

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU DİNAMİK ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Furat MAMUK

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU DİNAMİK ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Furat MAMUK
(501081033)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Reha ARTAN (İTÜ)
Doç. Dr. İrfan COŞKUN (YTÜ)

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim aşamasında ve tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, yardımlarını ve desteğini esirgemeyen değerli tez danışmanım ve hocam Sayın Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ' ye teşekkürü bir borç bilirim.

Yaşamım süresince desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, sevgileri ve ilgileri ile bana daima moral olan başta annem Vedia MAMUK olmak üzere tüm aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2010

Furat MAMUK
İnşaat mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Konunun Tanıtımı	1
1.2 Amaç ve Kapsam	2
2. ZEMİN-YAPI KİNEMATİK ETKİLEŞİMİ	3
3. ZEMİN-YAPI DİNAMİK ETKİLEŞİMİ	7
3.1 Zemin-Yapı Sisteminin Çözüm Yöntemleri	8
3.1.1 Alt sistemlere ayırma yöntemi	8
3.1.2 Direkt metot	8
3.2 Zemin Ortamının Modellenmesi	9
3.2.1 Zeminin eşdeğer elastik yay ve sönümleyicilerle modellenmesi	11
3.2.2 Sonlu elamanlar yöntemi ve çözümü	11
3.3 Zemin Ortamın Kısımları	14
3.3.1 Sınırsız ortam	15
3.3.2 Sınırlı ortam	15
3.3.3 Etkileşim ara yüzeyi	15
3.4 Viskoz Sınır Şartı	15
4. ZEMİN DEĞİŞKENLERİ	19
4.1 Zemin Sönümü	19
4.1.1 Malzeme sönümü	19
4.1.2 Geometrik sönüm	19
4.2 Yerel Zemin Koşulları	19
4.3 Yerel Zemin Kalınlıkları	20
4.4 Zemin Spektrumları	20
4.5 Sıvılaşma	21
4.6 Zemin Yenilmesi	21
4.7 Zemin Periyodu Etkisi	21
4.8 Yüzey Topografyasının Etkisi	22
5. ZEMİN MODELLERİ	23
5.1 Winkler Zemin Modeli	24
5.2 Filonenko –Brodich Zemin Modeli	25
5.3 Hetenyi Zemin Modeli	26
5.4 Pasternak Zemin Modeli	27
5.5 Vlasov Zemin Modeli	28

6. YATAK KATSAYISI.....	31
6.1 Plaka Yükleme Deneyi İle Yatak Katsayısı Hesaplama.....	33
6.2 Zemin Bilgilerini Kullanarak Yatak Katsayısı Hesaplama	33
6.3 Yerli ve Yabancı Kaynaklarda Yatak Katsayısı.....	34
7. SAYISAL ÖRNEKLER.....	37
7.1 Yapı Eleman Boyutlarının ve Yatak Katsayısının Üst Yapıya Etkisi	38
7.1.1 Yatak katsayısı etkisi.....	39
7.1.1 Kolon kesitlerinin etkisi.....	40
7.1.2 Temel plağı boyutlarının etkisi.....	41
7.2 Yatak Katsayısı ve Zemin Elastisite Modülünün Karşılıklı Analizi	42
7.2.1 Seçilen zemin özellikleri	42
7.2.2 Üst yapı özellikleri.....	42
7.3 Tabaka Kalınlığının Zemin-Yapı Dinamik Etkileşimine Etkisi	45
7.4 Gerçek Zemin Özellikleriyle Modellenen Sistemlerin Kıyaslanması	47
7.4.1 Üst yapı özellikleri.....	47
7.4.2 Zemin özellikleri.....	47
7.4.2.1 Genel jeoloji	48
7.4.2.2 İnceleme alanı mühendislik jeolojisi.....	50
7.4.2.3 Arazide yapılan çalışmalar	50
7.4.2.4 Sondajlar ve yerinde deneyler	50
7.4.2.5 Arazi ölçümlerinin değerlendirilmesi.....	51
7.4.2.6 Parseldeki sismik hızların dinamik parametreleri	51
7.4.2.7 Elastisite modülüne göre zeminin sınıflandırılması	53
7.4.2.8 Kohezyonlu zeminlerin V_s hızına göre zemin sınıflandırması.....	53
7.4.2.9 Poisson oranına göre zemin/kaya ortamlarının sıklığı.	53
7.4.2.10 Kayma modülüne göre zemin sağlamlığı	54
7.4.2.11 Deprem yönetmeliğine göre yerel zemin sınıfları	54
7.4.2.12 Zemin hâkim (titreşim) periyodu (T_0)	55
7.4.2.13 Terzaghi formülü, zemin taşıma gücü ve nihai taşıma gücü hesabı.....	56
7.4.2.14 SPT ile nihai taşıma gücü tayini	57
7.4.2.15 Zemin ve kaya türlerinin değerlendirilmesi.....	58
7.4.3 Problemin çözümü.....	58
8. SONUÇLAR.....	61
KAYNAKLAR.....	63
EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	83

KISALTMALAR

3BK	: Üç Boyutlu Katı
PL	: Plastik Limit
LL	: Likit Limit
PI	: Plastisite İndisi
TDY	: Türk Deprem Yönetmeliği
SAP	: Integrated Software for Structural Analysis and Design
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
Mom.	: Moment Kuvveti
Kes.	: Kesme Kuvveti
Dep.	: Deplasman
Ger.	: Gerilme
ZEG	: Zemin Emniyet Gerilmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1	: Zemin büyütme katsayısı	20
Çizelge 6.1	: Terzaghi'ye (1955) göre yatak katsayısı çizelgesi	34
Çizelge 6.2	: Ersoy'a (1995) göre yatak katsayısı çizelgesi	35
Çizelge 6.3	: Keskinel'e (1970) göre yatak katsayısı çizelgesi	35
Çizelge 7.1	: Elastisite modülü-yapı tepkileri çizelgesi.....	44
Çizelge 7.2	: Yatak katsayısı-yapı tepkileri çizelgesi.....	45
Çizelge 7.3	: Zemin tabaka kalınlığı-yapı tepkileri çizelgesi (yumuşak zemin).....	46
Çizelge 7.4	: Zemin tabaka kalınlığı-yapı tepkileri çizelgesi (sıkı zemin).	46
Çizelge 7.5	: İstanbul bölgesi formasyon karakteristik çizelgesi.....	49
Çizelge 7.6	: Sondaj sonucu elde edilen laboratuvar değerleri.....	51
Çizelge 7.7	: Zeminin dinamik parametreleri.....	52
Çizelge 7.8	: Kohezyonlu zeminlerin V_s hızına göre sınıflandırması.....	53
Çizelge 7.9	: Poisson oranına ile zemin/kaya ortamlarının sıklığı	53
Çizelge 7.10	: Kayma modülüne göre zemin sağlamlığı.....	54
Çizelge 7.11	: Zemin gurupları	55
Çizelge 7.12	: Yerel zemin sınıfları	55
Çizelge 7.13	: Düşey yatak katsayısı.....	57
Çizelge 7.14	: Nihai taşıma gücü ve düşey yatak katsayısı.....	57
Çizelge 7.15	: Farklı zemin yapı etkileşim modellerinin kıyaslanması.....	58

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Zemin yapı etkileşiminin üç boyutlu modeli	3
Şekil 3.1	: Zemin ortamının sönümleyicilerle modellenmesi	9
Şekil 3.2	: Zeminin eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesi	10
Şekil 3.3	: Zemin ortamının modelleri	10
Şekil 3.4	: Mesnetlerde çökme, yükselme veya dönmelerin oluşması	14
Şekil 3.5	: Dinamik sınırsız ortam-yapı etkileşimi	14
Şekil 3.6	: Birim küpe etkileyen kuvvetler	16
Şekil 5.1	: Winkler zemin modeli	25
Şekil 5.2	: Filonenko-Brodich zemin modeli	26
Şekil 5.3	: Hetenyi zemin modeli	27
Şekil 5.4	: Pasternak zemin modeli	28
Şekil 5.5	: Vlasov zemin modeli	28
Şekil 6.1	: Yatak katsayısı ile temel modelleri	32
Şekil 6.2	: Plaka yükleme deneyi ve yatak katsayısı ilişkisi	33
Şekil 7.1	: 1999 Düzce Depremi Bolu kaydı kuzey-güney ivme bileşeni	38
Şekil 7.2	: Üst yapı kesitlerinin sisteme etkisi	38
Şekil 7.3	: Modelin plan görünüşü	39
Şekil 7.4	: Yatak katsayısı-periyot ilişkisi	40
Şekil 7.5	: Kolon kesiti-periyot ilişkisi	40
Şekil 7.6	: Plak derinliği-periyot ilişkisi	41
Şekil 7.7	: Plak genişliği-periyot ilişkisi	41
Şekil 7.8	: Üç boyutlu katı zemin ile modellenmiş sistem	43
Şekil 7.9	: Winkler zemini ile modellenmiş sistem	43
Şekil 7.10	: Modelin plan görünüşü	44
Şekil 7.11	: Zemin tabakası 6m olan sistem	46
Şekil 7.12	: Bölgenin genel jeoloji haritası	49
Şekil 7.13	: Parsel sondaj çalışması	50
Şekil 7.14	: Parselin sondaj numuneleri	51
Şekil 7.15	: Zemin tabaka kalınlıkları ve zemin cinsleri	58
Şekil 7.16	: Deprem sırasında yapı zemin sisteminin hareketi mod.3	59
Şekil 7.17	: Deprem sırasında sistemde oluşan hareketler mod.1	59
Şekil A.1	: Elastisite modülü-periyot ilişkisi	68
Şekil A.2	: Yatak katsayısı-periyot ilişkisi	68
Şekil A.3	: Elastisite modülü-deplasman ilişkisi	69
Şekil A.4	: Yatak katsayısı-deplasman ilişkisi	69
Şekil A.5	: Elastisite modülü-gerilme ilişkisi	70
Şekil A.6	: Yatak katsayısı-gerilme ilişkisi	70
Şekil A.7	: Elastisite modülü-ivme ilişkisi	71
Şekil A.8	: Yatak katsayısı-ivme ilişkisi	71
Şekil A.9	: Elastisite modülü-kolon moment ilişkisi	72
Şekil A.10	: Yatak katsayısı- kolon moment ilişkisi	72
Şekil A.11	: Elastisite modülü-kolon kesme kuvveti ilişkisi	73

Şekil A.12 : Yatak katsayısı- kolon kesme kuvveti ilişkisi.....	73
Şekil A.13 : Elastisite modülü-kiriş momenti ilişkisi	74
Şekil A.14 : Yatak katsayısı- kiriş momenti ilişkisi.....	74
Şekil A.15 : Elastisite modülü-kiriş kesme kuvveti ilişkisi	75
Şekil A.16 : Yatak katsayısı- kiriş kesme kuvveti ilişkisi.....	75
Şekil B.1 : Zemin tabaka kalınlığı–periyot ilişkisi.....	76
Şekil B.2 : Zemin tabaka kalınlığı–deplasman ilişkisi.....	76
Şekil B.3 : Zemin tabaka kalınlığı–üst yapıda gerilme ilişkisi	77
Şekil B.4 : Zemin tabaka kalınlığı–kolon kesme kuvveti ilişkisi.....	77
Şekil B.5 : Zemin tabaka kalınlığı –kolon momenti ilişkisi.....	78
Şekil B.6 : Zemin tabaka kalınlığı–ivme ilişkisi.....	78
Şekil C.1 : Periyot kıyaslaması	79
Şekil C.2 : Tepe noktası deplasmanı kıyaslaması.....	79
Şekil C.3 : Gerilme kıyaslaması.....	80
Şekil C.4 : Tepe noktası ivme kıyaslaması	80
Şekil C.5 : 13 nolu kolon moment kıyaslaması	81
Şekil C.6 : 13 nolu kolon kesme kuvveti kıyaslaması	81
Şekil C.7 : 360 nolu kiriş momenti kıyaslaması	82
Şekil C.8 : 360 nolu kiriş kesme kuvveti kıyaslaması	82

SEMBOL LİSTESİ

A	: Etkili Alan
a	: Yer İvmesi
c	: Sönüm sabiti
B,L	: Teel Boyutları
[C]	: Sistemin Sönüm Matrisi
E	: Elastisite Modülü
Ec	: Bulk Modülü
G	: Kayma Modülü
D	: Plağın Eğilme Rijitliği
H	: Tabaka Kalınlığı
K_s	: Zemin Yatak Katsayısı
K	: Eleman Rijitlik Matrisi
[K]	: Sistem Rijitlik Matrisi
M	: Eleman Kütlesi
[M]	: Sistem Kütle Matrisi
ω	: Açısal Frekans
t	: Zaman
T	: Periyod
T_A,T_B	: Spektrum Karakteristik Periyotları
ν	: Poisson Oranı
v	: Yer Değiştirme
V_S	: Zeminin Kayma Dalgası Hızı
V_P	: Zemin Basınç Dalgası Hızı
ρ	: Kütleli Yoğunluk
U	: Toplam Yer değiştirme
u	: Yer Değiştirme
m	: Metre
T₀	: Zemin Hâkim Periyodu
σ	: Normal Gerilme
∇	: Laplace operatörü
Ø	: İçsel Sürtünme Açısı
τ	: Kayma Gerilmesi

ÜÇ BOYUTLU DİNAMİK ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, çok katlı çerçeve tipi betonarme yapı ile elastik zemin arasındaki dinamik etkileşim incelenmiştir. Zemin-yapı dinamik etkileşimi, deprem sırasında üst yapının zemine, aynı zamanda zeminin de üst yapıya olan etkilerini inceleyen bir konudur. Geçmişteki varsayım, zeminin sonsuz rijit bir yapısı olduğu, üst yapılarında zemine ankastre mesnetlendiği yönündeydi. Oysa günümüzde zemin-yapı etkileşiminin çok daha karmaşık ve çok daha fazla önemsenmesi gereken bir konu olduğu anlaşılmıştır. Bu durumun başlıca nedeni gün gittikçe ilerleyen bilim ve teknolojinin son ürünleri olan ve günümüzde sıklıkla inşa edilen baraj, nükleer santral, çok katlı konut ve kule tarzı yapıların varlığıdır. Özellikle yumuşak ve orta sert zeminlere inşa edilen yapıların zeminle etkileşimi daha çok önemsenmektedir. Bu yapıların büyük bir kısmının günümüzde depremselliği yüksek bölgelerde inşa ediliyor olması da bu konuyu daha çok ön plana çıkarmaktadır.

Bu tez çalışmasında gerçek zemin-yapı etkileşimine yaklaşmak ve en gerçekçi sonuçları elde edebilmek amacıyla konu kaynaklarda derinlemesine araştırılıp öneriler incelenmiştir. Modellerin uygunluğunu sağlamak amacıyla zemin-yapı etkileşimi üç boyutlu olarak hazırlanmıştır. Analizde sonlu elemanlar teorisi yöntemiyle çalışan SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Zemin-yapı etkileşimi modeli zaman tanım alanında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak dinamik analizleri yapılması uygun görülmüştür. Elastik zemin solid yani katı eleman olarak modellenmiştir. İncelenen sistemlerin homojen, izotrop ve elastik/viskoelastik olduğu kabul edilmiştir.

THREE DIMENSIONAL DYNAMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION

SUMMARY

Within the scope of this thesis study, dynamic interaction between multilayered frame type reinforced concrete structure and elastic foundation has been examined. Soil-structure dynamic interaction is an issue, which examines effect of upper structure on the soil as well as effects of soil on upper structure. The previous assumption was the fact that the soils had a infinite rigid structure; besides upper structures positioned on the soil as built-in. However nowadays it has become evident that soil-structure interaction is an issue, which is much more complicated and which has to be attached much more attention. The primary reason of this fact is existence of dams, nuclear power stations, multi-layered houses and tower like structures. In recent years, many important structures have been construed in seismic zones. Especially interaction of structures, built on soft and medium hard soils, is attached higher importance.

Within the scope of this thesis, for the purpose of approaching real soil-structure interaction and to obtain the most realistic results, the issue has been searched in detail in sources, and suggestions have been examined. With a view to ensuring appropriateness of the models, soil-structure interaction has been prepared as three dimensional. In the analysis, SAP2000 package programme, operating on the basis of finite element method, has been used. The proposed analysis model is applied to study the dynamic responses of structures to earthquake excitation in the time domain. Elastic foundation is modeled as solid elements. The system is assumed to be homogeneous, isotropic and elastic/viscoelastic.

1. GİRİŞ

1.1 Konunun Tanıtımı

İnşaat mühendisliği, çağlar boyunca insanların barınma ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla hizmet vermiş bir bilim dalıdır. Günümüzde ise insanlar sadece barınmayla yetinmeyip çok daha fonksiyonel ve güvenli yapılar talep etmektedir. Yeni ihtiyaçları karşılamak için ise inşaat mühendisliği alanında daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Gelişen bilim ve teknoloji, günümüz mühendisliğini daha özel ve daha ayrıntılı konularda araştırma yapmaya ve de daha iyi sonuçlar elde etmeye zorlamaktadır.

Doğal afetler beşeri düzeni çokça etkilemiş, insanlar doğaya karşı ne kadar korumasız olduklarını defalarca acı bir şekilde deneyimlemiştir. Bu da insanları, doğal afetlerin doğal felaketlere dönüşmemesi için yeni önlemler almaya zorlamıştır. Deprem, bu doğa olayları arasında belki de en yıkıcı olanıdır. İnsanlık tarihi boyunca belli aralıklarla gerçekleşen ve çok feci sonuçlar doğuran depremler insanların bu felaketleri daha fazla incelemesine ve inşa ettikleri yapıları daha dayanıklı hale getirmelerine neden olmuştur. Özellikle günümüzde kullanılan yüksek binalar, kuleler, barajlar, nükleer santraller vb özel yapılar daha fazla mühendislik çalışmasına ihtiyaç duymaktadır. Arazi kullanımını açısından risk taşımakla birlikte birçok yerde bu tür özel yapıların deprem bölgeleri veya aktif deprem bölgelerine yakın yerlerde inşa edildiği görülmektedir. Bu özel yapıların oturduğu zeminler çok farklı özellikler taşıyabilmektedir. Zeminlerin bu farklılıkları zemin-yapı etkileşimini daha iyi tahlil etme ihtiyacını doğurmaktadır. Oysaki yapılan ilk kabullerde yapının zemine rijit bağlı olduğu yönündeydi. Günümüzde ise yaşadığımız depremlerden elde ettiğimiz tecrübeler bize birçok yeni şey öğretti örneğin; zemin ana kaya altındaki deprem etkisini değiştirmekte, yapının periyot ve mod şekillerini farklılaştırmakta, yapı temelindeki dönmeler yapıda önemli etkiler yaratmaktadır. Zemin-yapı etkileşimi konusu bu kapsamda üzerinde çokça durulan, hakkında birçok çalışmanın yapıldığı ve gelecekte de yapılacağı araştırılmaya muhtaç geniş bir çalışma alanıdır [1, 2].

1.2 Amaç ve Kapsam

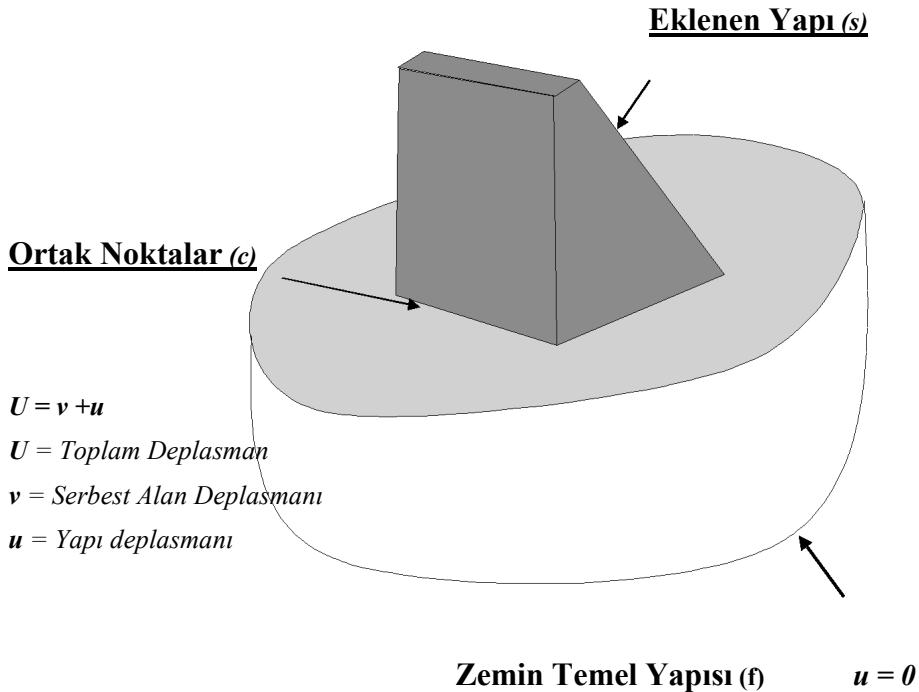
Ülkemizde 2007 yılından beri kullanılan Türk Deprem Yönetmeliğinde temel zemini ve temeller için depreme dayanıklı tasarım kuralları adı altında bir bölüm bulunmaktadır. Bu bölümde yerel zemin sınıfları ve zemin gurupları yol göstermek amacıyla verilmiştir. TDY-2007’de saha ve laboratuvar deneyleri yapıldıktan sonra projelendirmeye geçilmesi mecburiyeti getirilmiştir. Avrupa ülkelerinin Eurocode-8’i ve ABD’nin FEMA yönetmeliklerinde ise gevşek zeminler üzerine inşa edilecek yapılar için daha çok kısıtlama bulunmaktadır. Özellikle kayma dalga hızının $V_s < 100m/sn$ olması durumunda aşırı zemin büyütmesi olacağı uyarısı yapılmıştır [3]. Yapılan kaynak taramasında, yapı-zemin dinamik etkileşimi hakkında hazırlanmış farklı çalışmalar bulunmasına rağmen bu çalışmaların çoğunluğunun iki boyutlu olarak ele alındığı görülmüştür. Sözü edilen durumun başlıca nedeni yakın geçmişe kadar çözüm için uygun bilgisayar teknolojilerinin bulunmamasıdır. Tarafımızca yapılan tez çalışmasında ise modellerin üç boyutlu olarak ele alınması uygun görülmüştür. Yapılan analizlerde gerçekte var olan etkileşimin bilgisayar modeline en iyi şekilde yansıtılması hedeflenmiştir. Bu amaçla dinamik yükleme durumundaki geometrik uygunluk ve denge koşullarının yanında zemin ortamınca sağlanması gereken zeminin geometri ve malzeme sönümlerinin etkileri de sistem içinde göz önüne alınmıştır. Ayrıca tezde gerçek bir sondaj raporundan alınan verilerle modellenen zemin-yapı etkileşim sisteminin, günümüz bilgisayar programlarında kullanılan yatak katsayısı yöntemiyle modellenmiş sistemle karşılaştırmalı çözümü yapılmıştır. Buradan alınan sonuçla, proje çözümlerinde yatak katsayısı yerine, direkt olarak zemin özelliklerinin kullanarak statik hesap yapılmasının ne derece mümkün olduğu araştırılmıştır.

Bu çalışmada gelişen bilgisayar teknolojisinin oldukça önemli bir yeri vardır çünkü zemin-yapı dinamik etkileşimi gibi kapsamlı bir analiz ancak işlem kapasitesi yüksek ve hafıza alanı geniş bir bilgisayarlarla yapmak mümkündür. Yapılan analizlerde gerçekçi sonuçlar elde etmek amacıyla gerçek bir ivme kaydı olan 1999 Düzce depremi Bolu kaydı kuzey-güney ivme bileşeni kullanılmıştır. Yöntem olarak kullanılan deprem ivmelerinin ana kayaya etkiletilip oradan yapıya ulaşmasını sağlamak gerçekçi bir yaklaşım olabilir; ancak deprem kayıtlarının yeryüzü ölçümlerinden elde ediliyor olması ivmenin de ölçümün yapıldığı noktadan uygulanması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır.

2. ZEMİN-YAPI KİNEMATİK ETKİLEŞİMİ

Üç boyutlu zemin-yapı dinamik etkileşimi analizlerinin en büyük kolaylığı eklene hareket denklemidir. Bu denklem matematiksel olarak basit, teorik olarak doğru ve otomatikleştirip genel yapı analizi programlarında kullanılması kolay olan bir denklemdir. Buna ek olarak formül, herhangi bir kaynaktan üretilen deprem dalgalarının serbest alandaki hareketinin ifadesi için de uygundur. Yöntemin gereği olarak yapının tabanındaki serbest alan hareketi, yapı zemin karşılıklı etkileşimi öncesinde hesaplanmalıdır.

Zemin-yapı etkileşimi probleminin analizinde sistemi üç düğüm grubuna ayırmak mümkündür. Şekil 2.1’de sistem eklene yapı, zemin ve de yapı-zeminin temas noktaları olmak üzere üçe ayrılmıştır. Zemin ve yapının ortak noktalarındaki kesişim yüzey noktaları ‘c’ , yapıdaki noktalar ‘s’ ile ve de zemin ile ilgili noktalar ‘f’ ile gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Zemin yapı etkileşiminin üç boyutlu modeli [4].

Toplam yer değiştirme U olmak üzere dinamik denge denklemini **(2.1)** gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_c \\ \ddot{U}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} & 0 \\ K_{cf} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_c \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Burada yapı zemin ortak noktalarının katkısını **(2.2)** denklemini şeklinde yazılır:

$$M_{cc} = M^s_{cc} + M^f_{cc} \text{ ve } K_{cc} = K^s_{cc} + K^f_{cc} \quad (2.2)$$

Yüklerin yapıya direkt olarak uygulanmadığı zemin–yapı sismik etkileşiminde öncelikle serbest zemin hareketinin belirlenmesi gerekir. Üç boyutlu serbest alanda çözümü mutlak yer değiştirme v ve mutlak ivmeyle \ddot{v} ifade edilir. Verilerde basit bir değişiklik yapılarak toplam yer değiştirme U ve ivme \ddot{U} yerine, u ve v yer değiştirmeleri yazılırsa **(2.3)** denklemini elde edilir.

$$\begin{bmatrix} U_s \\ U_c \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_s \\ v_c \\ v_f \end{bmatrix} \quad \text{Ve} \quad \begin{bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_c \\ \ddot{U}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{u}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Denklem **(2.3)**'deki gibi ifade edildiğinde **(2.1)** denklemini artık şu şekilde yazılır:

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{u}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} & 0 \\ K_{cf} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_f \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} & 0 \\ K_{cf} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_c \\ v_f \end{bmatrix} = R \quad (2.4)$$

Eğer serbest alan yer değiştirmesi v_c , yapı tabanının üzerinde sabitse, v_s terimi rijit yapı hareketi olur. Sistemin statik rijit yapısından dolayı, **(2.4)** denklemini daha da basitleştirilir:

$$\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K^s_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Ayrıca dinamik serbest alan denklemi temelde (2.6) denklemini gerektirir.

$$\begin{bmatrix} M^{fcc} & 0 \\ 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{fcc} & K_{cf} \\ K_{cf} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Sonuçta (2.4) denklemi , (2.7) denklemi halini alacaktır:

$$R = \begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M^{scc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)' den anlaşılacağı gibi sistemde zeminin kütlesi etkili değildir.

Sonuç olarak üç boyutlu dinamik denge denklemi tüm sistem için yazılır ve de sönüm değeri de denklemde yerini alırsa oluşan denklem aşağıdaki gibidir.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -m_x\ddot{v}_x(t) - m_y\ddot{v}_y(t) - m_z\ddot{v}_z(t) \quad (2.8)$$

Burada M kütle, C sönüm ve K rijitlik matrisleridir. Eklenen yapının yer değiştirmesi u , bulunmaktadır ve bu değer yapının temelinde sıfır değerini alacaktır. Üst yapının bulunmadığı durumda $\ddot{v}_x(t)$, $\ddot{v}_y(t)$ ve $\ddot{v}_z(t)$ serbest alandaki hareketin ivme değerlerinin bileşenleri ifade eder. Buradaki m_i , matris kolonu yalnız üst yapının kütesinden oluşmaktadır.

Bazı yapı analiz programları direkt olarak sismik yükü tüm kütle matrisi değerlerine uygular bu nedenle bu yapı analiz programlarının zemin-yapı etkileşimini doğru olarak çözdüğünü söylemek mümkün değildir. Bu nedenle zeminin kütesiz olarak tanımlanması bir çözüm olarak görülmüştür. Bu yaklaşım sismik yükün uygulanmasında doğru bir sonuç verebilir; ancak zemin malzemesinden kaynaklanan atalet kuvvetleri ihmal edilmiş olacaktır. Bu hatadan dolayı çözümün mod şekillerinde, frekans değerlerinde ve de kesitlerde oluşan iç kuvvetlerde hata oluşabilmektedir.

Zemin-yapı etkileşimi problemini doğru bir şekilde çözebilmek için bilgisayar programının sismik yükü sadece yapıya etkiyecek şekilde tanımlaması gerekir. Bunun için sistemde hem tüm kütlelerin hem de sadece üst yapının kütesinin tanımlanması gerekir [2, 4].

3. ZEMİN-YAPI DİNAMİK ETKİLEŞİMİ

Yapı ve zemin deprem sırasında birbirini etkileyecek şekilde titreşirler. Zemin ortamının üst yapıya oranla çok rijit olduğu durumlar dışında üst yapı ve zeminin her ikisi de şekil değiştirebilen sistemler olarak statik ve dinamik dış etkilere karşı birlikte tepki gösterir. Bu nedenle gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir. Üstyapı temeli üzerinde ve zemin yüzeyinde temelden fazla uzakta olmayan bir noktadan aynı anda alınan kayıtlar arasında önemli değişiklikler olduğu görülmüştür. Bu durum depremin zemin aracılığıyla üstyapıya etkisinin karşılığı olarak, üstyapının zemini ve dolayısıyla deprem kaydını etkilediğini kanıtlamaktadır. Sonuç olarak zemin-yapı etkileşimi, ortak sistemin iki parçasını oluşturan yapı ile zeminin birbirlerine karşılıklı etkisini ifade eden bir olgu olarak tanımlanmaktadır.

Yapının zeminle temas noktası olan temel, zeminden gelen yüklerin yapıya iletilmesini aynı şekilde yapı kaynaklı yükün zemine aktarılmasını sağlayan önemli bir yapı elemanıdır. Deprem sırasında kaynaktan yayılan dalgalar yapı temeline ulaşınca bir kısmı yapının içerisinden tepeye doğru ilerlerken kalan kısmı ise temelden zemine geri döner. Yapı içerisinde tepeye doğru çıkan dalgalar tekrar tepeden zemine doğru iner, yapının salınışına neden olan bu dalgaların bir kısmı zemine geri dönerken bir kısmı tekrar yapının tepesine doğru ilerlemeye devam eder. Yapıdan zemine geçen bu dalgalara ‘radyasyon dalgaları’ yani “yansıma dalgaları” denir. Eğer yansıma dalgaları az ise yani yapı içerisindeki dalgalar zemine aktarılmamdan yapı içerisinde kalıyorsa yapı uzun süre titreşmeye devam eder. Yapısal sönüm neticesinde enerji tüketen sistem bir süre sonra tekrar durağan hale gelecektir. Bu süreç içerisinde deprem dalgalarından yapıya geçen ve oradan tekrar zemine geri dönen dalgaların neden olduğu enerji kaybına ‘radyasyon sönümü’ yani “geometrik sönüm” denir.

Zemin-yapı dinamik etkileşiminde zeminin özellikleri, yapı rijitliği, yapı kütlesi ve seçilen temel tipi en önemli unsurlardır. Örneğin zemin rijitliğinin üst yapının

kesitlerine gelen kuvvetleri, yer değiştirmeleri ve periyotları oldukça etkilediği görülmüştür. Üst yapının rijitliğinden kinematik etkileşimin; kütlesinden eylemsizlik etkileşiminin meydana geldiği bilinmektedir [1–7].

3.1 Zemin-Yapı Sisteminin Çözüm Yöntemleri

Zemin yapı etkileşimi analizi oldukça karmaşık bir konudur. Bunun idealleştirilmesi için yapılan her kabule göre farklı sonuçlar doğuracağı bilinmelidir. Doğru sonuçlar elde etmek için modelin uygun bir şekilde kurulması gerekmektedir. Bu modellerin oluşturulmasında kullanılan başlıca iki yöntem mevcuttur bunlar Alt Sistemlere Ayırma Yöntemi ve Direkt Metottur.

3.1.1 Alt sistemlere ayırma yöntemi

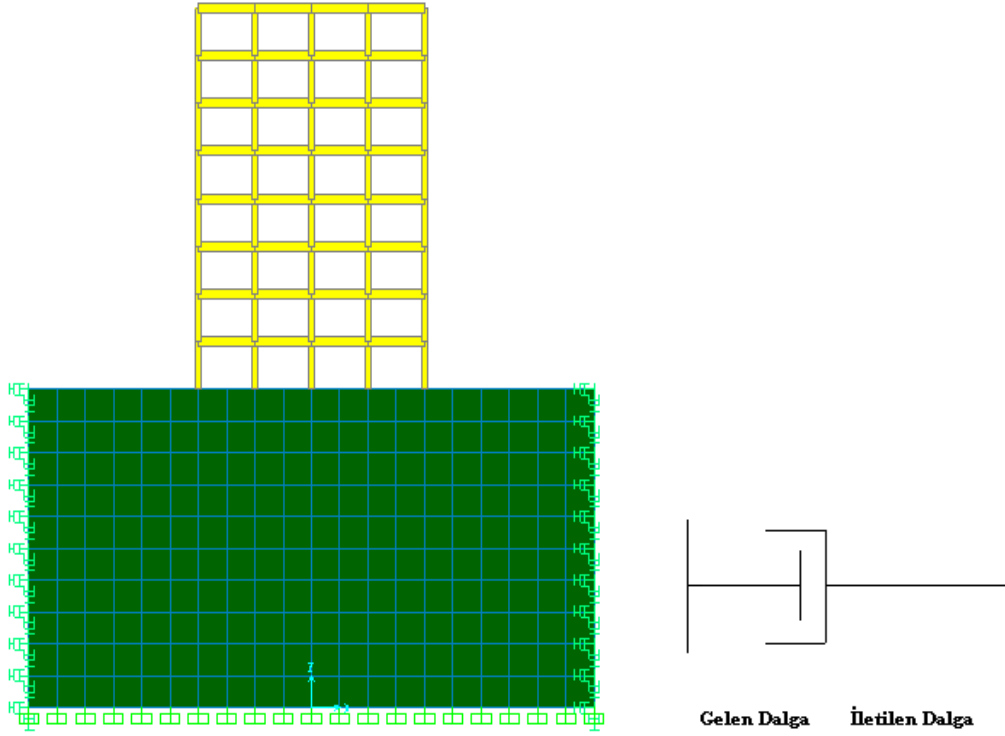
Yapı ve zemin ilk başta ayrı olarak ele alınır, sistemlerin kendi içerisinde denge denklemleri yazılır daha sonra bu denge denklemleri yapı ve zeminin keşişim yüzeyinde denge denklemleri ve geometrik uygunluk şartları dikkate alınarak birleştirilir. Böylece zemin ortamı sadece zemin -yapı ara yüzeyinde, sınırlı sayıdaki ayrıık düğüm noktalarında temsil edilen bir alt sistem olarak idealleştirilmiş olur.

3.1.2 Direkt metot

Bu yöntem, zemin ortamının da yapı sistemi gibi ayrııklaştırılmasını ve oluşturulan zemin-yapı modelinin, tanımlanan statik veya dinamik etkiler altında doğrudan analizini öngörür. Burada statik ve dinamik etki durumlarında zemin ortamının sınırlarının belirlenmesinde farklılıklar vardır. Statik durumda zemin ortamının sınırları, yer değiştirmelerin yeteri kadar küçüldüğü düğüm noktalarıyla tanımlanır. Bu düğüm noktalarına basit mesnet konulması ile zemin ortamı idealleştirilmiş olur Dinamik durumda ise geometrik sönümü nedeni ile zemin ortamı ne kadar büyütülürse bytlsn, sınırlar basit mesnetli olarak tanımlanamaz. Bu nedenle modellemede Şekil 3.1’de görüldüğü gibi geometrik sönüm koşulunu sağlayan mesnetlerin kullanılması gerekmektedir. Geçirgen sınırlar olarak ta adlandırılan bu tür mesnetler, sonlu elemanlarla modellenen zemin bölgesinden dışa doğru yayılan dalgaların içeri doğru yansımaya engel olup enerjinin yutulmasını sağlar.

Zemin-yapı etkileşimi problemi, sınırsız zemin ortamında dinamik enerjinin yayılması, zemin sönümü, yapının ve zeminin birbirilerinin davranışını etkilemesi,

zeminin doğrusal olmayan davranışı gibi özellikleri nedeniyle çözümü son derece karmaşık ve zor olan bir konudur.

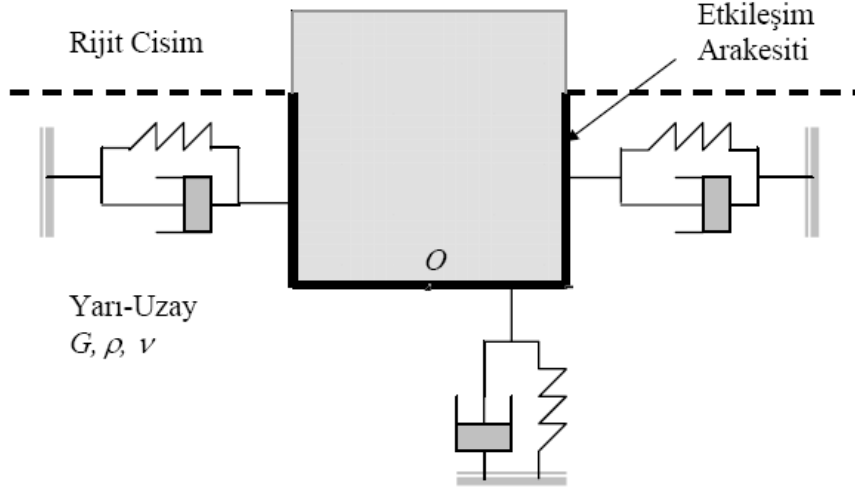


Şekil 3.1 : Zemin ortamının sönümleyicilerle modellenmesi.

Ayrıca zemindeki süreksizlikler, zeminin yarı sonsuz bir ortam olması, zemindeki tabakalaşma ve bu tabakaların değişkenliği, zemindeki yeraltı suyu, zeminin çekme gerilmesi almayan bir malzeme olması gibi olgular zemin yapı etkileşim problemlerini klasik analiz problemlerinden farklı kılan özelliklerdir. Zeminin dinamik karakterlerinin belirlenmesinde, zemin rijitliğini, sönümünü ve zemin ortamında sistemden yansıyan dalganın sisteme geri dönmeyecek şekilde dağılmasını sağlayan modeller kullanılmalıdır [8–11].

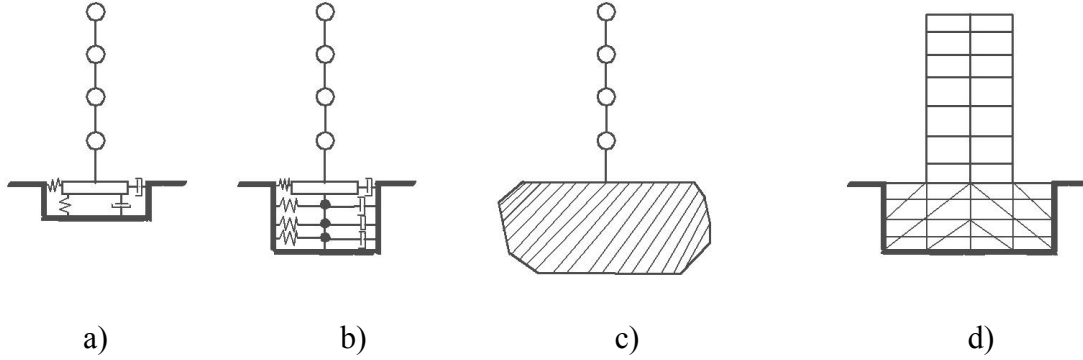
3.2 Zemin Ortamının Modellenmesi

Zemin ortamını modellemekte kullanılan çeşitli yöntemler mevcuttur. Örnek olarak Şekil 3.2’de görüldüğü gibi zeminin eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle modellenebilir. Bu gösterimde yaylar, zeminin şekil değiştirebilme (fleksibilite) özelliğini, sönümleyiciler ise enerji kaybına eşdeğer anlamda kullanılan (fiktif) zemin sönümünü (radyasyon sönümü veya geometrik sönüm) açıklamaktadır.



Şekil 3.2 : Zeminin eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesi [12].

Zeminin yaylar ve sönümleyiciler ile modellendiği gibi modelleme için farklı yaklaşımları da bulunmaktadır, bunlar Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3 : Zemin ortamının modelleri [13].

- a) Yapının temelinde kabul edilen eşdeğer elastik yay ve sönümlerle modellenmesi.
- b) Zemin düşey doğrultuda elastik yay ve sönümlerin bir gelmesinden oluşan kayma kirişi şeklinde modellenmesi.
- c) Yapının elastik veya viskoelastik yarı sonsuz ortamda yarı sonsuz olarak modellenmesi.
- d) Zeminin iki veya üç boyutlu sonlu elemanlarla modellenmesi [12, 13].

3.2.1 Zeminin eşdeğer elastik yay ve sönümleyicilerle modellenmesi

Yapının çevresini saran zemin yapısının, etkileşimli yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesiyle ile oluşturulur. Farklı zemin çeşitleri için yay ve sönüm değerlerindeki katsayılar değiştirilerek zemin özelliklerine benzetilir. Ancak bu yöntemde bilinmesi gereken bazı önemli hususlar vardır. Analizde zemin ortamının malzeme sönümünün olmaması sistemde hataya neden olabilir aynı zamanda zeminin geometrik sönümü etkisi de, malzeme sönümü gibi göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle malzeme ve geometrik sönümleri doğru şekilde yansıtacak uygun bir sönüm değeri atanarak model oluşturulur. Bu değerlerin %7 ile %10 arasında seçilmesi uygun olabilir.

Zeminin eşdeğer elastik yay ve sönümlerle modellenmesi, ayrıca zemindeki şekil değiştirmeleri, zeminin çoklu tabakalaşmasını, zemine gömülü yapının ifadesini, yapıyan yüzlerdeki hareketin değişimini ve komşu yapıların etkilerini modele yansıtması gibi bazı zayıf noktaları bulunmaktadır [14].

3.2.2 Sonlu elemanlar yöntemi ve çözümü

Günümüzde neredeyse tüm mühendislik alanlarında özellikle inşaat mühendisliğinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, aynı zamanda kullanılan inşaat mühendisliği programlarının da temel çalışma mantığını oluşturmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemini kısaca özetlemek gerekirse:

Sonlu Elemanlar Yöntemi, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. İlk kullanımı 1950'li yıllarda İnşaat Mühendisliğinde olmuştur. Yöntem çok güçlü ve çağdaş bir sayısal hesaplama yöntemidir. Son kırk yılda bilgisayarların hızlı gelişimine paralel olarak gelişen sayısal hesap yöntemleri içinde çok önemli bir yer tutmaktadır [15].

Bu yöntem:

- Karmaşık ve düzensiz geometrik yapıya sahip sistemlerin incelenmesinde kullanılabilir.
- Değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde uygulanabilir. Örneğin, Malzemenin heterojen (beton gibi) olması, anizotrop (ahşap gibi) olması, nonlinear malzeme olması gibi.

- Karışık ve süreksiz sınır koşullarının ve yüklemenin düzgün yayılı olmaması halinde kullanılabilir.
- Lineer ve lineer olmayan problemlerde kullanılabilir.
- Kararlı hal, zamana bağlı ve öz değer problemlerinde kullanılabilir [11].

Sonlu elemanlar yönteminde, sonlu sayıdaki eleman birbirine düğüm noktaları olarak adlandırılan sonlu sayıda noktayla bağlıdır ve her bir düğüm noktası serbestlik derecesi kadar bilinmeyen içermektedir. Eleman davranışı, bu bilinmeyen serbestlik dereceleri içeren denklemlerle ifade edilir. Gerek düğüm noktalarında gerekse eleman sınır yüzeylelerinde bazı süreklilik şartları sağlandığında cismin veya yapının matematiksel bir modeli elde edilmiş olur. Böylece sonsuz serbestlik derecesi olan bir model ortaya çıkar. Bu elde edilen modele sistemin sonlu eleman ağı adı verilir.

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir, sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin yer değiştirmenin) değeri o elemanın düğüm noktalarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğüm noktalarındaki değerlerdir.

Enerjinin minimum olması prensibi kullanılarak büyüklük alanının düğüm noktalarındaki değerleri için bir denklem takımı elde edildiğinde, bu denklem takımının matris formundaki gösterimi **(3.1)** denkleminde şeklindedir.

$$[M][\ddot{U}] + [C][\dot{U}] + [K][U] = [F] \quad (3.1)$$

Burada $[U]$ düğüm noktaları yer değiştirme vektörü, $[\dot{U}]$ hız vektörü, $[\ddot{U}]$ ivme vektörü, $[F]$ bilinen yük vektörü, $[C]$ sönüm matrisi, $[M]$ kütle matrisi ve $[K]$ ise bilinen sabitler matrisidir.

Gerilme analizinde $[K]$ rijitlik matrisi olarak bilinmektedir [8, 12].

Sonlu elemanlar yönteminde dinamik yapı zemin etkileşimi probleminin doğru sonuçları vermesi için bazı hususlara dikkat etmek gerekmektedir. Zemin ağının sınırlarının yeterince büyük alınması doğru sonuca ulaşmakta faydalı olacaktır; ancak kullanılan programların kapasitesi de önemlidir. Seçilen alanın çok büyük olması bilgisayar kapasitesini zorlayacağı ve işlem süresini uzatacağı için zemin belli bir alanla sınırlandırmak uygun olacaktır.

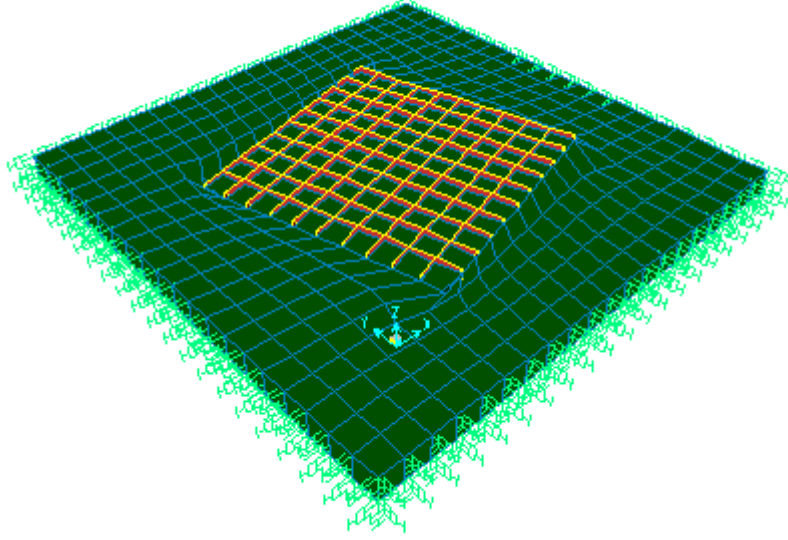
Bu sınırlamadan dolayı bir miktar hata oluşması muhtemel olsa da bu hata göz ardı edilebilir. Malzeme sönümü de sınırın belirlenmesinde etkilidir. Malzeme sönüm değeri fazlaysa ağ sınırı yapıya yaklaştırılabilir.

Zemin ağının tabanının belli bir derinlikte kaya tabakaya oturduğu varsayımı yapılır bu nedenle sonlu eleman ağında bu noktalar ankastre olarak seçilebilir. Zemin tabaka kalınlığı da sistemi etkileyen önemli bir etkidir. Yapının altında ve kaya zeminin üzerinde bulunan zeminin tabakalarının kalınlığı doğru bir şekilde sisteme yansıtılması gerekir bu durum özellikle yumuşak zeminler için geçerlidir. Ayrıca zemin sınırlarında bulunan kesim yüzeyleri uygun modellenmezse kapalı ortam içerisinde yayılan dalgalar, sınırlara çarpıp tekrar analiz ortamına geri dönerek çözümün olumsuz yönde etkilenmesine neden olacaktır. Bu durumun engellenmesi için kesim sınırlarının özel sınır şartlarıyla dalga geçirimsizliğini sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Bu amaçla sınıra vizkos sınır koşullarını sağlayan elemanlar konulmalıdır.

Sonuç olarak sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulmuş zemin-yapı etkileşim sisteminin, yaylar ve sönümleyicilerle oluşturulmuş sistemden daha iyi sonuç verdiğini düşünmek yanlış olmayacaktır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulmuş zemin-yapı etkileşim sisteminin üstünlüklerini şu şekilde sıralayabiliriz:

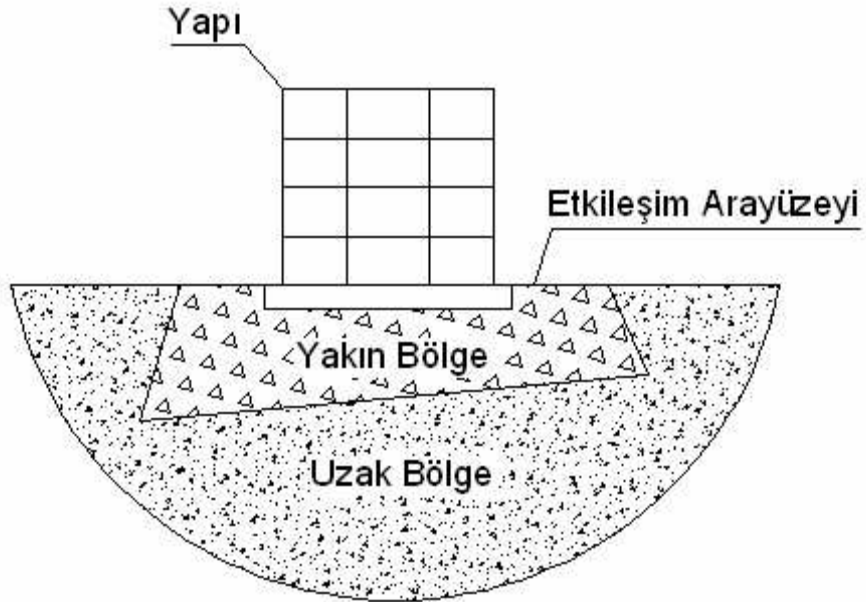
- Kullanılan modellerde, zeminin farklı özellikte katmanlardan oluştuğu gerçeği ifade edilebilmektedir.
- Zeminin deformasyonu Şekil 3.4'de görüldüğü gibi sisteme yansıtılabilmektedir.
- Yapının tabanındaki hareketin, serbest alandaki hareketle aynı alınması zorunluluğu yoktur.
- Analizde komşu yapıların etkisi hesaba katılabilmektedir.
- Malzeme ve geometrik sönümleri sisteme yeterince yansıtılabilmektedir
- Zemin profilinde ivmenin değişimi dikkate alınabilir [14].



Şekil 3.4 : Mesnetlerde çökme, yükselme veya dönmelerin oluşması.

3.3 Zemin Ortamın Kısımları

Zemin-yapı sisteminde yükleme ve kuvvetler, ortamlar aracılığıyla iletilir. Bu ortamlar hesaplama kolaylığı sağlamak için bazı araştırmacılar tarafından Şekil 3.5’de görüldüğü gibi üç gruba ayrıştırılmıştır.



Şekil 3.5 : Dinamik sınırsız ortam-yapı etkileşimi [1].

3.3.1 Sınırsız ortam

Zemin ortamının sonsuz olmasından dolayı belli sınırlarla gösterilen bu ortam, yapının dinamik rijitlik matrisine eklenen empedans katsayıları ile karakterize edilir. Bu kısmın doğrusal davranış gösterdiği varsayılır.

3.3.2 Sınırlı ortam

Yakın bölge de denilen ortamdır. Yapının sınırsız ortam ile etkileşime girdiği, malzeme davranışı bakımından büyük gerilme ve şekil değiştirmelerin olduğu ve zemin davranışının lineer olmayan davranış gösterdiği kabul edilen, zemin davranışının doğrusal davranış gösterdiği etkileşim ara yüzeyine kadar olan bölgedir.

3.3.3 Etkileşim ara yüzeyi

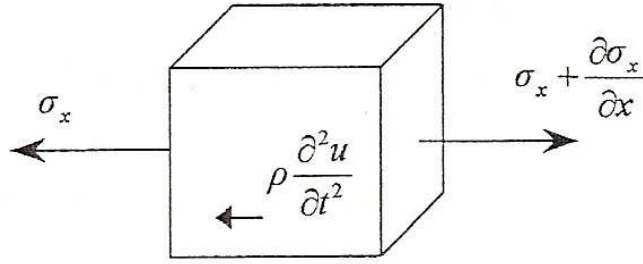
Zemin - yapı etkileşiminin sayısal olarak analizi uygun bir şekilde modellenmesi gereken ara yüzey etkilerini içerir. Etkileşim ara yüzeyi sınırlı ortam ile sınırsız ortamın etkileşime girdiği fiktif yüzey olarak kabul edilmektedir.

Yapı ile temasta olan sınırlı zemin ortamı (yakın bölge) ile yapının kendisi doğrusal olmayan davranış gösterirken, yarı sonsuz sınırsız zemin ortamı ise doğrusal olarak davrandığı kabul edilir. Yapı ile bitişik sınırlı zemin ortamının büyüklüğü, zemin davranışının doğrusal olmayan davranıştan, doğrusal davranışa geçiş yaptığı etkileşim ara yüzeyine kadar olan bölge olarak kabul edilmektedir [1, 2, 8, 10].

3.4 Viskoz Sınır Şartı

Zemin-yapı etkileşimini incelemekte kullanılan sistemin doğru sonuçlar vermesi için çok büyük zemin hacminin seçilmesi gerekmektedir. Çünkü zemin içinde yayılan dalgalar sonsuza ulaşmaktadır. Büyük bir zemin hacmine oturan yapı gerçek davranışa yakınsak sonuçlar verir; ancak böyle bir işlem çok uzun ve zor olduğundan viskoz sınır şartı kullanılması uygun olacaktır. Viskoz sınır koşulları, enerjinin sınırlara çarpıp tekrar sisteme geri dönmesini engelleyerek sistemde zemin hacmini sınırlama fırsatı oluşacaktır.

Dalga yayılmasında kuvvetlerin birim küpe etkisi Şekil 3.6' de görülmektedir.



Şekil 3.6 : Birim küpe etkiyen kuvvetler.

X doğrultusunda düzlem dalga yayılması düşünülerek sınır koşulları yazılabilir.

X doğrultusundaki denge denklemlerinden aşağıdaki denklemler çıkarılmıştır.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

Klasik denge dalga yayılması formuna ulaşmak için, (3.2) denklemini,

$$\sigma_x = E_C \varepsilon_x = E_C \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.3)$$

(3.3) denklem bağıntısını kullanarak yeniden düzenlersek klasik dalga yayılması formülüne ulaşırız.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - V_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3.4)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E_C}{\rho}} \quad (3.5)$$

Bu formüllerde kullanılan V_p malzemenin dalga yayılma hızı, ρ birim hacmin kütlesi, E_C ise bulk modülünü ifade etmektedir.

$$E_C = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E \quad (3.6)$$

Pozitif x doğrultusundaki harmonik dalga yayılımı için (3.4) denklem çözümünün yer değiştirmesi şöyledir:

$$u(t, x) = U \left[\sin \left(\omega t - \frac{\omega x}{V_p} \right) + \cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{V_p} \right) \right] \quad (3.7)$$

Çözüm (3.2) denklemde yerine yazılarak kontrol edilebilir. ω harmonik hareketin frekansıdır. Herhangi bir x noktasındaki parçacığın hızı $\frac{\partial u}{\partial t}$:

$$\dot{u}(t, x) = U\omega \left[\cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{V_p} \right) - \sin \left(\omega t - \frac{\omega x}{V_p} \right) \right] \quad (3.8)$$

X doğrultusundaki şekil değiştirme ise şöyledir:

$$\varepsilon(x, t) = \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\dot{u}(x, t)}{V_p} \quad (3.9)$$

Gerilmede artık daha basit bir şekilde söyle ifade edilir:

$$\sigma(x, t) = E_c \varepsilon(x, t) = -V_p \rho \dot{u}(x, t) \quad (3.10)$$

Viskoz elemanlarındaki kuvveti, $V_p \rho$ sabit sönüm değeri olarak ifade edebiliriz. Bu formülle sınırdaki viskoz sınır şartını sağlayıp dalganın sınırdan yansıyor tekrar sisteme geri dönmesini engeller ve sınırdaki enerji geçişini sağlar. Sönüm değeri birim alanda $V_p \rho$ olarak verilmişse kayma dalgası sınır koşulu, serbest alana paraleldir. Ayrıca sınır birim alanında $V_s \rho$ değerinin kullanılması halinde, kayma dalgası sönüm katsayısı değerini elde etmek mümkün olacaktır.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.11)$$

V_s Kayma dalgası hızı, G kayma modülüdür, A alanı, E zemin elastisite modülü, c_s ise efektif sönüm değerini göstermektedir [4, 9, 16].

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.12)$$

$$c_s = \rho V_s A \quad (3.13)$$

4. ZEMİN DEĞİŞKENLERİ

Zemin, hesaplanması kolay olmayan birçok belirsizliği içinde bulunduran bir malzemedir. Bu nedenle zeminin modellenmesi son derece güçtür ve yeterli yaklaşımı sağlamak için kapsamlı çalışma gerekmektedir.

4.1 Zemin Sönümü

Zeminde meydana gelen sönümleri iki grupta incelemek mümkündür:

4.1.1 Malzeme sönümü

Homojen, lineer elastik ortamda dalga hareketi genliğinde değişme olmaksızın hareketini devam ettirir. Gerçek malzemelerde ise böyle bir davranıştan söz etmek mümkün değildir çünkü gerçek malzeme içerisinde elastik enerjisinin bir kısmı ısıya dönüşerek kaybolur ve zemin içindeki dalganın genliğinde azalma meydana gelir. Zemin malzemesi ise sönümünün fazla olduğu bir yapıdır.

4.1.2 Geometrik sönüm

Kaynaktan yayılan enerjinin bir kısmı daha geniş bir hacme dağılırken kaybolur. Bu durum dalga genliklerinin azalmasının bir sonucudur. Geometrik sönüm radyasyon sönümü olarak da bilinir ve karmaşık bir dalga yapısına sahiptir. Yapı-zemin etkileşiminde, radyasyon sönümünü doğru bir şekilde ifade etmek son derece önemlidir [2, 14].

4.2 Yerel Zemin Koşulları

Dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelen depremlerin sonuçları incelendiğinde, yapılarda oluşan hasarların önemli bir kısmının yerel zemin koşullarını dikkate alınmamasından kaynaklandığı görülmüştür. Zemin de sınılaşma, göçme ve oturma gibi birçok olay meydana gelebilmektedir. Bu olumsuzluklar yapıya gelen deprem kuvvetinin genlik, frekans içeriği ve süre gibi özelliklerini değiştirebilmekte ve de yapının hasar almasına neden olmaktadır. Deprem sırasında zeminin neden olduğu bu olaya mühendislikte zeminin büyütme etkisi “amplifikasyon” denir. Buna en iyi

örnek 1985 Mexico City depremidir; Kaya ortamında ivme $a_{\max}=0.035g$, iken yumuşak zeminde ivme ortamında $a_{\max}=0.168g$ değerinde ölçülmüştür.

Zemin büyütmesi, deprem sırasında zeminin ve dolayısıyla yapının, depremi hangi şiddette hissedeceğinin bir ölçüsüdür. Ayrıca bir zemin tabakasının yüzeyinden elde edilen kayma dalgası hızı, söz konusu zeminin büyütme seviyelerinin belirlenmesi açısından oldukça önemli bir bilgidir [17]. Çizelge 4.1 kaynaklardan alınmıştır.

Çizelge 4.1 : Zemin büyütme katsayısı [3].

Deprem dış odağına uzaklık (km)	Yumuşak alüvyon tabakaları	Orta katı zemin tabakaları
0-25	0,6	0,75
25-50	1,1	1,2

4.3 Yerel Zemin Kalınlıkları

Yerel zemin kalınlığı deprem sırasında yapıyı etkileyen önemli bir unsurdur. Yeryüzüne yakın tabakalar ne kadar yumuşak ve derin olursa, maksimum ivmelerin görüldüğü periyot aralığının da o kadar fazla olacağı bilinen bir gerçektir. Bu nedenle zayıf zeminde sadece alçak katlı yani düşük periyotlu binalara izin verilmelidir. Sağlam zeminlerde maksimum ivmelerin görüldüğü periyot aralığı ise oldukça kısadır. Bu tür zeminlere ise çok katlı büyük periyotlu yapılar inşa edilmelidir. Bu tez çalışmasında bu kapsamda yapılan sayısal örneklerde de görülmüştür ki yerel zemin kalınlığı üst yapı elemanlarındaki yer değiştirme, ivme gibi değerlerin yanında yapı elemanlarında oluşan iç kuvvetleri de etkilemektedir.

4.4 Zemin Spektrumları

Farklı zeminler farklı spektrum eğrilerine sahiptir ve özellikle 0,5 saniyeden büyük periyotlarda spektrum eğrilerinde önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Spektral değerlerin, yumuşak ve orta sertlikteki kil dolgusu ve kohezyonsuz zeminlerde, 0,5 sn den büyük periyotlar için, sert zeminler ve kayaya göre daha büyük olduğu

görülmektedir. Bu durum söz konusu zeminlerin uzun periyoda ait titreşim bileşenlerinin daha büyük oranlarda yer hareketi ile etkileşime girdiğini gösterir [13].

4.5 Sıvılaşma

Kumlar ve plastik olmayan siltlerin en temel özelliklerinden olan sıvılaşma, zemin mekaniğinin de üzerinde sıkça durulan kavramlarından biridir. Özellikle yüzeye yakın suya doymuş kum tabakalarında, deprem titreşimlerinden dolayı zemin daneleri arasındaki denge bozulur ve zeminde sıkışmalar meydana gelir buna bağlı olarak hacimde azalmalar oluşur. Eğer su drenaj yoluyla bölgeden uzaklaşmaz ise boşluk suyu basıncında sürekli artış meydana gelir, nihayetinde artış ortalama çevre basıncına eşit olunca efektif gerilmeler sıfır olur ve bu durumda kum dayanımını kaybeder. Deprem sırasında özellikle ıslah edilmemiş göl, nehir, deniz kenarlarında ve bataklık bölgelerinde zeminlerin taşıma kapasitesi kaybetmesinden dolayı birçok yapının hasar aldığı bilinmektedir [3].

4.6 Zemin Yenilmesi

Çok genç yumuşak veya gevşek zeminler sıvılaşmasa dahi, depremin uyguladığı çevrimsel gerilmelerden olumsuz etkilenir ve aşırı ötelenmeler gösterirler. Bunun sonucu temelin taşıma gücü aşılar, çoğunda oturmalar kabul edilebilir limitlerin üstüne çıkar [18].

4.7 Zemin Periyodu Etkisi

Bir harmonik hareketin tur süresine periyot denir. Frekans ise birim zamandaki titreşim sayısıdır. Periyodik bir kuvvetin etkisindeki sistem, salınımlar yapar ve eğer harekete neden olan etkinin frekansı sistemin doğal frekansına eşit olur ise sistemin genliği sonsuza doğru artma eğilimi gösterir. Bu olaya rezonans denir. Salınımlar esnasında sistemin normal durumuna göre yaptığı yer değiştirme miktarı genlik olarak ifade edilmiştir. Yapının sonsuz genliğe ulaşması demek sistemin stabilitesini kaybetmesi manasına gelmektedir.

Örnek vermek gerekirse; kesintili rüzgâr etkisi altındaki bir köprüde salınımlar oluşmaya başlar. Salınımlar eğer sistemin doğal frekansına eşit olursa, sistemin genliği sonsuza dek artma eğilimi gösterir; aynı şekilde bu olaya, deprem dalgaları nedeniyle oluşan salınım etkisi altındaki bir binayı da örnek gösterebiliriz.

Zeminlerin de yapılar gibi periyotları bulunmaktadır. Kayalık, sıkı kum ve çakıl içeren zeminlerin periyotları kısa iken yumuşak kumlu ve killi zeminlerin periyotları oldukça uzundur. Depren sırasında yapı-zemin sistemi kendi karakteristik özelliklerine bağlı olarak salınmaya başlar. Eğer yapı (T) ve zemin hakim periyotları (T_0) bir birine yakın olursa sistem rezonans etkisine girer. Bu durum yapının büyük hasarlar almasına neden olur. Örneğin salınım periyodu 0,8 sn olan zeminin üzerine periyodu 0,8–0,9 sn olan bir yapı inşa etmek rezonans etkisi nedeniyle uygun değildir [19].

Bu duruma en iyi örnek yine 1985 Mexico City depremidir. Bu depremde Mexico City'nin kil tabakası üzerine inşa edilmesi nedeniyle, zemin 8–18 katlı yapılarla rezonans etkisine girmiştir ve bu yapıların çoğu ciddi hasarlar almış bir kısmı ise yıkılmıştır. Daha az veya daha çok katlı yapılarda ise hasar nispeten az olmuştur.

4.8 Yüzey Topografyasının Etkisi

Zemin yapı etkileşimini etkileyen önemli bir durum yüzey şekilleridir. Yapının zeminde çukur bir bölgede olması veya şeve yakın bir alanda bulunması dinamik davranışını oldukça etkilemektedir. Şayet yapı şevin üst kısmındaysa alt kısımda olmasına göre daha büyük genliklerde hareket ettiği görülmüştür. Bununla birlikte yapı şevin üst kısmında olup, şeve doğru yaklaştıkça genlikler daha da artmaktadır. Genliklerdeki bu artış zemin yüzeyinde gelen ve yansıyan dalgaların süresizliğinin olduğu bu bölgede etkileşime girmelerine neden olduğu ve dolayısıyla sistemin bu bölgesini daha fazla etkilediği sonucunu doğurmaktadır. Yapının şevin üst kısmında iken daha büyük genliklerde hareket etmesi, yıkıcı deprem olaylarında yamaç, tepe, kanyon gibi topografyaların üst kısımlarında inşa edilen yapılarda alt kısımdaki yapılara göre daha fazla hasar meydana gelmesinin nedenini açıklamaktadır. Şev eğimi azaldıkça hareketin genliğinde de azalmalar meydana geldiği bilinmektedir. Dolayısıyla en büyük genlikler zemin tabakası yüzeyinde dik bir şev olması durumunda, en küçük genlikler yüzeyde herhangi bir şev yoksa oluşur.

Çukur bölgelerde ise sistemin davranışı yine yapının konumuna göre değişmektedir. Ancak bu durumda yapı çukurun üst kısmında olup, çukura doğru yaklaştıkça genliklerde azalmalar meydana gelmekte ve yapının çukurun içerisinde olması durumunda minimuma inmektedir. Dolayısıyla en küçük genlikler yapı çukurun içerisindeyken oluşur [20].

5. ZEMİN MODELLERİ

Elastik zemin üzerine oturan plak ve kiriş modelleri ilk olarak geoteknik, demiryolu ve karayolu mühendisleri tarafından tasarım ve analiz için kullanılmıştır. İlk olarak kullanılan basit modeller Winkler teorisine dayanmaktaydı. Winkler zemin modelinde zemin, birbirinden bağımsız sadece düşey doğrultuda çalışan, lineer elastik yaylardan oluşmuş bir sistem olarak ifade edilmektedir. Her bir yayın tek başına çalışmasından dolayı sadece yükün etki ettiği yaylarda çökmeler meydana geleceği düşünülmüştür.

Bu teoride kullanılan q zemin tepkilerinin, w zemin çökmeleri ile doğru orantılı olduğu kabul edilmiştir ve bu kabule dayanarak:

$$q(x, y) = kw(x, y) \quad (5.1)$$

bağıntısı kabul edilmiştir.

Bununla beraber, Winkler modelinin bazı eksiklikleri bulunmaktadır. Winkler modeline göre zemini temsil eden yaylar arasında bir etkileşim söz konusu değildir. Bu kabul, zeminin süreksiz bir ortam olduğu düşüncesini de beraberinde getirmektedir. Bir diğer eksiklik ise; yay katsayısının, temelin rijitliği, geometrisi, zemin özellikleri gibi birçok parametreye bağlı olması ve ampirik bağıntılardan elde ediliyor olmasıdır. Bu nedenlerle Winkler modelinin zaafalarını gidermek amacıyla daha gelişmiş iki parametrelilik zemin modelleri tasarlanmıştır. (Filonenko-Borodich, 1940; Pasternak, 1954; Vlasov ve Leontiev, 1966; Hetenyi 1946; Kerr 1964). Bu modellerde de ilk parametre, Winkler modelinde olduğu gibi yay rijitliğidir, ikinci parametre ise lineer-elastik yayların etkileşimini temsil etmektedir. Bu modellerin tamamı matematiksel olarak eşittir ancak zemin parametreleri farklıdır.

Uygulamada kiriş modelleri de kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan iki model, Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş modelleridir. Euler-Bernoulli modeli ince kirişler için çok uygundur. Kısa ve kalın kirişlerde ise yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir.

Timoshenko kiriş teorisi ise, kirişlerin statik ve dinamik davranışlarını modellemekte

yaygın olarak kullanılan bir diğerk yöntemdir. Timoshenko modelinde kirişlerin titreşimi modellenirken eğilme ve kayma etkilerinin her ikisini de aynı anda dikkate alınmaktadır. Timoshenko kiriş teorisine göre, yer değıştirmelerden önce kiriş eksenine dik olan düzlemsel bir kesit, şekil değıştirmeden sonra da düzlemselliğini korur, ama kiriş eksenine dikliğini kaybeder. Ayrıca Timoshenko kiriş teorisinde, kayma birim uzamalarının ve yanal kayma gerilmelerinin kesit boyunca sabit olduğu kabul edilmektedir [21, 22, 23].

Tüm anlatılanları özetlemek gerekirse inşaat mühendisliği için zemin yapı etkileşimi son derece önemlidir. Bu nedenle zemin yapı etkileşimini en iyi şekilde yansıtacak modeller kullanılmaya çalışılmıştır. Bunun için ilk olarak yapı-zemin etkileşimini en iyi şekilde yansıtılacağı zemin modeli oluşturulmuştur. Zemin ve plağa ait değerler seçilmiş ardından daha önceki aşamalarda elde edilen bilgilerden yararlanılarak matematik modeller kurulmuştur, sonuçta problem çözümü gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tartışmaya açılmıştır.

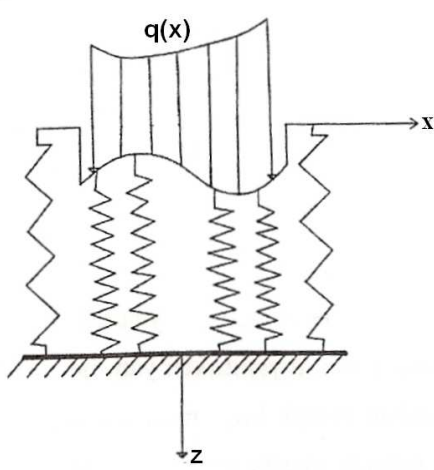
5.1 Winkler Zemin Modeli

Zemin-yapı etkileşimin hesaplanmasında kullanılan ilk modeldir. İfadesindeki basitlik ve hesaplanmasında mühendislere sağladığı kolaylık nedeniyle günümüzde hala en sık kullanılan zemin modelidir. Winkler modelinde zemini karakterize eden sadece k değeri yani, zemin yatak katsayısı değışkeni bulunmaktadır. Bu nedenle Winkler modeline ‘tek parametreliz zemin modeli’ demek doğru bir yaklaşım olacaktır.

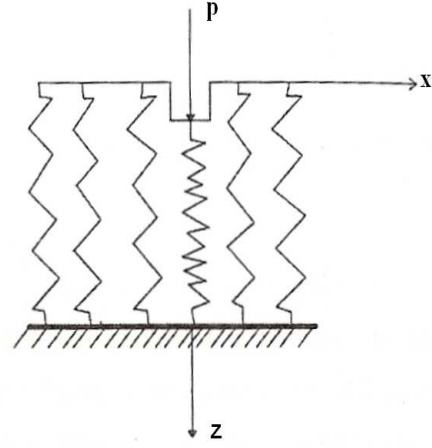
Winkler modelinin daha önce anlatılan nedenlerle yetersiz kalmasından dolayı araştırmacılar bu konuyu daha fazla irdelemiş ve yeni zemin modelleri ortaya koymuşlardır.

Bu modellerin bir kısmı iki parametreliz zemin modelleri olsa da geliştirilen tüm modellerin Winkler yöntemiyle bağlantısı bulunmaktadır.

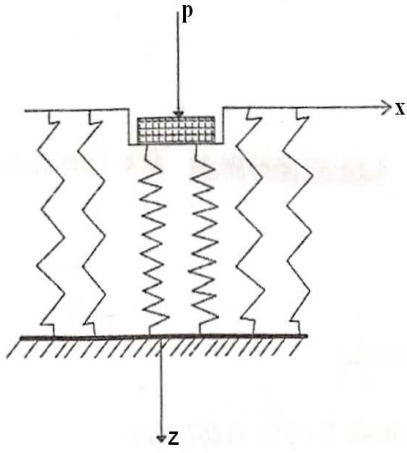
Şekil 5.1’de Winkler modelleri için değışik yükleme durumlarındaki yer değıştirme durumları gösterilmiştir.



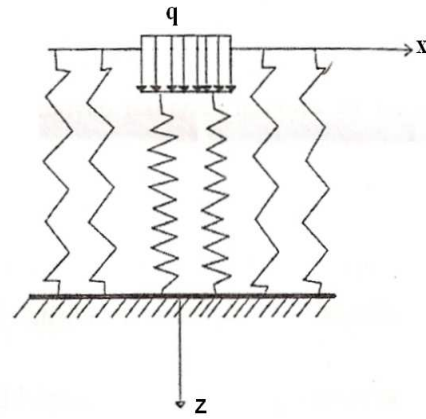
a) Düzgün olmayan yayılı yük durumu



b) Tekil yük durumu



c) Rijit cisimle yükleme durumu



d) Düzgün yayılı yük durumu

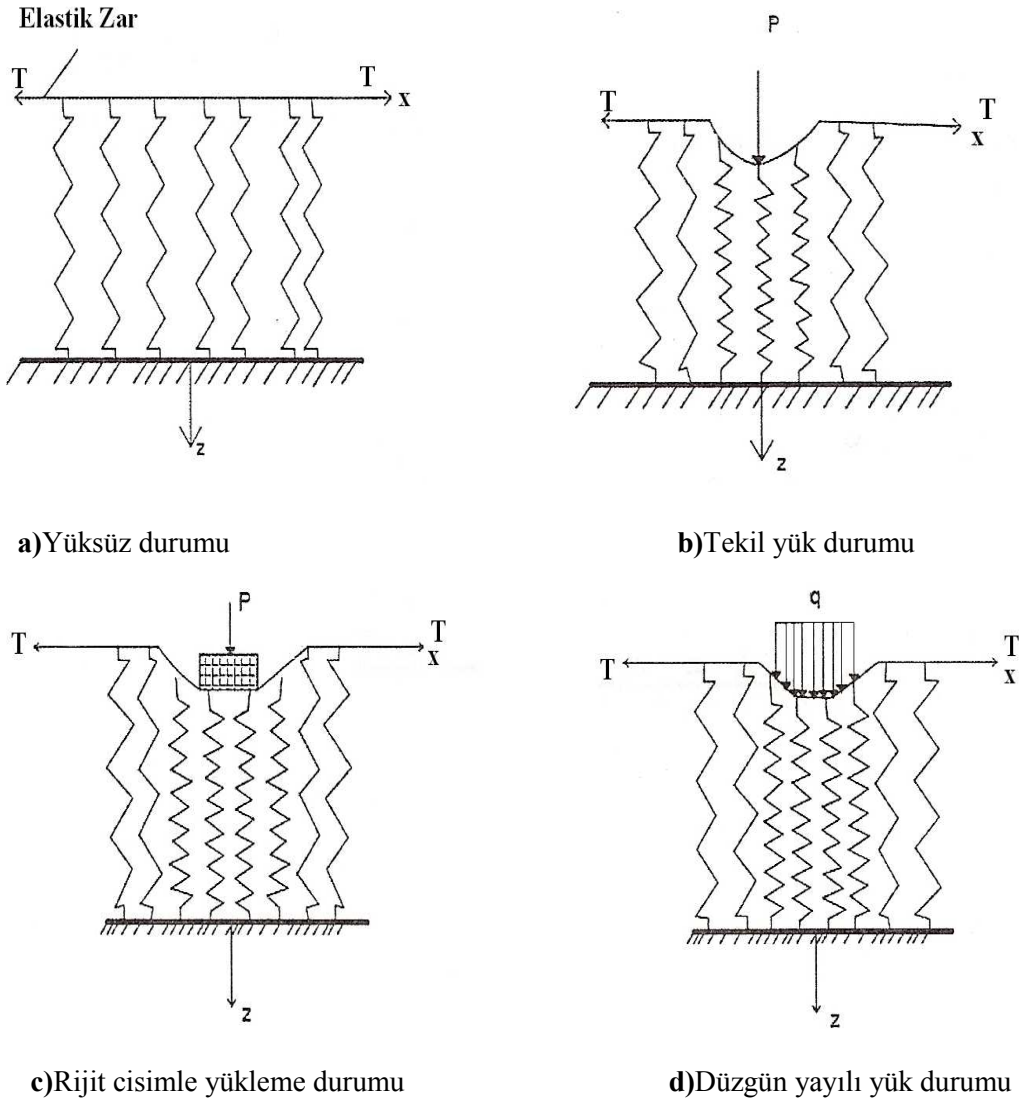
Şekil 5.1 : Winkler zemin modeli.

5.2 Filonenko –Brodich Zemin Modeli

Filonenko-Brodich modelinde (1940–1945), Winkler modeline farklı olarak Şekil 5.2 ‘de yayların üst yüzeyinde elastik bir zar olduğunu kabul etmektedir.

Bu modelde sisteme yükleme yapılması halinde yüzeydeki zarda bir miktar gerilme meydana gelecektir. Zar ve yay sisteminin dengesinden zemin reaksiyonu denklem (5.2) şekilde bulunur:

$$q(x) = kw - T \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (5.2)$$



Şekil 5.2 : Filonenko-Brodich zemin modeli.

Formülden de anlaşıldığı gibi Filonenko-Brodich modeli iki parametrelidir, k Winkler modelinde olduğu gibi zemin yatak katsayısı iken, T değeri ise yayları birbirine bağlayan zarda oluşan çekme kuvvetini ifade eder [24, 25].

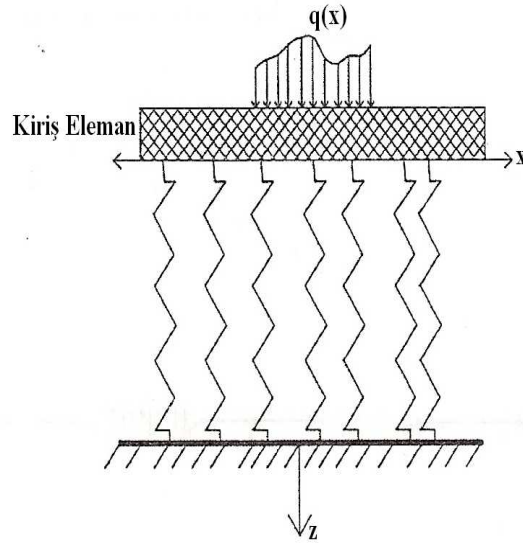
5.3 Hetenyi Zemin Modeli

Şekil 5.3'de görüldüğü gibi Hetenyi modelinde (1946), Winkler yayları üzerinde iki boyutlu problemler için bir plak, tek boyutlu problemler için ise elastik bir kiriş olduğu varsayılmaktadır.

D plağın eğilme rijitliği olmak üzere zemin reaksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q(x) = kw - D\nabla^4 w \quad (5.3)$$

Bu modelde anlaşıldığı üzere zemin parametreleri k ve D olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.3 : Hetenyi zemin modeli.

5.4 Pasternak Zemin Modeli

Daha sonraki yıllarda Pasternak modeli ortaya konulmuştur (1954). Bu teoride Winkler modelindeki yayların üzerinde sadece düşey yer değiştirme yapabilen ve sıkışmayan elemanlardan oluşan bir kayma tabakası olduğu düşünülmüştür. Pasternak modeli Şekil 5.4’de görülmektedir.

Kayma tabakası (x,y) düzleminde izotropik olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle kayma tabakasının, kayma modülleri arasında aşağıdaki bağıntı geçerlidir.

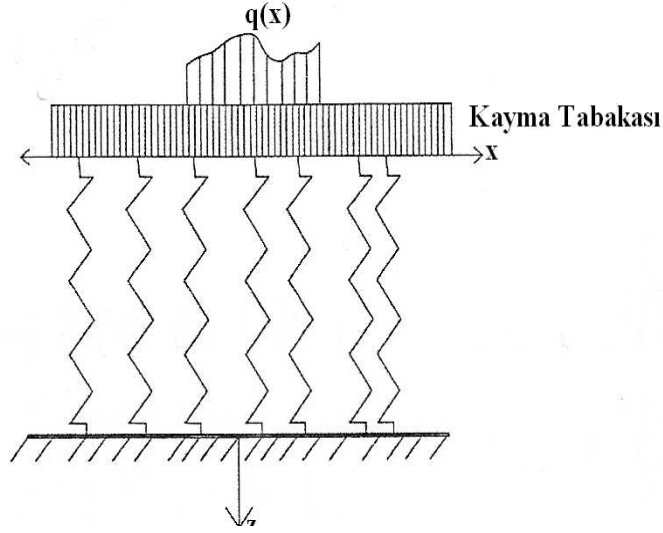
$$G_x = G_y = G_p \quad (5.4)$$

Burada G_p ile ifade edilen ikinci zemin parametresidir. Sonuç olarak zemin reaksiyonu (5.5) denklemi olarak ifade edilir.

$$q(x) = kw - G_p \nabla^2 w \quad (5.5)$$

Burada ∇ Laplace operatörü olup aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (5.6)$$

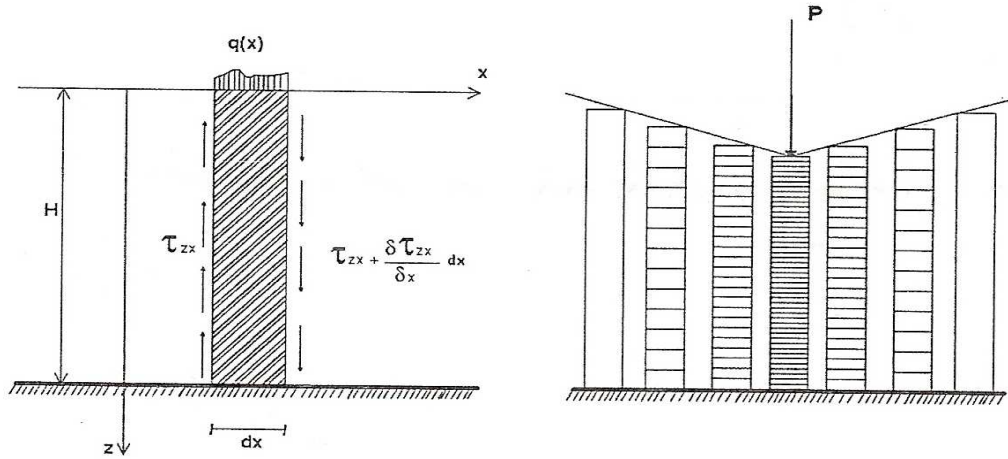


Şekil 5.4 : Pasternak zemin modeli.

5.5 Vlasov Zemin Modeli

Diğer modellerden farklı olarak Vlasov modelinde x-z düzleminde ele alınan zemin kolonu için yer değiştirme ifadesi (5.7) denkleminde verilmiştir. Şekil 5.5’de Vlasov modeli gösterilmiştir.

$$u(x, z) = 0, \quad w(x, z) \rightarrow w(x)\phi(z) \quad (5.7)$$



Şekil 5.5 : Vlasov zemin modeli.

Bu ifadede $u(x, z)$, x-z düzlemindeki yatay yer değiştirme, $w(x, z)$ aynı düzlemdeki düşey yer değiştirme ve $\phi(z)$ fonksiyonu ise $w(x)$ yer değiştirmelerinin sıkışabilir zemin tabakaları boyunca (z eksenini boyunca) değişim veren mod şekil fonksiyonudur. Plak diferansiyel denklemi (5.8)’ de ki gibi yazılır.

$$D_b \nabla_p^2 \nabla_p^2 w - 2t \nabla_p^2 w + kw = q \quad (5.8)$$

Bu model için zemin reaksiyonu aşağıda ifade edilmiştir:

$$q(x) = kw(x, y) - 2t \left\{ \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} \right\} \quad (5.9)$$

$$k = \frac{E}{(1 - \nu_0)^2} \int_0^H \psi^2(z) dz \quad (5.10)$$

$$2t = \frac{E}{2(1 + \nu_0)^2} \int_0^H \psi^2(z) dz \quad (5.11)$$

Burada: w plağın radyal yer değiştirmesi, ρ plak merkezinden yarıçapı doğrultusundaki uzaklık, ∇^2 : ρ argümanına göre Laplasiyen operatörü, D_b : plağın eğilme rijitliği, E : zemin elastisite modülü, ν_0 : zemin poisson oranı, H : sıkışabilir tabaka kalınlığı ve k ile t zemin parametreleridir.

Burada $\psi(z)$ fonksiyonu $w(x, z)$ fonksiyonun, z yönündeki yaklaşımı olarak tariflenir.

$$\psi(z) = \frac{\sinh(\gamma(H - z) / R)}{\sinh(\gamma H / R)} \quad (5.12)$$

Vlasov zemin modeli değişkenleri, zemin elastik özelliklerine ve sıkışan zemin tabaka kalınlığına bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu modele getirilebilecek en büyük eleştiri, kullanılan parametrelerin birçok unsurun etkisi altında olması nedeniyle belirlenmesinde karşılaşılan güçlüktür [26, 27, 28].

6. YATAK KATSAYISI

Elastik zemine oturan kiriş modeli demir yolları traverslerinin hesaplanması için ilk olarak kullanılmıştır. Winkler (1867) hesaplamalarında, trenlerin geçmesi sırasında traverslerde oluşan sehimleri bu yöntemle incelemiştir. Alman demiryolları hesaplamalarında kullanılan bu yöntem yatak sayısı yöntemi olarak adlandırılmıştır. Ülkemiz mühendislik bürolarında kullanılan bilgisayar programları, elastik zemine oturan temellerin, hesap ve tasarımlarında genellikle Winkler modelini kullanmaktadırlar. Bu yöntem, ülkemizde ‘yatak katsayısı yöntemi’ olarak bilinmektedir. Yatak sayısı yöntemi ile yapılan analizlerde kullanıcılardan girdi olarak yatak katsayısı değerleri istenmektedir. Bu yöntemde taban basınç dağılımının temelde oluşan oturumlarla orantılı olduğu varsayımı yapılmaktadır. Yatak katsayısı sadece zemin özellikleriyle değil aynı zamanda temelin boyutlarıyla da ilgilidir. Yatak katsayısı için temel kabul şudur ki zemin, birbirinden bağımsız sıkışabilen yaylardan meydana gelmiştir. Her yay kendi payına düşen yük ile bir miktar sıkışarak hareket etmektedir. Buradan yatak katsayısı, birim çökmeyi elde etmek için birim alana yüklenmesi gereken yük olarak ifade edilmektedir.

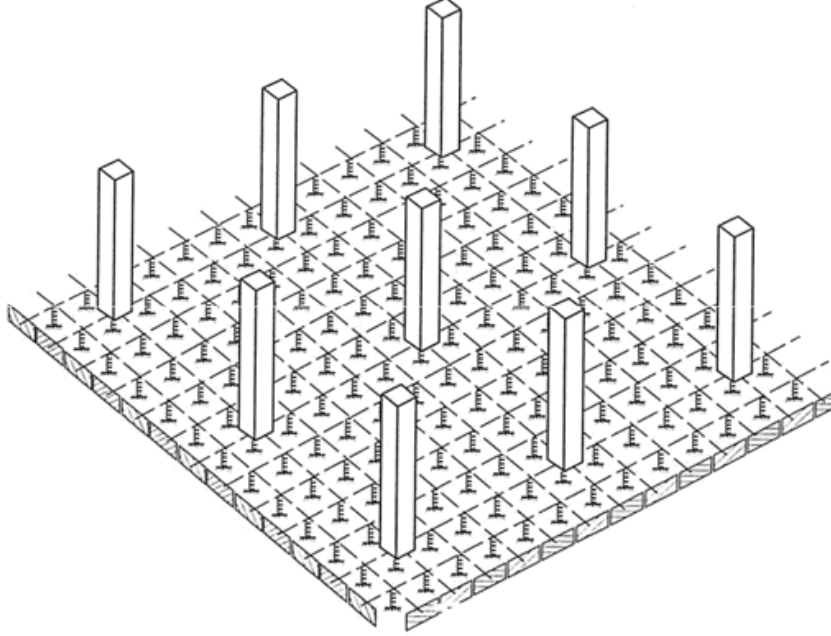
$$k = p / \Delta l \quad (6.1)$$

Burada k yatak katsayısı, p zemin noktasında uygulanan gerilmeyi ve Δl o noktada meydana gelen yer değiştirmeyi simgelemektedir.

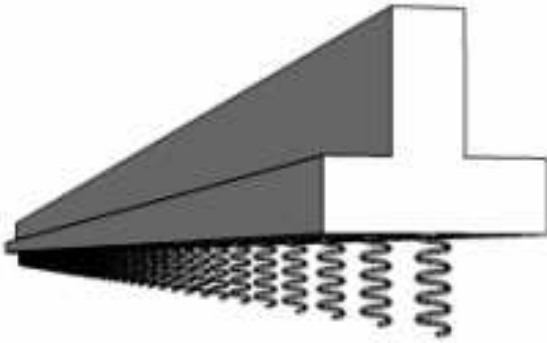
Zemin doğrusal yaylarla tariflenmesi veya zemin-yapı birleşimin rijit kabul edilmesi, özellikle kohezyonlu zeminlerin üzerine inşa edilen yapıların düşey ve yatay yükler altında gerçek davranışı yeterince temsil edememesine neden olur. Zeminin tabakalanması ve yatak katsayısının yakın alanda değişken olması da çoğu zaman göz ardı edilmektedir.

Yatak katsayısının hesaplanmasında kullanılan üç yöntem bulunmaktadır. Bunlardan ilki plaka yükleme deneyi sonucunda elde edilen bilgilerle yatak katsayısının hesaplanması, yerli ve yabancı kaynaklarda bulunan tablolardan faydalanılması ve son olarak zeminin incelenmesi sonucunda elde edilen zemin elastik parametrelerini kullanarak zemin yatak katsayısının hesaplanmasıdır [29, 30].

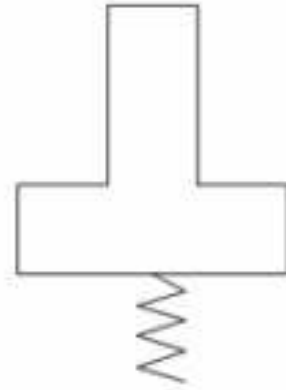
Yatak katsayısı yöntemiyle radye jeneral, mütemadi ve tekil temelin tipi yapı temellerinde kullanmak mümkündür. Bu temel tiplerinin nasıl modelleneceği Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



a)Radye temel



b)Sürekli temel



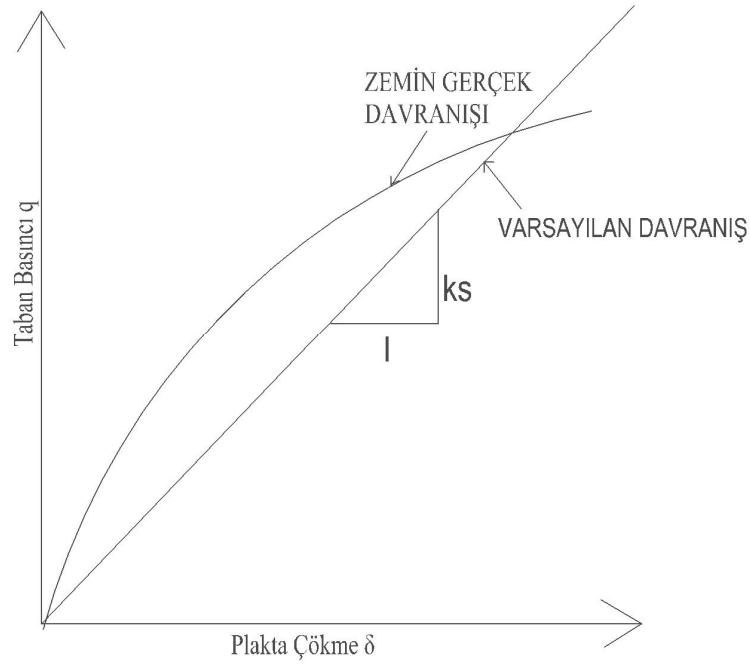
c)Tekil temel

Şekil 6.1 : Yatak katsayısı ile temel modelleri [31].

6.1 Plaka Yükleme Deneyi İle Yatak Katsayısı Hesaplama

Yatak katsayısı değerleri plaka yükleme deneyleri ile elde edilebilir. Plaka yükleme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-oturma eğrisinin Şekil 6.2 görülen, lineer kabul edilen parçasının eğimi, yatak sayısı olarak ifade edilmektedir.

Bu deney, zeminin rijit bir plakayla yüklenerek plaka çapının iki katı bir derinlikte, son taşıma gücü, deformasyon modülü ve yatak sayısının hesaplanmasını sağlayacak verileri elde etmekte kullanılır [31, 32].



Şekil 6.2 : Plaka yükleme deneyi ve yatak katsayısı ilişkisi [31].

6.2 Zemin Bilgilerini Kullanarak Yatak Katsayısı Hesaplama

Daloğlu ve Vallabhan eşdeğer Winkler yatak katsayısı yaklaşımında, Winkler yönteminde kullanılmak üzere iki parametrelili Vlasov-Leontiev eşdeğer yatak katsayısı veren ilişkiler kurulmuştur. Öncelikle plak eğilme rijitliği (D) ve plak karakteristik uzunluğu (r) değerleri,

$$D = \frac{E_p h^3}{12(1 - \nu_p^2)} \quad (6.2)$$

$$r = \sqrt[4]{\frac{DH}{E_s}} \quad (6.3)$$

İfadeleri hesaplanır. Burada H toplamda en fazla etkili zemin derinliği, E_p beton elastisite modülü, ν_p beton Poisson oranı E_s zemin elastisite modülü ve h plak kalınlığıdır. Eşdeğer Winkler yatak katsayısı k , temel üzerinde belirlenen her $x' = x/L, y' = y/B$ (L ve B sırasıyla temel planının uzun ve kısa boyutları) boyutsuz koordinatına sahip nokta için grafiklerden elde edilen değer,

$$k = \frac{K_{nw}D}{r^4} \quad (6.4)$$

K_{nw} kullanılarak ifadesi ile hesaplanabilir. Böylece yatak katsayısında temel ve zemin rijitlikleri yanında zemin tabaka kalınlıkları da dikkate alınmış olur.

Ortalama yatak katsayısı Vesic bağıntısını kullanılarak da bulunabilir,

$$k = 0,65 \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_p I}} \quad (6.5)$$

Burada ($E_p I$) temel şeridi eğilme rijitliği, ν_s zemin Poisson oranıdır [29].

6.3 Yerli ve Yabancı Kaynaklarda Yatak Katsayısı

Yerli yabancı kaynaklarda zemin sınıflarına göre tablolar halinde (k) yatak sayısı değerleri verilmektedir. Aşağıdaki tablolar buna örnek oluşturması amacıyla sunulmuştur [29]. Birçok yatak katsayısı tablosunun mevcut olduğu kaynak araştırmasında kolaylıkla görülmüştür. Yaklaşık benzer değerleri ifade eden bu üç tablo Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'de sunulmuştur.

Çizelge 6.1 : Terzaghi'ye (1955) göre yatak katsayısı çizelgesi [33].

Zemin sınıfı	Yatak katsayısı değerleri (KN/m^3)
Katı Kil	< 24 000 – 48 000
Sert Kil	48 000 – 96 000
Çok Sert Kil	>96 000
Gevşek Kum	8000 – 12 800
Orta Sıkı Kum	19 600 – 41 600
Sıkı Kum	96 000 – 160 000

Çizelge 6.2 : Ersoy'a (1995) göre yatak katsayısı çizelgesi [34].

Zemin sınıfı	Yatak katsayısı değerleri (KN/m^3)
Balçık, Turba	<2000
Plastik Kil	5 000 – 10 000
Yarı Sert Kil	10 000 – 15 000
Sert Kil	15 000 – 30 000
Dolma Toprak	10 000 – 20 000
Gevşek Kum	10 000 – 20 000
Orta Sıkı Kum	20 000 – 50 000
Sıkı Kum	50 000 – 100 000
Sıkı Kumlu Çakıl	100 000 – 150 000
Sağlam Şist	>500 000
Kaya	>2 000 000

Çizelge 6.3 : Keskinel'e (1970) göre yatak katsayısı çizelgesi [35].

Zemin sınıfı	Yatak katsayısı değerleri (KN/m^3)
Balçık, Turba	<2000
Plastik Kil	5 000 – 10 000
Yarı Sert Kil	10 000 – 15 000
Sert Kil	15 000 – 30 000
Dolma Toprak	10 000 – 20 000
Gevşek Kum	10 000 – 20 000
Orta Sıkı Kum	20 000 – 50 000
Sıkı Kum	50 000 – 100 000
Sıkı Kumlu Çakıl	100 000 – 150 000
Sağlam Şist	>500 000

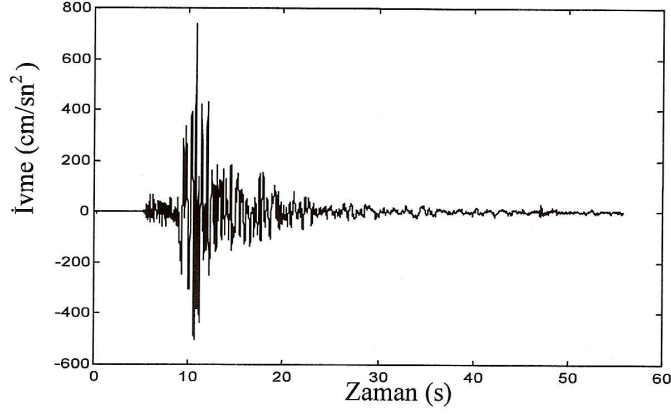
7. SAYISAL ÖRNEKLER

Yapıların bir kısmı, mühendislik açısından zayıf olarak nitelenen zeminler üzerinde inşa edilmektedir. Buna karşılık yapıların modellenmesinde ilk zamanlarda, yapının rijit zemine ankastre olarak mesnetlendiği kabulü yapılmış olup zeminin elastik davranışı göz ardı edilmiştir. Oysa zeminlerin kendine has birçok karmaşık özelliği bulunmaktadır. Ülkemizde Düzce ve Kocaeli bölgesinde meydana gelen depremlerde üst yapı olarak çok iyi inşa edilmiş olmasına rağmen birçok yapının kullanım dışı kaldığı görülmüştür. Deprem odağının Gölcük ilçesi olmasına rağmen bu yer hareketi genç kuvaterner alüvyon birikintilerinden oluşan Adapazarı bölgesinde birçok can ve mal kaybına neden olmuştur. Bu bilgilere dayanarak zemin-yapı etkileşiminin iyi irdelenmesi gerekliliği aşikârdır. Bu amaçla bu tezde çeşitli sayısal örnekler hazırlanmıştır. İlk olarak üst yapının yatak katsayısı, kolon kesitleri, temel kalınlığı ve temel genişliği özelliklerinde değişiklikler yapılarak bu farklılaşmaların deprem sırasında yapıda nasıl etkilere neden olduğu araştırılmıştır. Bir sonraki çalışmada zemin yatak katsayısı kullanılarak modellenen sistemler ile üç boyutlu katı zemin modeliyle oluşturulmuş zemin-yapı sistemleri analiz edilip sonuçları kıyaslanmıştır. Yatak katsayısı ile zemin elastisite modülünün artışının sistemi nasıl etkilediği incelenmiştir. Üçüncü olarak zemin-yapı sisteminde, zemin üst katman kalınlığının kaya tabakasına olan mesafesinin sistemi deprem sırasında nasıl etkileyeceği tartışılmıştır. Kaya tabakasının üzerinde bulunan yüzey önce sert zemin olarak daha sonra yumuşak zemin olarak modellenip sistem davranışları kıyaslanmıştır. Son olarak uzman jeofizik mühendisleri tarafından hazırlanmış gerçek zemin raporuna dayanılarak hazırlanmış üç farklı model analiz edilip alınan sonuçlar tartışılmıştır. Örneklerde zemin rapordan alınan yatak katsayısı ve zemin özellikleri kullanılmıştır. Bu modellerin ilki yatak katsayısı yöntemi ile ikincisi üç boyutlu katı zemin modeliyle ve sonuncusu rijit zemine oturmuş ankastre mesnet koşuluyla hazırlanmıştır. Yapılan tüm örneklerde oluşan tepkilerin anlaşılması için periyot, ivme, kesitlerde moment ve kesme kuvvetleri ile tepe noktası yer değiştirmeleri tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

7.1 Yapı Eleman Boyutlarının ve Yatak Katsayısının Üst Yapıya Etkisi

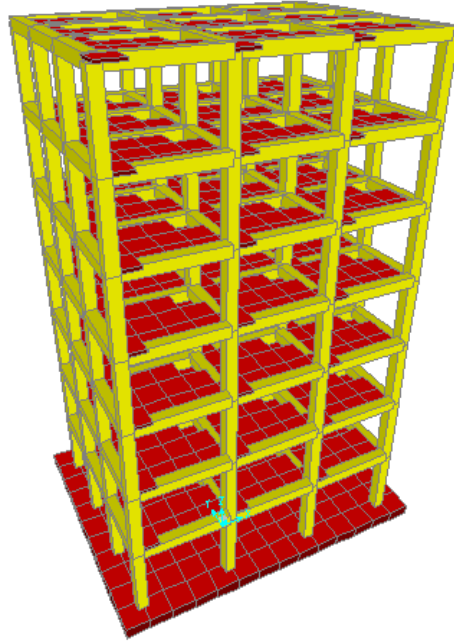
Dinamik analizlerin tamamında:

- 1999'da meydana gelen Düzce depreminin, Şekil 7.1, zemin-yapı sonlu eleman modellerinin tamamına aynı şiddette etki ettiği,

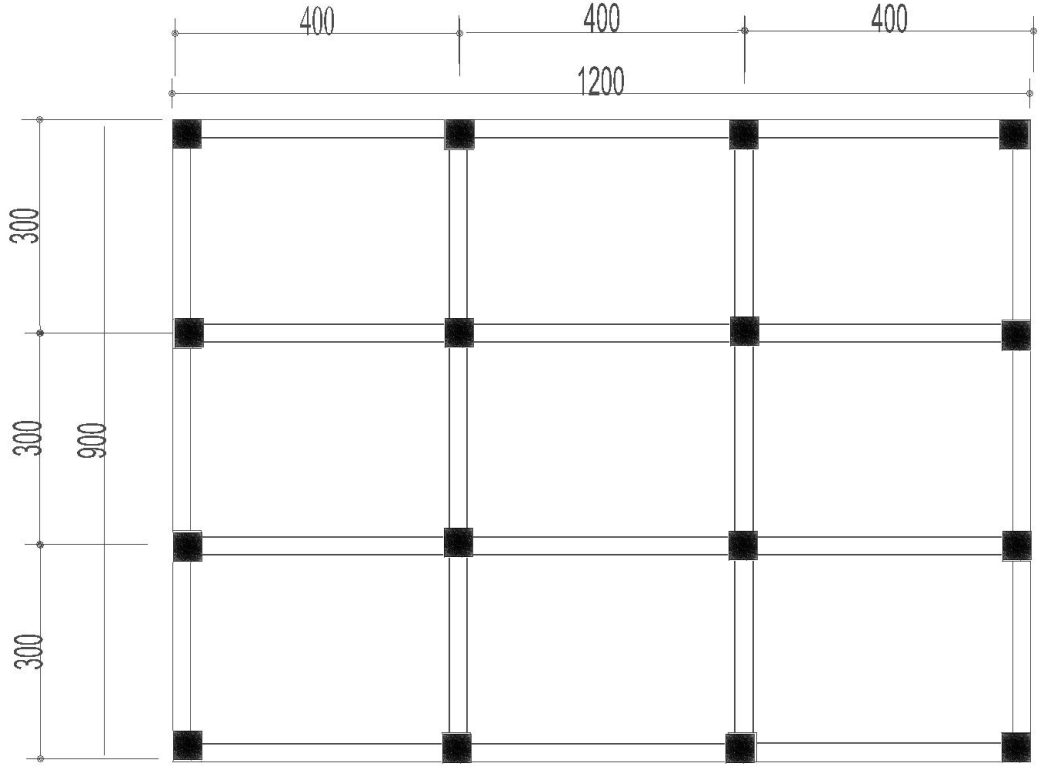


Şekil 7.1 : 1999 Düzce Depremi Bolu kaydı kuzey-güney ivme bileşeni [36].

- Zemin-yapı sisteminde sönümün %5 olduğu,
- Kolon ve kiriş kesitlerinin dikdörtgen ve kat yüksekliği boyunca sabit olduğu,
- Yapı yüksekliği boyunca kat yüksekliklerinin üç metre olduğu,
- Zeminin izotrop ve homojen olduğu varsayımları yapılmıştır.



Şekil 7.2 : Üst yapı kesitlerinin sisteme etkisi.



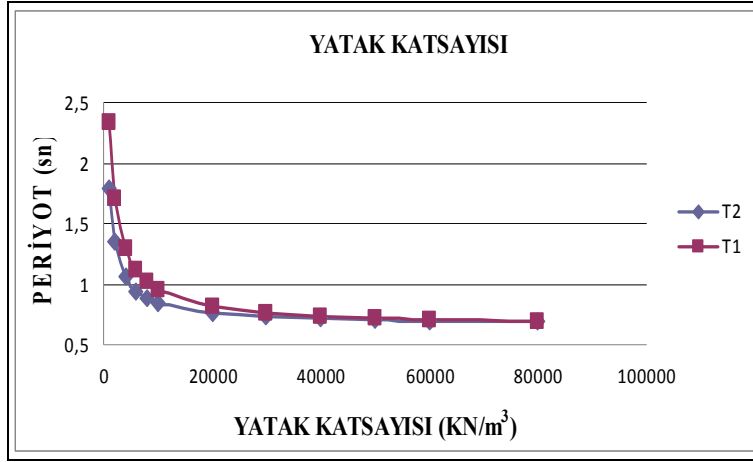
Şekil 7.3 : Modelin plan görünüşü.

Üst yapı özellikleri: Üst yapı sisteminin bir birini sabit eksen aralıkları ile takip eden çerçevelerden oluşan çok katlı betonarme yapı olduğu varsayılmıştır, yukarıda Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de plan ile görünüşü verilmiştir. Kolonlar 40cmx40cm kirişler, 25cmx50cm ve de döşemeler 12cm olarak boyutlandırılmıştır. Temellerde 2 metre büyütme yapılmıştır. Yapı toplamda 7 kattan oluşmaktadır. Beton sınıfı BS30 çelik sınıfı S420 olarak kullanılmıştır. Yükleme de sabit yük 1 KN/ m² , hareketli yük 3,5 KN/ m² alınmıştır.

7.1.1 Yatak katsayısı etkisi

Yapılan örnekler de farklı yatak katsayısına sahip zeminler üzerine aynı plan ve rijitliğe sahip binalar yerleştirilmiş ve aynı deprem etkisi altında farklı periyotlar meydana geldiği gözlenmiştir. Sayısal çözümler sonucunda, düşük taşıma gücü olan zemin üzerindeki yapılar ile taşıma gücü yüksek zemin üzerindeki yapıların dinamik davranışı karşılaştırılmıştır. Aşağıda modellerden elde edilen ilk iki periyot bilgisine dayanılarak hazırlanmış bir grafik görülmektedir. Buna göre yatak katsayısı 20000KN/m³ değerine ulaşıncaya kadar periyotta bir artış gözlenmiştir. Bu değerden sonra, zemin sistemi rijit bir davranış gösterdiğinden dolayı, sistemlerin

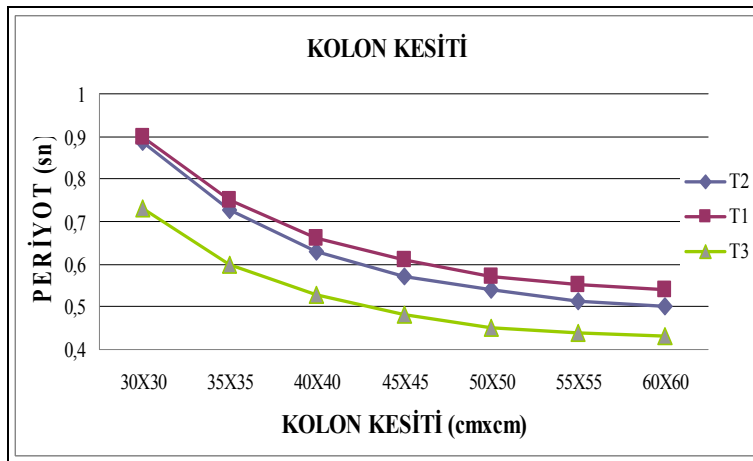
periyotlarında ciddi bir artış görülmemektedir. Sonuç olarak Şekil 7.4’de değerlendirilerek, yapı analizinde zemin yatak katsayısı 20000KN/m^3 değerinden küçük olan sistemlerde zemin-yapı etkileşimi daha çok önemsenmelidir.



Şekil 7.4 : Yatak katsayısı-periyot ilişkisi.

7.1.1 Kolon kesitlerinin etkisi

İnşa edilen bir yapı sisteminin en önemli elemanları kolonlardır. Sistemdeki yük aktarımı gereği döşeme topladığı yükleri önce kirişlere verir daha sonra kirişler döşemeden gelen yükleri kolonlara ve oradan zemine iletirler. Bu döngüdeki en önemli yapı elemanı kolonlardır çünkü kolonlarda oluşabilecek bir hasar yapıda göçmeye varan sonuçlara yol açabilir. Hazırlanan örneklerde yapının kolon kesitlerinin arttırılarak sistemin gittikçe rijitleştirilmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak aynı yapı ve zemin koşullarında, kolon kesiti $55\text{cm} \times 55\text{cm}$ kadar arttırıldığında yapı periyodunda ciddi bir azalma oluşurken bu değerden sonra ise kolon kesit alanındaki artışın sistem periyoduna etkisinin azaldığını görülmektedir, (Şekil 7.5).

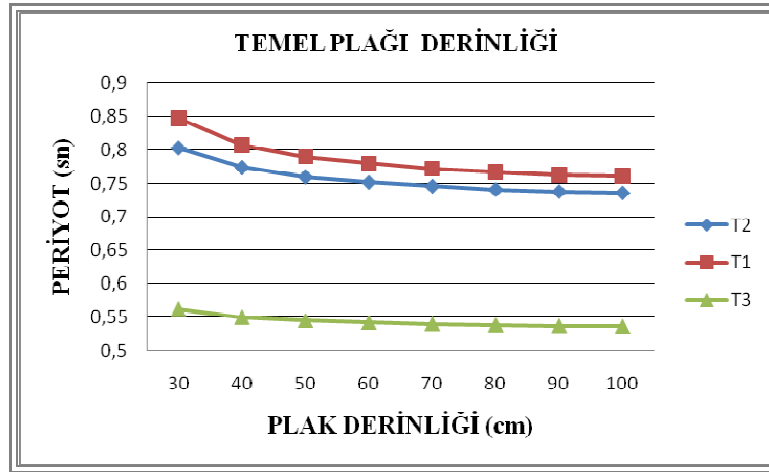


Şekil 7.5 : Kolon kesiti-periyot ilişkisi.

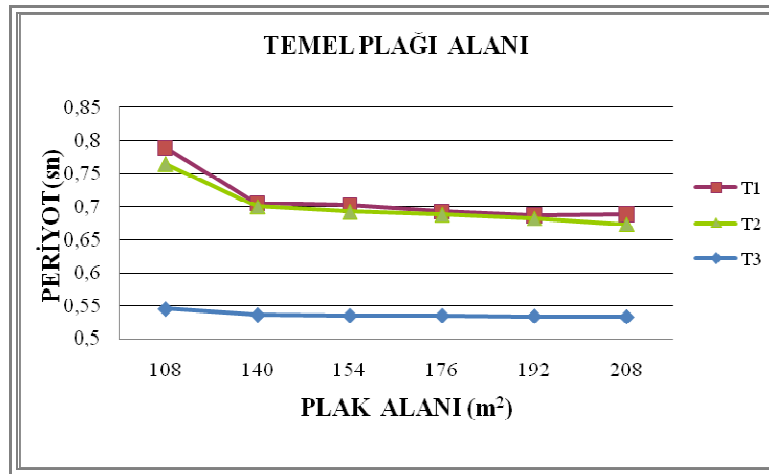
7.1.2 Temel plağı boyutlarının etkisi

Yapının kendi ağırlığı dahil taşıdığı tüm yükleri kolonlardan alıp zemine aktaran yapı elemanlarına ‘temel plağı’ denir.

Bina temel plakları, üst yapının yüklerini zemine emniyetle aktarmak için kullanılırlar. Bu yapılar bina güvenli için çok iyi düşünülerek ve hesaplanarak modellenmelidir. İyi tasarlanmamış bir temel farklı oturmalara neden olup üst yapıda ciddi hasarlara sebep olabilmektedir. Bundan dolayı plağın iyi analiz edilmesi gerekir. Temelin yapı periyoduna olan etkisini incelemek amacıyla plak derinliğini ve yapının oturduğu plak alanı artırılarak sayısal örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerde plak boyutlarının çok ciddi oranda olmasa da yapı sisteminin periyotlarını bir miktar etkilediği Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de görülmektedir.



Şekil 7.6 : Plak derinliği-periyot ilişkisi.



Şekil 7.7 : Plak genişliği-periyot ilişkisi.

7.2 Yatak Katsayısı ve Zemin Elastisite Modülünün Karşılıklı Analizi

Bu bölümde zemin-yapı etkileşimi problemlerinin çözümünde kullanılabilecek iki yöntemin, aynı üst yapı için karşılıklı olarak analizi ele alınmıştır. Bu amaçla önce artan yatak katsayıları için hesaplanmış Winkler modelleri oluşturulmuştur. Yatak katsayısı, balçık zemininden kaya zemine kadar ifade edilebilecek farklılıkta değerlerden seçilmiştir. Daha sonra ise Winkler modelinde kullanılan yaylar kaldırılıp aynı üst yapı için, zemin üç boyutlu katı elemanlarla modellenmiştir. Zemin ortamı sonlu eleman ağında homojen ve elastik zemin olarak oluşturulmuştur. Zemin modellerinde artan elastisite modülleri kullanılmıştır.

Burada unutulmaması gereken husus yatak katsayısının zemin elastisite modülü benzeri bir parametre olmayışdır. Zemin elastisite modülü mevcut gerilme, sınır koşulları ve zemin yapısı için gerilme-deformasyon ilişkisinin bir göstergesidir. Yatak katsayısı ise zemin fiziksel özellikleri, tabakalanması, yükleme koşulları, temel rijitliği ve üst yapı rijitliğinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle yatak katsayısı ile zemin elastisite modülü karıştırılmamalıdır.

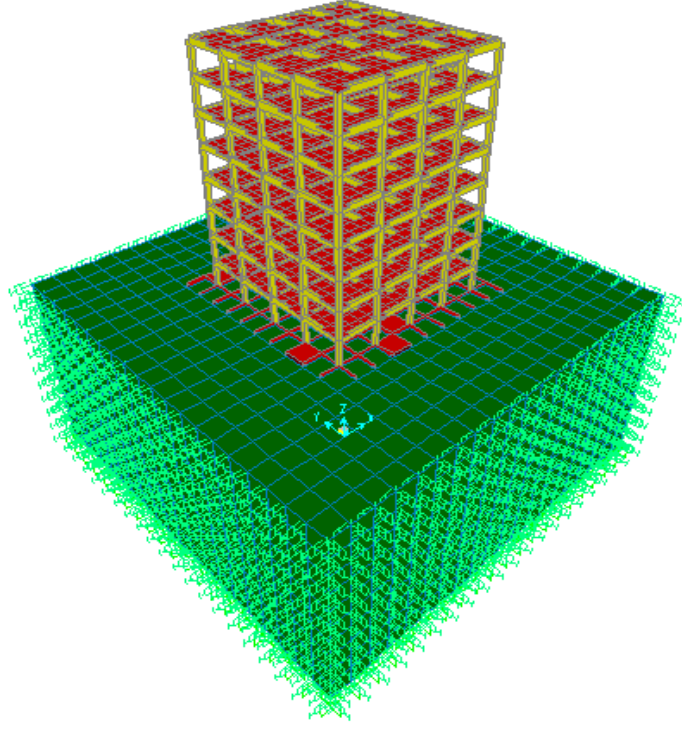
7.2.1 Seçilen zemin özellikleri

Poisson oranı sabit 0,4 olarak alınmıştır. Zemin kaya tabakası sınırı 20 m olarak seçilmiştir. Zemin boyutları $40 \times 40 \text{ m}^2$ olarak alınmıştır. Yapısal sönüm olarak %5 belirlenmiştir.

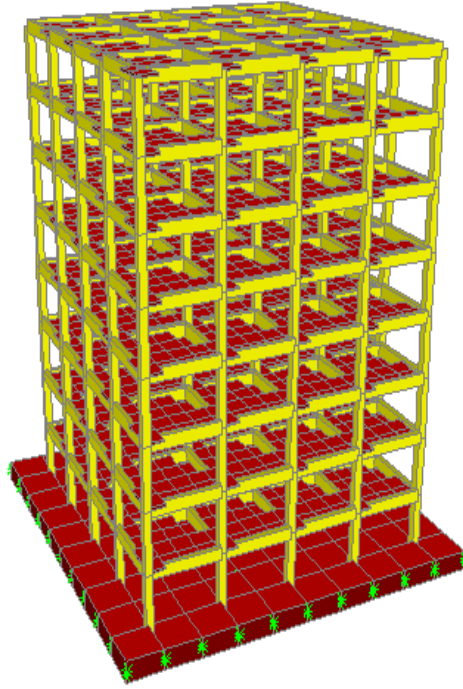
Zemin, SAP2000 programında bulunan solid (üç boyutlu katı) eleman özellikleri kullanılarak hazırlanmıştır.

7.2.2 Üst yapı özellikleri

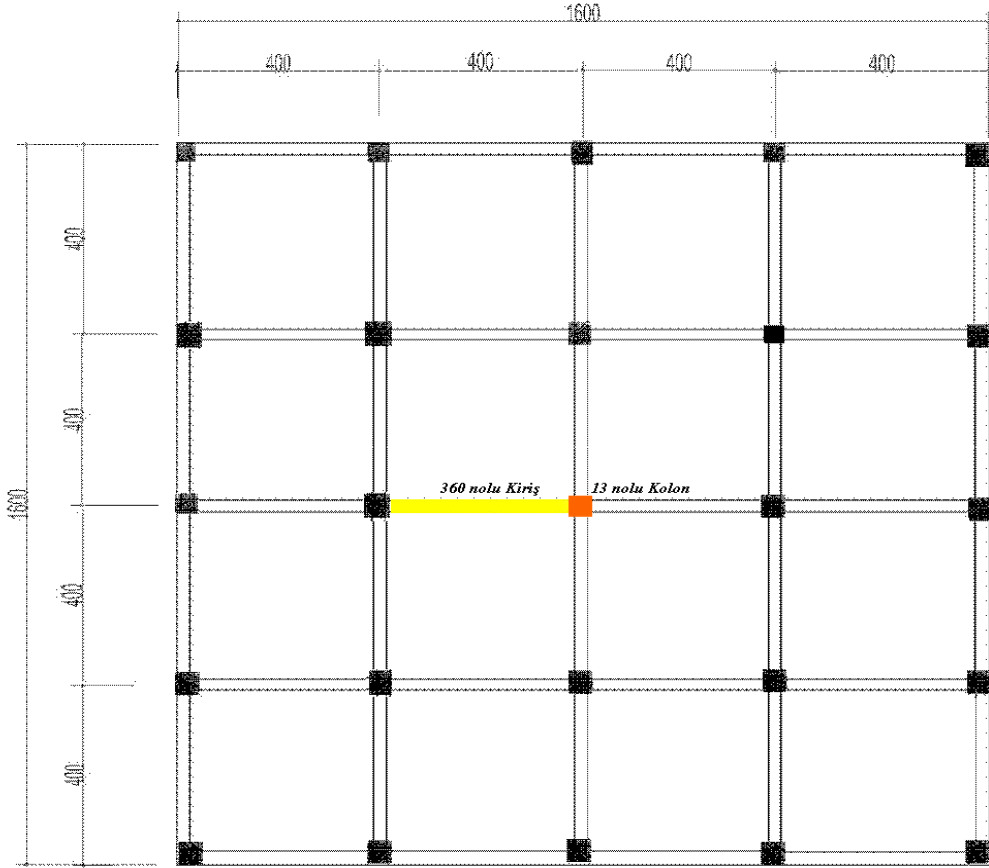
Üst yapı sisteminin bir birini sabit eksen aralıkları ile takip eden çerçevelerden oluşan çok katlı betonarme yapı olduğu varsayılmıştır. Kolonlar $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ kirişler, $25 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ve de döşemeler 12 cm olarak boyutlandırılmıştır. Temellerde 2 metre büyütme yapılmıştır. Yapı toplamda 8 kattan oluşmaktadır. Beton sınıfı BS 25 çelik sınıfı, S420 olarak kullanılmıştır. Yükleme de kullanılan sabit yük 1 KN/ m^2 , hareketli yük $3,5 \text{ KN/ m}^2$ değerindedir. Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da yapının üç boyutlu katı elemanlarla modellenmiş hali, Winkler modeli görünüşü ve de plandan görünüşü verilmiştir.



Şekil 7.8 : Üç boyutlu katı zemin ile modellenmiş sistem.



Şekil 7.9 : Winkler zemini ile modellenmiş sistem.



Şekil 7.10 : Modelin plan görünüşü.

Yapılan analizler sonucunda görülmüştür ki, zeminin üç boyutlu katı olarak modellenmesi ile yapının yatak katsayısı yöntemiyle çözümü benzer sonuçlar vermektedir. Yapıda esas alınan periyot değerleri, oluşan en büyük gerilmeler ve rastgele sistem içinden seçilmiş kolon ve kirişlerin aynı kesitlerinde ki kuvvetlerinin benzer sonuç gösterdiği görülmüştür. Bu sonuca göre Winkler modeli ile üç boyutlu katı zemin modelinin tutarlı sonuçlar vermesi nedeniyle iki yöntemin de doğru olduğunu gösterir. Ayrıntılar Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de görülmektedir.

Çizelge 7.1 : Elastisite modülü-yapı tepkileri çizelgesi.

Elast. mod(KN/m ²)	Periyot (sn)	Azami dep.(mm)	Azami gerilme (KN/m)	İvme tepe (m/sn ²)	kolon 13 mom.(KN*m)	kolon13 kes.(KN)	kiriş360 mom (KN*m)	kiriş360 kes.(KN)
1000	2,69	40,2	852	1,582	47,3	29,2	18	9,53
5000	1,40	56,3	1960	2,12	100,0	61,0	56,9	28,86
10000	1,14	68,3	3417	3,422	169,0	102,7	79,6	39,64
20000	0,99	69,8	4525	3,286	227,0	137,0	101	50,00
50000	0,89	66,0	4907	2,559	248,0	150,0	131,2	65,00
100000	0,85	61,7	4820	2,494	245,0	148,0	136,3	67,42
200000	0,83	58,9	4749	2,561	244,0	147,5	137,3	67,87
1000000	0,82	56,2	4688	2,7	243,4	147,3	137,5	67,93

Çizelge 7.2 : Yatak katsayısı-yapı tepkileri çizelgesi.

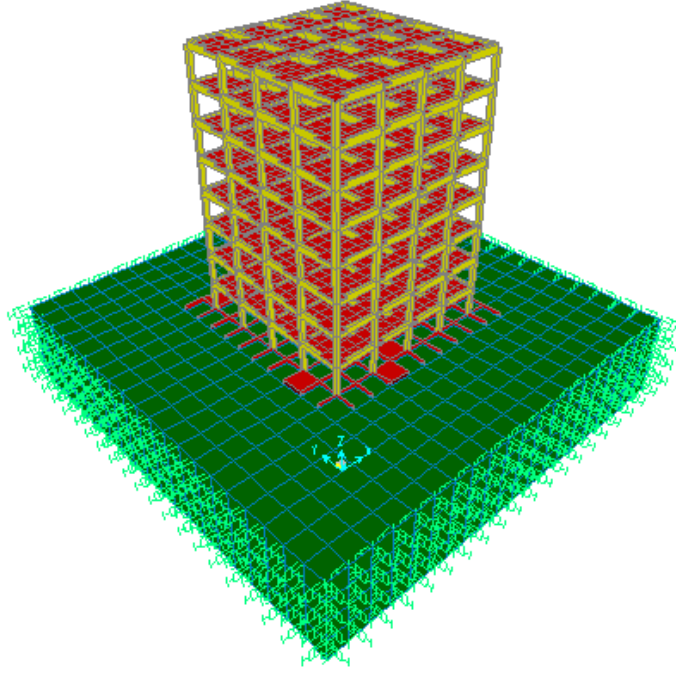
Yatak kat. (KN/m ³)	Periyot (sn)	Azami deplasma (mm)	Azami gerilme (KN/m ²)	İvme tepe (m/sn ²)	kolon 13 mom. (KN*m)	kolon13 kes.(KN)	kiriş360 mom.(KN*m)	kiriş360 kes.(KN)
250	2,44	40,6	1325	1,65	52	31,5	13,3	7,0
500	1,81	53,7	1258	1,93	57	34,8	24,4	12,1
1000	1,39	52,0	1471	2,54	81	48,8	40,0	19,8
5000	0,943	69,4	4523	2,88	249	150,5	116,9	57,6
10000	0,877	64,8	4671	2,71	256	154,8	134,3	66,0
50000	0,821	57,0	4606	2,78	247	149,0	136,2	67,0
100000	0,814	55,8	4671	2,82	245	148,0	135,4	66,8
200000	0,81	55,1	4612	2,82	243	147,1	134,7	66,4
1000000	0,807	54,6	4625	2,84	241	146,0	133,5	66,0

7.3 Tabaka Kalınlığının Zemin-Yapı Dinamik Etkileşimine Etkisi

Zemin-yapı etkileşiminden, zeminin içerdiği bilinmeyenler nedeniyle karmaşık bir problem olduğu bilinmektedir. Zeminin homojen olmayan bir malzeme olmasının yanında farklı tabakalardan oluştuğu da bilinmektedir. Yapı-zemin etkileşimini incelediğimiz modellerde, Şekil 7.11’de görüldüğü gibi zeminin belli bir kalınlıktan sonra kaya zemine oturacağı varsayılmıştır. Bu nedenle model belli derinlikten sonra ankastre mesnet koşuluna göre tasarlanmıştır; ancak rijit zemine ulaşıncaya kadar geçilen zemin tabaka kalınlıklarının, yapı zemin etkileşimi üzerindeki rolünün irdelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle farklı tabaka kalınlıkları için modeller oluşturulmuştur.

Oluşturulan modellerde iki farklı malzeme ama aynı tabaka kalınlıkları kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir.

İlk modellerde kullanılan zeminin tabaka kalınlığının, sert malzeme özelliği göstermesinden dolayı, üst yapıyı çok daha az etkilediği görülmüştür, (Çizelge 7.3). Sert zeminin rijit kaya zemine benzer bir rijitliğe sahip olması bu tabakaların kalınlığını önemsiz kılmaktadır, (Çizelge 7.4). Bu sonuç üzerine aynı üst yapı ve aynı zemin tabaka kalınlıkları için daha gevşek malzeme özelliği gösteren modeller analiz edilmiştir. Bu analizler sonrasında zeminin tabaka kalınlığının oldukça etkili olduğu görülmüştür. Kaya tabakası ile üst yapı arasına giren yumuşak zemin tabakası arttıkça yapının periyodunun da artmaya başladığı görülmüştür. Yumuşak tabaka kalınlığının azaltılmasının sistemin yararına olacağından, yumuşak zemin tabakasının kalın olduğu durumlarda gevşek zeminin değiştirilmesi, sıkıştırılarak direncinin artırılması gerekir veya son yıllarda kullanılan beton enjeksiyonu gibi yöntemler kullanılabilir.



Şekil 7.11 : Zemin tabakası 6m olan sistem.

Yumuşak zemin için elastisite modülü 5000 KN/m^2 , sert zemin de ise 300000 KN/m^2 değerleri seçilmiştir.

Çizelge 7.3 : Zemin tabaka kalınlığı-yapı tepkileri çizelgesi (yumuşak zemin).

Tabaka kal.(m)	Periyot(sn)	Azami dep(mm)	Azami ger(KN/m^2)	İvme tepe(m/sn^2)	Kolon 13 mom.(KN*m)	Kolon 13 kes.(KN)
20	1,40	56,27	1960	2,13	100,0	61,0
16	1,38	57,75	2044	2,20	100,7	61,5
10	1,30	62,43	2383	2,52	125,3	76,4
6	1,19	67,00	3170	3,06	168,3	102,4
2	0,98	69,43	4606	3,23	246,6	149,4
0	0,81	54,28	4636	2,85	240,0	145,2

Çizelge 7.4 : Zemin tabaka kalınlığı-yapı tepkileri çizelgesi (sıkı zemin).

Tabaka kal.(m)	Periyot(sn)	Azami dep(mm)	Azami ger(KN/m^2)	İvme tepe(m/sn^2)	Kolon 13 mom.(KN*m)	Kolon 13 kes.(KN)
20	0,83	57,87	4724	2,61	244,0	148,0
16	0,83	57,80	4721	2,61	244,0	147,6
10	0,83	57,49	4711	2,63	244,3	147,8
6	0,82	57,02	4693	2,65	245,0	148,2
2	0,82	56,14	4674	2,70	245,1	148,3
0	0,81	54,28	4636	2,85	240,0	145,2

7.4 Gerçek Zemin Özellikleri ile Modellenen Sistemlerin Kıyaslanması

Önceki çalışmalarda dinamik zemin-yapı etkileşimi problemi için farklı çalışmalar anlatılmıştır. İlk olarak yapının dinamik özelliklerini değiştiren yapı özellikleri üzerinde durulmuş, yapı elemanlarının kesit özelliklerinin yapı periyotlarını nasıl etkilediği tartışılmıştır. Daha sonraki aşamada, zemin-yapı etkileşimi problemi için ilk önce zemin üç boyutlu katı olarak modellenip analizi yapılmış daha sonra yatak katsayısı yöntemi kullanılarak model oluşturulup analizler yapılmıştır ve sonuçların ne derece benzerlik gösterdiği tartışılmıştır. Alınan sonuçlar neticesinde genel olarak bu iki yöntemin benzer sonuç verdiği kabul edilmiştir. Ardından farklı zemin özellikleri ve farklı zemin tabaka kalınlıkları için modeller oluşturulup sonuçları irdelenmiştir. Geline son aşamada ise gerçek zemin raporu kullanılarak zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin ilki zeminin üç boyutlu katı olan yapı modelidir. İkincisi zemin yatak katsayısı ile hazırlanan model ve son olarak ankastre mesnetli modellerden oluşturulmuştur.

7.4.1 Üst yapı özellikleri

Üst yapı sisteminin bir birini sabit eksen aralıkları ile takip eden çerçevelerden oluşan çok katlı betonarme yapı olduğu varsayılmıştır. Kolonlar 40cmx40cm kirişler, 25cmx50cm ve de döşemeler 12cm olarak boyutlandırılmıştır. Temelerde 2 metre büyütme yapılmıştır. Yapı toplamda 8 kattan oluşmaktadır. Beton sınıfı BS25 çelik sınıfı, S420 olarak kullanılmıştır. Yükleme de kullanılan sabit yük 1KN/m², hareketli yük 3,5 KN/m² değerindedir

7.4.2 Zemin özellikleri

Zemin kaya tabakası sınırı 20m olarak seçilmiştir. Zemin boyutları 40mx40 olarak alınmıştır. Yapısal sönüm olarak %5 belirlenmiştir.

Zemin bilgileri, İstanbul ili Bağcılar ilçesinde faaliyet gösteren uzman bir mühendislik firması tarafından yürütülmüş zemin çalışmasından sağlanmıştır. Gerçekleştirilen sondaj ve sismik zemin araştırmaları sonucunda söz konusu bölgenin jeofizik, jeoteknik ve jeolojik özellikleri belirlenmiştir [37].

Zemin, SAP2000 programında bulunan solid (üç boyutlu katı) eleman özellikleri kullanılarak hazırlanmıştır.

7.4.2.1 Genel jeoloji

İstanbul bölgesinde altta yer alan birimler Paleozoik yaşlıdır. Bu birimler Silüryen'den Alt Karbonifer'e kadar uyumlu bir istif oluştururlar. Genellikle kırıntılı ve karbonatça zengin bu birimler, tektonizma nedeniyle karışık bir yapı kazanmıştır. İnceleme alanındaki Paleozoik yaşlı birimler Dolayoba, Kartal, Tuzla, Baltalimanı ve Trakya formasyonudur.

En altta yer alan Silüryen yaşlı Dolayoba formasyonu, sıkı tutturulmuş kireçtaşlarından, kuvars kırıntılı kumtaşlarından ve yumrulu-bantlı kireçtaşlarından oluşur. Kireçtaşları genellikle resifal özelliktedir. Dolayoba formasyonu üzerine, Devoniyen yaşlı Kartal ve Tuzla formasyonları gelir. Kartal formasyonu; iri taneli kireçtaşı merceklerinden, yer yer karbonatlı şeyllerden, grovaplardan ve bol fosilli killi kireçtaşlarından meydana gelmiştir. Tuzla formasyonu ise; yumrulu kireçtaşı, kalkerli şeyl ve tabakalı çörtlere oluşmuştur. Alt Karbonifer yaşlı Baltalimanı formasyonu, Tuzla formasyonu üzerine gelir. Bu birim siyah renkli laminalı çörtlere ibarettir. Trakya formasyonu ise; başlıca kahve renkli kumtaşı (grovak), şeyl ve kireçtaşı merceklerinden oluşur.

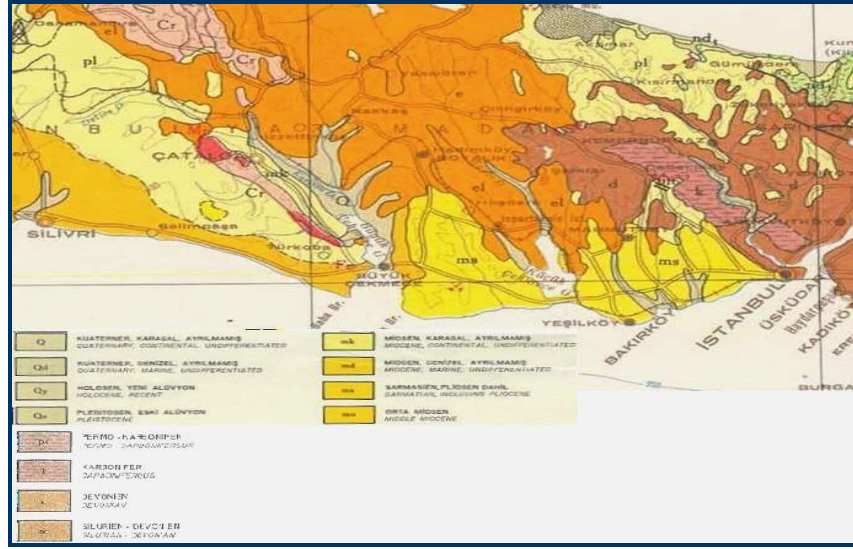
Sarıyer Formasyonu, volkanik tüf, andezit, anglomera katkıları içeren, marn konglomera ve gree den oluşur. Birimin alt kesimleri volkanik filiş karakterindedir.

Alt Karbonifer birimleri üzerine açısız uyumsuzlukla Eosen isitifi gelir. Killi kireçtaşı ve kireçtaşından oluşan Soğucak formasyonu, beyaz, sarımsı beyaz veya grimsi, ince-orta katmanlı, sert, killi kireçtaşlarınca zengindir. Ara tabakalar halinde yumuşak marn katmanlarına da rastlanılır. Formasyon içinde sert, kalın katmanlı, masif kireçtaşı düzeyleri de yer alır. Bu düzeyler resifal özellik gösterirler. Soğucak kireçtaşları üzerine geçişli ve aşmalı olarak Ceylan formasyonu gelir. Marn ve kil ardışımı şeklinde çökelmiş olan Ceylan formasyonu üzerinde ise Oligosen'e ait bir isitif yer alır.

İstanbul Yarımadası'nda Büyükçekmece-Hadımköy-Küçükçekmece arasındaki alanda karasal koşullarda gelişmiş, kırıntılı ve acısu karbonatlarından yapılmış bir istif izlenir. Gürpınar formasyonu olarak tanımlanan bu birim genellikle killerden, volkanik materyalden, kömürlü seviyelerden oluşur.

Gürpınar formasyonu üzerine ise Çamurluhan formasyonu gelir. Bu birim; genellikle çakıltaşı, kumtaşı ve sarı, kahve renkli kumtaşı ara tabakalarını içeren, yeşil renkli kil

ve marn ardışımından oluşur. Örgülü akarsu ürünü olan Çukurçeşme, gevşek tutturulmuş, blok, çakıl, kum ve siltten meydana gelir. Üst Miyosen döneminde gelişen geçici göllerde kil çökelimleri olmuştur. Hâkim olarak yeşil renkli, ince laminalı, plastik killerden meydana gelen birim Güngören formasyonu olarak tanımlanmıştır. Bu formasyon ayrıca kireçtaşı ara katkılı olup tedrici olarak, Bakırköy formasyonuna geçer. Genelde acı su koşullarının egemen olduğu bu denizel ortam içinde kireçtaşı-marn ardalanması çökelmiş ve Bakırköy formasyonu olarak adlandırılmıştır. Alüvyonel alanlar ise genellikle vadiler içinde sınırlı kalınlıklardadır. Şekil 7.12’de İstanbul genel jeoloji haritası ve Çizelge 7.5’de formasyon karakteristikleri çizelgesi görülmektedir.



Şekil 7.12 : Bölgenin genel jeoloji haritası.

Çizelge 7.5 : İstanbul bölgesi formasyon karakteristik çizelgesi.

Ordovizyen	Arkoz
Ordovizyen	Kuarsit ve Kuvars Arenit
Silüryen	Laminalı Şeyller
Silüryen	Fosilli Kireçtaşı
Devonien	Fosilli Şeyl
Devonien	Yumrulu Kireçtaşı
Karbonifer	Fosfat Yumrulu Çört
Karbonifer	Şeyl
Trias	Kumtaşları
Trias	Kireçtaşı
Kretase	Kireçtaşı
Eosen	Kumtaşı, Marn, Kireçtaşı
Neojen	Bakırköy For.(Kçt, marn, Silt ve Kil)
Kuaterner	Alüvyon

7.4.2.2 İnceleme alanı mühendislik jeolojisi

İnceleme alanındaki parselde 0,00–1,20 m arası dolgu. 1,20 – 6,50 m arası: Üst Miyosen Yaşlı Çukurçeşme formasyonuna ait kahve renkli kum bantlı kil;6,50–13,00 metreler arasında: yeşil renkli kumlu-siltli yer yer kumtaşı bantlı kum;13,00–20,00 m. arası: yeşil renkli kumtaşı ve kilaşı arabantlı sert kil formasyonu şeklinde devam etmektedir.

7.4.2.3 Arazide yapılan çalışmalar

Söz konusu sahada zemin koşullarının belirlenmesine yönelik detaylı zemin etüd ve araştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sahadaki jeolojik birimlerin sınır parametreleri, gerçekleştirilen sondaj ve sismik kırılma çalışması ile belirlenmiştir.

Arazi etütleri kapsamında, sondaj kuyusu içerisinde SPT deneyi gerçekleştirilmiştir. Sondaj esnasında örselenmemiş zemin numunesi alınmıştır.

Laboratuar deneyleri kapsamında; sondajlardan alınan zemin numuneleri üzerinde Su Muhtevası, Atterberg Limitleri ve Direkt kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

7.4.2.4 Sondajlar ve yerinde deneyler

Proje alanı yapılaşma ve alt yapı bakımından yoğun bir düzende bulunmaktadır. Bu sebeple uygulamalarda alan hakkında bilgi edinilebilecek müsait noktadan çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; yapı inşaatları öncesi ve devamında önceden yapılan arazi uygulamalarından da yararlanılmıştır. İnceleme alanında, 28.08.2009 tarihinde derinliği 20 m derinliğinde 1 adet sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir. Sondaja ait bilgileri içeren Çizelge 7.6'da resimler ise Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de görülmektedir.



Şekil 7.13 : Parsel sondaj çalışması.



Şekil 7.14 : Parselin sondaj numuneleri.

Çizelge 7.6 : Sondaj sonucu elde edilen laboratuvar değerleri.

Zemin sınıfı	Derinlik (m)	D.birim hacim ağırlığı gr/cm ³	Dane dağılımı		Atterberg limitleri			Nem oranı Wn %	koheznyon C Kg/cm ²	İçsel sürtüme açısı Ø
			+4	-200	LL %	PL %	PI %			
CL	2,50-3,00	1,806	-	-	31,5	21,6	9,9	24,01	0,518	9

7.4.2.5 Arazi ölçümlerinin değerlendirilmesi

Araştırma alanında 1 profil sismik P ve S dalgası ölçüm kayıtları kırılma yöntemi uygulanarak alınmıştır.

S₁ profili doğu-batı yönlü yapılmıştır. Profil boyu 12 metre, off settler 2m. penetrasyon derinliği 30 metredir. Sismik inceleme sonucunda ortaya konulan kesitte 10 ayrı katmanın varlığı görülmektedir. 0.00–1,20 metreler arasında dolgu toprak, 1,20–6,50 metreler arası: kahve renkli kumbantlı kil; 6,50–13,00 m arası: yeşil renkli kumlu-siltli yer yer kumtaşı bantlı kum;13,00–20,00m arası: yeşil renkli kumtaşı arabantlı sert kil formasyonlarından oluşan Çukurçeşme Formasyonu mevcuttur.

7.4.2.6 Parseldeki sismik hızların dinamik parametreleri

$V_{p1} = 481,00$ m/sn, $V_{p2} = 473,00$ m. / sn, $V_{s1} = 248,00$ m / sn, $V_{s2} = 140,00$ m./ sn. olarak verilen S dalgası hızları ise, malzemede şekil bozunumuna veya burulmaya karşı bir direnç ile orantılı olarak ölçülmüştür. Buna göre Young modülüne ilaveten kayma modülüne de ulaşılnca, kolaylıkla Poisson oranı da elde edilmiş olur.

Çizelge 7.7’de yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bilgilerin tablolastırılmış hali görülmektedir. Burada her bir zemin tabakası kalınlığı için hesaplanmış zemin yoğunluk, dalga hızlar, Poisson oranı, elastisite modülü gibi zemini tanımlamaya yarayacak değerler sunulmuştur.

Çizelge 7.7 : Zeminin dinamik parametreleri.

Dinamik parametreler hesap çizelgesi												
Katman No	Birim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
V_p	m/sn	481	473	465	554	645	778	1032	1355	1682	2825	
V_s	m./sn.	248	140	166	286	319	400	535	617	696	1154	
V_p/V_s	birimsiz	1,9	3,4	2,8	1,9	2,0	1,9	1,9	2,2	2,4	2,4	
Katman Kalınlığı	m.	1,2	1,4	1,8	2,3	2,8	3,5	4,4	5,5	6,9		
İnceleme Derinliği	m.	-1,2	-2,6	-4,4	-6,7	-9,5	-13,0	-17,4	-22,9	29,8		
Yoğunluk	Gr/cm ³	1,45	1,45	1,44	1,50,	1,56	1,64	1,76	1,88	1,99	2,26	
Poisson Oranı	birimsiz	0,32	0,452	0,427	0,318	0,339	0,320	0,316	0,369	0,397	0,400	
Kayma Modülü	kg/cm ²	889	281	397	1230	1585	2618	5026	7167	9609	30072	
Elastisite Modülü	kg/cm ²	2348	817	1133	3243	4244	6915	13233	19623	26844	84200	
Bulk Modülü	kg/cm ²	2173	2859	2583	2976	4386	6419	12011	24977	43353	140269	
Düşey Yatak Katsayısı	t/m ³	3,839	2,162	2,571	1,500	5,026	6,397	8,777	10,456	12,157	22,313	
Zemin Taşıma Gücü	kg/cm ²	9,60	5,40	6,43	3,75	12,56	15,99	21,94	26,14	30,39	55,78	
Güvenli Taşıma Gücü	kg/cm ²	3,20	1,80	2,14	1,25	4,19	5,33	7,31	8,71	10,13	18,59	
Kayma mod. Göre Zemin Sınıfı		Orta Sağlam	Gevşek	Gevşek	Orta Sağlam	Orta Sağlam	Orta Sağlam	Orta Sağlam	Sağlam	Sağlam	Sağlam	Çok Sağlam
Kayma mod. Göre Zemin Sınıfı		Orta Gevşek	Gevşek	Gevşek	Orta Gevşek	Orta Gevşek	Orta Gevşek	Orta Gevşek	Sağlam	Sağlam	Sağlam	Çok Sağlam
Ak Büyütme		1,92										
V₃₀	m/sn.	383										
Zemin Hakim Titreşim Periyodu	Sn.	0,31										

7.4.2.7 Elastisite modülüne göre zeminin sınıflandırılması

Elastisite Modülü, zeminin sağlamlığını, sertliğini, başka bir deyişle zeminin katılığını yansıtır. Eğer ortamın young modülü büyükse, gerilmeler altında kayacın biçim değiştirmesi küçük olur. Bir çok kayacın E young ölçęi 10^{11} - 10^{12} dyn/ cm² arasında yer alır. Granit için $4,7 \cdot 10^5$ kg/cm², kumtaşı için $5,8 \cdot 10^3$ kg/cm² dir.

Elastisite modülü hesaplanan tabaka sıralamasına göre sırasıyla birinci tabaka 1,20 metre olarak görülen dolgu tabaka için $E= 2348$ kg/cm² dir ve orta bir dayanıma sahiptir. İkinci tabaka için $E= 817$ kg/cm² dir. Bu tabaka plastik kil tabakasıdır.

7.4.2.8 Kohezyonlu zeminlerin V_s hızına göre zemin sınıflandırması

Temelin Oturacağı 2,50 m. deki zemin Çizelge 7.8’de görüldüğü gibi, $V_s = 140$ m/sn. ile yumuşak orta katı zemin sınıfı olarak ifade edilir.

Çizelge 7.8 : Kohezyonlu zeminlerin V_s hızına göre sınıflandırması.

V_s Dalga hızı (m/sn)	Zemin durumu
≤ 200	Yumuşak-Orta katı
200–300	Katı
300–500	Çok katı
500–750	Sert

7.4.2.9 Poisson oranına göre zemin/kaya ortamlarının sıklılığı.

Tabakanın Poisson oranı Çizelge 7.9 ‘da görüldüğü gibi 0.45 ile çok gevşek formasyonu işaret etmektedir.

Çizelge 7.9 : Poisson oranına ile zemin/kaya ortamlarının sıklılığı

Poisson oranı	Zemin/kaya sıklılığı
0,5	Cıvık - Sıvı
0,40 – 0,49	Çok Gevşek
0,30 - 0,39	Gevşek
0,20 – 0,29	Sıkı – Katı
0,10 – 0,19	Katı
0,00 – 0,09	Sağlam

7.4.2.10 Kayma modülüne göre zemin sağlamlığı

Zeminin yatay kuvvetlere karşı direncini dayanıklılığını gösterir. Enine Dalga hızı ile kayacın yoğunluğuna bağlıdır. Deprem hasarlarını tahmin etmede kullanılan önemli bir parametredir.

Çizelge 7.10 : Kayma modülüne göre zemin sağlamlığı.

Kayma modülü (kg/cm ²)	Değerlendirmesi
0 – 600	Gevşek
600 – 3000	Orta Sağlam
3000 – 10 000	Sağlam
10 000 ≥	Çok Sağlam

$$G = (\rho)(V_s)^2 / 100 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (7.1)$$

G= 281 kg/cm² değeri ile zeminimiz Çizelge 7.10’da görüldüğü gibi orta sağlam sınırında gevşek zemin sınıfındadır.

7.4.2.11 Deprem yönetmeliğine göre yerel zemin sınıfları

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmelik Esasları’na göre inceleme alanının zemin tabakaları Çizelge 7.12’den faydalanılarak C grubuna girdiğini tespit edilir. Aynı şekilde Çizelge 7.11’de görüldüğü gibi zemin Z4 sınıfına dâhildir. Bu zeminlerin ivme spektrum karakteristik periyotlarının $T_A = 0.20$ sn ve $T_B = 0.90$ sn arasındadır.

Sonuç olarak zeminin çeşitli değerlendirmelere göre sınıflandırması şu şekildedir:

- V_s hızına göre yüzey birimi olarak katman gevşek-yumuşak yapıdadır.
- Kayma modülüne göre ve elastisite değerine göre: gevşek-yumuşak yapıdadır.
- Yerel Zemin Sınıflandırmasına göre: gevşek-yumuşak zemin yapısındadır.

Çizelge 7.11 : Zemin gurupları [37].

Zemin Grubu	Zemin Grubu Tanımı	Standart Penetrasyon (N/30)	Relatif Sıklık (%)	Serbest Basınc Direnci (kPa)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
(A)	1. Masif volkanik kayalar ve ayrılmamış sağlam metamorfik kayalar, sert çimentolu tortul kayalar.... 2. Çok sıkı kum, çakıl..... 3. Sert kil ve siltli kil.....	— > 50 > 32	— 85–100 —	> 1000 — > 400	> 1000 > 700 > 700
(B)	1. Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayalar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrılmış çimentolu tortul kayalar..... 2. Sıkı kum, çakıl..... 3. Çok katı kil ve siltli kil..	— 30–50 16–32	— 65–85 —	500–1000 — 200–400	700–1000 400–700 300–700
(C)	1. Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrılmış metamorfik kayalar ve çimentolu tortul kayalar..... 2. Orta sıkı kum, çakıl..... 3. Katı kil ve siltli kil.....	— 10–30 8–16	— 35–65 —	< 500 — 100–200	400–700 200–400 200–300
(D)	1. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları..... 2. Gevşek kum..... 3. Yumuşak kil, siltli kil....	— < 10 < 8	— < 35 —	— — < 100	< 200 < 200 < 200

Çizelge 7.12 : Yerel zemin sınıfları [37].

Yerel Zemin Sınıfı	Çizelge 7.11'e Göre Zemin Grubu ve En Üst Zemin Tabakası Kalınlığı (h ₁)
Z1	(A) grubu zeminler h ₁ ≤ 15 m olan (B) grubu zeminler
Z2	h ₁ > 15 m olan (B) grubu zeminler h ₁ ≤ 15 m olan (C) grubu zeminler
Z3	15 m < h ₁ ≤ 50 m olan (C) grubu zeminler h ₁ ≤ 10 m olan (D) grubu zeminler
Z4	h ₁ > 50 m olan (C) grubu zeminler h ₁ > 10 m olan (D) grubu zeminler

7.4.2.12 Zemin hâkim (titreşim) periyodu (T₀)

Zemin hâkim periyodu T_0 (sn.) ; V_s dalga hızından yararlanarak hesaplanır

$$T_0 = 4h_1/V_{s1} + 4(50 - h_1)/V_{s2} \text{ sn.} \quad T_0 = 0.31sn \quad (7.2)$$

7.4.2.13 Terzaghi formülü, zemin taşıma gücü ve nihai taşıma gücü hesabı

Yapılacak olan inşaatların güvenli olabilmesi için, temellerde rastlanan kütlelerin birim yüzeylerinin kırılmadan, şekil ve hacim değiştirmeden kaç kg kuvvete dayanabileceklerinin bilinmesi gerekir. Bu da arazide veya laboratuvarlarda yapılan deneylerle anlaşılır. Uygulanması öngörülen gerilme kg/cm^2 veya ton/m^2 dir. Temellerin taşıma gücü, zeminin birim hacim ağırlığı, kayma mukavemeti ve deformasyon karakteristikleri gibi mekanik özelliklerine, zeminin ilk gerilme durumuna, hidrolik ve yapısal şartlarına, temelin büyüklük, derinlik, şekil, taban pürüzlülüğü ve taşıdığı yük değeri gibi geometrik ve fizik şartlarına ve inşa metoduna dayanmaktadır.

Q_d : Net Taşıma gücü (Kg/cm^2) G_s : Güvenlik Katsayısı: 3

K_1 ve K_2 : Temel şekline bağlı katsayılar C : Kohezyon

y_1 : Temel tabanı üstündeki birimin doğal birim hacim ağırlığı: $1,81 gr/cm^3$

y_2 : Temel tabanı altındaki birimin doğal birim hacim ağırlığı: $1,81 gr/cm^3$

B : Temel genişliği: 9,33 m. L : Temel uzunluğu: 9,95 m.

D_f : Temel Derinliği: 2,50 m. N_c : Taşıma Gücü Katsayıları: 5,38

N_y , Taşıma Gücü Katsayıları: 0,00 – 0,00

N_q : Taşıma Gücü Katsayıları: 1,09

\emptyset : İçsel Sürtünme Katsayısı: 1derece

C : $0,52 kg/cm^2$

Radye temeller için:

$$K_1 = 1 + (0,2 B/L) = 1,19 \quad (7.3)$$

$$K_2 = 0,5 - (0,1 B/L) = 0,41 \quad (7.4)$$

$$Q_d = K_1 C N_c + y_1 D_f N_q + K_2 N_y B y_2 \quad (7.5)$$

$$\text{Zemin Taşıma Gücü } q_d = 372,84 KPa \rightarrow 3,80 kg/cm^2 \quad (7.6)$$

$$\text{Nihai Taşıma Gücü (ZEG) } q_s = q_d / G_s \rightarrow 1,267 kg/cm^2 \quad (7.7)$$

$$\text{Yatak Katsayısı ortalama (Meyerhof) } = 1942 ton/m^3 \quad (7.8)$$

7.4.2.14 SPT ile nihai taşıma gücü tayini

Temel seviyesindeki SPT değeri; SK – 1 kuyusu için:

$$N_{30} = 16 \text{ (7-8-8)}$$

$$\text{SPT Düzeltme} = 15 + ((N_{30} - 15)/2) = 15 + ((16 - 15)/2) = 15,5 \quad (7.9)$$

$$\text{Zemin Emniyet Gerilmesi } (Q_a) = (N - 3)/10 = (15,5 - 3)/10 = 1,25 \text{ kg/cm}^2 \quad (7.10)$$

SPT (Standart Penetrasyon) deneyinden nihai taşıma gücü (ZEG) = 1,25 kg / cm²

Laboratuar sonucuna göre terzaghi nihai taşıma gücü (ZEG)_{ort} = 1,267 kg / cm²

Sismik verilerden elde edilen nihai taşıma gücü (ZEG)_{ort} = 1,80 ve 1,25 kg / cm²

Çizelge 7.13 : Düşey yatak katsayısı.

Zemin Türü	Düşey Yatak Katsayısı (t/m ³)
Plastik Kil	K _d = 500 – 1 000
Kil, Yarı Sert	K _d = 1 000 – 1 500
Kil, Sert	K _d = 1 500 – 3 000
Dolma toprak	K _d = 1 000 – 2 000
Kum, orta Sıkı	K _d = 2 000 – 5 000
Kum, Sıkı	K _d = 1 000 – 5 000
Kum, çakıl, sıkı	K _d = 10 000 – 15 000

Düşey yatak katsayısı (Bulk Mod. İle)= 1500 t/m³

Sismik değerlendirmelerden düşey yatak katsayısı ile = 1500 t/m³

Nihai taşıma gücü (zem) den düşey yatak katsayısı hesabı ile=1500 t/m³

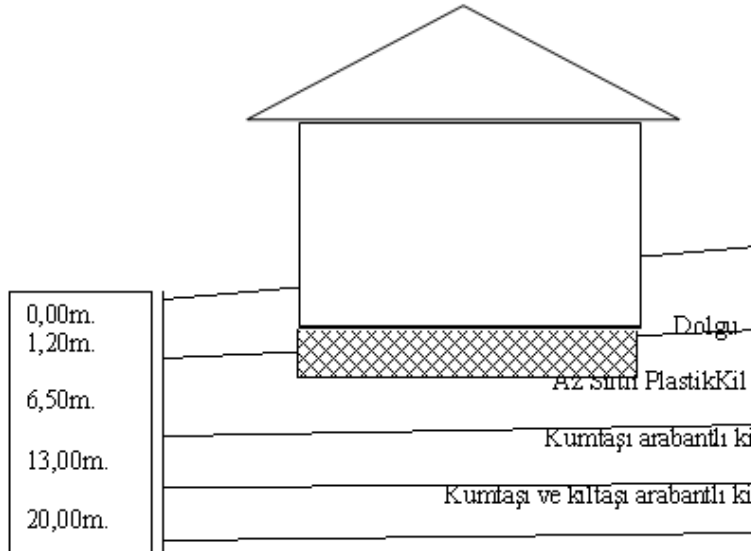
Yapılan gerek deneysel ve gerekse gözlemsel çalışmalar sonucunda, inşa edilecek yapının düşey yatak katsayısı ve nihai taşıma gücü Çizelge 7.14 verilmiştir.

Çizelge 7.14 : Nihai taşıma gücü ve düşey yatak katsayısı.

Jeolojik Birim	Uygulamaya Esas Değerler	
	$\sigma_{z,em}$ (kg/cm ²)	K _d (t/m ³)
Çukurçeşme Formasyonu	1,25	1500

7.4.2.15 Zemin ve kaya türlerinin değerlendirilmesi

İnceleme sahasında yapılan sondajda genel zemin profilinin 1,50–8,00 m. arası: Az siltli plastik kil; 8,00–14,00 m. arası: kumtaşı arabantlı siltli kil; 14,00–20,00 m. arası: kumtaşı ve kıltaşı arabantlı sert kil formasyonlarından oluşan Güngören formasyonunun görüldüğü formasyon geçilmiştir. İnceleme alanı zemin görünüşü Şekil 7.15’de sunulmuştur.



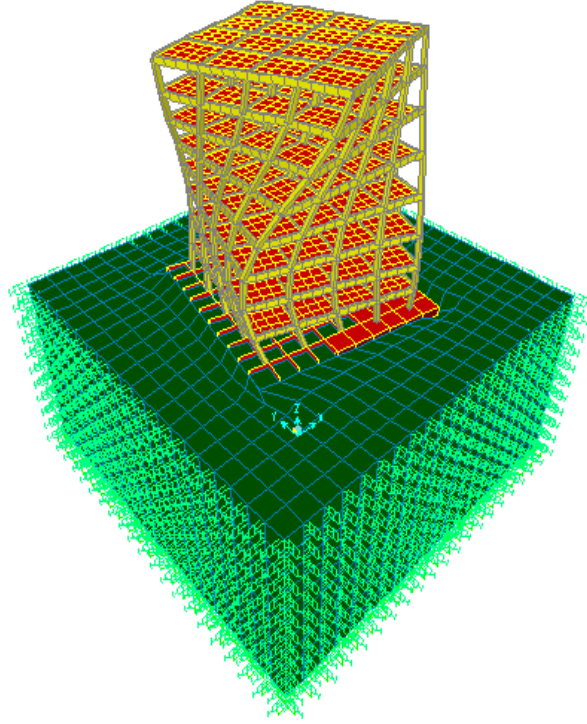
Şekil 7.15 : Zemin tabaka kalınlıkları ve zemin cinsleri.

7.4.3 Problemin çözümü

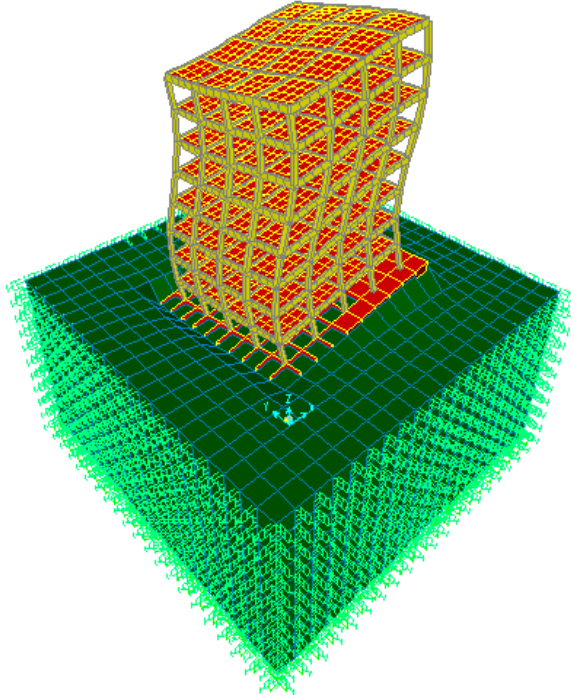
Verilen örneklerin sonucunda orta sıklıktaki zemin üzerine inşa edilen yapılar için hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın benzer sonuçlar elde edileceği görülmüştür. Zemini daha gevşek malzemeden oluşan zeminlerde, bulunan bu sonuçların değişeceği daha önceden yapılan örneklerden faydalanarak kolaylıkla anlaşılabilir. Çizelge 7.15 yapılan örnek çalışmanın özeti vermek üzere elde edilen sonuçlar ile hazırlanmış tablodur. Şekil 7.16 ve Şekil 7.17 üç boyutlu modelin deprem sırasındaki hareketinin örnek mod şekilleridir.

Çizelge 7.15 : Farklı zemin yapı etkileşim modellerinin kıyaslanması.

Zemin	Periyot (sn)	Azami dep(mm)	Azami ger(Kn/m ²)	İvme tep(m/sn ²)	Kolon 13 mom. (Kn*m)	Kolon 13 kes. (Kn)	Kiriş 360 mom.(Kn*m)	Kiriş 360 kes. (Kn)
3BK	0,8293	58	4716	2,589	246	148,9	138,5	68,39
Winkler	0,8551	62,14	4635	2,497	253	153,1	136	66,94
Ankastre	0,8058	54,28	4636	2,853	240	145,2	132,7	65,61



Şekil 7.16 : Deprem sırasında yapı zemin sisteminin hareketi mod.3.



Şekil 7.17 : Deprem sırasında sistemde oluşan hareketler mod.1.

8. SONUÇLAR

Zemin yapı etkileşimi konusunda hazırlanan bu tez çalışmasında birçok sayısal örnek verilerek gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Tarafımızca yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen bilgiler ile çalışmalarımıza ışık tutan makalelerden çıkarılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Dinamik zemin-yapı etkileşimi modelinin, zemini tamamen rijit kabul eden yaklaşımdan farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu farklılık zeminin: rijitlik, sönüm, kütle ve atalet gibi temel özelliklerinin ihmal edilmesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle yumuşak zeminlerde bu farklılaşma daha fazladır.
- 2) Etkileşimli sistemde periyotlar, gerilmeler, kolon ve kirişlerin kesme kuvvetleri gibi sistemin dinamik özelliklerinin zemin niteliğine bağlı olduğu görülmüştür. Örneğin zeminin rijitliğin azalması yapı periyodunun artmasına sebep olur.
- 3) Yapı zemin etkileşimi sisteminde, rijit zemin modeline göre daha büyük periyotlar oluştuğu ve periyotların zeminin elastisite modülü azalmasına zıt şekilde artmaya başladığı görülmüştür. Literatürde yumuşak zeminler üzerine inşa edilen kısa periyotlu yapılara dikkat edilmesi gerekliliği birçok kez vurgulanmıştır.
- 4) Zemin yapı etkileşimi sisteminde, zeminin elastisite modülü veya yatak katsayısı arttıkça başka bir deyişle rijitleştikçe üst yapı elemanlarında daha büyük gerilmeler meydana geldiği görülmüştür. Ancak bu artışın da belli bir sınıra kadar etkili olduğu anlaşılmıştır.
- 5) Sıkı zemin durumuyla karşılaştırıldığında zeminin orta sıkı ve gevşek zemin olması durumlarında, elde edilen değerlerin genliklerinde önemli oranlarda artışlar meydana gelmektedir. Bu durum literatürde bildirilen yumuşak zeminlerin sıkı zeminlere göre sistemin davranışını daha fazla etkilemesine neden olduğunu, dolayısıyla yumuşak zeminler üzerinde yapılacak yapılarda zemin yapı etkileşiminin daha etkin olduğu sonucunu doğrulamaktadır.

- 6) Yapı-zemin etkileşimi, yapı tabanındaki deprem hareketini değiştirdiği için serbest alan ile yapı tabanındaki deprem farklılık göstermektedir.
- 7) Zemine mesnetlenmenin olduğu noktalarda çökme, yükselme veya dönmeler oluşabilmektedir. Ayrıca zemin, deprem hareketini değiştirerek yapılara iletmede çoğu zaman depremin etkilerini arttırmaktadır. Yapı ile zeminin periyotlarının çakışması durumunda ise yapıda oluşacak rezonanstan dolayı üstyapı çok büyük zorlanmalara maruz kalmaktadır. Özellikle çok katlı yapı sistemlerinde temelde meydana gelen dönmeler çok etkili olabilmektedir.
- 8) Zeminin ani hareketi, yapıda atalet kuvvetleri (eylemsizlik kuvvetleri) oluşturmaktadır. Depremin düşey bileşeninin yapıya etkimesi durumunda, yapı yukarı doğru zeminden ayrılarak hareket edebilmektedir
- 9) Sistemde sönüm değerlerinin doğru bir şekilde yansıtılması önemlidir. Her ne kadar zemindeki farklı malzeme katmanları için farklı sönüm değerlerinin olduğu bilinse de hesaplarda bir miktar hatanın varlığı kabul edilebilir. Ayrıca üst yapının sönümü ve sınırlardaki geometrik sönümü de hesaba katılmalıdır.
- 10) Yapının oturacağı zeminin özellikleri ve tabaka kalınlıkları oldukça önemlidir. Özellikle gevşek zeminlerin tabaka kalınlıkları ve sağlam zeminin ne kadar derinde olduğu incelenmeli gerekirse gevşek zemini iyileştirme veya bu tabakayı kaldırma yoluna gidilmelidir.
- 11) Sert zemine inşa edilen yapılar yumuşak zemin üzerine inşa edilen yapılara oranla daha az deplasman yapmasına rağmen, üst yapıda oluşan kesit tesirleri daha fazladır. Buna bağlı olarak sert zemin üzerine oturan yapılarda yumuşak zemin üzerine oturan yapılara oranla daha fazla yapısal hasar meydana gelmektedir
- 12) Zemin yapı etkileşimi sistemi gerçeğe en uygun şekilde modellenmelidir. Zemin özellikleri, model eleman boyutları, sonlu eleman ağının büyüklüğü, yanal sınırların uygunlu gerçeği yansıtacak düzeyde olmalıdır.
- 13) Yapının zemine rijit bağlı olduğu varsayımı doğru kabul edilirse hesaplarda yapının temel tabanı burulması dolayısıyla kat burulmaları ihmal edilmiş olur. Oysa meydana gelen burulma, sistemi oldukça etkilemektedir.
- 14) Zemin yatak katsayısı ile zemin elastisite modülü benzer parametreler olmasa da Winkler modeli ve üç boyutlu katı zemin modelinde, bu değişkenlerin artışları yapı sisteminde benzer değişimlere neden olmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Ala, N.**, 2007. Adapazarı Zemininde Yapılan Betonarme yapılarda Zemin-Yapı Etkileşimi, *Yüksek lisans Tezi*, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [2] **Aydinoğlu, M. N.**, 1977. Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı, *Doktora Tezi*, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [3] **Mertol, A., Mertol, C.**, 2002. Deprem Mühendisliği *Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, Kozan Matbaacılık
- [4] **Wilson, E.**, 2002. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures , Computers and Structures Inc. Berkeley, CA, USA
- [5] **Elmas, M., Karabörk. T ve Mercan, D.**,2005. Deprem Etkisindeki Yapı Davranışına Zemin Taşıma Gücünün Etkisi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli Üniversitesi –Kocaeli, 23–25 Mart, s.27–34
- [6] **Mısır, S., Özden, G ve Kahraman, S.**, 2005. Zemin Özelliklerinin Çok Katlı Yapıların Dinamik Davranışı Üzerine Etkisi, *Deprem Sempozyumu*,Kocaeli Üniversitesi-Kocaeli 23–25 Mart, s.1064–1073
- [7] **Karabörk, T., Doğuş, S .**, 2005 Zemin Özelliklerinin Çok Katlı Yapıların Dinamik Davranışı Üzerine Etkisi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli Üniversitesi-Kocaeli, 23–25 Mart, s.1108–1113
- [8] **Kutanis, M .**, 2001. Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimi, *Doktora Tezi*, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [9] **Yerli, R .**, 1998. İki ve Üçboyutlu Dinamik Zemin-Yapı Etkileşimi Problemler Sonlu Ve Sonsuz Elemanlar Kullanılarak Analizi, *Doktora*, ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- [10] **Çelebi, E.**, 2001. Planda Simetrik Olmayan Çok Katlı Yapıların Zeminle Dinamik Etkileşimi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [11] **Kırtel, O.**, 2007. Sismik Bariyer Modelinin Tabakalı Zemin Ortamındaki Dalga Yayılışına Etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [12] **Maltaş, U.**, 2008. Dinamik Yükler Etkisi Altındaki Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Empedans Fonksiyonlarına Dayalı Çözümü, *Yüksek Lisans Tezi*, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

- [13] **Celep, Z., Kumbasar, N.**, 1993. *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarım*, Sema Matbaacılık, İstanbul
- [14] **Kaptan, A.**, 1999. Çok Katlı Çerçeve Tipi Betonarme Yapıların Elastik Zeminle Zeminle Dinamik Etkileşimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [15] **Fahjan, Y.**, 2010. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Sap 2000 Uygulaması), İMO Gebze Temsilciliği
- [16] **Livaoglu, R., Doğangün, A .**, 2007. Effect Of Foundation Embedment on Siesmic Behavior of Elevant Tanks Considering Fluid-Structure-Soil İnteraction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, SeptemberNo.27, p.855–863
- [17] **Çağlar, N., Garip, Ş ve Yaman, D.**, 2005. Deprem Etkisindeki Betonarme Yapılarda Yapı-Zemin Etkileşimi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli Üniversitesi –Kocaeli, 23–25 Mart, s.1089–1096
- [18] **Soysal, L.**, 2006. Deprem Koşullarında Yapı-Zemin Etkileşimi Ve Zemin İyileştirmesi *Yüksek Lisans*, İ.K.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [19] **Özaydın, K.**, 1982. *Zemin Dinamiği*, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayını, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası,
- [20] **Düzgün, A. O.**, 2007 . Topografik Yapının Zemin Yapı Sistemlerinin Dinamik Davranışları Üzerine Etkileri, *Doktora Tezi*, A.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- [21] **Gedikli, A., Ergüven M.E ve Kimençe, B.**, 2001. Winkler Zeminine Oturan Dikdörtgen Plaklar Yarı Sayısal Burkulma Analizi 7th *Ulusal Mekanik Kongresi*, 10–14 Eylül 2001, Konya, s 385–394
- [22] **Gedikli, A., Erguven M.E.**, 2003. A mixed inite element formulation for Timoshenko beam on Winkler foundation , *Computational Mechanics* 31(3–4): 229–237
- [23] **Gedikli ,A.**, 2007. Eigenvalue problems of beams with wedge-shaped Vlasov foundations, *Journal of Sound and Vibration*, 300: 817–830
- [24] **İnal, S.**, 2006. İki Parametrelili Elastik Zeminde Yapı Zemin Etkileşimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [25] **Dağoğlu, A.**, 2004. Elastik Zemine Oturan Plaklar için Parametreler, *İMO Teknik Dergi*, s.3283–3293, Yazı 220
- [26] **Gedikli, A., Kimençe ,B.**, 2002. İki parametrelili elastik zemine kısmi gömülü silindirik tank, *5th International Congress on Advances in Civil Engineering*, 25–27 September, İstanbul-Turkey,

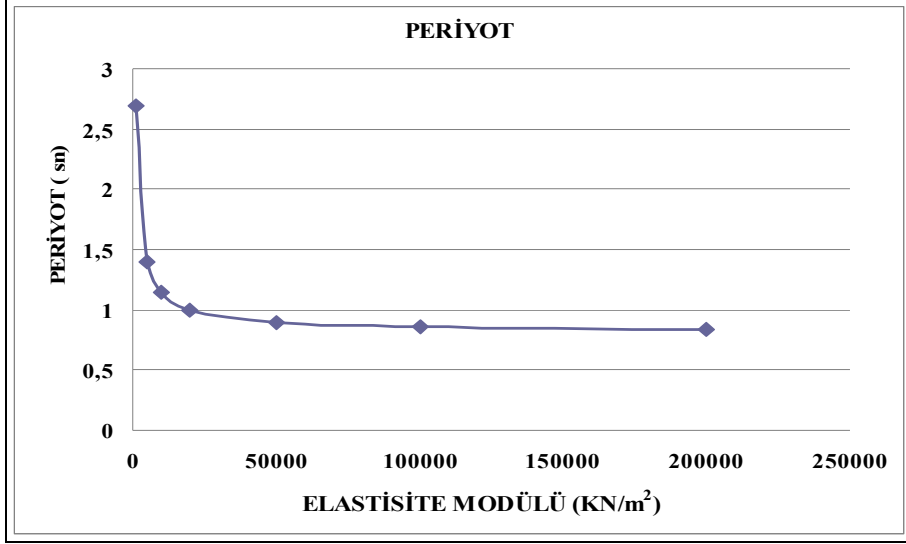
- [27] **Gedikli, A.**, 2006. Eigenvalue Problems of Beams on Vlasov Foundations Havin Shape of Wedge, *Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering*, October 11–13, İstanbul
- [28] **Gedikli, A., Ergüven M.E.**, 1993. Consistent stiffness matrix for analysis of beams and plates on elastic foundation, *Bulletin of The Technical University of Istanbul*, 46(1): 13-28,
- [29] **Mısır, S., Özden, G., Kahraman, S.**, 2007. Sabit ve Değişken Yatak Katsayısı Yaklaşımlarının Yapı Davranışına Etkisi, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16–20 Ekim 2007, s. 217–228, İstanbul
- [30] **Develioğlu, İ. N.**, 1996. Yatak katsayısı ve Temel Yapılarına Uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [31] **Kökten, Ö.**, 2008. Yüzeysel Temellerin TS 500'e Göre Hesap Ve Tasarım Yöntemleri, *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [32] **Tel, A.**, 2007. Esnek Temeller Üzerine Yapılan Plakların Sayısal Metotlarla Statik Analizi, *Yüksek lisans Tezi*, CÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas
- [33] **Terzaghi, K.**, 1955. Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction, *Geotechnique*, 4, s. 297-326
- [34] **Ersoy, U.**, 1995. *Betonarme 2 Döşeme Ve Temeller*, Evrim Yayınevi, Ankara
- [35] **Keskinel, F.**, 1970. *Elastik Zemine Oturan Sonlu Kiriş Tesir Çizgileri ve Sürekli Temellerin Çözümüne Uygulanması*, İstanbul Teknik Üniversitesi
- [36] **Darılmaz, K., Vatansever, C.**, 2009. SAP2000 Kursu Notları, İmo İstanbul Şubesi
- [37] **Zemin Etüd Raporu**, 2009. Bağcılar İlçesi, Kirazlı Mahallesi, Üstün Sokak F21C22B3B Pafta, 2725(395) Ada, 13 nolu Parsel Zemin Etüdü Dost Mühendislik.
- [38] **TDY**, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

EKLER

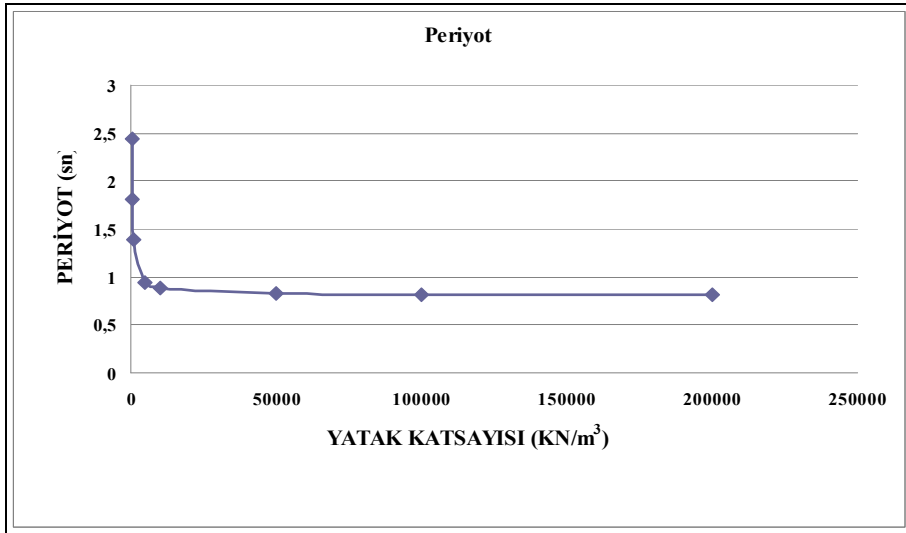
EK A : Üç Boyutlu Katı Eleman ve Yatak Katsayısı Yöntemlerinin Kıyaslanması

EK B : Değişken Zemin Tabaka Kalınlıklarının Üst Yapıya Etkisinin Analizi

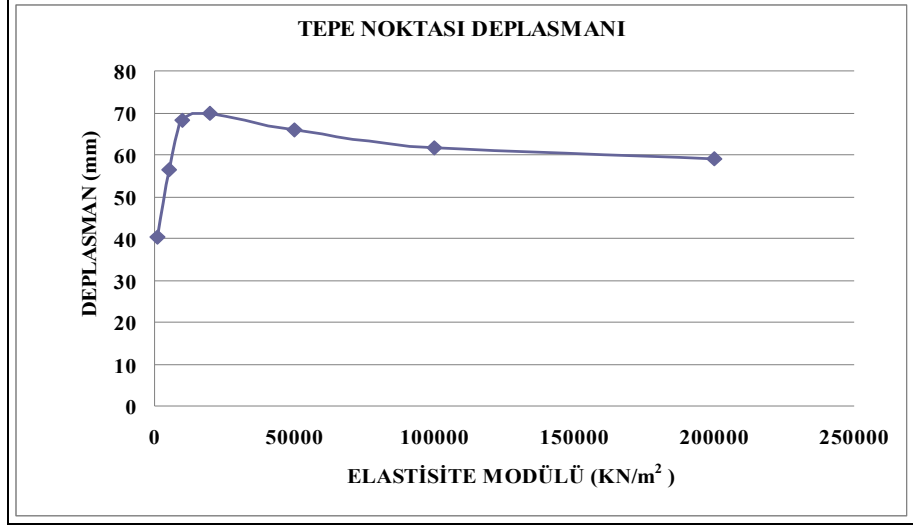
EK C : Gerçek Zemin Değerleriyle Modellenen Sistemlerin Kıyaslanması



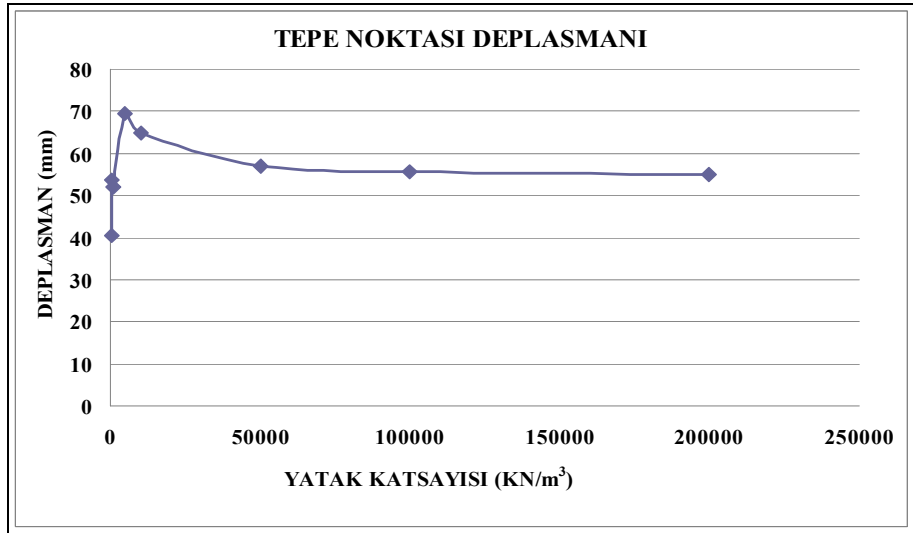
Şekil A.1 : Elastisite modülü-periyot ilişkisi.



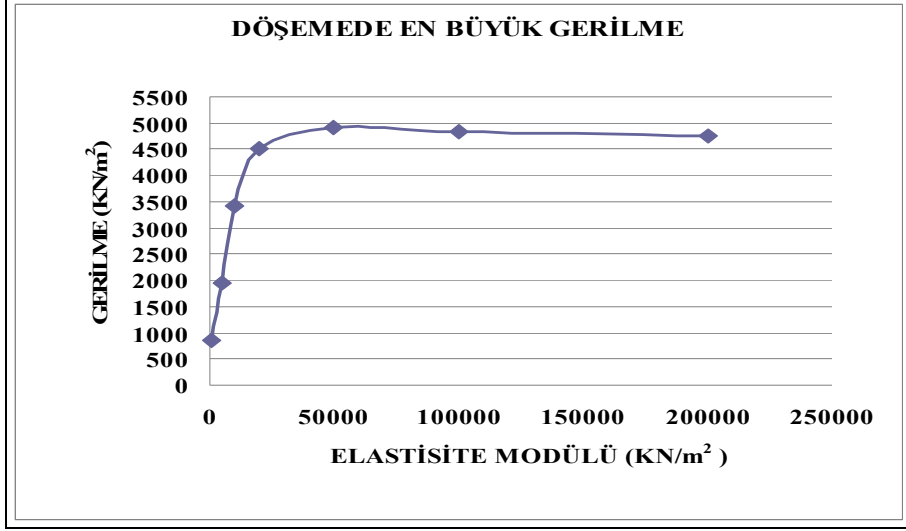
Şekil A.2 : Yatak katsayısı-periyot ilişkisi.



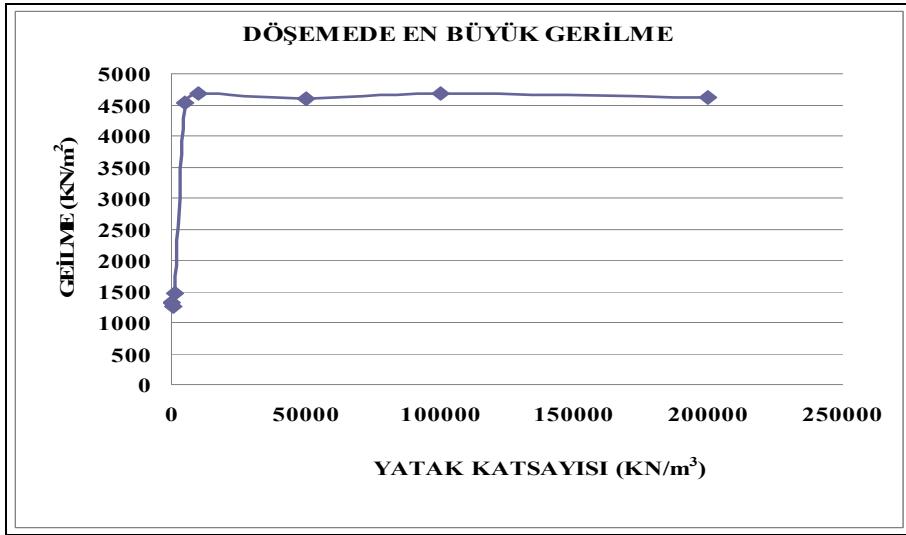
Şekil A.3 : Elastisite modülü-deplasman ilişkisi.



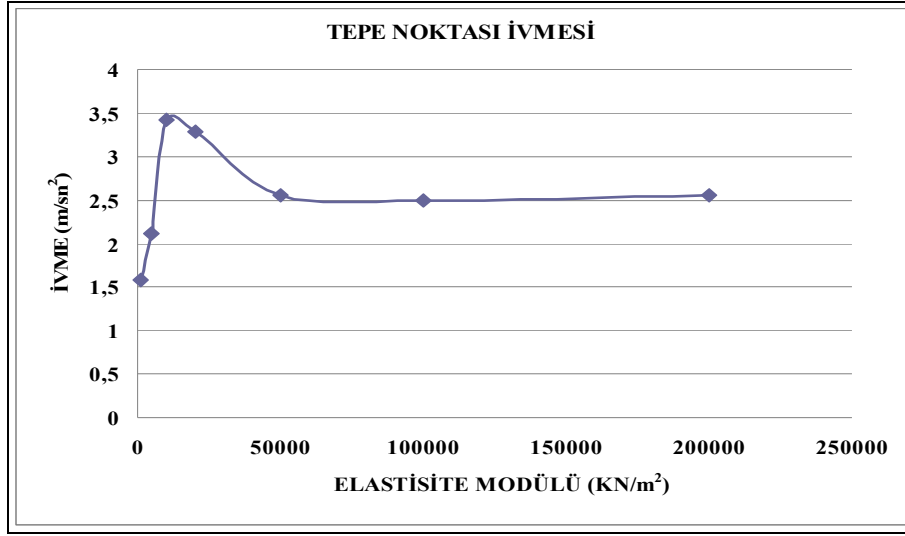
Şekil A.4 : Yatak katsayısı-deplasman ilişkisi.



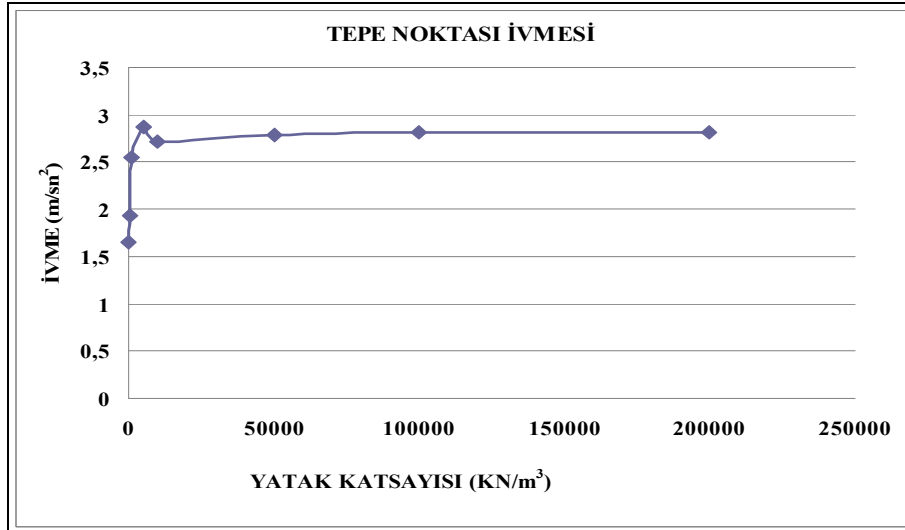
Şekil A.5 : Elastisite modülü-gerilme ilişkisi.



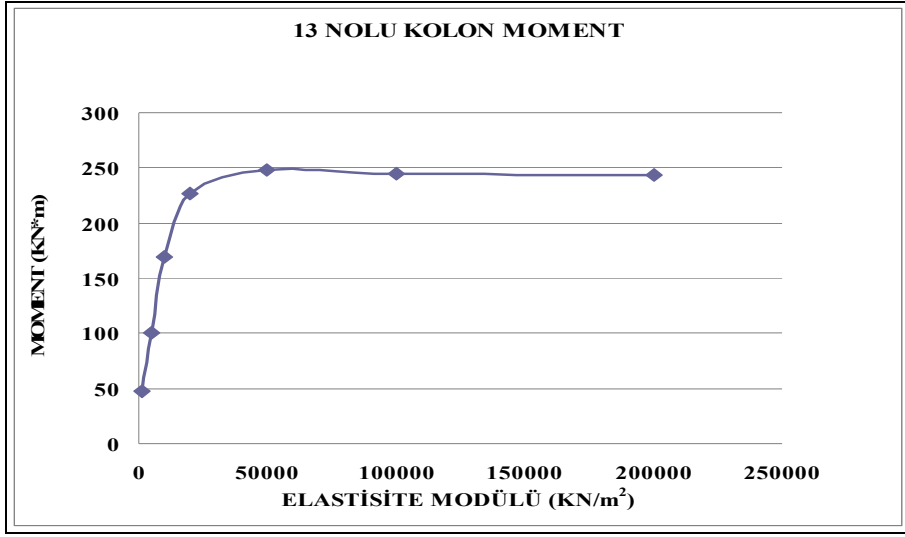
Şekil A.6 : Yatak katsayısı-gerilme ilişkisi.



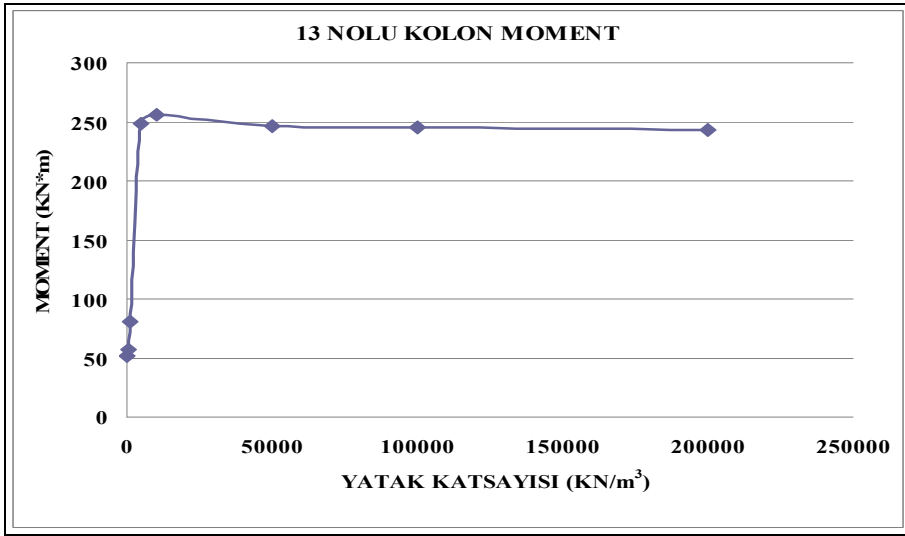
Şekil A.7: Elastisite modülü-ivme ilişkisi.



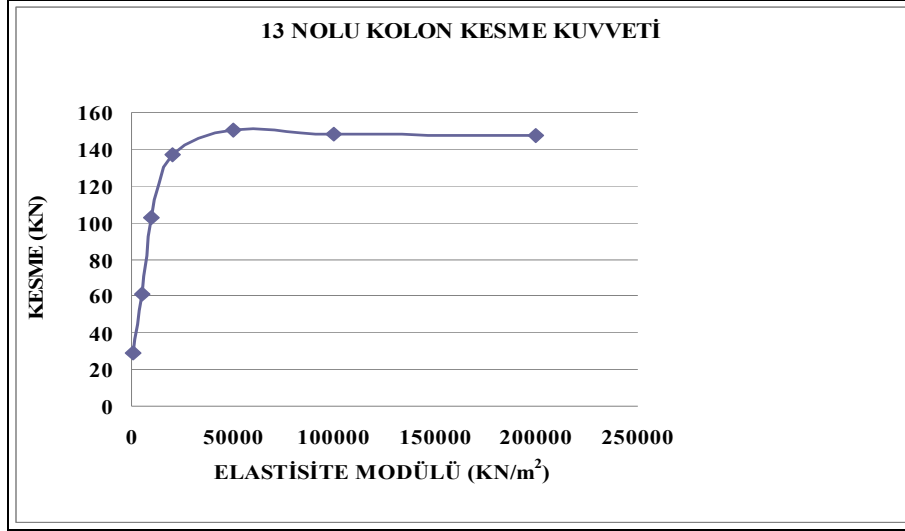
Şekil A.8 : Yatak katsayısı-ivme ilişkisi.



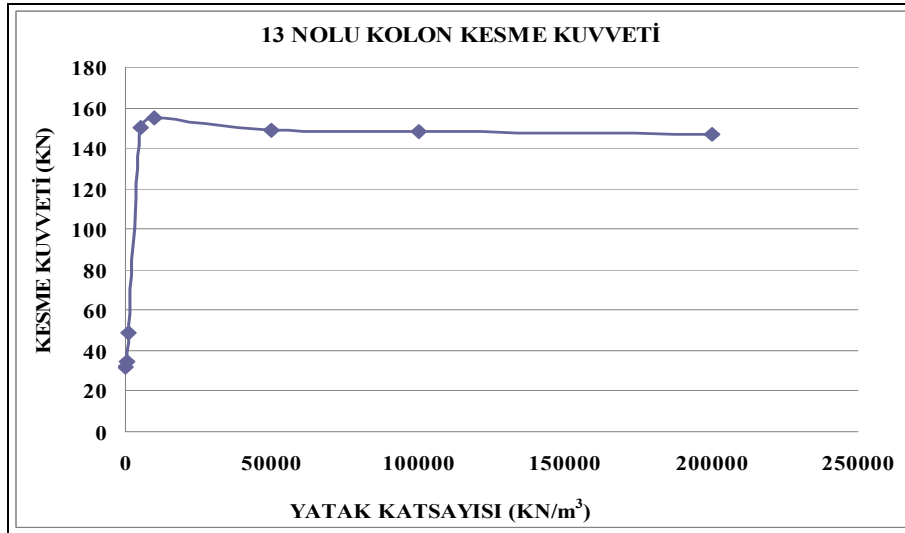
Şekil A.9 : Elastisite modülü-kolon moment ilişkisi.



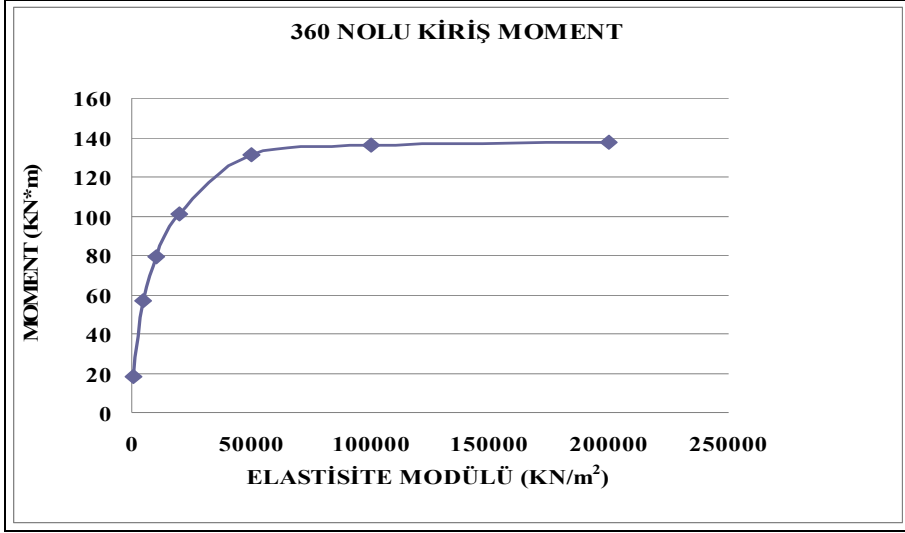
Şekil A.10 : Yatak katsayısı- kolon moment ilişkisi.



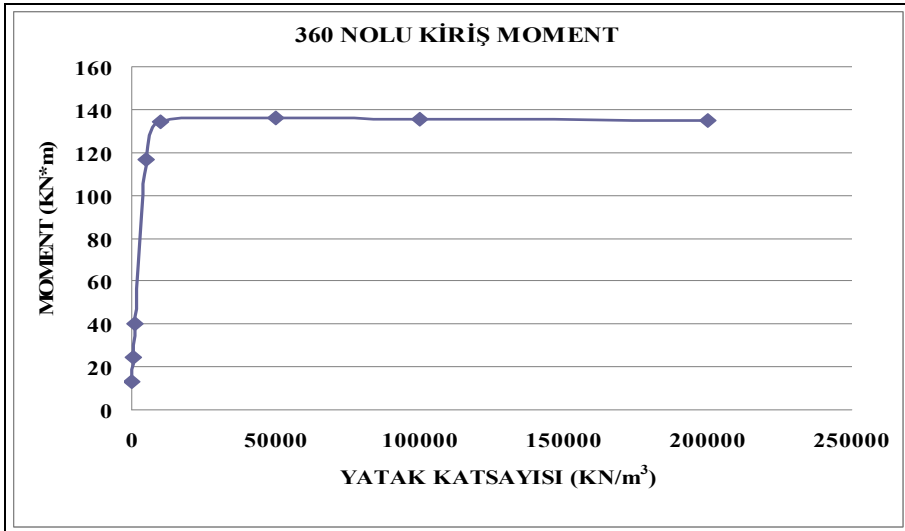
Şekil A.11 : Elastisite modülü-kolon kesme kuvveti ilişkisi.



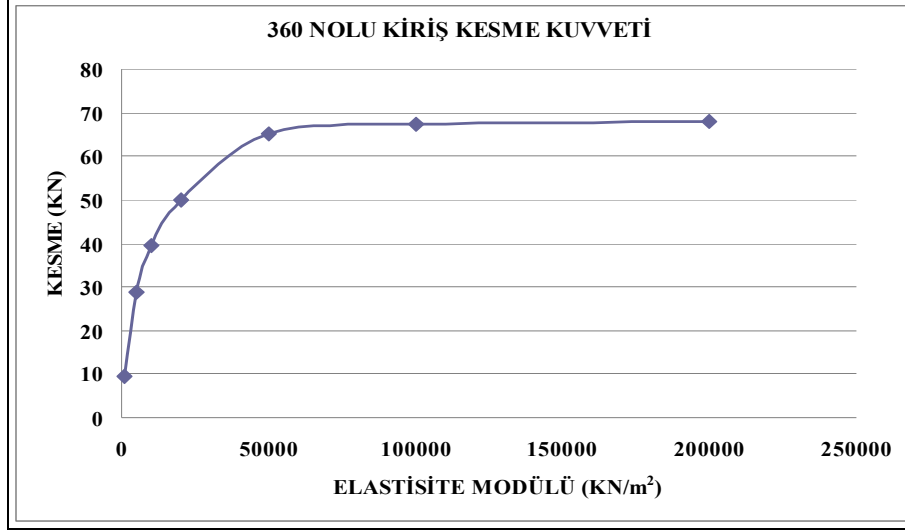
Şekil A.12 : Yatak katsayısı- kolon kesme kuvveti ilişkisi.



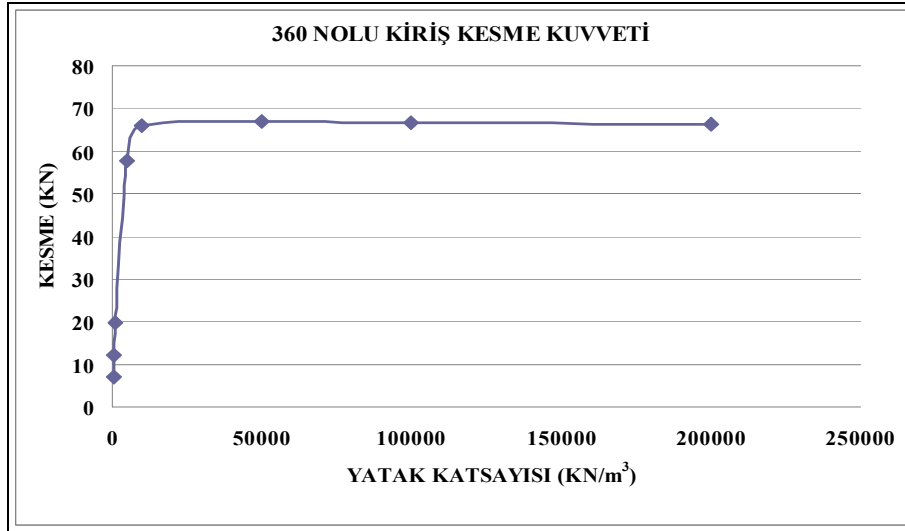
Şekil A.13 : Elastisite modülü-kiriş momenti ilişkisi.



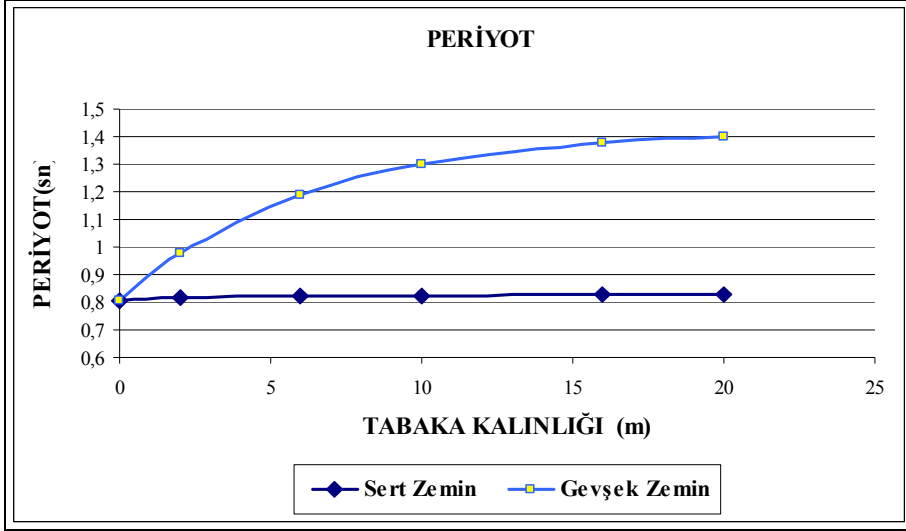
Şekil A.14 : Yatak katsayısı- kiriş momenti ilişkisi.



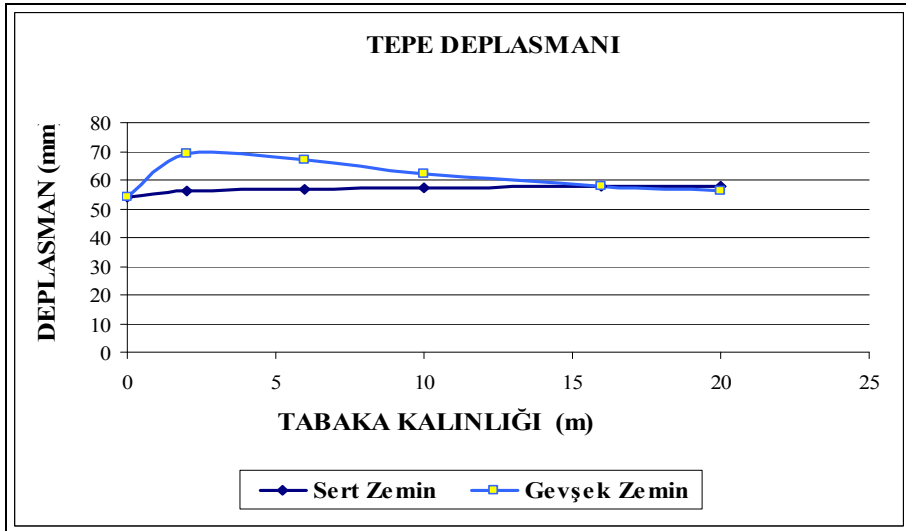
Şekil A.15 : Elastisite modülü--kiriş kesme kuvveti ilişkisi.



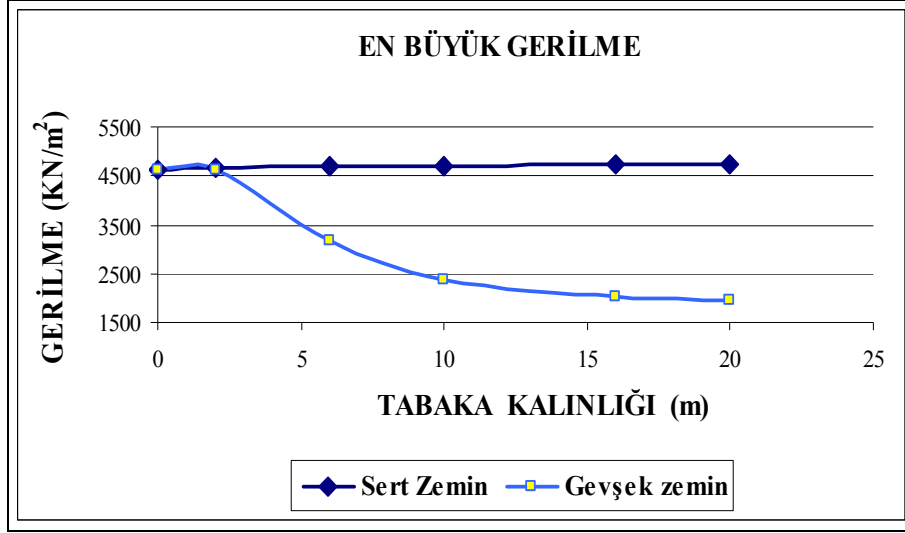
Şekil A.16 : Yatak katsayısı--kiriş kesme kuvveti ilişkisi.



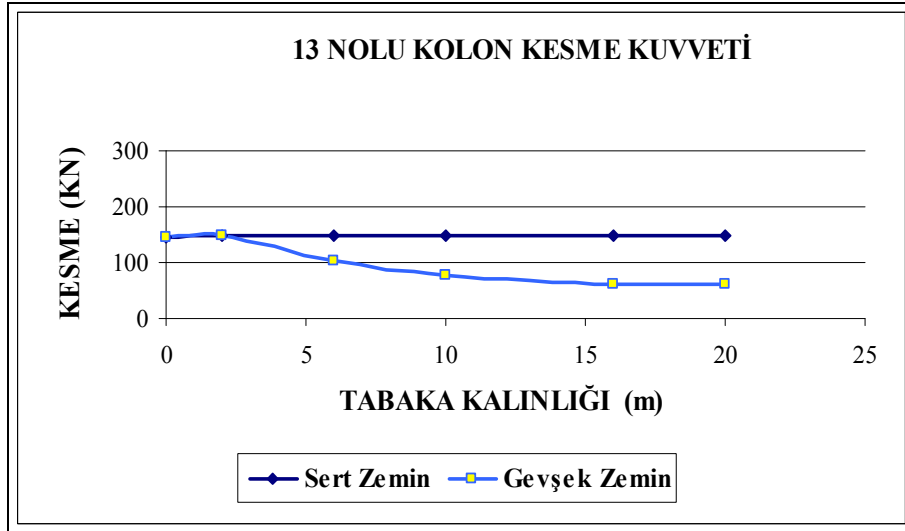
Şekil B.1 : Zemin tabaka kalınlığı–periyot ilişkisi.



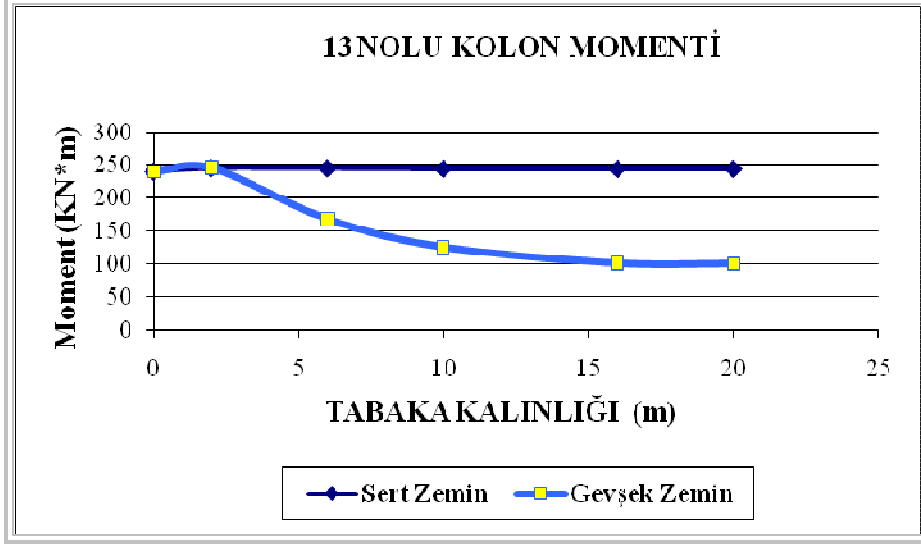
Şekil B.2 : Zemin tabaka kalınlığı–deplasman ilişkisi.



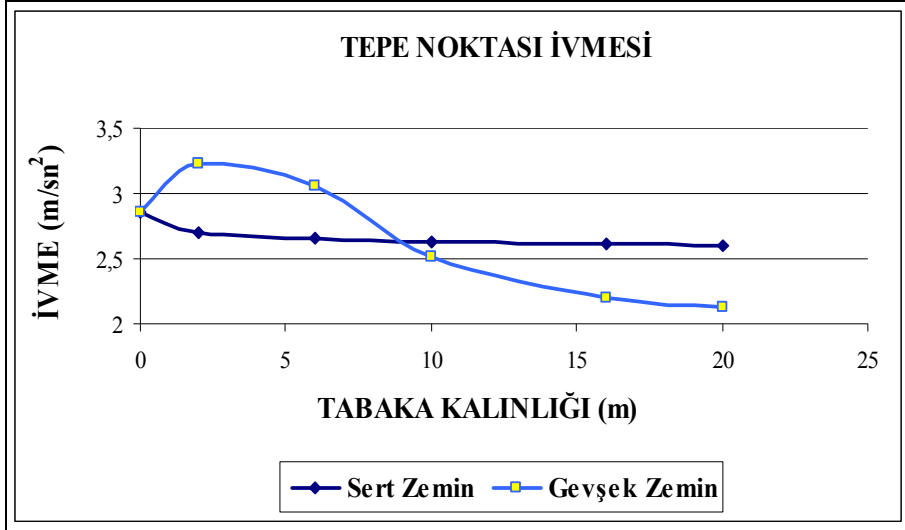
Şekil B.3 : Zemin tabaka kalınlığı–üst yapıda döşemesi gerilme ilişkisi.



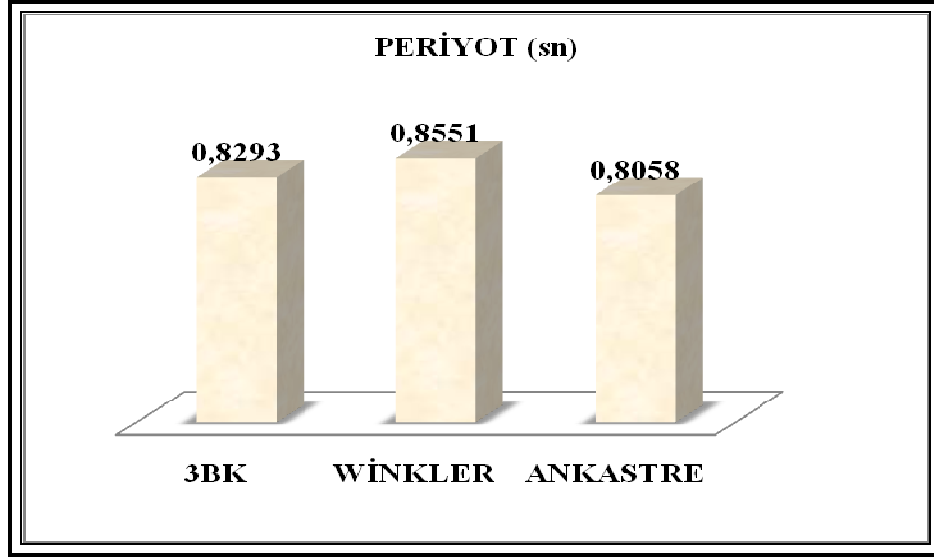
Şekil B.4 : Zemin tabaka kalınlığı –kolon kesme kuvveti ilişkisi.



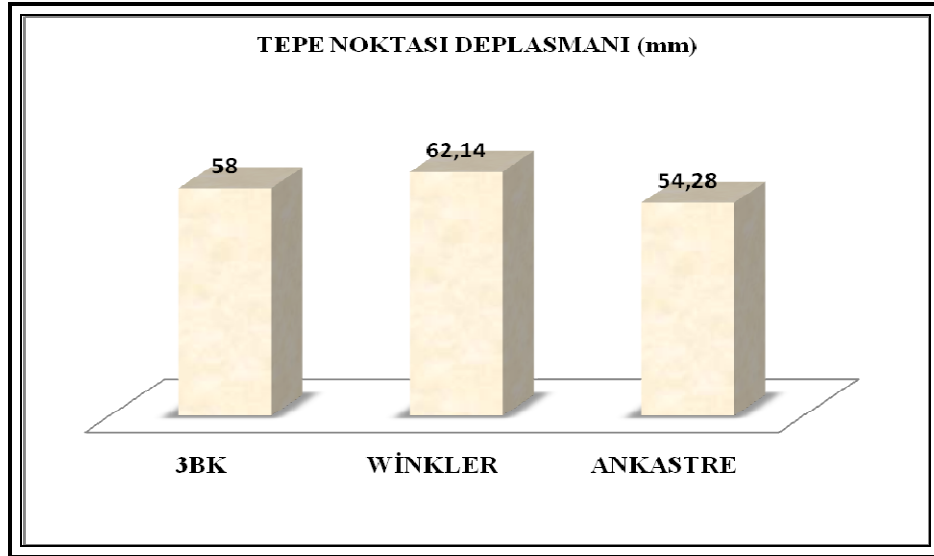
Şekil B.5: Zemin tabaka kalınlığı–kolon momenti ilişkisi.



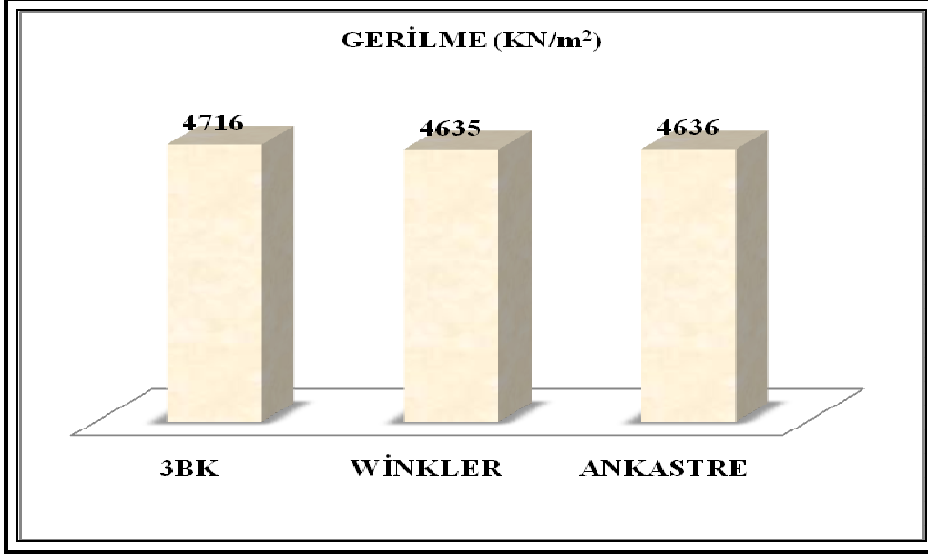
Şekil B.6 : Zemin tabaka kalınlığı–ivme ilişkisi.



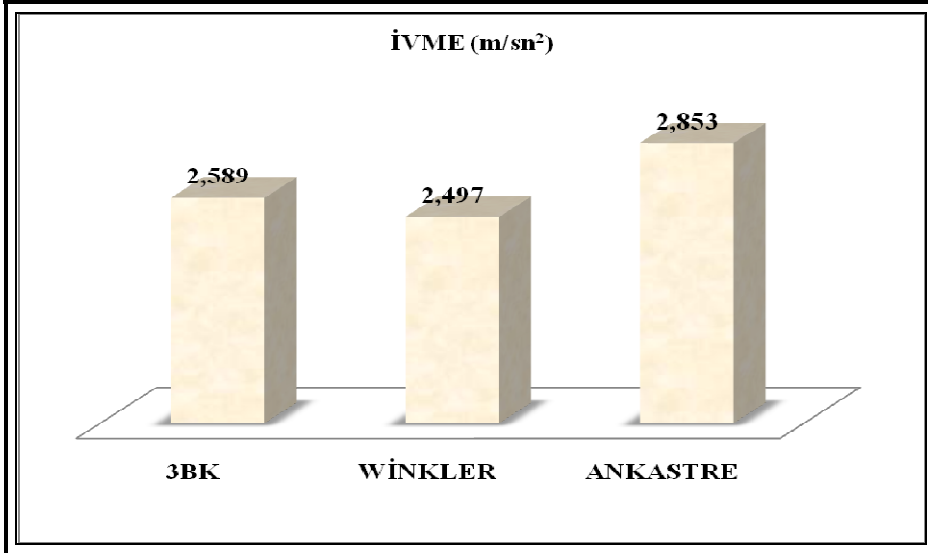
Şekil C.1 : Periyot kıyaslaması.



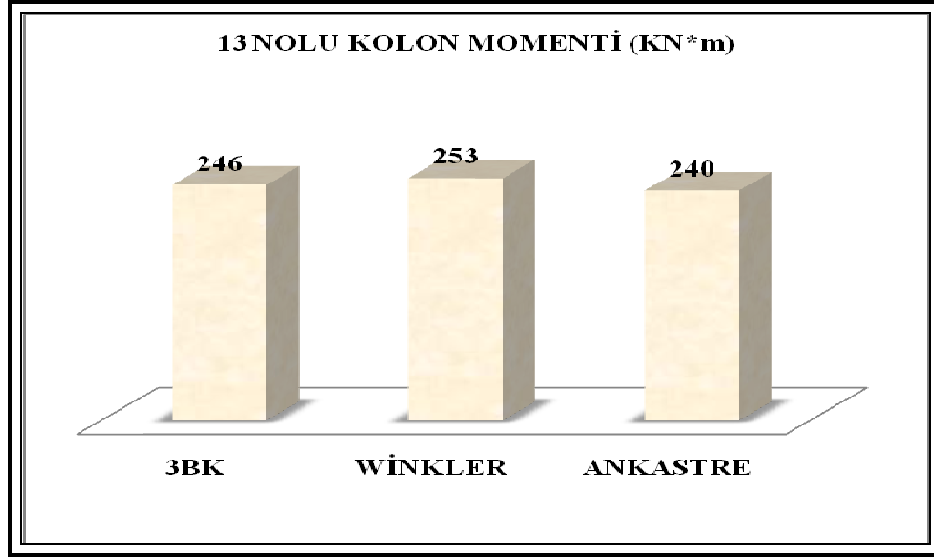
Şekil C.2 : Tepe noktası deplasmanı kıyaslaması



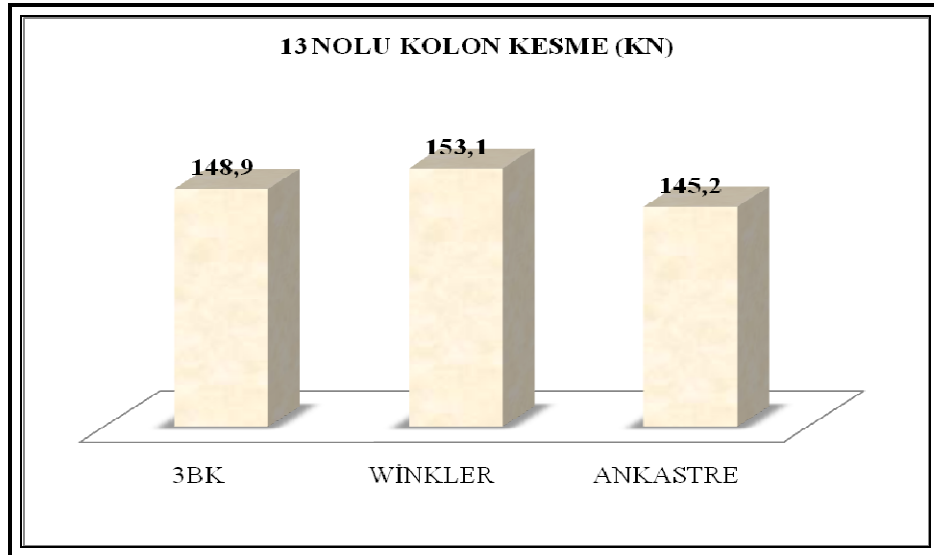
Şekil C.3 : Gerilme kıyaslaması



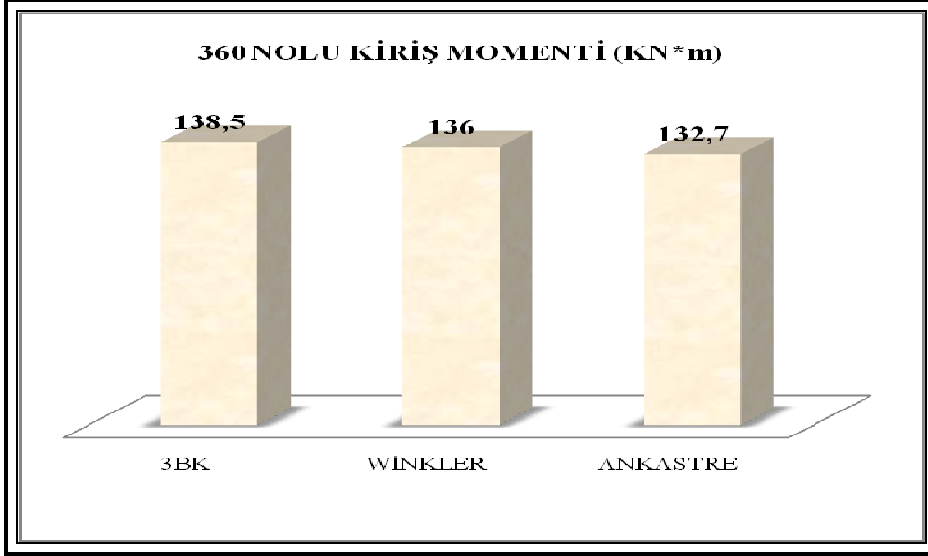
Şekil C.4 : Tepe noktası ivme kıyaslaması



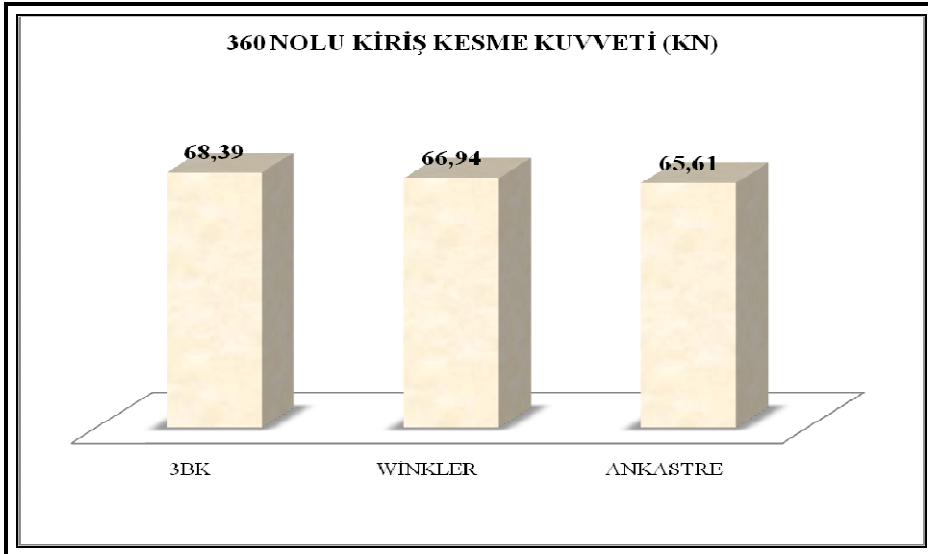
Şekil C.5 : 13 nolu kolon moment kıyaslaması



Şekil C.6 : 13 nolu kolon kesme kuvveti kıyaslaması



Şekil C.7 : 360 nolu kiriş momenti kıyaslaması



Şekil C.8 : 360 nolu kiriş kesme kuvveti kıyaslaması

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Furat MAMUK

Doğum Yeri ve Tarihi: Bitlis, 19.03.1984

Lisans Üniversitesi: Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü