

## YERALTI BORU HATLARININ DİNAMİK ANALİZİ

Fatih İmer<sup>1</sup> ve Nuri Akkaş<sup>2</sup>

Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi

ODTÜ, Ankara

## ÖZET

Bu çalışmada, uzun, parçalı yeraltı boru hatlarının eksenel yönde dinamik davranışı, boru ve zemin arasında oluşabilecek kaymalar da gözönünde tutularak incelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak bir analitik model geliştirilmiştir. Model kurulurken; boru parçaları sonsuz rijit olarak kabul edilmiş, boru parçalarının birleşme noktalarının fiziksel özellikleri birer yay ve sönüm cihazı kullanılarak modellenmiştir. Boru parçası ve zemin arasındaki etkileşim ise seri halde bağlanmış bir yay ve sürtünme cihazı ile modellenmiştir.

Modelin davranışını belirleyen denklemler doğrusal ivme yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Yapılan teorik çalışmanın bilgisayar uygulaması olarak PIPE adında bir program geliştirilmiştir. Boru ve zemin arasında oluşan kaymanın yeraltı boru hatlarının eksenel davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kayma halinde, diğer sistem parametrelerinin davranış üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

---

<sup>1</sup> Araştırma Görevlisi, Y.Müh.

<sup>2</sup> Doç.Dr.

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Genel

Yeraltında veya üstünde uzanan, eksenel boyutu diğer boyutlarına oranla çok uzun ve toplumun etkinliklerinin aksaksız olarak sürdürülmesi için gerekli yapısal sistemler yaşam hatları (lifelines) olarak adlandırılırlar.

Yaşam hatları genel olarak iki ana grupta ele alınabilir. i) Yerüstü yaşam hatları, ii) Yeraltı yaşam hatları. Yaşam hatlarının önemli bir yüzdesini ikinci grup oluşturur. Yapılan çalışmada bu grup ele alınacaktır.

Geçmiş depremlerden edinilen deneyimler ve yapılan gözlemler yeraltı yaşam hatlarının tasarımında sismik etkilerin gözönünde bulundurulmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Depremlerde su, enerji ve haberleşme hatları gibi yaşam hatlarında oluşan kesintiler özellikle yerleşim bölgelerinde yaşamı büyük ölçüde aksatmakta, deprem hasarına ek fazladan hasarlara yol açmaktadır (1). Örneğin; 1906 San Fernando depreminde hasarın yüzde seksenine su hatlarındaki kesintiden dolayı kontrol edilemeyen yangının neden olduğu saptanmıştır. Benzer olarak, 1923 Kanto, 1948 Fukui, 1964 Alaska, 1971 San Fernando, 1976 Tangshan, 1978 Miyagi-Ken-Okı ve diğer depremlerde yaşam hatlarındaki kesintilerden kaynaklanan yangın, sel, ilk yardımın aksaması gibi nedenlerden dolayı ek hasar ve kayıplar gözlenmiştir. Sözü edilen nedenlerden dolayı, yaşam hatlarının deprem sırasındaki davranışları özellikle 1970'lerden itibaren araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur.

Yeraltı boru hatlarının, daha genel olarak yaşam hatlarının, sismik davranışı alışıl gelmiş türdeki yapılardan oldukça farklıdır. Atalet kuvvetleri normal türdeki yapıların sismik davranışını birincil derecede etkilerken, yeraltı boru hatlarının sismik davranışı, fay oluşumu, bağlı yer hareketleri, zemin sıvılaşması, dalga yayılımı, boru hattı boyunca zemin özelliklerinin farklılaşması faktörlerinden birincil derecede etkilenirler.

Geçmiş depremlerde yapılan gözlemler, yeraltı boru hatlarındaki ana kırılma modlarının boru birleşme noktalarında oluşan çekme kırılmaları ve boru burkulması olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, araştırmacılar yaptıkları çalışmalarında genellikle yeraltı boru hatlarının eksenel yöndeki davranışını incelemişlerdir. Aşağıda, bu konuda yapılmış çalışmaların bir özeti sunulmaktadır.

## 1.2. Yapılmış çalışmalar

Weidlinger ve Nelson (21) uzun, parçalı yeraltı boru hatlarının farklılaşan yer hareketi (yapının değişik bölgelerinin aynı anda farklı yer hareketine maruz kalması) altında analizi için bir model geliştirdiler. Modelde; boru parçaları sonsuz rijit olarak alınırken, bağlantı özellikleri bir doğrusal elastik yay ve sönüm cihazı ile sembolize edilmiştir. Boru-zemin etkileşimi de benzer şekilde modellenmiştir. Modelin hareket denklemleri mod ayrışımı tekniği kullanılarak çözülmüş ve doğal frekanslar ve modlar için kapalı formda denklemler elde edilmiştir. Komşu iki boru parçasının davranışlarındaki maksimum farklılaşmalardan yola çıkılarak elde edilen ve Etkileşimli Davranış Spektrumunun (Interference Response Spectrum) kullanımını önerilmiştir.

Zemin-boru etkileşiminin modelinde sönüm cihazının kullanılmasının dışında yukarıdaki modele benzer bir model Wang ve Cheng (14) tarafından incelenmiştir. Dinamik terimleri ihmal ederek denklemler basite indirgenmiş ve yeraltı boru hatlarının aksenal davranışı yarı-statik (Quasi-static) diye adlandırılan bu yöntemle ele alınmıştır. Yapılan parametrik çalışmalarda zemin-boru etkileşim parametrelerinin, yayılan sismik dalgaların gecikme zamanının, boru hattı boyunca zemin özelliklerinin farklılaşmasının, sismik dalgaların yayılım süresince uğradığı farklılaşmaların davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, sismik dalgaların gecikme zamanının ve zemin özelliklerindeki farklılaşmaların diğer faktörlere oranla yeraltı Boru hatlarının sismik davranışını çok daha fazla etkilediği belirtilmiştir.

Kuribayashi, Wang ve Hadate (10) ögüne değin yeraltı boru hatlarının statik ve yarı-statik analizi ile ilgili çalışmalarını içeren bir rapor yayınlamışlardır. Raporda, yapılan çalışmalar dört grupta ele alınmaktadır. Üst sınır analizleri olarak adlandırılan ilk grup, basitleştirilmiş üst sınır yaklaşımını ve yarı-statik üst sınır yaklaşımını içermektedir. İkinci kısım elastik zeminde kiriş ve elasto-plastik zeminde kiriş modellerinden yola çıkılarak yapılan statik analizleri anlatmaktadır. Son iki grup ise yarı-statik elastik analiz ve yarı-statik elasto-plastik analizdir. Çalışmada, üstsınır analizleri hariç tüm yöntemlerin, zemin ile boru arasında oluşabilecek kaymalar zeminin akma sınırına ulaştığı anda ele alındığı için, oluşabilecek en düşük deplasmanları bulacağı vurgulanmaktadır. Basitleştirilmiş yaklaşım, bir üst sınır analizi olarak zeminle boru arasında bir bağıl deplasmanın olmayacağını, dolayısıyla sismik yer birim deplasmanının doğrudan boru birim deplasmanı

olarak alınabileceğini varsaymaktadır. Yarı-statik üst sınır yaklaşımına örnek olarak yukarıdaki paragrafta açıklanan Wang ve Cheng'in (14) araştırmasını gösterebiliriz. Statik analizlerde, boru malzemesinin elastikliği, birleşim noktalarının rijitliği ve zeminin direnci gerçekçi bir şekilde ele alınırken yer birim deplasmanı sabit varsayılmış ve problem herhangi bir zaman-deplasman verisinden bağımsız olarak ele alınmak zorunda kalmıştır. Yarı-statik elastik analiz Wang ve Cheng'in (14) modeli geliştirilerek elde edilmiştir. Bu kez, sonsuz rijit boru varsayımı yerine boru rijitliğinin etkisinde hesaba katılmıştır. Statik denge denklemleri zemin-boru etkileşim sisteminin toplam birim deformasyon enerji değişimi prensibinden elde edilmiştir. Elasto-plastik yarı-statik analiz tartışılan raporda bahsedilen en gelişmiş yöntemdir. Bu yöntemde birleşim noktalarının ve zeminin davranışını elasto-plastik olarak modellemek olasıdır. Rapor, bu analiz yöntemlerinden yararlanarak yapılan parametrik çalışmaları ve bunlardan elde edilen genel sonuçları da içermektedir.

Wang ve Olabimtan (19) bir yarı-statik yaklaşım kullanarak kapsamlı bir parametrik çalışma yapmışlardır. Çalışmada, değişik parametrelerin parçacı, düz yeraltı boru hatlarının sismik davranışı üzerindeki etkileri araştırıldı. Bağlantı noktalarının ve/veya zeminin plastisitesi, zemin rijitliği, dalga yayılım hızı, sismolojik şartlar incelenen parametrelerden bazılarıdır.

Daha sonraki çalışmalarında (16, 17, 18) Wang bu konudaki fiziksel, deneysel ve gözlemsel veri noksanlıklarını ve bunlar olmaksızın analitik çalışmaların yetersiz kalacağını vurguladı. Kaynak (18)'de, değişik parametrelerin etkilerinin analitik yöntemle incelenmesinin yanısıra, o ana değin elde edilen bu parametrelere ilişkin fiziksel veriler yayınlanmıştır. Ayrıca, raporda zemin parametrelerinin belirlenmesi için değişik deneysel yöntemlere yer verildi. Kaynak (16, 17)'de benzer çalışmalar içermektedir.

Yeraltı boru hatlarının sismik davranışı, dinamik zemin-boru etkileşimi de gözönünde bulundurularak teorik olarak Hindy ve Novak (5) tarafından incelendi. Sürekli ortamdaki statik ve dinamik teorilerden yola çıkılarak zeminin etkisinin hesaba katıldığı bir "toplanmış kütle" modeli elde edildi. Zeminin homojen yada fiziksel özelliği düşey bir sınırla farklılaşan iki ortamdan oluştuğu varsayıldı. Yapılan parametrik çalışmalar sonunda aksenal deformasyonların eğilme deformasyonlarına oranla çok daha fazla olduğu yargısına varıldı. Ayrıca, homojen bir ortamda zemin-boru etkileşiminin borularda oluşacak birim deformasyonları azaltacağı, buna karşın, değişik özelliklere sahip iki ortamdan oluşan zeminin özellikle sınıra yakın kısımlarında zemin-boru etkileşiminin boru birim deformasyonunun artmasına neden olacağı belirtilmiştir.

Hindy ve Novak (6,12) daha sonraki çalışmalarında boru yalıtımının etkisi üzerinde araştırmalar yaptılar. Bu amaçla zemin direncinin boru hareketine etkisi daha rijit bir dış tabaka ve bu tabaka ve boru arasında kalan daha yumuşak bir kısımdan oluşan visko-elastik bir ortam modellemesiyle ele alındı. Yapılan parametrik çalışmaların sonunda, boru yalıtımının yeraltı boru hatlarının sismik davranışını azaltıcı yönde etkisi olduğu fakat bu azalma etkisinin genellikle düşünülenenden çok daha az olduğu vurgulanmıştır.

O'Rourke ve Castro (13), sismik dalga yayılım hızının yeraltı boru hatları üzerindeki etkisini incelediler. Çalışmada, birçok analitik çalışmanın temel varsayımlarından biri olan sismik dalgaların ilerleme süresince değişikliğe uğramayan bir dalga formu varsayımının geçerliliği tüm detayları ile tartışılmıştır. Sonuç olarak bu varsayımın her zaman geçerli olmayacağı belirtilmiştir. Ek olarak, dalga yayılım hızının tahmin edilmesi ile ilgili yöntemler de tartışmalı olarak ele alınmıştır.

Wright ve Takada (23) yaptıkları çalışmada homojen ve lineer elastik ortamdaki parçalı silindirik yapıların zorlanmış harmonik titreşimlerini incelediler ve deplasman-frekans ilişkisini ortaya koyan dinamik davranış eğrileri elde ettiler. Sonuçta, genellikle kullanılan boru boyutları ve olası deprem frekansları gözönüne alındığında dinamik etkilerin ihmal edilebilir boyutlarda olduğunu vurguladılar.

Chen, Arıman ve Lee (2) yeraltı boru hatlarının burkulma analizi için bir yöntem geliştirdiler. Yapılan parametrik çalışmalarda zemin rijitliğinin etkisinin yanı sıra boru boyutlarının etkisi de araştırıldı. Zemin rijitliğindeki artmanın, dalga boyunu kısaltması sonucu, eksenel kritik yükü artıracığı sonucuna varıldı.

Weidlinger ve Nelson (22) sismik etkileri de hesaba katan bir boru hattı tasarım yöntemi önerdiler. Yöntemde, aşağıda belirtilen 4 ana kriter temel alınarak sismik tasarımın esasları oluşturulmuştur.

- o Boru hattı elemanlarının gerilme analizi
- o Boru hattı elemanlarının mekanik ve dayanım özellikleri
- o Sismik ortamda hareket
- o Boru hattının sismik etkiler altındaki davranışı.

Yaptığı bir çalışmada Wang (15) boru hatlarının sismik etkilerle uğradıkları hasarları ele aldı ve sismik tasarım konusunda önerilerde bulundu. Gerçekçi bir sismik tasarım yönteminin belli kırılma kriterleri ve bir risk düzeyi içermesinin gerekliliğini vurguladı.

Wang (20) bir kritik sismik etki yaklaşımı ile yaşam hatlarının sismik davranışının açıklanması konusunda çalışmalar yaptı. Yaklaşım özellikle yaşam hatlarında etkili olan sismik dalga yayılması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Yapılan araştırmaların sonucu olarak dalga yayılımının yaşam hatlarının sismik davranışını önemli derecede etkilediği vurgulanmaktadır.

Hakuno (4) ve Muhammadi ve Ang (11), deprem olgusu karşısında yaşam hatlarının emniyeti ve güvenilebilirliği ile ilgili olasılık teorisinden yola çıkarak çalışmalar yaptılar. Hakuno benzeşim tekniği ile değişik yaşam hatlarının basit modelleri için sismik güvenilebilirlik analizleri yaptı. Çalışmada yaşam hatlarının fonksiyonunu yerine getirememesinin önemli bir tasarım parametresi olduğu belirtildi. Muhammadi ve Ang olasılık teorisine dayandırılan çalışmalarında iki ana sismik tehlikeyi esas aldılar. Bunlar; depremde oluşan faylar nedeni ile hasar ve boru parçalarının taşıma gücünün üstünde zorlanması ile oluşacak hasarlardır.

Arıman ve Muleski (1) yaptıkları kapsamlı bir çalışmada yaşam hattı deprem mühendisliği ile ilgili ogüne değin yapılmış çalışmaların etraflı bir özetini verdiler. Yayınladıkları çalışmada geliştirilen modellerin yanısıra yapılan niteliksel ve niceliksel analizlere de yer verdiler.

### 1.3. Yapılan çalışmanın içeriği

Bu çalışmanın konusu, düz, parçalı yeraltı boru hatlarının aksenel sismik davranışının zeminle boru arasında oluşabilecek kaymaları da hesaba katarak analizidir. Kayma olmaması halinde zemin direnci doğrusal elastik olan bir yay ile sembolize edilmiştir.

Sistem değişkenlerine referans şartları tanımlanarak zemin ve boru arasında sürtünmenin azalmasını sağlayan boru yalıtımının yeraltı boru hatlarının aksenel sismik davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ek olarak, zemin ile boru arasında kayma olması halinde zemin, birleşim rijitlikleri, sınır koşulları, dalga yayılma hızı gibi diğer sistem parametrelerinin sistemin davranışına olan etkileri incelenmiştir.

Bu kısımda, zemin-boru etkileşimini içererek yeraltı boru hatlarının sismik davranışını incelememizi sağlayacak bir analitik modelin kurulması ve bu modelin matematiksel formülasyonu sunulacaktır.

Şimdiye değin yayınlanan çalışmalarda zemin-boru etkileşimi zeminin elastik ya da elasto-plastik direnimi şeklinde hesaba katılmıştır. Önemi birtakım çalışmalarda belirtilmesine karşın, boru-zemin arasında oluşacak kaymaların yeraltı boru hatlarının sismik davranışı üzerindeki etkisi bugüne kadar yeterince incelenmemiştir.

Sistem parametrelerinin değişik birleşimleri için (dış yüzey kaplama malzemesinin karakteristikleri, boru hattının gömülme derinliği gibi) kayma olgusu yeraltı boru hatlarının sismik davranışını umulandan çok daha fazla etkilemektedir. Bu çalışmada, sözü edilen gerçek gözönünde tutularak, oluştugu anda kaymayı da hesaba katabilecek bir zemin-boru etkileşim modeli geliştirilmiştir.

### 2.1. Temel varsayımlar

Problemin bir analitik modelinin kurulabilmesi için aşağıdaki temel varsayımlar yapılmıştır.

1. Boru hattı sadece eksenel yönde sismik yüklemelere maruz kalmaktadır. Sismik davranış da sadece bu yönde oluşmaktadır. Başka bir deyişle problem tek boyutludur.
2. Boru parçaları sonsuz rijittir.
3. Bağlantı noktalarının ve iki uçtaki sınır şartlarının fiziksel özellikleri, bir sönüm cihazı ve doğrusal elastik yay yardımıyla modellenenbilirler.
4. Bir boru parçası boyunca zemin özellikleri sabittir. Buna karşın borudan boruya bu özellikler değişebilir.
5. Zemin-boru etkileşimi her bir boru için seri halde bağlı bir doğrusal elastik yay ve bir sürtünme cihazı kullanılarak gösterilebilir. Yay-sürtünme cihazı sistemi bir ucundan borunun ortasına, diğer ucundan ise başlangıçta borunun merkezi ile aynı izdüşümde olan zemin noktasına bağlıdır.
6. Yer hareketi boru hattı boyunca yayılan bir sismik dalga formu tanımlanarak modellenenbilir.

7. Sismik dalga formu yayılırken değişme göstermez.
8. Aynı anda yapının değişik noktalarında değişik yer hareketlerine sahip olma özelliği dalga yayılma hızının ve boru boyunun bir fonksiyonu olan "gecikme zamanı" tanımlanarak modele uygulanacaktır.

Analitik model Şekil 2.1'de görülmektedir. Şekildeki sembollerin açıklamaları aşağıda verilmektedir.

- $m_i$  i. boru parçasının kütlesi
- $k_i$  i. birleşimin rijitliği
- $c_i$  i. birleşimin sönüm faktörü
- $x_{a_0}$  Sol sınır mutlak deplasmanı
- $x_{a_i}$  i. boru parçası mutlak deplasmanı
- $x_{a_{n+1}}$  sağ sınır mutlak deplasmanı
- $x_{g_0}$  sol sınır yer deplasmanı
- $x_{g_i}$  i. boru parçası hizasındaki yer deplasmanı
- $x_{g_{n+1}}$  sağ sınır yer deplasmanı
- $x_{rs_i}$  i. boru parçası için kayma limiti
- $k_{s_i}$  i. boru parçası hizasındaki zemin rijitliği

## 2.2. Zemin-boru etkileşim modelinin açıklanması

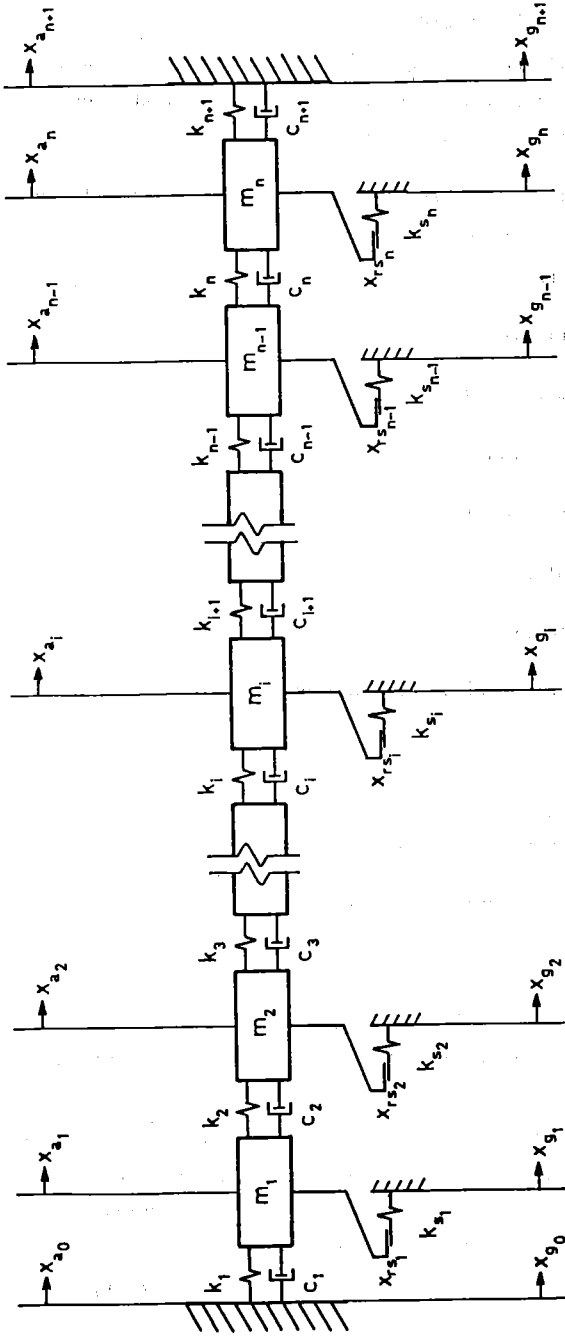
Şekil 2.2'de i. boru parçası için tipik bir zemin yay kuvveti-bağlı zemin boru deplasmanı ilişkisi gösterilmektedir.

$F_{s_i}$  kayma oluşmadan önce yer alabilecek maksimum zemin yay kuvveti olarak tanımlanmaktadır.  $F_{d_i}$  kayma esnasında zemin tarafından i. boru parçasına uygulanan toplam sürtünme kuvvetini göstermektedir. Bu tanımlar aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilirler.

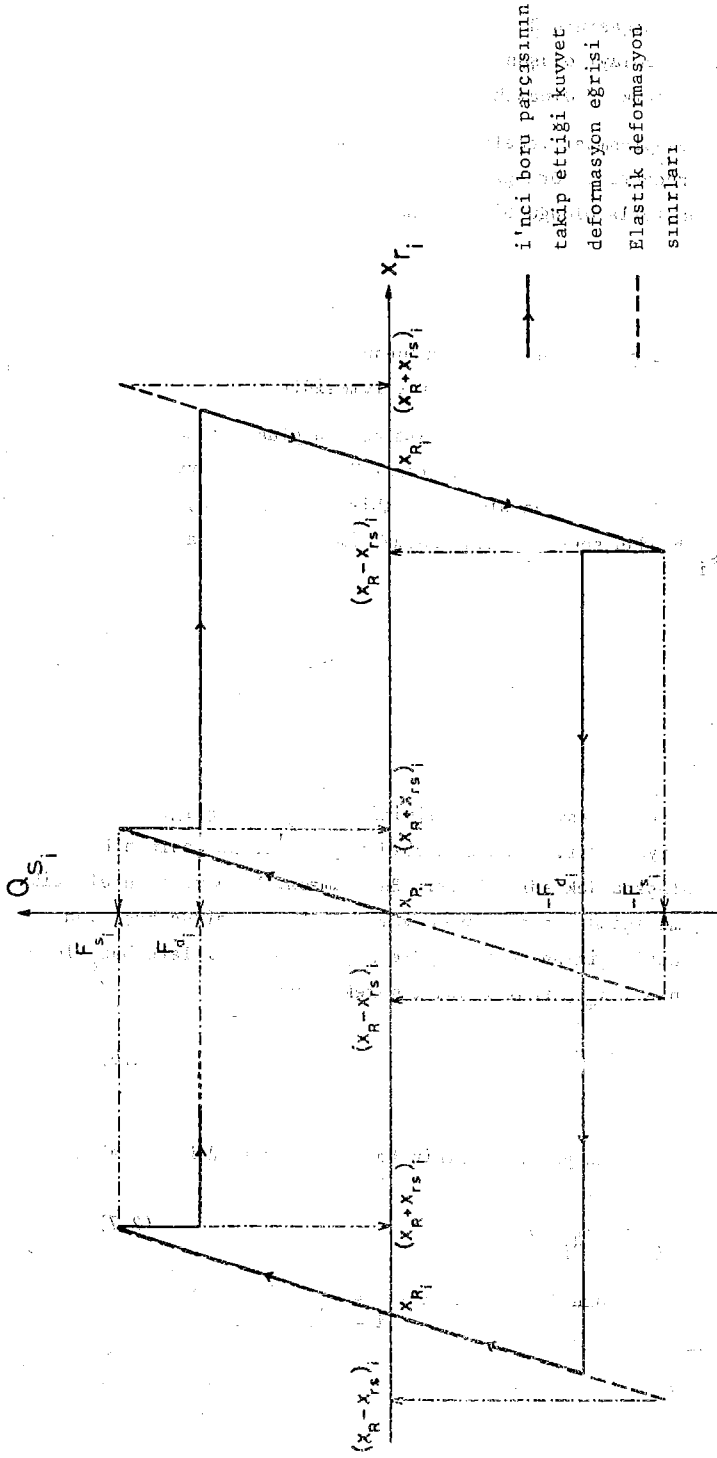
$$F_{s_i} = \mu_{s_i} F_{n_i} \quad (2.1)$$

$$F_{d_i} = \mu_{d_i} F_{n_i} \quad (2.2)$$





Şekil 2.1 Analitik model



Şekil 2.2 i'nci boru parçası için zemin yay kuvveti-bağıl zemin boru deplasmanı ilişkisi

Burada,  $F_{n_i}$  i. boru parçasının üstündeki toprağın ağırlığı ve/veya diğer dış statik etkilerden dolayı oluşan normal kuvvetlerin toplamıdır.  $\mu_{s_i}$  ve  $\mu_{d_i}$  i. borunun statik ve dinamik sürtünme katsayılarını göstermektedir.

$F_{n_i}$  değerinin hesaplanması incelenilen boru hattının özelliklerine göre değişiklikler gösterecektir. Örneğin, düşey toprak basıncının yanal basınçlara oranla çok daha fazla olduğu bir sistemde  $F_{n_i}$  aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$F_{n_i} = \bar{m}_i g \quad (2.3)$$

Burada,  $\bar{m}_i$  i. boru parçasının üzerinde bulunan toprağın toplam kütlesidir.  $g$  ise uygun birimlerle kullanılan yer çekimi ivmesidir.

Bu tanımlardan yola çıkarak, kayma olmaksızın oluşacak maksimum bağıl zemin-boru deplasmanını,  $x_{rs_i}$ , ve kayma sırasında sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle zemini modelleyen yayda oluşacak sabit deformasyonu,  $x_{rd_i}$ , tanımlayabiliriz.  $x_{rs_i}$  bundan sonra kısaca "kayma limiti" olarak adlandırılacaktır.

$$x_{rs_i} = \frac{F_{s_i}}{k_{s_i}} \quad (2.4)$$

$$x_{rd_i} = \frac{F_{d_i}}{k_{s_i}} \quad (2.5)$$

Bağıl zemin-boru deplasmanı kayma limitine,  $x_{rs_i}$ , ulaştığında boru parçası kaymaya başlayacaktır. Bu kayma sözü geçen boru parçasının bağıl hızı,  $\dot{x}_{r_i}$ , sıfıra ulaşana dek sürecektir. Bu aşamada, boru yeniden elastik zemin-boru etkileşimi içinde hareketine devam edecek ve yeniden başlayan elastik zemin boru etkileşimine ve buna göre saptanacak limitlere baz oluşturacak bir değişkenin,  $x_{R_i}$ , tanımlanması gerekecektir.

$$x_{R_i} = x_{r_i} \Big|_{\dot{x}_{r_i} = 0} - x_{rd_i} \quad (2.6)$$

Böylece, bu aşamadaki zemin yay kuvvetinin hesaplanması mümkün olacaktır.

$$Q_{s_i} = k_{s_i} (x_{r_i} - x_{R_i}) \quad (2.7)$$

veya etkili bağıl zemin-boru deplasmanını  $\bar{x}_{r_i} = x_{r_i} - x_{R_i}$  olarak tanımlarsak

$$Q_{s_i} = k_{s_i} \bar{x}_{r_i} \quad (2.8)$$

Bu formülasyonla, zemin yayı için elastik deformasyon limitleri de en genel şekliyle tanımlanabilecektir.

$$x_{R_i} - x_{rs_i} \leq x_{r_i} \leq x_{R_i} + x_{rs_i} \quad (2.9)$$

Hareketin başlangıcında  $x_{R_i}$  sıfır olarak tanımlanırsa (2.7), (2.8), ve (2.9) denklemleri i. boru parçasının elastik zemin etkileşimi gösterdiği tüm zaman aralıklarında geçerli olacaktır.

### 2.3. Hareket denklemleri

Sismik bir zorlama karşısında yerin ve boru parçalarının hareketlerini tanımlayacak koordinat sistemi Şekil 2.1'de görülmektedir. Burada  $x_{a_1}, \dots, x_{a_i}, \dots, x_{a_n}$  boru parçalarının orta kesitlerinin mutlak deplasmanını;  $x_{g_1}, \dots, x_{g_i}, \dots, x_{g_n}$  boru hattı eksenini yönündeki her bir boru parçasının altında bulunan zeminin deplasmanını;  $x_{r_1}, \dots, x_{r_i}, \dots, x_{r_n}$  ise boru parçaları ile hareketten önce borunun altında bulunan zemin arasındaki bağıl deplasmanı göstermektedir.

Denklem (2.10a, b, c) koordinat sistemleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$x_{a_i} = x_{g_i} + x_{r_i} \quad (2.10.a)$$

$$\dot{x}_{a_i} = \dot{x}_{g_i} + \dot{x}_{r_i} \quad (2.10.b)$$

$$\ddot{x}_{a_i} = \ddot{x}_{g_i} + \ddot{x}_{r_i} \quad (2.10.c)$$

Sınırlarda bağıl koordinat terimleri sıfır olacaktır. Böylece, sınırlardaki koordinat sistemleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olacaktır.

$$x_{a_0} = x_{g_0}, \quad \dot{x}_{a_0} = \dot{x}_{g_0}, \quad \ddot{x}_{a_0} = \ddot{x}_{g_0} \quad (2.11)$$

$$x_{a_{n+1}} = x_{g_{n+1}}, \quad \dot{x}_{a_{n+1}} = \dot{x}_{g_{n+1}}, \quad \ddot{x}_{a_{n+1}} = \ddot{x}_{g_{n+1}} \quad (2.12)$$

Dinamik denge diagramı Şekil 2.3'de görülen i. boru parçasının hareket denklemleri,  $x_{a_i} > x_{g_i}$  ve  $x_{a_{i-1}} < x_{a_i} < x_{a_{i+1}}$  varsayımları yapıldığında aşağıdaki gibi olacaktır.

$$m_i \ddot{x}_{a_i} - Q_{i+1} - D_{i+1} + Q_i + D_i + Q_{s_i} = 0 \quad (2.13)$$

burada,

$$Q_{s_i} = \begin{cases} k_{s_i} \bar{x}_{r_i} & \bar{x}_{r_i} \leq x_{rs_i} \\ (\text{sgn } \dot{x}_{r_i}) & \bar{x}_{r_i} > x_{rs_i} \end{cases} \quad (2.14)$$

ve  $D_i$  ve  $Q_i$  i'nci birleşimin sönüm ve yay kuvvetlerini göstermektedir.  $(\text{sgn } \dot{x}_{r_i})$  ise i'nci boru parçasının bağıl hızının işaretini sembolize etmektedir. Denklem (2.13) en açık şekliyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_{a_i} - k_{i+1} (x_{a_{i+1}} - x_{a_i}) + k_i (x_{a_i} - x_{a_{i-1}}) \\ - c_{i+1} (\dot{x}_{a_{i+1}} - \dot{x}_{a_i}) + c_i (\dot{x}_{a_i} - \dot{x}_{a_{i-1}}) \\ + k_{s_i} (x_{a_i} - x_{R_i} - x_{g_i}) = 0. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Bilinen terimler eşitliğin sağ tarafına alınıp, denklem (2.15) deplasmanlara göre düzenlendiğinde aşağıdaki şekli alacaktır.

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_{a_i} - k_{i+1} x_{a_{i+1}} + (k_{i+1} + k_i + k_{s_i}) x_{a_i} - k_i x_{a_{i-1}} \\ - c_{i+1} \dot{x}_{a_{i+1}} + (c_{i+1} + c_i) \dot{x}_{a_i} - c_i \dot{x}_{a_{i-1}} \\ = k_{s_i} (x_{g_i} + x_{R_i}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Kayma halinde, zemin yay kuvveti ile ilişkili terimler kalkacak yerine kayma sırasında zemin tarafından boru parçasına uygulanan sabit kuvveti gösteren  $F_{d_i}$  terimi denkleme girecektir.

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_{a_i} - k_{i+1} x_{a_{i+1}} + (k_{i+1} + k_i) x_{a_i} - k_i x_{a_{i-1}} \\ - c_{i+1} \dot{x}_{a_{i+1}} + (c_{i+1} + c_i) \dot{x}_{a_i} - c_i \dot{x}_{a_{i-1}} \\ = -(\text{sgn } \dot{x}_{r_i}) F_{d_i} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Denklem (2.16) ve (2.17) hareketin farklı iki aşamasını göstermektedir. Aşağıdaki tanımlamaların yardımı ile bu iki denklemi tek bir denklemle ifade etmek mümkün olacaktır.

$$a_i = \begin{cases} 1 & \bar{x}_{r_i} \leq x_{rs_i} \\ 0 & \bar{x}_{r_i} > x_{rs_i} \end{cases} \quad (2.18.a)$$

$$b_i = \begin{cases} 0 & \bar{x}_{r_i} \leq x_{rs_i} \\ 1 & \bar{x}_{r_i} > x_{rs_i} \end{cases} \quad (2.18.b)$$

Böylece, i'inci boru parçası için hareket denklemi en genel şekli ile aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_{a_i} - k_{i+1} x_{a_{i+1}} + (k_{i+1} + k_i + a_i k_{s_i}) x_{a_i} - k_i x_{a_{i-1}} \\ - c_{i+1} \dot{x}_{a_{i+1}} + (c_{i+1} + c_i) \dot{x}_{a_i} - c_i \dot{x}_{a_{i-1}} \\ = a_i k_{s_i} (x_{g_i} + x_{R_i}) - b_i (\operatorname{sgn} \dot{x}_{r_i}) F_{d_i} \end{aligned} \quad (2.19)$$

1. ve n. boru parçalarının hareket denklemlerinde, sınırla komşu olmaları nedeni ile, bağıl koordinat sistemine ilişkin bazı terimler ortadan kalkacak, bilinen bazı yeni terimler ise denklemin sağ kısmında yer alacaktır.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{a_1} - k_2 x_{a_2} + (k_2 + k_1 + a_1 k_{s_1}) x_{a_1} \\ - c_2 \dot{x}_{a_2} + (c_2 + c_1) \dot{x}_{a_1} \\ = a_1 k_{s_1} (x_{g_1} + x_{R_1}) + k_1 x_{g_0} - b_1 (\operatorname{sgn} \dot{x}_{r_1}) F_{d_1} + c_1 \dot{x}_{g_0} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} m_n \ddot{x}_{a_n} + (k_{n+1} + k_n + a_n k_{s_n}) x_{a_n} - k_n x_{a_{n-1}} \\ + (c_{n+1} + c_n) \dot{x}_{a_n} - c_n \dot{x}_{a_{n-1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= a_n k_{s_n} (x_{g_n} + x_{R_n}) + k_{n+1} x_{g_{n+1}} - b_n (\text{sgn } \dot{x}_{r_n}) F_{d_n} \\
&+ c_{n+1} \dot{x}_{g_{n+1}} \quad (2.21)
\end{aligned}$$

Sistemin hareket denklemleri matris formunda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
\underline{M} \ddot{\underline{X}}_a + \underline{C} \dot{\underline{X}}_a + \underline{K} \underline{X}_a &= \underline{K}_1 (\underline{X}_g + \underline{X}_R) + \underline{K}_B \underline{X}_{gb} \\
&- \underline{C}_1 \underline{F}_d + \underline{C}_B \dot{\underline{X}}_{gb} \quad (2.22)
\end{aligned}$$

Burada,  $\underline{M}$ ,  $\underline{C}$  ve  $\underline{K}$  matrisleri eşitliğin sol tarafında yer alan  $n \times n$  boyutlu kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir.  $\underline{K}_1$  ve  $\underline{C}_1$  denkleminin sağ tarafında yer alan  $n \times n$  boyutlu rijitlik ve sönüm matrisleridir.  $\underline{K}_B$  ve  $\underline{C}_B$  sınır şartlarını denklemin (2.22)'ye sokan  $n \times n$  boyutlu rijitlik ve sönüm matrisleridir.  $\underline{X}_a$  ve  $\underline{X}_g$  boru parçalarının mutlak deplasmanını ve ilişkili yer hareketlerini gösteren  $n \times 1$  boyutlu deplasman vektörleridir. Yer deplasman matrisi olan  $\underline{X}_{gb}$  ise sadece sınır değerlerini içermektedir.  $\underline{X}_R$  ve  $\underline{F}_d$  ise her bir borunun bağlı baz deplasmanını ve sabit sürtünme kuvvetini içeren  $n \times 1$  boyutlu vektörlerdir. Problemin tanımı, uygun sınır ve başlangıç şartlarının da açıklanmasıyla son haline gelecektir.

#### 2.4. Yer hareketi

Yeraltı boru hatlarının sismik davranışının bu yaklaşım ile incelenmesi için yer hareketinin zamana göre değişiminin her bir boru parçası için bilinmesi gerekmektedir. Daha önce belirtildiği gibi dalga formunun inceleme süresince hiçbir değişikliğe uğramadığı varsayılmaktadır. Böylece, yer hareketi değişkenleri olan  $\underline{X}_g$ ,  $\dot{\underline{X}}_g$  ve  $\ddot{\underline{X}}_g$ , dalga formunun sözkonusu olan boru parçasına ulaşması için gereken zamanın gecikme zamanı olarak tanımlanması ve hesaba katılması ile belirlenecektir.

Birinci sınırdan başlayarak konum ve zamana göre değişen yer hareketi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{g_0}(t) &= \ddot{x}_G(t) \\ \dot{x}_{g_0}(t) &= \dot{x}_G(t) \\ x_{g_0}(t) &= x_G(t) \end{aligned} \right\} t \geq 0 \quad (2.23)$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{g_1}(t) &= 0 \\ \dot{x}_{g_1}(t) &= 0 \\ x_{g_1}(t) &= 0 \end{aligned} \right\} t < t_{d_1} = \Delta T_1 / 2 \quad (2.24)$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{g_1}(t) &= \ddot{x}_G(t - t_{d_1}) \\ \dot{x}_{g_1}(t) &= \dot{x}_G(t - t_{d_1}) \\ x_{g_1}(t) &= x_G(t - t_{d_1}) \end{aligned} \right\} t \geq t_{d_1} \quad (2.25)$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{g_i}(t) &= 0 \\ \dot{x}_{g_i}(t) &= 0 \\ x_{g_i}(t) &= 0 \end{aligned} \right\} t < t_{d_i} = \sum_{j=1}^{i-1} t_{d_j} + \Delta T_i / 2 \quad (2.26)$$

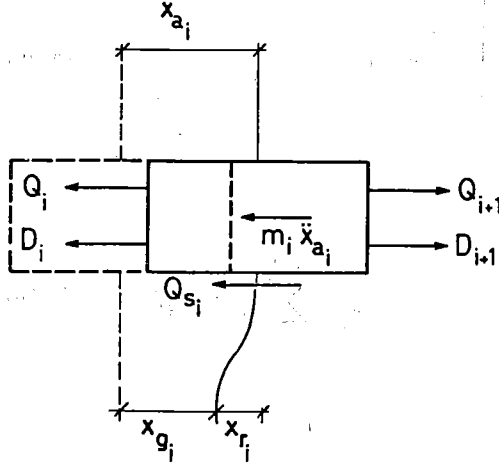
$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{g_i}(t) &= \ddot{x}_G(t - t_{d_i}) \\ \dot{x}_{g_i}(t) &= \dot{x}_G(t - t_{d_i}) \\ x_{g_i}(t) &= x_G(t - t_{d_i}) \end{aligned} \right\} t \geq t_{d_i} \quad (2.27)$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{g_{n+1}}(t) &= 0 \\ \dot{x}_{g_{n+1}}(t) &= 0 \\ x_{g_{n+1}}(t) &= 0 \end{aligned} \right\} t < t_{d_{n+1}} = \sum_{j=1}^n \Delta T_j \quad (2.28)$$



$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{g_{n+1}}(t) &= \ddot{x}_G(t-t_{d_{n+1}}) \\ \dot{x}_{g_{n+1}}(t) &= \dot{x}_G(t-t_{d_{n+1}}) \\ x_{g_{n+1}}(t) &= x_G(t-t_{d_{n+1}}) \end{aligned} \right\} t \geq t_{d_{n+1}} \quad (2.29)$$

Burada,  $x_G(t)$ ,  $\dot{x}_G(t)$  ve  $\ddot{x}_G(t)$  tanımlanmış yer hareketi,  $\Delta T_i = L_i / V_i$  ise i.nci borunun uzunluğu olan  $L_i$  mesafesini geçmesi için gerekli olan zamanı göstermektedir.  $V_i$  i.nci boru parçası altındaki zemindeki dalga yayılma hızını göstermektedir.



Şekil 2.3 i'nci boru parçasının dinamik denge durumu

### 3. SAYISAL ÇÖZÜM

Problemın doğrusal olmayan yapısı sayısal bir çözüm yöntemi kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Çözümde doğrusal ivme yöntemi (3) kullanılacaktır. Yöntemin bu probleme uygulanışı ve karşılaşılabilecek güçlükler bu bölümde verilecektir.

#### 3.1. Hareket denklemlerinin sayısal çözümü

Bir  $t$  zamanında denklem (2.22) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \underline{M} \ddot{\underline{X}}_a(t) + \underline{C} \dot{\underline{X}}_a(t) + \underline{K}(t) \underline{X}_a(t) &= \underline{Kl}(t) ( \underline{X}_g(t) + \underline{X}_R(t) ) \\ &+ \underline{KB} \underline{X}_{gb}(t) - \underline{Cl}(t) \underline{F}_d \\ &+ \underline{CB} \underline{X}_{gb}(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$t = t + \Delta t$  zamanında denklem (3.1) aşağıdaki şekli alacaktır.

$$\begin{aligned} \underline{M} \ddot{\underline{X}}_a(t + \Delta t) + \underline{C} \dot{\underline{X}}_a(t + \Delta t) + \underline{K}(t + \Delta t) \underline{X}_a(t + \Delta t) \\ = \underline{Kl}(t + \Delta t) ( \underline{X}_g(t + \Delta t) + \underline{X}_R(t + \Delta t) ) + \underline{KB} \underline{X}_{gb}(t + \Delta t) \\ - \underline{Cl}(t + \Delta t) \underline{F}_d + \underline{CB} \underline{X}_{gb}(t + \Delta t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Bilindiği gibi, doğrusal ivme yönteminin uygulanabilmesi için katsayı matrisleri olan  $\underline{M}$ ,  $\underline{C}$  ve  $\underline{K}$  matrislerinin denklem (3.1) ve (3.2)'de aynı olması gerekmektedir. Bu problemdeki rijitlik matrisi,  $\underline{K}$ , zamana bağımlıdır. Bu zamana bağımlılık her zaman adımında  $\underline{K}(t)$  ve  $\underline{K}(t + \Delta t)$  matrislerini karşılaştırarak kontrol edilmelidir. Rijitlik matrislerinin farklılık gösterdiği zaman dilimlerinde eşitliğin sol tarafında aynı matrislere sahip olmak için denklem (3.1) aşağıdaki gibi düzenlenecektir.

$$\begin{aligned} \underline{M} \ddot{\underline{X}}_a(t) + \underline{C} \dot{\underline{X}}_a(t) + \underline{K}(t + \Delta t) \underline{X}_a(t) \\ = \underline{Kl}(t) ( \underline{X}_g(t) + \underline{X}_R(t) ) + \underline{KB} \underline{X}_{gb}(t) - \underline{Cl}(t) \underline{F}_d \\ + \underline{CB} \underline{X}_{gb}(t) + ( \underline{K}(t + \Delta t) - \underline{K}(t) ) \underline{X}_a(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Böylece, denklemler çözüm yönteminin uygulanabileceği şekle girmiş bulunmaktadır.

Aşağıdaki denklemler doğrusal ivme yönteminin hareket denklemlerine uygulanmasıyla elde edilmiştir

$$\bar{K} = \underline{K} + \frac{6}{\Delta t} \underline{M} + \frac{3}{\Delta t} \underline{C} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{P}(t) = \Delta \underline{P}(t) + \underline{M} \left( \frac{6}{\Delta t} \dot{\underline{X}}_a(t) + 3 \ddot{\underline{X}}_a(t) \right) \\ + \underline{C} \left( 3 \dot{\underline{X}}_a(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{\underline{X}}_a(t) \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

burada,

$$\Delta \underline{P}(t) = \underline{P}(t + \Delta t) - \underline{P}(t) \quad (3.6)$$

ve,  $\underline{P}(t)$  ve  $\underline{P}(t + \Delta t)$  denklem (3.3) ve (3.2) nin sağ tarafında yer alan terimlerin toplamını sembolize eden yük vektörleridir.

Peşpeşe gelen iki zaman arasında, mutlak boru deplasmanlarında oluşacak değişiklik denklem (3.7)'deki ilişki yoluyla hesaplanacaktır.

$$\bar{K} \Delta \underline{X}_a(t) = \Delta \bar{P}(t) \quad (3.7)$$

Böylece,  $t = t + \Delta t$  zamanı için mutlak boru deplasmanları hesaplanabilmektedir.

$$\underline{X}_a(t + \Delta t) = \underline{X}_a(t) + \Delta \underline{X}_a(t) \quad (3.8)$$

Denklem (3.9) mutlak boru hızlarının artım denklemdir.

$$\Delta \dot{\underline{X}}_a(t) = \frac{3}{\Delta t} \Delta \underline{X}_a(t) - 3 \dot{\underline{X}}_a(t) - \frac{\Delta t}{2} \ddot{\underline{X}}_a(t) \quad (3.9)$$

Denklem (3.9) ve (3.10) kullanılarak  $t = t + \Delta t$  anındaki mutlak boru hızları elde edilecektir.

$$\dot{\underline{X}}_a(t + \Delta t) = \dot{\underline{X}}_a(t) + \Delta \dot{\underline{X}}_a(t) \quad (3.10)$$

Sistemin dinamik dengede olduğu gerçeği gözönünde tutularak  $t = t + \Delta t$ 'de mutlak boru ivmeleri hareket denklemi kullanılarak elde edilecektir.

$$\begin{aligned} \ddot{\underline{X}}_a(t + \Delta t) = \underline{M}^{-1} \{ \underline{P}(t + \Delta t) - \underline{C} \underline{X}_a(t + \Delta t) \\ - \underline{K}(t + \Delta t) \underline{X}_a(t + \Delta t) \} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Bu aşamada, koordinat sistemleri arasındaki ilişkinin belirtildiği denklem (2.10 a,b,c) kullanılarak bağıl deplasman, hız ve ivmeleri hesaplamak olası olacaktır.

### 3.2. Sayısal çözüm yönteminin uygulanmasına ilişkin notlar

Bu çözüm yönteminin uygulanmasında yöntemden kaynaklanacak sayısal hatalara düşmemek için kullanılacak zaman dilimi özenle seçilmelidir. Sistemin en küçük doğal periyodunun  $1/10$ 'una eşit veya daha küçük olarak seçilecek zaman diliminin sayısal kararlılığın sağlanması için yeterli olduğu bilinmektedir. Buna karşın, kayma olması halinde sistemin doğal periyodlarını bulmak imkansızdır. Zaman diliminin seçimi için önerilecek yöntem, ilkin kayma olmadığı varsayımı ile sistemin en küçük doğal periyodunun bulunması daha sonra olası kaymaların da etkisi gözönünde bulundurularak bir zaman diliminin saptanması olacaktır. Tüm bunlara karşın elde edilen sonuçlar kontrol edilmeli ve sonuçlardan şüphe edildiği durumlarda daha küçük zaman dilimi kullanılarak sonuçlar yeniden incelenmelidir.

Şekil 2.2'den de görülebileceği gibi, bu çalışmada kabul edilen zemin yay kuvveti-bağıl zemin-boru deplasmanı ilişkisi kaymanın olduğu anlarda ani değişiklikler göstermektedir. Bu ani değişiklikler, sayısal çözüme bir takım güçlükler getirecektir.

Bir analizin başlangıcında zemin-boru etkileşimi tüm boru parçaları için doğrusal elastiktir. Bu aşamada hesaplamalar saptanmış olan standart zaman dilimi kullanılarak sürdürülür. Her zaman adımından sonra her bir boru parçasının bağıl zemin-boru deplasmanının kayma limitini aşıp aşmadığı kontrol edilmelidir. Herhangi bir boru parçası kayma limitini aştığında son iki zaman adımındaki değerler ve doğrusal enterpolasyon tekniği kullanılarak bağıl zemin-boru deplasmanının kayma limitine ulaştığı an tesbit edilmeye çalışılmalıdır. Bu işlemler istenen doğruluk derecesine erişene kadar sürdürülmelidir. Kayma limitine ulaştığı kabul edilen an saptandıktan sonra peşisıra gelecek zaman dilimi boru veya boruların ani davranış değişikliğinden kaynaklanacak sayısal hatalara düşmemek için standart olan- dan çok daha küçük olarak seçilmelidir. Benzeri dikkat boru veya boruların yeniden elastik zemin-boru etkileşimine bağlıacağı zamanda da gösterilmelidir.

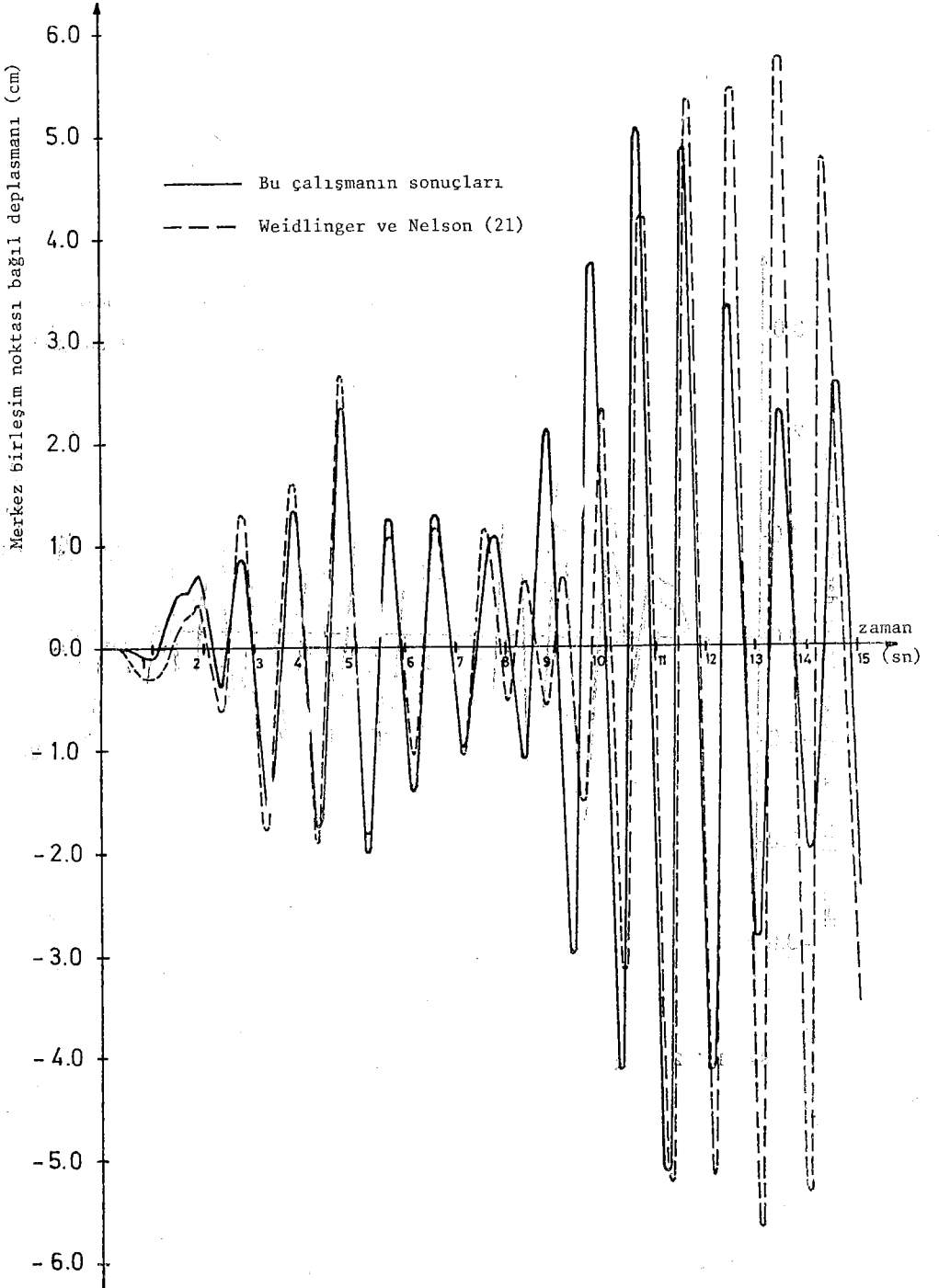
#### 4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda, yeraltı boru hatlarının sismik davranışını etkileyen parametreler üzerinde yapılan çalışmaların sonuçları sunulacaktır. Sayısal çalışmaların yapılabilmesi için önceki kısımlarda sunulan model ve sayısal çözüm yöntemi kullanılarak PIPE adında özel amaçlı bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

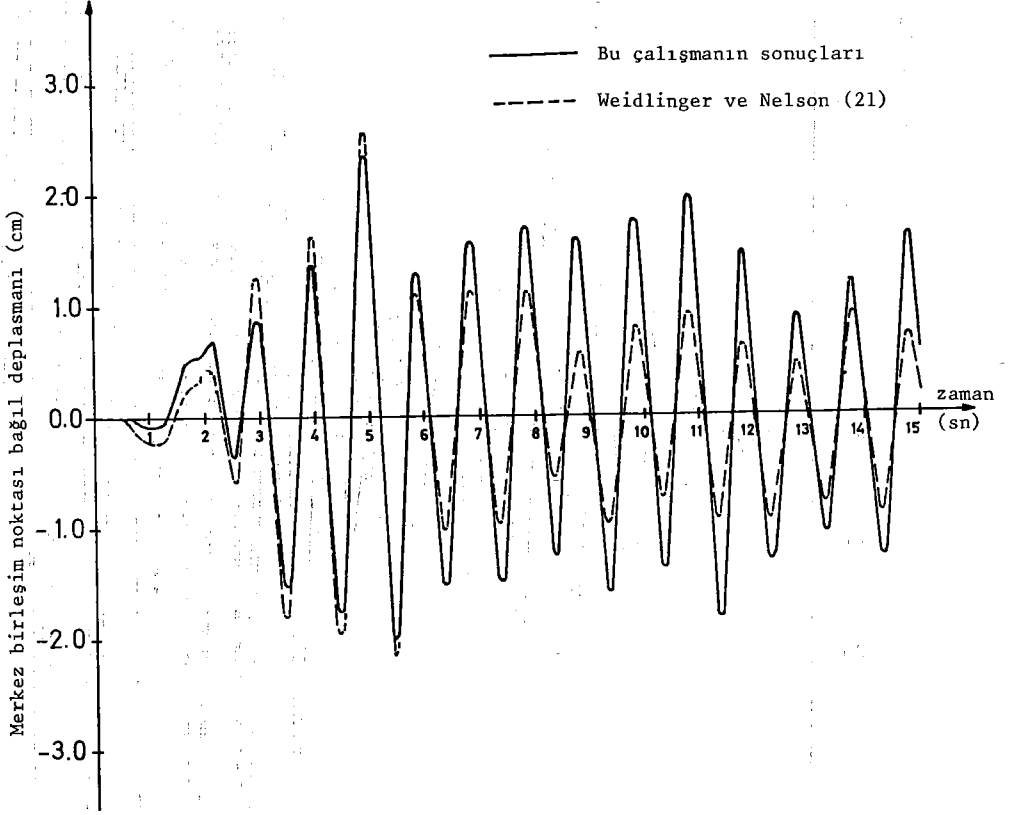
##### 4.1. Program PIPE'in incelenmesi

Geliştirilen programın sağlaması için aşağıda anlatılan yöntem kullanılmıştır. Başka çalışmaların sonuçlarıyla bir karşılaştırmanın yapılabilmesi için program öncelikle doğrusal zemin-boru etkileşiminin geçerli olduğu hal için kontrol edilmiştir. Bulunan diğer çalışmalarla bu durumda gösterdiği uyum gözlemlendikten sonra programın doğrusal olmayan hallerdeki sonuçları, zemin davranışındaki doğrusal olmayan durumun azalmasıyla sonuçların doğrusal haldeki sonuçlara yaklaşması gerektiği gerçeği gözönüne alınarak, kontrol edilmiştir.

Yukarıda açıklanan yöntemin ilk kısmı Weidlinger ve Nelson'un (21) bir çalışması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kurduğumuz modelde bulunmadığından dolayı PIPE programının da kapsamadığı zemin sönüm faktörü hariç aynı fiziksel veriler ve yer hareketi kullanılarak elde edilen sonuçlar yukarıda belirtilen çalışmanın sonuçlarıyla başarılı bir niteliksel uyum içindedir. 20 ve 40 boru parçalı sistemler için program PIPE yoluyla elde edilen sonuçlarla Weidlinger ve Nelson'un sonuçları Şekil 4.1 ve 4.2'de merkez birleşim noktasının bağıl deplasmanının zamana göre değişimi cinsinden karşılaştırılmalı olarak çizilmiştir. Şekillerden gözlenebileceği gibi 40 boru parçalı halde iki çalışmanın sonuçları çok iyi bir uyum göstermektedir. Bu uyum 20 boru parçalı sistem için elde edilen sonuçlarda azalmaktadır. Genel davranış benzerliğine karşın büyüklüklerde ortaya çıkan bu farklılık tümüyle program PIPE'da zemin sönüm faktörünün katılamamasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmalar program PIPE'in doğrusal elastik zemin-boru etkileşimi halinde geçerli olduğunun yeterli kanıtı olarak kabul edilmiştir. Doğrusal olmayan halde programın irdelenmesi Şekil 4.5 ve 4.7 ele alındığında yapılacaktır.



Şekil 4.1 20 parçalı boru için sonuçların karşılaştırılması



Şekil 4.2 40 parçalı boru için sonuçların karşılaştırılması

Şekil 4.3 yapılan bir parametrik çalışma sırasında 7. boru parçasının zemin yay kuvveti -bağıl zemin-boru deplasmanı ilişkisini göstermektedir. Şeklin teori kısmında bahsedilen Şekil 2.2 ile benzerliği program PIPE'a modelde planlanan zemin-boru ilişkisinin tümüyle doğru olarak aktarıldığını göstermektedir. Bu ise programın istendiği gibi çalıştığına ek bir kanıt olarak gösterilebilir.

#### 4.2. Parametrik çalışmalar

##### 4.2.1 Referans değerleri

Parametrik çalışmaların ilk aşamasında sistemin bazı değişkenlerine referans değerleri olarak adlandırılan sayısal değerler verilmiştir. Parametrik çalışmalar süresince aksi belirtilmediği sürece aşağıda belirtilen referans değerleri kullanılmıştır.

##### Boru hattı parametreleri

boru parçası adedi	$n = 10$
boru parçası uzunluğu	$L_i = 600 \text{ cm}$
sınır koşulları	Serbest-serbest
birleşimlerin sönüm faktörü	$C_i = 0 \text{ kg/sec}$

##### Zemin parametreleri

dalga yayılım hızı	$V_i = 30000 \text{ cm/sec}$
zemin rijitliği	$k_{s_i} = 2500 \text{ N/cm/cm}$
kayma limiti	$x_{rs_i} = 0.03 \text{ cm}$
$\mu_d/\mu_s$ oranı	0.7

##### Sismik parametreler

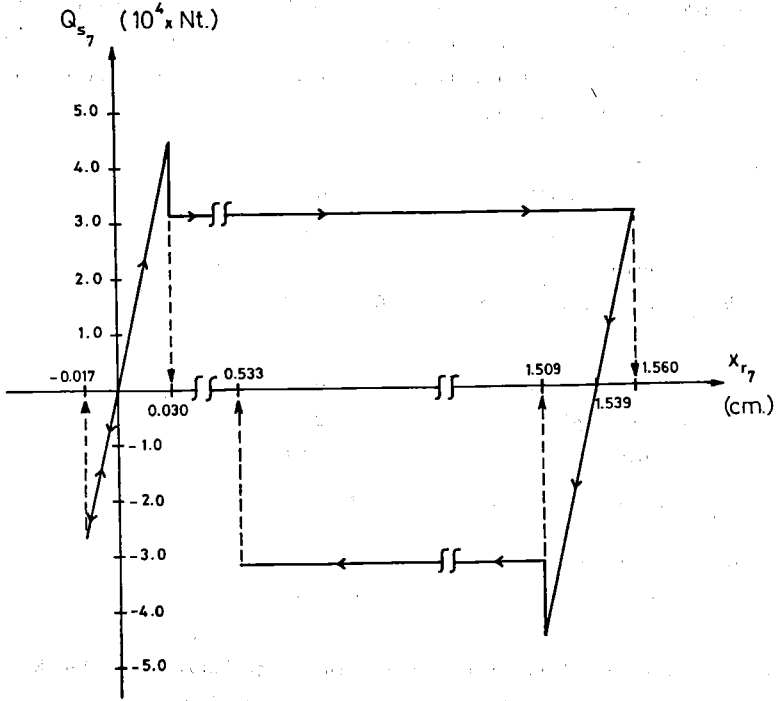
Yer hareketi	bak. Şekil 4.4.
--------------	-----------------

Burada, serbest-serbest sınır deyimi sınır koşullarını modellemek için kullanılan yayların çok ufak bir rijitliğe sahip olduğunu göstermek için kullanılmaktadır. Bu rijitlik teorik olarak sınıra yaklaşacaktır. Anlaşılabileceği üzere, sınır koşulları boru hattının sismik davranışı üzerinde herhangi bir direnç gösteren etkiye sahip olamayacaklardır. Uçlarında bulunan özel cihazlarla sınırlardaki yapılardan iyi bir şekilde titreşime karşı izole edilmiş bir boru hattı bu fiziksel durum için güzel bir örnektir. Diğer taraftan sınırdaki bulunan sonsuz rijit bir yay ise sabit sınır koşulunu oluşturacaktır. Bu kez sınır koşulu sistemin sismik davranışı üzerinde diğer sistem parametreleri kadar etkili olacaktır.

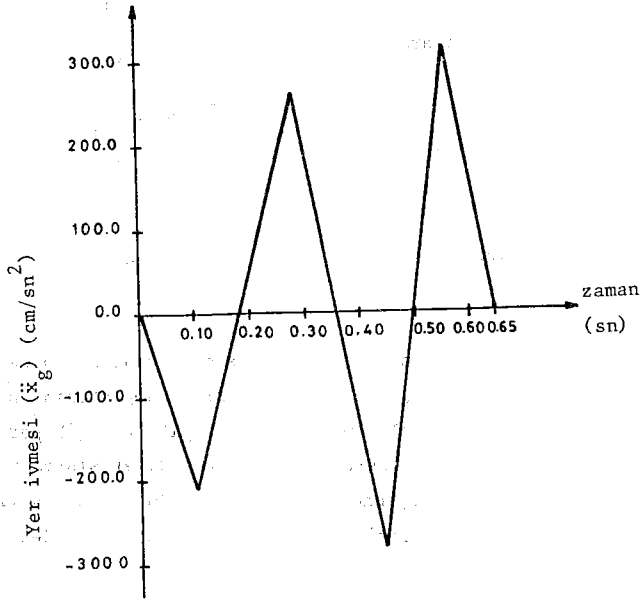


$$k_{\text{bağlantı}} = 5 \times 10^6 \text{ N/cm}$$

$$x_{rs} = 0.03 \text{ cm}$$



Şekil 4.3 7'nci boru parçası için zemin yay kuvveti-bağıl zemin boru deplasman ilişkisi (Serbest-ankastre)



Şekil 4.4 Yer hareketi

Boru hattının bir ucunda mevcut bir yapıya yapılacak yüksek rijitlikte bir bağlantı bu hal için geçerli bir örnektir.

Parametrik çalışmalarda kullanılan yer hareketi rastgele seçilmiştir. Uzun süreli, gerçek bir yer hareketinin çalışmalarda kullanılması kuşkusuz daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Fakat problemin doğrusal olmayan doğasından kaynaklanan çok sayıda iterasyon yapma gereği ve yapılan çok sayıda parametrik çalışma araştırmacıları daha kısa süreli herhangi bir yer hareketini kullanmaya itmiştir.

#### 4.2.2 Araştırma parametreleri

Bu çalışmada aşağıda belirtilen parametrelerin boru hatlarının sismik davranışı üzerindeki etkileri araştırılacaktır.

- Kayma limiti
- Sınır koşulları
- Zemin rijitliği
- Dalga yayılma hızı

#### 4.3. Sonuçların tartışılması

##### 4.3.1 Genel

Bu çalışmada kayma limiti zemin ve boru parçası arasında oluşan bağlı deplasman cinsinden ifade edilmiştir. Öte yandan; bu değişkenin boru parçasının gömülme derinliği, boru yalıtımı, boru çapı gibi değişik parametrelerin bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir. Böylece, diğer sistem parametrelerini sabit tutup birimi değiştirmek yoluyla verilen bir kayma limitinde yukarıda belirtilen parametrelerin sistemin davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak mümkün olacaktır.

Bugüne değin yapılan çalışmalar genellikle yarı-statik yaklaşımlarla gerçekleştirilmiştir. Bilindiği üzere bu yöntem sistemin sismik davranışında dinamik terimlerin ihmal edilebilir boyutlarda olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu yaklaşım bazı haller için yeterli doğruluk derecesini taşıırken bazı hallerde boru sayısı, boru kütlesi, gömü derinliği gibi faktörlere bağlı olarak dinamik terimlerin önem kazanması ile yetersiz bir hale gelecektir. Ayrıca, kayma olayının ele alınması ile dinamik etkiler ek bir önem kazanacaktır. Boru parçası sayısı dışında tüm özellikleri aynı olan iki sistemin maksimum deplasmanlarındaki farklılık Şekil 4.1 ve 4.2'de

izlenmektedir. Bu farklılık boru sayısının davranış üzerindeki etkisini dolayısıyla dinamik analizin önemini gösteren çarpıcı bir örnektir.

Herbir parametrik çalışma ele alınan parametrenin değişik değerleri için elde edilmiş iki değişik tip eğri grubunun elde edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Birinci tip eğriler maksimum bağıl birleşim noktası deplasmanının bağlantı rijitliğine karşı çizilmesi ile elde edilirken, maksimum bağıl zemin boru deplasmanının bağlantı rijitliği ile değişimi ikinci tip eğri grubunu oluşturmuştur.

Çalışmalarda bu iki tip eğrinin ters bir ilişki içinde olduğu görülmüştür. Örneğin, maksimum bağıl birleşim noktası deplasmanında oluşan bir düşüş, maksimum bağıl zemin-boru deplasmanında bir artış olarak gözlenmektedir. Bu ters ilişki yapılan tüm parametrik çalışmalarda izlenmiştir.

Değişik parametrik çalışmalarla elde ettiğimiz eğriler bazı ortak yönlerle sahiptir. Bu benzerlikler aşağıda kısaca açıklanacaktır.

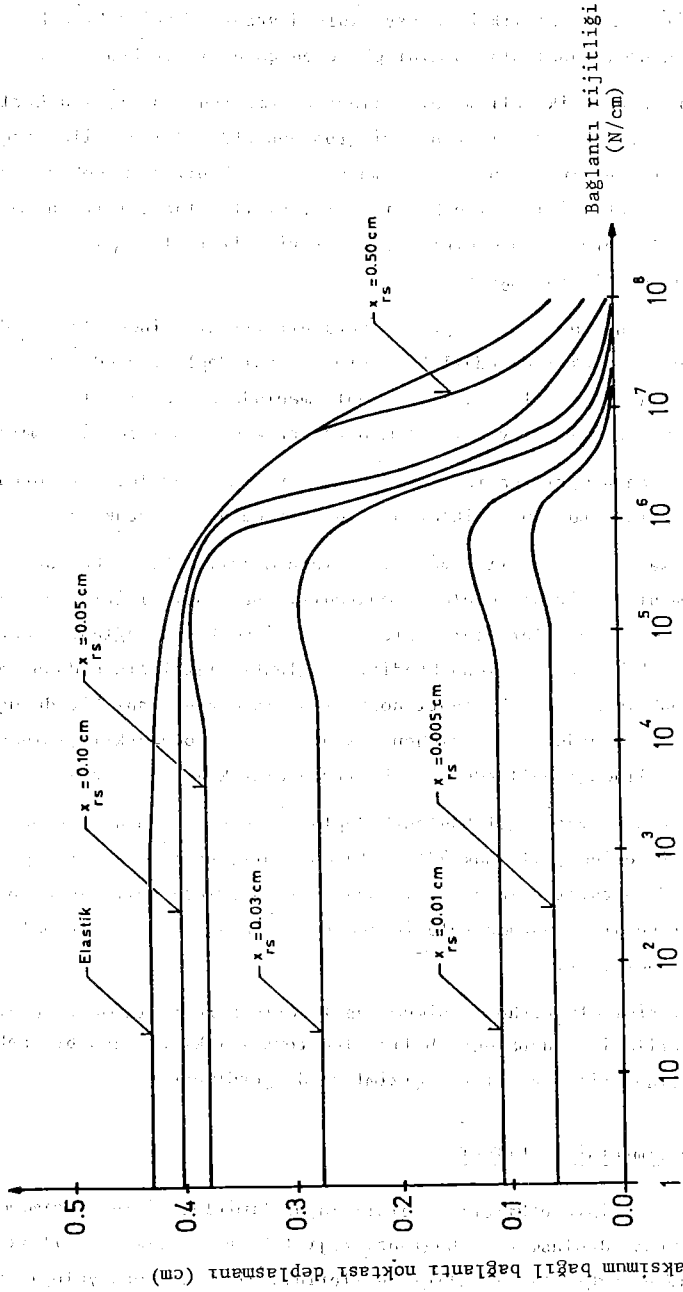
Düşük bağlantı rijitliği değerleri için maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanları bir plato oluşturmaktadır. Bağlantı rijitliğinin zemin rijitliğine yakın değerler aldığı kısımda maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanında bir artış gözlenmektedir. Bağlantı rijitliğinin daha fazla artmasıyla maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanında ani bir düşüş izlenecektir. Eğrilerde artış izlenen kısımlar, zemin-boru etkileşiminde kaymanın ele alındığı hallerde daha belirgin olarak gözlenmektedir.

Eğriler maksimum bağıl bağlantı deplasmanının ani düşüş gösterdiği kısımda birbirlerine yaklaşmaktadır. Bu davranış; bağlantı rijitliğinin artması ile bu parametrenin sistemin davranışı üzerinde belirleyici bir hal aldığını ve diğer parametrelerin göreceli olarak etkisiz bir hale geldiğini göstermektedir.

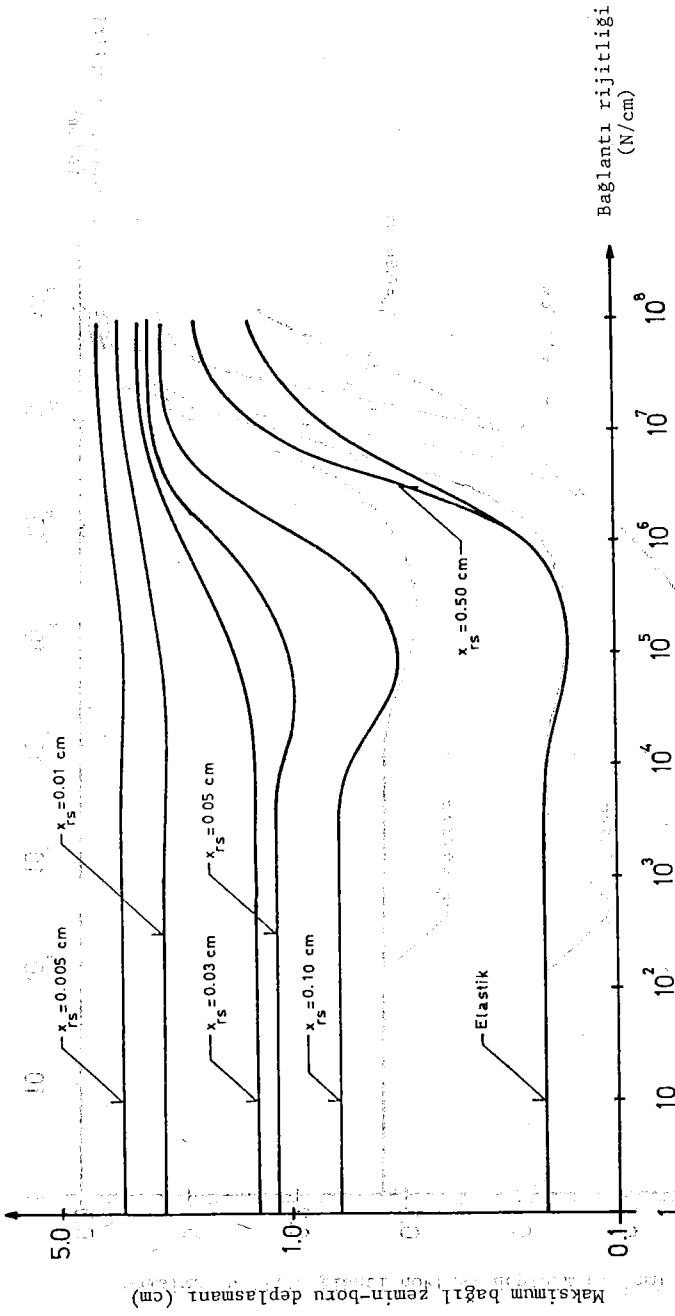
İkinci tipi oluşturan maksimum bağıl zemin-boru deplasmanı - bağlantı rijitliği eğrilerinin daha önce belirtilen ters ilişkiye uygun bir şekilde oldukları elde edilen verilerin çizimlerinde görülmektedir.

#### 4.3.2 Kayma limitinin etkileri

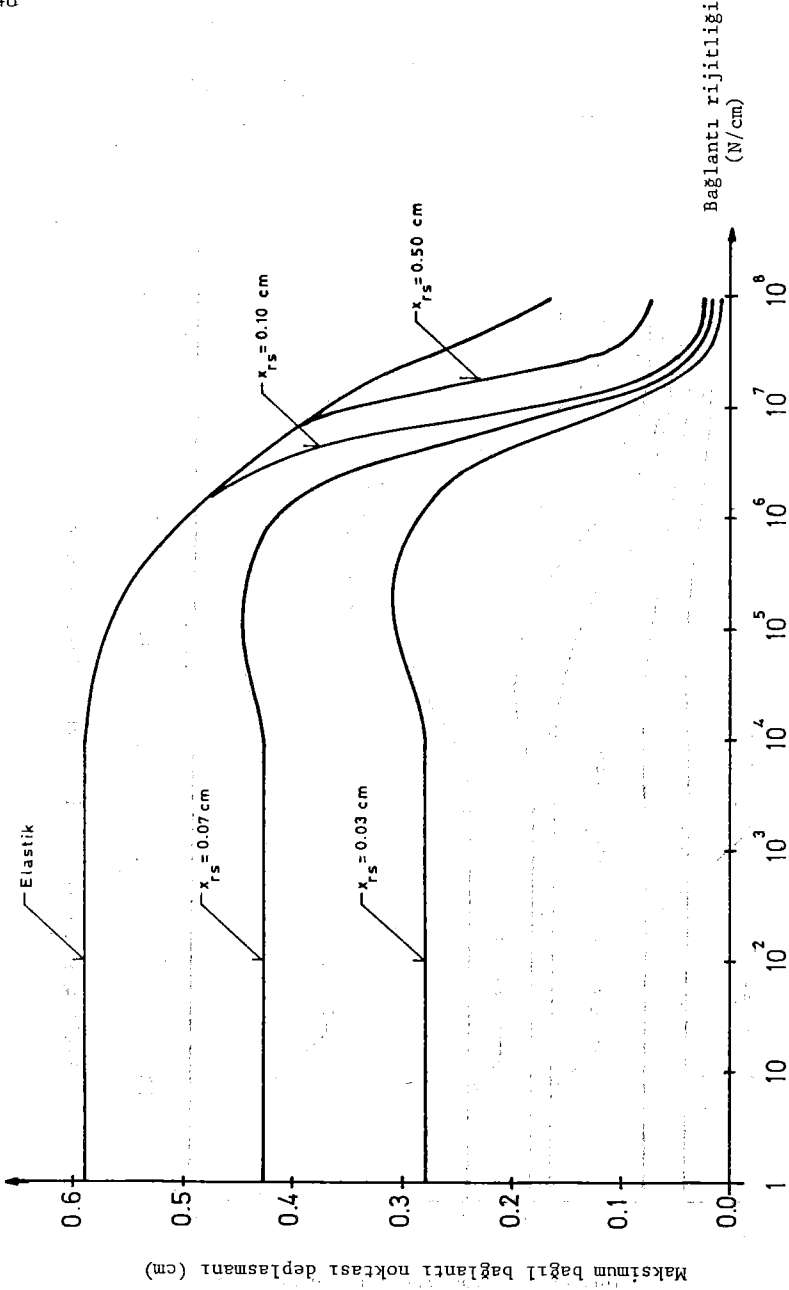
Kayma limitinin etkileri, değişik kayma limitleri için maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanı - bağlantı rijitliği ve maksimum bağıl zemin-boru deplasmanı - bağlantı rijitliği eğrilerinin elde edilmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen eğriler şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de



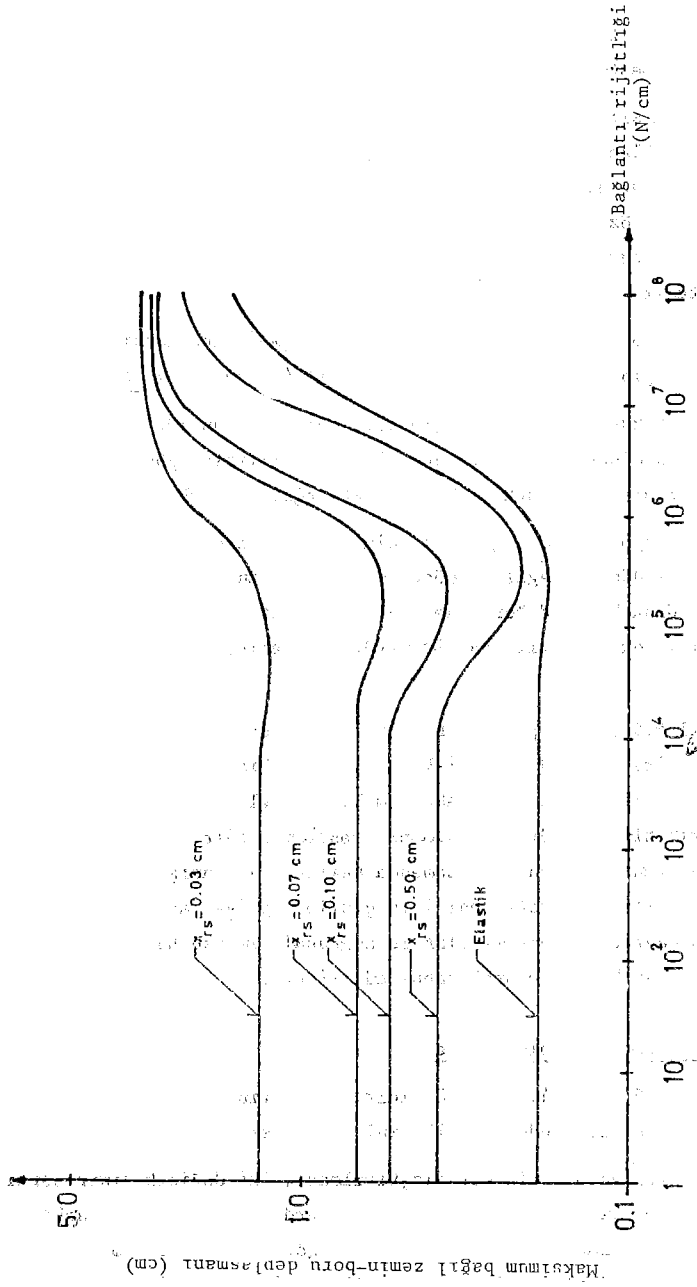
Şekil 4.5 Kayma limitinin etkisi (serbest-serbest)



Şekil 4.6 Kayma limitinin etkisi (Serbest-serbest)



Şekil 4.7 Kayma limitinin etkisi (Serbest-ankastre)



Şekil 4.8 Kayma limitinin etkisi (serbest-ankastre)



görülmektedir. Bunlardan ilk ikisi serbest-serbest sınır şartları diğer ikisi ise serbest-ankastre sınır koşulları halinde elde edilmiştir.

Değişik sınır koşulları için maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanının bağlantı rijitliğine ve kayma limitine göre değişimini gösteren Şekil 4.5 ve 4.7 üzerinde yapılan incelemeler kayma limitinde oluşan bir azalmanın, özellikle düşük bağlantı rijitlikleri halinde maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanlarında önemli azalmalara yol açacağını göstermektedir.

Öte yandan kayma limitinde oluşacak düşmelerin, maksimum bağıl zemin-boru deplasmanlarını artıracığı Şekil 4.6 ve 4.8'de görülmektedir.

Değişik kayma limitleri için elde edilmiş olan eğriler bağlantı rijitliğinin düşük olduğu hallerde daha büyük farklılıklar göstermekte, bağlantı rijitliği arttıkça farklılık azalmakta eğriler birbirine yaklaşmaktadır.

Düşük kayma limit değerleri için maksimum bağıl zemin-boru deplasmanı eğrileri düzelve eğilimi göstermektedir. Bu ise belli bir kayma limitinden daha küçük değerlerde bağlantı rijitliğinin bağıl zemin-boru deplasmanını çok az etkileyen bir parametre haline geleceğini göstermektedir.

Şekil 4.5 ve 4.7 program PIPE'in ek bir sağlamasını yapmak için de kullanılabilir. Bilindiği gibi bu şekiller değişik sınır koşullarında, değişik kayma limitleri için maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanının bağlantı rijitliğine göre değişimini göstermektedir. Eğri gruplarında gözlenen davranış, ki bu aynı zamanda beklenen davranıştır, kayma limiti büyüdükçe eğrilerin elastik hal için çizilen eğriye yaklaşmaları şeklindedir. Bu davranış programı PIPE'in doğrusal olmayan haller için de geçerli olduğunun kanıtı olarak kabul edilmiştir.

#### 4.3.3 Sınır koşullarının etkileri

Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8 sınır koşullarının yeraltı boru hatlarının sismik davranışı üzerindeki etkilerini incelemek için de kullanılabilirler.

Şekil 4.5 ve 4.7'nin karşılaştırılması, iki değişik sınır şartında eğrilerin genel olarak aynı davranışı gösterdiğini ve serbest-ankastre sınır koşulu halinde serbest-serbest hale göre daha yüksek maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanları elde edildiğini göstermektedir.

Daha önce bahsedilen ters ilişki fikrine uygun olarak, Şekil 4.6 ve 4.8'den maksimum bağıl zemin-boru deplasmanlarının serbest-ankastre

hal için serbest-serbest sınır koşullarına göre daha küçük değerler alacağı gözlenebilir.

Şekil 4.9 belirli bir zamanda 10 parçası olan boru hattının mutlak boru deplasmanlarının, bağıl zemin-boru deplasmanlarının, ve bağıl bağlantı noktası deplasmanlarının boru hattı boyunca dağılımını göstermektedir. Sonuçlar iki değişik sınır koşulu için de çizilmiştir. Diğer tüm sistem parametreleri aynı olduğundan Şekil 4.9 sınır koşullarının dinamik davranış üzerindeki etkisini araştırmak açısından yararlı olacaktır.

Şekil 4.9 öncelikle, belirli bir anda sınır koşulları dışında tüm sistem parametrelerinin ve yer hareketinin aynı olduğu iki boru hattının davranışlarındaki farklılıkları göstermektedir. Öte yandan, mutlak deplasmanların serbest ankastre halinde serbest-serbest hale göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanı serbest-ankastre halde sınıra yakın bağlantılarda oluşmaktadır. Serbest-serbest halde ise bu değer orta bağlantılarda gözlenmektedir.

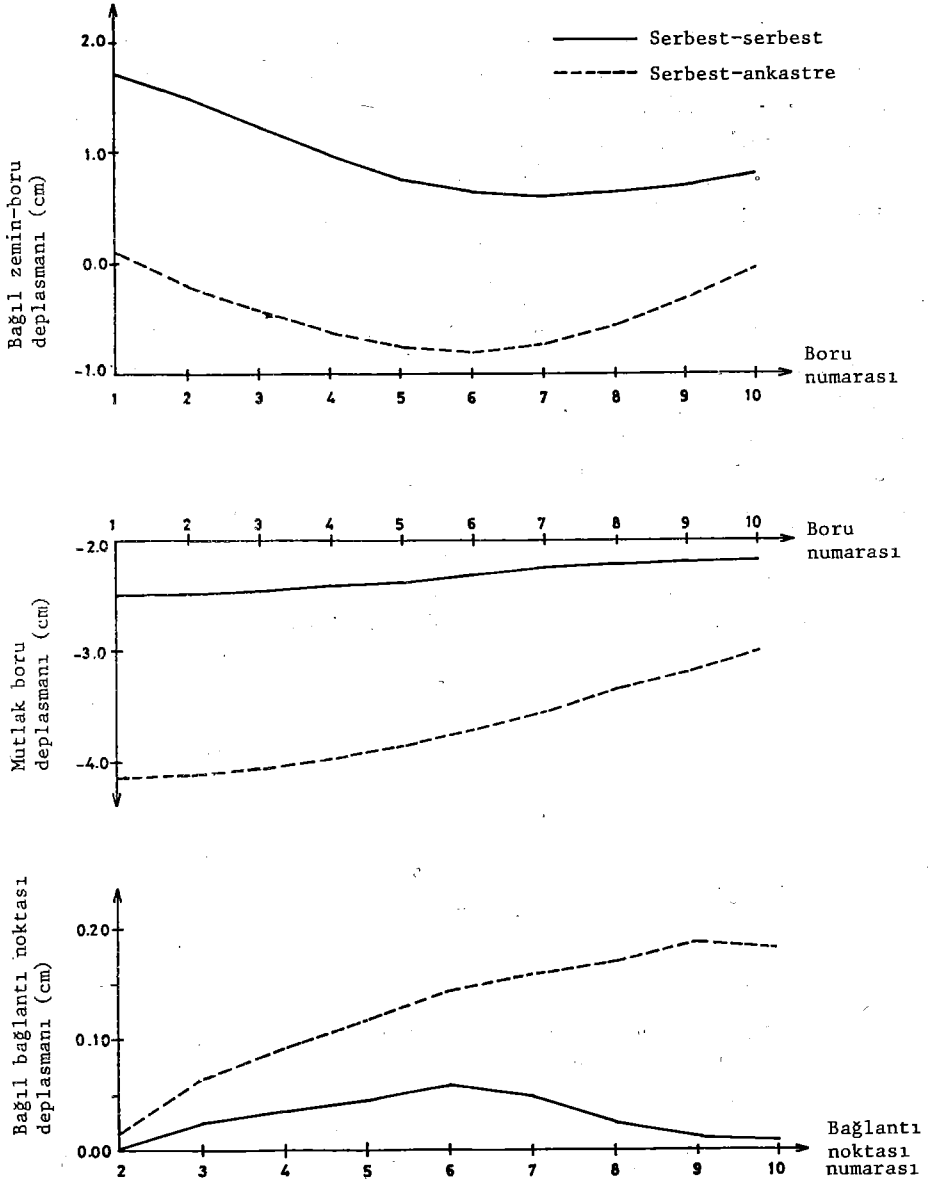
Şekil 4.10'da mutlak boru deplasmanlarının zamana göre değişimi 1., 5. ve 10. boru parçaları için ve iki değişik sınır koşulu için sunulmaktadır. Şekilden aynı sınır koşulu için değişik boru parçalarının benzer davranışlar gösterdiği, bir boru parçasının değişik sınır koşullarında farklı davranışlar gösterdiği gözlenmektedir.

Bu özel halde, serbest-ankastre sınır koşulları halinde serbest-serbest sınır koşullarına göre daha büyük mutlak boru deplasmanları gözlenmiştir. Şekil 4.10 yayılan yer hareketinin etkisini göstermesi açısından da ilginçtir. Mutlak boru deplasmanları dalga yayılım hızından kaynaklanan bir zaman gecikmesi ile srasıyla 1., 5. ve 10. boru parçasında sıfırdan farklı değerler almıştır.

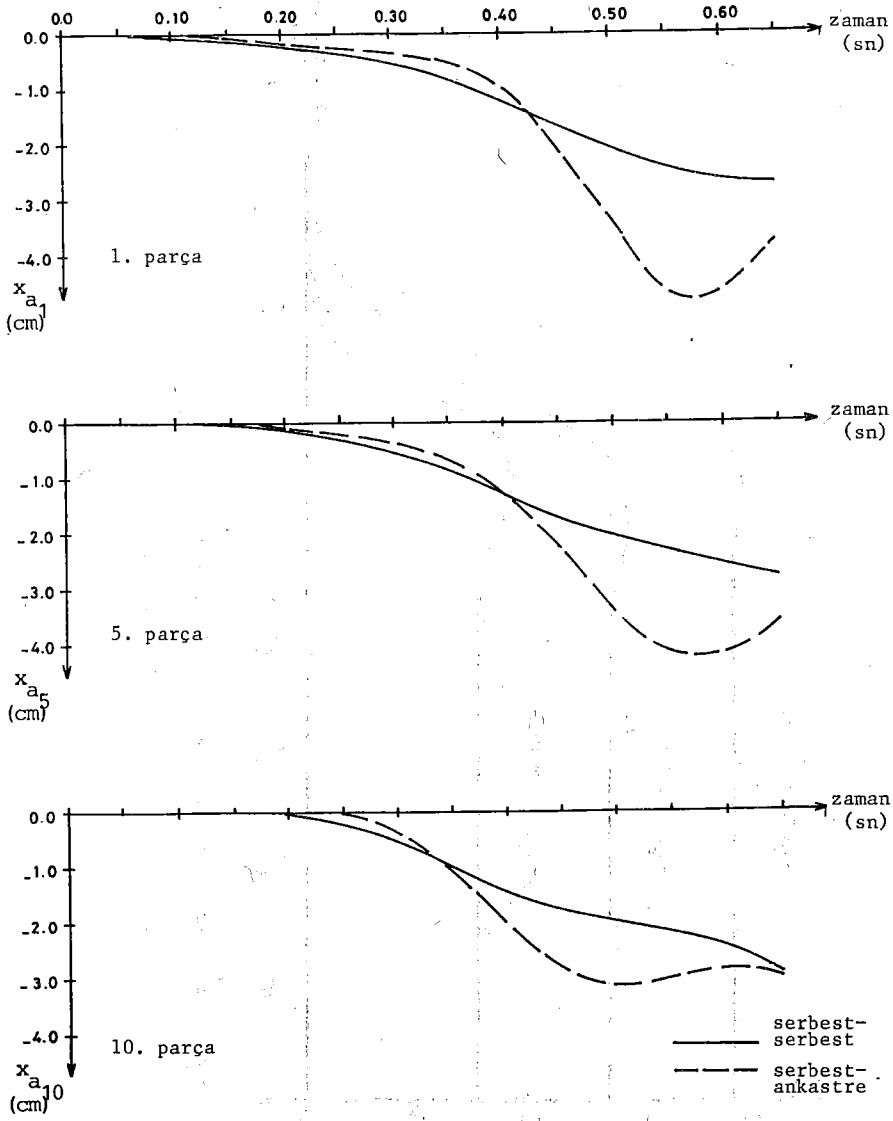
#### 4.3.4 Zemin rijitliğinin etkisi

Zemin rijitliğinin etkisini araştırmak için referans değerleri kullanılarak elde edilen eğriye ek olarak referans zemin rijitliğinden daha büyük ve daha küçük zemin rijitliği kullanılarak iki ek eğri elde edilmiştir.

Şekil 4.11'deki eğrülerin karşılaştırılması daha rijit zemin koşullarında daha büyük bağıl bağlantı noktası deplasmanlarının elde edildiğini ortaya çıkarmaktadır. Maksimum bağıl zemin-boru deplasmanlarının bağlantı rijitliğine göre değişiminin çizildiği Şekil 4.12 daha önce bahsedilen

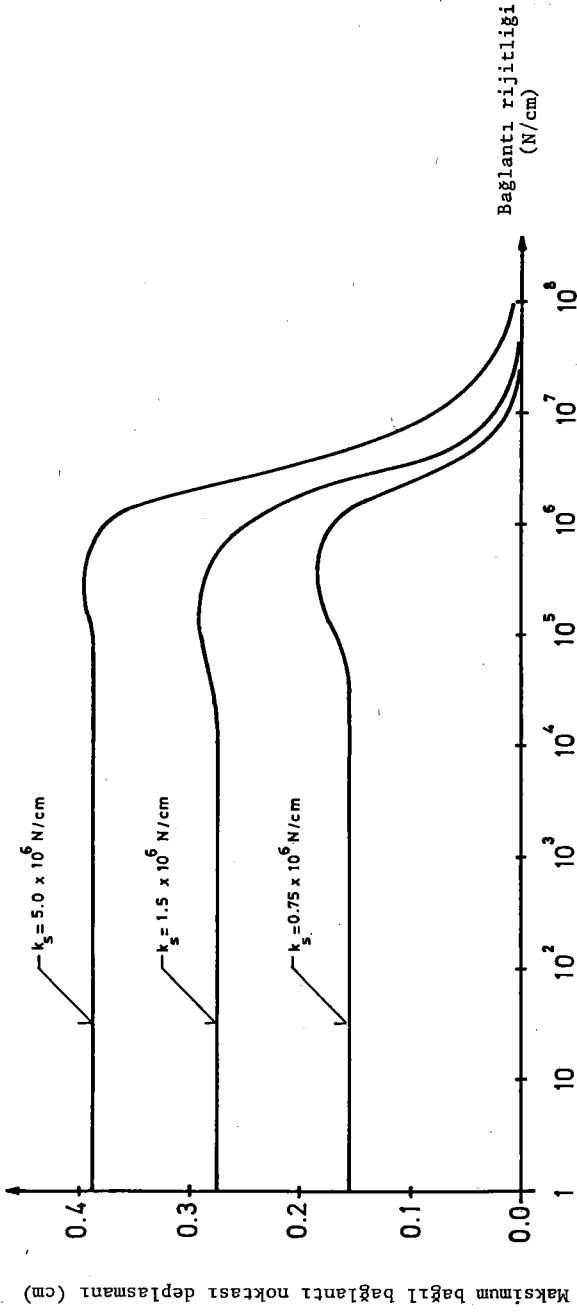


Şekil 4.9  $t=0.55$  sn'de çeşitli deplasmanların boru boyunca değişimi ( $k_{\text{bağlantı}} = 5 \times 10^6$  N/cm)

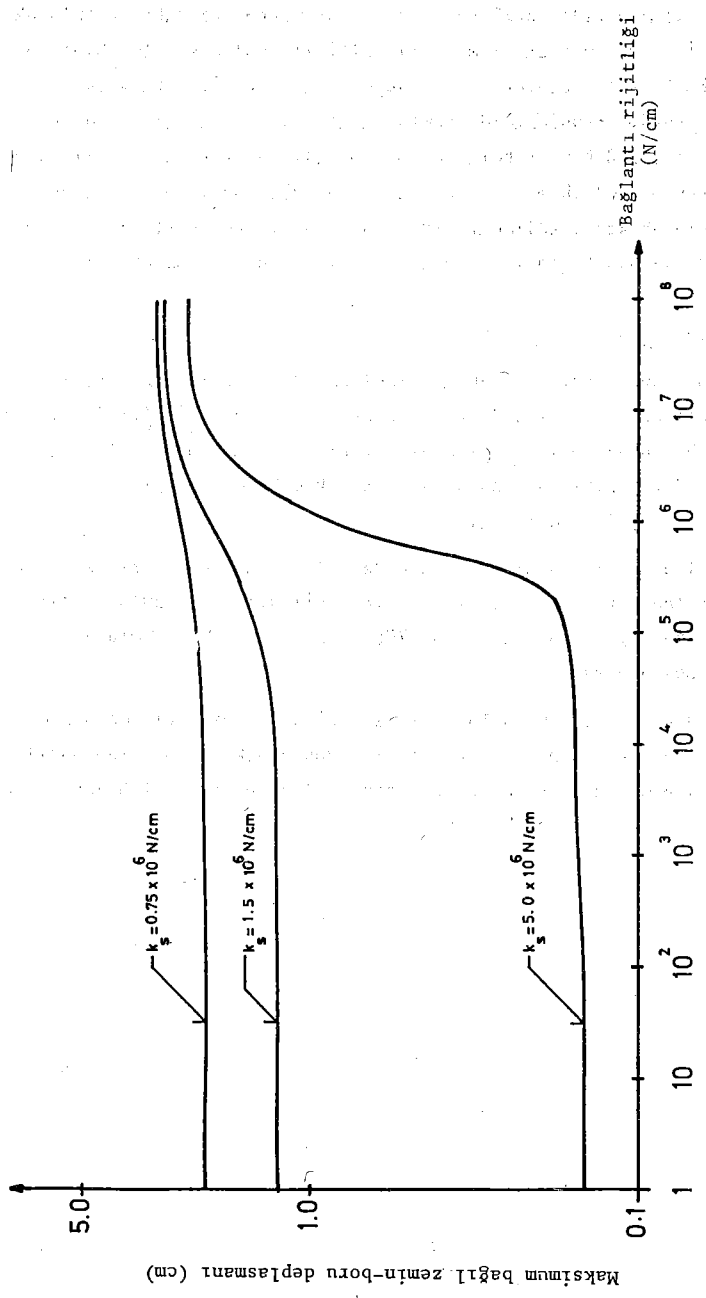


Şekil 4.10 Mutlak deplasmanların zamanla değişimi

( $k_{\text{bağlantı}} = 5 \times 10^6 \text{ N/cm}$ )



Şekil 4.11 Zemin rijitliğinin etkisi (serbest-serbest)



Sekil 4.12 Zemin rijitliğinin etkisi (serbest-serbest)

ters ilişkiye uygun sonuçları içermektedir.

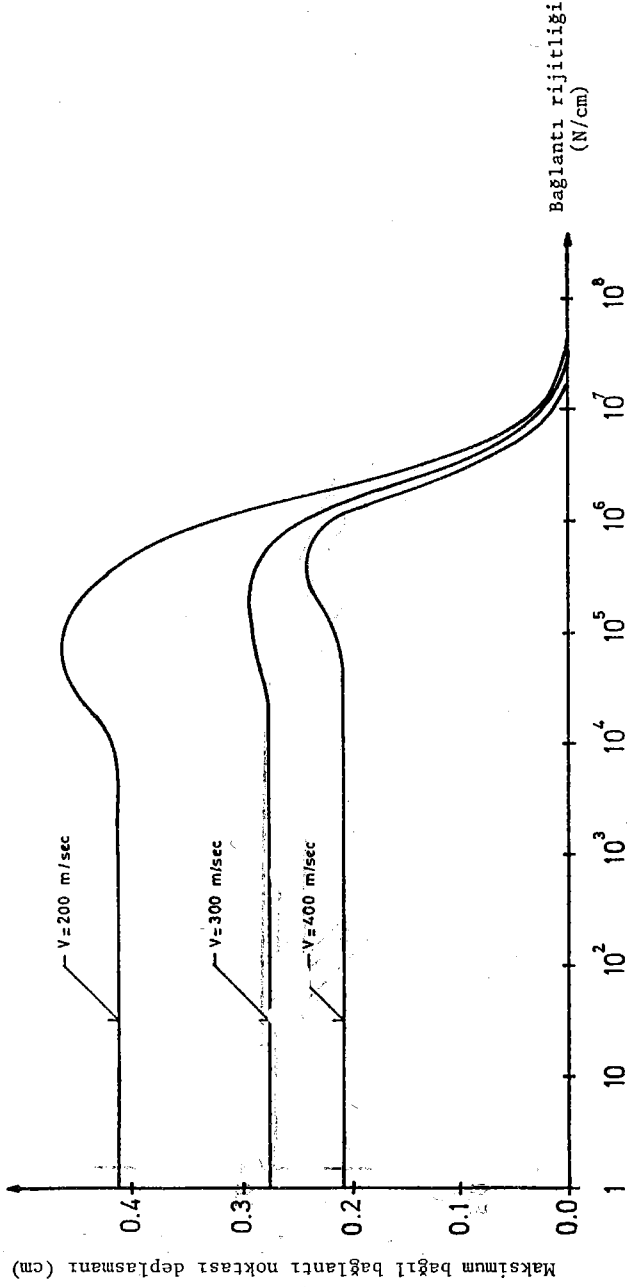
Şekil 4.11 ve 4.12'de verilen sonuçlar zemin rijitliği değiştirilirken, dalga yayılma hızıda dahil tüm sistem parametreleri sabit tutularak elde edilmiştir. Öte yandan, zemin rijitliği ile dalga yayılma hızının birbiri ile bağlantılı parametreler olduğu bilinmektedir. Buna karşın ele aldığımız türden problemlerde zemin rijitliği boru hattının yakın çevresinde önem taşıdığından bölgesel bir özellik olarak kabul edilirken jeolojik çevrenin özellikleri ile ilgili olan dalga yayılma hızı global bir özellik olarak kabul edilmektedir. Bu varsayım zemin rijitliği ile dalga yayılma hızının bağımsız olarak ele alınmasını sağlamaktadır.

#### 4.3.5 Dalga yayılma hızının etkileri

Maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanlarının bağlantı rijitliğine göre değişimleri üç farklı dalga yayılma hızı için Şekil 4.13'de verilmektedir. Daha büyük geçikme zamanını gerektiren daha düşük dalga yayılma hızlarında diğer hızlara nazaran daha büyük maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanları elde edilmiştir.

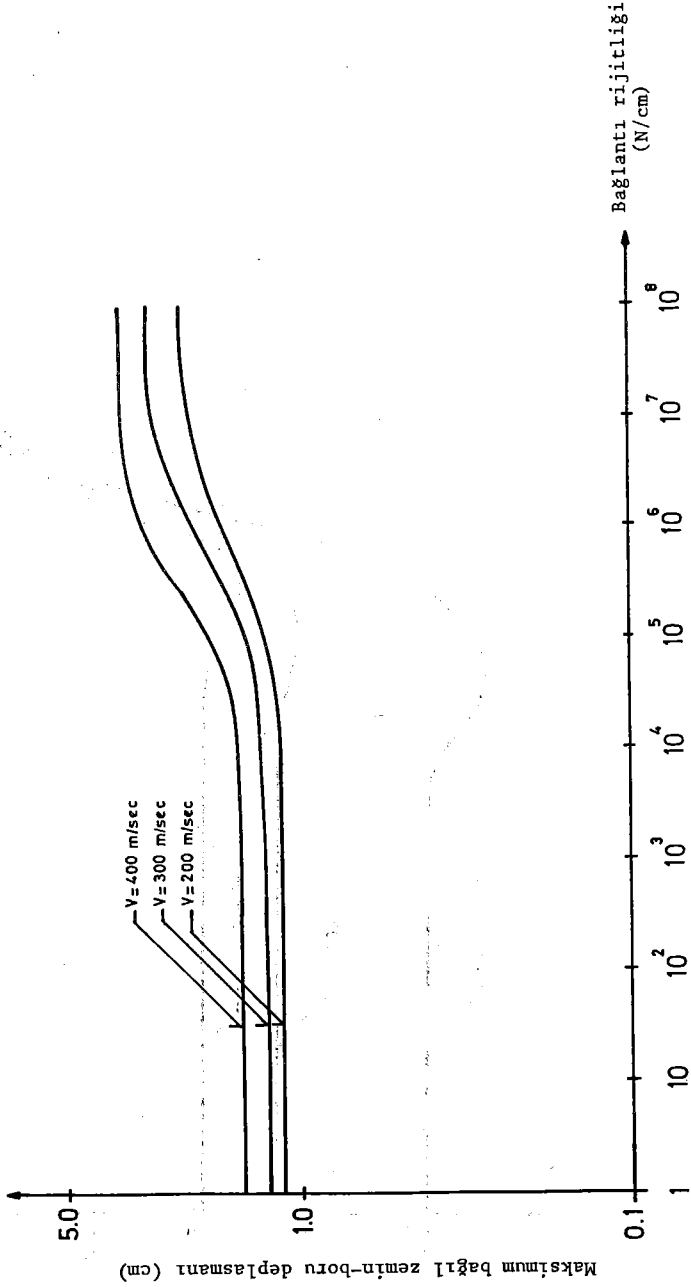
Aynı dalga yayılma hızları için elde edilen maksimum bağıl zemin-boru deplasman- bağlantı rijitliği eğrileri ise Şekil 4.14'de görülmektedir. Daha küçük dalga yayılma hızları daha küçük maksimum bağıl zemin-boru deplasmanlarına neden olmaktadır.

Diğer taraftan, büyük bağlantı rijitliği değerleri için maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanları sifıra yaklaşmakta, maksimum bağıl zemin-boru deplasmanları ise sıfırdan farklı olan, bu sayısal örnekte 4 cm.ye varan, bir üst sınıra yaklaşmaktadır.



Şekil 4.13 Dalga yayılma hızının etkisi (serbest-serbest)





Şekil 4.14 Dalga yayılma hızının etkisi (serbest-serbest)

## 5. ÖZET ve ÖNERİLER

Bu çalışmada; uzun, parçalı yeraltı boru hatlarının sismik davranışı zemin-boru arasında oluşabilecek kaymalar da gözönünde tutularak araştırılmıştır.

Bu amaca yönelik olarak problemin bir analitik modeli geliştirilmiştir. Problem, kayma olgusunun da ele alınması nedeniyle doğrusal olmayan bir şekil almış, bu nedenle hareket denklemlerinin çözümü için sayısal çözüm yöntemleri kullanılmıştır.

Kurulan model ve kullanılan çözüm yöntemleri ışığında PIPE adında bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program PIPE kullanılarak, öncelikle kayma etkisi ve sınır koşulları, zemin rijitliği, dalga yayılma hızı gibi diğer sistem parametrelerinin davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bu analitik-sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

Özellikle dinamik terimlerinsistemin fiziksel özelliklerinden dolayı etkili olduğu hallerde, kaymanın yeraltı boru hatlarının sismik davranışı üzerindeki etkisi çok belirli bir hal almaktadır. Boru parçalarının ağır olması, iyi bir boru yalıtımı (sürtünmeye karşı), boru üzerindeki toprak basıncının az olması kaymanın davranış üzerindeki etkisini artıran faktörlere örnek olarak gösterilebilirler.

Parçalı boru hatlarının tasarımında belkide en önemli parametre olan maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanları kayma limitinin küçülmesiyle azalma gösterecektir.

Serbest-ankastre sınır koşulları, serbest-serbest sınır koşullarına oranla daha büyük maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanlarına neden olmaktadır.

Zemin rijitliğindeki artma daha büyük maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanları yaratacaktır. Yüksek dalga yayılma hızları maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanlarının azalmasına neden olacaktır. Bu parametrik çalışmalar yapılırken zemin rijitliği ile dalga yayılma hızının bağımsız parametreler olarak değerlendirildiği unutulmamalıdır.

Yapılan tüm parametrik çalışmalarda maksimum bağıl zemin-boru deplasmanları ile maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanlarının ters bir ilişki içinde oldukları gözlenmiştir.

Kayma olgusunun maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanları üzerinde azaltıcı bir etkisi bulunmaktadır. Kayma etkisinin daha net bir sunuluşu, değişik frekans aralıklarını içeren gerçekçi yer hareketlerinin kullanıldığı ve öde esasta kayma etkisinin vurgulandığı bir çalışmayla mümkün olacaktır. Bu tür çalışmalar sonucunda kayma etkisinin etkili olduğu bazı limitleri tanımlamak mümkün olacaktır. Böylece, kayma limitinin maksimum bağıl bağlantı noktası deplasmanları üzerindeki azaltıcı etkisini tasarım aşamasında hesaba katan tasarım kriterleri geliştirmek mümkün olacaktır.

Kurulan analitik model ve bağlantılı olarak geliştirilen program, aksenal yönde dinamik etkilere maruz olan ve bu yönde davranış gösteren birçok sistemin analizi için geçerlidir. Şahmerdan yükü gibi düşey yönde dinamik yüklere maruz bir sürtünme kazığının dinamik analizi, geliştirilen teori ve programla yapılabilecek uygulamaların ilginç bir örneğidir.

KAYNAKLAR

1. Arıman, T. and Muleski, G.E. "A review of the response of buried pipelines under seismic excitations", Earthq. Engng. and Str. Dyn. 1981, Vol.9, pp.133-151.
2. Chen, C.C., et al. "Buckling analysis of buried pipelines under seismic loads", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng., 1980, Vol.8, pp.249-256, Istanbul.
3. Clough, R.W. and Penzien, J. "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, 1975.
4. Hakuno, M. "Characteristics of network reliability of various types of life-line systems", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.273-280, Istanbul.
5. Hindy, A. and Novak, M. "Earthquake response of underground pipelines", Earthq. Engng and Str. Dyn. 1979, Vol.7, pp.451-476.
6. Hindy, A. and Novak, M. "Earthquake response of buried insulated pipes", ASCE Jour. of Engng. Mech. Div., 1980, Vol.106, pp.1135-1149.
7. Katayama, T., et al. "Restoration of lifelines in Sendai after the damage caused by the 1978 Miyagi Ken-Oki earthquake", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.233-240, Istanbul.
8. Keizaburo, K. and Isoyama, R. "Damage to buried utility pipes in the 1978 Miyagi Ken-Oki earthquake", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.225-232, Istanbul.
9. Kuribayashi, E. et al. "Functional damage and rehabilitation of life-lines in earthquakes", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.185-192, Istanbul.

10. Kuribayashi, E., et al. "Static and quasi-static seismic response analyses of buried pipelines", Published by Public Works Research Institute, Ministry of Construction, 1981, Tsukuba, Japan.
11. Muhammadi, J. and Ang A.H. "Seismic hazard and safety evaluation of lifeline systems", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.177-184, Istanbul.
12. Novak, M. and Hindy, A. "Seismic analysis of underground tubular structures", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.287-294, Istanbul.
13. O'Rourke, M. and Castro, G. "Effects of wave propagation upon buried pipelines", Earthq. Engng. and Str. Dyn., 1980, Vol.8, pp.455-467.
14. Wang, L.R. and Cheng, K.-M. "Seismic response behavior of buried pipelines", ASME publ., 1978, Paper No.78-WA/PVP-5.
15. Wang, L.R. "Seismic vulnerability, behavior and design of buried pipelines", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.295-302, Istanbul.
16. Wang, L.R. "Field investigation and analysis of buried pipeline under various seismic environments", NSF Grant No. CEE-8209241, 1982, Fears Str. Eng. Lab., Univ. of Oklahoma.
17. Wang, L.R. and Yeh, Y. "Seismic performance evaluation of lifelines", NSF Grant No. CEE-8025172, 1982, Fears Str. Eng. Lab., Univ. of Oklahoma.
18. Wang, L.R. "Role and development of soil parameters for seismic responses of buried lifelines", ASME Publ., 1983, Paper No. PVP-77, New York, USA.

19. Wang, L.R. and Olabimtan, A. "General quasi-static seismic analysis of buried straight piping systems", NSF Grant No. CEE-8209241, 1983, Fears Str. Eng. Lab., Univ. of Oklahoma.
20. Wang, P.C., et al. "Critical seismic assesment of lifeline structures", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng., 1980. Vol.8, pp.257-264. Istanbul.
21. Weidlinger, P. and Nelson, I. "Dynamic seismic analysis of long segmented lifelines", ASME publ., 1978, Paper No. 78-WA/PVP-4.
22. Weidlinger, P. and Nelson, I. "Seismic design of underground lifelines", ASCE Journ. of Tech. Counc., 1980, Vol.106, pp.185-200.
23. Wright, P.J. and Takada, S. "Earthquake response characteristics of jointed and continuous buried lifelines", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.281-286, Istanbul
24. Yaoxian, Y. "Damage to lifeline systems and other urban vital facilities from the Tangshan China earthquake of July 28, 1976", Proc. 7th Wld. Conf. Earthq. Engng. 1980, Vol.8, pp.169-176, Istanbul.