

# Mesnetlerinden Farklı Yer Hareketlerine Maruz Çok Katlı Çerçevelerin Deplasman Yüklemesine Göre Analizi

Çağlayan HIZAL<sup>1</sup>  
Gürsoy TURAN<sup>2</sup>

## ÖZ

Yapıların sismik analizinde, genellikle tüm mesnetlerde aynı yer hareketinin olduğu kabul edilmektedir. Yapı temelinin rijit plakla teşkil edildiği durumlarda gerçekçi olduğu düşünülen bu yaklaşım, mesnetlerin birbirinden bağımsız hareket edebilmesi durumunda deprem dalgası ilerleyişinin dinamik analize olan etkisini hesaba katamamaktadır. Bu çalışmada, mesnetlerinden farklı yer hareketlerine maruz çok katlı çok açıklıklı çerçevelerin dinamik davranışı, deprem yükünün yer deplasmanına bağlı olarak tanımlandığı deplasman yüklemesi kullanılarak incelenmiştir. Farklı mesnet hareketlerine maruz yapıların modal analiz prosedürü detaylı olarak anlatılmış ve sözde statik deplasmanların yapının dinamik davranışına olan etkisi vurgulanmıştır. Deplasman yüklemesi ile ortaya çıkan yüksek mod etkilerinin, az sayıda titreşim modu hesaba katılarak elde edilmesi için bir statik düzeltme yöntemi kullanılmış ve yöntemin geçerliliği verilen bir sayısal örnekle gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deplasman yüklemesi, çoklu mesnet hareketi, statik düzeltme yöntemi.

## ABSTRACT

### Analysis of Multi Story Frames Subjected to Multiple Support Excitation by Using Displacement Loading

In seismic analysis of structures, generally it is assumed that all supports are subjected to identical ground motions. This approach is assumed to be realistic when the foundation of the structure is formed as a rigid plate, but it cannot consider the dynamic effects of the earthquake wave propagation if the supports are able to move independently. In this study, the multi-support excitation analysis of multi-story, multi bay frames is performed by using displacement loading which defines the seismic load depending on the ground displacement. The modal analysis procedure of the structures subjected to multi-support excitations is given

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 27.03.2017 günü ulaşmıştır. 17.04.2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.298564>

1 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - [caglayanhizal@iyte.edu.tr](mailto:caglayanhizal@iyte.edu.tr)  
<https://orcid.org/0000-0002-9783-6511>

2 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - [gursoyturan@iyte.edu.tr](mailto:gursoyturan@iyte.edu.tr)  
<https://orcid.org/0000-0003-4817-0351>

in detail and the effect of pseudo-static displacement on the dynamic response of the structure is highlighted. A static correction approach is implemented with a numerical example to reflect the higher mode effects which are a natural result of displacement loading.

**Keywords:** Displacement loading, multi-support excitation, static correction method.

## 1. GİRİŞ

Yapıların deprem etkisi altındaki davranışı incelenirken, deprem yükü genellikle yer ivmesi ve yapı kütesine bağlı olarak elde edilmektedir. Bina türü yapılarda ise dinamik hesap modeli oluşturulurken bütün mesnetlerin aynı deprem ivmesine maruz kaldığı kabul edilmektedir. Mesnet sayısının az ve mesnetler arasındaki mesafelerin kısa olması durumunda bu varsayım gerçekçi olabilmektedir. Yapı temelinin yeterince rijit olmadığı durumlarda deprem dalgasının zemindeki ilerleme hızı, özellikle yumuşak zeminlerde, dikkate alındığında ise tüm mesnetlerde aynı deprem ivmesinin oluşması beklenemez. Bu durumda dinamik hareket denkleminin çoklu/farklı mesnet hareketlerini içerecek şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Çoklu mesnet hareketinin köprü türü uzun açıklıklı yapılara olan etkisi literatürde birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [1-8]. Bu araştırmacıların çoğu deprem dalgasının yalnızca zaman gecikmesine uğramadığını, aynı zamanda uzaysal değişime de maruz kaldığını vurgulamaktadır. Literatürde çoklu/farklı mesnet hareketlerine göre dinamik analiz genellikle köprü benzeri yapılar için incelenmiş olup bina türü yapılar için Allam ve Rambabu'nun tek katlı ve iki açıklıklı yapılar üzerine yaptıkları incelemeler dışında bilinen bir çalışma bulunmamaktadır [9-10].

Yapılan araştırmaların birçoğunda deprem hareketi yer ivmeleriyle tanımlanmaktadır. Bu tanım gereğince hareket denklemleri rölatif deplasmanlara göre elde edilmekte olup farklı mesnet hareketlerine göre analiz yapılması durumunda yapının mutlak deplasmanlarının elde edilmesi bir gereklilik haline almaktadır [11]. Yapının mutlak deplasmanları ise rölatif ve sözde statik yapısal deplasmanların toplamı olarak elde edilmektedir. Mesnetlerin aynı deprem hareketine maruz kalması durumunda mutlak deplasmanlar rölatif deplasmanlarla yer deplasmanının toplanması ile kolayca elde edilebilmektedir. Farklı mesnet hareketi durumunda ise sözde statik deplasmanların önemi artmaktadır. Deprem yükünün mesnet rijitliği ve yer deplasmanına bağlı olarak tanımlandığı deplasman yüklemesinde, hareket denklemleri mutlak koordinatlara göre elde edildiğinden herhangi bir koordinat dönüşümüne gerek kalmamaktadır.

Deplasman yüklemesinin yarattığı en önemli problem, yüksek modların tetiklenmesi durumudur [12]. Modal analiz yapılması durumunda, yapıların deprem tasarımında önemli rol oynayan taban kesme kuvveti ve eğilme momentleri, ivme yüklemesinde az sayıda moda katılarak elde edilebilmektedir. Deplasman yüklemesinde ise yüksek modların baskın olması sebebiyle gerçekçi bir çözüm için bazı durumlarda neredeyse bütün modların hesaba katılması gerekmektedir. Bu durum Tsai [11] tarafından önerilen bir statik düzeltme yöntemiyle aşılabilmekte ve az sayıda moda katılarak gerçek taban kesme kuvveti/eğilme momenti elde edilebilmektedir. Deplasman yüklemesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalarda çoğunlukla kapalı çözüm uygulanmış ve nümerik hatalar üzerinde durulmuştur [13]. Yapılan literatür incelemesinde, yalnızca birkaç çalışmada deplasman yüklemesine maruz sistemlerin modal davranışının incelendiği görülmüştür [5, 11].

Dinamik analiz sırasında, incelenen yapının ve/veya yapıya etki eden dinamik kuvvetlerin frekans içeriğine bağlı olarak da yüksek mod etkileri ortaya çıkabilmektedir. Yüksek mod periyotlarının uygulanan dinamik yükün periyoduna oranla çok küçük olması nedeniyle, bu modlara ait eylemsizlik ve sönüm etkilerinin ihmal edilmesi mümkündür [14]. Bu durum için Chopra [14] tarafından önerilen formülasyonla yüksek modların dinamik (rölatif) deplasmanlara olan etkisi statik olarak hesaplanabilmektedir. Deplasman yüklemesinde görülen yüksek mod etkisi ise uygulanan dinamik yükün veya yapının frekans içeriğine bağlı olarak değil, yer hareketine bağlı olarak oluşan sözde statik deplasmanlar nedeniyle meydana gelmektedir [11]. Bu nedenle Tsai [11] tarafından deplasman yüklemesi için önerilen statik düzeltme yönteminin Chopra [14] tarafından bahsedilen yöntemden farkı da dinamik (rölatif) deplasmanlara değil, sözde-statik deplasmanlara uygulanmasıdır.

Bu çalışmada, yalnızca zaman gecikmesine sahip sismik yer deplasmanları nedeniyle mesnetlerinde farklı yer ivmelerine maruz kalan çok katlı çok açıklıklı modal analizi deplasman yüklemesine göre gerçekleştirilmiş, verilen sayısal analizde yer hareketinin taban kesme kuvvetlerine olan etkisi incelenmiştir.

## 2. HAREKET DENKLEMİNİN ELDE EDİLMESİ

Deprem hareketine maruz, çok serbestlik dereceli topaklanmış kütleli bir sistemin hareket denklemi, yapısal ve kısıtlanmış(mesnet) serbestlik derecelerini içerecek şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{rr} \end{bmatrix} + \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s(t) \\ \ddot{u}_r(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sr} \\ C_{rs} & C_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s(t) \\ \dot{u}_r(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sr} \\ K_{rs} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s(t) \\ u_r(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_r(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Burada  $M_{ss}$ ,  $C_{ss}$  ve  $K_{ss}$  yapısal serbestlik derecelerine ait kütle, sönüm ve rijitlik matrisini,  $M_{rr}$ ,  $C_{rr}$  ve  $K_{rr}$  kısıtlanmış serbestlik derecelerine ait kütle, sönüm ve rijitlik matrisini,  $C_{rs}$  ve  $K_{rs}$  ise yapısal ve kısıtlanmış serbestlik derecelerinin birleşik sönüm ve rijitlik matrisini göstermektedir.  $u_s(t)$  ve  $u_r(t)$  ise sırasıyla yapısal mutlak deplasmanları ve yer deplasmanı vektörünü göstermektedir. Yapısal serbestlik derecesi sayısının  $N$  ile, kısıtlanmış serbestlik derecesi sayısının ise  $N_g$  ile gösterilmesi durumunda  $M_{ss}$ ,  $C_{ss}$  ve  $K_{ss}$  matrisleri  $N \times N$ ,  $M_{rr}$ ,  $C_{rr}$  ve  $K_{rr}$  matrisleri  $N_g \times N_g$ ,  $C_{rs}$  ve  $K_{rs}$  matrisleri ise  $N \times N_g$  boyutlu olmaktadır. Eğer sönüm matrisi kütle ile orantılı olarak kabul edilirse  $C_{rs}$  matrisi sıfır matrisi olmaktadır. Bu durumda Denklem (1)'in birinci ve ikinci satırı aşağıdaki gibi yazılır.

$$M_{ss} \ddot{u}_s(t) + C_{ss} \dot{u}_s(t) + K_{ss} u_s(t) = -K_{sr} u_r(t) \quad (2)$$

$$M_{rr} \ddot{u}_s(t) + C_{rr} \dot{u}_g(t) + K_{rs} u_s(t) + K_{rr} u_r(t) = F_r(t) \quad (3)$$

Burada, Denklem (2) ve (3) sırasıyla yapısal ve kısıtlanmış serbestlik derecelerine ait hareket denklemini göstermektedir. Yapısal deplasman vektörü mod süperpozisyon yöntemi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u_s(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad (4)$$

Bu durumda  $n$ 'inci moda ait ayrık hareket denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M_n \ddot{q}_n(t) + C_n \dot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = \phi_n^T K_{sr} u_r(t) \quad (5)$$

Denklem (5)'de verilen  $M_n$ ,  $C_n$  ve  $K_n$ ,  $n$ 'inci moda ait genelleştirilmiş kütle, sönüm ve rijitlik değerini göstermektedir.

$$\begin{aligned} M_n &= \phi_n^T M_{ss} \phi_n \\ C_n &= \phi_n^T C_{ss} \phi_n \\ K_n &= \phi_n^T K_{ss} \phi_n \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (5)'in her iki tarafı  $M_n$ 'ye bölünürse ayrık hareket denklemini aşağıdaki hale gelir.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = \Gamma_n u_r(t) \quad (7)$$

Burada  $\Gamma_n$ ,  $1 \times N_g$  boyutlu modal katılım vektörünü göstermektedir.

$$\Gamma_n = - \frac{\phi_n^T K_{sr}}{\phi_n^T M_{ss} \phi_n} \quad (8)$$

Denklem (2)'nin sağ tarafındaki  $-K_{sr}$  matrisi yer deplasmanı vektörünün uzaysal dağılımı olarak adlandırılabilir. Bu durumda uzaysal dağılımın modal bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$K_{sr} = \sum_{n=1}^N s_n \quad (9)$$

Burada  $s_n$ , yer deplasmanının  $n$ 'inci moda ait  $N \times N_g$  boyutlu uzaysal dağılım matrisini göstermekte olup aşağıdaki gibi yazılır.

$$s_n = \sum_{n=1}^N M_{ss} \phi_n \Gamma_n \quad (10)$$

$s_n$  matrisinin ve  $i$ 'inci kolonu,  $i$ 'nci kısıtlanmış serbestlik derecesinin 1 birim hareketi ile oluşan uzaysal dağılım vektörünü göstermektedir.

### 3. STATİK DÜZELTME YÖNTEMİ

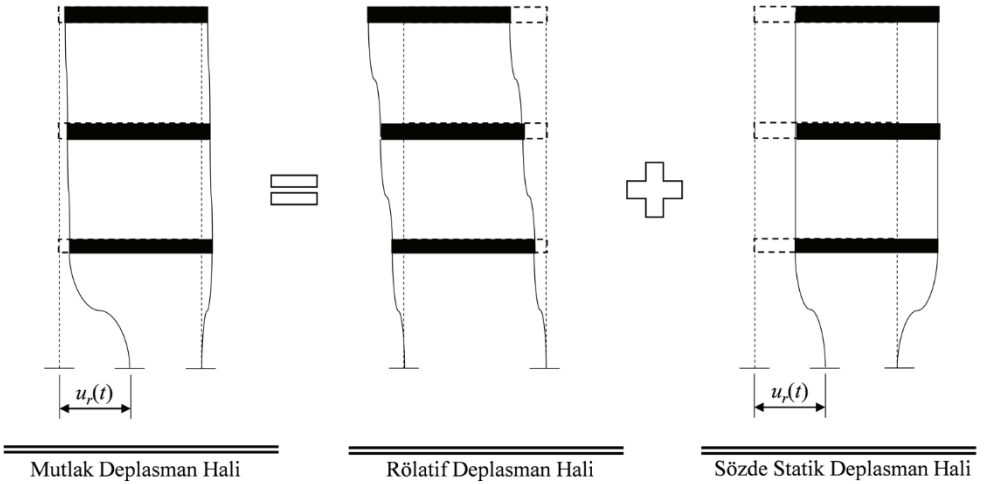
Mutlak deplasmanlarla dinamik (rölatif) deplasmanlar arasındaki ilişki yapıya etki eden elastik kuvvetler ile hesaplanabilir.

$$K_{ss}u_s(t) + K_{sr}u_r(t) = K_{ss}v(t) \quad (11)$$

Burada  $v(t)$ , yapının dinamik etkilerin görüldüğü rölatif deplasman vektörünü göstermektedir. Yapının mutlak deplasman vektörü ise

$$u_s(t) = v(t) + u_{qs}(t) \quad (12)$$

eşitliğiyle elde edilebilir (bkz. Şekil 1) [11]. Burada,  $u_{qs}(t)$  sözde statik deplasman vektörünü göstermekte olup mesnetteki hareketin üst yapıda meydana getirdiği deplasmanlara karşılık gelmektedir. Sözde statik deplasmanlar, yapının dinamik tepkisini içermemekte olup dinamik etkiler rölatif deplasmanlara yansımaktadır.



Şekil 1 - Deplasman durumlarının şematik gösterimi

Eğer Denklem (12), Denklem (11)'de yerine yazılırsa

$$u_{qs}(t) = Ru_r(t) \quad (13)$$

eşitliği elde edilir. Burada  $R$ ,  $N \times N_g$  boyutlu tesir matrisini göstermekte olup aşağıdaki gibi yazılır.

$$R = K_{ss}^{-1} K_{sr} \quad (14)$$

Bu durumda Denklem (12) aşağıdaki gibi yazılır.

$$u_s(t) = v(t) + Ru_r(t) \quad (15)$$

Literatürdeki çalışmalardan bilindiği üzere deplasman yüklemesinde yüksek modlar, ivme yüklemesinde ise genellikle düşük modlar etkili olmaktadır [11-12]. Denklem (15)'de görüldüğü üzere yüksek mod etkisi sözde statik deplasmanlardan kaynaklanmaktadır. Eğer sözde statik deplasmanların etkisi, az sayıda titreşim modunun dikkate alınması durumu için hesaba katılabilirse deplasman yüklemesindeki yüksek mod etkisi ortadan kaldırılabilir. Bu amaçla, deplasman yüklemesinin uzaysal dağılımı, tüm modal bileşenlerin toplamı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$-K_{sr} = \sum_{n=1}^N M_{ss} \phi_n \Gamma_n \quad (16)$$

Denklem (16)'da  $M_{ss} \phi_n$  yerine  $K_{ss} \phi_n / \omega_n^2$  ifadesi yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$R = \sum_{n=1}^N \frac{\phi_n \Gamma_n}{\omega_n^2} = \sum_{n=1}^N \phi_n \gamma_n \quad (17)$$

denklemini elde edilir. Burada  $\gamma_n$ , ivme yüklemesi için elde edilen modal katılım oranını göstermekte olup aşağıdaki gibi yazılır.

$$\gamma_n = \frac{\phi_n^T MR}{\phi_n^T M \phi_n} \quad (18)$$

Böylece sözde statik deplasmanlarda hesaba katılmayan yüksek modlar nedeniyle oluşacak etki aşağıdaki denklemle hesaba katılır.

$$\bar{u}_s(t) = \left[ R - \sum_{n=1}^m \phi_n \gamma_n \right] u_r(t) \quad (19)$$

Burada  $m$ , hesaba katılan mod sayısını göstermektedir. Böylece modal analiz sonunda, ilk  $m$  modun hesaba katılmasıyla elde edilen düzeltilmiş deplasman vektörü aşağıdaki gibi yazılır.

$$u_s^d(t) = u_s(t) + \bar{u}_s(t) \quad (20)$$

#### 4. HESABA KATILACAK MOD SAYISININ BELİRLENMESİ

İvme yüklemesinde hesaba katılması gereken mod sayısı için literatürde en çok bilinen yöntem olan toplam etkin kütle oranı baz alınmaktadır. Toplam etkin kütle oranı, 1 birim yer ivmesi etkisi altında her bir modda harekete katılan toplam kütle, yapının toplam kütlelerine bölünmesiyle elde edilmektedir (bkz. Denklem 21) [12].

$$M^* = \frac{\sum_{n=1}^m L_n^2 / M_n}{\mathbf{1}^T M_{ss} R \mathbf{1}} \quad (21)$$

Burada

$$L_n = \mathbf{1}^T M_{ss} \phi_n \quad (22)$$

olarak elde edilmekte olup  $\mathbf{1}$  ve  $\underline{\mathbf{1}}$ , sırasıyla  $N \times 1$  ve  $N_g \times 1$  boyutlu birim vektörleri göstermektedir. Deplasman yüklemesinde deprem yükü yapının kütleleriyle ilişkili olmayıp,  $K_{sr}$  ile yer deplasmanının çarpımı olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, hesaba katılacak mod sayısının tayininde etkin kütle oranı belirleyici değildir. Deplasman yüklemesinde hesaba katılması gereken belirlenmesi için ise her bir modda harekete geçen rijitliğin hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla, tüm mesnetlerin aynı yer deplasmanına maruz kaldığı kabul edilirse,  $n$ 'inci modda oluşan taban kesme kuvveti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} V_{bn} &= \mathbf{1}^T M_{ss} \phi_n \Gamma_n \underline{\mathbf{1}} \\ &= \mathbf{1}^T \omega_n^2 M_{ss} \phi_n \Upsilon_n \underline{\mathbf{1}} \end{aligned} \quad (23)$$

Bu durumda toplam etkin rijitlik oranı, hesaba katılan modlardan elde edilen toplam taban kesme kuvvetinin, harekete geçen toplam kuvvete bölünmesiyle Denklem (24)'deki gibi elde edilir.

$$K^* = \frac{\sum_{n=1}^m \mathbf{1}^T K_{ss} \phi_n \Upsilon_n \underline{\mathbf{1}}}{\mathbf{1}^T K_{sr} \underline{\mathbf{1}}} \quad (24)$$

Statik düzeltme uygulanması durumunda ise dinamik çözüm ivme yüklemesinden elde edilen çözüme denk olduğundan, hesaba katılacak mod sayısı toplam etkin kütle oranı kullanılarak elde edilebilir [5].

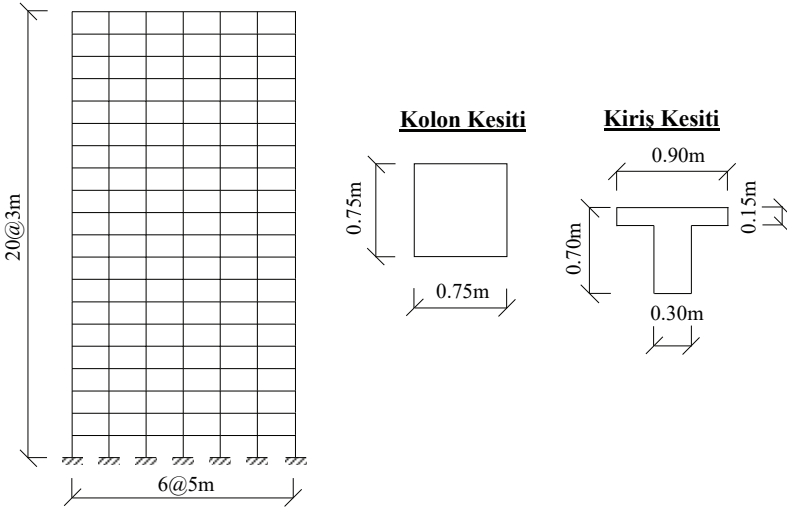
#### 5. SAYISAL ANALİZLER VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında sunulan yöntemin tutarlılığının belirlenmesi ve deprem dalgası ilerleme hızının çerçeve türü yapılara olan etkisini görebilmek adına iki adet sayısal uygulama verilmiştir. Sayısal uygulama 1'de deplasman yüklemesinin, statik düzeltme uygulanması ve uygulanmaması durumunda taban kesme kuvveti ve çatı kat

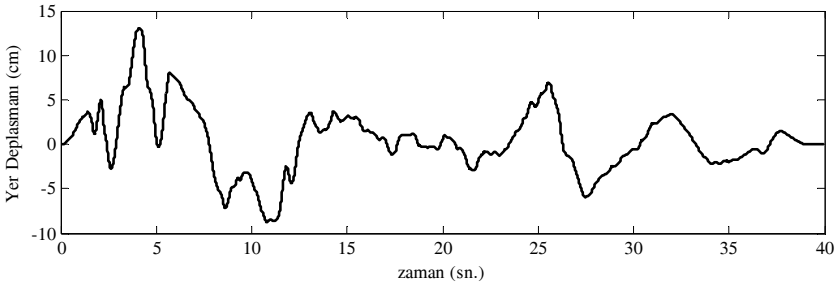
deplasmanlarının modal değişimi üzerine etkisi sunulmuştur. Sayısal uygulama 2’de ise deprem dalgası ilerleme hızının taban kesme kuvvetine olan etkisi incelenmiştir.

### 5.1. Sayısal Uygulama-1

Deplasman yüklemesinin, taban kesme kuvveti ve çatı katı mutlak deplasmanı modal değişimine olan etkisi 20 katlı ve 6 açıklıklı bir moment çerçevesi üzerinden incelenmiştir. Şematik gösterimi Şekil 2’de verilen moment çerçevesinin her bir katının ağırlığı 1500 kN, betonarme malzemenin elastisite modülü 30.000 MPa’dır. Sönüm oranı ise tüm modlar için %5 olarak alınmıştır. Yapının 2 boyutlu hesap modeli yazarlar tarafından geliştirilen bir MATLAB [15] programı yardımıyla elde edilmiştir. MATLAB [15] modelinin doğruluğunu test etmek amacıyla ayrıca bir SAP 2000 [16] modeli oluşturulmuş ve serbest titreşim periyotları kıyaslanmıştır. Dinamik analiz ise, Şekil 3’de verilen Imperial Valley 1940 depreminin kuzey-güney bileşenine ait yer deplasmanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



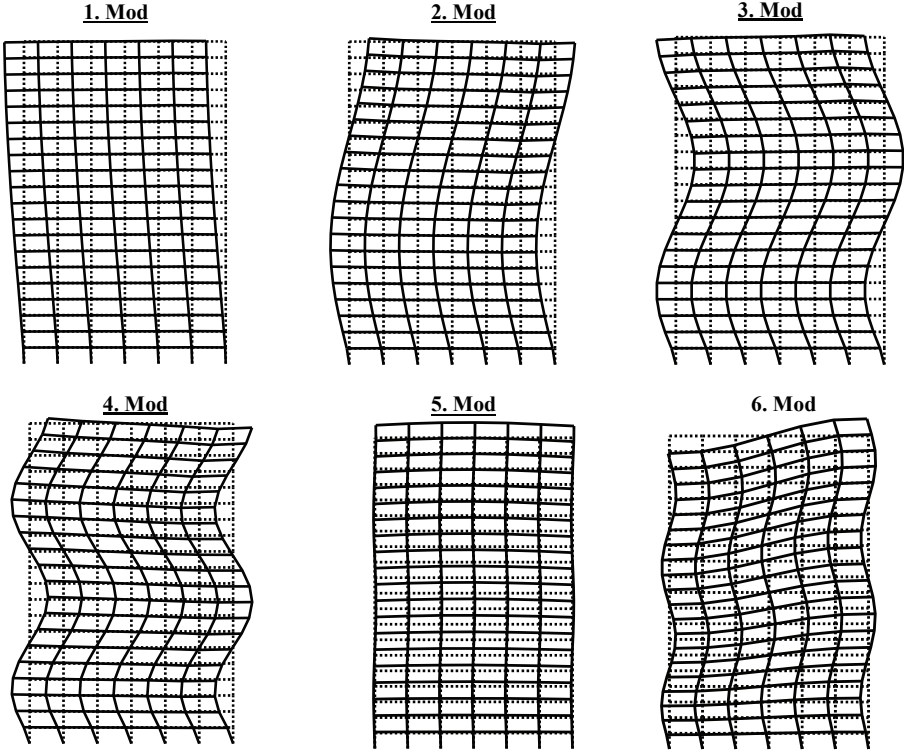
Şekil 2 - 20 katlı 6 açıklıklı kayma çerçevesinin şematik gösterimi



Şekil 3 - Yer deplasmanının zamana bağlı değişimi (Imperial Valley 1940)



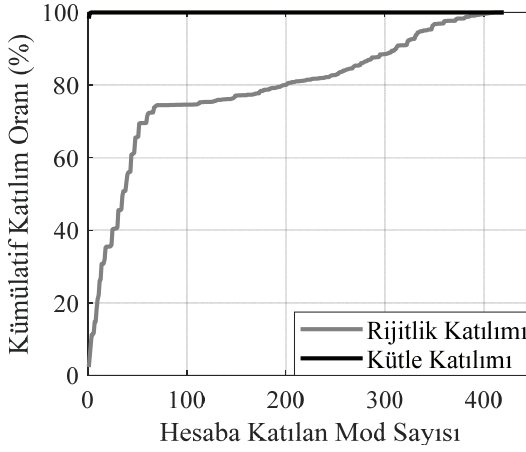
20 katlı çerçevenin yatay doğrultudaki ilk 6 moduna ait serbest titreşim mod şekilleri Şekil-4'de, periyotları ise Çizelge 1'de sunulmuştur. Şekil 3'de görüldüğü üzere ilk dört mod yatay doğrultuda, beşinci ve altıncı modlar ise düşey doğrultudadır. Çizelge 1'de ise MATLAB [15] ve SAP 2000 [16] modelinden elde edilen serbest titreşim periyotları birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4 - Çerçevenin ilk 6 moduna ait modal deplasman şekilleri

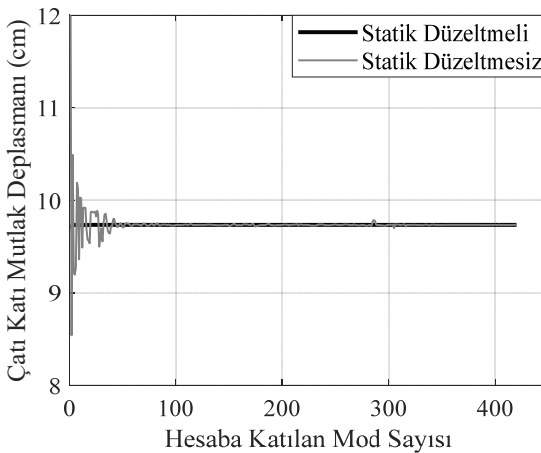
Çizelge 1 - Çerçevenin ilk 6 moduna ait serbest titreşim periyotları

Mod Sayısı	Periyot (sn.)	
	MATLAB Modeli	SAP 2000 Modeli
1	1,4311	1,4355
2	0,4685	0,4698
3	0,2661	0,2674
4	0,1869	0,1863
5	0,1786	0,1790
6	0,1494	0,1501



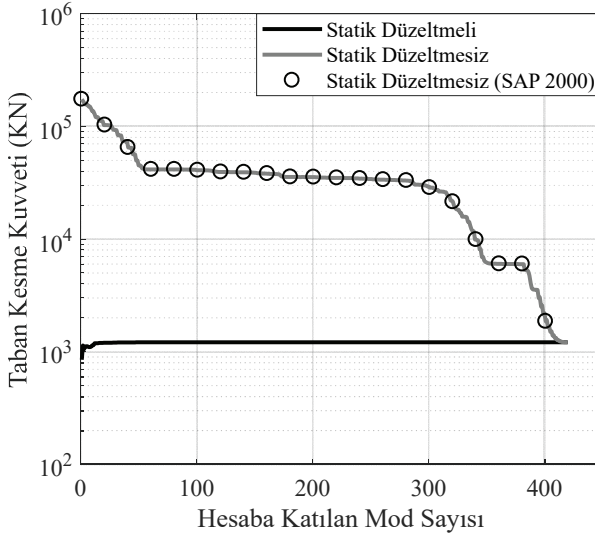
Şekil 5 - Toplam etkin kütle ve rijitlik oranı dağılımı

Şekil 5’de, 20 katlı kayma çerçevesinin yatay doğrultudaki toplam etkin kütle ve rijitlik katılım oranları sunulmuştur. Görüldüğü üzere, rijitlik katılımı mod sayısı ile birlikte kademeli olarak artmakta ve ancak 320. moddan sonra %90 nispetini aşmaktadır. Bu durumda gerçekçi bir çözüm elde etmek için neredeyse tüm modların (420 mod) hesaba katılması gerekmektedir. Toplam etkin kütle oranı ise yalnızca ilk modun hesaba katılmasıyla %99’a ulaşmaktadır. Rijitlik ve kütle katılım oranlarının dağılımındaki bu büyük fark deplasman yüklemesinin neredeyse tüm modları tetiklediğini göstermektedir. İvme yüklemesinde ise ilk modların katkısı çok yüksek olmaktadır. Statik düzeltme uygulanması durumunda ise modal katkı oranının dağılımının kütle oranı dağılımıyla aynı olması beklenmektedir.



Şekil 6 - Çatı katı mutlak deplasmanının hesaba katılan mod sayısına göre değişimi

Şekil 6’da statik düzeltmenin uygulanması ve uygulanmaması durumları için çatı katı mutlak deplasmanlarının, hesaba katılan mod sayısına göre değişimi sunulmaktadır. İlk bakışta, statik düzeltme uygulanması durumunda çatı katı deplasmanının gerçek değerine yakınsaması için ilk iki mod yeterli olmaktadır. Statik düzeltmenin uygulanmaması durumunda ise gerçek değer etrafında genliği giderek azalan salınımlar oluşmaktadır. 50. moddan itibaren ise mutlak deplasmanlar gerçek değerine yakınsamaktadır. Denklem (17)’de görüldüğü üzere sözde statik deplasmanlar açısıl frekansın karesiyle ters orantılıdır. Bu nedenle 50. moddan sonraki yüksek modların etkisi ortadan kalkmaktadır.

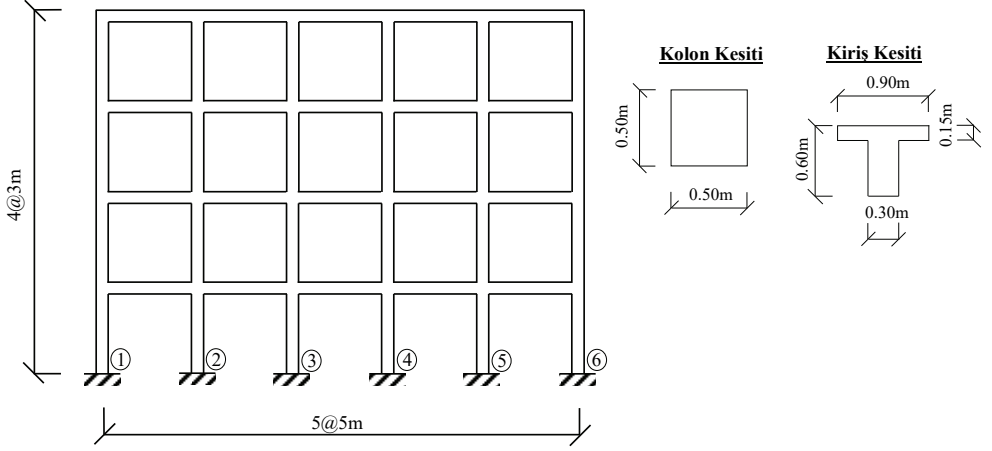


Şekil 7 - Taban kesme kuvvetinin hesaba katılan mod sayısına göre değişimi

Şekil 7’de, maksimum taban kesme kuvvetinin hesaba katılan mod sayısına göre değişimi sunulmaktadır. Taban kesme kuvveti dağılımlarının, Şekil 4’de verilen rijitlik ve kütle dağılımlarıyla şekilsel ve oransal olarak aynı olduğu görülmektedir. Statik düzeltme yapılmaması durumunda, gerçek taban kesme kuvvetini elde edebilmek için en azından ilk 415 modun hesaba katılması gerekmektedir. Statik düzeltmesiz durum için elde edilen taban kesme kuvvetleri SAP 2000’den elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Statik düzeltme yapılması durumunda ise gerçek taban kesme kuvvetini elde edebilmek için ilk üç mod yeterli olmaktadır. SAP 2000 yazılımında, çoklu mesnet hareketi için, mesnetlere yer deplasmanı tanımlanabilmektedir; ancak problemin çözümü için direkt integrasyon yöntemi (kapalı çözüm) önerilmektedir [17]. Modal analiz için, Chopra [14] tarafından bahsedilen statik düzeltme yöntemi seçenek olarak bulunmakla birlikte deplasman yüklemesi için işe yaramamaktadır. Bu nedenle kıyaslamada yalnızca statik düzeltmesiz durum için elde edilen taban kesme kuvveti kullanılmıştır. Statik düzeltme yapılmaması durumundaki hata miktarı 230 kata kadar çıkmaktadır. Denklem (23)’de görüldüğü üzere modal taban kesme kuvveti açısıl frekansın karesiyle doğru orantılıdır. Bu nedenle yüksek modların taban kesme kuvvetine etkisi, deplasmanlara olan etkisine nazaran çok daha fazla olmaktadır.

## 5.2. Sayısal Uygulama-2

Sayısal uygulama 2’de, depreme ait kayma dalgası hızının (deprem dalgası ilerleme hızı) taban kesme kuvvetine olan etkisi 4 katlı ve 5 açıklıklı, tekil temeller üzerine oturan betonarme bir moment çerçevesi modeli kullanılarak incelenmiştir (bkz. Şekil-8). Betonarme çerçevenin kat ağırlığı 1250 kN, sönüm oranı %5 ve beton elastisite modülü 30.000 MPa’dır. Dinamik analiz için 6 farklı deprem hareketi seçilmiştir. Deprem dalgası ilerleme hızının çerçeve üzerinde olan etkisini görebilmek için yapı temelleri arasında bağ kirişi olmadığı ve mesnetteki düğüm noktalarının birbirinden bağımsız hareket edebildikleri varsayılmıştır. Yapı dizaynında kritik rol oynayan taban ve kat kesme kuvvetlerinin deprem dalgası ilerleme hızına göre değişimi Şekil 10’da verilen yer deplasmanlarına göre elde edilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.



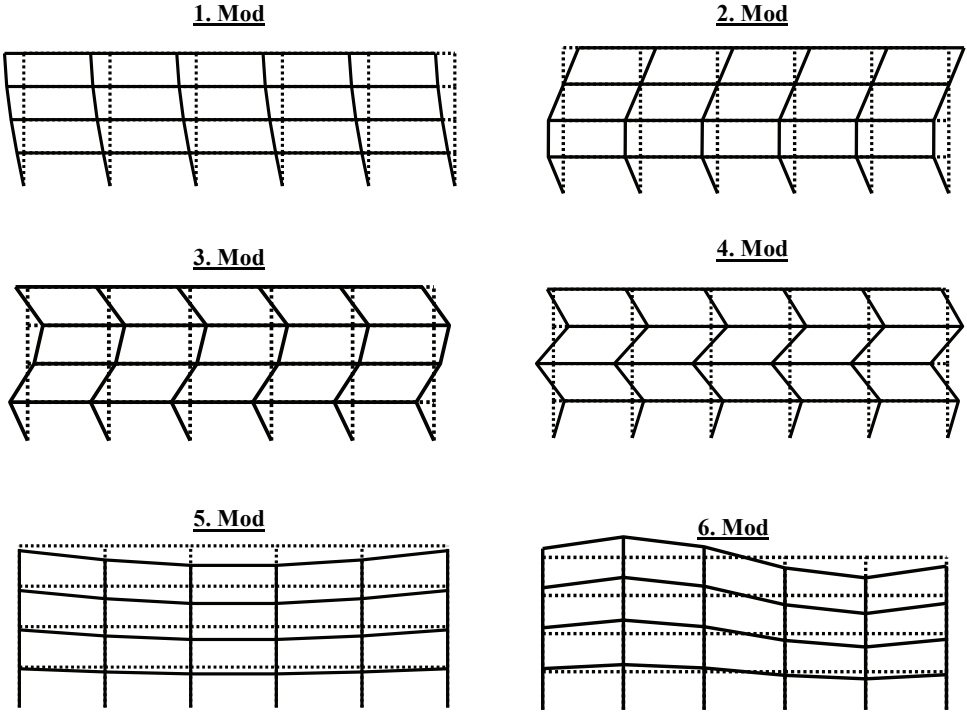
Şekil 8 - Model 1, 2 ve 3'ün şematik gösterimi

Çizelge 2 - Çerçevenin ilk 6 moduna ait serbest titreşim periyotları

Mod Sayısı	Periyot (sn.)	
	MATLAB Modeli	SAP 2000 Modeli
1	0,3266	0,3270
2	0,1132	0,1150
3	0,0737	0,0745
4	0,0600	0,0608
5	0,0575	0,0570
6	0,0527	0,0530

İncelenen 4 katlı çerçevenin yatay doğrultudaki ilk 6 moduna ait serbest titreşim periyotları ve mod şekilleri, sırasıyla Çizelge 2 ve Şekil 9’da sunulmaktadır. Yazarlar tarafından

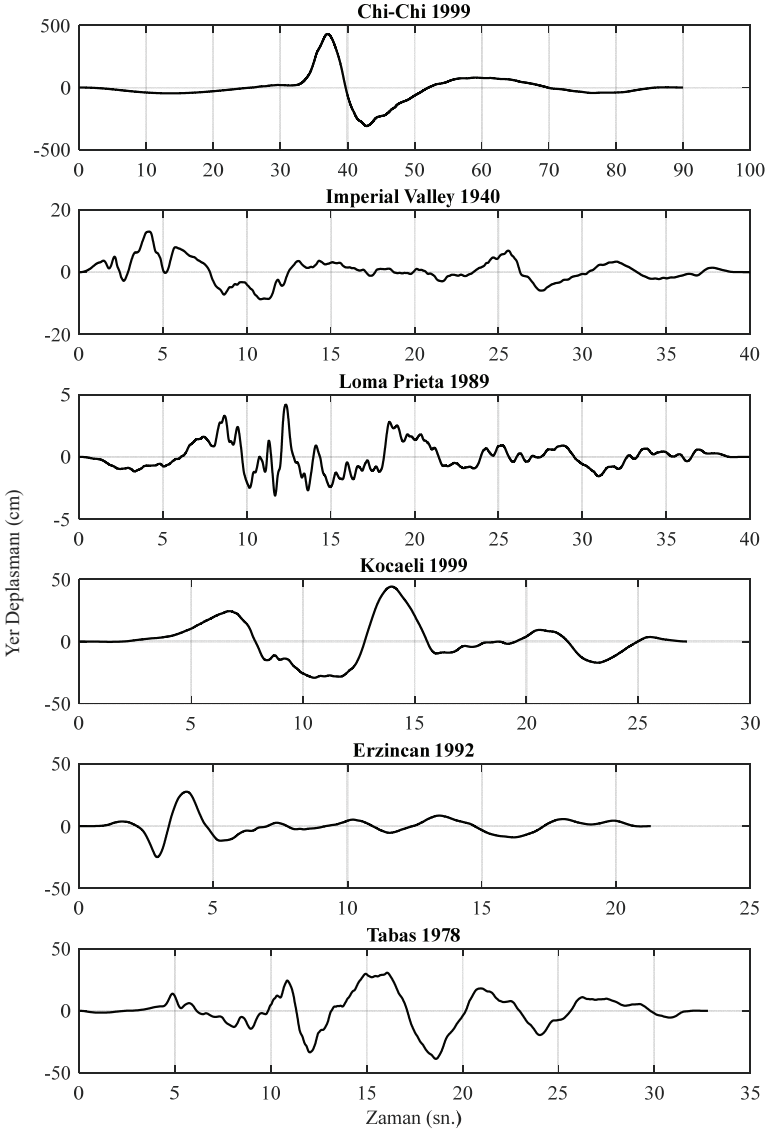
kullanılan MATLAB programı ve SAP 2000 yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 9'da görüldüğü üzere ilk dört mod yatay doğrultuda, beşinci ve altıncı modlar ise dikey doğrultudadır.



Şekil 9 - Çerçevenin ilk 6 moduna ait modal deplasman şekilleri

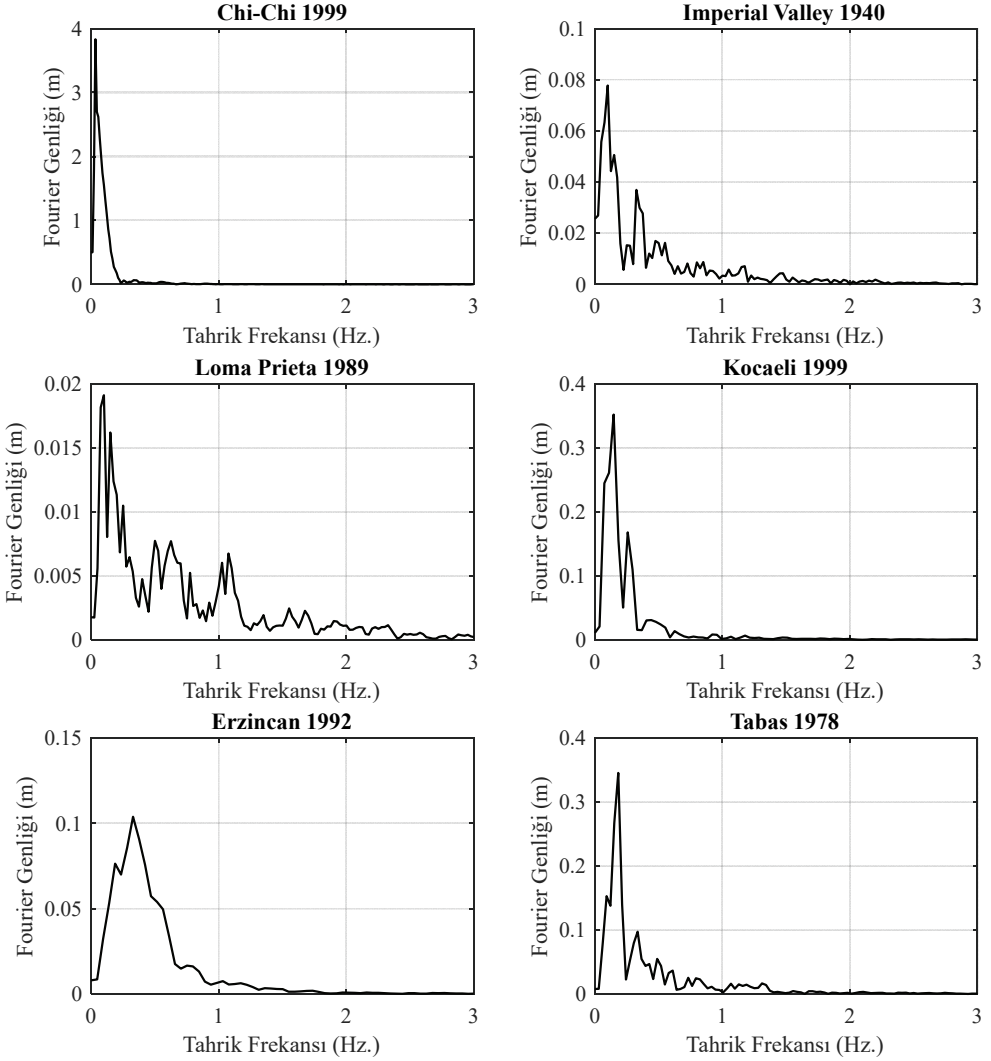
Deprem dalgasının zemin içerisindeki ilerleme hızının belirlenmesinde zemin özellikleri ön plana çıkmaktadır. Literatürden bilindiği üzere yapı mesnetlerinde titreşim hareketine neden olan deprem dalgası yıkım etkisi yüksek olan ve S dalgası olarak bilinen kayma (kesme) dalgalarıdır. Literatürde, S dalgalarının yumuşak ve sık zeminlerdeki ilerleme hızı ise 100 m/sn'nin dahi altına düşebildiği vurgulanmaktadır [18]. Bu durumda deprem dalgasının yapı mesnetlerine ulaşma zamanı uzamakta ve kaçınılmaz olarak çoklu mesnet hareketi durumu oluşmaktadır. Bu nedenle sayısal analizde deprem dalgası ilerleme hızı için 10 ile 500 m/sn. arasında değişen değerler seçilmiştir.

Kullanılan yer-deplasman kayıtlarına ait Fourier genlikleri Şekil 11'de sunulmaktadır. Görüldüğü üzere Loma Prieta 1989 haricindeki depremler düşük frekanslardan (1 Hz.'den küçük) etkilenmektedir. Loma Prieta 1989 depreminin ise yüksek frekanslardaki genlik değişimleri göreceli olarak yüksek gözükmektedir. Bu durumda her bir mesnette oluşacak yer deplasmanı genliklerinin birbirinden oldukça farklı olacağı ve yapının çoklu mesnet hareketi etkisinden etkileneceği görülmektedir.



Şekil 10 - Sayısal analizde kullanılan depremlere ait yer deplasmanları

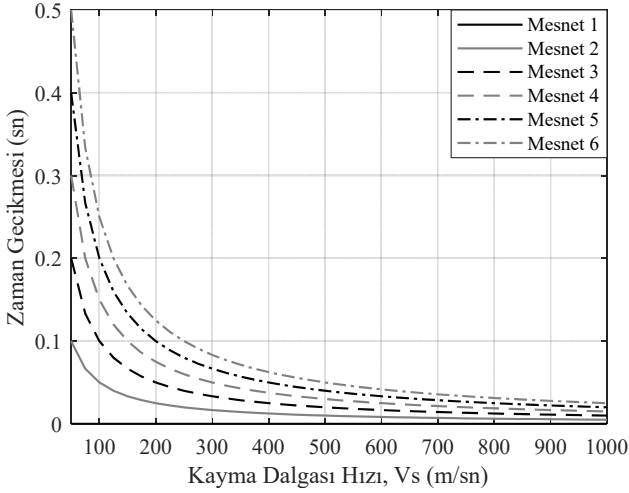
Şekil 10'da verilen yer deplasmanları 1 no'lu mesnete aynen uygulanmış, diğer mesnetlere ise oluşacak zaman gecikmeleri hesaplanarak eklenmiştir (Yer deplasmanları zaman ekseninde oluşacak gecikme kadar kaydırılmıştır). Her bir mesnet için kayma dalgası hızına bağlı olarak hesaplanan zaman gecikmeleri Şekil 12'de sunulmaktadır. Görüldüğü üzere mesnetler arasındaki zaman gecikmesinin maksimum değeri,  $V_s=50$  m/sn için 0.10 sn olmaktadır.



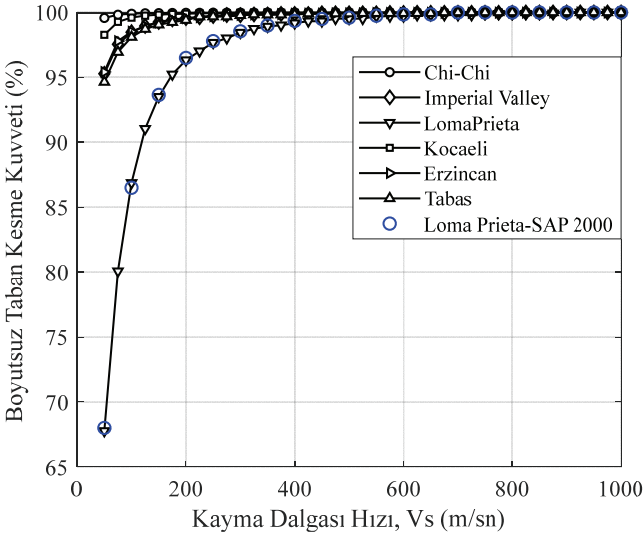
Şekil 11 - Analizde kullanılan depremlere ait yer deplasmanlarının Fourier dönüşümleri

Şekil 13’de, seçili deprem verileri kullanılarak elde edilen boyutsuz taban kesme kuvvetlerinin kayma dalgası hızına göre değişimi sunulmaktadır. Burada, boyutsuz taban kesme kuvveti, herhangi bir kayma dalgası hızı için elde edilen taban kesme kuvvetinin, eş zamanlı mesnet hareketi için elde edilen taban kesme kuvvetine olan oranıdır. Kayma dalgası hızına bağlı olarak, özellikle düşük dalga hızlarında ( $V_s < 300$  m/sn.) zemin rijitliğinde azalma olması kaçınılmazdır [19]. Bu düşük hızlarda zemin kayma modülü değişiklik göstereceğinden bu durumun zemin-yapı etkileşimi analiziyle irdelenmesi gerekmektedir. Ancak, bu durumda zemin ve yapı sisteminin frekansı her bir dalga hızı için farklı olacaktır.

Frekans değişiminden ötürü farklı taban kesme kuvveti talepleri oluşacaktır. Bu araştırmanın amacı ise taban kesme kuvvetinde yalnızca deprem dalgası ilerleme hızına bağlı çoklu mesnet hareketi nedeniyle oluşacak değişimlerin incelenmesidir. Çalışma sonucunda karşılaştırılabilir neticelerin alınabilmesi için incelenen örnekte yapı zemin etkileşimi ihmal edilmiştir.



Şekil 12 - Mesnetlerde oluşan zaman gecikmelerinin kayma dalgası hızına bağlı değişimi



Şekil 13 - Taban kesme kuvveti oranının deprem dalgası ilerleme hızına göre değişimi



Rölatif taban kesme kuvvetlerinin kayma dalgası hızına göre değişiminin, Loma Prieta dışındaki depremler için birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Bunlar için elde edilen rölatif taban kesme kuvvetleri düşük kayma dalgası hızları için (50-250 m/sn. arası) en fazla %95 mertebesine kadar düşerken 250 m/sn.'den sonra en az %100'e yaklaşmaktadır. Kayma dalgası hızının 200 m/sn.'den yüksek olduğu durumlar için çoklu mesnet hareketi etkisinin kaybolduğu görülmektedir. Loma Prieta depremi için elde edilen rölatif taban kesme kuvvetinin değişimi ise diğer deprem kayıtlarından elde edilenlere oranla oldukça farklı olmaktadır. Kayma dalgası hızının 50 ile 250 m/sn arasında olması durumunda, rölatif taban kesme kuvveti %67 ile %97 arasında değişmektedir. Kayma dalgası hızının 250 m/sn'den yüksek olması durumunda ise rölatif taban kesme kuvveti %100'e yaklaşmaktadır. Düşük kayma dalgası hızları için Loma Prieta depreminden elde edilen sonuçların diğer depremlerden elde edilen sonuçlardan farklı olmasının, yer deplasmanının yüksek frekanslarda etkin olmasına (bkz. Şekil 11) bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Loma Prieta depreminin yer deplasmanı kaydı diğer deprem kayıtlarıyla kıyaslandığında, değişim frekansının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle, mesnetlerde oluşan zaman gecikmeleri sebebiyle her mesnette birbirinden oldukça farklı ve zıt genlikte deplasmanlar meydana getirebilmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada deprem dalgasının ilerleme hızı nedeniyle mesnetlerinden farklı yer deplasmanlarına maruz çerçevelerin dinamik analizi deplasman yüklemesine göre incelenmiş ve yüksek mod etkilerini ortadan kaldırmak için bir statik düzeltme yöntemi kullanılmıştır. Yazarlar tarafından geliştirilen MATLAB [15] programı yardımıyla elde edilen analiz sonuçları, SAP 2000 [16] yazılımıyla doğrulanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Deplasman yüklemesinden kaynaklanan yüksek mod etkilerinin çatı katı deplasmanında %20'nin altında kaldığı görülmüştür. Statik düzeltme yönteminin uygulanması ile birlikte, deplasman yöntemi için hesaba katılması gereken titreşim modu sayısının, ivme yöntemi için gereken mod sayısına eşdeğer hale getirilebildiği anlaşılmaktadır.
- Statik düzeltme yapılmaması durumunda hesaplanan taban kesme kuvvetindeki fark çok yüksek olmakta ve gerçekçi bir çözüm elde etmek için neredeyse tüm modların hesaba katılmasını gerektirmektedir. Statik düzeltme yapılması durumunda ise gerçek taban kesme kuvvetini elde etmek için ilk üç mod (sunulan örnek için) yeterli olmaktadır.
- Yüksek sismik dalga hızları için elde edilen rölatif taban kesme kuvveti %100 mertebesindedir. Düşük sismik dalga ilerleme hızları için ise rölatif taban kesme kuvvetinin %25 mertebesine kadar düştüğü görülmüştür.
- Yer-deplasman kaydı değişiminin düşük frekanslı olması durumunda zaman gecikmesinin taban kesme kuvvetine olan etkisinin, 100 m/sn' den daha yüksek ilerleme hızları için, oldukça az olduğu görülmektedir. Yer-deplasman kaydı değişiminin yüksek frekanslı olması durumunda ise zaman gecikmelerinin düşük

yayımlı hızlarında ( $V_s < 300$  m/sn) taban kesme kuvveti üzerindeki etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

- Sonuç olarak, yapı temelini rijit plaklarla teşkil edilemediği veya mesnetlerin birbirinden bağımsız hareket edebildiği çerçve sistemlerin zaman-tanım aralığındaki çözümünde, deprem dalgası ilerleme hızının hesaba katılmasıyla birlikte tasarım kuvvetlerinde önemli miktarda bir azalma olduğu anlaşılmaktadır.

### **Kaynaklar**

- [1] Ye, J., Zhang, Z., Liu, X., A simplified multi-support response spectrum method, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11, 243-256, 2012.
- [2] Cui, P.J., Gao, D.F., Travelling wave effect analysis of long-span cable-stayed bridge, *Advanced Materials Research*, 243-249, 308-312, 2011.
- [3] Soyuluk, K., Comparison of random vibration methods for multi-support seismic excitation analysis of long-span bridges. *Engineering Structures*, 26, 1573-1583, 2004.
- [4] Su, L., Donk, S. and Kato, S., Seismic design for steel trussed arch to multi-support excitations, *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 725–734, 2007.
- [5] Hızal, Ç., Turan, G., Importance of static correction and damping in the analysis of a cable-stayed bridge subjected to displacement loading, *Journal of Bridge Engineering*, 22(6), 04017009(1-14), 2017.
- [6] Zhang, Y.H. Li, Q.S., Lin, J.H. and Williams, F.W., Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 620–629, 2009.
- [7] Yau, J.D., Dynamic response analysis of suspended beams subjected to moving vehicles and multiple support excitations, *Journal of Sound and Vibration*, 325, 907–922, 2009.
- [8] Yau, J.D., Fryba, L., Response of suspended beams due to moving loads and vertical seismic ground excitations, *Engineering Structures*, 29(12), 3255-3262, 2007.
- [9] Rambabu, K.V., Allam M.M., Response of an open-plane frame to multiple support horizontal seismic excitations with soil–structure interaction, *Journal of Sound and Vibration*, 299, 388-396, 2007.
- [10] Allam, M.M., Multiple support excitations of open-plane frames by a filtered white noise and soil–structure interaction, *Journal of Sound and Vibration*, 329, 4212–4226, 2010.
- [11] Tsai H.C., Modal superposition method for dynamic analysis of structures excited by prescribed support displacements, *Computers and Structures*, 66(5), 675-683, 1998.
- [12] Wilson, E.L., Three dimensional static and dynamic analysis of structures. *Computers and Structures, Inc., California, USA, 2002.*

- [13] Tian, Y., Yang, Q., On time step in structural seismic response analysis under-ground displacement/acceleration, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(3), 341-347, 2009.
- [14] Chopra, A.K., *Dynamics of structures: theory and applications*, 4<sup>th</sup> Edition, Prentice Hall, e-ISBN: 978-0-13-285803-8, 2015.
- [15] MATLAB (Computer software), MathWorks, Natick, M.A.
- [16] SAP 2000 (Structural Software for Analysis and Design), Computers and Structure, Berkeley, California, USA.
- [17] CSi Knowledge Base, Manual multi-support excitation, <https://wiki.csiamerica.com>.
- [18] Yılmaz, Ö., *Engineering seismology with applications to geotechnical engineering*, Society of Exploration Geophysicists, e-ISBN: 978-1-56080-330-0, 2015.
- [19] Thitimakorn, T., Channoo, S., Shear wave velocity of soils and NEHRP site classification, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2891-2904, 2012.

