

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÖMÜLÜ BORULARA ETKİYEN ZEMİN
YÜKLERİNİN BULUNMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ö. Gökhan AYALP

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Mete İNCECİK (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Sönmez YILDIRIM (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince yardımları ve tavsiyeleriyle yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER'e gösterdiği yakın ilgi ve değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Plaxis sonlu elemanlar programını öğrenmem ve tez çalışmam sırasındaki yakın ilgi ve yardımlarından dolayı Araş. Gör. Müge Baklaya'ya teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını hissettiren aileme teşekkür ederim.

Haziran, 2006

Ö. Gökhan AYALP

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	VI
TABLO LİSTESİ	VII
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
SEMBOL LİSTESİ	XII
ÖZET	XIV
SUMMARY	XVII
1. GİRİŞ	1
2. BORU DÖŞEME YÖNTEMLERİ	4
2.1 Hendek Tipi Borular	4
2.2 Dolgu Tipi Borular	5
2.3 Kazısız Yöntemler	6
2.3.1 Boru Çakma Yöntemi	7
2.3.2 Doğrusal Delgi Yöntemi	7
2.3.3 Pipejacking ve Mikrotünel Yöntemleri	8
2.3.3 Boru Patlatma Yöntemi	9
3. BORULARIN DÖŞENMESİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR	10
3.1 Giriş	10
3.2 Hendeklerin Açılması	11
3.2.1 Hendek Tabanı	12
3.2.2 Hendek Tipleri	14
3.3. Yataklama	16
3.3.1 Yataklama Malzemesi	20
3.3.2 Rijit Boruların Yataklanması	22
3.3.2.1 Dolaylı Yataklama Yöntemleri	23
3.3.2.2 Doğrudan Yataklama Yöntemleri	25
3.3.3 Fleksibl Boruların Yataklanması	27
3.4 Geri Dolgu	28
3.5 Sıkıştırma	29
4. GÖMÜLÜ BORULARA ETKİYEN DIŞ YÜKLER	32
4.1. Zemin Yüğü	32

4.2. Hareketli Yükler	32
4.3. Boru Eksenî Boyunca Oluşan Yükler	34
4.3.1. Üniform Olmayan Taban Desteği	35
4.3.2. Farklı Oturma	35
4.3.3. Yer Hareketleri	35
4.4 Don Olayı Sonucu Oluşan Yükler	36
5. GÖMÜLÜ RİJİT BORULARA ETKİYEN ZEMİN YÜKLERİNİN BULUNMASI	37
5.1. Marston Yük Teorisi	37
5.2. Hendek İçerisindeki Borulara Etkiyen Zemin Yükü	38
5.3. Dolgu Durumu	40
5.3.1 Pozitif Projeksiyon Durumunda Dolgu Yükü	43
5.3.2 Negatif Projeksiyon Durumunda Dolgu Yükü	46
5.4 Geçiş Genişliği	47
5.5 Tünel İçerisindeki Borulara Etkiyen Zemin Yükü	48
6. GÖMÜLÜ FLEKSİBL BORULARA ETKİYEN ZEMİN YÜKLERİNİN BULUNMASI	49
6.1 Marston Yük Teorisi	49
6.2 Prizma Yükü	50
6.3 Hendek İçerisindeki Borulara Etkiyen Zemin Yükü	51
6.4 Dolgu Durumundaki Borulara Etkiyen Zemin Yükü	51
6.5 Tünel İçerisindeki Borulara Etkiyen Zemin Yükü	52
7. GÖMÜLÜ BORULARIN TASARIMI	53
7.1. Rijit Boruların Tasarımı	53
7.2. Fleksibl Boruların Tasarımı	55
7.2.1 Zemin ve Boru Rijitliği	55
7.2.2 Spangler Iowa Formülü	56
7.3 Boru Performans Limitleri	58
7.3.1 Duvar Ezilmesi	58
7.3.2 Duvar Burkulması	59
7.3.3 Aşırı Eğilme	59
7.3.4 Eğriliğin Ters Dönmesi	60
7.3.5 Deformasyon Sınır	60
7.3.6 Boyuna Doğrultuda Gerilmeler	60
7.3.7 Kayma Yükleri	61
7.3.8Yorulma	61
7.3.9 Yapraklanma	61

8. PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULARA ETKİYEN YÜKLERİN İNCELENMESİ	62
8.1. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı	62
8.2. Plaxis Programı ile Zemine Gömülü Boruların Modellenmesi	64
SONUÇLAR	67
KAYNAKLAR	69
EKLER	73
ÖZGEÇMİŞ	104

KISALTMALAR

PVC: Polyvinyl Chloride

ABS: Acrylonitrile-butadiene-styrene

PE: Polyethylene

PB: Polybutylene

HDPE: High Density Polyethylene

SPT: Standard Penetration Test

CPT: Cone Penetration Test

ASCE: American Society of Civil Engineers

ACPA: American Concrete Pipe Association

SPIDA: Soil-Pipe Interaction Design and Analysis

USCS: Unified Soil Classification System

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

USBR: United States Bureau of Reclamation

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Yataklama malzemesi sınıfları ve açıklamaları.....	21
Tablo 3.2 Doğrudan yataklama yöntemlerinde kullanılan zemin türleri.....	26
Tablo 3.3 Doğrudan yataklama çeşitleri.....	26
Tablo 5.1 Çeşitli zeminlere ait γ , K ve μ değerleri	39
Tablo 5.2 Pozitif projeksiyonlu borular için oturma oranı değerleri.....	43
Tablo 5.3 Farklı zeminler için C değerleri.....	48
Tablo 7.1 Farklı yataklama türleri için önerilen yük faktörleri.....	53
Tablo 7.2 x ve x' değerleri.....	54
Tablo 7.3 Farklı yataklama durumları için N ve N' değerleri.....	54
Tablo 7.4 Yataklama sabiti değerleri.....	57
Tablo 8.1 Analizde kullanılan boru özellikleri	65
Tablo 8.2 Analizde kullanılan palplanş özellikleri.....	65
Tablo 8.3 Analizde kullanılan yataklama malzemesi özellikleri.....	65
Tablo B.1 Rijit borular için hesap sonuçları.....	97
Tablo B.2 Fleksibl borular için hesap sonuçları.....	97

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Hendek tipi boru yerleştirme..... 4
Şekil 2.2	Dolgu tipi boru yerleştirme..... 5
Şekil 2.3	Eksik hendek metodu 6
Şekil 3.1	Boruların yük taşıma prensipleri..... 10
Şekil 3.2	Boru performansına etki eden zemin bölgeleri..... 11
Şekil 3.3	Fleksibl borular için 1. Tip Hendek örneği..... 14
Şekil 3.4	Fleksibl borular için 2. Tip Hendek örneği..... 15
Şekil 3.5	Fleksibl borular için 3. Tip Hendek örneği..... 15
Şekil 3.6	Rijit borular için hendek örneği..... 16
Şekil 3.7	Yataklama elemanları..... 17
Şekil 3.8	Borunun hendek tabanına 60°'lik yataklama açısıyla oturtulması... 17
Şekil 3.9	Rijit borular için kenar dolgu yüksekliği..... 19
Şekil 3.10	Fleksibl borular için kenar dolgu yüksekliği..... 20
Şekil 3.11	Hendek içerisindeki rijit borular için yataklama yöntemleri..... 23
Şekil 3.12	Pozitif projeksiyonlu rijit boruların yataklanması..... 24
Şekil 3.13	Rijit borular için doğrudan yataklama metodu..... 25
Şekil 3.14	Fleksibl boruların hendek içerisinde yataklanması..... 27
Şekil 3.15	Dolgu durumunda fleksibl boruların yataklanması..... 27
Şekil 3.16	Geri dolgu..... 28
Şekil 3.17	Su jeti ve püskürtme yöntemleriyle sıkıştırma..... 30
Şekil 3.18	Zeminin belirli bir yükseklikten düşürülmesiyle sıkıştırılması..... 30

Şekil 4.1	Yol altında gömülü borulara etkiyen hareketli yük.....	33
Şekil 4.2	Boussinesq gerilme dağılımı ve gerçek gerilme ölçümlerinin karşılaştırılması.....	34
Şekil 5.1	Marston dar hendek teorisi.....	37
Şekil 5.2	Hendek durumunda yük katsayısı (C_d) için diyagram.....	39
Şekil 5.3	Pozitif projeksiyonlu borularda zemin prizmalarının hareketi.....	41
Şekil 5.4	Negatif projeksiyonlu borularda zemin prizmalarının hareketi.....	42
Şekil 5.5	Pozitif projeksiyonlu borular için C_c katsayısı.....	45
Şekil 5.6	Negatif projeksiyonlu borular için C_n değerleri.....	46
Şekil 5.7	Geçiş genişliği eğrileri	47
Şekil 6.1	Marston teorisine göre fleksibl borular üzerinde yük dağılımı	49
Şekil 6.2	Prizma yükü	51
Şekil 7.1	Spangler' a göre fleksibl boru üzerinde gerilme dağılımı	57
Şekil 7.2	Yataklama açısı	57
Şekil 7.3	Duvar ezilmesi	59
Şekil 7.4	Duvar burkulması	59
Şekil 7.5	Aşırı eğilme	59
Şekil 7.6	Eğriliğin ters dönmesi	60
Şekil 8.1	Zemin Profili	64
Şekil A.1	Geometri, yapısal elemanlar ve malzeme özelliklerinin tanımlanmış durumu.....	74
Şekil A.2	Sonlu elemanlar ağının oluşturulması	75
Şekil A.3	Boşluk suyu basıncı	76
Şekil A.4	Efektif gerilmeler.....	77
Şekil A.5	Palplanşın çakılması (1. Aşama).....	78
Şekil A.6	-1 m koduna kadar kazı yapılması ve yatay desteğin yerleştirilmesi	79

Şekil A.7	-4,7 m kotuna kadar kazı yapılması (3. Aşama).....	80
Şekil A.8	3. Aşamada boşluk suyu basıncı	81
Şekil A.9	3. Aşamada akım ağı.....	82
Şekil A.10	Borunun yerleştirilmesi ve -3,5 kotuna kadar gömlek malzemesinin doldurulması (4. Aşama).....	83
Şekil A.11	Geri dolgunun tamamlanması, palplanş ve yatay desteğin kaldırılması (5. Aşama).....	84
Şekil A.12	Rijit boruda oluşan yatay deformasyon örneği.....	85
Şekil A.13	Rijit boruda oluşan düşey deformasyon örneği.....	86
Şekil A.14	Rijit boruda oluşan toplam deformasyon örneği.....	87
Şekil A.15	Fleksibl boruda oluşan yatay deformasyon örneği.....	88
Şekil A.16	Fleksibl boruda oluşan düşey deformasyon örneği.....	89
Şekil A.17	Fleksibl boruda oluşan toplam deformasyon örneği.....	90
Şekil A.18	Boruya etkiyen eksenel kuvvet diyagramı örneği.....	91
Şekil A.19	Boruya etkiyen kesme kuvveti diyagramı örneği.....	92
Şekil A.20	Boruya etkiyen eğilme momenti diyagramı örneği.....	93
Şekil A.21	Rijit boruya etkiyen normal gerilme diyagramı örneği.....	94
Şekil A.22	Fleksibl boruya etkiyen normal gerilme diyagramı örneği.....	95
Şekil C.1	Rijit Boru İçin Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği ile Değişimi.....	99
Şekil C.2	Fleksibl Boru İçin Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği ile Değişimi.....	99
Şekil C.3	Rijit Boru İçin Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği ile Değişimi.....	100
Şekil C.4	Fleksibl Boru İçin Maksimum Kesme Kuvvetinin Hendek Genişliği ile Değişimi.....	100
Şekil C.5	Rijit Boru İçin Maksimum Momentin Hendek Genişliği ile Değişimi.....	101
Şekil C.6	Fleksibl Boru İçin Maksimum Momentin Hendek Genişliği ile Değişimi.....	101

Şekil C.7	Rijit Boru İçin Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği ile Değişimi.....	102
Şekil C.8	Fleksibl Boru İçin Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği ile Değişimi.....	102
Şekil C.9	Rijit Boru İçin Boru Üzerindeki Yükün Hendek Genişliği ile Değişimi.....	103
Şekil C.10	Fleksibl Boru İçin Boru Üzerindeki Yükün Hendek Genişliği ile Değişimi.....	103

SEMBOL LİSTESİ

D	: Boru çapı
W_{sc}	: Tekerlek yükünden dolayı borunun birim boyuna etkiyen ortalama yük (KN/m)
P	: Tekerlek yükü (KN)
F'	: Etki faktörü:
L	: Efektif boru uzunluğu (m)
C_s	: Yük katsayısı
W_d	: Hendek tipi borularda birim uzunluk için boru üzerindeki yük (KN/m)
E	: Doğal logaritma tabanı
γ	: Dolgunun birim hacim ağırlığı (KN/m ³)
V	: Dolgu içindeki herhangi bir yatay düzlemdeki düşey yük (KN/m)
B_d	: Hendek genişliği (m)
H	: Boru üst seviyesi ile doğal zemin yüzeyi arasındaki fark (m)
H	: Zemin yüzeyinden dolgu içindeki herhangi bir yatay düzleme olan mesafe (m)
C_d	: Hendek tipi borular için yük katsayısı
μ	: Dolgunun içsel sürtünme katsayısı (tanφ)
μ'	: Dolgu ve borunun kenarları arasındaki sürtünme katsayısı (tanφ)
F_s	: Birim uzunluğa etkiyen sürtünme kuvveti (KN/m)
K	: Yanal aktif birim basıncın düşey basınca oranı
r_{sd}	: Oturma oranı
S_m	: p.B _c yüksekliğindeki kenar dolgunun oturması (m)
S_g	: Boru etrafındaki doğal zeminin oturması (m)
S_f	: Boru altındaki temelin oturması (m)
d_c	: Borunun düşey yönde yüksekliğinin azalması (m)
S_d	: Hendek içerisindeki p'.B _d yüksekliğindeki dolgunun oturması (m)
S_f	: Borunun yataklandığı zeminin oturması (m)
P	: Pozitif projeksiyonlu borularda projeksiyon oranı
p'	: Negatif projeksiyonlu borularda projeksiyon oranı
W_c	: Dolgu durumunda birim uzunluk için boru üzerindeki yük (KN/m)
B_c	: Boru dış çapı (m)
C_c	: Pozitif projeksiyonlu borular için yük katsayısı
H_e	: Eşit oturma düzleminin yüksekliği (m)
C_n	: Negatif projeksiyonlu borular için yük katsayısı
W_t	: Tünel durumunda boruya etkiyen yük
B_t	: Tünel veya boru genişliği
P	: Prizma yükü (KN/m ²)
L_f	: Yük faktörü
N	: Düşey yöndeki yük ve reaksiyonun fonksiyonu olan parametre
x	: Dolgunun aktif yatay basıncının etkidiği alanın fonksiyonu olan parametre
q	: Toplam yatay gerilmenin toplam düşey gerilmeye oranı
m	: Yanal basıncın etkidiği boru kısmı

E	: Elastisite 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)
D_L	: Eğilme gecikme faktörü
K	: Yataklama faktörü
W_c	: Borunun birim uzunluğuna düşen Marston yükü (KN/m)
I_L	: Eylemsizlik momenti (m^4/m)
e	: Yan dolgunun pasif direnci ($\text{KN/m}^2/\text{m}$)
ΔX	: Yatay eğilme veya çaptaki değişim (m)
E'	: Efektif zemin modülü

ÖZET

Boru hatları taşıma ve iletim amacıyla eski çağlardan beri kullanılan mühendislik yapılarıdır. İlk örnekleri su kanalları ve kanalizasyon hatları olan boru hatları günümüzde çok değişik alanlarda kullanılmaktadır. Güvenlik, çevre ve ekonomi kriterleri bakımından diğer yöntemlere göre daha avantajlı olmaları nedeniyle borular hala önemli bir taşıma aracıdır. Su hatları, kanalizasyon hatları, drenaj hatları, gaz hatları, ısı dağıtım hatları, elektrik, telefon, televizyon hatları, otoyollardaki menfezler ve metro tünelleri, maden cevherleri, petrol ve gaz hatları gibi endüstri ve modern yaşam için önemli bir çok alanda kullanılmaktadırlar.

Gömülü boruların tasarımı ayrıntılı bir çalışmayı gerektirmektedir. Taşıma sisteminin teknik yönden yeterli ve ekonomik olmasına dikkat edilir. Sistemin yatırım masraflarının yanında bakım masrafları ve proje ömrü de göz önünde bulundurulmalıdır. Yatırım masrafları genel olarak boru hattının inşaat maliyetine, bakım masrafları hattın temizlik ve tamirine, proje ömrüyse boru malzemesinin dayanıklılığına bağlıdır. Boru hattının inşaat aşamaları şu şekildedir :

1. İnşaat öncesi planlama
2. Sahanın hazırlanması
3. Malzemelerin siparişi, taşınması
4. Kazı
5. Temel ve yataklama işlemleri
6. Boruların birleştirilmesi
7. Geri dolgu
8. Boru hattının test edilmesi

Borunun çevreyle ve taşınan maddeyle fiziksel ve kimyasal etkileşiminden oluşabilecek aşınma, korozyon ve çürümeye karşı dayanıklılığı borunun ömrünü ve işletim masraflarını etkiler. Bu nedenle boru hattının, tasarım ömrü boyunca istenilen performansta işletilebilmesi için boru malzemesinin seçimi çok önemlidir. Boru malzemesini seçerken fiziksel ve kimyasal aşınmaya karşı direnç, basınca

dayanıklılık, sağlamlık, imal edildiği yerden inşaat alanına taşıma ve öngörülen konuma yerleştirme kolaylığı ile teknik bakımdan yeterlilik ve maliyet gibi hususlar göz önünde bulundurulmalıdır. Asbestli çimento borular, camlaştırılmış kil borular, beton borular, çelik borular, font borular, düktil font borular yaygın olarak kullanılan boru çeşitleridir. Son yıllarda plastik boru endüstrisi çok büyük gelişme göstermiştir. Boru yapımında kullanılan dört temel termoplastik PVC (Polyvinyl chloride), ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene), PE (Polyethylene) ve PB (Polybutylene)'dir.

Borular döşeme yöntemi bakımından hendek tipi borular ve dolgu tipi borular olmak üzere ikiye ayrılır. Hendek tipi borular kısmen kendini tutabilen ve örselenmemiş zemine kazılan dar bir hendeğe yerleştirilip üzeri geri dolguyla kaplanan borular olarak tanımlanır. Zemin seviyesinin inşaatın bir parçası olarak yükseltildiği yerlere döşenen borular, dolgu tipi (projeksiyonlu) borular olarak adlandırılır. Son yıllarda teknolojik ilerlemelerle birlikte, özellikle şehir içinde yaşamı etkilememek amacıyla kazısız yöntemlerle boru döşenmesi yaygınlaşmaktadır. Başlıca kazısız boru döşeme yöntemleri boru çakma yöntemi, doğrusal delgi yöntemi, pipejacking ve mikrotünel yöntemleri, ve boru patlatma yöntemleridir.

Boru üzerindeki yükler esas olarak zemin yükü ve yüzeysel yüklerden oluşur. Bununla birlikte boru hatlarında meydana gelen hasarlar üzerinde yapılan araştırmalar, yalnız ideal koşullarda borulara sadece zemin ve hareketli yüklerin etkiğini göstermiştir. Üniform olmayan taban desteği, farklı oturma, yer hareketleri gibi kesin olarak hesaplanması mümkün olmayan, değişken, bölgesel ve eksenel eğilmeye neden olan büyük yükler de vardır.

Boru hattının kullanım amacı, taşınacak malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, boru malzemesinin türü, borunun yerleştirilme yöntemi gibi kriterlerle birlikte zeminlerin doğadaki homojen olmayan yapıları boru hatlarının tasarımında ayrıntılı bir çalışmayı gerektirmektedir. Gömülü boru sisteminde zeminler borunun yerleştirildiği temel vazifesi görmelerinin dışında borunun yük taşımaya destek olması bakımından yapısal bir mühendislik malzemesi olarak da kullanılırlar. Boruya etkiyen dış yüklerin bulunmasına yönelik ilk mühendislik yaklaşımı 1920'li yılların başlarında A. Marston tarafından gerçekleştirilmiştir. Boruya etkiyen yükler zemin-yapı etkileşiminin bir fonksiyonudur ve her ikisinin rölatif rijitliğine bağlıdır. Borular yapıldıkları malzemenin deformasyon direncine göre rijit ve fleksibl olmak üzere ikiye ayrılırlar ve yük hesapları da bu iki boru çeşidi için farklıdır. Yapısal hasar oluşmadan en az % 2 deforme olabilen borular fleksibl, bu kritere uymayanlar rijit olarak tanımlanır.

Bu çalışmada, boruların zemin içersine yerleştirme durumları, boruların yerleştirildiği zeminler, zemin-yapı etkileşimi ve gömülü borulara etkiyen dış yükler hakkında genel bilgiler verilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın son bölümünde, Plaxis sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan modellemelerle hendek genişliği, gömlek malzemesi ve boru türünün boru üzerindeki zemin yüküne etkisi incelenmiş ve bulunan sonuçlar Marston yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemelerin sonuçları şu şekildedir:

1. Marston yöntemiyle bulunan sonuçlar Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak bulunan sonuçlardan daha büyüktür.
2. Boruyu çevreleyen gömlek malzemesinin elastisite modülü arttıkça boruya etkiyen toplam yük, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir.
3. Hendek genişliği arttıkça boruya etkiyen toplam yük, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir.
4. Rijit borulara etkiyen yükler fleksibl borulara etkiyen yüklerden büyüktür.

SUMMARY

Pipelines are the engineering structures that have long been used for the purposes of transportation and transmission. First examples of pipelines are seen as water and sewerage lines. Because of economical, safety and environmental advantages pipelines are still important means of transportation and they are used for wide variety of purposes. Water mains, sewerage lines, drain lines, heat distribution lines, electric, telephone and television conduits, culverts, metro tunnels, petrol and gas lines are examples of pipelines which are essential in industry and modern life.

Design of buried pipes requires a comprehensive work to meet technical and economical criteria. Besides the construction costs, maintenance costs and project life of pipeline should also be taken into account. Therefore type of pipeline, physical and chemical properties of material to be conveyed and pipe material should be considered. Construction of a pipeline is done in following order:

1. Planning
2. Preparation of site
3. Transportation of materials to the site
4. Excavation works
5. Foundation and bedding works
6. Connection of pipes
7. Backfill
8. Testing pipeline

Chemical and physical interaction between pipe material and the surrounding soil or the material conveyed may cause abrasion, corrosion and decaying of pipe which will affect the life of pipeline and maintenance costs. Therefore in order to operate the pipeline with high performance through the project life, selection of pipe material is a very important issue. Resistance to physical and chemical abrasion, strength,

durability, transportation and installation easiness and cost issues should be considered to select suitable pipe material. Asbestos-cement pipes, vitrified clay pipes, concrete pipes, steel pipes, iron pipes are the widely used pipe types. In recent years much development has been seen in plastic pipe industry. PVC (Polyvinyl chloride), ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene), PE (Polyethylene) ve PB (Polybutylene) are the four basic thermoplastic types used in plastic pipe industry.

According to installation types pipes are classified into two groups. Ditch conduits are the pipes installed into a relatively narrow ditch dug in undisturbed soil. Embankment conduits are the ones which are installed to places where the soil level will be increase as part of the construction. In recent years, along with the technological developments, trenchless pipe installation techniques are encouraged especially in city centers not to disturb daily life. Pipe-ramming, directional drilling, pipejacking and microtunneling and pipe-bursting methods are the main trenchless pipe installation techniques.

Loads imposed on buried pipes are substantially consists of soil and surcharge loads. Researches made on failed pipelines revealed that only in ideal conditions pipes are merely subject to soil and surcharge loads. Because of non-uniform foundation support, differential settlement and ground movement pipes are subject to highly variable and localized loads which are impossible to be accurately calculated.

Along with the issues such as object of pipeline, chemical and physical properties of material to be conveyed, type of pipe material and installation techniques non-homogenous structure of soils in nature necessitates a comprehensive study for design of buried pipes. In buried pipe systems soil is not only used as foundation on which the pipe is laid, also as an structural engineering material to support the load carrying performance of pipes. First engineering approach to determine the loads on buried pipes was made by Anston Marston in early 1920's. Loads on buried pipes are a function of soil-pipe interaction and depends on their stiffness properties. Pipes are classified into two groups as rigid and flexible pipes. A flexible pipe has been defined as one that will deflect at least 2 % without structural distress. Materials that do not meet this criterion are usually considered to be rigid.

In this study general information provided about pipe types, pipe installation techniques, soil types used in buried pipe systems, soil-pipe interaction and calculation methods for determining loads on buried pipes. At the end of the study affects of pipe types, embedment material properties and width of ditch on the loads on buried pipes are analyzed by the models made in Plaxis finite elements software

program. Solutions obtained from these models are compared by the solutions found by using Marston Load Theory. The results of the analyses are as follows:

1. Load values found by Marston Load Theory are higher than the solutions obtained from Plaxis finite elements software program.
2. As the modulus of elasticity of the embedment soil around the pipe increases, total load, axial force, shear force, bending moment and normal stress on the pipe decreases.
3. As the width of the ditch increases, total load, axial force, shear force, bending moment and normal stress on the pipe increases.
4. Loads on rigid pipes are higher than loads on flexible pipes.

1. GİRİŞ

Boru hatları taşıma ve iletim amacıyla eski çağlardan beri kullanılan mühendislik yapılarıdır. İlk örnekleri su kanalları ve kanalizasyon hatları olan boru hatları günümüzde çok değişik alanlarda kullanılmaktadır. Güvenlik, çevre ve ekonomi kriterleri bakımından diğer yöntemlere göre daha avantajlı olmaları nedeniyle borular hala önemli bir taşıma aracıdır. Su hatları, kanalizasyon hatları, drenaj hatları, gaz hatları, ısı dağıtım hatları gibi modern bir şehir için vazgeçilmez olan yapıları oluştururlar. Güvenlik ve kapladıkları alandan tasarruf amacıyla elektrik, telefon, televizyon hatlarının da gömülü borularla iletimi yaygınlaşmaktadır. Otoyollardaki menfezler ve metro tünelleri, gömülü boruların ulaştırma alanındaki uygulamalarıdır. Ayrıca maden cevherleri, petrol ve gaz gibi önemli endüstriyel maddelerin de iletimi boru hatlarıyla sağlanabilmektedir.[1, 2, 3]

Gömülü boruların tasarımı ayrıntılı bir çalışmayı gerektirmektedir. Taşıma sisteminin teknik yönden yeterli ve ekonomik olmasına dikkat edilir. Sistemin yatırım masraflarının yanında bakım masrafları ve proje ömrü de göz önünde bulundurulmalıdır. Yatırım masrafları genel olarak boru hattının inşaat maliyetine, bakım masrafları hattın temizlik ve tamirine, proje ömrüyse boru malzemesinin dayanıklılığına bağlıdır. Boru hattının inşaat aşamaları şu şekildedir [3, 42]:

1. İnşaat öncesi planlama
2. Sahanın hazırlanması
3. Malzemelerin siparişi, taşınması
4. Kazı
5. Temel ve yataklama işlemleri
6. Boruların birleştirilmesi
7. Geri dolgu
8. Boru hattının test edilmesi

Boru hatları genellikle toprak altına döşenen boru sistemi ve ilgili sanat yapılarından oluşur. Ulaştırma Bakanlığı tarafından 1976 yılında yapılan bir çalışmaya göre boru hatları taşıma sisteminde gerek ilk yatırım maliyeti gerekse tesisin proje ömrü bakımından ayrı bir önem taşımaktadır. Bu nedenle boru çapı, et kalınlığı, boru malzemesinin cinsi, aşınma ve korozyona karşı alınacak koruma tedbirleri, boru ek yerleri ve dirsek kısımları, boru eğimi gibi karakteristiklerle boru hattının geçeceği

güzergah, pompa istasyonları, pompa tipi ve sayısı, ölçme ve kontrol donanımlarının yerleri ve sayıları için ayrı ayrı etütler yapmak gerekmektedir. Güzergah seçimi yapmadan önce gerekli bilgiler bölgeye ait haritalardan ve arazideki keşif çalışmalarından elde edilir. Bu bilgiler ışığında güzergah seçiminde şu hususlara dikkat edilir [4] :

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

Borunun çevreyle ve taşınan maddeyle fiziksel ve kimyasal etkileşiminden oluşabilecek aşınma, korozyon ve çürümeye karşı dayanıklılığı borunun ömrünü ve işletim masraflarını etkiler. Bu nedenle boru hattının, tasarım ömrü boyunca istenilen performansta işletilebilmesi için boru malzemesinin seçimi çok önemlidir. Boru malzemesini seçerken fiziksel ve kimyasal aşınmaya karşı direnç, basınca dayanıklılık, sağlamlık, imal edildiği yerden inşaat alanına taşıma ve öngörülen konuma yerleştirme kolaylığı ile teknik bakımdan yeterlilik ve maliyet gibi hususlar göz önünde bulundurulmalıdır. [2-7]

Asbestli çimento borular, pürüzlülüğü az, korozyona karşı dayanıklı ve uzun ömürlü borulardır. İşlenmesi kolay, ağırlıkları az ve dona karşı dayanıklıdır. Çarpma ve darbelere karşı hassastır ve düşük eğilme mukavemetleri vardır. Asbest maddesinin sağlık açısından zararlı olmasından dolayı kullanımı azalmaktadır.

Camlaştırılmış kil borular korozyona ve aşınmaya karşı dayanıklı olmakla birlikte düşük mukavemetli ve kırılabilirler.

Beton borular yüklere karşı dayanıklı olup montajları kolay ve bakımları ucuzdur. Alkali ve asidik ortamların dışında korozyona karşı da dayanıklıdırlar. Tamirleri zordur ve porozite ve büzülme sonucu oluşan çatlaklardan sızıntı olabilir.

Çelik borular değişik şekillerde çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Boru çapı ve et kalınlığı boruya etkiyecek olan iç ve dış basınca göre belirlenir. Heyelan bölgeleri için çok elverişlidir. Hafif olmaları nakliye kolaylığı sağlar. Korozyona karşı korunmaları çok önemlidir.

Font borular şehirlerin su şebekelerinde en çok kullanılmış borular olup korozyona karşı dayanıklı ve uzun ömürlüdürler. Dış yüklere karşı mukavimdir ve boru cidarının rijit ve kalın olmasından dolayı negatif basınçlardan zarar görmezler. Bitüm tabakası ile paslanmaya karşı korunurlar. Ağır olmaları, çarpma ve darbelere karşı hassas olmaları font boruların mahzurlarıdır. Son yıllarda geliştirilen düktil font borular ise çelik borular kadar mukavemete sahip olup normal font borular gibi korozyona dayanıklıdır.

Son yıllarda plastik boru endüstrisi çok büyük gelişme göstermiştir. Boru yapımında kullanılan dört temel termoplastik PVC (Polyvinyl chloride), ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene), PE (Polyethylene) ve PB (Polybutylene)'dir. Yüzeylerinin pürüzsüz olması, hafif olmaları, korozyona karşı dayanıklı olmaları, kolay montaj edilmeleri, esnek olmaları ve sızdırmazlıkları sundukları avantajlardır. Plastik borular arasında en çok kullanılan PVC borular, biyolojik çürümeye karşı mukavimlerdir ancak 5 °C nin altında kırılğan olmaktadır. PE borular düşük ısılarda da iyi performans gösterir ancak ayrışan ve çürüyen zeminlere döşenmemelidir. Plastik boruların dezavantajları yüksek sıcaklıklarda ve zamanla mukavemetlerinin azalmasıdır.

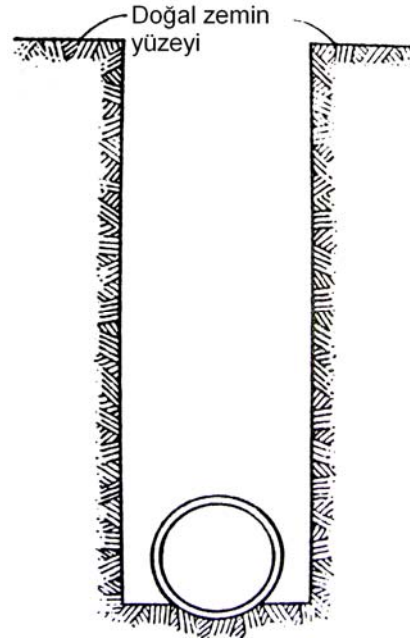
Boruların tasarımında önemli noktalardan biri de, bu çalışmanın konusunu oluşturan, boruya etkiyen dış yüklerin bulunmasıdır. Bu alandaki ilk mühendislik yaklaşımı 1920'li yılların başlarında A. Marston tarafından gerçekleştirilmiştir. Boruya etkiyen yükler zemin-yapı etkileşiminin bir fonksiyonudur ve her ikisinin rölatif rijitliğine bağlıdır. Borular yapıldıkları malzemenin deformasyon direncine göre rijit ve fleksibl olmak üzere ikiye ayrılırlar ve yük hesapları da bu iki boru çeşidi için farklıdır. Yapısal hasar oluşmadan en az % 2 deforme olabilen borular fleksibl, bu kritere uymayanlar rijit olarak tanımlanır. Asbestli çimento borular, camlaştırılmış kil borular, beton borular rijit; çelik borular, PVC borular ve yüksek yoğunluklu polietilen borular (HDPE) fleksibl borulara örnek verilebilir. [1, 3, 8]

Bu çalışmada, boruların zemin içerisine yerleştirme durumları, boruların yerleştirildiği zeminler, zemin-yapı etkileşimi ve gömülü borulara etkiyen dış yükler hakkında genel bilgiler verilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın son bölümünde, farklı yerleştirme şartlarının boru üzerindeki zemin yüküne etkisi Marston Yük teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiş ve bu yöntemler karşılaştırılmıştır.

2. BORU DÖŞEME YÖNTEMLERİ

2.1 Hendek Tipi Borular

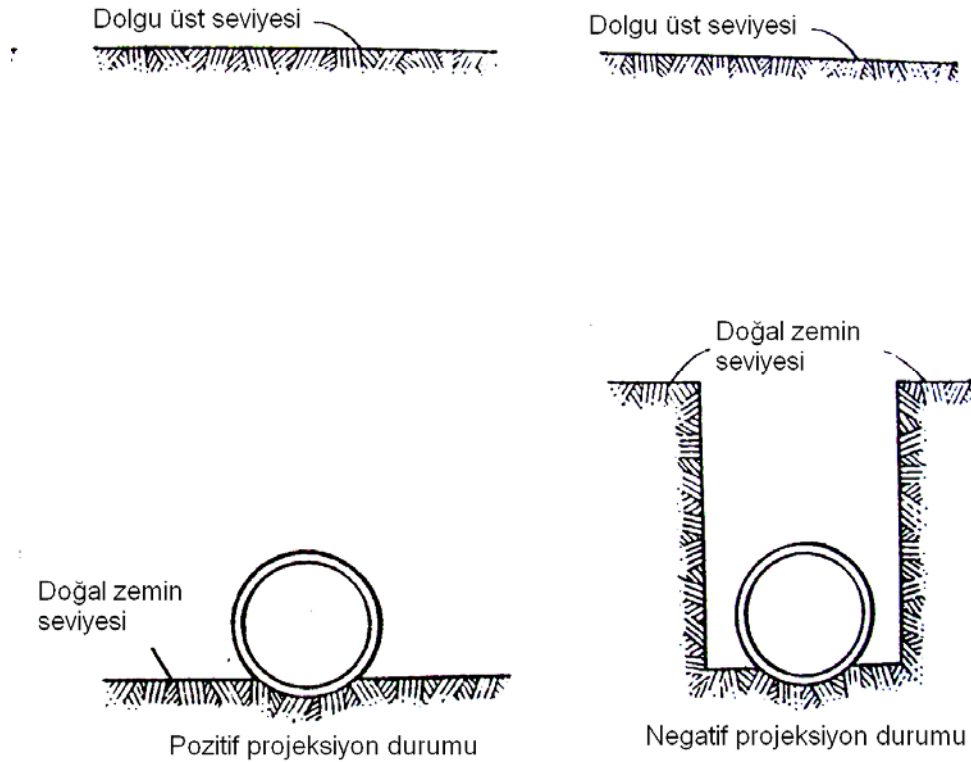
Hendek tipi borular kısmen kendini tutabilen ve örselenmemiş zemine kazılan dar bir hendeğe yerleştirilip üzeri geri dolguyla kaplanan borular olarak tanımlanır. Şekil 2.1’de hendek tipi boru yerleştirme örneği görülmektedir. Bu yöntem kanalizasyon hatları, su hatları, drenaj hatları ve gaz hatlarının döşenmesinde kullanılabilir. Yüzeye yakın küçük çaplı boruların döşenmesi en çok bu yöntemle yapılır. Hendekler genellikle mevcut yollar boyunca açılır ve kullanımları özellikle şehirlerde boru döşenmesinde yaygındır. Hendek içerisine yerleştirilmiş boru üzerinde geri dolgudan dolayı oluşan yükler, hendek duvarlarıyla olan sürtünmeden dolayı, toplam zemin yükünden daha azdır [9–11].



Şekil 2.1: Hendek tipi boru yerleştirme [9]

2.2 Dolgu Tipi Borular

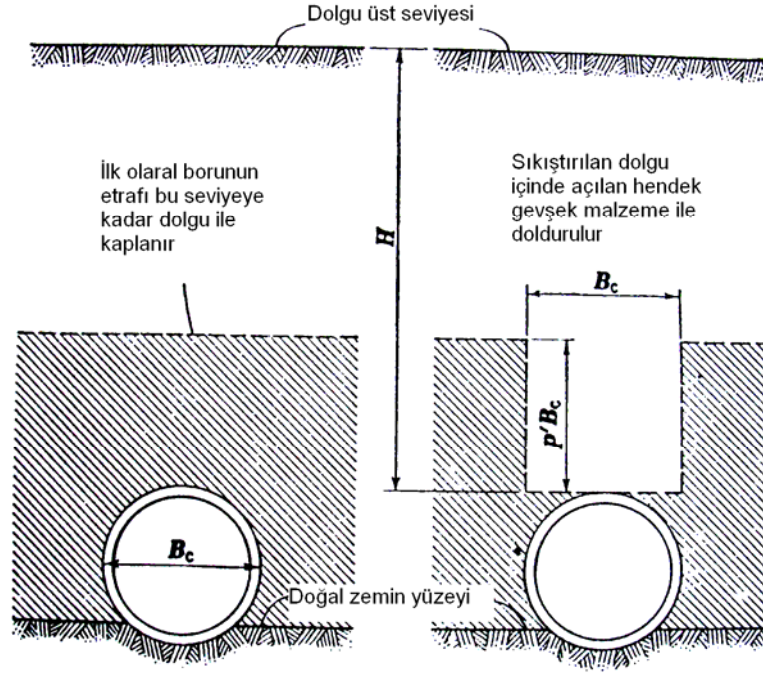
Zemin seviyesinin inşaatın bir parçası olarak yükseltildiği yerlere döşenen borular, dolgu tipi (projeksiyonlu) borular olarak adlandırılır. Karayolları ve demiryollarının altındaki menfezler dolgu tipi boruların tipik örnekleridir. Dolgu tipi borular yerleştirme şartlarına göre pozitif ve negatif projeksiyon durumu olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 2.2’ de görüldüğü üzere, pozitif projeksiyon durumu borunun yüzeysel bir yatak üzerine yerleştirilip dolguyla kaplanmasıdır. Negatif projeksiyon durumu ise borunun sığ bir hendeğe, boru taç kısmı doğal zemin yüzeyinin altında kalacak şekilde yerleştirilip dolguyla kaplanmasıdır. Dolgu ile boru sisteminde oluşan deformasyonların yol açtığı sürtünme kuvvetlerinin yönüne bağlı olarak, boruya etkiyen yük, zemin yükünden fazla veya daha az olmaktadır [3, 9, 10].



Şekil 2.2: Dolgu tipi boru yerleştirme [9]

Özel bir yerleştirme tekniği olan eksik hendek metodu ise negatif projeksiyon durumuna benzer. Boru ilk olarak pozitif projeksiyon durumuna göre yerleştirilir ve boru taç kısmının üzeri boru genişliğinin 1–1,5 katı yüksekliğe kadar dolgu ile kaplanır. Dolgunun iyi sıkışmasına dikkat edilmelidir. Daha sonra sıkıştırılmış dolgu içinde boru taç kısmına kadar bir hendek kazılır ve bu hendek mümkün olduğunca gevşek şekilde sıkışabilir malzemeyle doldurulur. Sıkışabilir malzeme olarak saman, tahıl sapları ve çöpleri, kuru yapraklar veya polistren köpük kullanılabilir. Daha

sonra normal dolgu işlemine devam edilir. Şekil 2.3'te eksik hendek metoduyla boru döşerken izlenen adımlar görülmektedir. Bu yöntemin amacı boru üzerindeki zeminin oturmasıyla oluşan yukarı yöndeki kayma gerilmelerinin boru üzerine etkiyen yükü azaltmasıdır. Sıkışabilir malzeme olarak polistren köpük kullanılan bir çalışmada, eksik hendek yöntemiyle yerleştirilmiş boruların üzerindeki yükün, pozitif projeksiyonlu borulara göre %28 daha az olduğu görülmüştür. [9, 10, 15].



Şekil 2.3: Eksik Hendek Metodu [9]

2.3 Kazısız Yöntemler

Son yıllarda boru alanındaki en büyük teknolojik gelişme boruların kazısız döşenmesi konusunda olmuştur. Boruların kazısız döşenmesi yeni boru hatlarının yapımında, eski boru hatlarının yenilenmesinde ve yeniden kaplanmasında kullanılabilmektedir [2].

Boruların döşenmesi sırasında oluşabilecek yer hareketleri çevredeki yapılara, yol kaplamalarına ve diğer hatlara zarar verebilir. Derin kazıların yapılması sırasında hendeğin desteklenmesi ve desteğin kaldırılması, yeraltı su seviyesinin indirilmesi ve geri dolgu işlemlerinin yol açtığı oturmalar oluşabilir. Özellikle kanalizasyon hatları, bu hatların genellikle mevcut yollar boyunca ve büyük derinliklere yerleştirildiğinden dolayı, hendek açılarak döşenmesi durumunda, trafiğin aksamasına, ticaretin ve toplu yaşamın olumsuz yönde etkilenmesine neden

olmaktadır. Birçok şehirde boru hatlarının, servis ömürlerinin dolmuş olması ve artan ihtiyaç nedeniyle yenilenmesi veya tamir edilmesi gerekmekte, ancak çevrelerinde bulunan diğer yapılar bu işlemlerin yapılmasını zorlaştırmaktadır [2, 12, 13].

Teknik gelişmelerle birlikte kazısız yöntemlerin kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Özellikle yüzeysel deformasyonların istenmediği durumlarda tercih edilirler. Ayrıca çevreyi koruma ve toplumu rahatsız etmeme amacıyla da bu yöntemin kullanımı desteklenmektedir. Boruya etkileyen yükler hendek tipindekilere göre çok farklı olabilir. Belli bir derinliğin altında boruya etkileyen yükler derinlikten etkilenmemektedir [11].

Kazısız boru döşemenin birçok yöntemi olmasıyla birlikte bu yöntemler çalışma alanına işçilerin girebilmesine ve hattın doğrultusunun kontrol edilebilmesine göre sınıflandırılır. Kullanılan araçların pahalı olması nedeniyle kazısız yöntemlerin kullanımı sırasında işin aksamamasına önem verilmelidir. İnşaat sırasında beklenmedik durumlarla karşılaşılması için, projeye başlamadan önce ayrıntılı bir geoteknik inceleme yapılmalıdır [12, 17].

2.3.1 Boru Çakma Yöntemi

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

2.3.2 Doğrusal Delgi Yöntemi

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

kadar, 30 m derinliğe bu yöntemle döşenebilir. Bu yöntem gaz, kanalizasyon ve su hatlarının yapılmasında kullanılabilir [2, 16].

2.3.3 Pipejacking ve Mikrot nel Yöntemleri

Pipejacking, tünel açma işlemi devam ederken borunun itilerek tünele yerleştirilip sürekli bir kaplamanın yapıldığı kazısız boru döşeme yöntemidir. En küçük boru çapı işçilerin kazıyı kontrol etmek için girebilmesine müsaade edecek büyüklükte olmalıdır ve ülkeden ülkeye de i mekle birlikte genel olarak 900 mm minimum boru çapı olarak kabul edilir. Teorik olarak boru çapları için üst bir limit yoktur ve bu yöntemle d  enmi  5000 mm çapındaki borular mevcuttur. Dairesel kesitli tünellerin yanında, hemen hemen her kesitte tünel açılabilir. Pipejacking ilk olarak demiryollarının ve karayollarının altından boruların geçirilmesi için kullanılmıştır. Daha sonra yöntemin ve makinelerin geliştirilmesiyle, 1970'li yılların sonuna doğru Japonya ve Almanya'da kanalizasyon hatlarının yapımında kullanılmıştır [2, 13, 14].

Pipejacking, bir boru döşeme yöntemi olmakla birlikte, diğer kazısız boru döşeme yöntemlerinde de kullanılan bir boru yerleştirme prensibidir [13].

Mikrot nel y ntemiye işçilerin  alı amayacağı genişlikteki tünellerde, tünel açma, kazılan zeminin dışarı atılması ve kalkanın kontrol edilmesi işlemlerinin dışardan kumanda edildiği bir kazısız boru döşeme yöntemidir. En büyük boru genişliği genel olarak 900 mm.'dir. Bu yöntem ilk olarak 1975 yılında Japonya'da kullanılmıştır. Mikrot nel küçük çapta borular için ortaya çıkmış bir yöntem olsa da 3600 mm çapındaki borular da bu yöntemle d  enebilmektedir [2, 13, 14].

Pipejacking ve mikrot nel yöntemleri sert kayalar, siltli ve kumlu zeminler gibi birçok zeminde uygulanabilir. Yeraltı su seviyesinin ve borunun d  enece i derinliğin yüksek olduğu durumlarda da uygulanabilir. Aşırı konsolide ve  i ebilen killerde yüksek sürtünme kuvvetleri boruyu itmeyi zorlaştırabilir ve bu durum itme uzunluğunu sınırlar. Mikrot nel yönteminin zemin özelliklerinin değişken olduğu şartlarda uygulanması zordur. Pipejacking ve mikrot nel yöntemlerinin uygulanmasıyla yer hareketleri ve de bu nedenle oluşabilecek hasarlar büyük ölçüde önlenir [2, 13].

Pipejacking ve mikrot nel yöntemleriyle beton, kil, plastik  elik ve font borular d  enebilir. Düşey ve yatay eksenden sapma 35 mm kadar olup, gelişen izleme ve yönlendirme tekniklerinin kullanılmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Borular 1000 m.'nin üzerine kadar itilebilmekte ve ara istasyonların kullanılmasıyla uzun hatlar yapılabilir [13].

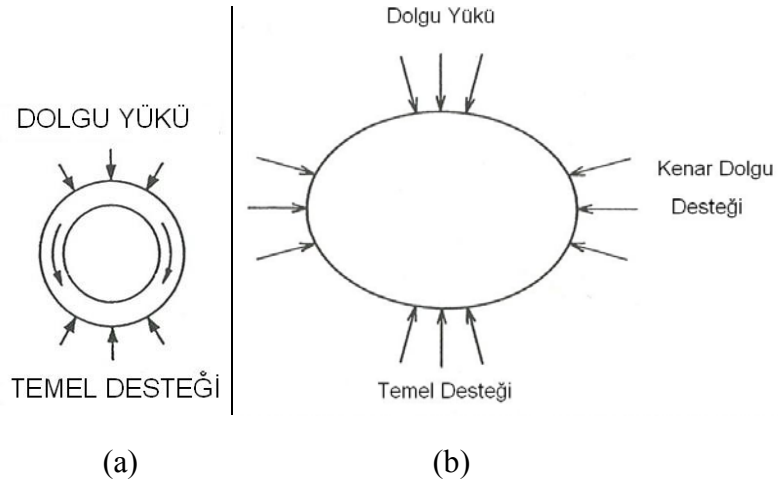
2.3.4 Boru Patlatma Yöntemi

Boru patlatma yöntemi, eski boru hatlarının yenilenmesinde kullanılır. Bu yöntemle, eski boru hattı kırılarak yerine yeni boru yerleştirilir. Bu amaçla, koni şeklindeki patlatma ucu eski boru içine itilerek, boruya çekme ve kayma mukavemetinden daha yüksek radyal gerilmeler uygulanır. Patlatma ucu eski boruyu kırarak (patlatarak) ilerlerken arkasından yeni boru itilir. Patlatma için gereken kuvvetin oluşturulmasına ve aktarılmasına bağlı olarak statik, hava basınçlı ve hidrolik boru patlatma sistemleri vardır. Boru patlatma yöntemi, 50–400 mm çapındaki dökme demir, kil, beton, PVC, HDPE ve sünek demirden yapılmış boruların 100–200 m.'ye kadar değiştirilmesinde kullanılmıştır. Bu yöntemle eski boru hattıyla aynı veya daha büyük çapta boru hatları yapılabilir [2, 12, 18].

3. BORULARIN DÖŞENMESİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR

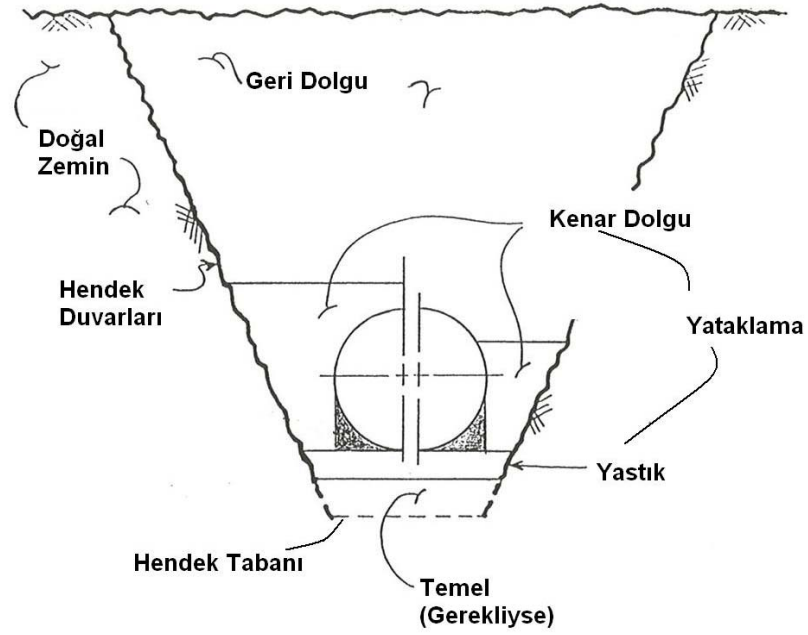
3.1 Giriş

Boru hatlarının yapılmasında zemin, üzerine yapının yerleştirildiği temel işlevi görmenin yanı sıra hem boruya destek olan hem de yüklerin iletimini sağlayan bir inşaat malzemesi olarak da kullanılır. Boruyu çevreleyen zemin boru performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Her boru çeşidinin farklı mukavemet ve rijitlik özellikleri vardır ve borunun yerleştirileceği zemin ve derinliğe göre farklı yataklama ve yerleştirme tekniği gerektirirler [3].



Şekil 3.1 Boruların yük taşıma prensipleri (a) Rijit boruların yük taşıma prensibi (b) Fleksibl boruların yük taşıma prensibi [8]

Şekil 3.1’de rijit ve fleksibl boruların yük taşıma prensipleri görülmektedir. Rijit borular, üzerlerindeki yükü boru duvarları vasıtasıyla alttaki zemine aktarırlar. Fleksibl borular ise yük altında deforme olarak, üzerlerindeki yükün bir kısmını yandaki zemine iletirler. Her iki borunun da yük taşıma kapasiteleri boru özelliklerinin yanında, boruyu çevreleyen zeminin özelliklerine de bağlıdır. Bu nedenle boruların tasarımı ve de yerleştirilmesi sırasında Şekil 3.2’de görülen hendek, temel, yataklama ve geri dolgu özellikleri üzerinde durulması gerekir [8, 9].



Şekil 3.2 Boru performansına etki eden zemin bölgeleri

3.2 Hendeklerin Açılması

Hendekler, hendek duvarları çalışma sırasında sağlam duracak şekilde açılmalı ve gerekliyse hendek duvarları desteklenmeli veya eğimli yapılmalıdır. Derinliği 1,5 m ye kadar olan hendeklerde yan yüzler dik olabilir. Ancak hendeğin açılmış olduğu zemin, bu derinlikte kendini tutamıyor ve kayıyorsa veya hendek daha derin ise, gerekli iksa, uygun şev veya basamak yapılmalıdır. Hendek şevlerinin zemin yüzeyini kestiği yerlerden başlayarak en az 0,6 m genişlikteki şeritler yüklenmemeli ve boş bırakılmalıdır [8, 19].

Trafiğin aksamaması ve yayaların güvenliği, hendeğin yağış, don ve kurumadan olumsuz etkilenmesini önlemek ve iksa sisteminin miktarını azaltmak için açılan hendek uzunluğu ve hendeğin açık kalma süresi sınırlandırılabilir. Hendeğe yeraltı suyu, sızıntı su veya yağmur suyu dolması ihtimali varsa veya hendek oynak zemine açılacaksa, hendek açma hızı boru yerleştirme hızına uydurulmalı, kazı en fazla bir kaç boru boyu önden gitmelidir [8, 20].

Hendek derinliği, boru donma derinliğinin altında kalacak şekilde hesaplanmalı ve inşaat sırasında projede belirtilen derinliklere uyulmalıdır. Donma derinliği, iklim ve zemin cinsine bağlı olarak değişirse de, yol kaplaması üst yüzeyinden veya hendek üstüne gelen tabii zemin kotundan, boru üst seviyesine kadar hesaplanmak üzere, su

boruları için en az 1 m, gaz boruları için en az 0,8 m olmalıdır. Telefon, su, gaz ve elektrik gibi üzerinden geçilmesi mecburi olan yerlerde bu tesislerin derinliğine uyulabilir. Ancak donmayı önleyici tedbirlerin alınması gerekir. Eğer dolgu yüksekliği 2 m.'yi geçiyorsa, borunun dolgu yükünü taşıyacak mukavemette olmasına dikkat edilmelidir. Su borularının kanalizasyon boruları ile kesişmeleri halinde, pis suların su borusu içine girmesini önlemek üzere gerekli tedbirler alınmalıdır [5, 19].

Borular dik eğimli hendeklerde döşenirken enlemesine ankrajlar tertip edilerek boruların hendek içerisinde hareket etmelerine engel olunmalıdır. Yüzey sularının hendek içine girerek boruların altındaki hendek tabanını oymaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Hendek tabanının ve dolgu malzemesinin meyil aşağı yıkanıp gitmemesi için su tutucu engeller tertiplenmelidir. Çok özel hallerde, hendeğin tamamının 3 cm.'den küçük çakıl ile doldurulması gerekebilir [8, 19, 21].

3.2.1 Hendek tabanı

Hendek tabanındaki zemin, yeterli temel desteğini sağlayacak, aşırı ve farklı oturmalara izin vermeyecek özellikte olmalıdır. Eğer hendek tabanındaki zemin bu özellikleri taşımıyorsa sıkıştırma, sorunlu zemin yerine uygun malzeme yerleştirilmesi, kimyasal karışımlar eklenmesi, geotekstil veya geogrid kullanılması gibi uygulamalarla hendek tabanı sağlamlaştırılır [8].

Hendek tabanı yumuşak ve su muhtevası yüksek malzemedan oluşuyorsa çakıl, kırma taş gibi dayanıklı malzemeye takviye edilerek stabil hale getirilebilir. Bazı durumlarda tabandaki yumuşak malzeme kaldırılıp yerine daha uygun ve dayanıklı malzeme yerleştirilir. Boşluk suyu basıncının efektif gerilmelerden yüksek olması (kum kaynaması) durumunda, hendek tabanına yüksek yoğunluklu ve ağır olan iri taneli çakıl veya kırma taş yerleştirilebilir. Kuru ve gevşek malzemedan oluşan zeminler sıkıştırılarak hendek tabanı sağlamlaştırılabilir. Eğer sıkıştırılacak zemin kalınlığı 15–30 cm.'den büyükse, tabandaki zemin kazılıp tekrar hendek tabanına tabakalar halinde yerleştirilip sıkıştırılır. Daha küçük kalınlıklarda zemin yerinde sıkıştırılır [8].

Şişebilen zeminler, su almaları sonucu oluşan hacim artışı nedeniyle gömülü borulara oldukça yüksek basınçlar uygulayabilirler. Şişebilen zeminin kazılıp, su eklendikten sonra tekrar hendek tabanına yerleştirilip sıkıştırılmasıyla, gelecekteki şişme potansiyeli azaltılır. Ancak bu durumda su muhtevası değişimlerini önlemek

gereklidir. Boru bağlantı yerlerinin, geri dolgu malzemesinin ve yüzeysel drenajın zemine su aktarmayacak şekilde tasarlanması da şişebilen zeminlerin hacim değişimlerini önleyebilir. Ayrıca %2–4 oranında kireç ilave edilmesi şişebilen zeminlerin şişme özelliğini azaltır. Rüzgar ve nehirlerin biriktirmesiyle oluşan çökebilen zeminler de su muhtevası değişiminden etkilenir. Boşluk oranı fazla olan bu zeminler likit limitlerinin üzerinde su alınca çökerler. Su muhtevasının kontrol edilmesi, zeminin 1 m kadar kazılıp hendek tabanında tekrar sıkıştırılması veya zeminin su eklenerek önceden çökertilmesiyle bu tür zeminlerin stabilizasyonu sağlanır [8].

Hendek tabanı, kaya veya büyük kaya parçaları içeren bir zeminden oluşuyorsa boru kaya veya taş üzerine oturtulmamalı, hendek tabanı 0,15 m daha derin kazılmalıdır ve kazılan kısım kum veya yumuşak toprak gibi malzemelerle doldurularak yastık yapılmalıdır. Yastık malzemesi seçiminde boru çapı, boru malzemesi ve kaplama cinsi göz önünde bulundurulmalıdır. Doldurulan kısım iki tabaka halinde serilip sıkıştırılmalıdır [8, 19].

Hendek, boru ekleme parçaları ve özel parçaların düzgün yerleştirilebileceği ve özellikle boru alt yarısının çevresindeki dolgunun gereği gibi sıkıştırılabileceği mertebede olmalıdır. Dış çapı 200 mm den küçük borular için hendek taban genişliği 0,6 m olmalıdır. Dış çapı 200 mm ile 1000 mm arasında olan borular için bu genişlik, borunun her iki yanında 0,2 m, dış çapı 1000 mm den büyük boruların her iki tarafında 0,3 m boşluk kalacak şekilde hesaplanmalıdır. Aynı hendek içine birden fazla boru konulduğunda iki boru arasında en az 0,2 m mesafe olmalıdır [8, 19, 20].

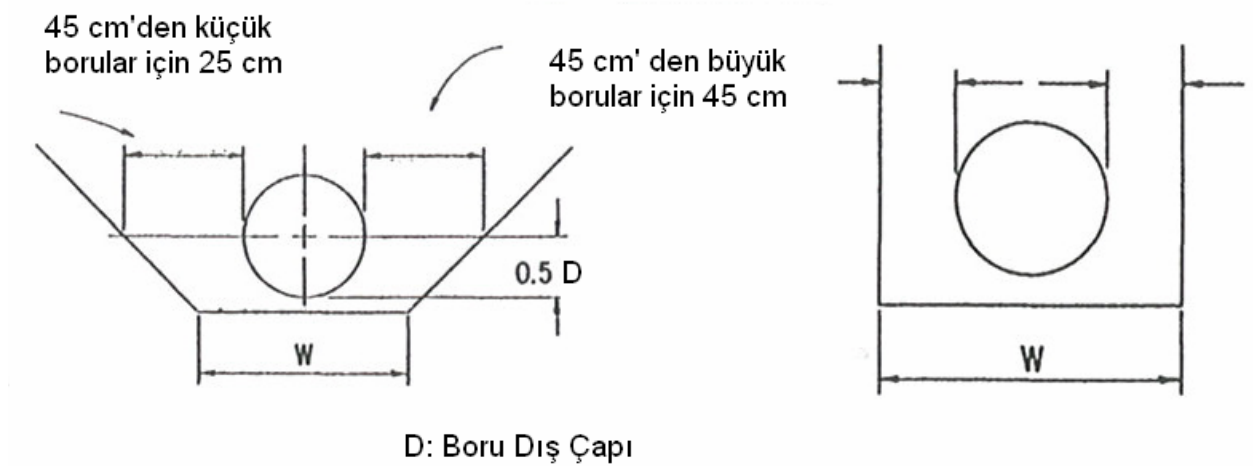
Boru eklemelerinin yapılabilmesi için boru başlarına gelen kısımlarda kafa çukurları açılır. Bu çukurlar en az 0,75 m uzunlukta ve 0,10 m derinlikte olmalıdır. Ek yerleri kaynak ile yapılmayan borularda, boruyu askıya almak için kullanılan kolonları geri almak üzere boru orta yerinde bir çukur açılır. Birleşim yapıldıktan sonra bu kısımlar doldurulur ve sıkıştırılmalarına gerek yoktur [8, 20].

Sert zeminden yumuşak zemine geçiş bölgelerinde, oluşabilecek farklı oturmaların boruya zarar vermesini ve bağlantı yerlerinin açılmasını önlemek için gerekli tedbirler alınmalıdır. Yeraltı su seviyesinin sık sık değiştiği veya trafik yükünün söz konusu olduğu hallerde hendek tabanında kaya, duvar kalıntısı ve benzeri rijit yerler bulunmamalıdır. Bu kısımlar, taşıma gücünün düşük olduğu zeminlerde hendek tabanından 0,5 m daha derine kadar temizlenerek yerleri uygun malzeme ile doldurulmalıdır [8, 20].

3.2.2 Hendek Tipleri

Fleksibl boruların performansı boru kenarlarındaki zeminin desteğine bağlıdır. Bu destek kenar dolgu (gömlek) ve hendek duvarları tarafından sağlanır. Bununla birlikte boru kenarlarındaki zemin desteği, kenar dolgu ve hendek duvarlarındaki zeminlerin rijitlikleri arasında önemli derecede fark olduğu zaman, hendek genişliğine de bağlıdır. Kenar dolgu, hendek duvarlarındaki zeminin daha rijit olması durumunda sadece boru ile hendek duvarları arasındaki boşluğu doldurma işlevi görür. Eğer hendek duvarları yumuşak ve kolayca sıkışabiliyorsa kenar dolgu boruya destek amacıyla normalden daha geniş yapılmalıdır. Gerekli dolgu genişliği için değişik fikirler olmakla birlikte USBR (U.S. Bureau of Reclamation) standardına göre fleksibl borular için 3 durum mevcuttur [8]:

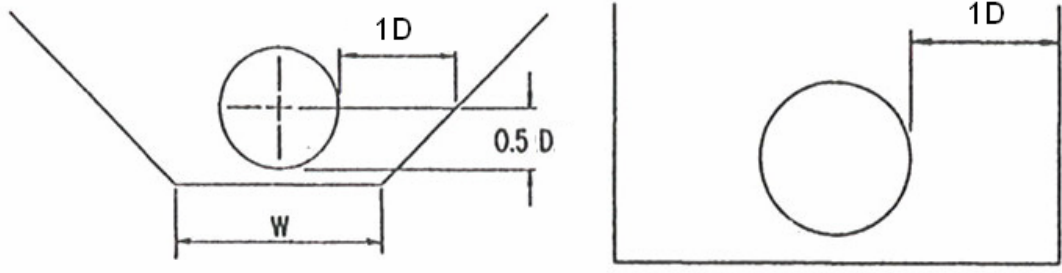
1. Tip hendeklerde, hendek duvarındaki malzeme gömlek malzemesine göre daha sıkı veya mukavimdir. Hendek duvarı kaya, çimentolaşmış zeminler, rölatif sıkılığı %70 ve üzerinde olan kum veya çakıllar ile %95 standart proktor sıkılığındaki killi veya siltli zeminlerden oluşabilir. Bu durumda hendek, boru kenarlarında, çapı 450 mm veya daha küçük borular için 25 cm, çapı 450 mm den büyük borular içinse 45 cm açıklık olacak şekilde açılır. Şekil 3.3'te dik ve eğimli hendek duvarı olması halinde 1. Tip hendek örneği görülmektedir.



Şekil 3.3 Flexibl borular için 1. Tip Hendek örneği [8]

2. Tip hendeklerde, gömlek malzemesinin ve hendek duvarındaki malzemenin sıkılığı veya mukavemeti birbirine oldukça yakındır. Hendek duvarı, %40 ile %70 arasında rölatif sıkılığa sahip kum veya çakıldan, veya %85 ile %95 standart proktor sıkılığındaki killi veya siltli zeminlerden oluşabilir. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi,

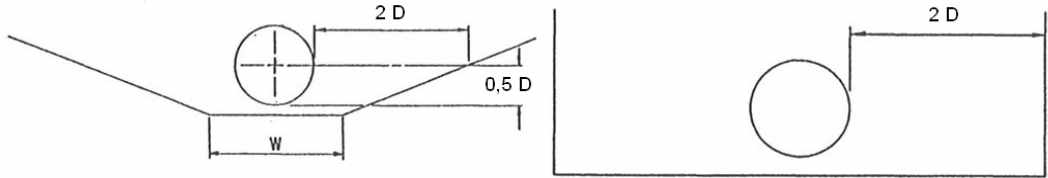
hendek genişliği boru kenarlarında boru dış çapı kadar açıklık kalacak şekilde ayarlanır.



D: Boru Dış Çapı

Şekil 3.4 Fleksibl borular için 2. Tip Hendek örneği [8]

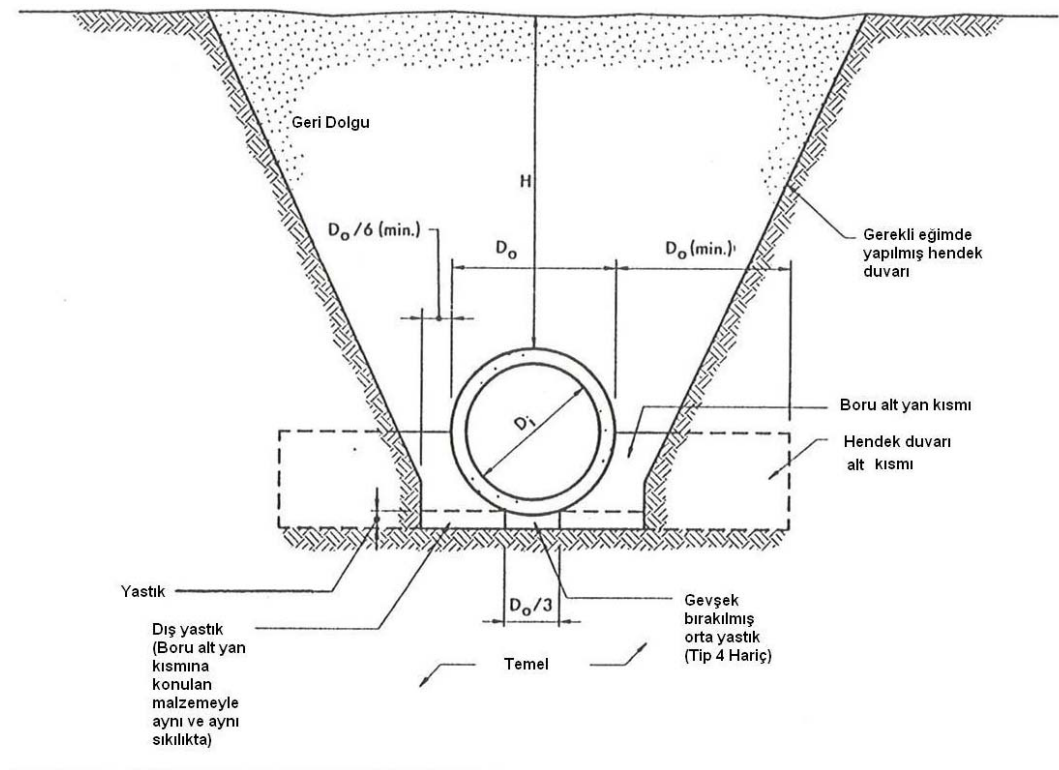
Hendek duvarlarındaki malzemenin, gömlek malzemesinden çok daha yumuşak olduğu durum ise 3. Tip olarak adlandırılır. Bu durumda ise hendek duvarı, organik zeminlerden, %85'ten az standart proktor sıkılığındaki killi veya siltli zeminlerden, veya %40'tan az rölatif sıkılığa sahip kohezyonsuz zeminlerden oluşabilir. Şekil 3.5'te görülen 3. Tip hendeklerin genişliği boru kenarlarında boru dış çapının iki katı açıklık kalacak kadardır.



Şekil 3.5 Fleksibl borular için 3. Tip Hendek örneği [8]

Kenar dolgu ve hendek duvarlarındaki malzemenin rijitlikleri, serbest basınç deneyi, standart penetrasyon (SPT) veya koni penetrasyon (CPT) testleri sonuçlarından veya malzemelerin efektif zemin modülleri (E') kullanılarak karşılaştırılabilir. Boru hatları için yapılan ön araştırmalarda 2. Tip ve 3. Tip hendeklerin olabileceği alanlar belirlenmelidir. Bu amaçla özellikle dere geçişleri, eski göl yatakları, lős birikintileri, eğimli ve doldurulmuş olan alanlara dikkat edilmelidir. Çok geniş bir kazı alanı gerektirdiğinden dolayı, 3. Tip hendekler uygulamada çok nadir kullanılır. Bunun yerine boru rijitliğini artırma, rijit boru kullanımı, borunun betonla kaplanması veya

Rijit borular, hendek içine ASCE (American Society of Civil Engineers) standardına göre dört şekilde yerleştirilebilir. Standard yerleşimi Şekil 3.6’da görülen hendek, boru alt yan kısmındaki (topuk) ve hendek duvarının alt kısmındaki malzemenin gevşek (4. Tip) veya sıkı (1. Tip) olmasına göre farklılık gösterir. Hendek duvarının alt kısmındaki malzemenin rijitliği arttıkça boruya etkiyen yük azalmaktadır. Geri dolgudan dolayı oluşan yükün bir kısmı dolgu ve hendek duvarı arasında oluşan kayma gerilmeleri tarafından taşınır. Eğer hendek duvarının alt kısmındaki zemin oturma yaparsa boruya gelen yük artmaktadır [8].

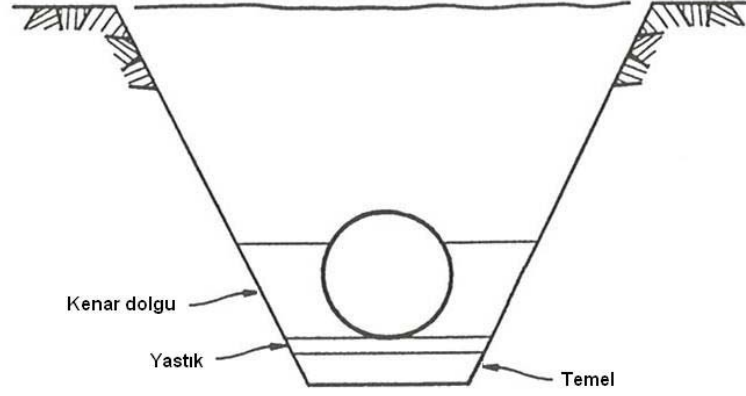


Şekil 3.6 Rijit borular için hendek örneği [8]

3.3 Yataklama

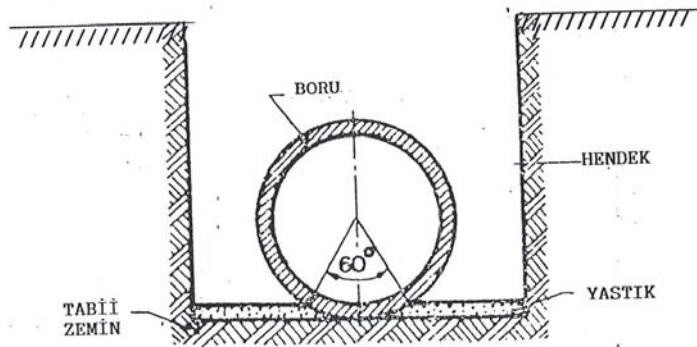
16

borunun yük taşımasına yardımcı olmaktadır. Boru-zemin sisteminin istenilen şekilde çalışması için uygun yataklama seçilmesine ve yataklamanın boru ile tam temasını sağlamak için malzemenin dikkatli yerleştirilmesine önem verilmelidir [1, 3, 8].



Şekil 3.7 Yataklama elemanları [8]

Hendek tabanındaki zemin yeterli temel desteğini sağlayacak, aşırı ve farklı oturmalara izin vermeyecek özellikte olmalıdır. Borular hendek tabanına tek noktadan veya bir çizgi boyunca oturacak şekilde yerleştirilmemelidir. Borunun hendek tabanına oturacağı kısım yataklanmış olmalı ve projesinde daha büyük bir açı belirtilmemişse, Şekil 3.8’de görüldüğü üzere, hendek tabanındaki yataklama açısı 60° olmalıdır [8, 19].



Şekil 3.8 Borunun hendek tabanına 60° 'lik yataklama açısıyla oturtulması [19]

Boruya üniform destek sağlamak için, hendek tabanına uygun malzeme yerleştirilerek yastık teşkil edilir. Üniform destek, hem borunun eksen boyunca desteklenmesi hem de yükün borunun altına yayılması açısından önemlidir. Yastık, üzerine boru yerleştirildiğinde, borunun uygun seviye ve eğimde olmasını sağlayacak şekilde yapılmalıdır ve gevşek veya sıkıştırılmış olabilir. Günümüzdeki eğilim borunun sıkıştırılmamış yastık üzerine yerleştirilerek malzeme içine batmasını sağlamaktır. Böylece boru tabanındaki basıncın yayılmasını sağlayarak bazı noktalarda basınç yoğunlaşmasının engellenmesi amaçlanmaktadır. Eğer yastık gevşek yapılıyorsa, eğimin fazla olduğu alanlara yerleştirilen borularda, olası bir su akımının gevşek malzemeyi taşıyarak oyuklar oluşturmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Ayrıca yataklama malzemesi sıkıştırılmıyorsa, hattın eğimini ve seviyesini muhafaza etmek açısından, bu malzemenin boru yerleştirilince ne kadar oturma yapacağı belirlenmelidir [8,].

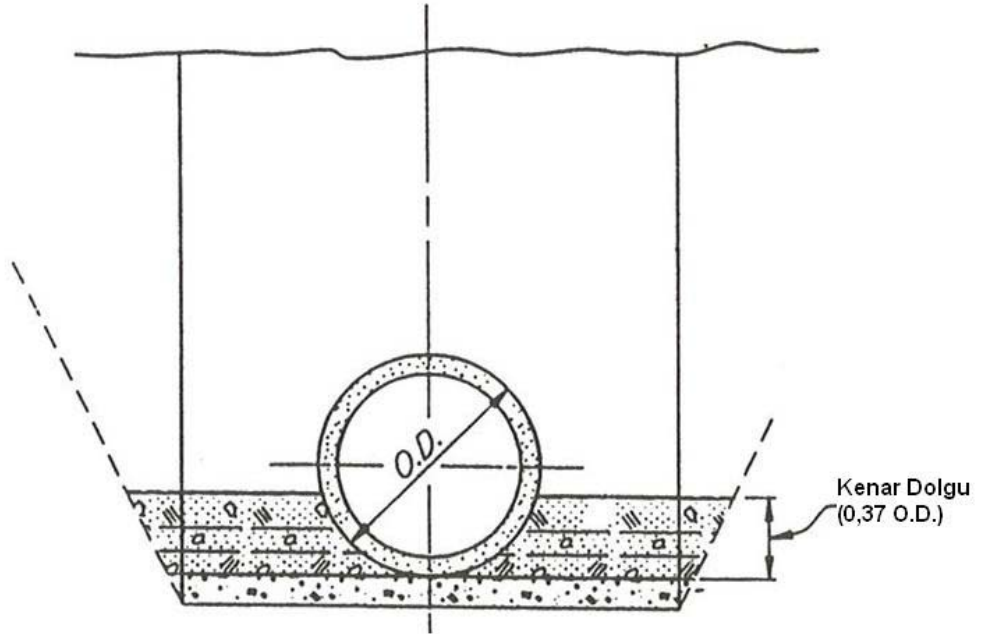
Malzeme yerleştirilmeden önce hendek tabanında kaya parçaları, büyük toprak parçaları, enkaz gibi uygun olmayan zemin varsa kaldırılmalıdır. Eğer hendek tabanındaki malzeme yataklamada kullanmak için uygunsa bu malzeme kazılıp tekrar hendek tabanına yerleştirilir. İnşaat açısından zeminin yerinde gevşetilip sıkıştırılması daha kolay olsa da, kazılarak zemin içinde bulunması muhtemel kaya parçaları gibi maddeler tespit edilebilir ve ayrıca daha üniform bir dolgu elde edilir [8].

Valfler gibi ağır donanımların bulunduğu ek ve bağlantı yerleri beton veya yüksek birim hacim ağırlığına sahip malzemeden oluşan zemin üzerine yerleştirilmeli, farklı oturmayı engellemek için ise bu bölümden gevşek zemine doğru orta sıklıkta bir geçiş bölgesi yapılmalıdır. Ayrıca aşırı oturmayı önlemek için bu donanımlar sıkı bir temel üzerine yerleştirilmelidir. Projedeki eğimi sağlamak amacıyla boru bloklar üzerine yerleştirilmemelidir. Bu durumda bloğun olduğu nokta boruyu taşıırken, diğer kısımlarda borunun altındaki malzemeyi sıkıştırmak zor olduğundan gerilmeler oluşabilir [8, 20].

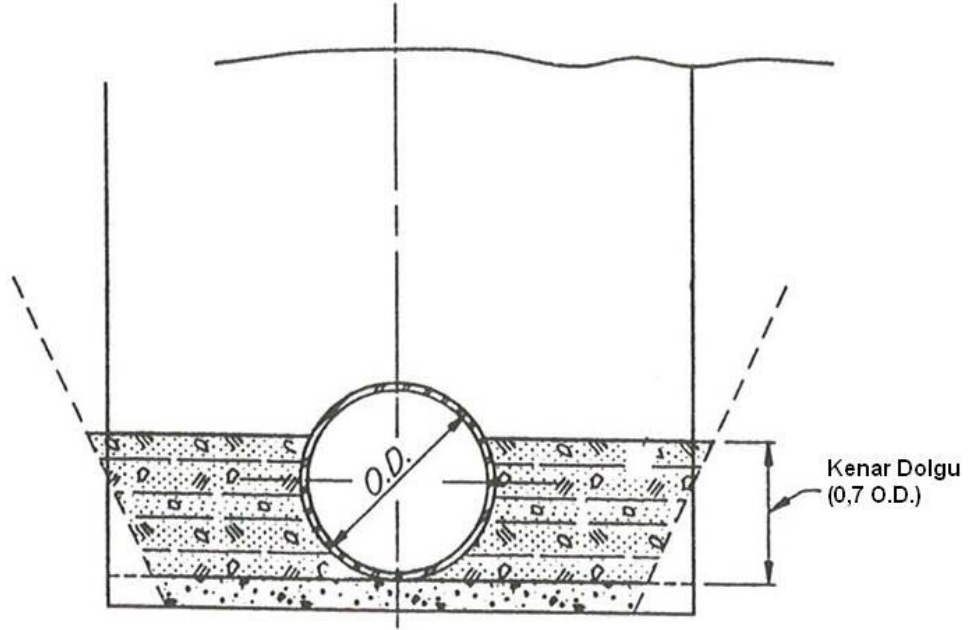
Yastık kalınlığı borunun cinsine ve boyutuna bağlıdır. Genel olarak birçok standartta minimum kalınlık 10–15 cm kadardır. Başka bir kritere göre yastık kalınlığı boru dış çapının 1/12'si kadardır. Hendek kaya içerisine açılmışsa tabaka kalınlığının artırılması tavsiye edilir ve genel olarak minimum yastık kalınlığı 15–22 cm alınır. TS 5991 e göre, boru çapı D (cm) olmak üzere serilecek tabaka kalınlığı en az $10+(D/10)$ cm, hendek tabanı kayalık zemine isabet ediyorsa en az $20+(D/10)$ cm olmalıdır [8, 20].

Bir diğ er yataklama metodu da hendek tabanının boruya uyacak şekilde kazılarak şekillendirilmesidir. Hendek tabanının boru çapına uyacak büyüklükte dairesel olarak şekillendirilmesi, uygulamada zor olduğundan bu yöntemin kullanılması pek tercih edilmemektedir. Ancak hendek tabanı ince daneli veya kumlu zeminden oluşuyorsa ve hendek tabanına yataklama için nemli kum yerleştirilmesi durumunda, şekillendirme işlemi kolay ve de bu yöntemin kullanımı efektif olmaktadır. Bu yöntem özellikle dış yüzü profillemiş metal borularda iyi sonuçlar vermektedir [8].

Kenar dolgu borunun gerekli desteğ i alması bakımından önemlidir. Kenar dolgunun rijit ve fleksibl borular için farklı işlevleri vardır. Rijit borularda borunun üzerindeki yükü tabandaki zemine aktarırlar. şekil 3.9’da görüldüğü gibi, kenar dolgu y ksekliğ i rijit borular için yastık seviyesinden borunun orta kısmına kadar olabilir. Fleksibl borularda ise kenar dolgu, borunun yanal deformasyonlarına karşı koyarak y k taşımasına yardımcı olmaktadır. Fleksibl borular için kenar dolgu y ksekliğ i, şekil 3.10’da görüldüğü üzere, boru orta kısmından borunun 30 cm üzerine kadar olabilir. Kenar dolgu sıkıştırılırken boruya zarar vermemeye  zen gösterilmelidir. Bu bölümü sıkıştırmak için verilen enerjiyle boru deforme olabilir ve dolgunun sıkıştırılması zorlaşabilir. [8].



şekil 3.9 Rijit borular için kenar dolgu y ksekliğ i [8]



Şekil 3.10 Fleksibl borular için kenar dolgu yüksekliği [8]

3.3.1 Yataklama Malzemesi

Genel olarak yastık için kullanılan malzeme ile kenar dolgu için kullanılan malzemeler aynıdır. Kullanılacak malzeme organik, donmuş toprak, enkaz ve çöp içermemelidir. Yataklama için kullanılacak malzemeler Tablo 3.1’de görüleceği gibi beş sınıfta toplanmıştır [8, 22].

Sınıf 1’e ait malzemeler büyük dane çaplarından dolayı drenaj için uygundur. Eğer hendek duvarlarından veya yataktan ince daneli malzemenin yıkanarak Sınıf 1’e ait malzeme içine taşınma olasılığı varsa malzemenin minimum dane çapı 6 mm.’den küçük olarak uygun şekilde derecelendirilmesi gerekir. Boruya yeterli destek sağlamak açısından Sınıf 2’ye ait malzemelerin derecelenmesine dikkat edilmelidir. Sınıf 4’e ait malzemelerin arazide su muhtevasının kontrolü zor olduğundan dolayı, tasarımında ve sıkıştırılmasında önlem alınmalıdır [3].

Zemin daneleri borunun alt kısmının şeklini almak için kolayca hareket edebilmelidir. Maksimum dane çapı boru türüne bağlıdır. Maksimum dane çapı tüm zemin danelerinin geçebildiği en küçük elek açıklığı olarak tanımlanır. Büyük çaplı zemin daneleri noktasal yük oluşturarak boruya zarar verebilir. Tablo B.1’de çeşitli boru türleri için yataklamada kullanılabilecek malzemelerin müsaade edilen maksimum dane çapları görülmektedir. Yeraltı suyunun bulunduğu durumlarda,

suyun hendeğin altına drene olmasını isteniyorsa, yataklama malzemesi olarak iri daneli temiz çakıl kullanılabilir. Bu durumda kullanılacak malzemenin Tablo A.1’de verilen maksimum dane çapı kriterlerine uyması gereklidir. Bu mümkün değilse drenaj malzemesi yatağın altına yerleştirilmelidir. Hendek duvarı ve dolgudan ince daneli zemin taşınması söz konusu ise drenaj malzemesinin filtre görevi görebilmeli veya geotekstil ile kaplanmalıdır [8].

Tablo 3.1 Yataklama Malzemesi Sınıfları ve açıklamaları [3]

Zemin Sınıfı	Zemin Türü	Malzeme Sınıfı için Açıklama
Sınıf 1	-	Köşeli, daneli, tanecikli yapıda, 6–40 mm arasında kırma taş, mıcır, cüruf gibi imal edilmiş malzeme
Sınıf 2	GW	%50 veya fazlası No.4 elek ve %95'ten fazlası No.200 elek üzerinde kalan, iyi derecelenmiş çakıl veya kum
	GP	%50 veya fazlası No.4 elek ve %95'ten fazlası No.200 elek üzerinde kalan, kötü derecelenmiş çakıl veya kum
	SW	%50'den fazlası No.4 elekten geçen ve %95'ten fazlası No.200 elek üzerinde kalan, iyi derecelenmiş kum veya çakıllı kum
	SP	%50'den fazlası No.4 elekten geçen ve %95'ten fazlası No.200 elek üzerinde kalan, kötü derecelenmiş kum veya çakıllı kum
Sınıf 3	GM	%50 veya daha fazlası No.4 elek ve %50'den fazlası No.200 elek üzerinde kalan siltli çakıl veya silt-kum-çakıl karışımları
	GC	%50 veya daha fazlası No.4 elek ve %50'den fazlası No.200 elek üzerinde kalan killi çakıl veya kil-kum-çakıl karışımları
	SM	%50'den fazlası No.4 elekten geçen ve %50'den fazlası No.200 elek üzerinde kalan siltli kum veya silt-kum karışımları
	SC	%50'den fazlası No.4 elekten geçen ve %50'den fazlası No.200 elek üzerinde kalan killi kum veya kil-kum karışımları
Sınıf 4	ML	Likit limitleri %50 veya daha düşük olup %50 veya daha fazlası No.200 elekten geçen inorganik siltler, ince kumlar, siltli veya killi ince kumlar
	CL	Likit limitleri %50 veya daha düşük olup %50 veya daha fazlası No.200 elekten geçen düşük ve orta plastisiteli inorganik killer, çakıllı killer, kumlu killer veya siltli killer
	MH	Likit limitleri %50'den büyük olup %50 veya daha fazlası No.200 elekten geçen inorganik siltler, mikalı veya kristalli ince kumlar veya siltler
	CH	Likit limitleri %50'den büyük olup %50 veya daha fazlası No.200 elekten geçen inorganik yüksek plastisiteli killer
Sınıf 5	OL	Likit limitleri %50 veya daha düşük olup %50'si veya fazlası No.200 elekten geçen organik siltler düşük plastisiteli siltli killer
	OH	Likit limitleri %50'den büyük olup %50'si veya fazlası No.200 elekten geçen düşük ve orta plastisiteli killer
	PT	Turba, gübre gibi oldukça organik zeminler

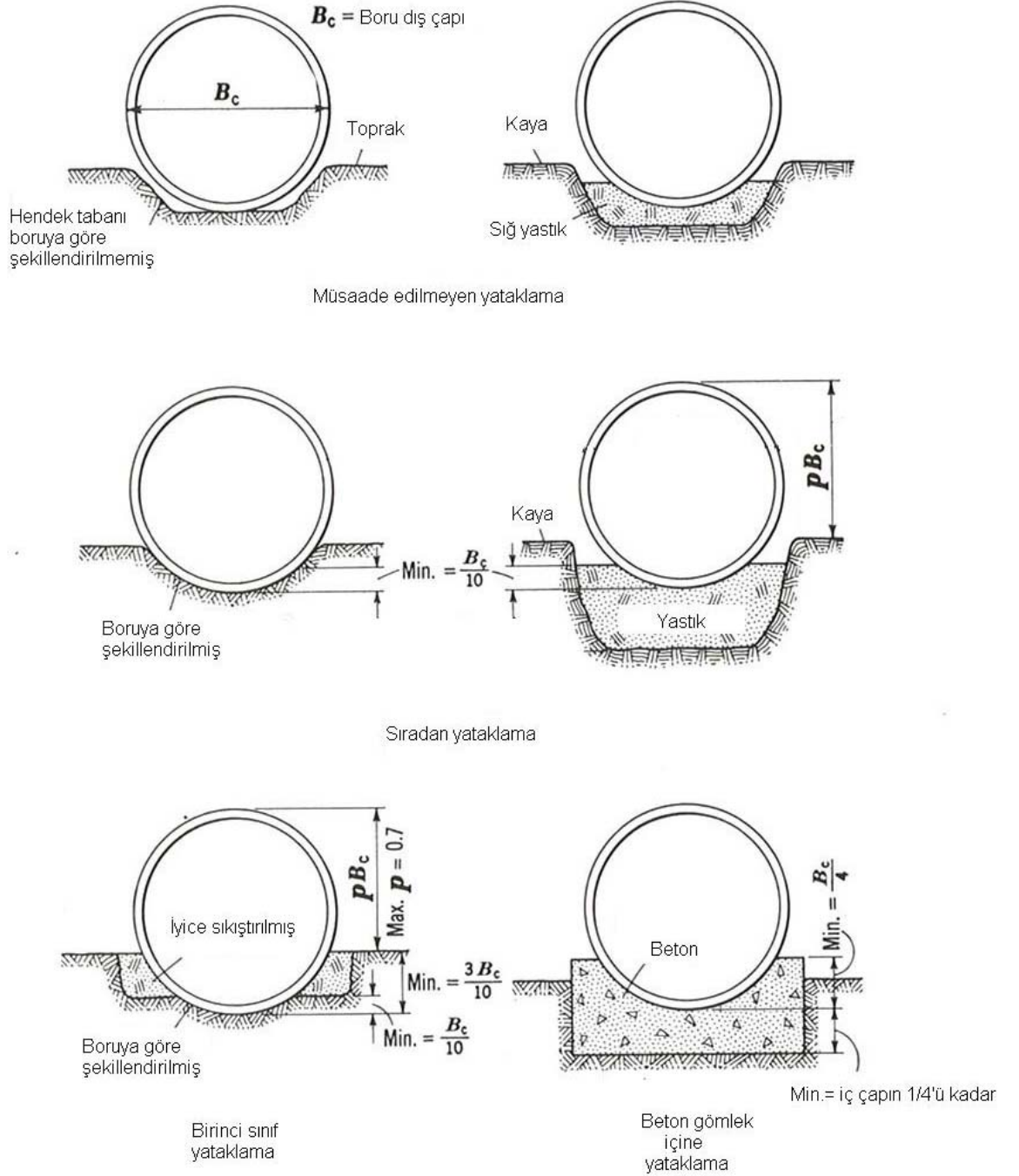
Bazı durumlarda yataklama için sulu çimento kullanılması daha ekonomik olmaktadır. Eğer sulu çimento boşlukları doldurmak için kullanılıyorsa, yükler borudan zemine iletiildiğinden dolayı tabandaki zeminin yeterli desteği sağlamalıdır. İnşaat hızının önem taşıdığı durumlarda sulu çimento hendeği doldurmak için de kullanılabilir. Sulu çimento kullanılarak boruların yataklanmasıyla boru üzerindeki trafik etkileri de azalmaktadır. Ayrıca birçok hattın kesiştiği bölümlerde de sıkıştırma işlemi zor olduğundan dolayı bu malzeme kullanılabilir. [8, 11, 22].

3.3.2 Rijit boruların yataklanması

Rijit boruların yük taşıma performansları esas olarak boru mukavemetine dayanır. Boru mukavemeti, laboratuarda yapılan yükleme testleriyle belirlenir. Boru etrafındaki zeminin desteği sonucu, arazide boruların hasar görmeden taşıyabildikleri yükler, laboratuarda belirlenen boru mukavemetinden yüksek olmaktadır. Rijit boruların yataklanması, arazi yüklerinin bulunmasında kullanılan hesap tekniğine göre ikiye ayrılır. Dolaylı yataklama yöntemleriyle borular Marston ve Spangler tarafından geliştirilmiş olan standard yataklama koşullarındaki yük faktörlerine göre tasarlanır. 1970’li yıllarda ACPA’nın (American Concrete Pipe Association) gömülü borular hakkında artan tecrübe ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda, arazi yüklerinin doğrudan hesaplanması üzerine başlattığı araştırmalar sonucu SPIDA (Soil-Pipe Interaction Design and Analysis) sonlu elemanlar programı geliştirilmiştir. Bu program 1980’lerden itibaren birçok çalışmada kullanılmış ve doğrudan yataklama yöntemleri olarak adlandırılan yeni yataklama metodları oluşturulmuştur. Dolaylı yöntemler halen birçok tasarımda kullanılsa da direkt yöntemlerin üstünlükleri şunlardır[23, 24]:

- Borunun gevşek bırakılmış yastığa oturtulması boruya etkiyen yükleri azaltmaktadır.
- Boru alt yan taraflarındaki zeminin sıkıştırılması zordur. Bu kısımdan boru orta seviyesine kadar olan dolgu boruya destek olmaktadır.
- Boru orta seviyesinin üzerinde kalan dolgu boruya destek sağlamaz ve zemin yüzeyindeki oturmalar önemli değilse bu bölümün sıkıştırılmasına gerek yoktur.
- Dolaylı yöntemlerde kullanılacak malzemeler ve bu malzemelerin sıkıştırılmasına dair yeterli açıklama bulunmamaktadır.
- Standard yataklamalar, yataklamada kullanılacak malzemeler için doğal zemini de içeren birçok malzeme çeşidine izin vermelidir.

Projeksiyon durumu için ise Şekil 3.12’de görülen dört yataklama çeşidi vardır. Rijit borular genellikle pozitif projeksiyon durumuna göre yerleştirilirler ve aktif yanal toprak basıncı da borunun yük taşımasına yardımcı olur [9].



Şekil 3.12 Pozitif projeksiyonlu rijit boruların yataklanması [9]

Projeksiyon durumu için müsaade edilmeyen yataklama temelinde boru alt kısmının şeklini alması veya boru altı ve etrafının granüler malzemeye doldurulması için fazla özen gösterilmediği yataklama metodudur. Borunun kaya üzerine yerleştirildiğinde

3.3.2.2 Doğrudan yataklama yöntemleri

25

Tablo 3.2 Doğrudan yataklama yöntemlerinde kullanılan zemin türleri [24]

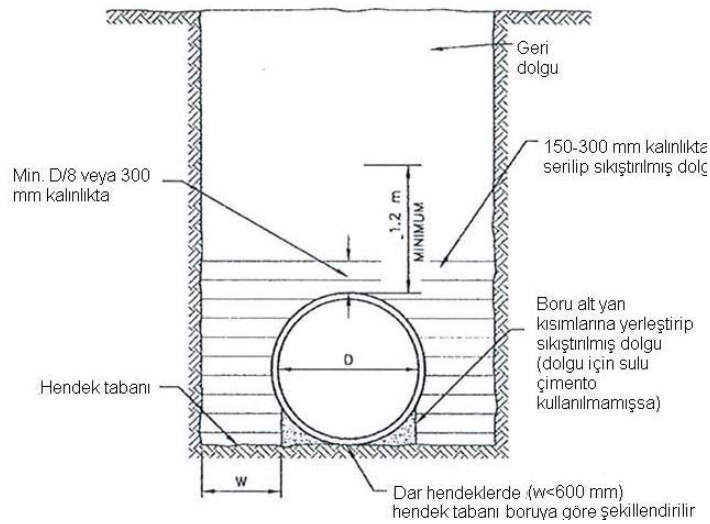
Zemin türü	Örnek Zeminler	
	USCS'ye göre	AASHTO'ya göre
Çakıllı kum (Kategori I)	SW, SP, GW, GP	A1, A3
Kumlu silt (Kategori II)	GM, SM, ML ve de %20'sinden azı No.200 elekten geçen GC, SC	A2, A4
Siltli kil (Kategori III)	CL, MH, GC, SC	A5, A6
Siltli kil (Kategori IV) (kullanılmaz)	CH	A7

Tablo 3.3 Doğrudan Yataklama Çeşitleri [24]

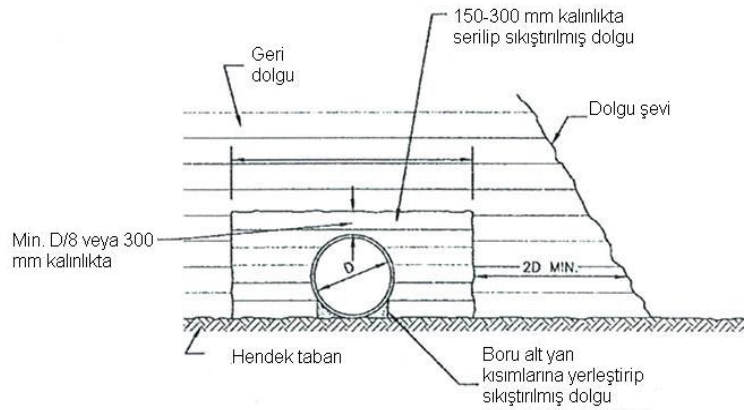
Yataklama Türü	Yastık Kalınlığı	Boru Alt Yan Kısımındaki Malzeme ve Sıkıştırma	Hendek Duvarı Alt Kısımındaki Malzeme ve Sıkıştırma
Tip 1	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%95 Kategori I	%90 Kategori I %95 Kategori II %100 Kategori III
Tip 2	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%90 Kategori I %95 Kategori II	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 3	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 4	Yastık gerekmez (tabanda kaya yoksa) Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	Sıkıştırma gerekmez (Kategori III kullanılması hariç) %85 Kategori III	Sıkıştırma gerekmez (Kategori III kullanılması hariç) %85 Kategori III

3.3.3 Fleksibl boruların yataklanması

Fleksibl borular, borunun yatay doğrultudaki deformasyonuna karşı oluşan yanıl toprak basıncının desteğiyle yük taşırlar. Bu nedenle fleksibl borular, borunun altında yeterli desteğin olmasını ve boru kenarlarında pasif toprak basıncının oluşmasını sağlayacak şekilde yataklanmalıdır. Boruların performansı, borunun kenarlardaki zemin kolonlarından daha fazla oturma yaptığıında artmaktadır. Bunu sağlamak amacıyla boru altına sıkışabilen malzeme yerleştirilmesi ve kenarlardaki zemin kolonlarının altındaki zeminin sıkıştırılması uygulanabilir. Yataklama malzemesinin sıklığı fleksibl boruların tasarımında önemlidir ve inşaat şartlarına göre belirlenir. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te sırasıyla hendek ve dolgu durumları için fleksibl boruların yataklanması görölmektedir [22, 28, 29, 30, 31, 32].



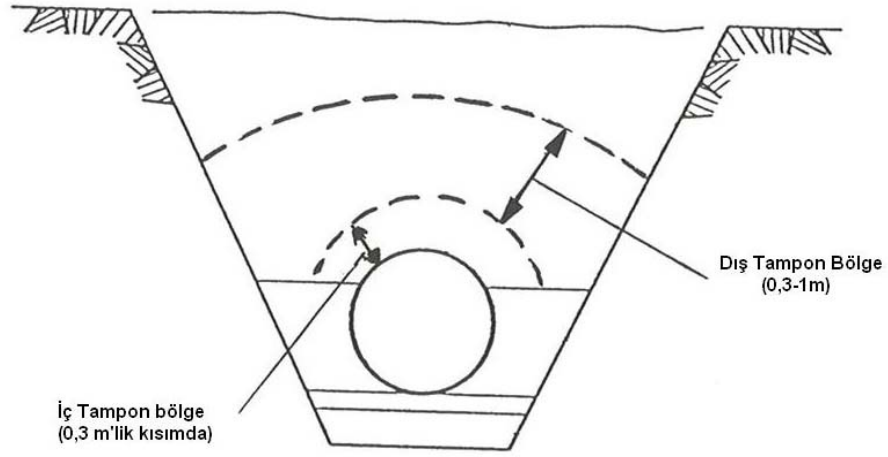
Şekil 3.14 Fleksibl boruların hendek içerisinde yataklanması [30]



Şekil 3.15 Dolgu durumunda fleksibl boruların hendek içerisinde yataklanması [30]

3.4 Geri dolgu

Hendekler iç basınç deneyinden önce kısmen, iç basınç deneyinden sonra tamamen doldurulmalıdır. Sıkıştırma için mekanik aletler kullanırken boruları hasara uğratmamaya özen gösterilmelidir. Özellikle fleksibl borularda muhtemel aşırı ve asimetrik deformasyonu önlemek amacıyla dolgu işlemi kontrollü yapılmalıdır. Hendeğin doldurulması ve sıkıştırılması sırasında boru kaplamasının zedelenmemesine dikkat edilmelidir [1, 11, 20].



Şekil 3.16 Geri dolgu [8]

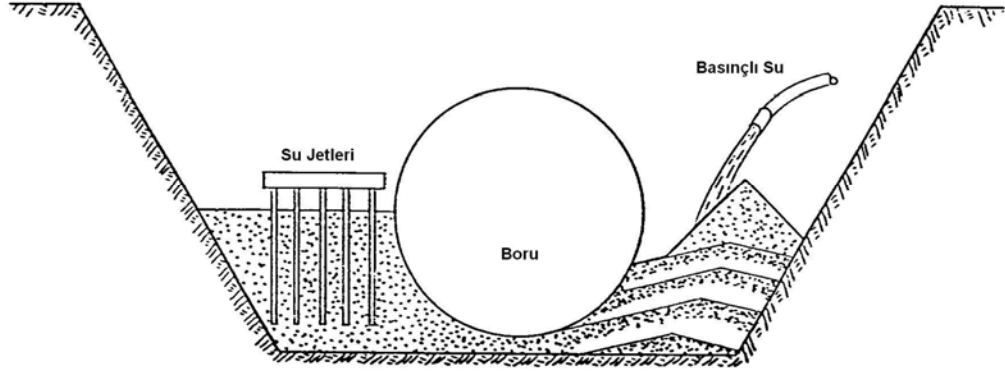
Geri dolgu malzemesinin maksimum dane çapı Şekil 3.16'da görülen iki bölgeye göre ayrı ayrı belirlenir. Boru üzerindeki ilk 30 cm lik dolguda kullanılacak malzemenin maksimum dane çapı genel olarak 38 mm ile 75 mm arasında değişmekte olup, Tablo B.1'de değişik durumlar için önerilen maksimum dane çapları görülebilir. Eğer kenar dolgu boru üzerinde 30 cm ye kadar yerleştirilmişse maksimum dane çapı için kenar dolgu malzemesi için kullanılan kriterler geçerlidir. Birçok standartta borunun üzerinde 30 cm ile 1 m arasında yer alan dolgu malzemesi için bir sınırlama bulunmasa da bu kısımda kullanılacak malzemenin maksimum dane çapı 15 cm.'i geçmemelidir. Çünkü 30 cm.'lik iç tampon bölge boruyu iri parçaların çarpma etkisinden koruyamayabilir. Ayrıca geri dolgu malzemesi hendeğe boşaltıldığında iri parçalar 30 cm lik dolguyu kolayca geçebilir [8].

Kısmi doldurma malzemesi borunun her iki tarafına hendek genişliğince 15 cm kalınlığında tabaka halinde üniform olarak serilmeli, borunun altında yan taraflarında dikkatle sıkıştırılmalıdır. Dolgu malzemesi doğrudan boru üzerine dökülmemeli, borunun doğrultusunu bozmamak için iki tarafa eşit miktarda yerleştirilmelidir. İki taraftaki dolgu seviyesi arasındaki fark, 1350 mm ve daha küçük çaplı borular için 15 cm, 1350 mm den büyük çaplı borular içinse 30 cm den fazla olmamalıdır. Kısmi doldurma anma çapı 200 mm ye kadar olan boruların 30 cm, daha büyük boruların 50 cm kadar üzerine kadar devam etmeli ve ek yerleri açıkta bırakılmalıdır. Genellikle kazıdan çıkan malzeme kullanıldığında, sıkıştırılmış dolgunun birim hacim ağırlığının ve su muhtevasının bozulmamış tabii kanal tabanı malzemesininki ile aynı olması sağlanmalıdır. Başka malzeme kullanıldığında, su muhtevası, maksimum birim hacim ağırlık elde edilecek şekilde ayarlanmalıdır. İç basınç deneyinin başarılı olduğu anlaşıldıktan sonra, önce açıkta kalmış birleşme yerleri sonra boru hattının tamamı doldurulmalıdır [3, 8, 20].

3.5 Sıkıştırma

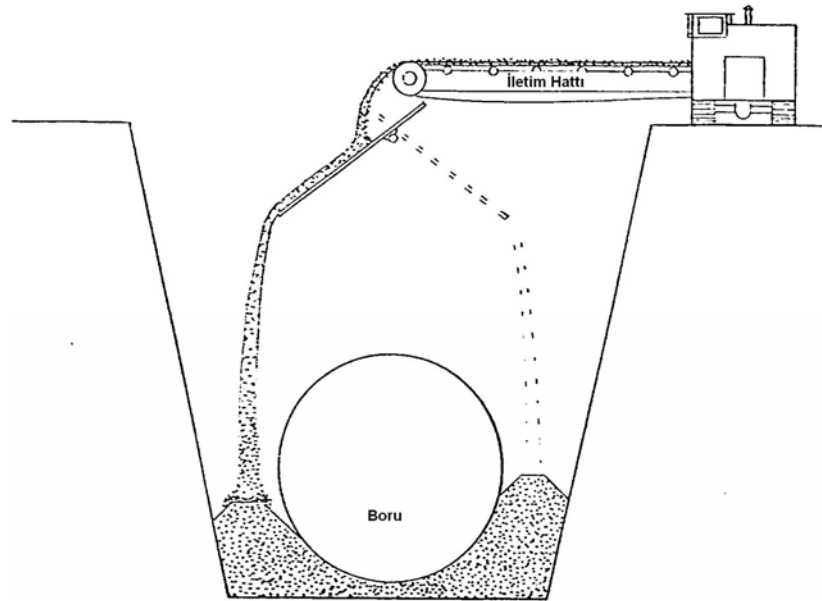
Geri dolgu ve yataklama malzemesinin istenilen sıklıkta yerleştirilmesi boru-zemin sisteminin tasarlanan şekilde çalışması bakımından önemlidir. Sıkıştırma işlemi basınç, darbe, yoğurma ve titreşim etkisiyle yapılabilir. Genel olarak kohezyonlu zeminler basınç, darbe ve yoğurma etkisiyle, kohezyonsuz zeminler ise titreşim etkisiyle daha iyi sıkıştırılabilir. Dolguda kullanılacak malzemeye göre sıkıştırma tekniğinin seçilmesi, bu tekniğe uygun ve boruya zarar vermeyecek sıkıştırma araçlarının kullanılması ve sıkıştırmanın kontrol edilmesi gerekmektedir [8].

Malzemenin sıkıştırılması için gereken basınç etkisi düz silindirlerle, lastik tekerlekli silindirlerle veya diğer inşaat makineleriyle; darbe etkisi mekanik tokmaklarla; yoğurma etkisi keçiayaklı silindirlerle; titreşim etkisi ise vibrasyonlu düz silindirler, vibrasyonlu keçi ayaklı silindirler, iç veya yüzeysel vibratörler vasıtasıyla sağlanabilir. Hendeğin içinde ve boru etrafında küçük vibratörler ve el tokmakları kullanılır. Dolgu boru üzerinde 30–60 cm.'lik seviyeye ulaştıktan sonra lastik tekerli silindirler, küçük traktörler veya vibrasyonlu silindirler kullanılabilir. Dolgu yüzeyin 60–90 cm üzerine ulaştığında ise keçiayaklı silindirler veya tekerlekli silindirler gibi daha büyük araçlar kullanılabilir [9, 33].



Şekil 3.17 Su jeti ve püskürtme yöntemleriyle sıkıştırma [1]

Drenaja izin veren zeminlerde sıkıştırma işlemi su jeti, püskürtme ve suya doyurma yöntemleriyle yapılabilir. Şekil 3.17’de sol tarafta görülen su jeti yöntemi, büyük çaplı boruların etrafındaki dolgunun sıkıştırılmasında kullanılır. 1–1,5 m yükseklikte veya boru orta seviyesine kadar serilen malzeme içine sokulan su jeti sayesinde sıkıştırma sağlanır. Şekil 3.17’de sağ tarafta görülen püskürtme yönteminde zemin, basınçlı su yardımıyla bir şevden aşağı, boru etrafına doğru püskürtülür. Suyu doyurma yöntemiyle, zemine eklenen suyun drenajı sonrasında oluşan sızma gerilmeleriyle suyun sıkıştırılmasıdır. Vibratör kullanımıyla bu işlem birleştirilebilir. Kumlu zeminlerde %85–90 sıkılık elde edilirken, killi ve siltli zeminlerde bu yöntemler uygun olmamaktadır. Bazı durumlarda zemin, Şekil 3.18’deki gibi boru etrafına belirli bir yükseklikten bırakılarak istenen sıkılıkta yerleştirilebilmektedir [1, 8, 33].



Şekil 3.18 Zeminin belirli bir yükseklikten düşürülmesiyle sıkıştırılması [1]

%5'ten az ince dane içeren GW, GP, SW, SP, GW-GP, SW-SP gibi iri daneli zeminlerde en büyük yoğunluk suya doyurma ve vibrasyon yöntemiyle sıkıştırma ile elde edilir. İç vibratörlerin kullanılması durumunda sıkıştırma için serilecek tabaka kalınlığı vibratörün uzunluğuna bağlıdır. Bu yöntem özellikle boru alt yan kısımlarındaki dolgunun sıkıştırılmasında etkili olmaktadır. Yüzeysel vibratörler kullanılırsa dolgu malzemesi 150–300 mm kalınlıkta tabakalar halinde sıkıştırılır [3, 8].

%12'den fazla ince dane içeren GM, GC, SM, SC gibi zeminler ile bu grupta herhangi bir sınır durumunda bulunan zeminler (GM-SM) ve MH, CH, ML, CL, SC-CL, SM-ML, ML-CL gibi ince daneli zeminler 100–150 mm kalınlıkta yerleştirilerek elle, mekanik kompaktörlerle veya mekanik tokmaklarla sıkıştırılmalıdır [3, 8].

%5–12 arasında ince dane içeren zeminler kohezyonlu veya kohezyonsuz davranış gösterebilir. Zemin danelerinin derecelenmesi ve ince danelerin plastisite özelliklerinin belirlenmesiyle bu tür zeminlerin sıkıştırılması için uygun yöntem belirlenir [3, 8].

Sıkıştırma miktarı arazideki dolgunun birim hacim ağırlığının, bu zemin için laboratuvar deneyleriyle belirlenen referans birim hacim ağırlıkla karşılaştırılmasıyla kontrol edilir. Referans birim hacim ağırlığı, kohezyonlu zeminler için standard veya modifiye proktor deneyiyle, kohezyonsuz zeminler için ise rölatif sıklık deneyiyle belirlenir. Arazide dolgunun yoğunluğunun belirlenmesi için kum konisi, lastik balon, nükleer testleri uygulanabilir. Her bir yöntemin üstünlükleri ve eksiklikleri olmakla birlikte, zemin özellikleri ve inşaat şartlarına göre uygun olan yöntem seçilmelidir [8].

4. GÖMÜLÜ BORULARA ETKİYEN DIŞ YÜKLER

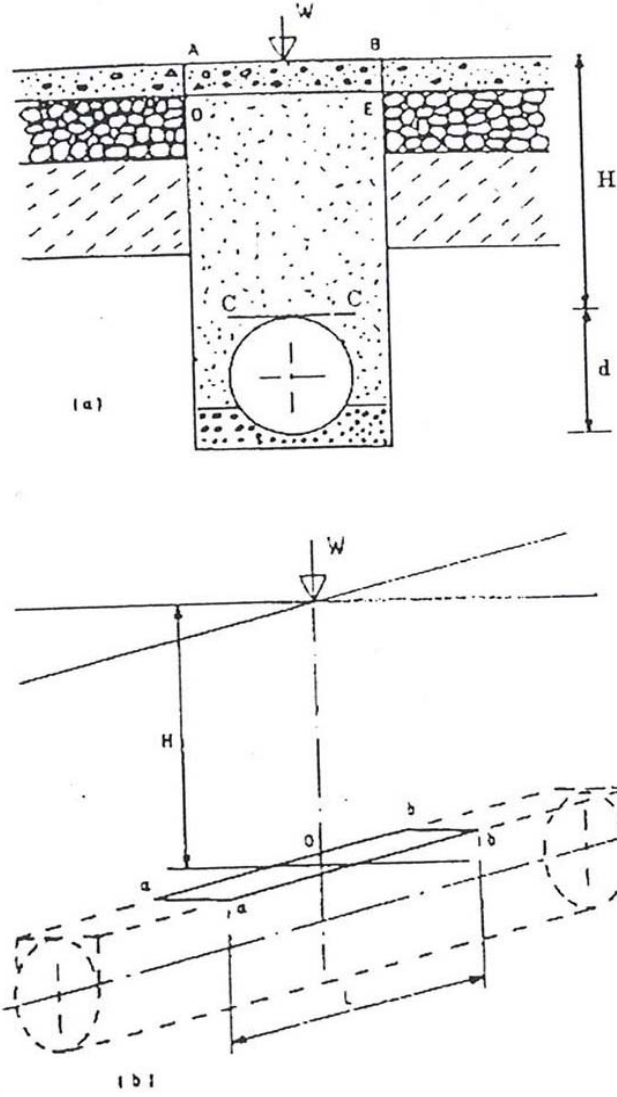
4.1 Zemin yükü

Gömülü boruların tasarımı zemin ve hareketli yüklerin büyüklüğüne göre yapılır. Düşük kaplama kalınlığı olduğu durumlarda trafik yükü, yüksek kaplama kalınlıklarında zemin yükü daha etkilidir. Boruya etkiyen zemin yükünü esas olarak boru üzerindeki zeminin ağırlığı oluşturmakla birlikte, boru etrafındaki zeminin oturması ve borunun deformasyonuna bağlı olarak oluşan sürtünme kuvveti ve kemerlenme, boru üzerindeki zemin yükünü etkiler. Boruya etkiyen yük, borunun ve yatak malzemesinin rijitliğine ve dolgu malzemesinin özelliğine bağlıdır. Gömülü borulara etkiyen zemin yüklerinin bulunması Bölüm 5 ve Bölüm 6’da anlatılmıştır [34, 35].

4.2 Hareketli yükler

Burada bahsedilen hareketli yükler, statik veya statik olduğu düşünülen yüzeysel yüklerdir. Gömülü borular trafikten dolayı bu tür yüklere maruz kalabilir. Gömülü boruların tasarımında zeminden dolayı oluşan hareketsiz yükler ve trafiğin neden olduğu hareketli yükler esas alınır. Hesaplar Şekil 4.1’de görülen c-c düzlemi gibi bir düzlem esas alınarak yapılır ve sonuç olarak bunan düşey yükün boru üzerindeki toplam yük olduğu kabul edilir [9, 36].

Hareketli yüklerin hesabı, Boussinesq gerilme dağılımına göre yapılır. Boussinesq, yüzeydeki noktasal yükün neden olduğu gerilmelerin zemin içerisindeki dağılımını hesaplamıştır. Hesaplarda zeminin yarı sonsuz homojen (noktadan noktaya özellikler aynı), izotrop (bir noktadan geçen bütün doğrultularda özellikler aynı) ve elastik olduğu kabul edilmiştir. Aslında zemin bu özellikleri taşımasa da, yapılan ölçümler hesaplanan değerlerin makul sonuçlar verdiğini göstermiştir. Şekil 3.2’de Boussinesq gerilme dağılımı ve gerçek gerilme ölçümleri görülmektedir [36].



Şekil 4.1 Yol altında gömülü borulara etkiyen hareketli yük (a) tipik kesit (b) hesapta kabul edilen homojen, izotrop durum [36]

Boussinesq gerilme dağılımını kullanarak hareketli yüklerin hesabı için şu formül kullanılabilir:

$$W_{sc} = C_s \cdot \left(\frac{P \cdot F'}{L} \right) \quad (4.1)$$

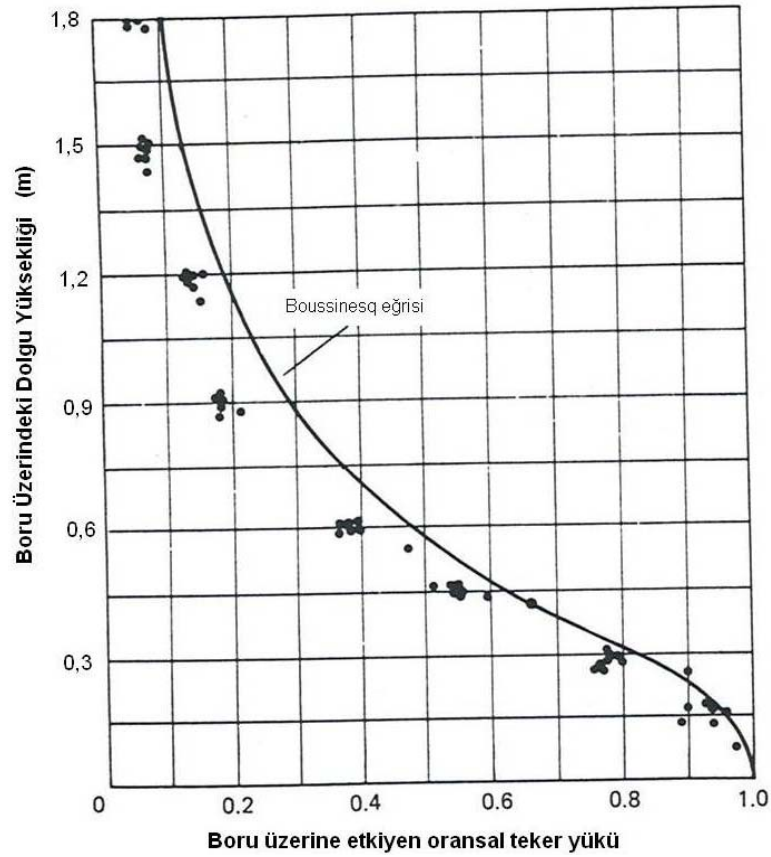
W_{sc} : Tekerlek yükünden dolayı borunun birim boyuna etkiyen ortalama yük (KN/m)

P: Tekerlek yükü (KN)

F': Etki faktörü:

L: Efektif boru uzunluğu (m)

C_s : Yük katsayısı



Şekil 4.2 Boussinesq gerilme dağılımı ve gerçek gerilme ölçümlerinin karşılaştırılması [3]

Yük statik olduğunda etki faktörü F' , bire eşittir. Eğer yük, kamyon veya uçak tekerinde olduğu gibi hareket halinde ise F' değeri, aracın hızına, titreşime, uçak kanatlarının kaldırma kuvvetine ve en önemlisi yüzeyin pürüzlülüğüne bağlıdır. Yapılan deneyler, etki faktörünün kaplama kalınlığından bağımsız olduğunu ve 1,5 ile 2 arasında değerler aldığını göstermiştir. C_s katsayısı ise, boru parçasının genişliğine, uzunluğuna ve boru üzerindeki kaplama yüksekliğine bağlıdır [9, 36].

4.3 Boru eksenî boyunca oluşan yükler

Boru hatlarında meydana gelen hasarlar üzerinde yapılan araştırmalar, yalnız ideal koşullarda borulara sadece zemin ve hareketli yüklerin etkidiğini göstermiştir. Bu yüklerin dışında kesin olarak hesaplanması mümkün olmayan, değişken, bölgesel ve eksenel eğilmeye neden olan büyük yükler de vardır [3].

4.3.1 Üniform Olmayan Taban Desteği

Üniform olmayan taban desteği, sabit olmayan temel malzemesi, fazla kazı sebebiyle oluşan farklı oturma, üniform olmayan sıkıştırma ve sızıntı yapan bir boru veya su akımı nedeniyle boru altındaki zeminin erozyonu sonucu oluşabilir. Fleksibl boruların deformasyon özellikleri böyle bir durumda oluşabilecek basınç yoğunlaşmalarını ortadan kaldırır. Fleksibl boru bağlantılarının kullanılması ve borunun uygun bir şekilde yerleştirilmesi de, borunun eksenel eğilmeye maruz kalmasını ve borunun zarar görmesi riskini azaltır [3].

4.3.2 Farklı Oturma

Borunun rijit bir şekilde bağlandığı baca veya diğer yapılarda meydana gelen farklı oturmalar, boruya yüksek eğilme momentlerinin ve de kayma kuvvetlerinin etkimesine neden olur. Bu moment ve kuvvetler, yapı ve boru birbirlerine göre yatay hareket ettiğinde oluşur. Oluşan gerilmelerin hesaplanması zordur. Bu nedenle tasarım ve inşaat sırasında farklı oturmayı önlemek veya azaltmak için önlemler alınmalıdır. Bunun için temel ve yatak malzemesinin seçilmesi ve sıkıştırılması uygun bir şekilde yapılmalıdır [3].

4.3.3 Yer Hareketleri

Belirli zemin türleri (çoğunlukla şişebilen killi) ortamdaki su miktarından etkilenirler. Su muhtevsındaki değişim nedeniyle bu zeminler, mevsimsel kabarma ve çökmeye maruz kalabilirler ve boruların yerleştirilmesi için uygun değildirler. Normalde bu hareketler küçük olsa da boruyu etkileyecek derecede büyük olabilir. Rijit borularda bu etkiyi azaltmak için kısa uzunluktaki borular ve fleksibl bağlantılar kullanılır. Fleksibl boruların deformasyon özellikleri, yapısal hasar oluşmadan borunun bu hareketlere uymasına izin verir. Bu durumda borunun hem boyuna ve hem de enine bükülebilirliği önemlidir. Ayrıca yeraltı su seviyesinin yükselip alçalması da yer hareketlerinde neden olabilir. Bu durumda da boruların tasarımında yukarıda anlatıldığı gibi yapılır [3].

Yer hareketlerine neden olan bir diğer etken de depremdir. Depremler, dalga yayılımı ve kalıcı yer deformasyonları sonucu borulara hasar verebilir. Bazı kritik bölgelerde, deprem nedeniyle oluşan yer hareketleri boruya büyük zararlar verebilir. Bu kritik bölgeler büyük farklı oturmaların görüldüğü fay zonları, zemin kayma düzlemleri veya borunun bir yapıya bağlandığı geçiş bölgeleridir. Ayrıca bazı zemin türleri depremden dolayı oluşan titreşim sonucu sıvılaşır ve taşıma güçlerini kaybederler.

Deprem sonucu borularda, sızıntı ve kırılma olmak üzere iki çeşit hasar meydana gelir. Bununla birlikte, çoğu fleksibl borular depremi hasar görmeden atlatabilir. Fleksibl boruların ve bağlantıların kullanılmasıyla borunun yer hareketlerine uygun hareket etmesi sağlanarak depremin zararlı etkileri önlenabilir. [3, 37, 38].

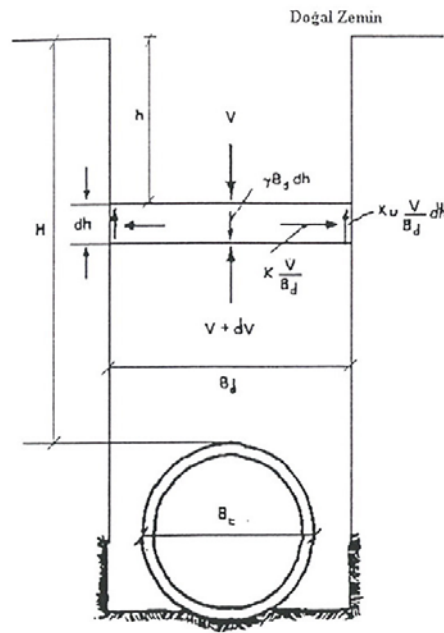
4.4 Don Olayı Sonucu Oluşan Yükler

Dondurucu hava koşulları birkaç saat devam ettiğinde, doğal zemin seviyesine yakın bölgelerde bulunan su tanecikleri buz tabakaları veya buz kristalleri oluşturur. Don etki derinliği arttıkça bir miktar su daha donar. Donma, su miktarını azalttığından kapiler kuvvetler etkisiyle don derinliğinin altındaki yeraltı suyu yukarı taşınır. Kapiler kuvvetler etkisiyle taşınan su da don etkisindeki bölgeye gelince donar ve bu işlem denge sağlanıncaya kadar devam eder. Oluşan buz kütleleri hacim artışı nedeniyle boruya yük etkiler. Rijit borularda don etkisiyle, boruya etkiyen yük yaklaşık iki kat artmaktadır. Don etkisiyle fleksibl borularda önemli bir yük artışı olmaz. Örnek olarak PVC borularda don etkisiyle, yapısal hasar oluşmadan küçük deformasyon artışları görülebilir. Don etkisini azaltmak için borular don derinliğinin 1 m kadar altına yerleştirilmelidir [3].

5. GÖMÜLÜ RİJİT BORULARA ETKİYEN ZEMİN YÜKLERİNİN BULUNMASI

5.1 Marston Yük Teorisi

Anston Marston, 1913 yılında hendek içerisindeki borular üzerine etkiyen yükler üzerindeki çalışmasını yayımlamıştır. Bu çalışma, gömülü borular üzerine etkiyen yüklerin bulunması için yapılan çalışmaların başlangıcıdır. Marston yük teorisi Şekil 5.1’de görüldüğü üzere, hendek içerisindeki zemin prizmasının boruya yük etkittiği düşüncesine dayanmaktadır. Dolgu malzemesinin ve borunun oturma yapmasına bağlı olarak hendek duvarlarında sürtünme kuvvetleri oluşur. Kohezyon olmadığı varsayılırsa, sürtünme kuvveti yanal toprak basıncıyla dolgu ve hendek malzemeleri arasındaki içsel sürtünme açının tanjantının çarpımına eşittir. Marston, kohezyonun oluşması için uzun zaman gerekmesi ve kohezyonsuz durumun daha büyük yüklere neden olması sebebiyle kohezyonun ihmal edilebileceğini varsaymıştır. Ayrıca zeminin birim hacim ağırlığının ve sürtünme özelliklerinin hendek boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir [3, 9, 39].



Şekil 5.1 Marston Dar Hendek Teorisi [3]

5.2 Hendek İçerisindeki borulara etkiyen zemin yükü

Şekilde görüldüğü üzere, $B_d.(1).dh$ hacmindeki parça üzerindeki düşey kuvvet V , bu parçanın altında yukarı yöndeki düşey kuvvet $V+dV$ ile dengelenir. Hacimsel parça B_d genişliğinde, dh yüksekliğinde ve boru eksenine boyunca birim genişliktedir. Parçanın ağırlığı, hacmiyle birim hacim ağırlığının çarpımına eşittir [3].

$$w = B_d \cdot (d_h) \cdot (1) \cdot \gamma \quad (5.1)$$

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

$$P_L = K \cdot \frac{V}{B_d} \quad (5.2)$$

$$K = \frac{\sqrt{(\mu^2 + 1)} - \mu}{\sqrt{(\mu^2 + 1)} + \mu} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (5.3)$$

Boru kenarlarındaki birim uzunlukta sürtünme kuvveti ise şu şekilde bulunur:

$$F_s = K \cdot \frac{V}{B_d} \cdot \mu' \cdot dh \quad (5.4)$$

Düşey yöndeki yüklerin eşitliğinden,

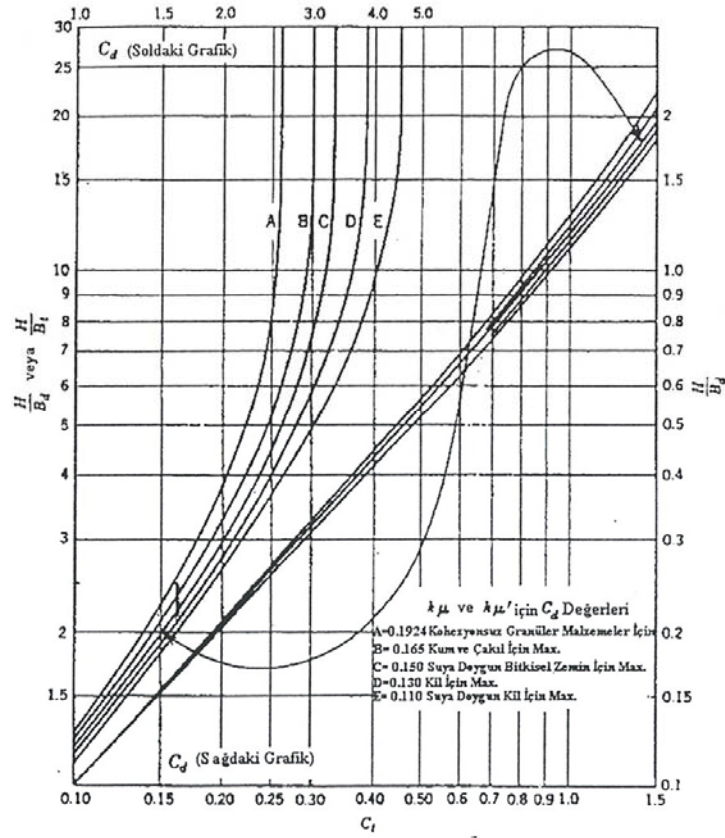
$$(V + dV) + \left(\frac{2 \cdot K \cdot \mu' \cdot V}{B_d} \right) \cdot dh = V + \gamma \cdot B_d \cdot dh$$
$$0 = \left(B_d - \frac{2 \cdot K \cdot \mu' \cdot V}{B_d} \right) \left(\frac{dh}{dV} \right) \quad (5.5)$$

Diferansiyel denklemin çözülmesiyle,

$$V = \frac{\gamma \cdot B_d^2 \cdot \left[1 - e^{-2K\mu'(h/B_d)} \right]}{2 \cdot K \cdot \mu'} \quad (5.6)$$

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

$$C_d = \left(\frac{1 - e^{-2K\mu'(H/B_d)}}{2K\mu} \right) \quad (5.7)$$



Şekil 5.2 Hendek durumunda yük katsayısı (C_d) için diyagram [3]

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi C_d fonksiyonunun H/B_d oranına göre değişimi, farklı zeminlerin $K\mu'$ değerleri için grafiksel olarak çizilebilir ve C_d değeri bu grafikten elde edilebilir. $K\mu'$ dolgu malzemesinin içsel sürtünme katsayısının bir fonksiyonudur. K , μ ve μ' değerleri Marston tarafından deneysel olarak bulunmuştur ve Tablo 4.1’de görülebilir.

Tablo 5.1 Çeşitli zeminlere ait γ , K , ve μ değerleri [3]

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

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

$$W_d = C_d \cdot \gamma \cdot B_d^2 \quad (5.8)$$

W_d : Hendek tipi borularda 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 yük (KN/m)

B_d : Hendek genişliği (m)

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

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

C_d : Hendek tipi borular için yük katsayısı

μ : Dolgunun içsel sürtünme katsayısı ($\tan\phi$)

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

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

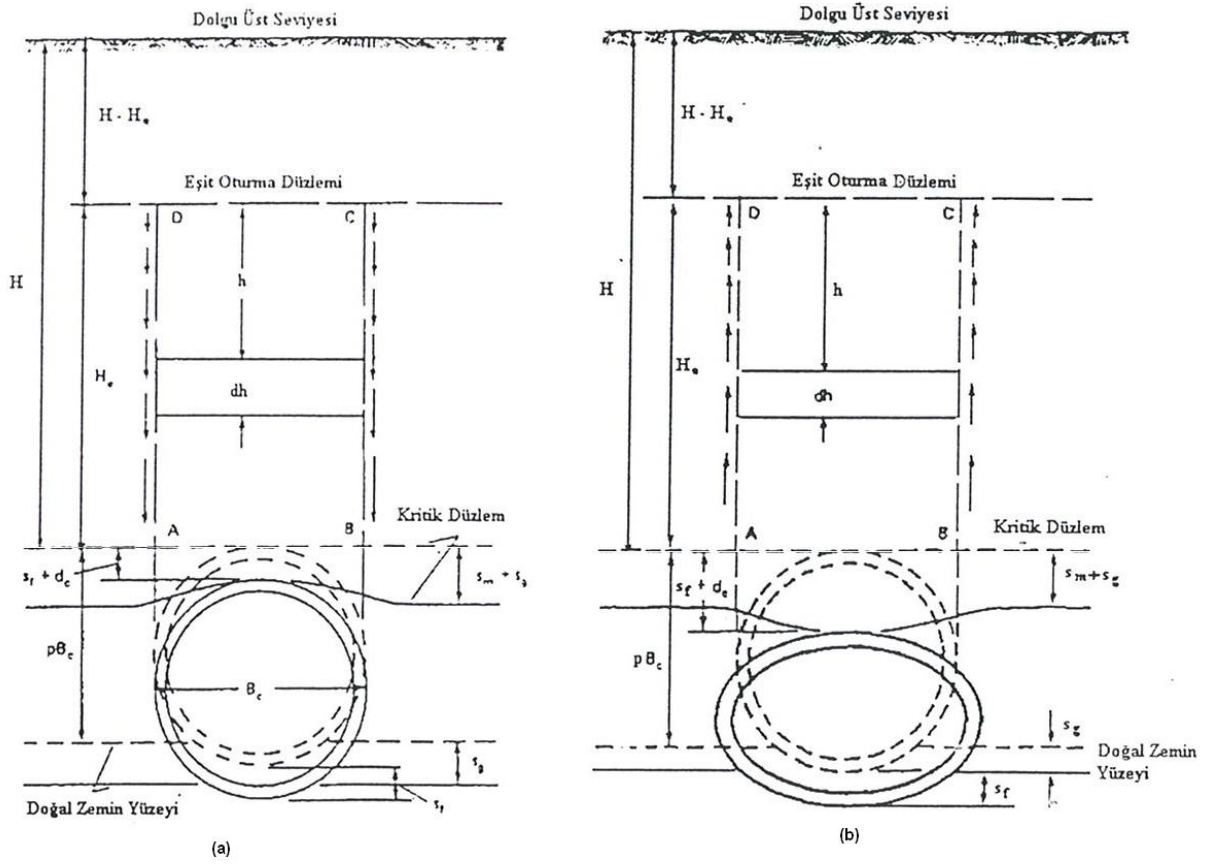
K : Yanal aktif birim basıncın düşey basınca oranı

5.3 Dolgu Durumu

Borular dolgu durumu için pozitif ve negatif projeksiyon durumu olmak üzere iki şekilde yerleştirilirler. Her iki yerleştirme durumunda da boruya etkiyen toplam zemin yükü, boru üzerinde (içteki zemin prizması) ve kenarlarında (dıştaki zemin prizması) bulunan zemin kütlelerinin oturmalarına bağlı olarak oluşan sürtünme kuvvetinden etkilenir. Zemin kütlelerinin yaptığı oturmaların karşılaştırılması için bir kritik düzlem ve oturma oranı tarif edilmiştir [9].

Pozitif projeksiyonlu borular için Şekil 5.3'te görülen iki durum söz konusudur. Şekil 5.3.a'da görülen birinci durum projeksiyon durumu olarak adlandırılır, boru kenarlarındaki zemin kütleleri boru üzerindeki zemin kütesinden daha fazla oturma yapar. Şekil 5.3.b'de görülen ikinci durum ise hendek durumu olarak adlandırılır ve boru üzerindeki zemin kütlesi boru kenarlarındaki zemin kütlelerinden daha fazla oturma yapar. Kritik düzlem dolgu seviyesi boru üst seviyesiyle bir olduğunda, boru üzerindeki yatay düzlemdir [3, 9].

Projeksiyon durumunda oturma oranı pozitifdir ve sürtünme kuvvetleri aşağı yönde olup boruya etkiyen yükü arttırırlar. Hendek durumunda oturma oranı negatiftir ve sürtünme kuvvetleri yukarı yönde olup boruya etkiyen yükü azaltırlar.



Şekil 5.3 Pozitif projeksiyonlu borularda zemin prizmalarının hareketi (a) projeksiyon durumu (b) hendek durumu [3]

Pozitif projeksiyonlu borular için oturma oranı şu şekilde bulunur:

$$r_{sd} = \frac{(S_m + S_g) - (S_f - d_c)}{S_m} \quad (5.9)$$

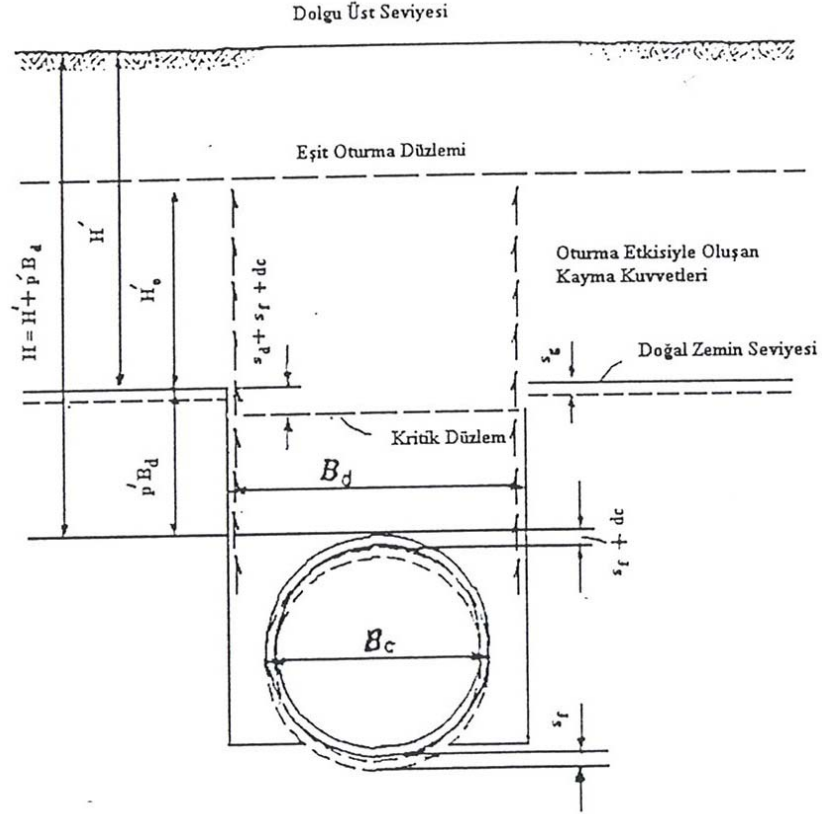
r_{sd} : Oturma oranı

S_m : p.B_c yüksekliğindeki kenar dolgunun oturması (m)

S_g : Boru etrafındaki doğal zeminin oturması (m)

S_f : Boru altındaki temelin oturması (m)

d_c : Borunun düşey yönde yüksekliğinin azalması (m)



Şekil 5.4 Negatif projeksiyonlu borularda zemin prizmalarının hareketi [9]

Negatif projeksiyon durumunda boruların yerleştirilmesi Şekil 5.4'te görülmektedir. Kritik düzlem boru üzerindeki dolgu doğal zemin yüzeyi seviyesine geldiğinde bu seviyeden geçen düzlem olarak tanımlanır. Bu durumda ise oturma oranı şu şekilde bulunur [9]:

$$r_{sd} = \frac{S_g - (S_d + S_f + d_c)}{S_d} \quad (5.10)$$

r_{sd} : Oturma oranı

S_g : Doğal zemin yüzeyinin oturması (m)

S_d : Hendek içerisindeki $p' \cdot B_d$ yüksekliğindeki dolgunun oturması (m)

S_f : Borunun yatakladığı zeminin oturması (m)

d_c : Borunun düşey boyutunun kısalması (m)

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

Hendek içerisine yerleştirilen borulardan farklı olarak dolgu durumunda, eğer dolgu yeterince yüksekse, belirli bir seviyeden sonra sürtünme kuvvetleri oluşmaz. Bu seviye eşit oturma düzlemi olarak tarif edilir ve bu düzlemin üzerinde iç ve dış zemin prizmalarının oturmaları eşittir. Eşit oturma düzleminin oluşmasının nedeni, zemin kütlelerinin oturma yaparken birbirlerine yük aktarmasıdır. Aktarılan bu yükler zemin kütlelerinde deformasyona neden olur ve boru üzerinde herhangi bir yükseklikte dış prizmadaki deformasyon ve oturmanın toplamı, iç prizmadaki deformasyon ve borunun taç kısmında oluşan oturmanın toplamına eşit olur. Eğer eşit oturma düzleminin olduğu yükseklik (H_e), dolgu yüksekliğinden (H) küçükse eşit oturma düzlemi gerçektir ve bu duruma tamamlanmamış projeksiyon durumu ya da tamamlanmamış hendek durumu denir. Eğer eşit oturma düzleminin olduğu yükseklik (H_e), dolgu yüksekliğinden (H) büyükse eşit oturma düzlemi sanaldır. Bu durum ise tamamlanmış projeksiyon durumu ya da tamamlanmış hendek durumu olarak adlandırılır [3, 9].

Oturma oranı matematiksel bir ifade olsa da değerinin tam olarak bulunması zordur. Bu nedenle tasarımda, dolgu durumunda inşa edilen boruların performansları üzerinde yapılan gözlemler sonucu elde edilen değerlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Tablo 4.2’de pozitif projeksiyonlu borular için, yapılan gözlemler sonucu belirlenen oturma oranı değerleri görülmektedir. Negatif projeksiyonlu borular üzerinde diğer türlere nazaran daha az araştırma yapılmış olup, oturma oranı için tam bir değer bulunmaması halinde -0,3 ile -0,5 arasında alınması önerilir [9].

Tablo 5.2 Pozitif projeksiyonlu borular için oturma oranı değerleri [9]

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

5.3.1 Pozitif projeksiyon durumunda dolgu yükü

Hendek durumundaki boruların analizine benzer yolla Marston pozitif projeksiyonlu borulara etkiyen düşey yöndeki dolgu yükünün bulunması için aşağıdaki formülü geliştirmiştir [3].

$$W_c = C_c \cdot \gamma \cdot B_c^2 \quad (5.11)$$

$$C_c = \frac{e^{\pm 2K\mu(H/B_c)} - 1}{\pm 2K\mu} \quad (5.12)$$

W_c : Dolgu durumunda birim uzunluk için boru üzerindeki yük (KN/m)

B_c : Boru dış çapı (m)

C_c : Pozitif projeksiyonlu borular için yük katsayısı

e : Doğal logaritma tabanı

γ : Dolgunun birim hacim ağırlığı (KN/m³)

H : Boru üzerindeki dolgu yüksekliği (m)

H_e : Eşit oturma düzleminin yüksekliği (m)

μ : Dolgunun içsel sürtünme katsayısı (tan ϕ)

K : Yanal aktif birim basıncın düşey basınca oranı

Bu formüldeki artı işaretler tamamlanmış projeksiyon durumu, eksi işaretler ise tamamlanmış hendek durumu için kullanılır.

Tamamlanmamış projeksiyon ve tamamlanmamış hendek durumu için ise aşağıdaki formül kullanılır. Formüldeki artı işaretler tamamlanmamış projeksiyon durumu, eksi işaretler tamamlanmamış hendek durumu için kullanılır.

$$C_c = \frac{e^{\pm 2K\mu(H/B_c)} - 1}{\pm 2K\mu} + \left(\frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c} \right) e^{\pm 2K\mu(H_e/B_c)} \quad (5.13)$$

Eşit oturma düzleminin olduğu yükseklik, içteki ve dıştaki prizmalarda oluşan deformasyon ve oturmalar eşitlenerek oluşturulan aşağıdaki denklemle bulunabilir. Bu denklemde üstteki işaretler tamamlanmamış projeksiyon durumu, alttaki işaretler ise tamamlanmamış hendek durumu için kullanılır [9].

$$\left[\frac{1}{2K\mu} \pm \left(\frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c} \right) \pm \frac{r_{sd} \cdot p}{3} \right] \cdot \frac{e^{\pm 2K\mu(H/B_c)} - 1}{\pm 2K\mu} \pm \frac{1}{2} \left(\frac{H_e}{B_c} \right)^2 \pm \frac{r_{sd} \cdot p}{3} \left(\frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c} \right) e^{\pm 2K\mu(H_e/B_c)} - \frac{1}{2K\mu} \cdot \frac{H_e}{B_c} \mp \frac{H}{B_c} \cdot \frac{H_e}{B_c} = \pm r_{sd} \cdot p \frac{H}{B_c} \quad (5.14)$$

C_c yük katsayısının değeri, hesaplarda kolaylık için oluşturulan Şekil 5.5'te görülen diyagramdan elde edilebilir. Yük katsayısı (C_c), dolgu yüksekliğinin boru genişliğine oranına (H/B_c), oturma oranıyla projeksiyon oranının çarpımına ($r_{sd} \cdot p$) ve zeminin sürtünme karakteristiklerine bağlıdır. Marston, dolgu durumunda içsel sürtünme açısının (μ), hendek içerisine yerleştirilen borulardan farklı olarak yük katsayısını pek etkilemediğini belirtmiştir. Bu nedenle Şekil 5.5'teki diyagram, projeksiyon durumunda $K\mu=0,19$ ve hendek durumunda $K\mu=0,13$ olduğu kabul edilerek

Şekil 5.5’teki diyagram incelendiğinde, oturma oranı ve projeksiyon oranı çarpımının sıfıra eşit olduğu durumda, yük katsayısı, dolgu yüksekliğinin boru genişliğine oranına eşit olduğu görülür.

Yük katsayısının bu değeri (5.11) denkleminde yerine yazılırsa dolgu yükünün değeri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

Bu formül, boruya etkiyen dolgu yükünün, $r_{sd.p}=0$ olduğunda boru üzerindeki zemin prizmasının ağırlığına eşit olduğu anlamına gelir. Bu durum kritik düzlemin

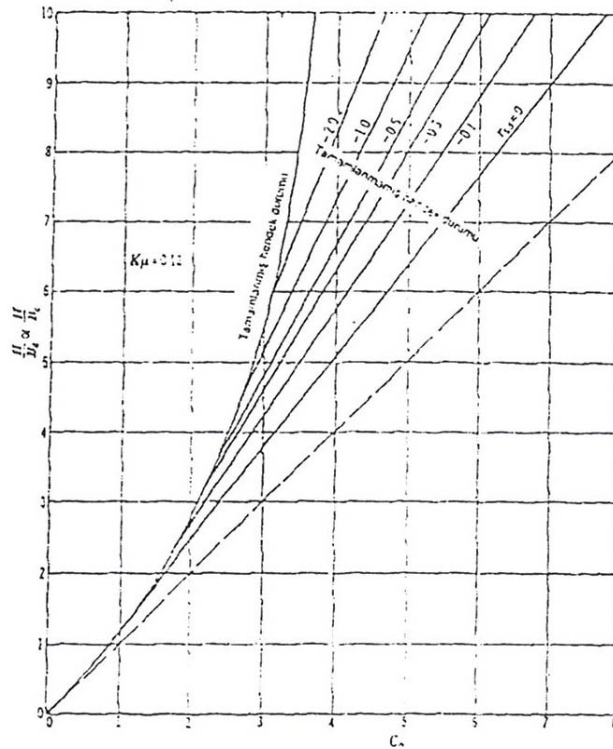
oturmasının boru üzerinde oluşan oturmaya eşit olduğunda, yani oturma oranı sifıra eşit olduğunda veya borunun dar bir hendek içerisine, boru üst seviyesinin doğal zemin yüzeyine eşit olacak şekilde yerleştirildiğinde, bir başka deyişle projeksiyon oranı sifıra eşit olduğunda oluşur. Projeksiyon oranının sifıra eşit olması pozitif ve negatif projeksiyon arasında geçiş durumudur ve bu şekilde yerleştirilen borular sifır projeksiyonlu boru olarak adlandırılır [9].

5.3.2 Negatif projeksiyon durumunda dolgu yükü

Negatif projeksiyonlu borulara etkiyen dolgu yükü aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$W_c = C_n \cdot \gamma \cdot B_d^2 \quad (5.17)$$

Negatif projeksiyonlu borularda projeksiyon oranı (p), boru taç kısmından doğal zemin seviyesine olan mesafenin hendek genişliğine oranıdır ve pozitif bir değerdir. Oturma oranı, negatif projeksiyonlu borularda daima negatif olduğundan, $r_{sd} \cdot p$ değeri her zaman negatiftir. C_n H/B_d oranına, projeksiyon oranına (p) ve oturma oranına (r_{sd}) bağlı bir katsayıdır. C_n değerleri Şekil 5.6'daki diyagramdan bulunabilir. Şekilde görüldüğü üzere, pozitif projeksiyon durumunda olduğu gibi, ışınsal doğrular zarf eğrilerini $H=H_e$ olan noktalarda kesmektedir. Eşit oturma düzleminin yüksekliği H_e , bu noktadaki H/B_d değeri B_d değeriyle çarpılarak bulunabilir [9].

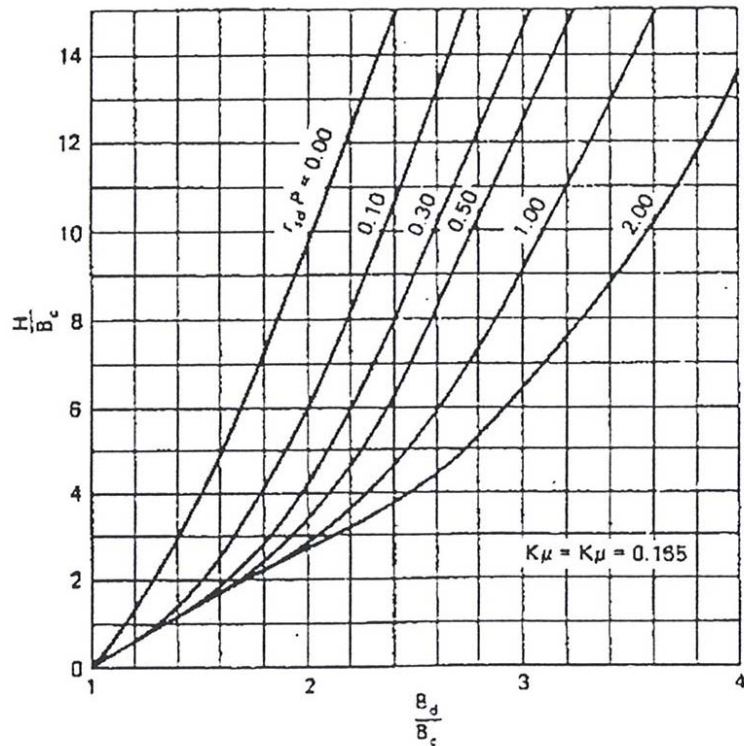


Şekil 5.6 Negatif projeksiyonlu borular için C_n değerleri [9]

5.4 Geçiş Genişliği

(5.8) denkleminde görüldüğü üzere, hendek içerisine yerleştirilen borulara etkiyen dolgu yükü hendek genişliğine bağlıdır. Hendek genişliği arttıkça boruya etkiyen dolgu yükü artmaktadır. Ancak bu artış limit bir hendek genişliği değerine kadar devam eder. Boruya göre oldukça geniş olan bir hendekte, hendek duvarları boruya etkiyen yükü etkilemeyecektir. Bu limit hendek genişliği geçiş genişliği olarak tanımlanır [3, 9].

Schlick'in boru genişliğinin boru üzerindeki yüke etkilerini incelediği çalışmalarına göre, dolgu yüklerinin bulunmasında, pozitif projeksiyon durumu için verilen (5.11) denkleminde aynı yük değerini veren hendek genişliğinden küçük genişlikler için hendek durumu için verilen formül kullanılır. Bir başka deyişle, diğer faktörler sabit kalmak üzere, hendek genişliği arttıkça boruya etkiyen yük, projeksiyon durumuna göre hesaplanana eşit olana kadar, dar hendek teorisine göre artmaktadır. Daha büyük genişliklerde ise boruya etkiyen yük hendek genişliğinden etkilenmemektedir. Şekil 5.7'de görülen diyagramda, projeksiyonlu boru teorisi ve dar hendek teorisine hesaplanan yüklerin eşit olduğu durumlarda, hendek genişliğinin boru çapına oranı (B_d/B_c) görülmektedir. Eğer B_d/B_c değeri diyagramdakinden küçükse dar hendek teorisine, büyükse projeksiyonlu boru teorisine göre hesap yapılmalıdır [3, 9].



Şekil 5.7 Geçiş genişliği eğrileri [9]

5.5 Tünel İçerisindeki Borulara Etkiyen Zemin Yükü

Marston yük teorisi tünel içerisindeki borulara veya örselenmemiş zemine itilerek yerleştirilen borulara etkiyen zemin yüklerinin bulunması için kullanılabilir. Marston'un tünel yükü denklemi aşağıda görülmektedir [3].

$$W_t = C_t \cdot B_t \cdot (\gamma \cdot B_t - 2C) \quad (5.18)$$

Burada W_t KN/m cinsinden boru üzerindeki yük ve γ özgül ağırlıktır. Yük katsayısı C_t , C_d ye benzer Şekil 5.2 yardımıyla hesaplanır. B_t maksimum tünel genişliği veya boru tünele itiliyorsa boru çapıdır. C katsayısı kohezyon katsayısı olarak adlandırılır ve boyutu kuvvet/birim alandır (KN/m^2).

(5.7) denklemi, C_d katsayısında olduğu gibi C_t katsayısının hesaplanmasında da kullanılır. Bu denkleme göre H/B oranının büyük değerleri için C_t katsayısı $1/(2K\mu')$ değerine eşit olur. Bu nedenle çok derindeki tünellerde zemin yükü hesaplanırken yük katsayısı C_t için $1/(2K\mu')$ değeri kullanılır.

Tünel içerisindeki veya örselenmemiş zemine itilen borular üzerine gelen yüklerin hesaplama teorisi, hendek içerisindeki borulara etkiyen yükleri hesaplama teorisine benzemektedir. Ancak kohezyonun etkisiyle tünel yükü daha düşük olmaktadır. (5.18) denkleminde de görüldüğü gibi C katsayısı tünellerdeki yüklerin hesaplanması için çok önemlidir ama C katsayısının değeri aynı zemin türü için bile çok farklı değerler alabilmektedir. C katsayısı, laboratuarda örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerle belirlenebilir. Zeminin suya doyma ihtimali göz önünde bulundurularak, tasarımda muhafazakar C değerleri kullanılmalıdır ve laboratuvar deneyleriyle elde edilen değerlerin $1/3$ 'ünün kullanılması tavsiye edilir. Güvenilir laboratuvar verilerinin olmadığı durumlarda Tablo 5.3'teki değerler kullanılabilir. Mevsimsel donmalara ve çatlamalara veya suya doygunluk nedeniyle mukavemet kaybına maruz kalan bölgelerde bu katsayının sıfır olarak alınması tavsiye edilir. $(\gamma \cdot B_t - 2C)$ değeri negatif olamaz ve bu nedenle $2C$, γB_t 'den büyük olamaz.

Tablo 5.3 Farklı zeminler için C değerleri [3]

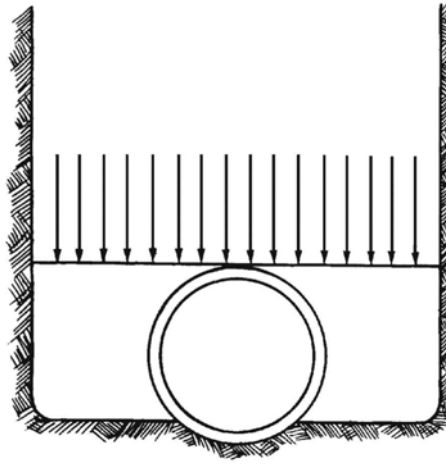
Malzeme	C Değeri (KN/m^2)
Kil, çok yumuşak	2
Kil, orta	12
Kil, sert	50
Kum, gevşek kuru	0
Kum, siltli	5
Kum, sıkı	15

6. GÖMÜLÜ FLEKSİBL BORULARA ETKİYEN ZEMİN YÜKLERİNİN BULUNMASI

6.1 Marston Yük Teorisi

Marston ve Spangler'ın yaptığı ölçümler sonucu fleksibl borulara etkiyen zemin yükünün, rijit borulara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Fleksibl boruların yük altındaki davranışları yay örneğiyle açıklanabilir. Bir yay üzerine ağırlık yerleştirildiğinde yay, yay rijitliği nedeniyle eğilmeye karşı koyarak deforme olacaktır. Yük-eğilme grafiği çizilirse, belirli bir değere kadar bu ilişkinin doğrusal olduğu görülür. Fleksibl borular üzerine de yük etkidiğinde, boru eğilmeye karşı koyarak deforme olur. Fleksibl boruları rijitlikleri nedeniyle doğrusal olmayan yay olarak kabul etmek mümkündür [3].

Yay örneği rijit bir boru için düşünülürse, boru sert bir yay ile, boru etrafındaki zemin ise fleksibl bir yay ile temsil edilir. Bu yay sistemi üzerine ağırlık konulduğunda veya yük etkitildiğinde, zemini temsil eden yaylar daha fazla deforme olacak ve yükün büyük kısmını boruyu temsil eden yaylar taşıyacaktır. Bu durumun tersi düşünülürse, yani boruyu temsil eden yayların fleksibl ve zemini temsil edenlerinkiyse sert olduğu durumda zemini temsil eden yaylar yükün çoğuluğunu taşıyacaktır [3].



Şekil 6.1 Marston teorisine göre fleksibl borular üzerinde yük dağılımı [3]

Boru ve zeminin aynı rijitliğe sahip olduğu özel durumda düşey yük boruya boru genişliği oranında aktarılır. Yani boru ve zemin aynı rijitliğe sahipse, Şekil 6.1’de görüldüğü gibi düşey yükün dağılımı üniform olur. Basit bir orantıyla boruya etkiyen yük şu şekilde bulunur [3].

$$W_c = \frac{W_d \cdot B_c}{B_d} = \frac{C_d \cdot \gamma \cdot B_d^2 \cdot B_c}{B_d} \cdot W_c = C_d \cdot \gamma \cdot B_c \cdot B_d \quad (6.1)$$

W_c : Dolgu tipi borularda birim uzunluk için boru üzerindeki yük (KN/m)

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

C_d : Hendek tipi borular için yük katsayısı

B_d : Hendek genişliği (m)

B_c : Boru dış çapı (m)

γ : Dolgunun birim hacim ağırlığı (KN/m³)

Bu denklemi Marston fleksibl borulara etkiyen dolgu yükünün bulunması için geliştirmiştir . Boru ve zeminin aynı rijitliğe sahip olması formülün geliştirilmesi için yapılan bir kabul olup her fleksibl boru için uygulanmamalıdır. Maksimum yükün oluşması zamanla gerçekleşmekte ve ilk başlarda oluşan yük maksimum yükten %20-25 daha düşüktür [9].

6.2 Prizma Yüğü

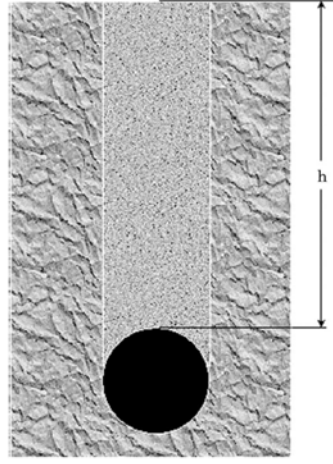
(5.8) denklemi maksimum, (6.1) denklemi minimum yük durumunu temsil eder. Fleksibl borulara etkiyen zemin yükünün bulunmasında daha gerçekçi bir yaklaşım prizma yükünün kullanılmasıdır. Fleksibl borular üzerindeki efektif yük, minimum yük ile prizma yükü arasında bir değer almaktadır. Uzun bir süreç sonunda yük, prizma yüküne ulaşabilir. Bu nedenle, fleksibl borulara etkiyen zemin yükünün hesaplanmasında prizma yükünün kullanılması tavsiye edilir. Prizma yükünün bir avantajı, hendek genişliğinden bağımsız olmasıdır. Şekil 6.2’de görülen prizma yükü aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir [3, 9].

$$P = \gamma \cdot H \quad (6.2)$$

P : Prizma yükü (KN/m²)

γ : Dolgunun birim hacim ağırlığı (KN/m³)

H : Dolgu yüksekliği (m)



Şekil 6.2 Prizma yükü [3]

6.3 Hendek İçerisindeki Borulara Etkiyen Zemin Yükü

Marston'un hendek içerisindeki fleksibl borulara etkiyen zemin yükünün bulunması için geliştirdiği denklem (6.1) denklemiyle verilmiştir. Hesaplamada C_d değeri Şekil 5.2'den elde edilir. Prizma yükü B_c ile çarpılıp Marston denkleminde elde edilen yüke eşitlenirse,

$$\text{Prizma yükü: } P = \gamma \cdot H$$

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

$$P \cdot B_c = C_d \cdot \gamma \cdot B_d \cdot B_c \Rightarrow \gamma \cdot H \cdot B_c = C_d \cdot \gamma \cdot B_d \cdot B_c$$

$$C_d = \frac{H}{B_d} \quad (6.3)$$

Görüldüğü gibi prizma yükü Marston yükünün özel bir durumudur [3, 9].

6.4 Dolgu Durumundaki Borulara Etkiyen Zemin Yükü

Dolgu durumundaki fleksibl borular için zemin yükü Marston ve Spangler'ın geliştirdiği (5.11) denklemiyle bulunur. C_c katsayısı Şekil 5.5'teki diyagramdan elde edilir. Yine prizma yükü B_c ile çarpılıp Marston denkleminde elde edilen yüke eşitlenirse,

$$\text{Prizma yükü: } P = \gamma \cdot H$$

$$\text{Marston yükü: } W_c = C_c \cdot \gamma \cdot B_c^2$$

$$\gamma.H.B_c = C_c.\gamma.B_c^2$$

$$C_c = \frac{H}{B_c} \quad (6.4)$$

Prizma yükü dolgu durumunda Marston yükü için $r_{sd.p}=0$ olduğu durumdur [3, 9].

6.5 Tünel İçerisindeki Borulara Etkiyen Zemin Yükü

Bu durumda fleksibl borulara etkiyen yük, prizma yükü veya (5.18) denklemi kullanılarak bulunur.

$$B_t=B_c$$

$$W_p = P.B_t = \gamma.H.B_t$$

$$W_t = C_t.B_t.(\gamma.B_t - 2C)$$

Bu durumda prizma yükünün kullanılması, sürtünme ve kohezyon etkisi ihmal edildiğinden dolayı, muhafazakar sonuçlar vermektedir. C_t 'nin H/B_t 'ye eşit olması ve kohezyonun sıfır alınması durumunda iki denklem de aynı sonucu vermektedir [3].

7. GÖMÜLÜ BORULARIN TASARIMI

7.1 Rijit boruların tasarımı

Rijit boruların yük taşıma kapasiteleri esas olarak borunun mukavemetine bağlıdır ve boru mukavemeti, laboratuarda boru numuneleri üzerinde yapılan yükleme testleriyle belirlenebilir. Bu testlerin başlıcaları iki kirişli taşıma, üç kirişli taşıma, kumlu taşıma, Minnesota taşıma gücü testleri olmakla birlikte, üç kirişli taşıma gücü testinin kullanımı daha yaygındır. Arazideki yükleme şartları testlerdekinden farklı olmakta ve yanal zemin desteği sonucu boruların yük taşıma kapasiteleri artmaktadır. Boruların arazideki mukavemetlerinin üç eksenli taşıma gücü testiyle belirlenen mukavemetlerine oranına yük faktörü denilir. Tablo 7.1’de çeşitli yataklama durumları için kullanılması önerilen yük faktörleri verilmiştir [3, 9].

Tablo 7.1 Farklı yataklama türleri için önerilen yük faktörleri [9]

Yataklama Türü	Yük Faktörü
Müsaade edilmeyen yataklama	1,1
Sıradan yataklama	1,5
Birinci sınıf yataklama	1,9
Beton gömlek içerisine yataklama	2,2-3,4

Ayrıca Spangler pozitif projeksiyon durumunda yük faktörünün bulunması için aşağıdaki denklemi geliştirmiştir. Beton gömlek içerisine yataklama yapıldığında N ve x yerine N’ ve x’ kullanılmalıdır. Tablo 7.2’de ve Tablo 7.3’te sırasıyla x, x’ ve N, N’ değerleri görülmektedir [9]:

$$L_f = \frac{1,431}{N - x.q} \quad (7.1)$$

L_f : Yük faktörü

N: Düşey yöndeki yük ve reaksiyonun fonksiyonu olan parametre

x: Dolgunun aktif yatay basıncının etkidiği alanın fonksiyonu olan parametre

q: Toplam yatay gerilmenin toplam düşey gerilmeye oranı

$$q = \frac{m.k}{C_c} \cdot \left(\frac{H}{B_c} + \frac{m}{2} \right) \quad (7.2)$$

K: Rankine yatay basınç oranı

m: Yanal basıncın etkidiği boru kısmı

Tablo 7.2 x ve x' değerleri [9]

m	x	x'
0	0	0,150
0,3	0,217	0,743
0,5	0,423	0,856
0,7	0,594	0,811
0,9	0,655	0,678
1	0,638	0,638

Tablo 7.3 Farklı yataklama durumları için N ve N' değerleri [9]

Yataklama Türü	N	N'
Müsaade edilmeyen yataklama	1,310	-
Sıradan yataklama	0,840	-
Birinci sınıf yataklama	0,707	-
Beton gömlek içerisine yataklama	-	0,505

Boru mukavemeti şu şekilde bulunur:

Gerekli üç mesnetli taşıma gücü=(tasarım yükü x güvenlik katsayısı)/yük faktörü

Güvenlik faktörü için aşağıdaki değerlerin genellikle uygun olduğu kabul edilir [40].

Camlı kil borular için: 1,5

Donatısız beton borular için: 1,5

Betonarme borular için: 1,25

Gömülü rijit boruların tasarımında uygun boru çeşidinin veya mukavemetinin seçimi için aşağıdaki işlem sırası takip edilir [3].

1. Zemin yükü hesaplanır.
2. Hareketli yük hesaplanır.
3. Yataklama tipi seçilir.
4. Seçilen yataklama tipine bağlı olarak yük faktörü belirlenir.
5. Güvenlik faktörü uygulanır.
6. Uygun boru mukavemeti seçilir.

7.2 Fleksibl boruların tasarımı

Fleksibl boruların yük taşıma kapasiteleri, borunun yatay yöndeki deformasyonuna karşı oluşan pasif toprak basıncının desteğine bağlıdır. Tasarımda aşağıdaki üç parametre önem taşır [3].

1. Yük
2. Boru çevresindeki zeminin rijitliği
3. Boru rijitliği

Boruya etkiyen yük, prizma yükü teorisi kullanılarak hesaplanabilir. Prizma yükü, dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığıyla dolgu yüksekliğinin çarpımına eşittir. Araştırmalar boru üzerindeki yükün zamanla prizma yüküne ulaştığını göstermiştir.

Fleksibl boruların performans limitleri eğilmeyle alakalıdır ve bu nedenle güvenlik faktörleri de eğilmeye dayanır. Her malzemenin farklı performans limitleri vardır ve güvenlik faktörü en az 1,5 alınır.

7.2.1 Zemin ve Boru Rijitliği

Fleksibl borularda zemin-boru sisteminin çalışması, boru ve zeminin rijitliklerine bağlıdır. Zemin rijitliği, efektif zemin modülü (E') ile ifade edilir ve birimi KN/m^2 'dir. Zemin modülü E' , sıkılık, zemin çeşidi ve su muhtevası gibi zemin özelliklerine bağlıdır. Zemin rijitliğini en çok sıkılık etkiler [3].

Boru rijitliği, fleksibl borular için ayırt edici bir özelliktir ve sıcaklık, zaman ve boru kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır. Sıcaklık artışı, aynı yüke uzun süre maruz kalma (sünme) ve boru kalınlığının düşük olması boru rijitliğini azaltır. Boru rijitliği farklı parametrelere dayanarak aşağıdaki biçimlerde ifade edilebilir. Bu ifadelerden en çok halka rijitliği kullanılır ve laboratuarda paralel levha yükleme deneyiyle belirlenir [3, 41].

Rijitlik faktörü: EI

Halka rijitliği: EI/r^3 (bazen EI/D^3)

Boru rijitliği: $F/\Delta y = 6,7 \cdot EI/r^3$

E : Elastisite 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)

7.2.2 Spangler Iowa Formülü

Spangler, Marston yük teorisinin fleksibl borulara etkiyen yüklerin hesaplanmasında yeterli olmadığını belirlemiştir. Yüklerin boru etrafında dağılımı ve borunun yanıl yönde genişlemesine karşı oluşan pasif toprak basınçları, fleksibl boruların yük taşıma kapasitelerini arttırmaktadır. Spangler, bu etkileri göz önünde bulundurarak ve halka eğilmesini temel alarak, fleksibl boruların tasarımı için 1941 yılında Iowa formülünü geliştirmiştir [3].

Spangler, Marston yükünün boru üzerinde üniform olarak dağıldığı, yataklama açısına bağılı olarak boru tabanında üniform destek olduğu ve boru kenarlarında, borunun zemine doğru gömülmesiyle orantılı yanıl toprak basınçlarının oluştuğı varsayımlarını yaparak, boru çevresindeki zeminin borunun eğilmesine etkilerini incelemiştir. Eğilmeyle yanıl toprak basınçları arasındaki orantı, Şekil 7.1’de görüldüğü gibi tanımlanan pasif toprak direncine (e) eşittir. Spangler sonuç olarak aşağıdaki formülü elde etmiştir [3, 9].

$$\Delta X = \frac{D_L \cdot K \cdot W_c \cdot r^3}{EI + 0,061 \cdot e \cdot r^4} \quad (7.3)$$

D_L : Eğilme gecikme faktörü

K: Yataklama faktörü

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

r: Borunun ortalama yarıçapı (m)

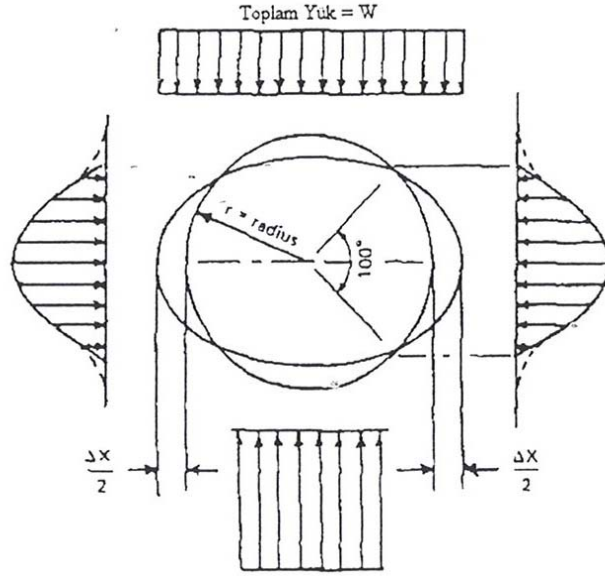
E: Boru malzemesinin elastisite modülü (KN/m²)

I: Eylemsizlik momenti (m⁴/m)

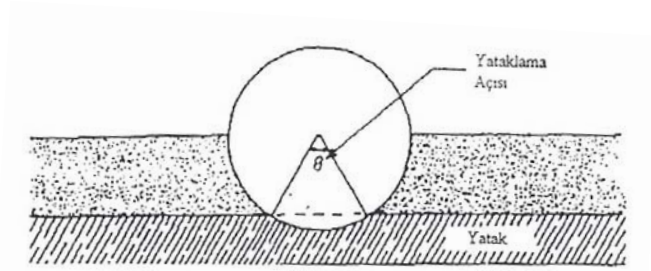
e: Yan dolgunun pasif direnci (KN/m²/m)

ΔX : Yatay eğilme veya çaptaki değişim (m)

(7.3) denklemi, K, D_L , e değerlerinin bilinmesi durumunda fleksibl boruların eğilmenin belirlenmesinde kullanılabilir. Yataklama sabiti K, yataklama genişliğine ve yataklama açısına bağılıdır. Şekil 7.2’de görülen yataklama açısının farklı değerleri için oluşan yataklama sabiti değerleri Tablo 7.4’te verilmiştir [3].



Şekil 7.1 Spangler' a göre fleksibl boru üzerinde gerilme dağılımı [9]



Şekil 7.2 Yataklama açısı [9]

Tablo 7.4 Yataklama sabiti değerleri [9]

Yataklama açısı (derece)	Yataklama sabiti K
0	0,110
15	0,108
22,5	0,105
30	0,102
45	0,096
60	0,090
90	0,083

1958 yılında, Spangler'ın öğrencisi R. K. Watkins, Iowa formülü üzerinde yaptığı boyut analizinde zemin pasif direnci e'nin, zeminin gerçek bir özelliği olmadığını belirlemiştir. Bu çalışmanın sonucunda, başka bir zemin parametresi olan zemin

reaksiyon modülü $E' = e.r$ tanımlanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilmiş Iowa formülü adında yeni bir formül ileri sürülmüştür [3].

$$\Delta X = \frac{D_L \cdot K \cdot W_c \cdot r^3}{EI + 0,061 \cdot E' \cdot r^3} \quad (7.4)$$

Iowa formülünde eğilmeleri hesaplamak için gerekli bir diğer parametre olan eğilme gecikmesi faktörüdür (D_L). Eğilme gecikmesi faktörü, maksimum yük oluştuktan sonra boruda meydana gelen eğilme artışını yansıtır. Boru kenarlarındaki zeminin oturması uzun bir zaman sürecinde gerçekleşir ve maksimum yükün oluşması geri dolgu işlemi bittikten 3-6 ay sonra oluşur. Spangler eğilmenin 40 yıllık bir sürede %30 artabileceğini belirtmiştir. Bu nedenle muhafazakar bir tasarımda D_L değerinin 1,5 olarak alınmasını önermiştir. Eğer prizma yükü kullanılıyorsa, bu yükün Marston yükünden en az 1,5 kat fazla olmasından dolayı, D_L değerinin olarak 1 alınmalıdır [3, 8, 9].

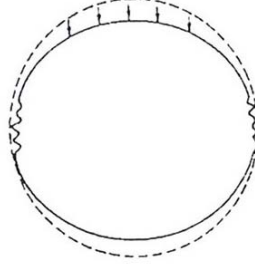
Geliştirilmiş Iowa formülünde yer alan zemin reaksiyon modülü E' değerinin ölçülmesi için yapılan araştırmalar başarısız olmuştur. Bu değer belirlenebilmesi için en kullanışlı yol, yerleştirilme koşullarının bilindiği bir boruda oluşan deformasyonları ölçüp Iowa formülünden geri işlem yapılmasıdır. Bunun için yük, yataklama faktörü ve eğilme gecikmesi faktörü yerine tahmini değerler kullanılması gerekir. Bu değerlerin tutarlı olmaması farklı E' değerlerinin bulunmasına neden olur [3].

7.3 Boruların Performans Limitleri

Gömülü boruların performans limitleri, gerilme, deformasyon, eğilme ve burkulmayla doğrudan ilgilidir. Her boru malzemesinin kendine has özellikleri olup bunlar tasarımda göz önünde bulundurulmalıdır [3].

7.3.1 Duvar Ezilmesi

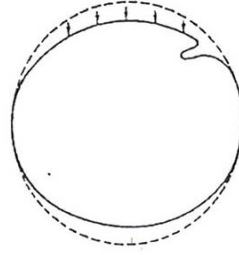
Duvar ezilmesi, sünek malzemeler için bölgesel akma, gevrek malzemeler içinse çatlakların olduğu göçme durumlarını açıklar. Bu performans limiti, boru duvarındaki gerilmeler akma veya kırılma gerilmesine ulaşıncaya oluşur. Duvar ezilmesi, birçok rijit veya gevrek boru için başlıca performans limitidir. Çok iyi sıkıştırılmış dolgu içinde, derine yerleştirilmiş fleksibl borularda da bu performans limitine ulaşılabilir. Şekil 7.3'te duvar ezilmesi örneği görülmektedir.



Şekil 7.3 Duvar Ezilmesi [3]

7.3.2 Duvar Burkulması

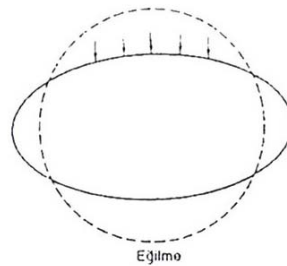
Burkulma yetersiz rijitlik etkisiyle oluşabilir. Burkulma olayı, içten vakum, dıştan hidrostatik basınç veya sıkıştırılmış zeminde yüksek toprak gerilmelerine maruz fleksibl boruların tasarımını etkiler. Borunun rijitliği azalırsa, burkulmaya karşı direnci de azalır. Şekil 7.4’te duvar burkulması örneği görülmektedir.



Şekil 7.4 Duvar Burkulması [3]

7.3.3 Aşırı Eğilme

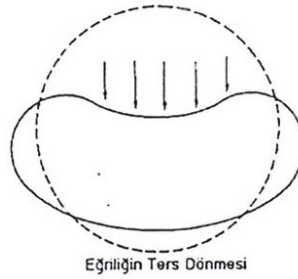
Şekil 7.5’ te örneği görülen aşırı eğilme fleksibl borular için bir tasarım kriteridir ve rijit borularda çok nadir göz önünde bulundurulurlar. Boru rijitliği, boru et kalınlığı, destekleme sisteminin türü ve zeminin sıkışma miktarı borularda meydana gelen eğilmeleri etkiler.



Şekil 7.5 Aşırı Eğilme [3]

7.3.4 Eğriliğin Ters Dönmesi

Eğriliğin ters dönmesi bir eğilme olayıdır ve eğilme kontrol edildiği takdirde oluşmaz. Örneğin oluklu çelik borularda yaklaşık %20'lik eğilmeden sonra eğriliğin ters döndüğü görülür. Güvenlik faktörü 4 alınarak limit eğilme %5 olarak belirlenmiştir. PVC borularda %30 eğilme oluştuğunda eğriliğin ters dönmesi açıkça görülebilir. Yapılan araştırmalarda, PVC boruların yük taşıma kapasitelerinin bu noktanın üzerindeki eğilmelerde dahi arttığı görülmüştür. Bu özellik göz önünde bulundurulduğunda, PVC borular için verilen %7,5 değerindeki limit eğilme değerinin muhafazakar olduğu görülür. Şekil 7.6'da eğriliğin ters dönmesi örneği görülmektedir.



Şekil 7.6 Eğriliğin ters dönmesi [3]

7.3.5 Deformasyon Sınırı

Fiberglas borular gibi bazı boru türlerinde deformasyon sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlama deformasyon korozyonunu önlemek açısından önemlidir. Deformasyon korozyonu, sınırlı bir zamanda, sadece borudaki deformasyonun belirli bir eşik değerden yüksek olduğu durumda meydana gelen çevresel bozulmadır. Burada bahsedilen deformasyon, toplam çevresel deformasyondur.

7.3.6 Boyuna Doğrultuda Gerilmeler

Rijit borular ve birçok fleksibl borular, boyuna doğrultuda yüksek gerilmelere karşı koyacak şekilde projelendirilmemişlerdir. Bu nedenle yerleşim tasarımı ve inşaat, boyuna doğrultudaki gerilmeler minimum olacak şekilde yapılmalıdır. Bu gerilmeler, sıcaklıkla genleşme veya büzülme, boyuna doğrultuda eğilme ve Poisson etkisi (iç basınca bağlı) nedeniyle oluşabilir.

Çelik boruların günün sıcak saatlerinde kaynaklandıktan sonra soğumaya bırakılması yüksek çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Kapatma kaynaklarının düşük sıcaklıklarda yapılması veya genişleme ekleri yapılarak bu gerilmeler azaltılabilir.

Borunun rijit yapılara bağlandığı yerlerde meydana gelen farklı oturmalar, yataklamanın eşit olmayan oturma yapması, yataklamanın erozyonu, yeraltı suyunun yükselip alçalması sonucu oluşan yer hareketleri, zeminde su muhtevası değişimine bağlı mevsimsel kabarma ve çökmeler, ağaç köklerinin basıncı, ve temelin üniform olmaması bir boru hattında boyuna doğrultuda meydana gelen eğilmenin ana nedenleridir.

7.3.7 Kayma Yükleri

Kayma yükleri üniform olmayan yatak ve farklı oturma sonucu oluşurlar. Bu yükler, değişken, bölgesel ve büyük değerlerde olabilir ve hesaplanmaları zordur. Bu nedenle bu yükler, uygun tasarım ve yerleştirme tekniğiyle ortadan kaldırılmalı veya etkileri azaltılmalıdır.

7.3.8 Yorulma

Yorulma, hem cazibeli akımlı borularda, hem de basınçlı borularda dikkat edilmesi gereken bir etkidir. Boru malzemesi, çok sayıda periyodik yükleme sonucunda düşük bir gerilmede göçecektir. Hatalı çalışan aletlere bağlı basınç yükselmesi ve bunun sonucunda oluşan su darbesi periyodik yüklemelere ve dolayısıyla yorulmaya neden olabilir. Trafik yüklerinden meydana gelen periyodik yüklemeler, sık yerleştirilmiş borular dışında problem oluşturmazlar.

7.3.9 Yapraklanma

Donatılı ve ince tabakalı malzemeler halka gerilmesine maruz kaldıklarında yapraklanma meydana gelebilir. Yapraklanma radyal çekme gerilmesi ve ince tabakalar arası kayma ve korozyon gibi kimyasal etkiler nedeniyle oluşur.

8. PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE ZEMİNE GÖMÜLÜ BORULARA ETKİYEN YÜKLERİN İNCELENMESİ

8.1 Plaxis Sonlu Elemanlar Programı

Sonlu elemanlar yöntemi 1950 yıllarının sonlarına doğru klasik, tek eksenli yapılan yapısal analiz metodlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar sonucu ortaya çıkmış, daha sonra gerçeğe yakın sonuçlar vermesi nedeniyle bu yöntem artan ilgi ve bilgisayarların da gelişmesiyle birlikte bir çok mühendislik probleminin çözümünde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yöntem ilk olarak mekanik, inşaat mühendisliği ve uzay araştırmalarında kullanılmaya çalışılmış, zamanla sünme, kademeli inşaat ve kazı, ısı transferi, geçirgen ortamlarda suyun hareketi, dinamik analiz gibi çeşitli problemlerin çözümünde kullanılmıştır. Paket programların geliştirilmesiyle, ayrıntılı matematik ve programlama bilgilerine gereksinim duyulmadan, yalnızca gerekli veri girişi sağlanarak farklı geometri ve malzeme özelliklerine sahip problemlerin çözümüne olanak sağlanmıştır. Plaxis sonlu elemanlar programı da zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği alanındaki problemlerin çözümünde kullanılan bir paket programdır.

Plaxis programı 1987 yılından bu yana zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği analizleri ile getoteknik mühendisliği alanında kullanılmaktadır.

Program INPUT, OUTPUT, CALCULATION ve CURVES olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerde sırasıyla geometrinin tanımlanması ve veri girişi, sistemin davranışının belirlenmesi, hesaplama ve grafiklerin çizdirilmesi işlemleri yapılır.

Program çalıştırılınca ilk önce birimler, geometri boyutları, modelleme türü gibi çözülecek probleme özgü genel özellikler belirtilir. Bu aşamadan sonra geometrinin oluşturulmasına geçilir. LINES komutuyla zemin kesiti, BEAM, GEOTEXTILE, NODE TO NODE ANCHOR ve FIXED END ANCHOR komutlarıyla da yapısal elemanlar oluşturulabilir. Bu işlemler sırasında ilgili komut seçildikten sonra fare kullanılarak veya koordinat değerlerinin girilmesiyle eleman yerleştirilir. Bir başka yapısal eleman olan tüneller ise TUNNEL komutuyla oluşturulur. Bu komut

seçildikten sonra çıkan menü kullanılarak tünel geometrisi ve boyutları, kaplama malzemesi ve zemin-yapı etkileşimini hesaba katmak için arayüz elemanları ve fleksibl yapılar için geçerli olan şekil değiştirme yüzdesi tanımlanabilir.

Çözülecek probleme bağlı olarak çizgisel yükler, yayılı yükler ve önceden belirlenmiş yer değiştirmeler sırasıyla POINT FORCES, TRACTION FORCES ve PRESCRIBED DISPLACEMENTS komutlarıyla oluşturulduktan sonra STANDARD FIXITIES komutuyla sınır şartları belirlenir ve malzeme özelliklerinin atanmasına geçilir.

Malzeme özelliklerinin tanımlanması için MATERIAL PROPERTIES komutu seçildikten sonra SOIL&INTERFACE, BEAM, ANCHOR ve GEOTEXTILE menüleri kullanılır. Çubuk elemanlar ve tünellerin tanımlanması için BEAM menüsünde normal rijitlik (EA), eğilme rijitliği (EI), duvar kalınlığı (d), eleman ağırlığı (w) ve poisson oranı (ν); ankraj ve destek elemanları için ANCHOR menüsünde normal rijitlik (EA), destek aralığı (L_s), ve maksimum kuvvet (F_{max}); ankraj kökü ve geotekstil malzemeleri için ise GEOTEXTILE menüsünde normal rijitlik (EA) değerleri girilmelidir.

Zemin özellikleri SOIL&INTERFACES menüsü kullanılır. Plaxis programıyla zeminler Mohr-Coulomb, Hardening Soil Model, Soft Soil Creep Model ve Linear Elastic Model modelleri kullanılarak tanımlanabilmekte ve her model kendine özgü parametreler içermektedir. Bu çalışmada kullanılan Mohr-Coulomb modeli kullanılması durumunda Young modülü (E), poisson oranı (ν), içsel sürtünme açısı (ϕ), genleşme açısı (ψ), zeminin kuru ve doğal birim hacim ağırlıkları (γ_k , γ_n) ile yatay ve düşey permabilite katsayılarının (k_v , k_h) değerleri gerekmektedir.

Malzeme özellikleri atandıktan sonra MESH komutuyla sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Sonlu elemanlar ağı gerilme yoğunlaşmalarının ve fazla deformasyonların beklendiği kısımlarda daha ince oluşturulmaya çalışılmalıdır.

INPUT bölümünde son olarak yeraltı suyu seviyesi, boşluk suyu basıncı, ve zeminin hiçbir yapısal eleman olmadığı durumdaki efektif gerilmelerin tanımlanması için INITIAL CONDITIONS komutu kullanılır ve CALCULATION bölümüne geçilir.

Bu aşamada kademeli inşaat yapılması durumunda STAGED CONSTRUCTION, tekil ya da yayılı yük kullanılması durumunda ise TOTAL MULTIPLIERS komutları kullanılır. Tüm aşamalar tanımlandıktan sonra ise CALCULATE komutuyla

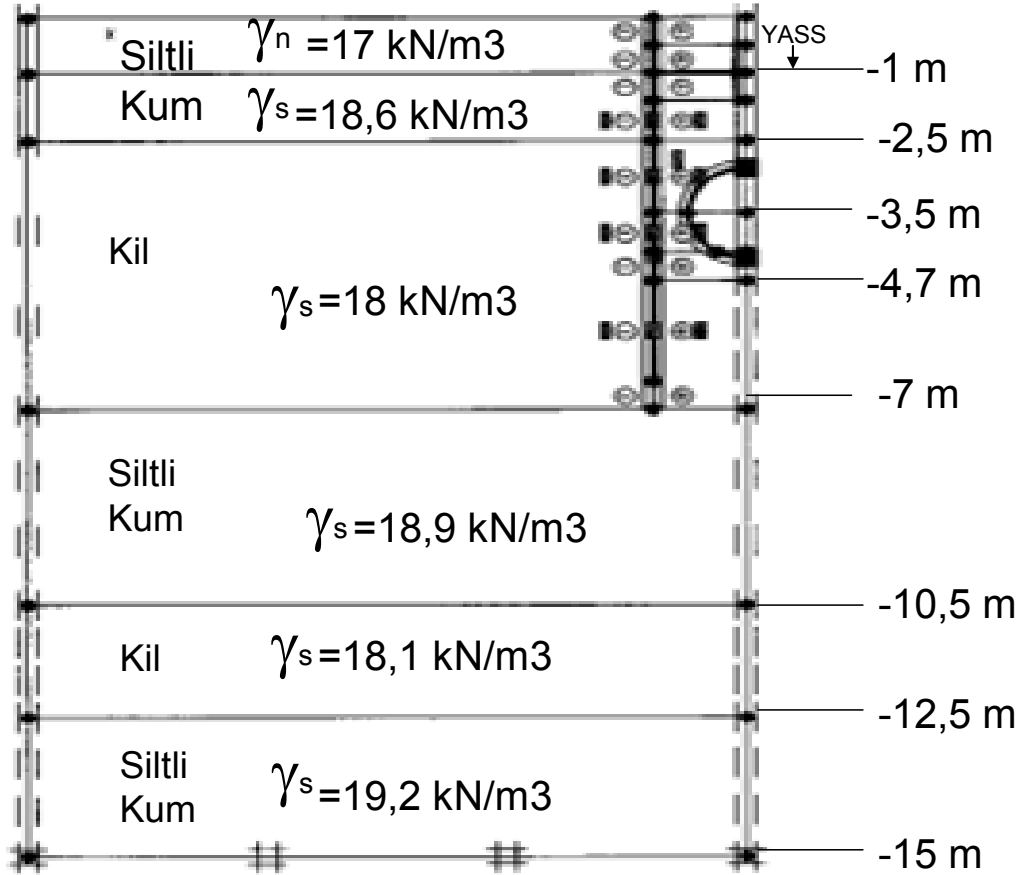
hesaplama işlemi başlatılır. Hesaplama işlemi bittikten sonra OUTPUT komutuyla istenilen aşamadaki zemin davranışları belirlenebilir. [43, 44]

Plaxis programının yukarıda anlatılan adımlarıyla ilgili şekiller EK A'da yer almaktadır.

8.2 Plaxis Programı ile Zemine Gömülü Boruların Modellenmesi

Bu çalışmada Plaxis programı kullanılarak yapılan modellemelerle boru malzemesi, gömlek malzemesi ve hendek genişliğinin gömülü borular üzerindeki yüklere etkisi incelenmiştir.

Boruların yerleştirildiği zeminin kesiti Şekil 8.1 de görülmektedir. Yapılan analizde iç çapı 1,6 m olan betonarme ve polietilen borular 4,3 m derinliğindeki hendeğe C sınıfı yataklama yapılarak yerleştirilmiştir. Kazının derinliği ve hendek tabanının yeraltı su seviyesinin altında olması gözönünde bulundurularak palplanş duvarlar ve yatay destek kullanılarak gerekli iksanın sağlanması ve hendeğe su dolmasının önlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 8.1 Zemin Profili

Borunun yerleştirileceği zemin kil olduğundan dolayı, boruya yeterli taban desteği sağlamak amacıyla hendek 4,7 m derinliğe kadar kazılıp granüler malzemeye yastık oluşturulmuştur. Modellemede kullanılan boru ve yataklama malzemesi özellikleri sırasıyla Tablo 8.1 ve Tablo 8.2’de görülmektedir. Hendek genişliği 2,6 m, 3 m, 3,4 m olarak alınarak hendek genişliğinin boruya etkiyen yüke etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

Tablo 8.1 Analizde kullanılan boru özellikleri

	Betonarme Boru	Polietilen Boru
Dış çap (mm)	1950	1788
İç çap (mm)	1600	1600
EA (KN/m)	4988000	71421,9
EI (KNm ² /m)	12730	52,705

Tablo 8.2 Analizde kullanılan palplanş özellikleri

EA (KN/m)	1162000
EI (KNm ² /m)	2944
ν	0,25

Tablo 8.3 Analizde kullanılan yataklama malzemesi özellikleri

	E (KN/m ²)	γ_k (KN/m ²)	γ_n (KN/m ²)	ϕ	ν
Gevşek kum	10000	15,7	19,4	30	0,3
Orta sıkı kum	30000	16,7	20	35	0,25
Sıkı kum	50000	17,9	20,7	40	0,2
Sıkı granüler malzeme	100000	18,5	21,1	40	0,25

Boru yerleştirilmesi kademeli inşaat olarak modellenelerek her adımda zemin ve boru davranışı incelenmeye çalışılmıştır. İnşaat kademeleri EK-A’da şekilsel olarak gösterilmiş olup, borunun yerleştirilmesi işlemi şu aşamalardan oluşmaktadır:

1. Palplanşın çakılması
2. -1 m kotuna kadar kazı yapılması ve yatay desteğin konulması
3. - 4,7 m kotuna kadar kazı yapılması

4. -4,3 m kotuna kadar dolgu yapılarak yastık oluşturulması ve borunun yerleştirilmesi, -3,5 m kotuna kadar gömlek malzemesi yerleştirilmesi

5. Geri dolgu yapılarak hendeğin doldurulması, yatay desteğin ve palplanşın kaldırılması

Boru üzerindeki yükün hesaplanması için boru orta noktasının üzerindeki düşey gerilmeler esas alınmıştır. Plaxis programıyla bulunan sonuçlar Marston yöntemiyle bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları EK A, EK B ve EK C’de yer almaktadır.

9. SONUÇLAR

Bu çalışmada gömülü boru türleri, boru çeşitleri, boruların kullanım alanları, boruların yerleştirilme teknikleri, gömülü boruların maruz kaldığı yükler, gömülü borulara etkiyen yüklerin hesaplanma yöntemleri ve tasarım kriterleri üzerine bir literatür çalışması yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bilgiler doğrultusunda, boru türü, gömlek malzemesi ve hendek genişliğinin gömülü borular üzerindeki etkisini belirlemek için 1,6 m çapındaki beton ve polietilen boruların 4,3 m derinlikte farklı yerleşim koşullarındaki davranışları incelenmiştir.

Hendek genişliğinin gömülü borular üzerindeki yüklere etkisini belirleyebilmek için 2,6 m, 3 m ve 3,4 m genişlikteki üç farklı hendek için hesaplamalar yapılmıştır. Boru etrafına farklı sıklıktaki malzemeler ($E= 10000 \text{ KN/m}^2$, $E= 30000 \text{ KN/m}^2$, $E= 50000 \text{ KN/m}^2$) yerleştirilmesiyle de gömlek malzemesinin gömülü boruların davranışına etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan incelemeler sonucu gömülü borulara etkiyen eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal gerilmelerin değişimi şekil olarak sırasıyla Şekil A.18, Şekil A.19, Şekil A.20, Şekil A.21’ deki diyagramlara benzer olarak elde edilmiştir. Hesaplamalar sonucu elde edilen değerler, Marston yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçların da eklenmiş olduğu Tablo B.1 ve Tablo B.2’deki tablolarda gösterilmiştir. Ayrıca bulunan bu değerler yardımıyla rijit ve fleksibl borular için, farklı gömlek malzemelerine göre, gömülü borulara etkiyen toplam yük, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal gerilmelerin hendek genişliğiyle değişimi EK C’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Yapılan incelemelerin sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

1. Marston yöntemiyle bulunan sonuçlar Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak bulunan sonuçlardan daha büyüktür (Tablo B.1 ve Tablo B.2). Çünkü Marston yöntemi kemerlenme etkisini gözönüne almaz, dolayısıyla Plaxis programıyla daha yaklaşık sonuçlar elde edilir.
2. Boruyu çevreleyen gömlek malzemesinin elastisite modülü arttıkça boruya etkiyen toplam yük, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal gerilme

değerlerinin azaldığı görülmektedir (EK C). Bu durum Marston'un yay anolojisi gözününe alınarak, rijitliğin artmasının daha fazla yük taşınmasına neden olmasıyla açıklanabilir.

3. Hendek genişliği arttıkça boruya etkiyen toplam yük, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve normal gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir (EK C). Çünkü hendek genişliğinin artması durumunda, hendek duvarları ile geri dolgu arasında oluşan sürtünme kuvvetinin borunun yük taşımaya etkisi azalmakta, bir başka deyişle pozitif kemerlenmenin etkisi azalmaktadır.

4. Rijit borulara etkiyen yükler fleksibl borulara etkiyen yüklerden büyüktür. Bunun bir nedeni madde 2'de bahsedilen Marston'un yay anolojisidir. Diğer bir nedeni de fleksibl boruların yük altında düşey yönde deforme olup, yatay yönde genişleyerek pasif toprak itkisinin desteğini alması ve böylece boru üzerindeki yükün bir kısmını yan dolgulara transfer etmesidir. Rijit ve fleksibl boruların yaptıkları deformasyonların farkları Şekil A.14 ve Şekil A.17'de görülebilir.

5. Normal şartlar altında boru hiçbir zaman yataklama malzemesiyle tam temas halinde olamayacağından normal gerilmeler boru alt noktasında yüksek değerler alır. Rijit borular deformasyon yapmadığından dolayı borunun yan kısımlarına yüksek yanal basınçlara neden olacak deformasyonlar oluşmaz, dolayısıyla bu kısımlarda normal gerilme değerleri daha düşüktür. Boru orta noktasından üst kısımlara gidildikçe geri dolgu ağırlığının etkisinden dolayı normal gerilmeler yine artış gösterir (Şekil A.21). Fleksibl boru da ise, borunun yanal deformasyonu sonucu oluşan pasif toprak basınçları nedeniyle efektif gerilmeler borunun yan kısımlarında daha yüksek değerler alır (Şekil A.22).

KAYNAKLAR

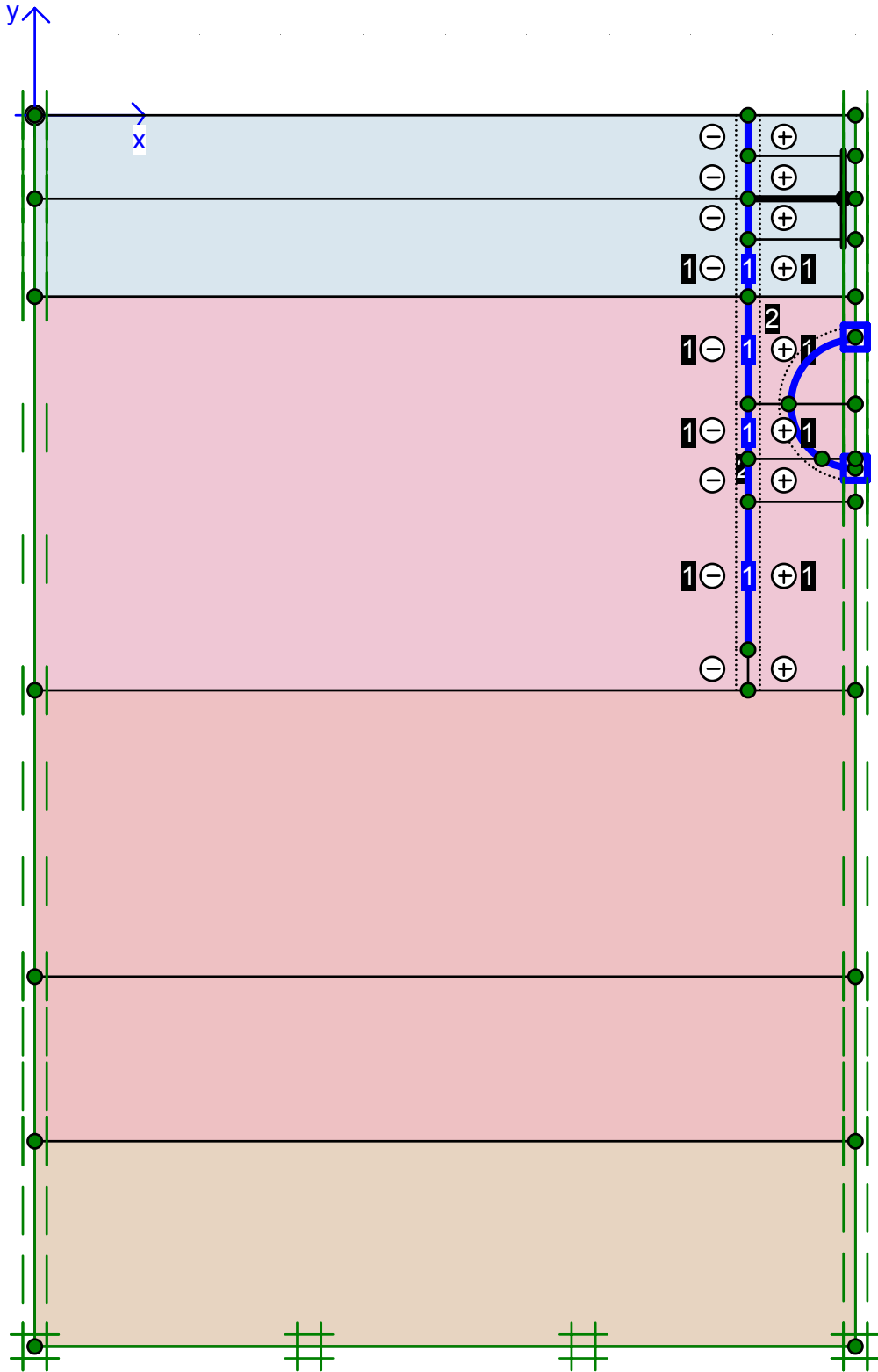
- [1] **Watkins, R. K. and Anderson, L. R.**, 2000. Structural mechanics of buried pipes, CRC Press LCC, Florida.
- [2] **Jeyapalan, J. K. and Balasubramaniam, B. K.**, 1995. Underground pipeline materials, design, and construcion, ASCE, New York, pp. 25-42.
- [3] **Moser, A. P.**, 1990. Buried pipe design, McGraw-Hill, New York.
- [4] **Çeçen, K., Bayazıt, M., Sümer, M., Avcı, İ.**, 1976. Boru hatlarının teknik ve işletme karakteristikleri, altyapı maliyeti ve işletme giderleri, Ulaştırma Bakanlığı Koordinasyon İdaresi Yayın No: (199.088) UKİ 5.094, Ankara.
- [5] **Twort, A. C., Law, F. M., Crowley, F. W.**, 1985. Water supply, Edward Arnold Ltd, London, pp. 450-473.
- [6] **Babbitt, H. E., Doland, J. J., Cleasby, J. L.**, 1962. Water supply engineering, McGraw-Hill Book Compony, U.S.A..
- [7] **Muslu, Y.**, 2002, Çözümlü problemlerle su temini ve çevre sağlığı, Su Vakfı, İstanbul.
- [8] **Howard, A.**, 1996. Pipeline installation, Relativity Publishing, Colorado.
- [9] **Spangler, M.G.**, 1966, Soil Engineering, International Textbook Company, Scranton.
- [10] **Anon.**, 2005, Vertical Soil Arching, www.geosyscorp.com/Documents/VertSA.pdf.
- [11] **Sandford T. C.**, Soil-Structure Interaction of Buried Structures, Transportation in the New Millenium.
- [12] **Stein, D.**, 2003. New pipeline technologies, security, and safety, ASCE, Virginia.
- [13] **Thomson, J.**, 1993. Pipejacking and microtunneling, Chapman&Hall, Cambridge.

- [14] **Boyce, M. B.**, What is trenchless technology anyway?,
http://www.microtunneling.com/education/Papers/tt0696_1.htm.
- [15] **Sun, L., Hopkins, T.C., Beckham T.L.**, 2005. Reduction of stresses on buried highway structures using the imperfect ditch method, Kentucky Transportation Center, Kentucky.
- [16] **Griffin, J.**, 2005, Getting the most out of your drilling fluids,
www.undergroundinfo.com/uceditorialarchive/March02/UCMar02.htm.
- [17] **Jonasson T., Watkins M.**, 1998. Microtunneling: An owner's perspective, *ASCE Practice Periodical On Structural Design And Construction*, May 1998, 56-59.
- [18] **Lueke, S.J., Ariaratnam S.T.**, Rehabilitation of underground infrastructure utilizing trenchless pipe replacement, *ASCE Practice Periodical On Structural Design And Construction*, Feb. 2001, 25-34.
- [19] **TS 2170**, 1989. Su ve Gaz Borularının Yeraltına Yerleştirilmesi Kuralları, TSE, Ankara..
- [20] **TS 5991**, 1988. Asbestli Çimento Boru Hatları Döşeme Kuralları, TSE, Ankara..
- [21] **Schwab, G.O., Fangmeier, D.D., Eliot, W.J., and Frevet, R.K.**, 1993. Soil and Water Conservation Engineering, John Wiley&Sons Inc., New York
- [22] **ASTM D 2321**, 2005, Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pipe for and Sewers and Other Gravity-Flow Applications, West Conshohocken, United States.
- [23] **Anon.**, 2005, Loads and supporting strengths,
www.enme.umd.edu/~ccfu/ence466/CH 4-AmConcPipeAsso.pdf.
- [24] **Anon.**, Standard Installations, 2005,
www.concretepipe.org/brochures/pdfs/standard_install.pdf.
- [25] **ASTM C 966**, 2003, Standard Guide for Installing Asbestos-Cement Nonpressure Pipe, West Conshohocken, United States.
- [26] **ASTM C 361**, 2004, Standard Specification for Reinforced Concrete Low Head Pressure Pipe, West Conshohocken, United States.

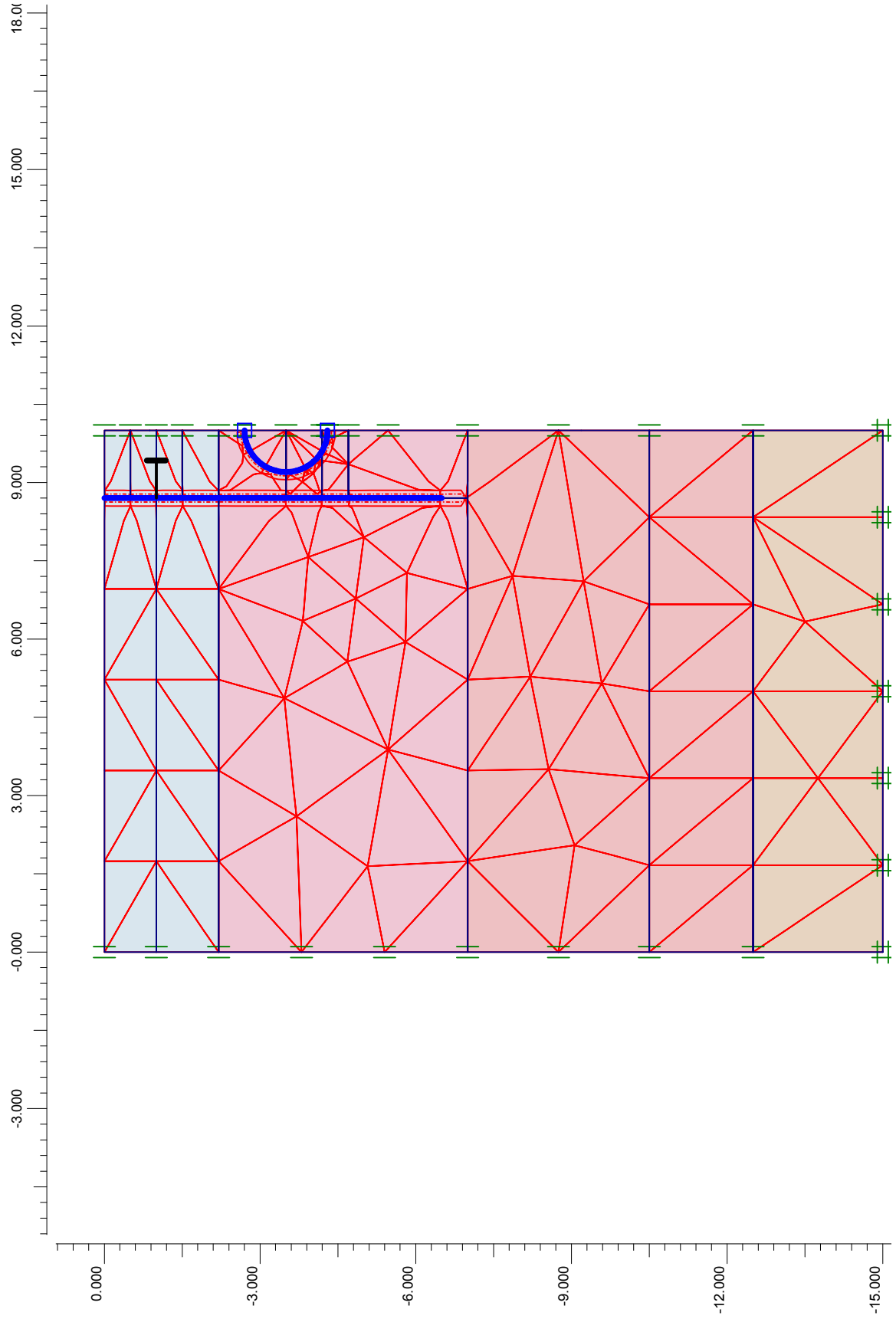
- [27] **ASTM C 12**, 2005, Standard Practice for Installing Vitrified Clay Pipe Lines, West Conshohocken, United States.
- [28] **ASTM D 2774**, 2004, Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pressure Piping , West Conshohocken, United States.
- [29] **ASTM D 3839**, 2003, Standard Guide for Underground Installation of Fiberglass Pipe, West Conshohocken, United States.
- [30] **ASTM B789/B 789M**, 2005, Standard Practice for Installing Corrugated Aluminum Structural Plate Pipe for Culverts and Sewers, West Conshohocken, United States.
- [31] **ASTM A 807/A 807M**, 2002, Standard Practice for Installing Corrugated Steel Structural Plate Pipe for and Sewers and Other Applications, West Conshohocken, United States.
- [32] **ASTM A 798/A 798M**, 2001, Standard Practice for Installing Factory-Made Corrugated Steel Pipe for and Sewers and Other Applications, West Conshohocken, United States.
- [33] **Ahlvin, R.G., Smoots, V.A.**, 1988. Construction guide for soils, John Wiley&Sons Inc., New York
- [34] **Linsley, R**, 1992. Water resources engineering, McGraw-Hill Book Company, U.S.A. .
- [35] **ASTM B 788/B 788M**, 2004, Standard Practice for Installing Factory-Made Corrugated Aluminum Culverts and Storm Sewer Pipe, West Conshohocken, United States.
- [36] **Bull, J.W.**, 1994. Soil Structure Interaction: Numerical Analysis and Modeling, Chapman&Hall, London.
- [37] **O'Rourke, M.J., Liu, X., Flores-Berrones, R.**, 1995. Steel Pipe Wrinkling due to Longitudinal Permanent Ground Deformation, *Journal of Transportation Engineering*, September/October 1995, 443-451.
- [38] **Hwang, H.H.M., Lin, H., and Shinozuka, M.**, 1998. Seismic Performance Assesment of Water Delivery Systems, *Journal of Infrastructure Systems*, September 1998, 118-125.

- [39] **Jeyapalan, J.K., Hamida, H.B.**, 1988. Comparison of German to Marston Design Method, *Journal of Transportation Engineering*, 114, 420-435, Wisconsin.
- [40] **Hardenberg, W.A.**, 1998. Sewerage and Sewerage Treatment, International Textbook Company, Pennsylvania.
- [41] **Anon.**, 2005. Pipe Stiffness,
<http://www.rinkermaterials.com/hydroconduits/infobriefs/i202.htm>.
- [42] **Anon.**, Construction Frame, 2005. www.ocpa.com/manual/construc.htm.
- [43] **Clough, R.W., Edward, L.W.**, 1999. Early Finite Element Research at Berkeley, *Fifth National Conference on Computational Mechanics*, August 4-6, 1999
- [44] **Balkaya, M.**, 2002. Zeminde Gömülü Boruların Mühendislik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

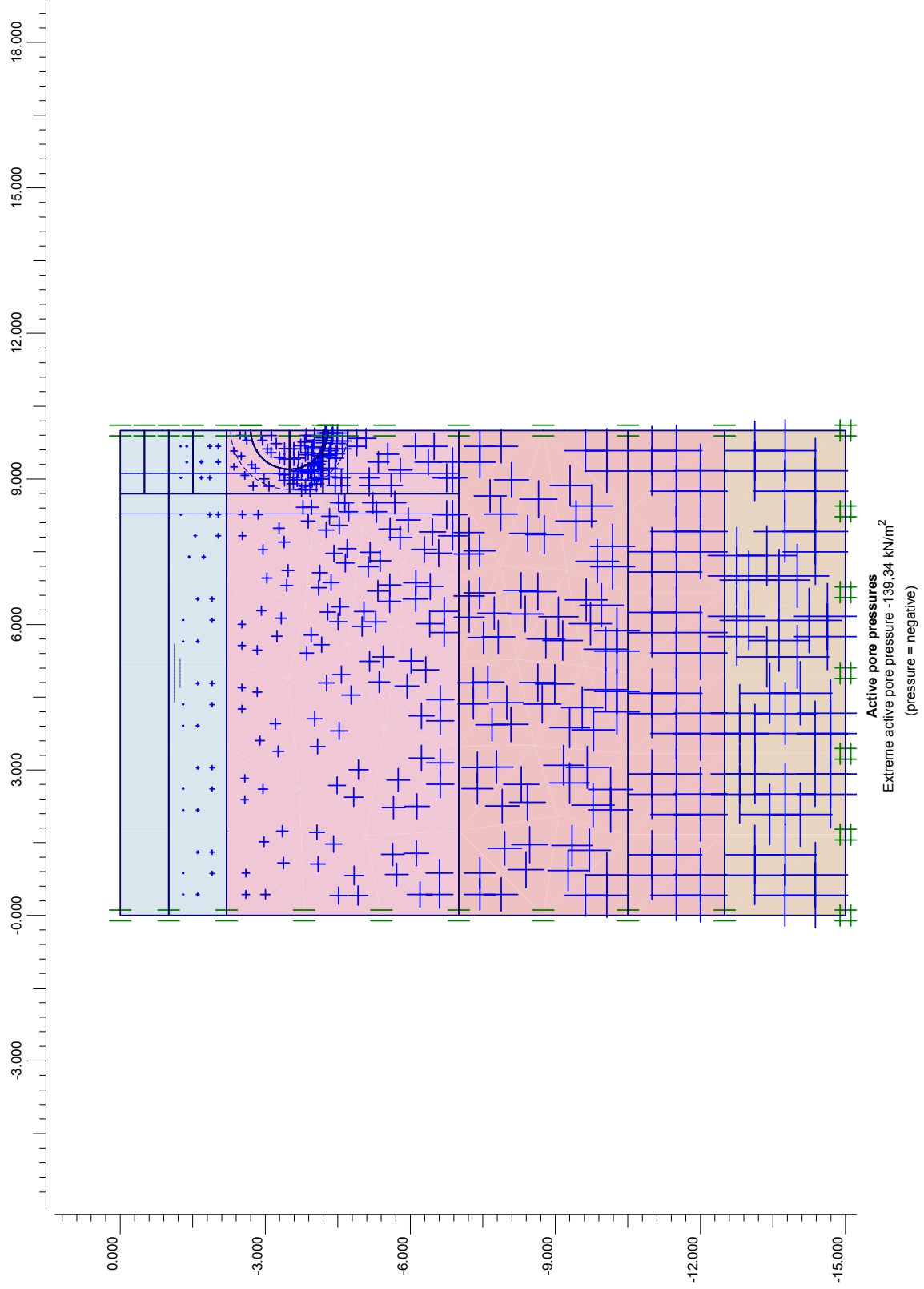
EK A



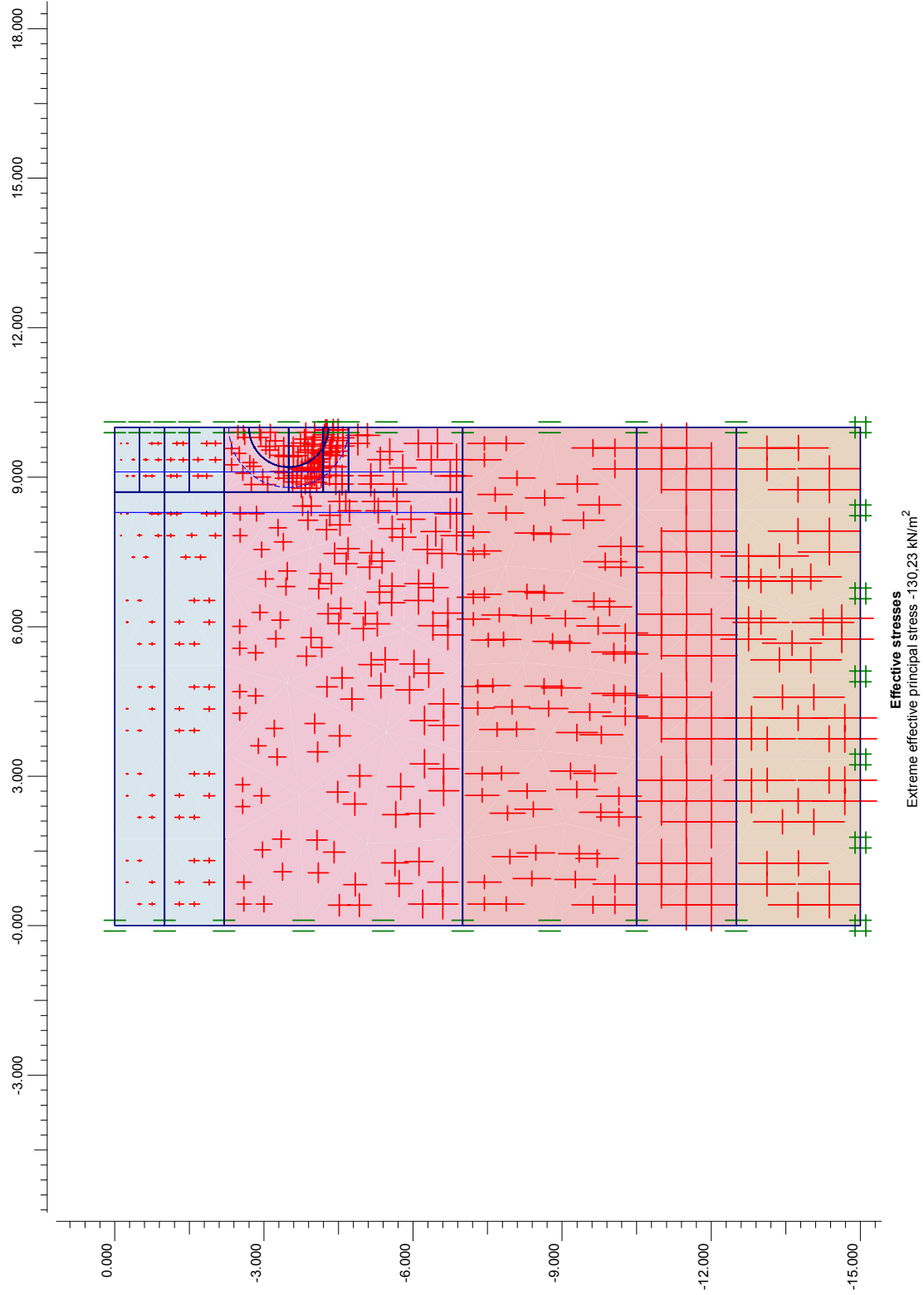
Şekil A.1 Geometri, yapısal elemanlar ve malzeme özelliklerinin tanımlanmış durumu



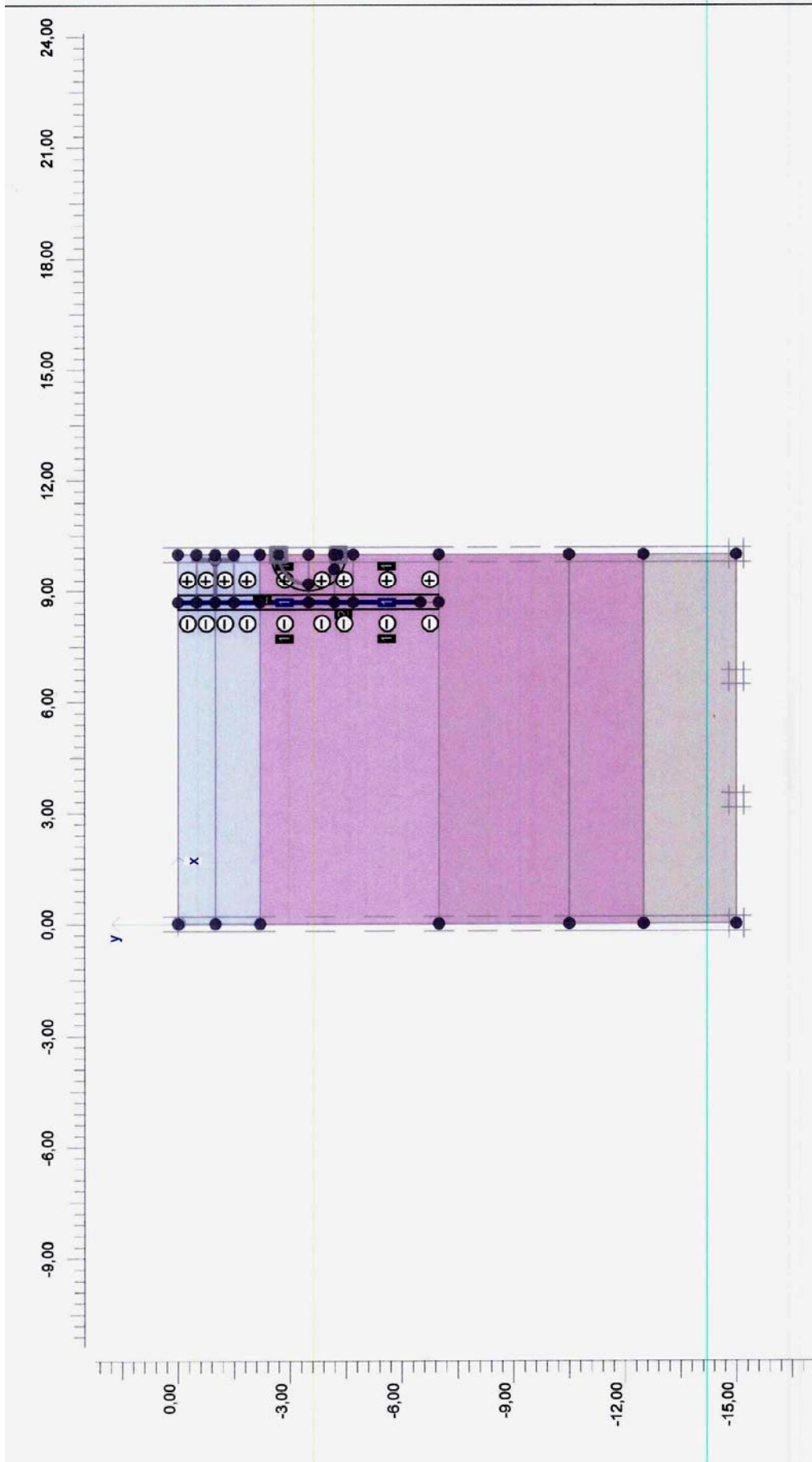
Sekil A.2 Sonlu elemanlar ağıının oluşturulması



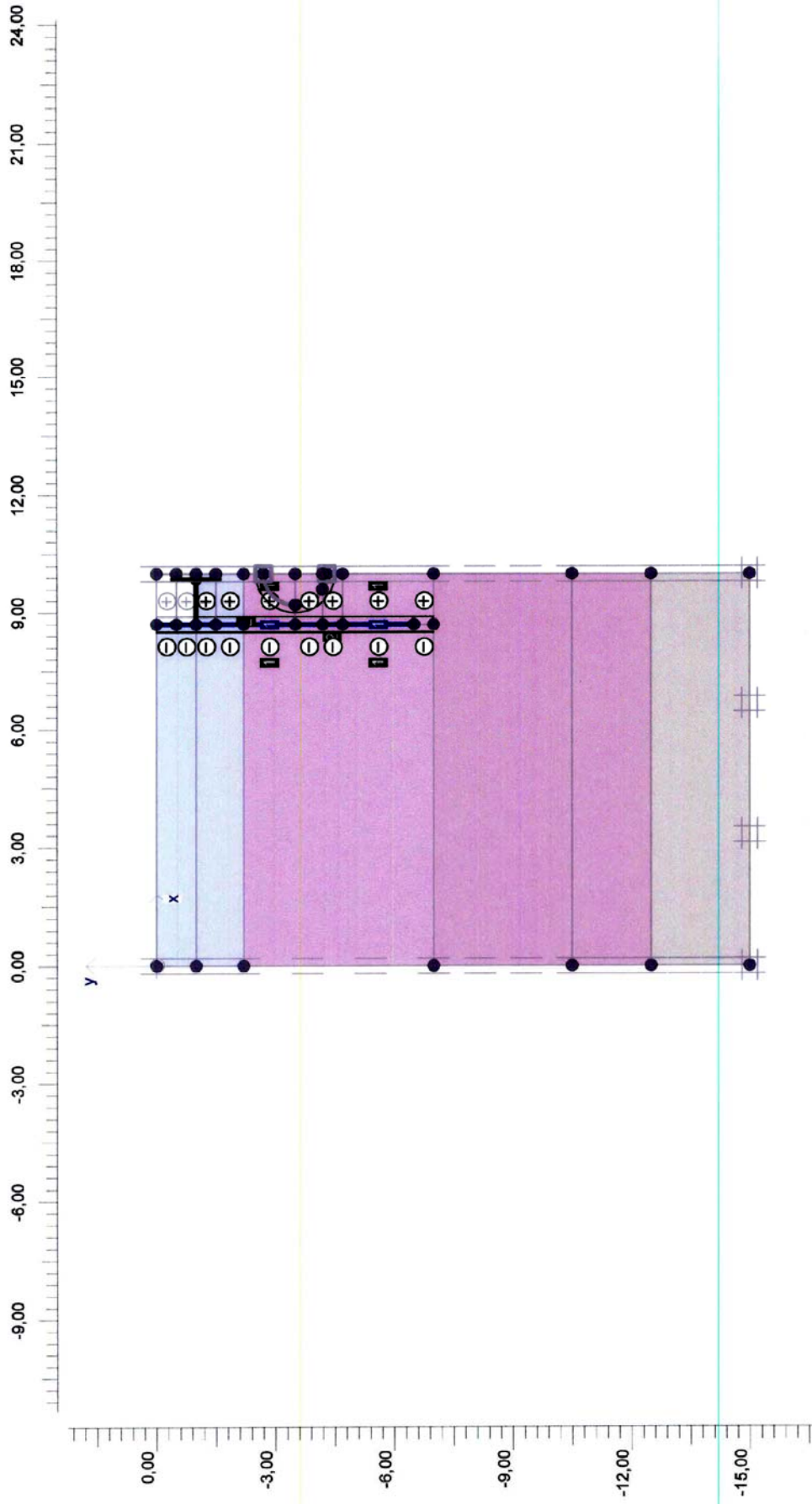
Şekil A.3 Boşluk suyu basıncı



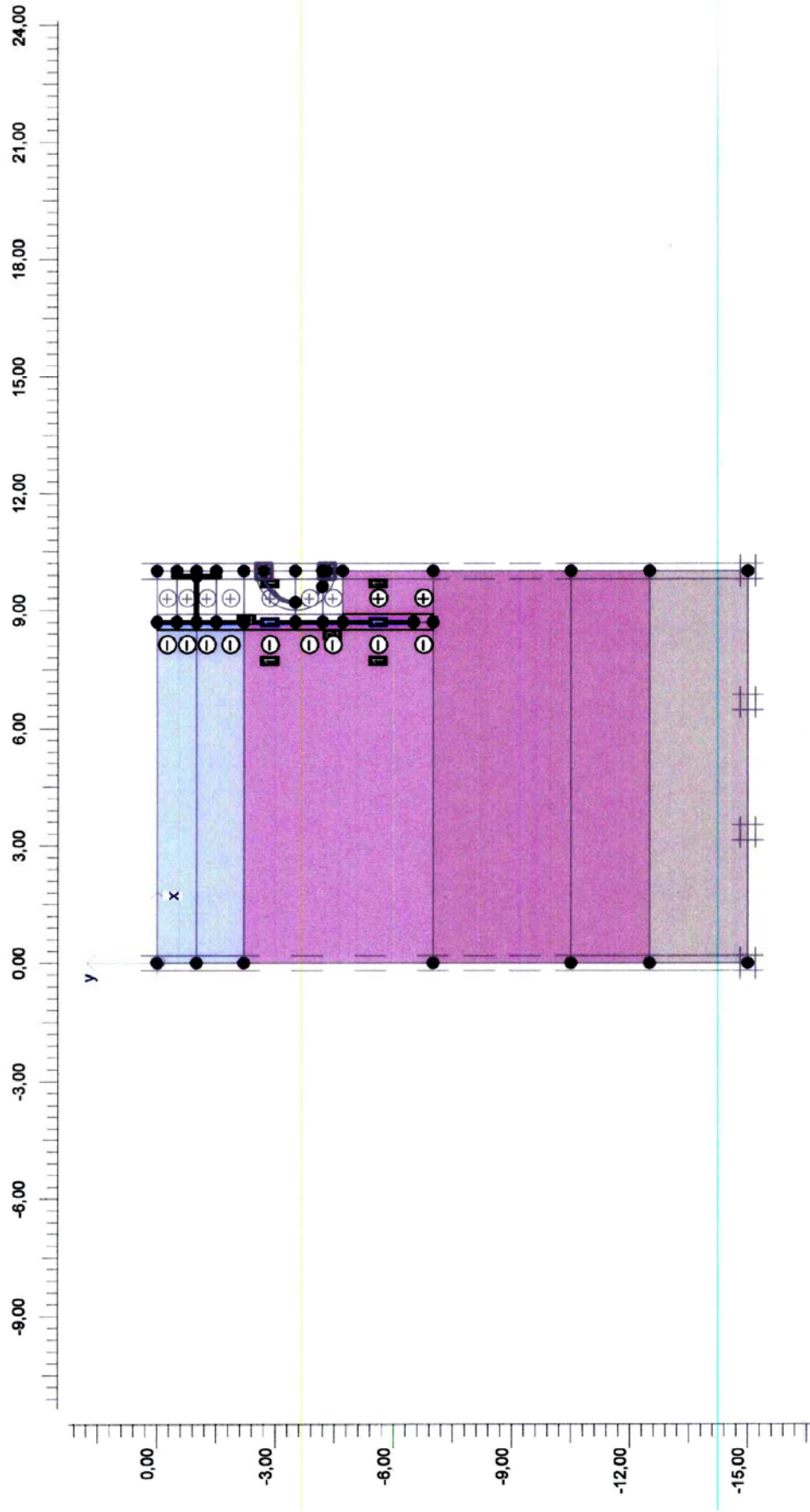
Şekil A.4 Efektif gerilmeler



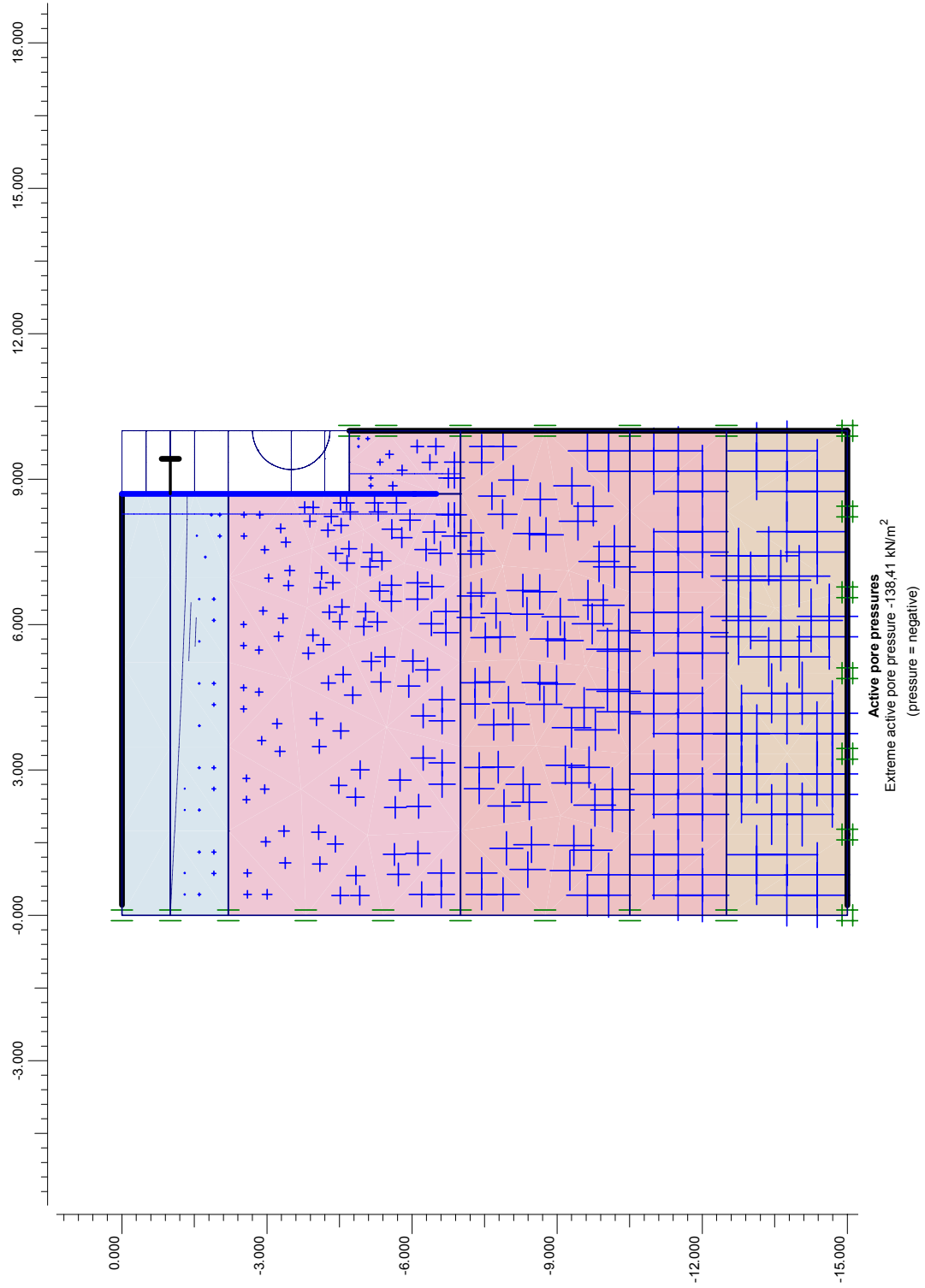
Şekil A.5 Palplanşın çakılması (1. Aşama)



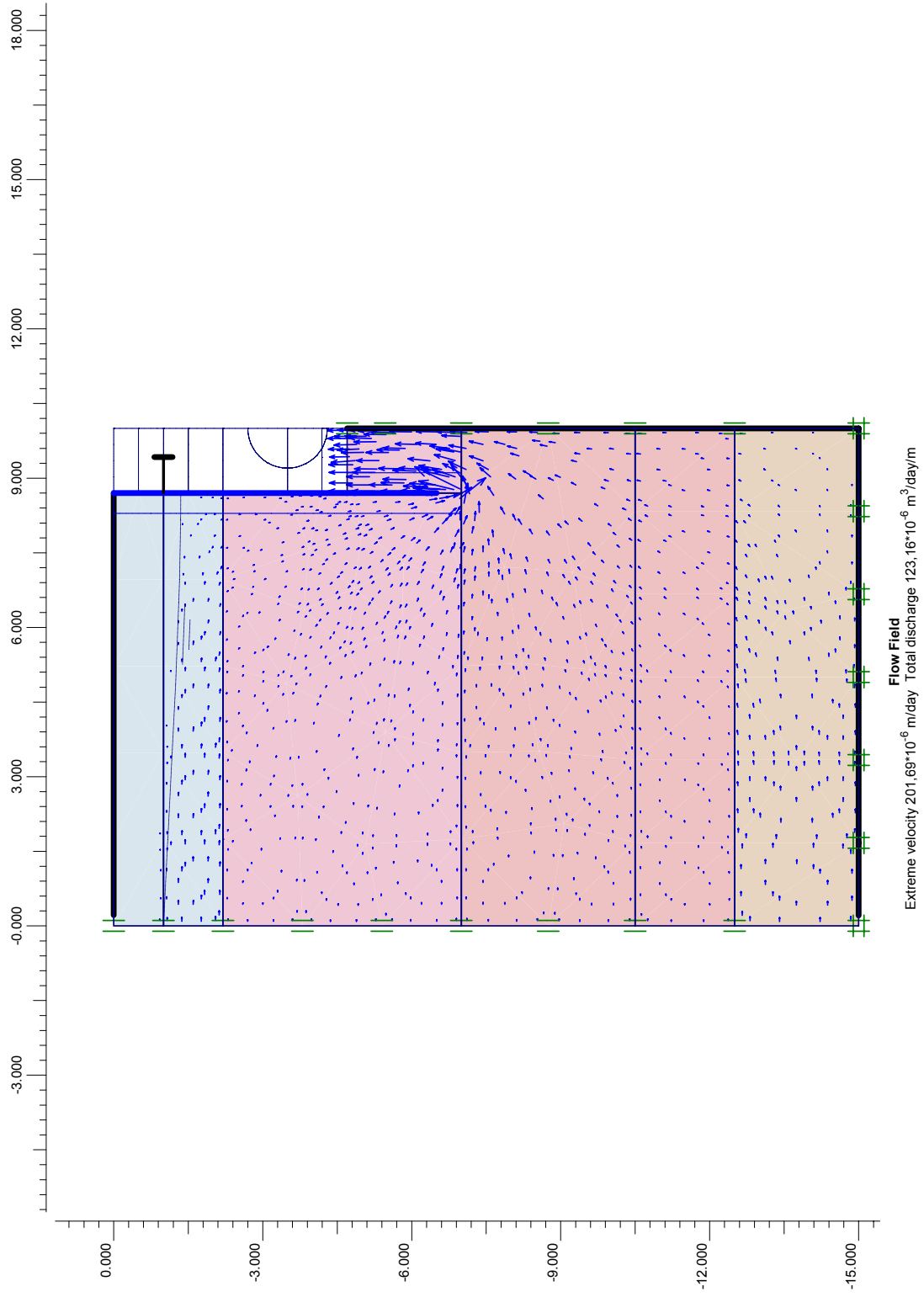
Şekil A.6 - 1 m koduna kadar kazı yapılması ve yatay destegün yerleştirilmesi (2. Aşama)



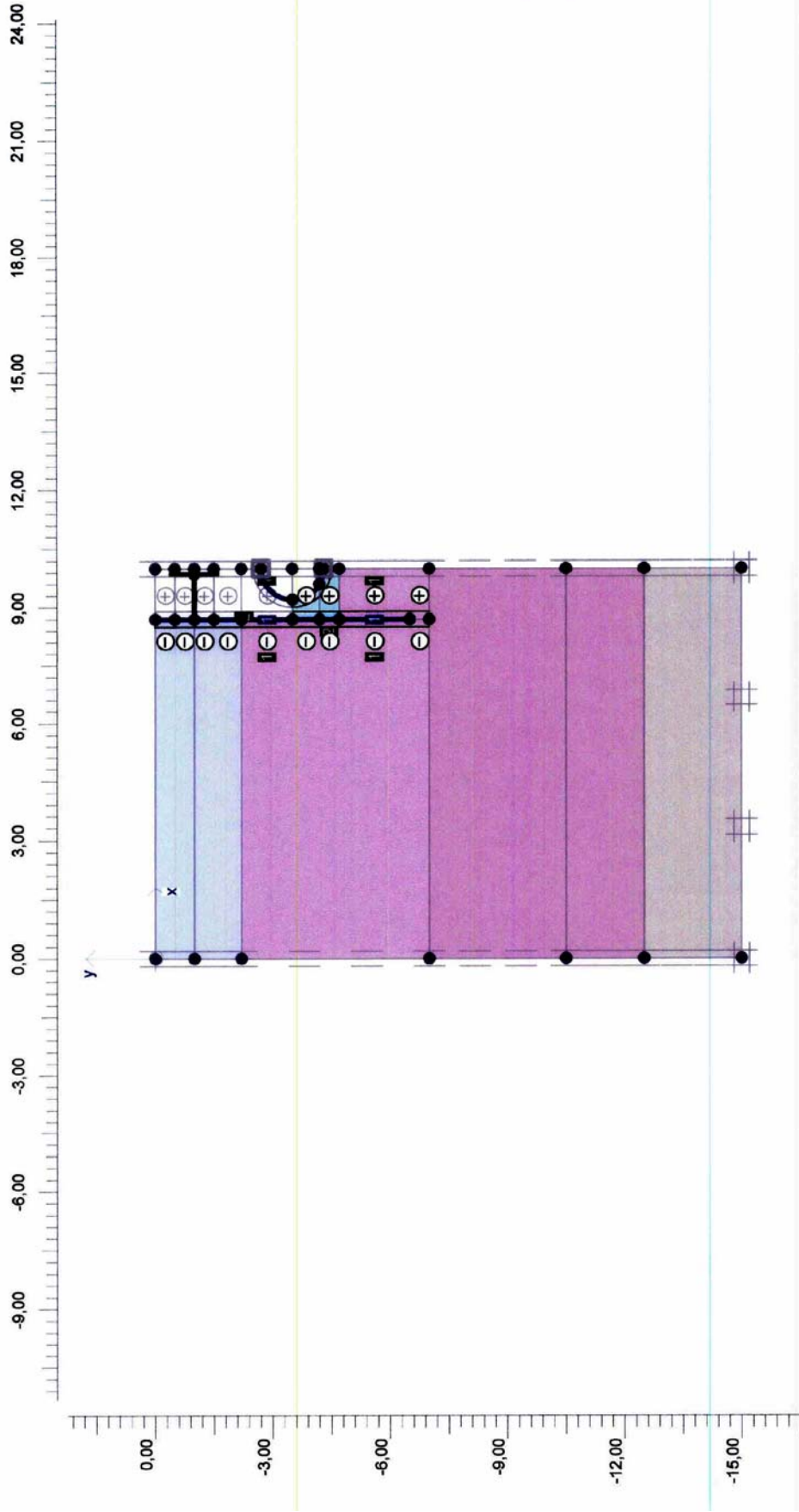
Şekil A.7 -4,7 m kotuna kadar kazı yapılması (3. Aşama)



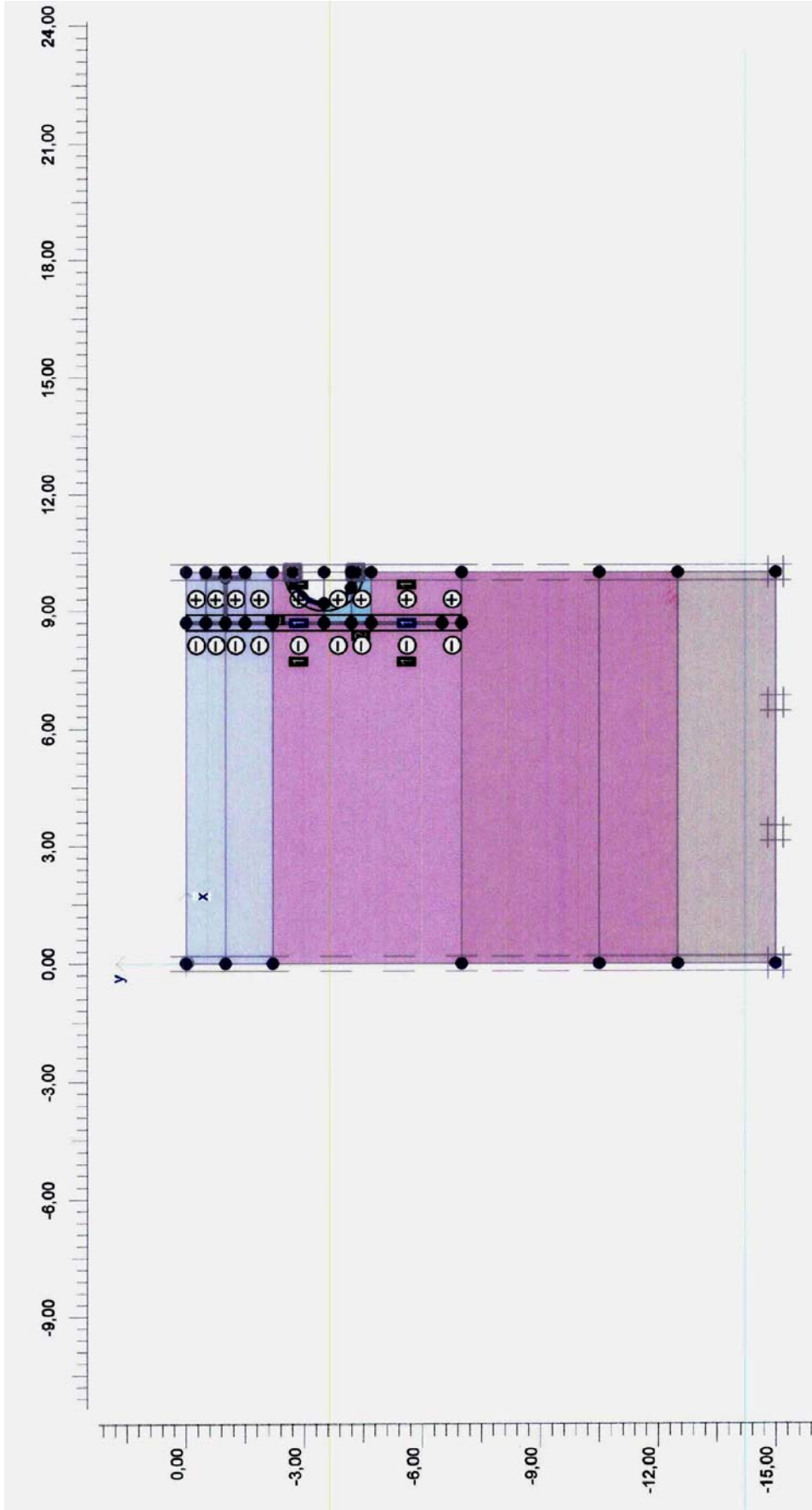
Şekil A.8 3. Aşamada boşluk suyu basıncı dağılımı



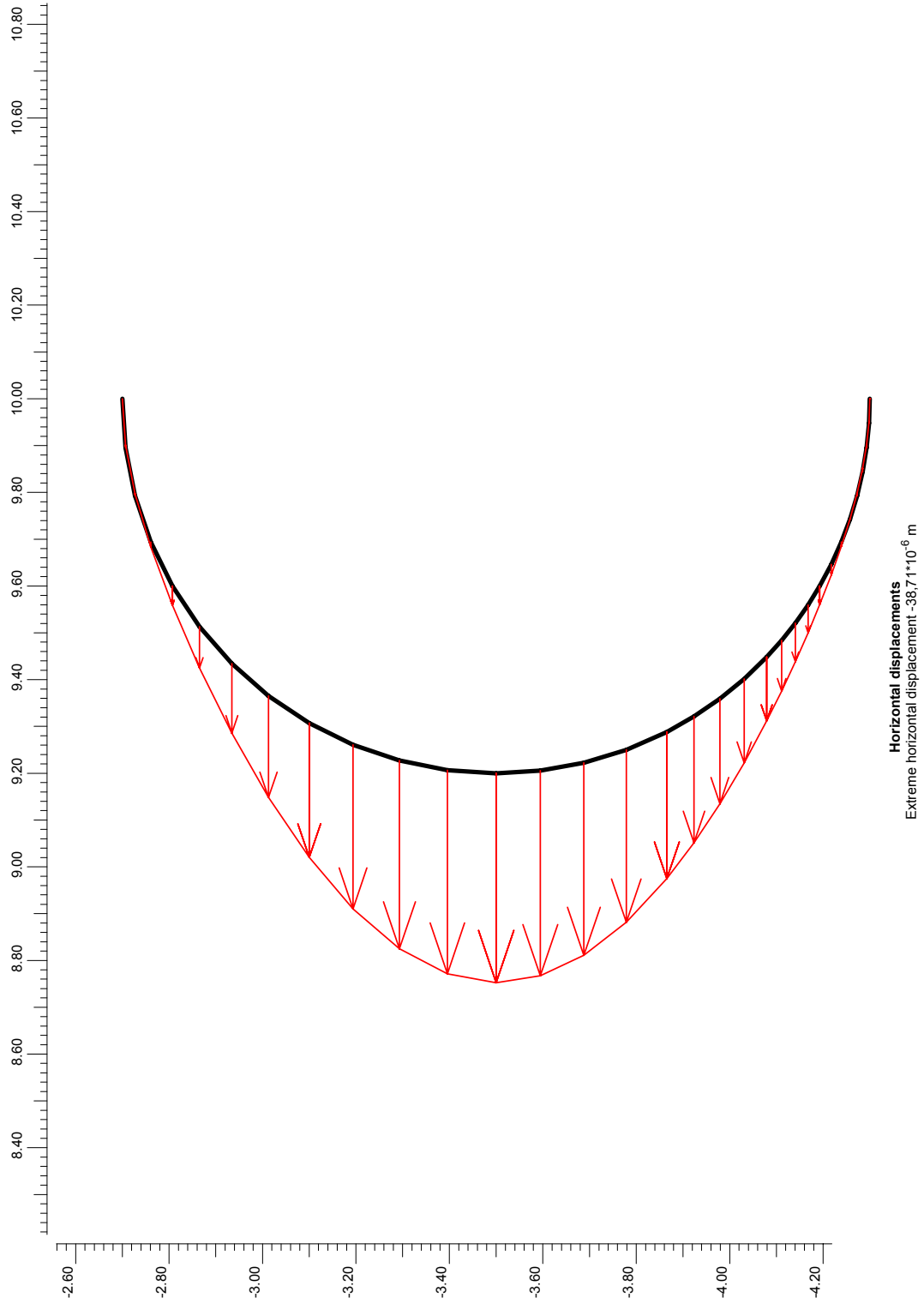
Şekil A.9 3. Aşamada akım ağı



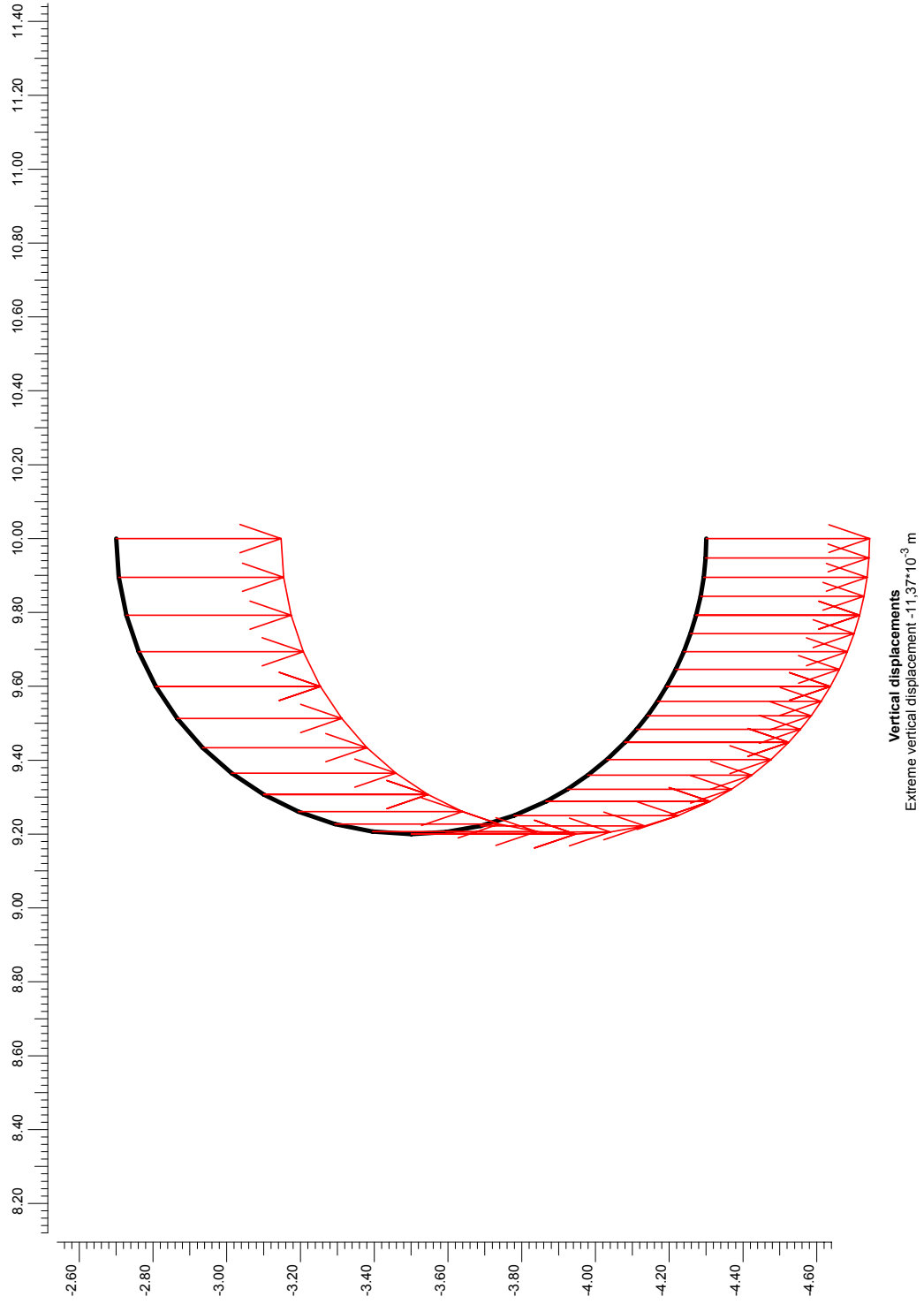
Şekil A.10 Borunun yerleştirilmesi ve -3,5 m kotuna kadar gömlek malzemesinin doldurulması (4. Aşama)



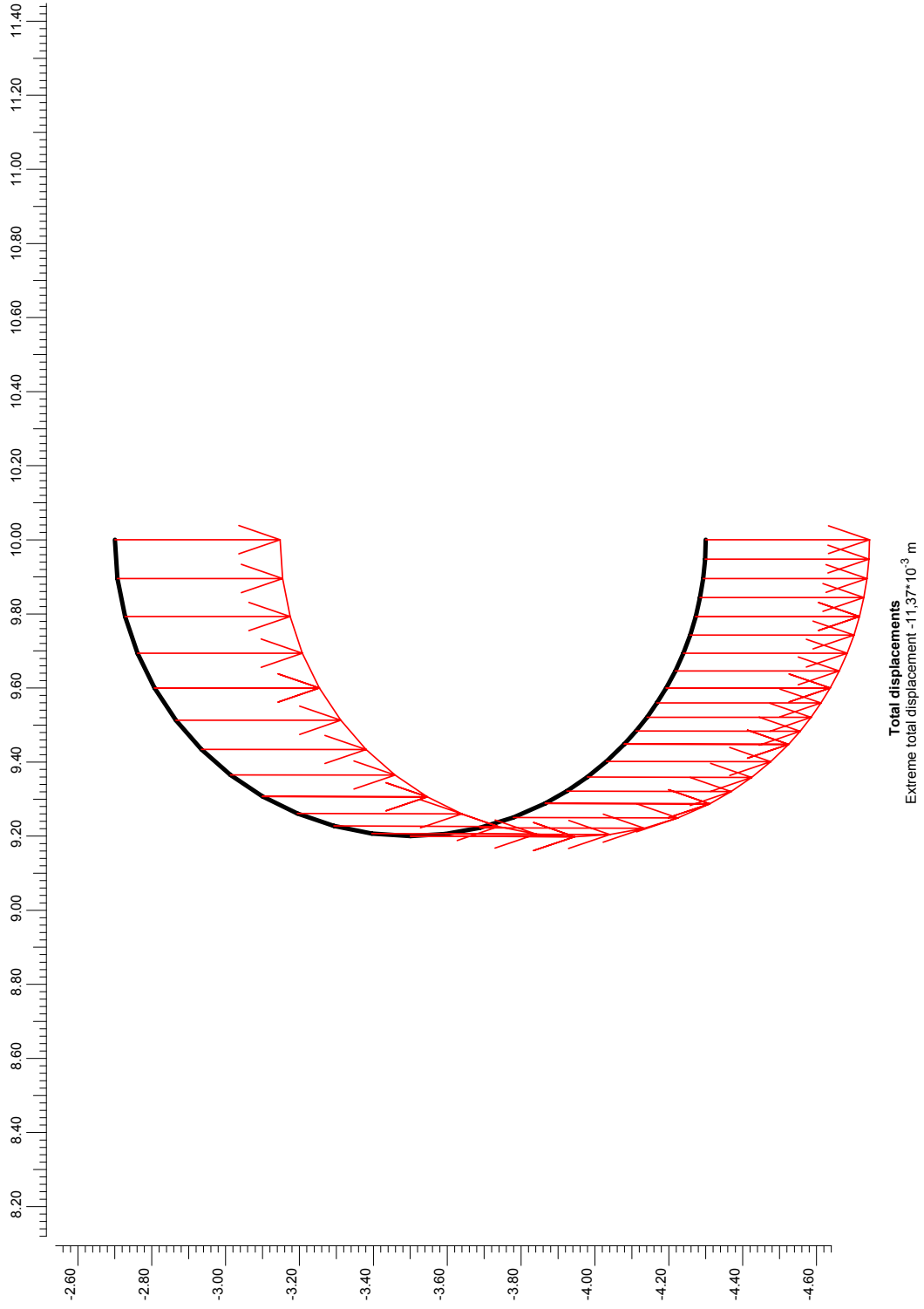
Şekil A.11 Geri dolgunun tamamlanması, palplanş ve yatay desteğin kaldırılması (5. Aşama)



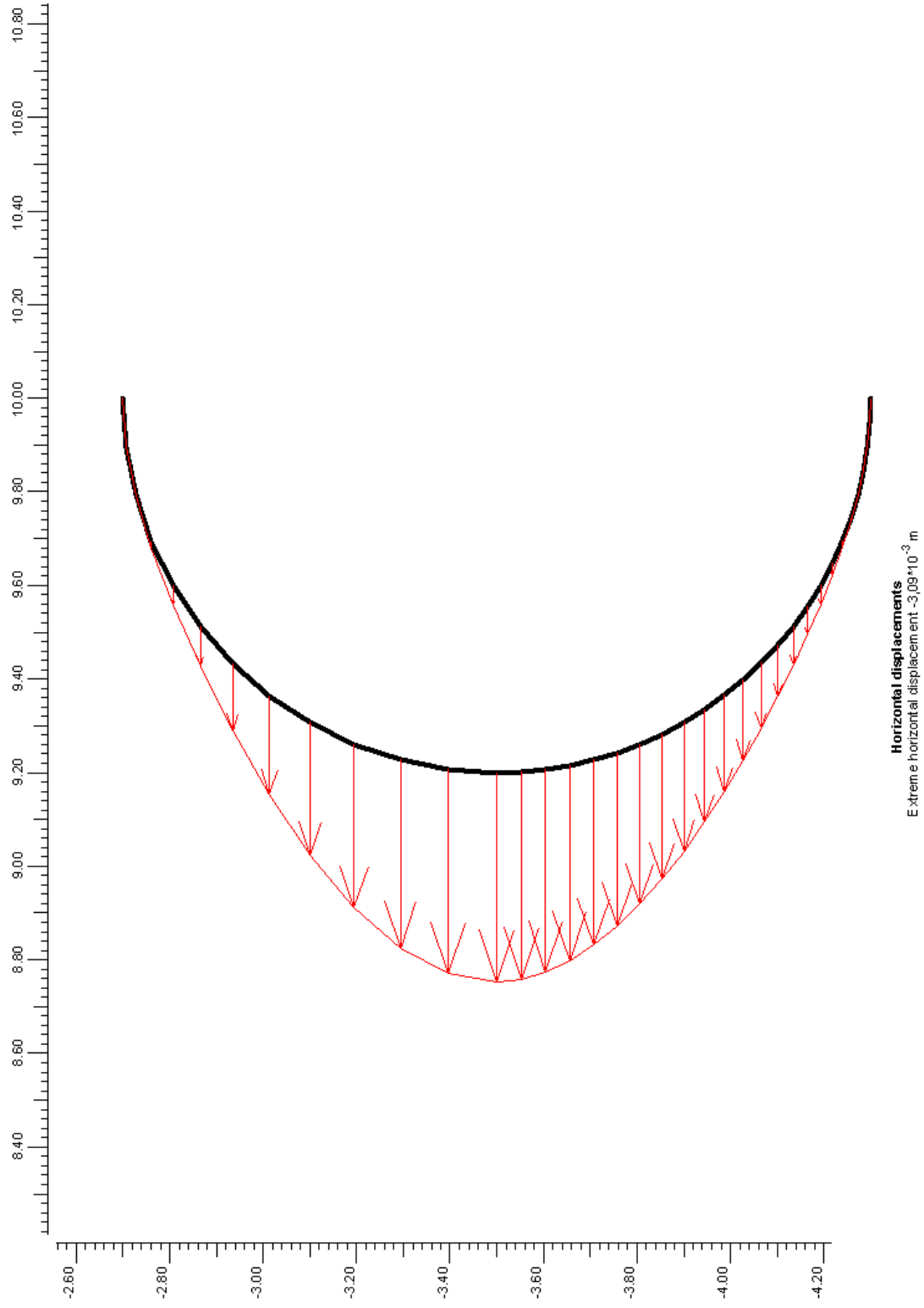
Şekil A.12 Rijit boruda oluşan yatay deformasyon örneği ($H=2,6 \text{ m}$, Gömlek malzemesi $E=10000 \text{ KN/m}^2$)



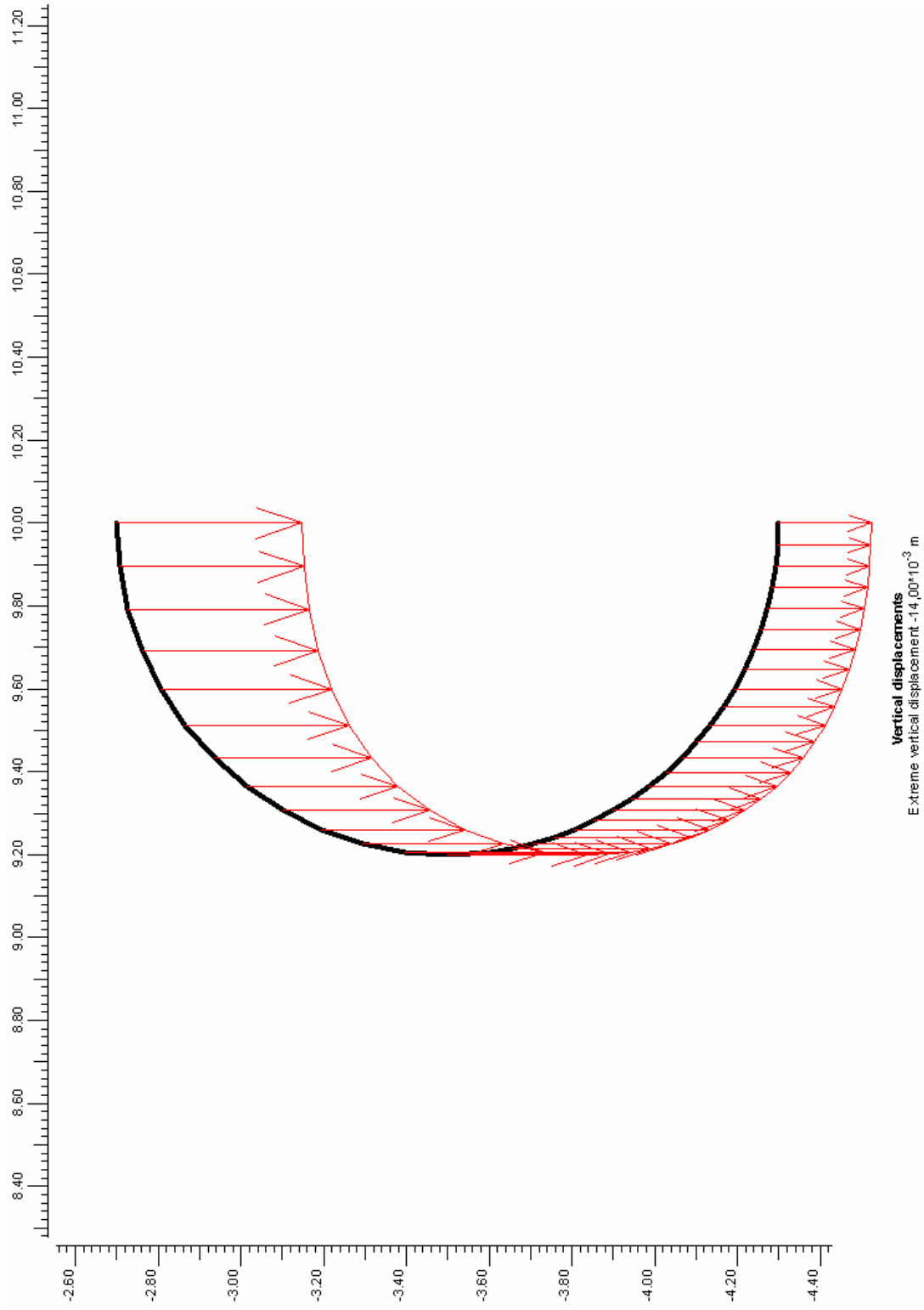
Şekil A.13 Rijit boruda oluşan düşey deformasyon örneği ($H=2,6 \text{ m}$, Gömlek malzemesi $E=10000 \text{ KN/m}^2$)



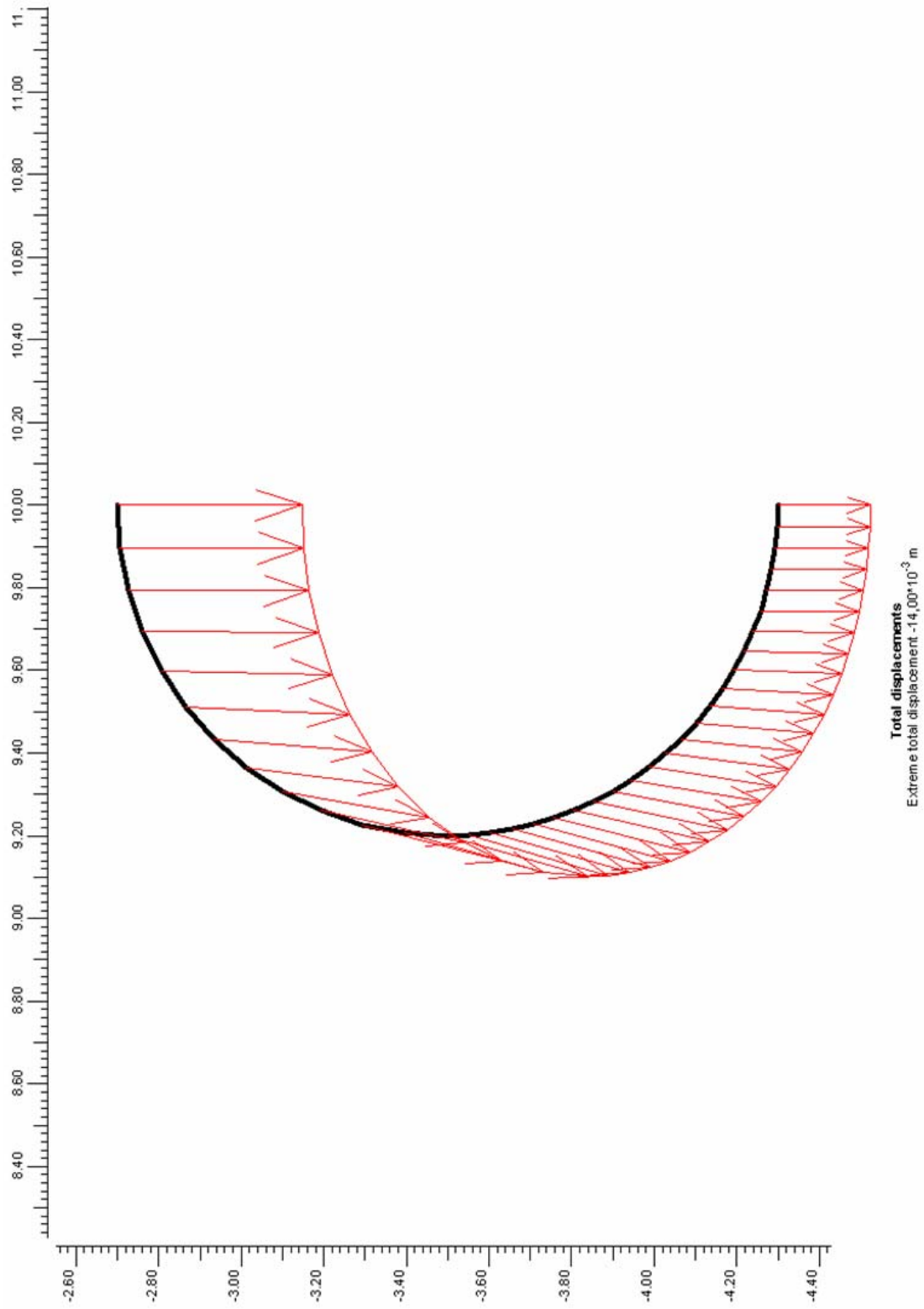
Şekil A.14 Rijit boruda oluşan toplam deformasyon örneği ($H=2,6 \text{ m}$, Gömlek malzemesi $E=10000 \text{ KN/m}^2$)



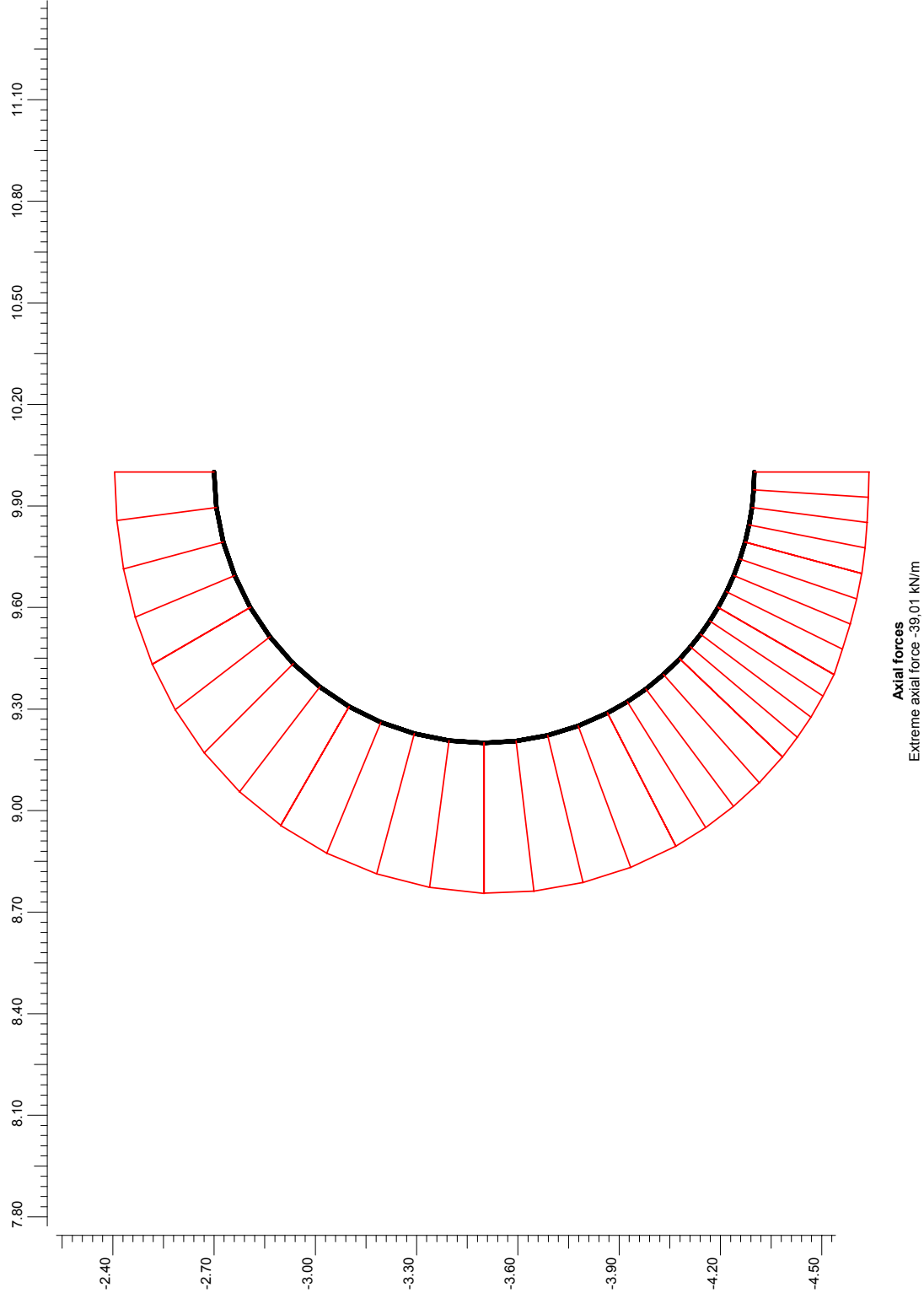
Şekil A.15 Fleksibl boruda oluşan yatay deformasyon örneği ($H=2,6$ m, Gömlek malzemesi $E=10000$ KN/m²)



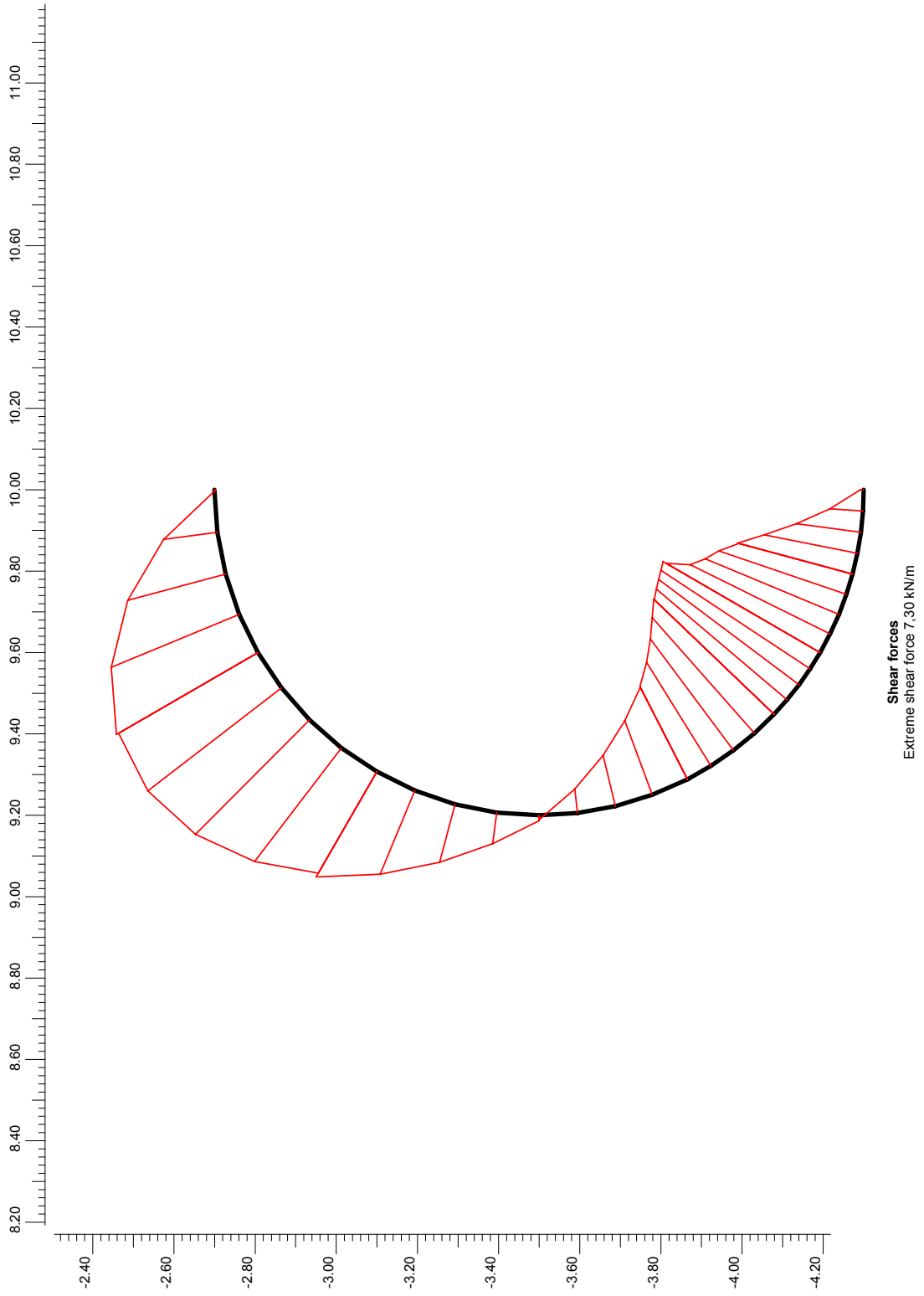
Şekil A.16 Fleksibl boruda oluşan düşey deformasyon örneği ($H=2,6$ m, Gömlek malzemesi $E=10000$ KN/m²)



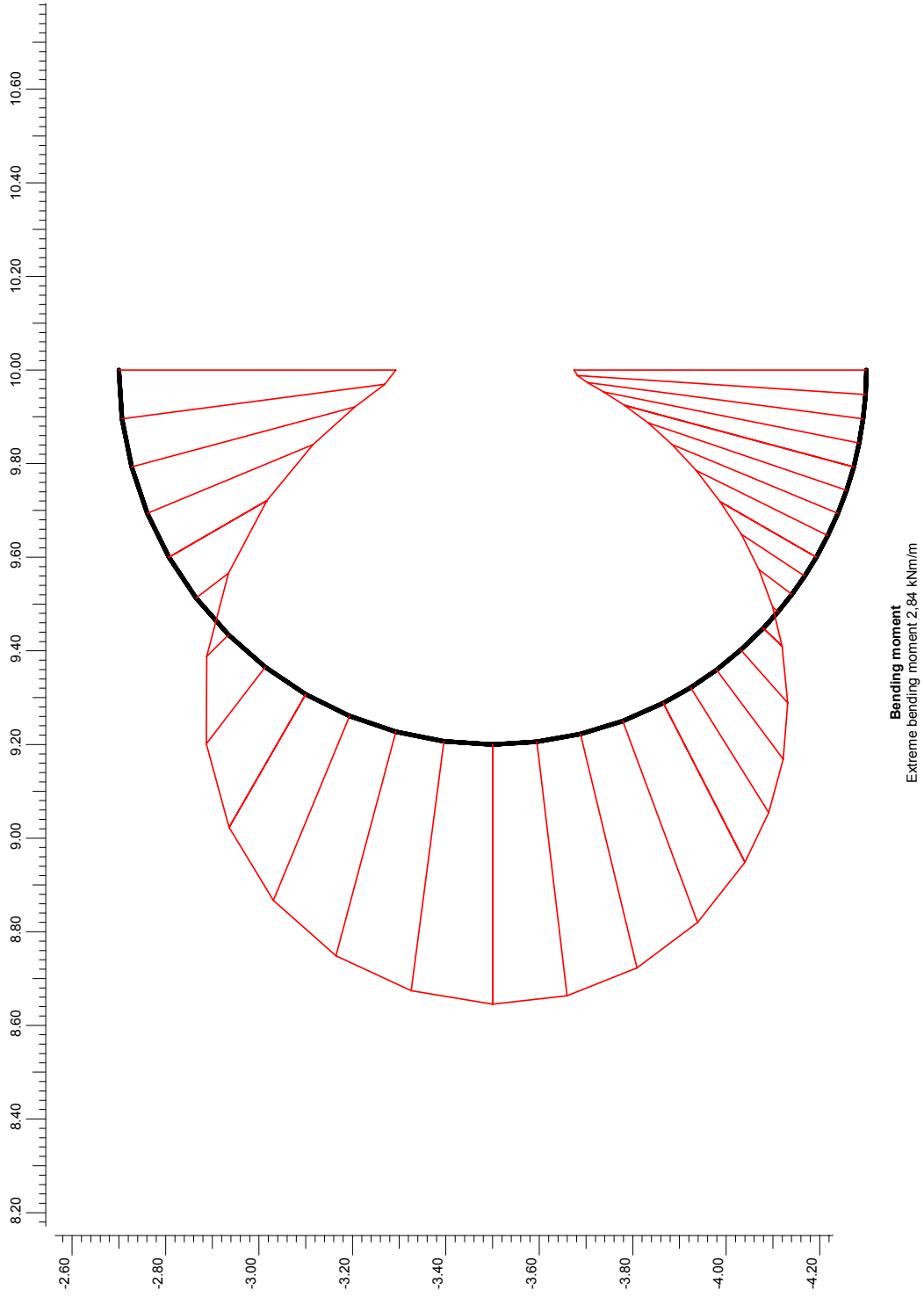
Şekil A.17 Fleksibl boruda oluşan toplam deformasyon örneği (H=2,6 m, Gömlek malzemesi E=10000 KN/m²)



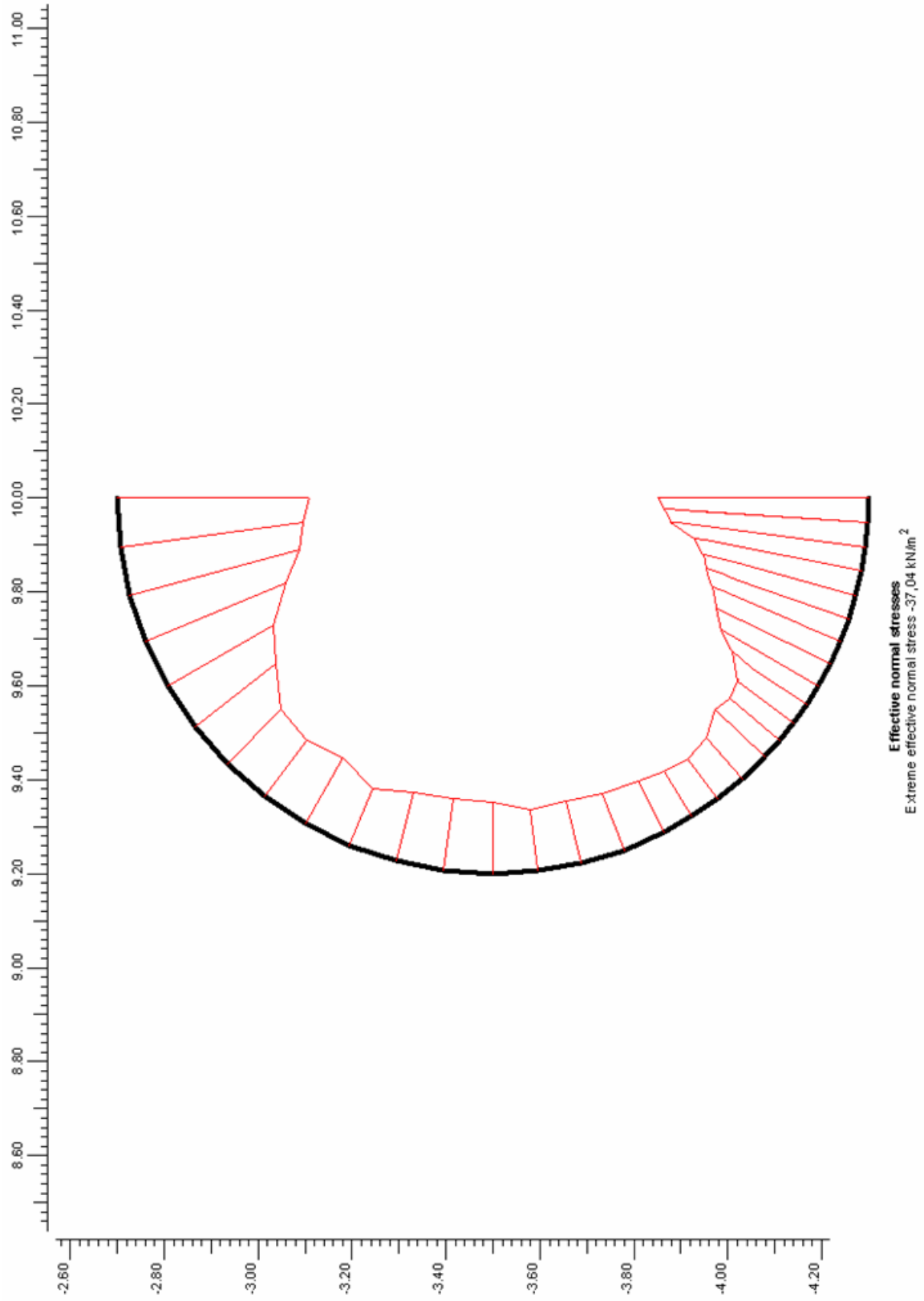
Şekil A.18 Boruya etkiyen eksenel kuvvet diyagramı örneği (Rijit boru, $H=2,6$ m, Gömlek malzemesi $E=10000$ KN/m²)



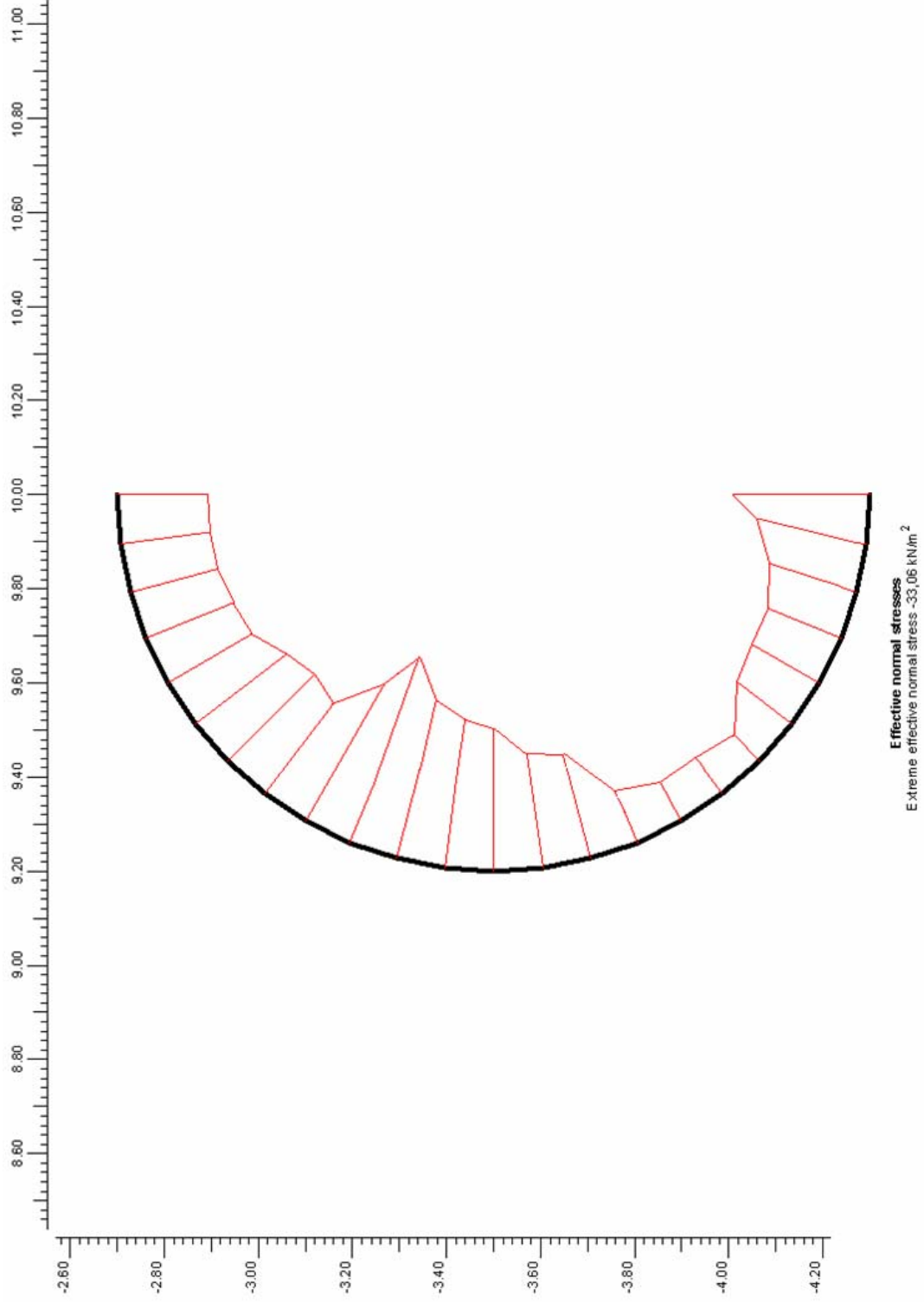
Şekil A.19 Boruya etkiyen kesme kuvveti diyagramı örneği ($H=2,6$ m, Gömlek malzemesi $E=10000$ KN/m²)



Şekil A.20 Boruya etkiyen eğilme momenti diyagramı örneği (Rijit boru, $H=2,6$ m, Gömlek malzemesi $E=10000 \text{ KN/m}^2$)



Şekil A.21 Rijit boruya etkiyen normal gerilme örneği (H=2,6 m, Gömlek malzemesi E=10000 kN/m²)



Şekil A.22 Fleksibl oruya etkiyen normal gerilme diyagramı örneği (H=2,6 m, Gömlek malzemesi E=10000 KN/m²)

EK B

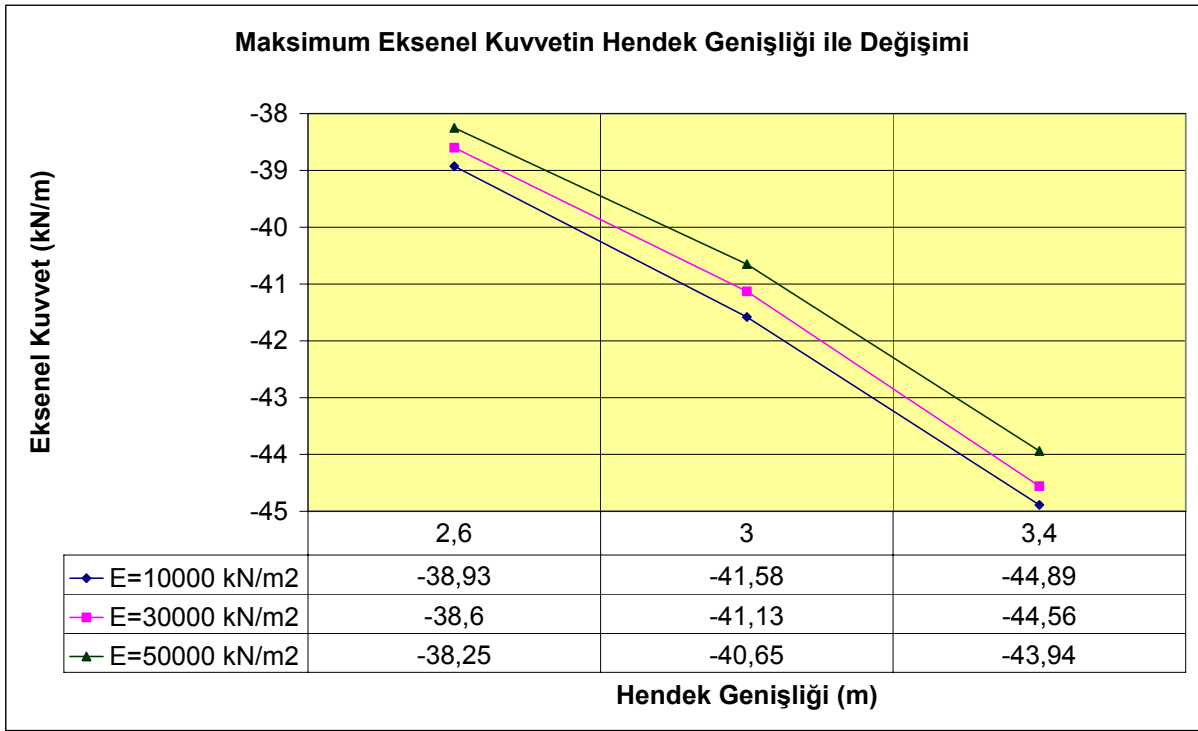
Tablo B.1 Rijt boru hesap sonuçları

Gömlek Malzemesi 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)			Marston Toprak yükü (kN/m)	Baru üzerindeki yük (PLAXIS) (kN/m)
			Üst		Alt	Üst		Alt	Üst		Alt	Üst		Alt		
			Orta	Alt	Orta	Alt	Orta	Alt	Orta	Alt	Orta	Alt	Orta	Alt		
10000	2,6	2,7	-25,96	-38,30	-29,64	-6,78	7,20	2,69	-2,51	2,85	-33,81	-19,46	-37,04		118,92	35,4
10000	3	2,7	-27,95	-41,58	-29,73	-8,1	8,56	3,33	-3,2	3,47	-38,75	-21,23	-45,42		138,73	39,49
10000	3,4	2,7	-28,92	-44,89	-29,84	-9,4	12,34	3,82	-3,89	4,11	-39,88	-24,21	-48,08		148,6	43,85
30000	2,6	2,7	-24,44	-38,6	-29,58	-6,05	6,71	2,47	-2,15	2,39	-33,57	-18,53	-31,48		118,92	34,85
30000	3	2,7	-26,78	-41,13	-29,6	-7,85	8,55	3,09	-2,85	3,13	-38,63	-20,21	-40,03		138,73	38,76
30000	3,4	2,7	-28,53	-44,58	-29,83	-9,27	11,85	3,76	-3,82	4,03	-39,48	-21,28	-45,91		148,6	43,39
50000	2,6	2,7	-23,64	-38,25	-29,01	-5,88	6,68	2,39	-2,01	2,28	-33,48	-17,97	-28,72		118,92	34,83
50000	3	2,7	-26,59	-40,85	-29,11	-7,47	8,2	3,01	-2,89	3,01	-38,21	-18,19	-38,21		138,73	38,48
50000	3,4	2,7	-28,28	-43,94	-29,28	-8,83	10,06	3,41	-3,23	3,59	-39,05	-19,73	-40,75		148,6	42,44

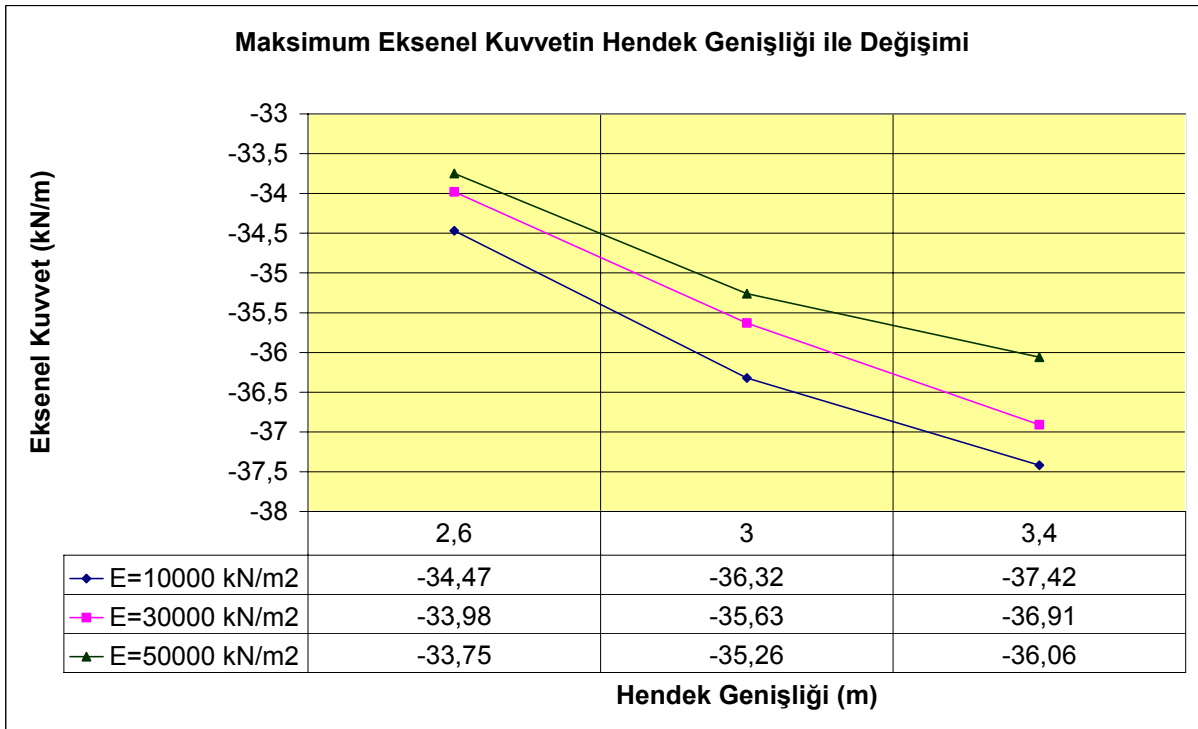
Tablo B.1 Fleksibl boru hesap sonuçları

Gömlek Malzemesi Elasticite Modülü (kN/m2)	Bd (m)	H (m)	Eksenel Kuvvet (kN/m)			Max. Kesme Kuvveti (kN/m)			Moment (kNm/m)			Normal Gerilme (kN/m2)			Marston Toprak yükü (kN/m)	Baru üzerindeki yük (kN/m)						
			Üst			Orta			Alt			Üst					Orta			Alt		
			Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt			Üst	Orta	Alt			
10000	2,6	2,7	-23,95	-34,47	-27,91	-3,43	3,78	1,09	-1,25	1,32	-14,64	-28,34	-18,21		86,48	28,1						
10000	3	2,7	-24,98	-36,32	-28,47	-3,82	3,94	1,11	-1,43	1,38	-15,05	-31,04	-18,65		86,48	30,78						
10000	3,4	2,7	-25,88	-37,42	-28,85	-4,02	4	1,19	-1,54	1,45	-15,31	-33,06	-21,06		86,48	34,57						
30000	2,6	2,7	-23,17	-33,86	-27,21	-2,75	3,47	1,04	-1,06	1,21	-13,61	-27,06	-17,41		86,48	27,65						
30000	3	2,7	-24,02	-35,63	-27,67	-2,93	3,7	1,05	-1,24	1,32	-14,31	-30,89	-17,88		86,48	30,21						
30000	3,4	2,7	-25,53	-36,91	-28,07	-3,08	3,83	1,12	-1,34	1,38	-14,92	-31,44	-20,31		86,48	33,19						
50000	2,6	2,7	-23,09	-33,75	-26,94	-2,86	2,8	1,01	-0,99	1,18	-11,44	-26,07	-16,97		86,48	27,36						
50000	3	2,7	-23,8	-35,26	-27,13	-2,86	3,33	1,01	-1,15	1,26	-11,51	-29,7	-17,42		86,48	29,7						
50000	3,4	2,7	-25,35	-36,06	-27,66	-2,81	3,8	1,07	-1,25	1,33	-11,74	-30,24	-19,5		86,48	32,55						

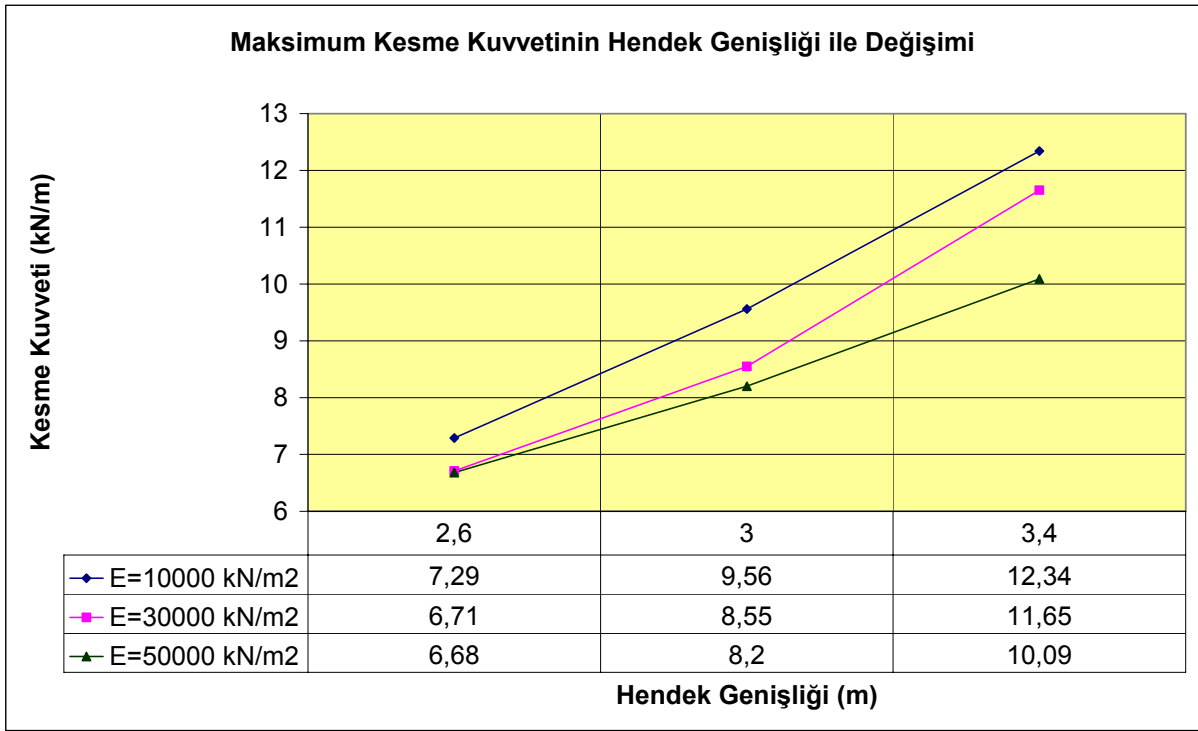
EK C



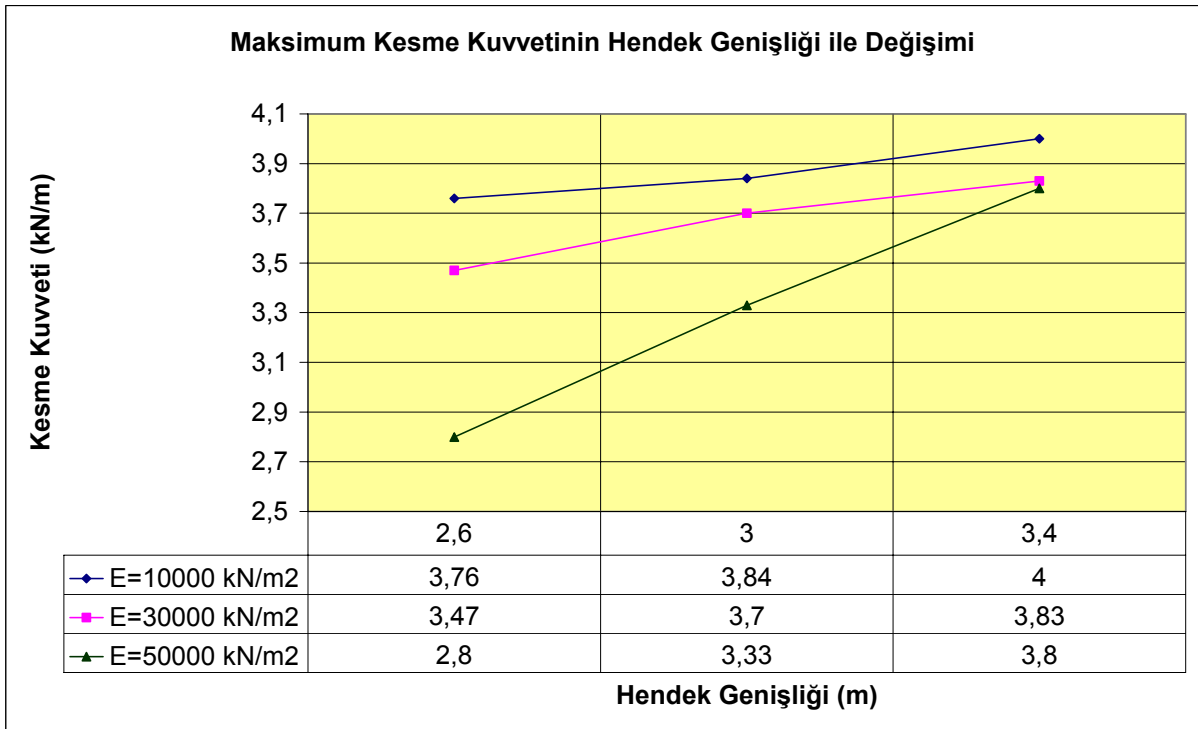
Şekil C.1 Rijit Boru İçin Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği ile Değişimi



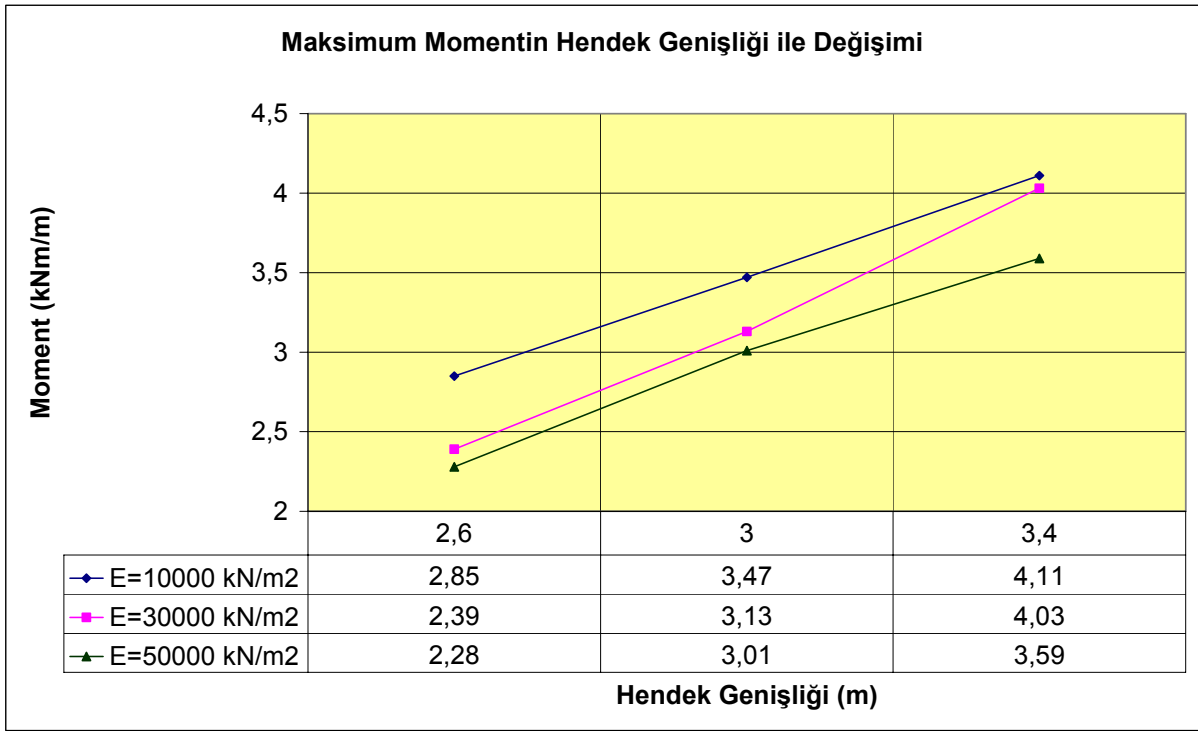
Şekil C.2 Fleksibl Boru İçin Maksimum Eksenel Kuvvetin Hendek Genişliği ile Değişimi



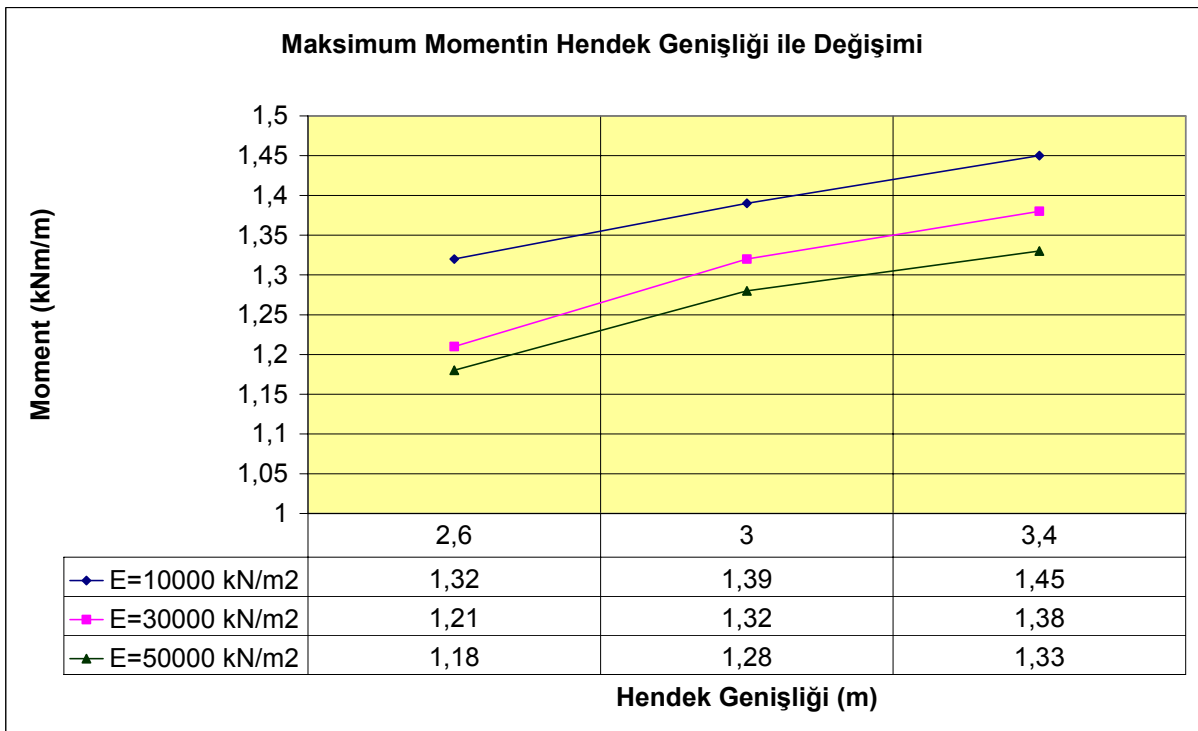
Şekil C.3 Rijit Boru İçin Maksimum Kesmel Kuvvetinin Hendek Genişliği ile Değişimi



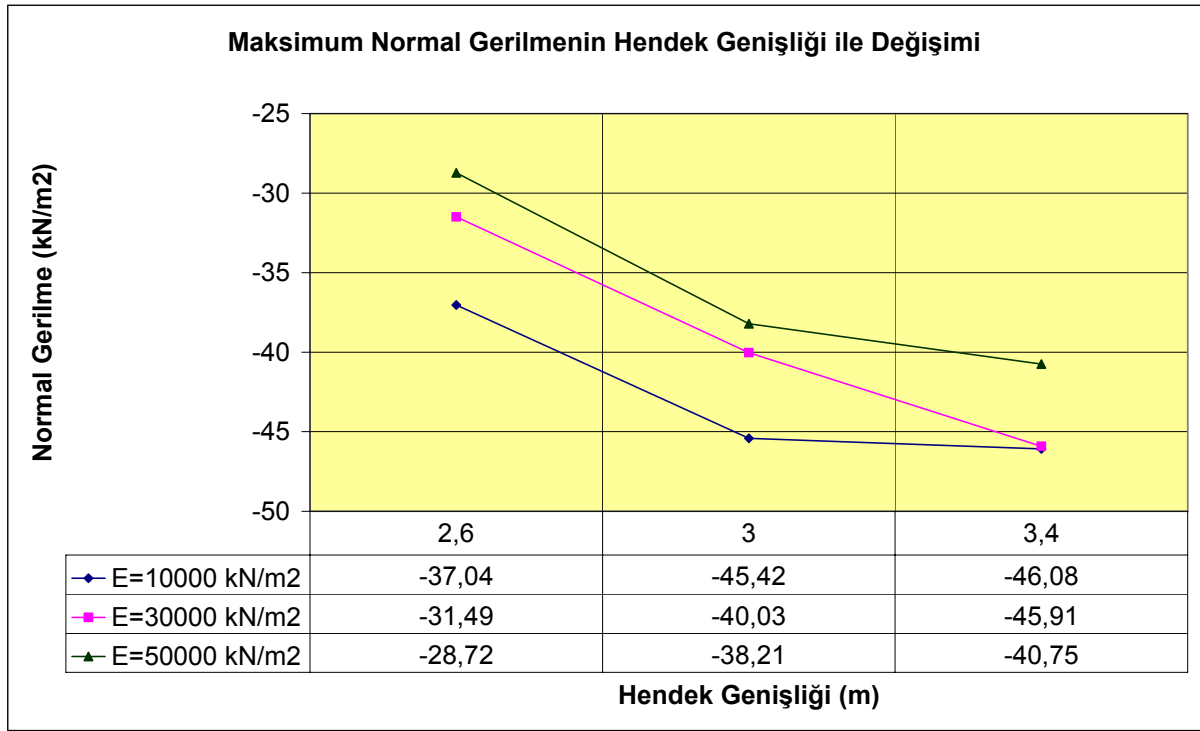
Şekil C.4 Fleksibl Boru İçin Maksimum Kesmel Kuvvetinin Hendek Genişliği ile Değişimi



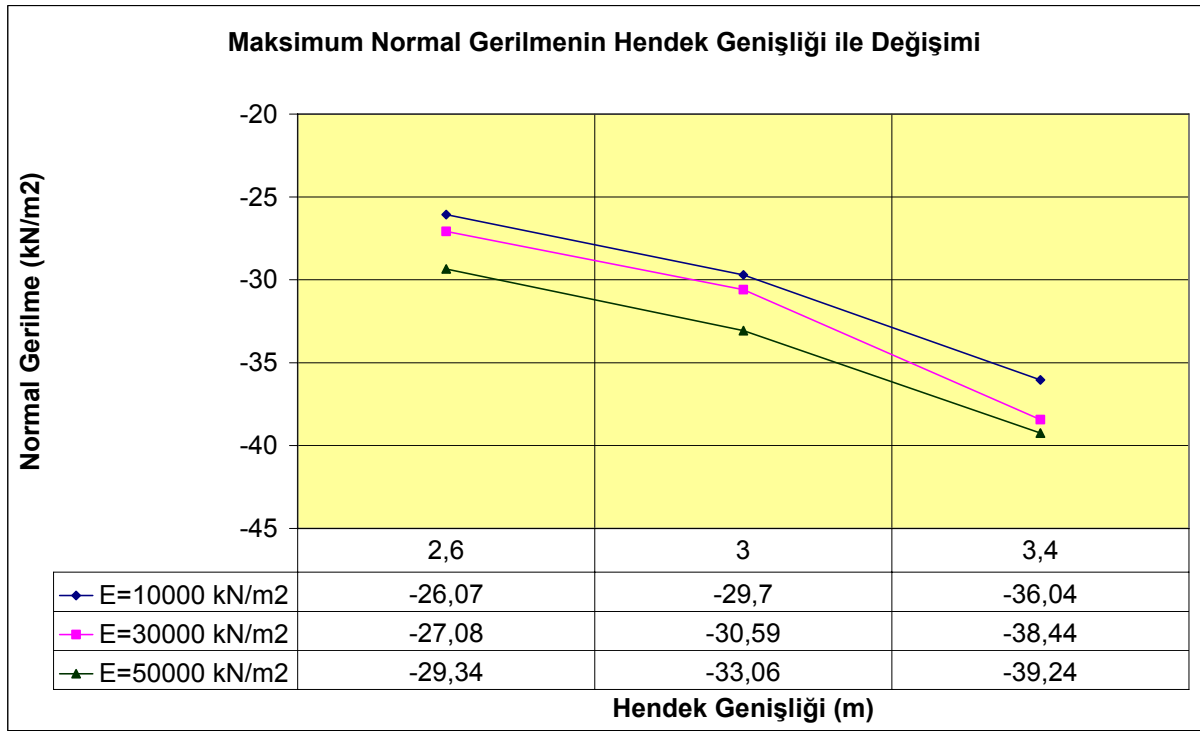
Şekil C.5 Rijit Boru İçin Maksimum Momentin Hendek Genişliği ile Değişimi



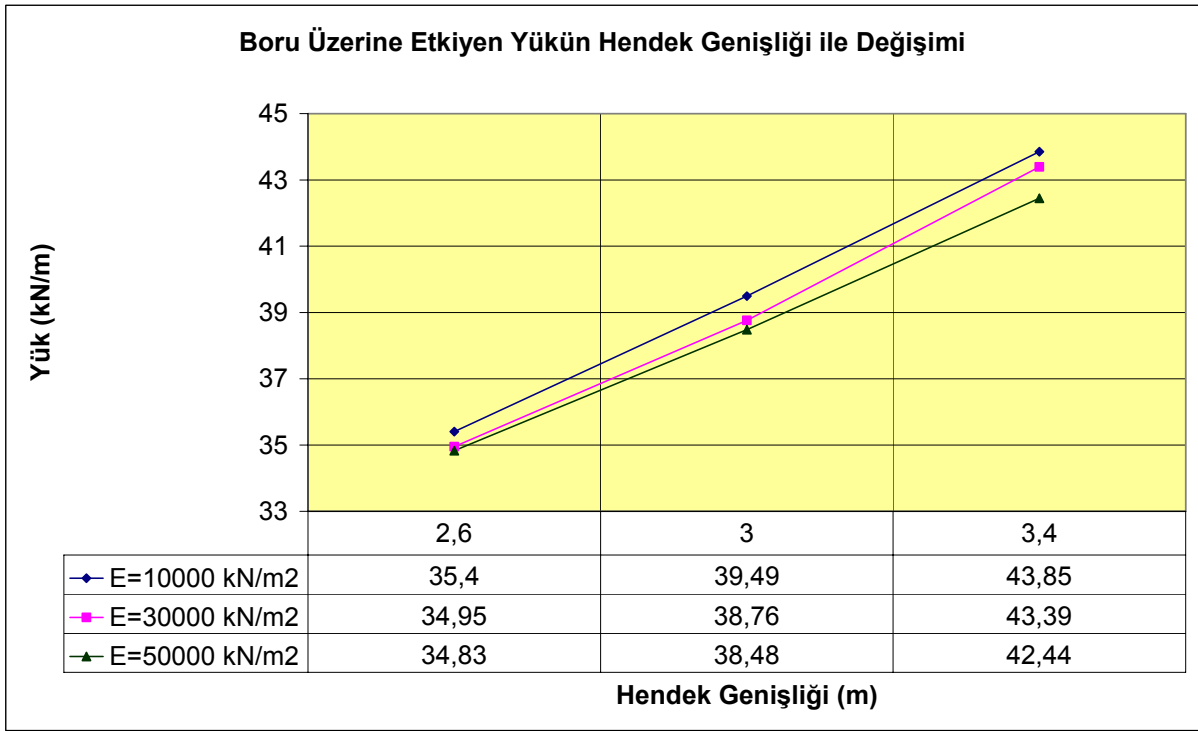
Şekil C.6 Fleksibl Boru İçin Maksimum Momentin Hendek Genişliği ile Değişimi



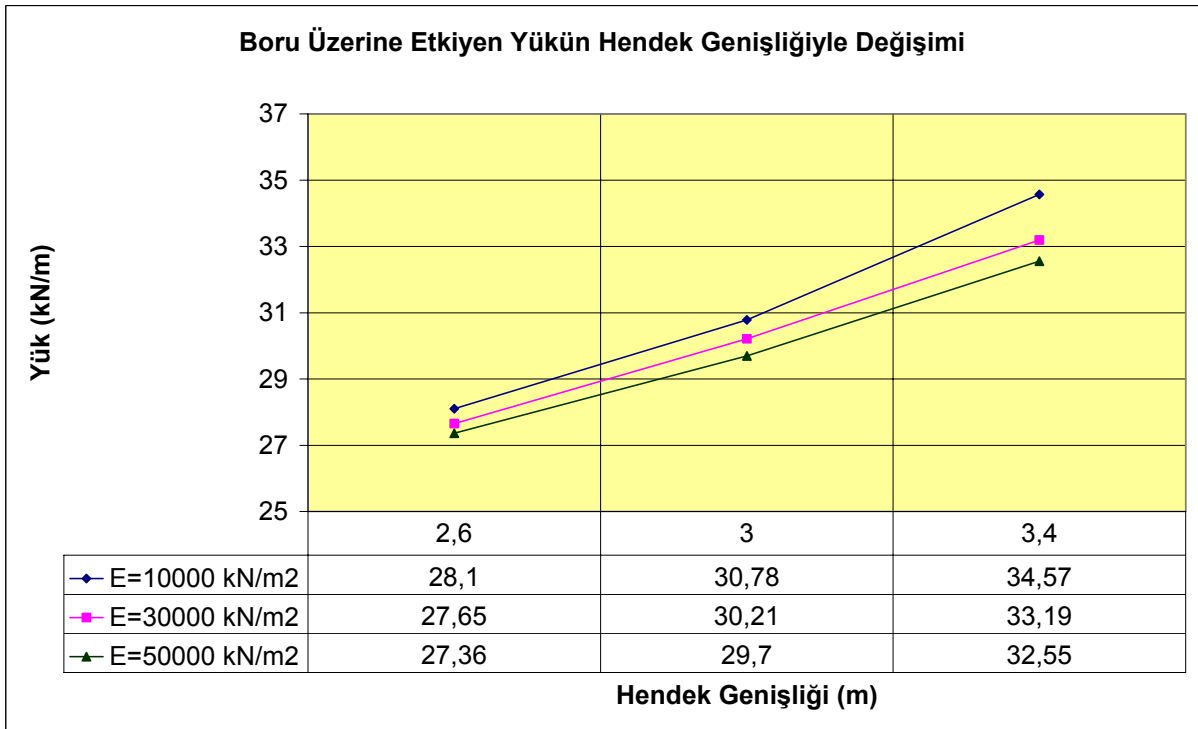
Şekil C.7 Rijit Boru İçin Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği ile Değişimi



Şekil C.8 Fleksibl Boru İçin Maksimum Normal Gerilmenin Hendek Genişliği ile Değişimi



Şekil C.9 Rijit Boru İçin Boru Üzerindeki Yükün Hendek Genişliği ile Değişimi



Şekil C.10 Fleksibl Boru İçin Boru Üzerindeki Yükün Hendek Genişliği ile Değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Ö. Gökhan Ayalp 1981 yılında Gaziantep’te doğdu. Orta ve lise eğitimini Gaziantep Anadolu Lisesi’nde gördükten sonra 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 2003 yılında lisans eğitimini tamamlayıp Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2004 yılında bir süre BTC Boru hattının Gürcistan kısmında çalıştıktan sonra 2005 yılında çalışmaya başladığı Moskova Sheremetyevo-3 Havaalanı Projesinde halen görev yapmaktadır.