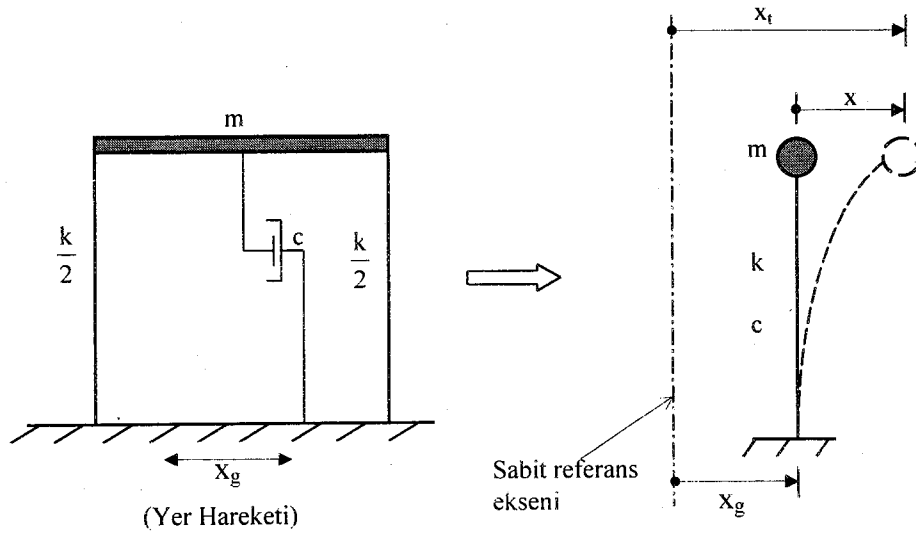


## 4. MOD BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ (SPEKTRUM ANALİZİ)

Bu bölümde, dinamik çözüm yöntemlerinden biri olan Mod Birleştirme Yöntemi anlatılmaktadır. Yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için yapı dinamiği konusuna ait bazı kavramlar özetlenmektedir.

## 4.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler



Şekil 4.1. Tek serbestlik dereceli sistem modeli

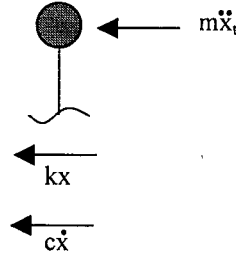
Tek serbestlik dereceli bir sistem Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, tek katlı bir çerçeve olarak gösterilebilir. Burada,

- $m$  = Cismin kütleini,
- $x_t$  = Toplam deplasmanı,
- $x_g$  = Yer hareketini,
- $x$  = Rölatif (görel) deplasmanı,
- $k$  = Yatay rijitlik katsayısını.
- $c$  = Sönüm katsayısını göstermektedir.

Sabit bir referans eksenine göre yapının zamana bağlı toplam ötelenmesi:

$$x_t = x_g + x \quad (4.1)$$

olmaktadır. Şekil 4.1'e ait serbest cisim diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.2. Serbest cisim diyagramı

Şekil 4.2'de;  $m\ddot{x}_t$  atalet kuvvetini,  $c\dot{x}$  sönüm kuvvetini,  $kx$  kolonda oluşan elastik kuvveti göstermektedir.

D'Alambert prensibi uygulanırsa,

$$m\ddot{x}_t + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4.2)$$

bulunur. (4.1) denklemi yardımıyla ivme ifadesi,  $\ddot{x}_t = \ddot{x}_g + \ddot{x}$  denklem (4.2)'de yerine konursa,

$$m(\ddot{x}_g + \ddot{x}) + c\dot{x} + kx = 0$$

bulunur ve sonuç olarak tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (4.3)$$

şeklinde 2. mertebeden adi diferansiyel denklem olmaktadır. Bu denklemin çözümünden  $x = x(t)$  bulunur. Denklem (4.2)'deki tüm terimleri kütleyle bölünerek,

$$x + \frac{c}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = -\ddot{x}_g \quad (4.4)$$

bağıntısı bulunur. Burada,

$$\frac{c}{m} = 2\xi\omega \quad \text{ve} \quad \frac{k}{m} = \omega^2$$

tarifleri yapıp denklem (4.4)'de yerlerine yazılırsa,

$$x + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{x}_g \quad (4.5)$$

denklemini bulunur. Bu bağıntıda,  $\omega$  ve  $\xi$  sırasıyla, sistemin doğal açısal frekansını ve sönüm oranını göstermektedir. Başlangıç şartları olarak,  $x(0)=0$  ve  $\dot{x}(0)=0$  alınırsa (4.5) denkleminin çözümü,

$$x(t) = \frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \quad (4.6)$$

şeklinde Duhamel integrali ile verilmektedir. Bu integralin maksimum değerine "Deprem Hız Spektrumu" denilmekte ve

$$S_{pv} = \max \left| \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \right| \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yapıda meydana gelen maksimum deplasman ise,

$$x_{\max} = \frac{S_{pv}}{\omega} = \frac{S_{pa}}{\omega^2} = S_d \quad (4.8)$$

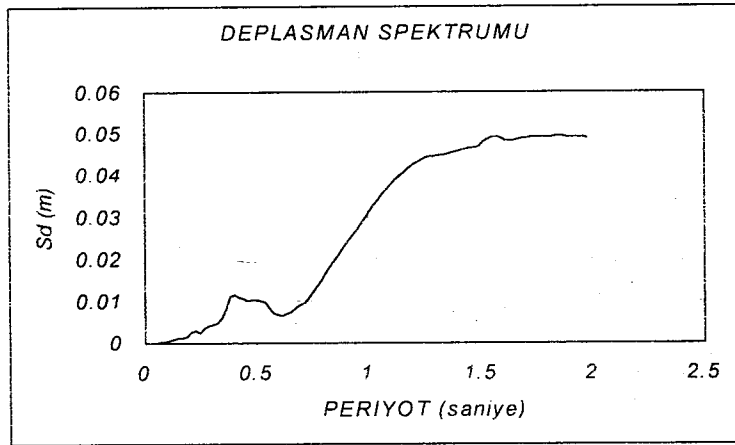
bağıntısı ile bulunmaktadır. Burada,

$S_{pa}$ : Deprem ivme spektrumunu,

$S_d$ : Deprem deplasman spektrumunu göstermektedir.

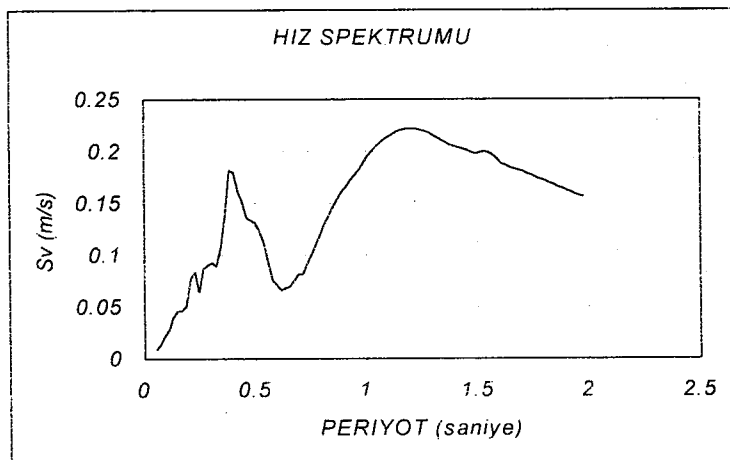
$$S_{pa} = S_{pa}(\omega, \xi) = S_{pa}(T, \xi) \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Denklem (4.6)'da çeşitli  $\omega$  ve  $\xi$  değerleri için maksimum deplasmanlar bulunur ve böylece deplasman spektrumu elde edilir (Şekil 4.3).

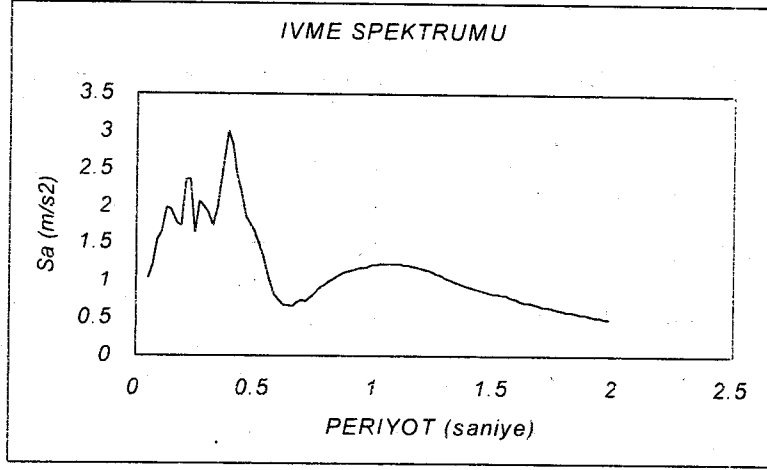


Şekil 4.3. Deplasman spektrumu grafiği

(4.8) formülleri yardımı ile  $S_{pv}$ -T,  $S_{pa}$ -T grafikleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

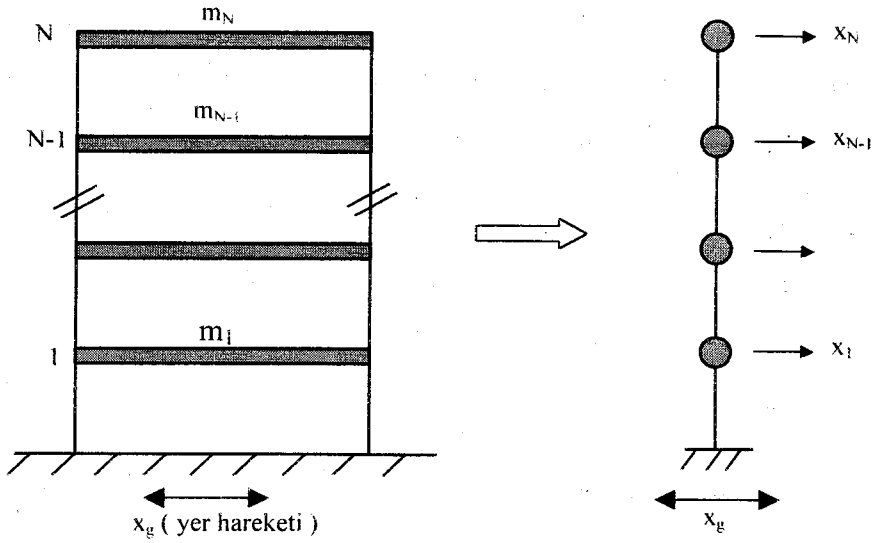


Şekil 4.4. Hız spektrumu grafiği



Şekil 4.5. İvme spektrumu grafiği

## 4.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler (Kesme Tipi Yapılar)



Şekil 4.6. Çok serbestlik dereceli sistem modeli

Bu tip yapılarda depreme karşı davranışı idare eden hareket denklemi:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{r\}\ddot{x}_g \quad (4.9)$$

şeklinde girişimli bir diferansiyel denklem takımı ile ifade edilmektedir. Burada,

$[M]$ : Sistem kütle matrisi,

$[C]$ : Sistem sönüm matrisi,

$[K]$ : Sistem rijitlik matrisi,

$\{r\}$ : Deprem doğrultusuna iştirak eden kat deplasmanlarını tanımlayan bir vektördür. Elemanları kesme tipi yapılar için,

$\{r\}^T = \{1, 1, 1, \dots, 1\}$  şeklinde verilmektedir.

Mod birleştirme yönteminde önce sistemin sönümsüz serbest titreşimi ele alınarak, serbest titreşim frekansları  $\omega_i$  ve bunlara karşılık gelen mod vektörleri  $\{\phi_i\}$  bulunur. Bunun için,

$$[K]\{\phi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\phi_i\} \quad (4.10)$$

cebrik özel değer problemi çözümlenerek sistemin serbestlik derecesi kadar frekans ve karşılık gelen mod vektörleri bulunur.

$$\omega_1 \longrightarrow \{\phi_1\}$$

$$\omega_2 \longrightarrow \{\phi_2\}$$

$$\partial \quad \quad \partial$$

$$\omega_N \longrightarrow \{\phi_N\}$$

Serbest titreşim mod vektörleri,

$$\{\phi_r\}^T [M] \{\phi_s\} = \begin{cases} 1 & r = s \text{ ise} \\ 0 & r \neq s \text{ ise} \end{cases} \quad (4.11)$$

olacak şekilde kütle matrisine göre normalize edilmektedir. Yapıya ait deplasmanlar, mod vektörleri cinsinden,

$$\{x\} = \{\phi_1\}Y_1 + \{\phi_2\}Y_2 + \dots + \{\phi_N\}Y_N \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu denklem kapalı formda,

$$\{x\} = [\phi] \{Y\} \quad (4.13)$$

olarak yazılabilir. Burada,

$[\phi] = [\{\phi_1\} \{\phi_2\} \dots \{\phi_N\}]$  : Modal matris,

$$\{Y\} = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_N \end{Bmatrix} : \text{Modal deplasman vektörüdür.}$$

Buna göre,

$$\{x\} = [\phi] \{Y\}$$

$$\{x\} = [\phi] \{Y\}$$

$$\{x\} = [\phi] \{Y\}$$

olmaktadır. Bu ifadeler, (4.9) denkleminde yerine konur ve soldan  $[\phi]^T$  ile çarpılırsa,

$$[\phi]^T [M] [\phi] \{Y\} + [\phi]^T [C] [\phi] \{Y\} + [\phi]^T [K] [\phi] \{Y\} = -[\phi]^T [M] \{r\} \ddot{x}_g \quad (4.14)$$

eşitliği bulunur. Burada,

$$[\phi]^T [M] [\phi] = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & 0 \\ & & \ddots \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix} = [I],$$

$$[\phi]^T [C] [\phi] = \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & & 0 \\ & 2\xi_2 \omega_2 & \\ 0 & & \ddots \\ & & & 2\xi_N \omega_N \end{bmatrix} \quad (4.14a)$$

$$[\phi]^T [K] [\phi] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \omega_2^2 & 0 \\ & & \ddots \\ 0 & & & \omega_N^2 \end{bmatrix}$$

ve

$$[\phi]^T [M] \{r\} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_N \end{Bmatrix}, \quad (4.14b)$$

olmaktadır. Burada,

$\alpha_i = \{\phi_i\}^T [M] \{r\}$  : i'inci modal kütle çarpanıdır (katılım faktörü).

Buna göre, r'inci mod için ayrıklaştırılmış hareket denklemi:

$$\ddot{Y}_r + 2\xi_r \omega_r \dot{Y}_r + \omega_r^2 Y_r = -\alpha_r X_g \quad (r = 1, 2, \dots, N) \quad (4.15)$$



şeklinde modal deplasmanlar cinsinden bulunur. Böylece (4.9) denklemi girişimsiz hale gelmektedir. (4.15) denklemi, tek serbestlik dereceli sistem için verilen (4.5) ifadesi ile karşılaştırılırsa,

$$\begin{aligned} x &\longrightarrow Y_r \\ \xi &\longrightarrow \xi_r \\ \omega &\longrightarrow \omega_r \\ -\ddot{x}_g &\longrightarrow -\alpha_r \ddot{x}_g \end{aligned}$$

olduğu görülür. Buna göre r'inci moda ait maksimum modal deplasman,

$$(Y_r)_{\max} = \alpha_r \frac{S_{pa}(T_r, \xi)}{\omega_r^2} \quad (4.16)$$

olarak elde edilir. Böylece  $\{x\}$  deplasmanlarına her moddan gelen maksimum katkı:

$$\{x\}_{i,\max} = \{\phi_i\} (Y_i)_{\max} \quad (4.17)$$

şeklinde hesaplanabilir. Her moddan gelen maksimum katkı aynı t zamanında meydana gelmediği için bu katkıların üst üste toplanması ekonomik bir çözüm olmaz. Dolayısıyla, mod katkılarının uygun bir istatistik yöntemle birleştirilmesi gerekmektedir. Mod katkılarının birleştirilmesinde,

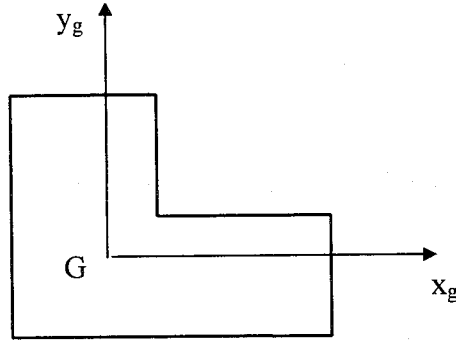
- a) Tam karesel birleştirme (CQC)
- b) Karelerin toplamının karekökü (SRSS)

yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden uygun olanı seçilerek modal deplasmanlardan, gerçek deplasmanlar elde edilir.

### 4.3. Mod Birleştirme Yöntemi'nin Adımları

**Adım 1 :** Döşemeler rijit diyafram olarak kabul edilmiş ise master noktası kütle merkezinde seçilir.

**Adım 2 :** Kütle atalet momentleri hesaplanır.



**Şekil 4.7.** Kütle atalet momentleri hesabı için tipik bir kat döşemesi

$$m\theta_i = (I_{x_g} + I_{y_g}) \frac{m_i}{A_i} \quad (4.18)$$

Bu bağıntıda,

$I_{x_g}$  : Kat döşemesinin  $x_g$  eksenine etrafındaki alan atalet momentini

$I_{y_g}$  : Kat döşemesinin  $y_g$  eksenine etrafındaki alan atalet momentini

$A_i$  : i'inci katın alanını

$m_i$  : i'inci katın kütlelerini ( $w_i/g$ )

$G$  : Kütle merkezini göstermektedir.

Kütle atalet momentleri,  $m\theta_i$ , kaydırılmamış kütle merkezinden geçen düşey eksen etrafında hesaplanmaktadır. Ayrıca, kütlelerin döşemeye üniform yayıldığı kabul edilmektedir.

**Adım 3 :** Kat kütleleri,  $\pm 5\%$  kaydırılmış kütle merkezinde tanımlandıktan sonra üç boyutlu analiz yapılarak serbest titreşim periyot ve modları bulunur. Gözönüne alınacak mod sayısı 4. ve 5. adımlarda belirlenmektedir.

**Adım 4 :** Etkin kütle oranları hesaplanır. i'inci moda karşılık gelen etkin kütle,

$$M_{ei} = \frac{\alpha_i^2}{M_i} \quad (4.19)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Toplam etkin kütle ise,

$$\Sigma M_{ei} = \frac{\alpha_1^2}{M_1} + \frac{\alpha_2^2}{M_2} + \dots + \frac{\alpha_i^2}{M_i} \quad (4.20)$$

şeklinde bulunmaktadır (Clough and Penzien, 1993). Burada i'inci mod için katılım faktörü  $\alpha_i = \{\phi_i\}^T [M] \{r\}$  şeklinde tarif edilmektedir.  $M_i$  ise modal kütledir. Mod vektörleri  $\{\phi_i\}$ ,  $M_i = \{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} = 1$  olacak şekilde normalize edilirse toplam etkin kütle,

$$\Sigma M_{ei} = \Sigma_{i=1}^Y \alpha_i^2 \quad (4.21)$$

şeklinde bulunur. Burada Y, gözönüne alınan mod sayısını göstermektedir. Bu durumda etkin kütle oranı,

$$\frac{M_{ei}}{M_T} = \frac{\alpha_i^2}{\Sigma_{j=1}^N m_j} \quad (4.22)$$

şeklinde hesaplanır. Bu ifadede  $m_j$ , j'inci katın kütlesidir.

**Adım 5 :** Her bir mod için hesaplanan etkin kütle oranları toplamının aşağıda belirtildiği gibi, 0.90'dan büyük olması şartını gözönüne alarak, hesaba katılması gereken yeterli titreşim modu sayısı (Y) belirlenir.

$$\Sigma_{i=1}^Y \left\{ \frac{\alpha_i^2}{M_T} \right\} \geq 0.90 \quad (4.23)$$

**Adım 6 :** Spektral ivme değerleri belirlenir. Herhangi bir r'inci mod için ivme spektrumu:

$$S_{pa}(T_r) = A(T_r)g/R_a(T_r) \quad (4.24)$$

olmaktadır (TDY, denklem 6.15). Burada,

$A(T_r)$  : r'inci serbest titreşim modu için spektral ivme katsayısı,

$R_a(T_r)$  : r'inci serbest titreşim modu için deprem yükü azaltma katsayısı,

$g$  : Yerçekimi ivmesidir ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

**Adım 7 :** Yapının spektrum analizi yapılarak deplasmanlar ve elemanlardaki iç kuvvet bileşenlerine her moddan gelen maksimum katkılar hesaplanır.

**Adım 8 :** 7. adımda bulunan katkılar uygun bir birleştirme yöntemi ile (SRSS veya CQC) birleştirilerek yapı deplasmanları ve eleman uç kuvvetleri bulunur.

$T_s < T_r$  olmak üzere, gözönüne alınan herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların, daima  $T_s/T_r < 0.80$  koşulunu sağlaması durumunda, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için Kareleri Toplamının Kare Kökü kuralı (SRSS) uygulanabilir. Verilen bu koşulun sağlanmaması durumunda ise birleştirme yöntemi olarak Tam Karesel Birleştirme (CQC) kuralı uygulanacaktır. CQC kuralının uygulanmasında kullanılacak çapraz korelasyon katsayılarının hesabında, modal sönüm oranları bütün titreşim modları için %5 olarak alınacaktır.

**Adım 9 :** Hesaplanan iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri için alt sınır değerleri belirlenir. Bunun için Mod Birleştirme Yöntemi ile bulunan bina toplam deprem yükü ( $V_{TB}$ ) ve Eşdeğer Deprem Yöntemi ile hesaplanan bina toplam deprem yükü ( $V_t$ ) elde edilir. Aşağıda açıklanan  $\beta$  değerine göre  $V_{TB} < \beta V_t$  olması durumunda Mod Birleştirme Yöntemine göre bulunan tüm iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri,

$$B_D = (\beta V_t / V_{tB}) B_B \quad (4.25)$$

formülü ile büyütülecektir (TDY, denklem 6.18). Burada,

$B_D$ : Büyütülmüş yerdeğiştirme veya iç kuvveti,

$B_B$ : Mod birleştirme yönteminde bulunan herhangi bir yerdeğiştirme veya iç kuvveti göstermektedir.

Bölüm 2.1’de tanımlanan A1, B2 veya B3 türü düzensizliklerden en az birinin yapıda bulunması durumunda  $\beta=1.00$ , aksi takdirde ise  $\beta=0.90$  alınacaktır.

**Adım 10 :** Göreli kat ötelemelerinin ve ikinci merteye etkilerinin kontrolü yapılır.

#### 4.4. Mod Birleştirme Yöntemi İle İlgili Sayısal Uygulamalar

Burada, bölüm 3.2’de Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ile analizi yapılan binaların, karşılaştırma yapabilmek amacıyla Mod Birleştirme Yöntemi ile tekrar deprem analizi yapılmaktadır.

##### 4.4.1. Örnek 4.1

Bu örnek, bölüm 3.2.1’de ele alınan uygulama olup burada Mod Birleştirme Yöntemi ile çözülmektedir (Şekil 3.3).

$$I_{xg}=I_{yg}=486.6048 \text{ m}^4, \quad m\theta_i=(I_{xg}+I_{yg}) m_i / A_i$$

**Çizelge 4.1.** Örnek 4.1’e ait kat kütle eylemsizlik momentlerinin hesabı

Kat No	$m_i$	$m\theta_i$
3	52.610	740.749
2	74.258	1045.554
1	74.258	1045.554

$$M_T=201.126$$

Kütle atalet momentleri ( $m\theta_i$ ) denklem (4.18) ile bulunmuştur.

Kat kütleleri +%5 kaydırılmış kütle merkezinde toplanmış ve yapının serbest titreşim analizi yapılarak aşağıdaki periyotlar bulunmuştur.

**Çizelge 4.2.** Örnek 4.1'e ait serbest titreşim mod ve periyotları

Mod No	$T_i(s)$
1	0.546
2	0.540
3	0.373
4	0.195
5	0.193
6	0.139
7	0.127

**Çizelge 4.3.** Örnek 4.1'e ait etkin kütle oranları

Mod	$\alpha_i$	$\alpha_i^2$	$\frac{\alpha_i^2}{M_T}$	Kümülatif Oran
1	13.01622	169.42198	0.8424	0.8424
2	1.608467	2.5871661	0.0129	0.8553
3	1.852665	3.4323676	0.0171	0.8724
4	4.355608	18.971321	0.0943	0.9667
5	0.155475	0.0241725	0.0001	0.9668
6	0.524470	0.2750688	0.0014	0.9682
7	2.468000	6.0910240	0.0303	0.9985

Kümülatif oran değerlerinin incelenmesinden, ilk 4 modun kümülatif oran değerleri toplamının 0.90'ı geçtiği görülmektedir (denklem 4.23). Dolayısıyla hesaplarda ilk 4 modun gözönüne alınması yeterli olmaktadır.

Spektral ivme değerleri, her bir doğal titreşim modu için denklem (4.24) kullanılarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.4.** Örnek 4.1'e ait spektral ivme değerleri

Mod	Periyot(T)	$R_a(T_r)$	$A(T_r)$	$S_{pa}(T_r)$
1	0.546	8	1	1.22625
2	0.540	8	1	1.22625
3	0.373	8	1	1.22625
4	0.195	8	1	1.22625

Bu aşamada yapının spektrum analizi yapılarak mod katkıları birleştirilmiştir. Mod katkılarının birleştirilmesi için Tam Karesel Birleştirme (CQC) yöntemi kullanılmıştır. Buna göre bina taban kesme kuvveti ( $V_{tB}$ ) aşağıdaki gibi bulunmuştur.

**Çizelge 4.5.** Örnek 4.1'e ait iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri için alt sınır değerleri

$V_{tB}$	$V_t$
213.200 kN	246.631 kN

Yapıda A1, B2 ve B3 düzensizliklerinden hiçbiri olmadığından  $\beta=0.90$  alınacaktır.  $V_{tB} < \beta V_t$  ifadesi kullanılarak,

$$213.200 < 0.9 \times 246.631 = 221.968$$

olduğu görülür. Dolayısıyla Mod Birleştirme Yöntemi'ne göre bulunan bütün yerdeğiştirme ve iç kuvvet büyüklükleri,

$$\beta \times V_t / V_{tB} = 1.0411$$

katsayısı ile çarpılarak büyütülecektir.

Çizelge 4.6. Örnek 4.1'e ait görelî kat ötelemeleri kontrolü

Kat No	$(d_i)_{\max}$	$(\Delta_i)_{\max}$	$h_i$	$(\Delta_i)_{\max}/h_i$
3	0.01325	$0.00316 \times 1.0411$	3.1	0.001061
2	0.01009	$0.00526 \times 1.0411$	3.1	0.001767
1	0.00482	$0.00482 \times 1.0411$	3.6	0.001394

$$(\Delta_i)_{\max}/h_i \leq 0.0035$$

$$(\Delta_i)_{\max}/h_i \leq 0.02/R = 0.0025$$

Çizelge 4.7. Örnek 4.1'e ait ikinci mertebe etkilerinin kontrolü ( $\theta_i$ )

Kat No	$w_i$	$\sum_{j=i}^N w_j$	$(\Delta_i)_{\text{ort}}$	$V_i$	$h_i$	$\theta_i$
3	516.104	516.104	$0.00270 \times 1.0411$	99.3079	3.1	0.004716
2	728.472	1244.576	$0.00446 \times 1.0411$	195.1394	3.1	0.009557
1	728.472	1973.048	$0.00407 \times 1.0411$	246.6310	3.6	0.010578

$$\theta_i < 0.12$$

Kat kesme kuvvetleri ( $V_i$ ), Eşdeğer Deprem Yüğü yöntemi ile yapılan çözümden (Örnek 3.1) alınmıştır.

Bu metodla yapılan analiz sonucunda da görüldüğü gibi, hem görelî kat ötelemeleri hem de ikinci mertebe etkileri yönetmeliğin öngördüğü sınır değerler aşılmamaktadır.



Çizelge 4.8. Örnek 4.1'e ait kolon kesit tesirleri (mutlak değerler)

Kat	Kolon	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	M <sub>x</sub> (üst)	M <sub>x</sub> (alt)	M <sub>y</sub> (üst)	M <sub>y</sub> (alt)
3	1	12.513	1.750	21.558	17.257	3.020	2.410
	2	12.741	0.515	20.512	18.986	0.868	0.728
	3	11.068	1.915	19.046	15.285	3.232	2.705
	4	9.820	1.753	16.879	13.579	2.827	2.607
	5	16.658	0.656	26.777	24.864	1.054	0.979
	6	9.718	1.914	16.729	13.415	3.229	2.705
	7	6.418	1.556	10.856	9.045	2.685	2.141
	8	6.558	0.402	11.059	9.278	0.668	0.579
2	1	20.994	3.185	34.085	31.023	5.187	4.691
	2	32.803	0.729	52.028	49.662	1.176	1.083
	3	21.241	4.829	34.611	31.258	7.846	7.127
	4	17.980	4.816	29.371	26.385	7.648	7.282
	5	26.739	0.932	42.011	40.882	1.456	1.433
	6	17.825	0.484	29.137	26.137	7.854	7.137
	7	16.032	3.211	26.078	23.631	5.248	4.711
	8	16.378	0.688	26.588	24.190	1.091	1.044
1	1	28.418	4.339	41.706	60.608	6.462	9.161
	2	37.022	0.902	62.347	70.936	1.331	1.917
	3	28.392	6.075	41.642	60.576	9.225	12.646
	4	23.779	5.553	34.802	50.812	9.372	10.618
	5	31.054	1.089	52.251	59.544	1.782	2.141
	6	23.663	6.080	34.522	50.672	9.238	12.652
	7	20.300	4.329	30.480	42.604	6.437	9.149
	8	20.572	0.905	31.132	42.931	1.338	1.920

Bulunan bu kesit tesirleri, daha önce bulunan 1.0411 katsayısı ile çarpıldıktan sonra kullanılmalıdır.

#### 4.4.2. Örnek 4.2

Bu örnek, 3. bölümde ele alınan Örnek 3.2'nin Mod Birleştirme Yöntemi ile yeniden yapılan analizidir.

Çizelge 4.9. Örnek 4.2'ye ait kat kütle eylemsizlik momentlerinin hesabı

Kat No	$m_i$	$m\theta_i$
5	35.156	4036.90
4	61.119	7018.22
3	61.119	7018.22
2	61.119	7018.22
1	61.119	7018.22

$$M_T=279.632$$

Kat kütleleri +%5 kaydırılmış kütle merkezinde toplanarak, yapının serbest titreşim analizi sonucu bulunan periyotlar aşağıda görülmektedir.

Çizelge 4.10. Örnek 4.2'ye ait serbest titreşim mod ve periyotları

Mod No	$T_i(s)$
1	1.187
2	1.143
3	0.990
4	0.438
5	0.423
6	0.358
7	0.264

Çizelge 4.11. Örnek 4.2'ye ait etkin kütle oranları

Mod	$\alpha_i$	$\alpha_i^2$	$\frac{\alpha_i^2}{M_T}$	Kümülatif Oran
1	13.17997	173.71161	0.6212	0.6212
2	0	0	0	0.6212
3	6.581051	43.310232	0.1549	0.7761
4	5.516729	30.434299	0.1088	0.8849
5	0	0	0	0.8849
6	2.145009	4.6010636	0.0165	0.9014
7	2.918610	8.5182843	0.0305	0.9319

Kümülatif oran değerlerinin incelenmesinden, ilk 6 modun hesaba katılmasının yeterli olduğu görülmektedir (denklem 4.23).

**Çizelge 4.12.** Örnek 4.2'ye ait spektral ivme değerleri

Mod	Periyot(T)	$R_a(T_r)$	$A(T_r)$	$S_{pa}(T_r)$
1	1.187	8	0.4189	0.51370
2	1.143	8	0.4367	0.52934
3	0.990	8	0.4843	0.59393
4	0.438	8	0.9295	1.13984
5	0.423	8	0.9556	1.17182
6	0.358	8	1	1.22625

Bu örnekte mod katkılarının birleştirilmesi için Tam Karesel Birleştirme (CQC) yöntemi kullanılmıştır.

**Çizelge 4.13.** Örnek 4.2'ye ait iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri için alt sınır değerleri

$V_{tB}$	$V_t$
116.310 ton	148.569 ton

Yapıda A1 türü düzensizlik olduğundan  $\beta=1.00$  alınacaktır.  $V_{tB} < \beta V_t$  ifadesi kullanılarak,

$$116.310 < 1.00 \times 148.569$$

olduğu görülür. O halde Mod Birleştirme Yöntemi'ne göre bulunan bütün yerdeğiştirme ve iç kuvvet büyüklükleri,

$$\beta \times V_t / V_{tB} = 1.28$$

katsayısı ile çarpılarak büyütülecektir.

Çizelge 4.14. Örnek 4.2'ye ait görelî kat ötelemeleri kontrolü

Kat No	$(d_i)_{\max}$	$(\Delta_i)_{\max}$	$h_i$	$(\Delta_i)_{\max}/h_i$
5	0.03330	$0.00373 \times 1.28$	3.5	0.001366
4	0.02957	$0.00792 \times 1.28$	3.5	0.002895
3	0.02165	$0.00832 \times 1.28$	3.5	0.003041
2	0.01333	$0.00850 \times 1.28$	3.5	0.003108
1	0.00484	$0.00484 \times 1.28$	3.5	0.001769

$$(\Delta_i)_{\max}/h_i \leq 0.0035 \text{ ve } (\Delta_i)_{\max}/h_i \leq 0.02/R = 0.0025$$

Çizelge 4.15. Örnek 4.2'ye ait ikinci mertebe etkilerinin kontrolü ( $\theta_i$ )

Kat No	$w_i$	$\sum_{j=1}^N w_j$	$(\Delta_i)_{\text{ort}}$	$V_i$	$h_i$	$\theta_i$
5	344.88	344.88	$0.00288 \times 1.28$	33.1847	3.5	0.010944
4	599.58	944.46	$0.00613 \times 1.28$	79.3385	3.5	0.026701
3	599.58	1544.04	$0.00624 \times 1.28$	113.9538	3.5	0.030925
2	599.58	2143.62	$0.00640 \times 1.28$	137.0307	3.5	0.036582
1	599.58	2743.20	$0.00369 \times 1.28$	148.5691	3.5	0.024896

$$\theta_i < 0.12$$

Kat kesme kuvvetleri ( $V_i$ ), Eşdeğer Deprem Yüğü yöntemi ile yapılan çözümden alınmıştır (Örnek 3.2).

Bu örnekte de ikinci mertebe etkileri, yönetmeliğin öngördüğü sınır değerleri aşmamaktadır.

## 4.4.3. Örnek 4.3

Bu örnek, 3. bölümde ele alınan Örnek 3.4'ün Mod Birleştirme Yöntemi ile hesabıdır.

**Çizelge 4.16.** Örnek 4.3'e ait kat kütle eylemsizlik momentlerinin hesabı

Kat No	$m_i$	$m\theta_i$
5	80.734	5436.0856
4	80.734	5436.0856
3	80.734	5436.0856
2	80.734	5436.0856
1	80.734	5436.0856

$$M_T=403.670$$

Yapının serbest titreşim analizi sonucu bulunan periyotlar aşağıda görülmektedir.

**Çizelge 4.17.** Örnek 4.3'ye ait serbest titreşim mod ve periyotları

Mod No	$T_i(s)$		
	ANSYS	ETABS	SAP90
1	1.154	1.153	1.155
2	1.022	1.019	1.021
3	0.819	0.831	0.833
4	0.380	0.382	0.383
5	0.325	0.327	0.328
6	0.272	0.276	0.277
7	0.222	0.225	0.226

**X-yönünde çözüm :****Çizelge 4.18.** Örnek 4.3'e ait etkin kütle oranları

Mod	$\alpha_i$	$\alpha_i^2$	$\frac{\alpha_i^2}{M_T}$	Kümülatif Oran
1	13.48872	181.9455	0.450728	0.450728
2	11.22094	125.9096	0.311912	0.76264
3	2.916899	8.508302	0.021077	0.783718
4	5.703548	32.53046	0.080587	0.864304
5	4.210224	17.72598	0.043912	0.908216
6	1.03049	1.06191	0.002631	0.910847
7	3.696505	13.66415	0.03385	0.944697

Kümülatif oran değerlerinin incelenmesinden, ilk 5 modun hesaba katılmasının yeterli olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.19.** Örnek 4.3'ye ait spektral ivme değerleri

Mod	Periyot(T)	$R_a(T_r)$	$A(T_r)$	$S_{pa}(T_r)$
1	1.154	8	0.4284	0.52534
2	1.022	8	0.4722	0.57902
3	0.819	8	0.5637	0.69124
4	0.380	8	1	1.22625
5	0.325	8	1	1.22625

Bu örnekte mod katkılarının birleştirilmesi için Tam Karesel Birleştirme (CQC) yöntemi kullanılmıştır.

**Y-yönünde çözüm :****Çizelge 4.20.** Örnek 4.3'e ait etkin kütle oranları

Mod	$\alpha_i$	$\alpha_i^2$	$\frac{\alpha_i^2}{M_T}$	Kümülatif Oran
1	10.9861	120.6944	0.298993	0.298993
2	13.7047	187.8187	0.465278	0.764271
3	2.366341	5.599571	0.013872	0.778143
4	4.05665	16.45641	0.040767	0.81891
5	5.871511	34.47464	0.085403	0.904313
6	0.967868	0.936769	0.002321	0.906633
7	2.315654	5.362253	0.013284	0.919917

Kümülatif oran değerlerinin incelenmesinden, ilk 5 modun hesaba katılmasının yeterli olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.21.** Örnek 4.3'e ait spektral ivme değerleri

Mod	Periyot(T)	$R_a(T_r)$	$A(T_r)$	$S_{pa}(T_r)$
1	1.154	8	0.4284	0.52534
2	1.022	8	0.4722	0.57902
3	0.819	8	0.5637	0.69124
4	0.380	8	1	1.22625
5	0.325	8	1	1.22625

Bu örnekte mod katkılarının birleştirilmesi için Tam Karesel Birleştirme (CQC) yöntemi kullanılmıştır.

Her iki deprem yönünde yapılan çözüm sonucu bazı elemanlarda hesaplanan kesit tesirleri ve %30 kuralı düzeltmeleri aşağıdaki çizelgelerde görülmektedir.

Çizelge 4.22. S112 nolu kolonun (zemin kat) moment değerleri

Deprem Yönü	Majör Eksen (ton-m)					
	M <sub>üst</sub>			M <sub>alt</sub>		
	ANSYS	ETABS	SAP90	ANSYS	ETABS	SAP90
X	5.749	8.203	8.203	101.72	94.692	93.92
Y	7.979	13.252	13.340	148.85	132.889	131.84
Deprem Yönü	Minör Eksen (ton-m)					
	M <sub>üst</sub>			M <sub>alt</sub>		
	ANSYS	ETABS	SAP90	ANSYS	ETABS	SAP90
X	6.320	6.363	6.390	8.479	8.490	8.520
Y	3.941	4.087	4.100	5.555	5.840	5.860

Çizelge 4.23. S112 nolu kolonun moment değerlerinin %30 kuralı ile düzeltilmesi

%30 Kuralı	Majör Eksen (ton-m)					
	M <sub>üst</sub>			M <sub>alt</sub>		
	ANSYS	ETABS	SAP90	ANSYS	ETABS	SAP90
$\pm M_x \pm 0.3 M_y$	8.143	12.179	12.205	146.375	134.559	133.472
$\pm 0.3 M_x \pm M_y$	9.704	15.713	15.801	179.366	161.297	160.016
%30 Kuralı	Minör Eksen					
	M <sub>üst</sub>			M <sub>alt</sub>		
	ANSYS	ETABS	SAP90	ANSYS	ETABS	SAP90
$\pm M_x \pm 0.3 M_y$	7.502	7.589	7.620	10.146	10.242	10.278
$\pm 0.3 M_x \pm M_y$	5.837	5.996	6.017	8.099	8.387	8.416



Çizelge 4.24. S112 nolu kolonun (zemin kat) eksenel kuvvet değerleri

Deprem Yönü	Eksenel Kuvvetler		
	N (ton)		
	ANSYS	ETABS	SAP90
X	1.685	1.074	1.050
Y	1.312	1.383	1.360

Çizelge 4.25. S112 nolu kolonun eksenel kuvvet değerlerinin %30 kuralı ile düzeltilmesi

%30 Kuralı	Eksenel Kuvvetler		
	N (ton)		
	ANSYS	ETABS	SAP90
$\pm M_x \pm 0.3 M_y$	2.079	1.489	1.458
$\pm 0.3 M_x \pm M_y$	1.818	1.705	1.675

Çizelge 4.26. S112 nolu kolonun (zemin kat) kesme kuvvet değerleri

Deprem Yönü	Kesme Kuvvetleri (ton)					
	$V_{majör}$			$V_{minör}$		
	ANSYS	ETABS	SAP90	ANSYS	ETABS	SAP90
X	34.154	31.469	31.070	4.920	4.938	4.960
Y	49.464	43.897	43.350	3.115	3.267	3.280

Çizelge 4.27. S112 nolu kolonun kesme kuvvet değerlerinin %30 kuralı ile düzeltilmesi

%30 Kuralı	Kesme Kuvvetleri (ton)					
	$V_{majör}$			$V_{minör}$		
	ANSYS	ETABS	SAP90	ANSYS	ETABS	SAP90
$\pm M_x \pm 0.3 M_y$	48.993	44.638	44.075	5.855	5.918	5.944
$\pm 0.3 M_x \pm M_y$	59.710	53.338	52.671	4.591	4.748	4.768

Çizelge 4.28. K121 nolu kirişin (zemin kat) i ve j uç moment değerleri

Deprem Yönü	Moment Değerleri (ton-m)					
	$M_i$			$M_j$		
	ANSYS	ETABS	SAP90	ANSYS	ETABS	SAP90
X	9.385	10.970	10.930	8.374	9.922	9.890
Y	13.988	15.794	15.740	12.678	14.583	14.560

Çizelge 4.29. K112 nolu kirişin moment değerlerinin %30 kuralı ile düzeltilmesi

%30 Kuralı	Moment Değerleri					
	$M_i$			$M_j$		
	ANSYS	ETABS	SAP90	ANSYS	ETABS	SAP90
$\pm M_x \pm 0.3 M_y$	13.581	15.708	15.652	12.177	14.297	14.258
$\pm 0.3 M_x \pm M_y$	16.804	19.085	19.019	15.190	17.560	17.527