

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince yardımlarını ve hoşgörüsünü esirgemeyen, destekleyen ve yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER'e gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

PLAXIS sonlu elemanlar programını öğrenmeme ve kullanmama yardımcı olan Dr. Elif Yılmaz ve Araş. Gör. Bülent Hatipoğlu'na yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, Geoteknik Anabilim Dalı Hocalarıma her konuda göstermiş oldukları yakın ilgi ve yardımlarından dolayı minnettarlığımı sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2002

Müge BALKAYA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TABLO LİSTESİ	VII
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
SEMBOL LİSTESİ	XI
ÖZET	XIII
SUMMARY	XIV
1.GİRİŞ	1
2. BORU TÜRLERİ, ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI	3
2.1. Kullanılan Boru Türleri	3
2.1.1 Beton Borular	3
2.1.2 Font Borular (Font döküm borular)	3
2.1.3 Çelik Borular	3
2.1.4 Asbestli Çimento Borular	4
2.1.5 PVC (Polivinil Klorür) Boru	4
2.1.6 Yüksek Yoğunluklu Polietilen Boru (HDPE)	4
2.2 Boruların Kullanım Alanları	5
2.2.1 Temiz Su Hatları	5
2.2.2 Kanalizasyon Hatları	5
2.2.3 Drenaj Hatları	6
2.2.4 Gaz hatları	6
2.2.5 Deniz Deşarj Hatları	7
3. GÜZERGAH SEÇİMİ VE BORU HATTININ PROJELENDİRİLMESİ	8
3.1 Güzergah Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar	8
3.2 Boru Hattının İnşaat Aşamaları	9
4. BORULARIN ZEMİNE GÖMÜLMESİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR	11
4.1 Giriş	11
4.2 Boruların Zemine Yerleştirilmesi	12
4.3 Boruların Üzerindeki Dolgu Kalınlığı ve Hendek Derinlikleri	12

4.4 Hendek Sınırları	14
4.4.1 Hendek Kenarlarının Şekli	14
4.4.2 Hendek Derinliği	14
4.4.3 Hendek Taban Genişliği	15
4.4.4 Hendek Şevleri	15
4.4.5 Hendek Taban Şekli	15
4.5 Hendeklerin Doldurulması	16
4.6 Yataklama	16
4.6.1 Müsaade Edilmeyen Yataklama:	17
4.6.2 Sıradan yataklama:	17
4.6.3 Birinci Sınıf Yataklama:	17
4.6.4 Beton Gömlek İçine Yataklama:	18
4.7 Yataklama Malzemeleri	19
4.7.1 Tabii Zeminlerde Yataklama	19
4.7.2 Kum ve İnce Çakılla Yataklama	19
4.7.3 Beton Yatak	20
4.7.4 Beton Gömlek	20
4.8 Geri Dolgu	21
4.8.1 Geri Dolgu Olarak Kullanılabilecek Malzemeler	21
4.8.2 Geri Dolgu Malzemelerini Sıkıştırmak İçin Kullanılan Yöntemler	22
5. HENDEK AÇMADAN UYGULANAN BORU DÖŞEME YÖNTEMLERİ	24
5.1 Pipe-Jacking	24
5.2 Mikrotünel	25
5.3 Boru patlatma yöntemi	25
6. YER HAREKETLERİNİN GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	26
6.1 Üniform Olmayan Eğilme	26
6.2 Farklı Oturma	26
6.3 Zeminin Su Muhtevastaki Değişme	26
6.4 Don Olayı Sonucu Oluşan Yükler	27
6.5 Deprem	27
6.5.1 Depremde Hasar Görmeye Eğilimli alanlar ve Karşılaşılan Hasar Türleri	28

6.5.2 Deprem Yıkıcı Etkilerinden Korunmak Amacıyla Alınması Gereken Tedbirler	29
6.5.3 Deprem Bölgelerinden Geçen Boru Hatlarında Kullanılması Tavsiye Edilen Boru Malzemeleri	29
7. GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNE ETKİYEN YÜKLER	31
7.1 Giriş	31
7.2 Boru Üzerindeki Yükü Etkileyen Koşullar	32
7.3 Marston Yük Teorisi	33
7.4 Rijit Boru Analizi	34
7.4.1 Hendek Durumu	34
7.4.2 Eğimli Hendekler İçindeki Borular Üzerine Gelen Yükler	38
7.4.3 Geçiş Genişliği	39
7.4.4 Eğilme Gecikmesi Faktörü (DL)	40
7.4.5 Dolgu Durumu (Pozitif Projeksiyon)	41
7.4.6 Pozitif Projeksiyonlu Borular Üzerindeki Yükler İçin Marston Formülü	43
7.4.7 Pozitif Projeksiyonlu Borular İçin Yük Hesaplama Diyagramı	43
7.4.8 Pozitif Projeksiyonlu Borularda Oturma Oranı	44
7.4.9 Eşit Oturma Düzlemi	45
7.4.10 Kritik Düzlem	45
7.4.11 $r_{sd,p} = 0$ Durumu	46
7.4.12 Negatif Projeksiyonlu Bir Boru Üzerindeki Toprak Yükü	46
7.4.13 Negatif Projeksiyonlu Borularda Oturma Oranı	47
7.5 Eksik Hendek Metodu	48
7.6 Tünel İnşaatı	50
7.7 Yeraltı Yapılarının Destek Mukavemetleri	51
7.7.1 Boruların Destek Mukavemetini Bulmak Amacıyla Yapılan Deneyler	51
7.7.2 Üç Mesnetli Dayanma Mukavemeti	52
7.7.3 Yük Faktörleri ve Güvenlik Sayıları	52
7.7.4 Yataklama Şartlarına Göre Yük Faktörü	53
7.8 Fleksibl Boru Analizi	55
7.8.1 Fleksibl Boru Üzerindeki Yükler	55
7.8.2 Boru Rijitliği	56
7.8.3 Fleksibl Borular İçin Boru Tasarım Kriterleri - Performans Limitleri	56

7.9 Marston Yük Teorisi	59
7.10 Prizma Yüğü	60
7.11 Hendek Durumu	61
7.12 Dolgu Durumu	62
7.13 Spangler Iowa Formülü	62
7.14 Hareketli Yüğülerin hesap yöntemleri	65
7.14.1 Trafik Yüğüünün Gömülü Boru Üzerindeki Etkisi	65
7.14.2 Etki Faktörü	66
7.14.3 Trafik Yüğülerinin Hesabı – Boussinesq Methodu	66
8. PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE ZEMİNE GÖMÜLÜ RİJİT BORULARIN MÜHENDİSLİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ	68
8.1 PLAXIS Sonlu Elemanlar Programının Tanıtımı	68
8.2 Programlama Sırasında İzlene Adımlar	70
9. SONUÇLAR	74
KAYNAKLAR	77
EKLER	81
ÖZGEÇMİŞ	116

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 6.1 Farklı Boru Malzemeleri İçin Hasar Oranları	29
Tablo 7.1 Çeşitli Zeminlere Ait γ , K ve μ Değerleri	37
Tablo 7.2 Tavsiye Edilen Kohezyon Katsayıları	51
Tablo 8.1 Kullanılan Zemin Parametreleri	71
Tablo B.1 D Sınıfı Yataklama İçin Hesap Sonuçları	99
Tablo B.2 C Sınıfı Yataklama İçin Hesap Sonuçları	100
Tablo B.3 B Sınıfı Yataklama İçin Hesap Sonuçları	101
Tablo B.4 A Sınıfı Yataklama İçin Hesap Sonuçları	102

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 4. 1 Yerleştirme Şartlarına Göre Gömülü Boru Türleri	13
Şekil 4.2 Boruların Hendek Tabanına Oturtulması	16
Şekil 4.3 Hendek Tipi Borularda Yataklama Sınıfları	18
Şekil 4.4 Beton Gömlek	21
Şekil 7.1 Gömülü borular üzerindeki yükler ve basınçlar	31
Şekil 7.2 Boruların Deformasyon Durumları	33
Şekil 7.3 Marston Dar Hendek Teorisi	35
Şekil 7.4 Hendek Durumunda Boru Üzerindeki Yükler İçin Hesap Diyagramı	38
Şekil 7.5 Eğimli Hendeklerde Hendek Genişliği	39
Şekil 7.6 Alt Hendekler	39
Şekil 7.7 Geçiş genişliği Eğrileri	40
Şekil 7.8 Pozitif projeksiyonlu boru - Projeksiyon durumu	42
Şekil 7.9 Pozitif projeksiyonlu boru - Hendek durumu	42
Şekil 7.10 Pozitif Projeksiyonlu Borular İçin C_c Katsayısı	44
Şekil 7.11 Negatif Projeksiyonlu Boru Yerleşimi	47
Şekil 7.12 Negatif Projeksiyonlu Boru İçin C_n değerleri	48
Şekil 7.13 Eksik Hendek Metodu	49
Şekil 7.14 Boruların Destek Mukavemetini Bulmak Amacıyla Yapılan Deneyler	52
Şekil 7.15 Üç Mesnetli Dayanma Deneyi	42
Şekil 7.16 Yataklama türleri	53
Şekil 7.17 Duvar Ezilmesi	57
Şekil 7.18 Duvar Burkulması	57
Şekil 7.19 Aşırı Eğilme	58
Şekil 7.20 Eğriliğin Ters Dönmesi	58
Şekil 7.21 Marston Teorisine Göre Fleksibl Boru Üzerindeki Yük Dağılımı	60
Şekil 7.22 Prizma Yükü	61
Şekil 7.23 Fleksibl Boruların Deformasyonu	63
Şekil 7.24 Yataklama Açısı	64

Şekil 7.25 Bir yol altına gömülü boru üzerindeki hareketli yükler. (a) tipik kesit, (b) analizde kabul edilen homojen, izotropik durum	66
Şekil 7.26 Gerilme Soğanı	67
Şekil 8.1 Gerçek Zemin Ortamı	72
Şekil A.1 Arazinin Kazı İşleminden Önceki Doğal Durumu	82
Şekil A.2 Hendek Kenarlarına Palplanş Çakılması (1. Aşama)	83
Şekil A.3 -4.0 m Kotuna Kadar Kazı Yapılması ve Yatay Desteklerin Yerleştirilmesi (2. Aşama)	84
Şekil A.4 Hendek Taba Seviyesine Kadar Kazı Yapılması (3. Aşama)	85
Şekil A.5 Borunu Yerleştirilmesi ve -4 m Kotuna Kadar Dolgu Yapılması (4. Aşama)	86
Şekil A.6 Doğal Zemin Seviyesine Kadar Hendeğin Doldurulması, Palplanş ve Yatay Desteğin Kaldırılması (5. Aşama)	87
Şekil A.7 Efektif Gerilme	88
Şekil A.8 Boşluk Suyu Basıncı	89
Şekil A.9 Sonlu Elemanlar Ağı	90
Şekil A.10 Toplam Yer Değiştirmeler	91
Şekil A.11 Borunun Düşey Deplasmanı	92
Şekil A.12 Borunun Yatay Deplasmanı	93
Şekil A.13 Boruya Etkiyen Eksenel Kuvvet	94
Şekil A.14 Boruya Etkiyen Kesme Kuvveti	95
Şekil A.15 Boruya Etkiyen Eğilme Momenti	96
Şekil A.16 Boru Üzerindeki Efektif Normal Gerilme	97
Şekil C.1. Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği İle Değişimi (D Sınıfı Yataklama)	104
Şekil C.2. Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği İle Değişimi (C Sınıfı Yataklama)	104
Şekil C.3. Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği İle Değişimi (B Sınıfı Yataklama)	105
Şekil C.4. Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği İle Değişimi (A Sınıfı Yataklama)	105
Şekil C.5. Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği İle Değişimi (D Sınıfı Yataklama)	106
Şekil C.6. Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği İle Değişimi (C Sınıfı Yataklama)	106

Şekil C.7. Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği İle Değişimi (B Sınıfı Yataklama)	107
Şekil C.8. Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği İle Değişimi (A Sınıfı Yataklama)	107
Şekil C.9. Maksimum Momentin Hendek Genişliği İle Değişimi (D Sınıfı Yataklama)	108
Şekil C.10. Maksimum Momentin Hendek Genişliği İle Değişimi (C Sınıfı Yataklama)	108
Şekil C.11. Maksimum Momentin Hendek Genişliği İle Değişimi (B Sınıfı Yataklama)	109
Şekil C.12. Maksimum Momentin Hendek Genişliği İle Değişimi (A Sınıfı Yataklama)	109
Şekil C.13: Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği İle Değişimi (D Sınıfı Yataklama)	110
Şekil C.14. Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği İle Değişimi (C Sınıfı Yataklama)	110
Şekil C.15. Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği İle Değişimi (B Sınıfı Yataklama)	111
Şekil C.16. Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği İle Değişimi (A Sınıfı Yataklama)	111
Şekil C.17. Boru Üzerine ve Yan Dolguya Etkiyen Yükler (D Sınıfı Yataklama)	112
Şekil C.18. Boru Üzerine ve Yan Dolguya Etkiyen Yükler (C Sınıfı Yataklama)	114
Şekil C.19. Boru Üzerine ve Yan Dolguya Etkiyen Yükler (B Sınıfı Yataklama)	114
Şekil C.20. Boru Üzerine ve Yan Dolguya Etkiyen Yükler (A Sınıfı Yataklama)	115

SEMBOL LİSTESİ

A	: Borunun üzerindeki yük hesaplanan kısmının uzunluğu (m)
B_e	: Borunun dış çapı, (m)
B_d	: Boru üst seviyesinde hendeğin genişliği (m)
C_d	: Hende boruları için yük katsayısı
C_t	: Yük katsayısı
D	: Borunun ortalama çapı (m)
d_c	: Borunun düşey boyutunda kısalma (m)
D_L	: Eğilme gecikme faktörü
Δx	: Yatay eğilme veya çapta değişim (m)
Δy	: Düşey yönde deformasyon (m)
e	: Doğal logaritma tabanı
E	: Elastite modülü (KN/m ²)
F	: Kuvvet (KN/m)
γ	: Dolgunun birim hacim ağırlığı (KN/m ³)
γ.B_d.dh	: Hacımsal elemanın ağırlığı
h	: Zemin yüzünden dolgu içindeki bir yatay düzleme mesafe (m)
H	: Boru üzerindeki dolgu yüksekliği, (m)
H_e	: Eşit oturma düzleminin yüksekliği, (m)
I	: Eylemsizlik momenti (m ⁴ /m)
I_c	: Etki faktörü
K	: Yanal aktif birim basıncın düşey birim basınca oranı
K	: Yataklama faktörü
K.(V/B_d).dh	: Hacımsal elemanın etrafındaki yanal basınç
μ	: tan φ = Dolgunun içsel sürtünme katsayısı
μ'	: tan φ =Dolgu ve borunun kenarları arasındaki sürtünme katsayısı
P	: Dolgunun yüzeyindeki eksenel tekerlek yükü, (KN)
P	: H derinliğindeki zemin ağırlığına bağlı basınç (KN/m ²)
r	: Borunun ortalama yarıçapı (m)
R	: Borunun ortalama yarıçapı (m)

r_{sd}	: Negatif projeksiyonlu bir boru için oturma oranı
s_d	: $p'.B_d$ yüksekliğinde bir hendek içindeki dolgunun oturması (m)
$s_d + s_f + d_c$	: Kritik düzlemin oturması (m)
s_f	: Borunun yataklandığı zeminin oturması (m)
s_g	: Doğal zemin yüzeyinin oturması (m)
s_m	: $p.B_c$ yüksekliğindeki kenar dolgunun oturması
V	: Dolgu içindeki herhangi bir yatay düzlemdeki düşey yük (KN/m)
$V+dV$	: Hacımsal elemanın altındaki düşey basınçlar
W_c	: Boru üzerindeki yük (Dolgu Tipi) (KN/m)
W_d	: Birim uzunluk için boru üzerindeki yük (Hendek Tipi) (KN/m)

ÖZET

Çok eski çağlardan bu yana insanların yer altına yerleştirdikleri borularla temiz su ve atıksularını taşıdıkları bilinmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle kullanım alanı genişleyen gömülü borular, günümüzde kanalizasyon hatları, drenaj hatları, su kanalları, menfezler, petrol boru hatları, atıksu arıtma tesisleri ve deniz deşarj sistemleri gibi pek çok farklı alanda karşımıza çıkmaktadır. Gömülü borular bu geniş kullanım alanları sayesinde kent yaşamının çok önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Bu yapıların kısa bir süre için bile kullanım dışı kalması günlük yaşantımızı olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu nedenle gömülü boruların tasarım aşamasından yerleşim aşamasına kadar özel bir dikkat sarfedilmeli ve kullanılacak boruların üzerlerine etkiyecek hareketli ve hareketsiz yükleri taşıyabilecek mukavemete sahip olup olmadıkları önceden belirlenmelidir.

Zemine gömülü borulara etkiyen toprak yüklerini hesaplamak için en yaygın olarak kullanılan yöntem, Marston ve Spangler'ın geliştirdikleri yöntemdir. Günümüzde bu hesap yöntemlerine ilave olarak diğer birçok alanda olduğu gibi zemin-boru etkileşimi ve boru üzerindeki toprak yükü hesaplarında sonlu elemanlar yönteminin kullanımı mümkündür. Bu sayede çeşitli inşaat aşamaları, farklı özellikteki zemin tabakaları ve farklı malzemelerden meydana gelen yapısal elemanların kullanımı sonucu zemin-boru sisteminde meydana gelebilecek muhtemel değişimler kolaylıkla incelenebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında zemine gömülü boruların mühendislik davranışını belirleyebilmek amacıyla yapılan bir literatür çalışması ve PLAXIS sonlu elemanlar programıyla yapılan 36 ayrı modele yer verilmiştir.

PLAXIS sonlu elemanlar programı kullanılarak 1.50 m dış çapa sahip rijit bir borunun (beton boru) farklı yataklama yöntemleri, farklı rijitlikteki gömlek malzemeleri ve üç ayrı hendek genişliği altında yerleşimi durumundaki davranışı incelenmiştir. Ayrıca boru üzerinde meydana gelecek toprak yüklerini hesaplamak amacıyla Marston Yük Teorisi kullanılmış ve bu hesap yöntemiyle bulunan yükler, sonlu elemanlar çözümlerinden bulunan yüklerle karşılaştırılmıştır ve elde edilen bu veriler kullanılarak yataklama türü, geri dolgu ve gömlekleme malzemesi seçiminin gömülü boruların mühendislik davranışına etkisi belirlenmiştir.

ENGINEERING BEHAVIOUR OF BURRIED PIPES

SUMMARY

It is known that since the very old ages people have transferred their drinking water and waste water by using burried pipes. With the development of technology, burried pipes became a very important part of the civilized life. Nowadays burried pipes are used as sewage systems, drainage systems, water mains, gas lines, telephone and electrical cables, culverts and oil lines.

As these lines are an important part of our daily life, any damage within these lines would effect our lives in a negative way. Therefore, burried pipes should be inspected very carefully during design and installation phases and the external loads that would occur on the burried pipes should be calculated before installation, so that the use of an appropriate pipe stiffness could be possible.

In order to calculate the earth load that a burried pipe is subjected in service life, Marston Load Theory is the most common method. Marston Load Theory serves to predict the supporting strength of pipe under various installation conditions. This theory is used for determining the loads on a rigid pipe. For flexible pipe design, M.G. Spangler, a student of Marston, developed a theory.

Nowadays the finite element method can be used for calculation of the loads on the burried pies as an alternative to the other computational methods. The finite element method is a computational procedure that may be used to obtain approximate solutions to mathematical problems that arise in a variety of areas of engineering. The essential feature of the method is that the governing mathematical equations (which are generally continuous) are approximated by a series of algebraic equations involving quantities that are evaluated at discrete points within the region of interest. The finite element equations are formulated in such a way as to minimize the error in the approximate solution.

The finite element method enables to have reasonable results in civil and geotechnical engineering for calculation of the loads, stresses, strains, flow field calculations, consolidation, load carrying capacity and general dynamic analysis where there is different kinds of materials.

BÖLÜM 1: GİRİŞ

Boru hatları, genellikle toprak altına döşenen boru sistemi ve bununla ilgili sanat yapılarından oluşur. Ulaşılması zor alanlara su iletimininin kolay olması ve taşıdıkları suya tat, koku ve renk vermemeleri nedeni ile tercih edilirler [15,55].

Gömülü borular; kanalizasyon hatları, drenaj kanalları, su kanalları, gaz hatları, telefon ve elektrik hatları, menfezler, petrol boru hatları, metro tünelleri, ısı dağıtım hatları, atıksu arıtma tesisleri ve deniz deşarj sistemleri gibi pek çok farklı amaç için kullanılmaktadır. Malzeme seçimi aktarılabacak akışkanın türüne, sıcaklık ve basıncına bağlıdır. Kurşun, çok yumuşak su ile (aşındırıcı) kimyasal tepkimeye girme tehlikesi gösterdiğinden daha az kullanılır. Dökme demirden boru hatları yüksek basınçlara, korozyona yol açan sıvılara, yüksek sıcaklıklara elverişlidir. Çelik boru hatları bunlardan daha hafiftir, ancak korozyona karşı korunması gerekir. Maliyeti yüksek olan bakır boru hatları özellikle sıcak su için uygun bir malzeme oluşturur. Düşük basınçlar (örneğin kullanılmış suların uzaklaştırılması) için asbestli çimento ya da betonarmeden yapılmış borular kullanılır. Plastik boru hatları orta şiddetteki basınçlara ve korozyona yol açan etkenlere karşı çok dirençlidir. Kuvvetli korozyona neden olan bazı sıvıların iletiminde ise cam kökenli borular kullanılır [15,34, 46].

Farklı amaçlar için değişik tür borular kullanılmakla birlikte, günümüzde en sık kullanım alanı bulan boru türleri; beton, font, karbon çeliği, dökme demir, düktil demir, cam ve teflon kaplı borular, plastik ve PVC borulardır. PE, sünek demir ve cam lifli donatılı plastik borular gibi fleksibl boruların deprem bölgelerinde kullanılması tavsiye edilir. Kullanılacak boruların seçiminde, maliyetin düşük olmasının yanında borunun teknik ve işletme yönlerinden de tatminkar olması amaçlanır. Borudaki aşınma ve korozyona karşı alınacak gerekli koruma yöntemleri, seçilen boru mazemesi, boru çapı ve et kalınlığı, boru hattının geçtiği güzergahın topoğrafik ve sosyo-ekonomik özellikleri ile hattın uzunluğu gibi faktörler ekonomik açıdan çok önemlidir [18,34].

Boruları teknik ve işletme yönlerinden karşılaştırmak için aşağıdaki hususların göz önüne alınmalıdır [3, 39, 42]:

1. Boru cidarının pürüzlülüğü ve sürtünme kayıpları,
2. Aşırı tamir ve bakıma gerek bırakmayan hizmet ömrü,
3. Aşınmaya karşı direnci,
4. Korozyona karşı direnci,
5. Mukavemet ve döşeme özellikleri,
6. Ek yeri tipi ve ek yerinin su sızdırmazlığı, ek yerlerinin kolay yapılabilirliği,
7. Kullanılan çap için boru ve özel parçaların mevcudiyeti,
8. Arazi durumuna göre tatbik edilebilecek inşaat metotları ve zemin durumu,

Borular, yapıldıkları malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirence göre rijit ya da fleksibl olarak ikiye ayrılırlar. Rijit boruların (asbestli çimento, beton ve betonarme, v.s.) deformasyon yapmadığı kabul edilir. Bu nedenle yükün tamamı boru tarafından taşınır. Marston, rijit boruları yatay veya düşey boyutlarında %0.1'den fazla değişikliğin önemli derecede zararlı çatlaklara neden olduğu borular olarak tanımlamıştır. Fleksibl borular (ondüleli sac borular ve termoplastik borular gibi ince çelik ve plastik borular) ise yük altında deformasyona uğrar. Bu tür borular, yapısal hasara meydan vermeden en az % 2 oranında eğilme yapabilen borulardır. Bu nedenle fleksibl borularda yük, boru tarafından taşındığı kadar boru etrafındaki zemin tarafından da taşınır [16, 33, 34].

BÖLÜM 2: BORU TÜRLERİ, ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

2.1. Kullanılan Boru Türleri

2.1.1 Beton Borular:

Beton borular, geri dolgu ve dış basınca bağlı oluşan yüklere karşı dayanıklıdır. Ağırlıkları nedeniyle içi boş olduğunda zemin içinde yüzme ihtimalleri azdır. Normal şartlar altında korozyondan etkilenmez, ancak alkali ya da asidik ortamda korozyona uğrarlar. Porozite ve büzülme sonucu oluşan çatlaklardan sızıntı olma ihtimali yüksektir. Bakım masrafları düşük, ancak tamirleri zordur [17, 35].

2.1.2 Font Borular (Font döküm borular):

Normal font borular, çeliğe kıyasla korozyona, toprak ve trafik yüklerine karşı daha dayanıklıdır. Font borular fabrikada tatbik edilen iki katlı bitüm tabakası ile ayrıca paslanmaya karşı da korunurlar. Uzun ömürlüdürler (40-60 yıl). Buna karşılık daha kırılğan, darbelere karşı mukavemeti daha az, daha ağır ve pahalıdır.

Son yıllarda font malzemeye iyi şekil verilebilen ve eğilip bükülebilen bir özellik kazandırılarak darbe ve çarpmalara dayanıklı borular yapılmaya başlanmıştır. Bu tür borulara Düktil Font Boru adı verilmektedir. Düktil font boruların mukavemeti çelik borulara yakın olduğu halde korozyona dayanıklılıkları normal font borular gibidir. Özellikle atık su ve yağmur iniş devrelerinde kullanılan dökme demir borular yüksek mekanik ve kimyasal mukavemetleri nedeniyle tercih edilirler [13, 35, 39, 42].

2.1.3 Çelik Borular:

İsale hatlarının yüksek basınca maruz büyük çaplı kısımlarında çoğu zaman çelik borular kullanılır. Boylarının uzun olması, boru hattının kısa zamanda döşenmesine imkan verir. Çelik borular heyelan bölgeleri için çok elverişlidir. Ancak, ek yapılmasındaki güçlük nedeniyle genellikle su şebekelerinde çelik borular nadiren kullanılır. Hafif olmaları nakliye masraflarını azaltır. Font borulara kıyasla daha ucuz, hafif, taşınması ve döşenmesi daha kolaydır. Buna karşılık, iç basınçlara karşı

dayanıksızdırlar. Örneğin boruların boşaltılması sırasında ortaya çıkan bir vakum, borunun göçmesine sebep olabilir. Cidarlarının ince ve korozyona dayanıksız olmaları bakım masraflarını artırır ve ömürlerini kısaltır [18, 35, 39, 42].

2.1.4 Asbestli Çimento Borular:

Asbestli çimento borular büyük bir kimyasal mukavemete sahiptir. Kolaylıkla işlenebilir, kesilebilir, delinebilirler. Hafif, dona karşı dayanıklı ve yük kayıpları küçüktür. Ancak font borular gibi çarpma ve darbelere karşı hassas ve eğilme mukavemetleri düşüktür. Heyelan bölgelerinde ve dolgu zeminlerde kullanılmazlar. Ayrıca asbestli çimento boruların özel parçaları yalnızca dirseklerden ibarettir. Bunların dışında kalan ayırım noktaları, vanalar, çap değişim noktaları ve benzer yerler fonttan yapılmış özel parçalarla teşkil edilir. Bu sebeple böyle yerleri az olan boru hatlarında kullanılabilirler [18].

2.1.5 PVC (Polivinil Klorür) Boru:

Sert plastik (PVC) boru, pis su deşarj inşaatı kapsamında kullanılabilecek plastik kökenli borulardan olup yüksek yoğunluklu borunun genelde bütün olumlu yönlerini içermektedir. Özetlenecek olursa; PVC borular çok uzun ömürlüdür (teorik olarak sonsuz, pratikte 50 yıl), asit ve bazlara karşı dayanıklıdır, hafiftir, taşınması ve döşenmesi kolaydır, lastik conta veya yapıştırılarak monte edilir. Montajı kolay olup diğer cins borularla birleşmesi mümkündür. Nakliyesi ucuz, firesi çok az (% 2) ve cidarı pürüzsüz olduğundan enerji kayıpları azdır. Aynı çaptaki diğer borulara kıyasla daha çok debi geçirir, kuduz teşekkülüne (terleme ve su emmesi) imkan vermez, terfi hattındaki pompanın ani durmasıyla oluşabilecek su darbesinin mertebesi daha küçüktür, $D < 600$ mm çapa kadar ekonomiktir. Ancak, PVC boruların 15 °C den düşük ve 60 °C den yüksek sıcaklıklarda kullanılması tavsiye edilmez. Borular, PVC ve katkı maddelerinin özelliklerinden dolayı kendiliğinden tutuşmaz. Sadece harici alev altında yanar. Kırılıp girdirler, güneş ışınları ve deniz ortamından etkilenirler [14, 18, 39, 42].

2.1.6 Yüksek Yoğunluklu Polietilen Boru (HDPE):

Yüksek yoğunluklu polietilen borular; esnek olmaları nedeniyle kolaylıkla şekil alırlar. Bu özellikleri dolayısıyla boru hattının yerine montajı diğer malzemelere kıyasla çok daha kolay olabilmektedir. Kimyasal etkilere dayanımı diğer

malzemelerden daha iyidir, hafif olduklarından taşınmaları, döşenmeleri kolay, hızlı ve ucuzdur. İnşaat sezonu kısa olan bölgelerde, yoğun trafiğin geçtiği yollarda büyük avantaj sağlar. Taşınma sırasında kırılma, çatlama olmadığından malzeme israfı yoktur. Diğer malzemelerde görülen iç oyulma olayı HDPE’lerde görülmez. Pürüzlülüğün az olması nedeniyle diğer borulara oranla %10-25 fazla debi geçirebildiklerinden boru hattı için daha küçük çapların seçilmesi mümkün olur. Faydalı ömrü ≥ 50 yıldır, doğada ancak 1000 yılda bozulur. İklim koşullarına karşı dayanıklıdır. Bakım ve onarım masrafları en alt düzeydedir. Diğer malzemelerin ek yerleri sürekli sorun yaratırken, HDPE boruların ek yerleri iyi yapıştırıldığı takdirde pratik olarak içten dışa, dıştan içe sızıntı yapmaz. Özgül ağırlığı 1.0’ın altında olduğundan özellikle su yapıları için en ideal malzemedir. Mekanik zorlamalara karşı dayanımlıdır, ayrıca elastik bir malzeme olması sebebiyle gelebilecek şok dalgaları genişleme sonucu sönmölenebilmektedir. Arazi şekline uyumludur, toprak hareketlerinden etkilenmez. Güneş ışınlarından etkilenmez (UV dayanımı), ancak, yüksek sıcaklıklara fazla dayanıklı bir malzeme olmaması nedeniyle sıcak artıkların deşarjında düşünölmemelidir (21 °C nin üstündeki sıcaklıklara dayanımı azalmaya başlar) [5, 18, 39, 42].

2.2 Boruların Kullanım Alanları

2.2.1 Temiz Su Hatları:

Su sistemleri, taşıma ve dağıtma sistemleri olmak üzere ikiye ayrılırlar. Taşıma sistemleri, suyu kaynağından dağıtma sistemine ileten parçalardır. Fazla bağlantıları yoktur. Bu nedenle bu tür hatlarda akım çok küçük süreksizlikler dışında sabit kabul edilir. Bu tür hatlar genellikle oldukça sıkı toprak kaplamalar içine yerleştirilirler. Projede esas olarak dikkate alınması gereken iç basınçtır.

Dağıtma sistemleri ise, suyu çeşitli kullanıcılara dağıtır. Birçok bağlantıları vardır. Boyuna doğrultudaki eğilmeleri ve farklı oturmaları önlemek amacıyla boru etrafındaki dolguya, bağlantılar projelendirilirken büyük özen gösterilir. Dağıtma sistemleri, birbirine içten bağlı boru hatlarından oluşur. Bu tür sistemlerde borular, meydana gelecek gerilmelere karşı koyacak kadar derine gömölü olmalı, oldukça pürüssüz duvarlara sahip olmalı, sıkı bir bağlantı sistemine sahip olmalı ve su ve zemine karşı kimyasal olarak tepkisiz olmalıdır [34, 48].

2.2.2 Kanalizasyon Hatları:

Kanalizasyon hatları, bir toplama sistemi ve bir arıtma sisteminden meydana gelir. Bu hatlar, genellikle suyun bodrum katlarından toplanmasına müsaade edecek şekilde oldukça derinlere gömülürler. Bu derinliğe bağlı olarak boru üstüne daha yüksek toprak basınçları etkir. Bu basınçlara karşı koymak için boru mukavemeti ve rijitliği tasarım açısından önemli parametreleri oluşturur. Toprak dolgu, dolgunun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması da önemlidir. Kanalizasyon hatlarında borular sızıntıyı önlemek amacıyla sıkı bir bağlantı ile kolayca bağlanabilmeli, zemin-boru sistemi toprak yükünü kaldırabilecek şekilde projelendirilmeli, kullanılan boru malzemesi zemin ve kanalizasyona karşı kimyasal olarak tepkisiz olmalı, boru içi, sıvı akışını engellemek için pürüzsüz olmalı ve herhangi bir kanalizasyon sistemi için proje ömrü en az 50 yıl olmalıdır [34].

Cazibeli akıma sahip kanalizasyon hatlarında en yaygın kullanım alanı bulan boru tipi, beton borulardır. pH aralıklarının ani değişim göstermediği nispeten üniform pH değerlerine sahip atıksuların iletiminde beton borular önerilmektedir. pH değeri salınım gösteren endüstriyel atıksuların iletimi için seramik kaplanmış kil veya içi korozyona karşı kaplanmış beton borular kullanılmaktadır. Bazı durumlarda, önerilmeli plastik harçlı borular ve PVC borular da yaygın kullanım alanı bulmaktadır [18, 48].

2.2.3 Drenaj Hatları:

Yeraltı veya döşeme altı atıksu drenaj hatları ve bağlantıları genellikle dökme demirden imal edilirler. Drenaj hatlarının ve tesisatın tüm bağlantıları geçmeli veya manşonlu tipte olabilir. Atıksu hattında temizleme amaçlı bağlantı yerleri bırakılmalıdır. Boru eğimleri 20 mm/m olarak düzenlenmelidir. Atıksu hatlarında havalandırma bacaları veya rögarları inşa edilmelidir [18, 48].

2.2.4 Gaz hatları:

Gaz hatlarında boru malzemesi genellikle standart dökme demirdir. Boruların zemine gömülmesi durumunda, toprak alkali ve asidik özellikler taşıyorsa, gaz hatları koruyucu malzeme ile kaplanmalıdır. Katodik koruma doğal gaz hatlarında gerekli değildir. Bununla birlikte, iletilen bazı gazlarda özellikle hidrojen sülfür gibi bir korozif gazın bulunması nedeniyle, gaz hatları korozyona karşı korunmalıdır [18,48].

2.2.5 Deniz Deşarj Hatları:

Deniz hatlarının inşasında kullanılan boru cinsleri betonarme, çelik ve plastik kökenlidir. En çok kullanılan boru tipleri dökme demir, çelik, betonarme, PVC, FRB (fiberglas lifli) boru ve yüksek yoğunluklu polietilen borulardır. Son zamanlarda boru malzemesi ve inşaat maliyetlerini düşürmek amacıyla genellikle çelik veya plastik boruların kullanılması yoluna gidilmektedir [18, 39, 42].

Genel olarak 1 metreden büyük çaplar için betonarme borular kullanılır ve ağır olmaları nedeniyle deniz zeminine tespitleri kolaydır. Bu tip boruların iç yüzeyleri demirlerin korozyona karşı korunması için katran ile kaplanır [8].

BÖLÜM 3: GÜZERGAH SEÇİMİ VE BORU HATTININ PROJELENDİRİLMESİ

3.1 Güzergah Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

Boru hatlarının tasarım ve yapımı sırasında belli adımlar izlenmelidir. Bunlardan ilki, boru hattı ve diğer ilgili yapıların konumunu ve izlenecek rota boyunca zemin profilini gösteren topoğrafik bir haritanın hazırlanmasıdır [55].

Hattın geçeceği güzergahın topoğrafik ve jeolojik özellikleri, boru hattı sisteminin maliyetine etki eden faktörlerden biridir. Öyle ki, arazinin topoğrafik yönden engebeli oluşu hat üzerinde viyadük, köprü ve tünel gibi sanat yapılarını gerektirecek, jeolojik yönden elverişsiz bir yapıya sahip olması halinde ise hafriyat ve tahkimat işleri zorlaşacaktır. Ayrıca, güzergahın bitki örtüsünün çok sık oluşu hattın inşasını zorlaştıracak gibi, güzergahın özel mülkiyetin olduğu bölgelerden geçmesi halinde de ortaya istismak sorunu çıkacaktır. Bu nedenlerden dolayı, boru hattının geçeceği kesin güzergahın belirlenmesinde aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır [3]:

1. Mümkün ölçüde arazinin az engebeli olduğu kısımlar tercih edilmeli,
2. Boru hattı üzerindeki sanat yapıları minimum sayı ve maliyette olmalı,
3. Boru hattı uzunluğunun minimum olmasına dikkat edilmeli,
4. Jeolojik yönden inşaat güçlüğü ve heyelan gibi bakım güçlüğü çıkaracak arazi kısımlarından uzak kalmaya çalışılmalı,
5. Özel mülkiyetin olduğu bölgelerden kaçınılmalı,
6. Zemin üstü bitki örtüsünün sık olduğu bölgelerden geçmemeye çalışılmalı,
7. Gerek inşaat, gerekse işletme sırasında bakım ve servis için gerekli ulaşım imkanları göz önünde bulundurulmalı, mümkün ölçüde yörede mevcut kara ve su yolu imkanlarından yararlanmaya çalışılmalı,
8. Mevcut güzergah alternatifleri arasında bir ekonomik analiz yapılarak güzergahın kesin şekli belirlenmelidir.

3.2 Boru Hattının İnşaat Aşamaları

Bir gömülü borunun arazide yerleştirme aşamaları aşağıdaki şekilde özetlenebilir [3]:

1. İnşaat öncesi planlama (Ön inceleme),
2. Arazinin hazırlanması,
3. Malzemelerin siparişi, alınması, taşınması,
4. Kazı yapılması,
5. Temel ve yatağın hazırlanması,
6. Boruların eklenmesi,
7. Geri dolgunun yerleştirilmesi,
8. Boru hattının test edilmesi.

Boru hattının kesin projesi hazırlandıktan sonra inşaat safhasına geçilir. Bu safhada, güzergah uygulaması yapıldıktan sonra eğer boru hattı toprak altına dönecekse gerekli hendek açılır. Buna paralel olarak taşınan borular hendeğin kenarı boyunca dizilir. Boru cinsi ve projede öngörülen inşaat tekniğine göre kaynakla ve flanşla birleştirilen borular, pasa karşı gerekli temizleme ve boyama işlemlerinden sonra korozyon için düşünülen dış izolasyon yapılarak hendeğe indirilir. Eğer birleşim kaynaklı yapılıyorsa, kaynak yerlerinin çok sıkı kontrol edilmesi gerekir, aynı şekilde yapılan dış izolasyonun da çok sıkı kontrol edilmesi gerekir. Birleşimler flanşlı ve geçmeli yapılıyorsa sızdırmazlık ayrı bir önem taşır. Özellikle arazi ve iklim şartları elverişsiz olan hallerde boru hattının toprak altına döneşmesi tercih edilir [3].

Boru hatları genellikle zemin profilini takip edecek şekilde ve mümkün olduğunca üniform eğimde döneşmelidir. Bununla beraber, konumu inşaat masraflarını ve iç basıncı azaltacak şekilde olmalıdır. Boru hattı hidrolik eğim çizgisine yakın olduğunda su basıncı azalır. Boru hattının hidrolik eğim çizgisinin üzerinden geçmesi sifon kullanımını gerektireceği ve boru içinde negatif basınç yaratacağından bu işleminden kaçınılmalıdır. Böyle bir durumda, uygun bir biçimde yerleştirilmiş yardımcı rezervuarlarla fazla basınç önlenabilir [55].

Boru hattı mümkün olduğunca düz bir rota izlemeli ve yön değışiklikleri boruların ek yerlerindeki açısal eğilmeyle yapılmalıdır. Kıvrımlar boru hattının taşıma kapasitesini azaltan aşırı sürtünmeye neden olacağından keskin kıvrımlardan kaçınılmalıdır. Her boru parçası, çatlak ya da hasar görmüş bir kaplamanın olup olmadığını anlamak amacıyla yerine yerleştirilmeden önce incelenmelidir. Boruyu

trafik ve hava koşullarının neden olabileceği hasarlara karşı korumak için uygun bir derinliğe gömmek gerekir. Soğuk iklimlerde su boruları don derinliğinin altına döşenmelidir [53, 55].

Borular, boruların eklerine hasar veren üniform olmayan oturmaları önlemek amacıyla sağlam zemin veya temel üzerine yerleştirilmelidir. Kaya zeminlerde, kayalar ve taşlar hendek tabanından 15 cm kadar temizlenmeli ya da kum veya ufak boyutlu yuvarlak çakılla değiştirilmelidir [55].

Yeni döşenmiş boru hatları, sızıntının kaynaklandığı yerleri ve sızıntı miktarını belirlemek için en az 24 saat hidrostatik deneylere tabii tutulmalıdır. Borular, suyu boşaltma vanalarına akıttıktan sonra yavaşça doldurulmalıdır ve tüm hava valfler vasıtasıyla çıkarılmalıdır. Bu deneyle yapılırken, ekler arasındaki boru parçaları kaplanmalı, fakat ek yerleri incelenmek üzere açıkta bırakılmalıdır. Ek yerlerinde sızıntının normal işletme basıncı altında 24 saat boyunca 8 lt/m'den fazla olmasına müsaade edilmemelidir [55].

BÖLÜM 4: BORULARIN ZEMİNE GÖMÜLMESİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR

4.1 Giriş

Toprak, tarih boyunca inşaat malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu nedenle, kanalizasyon sistemleri, kanal, menfez, tünel ve diğer yeraltı yapılarında zemin sadece yapının üzerine oturduğu bir malzeme değil, aynı zamanda destek vazifesi gören ve yükü transfer eden bir malzemedir. Bu nedenle, gömülü bir boru sisteminin tasarımında borunun malzeme özellikleri ve boruyu çevreleyen zemin zarfının özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır [34].

Çeşitli boru malzemeleri farklı mukavemet ve rijitlik özellikleri gösterirler ve arazideki zemin ve hendek derinliğine bağlı olarak farklı geri dolgu malzemesi ve yerleştirme tekniği gerektirirler. Zemin-yapı etkileşimi, boru özelliklerinin ve borunun gömüldüğü zeminin özelliklerinin bir fonksiyonu olduğundan boru performansını etkiler. Bu nedenle, proje sırasında zemin-boru etkileşimini göz önünde bulundurmalıdır [34].

Gömülü boruların zemin içindeki performansını artırmak için; boru zemin içinde stabil halde bulunmalı, zeminin fiziksel koşullarından ve dış yükleme şartlarından etkilenmemeli, kullanım amacına uygun olacak şekilde mukavemete ve rijitliğe sahip olmalı, aynı zamanda tasarım ömrü boyunca kullanılabilecek kadar da dayanıklı olmalıdır [34].

Gömülü boruların kullanım ömrünü artırmak için ise, boru hattının geçeceği güzergah üzerinde belirli aralıklarla sondajlar yapıp alınan numuneler üzerinde deneyler yapılmalı ve zeminde boruya zarar verebilecek kimyasal maddeler varsa ona uygun boru seçilmelidir. Ayrıca, boru etrafındaki dolgu malzemesinin cinsini ve kompaksiyon derecesini seçerken, kaplama derinliği, ortalama yeraltı su seviyesi, arazideki doğal zeminin özellikleri, boru malzemesi ve uygulanacak kompaksiyon derecesi dikkatlice belirlenmelidir.

4.2 Boruların Zemine Yerleştirilmesi

Gömülü boruların servis ömürleri boyunca maruz kaldıkları yükler ve çeşitli yerleştirme teknikleri altındaki destek mukavemetleri, Marston'un gömülü borular üzerindeki yük teorisi ile hesaplanabilir. Yük hesapları açısından yeraltı yapıları, yerleştirme ve yükü etkileyen çevre şartlarına bağlı olarak hendek tipi ve dolgu tipi borular olarak iki ana gruba ayrılır. Dolgu tipi borular da kendi aralarında, pozitif ve negatif projeksiyonlu borular olmak üzere ikiye ayrılır [47].

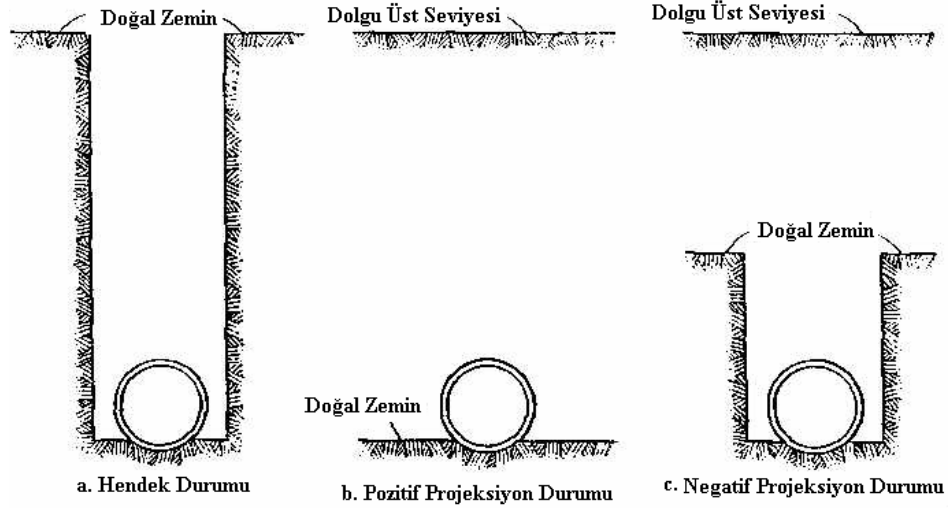
Hendek tipi borular, kısmen kendini tutabilen örselenmemiş zemin içinde kazılmış oldukça dar ve derin bir hendek içine yerleştirilen ve sonra geri dolguyla kaplanan boru türüdür. Kanalizasyon boruları, drenaj boruları, su ve gaz ana hatları bu tür borulara örnek olarak verilebilir.

Pozitif projeksiyonlu borular, doğal zemin yüzeyi seviyesinde yapılan sığ bir yatağa yerleştirilen ve daha sonra üzeri dolgu ile kaplanan borulardır. Ayrıca boru çapından üç kat veya daha fazla genişlikte olan hendek tipi borular da dolgu tipi boru olarak adlandırılır. Otoyol ve demiryolu menfezleri genellikle bu mantıkla yerleştirilir.

Negatif projeksiyonlu borular ise, nispeten dar ve sığ bir hendek içine boru üst seviyesi doğal zemin yüzeyinin altında kalacak şekilde yerleştirilen ve daha sonra üzeri dolgu ile örtülen borulardır. Bu yöntem, belirli bir dolgu yüksekliğinden kaynaklanan yükün pozitif projeksiyonlu boru üzerindeki yükten az olması nedeniyle otoyol ve demiryolu menfezlerinin yerleştirilmesinde sıkça kullanılan bir metottur. Bu metodun bir avantajı, hendek içinde, boru üst seviyesi ve doğal zemin yüzeyi arasında geri dolgu olarak gevşek, sıkıştırılmamış zemin kullanıldığı zaman yükü azaltmakta çok etkili olmasıdır. Şekil 4.1'de bu üç değişik boru yerleştirme tekniği görülmektedir [47].

4.3 Boruların Üzerindeki Dolgu Kalınlığı ve Hendek Derinlikleri

Boru hatları, zeminden veya trafik darbelerinden gelebilecek etkilerle kırılmaya karşı korunmak, don olayından etkilenmemek, düşük kotlu tesisat elemanlarının sularını tahliye etmelerine imkan vermek amacıyla yeterli derinliğe döşenmelidir. Zemin yüzeyini takip eden boru ve kanallar genellikle don derinliğinin altına döşenirler. Ancak, büyük boru ve kanalların üzerine gelen dış yükü azaltmak için boru veya kanalın sadece alt yarısı don derinliğinin altına döşenebilir.



Şekil 4. 1. Yerleştirme Şartlarına Göre Gömülü Boru Türleri [47].

Boruların üzerindeki toprak kaplama, normal şartlar altında 0.9 m'den, yoğun trafiğin geçtiği yerlerde ise 1.2-1.3 m'den az olmamalıdır. Ancak, bazı durumlarda üzerinden ağır vasıtaların geçtiği sokak ve caddelerde 1.50 m veya daha fazla üst örtü gerekli olabilir. 2.0 m'den fazla bir örtü tabakasıyla örtüldüklerinde ise, bu toprak yükünü taşıyabilecek kadar güçlü olup olmadıkları kontrol edilmelidir. Bu toprak yükünü taşıyamayacak durumdaki borular tamamen betonla sarılmalıdır [17, 20, 25, 35, 53].

Boruların zemin içindeki derinlikleri mahalli iklim şartlarına, binaların bodrum derinliklerine ve halen döşenmiş bulunan su, havagazı, elektrik ve P.T.T. tesislerinin derinliklerine bağlı olarak, içme suyu borusunun üst ana çizgisi arasındaki kot farkı en az 30 cm olmak üzere tesbit edilir. Bununla beraber, bu gibi tesisler bulunmayan yerlerde, boru üstünde en aşağı 1.0 m ve bu gibi tesisler inşa edilecek sokaklarda ise, boru üzerinde en aşağı 1.50 m toprak kalınlığı bulunması lazımdır. Bu asgari değerler için ayrıca don derinliği ve trafik darbeleri de göz önünde tutulmalıdır.

Su borusu atıksu kanalı ile kesiştiği zaman, yukarıda söz konusu edilen 30 cm'lik mesafe alındıktan başka, bu kısma tesadüf eden su borusu 25 cm kalınlığında ve eksenlerin kesişme noktasından itibaren her iki yönde ikişer metre uzunluğunda, beton gömlek içine alınacaktır. Atıksu borularının kesişme noktasından itibaren her iki yönde su sızdırmaz büz veya font boru tahvil edilecektir. Beton, betonarme ve asbestli çimento su boruları atıksu borusunu kestikleri takdirde, borunun her iki

tarafından beşer metrelik kısmı fonta tahvil edilerek yukarıda belirtilen tertibat alınacaktır.

Su borusu ve atıksu kanallarının dıştan dışa yatay mesafeleri 1.50-3.00 m ise atıksu kanalları büze tahvil edilir. Bu büzlerin üst ana çizgisi, su borusunun alt ana çizgisinden daha yüksekte olamaz. Boru güzergahı atıksu kanalları ile aynı istikamette olarak ve 1.50 m'den daha az bir mesafede boruyu takip ediyorsa, sokak genişliği müsait olduğu taktirde, güzergah tadil edilerek daha uzak bir mesafeye alınmalıdır. Bu imkan görünmüyorsa, borunun bu bölgede su sızdırmaz büz boruya tahvil edilmesi lazımdır. Bunun için boru başları 0.25 m kalınlığında 1.00 m uzunluğunda 300 dozlu kesif betonla kaplanır. Beton borunun üst ana çizgisi, su borusunun alt ana çizgisinden asgari 0.30 m aşağıda olmalıdır [35].

4.4 Hendek Sınırları

Boruya etkiyen geri dolgu yükü hendek genişliğine bağlıdır. Geri dolgu yükünü belirlemek için belirli bir hendek genişliği ve bu yükü taşıyabilecek bir boru mukavemeti seçilir. Eğer açılan hendeğin genişliği projedekinden büyükse boru aşırı yüklenebilir ve muhtemelen de yapısal olarak hasar görür. Geri dolgu yükleri ve boru mukavemetleri hendek genişliğinin fonksiyonu olduğundan, maksimum genişlikler genellikle planda ya da standart çizimlerde verilir. Maksimum hendek genişliğinin verilmediği durumlarda hendek, boru etrafındaki geri dolgunu yeterince sıkıştırılabilmesine müsade edecek şekilde mümkün olduğunca dar olmalıdır.

4.4.1 Hendek Kenarlarının Şekli

Kazı şekli, geri dolgunun boru üzerine etkittiği yükü önemli ölçüde etkiler. Boru hattının gömüldüğü hendekler, düşey ya da eğimli kenarlara sahip olabilir. Düşey kazılar daha az malzemenin uzaklaştırılmasını gerektirirken çoğu zaman desteklenme ihtiyacını da beraberinde getirir. Buna karşılık, geniş alanlarda hendek kenarları eğimli yapılarak destekleme ya da kuşaklama ihtiyacı ortadan kaldırılabilir [1].

4.4.2 Hendek Derinliği

Hendek derinliği, borunun don derinliğinin altında kalacağı şekilde hesaplanmalı ve inşaat sırasında projede belirtilen derinliklere uyulmalıdır. Don derinliği iklim ve zemin cinsine bağlı olarak değişse de, yol kaplaması üst yüzeyinden veya hendek

üstüne gelen tabii zemin kotundan boru üst seviyesine kadar hesaplanmak üzere, su boruları için en az 1.00 m, gaz boruları için en az 0.80 m olmalıdır. Telefon, su, gaz ve elektrik hatları gibi üzerinden geçilmesi mecburi olan yerlerde bu tesislerin derinliğine uyulabilir. Ancak donmayı önleyici tedbirlerin alınması gerekir [50].

4.4.3 Hendek Taban Genişliği

Dış çapı 200 mm'den küçük borular için hendek taban genişliği 0.60 m olmalıdır. Dış çapı 200 mm ile 1000 mm arasında olan borular için bu genişlik, borunun her iki yanından en az 0.20 m kalacak şekilde hesaplanmalıdır. Dış çapı 1000 mm'den büyük olan boruların her iki tarafında en az 0.30 m yer bırakılmış olmalıdır. Aynı hendek içine birden fazla boru konulduğunda iki boru arasındaki aralık en az 0.20 m olmalıdır [50].

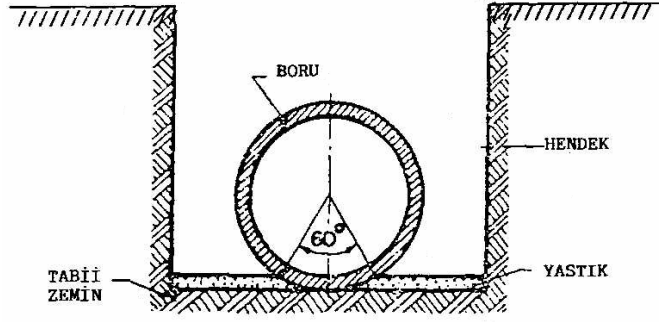
4.4.4 Hendek Şevleri

Derinliği 1.50 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 tabii zemin yüzeyini kestiği yerlerden başlayarak en az 0.60 m genişlikteki şeritler boru istifi, kazı toprağı vb. ile yüklenmemeli ve boş bırakılmalıdır [50].

4.4.5 Hendek Taban Şekli:

Hendek tabanının genişliği ve biçimi, boru yataklama cinsine ve gerekli çalışma hacmine göre belirlenir. Hendek tabanının doğal yapısının bozulması ve gevşetilmesi istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle araçların gidip gelmesi, fazla kazı yapılması, su ile yumuşama veya don etkisine maruz kalma sonucu hendek tabanının gevşemesine karşı gerekli tedbirler alınmalıdır. Alınan tüm önlemlere karşın kohezyonlu zeminlerde hendek tabanı gevşemiş ise, boru döşenmeden önce gevşeyen zemin kazılarak yerine kohezyonsuz zemin konulmalı ya da özel bir yataklama sistemi uygulanmalıdır [54].

Borular hendek tabanına tek noktadan veya bir çizgi boyunca oturacak şekilde yerleştirilmemelidir. Borunun hendek tabanına oturacağı kısım Şekil 4.2'de görüldüğü gibi yataklanmış olmalıdır. Projesinde daha büyük bir açı belirtilmemiş ise hendek tabanındaki yataklama açısı 60° olmalıdır.



Şekil 4.2. Boruların Hendek Tabanına Oturtulması [50].

Hendek tabanı, boru boyu boyunca tabana oturacak şekilde kazılıp tesviye edilmelidir. Gerekli hallerde boru ekleme yerlerinde derinleştirme yapılabilir. Hendek tabanında, projede verilenler dışında eğim ve yön değişimi bulunmamalıdır. Kazı sırasında hendek tabanında, bitkisel toprak, artık malzeme ve cüruf gibi taşıma gücü zayıf olan zemine rastlanırsa bu zayıf malzemeler çıkarılmalı, yerine uygun dolgu malzemesi konularak sıkıştırılmalıdır.

4.5 Hendeklerin Doldurulması

Hendek içine konulmuş boruların her iki yanı tabandan başlayarak yarı seviyesine kadar içinde boruyu ve koruyucu kaplamayı zedeleyecek ölçüde iri ve sert maddeler bulunmayan bir malzeme ile doldurularak sıkıştırılmalıdır. Dolgu tabakalarının kalınlığı 0.10 m'yi geçmemelidir. İki yana konulan dolgu malzemesi kotları arasındaki fark, bir tabaka kalınlığından fazla olmamalıdır.

Borunun üst yarısı aynı malzeme ile bu kez 0.20 m'lik tabakalar halinde sıkıştırılmalı ve bu şekilde yapılan doldurma boru üst seviyesinden en az 0.30 m yukarıya kadar sürdürülmelidir.

Hendeğin doldurulması ve sıkıştırılması sırasında boru kaplamasının zedelenmemesine dikkat edilmelidir. Boru üst seviyesi üzerindeki dolgu kalınlığının 1.00 m'den az olduğu yerlerden ağır taşıt araçları ve inşaat makinaları geçirilmemelidir [50].

4.6 Yataklama

Birçok durumda borular, yapısal olarak kendi başlarına yalnızca üzerlerindeki jeolojik yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanmışlardır. Bu durumlarda, borunun alt 1/3 ya da 1/4'ünde destek sağlamak amacıyla, yataklama ya da borunun dış hatlarına

uyacak şekilde yapılan hendek tabanı şekillendirme işlemi, borunun ezilip kırılmasını önlemek açısından çok önemlidir [1, 27].

Yataklama sırasında bütün iri taşların yataktan kaldırılmasına ve hendek içinde sert kaya bantları bulunmamasına dikkat edilmelidir. Genellikle 75 mm boyutundan büyük taşlar, borunun yataklanacağı hendeğin merkez hattı boyunca hendek genişliğinin üçte biri derinliğe kadar kaldırılmalıdır [52].

Boru yükü belirlendikten sonra belirli bir yerleşim şekli için, boru tasarımındaki ikinci adım yataklama faktörünü belirlemektir. Yataklama faktörü gömülü borunun destek mukavemeti ile borunun üç mesnetli dayanma deneyindeki mukavemeti arasındaki orandır. Yataklama faktörü, yataklama alanını genişliği, boru ve yataklama malzemesi arasındaki temasın kalitesi, boruya etkiyen destekleyici yanal basıncın büyüklüğü ve yanal basıncın etkidiği alan gibi bir dizi koşula bağlıdır [45].

4.6.1 Müsaade Edilmeyen Yataklama:

Temelin, boru tabanının şeklini alması ya da boru etrafındaki veya altındaki boşlukların sıkıştırılmış granüler malzemeye doldurulması için fazla özen gösterilmeden yapılan bir yataklama metodudur (Şekil 4.3) [27, 33, 47].

4.6.2 Sıradan yataklama:

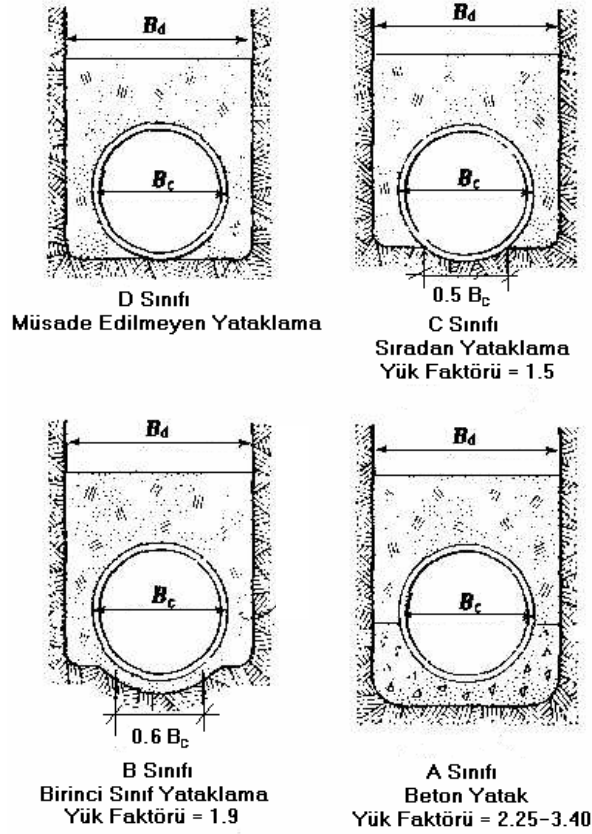
Borunun, çapının en az % 50'si kadar bir genişlikte olan boru tabanı şeklinin alan granüler bir temel içine yatakladığı bir yataklama yöntemidir. Bu yöntemde, borunun geri kalan kısmı boru üst noktasından en az 15 cm yukarıya kadar boru altında ve çevresindeki tüm boşlukları tamamen dolduracak şekilde yerleştirilen ve sıkıştırılan granüler bir malzemeye sarılmalıdır (Şekil 4.3) [27, 33, 47, 51].

4.6.3 Birinci Sınıf Yataklama:

Borunun, boru alt kısmının şekline uyacak biçimde, çapının en az % 60'ı genişliğinde dikkatlice hazırlanmış toprak bir temel içindeki ince granüler malzeme üzerine yatakladığı ve borunun geri kalan kısmının, boru üst seviyesinden en az 30 cm yukarıya kadar, boru altında ve kenarlarındaki tüm boşlukları dolduracak şekilde, mümkün olduğunca 15 cm kalınlığı geçmeyecek tabakalar halinde dikkatlice yerleştirilmiş ve iyice sıkıştırılmış granüler malzeme ile sarıldığı bir tür hendek borusu yataklama yöntemidir (Şekil 4.3) [27, 33, 47, 51].

4.6.4 Beton Gömlek İçine Yataklama:

Boru tabanının, boru altında en az iç çapın $\frac{1}{4}$ katı kalınlığa eşit ve boru kenerlarında yukarı doğru dış çapın $\frac{1}{4}$ 'üne eşit düşey bir mesafeye kadar uzanan beton yatak içine yerleştirildiği bir tür yataklama metodudur (Şekil 4.3) [27, 33, 47, 51].



Şekil 4.3. Hendek Tipi Borularda Yataklama Sınıfları [47].

Boru yerleştirme uygulamasında yük ve reaksiyon dağılımını ve yanal basınç durumunu etkileyen çok çeşitli yataklama koşulları vardır ve yalnızca yerleştirme şartlarını değiştirerek belirli bir boru için geniş bir destek mukavemeti aralığı elde etmek mümkündür. Yataklama koşullarını sınıflandırırken ve her sınıf için bir yük faktörü tanımlanır. Böylece, borunun üç mesnetli dayanma mukavemetiyle çarpıldığında bu sınıflandırmaya göre yerleştirilmiş borular için destek mukavemeti elde edilir. Bu yataklama sınıfları için kullanılan yük faktörleri ile ilgili yapılan deneylerden aşağıdaki değerler bulunmuştur:

Müsade edilmeyen yataklama (D Sınıfı) : 1.1

Sıradan yataklama (C Sınıfı) : 1.5

Birinci-Sınıf yataklama (B Sınıfı) : 1.9

Beton beşik içine yataklama (A Sınıfı) : 2.2-3.4

Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi, yeraltı yapılarının yapısal tasarımında da bir güvenlik sayısının kullanılması gereklidir. Rijit borular için bu ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\text{Tasarım destek mukavemeti} = \frac{(3 \text{ Mesnetli Dayanma Mukavemeti}) * (\text{Yük Faktörü})}{\text{Güvenlik sayısı}} \quad (4.1)$$

Uygulamada kullanılan güvenlik faktörleri çok çeşitlidir. Çelik donatısı olmayan bir boru numunesi için tavsiye edilen güvenlik faktörü değerleri 1.2-1.5 arasında değişir. Betonarme borularda tavsiye edilen güvenlik faktörü değeri 1.0'dir [47].

4.7 Yataklama Malzemeleri

4.7.1 Tabii Zeminlerde Yataklama

Kumlu ya da ince çakıllı zeminlerde boru döşenmeden önce hendek tabanında borunun alt kısmının şeklini alacak bir çukur açılarak boru bu çukurun içinde doğal zemine iyice oturtulur. Her çaptaki asbestli çimento, font, plastik ve çelik borularla, 600mm'ye kadar anma çaplı beton, betonarme, basınçlı betonarme ve sırlı seramik boru hatlarında hendek tabanı düz açılabilir. Borular bu düz hendek tabanına oturtulduktan sonra homojen olarak yük dağıtılacak biçimde boru hatları kohezyonsuz zeminlere iyice sıkıştırılarak yataklanır.

Çakıllı ve taşlı zeminlerde, elle kazılamayan ve kayalık zeminlerde boruların doğrudan hendek tabanına oturtulması suretiyle döşenmesine izin verilmez. Doğrudan yataklama yapılmayan hallerde taban daha derin kazılarak kum, ince çakıl ya da beton ile yataklama yapılır [53, 54].

4.7.2 Kum ve İnce Çakılla Yataklama

Hendek tabanı sert zeminde olduğunda, doğal zemini şekillendirerek boru için uygun bir yatak yapılmalıdır. Böylece borunun alt üçte biri zeminle temas halinde bulunacaktır. Eğer hendek tabanında kaya varsa, kazı boru tabanının altından yeterli derinliğe kadar sürdürülmelidir. Böylece boruyu desteklemek için kum yatak veya en ince bölümü en az 10 cm kalınlığında bir beton yatak kullanılabilir. Kum veya beton iyice sıkıştırılmış olmalı ve en azından boru çevresinin 1/3'üne kadar uzanmalıdır.

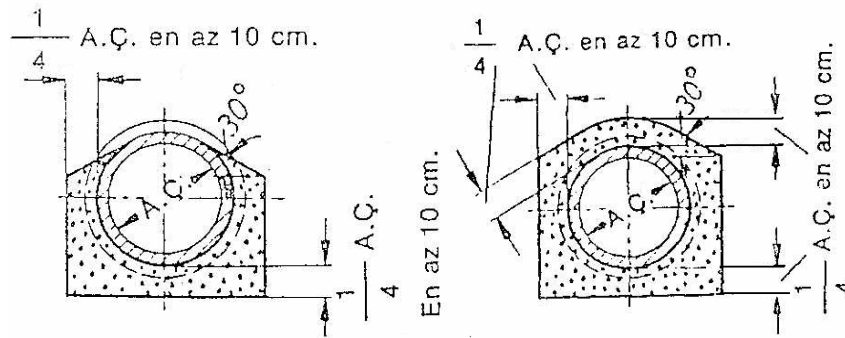
4.7.3 Beton Yatak

Bazı durumlarda zemin, boru için tatmin edici bir yataklanma sağlayamayacak kadar yumuşaktır. Bu durumda, boru için belirlenen derinlikten bir miktar daha alta kadar kazı yapmak ve bir beton yatak ya da herhangi başka bir malzemeden uygun bir temel yapmak gerekir. Zeminin boruyu aşırı oturma olmadan destekleyebilecek kadar sıkı olması, ancak kazı sırasında stabil olmaması durumunda, hendek tabanından 100-125 mm zeminin kaldırılması ve ince çakılla yer değiştirilmesi yeterli olabilir. Ancak, hendek tabanındaki zemin cinsi kum ve ince çakılla yataklamaya elverişli değilse, hendek tabanı fazla eğimli ise, ya da drenaj etkisi ile kum danelerinin sürüklenmesi söz konusu ise bu gibi durumlarda boruların altına boru hattı boyunca beton yatak yapılır [53, 27, 47, 52].

Beton yatağın kalınlığı $5 \text{ cm} + 1/10$ anma çapı kadar, fakat en az 10 cm olmalı ve beton yataklama için betonun 28 günlük küp basınç mukavemeti minimum 20 N/mm^2 olmalıdır. Ayrıca, yatak betonu içine donatı konulması da tavsiye edilmektedir [53].

4.7.4 Beton Gömlek

Boru hattının taşıma gücünün artırılması için, borular beton gömlek içine alınabilirler. Beton gömlekler Şekil 4.4'te görüldüğü şekilde yapılır. Beton gömlek içine yataklama metodunda yük faktörleri gömleğin tasarımına ve beton kalitesine bağlıdır. Beton yatak kullanımının birçok faydası vardır. Örneğin, beton yalnızca boruyu desteklemek, oturmaları, aşırı yüklemelere ve trafik yüklerine karşı korumakla kalmaz, aynı zamanda aşındırıcı zeminlerde korozyona karşı da korur [27, 47, 52, 53].



Şekil 4.4. Beton Gömlek [53].

4.8 Geri Dolgu

Bir boru hattı yerleştirildikten sonra, bir miktar toprakla kaplanmalıdır. Dikkatli bir biçimde uygulanan geri dolgu, yeni yerleştirilmiş bir boru hattının yer değiştirmelerini, değişken gerilmeler yüzünden meydana gelen yüzey oturmalarını ve çevredeki yapı ve temellere verebileceği zararları önlemek açısından çok önemlidir. Geri dolgu, borunun her yanında düzgün şekilde yükselmeli ve sıkıştırma işlemi de geri dolgunun yerleşimi süresince sürekli yapılmalıdır.

Borular etrafında geri dolgu olarak kullanılacak malzeme seçiminde dikkatli olmak gerekir. Koruyucu örtüyü delmeleri nedeniyle kayalar geri dolguda problem yaratabilir. Bu nedenle, geri dolgu malzemesi olarak içinde kaya ve iri taş ihtiva etmeyen zeminler seçilmelidir. Aksi taktirde, boru örtüsü kalın olmalı ya da başka bir şekilde korunmalıdır. Basınç birikmesinden kurtulmak için geri dolgu üniform olarak yerleştirilmeli ve sıkıştırılmalıdır. Borunun üzeri en az 0.6 m dolgu ile kaplanana kadar, malzeme ince üniform tabakalar halinde yerleştirilmeli ve boru etrafında her tabaka sıkıştırılmalıdır. Sıkıştırma işlemi sırasında boruya zarar verilmemesine ve kullanılan malzemenin borunun her yanında aynı seviyede yerleştirilmesine dikkat edilmelidir. Sıkıştırma işiyle görevli işçiler dışında hiç kimse, boru en az 0.6 m geri dolgu malzemesi ile kaplanana kadar tamamlanmış boru üzerinde yürümemelidir [1, 27, 34, 16].

4.8.1 Geri Dolgu Olarak Kullanılabilecek Malzemeler

Zemin türü, gerekli yoğunluk, gömülme derinliği, boru rijitliği ve boru mukavemeti gibi parametrelere dayanarak çeşitli geri dolgu malzemeleri kullanılabilir. Aşağıda belirtilen malzemelerin, en az güç harcanarak istenilen yoğunluğa ulaşılabilecek malzemeler olduğu belirtilmektedir.

GW, GP, SW, SP, GW-GP ve SW-SP gibi %5'ten az ince dane içeren iri daneli zeminlerde en büyük yoğunluk sıkıştırma, suya doyurma veya vibrasyonla elde edilir. İç vibratörler kullanılırsa, geri dolguların yüksekliği vibratörün penetrasyon derinliğiyle sınırlanmalıdır. Yüzey vibratörleri kullanılırsa, geri dolgu 150–300 mm kalınlıkta yerleştirilmelidir. Bu malzemeler ayrıca, istenilen yoğunluk elde edilene kadar el ile veya diğer yöntemlerle sıkıştırılmalıdır.

Temiz ve %5-12 arasında ince dane içeren iri daneli zeminler arasındaki sınırdaki bulunan GW-GM, SW-SM, GW-GC, SW-SC, GP-GM, SP-SM, GP-GC ve SP-SC

gibi iri daneli zeminler, istenilen yoğunluğa ulaşınca kadar el ile veya mekanik sıkıştırma ile veya herhangi bir metotla sıkıştırılmalıdır.

%12'den fazla ince dane içeren GM, GC, SM, SC gibi iri daneli zeminler ve bu gruptaki herhangi bir sınır durumu (GM-SM) el veya mekanik sıkıştırıcılarla sıkıştırılmalıdır. Geri dolgu 100-150 mm yükseklikte yerleştirilmelidir. MH, CH, ML, CL, SC-CL, SM-ML ve ML-CL gibi ince daneli zeminler 100-150 mm kalınlıkta olacak şekilde el ile veya mekanik sıkıştırıcılarla sıkıştırılmalıdır [34].

4.8.2 Geri Dolgu Malzemelerini Sıkıştırmak İçin Kullanılan Yöntemler

Hendek içerisindeki geri dolguları sıkıştırmak için değişik aletler kullanılır. Hendek tabanında ve boru etrafında küçük vibratörler ve el tokmakları yardımıyla zemin yerine yerleştirilir. Dolgu, borunun en üst kısmına geldiğinde küçük vibratörler kullanılabilir. Dolgu, boru üzerinde 30-60 cm'e ulaştıktan sonra, plastik lastikli silindirler, küçük traktörler, veya vibrasyonlu silindirler kullanmak sık karşılaşılan bir uygulamadır. Dolgu, yüzeyin 60-90 cm kadar üzerine ulaştığında ise, genellikle keçiayaklı silindirler ya da tekerlekli silindirler kullanılır. Dik hendeklerde dolgunun alt kısmı küçük el aletleriyle sıkıştırılır ve yalnızca üst kısımdaki 60-90 cm dolgu geniş mekanik aletlerle sıkıştırılabilir [1].

Dolgu zeminini hendek tabanında ıslatmak ya da şekillendirmek zordur. Bu nedenle, eğer zeminin kurutulması veya ıslatılması ya da başka bir işlem yapılması gerekiyorsa, bu değişiklikler en üst seviyede, malzeme hendeğin içine boşaltılmadan önce yapılmalıdır [1].

Borularda geri dolgu, borunun her tarafında boru taban seviyesine kadar düzgün tabakalar halinde yerleştirilmeli ve dikkatlice sıkıştırılmalıdır. Boru etrafındaki ve boru tacının 150 mm üzerindeki geri dolgu malzemesi boruya zarar verebilecek büyük sivri taşlardan arındırılmış olmalıdır. Hendek içindeki malzeme kazılırken, mümkünse bu malzemenin boru etrafında kullanılmaması sağlanmalıdır. Bu malzeme, boru uygun biçimde yumuşak malzemeyle kaplandıktan sonra hendeği yeniden doldurmak için kullanılabilir [52].

Boru hatları, oturmasına müsaade edilmeyen bina temellerinin ya da diğer yapıların altından geçtiğinde, geri dolgular 150-200 mm kalınlığında ince tabakalar halinde

yerleştirilir ve her tabaka mekanik aletlerle sıkıştırılır. Bu durumlarda, kumlu zeminlerde bile mekanik aletler gereklidir [1].

Boru 0.6 m derinliğe kadar kaplandıktan sonra, doldurulan malzeme ıslatma ya da sulama yoluyla konsolide edilebilir. Sulama, geri dolgunun yerleştirilmesi sırasında hendeğin içinde su kullanılması işlemidir. Bu, fazla onaylanan bir işlem değildir. Yıllar geçtikçe bu tür geri dolguların genellikle oturmaya devam ettiği veya çöktüğü gözlenmektedir. Sulama özellikle boruların otoyolların altına döşendikleri yerlerde yolların bozulmasına neden olmaktadır. Sadece çakıl veya kumda sulama uygulanır ve yalnızca gerekli olan minimum su miktarı kullanılmalıdır.

Sulamanın sıkıştırma gereğini ortadan kaldırdığı iddia edilmesine rağmen, sıkıştırma ile sulamadan elde edilenden daha sıkı bir dolgu elde edilir. Hiçbir durumda geri dolgunun ilk 0.6 m'lik kısmı dikkatlice yerleştirilmeden sulamaya başvurulmamalıdır, çünkü genellikle sulama boru yüklerini büyük ölçüde artırır ve boruları çatlatır. Boru altındaki malzemenin örselenmesini ve boru üzerindeki aşırı basıncı önlemek için aşırı miktarda su kullanılmasından kaçınılmalıdır [1, 16, 27].

BÖLÜM 5: HENDEK AÇMADAN UYGULANAN BORU DÖŞEME YÖNTEMLERİ

Boru döşenmesi, kazı hattı üzerinde bulunan yapılarda problemlere yol açan zemin hareketlerine neden olabilir. Bu yapılardan büyük bir kısmı ya zemin yüzeyinde ya da yüzeye yakın yerlerde bulunur. Zeminde meydana gelen oturmaların büyüklüğü, zemin türü, mukavemeti, inşaat tekniği ve zamanlamaya bağlıdır. Bu tür tehlikeleri önleyebilmek amacıyla geoteknik mühendisleri muhtemel hareketlerin büyüklüğünü ve dağılımını önceden tahmin edebilmeli ve bu hareketlerin müsaade edilebilir sınırlar dahilinde olmasını sağlamalıdır [40].

Eğer boru, 6 m'den daha derine yerleştirilecekse, kendini tutabilen zemin dışında, hendek açmak kullanışlı olmaz. Sığ yerlerde hem hendek metodu, hem de hendek açmadan yapılan yerleştirme yöntemleri kullanılabilir. Hangi yöntemin seçileceğine etki eden bir faktör, muhtemel zemin hareketleridir [40].

Günümüzde yer altı borularının yerleştirilmesi ve tünel açılması için çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Son zamanlarda boru hatlarını zemine yerleştirmek amacıyla bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar:

1. Boru sürme (Pipe Jacking)
2. Mikrotünel
3. Boru patlatma (Pipe Bursting) yöntemleridir.

5.1 Pipe-Jacking

Dünyanın birçok yerinde çapları 150mm-3000mm arasında olan ve çeşitli zeminlerden geçen 1.0 km'den uzun tünellerde yaygın olarak kullanılan bir çeşit tünel açma metottur. Otoyol, demiryolu, kanal, bina ve havaalanlarının altında ve şehirlerde açık kazı yapılarak boru döşenmesinin müsaade edilemeyen yüzey bozulmalarına neden olacağı yerlerde başarıyla uygulanmaktadır. Bu yöntemle genellikle dairesel kesitler açılmakla birlikte, dikdörtgen kesitler de açılabilir. Pipe-jacking yönteminde takip edilen kazı metodu geleneksel tünel açma yöntemine benzer. Bu yöntemde, kalkan içinde kazı sürerken tünel kaplaması hidrolik krikolar

vasıtasıyla ileri sürülür. Bu sayede, tünel kazılırken, su geçirmez ve tamamlanmış bir boru hattı elde edilmiş olur [24, 56].

Zeminlerin kıvamı, pipe-jacking'in başarısını etkileyen önemli bir faktördür. Zemin mukavemetinde değişiklikler ve karışık kaya ve zeminin mevcudiyeti ilerlemeyi etkiler. Kil içindeki önemli miktarda iri taş ve çakıllar ve buna benzer malzemeler, pipe-jacking işlemlerinde küçük çaplı kalkanlarda çok büyük kazı problemleri ortaya çıkarabilir [56].

Pipe-jacking yönteminin en genel uygulamaları; yeni kanalizasyon şebekesi inşaatı, kanalizasyonların şebekelerinin yenilenmesi ve yeniden kaplanması, gaz, su ve petrol boru hatları, elektrik ve telekomünikasyon servisleri, menfezeler, yaya alt geçitleri, yol ve köprü ayaklarının inşasıdır [56].

Yapının mukavemeti, su geçirmez özelliklerin sağlanması, daha az ek yeri olması, sistemin fleksibilitesi, oturma riskinin az olması, ikinci bir kaplamaya gerek olmaması, iyi akım özellikleri göstermesi, çevreye daha az hasar vermesi ve minimum yüzeysel bozulmaya sebep olması gibi nedenlerle pipe-jacking tekniği geleneksel tünel açma yöntemi ve diğer boru hattı yerleştirme tekniklerine göre daha avantajlıdır [24, 56]:

5.2 Mikrotünel

Tam otomatik kazı işlemi kullanılarak yapılan, içine insanların girmediği boru sürme yöntemine verilen isimdir. Mikrotünellerde boru çapı genellikle 1000mm'nin altındadır [24, 29, 56].

5.3 Boru patlatma yöntemi

Genellikle camlı kil ya da dökme demir gibi gevrek malzemelerden yapılmış, hasarlı boruların yerine yeni boruları yerleştirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemle, hava basıncı yardımıyla yeni boru eski borunu içine çakılır, eski boruyu patlatır ve yeni bir boru hattı oluşturur [56].

BÖLÜM 6: YER HAREKETLERİNİN GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Sadece ideal durumlarda bir boru hattı yalnızca düşey toprak yüküne maruz kalır. Üniform olmayan eğilme, boru hattının herhangi iki noktası arasındaki farklı oturma, deprem veya don olayından kaynaklanan kabarma gibi yer hareketleri de gömülü boruların zemin içindeki davranışlarını önemli derecede etkiler.

6.1 Üniform Olmayan Eğilme

Üniform olmayan eğilme; sabit olmayan temel malzemesi, fazla kazı sebebiyle eşit olmayan oturma, üniform olmayan kompaksiyon, ve erozyon veya sızıntı yapan bir borunun zeminde neden olduğu zayıflama sayesinde ortaya çıkabilir.

6.2 Farklı Oturma

Farklı oturmalar, trafik yükleri, zeminin ısı ve nem değişimleri ve hendek veya tünel açma gibi boru hattına komşu kazılarla bağlantılı hareketler nedeniyle meydana gelir. Borunun rijit bir şekilde bağlandığı baca veya diğer yapılarda meydana gelen farklı oturmalar boruya büyük eğilme momentleri etkimesine neden olur. Bu momentler, yapı veya borular birbirlerine göre yatay hareket yaptığında oluşur. Tasarım ve inşaat aşamasında farklı oturmanın ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi için uygun yataklama ve temel malzemesi seçilmelidir.

6.3 Zeminin Su Muhtevsındaki Değişme

Belli zemin türleri (çoğunlukla şişme özelliği gösteren killi), ortamdaki su miktarından etkilenir. Bu tür zeminler su muhtevsındaki değişikliklere bağlı olarak mevsimsel kabarma ve çökmeye maruz kalabildiklerinden boru döşenmesine uygun değildirler. Bu hareketler oldukça küçük olmasına rağmen borunun performansını kötü yönde etkileyebilecek mertebededir. Rijit bir boru için bu tür kötü etkileri azaltmak amacıyla, fleksibl bağlantılar kullanılmalı ve boru boyları kısaltılmalıdır. Fleksibl borularda, borunun doğal fleksibilitesi yapısal hasara meydan vermeden

borunun bu hareketlere uymasına izin verir. Bu durumda boruda hem boyuna, hem de enine yönde bükülebilirlik önemlidir.

6.4 Don Olayı Sonucu Oluşan Yükler

Birkaç saat boyunca dondurucu hava koşulları devam ettiğinde, sığ zemin tabakaları içindeki sular donduğundan buz tabakaları veya buz kristalleri oluşur. Buz tabakaları, hacim genişlemesine bağlı olarak ortaya çıkan kabarmadan dolayı basınç meydana getirir. Kabarma basıncı gömülü borular üzerindeki düşey yükü önemli derecede artırır.

6.5 Deprem

Depremin üst yapılara verdiği hasarlar genellikle gözle görülebilir mertebededir ve bu yapılarda meydana gelen hasarlar insanların hayatlarını kaybetmelerine veya yaralanmalarına neden olabilir. Bu nedenle, birçok durumda üst yapılara daha fazla özen gösterilir. Ancak, genellikle boru hatları gibi yer altı yapılarının depreme karşı yer üstünde inşa edilen binalardan daha kuvvetli olduğu düşünülmesine rağmen, alt yapılar da depremlerden önemli hasarlar görmektedir. Doğalgaz ve petrol boru hatları, su ve kanalizasyon hatları, tüneller, elektrik ve iletişim hatları, günlük hayatımızda çok büyük önemi olan yapılardır ve bu yapıların önemli bir kısmı yer altında bulunmaktadır. Bu yer altı yapılarının bir süre için bile kullanım dışı kalması günlük yaşantımızı olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, meydana gelen hasarlar yangınla mücadelenin engellenmesi, gerekli enerji iletiminin sağlanamaması, taşımacılığın yapılamaması ve su borularının kırılması sonucu su baskınlarının meydana gelmesi gibi nedenlerle etkisini daha da artırır [22, 23, 43].

Geçmiş depremlerden edinilen tecrübelerle dayanarak, özellikle zemin koşullarında keskin değişimlerin gözlemlendiği yerlerde, sıvılaşmış veya zayıf zeminlerde, boru hatlarının diğer yapılarla bağlandığı yerlerde, büyük yer hareketlerinin meydana geldiği fay zonlarında, zemin kayma düzlemleri veya geçiş bölgeleri gibi borunun yapıya girdiği yerlerde yer altı boru hatlarının büyük hasar gördüğü gözlenmiştir. Bununla beraber, çoğu gömülü boru depremden hasar görmeden kurtulabilir. Bükülebilir özellikle bağlantıları olan yüksek fleksibilite özelliği gösteren boru malzemesi, borunun yer hareketlerine göçmeden karşı koyabilmesini sağlar [22, 43].

Gömülü boru hatlarının sismik davranışı, birçok açıdan diğer yer üstü yapıların davranışından farklıdır. Örneğin, gömülü borular genellikle çok büyük alanları kaplamaları nedeniyle çeşitli geoteknik problemlere maruz kalırlar. Ayrıca, üst yapıların tasarımını etkileyen en önemli faktör olan eylemsizlik kuvvetleri, gömülü borularda çevre zemin tarafından sınırlandırılır. Birçok üst yapı zemin hareketlerine uygun biçimde projelendirilmesine rağmen, uzun ve sürekli sistemler olan boru hatları, farklı istasyonlar arasındaki faz farkı ve boru hattı boyunca zemin özelliklerinde gözlenen farklılıklar nedeniyle zemin hareketlerine uygun değildir. Bir üst yapıda meydana gelen hasarlar sadece o yapıyla sınırlıyken, bir boru hattının belirli bir yerindeki hasarlar, sistemin diğer parçalarını da etkiler [23, 38].

Deprem sonucu oluşan dalga yayılımına bağlı zemin hareketi, fay hareketi, sıvılaşma ve toprak kayması gibi etkenler önemli hasarlara yol açar [22, 23, 31, 38].

1979 yılında İngiltere’de yapılan bir çalışmaya göre, zemin hareketlerinin gömülü borular üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla aşağıdaki noktalar göz önüne alınmalıdır:

1. Zemin hareketinin türü,
2. Zemin hareketinin büyüklüğü,
3. Boru hattının zemin hareketiyle etkileşimi,
4. Boruların deformasyon özelliği ve mukavemeti,
5. Boru bağlantı elemanlarının deformasyon özelliği ve mukavemeti,
6. Boruların etrafındaki zeminin deformasyon özelliği ve mukavemeti.

6.5.1 Depremde Hasar Görmeye Eğilimli alanlar ve Karşılaşılan Hasar Türleri:

Yapılan çalışmalarda, depremde hasar görmeye eğilimli alanlar:

Zemin koşulları açısından; zayıf zeminli alanlar, ıslah edilen arsalar, gevşek kumlu zeminler, alüvyal ve dilüvyal zemin arasında sınırda bulunan zeminler, boruların gömüldüğü zeminde keskin topoğrafik değişikliklerin meydana geldiği yerler olarak belirlenmiştir.

Yerleştirme koşulları açısından ise, ana boru ve yan boruların birleşim yerleri ve ana boru ve bacaların birleşim yerleri, yapılarla birleşim yerleri, nispeten yüzeysel bir seviyeye gömülen boru hatları olarak sınıflandırılabilir .

6.5.2 Deprem Yıkıcı Etkilerinden Korunmak Amacıyla Alınması Gereken Tedbirler

Zayıf zemine, ıslah edilmiş arazilere, zemin özelliklerinde keskin değişikliklerin görüldüğü alanlar ve sıvılaşmaya eğilimli zeminlerde gömülü boruların deprem mukavemetini artırmak amacıyla, fleksibl, eğilme mukavemeti, kabarma ve büzülme yeteneği ve boru birleşim yerlerinde ayrılmaya karşı mukavemeti yüksek malzemeler kullanılmalıdır [22].

Fleksibl bir borunun avantajı, deforme olma kabiliyeti ve basınç konsantrasyonlarından kaçabilme yeteneğidir. Bu tür bağlantıların kullanımı, borunun bu kuvvetlere dayanma gücünü artırır ve göçme riskini azaltır. Bu avantajların iyi bir mühendislik bilgisi ve uygun yerleştirme koşulları ile birleşmesi sonucunda fleksibl boruların göçmesine neden olan eksenel eğilme ortadan kaldırılabılır [34].

6.5.3 Deprem Bölgelerinden Geçen Boru Hatlarında Kullanılması Tavsiye Edilen Boru Malzemeleri

Hangi tür boru malzemelerinin depremden daha fazla etkilendiğini belirlemek amacıyla, Tablo 6.1’de 1995 yılı Ocak ayında Japonya’da meydana gelen depremde Kobe Nishinamiyo ve Ashiya şehirlerindeki çeşitli gömülü boru malzemelerinde meydana gelen hasarlar verilmiştir.

Tablo 6.1. Kobe Nishinamiyo ve Ashiya Şehirlerinde Kullanılan Farklı Boru Malzemeleri İçin Hasar Oranları [43].

Boru Türü	Hasar Oranı (Hasar/km)
PE	0.000
Çelik	0.437
Sünek Demir	0.488
PVC	1.430
Dökme Demir	1.508
Asbestli Çimento	1.782

Yukarıdaki tablodan görüldüğü üzere, su ve gaz borusu olarak PE borular diğer boru malzemeleriyle karşılaştırıldığında deprem kuvvetlerine karşı daha iyi performans

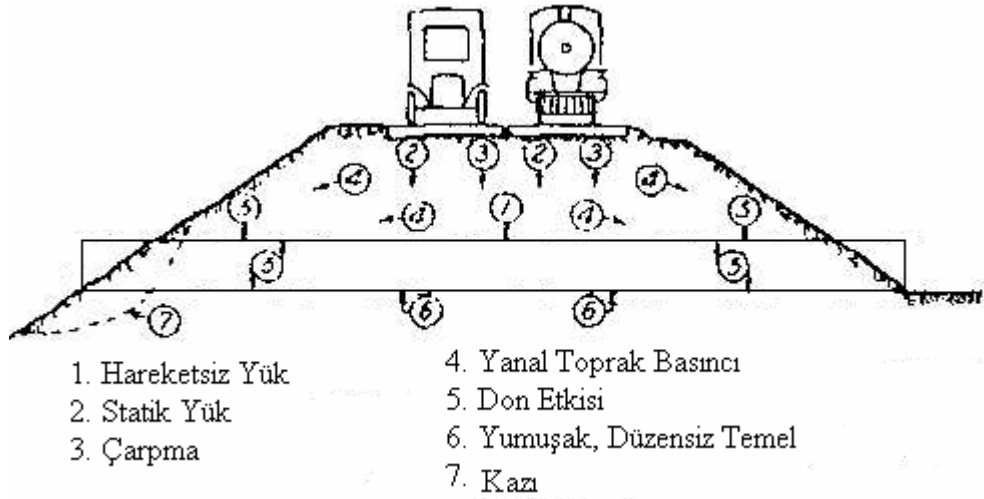
göstermektedir. Bu nedenle, deprem bölgelerinde polietilen, sünek demir ve cam lifi donatılı plastik borular gibi fleksibl boruların kullanılması tavsiye edilmektedir.

Buna karşılık, asbestli çimento boruların deprem bölgelerinde kullanılabilecek en kötü boru malzemesi olduğu görülmektedir. Asbestli çimento malzemeler kırılgandır, yer değiştirmelere, farklı oturmalara va deprem kuvvetelerine karşı savunmasızdır. Ayrıca, asbest lifleri (fibre) solunduğu taktirde kanserojen etki meydana getirir ve inşaatta çalışan işçiler, oluşan çatlaklar ve onların tamiri sırasında bu kanserojen malzemeyi soluma riskiyle karşılaşır. Bu nedenlerden dolayı asbestli çimento boruların özellikle deprem bölgelerinde kullanılması tavsiye edilmez [43].

BÖLÜM 7: GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNE ETKİYEN YÜKLER

7.1 Giriş

Gömülü borular iç ve dış basınçların etkisi altında çalışır. Bu nedenle, iç basınç, boru içindeki akışkanın hareketindeki değişiklikler, dış basınçlar ve ısı değişimleri nedeniyle meydana gelen gerilmelere karşı koyabilecek şekilde tasarlanmalıdırlar. İç basınçlar; iç sıvı basıncı, ve su darbesinden meydana gelir. Dış basınçlar ise, boru üzerindeki geri dolgu ağırlığı, boru ve bileşenlerinin kendi ağırlıkları ve trafik yükleri nedeniyle meydana gelir (Şekil 7.1). Ayrıca, dolgu yüksekliği, boru üzerinde ve etrafındaki zeminin yapısı ve yoğunluğu, hendek genişliği ve derinliği, borunun yük altındaki deformasyonu ve inşaat yöntemleri de boruya etkiyen dış yükler üzerinde büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle, gömülü borulara etkiyen dış yükleri hesaplarken boru ile yan dolgunun rölatif rijitliği, dolgu yüksekliği, yükün cinsi, yerleştirme şartları, boru çapı, borunun şekli ve malzeme özelliklerini dikkate almak gerekir [6, 33, 34, 36, 54].



Şekil 7.1. Gömülü borular üzerindeki yükler ve basınçlar [16].

Borular genellikle fleksibl olarak adlandırılan ince duvarlı metal veya plastik borular ya da rijit olarak adlandırılan kalın duvarlı betonarme borular olarak sınıflandırılabilir. Gömülü bir borunun üzerindeki toprak yükü ve trafik nedeniyle oluşan yüklere karşı yapısal davranışı, borunun bir halka olarak deforme olabilme

kabiliyetine ve boru etrafındaki geri dolgu malzemesinin rijitliğine bağlıdır. Yük altında, kalın duvarlı boru rijit bir halka gibi davranır ve zemin-boru ara yüzeyine dik doğrultuda ölçülen, boru tabanına ve tacına yakın yerlerde yüksek toprak basınçları, borunun orta hattına yakın yerlerde ise düşük toprak basınçları meydana gelir. Fleksibl borular ise yatay yönde, boru kenarındaki geri dolguya doğru deforme olmaya çalışır. Kenarlardaki dış yönlü hareket geri dolguda pasif basınç meydana getirir ve bu basınç borunun yük taşıma kabiliyetini artırır. Bu nedenle fleksibl boru etrafındaki zemin basınçları, rijit boru etrafındakilerden daha üniform dağılır [20, 36, 57].

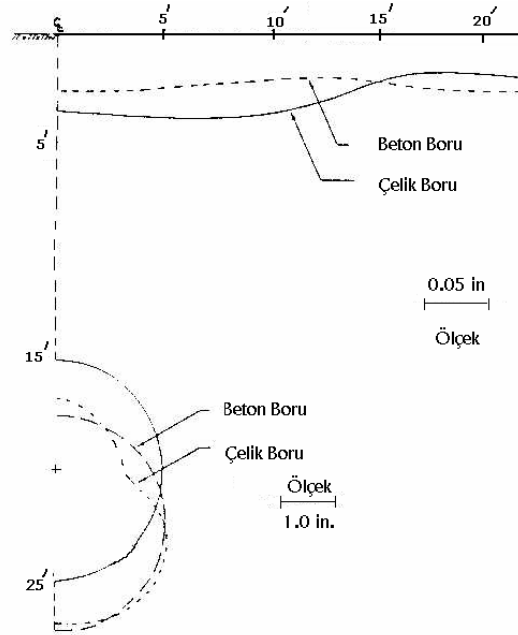
Boru üzerindeki fazla yükler; boru duvarının kırılması veya eğilmesi, çekme gerilmelerinin veya boyuna doğrultuda eğilmenin ortaya çıkması ve boruda burkulma meydana gelmesi gibi nedenlere bağlı olarak göçmeye neden olabilir. Ancak, dış yükler nedeniyle gömülü borularda kırılma meydana gelmesi çok sık rastlanan bir olay değildir. Gömülü borularda karşılaşılan göçme olaylarından çoğu hatalı inşaat, inşaat sırasında meydana gelen yüklerin tasarım yüklerinden fazla olması, temelin oturmasına veya göçmesine bağlı olarak boruların eğilmesi gibi nedenlerden dolayı meydana gelmektedir. Bu nedenle, çeşitli durumlar için uygun boru cinsi veya mukavemetini seçmek amacıyla, öncelikle toprak yükü ve hareketli yükü hesaplamak, yataklanma malzemesini seçmek, yük faktörünü belirlemek, güvenlik faktörünü uygulamak, uygun boru mukavemetini seçmek şeklinde sıralanan adımlar takip edilmelidir [32, 34, 57].

7.2 Boru Üzerindeki Yükü Etkileyen Koşullar

Boru rijitliğinin zemin rijitliğine oranı, boru üzerine etkiyen yükün büyüklüğünü belirler. Bu nedenle, gömülü yapıları projelendirilirken, yapı ve içine gömüldüğü zeminin performansı bir arada ele alınmalıdır. Bu durum genellikle zemin-yapı etkileşimi olarak adlandırılır. Zemin, yapı üzerine basınç etkitir. Eğer yapı zemine göre sıkışmaz nitelikteyse, yapı üzerinde basınç birikmesi meydana gelir. Diğer taraftan, eğer yapı zemin yükü altında sıkışır ya da deforme olursa, yapı üzerindeki zemin prizması ağırlığı zeminin mukavemeti sayesinde azalır. Zemin, yapı üzerinde bir taş kemer gibi kemerlenir ve zeminin kemerlenme etkisi yapı üzerindeki basıncı azaltır. Kemerlenme, zeminin mukavemetine ve zemin ile yapının birbirlerine göre sıkışmasına bağlıdır.

Hendek içindeki borularda, hendek duvarları dolgu malzemesinin oturmasına karşı koyar. Bu karşı kuvvet, yükün bir bölümünü yan dolgulara aktararak boru üzerindeki yükü azaltır. Hendek genişliği azaldıkça yük aktarımı artar [28, 58].

Fleksibl ve rijit boruların toprak yükü altındaki farklı deformasyon davranışları zemin-boru etkileşim mekanizmasını değiştirir ve farklı zemin kemerlenme davranışları oluşturur (Şekil 7.2) [58].



Şekil 7.2. Boruların Deformasyon Durumları [58].

Rijit bir boru üzerindeki düşey toprak basıncı, yapı üzerindeki zeminin ağırlığından büyüktür. Bu durumda negatif kemerlenme meydana gelir. Negatif kemerlenme durumunda, yan dolgular oturur ve bunun sonucunda da boruya ek bir yük biner. Böylece, gerilmeler boru etrafında yoğunlaşırken yan dolgular da azalır.

Fleksibl bir boru üzerindeki düşey toprak basıncı ise boru üzerindeki toprak ağırlığından küçüktür. Bu durumda da pozitif kemerlenme meydana gelir. Pozitif kemerlenme durumunda, boru üstündeki zemin prizması yükünün bir bölümü yan dolgulara transfer olur. Yani, rijit bir boru, aynı veya benzer durumda yerleştirilen fleksibl bir borudan çok daha fazla yüke maruz kalır [34, 54].

7.3 Marston Yük Teorisi:

Zemine gömülü borulara etkiyen dış yüklerin hesaplanması ile ilgili olarak yapılan ilk mühendislik çalışması, 1900'lü yılların başında Anson Marston tarafından

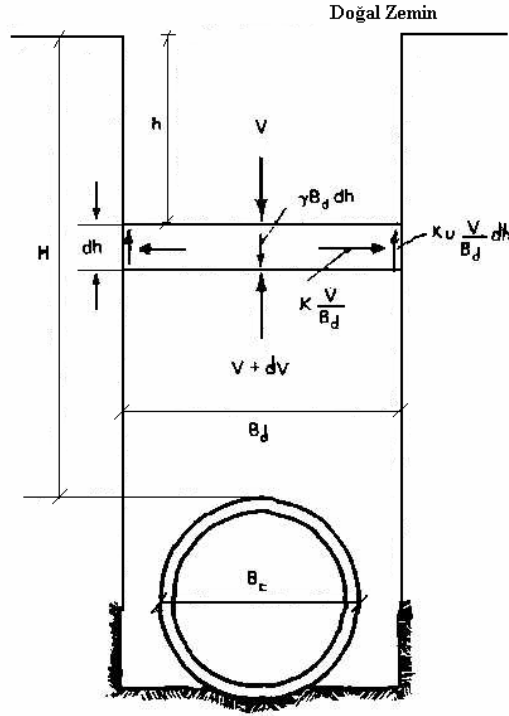
gerçekleştirilmiştir. Marston Yük Teorisi adı verilen bu metot, özellikle rijit borulara etkiyen yüklerin hesaplanmasında günümüzde de geçerliliğini sürdürmektedir. Marston'un öğrencisi M.G. Spangler ise, fleksibl boru dizaynı için bir yöntem geliştirmiştir. Daha sonraki yıllarda ise Spangler'in öğrencisi Watkins yine fleksibl borular üzerindeki yükleri hesaplamak amacıyla kullanılan başka bir yöntem üzerinde çalışmalar yapmıştır [34].

7.4 Rijit Boru Analizi

7.4.1 Hendek Durumu:

Marston Yük Teorisi, Şekil 7.3'de görüldüğü gibi, hendek içerisindeki bir boru üzerine yük etkilen zemin prizmasına dayanır. Marston tarafından tarif edilen hendek, örselenmemiş zemin içinde açılan oldukça dar bir hendektir. Hendek içindeki borularda geri dolgu sıkışıp aşağı doğru oturma eğilimindedir. Bu hareket, hendek içindeki ve boru üzerindeki zemin prizmasının kenarlardaki örselenmemiş zemine göre aşağı doğru hareket etmesine neden olur ve hendek kenarları boyunca geri dolguyu kısmen destekleyecek bir kemerlenme hareketi yaratacak yukarı yönlü kayma gerilmelerini mobilize eder. Borunun taşıdığı zemin ağırlığının, hendek içindeki tüm zeminin ağırlığından hendek duvarları boyunca meydana gelen düşey kayma gerilmeleri kadar eksik olduğu varsayılır [45, 47].

Hendek kohezyonlu bir geri dolguyla doldurulduğunda bile, geri dolgu yerleştirildikten sonra geri dolgu ve hendek kenarları arasında etkili bir kohezyon oluşabilmesi için uzun bir süre geçmelidir. Aynı zamanda, kohezyon olmadığı varsayımı hendek üzerinde olması muhtemel maksimum yükü meydana getirir. Bu maksimum yük, borunun ömrü boyunca aşırı yağmur veya geri dolgu ve hendek kenarları arasındaki kohezyonu ortadan kaldıracak ya da büyük ölçüde azaltacak diğer olayların bir sonucu olarak herhangi bir anda meydana gelebilir. Kohezyon oluşmadan önce uzun bir zaman geçmesi gerektiğinde ve boru üzerindeki maksimum yüke kohezyonun neden olmadığı varsayıldığında kohezyon ihmal edilebilir. Geri dolgu malzemesi ve hendek kenarları arasındaki kohezyon ihmal edildiğinde ise, düşey kayma gerilmeleri, geri dolgu tarafından hendek kenarlarına etkitilen aktif yanal basınçla bu iki malzeme arasındaki sürtünme açısının tanjantının çarpımına eşit olacaktır [34, 44, 46].



Şekil 7.3. Marston Dar Hendek Teorisi [34].

$[B_d.(1)].dh$ şeklindeki herhangi bir hacımsal elemanın üzerindeki düşey basınç V , elemanın altındaki yukarı doğru bir düşey kuvvet olan $V + dV$ ile dengelenir (Şekil 7.3). Bu hacımsal elemanın üzerindeki düşey basınçların B_d genişliğinde üniform dağıldığı varsayılmaktadır. Hacımsal eleman, B_d genişliğinde, dh yüksekliğinde ve boru ve hendeğin eksenine boyunca birim uzunluktadır. Hacımsal bölgenin ağırlığı, bu elemanın hacmi ile birim hacim ağırlığının çarpımına eşittir.

$$W = B_d.(dh).(1).\gamma \quad (7.1)$$

Burada $B_d.(dh).(1)$, elemanın hacmi, γ ise birim hacim ağırlığıdır. h derinliğindeki elemanın kenarlarındaki yanıl toprak basıncı P_L ,

$$P_L = K \times (V/B_d) \quad (7.2)$$

$$K = \frac{\sqrt{(\mu^2 + 1) - \mu}}{\sqrt{(\mu^2 + 1) + \mu}} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (7.3)$$

Şekil 7.3'ün 1 birim uzunluktaki bir hendek ve hendek tipi boru parçasını temsil ettiğini ve dolgu malzemesinin zemin yüzeyinden h derinliğinde dh yüksekliğinde

ince yatay bir elemanın olduğunu varsayarsak, denge halinde bu elemana etkiyen kuvvetler:

V : Hacımsal elemanın üst seviyesindeki düşey basınç,

$V+dV$: Hacımsal elemanın altındaki düşey basınçlar,

$\gamma.B_d.dh$: Hacımsal elemanın ağırlığı ve

$K.(V/B_d).dh$: Hacımsal elemanın etrafındaki yanıl basınçlardır.

Yanal basınçlar nedeniyle hacımsal elemanın kenarlarında oluşan ve birim uzunluğa karşılık gelen kayma kuvvetleri F_s , aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Burada μ' , sürtünme katsayısıdır.

$$F_s = K.(V/B_d).(\mu').dh \quad (7.4)$$

Eleman üzerindeki düşey kuvvetler toplanır ve sıfıra eşitlenir. $F_v = 0$, veya yukarı yönlü düşey kuvvetler aşağı yönlü düşey kuvvetlere eşittir. Böylece eşitlik,

$$(V+dV) + \left(\frac{2K\mu'V}{B_d} \right) \times dh = V + \gamma.B_d.dh$$

$$0 = (V+dV) + \left(\frac{2K\mu'V}{B_d} \right) \times \frac{dh}{dv} \quad (7.5)$$

Bu diferansiyel denklemin sonucu (denklem 8.5),

$$V = \frac{\gamma B_d^2 \left[1 - e^{-2K\mu'(h/B_d)} \right]}{2K\mu'} \quad (7.6)$$

$h=H$ değeri denklemde yerine konulduğunda borunun üst seviyesindeki toplam düşey basınç bulunur. Bu toplam basıncın boru tarafından taşınan kısmı borunun rijitliği ile boru ve hendek kenarları arasındaki dolgu malzemesinin rijitliklerine bağlıdır. Rijit borularda yan dolgular nispeten sıkışabilir niteliktedir ve boru hemen hemen V yükünün tamamını taşır. Diğer taraftan, fleksibl borularda boru etrafındaki zemin tamamen sıkıştırılmışsa, yan dolguların rijitliği borunun rijitliğine yaklaşır ve yapı üzerindeki yük yan dolguların taşıyabildiği oranda azalır. Hendek tipi borular üzerine etkiyen maksimum yük, $h=H$ yazıldığı taktirde (7.8) denklemi ile ifade edilir. Hesabı kolaylaştırmak için yük katsayısı C_d aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [34, 47].

$$C_d = \frac{1 - e^{-2K\mu'(H/B_d)}}{2K\mu'} \quad (7.7)$$

C_d katsayısı, Şekil 7.4 yardımıyla da elde edilebilir. Burada $K.\mu'$, dolgu malzemesinin içsel sürtünmesinin bir fonksiyonudur. K , μ , μ' değerleri Marston tarafından deneysel olarak bulunmuştur ve tipik değerler Tablo 7.1'de verilmiştir. Bu katsayı, dolgu türü yerleştirme olarak adlandırılan, boru üzerindeki hendek genişliğinin boru çapının 3 katından fazla olması durumunda kullanılmaz [57].

Tablo 7.1. Çeşitli Zeminlere Ait γ, K ve μ Değerleri [34].

Zemin Cinsi	Birim Hacim Ağırlık (KN/m ³)	Rankine Oranı K	Sürtünme Katsayısı μ
Kısmen sıkıştırılmış nemli bitkisel toprak	15	0.33	0.50
Suya doymun bitkisel toprak	18	0.37	0.40
Kısmen sıkıştırılmış nemli kil	17	0.33	0.40
Suya doymun kil	20	0.37	0.30
Kuru kum	17	0.33	0.50
Islak kum	20	0.33	0.50

Oldukça sıkışabilir yan dolgu içindeki rijit bir hendek tipi boruda, boru üzerindeki yük aşağıdaki şekilde hesaplanır [17, 27, 33, 34, 44]:

$$W_d = C_d \cdot \gamma \cdot B_d^2 \quad (7.8)$$

W_d : Birim uzunluk için boru üzerindeki yük (KN/m)

e : Doğal logaritma tabanı

γ : Dolgunun birim hacim ağırlığı (KN/m³)

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

B_c : Borunun yatay genişliği (dıştan) (m)

B_d : Boru üst seviyesinde hendeğin genişliği (m)

H : Boru ile doğal zemin seviyesi arasındaki mesafe (m)

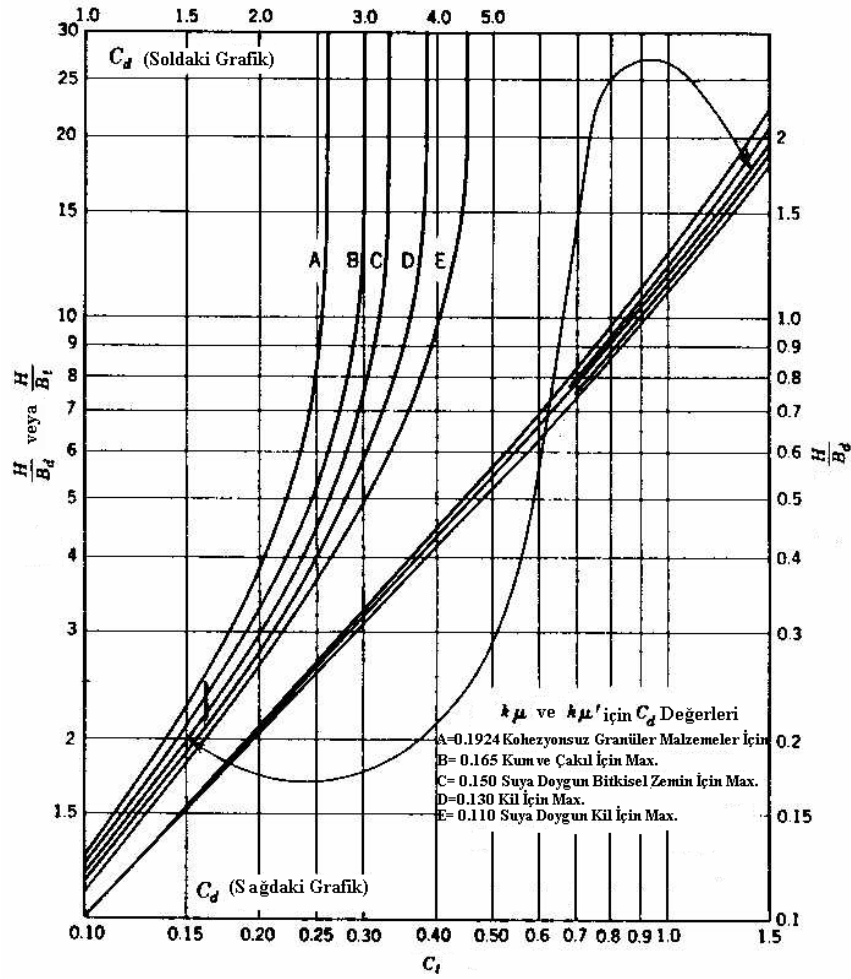
h : Zemin yüzünden dolgu içindeki herhangi bir yatay düzleme olan mesafe (m)

C_d : Hendek boruları için yük katsayısı

μ : $\tan \phi$ = Dolgunun içsel sürtünme katsayısı

μ' : $\tan \phi$ = Dolgu ve borunun kenarları arasındaki sürtünme katsayısı

K : Yanal aktif birim basıncın düşey birim basınca oranı



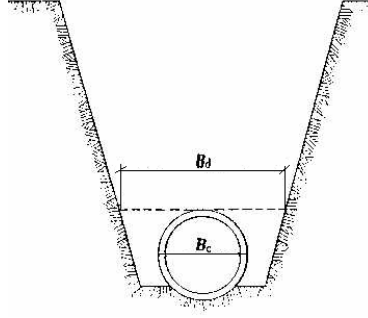
Şekil 7.4. Hendek Durumunda Boru Üzerindeki Yükler İçin Hesap Diyagramı [34].

Bu denkleme göre boru, hendek içinde taç kısmı seviyesine ulaşan tüm toprak yükünü taşıırken yan dolgu yük taşımaz. Bu nedenle boru çapı B_c denklemde kullanılmaz. Bu varsayım, hendek genişledikçe W_d değerinin çok daha konservatif olmasını sağlar. Bu etki sebebiyle hendek durumu için max. yükün aynı tür ve yükseklikteki geri dolgu için belirlenen bir dolgu türü yerleşimdeki toprak yükü olduğu varsayılır. Aynı yükü meydana getiren hendek genişliği geçiş genişliği olarak alınır [45].

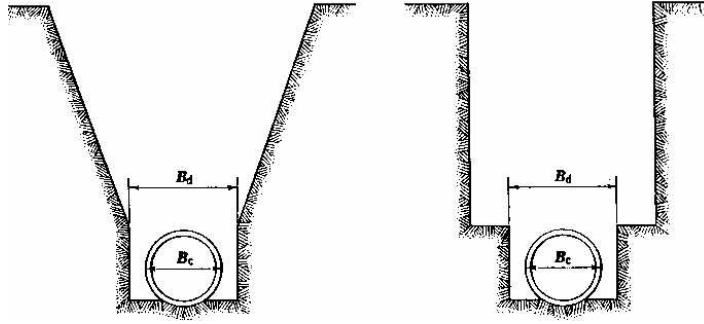
7.4.2 Eğimli Hendekler İçindeki Borular Üzerine Gelen Yükler

Yukarıdaki formüllerde kullanılan hendek genişliği B_d , düşey kenarları olan normal bir hendeğin genişliğidir. Şekil 8.5'te görüldüğü gibi eğimli kenarları olan bir hendek açıldığında, hemen boru üzerinde ya da borunun biraz altındaki genişlik, yük

hesaplarında kullanılması uygun olan genişliktir. Eğimli ya da boruya oranla çok geniş bir hendek açılması gerektiğinde boruyu geniş hendeğin tabanındaki nispeten dar bir alt hendeğe gömmek iyi sonuç veren bir uygulamadır. Böylece, yukarıda anlatılan prensibe dayanarak, boru üzerindeki yük minimum değerde tutulacaktır. Bu amaçla kullanılan alt hendekler Şekil 7.6’da gösterilmektedir [47].



Şekil 7.5. Eğimli Hendeklerde Hendek Genişliği [47].



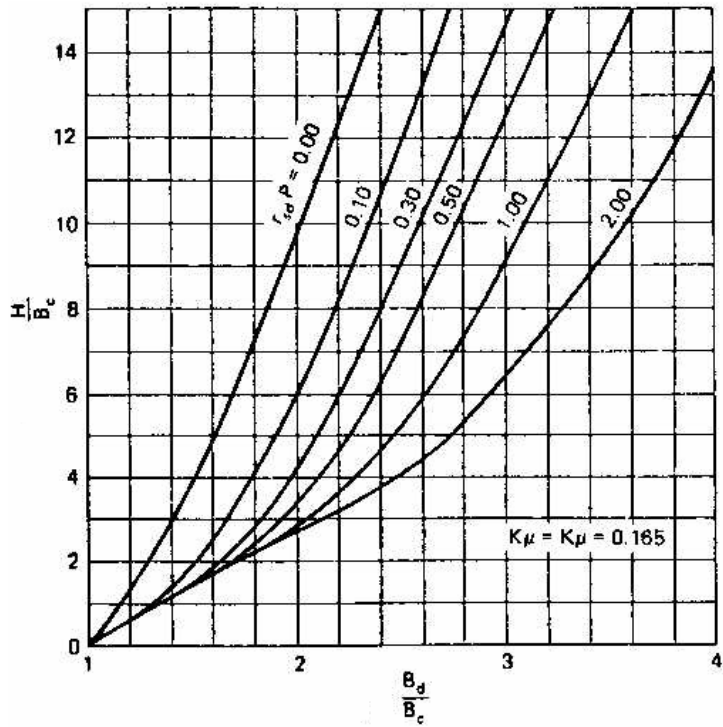
Şekil 7.6. Alt Hendekler [47].

7.4.3 Geçiş Genişliği

Hendek kesitli mecralarda genel yük denklemine ($W_d = C_d \gamma B_d^2$) göre hendek genişliği (B_d) arttıkça boruya etkiyen yük (W_d) artar. Yani, hendek ne kadar geniş ise, içine yerleştirilen boru üzerindeki yük de o kadar büyük olur. Ancak öyle bir genişlik vardır ki, artık hendek kenarlarının boruya etkiyen yük üzerinde bir etkisi kalmaz. Boruya göre çok geniş bir hendek içinde hendek kenarları boruya o kadar uzak olacaktır ki, boru üzerindeki yükü etkileyemeyecektir. Bu genişliğe geçiş genişliği denir. Geçiş genişliğine kadar olan genişliklerde boru üzerine etkiyen yük, dar hendek teorisine göre hesaplanırken daha büyük genişliklerde ise yük, hendek genişliğinden bağımsız olarak artar. Yani yük, artan hendek genişliği için hendek yükü dolgu yüküne eşit olana kadar (7.8) denklemine göre artmaya devam edecektir.

Bu noktaya bir kez ulaşıldığında, gerçek yük (7.9) denklemi ile hesaplanacaktır [17, 47].

Şekil 7.7’deki diyagram, rijit boru üzerindeki yüklerin hem hendek tipi boru teorisi, hem de projeksiyonlu boru teorisine eşit olduğu hendek genişliğinin boru genişliğine oranı (B_d/B_c) değerlerini vermektedir. Diyagramda verilen B_d/B_c değerlerinden küçük değerler için rijit bir boru üzerindeki yükler hendek borusu teorisinden bulunabilir. Bu oranın daha büyük değerleri için projeksiyonlu boru teorisi kullanılır [47].



Şekil 7.7. Geçiş genişliği Eğrileri [47].

7.4.4 Eğilme Gecikmesi Faktörü (DL)

(7.8) numaralı hendek tipi boru formülü, fiziksel şartların uygun biçimde seçilmesiyle, kullanım sırasında herhangi bir borunun maruz kalacağı maksimum yükü vermektedir. Bununla beraber, kohezyonun ortaya çıkmasıyla, borular yük nedeniyle göçme dışındaki herhangi bir sebepten dolayı kaldırılmadan önce, uzun bir süre için maksimum yüke maruz kalmayabilirler. Deneyler ve arazide yapılan incelemeler, dolgu tamamlandığı anda boru üzerindeki yükün bir süre sonra boru üzerine etkiyen yükten daha az olduğunu göstermiştir. Yani yük, maksimum dolgu yüksekliğine ulaşıldıktan sonra bir süre daha artmaya devam eder. Bu gecikme

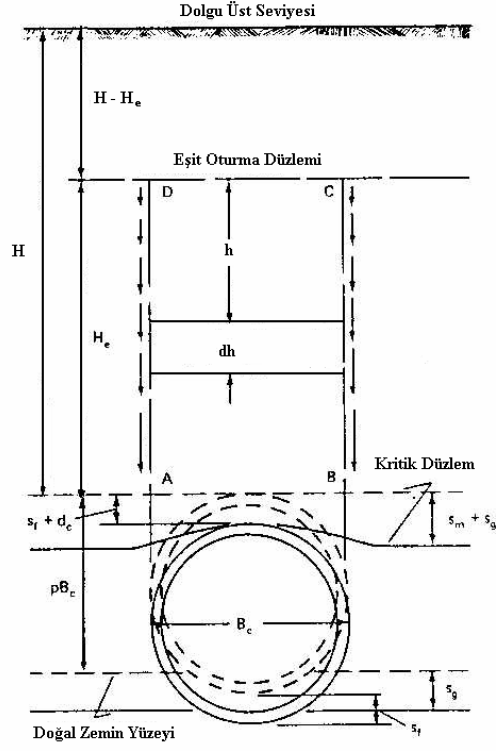
özelliğinin bazı durumlarda toplam yükün %20-25'i olduğu gözlenmiştir ve bazı çok özel durumlarda gelişmesi yıllarca sürebilmektedir. Bu da, yapısal olarak sağlam olduğu düşünülen gömülü borularda tamamlandıktan sonra birkaç ay ya da birkaç yıl içinde kırıkların oluşmasının sebebini açıklamaktadır [47].

7.4.5 Dolgu Durumu (Pozitif Projeksiyon)

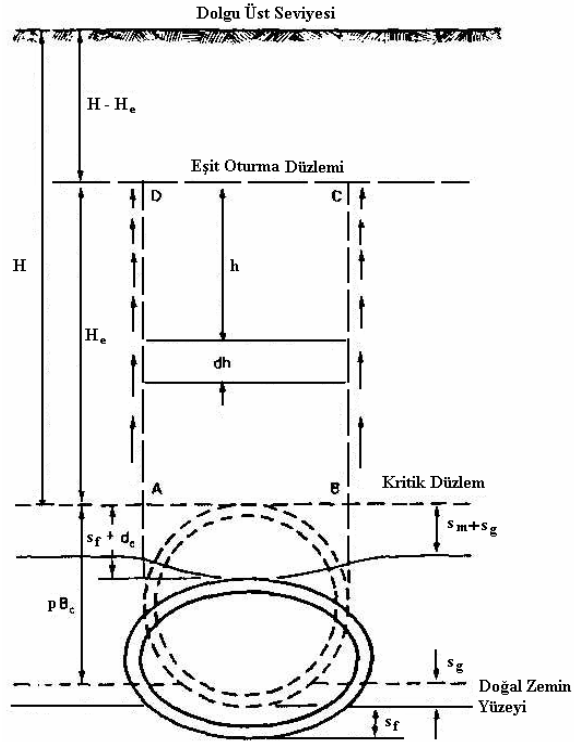
Pozitif projeksiyonlu borular, boru üst seviyesi doğal zemin yüzeyinden dışarı doğru bir miktar çıkıntı yapacak şekilde yerleştirilen borulardır. Karayolu ve demiryolu menfezleri bu duruma örnek olarak verilebilir.

Bir boru pozitif projeksiyonlu olarak yerleştirildiğinde, kayma kuvvetleri yapı üzerindeki nihai yükün meydana gelmesinde önemli bir rol oynar. Rölatif hareketlerin meydana gelebileceği ve kayma kuvvetlerinin olduğu düzlemler, borunun kenarlarından yukarı doğru uzanan hayali düşey düzlemlerdir ve Şekil 7.8 ve 7.9'de gösterilmektedir. Yüklerin tanımlanmasında kullanılan genişlik faktörü B_c , borunun dış genişliğidir. Doğal zemin yüzeyinden yapının üst noktasına kadar olan mesafe $p.B_c$ ile gösterilmektedir. Burada p , projeksiyon oranıdır [47].

Şekil 7.8'de, borunun yanlarındaki zemin borunun üst kısmından daha fazla oturma yapar. Şekil 7.9 ise borunun tepesi yanlardaki zeminden daha fazla oturur. Şekil 7.8 projeksiyon durumu olarak isimlendirilir ve pozitif oturma oranı r_{sd} ile tanımlanır. Bu durumda kayma kuvvetleri aşağı yönlüdür ve gömülü boru üzerine daha büyük bir yük etkimesine sebep olur. Şekil 7.9 ise hendek durumu olarak adlandırılır ve negatif oturma oranı r_{sd} ile tanımlanır. Bu durumda kayma kuvvetleri yukarı yönlüdür ve bu da boru üzerine daha az yük etkimesine neden olur.



Şekil 7.8. Pozitif projeksiyonlu boru - Projeksiyon durumu [47].



Şekil 7.9. Pozitif projeksiyonlu boru - Hendek durumu [47].

----- İlk Durum , $H = 0$
 _____ Son Durum

7.4.6 Pozitif Projeksiyonlu Borular Üzerindeki Yükler İçin Marston Formülü

Marston, pozitif projeksiyonlu bir boru üzerindeki düşey yükleri hesaplamak için aşağıdaki formülü geliştirmiştir. Tam hendek ya da projeksiyonlu durumda bu formül şöyledir [34, 47].

Pozitif projeksiyonlu (dolgu) borular için:

$$W_c = C_c \cdot \gamma \cdot B_c^2 \quad (7.9)$$

$$C_c = \frac{\left[e^{\pm 2K\mu(H/B_c)} - 1 \right]}{\pm 2K\mu} \quad (7.10)$$

$$C_c = \frac{\left[e^{\pm 2K\mu(H_e/B_c)} - 1 \right]}{\pm 2K\mu} + \frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c} \times e^{2K\mu(H_e/B_c)} \quad (7.11)$$

(7.10) denkleminde eksi işaretler tamamlanmış hendek, artı işaretler ise tamamlanmış projeksiyon durumunu göstermektedir. (7.11) denkleminde ise tamamlanmamış durumu gösterir ve eksi işaretler tamamlanmamış hendek, artı işaretler tamamlanmamış projeksiyon durumunu yansıtır.

Yukarıdaki formüllerde:

W_c : Boru üzerindeki yük, (KN/m)

γ : Dolgu zeminin birim hacim ağırlığı, (KN/m³)

B_c : Borunun dış çapı, (m)

H : Boru üzerindeki dolgu yüksekliği, (m)

H_e : Eşit oturma düzleminin yüksekliği, (m)

K : Rankine yanal basınç oranı

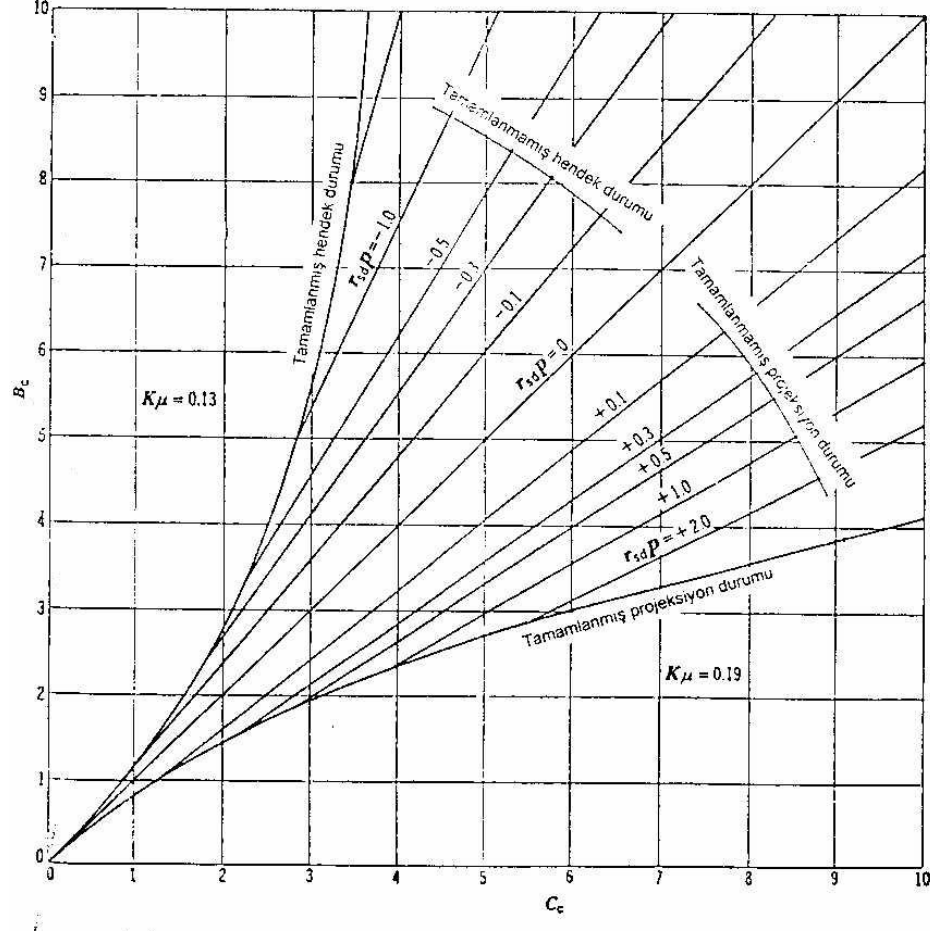
μ : $\tan \phi$: Dolgu malzemesinin sürtünme katsayısı

e : Doğal logaritma tabanıdır.

7.4.7 Pozitif Projeksiyonlu Borular İçin Yük Hesaplama Diyagramı

Yukarıdaki formülü kullanarak C_c değerini hesaplamak hem zor hem de zaman alıcıdır. Bu amaçla geliştirilmiş Şekil 7.10'da görülen diyagram vasıtasıyla C_c değeri kolaylıkla hesaplanabilir. C_c değeri, zeminin sürtünme karakteristiklerinin olduğu kadar, dolgu yüksekliğinin boru genişliğine oranının (H/B_c) ve oturma oranı ile projeksiyon oranının çarpımının ($r_{sd.p}$), Rankine sabiti ve sürtünme katsayısının

fonksiyonudur ($C_c = f(H/B_c, r_{sd} p, K, \mu)$). Şekil 7.10'da, kayma kuvvetlerinin aşağı yönlü olduğu projeksiyon durumunda $K.\mu=0.19$ ve yukarı yönlü olduğu hendek durumunda $K.\mu=0.13$ 'tür [47].



Şekil 7.10. Pozitif Projeksiyonlu Borular İçin C_c Katsayısı [34].

7.4.8 Pozitif Projeksiyonlu Borularda Oturma Oranı

İç prizma ABCD ve komşu dış prizmalar arasındaki bağıl hareketler (Şekil 7.8 ve 7.9), boru ve komşu zeminin belirli elemanlarının oturmasından etkilenir. Oturma oranı r_{sd} 'nin gözlemlere dayanarak hesaplanması çok zordur. Bu nedenle Tablo 7.2 kullanılabilir. $r_{sd}.p=0$ iken $C_c=H/B_c$ ve $W_c=H.\gamma.B_c$ 'ye eşit olur. Bu prizma yükü, yani boru üstündeki zemin prizmasının ağırlığıdır. $r_{sd}=0$ iken boru üstündeki kritik düzlem adı verilen düzlem borunun tepesi ile aynı miktarda oturma yapar (Şekil 7.8). Oturma oranı (r_{sd}) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$r_{sd} = [(S_m + S_g) - (S_f + d_c)]/S_m \quad (7.12)$$

S_m : $p.B_c$ yüksekliğindeki kenar dolgunun oturması

S_g : Boru etrafındaki doğal zeminin oturması

S_f : Boru altındaki temelin oturması

d_c : Borunun düşey yöndeki yüksekliğinin azalması

7.4.9 Eşit Oturma Düzlemi

Pozitif projeksiyonlu borularla birlikte, Marston boru üzerinde kayma kuvvetlerinin sıfır olduğu bir yatay düzlem tanımlanmıştır. Bu düzlem, eşit oturma düzlemi olarak adlandırılır. Bu düzlemin yukarısında, iç ve dış zemin prizmaları eşit şekilde oturur. Hendek tipi bir boruda kayma kuvvetleri, boru üst seviyesinden zemin yüzeyine kadar uzanır. Projeksiyonlu boru yerleştirme tekniğinde ise, kayma kuvvetleri dolgu içinde eşit oturma düzlemi adıyla anılan yatay bir düzlemde yok olur. Eşit oturma düzleminin oluşmasının nedeni, dış prizmadaki düşey basıncın bir kısmının kayma yoluyla iç prizmaya nakledilmesi ya da bu olayın tam tersinin olmasıdır. Bu basınç transferi iç ve dış prizmalarda farklı birim deformasyonlar meydana getirir ve boru üzerindeki herhangi bir yükseklikte biriken deformasyonlar+kritik düzlemin oturması, iç prizmada biriken deformasyonlar+yapının taç kısmında meydana gelen oturmaya eşit olur. Bitişik prizmalar arasında bağıl hareketler olmadığında, bu düzlem üzerindeki bölgede kayma kuvvetleri oluşmaz [34, 47].

Boru üzerindeki eşit oturma düzleminin yüksekliği H_e , dolgu yüksekliği H 'dan daha az olduğunda eşit oturma düzlemi gerçektir. Bu durum, kayma kuvvetlerinin tüm dolgu yüksekliği boyunca uzanmaması nedeniyle tamamlanmamış hendek durumu ya da tamamlanmamış projeksiyon durumu olarak adlandırılır. Eğer H_e , H 'dan büyükse, eşit oturma düzlemi hayalidir. Bu durum hem hendek, hem de projeksiyon durumunda geçerlidir, çünkü kayma kuvvetlerinin dolgu üst seviyesine kadar ulaştığı kabul edilir [34, 47].

7.4.10 Kritik Düzlem

Bir borunun oturmasıyla bağlantılı olarak bir kritik düzlem tarif edilebilir. Kritik düzlem, dolgu seviyesi boru üst seviyesiyle bir olduğunda, yani $H=0$ olduğunda, boru üzerindeki yatay düzlemdir. Dolgunun yerleştirilmesi sırasında ve sonrasında bu düzlem aşağı doğru oturma yapar. Eğer 7.7'de görüldüğü gibi borunun üst noktasından daha fazla oturursa, oturma oranı pozitifdir. Dış prizma, iç prizmaya göre aşağı doğru hareket eder ve iç prizma üzerindeki kayma kuvvetleri aşağı doğru yönelir. Bunun sonucu olarak yapı üzerinde meydana gelen yükler, yapının hemen

üzerindeki zemin ağırlığından daha büyük olur. Bu durum, projeksiyon durumu olarak bilinmektedir.

Eğer kritik düzlem Şekil 7.9’da görüldüğü gibi borunun üst noktasından daha az oturuyorsa, oturma oranı negatiftir. İç prizma, dış prizmaya göre aşağı doğru hareket eder ve iç prizma üzerindeki kayma kuvvetleri yukarı yönlendirir. Sonuçta meydana gelen yük, yapı üzerindeki zemin ağırlığından küçüktür. Bu durum, kayma kuvvetleri yukarı doğru yönlendiğinden ya da hendek içine gömülü bir boruda olduğu gibi aynı yönde hareket ettiğinden, hendek durumu olarak adlandırılır [47].

7.4.11 $r_{sd,p} = 0$ Durumu

Şekil 8.10’da verilen diyagramı incelediğimizde, oturma oranı $r_{sd,p}$ ve projeksiyon oranı p sıfır olduğunda, $C_c = H/B_c$ olduğu görülmektedir. Bu değer W_c formülünde yerine konulduğunda, formül aşağıdaki hali alır:

$$W_c = H \cdot \gamma \cdot B_c \quad (7.13)$$

Yani yük, borunun tam üzerindeki zemin prizmasının ağırlığına eşit olur. Bir boru, borunun üst kısmı doğal zemine çok yakın dar ve sığ bir hendeğin içine yerleştirildiğinde, o seviyedeki projeksiyon oranı p sıfırdır. Yani boru üst seviyesi, etrafındaki doğal zeminle aynı seviyededir. Bu, pozitif ve negatif borularda bir geçiş durumudur ve bazen sıfır projeksiyon durumu olarak da adlandırılır [34, 47].

Kritik düzlem oturması = $s_m + s_g$ ve borunun üst kısmının oturması = $s_f + d_c$ ’dir. Kritik düzlem boru üst kısmı ile aynı oranda oturduğunda oturma oranı sıfır olur; yani $s_m + s_g = s_f + d_c$ ’dir ve $s_m + s_g = s_f + d_c$ ise, $r_{sd}=0$ ’dır.

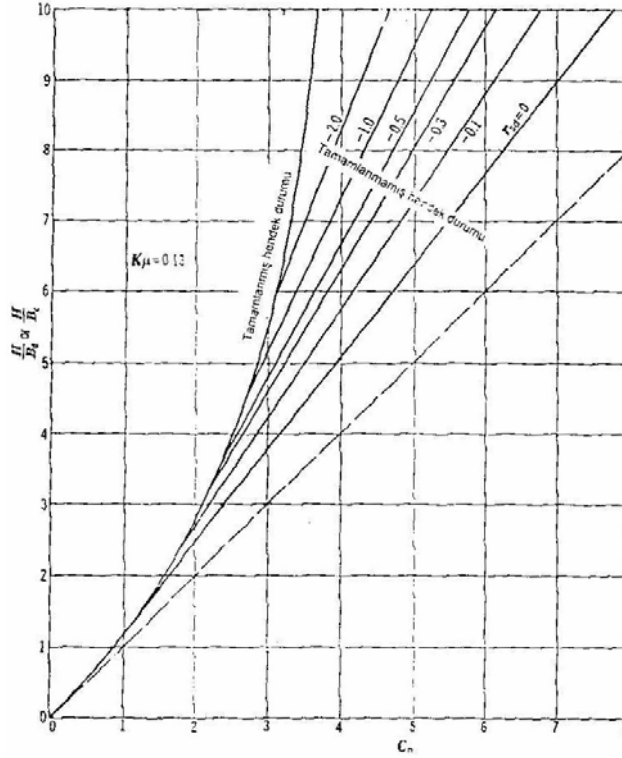
7.4.12 Negatif Projeksiyonlu Bir Boru Üzerindeki Toprak Yüğü

Negatif projeksiyonlu borular, Şekil 7.11’de görüldüğü gibi dar ve sığ bir hendek içine, boru üst seviyesi doğal zemin yüzeyinin altında kalacak şekilde yerleştirilen borulardır. Boru yerine yerleştirildikten sonra hendek yeniden doldurulur ve zemin yüzeyinden bir miktar yukarıya kadar dolgu yapılır. Bu tür yerleştirme tekniğinde dolgu malzemesinin dış prizmaları, boru üzerindeki prizma kadar yüksek değildir. Bu nedenle, iç prizma üzerindeki kayma kuvvetleri yukarı yönde hareket eder ve böylece boru üzerindeki yük iç prizma ağırlığından daha küçük bir değere iner [47].

Negatif projeksiyonlu boru üzerindeki yük aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

- s_g : Doğal zemin yüzeyinin oturması (m)
 s_d : $p'.B_d$ yüksekliğinde bir hendek içindeki dolgunun oturması (m)
 s_f : Borunun yatakladığı zeminin oturması (m)
 d_c : Borunun düşey boyutunda kısılma (m)
 $s_d + s_f + d_c$: Kritik düzlemin oturması (m)

Oturma oranı bu durumda daima negatif bir değerdir ve $r_{sd}.p'$ daima negatiftir. C_n değeri 7.12 diyagramından bulunabilir. Şekil 7.10'daki projeksiyonlu durumda bahsedildiği gibi, bu diyagramlardaki ışınlar zarf eğrilerini $H_e = H$ noktalarında keserler. Bu nedenle, eşit oturma düzlemi yüksekliği H_e , bu noktadaki H/B_d değeri B_d ile çarpılarak bulunabilir [47].

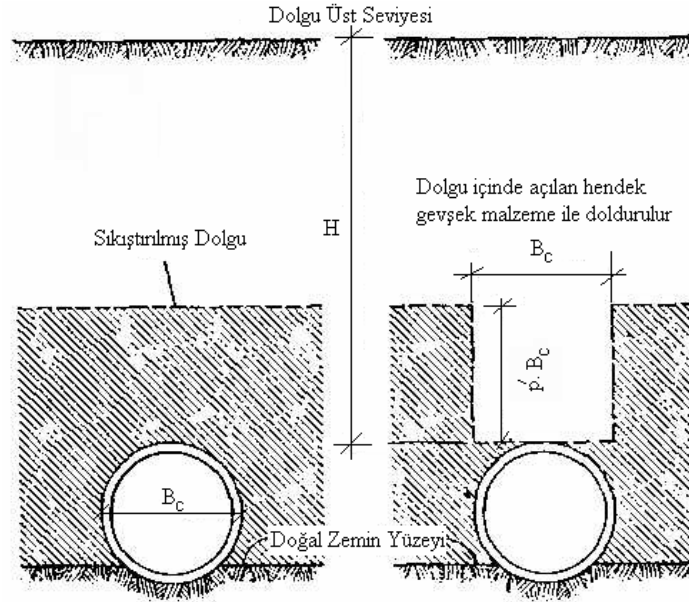


Şekil 7.12. Negatif Projeksiyonlu Boru İçin C_n değerleri [34].

7.5 Eksik Hendek Metodu

Spangler, Marston'un yaptığı deneylerden bazılarında dolgu altına yerleştirilen rijit menfezler üzerindeki yüklerin yapı üstündeki zemin ağırlığından % 90-95 daha büyük olduğunu belirtmiştir. Yapı üzerindeki yükte meydana gelen bu artışı önlemek amacıyla yapılan çalışmalar, eksik hendek metodunun gelişmesini sağlamıştır [54].

Eksik hendek metodu, negatif projeksiyonlu boruya benzer özel tip bir boru yerleştirme yöntemidir ve Şekil 7.13'te gösterilmektedir. Bu yöntemde boru öncelikle pozitif projeksiyonlu bir boru gibi yerleştirilir. Sonra, taç kısmı üzerinde boru genişliğinin 1-1 ½ katı seviyeye kadar dolgu ile kaplanır. Bu işlem sırasında dolgu iyice sıkıştırılmalıdır. Daha sonra sıkıştırılmış dolgu içinde borunun taç kısmına kadar aşağı doğru bir hendek kazılır ve borunun üzerine mümkün olduğunca gevşek bir biçimde sıkışabilir bir tabaka yerleştirilerek en üst seviyeye kadar hendek yeniden doldurulur. Dolgu yapılırken, yumuşak bölge çevre dolgudan daha fazla sıkışır ve bu nedenle iki bölge arasında yukarı doğru oluşacak kayma gerilmeleri boru üzerine gelen yükü azaltarak boru üzerinde pozitif kemerlenmeye neden olur. Bu işlemler yapılırken hendek genişliği boru genişliğine eşit olmalıdır ve merkezi tam boru merkezinden geçmelidir.



Şekil 7.13. Eksik Hendek Metodu [54].

Yapılan deneyler sonucunda, eksik hendek metodunun rijit borular üzerindeki düşey toprak basıncını azaltmak için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Eksik hendek metodunda zemin prizmasının sıkışabilirliğini ve kritik düzlemin oturmasını artırmak ve yapı üzerindeki yükü azaltmak amacıyla sıkışabilir malzeme olarak çok hafif olması ve kolayca taşınabilmesi nedeniyle polystren bloklar kullanılabileceği belirtilmektedir. Bu amaçla saman, kuru ot gibi organik malzemeler de kullanılmakla birlikte, organik malzeme kullanımı ayrışma ihtimali ve malzeme özelliklerinin belirlenmesinin zor olması nedeniyle tavsiye edilmemektedir [47, 54].

Yukarıda da belirtildiği gibi bu metodun amacı, dolgu malzemesi iç prizmasının dış prizmaya göre aşağı doğru oturması ve oturmanın yukarı yönlü kayma kuvvetleri meydana getirmesini sağlamaktır. Böylece borunun taşınması gereken yük azalacaktır. Bu şekilde yerleştirilmiş bir boru üzerindeki yük, negatif projeksiyonlu boruya benzer şekilde hesaplanabilir. Eğer hendek genişliği boru genişliğine eşitlenirse, bu yöntem belli bir dolgu yüksekliği için nispeten daha hafif bir yük oluşmasını sağlar. Bu yöntemin bir başka avantajı da, dairesel bir borunun kenarlarındaki geri dolgunun kolayca sıkıştırılabilmesi ve boru ile doğrudan temas içinde yerleştirilebilmesidir. Sıkıştırma, borunun kenarlarına doğru gelen yanal basıncın etkili bir hal almasını sağlar ve böylece yük faktörünü ve destek mukavemetini artırır. Yüksek kaliteli yataklama, geri dolgu zemininin dikkatlice yerleştirilmesi ve sıkıştırılması ve eksik hendek metodunun kullanılması, borunun bu etkenlerden herhangi birinin eksik olduğu durumdan önemli dercede büyük bir dolgu yükünü taşıyabilmesini sağlar [36, 47].

7.6 Tünel İnşaatı

Marston yük teorisi, tüneller içindeki veya örselenmemiş zemin içine sürülen borular üzerindeki yükü belirlemekte de kullanılabilir. Marston Tünel–Yük eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$W_t = C_t \cdot B_t \cdot (\gamma \cdot B_t - 2 \cdot C) \quad (7.16)$$

W_t , KN/m cinsinden boru üzerindeki yük ve γ , özgül ağırlıktır. Yük katsayısı C_t , C_d ile aynı yöntemle hesaplanır. B_t , maksimum tünel genişliği, veya eğer pipe-jacking yöntemi uygulandıysa, borunun dış çapıdır. C katsayısı, kohezyon katsayısı olarak adlandırılır ve boyut olarak kuvvet/birim alandır (KN/m^2).

(7.9) eşitliği kullanılarak C_d ve C_t değerleri hesaplanabilir. Bu denklem, H/B 'nin çok büyük değerleri için C_t 'nin $1/(2 \cdot K \cdot \mu')$ limit değerine ulaştığını belirtir. Bu nedenle çok derin tünellerde C_t için yük $1/(2 \cdot K \cdot \mu')$ değerini kullanarak yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Tüneller içindeki borular veya örselenmemiş zemine sürülen borular üzerine gelen yükler için geliştirilen teori, hendek içindeki borularınkiyle hemen hemen aynıdır. Ancak tünel yükü kohezyon nedeniyle biraz daha azdır. Ayrıca (7.16) denkleminde de anlaşılacağı gibi, C değeri yükü hesaplamak açısından çok önemlidir. Ancak C katsayısının değerleri, benzer zeminler için bile büyük

değişiklikler gösterir. Bu değer örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile belirlenebilir. Hesapta laboratuvarında belirlenen değer yaklaşık 1/3'ünün kullanılması tavsiye edilir. Ancak, güvenilir laboratuvar verilerinin olmadığı veya bu deneylerin yapılmasının uygun olmadığı durumlarda Tablo 8.2'teki değerler kullanılabilir. Ayrıca mevsimsel donmalara ve çatlamalara veya suya doygunluk nedeniyle mukavemet kaybına maruz kalan bölgelerde bu katsayının sıfır olarak alınması tavsiye edilir. $\gamma.B_t-2.C$ faktörü negatif olamaz. Bu nedenle $2.C, \gamma.B_t$ 'den büyük olamaz [34].

Tablo 7.2: Tavsiye Edilen Kohezyon Katsayıları [34].

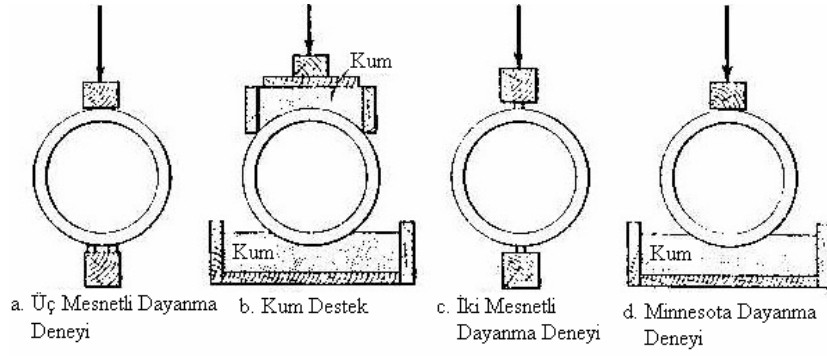
Malzeme	C Değeri (KN/m ²)
Kil, çok yumuşak	2
Kil, orta	12
Kil, sert	50
Kum, gevşek, kuru	0
Kum, killi	5
Kum, sıkı	15

7.7 Yeraltı Yapılarının Destek Mukavemetleri

7.7.1 Boruların Destek Mukavemetini Bulmak Amacıyla Yapılan Deneyler

Dairesel boruların destek mukavemetlerini laboratuvarında belirlemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Boruları desteklemek ve yüklemek için kullanılan dört metot, iki mesnetli dayanma, üç mesnetli dayanma, kum destek ve Minnesota dayanma metotlarıdır. Bu metodlarla ilgili detaylar Şekil 7.14'te gösterilmektedir. Bu deneylerden üç mesnetli dayanma metodu en kolay ve en çok kullanılandır ve ayrıca doğru sonuçlar vermektedir [46].

Şekil 7.14'te görüldüğü gibi, boru üzerindeki deney yükü ve reaksiyon her deney türünde farklı dağılmaktadır ve aynı şekilde kırılma yükü ya da destek mukavemetleri de farklıdır. Borunun dayanma mukavemetini üç mesnetli dayanma mukavemeti deneyiyle elde edilen değer olarak vermek uygundur [47].

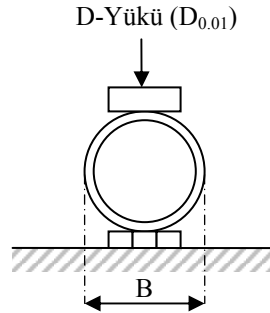


Şekil 7.14. Boruların Destek Mukavemetini Bulmak Amacıyla Yapılan Deneyler

7.7.2 Üç Mesnetli Dayanma Mukavemeti

Rijit bir borunun mukavemeti, laboratuvarında üç mesnetli dayanma mukavemeti deneyi ile bulunur Şekil (7.15). Üç mesnetli dayanma mukavemeti, boru numunesinde kırılmalara veya tehlikeli çatlamalara neden olabilecek yüküdür. Başka bir deyişle, üç mesnetli dayanma yükü, bir boru numunesi üzerinde 0.01 in. (0.254 mm) genişliğinde çatlak meydana getiren yüklemedir. Bu yükün zeminde göçmeye neden olması gerekli değildir [7, 34, 57].

Bu deneyde, üç adet yatay destek üzerinde duran bir boru, belirli bir yüke maruz bırakılır ve bu yük altında malzemede kırılmalar olup olmadığı gözlenir.



Şekil 7.15. Üç Mesnetli Dayanma Deneyi [7].

7.7.3 Yük Faktörleri ve Güvenlik Sayıları

Güvenlik faktörüne bağlı olarak gerekli mukavemet aşağıdaki formülle elde edilebilir:

$$\text{Gerekli üç-mesnetli taşıma gücü} = (\text{tasarım yükü} \times \text{güvenlik faktörü}) / \text{yataklama faktörü} \quad (7.17)$$

Kırılma mukavemeti borunun kırıldığı yük olduğundan, kırılma mukavemeti boru üzerinde olabilecek muhtemel yükü ve uygun bir yük faktörünü aşmalıdır. Aşağıdaki güvenlik faktörlerinin genellikle uygun olduğu kabul edilir [27]:

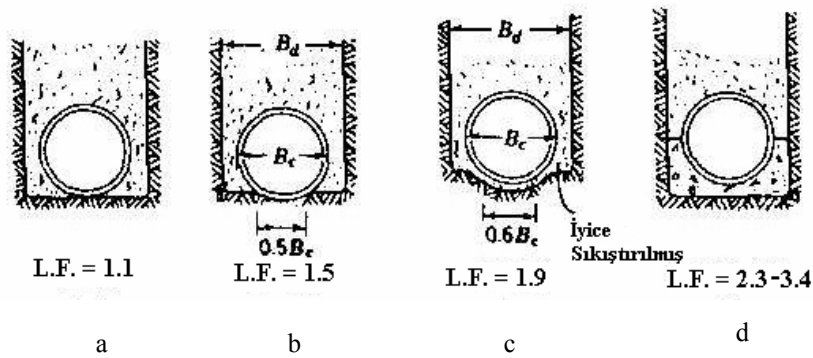
Camlı kil borular için	: 1.5
Donatısız beton borular için	: 1.5
Betonarme borular için	: 1.25

7.7.4 Yataklama Şartlarına Göre Yük Faktörü

Yük faktörü (LF), belirli bir yataklama şartı altında rijit bir boru mukavemetinin üç mesnetli dayanma mukavemeti deneyiyle belirlenen mukavemete oranıdır. Rijit borular üzerinde yapılan çok sayıda deney, 7.14’de gösterilen diğer üç yöntem için aşağıdaki yük faktörlerini vermektedir [47].

Kum destek deneyi	= 1.5
İki mesnetli dayanma deneyi	= 1.0
Minnesota dayanma deneyi	= 1.1

Şekil 7.16’da görüldüğü gibi, genellikle 4 çeşit yataklama durumu tanımlanır. Rijit borular üzerine etkiyen zemin yükü, Marston Formülü ($W_d = C_d \cdot \gamma \cdot B_d^2$) ile hesaplanabilir. Ancak, deneyler göçmeye sebep olan Marston yükünün genellikle üç mesnetli dayanma mukavemetinden büyük olduğunu ve bu değer borunun yataklanma türüne bağlı olduğunu göstermiştir.



Şekil 7.16. Yataklama türleri [46].

Arazi mukavemeti, arazide göçmeye neden olacak Marston Yüğü’dür. Arazi mukavemetinin üç-mesnetli dayanma mukavemetine oranı borunun yataklanma türüne bağlı olduğu için “yataklanma faktörü” olarak adlandırılır. Üç Mesnetli

dayanma mukavemeti, arazi mukavemeti ve yataklama faktörü cinsinden aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir:

$$\text{Üç Mesnetli Dayanma Mukavemeti} = \text{Arazi Mukavemeti} / \text{Yataklama Faktörü} \quad (7.18)$$

Boru arazide yerleştirilip yüklendiğinde, yük ve reaksiyon dağılımı deney yüklemesinde bulunandan çok daha farklı olacaktır ve belirli durumlarda borunun kenarlarına doğru yanıl basınçlar uygulanacak, böylece düşey yükleri taşıma kabiliyeti artırılacaktır. Bu nedenle, arazi şartları altında gömülü bir borunun gerçek dayanma mukavemeti, laboratuvarıa 3 mesnetli dayanma deneyinden elde edilen değerdan büyüktür. Dört yataklama durumunun herhangi birinde arazi mukavemeti, üç mesnetli dayanma mukavemetini bir yük faktörüyle çarparak bulunabilir. Bu yataklama durumları için yük faktörlerinin değeri aşağıdaki gibi alınabilir [47]:

- Müsaade edilmeyen yataklama için : 1.1
- Sıradan yataklama için : 1.5
- Birinci sınıf yataklama için : 1.87
- Beton-gömlek içine yataklama için : 2.25 - 3.37

7.16a’da görülen müsaade edilmeyen yataklama durumlarında temeli biçimlendirmek ya da boru altındaki veya çevresindeki zemini sıkıştırmak için hiçbir çaba harcanmaz. Bu tür bir yataklamanın yük faktörü düşüktür ($LF = 1.1$) ve drenaj işi için uygun değildir.

Sıradan yataklama durumunda ($LF = 1.5$) hendek tabanı, borunun en azından yarı genişliği kadar boru şeklini alacak şekilde biçimlendirilmelidir. Boru, en azından boru üst seviyesinden 0.15 m yukarıya kadar uzanan ince, granüler zeminle sarılmalıdır (Şekil 7.16b) [44].

Birinci sınıf yataklama için (Şekil 7.16c), boru genişliğinin 0.6’sı için ince, granüler malzeme içine yerleştirilmeli ve boru üstünden 0.3 m yukarıya kadar bu malzemeyle tamamen sarılmalıdır. Buna ilave olarak, geri dolgu malzemesi elle yerleştirilmeli ve kenarlarda ve boru üzerinde ince tabakalar halinde dikkatlice sıkıştırılmalıdır. Birinci sınıf yataklama için yük faktörü 1.9’dır [44].

Beton yatak, borunun alt kısmını beton içine yerleştirerek yapılır. Bu tür yapı, aşırı yüklerle karşılaşılın toprak baraj veya yüksek dolgular dışında muhafaza işinde

kullanışlı değildir. Bu tür bir yataklama 2.2-3.4 arasında değişen yük faktörleriyle, en iyi şartı sağlar [44, 57].

7.8 Fleksibl Boru Analizi

7.8.1 Fleksibl Boru Üzerindeki Yükler

Çatlamadan ya da kırılmadan deforme olabilen borular fleksibl olarak adlandırılır. Birçok fleksibl boru, mukavemetlerinin %90-99'luk bir bölümünü çevre zeminden karşılar. Bu nedenle, fleksibl boru sisteminin performansı büyük oranda çevre zeminin özelliklerine ve arazi sıkılık derecesine bağlıdır. Bu tür borular, mukavemetleri sayesinde bir miktar toprak yükünü taşıyabilmelerine rağmen, esas mukavemetlerini çevrelerindeki zeminin pasif yanal desteğinden alırlar. Pasif zemin desteği, düşey yarıçap azalırken yatay yarıçapın yanlara doğru genişlemesi sonucu meydana gelir. Bu nedenle, fleksibl boruların tasarımı, halka eğilmesinden yola çıkarak belirlenebilir. Yük, borunun gömüldüğü bölgedeki zeminin rijitliği ve borunun rijitliği fleksibl boru tasarım ve analizindeki üç önemli parametredir [21, 30, 9].

Boru üzerindeki yük, prizma yükü teorisi kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir. Bu yük, zeminin birim ağırlığı ve kaplama kalınlığı sonucu meydana gelir. Araştırmalar, fleksibl bir boru üzerindeki uzun süreli bir yükün prizma yüküne ulaştığını göstermiştir.

Fleksibl boruların yapıldığı malzeme, kırılmadan ya da çatlamadan en azından performans limitlerine kadar deforme olabilmelidir. Performans limiti (ya da göçme durumu), bu limitin ötesinde borunun kullanım amacına uygun olarak kullanılamayacağı bir sınırdır. Genellikle performans limiti, boru duvarlarının çatlaması, zeminin yer değiştirmesi, duvar burkulması gibi bir aşırı deformasyondur.

Başka bir deyişle, performans limiti, boru üzerindeki yükler zeminin kemerlenme hareketiyle azaltılmadığı takdirde halkanın deformasyona devam edeceği ve göçeceği deformasyon değeridir. Örneğin, eğer toprak yükü altında duvarlar gözle görülebilir şekilde kırılmaya başlarsa, halka göçmese bile daha fazla deformasyona dayanamayacağından performans limitine ulaşılmıştır [57].

7.8.2 Boru Rijitliği

Fleksibl borularda, kırılma mukavemeti yerine boru rijitliği, hakim boru malzemesi özelliğidir [30]. Boru rijitliğini etkileyen faktörler, sıcaklık, zaman ve boru kalınlığıdır. Sıcaklık arttıkça boru rijitliği azalır. Aynı zamanda, sabit yük altında da boru rijitliği zamanla azalır. Kalite kontrolü ve tasarım açısından borunun sabit bir kalınlığı olmalıdır. Aksi taktirde, kalınlıktaki bir değişim boru rijitliğini önemli ölçüde değiştirir. Boru rijitliğinin azalması sonucu eğilmeler artar, zemin etkileyen yükün daha büyük bir kısmını taşımak zorunda kalır, burkulma mukavemeti azalır, boru şeklinde bozulma meydana gelir ve boru duvarlarındaki deformasyon artar. Belirli bir boru için boru rijitliği, laboratuvarıda paralel levha yükleme deneyi ile elde edilir. Bu deneyde bir boru numunesi, deney aletinde iki yatay paralel levha arasına yerleştirilir. Sıkıştırıcı bir yük uygulanır ve düşey deformasyon (Δy), çapın %5'ine ulaşıncaya kadar yük artırılır [11] .

$$\text{Rijitlik faktörü} = EI \quad (7.19)$$

$$\text{Halka rijitliği} = EI / r^3 \quad (\text{bazen } EI / D^3 \text{ olarak alınabilir}) \quad (7.20)$$

$$\text{Boru rijitliği} = F / \Delta y = 6.7 EI / r^3 \quad (7.21)$$

Burada,

E : Elastite modülü (KN/m^2)

I : Eylemsizlik momenti (m^4/m)

r : Borunun ortalama yarıçapı (m)

D : Borunun ortalama çapı (m)

F : Kuvvet (KN/m)

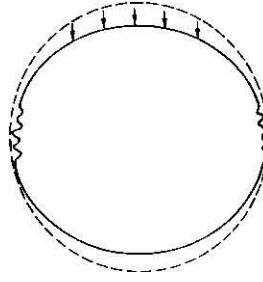
Δy : Düşey yönde deformasyon (m)

7.8.3 Fleksibl Borular İçin Boru Tasarım Kriterleri - Performans Limitleri

Gömülü borularda, birçok yapıda olduğu gibi performans limitleri de gerilme, deformasyon, eğilme veya burkulmadan doğrudan etkilenir. Projede göz önüne alınması gereken performans limitlerinden aşağıda kısaca bahsedilmiştir [34]:

a. Duvar Ezilmesi: Duvar ezilmesi, sünek bir malzemenin (lokalize olmuş) bölgesel akma durumunu veya gevrek malzemelerin çatlama sonucu göçmesini tanımlamak için kullanılan bir terimdir. İç duvar gerilmeleri akma gerilmelerine veya boru

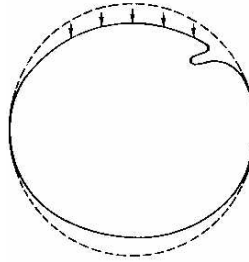
malzemesinin nihayi gerilmelerine ulaşınca bu performans limitine ulaşılır (şekil 7.17).



şekil 7.17. Duvar Ezilmesi [34].

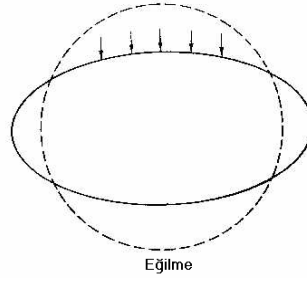
Duvar ezilmesi, birçok rijit veya gevrek boru için başlıca performans limiti veya tasarım esasıdır. Çok iyi sıkıştırılmış geri dolgu içine yerleştirilmiş ve çok derin bir örtü kalınlığına maruz bırakılmış fleksibl borularda da bu performans limitine ulaşılabilir.

b. Duvar Burkulması: Burkulma, yetersiz rijitlik durumunda meydana gelebilir. Burkulma olayı, i vakumu, dış hidrostatik basıncı veya sıkıştırılmış zeminde yüksek toprak gerilmelerine maruz kalan fleksibl boruların tasarımını etkiler. Boru ne kadar fleksibl ise, duvar yapısı burkulmaya karşı koyarken o kadar dengesiz olacaktır (şekil 7.18).



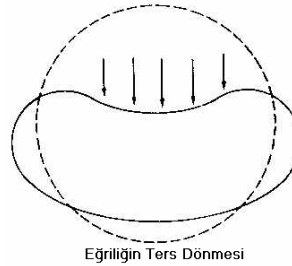
şekil 7.18. Duvar Burkulması [34].

c. Aşırı Eğilme: Boru rijitliği, boru et kalınlığı ya da profilindeki değişimler, toprak dolgu ve doğal zeminin rijitliği, destekleme sisteminin türü ve zeminin sıkıştırılma miktarı borularda meydana gelen eğilmeleri etkiler. Eğilme, fleksibl borular ve yarı-rijit veya yarı fleksibl borular için bir tasarım kriteridir (şekil 7.18) [12].



Şekil 7.19. Aşırı Eğilme [34].

d. Eğriliğin Ters Dönmesi: Eğriliğin ters dönmesi bir eğilme olayıdır ve eğilme kontrol edildiği takdirde meydana gelmez. Örneğin oluklu çelik borularda yaklaşık %20'lik bir eğilmeden sonra eğrinin ters döndüğü belirlenmiştir. Gömülü PVC borular ise, dış yüklemeye bağlı olarak eğildiğinde, %30 eğilmede eğrilikte önemli dönüş meydana gelebilir. Bu eğilme seviyesi PVC borular için makul bir performans limiti olarak belirtilir. Utah State Üniversitesi'nde yapılan deneyler sonucunda, PVC borularda eğriliğin ters döndüğü noktanın ötesinde eğilmeler önemli ölçüde arttığında bile yük taşıma kapasitesinin artmaya devam ettiği görülmüştür.



Şekil 7.20. Eğriliğin Ters Dönmesi [34].

e. Deformasyon Sınırı: Bazı donatılı fiberglas borular gibi belirli boru malzemelerinde deformasyon sınırlandırılmalıdır. Bu sınır, deformasyon korozyonunu önlemek için gereklidir. Deformasyon korozyonu, boru duvarında oluşan deformasyon eşik deformasyonu değerinden büyük olduğunda, boru duvarında çevresel etkiler sonucu ortaya çıkan ve zamana bağlı olarak gelişen bozulmadır.

f. Boyuna Doğrultuda Gerilmeler: Rijit ve fleksibl borular yüksek boyuna doğrultuda gerilmelere karşı koyacak şekilde projelendirilmemiştir. Bu nedenle projesi ve inşaat, boyuna doğrultudaki gerilmeler minimum olacak şekilde yapılmalıdır. Bu gerilmeler, sıcaklıkla meydana gelen genişleme (büzülme) (kaynakla

birleştirilen çelik boru hatları için en önemli tasarım kriteri), boyuna doğrultuda eğilme ve Poisson etkisine (iç basınca bağlı) bağlı olarak meydana gelir.

Kaynaklı çelik boru hatlarında meydana gelen gerilmeler genellikle boruyu günün yüksek sıcaklıktaki saatlerinde kaynaklamak nedeniyle oluşur. Daha sonra meydana gelen soğuma çok yüksek çekme gerilmelerine neden olabilir. Bu gerilmeler, soğuk havalarda kapatma kaynakları yaparak veya genleşme ekleri yaparak küçültülebilir. Bir boru hattında meydana gelen boyuna doğrultuda eğilmenin ana nedenleri; borunun rijit şekilde bağlı olduğu baca veya yapının farklı oturması, boru yatağının veya temelinin eşit olmayan oturması, boru altındaki zeminin erozyonu, gelgit hareketlerinden etkilenen bölgelerde gelgite bağlı zemin hareketi, su muhtevastaki değişimlerden etkilenen zeminin mevsimlere bağlı olarak kabarması ve çökmesi ve temelün üniform olmamasıdır.

g. Kayma Yüklemleri: Kayma yüklemleri, genellikle üniform olmayan eğilme veya farklı oturmaya bağlanabilir. Bu kuvvetler, uygun tasarım ve yerleştirme tekniği ile ortadan kaldırılmalı veya en aza indirilmelidir.

h. Yorulma: Yorulma, hem cazibeli akım borularında, hem de basınçlı akım borularında göz önüne alınması gereken bir etkidir. Boru malzemeleri, çok sayıda çevrimsel gerilmelerin mevcut olması durumunda, düşük bir gerilmeye göçecektir. Hatalı çalışan malzemeye bağlı basınç yükselmeleri ve bunun sonucunda oluşan su darbesi periyodik gerilmeler ve yorulma meydana getirebilir. Trafik yüklerinden meydana gelen periyodik gerilmeler ise, sık yerlere gömülen borular dışında genellikle problem yaratmazlar.

i. Yapraklanma: Donatılı ve ince tabakalı malzemeler halka eğilmesine maruz kaldıklarında yapraklanma meydana gelebilir. Yapraklanma, radyal çekme ve ince tabakalar arası kayma nedeniyle veya kimyasal nedenlerden kaynaklanabilir.

7.9 Marston Yük Teorisi

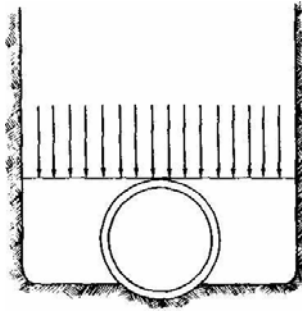
Marston ve Spangler tarafından yapılan ölçümler fleksibl bir boru üzerindeki yükün, rijit bir boru üzerine gelen yükten çok daha az olduğunu göstermiştir. Aşağıdaki örnek fleksibl bir boru eğildiğinde zeminde neler olduğunu anlamamıza yardımcı olacaktır. Bir yay üzerine ağırlık yerleştirildiğinde yay, yay rijitliği nedeniyle eğilmeye karşı koyarak deforme olacaktır. Yük-eğilme grafiği çizildiğinde, yayın

orantı limitine kadar bu ilişkinin doğrusal olduğu görülür. Fleksibl bir boru üzerine bir yük yerleştirildiğinde ise, boru hem eğilir hem de rijitliği nedeniyle eğilmeye karşı koyar. Bu nedenle, zemini rijitliği nedeniyle hareket veya eğilmeye karşı koyan doğrusal olmayan bir yay olarak kabul etmek mümkündür [26, 34].

Sert bir yay ile temsil edilen bir rijit boru ile boru çevresindeki daha fleksibl bir yay ile temsil edilen zemin arasında bir benzeşim çizildiğinde ve zemin içindeki rijit boruyu temsil eden yay sistemi üzerine bir yük veya ağırlık yerleştirildiğinde, zeminin deforme olduğu ve yükün büyük bir kısmını borunun taşıdığı görülür. Durum tersi olduğunda ve zemini temsil eden çok daha rijit iki yay arasına fleksibl bir yay yerleştirdiğimizde, yük uygulandığında borunun eğildiğini ve zeminin yükün büyük kısmını taşımak için zorlandığını görebiliriz [26, 34].

Yan dolgu ve zeminin aynı rijitliğe sahip olduğu özel durum için, boruyla orantılı olan V yükünün miktarı sadece genişlik baz alınarak belirlenebilir. Yani eğer boru ve yanlarındaki zemin aynı rijitlikte ise, V yükü Şekil 7.21’de gösterildiği gibi uniform olarak dağılacaktır. Basit bir orantıyla yük,

$$W_c = (W_d.B_c)/B_d = [(C_d.\gamma.B_d^2.B_c).W_c] / B_d = C_d.\gamma.B_d.B_c \quad (7.22)$$

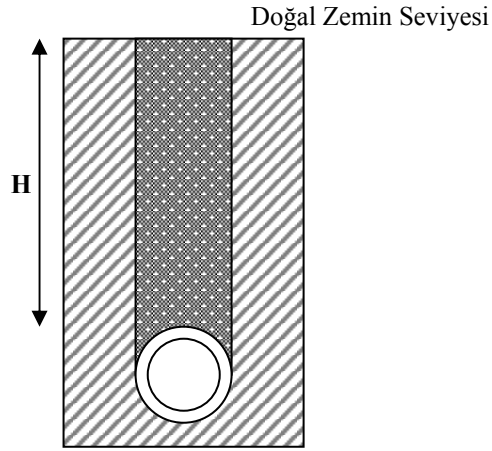


Şekil 7.21. Marston Teorisine Göre Fleksibl Boru Üzerindeki Yük Dağılımı [34].

7.10 Prizma Yüğü

(7.8) denklemi maksimum yük durumunu, (7.22) denklemi ise minimum yük durumunu temsil etmektedir. Fleksibl bir boru için daha gerçekçi bir yaklaşım ise, boru üzerindeki düşey zemin prizmasının ağırlığı olan prizma yükünün hesaplanmasıdır. Yapılan çalışmalarda fleksibl bir boru üzerindeki efektif yükün Marston yöntemiyle bulunan minimum değer ile prizma yükü arasında olduğu bulunmuştur. Uzun bir süreçte yük, prizma yüküne ulaşabilir. Bu nedenle, fleksibl bir boru üzerindeki yük hesaplanmak istendiğinde prizma yükü temel alınır. Prizma

yükünün bir avantajı, hendek genişliğinden bağımsız olmasıdır. Prizma veya dolgu yükü aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir (Şekil 7.22) [34].



Şekil 7.22. Prizma Yükü [34].

$$P = \gamma \cdot H \quad (7.23)$$

P : H derinliğindeki zemin ağırlığına bağlı basınç (KN/m^2)

γ : Zeminin birim ağırlığı (KN/m^3)

H : Zemin basıncının gerekli olduğu derinlik (m)

7.11 Hendek Durumu

Boru ile aynı rijitlik derecesine sahip iyice sıkıştırılmış yan dolgu içindeki fleksibl boruda W_c değeri, B_c/B_d ile çarpılır. Böylece, bir hendek içerisindeki fleksibl boru üzerine gelen yükü hesaplamak için kullanılan Marston-Spangler denklemi (7.22) no'lu denklem olarak bulunur. Fleksibl boru üzerindeki yük aşağıdaki şekilde hesaplanır. Yük katsayısı C_d , Şekil 7.4'ten elde edilir [34].

Prizma yükü : $P = \gamma \cdot H$ (KN/m^2)

Marston yükü : $W_d = C_d \cdot \gamma \cdot B_c \cdot B_d$

Prizma yükü B_c ile çarpılır ve Marston yüküne eşitlenir:

$$P \cdot B_c = \gamma \cdot H \cdot B_c = W_d = C_d \cdot \gamma \cdot B_d \cdot B_c \quad (7.24)$$

7.12 Dolgu Durumu

Dolgu içindeki bükülebilir boruya gelen yük hesabı ise Marston-Spangler teorisine göre (7.24) no'lu formül kullanılarak hesaplanabilir [34].

$$W_c = C_c \cdot \gamma \cdot B_c^2 \quad (7.25)$$

7.13 Spangler Iowa Formülü

Rijit ve fleksibl borular arasındaki en önemli farklardan biri, fleksibl boruların rijit borulardaki gibi boru duvarlarının kırılmasından çok eğilme nedeniyle zarar görmesidir. Fleksibl bir boru, düşey toprak yükü altında eğilir, düşey çapı azalır ve yatay çapı belli bir miktar artar. Boru kenarlarının çevre zemine doğru yaptığı bu dışarı yönlü hareket, zeminin pasif mukavemetini ortaya çıkarır. Dolgu yüksekliği artırıldıkça, boru üst seviyesi yaklaşık olarak düzleşene kadar bu hareket devam eder. Sonradan ilave yük, borunun üst kısmının eğriliğinin ters yöne dönmesine neden olur ve borunun üst kısmı yukarı doğru konkav hale gelir. Borunun eğilmesi, üstteki zeminin boru üst kısmının aşağı yönlü hareketini izleyebileceğinden hızlı bir biçimde ilerleyecek ve yapı üzerine basınç etkileyecektir. Sonuçta tamamen göçme veya kırılma meydana gelecektir. Bu nedenle, fleksibl bir boru tasarımı, rijit bir borudaki gibi yan duvarlardaki gerilmelerden çok halkanın eğilmesine bağlıdır [47].

Anson Marston'un öğrencisi M.G. Spangler, gömülü borular üzerine etkiyen yükleri hesaplamak için kullanılan Marston teorisinin fleksibl borular için uygun olmadığını bulmuştur. Spangler, fleksibl boruların rijit borulara kıyasla daha düşük rijitliğe sahip olmalarına rağmen yüklerin boru etrafında yayılması ve boru kenarlarının boruyu çevreleyen zemine doğru yaptığı dışarı yönlü hareket sonucunda oluşan pasif basınçlar nedeniyle zemin içine gömüldüklerinde oldukça iyi performans gösterdiklerini belirtmiştir. Bu varsayımlar, halka eğilmesinin fleksibl boru tasarımı için bir temel oluşturacağı düşüncesiyle birleşince, uygun tasarım yöntemi belirlemek için Spangler'ı fleksibl boru davranışı üzerinde çalışmaya teşvik etmiş ve bu çalışma ve deneyler 1942'de yayınlanan Iowa formülünün ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Bu tasarım yönteminde borunun yanal deformasyonu, düşey yükün, yataklama sonucu elde edilen desteğin ve borunun yatay hareketine karşı koyan yanal toprak basıncının bir fonksiyonu cinsinden hesaplamakadır. Spangler, borunun yeterince

rijit olduğu ve deforme olmuş dairesel bir borunun elips şeklinde olacağı varsayımına dayanarak, yatay eğilmenin yaklaşık düşey eğilmeye eşit olacağını belirlemiştir [10].

Spangler ayrıca, çevre zeminin borunun eğilmesi üzerindeki etkisini de hesaba katmıştır. Bu, Marston yük teorisinin uygulandığı ve bu yükün borunun üst kısmındaki düzlemde üniform dağıldığı varsayılarak elde edilmiştir. Ayrıca, yataklama açısına bağlı olarak taban üzerinde üniform basınç olduğu da varsayılmıştır. Spangler, kenarlarda, her bir kenardaki yatay basınç h 'nin borunun zemine doğru gömülmesiyle orantılı olduğunu kabul etmiştir. Orantılılık sabiti Şekil 8.23'te gösterildiği gibi tanımlanmış ve zeminin pasif direnci olarak adlandırılmıştır. Borunun yük taşıma kapasitesini bilerek, eğilme aşağıda verilen Iowa formülüyle hesaplanabilir [30, 34, 44, 47].

$$\Delta X = \Delta Y = (D_L \cdot K \cdot W_c \cdot r^3) / (EI + 0.061 e \cdot r^4) \quad (7.26)$$

D_L : Eğilme gecikme faktörü

K : Yataklama faktörü

W_c : Borunun birim uzunluğuna düşen Marston Yüğü (KN/m)

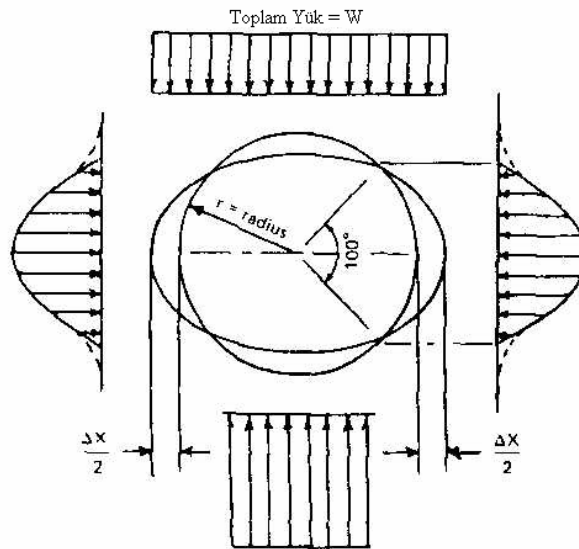
R : Borunun ortalama yarıçapı (m)

E : Boru malzemesinin elastisite modülü (KN/m²)

I : Eylemsizlik momenti (m⁴/m)

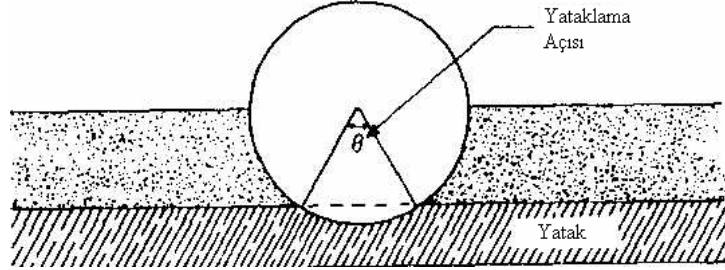
e : Yan dolgunun pasif direnci (KN/(m²)(m))

ΔX : Yatay eğilme veya çapta değişim (m)



Şekil 7.23. Fleksibl Boruların Deformasyonu [34].

(7.25) denklemi, üç amprik sabit K , D_L , ve e bilindiği taktirde gömülü borunun eğilmesini tahmin etmek amacıyla kullanılabilir. Yataklama sabiti, genişlik ve yerleştirmede elde edilen yataklama açısıyla değişir. Yataklama açısı Şekil 7.24'te gösterilmektedir. Genel bir kural olarak $K = 0.1$ değeri dikkate alınır.



Şekil 7.24. Yataklama Açısı [34].

1958 yılında, Spangler'in öğrencisi Reynold K. Watkins, Iowa formülünü boyutsal olarak incelemiştir. Watkins'in yaptığı analizler, e 'nin zeminin gerçek bir özelliği olamayacağını göstermiştir. Watkins'in çalışmalarının sonucu olarak başka bir zemin parametresi olan zemin reaksiyonu modülü $E' = e \cdot r$ tanımlanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilmiş Iowa formülü olarak adlandırılan formül ileri sürülmüştür.

$$\Delta X = (D_L K W_c r^3) / (EI + 0.061 E' r^3) \quad (7.27)$$

Iowa formülünde eğilmeleri hesaplamak için gereken başka bir parametre de, eğilme gecikmesi faktörü D_L 'dir. Bu faktör, zemin/boru sisteminin uzun süreli deformasyonunu belirler. Dolgunun sıkışma derecesine ve boru rijitliğine bağlıdır. Maksimum yük etkitildikten sonra fleksibl bir borunun eğilmeye devam ettiği süre sınırlıdır ve bu süre, boru çevresindeki zemin yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Boru kenarlarındaki zeminin yoğunluğu ne kadar büyük olursa, borunun eğilmeye devam edeceği süre o kadar kısaldır ve yüke tepki olan toplam eğilme daha az olur. Ters durumda, yani düşük zemin yoğunluğunda, sünme süresi daha uzundur ve sünmeye bağlı olarak ortaya çıkan eğilme daha büyüktür. Hendek yükü en büyük değere ulaştıktan sonra, boru etrafındaki zemin sıkılaşma sürecinde olduğu sürece zemin-boru sistemi eğilmeye devam edecektir. Boru, gömüldüğü zemin yükü taşımak için gerekli yoğunluğa ulaştığında ise, boru eğilmeye devam etmeyecektir [8, 34].

Zemin-boru sisteminde, zeminle ilgili tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi borunun kenarlarında oluşan konsolidasyon zamanla devam eder. Spangler'in yaptığı

alışmalara göre eğilme, 40 yıllık bir sürede %30 artabilir. Bu nedenle, uygun bir tasarım yöntemi olarak 1.5'lik bir eğilme gecikmesi faktörü kullanılması tavsiye edilmektedir. Ancak, birçok gömülü boru sisteminin yerleştirilmesi sırasında prizma yükü, Marston yükünün en az 1.5 katı büyüktür. Eğer projede prizma yükü kullanılırsa, eğilme gecikmesi değeri olarak $D_L = 1.0$ alınmalıdır.

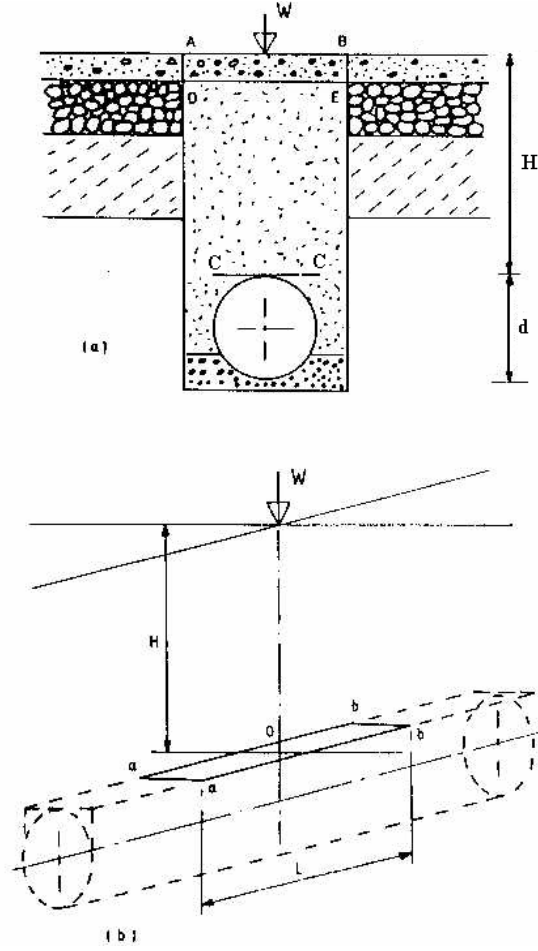
Geliştirilmiş Iowa formülünde kalıcı parametre, zemin modülü E' 'dr. E' değerini ölçmek için yapılan birçok deneme başarısızlıkla sonuçlanmıştır. En kullanışlı metot, yerleştirme koşullarının bilindiği gömülü bir borunun eğilmelerini ölçmek ve efektif E' değerini belirlemek için Iowa formülünden geri işlem yapmaktır. Bu; yük, yataklama faktörü ve eğilme gecikmesi faktörü için varsayım değerleri gerektir. Uygun olmayan varsayımlar bulunan E' değerlerinde değişimlere neden olur.

7.14 Hareketli Yüklerin hesap yöntemleri

7.14.1 Trafik Yükünün Gömülü Boru zerindeki Etkisi

Yeraltı mecraları dolgu ve zemin yüklerinin yanı sıra trafik (otoyol, demiryolu) yüklerinin de etkisi altındadır. Bu nedenle, gömülü boruların tasarımında zeminden kaynaklanan hareketsiz yk ve trafikten kaynaklanan hareketli yükün oluşturduğu toplam yük esas alınır. Hareketli ve hareketsiz yükler, boru üzerindeki yatay bir düzleme göre hesaplanır (şekil 7.25'de c-c) ve oluşan düşey yük, boru üzerindeki toplam yük olarak kabul edilir [20].

Doğal zemin seviyesiyle boru arasındaki mesafenin yakınlığı bu yüklerin etkisini artırır. Yani, sığ bir toprak kaplama altındaki borular bir yol altına yerleştirildiklerinde trafik yüklerinin etkisi artar. Ancak, tekerlek yüklerinin etkisi derinlikle azaldığından ve gömülü bir boru üzerindeki hareketsiz yükler genellikle hareketli yüklerden daha büyük olduğundan trafik yüklerinin borular üzerindeki etkisinin çok büyük olmadığını kabul edilir [20, 47].



Şekil 7.25. Bir yol altına gömülü boru üzerindeki hareketli yükler. (a) tipik kesit, (b) analizde kabul edilen homojen, izotropik durum [20].

7.14.2 Etki Faktörü

Boru hattı bir yolun altından geçtiğinde, genellikle kazıyı takiben uzun fakat çok sığ çukur veya yol yüzeyinde bir kabarma meydana gelir. Çukur veya kabarma, araç tekerlekleri yoldan geçerken küçük bir düşey harekete sebep olur ve bu nedenle meydana gelen atalet kuvvetleri hesaplamalarda dikkate alınmalıdır. Bu da, tekerlek yüklerini “etki faktörü” adı verilen bir katsayıyla artırarak elde edilir.

7.14.3 Trafik Yüklerinin Hesabı – Boussinesq Methodu

Hendek ve projeksiyon boruları üzerinde yapılan birçok deney, araçların tekerlek yükleri gibi statik eksenel bir yüzeysel yükünün, yarı sonsuz elastik zeminde olduğu gibi Boussinesq’nin gerilme dağılımı çözümüne dayanarak, zemin kaplaması vasıtasıyla yeraltı yapısına taşındığını göstermektedir (Şekil 7.27). Deneyler aynı zamanda hareketli tekerlek yükleri nedeniyle meydana gelen etki yüklerinin

büyükliğini de göstermektedir. Bu deneylerden elde edilen veriler ışığında Marston, yeraltı yapıları üzerindeki hareketli yükler için aşağıdaki formülü geliştirmiştir:

$$W_t = \frac{1}{A} I_c C_t P \quad (7.28)$$

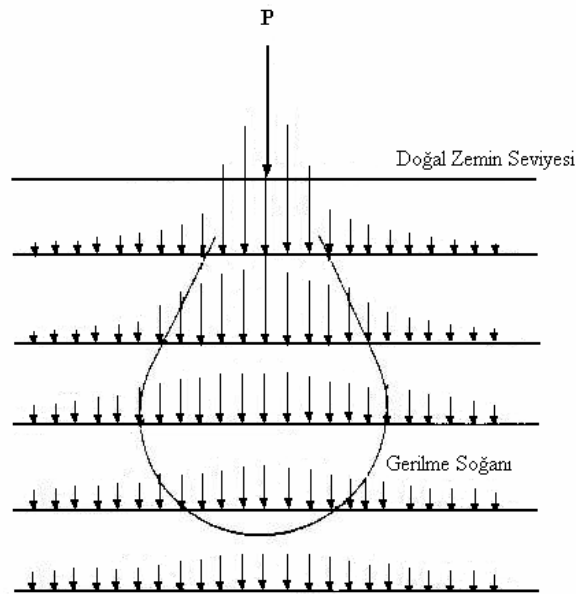
Burada; W_t = tekerlek yüküne bağlı olarak borunun birim boyuna gelen ortalama yük, (KN/m)

A = borunun üzerindeki yük hesaplanan kısmının uzunluğu, (efektif boy) (m)

I_c = etki faktörü

C_t = yük katsayısı

P = dolgunun yüzeyindeki eksenel tekerlek yükü, (KN)



Şekil 7.26. Gerilme Soğanı [47].

Yüzey yükü statik olduğunda etki faktörü I_c birine eşittir. Kamyon ya da uçak tekerleğinde olduğu gibi hareket ettiğinde ise, bu değer aracın hızına, vibrasyon hareketine, kanatların kalkması sırasında ortaya çıkan etkiye ve en önemlisi de yol yüzeyinin rijitlik özelliğine bağlı olarak değişir. Yapılan deneyler, etki faktörü değerlerinin menfez üzerindeki kaplama yüksekliğinden bağımsız olduğunu ve I_c 'nin tasarım değerlerinin genelde 1.5 ile 2 arasında değerler aldığını göstermiştir [8, 20, 34, 47].

C_t katsayısının değerleri, boru parçasının genişliğinden, uzunluğundan ve boru üzerindeki kaplama derinliğinden bağımsız, trafik yükü etkisi altındaki mecranın uzunluğuna, hendek genişliğine ve dolgu yüksekliğine bağlıdır [47].

BÖLÜM 8: PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE ZEMİNE GÖMÜLÜ RİJİT BORULARIN MÜHENDİSLİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

8.1 PLAXIS Sonlu Elemanlar Programının Tanıtımı

Sonlu elemanlar yöntemi, birçok mühendislik dalında karşılaştığımız matematiksel problemlere yaklaşık sonuçlar bulmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, inşaat mühendisliğinde zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme çeşitliği olan durumlarda kullanılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

PLAXIS programı, 1987 yılından bu yana geoteknik mühendisliğinin her alanında başarıyla kullanılan bir sonlu elemanlar programıdır. INPUT, OUTPUT, CALCULATION ve CURVES ana başlıkları altında dört bölümden oluşmaktadır. İlk olarak INPUT bölümünde gerekli veriler bilgisayara girilir, OUTPUT komutuyla zemin davranışı belirlenir, CALCULATION komutuyla o anki durum için hesaplamalar yapılır ve CURVES Komutu ile ise istenilen grafikler çizilebilir. Aşağıda programın işleyişine ait bazı önemli noktalar hakkında kısaca bilgi verilmektedir.

Programın kullanımı sırasında öncelikle geometrinin oluşturulması gereklidir. Bu amaçla LINES komutu ile çizgisel elemanlar kullanılabilir ve çalışma alanının sınırları belirlenir. Çok tabakalı bir zemin profili üzerinde çalışılacağı zaman yine bu çizgisel elemanlar yardımıyla arazi istenilen noktalardan ayrılarak farklı zemin bölgeleri tanımlanabilir.

Geometrinin oluşturulmasından sonra projede kullanılacak yapısal elemanlar (temel, palplanş, geotekstil, yatay destek, ankraj) yerine göre BEAM, GEOTEXTILE, NODE TO NODE ANCHOR ve FIXED END ANCHOR komutları yardımıyla modellenir.

Tünel hesapları için ayrı bir komut olan TUNNEL komutu kullanılmaktadır. Tünel hesaplarında tüneli üç farklı şekilde tanımlamak mümkündür (sol yarım tünel kesiti, yağ yarım tünel kesiti ve tam tünel kesiti). Bu komut BEAM komutunun farklı bir kullanımı olduğundan, tünel hesaplarında kullanılacak parametreler BEAM komutu için kullanılanların aynısıdır.

Tünel geometrisini belirlemek için ise TUNNEL DESIGNER komutu kullanılır. Burada tünelin yarıçapı ve her bir dilim için o dilimin merkez açısı belirlenir. Dairesel tünellerde bu açılar her bir dilim için aynı iken, değişik kesitli tüneller için bu açılar değiştirilerek farklı geometriler elde edilebilir. Ayrıca bu komut altında tünel etrafındaki kaplama malzemesi ve zemin-yapı etkileşimini hesaba katmak için arayüzey elemanlar (INTERFACE ELEMENTS) tariflenebilir. Buna ilave olarak, fleksibl yapılar için geçerli olan şekil değiştirebilme yüzdesi yine bu komut altında tünel kesitine atanabilir.

PLAXIS programı, önceden belirlenmiş yer değiştirmeler, çizgisel ve yayılı yükleri kullanmamıza da olanak sağlar. Bu amaçla, sırasıyla PRESCRIBED DISPLACEMENTS, POINT FORCES ve TRACTION LOADS komutları kullanılabilir.

Malzeme özellikleri atanmadan önce, sınır şartlarını belirlemek amacıyla STANDARD FIXITIES komutu kullanılır. Programda bu düğmeye basıldığında otomatik olarak düşey yönde harekete izin verilirken yatay yöndeki hareket sınırlandırılır. Ancak, gerekli hallerde bu sınır şartlarına müdahale edilerek gerekli düzenlemeler yapılabilir.

PLAXIS programında MATERIAL PROPERTIES ana başlığı altında malzeme özellikleri SOIL&INTERFACE, BEAM, ANCHOR ve GEOTEXTILE elemanlar tanımlanır.

Çubuk elemanlar için (BEAM ELEMENT), Normal rijitlik (EA), Eğilme rijitliği (EI), duvar kalınlığı (d), eleman ağırlığı (w) ve poisson oranları (ν); ankraj ve destek elemanlarını tanımlamakta kullanılan NODE TO NODE ANCHOR komutu için Normal rijitlik (EA), destek aralığı (L_s) ve maksimum kuvvet (F_{max}) değerleri; ankraj kökü ve geotekstil malzemesini tanımlamak için kullanılan GEOTEXTILE komutu için ise Normal rijitlik (EA) değerleri program girdileri kısmında verilmelidir.

Programda zemin özelliklerini belirlemek amacıyla Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil Model (HS), Soft Soil Creep Model (SSC) ve Lineer Elastic model olmak üzere dört farklı zemin modeli kullanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında Mohr-Coulomb modelinden yararlanıldığı için burada Mohr-Coulomb modeli parametrelerinden bahsedilecektir.

Bu modelde Young Modülü (E), poisson oranı (ν), içsel sürtünme açısı (ϕ), genleşme açısı (ψ), zeminin kuru ve doğal birim hacim ağırlıkları (γ_k ve γ_n), yatay ve düşey permeabilite katsayıları (k_v ve k_h) ve zeminin herhangi bir yapısal elemanla temasta olması durumunda arayüzey elemanlar tanımlanmaktadır. Tüm malzeme parametreleri tanımlandıktan sonra her bir malzeme ilgili ortama atanarak sonlu elemanlar ağının oluşturulması sahfasına geçilir.

Sonlu elemanlar ağı, MESH komutu ile oluşturulur. Programın normal işleyişinde sonlu elemanlar ağı çok ince olarak oluşturulmaz, ancak istendiği takdirde tüm zemin ortamı ya da sadece incelenmek istenen kısım için çok ince bir sonlu elemanlar ağı oluşturulabilir.

Sonlu elemanlar ağı da oluşturulduktan sonra başlangıç koşullarını belirlemek amacıyla INITIAL CONDITIONS düğmesine basılır. Burada varsa yeraltı su seviyesi çizilir ve boşluk suyu basıncı hesaplanır. Daha sonra zemin, üzerinde herhangi bir yapısal eleman olmadığı ilk haline getirilir ve efektif gerilmeler belirlenir.

Bu adımdan sonra CALCULATION komutuna basılarak ortam son haline getirilir ve hesaplamalara geçilir. Bu aşamada kademeli inşaat yapılması durumunda STAGED CONSTRUCTION, tekil ya da yayılı yük tanımlanması durumunda ise TOTAL MULTIPLIERS (toplam çarpanlar) komutuyla işlem yapılır. Tüm aşamalar tamamlanıp ortam son haline geldiğinde ise CALCULATE komutuyla zemin ve yapısal elemanların bu şartlar altındaki davranışı görülebilir. İstenildiği takdirde CURVES komutuyla istenilen grafikler çizilerek gerekli karşılaştırmalar yapılabilir [4, 19].

8.2 Programlama Sırasında İzlenen Adımlar

Bu çalışmada gerçek bir zemin problemi ele alınmış ve yapılan analizlerde zemin ve dolgunun malzeme özelliklerini ve arazi yapısını tespit ederken

Prof. Dr. Ahmet Sağlamer'in Marmaris Çevre Koruma ve Altyapı Projesi kapsamında inşa edilen kollektör hatları ile ilgili yaptığı çalışmalardan yararlanılmıştır [41].

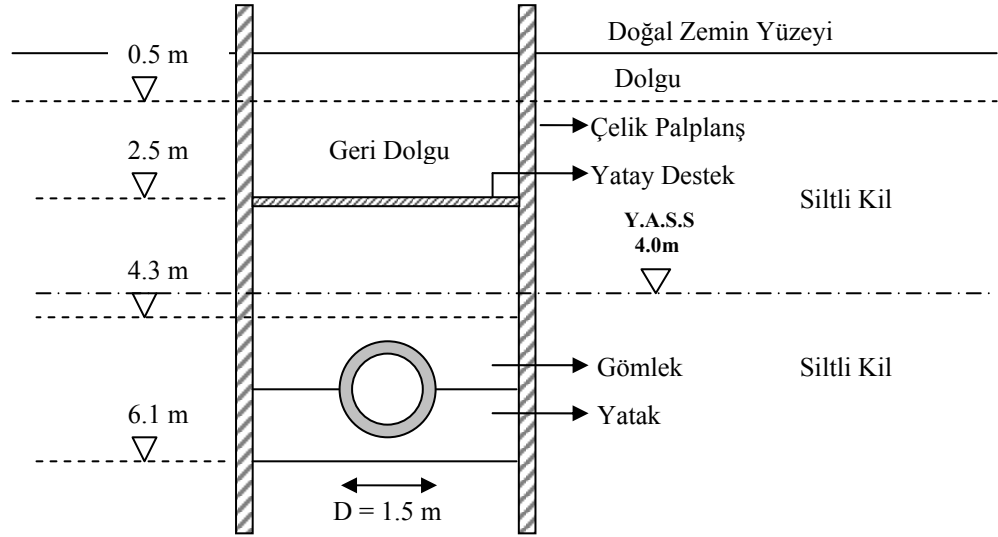
Aynı zemin profili ve malzeme özellikleri kullanılarak, 1.5 m çapındaki beton bir borunun farklı yerleştirme şartları altındaki davranışını görebilmek amacıyla 5.8 m derinliğinde, üç farklı hendek genişliğinde (2.2 m, 3.4 m, 4.4 m) ve farklı sıklıklardaki üç ayrı gömlek malzemesi kullanılarak A, B, C ve D sınıfı yataklama şartları altında hesaplamalar yapılmıştır. Bu amaçla 36 adet model oluşturulmuş ve bu yerleştirme şartları altında borudaki kesit tesirleri ve boru üzerindeki normal gerilme değerleri incelenmiştir.

Projenin yapıldığı alanda yeraltı su seviyesinin yüzeye yakındır ve doğal zemin siltli kildir (Tablo 8.1). Y.A.S.S'nin yüzeye yakın olması nedeniyle kazı sırasında hendek kenarlarının göçmesini önlemek için hendek kenarları çelik palplanşlarla desteklenmiş ve kazı ilerledikçe palplanşlarda ortaya çıkabilecek deformasyonları önlemek amacıyla da yatay destekler kullanılmıştır. Şekil 8.1'de sonlu elemanlar analizinde kullanılan hendek ortamı gösterilmektedir.

Tablo 8.1. Ortamdaki Zemin Parametreleri

Malzeme Cinsi	E	γ_n	ϕ	c	v
	[kN/m ²]	[kN/m ³]	[°]	[kN/m ²]	[-]
Dolgu	5000	20	28	-	0.40
Siltli Kil	4000	18	0	60	0.40
Siltli Kil	6000	18	0	40	0.35
Orta Sıkı Kum - Geri Dolgu	12000	20	30	-	0.25
Gevşek Granüler - Gömlek	10000	20	30	-	0.30
Orta Sıkı Granüler - Gömlek	30000	20	35	-	0.25
Sıkı Granüler - Gömlek	50000	21	40	-	0.20
Granüler - Yatak	100000	21.5	40	-	0.25

Yapılan analizler sırasında, hendeğin simetrik olması göz önünde bulundurularak hendeğin yarısı modellenmiştir. Simetrik kenar yanal hareketleri sınırlandıracak, buna karşılık düşey yönde harekete izin verecek şekilde yatay yönde tutulu, düşey yönde serbest olarak modellenmiştir.



Şekil 8.1. Gerçek Zemin Ortamı

Program ile boru yerleşimini en iyi şekilde modelleyebilmek amacıyla kademeli kazı ve dolgu yapılmıştır. Bu sayede boru ve zemin davranışının her aşamada değişimi izlenebilmiştir. Kazı, boru yerleşimi ve dolgu işlemlerinden oluşan bu aşamalar beş adımda tamamlanmıştır. Bu aşamalar aşağıda özetlenmiştir.

1. Aşama: Palplanşın çakılması.
2. Aşama: -4 m kotuna kadar kazı yapılması ve -2.5 m kotunda yatay desteğin yerleştirilmesi.
3. Aşama: -5.8 m kotuna kadar (hendeğin tabanı) kazı yapılması.
4. Aşama: Borunun yerleştirilmesi ve -4 m kotuna kadar hendeğin doldurulması.
5. Aşama: Hendeğin geri dolgu ile tamamen doldurulması, palplanş ve yatay desteğin kaldırılması.

Boru üzerindeki toprak yükü hesabında, boru orta noktasından yukarı doğru, boru etrafındaki düşey gerilmeler esas alınmıştır. Bu düşey gerilmelerin toplamı etkidikleri alan ile çarpılarak boru üzerindeki toprak yükü bulunmuştur.

Yan dolguların taşıdığı toprak yükünü hesaplamak amacıyla her model için boru orta noktası hizasında, borudan hendeğin duvarına kadar olan yatay düzlemdeki düşey gerilme dağılımları belirlenmiş ve bu gerilmelerin toplamı da etkidikleri alan ile çarpılarak yan dolguların taşıdığı toprak yükü bulunmuştur.

Boru üzerindeki toprak yükünün bir kısmı pozitif kemerlenme sonucu yan dolgulara aktarılmaktadır. Marston hesap yöntemi ise yan dolguların yük taşımadığını, hendek içindeki tüm zemin prizması ağırlığını borunun taşıdığını kabul etmektedir. Bu nedenle, PLAXIS programı ile bulunan yükler, Marston teorisine göre hesaplanan yükler ile karşılaştırıldığında, Marston teorisiyle bulunan yüklerin daha fazla olduğu görülmüştür.

Yapılan analizlerin sonuçları Ek A, Ek B ve Ek C’de detaylı olarak sunulmuştur.

BÖLÜM 9: SONUÇLAR

Sonlu elemanlar yöntemi, birçok mühendislik dalında karşılaştığımız matematiksel problemlere yaklaşık sonuçlar bulmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, inşaat mühendisliğinde zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme çeşitliği olan durumlarda kullanılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Bu sayede herhangi bir mühendislik projesi için tasarım aşamasında çeşitli alternatifler deneyerek en uygun ve en ekonomik çözümü elde etmek mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada, zemine gömülü boruların mühendislik davranışını incelemek amacıyla öncelikle mevcut boru türleri, bu boruların özellikleri ve kullanım alanları, güzergah seçimi ve boruların zemine gömülmesi sırasında dikkat edilmesi gereken noktalar, boru döşemek amacıyla kullanılan yöntemler, yer hareketlerinin gömülü borular üzerindeki etkisi ve boruların gömüldükleri ortamda maruz kaldıkları trafik ve toprak yüklerini hesaplamak amacıyla kullanılan yöntemler hakkında bir literatür çalışması yapılmıştır. Ayrıca, hendek genişliği, boruyu çevreleyen gömlek tabakası ve yataklama sınıflarının gömülü borular üzerindeki etkisini belirlemek için PLAXIS sonlu elemanlar programı yardımıyla 36 adet model hazırlanmıştır. PLAXIS sonlu elemanlar programı ile yapılan hesaplarda, siltli kil zemin ortamında açılan 5.8 m derinlikteki bir hendeğe yerleştirilen 1.5 m çapındaki bir beton borunun çeşitli yerleştirme şartları altındaki davranışı incelenmiştir.

Program ile boru yerleşimini en iyi şekilde modelleyebilmek amacıyla kademeli kazı ve dolgu yapılmıştır. Bu sayede boru ve zemin davranışının her aşamada değişimi izlenebilmiştir. Kazı, boru yerleşimi ve dolgu işlemlerinden oluşan bu aşamalar beş kademedeki tamamlanmıştır.

Gömlek malzemesi elastisite modülünün boru davranışına etkisini belirlemek amacıyla üç farklı sıklıkta ($E_1=10000 \text{ KN/m}^2$, $E_2=30000 \text{ KN/m}^2$, $E_3=50000 \text{ KN/m}^2$) gömlek malzemesi ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, boruyu çevreleyen

gömlek tabakasının elastisite modülü arttıkça boruya etkiyen aksenal kuvvet, kesme kuvveti, moment ve normal gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Hendek genişliğinin gömülü rijit boruların zemin içindeki davranışına etkisini incelemek için ise üç farklı hendek genişliğine göre hesaplar yapılmıştır ($B_d = 2.2$ m, 3.4 m, 4.4 m). Hendek genişliğinin artması boruya etkiyen aksenal kuvvet, kesme kuvveti, moment ve boru-zemin ara yüzeyindeki normal gerilmelerin artmasına yol açmaktadır. Buna bağlı olarak da boruya etkiyen toprak yükü artmaktadır.

Son olarak da yataklama türünün borular üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yukarıda belirtilen hendek genişliği ve gömlek malzemeleri için A, B, C ve D sınıfı yataklamalar modellenmiştir. Bu inceleme sonucunda ise yataklama sınıfı iyileştikçe boru üzerindeki aksenal kuvvet, kesme kuvveti, moment ve boru-zemin ara yüzeyindeki normal gerilmelerin azaldığı görülmüştür.

Normal şartlar altında boru hiçbir zaman şekillendirilmiş yataklama malzemesi ile tam temas halinde olamayacağından, normal gerilmeler boru taban noktası etrafında yüksek değerler alır. Buna karşılık, tabandan orta noktaya doğru gidildikçe, rijit borular yanal deformasyon yapmadığından bu noktalarda yüksek yanal basınçlara sebep olacak deformasyonlar meydana gelmez ve normal gerilme değerlerinde bir azalma olur. Boru orta noktasından sonra ise, geri dolgu malzemesinin ağırlığının bu bölgelere etkimesi ve toprak yükünün bu bölgeler tarafından taşınması nedeniyle normal gerilme değerleri artar. Boru üzerindeki normal gerilmelerde meydana gelen bu değişimler Tablo B1-B4'ten görülmektedir.

Gömülü boruların üzerine etkiyen yükleri hesaplarırken boru ile yan dolgunun rölatif rijitliği, dolgu yüksekliği, yükün cinsi, boru çapı, yerleştirme şartları, borunun şekli ve malzeme özelliklerini dikkate almak gerekir. Rijit bir boru üzerindeki düşey toprak basıncı, yapı üzerindeki zeminin ağırlığından büyüktür. Bu durumda negatif kemerlenme meydana gelir. Negatif kemerlenme durumunda, yan dolgular oturur ve bunun sonucunda da boruya ek bir yük bindirir. Böylece, gerilmeler boru etrafında yoğunlaşırken yan dolgularda azalır. Fleksibl bir boru üzerindeki düşey toprak basıncı ise boru üzerindeki toprak ağırlığından küçüktür. Bu durumda da pozitif kemerlenme meydana gelir. Pozitif kemerlenme durumunda, boru üstündeki zemin prizması yükünün bir bölümü yan dolgulara transfer olur. Yani, rijit bir boru, aynı şartlar altında yerleştirilen fleksibl bir borudan çok daha fazla yüke maruz kalır.

Boru üzerindeki gerilmeler, boru ve çevre zeminin rijitliğinden büyük oranda etkilenir. Rijit borular etraflarına yerleştirilen dolgudan her zaman daha rijittir. Bu sebeple boru, üzerindeki dolgu ağırlığından oluşan yükün büyük bir kısmını taşır. Ancak, boru etrafındaki dolgunun rijitliği arttıkça boru ile zemin arasındaki yük paylaşımı nedeniyle doğrudan boru üzerine etkiyen yük bir miktar azalır, buna karşılık yan dolguların taşıdığı yük artar (Tablo B1-B4).

KAYNAKLAR

- [1] **Ahlvin, R.G and Smoots V.A.**, 1988. Construction Guide for Soils and Foundations, John Wiley&Sons, New York.
- [2] **Anon.**, 1999. Comitte Report: Design and Installation of PE Pipe, pp. 92-100, Journal AWWA, 91.
- [3] **Anon.**, 1976. Boru Hatlarının Teknik ve İşletme Karakteristikleri, Altyapı Maliyeti ve İşletme Giderleri Ulaştırma Bakanlığı Ulaştırma Koordinasyon İdaresi, Yayın No: (199.088) UKİ 5.094, Ankara.
- [4] **Anon.**, 2002. International Course on Computational Geotechnics, İstanbul, September 1-3.
- [5] **Anon.**, 2001. http://www.dizaynteknik.com/tr/s_6.htm.
- [6] **Anon.**, 2001. <http://mainind.com/handbook3/chapter06.asp>, PVC Water Pressure Pipes Manual, Loads on Burried Pipes.
- [7] **Anon.**, 2001.http://www.cpcpa.com/ConcretePipeD_LoadDesign.htm, California Precast Concrete Pipe Association.
- [8] **Anon.**,2001.<http://www.plastro.com/PlastroGroup/Palad/LoadDesign.htm>, Loads Design.
- [9] **Anon.**, 2001. <http://ww.rinkermaterials.com/hydroconduit/infobriefs/i103.htm> Concrete Encasement of Pipes.
- [10] **Anon.**, 2001. <http://ww.rinkermaterials.com/hydroconduit/infobriefs/i204.htm>, Fleksibl Pipe Design.
- [11] **Anon.**, 2001. <http://ww.rinkermaterials.com/hydroconduit/infobriefs/i202.htm>, Pipe Stiffness.
- [12] **Anon.**, 2001. <http://ww.rinkermaterials.com/hydroconduit/infobriefs/i203.htm>, Pipe Deflection.
- [13] **Anon.**, 2002. <http://www.petekboru.com.tr/fb.htm>, Font Boru.
- [14] **Anon.**, 2002. http://www.firatplastik.com.tr/pvc_atik_main.asp, PVC Atıksu Boruları.
- [15] **Anon.**, 1986. Büyük Larousse Sözlük ve Ansiklopedisi, 4. Cilt, Interpress Basın ve Yayıncılık A.Ş., İstanbul.

- [16] **Babbitt, H.E. and Baumann, E.B.**, 1958. Sewerage and Sewage Treatment, John Willy & Sons Inc., New York.
- [17] **Babbitt, H.E., Donald, J.J. and Cleasby, J.L.**, 1962. Water Supply Engineering, McGraw-Hill Book Comp. Inc., New York.
- [18] **Balkaya, N.**, 2001. Çevre Mühendisleri İçin Yapı Teknolojisi, Samsun.
- [19] **Brinkgreve, R.B.J. and Vermeer, P.A.**, 1998. PLAXIS Version 7 Manual, Balkema, Rotterdam.
- [20] **Bull, J.W.**, 1994. Soil Structure Interaction: Numerical Analysis and Modelling, Chapman&Hall, London.
- [21] **Cates, W.H.**, 1964. Design of Fleksibl Steel Pipe Under External Loads, Journal of Pipeline Division, Proceedings of ASCE, **90**, 21-31.
- [22] **Chiba, Y. and Jo, N.Ito.**, Earthquake Resistance of Sewerage Pipeline Facilities.
- [23] **Datta, T.K.**, 1999. Seismic Response of Burried Pipelines: A State-of the Art Review, Nuclear Engineering and Design, **192**, 271-284.
- [24] **Eccles, C.**, 1994. Opening the Jack Door, Ground Engineering.
- [25] **Fair, G.M. and Geyer, J.C.**, Çeviren: Yılmaz Muslu, 1971. Su Getirme ve Kullanılmış Suların Uzaklaştırılması Esasları, Hikmet Gazetecilik Ltd. Şti., İstanbul.
- [26] **Fernando, N.S.M. and Carter, J.P.**, 1998. Elastic Analysis of Burried Pipes Under Surface Patch Loadings, ASCE, **124**, 720-728.
- [27] **Hardenberg, W.A.**, 1950. Sewerage and Sewage Treatment, International Textbook Company, Pennsylvania.
- [28] **Heger, F.J.**, 1988. New Installation Designs for Burried Concrete Pipe, Proc. Pipeline Infrastructure Conf. ASCE, pp. 117-135.
- [29] **Henry, Ph.**, 1992. Pipes for Microtunnels: Suitability of Use, No Trenches in Town, pp: 95-102, Balkema.
- [30] **Kienow, K.K.**, 1990. Pipeline Design and Installation, ASCE, pp: 17-31, New York.
- [31] **Kramar, S.L.**, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- [32] **Lambe, T.W. and Whitmann, R.V.**, 1969. Soil Mechanics, John Wiley & Sons Inc., USA.

- [33] **Linsley, R.K. and Franzini, J.B.**, 1955. Elements of Hydraulic Engineering, Mc-Graw Hill Book Comp. Inc., New York.
- [34] **Mooser, A.P.**, 1990. Burried Pipe Design, Mc Graw Hill, New York.
- [35] **Muslu, Y.**, 1998. Çözümlü Problemlerle Su Temini ve Çevre Sağlığı, Su Vakfı, İstanbul.
- [36] **Oglesby, C.H. and Hichs, R.G.**, 1982. Highway Engineering, IVth Eddition, John Wiley & Sons, N.Y.
- [37] **O'Rourke, M. and Castro, G.**, 1980. Effects Of Seismic Wave Propagation Upon Burried Pipelines, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **8**, 455-467, John Wiley & Sons Ltd.
- [38] **O'Rourke, M.J. and Lu, X.**, 1999. Response of Burried Pipelines to Earthquake Effects, Multidisciplinary Center for Earthquake Research, New York.
- [39] **Öztürk, İ.**, 1996. Atıksu Ön Arıtma ve Deniz Deşarjı Sistemleri, İTÜ Rektörlüğü Sayı: 1570, İstanbul.
- [40] **Rogers, C.D.F. and O'reilly, M.P.**, 1991. Ground Movements Associated with Pipeline Installation and Tunelling, 10th European Conference on SMFE, Florence, pp: 907-910.
- [41] **Sağlam, A.**, 2001. Mariç-Belbir Marmaris Çevre Koruma ve Altyapı Yapım Projesi Kolektör Hatlarında Meydana Gelen Oturmalar Hakkında Geoteknik Rapor, İstanbul.
- [42] **Samsunlu, A.**, 1995. Deniz Kirliliği ve Kontrolü, Birinci Baskı, İTÜ Rektörlüğü Sayı:1555, İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- [43] **Sarıkaya, H.Z ve Koyuncu, I.**, 1999. Evaluation of Kocaeli Earthquake on Water and Wastewater Syastems, ITU-IAHS International Conference on the Kocaeli Earthquake, İstanbul.
- [44] **Schwab, G.O., Fangmeier, D.D., Elliot, W.J. and Frevert, R.K.**, 1993. Soil and Water Conservation Engineering, John Wiley&Sons Inc., New York.
- [45] **Selig, E.T. and Packard, D.L.**, 1987. Burried Concrete Pipe Trench Installation Analysis, Journal of Transportation Engineering, **113**, 5.
- [46] **Spangler, M.G.**, 1948. Underground Conduits-An Appraisal of Modern Research, ASCE, **113**, 316-374.
- [47] **Spangler, M.G.**, 1966, Soil Engineering, International Textbook Company, Scranton.

- [48] **Toprak, H.**, 1994. Atıksu Arıtma Sistemlerinin Tasarım Esasları, Cilt 1, Dokuz Eylül Üniv. Müh. Fak. Yayınları No: 240, İzmir.
- [49] **Toprak, H.**, 1994. Atıksu Arıtma Sistemlerinin Tasarım Esasları, Cilt 2, Dokuz Eylül Üniv. Müh. Fak. Yayınları No: 241, İzmir.
- [50] **Trautmann, C.H. and O'Rourke, T.D.**, 1985. Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipe, ASCE, **111**, 1077-1092.
- [51] **TS 2170**, 1989. Su ve Gaz Borularının Yeraltına Yerleştirilmesi Kuralları, TSE, Ankara.
- [52] **TS 7397**, 1989. Dış Yüklere Maruz Basıncılı veya Basıncsız Asbestli Boru Seçilmesi Kuralları, TSE, Ankara.
- [53] **Twort, A.C., Law, F.M. and Crowley, F.W.**, 1985. Water Supply, Allion Printing Co. Ltd., Hong Kong.
- [54] **Uslu, M.**, 1979. Prefabrike Kanalizasyon Kanalları ve Boru Hatlarının Döşenmesine Ait Talimatlar, Alman Normları DIN 4033, İller Bankası, Ankara.
- [55] **Vaslestad, J.**, 1991. Load Reduction on Buried Rigid pipes, 10th European Conference on SMFE, Florence, pp: 771-774.
- [56] **Wagner, E.G. and Lonoix, J.N.**, 1991. Water Supply for Rural Areas and Small Communities, World Health Organization, Switzerland.
- [57] **Whittaker, B.N. and Frith, R.C.**, 1990. Tunnelling, The Institution of Mining and Metallurgy.
- [58] **Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y.**, Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- [59] **Wu, T.H. and Leonards, G.A.**, 1985. Characterisation of Soil Arching Above Buried Conduits, Advances in Underground Pipeline Engineering, Proc. Pipeline Infrastructure Conf. ASCE, pp. 396-407.

Tablo B.1 : D Sınıfı Yataklama İçin Yapılan Hesap Sonuçları

Gömlek Tabakası Elastisite Modülü (KN/m ²)	Bd (m)	H (m)	Eksenel Kuvvet (KN/m)			Max. Kesme Kuvveti (KN/m)		Moment (KNm/m)			Normal Gerilme (KN/m ²)			Toprak Yükü (Marston) (KN/m)	Boru Üzerindeki Yük (PLAXIS) (KN/m)	Yan Dolgu Yükü (PLAXIS) (KN/m)	Toplam Yük (PLAXIS)
			Üst	Orta	Alt	Üst	Alt	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt				
1.00E+04	2.20	4.00	-24.37	-35.85	-28.35	-8.19	7.86	2.34	-2.52	2.28	-61.58	-23.06	-55.81	138.76	65.70	41.36	107.06
1.00E+04	3.40	4.00	-26.14	-42.22	-30.36	-11.48	10.59	3.05	-3.68	2.99	-74.02	-22.85	-64.71	235.48	74.92	121.74	196.66
1.00E+04	4.40	4.00	-26.52	-44.23	-30.41	-12.20	10.96	3.17	-3.91	3.21	-78.61	-24.12	-70.60	316.92	76.53	213.44	289.97
3.00E+04	2.20	4.00	-21.25	-30.92	-23.51	-6.40	6.05	1.94	-2.03	1.75	-52.40	-19.40	-45.20	138.76	65.18	54.78	119.96
3.00E+04	3.40	4.00	-21.89	-33.87	-24.30	-8.04	8.04	2.17	-2.47	2.22	-56.13	-19.06	-52.28	235.48	71.13	134.00	205.13
3.00E+04	4.40	4.00	-22.49	-33.99	-25.43	-9.33	9.33	2.49	-2.77	2.68	-59.20	-17.15	-56.77	316.92	72.18	228.02	300.20
5.00E+04	2.20	4.00	-19.25	-28.51	-20.99	-6.10	5.99	1.86	-1.97	1.75	-48.01	-16.07	-41.97	145.38	63.33	60.50	123.83
5.00E+04	3.40	4.00	20.05	-31.00	-22.20	-7.95	7.95	2.07	-2.38	2.22	-50.20	-15.31	-49.48	246.75	69.38	143.78	213.16
5.00E+04	4.40	4.00	19.15	-31.07	-22.70	-9.47	9.89	2.45	-2.76	2.75	-54.48	-11.66	-54.48	332.12	71.01	238.34	309.35

Tablo B.2: C Sınıfı Yataklama İçin Yapılan Hesap Sonuçları

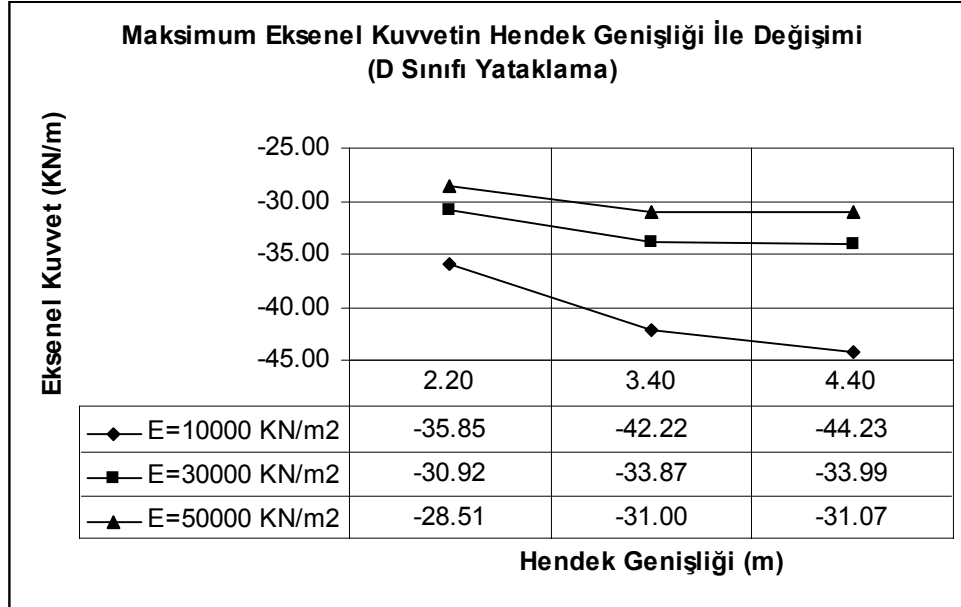
Gömlek Tabakası Elastisite Modülü (KN/m ²)	Bd (m)	H (m)	Eksenel Kuvvet (KN/m)			Max. Kesme Kuvveti (KN/m)		Moment (KNm/m)			Normal Gerilme (KN/m ²)			Toprak Yükü (Marston) (KN/m)	Boru Üzerindeki Yük (PLAXIS) (KN/m)	Yan Dolgu Yükü (PLAXIS) (KN/m)	Toplam Yük (PLAXIS)
			Üst	Orta	Alt	Üst	Alt	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt				
1.00E+04	2.20	4.00	-23.92	-36.04	-27.92	-8.06	7.84	2.31	-2.47	1.84	-61.49	-22.49	-44.26	138.76	65.58	40.94	106.52
1.00E+04	3.40	4.00	-25.98	-40.81	-28.97	-9.68	9.50	2.76	-2.99	2.28	-69.75	-24.05	-51.74	235.48	73.92	121.30	195.22
1.00E+04	4.40	4.00	-26.08	-41.79	-29.27	-10.28	10.28	3.04	-3.23	2.72	-73.86	-24.06	-58.55	316.92	76.27	213.46	289.73
3.00E+04	2.20	4.00	-21.22	-30.79	-23.49	-6.47	5.80	1.88	-2.26	1.66	-52.21	-18.73	-41.32	138.76	64.12	56.44	120.56
3.00E+04	3.40	4.00	-21.76	-33.66	-24.20	-7.62	7.40	2.14	-2.62	2.08	-55.88	-18.77	-48.60	235.48	70.89	138.64	209.53
3.00E+04	4.40	4.00	-22.45	-33.79	-25.23	-8.98	8.98	2.43	-2.95	2.54	-58.65	-17.23	-53.60	316.92	72.00	230.92	302.92
5.00E+04	2.20	4.00	-19.06	-28.33	-20.86	-6.15	5.97	1.82	-2.00	1.72	-47.87	-15.39	-39.60	145.38	61.79	65.56	127.35
5.00E+04	3.40	4.00	-19.93	-30.70	-21.97	-7.26	7.76	2.05	-2.34	2.14	-49.93	-14.97	-46.52	246.75	68.72	151.66	220.38
5.00E+04	4.40	4.00	-19.35	-30.93	-22.54	-9.29	9.29	2.39	-2.71	2.65	-53.08	-12.11	-52.73	332.12	70.41	240.96	311.37

Tablo B.3: B Sınıfı Yataklama İçin Yapılan Hesap Sonuçları

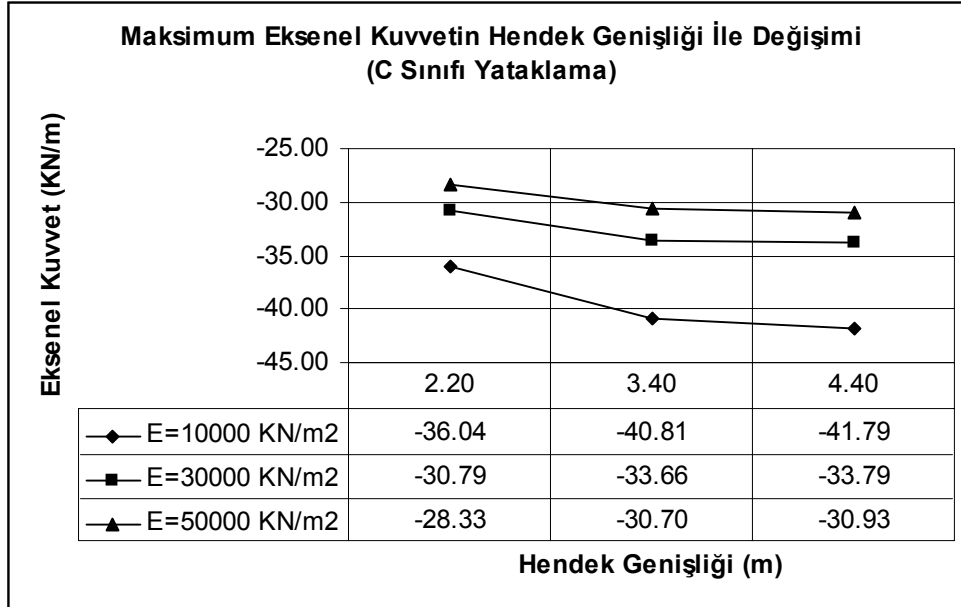
Gömlek Tabakası Elastisite Modülü (KN/m ²)	Bd (m)	H (m)	Eksenel Kuvvet (KN/m)			Max. Kesme Kuvveti (KN/m)		Moment (KNm/m)			Normal Gerilme (KN/m ²)			Toprak Yükü (Marston) (KN/m)	Boru Üzerindeki Yük (PLAXIS) (KN/m)	Yan Dolgu Yükü (PLAXIS) (KN/m)	Toplam Yük (PLAXIS)
			Üst	Orta	Alt	Üst	Alt	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt				
1.00E+04	2.20	4.00	-23.48	-35.82	-26.95	-7.63	6.82	2.16	-2.26	1.53	-61.15	-21.55	-44.10	138.76	65.46	40.82	106.28
1.00E+04	3.40	4.00	-25.64	-39.97	-28.63	-8.89	7.63	2.51	-2.62	1.82	-69.57	-24.21	-50.39	235.48	73.23	121.10	194.33
1.00E+04	4.40	4.00	-25.18	-40.70	-28.95	-9.55	8.29	2.85	-2.95	2.39	-73.09	-23.49	-58.19	316.92	76.19	214.68	290.87
3.00E+04	2.20	4.00	-21.06	-30.37	-23.21	-6.34	5.48	1.82	-1.96	1.54	-51.70	-18.04	-40.07	138.76	63.96	56.90	120.86
3.00E+04	3.40	4.00	-21.54	-33.11	-23.93	-7.22	6.61	2.05	-2.27	1.90	-55.36	-18.86	-47.73	235.48	70.77	138.96	209.73
3.00E+04	4.40	4.00	-22.33	-33.30	-25.01	-8.25	8.25	2.42	-2.64	2.43	-58.06	-16.23	-53.22	316.92	71.69	232.34	304.03
5.00E+04	2.20	4.00	-18.85	-28.03	-20.55	-6.12	5.68	1.80	-1.96	1.64	-47.44	-14.70	-38.45	145.38	61.19	68.46	129.65
5.00E+04	3.40	4.00	-19.77	-30.30	-21.73	-7.01	6.99	2.01	-2.27	2.02	-50.05	-14.58	-45.40	246.75	67.85	158.24	226.09
5.00E+04	4.40	4.00	-19.02	-30.58	-22.31	-8.72	8.72	2.42	-2.68	2.58	-53.03	-12.15	-51.83	332.12	69.00	242.52	311.52

Tablo B.4: A Sınıfı Yataklama İçin Yapılan Hesap Sonuçları

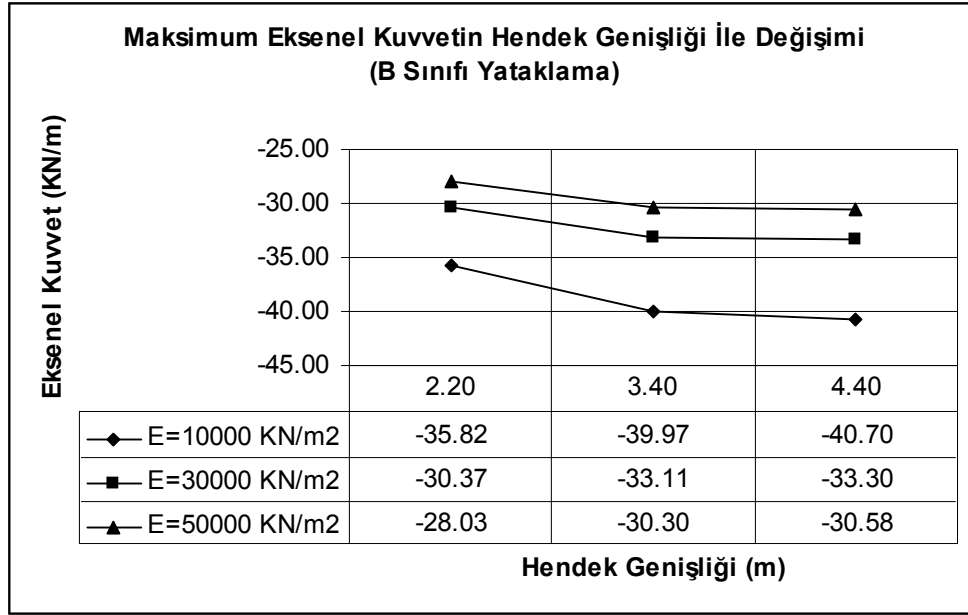
Gömlek Tabakası Elastisite Modülü (KN/m ²)	Bd (m)	H (m)	Eksenel Kuvvet (KN/m)			Max. Kesme Kuvveti (KN/m)		Moment (KNm/m)			Normal Gerilme (KN/m ²)			Toprak Yükü (Marston) (KN/m)	Boru Üzerindeki Yük (PLAXIS) (KN/m)	Yan Dolgu Yükü (PLAXIS) (KN/m)	Toplam Yük (PLAXIS)
			Üst	Orta	Alt	Üst	Alt	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt				
1.00E+04	2.20	4.00	-21.90	-36.25	-25.01	-9.72	9.72	2.85	-3.12	2.77	-62.83	-15.37	-57.34	138.76	66.71	40.98	107.69
1.00E+04	3.40	4.00	-24.62	-42.11	-28.42	-11.48	11.48	3.39	-3.68	3.27	-74.02	-19.12	-68.33	235.48	77.86	116.92	194.78
1.00E+04	4.40	4.00	-25.63	-44.13	-29.60	-12.20	12.20	3.64	-3.91	3.48	-78.61	-19.83	-72.55	333.69	82.52	209.12	291.64
3.00E+04	2.20	4.00	-19.15	-29.88	-21.31	-7.87	7.75	2.34	-2.51	2.21	-53.62	-12.76	-45.17	138.76	64.18	54.92	119.10
3.00E+04	3.40	4.00	-20.99	-32.86	-23.18	-8.38	8.38	2.47	-2.67	2.38	-58.74	-16.21	-50.39	235.48	75.21	137.60	212.81
3.00E+04	4.40	4.00	-21.47	-33.86	-24.06	-8.80	8.80	2.59	-2.79	2.50	-61.22	-16.59	-53.17	333.69	79.61	234.00	313.61
5.00E+04	2.20	4.00	-17.01	-26.54	-19.01	-7.25	6.88	2.17	-2.25	1.97	-49.52	-10.66	-38.82	145.38	62.16	64.20	126.36
5.00E+04	3.40	4.00	-18.89	-28.76	-20.68	-7.42	7.09	2.15	-2.30	2.04	-51.99	-13.33	-42.57	246.75	73.67	147.72	221.39
5.00E+04	4.40	4.00	-18.76	-29.66	-21.22	-7.70	7.70	2.33	-2.47	2.20	-54.13	-13.39	-45.03	349.69	75.29	241.72	317.01



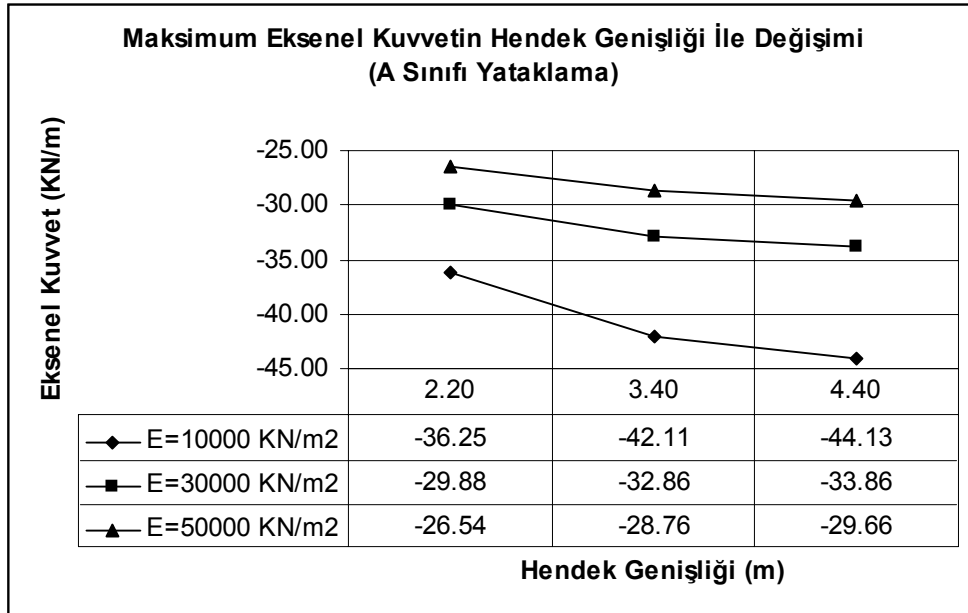
Şekil C.1 Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği İle Değişimi
(D Sınıfı Yataklama)



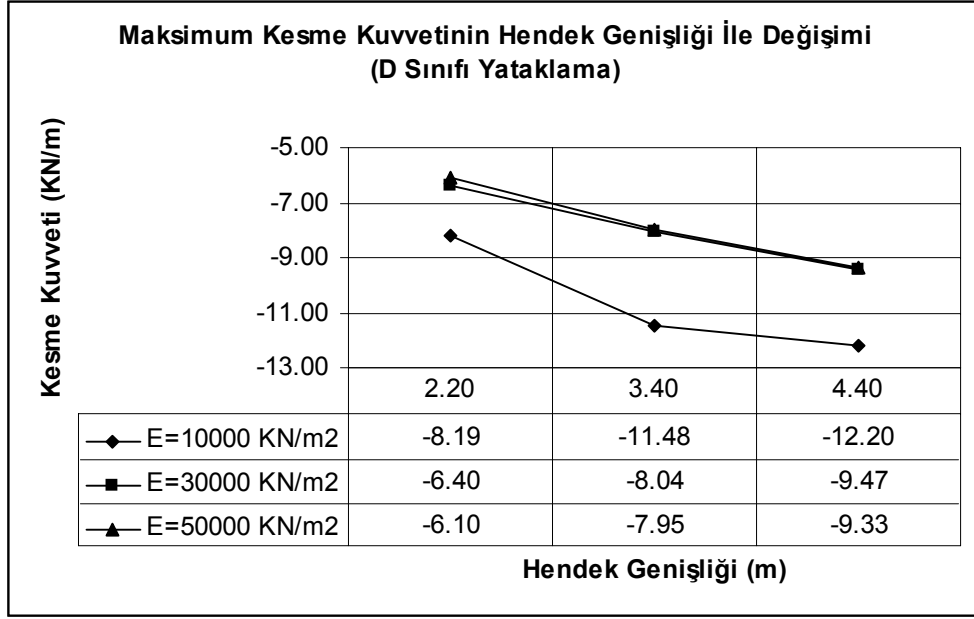
Şekil C.2 Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği İle Değişimi
(C Sınıfı Yataklama)



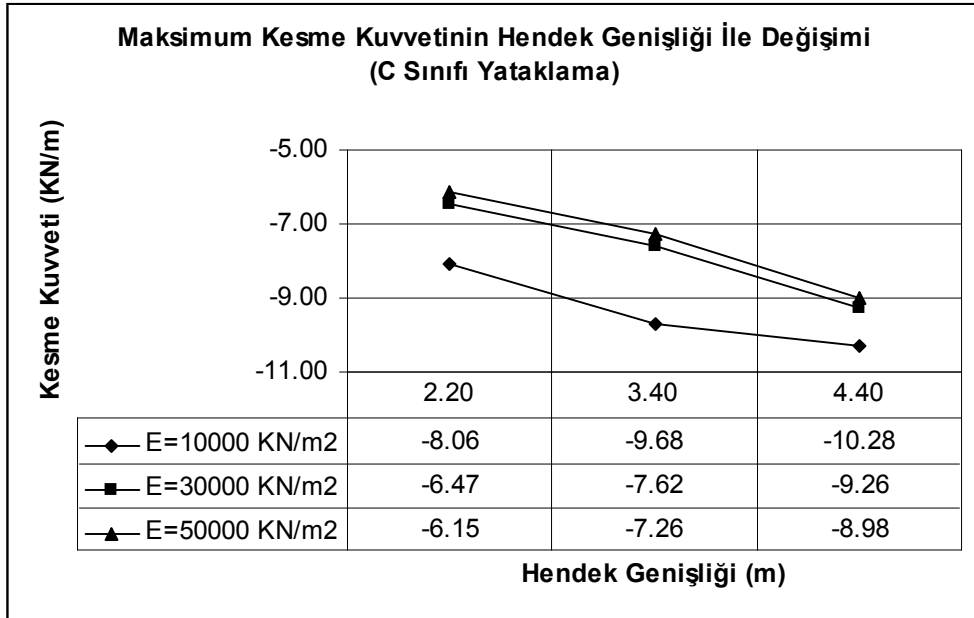
Şekil C.3 Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği İle Değişimi
(B Sınıfı Yataklama)



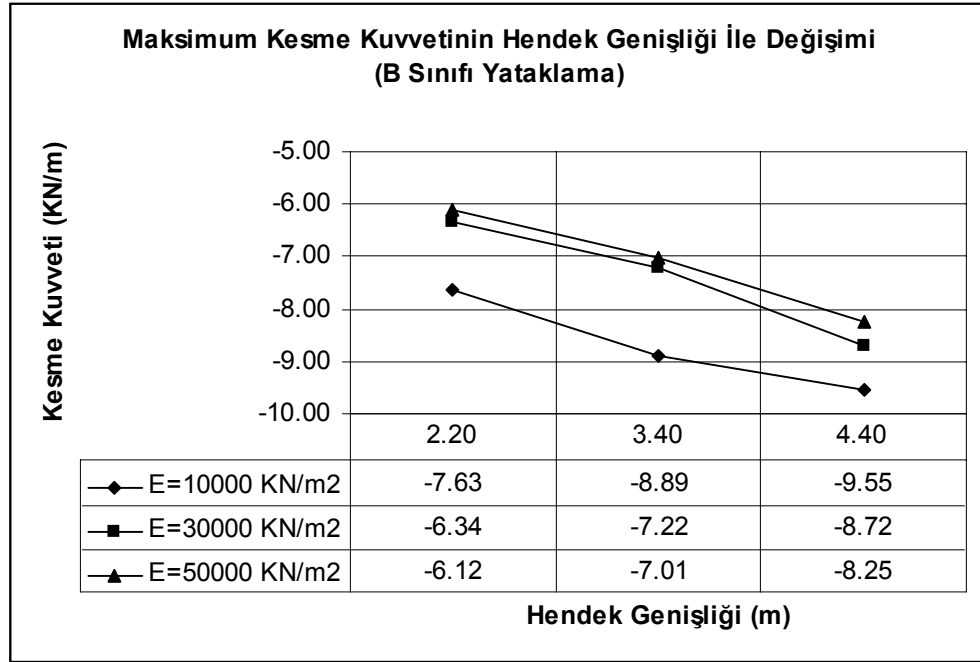
Şekil C.4 Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği İle Değişimi
(A Sınıfı Yataklama)



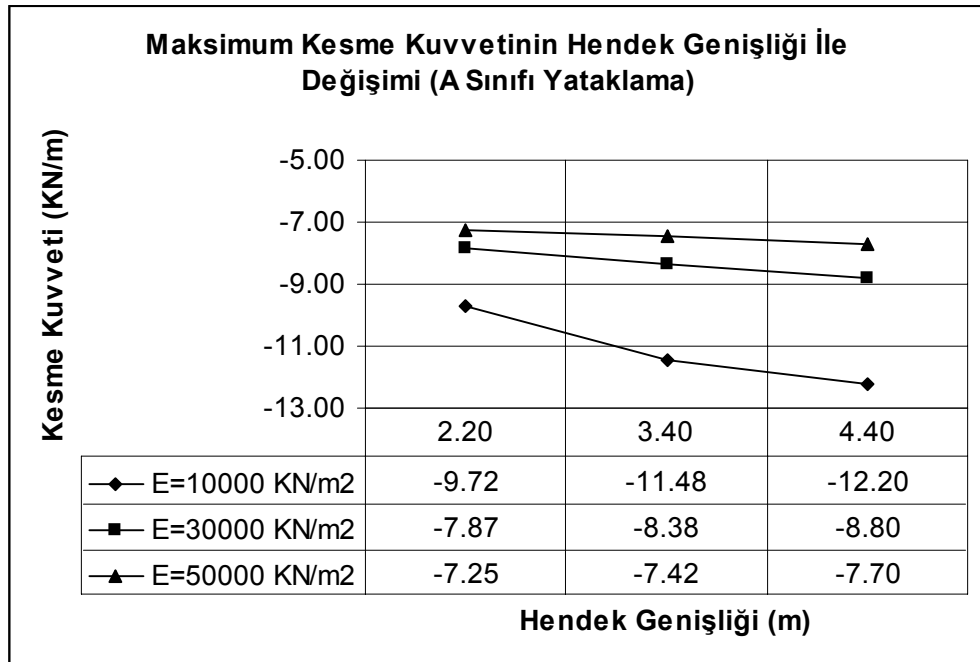
şekil C.5 Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği İle Değişimi
(D Sınıfı Yataklama)



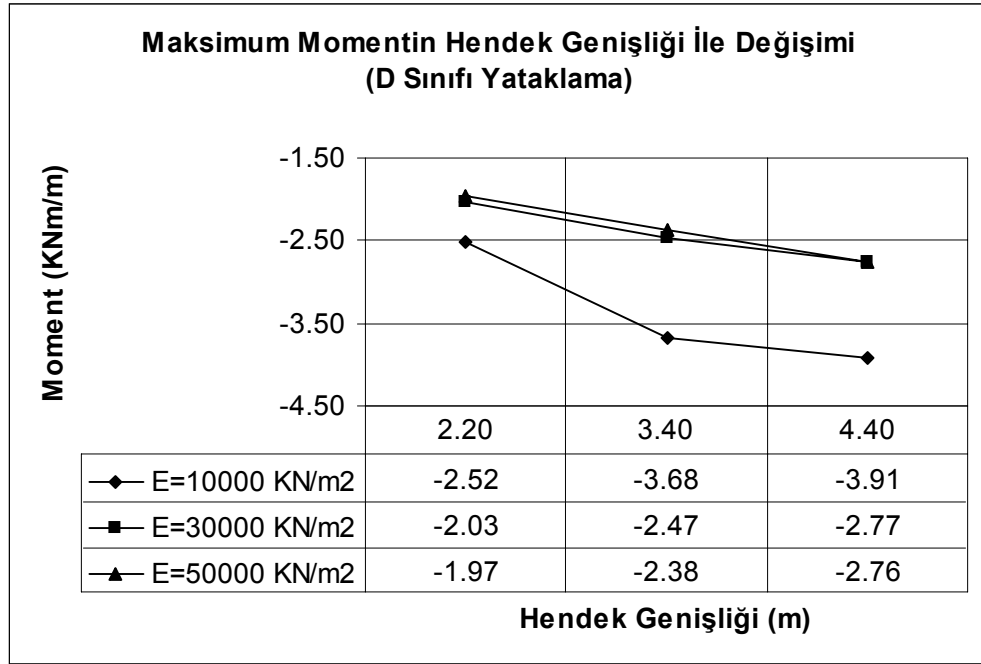
şekil C.6 Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği İle Değişimi
(C Sınıfı Yataklama)



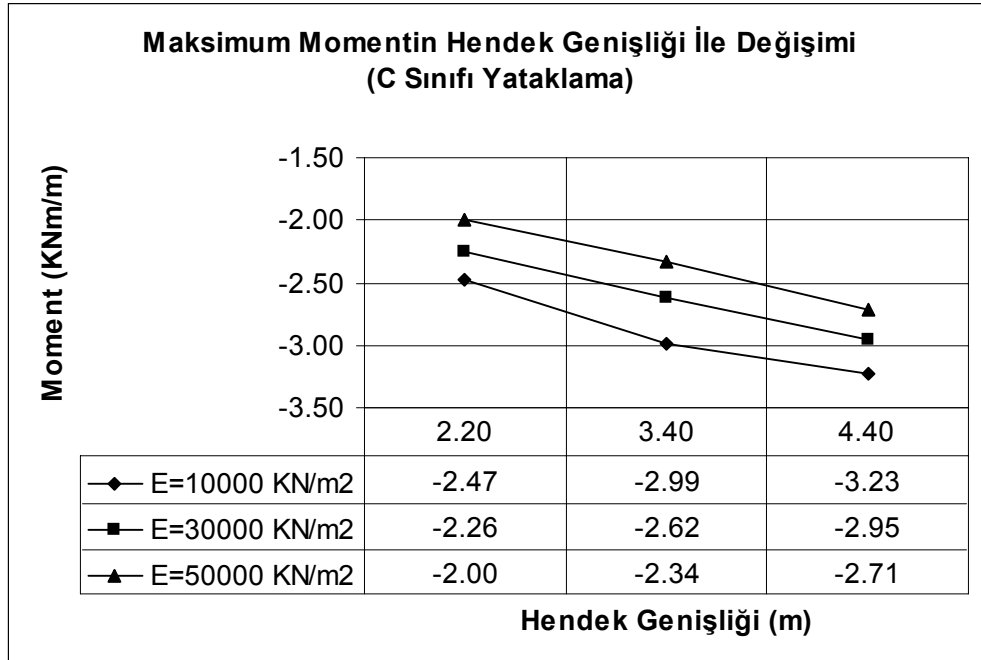
Şekil C.7 Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği İle Değişimi
(B Sınıfı Yataklama)



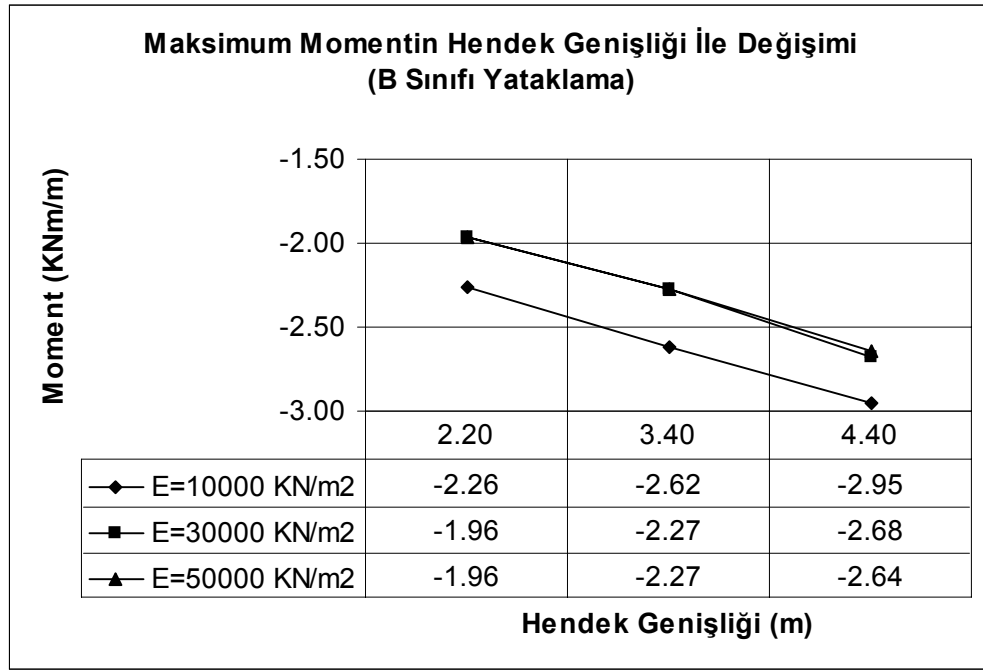
Şekil C.8 Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği İle Değişimi
(A Sınıfı Yataklama)



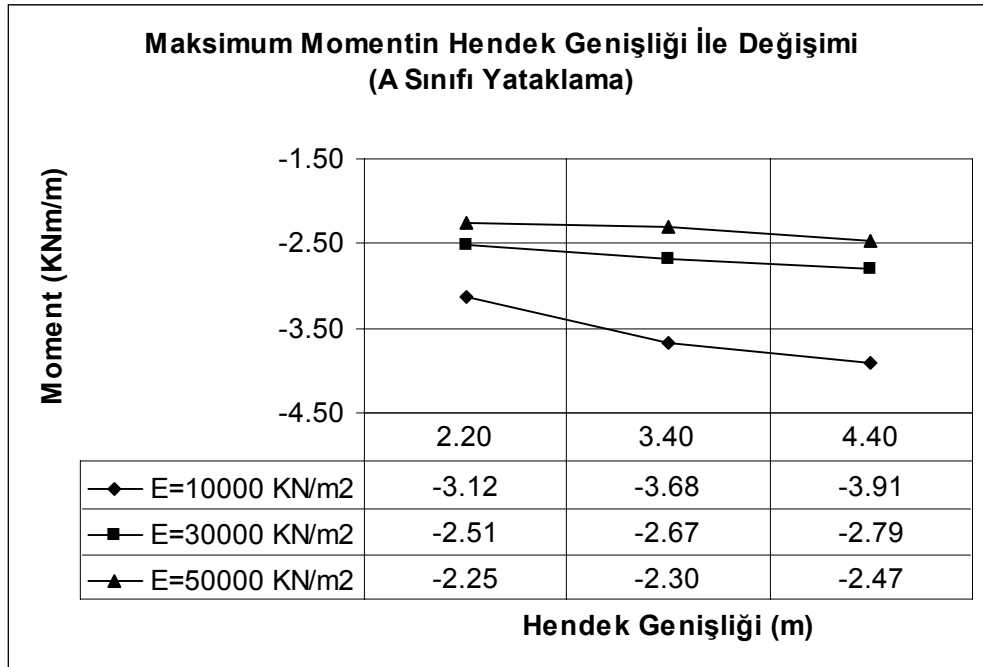
Şekil C.9 Maksimum Momentin Hendek Genişliği İle Değişimi
(D Sınıfı Yataklama)



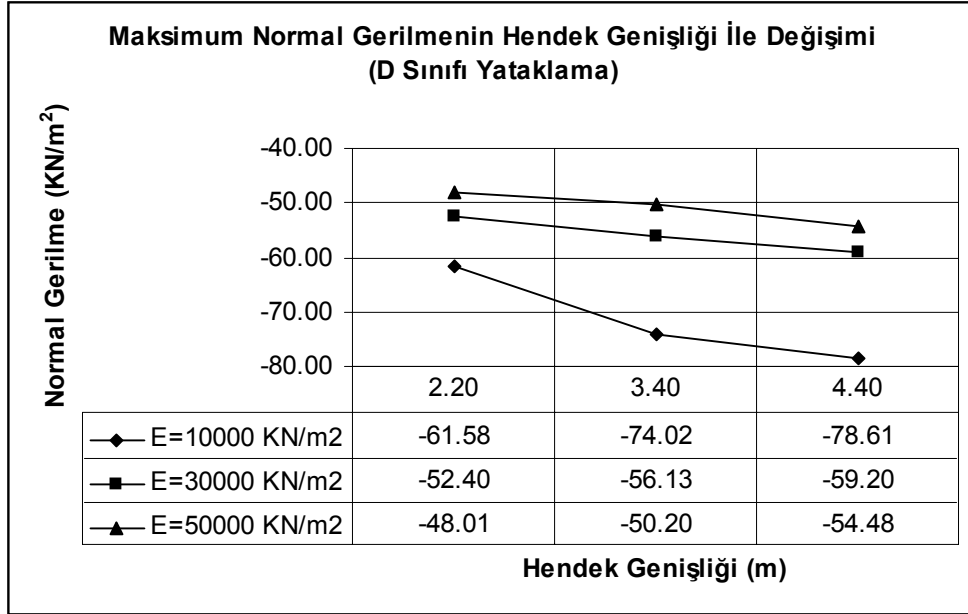
Şekil C.10 Maksimum Momentin Hendek Genişliği İle Değişimi
(C Sınıfı Yataklama)



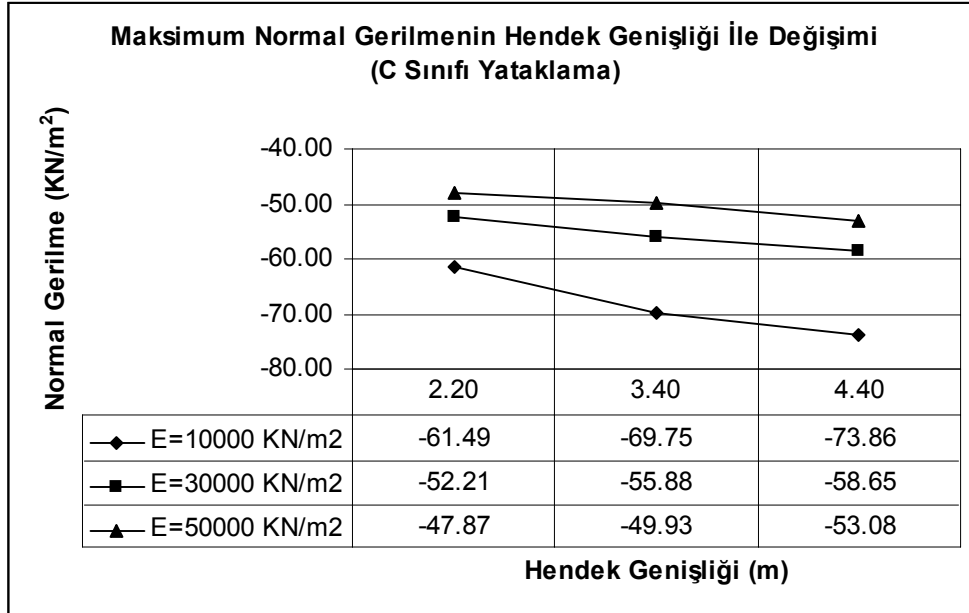
Şekil C.11 Maksimum Momentin Hendek Genişliği İle Değişimi
(B Sınıfı Yataklama)



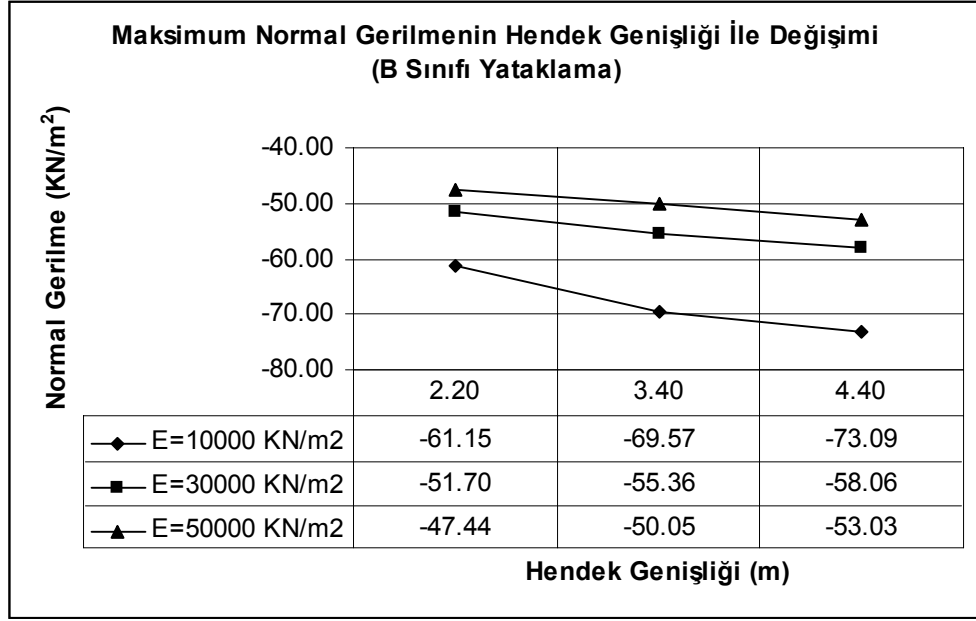
Şekil C.12 Maksimum Momentin Hendek Genişliği İle Değişimi
(A Sınıfı Yataklama)



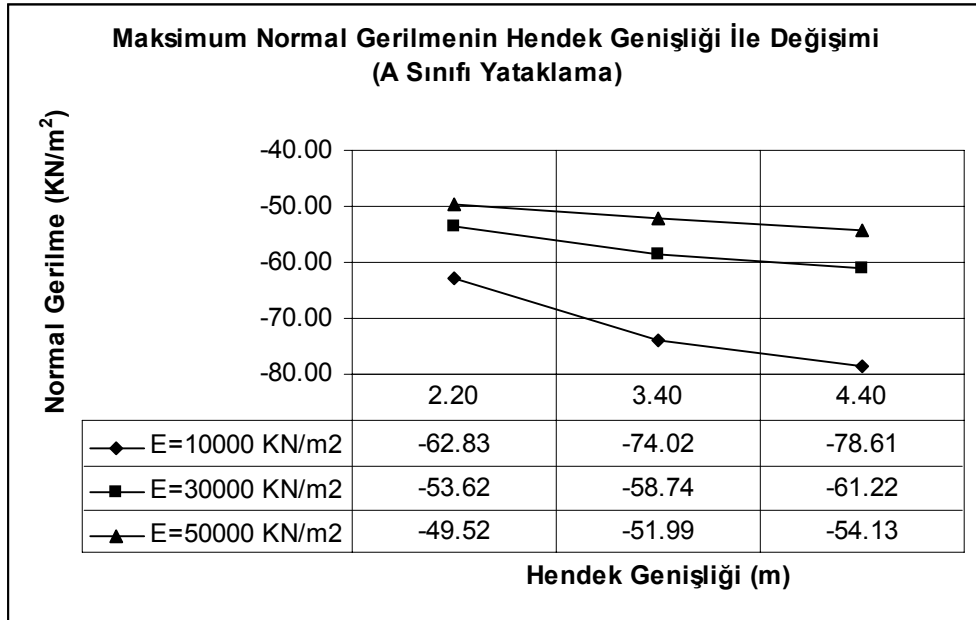
Şekil C.13 Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği İle Değişimi
(D Sınıfı Yataklama)



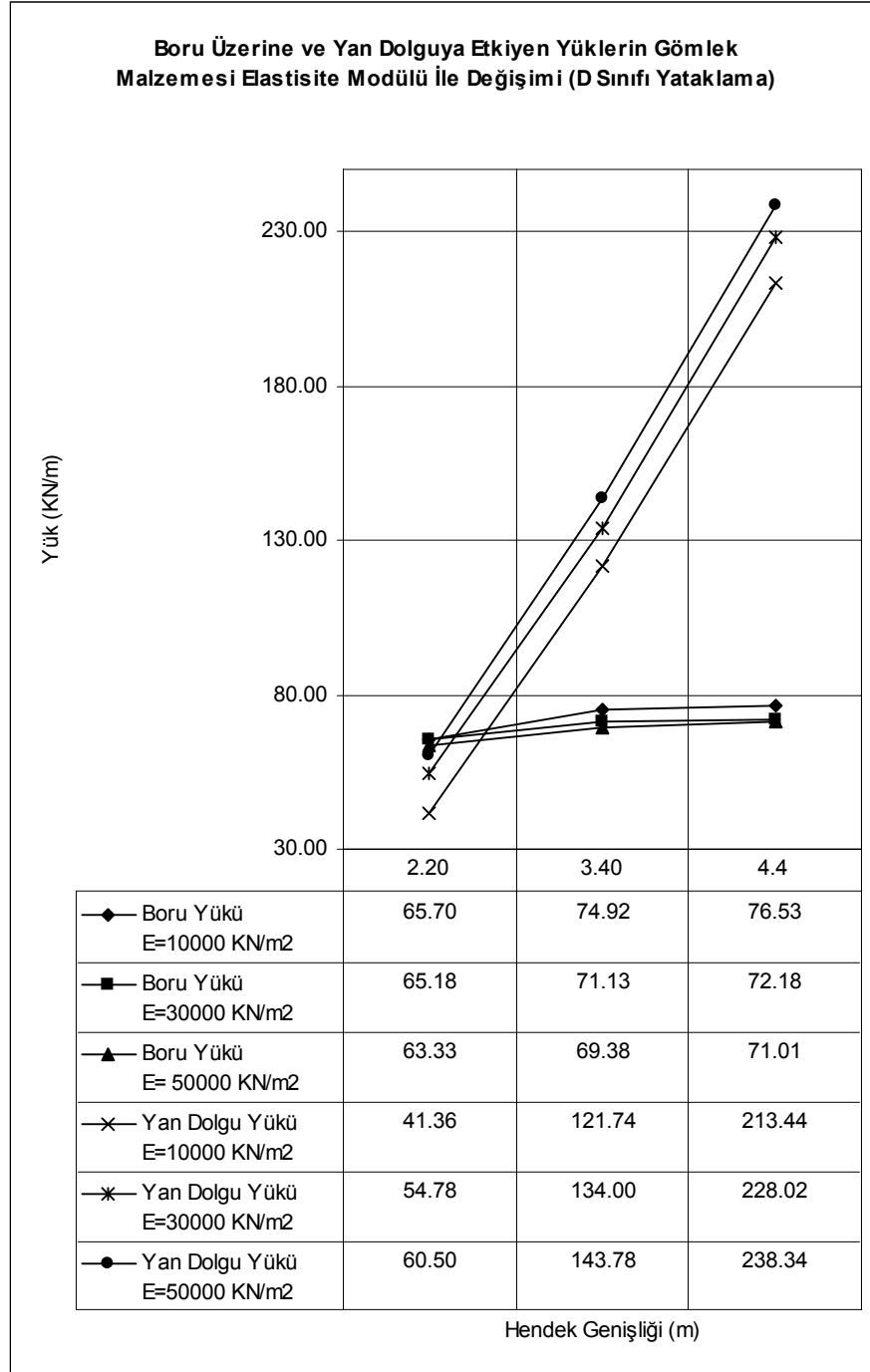
Şekil C.14 Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği İle Değişimi
(C Sınıfı Yataklama)



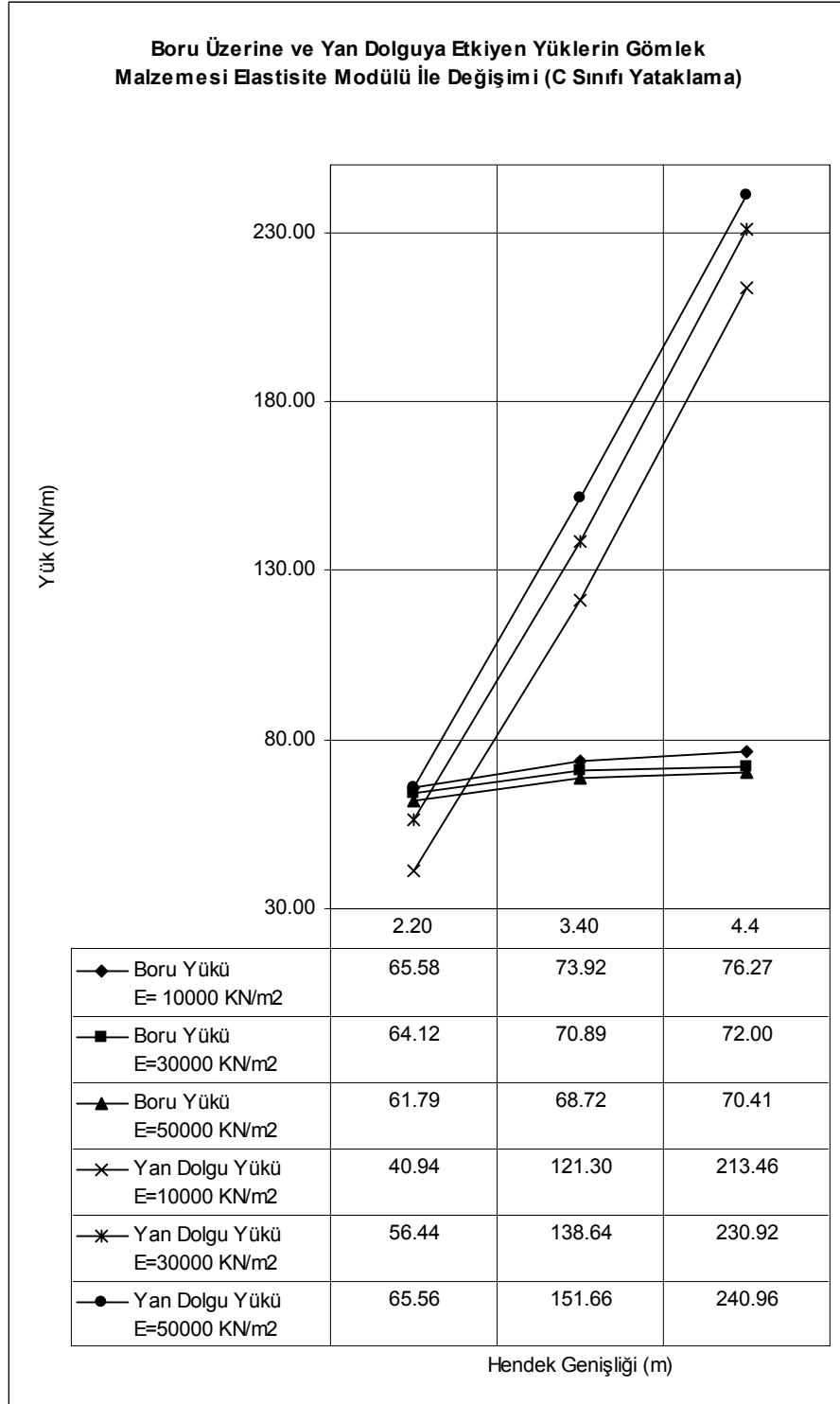
Şekil C.15 Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği İle Değişimi
(B Sınıfı Yataklama)



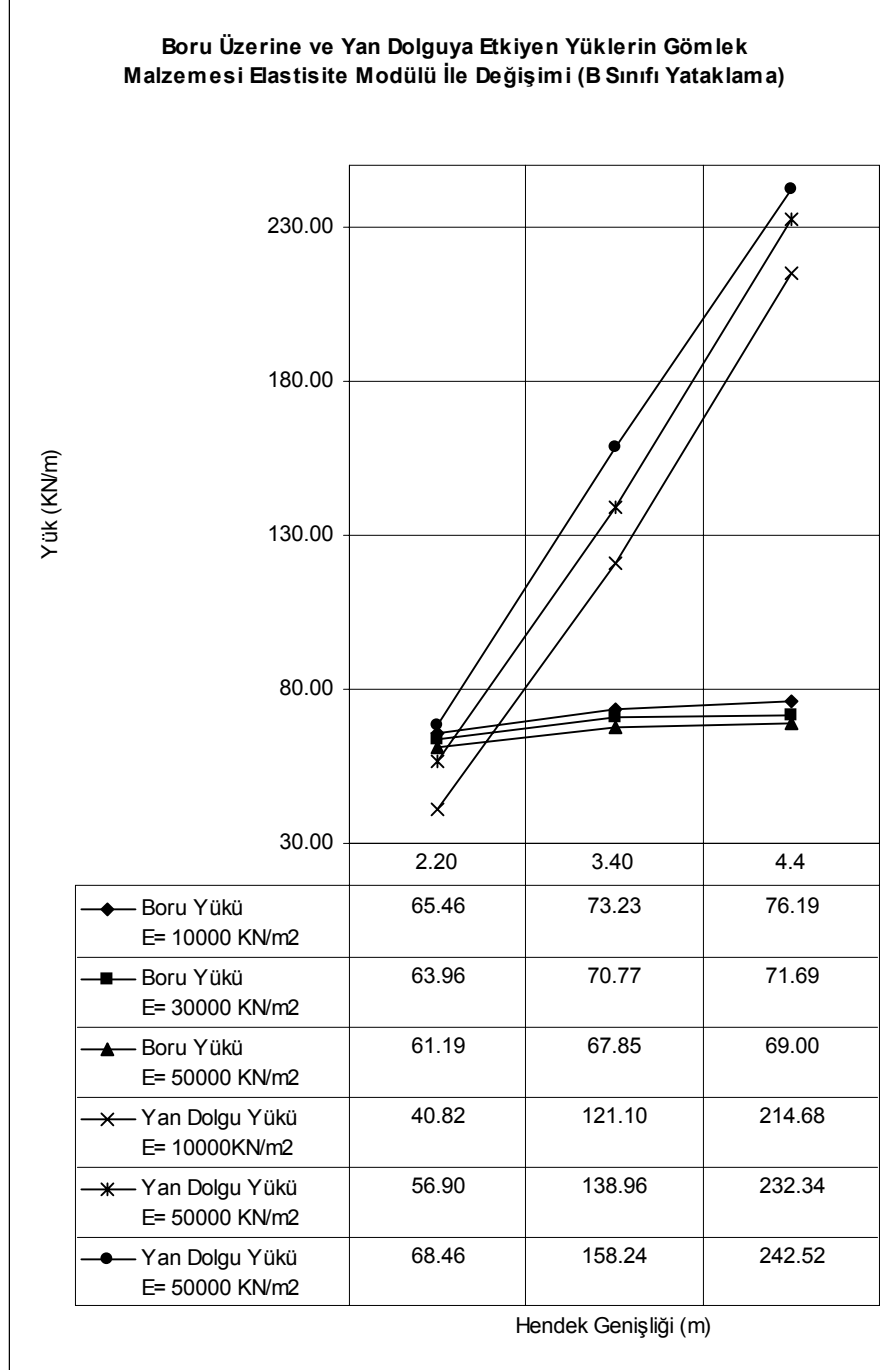
Şekil C.16 Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği İle Değişimi
(A Sınıfı Yataklama)



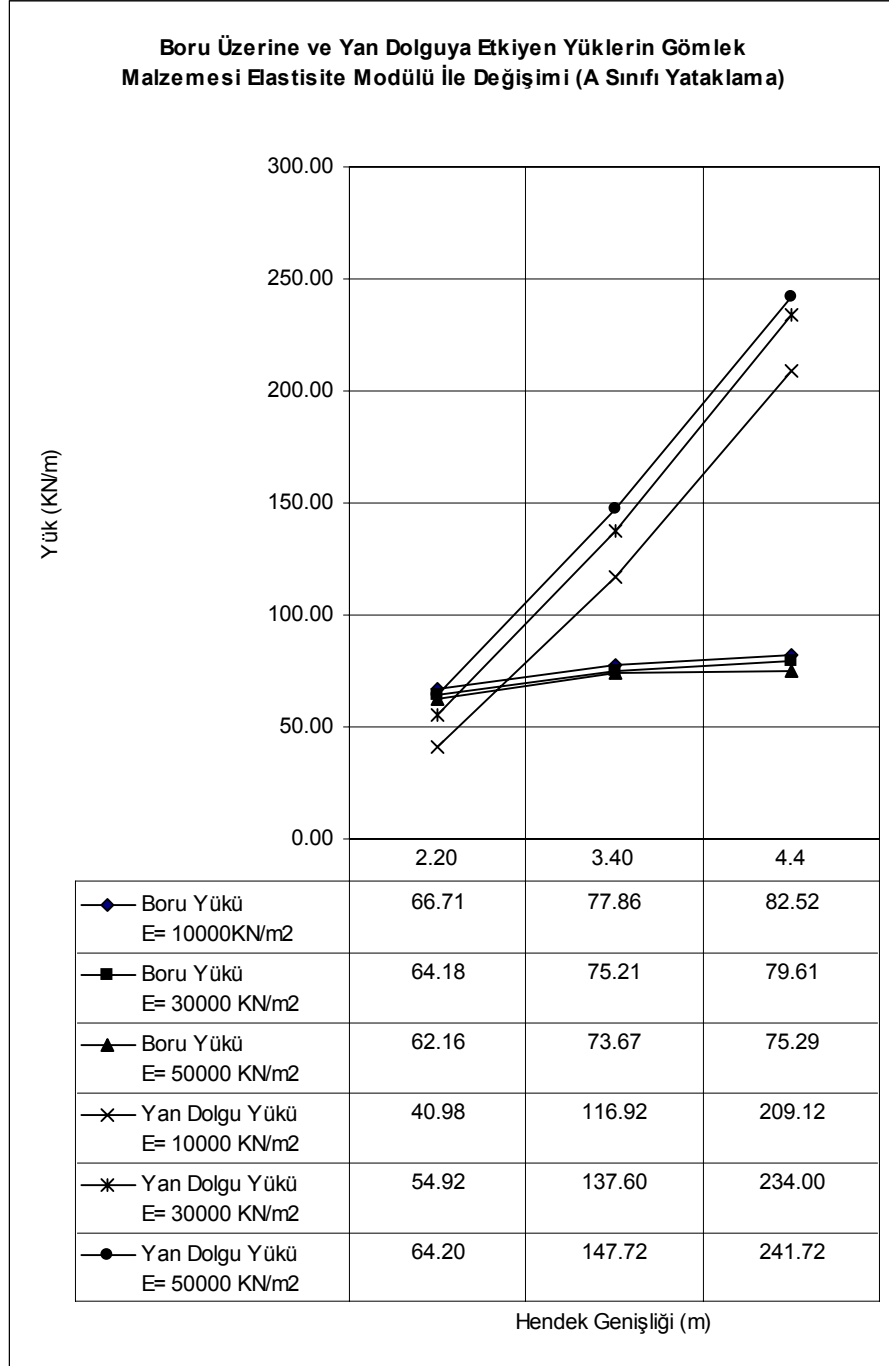
Şekil C.17 Boru Üzerine ve Yan Dolguya Etkiyen Yükler (D Sınıfı Yataklama)



Şekil C.18 Boru Üzerine ve Yan Dolguya Etkiyen Yükler (C Sınıfı Yataklama)



Şekil C.19 Boru Üzerine ve Yan Dolguya Etkiyen Yükler (B Sınıfı Yataklama)



Şekil C.20 Boru Üzerine ve Yan Dolguya Etkiyen Yükler (A Sınıfı Yataklama)

ÖZGEÇMİŞ

20 Şubat 1976 yılında Çanakkale’de doğdu. Ortaöğrenimini Özel Samsun Lisesi’nde, lise öğrenimini Samsun 19 Mayıs Lisesi’nde tamamladı. 1999 yılında İ.T.Ü İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Fakültesi Geoteknik Programı’nda Yüksek Lisansa başladı ve İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı’na Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.