Türk Bina Deprem Yönetmeliği Kapsamında Performansa Dayalı Tasarım, Sismik Taban Yalıtımı ve PERFORM-3D ile Mühendislik Uygulamaları

2017-2018 Dönemi

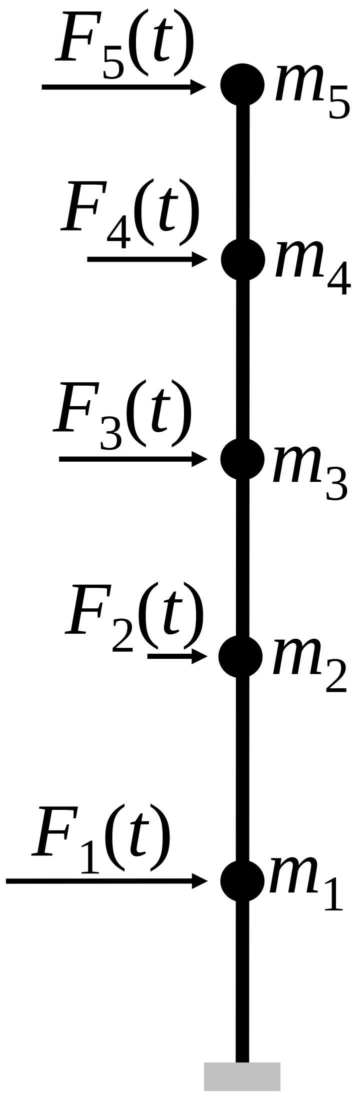
Yapı Dinamiği ve Deprem Yönetmeliğine Giriş:

Çok Serbestlik Dereceli Sistemler – 3. Bölüm

Dr. Barış Erkuş (İTÜ)

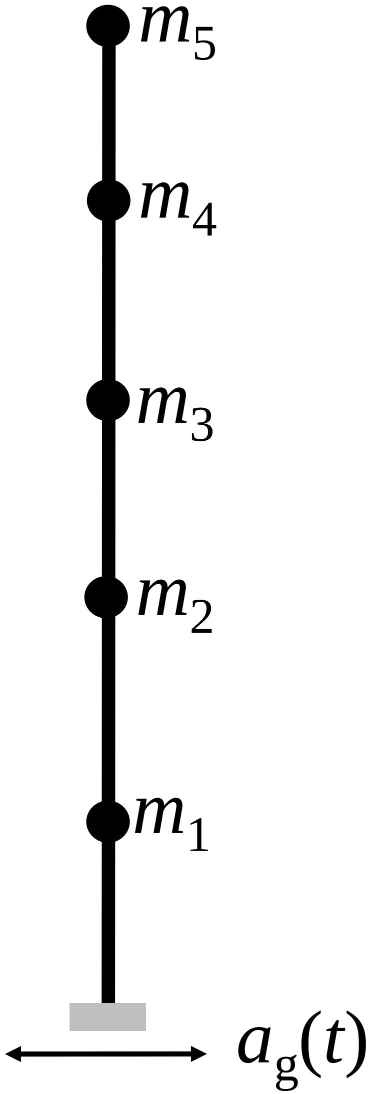
Genel Yükleme

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t)+\mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{x}(t)=\mathbf{F}(t)$$

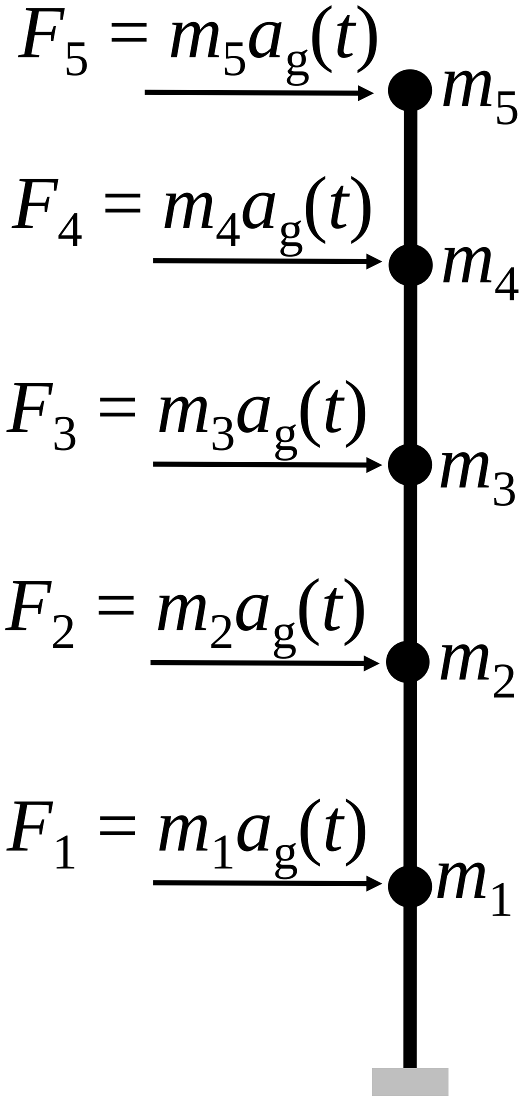


$$\mathbf{F}(t)=\begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ F_4(t) \\ F_5(t) \end{Bmatrix}$$

Yer İvmesi – Konsol Kolon Tipi Yapı



$\equiv$

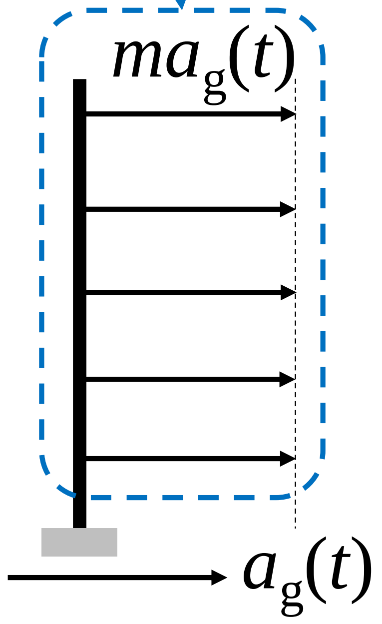


Yer ivmesi – Konsol Kolon Tipi Yapı

$$\mathbf{F}(t) = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ F_4(t) \\ F_5(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m_1 a_g(t) \\ m_2 a_g(t) \\ m_3 a_g(t) \\ m_4 a_g(t) \\ m_5 a_g(t) \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & m_3 & & \\ & & & m_4 & \\ & & & & m_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} a_g(t)$$

$$= -\mathbf{M}\mathbf{r}a_g(t)$$



Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Deprem Analizleri

- Zaman-Tanım Alanında Analizler: Verilen bir deprem kaydı için dinamik simülasyon
  - Doğrudan Çözüm
    - Matris diferansiyel denklemi doğrudan çözülür.
    - Yapısal cevaplar doğrudan zaman-tanım alanında elde edilmiş olur.
  - Modal Toplama
    - Her mod için genelleştirilmiş tek serbestlik dereceli sistemi zaman-tanım alanında çözülür.
    - Zaman-tanım alanında elde edilen genelleştirilmiş cevaplar ile mod şekilleri le çarpılarak modal cevaplar bulunur.
    - Modal cevaplar doğrudan toplanarak zaman-tanım alanında yapı cevapları elde edilir.
- Spektral Analizler: Tasarım spektrumu kullanılarak yapısal cevapların maksimum değerleri
  - Modal Birleştirme
    - Her mod için genelleştirilmiş tek serbestlik dereceli sistemin maksimum cevabı bulunur.
    - Genelleştirilmiştir cevaplar mod şekilleri ile çarpılarak modal cevapların maksimum değeri bulunur.
    - Maksimum modal cevaplar modal birleştirme yöntemi denilen yöntemlerden birisi ile birleştirilerek maksimum yapısal cevaplar bulunur.
    - Eğer iki yönde analiz yapılıyor ise, yukarıdaki işlem ayrı ayrı iki yönde yapılır. Her yön için maksimum değerler ayrı ayrı bulunur.
    - İki yöndeki maksimum değerler yönsel birleştirme yöntemi denilen yöntemlerden birisi ile birleştirilerek maksimum yapısal cevaplar bulunur.

Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz

Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t)+\mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{x}(t)=\mathbf{F}(t)$$

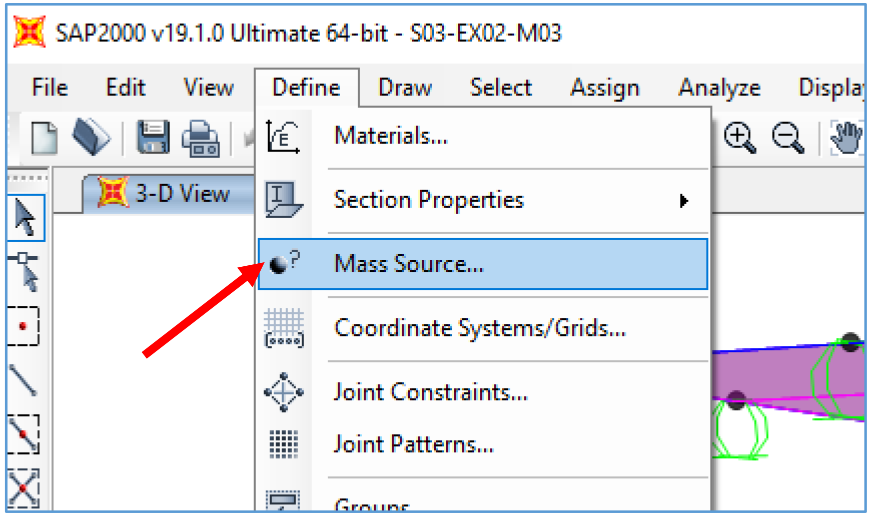
↓

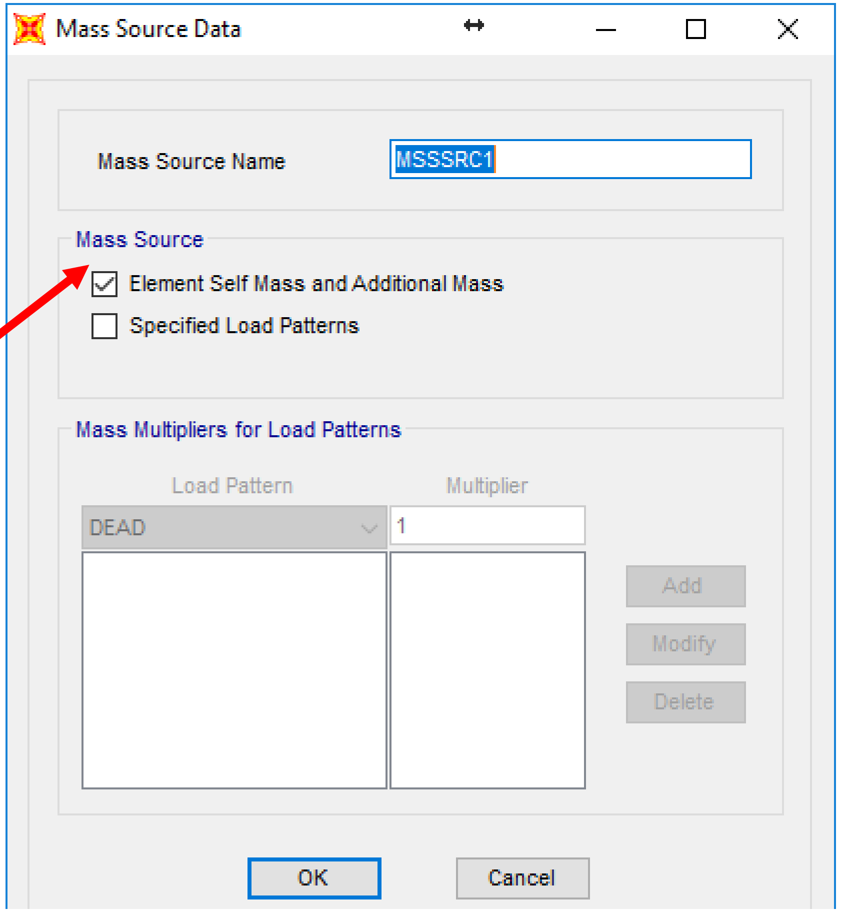
Doğrudan Matris Denkleminin Çözümü

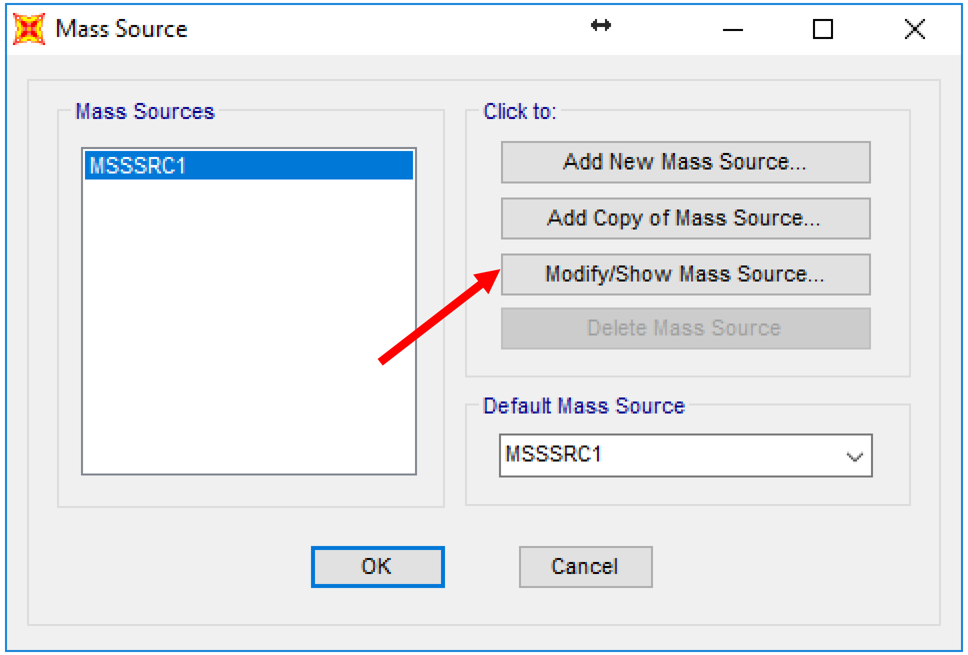
↓

$$\ddot{\mathbf{x}}(t),\quad \dot{\mathbf{x}}(t)\quad \text{ve}\quad \mathbf{x}(t)$$

Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Kütle

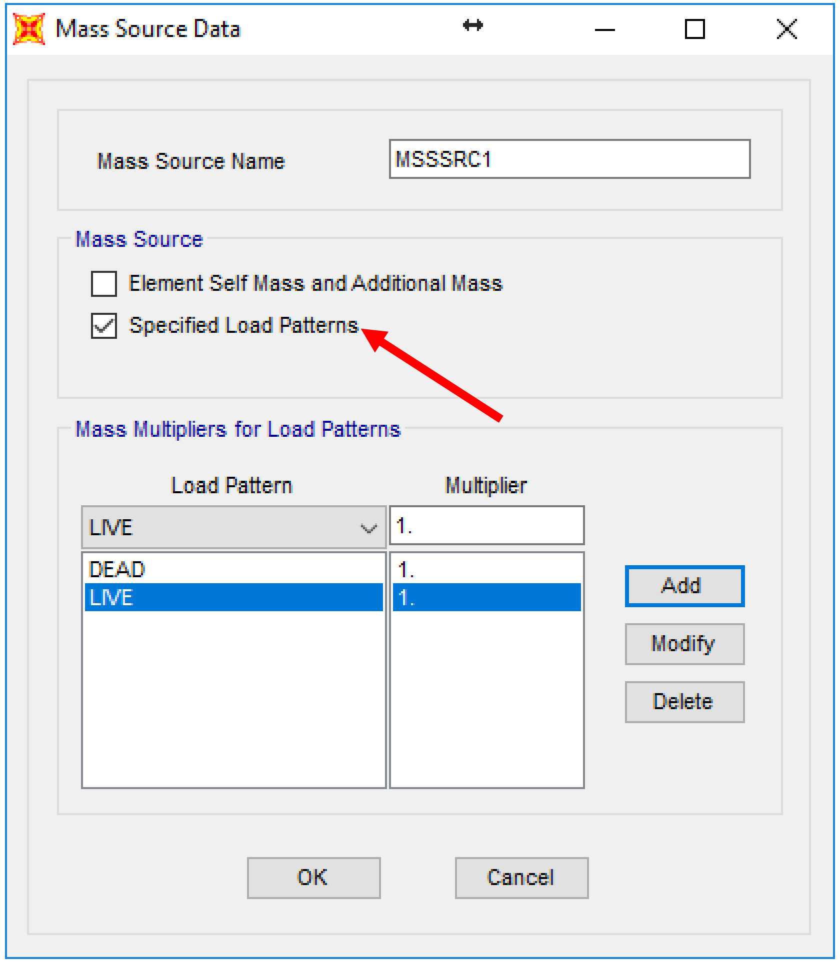


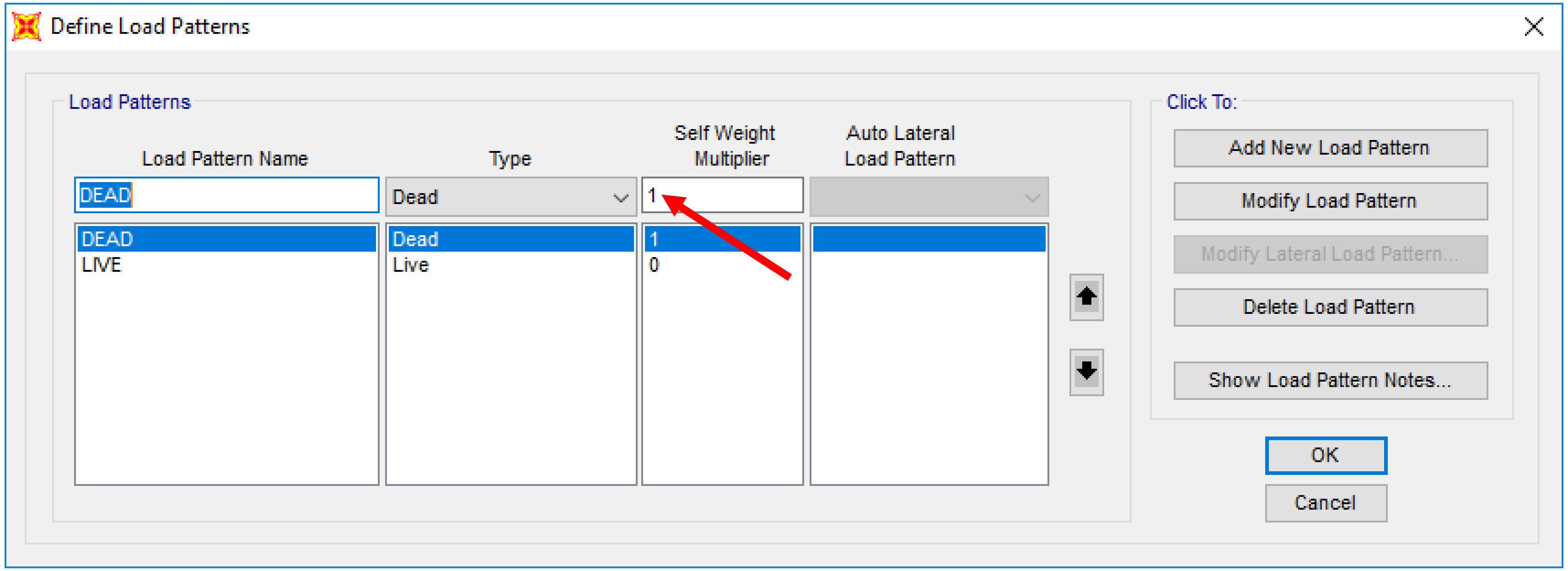




- **Element Self Mass and Additional Mass** option. This is the default. With this option, mass is calculated from the following specifications:
  - Mass density specified for materials.
  - Mass specified for link properties.
  - Additional mass assigned directly to the joints.
  - Additional line mass assigned to frame or cable objects.
  - Additional area mass assigned to area objects.

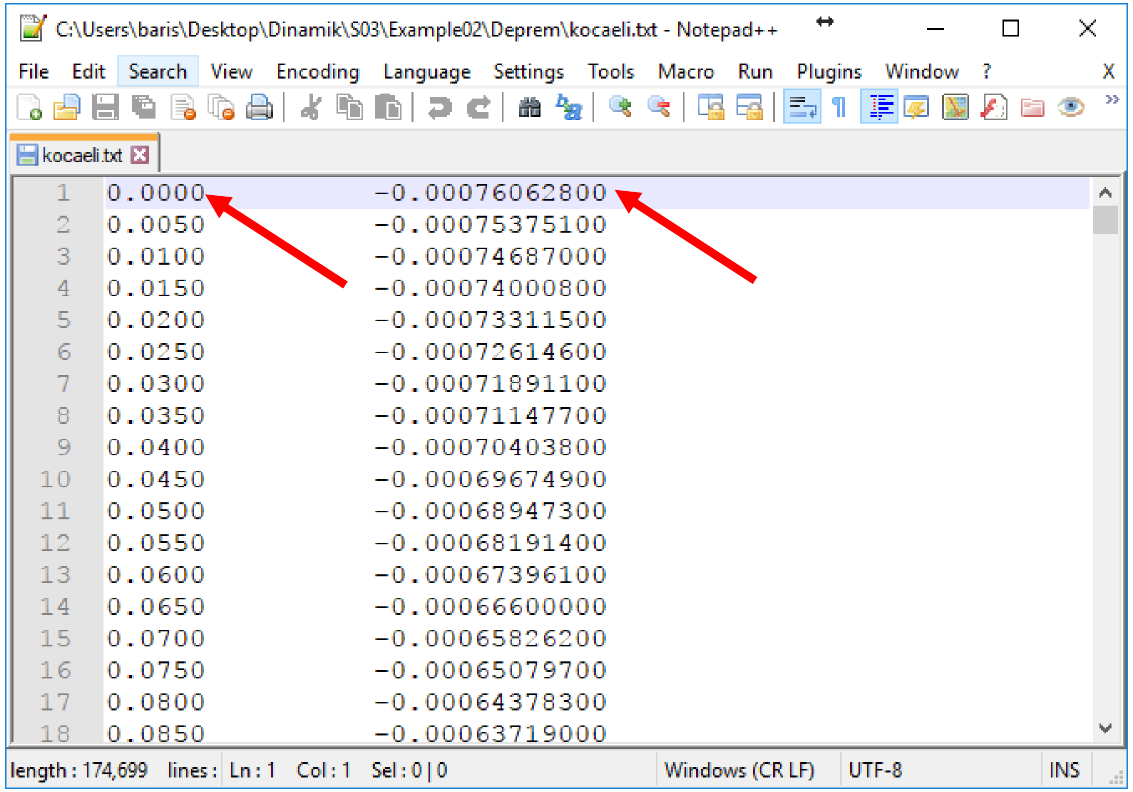
Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Kütle

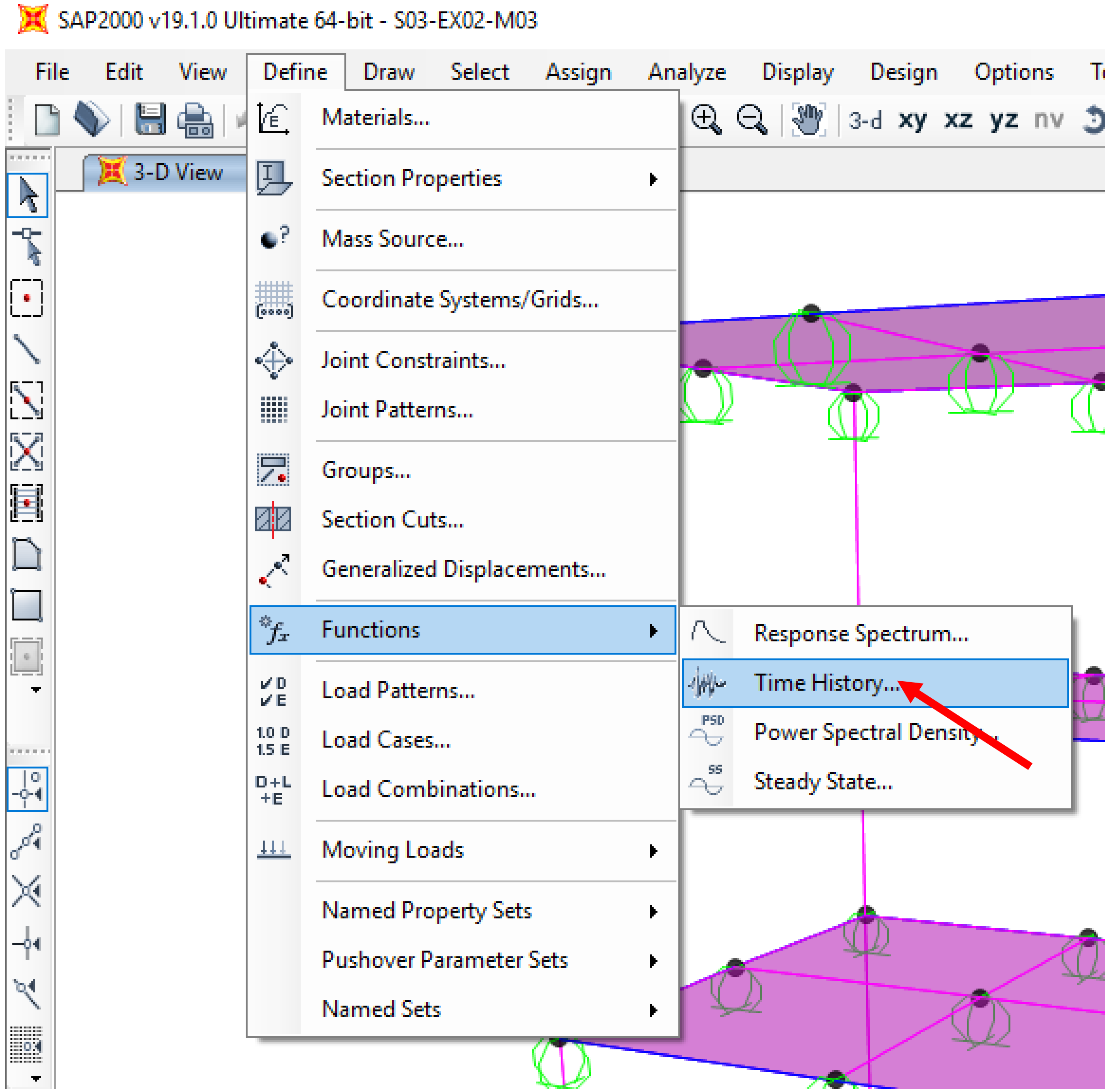




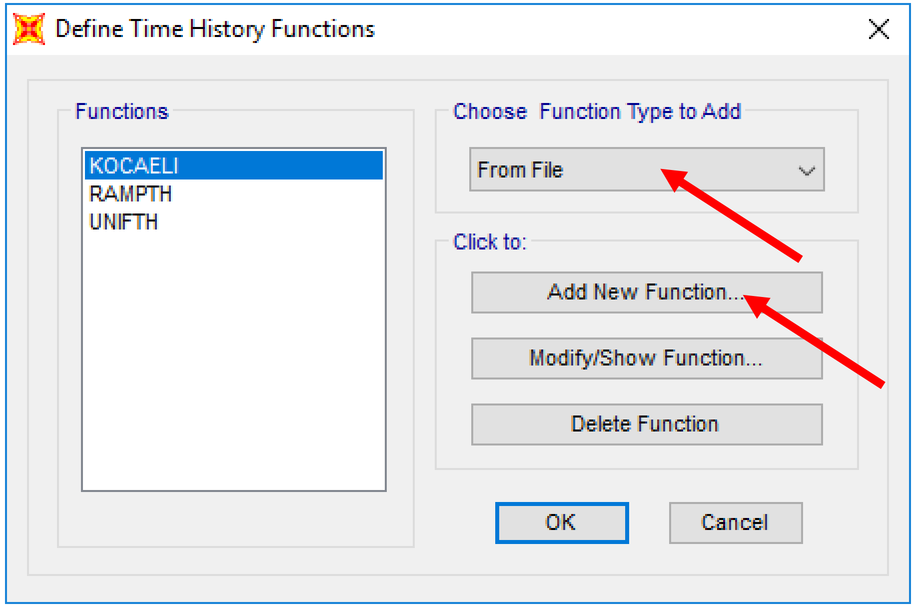
- **Specified Load Patterns** option. With this option, mass is calculated from a scaled combination of load patterns (see Define Mass Multiplier for Loads, below). The net load acting downward (in the negative global Z direction) on each element is divided by the acceleration due to gravity, in the current units, and is used for the mass in the three translational directions. See "Detailed Calculations" below. Load patterns should generally represent weight, and should not contain self-equilibrating loads, such as temperature and prestress.

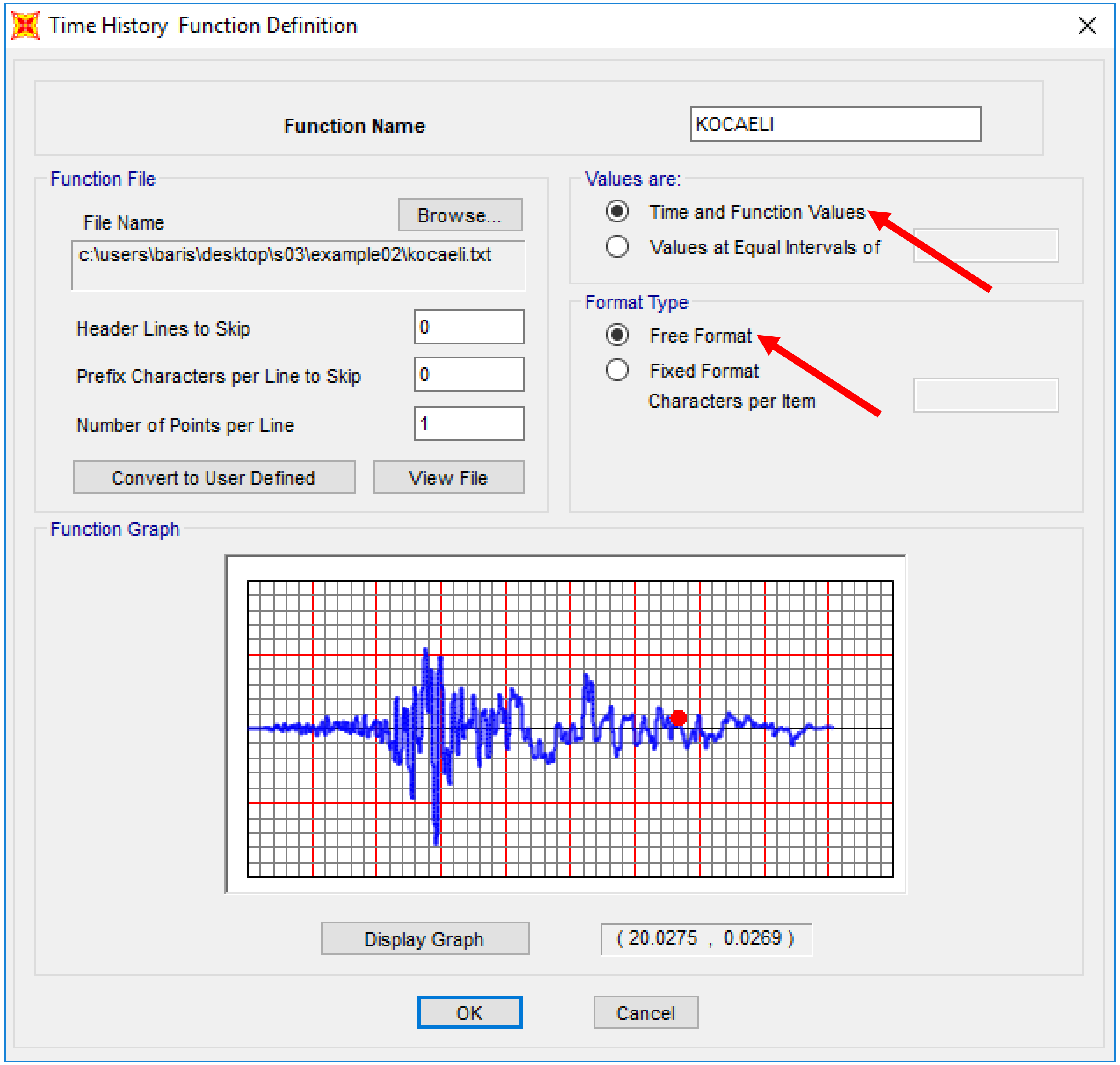
Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Deprem



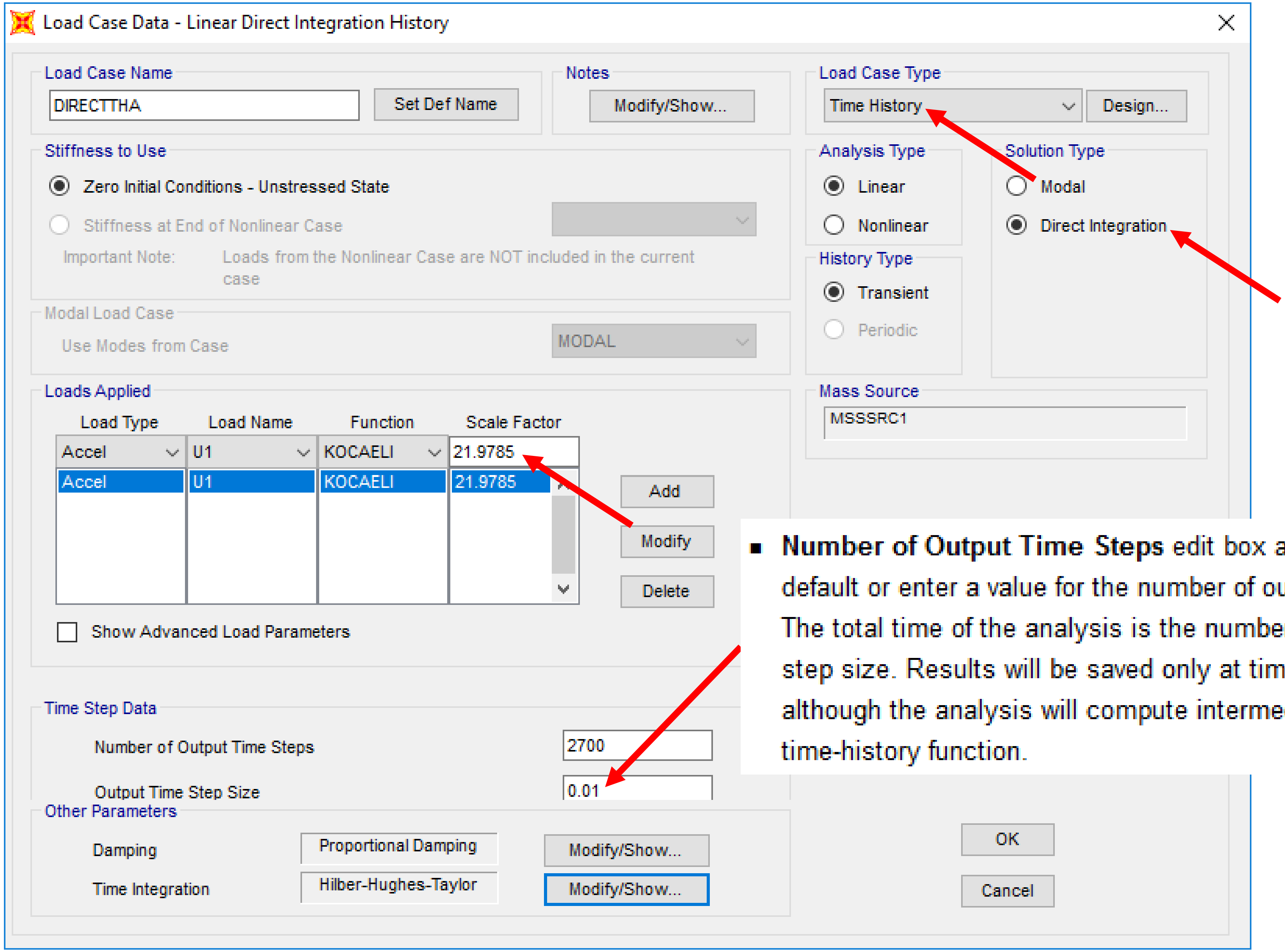


Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Deprem





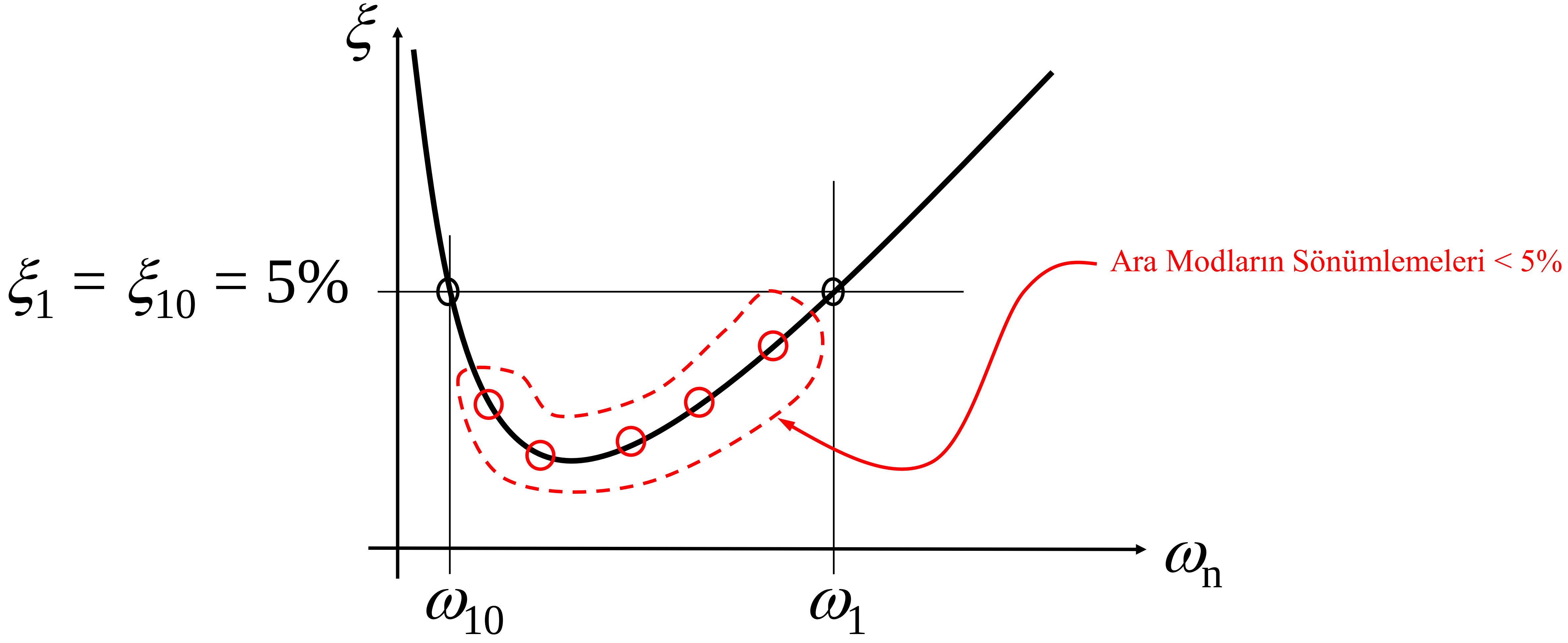
Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000



- **Number of Output Time Steps** edit box and **Output Time Step Size** edit box. Accept the default or enter a value for the number of output time steps and the size of the output time step. The total time of the analysis is the number of output time steps multiplied by the output time-step size. Results will be saved only at time zero and the subsequent output time steps, although the analysis will compute intermediate results at every time step of every applied-load time-history function.

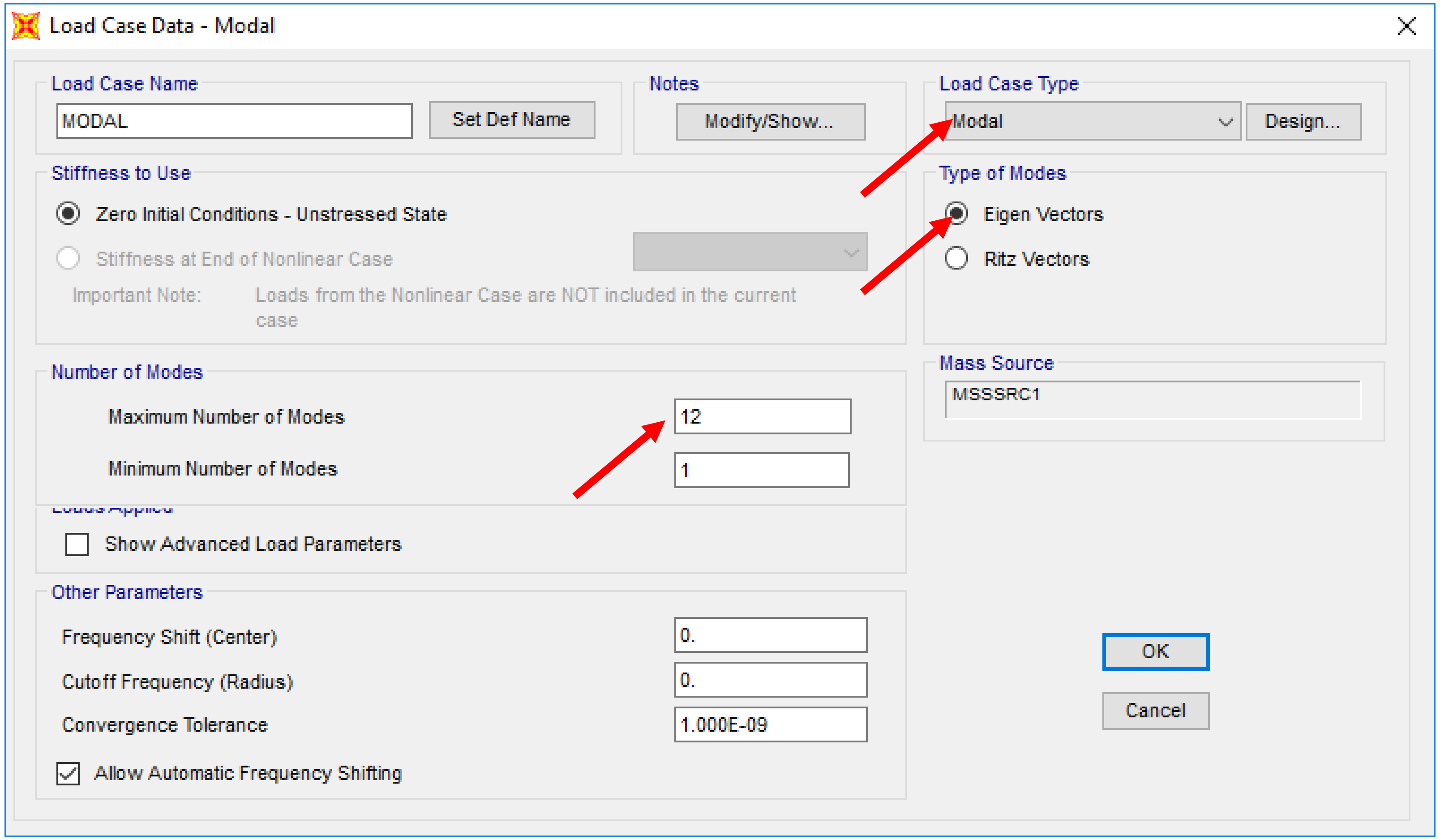
Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Sönümleme

- Doğrudan çözümde **C** matrisinin kendisi kullanılır. Bundan dolayı **C** matrisinin hesabı gerekir.
- Rayleigh yöntemi modal içsel sönümleme üzerinden klasik **C** matrisi oluşturmak için kullanılır.
- Bundan dolayı modal özelliklerin bilinmesinde fayda vardır. → Modal Analiz



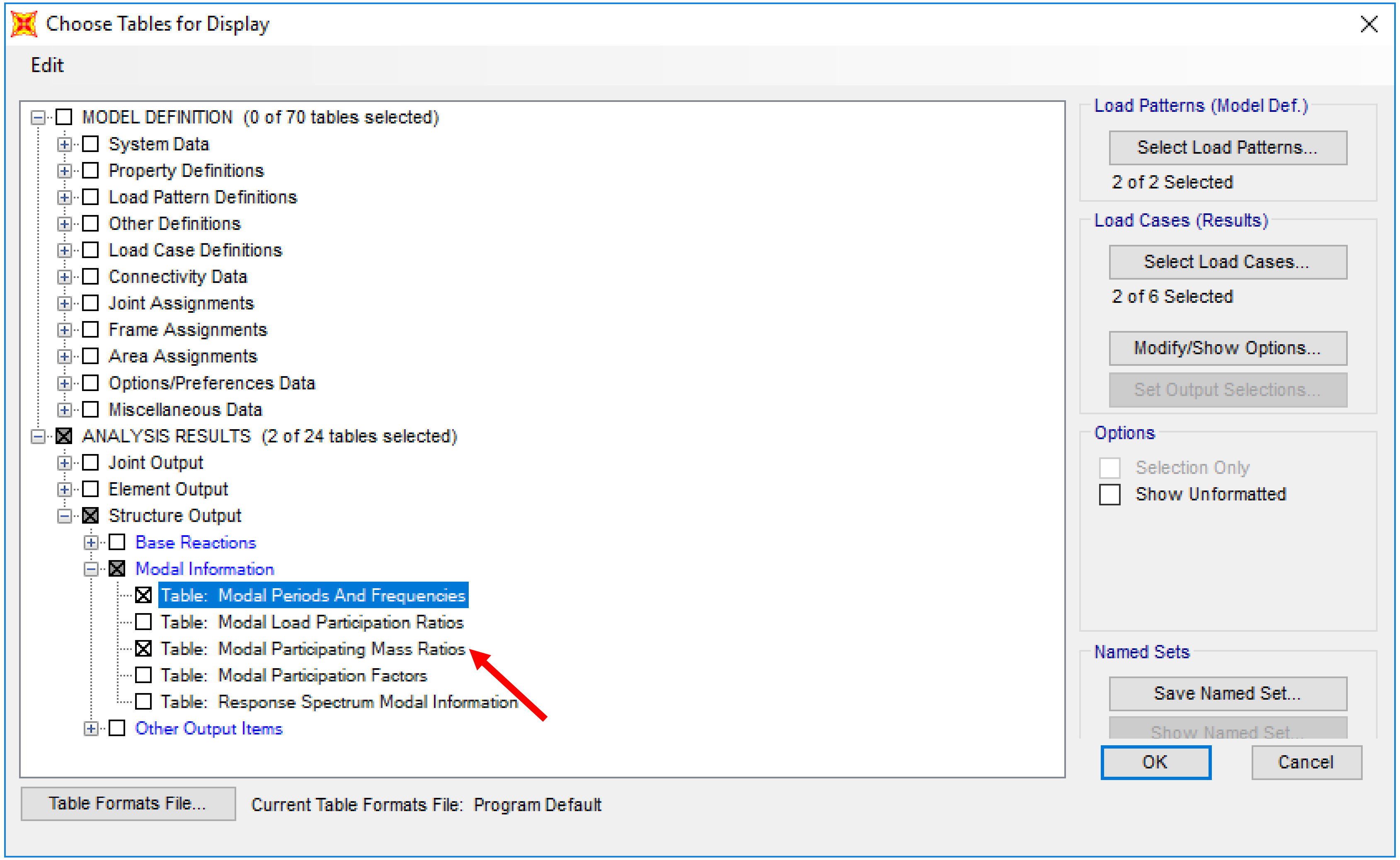
Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Sönümleme

- Modal Analiz



Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Sönümleme

- Modal Analiz Sonuçları



Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Sönümleme

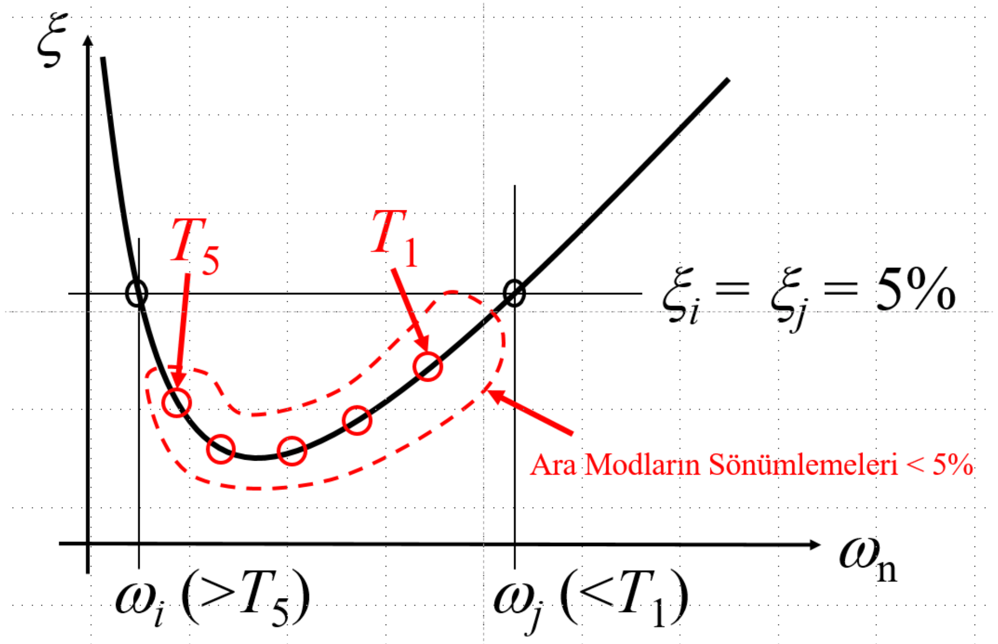
- Modal Analiz Sonuçları

Units: As Noted

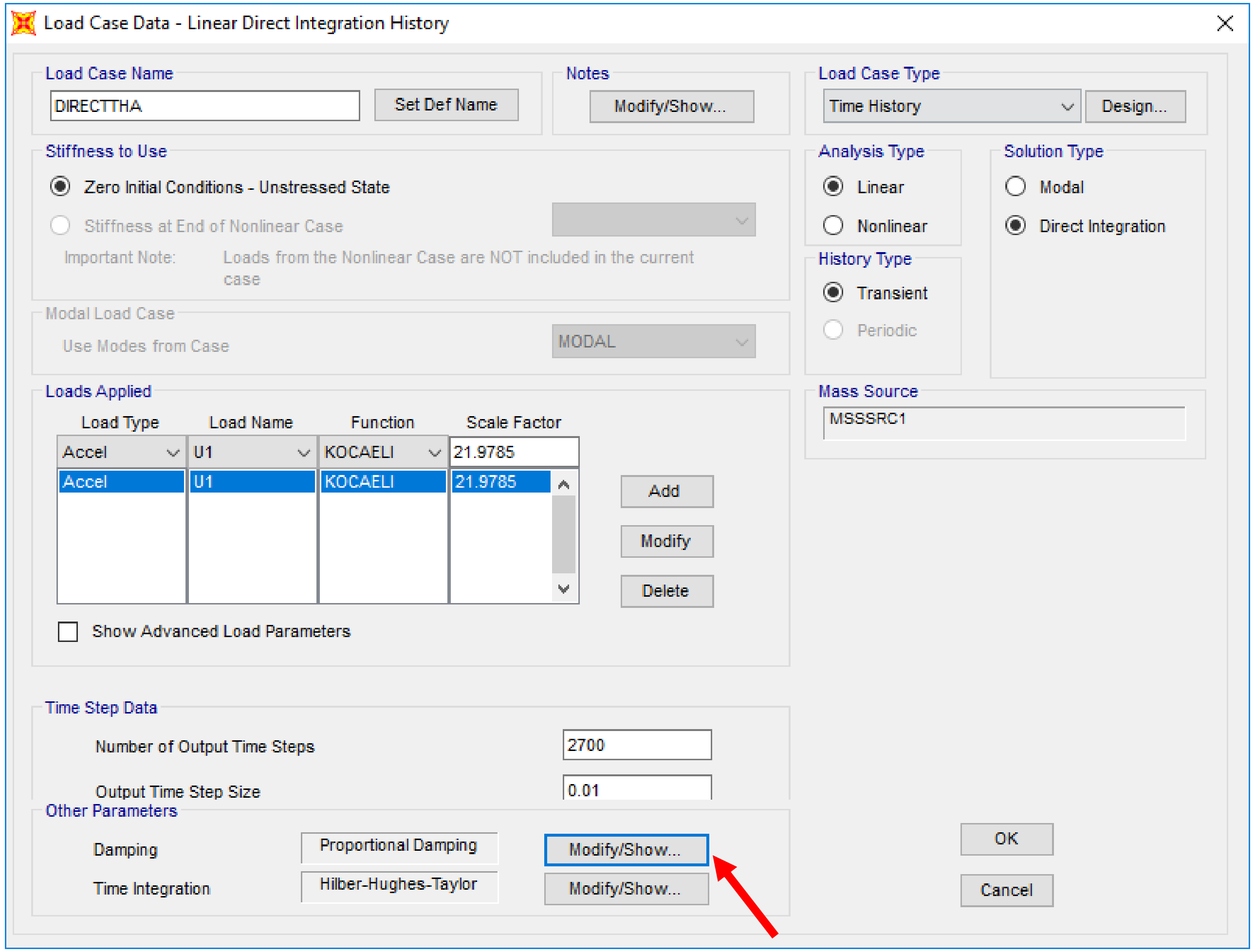
Filter:

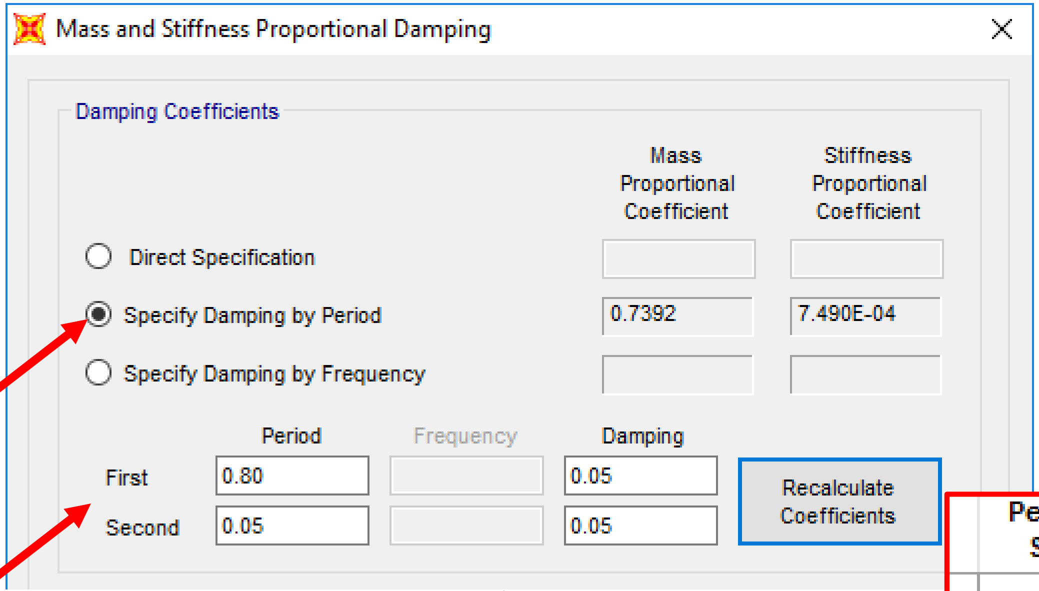
Modal Participating Mass Ratios

	OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless	RX Unitless	R… Uni…
▶	MODAL	Mode	1	0.704238	0.87968	0	0	0.87968	0	0	0	
	MODAL	Mode	2	0.241363	0.08712	0	0	0.9668	0	0	0	
	MODAL	Mode	3	0.153221	0.02416	0	0	0.99096	0	0	0	
	MODAL	Mode	4	0.119367	0.00748	0	0	0.99844	0	0	0	
	MODAL	Mode	5	0.104721	0.00156	0	0	1	0	0	0	

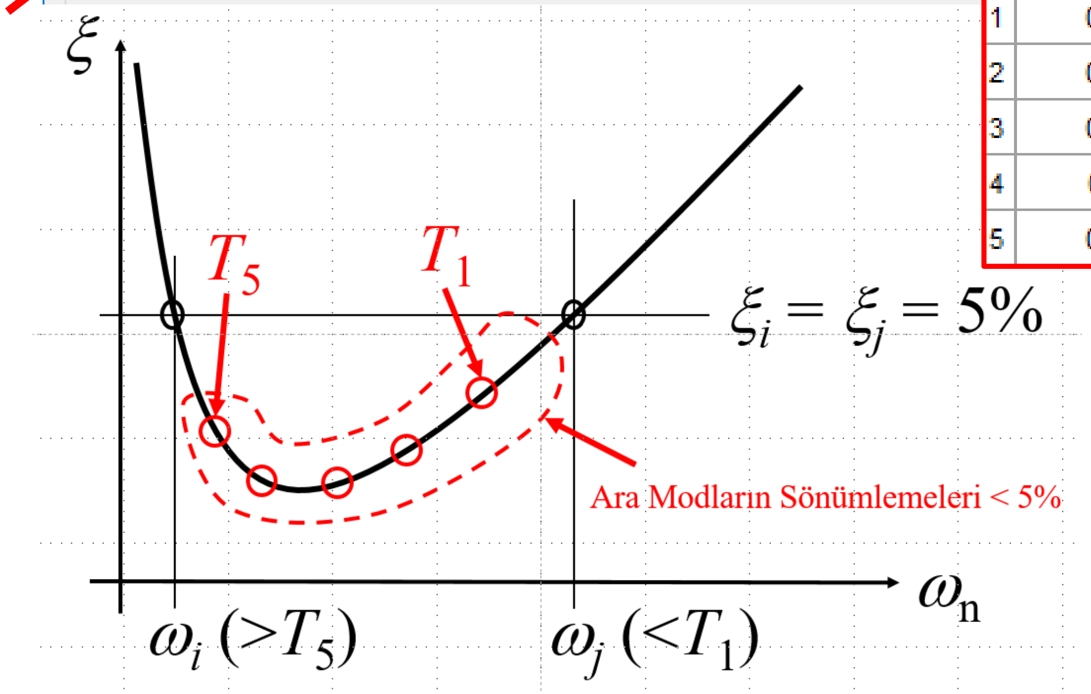


Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Sönümleme

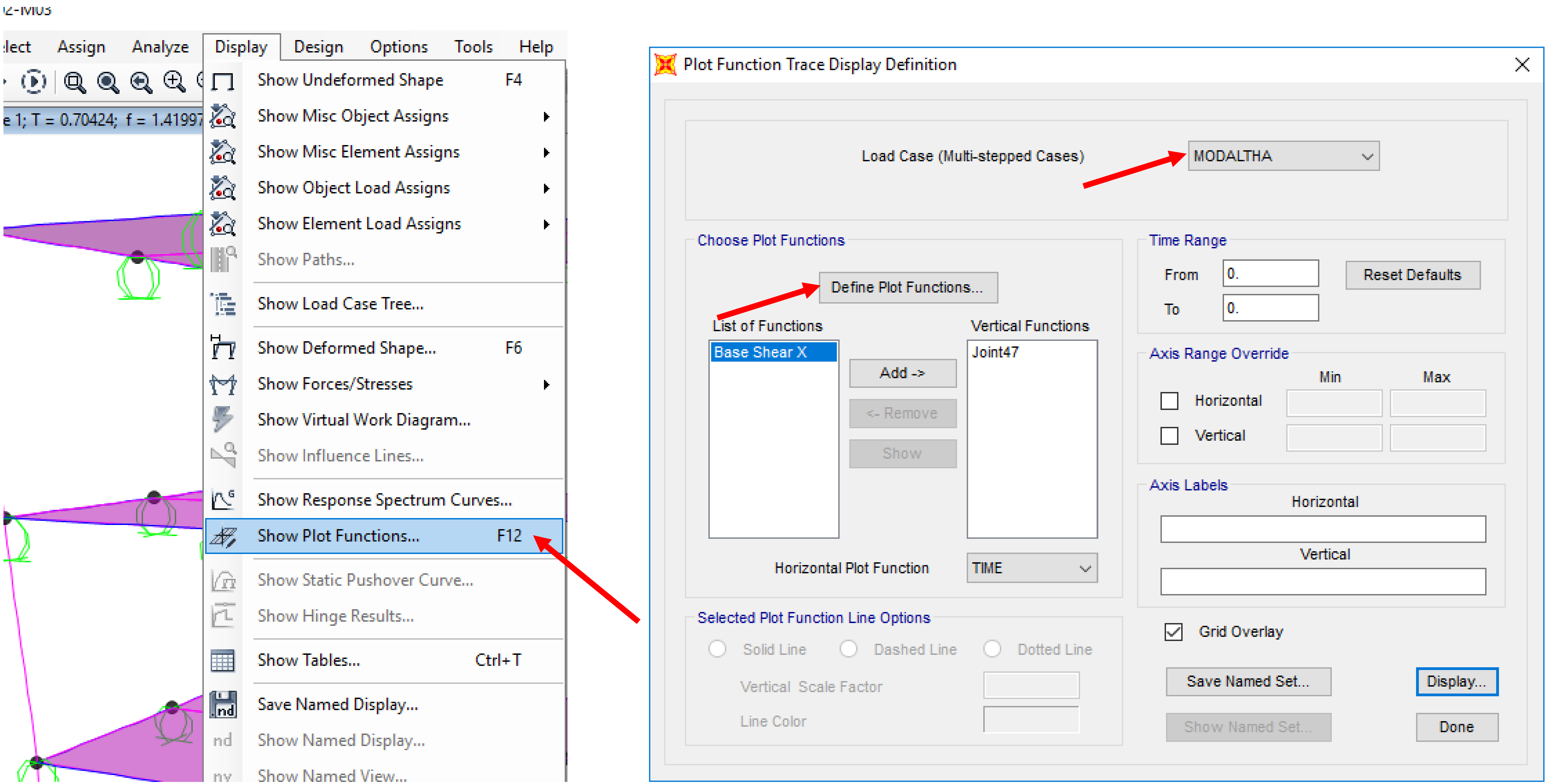




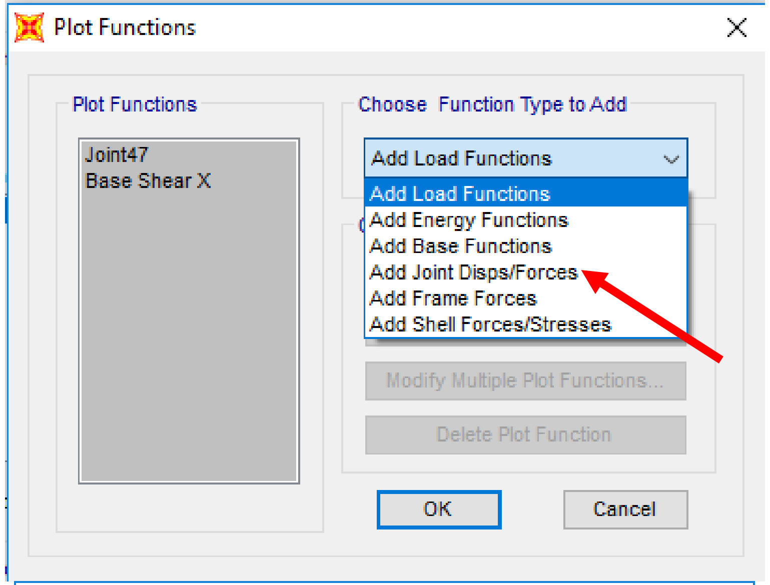
	Period Sec
1	0.704238
2	0.241363
3	0.153221
4	0.119367
5	0.104721

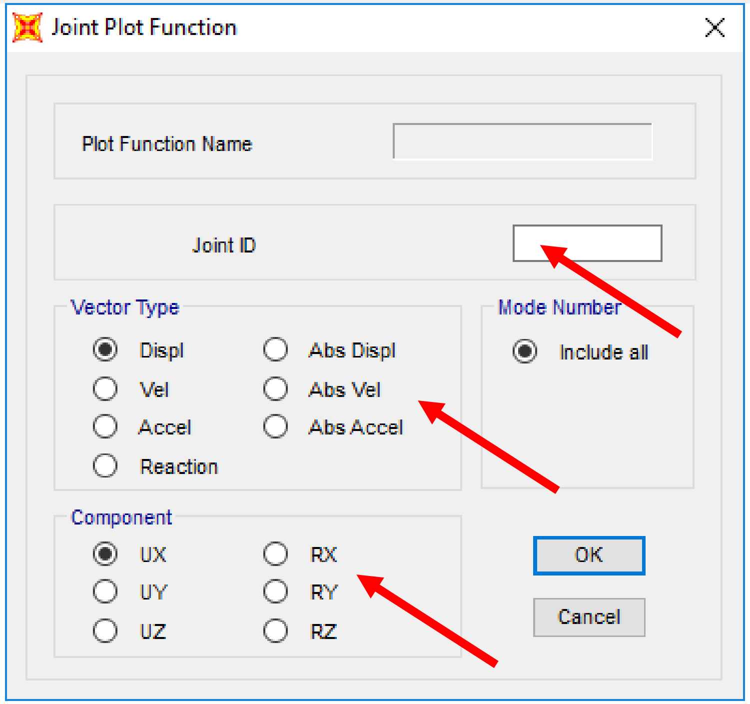


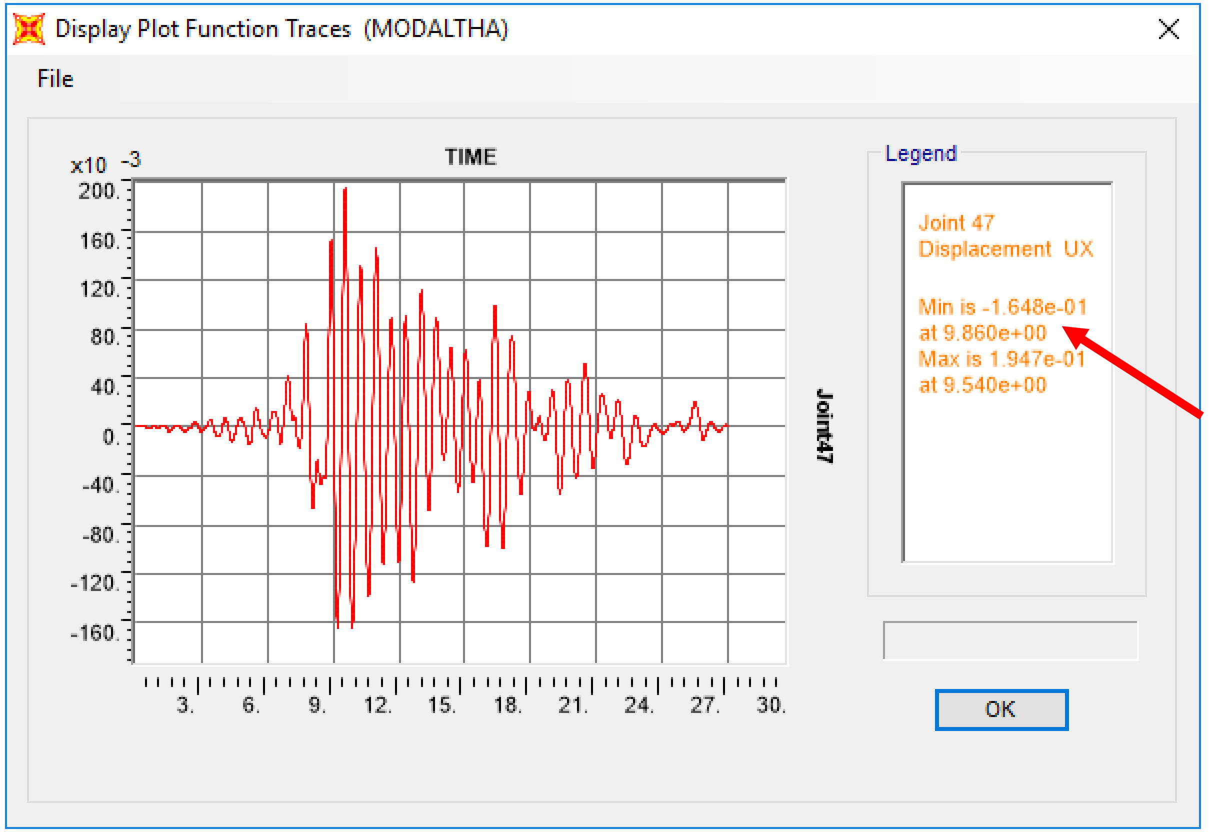
Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Sonuçlar



Zaman-Tanım Alanında Doğrudan Analiz: SAP2000 – Sonuçlar







Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz

$$\begin{bmatrix} \bar{m}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \bar{m}_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \bar{m}_n \end{bmatrix}_{n\times n} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_n \end{bmatrix}_{n\times 1} + \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & c_{nn} \end{bmatrix}_{n\times n} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix}_{n\times 1} + \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & k_{nn} \end{bmatrix}_{n\times n} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}_{n\times 1} = \begin{bmatrix} \bar{f}_1(t) \\ \bar{f}_2(t) \\ \vdots \\ \bar{f}_n(t) \end{bmatrix}_{n\times 1}$$

$$\bar{m}_1\ddot{q}_1(t) + c_{11}\dot{q}_1(t) + k_{11}q_1(t) = \bar{f}_1(t)$$

$$\bar{m}_2\ddot{q}_2(t) + c_{22}\dot{q}_2(t) + k_{22}q_2(t) = \bar{f}_2(t)$$

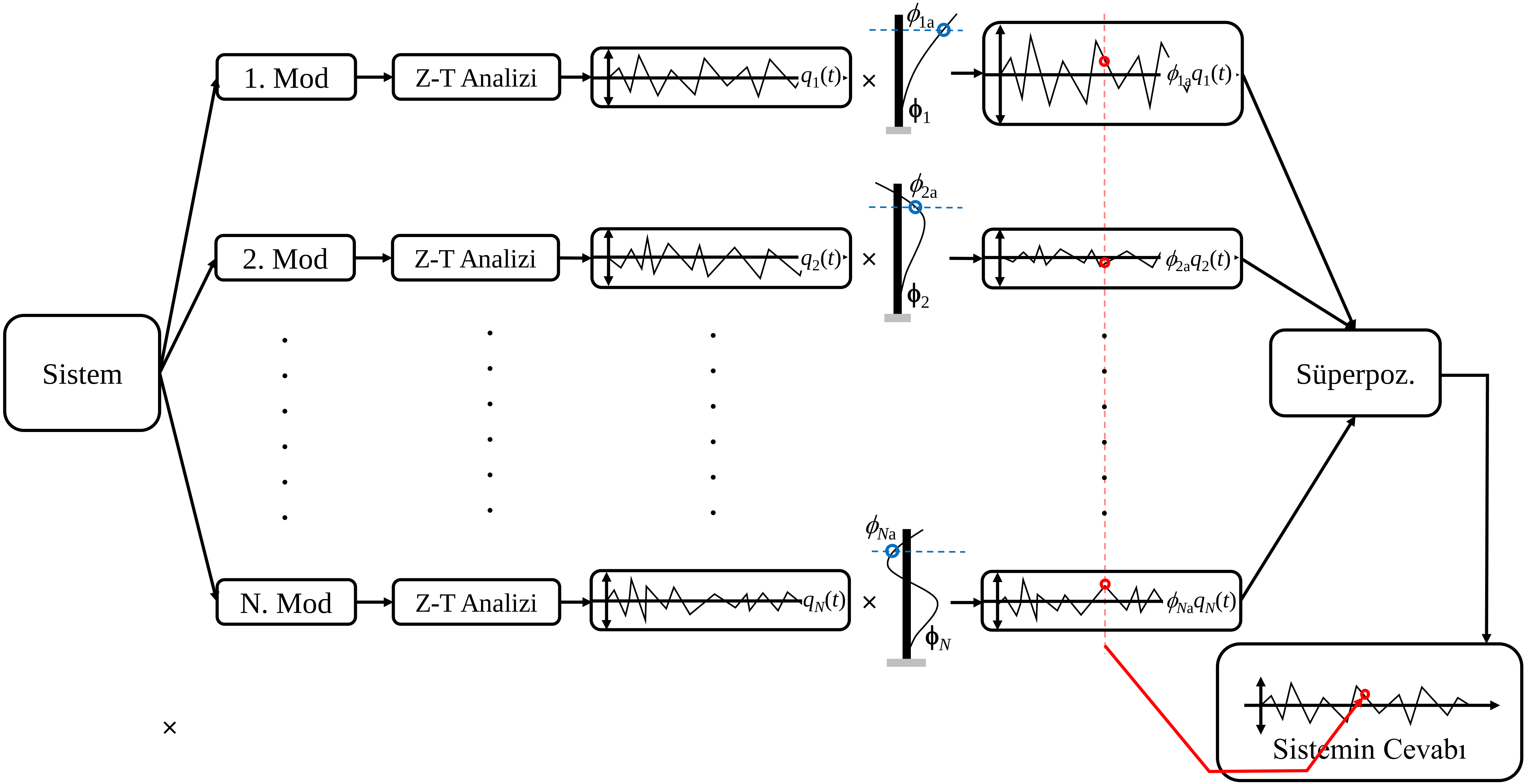
$$\vdots$$

$$\bar{m}_n\ddot{q}_n(t) + c_{nn}\dot{q}_n(t) + k_{nn}q_n(t) = \bar{f}_n(t)$$

→ $q_i(t)$ için çözülür

Unutmayalım: $\mathbf{x}(t)_{n\times 1} = \mathbf{\Phi}_{n\times n}\mathbf{q}(t)_{n\times 1}$

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz



Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t)+\mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{x}(t)=-\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t), \qquad \mathbf{x}(\mathbf{t})_{n\times 1}=\mathbf{\Phi}_{n\times n}\mathbf{q}(\mathbf{t})_{n\times 1}$$

$$\mathbf{M}\mathbf{\Phi}\ddot{\mathbf{q}}(t)+\mathbf{C}\mathbf{\Phi}\dot{\mathbf{q}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{\Phi}\mathbf{q}(t)=-\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$\mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\mathbf{\Phi}\ddot{\mathbf{q}}(t)+\mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\mathbf{\Phi}\dot{\mathbf{q}}(t)+\mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\mathbf{\Phi}\mathbf{q}(t)=-\mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}}(t)+\bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}}(t)+\bar{\mathbf{K}}\mathbf{q}(t)=-\mathbf{L}\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t) \qquad \mathbf{L}=\mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\mathbf{r}$$

$\mathbf{\Phi}$ doğal mod şekilleri, **C** klasik sönümleme matrisi ise:

$$\bar{m}_1\ddot{q}_1(t) \;+c_{11}\dot{q}_1(t) \;+k_{11}q_1(t) \;=L_1\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$\bar{m}_2\ddot{q}_2(t) \;+c_{22}\dot{q}_2(t) \;+k_{22}q_2(t) \;=L_2\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$\vdots$$

$$\bar{m}_n\ddot{q}_n(t) \;+c_{nn}\dot{q}_n(t) \;+k_{nn}q_n(t) \;=L_n\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz

n. Mod:

$$\bar{m}_n \ddot{q}_n(t) + c_{nn}\dot{q}_n(t) + k_{nn} q_n(t) = L_n \ddot{x}_g(t)$$

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

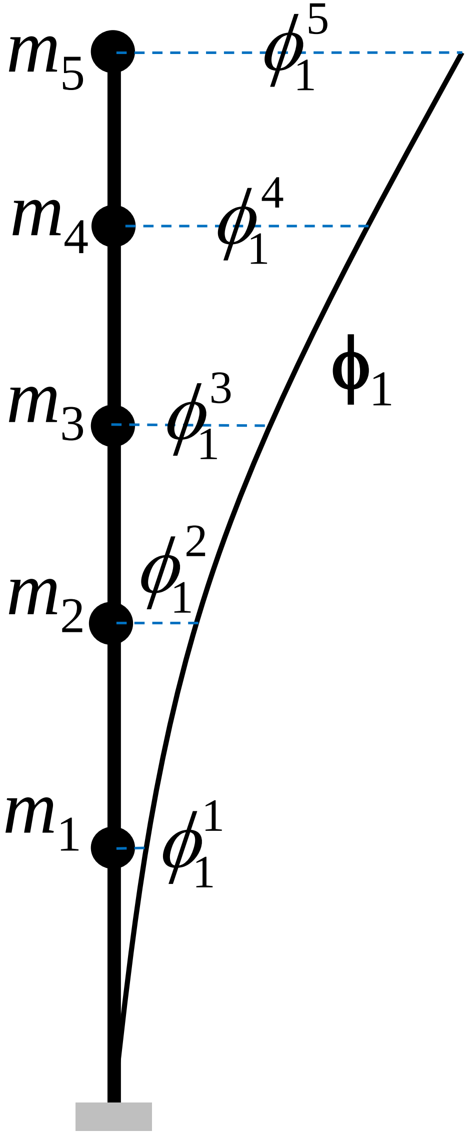
$$\bar{m}_n = \phi_n^T \mathbf{M} \phi_n = \sum_{i=1}^{n} \left(\phi_n^i\right)^2 m_i$$

$$L_n = \phi_n^T \mathbf{M}\mathbf{r} = \sum_{i=1}^{n} \phi_n^i m_i$$

L_n : Kütle katılım faktörü

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{\bar{m}_n} = \frac{\phi_n^T \mathbf{M}\mathbf{r}}{\bar{m}_n}$$

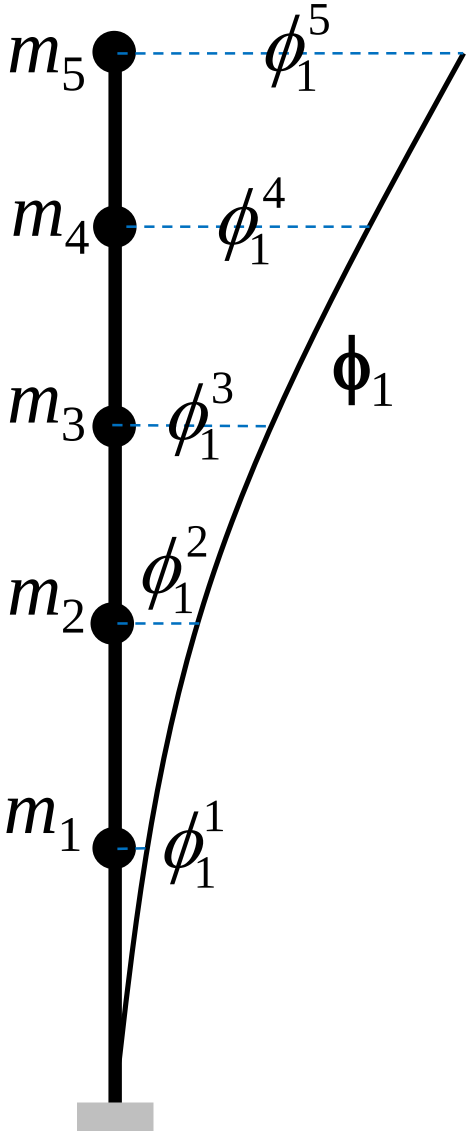
Γ_n : Normalize kütle katılım faktörü



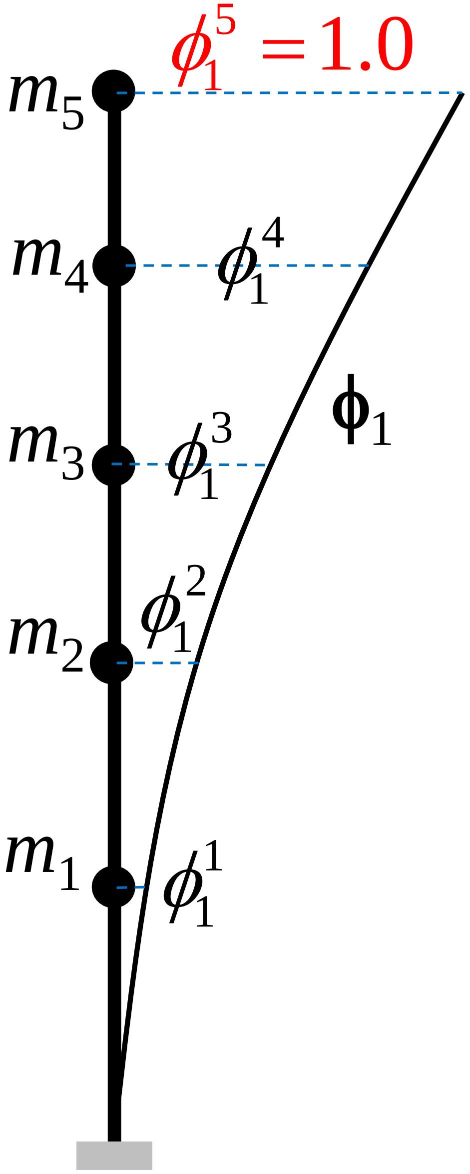
Notlar:

- Eğer $\phi_1^5 = 1$ ise L_n bir tür ağırlıklı toplam kütle olacaktır.
- Γ_n deprem ivmesinin ne kadar etkili olduğunu gösteren faktördür.

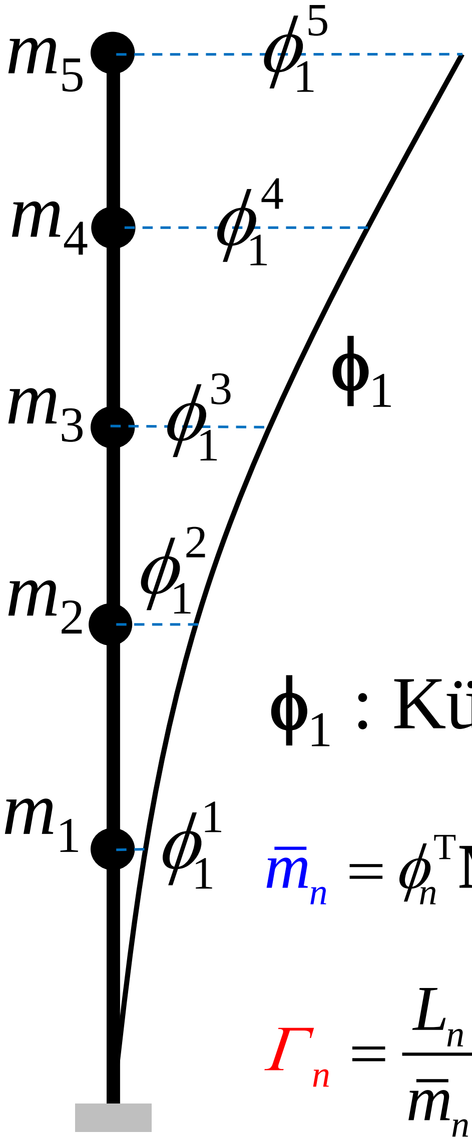
Mod Şekillerinin Normalleştirilmesi



$\boldsymbol{\phi}_1$: Genel



$\boldsymbol{\phi}_1$: Genlik-Normalize



$\boldsymbol{\phi}_1$: Kütle-Normalize

$$\bar{m}_n = \phi_n^{\mathrm{T}} \mathbf{M} \phi_n = \sum_{i=1}^{n} \left(\phi_n^i \right)^2 m_i = 1$$

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{\bar{m}_n} = L_n = \phi_n^{\mathrm{T}} \mathbf{Mr}$$

Mod Şekillerinin Normalleştirilmesi

Parametre	Genel Şekil	Genlik-Normalize	Kütle-Normalize
$\bar{m}$	-	Etkin Kütle	-
$\bar{c}$	-	$2\bar{m}\xi\omega$	$2\xi\omega$
$\bar{k}$	-	$\bar{m}\omega^2$	ω^2
L	-	Etkin Atalet Kütlesi	$L = \Gamma$
Γ	Etkin Yer İvmesi	Etkin Yer İvmesi	Etkin Yer İvmesi
Notlar		Fiziksel anlamı mevcuttur	Daha kolay çözülür

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz – Değerlendirme

TSD Sistem: $$m\ddot{x}(t)+c\dot{x}(t)+kx(t)=-m\ddot{x}_g(t)$$

Modal Sistem: $$\bar{m}_i\ddot{q}(t)+\bar{c}_i\dot{q}(t)+\bar{k}_i q(t)=-L_i\ddot{x}_g(t)$$

TSD Sistem: $$\ddot{x}(t)+2\xi_n\omega_n\dot{x}(t)+\omega_n^2 x(t)=-\ddot{x}_g(t)$$

Modal Sistem: $$\ddot{q}_i(t)+2\xi_i\omega_i\dot{q}_i(t)+\omega_i^2 q_i(t)=-\Gamma_i\ddot{x}_g(t)$$

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz

Tek Serbestlik Dereceli Sistemler:

Verilen bir ivme kaydı için sistem çözülürse:

$$\ddot{x}_g(t)$$

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

$$\ddot{x}(t)+2\xi_n\omega_n\dot{x}(t)+\omega_n^2x(t)=-\ddot{x}_g(t)$$

$$x(t)$$

Modal Sistem:

Aynı ivme kaydı için şu sistem çözülürse:

$$\ddot{x}_g(t)$$

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

$$\ddot{x}(t)+2\xi_n\omega_n\dot{x}(t)+\omega_n^2x(t)=-\Gamma\ddot{x}_g(t)$$

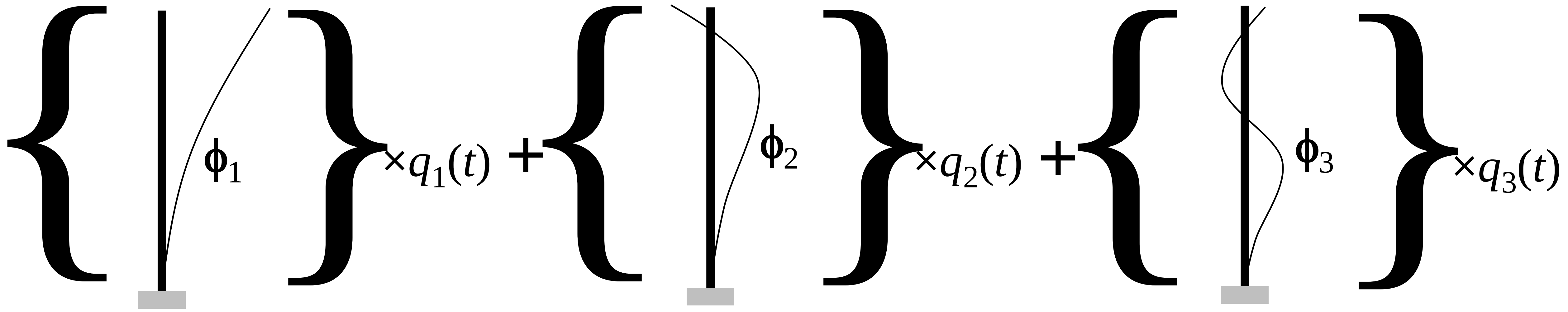
$$\Gamma x(t)$$

Doğrusal sistemler için

yapısal cevaplar Γ faktörü ile değişecektir

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz: Toplama İşlemi

$$\mathbf{x}(t)=\begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_1 \\ | \end{Bmatrix} q_1(t)+\begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_2 \\ | \end{Bmatrix} q_2(t)+\begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_3 \\ | \end{Bmatrix} q_3(t)$$



Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz: Sönümleme

- Bu yöntemde genelleştirilmiş serbestlik dereceleri çözülür: $a(t) + (2\xi\omega)v(t) + \omega^2 x(t) = f\,(t)$
- Sönümleme her mod için sönümleme oranı olarak ifade edilir, ξ_i
- Bundan dolayı **C** matrisinin oluşturulmasına gerek yoktur. Sadece ξ_i değerlerine ihtiyaç vardır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix}_{n\times n} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_n \end{bmatrix}_{n\times 1} + \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2\xi_2\omega_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & 2\xi_n\omega_n \end{bmatrix}_{n\times n} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix}_{n\times 1} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \omega_n^2 \end{bmatrix}_{n\times n} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}_{n\times 1} = \begin{bmatrix} \bar{f}_1(t) \\ \bar{f}_2(t) \\ \vdots \\ \bar{f}_n(t) \end{bmatrix}_{n\times 1}$$

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz: İçsel Kuvvetler

İki yöntem mevcuttur:

1. Yöntem: Rijitlik Matrisi ile

$$\mathbf{F}^{\text{iç}}(t) = \mathbf{Kx}(t)$$

$$\mathbf{x}_i(t) = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t), \qquad i.\ \text{moddan gelen yerdeğiştirme}$$

$$\mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = \mathbf{Kx}_i(t) = \mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t), \qquad i.\ \text{moddan gelen iç kuvvetler}$$

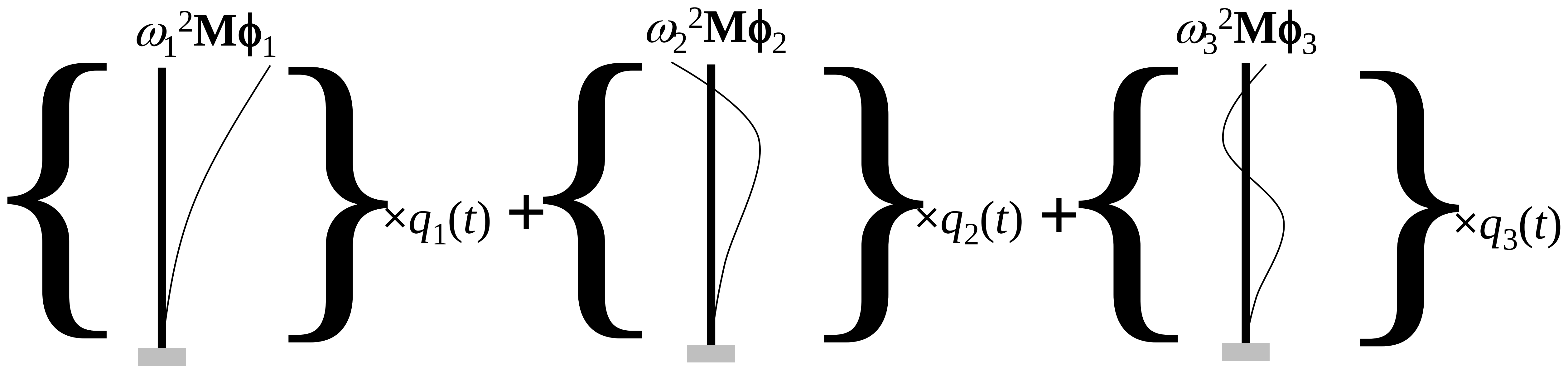
2. Yöntem: Kütle Matrisi ile

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} = \omega_i^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}, \qquad \text{modal denklemden}$$

$$\mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = \omega_i^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t)$$

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz: İçsel Kuvvetler

$$\mathbf{F}^{\text{iç}}(t)=\begin{Bmatrix} F_1^{\text{iç}}(t) \\ F_2^{\text{iç}}(t) \\ F_3^{\text{iç}}(t) \end{Bmatrix} \approx \begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_1^{\text{iç}}(t) \\ | \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_2^{\text{iç}}(t) \\ | \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_2^{\text{iç}}(t) \\ | \end{Bmatrix}$$



Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz: Taban Kesme Kuv.

Konsol kolon tipi yapılar için iki yöntem mevcuttur:

1. Yöntem: Rijitlik Matrisi ile

$$F^{\text{taban}}(t) = -\left(F_1^{\text{iç}}(t) + F_2^{\text{iç}}(t) + \cdots + F_n^{\text{iç}}(t)\right), \qquad \text{kat kuvvetlerinin toplamı}$$

$$F^{\text{taban}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}^{\text{iç}}(t), \qquad \mathbf{F}^{\text{iç}}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t), \qquad \mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}_i(t), \qquad \mathbf{x}_i(t) = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t)$$

$$F_i^{\text{taban}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t), \qquad i. \text{ moddan gelen taban kesme kuvveti}$$

2. Yöntem: Kütle Matrisi ile

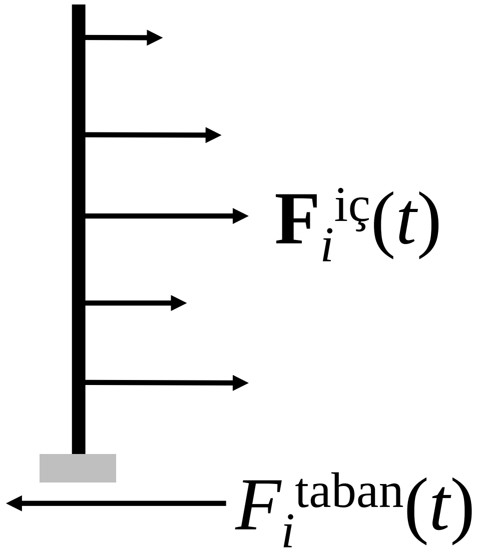
$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} = \omega_i^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}, \qquad \text{modal denklemden}$$

$$F_i^{\text{taban}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t)$$

$$F_i^{\text{taban}}(t) = -\omega_i^2 \mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t)$$

$$L_i = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\mathbf{r}, \qquad L_i = L_i^{\mathrm{T}} = \mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}$$

$$F_i^{\text{taban}}(t) = -\omega_i^2 L_i q_i(t)$$

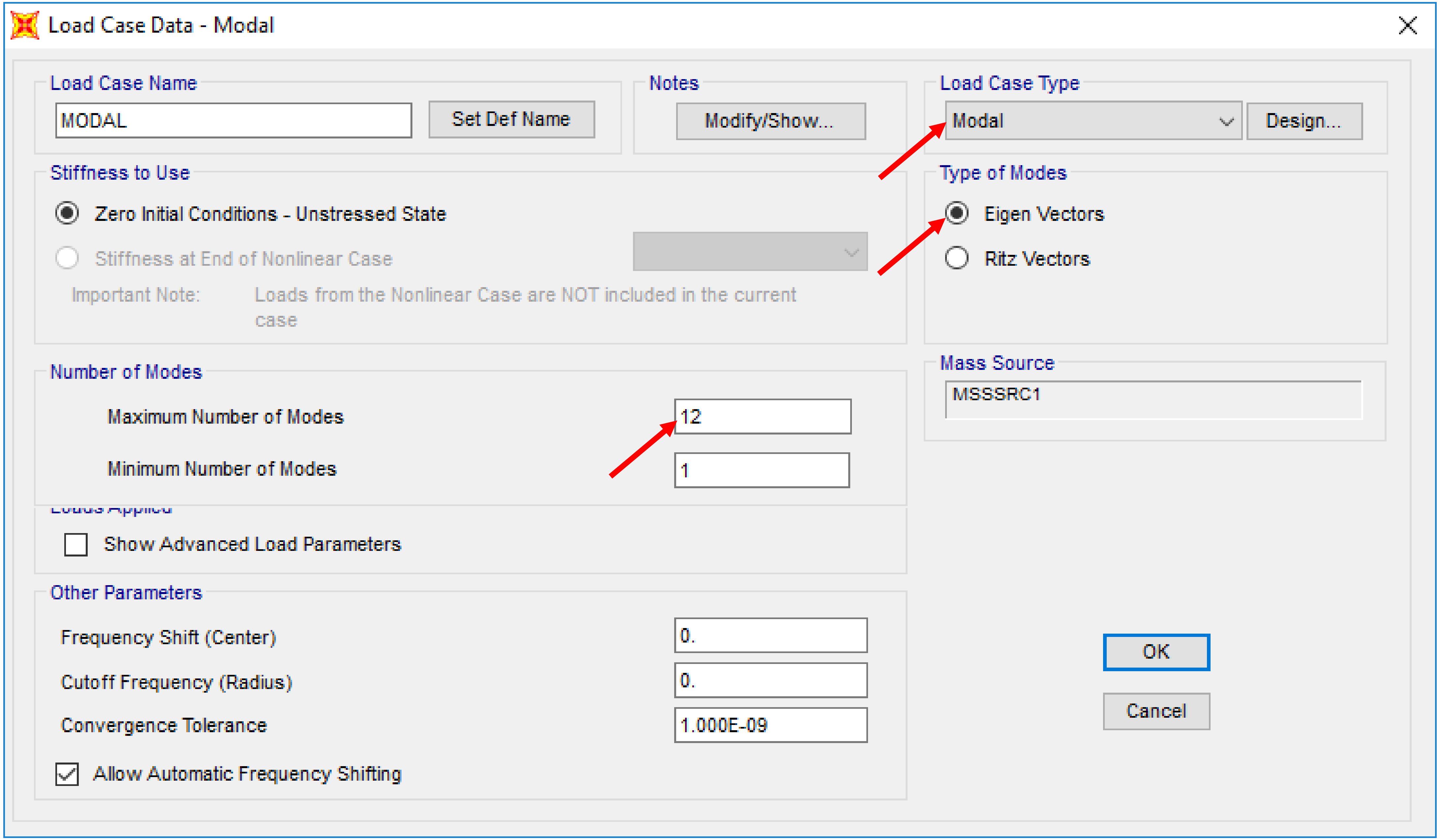


Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz: Taban Kesme Kuv.

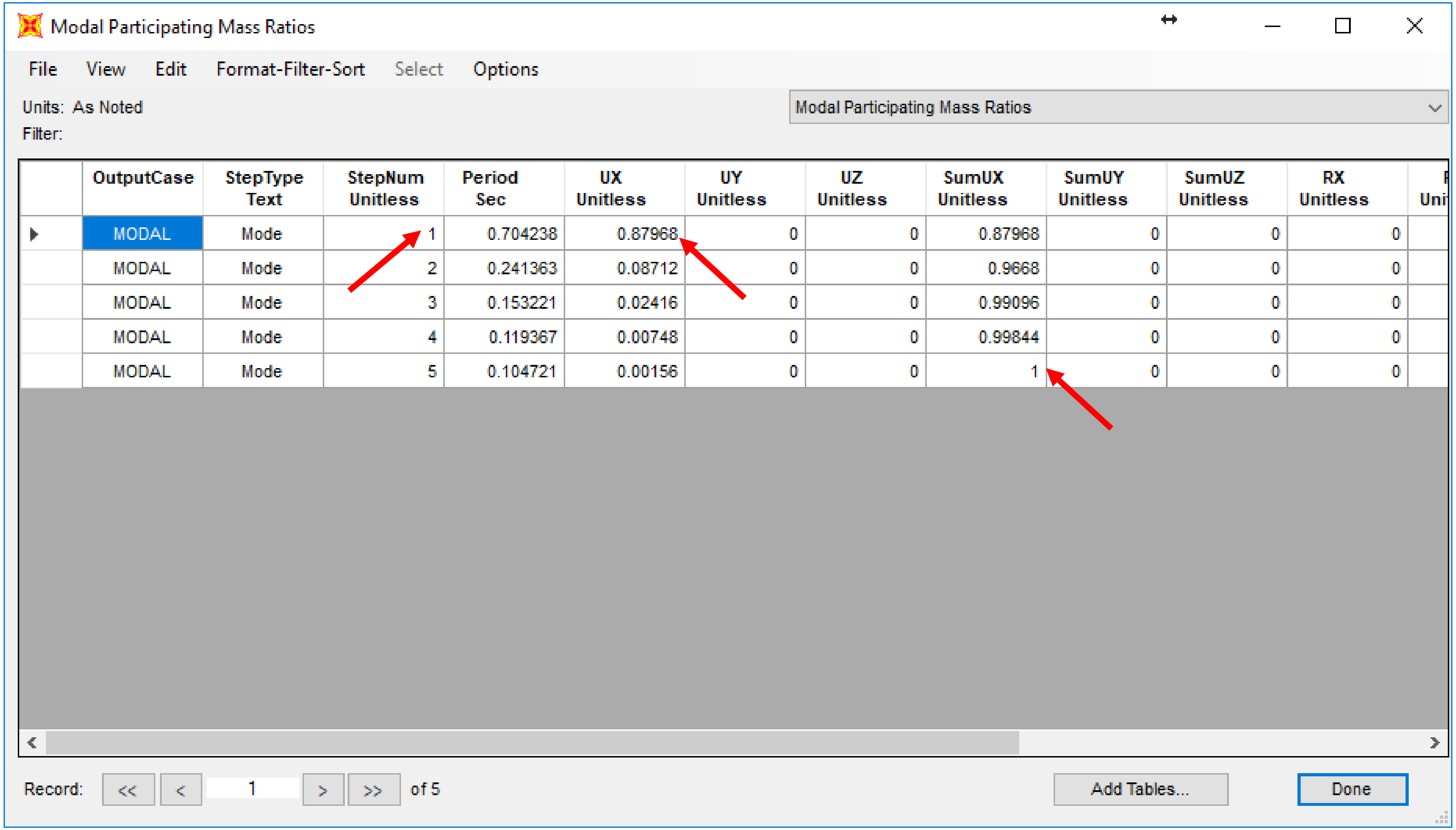
$$F^{\text{taban}}(t) = F_1^{\text{taban}}(t) + F_2^{\text{taban}}(t) + F_3^{\text{taban}}(t)$$

$$F^{\text{taban}}(t) = -\omega_1^2 L_1 q_1(t) - \omega_2^2 L_2 q_2(t) - \omega_2^2 L_2 q_2(t)$$

Modal Analiz: SAP2000



Modal Analiz: SAP2000 – Kütle Katılım Oranı



OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless	RX Unitless	R Uni
MODAL	Mode	1	0.704238	0.87968	0	0	0.87968	0	0	0	
MODAL	Mode	2	0.241363	0.08712	0	0	0.9668	0	0	0	
MODAL	Mode	3	0.153221	0.02416	0	0	0.99096	0	0	0	
MODAL	Mode	4	0.119367	0.00748	0	0	0.99844	0	0	0	
MODAL	Mode	5	0.104721	0.00156	0	0	1	0	0	0	

Modal Analiz: SAP2000 – Normalize Kütle Katılım Faktörü

Modal Participation Factors

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

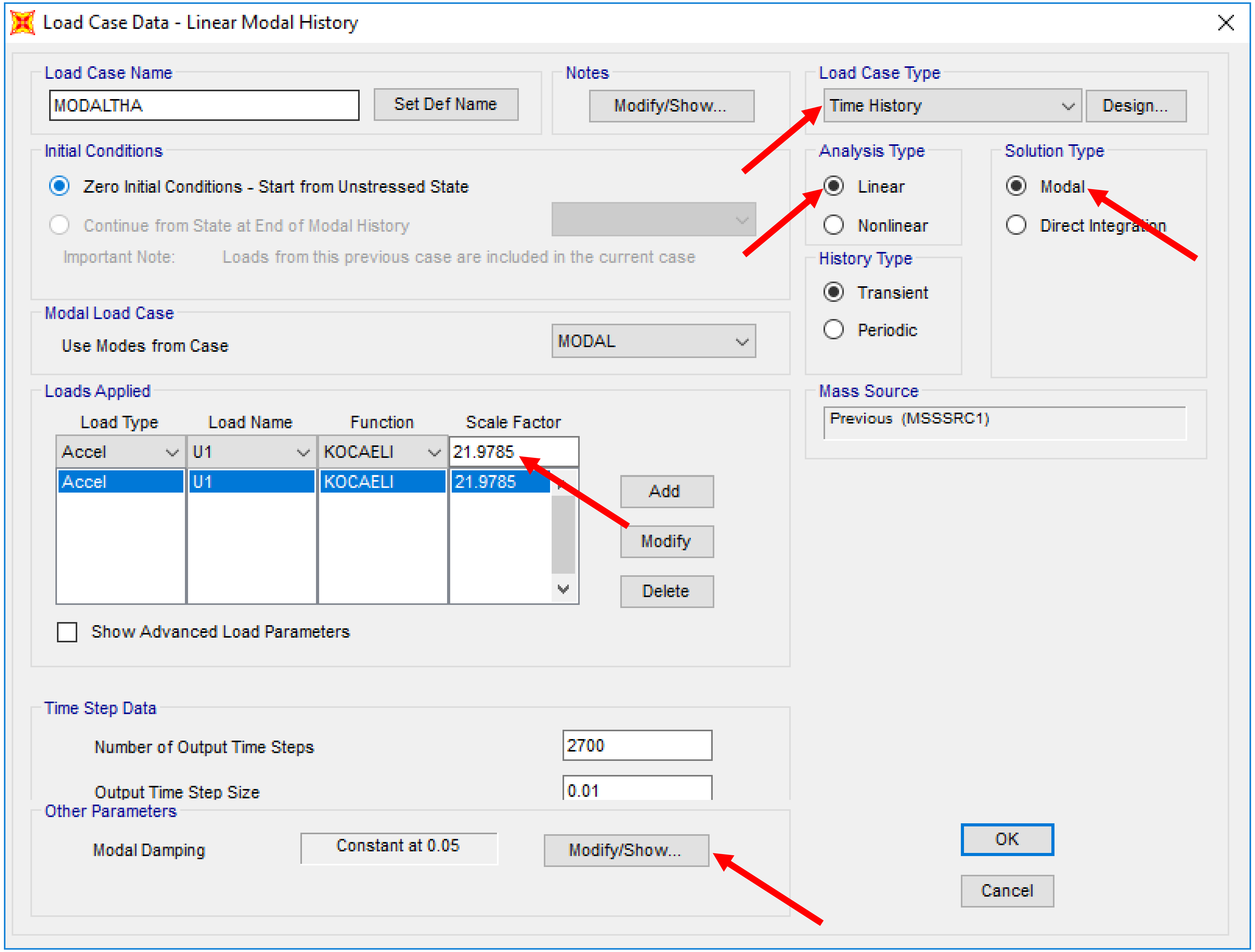
Filter:

Modal Participation Factors

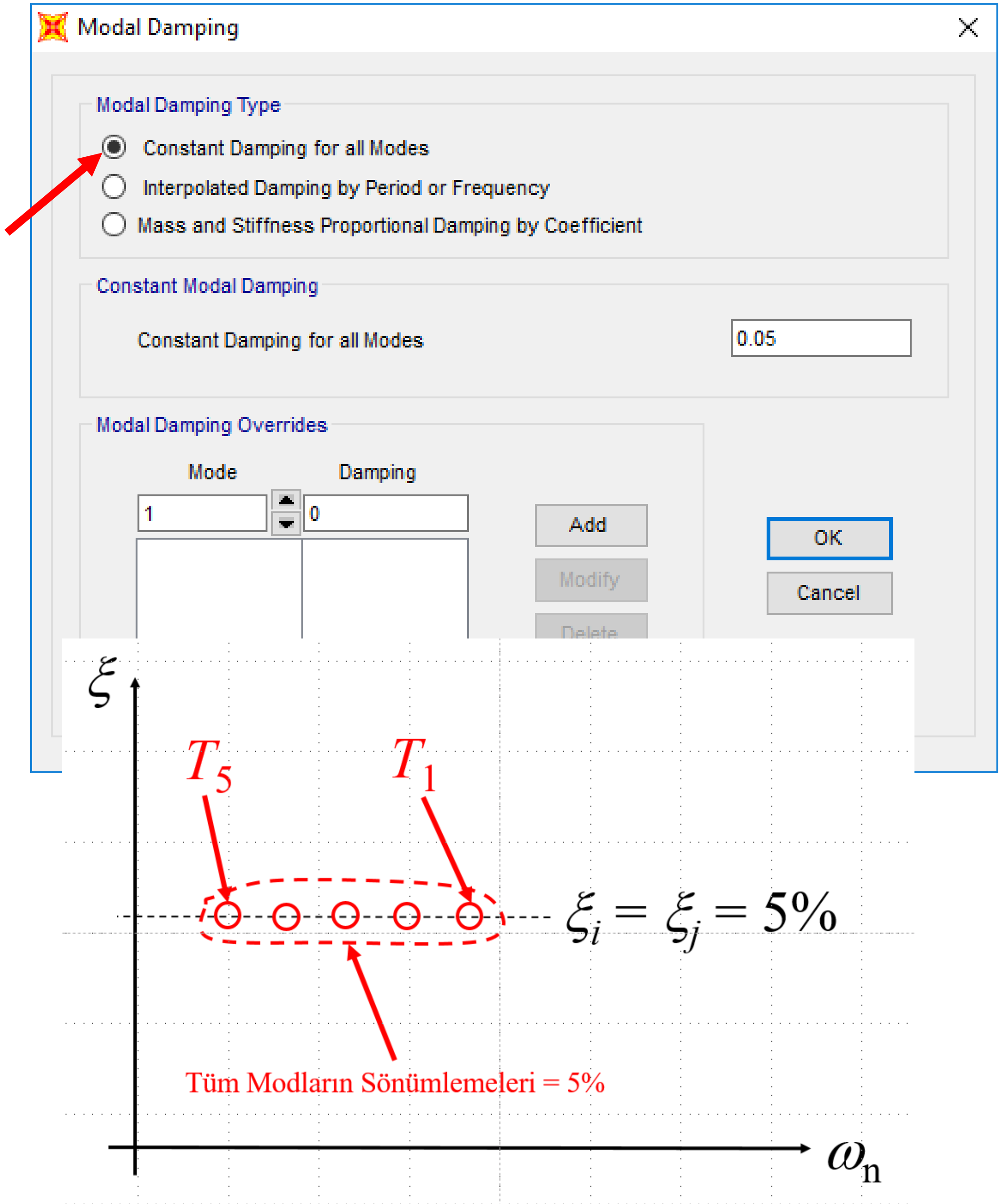
OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX KN-m	UY KN-m	UZ KN-m	RX KN-m	RY KN-m	RZ KN-m	ModalMass KN-m-s2	Mo
MODAL	Mode	1	0.704238	32.136398	0	0	0	50.263398	-2.38E-16	1	
MODAL	Mode	2	0.241363	-10.113152	0	0	0	127.171923	7.359E-17	1	6
MODAL	Mode	3	0.153221	5.326102	0	0	0	-35.342029	-4.008E-17	1	16
MODAL	Mode	4	0.119367	2.963475	0	0	0	-31.931023	-2.126E-17	1	27
MODAL	Mode	5	0.104721	1.353105	0	0	0	-9.937387	-1.028E-17	1	35

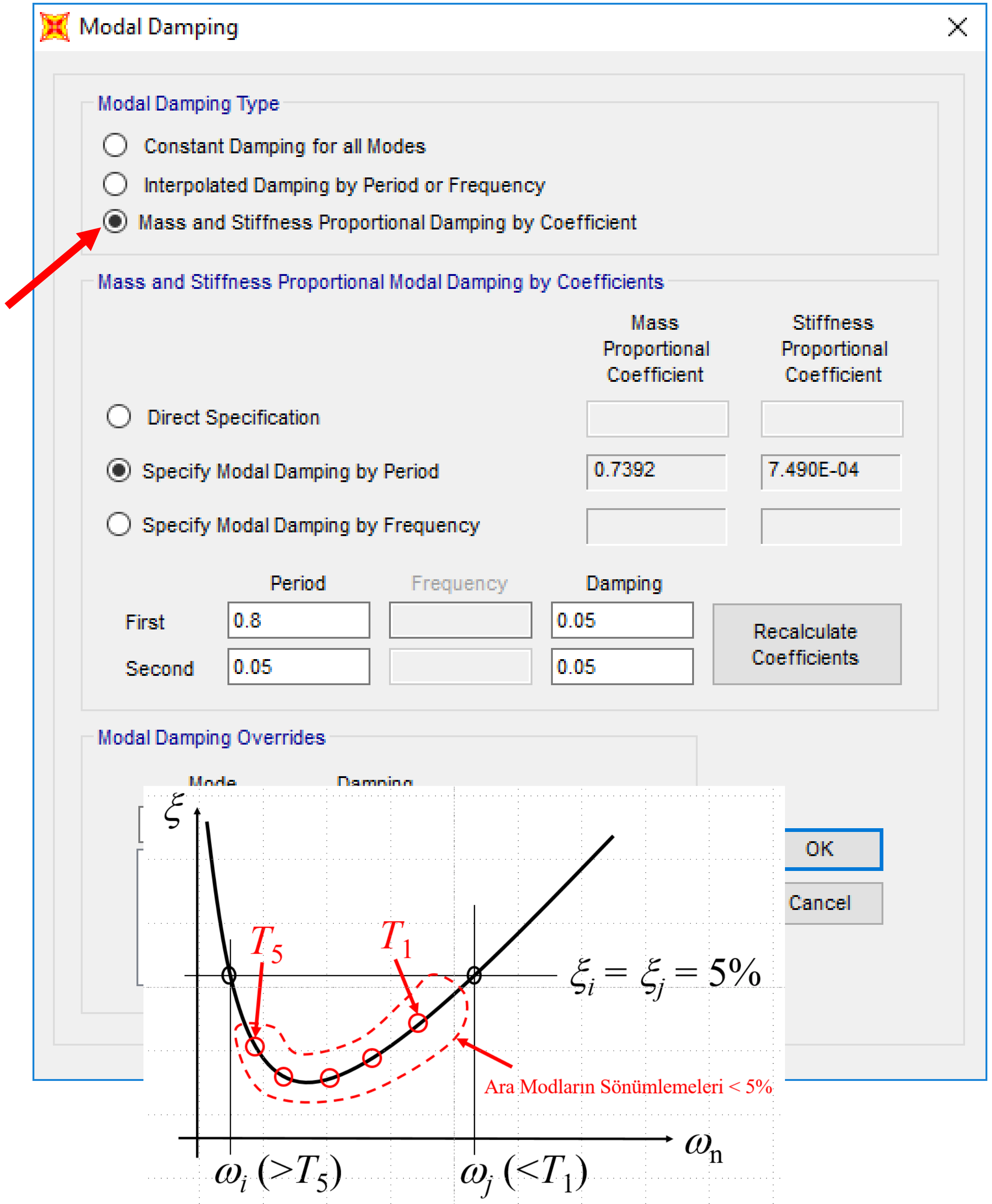
Record: << < 1 > >> of 5 Add Tables... Done

Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz: SAP2000



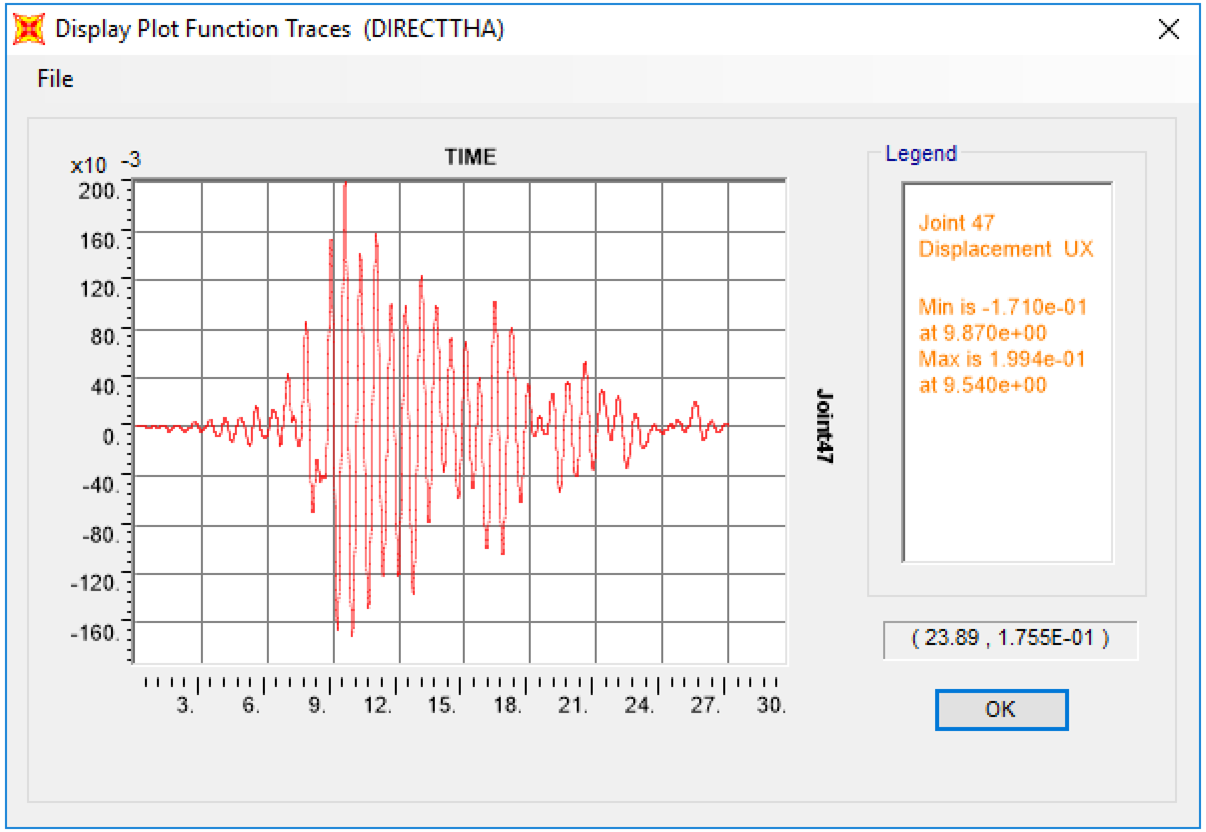
Zaman-Tanım Alanında Modal Toplama ile Analiz: SAP2000 – Sönüm.



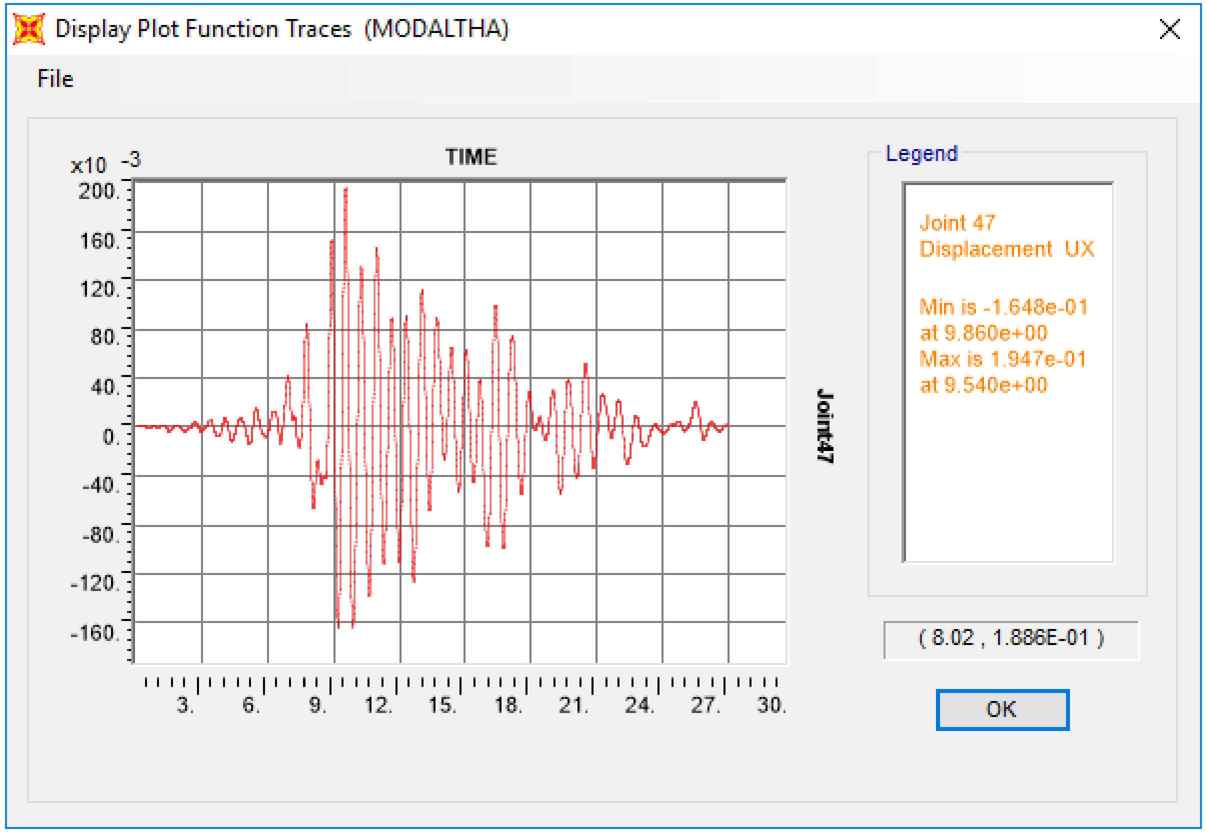


Sonuçların Karşılaştırılması

Doğrudan Çözüm

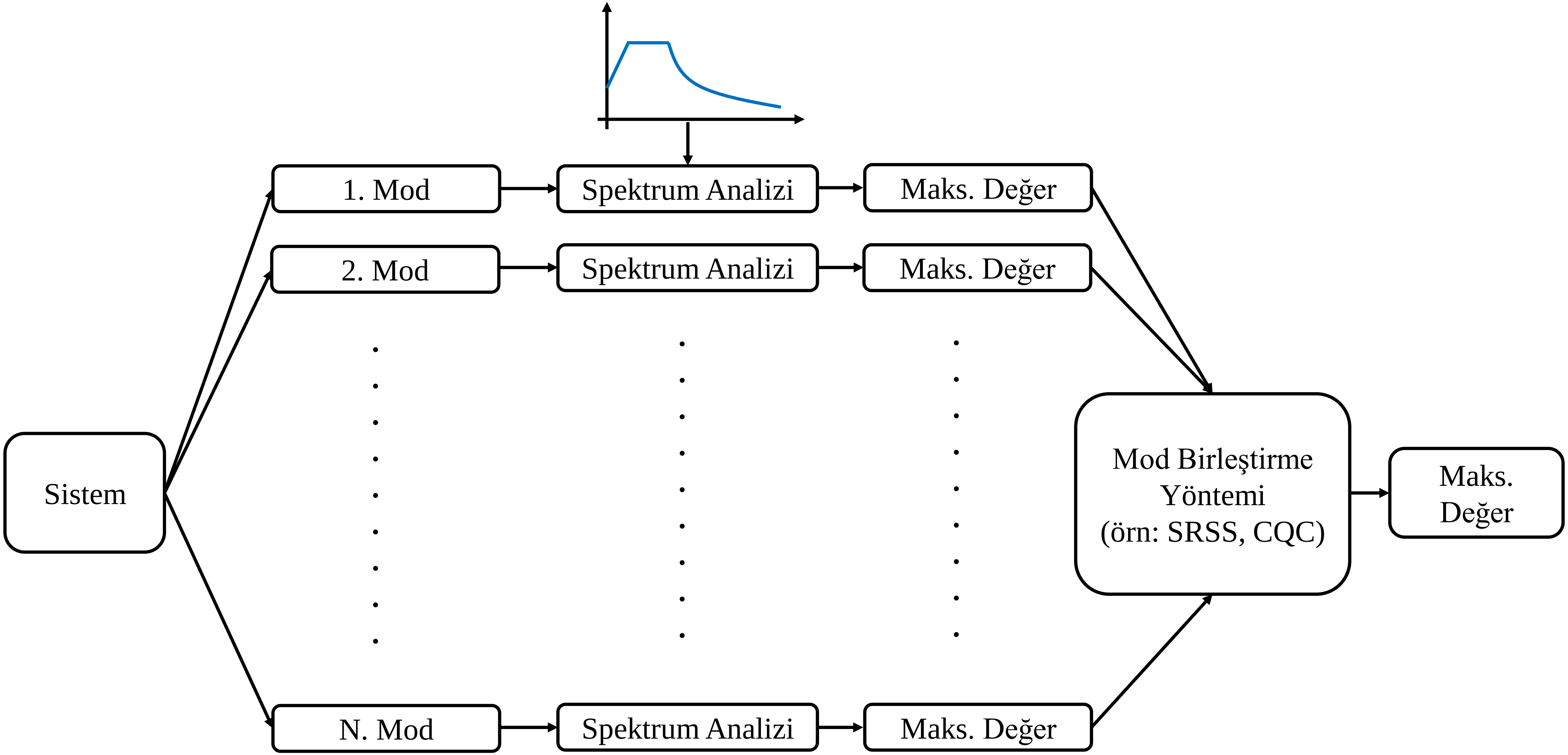


Modal Toplama ile Çözüm

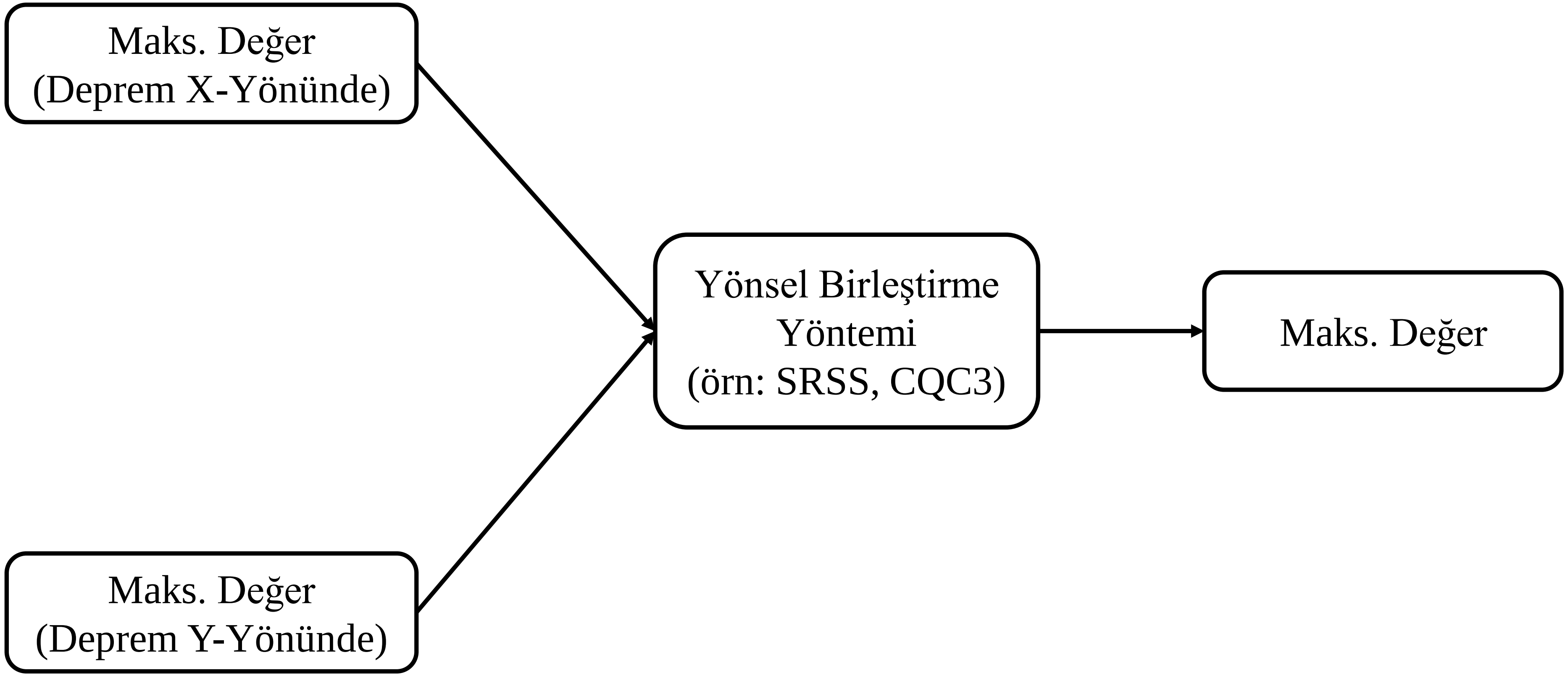


Spektral Analiz ile Modal Birleştirme Yöntemi

Spektral Analiz – Bir Yönde Mod Birleştirme



Spektral Analiz – İki Yönde Mod Birleştirme



Spektrum Analizi

Tek Serbestlik Dereceli Sistemler:

$$\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$m\ddot{x}(t)+c\dot{x}(t)+kx(t)=-m\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$\ddot{x}(t)+2\xi_{\mathrm{n}}\omega_{\mathrm{n}}\dot{x}(t)+\omega_{\mathrm{n}}^{2}x(t)=-\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$x^{\max}=\frac{S_{\mathrm{A}}}{\omega_{\mathrm{n}}^{2}},\qquad f_{\mathrm{s}}^{\max}=kx^{\max}=mS_{\mathrm{A}}$$

Modal Sistem:

$$\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$m\ddot{x}(t)+c\dot{x}(t)+kx(t)=-L\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

$$\ddot{x}(t)+2\xi_{\mathrm{n}}\omega_{\mathrm{n}}\dot{x}(t)+\omega_{\mathrm{n}}^{2}x(t)=-\Gamma\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$$

?

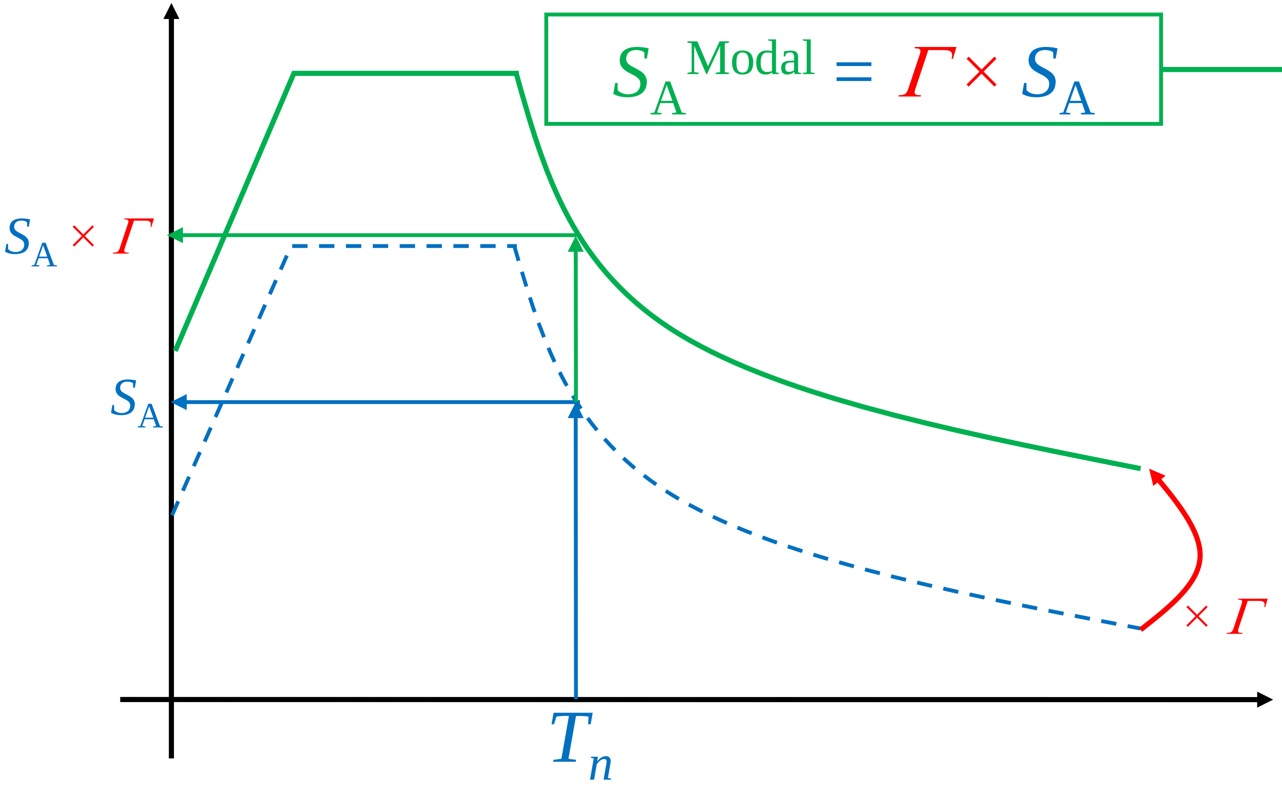
Spektrum Analizi

Modal Denklemler:

$$\bar{m}_i \ddot{x}(t) + \bar{c}_i \dot{x}(t) + \bar{k}_i x(t) = -L_i \ddot{x}_g(t)$$

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = -\Gamma_i \ddot{x}_g(t)$$

$$L_i = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} \mathbf{Mr} \qquad \Gamma_i = \frac{L_i}{\bar{m}_i} = \frac{\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} \mathbf{Mr}}{\bar{m}_i}$$



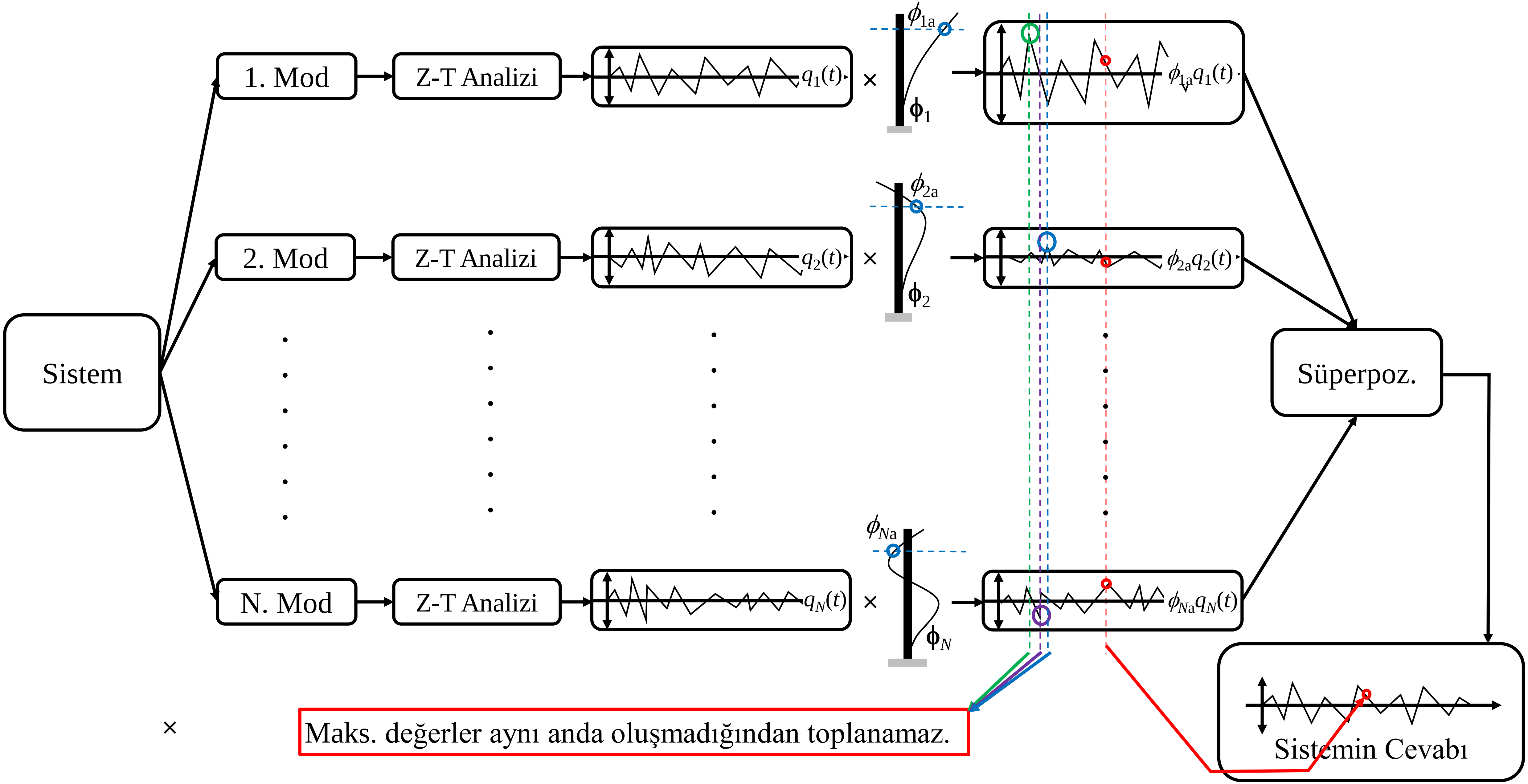
$$S_A^{\mathrm{Modal}} = \Gamma \times S_A$$

$$\max(q_i(t)) = q_i^{\max} = \frac{S_A^{\mathrm{Modal},i}}{\omega_i^2} = \frac{\Gamma_i S_A^i}{\omega_i^2}$$

$$q_i^{\max} = \frac{1}{\omega_i^2} \Gamma_i S_A^i$$

$$q_i^{\max} = \frac{1}{\omega_i^2} \frac{L_i}{\bar{m}_i} S_A^i$$

Modal Birleştirme



Modal Birleştirme

- Sistemin maksimum cevaplarını bulmak için modal maksimum cevaplar modal birleştirme yöntemleri olarak adlandırılan yöntemler ile birleştirilir (doğrudan toplanmaz)
- Bu yöntemlerin en bilineni SRSS'dir. Modların birbirinden ayrık olduğu durumda uygun sonuçlar verdiği kabul edilir.
- Diğeri CQC'dir. Modlar birbirine yakınsa bu yöntem tercih edilir.
- Genellikle uygulanan
  - Modal Birleştirme → CQC
  - Yönsel Birleştirme → SRSS

SRSS ile Mod Birleştirme: Yerdeğiştirmeler

$$\mathbf{x}^{\max} = \begin{Bmatrix} x_1^{\max} \\ x_2^{\max} \\ x_3^{\max} \end{Bmatrix} \approx \sqrt{\left(\begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_1 \\ | \end{Bmatrix} q_1^{\max} \right)^2 + \left(\begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_2 \\ | \end{Bmatrix} q_2^{\max} \right)^2 + \left(\begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_3 \\ | \end{Bmatrix} q_3^{\max} \right)^2}$$

$$\mathbf{x}^{\max} = \begin{Bmatrix} x_1^{\max} \\ x_2^{\max} \\ x_3^{\max} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_1 \\ | \end{Bmatrix} q_1^{\max} + \begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_2 \\ | \end{Bmatrix} q_2^{\max} + \begin{Bmatrix} | \\ \boldsymbol{\phi}_3 \\ | \end{Bmatrix} q_3^{\max}$$

SRSS ile Mod Birleştirme: Göreceli Kat Ötelemeleri

$$\boldsymbol{\delta}^{\max} = \begin{Bmatrix} \delta_1^{\max} \\ \delta_2^{\max} \\ \end{Bmatrix} \approx \sqrt{\left(\begin{Bmatrix} \phi_1^2 - \phi_1^1 \\ \phi_1^3 - \phi_1^2 \\ \end{Bmatrix} q_1^{\max} \right)^2 + \left(\begin{Bmatrix} \phi_2^2 - \phi_2^1 \\ \phi_2^3 - \phi_2^2 \\ \end{Bmatrix} q_2^{\max} \right)^2 + \left(\begin{Bmatrix} \phi_3^2 - \phi_3^1 \\ \phi_3^3 - \phi_3^2 \\ \end{Bmatrix} q_3^{\max} \right)^2}$$

$$\delta_{2-1}^{\max} \approx x_2^{\max} - x_1^{\max}$$

$$\delta_{3-2}^{\max} \approx x_3^{\max} - x_2^{\max}$$

$$\boldsymbol{\delta}^{\max} = \begin{Bmatrix} \delta_1^{\max} \\ \delta_2^{\max} \\ \end{Bmatrix} \approx \begin{Bmatrix} \phi_1^2 - \phi_1^1 \\ \phi_1^3 - \phi_1^2 \\ \end{Bmatrix} q_1^{\max} + \begin{Bmatrix} \phi_2^2 - \phi_2^1 \\ \phi_2^3 - \phi_2^2 \\ \end{Bmatrix} q_2^{\max} + \begin{Bmatrix} \phi_3^2 - \phi_3^1 \\ \phi_3^3 - \phi_3^2 \\ \end{Bmatrix} q_3^{\max}$$

Spektrum Analizi: İçsel Kuvvetler

İki yöntem mevcuttur:

1. Yöntem: Rijitlik Matrisi ile

$$\mathbf{F}^{\text{iç}}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t)$$

$$\mathbf{x}_i(t) = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t), \qquad i\text{. moddan gelen yerdeğiştirme}$$

$$\mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t), \qquad i\text{. moddan gelen iç kuvvetler}$$

$$\text{Spektral: } \mathbf{F}_i^{\text{iç, max}} = \mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i^{\max} = \mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} \frac{1}{\omega_i^2} \frac{L_i}{\bar{m}_i} S_{\mathrm{A}}^i$$

2. Yöntem: Kütle Matrisi ile

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} = \omega_i^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}, \qquad \text{modal denklemden}$$

$$\mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = \omega_i^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t)$$

$$\text{Spektral: } \mathbf{F}_i^{\text{iç, max}} = \omega_i^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i^{\max} = \omega_i^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} \frac{1}{\omega_i^2} \frac{L_i}{\bar{m}_i} S_{\mathrm{A}}^i = \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} \frac{L_i}{\bar{m}_i} S_{\mathrm{A}}^i$$

SRSS ile Mod Birleştirme: İçsel Kuvvetler

$$\mathbf{F}^{\max} = \begin{Bmatrix} F_1^{\max} \\ F_2^{\max} \\ F_3^{\max} \end{Bmatrix} \approx \sqrt{\left(\begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_1^{\max} \\ | \end{Bmatrix}\right)^2 + \left(\begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_2^{\max} \\ | \end{Bmatrix}\right)^2 + \left(\begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_3^{\max} \\ | \end{Bmatrix}\right)^2}$$

$$\mathbf{F}^{\max} = \begin{Bmatrix} F_1^{\max} \\ F_2^{\max} \\ F_3^{\max} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_1^{\max} \\ | \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_2^{\max} \\ | \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} | \\ \mathbf{F}_3^{\max} \\ | \end{Bmatrix}$$

Spektrum Analizi: Taban Kesme Kuvveti

İki yöntem mevcuttur

1. Yöntem: Rijitlik Matrisi ile

$$F^{\text{taban}}(t) = -\left(F_1^{\text{iç}}(t) + F_2^{\text{iç}}(t) + \cdots + F_n^{\text{iç}}(t)\right), \qquad \text{kat kuvvetlerinin toplamı}$$

$$F^{\text{taban}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}^{\text{iç}}(t), \qquad \mathbf{F}^{\text{iç}}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t), \qquad \mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}_i(t), \qquad \mathbf{x}_i(t) = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t)$$

$$F_i^{\text{taban}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t), \qquad i.\ \text{moddan gelen taban kesme kuvveti}$$

Spektral: $F_i^{\text{taban, max}} = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}_i^{\text{iç, max}} = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i^{\max} = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} \dfrac{1}{\omega_i^2}\dfrac{L_i}{\overline{m}_i} S_{\mathrm{A}}^{i}$

Spektrum Analizi: Taban Kesme Kuvveti

İki yöntem mevcuttur

2. Yöntem: Kütle Matrisi ile

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} = \omega_i^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}, \qquad \text{modal denklemden}$$

$$F_i^{\text{taban}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}_i^{\text{iç}}(t) = -\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t)$$

$$F_i^{\text{taban}}(t) = -\omega_i^2 \mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} q_i(t)$$

$$L_i = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\mathbf{r}, \quad L_i = L_i^{\mathrm{T}} = \mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}}$$

$$F_i^{\text{taban}}(t) = -\omega_i^2 L_i q_i(t)$$

$$\text{Spektral: } F_i^{\text{taban, max}} = -\omega_i^2 L_i q_i^{\max} = -\omega_i^2 L_i \frac{1}{\omega_i^2}\frac{L_i}{\bar{m}_i} S_{\mathrm{A}}^i = -\frac{L_i^2}{\bar{m}_i} S_{\mathrm{A}}^i$$

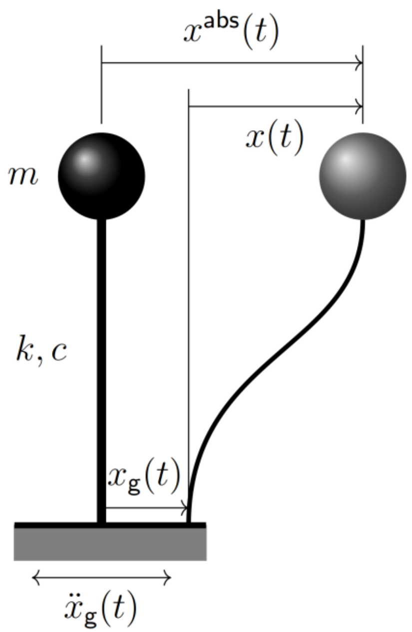
Spektrum Analizi: Taban Kesme Kuvveti

$$F^{\text{taban, max}} = \sqrt{\left(F_1^{\text{taban, max}}\right)^2 + \left(F_2^{\text{taban, max}}\right)^2 + \left(F_3^{\text{taban, max}}\right)^2}$$

$$F^{\text{taban, max}} = F_1^{\text{max}} + F_2^{\text{max}} + F_3^{\text{max}}$$

Spektrum Analizi: Efektif Modal Kütle

Tek Serbestlik Dereceli Sistemler:

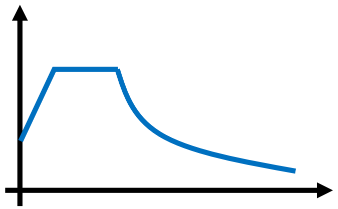


f_s : yay kuvveti, taban kesme kuvveti

$$f_s = kx = \omega_n^2 mx$$

$\dfrac{f_s}{m}$: kütleden bağımsız (normalize) yay kuvveti

$$\frac{f_s}{m} = S_A$$



$f_s = m S_A$: taban kesme kuvvetinin kütle üzerinden ifadesi

Benzer ifadeler

Modal Sistem:

$$F_i^{\text{taban, max}} = \frac{L_i^2}{\bar{m}_i} S_A^i$$

$$m_{\text{eff}, i} = \frac{L_i^2}{\bar{m}_i}$$: Efektif Modal Kütle

Spektrum Analizi : Efektif Modal Kütle

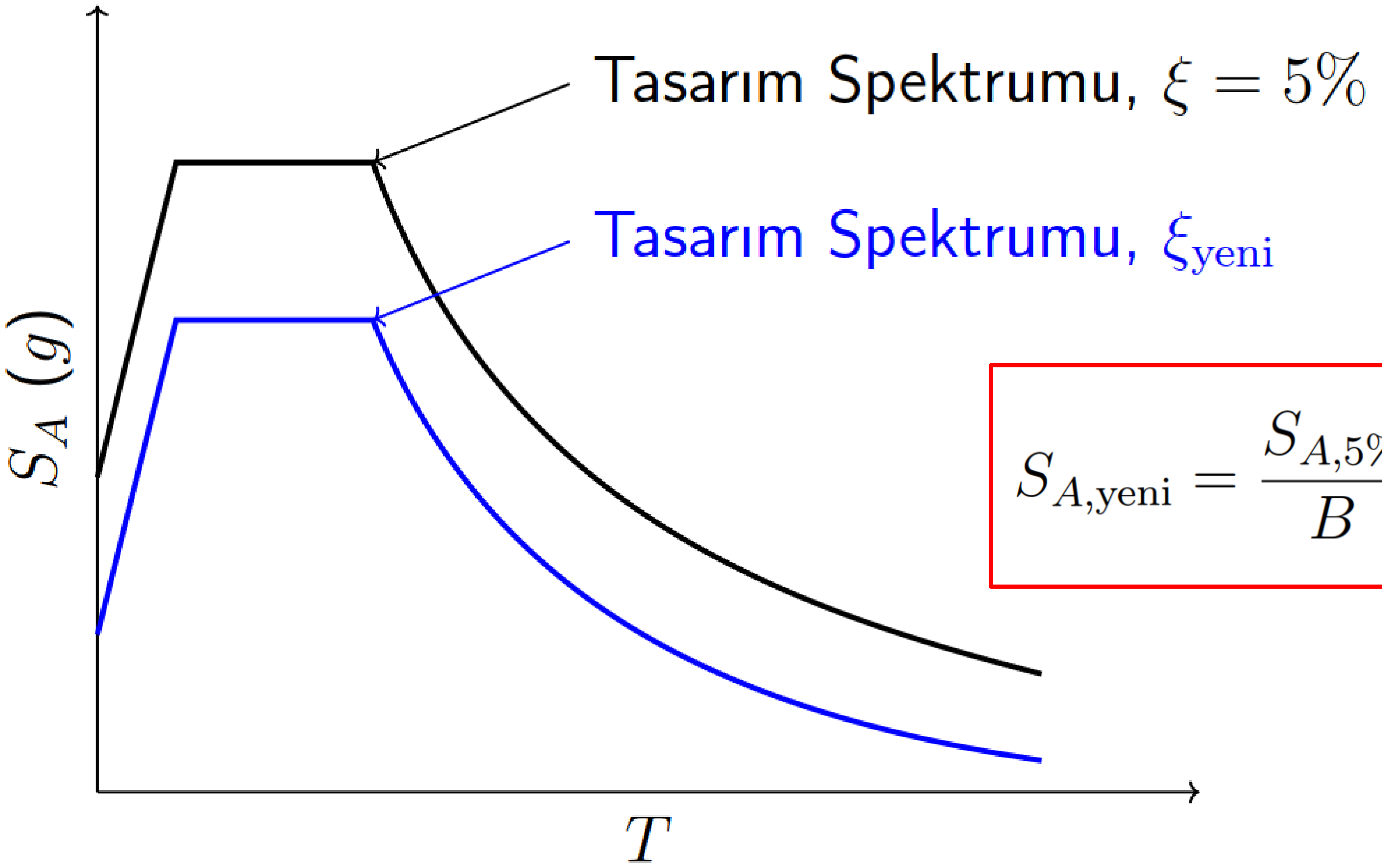
$$m_{\text{eff},\,i} = \frac{L_i^2}{\overline{m}_i} : \quad \text{Efektif Modal Kütle}$$

$$\sum_{i=1}^{n} m_{\text{eff},\,i} = \sum \mathbf{M} \quad : \text{ Yapının Toplam Kütlesi (ispatı mevcuttur)}$$

$$\frac{m_{\text{eff},\,i}}{\sum \mathbf{M}} : \quad i \text{ modunun kütle katılım oranı}$$

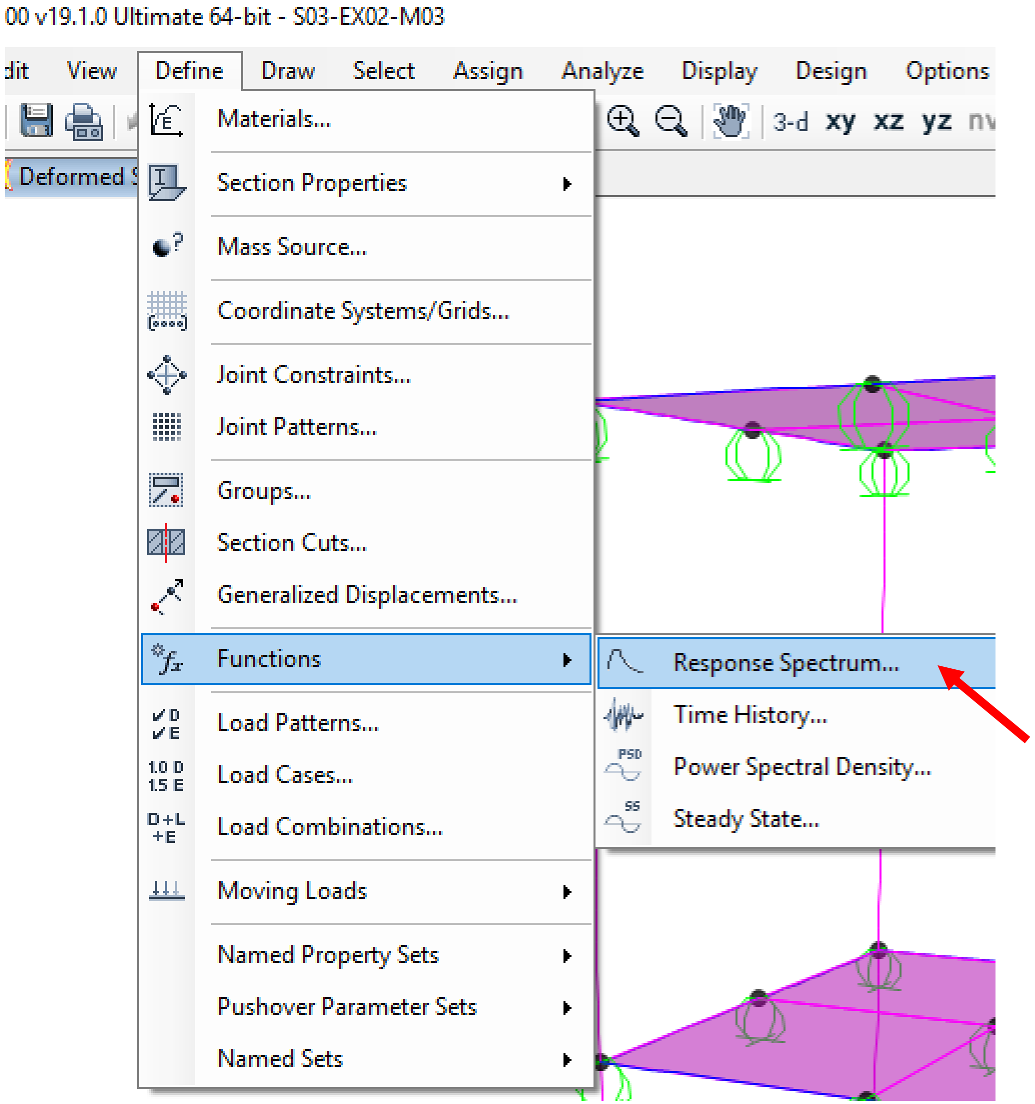
$$\frac{\sum_{i=1}^{gm} m_{\text{eff},\,i}}{\sum \mathbf{M}} > 90\% : \text{ Yönetmelik şartı (en az } gm \text{ (gerekli mod) adet mod kullanılmalı)}$$

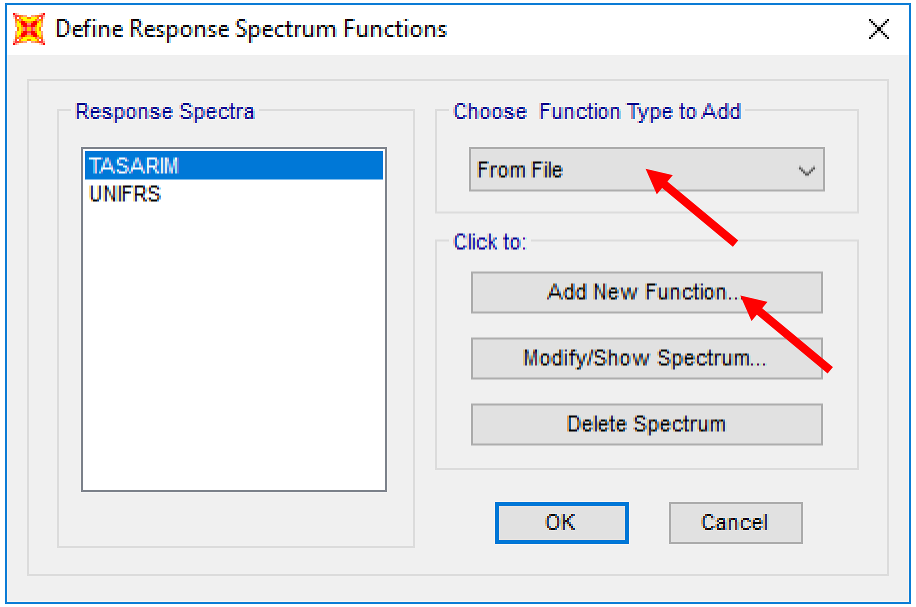
Tasarım Spektrumunu Sönümleme ile Değiştirme



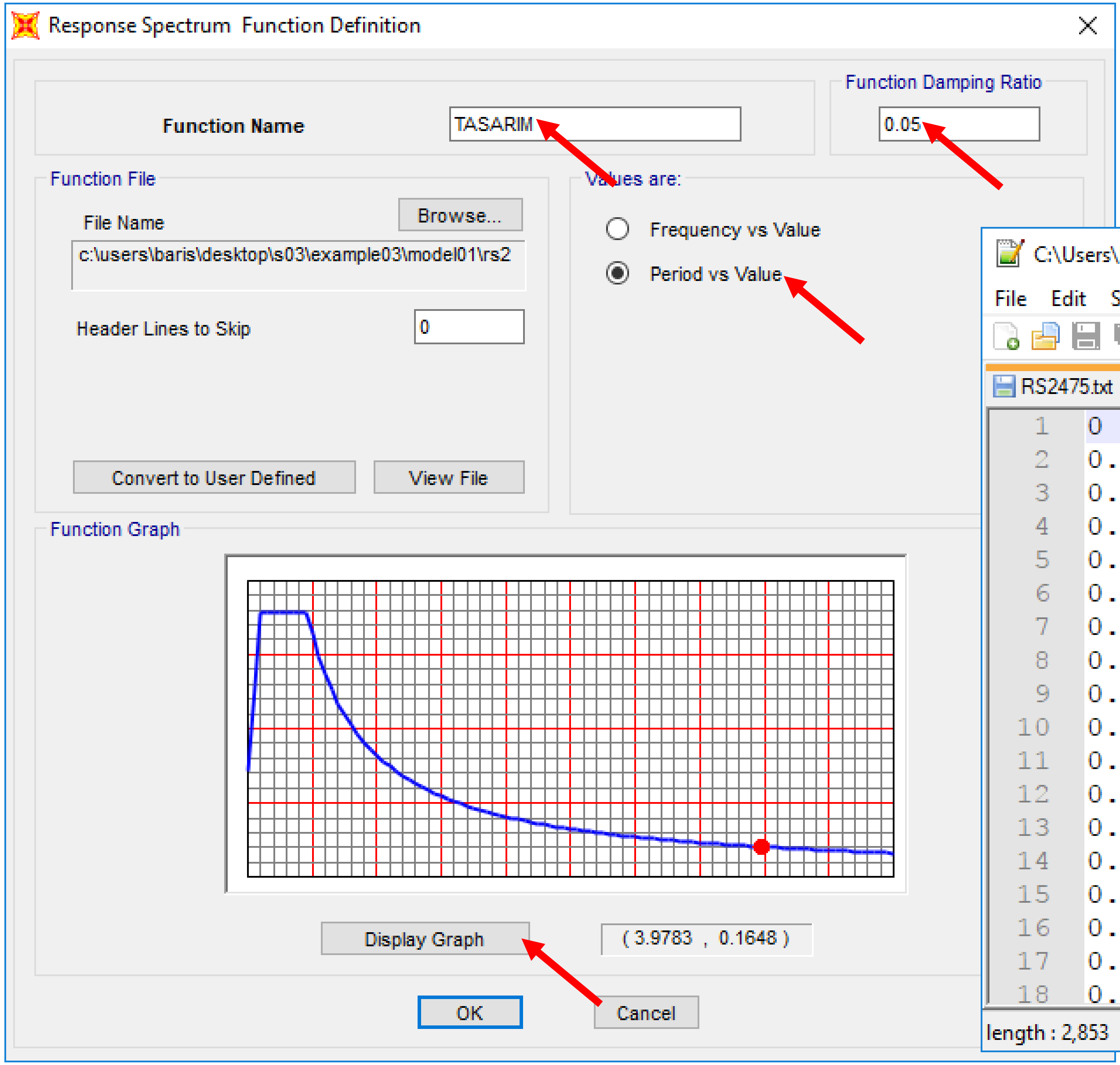
$$S_{A,\text{yeni}} = \frac{S_{A,5\%}}{B}, \qquad B = \left(\frac{\xi_{\text{yeni}}}{0.05}\right)^{0.3}$$

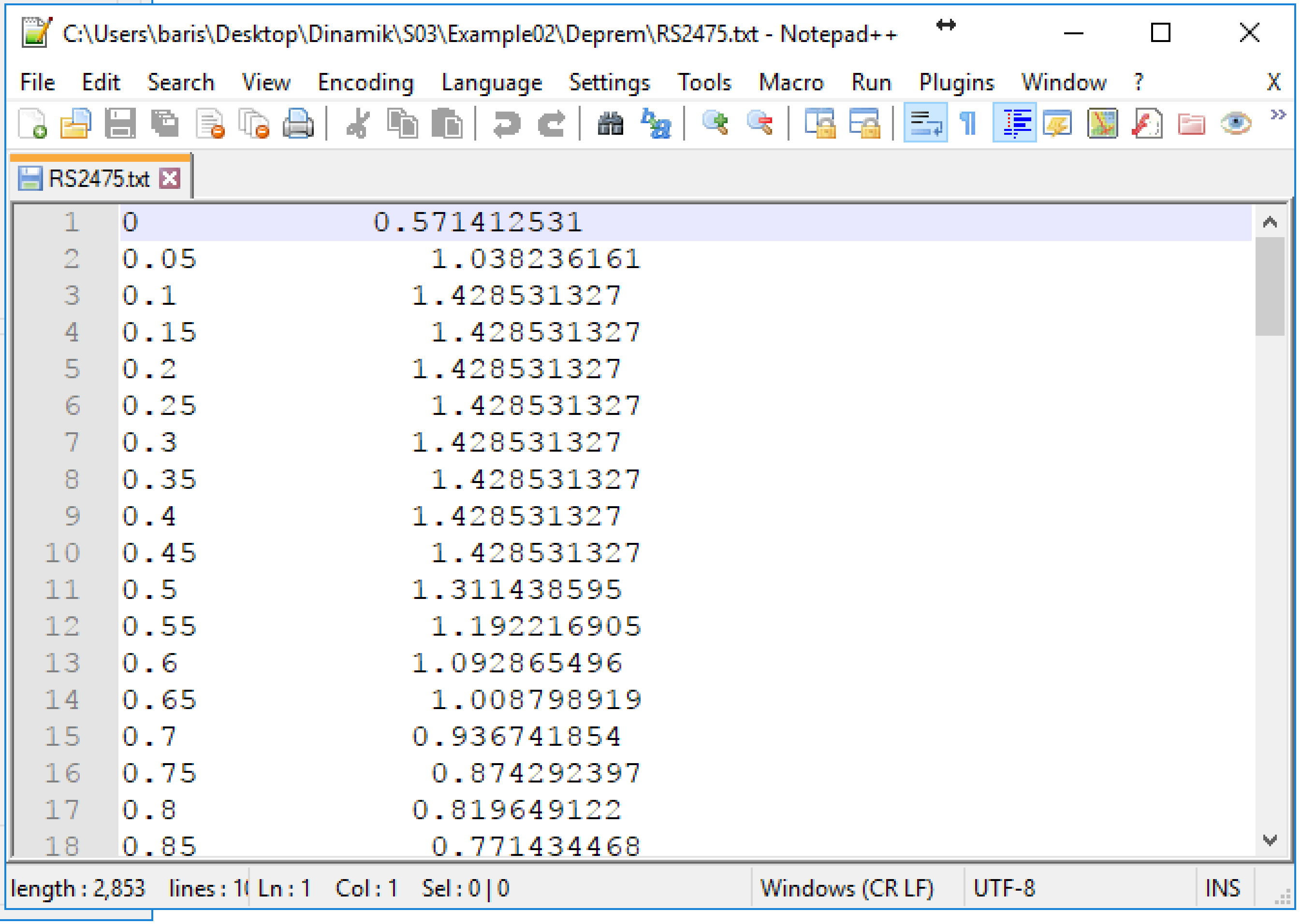
Spektrum Analizi: SAP2000 – Tasarım Spektrumunun Tanımlanması



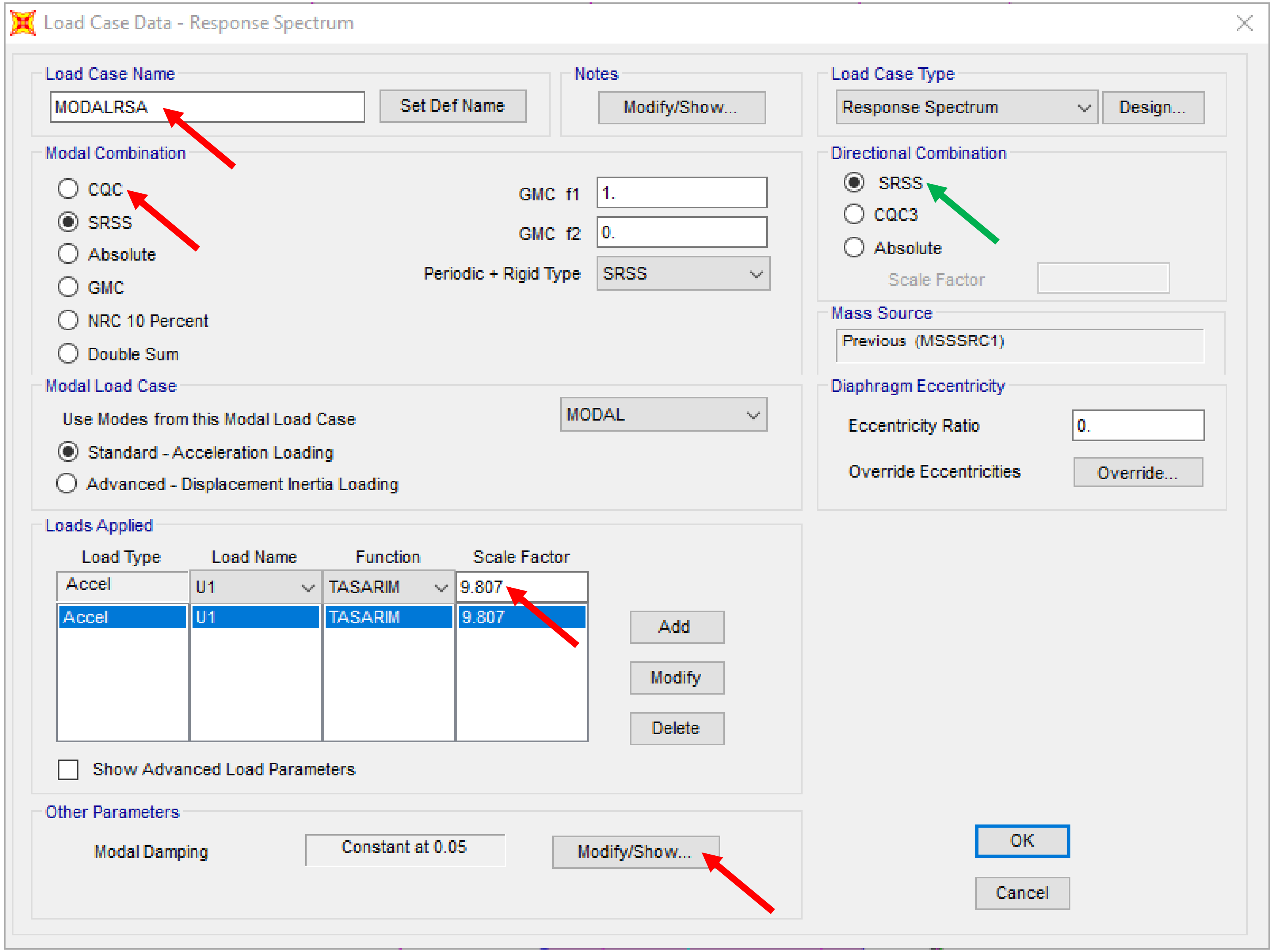


Spektrum Analizi: SAP2000 – Tasarım Spektrumunun Tanımlanması

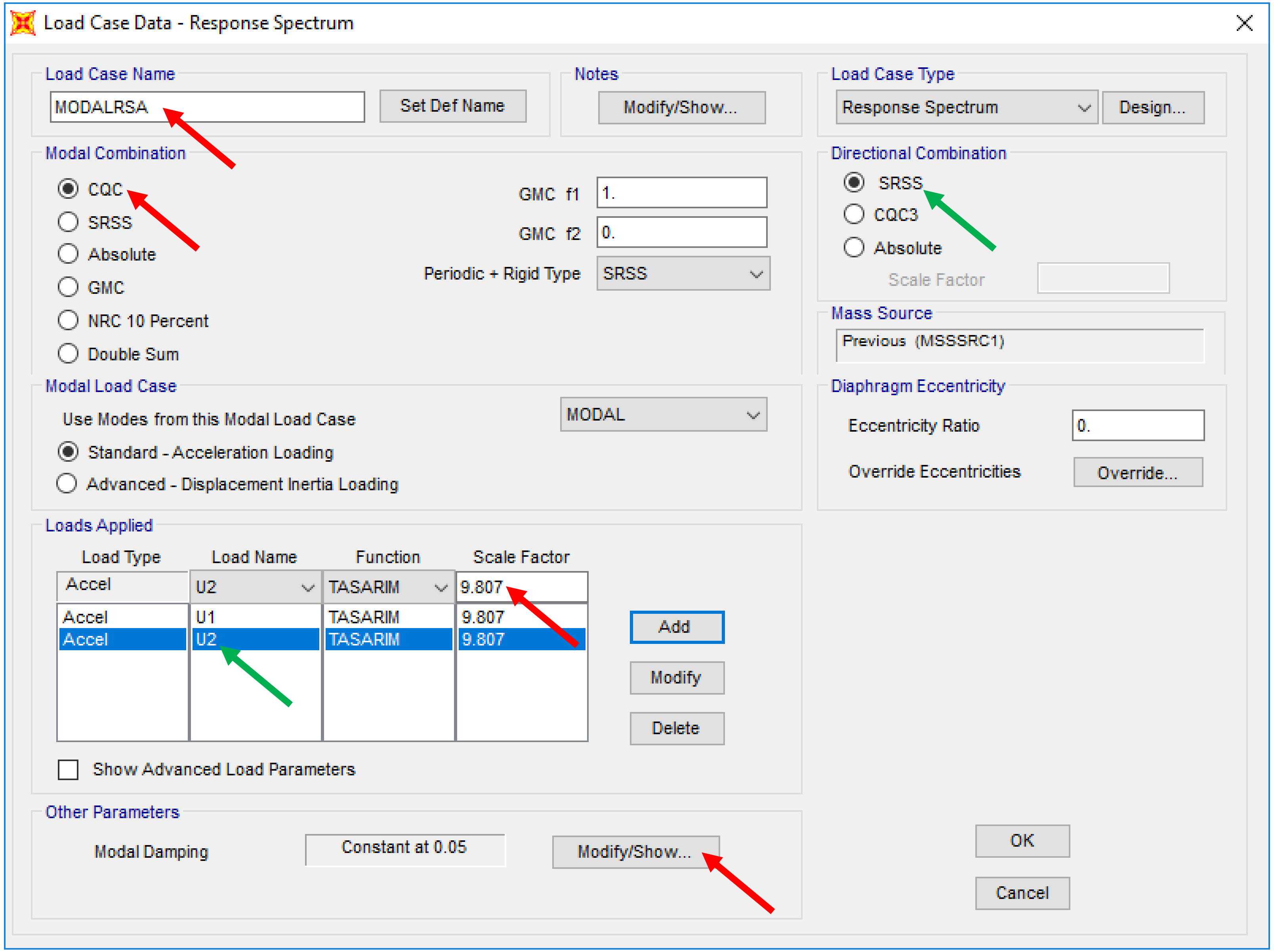




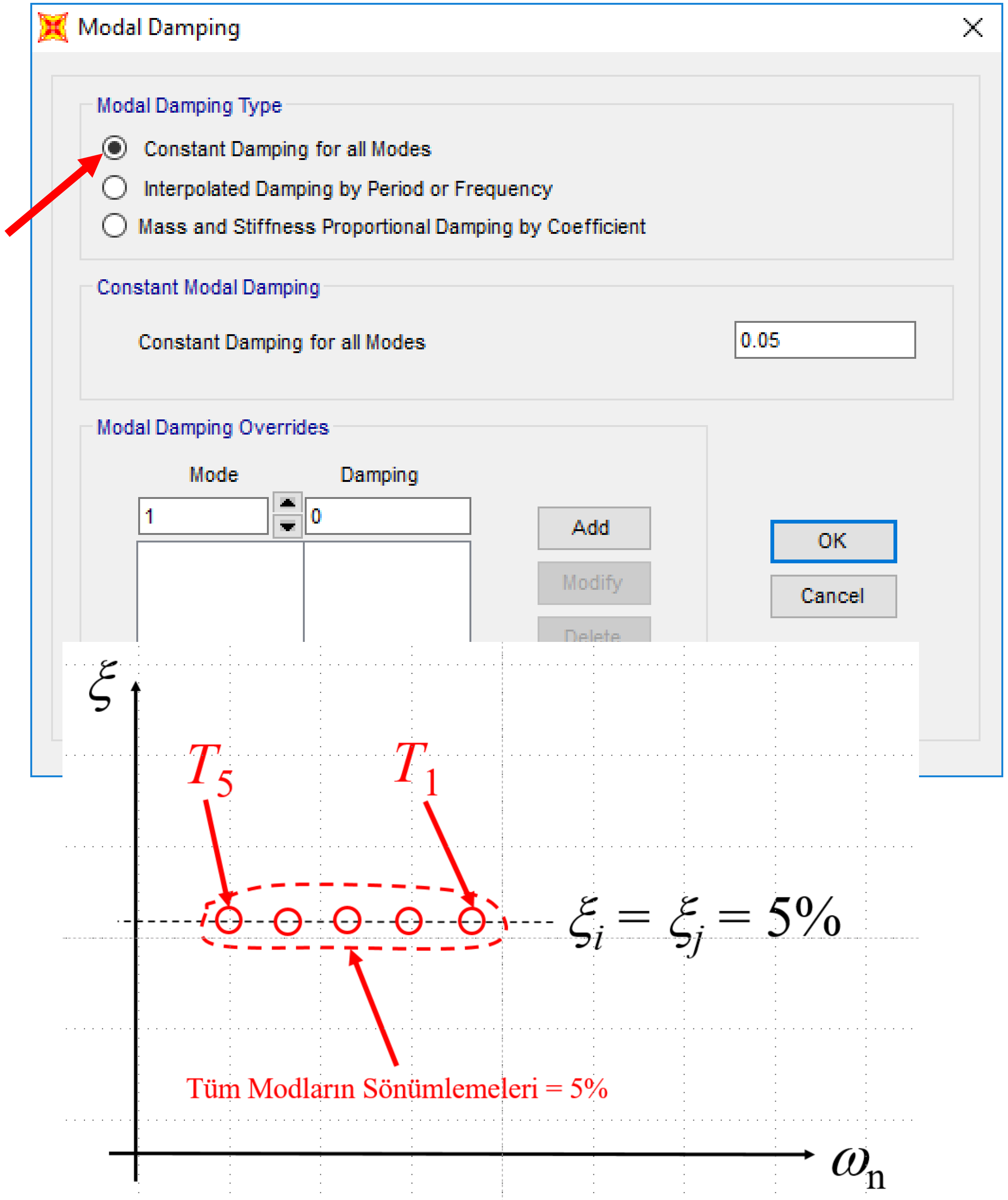
Spektrum Analizi: SAP2000 – Tek Yön

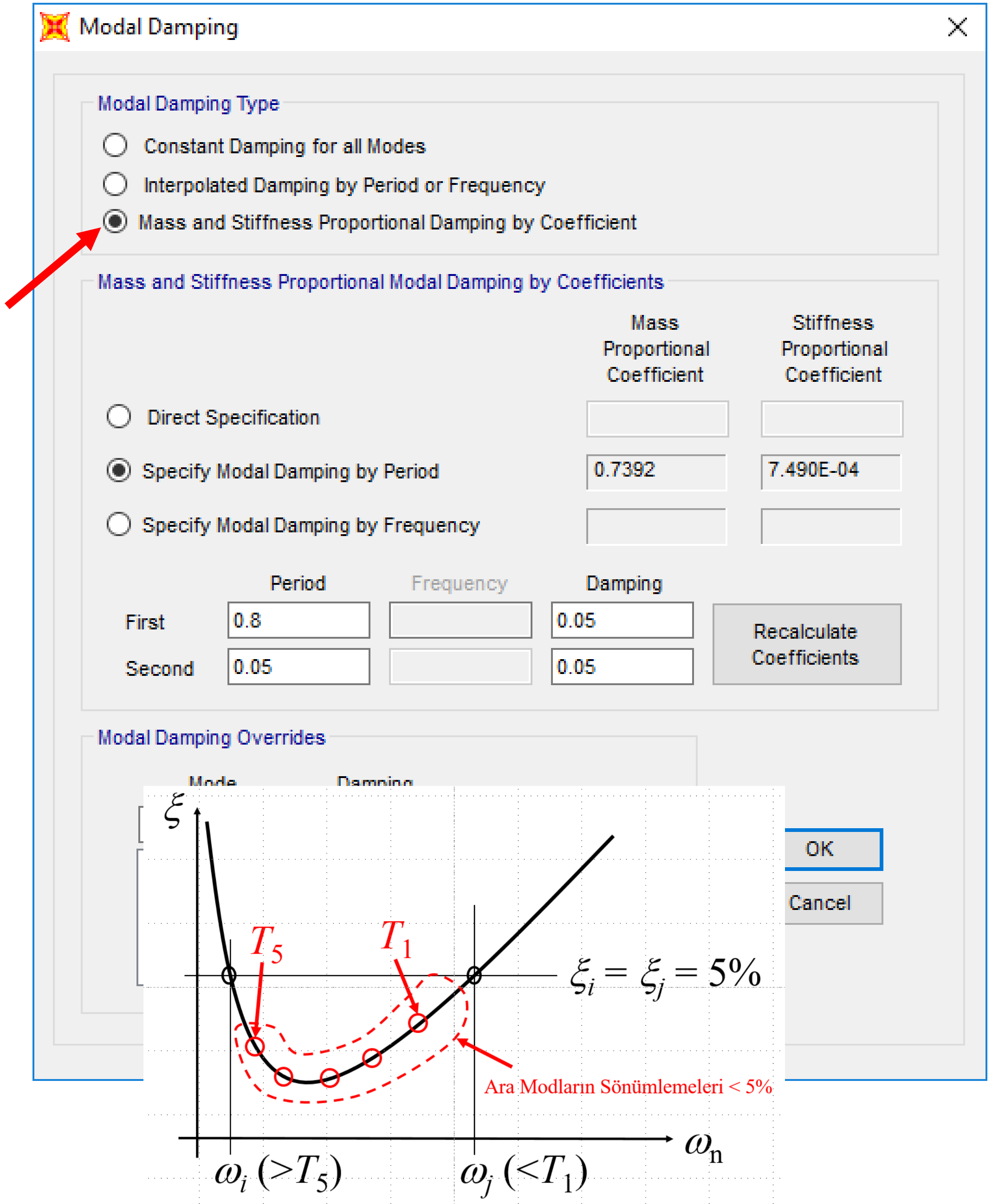


Spektrum Analizi: SAP2000 – İki Yön

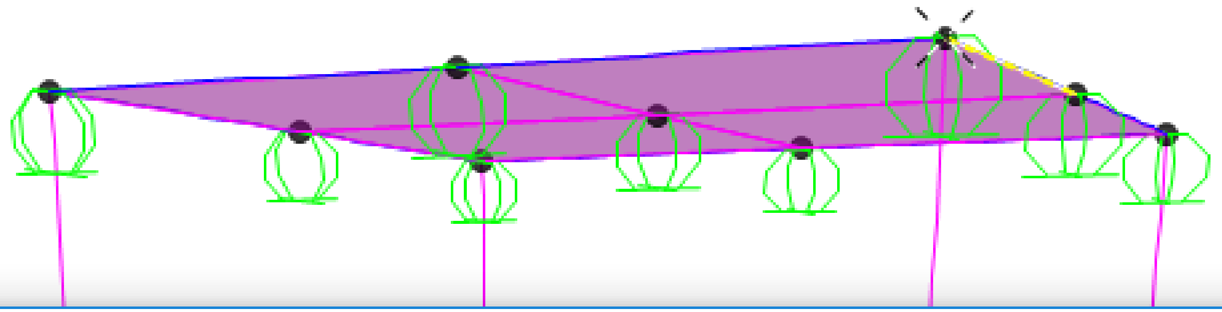


Spektrum Analizi: SAP2000 – Sönümleme





Karşılaştırma



Joint Displacements

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

Joint Displacements

Filter:

Joint Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
6	MODALTHA	LinModHist	Max	0.199545	0	0	0	0	0
6	MODALTHA	LinModHist	Min	-0.171099	0	0	0	0	0
6	MODALRSA	LinRespSpec	Max	0.143857	0	0	0	0	0
6	DIRECTTHA	LinDirHist	Max	0.199418	0	0	0	0	0
6	DIRECTTHA	LinDirHist	Min	-0.170998	0	0	0	0	0

Karşılaştırma