İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

DEPREMİN KANALİZASYON VE İÇMESUYU SİSTEMLERİNE ETKİSİ

Havva Güliz DEMİRALP

UZMANLIK TEZİ

NİSAN 2017

İLBANK
TÜRKİYE'NİN YAPICI GÜCÜ

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

DEPREMİN KANALİZASYON VE İÇMESUYU SİSTEMLERİNE ETKİSİ

Havva Güliz DEMİRALP

UZMANLIK TEZİ

Tez Danışmanı (Kurum)

Necla AKÇA

Tez Danışmanı (Üniversite)

Doç. Dr. Nihat IŞIK

ETİK BEYAN

"İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ Uzmanlık Tezi Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar ç vesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Havva Güliz DEMİRALP

03 Nisan 2017

Depremin Kanalizasyon Ve İçmesuyu Sistemlerine Etkisi

(Uzmanlık Tezi)

Havva Güliz DEMİRALP

İLLER BANKASI A.Ş.

Nisan 2017

ÖZET

Türkiye levha oluşumlarından bu yana kuzeyde Avrasya güneyde Afrika-Arabistan levhalarının jeoteknik hareketliliğine maruz kalan bir sıkışma zonu içerisindedir. Ülkemizin sismotektoniği bu levhaların ve bunlar arasında kalan Ege, Anadolu, Doğu Anadolu levhalarının göreceli hareketiyle temsil edilir. Bu sebeple aktif bir fay kuşağı olarak ciddi boyutlarda önem taşıyan KAF VE DAF zonu gibi fay zonlarını içine alan ülkemiz deprem potansiyeli yüksek bir pozisyondadır.

Deprem açısından bu denli aktif bir ülkede içmesuyu ve kanalizasyon boru hatlarına ve diğer tüm altyapı sistemlerine deprem sonrası işlevlerine devam edebilmeleri veya hasarın en hızlı şekilde işlevsellik kazandırabilecek durumda olmaları için ciddi bir hassasiyetle yaklaşılmalıdır. Deprem öncesi boru hatlarının deprem güvenirliliğinin denetlenmesi, analizler ve çözümlemelerle risk faktörlerinin belirlenip üzerinde çalışılarak iyileştirmelerin yapılması gereklidir. Bu çalışmada; depremin kanalizasyon ve içme suyuna etkisi üzerinde durmak adına öncelikle deprem parametreleri (oluşum şekli-tipi kaynağı vb.) açıklanmış, Türkiye'nin deprem potansiyeli, aktif fay kuşakları ve dağılımlarına değinilmiş, gömülü boru hatlarının döşenmesi kazı ve dolgu mevzuatları ve dikkat edilmesi gereken hususlar verilmiş ve bu hatların dış kuvvetler ve yükler altında kaldığında geliştirdikleri tepkiler üzerinde durulmuştur.

Deprem sarsıntısının farklı tür zeminler üzerinde ne şekil deformasyonlara yol açtığı (sıvılaşma, oturma, çökme vb.) belirtilmiş, bunların terminolojik olarak tanımlamaları yapılmış, dezavantajlı zemin tipleri üzerinde durulmuş, bu tarz zeminler üzerinde yapılan deneyler ve analizlere yer verilerek bu durum desteklenmiştir. Böylece gömülü boru hatları için risk oluşturan parametreler ortaya çıkarılmaya çalışılmış, bu özelliğe sahip yerlerde deprem öncesi dikkat edilmesi gereken hususlar ve yapılması gereken incelemelere dikkat çekilmiştir. Farklı zemin yapılarındaki analiz sonuçlarına göre yorumlamalar yapılmıştır. Geçmiş yıllarda gerçekleşmiş depremler üzerine yapılan analizlerin değerlendirilmesine hangi zeminlerin boru hatlarının deprem performansı açısından risk teşkil ettiğini belirtmek ve bu zeminler üzerinde önlemler ve iyileştirmeler yapılması gerektiği göstermek açısından faydalı olmuştur. Zemin yapılarının deprem sarsıntısında önemli etmen olduğu ve bu zeminlerde deprem öncesi zemin iyileştirmesinin altyapı sistemlerinde (içme suyu ve kanalizasyon hatlarında) deprem sonrasında korunması ve hizmetini sürdürebilmesi adına çok önemli olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler : Deprem, Deprem Hasarları, Gömülü Boru Hatları,
Sayfa Adedi : 81
Tez Danışmanı : Necla AKÇA (Kurum)
Doç. Dr. Nihat IŞIK (Üniversite)

Effect Of Earthquakes To Sewage And Potable Water Pipelines

(Expertise Thesis)

Havva Güliz DEMİRALP

İLBANK A.Ş.

April, 2017

ABSTRACT

Turkey is exposed to Eurasia plate from north and Africa-Arabia plate from south since formation of the plates and it is located in compression zone. Our country's seismo tectonics is represented by those plates and relative motions of Aegean, Anatolia and Eastern Anatolia plates. For those reasons, our country is located in a high degree seismic zone which contains important fault lines such as KAF and DAF.

In such a country which is located in a high degree seismic zone, potable water, sewage and other pipelines should be treated carefully so that they can be used or repaired immediately after a possible earthquake. Before an earthquake, earthquake security of those pipelines should be controlled, risk factors should be determined by analyses and those risk factors should be enhanced. In this work, earthquake parameters (formation, shape, type, source etc.), Turkey's earthquake potential, active fault lines, regulations about installing pipelines, external factors that can affect pipelines and reaction of pipelines to those external effects are explained to research the effect of earthquakes to sewage and potable water pipelines.

Deformations (liquefaction, settlement, deflection etc.) caused by earthquake to different kind of soils are stated and defined terminologically, most disadvantaged soils are touched on and findings are supported by experiments and analyses made on those type of soils. Therefore, most risky soil types for pipelines are determined. Points to consider about those soil types before the earthquake are found out. Some comments on different soil types are made according to results of analyses. Evaluation of past earthquakes was beneficial for determination of risky soil types and showing the necessity of precautions and improvements for those risky soil types. The most important outcomes of the study were effect of soil types on results of earthquakes and possible negative results of earthquakes to pipelines unless no precautions are taken.

Key words: Earthquake, Damage, Buried Pipelines.
Page Number : 81
Supervisor : Necla AKÇA (Corporate)
Assoc. Prof. Nihat IŞIK (Univercity)

TEŞEKKÜR

Uzmanlık tezi çalışmam süresince danışmanlığımı yürüten, değerli bilgi ve birikimini paylaşan, akademik bakış açısı kazandıran hocam Sayın Doç. Dr. Nihat IŞIK'a ve konu ile ilgili bilgilerini, deneyimlerini benimle paylaşan ve çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen değerli kurum danışmanım Necla AKÇA'ya saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince ilgi alaka ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen Kurum müdürlerim Sayın Ümit Aziz KARA ve Sedat YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak çalışmam süresince maddi ve manevi beni destekleyen aileme sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i

ABSTRACT ii

TEŞEKKÜR iii

İÇİNDEKİLER iv

ÇİZELGELERİN LİSTESİ vi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ vii

KISALTMALAR ix

GİRİŞ 1

1. DEPREM 3

1.1. Depremler ve Oluşum Mekanizmaları 3

1.1.1. Levha tanımı ve levhaların birbirine göre yer değiştirmesi 4

1.1.2. Fay oluşumu ve tipleri 5

1.1.3. Depremin odak noktası, dalgaları, merkez üssü, şiddeti ve büyüklüğü 7

1.2. Türkiye'nin Depremselliği 10

1.2.1. Doğu anadolu sıkışma bölgesi 11

1.2.2. Batı anadolu açılma bölgesi 12

1.2.3. Orta anadolu ova bölgesi 12

1.2.4. Büyük fay kuşakları ve depremselliği 13

2. ALT YAPI SİSTEMLERİ 17

2.1. Boruların Karakteristik Özellikleri ve Döşeme Yöntemleri 17

2.1.1. Hendek tipi borular 18

2.1.2. Dolgu tipi borular 18

2.1.3. Kazısız yöntemler 20

2.2. Gömülü Boru Hatlarının Döşenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar 23

2.2.1. Hendeklerin kazılması 24

2.2.2. Yataklama 29

2.2.3. Geri dolgu 33

2.2.4. Sıkıştırma 34

3. GÖMÜLÜ BORULARA ETKİ EDEN ZEMİN YÜKLERİ, SİSMİK ETKİLER VE BORU HATLARININ DAVRANIŞLARI 37

3.1. Gömülü Borulara Etki Eden Yükler 37
3.1.1. Zemin yükü 37
3.1.2. Hareketli yükler 37
3.1.3. Boru ekseni boyunca meydana gelen yükler 39
3.1.4. Don olayı neticesinde meydana gelen yükler 39
3.2. Gömülü Borulara Etki Eden Zemin Yüklerinin Tespit Edilmesi 40
3.2.1. Markston yük teorisi 40
3.2.2. Hendek içerisindeki borulara etki eden zemin yükü 41
3.2.3. Dolgu durumu 43
3.2.4. Geçiş genişliği 47
3.2.5. Tünel içerisindeki borulara etkiyen zemin yükü 47
3.3. Sismik Riskler 48
3.4. Deprem Dalga Yayılımı Kaynaklı Hasarlar ve Etkiler 50
3.4.1. Atenüasyon ilişkisi 50
3.4.2. Etkili yayılma sürati 53
3.4.3. Farklılaşan yeraltı koşullarının etkileri 55
3.5. Gömülü Boru Hatlarının Dalga Yayılımı Neticesindeki Davranışları 55
3.5.1. Düz sürekli boru hatları 56
3.5.2. Dirsek ve T'ler 58
3.6. Sıvılaşmanın Gömülü Boru Hatları Üzerine Etkisi 60
3.6.1. Genel olarak sıvılaşma 60
3.6.2. Sıvılaşmanın dinamikleri 61
4. ÖRNEK ÇALIŞMA (ADAPAZARI VE ÇEVRESİNDE DEPREM SONRASI OLUŞAN HASARLARIN TESPİTİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ) 65
4.1. Adapazarı zemin sıvılaşması üzerine nümerik yaklaşımlar 67
4.1.1. Gerçekleştirilen analizler 68
4.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 71
SONUÇ VE ÖNERİLER 73
KAYNAKLAR 75
ÖZGEÇMİŞ 81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Richter Büyüklük Ölçeği 9

Çizelge 3.1 Çeşitli zeminlere ait γ, K, ve μ değerleri 43

Çizelge 3.2 Pozitif projeksiyonlu borular için oturma oranı değerleri 46

Çizelge 3.3 Farklı zeminler için C değerleri 48

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Deprem oluşum mekanizması 3

Şekil 1.2 Yer Kabuğunda Bulunan Belli Başlı Levhalar 4

Şekil 1.3 Levhaların Birbirinden Uzaklaşması ve Biri Diğerinin Altına Dalan Levhalar 5

Şekil 1.4 Normal Fay 6

Şekil 1.5 Ters Fay 6

Şekil 1.6 Doğrultu atımlı fay 7

Şekil 1.7 Depremin Odak Noktası ve Merkez Üssü 7

Şekil 1.8 Deprem Dalgaları 9

Şekil 1.9 Türkiye'deki levha sınırları ve Ketin (1966) tarafından tanımlanmış olan Paleotektonik 10

Şekil 1.10 Türkiye ve Çevresi Sadeleştirilmiş Tektonik Haritası 14

Şekil 1.11 Türkiye'deki fay zonları, Kuzey Anadolu Fayı segmentleri ve üzerinde meydana gelmiş önemli depremler 15

Şekil 2.1 Hendek Tipi Boru Yerleştirme 18

Şekil 2.2 Dolgu Tipi Boru Yerleştirme 19

Şekil 2.3 Eksik Hendek Metodu 20

Şekil 2.4 Boruların yük taşıma prensipleri (a) Rijit boruların yük taşıma prensibi (b) 23

Şekil 2.5 Boru performansına etki eden zemin bölgeleri 24

Şekil 2.6 Fleksibl borular için 1. Tip Hendek örneği 27

Şekil 2.7 Fleksibl borular için 3. Tip Hendek örneği 28

Şekil 2.8 Rijit borular için hendek örneği 29

Şekil 2.9 Yataklama elemanları 30

Şekil 2.10 Borunun hendek tabanına 60º'lik yataklama açısıyla oturtulması 30

Şekil 2.11 Rijit borular için kenar dolgu yüksekliği 32

Şekil 2.12 Fleksibl borular için kenar dolgu yüksekliği 33

Şekil 2.13 Geri dolgu 34

Sayfa

Şekil 2.14 Su jeti ve püskürtme yöntemleriyle sıkıştırma 35

Şekil 2.15 Zeminin belirli bir yükseklikten düşürülmesiyle sıkıştırılması 36

Şekil 3.1 Yol altında gömülü borulara etkiyen hareketli yük (a) tipik kesit (b) 38

Şekil 3.2 Boussinesq gerilme dağılımı ve gerçek gerilme ölçümlerinin karşılaştırılması 39

Şekil 3.3 Marston Dar Hendek Teorisi 40

Şekil 3.4 Hendek durumunda yük katsayısı (Cd) için diyagram 42

Şekil 3.5 Pozitif projeksiyonlu borularda zemin prizmalarının hareketi (a) 44

Şekil 3.6 Negatif projeksiyonlu borularda zemin prizmalarının hareketi 46

Şekil 3.7 Geçiş genişliği eğrileri 47

Şekil 3.8 Tamirat Olarak km'de Boru Hasarı-En Yogun Yer İvmesi (g) 50

Şekil 3.9 1989 Loma Prieta Olayındaki En Yüksek Kaya Zemin Dalgasının 52

Şekil 3.10 1989 Loma Prieta Olayında Kayalık Mevkilerdeki En Yüksek Zemin Yer Değiştirmesinin Gregor Bağıntısı İle Karşılaştırılması 52

Şekil 3.11 Etkin Yayılma Hızı – Ayrılma Uzaklığı 54

Şekil 3.12 Boşluk suyu basıncındaki ani artış sonucu zemin daneleri arasındaki temas kuvvetlerinin değişimi 60

Şekil 3.13 Sıvılaşma Sonucu oluşmuş yanal yayılma 64

Şekil 4.1 Adapazarı'nın ilk 15 metredeki zemin tabakaları 66

KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
ASCE	Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu
CPT	Konik Penetrasyon Deneyi
DAFZ	Doğu Anadolu Fay Zonu
EBMUD	Doğu Körfezi Belediye Bölgesi
ETSE	Türkiye Doğu Bölgesi Sismik Deneyi
GPS	Global Konumlandırma Sistemi
KAFZ	Kuzey Anadolu Fay Zonu
P	Birincil
PGD	Daimi Zemin Deformasyonu
S	İkincil
SPT	Standard Penetrasyon Deneyi
USBR	ABD İyileştirme Bürosu
YASS	Yer Altı Su Seviyesi

GİRİŞ

Dünya çapında aktif deprem kuşakları içerisinde riskli bölgeleri içine alan Türkiye bu konuda önlemlerin üzerinde durulması gereken bir pozisyondadır. Yerel zemin yapısı, fay hatlarının aktivitesi ve dağılımı bütün sistemlerin yanı sıra altyapı sitemlerinin de ciddi hasarlar görme ihtimalini artıran bir konumdadır. Gömülü boru hatları (kanalizasyon ve içmesuyu sistemleri ve diğ.) insanların yaşamsal ihtiyaçlarını karşılayabilmesi adına özel bir yere sahiptir. Muhtemel deprem öncesi alınmayan önlemler, yapılamayan zemin iyileştirmeleri, dikkat edilmeyen spesifik tehlike riskleri sonucunda kanalizasyon ve içme suyu hatlarının zarar görmesi insan yaşamını ciddi kesintilere uğratabilir. Yaşam kaynağı olan içme suyu olmadan bir insan yaşamı düşünülemez. Aynı şekilde atık su hattında olan bir tahribat, borulardaki sızıntı, patlama, fışkırma gibi olaylar hem hijyenik yaşamı tehlikeye atar, bakteriyolojik tehlikeleri su yüzüne çıkarır hem de metan gazı nedeniyle oluşan ani patlamalar can kaybına yol açar. Bu hasarlar insan sağlığının yanı sıra maddi hasarlardan dolayı ülkemizin altyapı sistemleri projesi yatırımlarında da büyük kayıplar açar. Dolayısıyla deprem öncesi altyapı sistemlerinde alınmayan veya eksik alınan önlemler sebebiyle ülke maddi ve manevi büyük kayıplar yaşayabilir. Bu nedenle altyapı sistemlerinin döşeme, yerleştirme kriterleri, yataklama gömlekleme aşamalarına özel bir hassasiyet gösterilmeli, deprem açısından aktif bölgelerine ilişkin özel zemin iyileştirme yöntemlerine dikkatle yaklaşılmalıdır. Ayrıntılı analiz ve çalışmalarla sıvılaşma potansiyeli yüksek alanlara bakılmalı, her bölge ayrı değerlendirilerek alt yapı sistemleri bu kriterlere göre döşenmelidir.

Çalışmanın Amacı

Gömülü boru hatları deprem sarsıntılarından en çok etkilenen insan hayatında yaşamsal sistemlerden biridir. Ülkemizde aktif fay hatlarının geçtiği, deprem gerçekliğiyle daha fazla yüzyüze kalan bölgelerde de bu içmesuyu ve kanalizasyon hatları başta olmak üzere tüm altyapı sistemleri hizmet vermektedir. Bu çalışmanın amacı öncelikli olarak deprem riski yüksek yerlerde bulunan bu gömülü boru hatlarının zemin koşullarının da elverişsiz olduğu durumlarda ne tür tehlikelerle karşı karşıya kaldığını göstererek olası bu tehlikelerin hangi yaklaşımlar ve analizlerle önceden belirlenebileceğini vurgulamaktır.

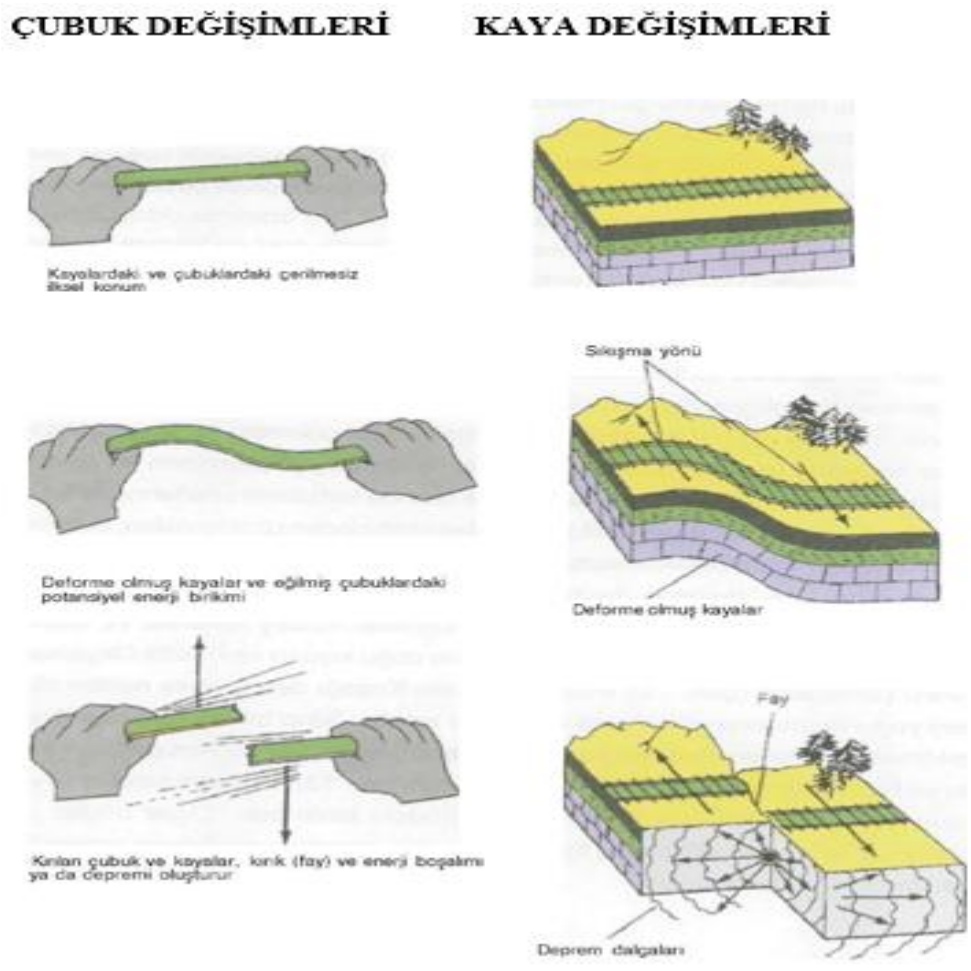
1.Bölümde deprem konu başlığıyla ilk olarak deprem terminolojilerine değinilmiş, ülkemizin de içinde olduğu bu gerçeklikle ilgili araştırmalar ve tanımlamalar verilmiştir. 2. bölümde gömülü boru hatlarının boru özellikleri, boru yerleştirme şekilleri, hendek

kazılarında dikkat edilmesi gereken hususlar ile dolgu malzemeleri seçimiyle ilgili konular işlenmiştir. 3. Bölümde altyapı sistemlerinde gömülü boru hatlarına etki eden zemin yükleri ve sismik risklere yer verilmiş, bu etkiler karşısında gömülü boru hatlarınının davranışına ve bu davranışın hangi yaklaşım metodlarıyla değerlendirilebildiğine değinilmiştir. 3. Bölümün son kısmında ise sismik etkiler sonucu oluşan sıvılaşma ve paremetrelerine, bunların gömülü boru hatlarna etkisine ver verilmiştir. Son bölüm olan 4. Bölümde ise örnek çalışma kapsamında olası deprem riski altında zemin iyileştirmesi yapılmamış sahalarda oluşan deformasyonlar ve kayıplar vurgulanmış, bu hasarların önceden tespiti ve zemin yapılarında sıvılaşma gibi deprem etkileri altında gerçekleşen tehlikelerin hangi analizlerle belirlendiği gösterilmiştir. Sıvılaşma, oturma, göçme, kayma gibi riskleri taşıyan zemin yapılarına ve bu sebepleri tetikleyen değişkenlere dikkat çekerek, bu alanda araştırmaların derinleşmesini sağlamak, olası potansiyel zeminler üzerinde yapılacak matematiksel hesaplar ışığında deprem öncesi önlemlerin alabilmesi sağlayabilir. Böylelikle deprem sonrası hasarlara, can kayıplarına, altyapı sistemlerindeki hizmet kesintilerine, yaşamsal ihtiyaçlara ve mağduriyetin engellenmesi amaçlanmıştır. Bahsedilen yaklaşım metodları ve analizler yardımıyla gömülü boru hatları (içmesuyu ve kanalizasyon sistemleri) üzerine yetkili ve etkili kamu kuruluşları tarafından yapılacak tespitler neticesinde alınacak önlemlerle, deprem gerçeğiyle yüz yüze olan herhangi bir bölgenin bu kapsamda yeniden değerlendirilmesini sağlanması, olası tüm kötü sonuçları engellemek adına önem teşkil edebilir.

1. DEPREM

1.1. Depremler ve Oluşum Mekanizmaları

Fayları oluşturan yer kabuğundaki sıkışma ve genişleme kuvvetleri kırıklar boyunca kaya kütlelerini hareket ettirmektedir. Ancak kırıklar boyunca kaya kütlelerinin hareket ettirilemediği bazı bölümlerde ise yoğun bir enerji birikimi oluşmaktadır. Yerin derinliklerinde biriken enerjinin, sonuçta bir şekilde boşalması gerekmekte olup, bu enerjinin boşalması sırasında da yer sarsıntıları (depremler**)** olmaktadır. Deprem fay düzlemi olarak tanımlanan kırıklar üzerinde biriken enerjinin aniden boşalması sonucunda gelişen bir olgudur [1] (Şekil 1.1).



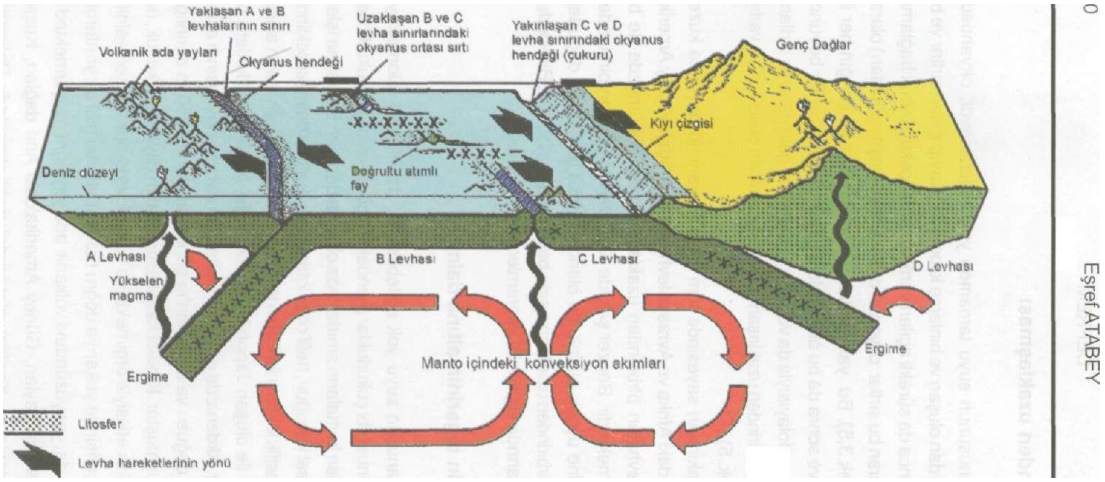
Şekil 1.1. Deprem oluşum mekanizması [1]

1.1.1. Levha tanımı ve levhaların birbirine göre yer değiştirmesi

Dünya içten dışa bir çekirdek, üst kısmında sürekli hareket halinde olan bir manto ve yerküreyi saran bir kabuktan oluşmaktadır. Yer kabuğunun yüzeyi çeşitli boyutlarda kara parçalarıyla kaplanmıştır. Bu okyanusal ve kıtasal kabuk olarak farklı şekillerde görülen dev boyutlarda ya da küçük kabuklara Levha denmektedir. Yer kabuğunda Büyük Okyanus, Avrasya, Arabistan, Güney Amerika, Kuzey Amerika, Afrika, Nazka, Hindistan-Avustralya, Antarktika, Kokos, Tongo, Anadolu levhası gibi levhaların yanısıra birçok küçük levha daha bulunmaktadır [1] (Şekil 1.2).

Şekil 1.2. Yer Kabuğunda Bulunan Belli Başlı Levhalar [1]

Levhalar sürekli olarak dünyanın oluşumundan günümüze değin hareket halindedir. Dünyanın merkez kısımlarında üretilen ısı mantodan geçerek sürekli dışarıya doğru ilerlemeye çalışır. Bu durum üst mantodaki sıvı akışkanın hareketlenmesine ve burada konveksiyonel akımın oluşmasına neden olur (Şekil 1.3). Bu oluşan enerji kırılgan kıtasal ve okyanusal kabuğun hareketine, yer yer kırık ve çatlaklar oluşumuna ve bu kırık ve çatlaklardan magma sıvısının çıkışına, yanardağların püskürmesine, kıtaların birbirinden uzaklaşmasına ve yakınlaşmasına, çarpışmasına neden olmaktadır. [1]



Şekil 1.3. Levhaların Birbirinden Uzaklaşması ve Biri Diğerinin Altına Dalan Levhalar [1]

Meydana gelen depremlerin birçoğu yerin 20 ile 35 km. altındaki elastik kısımda gerçekleşmektedir. Depremlerin meydana gelmesi kütlelerin ansızın kırılmasına bağlıdır. Netice itibariye, sert olmayan yer kabuğundaki enerji birikimi, her sene birkaç cm düzeyindeki yer değiştirmeler sonucunda ve belirli bir durgunluk evresinin sonrasında kabuğun birkaç metre ansızın yer değiştirmesi sonucunda kırılması ile sönümlenir [2].

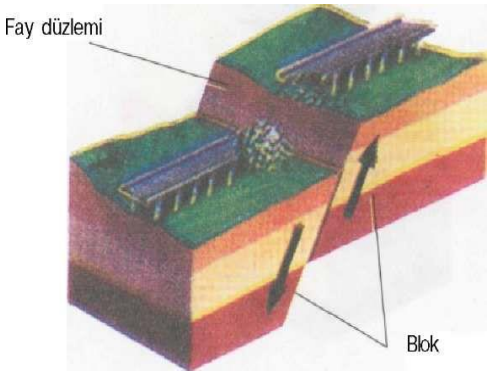
1.1.2. Fay oluşumu ve tipleri

Levhaların birbirine doğru hareket etmelerinden dolayı yan yana geldikleri orojenik kuşaklarda okyanusal ve kıtasal kabukta üzerinde jeolojik yapı ile birlikte çeşitli çatlamalar, kırılmalar ve yırtılmalar meydana gelir. Oluşan bu tür kırılmalara fay denir. Faylar, birbirine doğru hareket eden levhaların sıkışma kuvvetleriyle oluşabileceği gibi, tam tersi olarak birbirinden uzaklaşan levhaların genişleme kuvvetleriyle de gelişebilirler. Üç tipte fay oluşur: Normal fay, ters fay ve doğrultu atımlı fay. Fayın her iki tarafında kalan kaya kütlelerine blok denir. Yeryüzündeki fay çizgisinin derinlere uzanan şekline de fay düzlemi denir [1, 2].

Fay çeşitleri :

Normal fay

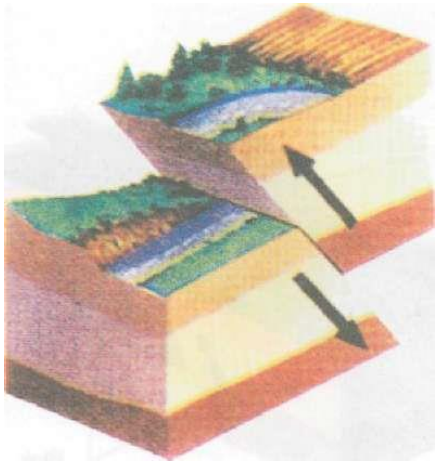
Fay düzlemi eğimli olan ve düzlem üzerindeki bloğun aşağıya doğru hareket ettiği faylara verilen isimdir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Normal Fay [1]

Ters fay

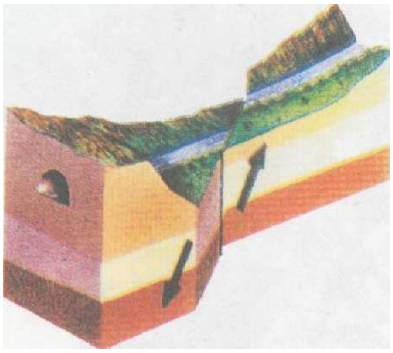
Fay düzlemi eğimli olan ve bu düzlem üzerindeki bloğu da yukarıya doğru hareket etmiş olan faylara ters fay denir [1] (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Ters Fay [1]

Doğrultu atılımlı fay

Fay düzlemi düşey olan ve bu düzlemin iki tarafındaki blokları, yatay olacak şekilde birbirinden ters yönde hareket etmiş olan faylara doğrultu atımlı fay denir [2] (Şekil 1.6).



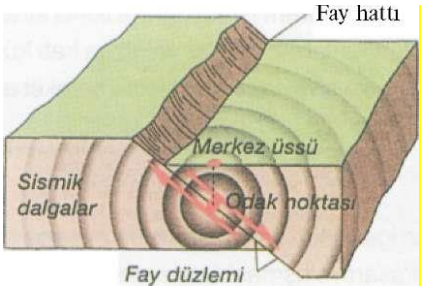
Şekil 1.6. Doğrultu atımlı fay [2]

Fay hareketlerinin başlıca tipleri kayma (yanal atım), normal kayma (normal atım), ters (atım) kaymadır. Yanal atımlı bir fayda hakim hareket yatay olup çekme veya itme basıncına maruz kalan zemin bu doğrultuda şekil değiştirir. Normal ve ters faylarda ise hakim zemin yer değiştirmesi dikeydir [1].

1.1.3. Depremin odak noktası, dalgaları, merkez üssü, şiddeti ve büyüklüğü

Depremin odak noktası ve merkez üssü

Depremin enerjisini ilk defa boşaltmaya başladığı bölge ve bununla birlikte sismik dalgaların kendisini ilk kez gösterdiği kaynak, depremin odak noktası ya da merkezi olarak belirtilmektedir [2] (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Depremin Odak Noktası ve Merkez Üssü [2].

Fay üzerindeki hareket noktalarının başlangıcı olan odak noktasının başlangıcı fay hattı üzerinde meydana gelen yer değiştirme faaliyeti ile başlamaktadır. Odak noktasının yani depremin merkezinin yeryüzündeki izdüşümü merkez üssü olarak isimlendirilmektedir. Depremin merkez üssü, yeryüzünde depremin şiddetinin en fazla hissedildiği ve yeryüzüne en çok hasar verdiği bölgedir [2].

Deprem dalgaları

Yerin altında meydana gelen kırık boyunca birikmiş olan enerjinin boşalımı esnasında etrafa yayılan dalgalara deprem dalgaları denir. Bu dalgaların yeryüzündeki

yansıması hafif sarsıntı ile başlamakta, ardından yerin altında patlayan top sesleri misali gürültüler şeklinde devam etmektedir. Akabinde sarsıntıların şiddeti aniden artmaya başlamaktadır. Devamında sarsıntılar en yüksek düzeye çıkar ve depremin şiddeti yavaşlamaya başlar. Ardından gelen günlerde ise yer altındaki kırıkta hafif sarsıntılar kendisini gösterir. Bu hafif sarsıntılara artçı depremler de denmektedir [2].

Deprem dalgalarının, başka bir ifade ile sismik dalgaların cisim dalgaları ve yüzey dalgaları olmak üzere iki türü mevcuttur.

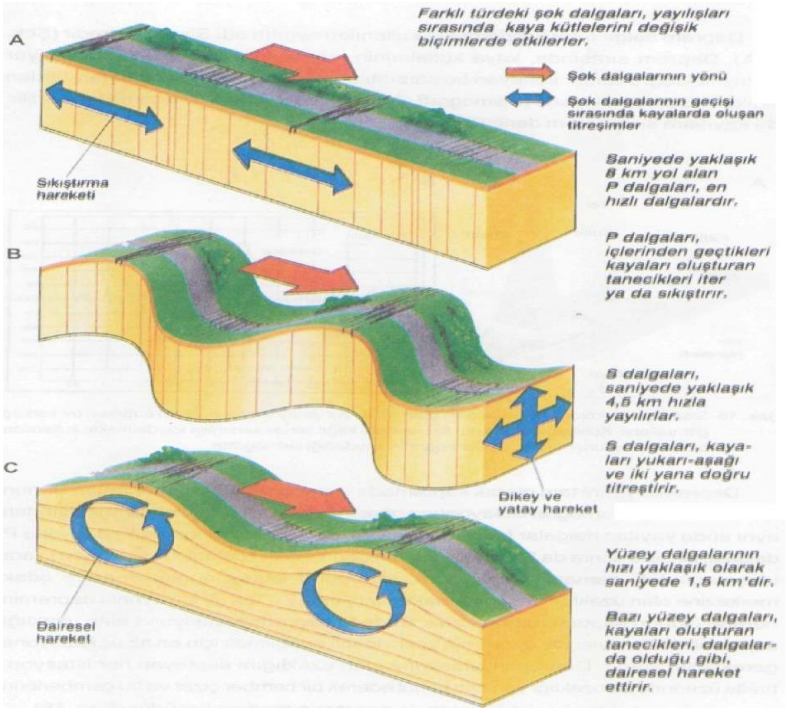
Cisim dalgaları

Deprem dalgalarının bir türü olan cisim dalgalarının P ve S Dalgaları olmak üzere iki türü mevcuttur. P Dalgaları İngilizcede birincil manasına gelen "Primary" kelimesinin ilk harfinin temsilidir. Bu tür dalgalar yayılma esnasında kayaları ileriye ve geriye iterek ve çekerek, dalgaların ilerleme yönüne paralel şekilde hareketlilik yaratmaktadırlar. P dalgalarının sürati 8 km/sn. dir. Deprem şiddetinin ölçülüğü merkezlere ilk olarak gelen bu dalgaların en önemli özellikleri ise katı, sıvı veya gaz ortamlarında da ilerleyebilmeleridir [2].

S dalgaları ise ismini, İngilizcede "Secondary" yani ikincil manasına gelen sözcüğün ilk harfinden almaktadır. P dalgalarından sonra deprem ölçüm merkezleri tarafından belirlenen bu dalgaların süratleri 4,5 km/sn'dir. S dalgaları P dalgalarının aksine yalnızca katı kütleler üzerinde ilerleyebilmekte ve hareketleri dört yöne doğru (aşağı, yukarı, sağ ve sol) gerçekleşebilmektedir [2].

Yüzey dalgaları

Yüzey dalgaları, deprem oluşumuna esas olan dalgalar arasında ilerleme hızı en yavaş olan dalgalardır. Bu nedenden dolayı en yüksek hasara sebebiyet veren dalgalar yüzey dalgalarıdır. Yüzey dalgalarının meydana gelmesi esnasında yer kabuğunun hareketi ve bu sebepten dolayı etkisi de şiddetli olmaktadır. Bu dalgaların "Love" ve "Rayleigh" olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Love dalgası, yeri yatay olarak hareket ettiren ve yüzey dalgalarının en süratli dalgasıdır. Rayleigh dalgası ise göl ya da okyanusta yuvarlanan dalga yayılımı benzeri yeryüzünde hareket etmektedir [2].



Şekil 1.8. Deprem Dalgaları [3].

Depremin şiddeti ve büyüklüğü

Deprem şiddet değeri olarak nitelendirilen Mercalli Şiddet Ölçeği, depremin meydana geldiği yerin jeolojik yapısında ve inşa edilen binaların kalitesi bazında değişkenlik göstermektedir. Depremin odak noktasından boşalan enerjinin düzeyi bazında ölçülen değer de depremin büyüklüğü (magnitüdü) kavramını meydana getirmiştir [2].

Belli aletler ile hesaplanan Richter Ölçeği ise rakamlarla belirtilen ve depremin ne ölçüde büyük olduğuna ilişkin değerlerin logaritmik biçimde arttığı bir deprem büyüklüğü ölçüsüdür [2].

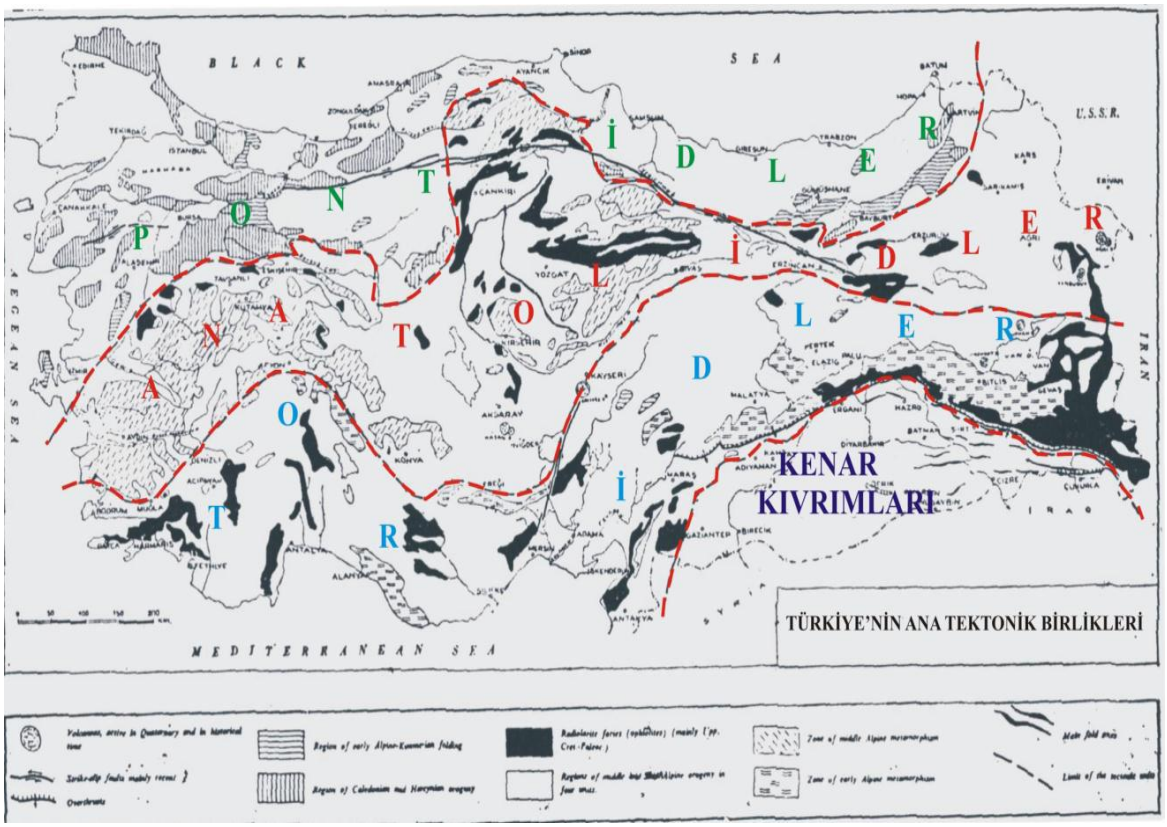
Çizelge 1.1. Richter Büyüklük Ölçeği [2]

BÜYÜKLÜK	DEPREMİN ETKİLERİ	YILDA YAKLAŞIK KAÇ KEZ GÖRÜLDÜĞÜ
1.0-3.0	Hissedilmez, sismografla kaydedilir.	3.000.000
3.1-4.0	Sık hissedilir. Çok az hasar	50.000
4.1-6,0	Binalarda ve diğer yapılarda hasar	15.000
6,1-6,9	Nüfusun yoğun olduğu yerlerde büyük hasar	120
7,0-7,9	Şiddetli deprem. Ciddi hasar.	20
8,0-daha büyük	Çok şiddetli deprem. Bir yerleşim yeri tümüyle yok olabilir.	1

1.2. Türkiye'nin Depremselliği

Türkiye ve yakın çevresi, Azor yarım adalarından başlayarak, uzak doğudan Endonezya'ya kadar uzanan Alpin deprem kuşağının, Akdeniz bölgesindeki, en aktif kısmını teşkil eder. Türkiye ve yakın çevresinde meydana gelen deprem episantırları haritaları incelendiğinde sismik aktivitenin en fazla doğrultu atımlı faylarla ilişkili olduğu görülmekle birlikte, Türkiye ve çevresindeki faaliyetin çoğunluğunun Ege Denizi civarında ve Kuzey Anadolu Kırık Kuşağında yer aldığı görülmektedir [4].

Alpin sıradağlar kuşağı içerisinde yer alan Türkiye, bu kuşağın genel nitelikleri yanı sıra kendine has bir takım jeolojik özellikleri de içermektedir. Kuzeyde Avrasya (Avrupa-Asya) ve güneyde Afrika-Arabistan levhaları (plakaları) arasında kalan Türkiye'nin jeolojisi bu iki levhanın hareketlerine ve bu levhalar arasında yer almış olan Eski Tetis ve Yeni Tetis okyanusunun jeotektonik evrimine bağlı olarak gelişmiştir. Türkiye'deki paleotektonik birlikleri (yaşlı tektonik) dağ kuşaklarının gelişmeleri sürecine dayalı olarak kuzeyden güneye doğru dört birimle sınırlamıştır [5] (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Türkiye'deki levha sınırları ve Ketin (1966) tarafından tanımlanmış olan Paleo-tektonik [5]

Bunlar:

1. Kuzey ve kuzeybatı Anadolu sıradağları

2. İç Anadolu sıradağları

3. Güney ve doğu Anadolu sıradağları-Toridler (Toroslar)

4. Güneydoğu Anadolu sıradağları –Kenar Kıvrımları Bölgesi'dir [5].

Yapısal ve deformasyon özelliklerine göre Türkiye'yi, Miyosen 'den bu yana (12 my) gelişen 3 ana Neotektonik (genç tektonik) bölgeye ayırmıştır. Bu bölgeler [6]:

1. Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi
2. Batı Anadolu Açılma Bölgesi
3. Orta Anadolu Ovalar Bölgesi

1.2.1. Doğu anadolu sıkışma bölgesi

Avrasya ve Arabistan levhalarının çarpışması ve devam eden kıtasal yakınsama nedeniyle Doğu Anadolu son 10 my'dan bu yana önemli sıkışmalı bir tektonik deformasyona maruz kalmıştır. Doğu Anadolu Bölgesini batıda Kuzey Anadolu Fayı, Kuzey Doğu Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı sınırlamaktadır. Bu bölgedeki ve kuzeydeki Kafkaslar 'da kuzey-güney yönlü sıkışma hızının 30 mm/yıl olarak bulunmuş ve buradaki deformasyonun %10-40'nın depremlerle ilişkili olduğunu belirtilmiştir [7]. Ayrıca ölçümlere göre Doğu Anadolu Fay zonu üzerinde ortalama kayma hızı 10±2 mm/yıl olarak saptanmıştır [6].

Güney Anadolu bölgesinde ise bindirme hareketleri ile oluşan ters faylanmaların etkin olduğu görülmektedir. Bindirmeler kuzeyden güneye doğru olmuş, yaşlı birimler daha genç birimler (Oligosen-Üst Eosen) üzerine 15-20 km bindirmişlerdir [8].

ETSE (Türkiye Doğu Bölgesi Sismik Deneyi) projesi kapsamında yapılan çalışmalar, sismik aktivitenin daha çok plaka sınırları boyunca Doğu Anadolu Fayı ve Kuzey Anadolu fayları üzerinde yoğunluk gösterdiğini öne sürmüştür [9]. Doğu Anadolu Fayı (DAF) dışında bu bölgede belli başlı etkin faylar ve tektonik unsurlar şunlardır; Horasan-Narman fayı, Çaldıran Fayı, Balık Gölü Fayı, Tutak ve Karayazı fayı, Erzurum fayı, Çobandede Fayı, Posof Fayı ve Van Fayı 'dır [5].

1.2.2. Batı anadolu açılma bölgesi

Neotektonik dönemin başlangıcı ile birlikte Batı Anadolu ve özellikle Ege bölgesi yoğun bir kuzey-güney yönlü gerilmeye uğramıştır. Batı Anadolu ve Ege'deki graben sistemleri Doğu Anadolu Sıkışma bölgesi gibi Avrasya- Arabistan çarpışmasının bir yan ürünüdür ve doğu Anadolu'daki sıkışma hareketinin Kuzey Anadolu Fayı ile batıya taşınması sonucu oluşmuştur. Günümüzde de sürmekte olan açılma ve gerilme hareketleri sonucu batı Anadolu'da birbirine koşut (D-B, KB-GD doğrultulu) pek çok graben, küçük çaplı havzalar ve yanal atımlı faylar oluşmuştur. Bu bölgedeki büyük çaplı grabenler olarak Büyük ve Küçük Menderes vadileri, Saros, Edremit, Kerme (Gökova), Gemlik, İzmit Körfezleri, İznik gölü ve Marmara denizinin büyük bir bölümü sayılabilir [10].

Batı Anadolu'daki birçok büyük deprem fay izleri oluşturmuşlardır. Sığ olan bu depremler Rodos ve Antalya körfezi açıklarında 90 km derinliklere kadar yer alabilmektedir [11]. Ege bölgesindeki graben sistemleri çok sayıda küçük deprem kümeleri oluşturmaktadır. Büyük depremlerin odak mekanizması çözümleri ve sismik momentleri kullanılarak yapılan bir çalışmada güneybatı Anadolu'nun yılda 13,5 mm hızla kuzey–güney yönünde açıldığını ve 0,5 mm/yıl 'lık bir hızla inceldiği bulunmuştur. Marmara Bölgesi ise daha yavaş olmakla birlikte (2,7 mm/yıl) kuzey-güney yönünde açılmaktadır. İncelemeler batı Anadolu'da depremlerin yerkabuğunun en üstteki 8–10 km'lik kırılgan bölümünde yer aldığını, bunun altında yerkabuğunun daha sünek bir yapıda bulunması olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir [12].

Batı Anadolu'da belli başlı etkin fay kuşakları ve kırıkları şunlardır: Eskişehir, Sultandağ, Büyük Menderes, Alaşehir, Gediz, Simav, Demirci, Soma- Akhisar ve Kerme fayları ile Aksu bindirmesi [5].

1.2.3. Orta anadolu ova bölgesi

Doğu Anadolu Sıkışma bölgesi ile Batı Anadolu Açılma bölgesi arasında kalan Orta Anadolu Ova Bölgesi, kuzeyde Kuzey Anadolu Fayı güneyde ise Toros sıradağları ile sınırlanır. Bölgede belirlenen tipik yapısal unsurlar, bazılarının varlıkları geçen yüzyıldan beri bilinen, kabaca KD-GB ve KB-GD yönlü büyük faylardır (Tuz Gölü Fayı, Ecemiş Fayı). Bu fayların yanal atımlı oldukları belirlenmiştir. Orta Anadolu bölgesinin tarihsel ve aletsel dönemleri incelendiğinde çok sayıda büyük deprem olmadığı görülmektedir [5].

1.2.4. Büyük fay kuşakları ve depremselliği

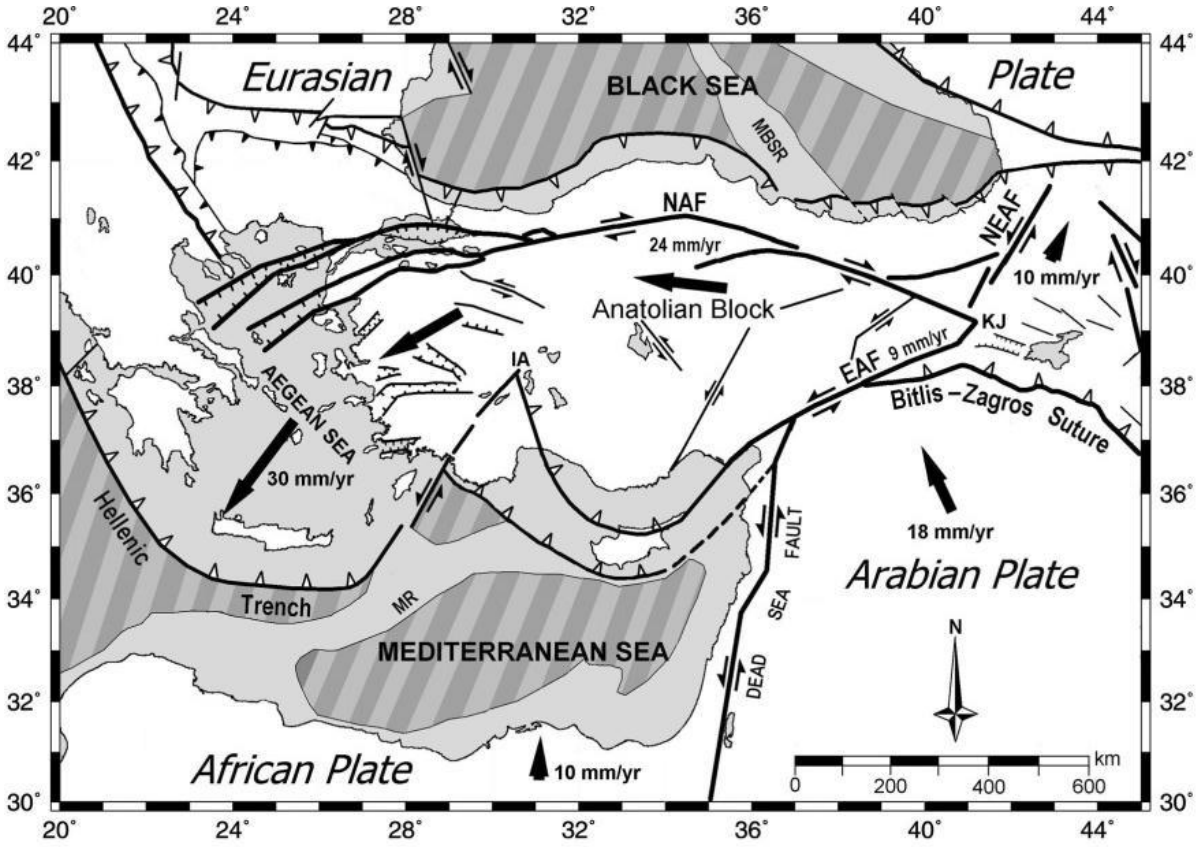
Türkiye'nin Başlıca Fay Zonları

1. Kuzey Anadolu Fay zonu
2. Bitlis Bindirme Kuşağı
3. Doğu Anadolu Fay Zonu
4. Batı Türkiye'nin açılmalı Tektonizması
5. Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu'dur.

Kuzey anadolu fay zonu

Alpin Deprem Kuşağı'nın ve Türkiye'nin en önemli kırık zonunu oluşturan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), sismik olarak dünyanın en diri fay zonlarından birisidir. KAFZ, doğuda Doğu Anadolu Fayı ile kesiştiği Karlıova üçlü eklem noktasından başlar, orta kesimi civarında dışa bükey bir yay yaparak Mudurnu Vadisi segmentinin batı ucuna kadar devam eder. Mudurnu Vadisi segmentinin batısında iki ana kola ayrılarak, kuzeydeki kol Sapanca, oradan Armutlu yarımadasının kuzey kenarını izleyerek Marmara Denizi içerisinden Saros Körfezine doğru uzanır. KAFZ, Marmara Denizi'nin kuzeyinden ve güneyinden geçerek kuzey Ege Denizi'ne kadar doğrultu atımlı ve normal faylanma göstererek üç kola ayrılır ve devam eder [14, 15, 16]. Adapazarı'nın batısından itibaren Marmara Bölgesi'nin fay zonu, doğudaki belirgin morfolojisini ve tek ana fay görünümünü kaybederek dallanma özelliği gösterir [17]. Güneyde yer alan kol ise Geyve-Mekece-İznik boyunca uzanarak oradan da Bandırma ve daha sonra Biga yarımadasını izleyerek Ege denizine doğru devam eder. Karlıova'nın doğusundaki ve Adapazarı'nın batısındaki uzanımları çok iyi anlaşılabilmiş olmamakla birlikte sağ yönlü doğrultu atımlı hareketlerin bu sınırların ötesinde de devam ettiği son yıllarda meydana gelen depremlerin odak mekanizmalarından ve GPS çalışmalarından anlaşılmaktadır [14, 18].

Türkiye'de meydana gelen önemli oranda can ve mal kaybına neden olan depremlerin büyük bir kısmının KAF zonuna bağlı olarak geliştiği gözlenmiştir. KAF zonundaki depremlerin zaman içerisindeki dağılımlarına bakıldığında aktivitenin fayın orta kısımlarından başladığı ve sonra batı ve doğu uçlarına ilerlediği görülmektedir. Kuzey Anadolu Fayı'nın orta kesimleri ile doğu ve batı uçları, paleosismolojik olarak oldukça belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu yüzden fayın bu farklı kesimleri, farklı davranışlar sunmaktadır. [19]



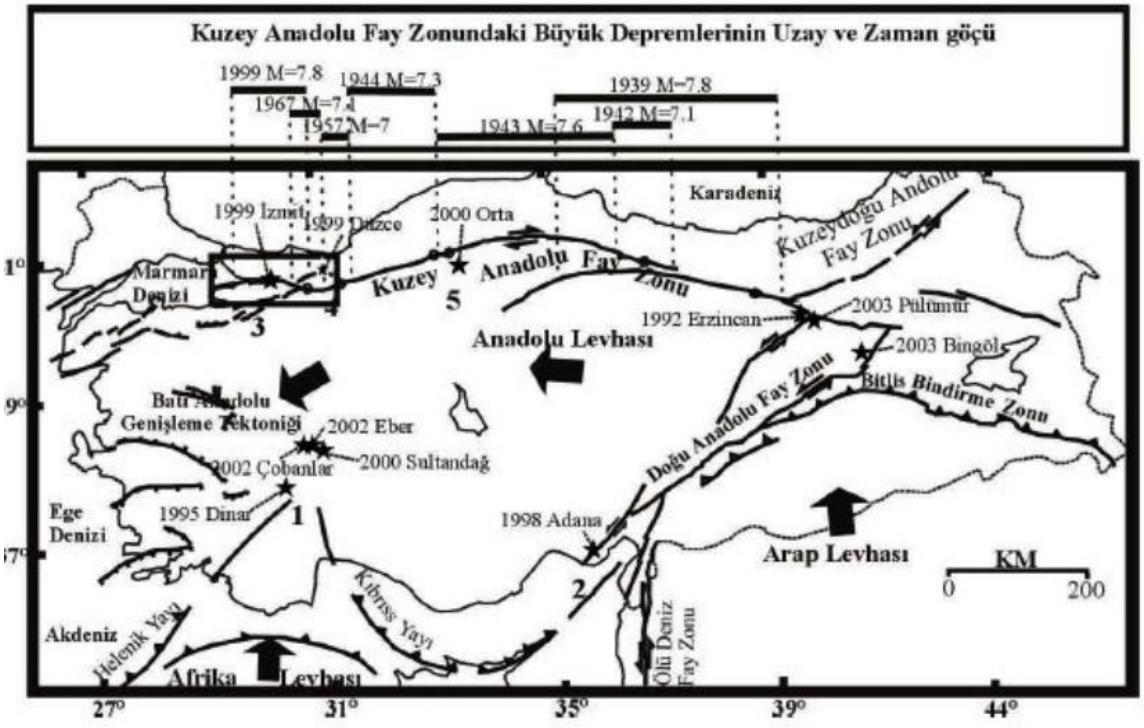
Şekil 1.10. Türkiye ve Çevresi Sadeleştirilmiş Tektonik Haritası [13]

Kuzey Anadolu Fayı üzerinde gözlenen yer değiştirmenin doğudan batıya doğru gittikçe azaldığını vurgulanmıştır. Jeolojik gözlemler Kuzey Anadolu Fayı üzerindeki yer değiştirme hızı için 0,5-0,8 cm/yıl düzeyinde değerler verirken [19, 20, 21] sismolojik incelemeler 1-11cm/yıl arasında değişen yer değiştirme hızı vermektedirler [15, 22, 23, 24].

Fayın doğu kesimi, sıkışma etkisi altında kalırken batı kesiminde çekilmeye maruz kalmaktadır. KAF boyunca şimdiye kadar oluşan depremlerin odak mekanizma sonuçları bu farklı gerilme rejimleri altında bulunduklarını kanıtlamaktadır. Bu depremlerden elde edilen P ve T eksenlerinin yönleri, faydaki hâkim olan ana sıkışma yönünün, KB-GD olduğuna işaret etmiştir. Elbette bu özelliklere bağlı olarak, bu kısımların da deprem tekrarlanma aralıkları değişmektedir. Sonuç olarak, bu farklı davranışlar Kuzey Anadolu fayında farklı deprem modelleri gösteren birkaç büyük ana sismik segment ile belirli sayıda da kısa uzunluklara sahip küçük segmentlerin varlığına işaret etmektedir. Genel olarak fayın orta kesimlerinde, Erzincan segmenti (1939 deprem kırığı), Lâdik-Tosya segmenti (1943 deprem kırığı) ve Gerede segmenti (1944 deprem kırığı) gibi uzunlukları

150 km-350 km arasında değişen üç ana segment ile bu segmentlerin doğu ve batı ucunda uzunlukları 100 km'nin altında olan kısa uzunlukta segmentler yer almaktadır [25].

Tarihsel dönemde Marmara Bölgesi ve civarı çok sayıda hasar yapıcı depremlerden etkilenmiştir [26, 27, 28, 29]. Bu depremler arasında 1719, 1754, 1878 ve 1894 depremleri İzmit Körfez bölgesi ve civarında meydana gelmiştir [28]. Kuzey Anadolu Fayının Hendek, Abant, Gerede, Düzce, Kurşunlu ve Mudurnu segmentlerine bakıldığında hasar yapıcı depremlerin meydana geldiği görülür. Bunlardan bazıları 1943 Hendek (M=6,3), 1944 Gerede (MS=7,3), 1951 Kurşunlu (MS=6,7), 1957 Abant (MS=7,0) ve 1967 Mudurnu (MS=7,1) depremleridir [30].



Şekil 1.11. Türkiye'deki fay zonları, Kuzey Anadolu Fayı segmentleri ve üzerinde meydana gelmiş önemli depremler [30]

Doğu anadolu fay zonu

Türkiye'nin en büyük ve en önemli kırık zonlarından diğeri olan DAFZ yaklaşık 400 km uzunluğa sahip, orta Miyosen 'de (yaklaşık 12 milyon yıl önce) oluşmuş aktif bir fay zonudur [22, 25]. Bu fay zonu, Karlıovada başlar ve güney batıda Antakya'ya kadar uzanarak Ölü Deniz Fay zonu ile birleşir. Ayrıca Adana Baseni'ne yakın Kahramanmaraş civarında üçlü birleşimi meydana getirir. Bu üçlü birleşim Arabistan, Afrika ve Avrasya

levhalarının birleştiği yerdir. DAFZ'nun yapısal ve geometrik özellikleri büyük ölçüde sismolojik gözlemlerle belirlenmiştir [11, 15]. KD-GB yönünde kırılmış faylarda gözlenen depremlerin odak mekanizmaları sol yönlü doğrultu atımlıdır [31, 32, 33]. Bu çalışmalardan edinilmiş sonuç, DAFZ'nun tamamen sol yönlü gelişen bir faylanma özelliği gösterdiği ve KAFZ ile eşlenik bir yapı oluşturarak Anadolu levhasının batıya doğru hareketine katkı sağladığıdır [34].

Doğu Anadolu fayının Karlıova'dan güneybatı doğru olan ana kısımdaki kayma hızı yıllık 5 mm civarındadır. DAFZ'nda levha hareketleri ve jeolojik bilgilere dayandırılan yer değiştirme miktarları 1,9-3,5 cm/yıl'dır. Araştırmalar, Doğu Anadolu'daki tektonik kinematik nedeniyle Avrasya-Suriye (Arab levhası ucu) arasındaki hareketin ancak ufak bir bölümünün Kuzey Anadolu Fayı üzerinden açığa çıktığını ortaya koymuştur [7, 22, 35, 36]. Bingöl ile Karlıova arasında gözlenen toplam yer değiştirmeden (22- 27 km) yaklaşık 0,5cm/yıl olarak bulunur [31, 37].

Bölgede gözlenen en büyük depremler, 4 Aralık 1905 Malatya depremi (Ms = 6,8) ve 1971 Bingöl depremidir (Ms=6,9). 14 Haziran 1964 Malatya depremi (Ms=5,7) birçok araştırmacı tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir [8, 15, 38, 39]. DAFZ 'nda son 1000 yıl içinde I0≥7,0 şiddetindeki depremler yerleşim bölgelerinde önemli ölçüde hasara neden olmuştur [40].

Kuzey doğu anadolu fay zonu

KDAFZ (Kuzey Doğu Anadolu Fay Zonu), Kuzey Doğu Anadolu Bloğu'nun kuzey sınırını oluşturan sol yönlü doğrultu atımlı bir fay zonudur. Bu fay zonu KD yönünde Kafkasya'ya kadar uzanır [41].

Bu bölgede gözlenen en büyük ve bölgenin tektoniği hakkında önemli bilgiler veren depremlerden biri de 30 Ekim 1983 tarihli Horasan, diğer ismiyle Narman depremidir. Bu depremle ilgili yapılan saha gözlemlerinden kaynak mekanizması çözümünden KD-GB doğrultuya sahip, KB'ya eğimli sol yan atımlı bir faylanma ile ilgili olduğu anlaşılmıştır. Bu depreme ait 2880 tane artçı sarsıntı kaydedilmiştir. Gözlenen en büyük sarsıntılardan ikisi (18 Eylül 1984, Ms=5,6; 18 Ekim 1984, Ms=4,8) yaklaşık bir yıl sonra meydana gelmiştir [12].

2. ALT YAPI SİSTEMLERİ

Altyapı sistemleri insanların şehir yaşamının devamlılığı sürecinde ihtiyaç dahilinde yeraltına yapılan sistemlerinin genel adı olarak tanımlanır. Altyapı sistemleri tanımlaması baz alındığında ulaşım ve hizmet sistemleri diye iki gruba ayrılır. Ulaşım sistemini karayolu ulaşım, demiryolu ulaşım, hafif raylı ulaşım, otobüs ulaşım, feribot ulaşım sistemleri iskele, hava limanları oluşturmaktadır. Hizmet sistemlerini ise içme suyu, atıksu, doğalgaz, enerji, elektrik ve telekomünikasyon sistemleri oluşturmaktadır [42] . Kanalizasyon hatları, drenaj kanalları, içmesuyu hatları, doğalgaz ve petrol hatları, telefon ve elektrik hatları gibi şehrin yaşamsal fonksiyonlarını yerine getiren hatlar hizmet sistemlerinin içerisindedir. Metro tünelleri, ısı dağıtım hatları, atıksu arıtma tesisleri ve deşarj hatları da bu gruba dahil edilir [43].

Bu sistemler şehir hayatının sağlıklı yürüyebilmesi ve ihtiyaçların giderilmesinde hayati rol oynadığı için bu sistemlerde kullanılan boru ve diğer malzemelerin uygunluğu da son derece önemlidir. Bütün altyapı sistemlerinde kullanılan boru hatları çeşitli ve farklıdır. Bu farklılıklar öncelikle altyapı sistemlerinin hizmet ettiği amaca göre oluşur. Öncelikli olarak iletilecek akışkanın karakteristiği, debisi, sıcaklığı, basıncı ve boru-sıvı etkileşimi gibi etkenler göz önüne alınarak seçilirler. Alt yapı sistemlerinin düzgün bir işleyişe sahip olabilmesi adına bu seçim oldukça önemlidir. Bunu yanı sıra döşenecek borunun cinsi dolayısıyla sahip olduğu eni, yüzey kalınlığı, korozyona karşı tepkisi ve diğer kuvvetlere karşı mukavemeti, boruların bağlantı yerlerindeki malzemeler, sızdırmazlık özelliği bakımından durumu, döşeme yöntemleri ve bulundukları zemin cinsi gibi birçok önemli parametre de altyapı sistemlerinin sağlıklı işleyişini etkileyecek unsurlardır. Bu faktörlerle birlikte gömülü boru hattının hizmet edeceği bölgenin nüfus ve teknoloji ihtiyaçları da göz önüne alınırsa en ideal alt yapı sistemi seçilmiş olacaktır. Bu ideal seçimin yapılamamasından dolayı geçmişten günümüze bu konuda ciddi sorunlar yaşanmıştır.

2.1. Boruların Karakteristik Özellikleri ve Döşeme Yöntemleri

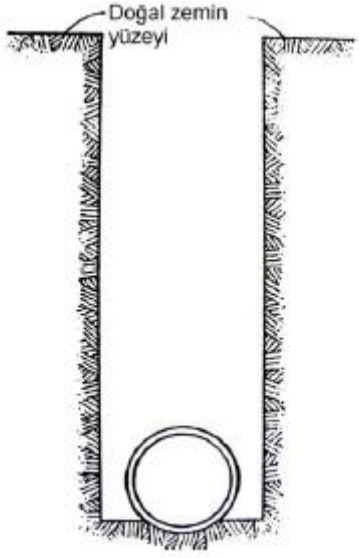
Gömülü boru hatlarında kullanılan borular dıştan gelen kuvvetlerle yapılarındaki şekil değişikliğine ve bu kuvvetlere karşı gösterdikleri tepkiye göre fleksibl ve rijit olarak sınıflandırılırlar. Rijit borular gelen kuvvete karşı her hangi bir esneklik göstermezler. Bu nedenle rijit borularda kalıcı deformasyonlar ortaya çıkar ve yükün etkisiyle boru geri

dönüşü olmayacak şekilde zarar görür ve çatlaklar oluşur. Fleksil borular ise esneme yapabilen kuvvet etkisinde direk yükü üzerinde taşımaya devam etmez. Esnek özellik göstererek kıvrılır, deformasyona uğrar. Böylece tüm yükü basıncı üzerinde taşımaz, zemine aktarır [44, 45, 46].

Altyapı sistemlerinde boru döşeme biçimleri başlıklar halinde açıklanmıştır.

2.1.1. Hendek tipi borular

Hendek tipi borular kısmen kendini tutabilen ve örselenmemiş zemine kazılan dar bir hendeğe yerleştirilip üzeri geri dolguyla kaplanan borular olarak tanımlanır. Şekil 2.1' de hendek tipi boru yerleştirme örneği görülmektedir. Bu yöntem kanalizasyon hatları, su hatları, drenaj hatları ve gaz hatlarının döşenmesinde kullanılabilir. Yüzeye yakın küçük çaplı boruların döşenmesi en çok bu yöntemle yapılır. Hendekler genellikle mevcut yollar boyunca açılır ve kullanımları özellikle şehirlerde boru döşenmesinde yaygındır. Hendek içerisine yerleştirilmiş boru üzerinde geri dolgudan dolayı oluşan yükler, hendek duvarlarıyla olan sürtünmeden dolayı, toplam zemin yükünden daha azdır [47, 48].

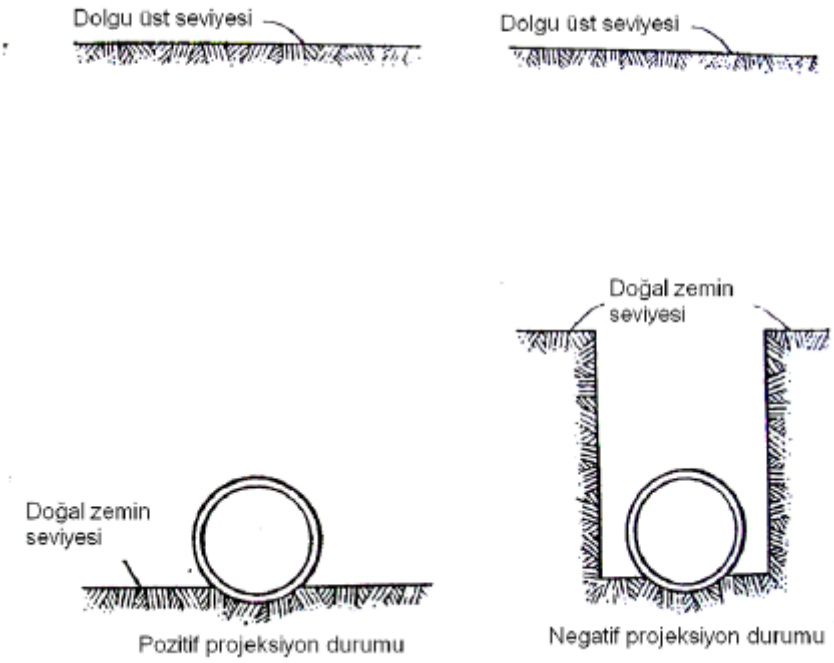


Şekil 2.1. Hendek Tipi Boru Yerleştirme [47]

2.1.2. Dolgu tipi borular

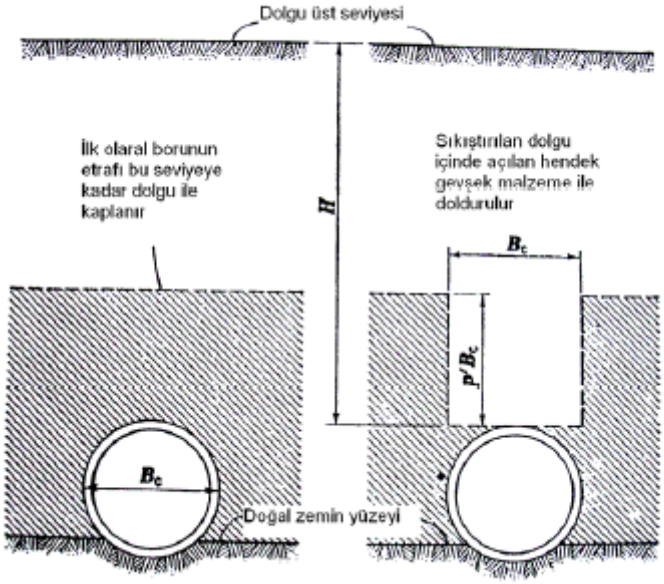
Zemin seviyesinin inşaatın bir parçası olarak yükseltildiği yerlere döşenen borular, dolgu tipi (projeksiyonlu) borular olarak adlandırır. Karayolları ve demiryollarının altındaki menfezler dolgu tipi boruların tipik örnekleridir. Dolgu tipi borular yerleştirme şartlarına göre pozitif ve negatif projeksiyon durumu olmak üzere ikiye ayrılır. Pozitif projeksiyon durumu borunun yüzeysel bir yatak üzerine yerleştirilip dolguyla

kaplanmasıdır. Negatif projeksiyon durumu ise borunun sığ bir hendeğe, boru taç kısmı doğal zemin yüzeyinin altında kalacak şekilde yerleştirilip dolguyla kaplanmasıdır. Dolgu ile boru sisteminde oluşan deformasyonların yol açtığı sürtünme kuvvetlerinin yönüne bağlı olarak, boruya etkiyen yük, zemin yükünden fazla veya daha az olmaktadır [47, 49, 50] (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Dolgu Tipi Boru Yerleştirme [47]

Özel bir yerleştirme tekniği olan eksik hendek metodu ise negatif projeksiyon durumuna benzer. Boru ilk olarak pozitif projeksiyon durumuna göre yerleştirilir ve boru taç kısmının üzeri boru genişliğinin 1–1,5 katı yüksekliğe kadar dolgu ile kaplanır. Dolgunun iyi sıkışmasına dikkat edilmelidir. Daha sonra sıkıştırılmış dolgu içinde boru taç kısmına kadar bir hendek kazılır ve bu hendek mümkün olduğunca gevşek şekilde sıkışabilir malzemeyle doldurulur. Sıkışabilir malzeme olarak saman, tahıl sapları ve çöpleri, kuru yapraklar veya polistren köpük kullanılabilir. Daha sonra normal dolgu işlemine devam edilir. Şekil 2.3' te eksik hendek metoduyla boru döşerken izlenen adımlar görülmektedir. Bu yöntemin amacı boru üzerindeki zeminin oturmasıyla oluşan yukarı yöndeki kayma gerilmelerinin boru üzerine etkiyen yükü azaltmasıdır. Sıkışabilir malzeme olarak polistren köpük kullanılan bir çalışmada, eksik hendek yöntemiyle yerleştirilmiş boruların üzerindeki yükün, pozitif projeksiyonlu borulara göre %28 daha az olduğu görülmüştür [44, 47, 50].



Şekil 2.3. Eksik Hendek Metodu [47]

2.1.3. Kazısız yöntemler

Son yıllarda boru alanındaki en büyük teknolojik gelişme boruların kazısız döşenmesi konusunda olmuştur. Boruların kazısız döşenmesi yeni boru hatlarının yapımında, eski boru hatlarının yenilenmesinde ve yeniden kaplanmasında kullanılabilmektedir [51].

Boruların döşenmesi sırasında oluşabilecek yer hareketleri çevredeki yapılara, yol kaplamalarına ve diğer hatlara zarar verebilir. Derin kazıların yapılması sırasında hendeğin desteklenmesi ve desteğin kaldırılması, yeraltı su seviyesinin indirilmesi ve geri dolgu işlemlerinin yol açtığı oturmalar oluşabilir. Özellikle kanalizasyon hatları, bu hatların genellikle mevcut yollar boyunca ve büyük derinliklere yerleştirildiğinden dolayı, hendek açılararak döşenmesi durumunda, trafiğin aksamasına, ticaretin ve toplu yaşamın olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Birçok şehirde boru hatlarının, servis ömürlerinin dolmuş olması ve artan ihtiyaç nedeniyle yenilenmesi veya tamir edilmesi gerekmekte, ancak çevrelerinde bulunan diğer yapılar bu işlemlerin yapılmasını zorlaştırmaktadır [42, 43, 51]. Teknik gelişmelerle birlikte kazısız yöntemlerin kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Özellikle yüzeysel deformasyonların istenmediği durumlarda tercih edilirler. Ayrıca çevreyi koruma ve toplumu rahatsız etmeme amacıyla da bu yöntemin kullanımı desteklenmektedir. Boruya etkiyen yükler hendek tipindekilere göre çok farklı olabilir. Belli bir derinliğin altında boruya etkiyen yükler derinlikten etkilenmemektedir [48].

Kazısız boru döşemenin birçok yöntemi olmasıyla birlikte bu yöntemler çalışma alanına işçilerin girebilmesine ve hattın doğrultusunun kontrol edilebilmesine göre sınıflandırılır. Kullanılan araçların pahalı olması nedeniyle kazısız yöntemlerin kullanımı sırasında işin aksamamasına önem verilmelidir. İnşaat sırasında beklenmedik durumlarla karşılaşılmaması için, projeye başlamadan önce ayrıntılı bir geoteknik inceleme yapılmalıdır [42, 45].

Boru çakma yöntemi

Boru çakma (pipe-ramming) yöntemi makinelerin az kullanıldığı, ucuz ve hızlı bir yöntemdir fakat yapım esnasında hattın yönünün kontrolü zordur. Hat doğrultusundan sapma hat uzunluğunun en az % 2'si kadardır. Zeminde bulunan sert kısımlar bu yöntemin uygulanışında zorluk çıkarır. Çapları 1500 mm.'ye kadar borular, hat uzunluğu 100 metreye kadar bu yöntemle döşenebilir. Kuzey Amerika ve Avrupa'daki projelerin 1/3'ü bu yöntemle döşenmiştir [51].

Doğrusal delgi yöntemi

Doğrusal delgi (directional drilling) yönteminde ilk önce pilot bir tünel açılır. Daha sonra bu tünel bitiş noktasından başlangıç noktasına doğru genişletilirken boru yerleştirilir. Elektromanyetik izleme sistemleri kullanılarak hat doğrultusundan sapma da kontrol edilebilir. Büyük taş ve kayalar bu yöntemin uygulanmasında zorluk çıkarır ve hattın tamamlanmasını engelleyebilir. İşlem sırasında sıvı madde kullanımı, boru yüzeyine etkiyen sürtünmeyi azaltır, oyuğun açılmasını kolaylaştırır ve çökmesini önler. Bu sıvıda, bentonit esas katkı malzemesi olmak üzere, zemin şartlarına göre değişik karışım maddeleri kullanılır. Birçok projede çelik ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru kullanılmasıyla birlikte bakır borular da bu yöntemle yerleştirilebilir. Çapları 900 mm.'ye kadar olan borular, 1500 m uzunluğa kadar, 30 m derinliğe bu yöntemle döşenebilir. Bu yöntem gaz, kanalizasyon ve su hatlarının yapılmasında kullanılabilir [51, 52].

Pipejacking ve mikrotünel yöntemleri

Pipejacking, tünel açma işlemi devam ederken borunun itilerek tünele yerleştirilip sürekli bir kaplamanın yapıldığı kazısız boru döşeme yöntemidir. En küçük boru çapı işçilerin kazıyı kontrol etmek için girebilmesine müsaade edecek büyüklükte olmalıdır ve ülkeden ülkeye değişmekle birlikte genel olarak 900 mm minimum boru çapı olarak kabul edilir. Teorik olarak boru çapları için üst bir limit yoktur ve bu yöntemle döşenmiş 5000 mm çapındaki borular mevcuttur. Dairesel kesitli tünellerin yanında, hemen hemen her

kesitte tünel açılabilir. Pipejacking ilk olarak demiryollarının ve karayollarının altından boruların geçirilmesi için kullanılmıştır.

Daha sonra yöntemin ve makinelerin geliştirilmesiyle, 1970'li yılların sonuna doğru Japonya ve Almanya'da kanalizasyon hatlarının yapımında kullanılmıştır [43, 51, 53]. Pipejacking, bir boru döşeme yöntemi olmakla birlikte, diğer kazısız boru döşeme yöntemlerinde de kullanılan bir boru yerleştirme prensibidir [43].

Mikrotünel yöntemiyse işçilerin çalışamayacağı genişlikteki tünellerde, tünel açma, kazılan zeminin dışarı atılması ve kalkanın kontrol edilmesi işlemlerinin dışardan kumanda edildiği bir kazısız boru döşeme yöntemidir. En büyük boru genişliği genel olarak 900 mm.'dir. Bu yöntem ilk olarak 1975 yılında Japonya'da kullanılmıştır. Mikrotünel küçük çapta borular için ortaya çıkmış bir yöntem olsa da 3600 mm çapındaki borular da bu yöntemle döşenebilmektedir [43, 51, 53].

Pipejacking ve mikrotünel yöntemleri sert kayalar, siltli ve kumlu zeminler gibi birçok zeminde uygulanabilir. Yeraltı su seviyesinin ve borunun döşeneceği derinliğin yüksek olduğu durumlarda da uygulanabilir. Aşırı konsolide ve şişebilen killerde yüksek sürtünme kuvvetleri boruyu itmeyi zorlaştırabilir ve bu durum itme uzunluğunu sınırlar. Mikrotünel yönteminin zemin özelliklerinin değişken olduğu şartlarda uygulanması zordur. Pipejacking ve mikrotünel yöntemlerinin uygulanmasıyla yer hareketleri ve de bu nedenle oluşabilecek hasarlar büyük ölçüde önlenir [43, 51].

Pipejacking ve mikrotünel yöntemleriyle beton, kil, plastik çelik ve font borular döşenebilir. Düşey ve yatay eksenden sapma 35 mm kadar olup, gelişen izleme ve yönlendirme tekniklerinin kullanılmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Borular 1000 m.'nin üzerine kadar itilebilmekte ve ara istasyonların kullanılmasıyla uzun hatlar yapılabilmektedir [43].

Boru patlatma yöntemi

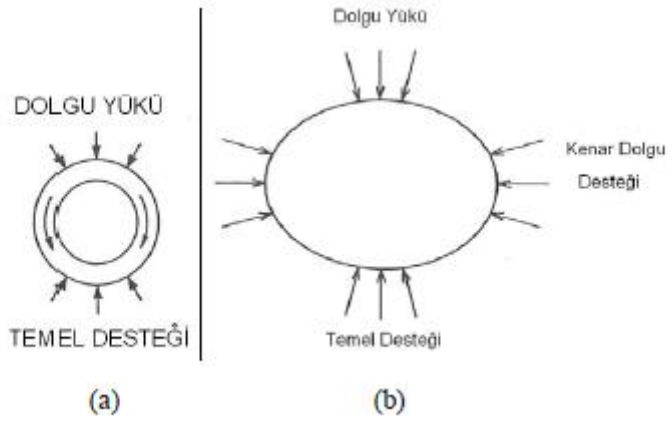
Boru patlatma yöntemi, eski boru hatlarının yenilenmesinde kullanılır. Bu yöntemle, eski boru hattı kırılarak yerine yeni boru yerleştirilir. Bu amaçla, koni şeklindeki patlatma ucu eski boru içine itilerek, boruya çekme ve kayma mukavemetinden daha yüksek radyal gerilmeler uygulanır. Patlatma ucu eski boruyu kırarak (patlatarak) ilerlerken arkasından yeni boru itilir. Patlatma için gereken kuvvetin oluşturulmasına ve aktarılmasına bağlı olarak statik, hava basınçlı ve hidrolik boru patlatma sistemleri vardır.

Boru patlatma yöntemi, 50–400 mm çapındaki dökme demir, kil, beton, PVC, HDPE ve sünek demirden yapılmış boruların 100–200 m.'ye kadar değiştirilmesinde kullanılmıştır. Bu yöntemle eski boru hattıyla aynı veya daha büyük çapta boru hatları yapılabilir [42, 46, 51].

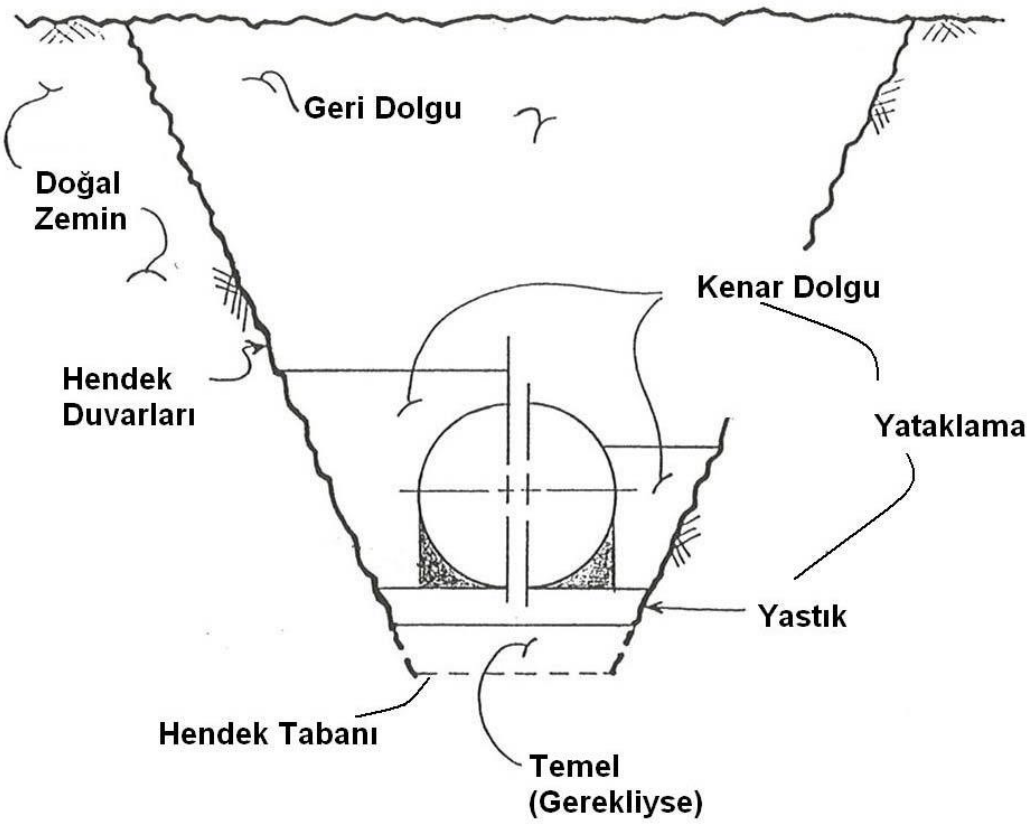
2.2. Gömülü Boru Hatlarının Döşenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Boru hatlarının yapılmasında zemin, üzerine yapının yerleştirildiği temel işlevi görmenin yanı sıra hem boruya destek olan hem de yüklerin iletimini sağlayan bir inşaat malzemesi olarak da kullanılır. Boruyu çevreleyen zemin boru performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Her boru çeşidinin farklı mukavemet ve rijitlik özellikleri vardır ve borunun yerleştirileceği zemin ve derinliğe göre farklı yataklama ve yerleştirme tekniği gerektirirler [49].

Şekil 2.4'te rijit ve fleksibl boruların yük taşıma prensipleri görülmektedir. Rijit borular, üzerlerindeki yükü boru duvarları vasıtasıyla alttaki zemine aktarırlar. Fleksibl borular ise yük altında deforme olarak, üzerlerindeki yükün bir kısmını yandaki zemine iletirler. Her iki borunun da yük taşıma kapasiteleri boru özelliklerinin yanında, boruyu çevreleyen zeminin özelliklerine de bağlıdır. Bu nedenle boruların tasarımı ve de yerleştirilmesi sırasında Şekil 2.5'te görülen hendek, temel, yataklama ve geri dolgu özellikleri üzerinde durulması gerekir [47, 54].



Şekil 2.4. Boruların yük taşıma prensipleri (a) Rijit boruların yük taşıma prensibi (b) [44]



Şekil 2.5 Boru performansına etki eden zemin bölgeleri [47]

2.2.1. Hendeklerin kazılması

Hendekler, hendek duvarları çalışma sırasında sağlam duracak şekilde açılmalı ve gerekliyse hendek duvarları desteklenmeli veya eğimli yapılmalıdır. Derinliği 1,5 m ye kadar olan hendeklerde yan yüzler dik olabilir. Ancak hendeğin açılmış olduğu zemin, bu derinlikte kendini tutamıyor ve kayıyorsa veya hendek daha derin ise, gerekli iksa, uygun şev veya basamak yapılmalıdır. Hendek şevlerinin zemin yüzeyini kestiği yerlerden başlayarak en az 0,6 m genişlikteki şeritler yüklenmemeli ve boş bırakılmalıdır [54, 55].

Trafiğin aksamaması ve yayaların güvenliği, hendeğin yağış, don ve kurumadan olumsuz etkilenmesini önlemek ve iksa sisteminin miktarını azaltmak için açılan hendek uzunluğu ve hendeğin açık kalma süresi sınırlandırılabilir. Hendeğe yeraltı suyu, sızıntı su veya yağmur suyu dolması ihtimali varsa veya hendek gevşek zemine açılacaksa, hendek açma hızı boru yerleştirme hızına uydurulmalı, kazı en fazla bir kaç boru boyu önden gitmelidir [54, 56].

Hendek derinliği, boru donma derinliğinin altında kalacak şekilde hesaplanmalı ve inşaat sırasında projede belirtilen derinliklere uyulmalıdır. 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 m, gaz boruları için en az 0,8 m olmalıdır. Telefon, su, gaz ve elektrik gibi üzerinden geçilmesi mecburi olan yerlerde bu tesislerin derinliğine uyulabilir. Ancak donmayı önleyici tedbirlerin alınması gerekir. Eğer dolgu yüksekliği 2 m.'yi geçiyorsa, borunun dolgu yükünü taşıyacak mukavemette olmasına dikkat edilmelidir. Su borularının kanalizasyon boruları ile kesişmeleri halinde, pis suların su borusu içine girmesini önlemek üzere gerekli tedbirler alınmalıdır [55, 57].

Borular dik eğimli hendeklerde döşenirken enlemesine ankrajlar tertip edilerek boruların hendek içerisinde hareket etmelerine engel olunmalıdır. Yüzey sularının hendek içine girerek boruların altındaki hendek tabanını oymaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Hendek tabanının ve dolgu malzemesinin meyil aşağı yıkanıp gitmemesi için su tutucu engeller oluşturulmalıdır. Çok özel hallerde, hendeğin tamamının 3 cm.'den küçük çakıl ile doldurulması gerekebilir [54, 55, 58].

Hendek tabanı

Hendek tabanındaki zemin, yeterli temel desteğini sağlayacak, aşırı ve farklı oturmalara izin vermeyecek özellikte olmalıdır. Eğer hendek tabanındaki zemin bu özellikleri taşımıyorsa sıkıştırma, sorunlu zemin yerine uygun malzeme yerleştirilmesi, kimyasal karışımlar eklenmesi, geotekstil veya geogrid kullanılması gibi uygulamalarla hendek tabanı sağlamlaştırılır [54].

Hendek tabanı yumuşak ve su muhtevası yüksek malzemeden oluşuyorsa çakıl, kırma taş gibi dayanıklı malzemeyle takviye edilerek stabil hale getirilebilir. Bazı durumlarda tabandaki yumuşak malzeme kaldırılıp yerine daha uygun ve dayanıklı malzeme yerleştirilir. Boşluk suyu basıncının efektif gerilmelerden yüksek olması (kum kaynaması) durumunda, hendek tabanına yüksek yoğunluklu ve ağır olan iri taneli çakıl veya kırma taş yerleştirilebilir. Kuru ve gevşek malzemeden oluşan zeminler sıkıştırılarak hendek tabanı sağlamlaştırılabilir. Eğer sıkıştırılacak zemin kalınlığı 15–30 cm.'den büyükse, tabandaki zemin kazılıp tekrar hendek tabanına tabakalar halinde yerleştirilip sıkıştırılır. Daha küçük kalınlıklarda zemin yerinde sıkıştırılır [54].

Şişebilen zeminler, su almaları sonucu oluşan hacim artışı nedeniyle gömülü borulara oldukça yüksek basınçlar uygulayabilirler. Şişebilen zeminin kazılıp, su eklendikten sonra tekrar hendek tabanına yerleştirilip sıkıştırılmasıyla, gelecekteki şişme

potansiyeli azaltılır. Ancak bu durumda su muhtevası değişimlerini önlemek gereklidir. Boru bağlantı yerlerinin, geri dolgu malzemesinin ve yüzeysel drenajın zemine su aktarmayacak şekilde tasarlanması da şişebilen zeminlerin hacim değişimlerini önleyebilir. Ayrıca %2–4 oranında kireç ilave edilmesi şişebilen zeminlerin şişme özelliğini azaltır. Rüzgâr ve nehirlerin biriktirmesiyle oluşan çökebilen zeminler de su muhtevası değişimden etkilenir. Boşluk oranı fazla olan bu zeminler likit limitlerinin üzerinde su alınca çökerler. Su muhtevasının kontrol edilmesi, zeminin 1 m kadar kazılıp hendek tabanında tekrar sıkıştırılması veya zeminin su eklenerek önceden çökertilmesiyle bu tür zeminlerin stabilizasyonu sağlanır [54].

Hendek tabanı, kaya veya büyük kaya parçaları içeren bir zeminden oluşuyorsa boru kaya veya taş üzerine oturtulmamalı, hendek tabanı 0,15 m daha derin kazılmalıdır ve kazılan kısım kum veya yumuşak toprak gibi malzemelerle doldurularak yastık yapılmalıdır. Yastık malzemesi seçiminde boru çapı, boru malzemesi ve kaplama cinsi göz önünde bulundurulmalıdır. Doldurulan kısım iki tabaka halinde serilip sıkıştırılmalıdır [54, 55].

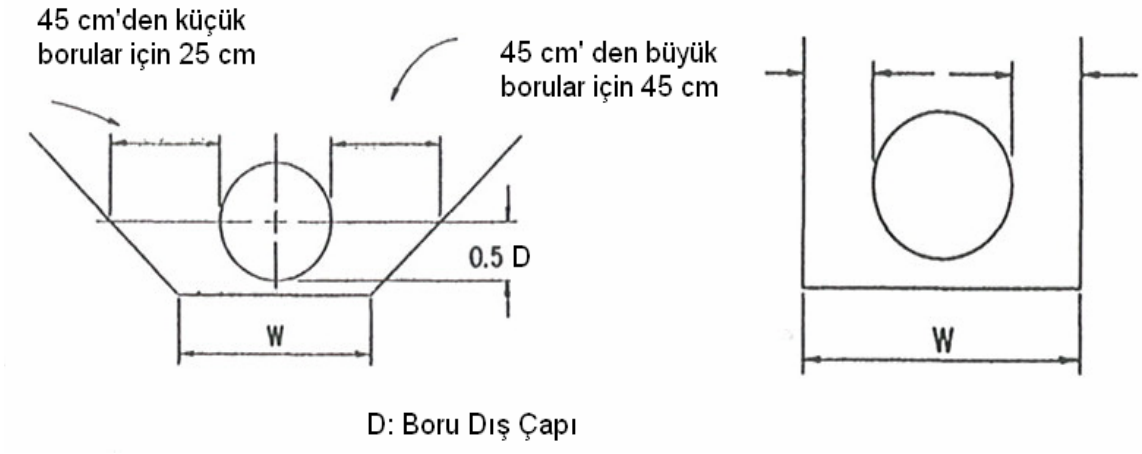
Hendek, boru ekleme parçaları ve özel parçaların düzgün yerleştirilebileceği ve özellikle boru alt yarısının çevresindeki dolgunun gereği gibi sıkıştırılabileceği mertebede olmalıdır. Dış çapı 200 mm den küçük borular için hendek taban genişliği 0,6 m olmalıdır. Dış çapı 200 mm ile 1000 mm arasında olan borular için bu genişlik, borunun her iki yanında 0,2 m, dış çapı 1000 mm den büyük boruların her iki tarafında 0,3 m boşluk kalacak şekilde hesaplanmalıdır. Aynı hendek içine birden fazla boru konulduğunda iki boru arasında en az 0,2 m mesafe olmalıdır [54, 55, 56].

Boru eklemelerinin yapılabilmesi için boru başlarına gelen kısımlarda kafa çukurları açılır. Bu çukurlar en az 0,75 m uzunlukta ve 0,10 m derinlikte olmalıdır. Ek yerleri kaynak ile yapılmayan borularda, boruyu askıya almak için kullanılan kolonları geri almak üzere boru orta yerinde bir çukur açılır. Birleşim yapıldıktan sonra bu kısımlar doldurulur ve sıkıştırılmalarına gerek yoktur [57, 58]. Sert zeminden yumuşak zemine geçiş bölgelerinde, oluşabilecek farklı oturmaların boruya zarar vermesini ve bağlantı yerlerinin açılmasını önlemek için gerekli tedbirler alınmalıdır. Yeraltı su seviyesinin sık sık değiştiği veya trafik yükünün söz konusu olduğu hallerde hendek tabanında kaya, duvar kalıntısı ve benzeri rijit yerler bulunmamalıdır. Bu kısımlar, taşıma gücünün düşük olduğu zeminlerde hendek tabanından 0,5 m daha derine kadar temizlenerek yerleri uygun malzeme ile doldurulmalıdır [54, 56].

Hendek tipleri

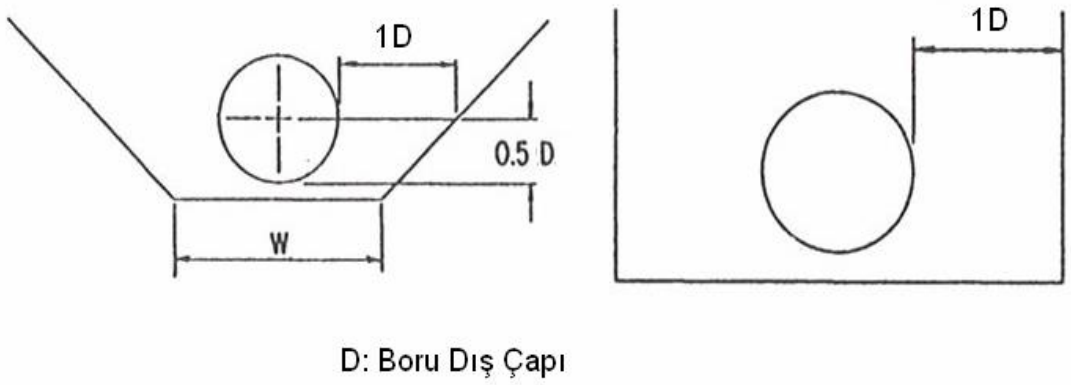
Fleksibl boruların performansı boru kenarlarındaki zeminin desteğine bağlıdır. Bu destek kenar dolgu (gömlek) ve hendek duvarları tarafından sağlanır. Bununla birlikte boru kenarlarındaki zemin desteği, kenar dolgu ve hendek duvarlarındaki zeminlerin rijitlikleri arasında önemli derecede fark olduğu zaman, hendek genişliğine de bağlıdır. Kenar dolgu, hendek duvarlarındaki zeminin daha rijit olması durumunda sadece boru ile hendek duvarları arasındaki boşluğu doldurma işlevi görür. Eğer hendek duvarları yumuşak ve kolayca sıkışabiliyorsa kenar dolgu boruya destek amacıyla normalden daha geniş yapılmalıdır. Gerekli dolgu genişliği için değişik fikirler olmakla birlikte USBR (ABD İyileştirme Bürosu) standardına göre fleksibl borular için 3 durum mevcuttur [54]:

1. Tip hendeklerde, hendek duvarındaki malzeme gömlek malzemesine göre daha sıkı veya mukavimdir. Hendek duvarı kaya, çimentolaşmış zeminler, rölatif sıkılığı %70 ve üzerinde olan kum veya çakıllar ile %95 standart proktor sıkılığındaki killi veya siltli zeminlerden oluşabilir. Bu durumda hendek, boru kenarlarında, çapı 450 mm veya daha küçük borular için 25 cm, çapı 450 mm den büyük borular içinse 45 cm açıklık olacak şekilde açılır. Şekil 2.6'da dik ve eğimli hendek duvarı olması halinde 1. Tip hendek örneği görülmektedir.



Şekil 2.6. Fleksibl borular için 1. Tip Hendek örneği [54]

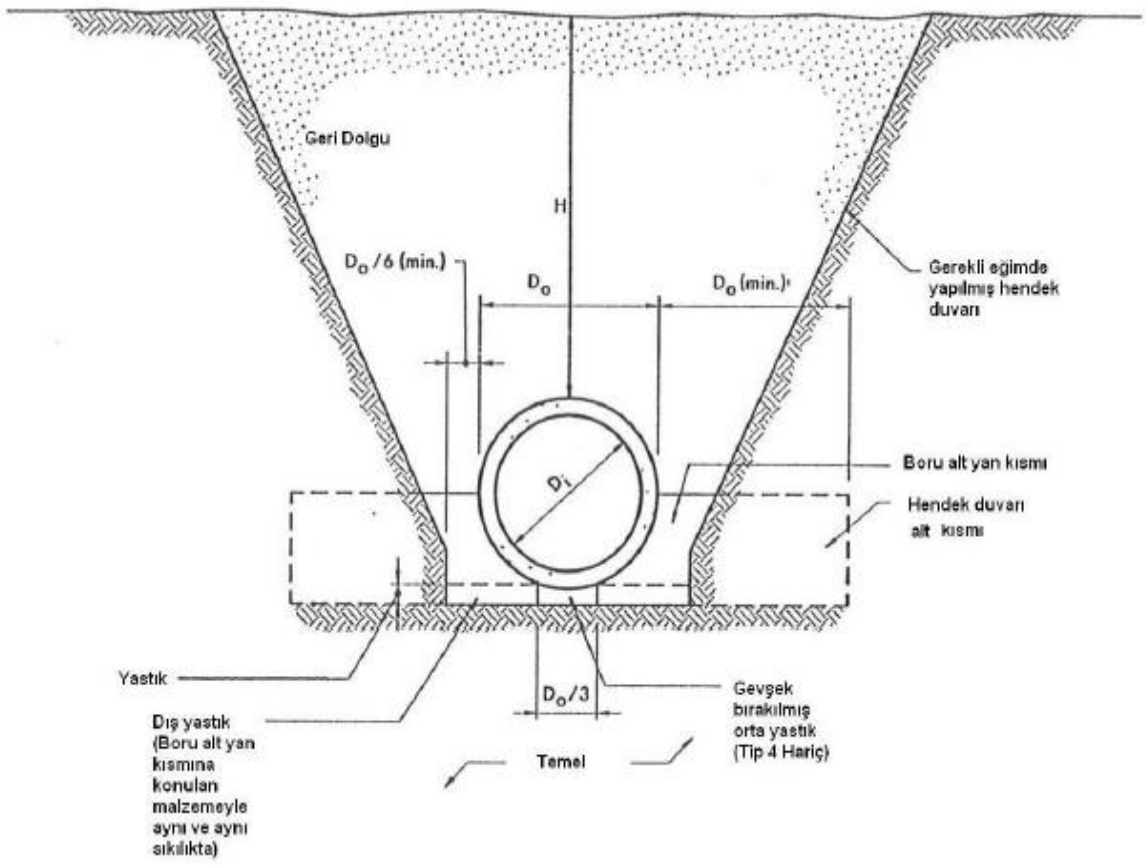
2. Tip hendeklerde, gömlek malzemesinin ve hendek duvarındaki malzemenin sıkılığı veya mukavemeti birbirine oldukça yakındır. Hendek duvarı, %40 ile %70 arasında rölatif sıkılığa sahip kum veya çakıldan, veya %85 ile %95 standart proktor sıkılığındaki killi veya siltli zeminlerden oluşabilir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi, hendek genişliği boru kenarlarında boru dış çapı kadar açıklık kalacak şekilde ayarlanır.



Şekil 2.7. Fleksibl borular için 3. Tip Hendek örneği [54]

Kenar dolgu ve hendek duvarlarındaki malzemenin rijitlikleri, serbest basınç deneyi, standart penetrasyon SPT (Standart Penetrasyon Deneyleri) veya koni penetrasyon C PT (Statik Penetrasyon Deneyleri) testleri sonuçlarından veya malzemelerin efektif zemin modülleri (E') kullanılarak karşılaştırılabilir. Boru hatları için yapılan ön araştırmalarda 2. Tip ve 3. Tip hendeklerin olabileceği alanlar belirlenmelidir. Bu amaçla özellikle dere geçişleri, eski göl yatakları, lös birikintileri, eğimli ve doldurulmuş olan alanlara dikkat edilmelidir. Çok geniş bir kazı alanı gerektirdiğinden dolayı, 3. Tip hendekler uygulamada çok nadir kullanılır. Bunun yerine boru rijitliğini arttırma, rijit boru kullanımı, borunun betonla kaplanması veya kenar dolgu ve hendek duvarındaki malzemeler için ortak bir efektif zemin modülü (E') hesaplanarak borunun tasarlanması gibi alternatifler kullanılabilir [55].

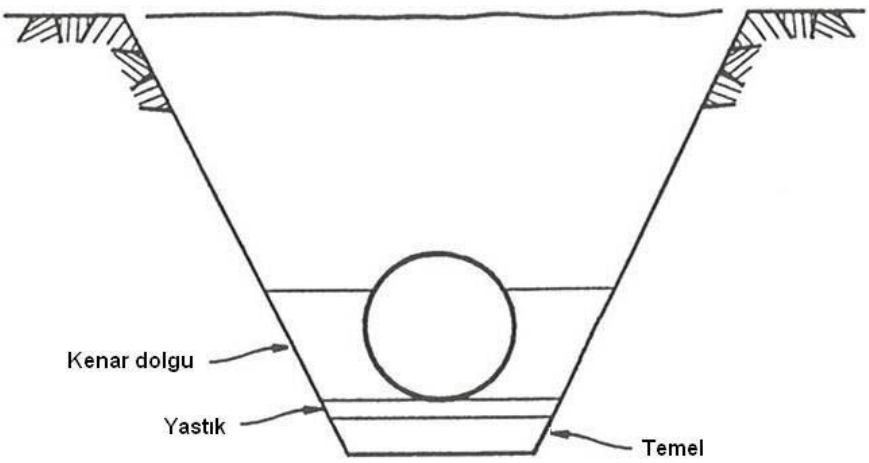
Rijit borular, hendek içine ASCE (Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu) standardına göre dört şekilde yerleştirilebilir. Standard yerleşimi Şekil 2.8'de görülen hendek, boru alt yan kısmındaki (topuk) ve hendek duvarının alt kısmındaki malzemenin gevşek (4. Tip) veya sıkı (1. Tip) olmasına göre farklılık gösterir. Hendek duvarının alt kısmındaki malzemenin rijitliği arttıkça boruya etkiyen yük azalmaktadır. Geri dolgudan dolayı oluşan yükün bir kısmı dolgu ve hendek duvarı arasında oluşan kayma gerilmeleri tarafından taşınır. Eğer hendek duvarının alt kısmındaki zemin oturma yaparsa boruya gelen yük artmaktadır [55].



Şekil 2.8. Rijit borular için hendek örneği [54]

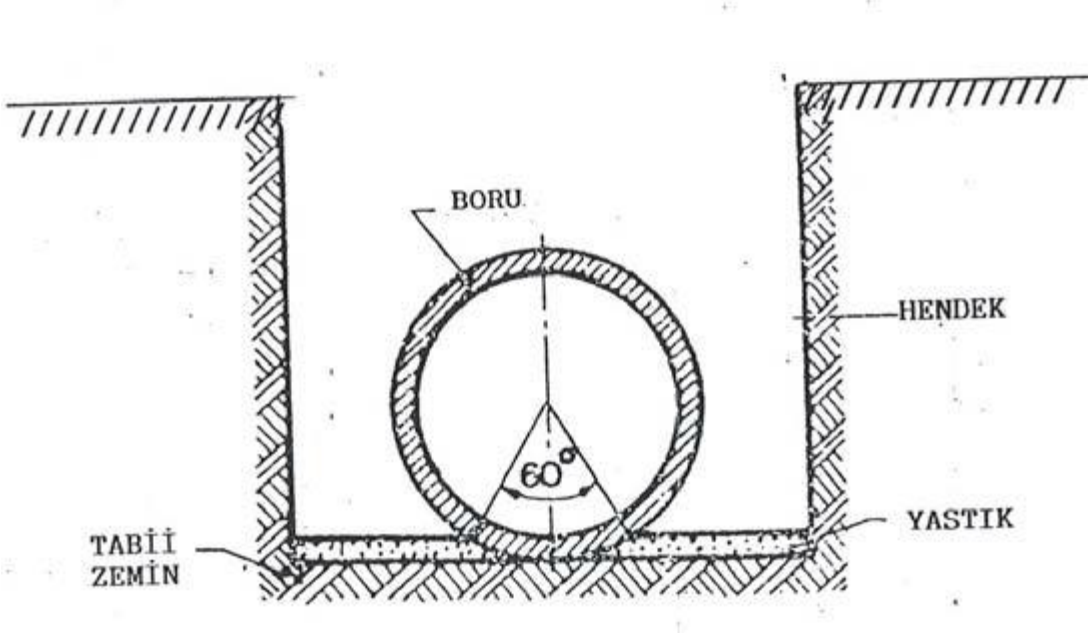
2.2.2. Yataklama

Yataklama, boruya gerekli desteği sağlamak için boru etrafının uygun malzeme yerleştirilerek doldurulmasıdır ve Şekil 2.9'da görüldüğü gibi temel, yastık, kenar dolgu gibi kısımlardan oluşmaktadır. Dış yüklerin taşınmasında boru ve etrafındaki zemin birlikte çalışırlar ve bu nedenle yataklama borunun yük taşıma performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Boru etrafındaki malzeme kemerlenme sonucu borunun yük taşımasına yardımcı olmaktadır. Boru-zemin sisteminin istenilen şekilde çalışması için uygun yataklama seçilmesine ve yataklamanın boru ile tam temasını sağlamak için malzemenin dikkatli yerleştirilmesine önem verilmelidir [49, 54, 59].



Şekil 2.9. Yataklama elemanları [54]

Hendek tabanındaki zemin yeterli temel desteğini sağlayacak, aşırı ve farklı oturmalara izin vermeyecek özellikte olmalıdır. Borular hendek tabanına tek noktadan veya bir çizgi boyunca oturacak şekilde yerleştirilmemelidir. Borunun hendek tabanına oturacağı kısım yataklanmış olmalı ve projesinde daha büyük bir açı belirtilmemişse, Şekil 2.10'da görüldüğü üzere, hendek tabanındaki yataklama açısı 60º olmalıdır [54, 55] (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Borunun hendek tabanına 60º'lik yataklama açısıyla oturtulması [55]

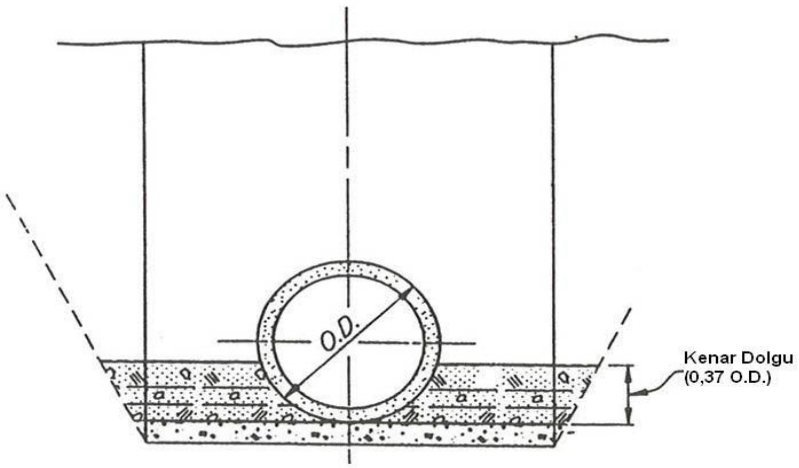
Boruya üniform destek sağlamak için, hendek tabanına uygun malzeme yerleştirilerek yastık teşkil edilir. Üniform destek, hem borunun ekseni boyunca desteklenmesi hem de yükün borunun altına yayılması açısından önemlidir. Yastık, üzerine boru yerleştirildiğinde, borunun uygun seviye ve eğimde olmasını sağlayacak şekilde yapılmalıdır ve gevşek veya sıkıştırılmış olabilir. Günümüzdeki eğilim borunun sıkıştırılmamış yastık üzerine yerleştirilerek malzeme içine batmasını sağlamaktır. Böylece boru tabanındaki basıncın yayılmasını sağlayarak bazı noktalarda basınç yoğunlaşmasının engellenmesi amaçlanmaktadır. Eğer yastık gevşek yapılacaksa, eğimin fazla olduğu alanlara yerleştirilen borularda, olası bir su akımının gevşek malzemeyi taşıyarak oyuklar oluşturmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Ayrıca yataklama malzemesi sıkıştırılmıyorsa, hattın eğimini ve seviyesini muhafaza etmek açısından, bu malzemenin boru yerleştirilince ne kadar oturma yapacağı belirlenmelidir [54].

Malzeme yerleştirilmeden önce hendek tabanında kaya parçaları, büyük toprak parçaları, enkaz gibi uygun olmayan zemin varsa kaldırılmalıdır. Eğer hendek tabanındaki malzeme yataklamada kullanmak için uygunsa bu malzeme kazılıp tekrar hendek tabanına yerleştirilir. İnşaat açısından zeminin yerinde gevşetililip sıkıştırılması daha kolay olsa da, kazılarak zemin içinde bulunması muhtemel kaya parçaları gibi maddeler tespit edilebilir ve ayrıca daha üniform bir dolgu elde edilir [54].

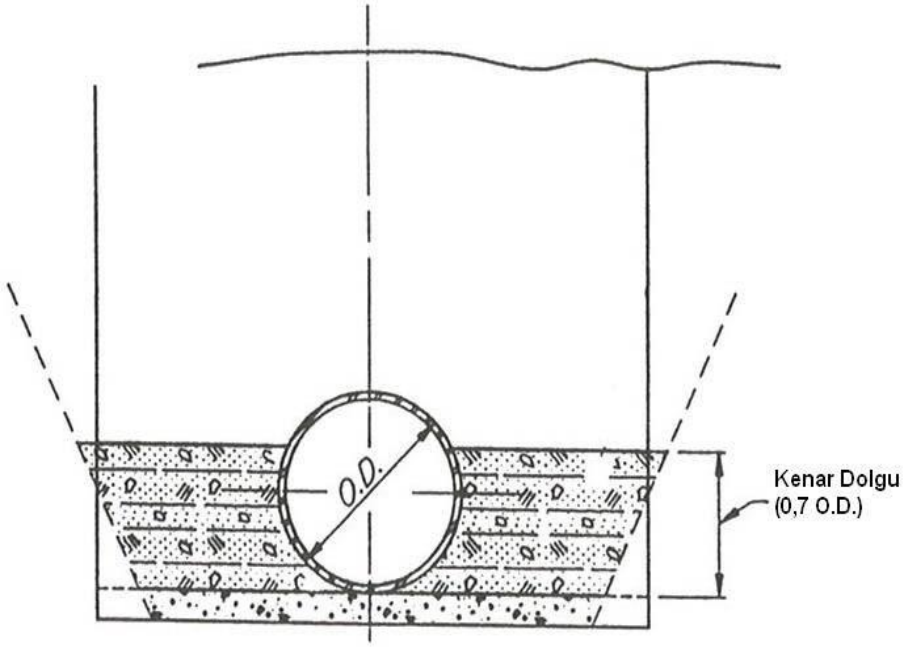
Valfler gibi ağır donanımların bulunduğu ek ve bağlantı yerleri beton veya yüksek birim hacim ağırlığına sahip malzemeden oluşan zemin üzerine yerleştirilmeli, farklı oturmayı engellemek için ise bu bölümden gevşek zemine doğru orta sıkılıkta bir geçiş bölgesi yapılmalıdır. Ayrıca aşırı oturmayı önlemek için bu donanımlar sıkı bir temel üzerine yerleştirilmelidir. Projedeki eğimi sağlamak amacıyla boru bloklar üzerine yerleştirilmemelidir. Bu durumda bloğun olduğu nokta boruyu taşırken, diğer kısımlarda borunun altındaki malzemeyi sıkıştırmak zor olduğundan gerilmeler oluşabilir [54, 56].

Yastık kalınlığı borunun cinsine ve boyutuna bağlıdır. Genel olarak birçok standartta minimum kalınlık 10–15 cm kadardır. Başka bir kritere göre yastık kalınlığı boru dış çapının 1/12'si kadardır. Hendek kaya içerisine açılmışsa tabaka kalınlığının arttırılması tavsiye edilir ve genel olarak minimum yastık kalınlığı 15–22 cm alınır. TS 5991 e göre, boru çapı D (cm) olmak üzere serilecek tabaka kalınlığı en az 10+(D/10) cm, hendek tabanı kayalık zemine isabet ediyorsa en az 20+(D/10) cm olmalıdır [54, 56].

Kenar dolgu borunun gerekli desteği alması bakımından önemlidir. Kenar dolgunun rijit ve fleksibl borular için farklı işlevleri vardır. Rijit borularda borunun üzerindeki yükü tabandaki zemine aktarırlar. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, kenar dolgu yüksekliği rijit borular için yastık seviyesinden borunun orta kısmına kadar olabilir. Fleksibl borularda ise kenar dolgu, borunun yanal deformasyonlarına karşı koyarak yük taşımasına yardımcı olmaktadır (Şekil 2.12). Fleksibl borular için kenar dolgu yüksekliği, boru orta kısmından borunun 30 cm üzerine kadar olabilir. Kenar dolgu sıkıştırılırken boruya zarar vermemeye özen gösterilmelidir. Bu bölümü sıkıştırmak için verilen enerjiyle boru deforme olabilir ve dolgunun sıkıştırılması zorlaşabilir. [54].



Şekil 2.11. Rijit borular için kenar dolgu yüksekliği [54]

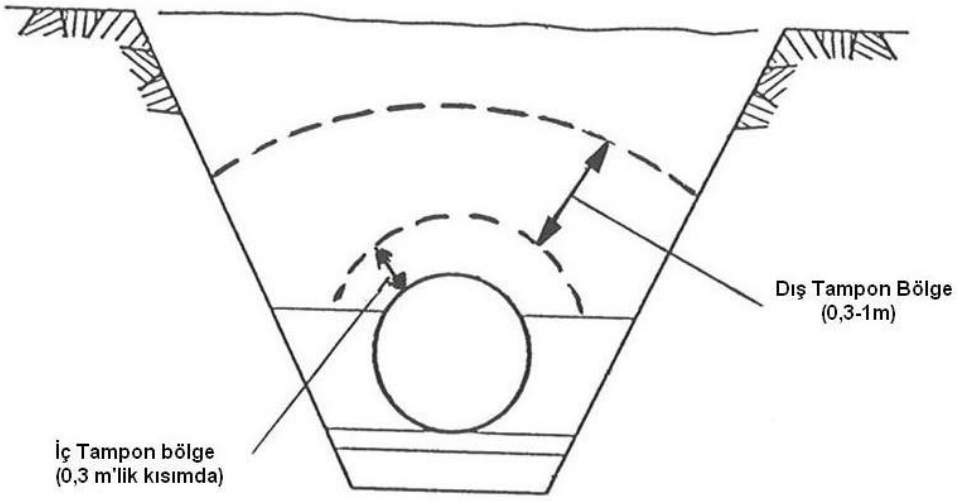


Şekil 2.12. Fleksibl borular için kenar dolgu yüksekliği [54]

2.2.3. Geri dolgu

Hendekler iç basınç deneyinden önce kısmen, iç basınç deneyinden sonra tamamen doldurulmalıdır. Sıkıştırma için mekanik aletler kullanırken boruları hasara uğratmamaya özen gösterilmelidir. Özellikle fleksibl borularda muhtemel aşırı ve asimetrik deformasyonu önlemek amacıyla dolgu işlemi kontrollü yapılmalıdır. Hendeğin doldurulması ve sıkıştırılması sırasında boru kaplamasının zedelenmemesine dikkat edilmelidir [48, 54, 59].

Geri dolgu malzemesinin maksimum dane çapı Şekil 2.13'te görülen iki bölgeye göre ayrı ayrı belirlenir. Boru üzerindeki ilk 30 cm lik dolguda kullanılacak malzemenin maksimum dane çapı genel olarak 38 mm ile 75 mm arasında değişmektedir. Eğer kenar dolgu boru üzerinde 30 cm ye kadar yerleştirilmişse maksimum dane çapı için kenar dolgu malzemesi için kullanılan kriterler geçerlidir. Birçok standartta borunun üzerinde 30 cm ile 1 m arasında yer alan dolgu malzemesi için bir sınırlama bulunmasa da bu kısımda kullanılacak malzemenin maksimum dane çapı 15 cm.'i geçmemelidir. Çünkü 30 cm.'lik iç tampon bölge boruyu iri parçaların çarpma etkisinden koruyamayabilir. Ayrıca geri dolgu malzemesi hendeğe boşaltıldığında iri parçalar 30 cm lik dolguyu kolayca geçebilir [54].



Şekil 2.13. Geri dolgu [54]

Kısmi doldurma malzemesi borunun her iki tarafına hendek genişliğince 15 cm kalınlığında tabaka halinde üniform olarak serilmeli, borunun altında yan taraflarında dikkatle sıkıştırılmalıdır. Dolgu malzemesi doğrudan boru üzerine dökülmemeli, borunun doğrultusunu bozmamak için iki tarafa eşit miktarda yerleştirilmelidir. İki taraftaki dolgu seviyesi arasındaki fark, 1350 mm ve daha küçük çaplı borular için 15 cm, 1350 mm'den büyük çaplı borular içinse 30 cm den fazla olmamalıdır. Kısmi doldurma anma çapı 200 mm'ye kadar olan boruların 30 cm, daha büyük boruların 50 cm kadar üzerine kadar devam etmeli ve ek yerleri açıkta bırakılmalıdır. Genellikle kazıdan çıkan malzeme kullanıldığında, sıkıştırılmış dolgunun birim hacim ağırlığının ve su muhtevasının bozulmamış tabii kanal tabanı malzemesininki ile aynı olması sağlanmalıdır. Başka malzeme kullanıldığında, su muhtevası, maksimum birim hacim ağırlık elde edilecek şekilde ayarlanmalıdır. İç basınç deneyinin başarılı olduğu anlaşıldıktan sonra, önce açıkta kalmış birleşme yerleri sonra boru hattının tamamı doldurulmalıdır [49, 54, 56].

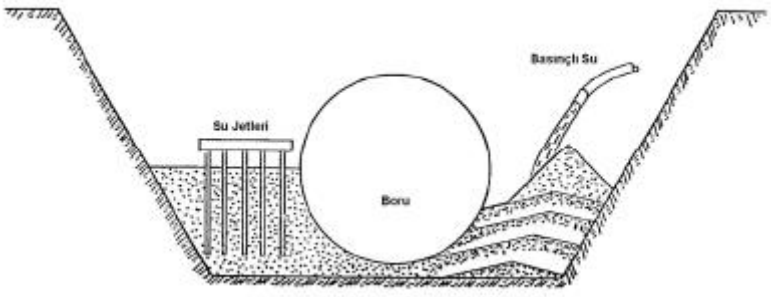
2.2.4. Sıkıştırma

Geri dolgu ve yataklama malzemesinin istenilen sıkılıkta yerleştirilmesi boru-zemin sisteminin tasarlanan şekilde çalışması bakımından önemlidir. Sıkıştırma işlemi basınç, darbe, yoğurma ve titreşim etkisiyle yapılabilir. Genel olarak kohezyonlu zeminler basınç, darbe ve yoğurma etkisiyle, kohezyonsuz zeminler ise titreşim etkisiyle daha iyi sıkıştırılabilir. Dolguda kullanılacak malzemeye göre sıkıştırma tekniğinin seçilmesi, bu

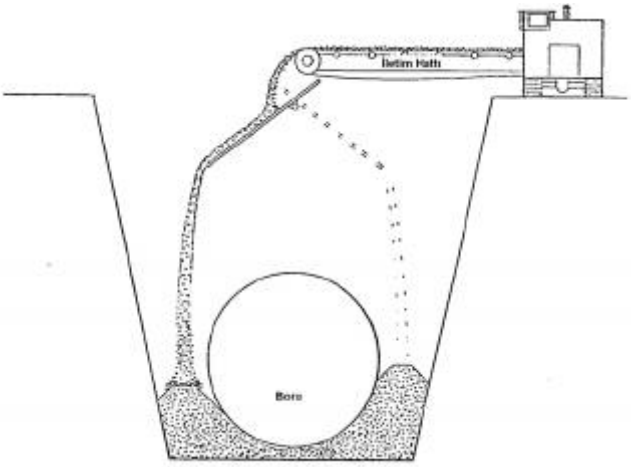
tekniğe uygun ve boruya zarar vermeyecek sıkıştırma araçlarının kullanılması ve sıkıştırmanın kontrol edilmesi gerekmektedir [54].

Malzemenin sıkıştırılması için gereken basınç etkisi düz silindirlerle, lastik tekerlekli silindirlerle veya diğer inşaat makineleriyle; darbe etkisi mekanik tokmaklarla; yoğurma etkisi keçiayaklı silindirlerle; titreşim etkisi ise vibrasyonlu düz silindirler, vibrasyonlu keçi ayaklı silindirler, iç veya yüzeysel vibratörler vasıtasıyla sağlanabilir. Hendeğin içinde ve boru etrafında küçük vibratörler ve el tokmakları kullanılır. Dolgu boru üzerinde 30–60 cm.'lik seviyeye ulaştıktan sonra lastik tekerli silindirler, küçük traktörler veya vibrasyonlu silindirler kullanılabilir. Dolgu yüzeyin 60–90 cm üzerine ulaştığında ise keçiayaklı silindirler veya tekerlekli silindirler gibi daha büyük araçlar kullanılabilir [47, 60].

Drenaja izin veren zeminlerde sıkıştırma işlemi su jeti, püskürtme ve suya doyurma yöntemleriyle yapılabilir. Şekil 2.14'de sol tarafta görülen su jeti yöntemi, büyük çaplı boruların etrafındaki dolgunun sıkıştırılmasında kullanılır. 1–1,5 m yükseklikte veya boru orta seviyesine kadar serilen malzeme içine sokulan su jeti sayesinde sıkıştırma sağlanır. Şekil 3.14'de sağ tarafta görülen püskürtme yönteminde zemin, basınçlı su yardımıyla bir şevden aşağı, boru etrafına doğru püskürtülür. Suya doyurma yöntemiyse, zemine eklenen suyun drenajı sonrasında oluşan sızma gerilmeleriyle suyun sıkıştırılmasıdır. Vibratör kullanımıyla bu işlem birleştirilebilir. Kumlu zeminlerde %85–90 sıkılık elde edilirken, killi ve siltli zeminlerde bu yöntemler uygun olmamaktadır. Bazı durumlarda zemin, Şekil 2.15'de ki gibi boru etrafına belirli bir yükseklikten bırakılarak istenen sıkılıkta yerleştirilebilmektedir [54, 59, 60].



Şekil 2.14. Su jeti ve püskürtme yöntemleriyle sıkıştırma [59]



Şekil 2.15. Zeminin belirli bir yükseklikten düşürülmesiyle sıkıştırılması [59]

%5'ten az ince dane içeren GW, GP, SW, SP, GW-GP, SW-SP gibi iri daneli zeminlerde en büyük yoğunluk suya doyurma ve vibrasyon yöntemiyle sıkıştırmayla elde edilir. İç vibratörlerin kullanılması durumunda sıkıştırma için serilecek tabaka kalınlığı vibratörün uzunluğuna bağlıdır. Bu yöntem özellikle boru alt yan kısımlarındaki dolgunun sıkıştırılmasında etkili olmaktadır. Yüzeysel vibratörler kullanılırsa dolgu malzemesi 150–300 mm kalınlıkta tabakalar halinde sıkıştırılır [49, 54].

%12'den fazla ince dane içeren GM, GC, SM, SC gibi zeminler ile bu grupta herhangi bir sınır durumunda bulunan zeminler (GM-SM) ve MH, CH, ML, CL, SCCL, SM-ML, ML-CL gibi ince daneli zeminler 100–150 mm kalınlıkta yerleştirilerek elle, mekanik kompaktörlerle veya mekanik tokmaklarla sıkıştırılmalıdır. %5–12 arasında ince dane içeren zeminler kohezyonlu veya kohezyonsuz davranış gösterebilir. Zemin danelerinin derecelenmesi ve ince danelerin plastisite özelliklerinin belirlenmesiyle bu tür zeminlerin sıkıştırılması için uygun yöntem belirlenir [49, 54].

Sıkıştırtma miktarı arazideki dolgunun birim hacim ağırlığının, bu zemin için laboratuar deneyleriyle belirlenen referans birim hacim ağırlıkla karşılaştırılmasıyla kontrol edilir. Referans birim hacim ağırlığı, kohezyonlu zeminler için standard veyamodifiye proktor deneyiyle, kohezyonsuz zeminler için ise rölatif sıkılık deneyiyle belirlenir. Arazide dolgunun yoğunluğunun belirlenmesi için kum konisi, lastik balon, nükleer testleri uygulanabilir. Her bir yöntemin üstünlükleri ve eksiklikleri olmakla birlikte, zemin özellikleri ve inşaat şartlarına göre uygun olan yöntem seçilmelidir [54].

3. GÖMÜLÜ BORULARA ETKİ EDEN ZEMİN YÜKLERİ, SİSMİK ETKİLER VE BORU HATLARININ DAVRANIŞLARI

3.1. Gömülü Borulara Etki Eden Yükler

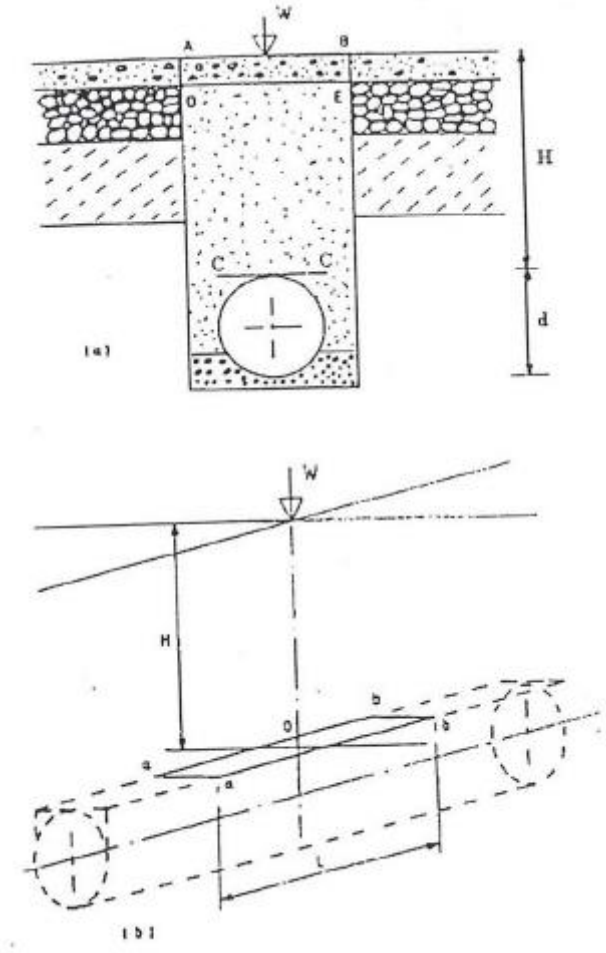
3.1.1. Zemin yükü

Gömülü boruların tasarımı zemin ve hareketli yüklerin büyüklüğüne göre yapılır. Düşük kaplama kalınlığı olduğu durumlarda trafik yükü, yüksek kaplama kalınlıklarında zemin yükü daha etkilidir. Boruya etkiyen zemin yükünü esas olarak boru üzerindeki zeminin ağırlığı oluşturmakla birlikte, boru etrafındaki zeminin oturması ve borunun deformasyonuna bağlı olarak oluşan sürtünme kuvveti ve kemerlenme, boru üzerindeki zemin yükünü etkiler. Boruya etkiyen yük, borunun ve yatak malzemesinin rijitliğine ve dolgu malzemesinin özelliğine bağlıdır [61, 62].

3.1.2. Hareketli yükler

Gömülü boruların tasarımında zeminden dolayı oluşan hareketsiz yükler ve trafiğin neden olduğu hareketli yükler esas alınır. Hesaplar Şekil 3.1'de görülen c-c düzlemi gibi bir düzlem esas alınarak yapılır ve sonuç olarak bunan düşey yükün boru üzerindeki toplam yük olduğu kabul edilir [63].

Hareketli yüklerin hesabı, Boussinesq gerilme dağılımına göre yapılır. Boussinesq, yüzeydeki noktasal yükün neden olduğu gerilmelerin zemin içerisindeki dağılımını hesaplamıştır. Hesaplarda zeminin yarı sonsuz homojen (noktadan noktaya özellikler aynı), izotrop (bir noktadan geçen bütün doğrultularda özellikler aynı) ve elastik olduğu kabul edilmiştir. Aslında zemin bu özellikleri taşımasa da, yapılan ölçümler hesaplanan değerlerin makul sonuçlar verdiğini göstermiştir [63].



Şekil 3.1. Yol altında gömülü borulara etkiyen hareketli yük (a) tipik kesit (b) [49]

Boussinesq gerilme dağılımını Şekil 3.2'de kullanarak hareketli yüklerin hesabı için şu formül kullanılabilir:

$W_{sc} = C_s . (P.F'/L)$

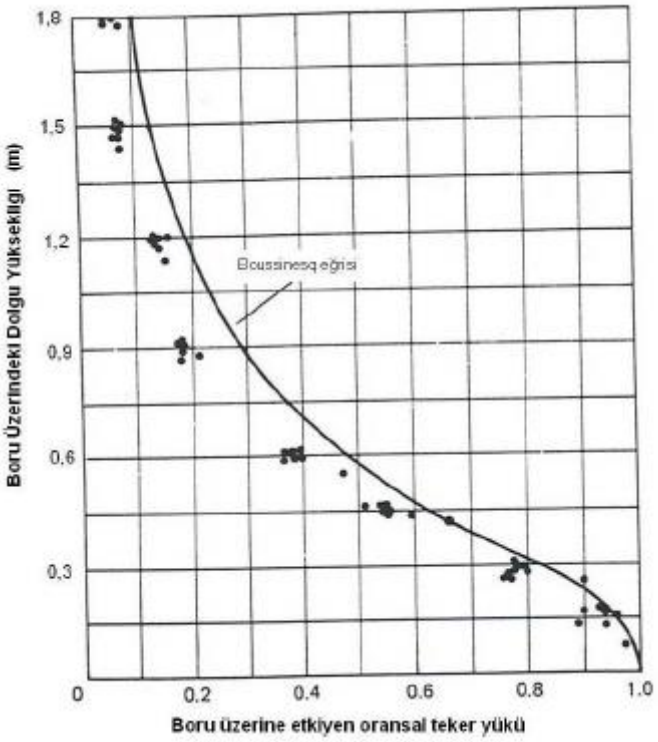
W_{sc}: Tekerlek yükünden dolayı borunun birim boyuna etkiyen ortalama yük (KN/m)

P: Tekerlek yükü (KN)

F': Etki faktörü:

L: Efektif boru uzunluğu (m)

C_s: Yük katsayısı



Şekil 3.2. Boussinesq gerilme dağılımı ve gerçek gerilme ölçümlerinin karşılaştırılması [49]

Yük statik olduğunda etki faktörü F', bire eşittir. Eğer yük, kamyon veya uçak tekerinde olduğu gibi hareket halinde ise F' değeri, aracın hızına, titreşime, uçak kanatlarının kaldırma kuvvetine ve en önemlisi yüzeyin pürüzlülüğüne bağlıdır. Yapılan deneyler, etki faktörünün kaplama kalınlığından bağımsız olduğunu ve 1,5 ile 2 arasında değerler aldığını göstermiştir. Cs katsayısı ise, boru parçasının genişliğine, uzunluğuna ve boru üzerindeki kaplama yüksekliğine bağlıdır [47, 63].

3.1.3. Boru ekseni boyunca meydana gelen yükler

Boru hatlarında meydana gelen hasarlar üzerinde yapılan araştırmalar, yalnız ideal koşullarda borulara sadece zemin ve hareketli yüklerin etkidiğini göstermiştir. Bu yüklerin dışında kesin olarak hesaplanması mümkün olmayan, değişken, bölgesel ve eksenel eğilmeye neden olan büyük yükler de vardır [49].

3.1.4. Don olayı neticesinde meydana gelen yükler

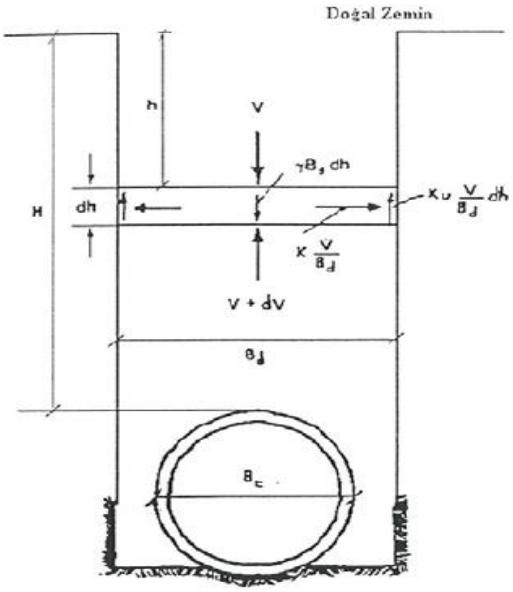
Dondurucu hava koşulları birkaç saat devam ettiğinde, doğal zemin seviyesine yakın bölgelerde bulunan su tanecikleri buz tabakaları veya buz kristalleri oluşturur. Don etki derinliği arttıkça bir miktar su daha donar. Donma, su miktarını azalttığından kapiler kuvvetler etkisiyle don derinliğinin altındaki yeraltı suyu yukarı taşınır. Kapiler kuvvetler

etkisiyle taşınan su da don etkisindeki bölgeye gelince donar ve bu işlem denge sağlanıncaya kadar devam eder. Oluşan buz kütleleri hacim artışı nedeniyle boruya yük etkitir. Rijit borularda don etkisiyle, boruya etkiyen yük yaklaşık iki kat artmaktadır. Don etkisiyle fleksibl borularda önemli bir yük artışı olmaz. Örnek olarak PVC borularda don etkisiyle, yapısal hasar oluşmadan küçük deformasyon artışları görülebilir. Don etkisini azaltmak için borular don derinliğinin 1 m kadar altına yerleştirilmelidir [49].

3.2. Gömülü Borulara Etki Eden Zemin Yüklerinin Tespit Edilmesi

3.2.1. Markston yük teorisi

Bu çalışma, gömülü borular üzerine etkiyen yüklerin bulunması için yapılan çalışmaların başlangıcıdır. Marston yük teorisi Şekil 3.3'de görüldüğü üzere, hendek içerisindeki zemin prizmasının boruya yük verdiği düşüncesine dayanmaktadır. Dolgu malzemesinin ve borunun oturma yapmasına bağlı olarak hendek duvarlarında sürtünme kuvvetleri oluşur. Kohezyon olmadığı varsayılırsa, sürtünme kuvveti yanal toprak basıncıyla dolgu ve hendek malzemeleri arasındaki içsel sürtünme açının tanjantının çarpımına eşittir. Marston, kohezyonun oluşması için uzun zaman gerekmesi ve kohezyonsuz durumun daha büyük yüklere neden olması sebebiyle kohezyonun ihmal edilebileceğini varsaymıştır. Ayrıca zeminin birim hacim ağırlığının ve sürtünme özelliklerinin hendek boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir [47, 49, 64].



Şekil 3.3. Marston Dar Hendek Teorisi [49]

3.2.2. Hendek içerisindeki borulara etki eden zemin yükü

Şekil 3.3'de görüldüğü üzere, Bd.(1).dh hacmindeki parça üzerindeki düşey kuvvet V, bu parçanın altında yukarı yöndeki düşey kuvvet V+dV ile dengelenir. Hacimsel parça Bd genişliğinde, dh yüksekliğinde ve boru ekseni boyunca birim genişliktedir. Parçanın ağırlığı, hacmiyle birim hacim ağırlığının çarpımına eşittir [49].

$w = B_d . (d_h).(1).\gamma$

Burada $B_d.(d_h).(1)$ parçanın hacmi, γ ise birim hacim ağırlığıdır. Parçanın kenarlarında h derinliğindeki yanal toprak basıncı P_L şöyle bulunur:

$P_L = K. (V / B_d)$

$K = [(\sqrt{(\mu^2 + 1)} - \mu) / (\sqrt{\mu^2 + 1}) + \mu] = (1 – \sin Ø) / (1 + \sin Ø) = \tan^2 (45 – Ø / 2)$

Boru kenarlarındaki birim uzunlukta sürtünme kuvveti ise şu şekilde bulunur:

$F_s = K. (V/ B_d) . \mu^t. dh$

Düşey yöndeki yüklerin eşitliğinden,

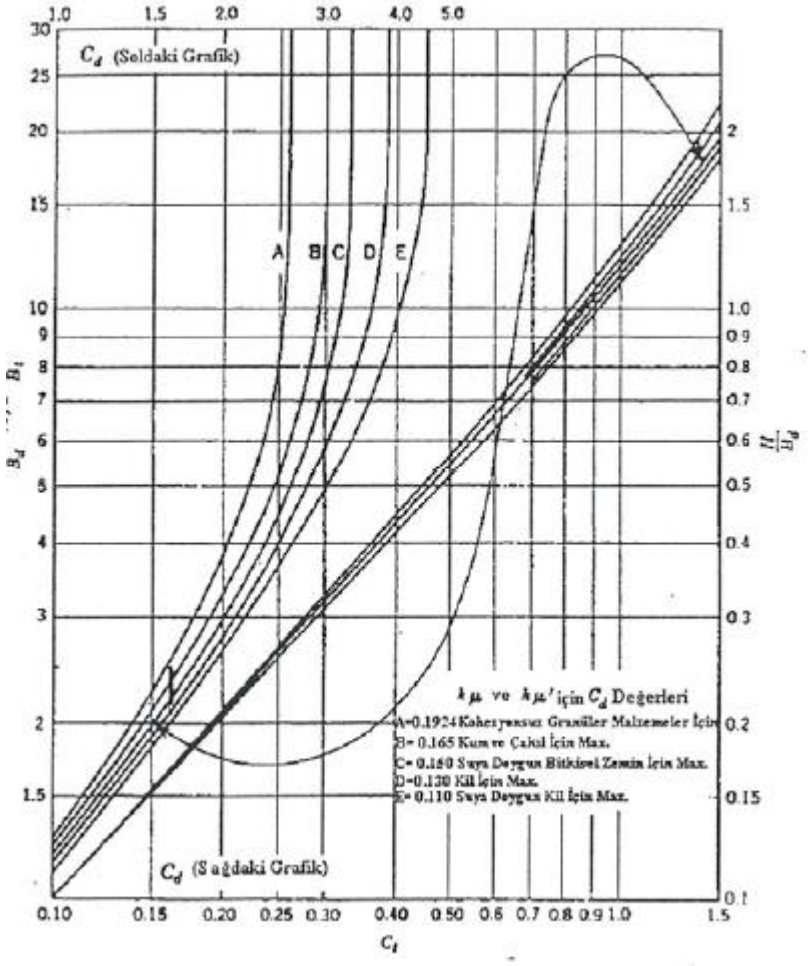
$(V + dv) + [(2.K.\mu^t. V) / B_d)]. dh = V + \gamma. B_d. dh$

$0 = [B_d – (2.K.\mu^t. V) / B_d] . (dh/dV)$

Denklemde h=H değeri yerine konulduğunda borunun üzerindeki seviyede toplam düşey basınç bulunur. Bu yükün ne kadarının boruya etkidiği boru ve zeminin rijitliklerine bağlıdır. Borunun oldukça rijit ve kenar dolgunun sıkışabilir olması durumunda bu yükün hemen hemen tamamı boru tarafından taşınır. Hesaplarda kolaylık sağlaması açısından yük katsayısı C_d tanımlanmıştır [49].

$C_d = [(1-e^{-2k\mu t(H/Bd)}) / (2.K.\mu)]$

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi Cd fonksiyonunun H/Bd oranına göre değişimi, farklı zeminlerin Kμ’ değerleri için grafiksel olarak çizilebilir ve Cd değeri bu grafikten elde edilebilir. Kμ’ dolgu malzemesinin içsel sürtünme katsayısının bir fonksiyonudur. K , μ ve μ’ değerleri Marston tarafından deneysel olarak bulunmuştur ve Çizelge 3.1’de görülebilir.[49]



Şekil 3.4. Hendek durumunda yük katsayısı (Cd) için diyagram [49]

Çizelge 3.1. Çeşitli zeminlere ait γ, K, ve μ değerleri [49]

Zemin Cinsi	Birim Hacim Ağırlık (KN/m^3)	Rankine Oranı K	Sürtünme katsayısı μ
Kısmen sıkıştırılmış nemli bitkisel	15	0,33	0,5
Suya doygun bitkisel toprak	18	0,37	0,4
Kısmen sıkıştırılmış nemli kil	17	0,33	0,4
Suya doygun kil	20	0,37	0,3
Kuru kum	17	0,33	0,5
Islak kum	20	0,33	0,5

C_d yük katsayısı kullanılarak rijit boru üzerindeki yük aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$W_d = C_d . \gamma . B^2_d$

W_d: Hendek tipi borularda birim uzunluk için boru üzerindeki yük (KN/m)

e: Doğal logaritma tabanı

γ: Dolgunun birim hacim ağırlığı (KN/m^3)

V: Dolgu içindeki herhangi bir yatay düzlemdeki düşey yük(KN/m)

B_d: Hendek genişliği (m)

H: Boru üst seviyesi ile doğal zemin yüzeyi arasındaki fark (m)

h: Zemin yüzeyinden dolgu içindeki herhangi bir yatay düzleme olan mesafe (m)

C_d: Hendek tipi borular için yük katsayısı

μ: Dolgunun içsel sürtünme katsayısı (tanφ)

μ': Dolgu ve borunun kenarları arasındaki sürtünme katsayısı (tanφ)

F_s: Birim uzunluğa etkiyen sürtünme kuvveti (KN/m)

K: Yanal aktif birim basıncın düşey basınca oranı

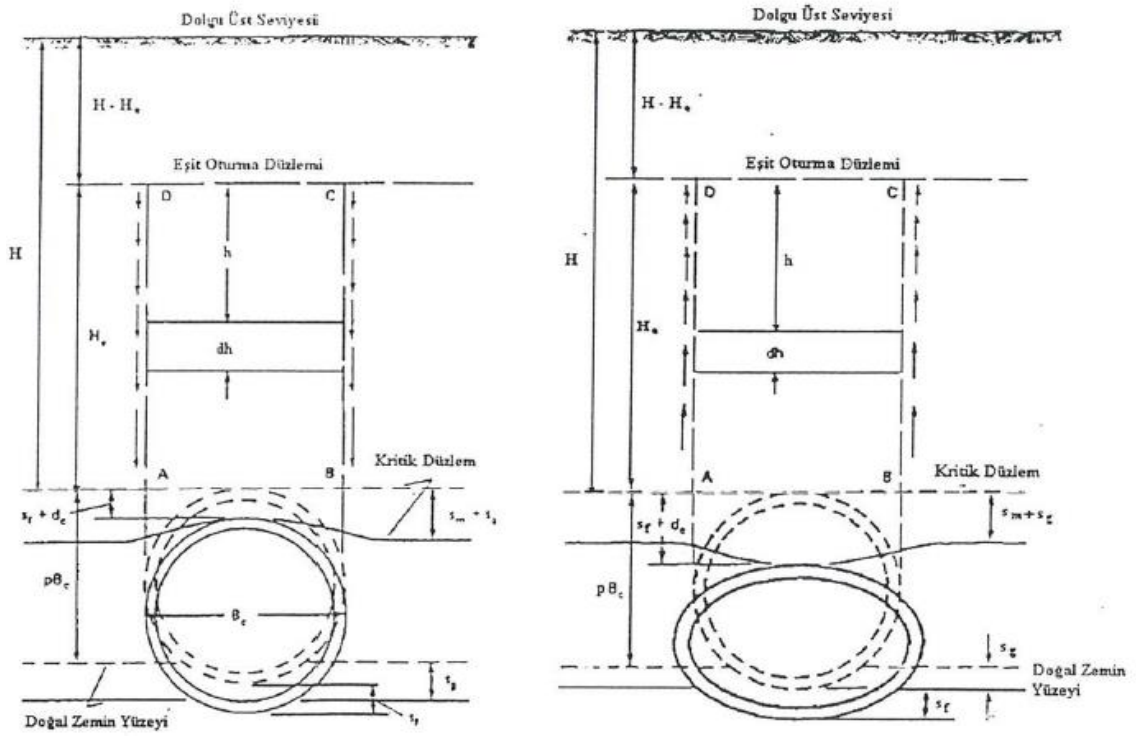
3.2.3. Dolgu durumu

Borular dolgu durumu için pozitif ve negatif projeksiyon durumu olmak üzere iki şekilde yerleştirilirler. Her iki yerleştirme durumunda da boruya etkiyen toplam zemin

yükü, boru üzerinde (içteki zemin prizması) ve kenarlarında (dıştaki zemin prizması) bulunan zemin kütlelerinin oturmalarına bağlı olarak oluşan sürtünme kuvvetinden etkilenir. Zemin kütlelerinin yaptığı oturmaların karşılaştırılması için bir kritik düzlem ve oturma oranı tarif edilmiştir [47].

Pozitif projeksiyonlu borular için Şekil 3.5'de görülen iki durum söz konusudur. Şekil 3.5a'da görülen birinci durum projeksiyon durumu olarak adlandırılır, boru kenarlarındaki zemin kütleleri boru üzerindeki zemin kütlesinden daha fazla oturma yapar. Şekil 3.5b'de görülen ikinci durum ise hendek durumu olarak adlandırılır ve boru üzerindeki zemin kütlesi boru kenarlarındaki zemin kütlelerinden daha fazla oturma yapar. Kritik düzlem dolgu seviyesi boru üst seviyesiyle bir olduğunda, boru üzerindeki yatay düzlemdir [47, 49].

Projeksiyon durumunda oturma oranı pozitiftir ve sürtünme kuvvetleri aşağı yönde olup boruya etkiyen yükü arttırırlar. Hendek durumunda oturma oranı negatiftir ve sürtünme kuvvetleri yukarı yönde olup boruya etkiyen yükü azaltırlar [49].



a) Projeksiyon Durumu

b) Hendek Durumu

Şekil 3.5. Pozitif projeksiyonlu borularda zemin prizmalarının hareketi (a) [49]

Pozitif projeksiyonlu borular için oturma oranı şu şekilde bulunur:

$$r_{sd} = [(S_m + S_g) – (S_f - d_c)] / S_m$$

rsd: Oturma oranı

Sm: p.Bc yüksekliğindeki kenar dolgunun oturması (m)

Sg: Boru etrafındaki doğal zeminin oturması (m)

Sf: Boru altındaki temelin oturması (m)

dc: Borunun düşey yönde yüksekliğinin azalması (m)

Negatif projeksiyon durumunda boruların yerleştirilmesi Şekil 3.6'da görülmektedir. Kritik düzlem boru üzerindeki dolgu doğal zemin yüzeyi seviyesine geldiğinde bu seviyeden geçen düzlem olarak tanımlanır. Bu durumda ise oturma oranı şu şekilde bulunur [47]:

$$r_{sd} = [\ S_g - (S_d + S_f + d_c)\ ] / S_d$$

rsd: Oturma oranı

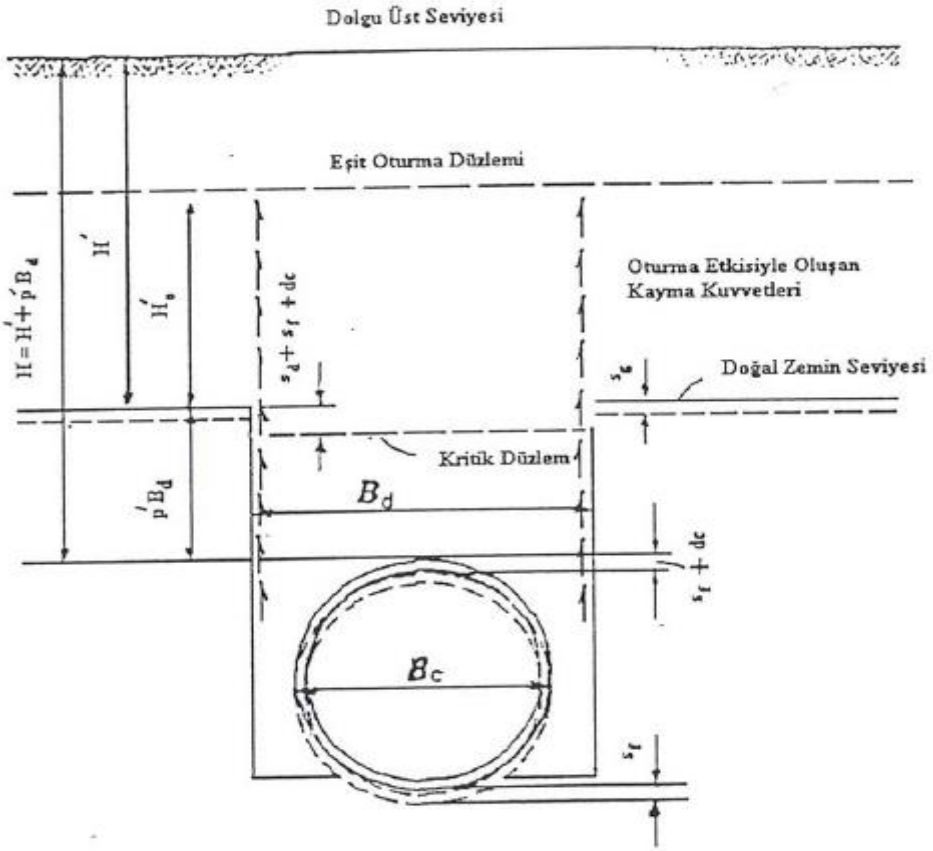
Sg: Doğal zemin yüzeyinin oturması (m)

Sd: Hendek içerisindeki p'.Bd yüksekliğindeki dolgunun oturması (m)

Sf: Borunun yataklandığı zeminin oturması (m)

dc: Borunun düşey boyutunun kısalması (m)

Negatif projeksiyonlu borularda boru üzerindeki dolgunun yüksekliği daha fazla olduğundan dolayı oturma oranı daima negatiftir. Sürtünme kuvvetlerinin yönü yukarı yönde olup boruya etkiyen yükü azaltırlar [47].



Şekil 3.6. Negatif projeksiyonlu borularda zemin prizmalarının hareketi [47]

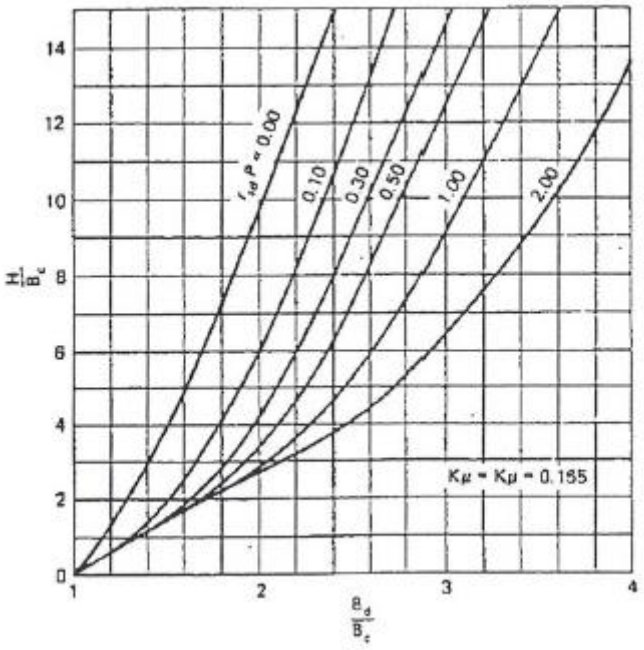
Oturma oranı matematiksel bir ifade olsa da değerinin tam olarak bulunması zordur. Bu nedenle tasarımda, dolgu durumunda inşa edilen boruların performansları üzerinde yapılan gözlemler sonucu elde edilen değerlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Çizelge 3.2'de pozitif projeksiyonlu borular için, yapılan gözlemler sonucu belirlenen oturma oranı değerleri görülmektedir. Negatif projeksiyonlu borular üzerinde diğer türlere nazaran daha az araştırma yapılmış olup, oturma oranı için tam bir değer bulunmaması halinde -0,3 ile -0,5 arasında alınması önerilir [47].

Çizelge 3.2. Pozitif projeksiyonlu borular için oturma oranı değerleri [47]

Durumlar	Oturma Oranı
Kaya veya oturma yapmayan zeminlere yerleştirimiş rijit borular	1
Sıradan zeminlere yerleştirimiş rijit borular	0,5 ile o,8 arasına
Oturma yapmayan zeminlere yerleştirimiş rijit borular	0 ile 0,5 arasında
Kenar dolgunun az sıkıştırıldığı fleksibl borular	0,4 ile 0 arasında
Kenar dolgunun iyi sıkıştırıldığı fleksibl borular	0,2 il3 0,8 arasında

3.2.4. Geçiş genişliği

Dolgu yüklerinin bulunmasında, pozitif projeksiyon durumu için verilen denklemiyle aynı yük değerini veren hendek genişliğinden küçük genişlikler için hendek durumu için verilen formül kullanılır. Bir başka deyişle, diğer faktörler sabit kalmak üzere, hendek genişliği arttıkça boruya etkiyen yük, projeksiyon durumuna göre hesaplanana eşit olana kadar, dar hendek teorisine göre artmaktadır. Daha büyük genişliklerde ise boruya etkiyen yük hendek genişliğinden etkilenmemektedir. Şekil 3.7'de görülen diyagramda, projeksiyonlu boru teorisi ve dar hendek teorisiyle hesaplanan yüklerin eşit olduğu durumlarda, hendek genişliğinin boru çapına oranı (Bd/Bc) görülmektedir. Eğer Bd/Bc değeri diyagramdakinden küçükse dar hendek teorisine, büyükse projeksiyonlu boru teorisine göre hesap yapılmalıdır [47, 49].



Şekil 3.7. Geçiş genişliği eğrileri [47]

3.2.5. Tünel içerisindeki borulara etkiyen zemin yükü

Marston yük teorisi tünel içerisindeki borulara veya örselenmemiş zemine itilerek yerleştirilen borulara etkiyen zemin yüklerinin bulunması için kullanılabilir. Marston'un tünel yükü denklemi aşağıda görülmektedir [47].

$$Wt = C_t . B_t . (\gamma . B_t - 2_C)$$

Burada Wt KN/m cinsinden boru üzerindeki yük ve γ özgül ağırlıktır. Yük katsayısı Ct, Cd ye benzer Şekil 40 yardımıyla hesaplanır. Bt maksimum tünel genişliği veya boru

tünele itiliyorsa boru çapıdır. C katsayısı kohezyon katsayısı olarak adlandırılır ve boyutu kuvvet/birim alandır (KN/m2).

Cd katsayısında olduğu gibi Ct katsayısının hesaplanmasında da kullanılır. Bu denkleme göre H/B oranının büyük değerleri için Ct katsayısı 1/(2Kμ') değerine eşit olur. Bu nedenle çok derindeki tünellerde zemin yükü hesaplanırken yük katsayısı Ct için 1/(2Kμ') değeri kullanılır.

Tünel içerisindeki veya örselenmemiş zemine itilen borular üzerine gelen yüklerin hesaplanma teorisi, hendek içerisindeki borulara etkiyen yükleri hesaplama teorisine benzemektedir. Ancak kohezyonun etkisiyle tünel yükü daha düşük olmaktadır. C katsayısı tünellerdeki yüklerin hesaplanması için çok önemlidir ama C katsayısının değeri aynı zemin türü için bile çok farklı değerler alabilmektedir. C katsayısı, laboratuarda örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerle belirlenebilir. Zeminin suya doyma ihtimali göz önünde bulundurularak, tasarımda muhafazakar C değerleri kullanılmalıdır ve laboratuar deneyleriyle elde edilen değerlerin 1/3'ünün kullanılması tavsiye edilir. Güvenilir laboratuar verilerinin olmadığı durumlarda Çizelge 3.3'teki değerler kullanılabilir. Mevsimsel donmalara ve çatlamalara veya suya doygunluk nedeniyle mukavemet kaybına maruz kalan bölgelerde bu katsayının sıfır olarak alınması tavsiye edilir. (γ.Bt-2C) değeri negatif olamaz ve bu nedenle 2C, γBt'den büyük olamaz [49].

Çizelge 3.3. Farklı zeminler için C değerleri [49]

Malzeme	C Değeri (KN/m^2)
Kil, çok yumuşak	2
Kil, orta	12
Kil, sert	50
Kum, gevşek kuru	0
Kum, siltli	5
Kum, sıkı	15

3.3. Sismik Riskler

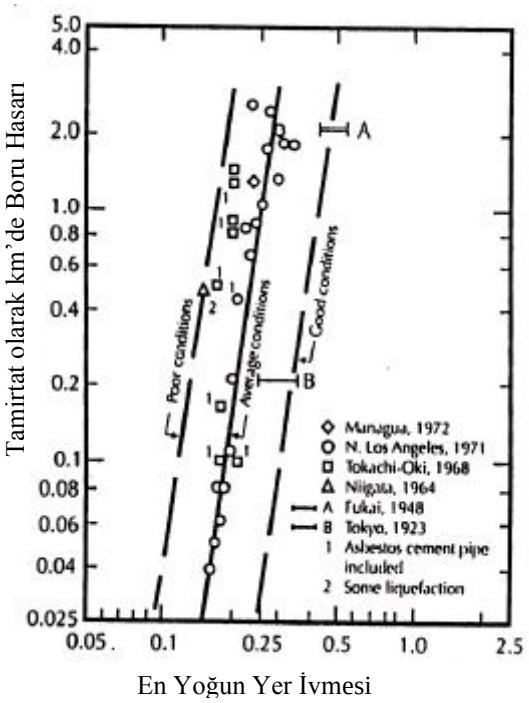
Daha önce meydana gelmiş depremler dikkate alındığında ve incelendiğinde gömülü boruların uğradığı sismik hasarlarla ilgili birçok bilgiye ulaşmak mümkündür. Bu

incelemeler kullanışlı bilgiler sunar. Geçmiş olaylardan edinilen bu tip bilgiler istatistiksel olarak hasar tahmini yapmayı sağlar, olası deprem ve hasarları tahmininde bu bilgiler kullanılabilir. Sismik tehlikeler, sismik dalga yayılımı riski ve kalıcı zemin deformasyonu PGD (Permanent Ground Deformation,) riski diye iki grupta sınıflandırılabilir. PGD hasarları tipik olarak belli bir alanda meydana gelirken sismik dalga yayılımı hasarları daha geniş alanda fakat daha az hasar oranıyla meydana gelmektedirler [49].

Deprem dalga yayılımı tehlikeleri yayılan dalga tesirleri dolayısıyla geçici gerilme ve kıvrılma (eğilme) olarak kendini gösterir. Zeminde PGD (yer kayması, yanal yayılmadan doğan sıvılaşma ve depremsel (sismik) oturmalar gibi) tehlikeleri, PGD bölgesinin mekânsal boyutu ve miktar, geometri tarafından sembolize edilirler. Fay kaynaklı PGD riskleri ise kalıcı yatay ve dikey faydaki denge meydana getirme ve boru-fay, kesişme açısı ile tanımlanır [49].

Deneysel hasar yaklaşımları

Boru hattı sisteminin ele alınmasında ilk adım mevcut sistemde deprem potansiyeli ile muhtemel hasar miktarlarının değerlendirilmesidir. Gömülü boru hatları için gözlemlenen sismik hasar ile yer hareketi arasındaki ampirik ilinti tipik olarak kullanılır. Buna ilişkin hasar oranı en yoğun yer ivmesinin bir fonksiyonu esas alınarak parçalı dökme demir boru hatları için bir bağıntı Büyükaşıkoğlu tarafından geliştirilmiştir. Bu ilişki, hem deprem hem dalga yayılması ve hem de PGD hasar verilerini içermektedir. Şekil 3.8'de gösterildiği üzere, en yoğun yer ivmesinin iki katı için hasar oranı 100'un bir faktörü (çarpanı) olarak artmaktadır [39].



Şekil 3.8. Tamirat Olarak km'de Boru Hasarı-En Yogun Yer İvmesi (g) [39]

3.4. Deprem Dalga Yayılımı Kaynaklı Hasarlar ve Etkiler

3.4.1. Atenüasyon ilişkisi

Pek çok araştırmacı ampirik olarak en yüksek zemin ivmesi, hızı ve yer değiştirmeleri için bağıntılar geliştirmiştir. Mevcut bağıntılar tipik olarak deprem şiddeti, mevki-kaynak uzaklığı ve yerel saha şartlarının fonksiyonlarıdır. Son zamanlarda fay mekanizmasını dikkate alan bağıntılar geliştirilmiştir. Bu bölüm göreceli olarak geniş miktardaki veriye dayandırılmış bu bağıntıları ele almaktadır. Büyükaşıkoğlu tarafından yapılan çalışmada en yüksek yer ivmesini elde etmek için en son bağıntılardan birini güncellemek için 1957'den 1993'e kadar olan 47 dünya çapındaki depremlerden 645'e yakın kaynak ivme-grafik kullanılmıştır. Ters ve itme depremlerinin kayma darbesi (yanal atım) depremlerinden daha büyük ivme oluşturduğunu ve yumuşak kayaların sert kayalara nazaran daha yüksek ivmeye sahip olduklarını ortaya konulmuştur. Bu bağıntı aşağıda verilmiştir [39].

$$\ln Am = -3{,}512 + 0{,}904\,MW - 1{,}328 \ln\{ (Rs)2 + [0{,}149 \exp(0.647\,MW)]2 \}1/2 + [1{,}125 - 0{,}112 \ln(RS) - 0{,}0957\,MW]\,F + [0{,}440 - 0{,}171 \ln(RS)]\,Ssr + [0{,}405 - 0{,}222 \ln(RS)]\,Shr$$

Burada Am en yüksek yer ivmesinin yatay bileşenleri (g); MW moment şiddeti; Rs fayın depremsel kırılma noktasına en yakın mesafe; F=0 Kayma darbeli (yanal atım) ve normal fay depremleri, F=1 ters, ters-eğik ve itme fay depremleri için; Ssr=1 yumuşak kayaçlı alanlar, Shr=1 sert kayaçlı alanlar, Ssr = Shr=0 alüvyonlu alanlar için bir den yüksek yer hızı için bir bağıntı geliştirdiler. Bu deneysel hafifletme bağıntısı 1979 Imperial Valley depremi ve diğer depremlerin 68 veri noktasına dayanarak elde edilmiştir [39].

$$\text{LogVm} = -0{,}67 + 0{,}489\ \text{Mw} - \text{LogRs} - 0{,}00256\ \text{Rs} + 0{,}175 + 0{,}22\ \text{P}$$

Burada Rs = (d2 + 16)1/2, Vm en yüksek zemin hızı (cm/sn), D fay kırılmasının toprak yüzeyi izdüşümüne en yakın mesafe (km), S=0 ve 1 sırasıyla kaya ve toprak mevkiler için, P=0 ve 1 sırasıyla 50. ve 84. frekans toplamına karşılık gelen yüzdelik değerlerdir. Yerel mevki şartını hesaba katan en yüksek zemin tepkileri (fcr) için yarı deneysel (yarı ampirik) bağıntılar geliştirilmiştir. Zemin tepkisinin; deprem şiddetine, merkez altı mesafeye (Rs) ve mevkinin büyütme faktörüne (AMP(V)) bağlı olduğu Büyükaşıkoğlu tarafından ortaya konulmuştur. En yüksek zemin dalga hızı aşağıdaki formülerle tahmin edilebilir [39].

$$\text{Vm} = 2{,}879 \times 100{,}153\text{M} \times \text{AMP(V)} \ldots \text{Rs} \leq 100{,}014 + 0{,}218\ \text{M}$$

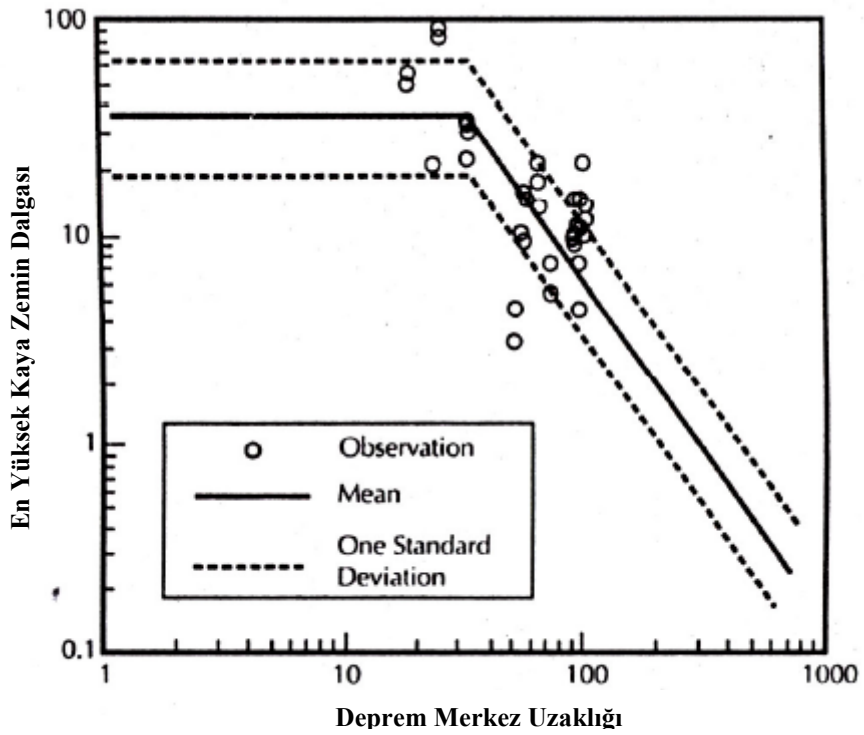
$$\text{Vm} = 3{,}036 \times 10\ 0{,}511\ \text{M} \times \text{AMP(V)} / \text{Rs}\ 1{,}64 \ldots \text{R} > 10\ 0{,}014 + 0{,}218\ \text{M}$$

Şekil 3.9 Amerikadaki Rocky Mountain kayalık mevkileri için Kamiyama'nın (AMP(V)=1) yarı ampirik bağıntısı ile 1989 Loma Prieta depreminden gözlenmiş verileri arasındaki ilişkiyi göstermektedir [47]. Büyütme çarpanları yerel mevkinin spektral tepkisi ile oluşabilmekte ve frekansın içeriği ile değişebilmektedir.

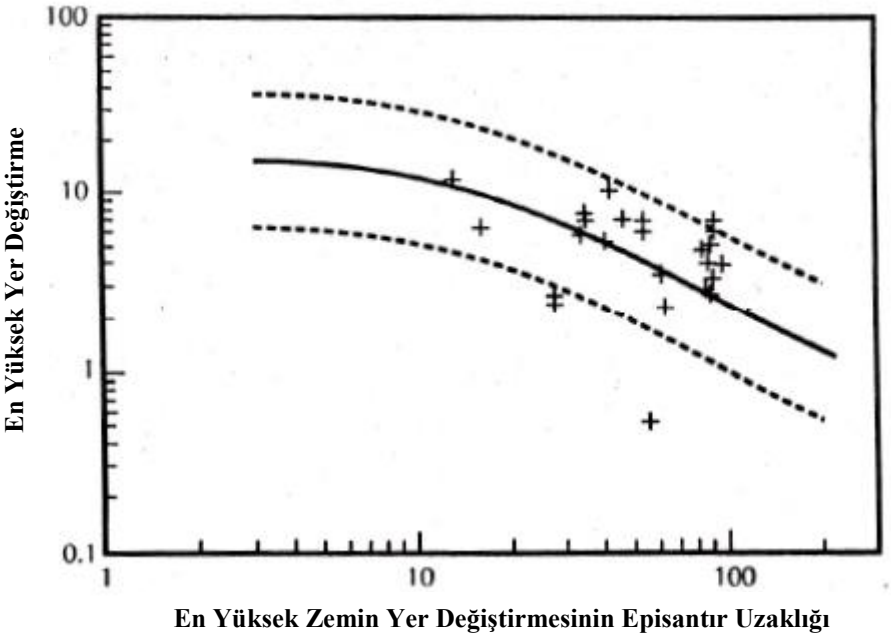
En yüksek zemin yer değiştirmeler için yeni deneysel bağıntılar geliştirmiştir. Bu çalışmada, farklı fay düzenekleri ve deprem dalga türlerinin etkilerini dikkate almıştır. Örmeğin, darbe-kaymalı faydan dolayı oluşan kesme dalgaları (SH dalgaları) için en yüksek kaya yer değiştirmesi aşağıdaki formül ile hesaplanabilir [47].

$$\text{LogSW} = -5{,}0 + 1{,}02\ \text{M} - 0{,}87\ \text{LogR}$$

1989 Loma prieta depremi (M=7,0) için Şekil 3.10'da ortalama düzenleme eğrisi (koyu çizgi), kesikli çizgiler ±1 standart sapmayı gösterilmektedir.



Şekil 3.9. 1989 Loma Prieta Olayındaki En Yüksek Kaya Zemin Dalgası ile Deprem merkezi uzaklığı arasındaki bağıntı [49]



Şekil 3.10. 1989 Loma Prieta Olayında Kayalık Mevkilerdeki En Yüksek Zemin Yer Değiştirmesinin Gregor Bağıntısı İle Karşılaştırılması [44]

3.4.2. Etkili yayılma sürati

Boru hatları tipik olarak zemin yüzeyinden 1-3m derine yatay olarak gömülü olmalarıından dolayı hem yapısal (dip) hem de yüzey dalgalarından etkilenirler. Bu bölümler yüzey ve yapı dalgaları için etkin yayılma sürati konusunda tahmini hesaplama tekniklerine odaklanmıştır [44].

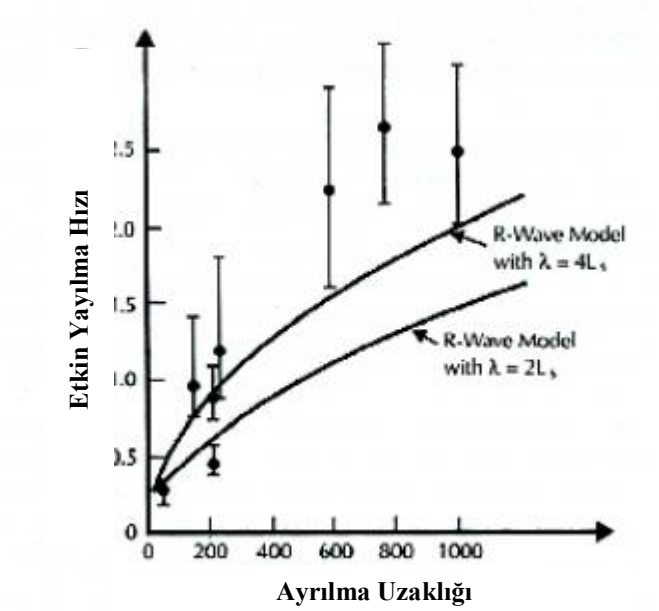
Dalga boyu

Malzeme sertliği derinlikle birlikte artan tipik toprak profilleri için temel R dalgalarının aşama hızı veya yayılma hızı, dalga boyunun artan bir fonksiyonudur. Bu yüzden uzun dalga boylu dalgalar kısa dalga boylu dalgalardan daha hızlı yol alırlar. Böylece, bir Ls uzaklıkla ayrılan istasyonlarla birlikte şekil değiştirme oranı hesaplamaları için etkin yayılma hızı, Ls ile orantılı λ dalga boyuna sahip R dalgalarının aşama hızıyla çok güzel bir bağıntı içindedir [39].

Ayrılma uzaklığı Ls (Şekil 3.11) ile uygun dalga boyu λ arasındaki kesin bir analitik bağıntı, sabit olmayan çeşitli dalga boylarıyla bağlantılı yer değiştirme genlikleri gerçeği yüzünden karmaşıktır. Fakat akla uygun hareket noktası $2Ls<\lambda<4Ls$ olabilmesidir. $\lambda=2Ls$ olması durumunda iki noktanın zemin hareketinin oldukça büyük göreceli yer değiştirmelere ve şekil değiştirmelere yol açarak 180° ile evre (faz) dışı kaldığı ortaya konulmuştur. Benzer bir şekilde iki noktada zemin hareketi, $\lambda=4Ls$ olması durumunda yine göreceli germeler ve yer değiştirmelere yol açarak 90° ile devre dışı kalmıştır. Eğer $\lambda=Ls$ olsaymış zemin hareketleri aşama-içi olabilecek ve bu dalga boyu nedeniyle şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler oluşmayacakmış. Böylece etkin yayılma hızının (Ceff) 2 ila 4 ayrılma uzaklıklarına eşit bir dalga boyu için, R dalgası aşama hızı (Cpu) olduğu görünür. Şekil 3.11'de, $\lambda=2Ls$ ve $\lambda=4Ls$ için hesaplanan temel R dalgaları aşama hızları için olduğu kadar Los Angeles Basin batı kanadındaki bir grup istasyon için ve 1971 San Fernando deprem olayı esnasındaki etkin yayılma hızı için geriye dönük hesaplanan değerler sunulmaktadır. $\lambda= 4Ls$ için oluşan R dalga modeli, gözlemlenen etkin yayılma hızı verilerine nazaran, $\lambda=2Ls$ için oluşan R dalga modeline göre daha kapsayıcı durumdadır [44].

Şekil 3.11'de gösterildiği üzere, uzaklık mesafeleri yaklaşık 500 m (1640 ft)'den daha az olan ayrılma uzaklıkları için $\lambda= 4Ls$ ile oluşan R dalgası modeli, gözlenen etkin yayılma hızı verisine çok daha iyi bir uyum sağlamaktadır. 500 m'den daha büyük ayrılma uzaklıkları için, $\lambda= 4Ls$ ile oluşan R dalgası modeli daha ılımlıdır, yani etkin yayılma

süratini eksik hesaplamaktadır. Bununla birlikte bu geniş ayrılma uzaklıkları mühendislik uygulamaları için daha üst düzeydedir [44].



Şekil 3.11. Etkin Yayılma Hızı – Ayrılma Uzaklığı [44]

Zemin hareketinin dalga boyunun aşağıdaki gibi tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur:

$\lambda = T\ Cs$

Zemindeki kesme hızının doğal periyodu, T ile ilgili aşağıdaki bağıntıyı verilmiştir.

$T = 4h / Cs$

Burada h toprak kalınlığını belirtmektedir [44].

Zemin gerilmesi

Gömülü boru hatlarının analiz ve tasarımı için zemin şekil değiştirme ve eğriliğine neden olan depremsel dalga yayılmasının etkileri tipik olarak karakterize edilmiştir. Zemin şekil değiştirmesini tahmini olarak hesaplamak için bir basitleştirilmiş işlem gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, sabit bir dalga şekliyle hareket eden basit bir dalgayı göz önüne almaktadır. Böylesine bir durum için en yüksek zemin şekil değiştirmesi, εg, (dalganın yayılma yönündeki çekme ve basınç) aşağıdaki gibi verilmektedir [44]:

$\varepsilon g = Vm / C$

Burada Vm dalga yayılma yönündeki en büyük yatay zemin hızı, C depremsel dalga yayılma hızıdır. Aynı şekilde en yüksek zemin kıvrılması, κg, ki mesafeyle ilgili çaprazvari yer değiştirmenin ikinci türevi olarak, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [47]:

Kg = Am / C2

Am, yayılma yönüne dik en büyük zemin ivmesidir.

Bu iki bağıntı dalga yayılma yönü boyunca zemin şekil değiştirme ve kıvrım eğikliği için göreceli olarak doğrudur. Zemin hareketinin parametreleri Vm ve Am, parçacık hızı ve ivmesi, deprem kayıtlarından veya daha önce tartışılan bağıntılardan elde edilebilir. R-dalgası yayılması için yer yüzeyine paralel zemin şekil değiştirmesi ara mesafenin dört katına eşit dalga boyuna karsı gelen ortam hızı olarak alınabilir. S-dalgaları durumunu göz önüne aldığımızda boru hattı dalga yayılma yönüne paralel olarak yöneltilmiş ise, S-dalgaları boru hattında eğilmeyi arttıracaktır. Ortaya çıkan zemin şekil değiştirmesi bu eğilme açısının bir fonksiyonudur. Yatay planda 45^0'lik bir açı için zemin şekil değiştirmesinin maksimum olduğunu gösterilmiştir [44]:

εg = Vm / 2C

3.4.3. Farklılaşan yeraltı koşullarının etkileri

Gömülü boru hatları hasarı değişken toprakaltı şartları (yatay yönde tekdüze olmayan toprak özellikleri) olan alanlarda yoğunlaşmıştır. 1994 Northridge deprem olayı esnasında göreceli olarak büyük miktarda boru hattı hasarı, eğimli zemin yüzeyi veya eğimli toprak-kaya ara yüzü durumlarında kaydedilmiştir. Değişken toprakaltı şartlarındaki yerler için toprak şekil değiştirmesini büyük oranda saha tepkisindeki yerel farklılıklar etkilemektedir [44].

1989 Loma Prieta depreminin kaydını kullanarak ve kum dolgularının sıvılaşmasını ihmal ederek, 1989 Loma Prieta depremi esnasında Marina bölgesi için zemin tepkisi analiz edilmiştir. Maksimum zemin ivmesi ve hızının sırasıyla 0.23g ve 34 cm/sn'ye kadar yüksek değerlere ulaştığı ve dalga yayılmasından doğan zemin şekil değiştirmelerinin 10-4 seviyesinde olduğu bulunmuştur [47].

3.5. Gömülü Boru Hatlarının Dalga Yayılımı Neticesindeki Davranışları

Depremsel dalga yayılmasının gömülü boru hatlarında en büyük hasar nedeni olduğu,1964 Puget Sound, 1969 Santa Rosa, 1983 Coalinga ve 1985 Michoacan

depremleri gibi olaylar meydana gelmiştir. Örneğin, yaklaşık 0.45 tamir/km olan Mexico City Büyükşehir göl bölgesinde (yumuşak toprak bölgesi) su temin sistemindeki hasar oranı, 1985 Michoacan olayındaki dalga yayılma etkilerine dayandırılmıştı [47].

Deprem dalgası zemin yüzeyi boyunca hareket ettiği zaman dalga yayılma güzergâhındaki konumlandırılmış herhangi iki nokta, düzene ayak uyduramamaya maruz kalacaktır. Bu hareketler boru-toprak ara yüzündeki karşılıklı etkileşimden ötürü gömülmüş boru hattında hem eksenel ve hem de eğilme şekil değiştirmeleri ortaya çıkarmaktadır. Parçalı borular için hasar genellikle boru ek yerlerinde oluşmaktadır. Her ne kadar, sürekli boru hattındaki depremsel dalga yayılma hasarı daha az yaygın olmakla beraber gözlemlenen arıza mekanizması, tipik olarak yerel burkulmadır [44].

3.5.1. Düz sürekli boru hatları

Genellikle bir düz sürekli boru hattında ortaya çıkan eksenel şekil değiştirme; zemin şekil değiştirmesine, hareket eden deprem dalgasının dalga boyuna ve boru-toprak ara yüzündeki karşılıklı etkileşim kuvvetlerine bağlıdır. Küçük ve orta halli zemin hareketleri için boru şekil değiştirmesinin zemin şekil değiştirmesine eşit olduğu kabul edilmektedir. Fakat büyük yer hareketleri için boru şekil değiştirmesinin zemin şekil değiştirmesinden daha az olmasından kaynaklanan boru– toprak ara yüzünde kayma tipik olarak yer alır [47].

Newmark yaklaşımı

Deprem Dalga yayılması nedeniyle borunun davranış biçimini tayin etmek için Spangler kullanılan Newmark yaklaşımı üç varsayıma dayanır. İlk varsayım tüm deterministik yaklaşımda ortak olan, deprem tetiklemesi ile ilgili olandır. Deprem dalga yayılma yolu boyunca iki noktada zeminin hareketi (yani, ivme, hız ve yer değiştirme zamanı) sadece bir zaman farkı ile ayrılmış kabul edilir. Yani, tetikleme deprem dalgasının dolaşımına göre modellenir. İkinci varsayımda ise boru hattının atalet şartları küçüktür ve göz ardı edilebilir. Japonya'dan elde edilen deneysel bulgular kadar analitik çalışmalar da gösteriyor ki bu bir mühendislik yaklaşımıdır. Üçüncü varsayım ise, boru-zemin ara yüzünde hiçbir göreceli hareket yoktur ve böylece boru şekil değiştirmesi zemin şekil değiştirmesine eşittir [47].

Bu durumda boru eksenine paralel zemin şekil değiştirmesi [44];

$$\varepsilon_g = (V_m / C_s)\, \sin\gamma_s \cos\gamma_s$$

Burada Vm en yoğun zemin hızı ve Cs kayma (kesme) dalga hızıdır [44].

V_m γ cos boru eksenine paralel zemin hızıdır, C_s γ sin / boru eksenine ve zemin yüzeyine göre görülen deprem dalga yayılma hızıdır. Benzer şekilde R dalgası için boru eksenine paralel olan zemin şekil değiştirmesi [44]:

$\varepsilon_g = (V_m / C_r)$

Deprem dalga yayılmasından dolayı borudaki eğilme şekil değiştirmesi tipik olarak ikinci derece etki olduğundan borudaki eksenel şekil değiştirmeyle sınırlıdır. Denklemler özellikle de zemin şekil değiştirmesi büyük olduğu zaman, boru şekil değiştirmesini fazla tahmin edilebilir. Bu durumlarda kayma, boru-toprak ara yüzünde yer alır ve boru şekil değiştirmesi zemin şekil değiştirmesinden daha azdır [39].

Sakurai ve takashi yaklaşımı

Boru eylemsizliğini göz önüne alan Newmark'ın varsayımı ile ilgili olarak Sakurai ve Takahashi (1969) de bir sonsuz elastik ortam (toprak) tarafından çevrelenmiş bir düz boru hattı için basit bir analitik model (yöntem) geliştirilmiştir. Eylemsizlik kuvvetiyle baş edebilmek için D'Alambert ilkesini kullanılmıştır [39].

M.O'Rourke ve El Hmadi yaklaşımı

Sun, Hopkins ve Beckham tarafından dalga yayılması sebebiyle sürekli borularda oluşan eksenel gerilmeyi tahmin için farklı bir yöntem kullanılmıştır. Boru kesit alanı A ve elastisite modülü E'dir. Borunun eksenel harekete karşı zemin direnci lineer elastik sabiti Kg olan bir yay ile modellenmiştir. Boru zemin ara yüzünde zemin yay kuvvetini maksimum sürtünme direnci tu ile sınırlar. Eğer sistem elastik kalırsa, yani boru şekil değiştirmesi akma dayanımından az ve zemin yay kuvveti tu'nun altında kalırsa, borunun eksenel yer değiştirmesi için diferansiyel denklem [44]**;**

$d_2 / d_{x2}\ U_p(x) - \beta_2 U_p(x) = -\beta^2 U_g(x)$ olur.

Burada (xU) /(2 AE Kg= β ve) g zemin eksenine paralel zemin yer değiştirmesidir.

Eğer zemin şekil değiştirmesi Ls uzaklığı tarafından ayrılmış iki nokta arasındaysa dalga boyu λ=4Ls sinüzoidal dalga olarak modellenir. Zemin şekil değiştirmesi Ug(x) (zemin yayının tabanının yer değiştirmesi olarak) aşağıdaki gibi verilir [44].

$Ug(x) = \varepsilon g\ Lg \sin(\square x/2L_s)$

Kayma şekil değiştirmeleri diğer şekil değiştirmelerden az olduğunda, boru hasar görür. Tipik olarak sürekli boruda yayılım hasarı boru-zemin arası kaymadan oluşur [44].

Bu mantıkla tüm boru boyunca oluşan kaymanın üst sınır durumu dikkate alınmıştır. Dalga boyu λ ile dalga için (A ve B noktası) zemin noktaları λ/2 yatay uzaklıkla birbirinden ayrılmıştır. Birim uzunluk için üniform sürtünme kuvveti tu kabul edilir. C noktasındaki sürtünmeden dolayı maksimum boru şekil değiştirmesi aşağıdaki gibi verilir [47]:

$\varepsilon_p = (t_u L_S) / AE$

Burada Ls= λ/4'tür.

R dalgalarının maksimum boru şekil değiştirmesini tahmin etmek için M.O'Rourke ve El Hmadi bir analiz prosedürü geliştirmiştir. Bu prosedür zemindeki eksenel şekil değiştirme ile boru boyunca zemin sürtünmesi sebebiyle sürekli boru hattındaki şekil değiştirmeyi karşılaştırır. R dalgaları nedeniyle oluşan zemin şekil değiştirmesinin boru eksenine paralel olduğu kabul edilir. R dalgasının yayılımının dağılmaya meyilli doğası nedeniyle (faz hızı dalga boyunun artan fonksiyonu) zemin şekil değiştirmesi, dalga boyunun veya ayrılma uzaklığının azalan fonksiyonudur. Boru şekil değiştirmesi (boru zemin arası sürtünmeden doğan) dalga boyunun veya ayrılma uzaklığının artan fonksiyonudur. Belirli bir ayrılma noktasında (yani belirli bir dalga boyunda) sürtünme şekil değiştirmesi zemin şekil değiştirmesiyle çakışır. Bu belirli şekil değiştirme sürekli boru hattının en büyük şekil değiştirmesi olur [47].

Kısa çeyrek-dalga boyu ayrılma uzaklıkları için boru sürtünme kuvveti tüm uzunluk üzerinde etken olur ve bundan dolayı boru şekil değiştirmesi çeyrek-dalga boyu ayrılma uzaklığı ile lineer orantılıdır. Buna rağmen daha uzun çeyrek-dalga boyu ayrılma mesafesi durumunda sadece A ve B noktalarında oluşan sürtünme kuvveti, C noktasındaki zemin şekil değiştirmesinin boru şekil değiştirmesine eşit olmasına neden olur. En büyük zemin hızının, Vmaks, R dalga yayılımının (dalga boylarının) tüm frekanslarına uygulanabilir olduğu kabul edilir ve tüm frekanslar (dalga boyları) kayıtlı olarak mevcuttur [44].

3.5.2. Dirsek ve T'ler

Boru ağları; düz boruları bağlayan dirsek, T gibi boru parçalarından oluşur. Bu parçaların varlığı ekstra eğilme şekil değiştirmelerine ve bunun sonucunda borunun hasar görmesine neden olur [44].

Smah ve Chu yaklaşımı

Boru zemin ara yüzünde var olan kuvvetleri dikkate alarak T'lerde ve dirseklerdeki moment ve kuvvetler için analitik formüller geliştirmişlerdir. Shah ve Chu kabulünde boru ve zemin şekil değiştirmeleri belirli bir noktada eşittir. Bu noktada zemin boru arasındaki göreceli bir yer değiştirme yoktur. L', bu noktanın dirseğe göre uzaklığını gösterecek şekilde dirsekte eleman-1'deki maksimum eksenel kuvvet (eleman-2'deki kayma kuvveti) aşağıdaki

$$S = \varepsilon_{max} AE - t_u L^t$$

Formülü ile tahmin edilir [47].

Moment ve eğilmedeki yer değiştirme ise aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir [44].

$$M = (S / 3\zeta)$$

$$\Delta_t = (4\zeta S / 3K_g)$$

$$\zeta = \sqrt[4]{Kgl\ (4EI)}$$

Etkin kayma uzaklığı, L', dirsekteki yer değiştirme uygunluğuna bağlı olarak hesaplanabilir. Yani, Lı uzaklığı içinde, toplam zemin şekil değiştirme (εmaxLI olarak alınır) eleman-2'nin Δ1 yanal yer değiştirmesi eleman-1'in eksenel şekil değiştirmesi, {(SLI)/(AE) + [tu(LI)2]/(2AE)} olur [44].

Boru şekil değiştirmesini A noktasındaki maksimum zemin şekil değiştirmesine eşit kabul edilir. Düz borunun dalga yayılımına tepkisi dikkate alınarak bu kabulün sadece küçük zemin şekil değiştirmeleri için geçerli olacağı beklenir. Bununla beraber toplam zemin yer değiştirmesini, maksimum zemin şekil değiştirmesi çarpı etken uzunluk L' olarak tahmin etmişlerdir. Zemin şekil değiştirmesi L' uzunluğu üzerinde sabittir. Bu, dalga boyunun L' uzunluğundan çok daha fazla olduğu durum için uygulanır [39].

Shinozuka ve Koike yaklaşımı

Sıfır zemin hareketi borunun zeminle hareketi kabulü ile, Shinozuka ve Koike tarafından daha önce de incelenmiş olan yapısal analizde, dirsekte boru şekil değiştirmesinin tahmini için basit denklemler geliştirmişlerdir. Bu analizlerde etken boy, L', tanımı çeyrek dalga boyu olarak kabul edilir [39].

3.6. Sıvılaşmanın Gömülü Boru Hatları Üzerine Etkisi

3.6.1. Genel olarak sıvılaşma

Youd sıvılaşmayı deprem gibi kuvvetli etkiler altında kalan zeminde boşluk suyu basıncının artarak efektif gerilmenin sıfıra ulaşması ile zemini viskoz bir sıvı gibi davranması olarak tanımlamıştır [65].

Zemin yapısı birbirine dokanak halde olan taneler ve tanelerin aralarındaki boşlukları dolduran su ve havadan oluşmaktadır. Suya doygun malzemelerde boşluklar tamamen su ile doludur ve bu suyun taneler üzerindeki basıncına 'boşluk suyu basıncı' adı verilmektedir. Boşluk suyu basıncı sıvılaşma olayında önemli bir paremetre olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü deprem etkisi altında kalan suya doygun kohezyonsuz zeminlerde artan boşluk suyu basıncı tanelerin birbiri ile olan dokanağını tamamen koparır ve bunlar üzerine basıç uygulayarak taneleri viskoz bir sıvı gibi harekete zorlar (Şekil 3.12). Bu basıncı tolere edecek zaman bulamayan zemin taneleri basınç karşında mukavemetini tamamen yitirerek yüzeye doğru su ile birlikte hareket eder. Böylece sıvılaşma olayı gerçekleşmiş olur [65].

Şekil 3.12. Boşluk suyu basıncındaki ani artış sonucu zemin daneleri arasındaki temas kuvvetlerinin değişimi [65]

Sıvılaşma olayını zeminin jeoteknik ve jeolojik özellikleri yakından etkilemektedir. Birimin çökelme koşulları, yaşı, geçmişi, YASS seviyesi, dane dağılımı ve çapı, yoğunluğu, bulunduğu derinliği ve eğimi gibi faktörler sıvılaşmaya karşı hassasiyeti etkileyen etmenlerdir [65].

Tekrarlı yüklemeler altında, artan boşluk suyu basıncı granüler zeminlerin çevrimsel kayma deformasyonuna bağlı olarak, zemin tanelerini sıkıştırmaya çalışır. Kısa sürede gelişen boşluk suyu basıncındaki artış zeminin bu kısa sürede drene olmayışından dolayı taneler üzerindeki etkin gerilmenin azalmasına neden olur. Bu azalım sıfır veya negatif değerlere ulaşır ise zemin sıvılaşması gelişir. Sıvılaşma sırasında; zeminler gevşeyerek, tekrarlı yükler altında büyük deformasyonlara maruz kalmasına izin

vermektedir. Bu deformasyonlar gevşek zeminlerde bir temel altında ve/veya şevde orta veya yüksek kayma dayanımına sahip yerlerde göçmeye neden olmaktadır [65].

Orta sıkıdan, sıkı zeminlere kadar sıvılaşma geçici gevşeme ve artan kayma deformasyonlarını beraberinde getirir. Fakat gerilme sırasında genişleme eğilimi asal gerilmenin kaybını ve büyük yer üstü deformasyonlarını engeller. Yavaş akan düz zeminler altında sıvılaşma; zeminin yanal yayılmasını akma deformasyonu sonucunda tetikleyebilir. Gevsek zeminlerde ise sıvılaşma sırasında kompaksiyon ve ikincil konsolidasyonlar oluşur ki bu da zeminde oturmalara sebep olur. Negatif değerlere ulasan boşluk suyu basıncını sıfırlamak için kum kaynamaları sonucu püskürmeler oluşabilir [65]. Bu durumda, kohezyonsuz zemin makaslama direncini kaybeder ve bir sıvı gibi davranarak büyük deformasyonlara maruz kalır. Böylece sıvılaşma davranışına geçilmiş olur [66].

3.6.2. Sıvılaşmanın dinamikleri

Sıvılaşma potansiyelini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Zemin numunelerinin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının ve sıvılaşma olasılığının incelenmeye başlandığı ilk araştırmalardan bu güne kadar, relatif sıkılığın sıvılaşmaya etkisi önemle belirtilmiştir [67].

Relatif sıkılığı yüksek olan zeminlerde, deformasyon ve boşluk suyu basıncı düşük olmakta, relatif sıkılığı düşük olan zeminlerde ise, daha büyük deformasyon ve boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Buradan yola çıkarak, başlangıç relatif sıkılığı yüksek olan zeminlerin, sıvılaşmaya karşı daha az duyarlı olduğu genel bir yaklaşımla, relatif sıkılığı %70'i geçen kumlarda, sıvılaşmanın gelişmediği gözlenmiştir [68]. Sıkılık değerinin artmasıyla ön sıvılaşmaya ulaşmak için gerekli devir sayısının veya uygulanan kayma gerilmesinin artmasının gerektiği bilinmektedir [69].

Bugüne kadar meydana gelmiş depremlerde, kötü derecelenmiş zeminlerin, iyi derecelenmiş zeminlere göre, boşluk oranlarının çok yüksek olması nedeni ile sıvılaşma açısından daha hassas oldukları görülmüştür [68].

Suya doygun gevşek zeminlerde, deprem gibi bir dinamik etki sonucunda gözlenen zemin sıvılaşması son 40 yıllık dönemde laboratuvar ve arazi deneyleri kullanılarak yaygın biçimde araştırma konusu olmuştur. Depremler sırasında meydana gelen tekrarlı gerilmeler, boşluk suyu basıncının o kadar artmasına neden olur ki bu basınç etkin gerilmeyi ortadan kaldırır. Özellikle kumlu zeminlerde kayma direnci sadece taneler

arasındaki sürtünmeye bağlı olduğundan, kum taneleri arasında boşluklardaki suyun basıncının artması bir an için kum tanelerini birbirinden ayırabilir. Bu sırada kum su ile birlikte akıcı hale gelir ve sıvı gibi davranmaya baslar ve hiçbir gerilmeye karşı koyamaz [70]. Sıvılaşma potansiyeli değerlendirilirken tane konusundaki genel anlayış, taneleri köseli olan zeminlerin yuvarlak olanlara oranla, belirli bir konsolidasyon basıncına kadar sıvılaşmaya karşı daha dirençli olacağı yönündedir. Çünkü zemin tanelerinin köşeli olması artıkça içsel sürtünme açısı da yükselmektedir. Daha büyük basınçlarda ise, köşelerin, kırılıp ince tane oluşturmaları nedeni ile sıvılaşmayı kolaylaştırıcı yönde bir etki yaptıkları gözlenmiştir [71].

Sıvılaşma potansiyeli örtü basıncının artması ile düşmektedir. Çünkü artan örtü basıncı tane üzerindeki etkin gerilmeyi de artırmaktadır. Devirsel yükler altında yapılan çeşitli araştırmalar örtü basıncının azalması ile sıvılaşma oluşturacak gerilmeleri artırdığı gözlenmiştir. Bu etki ayrıca 1964 Alaska depreminde de gözlenmiştir. Burada 2,4 metrelik bir kum dolgusunun altında kalan alan sıvılaşmazken çevresinde bulunan aynı zemin koşullarına sahip bölgelerde sıvılaşma gözlenmiştir [72].

Geçmiş depremler sırasında meydana gelen olaylar incelendiğinde sıvılaşmanın çoğunlukla aşağıdaki zemin koşullarında oluştuğu gözlenmiştir;

- Doygun iri kum, siltli kum ve hatta kumlu silt gibi zeminlerde drenaj koşulları yetersiz ise,
- Zeminin ortalama tane çapı D_{50} = 0,02 ile 1,00 mm arasında ve ince malzeme yüzdesi de (d < 0,005 mm) %10'unu geçmiyor ise,
- Üniformluluk kat sayısı (D60/D10) < 10 ise,
- Relatif sıkılık, Dr < % 75 ise,

zemin sıvılaşmaya karşı daha duyarlı olur. Bu koşulları sağlayan zeminlerde sıvılaşma olayını tetikleyen mekanizma deprem özellikleridir [119]. Diğer bir ifadeyle, yeterli bir büyüklükte deprem bu zeminlerde sıvılaşmaya neden olur. Bununla, birlikte düzeltilmiş SPT-N sayısının 30'u aşması durumunda zeminin sıvılaşmayacak derecede sıkı olduğu söylenebilir [65].

Zemin sıvılaşmasının en iyi bilinen örneği, 1964 Niigata depreminde gözlenen sıvılaşmalardır. Deprem etkisinde şehrin alçak bölgelerindeki kum/kumlu seviyelerin sıvılaşması, yapılarda büyük hasarlar meydana getirmiştir. Zemin sıvılaşmasının etkisinin görüldüğü diğer bilinen örnekler ise; 1920 California Calvers, 1938 Montana Fort Peck,

1948 Fukui, 1971 California San Fernando, 1964 Alaska Ancorage ve 1980 Mino-Owari olarak sıralanabilir [117]. 1992 Erzincan depremine kadar sıvılaşma üzerinde fazla durulmamış, 1998 Ceyhan, 1999 Marmara ve 1999 Düzce depremlerinde zemin sıvılaşma gözlenmiştir [67].

Sıvılaşma gösteren kumlar üzerinde yapılan SPT deneylerinde darbe sayısının genellikle 25'in altında olduğu, sıvılaşmanın ayrıca titreşim sayısına, kumun başlangıç boşluk oranına ve çevre basıncına da bağlı olduğu görülmüştür [73].

Drenajın geliştiği durumlarda, sıkı kumların hacimleri artarken gevsek kumların hacimleri azalır prensibi dikkate alınarak, hacimde değişmenin olmadığı her iki faz arasında kalabilecek bir kritik boşluk oranı tanımlanmıştır. Bununla birlikte kumların sıvılaşıp sıvılaşmayacağı konusunda bir yorum yapabilmek için bir eşitlik geliştirilmiştir. Buna göre zeminin boşluk oranı kritik boşluk oranından küçük olduğu durumlarda zemin sıvılaşmazken, büyük olduğu ve drenaj koşullarının sağlanmadığı durumlarda sıvılaşma olabileceği belirtilmiştir [74].

Ayrıca zeminlerde sıvılaşmanın oluşabilmesi için ilk şartlardan biri zeminin suya doygun olmasıdır. Bu yüzden yeraltı suyu seviyesinin YASS (Yeraltı Su Seviyesi) yüzeyden derinliği zeminlerde sıvılaşma için önemlidir [75].

Yeraltı suyu seviyesinin derinliğinin artması durumunda başlangıç etkin gerilme daha yüksek olacağından zemin sıvılaşmaya karşı daha dirençli olur. Belirli koşullardaki zeminlerin sıvılaşmaya karşı hassasiyeti depremin büyüklüğü ile deprem kuvvetleri tarafından oluşturulacak gerilmeler ve deformasyonlar ile açıklanabilir [72].

Deprem sonrası saha gözlemleri sıvılaşma bölgesinin sismik kaynağa olan uzaklıkla ilgili olduğunu da göstermiştir [76]. Fakat bunun güvenli bölgede kalmadığı görülmüş daha sonra bütün dünyada oluşmuş sığ depremlerden toplanan veriler derlenerek tasarlanmıştır. Buradan da olası sıvılaşma beklenen bölgenin odağa olan uzaklığının depremin büyüklüğü ile artığı gösterilmiştir [27]. Buna neden olarak ta deprem odağına olan uzaklık artıkça yatay yer ivmesi değerlerinin azalması ve sıvılaşmaya karşı direncin artması gösterilebilir.

Depremin oluş süresi de sıvılaşma için önemli bir kriterdir. Buna en iyi örnek 1964 Alaska depremidir. Bu deprem sırasında 90 saniye içinde sıvılaşma gözlenmemişken bundan sonra sıvılaşma oluşmaya başlamıştır. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında da örneklerin belirli bir devirli yükleme sonrası sıvılaştığı gözlenmiştir. Eğer Alaska 1964

depremi 45 saniye sürseydi belkide sıvılaşma gözlenmeyecekti [72]. Fakat deprem süresi ile sıvılaşma potansiyelini güvenilir bir biçimde ilişkilendirecek bir yöntem de geliştirilmemiştir [67]. Tekrarlı yükler ne kadar çok olur ise zemindeki aşırı boşluk suyu basıncı o kadar çok olur yaklaşımından da yola çıkarak, deprem süresi ve yaratacağı tekrarlı yüklerin sıvılaşma olayını etkilediği söylenebilmektedir.

Ülkemizde de Sıvılaşma ciddi bir risk faktörü oluşturmaktadır. Özellikle 17 Ağustos 1999 depreminden sonra bu konu üzerinde durulmuştur. KAF VE DAF gibi aktif fay kuşaklarını arasında yer alan Türkiye için sıvılaşma altyapı sistemlerini deformasyonu açısından büyük tehlike oluşturmaktadır. [77].

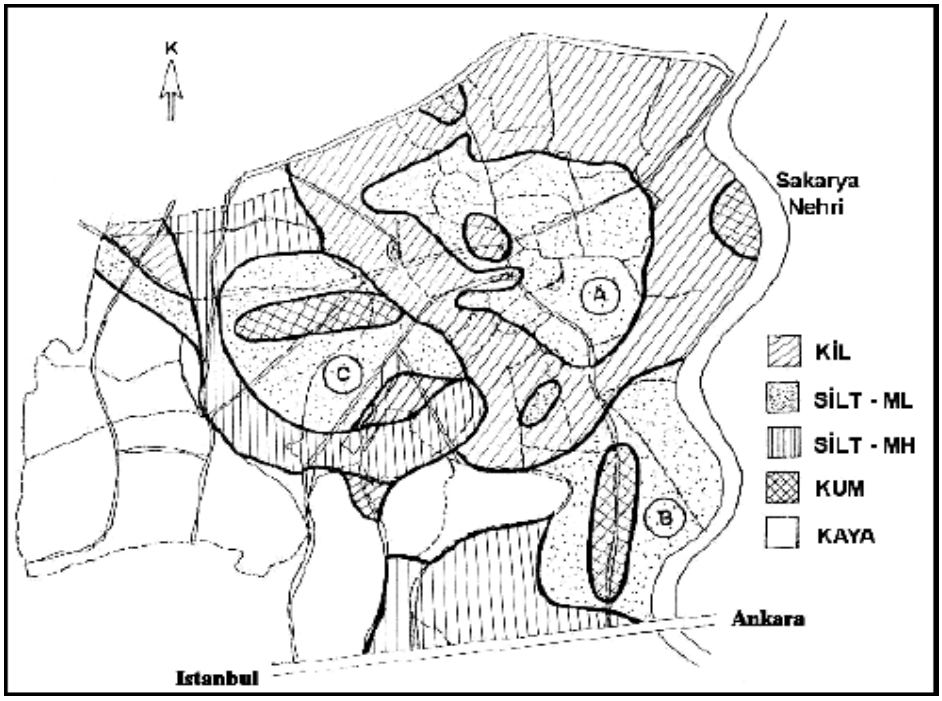
Şekil 3.13. Adapazarı içmesuyu ve atık su hattında sıvılaşma Sonucu oluşmuş hasarlar [78]

4. ÖRNEK ÇALIŞMA (ADAPAZARI VE ÇEVRESİNDE DEPREM SONRASI OLUŞAN HASARLARIN TESPİTİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ)

Örnek çalışma kapsamında 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi sonrası Adapazarı ve çevresinde oluşan zemin deformasyonları, altyapı hasarları ve bu hasarların yöntemsel yaklaşımlarla belirlenmesine değinilmiştir. Yapılan çalışmalar ve yöntemler ile Adapazarı ve çevresinin jeoteknik açıdan potansiyeli ve bu potansiyelin deprem hasarları etkilerine vurgu yapılmıştır.

Adapazarı ve çevresi bu depremde büyük hasarlara uğramış bir bölge olarak kabul edilmektedir. Bölgenin zemininde deprem sonrası meydana gelen ciddi sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları ölçümleri bu etkiyi gözler önüne sermektedir. Bu bölgenin çevresinde en büyük hasarlar ilçe merkezinde meydana gelmiştir. Sıvılaşma potansiyeli yüksek ve dane boyutu olarak ince taneli formasyonlara sahip olan ilçe merkezi Magnitiüd olarak 7,4 olan Kocaeli depreminden büyük değerlerde etkilenmiştir [78].

Adapazarı ilçesi Sakarya havzası içerisinde bulunan Sakarya nehri ve Çark Suyu tarafından taşınan alüvyonal zemin üzerine kurulu bir yerleşimdir. Şehrin üstüne kurulan bu alüvyonel zeminin kalınlığı 3m-15m ve daha fazlası kalınlıklarda görülemüştür. Bu alüvyonel havzanın boyutları deprem sonrası yapılan zemin sondajlarıyla netlik kazanmıştır. Şekil 4.1'de zeminin 15 m derinliğe kadar olan kısımdaki jeolojik birimlerin dağılımı gösterilmiştir. Zemin tabakalarının dağılımı şehir merkezinin düşük plastisiteli veya plastik olmayan malzemeden oluştuğuna dikkat çekmektedir [79].



Şekil 4.1. Adapazarı'nın ilk 15 metredeki zemin tabakaları [79]

Adapazarı Çark Bölgesi deprem sonrası en çok hasar gören bölge olması itibariyle kanalizasyon boru hattı projesi kapsamında bu bölgede açılan sondajlar Adapazarının zemininin deprem hasarı açısından dezavantajlı pozisyonunu net olarak yansıtmıştır. Bu sondaj verileri ışığında formasyonların yoğunluklu olarak kum bantlı plastik olamayan silt tabakasından, dolgu ve silt – kil ardalanmalı tabakalardan oluştuğu görülmüş, killi silt tabakasının üstünde ise çakıllı kum tabakasının yer aldığı gözlemlenmiştir. [79]

Yapılan zemin araştırmaları neticesinde Adapazarı'nın YASS 'nin yüzeye çok yakın olduğu görülmüştür. Yağışın yoğun olduğu zamanlarda ise karlar sayesinde YASS nin yüzeye kadar çıktığı gözlemlenmiştir. 1999 yılında yapılan 60 adet sondaj verisi göz önüne alınarak YASS'nin 1,5 metre civarında seyrettiği, yaz aylarında ise ancak 2,77 metre ye gerilediği görülmüştür. Daha sonraki yıllarda yapılan ölçümlerinde aynı değerlere yakın seyrettiği fark edilmiştir [80].

Bu durum hem genel itibariyle Adapazarı zemin yapısının hem de 1999 depreminin gerçekleştiği yılda Adapazarı YASS 'nin yüzeye yakınlığıyla sıvılaşma potansiyeli açısından bölgenin ciddi bir riske sahip olduğuna işaret etmiştir.

Adapazarı ve çevresi Türkiye üzerindeki aktif faylar ve deprem sonrası oluşan güncel kırıkların arasında deprem potansiyeli çok yüksek olan bölgede, KAF' nın aktif olduğu ve zemin koşullarının dezavantajlı olduğu alan içerisindedir. Türkiye içerisinde

bölgelendirmelerle sınıflandırılan deprem derecelendirme skalasına göre 1. Derece deprem bölgesi kapsamındadır [81].

Bölgede gerçekleşen 17 Ağustos depremi sonuçlarının değerlendirilmesi ağır hasarların dağılımının fay boyunca 20-200 m. arasındaki mesafeler arasında, yüzeyde yer alan deformasyon kırığı boyunca ve zayıf zemin sınıfına giren çakıl- kum-milden oluşan Alüvyonel zeminde olduğunu göstermiştir. Gevşek zeminli, fay kırığına uzak yerlerdeki deformasyonun fay kırığına yakın sağlam zeminlerde ki deformasyona göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Deprem dalgalarının sert zeminden geçişiyle yumuşak zeminden geçişi farklılık yaratmıştır. Duraysız zeminler, üzerinden geçen deprem dalgalarının titreşim periyodunu yükseltmiş ve deprem hasarını büyük oranda arttırmıştır. Dolasıyla ölümcül hasarların asıl sorumlusunun depreme karşı dayanımsız gevşek zeminlerin olduğunu kanıtlanmıştır. Bu bölgede yapılan deprem sonrası çalışmalar uygunsuz zemin koşullarının deprem hasarını son derece yüksek oranlara taşıdığını gözler önüne sermiştir [82].

Bu durum dikkate alınarak zemin iyileştirmeleri yapılamayan genç çökellerin üzerinde yapılan altyapı ve üst yapı sistemlerinin sıvılaşma etkileri ile büyük hasarlar gördüğü ortaya çıkmıştır. 17 Ağustos 1999 Depremi Adapazarı ovası gibi karakter taşıyan zemin yapıları adına gerekli zemin iyileştirme önlemleri alınmadığı taktirde deprem sonrası öncellikle sıvılaşma riski kapsamında ve diğer deformasyonlarla büyük hasarlar yaratabileceğini ortaya koymuştur.

4.1. Adapazarı zemin sıvılaşması üzerine nümerik yaklaşımlar

Adapazarı ve çevresinde gerçekleştirilen deprem sonrası meydana gelen deformasyonun tespiti için yapılan saha çalışmaları değerlendirilerek çeşitli yöntemler ve bu yöntemlerin karşılaştırılmasıyla çözümlemeler yapılmış, nümerik modelleme adı altında yapılan bu çözümlemelerle deprem sonrası sıvılaşma gözlenen zeminlerde boru hatlarının performansı değerlendirilmiştir [78].

Nümerik çalışma FLAC 2D iki boyutlu sonlu farklar programıyla yapılmıştır. Bu kullanılan yöntem diğer kayalaşmamış gevşek malzemelerde ve diğer zemin yapılarındaki deprem sonrası tepkileri ortaya koymayı amaçlamıştır. FLAC programında Lagrange hesaplama metodu ile zeminin plastik davranışları çözümlenebilmiştir. Yine bu sistem içerisinde yer alan doğrusal elastik modellerden, doğrusal olmayan birim deformasyonla

yumuşayan veya sertleşen (strain softening hardening) gibi birçok yaklaşım modeli zeminlerin tepkileri ölçülebilmiştir. Bunu yanı sıra dinamik analiz modeli adı altında yapısal elemanlarda dahil edilerek dinamik yapı zemin etkileşim sorunları çözülebilmiştir. Örneğin yeraltı suyu akım modeli ve dinamik model bir arada değerlendirilerek boşluk suyu basıncının artışı sonucu cereyan eden sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiştir [78].

Öncellikle bu metodların hatasız gerçekleşebilmesi, gerçeğe olabildiğince yakın olması adına boyutlandırma çalışmaları yapılmıştır. Genliği 0,3m büyüklüğünde harmonik yükler farklı boyuttaki modellere uygulanmış, bu modellerin tepkileri ölçülmüştür. Bu boyutlandırma çalışmasında sabit bir harmonik yük altında zemin özelliklerinin ölçüm sonuçlarına etkisi de incelenmiştir. Model boyutları 30*30 m olarak seçilmiş, SHAKE 1D programıyla doğrulaması yapılmış, FLAC analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 17 Ağustos depremi içinde model doğrulaması aşamasında iki analizde tabandan uygulanmış yüzeydeki ivme hareketinin değişimi kıyaslanmıştır. SHAKE metodu ile yüzeyde deprem başladıktan 7 sn. sonra 0,5 gr'lık ivme kaydı görülmüştür. Aynı şekilde FLAC 2D ile yapılan analiz sonuçları incelendiğinde aynı ivme değerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu karşılaştırma nümerik model yaklaşımının doğrusallığını ortaya koymada büyük önem taşımıştır [78].

Modelleme çalışmalarında sınır şartları, dalga yayılımı ve ağ aralıkları, sönüm oranı deprem kayıtları, malzeme özellikleri gibi paremetreler de dikkate alınmıştır [78].

4.1.1. Gerçekleştirilen analizler

Adapazarı ve çevresinin deprem sonrası deformasyonuna yönelik nümerik model yaklaşımlarından Tek Tabakalı Sıvılaşma Modeli, tabakalı zemin sıvılaşma modeli ve tek tabakalı Mohr- Coulomb model yöntemleri uygulanmıştır [78].

Tek tabakalı zemin analizi

Borulu ve borusuz olarak numerik modeller iki ayrı şekilde kurulmuştur. FLAC 2D ile yapılan çalışmada birimler Newton ve metre üzerinden elde edilmiştir. Bu analizler sonucunda yatay yer değiştirme ve maksimum yer değiştirme modelleri deprem anında ve sonrasında oluşan maksimum yer değiştirme değerleri kıyaslanmıştır. Bu sonuçlardan gömülü borunun deprem sırasında yatay yer değiştirmelere verdiği tepkinin düşey yer değiştirmelere göre az olduğu ve düşey yer değiştirmelerde boru içerisindeki oturmanın arttığı anlaşılmıştır [78].

Borulu ve Borusuz setlerde tabandan verilen deprem dalgası itibariyle yatay yer değiştirme analizleri yapılmış tabandan yüzeye kadar değişimi gözlemlenmiştir. Her iki yaklaşımda da tabandan yüzeye yer değiştirmenin azaldığı görülmüştür [78].

Borusuz dinamik analizlerde maksimum 4 cm'lik dikey, 2 cm'lik yatay yer değiştirme görülmüştür. Boru analiz çalışmasında ise yatay yer değiştirme borusuza göre artmış ancak 2,5 cm düşük değerde olduğu görülmüştür. Borulu analizin düşey yer değiştirmesinin ise 18 cm kadar çıktığı gözlemlenmiştir [144].

Tek tabakalı mohr- coulomb model zemin analizi

Tek tabakalı zemin analizi çalışmalarından sonra zemin davranışlarının daha iyi modellendiği bu yöntem uygulanmıştır. Borulu ve borusuz setlerde yapılan çalışmalar neticesinde sonuçlar elastik zaman modeline çok yakın çıkmıştır. Depreme bağlı gerilmelerin yüzeye doğru gittikçe zemin sınıfının özelliklerine ve sönüm oranına bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir [78].

Byrne model tek tabakalı zemin sıvılaşma analizi

Çalışılan alanın sıvılaşma potansiyeli yüksek bir alüvyon sahayı kapsadığı bilinmesi itibariyle sıvılaşma analizi çalışmanın en önemli aşamasını oluşturmuştur. Çalışma kapsamında öncelikle Byrne model sıvılaşma analizi ile gömülü boru hatlarının kumlu zeminlerde deprem etkisi karşısındaki durumu belirlenmiştir. İncelemelerde yüzeye doğru kayma gerilmesi zemini sönüm noktası katkısı ve toplam gerilmedeki azalmayla düştüğü; ivme değerlerinin ise deprem sırasında arttığı tespit edilmiştir. Sonuçlar göz önüne alındığında bu araştırma ve diğer önceki ölçümlerin birbiriyle uyumluluk gösterdiği ve Adapazarı zeminlerinin büyütme etkisinin olduğu yönünde ki fikri sağlamlaştırmıştır [78].

Sıvılaşma analizinde boşluk suyu basıncı sönümlemesinin deprem sonrası etkisi de göz önüne alınmıştır. Boşluk suyu basıncı deprem sürecinde artar, efektif gerilme düşer ve zeminin taşıma gücünde azalma olur. Bu şekilde efektif gerilmenin sıfır olduğu noktada zemin artık bir sıvı gibi davranmaya başlar ve sıvılaşma gerçekleşir. Boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ile beraber düşey yer değiştirmelerin artığı görülmüş, deprem etkisi bittikten sonra boşluk suyu basıncıyla güncel yer değiştirmenin % 20 oranında arttığı tespit edilmiştir [78].

Byrne model sıvılaşma analizinde gömülü borularla yer değiştirmeler incelendiğinde yatay ve düşey değerlerin her birinde artış gözlenmiştir [78].

Bu analizde boşluk suyu basıncının %20 'den % 90 a değişen oranlarda arttığı gözlenmiştir. Yatay yer değiştirmelerde % 56 a varan artış olmuştur. Yatay olarak her iki yönde de 110 cm 'lik bir yer değiştirme gerçekleşmiştir. Bu analizlerden boşluk suyu basıncının (u) arttığı ve buna ters orantıyla efektif gerilmenin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda Terzaghi taşıma gücü prensibine göre taşıma gücünün azaldığı görülmüştür [78].

Bu boşluk suyu basıncı artışı ile tetiklenen ve artan düşey yer değiştirmelerin gömülü boru hatlarına deprem sırası ve sonrası tahribatının ciddi olabileceği görülmüştür. Zeminlerin büyütme etkisi de göz önüne alınarak Sakarya bölgesinin sıvılaşma potansiyelinin deprem sonrası bu hasarlara katkısının büyük olduğu anlaşılmıştır [78].

Analizler sonucunda ivme kayıtları incelendiğinde sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde yüzeye doğru gidildikçe ivme kaydı verilerinin büyüdüğü gözlenlenmiştir. Dolasıyla Sakarya bölgesi gibi zemine sahip bölgelerde zemin büyütme etkisinin dikkate değer olduğunu görülmüştür [78].

Tabakalı zemin sıvılaşma modeli

Zeminler birçok formasyonun bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Bu formasyonlar yerkabuğunda birbirine çeşitli açılarla farklı zaman dilimlerinde yerleşen katmanlar şeklinde bulunmaktadır. Tüm bu formasyonların deprem etkisi altında farklı davranışlar göstermesi sebebi ile ayrı ayrı değerlendirmeye alınması gerekir. Ancak genel olarak bu katmanların karmaşık biçimlerde bulunmaları sebebi ile belli ortak özellikleri dayanak gösterilerek kabullerle bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekmiştir. Bu çalışmada tabakalı zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, taşıma gücü kaybı ve deformasyonları tek tabakalı analizler de olduğu gibi Byrne model sıvılaşma analizi ile değerlendirmeye alınmıştır. Bu zeminlerdeki gömülü boru hatlarının durumu irdelenmiştir. Üç ayrı zemin model sondaj verileri ile korele edilerek bu zeminlerde bulunan gömülü hatların etkiye karşı durumu incelenmiştir [78].

Uygulanan Byrne sıvılaşma analizinin elde edilmiş veriler ışığında kayma gerilmesinin toplam yüzeye doğru toplam gerilmenin azalmasına ve zeminin sönümleme bağlı olarak düştüğü gözlemlenmiştir. Deprem anında değişkenlik göstermek suretiyle ivme değerlerinin artığı görülmüştür. Bu analiz sonuçları yine daha önceki çalışmalar da

olduğu gibi Adapazarı zemininin büyütme etkisinin varlığına bir kere daha dikkat çekmiştir [78].

Tabakalı zemin analizleri yatay ve düşey yer değiştirme sonuçlarında gömülü boru hatlarının zemin içerisinde boru yapısına zarar vereceğini göstermiştir.

Borulu ve borusuz analizierde ise borunun zemin içerisine çok küçük alan kaplaması sebepleri ile bir etkisi olmadığı görülmüştür.

4.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bütün yaklaşımlar göz önüne alındığında deprem öncesi herhangi bir zemin iyileştirmesi yapılmamış Adapazarı zemininin, deprem sarsıntısı karşısında deformasyonu ve sıvılaşmayı artırıcı yönde hareket ettiği ortaya çıkmıştır. Çalışmaların ilk safhasında tek tabakalı zemin modeli içerisinde borunun deprem etkisine tepkisi, ikinci safhalarında ise tek tabakalı zeminde mohr-coulomb analizi ile zeminde borunun depreme karşı tutumu incelenmiştir. Son olarak ta tabakalı zeminde sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Çalışmaların ana teması farklı formasyonlar ve katmanlar içeren zeminlerde sıvılaşma modelinin kurulmasıyla Sakarya ili gibi alüvyonel bir sahada sıvılaşma - oturma riski karşısında oluşabilecek hasarları tespit etmek olmuştur. Bunun için kullanılan Finn-Byrne modeli ile boşluk suyu basıncı ve efektif gerilme üzerinden değişimler incelenmiştir.

Bölgenin jeoelojik ve jeoteknik özellikleri göz önüne alınarak yapılan bu çalışmalar neticesinde deprem sırası ve sonrası sıvılaşma ve oturma riskine müsait olduğu ortaya çıkmıştır. Bu oturma ve sıvılaşmalar altyapı ve üstyapı olarak nitelendirilen bütün mühendislik yapılarına deprem sarsıntısı sonrasında ciddi zararlar görmesine zemin hazırlamıştır. İnsan yaşamının devamlılığı sürecince yaşamsal ihtiyaçların hizmetini yürüten altyapı sistemleri (içmesuyu, kanalizasyon vs) boru hatlarının deformasyonu üzerinde durulması gereken bir potansiyel tehlikenin var olduğunu göstermiştir. Bu nedenle böle riskleri taşıyan bölgelerde deprem öncesi gömülü boru hatlarına bu hususlar doğrultusunda deprem sonrası deformasyona engel olucak şekilde hassasiyetle yaklaşılmasına ve zemin iyileştirmesi yöntemlerine dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmak istenmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz koşullarında hızla artan nüfus ile kentsel yapılaşmalar da artışa sürüklemektedir. Kentsel yapılaşmaların artışı ise yapıların özellikle deprem riski altında taşıma gücü zayıf, sıvılaşma riski taşıyan zeminlere sahip bölgeler ayırt edilmeksizin konutlaşmaya zorlamaktadır. Bu duruma paralel olarak çeşitli ihtiyaçları adına kurulan gömülü boru hattı (içme suyu, kanalizasyon, doğalgaz vb.) sistemlerinin ağı da genişlemektedir. Bu hatlar üstlendikleri görev itibariyle büyük önem taşımaktadır. Bu sistemlerin döşenmesinde ve yerleştirilmesinde, deprem gerçeği göz önüne alınmadığında, insan yaşamına büyük zararlar verdiği, can ve mal güvenliğini tehlikeye soktuğu, yaşamsal ihtiyaçları (içmesuyu temini, kanalizasyon atıklarının uzaklaştırılması vb.) sistemleri aksattığı tarih içerisindeki yaşanan depremlerde görülmüştür.

Gömülü boru hatlarının bulunduğu zeminin deprem sarsıntısına karşı tepkileri örnek çalışma içerisinde yer alan deney ve analizlerin sonuçlarıyla ortaya konulmuştur. Bu çalışmada gömülü boru hatlarının elverişsiz (zemin iyileştirme gerektiren) zeminlerde döşenmiş olması ve fay hatlarına yakın, deprem riski yüksek bölgelerde bulunması durumunda karşılaşabileceği tehlikelerin çözümlenmesinde kullanılan yaklaşım metodları verilmiştir. Bu şekilde analiz ve tespitlerle değerlendirmeye alınan yüksek deformasyon sorunları yaşayan, düşük taşıma gücüne sahip olduğuna karar verilen yerlerde zemin iyileştirmesi için güncel yöntemlerin ve tekniklerin geliştirilmesi gerekir. Adapazarı bölgesinde gerçekleştirilen model uygulamaya yer verilerek; zemin iyileştirmesi gerektiren zeminlere deprem öncesi önlemler alınmamasının bölgede yer alan gömülü boru hatlarının deprem sonrası hasarlarını nasıl arttırabildiği gösterilmek istenmiştir.

Bu hasarları önlemek adına İlbank A.Ş tarafından Türkiyede içme suyu ve kanalizasyon boru hatlarının deprem sonrası karşılaşacağı hasarlar için yapılacak her bölge ayrı ayrı spesifik özellikleriyle değerlendirilerek bir istatiksel çalışma gerçekleştirebilir. Bu veriler ışığında bölgelere kurulacak kanalizasyon ve içmesuyu hatları sistemlerinin kurulması ile ilgili özel maddeler mevzuatlara eklenebilir. Analizle ortaya çıkan mühendislik problemleri zemin iyileştirme yöntemleriyle hafifletilmeye çalışılabilir. Kanalizasyon ve içmesuyu projelerine deprem ile ilgili mevzuatlar ekleyebilir. Projelendirmenin yapılacağı riskli bölge sahası için ayrıntılı deprem performans analizlerine sözleşme maddeleri içerisinde yer verilebilir. Haritalama çalışmalarıyla belirlenecek fay hatları ve bunların aktif zonları dikkate alınarak gerekli görüldüğü taktirde

içmesuyu ve kanalizasyon hatlarının güzergâhlarında değişiklik yapılabilir. Deprem riski taşıyan alanlar için projelerde sıvılaşma, oturma, çökme, kayma vb. felaketlere yönelik analizlerle zeminlerin tehlike potansiyeli ölçülebilir. Bu bilgiler ışığında proje sözleşmelerine özel iyileştirme kriterleri konabilir. Zayıf zeminlerin taşıma kapasitesi, dolgu ve şevlerin stabilizasyonu artırılarak zeminin sıvılaşma potansiyeli azaltılabilir. Bu sayede zeminin kaymaya karşı mukavemeti artılabilir, oturma riski düşürülebilir, sıkışabilirlik azaltılabilir. Böylece deprem riski olan bölgelerde deprem sonrası mağduriyetlerin ve kayıpların yaşanması büyük oranda azaltabilir. Bölgeye ait kanalizasyon ve içme suları sistemlerinin deprem hasarı önlenebilir veya daha az hasar görmesi sağlanarak en kısa sürede sistemlerin çalışmaya devam etmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Pitilakis, K. and Kakderi, K. (2011). Seısmıc Rısk Assessment And Management Of Lıfelınes, Utılıtıes And Infrastructures, *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering Santiago*, Chile, January, 10-13.

2. Atabey, E. (2000). *Deprem*, Ankara: MTA Genel Müdürlüğü Yayınları.

3. Watt, F. (1993). *Depremler ve Yanardağlar,* Çev. A. Yurtsever, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları: Ankara.

4. Gülen, L. (2012). *JFM 204 Tektonik Ders Notları.*

5. Eyidoğan, H., Güçlü, U., Utku, Z. ve Değirmenci, E. (1991). *Türkiye büyük depremleri makrosismik rehberi 1900-1988.* İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Bölümü, İstanbul.

6. McClusky, S., Reılınger, R., Mahmoud, S., Ben Sarı, D. and Tealeb, A. (2003). *Gps constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motion: Geophysical Journal International*, v. 155, 126–138.

7. Jackson, J. and McKenzıe, D., (1988). *The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East: Geophysical Journal,* v. 93, 45–73.

8. Eyidoğan, H. (1983). *Bitlis-Zağros bindirme ve kıvrımlı kuşağının sismotektonik özellikleri.* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, İstanbul.

9. Örgülü, G., Aktar M., Turkelli N., Sandvol E. and Barazangı M. (2003). *Contribution to the seismotectonics of Eastern Turkey from moderate and small size events*. Geophys. Res. Lett., 30(24), 8040.

10. Ergin, K., Güçlü, U. Ve Aksoy, G. (1971). Türkiye ve dolaylarının deprem kataloğu, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Arz Fiziği Enstitüsü yayını*, İstanbul.

11. Jackson, J., McKenzıe, D. (1984). *Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan: Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. v. 77,185–264.

12. Eyidoğan, H. (1988), *Rates of crustal deformation in western Turkey as deduced from major earthquakes, Tectonophysics*. 148, 83-92.

13. Eyıdoğan, H., Güçlü. (1993). Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasının Evrimi ve Yeni Bir Harita İçin Öneri. *Jeofizik* 7, 95-108

14. Ergin, K., Güçlü, U. ve Uz, Z. (1967*).* Türkiye ve civarının deprem kataloğu. *İTÜ, Maden Fakültesi yayını.*

15. McKenzıe, D. P. (1972). *Active Tectonics of the Alpine-Himalayan Belt: the Aegean Sea and Surrounding Regions (tectonics of Aegean region)*. Geophys. J. R. Astr. Csoc, 55, 217-254.

16. Knopoff, L. (1964). The statics of earthquakes in southern California, Bull. Seism. Soc. Am. 54, 1871-1873.

17. Şaroğlu, F., Ö. Emre, I. Kuşçu. (1992). *Active Fault Map of Turkey*, *Mineral Res. Explor. Inst. Turkey.*

18. Oral, M. B., Reılınger, R. E., Toksöz, M. N., Kıng, R. W., Barka, A. A., Kınık, I., and Lenk, O. (1995). *Global Positioning System offers evidence of plate motions in eastern Mediterranean, EOS, Transactions, Amer. Geophys. Union,* 76, 9-11.

19. Çağnan, Z., and Tanırcan, GB. (2010). *Seismic hazard assessment for Cyprus, Springer Science.*

20. Clube, Tm., and Robertson, Ahf. (1986). The palaeorotation of the Troodos Micro plate, Cyprus, İn the Late Mesozoic-Early Cenozoic plate tectonic framework of the eastern Mediterranean. *Surveys in Geophysics*, 8, 375-437.

21. DeMets, C., Gordon, RG., Argus DF., and Steın S. (1994). *Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, Geophys. Res. Lett*, 21, 2191-2194.

22. Dewey, J. W. (1976). Seismicity of Northern Anatolia. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 843-868.

23. İnternet: http://www.viratrabzon.com/haber/karadenizde-ikinci-bir-deprem-fay-hatti-iddiasi-3039.html, Son Erişim Tarihi: 26.08.2016.

24. Ambraseys, N. N. (1975). Studies in historical seismicity and tectonics: Geodynamics Today. *Publications of the Royal Society of London*, 7–16.

25. Şengör, A.M.C., Görür, N. ve Şaroğlu, F., *Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in: Strike-slip Faulting*

26. Ambraseys, N. N. ve Zatopek, A. (1969). *The Mudurnu Valley, West Anatolia, Turkey, earthquake of 22 July 1967*. Bull. Seism. Soc. A.; 59, 521-589.

27. Ambraseys, N.N. (1988). *Engineering seismology. Earthquake Engineering and Structural Dynamics.* John Wiley&Sons Ltd. , 17: 1 – 105.

28. Ambraseys, N. N. (1988). *Engineering seismology: Earthquake Engineering and Structural Dynamics.* 17, 1–105.

29. Ambraseys, N. N. and Jackson, J. A., (1988). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal İnternational*, Oxford, 133, 390-406.

30. Alptekin, O. (1973). *Focal Mechanisms of Earthquakes in Western Turkey and Their Tectonic İmplications, Ph. D. thesis, Tech, Socorro, New Mexico*.

31. Arpat, E., Şaroglu, F. ve İz, Hb. (1977). *The 1976* Caldiran earthquake. *Yeryuvari Insan*, 2, 29– 41.

32. Mc Kenzie, D.P. (1977). *Can Plate tectonies describe continental deformation; Biju – Duval, B and Montadert L, Structural History of the Mediterranean basin de; Editions Teching.* Paris, 189 – 196.

33. Hatzidimitriou, P.M., Papadimitriou, E.E., Mountrakis, D.M. and Papazachos, B.C. (1985). *The seismic parameter b of the frequency–magnitude relation and its association with the geological zones in the area of Greece. Tectonophysics*. 120:141–151

34. Öncel, A. O. (2000). Fraktal analiz ile Türkiye'deki doğrultu atımlı fayların yapısal ve sismolojik özelliklerinin belirlenmesi, *Deprem Araştırma Bülteni*, (84).

35. Taymaz, T., Jackson, J., McKenzıe, D. (1991). *Active tectonics of the North and central Aegean Sea. Geophys. J, Int*. 106, 433-490.

36. Oral, M. B., Reılınger, R. E., Toksöz, M. N., Kıng, R. W., Barka, A. A., Kınık, I. and Lenk, O. (1995). *Global Positioning System offers evidence of plate motions in eastern Mediterranean, Eos, Transactions, Amer. Geophys. Union*; 76, 9-11.

37. Yalçınlar, İ. (1973). Nemrut sönmüş volkanı ve kaldersı (Doğu Anadolu). *Coğrafya Enstitüsü Dergisi*, 18-19, 253-274.

38. Ketin, İ., ve Canıtez. (1972). *Yapısal Jeoloji*. İTÜ yayını; sayı 869.

39. Büyükaşıkoğlu, S.. (1979). *Sismolojik verilere göre Anadolu ve Doğu Akdeniz'de Avrasya/Afrika levha sınırlarının özellikleri.* Doktora tezi, İ.T.Ü. (İstanbul), 1979.

40. Ambraseys, N. N. (1970). *Some characteristic features of the Anatolian fault zone: Tectonophysics.* v. 9, 143–165.

41. Jackson, J. (1992). *Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in Eastern Turkey: Journal of Geophysical Research*. v. 97, no. B9, p. 12,479.

42. Stein, D. (2003). New pipeline technologies, security and safety. *ASCE*, Virginia.

43. Thomson, J. (1993). Pipejacking and microtunneling. *Chapman&Hall*, Cambridge.

44. Sun, L., Hopkins, T.C. and Beckham T.L. (2005). *Reduction of stresses on buried highway structures using the imperfect ditch method. Kentucky Transportation Center*, Kentucky.

45. Jonasson T. and Watkins M. (1998). *Microtunneling: An owner's perspective, ASCE Practice Periodıcal On Structural Design And Constructıon*, May, 56-59.

46. Lueke, S.J. and Ariaratnam S.T. (2001). Rehahabilitation of underderground infrastructure utilizing trenchless pipe replacement. *ASCE Practice Periodıcal On Structural Design And Constructıon*, Feb., 25-34.

47. Spangler, M.G. (1966). Soil Engineering. *International Textbook Company*, Scranton.

48. Sandford T. C. (2000). Soil-Structure Interaction of Buried Structures. *Transportation in the New Millenium.*

49. Moser, A. P. (1990). Buried pipe design. *McGraw-Hill*, New York.

50. Anon. (2005). *Vertical Soil Arching*, www.geosyscorp.com/Documents/VertSA.pdf.

51. Jeyapalan, J. K. and Balasubramaniam, B. K. (1995). Underground pipeline materials, design, and construcion. *ASCE*, New York, 25-42.

52. Griffin, J. (2005). *Getting the most out of your drilling fluids.*

53. Balkaya, M. (2002). *Boru Türleri ve Özellikleri.*

54. Howard, A. (1996). *Pipeline installation, Relativity Publishing*. Colorado.

55. TS 2170. (1989). *Su ve Gaz Borularının Yeraltına Yerleştirilmesi Kuralları*. TSE, Ankara..

56. TS 5991. (1988). *Asbestli Çimento Boru Hatları Döşeme Kuralları. TSE*, Ankara.

57. Twort, A.C., Law, F.M. and Crowley, F.W. (1985). Water supply. *Edward Arnold Ltd, London*, 450-473.

58. Schwab, G.O., Fangmeier, D.D., Eliot, W.J. and Frevet, R.K. (1993). Soil and Water Conservation Engineering. *John Wiley&Sons Inc.*, New York

59. Watkins, R. K. and Anderson, L. R. (2000). Structural mechanics of buried pipes. *CRC Press LCC*, Florida.

60. Ahlvin, R.G., Smoots, V.A. (1988). Construction guide for soils. *John Wiley&Sons Inc.*, New York

61. Linsley, R. (1992). Water resources engineering. *McGraw-Hill Book Company*, U.S.A. .

62. ASTM B 788/B 788M. (2004). Standard Practice for Installing Factory-Made Corrugated Aluminum Culverts and Storm Sewer Pipe. *West Conshohocken*, United States.

63. Bull, J.W., 1994. Soil Structure Interaction: Numerical Analysis and Modeling. *Chapman&Hall*, London.

64. Jeyapalan, J.K., Hamida, H.B. (1988). Comparison of German to Marston Design Method. *Journal of Transportation Engineering*, 114, 420- 435, Wisconsin.

65. Youd T.L. and Idriss, I.M. (2001). Liquefaction resistance of soils : summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, 127 (4), 297 – 313.

66. Das, B.M. (1983). Fundamentals of soil dynamics. *Elsevier Science Publishing Co. Inc*. New York, USA, 353 – 374.

67. Tezcan S.S. ve Özdemir Z. (2004). Liquefaction risk analyses and mapping techniques. *Yüksek Ögrenim Egitim ve Arastırma Vakfı*, İstanbul, 1 – 102.

68. Ishihara K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. *11th ICSMFE San Francisco,* 2: 321 – 376.

69. Seed H.B. (1976). Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes. *ASCE National Convention Liquefaction problems in Geotechnical Engineering,* Reprint 2752, 1 – 105.

70. Siyahi B.G. ve Altaç Z. (2000). Sıvılaşma potansiyelinin tahmininde Arias şiddeti yöntemi (17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri). *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 45 – 68.

71. Vaid, Y.P., Fisher, J.M., Kuerbis, R.H. and Negussey, D. (1990). Effect of static shear on resistance to liquefaction. *Journal of Geotechnical Eng*. Div. ASCE, 116 (4): 698 – 703.

72. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for Evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical Engineering*, 97: 1055 – 1122.

73. Pampal S. (2000). *Depremler*, Alfa Basım Yayım Dağıtım, 54 – 66.

74. Casagrande, A. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earth fills. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 4: 12 – 90.

75. Karaca, G. (2001). An investigation into the large vertical displacements experienced by structures in Adapazarı during the August 1999 Earthquake. Yüksek Lisans, *ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnsaat Müh. Bölümü, 1 – 65.

76. Kuribayashi, E. and Tatsuoka, F. (1975). Brief Review of Liquefaction During Eartquakes İn Japan. *Soils and Foundations*, 15 (4): 81 – 92.

77. İnternet: İTÜ Deprem Mühendisleri ve Afet Yönetimi Enstitüsü, http://www.eedmi.itu.edu.tr/, Son Erişim Tarihi: 01.11.2016.

78. Vural, İ. (2012). Alüvyal ve Sıvılaşabilen Zeminlerde Altyapıların Deprem Risk Analizi: Adapazarı Örneği. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, 1-20, 74-202.

79. Erken, A. (2001). The Role of Geotecnical Factors on Observed Damage in Adapazarı, *XV Icmge Satelite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes*, İstanbul.

80. Byrne, P. M., Park, S. S., Beaty, M., Sharp, M. K., Gonzalez, L. and Abdoun, T., (2001). Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests. *Canadian, Geotechnical Journal*, 41 (2), 193-211.

81. Turoğlu, H. (2004). Zemin Sıvılaşmasının 17 Ağustos 1999 Depreminde Adapazarındaki Hasara Etkisi. *İstanbul Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Coğrafya Dergisi*, İstanbul, 12.

82. Sağlamer, G. ve diğ. (1999). 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi, *İTÜ Ön Değerlendirme Raporu.*

83. Nceer. (1996). *Liquafection Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 Nceer and 1998 Nceer/NSF Workshops on Evaluation of Liquafection Resistance of* Soils. Technical Report No: Nceer-96.

84. Youd, T. L. and Idriss, I. M. (1997). *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Technical Report Nceer- 97-0022, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.

85. Tokimatsu, K. and Seed, H. B. (1987). Evaluation of settlements in sand due to earthquake shaking. J. of Geotechnical Engineering. *ASCE*, 113(8), 861-878

86. Ishihara, K., and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32(1), 173-188.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: DEMİRALP Havva Guliz
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 14.02.1985 / SAFRANBOLU
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 541 952 44 01
Faks	: 0 366 215 02 75
e-mail	: demiralpguliz@hotmail.com

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet tarihi**
Lisans	Jeoloji Mühendisliği Çanakkale On Sekiz Mart Üniversitesi	Haziran 2010
Lise	Safranbolu Anadolu Lisesi	Haziran 2003

İş Deneyimi

Yıl	**Yer**	**Görev**
2013 - ……..	İller Bankası A.Ş. Kastamonu Bölge Müdürlüğü	Teknik Uzman Yrd.
2010 - 2011	ANKA MÜH. MÜŞ. LTD. ŞTİ. ANKARA	Jeoloji Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

İLBANK
TÜRKİYE'NİN YAPICI GÜCÜ