

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULARIN SİSMİK ETKİLER
ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Seda ŞENDİR**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ZEMİN MEKANİĞİ ve GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

MART 2005

**ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULARIN SİSMİK ETKİLER
ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Seda ŞENDİR
501021253**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Şubat 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Mart 2005**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet SAĞLAMER
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Recep İYİSAN (İ.T.Ü.)
Yar.Doç.Dr. Pınar ÖZDEMİR (İ.T.Ü.)**

MART 2005

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmam süresince danışmanlığımı yürüten, rehberlik ederek değerli ilgilerini, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER'e sonsuz saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Konu ile ilgili bilgilerini, deneyimlerini, kaynaklarını benimle paylaşan ve deneysel çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Pınar ÖZDEMİR'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Berrak TEYMUR'a ve Arş. Gör. Dr. Atilla SEZEN'e çok teşekkür ederim.

Yaptığım görüşmeler sırasında bilgi ve kaynak açısından yaptıkları katkılarından ötürü İGDAŞ çalışanlarından Mak. Müh. Nesrin KILIÇ'a, DİZAYN GROUP çalışanlarından Mak Müh. Olcay YENİCİ'ye ve SUBOR çalışanlarından İnş. Müh. Abdülkadir ÇİMEN'e teşekkür ederim.

İTÜ Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarı çalışanlarından Tek. Semih VİÇ ve Müh. Tek. İsmail CANTEKİN'e, İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına ve İTÜ Yapı ve Deprem Uyg-Ar Merkezi çalışanlarından Tek. Doğan BALDAN'a deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları için teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında ilgisini benden esirgemeyen, yardım ve desteği ile yanımda olan değerli arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Aslı Senem AÇIKEL'e, İnş. Müh. Emrah MAZICI'ya ve İnş. Müh. Ceyhun GÜDÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi beni destekleyen Sayın Narin OFLAZ'a ve akrabalarım, ayrıca hayatım boyunca yaptığım her işte yanımda olan ve her zaman beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerim ile en içten sevgi ve saygılarımla sunarım.

İnş Müh. Seda ŞENDİR

Şubat 2005

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULAR	3
2.1 Giriş	3
2.2 Gömülü Boruların Tasarımında Etkili Olan Zemin ve Boru Özellikleri	4
2.3 Gömülü Boruların Depreme Dayanıklı Tasarımı	7
2.3.1 Türk yönetmeliği	7
2.3.2 Amerikan yönetmeliği	8
2.3.2.1 Sismik dalga yayılımı	9
2.3.2.2 Kalıcı yer değiştirme	12
2.3.3 Japon yönetmeliği	13
2.3.3.1 Yüksek basınçlı gaz boru hatları	13
2.3.3.2 Orta ve düşük basınçlı boru hatları	22
2.4 Zemine Gömülü Borularda Hasara Neden Olan Faktörler	25
2.4.1 Dalga yayılımı etkisi	26
2.4.2 Fay geçişi davranışı	26
2.4.3 Toprak kayması	26
2.4.4 Sıvılaşma	26
2.4.5 Oturma	27
2.4.6 Birleşim bölgeleri ve teçhizat	27
2.4.7 Yıpranma ve korozyon	27
2.5 Boru Hatlarının Sismik Performansları	28
2.5.1 San Francisco Depremi	28
2.5.2 Anchorage Depremi	28
2.5.3 Santa Rosa Depremi	29
2.5.4 San Fernando Depremi	29
2.5.5 Managua Depremi	29
2.5.6 Guatemala Depremi	29
2.5.7 Cotabato Depremi	29

2.5.8 San Juan ve Mendoza Depremleri	29
2.5.9 Meksika Depremi	30
2.5.10 San Salvador Depremi	30
2.5.11 Napo Proviens Depremi	30
2.5.12 Whittier Depremi	30
2.5.13 Spitak ve Leninakan Depremi	31
2.5.14 Loma Prieta Depremi	31
2.5.15 Limón Depremi	31
2.5.16 Northridge Depremi	32
2.5.17 Kobe Depremi	32
2.5.18 Cariaco Depremi	33
2.5.19 Chi-Chi Depremi	33
2.6 Türkiye'deki Boru Hatlarının Sismik Performansları	33
3. DALGA YAYILIMI ETKİSİ ALTINDA ZEMİN-BORU SİSTEMİ VE ÇÖZÜMÜ	38
3.1 Dalga Yayılımı	38
3.2 Zemin-Boru Sistemi için Çözüm Yöntemleri	45
3.3 Fiziksel Modelleme	46
3.3.1 Ölçekli model benzerlik teorileri	47
3.3.2 Zemin mekaniğinde ölçekli model benzerlikleri	51
3.3.3 Genel değerlendirme	55
3.4 Zemine Gömülü Boruların Sismik Etkiler Altındaki Davranışına Dair Geçmişte Yapılmış Çalışmalar	56
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	60
4.1 Deney Düzenegi	60
4.1.1 Sarsıcı	60
4.1.2 Dijital sinüs dalgası üretici	61
4.1.3 Güç yükseltici	62
4.1.4 Geniş bantlı analog/dijital çevirici	62
4.1.5 Fast Fourier dönüşüm aleti	63
4.1.6 Servo tipi ivmeölçer	63
4.1.7 Piezo-elektrik ivmeölçer	64
4.1.8 Strain-gauge	64
4.1.9 Model haznesi	65
4.1.10 Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri	65
4.1.10.1 Zemin malzemesi	65
4.1.10.2 Boru malzemesi	67
4.2 Deneyler	68
4.2.1 Derinlik etkisinin saptanması ile ilgili yapılan deneyler	70

4.2.2 Boruda meydana gelen Şekil değiştirmelerin saptanması ile ilgili yapılan deneyler	73
5. SONUÇLAR	79
KAYNAKLAR	82
EKLER	87
ÖZGEÇMİŞ	100

KISALTMALAR

ALA	: American Lifelines Alliance
ANSI	: American National Standard Institute
AWWA	: American Water Works Association
API	: American Petroleum Institute
ASCE	: American Society of Civil Engineers
ASME	: American Society of Mechanical Engineers
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
JGA	: Japan Gas Association
TS	: Türk Standardı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Farklı dış kaplamalar için sürtünme faktörü	10
Tablo 2.2 Pik zemin hızının (cm/sn) pik zemin ivmesine (g) oranı.....	11
Tablo 2.3 Sismik bölge katsayısı (v_2).....	16
Tablo 2.4 Sismik bölge katsayısı (α_1).....	23
Tablo 2.5 Boru çeşidi ve zemin durumunun kombinasyonlarına bağlı katsayı (α_2)	23
Tablo 3.1 Analiz yöntemlerinin sınıflandırılması	45
Tablo 3.2 Matematik modelin oluşturulması ve sayısal analizin yapılmasında kullanılan kabuller	45
Tablo 3.3 Sarsma tablası deneyleri için başlıca ölçeklendirme faktörleri	55
Tablo 4.1 Model zeminin özellikleri	67
Tablo 4.2 Farklı frekanslar ve derinliklerde alınan ivme kayıtları.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Oturmanın (a) rijit ve (b) esnek borular üstündeki etkisi.....	5
Şekil 2.2 : Rijit boruda yük aktarımı ve yük etkisi altındaki davranışı.....	6
Şekil 2.3 : Esnek boruda yük aktarımı ve yük etkisi altındaki davranışı.....	6
Şekil 2.4 : Kalıcı yer değiştirme bölgesinin uzunluğunun az ile orta seviye arasında değiştiği boyuna kalıcı yer değiştirme durumunda boru aksenal çekme ve basınç bölgeleri	12
Şekil 2.5 : Kalıcı yer değiştirme bölgesinin uzunluğunun büyük olduğu boyuna kalıcı yer değiştirme durumunda boru aksenal çekme ve basınç bölgeleri	13
Şekil 2.6 : Sismik dalga hızı	14
Şekil 2.7 : Hız spektrumu	15
Şekil 2.8 : Sismik bölge katsayısı için bölge sınıflandırması	16
Şekil 2.9 : Tasarım depremi	18
Şekil 2.10 : Herhangi bir aktif fayın varlığının büyük bir sismik hareket yaratıp yaratmayacağı	19
Şekil 2.11 : Hız spektrumu	20
Şekil 2.12 : Zemin şekil değiştirmesi	21
Şekil 2.13 : Sismik dalga hızı	21
Şekil 2.14 : I, II ve III(a) durumlarında aksenal yöndeki zemin yer değiştirmesi	24
Şekil 2.15 : I, II ve III(a) durumlarında eksene dik yönde zemin yer değiştirmesi	25
Şekil 2.16 : Su dağıtım hattı	35
Şekil 2.17 : Çelik su borusunun burkulması	35
Şekil 2.18 : Düşey yer değiştirmeye neden olan normal fay ile kesişen boru hattının kırılması	35
Şekil 2.19 : Ana fayı geçen kanalizasyon borusunun kırılması	36
Şekil 2.20 : Kullar bölgesindeki hasarlı boru hattı	37
Şekil 3.1 : Prototip (a) ve modelde (b) deprem dalgaları	38
Şekil 3.2 : Kayma kolonunun deprem etkisi altındaki davranışı	39
Şekil 3.3 : Elemanter bir parçadaki gerilmeler	41
Şekil 3.4 : Kutupsal koordinatlarda düzlem şekil değiştirme problemi	43
Şekil 3.5 : Gerilme-şekil değiştirme ölçek faktörleri ile tanımlanmış ölçekli model davranışı	51
Şekil 3.6 : Kritik durum zemin mekaniğinde prototip A1Z1 ve model A2Z2 için geometrik olarak benzer gerilme izleri.....	52
Şekil 3.7 : Boru hatlarının stabilizasyonunu sağlayabilecek 3 yöntem.....	57
Şekil 4.1 : Deney düzeneği	60
Şekil 4.2 : Sarsıcı (Plan)	61
Şekil 4.3 : Dijital sinüs dalgası üretici	61
Şekil 4.4 : Güç yükseltici	62

Şekil 4.5	: Geniş bantlı analog/dijital çevirici	63
Şekil 4.6	: Fast Fourier dönüşüm aleti	63
Şekil 4.7	: Servo tipi ivmeölçer	64
Şekil 4.8	: Piezo-elektrik ivmeölçer	64
Şekil 4.9	: Strain-gauge	65
Şekil 4.10	: Model haznesi	65
Şekil 4.11	: Elek analizi sonucu	66
Şekil 4.12	: Kesme kutusu deneyi sonucu	66
Şekil 4.13	: Çekme deneyi sonrası numuneler.....	67
Şekil 4.14	: Çekme deneyi sonuçları.....	68
Şekil 4.15	: Yağmurlama ile numunenin serilmesi ve ivmeölçerlerin yerleştirilmesi.....	69
Şekil 4.16	: Mikrotremor cihazı ile zeminin serbest titreşiminin ölçümü.....	69
Şekil 4.17	: Sistemin serbest titreşimi.....	69
Şekil 4.18	: Yağmurlama ile numunenin serilmesi ve ivmeölçerlerin yerleştirilmesi.....	70
Şekil 4.19	: İvmeölçerlerin yerleşimi.....	70
Şekil 4.20	: Tabana, 5 cm ve 10 cm derinliğe yerleştirilen ivmeölçerlerden alınan ivme kayıtları.....	71
Şekil 4.21	: Tabanda ve 10 cm derinlikte maksimum ivme değerleri.....	72
Şekil 4.22	: Çelik, karton-folyo, pipet borular üzerine yapıştırılmış strain-gaugeler.....	73
Şekil 4.23	: Eksenel ve çeper gerilmelerini kaydetmek üzere strain-gaugelerin boru üzerine yerleşimi.....	73
Şekil 4.24	: Ek yüklemelere karşı gelen şekil değiştirmeler.....	74
Şekil 4.25	: Çelik borunun dalga yayılım yönüne paralel yerleştirildiği durumda 0.1g ivme altında borudaki şekil değiştirme.....	74
Şekil 4.26	: Çelik borunun konumu dalga yayılım yönüne paralelken 0.1g ivme altında 2 Hz, 5Hz, 10 Hz ve 15 Hz frekanslarda şekil değiştirme değerleri.....	75
Şekil 4.27	: Eksenel ve çeper gerilmeleri -frekans değişimine yön etkisi.....	76
Şekil 4.28	: Çelik boruda eksenel gerilme-frekans değişimine ivmenin etkisi.....	77
Şekil 4.29	: Karton boruda şekil değiştirme-frekans değişimine ivmenin etkisi.....	78

SEMBOL LİSTESİ

a	: İvme
A	: Borunun kesit alanı
α	: Adezyon faktörü
α	: Şekil değiştirme transfer katsayısı
α_1	: Sismik bölge katsayısı
α_2	: Boru çeşidi ve zemin durumunun kombinasyonlarına bağlı katsayı
c	: Kohezyon
C_s	: Sismik dalgaların yayılım hızı
δ	: Zemin ve boru arasındaki sürtünmenin ara yüz açısı
D	: Borunun dış çapı
Δu	: Borunun zeminin yer değiştirmesini tutma kapasitesi (yatay)
Δv	: Borunun zeminin yer değiştirmesini tutma kapasitesi (düşey)
E	: Elastisite modülü
\bar{E}	: Azaltılmış elastisite modülü
g	: Yerçekimi ivmesi
G	: Kayma modülü
ϵ_a	: Gömülü borularda dalga yayılımı nedeni eksenal şekil değiştirme
ϵ_{G1}	: Uniform zeminin şekil değiştirmesi
ϵ_{G2}	: Ana kayanın eğimli olması durumunda zeminin şekil değiştirmesi
ϵ_{G3}	: İki noktanın farklı yer değiştirmesi nedeni ile oluşan şekil değiştirme
ϵ_0	: Borunun izin verilen şekil değiştirmesi
ϵ_p	: Borunun şekil değiştirmesi
ϵ_v	: Borunun akma şekil değiştirmesi
ϵ_{v1}	: Zemin tabakasının ana kayaya paralel olması durumunda düz boruda şekil değiştirme
ϵ_{v3}	: Ana kayanın eğimli olması durumunda düz boruda şekil değiştirme
f	: Kaplama faktörü
ϕ	: Zeminin içsel sürtünme açısı
$\bar{\gamma}$: Zeminin efektif birim hacim ağırlığı
H	: Boru merkezine kadar olan yükseklik
H	: Yüzey tabakasının derinliği
k	: Temel zemini tepkisi azaltılmış katsayısı
κ	: Zemin doğal periyoduna bağlı katsayı
K_0	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
K_1	: Eksenal yönde zemin yay katsayısı
K_{0h}	: Ana kayada yatay sismik şiddet
L	: Dalga boyu
I	: Kesitin atalet momenti
λ, μ	: Lamé sabitleri
λ	: Zemin yüzeyindeki sismik dalgaların dalga boyu
λ	: Uzunluk ölçek faktörü

λE	: Borunun tanjant modülü
μ	: Kütle ölçek faktörü
ν_1	: Önem katsayısı
ν_2	: Sismik bölge katsayısı
q	: Boru ve zemin arasındaki kayma azaltma katsayısı
θ	: Ana kayanın eğim açısı
r_0	: Başlangıç konum vektörü
r	: Konum vektörü
ρ	: Birim hacim ağırlık
ρ_{model}	: Model birim hacim ağırlığı
$\rho_{prototip}$: Prototip birim hacim ağırlığı
σ_0	: Gerilme
S_v	: Spektral hız
t	: Et kalınlığı
t	: Zaman
T	: Zeminin doğal periyodu
τ	: Kayma gerilmesi
τ	: Zaman ölçek faktörü
τ_G	: Boru yüzüne etkiyen kayma gerilmesi
τ_{cr}	: Kritik kayma gerilmesi
T_U	: Zemin boru ara yüzünde birim uzunluk için pik sürtünme kuvveti
U	: Zeminin yatay yer değiştirmesi
U_0	: Standart tasarım zemin yer değiştirmesi
U_H	: Zemin yer değiştirmesi
V	: Zeminin düşey yer değiştirmesi
V	: Dalga hızı
V_g	: Zemin sarsıntısı nedenli pik zemin hızı
V_s	: Kayma dalgası hızı
Z	: Boru hattı derinliği
Ω	: Konservatif tarafta q hesabı için düzeltme faktörü

ÖZET

ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULARIN SİSMİK ETKİLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

1906 San Francisco ve 1995 Kobe Depremleri sonrasında yaşanmış büyük felaketler sonucunda gömülü boru hatlarının sismik tasarımı ve sismik etkiler altındaki davranışı ile ilgili araştırmalar yoğunlaşmıştır. Depremler sırasında zeminde geçici ve kalıcı yer değiştirmelerin meydana gelmesi sonucunda boru hatlarında hasarlar meydana gelmektedir. Bu yer değiştirmeler dalga yayılımı, borunun fay bölgesinde bulunması, toprak kayması, sıvılaşma ve oturma gibi çeşitli nedenlerle oluşmaktadır. Bunların dışında, bağlantı elemanlarının bulunduğu bölgelerde, korozyon ve kullanım süresi sonucunda sıklıkla hasarlar gözlenmektedir.

Amerikan ve Japon yönetmeliklerinin ilgili bölümleri ve deprem raporları incelendiğinde, sismik etkiler sonucunda borularda meydana gelen şekil değiştirmelerin ana kayanın derinliğine, yüzey tabakasının doğal periyoduna, yüzey tabakasındaki kayma dalgası hızına, sismik hareketin dalga boyuna ve borunun gömülme derinliğine bağlı olduğu görülmüştür.

Dalga yayılımı probleminin incelenmesinde sayısal ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, dalga yayılımı sonucunda gömülü boru hatlarında oluşan şekil değiştirmelerin deneysel yöntemler ile araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel borunun gömülme derinliği, boru ekseninin dalga yayılım yönüne göre konumu ve sismik hareketin ivmesi ve frekansı gibi değişkenlerin etkisi araştırılmıştır.

Model deneylerinde çelik, karton ve plastik boruların kullanılması düşünülmüştür. Strain-gauge'ler, plastik borularla uyum sağlayamadığından bu numune ile yapılan deneylerden alınan kayıtlar kullanılamamıştır. Karton boru ile strain-gauge'lerin uyum sağlaması için karton üzerine alüminyum yapraklar yapıştırılmıştır.

Farklı derinliklere yerleştirilen ivmeölçerlerden alınan kayıtlara göre 10 cm yüksekliğindeki zemin tabakasında zemin büyütmesi gözlenmemiştir. Bu nedenle, dalga yayılımı sonucunda boruda meydana gelen şekil değiştirmelere zemin tabakasının derinliğinin etkisi araştırılamamıştır.

Çelik ve karton borular hazne tabanına yerleştirilerek farklı ivme değerleri ve frekanslarda sismik hareket uygulanmıştır. Bu deneyler sonucunda dalga yayılım yönüne paralel yerleştirilen borularda, dik yerleştirilen borulara göre daha küçük gerilme değerlerinin olduğu gözlenmiştir. İvme değerinin artması sonucunda gerilme değerlerinde artış gözlenmiştir. Frekans değerindeki artış, borudaki eksenel ve çeper gerilmelerinin de artmasına neden olmuştur. Bu artış eksenel gerilme değerlerinde daha fazla görülmektedir.

SUMMARY

BEHAVIOR OF BURIED PIPES UNDER SEISMIC EFFECTS

During 1906 San Francisco and 1995 Kobe Earthquakes, some secondary disasters such as fires damaged the cities more than earthquakes. Because of the damages in buried pipelines it was not easy to extinguish the fire and the loss became larger. After these experiences the research about the behavior of buried pipelines under seismic motions has significantly increased.

During earthquakes temporary and permanent ground displacements cause some damages on buried pipelines. Wave propagation, fault movements, landslides, liquefaction and consolidation are the main causes of temporary and permanent ground displacements. Also, the connection joints and the effect of corrosion and aging are the other factors of damages.

As a part of this study, American and Japan design codes on buried pipelines are examined. They show that strains in a buried pipe depend on bedrock depth, natural period surface ground layer, shear wave velocity in the surface layer, wavelength of the seismic motion and the depth of the buried pipe.

Analytical and experimental methods are used to study the wave propagation problem. The aim of this research is to analyze the strains in buried pipes that occurred because of wave propagation. In the experiments, the effects of the depth of the pipe, the position of the axis of the pipe with respect to the direction of wave propagation and the frequency and acceleration of the seismic motion are investigated.

In the model tests utilizing steel, carton and plastic pipes are considered. However, the results of tests obtained from plastic pipes instrumented with the strain-gauges have been found unreliable as a result of poor bond between the plastic pipe and strain-gauges. The carton pipe is covered by aluminium foil, so that a good bond can be obtained.

The records from accelerometers have shown that the soil amplification does not occur for 10 cm depth of soil layer. Because of this, the effect of the depth of pipe can not be studied.

Steel and carton pipes are placed at the base of the box and the frequency and acceleration of the seismic motion are changed during the experiments. The stresses are lower in the pipes that are parallel to the direction of wave propagation than the pipes positioned perpendicular to the direction of wave propagation. The stress values increase with respect to the increase in the acceleration of the seismic motion. Also, the axial and hoop stresses in the pipe increase as a result of the increase in frequency of seismic motion. This increase is higher for axial stresses.

1. GİRİŞ

Kullanım alanlarının genişliği düşünülduğünde boru hatları, bir yerleşim bölgesinin can damarlarını oluşturmaktadır. Özellikle gelişmiş yerleşim birimlerinde bir deprem sonrası boru hatlarında oluşan hasarlar ve bunu takip eden yangın gibi ikincil felaketler oldukça ciddi kayıpların meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, gömülü boru hatlarının tasarımı büyük önem taşımaktadır. 1906 San Francisco ve 1995 Kobe Depremleri sonrasında yaşanmış büyük felaketler sonucunda, Amerika ve Japonya gibi ülkelerde, boru hatlarının tasarımı için özel deprem şartnameleri oluşturulmuş ve bunlara bağlı kalınarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde de birçok bölgemiz ciddi bir sismik risk altında bulunmasına karşın, zemine gömülü boru hatlarının depreme dayanıklı tasarımına dair herhangi bir yönetmelik bulunmamaktadır. Bu yüzden gömülü boru hatlarının sismik tasarımı ve sismik etkiler altındaki davranışının incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Gömülü boru hatlarının tasarımına dair ilk modern yaklaşımlar 1900'lerin başında Anston Marston'ın çalışmaları ile başlamış ve sonrasında çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Günümüzde bu problemin çözümü bilgisayarlarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak uygun zemin modelinin tanımlanması ile yapılabilmektedir. Tasarımlar genel olarak borunun rijit veya esnek olmasına göre yapılmaktadır. Rijit bir boru yüklendiğinde bu yükü boru çeperinde taşıyıp temel zeminine aktarmaktadır. Esnek borular ise yük altında eğilerek üzerindeki yükü hem temel zemine hem de yatayda dolgu zemine taşıtmaktadır. Borunun yerleştirilmesi ve dolgu yapıldığı durumlarda dolgunun yapılma şekli de büyük önem taşımaktadır.

Bir boru hattının tasarımında etkili olan parametreler ile Amerikan ve Japon yönetmelikleri incelendiğinde borunun sismik tasarımını etkileyen faktörlerin başında, boru hattı güzergahının belirlenmesinin geldiği görülmüştür. Bunun nedeni belirli kritik bölgelerde deprem sonucunda oluşan büyük zemin hareketleri sonucunda boru hattında hasarların meydana gelmesinin mümkün olmasıdır. Bu kritik bölgeler, büyük çoğunlukla fay bölgeleri, heyelan bölgeleri veya borunun bir

yapıya bağlandığı geçiş bölgeleri gibi büyük miktarda farklı hareketlerin gözlemlendiği yerlerdir. Yönetmeliklerde geçen hesap yöntemleri esas olarak sismik hareket etkisi altında boruda meydana gelebilecek şekil değiştirmenin hesaplanarak istenilen sınırdan kalıp kalmadığının kontrolünü kapsamaktadır. Bu şekil değiştirme değeri de ana kayanın derinliğine, yüzey tabakasının doğal periyoduna, yüzey tabakasındaki kayma dalgası hızına, sismik hareketin dalga boyuna ve borunun gömülme derinliğine bağlıdır.

Deprem raporlarında yer alan boru hatlarının sismik performansları ile ilgili bölümler incelendiğinde ise depremler sonucunda oluşan geçici ve kalıcı yer değiştirmelerin boruda çeşitli hasarlar meydana getirdiği görülmüştür. Raporlara göre geçici ve kalıcı yer değiştirmelerin oluşma nedenleri ise dalga yayılımı, borunun fay bölgesinde bulunması, toprak kayması, sıvılaşma ve oturma olarak gösterilmiştir. Ayrıca korozyon etkisi ile servis ömrü nedeni ile de çeşitli hasarlar meydana gelmiştir. Bunların dışında, parçalı boruların birleştirilmesi ve borunun bir yapıya bağlantısının yapılması gibi amaçlar ile kullanılan bağlantı elemanlarının bulunduğu bölgelerde de sıklıkla hasarlara rastlanmıştır. Bunun nedeni ise bağlantı elemanlarının yeterince esnek olmaması ve bir yapıya bağlantının yapıldığı durumlarda ise farklı oturma sonucunda kırılmaların meydana gelmesidir.

Bu çalışmanın kapsamında dalga yayılımı sonucunda boru hattının davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Dalga yayılım analizlerinin sayısal ve deneysel yöntemler ile gerçekleştirilebileceği bilinmektedir. Deneysel çalışmalar ise arazide veya laboratuvarında gerçekleştirilmektedir. Laboratuvarında bir modelin kurulması ve bu model üzerinde prototipteki etkilerin yaratılması sonucunda modelin davranışı incelenebilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmada deprem raporları, şartnameler ve konu ile ilgili çalışmalar göz önüne alındığında sismik hareketin genliği ve frekansı, borunun gömülme derinliği ve dalga yayılımı yönüne göre konumu değiştirilerek boruda meydana gelen şekil değiştirmelerdeki değişim incelenmiştir.

2. ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULAR

2.1. Giriş

Günümüzde zemine gömülü borular; su ve drenaj kanalları, kanalizasyon hatları, gaz hatları, petrol boru hatları, telefon ve elektrik hatları, menfezler, metro tünelleri, ısı dağıtım hatları, atık su arıtma tesisleri ve deniz deşarj sistemleri gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Zemine gömülü yapılar, medeniyetlerin var oluşundan bugünlere kadar insanların yaşam standartlarını yükseltmek üzere inşa edilmiştir. Bu tip su ve kanalizasyon sistemi yapılarının eski medeniyetlere ait kalıntıları Asya, Avrupa hatta batı yarıkürede güney ve orta Amerika'da bulunmaktadır. Eski Pers kalıntıları ortaya çıkarıldığında, düzlüklerdeki şehirlere su getirmek amacı ile dağların altından kazılmış yeraltı tünellerine rastlanılmıştır. Ortaçağda da, Paris ve Londra'da tuğla kaplamalı kanalizasyonlar inşa edilmiştir.

Zemine gömülü boru teknolojisi, ortaya çıkan sorunlar sonucu oluşan deneyimlerle gelişmiştir. Gömülü boru hatları ile ilgili ilk modern yaklaşımlar, 1920'lerin başında Iowa State Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı Anson Marston'ın çalışmaları ile başlamıştır. Bahar aylarında Iowa köylülerinin köy yollarında balçığa saplanmaları sonucu yaşadıkları sorunlar üzerine Marston, bu yolların drenajı ile ilgili çalışmış ve gömülü drenaj borularının tasarımı için bir yöntem geliştirmiştir. Daha sonraları bu yöntem Marston'ın öğrencisi olan Spangler tarafından geliştirilerek gömülü esnek borular için uyarlanmıştır. Bu gelişmelerin sonrasında yapılan deneyler ve çalışmalar sonucunda, tasarım aşamasında kullanılacak birçok ampirik bağıntı elde edilmiştir. Günümüzde ise çözümler, bilgisayarlarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak uygun zemin modelinin tanımlanması ile yapılmaktadır.

Zaman içinde korozyon dayanımları ve esnekliklerinden dolayı plastik boruların kullanımını artmış ve özellikle II. Dünya Savaşından bu yana gömülü boru piyasasında baskın hale gelmiştir. II. Dünya Savaşında Alman şehirlerine yapılan saldırılarda silahlar için çelik üreten endüstriler ile beraber su boru hatları için çelik üreten endüstriler de yok edilmiştir. Bu sırada en kolay çözüm yolu olarak PVC boruların

kullanılması gündeme gelmiştir. Almanlar PVC boru üretimine yönelmiş ve araştırmalar sonucunda bu boruların uygun değerler verdiği görülmüştür.

Zemine gömülü boru teknolojisinde, eski ve yıpranmış durumdaki hatlarda sıklıkla göçmeler meydana geldiği için bu hatların kontrolü ve iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu göçmeler o bölgede yaşayanların konfor kaybına, büyük maddi kayıplara ve hatta sağlıklarını tehdit edebilecek durumların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Hasar görmüş boruların değiştirilmesi veya iyileştirilmesi için birçok farklı yöntem uygulanmaktadır. Kentsel bölgelerde kazı yapılarak eski hattın yerinden çıkarılıp yerine yenisinin yerleştirilmesi oldukça zor ve maliyetli olmaktadır. Ayrıca, bazı durumlarda açık kazı zor olabilir ve çevreyi olumsuz şekilde etkiler. Bu tip durumlarda çözüm olarak mikrotünelleme yöntemi önerilmektedir (Moser, 2001, Watkins ve Anderson, 2000, Balkaya, 2002).

2.2. Gömülü Boruların Tasarımında Etkili Olan Zemin ve Boru Özellikleri

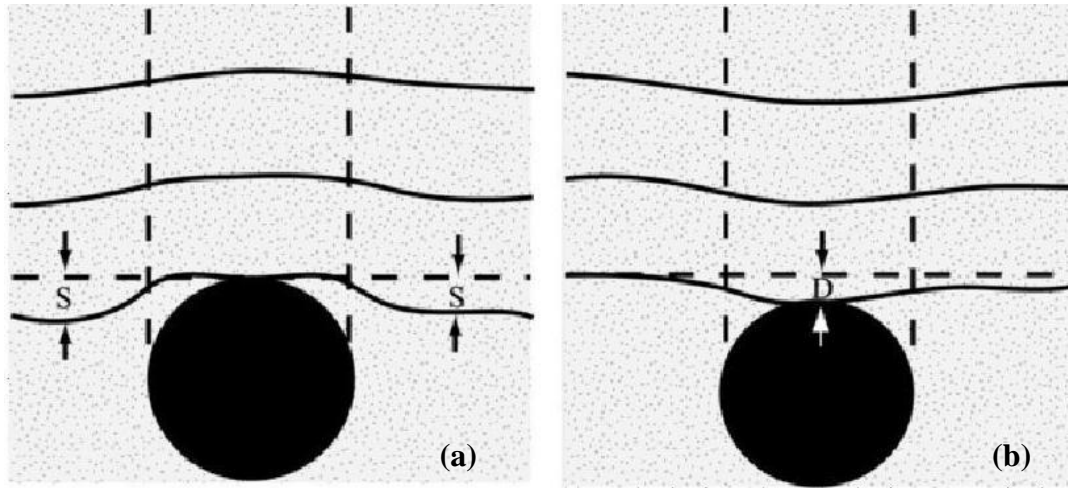
Gömülü boru hattı sistemlerinin tasarımında birçok farklı parametre kullanılmakta olup, bunların arasında boruyu çevreleyen dolgu zeminin ve boru malzemesinin özellikleri büyük önem taşımaktadır. Zemin-yapı etkileşimi, boru ve dolgu zemininin özelliklerinin bir fonksiyonudur. Tasarım sırasında malzeme özellikleri, proje ve servis koşulları ile maliyet arasında optimizasyon yapılarak uygun boru çeşidi ve dolgu malzemesi seçilmektedir.

Boru hattı tasarımı zemin özellikleri açısından ele alındığında; dolgu zeminin sıklığının, birim hacim ağırlığının, su muhtevasının ve defromasyon modülünün özellikle incelenmesi gereken parametreler olduğu görülmektedir. Gerilme birikmelerini önlemek üzere dolgu zeminin uniform olarak yerleştirilmesi ve uygun bir şekilde sıkıştırılması gerekmektedir. Yerleştirme yöntemi ise zemin cinsi, zeminin birim hacim ağırlığı, gömülme derinliği, boru rijitliği ve borunun mukavemeti gibi parametrelere göre kararlaştırılmaktadır.

Farklı amaçlara yönelik olarak piyasada, rijit betondan esnek termal plastiğe kadar farklı malzemelerden imal edilmiş değişik mühendislik özelliklerine sahip boru çeşitleri bulunmaktadır. Bu değişik malzemelerden üretilmiş boruların birbirlerine göre mukavemet, rijitlik, korozyon dayanımı, hafiflik, esneklik ve bağlama kolaylığı gibi avantajları bulunmaktadır.

Boruların tasarımını etkileyen çeşitli kriterler bulunmaktadır. Tasarım aşamasında dikkate alınan bu kriterlerin en önemlilerinden biri borunun, kullanım amacına uygun mukavemet ve/veya rijitlik değerlerine sahip olmasıdır. Ayrıca boru hattının servis ömrü düşünülerek buna uygun dayanıklılıkta borunun seçilmesi gerekmektedir. Mukavemet terimi burada gerilmeye karşı koyabilme yeteneği olarak kullanılmaktadır. Boruda meydana gelen gerilmeler; iç basınç, zemin yükleri, hareketli yükler, farklı oturmalar ve eğilme gibi çeşitli yüklemelerden oluşabilir. Rijitlik terimi ise malzemenin eğilmeye karşı koyabilmesi olarak tanımlanmaktadır. Rijitlik doğrudan boru malzemesinin elastisite modülüne ve borunun atalet momentine bağlıdır. Dayanıklılık borunun zamanla çevresel etkilere dayanabilme yeteneğinin bir ölçütüdür. Korozyon dayanımı ve aşınma direnci gibi terimler dayanıklılık özelliği içinde düşünülmektedir.

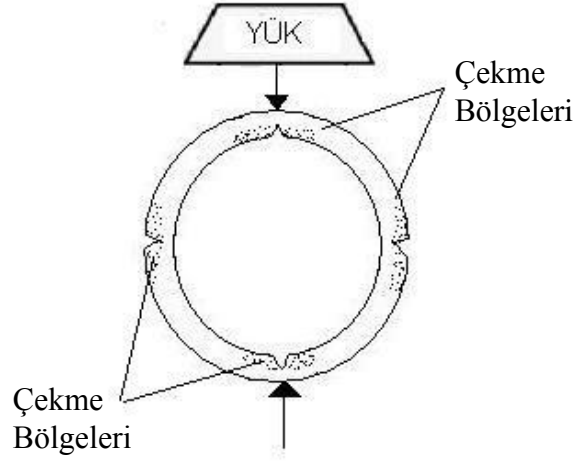
Boru malzemeleri genel olarak, rijit ve esnek borular olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Esnek borular, yapısal bozulma olmadan en az %2'lik eğilme yapabilen borulardır. Bu kritere uymayan malzemeler ise genellikle rijit olarak düşünülür. Bunların haricinde, “yarı rijit” veya “çok esnek” şeklinde tanımlanan malzemeler de bulunmaktadır. Tasarım sırasında bu borular için de rijit veya esnek boru tasarım standartları kullanılmaktadır. Şekil 2.1, rijit ve esnek boruların oturma etkisi altında davranışlarını göstermektedir.



Şekil 2.1 Oturmanın (a) rijit ve (b) esnek borular üstündeki etkisi (S: rijit borunun etrafına yapılmış dolgunun oturması, D: zemin basıncı etkisi altında esnek borunun düşey eğilmesi) (Moser, 2001)

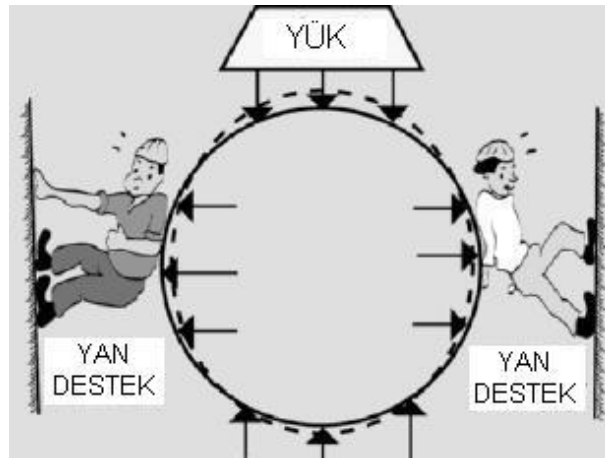
Rijit boruların tasarımında, borunun zemin ve trafik yüklerinden kaynaklı düşey basınç etkisi altında kaldığı ve herhangi bir yatay tepki kuvvetinin oluşmadığı veya

ihmal edilebilir olduğu kabul edilmektedir. Bunun nedeni, borunun etrafındaki zemine göre daha rijit olması nedeniyle üzerindeki yükün büyük bir kısmını borunun taşıması ve bir kısmını da temel zeminine iletmesidir (Şekil 2.2). Bu tip boru hatlarının geçeceği hendek tabanının yataklama özellikleri büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2.2 Rijit boruda yük aktarımı ve borunun yük etkisi altındaki davranışı (Howard, 1996)

Esnek borular için ise düşey yükler, boruda eğilmeye neden olmakta ve bunun sonucunda yatay destekleyici zemin basıncı oluşmaktadır (Şekil 2.3). Bir başka deyişle, borudaki yük arttıkça borunun düşey doğrultuda çapı azalmakta, yatay doğrultuda ise artmakta ve bu artış sonucunda boruyu saran yatay eksenindeki zeminin rijitliği tarafından boru desteklenmektedir. Eğer yatay zemin basıncı ve düşey basınç birbirine yakın değerlerde ise, boru çevresindeki yük bir hidrostatik kuvvete yaklaşır. Bu durumda boru çeperindeki gerilmeler büyük derinliklerde burkulmaya neden olurlar (Moser, 2001; Howard, 1996).



Şekil 2.3 Esnek boruda yük aktarımı ve borunun yük etkisi altındaki davranışı (Moser, 2001)

Asbest-çimento, beton (donatılı veya donatısız) ve kil borular rijit; çelik, dökme demir ve plastik borular ise esnek borulara örnek gösterilebilir. Her iki boru çeşidi için de bir veya daha fazla performans limiti bulunmaktadır. Rijit borular için genellikle, iç basınç ve dış yüklerin etkisine bağlı olan çeper gerilmesi değerleri kritiktir. Esnek borular için ise rijitlik, halka eğilmesi ve olası burkulmaya karşı koyması önemli olabilir. Yüksek mukavemetli malzemelere duyulan ihtiyaç nedeni ile çelikle güçlendirilmiş beton ve camla güçlendirilmiş termal ayarlı plastik gibi ürünlerin üretimi önem kazanmıştır. Bu tip ürünlerin tasarımında, kırılmayı önlemek üzere şekil değiştirme limiti gibi performans limitleri önem kazanmaktadır. PVC gibi termal plastik borular için mukavemet, uzun süreli hidrostatik tasarım çeper gerilmesi cinsinden ölçülür. Bu yüzden tüm ürünlerin tasarımının aynı şekilde olmadığı görülmektedir. Farklı çeşit boruların tasarım kriterleri bilinmeli ve buna uygun tasarım parametreleri kullanılmalıdır.

2.3. Zemine Gömülü Boruların Depreme Dayanıklı Tasarımı

Yapıların tasarımında olduğu gibi değişik yerleşim bölgelerinde boru hattı tasarımı da farklılıklar göstermektedir. Bölüm 2.3.1, 2.3.2 ve 2.3.3’de sırasıyla Türk, Amerikan ve Japon yönetmeliklerinin depreme dayanıklı boru hattı tasarımı bölümlerine yer verilmiştir.

2.3.1. Türk yönetmeliği

Boru hatlarının tasarım ve imalatına dair TSE’nin hazırladığı;

- TS–2170 (Su ve gaz boruların yer altına yerleştirilmesi kuralları)
- TS–8054 (Doğal gaz boru hattı-çelik boru donanımı projelendirme kuralları)
- TS–8415 (Doğal gaz boru hattı donanımında kullanılan terimler ve tarifleri)
- TS–8954 (Doğal gaz boru hattı-projelendirme genel kuralları)

gibi şartnameler bulunmaktadır.

Genel olarak bu şartnamelerde deprem etkisi her hangi bir şekilde ele alınmamıştır. Bu şartnamelerde boruların yüklenmesi, taşınması ve depolanması gibi konulara öncelikli olarak yer verilmiş, borunun yerleştirileceği hendeğin özellikleri üzerinde durulmuştur. Örneğin, TS 2170’e (1989) bakıldığında hendek derinliğinin, boru donma derinliğinin altında kalacak şekilde hesaplanması gerekmektedir. Donma

derinliği, iklim ve zemin cinsine bağlı olarak değişirse de, yol kaplaması üst yüzeyinden veya hendek üstüne gelen tabii zemin kotundan boru üst seviyesine kadar hesaplanmak üzere, su boruları için en az 1.00 m, gaz boruları için ise en az 0.80 m olmalıdır. Hendek taban genişliği ise, dış çapı 200 mm den küçük olan borular için 0.60 m, 200 mm ile 1000 mm arasında olan borular için her iki yanında en az 0.20 m yer kalacak şekilde ve 1000 mm den büyük olan borular için ise her iki yanında en az 0.30 m yer kalacak şekilde olmalıdır.

“Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” e bakıldığında, boru hatlarının kapsam dışında olduğu görölmektedir. Kısaca ölkemizde zemine gömölü boru hatlarının depreme dayanıklı tasarımına dair herhangi bir şartname bulunmamaktadır. Boru hatları ile ilgili kurum ve kuruluşlar genellikle Amerikan ve Japon yönetmeliklerini kullanmaktadır.

2.3.2. Amerikan yönetmeliği

Amerika’da gömölü boru hatlarına dair AWWA (American Water Works Association), API (American Petroleum Institute), ASCE (American Society of Civil Engineers), ASME (American Society of Mechanical Engineers) ve ANSI’nin (American National Standard Institute) şartnameleri bulunmaktadır. Ayrıca American Lifelines Alliance (ALA) için FEMA (Federal Emergency Management Agency) ve ASCE’nin ortak çalışması sonucunda gömölü boru hatlarının tasarımına dair bir şartname oluşturulmuştur. Bu standartta (ALA, 2001) gömölü borular üzerine etkiyen farklı kuvvetler üzerinde durulmuş ve bu kuvvetlerin etkisi altında boru tasarımının ve gerekli hesaplamaların ne şekilde yapılacağı belirtilmiştir. Göz önüne alınan kuvvetler aşağıda sıralanmıştır.

- İç basınç
- Düşey zemin yükleri
- Yüzey hareketli yükleri
- Yüzey etki kuvvetleri
- Suyun kaldırma kuvveti
- Isıl genleşme
- Rölatif boru-zemin yer değiştirmesi
- Boru dirseklerindeki hareket
- Deprem

- Hat yakınında patlama etkisi
- Geçici sıvı hareketi
- Servis sırasındaki tekrar yerleşim

Zemine gömülü borular için potansiyel deprem tehlikesi, zemin sarsıntısı ve yüzey faylanması sonucu oluşan kalıcı yer değiştirmeden ileri gelen farklı zemin yer değiştirmesi, yanal yayılma yer değiştirmesi, toprak kayması yer değiştirmesi ve sıkışma veya sıvılaşma sonucunda oluşan oturma nedenli geçici şekil değiştirmeleri kapsamaktadır. Standardın deprem bölümünde, dalga yayılımı nedenli şekil değiştirmenin meydana geldiği boru hatlarının tasarımına yer verilmiştir. Deprem sonucu oluşan kalıcı yer değiştirme, genel amaçlı olarak da kullanılan 3 boyutlu sonlu eleman programları (ANSYS veya ABAQUS) ve özel amaçlı 2 boyutlu boru hattı deformasyon analiz programları (PIPLIN) kullanılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca, idealize edilmiş durumlar için basit hesap kurallarına da bu bölümde değinilmiştir.

2.3.2.1. Sismik dalga yayılımı

Dalga yayılım koşulları boyuna aksenal şekil değiştirme (zemin şekil değiştirmesi nedenli boru eksenine paralel şekil değiştirme) cinsinden tanımlanmıştır. Zemin eğriliğine bağlı eğilme şekil değiştirmeleri, tipik boru hatlarının çapları göz önüne alındığında oldukça küçük olduklarından ihmal edilmişlerdir.

Gömülü borularda dalga yayılımı nedenli aksenal şekil değiştirme ε_a aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanabilir:

$$\varepsilon_a = \frac{V_g}{\alpha C_s} \quad (2.1)$$

V_g : zemin sarsıntısı nedenli pik zemin hızı

α : kayma dalgaları ile ilgili C_s için 2,0 diğer durumlarda 1,0 alınır

C_s : sismik dalgalanın yayılım hızı (genellikle 2 km/sn olarak alınır)

Denklem 2.2 ile hesaplanan aksenal şekil değiştirmelerin boru hattına transfer edildiği kabulü yapılabilir, fakat zemin boru ara yüzündeki sürtünmeden kaynaklanan aksenal şekil değiştirme kadar büyük alınmaması gerekmektedir:

$$\varepsilon_a \leq \frac{T_u \lambda}{4AE} \quad (2.2)$$

T_u : zemin boru ara yüzünde birim uzunluk için pik sürtünme kuvveti (Denklem 2.3)

λ : zemin yüzeyindeki sismik dalgaların dalga boyu (yeterli bilgi olmadığı durumlarda 1 km olduğu varsayılır)

A : borunun kesit alanı

E : boru malzemesinin elastisite modülü

$$T_u = \pi D \alpha c + \pi D H \bar{\gamma} \frac{1 + K_0}{2} \tan \delta \quad (2.3)$$

D : borunun dış çapı

c : dolgu zeminin kohezyonu

α : adezyon faktörü

$$\alpha = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1} \quad (c \text{ nin birimi ksf veya kPa/100})$$

H : boru merkezine kadar olan yükseklik

$\bar{\gamma}$: zeminin efektif birim hacim ağırlığı

K_0 : sükunetteki toprak basıncı katsayısı

δ : zemin ve boru arasındaki sürtünmenin ara yüz açısı ($\delta = f\phi$)

ϕ : zeminin içsel sürtünme açısı

f : kaplama faktörü (Tablo 2.1)

Tablo 2.1 Farklı dış kaplamalar için sürtünme faktörü (ALA, 2001)

Boru Kaplaması	f
Beton	1.0
Kömür katranı	0.9
Pürüzlü çelik	0.8
Pürüzsüz çelik	0.7
Füzyon bağlı epoksi	0.6
Polietilen	0.6

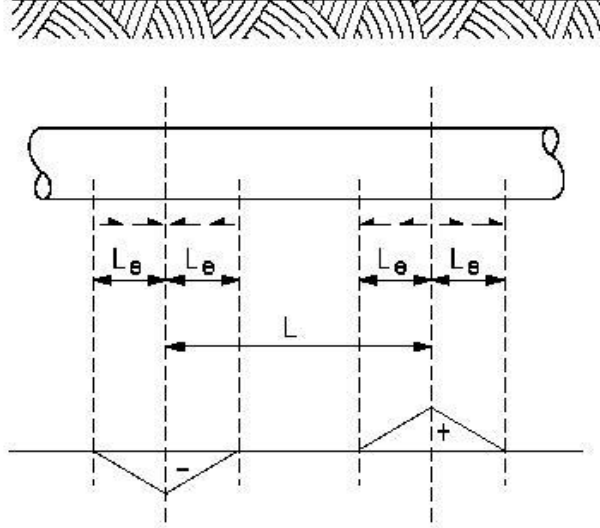
Eğer arazi ile ilgili sadece pik zemin ivmesi biliniyor ise bu durumda pik zemin hızını bulmak üzere Tablo 2.2 kullanılabilir. Pik zemin hızının bulunması ile ilişkili

sismik dalgaların çeşitlerinin saptanması, bir sismolog tarafından araziye özel keşif yapılmasını gerektirmektedir. Denklem 2.1'deki pik zemin hızı V_g özellikle deprem kaynağına yakın yerlerde, çoğunlukla kayma dalgası ile ilgilidir. Havza tepki etkileri ve iyi aletlendirilmiş depremler üzerinde yapılan birçok çalışma, geçmiş depremlerde belirli alanlarda (çoğunlukla deprem kaynağından 20 km uzaklıktaki alanlarda) yüzey dalgalarının baskın olduğu sonucuna varmaktadır. Geçmişte yapılan bu araştırmalar özellikle çökelti havzalarındaki arazilerde, yüzey dalgalarının dikkate alınması gerektiğinin altını çizmektedir. Gömülü borular üzerinde dalga yayılımının etkisinin önemini vurgulayan kabul edilebilir bir yaklaşım, zemin şekil değiştirmelerinin yüzey dalgaları tarafından oluşturulabileceği varsayımını yapmaktadır. Bu yaklaşım her zaman kayma dalgası hızları sonucunda oluşabilecek zemin şekil değiştirmelerinden daha büyük bir zemin şekil değiştirmesine karşı gelmektedir.

Tablo 2.2 Pik zemin hızının (cm/sn) pik zemin ivmesine (g) oranı (ALA, 2001)

Moment Büyükük, M_w	Pik Zemin Hızının (cm/sn) Pik Zemin İvmesine (g) Oranı		
	Kaynaktan Uzaklık (km)		
	0–20	20–50	50–100
Kaya*			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
Sert Zemin*			
6.5	94	102	109
7.5	104	127	155
8.5	180	188	193
Yumuşak Zemin*			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

*Çökelti çeşitleri, çökelti tabakaları ile değişen kayma dalgası hızlarını temsil etmektedir: kaya ≥ 750 m/sn, sert zemin 200 m/sn – 750 m/sn, yumuşak zemin < 200 m/sn. Yumuşak zeminlerde pik zemin hızı ve pik zemin ivmesi arasındaki ilişkinin doğruluğu daha azdır.



Şekil 2.5 Kalıcı yer değiştirme bölgesinin uzunluğunun büyük olduğu boyuna kalıcı yer değiştirme durumunda boru aksenal çekme ve basınç bölgeleri (ALA, 2001)

Transfer kalıcı yer değiştirme için, zemin hareketinin her doğrultudaki dağılımı önemlidir. Eğer kalıcı yer değiştirme hareketinin miktarı bölgenin genişliği W boyunca düzgün ise; o zaman sınırlarda (fay geçme davranışı gibi) oluşan şekil değiştirmeler, sınırlarda zemin hareketinin küçük olduğu ve merkeze doğru kademeli olarak arttığı duruma göre daha büyük olacaktır.

2.3.3. Japon yönetmeliği

Bu yönetmeliğin gömülü boruların tasarımı ile ilgili olan kısımları “Gaz Boru Hatlarının Depreme Dayanıklı Tasarımı için Önerilen Uygulamalar” adı altında verilmektedir (Japan Gas Association (JGA), 2000). 1978 Miyagiken-Oki Depremi sonrası Mart 1982 de yürürlüğe giren bu yönetmelik, yüksek basınçlı boru hatları ile orta ve düşük basınçlı boru hatlarının depreme dayanıklı tasarımının açıklandığı iki ana başlık altında toplanmıştır. 1995 Hyogoken-Nanbu Depreminden sonra yüksek basınçlı boru hatları için önerilen uygulamanın revize edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır ve 2000 yılında gerekli değişiklikler yapılarak tekrar basılmıştır. Yönetmelikte boruların dirsek ve T bölgelerinin hesaplarına da yer verilmiştir.

2.3.3.1. Yüksek basınçlı gaz boru hatları

Yüksek basınçlı gaz borularının, depreme dayanıklı tasarımında olası sismik hareketler iki farklı durum için ele alınmaktadır.

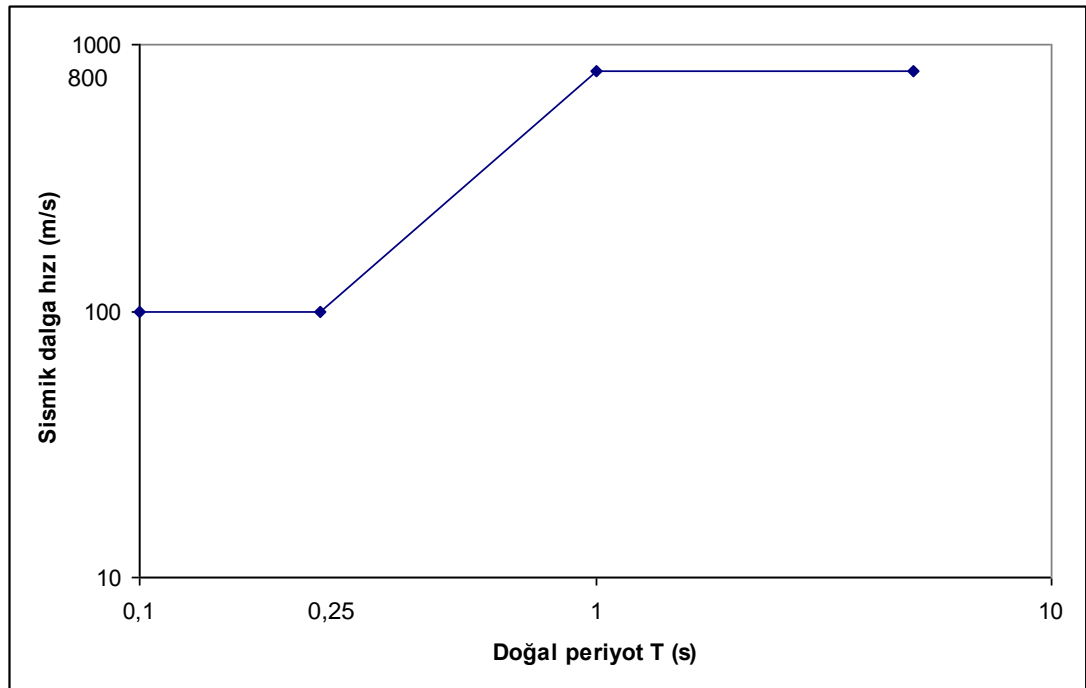
Deprem Hareketi 1: Tasarımda gaz boru hattının servis ömrü sırasında bir veya iki kez meydana gelebilecek genel sismik hareketler göz önüne alınmaktadır. Bu sismik hareketin sonrasında herhangi bir onarıma gerek duyulmadan sistemin yeniden işletilebilmesi istenmektedir. Tasarım yöntemi şekil değiştirme esaslıdır ve deprem sırasındaki şekil değiştirmelerin, elastik limiti aşmasına izin verilmektedir. Gömülü boru hatlarının düz kısımlarında, boruda oluşan şekil değiştirmeler zemin ve boru arasındaki kayma nedeni ile oluşmaktadır. Boru hattının dirsek ve/veya T bağlantı gibi bağlantı bölgelerindeki şekil değiştirmeler ise boruya etkiyen deprem kuvvetleri nedeni ile oluşmaktadır. Zeminin uniform olan ve olmayan bölgelerinde, boru hattında oluşan şekil değiştirmeler ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Özetle borularda oluşan şekil değiştirmelerin bu yönetmelik ile tanımlanan sınırlar içinde kalması arzu edilmektedir.

Uniform bir zeminin şekil değiştirmesi (2.4) bağıntısı ile hesaplanır.

$$\varepsilon_{G1} = \frac{2\pi U_h}{L} \quad (2.4)$$

Bu bağıntıdaki dalga boyu L, (2.5) ile hesaplanır.

$$L = VT \quad (2.5)$$



Şekil 2.6 Sismik dalga hızı (JGA, 2000)

Dalga hızı V ise Şekil 2.6'da verilen grafik yardımı ile bulunmaktır. Zeminin doğal periyodu T nin hesabı (2.8) bağıntısında verilmektedir.

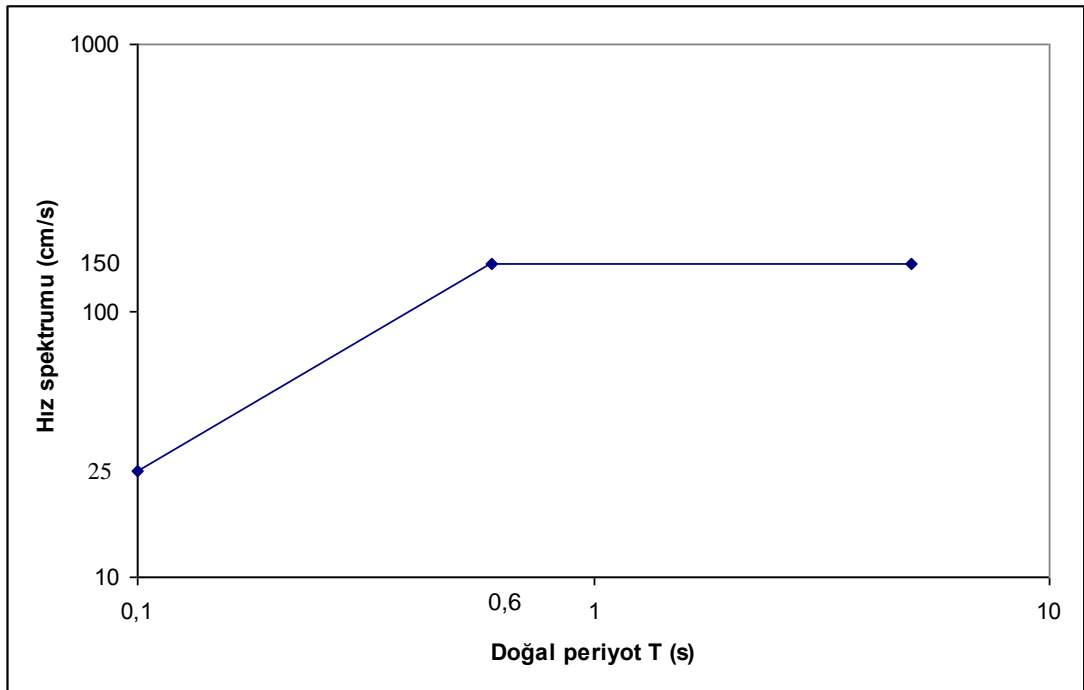
Zemin yer değiştirmesi U_h ise (2.6) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda yer alan diğer değişkenlerin hesabı da (2.7), (2.8) ve (2.9) bağıntıları, Tablo 2.3 ve Şekil 2.7 kullanılarak yapılmaktadır.

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} TS_v K_{oh} \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (2.6)$$

z : Boru hattı derinliği (m)

T : Zeminin doğal periyodu

S_v : Spektral hız (cm/s)



Şekil 2.7 Hız spektrumu (JGA, 2000)

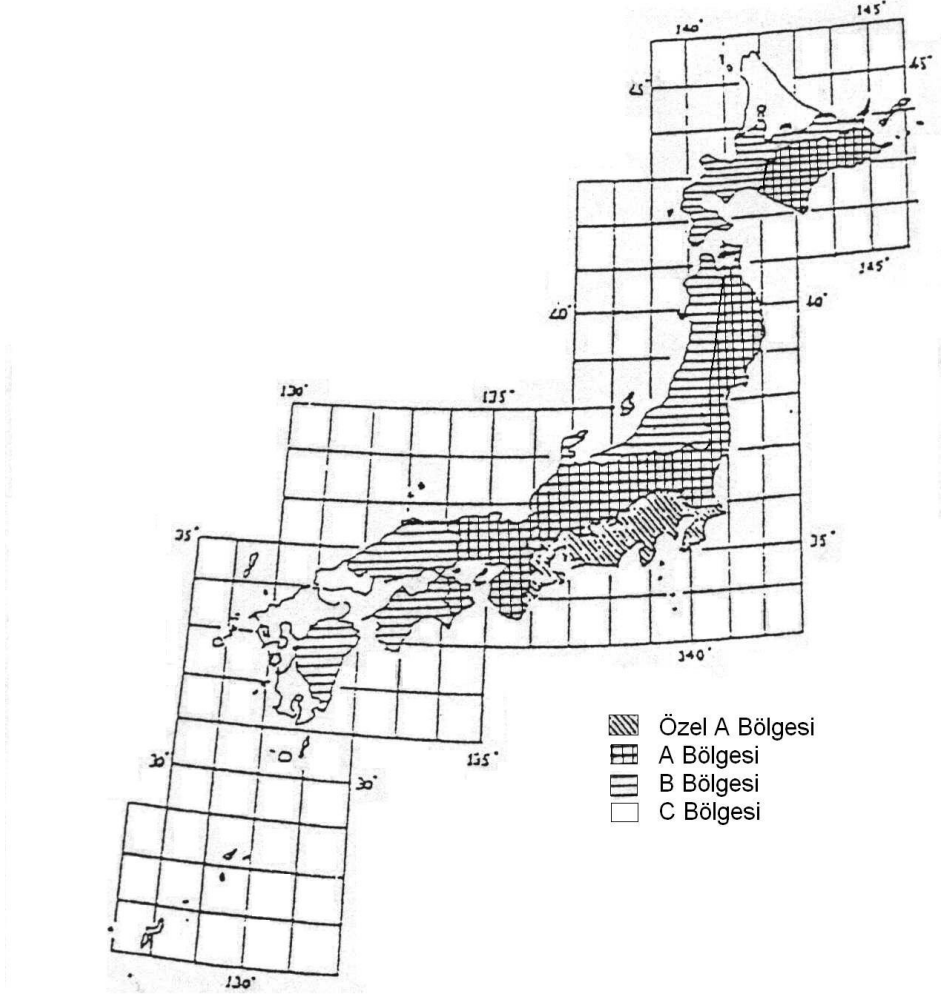
$$K_{oh} = 0.15v_1v_2 \quad (2.7)$$

v_1 : Önem katsayısı (Şehir içi yollarda gömülü borular 1.0, diğer yerler 0.8)

v_2 : Sismik bölge katsayısı

Tablo 2.3 Sismik bölge katsayısı (ν_2) (JGA, 2000)

Bölge Sınıflandırması	Özel A bölgesi	A bölgesi	B veya C bölgesi
Sismik Bölge Katsayısı (ν_2)	1.0	0.8	0.7



Şekil 2.8 Sismik bölge katsayısı için bölge sınıflandırması (JGA, 2000)

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (2.8)$$

$$V_s = \frac{\sum V_{s1} H_1}{H} \quad (2.9)$$

H : Yüzey tabakasının derinliği (m)

V_s : Kayma dalgası hızı (m/s)

Yüzey tabakasının derinliğinin bulunması için yapılacak olan çalışmada SPT değerinin 50 den büyük olması veya kayma dalgası hızının 300 m/s den büyük

olması aranır. Ana kayanın boru hattının geçtiği bölgede eğimli olması durumunda zemin şekil değiştirmesi (2.10) bağıntısı ile hesaplanır.

$$\varepsilon_{G2} = \sqrt{\varepsilon_{G1}^2 + \varepsilon_{G3}^2} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_{G3} = \kappa \frac{K_{oh}}{V_s} \tan \theta \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (2.11)$$

ε_{G3} : İki noktanın farklı yer değiştirmesi nedeni ile oluşan şekil değiştirme

κ : Zemin doğal periyoduna bağlı katsayı

$$T < 0.3s \quad \kappa = 405T$$

$$T \geq 0.3s \quad \kappa = 122$$

θ : Ana kayanın eğim açısı

Zemin şekil değiştirmesinin bulunmasının sonrasında, bu şekil değiştirmenin boru hattı üzerinde meydana getireceği şekil değiştirme, düz boru hatlarında uniform zemin olması durumunda (2.12), eğimli ana kaya olması durumunda ise (2.13) bağıntıları ile hesaplanır.

$$\text{Uniform zemin} \quad \varepsilon_{v1} = \alpha \varepsilon_{G1} \quad (2.12)$$

$$\text{Eğimli ana kaya} \quad \varepsilon_{v3} = \alpha \varepsilon_{G2} \quad (2.13)$$

Şekil değiştirme transfer katsayısı α , (2.14) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\alpha = q \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L} \right)^2} = q \alpha_o \quad (2.14)$$

q : Boru ve zemin arasındaki kayma azaltma katsayısı

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}} \quad K_1 : \text{Eksenel yönde zemin yay katsayısı}$$

Kaynaklı birleşimlerin olduğu boru bölümlerinde (2.12) ve (2.13) bağıntıları ile verilen şekil değiştirme değerlerinin iki katı dikkate alınır.

Yönetmelikte boru hattının düz kısımlarında izin verilen boru şekil değiştirmesi:

$$\varepsilon = 0.01 \quad \text{veya} \quad \varepsilon = \frac{4}{3} \frac{t}{D-t} n \quad (2.15)$$

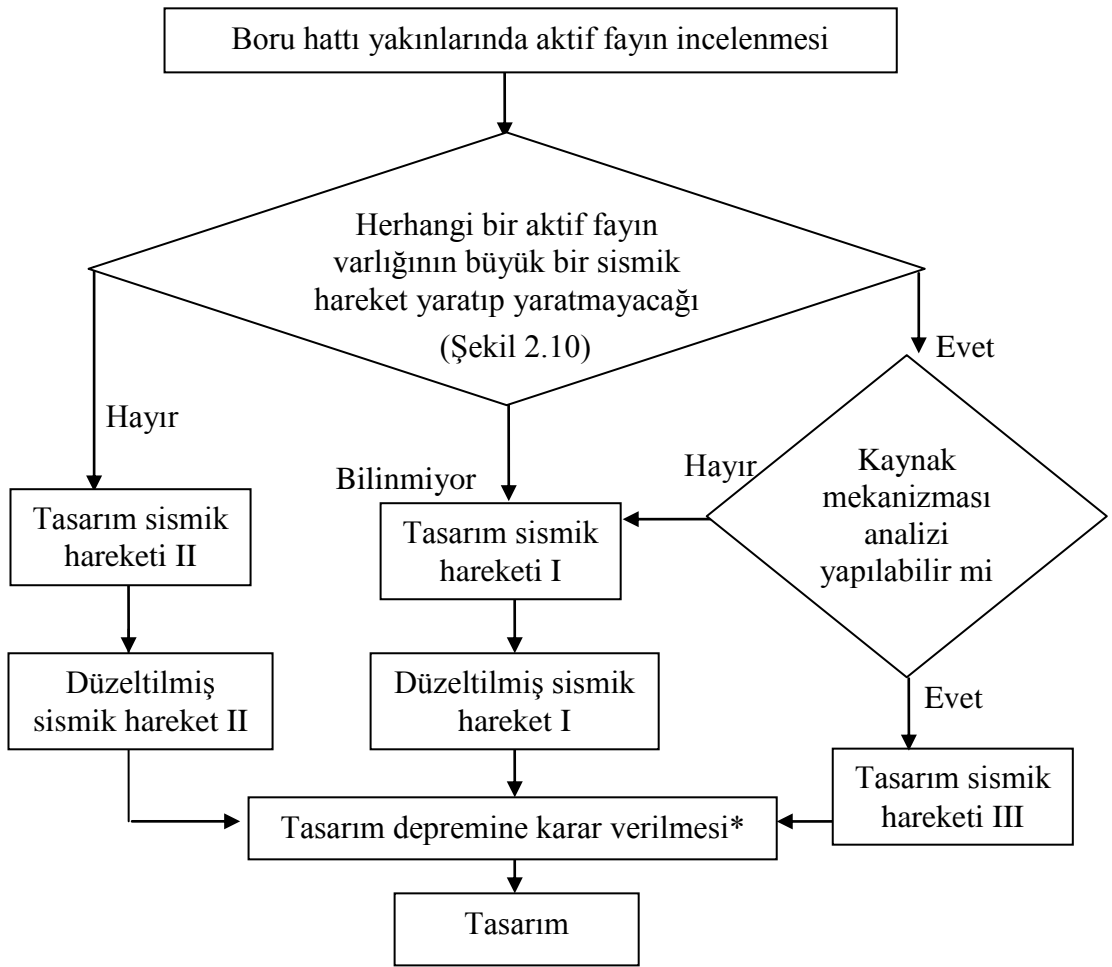
t : et kalınlığı (cm)

D : boru çapı (cm)

n : 0.11

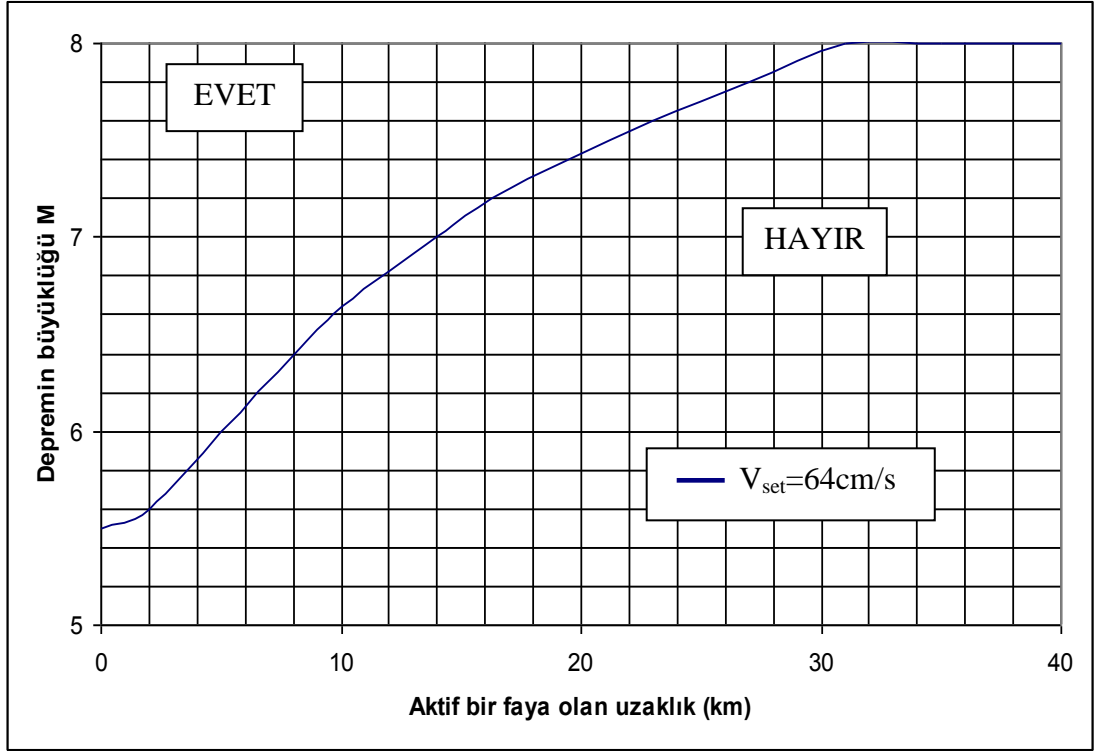
değerlerinden küçük olanıdır. Güvenlik katsayısı olarak da 1.25 kullanılmaktadır.

Deprem Hareketi 2: Gaz boru hattının servis ömrü sırasında oldukça düşük bir olasılıkla meydana gelebilecek büyük deprem hareketi burada konu edilmektedir.



*Fay analizi ile çözüm yapılıyorsa: eğer tasarım sismik hareket III düzeltilmiş tasarım sismik hareket II'den küçükse, tasarım sismik hareket olarak düzeltilmiş sismik hareket II kullanılır.

Şekil 2.9 Tasarım depremi (JGA, 2000)



Şekil 2.10 Herhangi bir aktif fayın varlığının büyük bir sismik hareket yaratıp yaratmayacağı (JGA, 2000)

Büyük deprem hareketine neden olacak kaynak mekanizması karadaki derin deprem ya da dalma-batma zonlarındaki hareket olabilir. Bu tür depremlerde bile boru hattında şekil değiştirmeler olsa bile herhangi bir sızma meydana gelmeyecek şekilde tasarlanması istenmektedir. Şekil 2.9’da bu durum için tasarım depreminin seçimi verilmiştir.

Tasarım depremi akış şemasında yer alan sismik hareket tipleri aşağıda açıklanmaktadır.

Tasarım sismik hareketi I: Hyogoken-Nanbu Depremi kayıtlarına bağlı olarak karada oluşan deprem için kararlaştırılan sismik hareket

Tasarım sismik hareketi II: Dalma-batma zonlarındaki geçmiş deprem kayıtlarına bağlı olarak seçilen sismik hareket

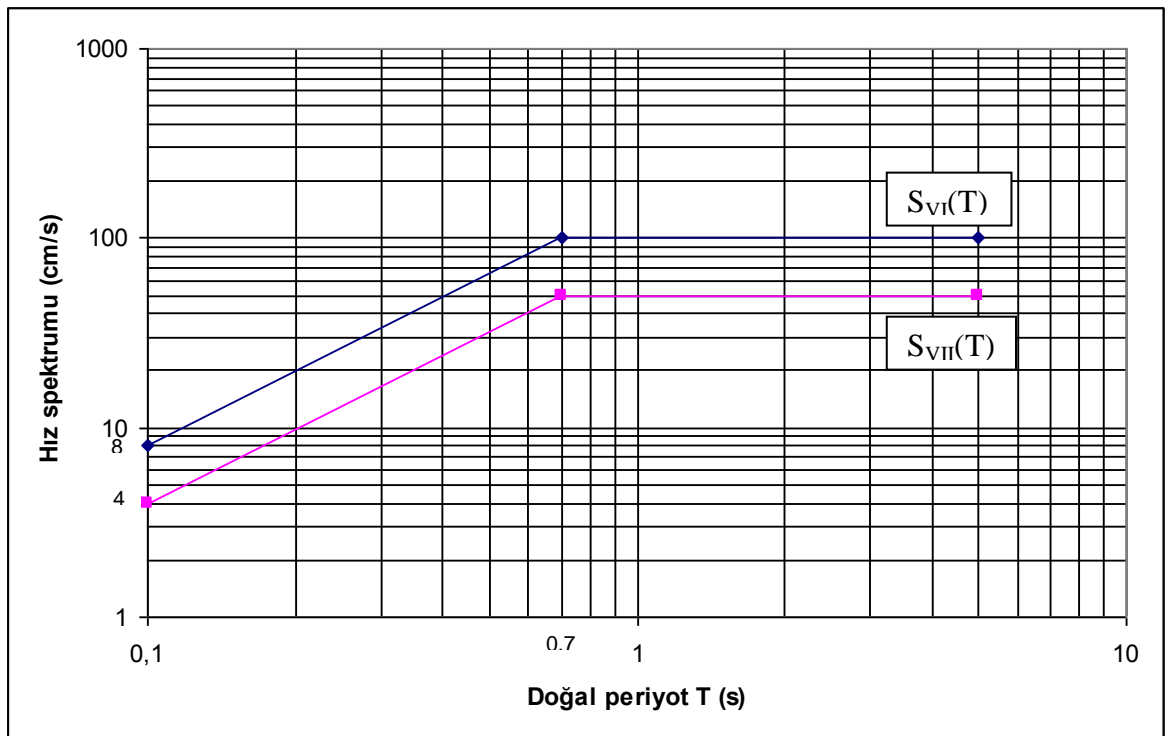
Tasarım sismik hareketi III: Karadaki derin depremlerin iç merkezine bağlı olarak yapılacak olan kaynak mekanizması çözümü ve buna bağlı olarak sismik dalga yayılımına karar verilmesi

Tasarım sismik hareketi I ve II için yönetmeliğin öngördüğü zemin yer değiştirmesi hesabı (2.15) ve (2.16) bağıntılarında verilmektedir. Bu ifadelerde görüldüğü gibi

spektral hız ilgili tasarım sismik hareketleri için düzenlenmiş olan grafiklerden (Şekil 2.11) alınmaktadır. Zemin şekil değiştirmelerinin bulunması amacı ile yazılan (2.17) ve (2.18) bağıntılarında yer alan şekil değiştirme değerleri (ε_{GI0} ve ε_{GII0} , Şekil 2.12) de ilgili grafiklerden alınmaktadır. Tasarım sismik hareketi III için bu değerler doğrudan arazide hesaplanır.

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} T v S_{VI}(T) \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (\text{Tasarım sismik hareketi I}) \quad (2.15)$$

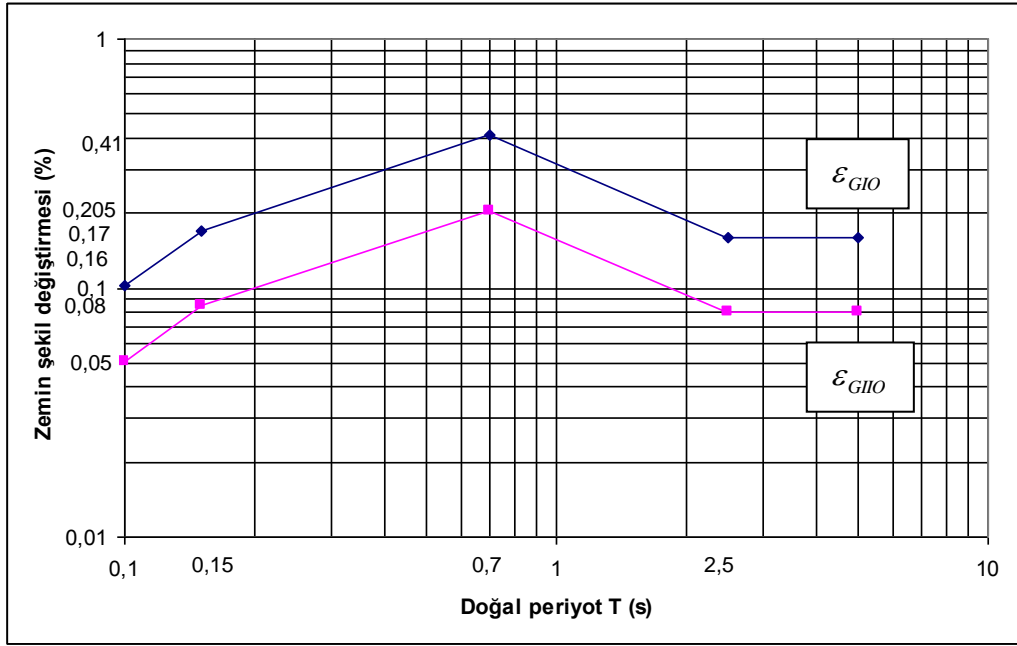
$$U_h = \frac{2}{\pi^2} T v S_{VII}(T) \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (\text{Tasarım sismik hareketi II}) \quad (2.16)$$



Şekil 2.11 Hız spektrumu (JGA, 2000)

$$\varepsilon_{GI} = v \varepsilon_{GI0} \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (\text{Tasarım sismik hareketi I}) \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_{GII} = v \varepsilon_{GII0} \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (\text{Tasarım sismik hareketi II}) \quad (2.18)$$

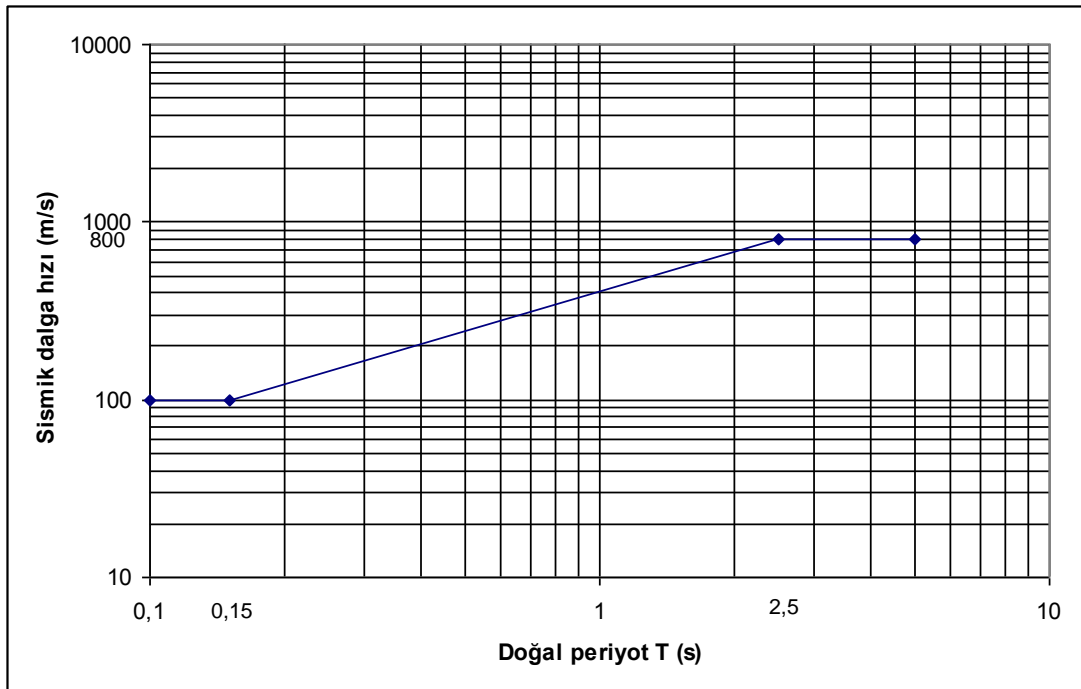


Şekil 2.12 Zemin şekil değıştirmesi (JGA, 2000)

Düz borudaki şekil değıştirme (2.19), zemin şekil değıştirmesinin şekil değıştirme iletim katsayısı (2.20) ile çarpılması sonucu hesaplanır.

$$\varepsilon_p = \alpha \varepsilon_G \quad (2.19)$$

$$\alpha = q \alpha_o \quad (2.20)$$



Şekil 2.13 Sismik dalga hızı (JGA, 2000)

Burada α_o 2.14 bağıntısında verildiği gibi hesaplanır. q kayma azaltma katsayısı, boru yüzüne etkiyen kayma gerilmesinin τ_G (2.21), kritik kayma gerilmesi τ_{cr} ile karşılaştırılması sonrasında hesaplanır (2.22 ve 2.23). L dalga boyu hesabı için Şekil 2.13 kullanılır.

$$\tau_G = \frac{2\pi}{L} Et \alpha_o \varepsilon_G \text{ (N/cm}^2\text{)} \quad (2.21)$$

* $\tau_G \geq \tau_{cr}$ (bu durumda boru ile zemin arasında kayma oluşur)

$$q = 1 - \cos \xi + \Omega \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \sin \xi \quad (2.22)$$

$$\xi = \arcsin \left(\frac{\tau_{cr}}{\tau_G} \right), \quad q \leq 1$$

Ω : konservatif tarafta q hesabı için düzeltme faktörü, 1.5

* $\tau_G < \tau_{cr}$ (bu durumda boru ile zemin arasında kayma oluşmaz)

$$q = 1 \quad (2.23)$$

Deprem şiddetinin oldukça büyük olması durumunda boru gerilmesi malzemenin akma seviyesini geçmekte ve boru plastik şekil değiştirmeyi gerçekleştirmektedir. Boru deformasyonu kendisini çevreleyen zemin hareketi ile sınırlı olduğundan, olası maksimum boru şekil değiştirmesi zemin şekil değiştirmesini aşamaz. Bu yüzden plastik bölgede boru şekil değiştirmesi $\varepsilon_p = \varepsilon_G$ olacaktır. Bu eşitlikte boru malzemesinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisindeki ikincil rijitliğin etkisi ihmal edilmiştir.

2.3.3.2. Orta ve düşük basınçlı gaz boru hatları

Orta ve düşük basınçlı gaz boru hatlarının depreme dayanıklı tasarımı, boru hattına daha fazla esneklik kazandırılarak boru hatlarındaki kırılmaların ve sızmaların azaltılmasını amaçlamaktadır. Tasarım genel olarak aşağıda belirtilen özelliklere dayanmaktadır:

1. Gömülme özelliklerinin seçilmesi
2. Tasarıma esas olan zemin yer değiştirmesinin hesaplanması

3. Boru hattının zemin yer değiştirmesini tolere etme kapasitesinin hesaplanması
4. Zemin yer değiştirmesi verilerinin seçilmesi
5. Standart Şekil değiştirme ve standart yer değiştirmenin seçilmesi
6. Deprem dayanımının değerlendirilmesi

Boru hattı esnekliğini değerlendirmek üzere hesaplanan tasarım zemin yer değiştirmesini hesaplamak üzere, yatay yer değiştirme (borunun eksenine yönünde) (2.24), düşey yer değiştirme (boru eksenine dik) (2.25) bağıntıları ile elde edilmektedir.

$$U = \alpha_1 \alpha_2 U_o \quad (2.24)$$

$$V = 1/2U \quad (2.25)$$

Standart tasarım zemin yer değiştirmesi olan U_0 , 5 cm olarak belirlenmiştir. Sismik bölge katsayısı α_1 değerleri Tablo 2.4'te, boru çeşidi ve zemin durumunun kombinasyonlarına bağlı katsayı α_2 Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.4 Sismik bölge katsayısı (α_1) (JGA, 2000)

Bölge Sınıflandırması	zel A bölgesi	A bölgesi	B bölgesi	C bölgesi
Sismik Bölge Katsayısı (α_1)	1.0	0.8	0.6	0.4

Tablo 2.5 Boru eşidi ve zemin durumunun kombinasyonlarına bağlı katsayı (α_2) (JGA, 2000)

Zemin Durumu	I	II	III
Boru Hattı eşidi			
Orta Basınçlı A ($3 \leq P < 10 \text{kgf/cm}^2$)	0.9	1.3	1.8
Orta Basınçlı B ($1 \leq P < 3 \text{kgf/cm}^2$)	0.7	1.0	1.4
Düşük Basınçlı (ana) ($P < 1 \text{kgf/cm}^2$)	0.5	0.7	1.0
Düşük Basınçlı (servis) ($P < 1 \text{kgf/cm}^2$)	0.7	1.0	1.0

Zemin Şartları değerlendirilirken boru hattının tesis edileceği alanın genel zemin özellikleri incelenir. Aşağıda sayılan türlerin herhangi birinin veya kombinasyonlarının görüldüğü alanlar I olarak sınıflandırılmaktadır.

1. Triassic Döneme veya öncesine dayanan zemin tabakaları (kaya tabakası)

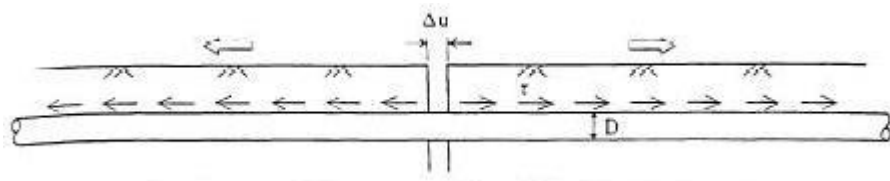
2. Diluvium tabakası

3. 10 m'den az alüvyon tabakası veya yumuşak tabakanın 5 m'den az olduğu tabaka (bir kaya tabakasının veya ince bir diluvium tabakasının olması koşulu ile)

10 m'den fazla alüvyon tabakasının veya 5 m den fazla yumuşak tabakanın bulunduğu tabakalar II olarak sınıflandırılmaktadır. III(a) ise I ve II'nin özelliklerine sahip iki farklı tabakanın birleşiminden veya karışımından oluşmaktadır. Ayrıca yer değiştirmenin süresiz olduğu ve II'nin özelliklerini taşıyan bir zemin tabakasından yapıya geçişlerin olduğu bölgeler de III(b) olarak kabul edilmektedir.

Tasarım yer değiştirmelerinin bulunmasından sonra boru hattının zemin şekil değiştirmesini tolere etme kapasitesi hesaplanır.

I, II ve III(a) durumlarında düz borunun Şekil 2.14'te belirtilen aksenal yöndeki zemin yer değiştirmesini tolere etme kapasitesi (2.26) bağıntısı ile hesaplanır. Bu çalışmanın kapsamı dışında kaldığından III(b) durumu için bağıntılar verilmemiştir.



Şekil 2.14 I, II ve III(a) durumlarında aksenal yöndeki zemin yer değiştirmesi (JGA, 2000)

Kaynaklı çelik borular için elastoplastik hesap modeli kullanılarak Δu hesabı (2.26) bağıntısında verilmiştir.

$$\Delta u = \frac{AE[\epsilon_v^2 + \lambda(\epsilon_o^2 - \epsilon_v^2)]}{\pi Dr} \quad (2.26)$$

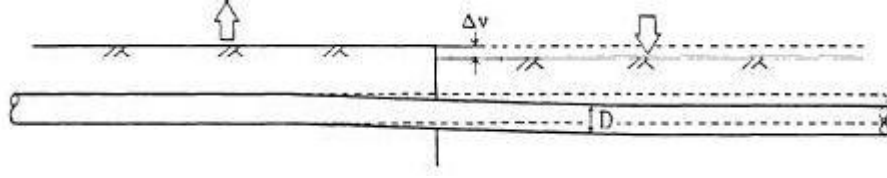
ϵ_v : Borunun akma şekil değiştirmesi

ϵ_o : Borunun izin verilen şekil değiştirmesi (çelik boru için %3)

E : Elastisite modülü (çelik boru için 2.1×10^5 N/mm²)

λE : Borunun tanjant modülü (çelik boru için $\lambda = 7.1 \times 10^{-3}$)

I, II ve III(a) durumlarında düz borunun Şekil 2.15'te belirtilen eksenine dik doğrultudaki zemin yer değiştirmesini tolere etme kapasitesi (2.27) bağıntısı ile hesaplanır.



Şekil 2.15 I, II ve III(a) durumlarında eksene dik yönde zemin yer değiştirmesi (JGA, 2000)

Ekseni boyunca homojen rijitliğe sahip boru hattı için (kaynaklı bağlantılı çelik boru ve polietilen boru için) Δv hesabı (2.27) bağıntısında verilmiştir.

$$\Delta v = \frac{2\sqrt{2}e^{\pi/4}}{D} \sqrt{\frac{4\bar{E}I}{kD}} \varepsilon_o \quad (2.27)$$

\bar{E} : azaltılmış elastisite modülü (çelik boru için $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$)

I : kesitin atalet momenti (mm^4)

k : temel zemini tepkisi azaltılmış katsayısı

Hesapların tamamlanmasından sonra güvenli tasarım kontrolü için $\Delta u > U$ ve $\Delta v > V$ şartları aranır.

2.4. Zemine Gömülü Borularda Hasara Neden Olan Faktörler

Gömülü boru hatlarının davranışı birçok açıdan yüzey yapılarınıninkinden farklıdır. Yüzey yapılarının tasarımına etkileyen ana faktör yatay atalet kuvvetleri iken gömülü borularda boru ve kendisini çevreleyen zeminin birbirine göre yer değiştirmeleridir. (Datta, 1999).

Gömülü boru hatlarının karşılaşılabileceği sismik tehlikeler genel olarak zeminde oluşan geçici ve kalıcı yer değiştirmeler şeklinde sınıflandırılabilir. Geçici yer değiştirmeler sismik dalgalar sonucunda oluşurken, kalıcı yer değiştirmeler yüzey faylanması, sıvılaşma, toprak kayması ve farklı oturmalar nedeni ile oluşmaktadır. Geçmişte karşılaşılmış pek çok olayda hasarlar bu tehlikelerin kombinasyonu ile oluşmuşsa da bazı olaylarda sadece dalga yayılımına bağlı hasarların görüldüğü gözlenmiştir (Mexico City 1985 Michoacan Depremi). Örneğin, O'Rourke ve diğ. (1985), 1906 San Francisco Depreminde görülen boru kırılmalarının yarısının şehrin bir kısmında sıvılaşma nedeni ile yanal yayılma bölgeleri sonucunda oluştuğunu, diğer yarısının ise daha büyük bir alanı kapsayan bölgede dalga yayılımı nedeni olduğunu belirtmişlerdir. Tipik kalıcı yer değiştirme hasarları zemin göçmesinden

izole edilmiş alanlarda yüksek hasar oranı ile, dalga yayılımı hasarları ise daha geniş alanlarda fakat daha düşük hasar oranı ile gerçekleşir (O'Rourke, 1995).

Bunların haricinde kullanım süresi ve korozyon gibi etkiler ve ayrıca boru hatlarında kullanılan bağlantı elemanları nedeni ile de hasarlar gözlenmektedir.

2.4.1. Dalga yayılımı etkisi

Zemin içerisinde ilerleyen sismik dalgalar zeminde geçici şekil değiştirme ve eğriliklere neden olmaktadır. Bu geçici şekil değiştirmeler farklı çaplardaki borular için araştırıldığında, borudaki şekil değiştirmelerin en önemli nedeni olarak görülmüştür. Yüzey dalgalarının yayılım hızları, cisim dalgalarınınkinden daha azdır. Bunun sonucu olarak da yüzey dalgaları, aynı parçacık hızına sahip cisim dalgalarına göre daha büyük zemin ve boru şekil değiştirmelerine neden olabilirler (O'Rourke, 1995).

2.4.2. Fay geçişi davranışı

Fay atımı ve kopma uzunluğu için deprem büyüklüğünün bir fonksiyonu olan çeşitli ampirik ilişkiler de bulunmaktadır. Sürekli boru hatları ile parçalı boru hatlarının fay hareketi etkisi altındaki davranışları karşılaştırıldığında, parçalı boru hatlarının süreklilere göre daha az fay hareketine karşı koyabildikleri görülmüştür. Parçalı boru hatlarında izin verilen fay yer değiştirmesi özellikle bağlantı elemanlarının esneme, sıkışma ve dönme yapabilme yeteneklerine bağlıdır (O'Rourke, 1995).

2.4.3. Toprak kayması

Toprak kaymaları zemin kütlelerinin kalıcı yer değiştirmesine neden olur. Bunun sonucu olarak gömülü borularda bu bölgeye etkiyen büyük yer değiştirmeler ciddi hasarlara yol açar. Özellikle yağışlı dönemde depremlerin meydana gelmesi sonucunda birçok toprak kayması oluşabilir. Toprak kayması hareketinin miktarı kalıcı yer değiştirme cinsinden ölçülmektedir (G&E Engineering Systems Inc., 2001).

2.4.4. Sıvılaşma

Sıvılaşma gevşek, doygun ve daneli zeminlerin uzun süreli tekrarlı-kuvvetli zemin sarsıntısına maruz kalmaları sonucunda oluşmaktadır. Sıvılaşma sonucunda zemin mukavemet ve rijitliğini kaybeder, yanal yayılma, kaynama, oturma ve dolayısı ile yapılarda göçmeler oluşur. Doygun-kohezyonsuz zeminlerde gömülü boru hatları

sıvılaşma sonucunda zemin yüzeyine doğru çıkarlar. Bu olay 1964 Niigata ve Alaska Depremlerinde gözlenmiştir (Hall ve O'Rourke, 1991). Yüzeğe doğru çıkma, yer değıştirme, burkulma, sıyrılma, boru bağlantılarında basınç ve kolektörlerin ayrılması boru hatlarında gözlenen sıvılaşma nedenli hasarlara örnek olarak verilebilir (Sun, 2001).

2.4.5. Oturma

Dolgudan doğal zemine geçiş bölgelerinde ve sıvılaşmanın rahatlıkla oluşabileceği yeni alüvyal zeminlerin bulunduğu alanlarda farklı oturma sonucunda boru kırılmaları gerçekleşmektedir. Ayrıca boruların bina veya tanklara bağlandığı yerlerde de farklı oturmaların gerçekleşmesi sonucunda kırılmalar gözlenmektedir. Oturma hareketinin miktarı kalıcı yer değıştirmeler cinsinden tanımlanmaktadır (G&E Engineering Systems Inc., 2001).

2.4.6. Birleşim bölgeleri ve teçhizat

Boru hattı hasarları özellikle boru dirsekleri, T birleşimler, hat içi vanalar, mesnetler ve servis bağlantıları gibi süreksizliklerin olduğu yerlerde sıklıkla görülmektedir. Bu aksamalar kuvvet-gerilme birikmelerinin oluştuğu mesnet noktaları veya rijit bölgeler yaratırlar. Bunun dışında tank, bina, köprü gibi ayırık yapılara bağlantı yerlerinde de yüksek gerilmeler oluşmaktadır (G&E Engineering Systems Inc., 2001).

2.4.7. Yıpranma ve korozyon

Özellikle parçalı çelik, dişli çelik ve dökme demir borularda kullanım süresi ve korozyon meydana gelecek hasarı arttırıcı etkide bulunmaktadır. Eski borularda göçme olaylarının görülmesi yeni borulara göre çok daha fazla bir oranda gerçekleşmektedir. 1987 Whittier Depreminde elde edilen kayıtlar, deprem sonucunda oluşan boru hattı kırıklarının borunun kullanım süresi ile birlikte arttığını göstermektedir (Wang, 1990). Benzer etkiye 1989 Loma Prieta Depreminde çelik borular üzerinde de rastlanmıştır (Eidinger, 1998).

Kullanım süresi etkisi muhtemelen korozyon etkisi ile doğrudan birbirine bağlıdır, çünkü zamanla korozyon sonucunda boruda meydana gelen hasarlar artmaktadır. Korozyon borunun et kalınlığında azalmaya ve gerilme birikmelerine neden olarak boruyu zayıflatmaktadır. Vidalı ve dişli çelik boruların diğer çelik boru çeşitlerine göre korozyon nedeni ile daha fazla göçtüğü gözlenmiştir. Ayrıca bazı dökme demir

borularda da korozyon göçmesi yüksek oranda görülmüştür (Isenberg, 1978, Isenberg, 1979, Isenberg ve Taylor,1984).

2.5. Boru Hatlarının Sismik Performansları

Geçmişteki depremlerin boru hattı sistemleri üzerinde birçok etkisi görülmüş ve bununla birlikte sismik etkiler altında boru hatlarının davranışı ile ilgili araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu bölümde literatürde rastlanan depremler sonrası incelemelere ve boru hatlarında meydana gelen hasarlara yer verilmektedir.

2.5.1. San Francisco Depremi [18 Nisan 1906, 7.8 (M)]

Deprem nedeni ile yumuşak zeminin oturması sonucunda şehrin ana su hattında birçok kırık meydana gelmiştir. Buna ek olarak şehre güneydeki rezervuarlardan su sağlayan büyük çaplı borular yumuşak zemin ile bataklık bölgesinde bulunmalarından ve fay ile hattın kesişmesi sonucu olarak kırılmıştır. Şehre su taşıyan boru hattındaki bu hasarlar nedeniyle çıkan yangınlara erken müdahale edilememiştir. Şehrin farklı yerlerinden 16 farklı yangın alarmı gelmiştir. Yangınların öncelikli nedeni yağ lambaları ile yağ ve gaz sobalarının devrilmesidir. O zamanlarda çalışan yangın uzmanları her ne kadar onların su sisteminde bir aksaklık olmadığını ileri sürseler de birçok yangında verimli olarak çalışmamışlardır. Konutlarda çıkan birçok yangın bina sakinleri tarafından söndürülmüştür, fakat depremin erken saatlerde meydana gelmesinden dolayı şehir merkezindeki binalarda müdahale için geç kalınmıştır. 3 saat içerisinde 9 yangın büyük boyutlara ulaşmıştır. Sonraki üç gün boyunca rüzgarın etkisi ile yangın batı yönüne doğru sıçramıştır. En büyük kayıplar, depremin doğrudan etkisi ile değil, yangınlar nedeni ile oluşmuştur. San Francisco'da deprem sonrasında çıkan yangında, 1995 Hyogo-Ken Nanbu Depreminde çıkan yangının verdiği hasara göre 10 kat daha fazla alan zarar görmüştür (ASCE-25 Task Committee On Earthquake Safety Issues For Gas Systems, 2002).

2.5.2. Anchorage Depremi (Alaska) [1964, 8.3 (M)]

Gömülü boru hatlarının büyük kısmı toprak kayması sonucunda büyük bir hasara uğramıştır. Farklı oturmalar, ana hat ve servis hatlarında kırılmalara neden olurken, doğrudan sismik kuvvetlere maruz kalan borular ezilmiş ve ayrılmıştır (Datta, 1999).

2.5.3. Santa Rosa Depremi (California, USA) [1 Ekim 1969, 5.7 (M)]

Deprem sonucunda depolama tankları, pompa istasyonu ve barajlarda önemsiz boyutta hasarlar gözlenmiş, dağıtım borularında ise büyük çapta hasar meydana gelmiştir (PAHO, 1998).

2.5.4. San Fernando (California, USA) [9 Şubat 1971, 6.6 (M)]

Çeşitli boru hattı sistemlerinde 1400 kırık meydana gelmiştir. Şehrin su, gaz ve kanalizasyon servisleri geçici olarak devre dışı kalmıştır. Depreminin en büyük etkisi hidrolik yapıların tedarik kaynakları ve boruları üzerinde gördükleri hasardır. Kuyularda su seviyesinde belirgin bir değişim olmuştur. İçme suyu üzerindeki en önemli etki barajlar, rezervuarlar, su tankları, ana tanklar, borular ve su yollarında gözlenmiştir (PAHO, 1998).

Hasarların çoğu sismik sarsıntı nedeni ile oluşmuş ve rijit bağlantı elemanlarının esnek bağlantı elemanlarına göre daha fazla hasara uğradığı gözlenmiştir. Ana göçme mekanizmaları ezilme, borularda eğilme göçmesi ile bağlantı elemanlarında sıyrılma ve kayma göçmeleridir. Deprem sonucunda oluşan basınç kuvvetleri fayı geçen boru hatlarında çoğunlukla burkulma göçmelerine neden olmuştur (Datta, 1999)

2.5.5. Managua Depremi (Nikaragua) [3 Aralık 1972, 6.25 (M)]

Dağıtım sistemi dökme demir borulardan oluşmaktadır. Daha küçük çaptaki borular ise PVC'dir. Şehrin altındaki alanda bulunan ana borularda yaklaşık 100 kırık rapor edilmiştir (PAHO, 1998).

2.5.6. Guatemala Depremi [4 Şubat 1976, 7.5 (M)]

Motagua fayının kırılması ile 250 km boyunca ortalama 100 cm yanal yer değiştirme meydana gelmiştir. Birçok teçhizatta hasarlar oluşmuş, ancak borularda hasar bildirilmemiştir (PAHO, 1998).

2.5.7. Cotabato Depremi (Mindinao Adası, Filipinler) [17 Ağustos 1976, 7.9 (M)]

Boru hattının 5.5 km'si 20 cm çapında borulardan, kalan 10.5 km'si 26 cm çapında borulardan oluşmaktadır. Üzerine köprü kaplamasının düşmesinden dolayı 26 cm çapındaki borularda kırık oluşmuştur (PAHO, 1998).

2.5.8. San Juan ve Mendoza Depremleri (Arjantin) [23 Kasım 1977, 7.4 (M)]

Depremin neden olduğu farklı büyüklüklerdeki hasarların en ciddileri Caucete, San Martín, ve 25 de Mayo Bölgesindedir. Caucete şehrinin su dağıtım sistemi tüm hat

boyunca kırılmıştır (yaklaşık 40km). Hasarın bu boyutta olmasının nedeni yüksek yeraltı suyu seviyesi ve meydana gelen sıvılaşmadır (PAHO, 1998).

2.5.9. Meksika Depremi [19 Eylül 1977, 8.1 (M)]

Mexico şehrinde 72,000 km uzunluğunda boru hattı bulunmakta ve boru çapları 5 cm ile 305 cm arasında değişmektedir. Gömülü borular yüzeydeki borulara göre daha büyük hasara uğramıştır. Büyük çaplı boruların çoğunluğu T-bağlantılar, çapraz bağlantılar, vanalar ve yapıların borulara bağlantılarında kullanılan bağlantı elemanları gibi rijit bağlantılar nedeni ile kırılmıştır (PAHO, 1998).

2.5.10. San Salvador Depremi (El Salvador) [10 Eylül 1986, 5.4 (M)]

San Salvador volkanik kül birikintilerinden oluşmuş bir bölgededir. Boru hattındaki kopmalar farklı oturmalara ve sismik dalgalar sonucu oluşan zemin deformasyonlarına bağlı olarak oluşmuştur. Esnek çelik borular da dahil olmak üzere içme suyu hattında göçmeler meydana gelmiştir. Deprem sonucunda oluşan 2400 kırığın çoğunluğu içme suyu sisteminde bulunmuştur. Düşük basınç nedeni ile kırıkların bulunduğu yerler oldukça çabuk tespit edilmiştir. Hasarlı boruların toplam uzunluğu 80 km, yani toplam hat uzunluğunun %20'sidir. Kanalizasyon sisteminin yaklaşık olarak 65 km'lik bölümü hasar görmüştür (toplamın %22'si) (PAHO, 1998).

2.5.11. Napo Proviencie Depremi (Ekvator) [5 Mart 1987, 6.8 (M)]

Deprem öncesi yağmurlar sonucunda zeminin doygunluğa ulaşılması ile toprak kayması meydana gelmiş ve 40 km uzunluğundaki Trans-Ekvator petrol boru hattının çoğunu etkilemiştir. Bu hat Salado Nehri ve San Rafael Şelalesi arasındaki Agrio Gölünden geçmektedir. Petrol boru hattının 17 km'lik kısmı bu deprem sonucunda yok olmuştur (PAHO, 1998).

2.5.12. Whittier Depremi (California) [1 Ekim 1987, 5.9 (M)]

Doğalgaz hattında, yüksek basınçlı gaz taşıma sistemi zarar görmemiştir. Dağıtım sisteminde tespit edilen 22 kırığın oluşmasındaki nedenin çoğunlukla korozyon etkisi olduğu gözlenmiştir. Depremden sonra yaklaşık 5900 çatlak rapor edilmiş, bunların yaklaşık 2000'inin deprem nedeni olduğu saptanmıştır. Hasarın yaklaşık %75'i deprem sırasında gaz bağlantı elemanlarının yer değiştirmesi sonucunda meydana gelmiştir. Servis hatlarındaki sızıntının yaklaşık 300'ü şehir dağıtım şebekeleri ile kullanıcı sayaçları arasında meydana gelmiştir (ASCE-25 Task Committee On Earthquake Safety Issues For Gas Systems, 2002).

2.5.13. Spitak ve Leninakan Depremi (Ermenistan) [7 Aralık 1988, 6.8 (M)]

Leninakan'ın su kaynağı şehrin 32 km kadar kuzeyinde bulunmakta ve su üç boru hattı ile şehre ulaştırılmaktadır. 500–600 mm çapındaki boruların biri çelik, diğerleri ise çelik ve dökme demir karışımdır. Bu üç boru şehrin 7 km kadar kuzeyindeki bir şevden geçmektedir. Boruların yaklaşık 1 km'lik kısmı bu şevde gömülüdür. 4.5 km genişliğindeki bölgede kayalar yuvarlanmış ve nehir boyunca bulunan borulara zarar vermiştir (PAHO, 1998).

2.5.14. Loma Prieta Depremi (California, USA) [17 Ocak 1989, 7.1 (M)]

Calaveras fayı kanallarının bulunduğu alandaki, 1950'lerde inşa edilmiş on, on beş cm kalınlığındaki muflonlu bağlantılı dökme demir borulardan oluşan su şebekesi ciddi hasar görmüştür. Yerleşim bölgesindeki bağlantılarında birçok kırılma oluşmuştur. Sıkıştırılmamış dolgularda ve alüvyal zeminde bulunan boruların çoğu hasar görmüştür, bunun yanında sıkıştırılmış zeminlerdeki borularda ise daha az sıklıkla hasar oluşmuştur (PAHO, 1998). Loma Prieta depremi ile araştırmacıların dikkatini çeken diğer bir olay ise, zeminlerde sıvılaşmanın meydana gelmesi sonucu oluşan büyütmedir. O'Rourke ve Pease (1995) sıvılaşmış zeminlerdeki geçici yanal kayma şekil değiştirmesinin, gömülü şebeke sistemlerindeki yatay yer değiştirmelerin ve sismik hasarların birincil sebebi olduğunu göstermişlerdir. Daha önceki çalışmalardan zemin titreşiminin, ciddi ölçüde deformasyona sebep olduğu bilinmekteydi. Loma Prieta depremi sonrasında Treasure Island'da doymun kum alanlarında yapılan ölçümler bu çalışmaları doğrular nitelikte olup geçici yanal kayma şekil değiştirmelerinin büyüklüğünün tahmin edilmesi için nicel bir temel sağlamıştır (North America-Japan Workshop Report, 1997).

2.5.15. Limón Depremi (Costa Rica) [22 Nisan 1991, 7.4 (M)]

Banone Nehri havzasında ciddi hasarlar meydana gelmiştir ve bu bölgeden geçen içme suyu boru hattı sisteminin 4 farklı bölgesinde hasarlar görülmüştür. Bunlar boru gövdesinin orta bölümlerinde, borunun iki parçasını bileştiren bağlantı elemanlarında, çekme nedenli ayrılmanın gözleneceği yerlerdeki bağlantı elemanlarında ve teleskopik basınç nedeni ile yapılan bağlantı elemanlarında çatlaklar olarak rapor edilmiştir (PAHO, 1998).

2.5.16. Northridge Depremi (Los Angeles, California, USA) [17 Ocak 1994, 6.7 (M)]

Van Norman Complex'inin büyük bölümü ve Santa Susana Dağlarının güneydoğu sırtlarına komşu alanlar fayın yakınında bulunmaktadır. Bu bölgelerde bulunan boru hatları çoğunlukla büyük S-dalgalarına maruz kalmıştır. Fayın yakınındaki bölgelerde kuvvetli yer hareketi yaklaşık 1 sn baskın periyotlu ve yüksek tanecik hızlı dalgalar oluşturmuştur. Bunun sonucu olarak oluşan büyük aksel kuvvetler, hattın kaynaklı birleşimlerinde yönetmeliğin öngördüğü sınırların aşılmasına neden olmuştur.

Northridge Depremi, çelik boruların fayın yakınında yer aldıkları takdirde daha çok hasar görebilir olduğunu göstermiştir. Çelik ana hat ve nakil hattı borularındaki hasarlar çoğunlukla bağlantı noktalarında bulunmaktadır. Bu hasarlar; O-halka contalı muflonlu bağlantılarda ve Dresser manşonlarda aksel basınç ve sıyrılma şeklinde veya kaynaklı muflonlu bağlantılarda burkulma ve kopma şeklinde olmuştur. Yanal atımlı alüvyal çökeltilerin bulunduğu Balboa Bulvarı Rinaldi Meydanı bölgelerinde olduğu gibi, çoğu bölgede de ana su boru hatlarında oluşan hasarlar zeminin kalıcı deformasyonuna bağlanmıştır. Diğer bölgelerdeki hasarlar ise, sismik dalga yayılımına, zemin-boru hattı etkileşimine bağlı olarak açıklanabilir. 54–77, 78–85 ve 120 inçlik beton borularda kırılmalar meydana gelmiştir. Tüneller araştırılmış ve beklenenin aksine Terminal Tepesi çevresindeki birkaç küçük çatlak haricinde önemli bir hasar rapor edilmemiştir. Bu çatlaklar üretan reçinesi ile kapatılmıştır. Terminal Tepesi'nin kuzeyindeki 77 inçlik çelik boruda basınç nedeni hasar gözlenmiştir. En çok hasar korozyon belirtileri gözlenen rijit bağlantılı çelik borularda meydana gelmiştir (ASCE-25 Task Committee On Earthquake Safety Issues For Gas Systems, 2002, North America-Japan Workshop Report, 1997).

2.5.17. Kobe Depremi (Japonya) [17 Ocak 1995, 7.2 (M), IX–X]

Kobe depremi sırasında büyük bir sıvılaşmanın beraberinde gömülü su boru hattındaki büyük hasarlara ve yer yer hattın kopmasına neden olarak farklı oturmalar ve yanal yer değiştirmeler görülmüştür. Su şehre arkasındaki tepe ve dağlardaki rezervuarlardan cazibe ile sağlanmaktadır. 86 rezervuardan sadece birinde deprem sonrası yapısal hasar rapor edilmiştir. Özellikle su boru hatlarındaki kopmalar ve yer değiştirmeler nedeni ile ana depremden 24 saat sonra 86 rezervuarın tamamı boşalmıştır. Zeminin sıvılaşması nedeni ile hasar gören su şebekesindeki su kaybı

yüzünden yangınlara karşı konulamamış ve Kobe şehrinin 0.6 km²'lik kısmı yangın sonucu yok olmuştur. Toprak kaymaları, farklı oturmalar, sıvılaşma ve yanal yayılma kaynaktan su akışının durmasına, iki ana ve bir küçük su arıtma tesisinin hasar görmesine ve dağıtım hattının parçalanmasına neden olmuştur.

Higashinada Atık su arıtma tesisi Kobe şehrinin arıtma kapasitesinin üçte birini oluşturmaktadır. Tesis arazisinde meydana gelen sıvılaşma nedeni ile iskele duvarlarında 2-3 m'lik yanal hareket meydana gelmiş ve bu yüzden tüm bölgede ortalama 1 m'lik düşüş yaşanmıştır. Zemin göçmesinin sonuçları sadece su temini ve atık su sistemlerine zarar vermekle kalmamış, yarma-dolgu bölgelerinde sıvılaşma nedeniyle zemin hareketi ve farklı oturmalar nedeni ile telekomünikasyon ve elektrik üretim tesisleri de zarar görmüştür. Kobe şehrinde gaz dağıtım boru hattının vidalı çelik birleşimlerde kopmalar ve yerinden ayrılmalar ile oldukça büyük bir hasar gözlenmiştir (North America-Japan Workshop Report, 1997).

2.5.18. Cariaco Depremi (Venezuela) [9 Temmuz 1997, 6.9 (M)]

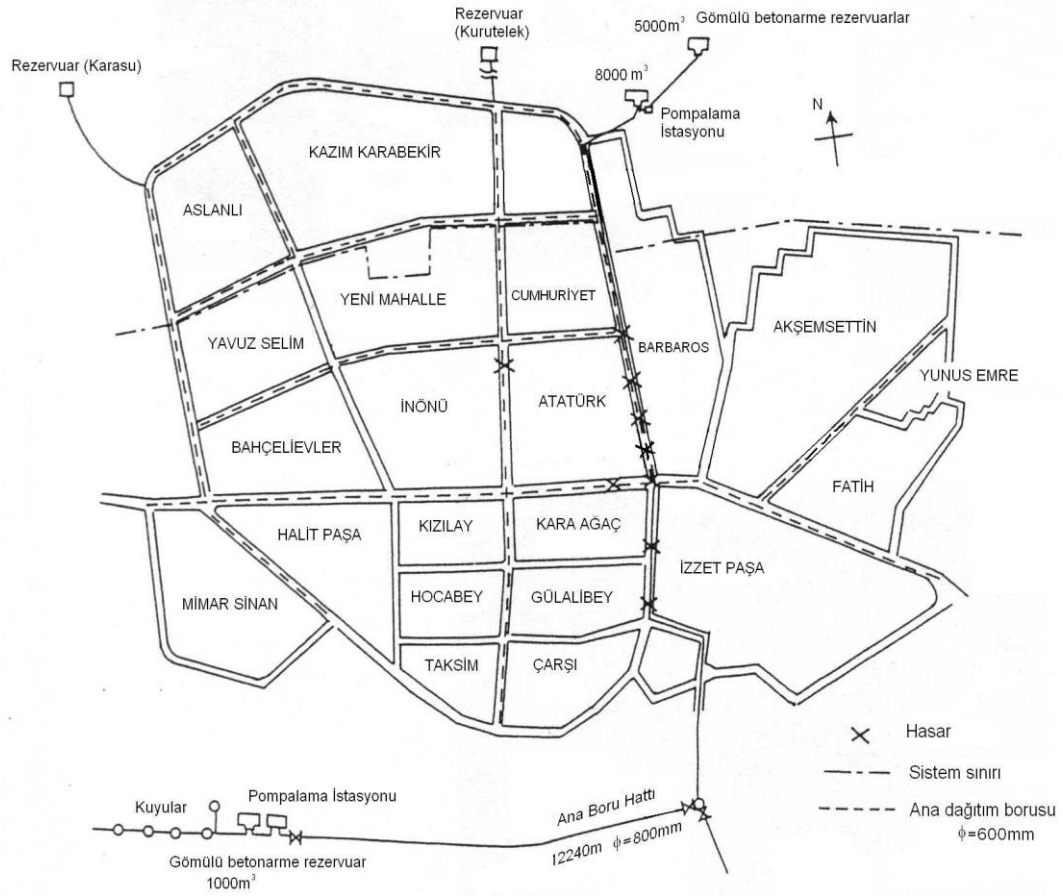
Deprem sonucunda El Pilar Fayında 50 km'lik bir kopma ile sağa doğru 40 cm'lik yanal yer değiştirme meydana gelmiştir. Gömülü borular ve atık su arıtma tesisleri hasar görmüştür. Cariaco'dan 5 km uzaklıkta fayı 30° ila 35.5° açı ile geçen bir içme suyu borusu eğilme basınç kuvvetlerinin etkisi sonucunda göçmüştür (PAHO, 1998).

2.5.19. Chi-Chi Depremi (Taiwan) [21 Eylül 1999, 7.3 (M)]

Bu deprem çok büyük fay kırılmalarına neden olmuştur. Fayın toplam uzunluğu 125 km civarında, maksimum düşey yer değiştirme ise 10 m civarındadır. Birçok bölgede su ve gaz boru hatlarında hasarlar rapor edilmiştir. Fay üzerindeki boru hatlarının, fay atımı ile oluşan kesme yüklemesine maruz kalmaları sonucunda hasar gördükleri düşünülmektedir (EDM, 2000).

2.6. Türkiye'deki Boru Hatlarının Sismik Performansları

13 Mart 1992'de merkezi Erzincan Şehri yakınlarında bulunan 6.9 büyüklüğünde (VIII (MMI)) bir deprem meydana gelmiştir. Depremin merkez üssü USGS'e göre 39.705N ve 39.549E de, odak uzaklığı ise 28 km olarak belirtilmiştir. 1992 Erzincan Depremi Hasar Raporuna (AIJ, JSCE ve BU, 1993) göre, deprem sonucunda su dağıtım hattında hasar gözlenmiştir.



Şekil 2.16 Su dağıtım hattı (AIJ, JSCE ve BU, 1993)

Erzurum'un güneyindeki kuyulardan alınan su şehrin etrafındaki haznelere pompalanıp binalara yeraltı boruları ile dağıtılmaktadır (Şekil 2.16). Derin kuyular çok az bir miktar hasara uğramış ve süratle onarılmıştır. Elektrik kaynağının çalışmaması nedeni ile deprem sonrasında üç gün boyunca su sağlanamamıştır. Daha büyük hasar borularda gerçekleşmiştir.

Dağıtım hattı daha çok 60 cm lik dökme demirden oluşmakta, ayrıca 8–12.5 cm PVC borular ve 20–25 cm asbest-çimento borular bulunmaktadır. Ana dökme demir borularda 4 adet, diğer alt kollarda 25 adet göçme saptanmıştır. Ancak bu sayılar kesin değildir, çünkü onarım çalışmasına katılan işçilerin birçoğu aralıksız çalışmış ve bu çalışmaların kaydı alınmamıştır. PVC ve asbest-çimento boruların birleşim yerlerinde kırılma gözlenmiştir. Binalara bağlanan su borularının bağlantılarındaki hasarlar onarılmadığından şehrin büyük bir kısmına 1 hafta süre ile su verilememiştir. Depremden 2 hafta sonra su hattının %70'lik bir kısmı onarılmıştır. 60 su tankı acil durum kaynağı olarak kullanılmıştır. Erzurum'da bulunan

kanalizasyon boru hattı 250 km uzunluğunda olmasına rağmen, deprem sonrasında yaklaşık %90'lık kısmında herhangi bir büyük sorun çıkmamıştır. Tanklarda ve pompalama istasyonlarında hasar gözlenmiş, fakat bu hasarlar işletimi etkilememiştir.

17 Ağustos 1999'da merkezi İzmit Şehri ve Gölcük İlçesi arasında kalan 7.4 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Depremin merkez üssü USGS'e göre 40.702N ve 29.987E, odak uzaklığı ise 17 km olarak belirtilmiştir. 1999 Kocaeli Depremi Hasar Tespit Raporuna (AIJ, JSCE ve JGS, 2001) göre gömülü borularda hasar meydana gelmiştir. Hasar gören bölgede daha çok faylanma sonucu oluşmuş kalıcı zemin yer değişmesi gözlenmiştir. Fayı geçen gömülü boru hatları ise ciddi hasara uğramıştır. Şekil 2.17'de Acısu köyündeki 28 inç çaplı su iletiminde kullanılan çelik boruların burkulması görülmektedir. Bu boru hattı ana fay çizgisini çaprazlama geçmektedir. Bu bölgenin yakınlarında bulunan kavak ağaçlarının bulunduğu alanda yapılan ölçümler sonucu 2.5 m yanıl atım olduğu saptanmıştır. Şekil 2.18'de 2 m den fazla bir düşey yer değiştirmeye neden olan ikincil bir normal fayı geçen Kavaklı'daki boru hattının kırılması görülmektedir.

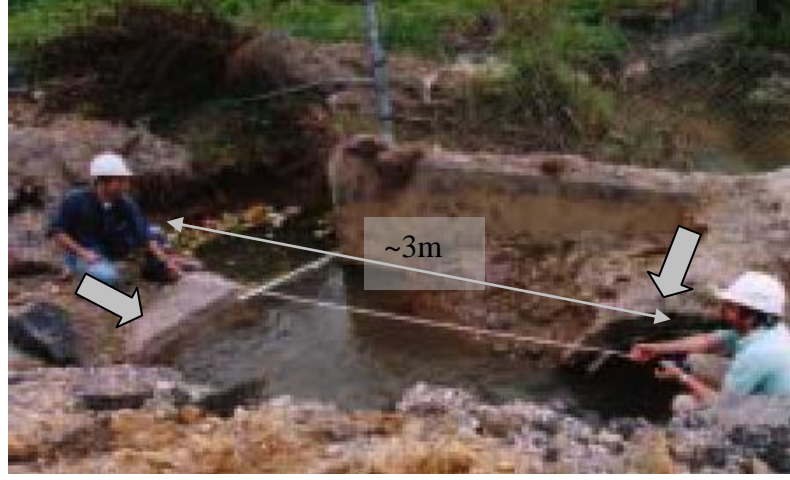


Şekil 2.17 Çelik su borusunun burkulması (AIJ, JSCE ve JGS, 2001)



Şekil 2.18 Düşey yer değiştirmeye neden olan normal fay ile kesişen boru hattının kırılması (AIJ, JSCE ve JGS, 2001)

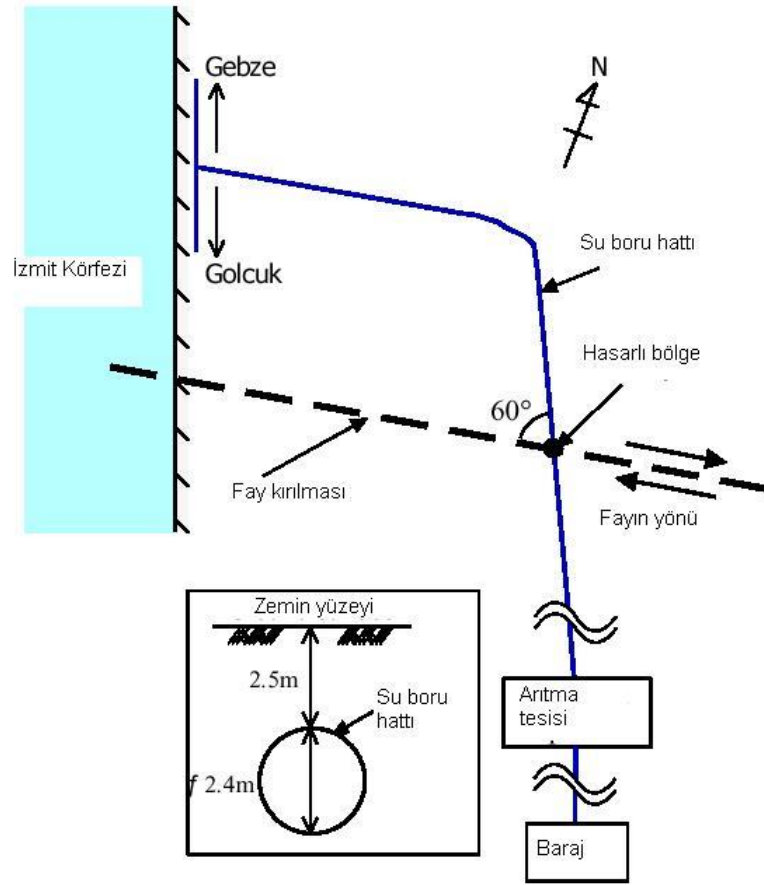
Şekil 2.19’da ise Arifiye’deki kanalizasyon borusundaki kırılma görülmektedir. Bu boru hattı ana fayı dik olarak kesmektedir ve borunun ayrılması yaklaşık 3 m dir.



Şekil 2.19 Ana fayı geçen kanalizasyon borusunun kırılması
(AIJ, JSCE ve JGS, 2001)

Kullar bölgesindeki su boru hattında 2.4 m çapındaki çelik borularda fay kırılması nedeni ile hasarlar meydana gelmiştir (Şekil 2.20).

Ciddi yapısal hasarların meydana geldiği Gölcük, Adapazarı ve İzmit’te su dağıtım tankerleri ile sağlanmıştır. Yapısal hasarların en ciddi biçimde görüldüğü bu bölgede boru hattı da çok büyük hasara uğramış ve bu yüzden yeni bir boru hattı inşa edilmiştir. Nüfusu yaklaşık 20 bin olan Sapanca Şehri suyu yaklaşık 80 m derinlikteki kuyulardan sağlamakta ve dağıtım 185 km’lik bir boru hattı ile yapılmaktaydı. Toplam uzunluğun yaklaşık %80’i asbest-çimento borudan geri kalan kısmı ise PVC borudan oluşmaktaydı. Ana boru hattını çapı 400 mm idi. 7 Eylül 1999 itibari ile toplam 300 onarım yapılmıştır. Onarım oranı kırık adedinin toplam boru uzunluğuna bölümü olarak tanımlanmıştır ve bu değer 1.62 /km’dir. Onarım işleri sonunda toplam onarım adedinin oldukça büyük bir rakama ulaşacağı düşünülmüştür, çünkü belirtilen tarihe kadar toplam onarım işlerinin %80’i tamamlanmıştır. Hasarların büyük bir çoğunluğu Sapanca gölü ve nehirler çevresinde gömülü asbest-çimento boruların bağlantılarında meydana gelmiştir. Sıvılaşma ve/veya fay hareketi sonucu oluşan zemin deformasyonunun bu bölgede oluşması, boru hasarlarının ana nedeni olarak görülmüştür.



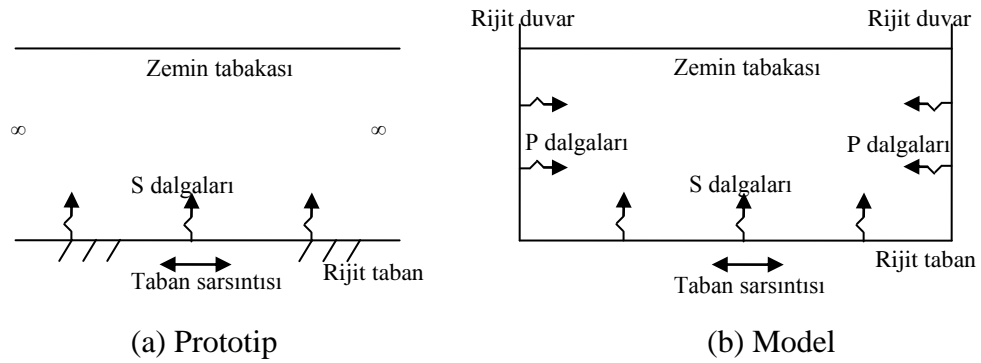
Şekil 2.20 Kullar bölgesindeki hasarlı boru hattı (Yasuda ve diğ., 2002)

Yapılarda yıkıcı hasarların oluştuğu Gölcük ve Adapazarı'nda gaz boru hattı bulunmamaktadır. Gaz boru hattı açısından en ciddi hasar İzmit şehrinde gözlenmiştir. Gaz kaçağı ise sadece Yalova'da ağır hasarlı ya da yıkılmış yapıların olduğu yerlerde saptanmıştır. Gaz boru hattı çapları 28–30 inç arasında değişen çelik borulardan oluşmaktadır. Bu borularda gaz basıncı 70 ila 20 bar arasında değişmektedir. Regülatörler ile ara geçişler arasında 6 inç çapında çelik borular, ara geçiş ile binalar arasında işletim basıncı 4 bar olan ve çapları 125–32 mm arasında değişen polietilen borular, binalarda ise işletim basıncı 300–21 mbar olan çelik borular kullanılmıştır. Deprem sonrasında 3 hafta boyunca regülatörün göçmesi dolayısı ile 1590 müşteriye gaz sağlanamamıştır.

3. DALGA YAYILIMI ETKİSİ ALTINDA ZEMİN-BORU SİSTEMİ VE ÇÖZÜMÜ

3.1. Dalga Yayılımı

Sismik dalga yayılımının modellendiği fiziksel modelleme deneylerinin başlıca zorluklarından biri, rijit bir hazne olması durumunda hazne yüzeylerinden yansıyan dalgaların problem koşullarını değiştirmesidir. Bir prototipte yatay yönde oluşan titreşim sonucunda düşey doğrultuda yayılan S dalgaları oluşmasına karşın (Şekil 3.1a), rijit bir kutu içerisinde oluşturulan bir modelde duvar ve zemin arasındaki etkileşim nedeni ile yanal sıkışma ve gevşeme oluşması sonucunda P dalgaları da meydana gelir (Şekil 3.1b). Ayrıca rijit duvarlar deprem dalgalarını yansıtmaktadır. Böylelikle bu tip bir model haznesi içerisinde dalga yayılımı P ve S dalgalarının bir kombinasyonu olacaktır.

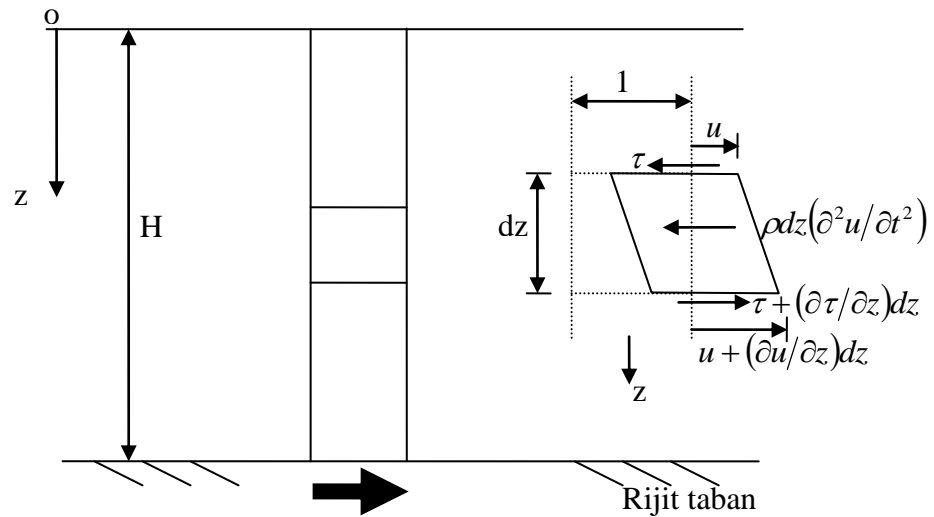


Şekil 3.1 Prototip (a) ve modelde (b) deprem dalgaları

Bu etkinin ortadan kaldırılmasına yönelik olarak, esnek veya oluşan etkiyi yutacak sınırların oluşturulmasına dair geçmişte birçok çalışma yapılmıştır. Esnek sınırlara dair ilk çalışmalar Whitman ve diğ.(1981) tarafından birbirinden ayrı alüminyum halkaların bir araya getirilmesi ile bir hazne oluşturulmasıdır, ancak bu çözümün de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Haznede tam olarak bir yanal rijitlik kontrolü sağlanamadığından tabanda oluşturulacak bir sarsıntı sonucunda halkalar arasındaki rölatif yer değiştirme numunenin bazı seviyelerinde şekil değiştirme yığılımlarının oluşmasına neden olacaktır. Haznenin iç yüzeyinin pürüzsüz oluşu, buralarda kayma gerilmelerinin oluşumunu engelleyecektir. Ayrıca dairesel şekli ve yükseklik/

uzunluk oranının düşük olması, analizi oldukça güç olan üç boyutlu bir problem meydana getirecektir (Zeng ve Schofield, 1996). Oluşacak etkiyi yutacak sınırların oluşturulması ise sınır duvarlardan yansıyan enerjiyi yutacak bir malzeme olan duxseal ile duvarların kaplanması şeklindedir (Coe ve diğ., 1985). Ancak duxsealin sürtünme ve rijitlik gibi özelliklerinin belirlenmesinin güç olması dolayısı ile duxseal ve zemin daneleri arasında oluşacak kayma gerilmeleri bilinmemektedir. Ayrıca bu tip bir sınır koşulunun uygun bir şekilde sayısal modelde tanımlanması güçlüğü de ortaya çıkmaktadır. Bu çözümlerin dışında halkaların birleştirilmesi ile oluşturulan hazne sisteminin daha gelişmiş olan laminar kutu kullanımı da önerilmektedir (Zeng ve Schofield, 1996). Bu çalışmada pleksiglass rijit bir kutu kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen rijit duvarlardan yansıma deneyde engellenememle birlikte bu etkinin deney sonuçlarını en az şekilde etkilemesi amacı ile ölçüm aletleri mümkün olduğunca kutunun orta kısmına yerleştirilmiştir.

Lineer elastik, homojen ve izotrop bir ortamda, tek doğrultudaki dalga yayılımı bir kayma kolonu üzerinde açıklanabilir. Kayma modülü G ve birim hacim ağırlığı ρ olan zeminin, serbest yüzeyden z kadar derinlikteki dz alanı üzerine etkiyen kuvvetler ve yer değiştirmeler Şekil 3.2’de görülmektedir (Miura, 2003).



Şekil 3.2 Kayma kolonunun deprem etkisi altındaki davranışı (Miura,2003)

Bu parça için kuvvet dengesi (3.1) bağıntısında yazılmıştır.

$$-\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dz + \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial z} dz \right) - \tau = 0$$

$$\therefore \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3.1)$$

τ kayma gerilmesini

$$\tau = G \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.2)$$

(3.1) bağıntısında yerine koyarsak

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.3)$$

tek boyutlu kayma dalgası yayılımının hareket denklemini elde etmiş oluruz.

Kayma dalgası (S-dalgası) hızı (3.4) bağıntısında tanımlanmıştır.

$$V = \sqrt{G/\rho} \quad (3.4)$$

(3.4) bağıntısını kullanarak hareket denklemini tekrar yazıp,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.5)$$

çözersek (3.6) bağıntısını elde etmiş oluruz.

$$u(z,t) = E\left(t + \frac{z}{V}\right) + F\left(t - \frac{z}{V}\right) \quad (3.6)$$

Burada $E(t + z/V)$ ve $F(t - z/V)$ keyfi fonksiyonlardır ve $E(t + z/V)$ geriye yayılan dalga, $F(t - z/V)$ ise ileriye yayılan dalga sonucunda oluşan yer değiştirmeyi göstermektedir.

$$\zeta = t - \frac{z}{V}, \quad \eta = t + \frac{z}{V} \quad (3.7)$$

alınarak (3.6) bağıntısı tekrar yazılması durumunda

$$u(z,t) = E(\zeta) + F(\eta) \quad (3.8)$$

kayma gerilmesi τ (3.9) bağıntısındaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}\tau(z,t) &= G \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = G \left[\frac{\partial E(t+z/V)}{\partial z} + \frac{\partial F(t-z/V)}{\partial z} \right] = G \left[\frac{\partial E(\zeta)}{\partial \zeta} + \frac{\partial F(\eta)}{\partial \eta} \right] \\ &= G \frac{1}{V} \left[\frac{\partial E(\zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial F(\eta)}{\partial \eta} \right]\end{aligned}\quad (3.9)$$

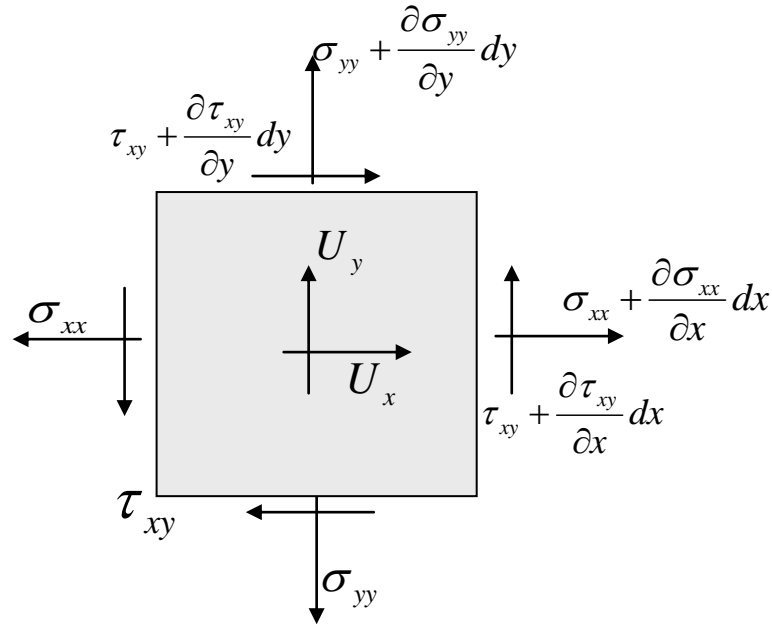
G/V katsayısı empedansa karşı gelmektedir.

$$\frac{G}{V} = \frac{\rho V^2}{V} = \rho V \quad (3.10)$$

Sonuç olarak kayma gerilmesi (3.11) bağıntısındaki halini almış olur.

$$\tau(z,t) = \rho V \left[\frac{\partial E(\zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial F(\eta)}{\partial \eta} \right] \quad (3.11)$$

Sismik dalga yayılımını nedeni ile hasar gören zemine gömülü boru problemi gerçekte üç boyutlu bir problemdir. Bu problemin düzlemde ve üç boyutlu uzayda çözümü çok sayıda araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Problem lineer elastik, homojen, izotrop ve yarı sonsuz ortamda serbest yüzeyden h kadar derinlikte bulunan, eksenî boyunca sabit çaplı bir borunun iki boyutlu problemi olarak ele alınacaktır.



Şekil 3.3 Elemanter bir parçadaki gerilmeler

Böyle bir ortamdan alınan elemanter bir parça için (Şekil 3.3) her iki doğrultuda hareket denklemi,

$$-\rho \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.12a)$$

$$-\rho \frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} + \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \quad (3.12b)$$

biçiminde yazılabilir. Gerilmeler ise (3.13) bağıntılarında şekil değiştirmeler cinsinden ifade edilmiştir.

$$\sigma_{xx} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + 2\mu\varepsilon_{xx} \quad (3.13a)$$

$$\sigma_{yy} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + 2\mu\varepsilon_{yy} \quad (3.13b)$$

$$\tau_{xy} = \mu\gamma_{xy} \quad (3.13c)$$

Burada λ ve μ Lamé sabitleri olup, μ sabiti G kayma modülü değeridir.

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.14a)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.14b)$$

Hooke yasalarındaki şekil değiştirme ifadeleri de aşağıda görüldüğü gibi yer değiştirmeler cinsinden yazılabilir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x} \quad (3.15a)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y} \quad (3.15b)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \quad (3.15c)$$

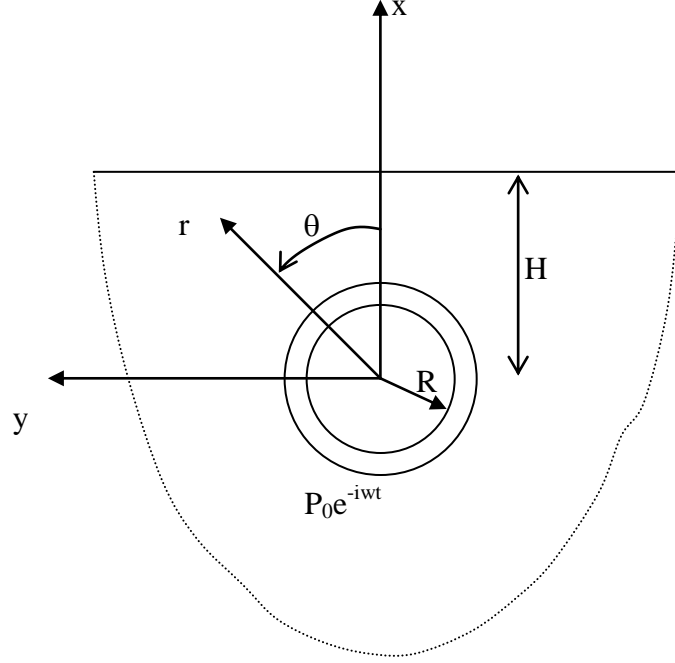
(3.13) ve (3.15) bağıntıları hareket denklemlerinde yerine konulduğunda Navier denklemleri,

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial e}{\partial x} + \mu \nabla^2 U_x = \rho \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} \quad (3.16a)$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial e}{\partial y} + \mu \nabla^2 U_y = \rho \frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} \quad (3.16b)$$

elde edilir.

Boru geometrisi nedeni ile problemin kartezyen koordinatlar yerine kutupsal koordinatlarda ifadesi daha uygun olacaktır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Kutupsal koordinatlarda düzlem şekil değiştirme problemi

Kutupsal koordinatlarda, düzlemde yer değiştirme vektörü,

$$\underline{u}^p = u_r \underline{e}_r^p + u_\theta \underline{e}_\theta^p \quad (3.17)$$

olarak yazılır. Zemin içindeki herhangi bir noktadaki yer değiştirme, harmonik fonksiyonlar cinsinden

$$U_r(r, \theta, t) = u_r(r, \theta) e^{-i\omega t} \quad (3.18a)$$

$$U_\theta(r, \theta, t) = u_\theta(r, \theta) e^{-i\omega t} \quad (3.18b)$$

ifade edilebilir. Navier denklemi ise vektörel formda

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \underline{u}^p + \mu \nabla^2 \underline{u}^p + \rho \omega^2 \underline{u}^p = 0 \quad (3.19)$$

şeklinde yazılabilir.

φ boyuna dalga, ψ enine dalga potansiyellerini göstermek üzere Navier denklemi

$$\nabla^2 \varphi + k_1^2 \varphi = 0 \quad (3.20a)$$

$$\nabla^2 \psi + k_2^2 \psi = 0 \quad (3.20b)$$

indirgenmiş dalga denklemini halini alır. Burada k_1, k_2, c_1 ve c_2

$$k_1 = \omega / c_1 \quad (3.21a)$$

$$k_2 = \omega / c_2 \quad (3.21b)$$

$$c_1 = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} \quad (3.21c)$$

$$c_2 = \sqrt{\mu / \rho} \quad (3.21d)$$

sırasıyla boyuna ve enine dalga sayısı ve hızları olarak tanımlanmaktadır. Kutupsal koordinatlarda yer değiştirme vektörü bileşenleri potansiyel fonksiyonları cinsinden

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (3.22a)$$

$$u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3.22b)$$

şeklinde yazılır.

Gerilme ifadeleri ise kutupsal koordinatlarda aşağıdaki formu alır.

$$\sigma_{rr} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} (u_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}) \quad (3.23a)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \lambda \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} (\lambda + 2\mu) (u_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}) \quad (3.23b)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\mu}{r} (r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - u_\theta + \frac{\partial u_r}{\partial \theta}) \quad (3.23c)$$

Bessel ve Hankel fonksiyonları ile serilere açılır ve problem mevcut sınır koşulları altında çözülür (Özmutlu, 2002, Wong ve diğ., 1986). Teorik olarak çözümü yapılmış olan bu problemdeki boruda oluşan gerilmeler, bu çalışmada deneysel olarak bulunması şeklinde ele alınmıştır. Deneyle ilgili detaylı bilgi, deney düzeneği ve deney değişkenleri Bölüm 4'te verilmiştir.

3.2. Zemin-Boru Sistemi için Çözüm Yöntemleri

Daha önceki bölümlerde gömülü boruların davranışına, bu konu hakkındaki yönetmeliklere, sismik olaylar karşısında arazide gözlenen hasarlara ve konu ile ilgili laboratuvar çalışmalarına yer verilmiştir. Bu incelemeler göz önüne alındığında zemin-boru sistemi davranışının zemin-yapı etkileşimi problemi olduğu görülmüştür. Bu tip araştırmaların ise deneysel çalışmalar ve analiz yöntemleri (Tablo 3.1) ile yapılabildiği bilinmektedir.

Tablo 3.1 Analiz yöntemlerinin sınıflandırılması (Miura, 2003)

Analiz Yöntemleri	Analitik Yöntemler	<ul style="list-style-type: none">• Kesin çözüm• Yaklaşık çözüm
	Yarı-Analitik Yöntemler	<ul style="list-style-type: none">• Sınır eleman yöntemi• Hibrid yöntem• İnce tabakalar yöntemi
	Ayrık Eleman Yöntemi	<ul style="list-style-type: none">• Sonlu eleman yöntemi• Sonlu farklar yöntemi• Modal kütle modeli

Bu çalışmalar sayesinde zemin profili, temel şekli, temel derinliği, komşu yapıların etkisi, temel esnekliği gibi değişkenlerin yapıların sismik tepki analizleri üzerindeki etkisini araştırmak mümkün olmaktadır. Ancak zemin-yapı sisteminin analizinde, yapının matematik modelinin kurulmasının dışında aşağıdaki tabloda verilen sayısal yaklaşımlarda da bazı basitleştirmeler, idealleştirmeler ve/veya kabuller yapılmaktadır. Bu kabullerin (Tablo 3.2) büyük kısmının zemin özelliklerindeki belirsizlikler nedeni ile yapıldığı görülmüştür.

Tablo 3.2 Matematik modelin oluşturulması ve sayısal analizin yapılmasında kullanılan kabuller (Miura, 2003)

	Yapılan Kabuller
Zemin	Zemin tabakasının idealleştirilmesi (elastik, viskoelastik, vb.) Homojen veya yatay tabaka Sönüm cinsi (Voigt, Hysteretic, vb.) Zemin sabitleri (Sönüm faktörü, Poisson oranı, vb.)
Ara yüz	Mükemmel sınırlar
Sayısal hesaplamalar	İki boyutlu veya pseudo-üç eksenli analiz Zemin tabakası veya arayüzün ayrılması Sonlu elemanlar modelinde kullanılan yapay sınırlar Non-lineer zemin için eş doğrusallaştırma

Ancak matematik model ile gerçek sistem arasında bu kabullerin yapılmasına rağmen büyük bir fark olabilir. Zemin-yapı etkileşimi deneylerinin ana amaçlarından biri de bu kabulleri kabul edilebilir sonuçlar verecek şekilde getirmektir. Deneysel

çalışmalar arazi ve laboratuvar çalışmalarını kapsamaktadır ve laboratuvarında incelenen bu sistemler ise fiziksel modelleme ile kurulmaktadır.

3.3. Fiziksel Modelleme

Zemin problemlerinin çözümünde de kullanılan fiziksel modelleme deneyleri, bir prototipin performansının belirlenmesinde, farklı parametrelerin genel bir problem üzerindeki etkilerinin araştırılmasında veya teorilerin ispatında kullanılmakta olup henüz yapıların doğrudan tasarlanmasında kullanılmamaktadır. Geoteknik mühendisliğinde ölçekli modellerin kullanımı kontrollü durumlar altında karmaşık sistemlerin modellenmesi avantajını sunmakta ve bu sistemlerde gözlenen temel mekanizmaları kavrama fırsatı sağlamaktadır. Harris ve Sabnis (1999)'e göre sarsma tablası ile gerçekleştirilen çalışmalarının başlangıcı 1920'lere dayanmaktadır. Başlangıçta hazırlanan modeller iskelet yapının etki doğrularının elde edilmesinde ve modelde oluşan deformasyonların saptanmasında kullanılmıştır.

Birçok durumda ölçekli modellemenin birebir modellemeye göre daha ekonomik bir çözüm sunacağı ortadadır. Sismik olaylar gibi prototipte istenilen zamanda ve istenilen şekilde meydana getirilemeyecek durumların modellenebilmektedir. Ölçekli modeller ile gerçekleştirilen parametre çalışmaları, vaka geçmişleri ve/veya prototip deneyleri sonucunda çok fazla verinin elde edilemediği durumlarda veri arttırma amacı ile de kullanılabilir. Ölçekli model deneyleri prototipte gözlenecek davranışın nicelik tahminlerini yapmak üzere de kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalar için ölçek ilişkilerinin kullanılması gereklidir, böylelikle gözlenen model ve prototip özellikleri arasında ilişki kurulabilir (Meymand, 1998).

Zemin özellikleri, gerilme değişimine karşı hassasiyet gösterirler. Yüksek normal gerilmeler altında hacim azalması gözlenen bir zeminde, düşük normal gerilmeler altında hacim artışı gözlenebilir. Dolayısı ile model deneylerinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, gerilme özelliği prototipe uyan modelin oluşturulmasıdır. Bu özelliğin yerçekimi alanı altında yakalanmasının zor olması nedeni ile artırılmış yerçekimi alanı altında deneyler yapılmaktadır. Bu nedenle model deneyleri yerçekimi alanı altında yapılanlar (1-g model deneyleri) ve yüksek yerçekimi ivmeleri altında yapılanlar (santrifüj deneyleri) olarak ikiye ayrılır (Kramer, 1996). 1-g model deneylerinin sıvılaşma, deprem sonrası oturma, yanal toprak basıncı

problemleri, yapay ve doğal şevlerin hareketi ve zemin-yapı etkileşimi gibi konuların araştırılmasında kullanıldığı konu ile ilgili kaynaklarda bulunmaktadır.

3.3.1. Ölçekli model benzerlik teorileri

Model deneylerinde benzerlik ve sınır koşulları büyük önem taşımaktadır. Benzerlik koşulu belirli bir ölçek kullanılarak prototip özelliklerinin modele aktarılması ile sağlanmaktadır. Model zeminin statik ve dinamik özellikleri model şevlerin ölçeğine uyumlu hale getirilmekte, fakat benzerlik koşulları model deneylerinde doğrudan uygulanamamaktadır. Wartman (1999) küçük ölçekli şev modellerinin deprem sırasındaki davranışlarını incelediği doktora çalışmasında 1-g ölçek ilişkilerini kullanarak ve geometrik ölçeklendirme faktörünü 75 alarak şev modelini oluşturmuştur. 30.48 cm yüksekliğindeki modelde ortalama drenajsız kayma mukavemeti 2.2 kN/m^2 ve kayma dalgası hızı 12.19 m/s olarak saptanmış ve ölçeklendirme ilişkileri kullanılarak modelin 2285.9 cm yüksekliğinde kayma mukavemeti 166.2 kN/m^2 ve kayma dalgası hızı 106.68 m/s olan bir prototip şevi modellediği düşünülmüştür. Ancak bu deneylerin şevlerde sismik nedenli deformasyonların mekanizmasını araştırmak üzere gerçekleştirilmesinden dolayı şev modeli tam olarak belirli bir prototipe uyacak şekilde tasarlanamadığından benzerlik koşulunu yerine getirememiştir. Bundan dolayı deney sonuçlarının model ölçeğinde değerlendirilmesi gerekmiştir.

Sınır koşulları ise model kutusuna bağlıdır, çünkü kutunun kenarları zemin hareketini engelleyebilir ve dinamik bir deneyde zeminde oluşan dalgaların yansımaya sebep olabilirler. Rijit kutuların kullanılması halinde kutunun kenarlarında ve ortasında elde edilen deney sonuçlarının farklı olması söz konudur. Buna rağmen rijit kutular kullanılarak yapılan fiziksel model deneylerinde daha doğru sonuçlar elde edilmiştir (Whitman ve Lambe, 1986). Kutunun iç duvarları, zemin ile kutu arasındaki sürtünme etkisini azaltmak amacı ile plastik örtü ile kaplanabilir. Ayrıca aletlerin kutunun orta bölgelerine yerleştirilerek ölçümlerin alınması sınır koşullarının sonuçlara etkisi azaltacaktır.

Ölçekli model ve ilgili prototip davranışı arasındaki ilişki, ölçekli model benzerlik teorileri kullanarak tanımlamıştır. Kline'in (1965) önerdiği boyutsal analiz, benzerlik teorisi ve yöneten eşitlikler yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

- Boyutsal Analiz: Fiziksel büyüklükleri içeren ve bir fiziksel fenomeni tanımlayan boyutsal olarak “homojen eşitliğin”, fiziksel büyüklüklerin kuvvetlerinin boyutsuz sonuçlarını içeren “eşitlik eşitliklerine” dönüşmesinden ibarettir. Boyutsal analiz tek başına problem çözüm biçiminin ölçek modeli uygulaması olmadan anlaşılmasında kullanılabilir.
- Benzerlik Teorisi: Sistemi kontrol eden kuvvetleri belirler, boyutsuz terimlerin oluşturulması ve eşitlenmesinde boyutsal analizi kullanır. Model ve prototip arasındaki ölçek ilişkileri “tahmin eşitlikleri” olarak da bilinir.
- Yöneten Eşitlikler Yöntemi: Analizi boyutsuz formda tanımlayan diferansiyel denklem dönüşümleri ve modeli prototip ile ilişkilendiren benzerlik değişkenlerinin oluşumunu içermektedir.

Ölçekli modeller prototip ile geometrik, kinematik, veya dinamik benzerliğe sahip olmaları ile tanımlanabilir (Langhaar, 1951).

- Geometrik Benzerlik: Model ve prototipi eş fiziksel boyutları ile tanımlar.
- Kinematik Benzerlik: Eş daneleri eş zamanlarda eş noktalarda bulunan model ve prototipi tanımlar.
- Dinamik Benzerlik: Model ve prototipin eş danelerinin eş net kuvvetler altında bulunduğunu tanımlar.

Ölçekli modeller prototip ile benzerliği farklı derecelerde sağlar, bunlar “gerçek”, “yetersiz”, “zorlanmış” olarak adlandırılır (Moncarz ve Krawinkler, 1981).

- Gerçek Model: Tüm benzerlik koşullarını sağlar.
- Yetersiz Model: Birincil özellikleri ölçeklendirmek ile birlikte ikincil etkilerin sapmasına izin verir, “tahmin eşitliklerini” tam olarak etkilemez.
- Zorlanmış Model: Benzerlik koşullarının sapmasının “tahmin eşitliklerini” zorladığı veya “tahmin eşitliklerini” koruyan başka boyutsuz sonuçlar ile zorlanmaları karşılayan durumları tanımlar.

En basit anlamı ile boyutsal analiz; herhangi bir mühendislik parametresinin temel “kütle-uzunluk-zaman” boyutlarına her üç faktör için de ölçek faktörleri kullanılarak indirgenmesini amaçlamaktadır. Örneğin elastisite modülü kuvvet/alan biriminde ve $ML^{-1}T^{-2}$ boyutlarında bir gerilme ölçüsüdür, bu yüzden kütle (μ), uzunluk (λ) ve zaman (τ) için ölçek faktörleri gerilme etkisinin model ve prototip arasındaki

ilişkisinin kurulmasını sağlar. Aynı sebepten dolayı model ve prototip arasındaki şekil değiştirme 1:1 ölçeklendirilmiştir, yani şekil değiştirme boyutsuz bir büyüklüktür. Model ve prototip malzemesinin birim hacim ağırlığı μ ve λ arasındaki oranının gösterilmesinde temeli oluşturmaktadır. Eğer $\rho_{\text{model}}/\rho_{\text{prototip}}=1$ ise o halde $\mu=\lambda^3$ olarak bulunmaktadır.

Zaman ölçek faktörü τ , atalet kuvvet oranı kullanıp, kütle oranı $\frac{\gamma_m}{\gamma_p} \lambda^3$ olarak alındığında ve bununla birlikte model ivmesinin prototip ivmesine eşit olacağı sonucu ile hesaplanabilir (alt indisler m: model, p: prototip).

$$\frac{M_m A_m}{M_p A_p} = \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \lambda^3 \frac{A_m}{A_p} \quad (3.24)$$

$$\frac{A_m}{A_p} = 1 = \frac{L_m / T_m^2}{L_p / T_p^2} = \lambda \frac{T_p^2}{T_m^2} \quad (3.25)$$

$$\frac{T_m^2}{T_p^2} = \lambda \rightarrow \tau = \sqrt{\lambda} \quad (3.26)$$

Bu yöntem kullanılarak diğer büyüklükler de μ , λ ve τ ölçek faktörleri cinsinden yazılabilir. Bu metot Clough ve Pirtz (1956) ile Seed ve Clough (1963) tarafından barajların deprem dayanımlarının incelenmesinde kullanılmıştır. Bu yöntemin bir kusuru her değişkenin ayrı ayrı hesaplanmasıdır.

Daha kapsamlı boyutsal analiz yöntemlerinden biri de Buckingham Pi Teoremidir. Belirli fiziksel büyüklükleri kapsayan herhangi bir boyutsal homojen eşitlik, boyutsuz sonuçlar grubunu kapsayan denge denklemlerine indirgenebilir. Örneğin bir fiziksel büyüklüğün çözüm denklemi

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (3.27)$$

aşağıda görüldüğü gibi de yazılabilir:

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0 \quad (3.28)$$

π terimleri X_1, X_2, \dots, X_n fiziksel büyüklüklerinin boyutsuz sonuçlarıdır. Boyutsuz elemanların sayısı m, fiziksel değişkenlerin sayısından (n) temel büyüklüklere ait

boyut sayısının (r) farkı kadardır (m=n-r). Birbirinden bağımsız Pi terimleri fiziksel değişkenlerin boyutsuz büyüklükler olarak gruplanması ile oluşturulur, tüm değişkenleri içermeli ve m terimleri birbirinden bağımsız olmalıdır. Teorik olarak bir problemde tek bir π terimleri grubu olamaz, fakat ölçekli modelleme problemlerinde doğru değişkenlerin sınıflandırılması ve π terimlerinin uygun bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. Ölçeklendirme ilişkileri model ve prototipin π terimlerinin birbirlerine eşitlenmesi ile elde edilmektedir, örneğin π_{i_m} π_{i_p} ye eşit olmalıdır. Daha önceden de belirtildiği gibi benzerlik teorisi ortaya konan problemi, sistemdeki baskın kuvvetleri temel alarak oluşturulan π terimleri ile daha mantıklı bir şekilde açıklayabilmektedir. Moncarz ve Krawinkler (1981) belirli bir ivme-zaman aralığında ölçek modelde gerilme bileşenlerinin $\sigma_{ij}(r,t)$ geçmişlerinin bulunmasında π terimlerinin oluşturulması üzerine çalışmışlar ve gerçek model kriterlerine uymak üzere Froude ve Cauchy koşulları gerçekleşmesini önermişlerdir. (3.29) bağıntısında verilen gerilme fonksiyonunda

$$\sigma = F(r, t, \rho, E, a, g, l, \sigma_o, r_o) \quad (3.29)$$

r konum vektörü, t zaman, ρ birim hacim ağırlığı, E elastisite modülü, a ivme, g yerçekimi ivmesi, l uzunluk, σ_o gerilme, r_o başlangıç konum vektörünü göstermektedir. Bu büyüklüğün Pi terimleri (3.30) bağıntısındaki gibi oluşturulur:

$$\frac{\sigma}{E} = \left(\frac{r}{l}, \frac{t}{l}, \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \frac{a}{g}, \frac{gl\rho}{E}, \frac{\sigma_o}{E}, \frac{r_o}{l} \right) \quad (3.30)$$

1-g ölçek modellemesinde, a/g boyutsuz sonucu (Froude sayısı, genellikle v^2/lg olarak gösterilir) genellikle birim değere eşit çıkmaktadır, bu da modelin özgül rijitliğinin (E/ρ) prototipinkine oranının geometrik ölçek faktörüne eşit olduğunu gösterir. Bu Cauchy koşulu olarak bilinir ve kayma dalgası hızları cinsinden de ifade edilebilir.

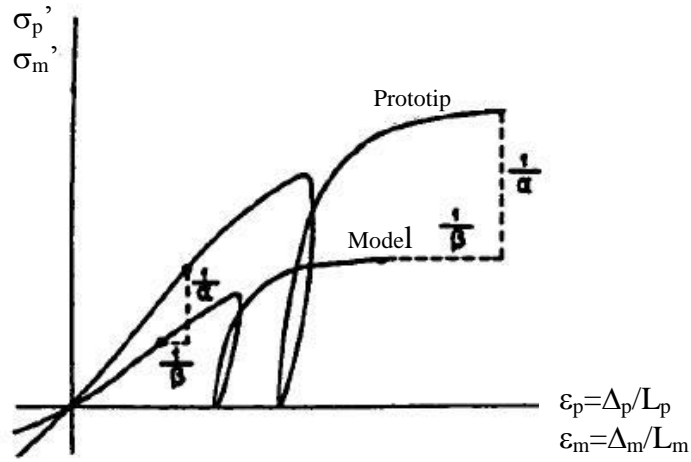
$$\frac{(v_s)_p}{(v_s)_m} = \sqrt{\lambda} \quad (3.31)$$

Ayrıca Moncarz ve Krawinkler, Cauchy koşulunun dinamik model sistemde tutan kuvvetlerin, ataletsel kuvvetler ve yerçekimi kuvvetlerinin eşzamanlı tekrarı

durumunda gerekli olduğunu belirlemiştir. Gerçek model ölçeklerinin oluşturulmasındaki zorluk, Cauchy koşulunu yakalamak üzere küçük modüle ve büyük kütle yoğunluğuna aynı anda sahip olan model malzemesinin seçilmesidir. Bunun için yapay kütle simülasyonlu ve yerçekimi etkilerinin yok sayıldığı model deneyleri gerçekleştirilmektedir.

3.3.2. Zemin mekaniğinde ölçekli model benzerlikleri

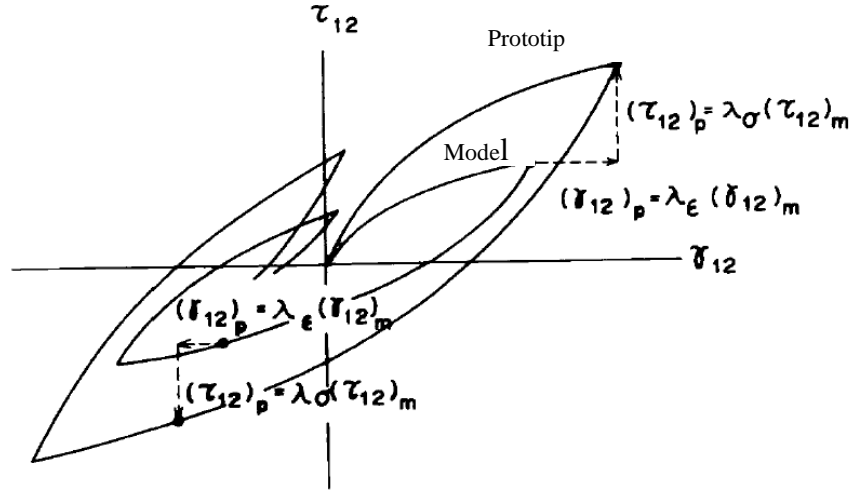
Zemin mekaniği problemleri için ölçekli modelleme sistematik olarak ilk defa Rocha (1957) tarafından tanımlanmıştır. Toplam gerilme ve efektif gerilme durumlarını ayırt ederek her iki durum için de ayrı benzerlik bağıntıları oluşturmuştur. Rocha bir modelde, prototipte oluşan farklı gerilme durumlarını dikkate almak için zeminin bünye davranışının ölçeklendirilebileceğini önererek model ve prototip arasında gerilme ve şekil değiştirmenin her ikisinde de doğrusal bir ilişki gösterdiği kabulünü yapmıştır. Bu yaklaşım Şekil 3.5'te gösterilmekte olup α gerilme ölçek faktörüne, β ise şekil değiştirme ölçek faktörüne karşı gelmektedir. Ayrıca türevleri elastik deformasyonlar ile sınırlamış ve non-linear davranışın incelenmesi durumunda analizin daha karmaşıklaşacağını belirtmiştir.



Şekil 3.5 Gerilme-şekil değiştirme ölçek faktörleri ile tanımlanmış ölçekli model davranışı (Rocha, 1957)

Roscoe (1968), çevre basıncı gibi zeminin kendi ağırlığına bağlı davranışlarının ölçekli modelde oluşturulmasının zorluğunu araştırmıştır. Rocha'nın kabullerini genişletmiş ve kritik durum zemin mekaniğine uyarlayarak yeniden hesaplamıştır. Eğer zeminin iki elemanın $e - \ln \sigma'$ grafiğindeki başlangıç durumları, kritik durum doğrusundan eşit uzaklıkta bulunuyor ise geometrik olarak benzer iki gerilme izi

gösterdiklerini ve ancak o sırada bu iki elemanın şekil değiştirme davranışının aynı olabileceğini ileri sürmektedir. Bu yaklaşım Şekil 3.6'da gösterilmiş ve sonuçlar sınırlı sayıda deney yapılarak elde edilmiştir. Ayrıca santrifüj deneylerinin bu tip araştırmalar için uygun bir alternatif olduğunu belirtmiştir.



Şekil 3.6 Kritik durum zemin mekaniğinde prototip A_1Z_1 ve model A_2Z_2 için geometrik olarak benzer gerilme izleri (Roscoe, 1968)

Iai (1989) doymuş zeminlerde bünye davranışını modelleyebilmek için, Rocha'nın çalışmasını tanjant modül yaklaşımını göz önüne alarak genişletmiştir.

Dinamik yükleme altında zemin-yapı-sıvı sistemi için ölçek ilişkileri türetmiş ve problemi tümü ile geometrik (λ), birim hacim ağırlığı (λ_ρ) ve şekil değiştirme ölçek faktörleri (λ_ε) cinsinden tanımlamıştır. Örneğin kuru kum için kuvvet dengesi (Denklem 3.9), şekil değiştirme (Denklem 3.10) ve bünye denklemlerini (Denklem 3.11) yazarak burada geçen değişkenlerin her biri için ayrı ayrı ölçek faktörlerini (Denklem 3.12) tanımlamıştır.

$$L^T \sigma + \rho g = \rho \ddot{x} \quad (3.9)$$

$$d\varepsilon = L du \quad (3.10)$$

$$d\sigma = D d\varepsilon \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} (x)_p &= \lambda(x)_m & (t)_p &= \lambda_t(t)_m & (\varepsilon)_p &= \lambda_\varepsilon(\varepsilon)_m & (\sigma)_p &= \lambda_\sigma(\sigma)_m \\ (u)_p &= \lambda_u(u)_m & (D)_p &= \lambda_D(D)_m & (\rho)_p &= \lambda_\rho(\rho)_m \end{aligned} \quad (3.12)$$

ayrıca diferansiyel denklemleri ölçeklendirebilmek üzere diferansiyel operatörler verilmiştir.

$$(L)_p = \frac{1}{\lambda}(L)_m \quad \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_p = \lambda_t \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_m \quad (3.13)$$

Birinci denklemi model (Denklem 3.14) ve prototip (Denklem 3.15a) için ayrı ayrı yazdıktan sonra, prototip için yazdığımız denklemi ölçek ilişkilerini kullanarak tekrar yazarsak

$$(L^T)_m \sigma_m + \rho_m g = \rho_m \ddot{x}_m \quad (3.14)$$

$$(L^T)_p \sigma_p + \rho_p g = \rho_p \ddot{x}_p \quad (3.15a)$$

$$\frac{1}{\lambda}(L^T)_m \lambda_\sigma \sigma_m + \lambda_\rho \rho_m g = \lambda_\rho \rho_m \frac{\lambda_u}{\lambda_t^2} \ddot{x}_m \quad (3.15b)$$

Denklem 3.15b'yi elde etmiş oluruz. Prototip için verilen eşitliğin modelde de sağlatılması için 3.14 ve 3.15b eşitliklerinin karşılaştırılması sonucu

$$\frac{\lambda_\sigma}{\lambda} = \lambda_\rho = \lambda_\rho \frac{\lambda_u}{\lambda_t^2} \rightarrow \lambda_\sigma = \lambda \lambda_\rho \text{ ve } \lambda_t = \sqrt{\lambda_u} \quad (3.16)$$

ilişkisi elde edilmiş olunur. Aynı şekilde Denklem 3.10 yazıldığında

$$d(\varepsilon)_m = L_m d(u)_m \quad (3.17)$$

$$d(\varepsilon)_p = L_p d(u)_p \quad (3.18a)$$

$$\lambda_\varepsilon d(\varepsilon)_m = \frac{1}{\lambda} L_m \lambda_u d(u)_m \quad (3.18b)$$

sonuç olarak

$$\lambda_\varepsilon = \frac{\lambda_u}{\lambda} \rightarrow \lambda_u = \lambda \lambda_\varepsilon \quad (3.19)$$

elde edilir. Benzer işlemler Denklem 3.11 için gerçekleştirildiğinde

$$\lambda_\sigma = \lambda_D \lambda_\varepsilon \quad (3.20)$$

olduğu görülecektir. Denklem 3.19, Denklem 3.16'nın ikinci kısmına yerleştirildiğinde ve Denklem 3.16'nın birinci kısmı ile Denklem 3.20 eşitlendiğinde

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda \lambda_\varepsilon} \text{ ve } \lambda_D = \frac{\lambda_\rho \lambda}{\lambda_\varepsilon} \quad (3.21)$$

elde edilecektir. Benzer şekilde yapı için kurulan denklemlerden, yapıya dair büyüklükler için de ölçek faktörlerini çıkarmak mümkündür. Sonuç olarak elde edilen tüm ölçek faktörleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Tablo 3.3'te gösterilen giriş tipi yapılar için ölçeklendirme faktörleri kazık tipi yapılar için verilmiştir. Palplanş tipi yapılar için tabloda verilen değerler λ ile bölünerek kullanılmalıdır.

Kullanılacak tipe ise limitli deformasyonun veya deformasyon yumuşaması rejiminin meydana geldiği zemin-yapı etkileşiminin oluşmasına göre karar verilir. Limitli deformasyonlu zemin-yapı etkileşimi durumlarda prototip zemin, genellikle orta sıkı-sıkı aralığındaki kumdan oluşmaktadır ve sarsma boyunca boşluk suyu basıncında çevre basıncına kadar artış görülmektedir. Zemin-yapı sisteminin deformasyonu sarsma boyunca artmaya devam etmektedir, fakat sarsmanın durması ile deformasyondaki artış da durmaktadır. Zeminin bu özelliği “çevrimsel devingenlik” olarak adlandırılmaktadır. Çevrimsel devingenlik özelliğinde şekil değiştirme sarsma boyunca artmakta, fakat hiçbir zaman “deformasyonla yumuşama” koşuluna ulaşmamaktadır. Bu durumda, kayma dalgası hızları biliniyorsa Tip I kullanılmaktadır. Kayma dalgası hızları kullanılarak λ_e hesap edilmektedir (Denklem 3.22).

$$\lambda_e = \left[\frac{\lambda}{(v_s)_p / (v_s)_m} \right] \quad (3.22)$$

Kayma dalgası hızlarının bilinmediği durumda ise $\lambda_e = \lambda^{0.5}$ kabulü yapılarak Tip II kullanılmaktadır.

Deformasyon yumuşaması rejiminin gözlemlendiği zemin-yapı etkileşimi durumunda deformasyon, şekil değiştirme için ölçeklendirme faktörünün kullanılmasına izin vermeyecek kadar büyük hale gelir. Bu durumda modelin özgül ağırlığı prototipin deformasyon yumuşaması özelliğini gösterecek şekilde uyumlu olmalıdır. Çevre gerilmeleri arasındaki farkı dikkate alabilmek için model zemin prototipe göre daha gevşek bir şekilde serilmelidir. Bu durumda Tip III ölçeklendirme faktörü kullanılır.

Tablo 3.3 Sarsma tablası deneyleri için başlıca ölçeklendirme faktörleri (Iai, 1996)

Nicelik	Ölçeklendirme Faktörü (prototip/model)			
	Genelleştirilmiş ölçeklendirme metodu	Pratikte Ölçeklendirme Faktörü		
		Tip I	Tip II	Tip III
		$\lambda_p=1$	$\lambda_\varepsilon=\lambda^{0.5}$ $\lambda_p=1$	$\lambda_\varepsilon=1$ $\lambda_p=1$
Uzunluk	λ	λ	λ	λ
Özgül Ağırlık	λ_p	1	1	1
Zaman	$(\lambda\lambda_\varepsilon^{0.5})$	$(\lambda\lambda_\varepsilon^{0.5})$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
İvme	1	1	1	1
Hız	$(\lambda\lambda_\varepsilon^{0.5})$	$(\lambda\lambda_\varepsilon^{0.5})$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Yer Değiştirme	$\lambda\lambda_\varepsilon$	$\lambda\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
Gerilme	$\lambda\lambda_p$	λ	λ	λ
Şekil Değiştirme	λ_ε	λ_ε	$\lambda^{0.5}$	1
Rijitlik	$\lambda\lambda_p/\lambda_\varepsilon$	$\lambda/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{0.5}$	λ
Geçirimlilik	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}/\lambda_p$	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Boşluk Suyu Basıncı	$\lambda\lambda_p$	λ	λ	λ
EI	$\lambda^5\lambda_p/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^5/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{4.5}$	λ^5
EA	$\lambda^3\lambda_p/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^3/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{2.5}$	λ^3
Moment	$\lambda^4\lambda_p$	λ^4	λ^4	λ^4
Kesme	$\lambda^3\lambda_p$	λ^3	λ^3	λ^3
Eksenel Gerilme	$\lambda^3\lambda_p$	λ^3	λ^3	λ^3

Sonuç olarak zemin mekaniği araştırmacılarının yaptıkları bu çalışmalar sonucunda ölçek model koşullarına zemin davranış problemleri için zeminin bünye davranış özelliklerini eklemişlerdir. Böylece sistemin farklı elastik parametrelerini basitçe modellemenin yeterli olmadığını, fakat non-lineer davranışın tamamı ile göz önünde tutulması gerektiği gerçeğini göstermektedir.

3.3.3. Genel değerlendirme

İncelenen araştırmalar modellemenin, zemin yapılarının davranışlarının kalitatif olarak incelenmesinde uzun bir süredir kullanılmakta olduğunu göstermiştir. Bir modelden kantitatif sonuçların sağlanması ise model davranışının tahmin edilen bir prototip davranışına dönüştürülmesini sağlayacak ölçek ilişkilerinin kullanılması sonucunda mümkün olabilmektedir. Temel olarak bu tip deneyler modelde, prototipte gözlenmesi beklenen gerilmelerin oluşturulması ile gerçekleştirilmektedir. Modelde gerçekleşen deformasyon ve şekil değiştirmeler kaydedilip ölçek ilişkileri kullanılarak prototip davranışı tahmin edilmektedir. Modellemenin anahtarı model ve prototip ilişkisini birbirine bağlayacak bu ölçek ilişkileridir. Zeminlerde bu ilişkilerin seçimindeki en zorlayıcı nokta, zeminin gerilme ölçeklendirilmesi ve gerilme-şekil

değiştirme ilişkisi ile ilgili bünye davranışı arasında uyumsuzluğun oluşmayacağı bir ölçek setinin seçimidir. Tüm sistemi tanımlayan yöneten eşitliklerin yazılamayacağı, boyutsal analizin veya benzerlik teorilerinin doğrudan karmaşık sisteme uygulanıp gerçek model benzerliğinin yakalanamayacağı açıktır. Pratik ölçek modelleme yaklaşımı, birincil kuvvetlerin ve sistemdeki aşamaların belirlenip modellenmesi ve aynı zamanda ikincil etkileri yok ederek yetersiz modelin sağlanmasını kapsamaktadır.

Bu çalışmada limitli deformasyonlu zemin-yapı etkileşimi incelendiğinden ve kayma dalgası hızları da bilindiğinden İai'nin (1996) tanımladığı ölçeklendirme faktörlerinden Tip I'in kullanılması uygun görülmüştür. Deneyler 1-g alanında yapıldığından model ve prototip ivmeleri birbirine eşittir ve ayrıca prototip ile aynı birim hacim ağırlığa sahip model zemini kullanıldığından birim hacim ağırlığı ölçek faktörü λ_p birim alınmaktadır.

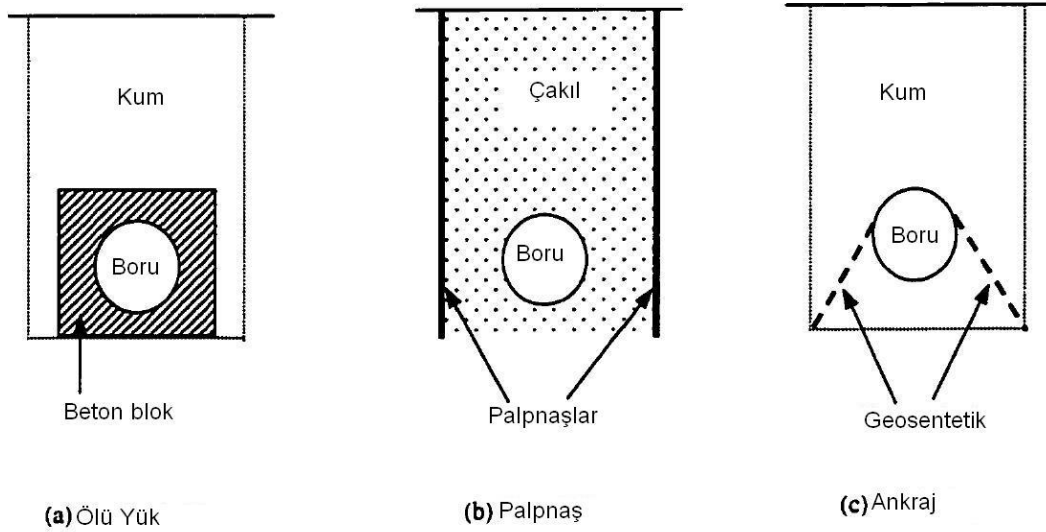
3.4. Zemine Gömülü Boruların Sismik Etkiler Altındaki Davranışına Dair Geçmişte Yapılmış Çalışmalar

Depremler sonrasında meydana gelen doğrudan (boru hatlarının kırılmalar nedeni ile servis dışı kalmaları) ve dolaylı (hatların servis dışı kalması nedeni ile yangınlara müdahale edilmemesi) hasarlar araştırmacıları yüzeydeki ve gömülü boru hatları üzerinde çalışma yapmaya yöneltmiştir. Newmark ve Hall (1975) ve Trautmann ve diğ (1985) boru hatlarının sismik performanslarını ayrıntılı biçimde incelemişlerdir. Bu çalışmalarda daha çok borunun yapısal özellikleri üzerinde durulmuş, fakat konuya geoteknik açıdan daha az yaklaşılmıştır.

Katada ve Hakuno (1981) zemine değişen miktarlarda su ilave ederek suya doygunluğun boru tepkisi üzerindeki etkilerini araştırmak üzere 50 cm veya 100 cm uzunluğunda 36 cm genişliğinde ve 25 cm yüksekliğinde rijit bir kutu içerisinde 20 cm yüksekliğinde Toyoura kumu serip sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde hem sinüzoidal dalga hem de rast gele dalga kullanılmış olup sinüzoidal dalga 6 Hz lik bir frekans altında uygulanmıştır. Sonuç olarak suya doygun olmayan zeminin sıvılaşmaya karşı daha fazla direnç göstermesine rağmen, sıvılaşma anı öncesindeki suya doygun zemine göre daha fazla tepki gösterdiği gözlenmiştir. Zeminin su muhtevastaki artış ile zemin büyütmesi azalmıştır. Borularda tepki tam sıvılaşma süresince giderek azalmıştır. Sıvılaşma sırasında ivmeölçerler tarafından

ivme tepkisinde keskin sivrilmeler kaydedilmiştir ve bu sonuca göre bu noktalarda zemin rijitliğinin azaldığı ve modelin rezonansa ulaşmış olabileceği yorumu yapılmıştır.

Sekiguchi ve Oishi (1987) sıvılaşma sırasında boru hatlarının stabilizasyonunu sağlayabilecek 3 yöntem üzerine odaklanmışlardır. 6 cm çapında bir alüminyum boru modelini, 3 m uzunluğunda 1 m genişliğinde ve 0.5 m yüksekliğinde %73 relatif sıklıkta hazırlanmış kum tabakasına 15 cm kadar gömerek deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle sadece doğal zemin denenmiş, sonrasında zemine boruyu yerleştirip borunun davranışı incelenmiştir. Ayrıca 3 farklı stabilizasyon yöntemi (boru kutunun tabanına tel ile sabitlenmişken, boru üstüne ölü yük uygulanırken ve çakıl drenler kullanılıp palplanşlar ile çevrelenmişken, Şekil 3.7) modellenerek karşılaştırılmıştır. 2 Hz frekanslı titreşimin uygulandığı bu deneylerin sonucunda stabilizasyon tekniklerinin etkili olduklarını gözlenmiştir. Tel ile sabitlenen borunun başlangıçtaki yerini koruduğu, diğer tekniklerin ise borunun yüzeye çıkmasını önlediği görülmüştür. Bunların dışında Takahashi ve Fuchida (1991) boru hattının güçlendirilmesinde genişleme derzi ve demir plakaların kullanılmasını önermişlerdir.



Şekil 3.7 Boru hatlarının stabilizasyonunu sağlayabilecek 3 yöntem (Sekiguchi ve Oishi, 1987)

Shimamura ve diğ. (1998) zeminde sıvılaşma sonucunda gömülü çelik gaz borularının yüzeye çıkma olayını araştırmak üzere bire bir ölçekli sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde orijinal zemin olarak üniform

derecelenmiş sıvılaşılabilen Gifu kumu kullanılmıştır. 5 deneyin dördünde 35 cm kalınlığında çakıl ve 5 cm kalınlığında asfalt kaplama yapılmıştır. Boru üzerine arazide kullanılan kum ile dolgu yapıldığında ve sıkıştırma işlemi karayolları yönetmeliğine göre gerçekleştirildiğinde sarsma sonucu borunun yüzeye doğru yükselmesinin 6 cm'den daha az olduğu görülmüştür. Zemin yüzeyi kaplandığında fakat dolgunun kompaksiyon yapılmadan serildiği durumda aynı hareketin uygulanması sonucu borunun yüzeye yükselme miktarı 20 cm civarındadır. Dolgu zeminin sıkıştırıldığı fakat kaplamanın yapılmadığı son deneyde borunun yüzeye çıkması 7 cm'den azdır ve bunun ana nedeninin sıkıştırılmış dolgu zeminin tamamı ile sıvılaşmaması olduğu düşünülmüştür.

Koseki ve diğ. (1998) atık su borularını çevreleyen zeminin deprem nedenli sıvılaşması sonucunda oluşan kabarma davranışını araştırmak üzere bir seri sarsma tablası deneyi yapmışlardır. Orijinal zemin sıvılaştığı sırada borunun kalıcı yukarı yönlü (uplift) yer değiştirmesi kademeli olarak artmış ve dolgu zeminin yüzeyinde rölatif kabarma gözlenmiştir. Orijinal zemin sıvılaşmadığı ve artık boşluk suyu basıncının dolgudan orijinal zemine geçişinin engellendiği sırada, nispeten büyük sarsma genliğinde boruda ani ve büyük bir yukarı yönlü yer değiştirme meydana gelmiştir. Boruların yukarı yönlü yer değiştirmesi, üst kısmın çakıllı kum ile doldurulması ile azalmış, fakat daha derindeki kısmın gevşek ince kum ile doldurulması ile artmıştır. Gömülü boru ve üstteki zemin blok üzerine etkiyen düşey kuvvetlerin eşitliğine dayanarak tanımlanan yukarı yönlü harekete karşı güvenlik sayısı F_s , 0.8 ile 1.0 aralığına indirildiğinde yukarı yönlü hareket tetiklenmektedir. Yani depremin derecesi yeterince büyük ise sıvılaşmayan zeminin bulunduğu bölgelerde bile yukarı yönlü hareketi tetikleyebilmektedir. 1994 Sanriku-Haruka-Oki depremi göz önüne alındığında, sıvılaşma nedenli boru hasarlarını azaltmak üzere dolgu malzemesi olarak iri ve iyi derecelenmiş zeminler daha çok tercih edilmesi ve ayrıca sıkıştırılmalarına da dikkat edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Sıvılaştıran kumun sismik akma göçmesi anındaki davranışını incelemek üzere Towhata ve diğ. (1999), gömülü borunun yatay olarak çekildiği ve akmaya karşı direnç kuvvetinin ölçüldüğü sarsma tablası deneylerini yapmışlardır. Deney sonuçları sarsma ivmesinin büyüklüğünün, kuru ve suya doymuş kumun davranışı üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir. Kuru kumda meydana gelen atalet kuvveti kayma gerilmesi ve akmaya karşı direncin azalmasına neden olmuştur. Kuru kumda akmaya

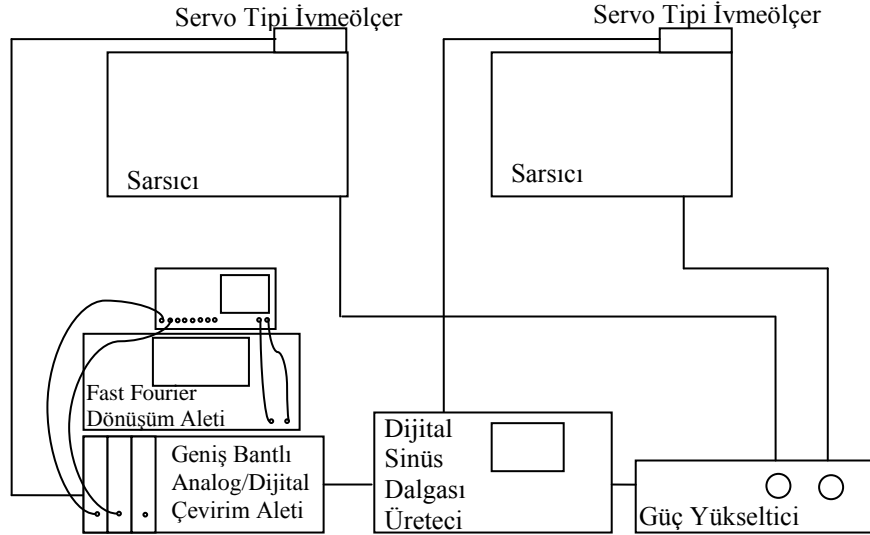
karşı direnç kuvvetli sarsma ile birlikte azalmaktadır. Sarsma daha da şiddetlendiğinde azalmanın dağılımı daha da belirginleşir. Efektif gerilmenin düşük olduğu durumlarda kumun kayma gerilmesi, sarsmanın büyüklüğü ile azalmaktadır. Kum suya doygun hale getirilerek yapılan deneylerde numune gevşek şekilde yerleştirilerek, kabarma için model deneyleri ve arazi koşulları arasındaki benzerliğin yakalanması sağlanmıştır. Suyu doygun kumlarda akmaya karşı direncin büyüklüğü boru hareketinin hızı ile değişmektedir. Bu hız bağımlılığı kum tamamen sıvılaştığı durumlarda daha büyük önem taşımaktadır. Boru hareketinin hızı arttıkça, akmaya karşı direncin arttığını belirten hız-bağımlılığı üzerinde durulmuş ve kumda gözle görülür bir viskoz davranış oluştuğu gözlenmiştir. Sarsma sırasındaki akmaya karşı direnç sarsma sonrasındaki değerden oldukça küçüktür. Ayrıca boru etrafındaki kum sıvılaşmıştır. Sarsmanın şiddetli olmasının kabarma oluşumuna zarar verdiği ve akmaya karşı direncin ihmal edilebilir noktaya geldiğini söylemek mümkündür.

Yoshizaki ve Sakanoue (2003) EPS (Expanded Poly-Styrene) malzemesinin zemin-boru hattı etkileşimini azaltıcı etkisini araştırmak üzere bire bir ölçekli deneyler gerçekleştirmişlerdir. 100 mm çaplı bir boru yol altına gömülme şartlarına uygun olarak gömülmüş ve 300 mm'lik bir hidrolik kriko kullanılarak yatay olarak zemine doğru itilmiştir. Sonrasında zemin-boru hattının yatay doğrultuda ve enine yöndeki etkileşimini araştırmak üzere reaksiyon kuvveti ölçülmüştür. Sonuçlar, EPS dolgunun zemin-boru etkileşimi üzerinde azaltıcı bir etkisinin olduğunu göstermiştir. EPS'nin dolgu olarak kullanıldığı durumlarda ölçülen reaksiyon kuvvetinin doruk değeri, sıkıştırılmış kumun dolgu olarak kullanıldığı duruma göre oldukça düşmüştür. Ayrıca kalıcı zemin şekil değiştirmesine maruz kalan dirseklerin bulunduğu gömülü boru hattında büyük şekil değiştirme davranışına karşı EPS dolgunun etkileri bir sonlu elemanlar modeli kullanılarak araştırılmıştır. Analitik sonuçlar, EPS dolgunun kalıcı zemin şekil değiştirmesine maruz kalan dirseklerin bulunduğu gömülü boru hatlarının depreme dayanımını arttırıcı etkisi olduğunu göstermiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deney Düzenegi

Deneysel çalışmalar Yapı ve Deprem Uygur Merkezi binasında gerçekleştirilmiştir. Deney düzenegini 2 adet sarsıcı, dijital sinüs dalgası üretici, geniş bantlı analog/dijital çevirim aleti, güç yükseltici, servo tipi ivmeölçer, piezoelektrik ivmeölçerler ve Fast Fourier dönüşüm aletinden oluşturmaktadır. Deney düzenegi Şekil 4.1’de görülmektedir.

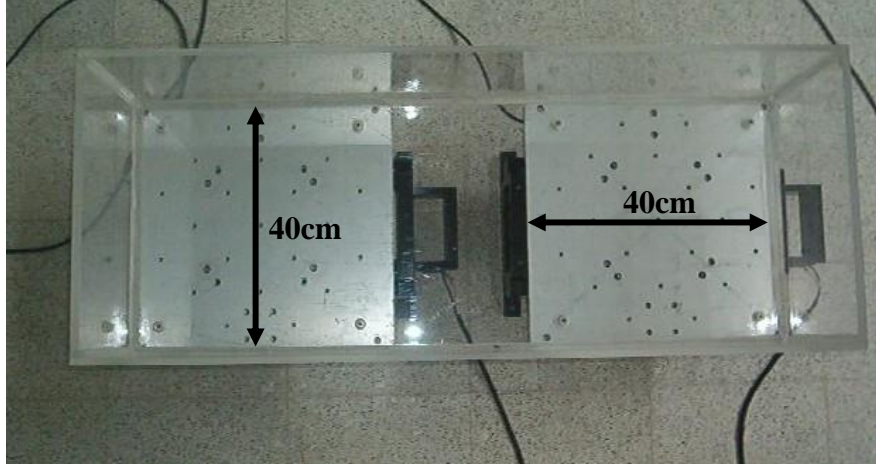


Şekil 4.1 Deney düzenegi

4.1.1. Sarsıcı

Elektrodinamik sarsıcı (Şekil 4.2) olarak adlandırılan sistem belirli bağlantılar yapılarak titreşim uyarıcı olarak da kullanılabilir. Tek serbestlik dereceli sarsıcı (2 adet) 40 cm uzunluk ve 40 cm genişliğindedir. Her bir sarsıcının taşıyabildiği en büyük kuvvet kapasitesi 245 N, yer değiştirme uçtan uca 150 mm dir. İşletim frekans aralığı 0.1 Hz–100 Hz’dir. Yatay ya da düşey konumda çalıştırılabilen sarsıcıların performansı, üzerlerindeki yük seviyesine ve konumlandırılmalarına göre değişmektedir. Yatay durumda uygulayabildiği maksimum ivme yüksüz halde 6.2 G (6076 cm/sn²) iken tam yüklü halde 2.5 G (2450 cm/sn²) dir. Bu çalışma kapsamında yapılacak deneylere uygun hale

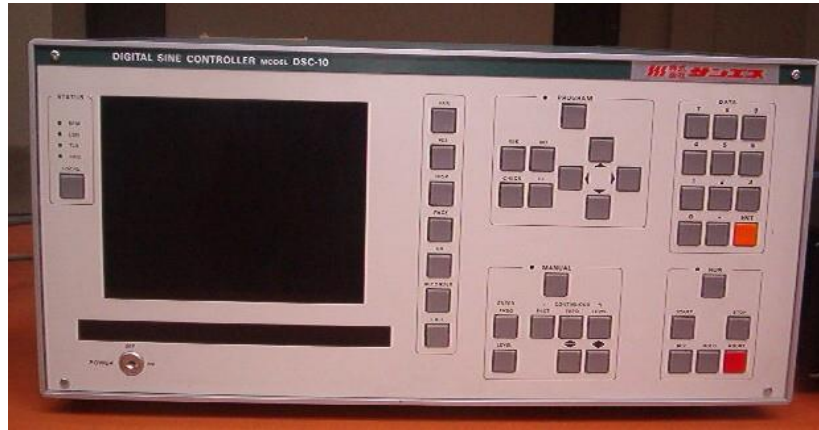
getirebilmek için sarsıcılar paralel olarak bağlanıp eş zamanlı olarak eş hareketleri yapabilmeleri sağlanmıştır. Sarsıcılar, aşağıda detayları verilen sinüs dalgası üreticisi ile harekete geçirilmektedir.



Şekil 4.2 Sarsıcı (Plan)

4.1.2. Dijital sinüs dalgası üretici

Dijital sinüs dalgası üretici (Şekil 4.3) sarsma ünitesine 0.1 Hz – 10000 Hz (10 kHz) frekans aralığında akım yollar. 20 V luk akımlar yollamak sureti ile sinüs dalgasının frekansı manuel olarak ayarlanıp istenilen değere getirilebilmektedir. Sarsıcıyı harekete geçirmek için yolladığı sinüzoidal akımların genliği en fazla ± 10 V olabilmektedir. Alet manuel ve iki program yardımı ile dalga üretebilmektedir. Ayrıca frekans tarama ve genlik programlarında da çalıştırılması mümkündür. Dijital sinüs dalgası üretici doğrudan sarsma ünitesine bağlı olmayıp güç yükselticiye bağlıdır.



Şekil 4.3 Dijital sinüs dalgası üretici

4.1.3. Güç yükseltici

Güç yükseltici (Şekil 4.4) elektromanyetik sarsıcıların eş ya da zıt yönlü hareket ettirilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Dijital sinüs dalgası üreticisinden gelen akımı yükseltmekte ve gelen akımı ikiye bölerek sarsma ünitelerinin her ikisinin de eş zamanlı olarak aynı sinüs dalgaları ile hareket etmelerini sağlamaktadır. İki ayrı sinüs dalgası üreticisi olması durumunda sarsma üniteleri, ayrı ayrı bağlantı kurularak çalıştırılır.



Şekil 4.4 Güç yükseltici

4.1.4. Geniş bantlı analog/dijital çevirici

Geniş bantlı titreşim ölçme aleti (Şekil 4.5) farklı amaçlara yönelik olarak geniş frekans aralığındaki titreşimlerin ölçülmesi için geliştirilmiştir. Örneğin düşük frekanslı olayların incelendiği mimari ve inşaat mühendisliği problemlerinden yüksek frekanslı olayların incelendiği makina problemlerine kadar birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Bu alete, piezoelektrik ivmeölçerler ve servo tipi ivmeölçerlerin her ikisi de bağlanabilir. Ölçme araçlarından gelen analog sinyalleri dijital hale dönüştürür. Alette 3 adet giriş kanalı bulunmaktadır. Piezoelektrik sensör (10 – 99.9PC/G) ile servo ivme sensör (3V/G) bu alete uyan sensörlerdir. İvme, hız, yer değiştirme olmak üzere 3 farklı modda ölçüm alınabilmektedir. Frekans aralığı ivme için 0.5 – 5000 Hz, hız için 1 – 1000 Hz, yer değiştirme için 1 – 100 Hz değerlerindedir. Ölçüm aralığı piezoelektrik ivmeölçer (10 – 99.9 PC/G) kullanıldığında ivme için 0.01 – 316 G, hız için 0.1 – 3160 cm/sn, yer değiştirme için 0.01 – 316 cm^{P-P} ve servo tipi ivmeölçer kullanıldığında ivme için 0.001 – 31.6 G, hız için 0.01 – 316 cm/sn, yer değiştirme için 0.001 – 31.6 cm^{P-P} değerlerindedir. 40 Hz ve 400 Hz için filtre özelliği mevcuttur.



Şekil 4.5 Geniş bantlı analog/dijital çevirici

4.1.5. Fast Fourier dönüşüm aleti

İki kanallı (Multi-Purpose FFT Analyzer CF 5220, Şekil 4.6) Fast Fourier dönüşüm aleti analog/dijital dönüştürme ve verileri toplama amaçları ile de kullanılabilen bir alettir. Veri toplama işlemi sırasında zaman ve/veya frekans alanında çalışabilmesi sayesinde titreşim dalgalarının genlik ve frekans değerlerinin anında bulunmasına yardımcı olur. Veri toplama aralığı isteğe bağlı olarak (1Hz – 1kHz) seçilebilir. İkiye ayrılabilen ekranında zaman ve frekans alanında verileri görüntülemek mümkündür. Genlik değerleri volt cinsinden okunur. Kullanılan titreşim ölçme cihazının hassaslığına göre bir katsayı ile çarpılarak gerçek genlik değerleri hesaplanabilir.



Şekil 4.6 Fast Fourier dönüşüm aleti

4.1.6. Servo tipi ivmeölçer

Servo tipi ivmeölçer (Şekil 4.7), $\pm 19.6 \text{ m/sn}^2$ ivme ölçüm aralığında $3 \text{ V} / 9.8 \text{ m/s}^2$ hassaslık ile ölçüm yapmaktadır. Yerleştirilen doğrultudaki ivme değerlerini doğrultudan bağımsız olarak ölçmektedir. İvmeölçer çevresel koşullara karşı hassasiyet göstermektedir. Bu açıdan deney sırasında ortam sıcaklığı, nem sarsıntı gibi çevresel değişimlerin belli değerleri aşım aşmadığı kontrol edilmelidir. İzin verilebilir sıcaklık aralığı $-40-80 \text{ }^\circ\text{C}$, maksimum vibrasyon 200 m/s^2 (DC – 1000 Hz)

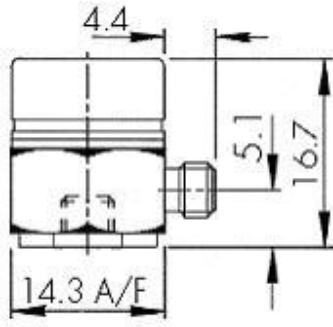
ve izin verilebilir şokun maksimum değeri 100 m/s^2 (10ms atım) aşmamasına dikkat edilmelidir. Neme karşı dayanımı ise epoksi ile kaplanarak sağlanabilir.



Şekil 4.7 Servo tipi ivmeölçer

4.1.7. Piezo-elektrik ivmeölçer

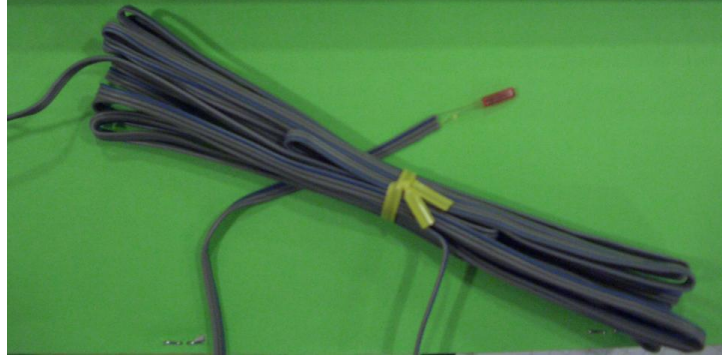
Hassaslığı $25 - 40 \text{ pC/g}$ arasında değişen ve her biri 17 g ağırlığında 3 adet piezo-elektrik ivmeölçer (Şekil 4.8) kullanılmıştır. İvmeölçerlerin rezonans frekansı 28 kHz 'dir. $-50 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında ölçüm yapabilen ivmeölçerlerin bu sıcaklıklardaki ölçüm hassaslığı sırası ile $-\%5$ ve $\%15$ 'tir.



Şekil 4.8 Piezo-elektrik ivmeölçer

4.1.8. Strain-gauge

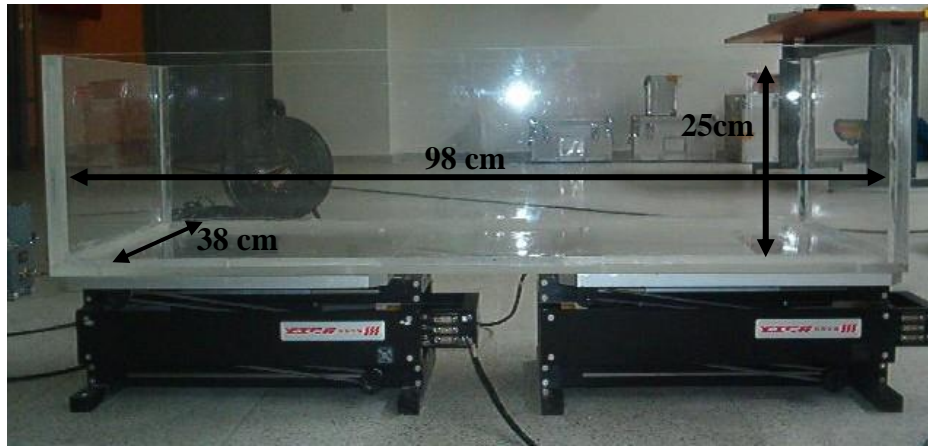
Strain-gaugeler (Şekil 4.9) lineer elastik sınırlar içinde şekil değiştirmeleri ölçerek gerilme değişimlerini bulmamıza yardımcı olan ölçüm aletlerinden biridir. Direnç değişimlerini başlangıç direncine oranlayarak şekil değiştirmeleri bulmamızı sağlarlar. $-20 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında ölçüm yapabilmektedirler. Ölçebildikleri şekil değiştirme limiti $\%2$ 'dir.



Şekil 4.9 Strain-gauge

4.1.9. Model haznesi

Model haznesi (Şekil 4.10), 1 cm et kalınlığında 2 adet 25x40 cm, 2 adet 25x100 cm ve 1 adet 40x100 cm pleksiglass malzemeden hazırlanan plakaların bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Haznenin iç boyutları, plakaların et kalınlıkları nedeni ile 38x98x25 cm şeklindedir. Sızdırmazlık sağlanması için plakalar birleştirilirken silikon kullanılmıştır ve ayrıca hazne içine su doldurularak bekletildiğinde sızdırma yapmadığı da görülmüştür.

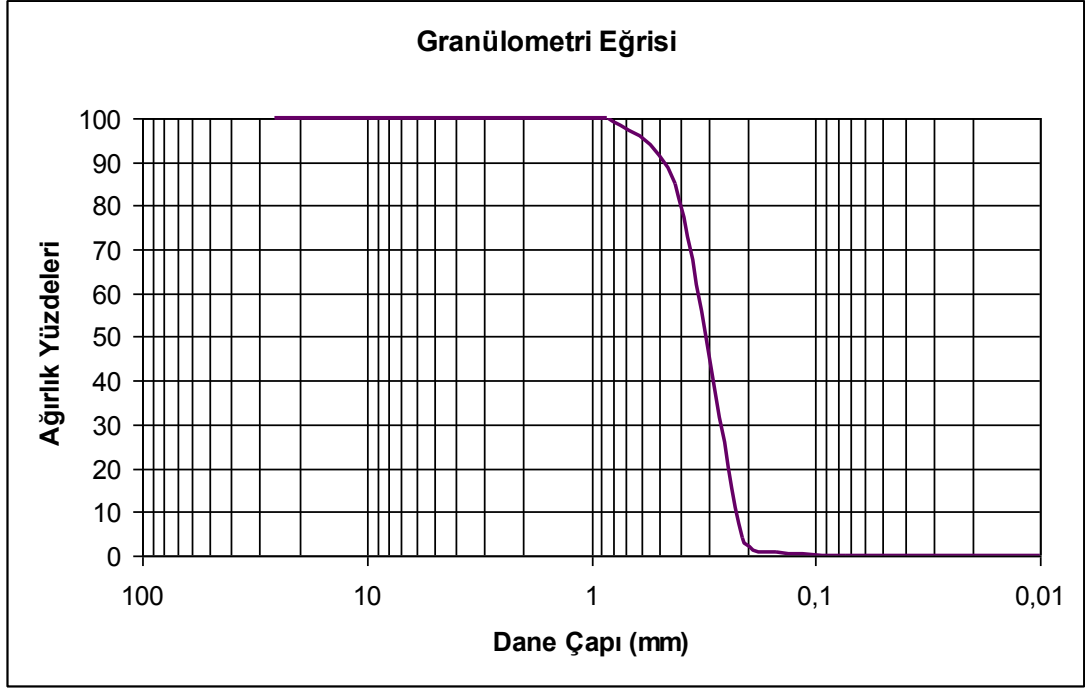


Şekil 4.10 Model haznesi

4.1.10. Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri

4.1.10.1. Zemin malzemesi

Model malzemesinin mühendislik özelliklerini tanımlamak üzere elek analizi, su muhtevası, piknometre ile birim hacim ağırlık, rölatif sıklık ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 4.1'de verilmiştir. Yapılan elek analizi (Şekil 4.11) sonucuna göre numunenin üniform orta kum olduğu saptanmıştır.



Tablo 4.1 Model zeminin özellikleri

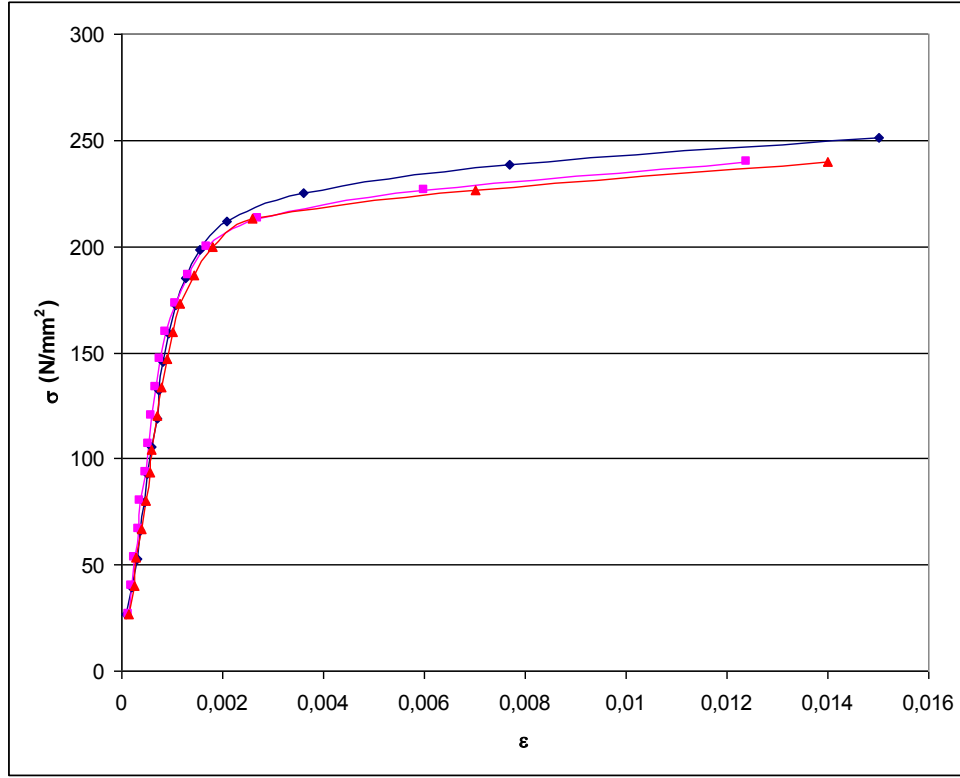
D_{10}	0.21 mm	γ_{\min}	1.36 g/cm ³
D_{30}	0.24 mm	γ_{\max}	1.56 g/cm ³
D_{60}	0.31 mm	e_{\min}	0.72
γ_s	2.68 g/cm ³	e_{\max}	0.97
γ_n	1.44 g/cm ³	e_n	0.86
ϕ	30°	D_r	%44

4.1.10.2. Boru malzemesi

Boru malzemesi için çeşitli alternatifler (çelik, plastik, bakır) denenmiştir. Ancak numunelerin rijit özellik göstermesinden dolayı 0.183 mm et kalınlığında sac malzemesi kıvrılarak model boru oluşturulmuştur. Teneke sacdan hazırlanan numune üzerinde çekme dayanımı (Şekil 4.13) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına (Şekil 4.14) göre malzemenin akma dayanımının 218 N/mm², kopma dayanımının 312 N/mm², boyuna uzamasının %14 ve elastisite modülünün 160000 N/mm² olduğu belirlenmiştir. Çelik borunun çapı 3.6 cm dir.



Şekil 4.13. Çekme deneyi sonrası numuneler



Şekil 4.14. Çekme deneyi sonuçları

1 mm et kalınlığındaki kartona alüminyum folyo yapıştırılıp kıvrılarak 2.5 cm çapında boru numunesi elde edilmiştir. Ayrıca özel üretim pipetler de deneylerde kullanıştır. 0.8 cm çapındaki bu pipetlerin akma dayanımının 28 N/mm^2 , boyuna uzamasının akmada %14 ve elastisite modülünün 1150 N/mm^2 olduğu bilinmektedir.

4.2. Deneyler

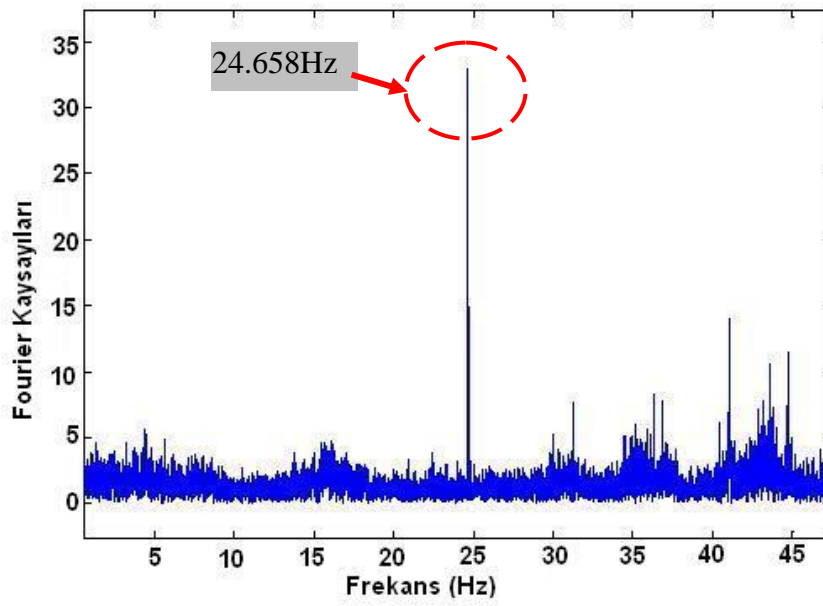
Sarsıcının taşıma kapasitesi göz önünde tutularak kum zeminin hazne içerisine 10 cm yükseklikte serilmesi uygun görülmüştür. Kum zemin yağmurlama tekniği kullanılarak 20 cm yükseklikten huni yardımı ile serilmiştir (Şekil 4.15). Numune serildikten sonra mikrotremor cihazları kullanılarak zeminin doğal periyodu belirlenmiştir (Şekil 4.16). Küçük titreşimlerin ölçülmesi işleminde kullanılan mikrotremor cihazları hazne içerisine yağmurlama tekniği ile 10 cm kum tabakası serildikten sonra serbest yüzeye yerleştirilmiş ve kayıtlar alınmıştır. MATLAB[®] programında yazılan Fast Fourier dönüşüm programı yardımı ile alınan kayıtlar analiz edilmiştir. Şekil 4.17'de verilen grafikten de görülebileceği gibi alınan kaydın serbest titreşim frekansı 24.658 Hz olarak bulunmuştur. Bu değer tüm sistemin serbest titreşim frekansına karşı gelmektedir. Hazne boyutunun yeterince büyük olmaması nedeni ile tüm sistemin frekansı elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Yağmurlama ile numunenin serilmesi ve ivmeölçerlerin yerleştirilmesi



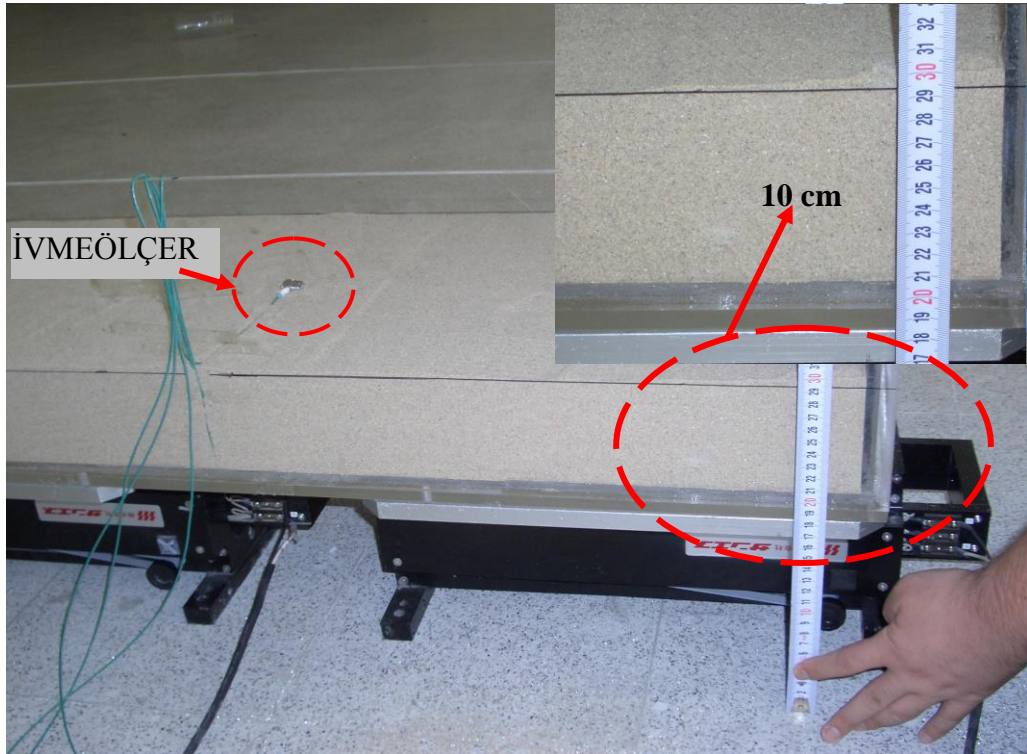
Şekil 4.16. Mikrotremor cihazı ile zeminin serbest titreşiminin ölçümü



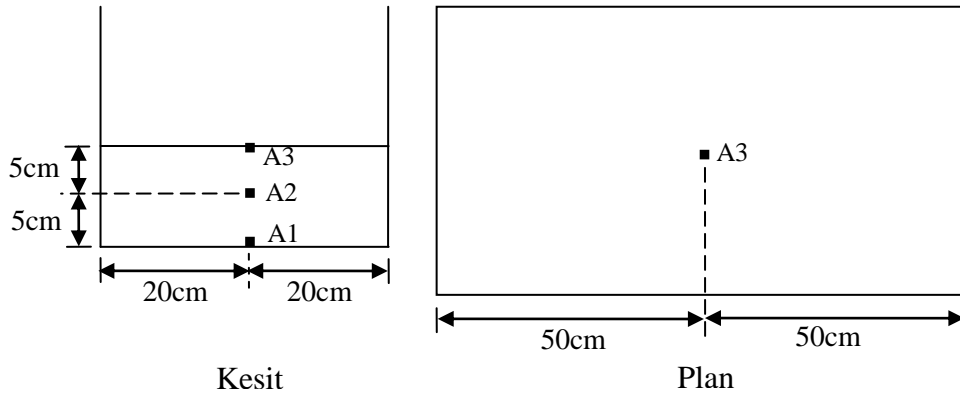
Şekil 4.17. Sistemin serbest titreşimi

4.2.1. Derinlik etkisinin saptanması ile ilgili yapılan deneyler

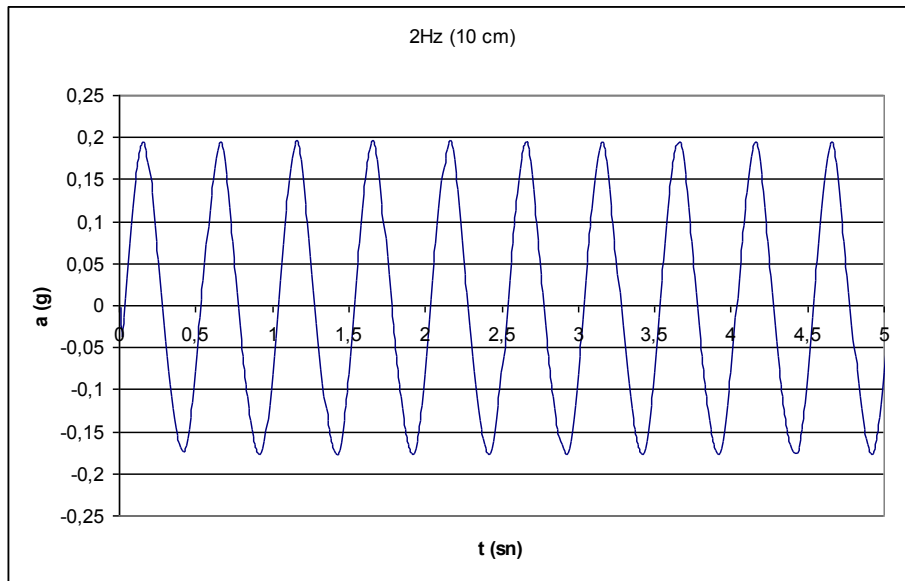
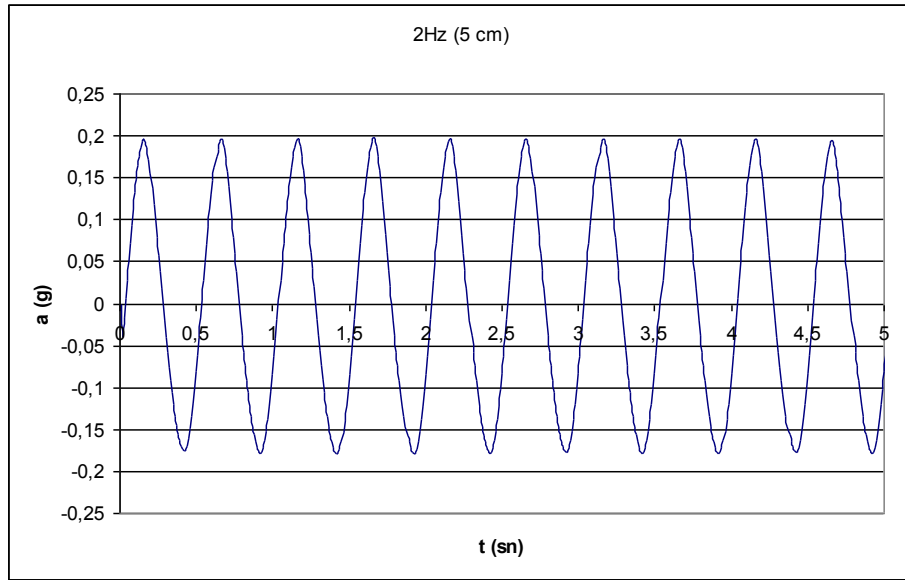
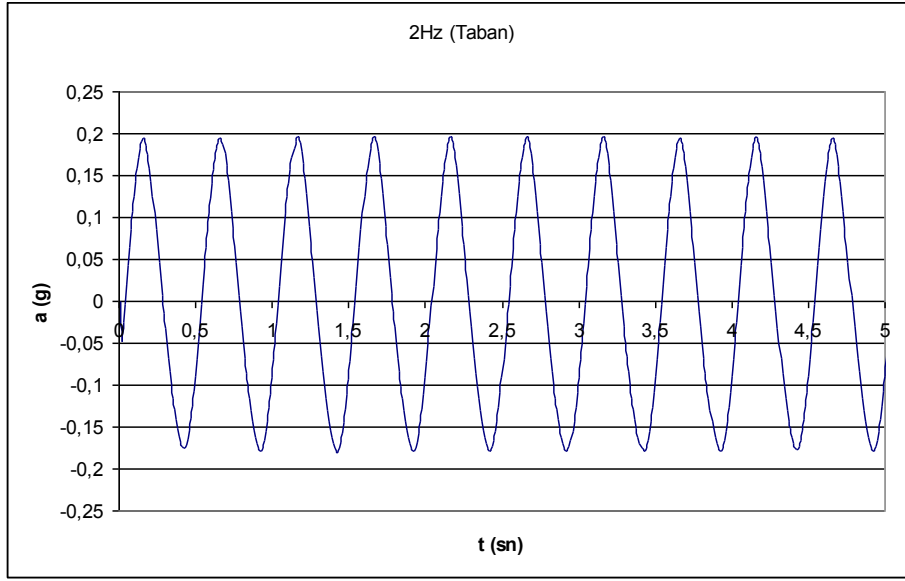
Derinlik etkisini saptamak üzere hazne içerisine 10 cm yükseklikte serilen zemin numunesinde (Şekil 4.18) farklı sismik hareketler altına ivme kayıtları alınmıştır. Piezo-elektrik ivmeölçerlerin yerleşim planı Şekil 4.19’da verilmektedir. Aynı noktada farklı derinliklere yerleştirilen bu ivmeölçerler ile hareketin frekansı (2 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 10 Hz) ve ivme değeri (0.1g ve 0.2g) değiştirilerek ivme kayıtları alınmıştır. Rezonans etkisinin deney sonuçlarını etkilememesi için deneyler, zeminin doğal periyodunun altındaki frekans değerlerinden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.18. 10 cm yükseklikte serilmiş zemin numunesi



Şekil 4.19. İvmeölçerlerin yerleşimi (Kesit ve plan)

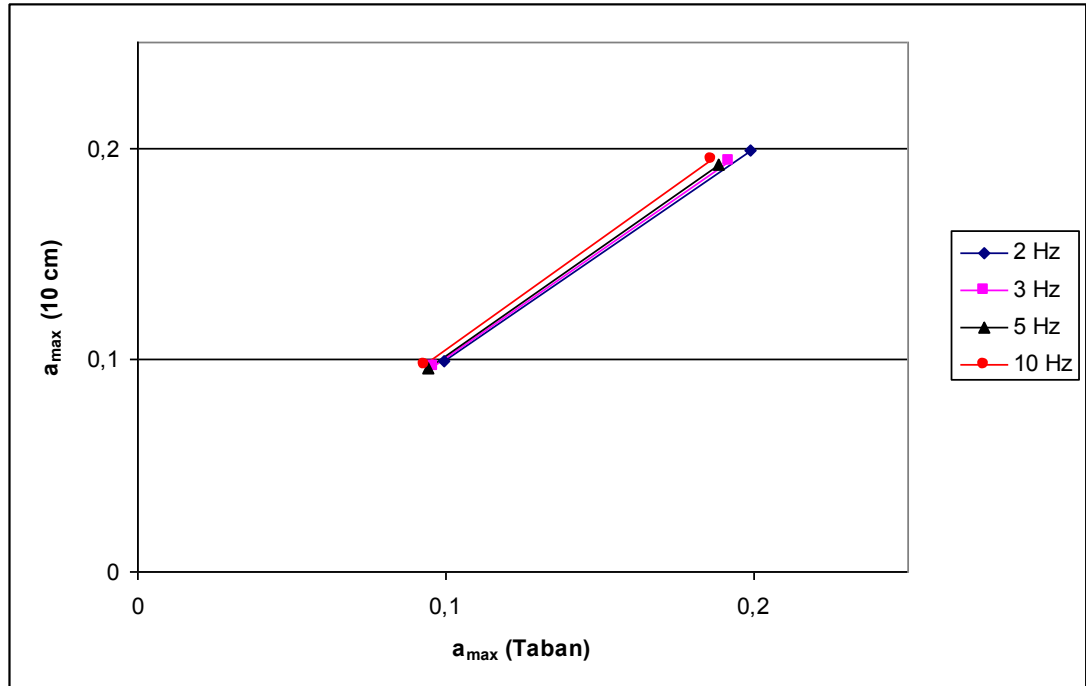


Şekil 4.20. Tabana, 5 cm ve 10 cm derinliğe yerleştirilen ivmeölçerlerden alınan ivme kayıtları

2 Hz frekans ve 0.2g ivme değerinde gerçekleştirilen deneyin sonuçları Şekil 4.20’de verilmekte olup diğer frekans ve ivme değerlerinde alınan ivme kayıtları Ek A’ da verilmiştir. Tüm kayıtlardan elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de özetlenerek Şekil 4.21’de grafiğe dönüştürülmüştür. Tablo 4.2 ve Şekil 4.21’den de görülebileceği gibi 10 cm derinlikte hazne içerisine serilen kum tabakasında herhangi bir zemin büyütmesi değeri gözlenmemiştir. Sarsıcının getirdiği kısıtlamalar nedeni ile 10 cm derinliğinde serilebilen zemin tabakasında büyütme olması beklenmemiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında dalga yayılımı sonucunda boruda meydana gelecek Şekil değiştirmeler üzerinde derinlik etkisinin incelenemeyeceği grlmştir.

Tablo 4.2. Farklı frekanslar ve derinliklerde alınan ivme kayıtları

		Taban	5 cm	10 cm	Taban	5 cm	10 cm
2 Hz	a_{max}	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10
	a_{min}	-0,18	-0,18	-0,18	-0,09	-0,09	-0,09
3 Hz	a_{max}	0,19	0,20	0,19	0,10	0,10	0,10
	a_{min}	-0,19	-0,20	-0,19	-0,10	-0,10	-0,10
5 Hz	a_{max}	0,19	0,20	0,19	0,09	0,10	0,10
	a_{min}	-0,19	-0,20	-0,19	-0,09	-0,10	-0,10
10 Hz	a_{max}	0,19	0,20	0,20	0,09	0,10	0,10
	a_{min}	-0,18	-0,19	-0,19	-0,09	-0,09	-0,09



Şekil 4.21. Tabanda ve 10 cm derinlikte maksimum ivme değerleri

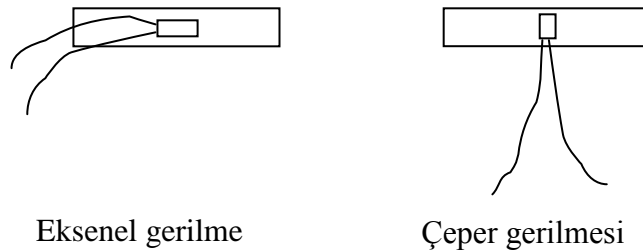
4.2.2. Boruda meydana gelen şekil-değişikliklerin saptanması ile ilgili yapılan deneyler

Deneyler sırasında üç farklı malzemeden yapılmış olan boru kullanılması amaçlanmıştır. Plastik, çelik ve kartondan yapılmış olan borularda (Şekil 4.22) gerilme-şekil değiştirme değerleri bulunmaya çalışılmıştır. Ancak şekil değiştirmeleri ölçen strain-gauge'lerin plastikle uyumlu olmaması nedeni ile bu borularla yapılan deneylerde elde edilen deney sonuçları kullanılamamıştır. Karton üzerinde de strain-gauge'ler uyum sağlayamamıştır. Karton üzerine yapıştırılan alüminyum yapraklarının üzerine yerleştirilen strain-gauge'lerden alınan sonuçlar burada sunulmuştur. Sonuç olarak başlangıçta düşünülen 3 farklı malzeme değil, çelik ve karton-alüminyum boruların deney sonuçları burada verilmektedir.



Şekil 4.22. Çelik, karton-folyo, pipet borular üzerine yapıştırılmış strain-gaugeler

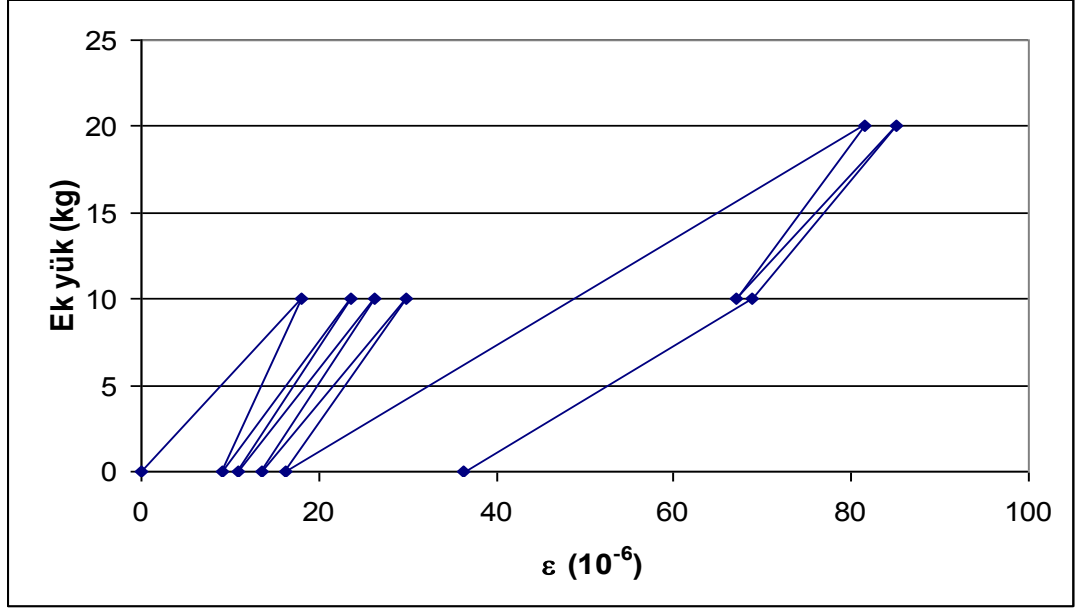
Boruda meydana gelen aksel ve çeper gerilmelerini kaydetmek üzere strain-gaugelerin yerleşim planı Şekil 4.23'te verilmektedir.



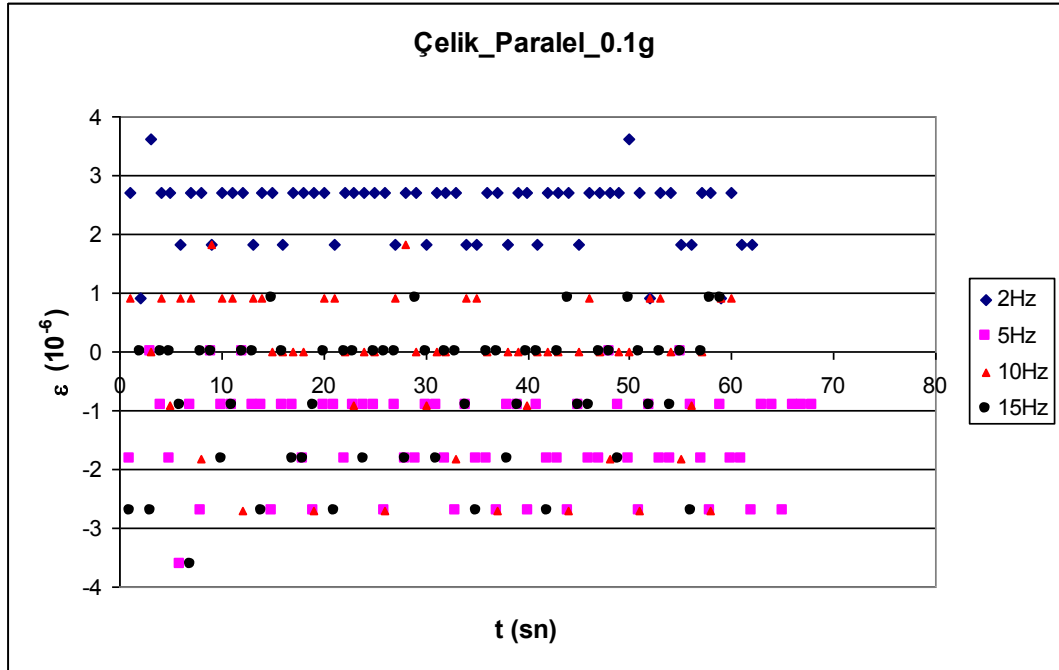
Şekil 4.23. Aksel ve çeper gerilmelerini kaydetmek üzere strain-gaugelerin boru üzerine yerleşimi

Boru yerleştirildikten sonra statik halde 10 kg ve 20 kg ek yüklemeler yapılarak şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Yükleme-boşaltmalara karşı gelen borudaki şekil

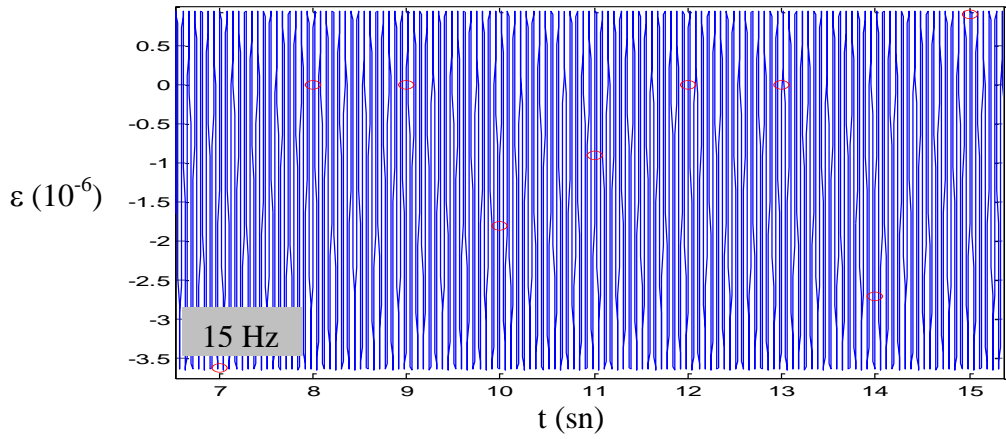
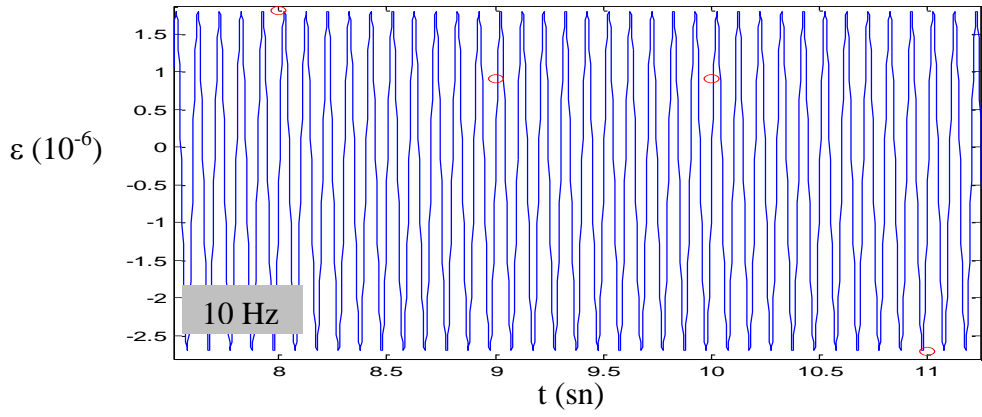
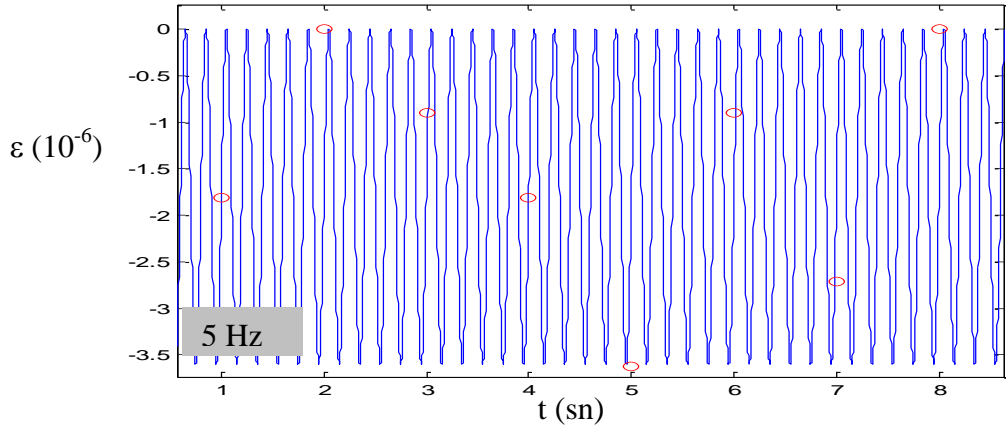
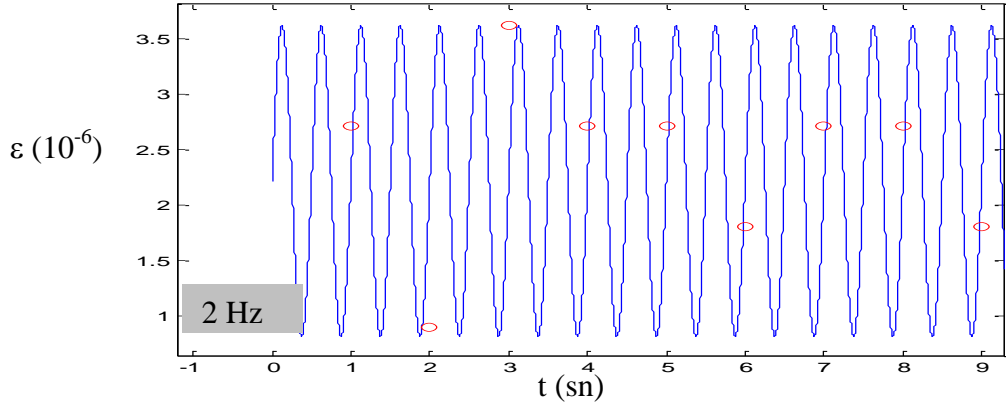
değişiklikler Şekil 4.24'teki grafikte verilmektedir. 10 kg ek yükün konulduğu ilk çevrim sonrasında yapılan boşaltmada borudaki şekil değişikliğinin büyük kısmının kaldığı, diğer çevrimlerden sonra ise şekil değiştirme değerlerinin geri döndüğü gözlenmiştir. Benzer şekilde 20 kg ek yüke çıkıldığında da aynı durum gözlenmiştir.



Şekil 4.24. Ek yüklemelere karşı gelen şekil değişiklikleri



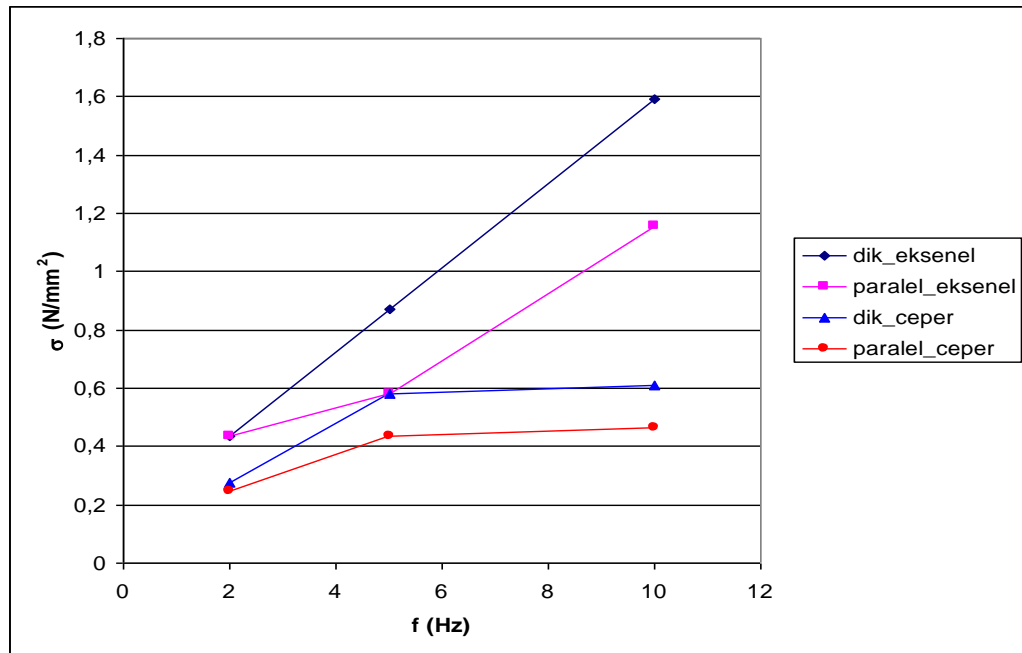
Şekil 4.25. Çelik borunun dalga yayılım yönüne paralel yerleştirildiği durumda 0.1g ivme altında borudaki şekil değiştirme



Şekil 4.26. Çelik borunun konumu dalga yayılım yönüne paralelken 0.1g ivme altında 2 Hz, 5Hz, 10 Hz ve 15 Hz frekanslarda şekil değıştirme değeri

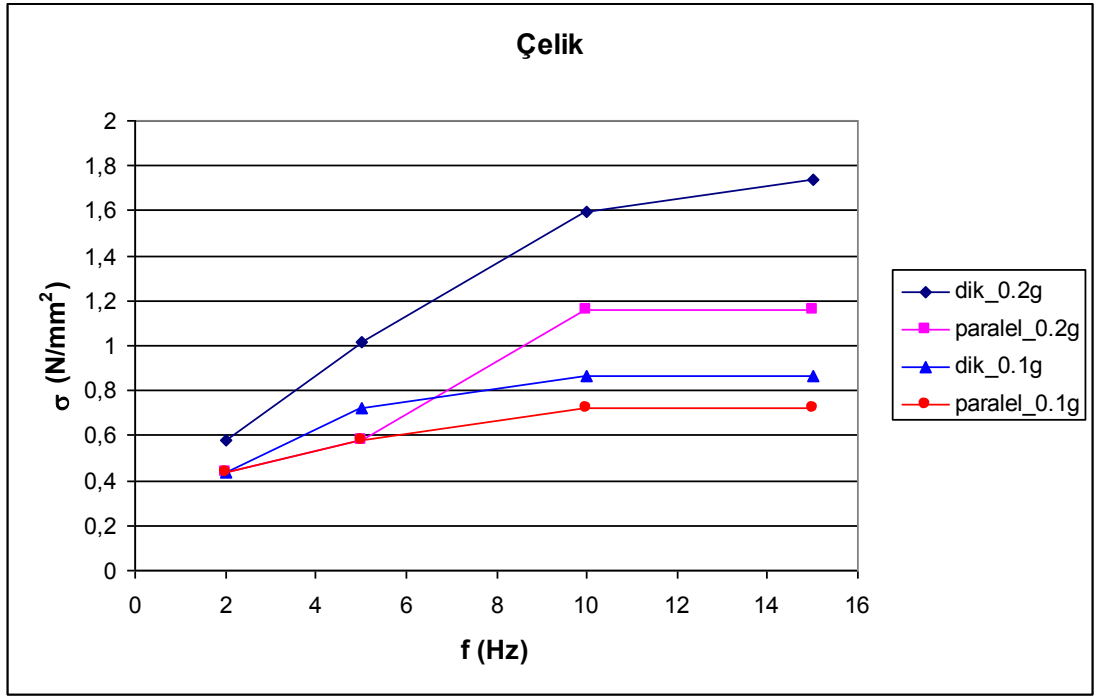
2 Hz, 5 Hz ve 10 Hz frekanslarında ve 0.1g ve 0.2g ivme değerlerinde sarsılan haznede boruda meydana gelen şekil değiştirmeler kaydedilip kayıtlar EK B’de verilmiştir. Bu kayıtlardan 0.1g ivme değeri ve değişen frekanslar altında borunun dalga yayılımı yönüne paralel yerleştirildiği durumda çelik boruda elde edilen şekil değiştirmeler Şekil 4.25’te verilemektedir. Data logger’ ın data toplama aralığının 1 sn altına düşürülmemesi nedeni ile kayıtlar 1 Hz’ de toplanmıştır. Şekil 4.25’te verilen kayıtların, hareketin verildiği frekans ile aynı frekansta toplanması halinde elde edilebilecek data kaydı Şekil 4.26’da verilmektedir. 1 Hz’ de toplanan kayıtlardan elde edilen maksimum ve minimum değerler sinüzoidal fonksiyonun pik değerleri olarak alınıp bu grafikler elde edilmiştir.

Deney parametrelerinden bir diğeri de boru ekseninin yönünün boru şekil değiştirmesine etkisidir. Dalga yayılım yönüne göre borunun konumu değiştirilerek yapılan deneylerin sonucu Şekil 4.27’de verilmektedir. Bu grafik borunun dalga yayılımı yönüne göre konumu değiştirilerek farklı frekans değerlerinde elde edilen eksenel ve çeper gerilme değerlerini ifade etmektedir. Borunun dalga yayılımı doğrultusuna göre dik yerleştirildiği durumda, paralel yerleştirildiği duruma göre daha büyük gerilme değerleri elde edilmiştir. Ayrıca frekans değişimi ile eksenel ve çeper gerilmeleri arasında doğru orantı bulunmaktadır. Bu artışın eksenel gerilmelerde çeper gerilmelerine oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Çeper gerilmeleri 5 Hz’ den büyük frekans değerlerinde azalan eğimle artmaktadır.



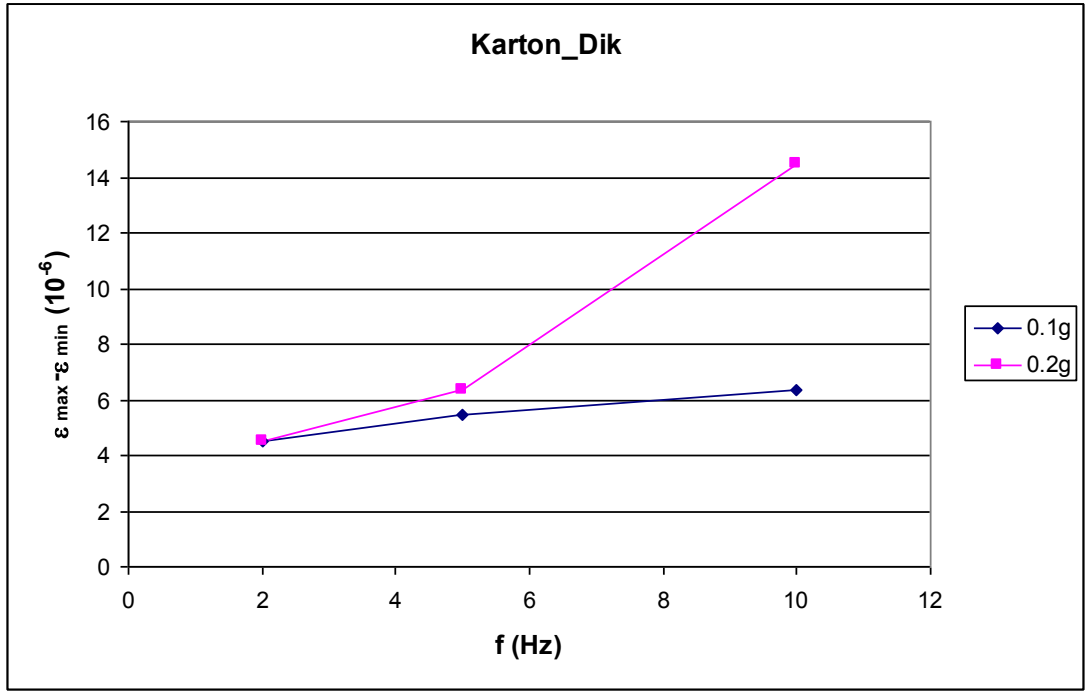
Şekil 4.27. Eksenel ve çeper gerilmeleri-frekans değişimine yön etkisi

Sismik hareketin ivme değerinin gerilmeler üzerindeki etkisi karton ve elik borularda araştırılmıştır. elik borularda elde edilen kayıtlar Şekil 4.28' de verilmektedir. İvme değerinin artması ile borunun dalga yayılım yönüne paralel ve dik yerleştirildiği konumların her ikisinde de gerilme değerlerinde artış gözlenmiştir. 0.2g ivme değeri altında yapılan deneylerde frekansın artması ile birlikte eksenel gerilmelerde gözlenen artış miktarı daha fazla iken, 0.1g ivme değeri altında yapılan deneylerde bu artışın daha düşük olduğu gözlenmiştir. Her iki ivme değerinde de 10 Hz frekans değerinden sonra azalan eğimle artış devam etmiştir.



Şekil 4.28. elik boruda eksenel gerilme-frekans değişimine ivmenin etkisi

Karton borunun boyunun kısa olması nedeni ile paralel yerleştirilmesi durumunda borunun hazne kenarlarına sabitlenmesi mümkün olmadığından bu numune üzerinde deneyler sadece borunun dalga yayılım yönüne dik yerleştirilmesi durumunda gerçekleştirilmiştir. Karton üzerine alüminyum yaprakları yapıştırılarak oluşturulan boru numunesinin elastisite modülü belirlenmediğinden alınan kayıtlar Şekil değiştirme değerleri olarak verilmiştir. Bu deneylerde de ivme değerinin artırılması sonucunda Şekil değiştirme değerlerinde artış gözlenmiştir (Şekil 4.29). 0.2g ivme değeri altında frekansların artması ile birlikte Şekil değiştirmeler artan eğimle artmıştır, 0.1g ivme değeri altında ise azalan eğimle artış gözlenmiştir.



Şekil 4.29. Karton boruda şekil değiştirme-frekans değişimine ivmenin etkisi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada zemine gömülü boru hatlarının sismik etkiler altındaki davranışını incelemek üzere model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Konu hakkındaki çalışmalar, deprem raporları ve çeşitli ülke yönetmelikleri incelendiğinde sismik hareket sonucu boruda oluşan şekil değiştirmenin

- ana kayanın derinliğine
- yüzey tabakasının doğal periyoduna
- yüzey tabakasındaki kayma dalgası hızına
- sismik hareketin dalga boyuna
- borunun gömülme derinliğine

bağlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle sismik hareketin frekansı ve ivme değeri, borunun dalga yayılım yönüne göre konumu ve gömülme derinliği değiştirilerek boruda meydana gelen şekil değiştirmelerdeki değişimin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın ilk bölümünde literatürde konu ile ilgili çeşitli kaynaklardan yapılan derleme sunulmuştur. Boru hattı tasarımı, borunun rijit ya da esnek olmasına göre yapılmaktadır. Türk yönetmeliklerine bakıldığında TSE şartnamelerinde boruların yüklenmesi, taşınması ve depolanması gibi konulara öncelikli olarak yer verildiği, ayrıca borunun yerleştirileceği hendeğin ve yapılacak dolgunun özellikleri üzerinde durulduğu görülmüştür. “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” te ise boru hatları kapsam dışında tutulmuştur. Kısaca ülkemizde zemine gömülü boru hatlarının depreme dayanıklı tasarımına dair herhangi bir şartname bulunmamaktadır. Boru hatları ile ilgili kurum ve kuruluşlar ise Amerikan veya Japon yönetmeliklerini kullanmaktadır. Genel olarak Amerikan ve Japon yönetmeliklerinde boru hatlarının depreme dayanıklı tasarımının, sismik etkiler sonunda zeminde meydana gelen şekil değiştirmenin boruda oluşturacağı şekil değiştirme miktarının hesaplanması ile yapıldığı görülmüştür. Bu bölümde ayrıca dalga yayılımı teorisi ele alınmıştır. Problem öncelikle lineer elastik, homojen,

izotrop ve yarı sonsuz ortamda serbest yüzeyden h kadar derinlikte bulunan, eksenî boyunca sabit çaplı bir borunun iki boyutlu problemi olarak ele alınmış, daha sonra kutupsal koordinatlarda çözülmüştür. Fiziksel modelleme ve ölçeklendirme ilişkileri açıklanarak, geçmişte yapılmış çalışmalar özetlenmiştir.

İkinci bölümde zemin endeks özellikleri belirlenen kum içerisinde çeşitli boru numunelerinin yerleştirilmesi ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kayıtlar verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda,

1. Elek analizi sonucunda numunenin yaklaşık %99 kum ve %1 silt+kilden malzemeden oluştuğu ve numunenin üniform orta kum olduğu saptanmıştır. $\gamma_{\min} = 1.36 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_{\max} = 1.56 \text{ g/cm}^3$, $e_{\min} = 0.72$ ve $e_{\max} = 0.97$ olan numunenin rölatif sıklığı $D_r = \%44$ ve kayma mukavemeti açısı 30° olarak bulunmuştur. Dane birim hacim ağırlığı 2.68 g/cm^3 olan numunenin doğal birim hacim ağırlığı ise 1.44 g/cm^3 tür.

2. Sac malzemeden kıvrılarak oluşturulan 0.183 mm et kalınlığındaki boru malzemenin akma dayanımının 218 N/mm^2 , kopma dayanımının 312 N/mm^2 , boyuna uzamasının %14 ve elastisite modülünün 160000 N/mm^2 olduğu belirlenmiştir.

3. Farklı derinliklere yerleştirilen ivmeölçerler ile sinüzoidal hareketin frekans ve ivme değerleri değiştirilerek kayıtlar alınmıştır. Alınan kayıtlara göre 10 cm derinlik için herhangi bir zemin büyütmesi değeri gözlenmemiştir. Bu nedenle dalga yayılımı sonucunda boruda meydana gelecek şekil değiştirmeler üzerinde derinlik etkisi incelenememiştir.

4. Dalga yayılım yönüne göre borunun konumu değiştirildiğinde, eksenel ve çeper boru gerilmeleri farklılık göstermektedir. Hareket yönüne paralel yerleştirilen borularda, dik yerleştirilen borular üzerindeki gerilmeden daha küçük değerler oluşmaktadır.

5. İvme değerlerinin artması sonucunda, çelik boruda ve karton üzerine alüminyum folyo sarılarak yapılan deneylerin her ikisinde de gerilme değerlerinde artış gözlenmiştir.

6. Frekans değerindeki artış, borudaki eksenel ve çeper gerilmelerinin de artmasına neden olmaktadır. Eksenel gerilme değerlerinde bu artış daha fazla görülmektedir.

Elde edilen bu sonuçlara göre ileride yapılacak çalışmalarda bir prototip üzerinde özellikle yön etkisinin araştırılması önerilmektedir. İvmeölçerler ve strain-gaugeler kullanılarak aletlendirilecek bir boru prototipi araziye şartnamelerde belirtilen hendek, dolgu ve kaplama özellikleri dikkate alınarak yerleştirildikten sonra dinamitle patlatma ya da ağır iş makinelerinin çalıştırılması sonucu oluşturulacak sismik dalgaların etkisi borunun doğrultusu değiştirilerek incelenebileceği düşünülmektedir. Bunlara ek olarak bu çalışmada verilen dalga yayılımı problemini teorisi ile deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasına da gidilebilir. Ayrıca bu çalışmada incelenen Amerikan ve Japon yönetmelikleri de göz önüne alınarak boru hatlarının depreme dayanıklı tasarımına dair bir yönetmeliğin ülkemiz şartlarına uygun olarak oluşturulmasına gidilebilir.

KAYNAKLAR

American Lifelines Alliance, 2001. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipes, by partnership FEMA&ASCE.

Architectural Institute of Japan, Japan Society of Civil Engineers and Bogazici University, 1993. Damage report on 1992 Erzincan earthquake, Turkey.

Architectural Institute of Japan, Japan Society of Civil Engineers and the Japanese Geotechnical Society, 2001. Report on the damage investigation of the 1999 Kocaeli earthquake in Turkey.

ASCE-25 Task Committee on Earthquake Safety Issues for Gas Systems, 2002. Improving Natural Gas Safety in Earthquakes, California Seismic Safety Commission, SSC-02-03, State of California, Gray Davis Governor.

Balkaya, M., 2002. Zeminde gömülü boruların davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bardet, J.P. and Davis, C.A., 1997. Seismic analysis of flexible buried structures, *Seismic Behavior of Ground and Geotechnical Structures*, ed. Seco e Pinto, Balkema, 163-171.

Clough, R. and Pirtz, D., 1956. Earthquake resistance of rock fill dams, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, **82** (2), 1-26.

Coe, C. J., Prevost, J. H. and Scanlan R. H., 1985. Dynamic stress wave reflection/attenuation: earthquake simulation in centrifuge soil models, *Journal of Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, **13**, 109-128.

Datta, T. K., 1999. Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review, *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, **192**, 271-284.

Erdik, M., 1999. Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) earthquakes, 22-30

Eidinger, J., 1998. Lifelines, water distribution system in the Loma Prieta earthquake, Performance of the built environment-lifelines, *US Geological Survey Professional Paper 1552-A*, ed. Schiff, pp. A63-A83.

G&E Engineering Systems Inc., 2001. Seismic fragility formulations for water systems, Web site report, pp. 27-59.

- Harris, H.G. and Sabnis, G.**, 1999. Structural modeling and experimental techniques, 2nd edition, CRC Press LLC, Florida.
- Howard, A.**, 1996. Pipeline Installation: a manual for construction of buried pipe, Relativity Pub., Lakewood.
- Iai, S.**, 1989. Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, *Soils and Foundations*, JSSMFE, 29 (1), 105-118.
- Isenberg, J.**, 1978. Seismic performance of underground water pipelines in the southeast San Fernando Valley in the 1971 San Fernando earthquake, *Grant Report No. 8*, Weidlinger Associates, New York.
- Isenberg, J.**, 1979. Role of corrosion in water pipeline performance in three U.S. earthquakes, *Proceedings of Second US National Conference on Earthquake Engineering*, Stanford, California.
- Isenberg, J. and Taylor, C. E.**, 1984. Performance of water and sewer lifelines in the May 2, 1983 Coalinga California Earthquake, *Lifeline Earthquake Engineering, Performance, Design and Construction*, ASCE, New York.
- Japan Gas Association**, 2000. Recommended practices for earthquake-resistant design of gas pipelines, Earthquake resistant design codes in Japan, Earthquake Engineering Committee Japan Society of Civil Engineers, Waco Co., Japan, pp. 6-1 – 6-29.
- Katada, T. and Hakuno, M.**, 1981. Experimental analysis on dynamic behavior of underground structures in the liquefaction process, *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers*, 380, 1-10.
- Kline, S.**, 1965. Similitude and Approximation Theory, McGraw-Hill, New York.
- Koseki, J., Matsuo, O. and Tanaka, S.**, 1998. Uplift of sewer pipes caused by earthquake-induced liquefaction of surrounding soil, *Soils and Foundations*, Vol 38, No 3, 75-87.
- Kramer, S.L.**, 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Langhaar, H.**, 1951. Dimensional analysis and theory of models, John Wiley and Sons, New York.
- Meymand, P.J.**, 1998. Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay, *PhD Thesis*, University of California, Berkeley.
- Miura, K.**, 2003. Dynamic soil-structure interaction, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Lecture Note.

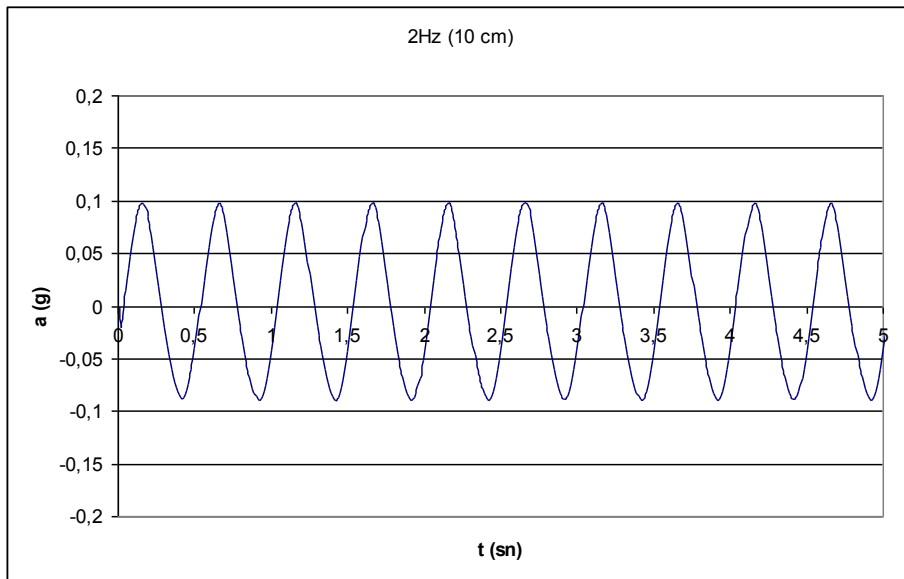
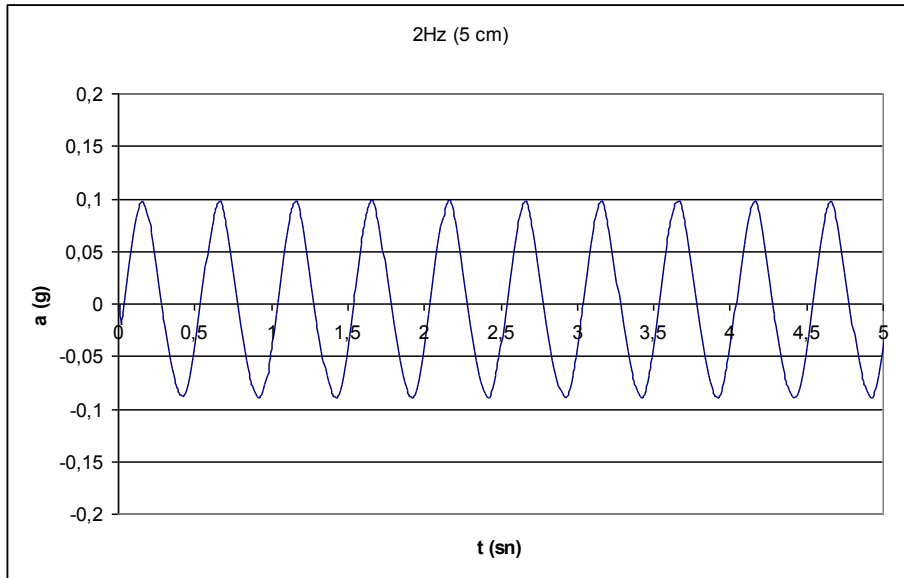
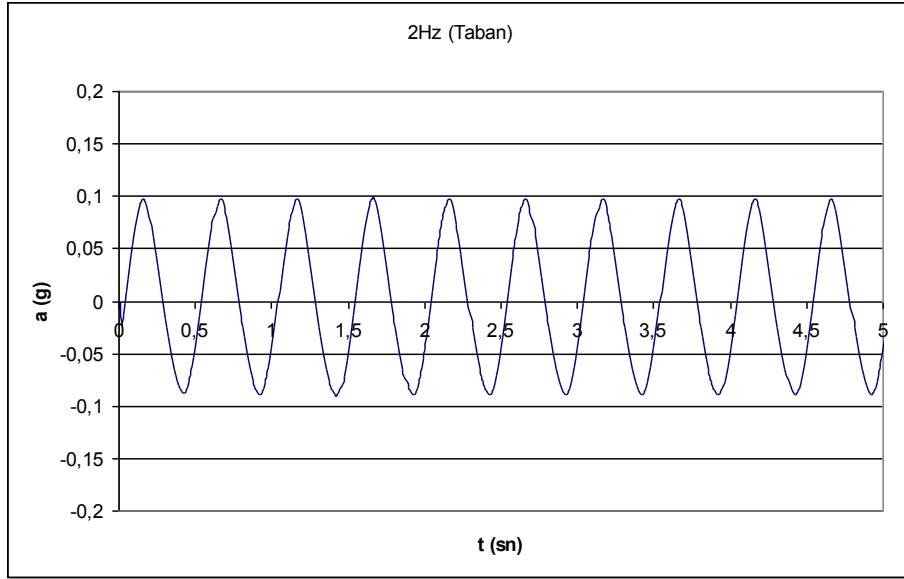
- Moncarz, P. and Krawinkler, H.**, 1981. Theory of application of experimental model analysis in earthquake engineering, *Rpt No. 50*, John Blume Earthquake Engineering Centre, Stanford University.
- Moser, A. P.**, 2001. Buried Pipe Design, McGraw-Hill, New York, 2nd Edition.
- Newmark, N.M. and Hall, W.J.**, 1975. Pipeline design to resist large fault displacement, *Proceedings of First US Conference on Earthquake Engineering*, Ann Arbor, 416-425.
- North America-Japan Workshop Report (on the Geotechnical Aspects of the Kobe, Loma Prieta and Northridge Earthquakes)**, 1997. Chapter 10: Lifelines, Report to National Science Foundation, Air Force Office of Scientific Research & Japanese Geotechnical Society, Osaka, Japan, 54-65.
- O'Rourke, M. J.**, 1995. Seismic behavior of buried pipeline components: a state-of-the-art review, *10th European Conference on Earthquake Engineering*, ed. Duma, Balkema, Rotterdam.
- O'Rourke, T., Grigoriu, M. and Khater, M.**, 1985. Seismic response of buried pipeline: a state-of-the-art review, in *Decade of Progress in Pressure Vessel Technology-1985*, ASME.
- Özmutlu, A.**, 2002. Harmonik zorlama etkisindeki boşluklu yarım uzayın titreşimleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- PAHO**, 1998. Natural disaster mitigation in drinking water and sewerage systems, Guidelines for Vulnerability Analysis, Washington, D.C., 59-64.
- Rocha, M.**, 1957. The possibility of solving soil mechanics problems by use of models, *Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, Vol 1, 183-188.
- Roscoe, K.**, 1968. Soils and model tests, *Journal of Strain Analysis*, **3** (1), 57-64.
- Seed, H. and Clough, R.**, 1963. Earthquake resistance of sloping core dams, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, **89** (1), 209-242.
- Sekiguchi, K. and Oishi, H.**, 1987. Experimental study on the effectiveness of stabilizing techniques of underground pipelines against liquefaction, *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers*, 382 (III-7), 175-181.
- Shimamura, K., Hamada, M., Yasuda, S., Kojima, S., Fujita, Y. and Kikuchi, T.**, 1998. An experimental study of the flotation of buried gas steel pipe due to liquefaction, *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam.
- Sun, L.**, 2001. Centrifuge modeling and finite element analysis of pipeline buried in liquefiable soil, *PhD Thesis*, Columbia University.

- Takahashi, A. and Fuchida, K.**, 1991. Anti-seismic reinforcement pipelines in liquefied ground, *Proceedings of 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, University of Missouri-Rolla, MO, 737-742.
- Towhata, I., Vargas-Monge, W., Orense, R.P. and Yao, M.**, 1999. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **18**, 347-361.
- Trautmann, C.H., O'Rourke, T. D. and Kulhawy, F.D.**, 1985. Uplift force-displacement response of buried pipe, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **111** (9), 1061-1076.
- TS-2170**, 1989. Su ve gaz borularının yeraltına yerleştirilmesi kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-8054**, 1991. Doğal gaz boru hattı-çelik boru donanımı projelendirme kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-8415**, 1990. Doğal gaz boru hattı donanımında kullanılan terimler ve tarifleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-8954**, 1991. Doğal gaz boru hattı-projelendirme genel kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Wang, L.**, 1990. A new look into the performance water pipeline systems from 1987 Whittier Narrows, California Earthquake, No. ODU LEE-05, Department of Civil Engineering, Old Dominion University.
- Wartman, J.**, 1999. Physical model studies of seismically induced deformations in slopes, *PhD Thesis*, University of California, Berkeley.
- Watkins, R.K. and Anderson, L.R.**, 2000. Buried Pipe Design, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Whitman, R.V., Lambe, P.C. and Kutter, B. L.**, 1981. Initial results from a stacked ring apparatus for simulation of a soil profile, *Proceedings of International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Rolla, 361-366.
- Whitman, R.V. and Lambe, P.C.**, 1986. Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation, *Geotechnical Testing Journal*, **9** (2), 61-71.
- Yasuda, S., Sutani, Y., Suzuki, N. and Isoyama, R.**, 2002. Countermeasures of buried steel pipes against surface fault rupture, *US-Japan Seminar on Seismic Disaster Mitigation Urban Area by Geotechnical Engineering*, Alaska, June 26th – 27th.

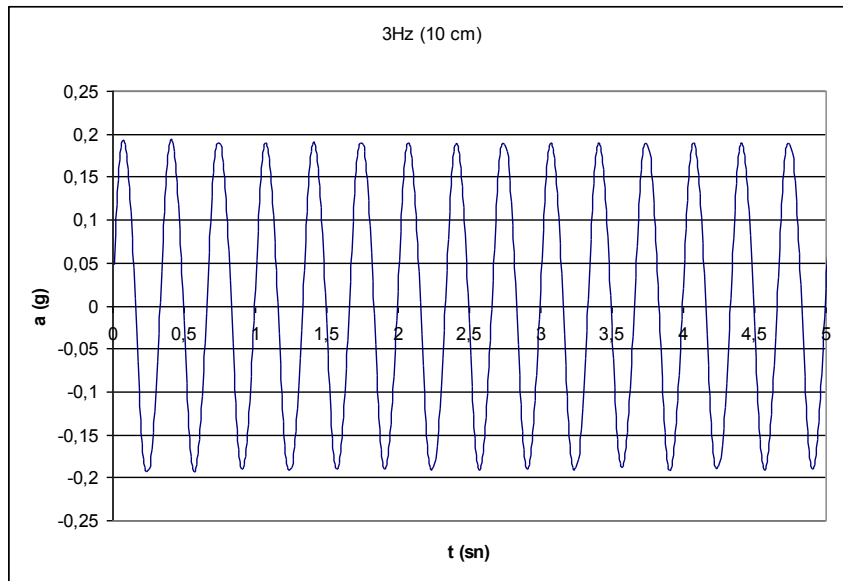
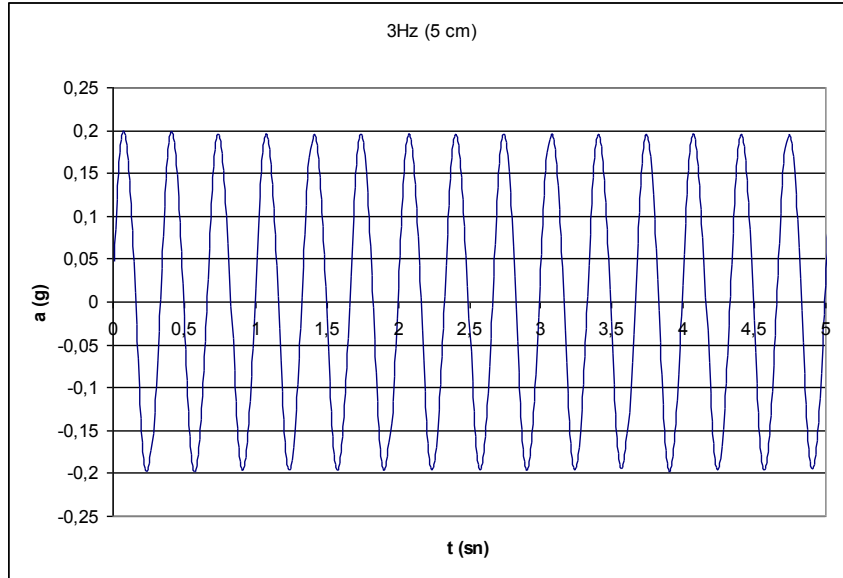
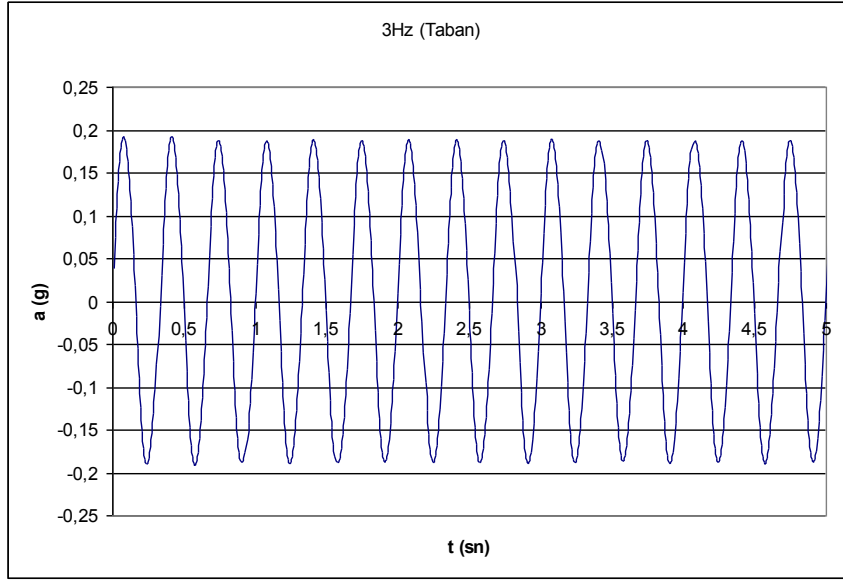
- Yoshizaki, K. and Sakanoue, T.**, 2003. Experimental study on soil-pipeline interaction using EPS backfill, New Pipeline Technologies, Security & Safety, *Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering & Construction*, ed. Najafi, M., Baltimore, Maryland, Volume 2, 1126-1133.
- Zeng, X. and Schofield, A. N.**, 1996. Design and performance of an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modeling, *Geotechnique*, **46**, No. 1, 83-102.

EKLER

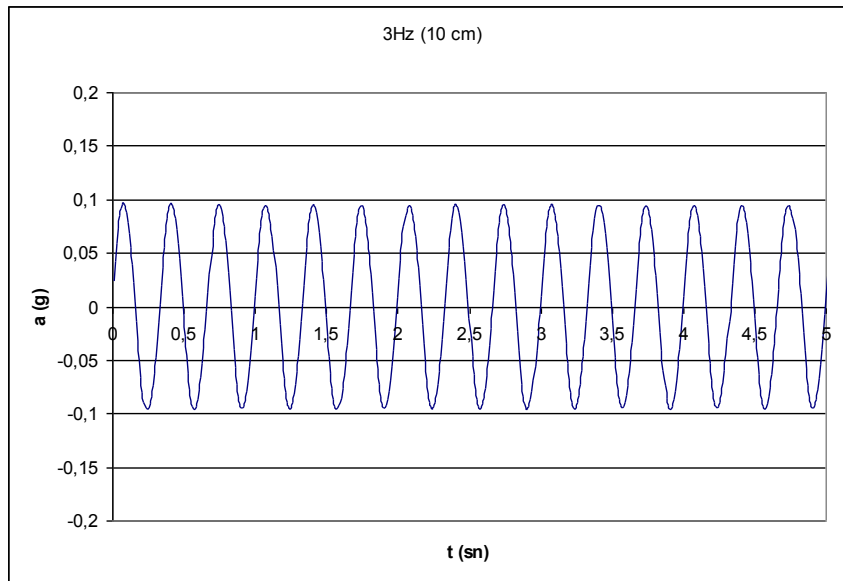
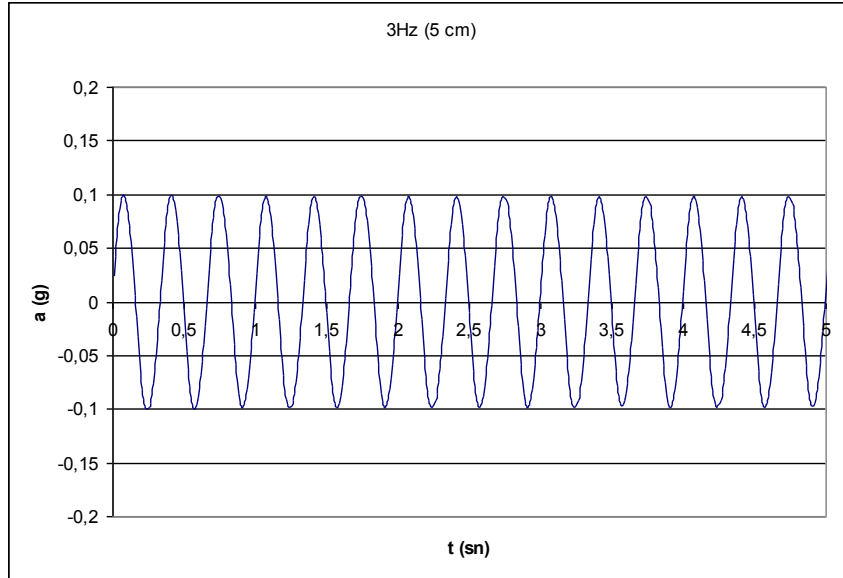
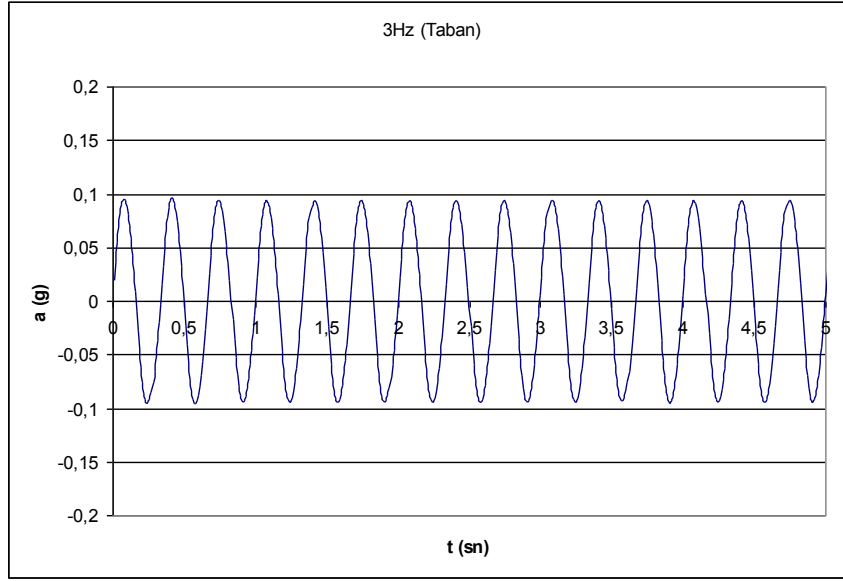
EK A



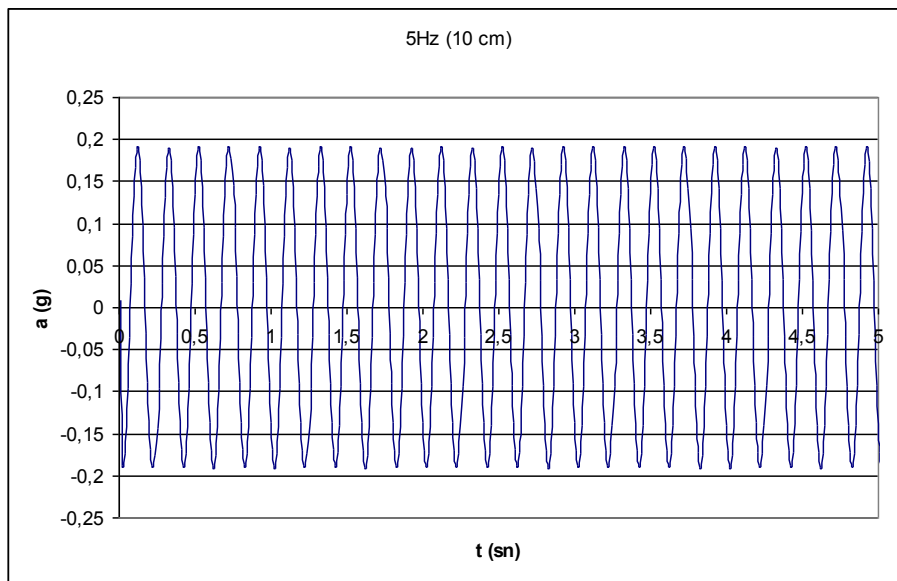
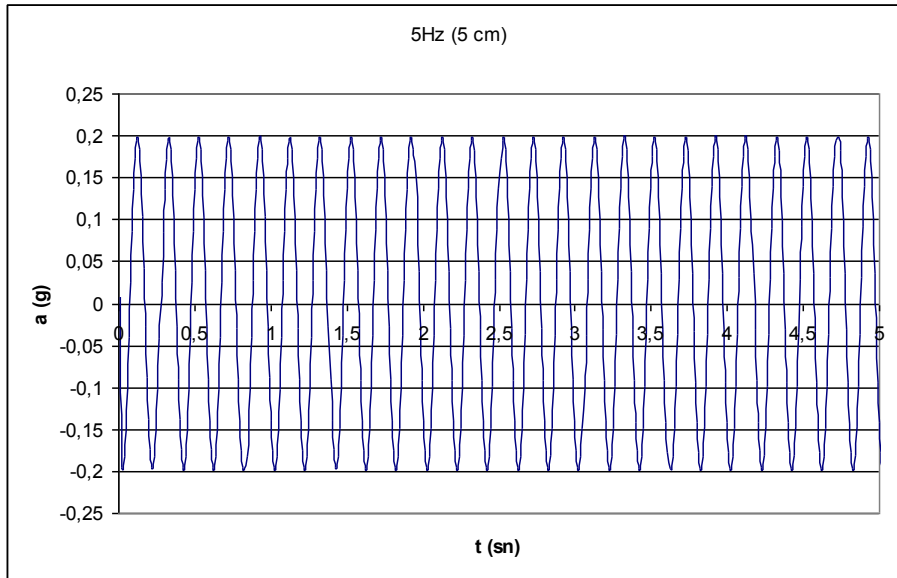
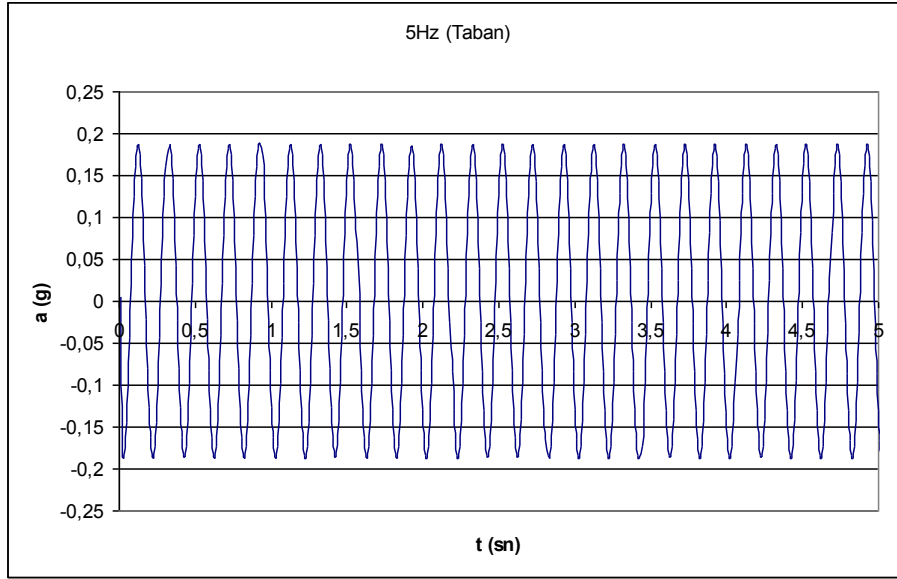
Şekil A1. 2Hz frekans ve 0.1g ivme altında ivmeölçerlerden alınan kayıtlar



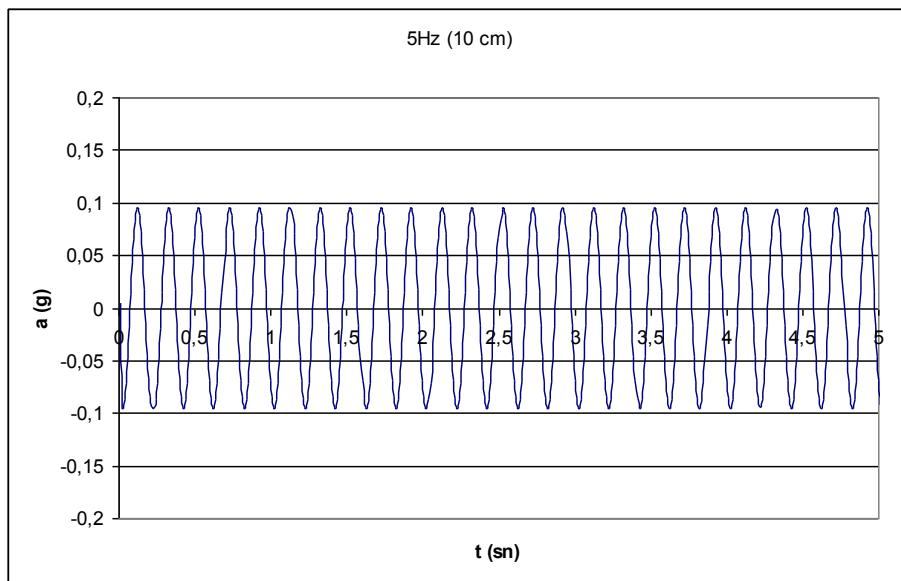
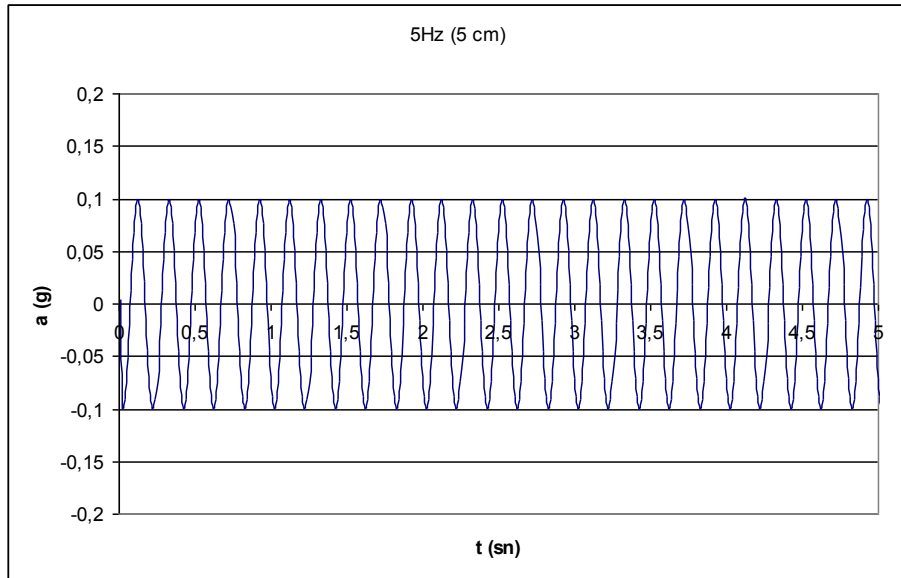
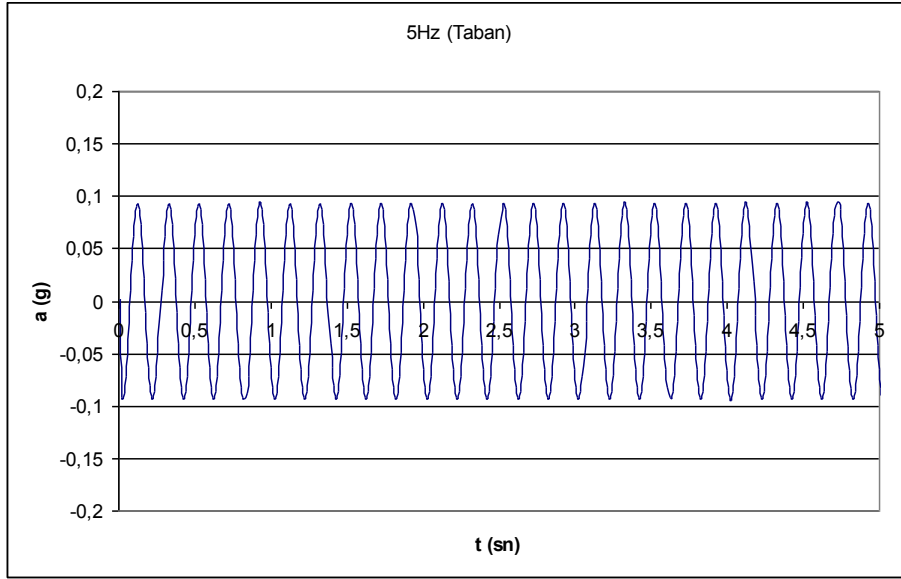
Şekil A2. 3Hz frekans ve 0.2g ivme altında ivmeölçerlerden alınan kayıtlar



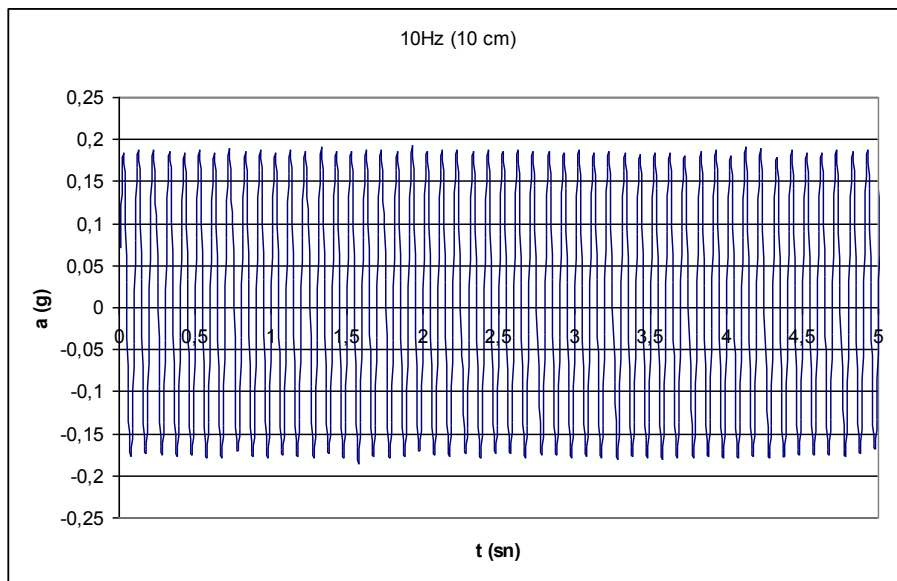
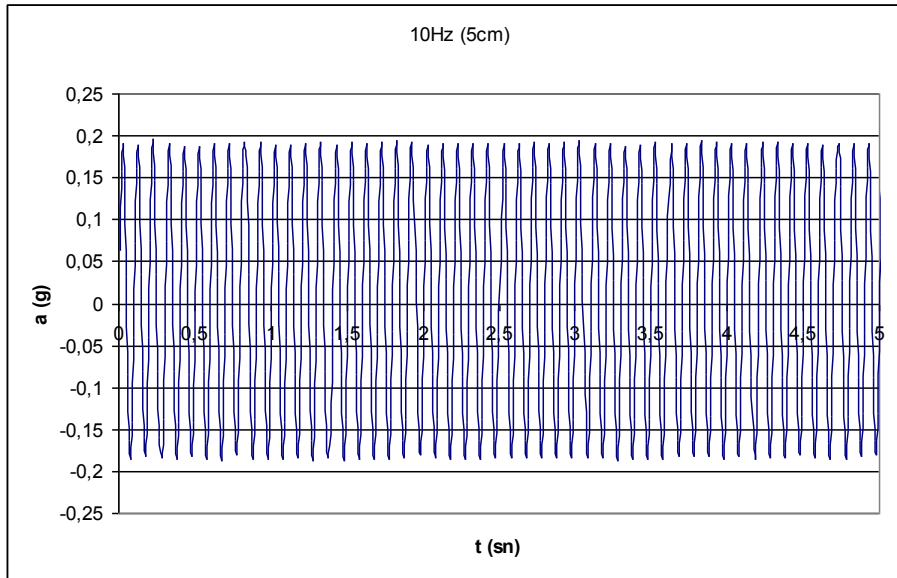
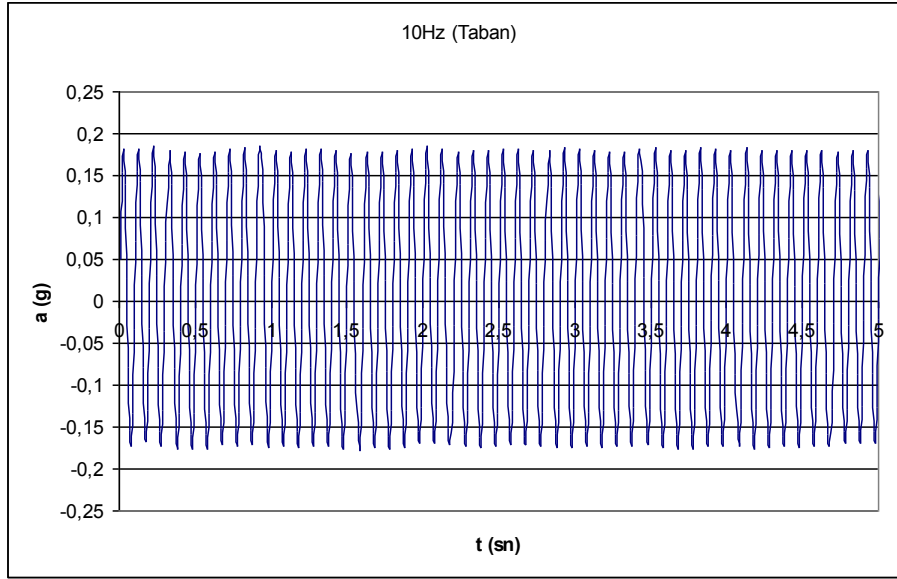
Şekil A3. 3Hz frekans ve 0.1g ivme altında ivmeölçerlerden alınan kayıtlar



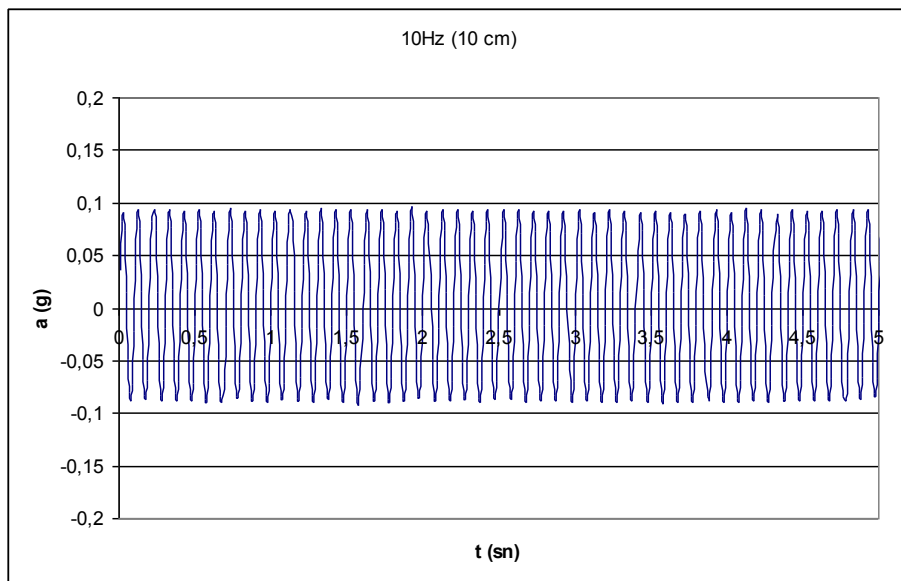
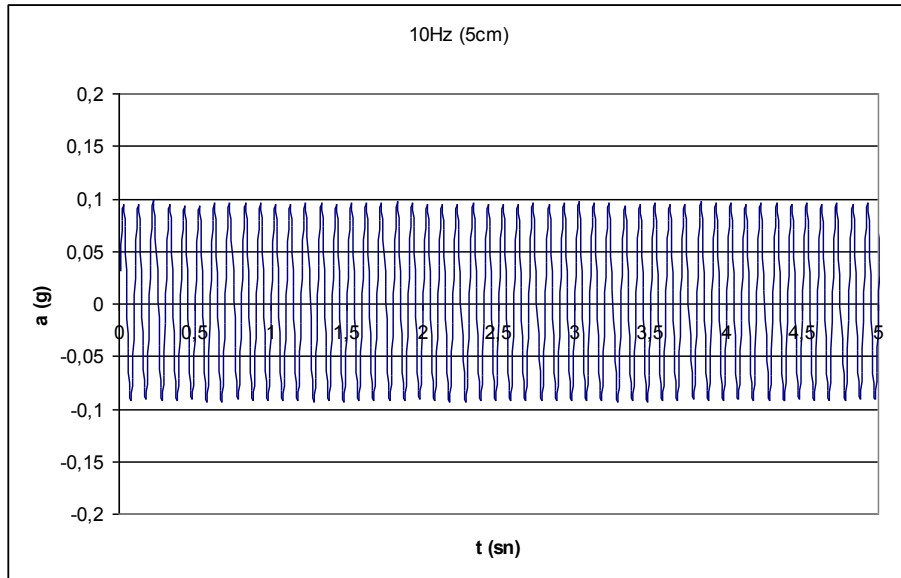
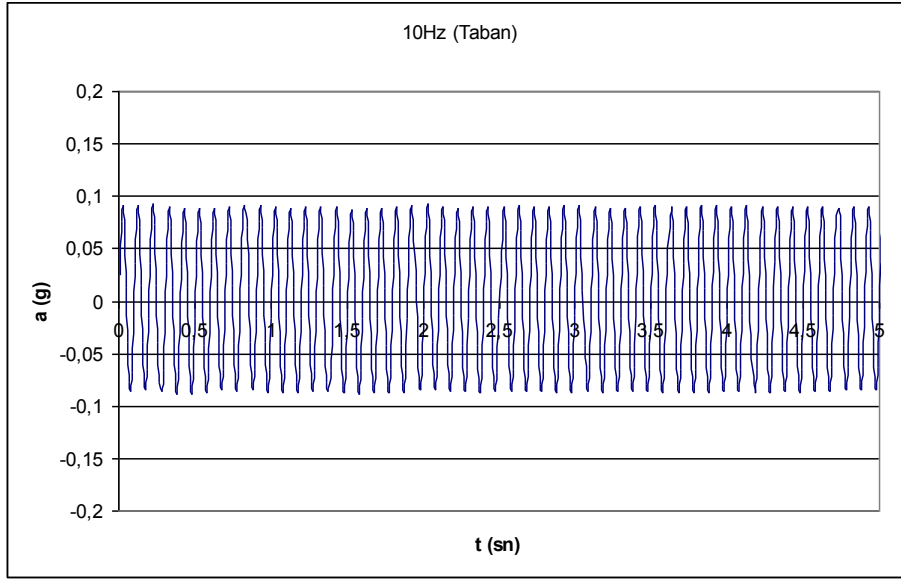
Şekil A4. 5Hz frekans ve 0.2g ivme altında ivmeölçerlerden alınan kayıtlar



Şekil A5. 5Hz frekans ve 0.1g ivme altında ivmeölçerlerden alınan kayıtlar

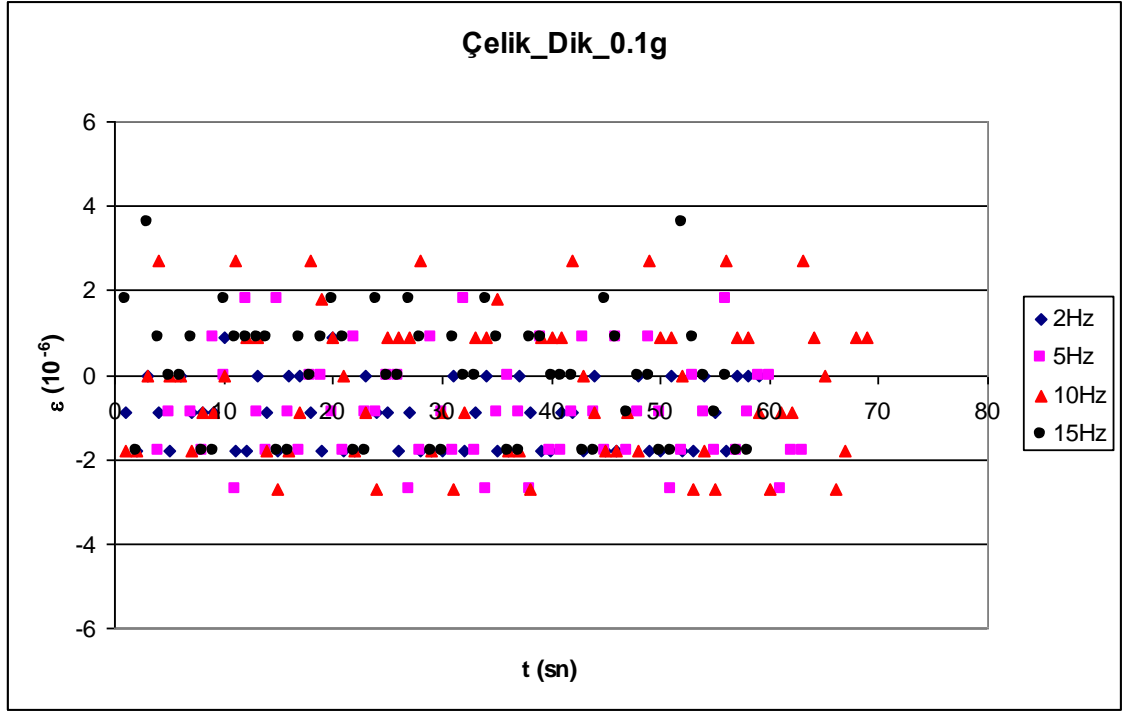


Şekil A6. 10Hz frekans ve 0.2g ivme altında ivmeölçerlerden alınan kayıtlar

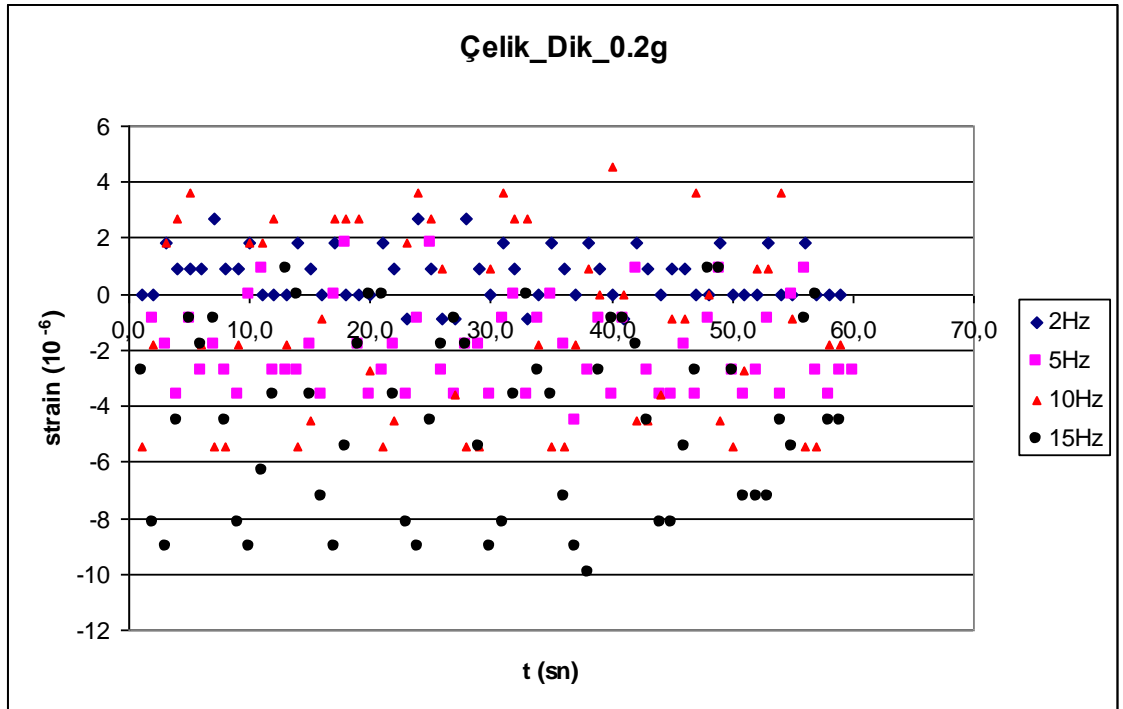


Şekil A7. 10Hz frekans ve 0.1g ivme altında ivmeölçerlerden alınan kayıtlar

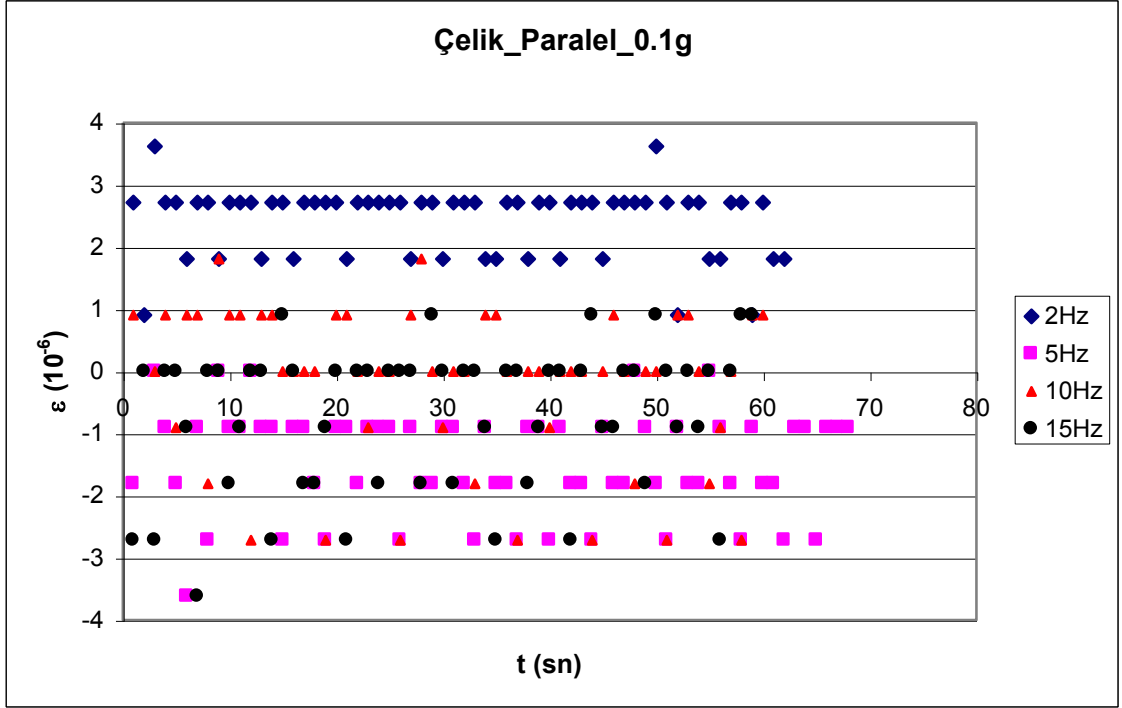
EK B



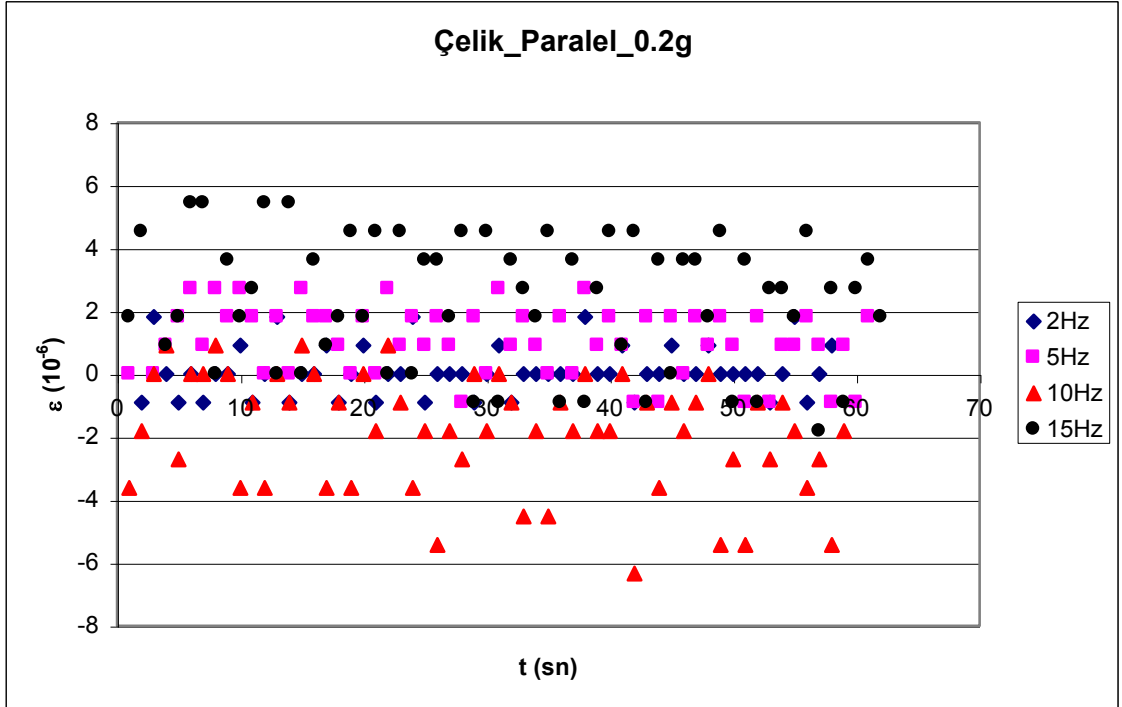
Şekil B1. Çelik borunun dalga yayılım yönüne dik yerleştirildiği durumda 0.1g ivme altında borudaki şekil değiştirme



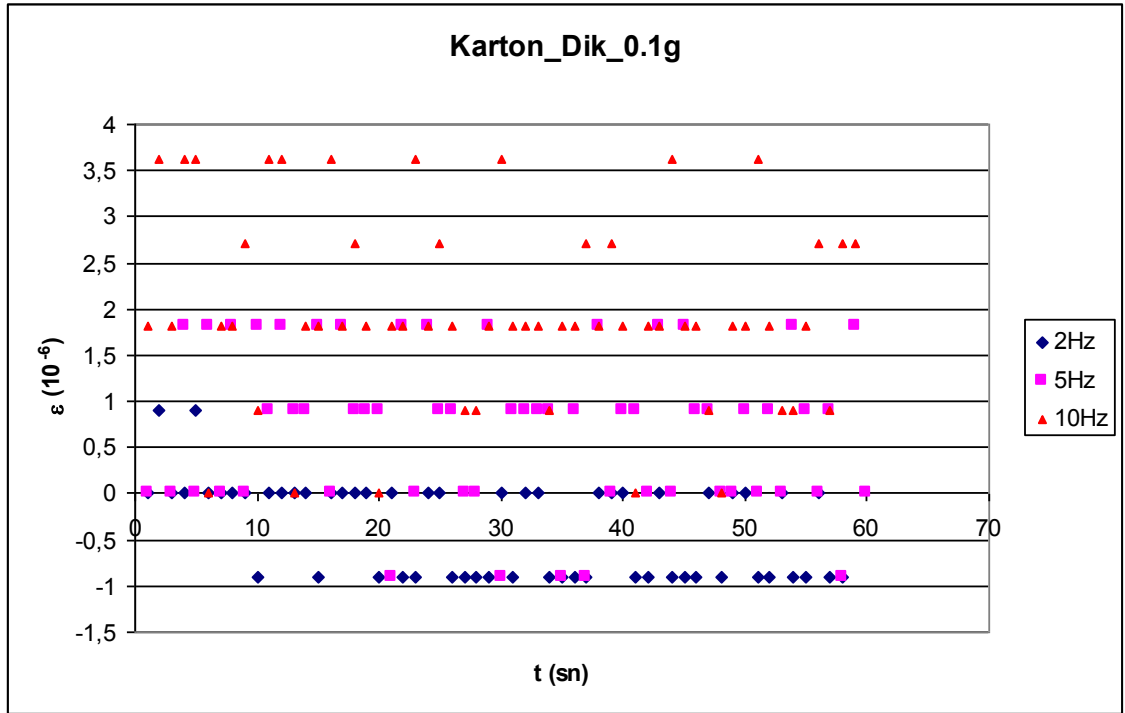
Şekil B2. Çelik borunun dalga yayılım yönüne dik yerleştirildiği durumda 0.2g ivme altında borudaki şekil değiştirme



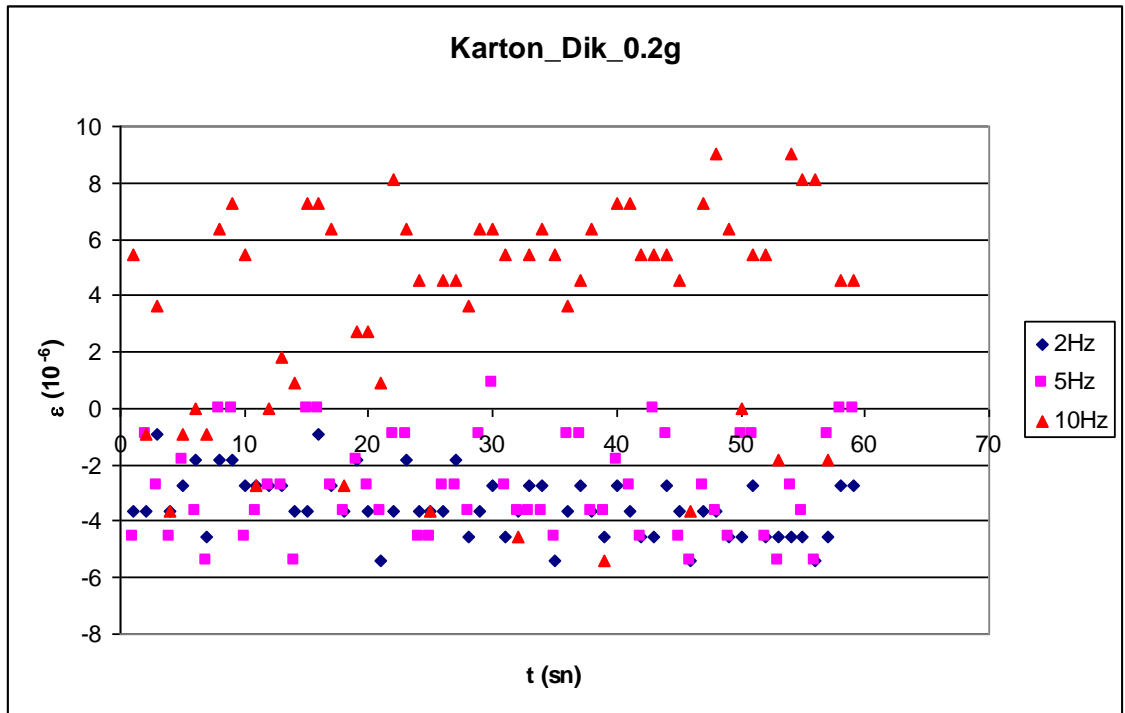
Şekil B3. Çelik borunun dalga yayılım yönüne paralel yerleştirildiği durumda 0.1g ivme altında borudaki şekil değişirme



Şekil B4. Çelik borunun dalga yayılım yönüne paralel yerleştirildiği durumda 0.2g ivme altında borudaki şekil değişirme



Şekil B5. Karton borunun dalga yayılım yönüne dik yerleştirildiği durumda 0.1g ivme altında borudaki şekil değiştirme



Şekil B6. Karton borunun dalga yayılım yönüne dik yerleştirildiği durumda 0.2g ivme altında borudaki şekil değiştirme

ÖZGEÇMİŞ

24 Ekim 1980'de İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini Çapa İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimini İSTEK Özel Bilge Kağan Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında girdiği İTÜ İnşaat Mühendisliği bölümünden 2002 yılında mezun oldu. 2002 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans Programında yüksek lisans eğitimine başladı.