n = a_1\omega_n^2 M_n$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n\omega_n} = \frac{a_1}{2}\omega_n \Rightarrow a_1 = \frac{2\xi_n}{\omega_n}$$

- Rayleigh Modeli: $[c] = a_0[m] + a_1[k]$

$$\xi_n = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2}\omega_n$$

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad a_0 = \xi\frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \xi\frac{2}{\omega_i + \omega_j}$$



Yatayda Birbirine Dik Doğrultulardaki Deprem Etkilerinin Birleştirilmesi

- (X) ve (Y) doğrultularında tanımlanan depremlerden oluşan deprem etkileri TBDY 2018 **Denk.(4.9)**'da tanımlandığı şekilde birleştirilecektir:

$$E_d^{(H)} = \pm E_d^{(X)} \pm 0.3 E_d^{(Y)} \qquad E_d^{(H)} = \pm 0.3 E_d^{(X)} \pm E_d^{(Y)}$$

- Yatay deprem etkisi altında taşıyıcı sistemin deprem hesabının **4.8.3**'te verilen yöntemle *zaman tanım alanında* yapılması durumunda, yatayda birbirine dik (X) ve (Y) doğrultularındaki deprem bileşenleri **2.5**'e göre birlikte eş zamanlı olarak tanımlandığından, birleştirilmiş yatay deprem etkisi bu hesap sonucunda doğrudan elde edilmektedir.

- DTS=1, DTS=1a, DTS=2 ve DTS=2a olarak sınıflandırılan ve aşağıdaki elemanları içeren binalarda düşey deprem hesabı, bu elemanların *yerel düşey titreşim modları* esas alınarak *sadece bu elemanlar için, düşey elastik ivme spektrumu*'na göre hesabı yapılacaktır. *Düşey deprem etkisi* $E_d^{(Z)}$ *'in* bu şekilde hesabında tüm taşıyıcı sistemler için $R/I = 1$ ve $D = 1$ alınacaktır.

(a) Açıklıklarının yataydaki izdüşümü 20 m veya daha fazla olan kirişleri içeren binalar,
(b) Açıklıklarının yataydaki izdüşümü 5 m veya daha fazla olan konsolları içeren binalar,
(c) Kirişlere oturan kolonları içeren binalar,
(d) Kolonları düşeye göre eğimli olan binalar.

Yukarıda belirtilen elemanların dışındaki taşıyıcı sistem kısımlarında ve **4.4.3.1**'deki tanımın dışında kalan binalarda *düşey deprem etkisi* $E_d^{(Z)}$, özel bir hesap yapılmaksızın, **TBDY Denk.(4.10)** ile yaklaşık olarak hesaplanacaktır.

$$E_d^{(Z)} \approx (2/3) S_{DS} G$$

Deprem Etkisinin Diğer Etkilerle Birleştirilmesi

- Taşıyıcı sistem elemanlarının tasarımında esas alınmak üzere, deprem etkisini içeren yük birleşimleri:

$$G+Q+0.2S+E_{\mathrm{d}}^{(\mathrm{H})}+0.3E_{\mathrm{d}}^{(\mathrm{Z})}$$

$$0.9G+H+E_{\mathrm{d}}^{(\mathrm{H})}-0.3E_{\mathrm{d}}^{(\mathrm{Z})}$$

- Burada Q hareketli yük etkisini, S kar yükü etkisini, H ise yatay zemin itkisini simgelemektedir.

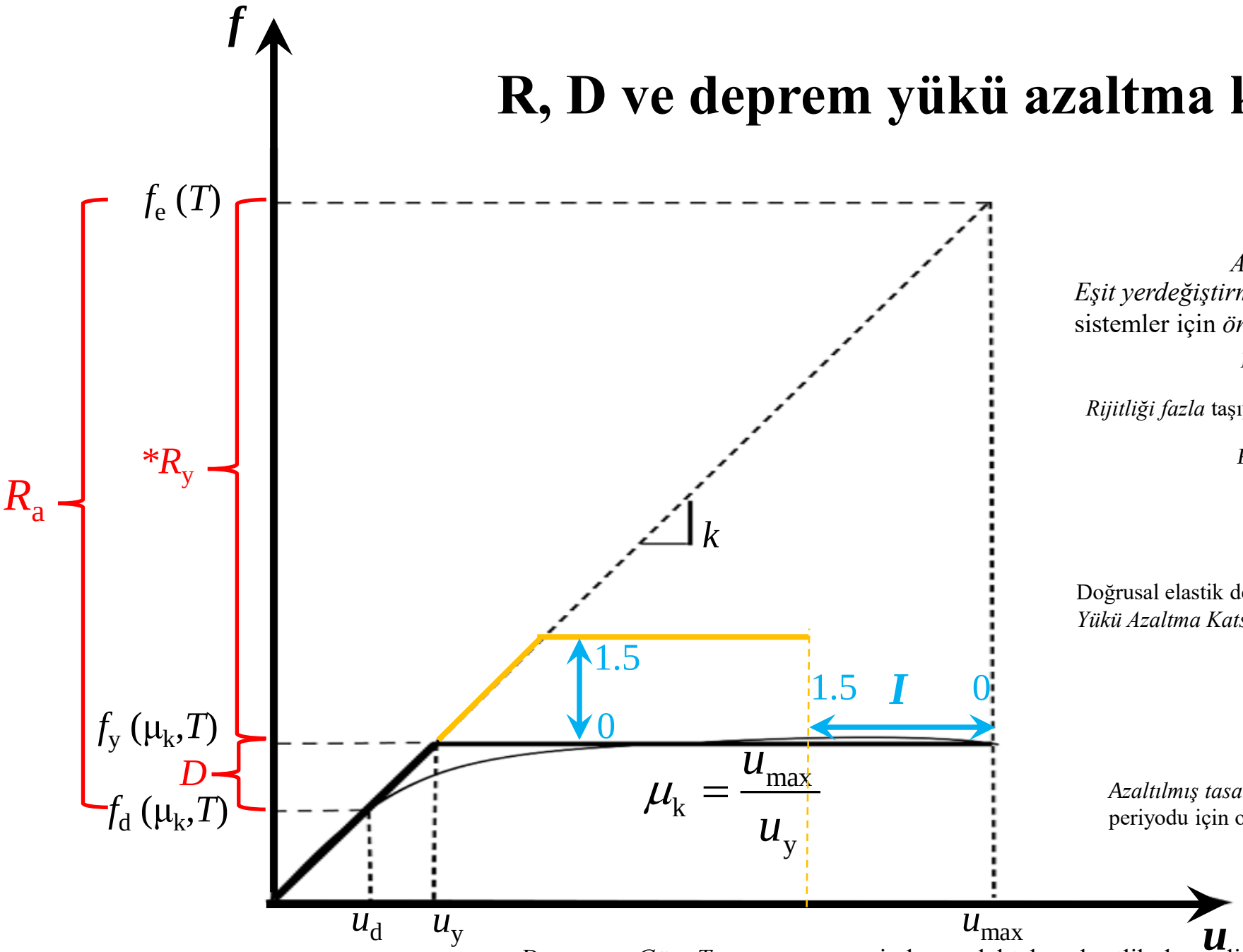
- Çelik ve hafif çelik binalarda;
  - *Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım* (YDKT) yaklaşımının uygulanması durumunda G yerine $1.2G$ alınacaktır.
  - *Güvenlik Katsayıları ile Tasarım* (GKT) yaklaşımının uygulanması durumunda, TBDY **Bölüm 16**'ya göre temel tasarımı dışında, TBDY **Bölüm 9** ve TBDY **Bölüm 10**'da verilen yük birleşimleri kullanılacaktır.

7

Yapısal sistemler

Tablo 4.1 · süneklik düzeyleri · çerçeve, perde, perde-çerçeve · perde payı · düzensizlikler · bodrumlu binalar

R, D ve deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$



$$f_y(\mu_k,T) = \frac{f_e(T)}{R_y(\mu_k,T)} \qquad \textit{akma dayanımı}$$

Akma Dayanımı Azaltma Katsayısı

Eşit yerdeğiştirme kuralı uyarınca *rijitliği fazla olmayan* taşıyıcı sistemler için *öngörülen süneklik kapasitesi* μ_k *'ya eşit alınır.*

$$R_y(\mu_k,T) = \mu_k \qquad T > T_B$$

Rijitliği fazla taşıyıcı sistemler için ise

$$R_y(\mu_k,T) = 1 + (\mu_k - 1)\frac{T}{T_B} \qquad T \le T_B$$

$$f_d(\mu_k,T) = \frac{f_y(\mu_k,T)}{D} \qquad \textit{tasarım dayanımı}$$

Doğrusal elastik deprem yüklerinin azaltılmasında esas alınacak *Deprem Yükü Azaltma Katsayısı;*

$$R_a(T) = \frac{R}{I} \qquad T > T_B$$

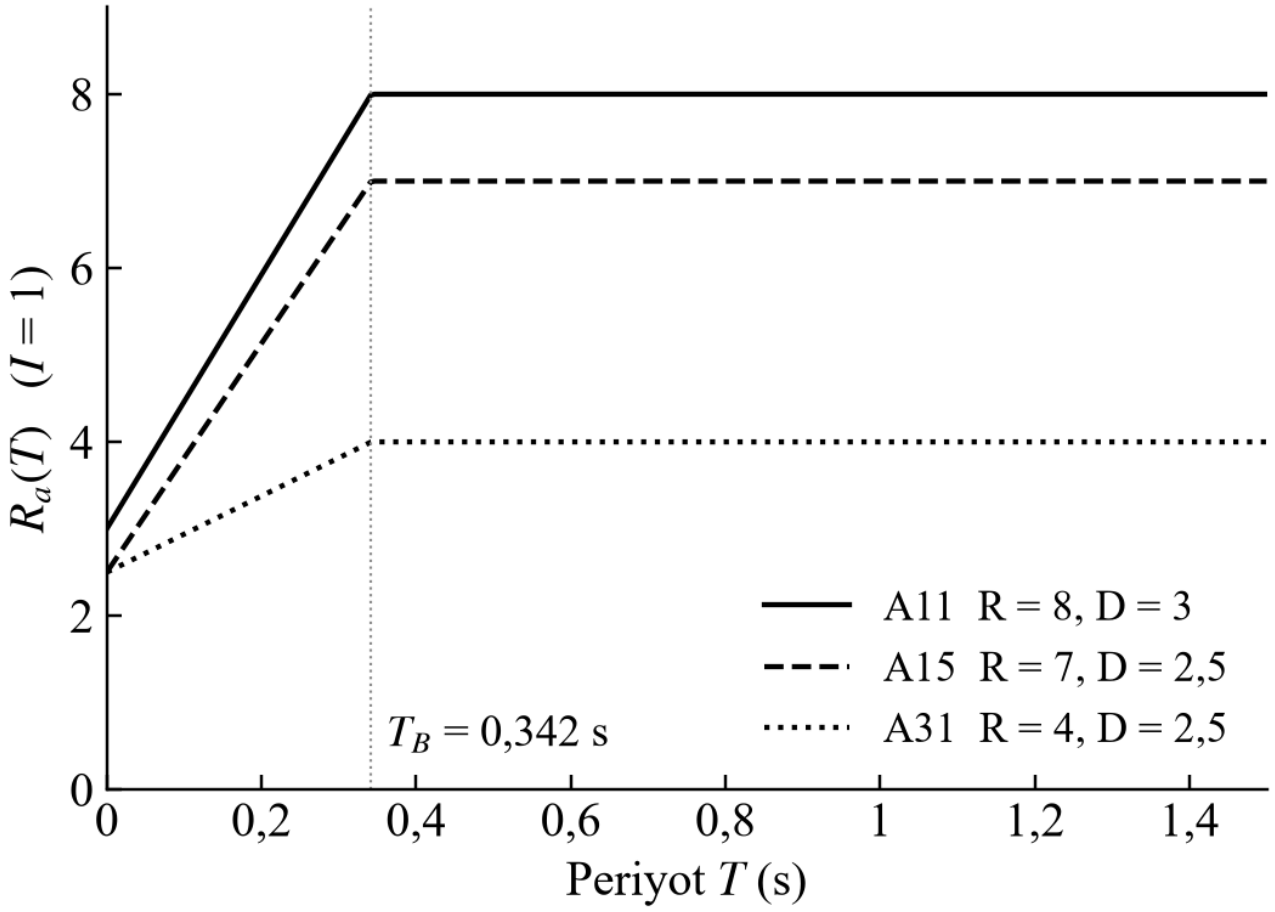
$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D\right)\frac{T}{T_B} \qquad T \le T_B$$

Azaltılmış tasarım ivme spektrumu'nun belirli bir T doğal titreşim periyodu için ordinatı olan *azaltılmış tasarım spektral ivmesi*

$$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)}$$

Dayanıma Göre Tasarım çerçevesinde, modal tek serbestlik dereceli sistem için *öngörülen süneklik kapasitesi – dayanım talebi* ilişkisi

R, D ve deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$



D: dayanım fazlalığı. Sünek olmayan davranış (kesme, temel, bağlantı) D ile büyütülmüş kuvvetle tasarlanır.

$$R_a(T) = \frac{R}{I} \qquad (T > T_B)$$

$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D\right)\frac{T}{T_B} \qquad (T \le T_B)$$

Süneklik Düzeyi Bakımından Taşıyıcı Sistemler ve Koşulları

- Betonarme ve çelik taşıyıcı sistemler, süneklik düzeyleri bakımından *süneklik düzeyi **yüksek** taşıyıcı sistemler*, *süneklik düzeyi **sınırlı** taşıyıcı sistemler* ve *süneklik düzeyi **karma** taşıyıcı sistemler* olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır.
- *Süneklik düzeyi **karma*** taşıyıcı sistemler, *süneklik düzeyi **sınırlı*** **çerçeve** taşıyıcı sistemlerinin *süneklik düzeyi **yüksek*** betonarme **perdeler** veya **çelik çaprazlı** çerçevelerle birlikte kullanılması ile oluşturulan sistemlerdir.

- **DTS=1a, DTS=2a, DTS=3a ve DTS=4a** olarak sınıflandırılan binalarda *süneklik düzeyi **sınırlı** taşıyıcı sistemler* **kullanılamaz**.
- **BYS ≤ 6** olan ve **DTS=1a** ve **DTS=2a** olarak sınıflandırılan binalarda *süneklik düzeyi **karma** taşıyıcı sistemler* **kullanılamaz** (DTS=1, 1a, 2, 2a , BYS=6 için $10.5<H_N \leq 17.5$).
- Birbirine dik doğrultularda taşıyıcı sistemlerin *süneklik düzeyleri*'nin **aynı** olması **zorunludur**. Ancak birbirine dik doğrultularda farklı *R* katsayıları ve bunlara karşı gelen *D* katsayıları kullanılabilir. TBDY **Tablo 4.1**'e göre izin verilen en üst *Bina Yükseklik Sınıfı*, iki doğrultuya göre verilenlerin **elverişsizi** olarak belirlenecektir.
- Deprem etkilerinin tamamı **moment aktaran** *süneklik düzeyi **sınırlı*** **betonarme çerçevelerle** karşılanan taşıyıcı sistemler (**Tablo 4.1**'de **A31**, **B31**, **C31** taşıyıcı sistemleri), **sadece DTS=3** ve **DTS=4** olan binalarda kullanılacaktır. Dolgulu (asmolen) veya dolgusuz tek doğrultulu dişli döşemeli betonarme çerçevelerden oluşan taşıyıcı sistemler de, perde içermedikleri takdirde, *süneklik düzeyi sınırlı taşıyıcı sistemler* olarak sınıflandırılacak ve sadece DTS=3 ve DTS=4 olan binalarda kullanılacaktır. Bu tür taşıyıcı sistemler, *süneklik düzeyi **yüksek*** betonarme bağ kirişli (boşluklu) ve/veya boşluksuz perdeler veya *süneklik düzeyi **yüksek*** çelik dışmerkez ve/veya merkezi çaprazlı çerçeveler ile birlikte düzenlenerek *süneklik düzeyi **karma*** sistemler olarak yapılabilir (**Tablo 4.1**'de **A2**, **B2**, **C2** taşıyıcı sistemleri).

Süneklik Düzeyi Bakımından Taşıyıcı Sistemler ve Koşulları

- **Sadece kirişsiz döşemeleri** içeren taşıyıcı sistemlerde, deprem etkilerinin tamamı betonarme binalarda *süneklik düzeyi* ***yüksek*** **bağ kirişli (boşluklu) ve/veya boşluksuz perdeler** veya *süneklik düzeyi* ***sınırlı*** **boşluksuz perdeler** tarafından karşılanacaktır (**Tablo 4.1**'de **A12**, **A13** ve **A32** taşıyıcı sistemleri). Çelik binalarda ise *süneklik düzeyi yüksek* merkezi ve/veya dışmerkez çaprazlı veya burkulması önlenmiş çaprazlı çerçeveler veya *süneklik düzeyi sınırlı* merkezi çaprazlı çerçeveler kullanılacaktır (**Tablo 4.1**'de **C12**, **C13** ve **C32** taşıyıcı sistemleri). Bu tür sistemlerin hesabı **iki aşamada** yapılacaktır. **Birinci aşama** hesapta çerçeve kolonları **alttan ve üstten mafsallı** alınacaktır. **İkinci aşama** hesapta ise bu elemanların bağlantıları **monolitik olarak modellenecektir**. Perde, kolon, çapraz ve döşemelerdeki iç kuvvetler, iki aşamada elde edilenlerin **elverişsiz** olanı olarak hesaplanacaktır. **Göreli kat ötelemeleri ikinci aşama** hesaptan elde edilecektir.
- *Süneklik düzeyi* ***yüksek*** bağ kirişli (boşluklu) veya boşluksuz yerinde dökme veya önüretimli betonarme perdeler ile merkezi, dışmerkez veya burkulması önlenmiş çelik çaprazlı çerçevelerin **moment aktaran** *süneklik düzeyi* ***yüksek*** **çerçevelerle** birlikte kullanıldığı binalarda, perdelerin veya çaprazlı çerçevelerin tabanında deprem yüklerinden meydana gelen devrilme momentlerinin toplamı, binanın tümü için deprem yüklerinden tabanda meydana gelen toplam devrilme momentinin %40'ından az, %75'inden fazla olmayacaktır:

$$0.40M_o < \sum M_{DEV} < 0.75M_o$$

- Bu bağıntıdaki **üst sınır koşulunun sağlanamaması** durumunda, TBDY **Tablo 4.1**'de **deprem etkilerinin tamamının** *süneklik düzeyi* ***yüksek*** **perdelerle** veya çaprazlı çerçevelerle karşılandığı durumlar için tanımlanan ***R*** ve ***D*** katsayıları ile **izin verilen en üst BYS** dikkate alınacaktır. Alt sınır koşulunun sağlanamaması durumunda ise TBDY **Tablo 4.1**'de verilen ***R*** ve ***D*** katsayılarında değişiklik yapılmayacak, ancak izin verilen **en üst BYS'nin bir fazlası** dikkate alınacaktır.

Süneklik Düzeyi Bakımından Taşıyıcı Sistemler ve Koşulları

- Betonarme ve çelik *süneklik düzeyi* ***karma*** taşıyıcı sistemlerde, *süneklik düzeyi* ***yüksek*** bağ kirişli (boşluklu) veya boşluksuz betonarme **perdeler** ile merkezi, dışmerkez veya burkulması önlenmiş çelik **çaprazlı çerçevelerin** tabanında deprem yüklerinden meydana gelen devrilme momentlerinin toplamı, binanın tümü için deprem yüklerinden tabanda meydana gelen toplam devrilme momentinin %75'inden az olmayacaktır. Bu koşulun sağlanamaması durumunda, TBDY **Tablo 4.1**'de deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi* ***sınırlı*** **çerçevelerle** karşılandığı durumlar için tanımlanan ***R*** ve ***D*** katsayıları ile izin verilen **en üst BYS** dikkate alınacaktır.

$$\sum M_{\mathrm{DEV}} \geq 0.75 M_{\mathrm{o}}$$

- *Süneklik düzeyi* ***sınırlı*** **boşluksuz betonarme perdeler** veya *süneklik düzeyi* ***sınırlı*** **merkezi çelik çaprazlı çerçevelerin** moment aktaran *süneklik düzeyi* ***sınırlı*** betonarme veya çelik **çerçevelerle** birlikte kullanıldığı binalarda da verilen koşul sağlanacaktır. Aksi durumda **yukarıda** verilen kural uygulanacaktır.

$$\sum M_{\mathrm{DEV}} \geq 0.75 M_{\mathrm{o}}$$

Taşıyıcı Sistem Türüne Göre R ve D Katsayıları – Tablo 4.1

- **TBDY Tablo 4.1**'de **A21**, **A22** ve **C21**, **C22** ile simgelenen taşıyıcı sistemlerde, sadece DTS = 4 olan binalar ile sınırlı olmak üzere, izin verilen *Bina Yükseklik Sınıfı,* BYS ≥ 2'ye yükseltilebilir.

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı *R*	Dayanım Fazlalığı Katsayısı *D*	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları BYS
A. YERİNDE DÖKME BETONARME BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
A2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.6)			
A21. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.1.2**)	6	2.5	BYS ≥ 4
A22. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.1.2**)	5	2.5	BYS ≥ 4
C. ÇELİK BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
C2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.6)			
C21. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* çelik çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.1.2**)	6	2.5	BYS ≥ 4
C22. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* çelik çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.1.2**)	5	2	BYS ≥ 4

Taşıyıcı Sistem Türüne Göre R ve D Katsayıları – Tablo 4.1

- Kompozit kolonlu sistemlerde, çelik taşıyıcı sistemler için verilen *R* ve *D* katsayıları kullanılacaktır.
- Dıştan rijit perdelerle çevrelenen bodrumların bulunduğu binalarda, bodrum katlarının bulunduğu alt bölümde (*R*/*I*) = 2.5 ve *D* = 1.5 alınacaktır.
- DTS = 1, 1a, 2, 2a olan **betonarme perdeli** ve/veya **çelik çaprazlı çerçeveli** binalarda, herhangi bir doğrultuda aşağıda **(a)** ve **(b)**'de tanımlanan iki koşuldan birinin sağlanamaması durumunda, o doğrultuda *Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R* yerine (4/5)*R* gözönüne alınacaktır. *Dayanım Fazlalığı Katsayısı D*'de herhangi bir değişiklik yapılmayacaktır. TBDY **4.5.4.5**'de verilen koşulu sağlayan bağ kirişli perde sistemi, tek bir perde olarak olarak gözönüne alınacaktır.

(a) Taşıyıcı sistemde tek bir perdenin veya çelik çaprazlı çerçevenin aldığı taban devrilme momenti M_{DEV} o doğrultuda binanın tümü için deprem yüklerinden meydana gelen toplam taban devrilme momenti M_o'ın 1/3'ünden fazla olmayacaktır.

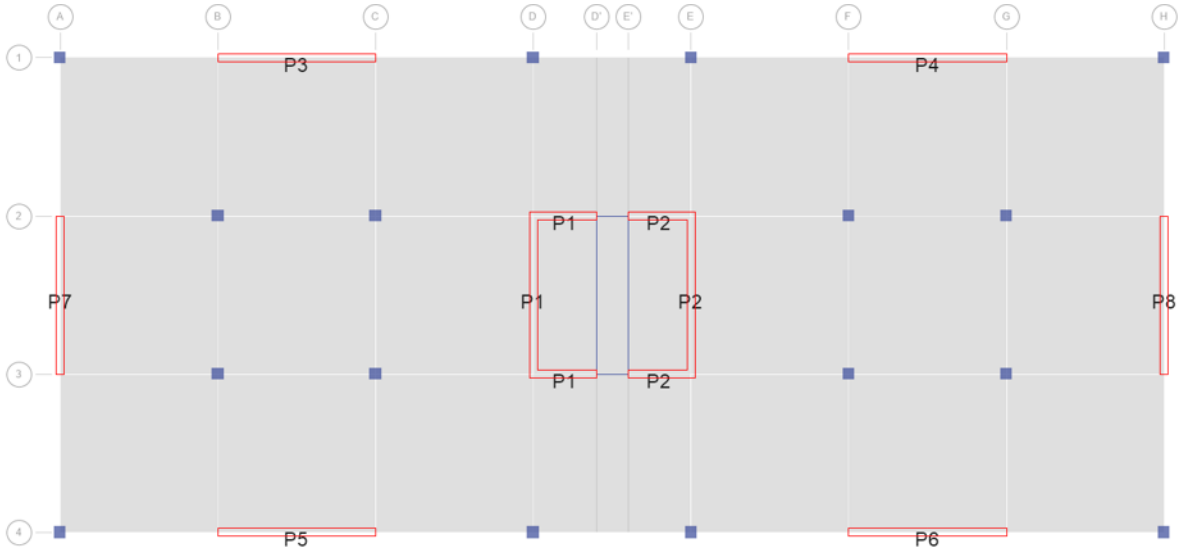
(b) Binanın her bir kenar aksında yer alan perde/perdelerin veya çelik çaprazlı çerçeve/çerçevelerin aldığı taban devrilme momenti M_{DEV} veya M_{DEV}'lerin toplamı, o doğrultuda binanın tümü için deprem yüklerinden meydana gelen toplam taban devrilme momenti M_o'ın 1/6'sından az olmayacaktır.

- Bodrum çevre perdeleri dışında, $H_w / l_w \leq 2$ olan boşluksuz perdelerde TBDY **Tablo 4.1**'de verilen *R* katsayılarına göre hesaplanan iç kuvvetler, $[3/(1+H_w/\ell_w)]$ katsayısı ile çarpılarak büyültülecektir. Ancak bu katsayı, 2'den büyük alınmayacaktır.
- Binaların bodrum katlarının çevresinde kullanılan rijit betonarme perdeler, TBDY **Tablo 4.1**'de yer alan perdeli veya perdeli-çerçeveli sistemlerin bir parçası olarak gözönüne alınmayacaktır.

Taşıyıcı Sistem Türüne Göre R ve D Katsayıları

(a) Taşıyıcı sistemde tek bir perdenin veya çelik çaprazlı çerçevenin aldığı taban devrilme momenti M_{DEV} o doğrultuda binanın tümü için deprem yüklerinden meydana gelen toplam taban devrilme momenti M_o'ın 1/3'ünden fazla olmayacaktır.

(b) Binanın her bir kenar aksında yer alan perde/perdelerin veya çelik çaprazlı çerçeve/çerçevelerin aldığı taban devrilme momenti M_{DEV} veya M_{DEV}'lerin toplamı, o doğrultuda binanın tümü için deprem yüklerinden meydana gelen toplam taban devrilme momenti M_o'ın 1/6'sından az olmayacaktır.



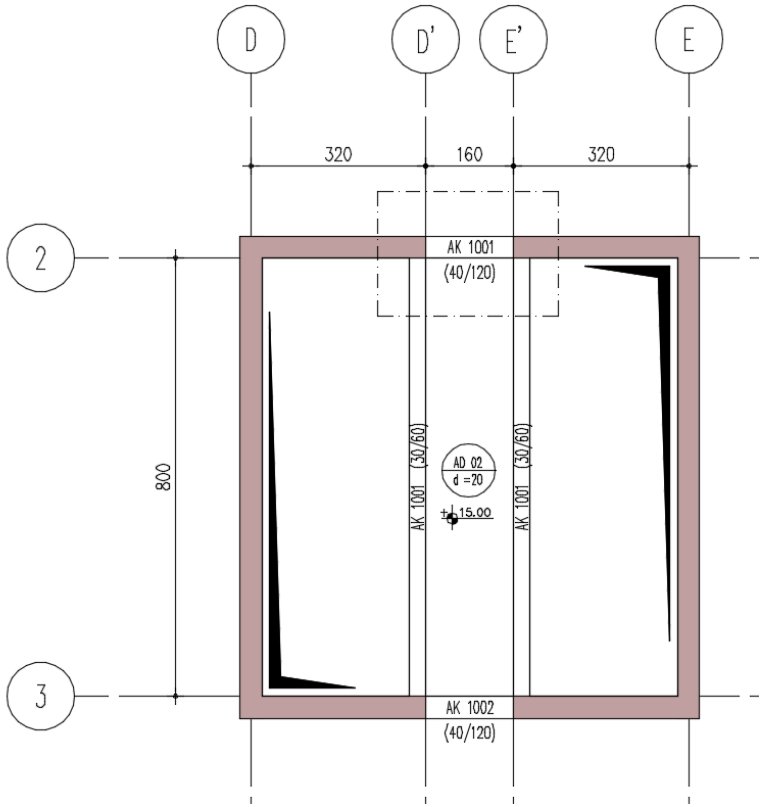
Perde İsmi	X-X Doğrultusu		Y-Y Doğrultusu	
	M_{DEV}/M_o	Kontrol < 1/3	M_{DEV}/M_o	Kontrol < 1/3
P1	0.37	X	0.25	√
P2			0.25	√
P3	0.13	√	0	√
P4	0.13	√	0	√
P5	0.13	√	0	√
P6	0.13	√	0	√
P7	0	√	0.18	√
P8	0	√	0.18	√

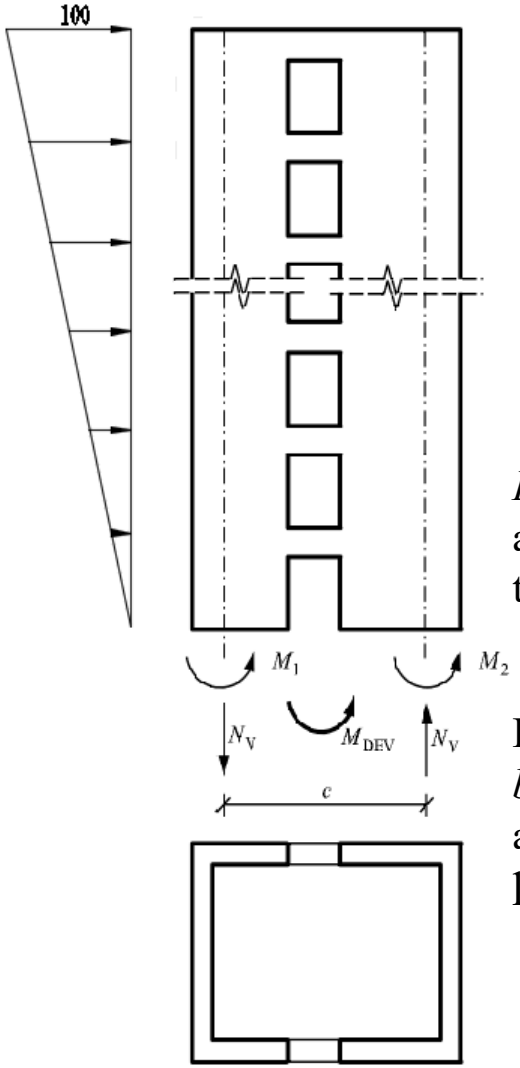
Kenar Aks Perde İsimleri	X-X Doğrultusu		Kenar Aks Perde İsimleri	Y-Y Doğrultusu	
	M_{DEV}/M_o	Kontrol > 1/6		M_{DEV}/M_o	Kontrol > 1/6
P3+P4	0.26	√	P7	0.184	√
P5+P6	0.26	√	P8	0.184	√

X-X doğrultusunda birinci koşulun P1-P2 perde parçalarından oluşan çekirdek perde tarafından sağlanmadığı görülmektedir. Y-Y doğrultusunda her iki koşulun da sağlandığı görülmektedir. **Binanın X-X doğrultusunda *Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı* R=6 yerine (4/5) R=4.8** gözönüne alınacaktır. Binanın **Y-Y doğrultusunda *Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı* R=6**'dır.

Bağ Derecesi Katsayısı / Betonarme Bağ Kirişli (Boşluklu) Perdeler

- Bu tür perdeler, güçlü bağ kirişleri sayesinde konsol olarak çalışan boşluksuz perdeler ile çerçeveler arasında bir davranış gösterirler.





$$M_1 = M_2 = 7170.1 kNm$$

$$N_V = 7223.2\,kN$$

$$c = 6.58\,m$$

$$M_{DEV} = M_1 + M_2 + cN_V \cong 61868\,kNm$$

$$\Omega = \frac{cN_V}{M_{DEV}} = \frac{47529}{61868} = 0.77$$

Bağ kirişli (boşluklu) perde, *bağ derecesi katsayısı*'nın aşağıdaki koşulu sağladığı taşıyıcı sistem elemanı olarak tanımlanır:

$$\Omega \geq \frac{1}{3}$$

Koşulun sağlanamaması durumunda perde parçalarının her biri *boşluksuz perde* sayılır. Bu koşula ek olarak, perde parçalarında aşırı eksenel kuvvetlerin oluşmasını önlemek bakımından $\Omega \leq 2/3$ koşulunun da sağlanmasına çalışılmalıdır.

Taşıyıcı Sistem Türüne Göre R ve D Katsayıları – Tablo 4.1

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı *R*	Dayanım Fazlalığı Katsayısı *D*	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları BYS
A. YERİNDE DÖKME BETONARME BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
A1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
A11. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar	8	3	BYS ≥ 3
A12. Deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdelerle karşılandığı binalar	7	2.5	BYS ≥ 2
A13. Deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdelerle karşılandığı binalar	6	2.5	BYS ≥ 2
A14. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.4.5**)	8	2.5	BYS ≥ 2
A15. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.4.5**)	7	2.5	BYS ≥ 2
A16. Deprem etkilerinin tamamının çatı düzeyindeki bağlantıları mafsallı olan ve yüksekliği 12 m'yi geçmeyen *süneklik düzeyi yüksek* betonarme kolonlar tarafından karşılandığı tek katlı binalar	3	2	–
A2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.6)			
A21. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.1.2**)	6	2.5	BYS ≥ 4
A22. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.1.2**)	5	2.5	BYS ≥ 4
A23. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı dolgulu (asmolen) veya dolgusuz tek doğrultulu dişli döşemeli* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	6	2.5	BYS ≥ 6
A24. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı dolgulu (asmolen) veya dolgusuz tek doğrultulu dişli döşemeli* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	5	2.5	BYS ≥ 6
A3. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.3, 4.3.4.7)			
A31. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar	4	2.5	BYS ≥ 7
A32. Deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi sınırlı* boşluksuz betonarme perdelerle karşılandığı binalar	4	2	BYS ≥ 6
A33. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi sınırlı* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	4	2	BYS ≥ 6

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı *R*	Dayanım Fazlalığı Katsayısı *D*	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları BYS
B. ÖNÜRETİMLİ BETONARME BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
B1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
B11. Deprem etkilerinin tamamının bağlantıları moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* önüretimli çerçevelerle karşılandığı binalar			
MAB1, **MAB2** tipi moment aktaran bağlantılar: **MAB3**, **MAB4** tipi moment aktaran bağlantılar:	7 5	2.5 2.5	BYS ≥ 4 BYS ≥ 6
B12. Deprem etkilerinin bağlantıları moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* önüretimli çerçeveler ile, *süneklik düzeyi yüksek* yerinde dökme bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.4.5**)			
MAB1, **MAB2** tipi moment aktaran bağlantılar: **MAB3**, **MAB4** tipi moment aktaran bağlantılar:	7 5	2.5 2.5	BYS ≥ 2 BYS ≥ 6
B13. Deprem etkilerinin bağlantıları moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* önüretimli çerçeveler ile, *süneklik düzeyi yüksek* yerinde dökme boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.4.5**)			
MAB1, **MAB2** tipi moment aktaran bağlantılar: **MAB3**, **MAB4** tipi moment aktaran bağlantılar:	6 5	2.5 2.5	BYS ≥ 2 BYS ≥ 6
B14. Düşey yüklerin bağlantıları mafsallı önüretimli ve iki doğrultulu çerçeveler ile, deprem etkilerinin tamamının ise *süneklik düzeyi yüksek* yerinde dökme boşluksuz ve/veya bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdelerle karşılandığı binalar	4	2	BYS ≥ 7
B15. Deprem etkilerinin tamamının çatı düzeyindeki bağlantıları mafsallı olan ve yüksekliği 12 m'yi geçmeyen *süneklik düzeyi yüksek* kolonlar tarafından karşılandığı tek katlı binalar	3	2	–
B2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.6)			
B21. Deprem etkilerinin bağlantıları moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* önüretimli çerçeveler ile, *süneklik düzeyi yüksek* yerinde dökme bağ kirişli (boşluklu) veya boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar			
MAB1, **MAB2** tipi moment aktaran bağlantılar: **MAB3**, **MAB4** tipi moment aktaran bağlantılar:	5 4	2.5 2.5	BYS ≥ 5 BYS ≥ 6
B3. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.7)			
B31. Deprem etkilerinin tamamının bağlantıları moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* önüretimli çerçevelerle karşılandığı binalar	3	2	BYS = 8
B32. Deprem etkilerinin bağlantıları moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* önüretimli çerçeveler ile, yerinde dökme *süneklik düzeyi sınırlı* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	3	2	BYS ≥ 7
B33. Deprem yüklerinin tamamının önüretimli betonarme düşey çift cidarlı paneller tarafından karşılandığı *süneklik düzeyi sınırlı* binalar	4	2	BYS ≥ 6
B34. Deprem yüklerinin tamamının önüretimli betonarme düşey tek cidarlı paneller tarafından karşılandığı *süneklik düzeyi sınırlı* binalar	3	2	BYS ≥ 7

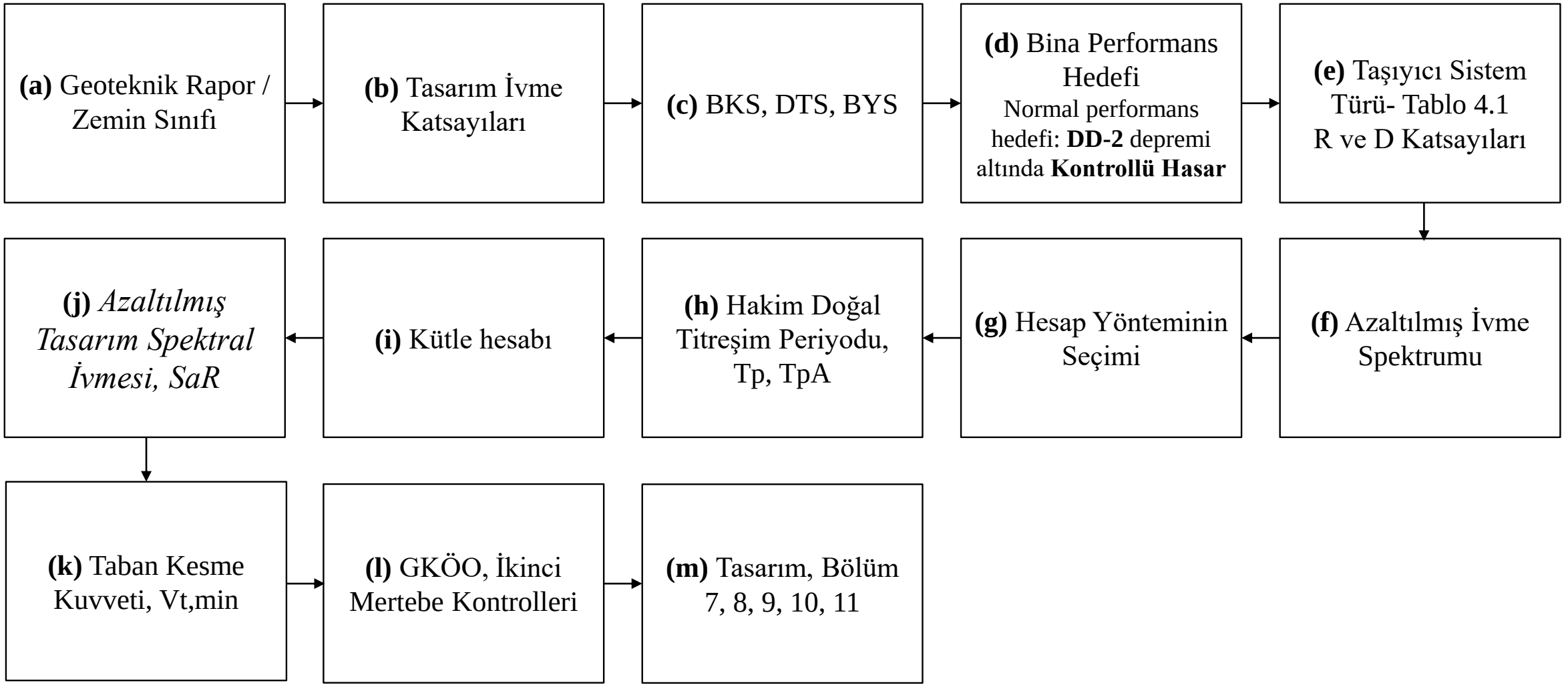
Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı *R*	Dayanım Fazlalığı Katsayısı *D*	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları BYS
C. ÇELİK BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
C1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
C11. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	8	3	BYS ≥ 3
C12. Deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi yüksek* dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı binalar	8	2.5	BYS ≥ 2
C13. Deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi yüksek* merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı binalar	5	2	BYS ≥ 4
C14. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* çelik çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.4.5**)	8	3	BYS ≥ 2
C15. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* çelik çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.4.5**)	6	2.5	BYS ≥ 2
C16. Deprem etkilerinin tamamının çatı düzeyindeki bağlantıları mafsallı olan ve yüksekliği 12 m'yi geçmeyen *süneklik düzeyi yüksek* çelik kolonlar tarafından karşılandığı tek katlı binalar	4	2	–
C2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.6)			
C21. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* çelik çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.1.2**)	6	2.5	BYS ≥ 4
C22. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* çelik çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.1.2**)	5	2	BYS ≥ 4
C3. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.7)			
C31. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	4	2.5	BYS ≥ 7
C32. Deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi sınırlı* merkezi çaprazlı çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	3	2	BYS = 8
C33. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi sınırlı* çelik çerçeveler ile *süneklik düzeyi sınırlı* merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından birlikte karşılandığı binalar	4	2	BYS ≥ 7

8

Bir binanın deprem analizine mühendislik yaklaşımı

Nereden başlanır · kütle, rijitlik, sınır şartları · yöntem seçimi · sonuçların denetimi · sistemin yorumu

Tasarım Esasları / Tasarım Süreci

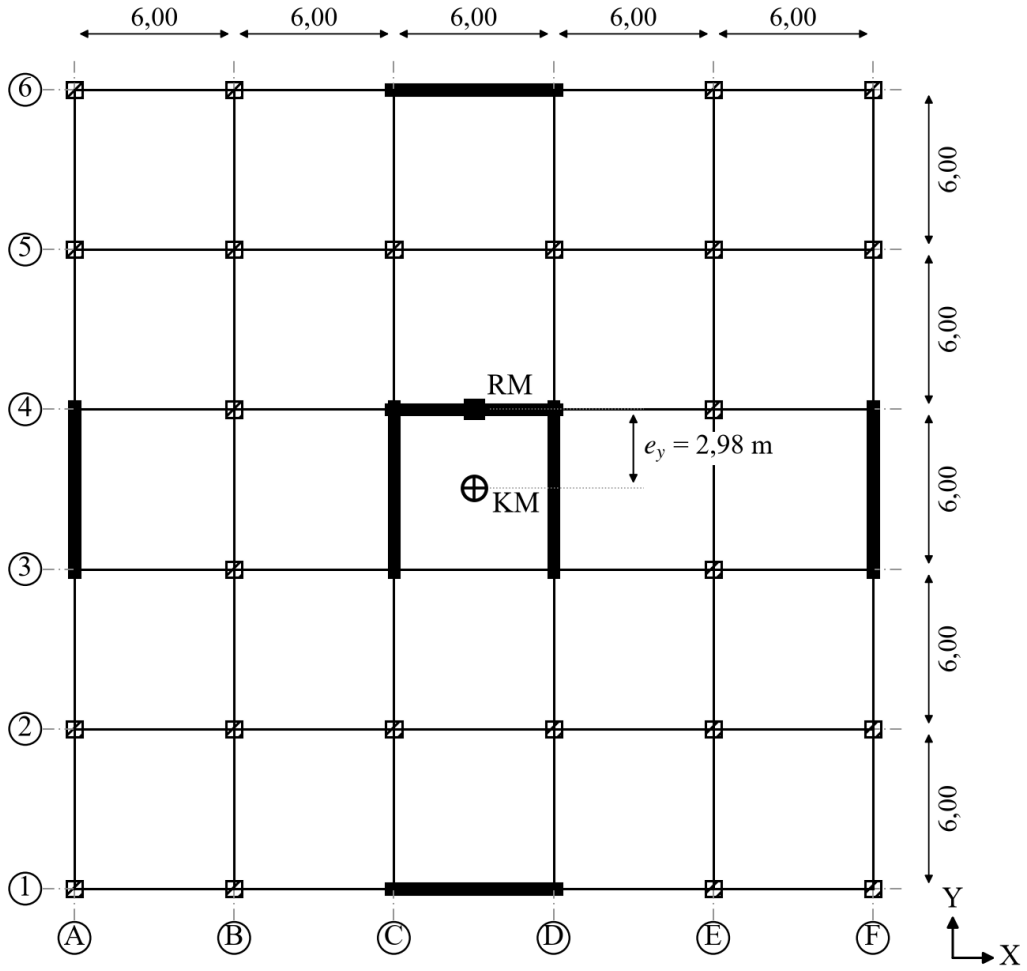


9

Uygulama: 6 katlı betonarme bina

Proje verisi · modal sonuçlar ve kütle katılımı · mod katkıları · EDY · mod birleştirme · zaman tanım alanı · kontroller

Proje verisi



Veri	Değer
Konum, zemin	İstanbul Kadıköy, ZC
Kat adedi, H_N	6x3m= 18,0 m
Plan	30 × 30 m, 6 m açıklık
Kolon / kiriş	60/60 / 40/50
Perde	40 cm; X'te 3, Y'de 4 adet
Döşeme	17 cm, rijit diyafram
Kat ağırlığı W = m g	10443 kN (normal), 9489 kN (çatı)
Sistem	A13, R = 6, D = 2,5
Kullanım	Konut, BKS = 3, I = 1,0
DTS / BYS	1 / 5

Zemin Sınıfı

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_S)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \%40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası $(c_u < 25\ \text{kPa})$ içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Table 20.2-1. Site Classification.

Site Class	$\bar{v}_s$ Calculated Using Measured or Estimated Shear Wave Velocity Profile (ft/s)		
A. Hard rock	>5,000	1524	
B. Medium hard rock	>3,000 to 5,000	914	1524
BC. Soft rock	>2,100 to 3,000	640	914
C. Very dense sand or hard clay	>1,450 to 2,100	442	640
CD. Dense sand or very stiff clay	>1,000 to 1,450	305	442
D. Medium dense sand or stiff clay	>700 to 1,000	213	305
DE. Loose sand or medium stiff clay	>500 to 700	152	213
E. Very loose sand or soft clay	≥500	152	
F. Soils requiring site response analysis in accordance with Section 21.1	See Section 20.2.1		

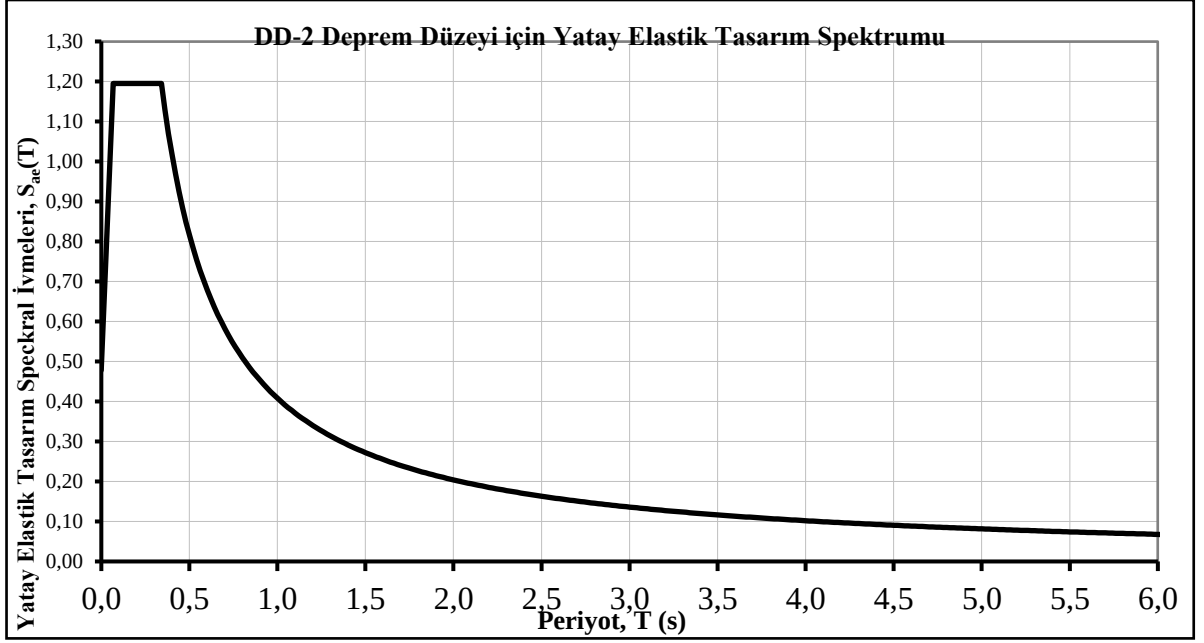
Note: For SI: 1 ft = 0.3048 m; 1 ft/s = 0.3048 m/s.

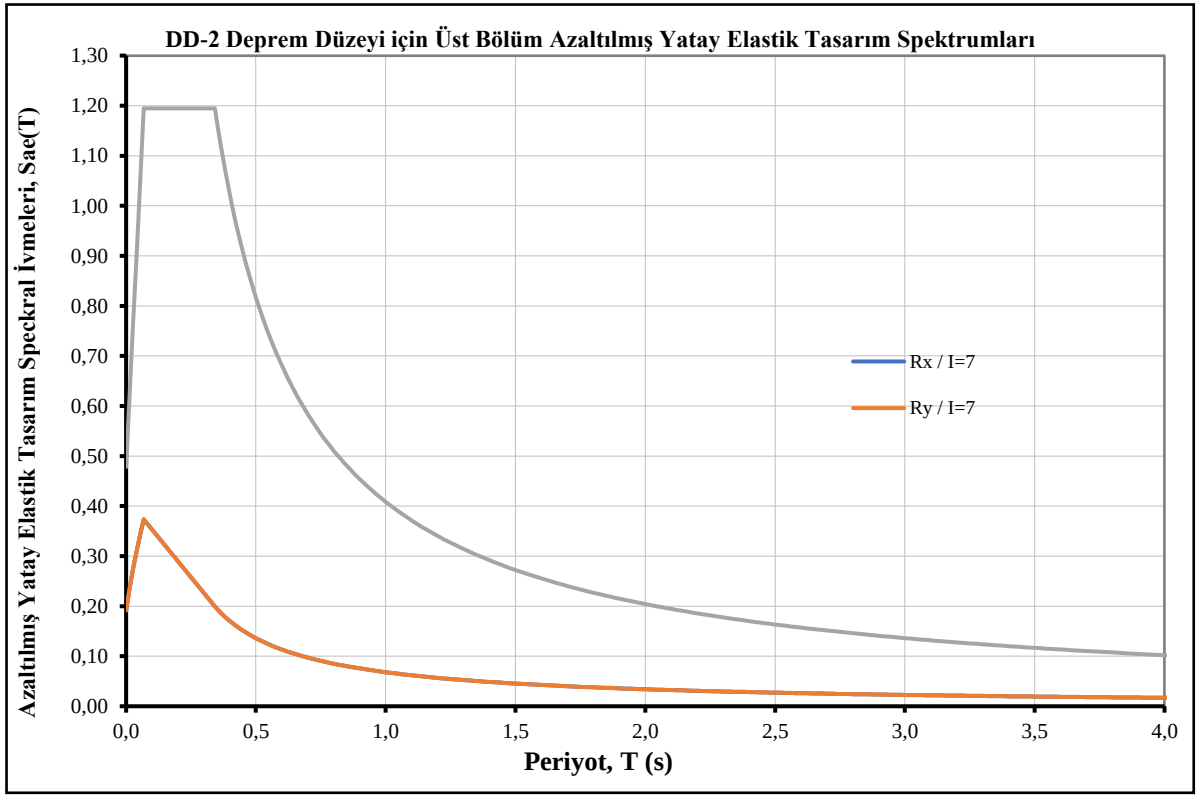
Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için *Yerel Zemin Etki Katsayısı* F_S					
	$S_S \le 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S \ge 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır* (**Bkz.16.5**).					

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için *Yerel Zemin Etki Katsayısı* F_1					
	$S_1 \le 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \ge 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır* (**Bkz.16.5**).					

Tasarım İvme Spektrumu

Saha	İstanbul, Kadıköy (40,990 K; 29,030 D), zemin ZC
Ss (DD-2)	0.9958
S1 (DD-2)	0.2724
Fs (Tablo 2.1, ZC)	1.20
F1 (Tablo 2.2, ZC)	1.50
SDS = Ss Fs	1.1949
SD1 = S1 F1	0.4086
TA = 0,2 SD1/SDS (s)	0.0684
TB = SD1/SDS (s)	0.3420
TL (s)	6.0





BKS, DTS, BYS

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	**Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar** **a)** Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) **b)** Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb. **c)** Müzeler **d)** Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1.5
BKS = 2	**İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar** Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	1.2
BKS = 3	**Diğer binalar** BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)	1.0

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0.33 \le S_{DS} < 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0.50 \le S_{DS} < 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0.75 \le S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

Bina Yükseklik Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları [m]		
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a	DTS = 4, 4a
BYS = 1	$H_N > 70$	$H_N > 91$	$H_N > 105$
BYS = 2	$56 < H_N \le 70$	$70 < H_N \le 91$	$91 < H_N \le 105$
BYS = 3	$42 < H_N \le 56$	$56 < H_N \le 70$	$56 < H_N \le 91$
BYS = 4	$28 < H_N \le 42$	$42 < H_N \le 56$	
BYS = 5	$17.5 < H_N \le 28$	$28 < H_N \le 42$	
BYS = 6	$10.5 < H_N \le 17.5$	$17.5 < H_N \le 28$	
BYS = 7	$7 < H_N \le 10.5$	$10.5 < H_N \le 17.5$	
BYS = 8	$H_N \le 7$	$H_N \le 10.5$	

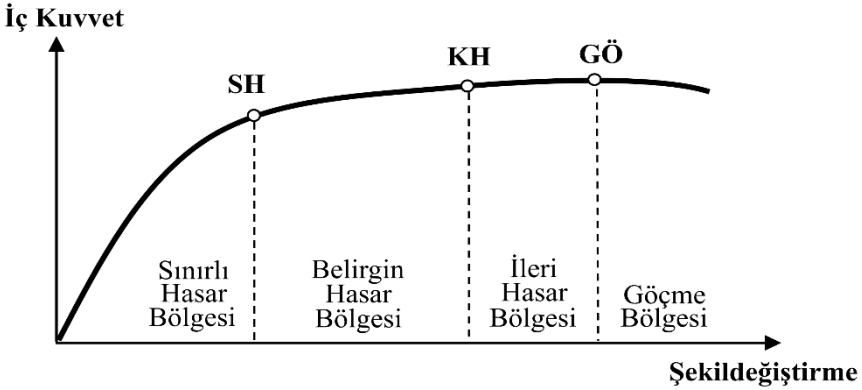
Bina Performans Hedefi

(a) Yeni Yapılacak Yerinde Dökme Betonarme, Önüretimli Betonarme ve Çelik Binalar (Yüksek Binalar Dışında – BYS≥2)

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1,1a[1], 2, 2a[1], 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a[2], 2a[2]	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-3	—	—	SH	ŞGDT
DD-2	KH	DGT[5]	KH	DGT[3,4]
DD-1	—	—	KH	ŞGDT

Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi

Bu performans düzeyi, can güvenliğini sağlamak üzere bina taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan kontrollü hasar düzeyine karşı gelmektedir.



Bina Taşıyıcı Sistem Türü-TBDY Tablo 4.1 – R , D

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı *R*	Dayanım Fazlalığı Katsayısı *D*	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları BYS
A. YERİNDE DÖKME BETONARME BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
A1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
A11. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar	8	3	BYS ≥ 3
A12. Deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdelerle karşılandığı binalar	7	2.5	BYS ≥ 2
A13. Deprem etkilerinin tamamının *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdelerle karşılandığı binalar	6	2.5	BYS ≥ 2
A14. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.4.5**)	8	2.5	BYS ≥ 2
A15. Deprem etkilerinin moment aktaran *süneklik düzeyi yüksek* betonarme çerçeveler ile *süneklik düzeyi yüksek* boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.**4.3.4.5**)	7	2.5	BYS ≥ 2
A16. Deprem etkilerinin tamamının çatı düzeyindeki bağlantıları mafsallı olan ve yüksekliği 12 m'yi geçmeyen *süneklik düzeyi yüksek* betonarme kolonlar tarafından karşılandığı tek katlı binalar	3	2	–

TBDY 4.3.4.5 – Perde payı kontrolü

EDY yükleri (Ex / Ey, ±%5 dışmerkezlikten elverişsiz olan), ST01 tabanı. Her doğrultuda yalnız o doğrultuda çalışan perdelerin düzlem-içi momentleri toplanır.

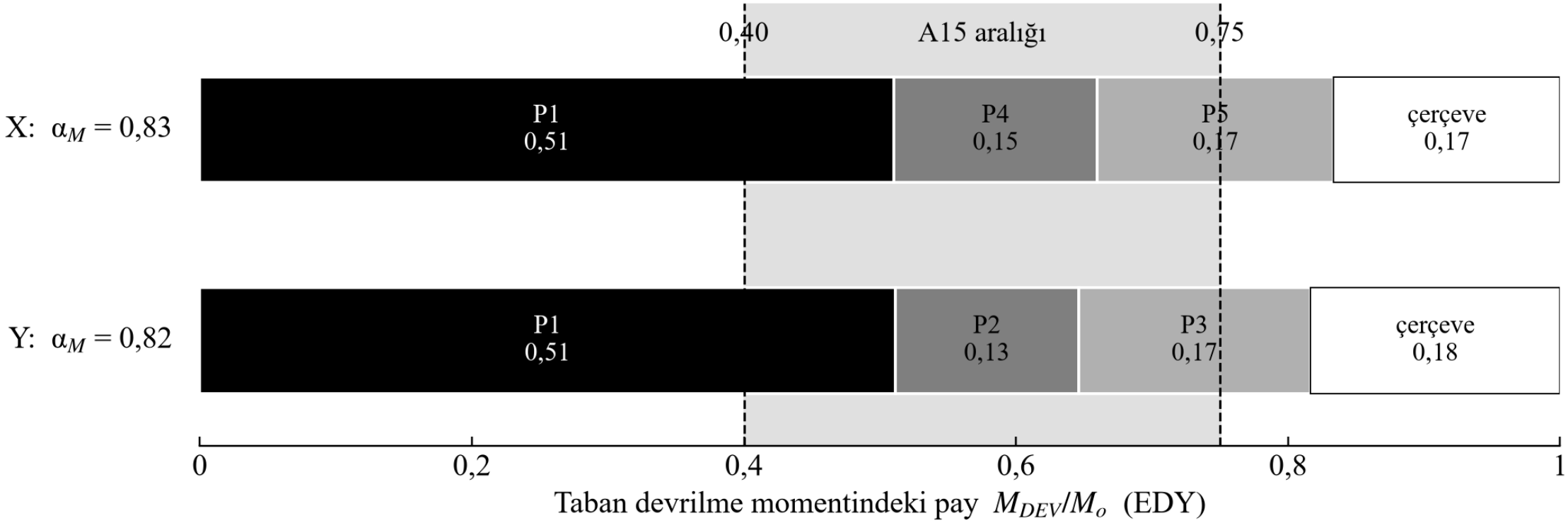
Perde	**Konum**	**X: M (kNm)**	**Y: M (kNm)**
P1 çekirdek	(15 ; 16)	83398	86869
P2 (Y perdesi)	x = 0	–	22876
P3 (Y perdesi)	x = 30	–	28985
P4 (X perdesi)	y = 30	24428	–
P5 (X perdesi)	y = 0	28419	–
ΣM_{DEV}		**136246**	**138729**
M_o (bina tabanı)		**163441**	**169917**
$\alpha_M = \Sigma M_{DEV} / M_o$		**0,83**	**0,82**

Koşul (A15): $0{,}40 < \alpha_M < 0{,}75$

X: $0{,}83 > 0{,}75$ ✗ Y: $0{,}82 > 0{,}75$ ✗

Devrilme momentinin büyük kısmını perdeler taşıyor: sistem A15 sayılamaz, Tablo 4.1 A13 ile tasarlanır: R = 6, D = 2,5 (BYS ≥ 2).

Perde payı: devrilme momentinin paylaşımı



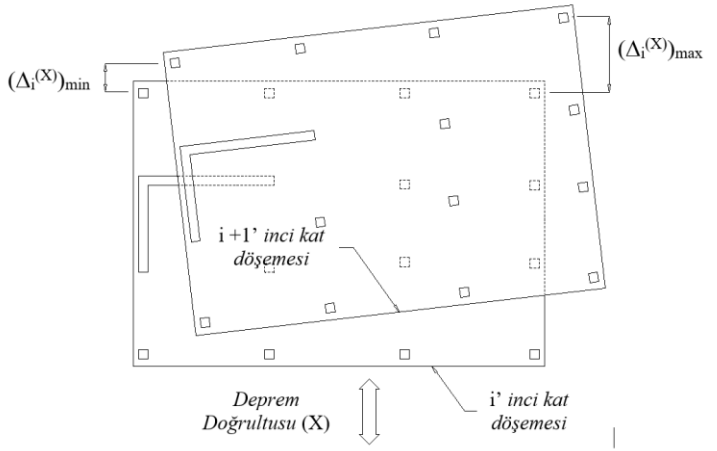
P1 çekirdeği tek başına M_o'nun %51'ini taşıyor; çerçeveye X'te %17, Y'de %18 kalıyor.

α_M iki doğrultuda da 0,75'in üstünde → A13: R = 6, D = 2,5

Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi – TBDY Tablo 4.4

Bina Türü	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfı	
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a, 4, 4a
Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \le 2.0$ koşulunu sağladığı ve ayrıca **B2** türü düzensizliğinin olmadığı binalar	BYS ≥ 4	BYS ≥ 5
Diğer tüm binalar	BYS ≥ 5	BYS ≥ 6

A – PLANDA DÜZENSİZLİK DURUMLARI	İlgili Maddeler
A1 – Burulma Düzensizliği: Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük göreli kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama göreli ötelemeye oranını ifade eden *Burulma Düzensizliği Katsayısı* η_{bi} 'nin 1.2'den büyük olması durumu (**Şekil 3.1**). $[\eta_{bi} = (\Delta_i^{(X)})_{max} / (\Delta_i^{(X)})_{ort} > 1.2]$. *Göreli kat ötelemelerinin hesabı, ± %5 ek dışmerkezlik etkileri de gözönüne alınarak,* **4.7***'ye göre yapılacaktır.*	**3.6.2.1**
B – DÜŞEYDE DÜZENSİZLİK DURUMLARI	İlgili Maddeler
B2 – Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat): Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, bodrum katlar dışında, herhangi bir i'inci kattaki ortalama göreli kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama göreli kat ötelemesi oranına bölünmesi ile tanımlanan *Rijitlik Düzensizliği Katsayısı* η_{ki} 'nin 2.0'den fazla olması durumu. $(\sum A_e)_i = (\sum A_w)_i + (\sum A_g)_i + (0.15 \sum A_k)_i$ veya $\eta_{ki} = (\Delta_i^{(X)} / h_i)_{ort} / (\Delta_{i-1}^{(X)} / h_{i-1})_{ort} > 2.0]$ *Göreli kat ötelemelerinin hesabı, ± %5 ek dışmerkezlik etkileri de gözönüne alınarak* **4.7***'ye göre yapılacaktır.*	**3.6.2.1**



Döşemelerin kendi düzlemleri içinde rijit diyafram olarak çalışmaları durumunda
$(\Delta_i^{(X)})_{ort} = 1/2\ [(\Delta_i^{(X)})_{max} + (\Delta_i^{(X)})_{min}]$
Burulma düzensizliği katsayısı: $\eta_{bi} = (\Delta_i^{(X)})_{max} / (\Delta_i^{(X)})_{ort}$
Burulma düzensizliği durumu: $\eta_{bi} > 1.2$

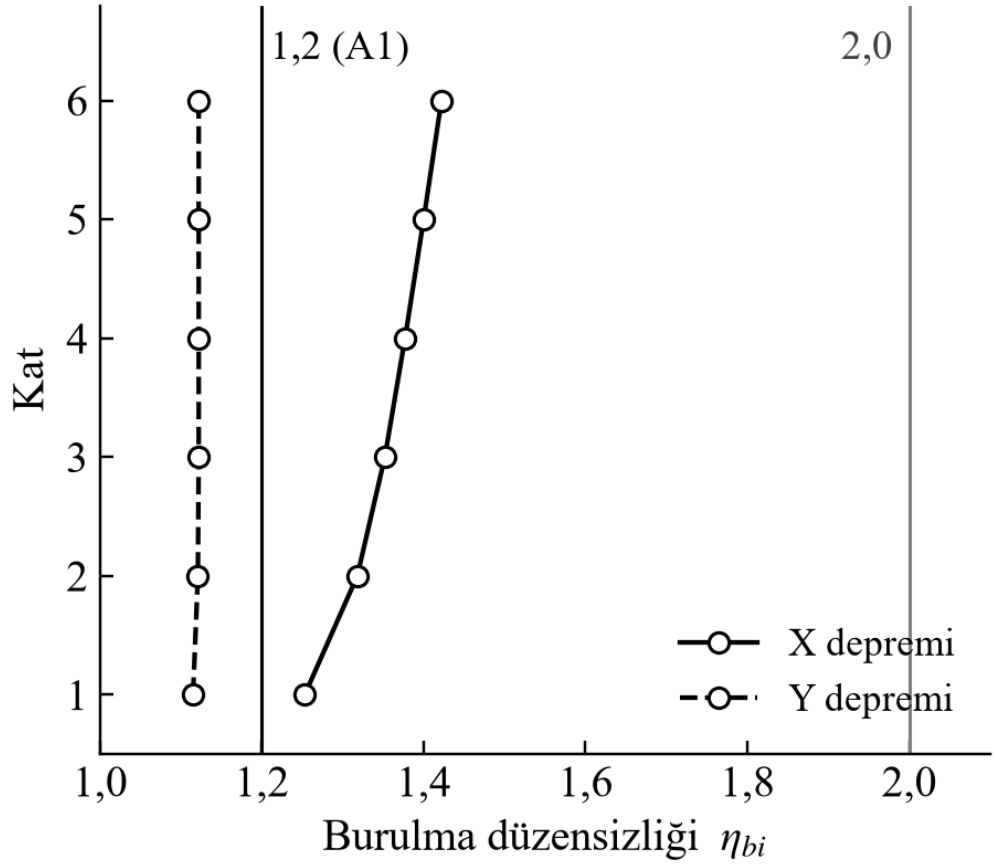
Kat	η_{bi} X	η_{bi} Y	η_{ki} X	η_{ki} Y
ST06	**1,42**	1,12	0,95	0,98
ST05	**1,40**	1,12	1,06	1,04
ST04	**1,38**	1,12	1,08	1,13
ST03	**1,35**	1,12	1,25	1,31
ST02	**1,32**	1,12	1,87	**2,003**
ST01	**1,25**	1,12	0,54	0,50

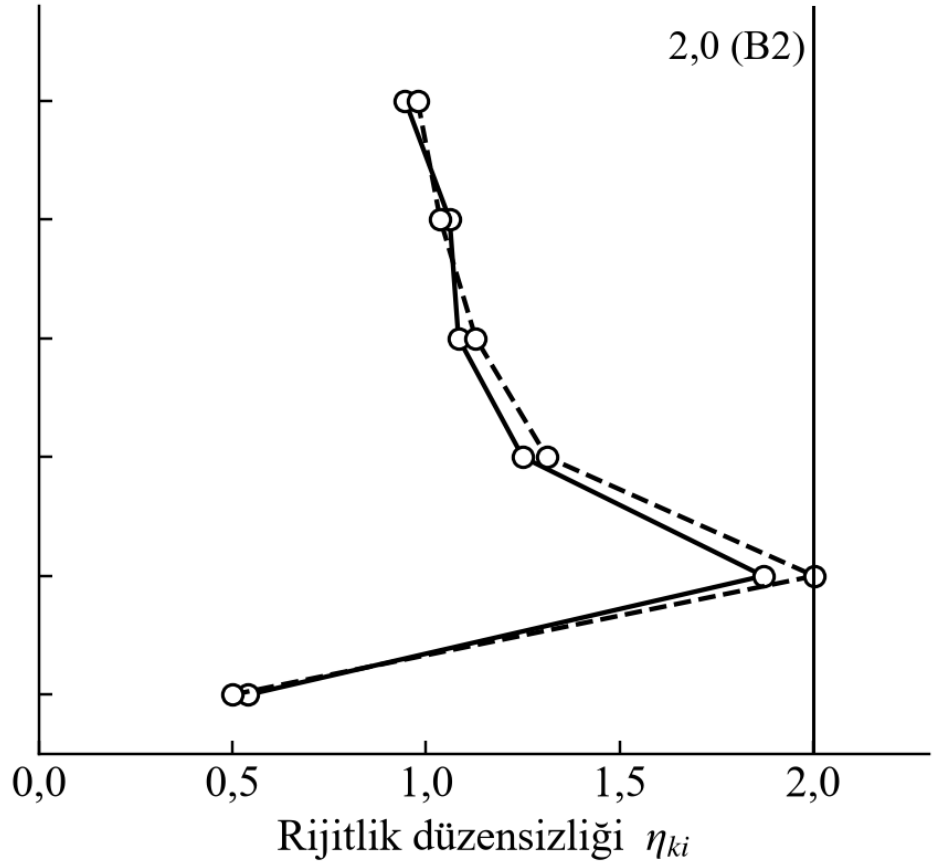
A1: X'te $\eta_{bi,max}$ = 1,42 > 1,2 → A1 var; Y'de 1,12 → yok.

B2: ST02'de η_{ki} X 1,87; Y 2,003 > 2,0 → Y'de B2 var (1. kat ötelemesi taban ankastreliği nedeniyle küçük).

DTS = 1, BYS = 5: ilk satır (B2) sağlanmıyor; "diğer tüm binalar" satırı (BYS ≥ 5) sağlanır → EDY uygulanabilir.

Düzensizlik katsayıları: kat boyunca





η_{bi}: X'te yukarı doğru artıyor (1,25 → 1,42); Y'de sabit 1,12, yalnız ±%5 ek dışmerkezlikten.

η_{ki} tepe değerini 2. katta alıyor (Y 2,003): 1. kat taban ankastreliği nedeniyle az ötelenir.

Hakim Doğal Titreşim Periyodu – TBDY 4.7.3

Kat	m_i (t)	F_{fi} (kN)	d_{fi}^X (mm)	d_{fi}^Y (mm)
ST06	967,6	26,66	0,0696	0,0722
ST05	1064,9	24,45	0,0567	0,0576
ST04	1064,9	19,56	0,0429	0,0425
ST03	1064,9	14,67	0,0290	0,0279
ST02	1064,9	9,78	0,0161	0,0149
ST01	1064,9	4,89	0,0056	0,0050

$T_p = 2\pi\,[\,\Sigma\, m_i\, d_{fi}^2 / \Sigma\, F_{fi}\, d_{fi}\,]^{1/2}$ (Denk. 4.26), ΣF_{fi} = 100 kN

X: $\Sigma m\, d^2 = 1{,}127\cdot10^{-5}$ t·m², $\Sigma F\, d = 4{,}690\cdot10^{-3}$ kN·m → T_p = 0,308 s

Y: $\Sigma m\, d^2 = 1{,}159\cdot10^{-5}$ t·m², $\Sigma F\, d = 4{,}744\cdot10^{-3}$ kN·m → T_p = 0,311 s

F_{fi} Denk. (4.23) dağılımıyla; d_{fi} kütle merkezinin yerdeğiştirmesi.

$$T_p^{(X)} = 2\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} m_i\, d_{fi}^{(X)2}}{\sum_{i=1}^{N} F_{fi}^{(X)} d_{fi}^{(X)}} \right)^{1/2}$$

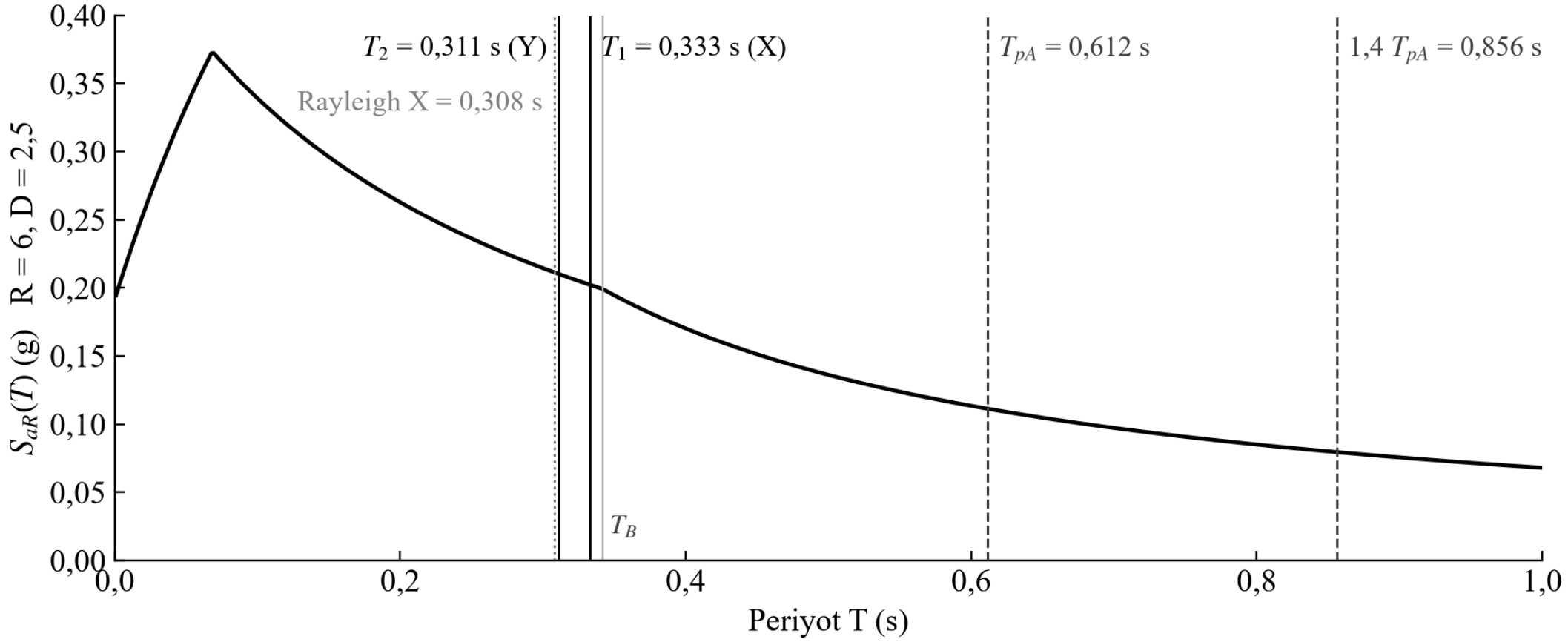
Yöntem	X (s)	Y (s)
Ampirik, C_t = 0,07 (4.7.3.4a)	0,612	0,612
Üst sınır 1,4 T_{pA} (C_t = 0,07)	0,856	0,856
Rayleigh (Denk. 4.26)	0,308	0,311
ETABS modal (mod 1 / mod 2)	0,333	0,311
Hesapta kullanılan T_p	**0,333**	**0,311**

Modal analiz "daha kesin hesap" (4.7.3.1) → T_p = modal periyot; Rayleigh değeri bilgi amaçlı (≤ 1,4 T_{pA}).

X'te mod 1 ve mod 3 burulmayla bağlı (U_X %42,7 + %30,0); Rayleigh periyodu ikisinin arasında kalır.

$T_p < T_B$ = 0,342 s → $S_{ae} = S_{DS}$, R_a periyotla değişir.

Hakim periyot ve azaltılmış spektrum



Modal periyotlar T_B = 0,342 s'nin hemen altında: $S_{ae} = S_{DS}$, R_a periyotla değişir.
Rayleigh periyodu (0,308 s) bilgi amaçlı; 1,4 T_{pA} = 0,856 s sınırı etkin değil.

Kat Kütleleri – TBDY 4.5.9, Denk. (4.20)

Kat	Döşeme	Kiriş	½ kolon + perde	$G_{yapı}$	Kaplama + duvar	n·Q	w_i (kN)	m_i (t)	ETABS m_i
ST06	3825	1470	954	6249	2700	540	9489	967,61	967,61
ST05	3825	1470	1908	7203	2700	540	10443	1064,89	1064,89
ST04	3825	1470	1908	7203	2700	540	10443	1064,89	1064,89
ST03	3825	1470	1908	7203	2700	540	10443	1064,89	1064,89
ST02	3825	1470	1908	7203	2700	540	10443	1064,89	1064,89
ST01	3825	1470	1908	7203	2700	540	10443	1064,89	1064,89
Toplam							**61704**	**6292,06**	**6292,06**

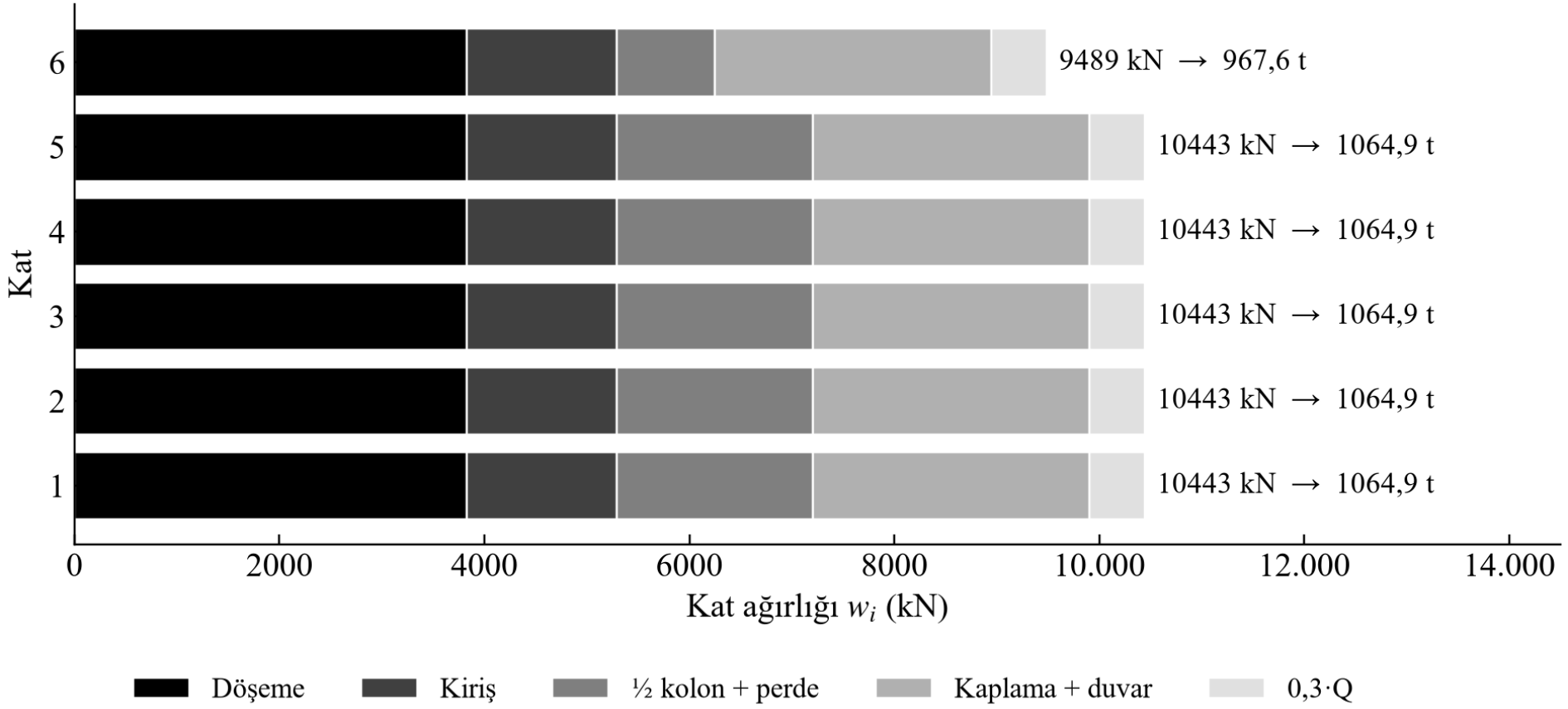
Döşeme 30×30×0,17×25 = 3825 kN; kolon 24×0,60×0,60×3×25 = 648 kN; perde 7×6,0×0,40×3×25 = 1260 kN; kiriş 40/50, 53 adet: 1470 kN (ETABS Material List)

Kat düzeyine: döşeme + kiriş + alttaki ve üstteki katın düşey elemanlarının yarısı (çatıda yalnız alttaki): ara kat 7203 kN, çatı 6249 kN

Kaplama 1,5 + duvar 1,5 = 3,0 kN/m² → 2700 kN; hareketli q = 2,0 kN/m², n = 0,3 (Tablo 4.3) → 540 kN

$w_i = G_i + n\,Q_i$, $m_i = w_i / g$ ($g = 9{,}80665$ m/s²); $m_t = \Sigma\, m_i = 6292{,}06$ t

Kat ağırlıklarının bileşenleri



Ara katta 10443 kN'un %69'u taşıyıcı sistemin öz ağırlığı; döşeme tek başına %37.

Çatıda düşey elemanların yalnız alt yarısı kat düzeyine gelir: 9489 kN.

Spektral İvme ve EDY Ölçekleme – TBDY 4.8.4

DD-2, ZC: S_{DS} = 1,195, S_{D1} = 0,409, T_A = 0,068 s, T_B = 0,342 s A13: R = 6, D = 2,5, I = 1, m_t = 6292,1 t

Büyüklük	**X**	**Y**
T_p (s)	0,333	0,311
$S_{ae}(T_p)$ (g)	1,195	1,195
$R_a = D + (R/I - D)\, T_p/T_B$	5,908	5,683
$S_{aR} = S_{ae}/R_a$ (g)	0,2023	0,2103
$V_{tE} = m_t\, S_{aR}\, g$ (kN)	12479	12974
$0{,}04\, m_t\, I\, S_{DS}\, g$ (kN)	2950	2950
$\Delta F_{NE} = 0{,}0075\, N\, V_{tE}$ (kN)	562	584
V_{tx} mod birleştirme, ETABS (kN)	8690	10739
V_{tx} / V_{tE}	0,70	0,83
γ_E (4.8.4.1)	0,90	0,90
$\beta_{tE} = \gamma_E\, V_{tE} / V_{tx} \geq 1$	**1,29**	**1,09**

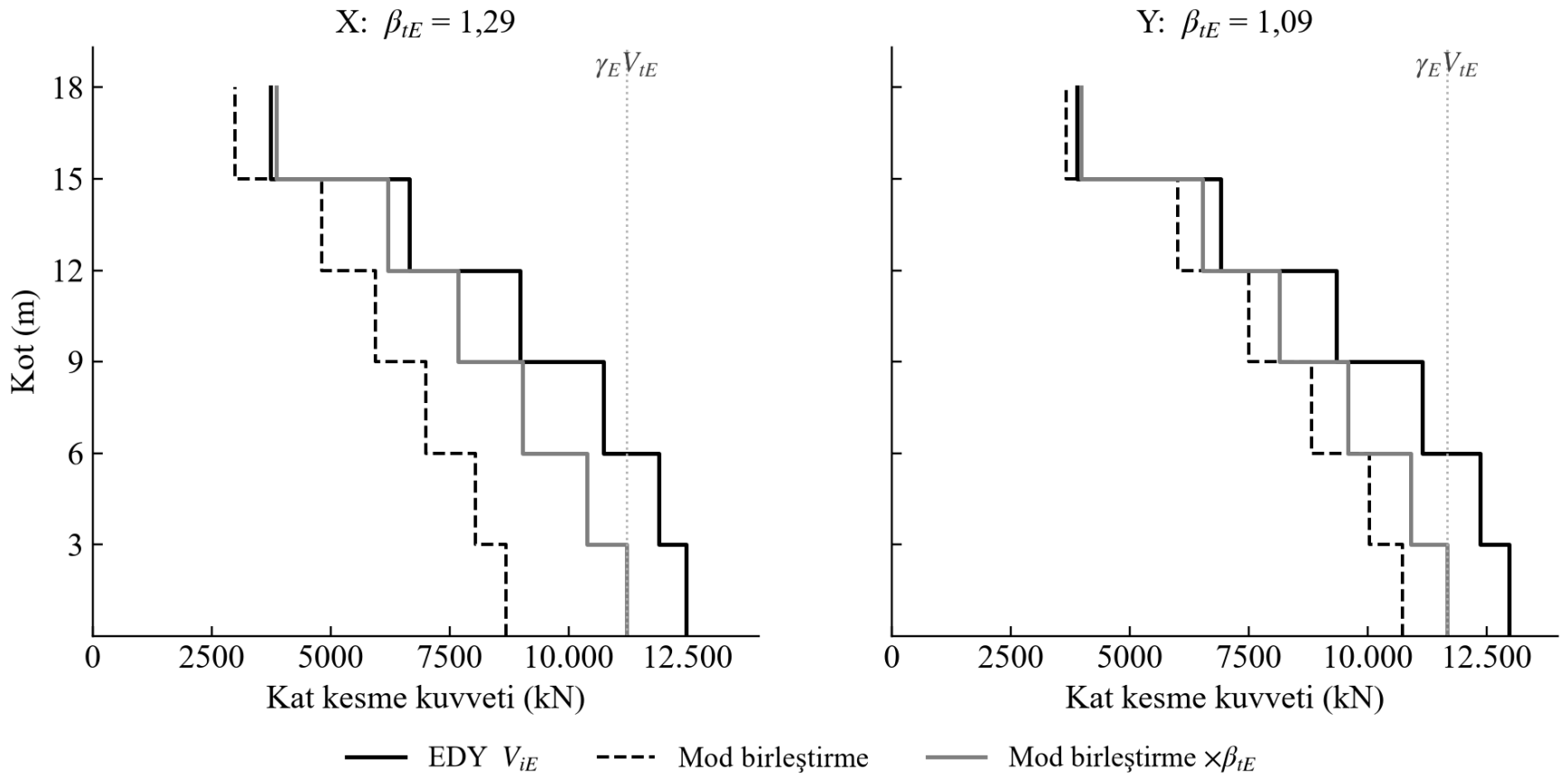
Mod	**T_n (s)**	**R_a**	**S_{aR} (g)**	**m^*_x/m_t**	**m^*_y/m_t**	**$V_{x,n}$ (kN)**	**$V_{y,n}$ (kN)**
1	0,333	5,91	0,2023	0,427	0,000	5334	0
2	0,311	5,68	0,2103	0,000	0,704	0	9141
3	0,267	5,23	0,2284	0,300	0,000	4226	0
4	0,079	3,31	0,3612	0,171	0,000	3817	0
5	0,070	3,22	0,3715	0,000	0,209	0	4793
6	0,063	3,14	0,3620	0,018	0,000	404	0
7	0,038	2,89	0,3033	0,052	0,000	975	0
8	0,033	2,84	0,2903	0,000	0,057	0	1025
9	0,029	2,80	0,2796	0,002	0,000	29	0

$V_{tE} > 0{,}04\, m_t\, I\, S_{DS}\, g$ → en küçük taban kesmesi koşulu belirleyici değil.

A1 ve B2 düzensizlikleri var → γ_E = 0,90 (yoksa 0,80).

Modal iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler β_{tE} ile çarpılır: X 1,29, Y 1,09

Kat kesmeleri: EDY ve mod birleştirme



β_{tE} ile taban kesmesi γ_E V_{tE}'ye çıkar: X 11231 kN, Y 11676 kN.

Büyütülmüş modal kesme en üst katta EDY'yi geçiyor (yüksek modlar); alt katlarda EDY büyük.

Göreli Kat Ötelemesi – TBDY 4.9.1

Δ_i: mod birleştirme (CQC) + ±%5 ek dışmerkezlik, kat içindeki en büyük değer (köşe aksı), β_{tE} ile büyütülmüş

$\delta_i = (R/I)\,\Delta_i$, $\lambda\,\delta_{i,max} / h_i \le 0{,}008\,\kappa$ (Denk. 4.34a, $\kappa = 1$) $\lambda = S_{ae}^{DD\text{-}3}(T_p) / S_{ae}^{DD\text{-}2}(T_p)$: X 0,481 / 1,195 = 0,403, Y 0,513 / 1,195 = 0,429

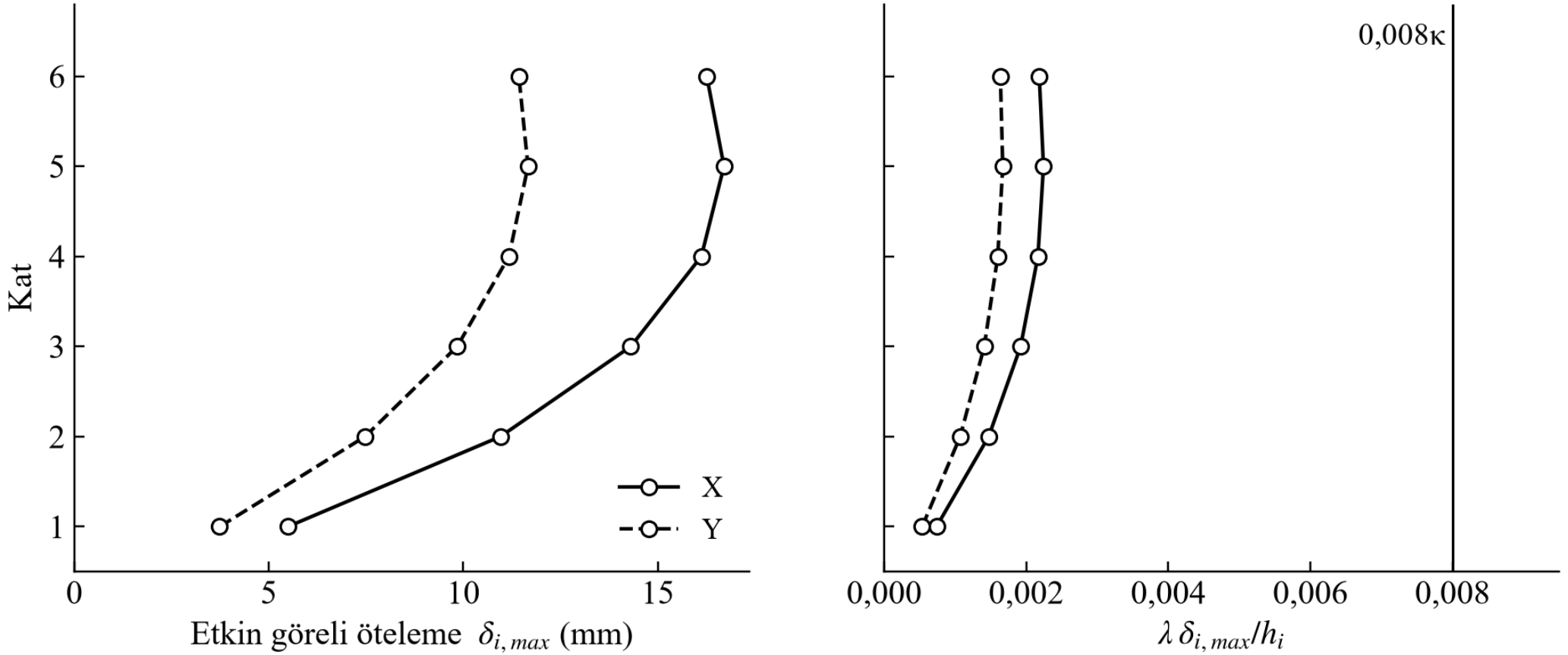
Kat	h_i (m)	Δ_X (mm)	δ_X (mm)	$\lambda\delta_X/h$	Δ_Y (mm)	δ_Y (mm)	$\lambda\delta_Y/h$
ST06	3,0	2,71	16,26	0,0022	1,90	11,43	0,0016
ST05	3,0	2,78	16,70	0,0022	1,94	11,66	0,0017
ST04	3,0	2,69	16,12	0,0022	1,86	11,17	0,0016
ST03	3,0	2,38	14,31	0,0019	1,64	9,84	0,0014
ST02	3,0	1,83	10,96	0,0015	1,25	7,48	0,0011
ST01	3,0	0,91	5,49	0,0007	0,62	3,74	0,0005

En büyük: X 0,0022, Y 0,0017 ≤ 0,008 → koşul her katta sağlanır.

β_{tE}: X 1,29, Y 1,09; R = 6; T_p = 0,333 / 0,311 s (DD-3: T_B = 0,312 s → X'te $S_{ae} = S_{D1}/T_p$, Y'de $S_{ae} = S_{DS}$)

Δ_i: ETABS Ex / Ey (R = 6, %5 dışmerkezlik) göreli öteleme çıktısı.

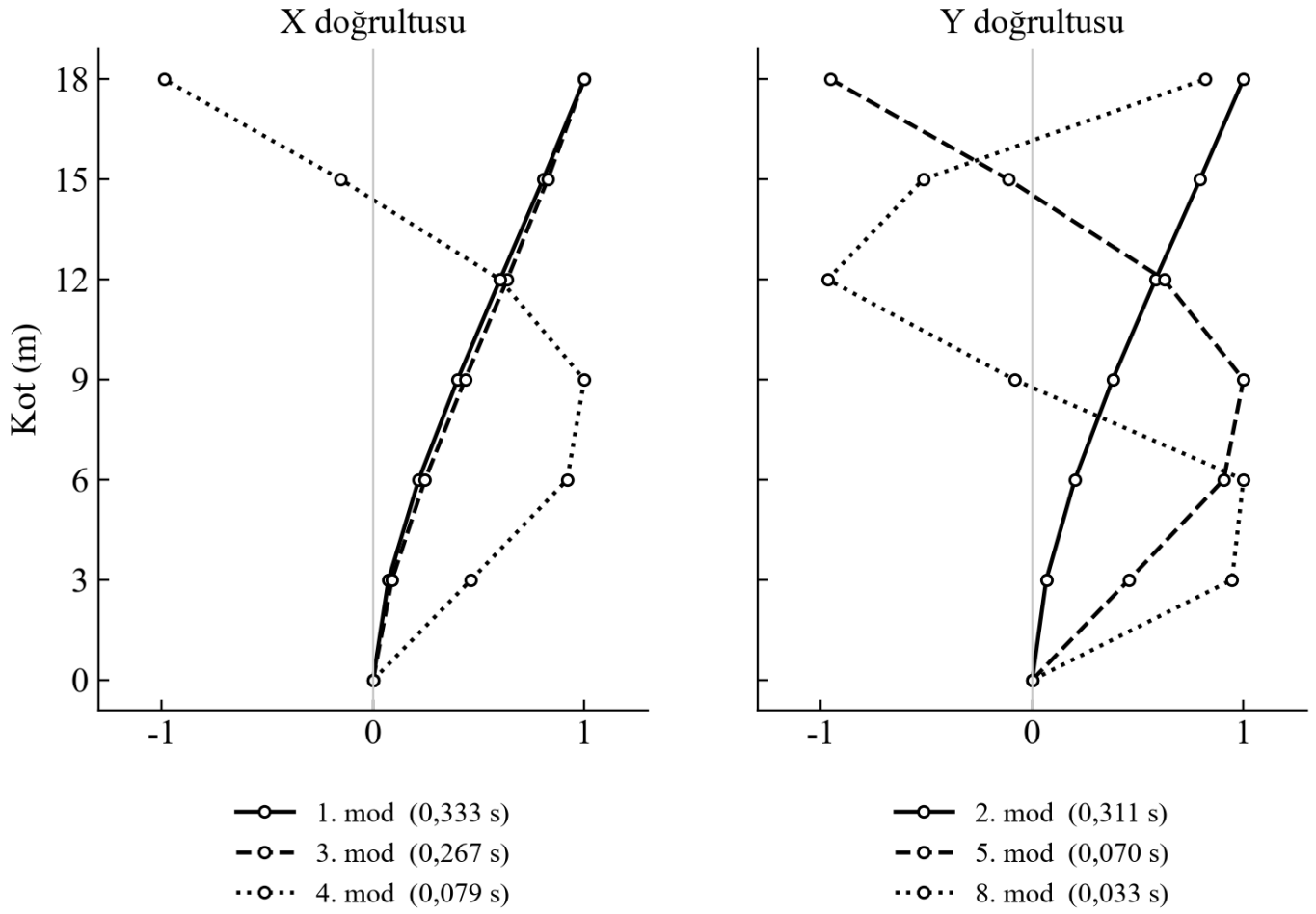
Göreli kat ötelemesi: kat boyunca



En büyük öteleme 4. ve 5. katlarda: perdeler konsol gibi çalışıyor.

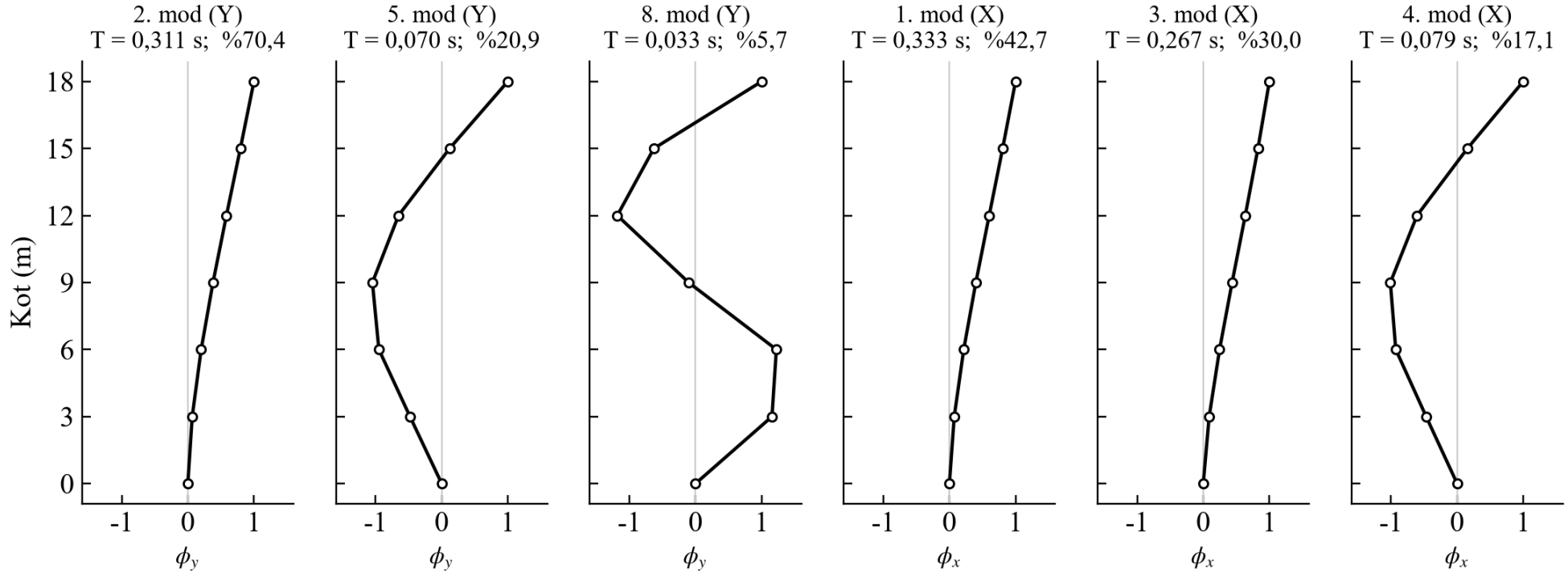
λδ/h en çok 0,0022 (X): sınırın %28'i; öteleme bu binada belirleyici değil.

Modal sonuçlar



	X	Y	Burulma
Hakim mod	1	2	3
T (s)	0,333	0,311	0,267
m_{eff}/m_t	%42,7	%70,4	%42,0 (dönme)
%95 modu	7	8	
YM	8		

6 katlı örnek binanın modları



- Y modları saf öteleme: 2, 5 ve 8. modlar; sıfır noktası sayısı 0, 1, 2
- X modları burulmayla bağlaşık: X kütlesi **1. ve 3. modlara bölünmüş**

6 katlı örnek binada katkı çarpanı: adım adım

Kat	m (t)	m_θ (t·m²)	φ_x (m)	φ_θ (rad)	$m\,\varphi_x$	$m_\theta\,\varphi_\theta$	$m\,\varphi_x^2$	$m_\theta\,\varphi_\theta^2$
1	1064,9	178942	−0,001186	−0,0000630	−1,263	−11,27	0,00150	0,00071
2	1064,9	178942	−0,003507	−0,0002020	−3,735	−36,15	0,01310	0,00730
3	1064,9	178942	−0,006479	−0,0003900	−6,899	−69,79	0,04470	0,02722
4	1064,9	178942	−0,009750	−0,0006060	−10,383	−108,44	0,10123	0,06571
5	1064,9	178942	−0,013047	−0,0008310	−13,894	−148,70	0,18127	0,12357
6	967,6	162127	−0,016202	−0,0010530	−15,677	−170,72	0,25400	0,17977
Σ	6292,1	1056835			−51,850	−545,07	0,59580	0,40428

$L_x = \Sigma\, m\,\varphi_x = -51{,}850$; $L_\theta = \Sigma\, m_\theta\,\varphi_\theta = -545{,}07$

$M_n = \Sigma\, m\,\varphi_x^2 + \Sigma\, m_\theta\,\varphi_\theta^2 = 0{,}5958 + 0{,}4043 = 1{,}0001$

$\Gamma_x = L_x / M_n = \mathbf{-51{,}85}$

$m_{tx} = L_x^2 / M_n = 2688{,}3$ t → **%42,72** (ETABS %42,73)

Dönme: $L_\theta^2 / M_n / \Sigma\, m_\theta$ → **%28,11** (ETABS %28,14)

- Girdi: ETABS **kat kütleleri** ve **mod şekilleri** (kütle merkezi yerdeğiştirmeleri)
- 1. modda X ile dönme birlikte; $\varphi_y = 0$
- Y modlarında (2, 5, 8 …) yalnız φ_y; hesap aynı

Örnek bina: yeterli mod sayısı

$$\sum_{n=1}^{YM} m_{txn} \geq 0{,}95\, m_t \qquad \sum_{n=1}^{YM} m_{tyn} \geq 0{,}95\, m_t$$

- Her iki doğrultuda $\Sigma\, m_{txn} \geq 0{,}95\, m_t$ olana kadar mod alınır
- Katkısı **%3'ten büyük** bütün modlar ayrıca hesaba katılır
- İki doğrultu için bulunan **YM'nin büyüğü** üç boyutlu hesapta kullanılır

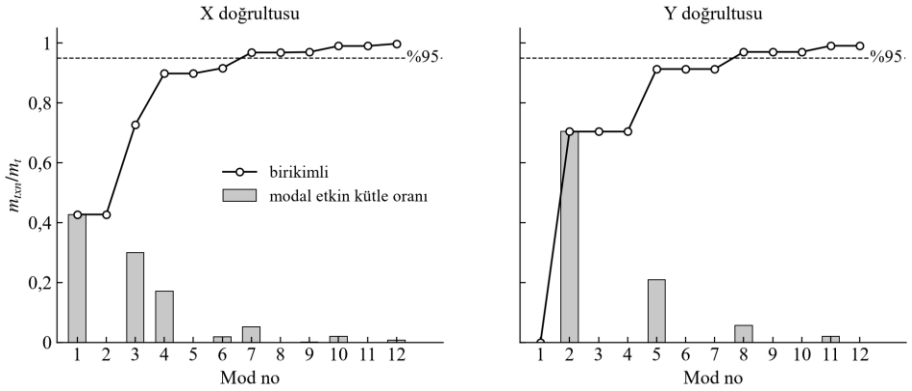
Mod	T (s)	X	Σ X	Y	Σ Y
1	0,333	%42,7	%42,7	–	%0,0
2	0,311	–	%42,7	%70,4	%70,4
3	0,267	%30,0	%72,7	–	%70,4
4	0,079	%17,1	%89,8	–	%70,4
5	0,070	–	%89,8	%20,9	%91,3
6	0,063	%1,8	%91,6	–	%91,3
7	**0,038**	**%5,2**	**%96,9**	**–**	**%91,3**
8	**0,033**	**–**	**%96,9**	**%5,7**	**%97,0**
9	0,029	%0,2	%97,0	–	%97,0

6 katlı örnek bina: X'te %95 → **7. mod**, Y'de %95 → **8. mod**
YM = **8** (18 modun 8'i); %3'ten büyük modlar (1, 2, 3, 4, 5, 7, 8) bu 8 modun içinde

6 katlı modelin (ST06) modal katılım tablosu

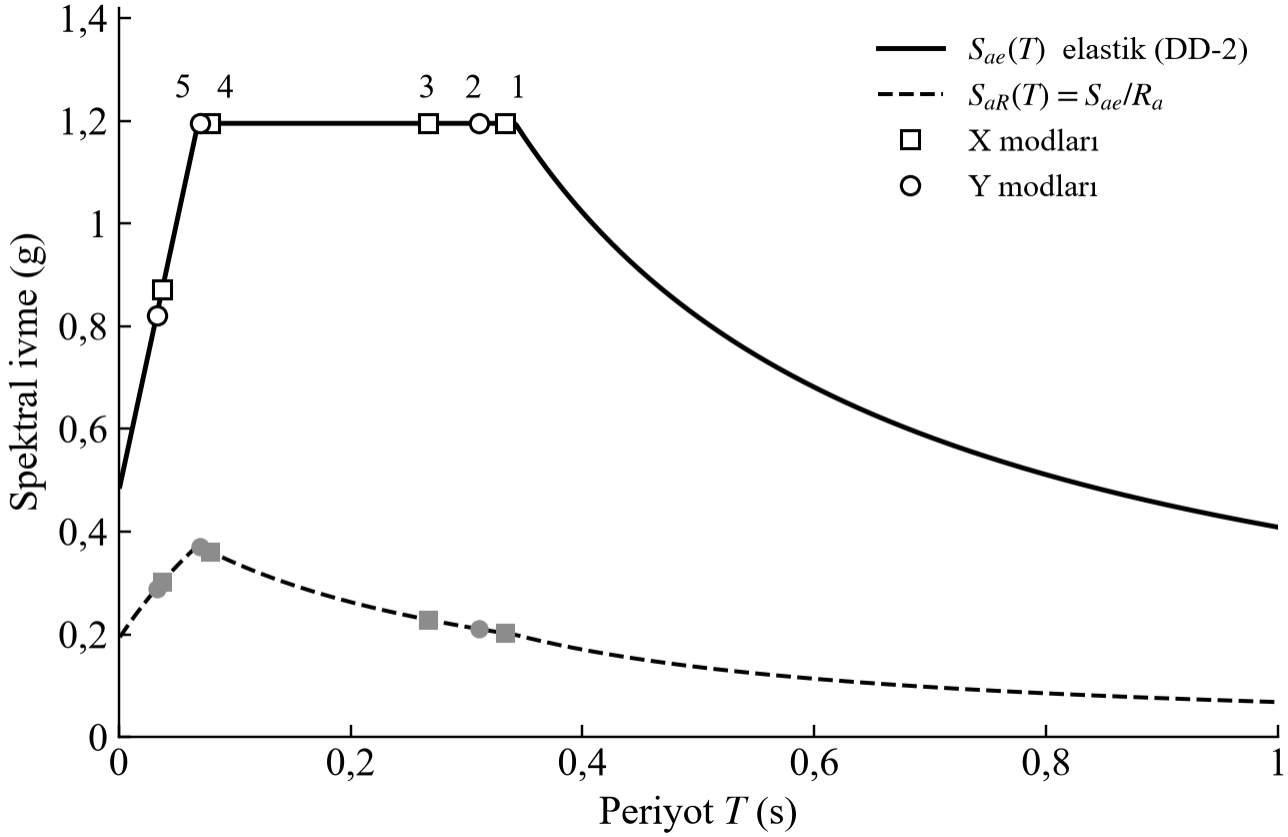
EK 4B.1

Mod	T (s)	X	Y	Dönme	Σ X	Σ Y
1	0,333	%42,7	%0,0	%28,1	%42,7	%0,0
2	0,311	%0,0	%70,4	%0,0	%42,7	%70,4
3	0,267	%30,0	%0,0	%42,0	%72,7	%70,4
4	0,079	%17,1	%0,0	%2,2	%89,8	%70,4
5	0,070	%0,0	%20,9	%0,0	%89,8	%91,3
6	0,063	%1,8	%0,0	%18,3	%91,6	%91,3
7	**0,038**	**%5,2**	**%0,0**	**%0,3**	**%96,9**	**%91,3**
8	**0,033**	**%0,0**	**%5,7**	**%0,0**	**%96,9**	**%97,0**
9	0,029	%0,2	%0,0	%5,9	%97,0	%97,0



- Y temiz öteleme; X kütlesi **1. ve 3. moda bölünmüş**
- %95 eşiği: X'te 7., Y'de 8. mod
- 4. ve 5. modlar %17–21: perdeli binada **yüksek modlar önemli**

Her mod spektrumdan kendi ivmesini okur



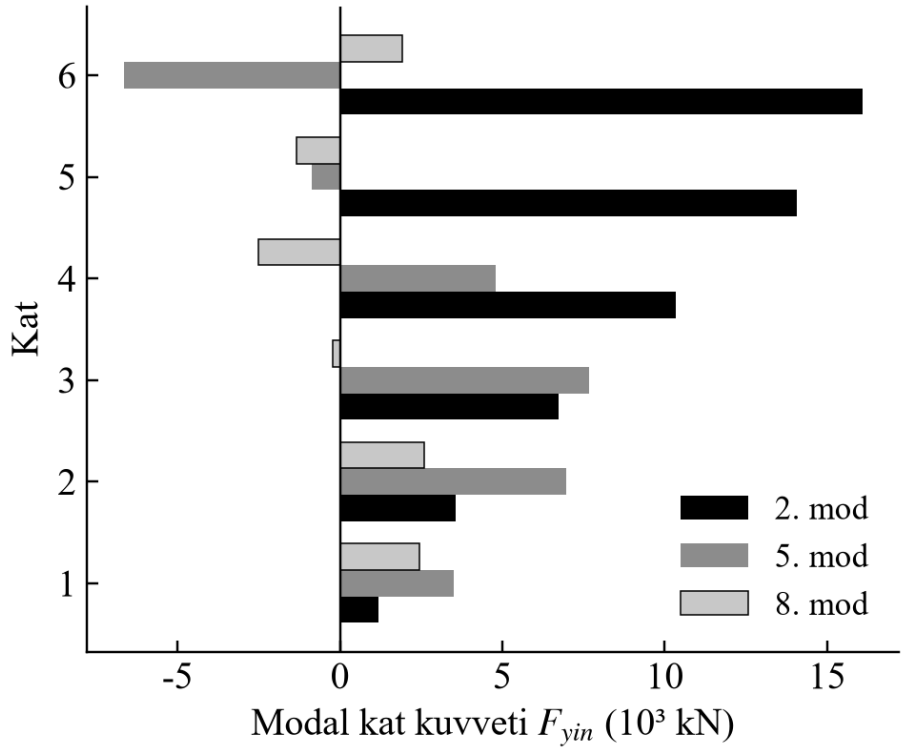
$$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)}$$

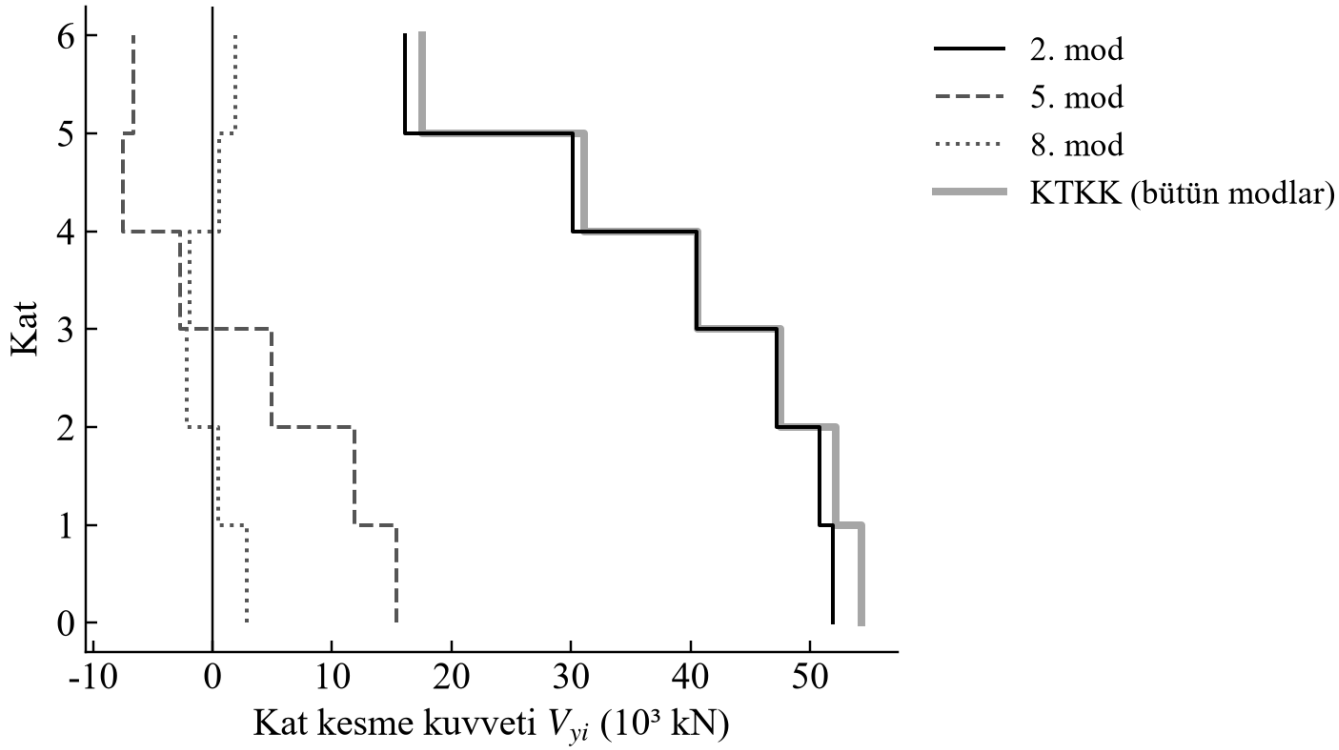
Mod	T_n (s)	S_{ae} (g)	R_a	S_{aR} (g)
1	0,333	1,195	5,91	0,202
2	0,311	1,195	5,68	0,210
3	0,267	1,195	5,23	0,228
4	0,079	1,195	3,31	0,361
5	0,070	1,195	3,22	0,372
7	0,038	0,876	2,89	0,303
8	0,033	0,824	2,84	0,290

1–5. modlar platoda: elastik ivme aynı. Azaltılmış spektrumda yüksek modların ivmesi yaklaşık 1,8 kat büyük

Modal yerdeğiştirmeler ve kat kuvvetleri

$$u_{in} = \Gamma_n \, \phi_{in} \, \frac{S_{ae}(T_n)\, g}{\omega_n^2} \qquad f_{in} = m_i \, \phi_{in} \, \Gamma_n \, S_{ae}(T_n)\, g$$





6 katlı örnek bina: her modun katkısı

X depremi: mod	m_{tx}/m_t	$V_{x,taban}$ (kN)	$u_{x,tepe}$ (mm)	θ_{tepe} (10^{-3} rad)
1	%42,7	31512	27,71	1,801
3	%30,0	22110	11,90	1,161
4	%17,1	12624	0,96	0,023
7	%5,2	2806	0,07	0,001
KTKK (18 mod)		**40641**	**30,17**	**2,143**

Y depremi: mod	m_{ty}/m_t	$V_{y,taban}$ (kN)	$u_{y,tepe}$ (mm)
2	%70,4	51945	40,64
5	%20,9	15417	0,86
8	%5,7	2899	0,05
KTKK (18 mod)		**54270**	**40,65**

Taban kesmesi: katkı ≈ **etkin kütle** payı (modlar platoda)

Y'de 5. mod: taban kesmesi 15417 kN (KTKK'nın %28), tepe yerdeğiştirmesi 0,86 mm (%2)

Yerdeğiştirme ≈ 1. öteleme modu; kesme ≈ birçok mod

Modların birleştirilmesi: KTKK ile TKB

$$u_{\mathrm{KTKK}} = \sqrt{\sum_n u_n^2} \qquad u_{\mathrm{TKB}} = \sqrt{\sum_m \sum_n u_m \, \rho_{mn} \, u_n}$$

Büyüklük	KTKK	TKB	TKB / KTKK
X depremi: tepe u_x (mm)	30,17	31,93	+%5,8
X depremi: tepe θ (10^{-3} rad)	2,143	1,974	−%7,9
X depremi: taban V_x (kN)	40641	43548	+%7,2
X depremi: taban burulma momenti (kN·m)	480857	439102	−%8,7
Y depremi: tepe u_y (mm)	40,65	40,65	%0,0
Y depremi: taban V_y (kN)	54270	54334	+%0,1

X: 1. ve 3. mod, T oranı 0,80, **ρ = 0,17**

Y: periyotlar uzak → fark yok

Rayleigh periyodu, Y doğrultusu: adım adım

Denk. (4.26)

Kat	H_i (m)	m_i (t)	F_{fi} (kN)	d_{fi} (mm)	$m_i\, d_{fi}^2$ (t·mm²)	$F_{fi}\, d_{fi}$ (kN·mm)
1	3,0	1064,9	4,89	0,0050	0,027	0,024
2	6,0	1064,9	9,78	0,0149	0,238	0,146
3	9,0	1064,9	14,67	0,0279	0,831	0,410
4	12,0	1064,9	19,56	0,0425	1,926	0,832
5	15,0	1064,9	24,45	0,0576	3,529	1,407
6	18,0	967,6	26,66	0,0722	5,043	1,925
Σ		6292,1	100,00		11,594	4,744

$T_p = 2\pi \sqrt{(\ 11{,}594 / 4{,}744 \times 10^{-3}\ )} =$ **0,311 s** $\quad (\text{t·mm}^2/(\text{kN·mm}) = 10^{-3}\ \text{s}^2)$

$T_{pA} = 0{,}07 \times 18{,}0^{3/4} = 0{,}612$ s; $1{,}4\, T_{pA} = 0{,}856$ s > 0,311 s → Rayleigh: $T_p(Y) = 0{,}311$ s, $T_p(X) = 0{,}308$ s (bilgi); hesapta modal periyot: X 0,333 s, Y 0,311 s

Örnek bina: toplam eşdeğer deprem yükü V_{tE}

$$V_{tE} = m_t \, S_{aR}(T_p) \, g \;\geq\; 0{,}04 \, m_t \, I \, S_{DS} \, g$$

	X	Y
T_p (s)	0,333	0,311
$S_{ae}(T_p) = S_{DS}$ (g)	1,1949	1,1949
$R_a(T_p) = D + (R - D)\, T_p/T_B$	5,908	5,683
$S_{aR}(T_p)$ (g)	0,2023	0,2103
$m_t \, S_{aR} \, g$ (kN)	12479	12974
$0{,}04 \, m_t \, I \, S_{DS} \, g$ (kN)	2950	2950
V_{tE} (kN)	**12479**	**12974**
V_{tE} / W	%20,2	%21,0

12974 kN

V_{tE}, Y doğrultusu

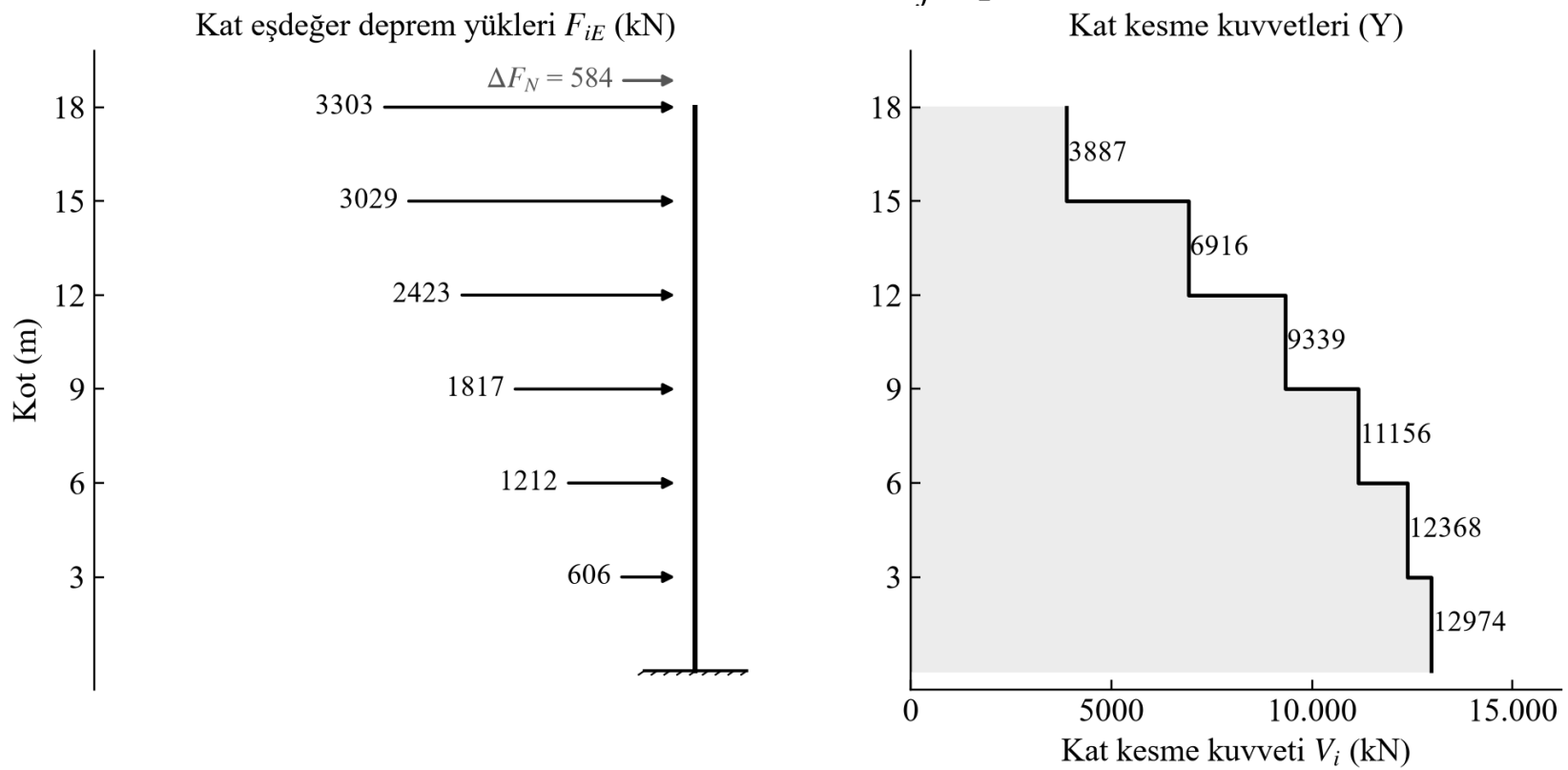
%21,0

$V_{tE} / W \approx S_{aR}(T_p)$

Örnek bina: katlara dağıtım ve tepe kuvveti

$$\Delta F_{NE} = 0{,}0075\, N\, V_{tE}$$

$$F_{iE} = (V_{tE} - \Delta F_{NE}) \frac{m_i H_i}{\sum_{j=1}^{N} m_j H_j}$$



Kat yükleri tablosu, Y doğrultusu

Denk. (4.23), (4.25)

Kat	w_i (kN)	H_i (m)	m_iH_i (t·m)	F_{iE} (kN)	V_i (kN)	$F_{iE}H_i$ (kNm)
6	9489	18,0	17417	3302,8 + 583,8	3887	69959
5	10443	15,0	15973	3029,0	6916	45435
4	10443	12,0	12779	2423,2	9339	29079
3	10443	9,0	9584	1817,4	11156	16357
2	10443	6,0	6389	1211,6	12368	7270
1	10443	3,0	3195	605,8	12974	1817
Σ	61704		65337	12974		169917

$\Delta F_{NE} = 0{,}0075 \times 6 \times 12974 = 583{,}8$ kN; $F_{iE} = (12974 - 583{,}8) \times m_iH_i / 65337$

Devrilme momenti $M_o = \Sigma F_{iE} H_i = 169917$ kNm

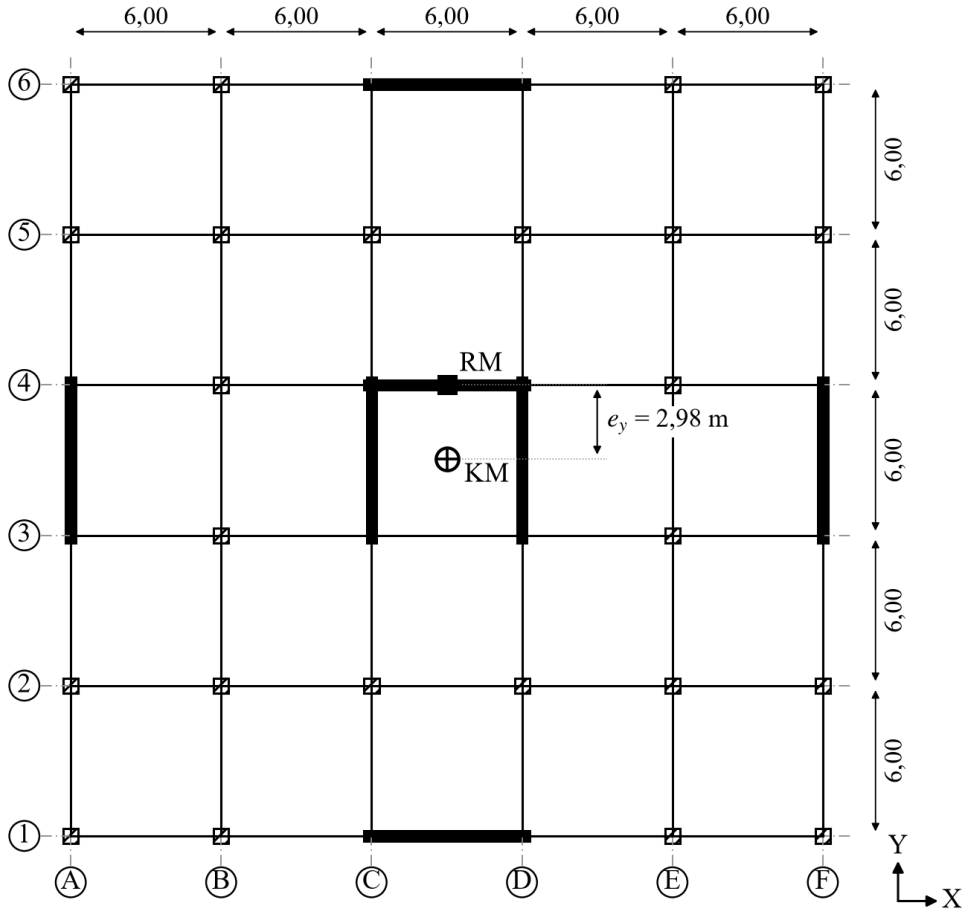
Örnek bina: ±%5 ek dışmerkezlik

Madde 4.5.10, Denk. (4.17)

$$M_{ib} = F_{iE}\, e \qquad e = \pm 0{,}05\, L$$

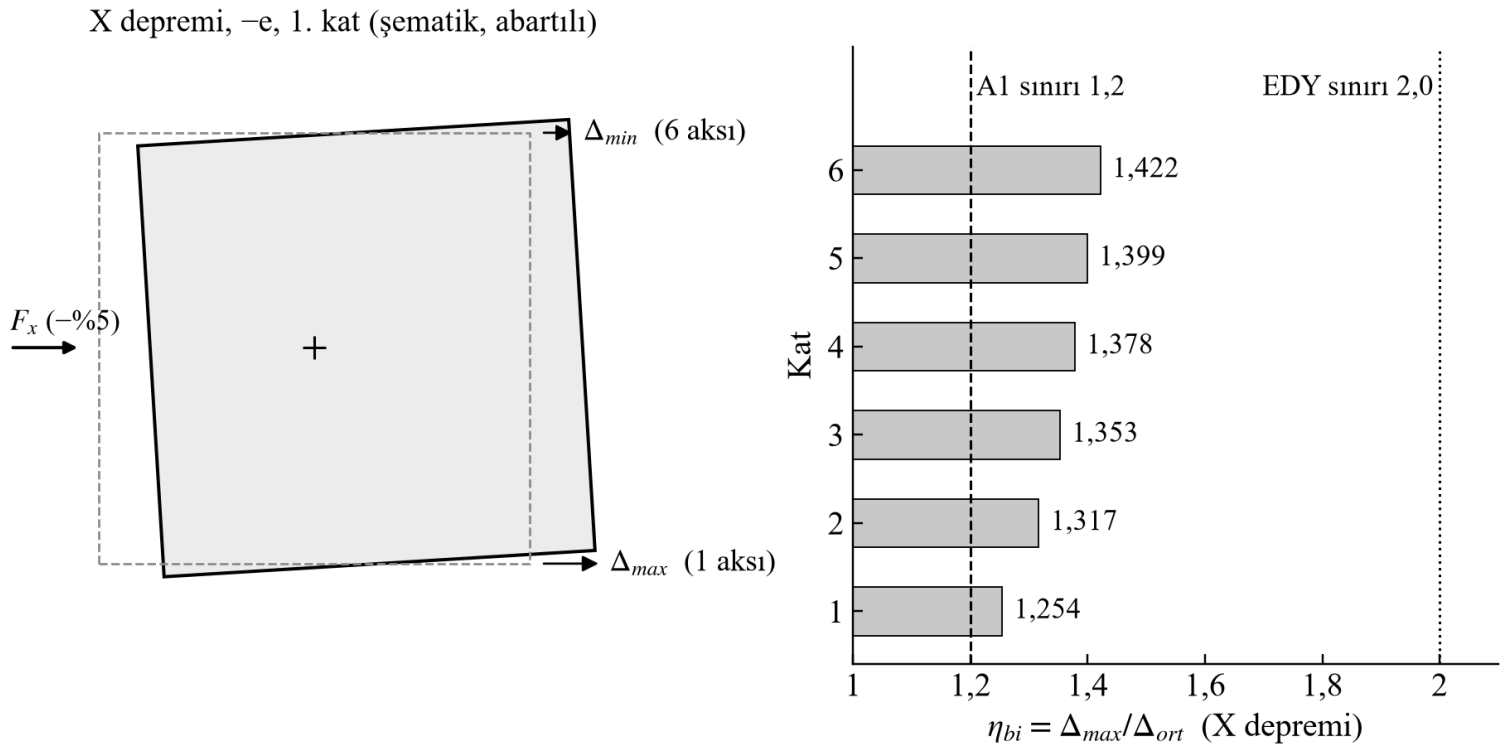
Deprem doğrultusu	Dik boyut	e = 0,05 L	Durumlar
X	L_y = 30 m	1,50 m	+e, −e
Y	L_x = 30 m	1,50 m	+e, −e

- Kuvveti kaydırmak ile $M_{ib} = F_{iE}$ e eklemek eşdeğerdir
- Her doğrultuda iki çözüm: **EDY'de dört deprem yüklemesi**
- Burulma düzensizliği bu yüklemelerle hesaplanır



Örnek bina: burulma düzensizliği η_{bi}

$$\eta_{bi} = \frac{(\Delta_i)_{max}}{(\Delta_i)_{ort}} \qquad (\Delta_i)_{ort} = \frac{(\Delta_i)_{max} + (\Delta_i)_{min}}{2}$$



1. kat, X, −e

Δ_{max} = 0,903 mm

Δ_{min} = 0,539 mm

η_{b1} = 1,253 > 1,2

max η = 1,422 (6. kat)

→ **A1 düzensizliği var**

Y: max η = 1,122

Örnek bina: burulma büyütme katsayısı D_{bi}

Madde 4.7.4, Denk. (4.29)

$$D_{bi} = \left(\frac{\eta_{bi}}{1{,}2}\right)^2 \qquad (1{,}2 < \eta_{bi} \leq 2{,}0)$$

Kat	Δ_{max} (mm)	Δ_{min} (mm)	η_{bi}	D_{bi}	e (m)	D_{bi} e (m)
6	2,455	0,999	1,422	1,404	1,50	2,106
5	2,556	1,096	1,400	1,361	1,50	2,042
4	2,517	1,137	1,377	1,317	1,50	1,975
3	2,280	1,092	1,352	1,269	1,50	1,904
2	1,778	0,920	1,318	1,206	1,50	1,810
1	0,903	0,539	1,253	1,090	1,50	1,635

- Büyütme **her iki** deprem doğrultusu için
- Büyütülmüş dışmerkezlikle hesap tekrarlanır
- Kalıcı çare: **rijitlik merkezini kütle merkezine yaklaştırmak** (örnekte 3 aksına X perdesi)

Örnek bina: yumuşak kat (B2) kontrolü

Tablo 3.6 (B2)

Kat	$(\Delta/h)_{ort}$, X	η_{ki}, X	$(\Delta/h)_{ort}$, Y	η_{ki}, Y
6	0,000576	0,946	0,000657	0,978
5	0,000609	1,061	0,000671	1,037
4	0,000609	1,084	0,000648	1,128
3	0,000562	1,250	0,000574	1,312
2	**0,000450**	**1,871**	**0,000437**	**2,003**
1	0,000240	0,540	0,000218	0,499

- En büyük: 2. kat / 1. kat = 2,003 (Y) > 2,0: B2 var, tam sınırda
- Sebep zayıf kat değil: perde tabanda ankastre, 1. kat ötelemesi doğal olarak küçük
- Katsayıyı mekanik geçmeyin; **mekanizmayı yorumlayın**

Örnek bina: modal taban kesme kuvvetleri

EK 4B.2.5

Mod	**T_n (s)**	**R_a**	**S_{aR} (g)**	**V_{txn} (kN)**	**V_{tyn} (kN)**
1	0,333	5,91	0,2023	5334	–
2	0,311	5,68	0,2103	–	9141
3	0,267	5,23	0,2284	4226	–
4	0,079	3,31	0,3612	3817	–
5	0,070	3,22	0,3715	–	4793
6	0,063	3,14	0,3620	404	–
7	0,038	2,89	0,3033	975	–
8	0,033	2,84	0,2903	–	1025
KTKK				7882	10378
TKB				**8414**	**10402**

- $T < T_B$ olan modlarda R_a küçülür, S_{aR} büyür
- X'te 4. mod, 1. modun %72'si kadar
- X'te TKB, KTKK'dan %6,8 büyük (1. ve 3. mod)

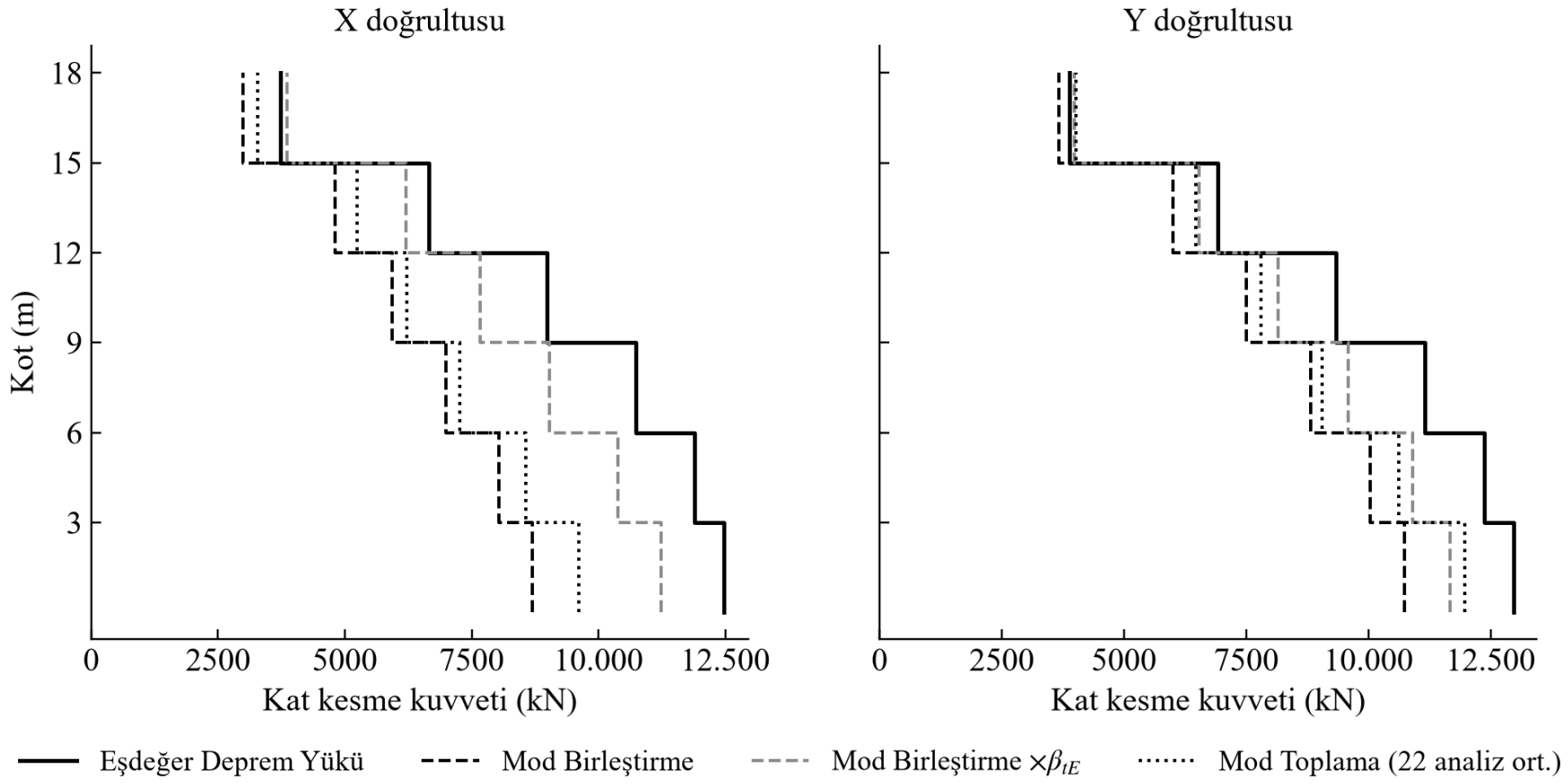
Örnek bina: V_{tE}'ye göre büyütme β_{tE}

$$\beta_{tE} = \frac{\gamma_E \, V_{tE}}{V_{tx}} \geq 1$$

	X	Y
V_{tE} (EDY) (kN)	12479	12974
V_{tx} (ETABS, TKB) (kN)	8690	10739
V_{tx} / V_{tE}	0,696	0,828
γ_E (A1, B2 var)	0,90	0,90
β_{tE}	**1,292**	**1,087**

- γ_E = **0,90**: A1, B2 veya B3 düzensizliği varsa
- γ_E = **0,80**: Tablo 3.6'daki düzensizliklerin hiçbiri yoksa
- β_{tE} **bütün iç kuvvetlere ve yerdeğiştirmelere** uygulanır
- Bodrumlu binada yalnız üst bölüm için (4.8.4.2)
- Düzensizlik olmasaydı (γ_E = 0,80): X'te β = 1,15, Y'de büyütme gerekmezdi

Kat kesmeleri: EDY, Mod Birleştirme ve Mod Toplama



EDY her katta güvenli tarafta; modal sonuç β_{tE} ile büyütüldükten sonra EDY'nin yaklaşık %90'ı.

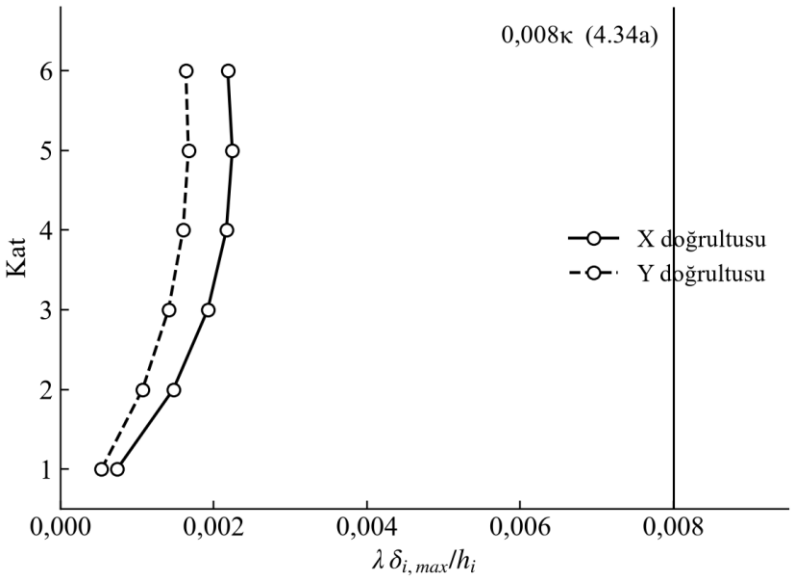
Örnek bina: göreli kat ötelemesi

Madde 4.9.1

$$\Delta_i = u_i - u_{i-1} \qquad \delta_i = \frac{R}{I}\Delta_i$$

$$\lambda \frac{\delta_{i,max}}{h_i} \le 0{,}008\,\kappa \qquad \lambda = \frac{S_{ae}^{DD3}(T_p)}{S_{ae}^{DD2}(T_p)}$$

Kat	h_i (m)	$\Delta_{i,max}$ (mm)	$\delta_{i,max}$ (mm)	$\lambda\,\delta_{i,max}/h_i$	Sınır 0,008κ
6	3,0	1,90	11,4	0,00164	0,008
5	3,0	1,94	11,7	0,00167	0,008
4	3,0	1,86	11,2	0,00160	0,008
3	3,0	1,64	9,8	0,00141	0,008
2	3,0	1,25	7,5	0,00107	0,008
1	3,0	0,62	3,7	0,00053	0,008



$\lambda_Y = 0{,}5130 / 1{,}1949 = 0{,}429$; $\lambda_X = 0{,}4813 / 1{,}1949 = 0{,}403$

$\kappa = 1$ (betonarme)

Y: max $0{,}0017 \le 0{,}008$

X: max $0{,}0022 \le 0{,}008$

Örnek bina: ikinci mertebe etkileri

Madde 4.9.2, 4.9.3

$$\theta_{II,\,i} = \frac{(\Delta_i)_{ort} \sum_{k=i}^{N} w_k}{V_i\, h_i} \;\le\; 0{,}12\,\frac{D}{C_h\, R}$$

	X	Y
max $\theta_{II,i}$	0,0028	0,0022
Sınır 0,12 D/(C_h R)	0,1000	0,1000
Sonuç	β_{II} gerekmez	β_{II} gerekmez

- Betonarmede C_h = 0,5; çelikte C_h = 1
- Aşılırsa iç kuvvetler β_{II} ile büyütülür (4.37) veya sistem rijitleştirilir
- **Derz:** α = 0,25 R/I (kat seviyeleri aynı), 0,5 R/I (farklı)
- En az derz: 6 m'ye kadar 30 mm, sonraki her 3 m için +10 mm

Bütün kontroller tek tabloda

Kontrol	Madde	Sonuç	Sınır	
Yeterli mod sayısı	4.8.1.2	YM = 8; %96,9 / %97,0	≥ %95	✓
Burulma düzensizliği η_{bi}	Tablo 3.6	X 1,422, Y 1,122	1,2 (A1) / 2,0 (EDY)	A1 var
Yumuşak kat η_{ki}	Tablo 3.6	X 1,871, Y 2,003	≤ 2,0	B2 var (Y)
Perde payı $\Sigma M_{DEV}/M_o$	4.3.4.5	X 0,83, Y 0,82	%40 – %75	A13 (R = 6)
EDY uygulanabilirliği	Tablo 4.4	BYS = 5; $\eta \le 2$, B2 var	BYS ≥ 5	✓
$V_{tx}/V_{tE} \rightarrow \beta_{tE}$	4.8.4	X 0,696 → 1,292; Y 0,828 → 1,087	γ_E = 0,90	büyütüldü
Göreli öteleme $\lambda\delta/h$	4.9.1	X 0,0022, Y 0,0017	≤ 0,008	✓
İkinci mertebe θ_{II}	4.9.2	X 0,0028, Y 0,0022	≤ 0,100	✓

Kaynaklar

- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), Bölüm 2, 3, 4 ve EK 4A, 4B; Resmî Gazete 18.03.2018, Sayı 30364 (Mükerrer)
- AFAD, Türkiye Deprem Tehlike Haritası: harita spektral ivme katsayıları (DD-2, DD-3)
- Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Pearson
- Wilson, E. L., Yuan, M.-W., Dickens, J. M. (1982), Dynamic analysis by direct superposition of Ritz vectors, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*
- Der Kiureghian, A. (1981), A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (TKB kuralı)
- PEER NGA-West2 ve AFAD Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi veri tabanları (deprem kayıtları)
- Ek dosya: *TBDY_Bolum4_Ornek_Hesap_R1.xlsx* (örnek binanın bütün ara değerleri)

Teşekkürler. Sorular?