

DİNAMİK YÜKLER ETKİSİ ALTINDAKİ ÜSTYAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN EMPEDANS FONKSİYONLARINA DAYALI ÇÖZÜMÜ

SUBSTRUCTURING ANALYSIS BASED ON IMPEDANCE FUNCTIONS FOR SOIL-STRUCTURE COUPLING SYSTEM SUBJECTED TO DYNAMIC LOADS

ERYILMAZ D. M., MALTAŞ U, ÇELEBİ E., KIRTEL O.

Posta Adresi: Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 54187 Esentepe Kampüsü/Sakarya

E-posta: dmercan@sakarya.edu.tr, umutmaltas@hotmail.com, ecelebi@sakarya.edu.tr, okirtel@sakarya.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Yapı-zemin dinamik etkileşimi, statik empedans katsayıları, alt sistem yaklaşımı harmonik dış yük

ÖZ Bu çalışmada yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümü için frekanstan bağımsız sabit katsayılı empedans katsayıları gömülü ve yüzeysel temel durumları için kullanılmıştır. Ayrıntılı parametrik araştırmalar ve sistematik hesaplamalar farklı kontrol parametrelerine bağlı yürütülerek dinamik yükler etkisi altında titreşen yapı-zemin ortak sisteminin yapısal davranışı incelenmiştir.

ABSTRACT *In this study, the frequency independent values of impedance functions are considered in the analysis of dynamic soil-structure interaction problems for both surface-supported and embedded foundations. A comprehensive parametric analysis and systematic calculations are accomplished with different controlling parameters to evaluate the structural response of the vibrating soil-structure system under dynamic loads.*

GİRİŞ

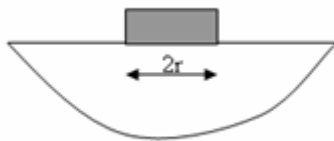
Dinamik dış yükler altındaki önemli yapı sistemlerinin davranışını daha iyi değerlendirebilmek ve bunun sonucunda tam güvenliğini sağlayabilmek için sayısal çözüm yaklaşımlarının yaygın olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilen simülasyon uygulamaları günümüzde gittikçe önem kazanmaktadır. Bilgisayarların sağladığı hız ve etkinlik yapı mühendisliğinin gittikçe daha büyük ve karmaşık problemlerinin çözümüne yönelmektedir. Ayrıca dış etkiler altında yapı performansının gerçeğe daha yakın olarak izlenmek istenmesi durumunda, sistemde dikkate alınan bilinmeyen sayısının artırılması, yoğun parametrik çalışmalar ve bunun beraberinde getirdiği çeşitli güçlüklerinde aşılması gerekmektedir. Söz konusu nedenlerle artan işlem hacmine bağlı olarak, mevcut belleğin ekonomik kullanımı ve öngörülen doğruluk düzeyine mümkün olan en kısa sürede erişme isteği, bilgisayar teknolojisindeki tüm gelişmelere rağmen hala önemini korumaktadır. Nükleer güç santralleri, çok katlı rijit yapılar, viyadükler ve barajlar gibi depreme karşı davranışlarının önemli olduğu bilinen yapı sistemleri bazı durumlarda çok değişik özellikler taşıyan zeminler üzerinde kurulması zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki dinamik karşılıklı etki probleminin konusunu oluşturmaktadır. Bir bölgedeki yapı davranışının ayrıntılı değerlendirilmesinde, yapı-zemin ortak sisteminin dinamik özelliklerinin iyi anlaşılmasını gerektirir.

EMPEDANS FONKSİYONLARINA DAYALI ZEMİN ALT SİSTEMİ VE ÜSTYAPI ORTAK MODELİ

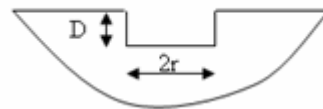
Yapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinde altsistem yaklaşımının en önemli çözüm aşaması, temel-zemin arakesitindeki serbestlik dereceleri için tanımlanan ve titreşen yapı temellerinin davranışının incelenmesinde de etkin olarak kullanılan dinamik empedans fonksiyonlarının belirlenmesidir. Temel ortamının rijitlik düzeyini yada başka bir ifadeyle zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini gösteren bu karmaşık dinamik büyüklüklerin frekansa bağlı sayısal değerlerini hesaplayabilmek için günümüzde mevcut analitik ve yarı analitik çözüm yöntemlerinin yanında sınır elemanlar ve sonlu elemanlar gibi nümerik çözüm yöntemleriyle bunların her ikisini de kapsayan karma çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Zeminini katkısını ifade eden bu eşdeğer elemanların dış yükün frekansına bağımlılığı, yapı dinamiği problemlerini özellikle karşılıklı etkileşen sistemlerin davranışının araştırılmasını daha karmaşık hale getirmektedir. İleri düzey gerçekleştirilebilir uygulamalar yapabilmek ve yapısal tepkileri doğru yorumlayabilmek için sinüzoidal tipi harmonik dış yükler etkisi altında titreşen üstyapı-temel-zemin ortak sisteminin dinamik davranışı, temel-zemin arakesitinde tanımlanan titreşim kaynağının frekansından bağımsız sabit değerli empedans fonksiyonlarına bağlı olarak incelenmiştir. Yapı- zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkileşimini incelemek için tüm problemi temsil edebilecek uygun matematik modeller ve onun sayısal uygulamaları çeşitli kontrol parametrelerine bağlı ayrıntılı ve sistematik araştırma yürütülerek ve etkin bir nümerik çözüm yöntemi kullanılarak ele alınmıştır. Bu çalışmada elastik yarı uzay ve tabakalı zemin modelleri için dikdörtgen rijit temellerin yüzeysel ve gömülü olmaları durumlarına göre empedans katsayıları kullanılarak bilgisayar destekli matematik model geliştirilmiştir.

Temel-zemin arakesitindeki serbestlik dereceleri için tanımlanan ve titreşen yapı temellerinin davranışının incelenmesinde de etkin olarak kullanılan dinamik empedans fonksiyonlarının belirlenmesi yapı-zemin sistemleri için önem kazanmaktadır. Zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini gösteren bu karmaşık dinamik büyüklüklerin belirlenmesi için farklı çözüm yöntemleri kullanılmaktadır.

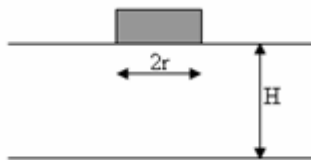
- Analitik ve yarı analitik çözüm yöntemleri (Veletsos ve Wei, 1971; Gazetas 1983; Apsel ve Luco, 1987)
- Sınır elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemi (Wolf, 1997; Çelebi ve diğ.,2006)



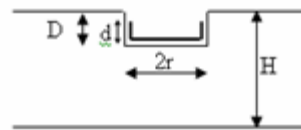
Luco-Gazetas-Veletsos



Apsel



Kausel-Luco



Kausel-Tassoulas

Şekil 1. Yapı zemin etkileşiminde bazı çözüm yöntemleri

Yapı zemin dinamik etkileşim probleminin çözümü için zeminin şekil değiştirebilirliğini temsil eden eşdeğer elastik yaylar kullanılmıştır.

Elastik yarı uzay ve tabakalı zemin durumları için dikdörtgen rijit temellerin yüzeysel ve gömülü olma durumlarına göre empedans katsayıları kullanılarak bilgisayar destekli matematik model geliştirilmiştir.

Yapı-zemin etkileşim problemlerinin analizinde boyutsuz parametrelerle çözümler gerçekleştirildiğinden dış yükün değişimi frekansa bağlı olmasından dolayı boyutsuz frekans faktörü tanımlamak yararlı olacaktır. Bu durumda;

$$a_0 = \frac{\omega B}{c_s}$$

Bu eşitlikte titreşim kaynağının açısal frekansı ω , dairesel temelin yarı çapı yada dikdörtgen temelin yarı genişliği B , yarı uzayın kayma dalga hızı C_s ile gösterilmektedir. En genel ifadesiyle dinamik empedans matrisinin terimleri boyutsuz frekans parametresine bağlı olarak;

$$K_\alpha(\omega) = K_{s\infty\alpha}(k_\alpha(a_0) + ia_0c_\alpha(a_0))(1 + 2i\beta)$$

Burada $K_{s\infty\alpha}$ statik rijitliği, β ise yapısal sönümü göstermektedir. Empedans fonksiyonunun boyutsuz rijitlik ve sönüm katsayıları k_α ve c_α ile belirtilmiştir. Her bir titreşim modu dikkate alındığında statik rijitlik terimlerine bağlı dinamik empedans büyüklükleri aşağıda belirtildiği gibi hesap edilecektir. Bunlar sırasıyla ;

- Yanal Titreşim modunda;

$$K_\alpha(\omega) = \frac{8Gr}{2-\nu}(k_\alpha + ia_0c_\alpha); \quad r = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}}$$

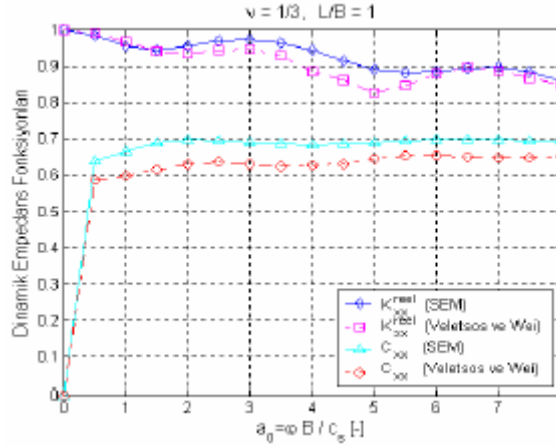
- Düşey titreşim modunda;

$$K_\alpha(\omega) = \frac{4Gr}{1-\nu}(k_\alpha + ia_0c_\alpha); \quad r = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}}$$

- Eğilme titreşim modunda;

$$K_\alpha(\omega) = \frac{8Gr\alpha^3}{3(1-\nu)}(k_\alpha + ia_0c_\alpha); \quad r_{mx} = \sqrt[4]{\frac{16B^3L}{3\pi}}, \quad r_{my} = \sqrt[4]{\frac{16BL^3}{3\pi}}$$

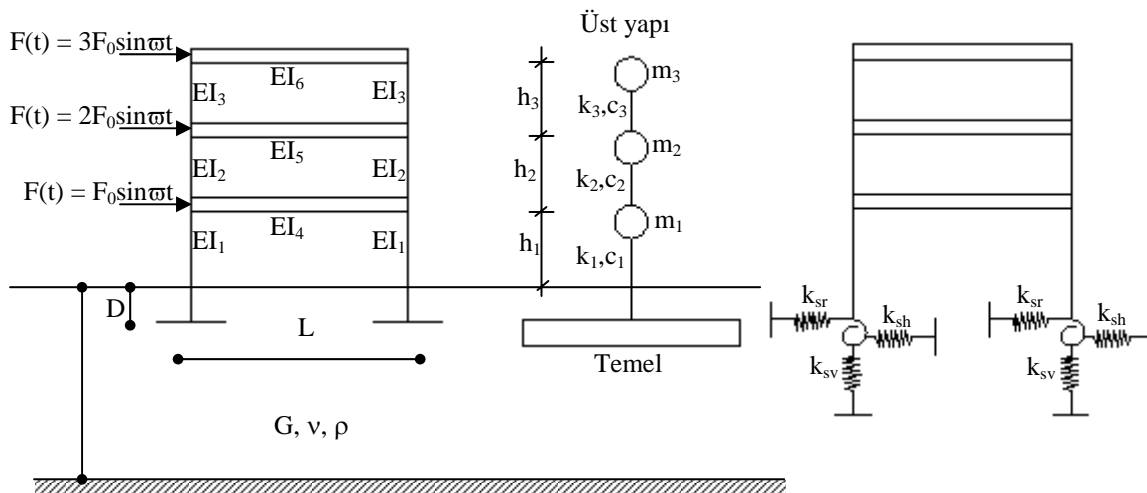
Bu çalışmada; kullanılan frekans aralığında dinamik empedans fonksiyonu için geçerli olan a_0 değeri sabit kaldığından (Çelebi ve diğerleri) dolayı sadece statik rijitlikler göz önüne alınarak çözümlenmeler yapılmıştır. (Şekil 2)



Şekil 2. Yatay ötelenme titreşim modunda dinamik empedans fonksiyonunun a_0 değerine bağlı değişimi

SAYISAL UYGULAMALAR

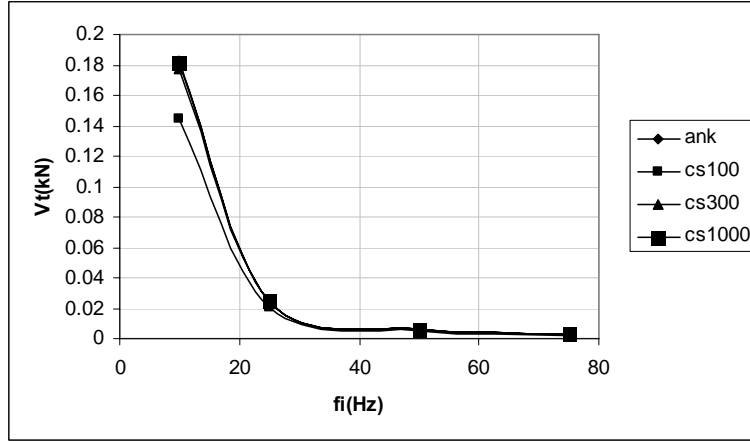
Çalışmanın ilk aşamasında elastik yarı sonsuz zemin bölgesine oturan rijit kütleli boyutları $L=B=4$ m olarak tanımlanmış kare biçimindeki bir temel plağın üzerindeki tek katlı bir yapının dinamik davranışı, kat seviyesinde etki eden sinüzoidal dinamik yüke göre incelenmiş ve yapı-zemin ortak sisteminin davranış spektrum eğrileri elde edilmiş ve bazı temel büyüklükler sistem parametrelerine bağlı olarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Aynı sayısal model değişen kalınlıktaki tek tabakalı zemin ortamında yer alan temelin yüzeysel ve gömülü durumları içinde değerlendirilmiştir. Temelin oturduğu zemin bölgesinin malzeme özellikleri; zemin yoğunluğu için $\rho=2$ t/m³, Poisson oranı için de $\nu=0.33$ değeri verilmiştir.



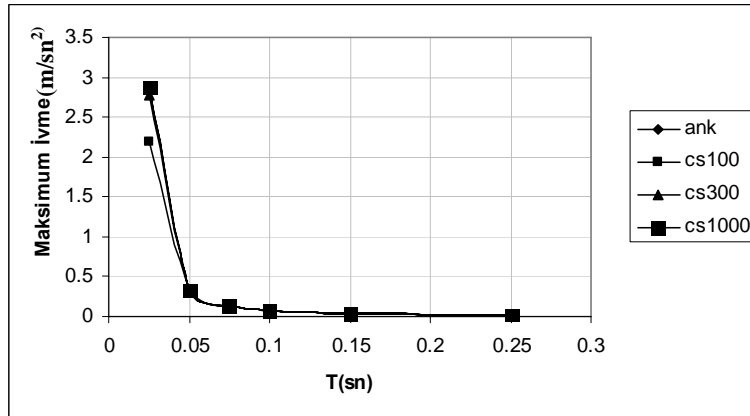
Şekil 3. Tabakalı zemin ortamında üst yapı-temel-zemin ortak sistemi

Dinamik davranışı belirleyen etkin sistem parametreleri olarak zemin ortamının şekil değiştirme özelliği yani rijitliğini ifade eden c_s kayma dalga hızı (burada $c_s=100$ m/s, 300m/s, 1000m/s), gömülü temeller için ise D temel derinliğini göstermek üzere D/B oranı ve dış yükün değişen frekansı yani $10\text{Hz} \leq f \leq 100\text{Hz}$ aralığındaki değişimi dikkate alınmıştır. Tabakalı zemin modelinde tabaka kalınlığı ($H=5, 10, 20, 50, 100\text{m}$) da problemin değişkenleri olarak araştırmalarda yer almıştır. Bu çalışma yukarıda değinilen kontrol parametrelerine bağlı olarak çok katlı yapıların dinamik davranışını incelemek içinde genişletilmiştir (Şekil 3).

Tek serbestlik dereceli sistemlerde farklı zemin rijitlikleri için analizler yapılmış ve grafikler halinde sunulmuştur (Şekil 4-5).



Şekil 4. Tek serbestlik dereceli sistemlerde, yüzeysel temel durumu için kayma dalga hızlarına bağlı olarak üstyapı taban kesme kuvveti-dış yük frekans ilişkisi ($T_{\text{yapı}}=0.25\text{sn}$)

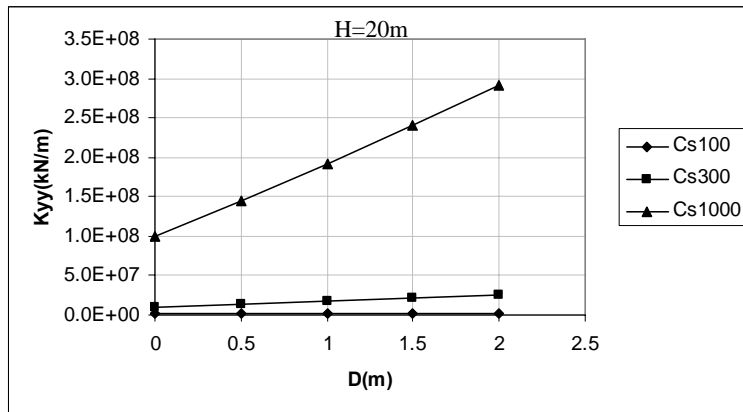
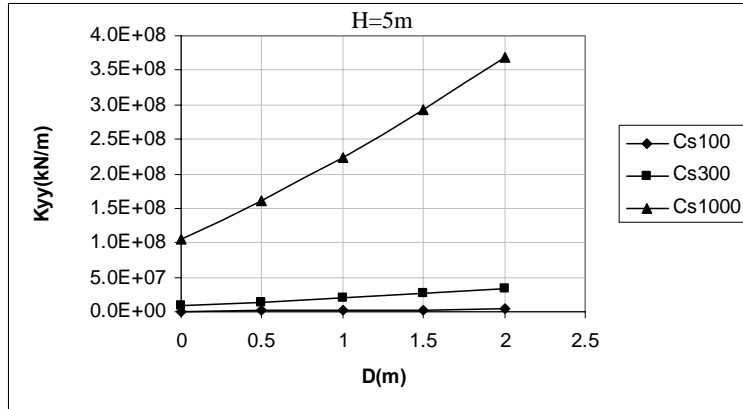
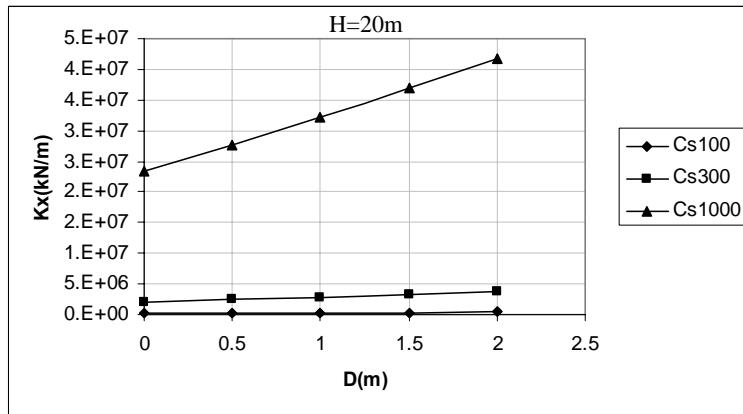
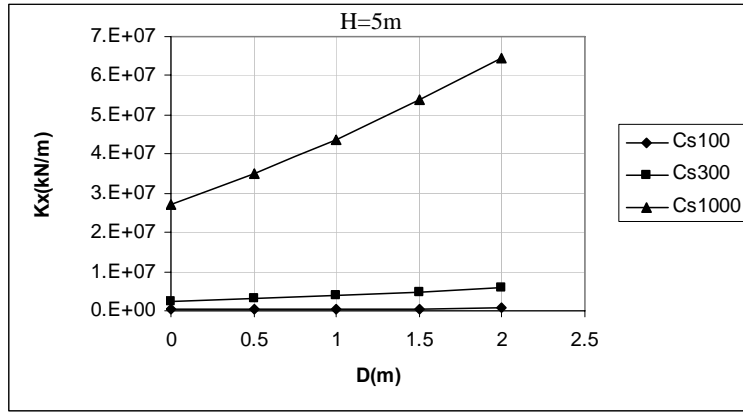


Şekil 5. Tek serbestlik dereceli sistemlerde, yüzeysel temel durumu için kayma dalga hızlarına bağlı olarak maksimum ivme-periyod ilişkisi ($f=50\text{Hz}$)

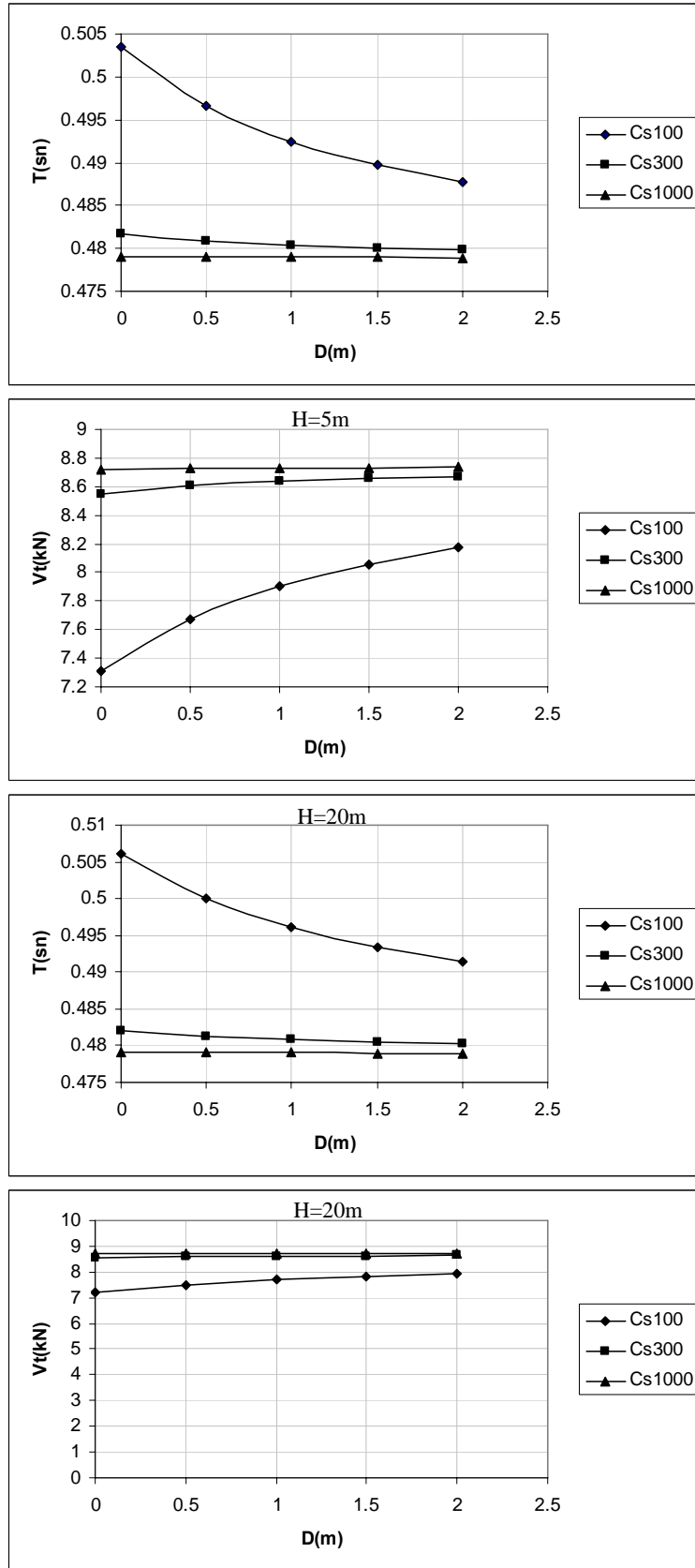
Tek serbestlik dereceli sistemin yüzeysel temel durumu zemin rijitliğine bağlı incelendiğinde, dış yük frekansı küçüldükçe taban kesme kuvvetinin arttığı gözlenmiştir.

Tek serbestlik dereceli sisteme ait yüzeysel temel durumu için kayma dalga hızlarına bağlı olarak yapı periyod değeri büyüdükçe ivme değerlerinin azaldığı gözlenmiştir.

Çok serbestlik dereceli sistemler için farklı zemin rijitliklerine ve tabaka kalınlıklarına bağlı olarak elde edilen sayısal sonuçlar farklı temel gömülme derinliklerine göre grafikler halinde sunulmuştur (Şekil 6-7).



Şekil 6. Çok katlı yapılarda, tabakalı zemin durumu için kayma dalga hızına bağlı olarak zemin ötelenme ve dönme rijitliklerinin temel gömülme derinliğine göre değişimi (H=5m ve H=20m; f=50Hz)



Şekil 7. Çok katlı yapılarda, tabakalı zemin durumu için zemin rijitliğine bağlı olarak üstyapı temel taban kesme kuvveti-temel gömülme derinliği ilişkisi (H=5m ve H=20m; $f=50\text{Hz}$)

Çok katlı yapıların oturduğu zeminin rijitliğine bağlı olarak temelin gömülme derinliği arttıkça zemin ötelenme ve dönme rijitliklerinin de arttığı gözlenmiştir. Ayrıca anakaya üzerindeki zemin tabaka kalınlığının artması ötelenme ve dönme rijitliklerini azaltmıştır. Bunun paralelinde gömülme derinliği arttıkça taban kesme kuvvetinin arttığı ve periyod değerinin azaldığı görülmüştür.

SONUÇLAR

Çeşitli kontrol parametrelerine bağlı kapsamlı ve sistematik araştırmalar yürütülerek yapı-temel-zemin ortak sisteminin dinamik davranışı elastik yarı sonsuz ve tabakalı zemin modelleri için ayrı ayrı incelenmiştir. En büyük yerdeğiştirme, taban kesme kuvveti gibi temel dinamik büyüklüklerin farklı zemin rijitliklerine göre yapı periyoduyla ilişkisi, zemin tabakası kalınlığına ve dış yük frekanslarına bağlı değişimleri elde edilmiştir.

Ayrıca rijit temellerin yüzeysel ve gömülü olma durumlarına göre hesaplanan empedans değerlerinin pratiğe dönük sonuçları ve üstyapıdaki önemli karakteristikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

KAYNAKLAR

Veletsos A.S., Wei Y.T., 1971, Lateral and rocking vibration of footings, **Journal of Soil Mechanics and Foundations**, ASCE 97, 1227-1248

Gazetas G., 1983, Analysis of machine foundation vibrations: State of the art, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2(1) 2-42

Apsel, R. J., Luco, J. E., 1987, Impedance functions for foundations embedded in a layered medium: an integral equation approach, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 15, 213-231

Wolf, J. P., Song, C., 1997, Finite element modelling of unbounded media, John Wiley & Sons

Çelebi E., Fırat S. and Çankaya I., 2006, The evaluation of impedance functions in the analysis of foundations vibrations using boundary element method, **Journal of Applied mathematics and Computation**, Volume 173, Issue 1, 636-667