

75187

**ÜSTYAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN DİNAMİK ETKİLEŞİM
PROBLEMİ**

75187

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Onur GENCER

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 1 Haziran 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Haziran 1998

29.6.98

Tez Danışmanı : Doç. Dr. A.Necmettin GÜNDÜZ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zekai CELEP

Prof. Dr. Metin AYDOĞAN 29/6/98

HAZİRAN 1998

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince yardımlarını ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen, beni destekleyen ve yönlendiren tez danışmanım Sayın Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ'e gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca değerli katkılarından dolayı Dr. Mecit ÇELİK, tüm Yapı Anabilim Dalı Öğretim Görevlilerine ve Boğaziçi Üniversitesi Araş. Gör. Burçin Avar'a teşekkür ederim. Ayrıca, yüksek lisans öğrenimim boyunca bana karşı her türlü destek ve sabrı gösteren aileme sonsuz teşekkür ederim.

İstanbul, 1998

Onur GENÇER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Konusu	1
1.2 Dinamik Özellikler	2
1.3 Konu ile İlgili Çalışmalar	2
1.3.1 Zemini Yarı Sonsuz Ortam Olarak İdealleştiren Çalışmalar	2
1.3.2 Zemini Sınırlı Bir Bölgede Ayrık Sistem Olarak İdealleştiren Çalışmalar	4
BÖLÜM 2 ÜSTYAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNDE UYGULANAN YÖNTEMLER	6
2.1 Üstyapı-Zemin Dinamik Etkileşim Analizi	6
2.2 Sistemi İdealize Ederek Yapılan Analizler	6
2.2.1 Direkt Çözüm Yöntemleri	7
2.2.2 Çok Adımlı Çözüm Yöntemleri	7
2.3 Kullanılan Modellerin Eleştirisi	10
2.4 Kullanılan Modeller	11
2.4.1 Zeminin Sınırlı Bir Bölgesini Sonlu Elemanlarla, Geri Kalan Kısmını Tek tabakalı Ortam Olarak İdealleştiren Model	11
2.4.2 Zeminin Tümünü Tek Tabakalı Ortam Olarak İdealleştiren Model	13
BÖLÜM 3 ALT SİSTEMLERE AYIRMA YÖNTEMİ	15
3.1 Giriş	15
3.2 Genel Bağıntılar	16
3.3 Zeminin Lineer Elastik Olması Durumu	19

BÖLÜM 4 EMPEDANS FONKSİYONLARI İLE ÇÖZÜM	23
4.1 Giriş	23
4.2 Matematik Model	24
4.3 Fourier Analizi	30
4.3.1 Matematik Model	30
 BÖLÜM 5 SAYISAL ÖRNEK	 39
5.1 Üstyapı-Zemin Ortak Sistemine Ait Bir Örnek	39
5.2 Sistemin Özellikleri	41
 BÖLÜM 6 SONUÇLAR	 50
 KAYNAKLAR	 51
 EK A	 53
 EK B	 59
 ÖZGEÇMİŞ	 65

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{A}$	: Zemin ortamının elastik sabitlerine ve rijit temel plağın boyutlarına bağlı bir katsayı
a_0	: Boyutsuz frekans
$\overline{\mathbf{A}}_j, \overline{\mathbf{B}}_j$	: Bycroft'a ait etkileşim katsayıları
f_1, f_2	: Plağın boyutlarına ve ortamın elastik sabitlerine bağlı büyüklükler
h_j	: j nolu katın yüksekliği
$[\mathbf{h}]$	: Kat yüksekliklerinden oluşan kolon matris
$\{\mathbf{H}(i\omega)\}$	: Transfer fonksiyonu vektörü
$[\mathbf{I}]$	: Birim vektör
$\mathbf{K}_{VV}(\omega), \mathbf{K}_{MM}(\omega), \mathbf{K}_{VM}(\omega)$	: Empedans fonsiyonları
m_0	: Rijit temelin kütlesi
$[\mathbf{M}]^c, [\mathbf{C}]^c, [\mathbf{K}]^c$	: Ortak sistemin kütle, sönüm, rijitlik matrisleri
$\mathbf{M}(t), \mathbf{V}(t)$	: Etkileşim kuvvetleri
P_0	: Rijit plağa etkiyen kuvvetin genliği
$\mathbf{P}^{(5)}, \mathbf{P}^{(7)}$	: Oien'e ait etki fonksiyonları
$\mathbf{R}^{(5)}, \mathbf{R}^{(7)}$	: Oien'e ait etki fonksiyonları
r	: Rijit dairesel temelin yarıçapı
$[\mathbf{u}]^a$	: Üstyapının bulunmaması durumunda deprem sonucu zeminde oluşan deplasmanlar
$[\mathbf{u}]^b$	: Üstyapının bulunması durumunda birinci tür titreşim sonucu oluşan deplasmanlara ilave yerdeğiştirme

$[u]_y^c, [u]_t^c, [u]_z^c$	: Üstyapı-zemin ortak sisteminin sırasıyla temel dışındaki yapı, temel tabanı ve temel tabanı dışındaki zemin noktalarının toplam deplasmanları
$[u]_t^a, [u]_z^a$	: Üstyapı mevcut değilken, temel tabanı ve temel tabanı dışındaki zemin noktalarında deprem sonucu oluşan deplasmanlar
$[u]_y^a$	: Kuasi-statik deplasmanlar
$\ddot{u}_g(t)$	: Yer ivmesi
u_0	: Rijit temelin yatay yerdeğiştirmesi
u_j^t	: j nolu katın toplam yerdeğiştirmesi
V_s	: Kayma dalgası hızı
ω	: Harmonik zorun açısal frekansı
$[Z(i\omega)]$	: Frekansa bağılı katsayılar matrisi
θ	: Rijit temelin dönmesi
ν	: Poisson oranı
λ	: Viskoz sönüm faktörü
ρ	: Zemin ortamının birim hacim kütlesi

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	Sonsuz rijit plağa etkiyen yükler	3
Şekil 2.1	Kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizleri	8
Şekil 2.2	Zeminin sınırlı bölgesini sonlu elemanlarla, geri kalan kısmını tek tabakalı sonsuz ortam olarak idealleştiren model	11
Şekil 2.3	Zeminin tümünü tek tabakalı sonsuz ortam olarak idealleştiren model	13
Şekil 3.1	Denklemlerdeki indisleme işleminin şematik gösterimi	17
Şekil 4.1	Yatay yer hareketi etkisindeki ortak sistemin davranışı	25
Şekil 4.2	Efektif deprem kuvvetlerinin dağılımı	29
Şekil 4.3	Yatay yer hareketi etkisindeki tek katlı üstyapının davranışı	32
Şekil 4.4	Yatay yer hareketi etkisindeki çok katlı üstyapının davranışı	35
Şekil 5.1	Ortak sistemin özellikleri	40
Şekil 5.2	Kayma dalgası hızı 100m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi	43
Şekil 5.3	Kayma dalgası hızı 200m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi	43
Şekil 5.4	Kayma dalgası hızı 400m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi	43

Şekil 5.5	Kayma dalgası hızı 800m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi	44
Şekil 5.6	Kayma dalgası hızı 1000m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi	44
Şekil 5.7	Kayma dalgası hızı 5000m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi	44
Şekil 5.8	Zeminin rijit olması durumu için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi	45
Şekil 5.9	Kayma dalgası hızı 100 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi	45
Şekil 5.10	Kayma dalgası hızı 200 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi	45
Şekil 5.11	Kayma dalgası hızı 400 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi	46
Şekil 5.12	Kayma dalgası hızı 800 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi	46
Şekil 5.13	Kayma dalgası hızı 1000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi	46
Şekil 5.14	Kayma dalgası hızı 5000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi	47
Şekil 5.15	Zeminin rijit olması durumu için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi	47
Şekil 5.16	Kayma dalgası hızı 100 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi	47

Şekil 5.17	Kayma dalgası hızı 200 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi	48
Şekil 5.18	Kayma dalgası hızı 400 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi	48
Şekil 5.19	Kayma dalgası hızı 800 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi	48
Şekil 5.20	Kayma dalgası hızı 1000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi	49
Şekil 5.21	Kayma dalgası hızı 5000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi	49
Şekil 5.22	Zeminin rijit olması durumu için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi	49
Şekil B.1	Ortak sistemin 1. Mod biçimi	60
Şekil B.2	Ortak sistemin 2. Mod biçimi	60
Şekil B.3	Ortak sistemin 3. Mod biçimi	61
Şekil B.4	Ortak sistemin 4. Mod biçimi	61
Şekil B.5	Ortak sistemin 5. Mod biçimi	62
Şekil B.6	Ortak sistemin 6. Mod biçimi	62
Şekil B.7	Ortak sistemin 7. Mod biçimi	63
Şekil B.8	Ortak sistemin 8. Mod biçimi	63
Şekil B.9	Ortak sistemin 9. Mod biçimi	64
Şekil B.10	Ortak sistemin 10. Mod biçimi	64

TABLO LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1	Üstyapı-zemin ortak sisteminin titreşim frekansları	41
Tablo 5.2	Kolonların kesit özellikleri	42
Tablo 5.3	Kirişlerin kesit özellikleri	42
Tablo 5.4	Zemine ait özellikler	42



ÖZET

Bu çalışmada, üstyapı ile zeminden oluşan ortak sistemin deprem hesabı için bazı matematik modellerin üzerinde durulmuştur. Bu modellerin çerçevesinde üstyapı ile zemin arasındaki karşılıklı dinamik etki olayı incelenmiştir. Çalışma altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konunun tanımı yapılmakta, üstyapı ile zeminden oluşan ortak sistemin deprem hesabı için yapılan çalışmalar iki grup halinde incelenerek özetlenmiştir.

İkinci bölümde, üstyapı-zemin ortak sisteminin dinamik analizi için çeşitli yöntemlere ait kısa açıklamalara yer verilmiştir. Bu bölümde, ayrıca ortak sistemin idealleştirilmesi için kullanılan modeller eleştirilmiş, geliştirilen modellerin özellikleri ve problemin çözümünde sağladığı olanaklar açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, zeminin homojen ve lineer elastik olması durumunda deprem etkisi altında ortak sistemin dinamik hareket denklemlerine yer verilmiştir. Dinamik hareket denklemlerinin elde edilmesi maksadı ile alt sistemlere ayırma metodundan (Substructure Method) yararlanılmış olup, böylece yöntemin esası hakkında genel bir fikir verilmeye çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde, üstyapı ile zemin arasındaki dinamik etkileşimi ifade eden empedans (etkileşim) fonksiyonlarına bağlı olarak ortak sistemin deprem hesabı açıklanmıştır. Bu fonksiyonların boyutsuz frekans değerine bağlı olmasından dolayı ortak sisteme ait dinamik denge denklemlerinin frekans alanındaki ifadelerine yer verilmiştir.

Beşinci bölümde, sekiz katlı bir betonarme çerçeve ve zeminden oluşan ortak sistemin dinamik davranışı SAP90 programı incelenmiştir. Bu amaç ile, zeminde kayma dalgası hızına bağlı olarak, birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki ortak sistemin üstyapıya ait zemin kat kolonu uç kuvvetlerinin (kesme kuvveti ve eğilme momenti) ve en üst katın yatay yerdeğiştirmesinin 0-100 rad/s'lik frekans bölgesinde frekansa bağlı değişimi elde edilmiş, eğriler ile gösterilmiştir.

Altıncı bölümde, bu çalışmada elde edilen genel sonuçlar açıklanmıştır.

SUMMARY

This work deals with the analysis of earthquake response of structures including soil structure interaction.

In recent years, many important structures such as tall buildings, dams, nuclear power plants etc., have been constructed in seismic zones on weak or strong soil conditions. It is evident that, in the earthquake response analysis of such structures, the characteristics of the soil medium have to be considered in addition to the dynamic characteristics of the superstructures.

It is evident that the soil conditions affect the seismic waves transmitted through the soil medium from the structure. Soil effect, which is independent of existing structure, causes in response an opposite effect, due to the transmission of the stress waves from the vibrating structure into the soil. This dynamic interactive behaviour of soil and structure constitutes the subject of *soil-structure interaction*.

In the first chapter of this study, the problem is defined and a detailed review of the previous work is given. The previous investigations can be separated mainly into two groups which are different idealization procedures for the soil medium. In the first group of investigations, the structure is assumed to be founded on a half space or a stratum through an infinitely rigid foundation plate. This approach makes use of the solution of steady state vibration of rigid circular or rectangular plates bonded on a half space. The force-displacement relationship of the rigid plate is expressed by the compliance matrix. The imaginary part of the compliance matrix states the energy loss due to the infinite soil medium. This model has some important restrictions:

- a) Under actual soil conditions, homogeneous and linearly elastic soil assumption seems to be unrealistic.
- b) Earthquake analysis of the soil-structure systems can be done in frequency domain using Fourier Transform Technique because of the elements of complex compliance matrix are frequency dependent.

In the second model, the soil medium is assumed to be finite and composed of some discrete elements. The finite element method is used for the discretization. The finite element method has many advantages in the solution of soil-structure system:

- a) Geometrical, mechanical discontinuities and irregularities of the soil medium can be taken into account.

- b) Earthquake analysis of soil-structure systems can be made directly in the time domain. Nonlinear soil and structure conditions can be taken into account using step by step integration.
- c) It is not necessary that the foundation plate is rigid.

Although the discrete model is efficient and provides some flexibilities, it has also some drawbacks for the solution of the problem:

- a) Large computer storage is needed for sufficient idealization. Since the discrete model has to contain enough number of nodal points.
- b) Because of the model is finite, radiation energy loss can not be taken into consideration due to reflection of waves from the boundaries of the model.

In the second chapter of this study, it is not only investigated the methods for analyzing soil-structure interaction but also two types mathematical models. *Complete interaction analysis* must account for the variation of soil properties with depth, give appropriate consideration to the material nonlinear behaviour of soil, consider three dimensional nature of the problem, consider the complex nature of wave propagation which produced the ground motions, consider possible interaction with neighboring structures. *Idealized interaction analysis* is used when researchers are encountered with complex problem. The soil deposit is represented by a series of horizontal layers, and the patterns of ground motion in the near-surface soils are considered to be the result of simple mechanisms. Idealized problems can be solved by the *Direct and Multistep Methods*.

Direct methods evaluate the dynamic response of the structure in a single analysis step. The equation of motion resulting from the formulation of the soil-structure system with finite elements can be solved by two methods. Solution in the time domain in which the system of differential equations is solved directly by the step by step integration. Solution in the frequency domain, in which the impedance function of any effect is obtained by solving at each frequency a system of linear algebraic equations, and the time history response is then computed by using Fourier transforms.

Multistep methods are based on the principle of superposition and are restricted to linear systems. The basic idea is to perform the analysis of the interaction problem in several steps whose solution might be easier. The two step solution can be explained in the following two steps. In the first step, it is assumed that the structure has no mass but has stiffness and damping. The acceleration time history of each point of the structure is computed as well as the forces in the structure. In the second step, time varying inertial forces are applied at each point of the structure; the force at each point is the product of the mass at the point, and the acceleration is determined in the first step to the base rock acceleration. The motions and forces in the structure are computed and added to those computed in step one. The nature and amount of this interaction depends not only the soil stiffness, but also on the stiffness and mass properties of the structure. The interaction effect associated with the stiffness of the

structure is termed *kinematic interaction* and the corresponding mass related effect is called *inertial interaction*.

Two different models are developed; the first intended to be used in the earthquake response analysis and the second to obtain qualitative results about the dynamic behaviour of soil-structure systems. In the first model, the soil medium is idealized as two subsystems. The soil is discretized by means of two dimensional finite elements whereas the rest of the medium is assumed to be a linear elastic and homogenous stratum. The major soil deformations caused by the vibrating structure occur near the foundation. On the other hand, the soil deformations decrease in the far region of the structure, this part of the soil is idealized as a stratum.

In the second model, the whole soil medium is idealized as a linear elastic and homogenous stratum. In both models, the soil deposit is discretized by means of nodal points which are defined on the surface of the medium.

In the third chapter, the equations of motion of soil-structure systems are obtained. The problem is considered in a general manner. In order to obtain the equations, the soil and the structure are thought separately.

In the soil-structure systems, total displacements can be separated into two parts as follows;

$$[u] = [u]^a + [u]^b$$

where $[u]^a$ represents earthquake free field displacement vector which can be calculated anywhere in the soil medium. $[u]^b$ represents the interaction displacements due to structure's vibration.

In the fourth chapter, an efficient method, based on the Ritz concept, for dynamic analysis of response of multistorey buildings including foundation interaction to earthquake ground motion is presented. The system considered is a shear building on a rigid circular disc footing attached to the surface of a linearly elastic halfspace. The mass of the building is considered to be concentrated at the floor levels. The floor systems are assumed to be rigid so that the relative displacements are due to the deformations in the columns. In this method, the structural displacements are transformed to normal modes of vibration of the building on a rigid foundation. Numerical results show that excellent results can be obtained by considering only the first few modes of vibration. This method can be applied to all types of linear structure-foundation systems and multistorey buildings.

The governing equations of motion for a structure including foundation interaction as well as the methods are complex. The foundation stiffness and damping terms relating forces and displacements for the rigid disc on a linear elastic halfspace depend on the frequency excitation. The governing equations for the structure-foundation system must be written in the Fourier transformed frequency domain. The steady-state response to harmonic ground motion at a particular excitation frequency is determined by solving the frequency domain equations.

For each frequency, the solution of a set of simultaneous algebraic equations is obtained. Such a procedure, called as a direct method, requires a large computational effort for structures with many degrees-of-freedom. Sufficiently accurate solutions for structural displacements should result when the number of modes included, is much smaller than the number of degrees-of-freedom of the building excluding those at the base. The efficiency in the solution process is of great significance because the process has to be repeated for many values of excitation frequency. If all the modes are included, it is reached the exact results.

In the Fourier analysis, the effect of the soil on the structure can be expressed in terms of a set of dimensionless influence functions P and R derived by Oien. These functions characterize the interaction forces between an elastic soil half space with a shear wave velocity V_s and density ρ and a rigid, infinitely long strip of width $2b$ bonded to it which diffracts normally incident harmonic seismic waves. For a building foundation of plan dimensions $2b$ and d undergoing harmonic translation and rotation, Oien's solution yields,

$$M_\theta = \rho V_s^2 b d (R^{(5)} U_0 + b R^{(7)} \theta)$$

$$F_b = \rho V_s^2 d (P^{(5)} U_0 + b P^{(7)} \theta)$$

in which M_θ , F_b , U_0 and θ are all functions of excitation frequency and are the Fourier transform of the interaction rocking moment at the interface, interaction translation force at the interface, interaction translation of the base and the interaction rotation of the base. In this method, the system is considered as a shear-type structure-foundation system possessing $N+2$ degrees of freedom (N : degree of freedom of the shear type structure). The rocking of the system about a horizontal axis and the horizontal translation of the base and the floors. In the dynamic equilibrium equations of a structure including interaction, after placing displacement and derivatives' Fourier transform in these equations and separate real and imaginary part of these equations, is obtained equations in the frequency domain. These equations contain influence functions and are to be calculated for each excitation frequency.

For given structural parameters, base geometry, and soil properties, the desired solution to the earthquake interaction problem requires finding:

- a) Base translation, base rotation, and floor horizontal translation transfer functions.
- b) The time history response of the interaction rotation of the base, the interaction horizontal translation of the base and floor horizontal translation for a specified free field acceleration by using inverse Fourier transform.

Earthquake response of tall buildings founded on various soils, the following general conclusions can be drawn:

- a) The amount of interaction increases when the value of shear wave velocity decreases. The motion associated with the higher modes of vibration may be attenuated for massive structures.

- b) The natural frequency of the fundamental mode of the structure decreases when shear wave velocity decreases.
- c) Rocking motions contributes to the total displacement response of tall buildings founded on soft soil.
- d) The floor accelerations or displacements are largest when the dominant frequency of the earthquake matches the fundamental frequency of the structures, and when the founding soil is very stiff; the interaction caused by soils can reduce accelerations or displacements.
- e) If the dominant frequency of the earthquake is as high as the second-mode natural frequency of the structure, the maximum accelerations or displacements responses of the structure are generally independent of shear wave velocity.

In the fifth chapter, a numerical example is presented. A eight-story framed building with a rigid footing is considered. This model has the value of a height of 24m and having base dimensions 24m, damping ratio 0.05, the fundamental frequency of this building neglecting interaction effects in 11.33 rad/s. The values of the shear wave velocity are taken into account as 100,200,400,800,1000,5000 m/s.

The earthquake input used for this interaction system was the unit amplitude harmonic ground motion. The duration of the earthquake is 30s and the accelerogram is recorded the values of the ground acceleration at 600 data points.

It has been shown that soil properties affect the natural frequencies of vibration. As a consequence of the decreasing shear wave velocity, the frequencies of vibrations decrease.

The displacement of the roof and ground floor column's shear force and bending moment are plotted versus frequency. It is noticed that the horizontal displacements of the eight (roof) floor and the bending moment, shear force of the ground floor's column are largest when dominant frequency of the earthquake matches the fundamental frequency of the soil-structure system, and when the soil is very stiff; the interaction caused by soils can reduces the values of the eighth (roof) floor displacement and bending moment, shear force of the ground floor's column.

In the sixth chapter, the conclusions of this study are presented.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 TEZİN KONUSU

Zemin-üstyapı dinamik etkileşimi problemi karşımıza ilk olarak yüksek binaların, barajların, nükleer enerji santrallerinin çok değişik zemin ortamlarında ve deprem bölgelerinde inşaa edilmek istenmesiyle karşımıza çıkmaktadır.

Yapı mühendisliği açısından deprem jeofizik nedenlerle zeminde meydana gelen yer hareketi olarak tanımlanmaktadır. Doğal olarak yapılar zemine oturduğundan, deprem hesabı için üstyapı ile zemini birlikte düşünme gereği ortaya çıkmıştır.

Deprem sebebiyle zemin ortamından yapıya aktarılan titreşimler,yapıda bazı etkiler meydana getirmektedir. Titreşim sonucu yapıda oluşan etkiler,zeminde deprem etkilerine ilave olarak karşı etki meydana getirmektedir.

Günümüzde deprem hesabı için uygulanan yöntemlerde, zemin yapının titreşimlerinden etkilenmeyen bir ortam olarak kabul edilmektedir.Yani zemin rijit olarak varsayılmaktadır. Fakat zemin, aynı kabul çerçevesinde şekil değiştiren ortam olarak da düşünülmektedir. Bunun sonucu olarak, zeminin yapıyı etkilemesi, fakat ondan etkilenmemesi gibi tek yönlü düşünce ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, zeminin yumuşaklığı ve sağlamlığı, yapının dinamik özellikleriyle birlikte düşünülürse anlam kazanmaktadır. Buna karşılık, yapının tüm sistem içindeki davranışı, zeminden bağımsız olarak ele alındığı duruma göre önemli farklar içermektedir. Tezin

konusunu ; çeşitli zemin koşulları gözönüne alınarak, birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki üstyapı davranışının SAP90 programı ile incelenmesi oluşturur.

1.2 DİNAMİK ÖZELLİKLER

Genel olarak, şekil değiştirme yapabilen bir sistemde titreşimi etkileyen üç unsur vardır: Bunlar, rijitlik, sönüm ve eylemsizlik olarak sıralanabilir. Sönüm ve eylemsizlik özelliği dinamik davranışla, rijitlik özelliği statik davranışla ilgilidir. Üstyapı-zemin ortak sisteminin analizi için bu üç özellik saptanarak matematik modellemesine gidilebilir. Zeminin karmaşık yapısından dolayı titreşime olan etkisi asıl problemi oluşturmaktadır.

Bu konu ile yapılan çalışmalarda, ilk olarak zeminin sadece rijitlik özelliği gözönüne alınmıştır. Rijitlik değerleri olarak bazı amprik ifadelerden elde edilen değerler kullanılmıştır. Ayrıca zeminde, rijitliğin yanında eylemsizlik kuvvetlerinin gözönüne alındığı çalışmalar yapılmıştır.

1.3 KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

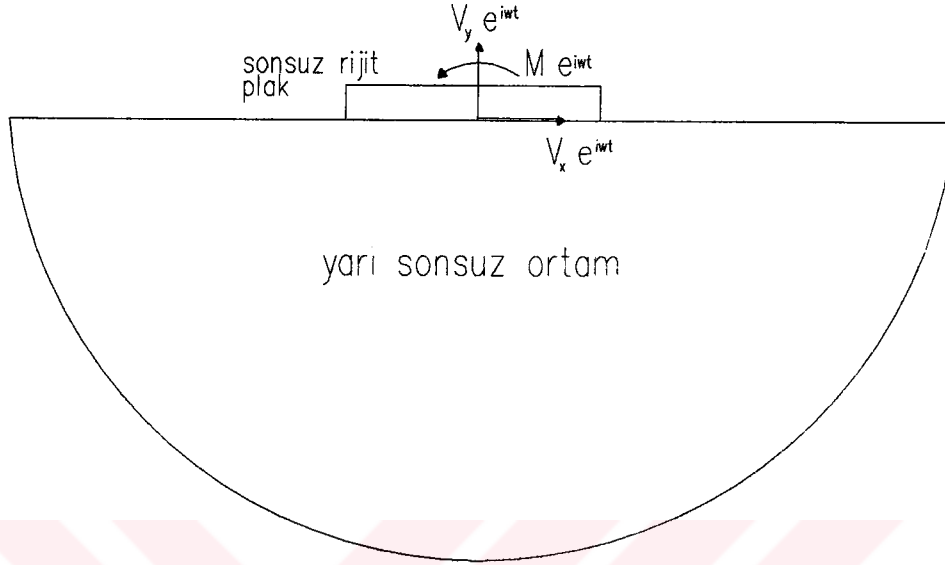
Üstyapı-zemin ortak sistemini inceleyen ilk çalışmalarda zeminin rijitlik özelliğinden yararlanılmıştır. Eylemsizlik özelliği terkedildiğinden, zemine ait rijitlik değerleri statik anlamdadır. Winkler hipotezi, zemine ait rijitlik değerlerini hesaba katmamıza sağlayan önemli bir çalışma olmaktadır.

Zeminin rijitlik özelliği yanında eylemsizlik özelliğinin de gözönüne alındığı çalışmalar karşımıza yeni olarak çıkmaktadır. Bu çalışmalar sırasında yapılan kabullerin hassasiyetinin az olması, bu konunun yeniliği hakkında bize bilgi vermektedir.

1.3.1 Zemini Yarı Sonsuz Ortam Olarak İdealleştiren Çalışmalar

Bu çalışmalarda zemin homojen, izotrop, lineer elastik yarı sonsuz ortam olarak idealleştirilmektedir. Bu ortamın yüzeyinde kütsüz, dairesel veya dikdörtgen plak

gözönüne alınmaktadır. Sistemin serbestlik derecesi üçü doğrusal, üçü açısall olmak üzere altıdır. Plağa etkiyen yükler şekil 1.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Sonsuz rijit plağa etkiyen kuvvetler

Dinamik dış etkiler altında rijit temel plağının tabanındaki gerilme dağılışı bilinmediğinden, bu dağılışı için bazı bilim adamları çeşitli kabuller yaparak sonuca gitmeye çalışmışlardır. Bu konudaki ilk çalışmalarda, Reissner yarı sonsuz ortam için harmonik düşey yük etkisindeki rijit dairesel plağın altındaki gerilme dağılışı sabit olarak düşünmüş, daha sonraları, Veletsos-Wei, Luco-Westmann, Bycroft ve Lysmer rijit dairesel plağın altındaki gerilme dağılımını daha gerçekçi bir ifade ile elde etmişlerdir. [1,2,3] Bu araştırmalar sonucunda rijit plağın düşey, yatay ve açısall deplasmanı,

$$u=A(f_1+f_2)P_0e^{i\omega t} \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, A, ortamın elastik sabitlerine ve plağın boyutlarına bağlı bir katsayı, P_0 rijit plağa etkiyen kuvvetin veya momentin genliği, ω harmonik zorun

açısal frekansı; f_1 ve f_2 fonksiyonları plağın boyutlarına, ortamın elastiklik sabitlerine bağlı büyüklüklerdir.

Üstyapı-zemin ortak sisteminin incelenmesinde çalışmaların en önemlisi Parmalee tarafından yapılmıştır. Parmalee, Bycroft'un çalışmalarından faydalananak, yatay harmonik yer hareketi etkisi altındaki tek katlı sistemi ve zeminin katkısını ifade eden yay ve sönümleyicileri gözönüne alarak incelemiştir.

Üstyapı-zemin ortak sisteminde birinci titreşim modunun sistemin davranışına en büyük oranda katkıda bulunduğu, birçok araştırmacı tarafından kanıtlanmıştır. Parmalee ve Lee bu özelliği gözönünde tutarak, bazı çalışmalarında zemin ortamı ile ilgili katsayıları birinci titreşim frekansı için hesaplayıp bunları titreşim süresince sabit kabul ederek parametrik bir araştırma yapmıştır.

Rijit plak çözümlerinden yararlanan yaklaşımın en önemli bir eksiği, üstyapının temelini yüzeysel olarak kabul etmek zorunda oluşudur. Uygulama açısından önemli olan gömülü temel durumları için Novak-Beredugo, Parmalee-Kudder, Petrovski tarafından yaklaşık çözümler geliştirilmiştir.

1.3.2 Zemini Sınırlı Bir Bölgede Ayrık Sistem Olarak İdealleştiren Çalışmalar

Üstyapı-zemin ortak sistemini inceleyen çalışmaların önemli bir bölümünde, zemin ortamı sınırlı bir bölgede ayrık bir sistem olarak idealleştirilmektedir.

Parmalee ve Lee zemini sonlu bir bölgede, kendilerinin tanımladığı rijitlik ve sönüm elemanları ile idealleştiren bir model geliştirmişlerdir. Lysmer-Kuhlemeyer sonsuz ortamda radyasyondan dolayı meydana gelen enerji kaybını, sonlu elemanlarla idealleştirdiği bir bölgede gözönüne almayı amaçlamıştır. Bunun için, enerji kaybını gözönüne almak için sonlu elemanlarla idealleştirilen bölgenin çevresine enerji yutan viskoz sınırlar ve bunlara ait sınır şartları tanımlanmıştır. [4] Sonlu elemanlarla idealleştirilen bütün çalışmalarda zemin ve yapı ortak bir sistem olarak birlikte gözönüne

alınmaktadır. Son yıllarda, çubuk sistemlerde ve sürekli ortamların statik ve dinamik analizlerinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi üstyapı ve zeminden oluşan sistemin idealleştirilmesi için uygun bir yöntem olmaktadır. Seed-Idriss, Khanna, Finn-Reiner ve Wilson gibi bilim adamları sonlu elemanlarla zemini modelleyerek zemin-yapı dinamik etkileşim problemini incelemişlerdir.



BÖLÜM 2

ÜSTYAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNDE UYGULANAN YÖNTEMLER

2.1 ÜSTYAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİM ANALİZİ

Üstyapı-zemin dinamik etkileşim analizi genel olarak iki grup altında incelenebilir. Bunlar kesin dinamik etkileşim analizi ve sistemi idealize ederek yapılan dinamik analizler olmak üzere sıralanabilirler. Burada, sistemi idealize ederek yapılan dinamik analiz yöntemleri kısaca tanıtılacaktır.

Kesin dinamik etkileşim analizinde gözönünde bulundurulacak noktaları:

- a) Zemine ait karakteristiklerin derinliğe bağlı olarak değişmesi
 - b) Zeminin non-üniform özellik göstermesi
 - c) Problemin üç boyutlu olarak tasarlanabilmesi
 - d) Yapıların birbirlerine olan dinamik etkisi
- şeklinde sıralayabiliriz.

2.2 SİSTEMİ İDEALİZE EDEREK YAPILAN ANALİZLER

Üstyapı-zemin ortak sistemlerinde karşılaşılan problemlerin en önemlileri, zemin tabakalarının yatay olmaması ve deprem dalgasının düşey olarak yayılmamasıdır. Bu tür problemleri giderebilmek için, birçok araştırmacı sistemi idealize ederek çözüme kolay yoldan ulaşmayı amaç edinmiştir. Sistemleri idealize ederek yapılan çözümleri genel olarak iki grup altında toplayabiliriz.

- a) Direkt çözüm yöntemleri
- b) Çok adımlı çözüm yöntemleri

2.2.1 Direkt Çözüm Yöntemleri

Bu çözüm yöntemleri ile deprem etkisi altında bulunan ortak sisteme ait yerdeğiştirmelerin, taşıyıcı elemanlara ait kesit zorlarının, mod şekillerinin ve zemin gerilmelerinin zamana veya frekansa bağlı olarak çözümü tek adımda hesabı amaçlanmaktadır.

Bu etkilerin belirlenmesinde birçok çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemini bu yöntemlere örnek olarak gösterebiliriz. Sonlu elemanlar yönteminin amacı, bir yapıyı, zemini, bölgeyi veya bir cismi çok sayıda parçaya ayırarak en iyi şekilde analiz etmektir. En çok kullanılan iki boyutlu eleman olarak üçgen ve dörtgen elemanlar kullanılmaktadır. Bu elemanların yardımıyla iki boyutlu bir yapının veya zeminin geometrisi bu elemanlardan çok sayıda kullanılarak temsil edilebilmektedir.

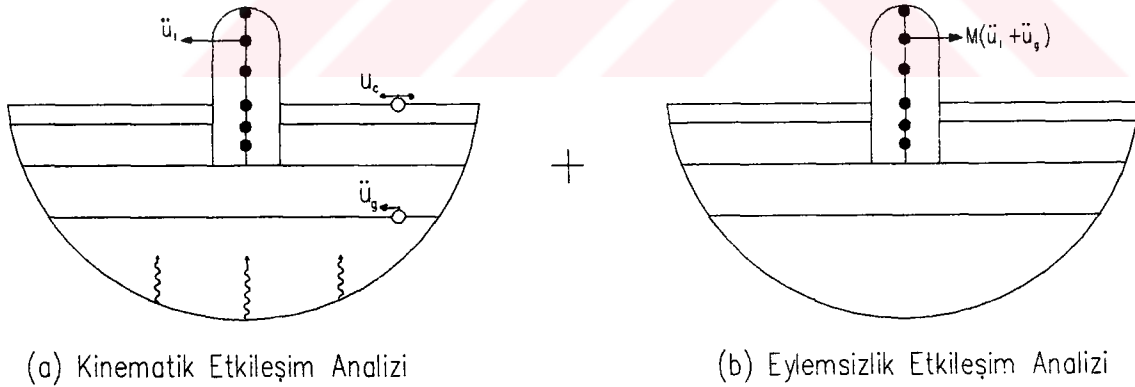
Sonlu elemanlar yardımıyla elde edilen üstyapı-zemin dinamik etkileşimini ifade eden hareket denklemini zamanın veya frekansın fonksiyonu olarak iki şekilde yazabiliriz. Zamana bağlı olarak yapılan çözümlerde hareket denklemini direkt integrasyon veya modal analiz gibi yöntemlerle çözebiliriz. Frekansa bağlı olarak yapılan çözümlerde, hareket denklemini frekansın fonksiyonu olarak çözüp Fourier dönüşümü uygulayarak zamana bağlı değerlere geçilebilir.

2.2.2 Çok Adımlı Çözüm Yöntemleri

Bu yöntemlerin temeli süperpozisyon prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemlerin ışığı altında hesap yaparken, üstyapı-zeminden oluşan sistemi alt sistemlere ayırarak çözüme gitmek, daha sonra elde edilen sonuçları süperpoze etmek çok adımlı çözüm yöntemlerinin temel esasını teşkil etmektedir. Bu yöntemler kullanışlı ve basit bir hesap tarzı oluşturduğundan direkt çözüm yöntemlerine göre daha avantajlı olmaktadır.

• **İki Adımlı Çözüm Yöntemi (Süperpozisyon Prensibi)**

Üstyapı-zemin dinamik etkileşimi iki aşamada incelenmektedir. İlk adımda, yapının belirli bir sönüm ve rijitliğe sahip olduğu buna karşılık kütlesinin olmadığı varsayılmıştır. Kütlelerin toplandığı kat seviyelerindeki ivme değerlerine ilave olarak, taban ivmesi sonucu yapıda oluşan sönüm ve elastik(yay) kuvvetler hesaplanmaktadır. İkinci adımda, ilk adım sonucu bulunan ivme değerlerine taban ivmesini katarak kat hizalarındaki toplam ivme değerleri hesap edilir. Her kat için hesap edilen toplam ivme değeri ile o katın kütlesi çarpılarak atalet kuvvetleri bulunur. İlk adımda herbir kat için bulunmuş olan sönüm ve elastik kuvvetlerine ikinci adımda bulunan atalet kuvvetlerini eklemek suretiyle kat seviyelerindeki toplam dinamik kuvvetler elde edilmiş olur. Her iki adımda da üstyapının rijitliği, zeminin rijitliği ve kütlesi gözönünde tutulmaktadır. Bu yöntemin sonucunda, üstyapı-zemin ortak sistemlerinde etkileşim miktarının ve türünün zeminin rijitliğine, üstyapının rijitlik ve kütlesine bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Üstyapının rijitlik özelliğine bağlı olarak meydana gelen etkileşime *kinematik etkileşim*; üstyapının kütlesi sebebiyle oluşan etkileşime ise *eylemsizlik etkileşimi* denilmektedir.



Şekil 2.1 Kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizleri

• Üç Adımlı Çözüm Yöntemi (Lumped Spring Method)

Bu yöntemi iki adımlı çözüm yönteminin özel bir hali olarak düşünebiliriz. Zemin ortamının rijit olduğu varsayılarak Kausel ve Roesset tarafından aşağıdaki üç aşamalı bir hesap tarzı geliştirilmiştir. [5]

İlk adımda, sismik etki altında kütlesi olmadığı kabul edilen rijit temel plağına ait hareketin belirlenmesi; ikinci adımda, zemin ortamı ile üstyapı arasındaki dinamik etkileşimi ifade edebilmek amacıyla yani zeminin elastik davranışını hesaba katabilmek için yay ve sönüm sabitlerinin (empedans sabitleri) tespit edilmesi ; üçüncü adımda dinamik etki altındaki idealize edilmiş ortak sistemin hesabı yapılarak çözüm yöntemine son verilir. Tanımlanan yay ve sönüm sabitleri (empedans sabitleri) rijit temel plağının geometrisine ve hareketine, zeminin poisson oranına bağlı olarak tablolar halinde Veletsos-Wei tarafından verilmiştir. [1]

• Alt Sistemlere Ayırma Yöntemi (Substructure Method)

Bu yöntemin esası, yapıyı ve zemini birbirinden bağımsız iki matematik model olarak tasarlamaya çalışmaktan ibarettir. Yapıyı alt sistem 1, zemini ve rijit temel plağını alt sistem 2 olarak tanımladığımızda birleşim bölgesindeki etkileşim kuvvetleri, her iki sistemde birbirine eşit zıt yönlü olarak etkimektedir. Alt sistem 2 için yazılan etkileşim kuvvetleri ile yerdeğiştirmeler arasındaki ilişkiyi sağlayan empedans matrisindeki terimler zemin ortamı ile ilgili rijitlik ve sönüm sabitlerini karakterize etmektedir. Bu sabitler, zeminin poisson oranına ve boyutsuz frekans değerine bağlı olarak Veletsos ve Wei tarafından verilmiştir. [1] P_b^* ve U_b^* deprem etkisindeki yapının, zemin ortamı ile temas ettiği bölgedeki kuvveti ve yerdeğiştirmeyi; $X(\omega)$ ise depremin açısıl frekansına bağlı empedans matrisini göstermektedir. Alt sistemlere ayırma yöntemine göre, zemin ortamının yapı üzerindeki etkisini ifade etmek maksadıyla, fiktif $P_b^* + XU_b^*$ kuvvetinin, yapının zemin ile temas ettiği bölgede etkidiği düşünülmektedir. Böylece depremin açısıl frekans değerine bağlı olarak deplasmanlar hesaplanmaktadır.

2.3 KULLANILAN MODELLERİN ELEŞTİRİSİ

Zemini yarı sonsuz ve tek tabakalı ortam olarak modellemenin bazı sakıncaları vardır.

Bunlar şöyle sıralanabilir:

- a) Dinamik özelliklerin zemin içinde noktadan noktaya değişmesi
- b) Dinamik koşullar altında zeminin elastoplastik nitelikte davranması
- c) Çoğu zaman uygulamada olduğu gibi, yapıya ait temelin yüzeysel ve rijit olmayışı

Geliştirilen modeldeki rijitlik ve radyasyon sönümü katsayıları frekansa bağlı olduğundan çözüm frekans alanında yapılmaktadır. Daha sonra invers Fourier dönüşümü uygulanarak zaman alanında çözümler elde edilmektedir. Zemin ortamının sonlu elemanlarla idealleştirilmesi çözüme önemli katkılar sağlamaktadır:

- a) Zeminle ilgili geometri ve yapısı bakımından süreksizliklerin gözönüne alınabilmesi
- b) Yapıya ait temelin rijitliği ile ilgili sınırlamanın olmayışı
- c) Dinamik hareket denklemi zamana bağlıdır. Modların süperpozisyonu yöntemiyle veya zaman alanında adım adım integrasyonla sonuca ulaşılır.
- d) Adım adım integrasyon işlemi sırasında zeminin nonlinear ve elastoplastik davranışı gözönüne alınabilir.

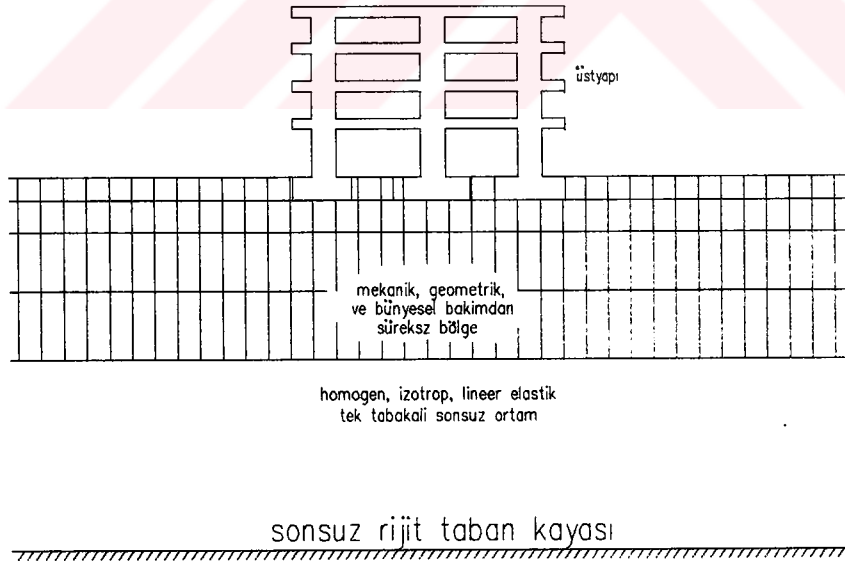
Sonlu elemanlarla idealleştirilen zemin ortamı için ortaya çıkan en önemli eleştiri, zeminin belirli bir bölge ile sınırlandırılmasıdır. Üstyapı-zemin ortak sisteminde bölgeyi sınırlayan kaya ortamı mevcut değilse, belirli bir bölge ile çalışma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu durumun sakıncası olarak, deprem dalgaları ile yapıdan zemin ortamına yayılan dalgaların sınırlı bölgeden yansıması tehlikesi söylenebilir.[6] Sonlu elemanlarla idealleştirilen sistemlerin sakıncaları olarak; zemin ortamının yeterince temsil edilememesi, dalga yayılışı ile ilgili problemin ayrı olarak belirlenmesi ve bunun sonucu olarak çok sayıda sonlu elemanın kullanılması gerekmektedir.

2.4 KULLANILAN MODELLER

- a) Zeminin sınırlı bir bölgesini sonlu elemanlarla, geri kalan kısmını tek tabakalı sonsuz ortam olarak idealleştiren model
- b) Zeminin tümünü tek tabakalı sonsuz ortam olarak idealleştiren model

2.4.1 Zeminin Sınırlı Bir Bölgesini Sonlu Elemanlarla, Geri Kalan Kısımını Tek Tabakalı Sonsuz Ortam Olarak İdealleştiren Model

Zeminin iyi temsil edilebilmesi bakımından çok sayıda sonlu eleman kullanılması gerektiği daha önce belirtilmişti. Bu düşünce ile mümkün olduğu kadar az sayıda sonlu eleman kullanılıp, buna karşın sistemin serbestlik derecesi fazla arttırılmadan, zemin ortamının rijitlik ve eylemsizlik özelliğinin gözönüne alındığı bir matematik model geliştirilmiştir. Bu modelde, şekil(2.2)'de görüldüğü gibi zemin ortamı belirli bir derinliğe kadar sonlu elemanlarla, bu derinlikten itibaren tek tabakalı sonsuz ortam olarak kabul edilmiştir. [6]



Şekil 2.2 Zeminin sınırlı bir bölgesini sonlu elemanlarla, geri kalan kısmını tek tabakalı ortam olarak idealleştiren model

Zemin için önerilen bu modelin idealleştirme açısından sağladığı olanaklar aşağıda açıklanmıştır:

a) Üstyapı-zemin ortak sisteminde, zemin titreşimlerinin önemli bir bölümü deprem etkisiyle meydana gelmektedir. Bu titreşime ek olarak yapıdan gelen etki gözönünde bulundurulur. Bu etki yapıya yakın zemin bölgesinde önemli olduğu, büyük gerilme ve şekil değiştirmelerin bu bölgede olduğu görülmektedir. Bu nedenle yapıya yakın zemin bölgesi sonlu elemanlarla idealize edilerek bazı mekanik ve bünyesel süreksizlikler gözönüne alınmıştır.

b) Deprem sırasında sistemin tümü ile titreşime ek olarak yapının varlığı nedeniyle oluşan titreşimlerin meydana getirdiği şekil değiştirmelerin, yapıdan itibaren belirli derinlikte lineer elastik sınır içinde kalacağı düşünülmektedir.

c) Geliştirilen bu modelde, zemin ortamının yatay doğrultuda yapıya belirli uzaklıkta kesilerek sınırlandırılması mümkündür. Yapının etkisiyle oluşan ek titreşimlerin az olduğu noktaların birleştirilmesiyle bu yatay sınır elde edilmektedir. Bu sınırın yapıdan uzaklığı konusunda kesin bir değer vermek mümkün olmamaktadır.

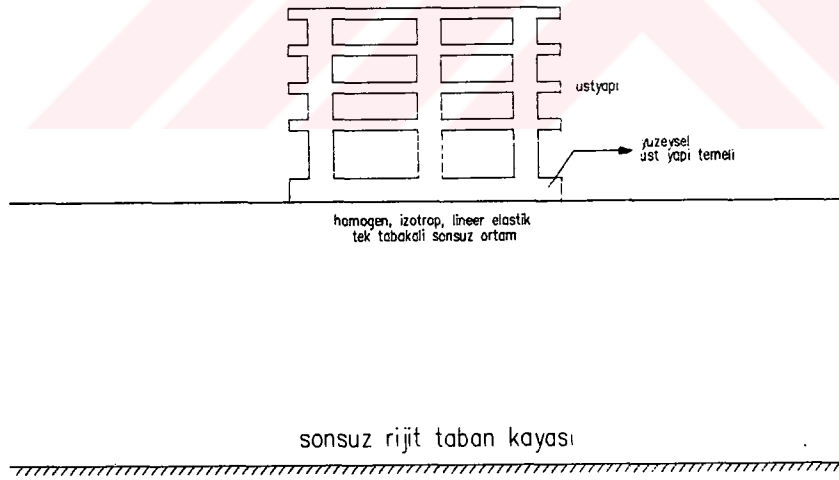
d) Üstyapı-zemin ortak sistemini idealleştirirken ortama yayılan radyasyon enerjisinin bahsedilmiştir. Sonlu eleman modeliyle zemini idealleştirirken bu enerji kaybının tam olarak gözönüne alınamaması, bu yöntemi eleştiri odağı yapmıştır. Yapıdan belirli uzaklıkta radyasyon enerjisi dolayısıyla oluşacağı düşünülen fiktif sönüm kuvvetlerinin, deprem nedeni ile zemin ortamında oluşacak dinamik kuvvetlerin yanında ihmal edilecek kadar küçük olduğundan, radyasyon sönümü sonlu elemanlarla idealize edilen sistemlerde gözönüne alınmamaktadır. Bu enerji kaybı titreşim frekansının büyüklüğüne bağlı olduğundan, makine temellerinin hesabında dikkatle gözönüne alınmalıdır.

e) Dinamik rijitlik matrisinin frekansa bağlı olmasından dolayı, üstyapı-zemin ortak sisteminin deprem hesabının frekans alanında yapılmasını zorunlu kılar. [6,7]

2.4.2 Zeminin Tümünü Tek Tabakalı Sonsuz Ortam Olarak İdealleştiren Model

Deprem sırasında yapı sistemlerinin davranışının tam anlamıyla teorik ve deneysel olarak henüz belirlenememiş olması, birçok basitleştirilmiş modellerin kullanılmasına olanak tanımıştır. Basit modellerle bulunan sonuçlar deneysel verilerle değerlendirilerek gerçeğe yakın çözümlere ulaşılır. Örneğin çerçeve tipi yapıların serbest titreşim hesabında dolgu duvarlarının etkisini gözönüne alan bir çalışma henüz tam anlamıyla yapılamamıştır. Bu sebep ile çerçevenin serbest titreşim hesabında dolgu duvarının etkisi terkedilmekte, modların süperpozisyonu yöntemiyle yapılan deprem hesabında bu etki, bazı amprik faktörlerle gözönüne alınabilmektedir.

Basitleştirilmiş model kullanmanın bir nedeni de sistemin davranışı hakkında fikir sahibi olunmak istenmesidir. Burada, üstyapı-zemin ortak sistemi içinde bir veya birden fazla yapı durumları için sistemin serbest titreşiminin incelenebilmesine olanak tanıyan basit bir model geliştirilmiştir.[6]



Şekil 2.3 Zeminin tümünü tek tabakalı sonsuz ortam olarak idealleştiren model

Şekil (2.3)'de görüldüğü gibi basit bir model olmak üzere, zemini tek tabakalı sonsuz ortam olarak, yapının yüzeysel temel ile zemine oturduğu kabul edilmektedir. Geliştirilen bu model zemin üzerinde birden fazla yapı bulunması durumunu da kapsamaktadır.



BÖLÜM 3

ALT SİSTEMLERE AYIRMA YÖNTEMİ

3.1 GİRİŞ

Üstyapı-zemin ortak sisteminin deprem sırasındaki titreşimi iki tür titreşimin toplamından oluşmaktadır. Birinci tür titreşim, yapının bulunmaması durumundaki deprem nedeniyle zemin ortamındaki titreşimi ifade etmektedir. İkinci tür titreşim, yapının varlığı nedeniyle sistemde birinci tür titreşime ilave olarak meydana gelen ve karşılıklı etkiyi içeren titreşimdir. Bu iki tür titreşime ait deplasmanlar sırayla $[u]^a$ ve $[u]^b$ ise, ortak sisteme ait toplam deplasmanlar $[u] = [u]^a + [u]^b$ şeklinde ifade edilir. Bu bağıntı sadece lineer sistemler için kullanılır. Lineer olmayan sistemlerde, çok küçük şekil değiştirme ve zaman artımlarında sistem lineer olarak davrandığı için toplam deplasmanlara ait ifade tekrar kullanılabilir.

Üstyapı-zemin ortak sisteminin deprem hesabının amacı, $[u]$ toplam deplasmanlarının veya $[u]^b$ ek titreşimlerinin ve bunlara bağlı olarak bazı dinamik büyüklüklerin bulunmasıdır. Deprem verisi olarak, sonlu derinlikteki zemin ortamını sınırlayan sonsuz rijit taban kayasının hareketi düşünülmektedir. Yapının bulunmaması durumundaki deprem nedeniyle zeminde oluşan deplasmanlarla, yapının bulunması durumundaki zeminde oluşan deplasmanları ayırmak mümkün olmadığından toplam deplasmanlarla hesap yapılması gerekmektedir. Bu hesap tarzı ile zeminin lineer olmaması durumu da gözönüne alınabilir.

3.2 GENEL BAĞINTILAR

Üstyapı-zemin ortak sistemin deprem etkisi altındaki hareket denklemi genel olarak,

$$[M]^c [\ddot{u}]^c + [C]^c [\dot{u}]^c + [K]^c [u]^c = [0] \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde $[M]^c, [C]^c, [K]^c$ ortak sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $[u]^c, [\dot{u}]^c, [\ddot{u}]^c$ ise yapının bulunmaması durumundaki yer hareketini de içeren toplam deplasmanları ve zamana göre türevlerini göstermektedir. (3.1) denklemi ayrıntılı bir şekilde düzenlenirse,

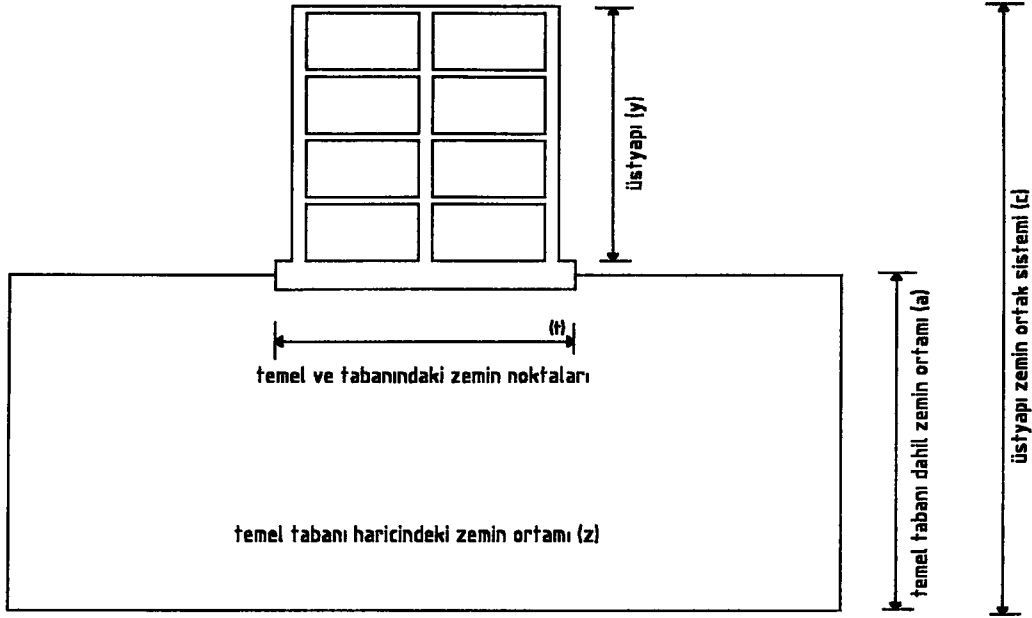
$$\begin{bmatrix} [M]_{zz}^c & [M]_{z\alpha}^c & [0] \\ [M]_{\alpha z}^c & [M]_{\alpha\alpha}^c & [M]_{\alpha y}^c \\ [0] & [M]_{y\alpha}^c & [M]_{yy}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\ddot{u}]_z^c \\ [\ddot{u}]_\alpha^c \\ [\ddot{u}]_y^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C]_{zz}^c & [C]_{z\alpha}^c & [0] \\ [C]_{\alpha z}^c & [C]_{\alpha\alpha}^c & [C]_{\alpha y}^c \\ [0] & [C]_{y\alpha}^c & [C]_{yy}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{u}]_z^c \\ [\dot{u}]_\alpha^c \\ [\dot{u}]_y^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K]_{zz}^c & [K]_{z\alpha}^c & [0] \\ [K]_{\alpha z}^c & [K]_{\alpha\alpha}^c & [K]_{\alpha y}^c \\ [0] & [K]_{y\alpha}^c & [K]_{yy}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u]_z^c \\ [u]_\alpha^c \\ [u]_y^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

elde edilir. Bu denklemdeki $[u]_y^c, [u]_\alpha^c, [u]_z^c$ üstyapı-zemin ortak sisteminde sırasıyla temel dışındaki yapı, temel tabanı ve temel tabanı dışındaki zemin noktalarının toplam deplasmanlarını göstermektedir. Şekil (3.1)'deki yapı, zemine yalnızca temeli dolayısıyla bağlandığından,

$$[M]_{yz} = [M]_{zy}^T = [0]$$

$$[C]_{yz} = [C]_{zy}^T = [0]$$

$$[K]_{yz} = [K]_{zy}^T = [0] \quad \text{olarak alınmıştır.}$$



Şekil 3.1 Denklemlerdeki indisleme işleminin şematik gösterimi

Diğer taraftan yapının bulunmaması durumunda, toplam deplasmanlar cinsinden zemin ortamına ait hareket denklemi,

$$[M]^a[\ddot{u}]^a + [C]^a[\dot{u}]^a + [K]^a[u]^a = [0] \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemdeki “a” indisi altyapı olarak adlandırılan zemin ortamını ifade etmektedir. Zemin ortamında olmak üzere, yapı temelini tabanına rastlayan noktaların toplam deplasmanları ile diğer noktalardaki toplam deplasmanlar birbirlerinden ayrılarak

$$\begin{bmatrix} [M]_{zz}^a & [M]_{zt}^a \\ [M]_{tz}^a & [M]_{tt}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\ddot{u}]_z^a \\ [\ddot{u}]_t^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C]_{zz}^a & [C]_{zt}^a \\ [C]_{tz}^a & [C]_{tt}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{u}]_z^a \\ [\dot{u}]_t^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K]_{zz}^a & [K]_{zt}^a \\ [K]_{tz}^a & [K]_{tt}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u]_z^a \\ [u]_t^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

şeklinde düzenlenebilir. “t” indisi temel tabanına rastlayan zemin noktalarını, “z” indisi diğer zemin noktalarını temsil etmektedir. Zemin-üstyapı ortak sisteminde toplam deplasmanları ifade eden $[u]_z^c, [u]_t^c, [u]_y^c$ kolon alt matrisleri aşağıdaki şekilde kısımlara ayrılabilir:

$$[u]^c = \begin{bmatrix} [u]_z^c \\ [u]_t^c \\ [u]_y^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [u]_z^a + [u]_z^b \\ [u]_t^a + [u]_t^b \\ [u]_y^a + [u]_y^b \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Burada $[u]_t^a$ ve $[u]_z^a$ yapı mevcut değilken, temel tabanı ve temel tabanı dışındaki zemin noktalarında depremin meydana getirdiği toplam deplasmanları; $[u]_t^b, [u]_z^b$ ise bu noktalarda yapının etkisi nedeniyle oluşan ek deplasmanları göstermektedir. $[u]_y^a$ kolon alt matrisi, temel tabanında depremin meydana getirdiği $[u]_t^a$ toplam deplasmanlarından üstyapıya statik anlamda aktarılan, fakat üstyapıda eylemsizlik kuvvetleri meydana getiren kuasi-statik deplasmanları, $[u]_y^b$ ise bu deplasmanlara göre relatif olarak ifade edilen üstyapı dinamik deplasmanlarını göstermektedir. Üstyapıya statik anlamda aktarılan $[u]_y^a$ deplasmanları, eylemsizlik ve sönüm kuvvetlerinin bulunmadığı durum için (3.2) denkleminin üçüncü satırından elde edilir:

$$[K]_{yt}[u]_t^a + [K]_{yy}[u]_y^a = [0] \quad (3.6)$$

$$[u]_y^a = -[K]_{yy}^{-1}[K]_{yt}[u]_t^a \quad (3.6a)$$

elde edilir.

$$[T]_{yt} = -[K]_{yy}^{-1}[K]_{yt} \quad (3.7)$$

(3.6a) ve (3.7) bağıntılarından,

$$[u]_y^a = [T]_{yt}[u]_t^a \quad (3.8)$$

bulunur. Üstyapı-zemin ortak sisteminde temel ve temel tabanındaki zemin deplasmanlarına ilişkin kütle, sönüm ve rijitlik alt matrisleri için

$$[M]_{tt}^c = [M]_{tt}^a + [M]_{tt}^b \quad [C]_{tt}^c = [C]_{tt}^a + [C]_{tt}^b \quad [K]_{tt}^c = [K]_{tt}^a + [K]_{tt}^b \quad (3.9)$$

bağıntıları yazılabilir.

Burada $[M]_{tt}^b, [C]_{tt}^b, [K]_{tt}^b$ üstyapı temelinin katkısını ifade etmektedir. Buraya kadar yazılan bağıntılar, ayrık sistem olarak idealleştirilen zemine ait bağıntılardır. [6]

3.3 ZEMİNİN LINEER ELASTİK OLMASI DURUMU

Zeminin davranışının lineer elastik olması halinde, üstyapının mevcut olup olmaması, zemin ortamına ait kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini etkilemez. O halde,

$$\begin{aligned}
 [M]_{zz}^c &= [M]_{zz}^a & [M]_{za}^c &= [M]_{za}^a & [M]_{tz}^c &= [M]_{tz}^a \\
 [C]_{zz}^c &= [C]_{zz}^a & [C]_{za}^c &= [C]_{za}^a & [C]_{tz}^c &= [C]_{tz}^a \\
 [K]_{zz}^c &= [K]_{zz}^a & [K]_{za}^c &= [K]_{za}^a & [K]_{tz}^c &= [K]_{tz}^a
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

eşitlikleri yazılabilir.

Zemin ortamı lineer elastik olduğuna göre, (3.5), (3.9) ve (3.10) bağıntıları gözönünde tutularak (3.4) denklemi (3.2) denkleminin birinci ve ikinci satırlarından çıkarılarak düzenlenirse,

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} [M]_{zz}^a & [M]_{za}^a & [0] \\ [M]_{tz}^a & [M]_{ta}^c & [M]_{ty} \\ [0] & [M]_{yt} & [M]_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\ddot{u}]_z^b \\ [\ddot{u}]_t^b \\ [\ddot{u}]_y^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C]_{zz}^a & [C]_{za}^a & [0] \\ [C]_{tz}^a & [C]_{ta}^c & [C]_{ty} \\ [0] & [C]_{yt} & [C]_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{u}]_z^b \\ [\dot{u}]_t^b \\ [\dot{u}]_y^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K]_{zz}^a & [K]_{za}^a & [0] \\ [K]_{tz}^a & [K]_{ta}^c & [K]_{ty} \\ [0] & [K]_{yt} & [K]_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u]_z^b \\ [u]_t^b \\ [u]_y^b \end{bmatrix} = \\
 & - \begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] \\ [0] & [M]_{ta}^b & [M]_{ty} \\ [0] & [M]_{yt} & [M]_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\ddot{u}]_z^a \\ [\ddot{u}]_t^a \\ [\ddot{u}]_y^a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] \\ [0] & [C]_{ta}^b & [C]_{ty} \\ [0] & [C]_{yt} & [C]_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{u}]_z^a \\ [\dot{u}]_t^a \\ [\dot{u}]_y^a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] \\ [0] & [K]_{ta}^b & [K]_{ty} \\ [0] & [K]_{yt} & [K]_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u]_z^a \\ [u]_t^a \\ [u]_y^a \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

lineer elastik zemin durumu için üstyapı-zemin ortak sisteminin genel hareket denklemi elde edilir. $[u]_y^a$ 'nın (3.8) deki değeri ve türevleri (3.11) de yerine konulursa,

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} [M]_{zz}^a & [M]_{z\alpha}^a & [0] \\ [M]_{tz}^a & [M]_{t\alpha}^a & [M]_{ty}^a \\ [0] & [M]_{yt}^a & [M]_{yy}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\ddot{u}]_z^b \\ [\ddot{u}]_t^b \\ [\ddot{u}]_y^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C]_{zz}^a & [C]_{z\alpha}^a & [0] \\ [C]_{tz}^a & [C]_{t\alpha}^a & [C]_{ty}^a \\ [0] & [C]_{yt}^a & [C]_{yy}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{u}]_z^b \\ [\dot{u}]_t^b \\ [\dot{u}]_y^b \end{bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} [K]_{zz}^a & [K]_{z\alpha}^a & [0] \\ [K]_{tz}^a & [K]_{t\alpha}^a & [K]_{ty}^a \\ [0] & [K]_{yt}^a & [K]_{yy}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u]_z^b \\ [u]_t^b \\ [u]_y^b \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [0] \\ \{[M]_{t\alpha}^b + [M]_{ty}^a [T]_{yt}\} [\ddot{u}]_t^a \\ \{[M]_{yt}^b + [M]_{yy}^a [T]_{yt}\} [\ddot{u}]_t^a \end{bmatrix} \\
& - \begin{bmatrix} [0] \\ \{[C]_{t\alpha}^b + [C]_{ty}^a [T]_{yt}\} [\dot{u}]_t^a \\ \{[C]_{yt}^b + [C]_{yy}^a [T]_{yt}\} [\dot{u}]_t^a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] \\ \{[K]_{t\alpha}^b + [K]_{ty}^a [T]_{yt}\} [u]_t^a \\ [0] \end{bmatrix} \quad (3.12)
\end{aligned}$$

denkleminde varılır. Üstyapının bulunmaması durumu için bilinen ve temel tabanındaki yer hareketi olarak adlandırılan $[u]_t^a$ ve türevlerine bağlı olarak (3.12) differansiyel denkleminin çözümü ile üstyapının varlığı nedeniyle temel ve temel dışındaki zemin noktalarında oluşan ek deplasmanlar ve üstyapıda meydana gelen relatif deplasmanlar hesap edilmiş olurlar. İstendiği takdirde, (3.5) yardımı ile toplam deplasmanlar da hesaplanabilir. (3.5)'de yeralan $[u]_z^a$ deplasmanları, (3.4) denkleminin zemin için bağımsız olarak çözümü ile; $[u]_y^a$ ise (3.8) bağıntısı ile $[u]_t^a$ deprem deplasmanlarına bağlı olarak elde edilir.

Yukarıdaki (3.12) ifadesinde yeralan ve yer hareketini temsil eden $[u]_t^a$ ile türevlerinin temel boyunca üniform olması zorunluluğu yoktur. Bu durumda, zemin ortamının temele rastlayan kesiminin homojen olmaması nedeniyle deprem kayıtlarının noktadan noktaya değişmesi durumunda (3.12) denklemi aynen geçerlidir.

Üstyapı temeli dışındaki herhangi bir zemin noktasında, deprem kaydını veri olarak (3.12) hareket denkleminde kullanılabilmesi için, temel tabanındaki deplasmanlarla türevlerinin önceden tespit edilmesi gerekir. Bu sebep ile, yapının bulunmaması durumundaki zemin ortamı için hareket denklemi aşağıdaki (3.13) ifadesiyle verilir.

u_j^a : Herhangi bir “j” noktasında belirli bir doğrultuda alınan depreme ait deplasmanı,

$[u]_a^a$: Bu noktanın dışındaki noktalarda oluşan altyapıya ait (temel tabanı dahil zemin ortamı) deplasmanları ifade etmek üzere,

$$\begin{bmatrix} [M]_{aa}^a & [M]_{aj}^a \\ [M]_{ja}^a & M_{jj}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\ddot{u}]_a^a \\ \ddot{u}_j^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C]_{aa}^a & [C]_{aj}^a \\ [C]_{ja}^a & C_{jj}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{u}]_a^a \\ \dot{u}_j^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K]_{aa}^a & [K]_{aj}^a \\ [K]_{ja}^a & K_{jj}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u]_a^a \\ u_j^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Bu denklem, iki denklem olarak açık biçimde yazılır ve u_j^a elenirse (3.13) denklemi yerine

$$[M]_1 [\ddot{u}]_a^a + [C]_1 [\dot{u}]_a^a + [K]_1 [u]_a^a = [q] \quad (3.14)$$

elde edilir. Bu denklemde,

$$[M]_1 = [M]_{aa}^a - \frac{1}{K_{jj}} [K]_{aj}^a [M]_{ja}^a$$

$$[C]_1 = [C]_{aa}^a - \frac{1}{K_{jj}} [K]_{aj}^a [C]_{ja}^a$$

$$[K]_1 = [K]_{aa}^a - \frac{1}{K_{jj}} [K]_{aj}^a [K]_{ja}^a$$

$$[q] = \left\{ \frac{M_{jj}}{K_{jj}} [K]_{aj}^a - [M]_{aj}^a \right\} \ddot{u}_j^a + \left\{ \frac{C_{jj}}{K_{jj}} [K]_{aj}^a - [C]_{aj}^a \right\} \dot{u}_j^a$$

şeklinde ifade edilebilir. (3.14)'ün çözümü ile elde edilen $[u]_a^a$ ve türevlerinden temel tabanına rastlayan noktalara ait olanlar ayrılır, $[u]_t^a$ ve türevleri olarak (3.12) denklemindeki yerlerine konulursa, deprem kaydı açısından ortaya çıkabilecek bu özel durumda da (3.12) genel denklemi ile ifade edilmiş olur.

Genel olarak homojen olmayan zemin ortamında depremin temel tabanı noktaları için bilinmesi durumunda (3.12) denklemi yeterli olmaktadır. Depremin temel dışındaki

nokta için bilinmesi halinde, ayrıca zemin ortamına ait (3.14) denkleminin çözülmesi gerekir. [6]



BÖLÜM 4

EMPEDANS FONKSİYONLARI İLE ÇÖZÜM

4.1 GİRİŞ

Deprem etkilerine maruz kalan yapıların davranışı zemin ortamının deformasyon yapabilme yeteneğine bağlı olarak değişmektedir. Burada üstyapı-zeminden oluşan sistemlerin deprem hesabında dinamik etkileşimi de gözönüne alan bir yöntemin üzerinde durulmuştur. Bu yöntem ile elastik, homojen ve izotrop zemin koşullarında rijit temel plağına oturan çok katlı lineer sistemlerin dinamik davranışı incelenebilmektedir. Zemin ortamının rijit olarak kabul edildiği durumda, yüksek binaların deprem hesabında çok etkili bir yöntem olan *mod süperpozisyonu* yönteminin kullanıldığı bilinmektedir. Mod süperpozisyonu yönteminin temel prensibi genelleştirilmiş koordinatları kullanarak dinamik denge denklemlerinin birbirinden ayrık duruma getirilmesidir. Böylece denklemlerin herbiri tek serbestlik dereceli bir sistemin deprem etkisindeki titreşim denklemlerine benzemektedir. Zemin ortamının rijit olmaması durumunda, dinamik etkileşim meydana geldiğinden klasik mod süperpozisyonuna ait denklemler artık geçerli olmamaktadır. Zeminin lineer elastik olması durumundaki mod şekilleri, rijit zemin olması durumundaki mod şekillerinden farklı olmaktadır. Üstyapı-zemin ortak sistemine ait ilk on mod biçimi Ek B’de verilmiştir. Zemin ile üstyapı arasındaki etkileşim katsayıları dinamik denge denklemleri içinde göze çarpmaktadır. Zemin ve üstyapının birbirlerine olan etkilerini ifade eden empedans fonksiyonlarının boyutsuz açısal frekans değerine bağlı olmasından dolayı, dinamik denge denklemleri frekans alanında yazılmaktadır. Zaman alanındaki sonuçlara geçmek için invers Fourier dönüşümü uygulanmaktadır.

Yukarıda sözü edilen yöntemin, klasik mod süperpozisyonu yönteminden farkı mod şekillerinin empedans fonksiyonlarından etkilenmesini söyleyebiliriz. Daha önce

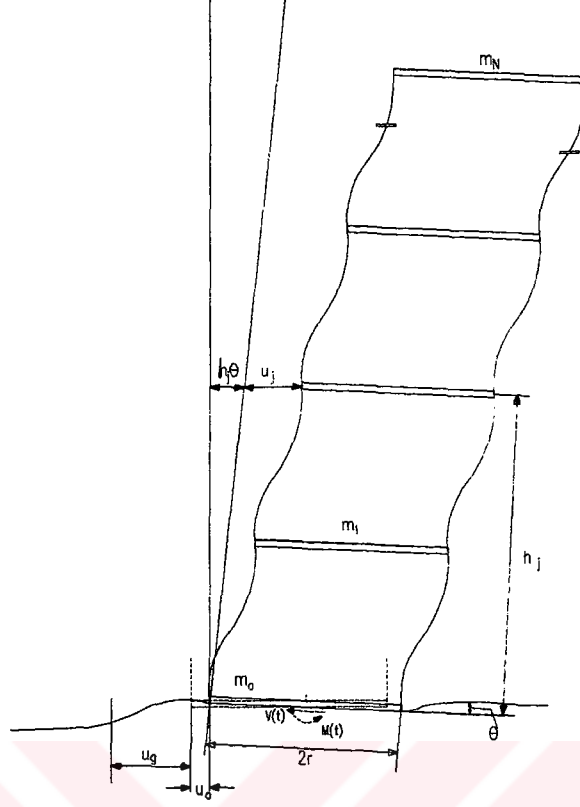
belirtildiği gibi, bu fonksiyonların boyutsuz frekansa dolayısıyla ortak sistemin titreşim frekansına bağlı olması sebebiyle üstyapıda ilave tesirlerin oluşması zemin ortamının etkisi olarak göze çarpmaktadır.

4.2 MATEMATİK MODEL

Üstyapı-zemin ortak sisteminin matematik modeli Jennings ve Bielak tarafından ortaya konmuştur. [8] Kat adedi N olan bir üstyapının temelindeki yatay yerdeğiştirme ve dönme ile birlikte ortak sistemin dinamik serbestlik derecesi $(N+2)$ olarak alınmıştır. Buna göre ortak sistemin matematik modelinin geliştirilmesinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- a) Üstyapıyı kayma çerçevesi olarak idealize ederek, kat ağırlıklarının kat seviyelerinde toplandığı,
- b) Kirişlerin sonsuz rijit olduğu,
- c) Kayma çerçevesinin dairesel rijit bir plağa oturduğu,
- d) Dairesel rijit plağın yeterince ince olduğu,
- e) Zeminin lineer elastik davranış gösterdiği,
- f) Dairesel rijit plağın sadece yatay yerdeğiştirme ve dönme yaptığı,
- g) Kolonların deformasyonu sonucu katlarda yerdeğiştirmelerin meydana geldiği,

Üstyapı-zemin ortak sisteminin yatay yer hareketi etkisi altındaki davranışı şekil (4.1)'de gösterilmiştir. Yer hareketine ile ilgili yerdeğiştirme ve ivme değerleri $u_g(t)$, $\ddot{u}_g(t)$ ile ifade edilmektedir. Herhangi bir kata ait toplam yerdeğiştirme, o katın relatif yerdeğiştirmesiyle dairesel rijit plağın dönmesi ve yatay ötelenmesi sonucu üstyapıda oluşan yerdeğiştirmelerin toplamına eşittir.



Şekil 4.1 Yatay yer hareketi etkisindeki ortak sistemin davranışı

Şekil (4.1)'deki sisteme ait dinamik denge denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$[M][\ddot{u}_t] + [C][\dot{u}] + [K][u] = [0] \quad (4.1a)$$

Üstyapıya ait bu dinamik denkleme ilave olarak yatay ve moment denge denklemleri yazılırsa,

$$\sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_j + m_0 (\ddot{u}_g + \ddot{u}_0) + V(t) = 0 \quad (4.1b)$$

$$\sum_{j=1}^N m_j h_j \ddot{u}_j + I_t \ddot{\theta} + M(t) = 0 \quad (4.1c)$$

$[M]$: Diyagonal kütle matrisi

$[K]$: Üstyapının rijitlik matrisi

$[C]$: Üstyapının sönüm matrisi

u_g : Yatay yer hareketi ile ilgili yatay yerdeğiştirme

u_0 : u_g 'ye ilave olarak temelin yatay yerdeğiştirmesi

θ : Temelin dönmesi

h_j : j nolu katın yüksekliği

u_j^t : j nolu katın toplam yerdeğiştirmesi ($u_j^t = u_g + u_0 + h_j\theta + u_j$)

m_0 : Temelin kütlesi

I_j : j nolu kat seviyesinde toplandığı varsayılan kütlelerin polar atalet momenti.

Tüm kütlelere ait toplam polar atalet momenti : $\sum_{j=0}^N I_j$

$V(t), M(t)$: Temel ile zemin arasındaki taban kesme kuvveti ve eğilme momenti
(Etkileşim kuvvetleri)

(4.1) nolu denklemleri açık olarak yazarsak;

$$[M][\ddot{u}] + [C][\dot{u}] + [K][u] + [M][I]\ddot{u}_0 + [M][h]\ddot{\theta} = -[M][I]\ddot{u}_g(t) \quad (4.2a)$$

$$[I]^T[M][\ddot{u}] + m_t\ddot{u}_0 + L_0'\ddot{\theta} + V(t) = -m_t\ddot{u}_g(t) \quad (4.2b)$$

$$[h]^T[M][\ddot{u}] + L_0'\ddot{u}_0 + I_b\ddot{\theta} + M(t) = -L_0'\ddot{u}_g(t) \quad (4.2c)$$

denklemleri elde edilir.

$$m_t : \text{Temel kütlesi dahil yapının toplam kütlelerini} \quad m_t = \sum_{j=0}^N m_j$$

I_b : Üstyapıya ait tüm kütlelerin temelin ağırlık merkezine göre polar atalet

$$\text{momentlerinin toplamını} \quad I_b = I_t + \sum_{j=0}^N m_j h_j^2$$

$$L_0^T = \sum_{j=1}^N m_j h_j$$

[h] : Kat yüksekliklerini içeren kolon matris

[I] : Birim vektör

Açısal frekansı ω olan sürekli harmonik titreşim sırasındaki etkileşim kuvvetlerini

$V(t) = V e^{i\omega t}$, $M(t) = M e^{i\omega t}$ ve bu kuvvetlerin rijit temel plağında yapmış olduğu yerdeğiştirmeleri $u_0(t) = U_0 e^{i\omega t}$, $\theta(t) = \theta e^{i\omega t}$ şeklinde ifade edersek, bu kuvvetler ile yerdeğiştirmeler arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} V \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{VV}(\omega) & K_{VM}(\omega) \\ K_{MV}(\omega) & K_{MM}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ \theta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

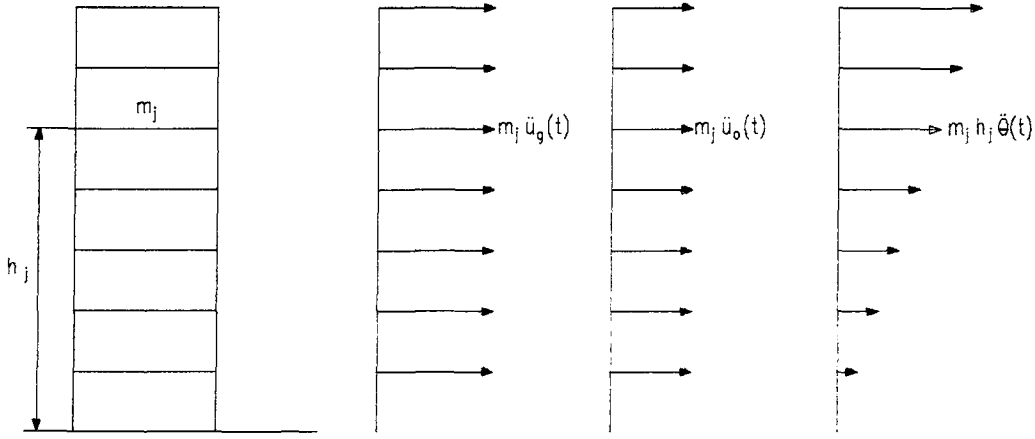
$K_{VV}(\omega)$, $K_{MM}(\omega)$ ve $K_{VM}(\omega)$ katsayılarına *empedans fonksiyonları* denilmektedir. Bu fonksiyonların değerleri boyutsuz frekans değerine, poisson oranına bağlı olarak Veletsos-Wei tarafından verilmiştir. [1] Bu fonksiyonların ifadesi karışık sınır değer probleminin çözülmesi sonucu,

$$\begin{aligned} K_{VV}(\omega) &= (k_{11} + i a_0 c_{11}) K_X \\ K_{MM}(\omega) &= (k_{22} + i a_0 c_{22}) K_\theta \\ K_{VM}(\omega) &= (k_{21} + i a_0 c_{21}) K_X r \end{aligned} \quad (4.4)$$

olarak elde edilmiştir. (4.4) ifadesindeki k ve c , poisson oranına ve boyutsuz frekansa bağlı boyutsuz rijitlik ve sönüm sabitlerini; $a_0 = \omega r / V_s$, V_s zemin ortamındaki kayma dalgası hızını; K_X rijit dairesel plakta yatay doğrultuda birim deplasman meydana getiren yatay statik kuvveti; K_θ rijit dairesel plakta birim dönme meydana getiren statik momenti; r dairesel rijit plağın yarıçapını göstermektedir. Empedans fonksiyonlarının reel ve sanal kısımları mevcuttur. Reel kısım zemin ortamı ile ilgili dinamik rijitlik sabitini, sanal kısım ise yarı sonsuz zemin ortamındaki üstyapıdan zemine aktarılan enerji kaybını temsil etmektedir. Empedans fonksiyonlarındaki rijitlik ve sönüm sabitlerinin frekansa bağlı olması sebebiyle (4.2) nolu denklemlerin geliştirilmiş ifadeleri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}
& (-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])[u(\omega)] - \omega^2[M][I]u_0(\omega) - \omega^2[M][h]\theta(\omega) = -[M][I] \\
& -\omega^2[I]^T[M][u(\omega)] - \omega^2 m_t u_0(\omega) - \omega^2 L_0^T \theta(\omega) + K_{vv}(\omega)u_0(\omega) + K_{vM}(\omega)\theta(\omega) = -m_t \\
& -\omega^2[h]^T[M][u(\omega)] - \omega^2 L_0^T u_0(\omega) - \omega^2 I_b \theta(\omega) + K_{Mv}(\omega)u_0(\omega) + K_{MM}(\omega)\theta(\omega) = -L_0^T
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

şeklinde yazılabilir.(4.5) nolu denklemleri belirli bir frekans değeri için (N+2) adet lineer denklemden oluşmaktadır. Görüldüğü üzere denklem sisteminin bazı katsayıları kompleks terimlerden oluşmaktadır. Bilinmeyen $[u(\omega)], u_0(\omega), \theta(\omega)$ değerlerinin birçok frekans değeri için hesaplanacak olması ve denklemlerin kompleks terimlerden oluşması hesabı oldukça zor hale getirmektedir. Akla gelen ilk yol, ortak sistemin serbestlik derecesinin azaltılması ve bundan sonra hesaba başlamak çözümü oldukça kolaylaştırmaktadır. *Ritz Metodu*'na göre denklem sistemindeki bilinmeyenleri azaltmak amacıyla, üstyapı-zemin ortak sisteminde ilk birkaç modun etkin olduğu düşünülerek, sistemin serbestlik derecesinin azaltılması yoluna gidilmiştir. (4.2a) nolu denklem, $[M][\ddot{u}] + [C][\dot{u}] + [K][u] = -[M][I]\ddot{u}_g(t) - [M][I]\ddot{u}_0(t) - [M][h]\ddot{\theta}(t)$ şeklinde düzenlenirse, denklemin sağ tarafındaki ifadeler yer hareketi, rijit temel plağının yaptığı yatay ve dönme deplasmanları sebebi ile oluşan efektif deprem kuvvetlerini temsil etmektedir. Üstyapı-zemin dinamik etkileşimi sebebi ile oluşan dinamik kuvvetleri, rijit zemine oturan üstyapıya etki eden efektif deprem kuvvetleri şeklinde ifade etmiş oluruz. Rijit temel plağının hareketi sebebi ile oluşan üstyapıya etki eden efektif deprem kuvvetleri zemin ortamının rijit olması halinde sıfır olmaktadır. Böylece yer ivmesi etkisi altındaki üstyapının klasik dinamik denge denkleminde ulaşılır. Bu kuvvetlerin üstyapının yüksekliği boyunca dağılımı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.2 Efektif deprem kuvvetlerinin dağılımı

Ritz Metodu, rijit dairesel plağın üzerindeki yapıya ait mod şekillerinin zemin ortamının varlığı nedeniyle değişmediğini kabul etmiştir. Buna göre üstyapıdaki yerdeğiştirmeler mod şekillerine ve genelleştirilmiş koordinatlara bağlı olarak,

$$[u(t)] = \sum_{n=1}^N Y_n(t) [\phi_n] \quad (4.6)$$

ifadesiyle verilmiş olup, $Y_n(t)$ modal amplitüdü belirtmektedir. Denklemlerin birbirinden bağımsız olmasını sağlamak amacıyla genelleştirilmiş koordinatlar kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} M_n &= [\phi_n]^T [M] [\phi_n] & K_n &= [\phi_n]^T [K] [\phi_n] & L_n^r &= [\phi_n]^T [M] [h] \\ C_n &= [\phi_n]^T [C] [\phi_n] & L_n^h &= [\phi_n]^T [M] [I] \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ritz Metodu'nun sağlamış olduğu kolaylık nedeniyle $(N+2)$ adet denklem yerine $(J < N)$ olmak üzere $(J+2)$ adet denklem kullanılır. L_n^h ve L_n^r n. Moda ait rijit temel plağının yatay hareketi ve dönmesi sonucu oluşan genelleştirilmiş dinamik yükün çarpanlarıdır. İlk birkaç moda ait mod katılım faktörlerinin toplamı önemli olduğundan, L_n^h ve L_n^r nin önemi mod numarasının artması ile azalmaktadır. Bu sebepten dolayı, çok katlı üstyapı zemin ortak sistemlerinde dinamik etkileşim

sırasında hesabı için ilk birkaç mod gözönüne alınmaktadır. (4.6) nolu denklem frekans alanında yazılıp ve (4.7) nolu ifadelerden yararlanılırsa, (4.5) nolu denklemler aşağıdaki forma dönüşür.

$$\begin{aligned}
 M_n(-\omega^2 + 2i\xi_n\omega\omega_n + \omega_n^2)Y_n - \omega^2 L_n^h u_0(\omega) - \omega^2 L_n^r \theta(\omega) &= -L_n^h & n=1,2,\dots,J \\
 -\omega^2 \sum_{n=1}^J L_n^h Y_n(\omega) - \omega^2 m_t u_0(\omega) - \omega^2 L_o^r \theta(\omega) + K_{vv}(\omega)u_0(\omega) + K_{vM}(\omega)\theta(\omega) &= -m_t \\
 -\omega^2 \sum_{n=1}^J L_n^r Y_n(\omega) - \omega^2 L_o^r u_0(\omega) - \omega^2 I_b \theta(\omega) + K_{Mv}(\omega)u_0(\omega) + K_{MM}(\omega)\theta(\omega) &= -L_o^r
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

(4.8) nolu denklemlerden $Y_n(\omega)$, $u_0(\omega)$ ve $\theta(\omega)$ değerleri açısal frekansa bağlı olarak çözülür. Böylece dinamik etkileşim sırasındaki üstyapının ve rijit temel plağının hareketi tespit edilmiş olur. Yukarıda açıklanan yöntem, çok katlı yapıların lineer davranış göstermesi durumunda geçerlidir. [9]

4.3 FOURIER ANALİZİ

Zemin-üstyapı ortak sisteminin dinamik kuvvetler altında titreşim probleminin incelenmesinde Fourier analizi çok önemli yöntemlerden biri olmaktadır. Üstyapının dinamik davranışına etki eden zemin ortamı, problemin asıl kaynağını oluşturmaktadır. Bycroft ve Oien tarafından elde edilen etki (influence) fonksiyonları yardımıyla etkileşim bölgesindeki kuvvetler ve yerdeğiştirmeler depremin açısal frekansına bağlı olarak elde edilebilir. Frekansa bağlı olarak bulunan ifadeleri zaman ortamında belirleyebilmek için invers Fourier dönüşümünden yararlanılır.

4.3.1 Matematik Model

Üstyapı-zemin ortak sisteminin Fourier analizi ile incelenmesinde bazı kabuller yapılmıştır: Üstyapının kayma çerçevesi olarak idealleştirilmesi yani kirişlerin sonsuz rijit olması, zeminin lineer elastik davranması, üstyapının rijit bir plağa oturması, kat seviyelerinde meydana gelen relatif yerdeğiştirmelerin kolonların deformasyonu

sonucu oluşması, rijit plağın sonsuz ince olması bu kabulleri oluşturur. Yöntemin kolay bir şekilde anlaşılması maksadıyla, önce tek katlı bir kayma çerçevesi üzerinde hesap tarzı anlatılmıştır. Çok katlı kayma çerçevesi için ifadeler daha sonra yer verilmiştir.

Tek Katlı Üstyapı İçin Hesap:

Yer hareketini temsil eden fonksiyonun harmonik olması durumunda, zemin ile rijit temel plağı arasında oluşan etkileşim kuvvetleri, rijit plağın yapmış olduğu yatay ve açılmalı deplasmanlar cinsinden ifade edilebilir. Bu ifadeler Oien tarafından çıkarılmış olup, (4.13) denklemi ile verilmiştir. Frekans alanında üstyapı-zemin ortak sisteminin dinamik denge denklemi,

$$[M]\{\ddot{U}(i\omega)\} + [C(i\omega)]\{\dot{U}(i\omega)\} + [K(i\omega)]\{U(i\omega)\} = \{F(i\omega)\} \quad (4.9)$$

şeklinde olup frekansa ve kompleks sayılara bağlı yerdeğiştirme, hız, ivme ve dinamik kuvvet ifadeleri, $\{U(i\omega)\}, \{\dot{U}(i\omega)\}, \{\ddot{U}(i\omega)\}, \{F(i\omega)\}; \{u(t)\}, \{\dot{u}(t)\}, \{\ddot{u}(t)\}, \{f(t)\}$ 'nin Fourier dönüşümlerini göstermektedir. $H_j(i\omega) = U_j(i\omega)/F_j(i\omega)$, transfer fonksiyonu olmak üzere (4.9) nolu denklem yeniden düzenlendiğinde,

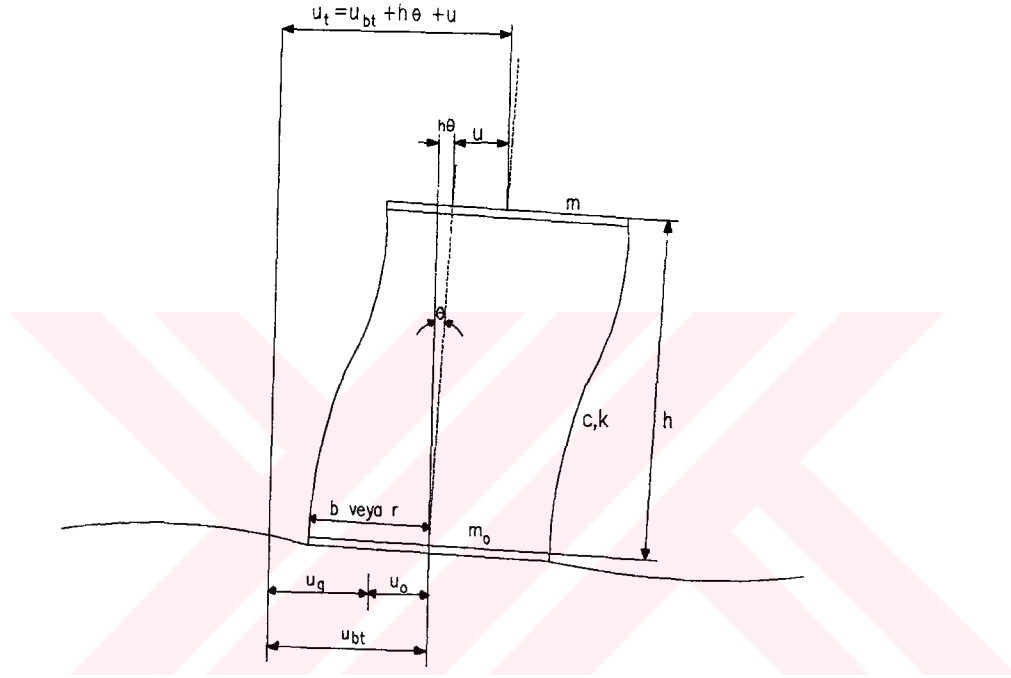
$$[Z(i\omega)]\{H(i\omega)\} = \{1\} \quad (4.10)$$

halini alır. $[Z(i\omega)], \{H(i\omega)\}$ ifadeleri reel ve sanal kısımlara ayrıldıktan sonra (4.10) denklemi açık bir şekilde yazıldığında aşağıdaki denklem elde edilir. Burada $[Z(i\omega)]$ üstyapının dinamik denge ve etkileşim sebebi ile oluşan ilave yatay ve moment denge denklemlerinin Fourier dönüşümlerinin matris formunda yazılması ile elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \text{Re } Z & -\text{Im } Z \\ \text{Im } Z & \text{Re } Z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{Re } H \\ \text{Im } H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

Şekil (4.3)'teki üç serbestlik dereceli sisteme ait denge denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} + m\ddot{u}_t &= m_{\theta} \\ m\ddot{u}_t + m_0\ddot{u}_{bt} &= f_b \\ m\ddot{u}_t + c\dot{u} + ku &= 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$



Şekil 4.3 Yatay yer hareketi etkisindeki tek katlı üstyapının davranışı

m_{θ} ve f_b , etkileşim bölgesindeki moment ve yatay kuvveti; I , tüm sistemin polar atalet momentini; m ve m_0 , katın ve rijit temelin kütlelerini; $u_{bt}=u_g+u_0$; $u_{\theta}=h\theta$; u_0 ve θ dinamik etkileşim sonucu rijit temel plağında meydana gelen yatay ve açısal deplasmanları; $u_t=u_{bt}+h\theta+u$ ise katın toplam yatay deplasmanını göstermektedir. Zemin ortamının üstyapı üzerindeki etkisini göstermek amacıyla Oien tarafından bazı fonksiyonlar tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlara etki (influence) fonksiyonları denir ve zeminin poisson oranına, kayma dalgası hızına bağlı olarak değişirler. [10] Plandaki

boyutları 2b ve d olan dikdörtgen rijit temel plağındaki etkileşim kuvvetleri Oien tarafından bulunmuş olup aşağıdaki denklemler ile verilmiştir:

$$\begin{aligned} M_\theta &= \rho V_s^2 b d (R^{(5)} U_0 + b R^{(7)} \theta) \\ F_b &= \rho V_s^2 d (P^{(5)} U_0 + b P^{(7)} \theta) \end{aligned} \quad (4.13)$$

$R^{(5)}, R^{(7)}, P^{(5)}, P^{(7)}$; Oien etki fonksiyonları zeminin poisson oranına ve boyutsuz frekans değerine göre değişir. ρ , zemin ortamına ait birim hacim kütlelerini gösterir. Bu etki fonksiyonları poisson oranının 0.4 değeri için Oien tarafından verilmiştir. [10]

(4.12) dinamik denge denklemlerindeki deplasmanlara ait türev ifadelerinin yerine Fourier dönüşümleri yazılıp, (4.13) denklemi ile etkileşim kuvvetlerine ait ifadelerin Fourier dönüşümleri (4.12) denklemlerinde yerine konulduktan sonra elde edilen denklemler reel ve sanal kısımlara ayrılarak aşağıdaki denklemlere ulaşılır. Bu denklemlerdeki $\ddot{U}_g(i\omega)$, zaman alanında verilmiş harmonik fonksiyona sahip yer ivmesinin Fourier dönüşümünü; R ve I etki fonksiyonlarının reel ve sanal kısımlarını; λ ve w_r yapının sönüm oranını ve doğal frekansını; $\alpha = m / (m + m_0)$; $\beta_{11} = \rho V_s^2 b^2 d / m h^2$; $\beta_{12} = \rho V_s^2 b d / m h$; $\beta_{22} = \rho V_s^2 d / m$ ve $\eta = 1 + (b / h)^2 / 3\alpha$ ifade etmektedir.

$$\{H\} = \begin{Bmatrix} H_\theta \\ H_0 \\ H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_\theta(i\omega) / \ddot{U}_g(i\omega) \\ U_0(i\omega) / \ddot{U}_g(i\omega) \\ U(i\omega) / \ddot{U}_g(i\omega) \end{Bmatrix} \quad (4.14a)$$

$$[Re Z] = \begin{bmatrix} \omega^2 \eta + \beta_{11} R_R^{(7)} & \omega^2 + \beta_{12} R_R^{(5)} & \omega^2 \\ \alpha(\omega^2 + \beta_{12} P_R^{(7)}) & \omega^2 + \beta_{22} P_R^{(5)} & \alpha \omega^2 \\ \omega^2 & \omega^2 & \omega^2 - \omega_r^2 \end{bmatrix} \quad (4.14b)$$

$$[Im Z] = \begin{bmatrix} \beta_{11} R_I^{(7)} & \beta_{12} R_I^{(5)} & 0 \\ \alpha \beta_{12} P_I^{(7)} & \alpha \beta_{22} P_I^{(5)} & 0 \\ 0 & 0 & -2\omega \omega_r \lambda \end{bmatrix} \quad (4.14c)$$

Bycroft'un varsayımıyla, rijit temel yarıçapı r olan plak olarak alınmıştır. Bu durumda (4.14b) ve (4.14c) denklemleri yerine,

$$[\text{Re } Z] = \begin{bmatrix} \omega^2 \eta_0 - B_1 & \omega^2 & \omega^2 \\ \omega^2 \alpha & \omega^2 - A_1 & \omega^2 \alpha \\ \omega^2 & \omega^2 & \omega^2 - \omega_r^2 \end{bmatrix} \quad (4.14d)$$

$$[\text{Im } Z] = \begin{bmatrix} -\omega B_2 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega A_2 & 0 \\ 0 & 0 & -2\omega \omega_r \lambda \end{bmatrix} \quad (4.14e)$$

denklemleri kullanılır. $\eta_0 = 1 + (r/h)^2 / 4\alpha$; $A_j = (\alpha \overline{A_j}) / m$; $B_j = \overline{B_j} / (mh^2)$

$\overline{A_j}, \overline{B_j}$: Bycroft'a göre frekansa bağlı etkileşim katsayılarını gösterir.

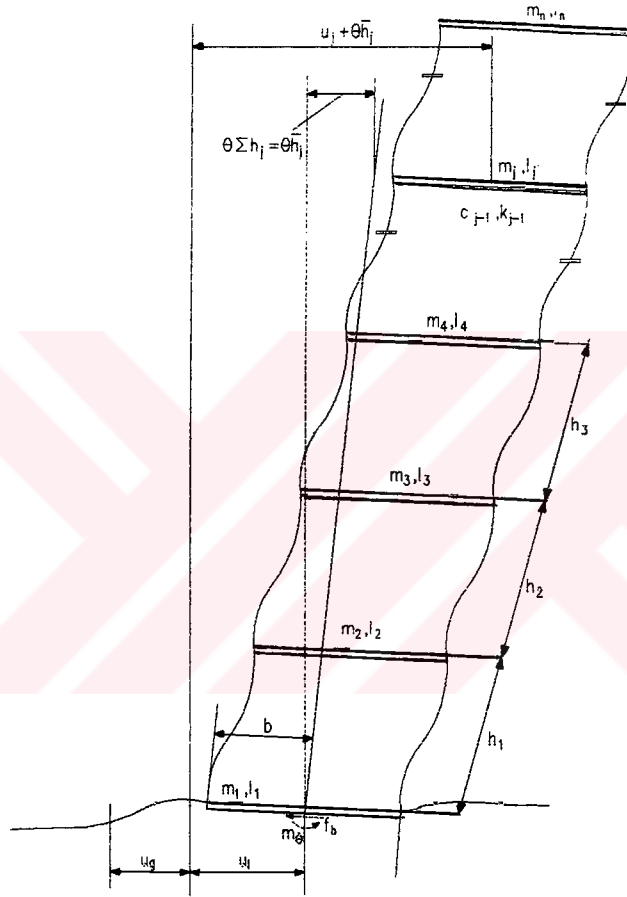
(4.14) denklemleri yardımıyla transfer fonksiyonları bulunduktan sonra verilen bir deprem kaydı için (4.14a) denklemini kullanarak aranan yerdeğiştirmelerin Fourier dönüşümleri $U_\theta(i\omega), U_o(i\omega), U(i\omega)$ bulunur. Bu yerdeğiştirmelere invers Fourier dönüşümü uygulanarak zaman alanındaki ifadeler geçilebilir.

Çok Katlı Üstyapı İçin Hesap:

Zemin-üstyapı ortak sisteminin dinamik hesabında üstyapının çok katlı olması halinde sistemi idealleştirebilmek için yapılan kabuller, tek katlı üstyapı için yapılanların aynısıdır. İdealize edilmiş sistemle ilgili büyüklükler Şekil (4.4) 'de verilmiştir. Burada k_j , c_j j nolu katın rijitlik ve sönüm sabitlerini ; h_j , j nolu katın yüksekliğini ; $\overline{h_j} = \sum_{i=1}^{j-1} h_i$; θ, u_1 rijit temel plağın dinamik etkileşim süresince yaptığı açısall ve yatay

deplasmanları ; u_g yatay yer hareketini ; $\overline{h_j}\theta$, rijit plağın dönmesinden dolayı j nolu katın yaptığı yatay yerdeğiştirmeyi ; u_1 , rijit plağın merkezinin referans düzlemine göre yaptığı yatay yerdeğiştirmeyi göstermektedir.

Tek katlı üstyapının hesabı için izlenen yol, çok katlı üstyapıların hesabı için de geçerli olup ifadelerin genelleştirilmiş şekli aşağıda verilmiştir. Yöntem genel olarak izah edilmek istendiğinde, (4.11) nolu denklemi kullanarak üstyapıya ait transfer fonksiyonları bulunduğundan sonra (4.14a) nolu denklem yardımıyla üstyapının aranan yerdeğiştirmeleri frekans alanında elde edilir. Zaman alanındaki yerdeğiştirme ifadelerine ters Fourier dönüşümü uygulanarak geçilir. [11]



Şekil 4.4 Yatay yer hareketi etkisindeki çok katlı üstyapının davranışı

Çok katlı üstyapıların dinamik hareket denklemleri:

$$\frac{\ddot{\theta} \left(\sum_1^n I_j + \sum_2^n m_j \bar{h}_j^2 \right)}{m_n} + \ddot{u}_g \sum_2^n \frac{m_j \bar{h}_j}{m_n} + \sum_2^n \left(\frac{m_j \bar{h}_j}{m_n} \right) \ddot{u}_j = \frac{m_\theta(t)}{m_n} \quad (4.15a)$$

$$\ddot{u}_g + \ddot{u}_1 + \frac{k_1}{m_1}(u_1 - u_2) + \frac{c_1}{m_1}(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) = \frac{f_b(t)}{m_1} \quad (4.15b)$$

$$h_j \ddot{\theta} + \ddot{u}_g + \ddot{u}_j + \frac{k_{j-1}}{m_j}(u_j - u_{j-1}) + \frac{k_j}{m_j}(u_j - u_{j+1}) + \frac{c_{j-1}}{m_j}(\dot{u}_j - \dot{u}_{j-1}) + \frac{c_j}{m_j}(\dot{u}_j - \dot{u}_{j+1}) = 0 \quad 2 \leq j \leq n-1 \quad (4.15c)$$

$$\ddot{u}_g + \ddot{u}_n + \frac{k_{n-1}}{m_n}(u_n - u_{n-1}) + \frac{c_{n-1}}{m_n}(\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1}) = 0 \quad (4.15d)$$

(4.15a), (4.15b) denklemleri rijit temelin dönme ve yatay hareketini; (4.15c),(4.15d) denklemleri ise j ve n nolu katın yatay hareketini temsil etmektedir.

(4.15) denklemlerinde: (1) $\alpha_j = m_j / m_n$; $\gamma_j = k_j / k_{n-1}$; $\omega_T^2 = k_{n-1} / m_n$; λ sönüm oranı $I_j = m_j b^2 / 3$ olarak tanımlanırsa ; (2)Etkileşim kuvvetlerinin Fourier dönüşümleri olan M_θ ve F_b yukarıdaki denklemlere yerleştirilirse ; (3)Dinamik denge denklemlerindeki deplasman ve türevlerinin Fourier dönüşümleri yerlerine konulup, bilinmeyen deplasmanlara ait transfer fonksiyonları paranteze alınırsa; (4)Elde edilen denklemler reel ve sanal kısımlara ayrılırsa ,

$$\begin{bmatrix} \text{Re} Z & -\text{Im} Z \\ \text{Im} Z & \text{Re} Z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{Re} H \\ \text{Im} H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.16)$$

denkleminde ulaşılır. Transfer fonksiyonları,

$$\begin{Bmatrix} H_\theta \\ H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \theta / \ddot{u}_g \\ U_1 / \ddot{u}_g \\ U_2 / \ddot{u}_g \\ \vdots \\ U_n / \ddot{u}_g \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

şeklinde dir. $[\text{Re} Z]$ ve $[\text{Im} Z]$ kare matrislerinin boyutları $(n+1)$ olup aşağıda verilmiştir:

$$[\text{Re}Z] = \begin{bmatrix} \text{Re}z_{\theta,\theta} & \text{Re}z_{\theta,1} & \text{Re}z_{\theta,n} \\ \text{Re}z_{j,\theta} & \text{Re}z_{j,1} & \text{Re}z_{j,n} \\ \text{Re}z_{n,\theta} & \text{Re}z_{n,1} & \text{Re}z_{n,n} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\text{Re}z_{\theta,\theta} = \frac{\omega^2}{L} \left(\frac{b^2}{3} \sum_1^n \alpha_j + \sum_2^n \alpha_j \overline{h_j^2} \right) + \frac{\rho V_s^2 b^2 d}{m_n L} R_R^{(7)}; \quad L = \sum_2^n \alpha_j \overline{h_j}$$

$$\text{Im}z_{\theta,\theta} = \frac{\rho V_s^2 b^2 d R_I^{(7)}}{m_n L}; \quad \text{Re}z_{\theta,1} = \frac{\rho V_s^2 b d}{m_n L} R_R^{(5)}$$

$$\text{Im}_{\theta,1} = \frac{\rho V_s^2 b d}{m_n L} R_I^{(5)}; \quad \text{Re}z_{\theta,k} = \frac{\omega^2 \alpha_k \overline{h_k}}{L} \quad 2 \leq k \leq n$$

$$\text{Re}z_{1,\theta} = \frac{\rho V_s^2 b d R_R^{(5)}}{\alpha_1 m_n}; \quad \text{Im}z_{1,\theta} = \frac{\rho V_s^2 b d R_I^{(5)}}{\alpha_1 m_n}$$

$$\text{Re}z_{1,1} = \omega^2 + \frac{\rho V_s^2 d P_R^{(5)}}{\alpha_1 m_n} - \frac{\omega_T^2 \gamma_1}{\alpha_1};$$

$$\text{Im}z_{1,1} = \frac{\rho V_s^2 d P_I^{(5)}}{\alpha_1 m_n} - 2\lambda\omega\omega_T \left(\frac{\gamma_1}{\alpha_1} \right)^{0.5}; \quad \text{Re}z_{1,2} = \frac{\omega_T^2 \gamma_1}{\alpha_1};$$

$$\text{Im}z_{1,2} = 2\lambda\omega\omega_T \left(\frac{\gamma_1}{\alpha_1} \right)^{0.5}; \quad \text{Re}z_{j,\theta} = \omega^2 \overline{h_j}; \quad \text{Re}z_{j,j-1} = \frac{\omega_T^2 \gamma_{j-1}}{\alpha_j};$$

$$\text{Im}z_{j,j-1} = 2\lambda\omega\omega_T \frac{(\gamma_{j-1} \alpha_{j-1})^{0.5}}{\alpha_j}; \quad \text{Re}z_{j,j} = \omega^2 - \frac{\omega_T^2 (\gamma_j + \gamma_{j-1})}{\alpha_j};$$

$$\text{Im } z_{j,j} = -2\lambda\omega\omega_T \left[\frac{(\gamma_j \alpha_j)^{0.5} + (\gamma_{j-1} \alpha_{j-1})^{0.5}}{\alpha_j} \right]; \quad \text{Re } z_{j,j+1} = \omega_T^2 \frac{\gamma_j}{\alpha_j};$$

$$\text{Im } z_{j,j+1} = 2\lambda\omega\omega_T \frac{(\gamma_j \alpha_j)^{0.5}}{\alpha_j}; \quad 2 \leq j \leq n-1; \quad \text{Re } z_{n,\theta} = \omega^2 \overline{h_n};$$

$$\text{Re } z_{n,n-1} = \omega_T^2 \gamma_{n-1}; \quad \text{Im } z_{n,n-1} = 2\lambda\omega\omega_T \frac{(\alpha_{n-1})^{0.5}}{\alpha_n};$$

$$\text{Re } z_{n,n} = \omega^2 - \omega_T^2 \gamma_{n-1}; \quad \text{Im } z_{n,n} = -2\lambda\omega\omega_T \frac{(\alpha_{n-1})^{0.5}}{\alpha_n} \quad (4.19)$$

(4.19) denklemlerindeki $P^{(5)}, P^{(7)}, R^{(5)}, R^{(7)}$ değerleri boyutsuz frekans ve poisson oranına bağlı olup, Oien etkileşim fonksiyonları adını alır. [11]

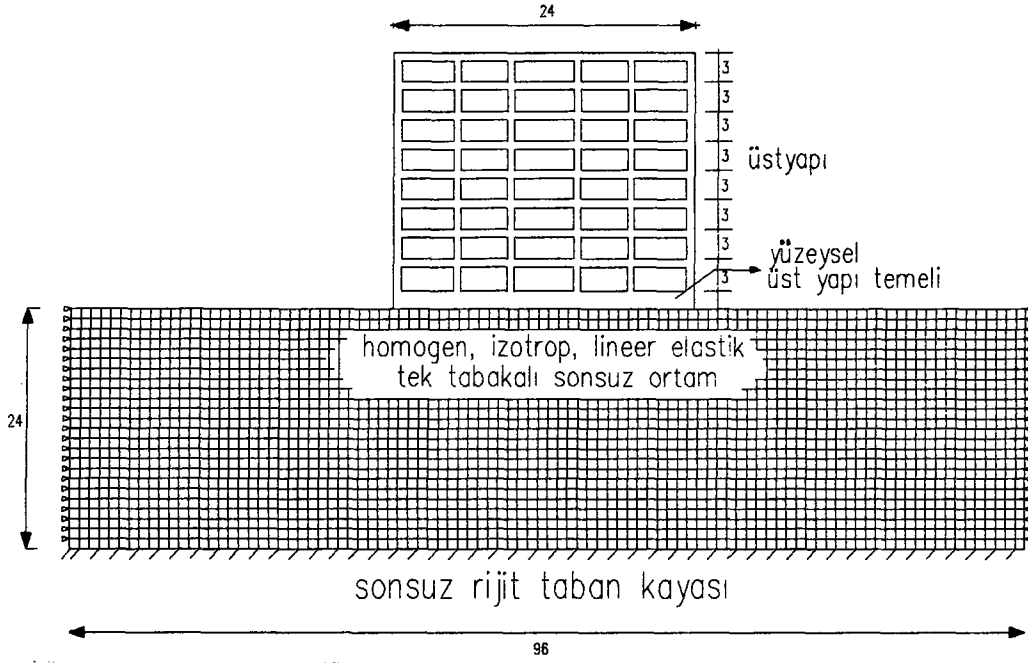
BÖLÜM 5

SAYISAL ÖRNEK

5.1 ÜSTYAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNE AİT BİR ÖRNEK

Bu sayısal örnekte, bir üstyapı ile zeminden oluşan ortak sistemin birim genlikli harmonik yer ivmesi ($\ddot{u}_g(t) = 1 \cdot \sin \omega t$) etkisi altındaki titreşimi incelenmiştir. Şekil 5.1’de verilen örnekte, üstyapı sistemi sabit tutularak farklı zemin koşulları için ortak sistemin titreşim frekansları tayin edilmiştir. Ayrıca, 0-100 rad/s’lik bir frekans bölgesinde, ortak sistem harmonik yer hareketi ile titreştirilerek, sekizinci katın yatay deplasmanı ile zemin kat kolonunun uç kuvvetlerinin bu bölgedeki değişimi elde edilmiştir. Rezonans durumunda dinamik büyüklüklerin sonsuza gitmesini önlemek maksadı ile sadece üstyapıda yapısal nitelikte küçük bir sönümün bulunduğu kabul edilmiş ve hesapların tümünde yapısal sönüm oranı olarak 0.05 alınmıştır. Hesaba katılması gereken yeterli titreşim modu sayısı olarak, gözönüne alınan birbirine dik yatay deprem doğrultularında her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütlelerinin %90’ından daha az olmaması kuralına riayet edilerek tespit edilmiştir.

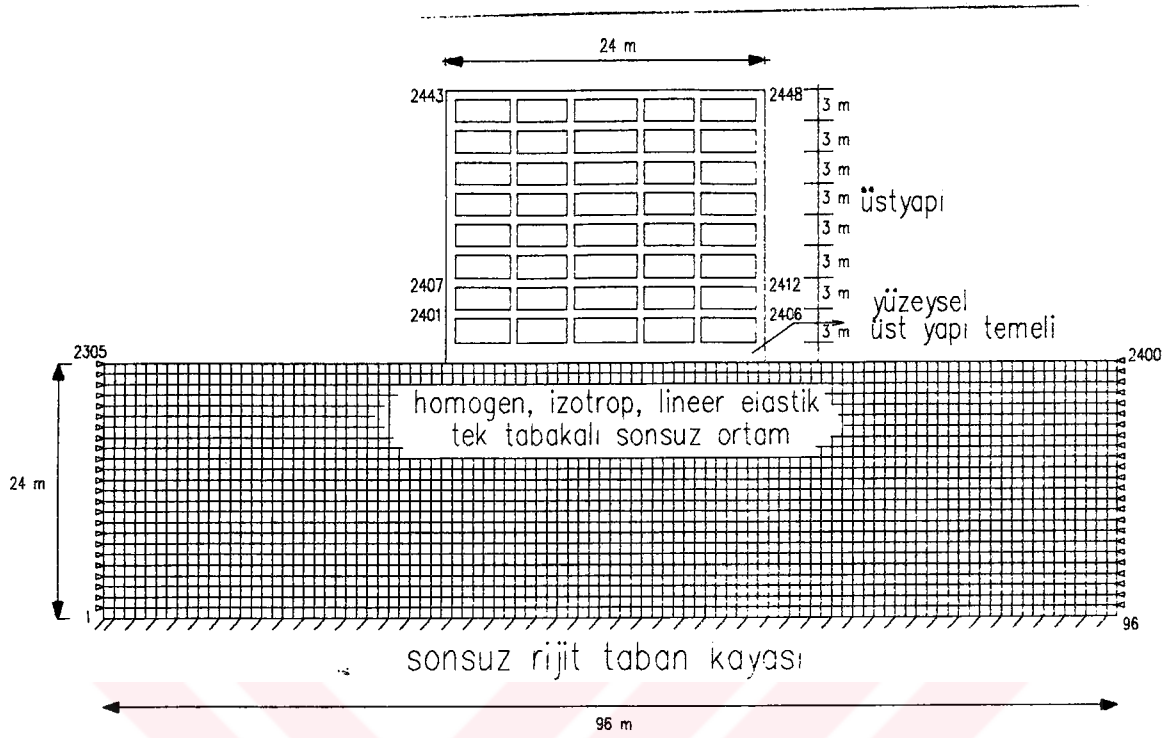
Aşağıdaki şekilden görüldüğü üzere, üstyapının temelden itibaren ölçülen yüksekliği ve taban genişliği 24m’dir. Altı değişik zemin durumu için hesap yapılmıştır. Gözönüne alınan zeminlerin kayma dalgası hızları sırasıyla, 100; 200; 400; 800; 1000 ve 5000 m/s’dir. Bütün zemin gruplarının poisson oranı 1/3 olarak alınmıştır.



Şekil 5.1 Üstyapı-zemin ortak sistemi

Gözönüne alınan altı zemin türü için, üstyapının zemin kat kolonuna ait kesme kuvvetinin ve eğilme momentinin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 5.2-Şekil 5.7 ve Şekil 5.16-Şekil 5.21’de görülmektedir. Zeminin sonsuz rijit olması durumunda zemin kat kolonuna ait kesme kuvvetinin ve eğilme momentinin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 5.8 ve Şekil 5.22’de verilmiştir.

Üstyapının sekizinci katına ait yatay yerdeğiştirmelerin frekansa bağlı olarak değişimi ise Şekil 5.9-Şekil 5.14’de gösterilmiş olup, zeminin sonsuz rijit olması durumu halinde yerdeğiştirmelerin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 5.15’de verilmiştir. Sekizinci katın yatay yerdeğiştirmesi ilgili değerler toplam yerdeğiştirmeyi ifade etmektedir. Yani zemin ortamının yapmış olduğu deplasmanlar sekizinci katın deplasmanları içinde gözönüne alınmıştır.



Şekil 5.1 Üstyapı-zemin ortak sistemi

Gözönüne alınan altı zemin türü için, üstyapının zemin kat kolonuna ait kesme kuvvetinin ve eğilme momentinin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 5.2-Şekil 5.7 ve Şekil 5.16-Şekil 5.21’de görülmektedir. Zeminin sonsuz rijit olması durumunda zemin kat kolonuna ait kesme kuvvetinin ve eğilme momentinin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 5.8 ve Şekil 5.22’de verilmiştir.

Üstyapının sekizinci katına ait yatay yerdeğiştirmelerin frekansa bağlı olarak değişimi ise Şekil 5.9-Şekil 5.14’de gösterilmiş olup, zeminin sonsuz rijit olması durumu halinde yerdeğiştirmelerin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 5.15’de verilmiştir. Sekizinci katın yatay yerdeğiştirmesi ilgili değerler toplam yerdeğiştirmeyi ifade etmektedir. Yani zemin ortamının yapmış olduğu deplasmanlar sekizinci katın deplasmanları içinde gözönüne alınmıştır.

5.2 SİSTEMİN KARAKTERİSTİKLERİ

Üstyapı-zemin ortak sisteminin titreşim frekanslarının zemin ortamına bağlı olarak değişimi tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Üstyapı-zemin ortak sisteminin titreşim frekansları (rad/s)

MOD SAYISI	KAYMA DALGASI HIZI (m/s)					
	100	200	400	800	1000	5000
1	8.118	11.023	11.266	11.315	11.319	11.327
2	11.404	17.484	30.330	30.907	30.932	30.969
3	11.664	23.402	35.287	54.610	54.762	54.890
4	13.592	27.094	46.862	69.705	82.932	84.094
5	13.720	27.231	54.331	84.284	88.268	111.078
6	15.373	30.728	54.708	93.163	111.923	152.857
7	16.620	30.869	58.056	108.736	115.243	176.806
8	17.917	35.756	62.314	114.878	135.910	189.989
9	19.023	37.330	69.146	119.294	146.601	216.247
10	21.504	41.375	73.695	129.490	156.284	237.544
11	24.145	47.276	77.312	150.892	185.838	425.879
12	30.016	59.273	98.444	154.950	189.903	438.440
13	33.322	60.919	103.663	192.940	250.383	505.011
14	45.301	83.875	146.131	236.640	254.092	646.783
15	46.033	90.619	159.760	318.811	399.096	831.899

Yukarıdaki tablodan görüldüğü üzere, zeminin kayma dalgası hızının artması ile üstyapı-zemin ortak sisteminin serbest titreşim frekanslarının büyüdüğü anlaşılmaktadır.

Tablo 5.2 Kolonların kesit özellikleri

KAT NO	ALAN(m ²)	ATALET MOMENTİ(m ⁴)		BİRİM BOY AĞIRLIĞI (kN/m)	KAYMA ALANI (m ²)
		I33	I22		
1	0.280	0.373E-02	0.114E-01	7.000	0.2330
2	0.280	0.373E-02	0.114E-01	7.000	0.2330
3	0.165	0.124E-02	0.416E-02	4.125	0.1380
4	0.165	0.124E-02	0.416E-02	4.125	0.1380
5	0.100	0.521E-03	0.133E-02	2.500	0.0833
6	0.100	0.521E-03	0.133E-02	2.500	0.0833
7	0.075	0.391E-03	0.563E-03	1.875	0.0625
8	0.075	0.391E-03	0.563E-03	1.875	0.0625

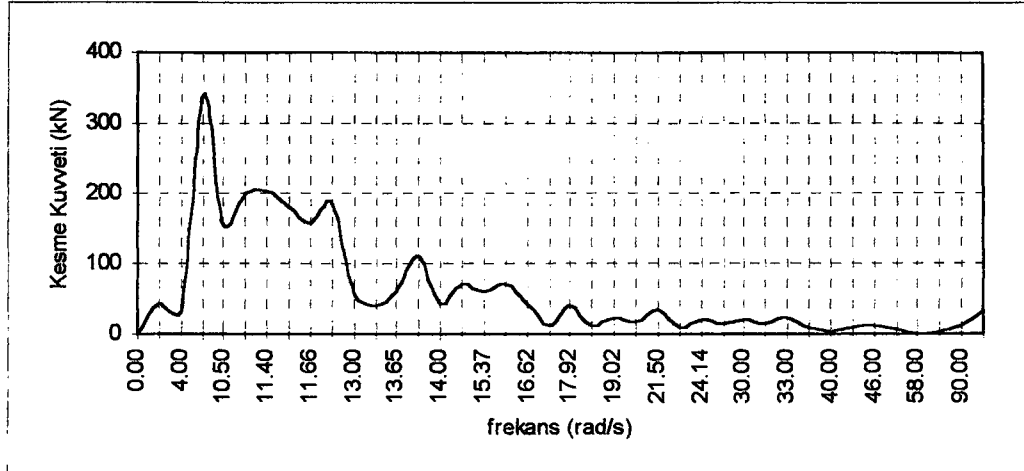
Tablo 5.3 Kirişlerin kesit özellikleri

KAT NO	ALAN (m ²)	ATALET MOMENTİ(m ⁴)		BİRİM BOY AĞIRLIĞI (kN/m)	KAYMA ALANI (m ²)
		I33	I22		
1-8	0.900E-01	0.675E-03	0.675E-03	2.250	0.750E-01

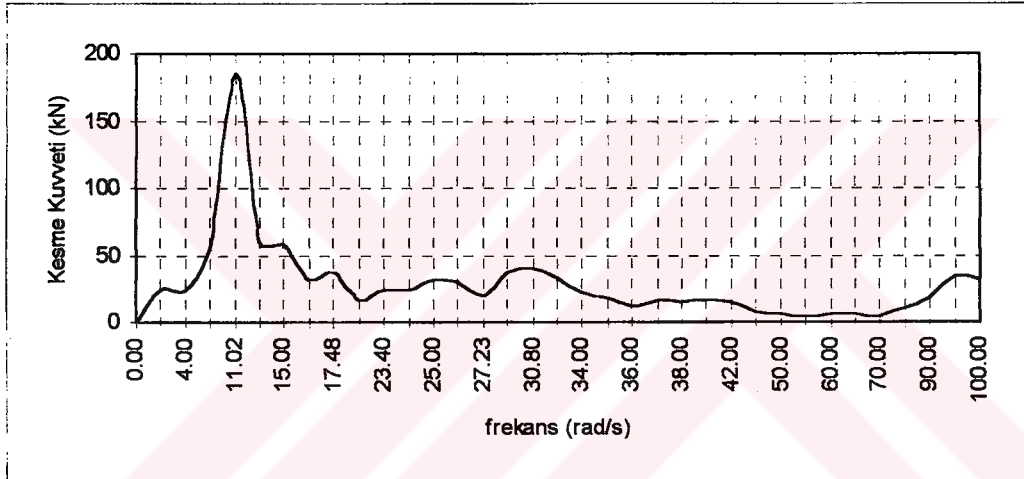
Tablo 5.4 Zemine ait özellikler (poisson oranı 1/3)

KAYMA DALGASI HIZI (m/s)	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (kN/m ³)	KAYMA MODÜLÜ(G) (kN/m ²)	ELASTİSİTE MODÜLÜ (kN/m ²)
100	18	18350	48933.33
200	19	77470	206592
400	20	326197.75	869860.70
800	21	1370030.60	3653415
1000	21	2140672.80	5708460
5000	21	53516819.60	142711519

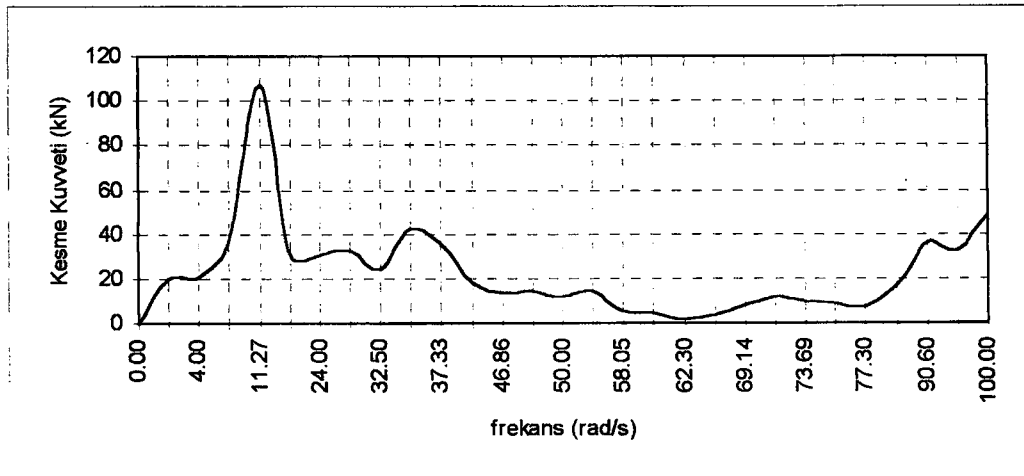
$$\text{Kayma Dalgası Hızı} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$



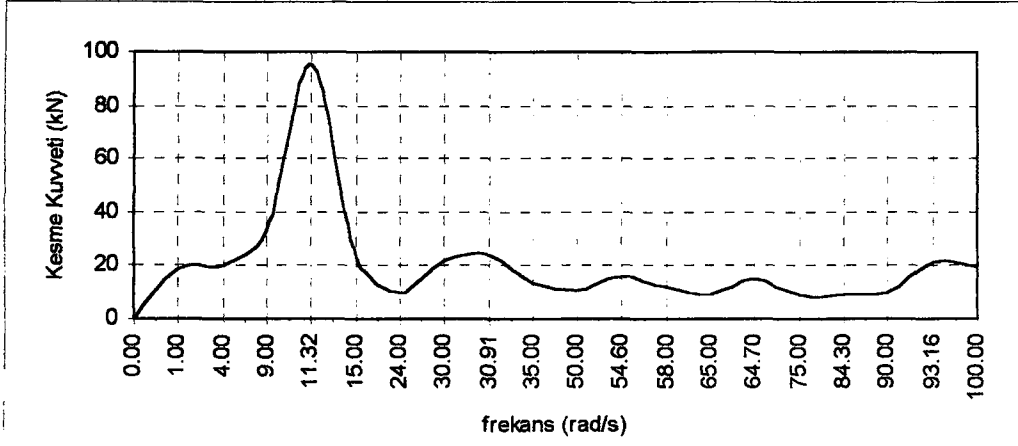
Şekil 5.2 Kayma dalgası hızı 100 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi



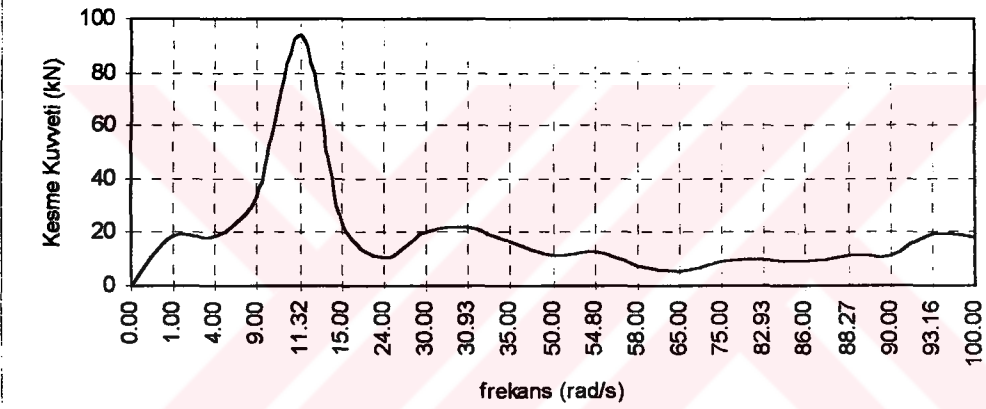
Şekil 5.3 Kayma dalgası hızı 200 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi



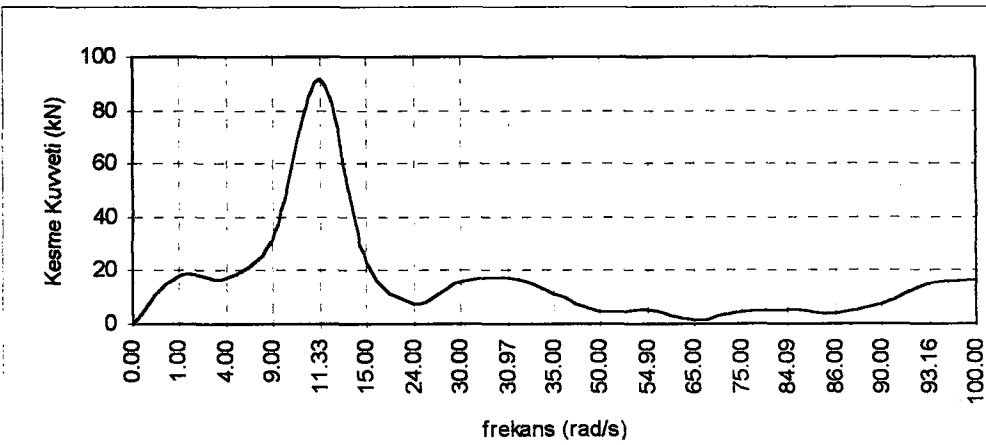
Şekil 5.4 Kayma dalgası hızı 400 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi



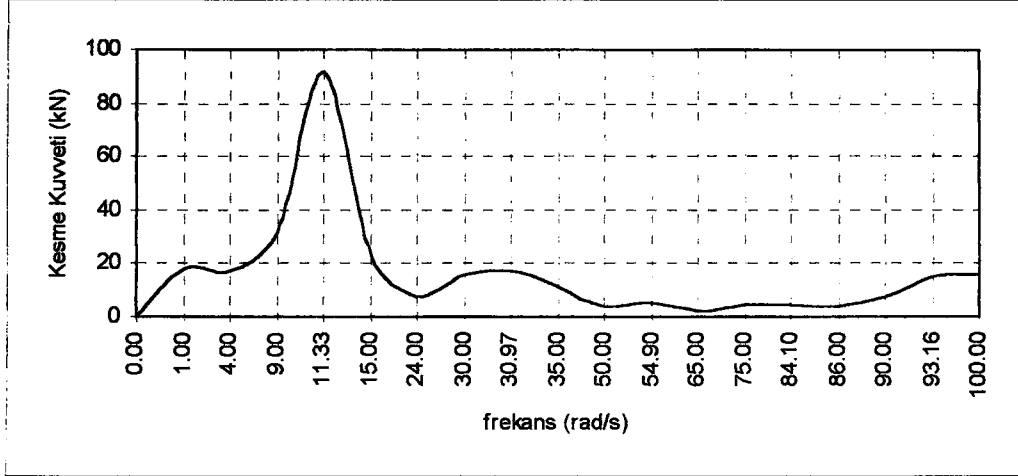
Şekil 5.5 Kayma dalgası hızı 800 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi



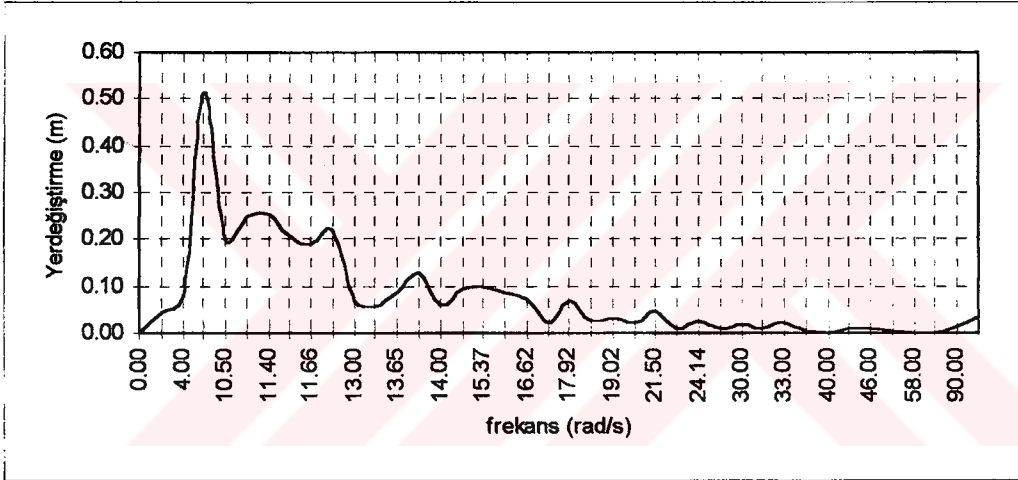
Şekil 5.6 Kayma dalgası hızı 1000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi



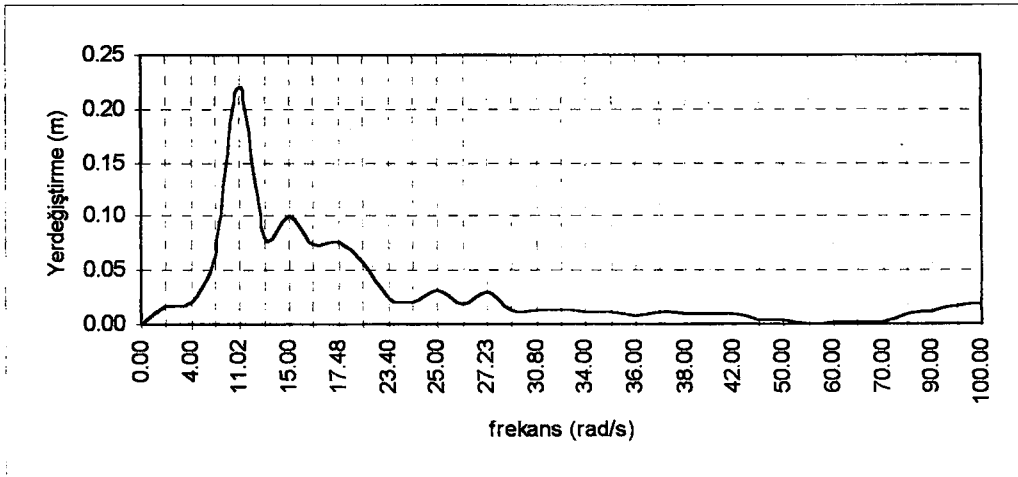
Şekil 5.7 Kayma dalgası hızı 5000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi



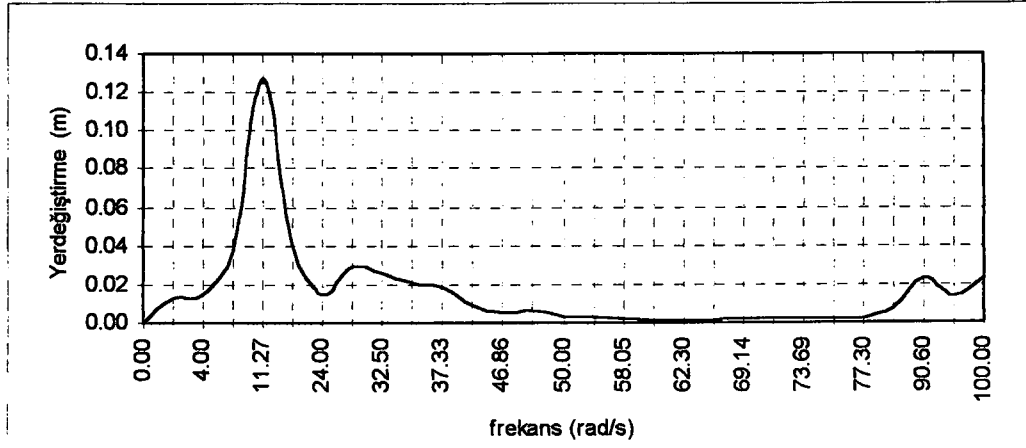
Şekil 5.8 Zeminin rijit olması durumu için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun kesme kuvveti-frekans eğrisi



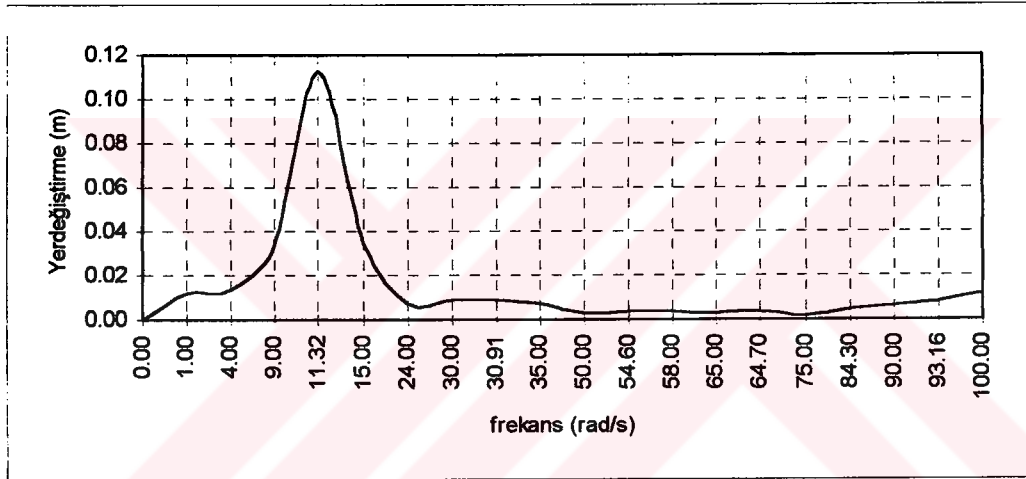
Şekil 5.9 Kayma dalgası hızı 100 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi



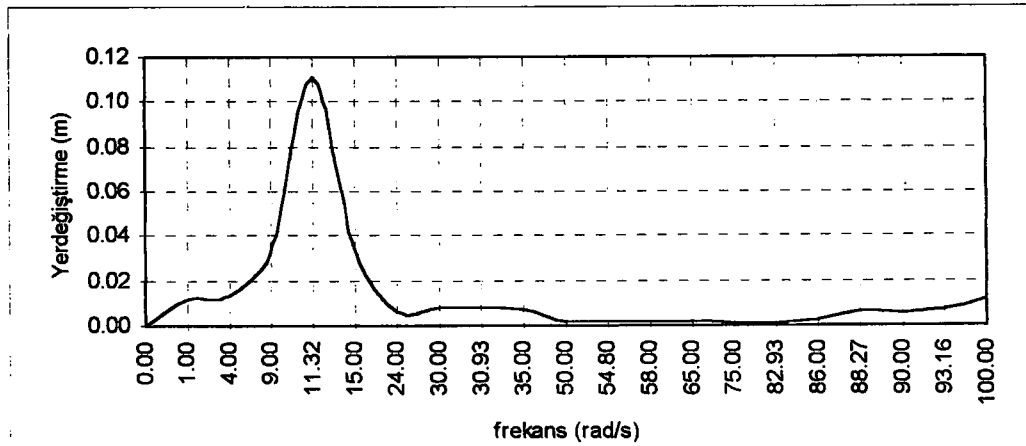
Şekil 5.10 Kayma dalgası hızı 200 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi



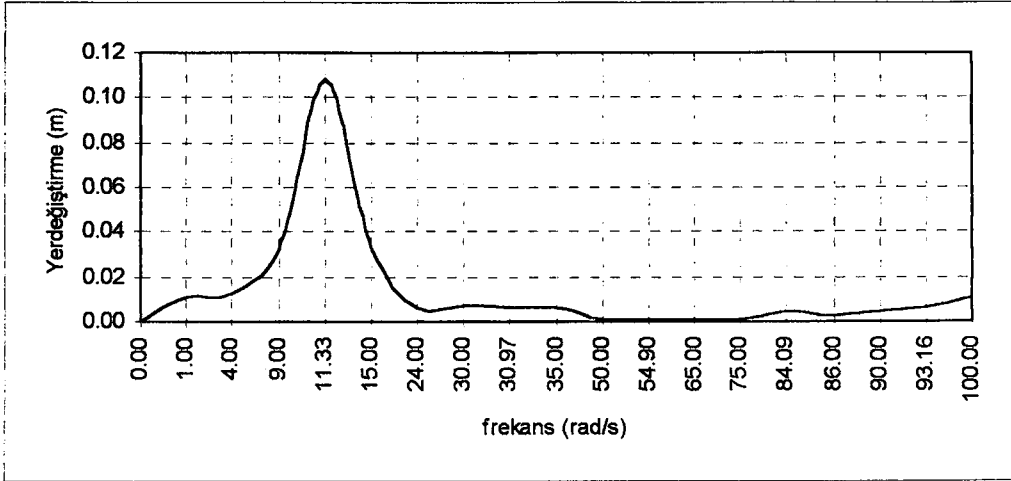
Şekil 5.11 Kayma dalgası hızı 400 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi



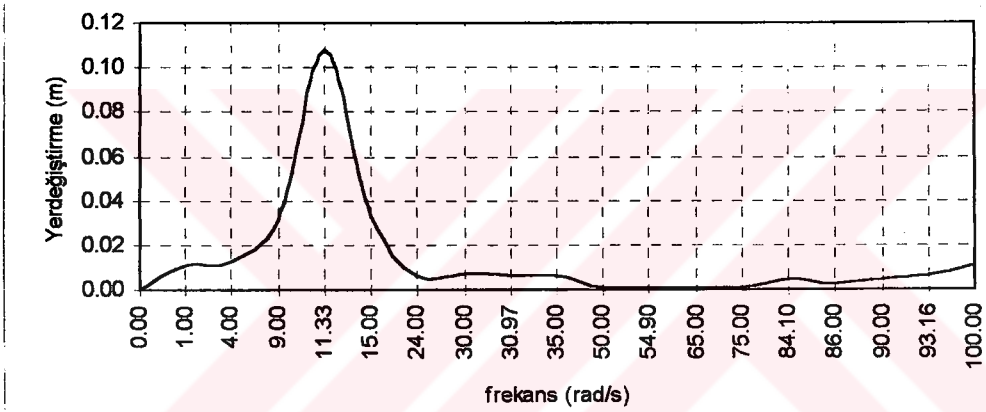
Şekil 5.12 Kayma dalgası hızı 800 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi



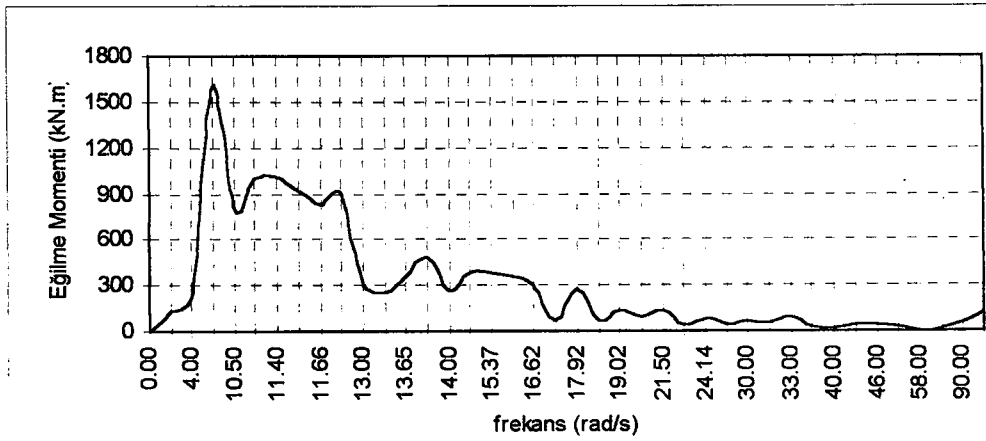
Şekil 5.13 Kayma dalgası hızı 1000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi



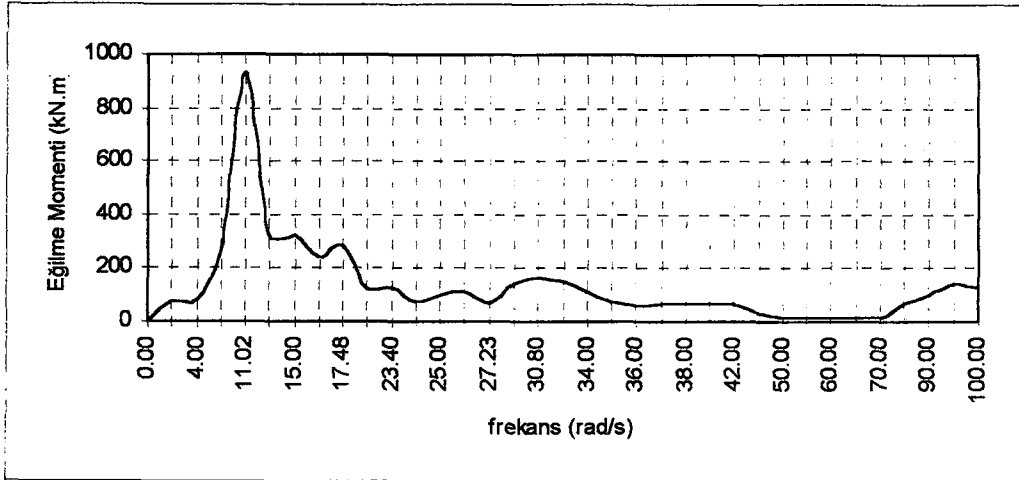
Şekil 5.14 Kayma dalgası hızı 5000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi



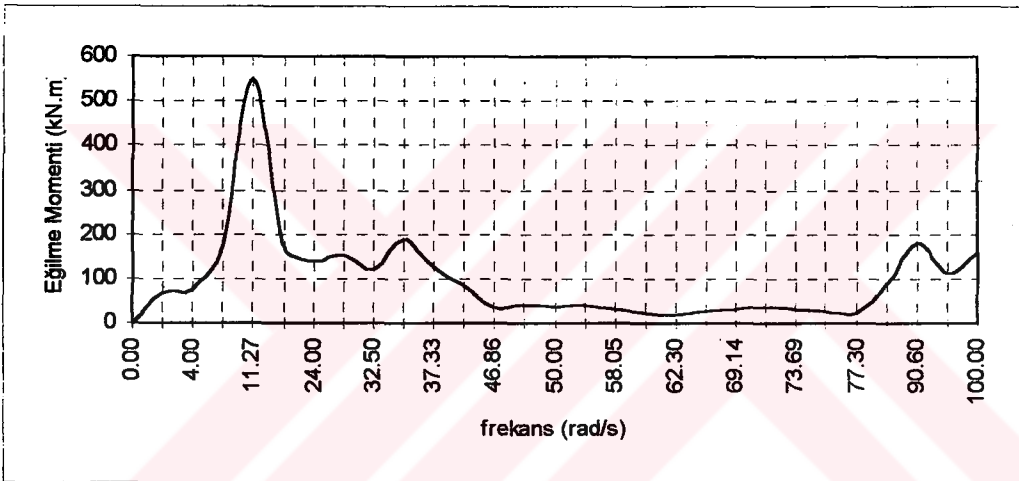
Şekil 5.15 Zeminin rijit olması durumu için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki 8. katın yerdeğiştirme-frekans eğrisi



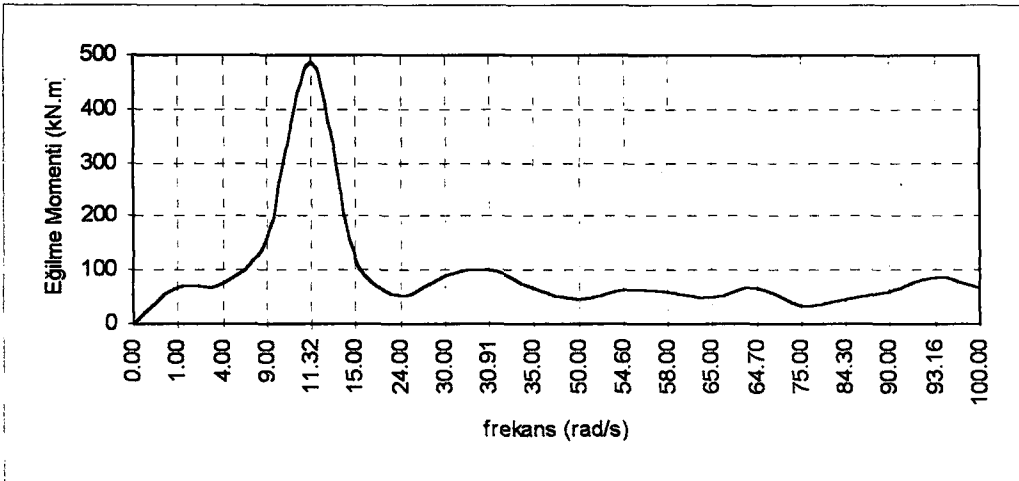
Şekil 5.16 Kayma dalgası hızı 100 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi



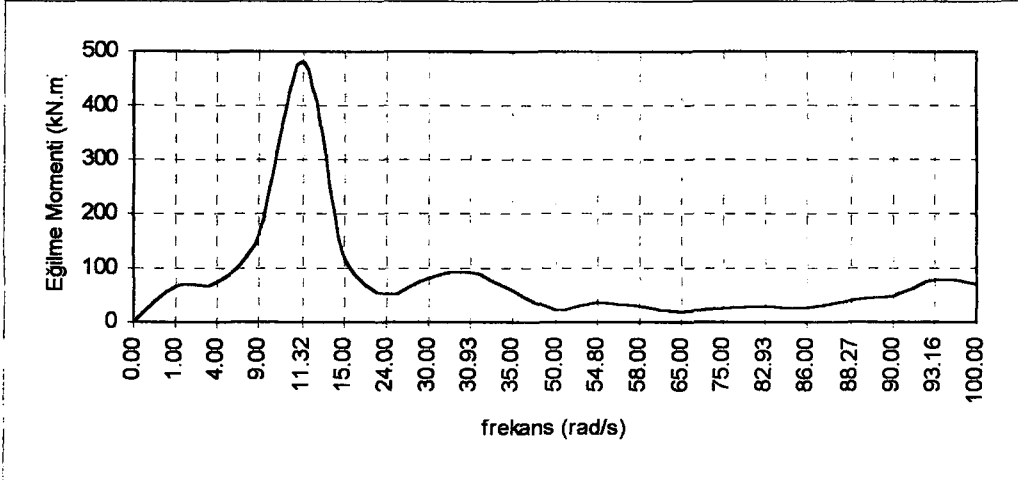
Şekil 5.17 Kayma dalgası hızı 200 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi



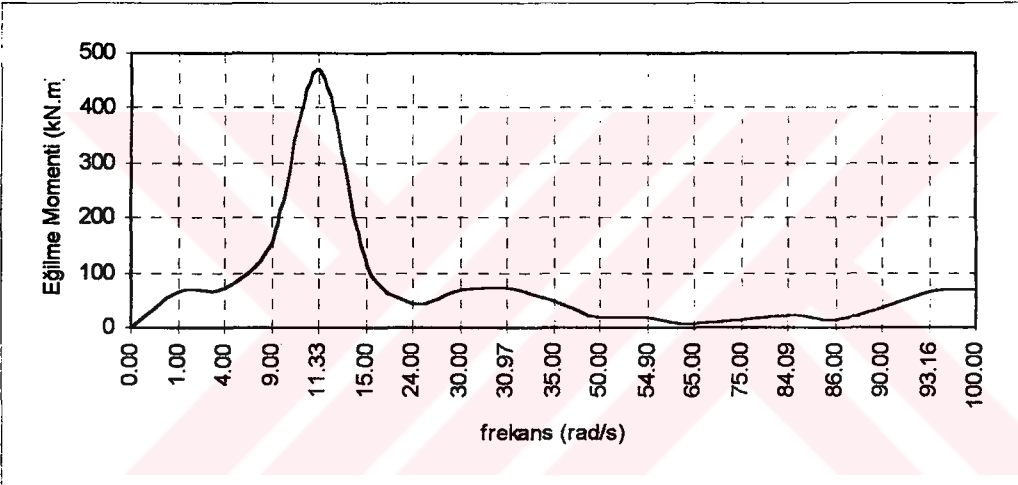
Şekil 5.18 Kayma dalgası hızı 400 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi



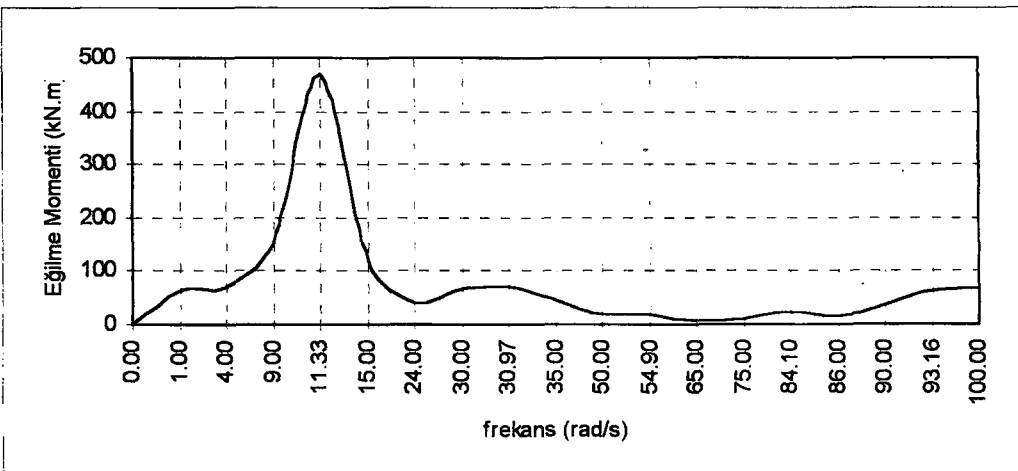
Şekil 5.19 Kayma dalgası hızı 800 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi



Şekil 5.20 Kayma dalgası hızı 1000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi



Şekil 5.21 Kayma dalgası hızı 5000 m/s için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi



Şekil 5.22 Zeminin rijit olması durumu için birim genlikli harmonik yer ivmesi etkisi altındaki zemin kat kolonunun eğilme momenti-frekans eğrisi

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Üstyapı-zemin ortak sisteminin dinamik hesabında en önemli aşamayı oluşturan matematik model seçimi problemine çözüm getirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, zemin ortamı taban kayasına kadar homojen, izotrop ve lineer elastik olarak kabul edilmiştir. Üstyapıya yakın bölgedeki zemin noktalarındaki şekil değiştirmelerin ve gerilmelerin hesabının yapılabilmesi için zemin ortamı sonlu elemanlarla temsil edilmiştir.

Tek üstyapı ile zeminden oluşan ortak sistemin serbest titreşimi incelenmiş, zeminin varlığının birinci titreşim frekansına etkisi araştırılmıştır. Bunun sonucunda, zeminin rijitliğini ifade eden kayma dalgası hızının artması ile birinci titreşim frekansının arttığı yani titreşim periyodunun küçüldüğü görülmüştür. Ayrıca, zeminin etkisi ile üstyapının dinamik davranışında meydana gelen değişimi saptamak amacı ile en üst kata ait yerdeğiştirmelerin ve zemin kat kolonunun uç kuvvetlerinin (kesme kuvveti ve eğilme momenti) birim genlikli harmonik taban ivmesi etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Gözönüne alınan sekiz katlı bir betonarme çerçeve ve zeminden oluşan ortak sistemde; zeminin kayma dalgası hızına bağlı olarak 0-100 rad/s'lik frekans aralığında bu büyüklüklere ait transfer fonksiyonları elde edilmiştir.

Gözönüne alınan zeminlerin kayma dalgası hızları 100, 200, 400, 800, 1000, 5000 m/s için elde edilen sekizinci kata ait yerdeğiştirme ve zemin kat kolonuna ait uç kuvvetleri transfer fonksiyonlarının incelenmesinden maksimum genliklerin birinci titreşim frekansı değerlerinde olduğu görülmektedir. Zemin ortamının rijitliğinin artması ile yerdeğiştirme ve uç kuvveti transfer fonksiyonlarına ait maksimum genliklerin küçüldüğü ve sağa doğru kaydığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] VELETSOS, A.S. , WEI, Y.T. , “Lateral and Rocking Vibration of Footings”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, 1971, pp. 1227-1248.
- [2] LUCO, J.E. , WESTMAN, R.A. , “Dynamic Response of Circular Footings”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 97, EM5, 1971, pp. 1381-1395.
- [3] BYCROFT, G.N. , “Forced Vibrations of a Rigid Circular Plate on a Semi-Infinite Elastic Space and on an elastic Stratum”, Philosophical Transactions, Royal Society of London, Series A, No.948, Vol.248, pp. 327-368.
- [4] LYSMER, J. ,KUHLEMEYER, R.L. , “Finite Dynamic Model for Infinite Media”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.95, EM4, 1969, pp.859-877.
- [5] CHAIRMAN, I.M. , KAUSEL, E. , LYSMER, J. , SEED, H.B. , WHITMAN, R.V. , HADJIAN, A.H. ,AGRAWAL, P.K. , “Analyses for Soil-Structure Interaction Effects for Nuclear Power Plants” Report by the Ad Hoc Group on Soil-Structure Interaction of the Committee on Nuclear Structures and Materials of the Structural Division of ASCE
- [6] AYDINOĞLU, M.N. ,”Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1977
- [7] CLOUGH, R.W. ,PENZIEN, J. , “Dynamics of Structures” McGraw-Hill Book Company, London, 1993
- [8] JENNINGS, P.C. , BIELAK, J. , “Dynamis of Building Soil Interaction” Bulletin Seism. Soc. Am. 63, 1973
- [9] CHOPRA, A.K. , GUITIERREZ, J.A. , “Earthquake Response Analysis of Multistorey Buildings Including Foundation Interaction”, Int. J. Earth. Engng. Struct. Dyn. Vol. 3, 1974, pp. 65-77
- [10] FAGEL, L.W. , LIU, S.C. , “Earthquake Interaction by Fast Fourier Transform”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.97, EM4, Proc. Paper 8324, 1971, pp.1223-1237

[11] FAGEL, L.W. , LIU, S.C. , “Earthquake Interaction for Multistory Buildings”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.98, EM4, Proc. Paper 9149, 1972, pp.929-945.



EK A

**Sekiz katlı bir betonarme çerçeve ve zeminden
oluşan ortak sistemin SAP90 input dosyası**

ÜSTYAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN SAP90 INPUT DOSYASI

SYSTEM

L=1 Z=15

JOINTS

1	X=0.0	Y=0.0	Z=0.0	
96	X=95	Y=0.0		
2305	X=0	Y=24		
2400	X=95	Y=24		Q=1,96,2305,2400,1,96
2401	X=36	Y=27		
2443	X=36	Y=48		G=2401,2443,6
2402	X=41	Y=27		
2444	X=41	Y=48		G=2402,2444,6
2403	X=45	Y=27		
2445	X=45	Y=48		G=2403,2445,6
2404	X=51	Y=27		
2446	X=51	Y=48		G=2404,2446,6
2405	X=55	Y=27		
2447	X=55	Y=48		G=2405,2447,6
2406	X=60	Y=27		
2448	X=60	Y=48		G=2406,2448,6

RESTRAINTS

1,96,1	R=1,1,1,1,1,1
97,2305,96	R=1,1,1,1,1,1
192,2400,96	R=1,1,1,1,1,1
98,191,1	R=0,0,1,1,1,1
194,287,1	R=0,0,1,1,1,1

290,383,1	R=0,0,1,1,1,1
386,479,1	R=0,0,1,1,1,1
482,575,1	R=0,0,1,1,1,1
578,671,1	R=0,0,1,1,1,1
674,767,1	R=0,0,1,1,1,1
770,863,1	R=0,0,1,1,1,1
866,959,1	R=0,0,1,1,1,1
962,1055,1	R=0,0,1,1,1,1
1058,1151,1	R=0,0,1,1,1,1
1154,1247,1	R=0,0,1,1,1,1
1250,1343,1	R=0,0,1,1,1,1
1346,1439,1	R=0,0,1,1,1,1
1442,1535,1	R=0,0,1,1,1,1
1538,1631,1	R=0,0,1,1,1,1
1634,1727,1	R=0,0,1,1,1,1
1730,1823,1	R=0,0,1,1,1,1
1826,1919,1	R=0,0,1,1,1,1
1922,2015,1	R=0,0,1,1,1,1
2018,2111,1	R=0,0,1,1,1,1
2114,2207,1	R=0,0,1,1,1,1
2210,2303,1	R=0,0,1,1,1,1
2306,2399,1	R=0,0,1,1,1,1
2401,2448,1	R=0,0,1,1,1,0

CONSTRAINTS

2402,2444,6	C=2401,0,0,0,0,0	I=6,0,0,0,0,0
2403,2445,6	C=2401,0,0,0,0,0	I=6,0,0,0,0,0
2404,2446,6	C=2401,0,0,0,0,0	I=6,0,0,0,0,0
2405,2447,6	C=2401,0,0,0,0,0	I=6,0,0,0,0,0
2406,2448,6	C=2401,0,0,0,0,0	I=6,0,0,0,0,0
2342,2365,1	C=2341,0,0,0,0,0	

FRAME

NM=6

C KOLONLAR

1 SH=R T=0.40,0.70 E=28500000 G=28500000/2.32 W=7.000 M=7.000/9.81
2 SH=R T=0.30,0.55 G=28500000/2.32 W=4.125 M=4.125/9.81
3 SH=R T=0.25,0.40 G=28500000/2.32 W=2.500 M=2.500/9.81
4 SH=R T=0.25,0.30 G=28500000/2.32 W=1.875 M=1.875/9.81

C KİRİŞLER

5 SH=R T=0.30,0.30 E=28500000 G=28500000/2.32 W=2.250 M=2.250/9.81
6 SH=R T=0.30,1.00 E=2.85E10 G=2.85E10/2.32 W=7.500 M=7.500/9.81

C ÇUBUKLARIN TANIMLANMASI**C KİRİŞLER**

1,2401,2402	M=5	LP=1,0	G=4,1,1,1
6,2407,2408	M=5	LP=1,0	G=4,1,1,1
11,2413,2414	M=5	LP=1,0	G=4,1,1,1
16,2419,2420	M=5	LP=1,0	G=4,1,1,1
21,2425,2426	M=5	LP=1,0	G=4,1,1,1
26,2431,2432	M=5	LP=1,0	G=4,1,1,1
31,2437,2438	M=5	LP=1,0	G=4,1,1,1
36,2443,2444	M=5	LP=1,0	G=4,1,1,1
89,2341,2346	M=6	LP=1,0	
90,2346,2350	M=6	LP=1,0	
91,2350,2356	M=6	LP=1,0	
92,2356,2360	M=6	LP=1,0	
93,2360,2365	M=6	LP=1,0	

C KOLONLAR

41,2341,2401	M=1	LP=3,0	
49,2346,2402	M=1	LP=3,0	
57,2350,2403	M=1	LP=3,0	
65,2356,2404	M=1	LP=3,0	
73,2360,2405	M=1	LP=3,0	
81,2365,2406	M=1	LP=3,0	
42,2401,2407	M=1	LP=3,0	
43,2407,2413	M=2	LP=3,0	G=1,1,6,6
45,2419,2425	M=3	LP=3,0	G=1,1,6,6
47,2431,2437	M=4	LP=3,0	G=1,1,6,6
50,2402,2408	M=1	LP=3,0	
51,2408,2414	M=2	LP=3,0	G=1,1,6,6
53,2420,2426	M=3	LP=3,0	G=1,1,6,6
55,2432,2438	M=4	LP=3,0	G=1,1,6,6
58,2403,2409	M=1	LP=3,0	
59,2409,2415	M=2	LP=3,0	G=1,1,6,6
61,2421,2427	M=3	LP=3,0	G=1,1,6,6
63,2433,2439	M=4	LP=3,0	G=1,1,6,6
66,2404,2410	M=1	LP=3,0	
67,2410,2416	M=2	LP=3,0	G=1,1,6,6
69,2422,2428	M=3	LP=3,0	G=1,1,6,6
71,2434,2440	M=4	LP=3,0	G=1,1,6,6
74,2405,2411	M=1	LP=3,0	
75,2411,2417	M=2	LP=3,0	G=1,1,6,6
77,2423,2429	M=3	LP=3,0	G=1,1,6,6
79,2435,2441	M=4	LP=3,0	G=1,1,6,6
82,2406,2412	M=1	LP=3,0	
83,2412,2418	M=2	LP=3,0	G=1,1,6,6
85,2424,2430	M=3	LP=3,0	G=1,1,6,6

87,2436,2442 M=4 LP=3,0 G=1,1,6,6

ASOLID

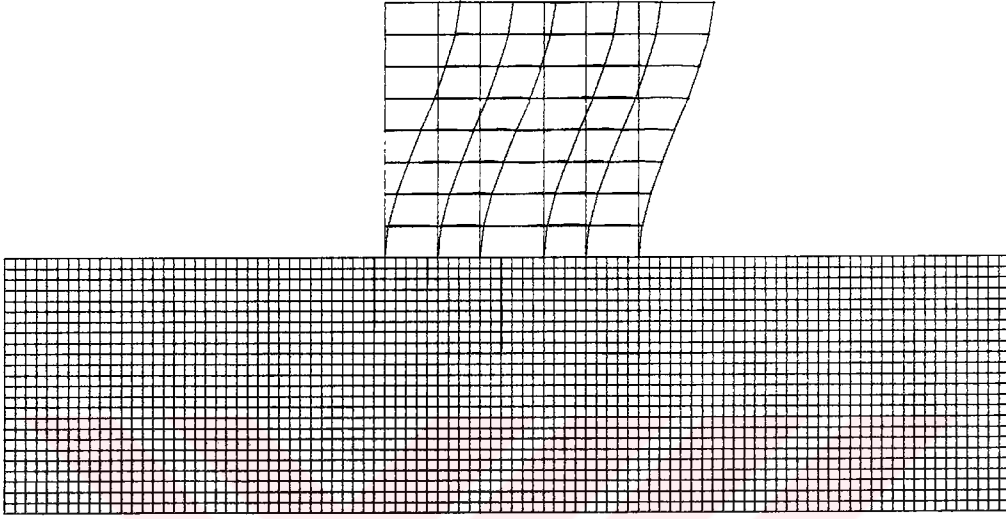
NM=1 ETYPE=1 MAXN=1 X=1
1 NUMT=1 W=18 M=18/9.81
T=0 E=48933,48933 U=0.33,0.33 G=18350
1 JQ=1,2,97,98 M=1 TZ=0 TH=1 G=95,24 LP=1

TIMEH

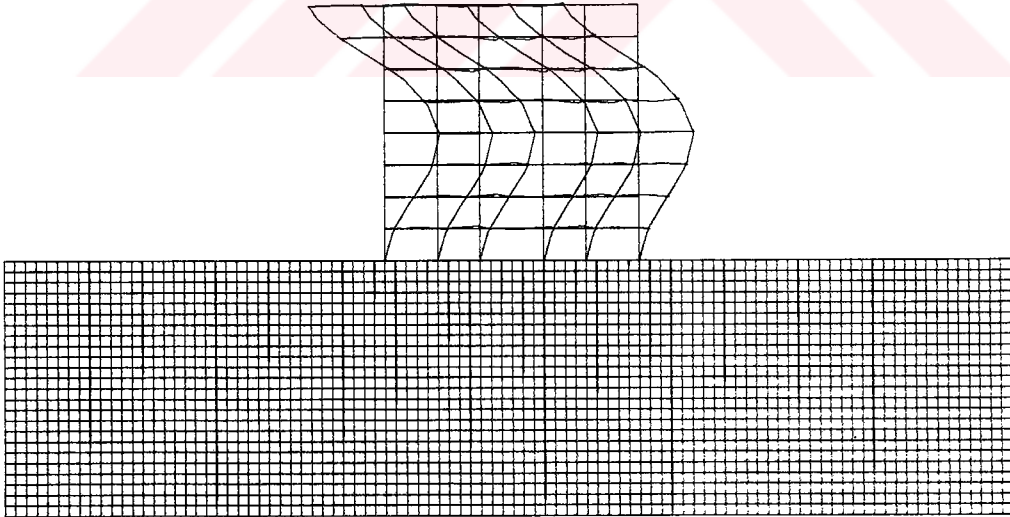
ATYPE=1 NSTEP=600 DT=0.05 NF=1 D=0.05 NV=15
NF=1 NPL=1 DT=0.05 NAM=CEVAP1 PRIN=1
LC=-1 NF=1 S=1 ANGLE=0.0 AT=0.0

EK B

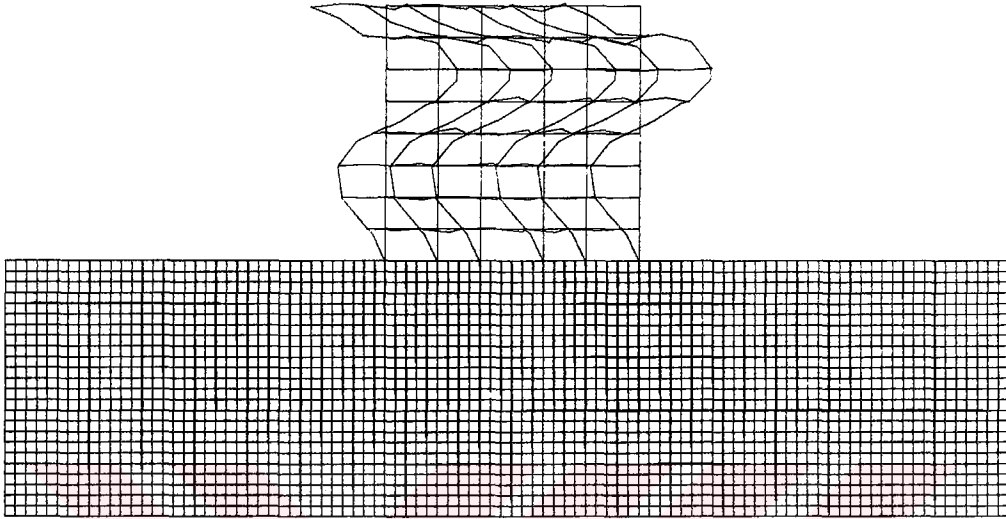
**Kayma dalgası hızı 1000 m/s için üstyapı-zemin
ortak sisteminin ilk 10 titreşim mod şekilleri**



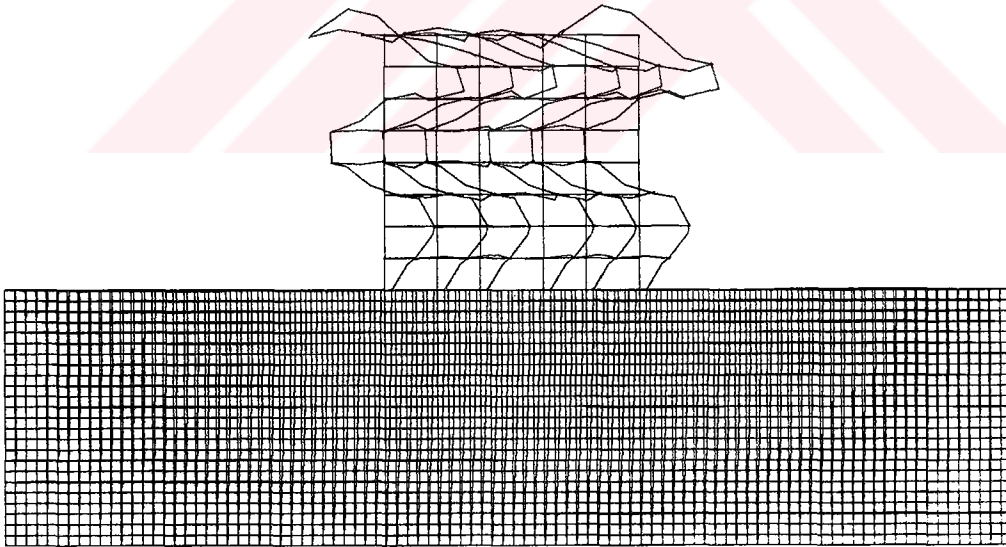
Sekil B.1 ortak sistemin 1.mod bicimi



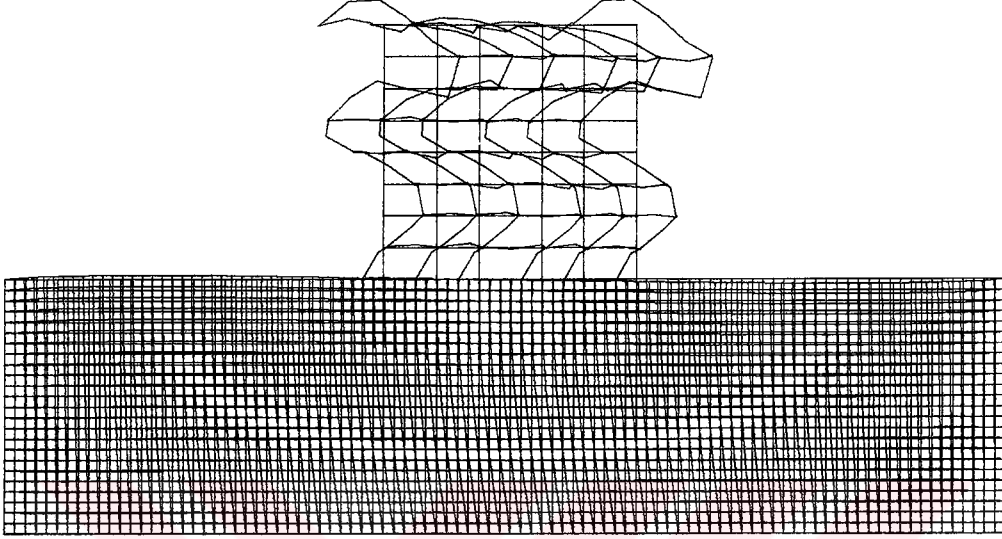
Sekil B.2 ortak sistemin 2.mod bicimi



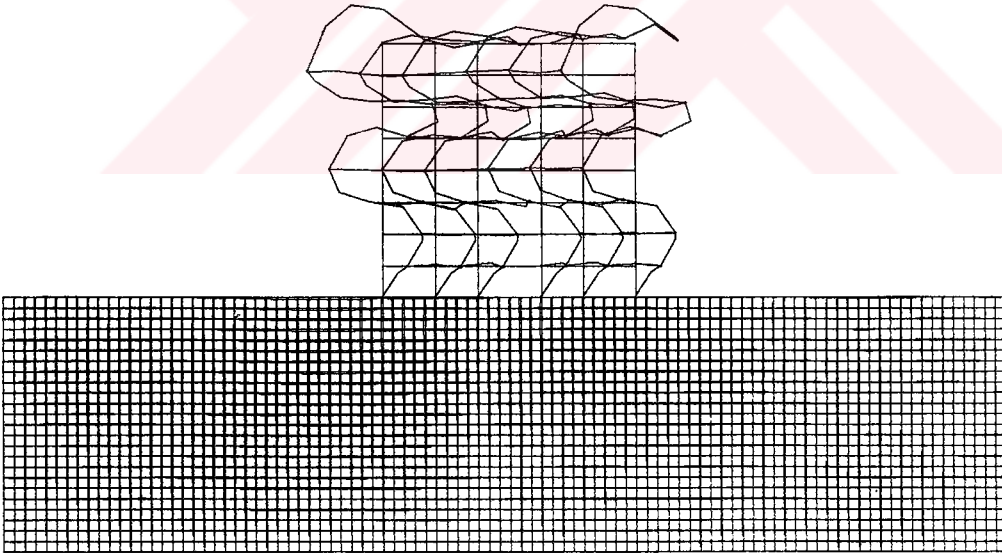
Sekil B.3 ortak sistemin 3.mod bicimi



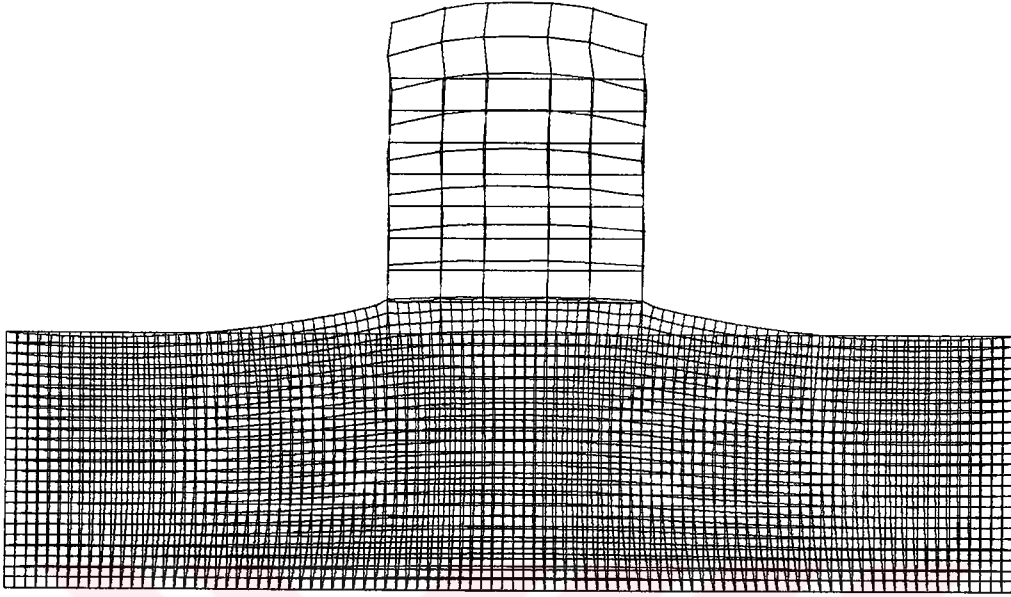
Sekil B.4 ortak sistemin 4.mod bicimi



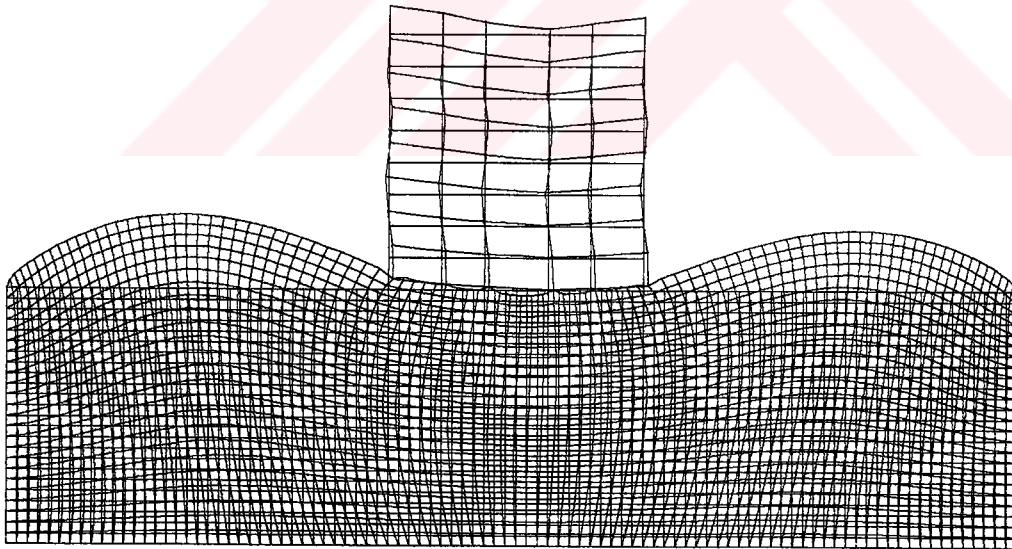
Sekil B.5 ortak sistemin 5.mod bicimi



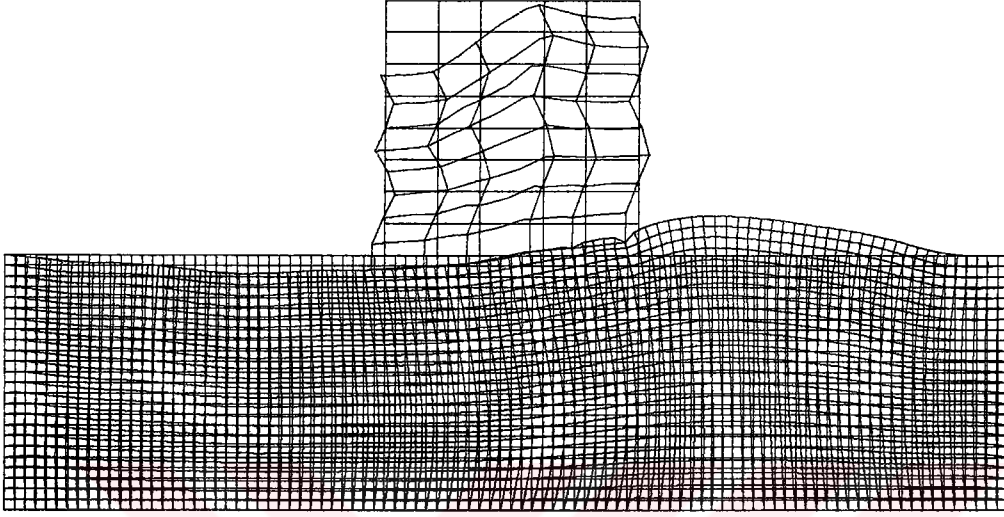
Sekil B.6 ortak sistemin 6.mod bicimi



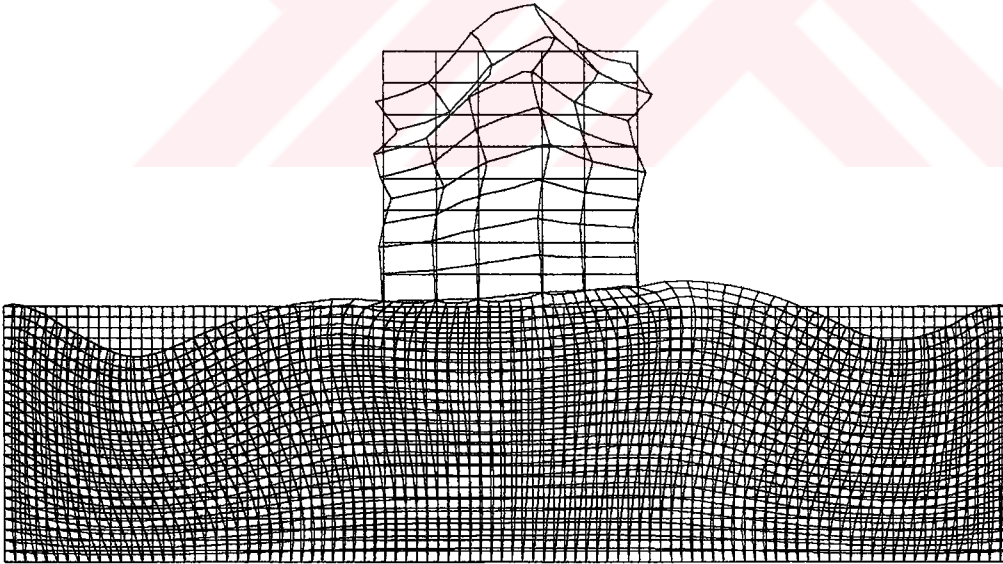
Sekil B.7 ortak sistemin 7.mod bicimi



Sekil B.8 ortak sistemin 8.mod bicimi



Sekil B.9 ortak sistemin 9.mod bicimi



Sekil B.10 ortak sistemin 10.mod bicimi

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında İstanbul’da doğdu. Orta ve lise öğrenimini 1984 - 1992 yılları arasında İstanbul Galatasaray Lisesi’nde bitirdikten sonra aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği’nde lisans eğitime başladı. 1996 yılı yaz döneminde iyi derece ile mezun oldu. Özel sektörde değişik konumlarda çalıştıktan sonra aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programında Yüksek Lisans öğrenimine başladı.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 İTÜ 150x150 mm TRİSONİK RÜZGAR TÜNELİ TANITIMI VE DENEY İMKANLARI	4
2.1. Giriş	4
2.2. İTÜ 150x150 mm Trisonik Rüzgar Tüneli ve Donanımı	4
2.3. İTÜ 150x150 mm Trisonik Rüzgar Tünelinde Deney Olanakları	9
2.4. İTÜ 150x150 mm Trisonik Rüzgar Tüneline Ait Ölçme Sistemleri	10
2.4.1. Basınç-ölçerler	11
2.4.2. Sıcaklık-ölçer	11
2.4.3. Çoklu basınç ölçer	11
2.4.4. Schlieren sistemi	11
2.4.5. Rüzgar tüneli balansları	12
2.4.5.1. İç balansların kalibrasyonu	13
2.4.5.2. İTÜ 150 x 150 mm Trisonik Rüzgar Tüneli 3 bileşenli balansı	15
2.5. Modeller	16
BÖLÜM 3 İTÜ 150x150 mm TRİSONİK RÜZGAR TÜNELİ PERFORMANSI	18
3.1. Giriş	18
3.2. Toplam ve Statik Basınç Ölçümleri	18
3.3. Akım Görüntüleme Deneyleri	24
3.4. Kuvvet ve Moment Ölçüm Deneyleri	25
BÖLÜM 4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	28
KAYNAKLAR	30
EK-A TABLOLAR	31
EK-B ŞEKİLLER	36
ÖZGEÇMİŞ	49

ÖZET

Rüzgar tünelleri atmosfer içinde hareket eden uçak, helikopter, roket, mermi gibi uçan sistemlerle araba, otobüs ve raylı sistemler gibi karada hareket eden araçların deneysel olarak incelenmesine olanak sağlayan uçak mühendislerinin temel laboratuvarlarıdır. Rüzgar tünelleri çalışma hızlarına göre düşük ses altı, yüksek ses altı, transonik, ses üstü ve hipersonik tüneller olarak sınıflandırılırlar. İTÜ 150x150 mm Trisonik Rüzgar Tüneli, iki değiştirilebilir kesiti sayesinde ses altı, transonik ve ses üstü hızlarda deneyler yapılmasına olanak tanıyan bir rüzgar tünelidir. Rüzgar tünellerinin kalibrasyonu yapılacak deneysel çalışmaların güvenilirliği açısından son derece önemlidir.

Bu çalışmada ilk başta İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Aerodinamik Laboratuvarında bulunan 150x150 mm kesitli deney odasına sahip trisonik rüzgar tünelinin genel donanımı ve ölçüm sistemleri tanıtılmaktadır. İkinci aşamada rüzgar tünelinin kalibrasyonu için yapılan çalışmaların sonuçları verilmektedir. Verilen sonuçlar bazen tünel performans büyüklükleri veya parametreleri ismiyle de tanımlanmaktadır. Tünel performans büyüklüklerinin tespiti için deney odasında statik basınç dağılımı ve toplam basınç değişimini içeren basınç ölçümleri, tünel hız ölçüm güvenilirliğinin tespiti için akım görünürlülüğü ve bir standart modele ait kuvvet ve moment ölçümleri yapılmıştır. Bu deneyler, İTÜ Trisonik Rüzgar Tünelinin performans parametreleri hakkında önemli bilgiler elde edilmesini ve yeni ölçüm sistemlerinin geliştirilmesi gerektiğinin anlaşılmasını sağlamıştır.

Bu değerlendirme sonucunda İTÜ 150x150 mm Trisonik Rüzgar Tünelinin yüksek hızlarda bilimsel çalışmalara uygun olduğu sonucu elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} X \\ N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xn} & K_{xm} \\ K_{nx} & K_{nn} & K_{nm} \\ K_{mx} & K_{mn} & K_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_n \\ V_m \end{bmatrix}$$

A three component sting type strain-gage electronic balance is used in İTÜ 150x150 mm Trisonic Wind Tunnel to measure lift, drag force and pitching moment at various angles of attack.

CALIBRATION WORKS

Calibration of the İTÜ Trisonic Wind Tunnel has been carried out in three steps : determination of total and static pressure distribution within the test chamber, determination of free stream Mach number by flow visualization method, force and moment measurements on standard models.

Pressure Measurements

Tracking a pitot tube and a static tube along a vertical section of the test chamber, total and static pressure distributions are evaluated in two different Mach numbers – $M=2.67$ and $M=3.13$ – having intervals of 20mm at 7 vertical stations. In Figure 5 the ratio of the difference between measured total pressure in one station and average value of the total pressures measured in different stations, and total pressure in the settling chamber is given. It is obtained that the total pressure distribution is satisfactory. In Figure 6 the same ratio is evaluated for static pressures.

In addition, static pressures are measured both from the upper and lower walls of the $2.6 < M < 4.0$ test section and are compared with each other. Pressure distributions are found satisfactory and a minor difference has been detected between the pressure values obtained from the lower and upper walls.

Flow Visualization

Flow visualization has been made on 15° nose angle conical model at zero angle of attack by means of the Schlieren system. Angle of the oblique shock wave formed on the front of the model has been measured and Yükselen [8] has used this for evaluating the free stream Mach number theoretically, which is then compared with the Mach number given by the data acquisition system of the wind tunnel. As an example in Figure 7. Schlieren photographs of the conical model are given at $M=2.804$ and $M=3.078$. Angle of the shock waves are measured 22° and 20° from these photographs respectively. Shock wave angles have been used to obtain free stream Mach number of 2.783 and 3.074 respectively. The two values have been found in good agreement.