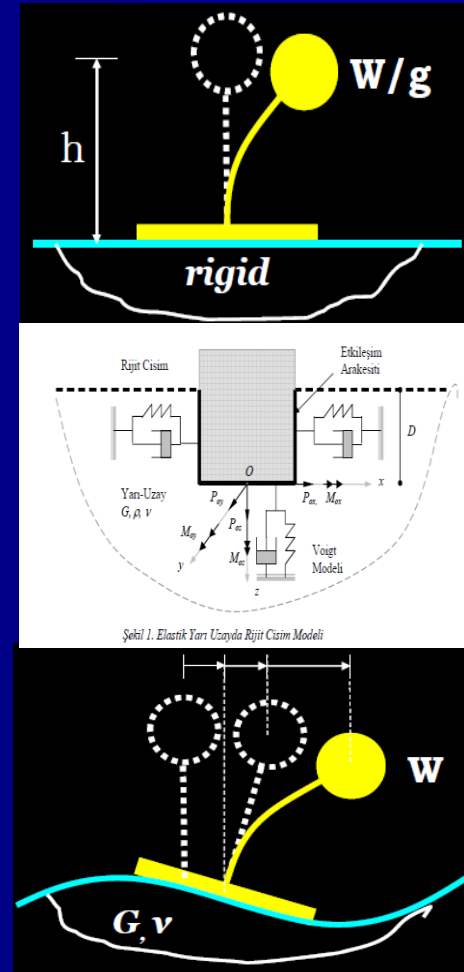


# YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİMİ

## DERS BİLGİLERİ

Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Yapı Anabilim Dalı

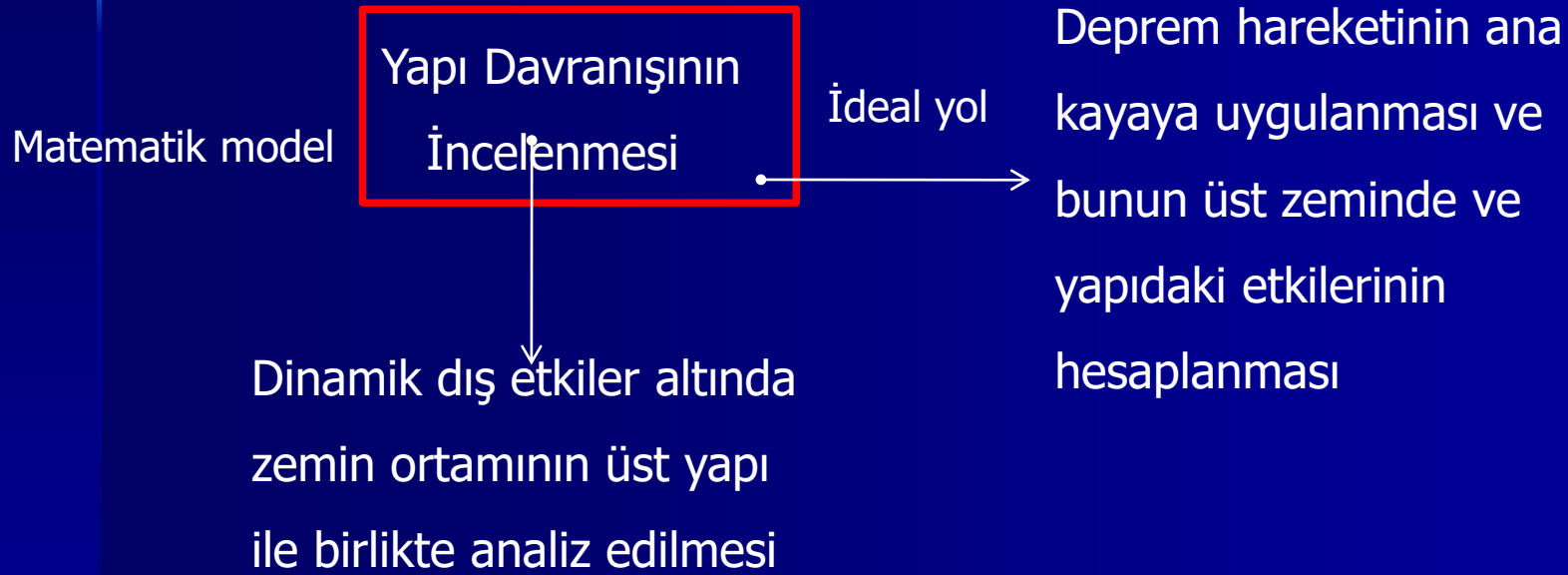
Ofis: M-8 Bina; 8203 Oda  
[www.sakarya.edu.tr/~ecelebi](http://www.sakarya.edu.tr/~ecelebi)



Bu Sunuda jeofizik Çalışmalar Olarak Bizi İlgilendiren Temel Tanımlar;

Deprem hareketinin ana kayaya uygulanarak üst zeminde ve yapıdaki etkilerinin hesaplanması gerekirken çoğunlukla yapılan uygulama, yer yüzünden elde edilmiş deprem kayıtlarının zemin etkisi çıkartılmadan anakaya verisi olarak kullanılmasıdır.

Sonuç: Yapı yapılacak noktadaki mühendislik ve sismik anakayaya ait gerçekçi deprem verilerinin elde edilmesidir.



## DERS BİLGİLERİ

| Ders                            | Kodu    | Yarıyıl | T+U Saat | Kredi | AKTS |
|---------------------------------|---------|---------|----------|-------|------|
| YAPI - ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİMİ | INM 513 | 0       | 3 + 0    | 3     | 6    |

|                          |      |
|--------------------------|------|
| Ön Koşul Dersleri        | -    |
| Önerilen Seçmeli Dersler | None |

|                     |  |
|---------------------|--|
| Dersin Dili         | Türkçe  |
| Dersin Seviyesi     | Yüksek Lisans  |
| Dersin Türü         | Seçmeli  |
| Dersin Koordinatörü | Prof.Dr. Erkan ÇELEBİ  |
| Dersi Verenler      | Prof.Dr. Erkan ÇELEBİ  |
| Dersin Yardımcıları |  |

|              |   |
|--------------|---|
| Dersin Amacı | <p>Çok katlı yapılar, barajlar, viyadükler, asma köprüler, nükleer güç santralleri gibi depreme karşı davranışlarının önemli olduğu bilinen yapı sistemlerinin, çok değişik özellikler taşıyan zeminler üzerinde kurulması zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki karşılıklı dinamik etkileşiminin iyi anlaşılmasını gerektirmektedir. Mühendislik yapılarının deprem analizinde, yapı-zemin etkileşimini göz önüne alan hesap modellerinin geliştirilmesi ve çözüm yaklaşımlarının öğretilmesi bu dersin amacını oluşturmaktadır.</p> |
|--------------|---|

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Dersin İçeriği</b> | 1. Rijit temellerin titreşimleri<br>Geometrisi dairesel, dikdörtgen ve şerit tipte olan temellerin incelenmesi   |
|                       | 1.1. Elastik yarı sonsuz ortamda yüzeysel ve gömülü temellerin dinamik davranışının incelenmesi ve empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi ve temel-zemin parametrelerine bağlı incelenmesi,<br>1.2. Tabakalı zemin ortamında yüzeysel ve gömülü temellerin dinamik davranışının incelenmesi ve empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi ve temel-zemin parametrelerine bağlı incelenmesi,<br>2. Yapı-zemin dinamik etkileşim problemleri<br>2.1. Doğrudan çözüm yöntemleri (sonlu elemanlar ve sınır elemanlar modeli)<br>2.2. Zemin altsistem yöntemi (rijit temellere bağlı tek ve çok serbestlik dereceli sistemlerin incelenmesi, nümerik ve basitleştirilmiş çözüm yaklaşımlarıyla zemin altsisteminin modellenmesi ) |

| <b>Dersin Öğrenme Çıktıları</b>   | <b>Öğretim Yöntemleri</b> | <b>Ölçme Yöntemleri</b> |
|---|---------------------------|-------------------------|
| 1) Yapı-temel-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimini göz önüne alan empedans fonksiyonlarını altsistem yaklaşımıyla kavrayabilmek ve sonucunda sistemin dinamik davranışını yorumlayabilmek için gerekli teorik donanımı kazanmak | 1,2,4,9,14,15             | A,C                     |

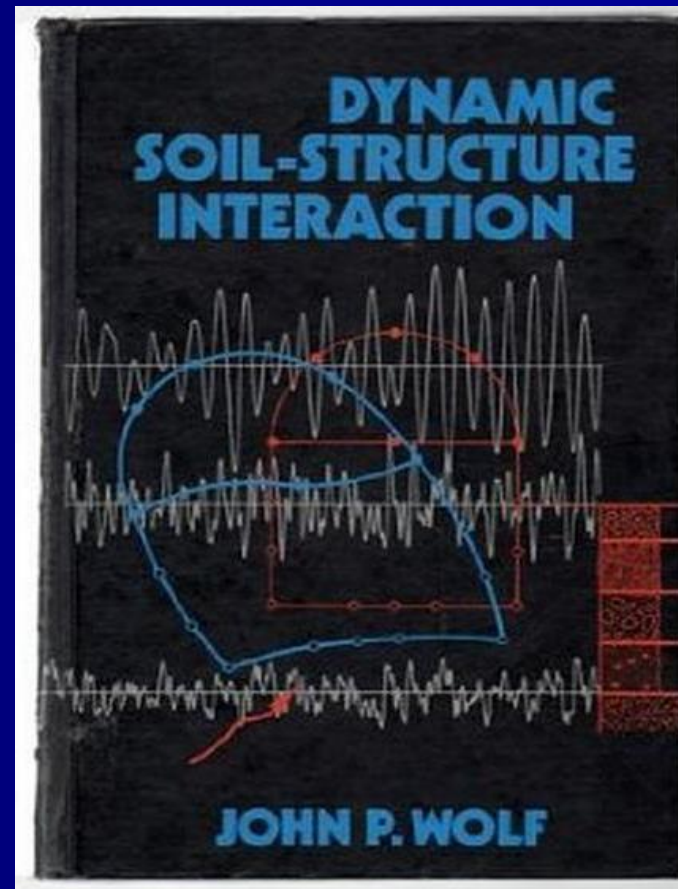
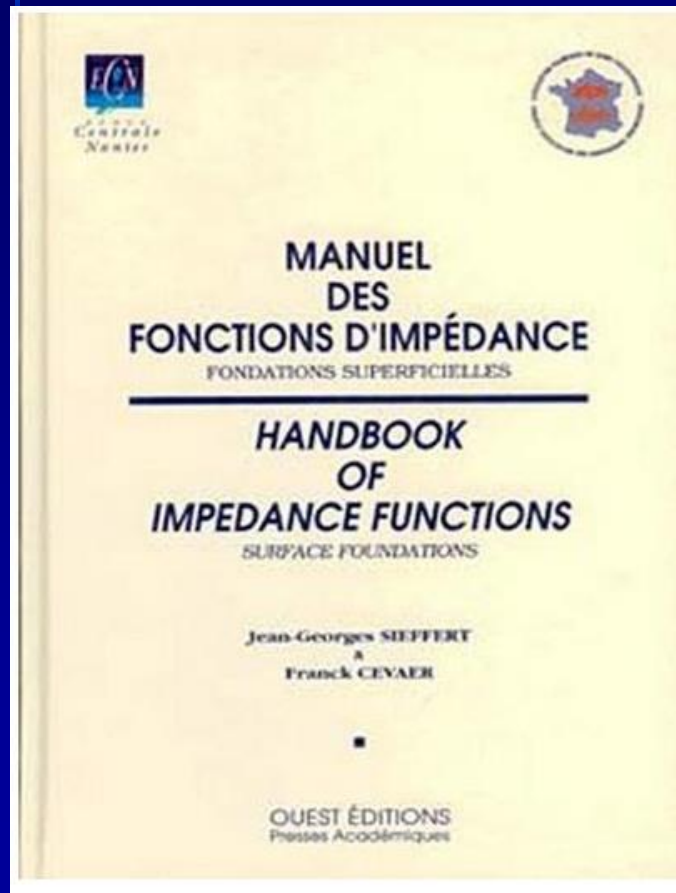
|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Öğretim Yöntemleri:</b> | 1: Anlatım, 2: Soru-Cevap, 4: Alıştırma ve Uygulama, 9: Benzetim, 14: Bireysel Çalışma, 15: Problem Çözme |
| <b>Ölçme Yöntemleri:</b>   | A: Sınav , C: Ödev  |

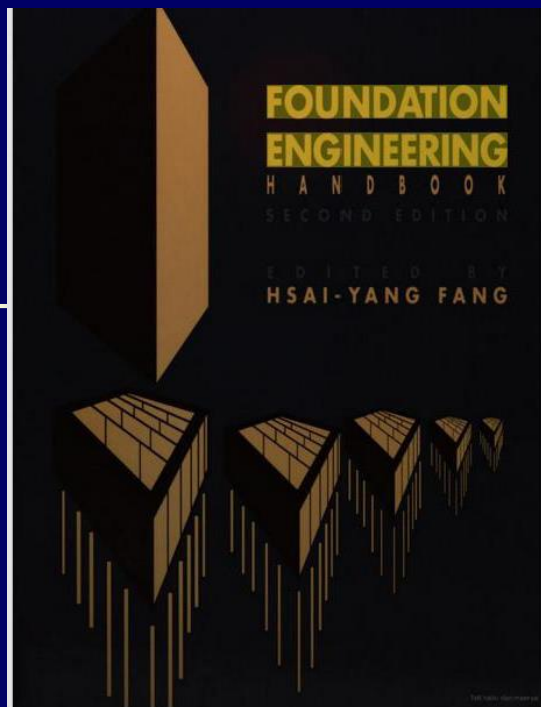
## DERS AKIŞI

| Hafta | Konular  |  |
|-------|--|--|
| 1     | Rijit temellerin titreşimleri  |  |
| 2     | Elastik yarı sonsuz ortamda yüzeysel temellerin dinamik davranışının incelenmesi   |  |
| 3     | Empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi ve temel-zemin parametrelerine göre incelenmesi |  |
| 4     | Elastik yarı sonsuz ortamda gömülü temellerin dinamik davranışının incelenmesi   |  |
| 5     | Empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi ve temel-zemin parametrelerine göre incelenmesi |  |
| 6     | Tabakalı zemin ortamında yüzeysel temellerin dinamik davranışının incelenmesi  |  |
| 7     | Empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi ve temel-zemin parametrelerine göre incelenmesi |  |
| 8     | Tabakalı zemin ortamında gömülü temellerin dinamik davranışının incelenmesi  |  |
| 9     | Empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi   |  |
| 10    | Yapı-zemin dinamik etkileşim problemleri   |  |
| 11    | Doğrudan çözüm yöntemleri (sonlu elemanlar ve sınır elemanlar modeli)  |  |
| 12    | Zemin altsistem yöntemi ve rijit temellere bağlı tek ve çok serbestlik dereceli sistemlerin incelenmesi  |  |
| 13    | Nümerik ve basitleştirilmiş çözüm yaklaşımlarıyla zemin altsisteminin modellenmesi   |  |
| 14    | Nümerik ve basitleştirilmiş çözüm yaklaşımlarıyla zemin altsisteminin modellenmesi   |  |

## KAYNAKLAR

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>Ders Notu</b>       | Çelebi, E.; Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimi, Hazırlanmış ders notları, 2005   |
| <b>Diğer Kaynaklar</b> | Schmid, G., Tosecky, A., Soil-Structure Interaction, Foundations Vibrations, Lecture Notes, Skopje, 2003.<br>Talaganov, K., Soil and foundation dynamics, Lecture Notes, Skopje, 1998.<br>Sieffert, J., G., and Cevaer F., Handbook of Impedance Functions, Surface Foundations, Quest Editions, Nantes, 1991.<br>Wolf, J. P., Dynamic soil-structure interaction, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.<br>Newmark, N. L. , Hall, W. J., Vibration of structures induced by ground motion, Chapter 29, part 1, in Shock and Vibration Handbook, 2nd Edn. , McGraw-Hill, New York. 1976. |





## 15 FOUNDATION VIBRATIONS

GEORGE GAZETAS, Ph.D., P.E.  
Professor of Soil Mechanics  
National Technical University  
Athens, Greece  
and  
State University of New York  
Buffalo

### 15.1 INTRODUCTION

When subjected to dynamic loads, foundations oscillate in a way that depends on the nature and deformability of the supporting ground, the geometry and inertia of the foundation and superstructure, and the nature of the dynamic excitation. Such an excitation may be in the form of support motion due to waves arriving through the ground during an earthquake, an adjacent explosion, or the passage of a train; or it may result from the dynamic forces imposed directly or indirectly on the foundation from operating machines, ocean waves, and vehicles moving on the top of the structure.

Since the very important subject of foundation response during earthquake shaking is treated in the next chapter, attention herein will be focused on determining the vibratory response of foundations to applied loads such as those produced by a machine. A key step in such response analyses (and hence the main thrust of this chapter) is to estimate the dynamic "spring" and "dashpot" coefficients of flexibly-supported foundations. To this end, an engineering procedure is developed, based on simple algebraic formulae and dimensionless charts, for surface and shallow foundations, embedded foundations, and piles. Note that, in addition to being directly applicable to machine-loaded foundations, much of the information presented could also be used in assessing the dynamic soil-foundation-structure interaction during seismic (or any other ground) shaking. Of course, in such cases the loading arises from inertial (D'Alembert) forces developing in the oscillating superstructure.

This chapter also presents information on the pertinent dynamic soil parameters, and outlines current methods of measuring them in the laboratory and in the field. Some useful results and concepts from dynamics and wave propagation theory are also presented and elucidated when the need arises, throughout the chapter; they provide background information and help in developing a better understanding of the methods presented. The chapter concludes with a number of illustrative realistic examples.

### 15.2 MACHINE FOUNDATION VIBRATIONS: STATEMENT OF THE PROBLEM

A sketch of a typical rigid block foundation carrying rotatory machinery and supported on a layered soil profile is shown in Figure 15.1. The dynamic loading arises from an unbalanced

mass  $m_0$  rotating with an eccentricity  $r_0$  at the operational circular frequency  $\omega = 2\pi f$ , where  $f$  = frequency in cycles per second (Hz). The forces and moments acting on the soil-foundation interface and transmitted into the ground are of the form  $m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t$  or, using complex notation,  $m_0 r_0 \omega^2 \exp(i\omega t)$ ;<sup>\*</sup> that is, they vary harmonically with time. Waves are emitted from the interface and propagate in all directions within the deposit. In the presence of the free ground surface and of soil layers with differing stiffnesses these waves undergo numerous reflections and refractions, as well as transformations into surface waves. Much of the energy imparted onto the foundation is diffused by such outward- and downward-spreading waves, while a small portion is dissipated by inelastic action in the soil.

As a result, the soil-foundation interface, and with it the foundation block, undergoes harmonic oscillations of the form  $u_0 \cos(\omega t + \phi)$  or, using complex notation,  $u_0 \exp[i(\omega t + \phi)]$ , with frequency-dependent amplitude and phase lag,  $u_0 = u_0(\omega)$  and  $\phi = \phi(\omega)$ . The basic goal of the geotechnical design is to limit the amplitudes of all possible modes of oscillation to small enough levels that will neither endanger the satisfactory operation of the machine nor disturb the people working in the immediate vicinity. Charts like the one depicted in Figure 15.1b (based on information from Richart, 1975) may guide the selection of an appropriate upper limit for a satisfactory foundation performance.

Notice that these limiting displacement amplitudes are typically of the order of a hundredth of a centimeter—compared to the several centimeters that is the usual restriction for foundation settlement under static load. A direct consequence is that soil deformations would in the majority of cases be quasistatic, involving negligible nonlinearities and no permanent deformations. Among the possible exceptions are a laterally oscillating piled foundation working at low frequencies, which may induce strains of the order of 0.02 percent in soft clayey layers; and a rocking shallow foundation may induce large strains directly under its edges. Thus, analyses to predict vibration amplitudes assume linear viscoelastic soil behavior, with hysteretic soil damping to model energy losses at these

<sup>\*</sup> It has become traditional in dynamics to introduce complex-number notation, which significantly simplifies the computations. The understanding, of course, is that at the end the absolute value (amplitude) and phase angle can be recovered from a complex response  $u_1 + iu_2$ ; the former being equal to  $\sqrt{u_1^2 + u_2^2}$  and the latter to  $\tan^{-1} u_2/u_1$ .



## PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS



# 4. Foundations and Geologic Site Hazards

## 4.1 Scope

This chapter sets forth general requirements for consideration of foundation load-deformation characteristics, seismic rehabilitation of foundations, and mitigation of geologic site hazards in the Systematic Rehabilitation of buildings.

Section 4.2 specifies data collection for site characterization and defines geologic site hazards. Section 4.3 outlines procedures for mitigation of geologic site hazards. Section 4.4 provides soil strength and stiffness parameters for consideration of foundation load-deformation characteristics. Section 4.5 specifies seismic earth pressures on building walls. Section 4.6 specifies requirements for seismic rehabilitation of foundations.

### C4.1 Scope

This chapter provides geotechnical engineering provisions for building foundations and seismic-geologic site hazards. Acceptability of the behavior of the foundation system and foundation soils for a given performance level cannot be determined apart from the context of the behavior of the superstructure.

Geotechnical requirements for buildings that are suitable for Simplified Rehabilitation are included in Chapter 10. Structural engineering issues of foundation systems are discussed in the chapters on Steel and Cast Iron (Chapter 5), Concrete (Chapter 6), Masonry (Chapter 7), and Wood and Light Metal Framing (Chapter 8).

## 4.2 Site Characterization

Site characterization shall include collection of information on the building foundation as specified in Section 4.2.1, and on seismic geologic site hazards as specified in Section 4.2.2.

### C4.2 Site Characterization

The guidance of the State Historic Preservation Officer should be obtained if historic or archeological resources are present at the site.

## 4.2.1 Foundation Information

Information on the foundation supporting the building to be rehabilitated, nearby foundation conditions, design foundation loads, and load-deformation characteristics of the foundation soils shall be obtained as specified in Sections 4.2.1.1 through 4.2.1.3.

### 4.2.1.1 Foundation Conditions

#### 4.2.1.1.1 Structural Foundation Information

The following structural information shall be obtained for the foundation of the building to be rehabilitated:

1. Foundation type.
2. Foundation configuration, including dimensions, locations, depth of embedment of shallow foundations, pile tip elevations, and variations in cross-section along the length of pile or belled caissons.
3. Material composition and details of construction.

#### C4.2.1.1.1 Structural Foundation Information

Foundation types may consist of shallow isolated or continuous spread footings, mat foundations, deep foundations of driven piles, or cast-in-place concrete piers or drilled shafts of concrete.

Foundation material types include concrete, steel, and wood. Foundation installation methods include cast-in-place and open/closed-end driving.

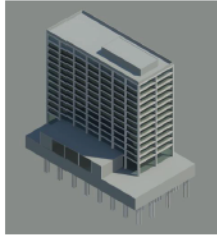
With this minimum amount of information, presumptive or prescriptive procedures may be used to determine the ultimate bearing capacity of the foundations. However, additional information is required for site-specific assessments of foundation bearing capacity and stiffness. Acquiring this additional information involves determining unit weights, shear strength, friction angle, compressibility characteristics, soil moduli, and Poisson's ratio.

#### 4.2.1.1.2 Subsurface Soil Conditions

The following information on subsurface soil conditions shall be obtained as required by the selected performance level:



NIST GCR 12-917-21



## Soil-Structure Interaction for Building Structures

NEHRP Consultants Joint Venture  
*A partnership of the Applied Technology Council and the  
Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering*



**NIST**  
National Institute of  
Standards and Technology  
U.S. Department of Commerce

NIST GCR 12-917-21

# Soil-Structure Interaction for Building Structures

Prepared for  
*U.S. Department of Commerce  
National Institute of Standards and Technology  
Engineering Laboratory  
Gaithersburg, MD 20899*

By  
*NEHRP Consultants Joint Venture  
A partnership of the Applied Technology Council and the  
Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering*

September 2012



U.S. Department of Commerce  
*Rebecca M. Blank, Acting Secretary*

National Institute of Standards and Technology  
*Patrick D. Gallagher, Under Secretary of Commerce  
for Standards and Technology and Director*

## YZDE ile ilgili bazı Makaleler:

**Çelebi E., Goktepe F., and Karahan N.,** "Non-linear finite element analysis for prediction of seismic response of buildings considering soil-structure interaction", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Volume 12, Pages 3495-3505, November 2012

**Çelebi E., Fırat S. and Çankaya İ.,** "The Effectiveness of Wave Barriers on the Dynamic Stiffness Coefficients of Foundations using Boundary Element Method", *Journal of Applied Mathematics and Computation*, Volume 180, Issue 2, Pages 683-699, September 2006

**Çelebi, E., Fırat S. and Çankaya İ.,** "Evaluation of Impedance Functions in the Analysis of Foundations Vibrations using Boundary Element Method", *Journal of Applied Mathematics and Computation*, Volume 173, Issue 1, Pages 636-667, February 2006

**Çelebi, E., S. Fırat ve İ. Çankaya** "Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları", *Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, 3827-3849, Yazı 252, Ankara, 2006

**Çelebi E. and N. Gündüz,** "An Efficient Seismic Analysis Procedure for Torsionally Coupled Multistorey Building Including Soil-Structure Interaction", *Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Volume 29, Issue 3, 143-157, 2005

**DEĞERLENDİRME SİSTEMİ**

| <b>YARIYIL İÇİ ÇALIŞMALARI</b> | <b>SIRA</b> | <b>KATKI YÜZDESİ</b> |
|--------------------------------|-------------|----------------------|
| Ara Sınav                      | 1           | 50                   |
| Kısa Sınav                     | 2           | 30                   |
| Ödev                           | 2           | 20                   |
| <b>Toplam</b>                  |             | <b>100</b>           |

**AKTS / İŞ YÜKÜ TABLOSU**

| <b>Etkinlik</b>   | <b>SAYISI</b> | <b>Süresi<br/>(Saat)</b> | <b>Toplam<br/>İş Yüğü<br/>(Saat)</b> |
|---|---------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Ders Süresi (Sınav haftası dahildir: 16x toplam ders saati) | 16            | 3                        | 48                                   |
| Sınıf Dışı Ders Çalışma Süresi(Ön çalışma, pekiştirme)      | 16            | 3                        | 48                                   |
| Ara Sınav   | 1             | 12                       | 12                                   |
| Kısa Sınav  | 2             | 6                        | 12                                   |
| Ödev  | 2             | 6                        | 12                                   |
| Final   | 1             | 12                       | 12                                   |
| <b>Toplam İş Yüğü</b>                                       |               |                          | <b>144</b>                           |
| <b>Toplam İş Yüğü / 25 (s)</b>                              |               |                          | <b>5.76</b>                          |
| <b>Dersin AKTS Kredisi</b>                                  |               |                          | <b>6</b>                             |

# YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİMİ

## Zemin ve Temel Dinamiği & Yapı-Zemin Etkileşim Problemleri'ne GİRİŞ

| DERS AKIŞI |  |  |
|------------|--|--|
| Hafta      | Konular  |  |
| 1          | Rijit temellerin titreşimleri  |  |
| 2          | Elastik yarı sonsuz ortamda yüzeysel temellerin dinamik davranışının incelenmesi   |  |
| 3          | Empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi ve temel-zemin parametrelerine göre incelenmesi |  |
| 4          | Elastik yarı sonsuz ortamda gömülü temellerin dinamik davranışının incelenmesi   |  |
| 5          | Empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi ve temel-zemin parametrelerine göre incelenmesi |  |
| 6          | Tabakalı zemin ortamında yüzeysel temellerin dinamik davranışının incelenmesi  |  |
| 7          | Empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi ve temel-zemin parametrelerine göre incelenmesi |  |
| 8          | Tabakalı zemin ortamında gömülü temellerin dinamik davranışının incelenmesi  |  |
| 9          | Empedans fonksiyonlarının (dinamik rijitlik-fleksibilite terimlerinin) analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle elde edilmesi   |  |
| 10         | Yapı-zemin dinamik etkileşim problemleri   |  |
| 11         | Doğrudan çözüm yöntemleri (sonlu elemanlar ve sınır elemanlar modeli)  |  |
| 12         | Zemin altsistem yöntemi ve rijit temellere bağlı tek ve çok serbestlik dereceli sistemlerin incelenmesi  |  |
| 13         | Nümerik ve basitleştirilmiş çözüm yaklaşımlarıyla zemin altsisteminin modellenmesi   |  |
| 14         | Nümerik ve basitleştirilmiş çözüm yaklaşımlarıyla zemin altsisteminin modellenmesi   |  |

## Üç Önemli Dinamik Yük Kaynağının Karşılaştırılması:

✓ **Depremler:** Tesir eden yük:

**hızlı** (frekans aralığı  $\approx 0.5$  Hz ile 10 Hz)

**çevrimsel** (10-30 önemli gerilme tersinmeleri içerir)

**Şekil-değiştirme kontrollü**

**büyük şekil değiştirme üretir** ( $\gamma_c = 10^{-2} - 10^{-1}$ )

**titreşim yapısı rastgele** (gelişigüzel) ve geniş frekans

spektrum içeriği

✓ **Dönen Makinalar:**

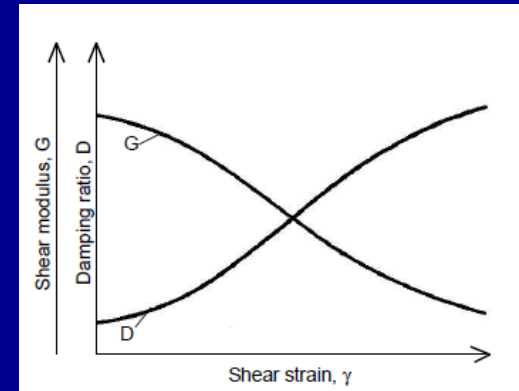
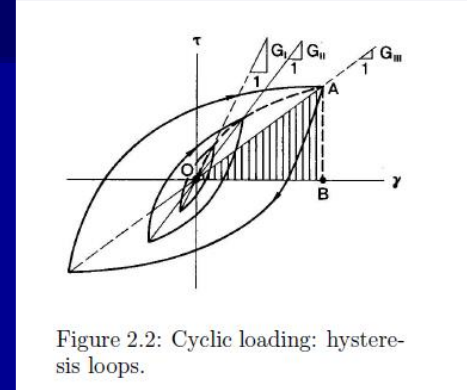
**hızlı-çok hızlı** (frekans aralığı  $\geq 100$  Hz)

**çevrimsel** (1000lerce çevrimler içerir)

**gerilme kontrollü**

**çok küçük şekil değiştirmeler üretir** ( $\gamma_c \leq 10^{-5}$ )

**harmonik** (kendini tekrarlayan)



## Üç Önemli Dinamik Yük Kaynağının Karşılaştırılması:

### ✓ Açık Deniz Dalgaları:

yavaş-çok yavaş (frekans aralığı  $\approx 0.05$  Hz ile  $0.1$  Hz)

çevrimsel (100lerce çevrimler içerir)

gerilme kontrollü

orta dereceli şekil değiştirmeler üretir ( $\gamma_c \approx 10^{-2}$ )

Yaklaşık olarak harmonik



# Muhtemel şekil değiştirme genliklerine genel bir bakış:

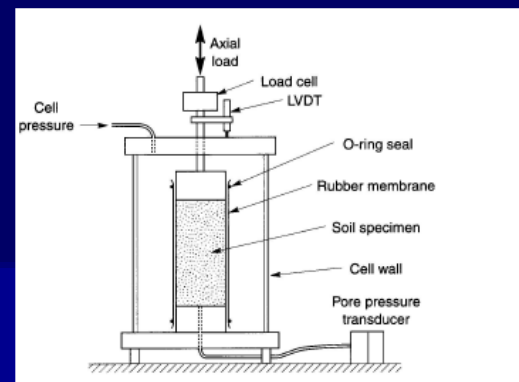
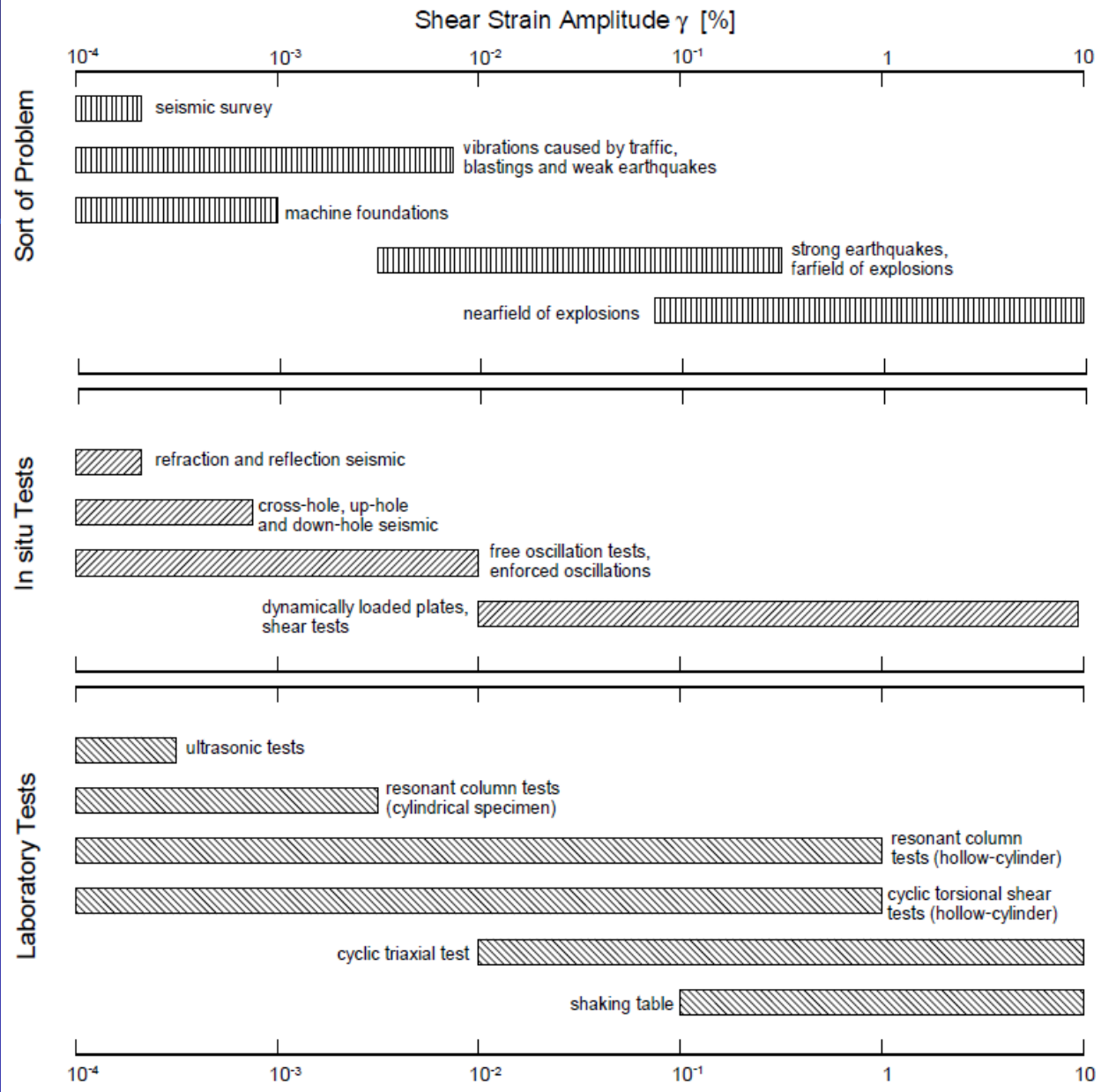


Figure 3.3: Cyclic triaxial test device from Kramer (1996).

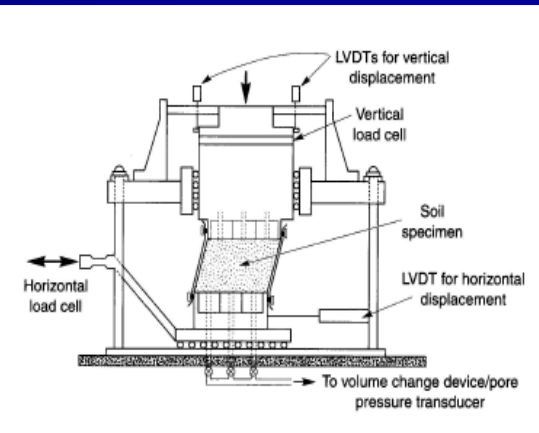


Figure 3.2: Cyclic simple shear test device from Airey & Wood (1987).

Dinamik gerilme-şekildeğiştirme davranışından elde edilecek araştırma bulguları:

1-) Çok küçük şekil değiştirmeler  $\gamma_c \leq 10^{-5}$

Zemin doğrusal elastik malzeme davranışına benzer davranış gösterir.

Histeresiz sönüm 0.03 civarında

Frekanstan ve çevrim sayısından bağımsız davranış

2-) Orta derecede şekil değiştirmeler  $10^{-5} \leq \gamma_c \leq 10^{-3}$

Histeresiz davranış, kayma şekil değiştirmeye bağlı Kayma modülü ve sönüm önem kazanır,

Frekanstan bağımsız ama çevrim sayıları önemli olabilir.

Özellikle yumuşak killer ve suya doğgun kumlar...

3-) Çok büyük şekil değiştirmeler  $\gamma_c > 10^{-3}$

Doğrusal ve elastik olmayan davranış

Doğrusal histeresiz model yetersiz

Çevrim sayısı önemli

Visko-elastik etkiler yüksek frekansta önemli rolde

Deprem yer hareketine veya insan yapısı titreşimlere;

*makine temelleri, demiryolu ve karayolu trafik yükleri, kazık çakmak veya patlatma aktiviteleri*

maruz yapıların dinamik davranışı birbirine bağlı **üç ortak sistemin** etkileşimi altındadır.

Bunlar

**Üstyapı,**

**yapı temeli ve**

temelin altını ve çevresini saran jeolojik **zemin** ortamıdır.

Günümüzde DEPREM HESABINDA kullanılan geleneksel yöntemlerde:

- Yapının oturduğu zemin ortamının ŞEKİL DEĞİŞTİRMEDİĞİ kabul edilir.
- RİJİT TEMEL varsayımı söz konusu olur.

Bunun sonucu olarak yapı temelinden zemine ankastre bağlı bir sistem,

Deprem verisi olan yer hareketi de yapının varlığından etkilenmeyen yatay bir rijit ötelenme olarak ele alınır.

Konuyla ilgili bazı kavramlar:

**Rijit taban (ayak)** (rigid base): Sonsuz rijit zemin tarafından taşınan temel plağı,

**Rijit temel** (rigid foundation): Sonsuz rijitliğe sahip temel bileşenlerinden oluşan temel plağı,

**Ankastre taban (ayak)** (fixed base) : rijit temelin sonsuz rijit zemine yerleştirilmesi,

**Esnek taban (ayak)** (flexible base) : temel bileşenlerinin ve zeminin deformasyonunu kabul eden yaklaşım.

Konuyla ilgili bazı kavramlar:

yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin analizi YÜZEYİ SERBEST

YER HAREKETİ'ne maruz;

yapı, temel ve temelin çevresinde ve altındaki jeolojik ortamın kolektif davranışını (tepkisini) değerlendirir.

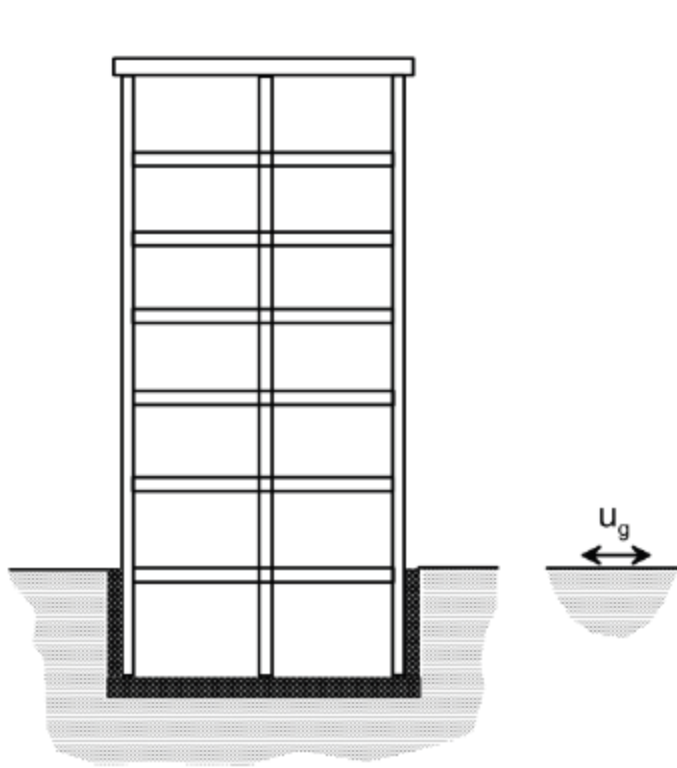
**Yüzeyi serbest yer hareketi** (free field ground motion): temel veya temel çevresinde dalga yayılmasından veya yapısal titreşimden etkilenmeyen yer hareketi.

**Zeminin yapısal davranışı etkilemesi, RİJİT ZEMİNE mesnetlenmiş RİJİT TEMEL** koşulu için sözkonusu değildir.



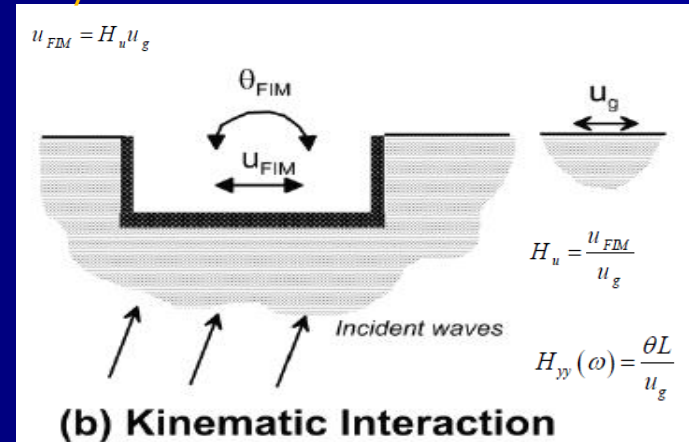
## Konuyla ilgili bazı kavramlar:

Temel girdi hareketi ile yüzeyi serbest yer hareketi birbirinden farklı olabilir.



(a) Complete System

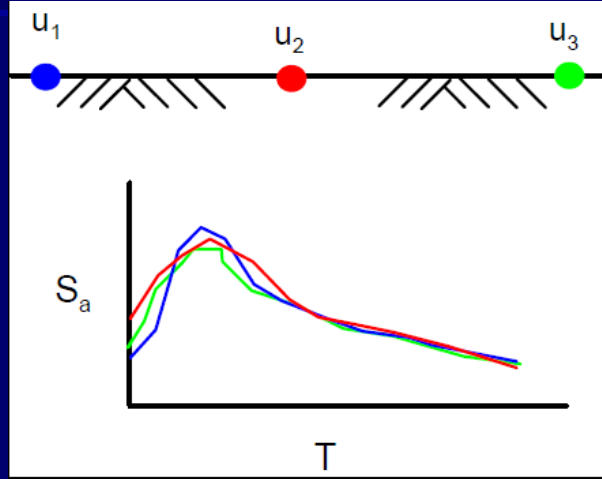
- a-) Kinematik etkileşimden dolayı farklılık; Rijit temel elemanlarının zemin yüzeyine veya altına yerleştirilmesi , temel hareketinin serbest yüzeyli yer hareketinden farklı olmasına neden olur. (dalga yayılması, yapı ve temel ataletinin varlığından kaynaklanan gömülme etkisi, ortalama taban döşemesinin hareketinin alınması)
- b-) Yapı ve temel ataletine bağlı yüzeyi serbest arazi ile temel arasında **göreceli yerdeğiştirme ve dönmelerden kaynaklanan farklılık.**



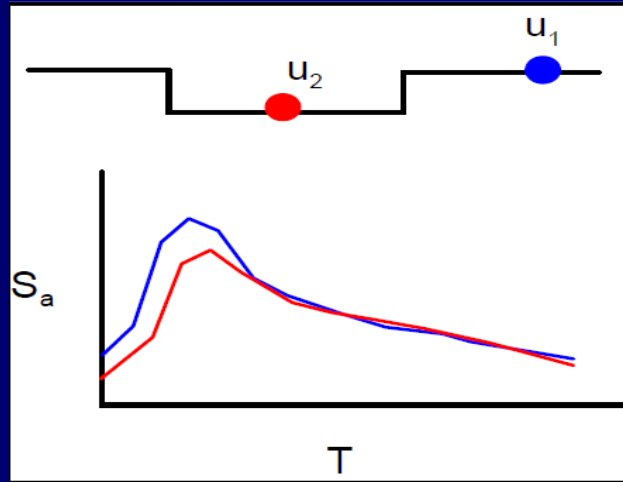
Deprem kayıtları yeryüzü ölçümlerinden elde edilir.

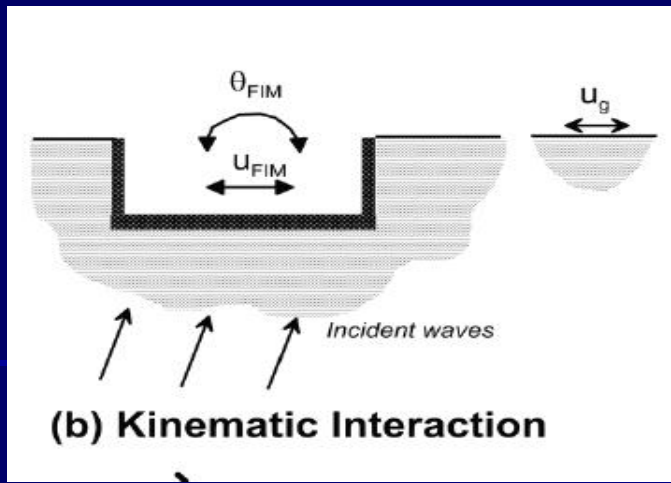
### Kinematik etkileşim

Zemin yüzeyinde farklı yer hareketleri  $\longrightarrow$  ortalama taban döşemesi hareketi



Yer hareketi derinlikle azalır





- **Temel girdi hareketi (FIM)** tanımı, temelin geometrisini ve rijitliğini hesaba katan temel döşemesinin hareketi olarak anlaşılır. Bu hareket, serbest yüzeyli yer hareketinden farklıdır ve temel dönme ve ötelenme bileşenlerini kapsar.
- Temel ve yapı sistemine uygulanan **sismik talebi** temsil eder.
- **Serbest yüzeyli yer hareketi** ile **temel girdi hareketi** arasındaki farklılık (değişim) frekans bölgesinde tanımlanan **transfer fonksiyonu** ile belirtilir. Transfer fonksiyonu, atalet etkisi ihmal edildiğinden **kinematik etkileşim** etkileri ile temsil edilir.

## Deprem analizi:

Rijit temeller ile mesnetlenmiş yapılar... **RİJİT TEMEL ANALİZİ**

## Depremler:

Temel seviyesinde tanımlanmış hareket...

**Etkin deprem verisi**, yapının ve temel kazısının varolmadığı durumda zeminde tanımlanan serbest zemin deprem verisinden farklıdır.

Deprem dalgalarının ilerleme doğrultusunun düşey ve yapı temeli yüzeysel ise...

**Tam YZDE Problemi:** Yüksek dereceden karmaşık bir problem...Zemin yapısal davranışı etkiler, Yapıda zemini hem kinematik hem de dinamik olarak etkiler.

Derinlikle değişen zemin özelliklerini hesaba katar,

Zeminin doğrusal olmayan malzeme davranışını dikkate alır,

Problemin 3-D doğasını dikkate alır,

Yer hareketinin ürettiği dalganın doğal yapısını dikkate alır,

Komşu yapılarla olası etkileşimi dikkate alır.

## İdealleştirilmiş YZDE Problemi:

Yatay zemin katmanları, homojen zemin, lineer malzeme davranışı, basitleştirilmiş dalga mekanizması, ...

Önceden tanımlanmış serbest yüzey hareketi  
(yapısız yüzey hareketi)

Kontrol noktasındaki dalga oluşum mekanizması:

Düşey yada açısız gelen S veya SH dalgaları,  
Rayleigh dalgaları,

Yapı Davranışının  
İncelenmesi

İdeal yol

Deprem hareketinin ana  
kayaya uygulanması ve  
bunun üst zeminde ve  
yapıdaki etkilerinin  
hesaplanması

Matematik model

Dinamik dış etkiler altında  
zemin ortamının üst yapı  
ile birlikte analiz edilmesi

Halbuki, **deprem kayıtları**  
**yeryüzü ölçümlerinden elde**  
**edilir.**



## Yapı-zemin dinamik etkileşiminin incelenmesini gerektiren durumlar ve genel uygulamalar:

Nükleer güç santralleri

Açık deniz petrol platformları

Asma köprüler

Yüksek Binalar

Barajlar

Viyadükler

Rijit ve büyük ölçekli ağır yapılar...

Deprem davranışının önemli olduğu yapılar...

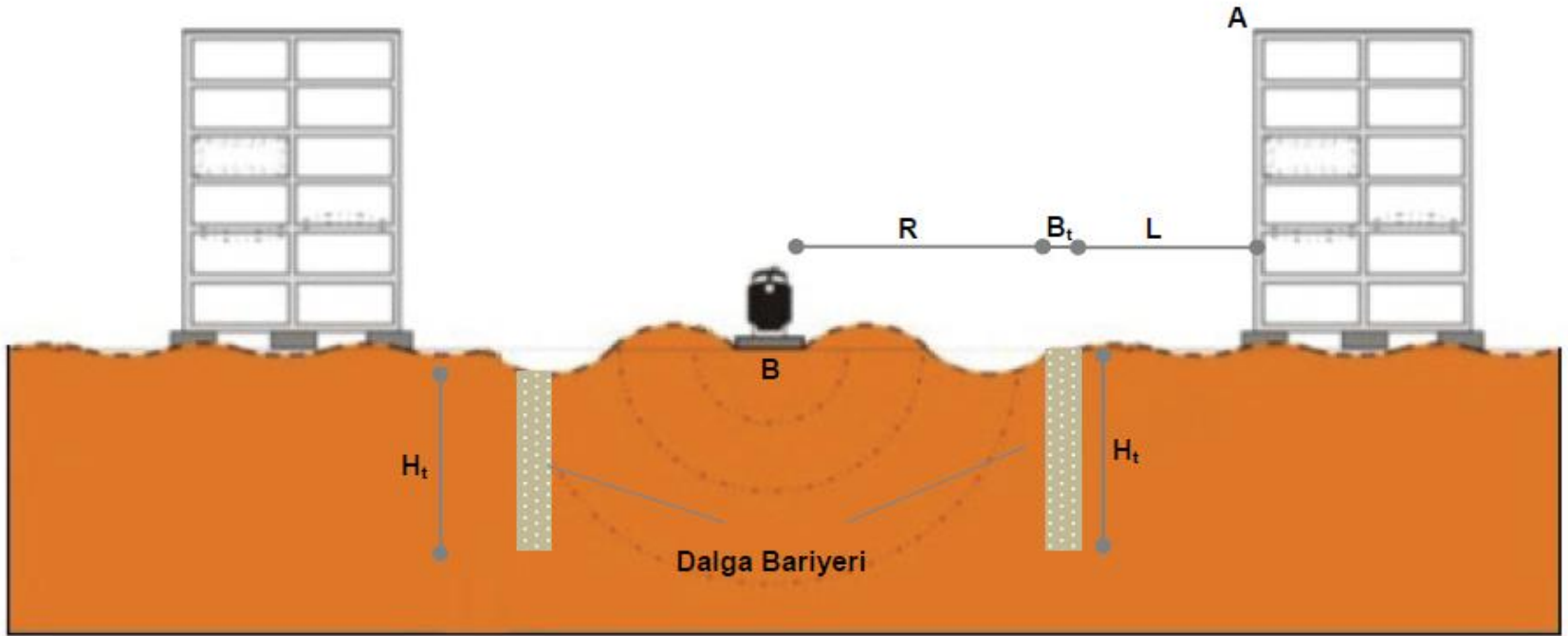
Zorunlu olarak aktif deprem bölgelerin de inşa edilmeleri...

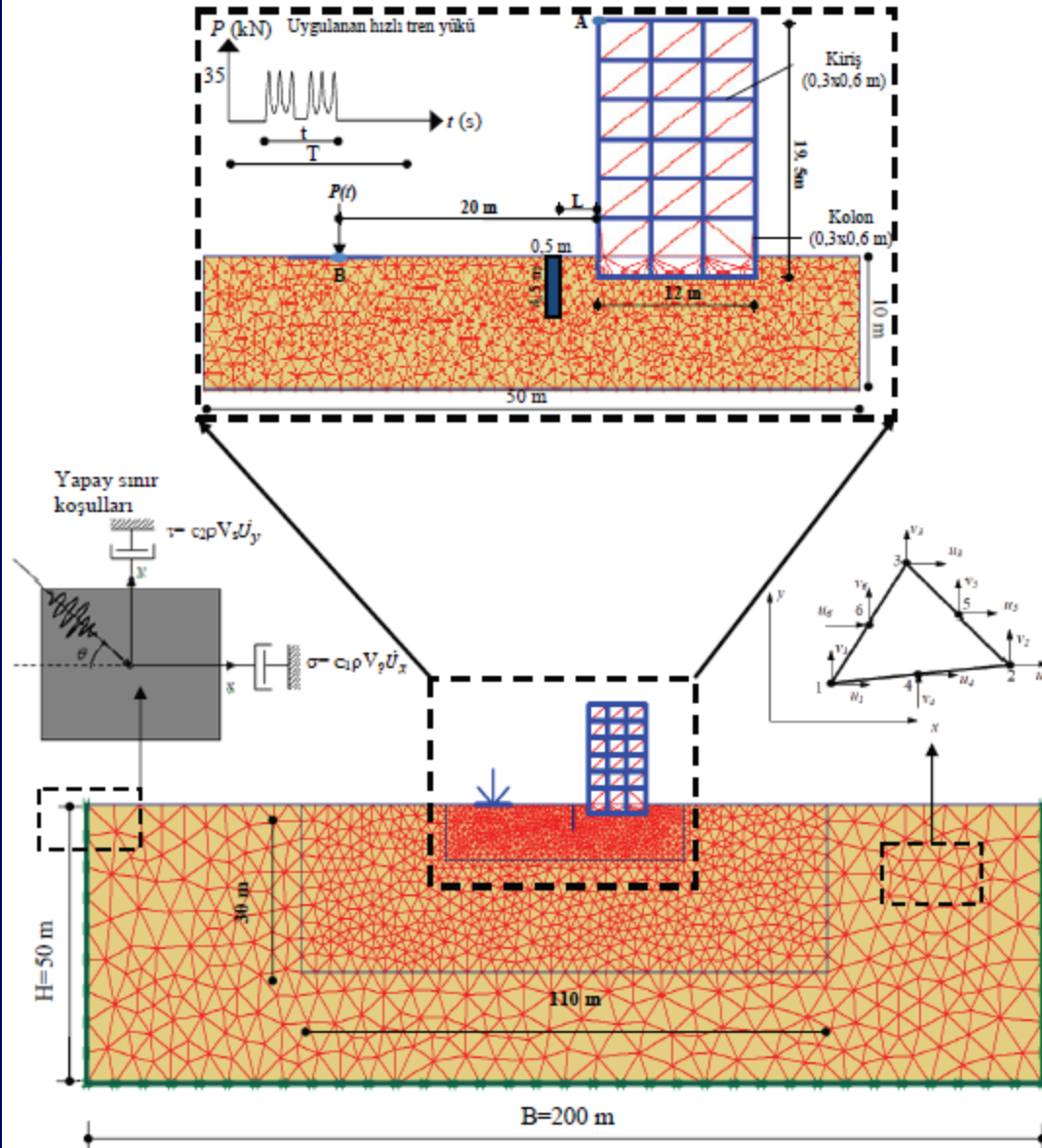
Ağır makinelerin büyük ve rijit temelleri

Demiryolu ve karayolu trafiğinin yoğun yerleşim bölgesinden geçmesi

Yüksek seviyedeki titreşimlerin çevre yapılara zarar vermesi...

**Örnek YZDE problem:** Yüksek hız trenlerinin oluşturduğu yakın çevre titreşimlerinin azaltılması

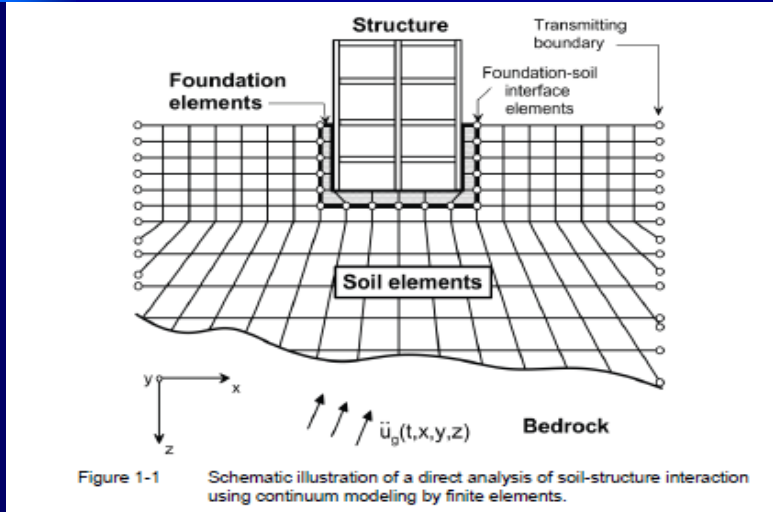




Sekil 3. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli (Schematic diagram of FE model developed for soil-structure interaction problem)

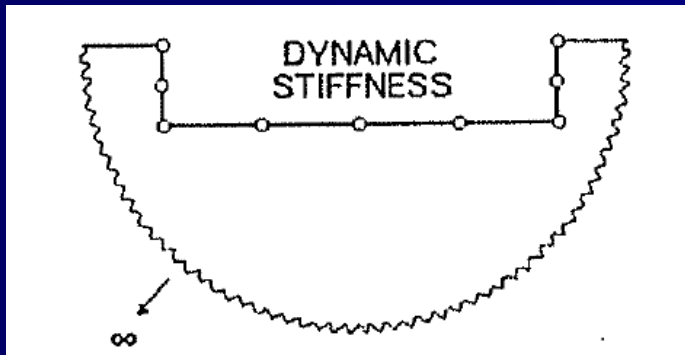
## Yapı-Zemin Dinamik Etkileşim (YZDE) probleminin ANALİZİ için:

✓ Doğrudan Çözüm Yaklaşımı olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)



yapay sınırlara ihtiyaç var !

✓ Alt Sistem Yaklaşımında yarı sonsuz zemin modeli



zemin sonsuz olarak modellendiğinden yapay sınır gerektirmez !

## Örnek YZDE problem:

Doğrudan Çözüm Yaklaşımı olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) seçildiğinde,

Sonlu eleman (SE) büyüklüğü dış yükün frekansına bağlı olmak zorundadır.

Dalga yayılımının tam olarak yansıtılabilmesi için:

$$\text{SE boyutu} \leq \text{dalga boyu} / 8 = V_s / 8f$$

Dalga boyu:  $\lambda_s = V_s / f$       yüksek frekansta SE boyutu çok küçük !!!

## Doğrudan Çözüm Yaklaşımı olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) :

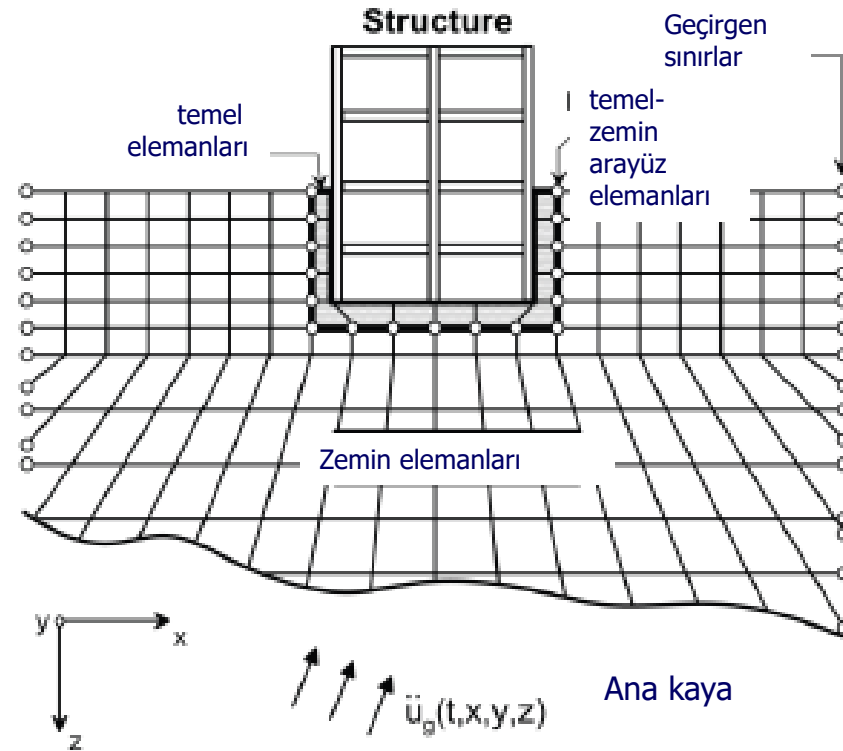


Figure 1-1

Schematic illustration of a direct analysis of soil-structure interaction using continuum modeling by finite elements.



Yapı-Zemin etkileşim probleminin çözümünde esas sorun ???

Zemin ortamının analitik açıdan yapısal anlamda nasıl idealleştirileceği...

Yaygın olarak kullanılan çözüm yaklaşımları:

•

Doğrudan çözüm yöntemi

(ortak sistem yaklaşımı)

+ Tek aşamada analiz, geometri ve malzeme açısından doğrusal ve doğrusal olmayan davranış, heterojenliğin dahil edilmesi, zaman ve frekans bölgesinde çözüm

- Sonsuzluğa doğru yetersiz radyasyon, çözüm zamanı, karmaşıklık, sonlu derinlikte taban kaya ile sınırlandırma gereksimi

SEY • → Sistem geometrisi 2D (Düzlem şekil-değiştirme durumu)

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Dönel simetrik problem

Yapıdan zemine doğru yayılan dalgalar sınırsız zemin ortamında söner.

**Zorunlu sınırlarda** dalgaların **geriye doğru yansımaları** durumu ortaya çıkabilir!

Gözönüne alınan kuşatılmış bir bölgedeki dalga enerjisinin sınırlardaki tükenişi sınırsız bir zemindeki dalga yayılışıyla sönümlenmesi koşullarına indirgenmelidir...

Kaybolan enerji, yayılan dalganın frekansı ile orantılıdır...

Malzeme sönümü ile ilgisi olmayan bu zeminlerdeki sönüm RADYASYON sönümü yada **GEOMETRİK sönüm** olarak adlandırılır.

Viskoz sönümlü sistemlerdeki enerji yutulma mekanizması gibi...

Zeminin yatay doğrultudaki sınırsızlığında **bu sönüm** önem kazanmaktadır.

## Alt sistem yaklaşımı

(zemin ortamının ayırık veya sürekli bir sistem olarak ele alınması)

+ Alt bölgelere ayırma, frekans bölgesinde çözüm, basit modelleme, anlaşılabilirlik, içyüzünü somut kavrama, azaltılmış hesap yükü

-Doğrusal davranışla sınırlı,

-SEY, SİEY (Sınır Elemanlar Y.),Empedans fonksiyonları

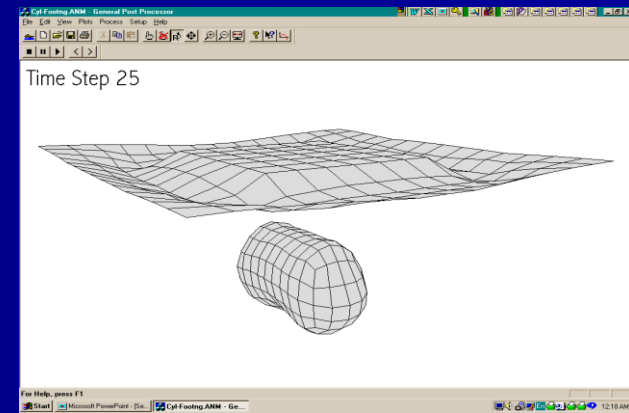
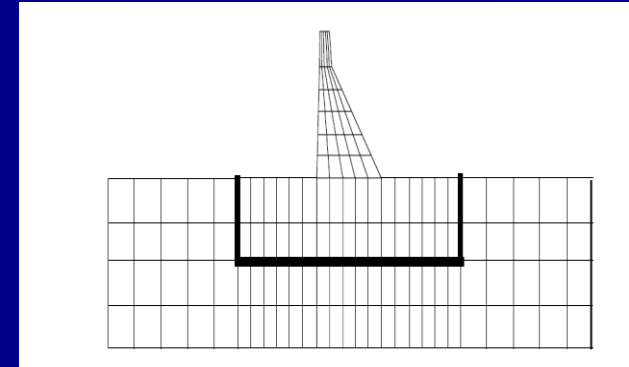
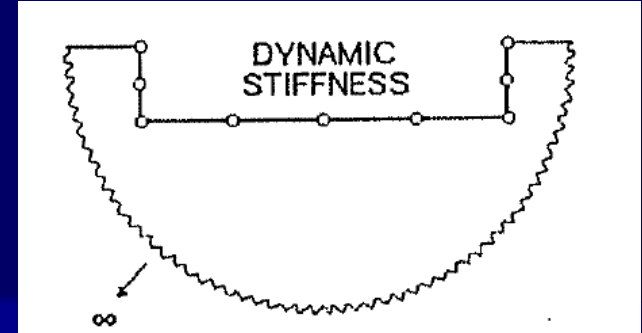
SEY: + Lineer olmayan analiz, iyi yapılandırılmış

- Sınırlı bölgeler, hacim ayrıklaştırmaları

SİEY: + Sonsuz ortam, yüzey ayrıklaştırması

- Simetrik olmayan matrisler,

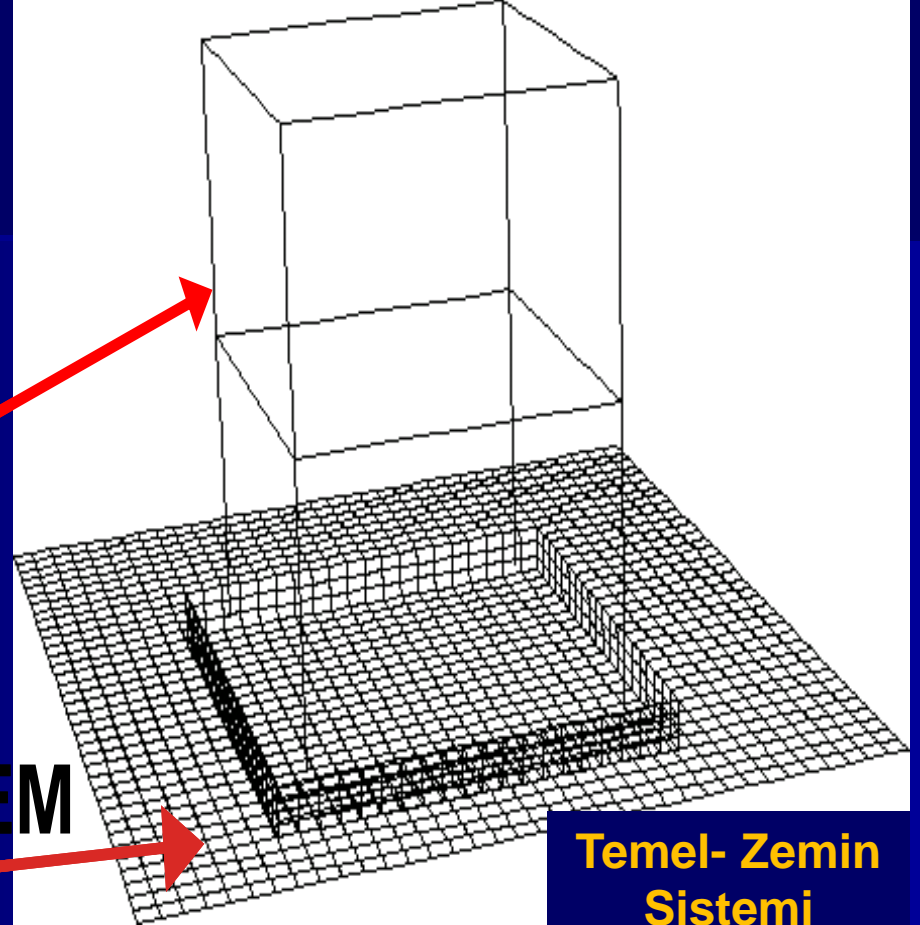
Lineer olmayan analiz de yetersizlik





SİEY,  
SEY veya  
Klasik  
Analitik  
Yöntem

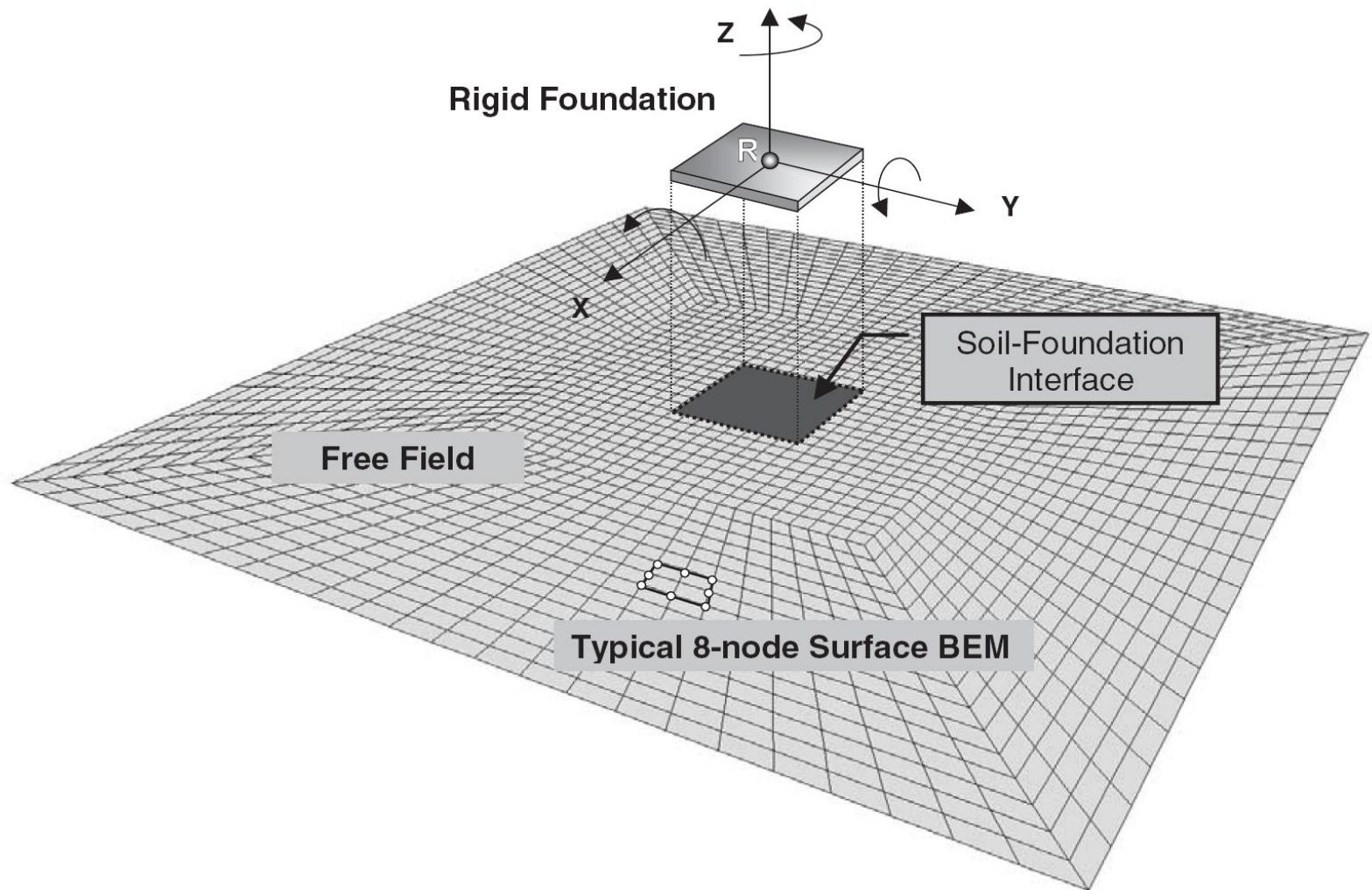
Üstyapı

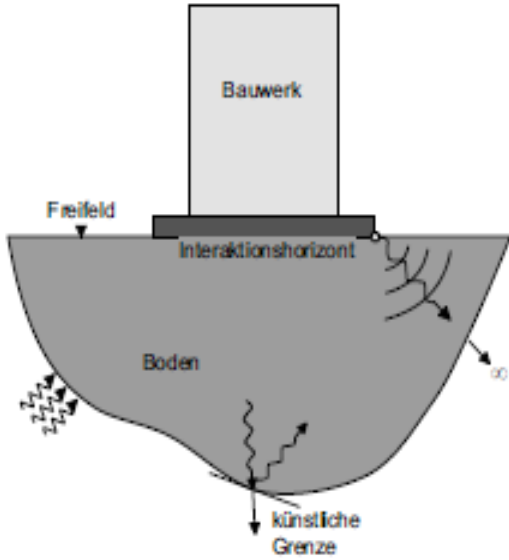


REM

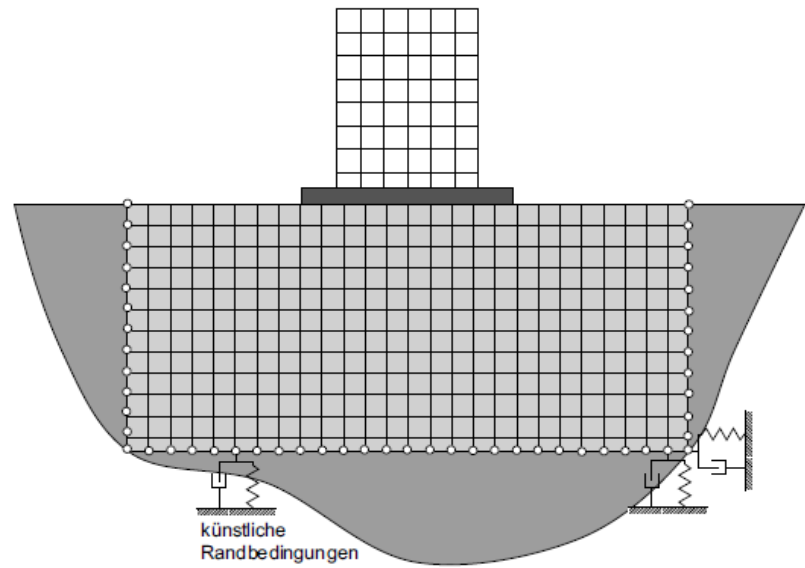
Temel- Zemin  
Sistemi

**Matematik Model**

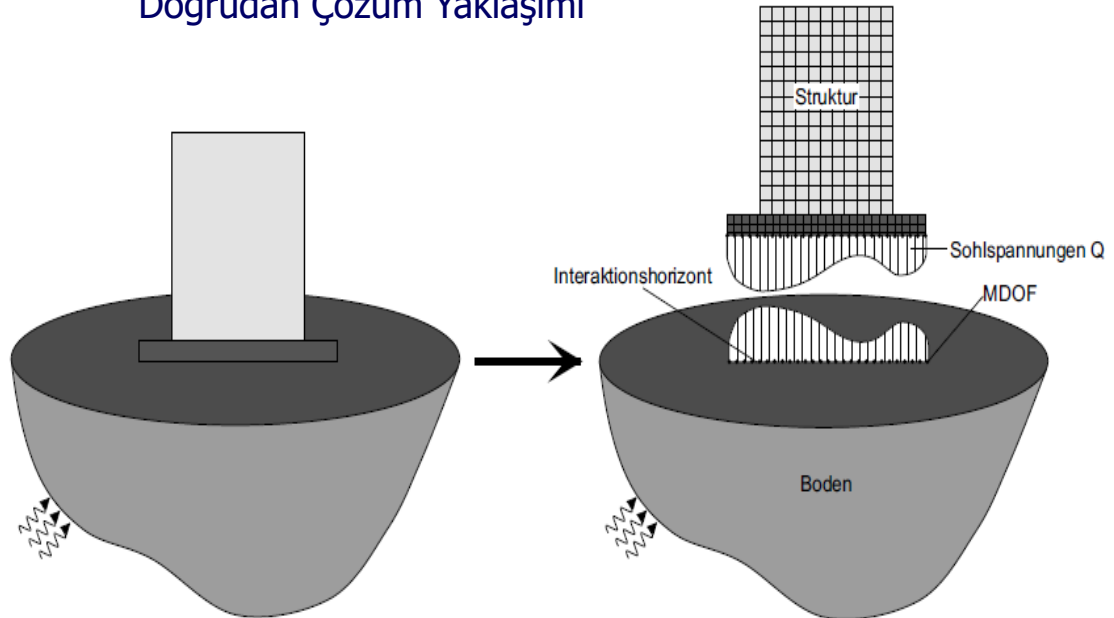




YZDE problemi

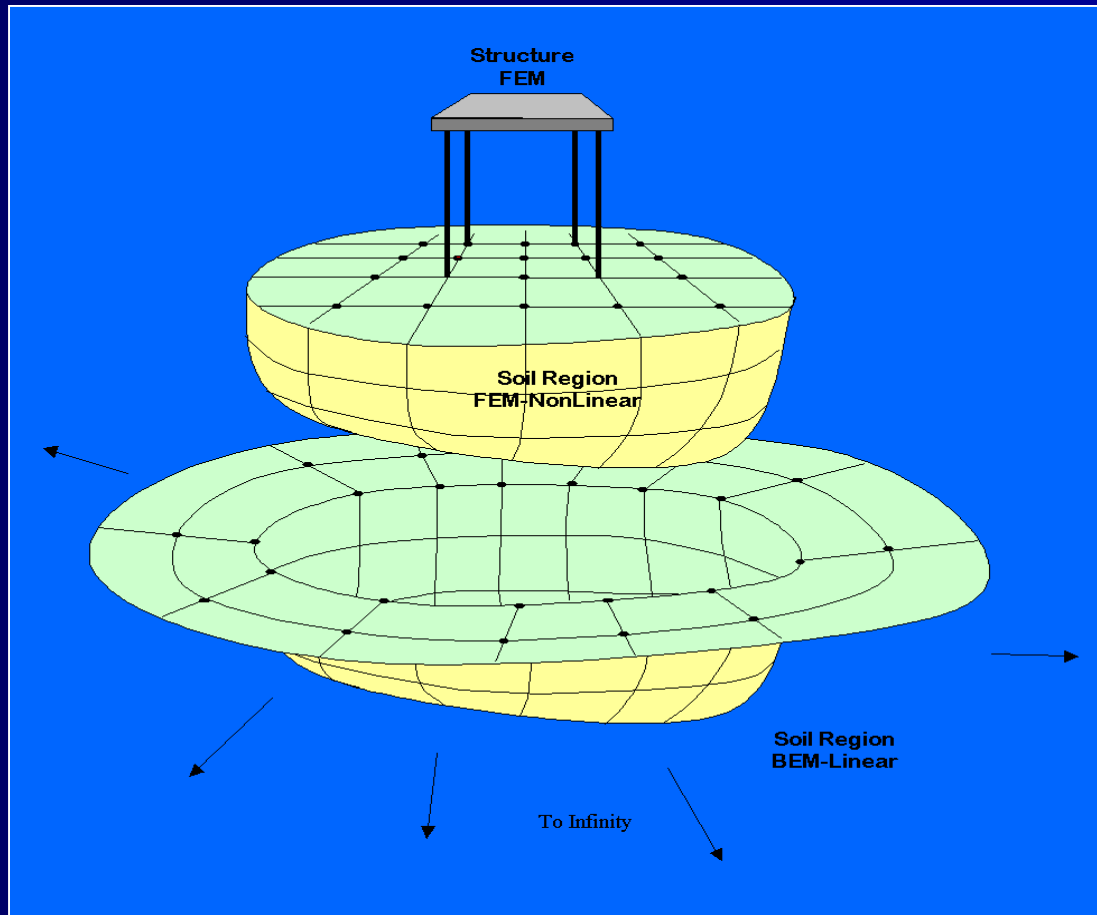


SEY ile YZDE problemi için Doğrudan Çözüm Yaklaşımı



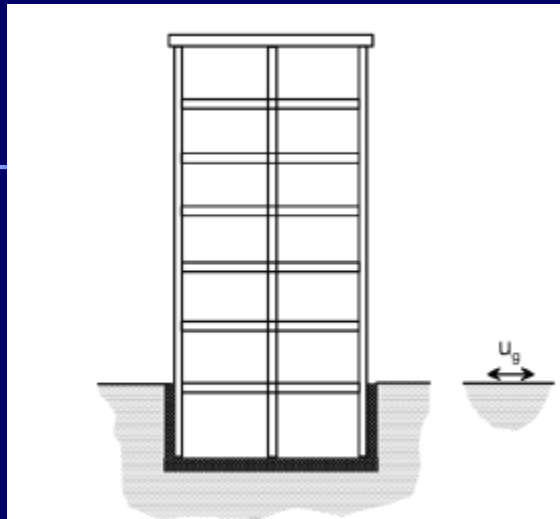
Alt sistem yaklaşımı

Hibrit Çözüm: SEY+SİEY ortak kademeli çözüm yaklaşımı



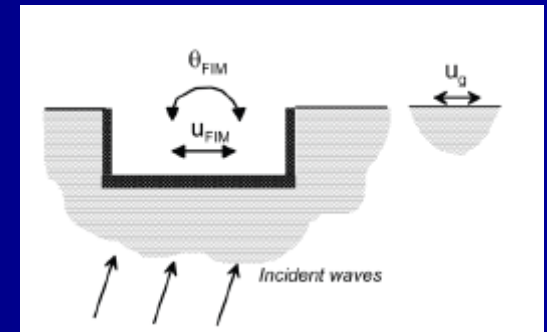


# Yapı-zemin ortak sisteminin modellenmesinde altsistem yaklaşımının kullanılması

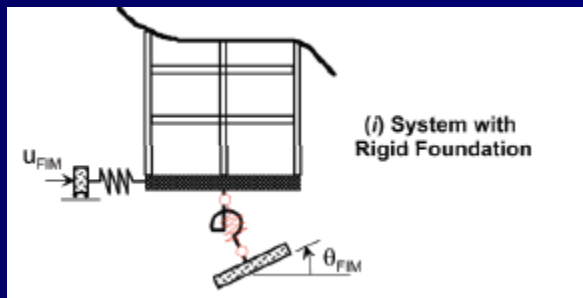


Tüm yapı sistemi

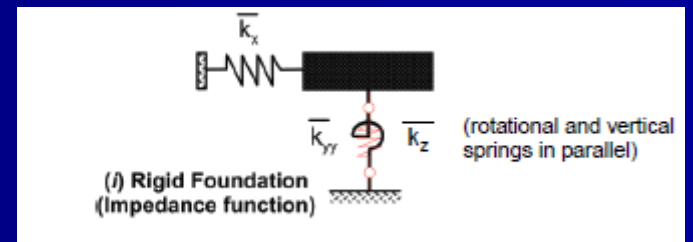
## Kinematik etkileşim



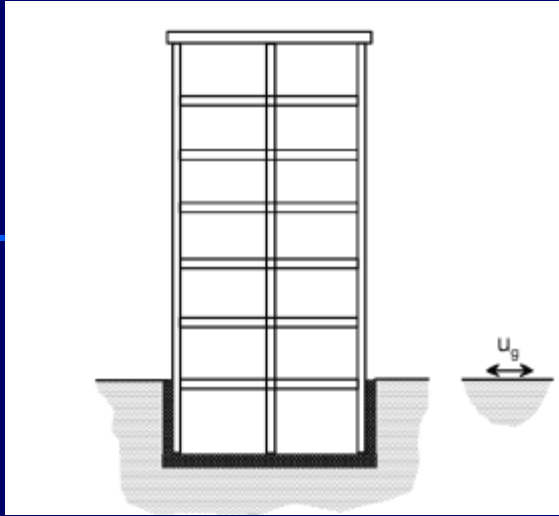
## Rijit temelli yapı sistemi



## Dönme ve ötelenme yay sistemli rijit temel modeli

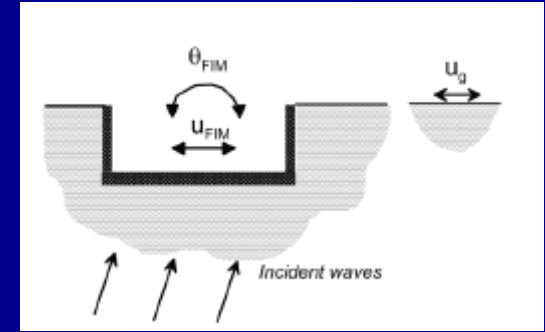




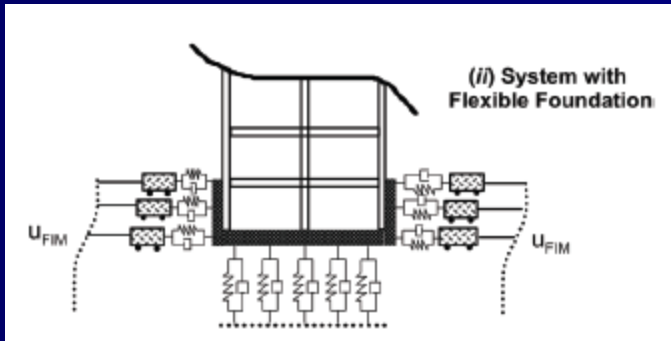


Tüm yapı sistemi

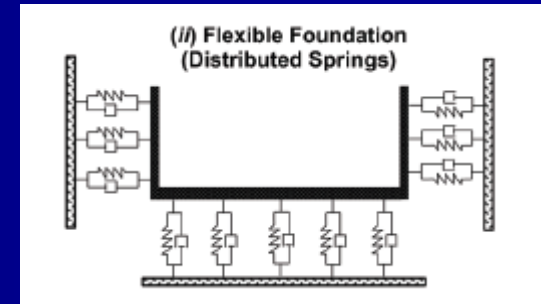
Kinematik etkileşim



Esnek temelli yapı sistemi



yayılmış yay sistemli esnek temel modeli



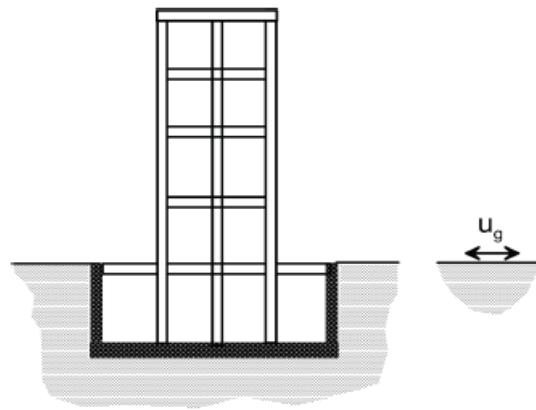
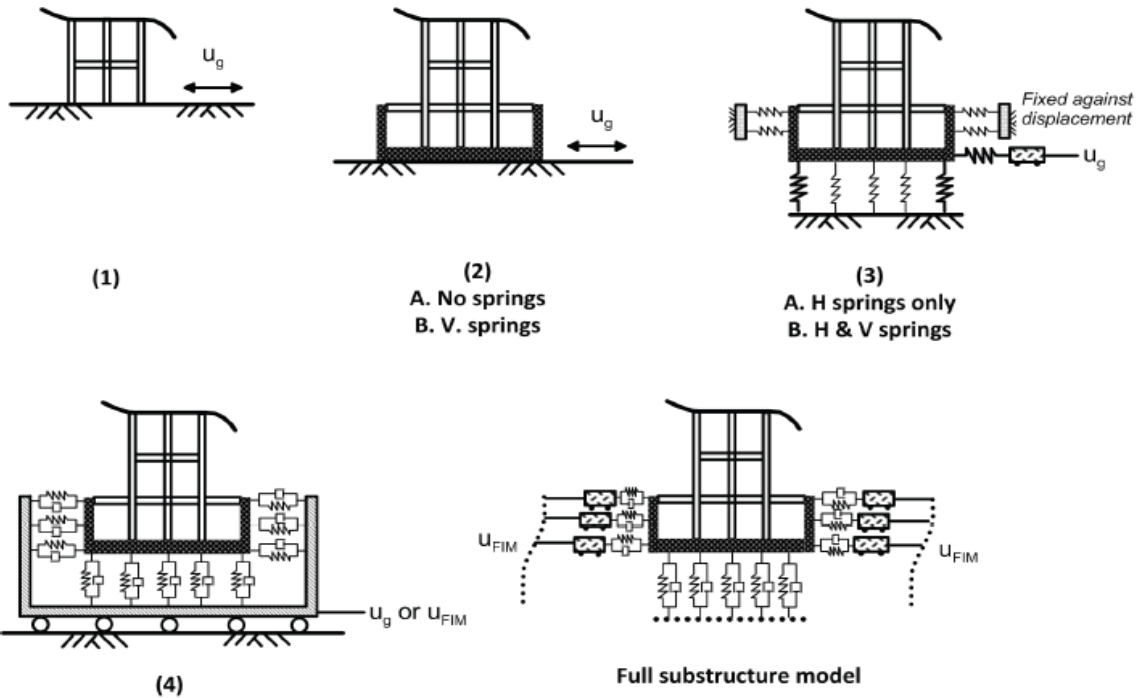


Figure 6-1 Illustration of an embedded building configuration with a basement surrounded by soil and a level grade on all sides.



Gömülü temele sahip yapı sistemi için TAM ALT SİSTEM Yaklaşımı

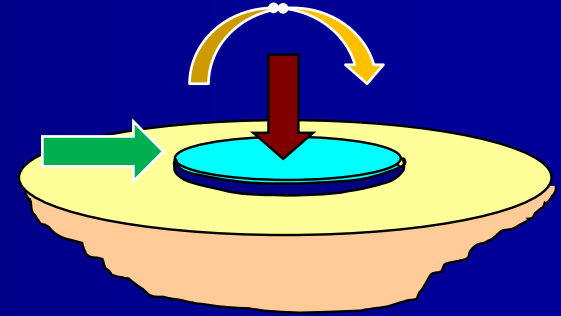
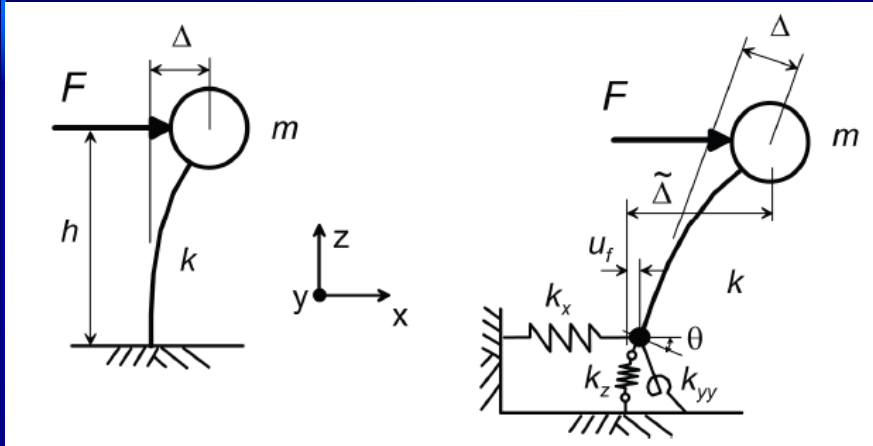
## Yapı-zemin ortak sisteminin modellenmesinde altsistem yaklaşımının kullanılması

Deprem yer hareketiyle zorlanan yüzeysel ve gömülü temellerin ötelenme ve dönme titreşim modlarında **zeminin deformasyonunu** ve **radasyon (geometrik) sönümünü** temsil eden temel-zemin arakesitinde geliştirilen **yaylar ve söndürücülerin** etkisinin nasıl tanımlanabileceği konusu ayrıntılı ve parametrik araştırmalara dayalı olarak tartışılacaktır.

Titreşen **zemin-temel-yapı sisteminin** dinamik davranışının incelenmesinde aşağıdaki kontrol parametreleri kullanılmaktadır:

- **yapı-zemin rijitliği oranı**,  $h/V_s T$ ,
- **yapı yüksekliği-temel genişliği oranı**,  $h/B$ ,
- **temel genişliği-uzunluğu oranı**,  $B/L$ ,
- **yapı kütesinin zemin kütesine oranı**,  $m/\rho_s ABh$ ,
- **zeminin Poisson oranı**
- **dış yükün frekans içeriği**

**Dersin Amacı:** Yapı-zemin etkileşim probleminin alt sistem yaklaşımına bağlı çözümünde mevcut **empedans fonksiyonlarının** kullanımını göstermek.

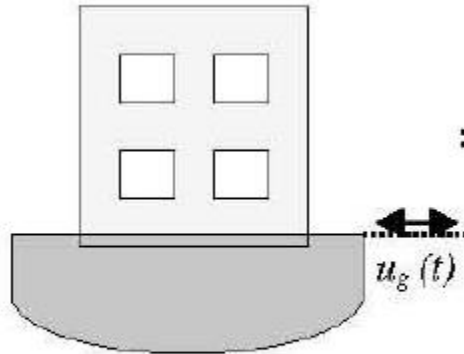


**Zemin rijitliğini** ifade etmek için kullanılan **rijitlik katsayılarının** sürekli ortam çözümleri şeklinde elde edilmiş olması işimizi kolaylaştırmaktadır...

+ Bu katsayılar geometrik sönüm mekanizmasını kendiliğinden içermekte,

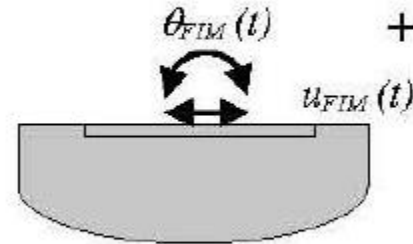
+ Az sayıda serbestlik derecesi ile tüm zemin ortamının temsil edilebilmektedir.

## *Yapı-zemin ortak sisteminin modellenmesinde alt-sistem yaklaşımının kullanılması*

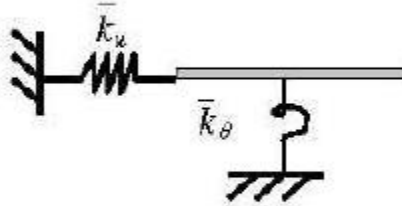


Zemin-temel-yapı davranış problemi

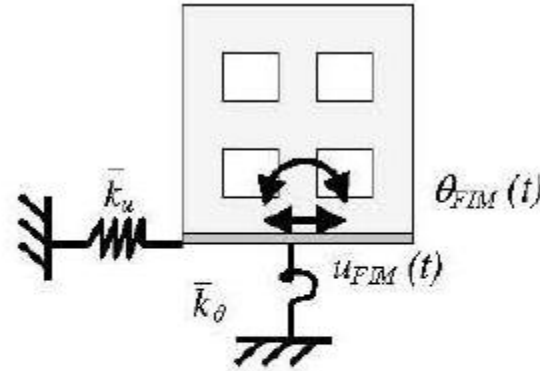
=



Temel girdi hareketinin (FIM) hesaplanması



Empedans fonksiyonlarının hesaplanması



Temel girdi hareketine maruz şekil değiştirebilir zemin üzerindeki yapının analizi

Zeminlerin empedans fonksiyonları **kütlesiz temeller** için verilmektedir.

Yani yapı ile zemin arakesiti için verilir.

Empedans fonksiyonları;

Analitik ve nümerik çözüm yöntemleri aracılığıyla elde edilebilir.

- Elasto-dinamik çözüme dayalı
- SıEY (Sınır Elemanlar Yöntemi) Boundary Element Method
- Thin Layer Method/Flexible Volume Method

...

## Dinamik rijitlik (Empedans fonksiyonları):

✓ **Zemin özelliklerinin** bir fonksiyonudur.

Kayma modülü,  $G$

Poisson oranı,  $\nu$

Yoğunluk,  $\gamma$

İçsel sönüm,  $\xi$

✓ **Temel özelliklerinin** bir fonksiyonudur.

Geometrik durumu

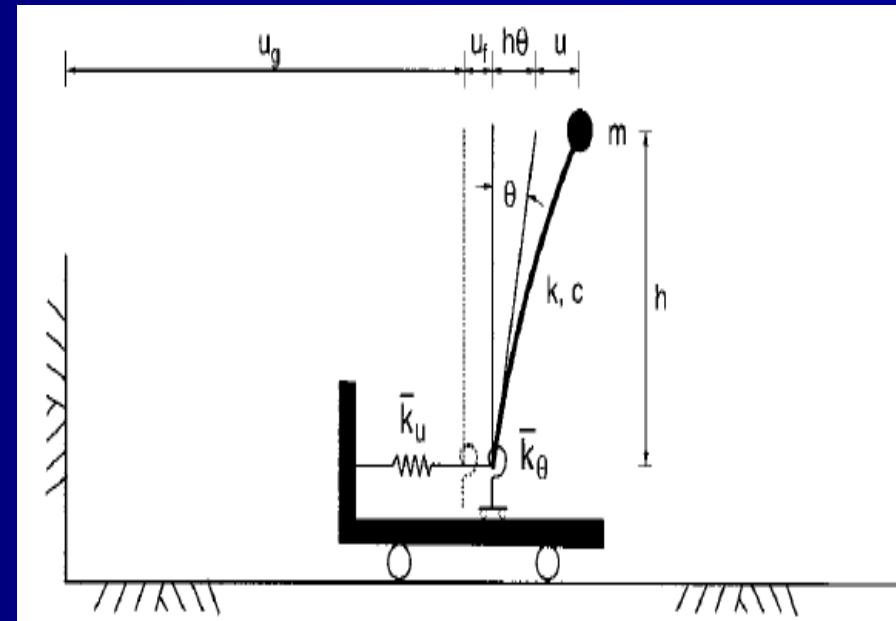
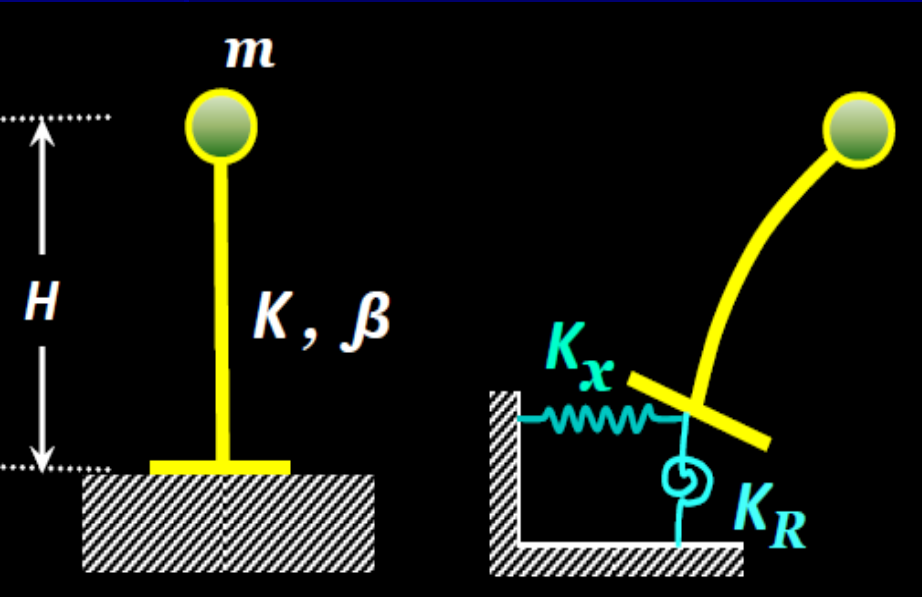
Gömülü/yüzeysel olma durumu

Rijitlik

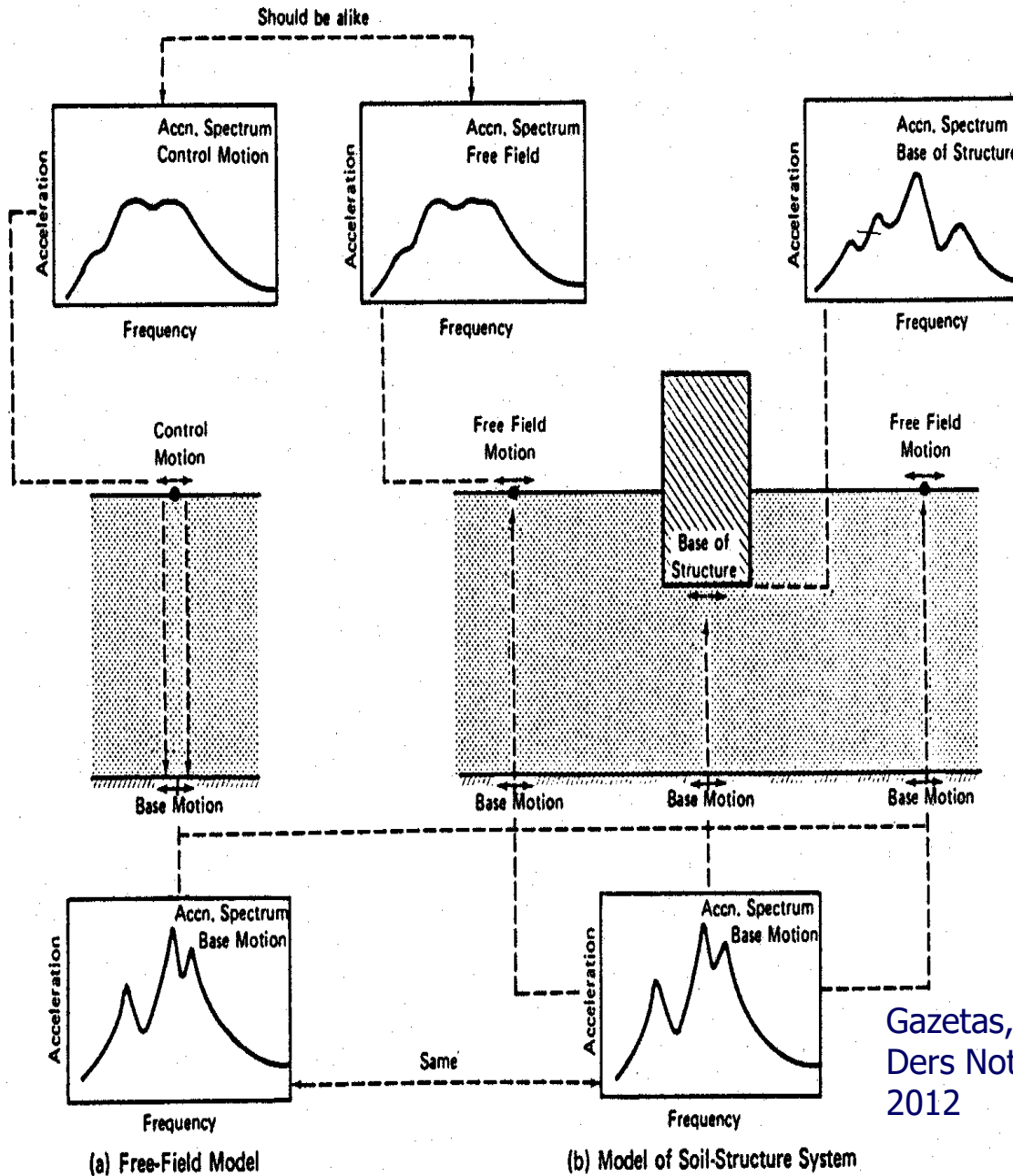
✓ Titreşimlerin frekansına bağlıdır.

Bu dersin amacı empedans fonksiyon değerlerini veya denklemlerini elde etmek için teorik altyapısını geliştirmek değildir.

Sadece bu fonksiyonların kullanımını göstermektir.







Zemin koşullarının yapı davranışına etkileri:

✓ Üstyapı temeli altındaki zemin, ana kayadaki deprem etkisini **değiştirir**. Bu etkinin büyümesi olarak gözlenir.

Mexico City 1985

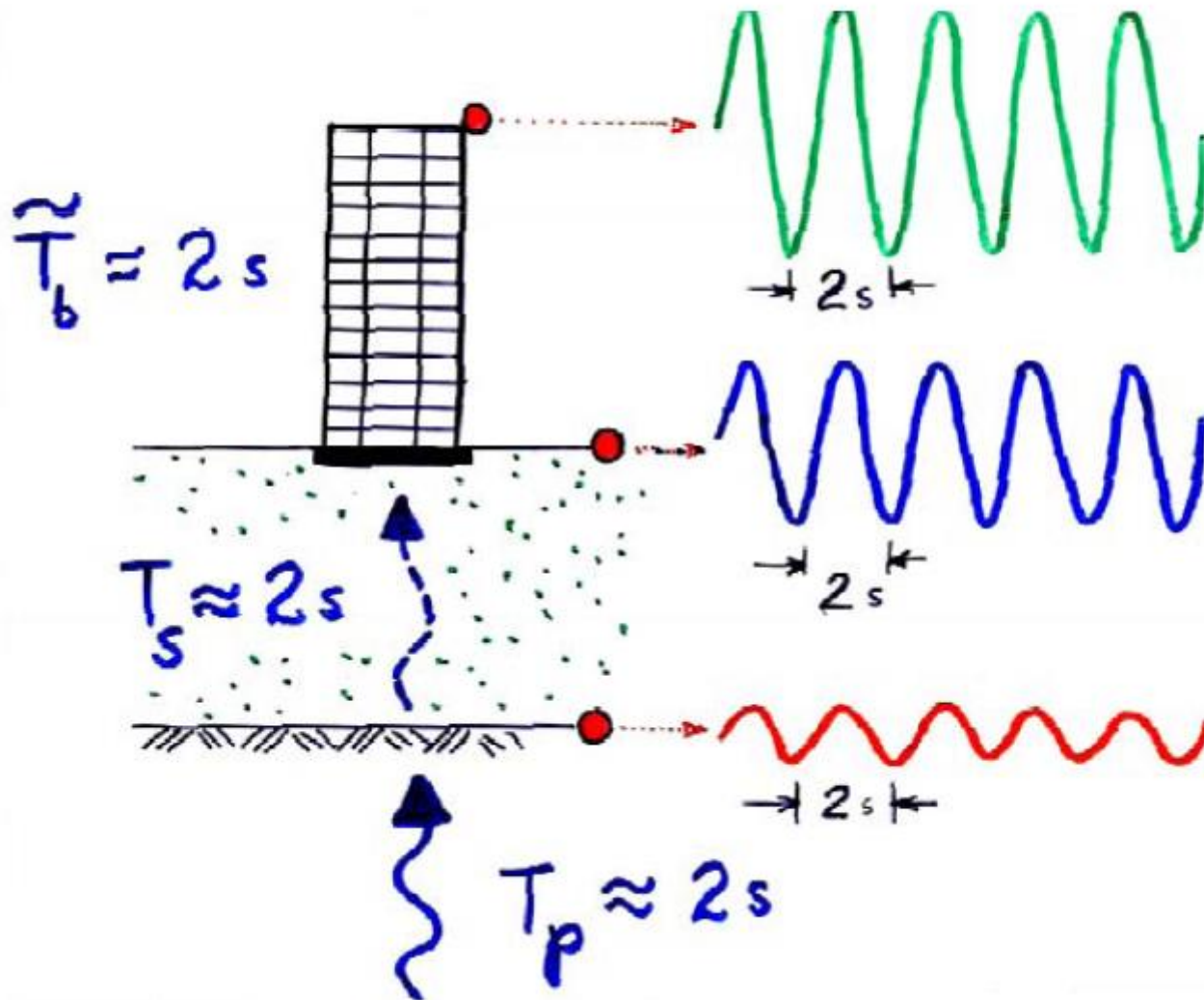
$a_{maks} = 0.035g$  (kaya)

$a_{maks} = 0.168g$  (yumuşak zemin)

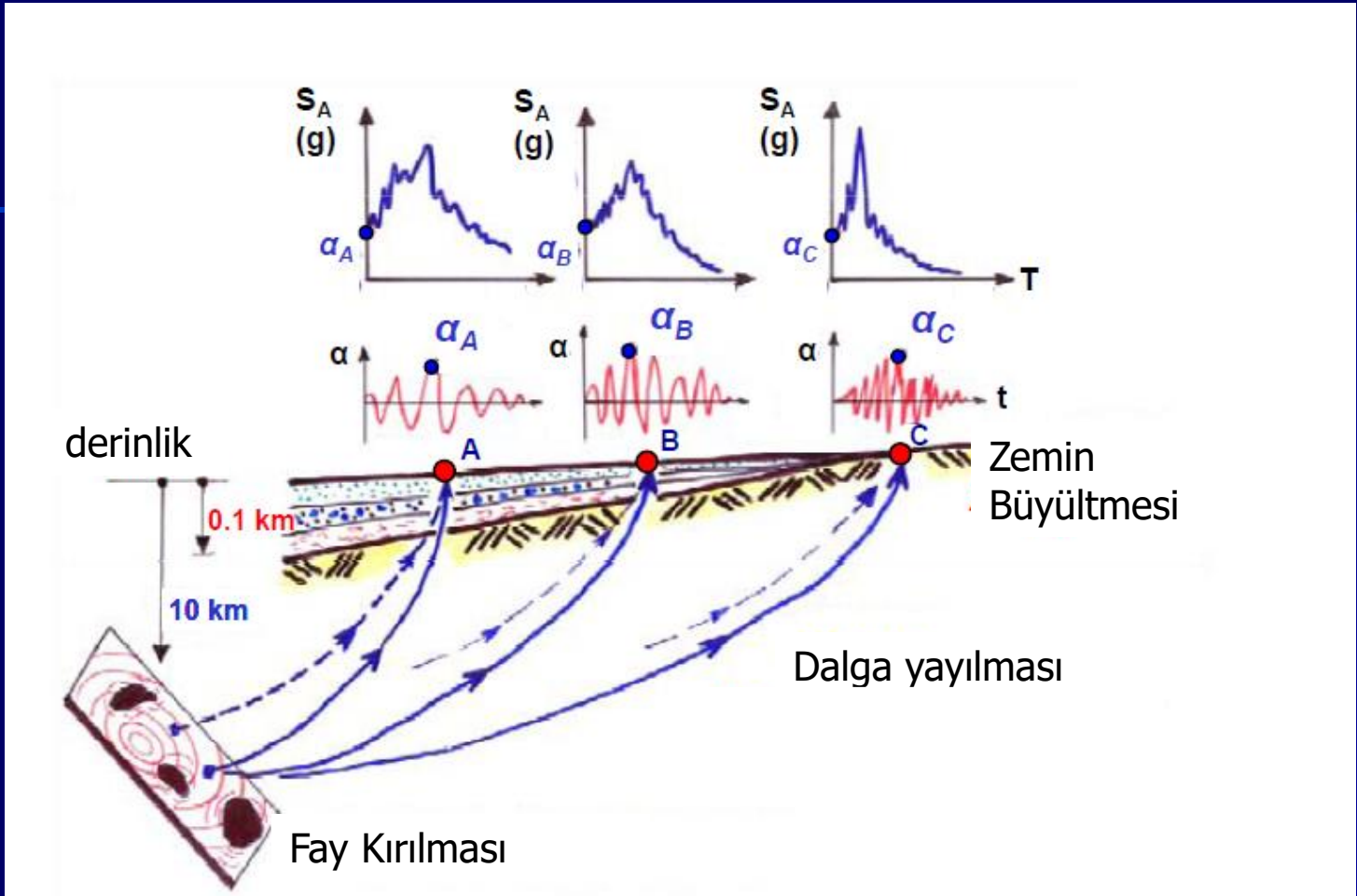
✓ Zeminin etkisiyle yapının dinamik özellikleri **değişir**.  
(Periyod ve mod biçimleri)

✓Yapıdaki titreşim enerjisinin büyük bir kısmı, temelin zemine mesnetlenme koşulunun rijit olmaması nedeniyle, zemindeki **malzeme sönümü** ve **sonsuz zeminde yayılma** etkisiyle söner

# DOUBLE RESONANCE



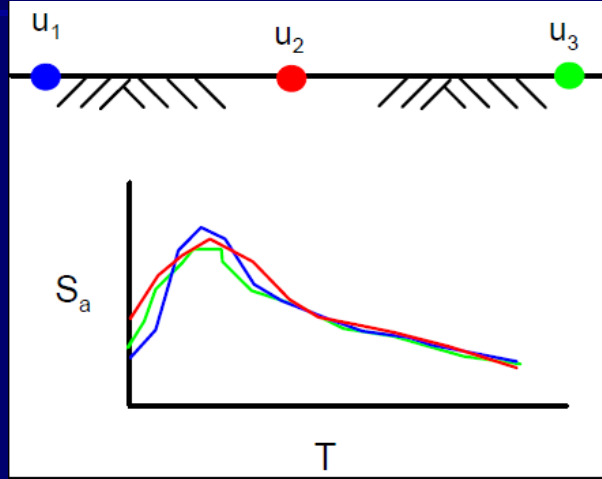
## Yer hareketine zeminin etkisi



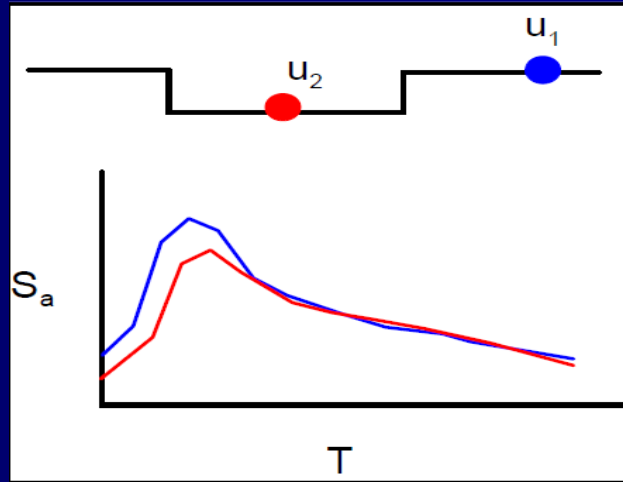
Deprem kayıtları yeryüzü ölçümlerinden elde edilir.

### Kinematik etkileşim

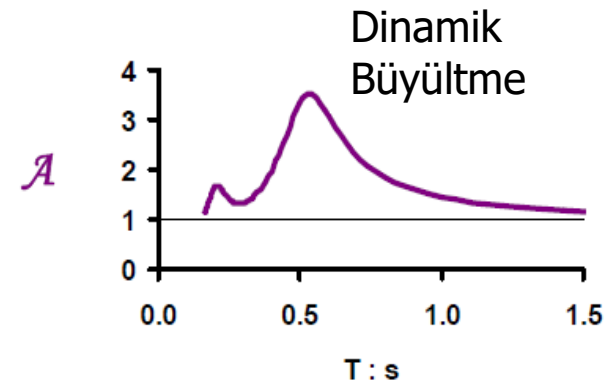
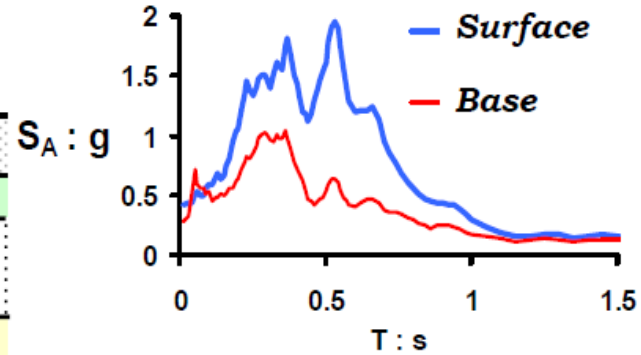
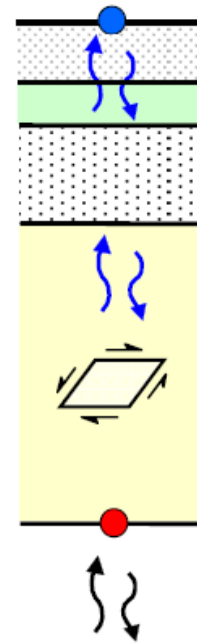
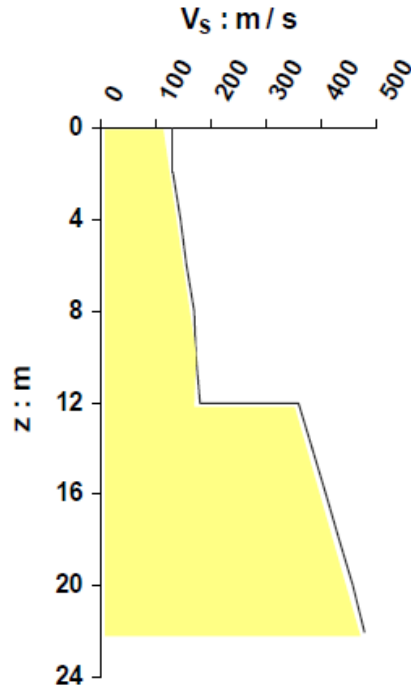
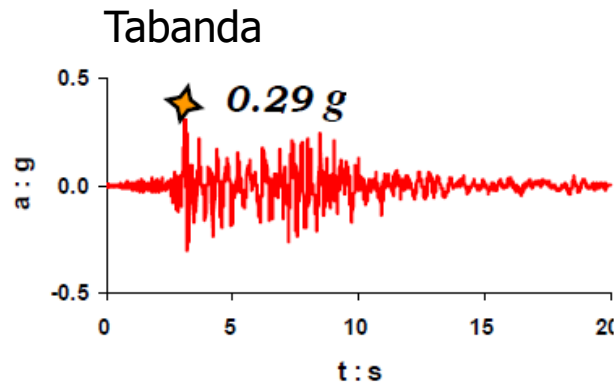
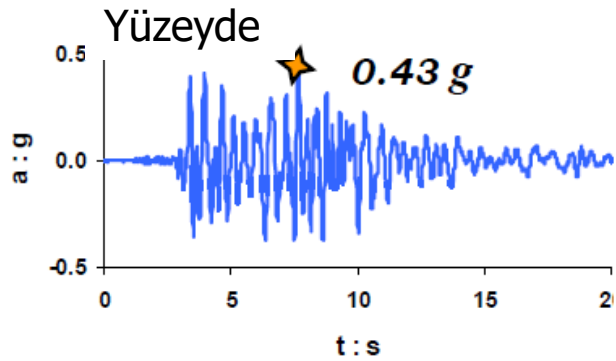
Zemin yüzeyinde farklı yer hareketleri  $\longrightarrow$  ortalama taban döşemesi hareketi



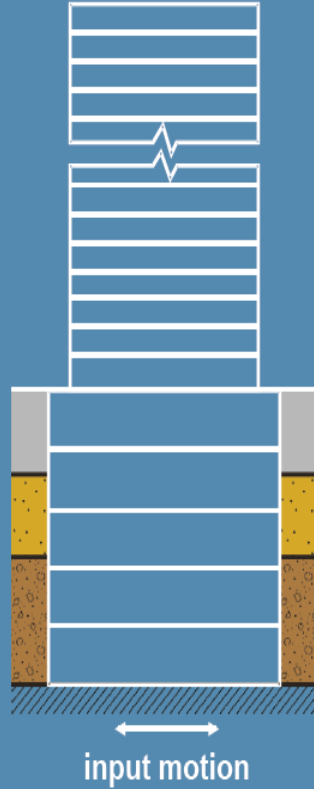
Yer hareketi derinlikle azalır



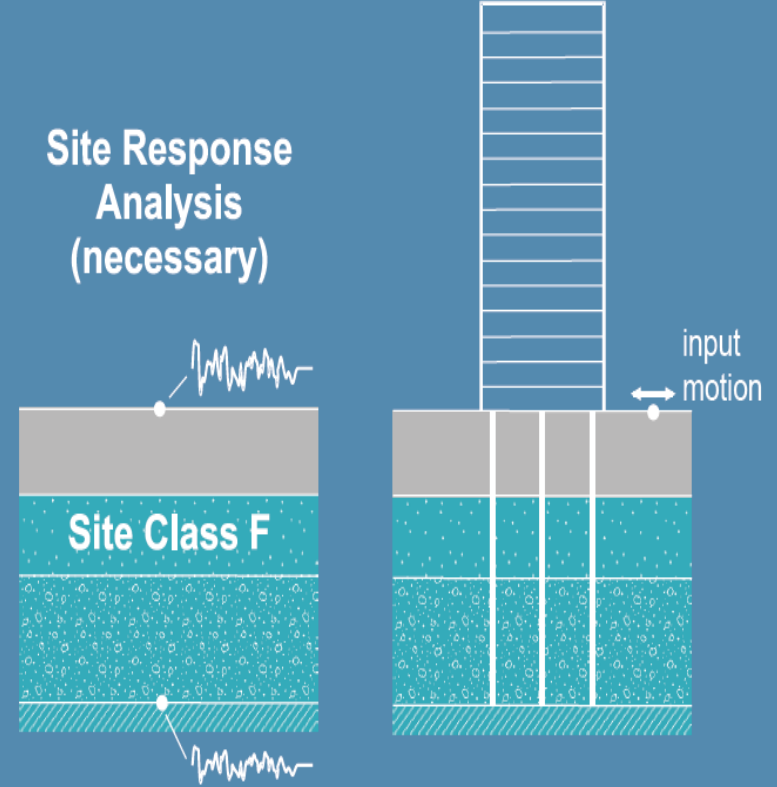
# Deprem dalgalarının yayılması



## Tall Embedded Building

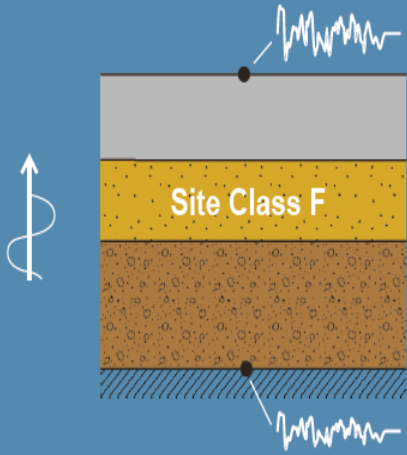


## Tall Building on Piles



## Site Response Analysis

(may not be necessary)



## Site Response Analysis

(necessary)

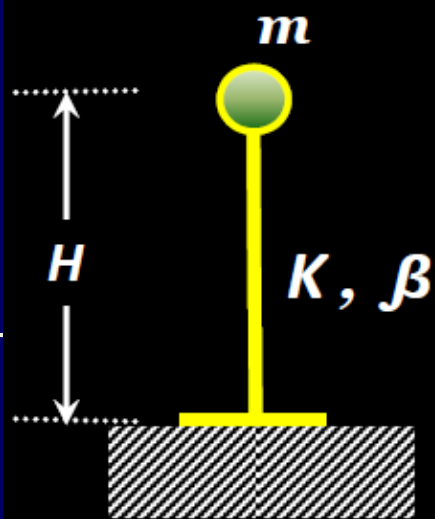


Derin Gömülü Yüksek Yapı

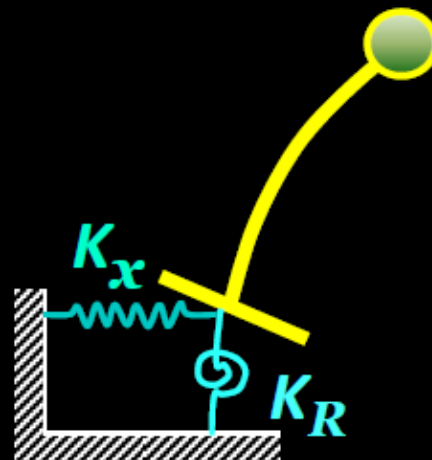
Zemin Tepki Analizi  
(gerekli olmayabilir)

Kazıklar üzerinde Yüksek Yapı

Zemin Tepki Analizi  
(gerekli)



**Structure on  
RIGID  
Base**



**Structure on  
COMPLIANT  
Ground**

$$\tilde{T} > T$$

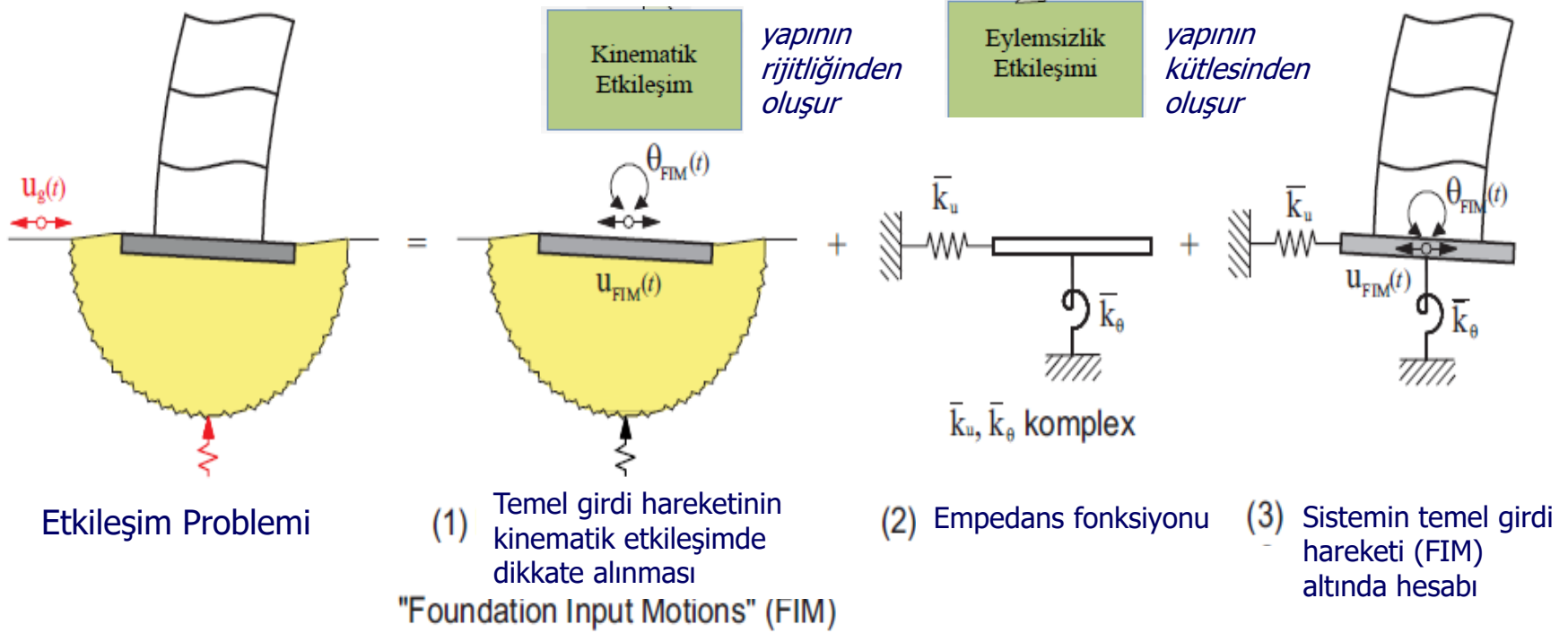
$$\tilde{\beta} > \beta$$

Gazetas,  
Ders Notları 2012

Table 3.3 Stiffness and damping coefficients for circular rigid footing (Datta, 2010).

| Component  | Stiffness parameter                 | Damping parameter                           |
|------------|-------------------------------------|---|
| Vertical   | $k_{vert} = \frac{4Gr}{1-\nu}$      | $c_{vert} = \frac{3}{1-\nu} \rho V_s r^2$   |
| Horizontal | $k_h = \frac{8Gr}{2-\nu}$           | $c_h = \frac{4.6}{2-\nu} \rho V_s r^2$      |
| Rocking    | $k_\theta = \frac{8Gr^3}{3(1-\nu)}$ | $c_\theta = \frac{0.4}{1-\nu} \rho V_s r^4$ |
| Torsional  | $k_\varphi = 5.3Gr^3$               | $c_\varphi = 0.8\rho V_s r^4$               |

$V_s$  is the shear wave velocity;  $G$  is the shear modulus;  $\rho$  is the mass density;  $r$  is the radius of the circular footing;  $\nu$  is the Poisson's ratio.



- ✓ Rijit temeile ilişkin etkin deprem verisi hesaplanır.
- ✓ Rijit temelin rijitlik matrisinin elemanları elde edilir (empedans fonksiyonları).
- ✓ Bu bilgilere dayalı olarak yapı-zemin sisteminin hesabı yapılır.



## Kinematik Etkileşim

Temelin gömülme derinliği

Yapının geometrisi, buna bağlı olarak temel biçimi, dayanımı ve rijitliği

Sismik dalga içeriği ve yapıya geliş açısı

## Eylemsizlik Etkileşimi

Yapının kütesinden dolayı kesme kuvveti ve moment

(yapı ve temelin titreşimden eylemsizlik etkisi, temel de ötelenme ve dönme meydana getirir. Doğrudan sistemin fleksibilitesi ve mod şekillerini etkiler, temelde sönüm oluşturur).

Yapı zemin etkileşiminin üç etkisi bina yapılarının dinamik davranışına önemli derecede değiştirir:

a-) Temel rijitliği ve sönüm

b-) Temel seviyesindeki yer hareketiyle serbest zemin hareketi arasındaki değişim

c-) Temel deformasyonu

## a-) Temel rijitliği ve sönüm

### Eylemsizlik Etkileşim Etkileri

✓ Titreşen sistemde kat kütlelerinden dolayı ortaya çıkan eylemsizlik; tabanda kesme, moment ve burulma etkilerinin oluşmasına neden olur.

Bu yükler sırasıyla temelin, serbest zemine göre yerdeğıştirme ve dönmesine neden olur.

✓ Bu göreceli yerdeğıştirmeler ve dönmeler ancak temel-zemin sisteminin şekildeğıştirmesinden dolayı mümkündür.

✓ Göreceli temel-serbest zemin hareketi RADYASYON ve HİSTERETİK (çevrimsel) sönüm vasıtasıyla enerji tüketimine (kaybına) neden olur. Bu enerji tüketimi zemin-temel-yapı sisteminin genel sönümünü önemli derecede etkiler.

**Radyasyon sönümü:** Temelden zeminin sonsuzluğuna uzaklaşan dalga yayılımı ile ilgili sönüm.

## b-) Temel seviyesindeki yer hareketiyle serbest zemin hareketi arasındaki değişim

Temel ile serbest zemin hareketleri arasındaki farklılıklar iki sebepten kaynaklanır:

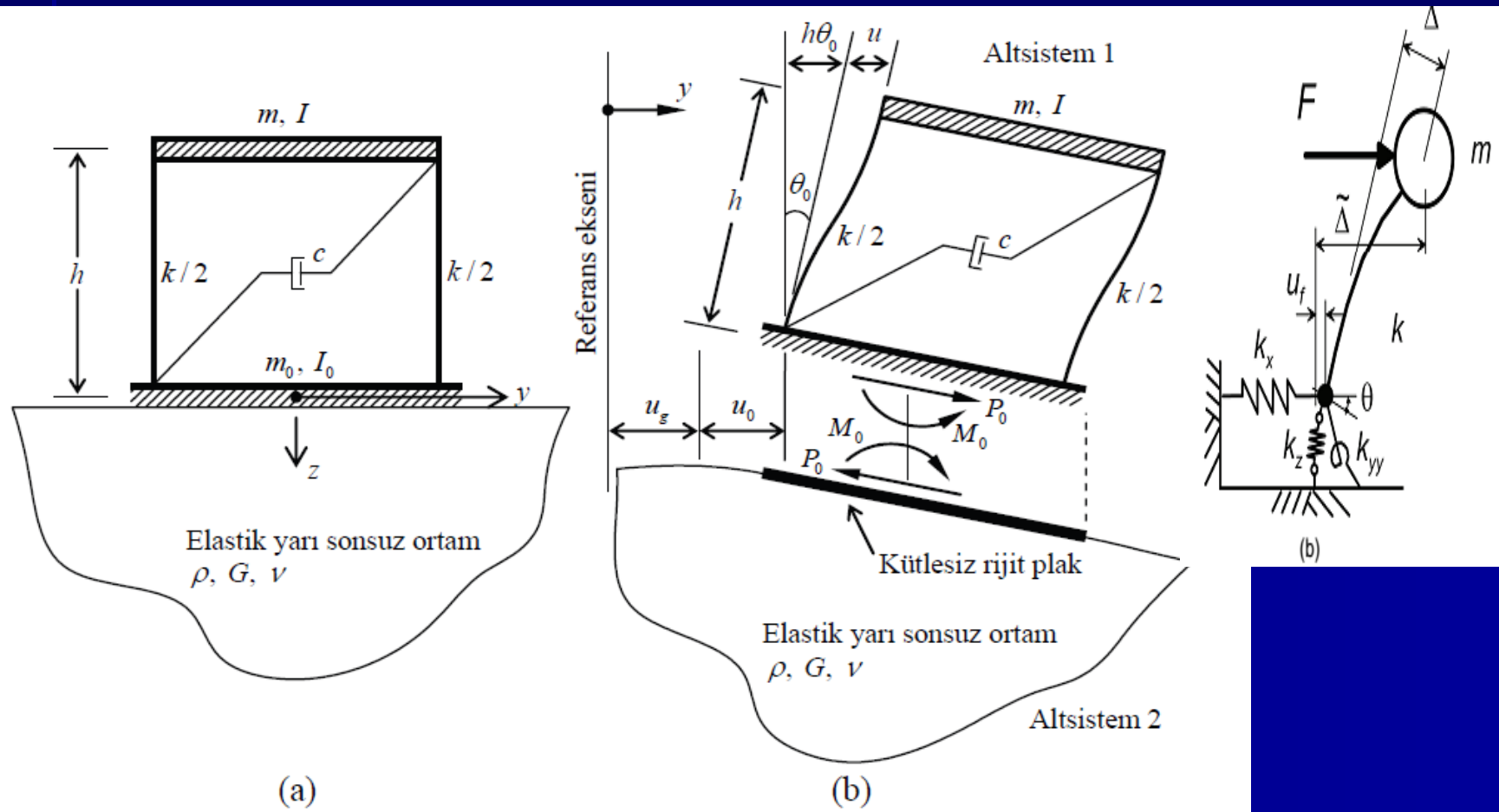
- i. Zemin yüzeyinde veya içinde rijit temel elemanlarının varlığından kaynaklanan kinematik etkileşim temel hareketini serbest zemin hareketinden saptırır ( gömülme etkisi, dalga yayılımı ve ortalama taban döşemesi varsayımı sonucunda),
- ii. Yapı ve temelin eylemsizliği ve sonucunda göreceli temel-serbest zemin yerdeğiştirmeleri ve dönmelerinin meydana gelmesi

### c-) Temel deformasyonu

Oturduğu zemin ortamı ve üstyapı vasıtasıyla uygulanan yüklerin sonucunda temel elemanlarında eğilme, uzama ve kesme deformasyonlarının oluşması,

Böylesine deformasyonlar tasarlanacak olan temel elemanlarının sismik taleplerinin gösterir.

Bu deformasyonlar tüm sistemin davranışını önemli derecede etkileyebilir, özellikle Sönüm bakımından.



Şekil 1: Yarı sonsuz ortama oturan tek serbestlik dereceli sistem

## Kinematik Etkileşim

Temelin gömülme derinliği

Yapının geometrisi, buna bağlı olarak temel biçimi, dayanımı ve rijitliği

Sismik dalga içeriği ve yapıya geliş açısı

## Eylemsizlik Etkileşimi

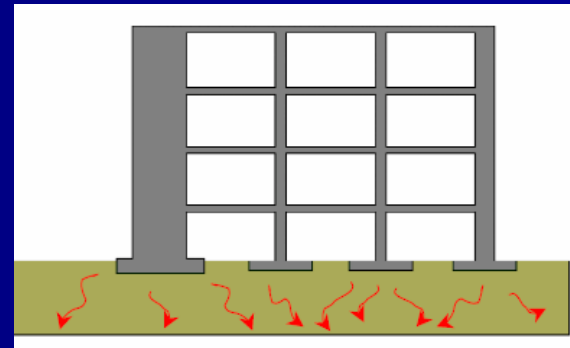
Yapının kütesinden dolayı kesme kuvveti ve moment

(yapı ve temelin titreşimden eylemsizlik etkisi, temel de ötelenme ve dönme meydana getirir. Doğrudan sistemin fleksibilitesi ve mod şekillerini etkiler, temelde sönüm oluşturur).

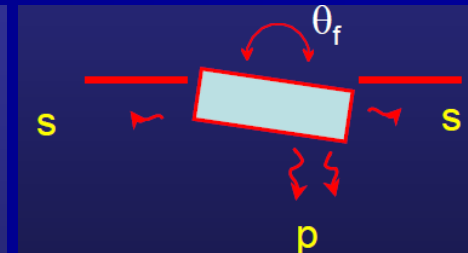
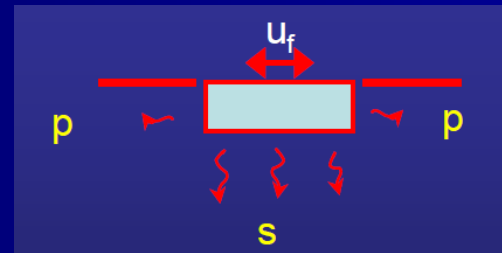
$V \rightarrow$  relative foundation/free-field displacement ( $u_f$ )

$M \rightarrow$  relative foundation/free-field rotation ( $\theta_f$ )

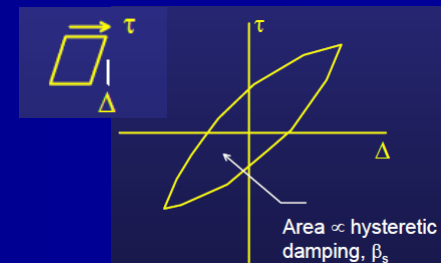
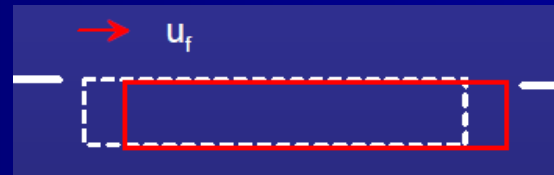
$u_f, \theta_f \rightarrow$  foundation damping



Radiation damping – foundation acts as wave source



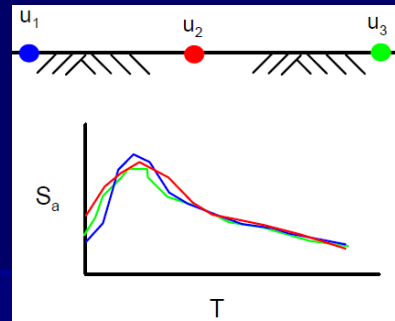
Hysteretic damping in soil



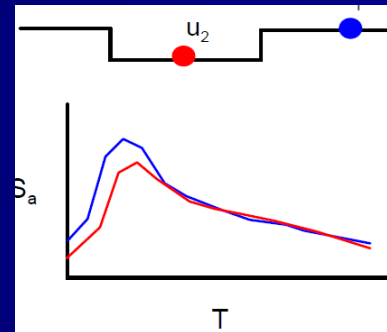


## Kinematic interaction

- Incoherent ground motions  $\rightarrow$  base slab averaging

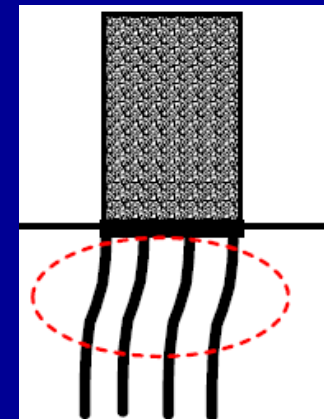
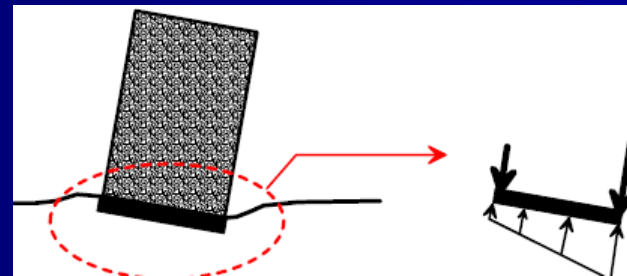


- Ground motion reductions with depth

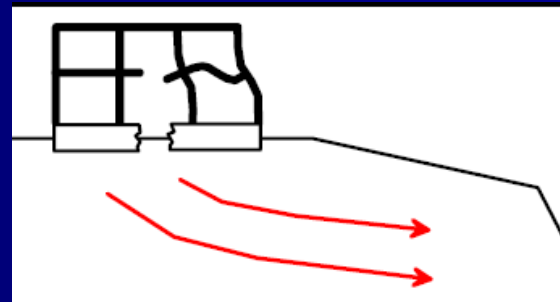


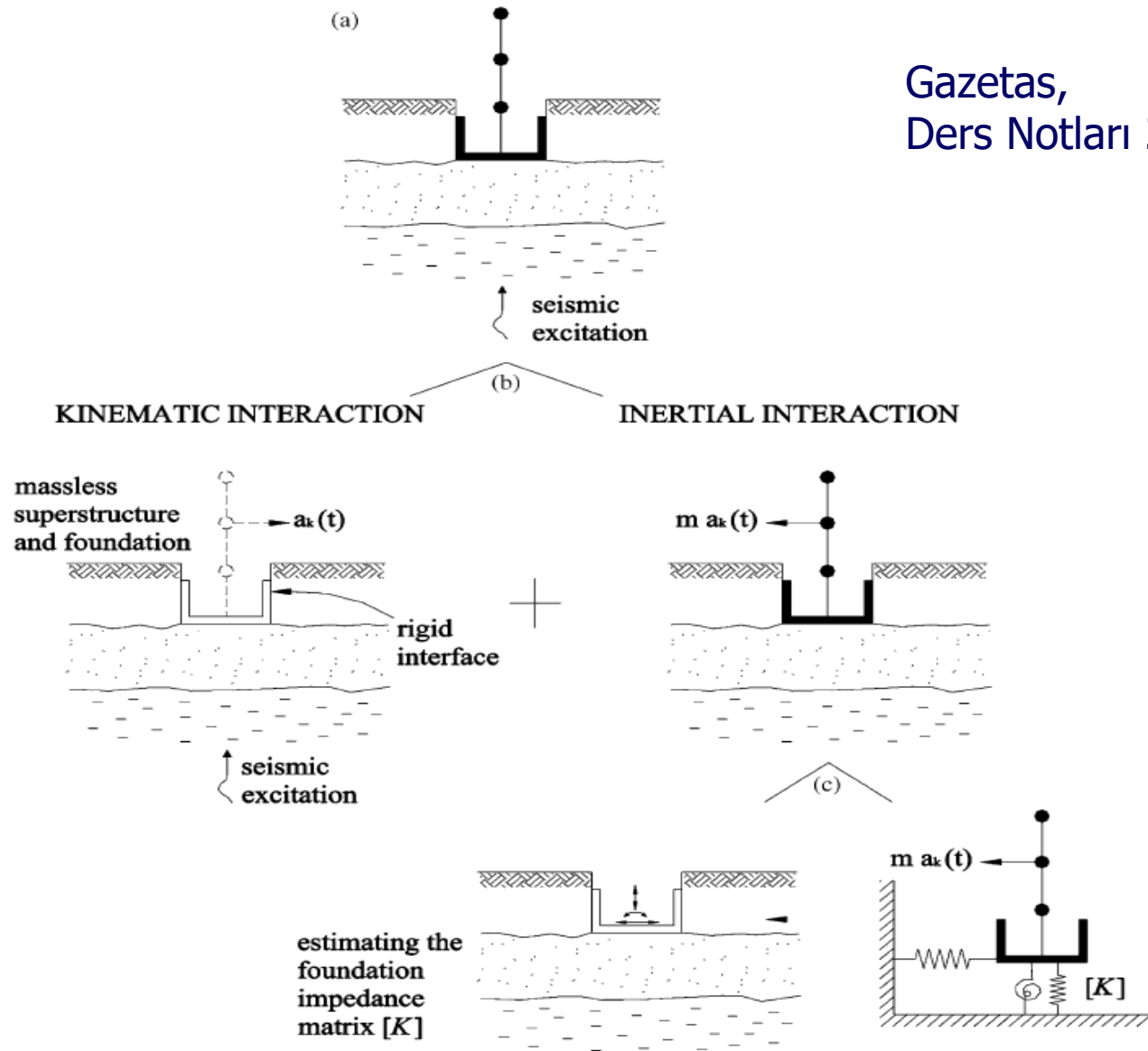
## Foundation deformations

- Loads from superstructure inertia

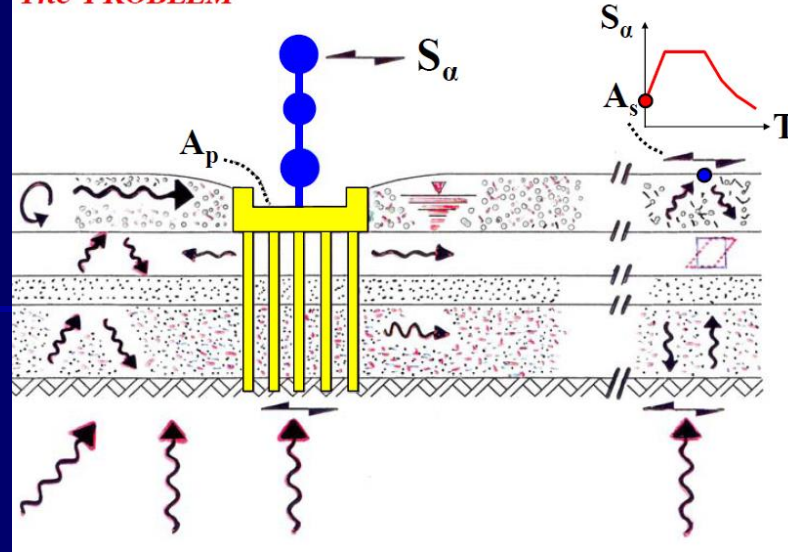


## Deformations applied by soil

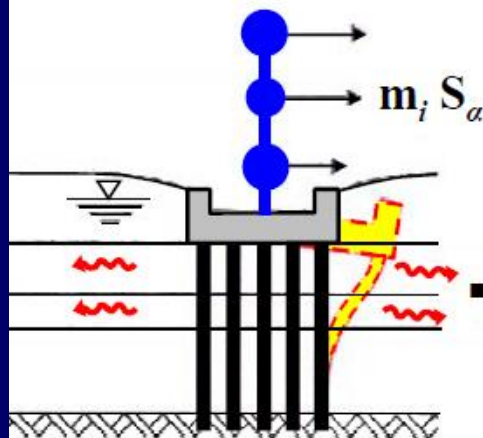




**The PROBLEM**

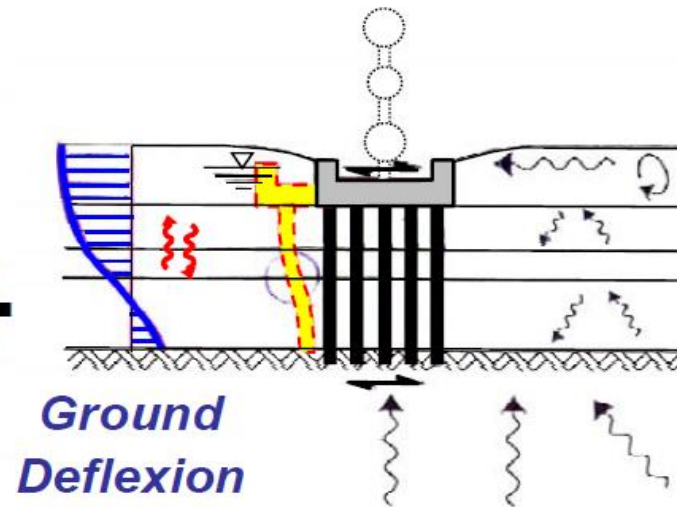


**“Inertial”  
Loading**

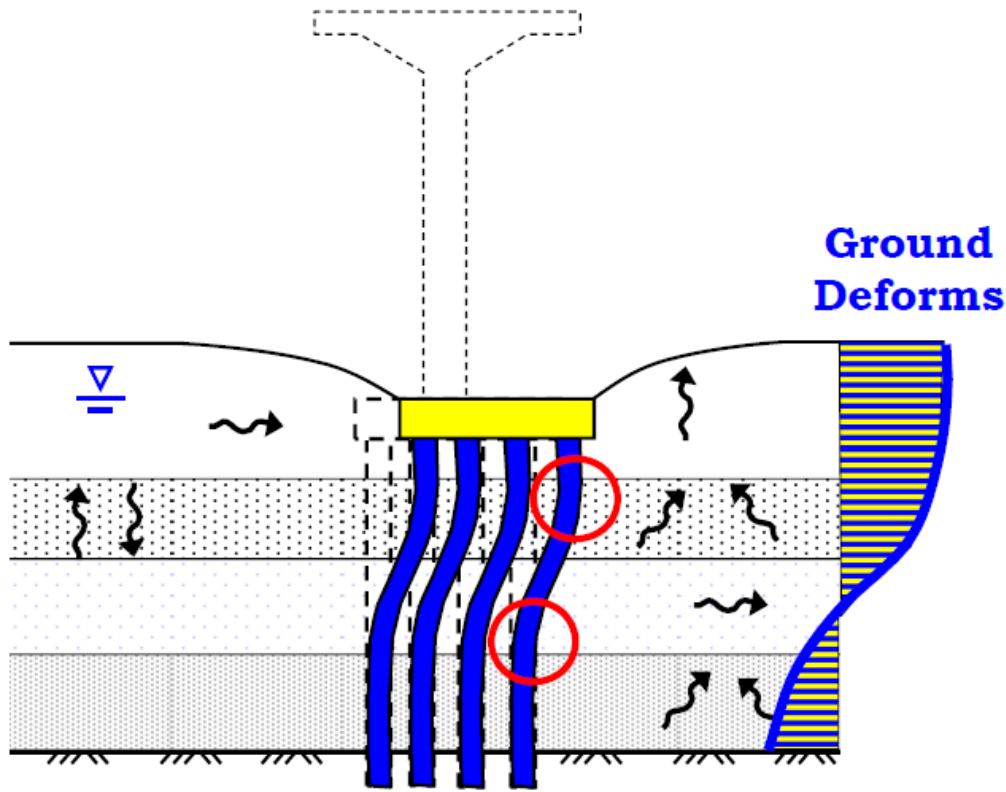


+

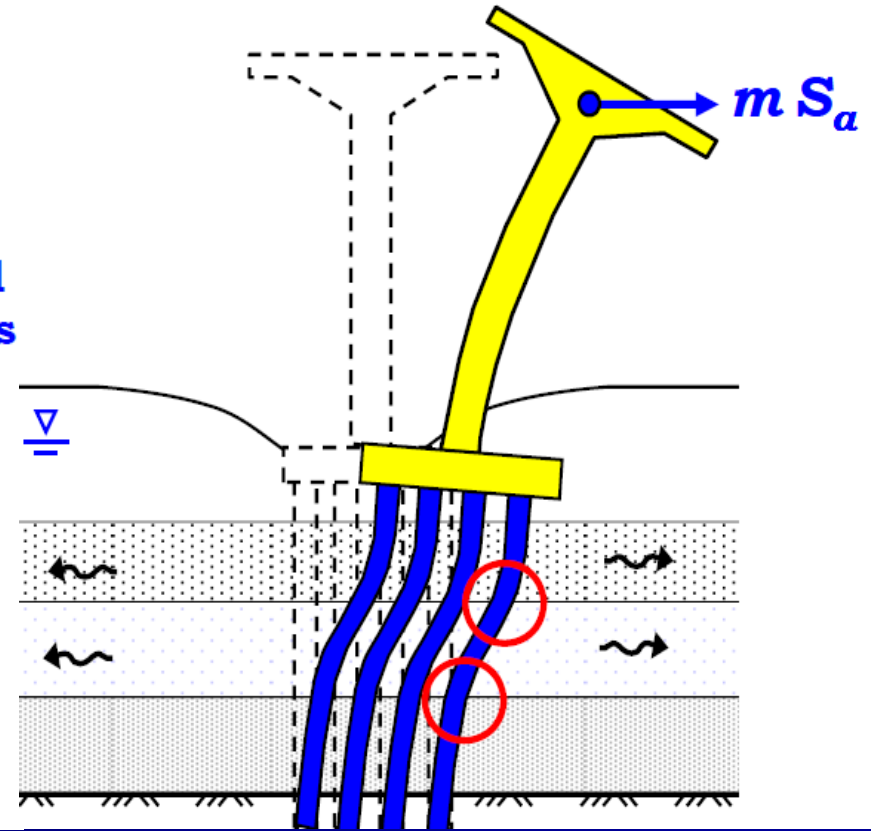
**“Kinematic”  
Loading**

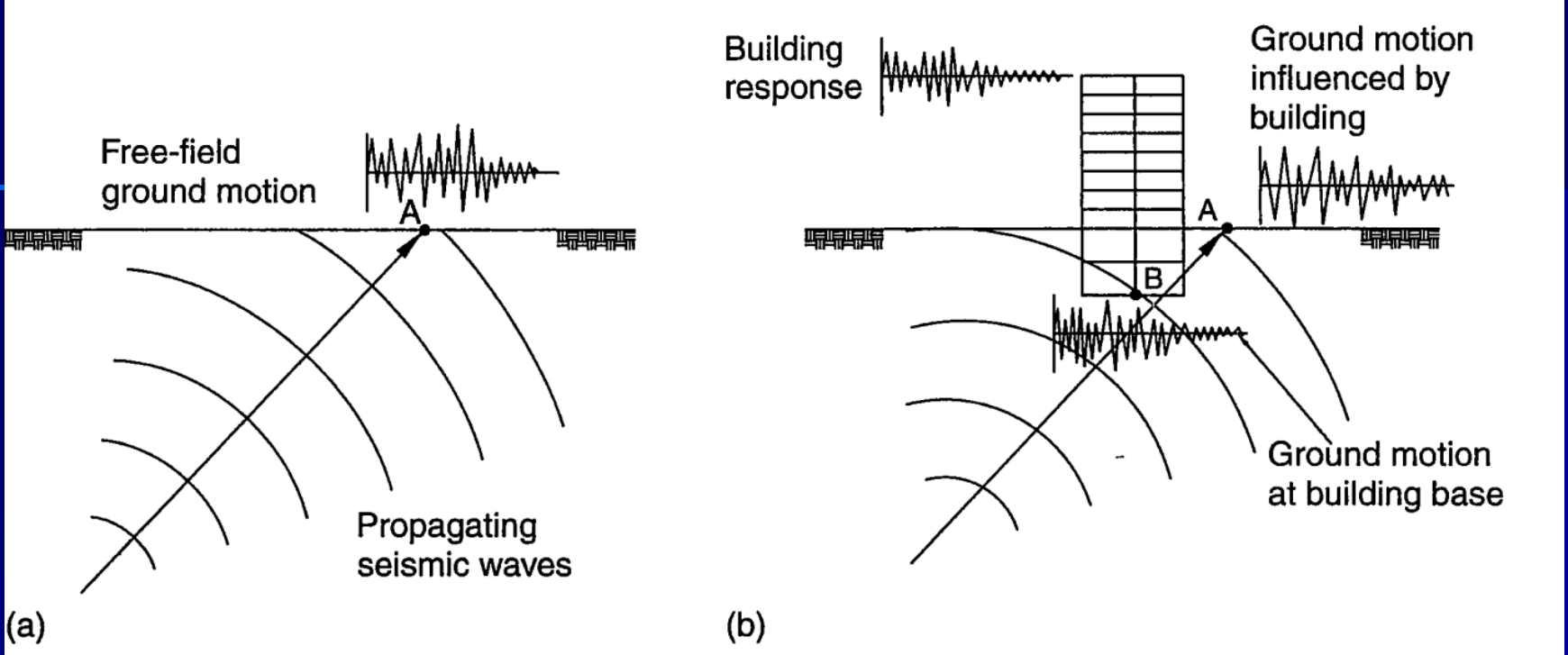


## Kinematic Response



## Inertial Response





## Şekil-1 Yer hareketinin serbest bölge ve bina temelindeki gösterimi

(Roberto Villaverde, *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering* (2009) adlı kitaptan alıntıdır)