İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BALTALİMANI-SARIYER ARASI SAHİL KUŞAKLAMA KOLLEKTÖRLERİ KAZILARINDA KULLANILAN MİKROTÜNEL MAKİNELERİNİN PERFORMANS VE İTME KUVVETLERİ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Ertan BOSTANCI

Anabilim Dalı : MADEN MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MADEN MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BALTALİMANI-SARIYER ARASI SAHİL KUŞAKLAMA KOLLEKTÖRLERİ KAZILARINDA KULLANILAN MİKROTÜNEL MAKİNELERİNİN PERFORMANS VE İTME KUVVETLERİ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ertan BOSTANCI
(505021015)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008

Tez Danışmanı : **Doç.Dr. Hanifi ÇOPUR**

Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Nuh BİLGİN (İ.T.Ü.)**

Prof.Dr. Mustafa ERDOĞAN (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Tez çalışması süresince gösterdiği anlayış ve yardımlardan dolayı tez danışmanım Sayın Doç.Dr.Hanifi Çopur'a, Baltalimanı-Sarıyer Sahil Kuşaklama Kollektörleri Projesi yüklenicisi Çelikler İnşaat A.Ş.nin yöneticilerine, proje mühendisi Sayın Nadir Omaç'a ve mikrotünel projesi ekibine, sahada gözlem çalışmalarını birlikte yürüttüğümüz lisans öğrencisi Sayın Mete Akın'a, çalışmalarıma destek olan Şube Müdürüm Sayın Mehmet Ali Aktürk'e, mesai arkadaşım Sayın Gürkan Kurt'a, ayrıca aileme, sevgi ve saygılarımı sunar, teşekkür ederim.

Haziran 2008 **Ertan BOSTANCI**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **vi**
TABLO LİSTESİ **vii**
ŞEKİL LİSTESİ **viii**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xii**
SUMMARY **xiv**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Genel 1
1.2. Amaç 2
1.3. Yöntem ve Kapsam 2

2. MİKROTÜNEL YÖNTEMİ **3**
2.1. Tanım ve Uygulama Esasları 3
2.2. Tarihsel Gelişim 4
2.2.1. Boru İtmenin Gelişimi 4
2.2.2. Mikrotünel Makinesinin Gelişimi 6
2.3. Mikrotünelciliğin Unsurları 7
2.3.1. Kazı Kısmı 7
2.3.2. Boru Hattı 8
2.3.2.1. İtme Boruları ve Özellikleri 8
2.3.2.2 Ara itme İstasyonları 9
2.3.3. İtme Kuyusu 9
2.3.3.1. İtme Ekipmanı 9
2.3.3.2. İtme Duvarı 9
2.3.4. Yerüstü Unsurları 9
2.4. Mikrotünelcilikte Verimliliği Etkileyen Faktörler 10
2.4.1. Kesici Kafa tipi 10
2.4.2. Operatör Deneyimi 10
2.4.3. Zemin Koşulları 10
2.4.4. Ara itme İstasyonu Kullanımı 11
2.4.5. Sürüş Uzunluğu 11
2.4.6 Ayrıştırma Ünitesi 11
2.4.7 Boru Uzunluğu 11
2.4.8. Jeoteknik Araştırmalar 12
2.4.9. Çamur Akış Hızı 12

2.4.10. Yağlama 12
2.4.11. Boru Malzemesi 12
2.4.12. Su Jetleri 12
2.4.13. Makine tipi 12
2.4.14. Yeraltı Suyu Koşulları 13
2.4.15. Boru Döşeme Derinliği 13
2.4.16. Hattın Doğrultusu 13
2.4.17. Teknik Destek 13
2.4.18. Kuyu Tasarımı 14
2.5. Mikrotünelcilik Metodunun Seçimi 14
2.5.1. Jeoteknik Koşullar 14
2.5.1.1. Çökme Potansiyeli 14
2.5.1.2. Doğal Zorluklar 14
2.5.1.3. Kazılan Malzeme ve Yeraltı Suyu 15
2.5.2. Boru Malzemeleri ve Ölçüleri 15
2.5.3. İtme Uzunluğu ve Derinlik 15
2.5.4. Yönlendirilebilme Kapasitesi 16
2.5.5. Saha Sınırlamaları 16

3. BALTALİMANI-SARIYER SAHİL KUŞAKLAMA KOLLEKTÖRLERİ VE BAĞLANTILARI İNŞAATI PROJESİ 17
3.1. Projenin Tanıtımı 17
3.2. Güzergahın Jeolojisi 19
3.3. Güzergahla İlgili Sondaj Verileri 21
3.3.1. İstinye-Yeniköy Arası Sondajlar 21
3.3.2. Yeniköy-Tarabya Arası Sondajlar 22
3.3.3. Tarabya-Kireçburnu Arası Sondajlar 22
3.3.4. Kireçburnu-Kefeliköy Arası Sondajlar 23
3.3.5. Kefeliköy-Sarıyer Arası Sondajlar 24
3.3.6. Rumelihisarı-Baltalimanı Arası Sondajlar 24
3.4. Kullanılan Ekipman ve Özellikleri 25
3.4.1. Mikrotünel Makinesi 25
3.4.1.1. Kesici Kafa 26
3.4.1.2. Yönlendirme Kafası 27
3.4.1.3. Makine Gövdesi 27
3.4.1.4. Kuyruk Borusu 28
3.4.2. Kuyu Ekipmanı 29
3.4.2.1. İtme Ekipmanı 29
3.4.2.2. Lazer Cihazı 30
3.4.3. Yüzey Ekipmanı 31
3.4.3.1. Kontrol Konteyneri 31
3.4.3.2. Çamur Ayırma Sistemi 32
3.4.3.3. Pompalar 33

3.4.4. Kuyular 35
3.4.5. Borular 36

4. PERFORMANS ANALİZİ 37
4.1. Genel 37
4.2. Yapılan Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları 39
4.2.1. Nokta Yük Dayanım İndeksi Deneyi 40
4.2.2. Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi(Brazilian) 41
4.2.3. Cerchar Aşındırıcılık İndeks Deneyi 42
4.2.4. İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nün Çalışmaları 43
4.2.5. Tez Kapsamında yapılan Çalışmalar 45
4.3. Gerçekleşen İlerlemeler 48
4.3.1. Hakedişlerden Elde Edilen İlerleme Hızları 51
4.3.2. Makine Kayıtlarından Elde Edilen İlerleme Hızları 53
4.3.3. Makinelerinin Yerinde İzlenmesi İle Belirlenen İlerleme Hızları 55
4.4. Günlük İlerleme Hızları İle İlgili Özet ve Tartışma 56

5. İTME KUVVETLERİ ANALİZİ 59
5.1. Penetrasyon Direnci 60
5.2. Sürtünme Direnci 60
5.3. İtme Kuvvetlerine Etki Eden Faktörler 61
5.3.1. Zemin Tipi 61
5.3.2. Yeraltı Suyu 61
5.3.3. Aşırı Kazı 62
5.3.4. Yağlama 62
5.3.5. Doğrultu Sapmaları 63
5.3.6. Duraklamalar 65
5.3.7. Boru Kaplamaları 65
5.3.8. Membranlar 65
5.3.9. Ara İtme İstasyonları 66
5.4. İtme Kuvvetlerinin Tahmini 67
5.4.1. İtme Kuvvetlerinin Teorik Tahmini 67
5.4.2. İtme Kuvvetlerinin Tahmininde Kullanılan Empirik Yöntemler 74
5.4.3. Gerçekleşen ve Tahmin Edilen İtme Kuvvetlerinin Karşılaştırması 77
5.4.3.1 Kayada Gerçekleşen ve Tahmin Edilen İtme Kuvvetleri 77
5.4.3.2 Yumuşak Ortamda Gerçekleşen ve Tahmin Edilen İtme Kuvvetleri 79
5.5. İtme Kuvvetleri İle İlgili Özet ve Tartışma 85

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 87
KAYNAKLAR 91
EKLER 94
ÖZGEÇMİŞ 131

KISALTMALAR

ASTM **:** American Society for Testing and Materials
ATV **:** Abwassertechnische Vereinigung e.V
CSM **:** Colorado School of Mines
EPB : Earth Pressure Balance
İSKİ **:** İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü
İTÜ **:** İstanbul Teknik Üniversitesi
NTNU **:** Norwegian University of Science and Technology
PJA **:** The Pipe Jacking Association
RQD **:** Rock Quality Designation
SPT **:** Standard Penetration Test
TCR **:** Total Core Recovery

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1	Pasa basınçlı ve çamur basınçlı makinelerin karşılaştırması……..	7
Tablo 3.1	Projede çalışan personel……..	19
Tablo 3.2	İstinye-Sarıyer arası sondaj çalışması bölgeleri……..	21
Tablo 3.3	İstinye-Yeniköy arası sondajlar……..	22
Tablo 3.4	Yeniköy-Tarabya arası sondajlar…….....	22
Tablo 3.5	Tarabya-Kireçburnu arası sondajlar…….....	23
Tablo 3.6	Kireçburnu-Kefeliköy arası sondajlar……..	23
Tablo 3.7	Kefeliköy-Sarıyer arası sondajlar…….....	24
Tablo 3.8	Rumelihisarı Branşman Tüneli sondajları……..	25
Tablo 3.9	Herrenknecht AVN600XC makinesinin teknik özellikleri….....	26
Tablo 3.10	Kesice kafa özellikleri……	27
Tablo 3.11	Kuyruk borusu teknik özellikleri…….....	28
Tablo 3.12	İtme ekipmanı teknik özellikleri…….....	29
Tablo 3.13	Lazer cihazı teknik özellikleri…….....	31
Tablo 3.14	Makine odasındaki ekipmanın teknik özellikleri……..……	32
Tablo 3.15	Çamur ayırma ekipmanın teknik özellikleri……...	33
Tablo 3.16	Çamur pompasının teknik özellikleri…….....	34
Tablo 3.17	Besleme pompasının teknik özellikleri…….....	34
Tablo 3.18	Bentonit pompasının teknik özellikleri……..	35
Tablo 3.19	Enjeksiyon pompasının teknik özellikleri……..	35
Tablo 3.20	Boruların teknik özellikleri…….....	36
Tablo 4.1	Performans tahmin modelleri…….....	37
Tablo 4.2	Cerchar Aşınma İndeksine göre kayaç aşındırıcılıkları……..	43
Tablo 4.3	Nokta Yük Dayanımı (eksenel) deney sonuçları…….	43
Tablo 4.4	Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deney sonuçları……..……	44
Tablo 4.5	Nokta Yük Dayanımı deney sonuçları……	46
Tablo 4.6	Dolaylı Çekme Dayanımı deney sonuçları…….....	47
Tablo 4.7	Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deney sonuçları……..….....	48
Tablo 4.8	Bölgelere göre mikrotünel gerçekleşme oranları…….....	49
Tablo 4.9	Bölgelere göre kazıyla ilgili açıklamalar…….....	50
Tablo 4.10	Hakediş dönemlerinin tarih aralıkları…….....	52
Tablo 4.11	Hakediş dönemlerine göre boru döşeme işleri…….....	52
Tablo 4.12	12.04.2006 tarihinde gerçekleşen boru itişleri…….....	54
Tablo 4.13	Gözlem yapılan sürüşlerde günlük ilerlemeler……	56
Tablo 4.14	Tespit kaynaklarına göre makine ilerlemeleri……	58
Tablo 5.1	Sürtünme katsayıları……	71
Tablo 5.2	Zemin parametreleri…….....	73
Tablo 5.3	Chapman-Ichioka tahmin metodunda kullanılan ‘a’ değerleri.....	75
Tablo 5.4	Zemin türlerine göre C_a ve C_f değerleri…….....	76
Tablo 5.5	Kayada gerçekleşen ve tahmin edilen toplam itme kuvvetleri……	77
Tablo 5.6	Karşılaşılan zemin tipleri için kullanılan hesap değerleri……..	79
Tablo 5.7	Yumuşak ortamda gerçekleşen ve tahmin edilen itme kuvvetleri...	80

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Mikrotünel yöntemi……..	3
Şekil 3.1	Mikrotünel güzergahı……...	18
Şekil 3.2	Mikrotünel makinesinin kısımları ve genel görünüşü……..	25
Şekil 3.3	Mikrotünel makinesi kesici kafası ……..	27
Şekil 3.4	Lazer hedefinin konumu……...	28
Şekil 3.5	Kuyruk borusu görünüşü……..	28
Şekil 3.6	İtme ekipmanı görünüşü……...	29
Şekil 3.7	Lazer cihazı……..	30
Şekil 3.8	Çamur ayırma sistemi görünüşü……...	33
Şekil 3.9	Çamur pompası……	33
Şekil 3.10	Besleme pompası……..	34
Şekil 3.11	Prekast kuyu…….	36
Şekil 3.12	Kullanılan itme borusu…….	36
Şekil 4.1	Nokta Yük Dayanım İndeksi deney ekipmanı……..……....	40
Şekil 4.2	Dolaylı Çekme Dayanımı deney seti……...	41
Şekil 4.3	Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deney seti……..……	42
Şekil 4.4	Numunelerin kırılma şekilleri……..	44
Şekil 4.5	Kalender Bölgesi'ndeki makine kurtarma çalışması……	45
Şekil 4.6	Yeniköy Bölgesi'ndeki açık kazı çalışması……..…...	46
Şekil 4.7	ELE marka deney presi……	47
Şekil 4.8	Örneklerin deney öncesi ve sonrası görünüşü……..	48
Şekil 4.9	Bölgelere göre boru döşeme işinin dağılımı…….	49
Şekil 4.10	Bölgelere göre mikrotünel ve açık kazı miktarları……...	50
Şekil 4.11	Bölgelere göre ortalama günlük ilerlemeler…….	53
Şekil 4.12	BLTA13-BLTA14 kuyuları arası günlük ilerlemeler……..	54
Şekil 4.13	Gözlemlenen sürüşlerdeki zaman dağılımı……..	55
Şekil 5.1	Boru itme esnasında oluşan kuvvetlerin temel gösterimi…….	59
Şekil 5.2	Makine kesici kafasına etki eden zemin ve su basınçları…….	60
Şekil 5.3	Boru ile kazı hattı arasındaki boşluk……	62
Şekil 5.4	Yağlamanın itme kuvvetleri üzerindeki etkisi……..	63
Şekil 5.5	Sapma yönüne bağlı olarak boru üzerinde oluşan gerilmeler……..	64
Şekil 5.6	Sapmaların sürtünme ve itme kuvveti üzerine etkisi……	64
Şekil 5.7	Kaplama yapılmış borular……	65
Şekil 5.8	Mikrotünel hattında membran uygulaması……...	66
Şekil 5.9	Ara itme istasyonu kullanımı……...	66
Şekil 5.10	Ara itme istasyonlu ve istasyonsuz sürüşler…….	67
Şekil 5.11	Boru üzerine etkiyen kuvvetler(Auld)……..	69
Şekil 5.12	Boru üzerine etkiyen kuvvetler(ATVA)……...	70
Şekil 5.13	Kaya ve sert zeminlerde itme borularının zemin ile etkileşimi …..	74

Sayfa No

Şekil 5.14	Kayada gerçekleşen ortalama itme kuvvetleri……..	78
Şekil 5.15	Gerçekleşen ve tahmin edilen itme kuvvetlerinin ilişkisi…….	78
Şekil 5.16	RHA08-RHB12 kuyuları arasında itme kuvveti değişimi……	79
Şekil 5.17	Yumuşak ortamda gerçekleşen itme kuvvetleri……...	82
Şekil 5.18	Kum-çakılda gerçekşen itme kuvvetlerinin dağılımı……...	82
Şekil 5.19	Dolguda gerçekleşen itme kuvvetlerinin dağılımı……	83
Şekil 5.20	Çamurda gerçekleşen itme kuvvetlerinin dağılımı……...	83
Şekil 5.21	Chapman-Ichioka değerleri ile gerçek değerlerin ilişkisi ……	84
Şekil 5.22	Tahmin edilen kuvvetlerin gerçekleşenlere oranı…….	84

SEMBOL LİSTESİ

ICR	:Net kazı hızı
P	:Kesici kafa gücü
$\mathbf{SE_{opt}}$	:Optimum spesifik enerji
$\mathbf{k_e}$	:Enerji transfer oranı
$\mathbf{I_s}$	:Nokta yükü dayanımı indeksi
$\mathbf{d_e}$	:Eşdeğer karot çapı
F	:Kırılma yükü
$\boldsymbol{\sigma_t}$	:Çekme dayanımı
d	:Örneğin çapı
$\boldsymbol{l}$	:Örneğin uzunluğu
$\boldsymbol{F_t}$	:Toplam itme kuvveti
$\boldsymbol{F_p}$	:Penetrasyon kuvveti
$\boldsymbol{F_r}$	:Sürtünme kuvveti
R	:Aşırı kazı oranı
$\mathbf{D_e}$	:Kazı çapı
$\mathbf{D_p}$	:Boru dış çapı
$\boldsymbol{f}$	:Sürtünme katsayısı
$\boldsymbol{N}$	:Normal kuvvet
$\boldsymbol{\gamma}$	:Zeminin birim ağırlığı
K	:Arazi basıncı katsayısı
$\boldsymbol{\varphi}$	:İçsel sürtünme açısı
B	:Etkilediği varsayılan zemin genişliğinin yarı uzunluğu
h	:Boru üzerindeki zeminin yüksekliği
b	:Boru üzerindeki yük prizmasının ideal genişliği
$\boldsymbol{\delta}$	:Sürtünme açısı
c	:Kohezyon
$\mathbf{D_s}$	:Mikrotünel makinesi kalkan çapı
$\boldsymbol{\sigma_v}$	:Düşey arazi basıncı

σ_h :Yatay arazi basıncı

L :İtme mesafesi

σ_s :Yüzey yüklerinden kaynaklanan basınç

κ :Arazi yükü indirgeme faktörü

$\gamma_1, \gamma_2,..,\gamma_n$:Boru üzerindeki zemin türlerinin her birinin birim ağırlığı

$h_1, h_2,.,h_n$:Boru üzerindeki zemin türlerinin her birinin kalınlığı

σ_w :Su basıncı

σ'_h :Efektif yatay arazi basıncı

σ'_v :Efektif düşey arazi basıncı

h_w :Hat üzerindeki su tablasının yüksekliği

W_P :Boru hattının ağırlığı

ζ :Boru ile kaya etkileşiminin olduğu noktanın düşeyle yaptığı açı

a :Chapman_Ichioka yönteminde empirik katsayı

P_p :Ayna basıncı

P_r :Sürtünme basıncı

A_p :Boru çevresi

C_a: :Zeminin birim ağırlığının indirgeme faktörü

C_f: :Zeminin sürtünme açısının indirgeme faktörü

BALTALİMANI SARIYER ARASI SAHİL KUŞAKLAMA KOLLEKTÖRLERİ KAZILARINDA KULLANILAN MİKROTÜNEL MAKİNELERİNİN PERFORMANS VE İTME KUVVETLERİ ANALİZİ

ÖZET

İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından, Rumeli Hisarı ile Sarıyer Merkez Mahallesi arasındaki kıyı şeridinden doğrudan İstanbul Boğazı'na deşarj edilen ve kirliliğe neden olan atık suların önlenmesi amacıyla kuşaklama kollektörleri projesi yapılmıştır. Bu proje kapsamında, Rumelihisarı-Kefeliköy arası ana hattı 600 mm iç çapa sahip olan boru döşeme işi büyük oranda 2 adet mikrotünel makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu mikrotünel makineleri, proje yüklenicisi Çelikler İnşaat A.Ş. tarafından Alman Herrenknecht firmasından tüm ekipmanı ile birlikte alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında;

-Mikrotünelciliğin genel uygulama esasları, unsurları ve tarihsel gelişimi anlatılarak, projenin gerçekleştirildiği güzergahın jeolojik yapısı ve projede kullanılan AVN600 tipi çamur basınçlı makine ile tüm ekipmanın teknik özellikleri verilmiştir.

-Rumelihisarı, Baltalimanı, Emirgan, İstinye, Yeniköy, Kalender, Tarabya ve Kireçburnu olmak üzere 8 bölge ismi altında gerçekleşen kazıların mikrotünel makinesiyle yapılan miktarları çıkartılarak, tüm proje için kazı performansı ortaya konmuştur. Buna göre; mikrotünel makineleri ile 6776 m'lik hattın 6196 m'lik kısmı (%91,4) sürülmüştür, geriye kalan 580 m'lik(%8,6) kısım ise mikrotünel makinelerinin kaya kazısında başarısız olmasından dolayı ekskavatörle gerçekleştirilmiştir.

-Kazı makinelerinin performans incelemesine yönelik olarak, projeyle ilgili dökümanlar incelenerek kazının gerçekleştiği zemin türleri ortaya çıkartılmıştır. Hakedişler, günlük raporlar, makine kayıtları ve makinenin izlenmesi sayesinde makine ilerlemeleri tespit edilmiştir.

Tutulan günlük raporlara ve makine kayıtlarına göre 8,71 m/gün, hakediş raporlarına göre; toplamda 7,99 m/gün ve makine başına 5,16 m/gün ilerleme hızları, saha gözlemlerine göre ise anrojman kayada 0,32 m/saat ve dolguda 0,83 m/saat net kazı hızları hesaplanmıştır. Yine sahada yapılan gözlemler ile, makine kullanım oranının anrojman kayada yapılan sürüşde %28, dolguda yapılan sürüşlerde %53 (3 sürüşün ortalaması) olduğu belirlenmiştir. Yumuşak ortamda gerçekleşen 10 sürüşe ait makine kayıtlarından; boru itme süreleri otalaması 20,1 dakika, net kazı hızları ortalaması 7,11 m/saat olarak hesaplanmıştır.

-Makinenin kazmakta başarısız olduğu bazı kesimlerden numuneler alınarak, Nokta Yük Dayanım İndeksi, Dolaylı Çekme Dayanımı ve Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deneyleri yapılmıştır. BLT-A11 nolu kuyu yakınından alınan kaya numunelerin ortalama basınç dayanımının 124 MPa ve çok az aşındırıcı özellikte olduğu, makinenin ilerleme yapamadığı YKD02-YKD03 kuyuları arasından alınan kaya numunesinin ortalama basınç dayanımının 165 MPa ve çok az aşındırıcı özellikte olduğu, KLB07-KLB08 kuyuları arasından alınan kaya numunelerin ortalama basınç dayanımının 93 MPa ve az aşındırıcı özelliğe sahip olduğu görülmüştür.

-Kayada gerçekleşen sürüşlerde metre başına gerekli olan itme kuvveti ortalama; 2,27 ton, yumuşak ortam diye tabir edilen; dolgu, kum-çakıl ve çamur içerisindeki sürüşlerde sırasıyla 1,81 ton, 1,74 ton ve 2,20 ton olarak hesaplanmıştır.

-Gerçekleşen itme kuvvetleri, teorik ve emprik yöntemlere göre elde edilen tahmin değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yumuşak ortamlarda gerçek kuvvetlere göre; Terzaghi(Japonya), ATVA(Almanya) ve PJA(İngiltere) teorik yöntemleri sırasıyla; 4,7, 3,8 ve 3,5 kat, Chapman-Ichioka ve Bannet empirik yöntemleri ise sırasıyla; 1,6 ve 0,9 kat itme kuvveti değeri vermiştir. Dolayısıyla empirik yöntemlerden elde edilen değerler gerçek değerlere daha yakındır. Kayada(kireçtaşı) ise; keskilerin üzerine alabileceği yükler ile boru ve makine ağırlığından dolayı meydana gelen sürtünme göz önüne alınarak itme kuvvetleri hesaplanmıştır. Tahmin edilen itme kuvvetleri gerçekleşen itme kuvvetinin 0,84 katı bulunmuştur.

THE ANALYSIS OF JACKING FORCES AND THE PERFORMANCE OF MICROTUNNELLING MACHINES THAT WERE USED IN THE CONSTRUCTION OF BALTALİMANI-SARIYER COAST BANDING COLLECTORS AND CONNECTIONS

SUMMARY

The Collector Project is carried out by Istanbul Water and Sewage Administration General Management (İSKİ) in order to prevent waste water from being discharged directly into the Istanbul Bosphorus hence causing pollution along the coastline between Rumelihisarı and Sarıyer District Center. Within this project, the pipeline installment work of 600 mm internal diameter pipes in the main line between Rumelihisarı and Kefeliköy is performed mostly by two microtunnelling machines. These microtunnel machines with auxiliaries were bought by project contractor Çelikler İnşaat A.Ş. from German Firm Herrenknecht.

In the contex of the study; the following tasks are performed;

-General application principles and historical development of microtunneling are described, geological structure of the Project route and technical specifications of slurry type AVN600 model machines used in this Project are summarized.

-Daily excavation rates achieved by microtunneling in the 8 regions named by Rumelihisarı, Baltalimanı, Emirgan, İstinye, Yeniköy, Kalender, Tarabya and Kireçburnu are estimated and excavation performance for the whole Project is summarized . As a result, the part of 6196 m (91,4%) of the whole 6776 m pipeline is driven by microtunneling machines, the rest part of 580 m (8,6%) is driven by an excavator because of microtunnelling machines failure to excavate the hard rock formation.

-The excavated ground types are revealed by reviewing documents related to this Project according to excavating machine performance analysis. Advance rates of the machines are detected through the follow-up of daily reports, payment documentaries, machine records and observations of the machine in the field.

Advance rates are calculated as 8,71 m/day with reference to daily reports and machine records; totally 7,99 m/day and 5,16 m/day per machine with reference to payment documentaries. Net cutting rates are calculated as 0,32 m/h in filled rock and 0,83 m/h in fill ground with reference to field observations. According to field observations machine utilisation time is estimated as 28% in the drive through filled rock and 53% (average of 3 drives) in the drive through fill ground. Average drive time of the pipe is calculated as 20,1 minute and average of net cutting rates is calculated as 7,11 m/h according to the machine records of 10 drives achieved in soft ground.

-Samples are obtained from the site where the machine is unable to operate and Point Load Index, Brazilian Tensile Strength and Cerchar Abrasivity Index tests are carried out. Average compressive strength of rock samples from BLT-A11 shaft is estimated as 124 MPa and its abrasivity is found out to be slightly abrasive. Average compressive strength of rock samples from the place between YKD02 and YKD03 shafts is estimated as 165 MPa and its abrasivity is found out to be very little. Average Pressure Strength of rock samples from the place between KLB08-KLB09 shafts is calculated as 93 MPa and its abrasivity is found out to be slightly abrasive.

-Required average jacking forces per meter is calculated as 2,27 ton in the drives through rock ; 1,81 ton, 1,74 ton and 2,20 ton in the soft grounds of fill, gravel-sand and mud, respectively.

-Jacking forces estimated by theoretical and empirical methods are compared to the realized jacking forces. In soft grounds; Terzaghi(Japan), ATVA(German) and PJA(UK) theoretical methods result in values respectively 4,7, 3,8 and 3,5 times and Chapman-Ichioka and Bannet empirical methods result in values respectively 1,6 and 0,9 times greater than realized values. Therefore values obtained by empirical methods are found out to be closer to realized values. In rock conditions; jacking forces are calculated by taking into consideration of the loads on the cutter and the friction force caused by pipe and machine weight. Estimated jacking force values result in 0,84 times than realized values.

1. GİRİŞ

1.1 Genel

Şehirleşmenin, dolayısıyla nufüsun artmasına paralel olarak alt yapı ihtiyaçları da artmaktadır. Bu alt yapı ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik hatların (telefon, elektrik, su, atık su, vb) döşenmesi genel olarak; açık kazı (aç-kapa, hendek / kanal kazısı) ve mikrotünel yöntemleri (boru itme-çekme, hendeksiz/kanalsız yöntem) ile yapılmaktadır[1]. Açık kazıda; hat döşemesi aç-kapa şeklinde olmakta, hendekler kazılarak hat döşenmektedir. Kanal kazısına gerek kalmadan boru ve kablo hatlarının döşenmesi, değiştirilmesi, tamir edilmesi ve bakımlarının yapılması amacıyla uygulanan yöntemlere hendeksiz(kazısız) yöntemler veya genel olarak mikrotünel yöntemleri denilmektedir.

Mikrotünel yöntemi; günümüzde toplumun çevresel kaygılarının artması nedeniyle özellikle yerleşim bölgelerinde üst yapıya zarar verilmeden hatların döşenmesine imkan sağlamasından dolayı açık kazıya alternatif oluşturmaktadır. Bunun yanında açık kazı uygulamanın zor olduğu, karayolu, demiryolu, havaalanı gibi unsurların altlarından geçişlerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Mikrotünelciliğin, açık kazıya alternatif oluşturmasının sebepleri olan açık kazının dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

-Çalışma yapılan yollar ve geçitler kullanıma kısmen yada tamamen kapatılır.
-Üst yapı bozulur.
-Göçük riski vardır.
-Açık kazı yönteminde çalışanlar için kaza riski fazladır.
-Mevcut hatlar kazı sırasında genelde hasar görür.
-Kazılan malzeme miktarı değişkendir ve bir kısmının berterafi gerekir.
-Tozunma nedeniyle hava kirliliğine neden olur.
-Yağmurdan yada pompalamadan kaynaklanan su, toprak erozyonuna sebep olur, böylece su kirliliği de meydana gelir.

-Gürültü kirliliğine neden olur.
-Açık kazı çimen, ağaç gibi unsurlara zarar verir.
-Arazi deformasyonlarından dolayı çevredeki binalar hasar görebilir.
-İşyerlerinin gelir kaybı, dolayısıyla vergi kayıpları meydana gelir.

Açık kazı yöntemleri, son yıllarda tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de toplumsal bilinçlenmenin artması nedeniyle nüfusun yoğun olduğu yerleşim bölgelerinde uygulanabilirlikten çıkarak, yerini mikrotünel yöntemine bırakmaktadır. Ülkemizde özellikle nüfus ve ona bağlı olarak trafik yoğunluğunun fazla olduğu İstanbul'da mikrotünel uygulamalarına öncelik verilmektedir. Rumeli Hisarı ile Sarıyer Merkez Mahallesi arasındaki kıyı şeridinden doğrudan İstanbul Boğazı'na deşarj edilen ve kirliliğe neden olan atıksuların önlenmesi amacıyla yapılan, ana hattı 600 mm iç çapa sahip olan kuşaklama kollektörleri projesi de mikrotünel ile gerçekleştirilmektedir.

1.2 Amaç

Tez çalışmasının ana amacı, Baltalimanı-Sarıyer Sahil Kuşaklama Kollektörleri Projesi uygulamasında kullanılan Alman Herrenknecht firmasından satın alınmış 2 adet AVN600XC model mikrotünel makinesinin kazı performansını zemin çeşitlerine ve koşullarına göre belirlemek, yine zemin çeşitlerine ve koşullarına göre uygulanan itme kuvvetlerini belirlemek, teorik ve empirik tahmin yöntemlerinin itme kuvvetleri tahmini yeteneklerini ortaya koymaktır. Bu çalışma; benzer koşullarda gerçekleştirilmesi muhtemel sürüşler için, makine ilerlemeleri ve gerekli itme kuvvetlerinin tahmini konusunda örnek oluşturacaktır.

1.3 Yöntem ve Kapsam

Projeyle ilgili, jeoteknik raporlar, sözleşme, ihale dökümanları, hakediş raporları, günlük raporlar, makine kayıtları incelenmiş, ayrıca makine kazıları arazide takip edilerek zemin türüne göre, makinelerin kazı performansı ortaya konmaya çalışılmıştır. Makinelerin kazmakta başarısız olduğu bazı bölgelerden numuneler alınarak, Nokta Yük Dayanımı, Çekme Dayanımı ve Cerchar Aşındırıcılık İndeks deneyleri yapılmıştır. Ayrıca teorik ve empirik tahmin yöntemleriyle hesaplanan itme kuvvetleri ile gerçekleşen itme kuvvetleri karşılaştırılmıştır.

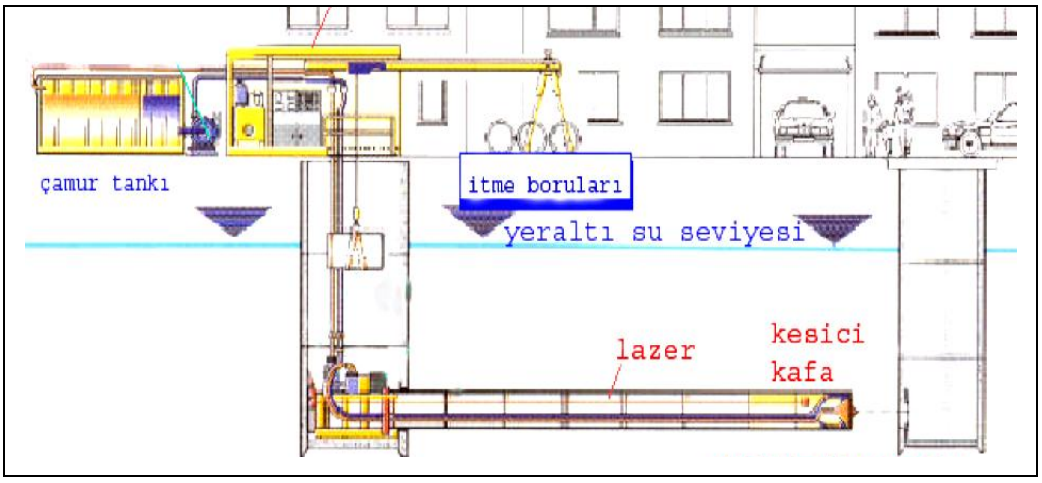
2. MİKROTÜNEL YÖNTEMİ

2.1 Tanım ve Uygulama Esasları

Mikrotünelciliğin, Avrupada'ki tanımı ile Kuzey Amerika'daki tanımı farklıdır. Avrupa'da, insanın giremeyeceği çaplardaki uygulamalar olarak tanımlamıştır, bu sınır 900 mm 'dir. Amerika'da ise, tüm itme ekipmanı ile beraber uzaktan kumandalı sistemi ifade eder.

Hendeksiz yöntemler arasında en fazla gelişim gösteren mikrotünel yöntemidir. Mikrotünelciliğin en önemli uygulama alanı kanalizasyon borularının doğrudan döşenmesidir, ayrıca yol geçişlerinde de uygulanan etkin bir yöntemdir. Bu yöntemde makine uzaktan kumanda edilir, böylece tünel içine insan girişine gerek kalmadan kazı yapılması imkanı bulunur.

Mikrotünel yöntemiyle yapılacak boru döşemesi için, itme ve alıcı kuyular inşa edilmektedir(Şekil 2.1). İtme kuyusu içerisine bir itme duvarı oluşturulur. İtme duvarı, itme silindirlerinden gelen tepki kuvvetlerini karşılar. Kuyu içerisine kurulan itme ekipmanı sayesinde, borular en uçta bulunan kazı makinesinin açtığı boşluğa doğru hareket ederek kazılan boşluğu doldurmaktadır.



Şekil 2.1: Mikrotünel yöntemi[2].

Kazı makinesi uzaktan kontrol edilmektedir. Makinenin yönlendirilmesinde kullanılan veriler lazer sistemi yardımı ile elde edilir. Mikrotünel yöntemi ile boru itme işlemindeki aşamalar şu şekilde sıralanabilir.

1. İtme kuyusunun açılması.
2. İtme kuyusunun yanına yüzey ekipmanının yerleştirilmesi.
3. İtme kuyusu içine itme ekipmanının yerleştirilmesi.
4. Sürülecek hatta göre gerekli ayarların yapılması.
5. Mikrotünel makinesinin ve lazer ekipmanının yerleştirilmesi.
6. Makine üzerine gerekli bağlantıların yapılması.
7. Makinenin hidrolik silindirler yardımıyla itilmesi.
8. Makine tam yerleşene kadar kazı yapılması, kazılan malzemenin uzaklaştırılması.
9. Hidrolik pistonların geri çekilmesi.
10. İlk borunun yerleştirilmesi (kuyruk borusuda olabilir).
11. Gerekli bağlantıların yapılması.
12. İtme ile birlikte kazının yapılması ve kazılan malzemenin uzaklaştırılması.
13. Çıkış kuyusundan makine ve varsa kuyruk borusunun alınması.
14. İtme kuyusundaki ekipmanın çıkarılması.
15. Kuyu yerlerinde menhol inşası.
16. Kuyu yerlerinin eski haline getirilmesi.

2.2 Tarihsel Gelişim

2.2.1 Boru İtmenin Gelişimi

Boru itme, Romalılar dönemine kadar uzanmaktadır ve Ortadoğu'da uygulamalarına rastlanmıştır. Amerika'da 1892 yılında gündeme gelmiştir ve ilk olarak demiryolu altından kanal geçişleri için dökme demir boruların döşenmesinde kullanılmıştır. Pratik uygulaması 1896-1900 yılları arasında Northern Pasific Railroad firması tarafından gerçekleştirilmiştir, daha sonra bu uygulama Great Western Railway'de 1911 yılında, California'da ise Augustus Griffin tarafından 1906-1918 yılları arasında uygulanmıştır. Bu yöntem birçok demiryolu şirketince kullanılarak yaygın hale gelmiştir. Dökme demir boruların yerine 1920'li yıllarının başında çelik borular, sonlarında ise beton borular kullanılmaya başlanmıştır[3].

Beton borular (108 mm ile 1800 mm arasındaki) için Northern Pasific şirketi tarafından 1930'larda bir standart geliştirilmiştir. İlk başlarda 1200 mm iç çaplı beton borular yaygın iken, 1930'ların sonlarından itibaren 2400 mm iç çaplı borular tercih edilmeye başlanmıştır[3].

Boru itme, esasen tren ve karayolu alt geçişlerinde kullanılırken, daha sonra kanalizasyon ve diğer hatların döşenmesi içinde kullanılmaya başlandı. Kazı, temel olarak kazma-kürekle yapılırken, daha sert zeminlerde pnomatik sökücüler, kayaların kırılması içinde pnomatik çekiçler kullanılmıştır. Başka bir yöntemde ise, kayaların kızgın yağ ise ısıtılıp, su takviyesiyle parçalanması sağlanmaktaydı[3].

Avrupa ülkelerinde ve Japonya'da 2. Dünya Savaşı öncesi boru itme tekniği kullanılmaya başlanmıştır, 1950'li yıllarda bu teknik geliştirilerek; İngiltere, Almanya, Fransa ve İskandinavya ülkelerinde kullanılmıştır. Batı dünyasında; savaştan dolayı hasar görmüş şebekelerin iyileştirilmesi, yükselen hayat standartlarının karşılanması amacıyla bir program sürdürülmüştür. Çoğu boru hattının, trafiğin yoğun olduğu yollar ile demir yollarının altından ve açık kazı yapılamayacak derinlikten geçmesi gerekmekteydi. Boru itme, hem ekonomik hem emniyet açısından kısa geçişlerde çözüm sunmaktaydı. Almanya'da, ilk beton boru sürülmesi 1957 yılında yapılmış, daha sonra teknik ilerleyerek 1970 yılında 200 km'lik bir boru hattı bu yöntemle döşenmiştir. Japonya'da yapılan ilk uygulamada 1948 yılında 600 mm iç çaplı demir boru, demiryolu altından döşenmiştir. Beton boruların kullanılması ise ilk defa 1950 yılında yapılmıştır. Boru itme 1970'lerde, Japonya ve Batı Almanya'da geçişlerden çok kanalizasyon hatlarının döşenmesinde kullanılmaya başlandı[3].

Stabil olmayan zeminlerde ve daha büyük derinliklerde boru itme sayesinde borularının döşenmesi imkanı bulunmuş ve hızlı kazı ile pasa nakliyatı ihtiyacı ortaya çıkmış, bundan dolayıda; farklı sistemlere gereksinim duyulmaya başlanmıştır. Mekanik kazı ekipmanı, uzaktan kumandalı tünel açma makinesi, helozonik ve boru hatlı taşıma sistemleri geliştirilmiştir. Hidrolik itme sistemleri, güç üniteleri ve kontrol sistemleri büyük oranda gelişim göstermiştir. Ayrıca; uzun itişler için ara istasyonlar ve zorlu koşullar için de çeşitli sistemler geliştirilmiştir[3].

Son gelişmelerle, 3000 mm iç çapa kadar olan boruların itilerek döşenmesi yapılabilmektedir. Boru itme günümüzde başlı başına uzmanlık alanı durumuna gelmiş, ilgili şirket sayısı artmış ve daha verimli boru itme imkanı bulunmuştur[3].

2.2.2 Mikrotünel Makinesinin Gelişimi

Su kirliliğinin kontrol altına alınması ve çevreye zararın en aza indirilmesi amacıyla açık kanalizasyonların yaygın olduğu Japonya'da 1960'larda yeni bir yer altı şebekesi kurulması ihtiyacı doğmuştur. Bunun için ilk olarak daha büyük ana hatlar yapılması düşünüldü. Bu hatların yapımında çamur basınçlı makineler ve uzaktan kontrollü sistemler kullanıldı. Ana hatları mütaakip, daha küçük çaplı kanalizasyon yapımı da yaygınlaşmaya başladı ve bu noktada mikrotünelciliğe yönelindi. Komatsu firması tarafından 1972 yılında Ironmole isimli ilk mikrotünel makinesi geliştirildi ve ilk olarak 1974 yılında pratik olarak uygulandı. Iseki firmasınca 1976 yılında yeni bir mikrotünel makinesi imal edildi. Bu makine pasa basınçlı idi ve zayıf zemin koşullarında kullanılabilme imkanı buldu. Yine, Iseki firması; 1979 yılında daha küçük çaplı yeni bir makine ile 1981 yılında büyük taşları kırarak taşınacak boyuta getirme kapasitesine sahip 'Crunching Mole' isimli makineyi geliştirdi. Tüm bu makineler ile 1979 yılına kadar toplam 30 km hat döşemesi gerçekleştirildi. Çamur basınçlı makinenin kullanıldığı mikrotüneller ilk olarak 1979 yılında yapılmaya başlandı[3].

Batı Almanya'da kullanılan ilk mikrotünel makinesi, Japon Iseki firmasından alınmıştır. Bu makine 600 mm çapa sahipti ve Hamburg Mikrotünel projesinde (1981-1984) kullanılmıştır. Bu proje dahilinde 2500 m küçük çaplı kanalizasyon borusu döşenmiştir. Hamburg Projesi Almanlar için bir dönüm noktası olmuştur. Almanya halen mikrotünel makinelerinin Avrupadaki en büyük imalatçısı ve Dünyadaki en önemli kullanıcılarından biri konumundadır. Avrupa'da 1992 yılında yapılan tespite göre, kıtadaki 200 mikrotünel makinesinesinin yaklaşık % 75'i Almanya'da bulunmaktadır[3].

Amerikadaki ilk mikrotünel makinesinin kullanımı 1980'li yılların başında kendini gösterdi. Florida'da 1984 yılında 188 m'lik hat boyunca 1,83 m çaplı borular Iseki firmasından alınan mikrotünel makinesi sayesinde döşenmiştir. Bu yıldan itibaren mikrotünel makinelerinin kullanımı Kuzey Amerika'da hızlı bir gelişim gösterdi[4].

2.3 Mikrotünelciliğin Unsurları

Mikrotünelcilik yöntemi 4 ana kısım altında anlatılabilir; kazı kısmı, boru hattı, itme kuyuları ve yerüstü unsurları.

2.3.1 Kazı Kısmı

Kazının yapıldığı şilt kısmı; kazı kesitinin istenilen boyutta açılmasını, güvenli bir çalışma ortamı, yüzey stabilitesi ile hat ve seviyenin kontrolünü sağlar. Kısa sürüşler insan eliyle kazı yapılabilirken, uzun sürüşlerde makineli kazı gerekmektedir. Hattın doğrultusunun ayarlanmasında kullanılan lazer sisteminin unsurlarından olan lazer hedef buradadır. Kazılan malzemenin, kullanılan taşıma sistemine aktarımı da burada yapılmaktadır. Kullanılan kazı makineleri 2 ana grupta toplanabilir. Bunlar; EPB (pasa basınçlı) ve slurry (çamur basınçlı) makinelerdir(Tablo 2.1).

Tablo 2.1: Pasa basınçlı ve çamur basınçlı makinelerin karşılaştırması[5].

Makine Tipi	**Avantajları**	**Dezavantajları**
Pasa basınçlı (EPB)	-Sistem çamur basınçlı sisteme göre daha basittir ve az maliyetlidir. -Daha az problemle karşılaşılmaktadır. -Daha az derinlik ve daha az çaplı uygulamalarda etkindir. -Kohezyonlu ve düşük su seviyelerinde daha etkilidir. -Su seviyesi üzerindeki uygulamalarda etkilidir.	-Su seviyesi altındaki uygulamaları sınırlıdır. -Çap değişimleri dar bir aralıktadır. Genelde 120 cm çapın altındaki uygulamalarda kullanılır. -Sürüş uzunluğu 105 m'ye kadardır.
Çamur basınçlı (Slurry)	-Geniş aralıkta zemin koşullarına ve geniş aralıktaki çaplara uygundur. Bundan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. -Bir çok çeşidi sahiptir ve seçilebilme kolaylığı vardır. -Su seviyesinin 3 m altına kadar başarılı şekilde uygulanabilir. -Yumuşak kayaçlar için uygun tipleri mevcuttur. -Kuyu içi ve itme ekipmanı daha temiz kalabilmektedir. -Uzun sürüşler başarıyla yapılabilir. -150 m'ye kadar sürülebilir. Ara istasyon kullanılarak 0,9 m çaptan yukarı uygulamalarda 150 m üzerine çıkılabilir.	-Sistem pasa basınçlı tipe göre daha karmaşıktır. -Sistem pasa basınçlı tipe göre daha maliyetlidir. -Derinliğin az ve zeminin kohezyonlu olduğu yerlerde sorun çıkartmaktadır.

Pasa basınçlı makinelerde; kazılan malzeme bir burgulu konveyör ile yüzeyden uzaklaştırılır ve makinenin arkasında bulunan taşıma ekipmanına aktarılır. Bu tip makineler kazı yüzeyine basınç uygulama yeteneğine sahiptir. Çamur basınçlı makinelerde ise bentonit içeren su kazı yüzeyine borular vasıtasıyla kazı yüzeyine pompalanır ve kazı yüzeyini destekler, ayrıca kazılan malzeme çamur içinde yine borular vasıtasıyla yeryüzüne aktarılır.

2.3.2 Boru Hattı

Boru hattı; tünelde hizalamayı, kazı yüzeyinden alınan pasanın taşınmasını sağlar ve kazı yüzeyine ulaşım için bir yol oluşturur. Ayrıca, kazı kısmına olan bağlantı sayesinde güç ve iletişim sağlama, izleme, yönlendirme işleri yapılmaktadır. İtme operasyonunun ekonomisi ve hızı, büyük oranda kazılan malzemenin kazı yüzeyinden uzaklaştırma hızına bağlıdır. Bunun için; işin büyüklüğüne ve çeşidine göre bir çok yöntem kullanılabilmektedir. Basit bir taşıma sisteminden, burgulu konveyör, hidrolik taşıma sistemine (boru hattı ile) kadar çeşitlilik göstermektedir.

İtilecek hattın uzunluğu; itme ekipmanı kapasitesine ve boruların emniyetle alabileceği yüklere bağlı olarak belirlenmektedir. İhtiyaç duyulan itme kuvveti, boru ile zemin arasındaki sürtünme kuvvetine ve kısmen boru ağırlıklarına bağımlıdır.

Sürüş uzunluğunu arttırmak için iki yol vardır. Birincisi, boru ile zemin arasındaki sürtünmeyi azaltıcı yağlayıcıların enjekte edilmesi, ikincisi ise boru hattında ara itme istasyonlarının kurulmasıdır.

2.3.2.1 İtme Boruları ve Özellikleri

Beton, kil, plastik, çelik ve demirden yapılmış çeşitli itme boruları mevcuttur. En çok tercih edileni beton malzemeden yapılmış olanlardır. Boruların kullanım amacı ve yerine göre uygun dayanımda ve itme operasyonu esnasında maruz kalınacak farklı yüklere karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Boru bağlantıları su geçirmez olmalıdır.

Boru uzunlukları bir çok unsur göz önüne alınarak belirlenmektedir. Bir taraftan sızdırma riskinin azaltılması için eklerin minimum olarak düşünülmesi gerekmekteyken, diğer taraftan daha uzun borularda; ağırlık artmakta, kontrol zorlaşmakta ve önemli ölçüde maliyet ortaya çıkmaktadır.

2.3.2.2 Ara İtme İstasyonları

Ara itme istasyonları borularla aynı dış çapa sahiptir ve hidrolik itme silindirleriyle donatılmıştır. Ara istasyonlar arkasındaki borulara dayanarak oluşan tepki kuvvetiyle öndeki boruları itmektedir, daha sonra itme silindirleri geri çekilerek oluşan boşluğa arka bölümdeki borular daha gerideki itme istasyonu sayesinde ileri doğru itilmektedir. Ara istasyonların bu şekilde teşkil edilmesiyle uygulanacak itme kuvvetleri bölünmektedir. Böylece boru yüzeyine uygulanan yükler azalmaktadır.

2.3.3 İtme Kuyusu

İtme kuyusu; boruların itilmesi için itme ekipmanına yataklık yapmakta, itme ekipmanından gelen tepki kuvvetini itme duvarı sayesinde karşılamaktadır. Borular bu kuyudan sisteme eklenmekte, kazılan malzemenin dışarıya alınması buradan yapılmaktadır ve ayrıca itme işleminin gözlemlenmesi buradan olmaktadır.

2.3.3.1 İtme Ekipmanı

İtmeyi sağlamak için 2 yada daha fazla sayıda hidrolik piston vardır. İtme pistonları boruyu ve kazıcı makineyi iterken, kesici kafa da dönüşü esnasında kazıyı gerçekleştirir. İtme kapasitesi, itme duvar kalınlığına, itilecek boruların çapı ile dayanımına bağlıdır. İtme kapasitesi belli bir toleransa sahiptir. Bu da, duruşlardan sonra oluşan kısa süreli yüksek başlangıç yüklerinin göz önüne alınmasıdır.

2.3.3.2 İtme Duvarı

İtme pistonlarının arkasında hareketsiz olarak tüm itme kuvvetlerine karşı tepki elemanı görevini görmektedir ve çoğunlukla sürüş güzergahının ters yönündedir. Eğer zemin üstüne gelecek yükleri berteraf edecek kapasitede değilse, blok gibi alternatif reaksiyon elemanları seçilebilir. Yaygın problem reaksiyon elemanının yanlış seçilmesidir. Bunun nedeni, yük altındaki zemin davranışları hakkında yeterli bilgiye sahip olunamaması ve böylece zeminin tahmin edilenden farklı davranmasıdır.

2.3.4 Yerüstü Unsurları

Yerüstünde; elektrik pnomatik ve hidrolik güç üniteleri, kontrol konteyneri, yağlama, karıştırma ve enjeksiyon ekipmanları ile eğer kullanılan makine çamur basınçlı ise çamur ayrıştırma tesisi bulunabilmektedir.

Yerüstünde ayrıca; çıkan pasa ile boruların depolanması yapılmakta ve vinç, kepçe ile kamyon gibi yardımcı ekipmanlar teşkil edilmektedir.

2.4 Mikrotünelcilikte Verimliliği Etkileyen Faktörler

Mikrotünelcilikte bir çok etken kazı ilerlemelerini dolayısıyla verimliliği etkilemektedir. Bu etkenlerden bazıları aşağıda sıralanmış ve açıklanmıştır[4].

-Kesici kafa tipi.
-Operatör ve çalışanların tecrübesi.
-Zemin koşulları.
-Ara itme istasyonları kullanımı.
-Sürüş uzunluğu.
-Ayrıştırma ekipmanı.
-Boru uzunluğu ve çapı.
-Jeoteknik araştırmalar.
-Çamur akış hızı.
-Yağlama.
-Boru malzemesi.
-Kazı esnasında su jeti kullanımı.
-Uygun makine kullanımı.
-Yer altı suyu koşulları.
-Boru döşeme derinliği
-Hizalama.
-Teknik destek.
-Kuyu tasarımı.

2.4.1 Kesici Kafa Tipi

Mikrotünel makinelerinde çeşitli kafa tipleri kullanılmaktadır. Kafalarda disk yada kazıyıcı özelliğe sahip diş şeklinde keskiler olabilmektedir. Kafanın dizaynı, dayanıklılığı ve keski sayıları kazı performansını etkilemektedir. Zemine uygun kafa seçimi performans için önemlidir.

2.4.2 Operatörün Deneyimi

Mikrotünel makinesinin verimliliğini önemli oranda operatör tecrübesi etkilemektedir. Operatörün makine üzerindeki etkisini azaltmak için otomatik kontrol sistemleri de geliştirilmiştir.

2.4.3 Zemin Koşulları

Zemin koşullarının iyi şekilde tanımlanması mikrotünelciliğin başarısı açısından önemlidir. Zemine uygun mikrotünel ekipmanı seçimi sayesinde mikrotünel çalışması daha sağlıklı yapılabilecektir. Zeminin; tane boyutu, dayanımı, nem içeriği, kıvamı, sıkıştırılabilirliği ve geçirgenliği önemli özellikleridir.

Çalışma esnasında eski kalıntılar, ağaçlar, bina temelleri, su boruları ile karşılaşılması gibi öngörülemeyen durumlar mikrotünel makineleri için problem oluşturabilmektedir. Ayrıca, kazılan bölgedeki büyük kaya parçaları arttıkça makine performansı azalmaktadır.

2.4.4 Ara İtme İstasyonu Kullanımı

Eğer boru iç çapı 900 mm'den daha büyükse ara istasyon kullanılabilmektedir. Ara itme istasyonlarının kendilerine ait itme sistemi vardır. Ara itme istasyonları sürülebilecek boru mesafesini arttırmakta, böylece kuyu sayısı da azaltılmaktadır. Sonuç olarak verim artmakta, kuyu yapım masrafı da azalmaktadır.

2.4.5 Sürüş Uzunluğu

Sürüş uzunluğu, itme kuvvetine ve boru çapına göre değişir. Uzunluk artıkça sürtünmede artmaktadır. İtme kuvvetini arttırmak suretiyle zeminin sürtünme direnci yenilebilmektedir.

2.4.6 Ayrıştırma Ünitesi

Ayrıştırma ünitesi; kazılmış malzemeyi çamurdan ayırmak için kullanılır. Böylelikle çamur tekrar tekrar kullanılır. Sistem farklı boyuttaki malzemenin ayrıştırılması için elek ve siklonlardan oluşmuştur. Her bir aşamada belirli boyuttaki taneler ayrıştırılır. Ayrıştırma ünitesi makinenin kazı kapasitesine uygun olarak dizayn edilir. İlk olarak büyük çaplı taneler ayrıştırılır ve ayrıştırılan malzeme dışarı verilir. Kalan kısım bir santrifuj pompasıyla siklona basılır ve burada santrifuj kuvvetiyle katı malzemenin büyük çoğunluğu ayrılır. İkinci bir siklonda kalan ince malzeme ayrıştırılır, depolanan su besleme borusuyla geri beslenir.

Tane boyutları, kazılan malzeme, su içeriği ve ayrıştırma ünitesindeki aşamaların sayısı ve çeşitliliği ayrıştırmaya etki eder. Çamur akış hızı da kazılan malzemenin uzaklaştırma hızını etkiler, bundan dolayı zemin koşullarına uygun ayrıştırma ünitesinin seçimi kazı verimliliğine etki eder.

2.4.7 Boru Uzunluğu

Boru uzunluğu, itme kuyusu boyutunu etkilemektedir, dolayısıyla kuyu maliyeti artmaktadır. Daha uzun borular için daha uzun itme aksamına ihtiyaç duyacaktır.

Ayrıca, itme ekipmanı maliyeti artacaktır. Diğer yandan boru eklerinde ve boru değiştirme zamanında azalma olacaktır.

2.4.8 Jeoteknik Araştırmalar

Zeminin tanımlanabilmesi için araştırmalar yapılabilmektedir. Bu araştırmaların doğru şekilde yapılması uygun ekipman seçimine önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu şekilde makineden maksimum verim alınabilecektir.

2.4.9 Çamur Akış Hızı

Çamur; kazı yüzeyinde bir dengeleyici unsur olarak görev yapabilmeli ve bu şekilde çökme olmadan bir kazı yapılmasını sağlayabilmelidir. Çamur akış hızı çökelmelerden kaynaklanabilecek tıkanmaları önleyecek şekilde ayarlanmalıdır.

2.4.10 Yağlama

Boru ile zemin arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla borunun etrafındaki boşluklara bentonit su karışımı bir yağlayıcı basılır, bu yağlayıcı aynı zamanda boşlukları doldurduğu için çökmeleri engeller. Sürtünmenin azalması nedeniyle ihtiyaç duyulan itme kuvveti azalır. Kesici kafa için gerekli enerjide de azalma meydana gelir.

2.4.11 Boru Malzemesi

Mikrotünelcilikte kullanılan borular belirli özelliklere sahip olmalıdır. Bu borular bilinen borulara kıyasla itme kuvvetine maruz kalacakları için daha dayanıklıdır. Borunun imal edildiği malzeme sürtünmeye de etki eder.

2.4.12 Su Jetleri

Su jetleri, kesici kafaya yardımcı olarak kazıyı kolaylaştırır, özellikle killi malzemenin kazısı esnasında kafaya yapışmaları önlediğinden büyük fayda sağlamaktadır.

2.4.13 Makine Tipi

Zemine uygun makinenin tipi çalışma verimine etki eder. Mikrotünel makineleri genelde pasa basınçlı yada çamur basınçlıdır. Pasa basınçlı makineler daha az karmaşık bir sisteme sahiptir, ancak su seviyesi altında kullanılmaya uygun değildir.

Çamur basınçlı makineler ise karmaşıktır, ancak su seviyesi altında kullanılabilirler, ayrıca taneli zeminlerde kullanılmakla beraber çoğu zemin tiplerinde uygulanabilmektedir. Pasa basınçlı tipler daha çok kohezyonlu zeminlerde uygundur, kumlu zeminlerde uygulaması sınırdır. Çamur basınçlı makineler içinde kaya kazısı için tasarlanmış olanları vardır. Çamur basınçlı makineler en çok tercih edilenlerdir.

2.4.14 Yeraltı Suyu Koşulları

Yeraltı su seviyesi makinenin ve borunun döşenme derinliğinin seçimini etkilemektedir. Genel olarak ya tamamen kuru yada tamamen sulu ortamda kazı yapılması önerilmektedir.

2.4.15 Boru Döşeme Derinliği

Derinlik, dolaylı yönden verimliliğe etki eder. Derinliğin seçiminde, istenen şebeke özellikleri ve mevcut hatların seviyesi göz önüne alınır. Derinliğin artması, mevcut hatlara çarpma riskini azaltmaktadır, fakat kuyuların inşa süresini ve maliyetleri arttırmaktadır.

2.4.16 Hattın Doğrultusu

Mikrotunelcilikte, proje gereği düz olmayan bir hattın döşenmesi düz yapılacak bir hattın döşenmesinden daha zordur. Düz olmayan hatlarda lazer hattından sapmalar meydana gelmektedir, dolayısıyla doğrultu belirlemek zorlaşmaktadır. Buna paralel olarak her bir boru bağlantısında yönlendirme gözden geçirilmekte, bu da zaman kaybına yol açmaktadır. Ayrıca düz olmayan hatlarda boruların ek yerlerinde oluşabilecek boşluklardan zemin malzemesi borulara akabilmektedir.

2.4.17 Teknik Destek

Yeni bir mikrotünel makinesinin çalışma performansını görmek ve makine kullanımı hakkında eğitim vermek amacıyla imalatçı firma tarafından sahada kontrol çalışmaları ve periyodik ziyaretlerin yapılması verimliliği artırmaktadır. Böylece, makineyi satın alan firmanın makine operatörleri makine kullanımı hakkında kısa sürede bilgilendirilerek makineyi kullanacak duruma getirilebilmektedir. Ayrıca, makine imalatçısı firmanın makine arızalarına mudahalesi ve yedek parça desteği önem arz etmektedir.

2.4.18 Kuyu Tasarımı

Kuyular genellikle dikdörtgen ve daire şeklinde açılabilmektedir. Kuyunun uzunluğu, mikrotünel makinesinin, itme ekipmanının ve itilecek boruların ölçülerine bağlıdır. Kuyular; itme ekipmanından üzerlerine gelecek tepki kuvvetlerini karşılayacak nitelikte yapılmalıdır.

2.5 Mikrotünelcilik Metodunun Seçimi

Mikrotünelcilikte metodunun seçimi aşamasında bir çok etken rol oynamaktadır. Bunlardan bazıları; jeoteknik koşullar, boru malzemesi ve boru ölçüleri, itme uzunluğu ve derinlik, yönlendirilebilme kapasitesi, saha kısıtlamalarıdır [6].

2.5.1 Jeoteknik Koşullar

Mikrotünelcilik prosesine başlamadan önce kapsamlı bir jeoteknik araştırma yapılması önemlidir. Bu araştırma boru hattı güzergahındaki jeolojik koşulları tanımlar ve proje için en uygun mikrotünel ekipmanının seçimi için anahtar rol oynar. Aşağıda belirtilen jeoteknik özellikler mikrotünel prosesi üzerinde önemli etkilere sahiptir.

2.5.1.1 Çökme Potansiyeli

Yüzeyde oturmalara sebep olabilecek boşluklar oluşabilmektedir. Bu boşlukların büyüklükleri zeminin fiziksel özelliklerine (dayanıklılık, tane boyutu, nem içeriği, plastiklik ve sıkıştırılabilirlik) bağlıdır. Ayrıca bu oturmalar yeraltı su koşullarına, borunun derinliğine ve büyüklüğüne, ekipmanın teknik kapasitesine göre de değişiklik gösterebilir. Örneğin, kumlu zeminlerde büyük oturmalar meydana gelebilir, ama kohezyonlu zeminlerde risk fazla yoktur.

2.5.1.2 Doğal Zorluklar

Çoğu mikrotünel makineleri, kesici kafa çapının 3'te 1 çapı kadar büyüklükteki kaya içeren zeminleri kazma özelliğine sahiptir. Daha büyük kayalar ise kazıya olumsuz etki eder ve makinenin ileriye gitmesine engel olur. Kaya kitlelerinin yerlerini ve özelliklerini tespite yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Bu bilgilere dayanılarak projeye uygun makine kafa tasarımı yapılabilmektedir.

2.5.1.3 Kazılan Malzeme ve Yeraltı Suyu

Mikrotünelcilikte kazılan malzeme miktarı açık kazı metoduna kıyasla çok daha azdır. Koşulları belirleyecek jeoteknik araştırma mikrotünel prosesini belirlemede önem arz edecektir. Jeoteknik araştırmalar sonucunda su seviyesinin tanımlanması; mikrotünel ekipmanının, su giderim ekipmanı, zemin destekleme sistemlerinin seçiminde ve yakında bulunan yapıların çökme potansiyellerini belirlemede rol oynamaktadır. Her mikrotünel ekipmanı su seviyesi altında çalışmaya yönelik dizayn edilmemektedir.

2.5.2 Boru Malzemeleri ve Ölçüleri

Boru malzemesinin seçiminde gözönüne alınan unsurlar; borunun kullanım amacı, zemin koşulları ve mikrotünelciğe uygunluğudur. Mikrotünelcilikte çeşitli malzemeden (çelik, kil, beton, fiberglas) yapılmış borular kullanılabilmektedir.

Boru malzemesinin seçiminde diğer faktör ise; mikrotünel prosesi sırasında boru yüzeyine etkiyebilecek maksimum eksenel kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin büyüklüğü; zemin tipine, kazı derinliğine, yağlama sistemine, yönlendirme kabiliyetine, sürüş uzunluğuna ve aşırı kazı miktarına bağlıdır.

2.5.3 İtme Uzunluğu ve Derinlik

Mikrotünel prosesinde itme uzunluğu ve döşeme derinliği önemli faktörlerdir. Boru döşeme derinliğinin tespiti; mevcut tesisatın durumu, değişen zemin koşulları ve örtü miktarına bağımlıdır. Mikrotünelcilikte minimum örtü kalınlığı miktarı 1,5 m yada örtü kalınlığının boru çapına oranı 3:1'dir. Bununla birlikte maliyet açısından açık kazıyla karşılaştırıldığında 4,5 m ve yukarısı derinlikler ekonomik olmaktadır .

İtme uzunluğu ise; zemin koşullarına, boru çapına ve dayanımına, ara istasyon kurulma durumuna ve kazılan malzemenin uzaklaştırılmasında kullanılan sisteme göre değişiklik göstermektedir.

İtme kuvvetleri borunun dizayn kapasitesinden daha büyükse, ara istasyonlar mikrotünel prosesine dahil edilir. Ara istasyon kullanılan çamur basınçlı makinelerin kullanıldığı projelerde, ortalama sürüş uzunluğu 150 m ile 300 m arasında değişir. Diğer taşıma sistemlerine sahip makinelerin kullanıldığı çalışmalarda sürüş uzunluğu daha az olmaktadır .

2.5.4 Yönlendirilebilme Kapasitesi

Kazının ve boru döşemesinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için lazer sistemi kullanılmaktadır. Lazer sistemi, kontrol paneliyle sürekli irtibat halinde olduğundan her hangi bir sapma durumunda operatör tarafından gerekli düzeltmelerin yapılmasını sağlar.

2.5.5 Saha Sınırlamaları

Mevcut saha koşulları mikrotünel prosesinde göz önüne alınması gereken diğer bir etkendir. İtme kuyusu, çamur ayrıştırma ünitesi, vinç, konteyner, boru deposu ve diğer yardımcı ekipman için yeterli alan olması gerekmektedir. İtme kuyusunun boyutu ve yeri önemli bir parametredir. Çıkış kuyusu ise, itme kuyusuna göre daha küçük ölçülerdedir ve mikrotünel makinesinin ebatlarına bağımlıdır.

3. BALTALİMANI-SARIYER SAHİL KUŞAKLAMA KOLLEKTÖRLERİ VE BAĞLANTILARI İNŞAATI PROJESİ

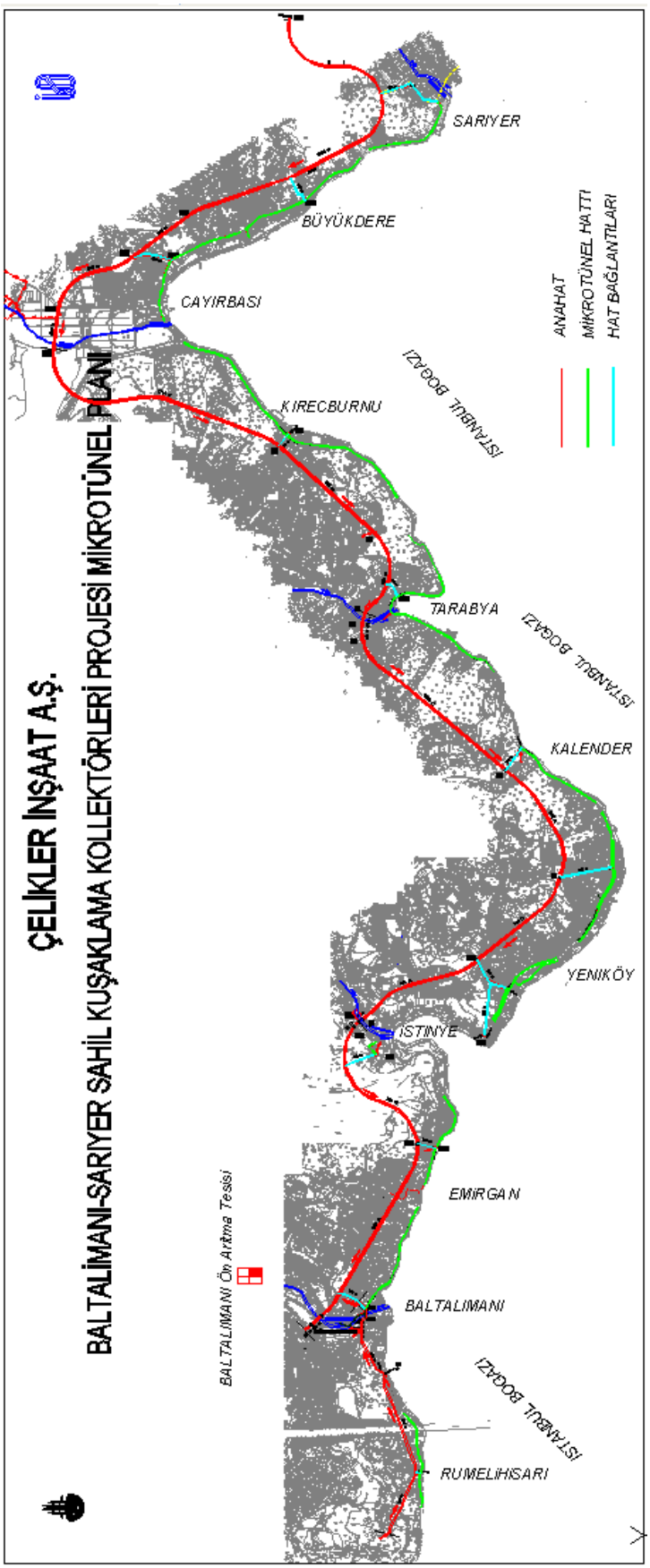
3.1 Projenin Tanıtımı

İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (İSKİ) tarafından yapılması planlanan; Rumeli Hisarı ile Sarıyer Merkez Mahallesi arasındaki kıyı şeridinden(Şekil 3.1) doğrudan İstanbul Boğazı'na deşarj edilen ve kirliliğe neden olan atıksuları önlenmesine yönelik sahil kuşaklama kollektörleri yapım işini Çelikler İnşaat A.Ş. firması almıştır. Sahil kuşaklama kolektörlerinin yapım işinin 23 Nisan 2007 tarihinde tamamlanması ve maliyetinin 13 milyon 200 bin YTL olması öngörülmüştür. Bu proje kapsamında 600 mm iç çapında 10.359 m, 200 mm iç çapında 5.000 m mikrotünel, 353 adet kuyu, 300 mm ve 600 mm çapları arasındaki boruların döşenmesi için 350 m açık kanal inşaatının yapılması planlanmıştır.

Rumeli Hisarı'ndan Sarıyer'e kadar bütün sahili kuşaklayan ve mansabı Tarabya Atıksu Tüneli olan projenin ihalesi 2 Haziran 2005 tarihinde, işyeri teslimi 15 Ağustos 2005 tarihinde ve işin başlangıcı 23 Ağustos 2005 tarihinde yapılmıştır.

Projenin, 23 Nisan 2007 tarihinde işin tamamlanamaması nedeniyle 5 Haziran 2007 tarihindeki 270 gün süre uzatımı ile yeni proje bitim tarihi 17 Ocak 2008 olarak belirlenmiştir. Rumelihisarı-Kefeliköy arasındaki mikrotünel işi bu tarihte tamamlanmıştır. Kefeliköy-Sarıyer arasındaki kesim için ise yeniden ihaleye çıkılmıştır.

Projenin gerçekleştirilmesine yönelik olarak, yüklenici firma olan Çelikler İnşaat A.Ş. tarafından Alman Herrenknecht firmasından AVN600XC model 2 adet mikrotünel makinesi tüm ekipmanıyla birlikte satın alınmıştır.



Şekil 3.1: Mikrotünel güzergahı[7]

Çelikler İnşaat A.Ş. tarafından ihalesi alınarak gerçekleştirilen faaliyetler, kuyuların açılması, 600 mm iç çaplı anahattın döşenmesi ve bu ana hatta bölgedeki konut ve işyerlerinin bağlantılarının yapılması işleridir. Ana hattın döşenmesi işi Çelikler İnşaat A.Ş.nin kendi imkânı ile gerçekleştirilirken, parsel bağlantıların yapımı ile kuyuların açılması taşeron firmalar tarafından gerçekleştirilmiştir. Projedeki mikrotünel kazısında 7 gün 24 saat esasına göre çalışılmıştır.

Projenin saha uygulaması ile şantiye binasında çalışan personelin görevleri ve sayısı Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Projede çalışan personel [8].

Çalışanın görevi	**Kişi sayısı**
Proje Müdürü	1
Şantiye şefi	1
Formen	1
Topoğraf ve yardımcısı	2
Mikrotünel makinesi operatörü	5
Mikrotünel ekibi çalışanı(operatörler hariç)	12
Mekanik ve Elektrik ustası	2
Diğer ekipman operatörleri ve şöförler	6
Parsel bağlantı ekibi (taşeron)	10
Kuyu inşaa ekibi (taşeron)	5
Yedek işçi	4
Ahçı ve yardımcısı	2

Projede makine parkını; 2 mikrotünel makinesi, 1 adet vinç, 1 adet arazi aracı, 1 kamyon, 3 kiralık kamyon, 1 kiralık ekskavatör ve 2 binek aracı oluşturmuştur[8].

3.2 Güzergahın Jeolojisi

Proje bölgesinin jeolojik bilgileri; STFA Tünel A.Ş.nin İstinye-Sarıyer Güzergahı Zemin Etüd Raporu ile Rumelihisarı Branşman Tüneli Geoteknik Raporu'ndan alınmıştır.

Baltalimanı ve Rumelihisarı Bölgeleri'nde, Kocaeli Yarımadası Paleozoyik istifi bulunmaktadır. Paleozoyik istifte, alttan yukarıya doğru Devoniyen yaşlı fosilli şeyl-kireçtaşı ardalanması ve yumrulu kireçtaşı bulunmaktadır. Baltalimanı civarında Kuvaterner-Güncel yaşlı alüvyon yeralmaktadır.

İstinye-Rumelikavağı arası İstanbul Paleaozoyik arazisinin Devoniyen ve Karbonifer yaşlı formasyonlarından oluşmaktadır. Devoniyen yaşlı arazi, alttan üste doğru kalın tabakalı kireçtaşları (Alt Devoniyen) ve üzerinde normal uyumlu kumtaşı, fosilli şeyl ve silttaşları (Orta Devoniyen), bunların üzerinde yumrulu kireçtaşı tabakaları (Üst Devoniyen) bulunmaktadır.

Karbonifer formasyonları ise, altta çörtlü ince taneli silisli şeyler ile üzerlerine gelen kumtaşı, çamurtaşı, konglomera ve grovaklardan oluşur (Trakya Serisi).

Devoniyen ve Karbonifer yaşlı formasyonlar; kıvrımlı, kırıklı, kaymalı, çatlaklı ve kayma yüzeyleri boyunca ezilmiştir. Paleozoik formasyonlar ise, yer yer andezit ve diyabaz daykları ile kesilmiştir. Paleozoik formasyonlar üzerine bazı kısımlarda Kuvaterner yaşlı kum, çakıl ve kil depoları gelmektedir. İstinye-Tarabya arasındaki Devoniyen yaşlı kireçtaşı, kumtaşı, şeyl tabakaları ardalanmaktadır.

Tarabya-Kireçburnu arasında bulunan Alt-orta Devoniyen yaşlı kireçtaşı, kumtaşı, grovak, ve şeyller Tarabya civarında yüzeylenmektedir. Üst Devoniyen yaşlı yumrulu kireçtaşı, Alt Karbonifer yaşlı çört ve silisli şeyller Kireçburnu Bölgesi'nde yer almaktadır.

Kireçburnu-Kefeliköy arasında tümüyle Trakya Serisi'nden kumtaşı, silttaşı, şeyl, çamurtaşı tabakaları yer almaktadır.

Kefeliköy-Büyükdere arasında Trakya Serisi kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı, şeyl ve grovaklar yer almaktadır. Kefeliköy Bakla Deresi'nde kum, çakıl ve kil çökelleri bulunmaktadır.

Kefeliköy-Büyükdere arasında Trakya Serisi kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı, şeyl ve grovaklar yer almaktadır. Büyükdere Koyu'nda 2-5 m kalınlığında alüvyon tabakası ve Pliyo-kuvaterner yaşlı karasal tortullar mevcuttur.

Büyükdere-Sarıyer arasındaki kesimde Silüriyen yaşlı silttaşı, laminalı şeyl ve Üst Devoniyen yaşlı yumrulu kireçtaşları yer almaktadır.

Sarıyer-Rumeli Kavağı arasında Üst Kretase yaşlı volkanik kayaçlardan, andezit (kireçtaşı-şeyl ara tabakalı), lav, tüf ve anglomeralar yüzeylenmektedir.

3.3 Güzergahla İlgili Sondaj Verileri

STFA Temel A.Ş. 04.11.1987 ile 11.02.1988 tarihleri arasında İstinye-Sarıyer güzergahı boyunca, Kasım 2000'de ise Rumelihisarı-Baltalimanı arasında kazı yöntemlerini ve zemin karakteristiklerini belirlemek amacıyla zemin etüd sondajları yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında İstinye-Sarıyer arasında 32 ve Rumelihisarı Branşman Tünel'i için 8 adet sondaj yapılmıştır. İstinye-Sarıyer arasındaki sondajlar hazırlanan zemin etüd raporunda 5 bölümde incelenmiştir. Bu bölümler ve mesafeleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Ayrıca Rumelihisarı Branşman Tüneli için sürülen sondajlardan yararlanılarak Rumelihisarı ve Baltalimanı Bölgeleri'nde mikrotünel güzergahı değerlendirilmiştir.

Tablo 3.2: İstinye-Sarıyer arası sondaj çalışması bölgeleri[9].

Kısım adı	**Uzunluk(m)**
İstinye-Yeniköy güzergahı	1258
Yeniköy-Tarabya güzergahı	2590
Tarabya-Kireçburnu güzergahı	2186
Kireçburnu-Kefeliköy güzergahı	1902
Kefeliköy-Sarıyer güzergahı	1950

3.3.1 İstinye-Yeniköy Arası Sondajlar

Güzergah uzunluğu 1258 m'dir. Tüm sondajlarda dolgu zemin görülmektedir. Dolgu zemin, kum, çakıl, kiremit parçalarını içermektedir ve kalınlığı 0,3-4,8 m arasında değişmektedir. Dolgu zeminin SPT değeri N=3-15 arasında bulunmuştur. Penetrasyon değerindeki değişimler dolgu zeminin heterojen yapısından dolayıdır. IRS 2 sondajıyla dolgu zemin altında çakıllı killi kum tabakası tespit edilmiştir. Bu tabakanın SPT değeri N=22-36 arasında değişmektedir. IRS 3 nolu sondajda dolgu altında 3,10 m kalınlığında az kabuklu kil tabakası görülmüştür. Bu tabakanın SPT değeri N=7 olarak bulunmuştur. IRS 1 ve IRS 4 nolu sondajlarda dolgu zemin altında az-orta ayrışmış kireçtaşı tabakası bulunmaktadır. Bu tabakanın RQD değeri %0-18 ve TCR değeri % 27-100 arasında değişmektedir. IRS 5 nolu sondajda ise dolgu zemin altında tamamen ayrışmış kumtaşı görülmüştür. Kumtaşının RQD değeri 0 olarak belirlenmiştir. İstinye-Yeniköy arası sondajların kotları ve tünel seviyesinde kesilen zemin türleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3: İstinye-Yeniköy arası sondajlar.

Sondaj No	Başlangıç Kotu (m)	Derinlik (m)	Taban Kotu (m)	Akar Kot (m)	Tünel seviyesinde kesilen formasyon	Temsil mesafesi (m)
IRS 1	+5,60	4,55	+1,05	-2,63	-	-
IRS 2	+5,23	5,45	-0,22	-3,02	Çakıllı killi kum	545
IRS 3	+2,18	9,45	-7,27	-3,36	Dolgu zemin	272
IRS 4	+2,50	8,50	-6,00	-3,82	Kireçtaşı(çok kırıklı)	254
IRS 5	+2,30	9,00	-6,70	-4,13	Kumtaşı(tamamen ayr.)	187

3.3.2 Yeniköy-Tarabya Arası Sondajlar

Güzergah uzunluğu 2590 m'dir. IRS 6 ve IRS 12 dışındaki tüm sondajlarda dolgu zemin kesilmiştir. Dolgu zeminin SPT değeri N=15-30 arasında değişmektedir. IRS 8 nolu sondaj; dolgu zemin altında 1,30 m kalınlığa sahip kumlu kabuk tabakası, IRS 7 nolu sondaj ise dolgu zemin altında kalınlığı 3,10 m olan kumlu killi çakıl tabakası kesmiştir. IRS 10 ve IRS 13 nolu sondajlar dolgunun altında az ayrışmış kireç tabakasını kesmiştir. Buradan alınan numunelerin TCR değeri %71-100, RQD değeri %0-83 arasında değişmektedir. Yeniköy-Tarabya arası sondajların kotları ve tünel seviyesinde kesilen zemin türleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4: Yeniköy-Tarabya arası sondajlar.

Sondaj No	Başlangıç Kotu (m)	Derinlik (m)	Taban Kotu (m)	Akar Kot (m)	Tünel seviyesinde kesilen formasyon	Temsil mesafesi (m)
IRS 6	+2,50	+9,50	-7,00	-4,33	Kumtaşı-şeyl(az ayr.)	232
IRS 7	+2,26	+9,50	-7,24	-4,70	Kumtaşı	250
IRS 8	+2,00	+10,00	-8,00	-5,00	Kumlu kabuklu	265
IRS 9	+2,23	+10,00	-7,77	-5,39	Az ayrışmış şeyl	287
IRS 10	+2,21	+13,50	-11,29	-5,73	Kireçtaşı(çok kırıklı)	300
IRS 11	+2,00	+13,00	-11,00	-6,07	Kumtaşı(tamamen ayr.)	310
IRS 12	+2,09	+13,00	-10,91	-1,39	Az ayrışmış şeyl	327
IRS 13	+1,85	+12,50	-10,65	-1,75	Dolgu zemin	345
IRS 14	+1,96	+12,50	-10,54	-2,09	Dolgu zemin	385

3.3.3 Tarabya-Kireçburnu Arası Sondajlar

Güzergah uzunluğu 2186 m'dir IRS 21 ve IRS 23 dışındaki tüm sondajlarda dolgu zemin kesilmiştir. IRS 16 ile IRS 22 sondajlarıyla dolgu zemin altında ince kum tabakası tespit edilmiştir. Kumlu tabakanın SPT değeri N= 13-28 arasında değişmektedir. IRS 19 ile IRS 22 tarafından kesilen kabuklu-kumlu çakıl tabakasının SPT değeri N= 20-42 arasında değişmektedir. IRS 17, IRS 19, IRS 20 ve IRS 23 nolu sondajlarla kesilen ince taneli kırıklı çatlaklı az ayrışmış kireçtaşı tabakasının TCR değeri %65-100 ve RQD değeri %0-91 arasında değişmektedir.

IRS 16, IRS 20, IRS 22 ile IRS 23 nolu sondajlarda kesilen az-orta derece ayrışmış şeyl tabakasının TCR değerleri %37-100 ve RQD değerleri %0-82 arasında değişmektedir. Tarabya-Kireçburnu arası sondajların kotları ve tünel seviyesinde kesilen zemin türleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5: Tarabya-Kireçburnu arası sondajlar.

Sondaj No	Başlangıç Kotu (m)	Derinlik (m)	Taban Kotu (m)	Akar Kot (m)	Tünel seviyesinde kesilen formasyon	Temsil mesafesi (m)
IRS 16	+1,91	11,50	-9,59	-2,63	Dolgu zemin + kum	318
IRS 17	+1,86	11,50	-9,64	-3,05	Az ayrışmış kireçtaşı	260
IRS 18	+1,89	11,00	-9,11	-3,37	Kumlu kabuk	295
IRS 19	+1,86	10,50	-8,64	-3,61	Kumlu çakıl	255
IRS 20	+1,72	10,00	-8,28	-3,70	Az ayrışmış şeyl	248
IRS 21	+2,40	14,00	-11,60	-4,03	Ort.der.ayr.kireçtaşı	270
IRS 22	+2,46	14,00	-11,54	-4,26	Kumlu çakıl	274
IRS 23	+2,33	14,00	-11,67	-4,52	Az ayrışmış şeyl	265

3.3.4 Kireçburnu-Kefeliköy Arası Sondajlar

Güzergah uzunluğu 1902 m'dir Tüm sondajlarda, en üstte dolgu zemin görülmektedir. Dolgu zemin, kum, çakıl, kiremit parçalarını içermektedir ve kalınlığı 2,00 m ile 5,30 m arasında değişmektedir. IRS 26 ve IRS 34 sondajlarıyla dolgu zemin altında siltli, kumlu, yer yer kabuklu çakıl tabakası yer almaktadır. Çakıl tabakasının SPT değeri N = 22-30 arasında değişmektedir. IRS 26 ve IRS 27 nolu sondajlarla kesilen az killi ince kum tabakasının SPT değeri ise N= 8-13 arasında değişmektedir. Bu iki sondajda da bu tabakanın altında killi kumlu silt tabakası yer almaktadır. Bu tabakanın SPT değeri ise N=10 olarak bulunmuştur. IRS 24 ile IRS 25 nolu sondajlarda kesilen kırıklı, çatlaklı az ayrışmış kumtaşından alınan karotların TCR değerleri %19-100 ve RQD değerleri %0-40 arasında değişmektedir. Kireçburnu-Kefeliköy arası sondajların kotları ve tünel seviyesinde kesilen zemin türleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Kireçburnu-Kefeliköy arası sondajlar.

Sondaj No	Başlangıç Kotu(m)	Derinlik (m)	Taban Kotu(m)	Akar Kot(m)	Tünel seviyesinde kesilen formasyon	Temsil mesafesi (m)
IRS 24	+2,03	14,00	-11,97	-4,77	Az ayrışmış şeyl	250
IRS 25	+2,16	14,50	-12,34	-5,00	Kumtaşı şeyl ard..	307
IRS 26	+3,13	16,00	-12,87	-5,27	Çakıllı kum	332
IRS 27	+2,75	8,00	-5,25	-5,68	Kumlu silt	220
IRS 34	+2,10	11,50	-9,40	-5,18	Kabuklu çakıl	205

3.3.5 Kefeliköy-Sarıyer Arası Sondajlar

Güzergah uzunluğu 1950 m'dir. Tüm sondajlarda, en üstte dolgu zemin görülmektedir. Dolgu zemin, çakıl, kum, kil ve kiremit parçaları içermektedir ve kalınlığı 2,00 m ile 6,00 m arasında değişmektedir. IRS 35 ve IRS 36 nolu sondajlarda dolgu zemin altında çok yumuşak kil-silt tabakası bulunmaktadır. Bu tabakanın SPT değeri N=2-6 arasında değişmektedir. IRS 38 nolu sondajda, dolgu zemin altında 2,10 m kalınlıkta çakıllı kabuklu kil tabakası bulunmaktadır. Bu tabakanın SPT değeri N=10 dur. IRS 37 nolu sondajda dolgu zemin, IRS 38 sondajda kil tabakası ve IRS 40 nolu sondajda kum tabakası altında kesilen kabuklardan oluşan tabakanın SPT değeri N=14 olarak belirlenmiştir. Kefeliköy-Sarıyer arası sondajların kotları ve tünel seviyesinde kesilen zemin türleri Tablo 3.7'da verilmiştir.

Tablo 3.7: Kefeliköy-Sarıyer arası sondajlar.

Sondaj No	Başlangıç Kotu (m)	Derinlik (m)	Taban Kotu (m)	Akar Kot (m)	Tünel seviyesinde kesilen formasyon	Temsil mesafesi (m)
IRS 35	+2,52	11,50	-8,98	-4,96	Silt-kil	262
IRS 36	+2,50	11,00	-8,50	-4,68	Kabuklu silt	280
IRS 37	+2,20	10,50	-8,30	-4,45	Kabuklu şeyl	220
IRS 38	+1,68	10,00	-8,32	-4,10	Dolgu zemin	270
IRS 39	+1,61	9,50	-7,89	-3,80	Killi kum çakıl	357
IRS 40	+1,57	9,00	-7,43	-3,30	Kum	500

3.3.6 Rumelihisarı-Baltalimanı Arası Sondajlar

Rumelihisarı'ndan Baltalimanı'na uzanan Rumelihisarı Branşman Tüneli için yapılan sondajlardan RH1 ve RH2 mikrotünel güzergahından uzaktadır. RH3 sondajı Rumelihisarı bölgesinde mikrotünel güzergahında bulunan tek sondajdır. Bu sondaj tünel seviyesinde SPT değeri N=16 olan çakıllı kum içinden geçmiştir. RH6, RH7 ve RH8 mikrotünel güzergahının zemin özelliğini gösterebilecek konumda görülmektedir. RH9 ve RH10 sondajları Baltalimanı Bölgesi mikrotünel güzergahı başlangıcında gözükmektedir. Bu sondajlar Baltalimanı'ndaki derenin iki yanındadır, dolayısıyla dere bölgesinde yapılacak kazı için aydınlatıcı olabilecektir. RH9 sondajında -0,70 kotuna kadar dolgu ve ardından çakıllı siltli kum gelmektedir, bu tabakanın ortalama SPT değeri N=12'dir. RH10 sondajı ise -1,20 kotuna kadar dolgu ve ardından killi siltli çakıllı kumdan geçmiştir. Bölgedeki kazı güzergahını niteleyecek yeteri kadar sondaj yoktur. Rumelihisarı Branşman Tüneli'ne ait sondajların kotları Tablo 3.8'de verilmiştir

Tablo 3.8: Rumelihisarı Branşman Tüneli sondajları [10].

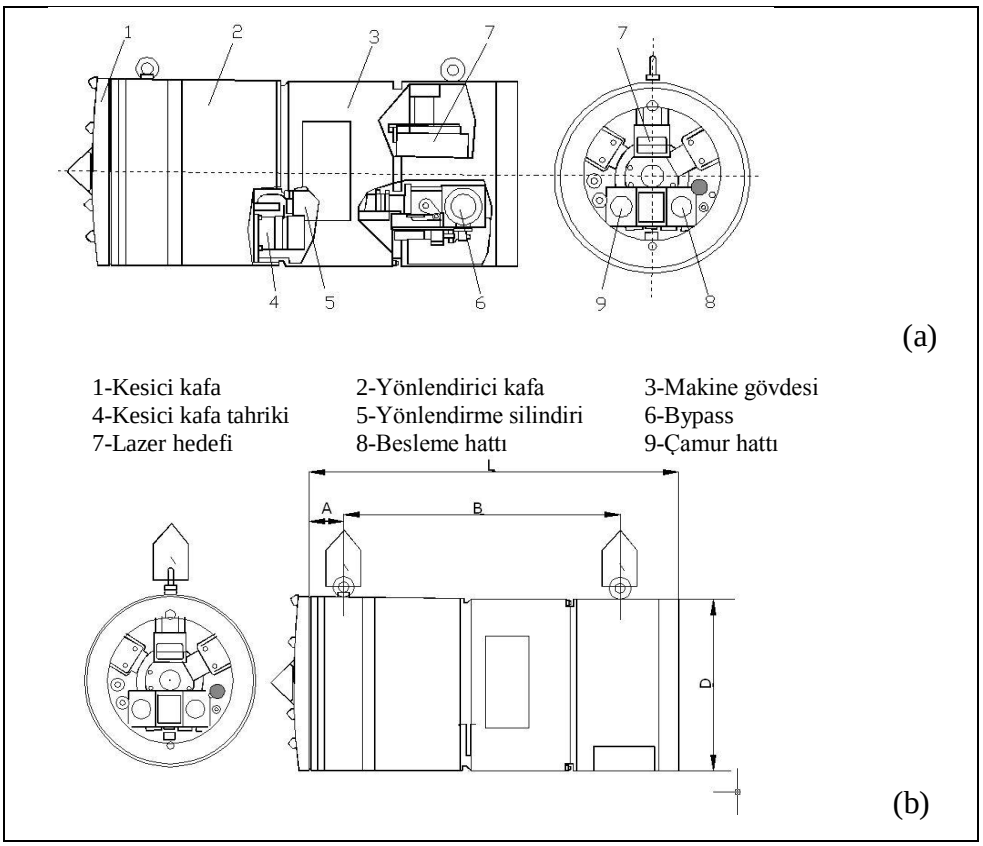
Sondaj No	Başlangıç Kotu	Derinlik	Taban Kotu	Giriş Kotu
RH1	+5,60	25,00	10,00	35,00
RH2	+5,23	47,00	2,40	49,40
RH3	+2,18	10,00	-7,50	2,50
RH6	+2,50	10,00	-7,00	3,00
RH7	+5,60	10,00	-7,10	2,90
RH8	+5,23	12,10	-8,60	3,50
RH9	+2,18	30,45	-28,15	2,30
RH10	+2,50	19,95	-18,15	1,80

3.4 Kullanılan Ekipman ve Özellikleri

Kullanılan mikrotünel ekipmanını; mikrotünel makinesi, itme kuyusu ekipmanı ve yüzey ekipmanı olarak inceleyebiliriz, itme boruları ve kuyular da diğer teknik unsurlardır.

3.4.1 Mikrotünel Makinesi

Makine 3 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; kesici kafa, yönlendirme kafası ve baypass, lazer hedefi gibi unsurları muhafaza eden gövde kısmı (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Mikrotünel makinesinin kısımları ve genel görünüşü[11].

Bu mikrotünel makinesi tamamen uzaktan kumanda edilmekte ve aynaya insan girişine izin vermemektedir. Makine yumuşak zemin, karışık zemin ve sert kayaları kazmaya yönelik olarak tasarlanmıştır. Killi ortamlarda kazı yapabilmek için yüksek basınçlı su sistemi, iri parçaları parçalayabilmek için ise konik kırıcı bulunmaktadır. Çamurlu su kazı yüzeyine pompalanır, böylece kazı yüzeyi desteklenir ve kazılan malzeme de çamur içinde yüzeye aktarılır. Mikrotünel makinesinin teknik özellikleri Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

Tablo 3.9: Herrenknecht AVN600XC makinesinin teknik özellikleri[11].

Şilt çapı	D	780	mm
Makine uzunluğu		2090	mm
Makinenin kesici kafa hariç uzunluğu	L	1890	mm
Boru dış çapı		760	mm
Boru iç çapı		600	mm
Maksimum tork (sağ/sol)		34	kNm
Devir (sağ/sol)		0-13	rpm
Güç		45	kW
Motor sayısı		3	adet
Yönlendirme silindiri sayısı		3	adet
Yönlendirme silindirlerin maksimum basıncı		500	bar
Yönlendirme silindiri strok uzunluğu		25	mm
Yönlendirme silindirleri çapları piston/piston kolu		90/60	mm
Yönlendirme açısı (yukarı/aşağı)		3,4	º
Yönlendirme açısı (çapraz)		3,4	º
Yönlendirme açısı (sağa/sola)		3,0	º
Mesafe	A	165	mm
Mesafe	B	825	mm
Makine ağırlığı		2900	kg

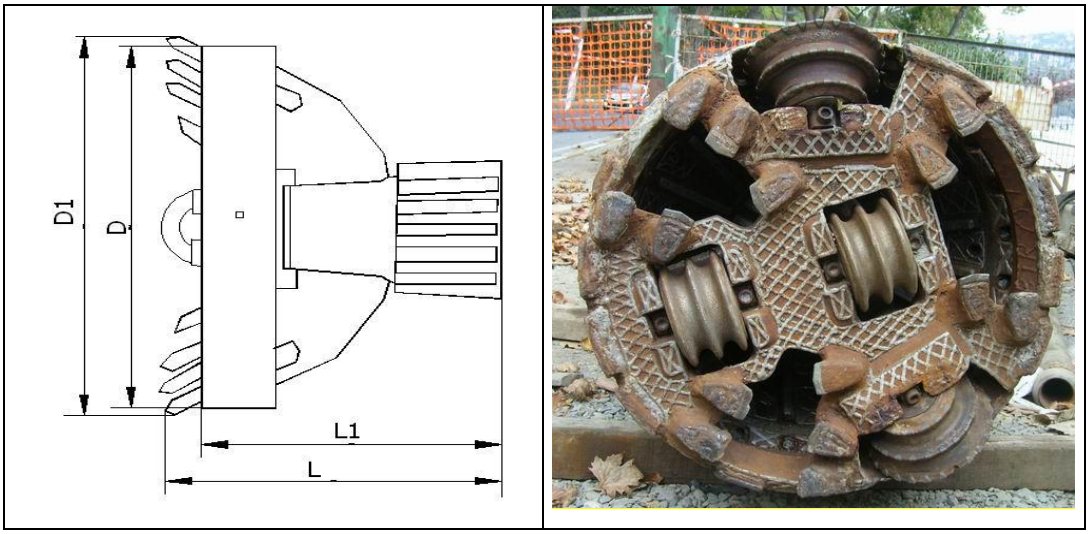
3.4.1.1 Kesici Kafa

Kesici kafa üzerine 4 adet disk ve 14 adet kama türü keski monte edilmiştir. Makine; yumuşak zemin koşullarının yanı sıra, sert zemin, kaya ve karışık koşullarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Birbirinden ayrı 3 tane motor kesici kafanın tahriki için kullanılmaktadır. Bu motorlar yüzeyden gelen hidrolik hortumlardan güç sağlamaktadır.

Kesici kafa arkasında bulunan konik kırıcı sayesinde kazılan malzeme çamur pompası ve çamur hattı tarafından ayrıştırma ünitesine taşınmasını sağlayacak uygun boyuta getirilir. Basınçlı su, nozüllerden kırma odasına püskürtülerek malzemenin birikmeden akışını sağlamaktadır. Makine kesici kafasının teknik özellikleri Tablo 3.10'da, görünüşü ise Şekil 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.10: Kesice kafa özellikleri[11].

Çap	D	780 mm
Çap (keskiler dahil)	D1	799 mm
Kesici kafanın keskiler hariç uzunluğu	L1	519 mm
Kesici kafanın uzunluğu	L	577 mm
Kesici kafanın ağırlığı		560 kg



Şekil 3.3: Mikrotünel makinesi kesici kafası[11].

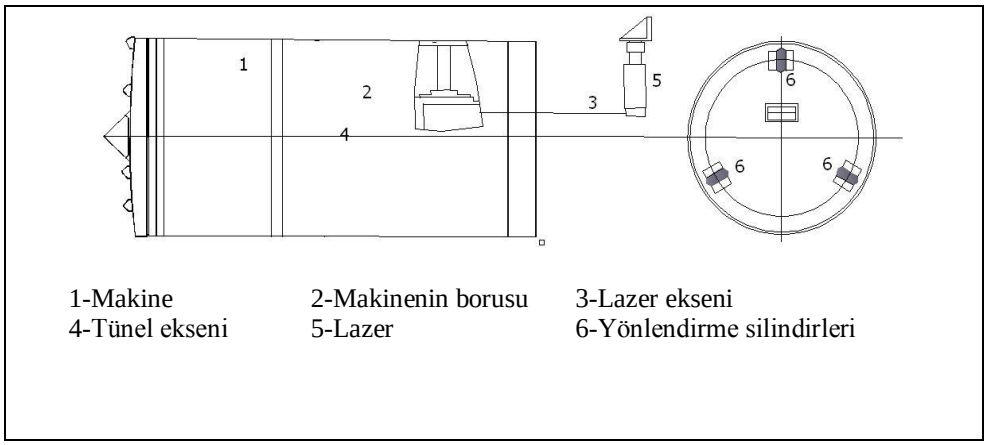
3.4.1.2 Yönlendirme Kafası

Yönlendirme kafası makinenin ön kısmındadır. Makine gövdesine 3 hidrolik yönlendirme silindirleriyle bağlıdır. Bunlar kafanın 4 derecelik bir yönlendirme hareketi yapmasını sağlar. Yönlendirme silindirleri ölçüm sistemiyle donatılmıştır ve bu sayede kafanın yönlendirilmesi yapılabilmektedir.

3.4.1.3 Makine Gövdesi

Lazer hedefi ve bypass makine gövdesinin içine monte edilmiştir. Bypass su döngüsünün bir parçasıdır. Bypass vanası açılıp, çamur ve besleme vanaları kapatıldığında su doğrudan çamur borusuna geçer. Böylece çamur borusunda meydana gelen birikinti ve tıkanıklıklar açılabilmektedir. Bu durumda su makinenin kesici kafasının bulunduğu yere ulaşmaz, ancak sabit bir su basıncı kazı yüzeyini desteklemeye devam eder.

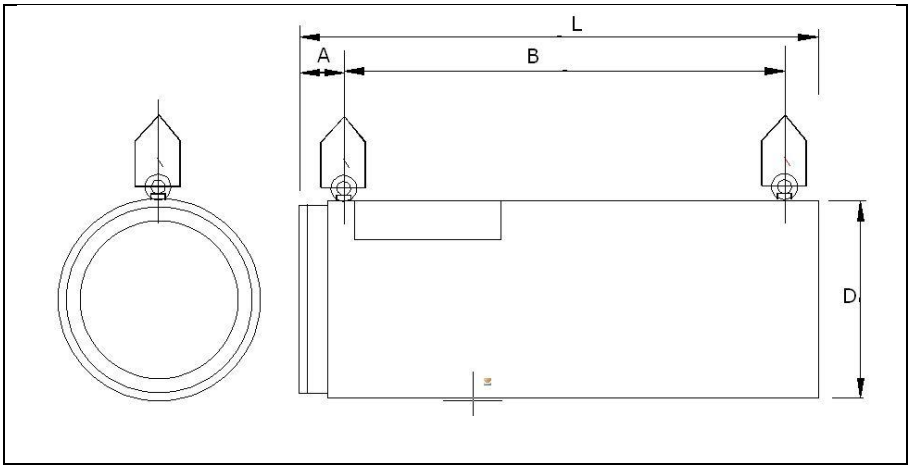
Lazer hedef ise; makinenin kontrolünü sağlayan alıcı bir ünitedir (Şekil 3.4). Lazer ışın demetinin pozisyonunu belirleyerek, bilgileri kablo vasıtasıyla kontrol panelindeki ekrana yansıtmaktadır.



Şekil 3.4: Lazer hedefinin konumu[11].

3.4.1.4 Kuyruk Borusu

Makinenin hemen ardına eklenen metal borudur (Şekil 3.5). Kuyruk borusu, kesici kafanın çalışmasından kaynaklanan makinedeki dönme hareketini yüzey sürtünmesi sayesinde önlemektedir. Üzerinde yağlayıcı enjekte etmek üzere delikler mevcuttur. Kuyruk borusunun teknik özellikleri Tablo 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.5: Kuyruk borusu görünüşü[11].

Tablo 3.11: Kuyruk borusu teknik özellikleri[11].

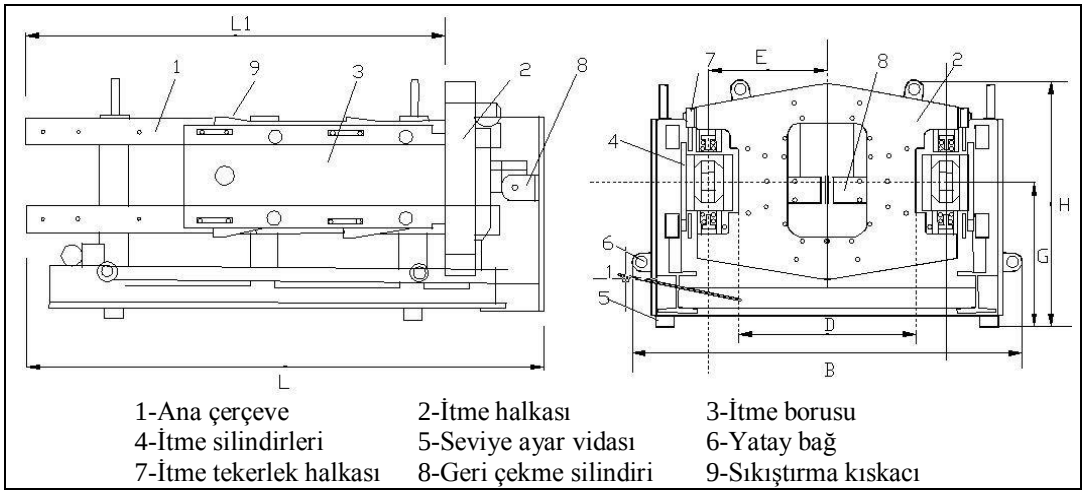
Çap	D	780 mm
Uzunluk	L	1990 mm
Mesafe	A	165 mm
Mesafe	B	1735 mm
Ağırlık		735 kg

3.4.2 Kuyu Ekipmanı

Kuyu ekipmanı, itme ekipmanı, lazer cihazı gibi unsurları içermektedir. İtme kuyusu boyutları itme ekipmanın boyutlarına göre belirlenmektedir.

3.4.2.1 İtme Ekipmanı

Boruların itilmesinde kullanılan ve itme kuyusuna yerleştirilen ekipmandır(Şekil 3.6). İtme işlemi 2 adet silindir sayesinde gerçekleştirilmektedir. Pistonlardan gelen kuvvet itme çerçevesi sayesinde makine, kuyruk borusu yada boruların üzerine aktarılmaktadır. İtme ekipmanı teknik özellikleri Tablo 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6: İtme ekipmanı görünüşü[11].

Tablo 3.12: İtme ekipmanı teknik özellikleri[11].

İtme uzunluğu		140	m
Maksimum boru uzunluğu		2000	mm
Maksimum dış boru çapı		975	mm
İtme silindirler arası mesafe	D	1050	mm
İtme silindiri sayısı		2	adet
İtme silindiri çapı (piston/piston kolu)		180/140	mm
İtme silindiri ilk hareketi		830	mm
İtme silindiri ikincil hareketi		740	mm
İtme silindirleri uzunluğu	L1	2310	mm
Maksimum basınç (her bir silindir)(itme/çekme)		500	bar
Kuvvet (her bir silindir için) (itme/çekme)		1270/520	kN
Toplam kuvvet (itme/çekme)		2540/1040	kN
Silindir ekseni ile çerçeve ekseni arası mesafe	E	665	mm
Boru ekseninin tabandan yüksekliği	G	850	mm
Uzunluk	L	2915	mm
Genişlik	W	2090	mm
Yükseklik	H	1350	mm
Taşıma noktası sayısı		4	adet
Ağırlık		5700	kg

3.4.2.2 Lazer Cihazı

Boru itme yönteminde ölçme işleri diğer tünel işlerindeki ölçme işlerinden farklıdır. Kazı kesiti çoğu zaman insan girişine izin vermeyecek kadar küçüktür. Kazı makinesinin yatay ve düşeyde kontrolü uzaktan kumandalı olarak itme kuyusunun yüzeyinde bulunan kontrol kabininden yapılmaktadır. Kontrol öğelerinden biride lazer cihazıdır (Şekil 3.7). Lazer cihazı, mikrotünel makinesinin konumunu belirlemek ve doğrultudan sapmaları engellemek için kullanılmaktadır. Makinenin yönlendirilmesi bu sayede mümkün olmaktadır.



Şekil 3.7: Lazer cihazı

Lazer cihazı itme kuyusuna yerleştirilmektedir. Mikrotünel makinesinin üzerindeki lazer hedefine yollanan ışınlar sayesinde elde edilen veriler kontrol odasındaki ekrana kablo bağlantısı sayesinde yansımaktadır. Böylece, operatör tarafından yönlendirme silindirleri sayesinde makine kontrol altında tutulmuş olur. Lazer cihazının teknik özellikleri Tablo 3.13'de gösterilmiştir.

Tablo 3.13: Lazer cihazının teknik özellikleri[11].

Dalga boyu	658 nm
Işık çapı	13 mm
Doğrultu değişimi	±5 %
Hedef ışığın ayar değişimi eğilimi	-10 +40 %
Okuma hassasiyeti	0,001 %
İzin verilebilir sapma	±0,005 %
Çalışma sıcaklığı	-10 +50 ^{0}C
Su geçirmezlik	0,35 bar
Çap	130 mm
Yükseklik	365 mm
Ağırlık	5,3 Kg

3.4.3 Yüzey Ekipmanı

Yüzeyde; kontrol konteyneri, çamur ayrıştırma tesisi, pompalar, vinç gibi unsurlar yer almaktadır.

3.4.3.1 Kontrol Konteyneri

Kazı esnasında, kontrol konteyneri itme kuyusu yanında yer almaktadır. Mikrotünel makinesi, itme ekipmanı, pompalar ve motorların kontrolü buradan yapılmaktadır. Konteynerde, operatör odasının yanı sıra makine odası da bulunmaktadır.

Operatör odasında bulunan kontrol panosundan ise, aşağıdaki unsurların kontrolü ve yönlendirmesi yapılmaktadır.

-Makinenin çalıştırılması.
-Kafanın dönüş yönü ve dönüş hızı ayarları.
-Yönlendirme silindirlerinin kontrolü.
-İtme silindirlerinin ileri itilmesi ve geri çekilmesi, itki miktarının ayarlanması.
-Bypass vanası, çamur ve besleme vanalarının açılıp kapatılması.
-Hidrolik motorun çalıştırılması.
-Çamur ve besleme pompalarının devir seviyesinin ayarlanması.
-Bentonit pompasının çalıştırılması.
-Lazer sisteminin açılıp kapatılması.

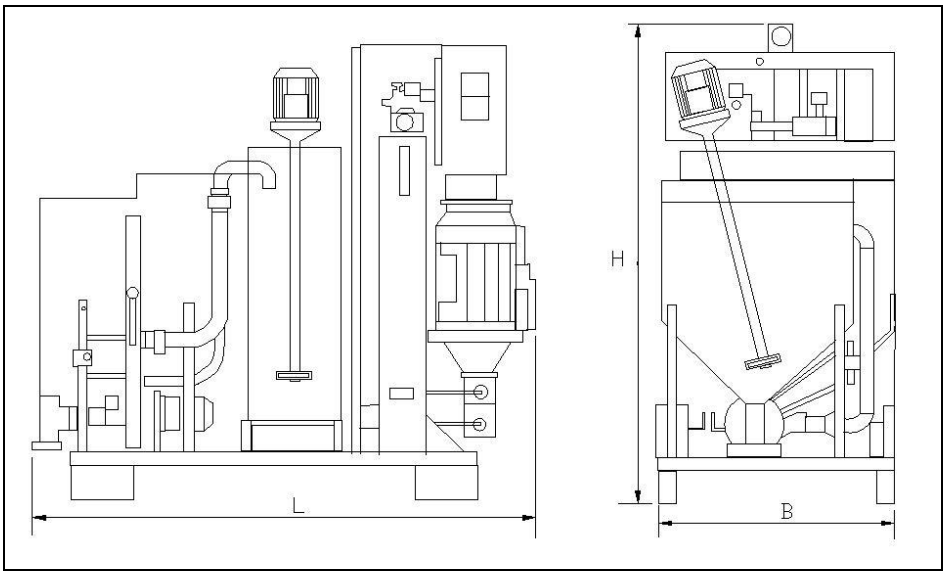
Makine odasında ise güç üniteleri yer almaktadır. Buradaki ekipmanın teknik özelllikleri Tablo 3.14'de gösterilmiştir.

Tablo 3.14: Makine odasındaki ekipmanın teknik özellikleri[11].

A) HİDROLİK		
Elektrik Motoru		
Güç	75	kW
Gerilim	400	V
Frekans	50	hz
Hız	1450	min^{-1}
Ağırlık	520	kg
Eksenel Piston Pompa		
1450 rpm'deki nominal akış	195	lt/dak
Maksimum basınç	420	bar
Hız	1450	min^{-1}
Ağırlık	65	kg
Akım Filtresi		
1500 rpm'deki nominal akış	84	lt/dak
Maksimum basınç	215	bar
Ağırlık	9,8	kg
B) KOMPRASÖR		
Giriş hacmi	350	lt/dak.
Çıkış hacmi (6 bar çalışma basıncında)	230	lt/dak.
Maksimum basınç	10	bar
Reservuar kapasitesi	40	lt
Elektriksel güç	1,7	kW
C) KURULU GÜÇ		
Kesici kafa, itme, yönlendirme ve bypass silindirleri	55	kW
Komprasör	1,7	kW
Besleme pompası	30	kW
Çamur Pompası	30	kW
D) HİDROLİK TANK		
Tank Kapasitesi	750	lt
Uzunluk	2750	mm
Genişlik	2150	mm
Yükseklik	2150	mm
Ağırlık	2750	Kg

3.4.3.2 Çamur Ayırma Sistemi

Mikrotünel makinesinden gelen suyun kazılmış malzemeden ayrılarak tekrar kullanılabilmesi sağlayan birimdir. Elek, depo, karıştırıcı, pompa ve elektrik motorlarından oluşmaktadır (Şekil 3.8). Suyundan ayrılan malzeme dışarı alınırken, su sisteme tekrar beslenmektedir. Çamur ayırma sisteminin teknik özellikleri Tablo 3.15'de gösterilmiştir.



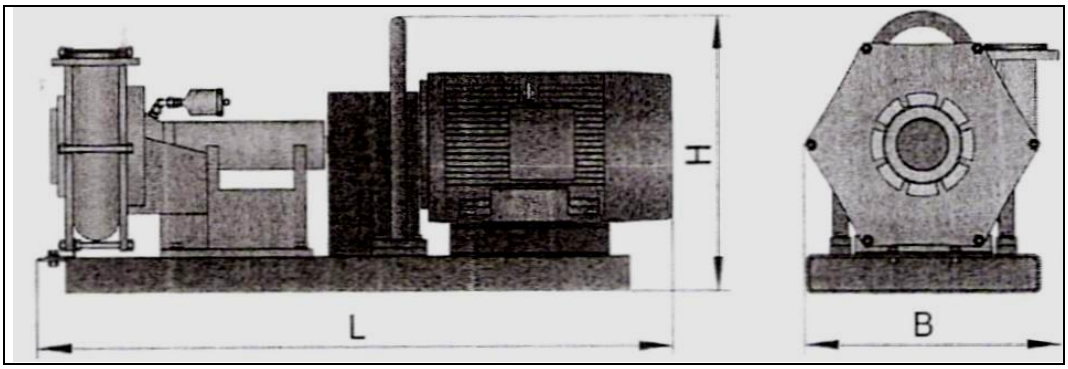
Şekil 3.8: Çamur ayırma sistemi görünüşü[11].

Tablo 3.15: Çamur ayırma ekipmanın teknik özellikleri[11].

Maksimum tane boyutu		5	mm
Depo kapasitesi		150	lt
Karıştırıcı elektrik motoru gücü		0,55	kW
Devir		47,6	dak^{-1}
Giriş bağlantısı		2,5	"
Çıkış bağlantısı		2,0	"
Uzunluk	L	1600	mm
Genişlik	W	780	mm
Yükseklik	H	1560	mm
Ağırlık		610	kg

3.4.3.3 Pompalar

Sistemdeki kazılmış malzemeyi taşıyan suyun ayırma sistemine getirilmesini sağlayan pompa, çamur pompasıdır (Şekil 3.9 ve Tablo 3.16).

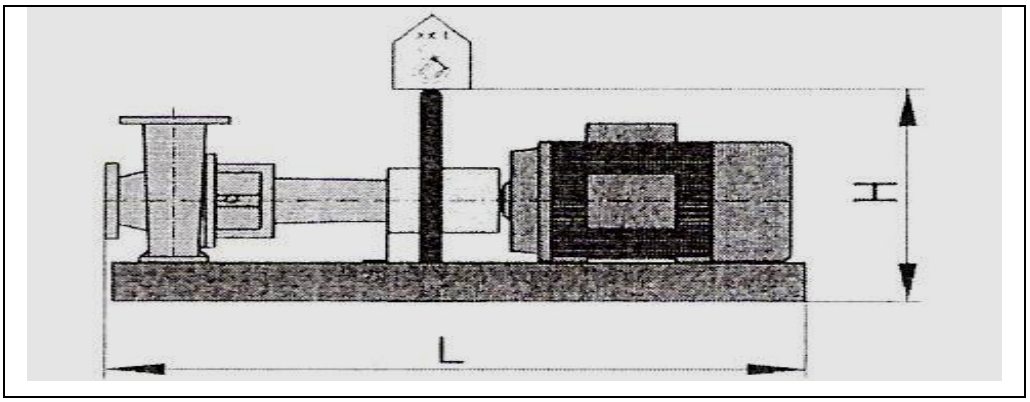


Şekil 3.9: Çamur pompası[11].

Tablo 3.16: Çamur pompasının teknik özellikleri[11].

Hız değişimi		0-1500 rpm
Güç		30 kW
Voltaj		400 V
Frekans		50 Hz
Nominal akış		150 m^3/h
Basma yüksekliği		36 m
Yoğunluk		1,17 kg/lt
Maksimum parça boyutu		50 mm
Uzunluk	L	1580 mm
Genişlik	B	655 mm
Yükseklik	H	690 mm
Taşıma noktası sayısı		1 adet
Ağırlık		574 kg

Suyun, tanktan alınarak sisteme verilmesini sağlayan pompa ise besleme pompasıdır.(Şekil 3.10 ve Tablo 3.17).



Şekil 3.10: Besleme pompası[11].

Tablo 3.17: Besleme pompasının teknik özellikleri[11].

Hız değişimi		0-2900 rpm
Güç		30 kW
Voltaj		400 V
Frekans		50 Hz
Nominal akış		0-170 m^3/h
Basma yüksekliği		47,1 m
Yoğunluk		0,99 kg/lt
Uzunluk	L	1250 mm
Genişlik		400 mm
Yükseklik	H	750 mm
Taşıma noktası sayısı		1 adet
Ağırlık		350 kg

Boru itme sırasında boru ile zemin arasındaki sürtünmeyi azaltmak için kullanılan bentonit, bentonit pompası sayesinde kuyruk borusu üzerindeki 3 adet delikten boru hattına ilave edilmektedir. Bu pompanın teknik özellikleri Tablo 3.18'de listelenmiştir.

Tablo 3.18: Bentonit pompasının teknik özellikleri[11].

Maksimum tane boyutu		5 mm
Maksimum çıkı debisi		1,5 m³/h
Maksimum double stroke/dakika		100 bar
Minimum double stroke/dakika		3 bar
Güç	400V 50Hz	9,05 kW

Diğer bir pompa olan enjeksiyon pompasının teknik özellikleri ise Tablo 3.19'da sıralanmıştır.

Tablo 3.19: Enjeksiyon pompasının teknik özellikleri[11].

Kapasite	1,5 m³/h
Maksimum double stroke/dakika	100 bar
Minimum double stroke/dakika	3 bar
Maksimum tane boyutu	5 mm

3.4.4 Kuyular

Kuyular dikdörtgen kesitli olarak imal edilmiştir. İtme kuyuları; mikrotünel makinesi, itme ekipmanı ve itilecek borular sığacak şekilde 2,5 m x 3,5 m boyutunda, alıcı kuyular ise 1,5 m x 2,5 m boyutunda açılmıştır. Derinlik ise, hat derinliğine bağımlıdır.

Kuyu duvarları itme kuvvetlerini ve yanal kuvvetleri karşılayacak şekilde 30 cm kalınlıkta donatılı olarak imal edilmiştir. Kuyu imalatı iki şekilde yapılmıştır; birincisi, kazısı yapılan itme ve çıkış kuyuları içine kalıplar yerleştirilerek donatılı hale getirildikten sonra beton dökülerek imalat gerçekleştirilmiş. Uygun zemin koşullarınında ise, çıkış kuyularının donatılı betonu bütün olarak önceden imal edilerek vinç ile kazı boşluğuna yerleştirilmiştir(Şekil 3.11). İtme kuyularında ayrıca itme duvarı yapılarak kuyuların zarar görmesi engellenmiştir.

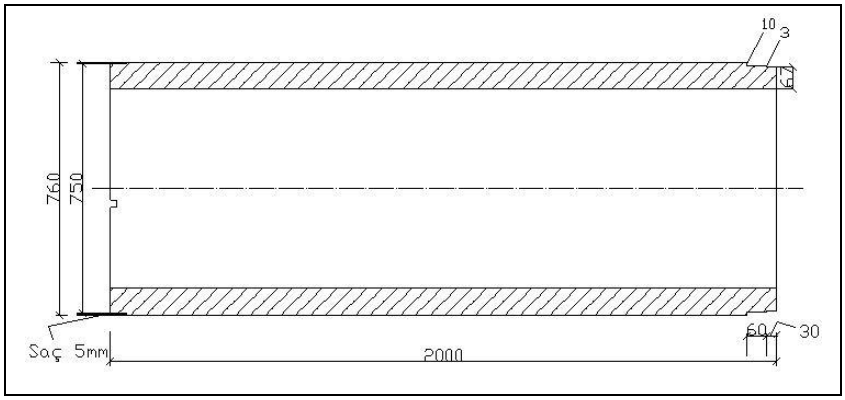
Proje kapsamında imal edilen kuyuların kazı bölgelerine göre dağılımı ile bu kuyuların yüzey ve akar kotları Ek_A'da verilmiştir.



Şekil 3.11: Prekast Kuyu[1].

3.4.5 Borular

Teknik şartname gereği; itme boruları, BS5911(Kısım 120:1989) Elastik Derzli Donatılı İtme Boruları için kullanılan standarda ve DIN 4035 standartına uygun olarak tasarlanmıştır. Borular çelik kenar derzli ve donatısı hem çevresel hemde boyuna yükleri karşılayak şekilde imal edilmiştir. Proje kapsamında kullanılan itme boruların teknik özellikleri Şekil 3.12 ve Tablo 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Kullanılan itme borusu[8].

Tablo 3.20: Boruların teknik özellikleri[12].

Boru dış çapı	760 mm
Boru iç çapı	600 mm
Boru et kalınlığı	80 mm
Boru boyu	2000 mm
Boru üstüne uygulanabilecek maksimum basınç	350 bar
Maksimum boru itme uzunluğu	120 m
Boru ağırlığı	1100 kg

4. PERFORMANS ANALİZİ

4.1 Genel

Kazı makinelerde kesme işi ana işlemdir, ancak kesmenin yanında diğer faktörlerde göz önüne alınır. Hızlı ilerleme bütün makine bölümlerinin uyumlu şekilde çalışmasıyla mümkündür. Makine ile yapılacak bir kazıda önceden maliyetin belirlenmesi önemli bir faktördür. Performans tahmin yöntemleri, belirli formasyonu kazısında kullanılacak bir mekanik kazıcının ekonomikliğini belirleyerek, kazı maliyetini ortaya koyar. Makine performansını; jeolojik-jeoteknik parametreler, makine parametreleri ve teknik-operasyonel parametreler belirlemektedir.

Makine performansını belirlemeye yönelik olarak bir çok model geliştirilmiştir. Bu modeller Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Performans tahmin modelleri[13].

Performans Tahmin Modelleri		
1	Empirik modeller	
2	Deneysel modeller	-Tam boyutlu kazı seti ile yapılan testler -Küçük boyutlu kazı seti ile yapılan testler -İndeks deneyleri
3	Yarı teorik modeller	-Bilgisayar modellemeleri ve kesici kafa simülasyonu
4	Gerçek makine ile yapılan arazi testleri	
5	Gerçek makine ile yapılan laboratuvar testleri	

Performans tahmininde kullanılan empirik modeller; kazı makinesinin arazi performansı ile zemin veya kaya özellikleri arasındaki istatiksel ilişkiden elde edilmişlerdir. Uygulanabilirlikleri oldukça kolaydır ve düşük maliyetlere sahiptirler. Gerçek kazı makinesinin kullanıldığı arazi ve laboratuvar testleri ise oldukça doğru sonuçlar vermektedir ancak bu tür uygulamaların maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle çok büyük projeler dışında tercih edilmezler. Deneysel modeller ise; empirik modellere göre pahalıdır ancak, gerçek makine ile yapılacak testlere göre oldukça kolay uygulanabilirliğe ve düşük maliyete sahiptir.

İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Maden Mühendisliği Bölümü imkanları arasında kazı makinesinin performansının, deneysel verilere göre tahmininde kullanılan Tam Boyutlu Doğrusal Kazı Seti ile küçük boyutlu kazı seti bulunmaktadır.

Tam Boyutlu Doğrusal Kazı Seti ile performans tahmini, kaya ortamından alınan büyük boyutlu numune üzerinde laboratuvar ortamında gerçek boyuttaki keskilerle yapılmaktadır. Kesme derinlikleri ve keskiler arası mesafeler değiştirilerek, normal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri belirlenmektedir. Bu yöntem, tam boyutlu bir test olduğu için, boyut ile kayaç davranışlarından kaynaklanan belirsizlikleri azaltır. Kuvvetlerin ölçülmesi sayesinde; makine ve keski seçimi yapılabilir, performans ve maliyet tahmininde bulunulabilir. Spesifik enerji değerleri farklı kesme derinliği ve keskiler arası mesafeler için belirlenir, daha sonra aşağıdaki eşitlikte(4.1) mekanik bir kazıcı için kazı hızı hesaplanabilir[14].

$$ICR = k_e . \frac{P}{SE_{opt}} \quad \textbf{(4.1)}$$

Burada;

ICR : Net kazı hızı (m^3/h)

P : Kesici kafa gücü (kW)

SE_{opt} : Optimum spesifik enerji (kWh/m^3)

k_e : Enerji transfer oranı (0,7-0,8)

olarak ifade edilir.

Büyük blok numunesi almanın zahmetli olması Tam Boyutlu Doğrusal Kesme deneyinin kullanımını azaltmaktadır. Bu nedenle, Küçük Boyutlu Kazı Seti ile performans tahmini yaygındır. Küçük Boyutlu Kesme deneyleri 7,6 cm çapındaki karot numunesi yada 20×10×10 cm boyutundaki kayaç numunesinin bir planya makinesinde tablaya oturtulup genişliği 12,7 mm olan bir kama uçlu keski vasıtasıyla 5 mm kesme derinliğinde kesilmesi esasına dayanır. Kesme esnasında oluşan kuvvetler kaydedilir ve ortalama kesme kuvvetlerinin birim mesafede kesilen pasa hacmine bölünmesiyle spesifik enerji MJ/m^3 veya kWh/m^3 olarak bulunur. İndeks değerler olarak sınıflandırılan test sonuçları daha önceden toplanmış olan arazi performans verilerine göre değerlendirilir[15].

Makinenin performansının belirlenmesi ve ifade edilmesinde bazı hesaplamalardan faydalanılmaktadır. Bu hesaplamaların çoğu, zamanı esas almaktadır. Bazı performans belirleme unsurlarını şu şekilde sıralayabiliriz.

-İlerleme hızı; belirli çalışma zamanında kaydedilen ilerleme miktarıdır ve genellikle m/gün, m/hafta ve m/ay olarak ifade edilir. Bakım zamanı da çalışma zamanı içinde değerlendirilir. Bakım zamanı düzenli periyotlar halinde düşünülebileceği gibi, ihtiyaç olduğunda harcanan zaman olarak da düşünülebilir. Bundan dolayı, bakım zamanlarının göz önünde bulundurulmasıyla kıyaslama açısından daha sağlıklı değerler elde edilmektedir.

-Makine kullanım oranı; makinenin kazı yaptığı zamanın, toplam çalışma zamanına oranı olarak ifade edilebilir.

-Keski tüketimi; birim hacim kayanın kazısı için tüketilen keski miktarını ifade etmektedir ve adet/m^3 olarak gösterilir. Tüm kazıda gerekli olan keski sayısının belirlenmesinde kullanılır.

4.2 Yapılan Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları

Baltalimanı-Sarıyer Sahil Kuşaklama Kolektörleri projesinin uygulama aşamasında, yapımcı firma Çelikler İnşaat A.Ş.nin talebi üzerine İTÜ Maden Mühendisliği Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Anabilim Dalı tarafından hazırlanan, mikrotünel kazılarındaki durumun tespiti ve önerileri içeren rapor kapsamında Baltalimanı Bölgesi'nden alınan kaya numuneleri üzerinde, Nokta Yük Dayanım İndeksi ve Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca makinenin performansının belirlenmesine yönelik olarak arazide gözlemler gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında ise; Kalender ve Yeniköy Bölgesi'nde makinenin kazmakta başarısız olduğu kayaçlardan alınan numuneler üzerinde; Nokta Yük Dayanım İndeksi, Dolaylı Çekme Dayanımı ve Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deneyleri yapılmıştır. Makinelerin performansının belirlenmesine yönelik olarak Kalender ve Kireçburnu Bölgeleri'nde yapılan kazı çalışmaları gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen Nokta Yük Dayanım İndeksi, Dolaylı Çekme Dayanımı ve Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deneyleri hakkında özet bilgi ve yapılan çalışmaların detayları aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

4.2.1 Nokta Yük Dayanım İndeksi Deneyi

Bu deney, kaya malzemesinin dayanım sınıflandırmasında, basınç ve çekme dayanımı gibi özelliklerin dolaylı olarak belirlenmesi ile dayanım anizotropisinin bulunmasında kullanılır. Deney ekipmanının taşınabilir olması hem laboratuvar hem de arazide kullanılmasını sağlamaktadır. Kullanılan örnek çapı 30 ile 85 mm arasında olabilir ancak tercih edilen ölçü 50 mm'dir[16]. Deney, karotlar (çapsal ve eksenel) ve düzgün kesilmiş veya az düzeltilmiş kaya blokları üzerinde yapılabildiği için örnek hazırlanması zahmetsiz ve masrafsızdır.

Deney, 60° tepe açısına ve 5 mm eğrilik çapına sahip konik yükleme başlıkları arasına sıkıştırılan numunenin bir kriko yardımıyla hidrolik kuvvet üretilmesi sonucunda numunenin yenildiği basıncın göstergeden okunması esasına dayanmaktadır(Şekil 4.1). Bu deneyde aynı kayaçtan alınan en az 10 örnek kullanılmalıdır[16]. Nokta Yük Dayanım İndeksi değeri(4.2)'de ifade edilmiştir.



Şekil 4.1: Nokta Yük Dayanım İndeksi deney ekipmanı.

$$I_s = \frac{F}{{d_e}^2} \quad \textbf{(4.2)}$$

Burada;

I_s : Nokta Yük Dayanım İndeksi (MPa)

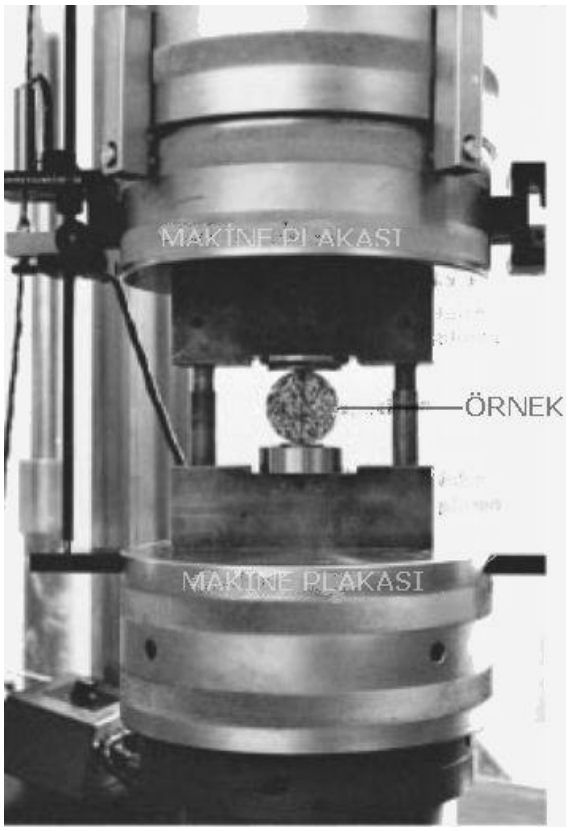
d_e : Eşdeğer karot çapı (mm) (Deney yapılan numunenin şekline ve yükleme biçimine göre değişmektedir)

F : Kırılma yükü (N)

olarak ifade edilmiştir.

4.2.2 Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi (Brazilian)

Dolaylı çekme dayanımı deneyi; yükleme iki plaka arasına konulan, kalınlığının çapına oranı 0,2-0,75 değerleri arasında değişen dairesel disk şeklindeki örneğin basınç uygulanarak kırılması ve elde edilen kırılma yükü değerinin (4.3)'de yerine konulmasıyla çekme dayanımının hesaplanması esasına dayanır(Şekil 4.2)[17]. Bu deneyde kırılma merkezde oluşan yatay çekme gerilmesi nedeniyle olmaktadır.



Şekil 4.2: Dolaylı Çekme Dayanımı deney seti[16].

$$\sigma_t = \frac{2.F}{\pi.d.l} \quad \textbf{(4.3)}$$

Burada;

σ_t : Çekme dayanımı (kg/cm^2)

F : Kırılma yükü (kg)

d : Örneğin çapı (cm)

l : Örneğin uzunluğu (cm)

olarak ifade edilmektedir.

4.2.3 Cerchar Aşındırıcılık İndeks Deneyi

Çekme dayanımı 160 kg/mm^2 olan 90° tepe açılı konik bir uç 7 kg bastırma kuvveti ile numune üzerinde 1 cm çekilmekte ve uçta oluşan aşınma yüzeyi kayaç numunesinin aşındırıcılığını vermektedir.

Bir Cerchar aşınma indeksi 1/10 mm'lik aşınmayı ifade eder. Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deney seti Şekil 4.3'de, kayaçların aşınma indeksine göre sınıflandırması Tablo 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deney seti.

Tablo 4.2: Cerchar Aşınma İndeksine göre kayaç aşındırıcılıkları[18].

Sınıflandırma	Cerchar İndeksi	Kayaç Tipi
Çok aşındırıcı	>4,5	Hornblend, gnays, pegmatit, granit
Oldukça aşındırıcı	4,25-4,5	Amfibol, granit
Aşındırıcı	4,0-4,25	Granit, gnays, şist, kumtaşı, silttaşı
Orta aşındırıcı	3,5-4,0	Dolorit
Biraz aşındırıcı	2,5-3,5	Kumtaşı, silttaşı
Az aşındırıcı	1,25-2,5	Portland kumtaşı
Çok az aşındırıcı	<1.2	Kireçtaşı

4.2.4 İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nün Çalışmaları

İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü tarafından Çelikler İnşaat A.Ş. için yapılan rapor çalışması kapsamında; BLT-A11 kuyusunun yakınındaki açık kazıdan bir adet kaya bloğu alınarak laboratuara getirilmiş ve bu bloktan Nokta Yük Dayanım İndeks deneyi için numuneler alınmıştır. Yapılan Nokta Yük Dayanım İndeksi deneylerinin sonuçları Tablo 4.3'de verilmiştir. Buradan ortalama basınç dayanımı yaklaşık 124 MPa hesaplanmıştır. Deney sonrası numuneler üzerinde oluşan kırılma şekilleri fotoğraflanmıştır(Şekil 4.4).

Tablo 4.3: Nokta Yük Dayanımı (eksenel) deney sonuçları[19].

Numune no	Çap (mm)	Boy (mm)	Kırılma basıncı(bar)	Kırılma yükü (N)	Nokta Yük İndeksi(MPa)	Başınç dayanımı(MPa)
1	54,4	46,6	110	15869	4,92	118,0
2	54,4	45,3	125	18032	5,75	137,9
3	54,4	41,1	100	14426	5,07	121,6
4	54,4	39,2	100	14426	5,31	127,5
5	54,5	46,1	125	17311	5,41	129,9
6	54,4	48,1	Geçersiz kırılma			
7	54,4	43,2	96	13705	4,58	109,9
8	54,4	45,2	110	15869	5,07	121,6
9	54,4	51,6	Geçersiz kırılma			
Ortalama					5,16	123,8



Şekil 4.4: Numunelerin kırılma şekilleri[19].

Ayrıca aynı çalışma kapsamında 2 adet numune üzerinde Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deneyi yapılmıştır. Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deney sonuçları Tablo 4.4'de verilmektedir.

Tablo 4.4: Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deney sonuçları[19].

Numune No	Cerchar Aşındırıcılık İndeksi	Aşındırıcılık sınıfı
2	1,0	Çok az aşındırıcı
5	1,0	Çok az aşındırıcı

BLTA11-BLTA12 kuyuları arasında kireçtaşı içinde gerçekleşen mikrotünel kazısının gözlemini sonucunda, saatte 13,6 cm'lik bir net kazı hızına ulaşıldığı ifade edilmektedir.Mikrotünel makinesinin kesici kafasında 4 adet disk keski yatağı üzerinde 12 adet disk keski ringi vardır. Proje deki kazı çapı için keskiler arası mesafenin 3,4 cm olması ve buna bağımlı olarak optimum kesme derinliğinin 1,7 ile 3,4 mm/devir arasında olması gerekmektedir. Yapılan değerlendirmede; 0,174 mm/devir değerinin optimum olmadığı, yapılan kazının veriminin çok düşük kalacağı belirtilmiştir[19].

4.2.5 Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında; KLB08-KLB09 kuyuları ve YKD02-YKD03 kuyuları arasından numuneler alınmıştır. Projenin izlenmeye başladığı tarihten önce numune almaya en uygun çalışma olan kuyu kazılarının tümünün tamamlanmış olması deney sayısını sınırlandırmıştır.

Kalender Bölgesi'nde yapılan çalışmalar esnasında makine bir çok kez kazıdan çıkarılmak zorunda kalmıştır. KLB08-KLB09 kuyuları arasındaki boru itme çalışması esnasında da makine ilerleyememiş ve ekskavatörle kuyu açılarak kurtarılmıştır (Şekil 4.5). Makinenin kesmekte başarısız olduğu burada ki kayadan numuneler alınmıştır. Bu numuneler üzerinde; Dolaylı Çekme Dayanımı, Nokta Yük Dayanım İndeksi ve Cerchar Aşındırıcılık İndeks deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.5: Kalender Bölgesindeki makine kurtarma çalışması.

Yeniköy Bölgesi'nde ise; YKD02-YKD03 arasındaki itiş esnasında dolgunun ardından sert kayaya rastlanmış ve makine kazı yapamamıştır. YKD02-YKD01 kuyuları arasının da aynı özellikli kaya olması nedeniyle ekskavatörün koluna kırıcı takılarak kaya parçalanmış sonra yine ekskavatörle kazı yapılmıştır(Şekil 4.6). Buradan alınan numuneler üzerinde; Dolaylı Çekme Dayanımı, Nokta Yük Dayanım İndeksi ve Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.6: Yeniköy Bölgesi'ndeki açık kazı çalışması.

Nokta Yük Dayanım İndeks deneyinden; Yeniköy Bölgesi YKD02-YKD01 kuyuları arasından alınan numunelerin ortalama basınç dayanımı yaklaşık 165 MPa, Kalender Bölgesi KLB07-KLB08 kuyuları arasından alınan numunelerin ortalama basınç dayanımı 93 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 4.5).

Kalender Bölgesi'nden alınan kaya bloklarının çatlaklı yapıya sahip olması nedeniyle numune hazırlamada problem çıkmış ve alınan üç deney numunesinden biri deney esnasında yük almaksızın parçalanmıştır

Tablo 4.5: Nokta Yük Dayanımı deney sonuçları.

Numune no	Çap (mm)	Boy (mm)	Kırılma basıncı (bar)	Kırılma yükü (N)	Nokta Yük İndeksi (MPa)	Başınç dayanımı (MPa)	Kırılma şekli
Y4(Eksenel)	51,60	34,80	110	17023	7,45	185,0	Normal
Y5(Eksenel)	51,80	38,30	125	15580	6,17	153,5	Normal
Y6(Eksenel)	51,00	38,10	100	15147	6,12	151,3	Normal
Y7(Eksenel)	51,70	33,60	100	15869	7,17	178,4	Normal
Y8(Eksenel)	51,70	35,20	125	14426	6,23	154,8	Normal
Yeniköy numunesi ortalama basınç dayanımı						164,6 MPa	
K1(eksenel)	51,70	31,30	55	7934	3,85	95,8	Yapısal
K2	52,00	92,80	Deney yapılamadı (numune parçalandı)				
K3(çapsal)	51,80	107,00	75	10819	4,03	90,1	Yapısal
Kalender numunesi ortalama basınç dayanımı						93,0 MPa	

Not : K1 nolu numune tabakalı (tabakalanma düzlemi karot eksenine dik), Y nolu numunelerin tümü ise masif görünümlüdür.

Yeniköy Bölgesi numuneleri üzerinde ayrıca yapılan Dolaylı Çekme Dayanımı deneyi sonucunda; ortalama 7,1 MPa çekme dayanım bulunmuştur(Tablo 4.6).

Tablo 4.6: Dolaylı Çekme Dayanımı deney sonuçları.

Numune No	Çap (cm)	Boy (cm)	Kırılma yükü (kN)	Kırılma yükü (kg)	Çekme dayanımı (MPa)	Açıklama
Y1	5,16	3,48	22,0	2243,4	7,8	Normal yenilme
Y2	5,16	3,92	20,0	2039,4	6,3	Geçersiz yenilme
Y3	5,17	3,81	19,4	1978,2	6,3	Normal yenilme
Yeniköy numunesi ortalama çekme dayanımı						7,1 MPa

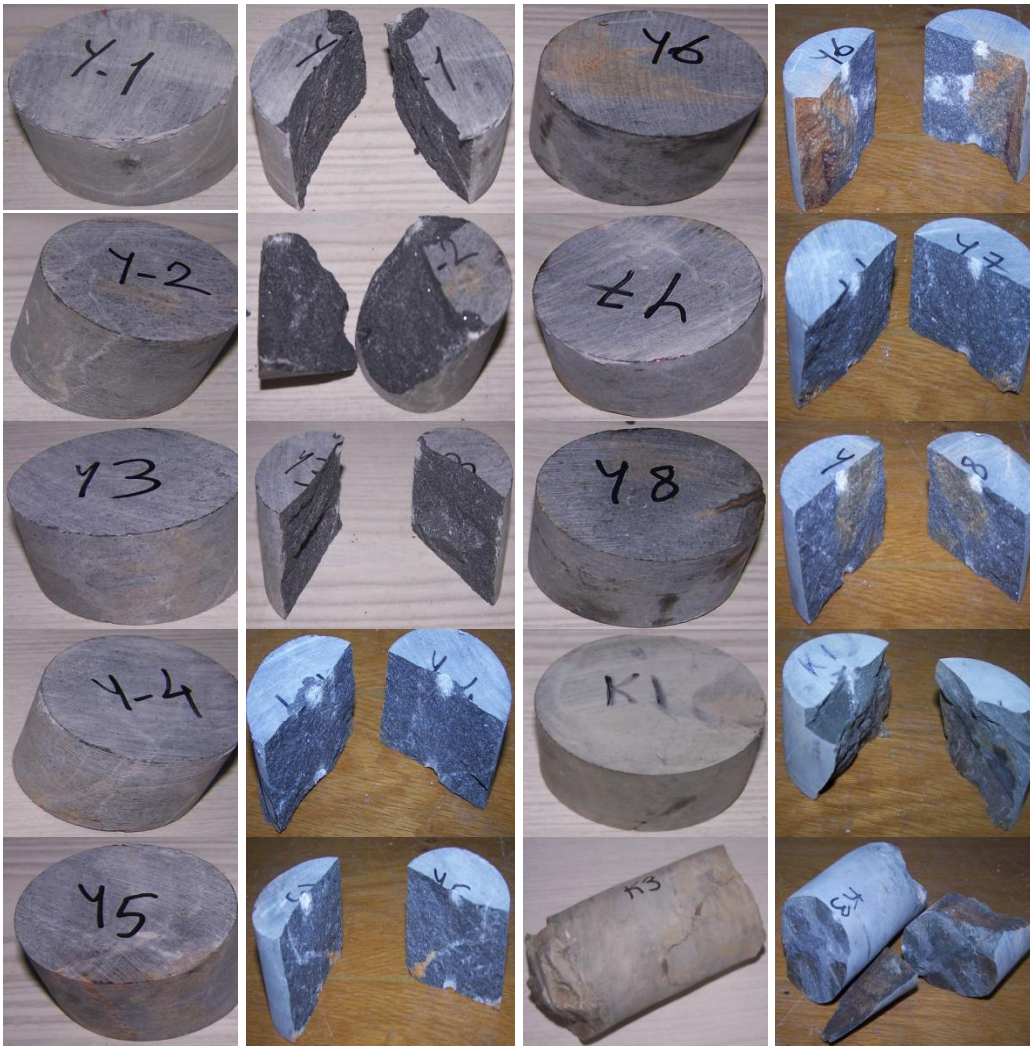
Not: Yükleme hızı 0,25kN/s

Dolaylı Çekme Dayanımı deneyi 300 ton kapasiteli elektronik göstergeye sahip ELE marka presde yapılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: ELE marka deney presi.

Dolaylı Çekme Dayanımı deneyinde kullanılan Y1,Y2,Y3 örnekleri ve Nokta Yük Dayanım İndeksi deneyinde kullanılan Y4,Y5,Y6,Y7,Y8,K1,K3 örneklerinin kırılma öncesi ve sonrası çekilen fotoğrafları Şekil 4.8'da verilmiştir.



Şekil 4.8: Örneklerin deney öncesi ve sonrası görünüşü.

Yeniköy ve Kalender Bölgeleri'den alınan numuneler üzerinde yapılan Cerchar Aşındırıcılık İndeks deneyi sonucunda Kalender numunesinin aşındırıcılığı Yeniköy'e göre az miktarda da olsa yüksek çıkmıştır(Tablo 4.7).

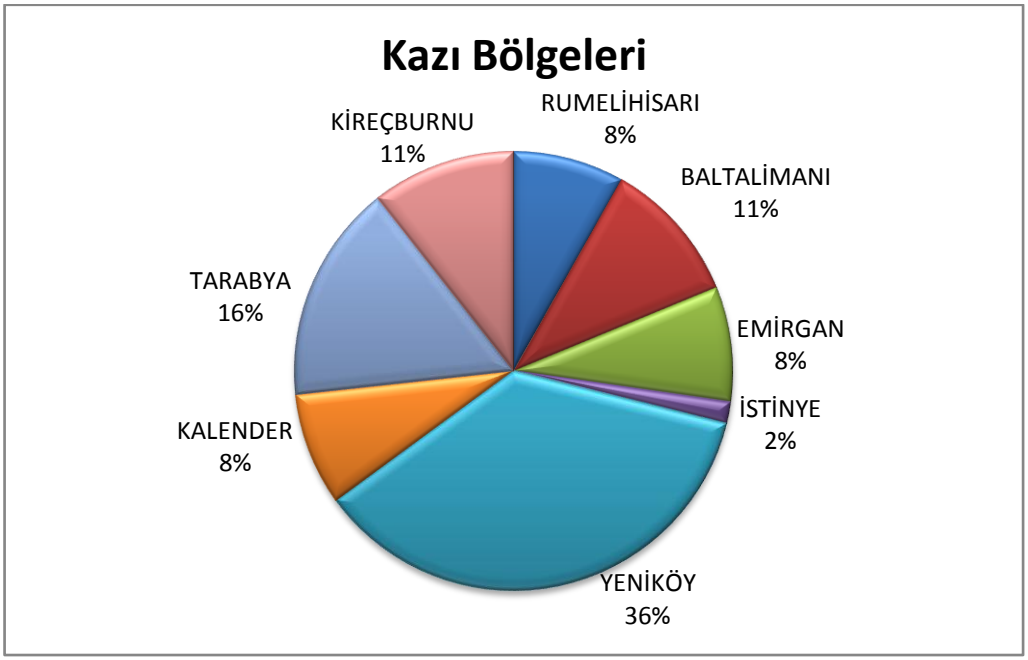
Tablo 4.7: Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deney sonuçları.

Numune No	Cerchar Aşındırıcılık İndeksi	Aşındırıcılık sınıfı
Y1	1,00	Çok az aşındırıcı
K1	1,25	Az aşındırıcı

4.3 Gerçekleşen İlerlemeler

Rumelihisarı'ndan Kefeliköy'e kadar uzanan ve 8 bölge adı altında projelendirilen 600 mm çaplı boru döşeme işi 7 gün 24 saat çalışma esasına göre gerçekleştirilmiştir.

Tüm projedeki en fazla boru döşemesi; %36 (2450m) ile Yeniköy Bölgesi'nde, en düşük boru döşemesi ise; %2 (110m) ile İstinye Bölgesi'nde gerçekleşmiştir(Şekil 4.9 ve Tablo 4.8). Toplamda ise 6776 m kazı yapılmıştır[20].

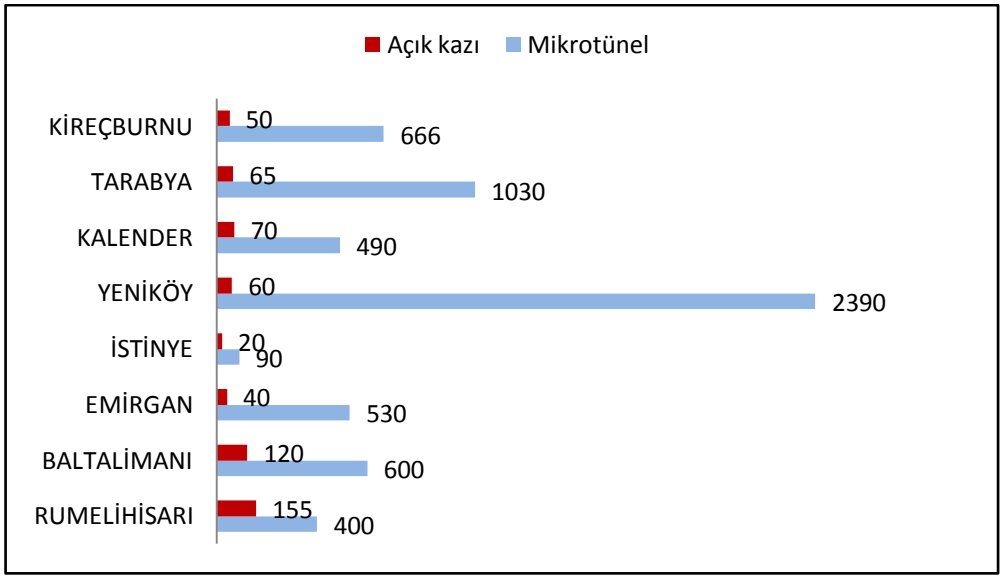


Şekil 4.9: Bölgelere göre boru döşeme işinin dağılımı.

Toplam kazının %91,4'ü mikrotünel makinesi ile gerçekleştirilirken, geriye kalan %8,6'lık oran ise; makinelerin zaman zaman çeşitli nedenlerden(makine arızası, ortam özellikleri vb.) kazıdan alınmak zorunda kalınması ve makinenin kazamayacağı dayanıma sahip kayalara rastlanmasından dolayı açık kazı oluşturmuştur(Tablo 4.8 ve Şekil 4.10).

Tablo 4.8: Bölgelere göre mikrotünel gerçekleşme oranları.

Bölge	Mikrotünel makinesi ile kazı(m)	Açık kazı (m)	Toplam (m)	Mikrotünel gerçekleşme oranı(%)
Rumelihisarı	400	155	555	72,1
Baltalimanı	600	120	720	83,3
Emirgan	530	40	570	93,0
İstinye	90	20	110	81,8
Yeniköy	2390	60	2450	97,6
Kalender	490	70	560	87,5
Tarabya	1030	65	1095	94,1
Kireçburnu	666	50	716	93,0
Proje toplamı	6196	580	6776	91,4



Şekil 4.10: Bölgelere göre mikrotünel ve açık kazı miktarları

Kazı bölgelerine göre genel olarak karşılaşılan formasyon türleri ve kazı esnasında formasyonlardan dolayı ortaya çıkan problemlerle ilgili açıklamalar Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.9: Bölgelere göre kazıyla ilgili açıklamalar.

Kazı Bölgesi	Karşılaşılan Zemin Türleri	Gerçekleşen Kazı (m)			Açıklamalar
		Makine	Açık kazı	Toplam	
R.HİSARI	Kum,çakıl,toprak iskele kazıkları, yerel kayalar	400	155	555	Sert kireçtaşından dolayı; 2.Boğaz Köprüsü altından Baltalimanı istikametindeki 112 m'lik kesim açık kazı ile geçilmiştir. Mikrotünel makinesi, kaya sokulumlarından dolayı 3 kez kazıdan çıkarılmak zorunda kalınmıştır.
BALTALİMANI	Kum, toprak, dolgu, yerel ve anrojman kayalar	600	120	720	Mikrotünel makinesi, kayada ilerleme problem yaşanmış ve bir kaç kez kazıdan çıkarılmak zorunda kalınmıştır, ayrıca sert kayalardan dolayı yaklaşık 120 m'lik kısım açık kazı ile geçilmiştir.
EMİRGAN	Dolgu, kum, çakıl ve anrojman kayalar	530	40	570	Boyacıköy kesiminde yer alan yerel kayalardan dolayı makine birkaç kez alınmak zorunda kalmış ve yaklaşık 40 m'lik kısım açık kazı ile döşenmiştir.
İSTİNYE	Dolgu, yumuşak zemin ve yerel kayalar	90	20	110	Kayada ilerlemede problem yaşanmış ve makine alınarak kalan yaklaşık 20 m'lik kısımda açık kazı yapılmıştır. Bu kesimde sadece 2 sürüş gerçekleşmiştir.

Tablo 4.9: Bölgelere göre kazıyla ilgili açıklamalar(devamı).

YENİKÖY	Dolgu ve yerel kayalar	2390	60	2450	Yeniköy Bölgesi AB ve CD olmak üzere 2 kısım olarak projelendirilmiştir. AB kısmında çoğunlukla dolgu ile karşılaşılmıştır. CD kısmında ise dolguyla beraber sert kireç taşları bulunmaktadır. Sert kireçtaşlarının bulunduğu kuyuların arasında açık kazı yapılmıştır.
KALENDER	Anrojman kayalar ve dolgu	490	70	560	Bu bölgede mikrotünel makinesi ile kazı esnasında gömülü iskele duvarı ile dolgu içerisindeki anrojman kayalardan dolayı ilerlemede sıkıntılar yaşanmış ve makine bir çok kez kazıdan alınarak açık kazıyla hatlar tamamlanmıştır.
TARABYA	Kum, çakıl, bataklık ve yerel kayalar	1030	65	1095	Tarabya Otelinin önünde sert kaya içerisinde makine ile ilerleme sağlanamamış ve açık kazıya dönülmüştür. Ayrıca, Tarabya Deresi'nin olduğu kesimde ise çamur ortamda kazı makinesi batarak kazı güzergahından çıkmıştır. Bu nedenle bu kesimde ilave kuyu inşaasına gidilerek yaklaşık 10 m'lik kısım daki borular mikrotünel makine olmaksızın itilmiştir.
KİREÇBURNU	Kum, çakıl, dolgu ve yerel kayalar	666	50	716	Bu bölge A ve B hattı olmak üzere iki kısımda projelendirilmiştir, her iki kısım Kireçburnu Zabıta Karakolu önünde birleşmektedir. A hattında mikrotünel makinesi ile çalışmalar yürütülmüştür. Anrojman kayalardan dolayı ilerlemede problemler yaşanmış ve makine bir çok kez kazıdan alınmak zorunda kalınmıştır.

4.3.1 Hakedişlerden Elde Edilen İlerleme Hızları

Proje kapsamında toplam 26 hakediş hazırlanmış ve İSKİ Genel Müdürlüğü'ne sunulmuştur. Hazırlanmış olan hakedişlerin tarih aralıkları Tablo 4.10'da, gün sayıları ve gerçekleşen ortalama günlük ilerlemeleri ise Tablo 4.11'da verilmiştir. Proje toplam 848 gün sürmüş ve bazı hakediş dönemlerinde 2 mikrotünel makinesi kullanılmıştır. Mikrotünel ve açık kazının toplamı için günde ortalama 7,99 m'lik hat döşemesi hesaplanmıştır. Günlük ortalama mikrotünel kazısı miktarı, 2 makineli dönemlerdeki günlük ilerleme hızlarının yarısı değerlendirilerek, tüm hakediş dönemlerinin ortalamasından makine başına günlük ortalama ilerleme hızı 5,16 m olarak belirlenmiştir. En yüksek makine ilerleme hızları; 10. ve 12. Hakediş döneminde sırasıyla 10,40 m/gün ve 10,43 m/gün olarak Tarabya Bölgesi'ndeki çamurlu ortam içerisinde gerçekleşmiştir(Tablo 4.11).

Tablo 4.10: Hakediş dönemlerinin tarih aralıkları[20].

Hakediş No	Hakediş Tarihi	Hakediş No	Hakediş Tarihi
1	23.08.2005-30.09.2005	14	31.12.2006-31.01.2007
2	30.09.2005-31.10.2005	15	31.01.2007-28.02.2007
3	31.10.2005-31.12.2005	16	28.02.2007-31.03.2007
4	31.12.2005-31.03.2006	17	31.03.2007-22.04.2007
5	31.03.2006-30.04.2006	18	22.04.2007-31.05.2007
6	30.04.2006-31.05.2006	19	31.05.2007-30.06.2007
7	31.05.2006-30.06.2006	20	30.06.2007-31.07.2007
8	30.06.2006-31.07.2006	21	31.07.2007-31.08.2007
9	31.07.2006-31.08.2006	22	31.08.2007-30.09.2007
10	31.08.2006-30.09.2006	23	30.09.2007-31.10.2007
11	30.09.2006-31.10.2006	24	31.10.2007-30.11.2007
12	31.10.2006-30.11.2006	25	30.11.2007-31.12.2007
13	30.11.2006-31.12.2006	26	31.12.2007-17.01.2008

Tablo 4.11: Hakediş dönemlerine göre boru döşeme işleri[20].

HAKEDİŞ		İLERLEMELER (m)						
		Mikrotünel			Açık Kazı		Toplam	
No	Gün sayısı	Kazılan hat	Günlük Ortalama	Günlük Makine.başı	Dönemlik gerçekl.	Günlük	Dönemlik gerçekl.	Günlük
1	38	130	3,42	3,42	0	0	130	3,42
2	31	74	2,39	2,39	0	0	74	2,39
3	62	87	1,40	1,40	20	0,32	107	1,73
4	90	174	1,93	1,93	47	0,52	221	2,46
5	30	170	*5,67	2,84	0	0	170	5,67
6	31	203	*6,55	3,28	12	0,39	215	6,94
7	30	323	*10,77	5,39	0	0	323	10,77
8	31	160	5,16	5,16	33	1,06	193	6,23
9	31	250	*8,06	4,03	0	0	250	8,06
10	30	312	10,40	10,40	0	0	312	10,40
11	31	303	9,77	9,77	0	0	303	9,77
12	30	313	10,43	10,43	55	1,83	368	12,27
13	31	356	*11,48	5,74	0	0	356	11,48
14	31	375	*12,10	6,05	11	0,35	386	12,45
15	28	360	*12,86	6,43	35	1,25	395	14,11
16	31	425	*13,71	6,86	10	0,32	435	14,03
17	22	394	*17,91	8,96	0	0	394	17,91
18	9	137	*15,22	7,61	10	1,11	147	16,33
19	30	337	*11,23	5,62	70	2,33	407	13,57
20	31	268	*8,65	4,33	20	0,65	288	9,29
21	31	234	*7,55	3,78	122	3,94	356	11,48
22	30	142	4,73	4,73	30	1,00	172	5,73
23	31	237	*7,65	3,83	35	1,13	272	8,77
24	30	191	*6,37	3,19	40	1,33	231	7,70
25	31	175	*5,65	2,83	30	0,97	205	6,61
26	17	66	3,88	3,88	0	0	66	3,88
Proje	848	6196	7,31	5,16	580	0,68	6776	7,99

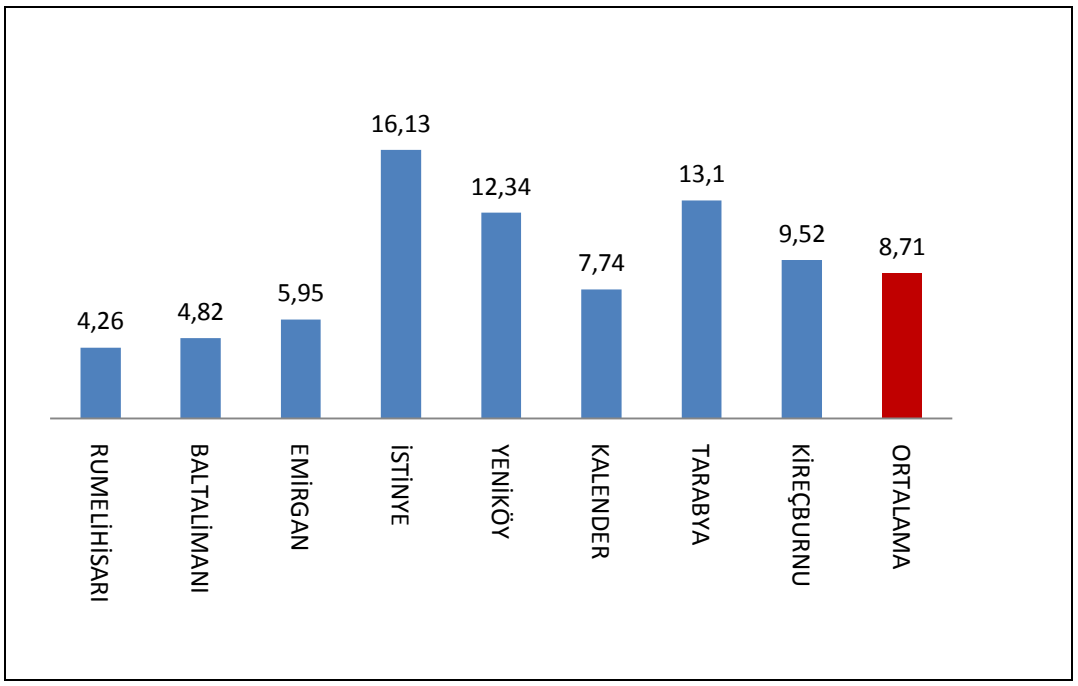
*2 mikrotünel makinesi kullanılmıştır.

4.3.2 Makine Kayıtlarından Elde Edilen İlerleme Hızları

Makine kaydı olan itişler incelenerek, mikrotünel makinelerinin günlük ilerlemeleri bölgelere göre belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmede, kum, çakıl, dolgu, toprak, çamur v.b zeminler yumuşak ortam, kayalar ise sert ortam olarak nitelenmiştir. Her ikisinin birlikte yer aldığı ortamlar da karışık ortam olarak nitelenmiştir. Kayıt altına alınmış ilerlemelerin zemin türü ve itme mesafesi de dikkate alınarak bölgelere göre oluşturulmuş tabloları Ek_B'de verilmiştir. Makine kayıtları, sürüşler için ayrı ayrı olduğundan elde edilen ilerleme hızları da tek makine için geçerlidir.

En yüksek ortalama ilerleme hızı 16,13 m/gün olarak İstinye Bölgesi'nde gerçekleşmiştir. Ancak bu bölgede sadece 2 sürüş yapılmış ve 1 tanesinin makine kaydı bulunmaktadır. Çoğunlukla çamur içerisinde kazının gerçekleştiği Tarabya Bölgesi'nde ortalama 13,10 m/gün ilerleme hızına ulaşmıştır.

En düşük ilerleme hızları ise, kaya içinde kazının yoğun olduğu Rumelihisarı ve Baltalimanı Bölgeleri için sırasıyla 4,26 ve 4,82 m/gün olarak gerçekleşmiştir. Tüm proje için ise makine verilerinden, ortalama 8,71 m/gün ilerleme hızı hesaplanmıştır(Şekil 4.11).

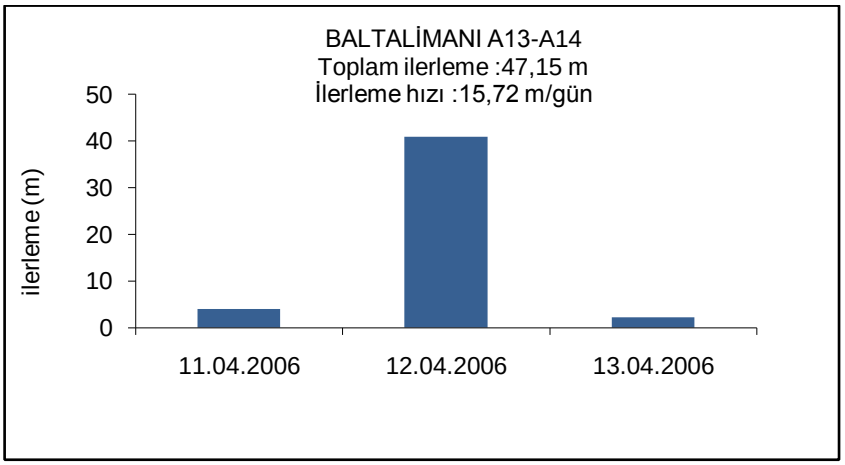


Şekil 4.11: Bölgelere göre ortalama günlük ilerlemeler.

Ayrıca; makine kaydı bulunan itişler bütün olarak değerlendirilerek tüm proje için; Yumuşak ortamda; 12,42 m/gün, karışık ortamda; 5,49 m/gün ve kaya ortamlarda ise; 2,68 m/gün ortalama ilerleme hızı hesaplanmıştır.

Dolgu, kum-çakıl ve bataklık içerisinde gerçekleşen 10 sürüşe ait makine kayıtlarından, boru itme süresinin ortalaması 20,10 dakika, net kazı hızlarının ortalaması 7,11 m/saat olarak hesaplanmıştır(Ek_C).

Rekor günlük ilerleme, 12.04.2006 günü Baltalimanı Bölgesi'nde BLTA13-BLTA14 kuyuları arasında dolguda 41 m olarak gerçekleşmiştir(Şekil 4.12). Bu güne ait makine kaydının incelenmesi sonucunda; itilen 20 boru için, itme sürelerinin ortalaması 17,7 dakika, net kazı hızlarının ortalaması ise 7,56 m/saat olarak hesaplanmıştır(Tablo 4.12).



Şekil 4.12: BLTA13-BLTA14 kuyuları arası günlük ilerlemeler.

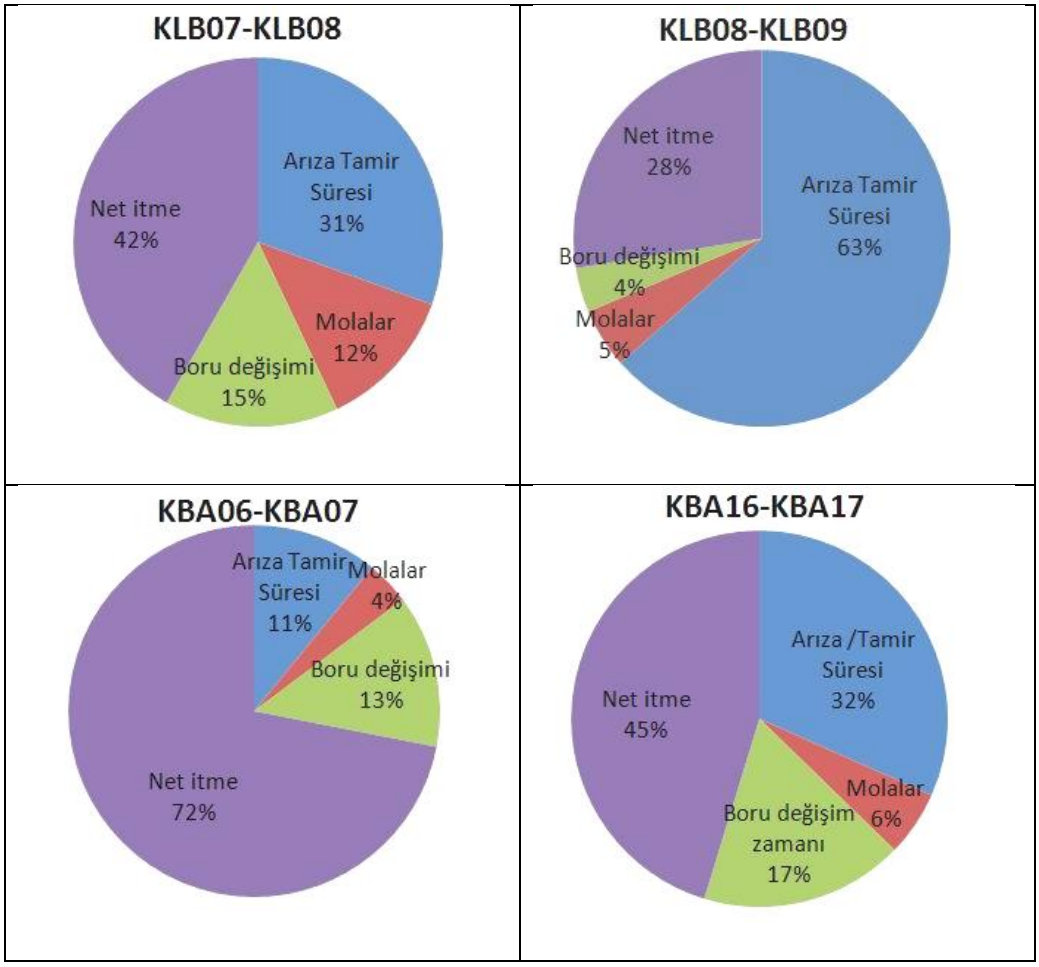
Tablo 4.12: 12.04.2006 tarihinde gerçekleşen boru itişleri.

Boru No	İtme süresi (dakika)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru No	İtme süresi (dakika)	Net kazı hızı (m/saat)
1	15	8,00	11	16	7,50
2	18	6,67	12	11	10,91
3	25	4,80	13	12	10,00
4	20	6,00	14	14	8,57
5	17	7,06	15	11	10,91
6	26	4,62	16	14	8,57
7	41	2,93	17	16	7,50
8	25	4,80	18	13	9,23
9	15	8,00	19	11	10,91
10	19	6,32	20	15	8,00
Ortalama itme süresi 17,7 dakika.			Ortalama net kazı hızı 7,56m/saat.		

Makine kayıtlarının incelenmesi sonucunda günlük ilerlemeleri tespit edilebilen bazı sürüşlere ait ilerleme grafikleri Ek_D'de verilmiştir.

4.3.3 Makinelerin Yerinde İzlenmesi İle Belirlenen İlerleme Hızları

Kalender ve Kireçburnu Bölgelerinde kazı çalışmasını yürüten AVN600XC mikrotünel makinelerinin çalışmaları takip edilerek zaman kayıtları tutulmuştur. Kalender Bölgesi'nde KLB07-KLB08 ve KLB08-KLB09, Kireçburnu Bölgesinde ise, KBA06-KBA07 ve KBA16-KBA17 itişleri gözlemlenmiştir. Burada çalışma esnasında geçen zaman; mola süresi, boru değişim süresi, arıza/tamir süresi ve itme süresi olmak üzere 4 ayrı başlık altında değerlendirilmiştir. Gözlemlenen sürüşler için; her bir başlığın yüzde değerleri bulunmuştur (Şekil 4.13).



Şekil 4.13: Gözlemlenen sürüşlerdeki zaman dağılımı.

Bu sürüşler içinde; makine kullanım oranı en yüksek %72 ile KBA06-KBA07 kuyuları arasında dolgu içinde gerçekleşmiştir. Bu sürüşteki net kazı hızı; 0,52 m/saat olarak belirlenmiştir(Tablo 4.13).

En yüksek arıza/tamir süresi ise %63 ile anrojman kayaların yoğun olduğu KLB08-KLB09 kuyuları arasında gerçekleşmiştir(Şekil 4.13). Bu sürüşteki makine kullanım oranı %28 ve net kazı hızı 0,32 m/saat'tir(Tablo 4.13).

Tablo 4.13: Gözlem yapılan sürüşlerde günlük ilerlemeler.

Kuyular	Mesafe (m)	Zemin tipi	Toplam süre (saat)	Kazı süresi (saat)	Net kazı hızı (m/saat)	Makine kullanım oranı(%)
KLB08-KLB09	20,0	Anr.kaya	223,8	62,7	0,32	28
Anrojman kayada ortalama					0,32	28
KLB07-KLB08	33,0	Dolgu	75,4	31,7	1,04	42
KBA06-KBA07	54,4	Dolgu	146,3	105,3	0,52	72
KBA16-KBA17	63,4	Dolgu	146,9	66,0	0,94	45
Dolguda ortalama					0,83	53

Duraklamalarda en fazla pay sahibinin arıza/tamir süreleri olduğunu söylenebilir. Başlıca karşılaşılan arızaları ise; boru tıkanmaları, pompaların arızalanması, çamur ayrıştırma sisteminde meydana gelen aksaklıklar(eleklerin delinmesi, çamur tankının kazılan malzeme ile dolması), lazer sistemi arızaları, yönlendirme silindirleri ile ilgili arızalar olarak sıralayabiliriz. Kazı sistemi bir bütün olduğu için, her hangi bir ünitede meydana gelen bir aksaklık kazının tamamen durmasına sebep olmaktadır. Gözlemlenen dört sürüşteki ortalama boru değişim süresi 44 dakika olarak hesaplanmıştır.

4.4. Günlük İlerleme Hızları İle İlgili Özet ve Tartışma

Makine ilerlemelerinin tüm proje için belirlenmesinde kullanılan makine kayıtları ve günlük raporlara göre ortalama ilerleme hızları özellikle kireçtaşı içindeki kazıların gerçekleştiği Rumelihisarı ve Baltalimanı Bölgeleri'nde sırasıyla, 4,26 m/gün ve 4,82 m/gün olarak en düşük değerleri oluşturduğu görülmüştür. BLTA11-BLT-A12 arasında ortalama basınç dayanımının yaklaşık 124 MPa olduğu tespit edilen kireçtaşı içinde gerçekleşen sürüşün izlenmesi sonucunda, saatte 13,6 cm'lik bir net kazı hızına ulaşıldığı ifade edilmektedir. Kesici kafa devir sayısı göz önüne alınarak yapılan değerlendirmede; 0,174 mm/devir değeri elde edilmiş, bunun kesici kafa için optimum olmadığı, yapılan kazının veriminin çok düşük kalacağı belirtilmiştir[19].

Dolayısıyla kireçtaşı kazısının gerçekleştiği bu bölgelerde küçük çaplı makinelerin yeterli gücü olmadığından optimum kesme derinliğini sağlayamadığı ve bu nedenle ortalama ilerlemelerin düşük kaldığı söylenebilir.

Yine makine kayıtlarından elde edilen verilere göre İstinye Bölgesi en yüksek ilerleme sağlanan bölge gözükmektedir, ancak bu bölgede sadece 2 sürüş gerçekleşmiştir. Bu nedenle, 15 sürüşün ortalaması alınarak günlük ilerlemenin 13,10m hesaplandığı Tarabya Bölgesi en hızlı ilerlemenin sağlandığı bölge olarak düşünülebilir(Ek-B). Bu bölgedeki yüksek hızlara ulaşılmasının sebebi; yumuşak ortam içerisinde (çamur ve kum-çakıl) kazıların gerçekleşmesidir. Bu bölgede en yüksek günlük ilerleme kum-çakıl içerisinde 37,1 m ile 04.10.2006 tarihinde TRB13-TRB12 kuyuları arasında gerçekleşmiştir(Ek_D). En yüksek günlük ortalama ilerleme ise; TRB16-TRB15-TRB14 kuyuları arasında bataklık diye tabir edilen ortam içerisinde 17,97 m/gün olarak gerçekleşmiştir(Ek_B). Makine kaydı bulunan sürüşler hep beraber değerlendirildiğinde tüm proje için; yumuşak ortamda; 12,42 m/gün, karışık ortamda; 5,49 m/gün ve kaya ortamda ise; 2,68 m/gün ortalama ilerleme hesaplanmıştır. Tüm proje içindeki rekor ilerleme ise; Baltalimanı Bölgesi'nde BLTA13-BLTA14 kuyuları arasında dolguda 12.04.2006 günü 41 m olarak gerçekleşmiştir. Bu günde gerçekleştirilen 20 boru itişindeki, itme süreleri ortalaması 17,7 dakika, net kazı hızlarının ortalaması ise 7,56 m/saat olarak hesaplanmıştır. Boru itme zamanının 11 dakikaya düştüğüde göz önüne alındığında 10,91 m/saat net kazı hızına ulaşıldığı görülmektedir. Dolgu, kum-çakıl ve bataklık içerisinde gerçekleşen 10 sürüşe ait makine kayıtlarından, boru itme süresinin ortalaması 20,10 dakika, net kazı hızlarının ortalaması 7,11 m/saat olarak hesaplanmıştır. Boru itme süreleri 8 dakikaya kadar düşmektedir(Ek_C). Bir kısmı AVN 600 tipi makine ile gerçekleşen benzer bir proje olan Mısır'daki Boulac Atıksu Projesi'nde orta seviyede tecrübeli bir operatörle, dolgu içinde ortalama 5,58 m/saat ve kum içerisinde ise ortalama 7,98 m/saat net kazı hızları elde edilmiştir[21].

Kazı yapılan ortam ve kazı bölgeleri göz önüne alınmaksızın tüm proje süresi (848 gün) düşünüldüğünde bir mikrotünel makinesinin günlük ortalama ilerleme hızı tüm hakediş dönemlerinin ortalamasından 5,16 m olarak belirlenmiştir.

Kalender Bölgesi'nde gözlemi yapılan KLB07-KLB08 sürüşü dolguda, KLB08-KLB09 sürüşü ise, anrojman kayaların içerisinde gerçekleşmiştir. KLB07-KLB08 sürüşündeki %42 makine kullanım oranı göz önüne alındığında 1,04 m/saat net kazı hızına ulaşılmıştır. KLB08-KLB09 sürüşünde ise, 0,32 m/saat net kazı hızı ve sık sık arızaların meydana gelmesi nedeniyle %28 makine kullanım oranı gerçekleşmiştir. Kireçburnu Bölgesi'nde gözlemi yapılan; KBA06-KBA07 ve KBA16-KBA17 sürüşleri dolguda gerçekleşmiş ve makine kullanım oranı sırasıyla %72 ve %45 olarak belirlenmiştir. Dolguda gerçekleşen üç sürüş için; ortalama net kazı hızı 0,83 m/saat, ortalama makine kullanım oranı ise %53 olarak hesaplanmıştır. Gözlemi yapılan 4 sürüşte; ortalama 44 dakikalık boru değişim süresi tespit edilmiştir. Boru değişim süresi, çalışan işçilerin tecrübelerine bağlı olarak 20 dakikaya kadar düşebilmektedir. Proje hakedişleri, makine kayıtları ve gözlemlerden elde edilen verilerden hesaplanan ilerleme miktarları Tablo 4.14'de gösterilmiştir.

Tablo 4.14: Tespit kaynaklarına göre makine ilerlemeleri.

Hesaplamada Yararlanılan Kaynak		Kaya ortam	Karışık ortam	Yumuşak ortam	Genel
Hakedişler	Ortalama ilerleme (m/gün)	-	-	-	5,16
Makine kayıtları	Ortalama ilerleme (m/gün)	2,68	5,49	12,42	8,71
Gözlemler	Net kazı hızı(m/saat)	0,32	-	0,83	-
	Makine kullanım oranı	%28	-	%53	-

Kazı gözlemi yapılan, anrojman kayaların yoğun olduğu Kalender Bölgesi'nde, mikrotünel makinesi sık sık kazıda başarısız olarak çıkarılmıştır. KLB08-KLB09 kuyuları arasından alınan numunelerin ortalama basınç dayanımı 93 MPa olarak belirlenmiştir. Makinenin kazamama nedeni olarak, anrojman kayaların makine önünde hareket etmesi olarak gösterilebilir. Herrenknecht firması makinenin 50 MPa kadar basınç dayanımına sahip kayaları kesebileceğini belirtmiş olmasıda gözönüne alınırsa kayanın basınç dayanımının da makine için yüksek olduğu söylenebilir.

Alınan makinelerin sert kayalarda kazı için uygun olmadığı söylenebilir. Özellikle anrojman kayaların bulunduğu Kalender Bölgesi, mikrotünel makinesinin birçok kez kazıdan alınıp, ekskavatörle kazıların tamamlanmasıyla bitirilmiştir. Bu tür yerlerde önceden durum tespit edilirse; makine hiç kazıya sokulmadan imkan ölçüsünde açık kazı yoluna gidilebilir. Çünkü mikrotünel makinesinin kazıdan alınıp çıkartılması zaman kaybına yol açmakta ve işler aksamaktadır.

5. İTME KUVVETLERİ ANALİZİ

Mikrotünel makinesinin ilerlemesinin sağlanabilmesi için hatta uygulanan itme kuvvetlerinin, boruların sürtünme direncini ve makineden kaynaklanan dirençleri yenmesi gerekmektedir (Şekil 5.1). İtme kuyusunun ve itme duvarının tasarımı, bunun yanında itme ekipmanlarının seçimi, itilecek boruların özellikleri, yağlama gereksimi, kuyular arası mesafelerin belirlemesi ile ara itme istasyonlarının sayısı ve yerleşim yerlerinin belirlenmesinde itme kuvvetlerinin tahmini önemlidir. Boru hattının döşenmesi esnasında ihtiyaç duyulan itme kuvveti (5.1)'deki gibi ifade edilebilir.

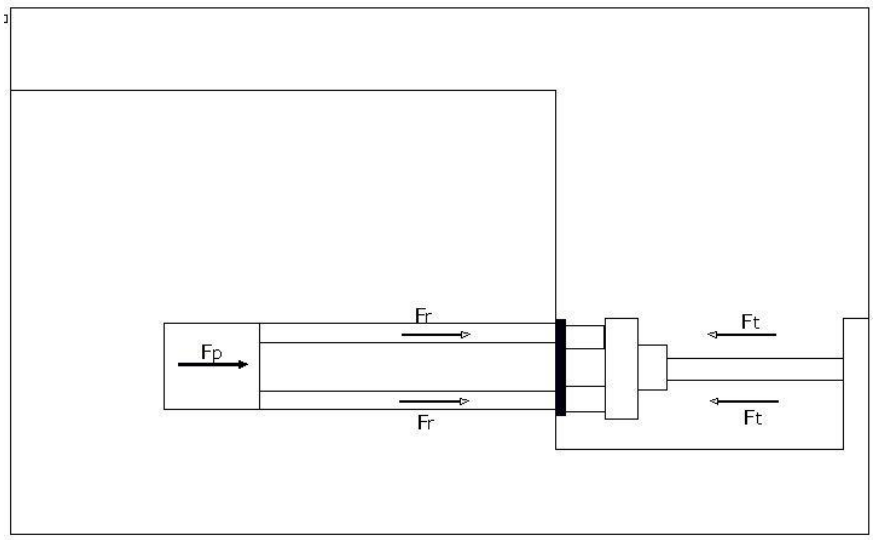
$$F_t = F_p + \Sigma F_r \qquad \textbf{(5.1)}$$

Burada;

F_t :Toplam itme kuvveti.

F_p : Mikrotünel makinesinin kazı yüzeyi ile etkileşimi esnasında ortaya çıkan tepki kuvveti (penetrasyon direnci).

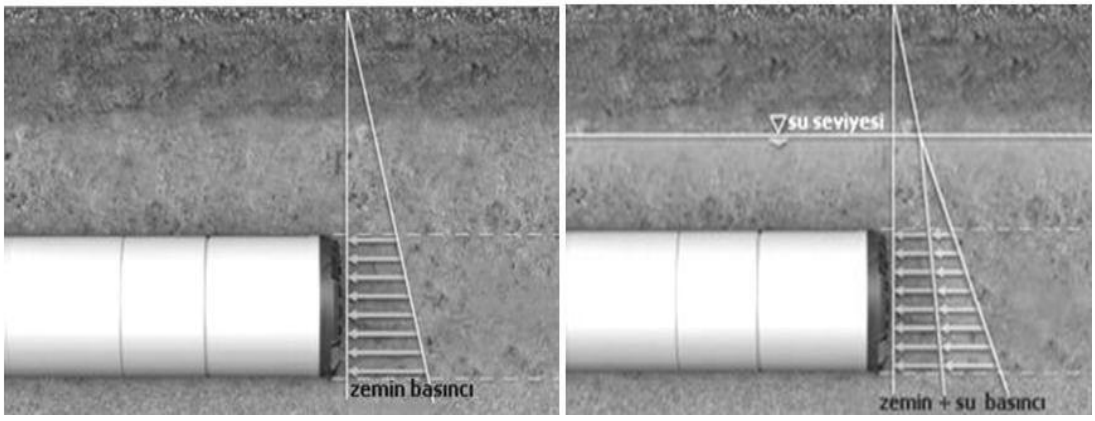
F_r : Boru hattı ile zemin arasındaki temastan kaynaklanan sürtünme kuvveti olarak ifade edilir.



Şekil 5.1: Boru itme esnasında oluşan kuvvetlerin temel gösterimi.

5.1 Penetrasyon Direnci

Penetrasyon yada kazı aynası direnci; makinenin ilerlemesine karşı bir direnç olup, zemin tipine, yeraltı su seviyesine, makinenin yönlendirilmesine ve hareketine bağlı olarak değişmektedir. Makinenin ilerleme hızı teorik olarak kazı aynasındaki basıncı dengeler, böylece herhangi bir çökme ve yüzey kabarması engellenir. Saha tecrübeleri göstermiştir ki, kazı aynasında oluşan kuvvetler tüm tepki kuvvetlerinin küçük bir oranını teşkil etmekle birlikte, makine operatörleri kazı aynasında oluşan kuvvetlere göre makine hızını ayarlar. Yeryüzü oturmalarını engellemek için kazı makinelerinin uyguladığı basıncın zeminden gelen basıncı dengelemesi gerekmektedir, yeraltı su seviyesinin altında yapılan çalışmalarda ise yeraltı suyunun hidrostatik basıncını dengeleyecek ilave bir basınç tatbik edilmelidir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Makine kesici kafasına etki eden zemin ve su basınçları.

5.2 Sürtünme Direnci

Sürtünme direnci; makine gövdesi ve boruların dış yüzeyinin zemin ile yapmış olduğu temastan dolayı ortaya çıkmaktadır. Sürtünme direnci itme kuvvetleri için belirleyici unsur olduğu için; ana itme silindirlerinin kapasitesini belirlemek ve ara itme istasyonlarının kullanımına karar verilmesi açısından önemli bir faktördür. Sürtünme direncini etkileyen ana parametreler, saha ve operasyonla ilgili olarak 2 ayrı kısımda sınıflandırılabilir[22].

Sürtünmeyi etkileyen saha ve tasarımla ilgili faktörler
-Güzergah boyunca zemin tipleri, kalınlıkları, özellikleri ve stabilitesi.
-Boruların boyutları, şekli, ağırlığı ve dış yüzeyi.
-Döşenecek boru hattının uzunluğu.

-Yüzey yükleri (Bina, araç, trafik vb.) ve titreşim.
-Birincil zemin yükleri.
-Yeraltı su seviyesi.

Sürtünmeyi etkileyen operasyonel faktörler
-Aşırı kazı miktarı.
-Yağlayıcı kullanımı.
-Hattın ek noktalarındaki deformasyonlar.
-Ara itme istasyonlarının kullanımı.
-Hatta meydana gelen sapmalar.
-Duraklamaların sıklığı ve süresi.
-Boru hattının ilerleme hızı.

5.3 İtme Kuvvetlerine Etki Eden Faktörler

İtme kuvvetlerini etkileyen faktörlerden, zemin tipi, yeraltı suyu, aşırı kazı miktarı, yağlama, doğrultu sapmaları, duraklamalar, boru kaplamaları, membranlar ve ara itme istanyonları ile ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.

5.3.1 Zemin Tipi

Boru hattı üzerindeki zeminin düşey basıncı; tabakanın yoğunluğu ve hacminden, kohezyon ile içsel sürtünme açısı da göz önünde bulundurularak hesaplanabilir[3].
Bu basınçlar düzenli bir değer göstermez ve boruların etrafındaki boşlukların büyüklüğü ile zemin-boru etkileşimine göre değişiklik gösterir. Benzer şekilde yatay basınçlarda, zeminin türüne ve boru malzemesin tipine göre değişiklik gösterir.

5.3.2 Yeraltı Suyu

Su seviyesi, zeminin stabilitesini etkileyen önemli bir faktördür. Kohezyonsuz zeminler suyu tutamazlar ve kazı esnasında yada hemen ardından boru üzerine çökerler. İnce taneli kohezyonsuz zeminlerde geçirgenlik az olacağı için, çökme daha geç olacaktır. Kohezyonlu zeminlerin ise su tutma özelliği yüksektir. Bu tür zeminlerde şişme ve yapışma özelliği vardır. Zeminin kendini tutma özelliği sürtünme direncini etkileyen önemli bir faktördür. Hattın üzerine zemin çökerse sürtünme yükleri artması kaçınılmazdır[3].

5.3.3 Aşırı Kazı

Kazılan tünel ile borunun dış yüzeyi arasındaki boşluktur ve yaklaşık 10-15 mm kadardır(Şekil 5.3). Taneli zeminlerde sürtünmeyi en alt seviyeye düşürebilmek için kazı çapının boru çapından minimum 10 mm daha fazla olması gerekmektedir[22]. Aşırı kazı oranı arttıkça etki eden kuvvetler azalmaktadır. Aşırı kazı oranı (5.2)'de ifade edilmiştir[3].

$$R = \frac{D_e - D_p}{D_p} \qquad \textbf{(5.2)}$$

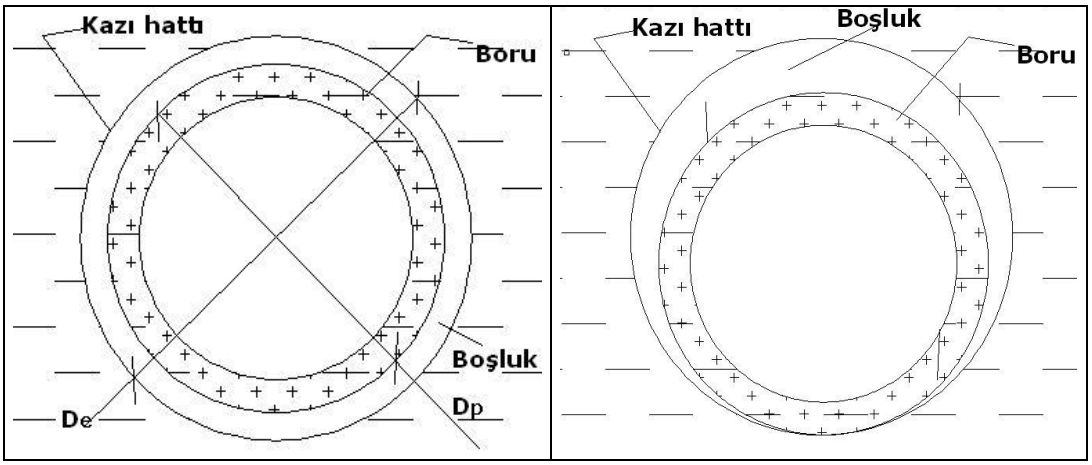
Burada;

R : Aşırı kazı oranı

D_e :Kazı çapı

D_p : Boru dış çapı

olarak ifade edilir.

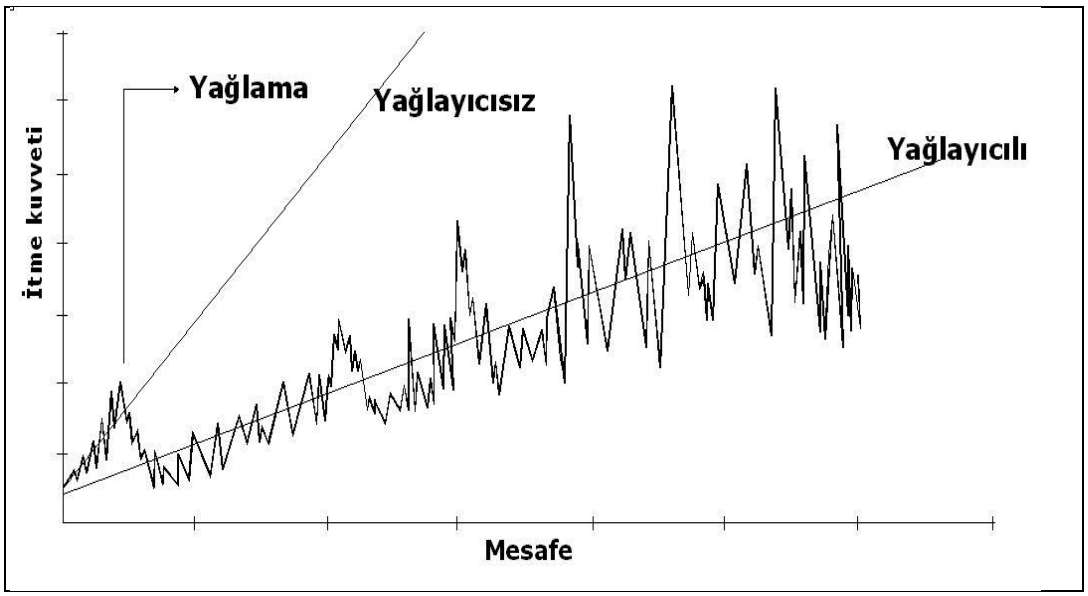


Şekil 5.3: Boru ile kazı hattı arasındaki boşluk[3].

5.3.4 Yağlama

Yağlayıcı kullanımı sayesinde, boru ile zemin arası doldurularak sürtünme azaltılmakta ve boşluğa zemin çökmeleri engellemektir. Bunların yanında, kesici kafa ile zemin arasındaki sürtünme azaltılarak, kesici kafanın ve keskilerin aşınması ve enerji tüketimi azalmaktadır.

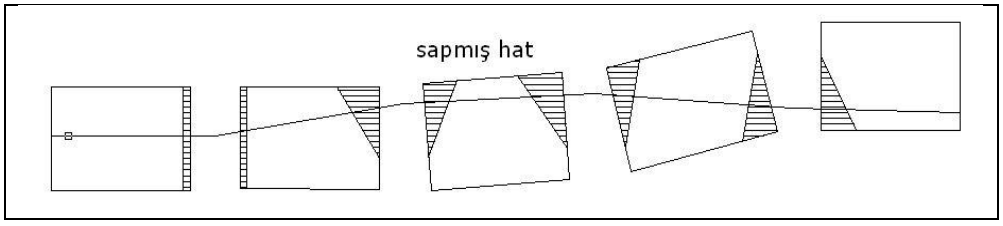
En çok kullanılan bentonit karışımlı yağlayıcılardır. Kil minerali olan bentonit suyla karıştırılıp kazı makinesi üzerindeki enjeksiyon soketlerinden boşluklara pompalanır. Bentonit karışımının etkinliği büyük ölçüde; bentonitin kalitesi, karışımın içeriği ve enjeksiyon işinin kontrolüne bağlıdır. Bentonit kullanımı ile sürtünmede önemli oranda azalma sağlanmaktadır (Şekil 5.4). Killi zeminlerde %30-50 arası, kum zeminde %20 daha az olmaktadır. Diğer bir araştırmaya göre ise itme kuvvetindeki azalma; killi kumda %25, ince kumda %73 civarında olmaktadır [3].



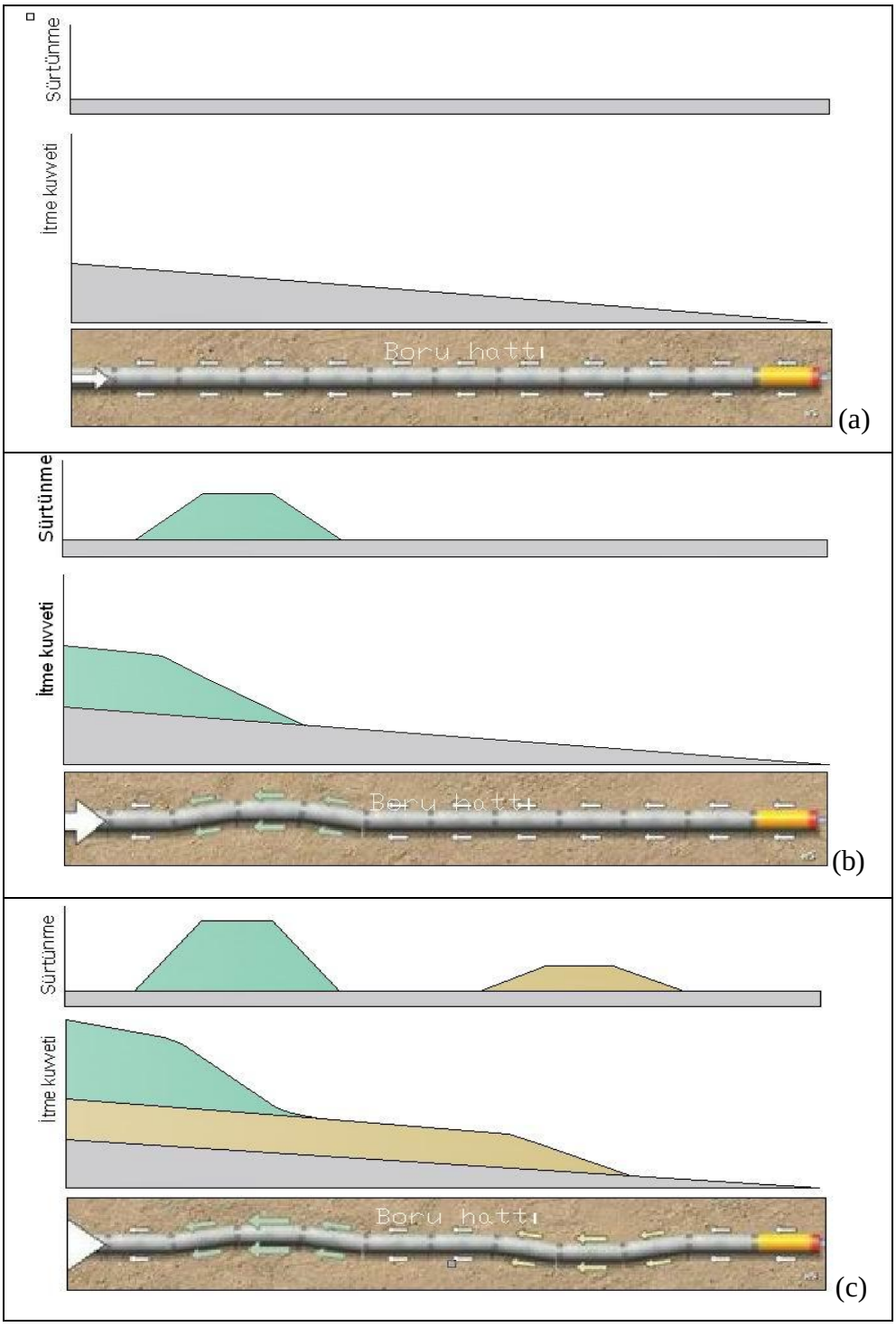
Şekil 5.4: Yağlamanın itme kuvvetleri üzerindeki etkisi.

5.3.5 Doğrultu Sapmaları

Borular itilirken belirlenen güzergahtan sapmalar meydana gelebilmektedir. Böyle bir hatta borular üzerindeki radyal kuvvetler artmakta ve bu da itme kuvvetinin de arttırılmasına sebep olmaktadır. İtme kuvvetlerin arttırılması ise boru birleşme noktalarında yüzeylerin temasının tam olmaması durumunda temas eden noktalarda aşırı kuvvetlerden dolayı deformasyona yol açar (Şekil 5.5). Güzergahtan sapmalar; yatay, düşey yada her ikisinin karışımı şeklinde olabilmektedir. Düşey sapmalar yatay sapmalara göre daha fazla itme kuvvetine ihtiyaç duyulmasına sebep olur (Şekil 5.6).



Şekil 5.5: Sapma yönüne bağlı olarak boru üzerinde oluşan gerilmeler[22].



Şekil 5.6: Sapmaların sürtünme ve itme kuvveti üzerine etkisi[23].

5.3.6 Duraklamalar

Mikrotünelcilikte gecikmeler, çalışılmayan zamanı ifade eder. Bu gecikmeler çeşitli sebeplerden dolayı olabilmektedir. Sisteme boru eklenmesi, mekanik arızalar, pompalardaki arızalar sonucunda ortaya çıkan gecikmelerden dolayı yeniden boruları harekete geçirmek için gerekli olan itme kuvveti artacaktır. Gecikme süresi ayrıca projenin gerçekleşme zamanını ve masrafları arttırır.

5.3.7 Boru Kaplamaları

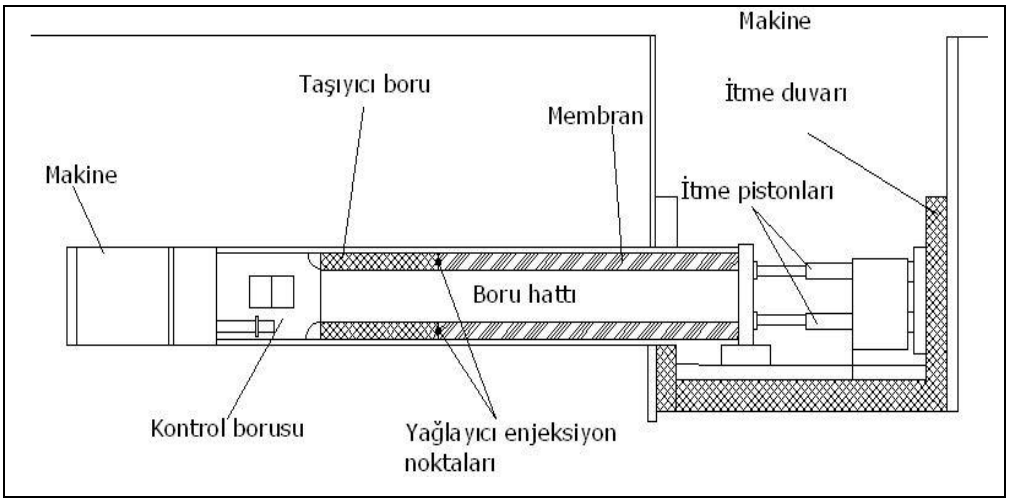
Borunun dış yüzeyinde kullanılan malzeme, sürtünme direncinden dolayı itme kuvvetlerinin artmasında önemli rol oynar. Borunun cidarına sürtünmeyi azaltıcı kaplama uygulanarak sürtünme azaltılabilir(Şekil 5.7).



Şekil 5.7: Kaplama yapılmış borular

5.3.8 Membranlar

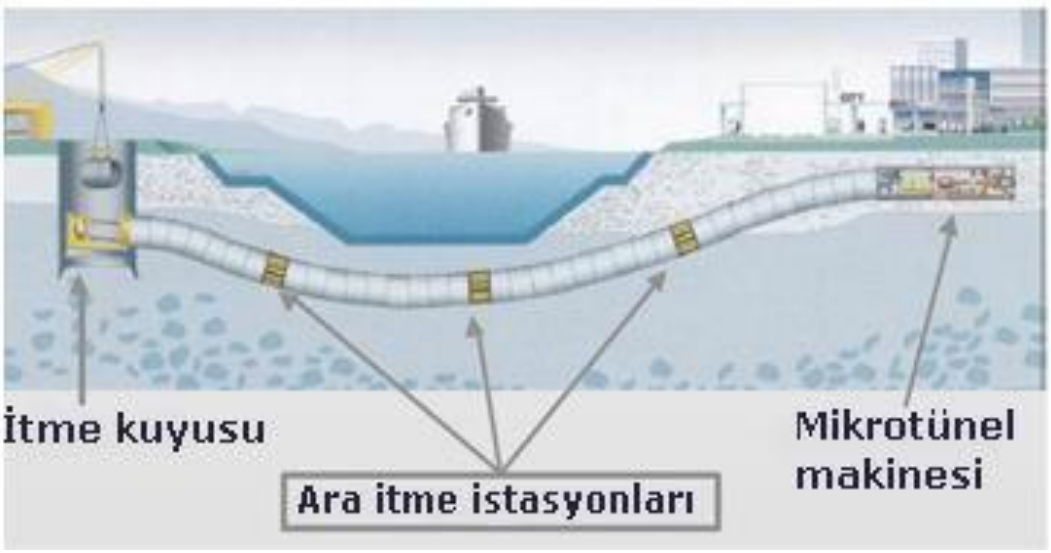
Zemin ile borunun temasını yapay bir tabaka ile ayırmak suretiyle boru ile zemin arasında sürtünmesi düşük yüzey oluşturulur(Şekil 5.8). Membranlar bu amaçla kullanılan bir malzemedir. Bir yağlayıcının membran ile boru arasına enjekte edilmesi ile sürtünme büyük oranda azaltılır.



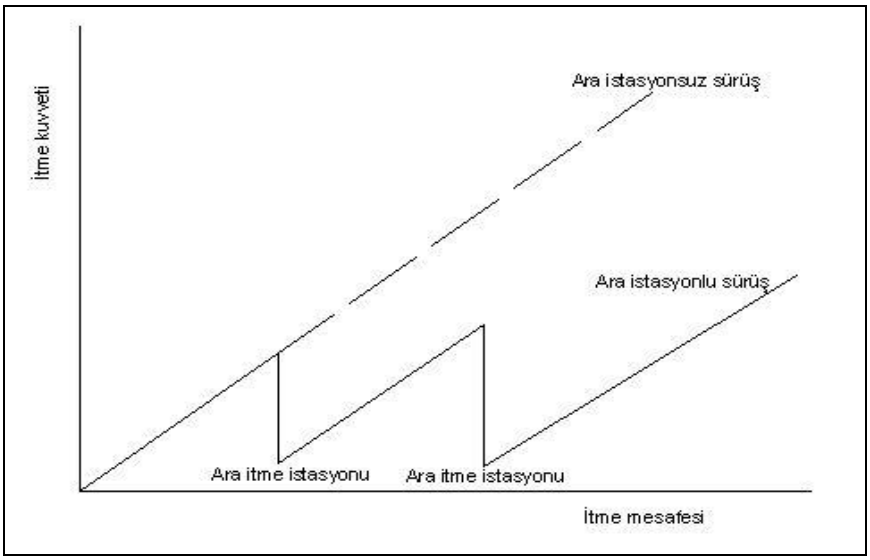
Şekil 5.8: Mikrotünel hattında membran uygulaması[3].

5.3.9 Ara İtme İstasyonları

Sürtünme kuvvetlerinin çok fazla olduğu, ancak yağlamanın yeterli olmamasından dolayı ana itme istasyonunun kapasitesinin yetmediği durumlarda ara itme istasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kurulan ara itme istasyonları güzergahı itilebilir uzunluklara böler(Şekil 5.9). Ara itme istasyonları kendi önündeki kısmı diğer bölümlerden ayrı olarak itmektedir. Böylece, borular üzerindeki kuvvetlerde azalma olmakta, boru kırılmalarının da önüne geçilebilmektedir(Şekil 5.10).



Şekil 5.9: Ara itme istasyonu kullanımı[2].



Şekil 5.10: Ara itme istasyonlu ve istasyonsuz sürüşler.

5.4 İtme Kuvvetlerinin Tahmini

Mikrotünelcilikte itme kuvvetlerinin tahmini için teorik yöntemlerin yanında, sahadan elde edilen verilere dayanmakta olan empirik modellerde kullanılmaktadır. Mikrotünel operasyonlarında özellikle kendini tutamayan ve yumuşak zeminlerin içerisinde yapılan ilerlemelerde asıl yenilmesi gereken unsur sürtünme kuvvetidir. Bu nedenle sürtünme kuvvetinin önceden tahmini boru dizaynı ve itme ekipmanının seçimi için önem arz etmektedir.

5.4.1 İtme Kuvvetlerinin Teorik Tahmini

İtme kuvvetlerinin belirlenmesinde sürtünme kuvvetlerinin tahmini esas teşkil etmektedir. Sürtünme kuvveti için (5.3)'de ki genel ifade bulunmaktadır[24].

$$F_r = f \,.\, N \qquad \textbf{(5.3)}$$

Burada;

F_r :Sürtünme kuvveti

f: Sürtünme katsayısı

N: Normal kuvvet

olarak tanımlanmaktadır.

Sürtünme katsayılarının hesaplanmasında kullanılan çoğu modelde zeminin içsel sürtünme açısı (φ) esas alınır. İçsel sürtünme açısı için bir tür indirgeme faktörü kullanılmak suretiyle sürtünme katsayısı(*f*) elde edilir. Başka modellerde ise, zemin ile boru ara yüzey sürtünme katsayılarıyla ilgili literatür değerleri esas alınır[24].

İtme kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılan normal kuvvetlerin belirlenebilmesi için değişik metotlar geliştirilmiştir. Bu metotların bazılarında zeminin kendini tutma özelliği göz önüne alınırken, bazılarında ise hesaba katılmaz ve zeminin birim ağırlığı ile tabaka kalınlığına isabet eden normal kuvvet değeri esas alınır[24].

Boru hattı üzerine etki eden zeminden kaynaklanan kuvvetlerin hesaplanmasında Karl Terzaghi'nin Teorisi (1943) genel olarak uygulanmaktadır. Terzaghi kohezyonun sıfıra eşit olduğu ve yüzey kuvvetlerinin etkin olmadığı ideal bir kum için; düşey kuvvetin derinlikten bağımsız olduğu (5.4) eşitliğini bulmuştur. Bir çok araştırmada boru itme esnasında boru üzerine etki eden normal kuvvetin hesaplanmasında Terzaghi'nin bu modeli esas alınmıştır[24].

$$\sigma_v = \frac{\gamma.B}{K.\tan\varphi} \qquad \textbf{(5.4)}$$

Burada;

σ_v : Etkiyen düşey arazi basıncı (kN/m^2)
γ : Zeminin birim ağırlığı (kN/m^3)
K : Arazi basıncı katsayısı
φ : İçsel sürtünme açısı (°)
B : Etkilediği varsayılan zemin genişliğinin yarı uzunluğu (m)
olarak ifade edilmektedir.

Auld ise, Terzaghi'nin bu modelini temel alarak normal kuvvetlerin hesaplanması için bir model oluşturmuştur(5.5), bu modelde boru kohezyonsuz zemin içerisinde ilerlemektedir. Zeminin boruyu tamamen saracak şekilde çökmesinden dolayı boru hattı etrafında çevresel bir kuvvet uygulandığı varsayımına dayanmaktadır (Şekil 5.11)[24].

$$\sigma_v = \frac{\gamma.B}{(K.\tan\varphi)}\left(1 - e^{-K.\tan\varphi(h/B)}\right) \quad \textbf{(5.5)}$$

Burada;

σ_v : Etkiyen düşey arazi basıncı (kN/m^2)

γ : Zeminin birim ağırlığı (kN/m^3)

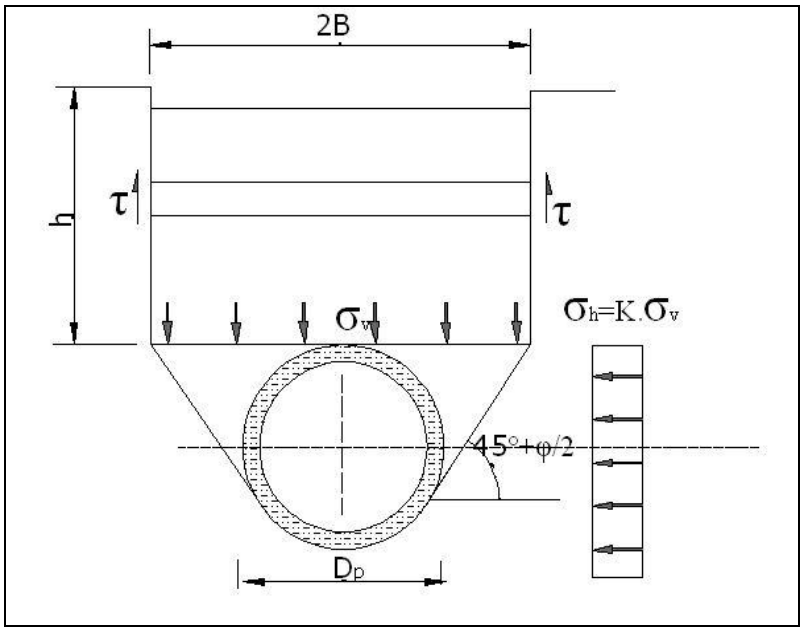
K : Arazi basıncı katsayısı

φ : İçsel sürtünme açısı (°)

B : Etkilediği varsayılan zemin genişliğinin yarı uzunluğu (m)

h : Boru üzerindeki zeminin yüksekliği (m)

olarak ifade edilmektedir.



Şekil 5.11: Boru üzerine etkiyen kuvvetler [24].

Boru dizaynına yönelik olarak, boru üzerine gelen normal kuvvetlerin hesaplanmasıyla ilgili olarak Almanya'da standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlar ASTM Standartlarına benzer olup, özellikle mikrotünel uygulamaları için geliştirilmiştir. ATVA 161 standartı, mikrotünel uygulamaları için boru dizaynını gösteren Alman standartıdır. Bu standart silo genişliğini (b) kullanmaktadır ve Auld tarafından önerilen modele benzemektedir (Şekil 5.12)[24].

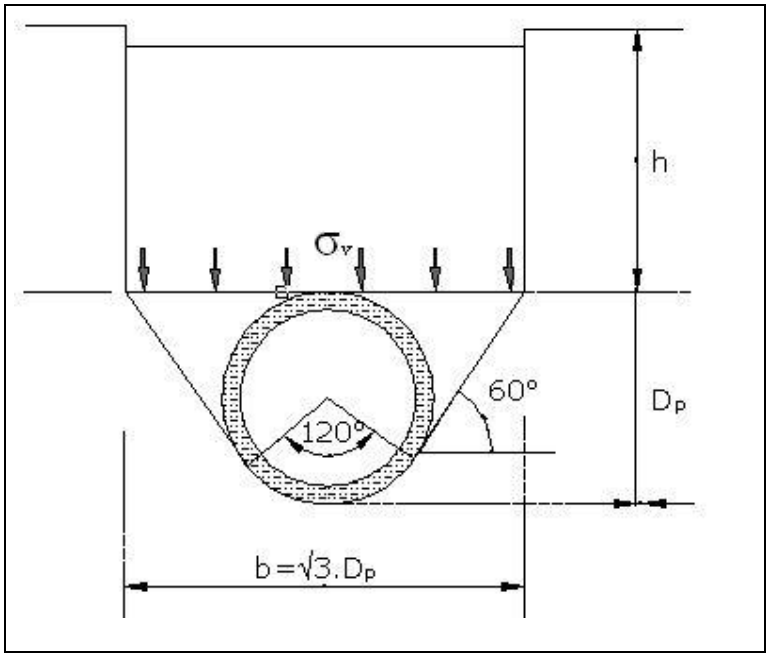
ATV A 161 standardına göre boru üzerine etki eden düşey gerilmenin bulunabilmesi için (5.6)'dan elde edilen 'b' değeri (5.7)'de kullanılmaktadır.

$$b = \sqrt{3}.D_p \tag{5.6}$$

$$\sigma_v = \frac{b.\left(\gamma - \frac{2.c}{b}\right)}{(2K.\tan\delta)}.\left(1 - e^{-2K.\tan\delta.(h/b)}\right) \tag{5.7}$$

Burada;

D_p: Boru dış çapı (m)
b: Boru üzerindeki yük prizmasının ideal genişliği (m)
h: Örtü tabakası kalınlığı(m)
K: Arazi basıncı katsayısı
δ: Sürtünme açısı(°)
c: Kohezyon
olarak ifade edilmektedir.



Şekil 5.12: Boru üzerine etkiyen kuvvetler [24].

Tüm zemin türlerinin içindeki mikrotünel çalışmalarında; penetrasyon kuvvetinin tahmini için (5.8) ve sürtünme kuvvetlerinin tahminine yönelik ise (5.9) kullanılabilmektedir[3].

$$F_p = \pi . \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 . \sigma_h \quad \textbf{(5.8)}$$

$$F_r = \pi . D_p . L . f . \left(\frac{\sigma_h + \sigma_v}{2}\right) \quad \textbf{(5.9)}$$

Burada;

F_r: Sürtünme kuvveti (kN)

F_r: Penetrasyon kuvveti (kN)

σ_h : Yatay arazi basıncı (kN/m^2)

σ_v : Düşey arazi basıncı (kN/m^2)

D_P : Boru dış çapı (m).

D_s : Mikrotünel makinesi çapı (m)

L : İtme mesafesi (m)

f : Sürtünme katsayısı

olarak ifade edilmektedir.

Sürtünme kuvvetinin hesaplanması için gerekli olan sürtünme katsayısı litaratürden zemin türüne göre tespit edilebilir. Bazı zemin türleri için belirlenmiş sürtünme katsayıları (*f*) Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1: Sürtünme katsayıları (*f*) [3].

Zemin türü	Boru yüzeyi	
	Metal	Beton
Çakıl	0,55	0,88
Kum	0,45	0,65
Marn	0,35	0,40
Alüvyal kil	0,30	0,35
Kil	0,20	0,25

Mikrotünel çalışması yeraltı suyunun olmadığı ortamda gerçekleşiyorsa, düşey ve yatay arazi basıncının hesaplanmasında (5.10) ve (5.11)'den yararlanılır[3]. Düşey arazi basıncının hesaplanmasında indirgeme faktörü (κ) kullanılmaktadır. Bu değer (5.12)'den elde edilmektedir.

$$\sigma_v = \kappa.(\gamma_1.h_1 + \gamma_2.h_2 + \cdots + \gamma_n.h_n) + \sigma_s \quad \textbf{(5.10)}$$

$$\sigma_h = K.\left(\sigma_v + \gamma_n.\frac{D_s}{2}\right) \quad \textbf{(5.11)}$$

$$\kappa = \frac{1 - e^{-2K.\tan(\delta)(\frac{h}{b})}}{2K.\tan(\delta)\,(\frac{h}{b})} \quad \textbf{(5.12)}$$

Burada;

σ_h : Yatay arazi basıncı (kN/m^2)

σ_v : Düşey arazi basıncı (kN/m^2)

σ_s :Yüzey yüklerinden kaynaklanan basınç (kN/m^2)

κ : İndirgeme faktörü (su seviyesi altında κ=1)

$\gamma_1, \gamma_2,..,\gamma_n$: Boru üzerindeki zemin türlerinin her birinin birim ağırlığı (kN/m^3)

$h_1, h_2,..,h_n$: Boru üzerindeki zemin türlerinin her birinin kalınlığı (m)

K : Arazi basıncı katsayısı

δ: Sürtünme açısı(°)

D_s : Mikrotünel makinesi çapı (m)

h : Örtü tabakası kalınlığı(m)

b :Boru üzerindeki yük prizmasının ideal genişliği (m)

olarak ifade edilmektedir.

Mikrotünel çalışması yeraltı suyunun olduğu ortamda gerçekleşiyorsa; düşey ve yatay arazi basıncının hesaplanmasında (5.13) ve (5.17)'den yararlanılır[3]. Yatay arazi basıncının belirlenmesinde, suyun etkisi göz önünde tutulduğundan (5.14), (5.15) ve (5.16)'daki hesaplamalar yapılır.

$$\sigma_v = (\gamma_1.h_1 + \gamma_2.h_2 + \cdots + \gamma_n.h_n) + \sigma_s \quad \textbf{(5.13)}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - \sigma_w \quad \textbf{(5.14)}$$

$$\sigma_w = \gamma_w . h_w \quad \textbf{(5.15)}$$

$$\sigma'_h = K.(\sigma'_v + (\gamma_n - \gamma_w).\frac{D_s}{2}) \quad \textbf{(5.16)}$$

$$\sigma_h = \sigma'_h + (\sigma_w + \gamma_w.\frac{D_s}{2}) \quad \textbf{(5.17)}$$

Burada;

σ_h : Yanal toprak basıncı (kN/m^2)

σ_v : Düşey toprak basıncı (kN/m^2)

σ_s :Yüzey yüklerinden kaynaklanan basınç (kN/m^2)

σ_w : Su basıncı (kN/m^2)

σ'_h : Efektif yanal toprak basıncı (kN/m^2)

σ'_v : Efektif düşey toprak basıncı (kN/m^2)

$\gamma_1, \gamma_2,..,\gamma_n$: Boru üzerindeki zemin türlerinin her birinin birim ağırlığı (kN/m^3)

$h_1, h_2,..,h_n$: Boru üzerindeki zemin türlerinin her birinin kalınlığı (m)

K : Yanal toprak basıncı katsayısı

h_w : Hat üzerindeki su tablasının yüksekliği (m)

olarak ifade edilmiştir.

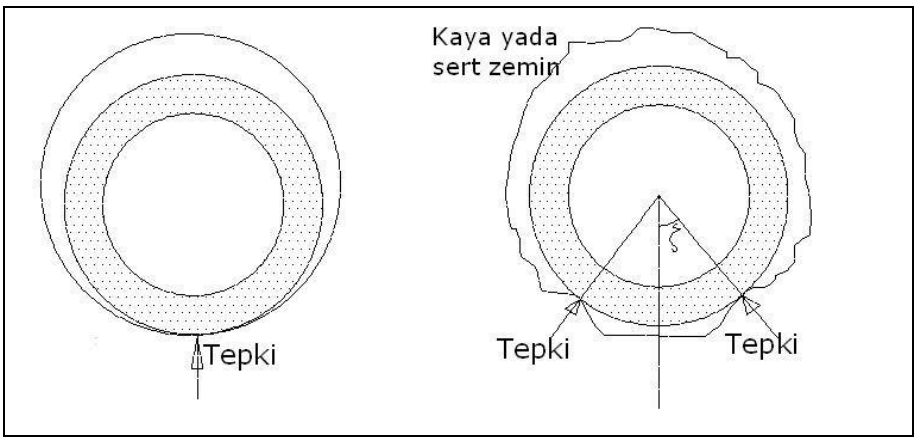
Terzaghi(Japonya), ATVA161(Almanya) ve PJA(İngiltere) için zemin parametreleri değerlerini belirleme formülleri Tablo 5.2' de gösterilmiştir.

Tablo 5.2: Zemin parametreleri [25].

Parametreler	Değerler		
	Terzaghi	ATVA161	PJA(UK)
Yük prizması ideal genişliği (b)	$D_e.(1 + 2\tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$	$\sqrt{3}.D_e$	$D_e.\tan(\frac{3\pi}{8} - \frac{\varphi}{4})$
Sürtünme açısı (δ)	φ	φ/2	φ
Arazi basıncı katsayısı (K)	1	0,5	$\frac{(1-\sin\varphi)}{(1+\sin\varphi)}$

(Burada; D_e; Kazı çapı(m),φ; İçsel sürtünme açısı(°))

Sağlam zemin ve kaya içerisindeki mikrotüneller için sürtünme kuvvetinin tahmininde boru hattının ağırlığı esas alınmaktadır[3]. Böyle ortamlarda, boru üzerine göçme olmadığı için çok az noktada zemin boru etkileşimi olmaktadır(Şekil 5.13). Bu da sürtünme kuvvetinin oldukça az olmasına neden olmaktadır. Bu tür ortamlarda sürtünme kuvveti (5.18)'den hesaplanabilmektedir.



Şekil 5.13: Kaya ve sert zeminlerde itme borularının zemin ile etkileşimi[3].

$$F_r = \frac{W_p.\tan\delta}{\cos\zeta} \qquad \textbf{(5.18)}$$

Burada;

F_r: Sürtünme kuvveti (kN)

W_P: Boru hattının ağırlığı (kN)

δ: Boru ile zemin-kaya arasındaki sürtünme açısı (°)

ζ: Boru ile zemin-kaya etkileşiminin olduğu noktanın düşeyle yaptığı açı (°)
(Deneysel veri yoksa δ ve ζ değerleri 30°ile 40° arasında alınabilir)

olarak ifade edilmektedir.

5.4.2 İtme Kuvvetlerinin Tahminde Kullanılan Emprik Yöntemler

İtme kuvvetlerinin tahmininde kullanılan emprik bağıntılardan ikisi; Chapman-Ichioka Tahmin Modeli ve Bennett Tahmin Modeli'dir.

Chapman-Ichioka Modeli; Japonya'da gerçekleştirilen çok sayıda mikrotünel çalışmalarından elde edilen verilerin incelenmesi sonucunda oluşmuştur. İncelenen veriler içerisinde çamur basınçlı makineler 236 proje ile başı çekmektedir.

Çamur basınçlı makineler için oluşturulan model, yağlayıcılı 360-1200 mm dış çapa sahip borular için gereken itme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılır[24].

Bu modelde; (5.20) ve (5.21)'den elde edilen değerler (5.19)'da kullanılarak itme kuvvetleri hesaplanır.

$$F_t = F_p + \pi . D_p . P_r . L \quad \textbf{(5.19)}$$

$$F_p = \pi . \left(\frac{D_e}{2}\right)^2 . P_p \quad \textbf{(5.20)}$$

$$P_r = a + 0{,}38 . D_p . \quad \textbf{(5.21)}$$

Burada;

F_t : Toplam itme kuvveti (ton)
F_p:Penetrasyon kuvveti (ton)
D_p: İtme borusunun dış çapı (m)
D_e: Kazı çapı (m)
L: İtme mesafesi (m)
a: Empirik katsayı
P_p: Ayna basıncı (ton/m^2) (50-90 ton/m^2 arasında değişmektedir)
P_r: Sürtünme basıncı (ton/m^2)
olarak ifade edilmektedir.

Eşitlik (5.21)'deki a değeri 360 mm (250 mm nominal çap) dış çaplı boru esas alınarak çeşitli zemin tipleri için Tablo 5.3'de belirtilmiştir.

Tablo 5.3: Chapman ve Ichioka Tahmin Metodunda kullanılan 'a' değerleri[26].

Zemin türü	Kil	Kum	Kum-çakıl
a değeri	0,153	0,243	0,343

Bannett Modeli ise; Amerikan Ordusu Mühendisleri tarafından 4 farklı tipteki zeminden geçen 2 mikrotünelin saha çalışmaları esnasında saha testleri yapılması ve elde edilen verilerin Bennett tarafından analiz edilmesi sonucunda, hem kohezyonlu hem kohezyonsuz zeminler için geliştirilmiştir.

Bennett Modeli; toplam itme kuvveti, borunun yüzey alanının, normal kuvvet ve sürtünme faktörüyle çarpılmasıyla oluşmuş bir fonksiyondur. Normal kuvvet, derinlikten ziyade borunun dış çapı ve zeminin birim ağırlığına bağlıdır. Bennett, zeminin birim ağırlığı için indirgeme faktörü oluşturmuştur ve bunu C_a ile simgelemiştir. C_a, birim ağırlıkla ve çapla çarpılmaktadır. Bennett'in sürtünme kuvveti zeminin sürtünme açısına bağlıdır. Sürtünme indirgeme faktörü oluşturmuştur ve C_f ile simgelemiştir. C_f, zeminin sürtünme açısıyla çarpılmaktadır(5.22). Bannett tarafından kum ve killerde kullanılacak C_a ve C_f faktörleri için Tablo 5.4 oluşturulmuştur[24].

$$F_r = C_a.\gamma.D_p.\tan\left(C_f.\varphi\right).A_p.\mathrm{L} \quad \textbf{(5.22)}$$

Burada;

F_r: Sürtünme kuvveti (kN)

γ: Zeminin birim ağırlığı (kN/m^3)

D_p: Boru dış çapı (m)

φ: Zeminin içsel sürtünme açısı(°)

A_p: Boru çevresi (m)

L: Tünel uzunluğu (m)

C_a: Zeminin birim ağırlığının indirgeme faktörü.

C_f: Zeminin Sürtünme açısının indirgeme faktörü.

olarak ifade edilmektedir.

Tablo 5.4: Zemin türlerine göre C_a ve C_f değerleri[24].

Zemin türü	**Su**	**Yağlayıcı**	**C_a Değeri**	**C_f Değeri**	**γ Değeri**
Kum	Yok	Yok	1,5	1,0	γ
	Yok	Var	1,5	2/3	γ
	Var	Yok	1,0	1,0	γ- γ_w
	Var	Var	1,0	2/3	γ- γ_w
Sert –yumuşak kil ve siltler	Yok	Yok	1,0	1,0	γ
	Var	Yok	1,0	1,0	γ
Sert kil ve silt	Yok	Var	2/3	2/3	γ
	Var	Var	2/3	2/3	γ
Yumuşak kil ve silt	Yok	Var	3,0	1,0	γ
	Yok	Var	3,0	1,0	γ

5.4.3 Gerçekleşen ve Tahmin Edilen İtme Kuvvetlerinin Karşılaştırması

İtme kuvvetleri; boru üzerine çökmenin olmadığı kaya ortamlar ve çökmenin olduğu düşünülen yumuşak ortam olarak nitelendirilen kum, çakıl, dolgu ve çamur zeminlere yönelik olarak hesaplanmıştır. Gerçekleşen ve tahmin edilen itme kuvveti değerleri aynı tablo ve grafikler üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca, makine kayıtlarında itme mesafesinin de belli olduğu sürüşler için itme miktarı itme mesafesi grafikleri çıkartılmış ve EK-E'de verilmiştir. Gerçekleşen itme kuvvetlerinin maksimum ve ortalama değerleri tablolarda belirtilmiştir. Maksimum gerçekleşen değer, her bir sürüş içerisindeki maksimum değeri ifade etmektedir. Ortalama gerçekleşen değer ise; her bir sürüş için son 5 m içerisinde makinenin kaydettiği kuvvetlerin ortalaması alınarak bulunmuştur. Son 5 m'lik itme kuvvetlerinin alınmasının sebebi ise, ölçülen değerlerin sürekli bir artış göstermemesi ve son 1-2 m'deki itme kuvveti değerlerinin makinenin alıcı kuyuya ulaşmış durumundaki değerler olacağından, düşük çıkması olasıdır.

5.4.3.1 Kayada Gerçekleşen ve Tahmin Edilen İtme Kuvvetleri

Sert zeminlerde ve kaya ortamlarda; keskilerin alabileceği kuvvetin üzerine, boru ağırlığından kaynaklanan sürtünmeyi yenmek için gerekli olan itme kuvveti hesaplanıp ilave edilmiş ve gerçekleşen itme kuvveti değerleri ile karşılaştırılmıştır(Tablo 5.5).

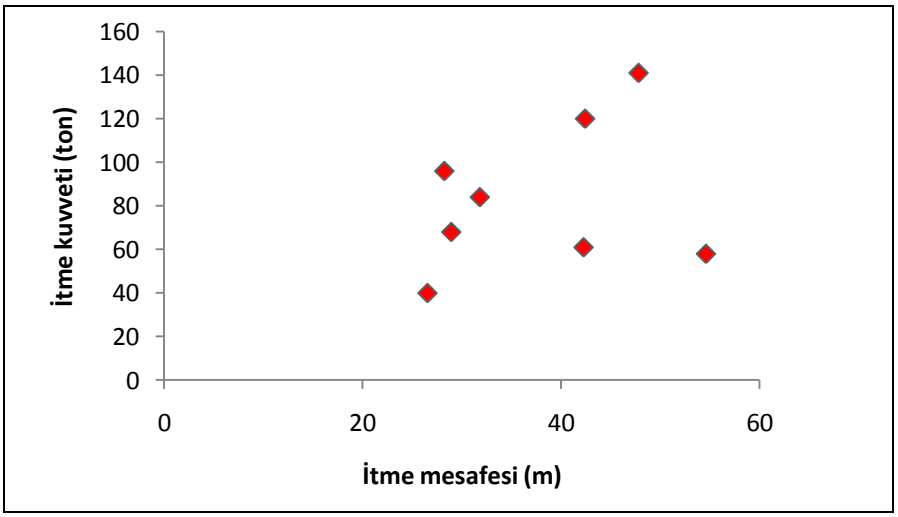
Tablo 5.5: Kayada(kireçtaşı) gerçekleşen ve tahmin edilen toplam itme kuvvetleri.

Hat	İtme mesafesi (m)	Tahmin edilen itme kuvveti			Gerçekleşen toplam itme kuvveti		
		4 disk (ton)	Sürtünme (ton)	Toplam (ton)	Maks. (ton)	Ortalama	
						(ton)	(ton/m)
RHA01-A03	54,60	40	29	69	113	58	1,06
RHA08-B13-B12	47,80	40	26	66	204	141	2,95
RHB10-B11-B12	42,40	40	23	63	175	120	2,83
RHB10-B09	28,20	40	16	56	147	96	3,40
BLTA06-A07	28,90	40	17	57	158	68	2,35
BLTA08-A07	26,50	40	16	56	124	40	1,51
BLTA08-A09	42,25	40	23	63	129	61	1,44
EM06-B05	31,78	40	18	58	152	84	2,64
Ortalama							2,27

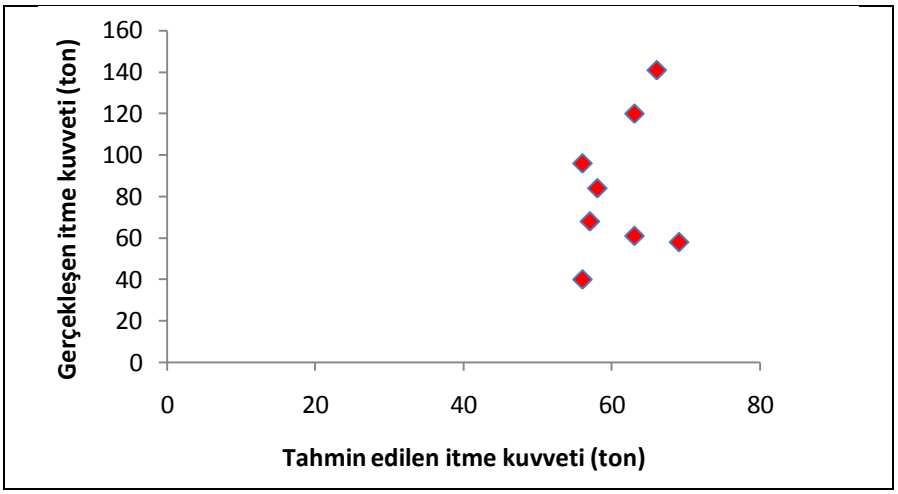
Projede kullanılan AVN600 tipi makinenin kesici kafasında 12 cm çapında 4 adet disk keski bulunmaktadır. Her bir keski yatağının 10 ton yük alabileceği varsayıldığında 4 disk keski için 40 ton'luk bir kuvvet uygulanması gerekmektedir.

Herbir borunun ağırlığı yaklaşık 1100 kg'dır. Makine ağırlığı (2900 kg) ve kuyruk borusu ağırlığı da(735 kg) göz önüne alınmış ve belirlenen boru hattı toplam ağırlığı (5.18)'deki eşitlikte kullanılarak sürtünme kuvvetleri hesaplanmıştır(Tablo 5.5).

Tablo 5.5'de belirtilen kaya(kireçtaşı) içerisindeki her bir sürüşteki tahmin edilen/gerçekleşen toplam itme kuvveti oranlarının ortalama değeri 0,84 olarak belirlenmiştir. Kayada gerçekleşen ortalama itme kuvvetlerinin dağılımı Şekil 5.14'de, tahmin edilen ile gerçekleşen itme kuvvetlerinin ilişkisi ise Şekil 5.15'de gösterilmiştir.



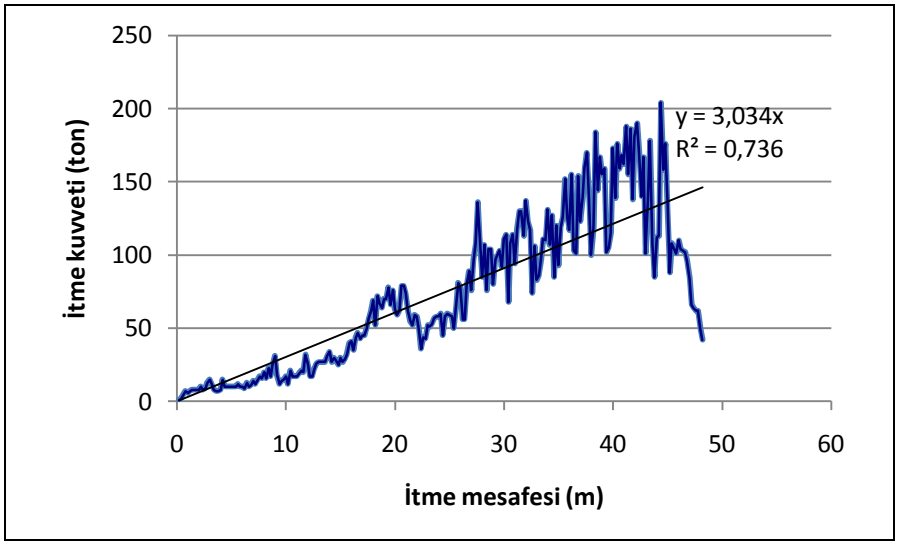
Şekil 5.14: Kayada gerçekleşen ortalama itme kuvvetleri.



Şekil 5.15: Gerçekleşen ve tahmin edilen itme kuvvetlerinin ilişkisi.

Kayalık bölgede yer alan BLT-A11 kuyusunun yakınındaki açık kazıdan alınmış olan kireçtaşı numunesinin basınç dayanımı yaklaşık 124 MPa, aşındırıcılığı da 1,0 Cerchar (az aşındırıcı) bulunmuştur. Rumelihisarı Bölgesi ve Baltalimanı

Bölgesi'ndeki kireçtaşlarının benzer özellikte olduğu düşünülebilir. Kireçtaşı içerisinde gerçekleştirilen RHA08-RHB13-RHB12 kuyuları arasındaki sürüşte, gerçekleşen maksimum itme kuvveti 204 ton'a, ortalama itme kuvveti ise 141 tona kadar çıkmıştır (Tablo 5.5 ve Şekil 5.16). Bu hattın her bir metresi için gerekli itme kuvveti değeri 2,95 ton olarak hesaplanmıştır(Tablo 5.5). Kayadaki (kireçtaşı) tüm sürüşler için genel oran ise; 2,27 ton/m'dir(Tablo 5.5).



Şekil 5.16: RHA08-RHB12 kuyuları arasında itme kuvveti değişimi.

5.4.3.2 Yumuşak Ortamda Gerçekleşen ve Tahmin Edilen İtme Kuvvetleri

Yumuşak ortam olarak tarif edilen kum, çakıl, dolgu ve çamur içeren zeminlerde yapılan sürüşlerinde ki itme kuvvetlerinin teorik tahmini, Terzaghi, ATVA161 ve PJA'ya göre, emprik tahmini ise; Bannett ve Chapman-Ichioka emprik modellerine göre yapılarak makine kayıtlarıyla karşılaştırılmıştır. İtme kuvvetlerinin tahmininde kullanılan zemin birim ağırlıkları(γ) ve içsel sürtünme açıları(φ) için kabullerde bulunulmuş, sürtünme katsayısı(*f*) için ise Herzog'un(1985)[3] boru-zemin sürtünme katsayıları tablosundan yararlanılarak Tablo 5.6 oluşturulmuştur. Yumuşak ortam için teorik ve emprik yöntemler sayesinde tahmin edilen toplam itme kuvveti ile gerçekleşen toplam itme kuvveti değerleri Tablo 5.7'de listelenmiştir.

Tablo 5.6: Karşılaşılan zemin tipleri için kullanılan hesap değerleri.

Zemin tipi	γ (kN/m^3)	φ(°)	*f*
Dolgu	18	25	0,76
Kum-çakıl	18,5	27	0,76
Çamur	17	20	0,25

Tablo 5.7: Yumuşak ortamda gerçekleşen ve tahmin edilen toplam itme kuvvetleri.

Kuyular	Zemin türü	Ortalama derinlik (m)*	Mesafe (m)	Ort. su seviyesi (m)**	İtme Kuvveti Tahmin Metodu					Gerçekleşen		
					Teorik(ton)			Emprik(ton)		Maks. (ton)	Ortalama	
					Terzaghi	ATVA	PJA	Bannett	Chap.Ichi.		(ton)	(ton/m)
BLTA13-A14	Dolgu	2,26	47,15	-	332	315	262	110	133	145	85	1,80
KBA04-A05	Dolgu	1,47	44,10	-	262	220	196	103	126	140	98	2,22
KBA06-A07	Dolgu	1,57	54,40	-	333	281	249	127	146	126	71	1,31
YKA04-A05	Dolgu	2,62	36,00	0,32	402	309	292	28	111	125	84	2,33
YKA07A-A08A-A09A	Dolgu	2,58	76,00	0,31	844	645	609	53	187	174	112	1,47
YKB12A-B13A	Dolgu	2,63	42,00	0,25	474	360	340	30	123	168	70	1,67
YKA04-A03	Dolgu	2,50	48,00	0,18	520	394	372	34	134	152	75	1,56
YKA07-A06-A05	Dolgu	2,79	85,00	0,52	1002	772	731	60	204	138	69	0,81
YKA05A-A06A-A07A	Dolgu	2,26	76,00	0,04	863	649	611	60	205	149	104	1,37
YKD08A-C08A	Dolgu	4,03	40,00	0,31	640	485	457	30	119	133	90	2,25
YKD08A-D05A	Dolgu	2,93	57,00	-	188	170	155	70	100	151	81	1,42
YKB01-B02	Dolgu	2,23	75,00	-	522	496	412	175	185	176	100	1,33
YKB03A-B05A	Dolgu	1,91	60,00	-	395	355	307	140	156	174	71	1,18
YKB07-B05-B04	Dolgu	2,66	60,00	-	426	406	379	140	156	165	94	1,57
YKB11A-10A-08A	Dolgu	2,44	70,00	-	500	470	407	163	175	156	73	1,04
YKC01A-SAV04	Dolgu	1,74	50,00	-	317	274	242	117	138	162	130	2,60
YKC09-C04A	Dolgu	1,40	30,00	-	175	146	129	70	100	147	90	3,00
KLB02-B03	Dolgu	2,61	33,00	-	242	231	196	77	105	166	98	2,97
KLB03-B04	Dolgu	2,13	49,00	-	332	303	261	114	136	117	50	1,02
KLB07-B08	Dolgu	2,07	33,00	0,42	312	240	227	24	105	190	106	3,21
KLB08-B09	Dolgu	2,15	30,00	0,58	292	227	215	22	100	173	70	2,33
KLB12-B16	Dolgu	3,02	56,00	1,19	704	559	533	40	149	120	73	1,30
										Dolguda ortalama		1,81

*Boru üst kotunun yüzeyden derinliği. **Boru üst kotu üzerinde kalan su tablası kalınlığı.

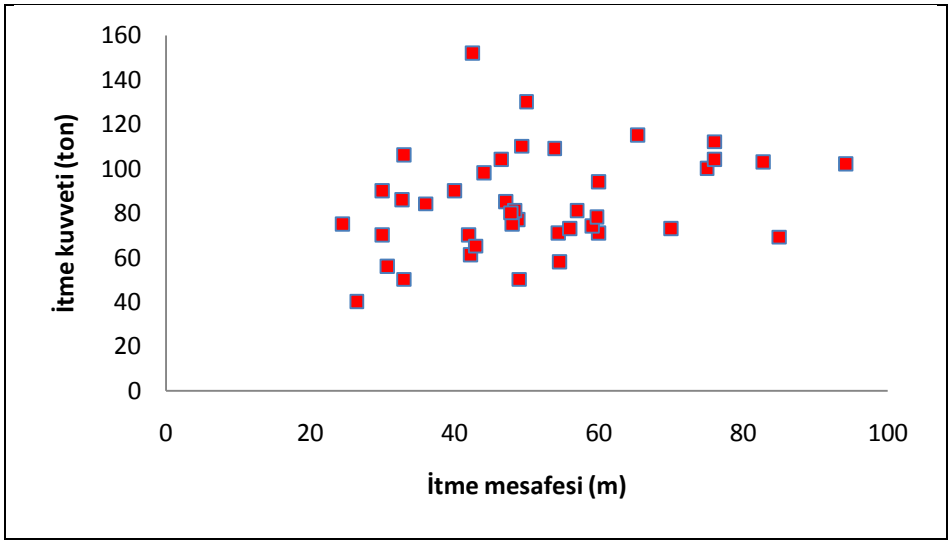
Tablo 5.7: Yumuşak ortamda gerçekleşen ve tahmin edilen toplam itme kuvvetleri(devamı).

Kuyular	Zemin türü	Ortalama derinlik (m)*	Mesafe (m)	Ort. Su seviyesi (m)**	İtme Kuvveti Tahmin Metodu					Gerçekleşen		
					Teorik(ton)			Emprik(ton)		Maks. (ton)	Ortalama	
					Terzaghi	ATVA	PJA	Bannett	Chap.Ichi.		(ton)	(ton/m)
TRA06-A05	Çamur	2,18	49,30	0,59	153	119	118	24	109	152	110	2,23
TRA05-A04	Çamur	2,11	42,50	0,49	126	98	97	21	99	233	152	3,58
TRA10-A11	Çamur	2,42	24,50	0,94	83	66	65	13	76	142	75	3,60
TRA11-B21	Çamur	2,58	42,96	1,16	147	117	116	22	100	155	65	1,51
TRB14-B13	Çamur	2,39	30,70	0,70	103	81	80	16	84	129	56	1,82
TRB16-B15-B14	Çamur	2,85	53,90	0,54	219	171	170	27	115	171	109	2,02
TRB19-B18-B17	Çamur	3,10	59,10	1,06	240	189	188	30	121	172	74	1,25
TRB19-B21	Çamur	2,82	59,75	1,20	262	209	208	34	135	151	78	1,31
											Çamurda ortalama	2,20
TRB03-B04	Kum çakıl	1,48	48,80	-	287	246	210	128	135	170	77	1,58
TRB05-B04	Kum,çakıl	1,60	46,50	-	284	247	214	111	131	165	104	2,24
TRB07-B06	Kum,çakıl	1,93	48,35	-	315	287	246	127	135	169	81	1,68
TRB09-B10	Kum,çakıl	1,84	32,75	0,36	290	223	207	27	105	148	86	2,63
TRB09-B08-B07	Kum,çakıl	1,96	94,20	0,09	862	652	601	76	221	165	102	1,08
TRB12-B11-B10	Kum,çakıl	1,77	82,75	0,48	709	550	512	67	198	171	103	1,24
TRB13-B12	Kum,çakıl	2,01	47,85	0,62	450	351	328	39	133	159	80	1,67
EMA05-A04-A03	Kum,çakıl	2,21	65,40	-	453	416	368	153	166	175	79	1,21
EMB04-B03	Kum,çakıl	1,94	30,50	0,94	281	217	202	25	101	150	70	2,30
											Kum ve çakılda ortalama	1,74

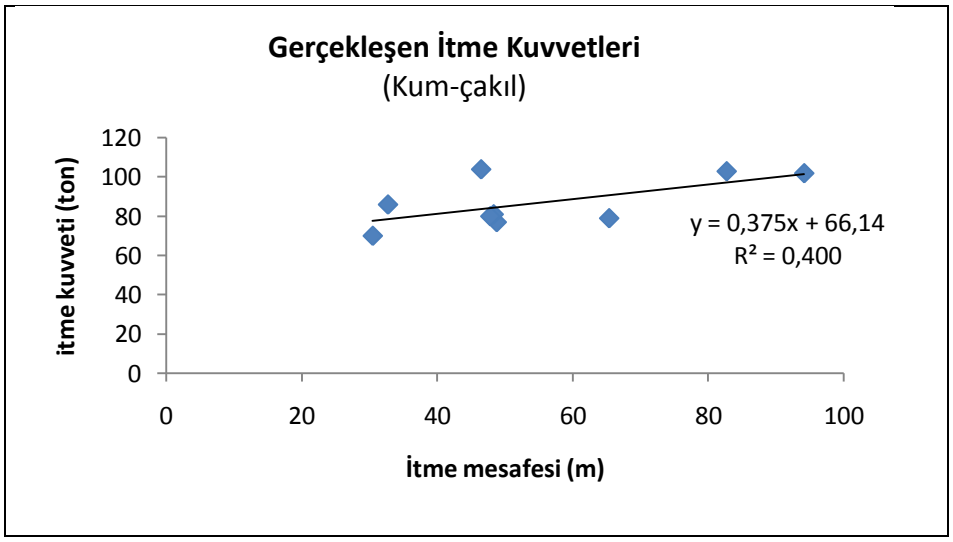
*Boru üst kotunun yüzeyden derinliği. **Boru üst kotu üzerinde kalan su tablası kalınlığı.

Yapılan sürüşlerde makineye ayna basıncı verilmemiştir, makinenin itme hızıyla basınç dengelenmiştir. Sürüşler esnasında yağlayıda kullanılmamıştır. Bundan dolayı, iyi yağlama yapılan ortamlar için geliştirilen Chapman Ichioka yönteminden elde edilen sonuçlar, yağlamanın etkisiyle killerde %30-50, kumlarda ise %20 oranında kuvvet gereksiniminde azalma olacağı hususu göz önüne alınarak düzeltilmiştir.

Yumuşak ortam diye tabir edilen, dolgu, kum, çakıl, toprak ve çamur zeminlerde gerçekleşen toplam itme kuvvetlerinin itme mesafesine göre dağılımı Şekil 5.17'de verilmiştir. Yumuşak zeminler türlerine göre gruplandığında en iyi ilişki kum-çakıl için elde edilmiştir. Bu ilişkinin koralasyonu zayıftır(Şekil 5.18).

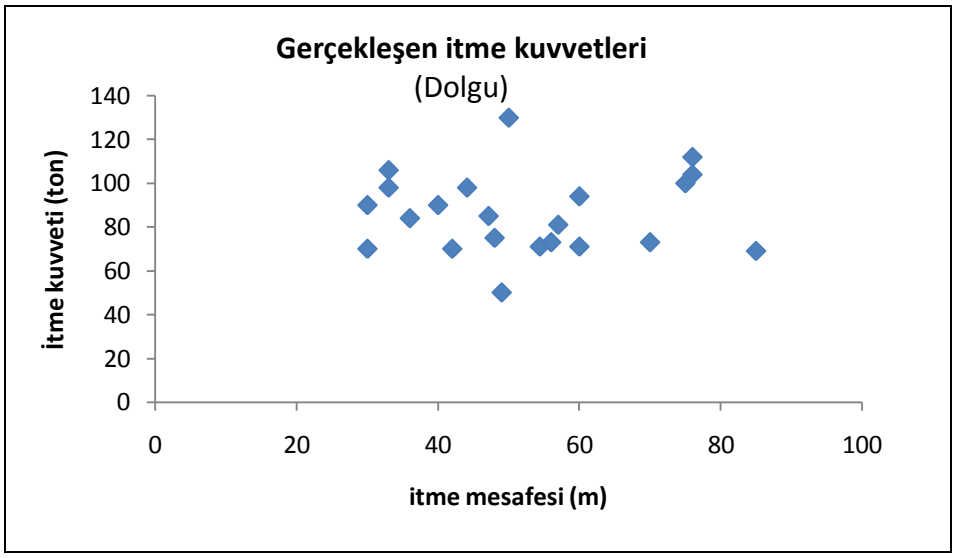


Şekil 5.17: Yumuşak ortamda gerçekleşen itme kuvvetleri.

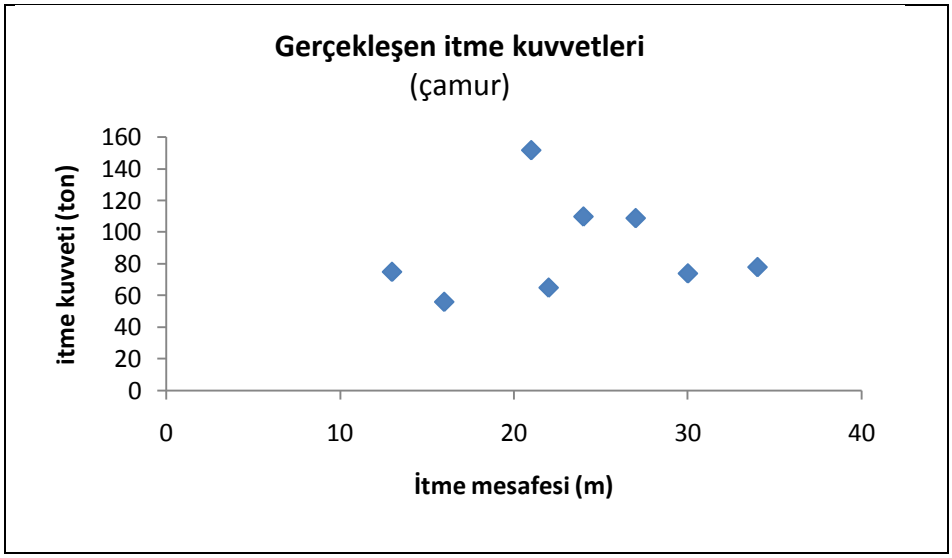


Şekil 5.18: Kum-çakılda gerçekleşen itme kuvvetlerinin dağılımı.

Dolgu ile çamurda gerçekleşen itme kuvvetlerinde ilişki kurulamamıştır. Dolgu ve çamur için elde edilen verilerin dağılımı sırasıyla Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de verilmiştir.

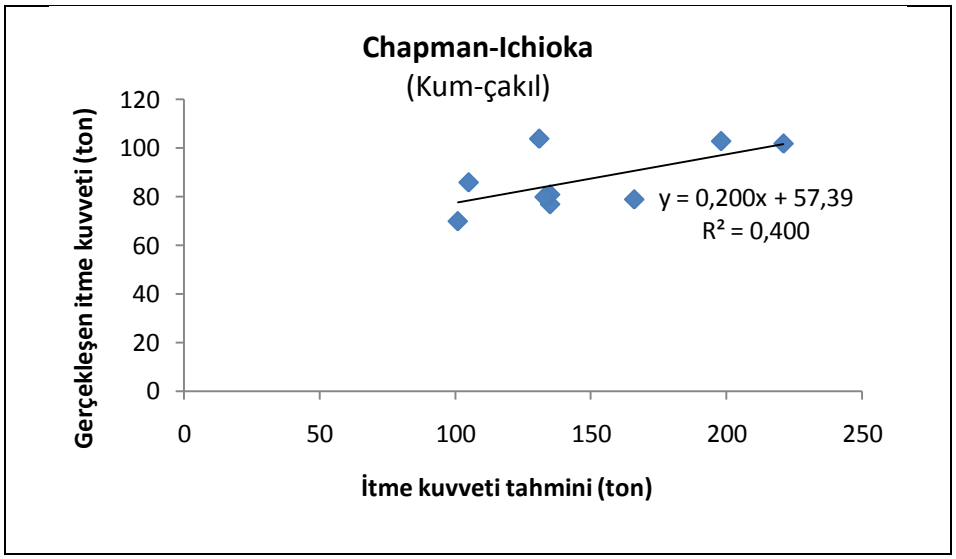


Şekil 5.19 Dolguda gerçekleşen itme kuvvetlerinin dağılımı.



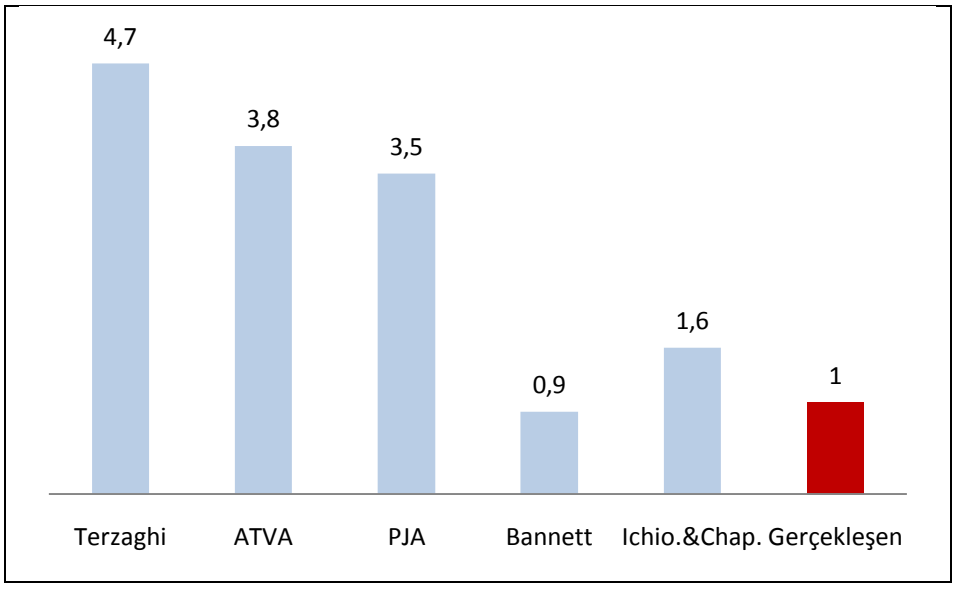
Şekil 5.20: Çamurda gerçekleşen itme kuvvetlerinin dağılımı.

Zemin türlerine göre, teorik ve empirik tahmin yöntemlerinden elde edilen itme kuvveti değerleri ile gerçekleşen itme kuvveti değerleri arasındaki ilişkinin gösterildiği grafikler Ek_F'de verilmiştir. En iyi ilişki kum-çakıl için Chapman-Ichioka tahmin yöntemi ile bulunan itme kuvveti değerlerinde sağlanmıştır, ancak bu ilişkinin koralasyonu zayıftır(Şekil 5.21).



Şekil 5.21: Chapman-Ichioka değerleri ile gerçek değerlerin ilişkisi.

Tablo 5.7'de belirtilen yumuşak ortamdaki tüm sürüşler için modellerden elde edilen itme kuvvetlerinin, gerçekleşen itme kuvvetlerine ne kadar yaklaştığının tespitine yönelik olarak tahmin edilen/gerçekleşen toplam itme kuvveti oranlarının ortalama değerleri hesaplanarak Şekil 5.22 oluşturulmuştur.



Şekil 5.22: Tahmin edilen itme kuvvetlerinin gerçekleşenlere oranı.

Tahmin yöntemleri içerisinde; sırasıyla Terzaghi, ATVA ve PJA teorik tahmin modelleri gerçekleşen itme kuvveti değerlerine göre oldukça yüksek değerler vermiştir. Kullanılan emprik modellerde ise gerçek değerlere yaklaşılmıştır.

5.5 İtme Kuvvetleri İle İlgili Özet ve Tartışma

Sert ortam diye tabir edilen kaya(kireçtaşı) daha çok Rumelihisarı ve Baltalimanı Bölgesin'de mikrotünel makinesi ile kazılma imkanı bulmuştur. İlerleme hızlarından da görüleceği üzere en düşük ortalama günlük ilerleme hızları bu bölgelerde gerçekleşmiştir. Rumelihisarı Bölgesi'nde gerçekleştirilen RHA08-RHB13-RHB12 kuyuları arasında 47,80 m'lik sürüşte, itme kuvvetleri ortalama 141 ton ve maksimum 204 ton'a ulaşılmıştır. Benzer şekilde kireçtaşı içinde gerçekleşen İtalya'nın Martina Franca şehrindeki projede AVN800 tipi makine ile yapılan sürüşte aynı mesafedeki ortalama itme kuvveti 70 ton civarında gerçekleşmiştir[27].

RHA08-RHB13-RHB12 ve diğer kaya içinde yapılan sürüşlere bakıldığında ortalama ve maksimum itme kuvveti değerleri oldukça yüksektir. Makinedeki disk keskilerinin katlanabileceği itme kuvvetinin çok üzerinde olan baskılarda, disk aşınmaları ve makine keskilerinin aşırı tükenmesine sebep olması kaçınılmazdır. Ancak, proje uygulamasında yeni keski alınması yerine keski uçlarına elmas kaynak yaptırılmak suretiyle kazılara devam edilmesi nedeniyle tüketilen keski sayısı hakkında bilgi yoktur.

Kayada gerçekleşen sürüşlerde metre başına gerekli olan itme kuvveti ortalama; 2,27 ton, yumuşak ortam diye tabir edilen; dolgu, kum-çakıl ve çamur için sırasıyla, 1,81 ton, 1,74 ton ve 2,20 ton olarak hesaplanmıştır. Çamurda itme kuvvetinin yüksek çıkmasının sebebi olarak, Tarabya Bölgesi'ndeki sürüşlerde makinenin doğrultudan sık sık sapması söylenebilir.

Kaya(kireçtaşı) içerisindeki her bir sürüşteki tahmin edilen/gerçekleşen toplam itme kuvveti oranlarının ortalama değeri 0,84'dür, dolayısıyla gerçek değere oldukça yaklaşılmıştır. Yumuşak ortamlar için ise; teorik ve empirik itme kuvveti tahmin modellerinden elde edilen değerlere göre, kullanılan empirik modeller gerçeğe daha yakın sonuçlar vermiştir. Teorik tahmin yöntemleri; Terzaghi, ATVA ve PJA gerçekleşen değerlere göre ortalama olarak sırasıyla, 4,7, 3,8 ve 3,5 kat itme kuvveti değeri vermiştir. Tahmin değerlerinin yüksek çıkmasının sebebi teorik modellerdeki zeminin boru üzerine tamamen göçtüğü varsayımı olarak düşünülebilir. Atalah'ın çalışmasında da; teorik tahmin modellerinden Terzaghi ve ATVA'nın gerçek değerlerin 2,6 ve 5,3 kat fazlasını verdiği belirtilmektedir[26].

Kullanılan emprik modellerden Bannett Modeli, yumuşak ortam için gerçeğe en yakın sonuçları vermiştir. Bannet modelinin, yeraltı suyu seviyesi altında sürüşlerde, kuru ortamlar için verdiği değerlerin çok altında değerler verdiği söylenebilir. Çünkü, Bannett modelin'de, suyun birim ağırlığı direkt olarak zeminin birim ağırlığından çıkartılmaktadır. Chapman-Ichioka Modeli ise, gerçekleşen değerlerin ortalamasının 1,6 kat fazlasını vermiş ve gerçekleşen değerlere yaklaşmıştır.

Dolgu, kum-çakıl ve çamur ortamlar ayrı ayrı yapılan değerlendirmede, kum-çakılda gerçekleşen itme kuvvetlerinin ilişkisinin dolgu ve çamur ortama göre daha iyi olduğu, tahmin yöntemlerinden elde edilen değerler ile gerçekleşen değerler arasındaki ilişkiye bakıldığında ise, en iyi ilişkinin Chapman-Ichioka yönteminin kum-çakıl için uygulamasında gerçekleştiği ancak bu ilişkilerin korelasyonunun zayıf olduğu söylenebilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hendek kazısı yapılmadan boru hattı döşenmesi yöntemlerinden olan mikrotünel yöntemi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde yaygınlaşmaktadır. Ülkemizdeki en kalabalık şehir olan İstanbul'da yapılan kanalizasyon hattı döşeme projeleri İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından mikrotünel yöntemi ile yaptırılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada incelemesi yapılan Baltalimanı-Sarıyer Sahil Kuşaklama Kollektörleri Projesi'nin 600 mm çaplı ana hat döşeme işi, Rumelihisarı-Kefeliköy arasında büyük oranda Alman Herrenknecht firmasından satın alınan 2 adet AVN600XC çamur basınçlı mikrotünel makinesiyle gerçekleştirilmiştir.

Rumelihisarı'ndan Kefeliköy'e kadar olan hat döşeme işi; Rumelihisarı, Baltalimanı, Emirgan, İstinye, Yeniköy, Kalender, Tarabya ve Kireçburnu olmak üzere 8 bölgede gerçekleştirilmiştir. Kefeliköy-Sarıyer arasında kalan kısım için ise yeniden ihaleye çıkılmıştır.

Mikrotünel makineleri ile 6776 m'lik hattın 6196 m'lik kısmı (%91,4) sürülmüştür: Makinelerin zaman zaman çeşitli sebeplerden(makine arızası, zemin ve kaya özellikleri vb.) dolayı kazıdan alınmak zorunda kalınması ve makinenin kazamayacağı dayanıma sahip kayalara rastlanmasından dolayı yaklaşık 580 m'lik kısım açık kazıyla gerçekleştirilmiştir. Bölgelere göre en yüksek mikrotünel makinesi ilerleme oranı, dolgu zemin ağırlıklı 2450 m hat uzunluğuna sahip Yeniköy Bölgesi'nde %97,6 oranı ile gerçekleşmiştir. Yeniköy Bölgesi aynı zamanda tüm hat döşemesinin %36'sını oluşturmaktadır. Buradaki yoğun yerleşimden dolayı büyük kısmı birbirine paralel ve yolun her iki yanına olmak üzere 2 ana hat döşenmiştir.

Kazı esnasında en çok karşılaşılan zemin türü dolgudur. Bunun nedeni ise, sahil yolu altında kazı yapılmasıdır. Bunun yanında; kum, çakıl, toprak ve çamur gibi yumuşak ortam diyebileceğimiz zeminler içerisinde ilerlemeler gerçekleşmiştir.

İstanbul Boğazı kıyısındaki kazı esnasında; Rumelihisarı, İstinye, Yeniköy, Tarabya ve Kireçburnu Bölgeleri'nde yerel kayalara, Emirgan ve Kalender Bölgeleri'nde anroşman kayalara, Baltalimanı Bölgesi'nde anroşman ve yerel kayalara rastlanmıştır.

Sert yerel ve hareketli anrojman kayalara rastlanılan bölgelerde makineler bir çok kez kazıdan alınmak zorunda kalınmış ve açık kazı ile kuyu araları birleştirilmiştir. Satın alınan makinelerin zemin ve kayada kazı yapabilir özellikte olması nedeniyle proje güzergahındaki koşullara uygun olduğu söylenebilir. Ancak, makinelerin küçük çaplı olması, makine kesici kafa motorunun da küçük olmasına sebeb olmakta, dolayısıyla makinenin gücü ve torku sınırlı kalmaktadır. Üretici firma tarafından AVN600 tipi makine ile en fazla 50MPa dayanıma sahip kayaların kesilebileceği belirtilmiştir.

Tez çalışması kapsamında; makinenin ilerleme yapamadığı YKD02-YKD03 ve KLB07-KLB08 kuyuları arasından alınan kaya numuneleri üzerinde, Dolaylı Çekme Dayanımı, Nokta Yük Dayanım İndeksi ve Cerchar Aşındırıcılık İndeksi deneyleri yapılmıştır. YKD02-YKD03 kuyuları arasından alınan kaya numunesinin basınç dayanımı yaklaşık165 MPa, KLB08-KLB09 kuyuları arasından alınan numunenin basınç dayanımı ise; 93 MPa olarak bulunmuştur. Bulunan değerler makinenin verimli olarak kazabileceği değer olarak belirtilen 50 MPa'nın çok üzerindedir. Bu durum, söz konusu bölgelerde makinelerin neden çok zorlandığını açıklamaktadır. Kalender Bölgesi'nde kayaların anrojman olması ve bu tür kayalarda kazı esnasında oynamaların meydana gelmesinden dolayı kazının zorluğu daha da artmıştır. Özellikle bu bölgede makine ile kazıda problemlerin çok yaşanması nedeniyle sürüşlerin çoğu açık kazı ile tamamlanmıştır.

BLT-A11 ile BLT-A12 kuyuları arasında mikrotünel makinesinin kazı performansı gözlemleri sonucunda, makinenin bir devirdeki kesme derinliğinin 0,174 mm/devir ve net kazı hızının 0,136 m/saat olduğu bulunmuştur. Keskiler arası mesafenin 34 mm olduğu göz önüne alındığında, bu kesme derinliğinin optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı olan 10-20 değer aralığına göre çok düşük olduğu, dolayısı ile verimsiz bir kazı gerçekleştiği görülmektedir[19].

Hazırlanan hakediş raporlarına göre; proje toplam 848 gün sürmüş ve ilerleme tüm proje için 7,99 m/gün, tek makine başına ise ortalama 5,16 m/gün olarak hesaplanmıştır.

Tutulan günlük raporlara ve makine kayıtlarına göre tüm proje için; yumuşak ortamda; 12,42 m/gün, karışık ortamda; 5,49 m/gün ve sert ortamlarda ise; 2,68 m/gün ortalama ilerleme hesaplanmıştır. Tüm ortamlarda gerçekleşen ilerlemelerin ortalaması 8,71 m/gün olarak belirlenmiştir.

Yumuşak ortamda gerçekleşen 10 sürüşe ait makine kayıtlarından, boru itme süresinin ortalaması 20,10 dakika, net kazı hızlarının ortalaması 7,11 m/saat olarak hesaplanmıştır. Bu sürüşlerin bazılarında boru itme süreleri 8 dakikaya kadar inmektedir.

Ulaşılan maksimum günlük ilerleme hızı; Baltalimanı Bölgesi'nde BLTA13-BLTA14 kuyuları arasında dolguda 12.04.2006 günü 41 m olarak gerçekleşmiştir. Bu gün içerisinde 1 borunun itme süresinin 11 dakikaya kadar düştüğü gözönüne alınırsa net kazı hızı 10,91 m/saat'e ulaşmış, ortalama net kazı hızı ise 7,59 m/saat olarak gerçekleşmiştir.

Kalender Bölgesinde KLB07-KLB08 ve KLB08-KLB09, Kireçburnu Bölgesinde ise, KBA06-KBA07 ve KBA16-KBA17 kuyuları arasında kazı makinelerinin çalışmaları takip edilerek zaman kayıtları tutulmuştur. Çalışma zamanı; mola süresi, boru değişim süresi, arıza/tamir süresi ve itme süresi olmak üzere 4 ayrı başlık altında değerlendirilmiştir. Bu sürüşler içinde; en yüksek makine kullanım oranı %72 ile KBA06-KBA07 kuyuları arasında dolgu içerisinde; en yüksek arıza/tamir süresi ise %63 ile anrojman kayaların yoğun olduğu KLB08-KLB09 kuyuları arasında gerçekleşmiştir. Anrojman kayalara rastlanan bu sürüşteki, net kazı hızı 0,32 m/saat, makine kullanım oranı ise %28'dir. Dolgu ağırlıklı 3 sürüşün ortalama net kazı hızı 0,83 m/saat, ortalama makine kullanım oranı ise %53 olarak hesaplanmıştır. Gözlemlenen 4 sürüşteki ortalama boru değişim süresi ise 44 dakika olarak bulunmuştur, tecrübeli işçilerle bu süre 20 dakikaya düşmektedir.

Makine ilerlemesi ve itme kuvvetinin bulunduğu itişlere ait makine kayıtları incelenmiş ve itme kuvveti-itme mesafesi grafikleri Ek_E'de verilmiştir. Bu verilere göre; 47,80 m'lik RHA08-B13-B12 kuyuları arasında kaya içerisinde gerçekleşen itişte en yüksek değer olan 204 ton'a ve en yüksek ortalama toplam itme kuvveti değeri olan 140 ton'a ulaşılmıştır Kayada gerçekleşen sürüşlerde metre başına gerekli olan itme kuvveti ortalama; 2,27 ton, yumuşak ortam diye tabir edilen; dolgu, kum-çakıl ve çamur içerisindeki sürüşlerde sırasıyla, 1,81 ton, 1,74 ton ve 2,20 ton olarak hesaplanmıştır.

Yapılan itme kuvveti tahminlerinde; kaya(kireçtaşı) içerisindeki sürüşler için, tahmin edilen/gerçekleşen toplam itme kuvveti ortalama değeri 0,84 olarak bulunmuştur. Yumuşak ortamlar için kullanılan itme kuvveti tahmin yöntemleri içerisinde; Terzaghi, ATVA ve PJA teorik modelleri gerçekleşen itme kuvveti değerlerine göre sırasıyla 4,7, 3,8 ve 3,5 değerler vermiştir. Kullanılan Chapma-Ichioka ve Bannett empirik modelleri ise gerçekleşen itme kuvveti değerlerine yaklaşmıştır. Ancak, bu tür itme kuvveti tahmin çalışmalarında teorik ve empirik yöntemler birlikte analiz edilerek yorumlanmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] **Çopur, H., Engin M., Omaç, N., Balcı, C. ve Tumaç, D.,** 2007. Baltalimanı-Sarıyer Arası Sahil Kuşaklama Kollektörleri ve Bağlantıları İnşaatı Mikrotünel Kazıları. *2. Ulaşımda Yeraltı Kazıları Sempozyumu,* İstanbul, Türkiye, Kasım 15-17, ss.129-138.

[2] **Herrenknecht**, 2007. www.herrenknecht.com

[3] **Thomson J.C.,** 1993. Pipejacking and Microtunnelling, Blackie Academic Professional, London, p.273.

[4] **Hegap, M.Y.,** 2003. Productivity Modeling of Microtunneling Projects, *PhD Thesis,* North Dakota State University, Fargo, USA, p.172.

[5] **Ueki, M., Haas, C.T. and Seo, J.,** 1999. Decision Tool for Microtunneling Method Selection. *Journal of Construction Engineering and Management.* March/April, pp.123-131.

[6] **Myers, M.B., Stickrod, T.W., Dulcy, M.A. and Iseley, T,** 1999. Microtunneling Technology for Conduit Construction. *Practice Periodical Structural Design and Construction.* May, pp.56-63.

[7] **Çelikler İnşaat A.Ş.**, 2005. Baltalimanı-Sarıyer Arası Sahil Kuşaklama Kollektörleri İnşaatı Mikrotünel Planı, Ölçek 1:500, İstanbul, Türkiye.

[8] **Omaç N.,** 2007. Kişisel görüşme.

[9] **STFA,** 1988. İstinye-Sarıyer Güzergahı Zemin Etüd Raporu. İstanbul, Türkiye.

[10] **STFA,** 2000. Rumelihisarı Branşman Tüneli Jeoteknik Raporu. İstanbul, Türkiye.

[11] **Herrenknecht**, 2006. AVN600 Operating Manuel. Schwanau, Germany.

[12] **İSKİ,** 2005. Baltalimanı-Sarıyer Arası Sahil Kuşaklama Kollektörleri ve Bağlantıları İnşaatı Mikrotünel Teknik Şartnamesi. İstanbul, Türkiye.

[13] **Çopur, H., Tunçdemir, H., Bilgin, N. and Dinçer, T.,** 2001. Specific Energy as a Criterion for The Use of Rapid Excavation Systems in Turkish Mines, *Transactions of The Institution of Mining and Metallurgy*, **Vol 110**, pp. A149-A157.

[14] **Eskikaya,Ş., Bilgin,N. et al.** 2000., NATO Tu-Excavation Project Development of Rapid Excavation Technologies for The Turkish Mining and Tunnelling Industries, *ITU Mining Engineer Department,* İstanbul, Turkey.

[15] **McFeat-Smith, I. and Fowell, R.J.,** 1977. Correlation of Rock Properties and The Cutting Performance of Tunnelling Machines. *Proceedings of a Conference on Rock Engineering,* Newcastle Upon Tyne, England, pp.581-602.

[16] **ASTM D 5751-02**, 1995. Standart Test Method for Determination of The Point Load Strength Index of Rock.

[17] **ASTM D 3967-95a**, 1995. Standart Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.

[18] **Bilgin, N.,** 1989. İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği. *Birsen Yayınevi*, İstanbul, s.192

[19] **Çopur, H., Balcı, C. ve Tumaç D.,** 2006. Baltalimanı-Sarıyer Arası Sahil Kuşaklama Kollektörleri ve Bağlantıları İnşaatı Mikrotünel Kazıları için Durum Tespiti ve Öneriler. Çelikler İnşaat A.Ş.ye Sunulan Rapor, İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.

[20] **Çelikler İnşaat A.Ş.,** 2005-2006-2007-2008. Baltalimanı-Sarıyer Arası Sahil Kuşaklama Kollektörleri ve Bağlantıları İnşaatı Hakediş Raporları, İstanbul, Türkiye .

[21] **Hegap, M.Y. and Ossama M.S.,** 2004. Productivity Analysis for Boulac's Wastewater Microtunnels in Egypt. *Practice Periodical on Structural Design and Construction,* ASCE, May. pp.116-120.

[22] **Marshall, M.,** 1998. Pipe-Jacked Tunnelling: Jacking Loads and Ground Movements, *PhD Thesis,* The University of Oxford, UK, p.247.

[23] **Norris, P.,** 1992. The Behaviour of Jacked Concrete Pipes During Site Installation. *PhD Thesis,* University of Oxford. p.216

[24] **Staheli, K.,** 2006. Jacking Force Prediction: An Interface Friction Approach Based On Pipe Surface Roughness, *PhD Thesis,* Georgia Institute of Technology. p.350

[25] **Atalah, A.L., Bannet D. and Iseley, T.,** 1991. Estimating The Required Jacking Force. Louisiana Tech University, Louisiana, USA, p.23.

[26] **Chapman, D.N. and Ichioka, Y.,** 1999. Prediction of Jacking Forces for Microtunneling Operations, *Trenchless Technology Research*, International Society of Trenchless Technology, **Vol. 14 No:1**, 31-41.

[27] **Barla, M., Camusso, M. and Aiassa, S**., 2006. Analysis of Jacking Forces During Microtunnelling in Limestone. *Trenchless Technology Research*, Torino, Italy, p.14.

[28] **Çopur H.,** 2006. MAD 605E Microtunnelling. *İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Doktora Ders Notları*, İstanbul, Türkiye.

Ek _A

KAZI BÖLGELERİNE GÖRE KUYULARIN DAĞILIMI, YÜZEY VE AKAR KOTLARI

Ek_A

Rumelihisarı Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Yüzey kotu(m)	Akar kot (m)
RH-A01	1,68	0,02	RH-B04	8,25	4,44
RH-A02	1,32	-0,09	RH-B05	7,10	3,70
RH-A03	1,41	-0,20	RH-B06	5,81	2,53
RH-A04	1,91	-0,30	RH-B07	4,90	1,49
RH-A05	1,97	-0,39	RH-B08	4,39	1,21
RH-A06	2,00	-0,56	RH-B09	3,97	0,65
RH-A07	2,03	-0,70	RH-B10	3,57	0,45
RH-A08	2,14	-0,82	RH-B11	3,26	-0,04
RH-B01	11,22	6,74	RH-B12	2,80	-0,40
RH-B02	10,50	5,70	RH-B13	2,48	-0,50
RH-B03	9,20	5,04			

Baltalimanı Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Üst kot (m)	Akar kot (m)
BLT-A01	2,32	0,54	BLT-A12	2,25	-0,45
BLT-A02	2,31	0,46	BLT-A13	2,39	-0,58
BLT-A03	2,21	0,40	BLT-A14	2,34	-0,72
BLT-A04	2,14	0,34	BLT-A15	2,19	-0,85
BLT-A06	2,03	0,22	BLT-A16	2,13	-0,98
BLT-A07	2,18	0,16	BLT-A17	1,85	-1,16
BLT-A08	2,27	0,10	BLT-A18A	2,20	-1,36
BLT-A09	2,46	0,04	BLT-A18	1,93	-1,26
BLT-A10	2,42	-0,12	BLT-A19	2,58	-1,44
BLT-A11	2,25	-0,32	BLT-A20	3,51	-1,58

Ek_A

Emirgan Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)
EM-A02	4,90	0,60	EM-A11	1,58	-0,34
EM-A03	3,20	0,43	EM-A12	1,58	-0,42
EM-A04	2,56	0,34	EM-B01	1,75	-0,75
EM-A05	2,42	0,25	EM-B02	1,44	-1,86
EM-A06	2,24	0,16	EM-B03	1,49	-1,02
EM-A07	2,02	0,07	EM-B04	1,41	-1,48
EM-A08	1,87	-0,02	EM-B05	1,20	-1,20
EM-A09	1,64	-0,11	EM-B06	1,02	-1,31
EM-A10	1,57	-0,28	EM-B08	1,54	-0,50

İstinye Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)
IS-A01	3,74	-2,60	IS-A02	1,44	-2,00
IS-BS1A	5,40	-3,20			

Ek_A

Yeniköy Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)
SAV-07	2,62	0,12	YK-A09	2,33	-1,65
YK-B01	2,82	-0,08	YK-B01A	2,79	0,58
YK-B02	2,72	-0,35	YK-B02A	2,75	0,47
YK-B04	2,70	-0,60	YK-B03A	2,88	0,17
YK-B05	2,65	-0,70	YK-B04A	2,65	0,03
YK-B07	2,73	-0,80	YK-B05A	2,60	-0,03
YK-B08	2,52	-0,93	YK-B06A	2,68	-0,18
YK-B10	2,62	-1,12	YK-B07A	2,65	-0,32
YK-B11	2,54	-1,25	YK-B08A	2,50	-0,50
YK-B12	2,40	-1,33	YK-B10A	2,62	-0,67
YK-B13	2,33	-1,51	YK-B11A	2,60	-0,80
SAV-09	2,41	-0,45	YK-B12A	2,42	-0,94
YK-A02	2,41	-0,69	YK-B13A	2,33	-1,08
YK-A03	2,34	-0,85	YK-A05A	2,25	-0,65
YK-A04	2,30	-1,02	YK-A06A	2,27	-0,77
YK-A05	2,30	-1,13	YK-A07A	2,20	-0,94
YK-A06	2,27	-1,26	YK-A08A	2,27	-1,06
YK-A07	2,24	-1,42	YK-A09A	2,34	-1,20
YK-A08	2,28	-1,54	SAV-04	2,78	0,72

Ek_A

Yeniköy Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)
YK-D01	9,60	8,15	YK-C13	2,68	-0,20
YK-D02	10,20	7,75	YK-D01A	10,60	8,00
YK-D03	9,00	7,00	YK-D02A	10,47	7,85
YK-D04	6,73	4,74	YK-D03A	10,18	7,70
YK-D05	5,00	3,00	YK-D04A	7,75	5,76
YK-D06	3,87	1,87	YK-D05A	5,95	3,95
S8AB	5,22	-1,14	YK-D08A	4,29	1,37
YK-D08A	4,29	-1,09	SAV-04	2,78	0,15
YK-C08A	3,15	-1,05	YK-C01	2,33	-0,03
SAV4A	2,78	0,72	YK-C02	2,36	-0,12
YK-C01A	2,30	0,64	YK-C03	2,45	-0,54
YK-C02A	2,27	0,60	YK-C04	1,71	-0,59
YK-C03A	2,29	0,55	YK-C05	1,43	-0,65
YK-C04A	2,78	0,47	YK-C06	1,57	-0,74
YK-C09	2,40	0,40	YK-C07	1,12	-0,86
YK-C11	2,54	0,15	YK-C08	1,58	-0,98
YK-C12	2,53	-0,06	YK-C13	2,68	-1,00

Kalender Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)
KL-B01	2,46	-0,34	KL-B08	1,63	-1,24
KL-B02	2,71	-0,83	KL-B09	1,52	-1,43
KL-B03	2,64	-0,56	KL-B10	1,96	-1,55
KL-B04	1,86	-0,71	KL-B11	2,16	-1,69
KL-B05	1,53	-0,86	KL-B12	1,97	-1,87
KL-B06	1,71	-0,98	KL-B16	1,68	-2,03
KL-B07	1,67	-1,12	S7B	3,12	-2,05

Ek_A

Tarabya Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)
TR-A01	1,69	-0,88	TR-B06	2,14	-0,45
TR-A02	1,72	-0,99	TR-B07	2,18	-0,61
TR-A03	1,70	-1,10	TR-B08	2,18	-1,00
TR-A04	1,63	-1,21	TR-B09	1,53	-1,08
TR-A05	1,60	-1,29	TR-B10	1,44	-1,15
TR-A06	1,58	-1,40	TR-B11	1,45	-1,22
TR-A07	1,58	-1,46	TR-B12	1,14	-1,32
TR-A08	1,57	-1,53	TR-B13	1,64	-1,43
TR-A09	1,68	-1,60	TR-B14	1,73	-1,49
TR-A10	1,48	-1,67	TR-B15	1,80	-1,61
TR-A11	1,47	-1,73	TR-B16	2,30	-1,70
TR-B02	2,14	0,20	TR-B17	2,30	-1,74
TR-B03	2,14	0,03	TR-B18	2,30	-1,79
TR-B04	2,14	-0,14	TR-B19	1,78	-1,90
TR-B05	2,14	-0,31	TR-B21	1,45	-2,02

Ek_A

Kireçburnu Bölgesi Kuyuları

Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)	Kuyu No	Yüzey kotu (m)	Akar kot (m)
KB-A01	2,58	0,19	KB-B05	2,26	0,01
KB-A02	2,20	0,10	KB-B06	2,17	-0,09
KB-A03	2,11	0,01	KB-B07	2,25	-0,19
KB-A04	2,14	-0,11	KB-B08	2,40	-0,29
KB-A05	1,98	-0,23	KB-B09	2,21	-0,39
KB-A06	1,98	-0,29	KB-B10	2,50	-0,47
KB-A07	2,00	-0,38	KB-B11	2,50	-0,57
KB-A08	2,06	-0,47	KB-B12	2,54	-0,67
KB-A09	1,90	-0,56	KB-B13	2,57	-0,75
KB-A10	1,95	-0,62	KB-B14	2,55	-0,85
KB-A11	2,03	-0,77	KB-B15	2,58	-0,95
KB-A12	2,14	-0,94	KB-B16	2,58	-1,04
KB-A13	2,00	-1,11	KB-B17	2,58	-1,13
KB-A14	2,20	-1,28	KB-B18	2,58	-1,23
KB-A15	1,83	-1,45	KB-B19	2,52	-1,33
KB-A16	1,79	-1,62	KB-B20	2,52	-1,43
KB-A17	2,07	-1,79	KB-B21	2,50	-1,53
KB-A18	2,33	-1,99	KB-B22	2,40	-1,64
KB-A19	2,56	-2,19	KB-B23	2,40	-1,71
KB-A20	2,93	-2,29	KB-B24	2,31	-1,78
KB-A21	2,90	-2,36	KB-B25	2,44	-1,89
KB-A22	2,40	-2,38	KB-B26	2,52	-2,00
S2B	2,35	-2,40	KB-B27	2,50	-2,10
KB-B01	2,78	0,41	KB-B28	2,50	-2,24
KB-B02	2,46	0,31	KB-B29	2,50	-2,28
KB-B03	2,16	0,21	S2B	2,35	-2,30
KB-B04	2,28	0,11			

Ek _B

KAZI BÖLGELERİNE GÖRE MAKİNE KAYITLARINDAN ÇIKARTILMIŞ OLAN GÜNLÜK İLERLEME HIZLARININ TABLOLARI

Ek_B

Rumelihisarı Bölgesi İlerlemeleri

Rumelihisarı Kuyular	Uzunluk (m)	Kazı yapılan gün sayısı	İlerleme (m/gün)	Karşılaşılan zemin	Ortam
A01-A02-A03	54,60	11	4,96	Kum-Çakıl-Kaya*-Dolgu	Karışık
A05-04A-A03	56,00	12	4,66	Kum-Çakıl-Kaya*-Dolgu	Karışık
A07-A08	30,00	3	10,00	Dolgu zemin	Yumuşak
A08-B13-B12	47,80	14	3,41	Kaya*	Sert
B10-B11-B12	42,40	14	3,03	Kaya*	Sert
B10-B09	28,20	12	2,35	Kaya*	Sert
B08-B09	34,77	3	11,59	Toprak-Dolgu	Yumuşak
Ortalama ilerleme			4,26	*Kireçtaşı	

Baltalimanı Bölgesi İlerlemeleri

Baltalimanı Kuyuları	Mesafe (m)	Kazı yapılan gün sayısı	İlerleme (m/gün)	Karşılaşılan zemin	Ortam
A06-A07	28,90	14	2,06	Kaya*	Sert
A08-A07	26,50	7	3,79	Kaya*-Dolgu	Karışık
A09-A08	45,25	6	7,54	Kaya*-Toprak-Dolgu	Karışık
A09-A10	41,54	6	6,92	Kaya*-Toprak-Dolgu	Karışık
A11-A10	42,01	7	6,00	Kaya* -Dolgu	Karışık
A11-A12	38,50	13	2,96	Kaya*	Sert
A13-A14	47,15	3	15,72	Dolgu	Yumuşak
Ortalama ilerleme			4,82	*Kireçtaşı	

Emirgan Bölgesi İlerlemeleri

Emirgan Kuyuları	Mesafe (m)	Kazı yapılan gün sayısı	İlerleme (m/gün)	Karşılaşılan zemin	Ortam
A05-A04-A03	65,40	8	8,18	Kum-çakıl-dolgu	Yumuşak
A06-A05	31,78	3	10,60	Kum-çakıl-dolgu	Yumuşak
B02-B01	27,80	2	13,90	Kum-çakıl-dolgu	Yumuşak
B02-B03	27,41	3	9,14	Kum-çakıl-dolgu	Yumuşak
B04-B03	30,50	3	10,16	Kum-çakıl-dolgu	Yumuşak
B04-B05	59,00	13	4,54	Kaya-kum-dolgu	Karışık
B06-B05	31,78	14	2,23	Kaya*	Sert
Ortalama ilerleme			5,95	*Kireçtaşı	

İstinye Bölgesi İlerlemeleri

İstinye Kuyuları	Mesafe (m)	Kazı yapılan gün sayısı	İlerleme (m/gün)	Karşılaşılan zemin	Ortam
A02-A01	49,60	3	16,53	Dolgu ve toprak	Yumuşak
Ortalama ilerleme			16,53		

Ek_B

Yeniköy Bölgesi İlerlemeleri

Yeniköy Kuyuları	Mesafe (m)	Kazı yapılan gün sayısı	İlerleme (m/gün)	Karşılaşılan Formasyon	Ortam
A03-A04	48,00	3	16,00	Dolgu	Yumuşak
A04-A05	36,00	2	12,00	Dolgu	Yumuşak
A07-A06-A05	85,00	9	9,44	Dolgu	Yumuşak
A05A-A06A-A07A	86,00	7	12,29	Dolgu	Yumuşak
A07A-A08A-A09A	76,00	9	8,44	Dolgu	Yumuşak
B01-B02	75,00	5	15,00	Dolgu	Yumuşak
B02A-B03A	90,00	8	11,25	Dolgu	Yumuşak
B03A-B05A	60,00	9	6,67	Dolgu	Yumuşak
B06A-B08A	85,00	4	21,25	Dolgu	Yumuşak
B07-B05-B04	60,00	3	20,00	Dolgu	Yumuşak
B11A-B10A-B08A	70,00	3	23,33	Dolgu	Yumuşak
B11-B10-B08	99,00	4	24,75	Dolgu	Yumuşak
B13-B12	60,00	6	10,00	Dolgu	Yumuşak
B13A-B09A	35,00	7	5,00	Dolgu-kaya*	Karışık
B13A-B12A	45,00	3	15,00	Dolgu	Yumuşak
C01A-SAV04A	50,00	4	12,50	Dolgu	Yumuşak
C04A-C03A-C02A	78,00	6	13,00	Dolgu	Yumuşak
C09-C04A	43,00	3	14,33	Dolgu	Yumuşak
D05-D06	30,00	5	6,00	Dolgu-kaya*	Karışık
D08A-C08A	40,00	3	13,33	Dolgu	Yumuşak
D05A-D08A	57,00	3	19,00	Dolgu	Yumuşak
Ortalama ilerleme			12,34	*Kireçtaşı	

Kalender Bölgesi İlerlemeleri

Kalender Kuyuları	Mesafe (m)	Kazı yapılan gün sayısı	İlerleme (m/gün)	Karşılaşılan zemin	Sınıflama
B01-B02	49,00	3	16,33	Dolgu	Yumuşak
B02-B03	33,00	2	16,50	Dolgu	Yumuşak
B03-B04	49,00	6	8,17	Dolgu	Yumuşak
B07-B08	33,00	3	11,00	Dolgu	Yumuşak
B08-B09	20,00	10	2,00	Anrojman kayalar	Sert
B12-B16	56,00	7	8,00	Dolgu	Yumuşak
Ortalama ilerleme			7,74		

Ek_B

Tarabya Bölgesi İlerlemeleri

Tarabya Kuyuları	Uzunluk (m)	Kazı yapılan gün sayısı	İlerleme (m/gün)	Karşılaşılan zemin	Sınıflama
A04-A05	41,50	3	13,83	Bataklık	Yumuşak
A06-A05	49,30	4	12,33	Bataklık	Yumuşak
A10-A11	24,50	2	12,25	Bataklık	Yumuşak
A11-B21	42,96	4	10,74	Bataklık	Yumuşak
B03-B04	48,80	4	12,20	Kum-çakıl	Yumuşak
B05-B04	46,50	3	15,50	Kum-çakıl	Yumuşak
B07-B06	48,35	3	16,12	Kum-çakıl	Yumuşak
B09-B08-B07	94,20	10	9,42	Kum-çakıl	Yumuşak
B09-B10	32,75	3	10,92	Kum-çakıl	Yumuşak
B12-B11-B10	82,75	6	13,78	Kum-çakıl	Yumuşak
B12-B13	47,85	3	15,95	Kum-çakıl	Yumuşak
B14-B13	30,70	2	15,35	Bataklık	Yumuşak
B16-B15-B14	53,90	3	17,97	Bataklık	Yumuşak
B19-B18-B17	59,10	5	11,82	Bataklık	Yumuşak
B19-B21	69,75	4	17,43	Bataklık	Yumuşak
Ortalama ilerleme			13,10		

Kireçburnu Bölgesi İlerlemeleri

Kireçburnu Kuyuları	Uzunluk (m)	Kazı yapılan gün sayısı	İlerleme (m/gün)	Karşılaşılan Formasyon	Sınıflama
A04-A05	44,10	3	14,70	Dolgu	Yumuşak
A06-A07	54,40	7	7,77	Dolgu	Yumuşak
A16-A17	63,40	7	9,05	Dolgu	Yumuşak
Ortalama ilerleme			9,52		

Ek _C

BAZI SÜRÜŞLERİN MAKİNE KAYITLARINDAN ÇIKARTILAN NET KAZI HIZLARI TABLOLARI

Ek_C

BLTA13-BLTA14 (dolgu)

	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	23	5,22	13	15	8,00
2	30	4,00	14	10	12,00
3	16	7,50	15	9	13,33
4	17	7,06	16	13	9,23
5	24	5,00	17	10	12,00
6	20	6,00	18	13	9,23
7	17	7,06	19	16	7,50
8	26	4,62	20	13	9,23
9	25	4,80	21	10	12,00
10	25	4,80	22	15	8,00
11	15	8,00	23	14	8,57
12	19	6,32	-	-	-
Ortalama itme süresi 17,17 dakika			Ortalama net kazı hızı 7,80 m/saat		

EMB04-EMB03 (kum, çakıl, dolgu)

	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	40	3,00	9	9	13,33
2	40	3,00	10	8	15,00
3	45	2,67	11	8	15,00
4	26	4,62	12	9	13,33
5	14	8,57	13	17	7,06
6	20	6,00	14	49	2,45
7	22	5,45	15	20	6,00
8	16	7,50	-	-	-
Ortalama itme süresi 22,87 dakika			Ortalama net kazı hızı 7,53 m/saat		

EMB14-EMB15 (kum, çakıl, dolgu)

	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	15	8,00	9	21	5,71
2	32	3,75	10	19	6,32
3	18	6,67	11	19	6,32
4	20	6,00	12	20	6,00
5	19	6,32	13	21	5,71
6	18	6,67	14	20	6,00
7	21	5,71	15	20	6,00
8	26	4,62	-	-	-
Ortalama itme süresi 20,60 dakika			Ortalama net kazı hızı 5,99 m/saat		

Ek_C

EMA03-EMA04-EMA05 (kum, çakıl, dolgu)

Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	29	4,14	17	40	3,00
2	23	5,22	18	28	4,29
3	31	3,87	19	22	5,45
4	29	4,14	20	19	6,32
5	30	4,00	21	20	6,00
6	24	5,00	22	25	4,80
7	30	4,00	23	37	3,24
8	33	3,64	24	35	3,43
9	19	6,32	25	30	4,00
10	17	7,06	26	42	2,86
11	22	5,45	27	43	2,79
12	40	3,00	28	40	3,00
13	30	4,00	29	37	3,24
14	23	5,22	30	30	4,00
15	16	7,50	31	30	4,00
16	24	5,00	32	45	2,67
Ortalama itme süresi 29,47 dakika			Ortalama net kazı hızı 4,39 m/saat		

TRB07-TRB06 (Kum-Çakıl)

Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	17	7,06	13	19	6,32
2	17	7,06	14	19	6,32
3	20	6,00	15	21	5,71
4	16	7,50	16	14	8,57
5	20	6,00	17	19	6,32
6	14	8,57	18	12	10,00
7	16	7,50	19	21	5,71
8	17	7,06	20	17	7,06
9	13	9,23	21	18	6,67
10	16	7,50	22	17	7,06
11	17	7,06	23	12	10,00
12	16	7,50	24	13	9,23
Ortalama itme süresi 16,71 dakika			Ortalama net kazı hızı 7,37 m/saat		

Ek_C

TRB13-TRB12 (Kum-Çakıl)

Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	16	7,50	13	8	15,00
2	20	6,00	14	8	15,00
3	42	2,86	15	8	15,00
4	24	5,00	16	10	12,00
5	33	3,64	17	12	10,00
6	14	8,57	18	11	10,91
7	14	8,57	19	15	8,00
8	10	12,00	20	17	7,06
9	9	13,33	21	30	4,00
10	10	12,00	22	29	4,14
11	11	10,91	23	16	7,50
12	11	10,91	-	-	-
Ortalama itme süresi 16,43 dakika			Ortalama net kazı hızı 9,13 m/saat		

TRB09-TRB08-TRB07 (Kum-Çakıl)

Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	14	8,57	25	45	2,67
2	15	8,00	26	29	4,14
3	13	9,23	27	29	4,14
4	20	6,00	28	19	6,32
5	21	5,71	29	17	7,06
6	19	6,32	30	19	6,32
7	13	9,23	31	19	6,32
8	13	9,23	32	16	7,50
9	13	9,23	33	16	7,50
10	14	8,57	34	17	7,06
11	25	4,80	35	12	10,00
12	20	6,00	36	13	9,23
13	17	7,06	37	13	9,23
14	17	7,06	38	18	6,67
15	22	5,45	39	13	9,23
16	25	4,80	40	29	4,14
17	20	6,00	41	29	4,14
18	24	5,00	42	40	3,00
19	19	6,32	43	19	6,32
20	24	5,00	44	30	4,00
21	12	10,00	45	34	3,53
22	26	4,62	46	26	4,62
23	35	3,43	47	30	4,00
24	20	6,00	-	-	-
Ortalama itme süresi 21,13 dakika			Ortalama net kazı hızı 6,36 m/saat		

Ek_C

TRB10-TRB09 (Kum-Çakıl)

Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	32	3,75	9	30	4,00
2	25	4,80	10	22	5,45
3	30	4,00	11	32	3,75
4	20	6,00	12	18	6,67
5	29	4,14	13	13	9,23
6	22	5,45	14	14	8,57
7	29	4,14	15	13	9,23
8	27	4,44	16	25	4,80
Ortalama itme süresi 23,81 dakika			Ortalama net kazı hızı 5,53 m/saat		

TRB19-TRB18-TRB17 (Bataklık)

Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	10	12,00	16	28	4,29
2	22	5,45	17	20	6,00
3	18	6,67	18	50	2,40
4	19	6,32	19	18	6,67
5	16	7,50	20	14	8,57
6	9	13,33	21	14	8,57
7	11	10,91	22	20	6,00
8	8	15,00	23	25	4,80
9	16	7,50	24	28	4,29
10	16	7,50	25	32	3,75
11	12	10,00	26	20	6,00
12	11	10,91	27	17	7,06
13	11	10,91	28	20	6,00
14	23	5,22	29	17	7,06
15	14	8,57	-	-	-
Ortalama itme süresi 18,59 dakika			Ortalama net kazı hızı 7,56 m/saat		

Ek_C

TRB21-TRB19 (Bataklık)

Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)	Boru no	İtme süresi (dakika/boru)	Net kazı hızı (m/saat)
1	19	6,32	19	11	10,91
2	20	6,00	20	11	10,91
3	30	4,00	21	16	7,50
4	18	6,67	22	10	12,00
5	13	9,23	23	12	10,00
6	12	10,00	24	12	10,00
7	10	12,00	25	10,00	12,00
8	11	10,91	26	11	10,91
9	11	10,91	27	9	13,33
10	11	10,91	28	20	6,00
11	10	12,00	29	10	12,00
12	17	7,06	30	10,00	12,00
13	17	7,06	31	18	6,67
14	10	12,00	32	15	8,00
15	40	3,00	33	15	8,00
16	11	10,91	34	14	8,57
17	10	12,00	35	15	8,00
18	10	12,00	-	-	-
Ortalama itme süresi 14,26 dakika			Ortalama net kazı hızı 9,42 m/saat		

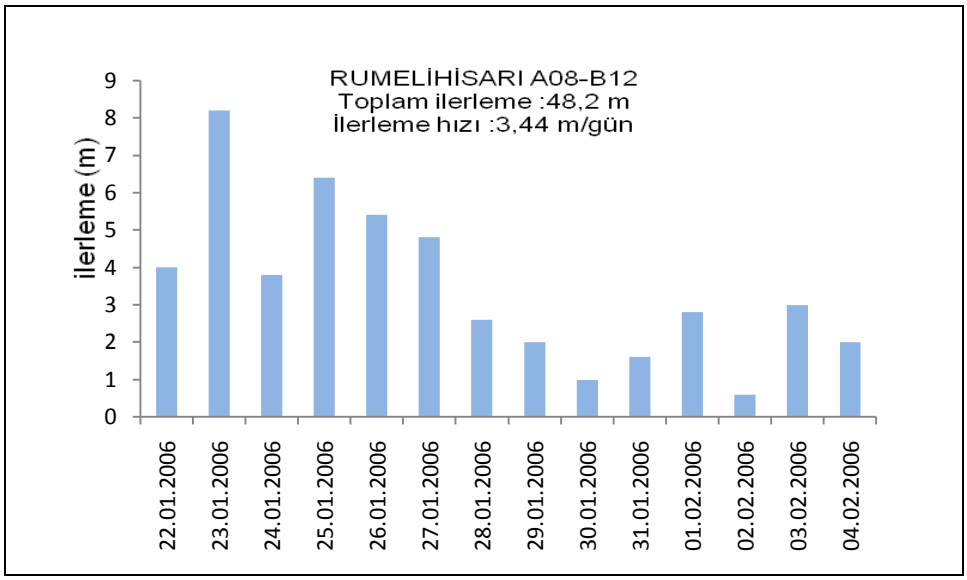
10 Adet Sürüşe Ait Ortalamalar

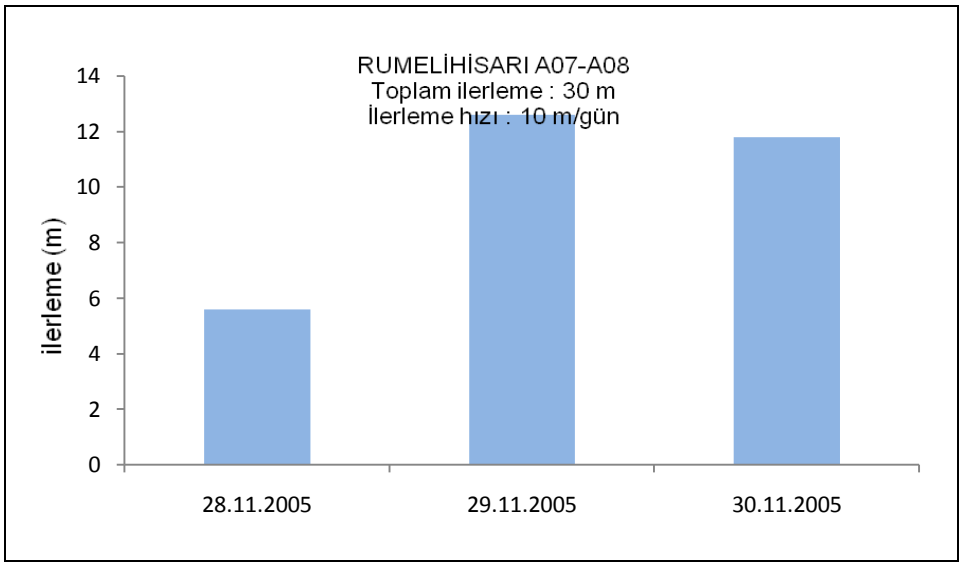
Hat	Karşılaşılan zemin	Ort. İtme Süresi (dakika/boru)	Ort. Net kazı hızı (m/saat)
BLTA13-BLTA14	Dolgu	17,17	7,80
EMB04-EMB03	Kum-çakıl-dolgu	22,87	7,53
EMB14-EMB15	Kum-çakıl-dolgu	20,60	5,99
EMA03-EMA04-EMA05	Kum-çakıl-dolgu	29,47	4,39
TRB07-TRB06	Kum-çakıl	16,71	7,37
TRB13-TRB12	Kum-çakıl	16,43	9,13
TRB09-TRB08-TRB07	Kum-çakıl	21,13	6,36
TRB10-TRB09	Kum-çakıl	23,81	5,53
TRB19-TRB18-TRB17	Bataklık	18,59	7,56
TRB21-TRB19	Bataklık	14,26	9,42
	Ortalama	20,10	7,11

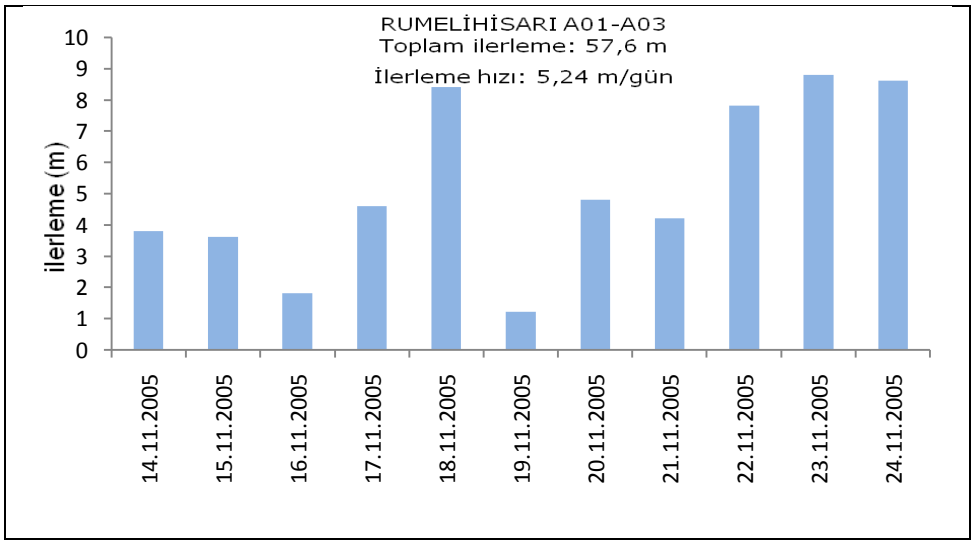
Ek _D

BAZI SÜRÜŞLERİN MAKİNE KAYITLARINDAN ÇIKARTILAN GÜNLÜK İLERLEME HIZLARI GRAFİKLERİ

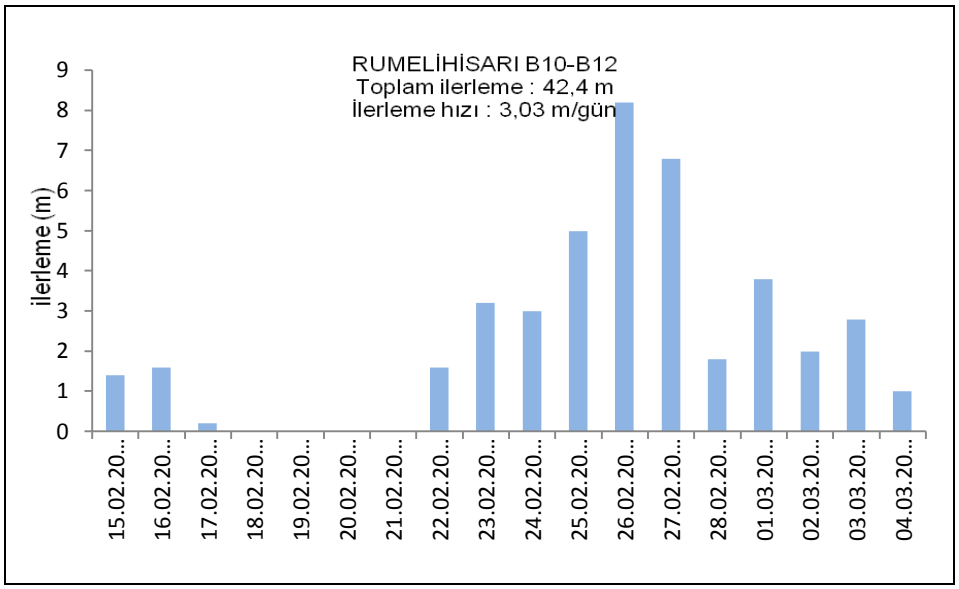
Ek_D

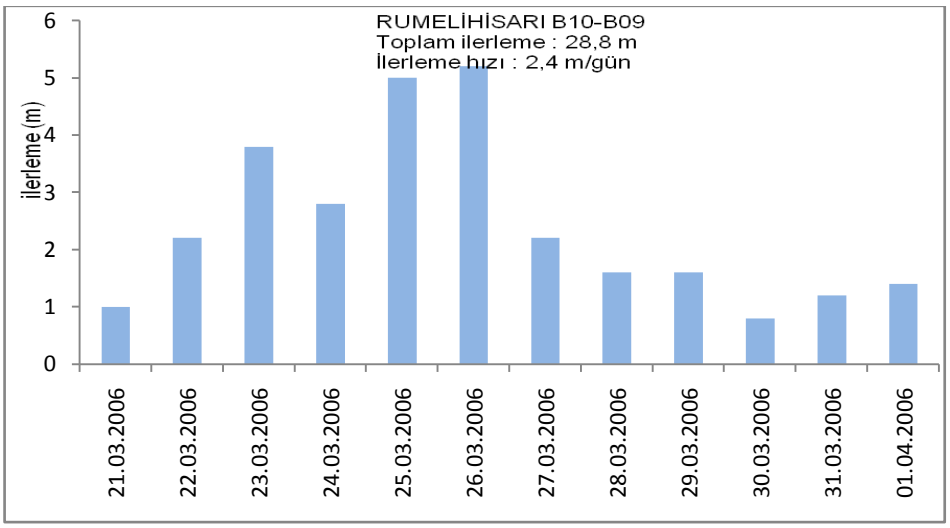

RUMELİHİSARI A08-B12
Toplam ilerleme :48,2 m
İlerleme hızı :3,44 m/gün
ilerleme (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
22.01.2006
23.01.2006
24.01.2006
25.01.2006
26.01.2006
27.01.2006
28.01.2006
29.01.2006
30.01.2006
31.01.2006
01.02.2006
02.02.2006
03.02.2006
04.02.2006

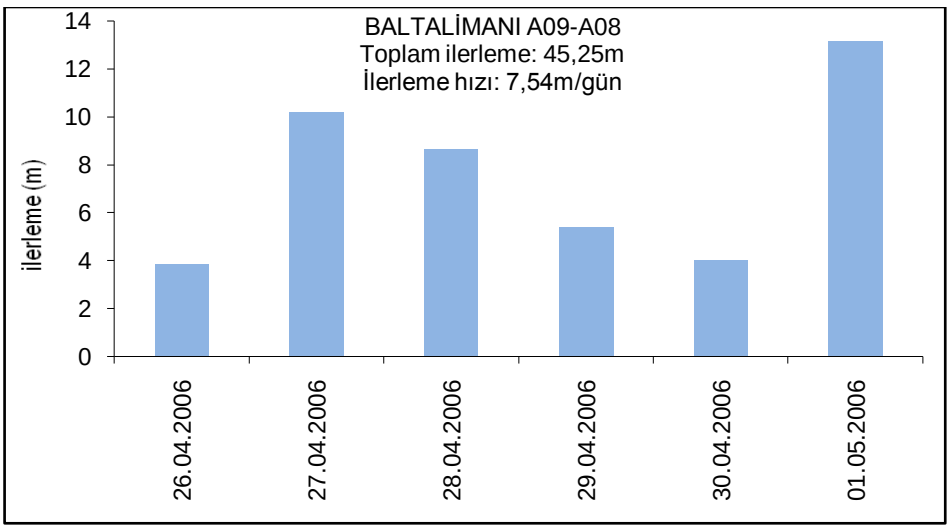

RUMELİHİSARI A07-A08
Toplam ilerleme : 30 m
İlerleme hızı : 10 m/gün
ilerleme (m)
0
2
4
6
8
10
12
14
28.11.2005
29.11.2005
30.11.2005


RUMELİHİSARI A01-A03
Toplam ilerleme: 57,6 m
İlerleme hızı: 5,24 m/gün
ilerleme (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
14.11.2005
15.11.2005
16.11.2005
17.11.2005
18.11.2005
19.11.2005
20.11.2005
21.11.2005
22.11.2005
23.11.2005
24.11.2005

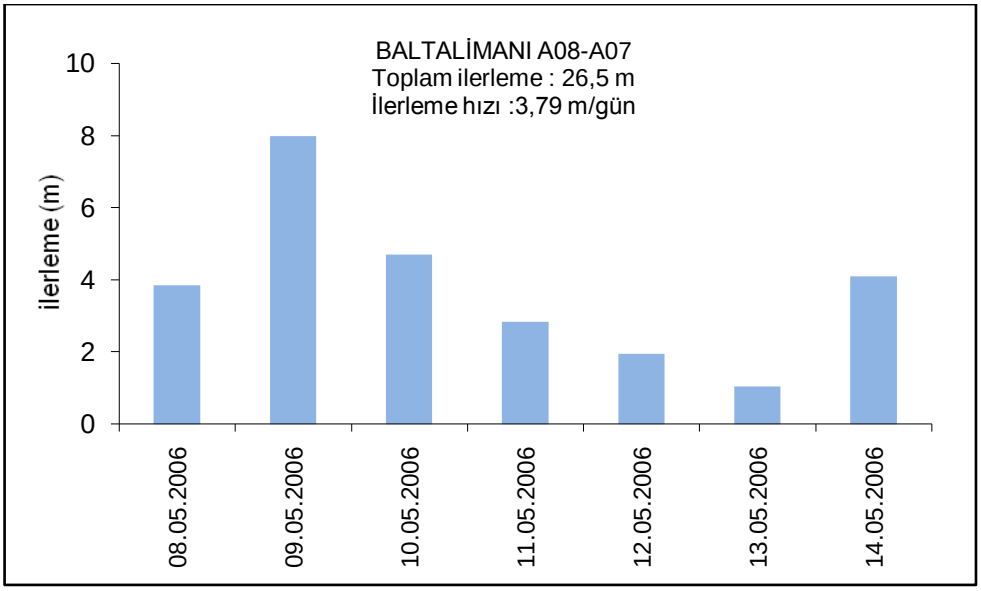
Ek_D

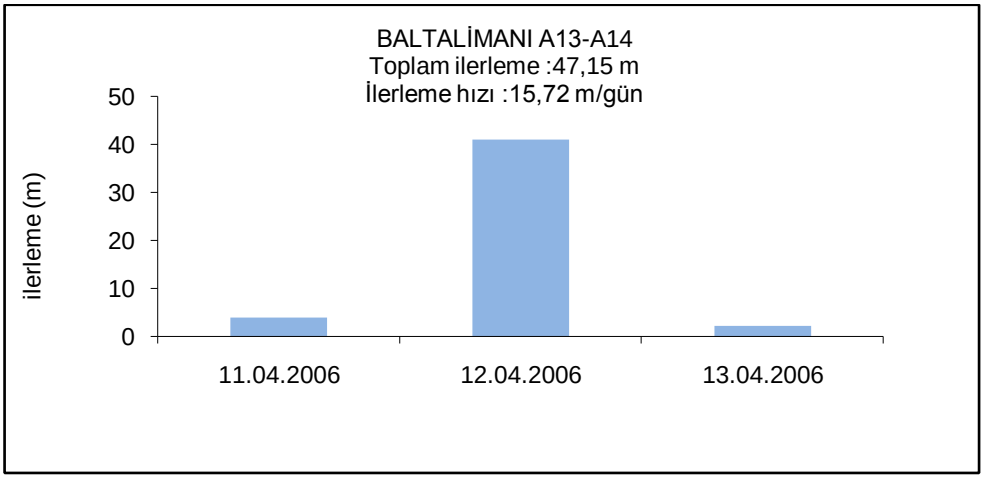

RUMELİHİSARI B10-B12
Toplam ilerleme : 42,4 m
İlerleme hızı : 3,03 m/gün
İlerleme (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
15.02.20...
16.02.20...
17.02.20...
18.02.20...
19.02.20...
20.02.20...
21.02.20...
22.02.20...
23.02.20...
24.02.20...
25.02.20...
26.02.20...
27.02.20...
28.02.20...
01.03.20...
02.03.20...
03.03.20...
04.03.20...

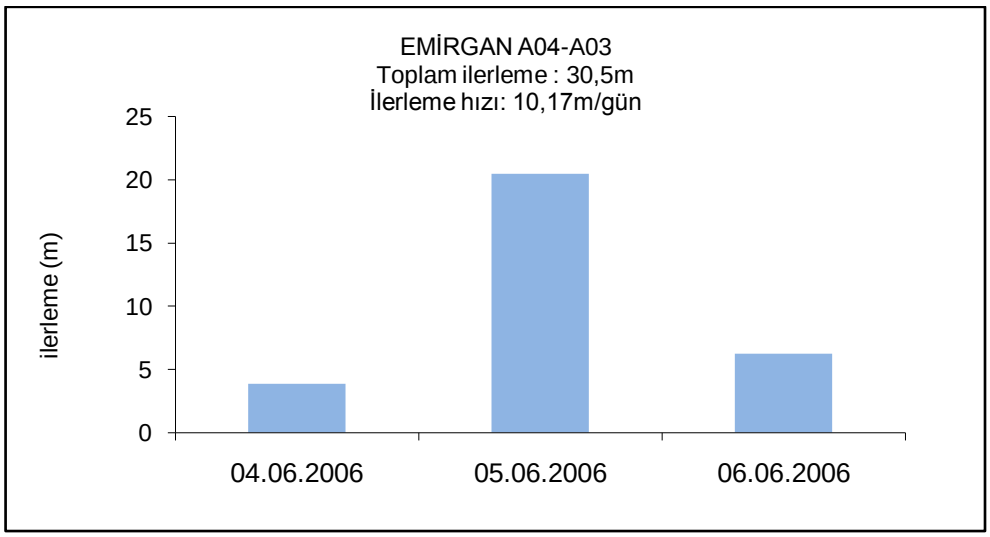

RUMELİHİSARI B10-B09
Toplam ilerleme : 28,8 m
İlerleme hızı : 2,4 m/gün
İlerleme (m)
0
1
2
3
4
5
6
21.03.2006
22.03.2006
23.03.2006
24.03.2006
25.03.2006
26.03.2006
27.03.2006
28.03.2006
29.03.2006
30.03.2006
31.03.2006
01.04.2006


BALTALİMANI A09-A08
Toplam ilerleme: 45,25m
İlerleme hızı: 7,54m/gün
İlerleme (m)
0
2
4
6
8
10
12
14
26.04.2006
27.04.2006
28.04.2006
29.04.2006
30.04.2006
01.05.2006

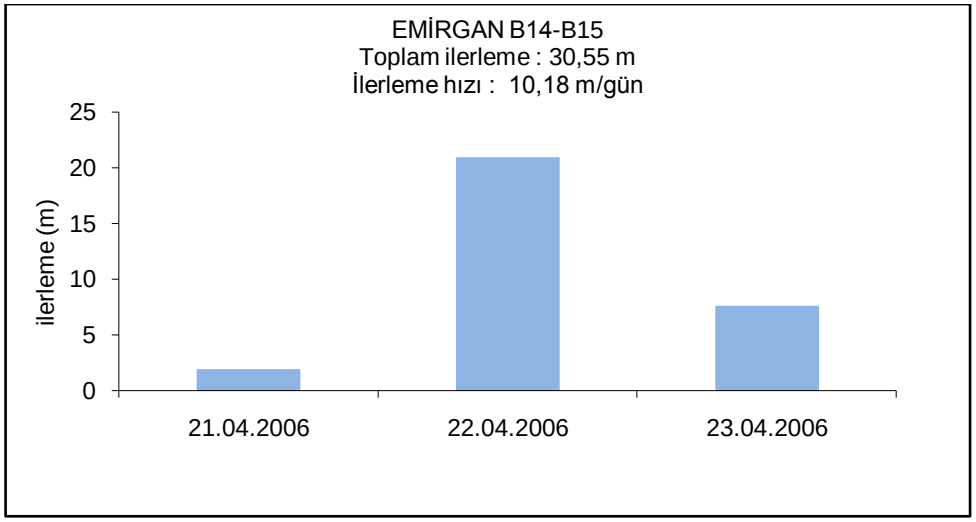
Ek_D

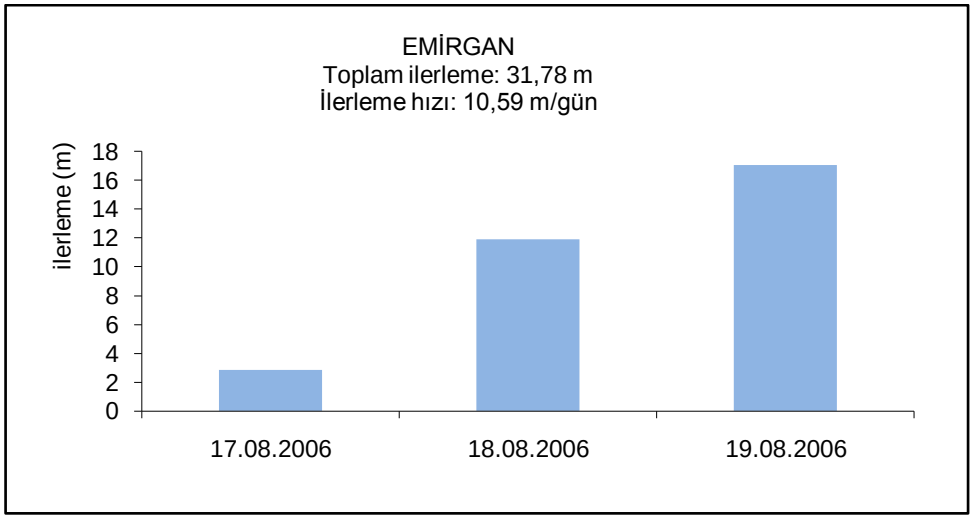

BALTALİMANI A08-A07
Toplam ilerleme : 26,5 m
İlerleme hızı :3,79 m/gün
ilerleme (m)
10
8
6
4
2
0
08.05.2006
09.05.2006
10.05.2006
11.05.2006
12.05.2006
13.05.2006
14.05.2006

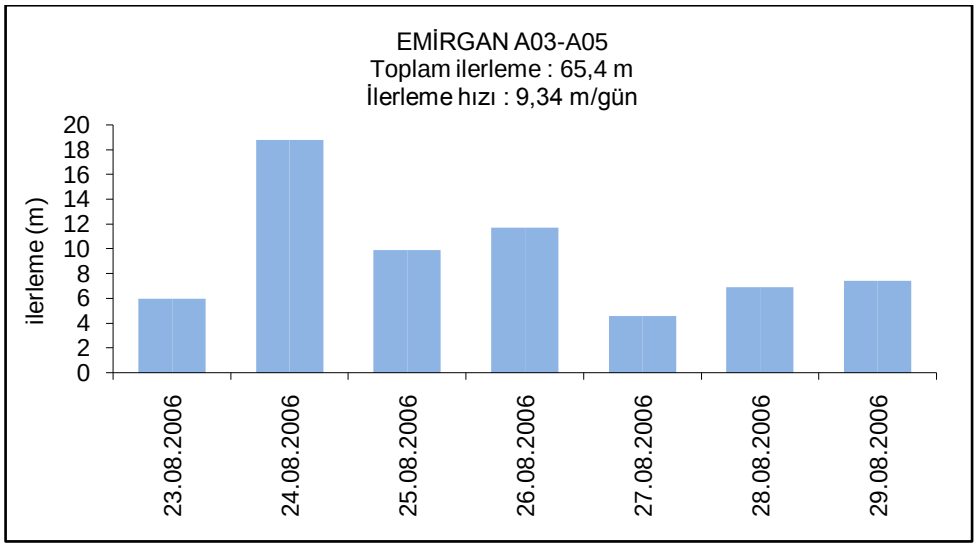

BALTALİMANI A13-A14
Toplam ilerleme :47,15 m
İlerleme hızı :15,72 m/gün
ilerleme (m)
50
40
30
20
10
0
11.04.2006
12.04.2006
13.04.2006


EMİRGAN A04-A03
Toplam ilerleme : 30,5m
İlerleme hızı: 10,17m/gün
ilerleme (m)
25
20
15
10
5
0
04.06.2006
05.06.2006
06.06.2006

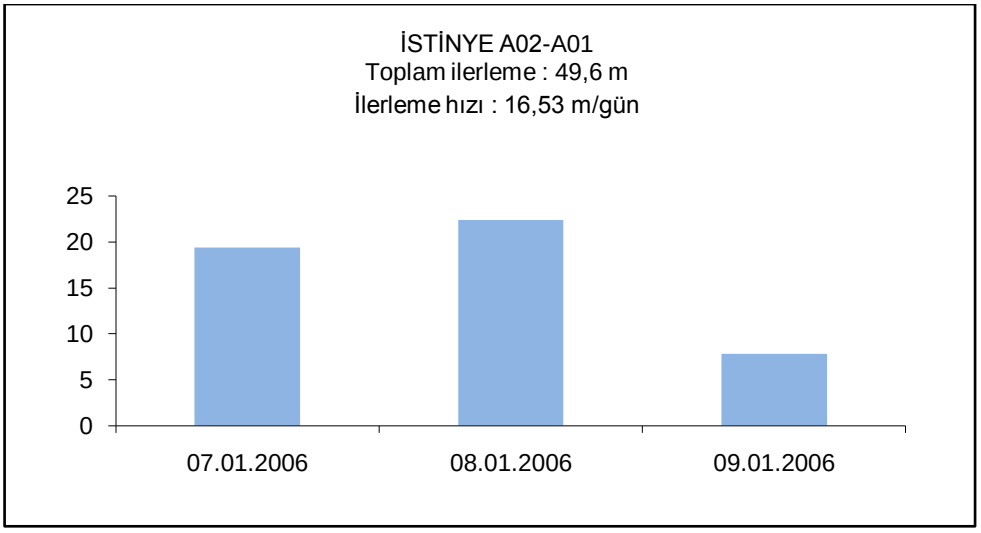
Ek_D

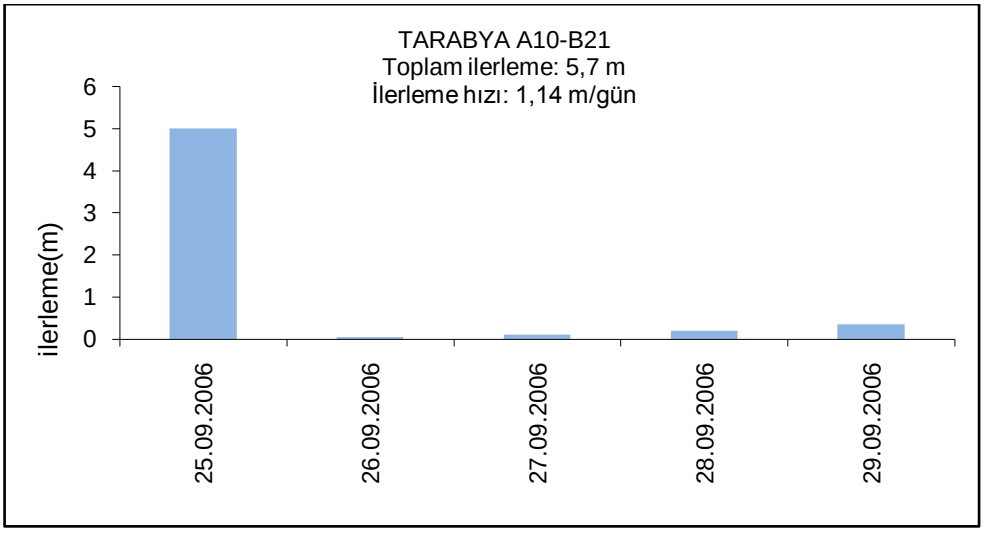

EMİRGAN B14-B15
Toplam ilerleme : 30,55 m
İlerleme hızı : 10,18 m/gün
ilerleme (m)
25
20
15
10
5
0
21.04.2006
22.04.2006
23.04.2006

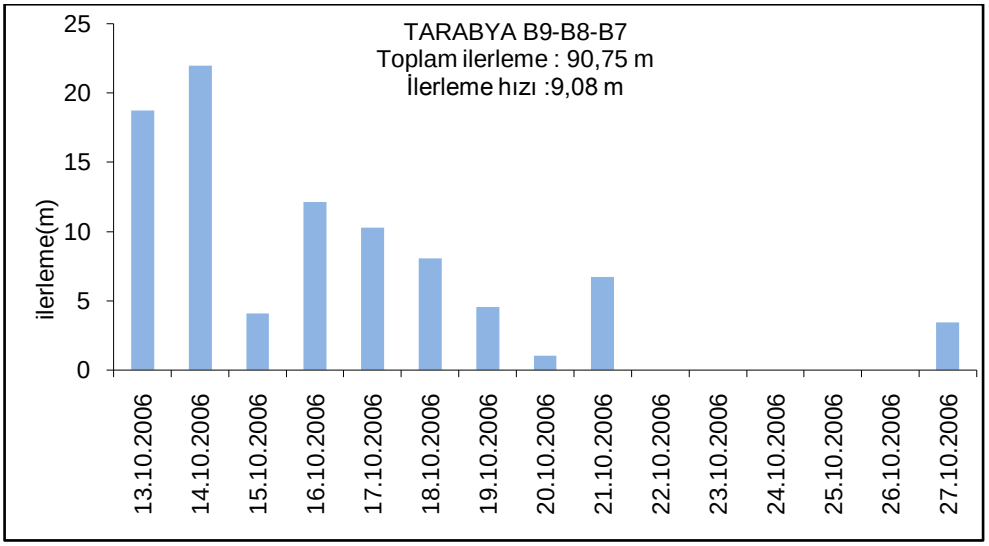

EMİRGAN
Toplam ilerleme: 31,78 m
İlerleme hızı: 10,59 m/gün
ilerleme (m)
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
17.08.2006
18.08.2006
19.08.2006


EMİRGAN A03-A05
Toplam ilerleme : 65,4 m
İlerleme hızı : 9,34 m/gün
ilerleme (m)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
23.08.2006
24.08.2006
25.08.2006
26.08.2006
27.08.2006
28.08.2006
29.08.2006

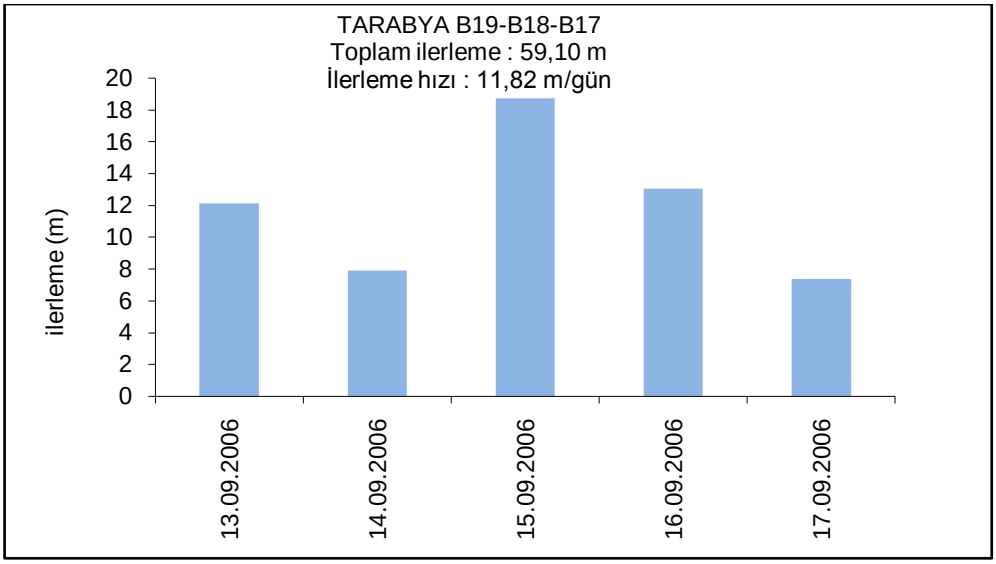
Ek_D

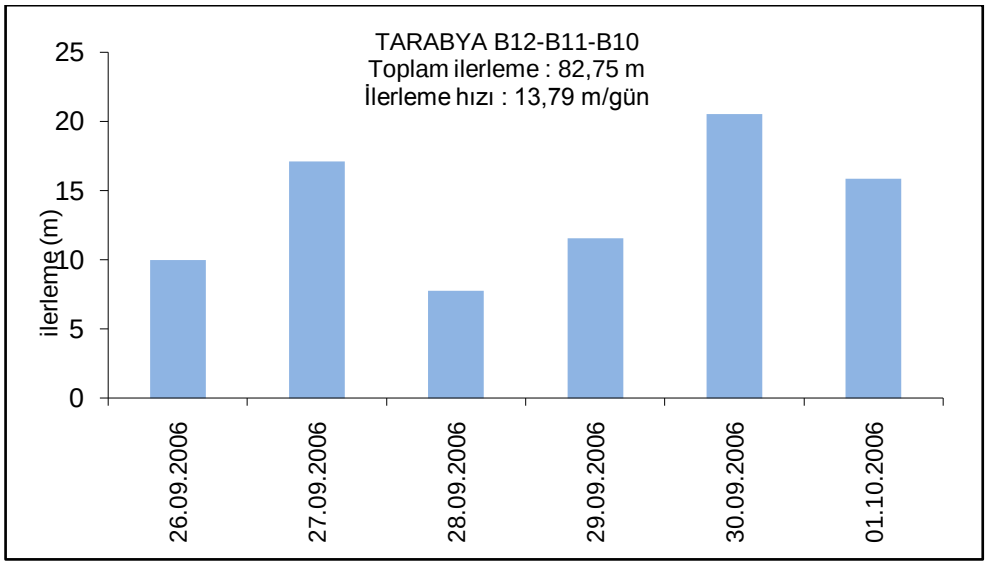

İSTİNYE A02-A01
Toplam ilerleme : 49,6 m
İlerleme hızı : 16,53 m/gün
25
20
15
10
5
0
07.01.2006
08.01.2006
09.01.2006

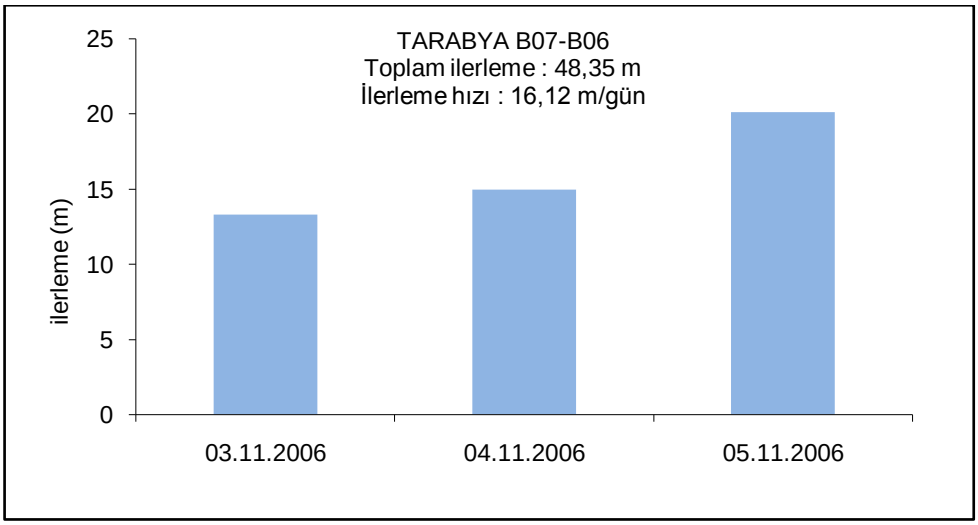

TARABYA A10-B21
Toplam ilerleme: 5,7 m
İlerleme hızı: 1,14 m/gün
ilerleme(m)
6
5
4
3
2
1
0
25.09.2006
26.09.2006
27.09.2006
28.09.2006
29.09.2006


TARABYA B9-B8-B7
Toplam ilerleme : 90,75 m
İlerleme hızı :9,08 m
ilerleme(m)
25
20
15
10
5
0
13.10.2006
14.10.2006
15.10.2006
16.10.2006
17.10.2006
18.10.2006
19.10.2006
20.10.2006
21.10.2006
22.10.2006
23.10.2006
24.10.2006
25.10.2006
26.10.2006
27.10.2006

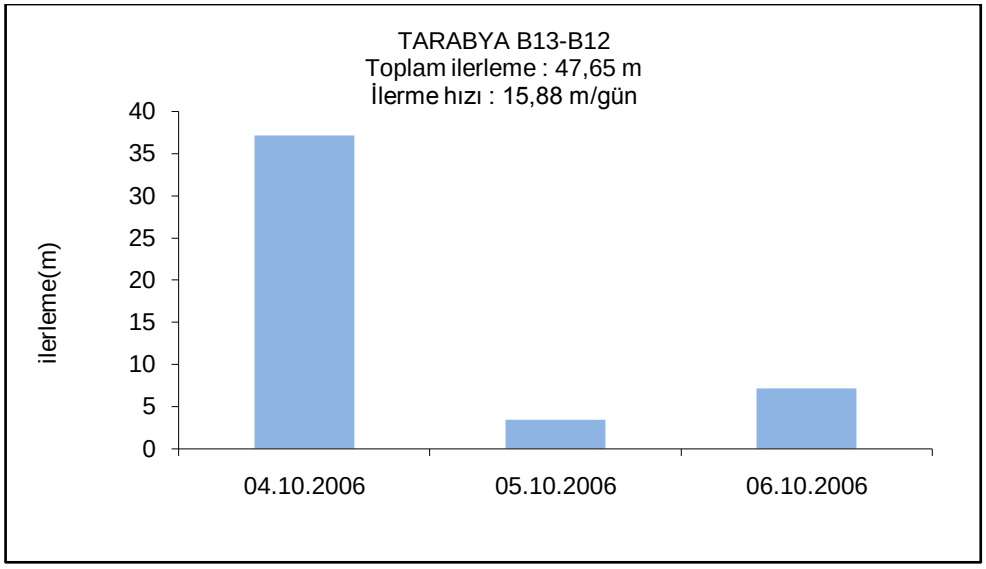
Ek_D

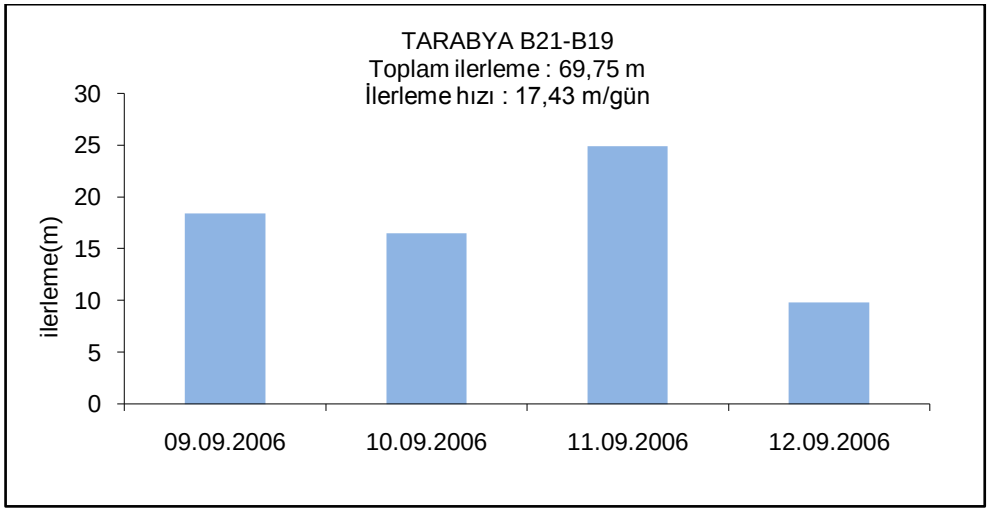

TARABYA B19-B18-B17
Toplam ilerleme : 59,10 m
İlerleme hızı : 11,82 m/gün
ilerleme (m)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
13.09.2006
14.09.2006
15.09.2006
16.09.2006
17.09.2006

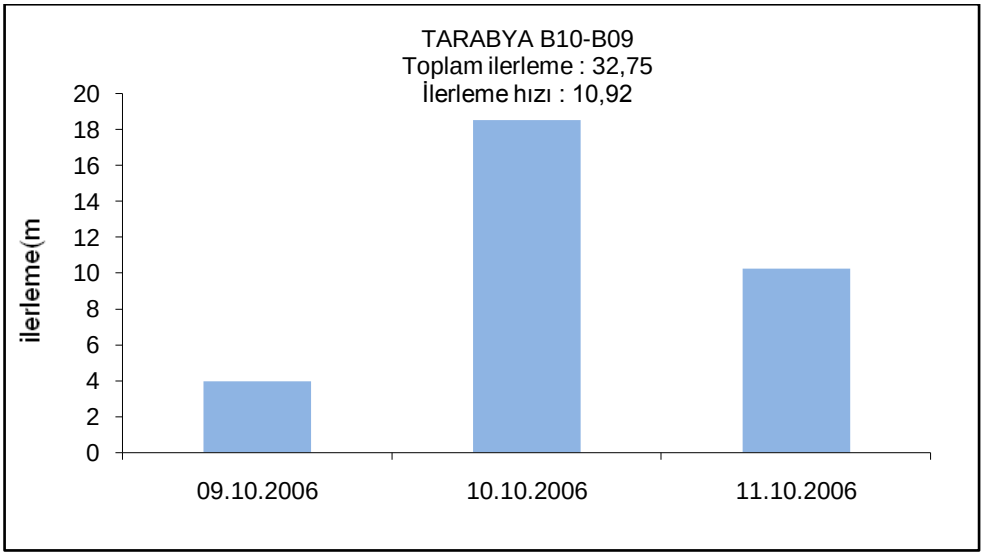

TARABYA B12-B11-B10
Toplam ilerleme : 82,75 m
İlerleme hızı : 13,79 m/gün
ilerleme (m)
25
20
15
10
5
0
26.09.2006
27.09.2006
28.09.2006
29.09.2006
30.09.2006
01.10.2006


TARABYA B07-B06
Toplam ilerleme : 48,35 m
İlerleme hızı : 16,12 m/gün
ilerleme (m)
25
20
15
10
5
0
03.11.2006
04.11.2006
05.11.2006

Ek_D


TARABYA B13-B12
Toplam ilerleme : 47,65 m
İlerme hızı : 15,88 m/gün
ilerleme(m)
40
35
30
25
20
15
10
5
0
04.10.2006
05.10.2006
06.10.2006

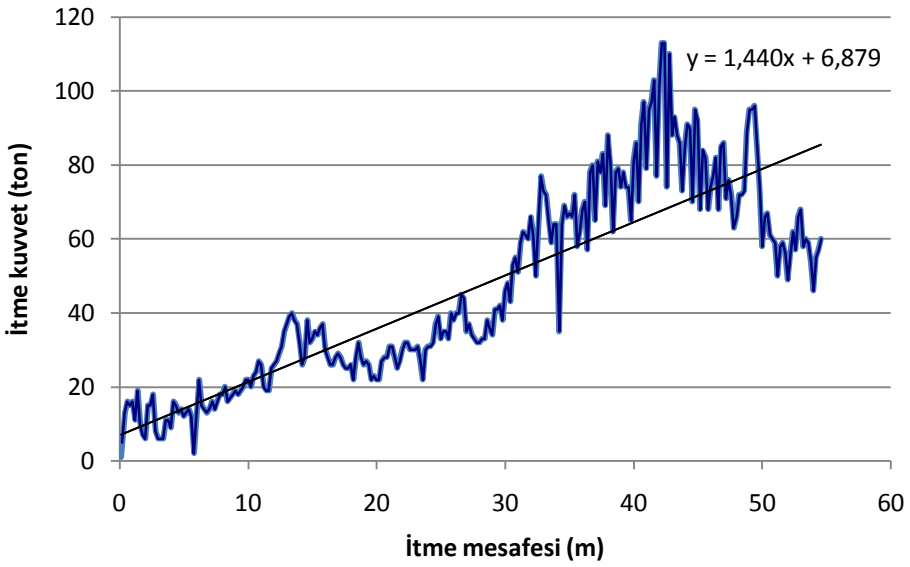

TARABYA B21-B19
Toplam ilerleme : 69,75 m
İlerleme hızı : 17,43 m/gün
ilerleme(m)
30
25
20
15
10
5
0
09.09.2006
10.09.2006
11.09.2006
12.09.2006


TARABYA B10-B09
Toplam ilerleme : 32,75
İlerleme hızı : 10,92
ilerleme(m
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
09.10.2006
10.10.2006
11.10.2006

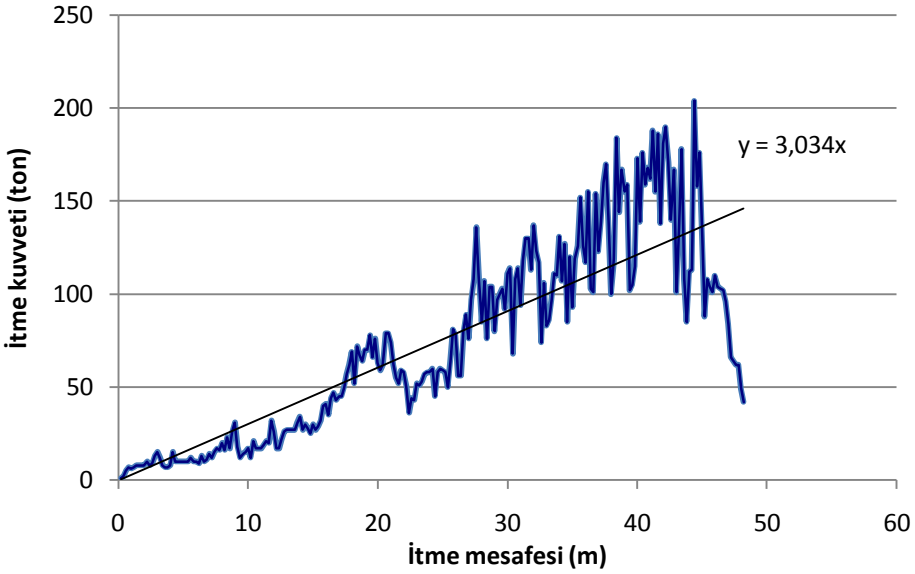
Ek _E

BAZI SÜRÜŞLERİN İTME KUVVETİ-İTME MESAFESİ GRAFİKLERİ

Ek_E

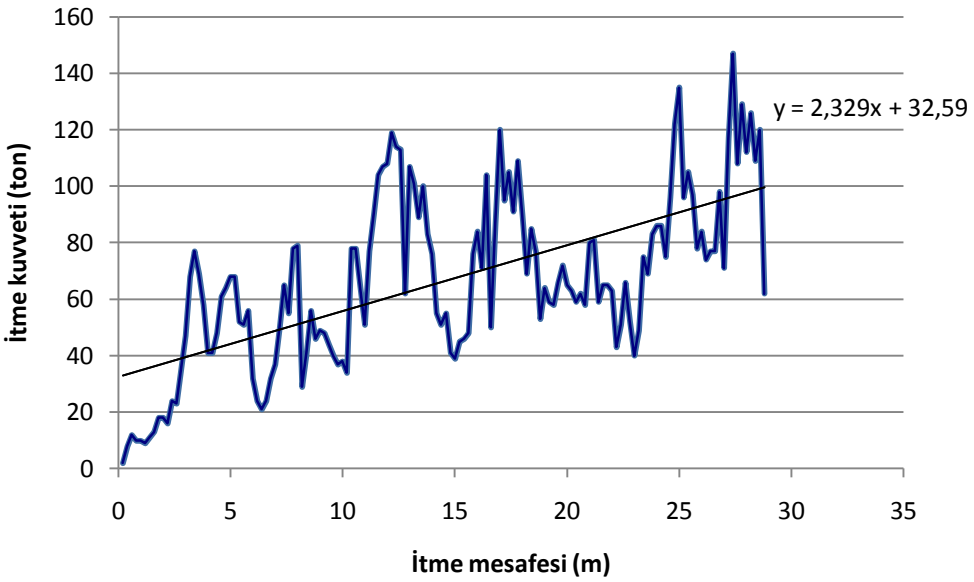


RHA01-RHA02 Kuyuları Arasında İtme Kuvveti Değişimi

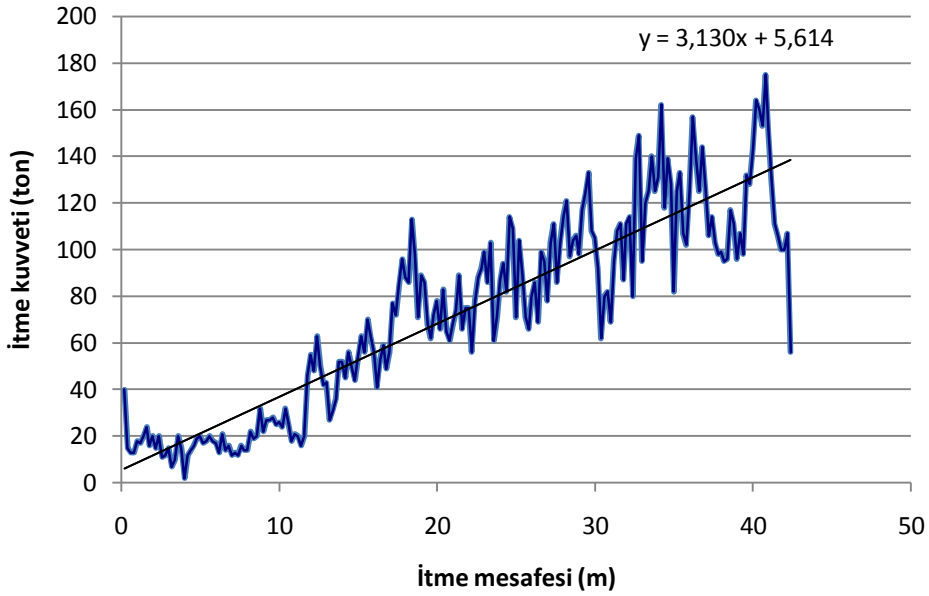


RHA08-RHB12 Kuyuları Arasında İtme Kuvveti Değişimi

Ek_E

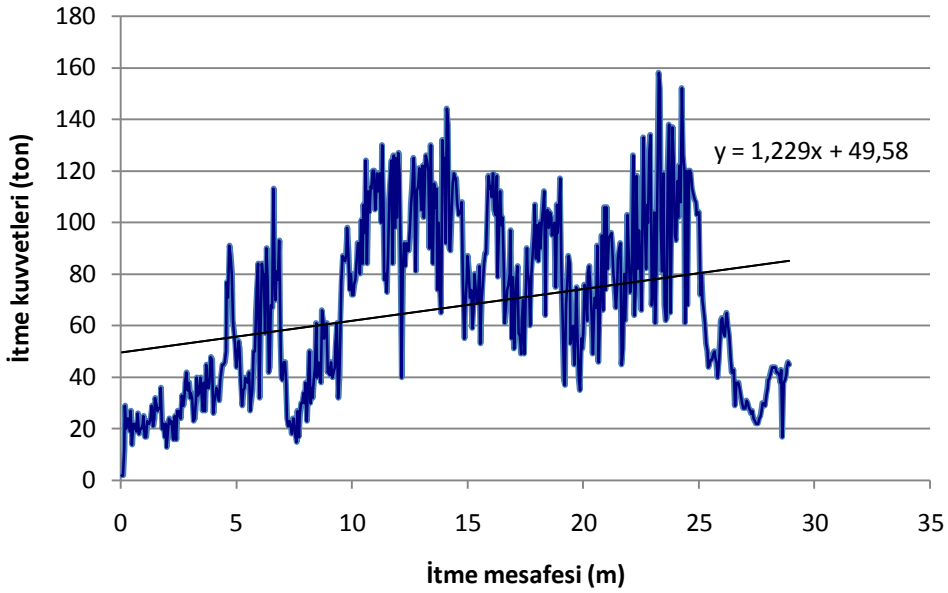


RHB10-RHB09 Kuyuları Arasında İtme Kuvveti Değişimi

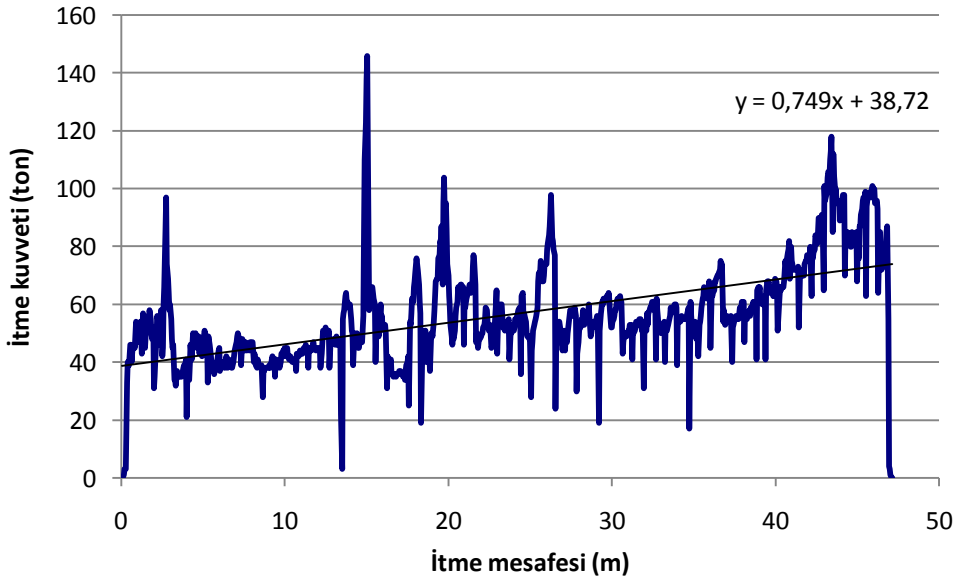


RHB10-RHB12 Kuyuları Arasında İtme Kuvveti Değişimi

Ek_E

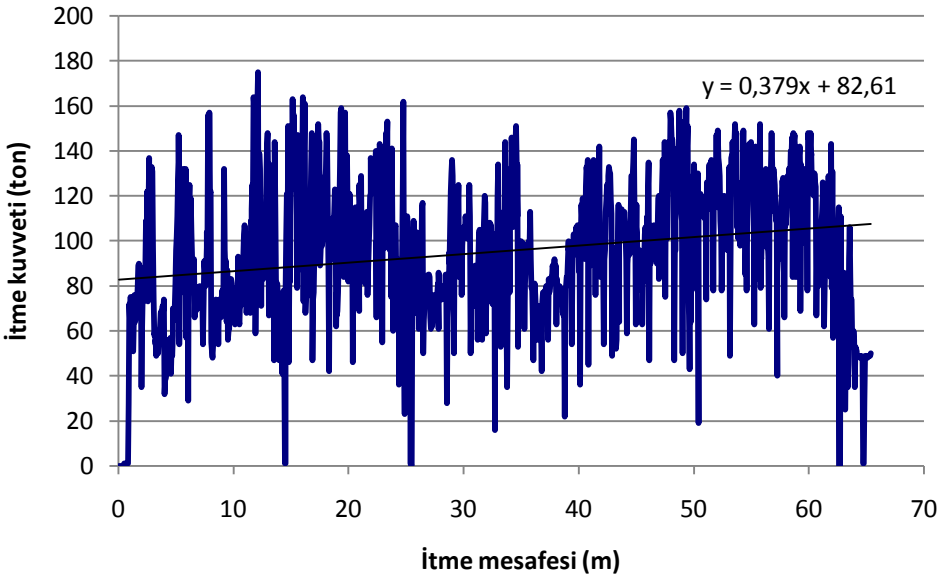


BLTA06-BLTA07 Kuyuları Arasında İtme Kuvveti Değişimi

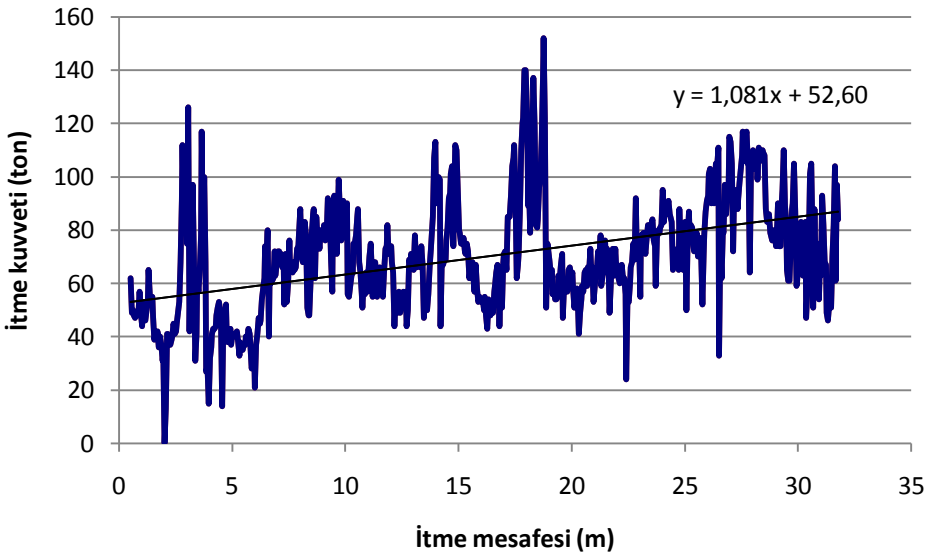


BLTA13-BLTA14 Kuyuları Arasında İtme Kuvveti Değişimi

Ek_E



EMA03-EM05 Kuyuları Arasında İtme Kuvveti Değişimi

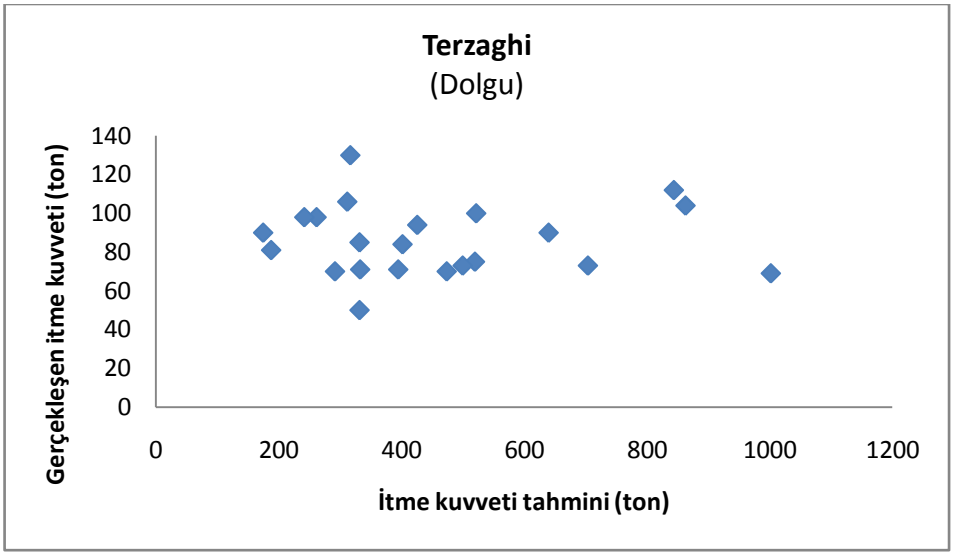


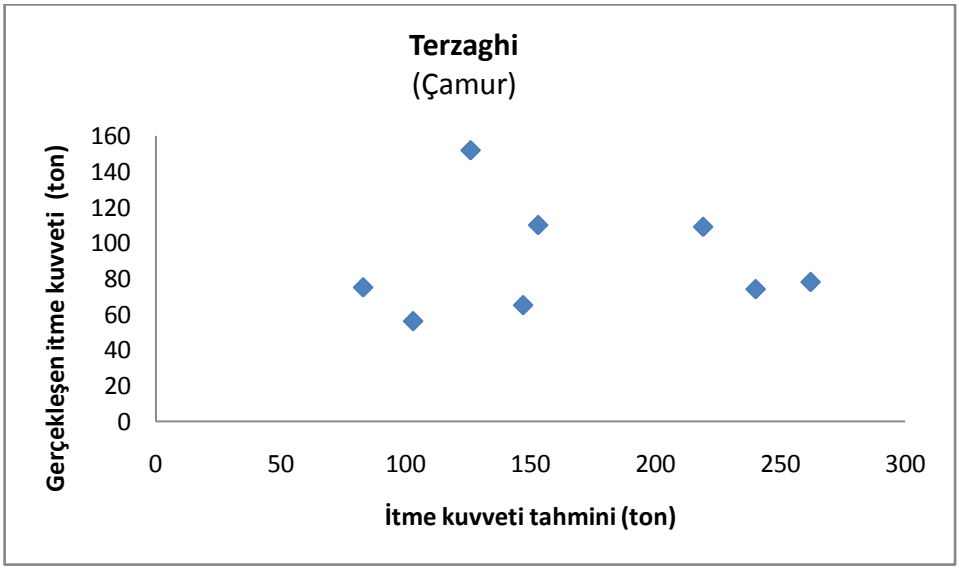
EMB06-EMB05 Kuyuları Arasında İtme Kuvveti Değişimi

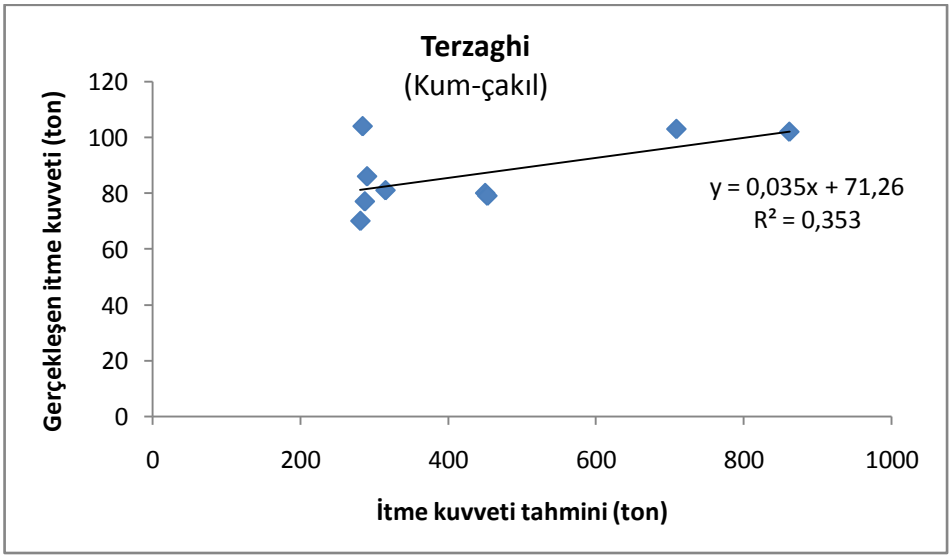
Ek _F

GERÇEKLEŞEN TOPLAM İTME KUVVETİ İLE TAHMİN EDİLEN İTME KUVVETLERİ İLİŞKİSİ

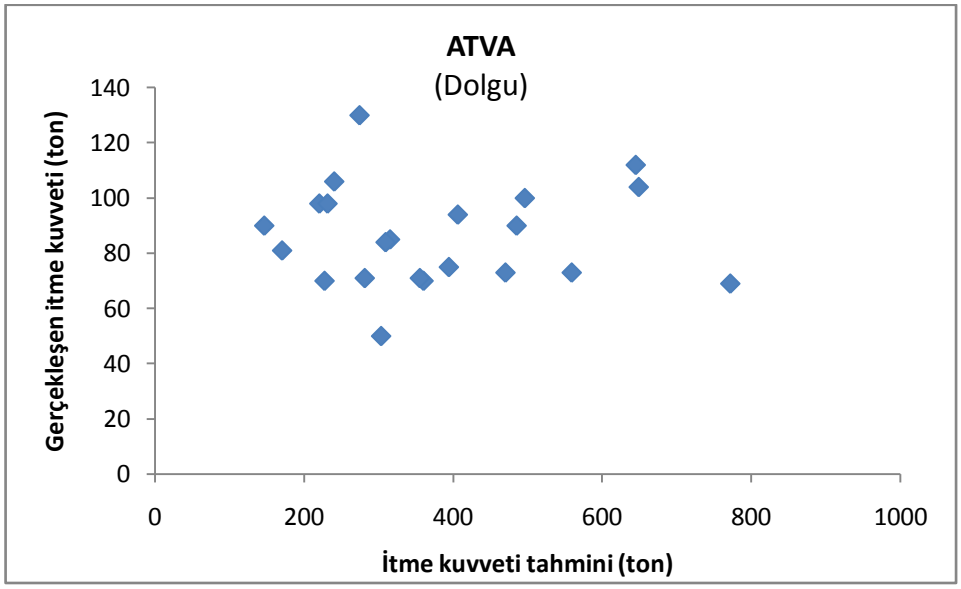
Ek_F

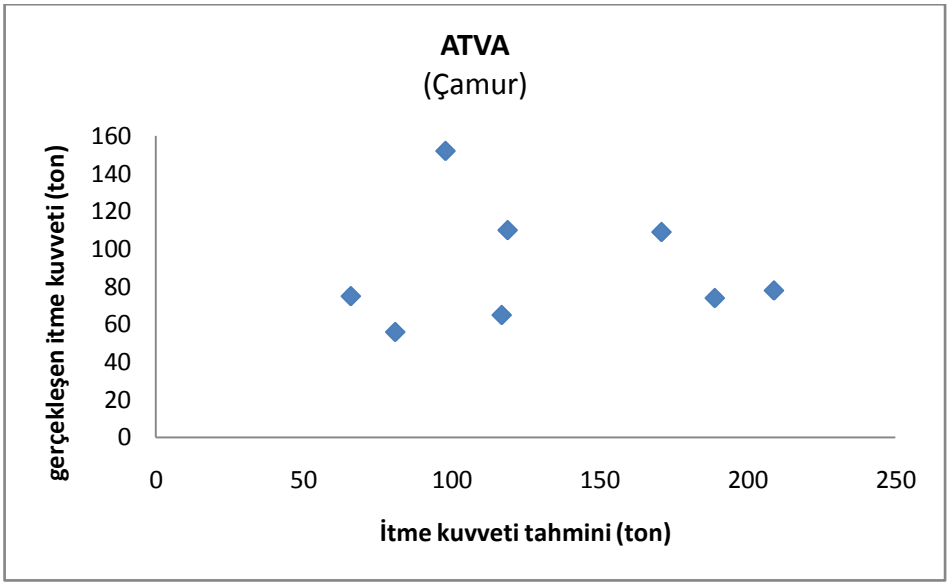

Terzaghi
(Dolgu)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
140
120
100
80
60
40
20
0
0
200
400
600
800
1000
1200
İtme kuvveti tahmini (ton)

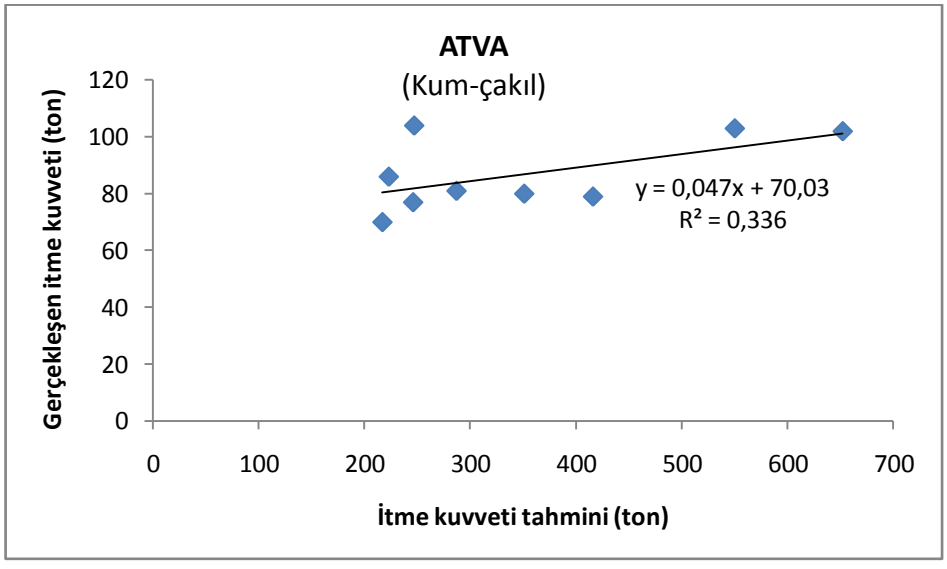

Terzaghi
(Çamur)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
250
300
İtme kuvveti tahmini (ton)


Terzaghi
(Kum-çakıl)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
120
100
80
60
40
20
0
y = 0,035x + 71,26
R² = 0,353
0
200
400
600
800
1000
İtme kuvveti tahmini (ton)

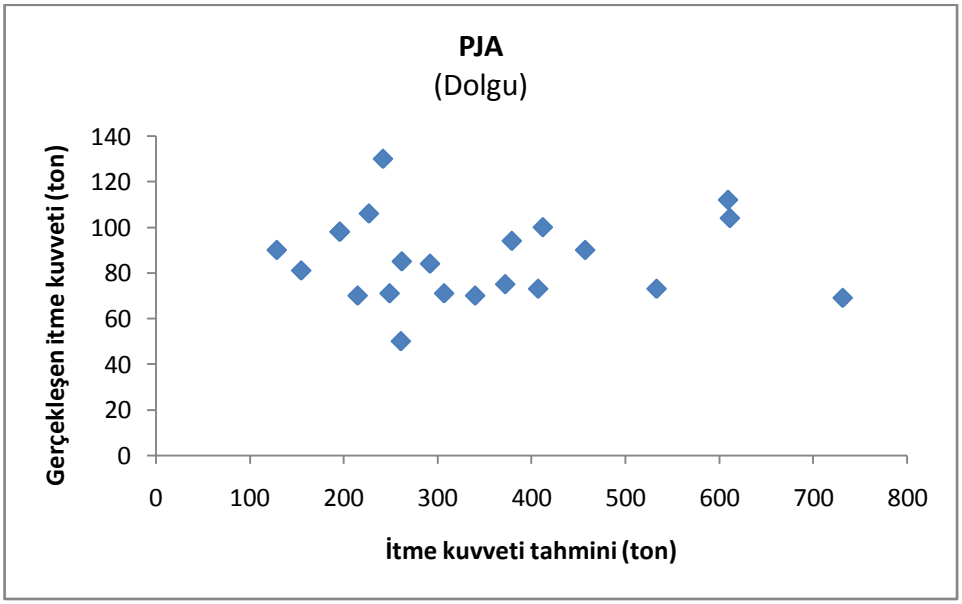
Ek_F

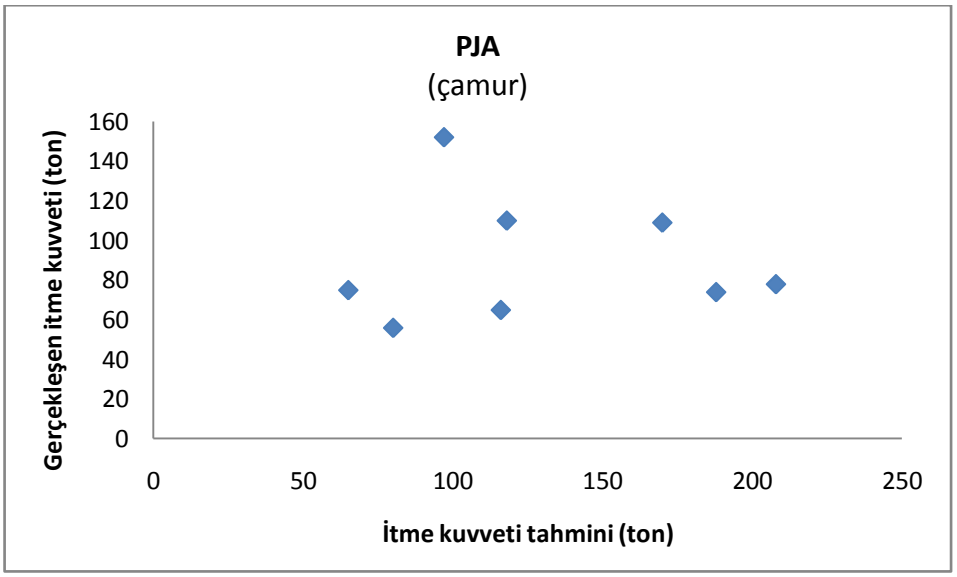

ATVA
(Dolgu)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
140
120
100
80
60
40
20
0
0
200
400
600
800
1000
İtme kuvveti tahmini (ton)

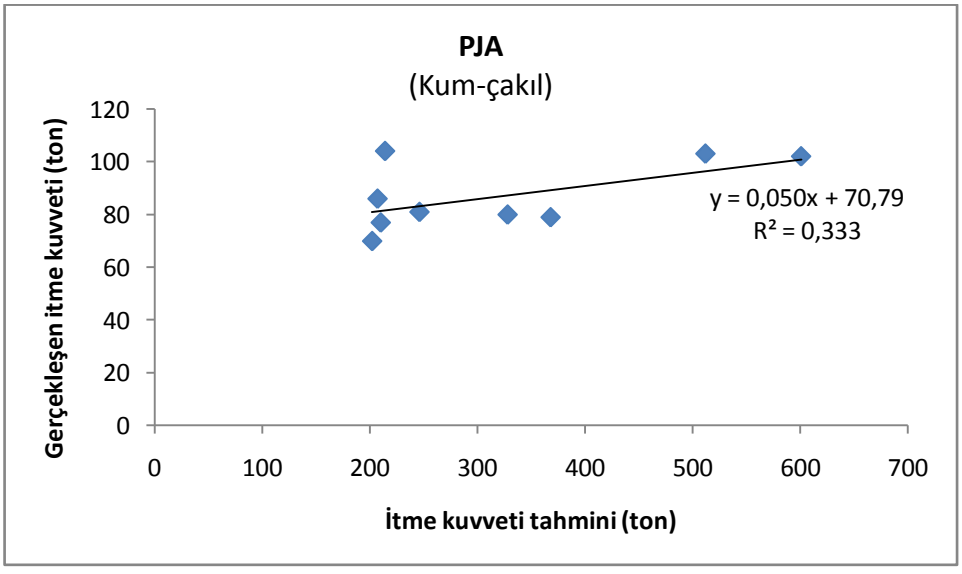

ATVA
(Çamur)
gerçekleşen itme kuvveti (ton)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
250
İtme kuvveti tahmini (ton)


ATVA
(Kum-çakıl)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
120
100
80
60
40
20
0
y = 0,047x + 70,03
R² = 0,336
0
100
200
300
400
500
600
700
İtme kuvveti tahmini (ton)

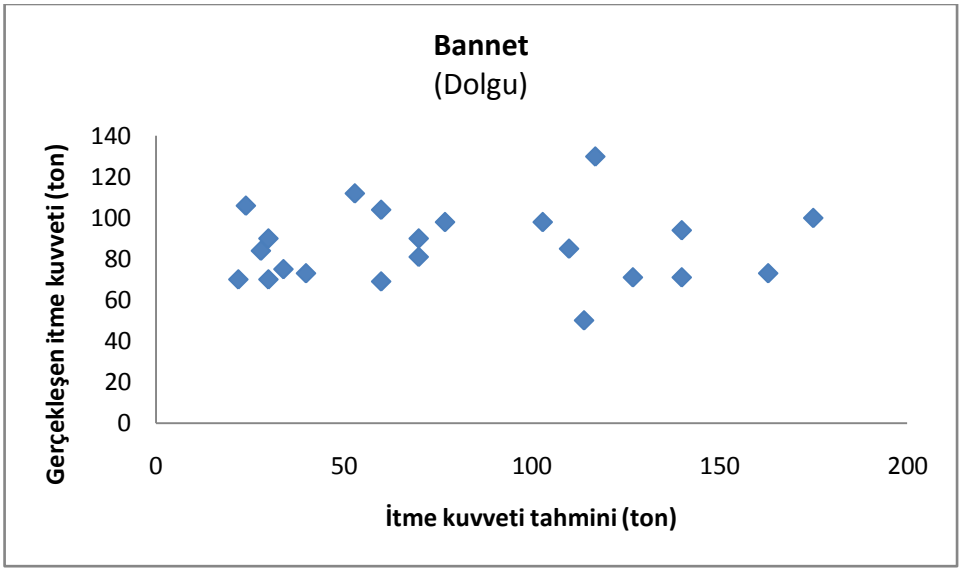
Ek_F

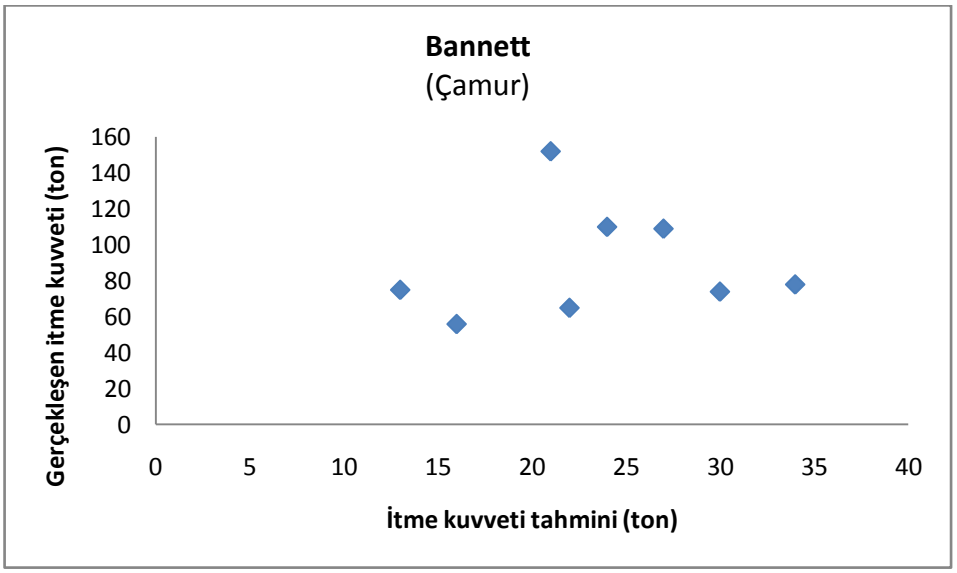

PJA
(Dolgu)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
0
20
40
60
80
100
120
140
0
100
200
300
400
500
600
700
800
İtme kuvveti tahmini (ton)

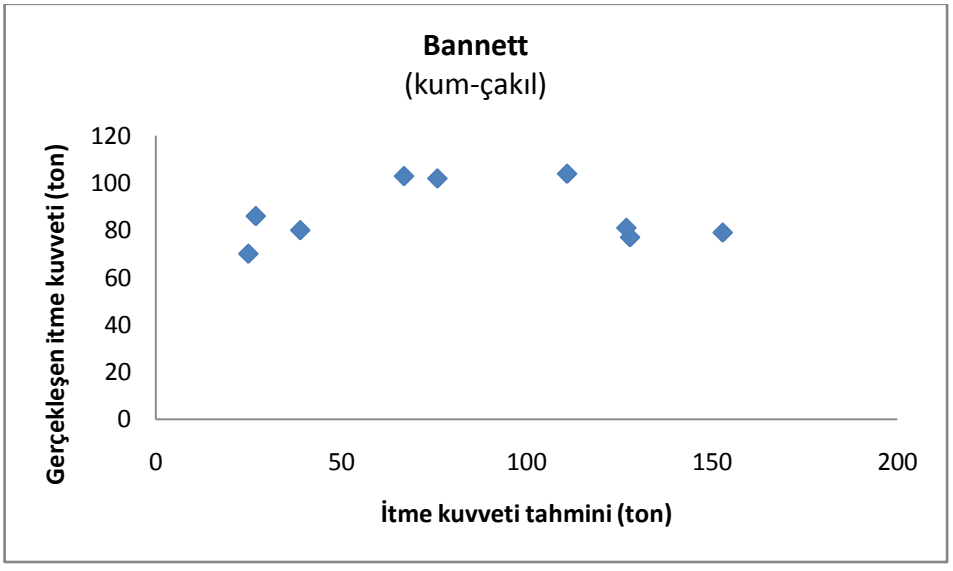

PJA
(çamur)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
0
50
100
150
200
250
İtme kuvveti tahmini (ton)


PJA
(Kum-çakıl)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
0
20
40
60
80
100
120
0
100
200
300
400
500
600
700
y = 0,050x + 70,79
R² = 0,333
İtme kuvveti tahmini (ton)

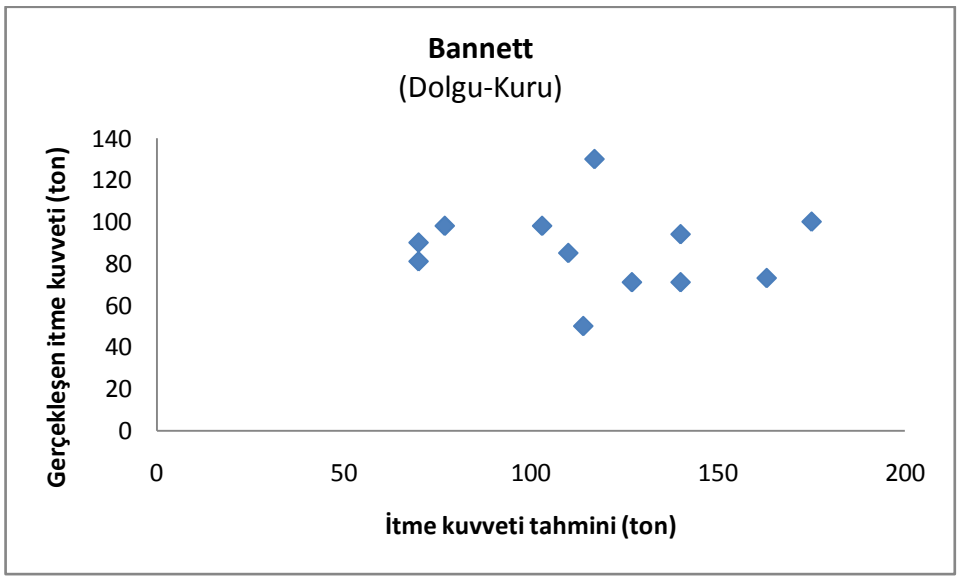
Ek_F

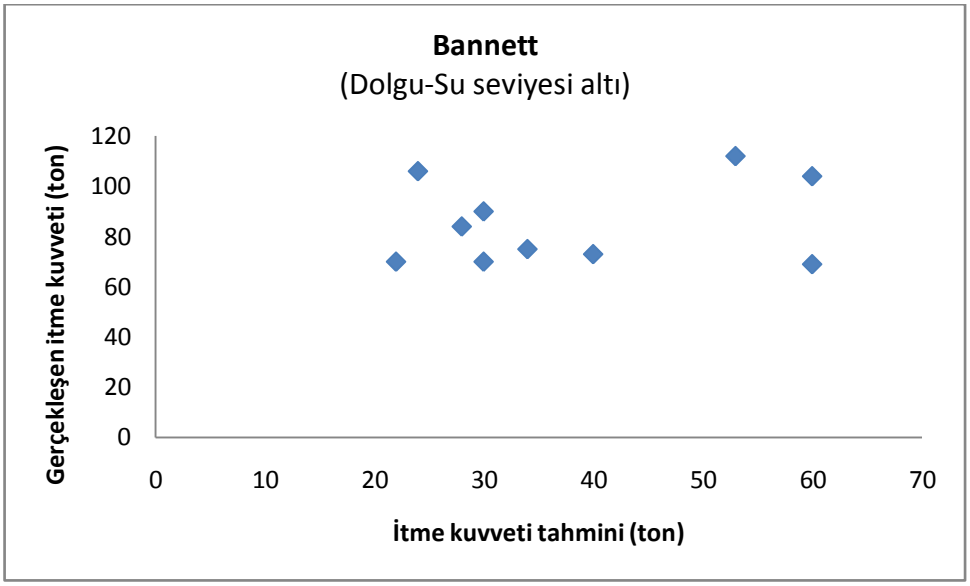

Bannet
(Dolgu)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
140
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
İtme kuvveti tahmini (ton)


Bannett
(Çamur)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
İtme kuvveti tahmini (ton)

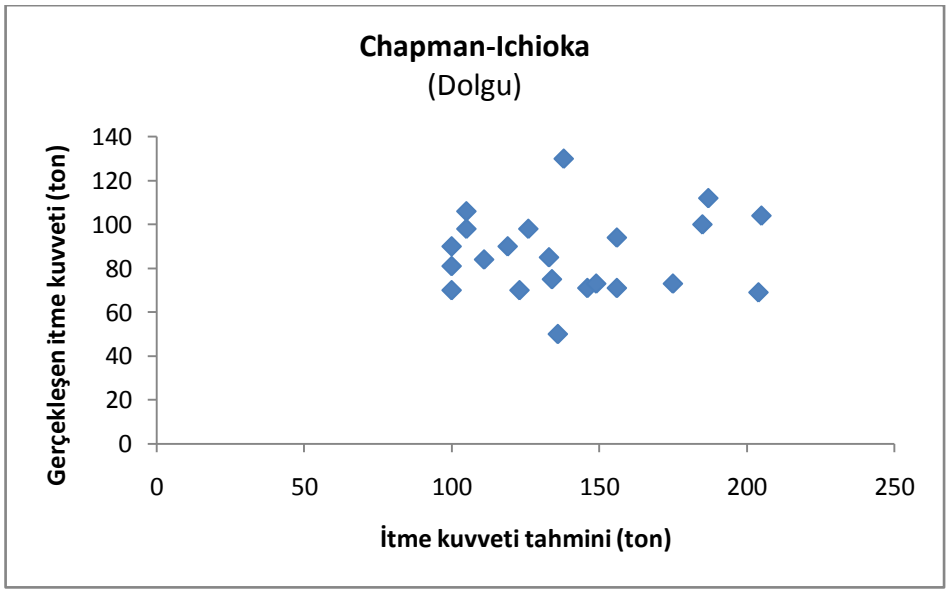

Bannett
(kum-çakıl)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
İtme kuvveti tahmini (ton)

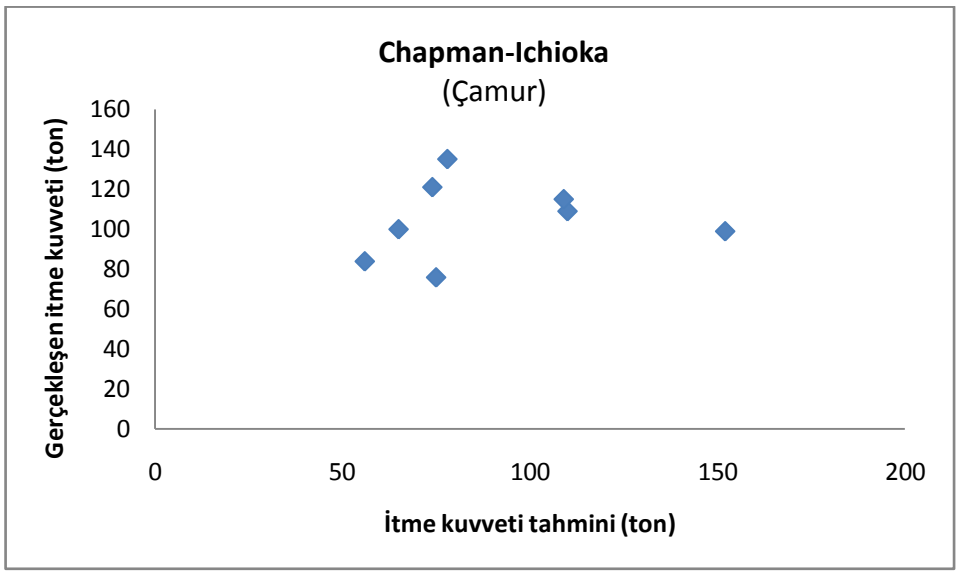
Ek_F

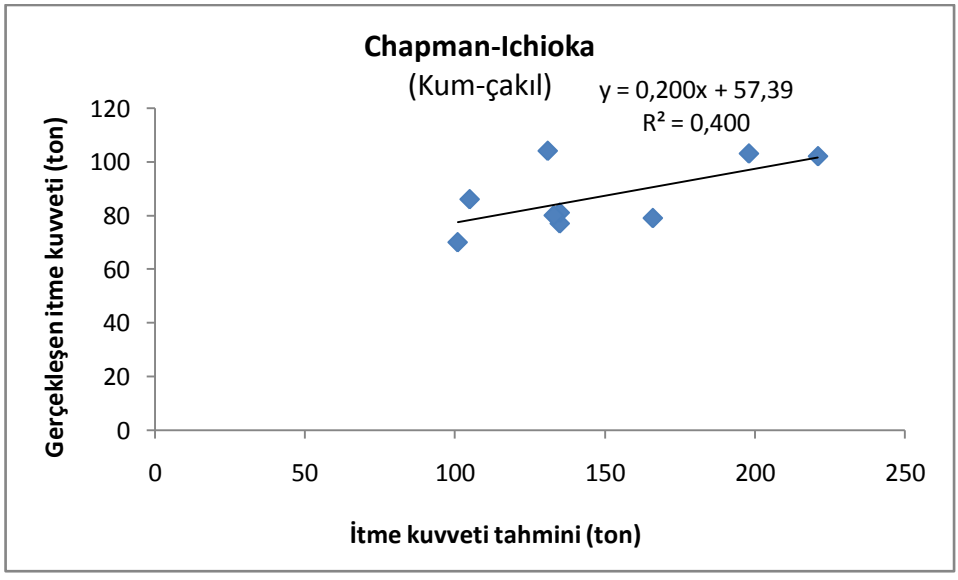

Bannett
(Dolgu-Kuru)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
140
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
İtme kuvveti tahmini (ton)


Bannett
(Dolgu-Su seviyesi altı)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40
50
60
70
İtme kuvveti tahmini (ton)

Ek_F


Chapman-Ichioka
(Dolgu)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
140
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
250
İtme kuvveti tahmini (ton)


Chapman-Ichioka
(Çamur)
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
İtme kuvveti tahmini (ton)


Chapman-Ichioka
(Kum-çakıl)
y = 0,200x + 57,39
R² = 0,400
Gerçekleşen itme kuvveti (ton)
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
250
İtme kuvveti tahmini (ton)

ÖZGEÇMİŞ

Ertan BOSTANCI, 1975 yılında Karabük'de doğdu. İlk Öğretimi; sırasıyla, Eflani-Akçakese İlkokul'u, Sarıyer-Pınar Mahallesi İlkokul'u, Kağıthane-Çeliktepe Ortaokulu'nda ve Ortaöğretimi Şişli Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. Lisans öğrenimini Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde tamamlayarak 1999 yılında mezun oldu. 2000-2001 yıllarında askerliğini yedek subay olarak tamamladıktan sonra yüksek lisans öğrenimi için İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne kaydolmuştur. Maden Mühendisleri Odası üyesidir.