

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEMİN ŞARTLANDIRMANIN EPB TBM PERFORMANSINA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**



DOKTORA TEZİ

Emre AVUNDUK

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

EYLÜL 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEMİN ŞARTLANDIRMANIN EPB TBM PERFORMANSINA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Emre AVUNDUK

(505112004)

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR

EYLÜL 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505112004 numaralı Yüksek Doktora Öğrencisi Emre AVUNDUK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ZEMİN ŞARTLANDIRMANIN EPB TBM PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Nuh BİLGİN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN

İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Cemal BALCI

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alaettin KILIÇ

İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi: **04.Eylül.2018**

Savunma Tarihi: **24.Eylül.2018**





Eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında danışmanlığımı yapan yardımları ve yönlendirmeleriyle ufkumu açan Prof. Dr. Hanifi Çopur'a teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Nuh Bilgin ve Prof. Dr. Ataç Başçetin'e değerli fikirleri için minnetlerimi sunarım. Ayrıca fikirleri ve destekleri için Prof Dr. Cemal Balcı, Doç. Dr. Deniz Tumaç, Yüksek Müh. Sahand Tolouei ve Yüksek Müh. Aydın Shaterpour Mamaghani'ye teşekkürlerimi sunarım.

İksa Yapı Kimyasalları Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. yöneticisi Sayın Kazım Yaşar Levent'e ve Ar+Ge Mühendisi Sayın Fevzi Aksu'ya çalışmalarım esnasında özveri ile yardımcı oldukları için teşekkür ederim.

Arcan Makina Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. sahibi Sayın Yavuz Selçuk'a ve Tansel Çavuş'a bu proje kapsamında tasarladığımız basınçlı kanatlı kesme cihazındaki tasarım hatalarını bulup, bizlerle birlikte EPB TBM kazılarını laboratuvar ortamında basınçlı köpük ile sağlayabilecek şekilde simule edebilen daha kapsamlı bir deney cihazını (Mini EPBM) üreterek önemli bir katkı sağladıkları için çok teşekkür ederim.

Eser Makina Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. ortaklarından Genel Müdür Sayın Murat Akyıldız'a, tez kapsamında bölümümüze bir laboratuvar tipi köpük jeneratörü yaptığı için çok teşekkür ederim.

Saha çalışmalarım esnasında özveri ile her türlü kolaylığı sağlayan, dokümanları sağlayan, deneyler için numune temininde yardımcı olan ve TBM veri kayıtlarını bizlerle paylaşan, Gülermak-Kolin-Kalyon İnşaat Ortaklığı'na ve İstanbul Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli Proje Müdürü Sayın Gökhan Erkuş'a, TBM Tünel Şefi Sayın Sinan Acun'a, Vardiya Mühendisi Sayın Uğur Ateş'e ve Vardiya Mühendisleri Sayın Fatih Kara ve Fatih Esat'a çok teşekkür ederim.

Saha çalışmalarımız esnasında özveri ile her türlü kolaylığı sağlayan, dokümanları sağlayan, deneyler için numune temininde yardımcı olan ve TBM veri kayıtlarını bizlerle paylaşan, Eferay-Silahtaroglu İnşaat Ortaklığı'na ve İstanbul Zeytinburnu

Ayvalı 2 Atıksu Tüneli Proje Müdürü Sayın Muammer Çınar'a ve TBM Tünel Şefi Sayın Şener Kahya'ya çok teşekkür ederim.

Saha çalışmalarımız esnasında özveri ile her türlü kolaylığı sağlayan, dokümanları sağlayan, deneyler için numune temininde yardımcı olan ve TBM veri kayıtlarını bizlerle paylaşan, Nas-Akad İnşaat Ortaklığı'na ve İstanbul Tuzla Atıksu Tüneli Proje Müdürü Sayın Utku Gümüş'e ve Vardiya Şefi Sayın Uğur Altay'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında finansal destek sağlayan Sayın TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) (Proje No: 213M487) yetkililerine ve İTÜ BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) (BAPSO Proje No: 37793) birimi çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2018

Emre Avunduk
(Yüksek Maden Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Tezin Yöntemi ve Parametreler	3
1.3.1 Arazi çalışmaları	3
1.3.2 Laboratuvar çalışmaları	4
1.3.3 Ofis çalışmaları	6
1.4 Sınırlayıcı Faktörler	7
2. LİTERATÜR ÖZETİ	9
2.1 Kentsel Alanlarda Mekanize Tünelcilik	9
2.1.1 Kentsel alanda tünelciliğin getirdiği zorluklar	10
2.1.2 Projelerin başarısı için doğru yaklaşım	11
2.2 Mekanize Kazı Sistemleri	13
2.2.1 Tam cepheli tünel açma makineleri	13
2.2.1.1 Tarihsel gelişim	14
2.2.2. Pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makineleri (EPB – TBM’ler)..	20
2.2.2.1 Tarihsel gelişim	21
2.2.2.2 Pasa basınçlı TBM’lerin çalışma prensibi.....	23
2.2.3 Mekanize tünel kazılarında yapışma (adezyon) ve tıkanma problemi	26
2.3 Zemin Şartlandırma	30
2.3.1 Zemin şartlandırmanın TBM operasyonuna etkisi.....	31
2.3.2 Zemin şartlandırma kimyasalları.....	32
2.4 Önceki Çalışmalar.....	41
3. ARAZİ ÇALIŞMALARINI KAPSAMINDA İNCELENEN PROJELER	51
3.1 Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli.....	51
3.2. Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli.....	54
3.3. Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli	56
4. DENEYSEL YÖNTEM VE PARAMETRELER	59
4.1 Giriş.....	59
4.2 Zemin Karakterizasyon Deneyleri	59
4.2.1 Zeminlerin doğal su içeriğinin belirlenmesi.....	59
4.2.2 Parça boyut dağılım deneyi	60
4.2.3 Likit limit deneyi	67
4.2.4 Plastik limit deneyi.....	68

4.2.5 Arazi tipi kanatlı kesme (shear vane) deneyi	69
4.2.6 Statik konik penetrometre deneyi	70
4.2.7 Cep tipi (vane shear) kanatlı kesme deneyi	70
4.2.8 Cep penetrometresi deneyi	71
4.3 Köpük Karakterizasyon Deneyleri	71
4.3.1 Köpük jeneratörü	71
4.3.2 Köpük yoğunluğu	72
4.3.3 Köpük kararlılığı (yarı ömür) deneyi	73
4.3.4 Köpük kabarcık boyutunun belirlenmesi	74
4.3.5 Köpüğün plastikleştirme etkisi	74
4.4 Zemin+Köpük Karakterizasyon Deneyleri	75
4.4.1 Güç ölçümlü karışım ve yapışma deneyi	75
4.4.2 Penetrasyon deneyi	76
4.4.3 Cep tipi kanatlı kesme (Vane Shear) deneyi	77
4.4.5 Cep penetrometresi deneyi	77
4.4.6 Slump deneyi	78
4.4.7 Mini slump deneyi	79
4.4.8 DIN yayılma tablası deneyi	80
4.5 Mini EPBM Cihazı (Basınçlı Ortamda EPB TBM Kazı Simülasyonu)	80
5. DENEYSEL SONUÇLAR	83
5.1 Giriş	83
5.2 Sahada Kazı Aynasında ve/veya Köpüklü Pasa Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler	83
5.3 Köpük Karakterizasyonu Deney Sonuçları	84
5.3.1 Exfoam 1 (köpük kimyasalı) köpük karakterizasyonu deneyleri	84
5.3.2 Exfoam 2 (antikil polimeri + köpük kimyasalı) karakterizasyonu deneyleri	89
5.3.3 SLF 30 (köpük kimyasalı) köpük karakterizasyonu deneyleri	92
5.3.4 ACP 143 (antikil polimeri + köpük kimyasalı) karakterizasyonu deneyleri	96
5.4 Zemin Karakterizasyonu Deney Sonuçları	100
5.4.1 Kaolen	100
5.4.2 Standart kum	102
5.4.3 Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli numunelerinde yapılan zemin karakterizasyon deneyi sonuçları	103
5.4.4 Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli numunelerinde yapılan zemin karakterizasyon deneyi sonuçları	107
5.4.5 Mahmutbey - Mecidiyeköy Metro Tüneli numunelerinde yapılan zemin karakterizasyon deneyi sonuçları	111
5.5 Zemin Şartlandırma Deney Sonuçları	115
5.5.1 Kaolen	115
5.5.2 Standart kum	120
5.5.3 Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli	124
5.5.4 Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli	132
5.5.5 Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli	138
5.6 Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi	150
6. SAHA PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ İLE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DOĞRULAMASI VE MODELLEME ÇALIŞMALARI	165
6.1 Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli Verileri	165
6.2 Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli Verileri	168

6.3 Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli Verileri	173
6.4 İnce Taneli Zemin Karakteristik Özelliklerine Bağlı Olarak (Şartlandırmasız ve Basıncsız Ortamlar İçin) EPB TBM Performans Tahmin Modeli Çalışmaları	177
6.4.1 EPB TBM performans analizi	182
6.4.2 İstatiksel modelleme.....	185
7. SONUÇLAR	191
KAYNAKLAR	197
ÖZGEÇMİŞ.....	205





KISALTMALAR

AR	: Advance rate of TBM
ASTM	: American Society For Testing And Materials
BS	: British standards
C_F	: Foam (anticlay) concentration
EPB	: Earth pressure balance
FCPD	: Fall cone penetration depth
FER	: Foam expansion ratio
FIR	: Foam injection ratio
ICR	: Instantaneous cutting rate
I_c	: Consistency index
IPR	: Instantaneous penetration rate
JSCE	: Japan society of civil engineering
LL	: Liquid limit
M_c	: Mass of dry moisture can
M_{cds}	: Mass of moisture can containing dried soil
M_{cms}	: Mass of moisture can containing the moist soil
M_s	: Mass of soil
M_w	: Mass of water
R²	: Coefficient of determination
PL	: Plastic limit
TBM	: Tunnel boring machine



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Arazi çalışmalarının içeriği, deneyler, ilgili çalışmalar, parametreler ve standartlar ve bazı kısa notlar.....	3
Çizelge 1.2: Laboratuvar çalışmalarının içeriği, deneyler, ilgili çalışmalar, parametreler, standartlar ve bazı kısa notlar.....	5
Çizelge 1.3: Ofis çalışmalarının içeriği, ilgili çalışmalar, parametreler ve bazı kısa notlar.....	7
Çizelge 3.1: Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli'nde kullanılan EPB TBM'in teknik özellikleri.....	53
Çizelge 3.2: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli'nde kullanılan EPB TBM'in teknik özellikleri.....	55
Çizelge 3.3: Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Tüneli'nde kullanılan EPB TBM'in teknik özellikleri.....	57
Çizelge 4.1: 152 H hidrometre için efektif derinlik değerleri	64
Çizelge 4.2: Sıcaklık ve özgül ağırlığa bağlı K değerleri	65
Çizelge 4.3: Sıcaklık düzeltme faktörü (C_T).....	66
Çizelge 4.4: Özgül ağırlık değerlerine göre "a" düzeltme faktörü.	67
Çizelge 5.1: Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Ayvalı 2).	105
Çizelge 5.2: Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Akfırat).	109
Çizelge 5.3: Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).	112
Çizelge 5.4: Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).	113
Çizelge 5.5: Kaolen+su karışımı ile yapılan deney sonuçları.	116
Çizelge 5.6: Kaolen+Exfoam 1 karışımı ile yapılan deney sonuçları.	118
Çizelge 5.7: Kaolen+Exfoam 2 karışımı ile yapılan deney sonuçları.	118
Çizelge 5.8: Standart Kum+Exfoam 1 karışımı ile yapılan deney sonuçları.....	121
Çizelge 5.9: Standart Kum+SLF 30 karışımı ile yapılan deney sonuçları.	122
Çizelge 5.10: Zemin + su karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları (Ayvalı 2).....	125
Çizelge 5.11: Zemin + Exfoam 2 karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %35 W_n , %3 C_F ve FER 16 değerinde (Ayvalı 2).	128
Çizelge 5.12: Zemin + ACP 143 karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %35 W_n , %3 C_F ve FER 16 değerinde (Ayvalı 2).	128
Çizelge 5.13: Zemin + ACP 143 + %12 su ilaveli karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %45 W_n , %3 C_F ve FER 16 değerinde (Ayvalı 2).	129
Çizelge 5.14: Zemin + su karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları (Akfırat).	132
Çizelge 5.15: Zemin + su karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları (Mahmutbey- Mecidiyeköy1).	138
Çizelge 5.16: Zemin + SLF 30 karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %17 W_n , %3 C_F ve FER 16 değerinde (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).	142

Çizelge 5.17: Zemin + su karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).....	145
Çizelge 5.18: Zemin + ACP 143 karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %35 W _n , %3 C _F ve FER 16 değerinde (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).	148
Çizelge 5.19: Farklı CF ve FER oranlarında köpük karakterizasyon değerleri.	151
Çizelge 6.1: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli güzergahında killi zonların yapışkanlıklarına göre sınıflandırılması.	168
Çizelge 6.2: İncelenen zeminlerin geoteknik özellikleri.	179
Çizelge 6.3: Zemin numunelerinin geoteknik özellikleri.	180
Çizelge 6.4: Farklı zemin sınıflarına göre EPB TBM performans parametreleri.	182
Çizelge 6.5: Ölçülen ve tahmin edilen performans parametreleri.	188



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Joseph Maus tarafından geliştirilen tünelticilik makinesi.	15
Şekil 2.2: Charles Wilson tarafından geliştirilen ilk tünel açma makinesi.....	15
Şekil 2.3: Manş Tüneli kazısında kullanılan tünel açma makinesi.....	16
Şekil 2.4: Galeri açma makinesi “Eiserner Bergmann”.....	16
Şekil 2.5: Schmidt Kranz tarafından geliştirilen galeri açma makinesi.....	17
Şekil 2.6: Robbins tarafından geliştirilen ilk tünel açma makinesi.	18
Şekil 2.7: Wirth tarafından geliştirilen tünel açma makinesi.	18
Şekil 2.8: Gubrist tüneline kullanılan tek kalkanlı TBM.....	19
Şekil 2.9: Grandori tarafından geliştirilen ilk çift kalkanlı TBM.	20
Şekil 2.10: Brunel tarafından geliştirilen kalkan.	21
Şekil 2.11: The Greathead Shield.	22
Şekil 2.12: Steinway Tüneli kazısında kullanılan hidrolik kalkan.	22
Şekil 2.13: Bir pasa basınçlı TBM’e ait kesit görünüşü.	23
Şekil 2.14: Açık modda çalışan pasa basınçlı TBM.	24
Şekil 2.15: Kapalı modda çalışan pasa basınçlı TBM.	25
Şekil 2.16: Yarı açık modda çalışan pasa basınçlı TBM.	25
Şekil 2.17: EPB TBM’lerin kullanılabileceği zemin koşulları ve genel zemin şartlandırma önerileri.	26
Şekil 2.18: Kesici kafayı kil sarması.	27
Şekil 2.19: Zeminlerin adezyonuna etki eden parametreler.	27
Şekil 2.20: Kesici kafa ve bantta adezyona bağlı tıkanma.	28
Şekil 2.21: Kilin topaklanması sonucu kazı odasında çökeliş yapışması.	28
Şekil 2.22: Kazı odasında kilin metale yapışması sonucu oluşan tıkanma.....	29
Şekil 2.23: Zemin danelerinin yüzeye adezyonu.....	29
Şekil 2.24: Zemin topaklanmasının kıvam ve plastisite indeksleri arasındaki ilişki.	30
Şekil 2.25: EPB TBM kazısında zemin şartlandırma uygulama alanları.	31
Şekil 2.26: İki boyutlu köpük kabarcığı.	36
Şekil 2.27: Köpük Oluşumu.	37
Şekil 2.28: Sürfaktanın köpük içindeki oranı.	38
Şekil 2.29: Köpük jeneratörü.....	39
Şekil 2.30: Köpük dozajlama ünitesi.....	39
Şekil 2.31: Köpük iletim hatları.....	40
Şekil 2.32: Zeminlerin yapışma tıkanma potansiyeli.....	46
Şekil 2.33 : Konik çekme testi.....	46
Şekil 2.34: Statik yanal kayma tablası.....	47
Şekil 2.35: Zeminlerin yapışma tıkanma potansiyeli.....	47
Şekil 2.36: Laboratuvar ölçekli zemin kazı seti.....	48
Şekil 2.37: Laboratuvar tipi burju konveyör.....	49
Şekil 2.38: 1/10 ölçekli burju konveyör.....	49
Şekil 3.1: Ayvalı-2 tüneli güzergahı.....	52

Şekil 3.2: Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli güzergahının jeolojik kesiti.....	52
Şekil 3.3: Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli'nde kullanılan EPB TBM.	53
Şekil 3.4: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli jeolojik kesiti.	54
Şekil 3.5: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli'nde kullanılan EPB TBM.	55
Şekil 3.6: Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Hattı Kazım Karabekir İstasyonu jeolojik kesiti.	56
Şekil 3.7: Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Tüneli'nde kullanılan EPB TBM.	57
Şekil 4.1: Doğal su içeriği tayini.	60
Şekil 4.2: Numunelerin yıkama eleğinde yıkanması.	61
Şekil 4.3: Eleme cihazındaki elek seti.	62
Şekil 4.4: Elek üzerinde kalan zemin numuneleri.	62
Şekil 4.5: Hidrometre analizi.	63
Şekil 4.6: Düşen konik penetrometre deney cihazı.....	68
Şekil 4.7: Plastik limit deneyi.	69
Şekil 4.8: Arazi tipi kanatlı kesme (shear vane) deneyi.	69
Şekil 4.9: Statik konik penetrometre deneyi.	70
Şekil 4.10: Cep tipi kanatlı kesme deneyi.....	70
Şekil 4.11: Cep tipi penetrometre deneyi.....	71
Şekil 4.12: Laboratuvar tipi köpük jeneratörü, İTÜ Maden Müh. Bölümü.....	72
Şekil 4.13: Köpük yoğunluğu deneyi.	72
Şekil 4.14: Köpük kararlılık deneyi.....	73
Şekil 4.15: DIN yayılma tablası.....	75
Şekil 4.16: Güç ölçümlü karışım deneyi.....	76
Şekil 4.17: Şartlandırmış zeminde penetrasyon deneyi.	76
Şekil 4.18: Kesme deneyi (Cep tipi kanatlı kesme).....	77
Şekil 4.19: Cep tipi penetrometrenin sahada kullanımı.	78
Şekil 4.20: Slump deneyi.	79
Şekil 4.21: Mini slump deney aleti.	79
Şekil 4.22: Yayılma tablası deneyi.	80
Şekil 4.23: Geliştirilen Mini EPBM deney cihazı.	82
Şekil 5.1: Exfoam 1 köpük yoğunluğunun FER (ve C_F) ile değişimi.....	85
Şekil 5.2: Exfoam 1 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 3$).....	85
Şekil 5.3: Exfoam 1 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 4$).....	86
Şekil 5.4: Exfoam 1 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 5$).....	86
Şekil 5.5: Exfoam 1 köpük yarı ömrünün FER (ve C_F) ile değişimi.	87
Şekil 5.6: Exfoam 1 köpük yarı ömrünün C_F (ve FER) ile değişimi.	87
Şekil 5.7: Exfoam 1 köpük kabarcık boyutunun FER (ve C_F) ile değişimi	88
Şekil 5.8: Exfoam 1 köpük kabarcıklarının mikroskop altındaki fotoğrafları.....	88
Şekil 5.9: Exfoam 2 köpük yoğunluğunun FER (ve C_F) ile değişimi.....	89
Şekil 5.10: Exfoam 2 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 3$).....	90
Şekil 5.11: Exfoam 2 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 4$).....	90
Şekil 5.12: Exfoam 2 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 5$).....	91
Şekil 5.13: Exfoam 2 köpük yarı ömrünün FER (ve C_F) ile değişimi.	91
Şekil 5.14: Exfoam 2 köpük yarı ömrünün C_F (ve FER) ile değişimi.	92

Şekil 5.15: SLF 30 köpük yoğunluğunun FER (ve C_F) ile değişimi.	93
Şekil 5.16: SLF 30 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 3$).	93
Şekil 5.17: SLF 30 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 4$).	94
Şekil 5.18: SLF 30 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 5$).	94
Şekil 5.19: SLF 30 köpük yarı ömrünün FER (ve C_F) ile değişimi.....	95
Şekil 5.20: SLF 30 köpük yarı ömrünün C_F (ve FER) ile değişimi.....	95
Şekil 5.21: SLF 30 köpük kabarcık boyutunun FER (ve C_F) ile değişimi.....	96
Şekil 5.22: ACP 143 köpük yoğunluğunun FER (ve C_F) ile değişimi.	97
Şekil 5.23: ACP 143 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 3$).	97
Şekil 5.24: ACP 143 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 4$).	98
Şekil 5.25: ACP 143 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 5$).	98
Şekil 5.26: ACP 143 köpük yarı ömrünün FER (ve C_F) ile değişimi.....	99
Şekil 5.27: ACP 143 köpük yarı ömrünün C_F (ve FER) ile değişimi.....	99
Şekil 5.28: Tane boyut dağılım grafiği (Kaolen).....	100
Şekil 5.29: Su içeriğinin konik penetrasyona bağlı dağılımı (Kaolen).....	101
Şekil 5.30: Zemin numunesinin (Kaolen) plastisite abağındaki yeri.....	101
Şekil 5.31: Zemin numunesinin (Kaolen) yapışma/tıkanma grafiğindeki yeri.....	102
Şekil 5.32: Zemin numunesinin (Kaolen) kıvam grafiğindeki yeri.....	102
Şekil 5.33: Standart kum.	103
Şekil 5.34: Standart kum tane boyut dağılım grafiği.	103
Şekil 5.35: Ayvalı 2 SK 15 şaftından alınan numune (solda) ve kuyruk tüneli aynası (sağda).	104
Şekil 5.36: Ayvalı 2 numunesinin tane boyut dağılım grafiği.....	105
Şekil 5.37: Likit limit deney sonuçları (Ayvalı 2).	106
Şekil 5.38: Numunenin plastisite grafiğindeki yeri (Ayvalı 2).	106
Şekil 5.39: Numunenin yapışma / tıkama riski grafiğindeki yeri (Ayvalı 2).	107
Şekil 5.40: Numunenin kıvam grafiğindeki yeri (Ayvalı 2).....	107
Şekil 5.41: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli S8-236 şaftı kuyruk tüneli aynasından numune alınması.	108
Şekil 5.42: Akfırat tünel numunesinin tane boyut dağılım grafiği.	109
Şekil 5.43: Likit limit deney sonuçları (Akfırat).	110
Şekil 5.44: Numunenin plastisite grafiğindeki yeri (Akfırat).	110
Şekil 5.45: Mahmutbey-Mecidiyeköy Tüneli Kazım Karabekir İstasyonu'ndan numune alınması.	111
Şekil 5.46: Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli 1 numunesinin tane boyut dağılım grafiği.	112
Şekil 5.47: Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli 2 numunesinin tane boyut dağılım grafiği.	113
Şekil 5.48: Likit limit deney sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).	114
Şekil 5.49: Numunenin plastisite grafiğindeki yeri (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).	114
Şekil 5.50: Numunenin kıvam grafiğindeki yeri (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).	115
Şekil 5.51: Farklı su içeriklerinde güç sarfiyatı (Kaolen).....	116
Şekil 5.52: Farklı su içeriklerinde kaolenin mikser bıçağına yapışma miktarı.....	116
Şekil 5.53: Farklı su içeriklerinde penetrasyon değeri (Kaolen).	117

Şekil 5.54: Farklı su içeriklerinde vane shear kesme dayanımı değerleri (Kaolen).	117
Şekil 5.55: Exfoam 1 ve Exfoam 2 için farklı FIR oranlarında mikser güç miktarı karşılaştırılması (Kaolen).	118
Şekil 5.56: Exfoam 1 ve Exfoam 2 için farklı FIR oranlarında yapışma karşılaştırılması (Kaolen).	119
Şekil 5.57: Exfoam 1 ve Exfoam 2 için farklı FIR oranlarında konik penetrasyon değerleri karşılaştırılması (Kaolen).	119
Şekil 5.58: Exfoam 1 ve Exfoam 2 için farklı FIR oranlarında vane shear kesme dayanımı değerleri karşılaştırılması (Kaolen).	120
Şekil 5.59: Exfoam 1 için farklı FIR ve FER değerleri için yayılma miktarları karşılaştırılması (Standart Kum).	121
Şekil 5.60: Exfoam 1 için farklı FIR ve FER değerleri için mini slump değerleri karşılaştırılması (Standart Kum).	122
Şekil 5.61: SLF 30 için farklı FIR ve FER değerleri için yayılma miktarları karşılaştırılması (Standart Kum).	123
Şekil 5.62: SLF 30 için farklı FIR ve FER değerleri için mini slump değerleri karşılaştırılması (Standart Kum).	123
Şekil 5.63: Farklı FIR ve FER değerleri için mini slump çökme değerleri ve yayılma çapları arasındaki ilişki (Standart Kum).	124
Şekil 5.64: Farklı su içeriklerinde güç sarfiyatı (Ayvalı 2).	125
Şekil 5.65: Farklı su içeriklerinde zeminin mikser bıçağına yapışma miktarı (Ayvalı 2).	125
Şekil 5.66: Farklı su içeriklerinde zeminin mikser bıçağına yapışma görüntüsü (Ayvalı 2).	126
Şekil 5.67: Farklı su içeriklerinde penetrasyon değeri (Ayvalı 2).	126
Şekil 5.68: Farklı su içeriklerinde yayılma miktarı (Ayvalı 2).	127
Şekil 5.69: Farklı su içeriklerinde vane shear kesme dayanımı değerleri (Ayvalı 2).	127
Şekil 5.70: Vane shear kesme dayanımı deneyi (Ayvalı 2).	127
Şekil 5.71: Exfoam 2, ACP 143 ve ACP 143 +%12 ilave su için farklı FIR oranlarında mikser güç miktarı karşılaştırılması (Ayvalı 2).	129
Şekil 5.72: Exfoam 2, ACP 143 ve ACP 143 +%12 ilave su için farklı FIR oranlarında mikser yapışma miktarı karşılaştırılması (Ayvalı 2).	130
Şekil 5.73: Exfoam 2, ACP 143 ve ACP 143 +%12 ilave su için farklı FIR oranlarında penetrasyon değerlerinin karşılaştırılması (Ayvalı 2).	130
Şekil 5.74: Exfoam 2, ACP 143 ve ACP 143 +%12 ilave su için farklı FIR oranlarında vane shear kesme dayanımlarının karşılaştırılması (Ayvalı 2).	131
Şekil 5.75: Slump ile su içeriği ilişkisi (Akfırat).	133
Şekil 5.76: Slump deney fotoğrafları (Akfırat).	133
Şekil 5.77: Yapışma ağırlığı ile su içeriği ilişkisi (Akfırat).	133
Şekil 5.78: Değişik su içeriklerinde slump (çökme) ve yayılma ilişkisi (Akfırat).	134
Şekil 5.79: Değişik su içeriklerinde yayılma tablası deney fotoğrafları (Akfırat).	134
Şekil 5.80: Değişik su içeriklerinde slump (çökme) ve yayılma ilişkisi (Akfırat).	134
Şekil 5.81: Exfoam 2 için FIR ve yayılma ilişkisi (Akfırat).	136
Şekil 5.82: Exfoam 2 ile yapılan yayılma tablası deney fotoğrafları (Akfırat).	136
Şekil 5.83: ACP 143 için FIR ve yayılma ilişkisi (Akfırat).	136
Şekil 5.84: ACP 143 ile yapılan yayılma tablası deney fotoğrafları (Akfırat).	137
Şekil 5.85: Mikser güç sarfiyatının su içeriği ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).	138

Şekil 5.86: Penetrasyon değerinin su içeriği ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).	139
Şekil 5.87: Konik penetrasyon deneyi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).....	139
Şekil 5.88: Yayılma miktarının su içeriği ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).	140
Şekil 5.89: Yayılma tablası deneyi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).....	140
Şekil 5.90: Vane shear kesme dayanımının su içeriği ile değişimi (Mahmutbey- Mecidiyeköy 1).	141
Şekil 5.91: Vane shear kesme dayanımı deneyi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).....	141
Şekil 5.92: SLF 30 için mikser güç tüketiminin FIR ile değişimi (Mahmutbey- Mecidiyeköy 1).	142
Şekil 5.93: SLF 30 için penetrasyon değerlerinin FIR ile değişimi (Mahmutbey- Mecidiyeköy 1).	143
Şekil 5.94: SLF 30 için vane shear kesme dayanımının FIR ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).	143
Şekil 5.95: SLF 30 için yayılma tablası değerlerinin FIR ile değişimi (Mahmutbey- Mecidiyeköy 1).	144
Şekil 5.96: Farklı su içeriklerinde güç sarfiyatı (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).	146
Şekil 5.97: Farklı su içeriklerinde zeminin mikser bıçağına yapışma miktar (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).....	148
Şekil 5.98: Farklı su içeriklerinde penetrasyon değeri (Mahmutbey- Mecidiyeköy2).....	149
Şekil 5.99: Farklı su içeriklerinde vane shear kesme dayanımı değerleri (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).....	149
Şekil 5.100: Farklı FIR oranlarında mikser güç miktarı karşılaştırılması (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).	148
Şekil 5.101: Farklı FIR oranlarında yapışma karşılaştırılması (Mahmutbey- Mecidiyeköy 2).	149
Şekil 5.102: Farklı FIR oranlarında konik penetrasyon değerleri karşılaştırılması (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).	149
Şekil 5.103: Farklı FIR oranlarında vane shear kesme dayanımı değerleri karşılaştırılması (Mahmutbey-Mecidiyeköy).....	150
Şekil 5.104: Farklı FER oranlarında farklı köpüklerin yoğunlukları.	152
Şekil 5.105: Farklı FER oranlarında farklı köpüklerin yarı ömür süreleri (Cf= %3).....	153
Şekil 5.106: Farklı FER oranlarında farklı köpüklerin yarı ömür süreleri (Cf= %4).....	153
Şekil 5.107: Farklı FER oranlarında farklı köpüklerin yarı ömür süreleri (Cf= %5)	154
Şekil 5.108: Zemin numunelerinin tane boyut dağılım grafiği.....	155
Şekil 5.109: İnce taneli zemin numunelerinin plastisite abağındaki yeri.	156
Şekil 5.110: Zemin numunesinin kıvam grafiğindeki yeri.	156
Şekil 5.111: Farklı su içeriklerinde güç sarfiyatı.....	157
Şekil 5.112: Farklı su içeriklerinde zeminin mikser bıçağına yapışma miktarı.	158
Şekil 5.113: Farklı su içeriklerinde penetrasyon değeri.	158
Şekil 5.114: Farklı su içeriklerinde vane shear kesme dayanımı değerleri.	159
Şekil 5.115: Farklı FIR oranlarında güç sarfiyatı.....	160
Şekil 5.116: Farklı FIR oranlarında mikser bıçağına yapışma miktarları.....	160
Şekil 5.117: Farklı FIR oranlarında penetrasyon derinlikleri.....	161
Şekil 5.118: Farklı FIR oranlarında vane kesme kuvveti.....	161

Şekil 5.119: Zemin numunelerinin tane boyut dağılım grafiği.....	162
Şekil 5.120: Farklı su içeriklerinde yayılma değerleri.....	163
Şekil 5.121: Farklı FIR değerlerinde yayılma değerleri.....	163
Şekil 6.1: Önceden ve yeni uygulanan şartlandırma durumlarında kesici kafa torkundaki değişim (Ayvalı 2).	166
Şekil 6.2: Önceden ve yeni uygulanan şartlandırma durumlarında itme kuvvetindeki değişim (Ayvalı 2).....	167
Şekil 6.3: Önceden ve yeni uygulanan şartlandırma durumlarında net kazı hızındaki değişim (Ayvalı 2).....	168
Şekil 6.4: EPB TBM penetrasyonu ile FIR arasındaki dağılım grafiği (Akfırat). ...	170
Şekil 6.5: EPB TBM penetrasyonu ile FIR arasındaki yapışkanlık sınıflarına göre dağılım grafiği (Akfırat).....	170
Şekil 6.6: FIR ile EPB TBM penetrasyonu arasındaki ilişki (Akfırat).....	171
Şekil 6.7: Spesifik enerji ile FIR arasındaki dağılım grafiği (Akfırat).	171
Şekil 6.8: Spesifik enerji ile FIR arasındaki ilişki (Akfırat).	172
Şekil 6.9: FIR ile net kazı hızı (ICR) arasındaki ilişki (Akfırat).	172
Şekil 6.10: FIR ile EPB TBM penetrasyonu arasındaki ilişki (Mahmutbey-Mecidiyeköy).	174
Şekil 6.11: FIR ile EPB TBM itme kuvveti arasındaki ilişki (gruplandırılmış veri) (Mahmutbey-Mecidiyeköy).	175
Şekil 6.12: FER ile EPB TBM itme kuvveti arasındaki ilişki (gruplandırılmış veri) (Mahmutbey-Mecidiyeköy).	175
Şekil 6.13: EPB TBM penetrasyonu ile FIR arasındaki ilişki (gruplandırılmış veri) (Mahmutbey-Mecidiyeköy).	176
Şekil 6.14: EPB TBM penetrasyonu ile FER arasındaki ilişki (gruplandırılmış veri) (Mahmutbey-Mecidiyeköy).	177
Şekil 6.15: Zemin numunelerinin parça boyut dağılım grafiği.....	181
Şekil 6.16: Zemin numunelerinin plastisite grafiğindeki yerleri.	181
Şekil 6.17: Zemin numunelerinin yapışma-tıkanma grafiğindeki yerleri.....	182
Şekil 6.18: Zemin sınıflarına göre kesici kafa tork dağılımı.	183
Şekil 6.19: Zemin sınıflarına göre itme kuvveti dağılımı.	184
Şekil 6.20: Zemin sınıflarına göre spesifik enerji dağılımı.	184
Şekil 6.21: Zemin sınıflarına göre anlık net kazı hızı dağılımı.	185
Şekil 6.22: Net kesici kafa torku ve kıvam indisi arasındaki ilişki.....	186
Şekil 6.23: İtme kuvveti ve düşen konik penetrometre derinliği arasındaki ilişki. .	186
Şekil 6.24: Anlık net kazı hızı ve plastik limit arasındaki ilişki.	187
Şekil 6.25: Saha spesifik enerji ve likit limit arasındaki ilişki.....	187
Şekil 6.26: Tahmin edilen ve ölçülen performans parametreleri.....	189

ZEMİN ŞARTLANDIRMANIN EPB TBM PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Tez çalışmasının temel amacı EPB TBM'lerin performanslarının tahmini için ampirik (görgül) modeller geliştirmek, zeminin köpük ile şartlandırılmasını ve kazı performansını optimize etmek amacıyla daha önce denenmemiş arazide ve laboratuvarda uygulanabilen basit deneysel yöntemleri kullanarak ve kazı aynasının basıncını da dikkate alan zemin ve köpüğün basınç altında karıştırıldığı Mini EPBM deney cihazını geliştirerek yeni köpük optimizasyonu ve performans tahmin yöntemleri ortaya koymaktır. Bu çalışmalar sonucunda, EPB TBM'lerin performanslarını tahmin etmek, optimize etmek, arttırmak, TBM duraklamalarını ve arazi deformasyonlarını azaltmak, dolayısı ile maliyetleri düşürmek mümkündür.

Deneysel olarak kullanılan köpük ve antikal kimyasallarının özelliklerini belirlemek amacıyla köpük yoğunluğu ve yarı-ömür deneyleri ile birlikte köpük kabarcık boyutları ölçülmüştür. Zemin numunelerinin karakteristiklerini belirlemek amacıyla tane boyut dağılımı ve atterberg limit deneyleri yapılmıştır. Zemin numuneleri ile laboratuvar tipi köpük jeneratöründe çeşitli karakteristik özelliklerinde üretilen köpükler karıştırılarak etkileşimlerini belirlemeye yönelik slump, yayılma tablası, konik penetrometre, güç ölçümlü mikser-yapışma, cep tipi vane shear, cep tipi penetrometre ve vane shear cihazları ile zemin şartlandırma deneyleri yapılarak optimum köpük tasarımları belirlenmiştir.

Deneysel olarak öncelikle sadece su ile şartlandırma yapılmış, sonrasında zemin + köpük karışımı ile yapılmıştır. Böyle bir "çoklu" deney sistemi ile köpük optimizasyonuna literatürde rastlanmamıştır. Bu projede yapılan çalışmalar, literatürde görülen tekli deney sistemi ile yapılan optimizasyonlarda yanılma payının olduğunu da göstermiştir.

Farklı üreticilere ait ve farklı tipteki (süfaktan-polimerli) köpüklerin zemin şartlandırma performansına etkilerinin araştırılması amacıyla yapılan köpük

karakterizasyon deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Köpük yoğunluğunun artan FER ile azaldığı tespit edilmiştir. Genel olarak polimer içeren köpüklerin polimer içermeyen köpüklere oranla yoğunluğunun daha düşük olduğu görülmüştür. Farklı C_F ve FER değerlerinde köpükler üretilmiş ve drenaj miktarı ve yarı ömür süreleri ölçülmüştür. Köpük drenaj miktarı ve yarı ömür süresini belirleyen en önemli faktörlerin C_F ve FER değerleri olduğu görülmüştür. Köpük yarı ömür süresinin artan C_F değeri ile düştüğü ve artan FER değeri ile arttığı bulunmuştur. En yüksek yarı ömür süresi %3 C_F ve 16 FER değerlerinde 802 saniye olarak ve en düşük yarı ömür süresi ise % 5 C_F ve 8,5 FER değerinde 251 saniye olarak ölçülmüştür. Polimerli köpüklerin düşük FER oranlarında yarı ömürlerinin polimersiz köpüklere oranla daha uzun olduğu yani polimerli köpüklerin daha kararlı olduğu görülmüştür. Yüksek FER oranlarında ise köpük cinsinin yarı ömüre herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Proje amaçlarına ulaşmak üzere, İstanbul’da bulunan üç tünel sahası ziyaret edilerek sahaların jeolojisi, uygulanan kazı yöntemi ve EPB TBM özellikleri hakkında bilgiler edinilmiş; kazılacak formasyonlardan numuneler alınmış; TBM performans verileri toplanmış ve gözlemler yapılmıştır. Laboratuvarda özgül ağırlık, doğal nem içeriği, tane boyut dağılımı, kıvam limitleri deneyleri ile zemin numunelerinin köpük optimizasyonu bakımından önemli olan bazı fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Tez kapsamında dünyada ilk olma özelliği bulunan “Mini EPBM” deney cihazı geliştirilmiştir. Ancak, cihazın bazı özellikleri istenen amaca ulaşmak için yetersiz kaldığından, cihazın geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Bu nedenle, halihazırda bu cihaz kullanılarak deneyler yapılamamıştır.

Yine bu tez kapsamında geliştirilen “mini-slump” deney aleti, standart slump deney aletinin $\frac{1}{2}$ oranında küçültülmüşü olup, bir deney için gereken zemin numunesi ihtiyacını yaklaşık %90 azaltmıştır ve homojen ve iri parça içermeyen zeminlerde yayılma tablası ile çok güçlü bir ilişki vermiştir. Bu çalışmaların sonucunda elde edilen bulgular ile çeşitli köpük tasarımlarının ve zemin özelliklerinin EPB TBM’lerin performanslarına olan etkileri incelenmiş, önemli parametreler belirlenmiştir.

Tez kapsamında cep tipi kanatlı kesme (Vane Shear) deney aleti kullanılarak, zeminlerin ve zemin+köpük karışımlarının kıvamlarının tahmin edilebileceği ortaya

konmuştur. Bu deney aletinin şartlandırma deneylerinde kullanılabilceği görölmüştür.

EPB TBM'lerin kazı performanslarını tahmin amacıyla Zeytinburnu Ayvalı 2 tünel güzergahı boyunca geçilen 3 farklı formasyondan numuneler alınmış ve kazı boyunca gözlemler yapılmıştır. Alınan zemin numuneleri üzerinde doğal nem içeriği, lazer kırınım yöntemiyle parça boyut analizi, atterberg kıvam limitleri, konik penetrasyon ve vane kesme deneyleri yapılmıştır. Geçilen 3 farklı jeolojik formasyonda TBM performans analizi yapılmış zemin özelliklerinin kazı performansına etkileri araştırılmıştır. EPB TBM performans tahmin modelleri geliştirmek amacıyla zemin özellikleri kazı performans parametreleriyle (EPB TBM penetrasyonu, itme kuvveti, kesici kafa torku ve spesifik enerji) basit ve çoklu regresyon analizleri yapılarak ilişkilendirilmiş ve istatistiksel olarak anlamlı ve güvenilir ampirik kazı performans modelleri geliştirilmiştir.

Yapılan bu çalışmaların bulguları, tasarımcı mühendislik firmaları ve proje sahibi kurumlar (işveren) ile yüklenici firmalar tarafından fizibilite ve planlama aşamalarında kullanılabilir.



INVESTIGATION OF EFFECTS OF SOIL CONDITIONING ON EPB TBM PERFORMANCE

SUMMARY

The vast majority of tunneling projects are now being carried out by mechanical excavation methods due to their superiority over traditional drilling and blasting methods. Although mechanical excavation methods are superior to other excavation methods, problems are encountered especially during excavation of urban tunnels. Most of the tunnels in urban areas are built on soft ground, shallow depths, and under water table. For this reason, the problems caused by tunneling on soft grounds and studies on the solution of these problems have attracted attention in recent years.

With the developing technology, Tunnel Boring Machines (TBMs) are widely used in difficult and mixed ground conditions in urban tunnels where the risks are high. Under these conditions, it has become very important that the efficiency and safety of underground excavations. Engineers and contractors have to do tunnel excavation quickly, at low cost and with minimal damage to the environment. Although the developing technology makes it possible, especially in urban tunnels, mixed ground structure is encountered with problems due to low tunnel progress performance, increased cost and dents due to the size of the risks, thus causing damage to the surrounding structures. In order to improve the existing technology and reduce the problems mentioned above, it is necessary to combine new researches and existing experiences with the experiences gained from the realized projects.

Soil conditioning has a great prospect for increasing the tunneling performance both in the Earth Pressure Tunneling Machines (EPB TBMs) and reducing the damage to the environment by reducing surface settlements and creating an effective counter face pressure if necessary. This preliminary response to soil conditioning is often carried out by field engineers on experience and assumptions, particularly with regard to tunnel progressive performance, or on the basis of soil conditioning in mixed and difficult ground conditions and understanding of machine-soil-conditioning interaction. Due to limited work in this area, the issue of soil

conditioning in the EPB TBM tunneling continues to be a "black box" in our country and in the world.

The main objective of the thesis is effect of soil conditioning on the EPB TBM excavation performance parameters (Torque, thrust, net penetration) and to develop an empirical model for the EPB TBM performance prediction. The effect of soil conditioning on the EPB TBM excavation performance parameters as well as the interaction between the soil, the foam and the cutting head will be understood and optimum foam utilization rates for different types of soils will be recommended. This information will be used by planners, contractors and consultants during the planning phase as well as providing solutions to the problems encountered during excavation. The study will enhance existing knowledge on soil conditioning and will provide new literature methods on the effects of soil conditioning.

Foam bubble sizes foam density and half-life were measured in order to determine the properties of the foam and anticlay chemicals used in the experiments. Particle size distribution and atterberg limit test were carried out to determine the characteristics of the soil samples. Optimum foam designs defined by making soil conditioning experiments with slump, flow table, cone penetrometer, power measuring mixer, pocket type vane shear and pocket type penetrometer tests to determine interactions foam types with the soil samples.

Experiments were done firstly by only with water, followed by ground + foam mixture. Foam optimization with such a "multiple" test system has not been found in the literature. Studies in this project have also shown that there is a margin of error in the optimizations made with the single test system in the literature.

The foam characterization test results were compared in order to investigate the effect of different types of (surfactant-polymered) foams of different manufacturers on the soil conditioning performance. Foam density has been found to decrease with increasing FER. In general, polymer-containing foams were found to be less dense than polymer-free foams. Foams were produced at different CF and FER values and the amount of drainage and half-life were measured. The most important factors determining the amount of foam drainage and half-life are CF and FER. Foam half-life time was found to increase with increasing CF value and increased FER values. The highest half-life time was measured as 723 seconds at 3% CF and 16 FER, and

the lowest half-life was measured at 251 seconds at 5% CF and 8.5 FER. It has been found that polymer based foams have a longer half-life at low FER ratios than polymer-free foams.

Three tunneling sites in Istanbul are visited for obtaining information on geology, construction method, TBM; obtaining soil samples; applying in-situ experiments using pocket penetrometer, static cone penetrometer, pocket and field types vane shear devices; and collecting excavation performance data of EPB TBMs. In the laboratory, physical properties of the soil samples are determined (specific gravity, natural water content, size distribution, consistency limits). Foam density and half-life tests, along with measuring foam bubble size under microscope, are performed to determine properties of the foams and anticlays used in the tests. Soil samples and foam generated with a laboratory type generator are mixed and their interaction is determined using slump, flow table, cone penetrometer, mixing with power measurement and sticking amount) and pocket type vane shear and pocket penetrometer tests; and optimum foam designs are determined by each test. The findings of these studies and the effects of various foam designs and formation properties on the performance of different EPB TBMs were examined and the most important parameters were determined. The optimized soil conditioning parameters and conditioning methods on field were analyzed in order to validate the experimental results.

During the excavation of Zeytinburnu Ayvali Tunnel it is observed that soil has a high potential of adhesion. During laboratory conditioning studies it is observed that with optimum soil conditioning parameters (FER 16, CF 3% and FIR 250% and 12% more water) sticking problem would be solved and also performance will be increased. Optimum ground conditioning parameters could be partially applied in the field and it was seen that the cutter head torque decreased by 13% and thrust force by 10%. On the other hand, the net excavation speed increased by 32%.

During the Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tunnel excavation, two different soil types, silted sand (Mahmutbey-M.köy1) and sandy silt (Mahmutbey-M.köy 2), were studied. The Mahmutbey-M.köy 1 sample is optimized with SLF 30 at CF 3%, FER 16 and FIR 20%, in natural water content (17%). In Mahmutbey-M.köy 2 sample, the sample shows aggregation property and it is anticipated that the increasing amount of water will increase the stickiness property and it is optimized with CF 3%, FER 16

and FIR% 250 with ACP 143 in 35% water content. According to the performance measurements during tunnel excavation, there is no relation between EPB TBM thrust and cutter head torque and FIR. On the other hand, there is a relationship between FIR and EPB TBM penetration. At decreasing penetration values (increasing excavation difficulty) FIR appears to be increased. It is also seen that the FIR value is increased with increasing thrust force.

Tuzla Akfirat Tunnel contains clayey sand with gravel which has a potential of adhesion. The optimum soil conditioning results obtained with 12,5 % more water and ACP 143 polymeric foam (FER 8.5, CF 3% and 120% FIR). Tuzla Akfirat Wastewater Tunnel has encountered different grades of clay content. As the clay content in the soil increased, the stickiness increased and the EPB TBM performance decreased. The relationship between FIR, FER and Foam Quantity values and some performance parameters of EPB TBM (EPB TBM penetration, thrust, cutter head torque, specific energy) were investigated. The FER and foam amount did not correlate significantly with the performance parameters. There is a general trend between FIR and penetration. When considering only clayey soils (when clay-free, non-stick soils are kept out), the applied FIR limit values generally range from 150-300% in very sticky zones, 50-200% in medium sticky zones and 50-100% in less sticky zones. There is a strong correlation between EPB TBM penetration and FIR, as the excavation rate decreases (excavation becomes more difficult) FIR increases.

Mini EPBM is developed within the scope of project, which is a first in the world, in order to investigate the effect of soil conditioning on EPB TBM performance parameters under real working conditions. Unfortunately any test was performed by using this machine.

The "mini-slump" test tool developed in the scope of this thesis has been reduced by $\frac{1}{2}$ of the standard slump test instrument, reducing the need for ground sample by about 90% and providing a very strong relationship with the flow table in homogeneous soils without coarse material. The findings of the studies and the effects of different foam designs and soil properties on the performance of EPB TBMs were examined and important parameters were determined.

In the scope of the thesis, it is demonstrated that the consistency of soils and soil + foam mixes can be predicted by using pocket type vane shear. This test apparatus has been shown to be used in conditioning experiments.

Within the scope of the thesis, studies were carried out in Zeytinburnu Ayvalı 2 tunnel to estimate the excavation performances of EPB TBMs used in fine grained soils. Observations were made during the excavation of the samples taken from 3 different formations along the tunnel route. Particle size analysis, Atterberg consistency limits, cone penetration and vane shear tests were performed on the soil samples. TBM performance analysis was performed on the 3 different geological formations and the effects of soil properties on excavation performance were investigated. In order to develop EPB TBM performance prediction models, soil properties were correlated by simple and multiple regression analyzes with excavation performance parameters, and statistical excavation performance models were developed.

The results of these studies can be used by engineering companies, project owners and contractors in feasibility and planning stages.



1. GİRİŞ

1.1 Genel

Günümüzde dünyadaki şehirler ulaşım ve altyapı sistemleri ile yerleşim ve endüstriyel alanlara bağlanmıştır. Milyonlarca insanın yaşadığı bu şehirler sıkışık alanlara hapsolmuştur. Yapılan çalışmalara göre (Gugliemanti ve diğ, 2007), önümüzdeki yıllarda kentsel nüfusun hızla artacağı ve küçük ölçekli şehirlerin bile mega şehirlere dönüşeceği varsayılmaktadır.

Bu tür eğilimler, sınırlı kentsel alanın, mevcut ve yeni çeşitli şehir işlevlerine uygun bir şekilde tahsis edilmesini ve tekrar dağıtılmasını gerektirmektedir. Artan dünya nüfusunun ve buna paralel olarak şehir planlamasının getirdiği zorluklar (yeni altyapılar için sınırlı yeryüzü alanları), politikacıları, planlamacıları, mühendis ve mimarları yeraltı alanlarının kullanımına itmiştir.

Tarih boyunca kentsel alanlarda yeraltı alanları çoğunlukla ulaşım ve altyapı sistemleri için kullanılmış olup günümüzde ise bunlara ek olarak barınma, depolama, ticaret, enerji üretimi gibi birçok amaç için kullanılmaktadır.

Tünel açma projelerinin büyük çoğunluğu günümüzde geleneksel delme ve patlatma yöntemine üstünlüklerinden dolayı mekanize kazı yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Her ne kadar mekanize kazı yöntemleri diğer kazı yöntemlerine göre üstün olsada özellikle şehir içi tünel kazıları sırasında problemlerle karşılaşmaktadır. Kentsel alanlardaki tünellerin çoğu yumuşak zeminde, sığ derinliklerde ve su altı tablası altında inşa edildiği bir gerçektir. Bu nedenle, yumuşak zeminlerde tünel açmanın doğurduğu problemler ve bu problemlerin çözümü üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır.

Gelişen teknoloji ile beraber TBM'ler risklerin yüksek olduğu şehir içi tünelticiliğinde zor ve karışık (mixed) zemin koşullarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bahsedilen koşullarda yeraltı kazılarının veriminin ve güvenliğinin yüksek tutulup inşaat süresinin, maliyetinin ve tünelticilikten doğan risklerin azaltılması büyük önem kazanmıştır. Mühendisler ve yükleniciler tünel kazısını hızlı, düşük maliyetle ve

çevreye minimum zarar vererek yapmak zorundadırlar. Gelişen teknoloji bunu mümkün kılsa da özellikle şehir içi tünelticiliğinde gerek karışık zemin yapısı gerekse risklerin büyüklükleri nedeniyle düşük tünel ilerleme performansı, artan maliyet ve oluşan göçükler nedeniyle çevredeki yapıların zarar görmesine yol açan problemlerle karşılaşmaktadır. Mevcut teknolojinin geliştirilip bahsedilen sorunların azaltılması amacıyla bu konuda yeni araştırmalara ve mevcut çalışmaların gerçekleştirilen projelerden kazanılan deneyimlerle birleştirilerek geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Zemin şartlandırma, Pasa Basıncılı Tünel Açma Makinelerinde gerek tünel ilerleme performansını artırması ve gerekse etkin karşıt ayna basıncı oluşturarak zemin oturumlarının azaltılıp çevreye verilen zararın azaltılması açısından büyük bir öneme sahiptir. Bahsedilen bu öneme karşılık zemin şartlandırma konusu saha uygulamalarında çoğunlukla tecrübe ve varsayımlar üzerine yapılmakla beraber özellikle tünel ilerleme performansının önem kazandığı veya karışık ve zor jeolojik koşullarda zemin şartlandırmanın temelleri ve makine-zemin-şartlandırma etkileşiminin anlaşılması mühendisler tarafından büyük önem taşımaktadır. Bu konudaki kısıtlı çalışmalar nedeniyle EPB TBM tünelticiliğinde zemin şartlandırma konusu ülkemizde ve dünyada halen “kapalı kutu” olma özelliğini sürdürmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Tezin temel amacı zemin şartlandırmanın EPB TBM kazı performans parametrelerine (tork, itme kuvveti (thrust), net penetrasyon, spesifik enerji) etkilerini araştırmak ve EPB TBM performans tahmini için ampirik model(ler) geliştirmektir.

Araştırmanın sonucunda elde edilecek bulgular ışığında zemin şartlandırmanın EPB TBM kazı performans parametrelerine etkisi daha iyi anlaşılacak, bunun yanı sıra zemin - köpük - kesici kafa arasındaki etkileşim anlaşılacak ve farklı zemin türleri için optimum köpük tasarım parametreleri belirlenecektir. Elde edilen bu bilgiler, kazı sırasında karşılaşılan sorunlara çözüm üretmekle beraber planlama aşamasında planlamacılar, yükleniciler ve danışmanlar tarafından kullanılabilir. Çalışma zemin şartlandırma konusunda mevcut bilgi birikimini artıracak ve zemin şartlandırmanın etkileri konusunda literatüre yeni metotlar kazandıracaktır. Ayrıca, EPB TBM’ler için fizibilite aşamasında kullanılabilir yeni ve daha güvenilir performans tahmin modelleri geliştirilecektir.

1.3 Tezin Yöntemi ve Parametreler

Yukarıda belirtilen amaç ve hedeflere ulaşmak için belirlenen kapsam 3 ana başlık altında toplanmıştır: Arazi Çalışmaları, Laboratuvar Çalışmaları ve Ofis Çalışmaları. Aşağıda doktora tezinin kapsam ve yöntemi özetlenmiştir.

1.3.1 Arazi çalışmaları

Planlanan arazi çalışmalarının içeriği, ilgili çalışmalar, parametreler, uygulanan standartlar ve bazı kısa notlar Çizelge 1.1’de özetlenmektedir.

Çizelge 1.1: Arazi çalışmalarının içeriği, deneyler, ilgili çalışmalar, parametreler ve standartlar ve bazı kısa notlar.

1	ARAZİ ÇALIŞMALARI	UYGULANAN STANDART
	<i>(EN AZ 4 DEĞİŞİK FORMASYONDA YAPILACAKTIR, FORMASYONLAR ÇEŞİTLİ ORANLARDA KİL-SİLT-KUM İÇERECEKTİR)</i>	YÖNTEM / REFERANS
1.1	BİLGİ TOPLAMA	
	<i>(BİR BİLGİ FÖYÜ OLUŞTURULACAK VE BUNA GÖRE BİLGİLER EKSKİSİZ TOPLANACAKTIR)</i>	
1.1.1	Sahaların jeolojik ve jeoteknik özellikleri	
1.1.2	Projeler hakkında genel bilgiler ve yapım yöntemleri	
1.1.3	Projelerde kullanılan EPB TBM’lerin teknik özellikleri	
1.2	PROJELERDE KULLANILAN EPB TBM’LERİN PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ	
	<i>(RING NO, TÜNEL KİLOMETRESİ, NET KAZI HIZI, GÜNLÜK İLERLEME HIZI, MAKİNE KULLANIM ORANI, DURAKLAMA NEDENLERİ, KESİCİ KAFA RPM-TORK-GÜÇ, TBM İTME KUVVETİ, ARAZİ BASINCI, KÖPÜK PARAMETRELERİ Cİ, FER, FIR ÖLÇÜLECEKTİR)</i>	
	<i>(AYNI FORMASYONDA NUMUNE ALINACAK, ARAZİ DENEYLERİ VE PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ YAPILACAKTIR)</i>	
1.2.1	Yerinde performans ölçümü ve gözlemlerin yapılması (yüksek lisans ve doktora öğrencileri ile)	
1.2.2	TBM veri kayıt sisteminden performans verilerinin elde edilmesi ve incelenmesi	
1.2.3	Vardiya ve hakediş raporlarının incelenmesi	
1.3	ARAZİDE NUMUNE ALMA	
	<i>(TBM PERFORMANSI ÖLÇÜLEN VE ARAZİ DENEYİ YAPILAN YERLERDE, NUMUNE ALMA-ÇIKARTMA SETİ İLE, UYGUN NUMUNE KORUMA YÖNTEMLERİYLE, LABORATUVAR DENEYLERİ YAPMAK ÜZERE, HER ÖLÇÜM YERİNDEN YAKLAŞIK 50-100 KG ÖRSELENMİŞ NUMUNE ALINACAKTIR)</i>	
1.3.1	Formasyon’dan numune alma (numune alma seti - tüp veya burgu ile tünel aynasından ve/veya yeryüzünden)	BS 1377-9 (1990)
1.3.2	Pasa’dan (vagon veya banttaki kazılmış malzeme’den) numune alma (laboratuvar ve arazi deneylerini kıyaslamak üzere)	
1.4	ARAZİDE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	
	<i>(TBM PERFORMANSI ÖLÇÜLEN VE NUMUNE ALINAN FORMASYONLARDA)</i>	
1.4.1	Formasyon / zemin’de yapılan deneyler	
	<i>(Formasyon stabil ise tünel aynasında veya mostralarda)</i>	
1.4.1.1	Statik konik penetrometre deneyi ile penetrasyon direnci ölçümleri	ASTM D3441 - 05 (2005a)
1.4.1.2	Arazi tipi vane shear deneyi ile vane kayma mukavemeti ölçümleri	ASTM D2573 - 08 (2008a)
1.4.1.3	Doğal nem içeriği deneyi (hızlı nem tayin cihazı ile)	ASTM D4944 - 11 (2011)
1.4.2	Pasa’da (kazılmış malzeme üzerinde) yapılan deneyler	
	<i>(Vagonlardan veya banttardan alınan pasa üzerinde, numune alınan yerlerde, laboratuvar deneyleri ile kıyaslamak amacıyla)</i>	
1.4.2.1	Cep penetrometresi deneyi ile penetrasyon direnci ölçümleri	ASTM WK27337 (2010a)
1.4.2.2	Cep tipi vane shear deneyi ile vane kayma mukavemeti ölçümleri	ASTM D4648M (2008b)

İstanbul’da bulunan tünel kazı sahaları (Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli, Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli, Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli) ziyaret edilerek sahaların jeolojisi - uygulanan yapım yöntemi – proje genel bilgileri - TBM özellikleri ile ilgili bilgiler edinilmiş; EPB TBM’lerin kazı yapacağı formasyonlardan / zeminlerden numuneler alınmıştır. Ayrıca, TBM performans verileri (gözlem ve ölçümler yapılarak, makine veri kayıt sistemlerinden, vardiya raporlarından) toplanmıştır. TBM performans ölçümleri, arazi deneyleri ve laboratuvar deneyleri ile numune alınan lokasyonların aynı yerler olmasına gayret gösterilmiştir. Veri olarak toplanan performans parametreleri şunlardır: ring no, tünel kilometresi, net kazı hızı, günlük ilerleme hızı, makine kullanım oranı, duraklama nedenleri, kesici kafa devir

hızı (rpm) - tork ve gücü, TBM itme kuvveti, ayna basıncı ve köpük parametreleri (köpük konsantrasyonu (CF), köpük genleşme oranı (FER), köpük enjeksiyon oranı (FIR)), burgulu konveyörün rpm ve torku.

Numune alınan yerlerin (Ayvalı 2 ve Akfırat Atıksu Tünelleri) kazı aynalarında formasyonun / zeminin karakteristiklerini belirlemek üzere cep penetrometresi, statik konik penetrometre ve cep tipi kanatlı kesme (vane shear) ve arazi tipi vane shear deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, aynada veya kazılmış olan köpüklü pasadan numuneler alınarak tünel içinde cep penetrometresi, cep tipi vane shear kesme dayanımı ve slump cihazları / aletleri (standart ve mini) ile deneyler yapılmıştır.

1.3.2 Laboratuvar çalışmaları

Laboratuvar çalışmalarının içeriği, ilgili çalışmalar, parametreler, uygulanacak standartlar ve bazı kısa notlar Çizelge 1.2’de özetlenmektedir. Toplam 3 değişik grup laboratuvar deneyi yapılmıştır. Birbirini sırayla takip edecek olan bu deney grupları ve her bir grupta yapılacak deneyler, ölçülecek parametreler, uygulanacak standartlar, kullanılan cihazlar-aletler ve sınırlayıcı faktörler aşağıda özetlenmektedir:

a) Formasyon / zemin numunelerinin karakterizasyonu deneyleri (fiziksel özellikler):

Köpük optimizasyonu bakımından literatürde en çok önem verilen bazı formasyon fiziksel özelliklerin belirlenmesi planlanmıştır. Bunlar: Doğal nem içeriği ölçümleri, özgül ağırlık deneyleri (piknometre kullanılarak), boyut dağılımı deneyleri (elek seti ve hidrometre seti kullanılarak), likit limit deneyleri (yarı otomatik konik penetrometre), plastik limit deneyleri).

b) Köpük numunelerinin karakterizasyonu deneyleri:

Bu deneylerde kullanılan köpükler ve köpük üretimi için gereken laboratuvar tipi köpük jeneratörü, İKSA İnşaat Katkıları San ve Tic. Ltd. Şti. tarafından sağlanmıştır. Köpük jeneratörü ile oluşturulan değişik köpük örnekleri üzerinde yapılan deneyler ve kullanılan cihazlar-aletler şunlardır: Köpük kararlılığı (half-life, yarı ömür) deneyi (filtre hunisi kullanılarak), köpük yoğunluğu ölçümleri (hassas terazi ve mezür kullanılarak), köpüğün plastikleşme etkisi deneyi (köpük + standart kum karışımı üzerinde DIN yayılma tablası deney seti). Daha sonra, zaman kısıtlamasından dolayı

köpüğün plastikleşme etkisi deneyinden vazgeçilmiştir, half-life ve yoğunluk deneylerinin yeterli olacağı düşünülmüştür.

Çizelge 1.2: Laboratuvar çalışmalarının içeriği, deneyler, ilgili çalışmalar, parametreler, standartlar ve bazı kısa notlar.

2	LABORATUVAR ÇALIŞMALARI	UYGULANAN STANDART
2.1	FORMASYON/ZEMİN NUMUNELERİNİN KARAKTERİZASYONU DENEYLERİ (FİZİKSEL ÖZELLİKLER)	YÖNTEM / REFERANS
2.1.1	Özgül ağırlık deneyleri (piknometre ile)	ASTM D854 - 10 (2010b)
2.1.2	Doğal nem içeriği deneyleri (etüv ve hassas terazi ile)	ASTM D4944 - 11 (2011)
2.1.3	Boyut dağılımı deneyleri (elek seti ve hidrometre seti ile)	ASTM D422 - 63 (2007)
2.1.4	Likit limit deneyleri (konik penetrometre cihazı ile)	ASTM D4318 - 05 (2005b)
2.1.5	Plastik limit deneyleri (plastik limit aparatı ile)	ASTM D4318 - 05 (2005b)
2.1.6	Geçirgenlik deneyleri (düşen seviyeli geçirgenlik deney aleti ve proktor tokmağı ile)	ASTM D5084 - 10 (2010c)
2.2	KÖPÜK KİMYASALI (SÜRFAKTİF / KÖPÜK AJANI) NUMUNELERİNİN KARAKTERİZASYONU DENEYLERİ	
	(SÜRFAKTİF / KÖPÜK AJANI NUMUNELERİ ÜZERİNDE, LABORATUVAR TİPİ KÖPÜK JENERATÖRÜ İLE KÖPÜK ÜRETİMİ,	
2.2.1	Köpük kararlılığı (half-life, yarı ömür) deneyi (filtre hunisi ile)	
2.2.2	Köpük yoğunluğu ölçümleri (hassas terazi ve mezur ile)	EFNARC (2005)
2.2.3	Köpüğün plastisite etkisi deneyi (DIN yayılma tablası ve perfore mezur (litrelik) ile, Standart kum ile karıştırıldığında)	
2.3	KÖPÜK+PASA KARIŞIMININ KLASİK DENEYLER İLE KARAKTERİZASYONU VE OPTİMUM KÖPÜK TASARIMI	
	(EN AZ 4 FARKLI W_n (SU İÇERİĞİ), Cf, FER VE FIR DEĞERLERİNDE, NUMUNE+KÖPÜK ATMOSFERİK KOŞULLARDA KARIŞTIRILACAK)	
2.3.1	Konik penetrometre deneyleri (plastik limit - penetrasyon derinliği belirlenecek)	ASTM D4318 - 05 (2005)
2.3.2	Slump deneyleri (çökme yüksekliği değeri belirlenecek)	
2.3.3	DIN yayılma tablası deneyleri (yayılma çapı belirlenecek)	EFNARC (2005)
2.3.4	Güç ölçümlü karıştırma deneyleri (vatmetreli mikser ile)	
2.4	KÖPÜK+PASA KARIŞIMININ CEP TİPİ (LABORATUVAR) DENEY ALETLERİ İLE KARAKTERİZASYONU VE OPTİMUM KÖPÜK TASARIMI	
	(EN AZ 4 FARKLI W_n (SU İÇERİĞİ), Cf, FER VE FIR DEĞERLERİNDE, NUMUNE+KÖPÜK ATMOSFERİK KOŞULLARDA KARIŞTIRILACAK)	
2.4.1	Cep penetrometresi deneyi ile penetrasyon direnci ölçümleri	ASTM WK27337 (2010)
2.4.2	Cep tipi vane shear deneyi ile vane kayma mukavemeti ölçümleri	ASTM D4648M (2008)
2.5	KÖPÜK+PASA KARIŞIMININ BASINÇLI VANE SHEAR DENEYİ (KAZI AYNASI SİMULASYONU) İLE KARAKTERİZASYONU VE OPTİMUM KÖPÜK TASARIMI	
	(BU ÇALIŞMADA GELİŞTİRİLECEK OLAN "KAZI AYNASI SİMULASYONU" DENEYİ, EN AZ 4 FARKLI KAP BASINCI, RPM (dönüş hızı), W_n , Cf, FER VE FIR DEĞERLERİNDE, NUMUNE+KÖPÜK BASINÇ ALTINDA KARIŞTIRILACAK; GÜÇ, TORK, RPM, BASKI-İTME KUVVETİ VE AYNA (KAP) BASINÇ ÖLÇÜMLERİ YAPILACAK)	
2.5.1	Güç ölçümleri (basınçlı vane shear cihazı üstündeki vatmetre ile)	
2.5.2	RPM (dakikadaki devir) ölçümleri (basınçlı vane shear cihazı üstündeki takometre ile)	
2.5.3	Tork ölçümleri (torkmetre ile ölçülecek, ve güç ve RPM ölçümleri kullanılarak hesap ile kontrol edilecek)	
2.5.4	Baskı-itme kuvveti ölçümleri (basınçlı vane shear cihazı içindeki yük hücresi ile)	
2.5.5	Ayna (kap) basıncı ölçümleri (basınçlı vane shear cihazı içindeki basınç transdüseri ile)	
2.6	FORMASYONUN YAPIŞMA VE TIKAMA KARAKTERİZASYONU DENEYLERİ VE OPTİMUM ANTI KİL	
	VEYA ANTI KİL+KÖPÜK TASARIMI	
	(EN AZ 4 FARKLI ANTI-KİL YÜZDESİ, Cf, FER VE FIR DEĞERLERİNDE)	
2.6.1	Kayma plakası deneyleri (basit metal kayma plakası ile)	
2.6.2	Güç ölçümlü karıştırma deneyleri (vatmetreli mikser ile)	
2.6.3	Ağırlık ölçümlü karıştırma deneyleri (mikser ve hassas terazi ile)	Ball vd (2009)
2.6.4	Cep penetrometresi deneyi ile penetrasyon direnci ölçümleri	
2.6.5	Cep tipi vane shear deneyi ile vane kayma mukavemeti ölçümleri	
2.7	KENDİNİ TUTABİLEN STABİL YUMUŞAK FORMASYONLARIN (KİLTAŞI, SİLTTAŞI, ÇAMURTAŞI VB) KÜÇÜK ÖLÇEKLİ KAZI DENEY SETİ İLE KESİLEBİLİRLİK DENEYLERİ	
	(EN AZ 3 FARKLI KESME DERİNLİĞİNDE, EN AZ 3 DEĞİŞİK S/P ORANINDA)	
2.7.1	Keski kuvvetleri ölçümleri	McFeat-Smith and Fow ell (1977)
2.7.2	Spesifik enerji ölçümleri	

Köpük numunelerinin karakterizasyonu deneylerinde Exfoam 1 ve SLF 30 köpük kimyasalları ile Exfoam 2 ve ACP 143 antikal (köpük + polimer) kimyasalları kullanılmıştır.

Bu deneylere ilave olarak, iki değişik köpük kimyasalı için (Exfoam 1 ve SLF30) çeşitli CF ve FER değerlerinde köpüklerin kabarcık boyutları özel bir mikroskop altında analiz edilmiştir.

c) Köpük + zemin karışımının karakterizasyonu ve köpük optimizasyonu deneyleri:

Değişik köpük ve antikal kimyasalları temin edilerek bunların köpük kaliteleri ile özellikleri çeşitli deneylerle belirlenmiş ve deneyler için gereken uygun köpük kimyasalı seçimi yapılmıştır. Özellikleri bilinen formasyon numuneleri ile laboratuvar tipi köpük jeneratörü ile oluşturulan ve özellikleri bilinen köpükler karıştırılarak (köpük + zemin) her ikisinin etkileşimini belirlemeye ve optimum köpük tasarımına yönelik Efnarc'ın belirlediği literatürde kullanılan ve literatürde rastlanılmamış bazı zemin şartlandırma deneyleri yapılmıştır.

Bu deneylerde numune ve köpük atmosferik koşullarda karıştırılır. Deneyler değişik W_n (su içeriği), CF, FER ve FIR değerlerinde yapılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneyler ve kullanılan cihazlar-aletler şunlardır: Dijital konik penetrometre deneyleri (plastik limit değeri ve penetrasyon derinliği), slump deneyleri (çökme yüksekliği), DIN yayılma tablası deneyleri (yayılma çapı), güç ölçümlü mikser deneyleri (yapışma miktarı ve güç sarfiyatı), vane kesme dayanımı deneyleri (kesme kuvvetleri).

1.3.3 Ofis çalışmaları

Ofis çalışmalarının içeriği, ilgili çalışmalar, parametreler, ilişkiler ve bazı kısa notlar Çizelge 1.3'de özetlenmektedir.

Ofis çalışmasında ilk olarak arazide ve laboratuvarında yapılan deneysel çalışmaların genel bir değerlendirmesi yapılmış ve değişik köpük optimizasyonu yöntemleri ve sonuçları kıyaslanmıştır. Daha sonra, değişik prensiplere ve deneysel sonuçlara dayanarak EPB TBM performans tahmin modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller ile EPB TBM'lerin net kazı hızı, günlük ilerleme hızı, makine kullanım oranı, kesici kafa dönüş hızı-torku-gücü ve TBM itme kuvveti gibi performans parametrelerinin tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda elde edilen bulgular ile çeşitli köpük tasarımlarının ve formasyon özelliklerinin EPB TBM performansına (net kazı hızı, günlük ilerleme hızı, kesici kafa torku ve gücü, TBM itme kuvveti) olan etkileri incelenerek en önemli etken parametreler belirlenmiştir. Literatürde bulunmayan yeni bir köpük optimizasyon yöntemleri (cep tipi vane shear ve Mini EPBM) geliştirilmiştir. EPB TBM performansı ile deneysel parametreler arasında istatistiksel ilişkiler araştırılarak, zemin şartlandırmanın performansa etkileri belirlenmiş ve görgül (ampirik) tahmin modelleri geliştirilmiştir. En son olarak,

genel bir değerlendirme yapılarak, sonuçlar ile öneriler belirlenmiş ve raporlandırılmıştır.

Çizelge 1.3: Ofis çalışmalarının içeriği, ilgili çalışmalar, parametreler ve bazı kısa notlar.

3 OFİS ÇALIŞMALARI	
3.1 ARAZİDE VE LABORATUVARDA YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALARIN GENEL DEĞERLENDİRMESİ	
3.1.1	Arazi tipi deney aletleri ile yapılan çalışmaların değerlendirilmesi
3.1.2	Klasik laboratuvar deney aletleri ile yapılan deneysel köpük optimizasyonu çalışmalarının değerlendirilmesi
3.1.3	Laboratuvar (cep) tipi deney aletleri ile yapılan deneysel köpük optimizasyonu çalışmalarının değerlendirilmesi
3.1.4	Kazı aynası simülasyonu (basınçlı vane shear) deneyleri ile köpük optimizasyonu çalışmalarının değerlendirilmesi
3.1.5	Değişik köpük optimizasyonu yöntemlerinin ve sonuçlarının kıyaslanması
3.2 DEĞİŞİK KÖPÜK OPTİMİZASYONU YÖNTEMLERİ VE SONUÇLARININ KIYASLANMASI	
3.3 EPB TBM PERFORMANS TAHMİN MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ	
<i>(NET KAZI HIZI, GÜNLÜK İLERLEME HIZI, MAKİNE KULLANIM ORANI, KESİCİ KAFA DÖNÜŞ HIZI-TORKU-GÜCÜ VE TBM İTME KUVVETİNİN TAHMİNİ)</i>	
3.3.1	İstatistiksel (ampirik, görgül) performans tahmin modellerinin geliştirilmesi
3.3.1.1	Performans parametrelerinin formasyon/zemin numunelerinin arazi penetrasyon direnci ve arazi vane kayma mukavemeti ile ilişkileri
3.3.1.2	Performans parametrelerinin formasyon/zemin numunelerinin laboratuvar (cep tipi) penetrasyon direnci ve laboratuvar (cep tipi) vane kayma mukavemeti ile ilişkileri
3.3.1.3	Performans parametrelerinin formasyon/zemin numunelerinin fiziksel özellikleri ile ilişkileri (yoğunluk, doğal nem içeriği, kıvam limitleri, geçirgenlik, kil-silt-kum yüzdesi)
3.3.1.4	EPB TBM performansını etkileyen en önemli parametrelerin belirlenmesi ve istatistiksel (ampirik, görgül) performans tahmin modellerinin geliştirilmesi
3.4 MODELLERİN DOĞRULUKLARININ TEST EDİLMESİ, ARAZİ PERFORMANS VERİLERİ İLE MODELLERİN TAHMİN SONUÇLARINI KIYASLAMA VE MODEL KALİBRASYONU	
3.4.1	İstatistiksel (ampirik, görgül) modellerin doğruluğu
3.4.2	Deteministik modelin doğruluğu
3.4.3	Modellerin kalibrasyonları ile ilgili öneriler
3.5 GENEL DEĞERLENDİRME, SONUÇLAR, ÖNERİLER VE RAPORLANDIRMA	

1.4 Sınırlayıcı Faktörler

Belirlenen optimum köpük parametrelerini sahada tam anlamıyla uygulama imkanı bulunamamıştır, kısmen uygulanmıştır. Bunun başlıca nedeni, uygulamacıların iş organizasyonlarını aksatacak girişimlere sıcak bakmamalarıdır. Daha sonraki çalışmalarda bunun gerçekleşmesine çalışılmalıdır. Kısmi uygulamada (Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli'nde), yeni köpük tasarımının kısmen uygulanarak kısmen başarı sağlandığı, EPB TBM'in net kazı hızının %30'un üzerinde arttığı görülmüştür. Tasarlanan köpük parametre değerlerinin tam olarak uygulanması sonucunda bu artışın daha yüksek olacağı kesindir.

Numune alınan yerlerin kazı aynalarında (Ayvalı 2 ve Akfırat Atıksu Tünelleri), formasyonun / zeminin karakteristiklerini belirlemek üzere cep penetrometresi, statik konik penetrometre ve cep tipi vane shear ve arazi tipi vane shear deneyleri yapılmıştır. Bu cihazlar ile sahada yapılan deneylerin çok verimli ve güvenilir

olmadığı görülmüştür. Bunun başlıca nedeni kazı aynalarının oldukça homojen olmaması ve çakıl içermesidir. Ancak, homojen ortamlar buldukça deneysel çalışmalara devam edilmelidir. Bu nedenle bu cihazlardan cep penetrometresi ve cep tipi vane shear cihazlarının laboratuvar deneylerinde zemin + su ve zemin + köpük karakterizasyonu deneylerinde kullanılmasına karar verilmiştir. Bu cihazların laboratuvarında yapılan zemin şartlandırma deneylerinde kullanılmasına literatürde rastlanmamıştır, bu bir ilk olmuştur. Ancak, cep tipi penetrometre laboratuvarında verimli olmamıştır, numune içine gömüldüğünden ölçüm yapılamamıştır; cep tipi shear vane ölçümleri başarıyla yapılmıştır ve klasik köpük optimizasyonu ile ilişkisi araştırılmıştır. Ancak, istatistiksel olarak daha güvenilir ilişkiler elde etmek için cihazın kullanılabilirdiği saha / veri sayısının artırılması gerekmektedir.

Tez kapsamında yapılan zemin şartlandırma deneyleri atmosferik basınçta yapılmış olup gerçek bir EPB TBM kazısında ise şartlandırma genellikle basınçlı ortamda yapılmaktadır; bu durum tez kapsamında yapılan araştırmalar bakımından sınırlayıcı olmuştur. Ayrıca yukarıda bahsedilen basınçlı ortamda zemin şartlandırmasını simüle etmek için geliştirilen Mini EPB test düzeneği maddi olanaksızlıklar nedeniyle tamamlanamamış ve basınçlı ortamda şartlandırma çalışmaları yapılamamıştır.

Tez kapsamında tünel aynasındaki örselenmemiş zeminde saha deneyleri yapılması planlanmış fakat gerek kazı sırasında tünel aynasına erişilememesi gerekse erişilebilen durumlarda zemin özelliklerinin yapılacak saha deneyleri için uygun olmaması nedeniyle yapılamamıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Kentsel Alanlarda Mekanize Tünelcilik

Günümüzde dünyadaki şehirler, ulaşım ve altyapı sistemleri ile yerleşim ve endüstriyel alanlara bağlanmıştır. Milyonlarca insanın yaşadığı bu şehirler sıkışık alanlara hapsolmuştur. Yapılan çalışmalara göre (Gugliementi ve diğ, 2007), önümüzdeki yıllarda kentsel nüfusun hızla artacağı ve küçük ölçekli şehirlerin bile mega şehirlere dönüşeceği varsayılmaktadır.

Bu tür eğilimler, sınırlı kentsel alanın, mevcut ve yeni çeşitli şehir işlevlerine uygun bir şekilde tahsis edilmesini ve tekrar dağıtılmasını gerektirmektedir. Artan dünya nüfusunun ve buna paralel olarak şehir planlamanın getirdiği zorluklar (yeni altyapılar için sınırlı yeryüzü alanları), politikacıları, planlamacıları, mühendis ve mimarları yeraltı alanlarının kullanımına itmiştir.

Tarih boyunca kentsel alanlarda yeraltı alanları çoğunlukla ulaşım ve altyapı sistemleri için kullanılmış olup günümüzde ise bunlara ek olarak barınma, depolama, ticaret, enerji üretimi gibi birçok amaç için kullanılmaktadır. Uluslararası Tünelcilik Derneği (ITA) tarafından 2012 yılında yayınlanan “ Neden Yeraltı” konulu raporda; kentsel alanlarda inşa edilen yeraltı yapılarının türü ne olursa olsun yeryüzü alanlarını boş bırakıp şehirlerin yaşam kalitesini artırmanın amaçlandığı belirtilmiştir. Şehirlerarası bağlantılar söz konusu olduğunda uzun metrajlı tüneller zamandan tasarruf etmek ve maliyetleri düşürmek (daha kısa yolculuklar ve daha az yakıt tüketimi), yolculuk emniyetini en üst düzeye çıkarmak ve çevresel etkileri en aza indirmek suretiyle tercih edilmelidir denilmiştir (Gugliementi ve diğ, 2007).

Assis (2003) tarafından dünya çapında yer altı yapılarının giderek artan talep perspektiflerinin analizi yapılmış ve inşa yöntemleri üzerinde durulmuştur. Gelecekte yeraltı alanının geniş ölçekli kullanımı açısından ulaşım (metrolar, otoyollar, demiryolları), altyapı hizmetleri (su temini, kanalizasyon, telekomünikasyon, ısıtma) gibi tipik kentsel işlevler yer altı alanını kullanmaya yönelik umut verici bir teşvik grubunu oluşturmaktadır. Bu tipik kentsel işlevleri yer altına almanın bir başka güçlü

nedeni, görsel etkilerini azaltmak, ses kirliliğini sınırlamak ve yeryüzü ortamını korumaktır.

Pelizza'ya (1996) göre "yeraltına gitmek bir zorunluluk değildir: çeşitli çözümler arasından sosyal ve ekonomik yönlerden yaşam kalitesini artıran makul bir seçimdir.

2.1.1 Kentsel alanda tünelticiliğin getirdiği zorluklar

Kentsel alanlardaki altyapıların ve ilgili yeraltı yapılarının geliştirilmesi, özellikle sürdürülebilir kalkınma için gereken şartları karşılamalıdır: Bu zorunluluk proje sahiplerini, planlamacıları ve yüklenicileri yeraltı yapılarının inşası sırasında kalite, emniyet, zaman ve maliyet hedeflerini aynı anda garanti altına alarak şehirlerin günlük yaşam faaliyetlerini olabildiğince az rahatsız etmeğe itmiştir.

Kırsal alanlarda tünel açma ile karşılaştırıldığında, kentsel alanlarda tünel açma, aşağıda özetlenen bazı önemli özelliklere ve kısıtlara sahiptir (Gugliementi ve diğ., 2007).

- Yerleşim planı ve tasarımı tünelin son kullanımı ve işlevsel yönleriyle ilişkilidir. Bu nedenle tünel güzergâh seçimi her ne kadar yeraltında üçboyutlu planlamanın özgürlüğüne sahip olsa da mevcut yeraltı yapıları, bina temelleri ve yerüstü yapıları tarafından sınırlandırılmıştır.
- Kentsel alanda tünelticilik faaliyetleri maliyet ve işletme gibi nedenlerle genellikle sığ derinliklerde gerçekleştirilir. Buda beraberinde jeolojik, yeraltı yapıları ve yer üstü etkileri gibi sorunların artmasına yol açmaktadır.
- Sığ derinlikteki jeolojik formasyonlar genellikle gevşek zeminler, alüvyon çökeltileri veya yapay dolgular içerir. Düşük zemin kalitesi, tünel tasarımı ve inşaat kontrolü için kilit faktörlerden biridir.
- Kentsel alanlarda yeryüzünün ilk seviye derinliklerinde bulunan altyapı sistemleri (elektrik, iletişim, su, kanalizasyon hatları) tünelticilik faaliyetleri kaynaklı yeryüzü oturmaları nedeniyle hasara uğrayabilir, bu nedenle tünel açılmadan önce mevcut sistemlerin analizi yapılarak güçlendirilmesi veya tamamen taşınması gerekmektedir.
- Dünyadaki birçok şehirde yeraltında saklı kalmış tarihi kalıntılar mevcuttur, tünel güzergâhı ve tünel için kullanılacak istasyon veya kuyular planlanırken bu kalıntıların göz önüne alınması zorunludur.

- Sığ derinliklerde gerçekleşen tünelticilik faaliyetleri genellikle yeryüzü oturmalarına neden olur. Bu oturmaların büyüklüğü zemin kalitesi, tünel açımı sırasında zemin davranışı, tünel aynasında stabilite kontrolü, yeraltı suyu gibi faktörlere bağlıdır.
- Tünel açımı sırasında oluşabilecek yeryüzü oturmalarının yeryüzünde bulunan yapılara vereceği zararın normal ve anormal koşullar göz önünde tutularak titizlikle değerlendirilmesi gerekmektedir.
- Yeryüzü oturmalarının ve bundan kaynaklı risklerin gerekli önlemler alınarak minimum düzeye çekilmesi zorunluluktur.
- Kentsel alanlarda gerçekleştirilen tünelticilik faaliyetleri o bölgedeki insanlarla etkileşim halindedir, tünelticilik faaliyetleri sırasında oluşacak sorunlar dikkatle analiz edilerek halk tarafından da kabul gören çözümler üretilerek çözümlenmelidir. Bu çözümler şantiye alanlarının doğru planlanması, toz ve gürültü emisyonlarının kontrolü, güvenlik gibi konuları kapsayan bir planlamayı ihtiva etmelidir.
- Tünel inşası sırasında kapsamlı geoteknik, yapısal ve çevresel izleme planları ortaya konulmalı ve titizlikle takip edilmelidir.
- Kentsel alanlarda inşa edilen tünel projeleri genellikle politik açıdan stratejik öneme sahip projelerdir. Politikacılar, proje finansörleri ve kamuoyu projenin maliyet ve süre açısından kesinliğini talep edeceklerdir.

Kentsel alanlarda açılacak tünellerde kamuoyu projenin gelişimini büyük ölçüde etkileyebilir. Dolayısıyla halk proje konusunda doğru bilgilendirilmeli ve görüşlerini dile getirme ve projeye hakkında bilgi alma imkânı sağlanmalıdır Ayrıca, kamu güvenliği için her türlü çaba sarf edilmeli, böylelikle proje kamuoyu tarafından kabul edilebilir ve potansiyel olarak olumsuz bir kamuoyunun olumsuz etkileri en aza indirgenmiş olur (Gugliemanti ve diğ, 2007).

2.1.2 Projelerin başarısı için doğru yaklaşım

Normal koşullar altında, bir tünelin tasarımı ve müteakip inşasındaki temel hedef, çalışmaların bütçe dâhilinde gerçekleştirildiğinden, zaman kısıtlamalarına uyulduğundan teknik şartnamelere ve gereksinimlere karşılık geldiğinden emin olmaktır. Bu hedefler tünel projesinin temelini oluştursa da kentsel alanlarda açılacak tüneller için yeterli değildir. Şehir içi tünelticiliğinde tasarım ve inşa yöntemini

etkileyen farklı faktörleri dikkate almak gerekmektedir. Bu faktörler aşağıda özetlenmiştir(Gugliementi ve diğ, 2007).

- Üst ve altyapıları dikkate alarak tünelcilik kaynaklı yeryüzü bütünlüğünü olabildiğince korumak.
- Tasarım sırasında belirlenen ve zemin tipi, tünelcilik metodu ve üstyapılar dikkate alınarak sınırlandırılan yeryüzü oturma limitlerine uyulması.
- Yapı hasarı ve/veya can kaybına neden olabilecek tünel aynası çökmelerine engel olunması.

Kırsal kesimlerde açılan bir tünelin kazı sırasında çökmesi sonrasında alınacak önlemlere ve kazıya tekrar başlamak için yapılacak iyileştirme çalışmaları sırasında kazı faaliyetleri uzun süreler boyunca durabilir, bu durum proje maliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun yanında kentsel alanlarda açılan tünellerde insan popülasyonunun yoğun olduğu bir bölgede yaşanabilecek bir çökme yapı hasarı ve/veya can kayıplarına neden olarak projenin tamamen veya çok uzun bir süre durmasına neden olabilmektedir. Bu gibi sorunlara yol açabilecek riskler tamamen yok edilemese de alternatif çözüm yolları üretilerek minimize edilmelidir.

Mevcut risklere karşı alınacak ilk önlemin uygun inşaat yönteminin seçilmesi olduğu açıktır. Son on yıllarda elde edilen büyük teknolojik gelişmeler göz önüne alındığında, mekanize tünel açma yöntemi, tünelcilik projelerini fizibil hale getirebilir ve aynı zamanda istenmeyen etkileşimleri en aza indirebilir.

Günümüz koşullarında, mekanize kazı teknolojilerinde son 40 yılda elde edilen teknolojik gelişmeler, kentsel alanlarda yeryüzü oturmalarını sınırlayıp üstyapılara minimum zarar vererek sığ derinliklerde, zayıf zeminlerde ve yeraltı su seviyesinin altında tünel açmaya imkân sağlamaktadır.

Konvansiyonel tünel açma yöntemleri ile karşılaştırıldığında, kentsel alanlarda mekanize tünel açma yöntemlerinin tercih edilmesinin nedenleri aşağıda özetlenen avantajları nedeniyledir (Gugliementi ve diğ, 2007).

- Çalışma ortamı madencilik şartlarından çok fabrika üretimine benzediği için çalışanlar için daha fazla konfor ve güvenlik sunmaktadır.
- Tüm tünelcilik faaliyetleri için inşa döngüsünün (kazı, tahkimat, nakliye) otomasyona uygun hale getirilerek hızlandırılması ve buna bağlı olarak inşa süresinin kısalması.

- Kazılan malzeme miktarı, tünel aynasına uygulanan karşıt basınç, tünel çevresindeki yeryüzü oturmaları gibi parametrelerin ölçülerek kontrol altında tutulabilmesi.
- Düşük gürültü değerleri, konvansiyonel kazıya oranla düşük toz oluşumu ve yeraltı su tablasının minimum düzeyde etkilenmesi.
- Tünel kaplaması olarak prekast segment kullanımı, dolayısıyla kalitenin kontrol edilebilmesi ve bitmiş işin kalitesinin artırılması.
- Konvansiyonel tünelcilik metotları ile kıyaslandığında çoğunlukla daha düşük kazı maliyetleri.

Özetle, günümüzde kentsel alanlarda mekanize tünelcilik methodlarına olan talep artmaktadır, teorik olarak yeryüzünde inşa edilen herhangi bir altyapı projesi rahatlıkla yeraltında da inşa edilebilir (Bilgin vd., 2014).

2.2 Mekanize Kazı Sistemleri

Mekanize kazı jeolojik ortamın makineler aracılığı ile kazılması işlemi olarak tanımlanabilir. Yeraltı madenciliğinde kazı işlemleri, klasik kazı ve mekanize kazı olmak üzere ikiye ayrılır. Laboratuvar ve arazi çalışmaları uzun zamandır süren fakat endüstriye geçirilememiş olan, termal parçalama, kimyasal parçalama ve mikrodalga gibi kazı yöntemleri de bulunmaktadır.

2.2.1 Tam cepheli tünel açma makinaları

Tam cepheli tünel açma makineleri günümüzde 3 ile 17,6 m çaplarındaki ayna yüzeylerini, belirli kesme derinliğinde bir defada kazabilen makinelerdir. Tüm donanım uzunluğu 120-150 m kadardır. Çok kısa olan kısmi cepheli makinelerle 10-12 m yarıçapında virajlar / dönemeçler dönülebilmekte, hali hazırdaki tam cepheli makinelerle 200-250 m yarıçapında dönemeçler dönülebilmektedir. Tam cepheli tünel açma makineleri, kazı işlemi, pasa nakliyatı ve tahkimatı yapabilen tek birimde birleştirilmiş mekanik ve elektrik parçalar birliğidir. Bu makineler; tam hizalama, pasa nakliyatı, hayati hizmet sağlama sistemi (hava, su, enerji) ve tahkimat gibi alt yapı sistemlerini içine alan geniş kapsamlı mekanize kazı sisteminin bir parçasıdır. Yedekleme alt sistemi bileşenlerinin çoğu tam cepheli makinenin arkasında çekilmekte olan kızak ya da platformlar üzerine kurulmuştur. Yapısal olarak siltli (kalkanlı) ve şiltsiz (kalkansız) olabilirler. Kalkansız makineler stabil kaya

ortamlarında kullanılmaktadır. Kalkanlı makineler ise kalkanların varlığı nedeniyle kırıklı çatlaklı formasyonlarda kazı yapabilme özelliğine sahiplerdir.

2.2.1.1 Tarihsel gelişim

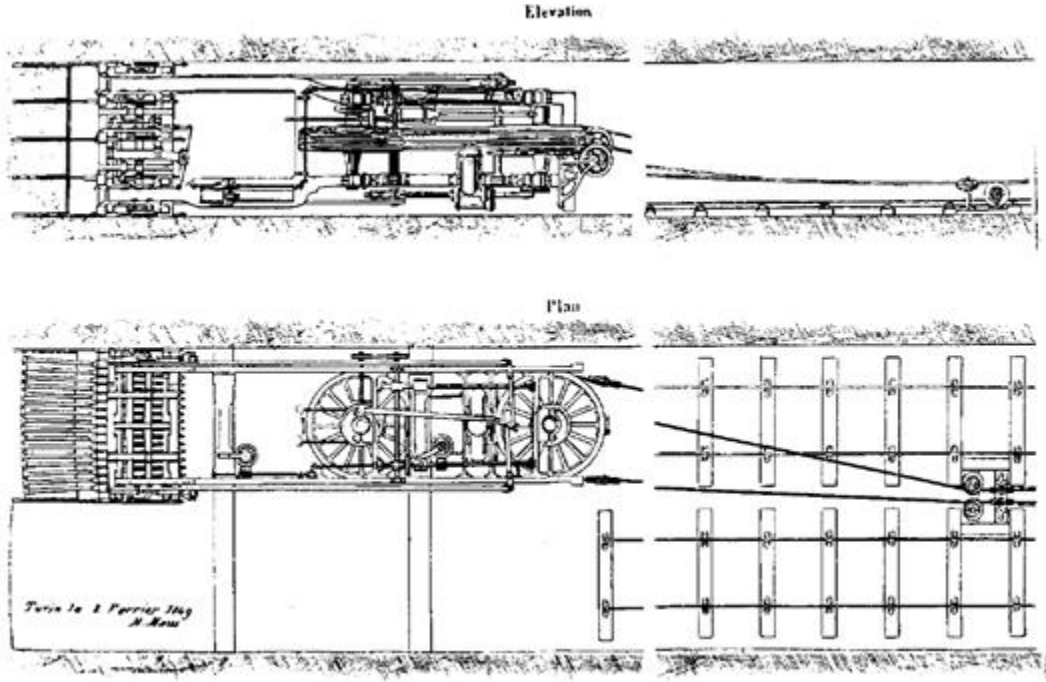
Tünelciliğin gelişimi 19. Yüzyıl başlarında başlayan endüstrileşmeye paralel olarak demiryolu ağlarının kurulması ile hızlanmıştır. Tünelcilikte mekanizasyonun geliştirilmesi ilk olarak sert kayada delme patlama için kullanılan deliklerin verimli olarak delinmesi amacıyla olmuştur. Ayrıca tüm kazının makine ile yapılması için girişimler de olmuştur.

İlk tünel açma makinelerinin geliştirilmesinin öyküsü, Manş Tüneli'nin keşif tünellerinin Beaumont makineleri tarafından teknik olarak başarılı bir şekilde kazılmasının yanı sıra, çeşitli sorunlardan dolayı başarısız olan birçok girişimi de içermektedir. Mevcut malzemelerin teknolojik sınırlamaları veya tünel açılacak kayanın TBM için uygun olmaması nedeniyle birçok proje başarısız olmuştur. TBM tünelciliğinin ilk uygulamaları kaya kütlelerinin TBM kazısı için ideal şartları sunduğu durumlarda başarılı olmuştur.

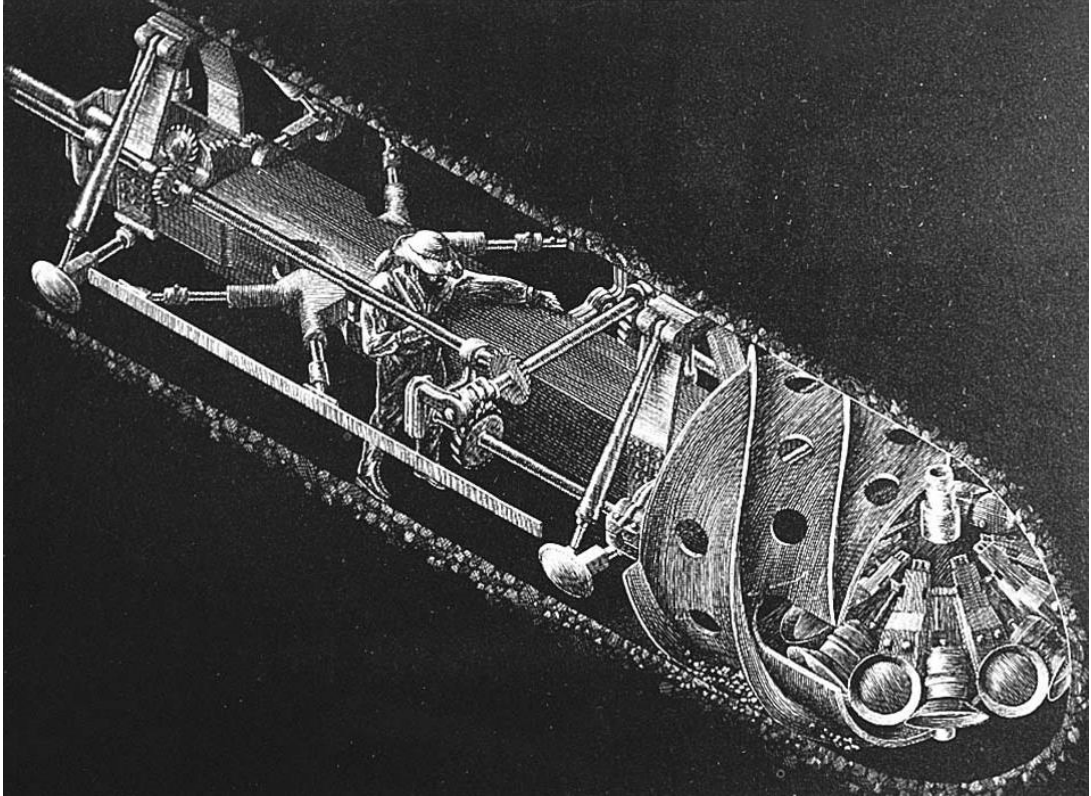
Geliştirilen ilk tünelcilik makineleri günümüz tünel açma makinelerinden oldukça farklıdır. Tam cephe tünel kazısı yerine aynada oyuk açarak kalan kısmın delme patlatma yöntemiyle kazılması prensibine göre çalışmaktadırlar. Bu prensipte çalışan ilk makine 1846 yılında Belçikalı mühendis Joseph Maus tarafından geliştirilmiş ve Mount Cenis Tüneli kazısında kullanılmıştır (Şekil 2.1).

Günümüzde kullanılan tünel açma makinelerinin atası sayılabilecek ilk makine Charles Wilson tarafından 1851 yılında geliştirilmiştir (Şekil 2.2). Hoosac tüneline kazısında kullanılan bu makine sadece 3 metre ilerleyebilmiş disk keskinde aşınma problem nedeniyle tünel kazısı delme patlatma yöntemi ile tamamlanmıştır.

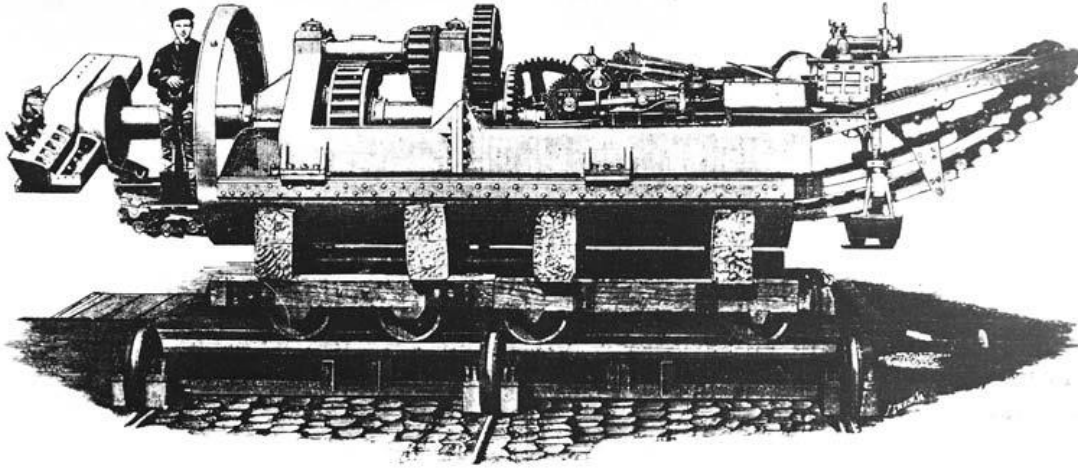
Beaumont tarafından geliştirilen tünel açma makineleri Manş Tüneli kazısında 1882-1883 yılları arasında proje politik sebeplerden duruncaya kadar başarılı şekilde kullanılmışlardır (Şekil 2.3). Bu makinelerle Fransa tarafında 1840 m İngiltere tarafında ise 1850 m tünel kazısı yapılmış olup maksimum günlük ilerleme değeri 25 m olarak ölçülmüştür (Maidl ve diğ, 2012).



Şekil 2.1: Joseph Maus tarafından geliştirilen tünellerlik makinesi (Stack,1982).

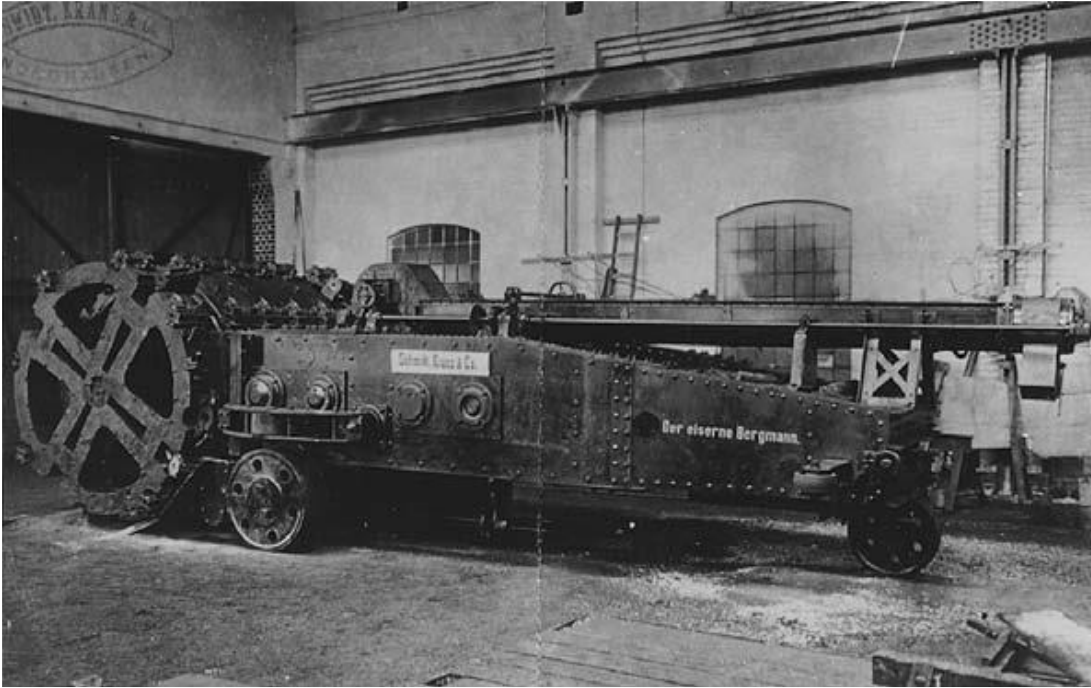


Şekil 2.2: Charles Wilson tarafından geliştirilen ilk tüneller açma makinesi (Maidl ve diğ., 2012).



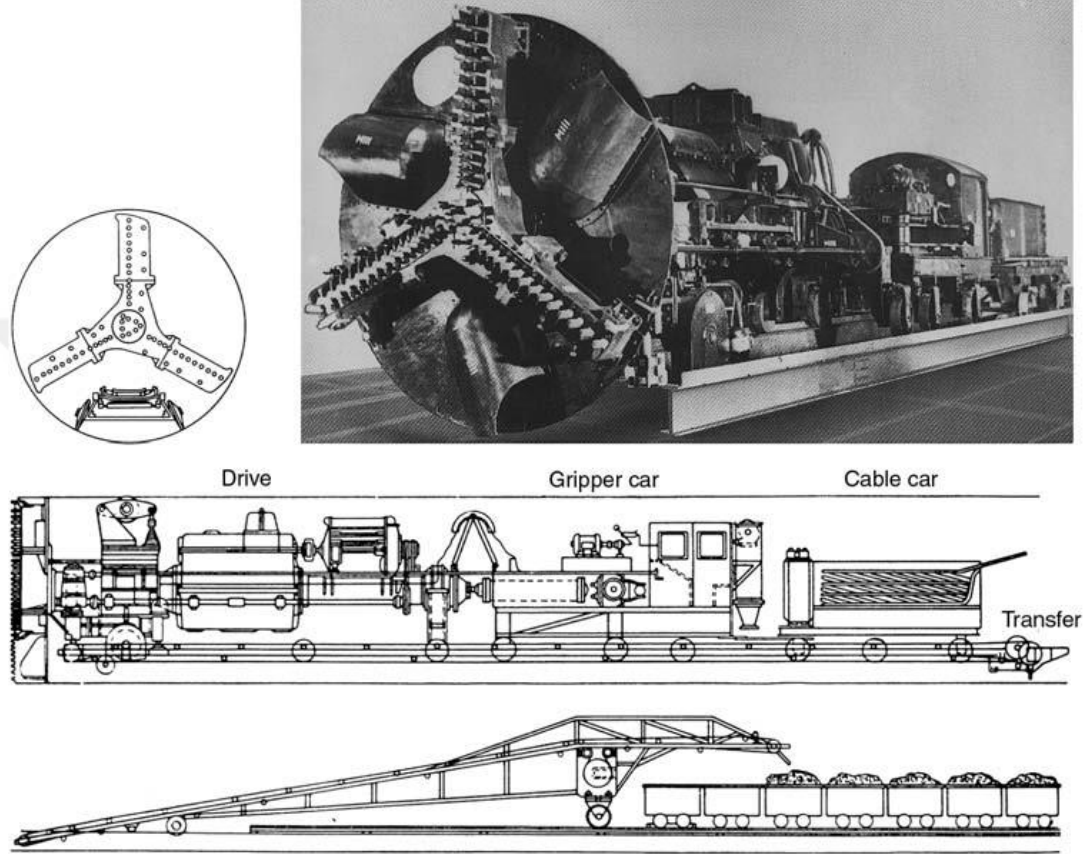
Şekil 2.3: Manş Tüneli kazısında kullanılan tünel açma makinesi (Maidl ve diğ, 2012).

Sonraki yıllarda tünelticilik makinelerinin gelişimi anlamında kayda değer gelişmeler yaşanmamıştır. Tünel açma makineleri bu dönemlerde tünel açma yerine madencilik faaliyetlerinde yumuşak kaya kazısında kullanılmışlardır. 20. Yüzyılın ilk yarısında potas madenlerinde galeri kazısında kullanılmak üzere geliştirilen “Eiserner Bergmann” isimli makine kesici kafa üzerine monte edilmiş çelik kesicilerden oluşmuştur (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Galeri açma makinesi “Eiserner Bergmann” (Maidl ve diğ, 2012).

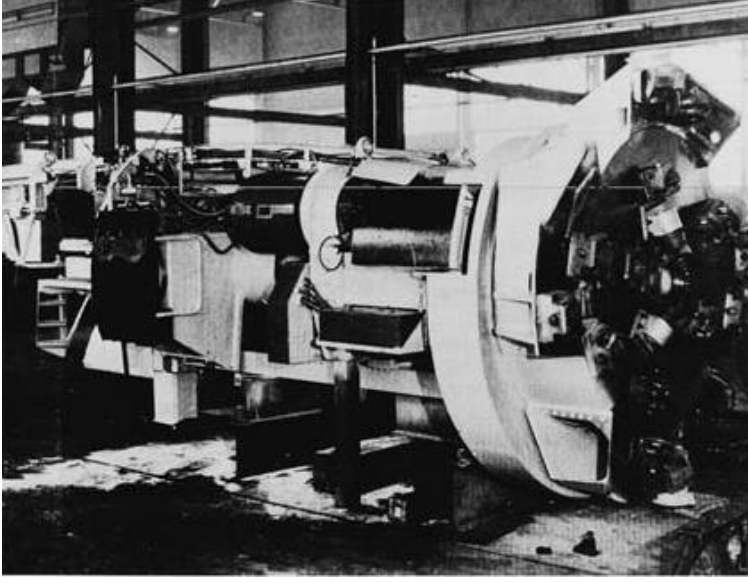
Yeni nesil galeri açma makineleri 1931 yılında Schmith&Kranz firması tarafından üretilmiştir (Şekil 2.5). Makine delici kısım, kablo arabası ve yükleme bandı gibi ana kısımlardan oluşmuş ve vardiya başı 5m ilerleme hızları kaydedilmiştir, fakat makinenin ağırlık, boyut ve kısıtlı hareket kabiliyeti gibi nedenlerden dolayı kullanımını sınırlı olmuştur.



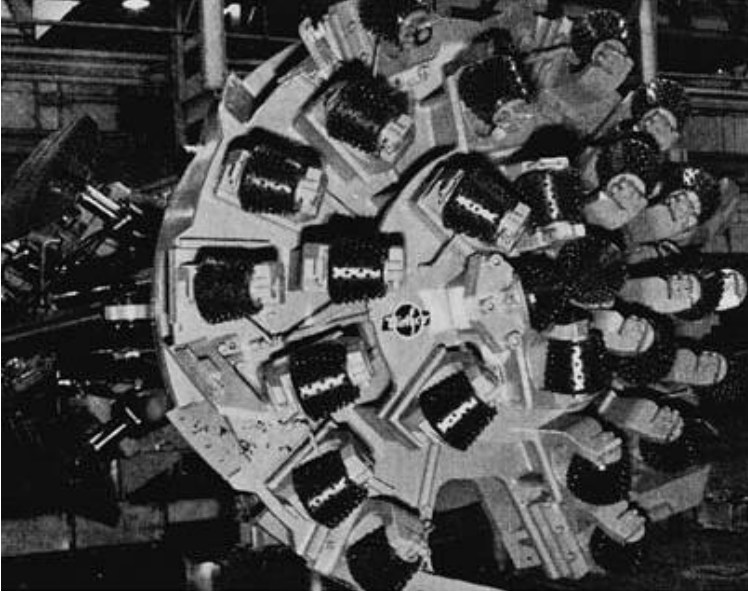
Şekil 2.5: Schmidt Kranz tarafından geliştirilen galeri açma makinesi (Maidl ve diğ, 2012).

Günümüz tünel açma makinelerinin gelişmesi 1950'li yıllarda Amerikalı maden mühendisi James Robbins tarafından geliştirilen OPEN GRIPPER tipi tünel açma makinesi ile başlamıştır (Şekil 2.6). Güçlendirilmiş çelikten imal edilmiş disk keski kullan bu makine Torontoda Humber atık su tüneline kullanılmış ve kumtaşı, kireçtaşı formasyonunda günlük 30 m ilerleme değerlerine ulaşmıştır.

1960'lı yıllarda Demag ve Wirth gibi Alman üreticiler tünel açma makineleri üretmeye başlamışlardır, üretilen bu makineler sert kaya kazısı yapmak üzere tasarlanmıştır (Şekil 2.7). Kesici kafalarda ilk başlarda sondaj bitleri kullanılmış daha sonraki yıllarda gelişen disk keski sertleştirme teknolojisiyle bu keski kesici kafalara monte edilerek sert kaya kazısı yapılmıştır (Maidl ve diğ, 2012).



Şekil 2.6: Robbins tarafından geliştirilen ilk tünel açma makinesi (Maidl ve diğ., 2008).

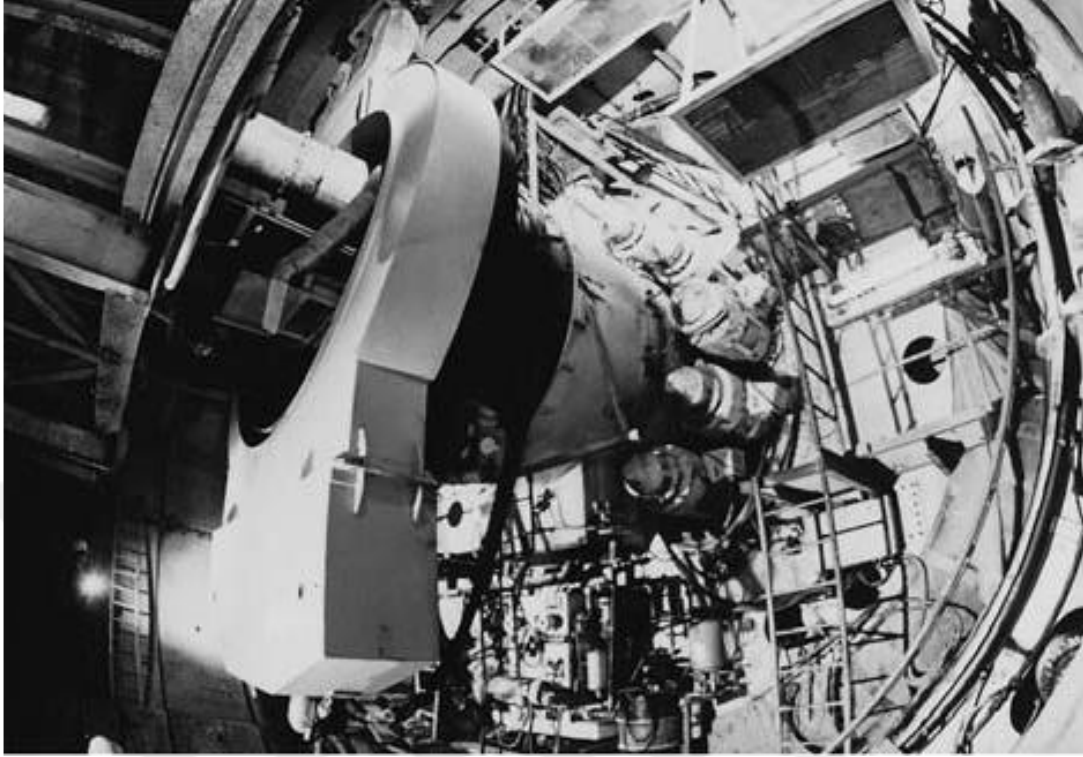


Şekil 2.7: Wirth tarafından geliştirilen tünel açma makinesi (Maidl ve diğ., 2008).

1970 ve 80'lerdeki gelişmelerde ise gevrek kayalarda ve büyük çaplarda açılan tünellerde kazı aynasının ayakta kalma süresinin önemi ön plana çıkmıştır. 1963 yılında Mangla barajı için 11,17 m ve 1971 yılında Heitersberg tüneli için 10,65 m çaplarında gripper tipi makineler kullanılmış ve açılan boşluklar, çelik tahkimat, bulon ve çelik hasırlı püskürtme betonla desteklenmiş fakat istenilen ilerleme hızlarına ulaşamaması nedeniyle bu makinelerin kullanımı verimli olmamıştır.

1980 yılında Gubrist Tünelinin kazısında kullanılmak üzere, Heitersberg tüneline kullanılan pabuçlu TBM (Şekil 2.8) in modifiye edilip segment kaplamalı kalkanlı

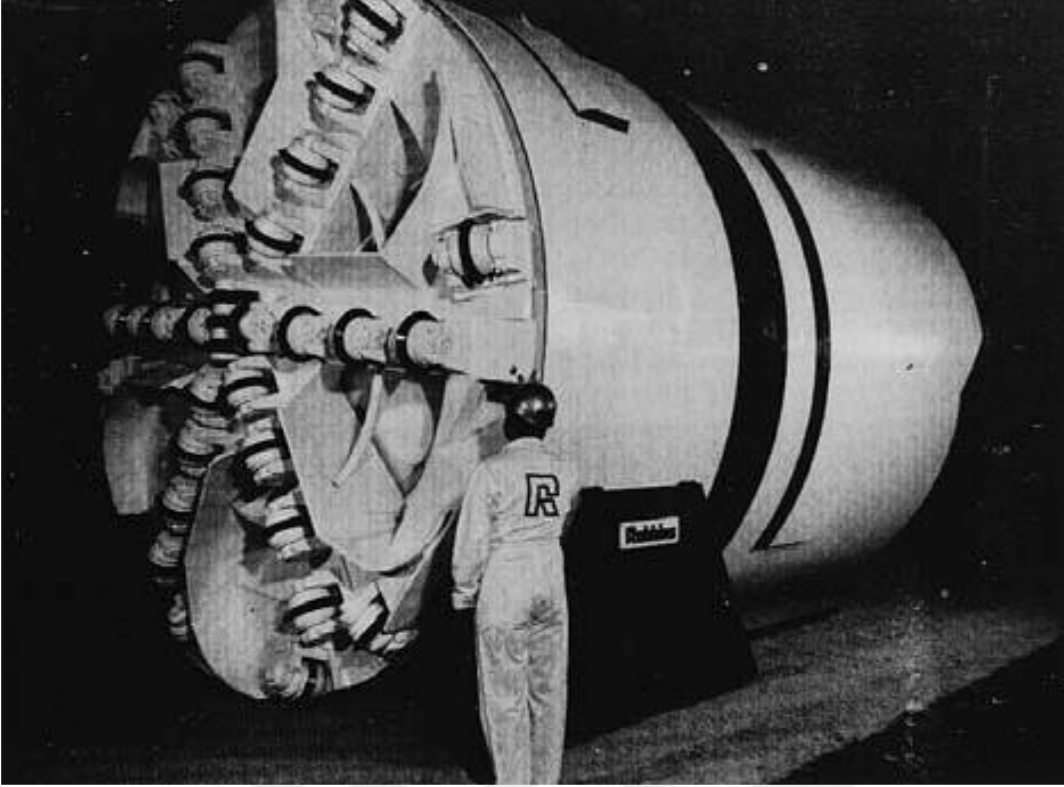
TBM'e dönüştürülmesiyle büyük çaplı tüneller için TBM kullanımı mümkün olmuştur.



Şekil 2.8: Gubrist tüneline kullanılan tek kalkanlı TBM (Maidl ve diğ, 2008).

Aynı dönemlerde Carlo Grandori, Robbins firması ile işbirliği yaparak çift kalkanlı tünel açma makinesi konseptini geliştirmiştir (Şekil 2.9). Bu makinenin geliştirilme amacı yıllardır optimum jeolojik koşullarda kendini kanıtlayan pabuçlu TBM'lerin zor jeolojik koşullara uygun hale getirilmesiydi. Çift kalkanlı TBM ler ilk kullanıldıkları 1972 yılından beri güvenilirliğini kanıtlamış ve günümüzde yüksek ilerleme hızlarına ulaşmışlardır.

TBM üreticileri optimum koşullarda kendini kanıtlamış olan pabuçlu TBM'lerin zor jeolojik koşullarda çalışması amacıyla açılan tünel boşluğunu destekleyecek ve tahkimat kurulumunu kazı sonrası gerçekleştirecek makine tasarımları üzerinde çalışmışlar ve kalkanlı TBM teknolojisini geliştirmişlerdir.



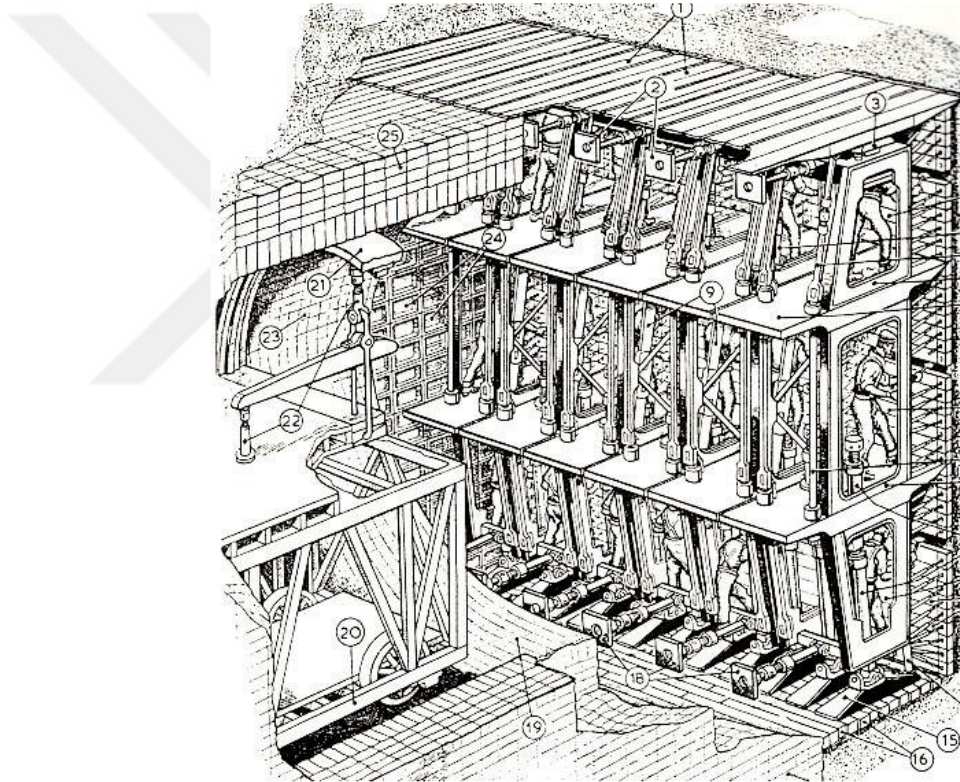
Şekil 2.9: Grandori tarafından geliştirilen ilk çift kalkanlı TBM (Maidl ve diğ, 2008).

2.2.2. Pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makineleri (EPB – TBM'ler)

Arazi basıncını dengeleme esasına göre çalışan (EPB) makineler ilk olarak Japonya'da 1960-70'li yıllarda görülmeye başlamıştır. Kohesif olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda ve kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu makineden faydalanılır. Temel çalışma prensibi su gelimini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, "bizzat arazi ve içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkan verilmesi" diye tanımlanabilir. Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir. Bu destekleme basıncının tünel üzerindeki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir. Bu makineler 5 bar'a kadar ulaşan basınçlar altında çalışabilecek şekilde imal edilebilirler. En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının % 10-15 veya daha az olduğu durumlardır. EPB makinesi çok sert kayaçlardan (diskli) çok yumuşak olanlarına (kalem kesikli) kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonlarında kullanılmak üzere tasarımılandırılabilirler.

2.2.2.1 Tarihsel gelişim

19. yüzyıl başlarına kadar açılan tüneller ahşap tahkimat ve sonrasında tuğla kaplama ile tahkim ediliyordu. Bu yöntem sağlam olmayan zemin ve kırıklı çatlaklı kaya formasyonlarında kullanılsa da su tablasının altında açılacak tünellerde kullanılamıyordu. 1825 yılında İngiliz mühendis Sir Marc Brunel geliştirdiği kalkanlı kazı metodunu Thames Tüneli kazısında başarıyla kullanmış ve dünyayı yeni bir tünelcilik metodu ile tanıştırmıştır. Dikdörtgen şekilli olan bu kalkan 3 kattan oluşmakta ve her kata 12 hücre bulunmaktadır toplam 36 işçi tarafından yapılan ayna kazısında her bir seferde 150 mm'lik ilerleme kaydedilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Brunel tarafından geliştirilen kalkan(Carrol, 2005).

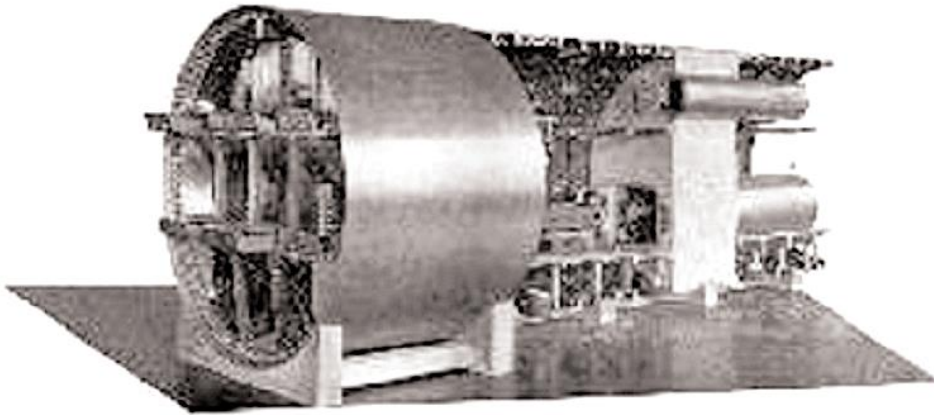
1864 yılında Peter Barlow tarafından silindirik tünel kalkanı geliştirilmiş ve Thames nehri altında açılan yaya tünellerinin kazısında kullanılmıştır. Greathead Shield olarak adlandırılan bu kalkan silindirik şekilli su geçirmez ayna bölme sahiptir (Şekil2.11). Killi formasyon kazılarında bu bölme açık konuma getirilerek elle kazı işlemi yapılır, su gelinine sahip kumlu formasyonlarda ise ayna duvarı kapatılarak kazı günümüz slurry tip (çamur basınçlı) TBM'lerine benzer metotla kum ve su borular vasıtasıyla aynadan çekilerek yapılır. Karışık ayna kazısında ise işçiler

basınçlı hava verilen ayna bölümüne geçerek kazıyı yaparlar, Londra Underground raylı sistemlerin büyük bir bölümü Great Shield kullanılarak kazılmıştır (Carrol, 2005).



Şekil 2.11: The Greathead Shield (Carrol, 2005).

Steinway Tüneli kazısı sırasında geliştirilen hidrolik kalkan (Şekil 2.12)günümüz kalkanlı tünel açma makinelerinin ilk örneklerindendir, tünel aynası su baskınlarına karşı metal silindirik kalkan ile yalıtılmış olup kazı işlemi basınç altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.12: Steinway Tüneli kazısında kullanılan hidrolik kalkan(Carrol, 2005).

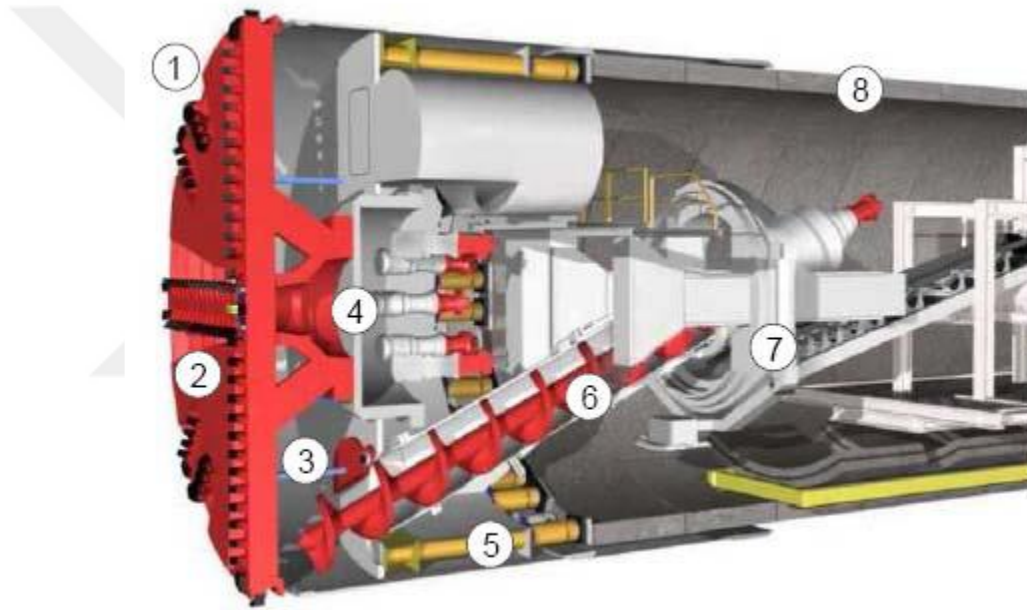
İngiltere’de 1964 yılında John Barlet tarafından geliştirilen slurry (çamur basınçlı) tünelticilik makinesi TBM teknolojisinin gelişimde devrim sayılmaktadır. Bu makineler 1960’lı yıllarda Japonlar, 70’lerde İngilizler ve Almanlar tarafından açılan tünellerde yoğun olarak kullanılmıştır. Slurry makilerdeki killi zeminlerde bulamacı

ayırma prosesindeki zorluklar Japonları 1970'li yılların ortalarında Pasa Basıncılı Tünel Açma Makinelerini (EPB TBMs) geliştirmeye itmiştir.

Günümüzde yumuşak formasyonların kazısında, aktif ayna basıncı kontrolünün getirdiği güvenli çalışma koşulları nedeniyle şehiriçi kazılarında EBP TBM'ler yoğun olarak kullanılmaktadır.

2.2.2.2 Pasa basınçlı TBM'lerin çalışma prensibi

Pasa basınçlı TBM'ler (Şekil 2.13) genelde kesici kafa ve keskinin bulunduğu ön bölüm, motor, piston ve helezoni konveyörün bulunduğu orta bölüm (kalkan) ve "back up" denilen geri bölmeden oluşurlar.

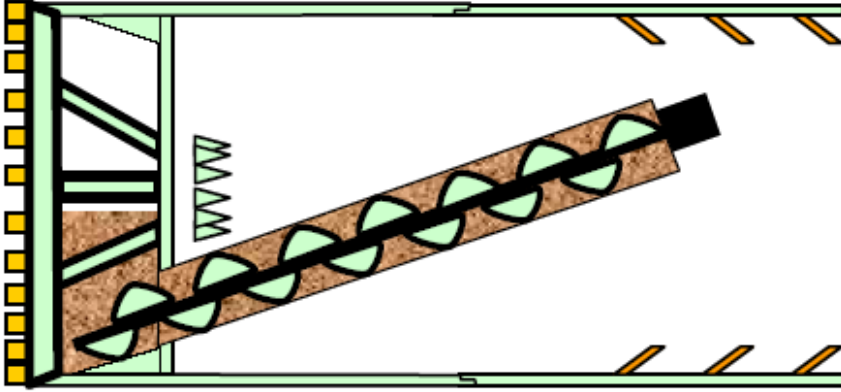


- | | |
|-------------------|----------------------|
| 1) Arın | 5) İtme Silindirleri |
| 2) Kesici Kafa | 6) Helezon Konveyör |
| 3) Pasa Odası | 7) Segment Erektörü |
| 4) Basıncı Duvarı | 8) Segmentler |

Şekil 2.13: Bir pasa basınçlı TBM'e ait kesit görünüşü (Maidl ve diğ, 2012).

Pasa basınçlı TBM'ler jeolojik koşullara bağlı olarak açık mod, geçiş modu ve kapalı mod olmak üzere üç temel kazı modundan birinde kazı yaparlar. Açık mod ile kazı, arının kendini tutabildiği ve su gelirden herhangi bir hidrojeolojik ve operasyonel probleme neden olmadığı durumlarda mümkün olur. Mod seçiminde öncelik, arının duraylılığının sağlanması ve yeryüzü oturmalarının engellenmesi olduğundan duraylı zeminlerde arın basıncına ihtiyaç bulunmamaktadır.

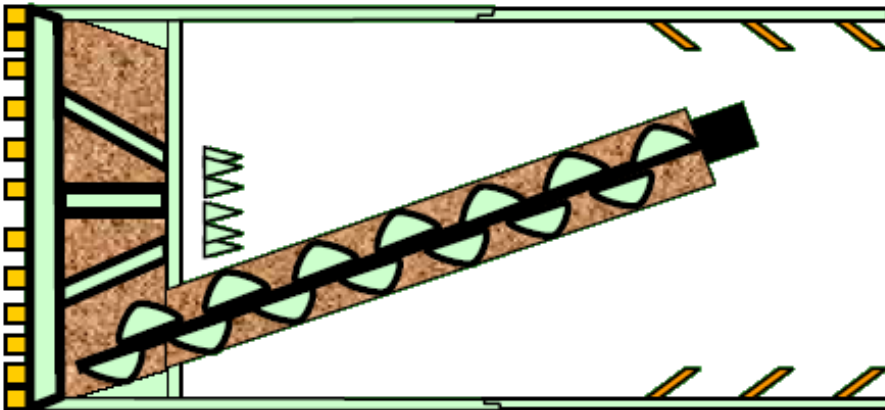
Arında sert ve aşındırıcı kayalara rastlandığında açık moda (Şekil 2.14) geçilerek keskinlerin aşınmasına ve keskilere gelen aşırı yüklere engel olunabilir.



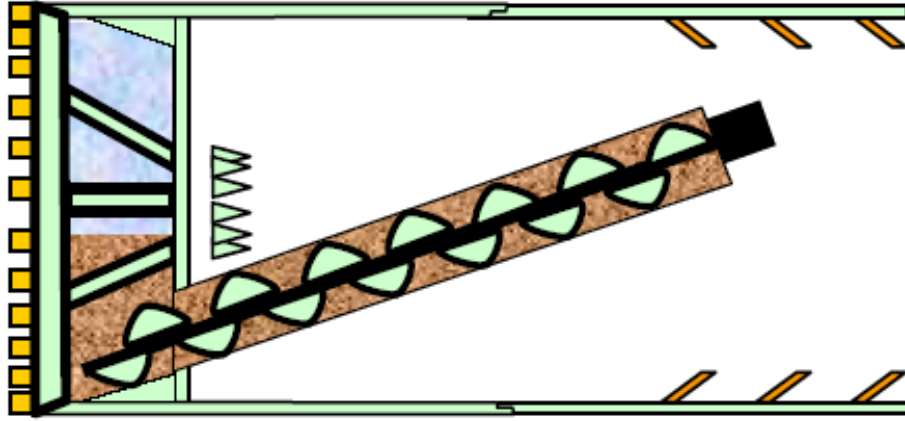
Şekil 2.14: Açık modda çalışan pasa basınçlı TBM (Langmaack ve Ibarra 2011).

Kapalı modun (Şekil 2.15) amacı ise su içeren zeminlerden geçerken duraylılığı sağlayabilmek ve yeryüzü oturmalarını minimize etmektir. Bu durum, pasa odasında basınç oluşturarak arında bulunan arazi ve su basınçları ile dengeli hale getirilmesi ile sağlanır (Maidl, 2005b). Bunun için pasa odası tamamen pasa ile dolu olmalıdır. Pasa odasındaki malzeme hacminin artmasıyla yüksek tork gereksinimi oluşacaktır ve aşınmalarda artış meydana gelecektir.

Geçiş modunda (Şekil 2.16) ise pasa basınçlı TBM kapalı moddaymış gibi çalışmaktadır ancak pasa odasında basınç bulunmamaktadır. Arının kendini tutabildiği varsayımı geçiş modunu kapalı moddan ayırır. Geçiş modunda pasa odası kısmen ya da tamamen pasa ve/veya su ile doldurulurken 0,1 ve 0,2 bar arası gibi çok az miktarda destek basıncına su gelirini kontrol altına alabilme amacıyla gereksinim duyulabilir.



Şekil 2.15: Kapalı modda çalışan pasa basınçlı TBM (Langmaack ve Ibarra 2011).

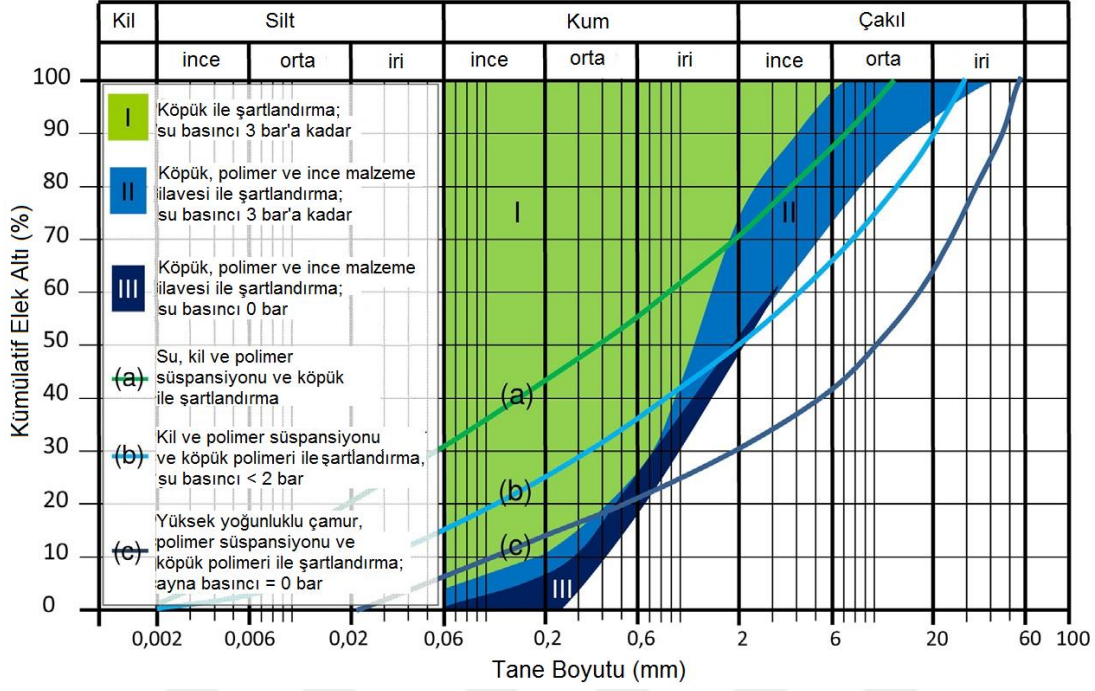


Şekil 2.16: Yarı açık modda çalışan pasa basınçlı TBM (Langmaack ve Ibarra 2011).

TBM uygulamalarında kazı sonrasında açılan boşluğun tahkimatının biran önce yapılması ve kazı yüzeyinin duraylı hale getirilmesi gerekmektedir. Özellikle yumuşak killer, kohezyonsuz zeminler ve çok çatlaklı kayalar (genellikle su seviyesinin altında olanlar) gibi duraylı olmayan zeminlerde arın, kazı esnasında tahkim edilerek desteklenmelidir. Arına uygulanan destek basınçları birkaç yolla sağlanmaktadır. Bunlar; mekanik basınç, sıkıştırılmış hava basıncı, bulamaç gibi akışkan süspansiyonlar yoluyla oluşturulan basınç ve şartlandırılmış pasa ile oluşturulan basınçlardır (Milligan, 2000). Son iki basınç türü çamur basınçlı TBM ve pasa basınçlı TBM'lerde uygulanmaktadır ve TBM sistemlerindeki gelişmelerle birlikte bu basınç türlerinin mekanik ve hava basıncına göre daha başarılı performans gösterdikleri belirlenmiştir (Babendererde,1998).

Pasa basınçlı TBM tünelciliğinin uygulama aralığı (Şekil 2.17) kil ve silt gibi ince taneli zeminlerken son yıllarda belirgin bir şekilde iri taneli zeminlere doğru genişleme meydana gelerek bu tür zeminlerde de uygulanabilir duruma gelinmiştir.

Bu duruma katkı sağlayan en önemli etken ise köpük ile zemin şartlandırma sistemindeki yeni gelişimlerdir. Bu sayede sert kayaç koşullarında ve karışık zemin formasyonlarında EPB kullanımını artarak devam etmektedir.



Şekil 2.17: EPB TBM'lerin kullanılabilmesi için uygun zemin koşulları ve genel zemin şartlandırma önerileri (Budach ve Thewes, 2015).

Başarılı bir EPB performansı için zeminin likit-yumuşak arası bir kıvamda, düşük aşındırıcı özellikte, düşük içsel sürtünmeye ve düşük geçirgenliğe sahip olması gerekmektedir

2.2.3 Mekanize tünel kazılarında yapışma (adezyon) ve tıkanma problemi

Yeraltı kazılarında killi zeminin tünel açma makinasının çelik yüzeylerine aderansı kazı verimini önemli ölçüde düşürerek projede büyük sorunlara yol açar. Özellikle şehir içi tünelcilikte bu problemle sıkça karşılaşılmaktadır. Şekil 2.18 de killi zeminin tünel açma makinasının kesici kafasını sardığı durum görülmektedir. Killi zeminin kesici kafayı sararak kazı verimini düşürdüğü bu gibi durumlarda, kazının durdurularak kesici kafanın temizlenmesi proje bitiş süresini ve proje bütçesini önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 2.18: Kesici kafayı kil sarması (Martinotto ve Langmaack, 2007).

Kazılan malzemenin makinanın çelik yüzeylerine adezyonu, zeminin ve zeminin yapıştığı yüzeyin özelliklerine bağlıdır. Zeminin adezyon kuvvet potansiyelinin, belirleyen başlıca parametreler Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19: Zeminlerin adezyonuna etki eden parametreler.

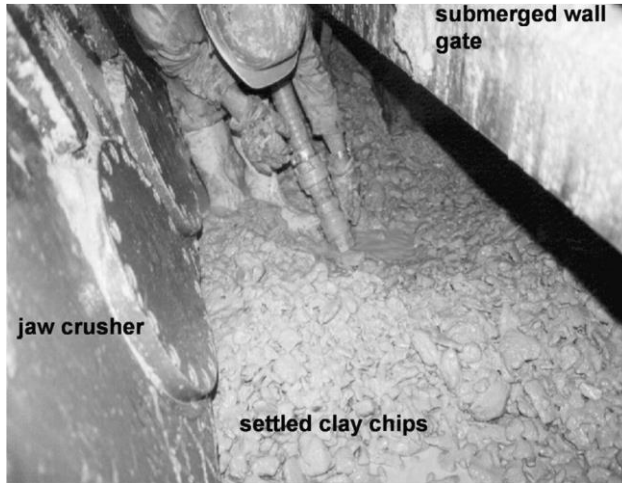
Mekanize tünel kazılarında zeminin tünel açma makinasının çelik parçalarına adezyonu sonucunda oluşan problemlerin başında tıkanma problemi gelir. Kazı

sırasında su geliriyle yapışkanlığı artan malzeme çelik yüzeylere, keskilere veya nakliye sistemine yapışır. Bu durum tünel kazısı sırasında, kazı ve nakliye sırasında problemlere yol açar: Yüksek tork, keskilerin bloke olması ve/ya kırılması, helezon veya bant konveyörlerin tıkanması (Şekil 2.20).



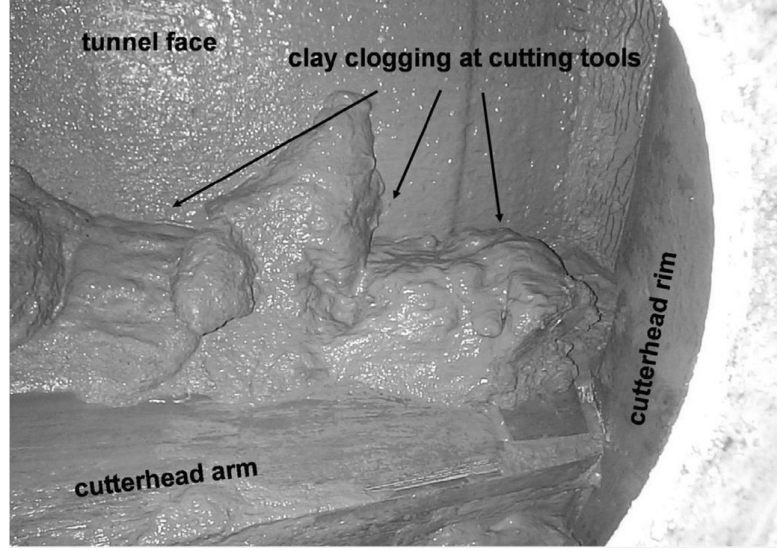
Şekil 2.20: Kesici kafa ve bantta adezyona bağlı tıkanma.

Tünel açma makinalarında adezyon sonucu oluşan tıkanma, sıklıkla kesici kafa ve kazı odasında görülür. Öncelikli olarak kazı odasında görülen bu problem kazılan yapışkan malzemenin kazı odasının alt tarafında çöküp yapışması sonucu, pasanın tünel dışına nakliyatını durdurur (Şekil 2.21).



Şekil 2.21: Kilin topaklanması sonucu kazı odasında çöküp yapışması (Thewes ve Hollman, 2016).

İkinci durumda ise tıkanma kesici kafada gözlenir (Şekil 2.22). Öncelikle kesici disk yataklarında yapışma sonucu tıkanma meydana gelir, sonrasında ise yapışkan malzeme kesici kafadaki boşluklara yapışarak kazının durmasına neden olur.

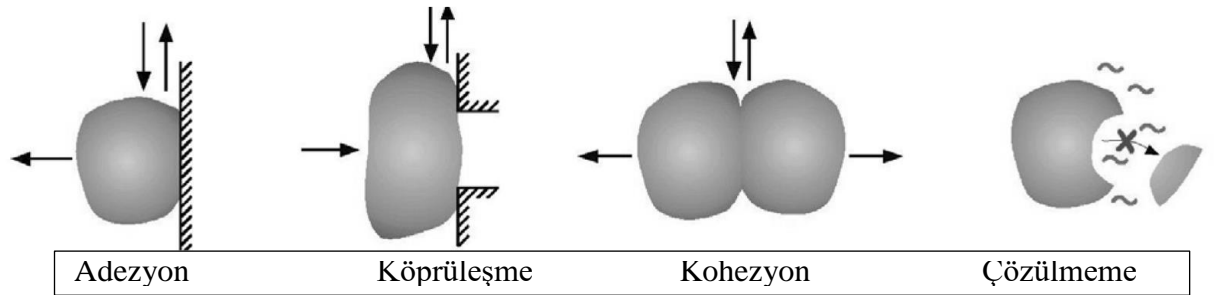


Şekil 2.22: Kazı odasında kilin metale yapışması sonucu oluşan tıkanma (Thewes ve Hollman, 2016).

Mekanize tünel kazıları sırasında Tünel açma makinalarında tıkanma riski, zemin formasyonunun birbirleriyle etkileşen 4 özelliğine bağlıdır (Şekil 2.23).

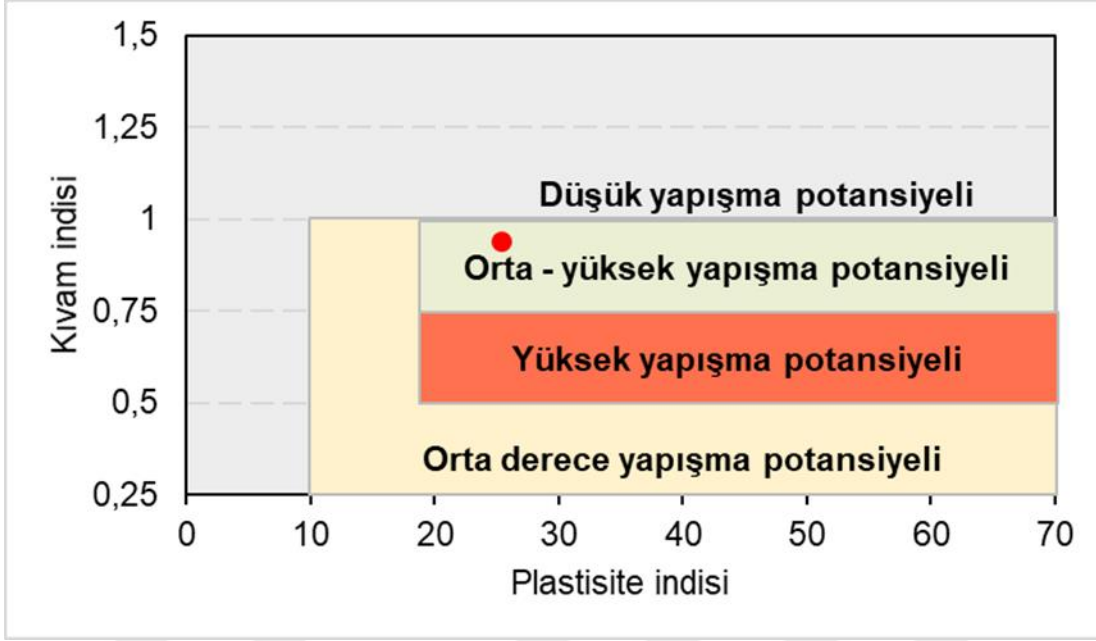
Zemin danelerinin yüzeye adezyonu:

- Topaklanmış zemin danelerinin açık yüzeylerde üzerine yapışarak köprü oluşturması
- Zemin danelerinin kohezyon sonucunda birbirine yapışması
- Topaklanan zeminin su içinde çözülmeye düşük eğilimli olması



Şekil 2.23: Zemin danelerinin yüzeye adezyonu (Thewes ve Hollman, 2016).

Bu konu Thewes tarafından araştırılmış ve kilin plastisite indeksi ve kıvam indeksi ile yapışma potansiyeli arasındaki ilişki ortaya konmuştur. (Şekil 2.24.)



Şekil 2.24: Zemin topraklanmasının kıvam ve plastisite indeksleri arasındaki ilişki (Hollman ve Thewes, 2013'den uyarlanmıştır).

Adezyonlu zeminlerde tünel kazısının başarısı makine seçimine bağlı olduğu kadar zemin şartlandırmaya da bağlıdır. Yapılan deneysel çalışmalar ve saha deneyimleri göstermiştir ki efektif zemin şartlandırma zeminin kohezyonunu ve yapışkanlığını önemli ölçüde düşürerek mekanize tünel kazılarında yaşanan adezyon problemini önemli ölçüde azaltmıştır.

2.3 Zemin Şartlandırma

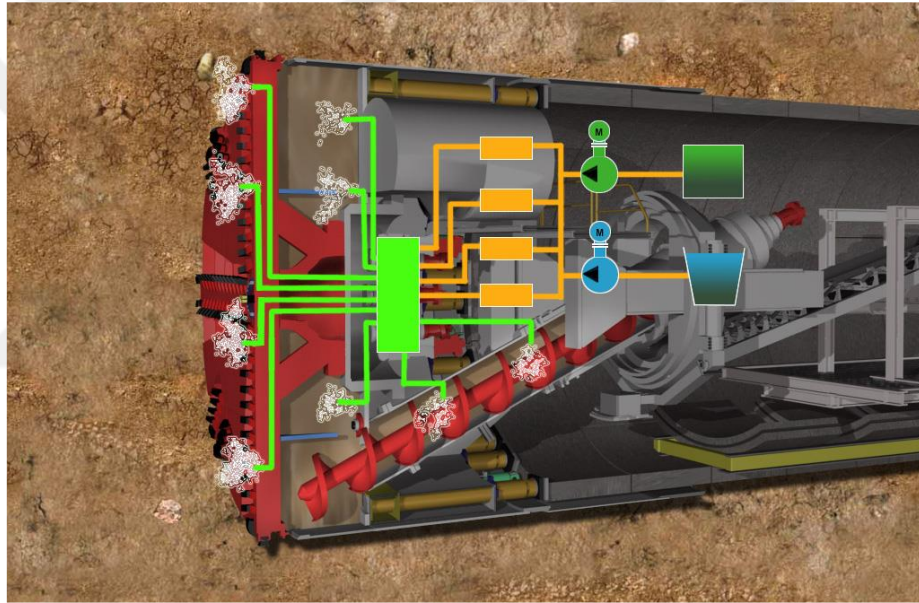
Yüzyıllar boyunca insanlar zeminlerin özelliklerini değiştirmeye veya kontrol altına almaya çalışmışlardır. Gelişen medeniyetle birlikte özellikle modern ulaşım sistemlerinin gelişmesiyle mühendisler açısından zeminin karakteristiklerinin değiştirilmesi veya değişen zemin suyu şartları altında optimum zemin özelliklerine ulaşılması önem kazanmıştır. Lambe (1953) yaptığı araştırmalarla polimer kullanılarak zemin ıslahının sağlanabileceğini belirtmiş ve uygun oranlarda kullanılan polimerle zeminlerin plastisitesinin, permabilitesinin, dayanımının ve yoğunluğunun artırılıp azaltılabileceğini ortaya koymuştur.

Mekanize tünel kazılarında zemin şartlandırma çeşitli şartlandırıcılar kullanılarak zeminin istenilen özelliklere (düşük geçirgenlik, düşük içsel sürtünme açısı, düşük adezyon yüksek sıkıştırılabilirlik ve elastisite ve düşük aşındırıcılık) getirilmesi şeklinde ifade edilir. Düşük permabilite tünel aynasından gelen su basıncına karşı

konularak su baskınlarını ve buna bağlı yüzey oturmalarını önlemek için gereklidir. Düşük adezyon ve içsel sürtünme açısı tünel aynasından malzeme naklini kolaylaştırır, yapışma problemlerini önler ve kesme kuvvetlerini düşürerek enerji sarfiyatını azaltır. Yüksek sıkıştırılabilirlik ve elastisite kazı sırasında verilen karşıt ayna basıncının oluşturulması ve korunması için gereklidir. Düşük aşındırıcılık ise keskin ve diğer yüzeylerin aşınmasını azaltarak ömürlerini uzatır.

2.3.1 Zemin şartlandırmanın TBM operasyonuna etkisi

Zemin şartlandırma EPB-TBM kazılarında temel olarak ayna kazısından pasaya nakliyesine kadar tünel aynası, kazı odası-kesici kafa ve nakliye sistemleri olmak üzere 3 bölümde uygulanır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25: EPB TBM kazısında zemin şartlandırma uygulama alanları (Langmaack ve Ibarra 2011).

2.3.1.1 Tünel aynası

Zemin şartlandırmanın tünel aynasındaki temel etkisi zeminle keskin arasındaki sürtünme kuvvetini azaltmaktır. Azalan sürtünme kuvveti kazı sırasında tork gereksinimini ve aşınmayı azaltır ve bunların sonucunda operasyonel maliyetler ve keskin ömürleri uzar.

Zemin şartlandırmanın tünel aynasında yarattığı diğer bir önemli etkide zeminin geçirgenliğini düşürmesidir. EPB-TBM'ler kazdıkları pasayı kazı odasında sıkıştırarak karşıt ayna basıncı oluştururlar. Fakat bu durum su tablası üzerinde yapılan kazılarda ve zeminin geçirgen olmadığı durumlarda sağlanabilir. Genel

olarak başarılı bir kazı için zeminin geçirgenliğinin 10^{-6} m/sn olması arzu edilir. Daha geçirgen zeminlerde ise aynada şartlandırma yapılarak şartlandırma kimyasallarının aynadaki zemine nüfus ederek geçirgenliği istenilen seviyeye çekilebilir.

2.3.1.2 Kesici kafa-kazı odası

Kesici kafa ve kazı odasında yapılan şartlandırma iki temel amaca hizmet eder; sürtünmenin azaltılmasıyla aşınmaların azalması ve plastik killerin topaklanarak yüzeylere yapışma potansiyelinin (adezyon) düşürülerek kesici kafa ve kazı odasında tıkanmaların önlenmesi. Kesici kafada yapılan yüzey şartlandırma tünel aynasındaki zeminin sürtünme kuvvetini azaltarak, keski ve zemin arasında sürtünmeye ve ısıya bağlı olan aşınmaları azaltarak keski maliyetlerini önemli ölçüde düşürür. Diğer yandan şartlandırma sorası kohezyon kuvveti düşen zemin kazı sırasında daha kolay yenilerek tork ve itme kuvvetlerini düşürür. EPB TBM'lerde kazı odasında yapılan zemin şartlandırma sonrasında kazılan zemin homojen ve plastik kıvamda getirilerek kazı odasında istenilen karşıt ayna basıncı oluşturulabilir ve yeryüzü oturmaları daha iyi kontrol edilmiş olur.

2.3.1.3 Pasa nakliyatı

EPB TBM kazılarında pasa nakliyatının ilk aşaması vidalı konveyörle pasanın kazı odasından nakliye işlemidir. Bu çıkarılan pasa aşınmaları ve güç tüketimini azaltacak şekilde ve vidalı konveyör içerisinde bir tıkaç oluşturacak şekilde plastik kıvamda olmalıdır. Kazı odasındaki zemin istenilen geçirgenlik özelliğine ulaşmadığı zaman vidalı konveyörde yapılan zemin şartlandırma yardımıyla geçirgenliği düşürülür ve tıkaç görevi görerek su basmalarını önlemiş olur.

2.3.2 Zemin şartlandırma kimyasalları

Bu bölümde EPB TBM'lerde kullanılan zemin şartlandırma katkıları anlatılmıştır. Bahsedilen bu zemin şartlandırma katkıları; köpük, bentonit ve polimerlerdir. Bentonit ve polimer süspansiyonları çoğunlukla zemini akışkan kıvamda getirmek amacıyla kullanılırlar.

2.3.2.1 Bentonitler

Tünelcilik endüstrisinde kullanılan bentonit çamurları, bentonit ve suyun karıştırılması ile elde edilirler. Tikotropik (cıvıma) özelliklere sahip bentonit çamurları hacimce % 3-6 oranında konsantrasyona sahiptir (Lyon, 1999a). Bentonit ismi, kullanılan kil mineralini karakterize etmek amacıyla kullanılır; başlıcaları potasyum, kalsiyum ve montmorilonitlerdir. İnce düz kil partiküllerinden oluşan Montmorilonitler yüksek su tutma kapasitesi ve şişme özelliğine sahiptir. Düşük bağlanma özellikleri nedeniyle su iç ve dış yapraklarda hapsedilir. Kalsiyum sodyuma oranla daha güçlü bağa sahip olup daha düşük şişme potansiyeline sahiptir. Tünelcilik endüstrisinde diğerlerine göre yüksek çözülme oranı ve yüksek viskozitesi nedeniyle bentonit tercih edilir (Lyon,1999b).

Tünelcilik endüstrisinde bentonitlerin temel kullanım amacı slurry tip makinelerde ayna basıncını dengelemek ve boru itme uygulamalarında zeminle borular arasındaki sürtünmeyi düşürmektir. Slurry TBM kazılarında kullanılan bentonitlerde zemin ile kesici kafasında “filter cake” formunu oluşturarak zemin geçirgenliğini düşürmesi ve efektif ayna basıncını sağlamasıdır(Jancsecz ve Steiner, 1994).

Bentonitlerin tünelcilik endüstrisinde diğer bir kullanım amacı ise EPB TBM kazılarında plastisiteyi artırmak ve kaba daneli zemin kazılarında taneler arasını doldurarak geçirgenliği düşürmesidir. Kusakabe vd.(1999) kaba daneli zemin kazılarında geçirgenliği düşürmek için gerekli bentonit miktarını Eşitlik 2.1’de formüle etmiştir.

$$D = a \cdot (30 - p_{0,075}) \cdot \alpha + (40 - p_{0,25}) \cdot \beta + (60 - p_{2,0}) \cdot \gamma \quad (2.1)$$

D: bentonit konsantrasyonu,

α : 2,0

β : 0,5

γ : 0,2

$a = 1,0 \quad U_c > 4$

$a = 1,1 \quad 4 > U_c > 3$

$a = 1,2 \quad 3 > U_c > 1$

2.3.2.2 Polimerler

Polimerler esas itibariyle büyük, uzun zincirli moleküller olup, çok sayıda küçük kimyasal 'yapı taşı' veya monomerlerinin birbirine bağlanmasıyla oluşur. Homopolimerler, tek bir bazik monomer ünitesinin, iki ya da daha fazla farklı monomere göre kopolimerler polimerizasyonu ile elde edilmektedir. Bir polimer materyali, polimer zincirlerinin uzunluklarına (molekül ağırlığı ile ölçülür), polimer zincirleri arasındaki herhangi bir bağlantının varlığına ve doğasına ve moleküllerin yapılandırılmış (kristal) gruplarının varlığına bağlı olarak birçok farklı biçimde mevcut olabilir.

Polimerler doğada yaygın olarak bulunur ve tünelcilik endüstrisinde kullanılabilen doğal polimerler; nişastalar, şekerler, selülozlar ve proteinlerden oluşur. Tünel açma uygulamalarında kullanılan yapay polimerlerin bazıları poliakrilamidler ve poliakrilatlar, kısmen hidrolize poliakrilamidler (PHPA), karboksimetil selüloz (CMC) ve polianyonik selüloz (PAC)'dir. Zemin şartlandırma uygulamalarında kullanılan en önemli polimer gruplarından biri, cevher hazırlama sanayi için yaygın olarak geliştirilen poliakrilamidler (PA) ve bunların türevleridir (Milligan 2001).

Lambe (1953) 65 yıl önce sodyum poliakrilatı kullanarak zemin sağlamlığı ve sıkıştırılabilirliğini tartışmıştır. Yüksek molekül ağırlıklı ($> 10 \times 10^6$) suda çözünür poliakrilamidler katıların akışkanlaştırıcı olarak aktifleştirilmesine yardımcı olmak için uzun yıllar kullanılmaktadır. Daha düşük moleküler ağırlıklı ($< 300,000$) poliakrilamidler, çapraz bağlı versiyonlar su emici polimerler üretirler. Molekül ağırlığı, birkaç bin ila 10 milyon arasında değişen ve % 100 katyonik ila % 100 anyonik (sırasıyla pozitif veya negatif yüklere sahip monomer üniteleri) iyonik karakterde geniş bir poliakrilamid çeşitliliği mümkündür. Yüksek derecede doğrusallığa sahip oldukları için su çözünürlüklerini korurlar; yüksek derecelerde çapraz bağlanmanın ortaya çıkması, büyük miktarda suyun çözünmediği, şişmesine ve emmesine neden olan malzemeleri üretir.

Flokülasyonun esas olarak köprü vasıtasıyla meydana geldiği düşünülür; bu sayede polimer molekülleri kendilerini mineral partiküllerin yüzeyine tutturur ve uzunlukları değişen projeksiyon döngüleri bırakır. Parçacıklar çarpıştığında, bu halkalar birbirine dolaşır ve parçacıkları birlikte kilitlet.

Sentetik PA esaslı polimerlere ek olarak, bir dizi doğal ürün, topaklayıcı maddeler olarak kullanılmıştır. Çoğunluk, nişastalar ve guarlar gibi polisakkaritlerdir; nişastalar, özellikle de alümina endüstrisinde boksitin topaklaşması için en yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Düşük molekül ağırlıklı PA polimerleri, bağlandıkları katı parçacıklar üzerindeki toplam negatif yüzey yükünü arttırarak, parçacıklardaki yükün değişken dağılımının bir sonucu olarak parçacıkların topaklaşmasına neden olan doğal eğilimini azaltarak ve böylece dağılmış Düşük viskoziteli yapı.

Su emici polimerler, çok yüksek moleküler ağırlıklı ($> 10^7$) ve çapraz bağlamanın yüksek seviyedeki PA'lerdir. Sonuç olarak, kutupsal amid ve akrilat gruplarının varlığına rağmen suda çözünürlüğe son verilir, ancak sadece su emer ve şişer. Polimerin ağırlığının 300 katı kadar su emme kapasitesi saf su ile mümkündür ancak çözülmüş katı içeren su için 100 kat daha gerçekçi olur.

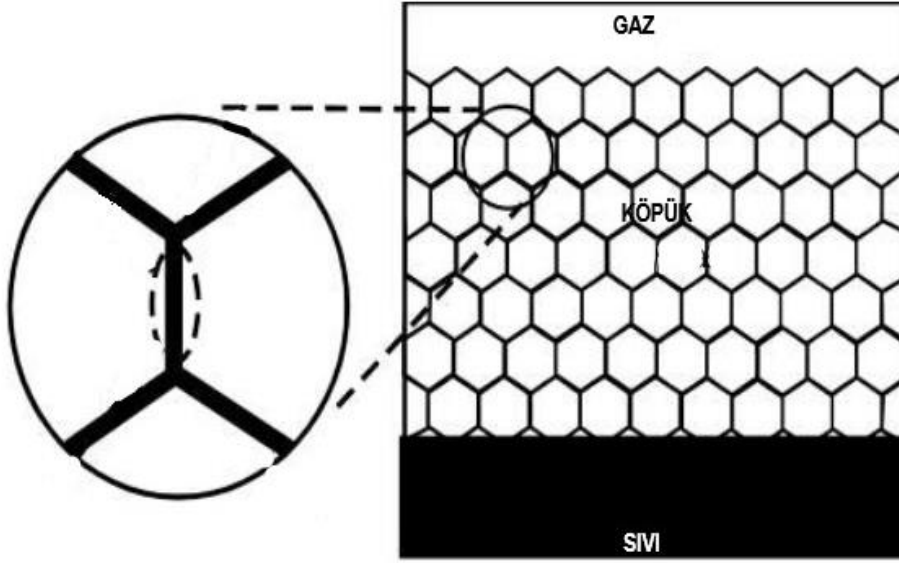
Mekanize tünel kazılarında kullanılan polimerler ilk olarak Japonya'da geliştirilmiş olup, slurry tip makinelerde bentonit bulamaçlarının akışkanlığının arttırılması ve filter cake oluşturarak zemin stabilitesini sağlamak amacıyla kullanılmışlardır. Küçük miktarlarda polimer eklenmesiyle bentonit bulamaçlarının performansları ciddi ölçüde arttırılabilir fakat polimerlerin pahalı olması nedeniyle maliyetleri de önemli ölçüde arttırırlar.

EPB TBM kazılarında polimerler pasanın plastik özelliğini arttırmak amacıyla kazı odasına tek başına veya köpük katkısı olarak eklenebilirler. Polimerler kazı sırasında tek başlarına kullanıldıklarında, kazılan zeminin su içeriği plastikleşme etkisini ölçmek için önem kazanır. Su tutucu polikramit polimerleri kazı odasına veya vidalı konveyöre verilerek tünel içine su akışı önlenir ve pasa nakli kolaylaştırılmış olur.

2.4.2.3 Köpükler

Köpükler gaz-sıvı arasında yüzey gerilimini azaltan sürfaktanlar (köpük ajanı) tarafından oluşturulmuş, sıvı ortam içerisinde kabarcık halinde dağılmış gazlardır. Kabarcıkların, boyutlarına ve kabarcık zarının mukavemetine bağlı olarak atmosfer basıncının üzerinde bir iç basıncı vardır. Kabarcıkların duvar kalınlığının kabarcıkların boyutuna kıyasla küçük olduğu 'kuru' bir köpük içindeki kabarcıklar küresel değildir ancak düzlemdeyken neredeyse düz dodekahedra olan (12 yüze

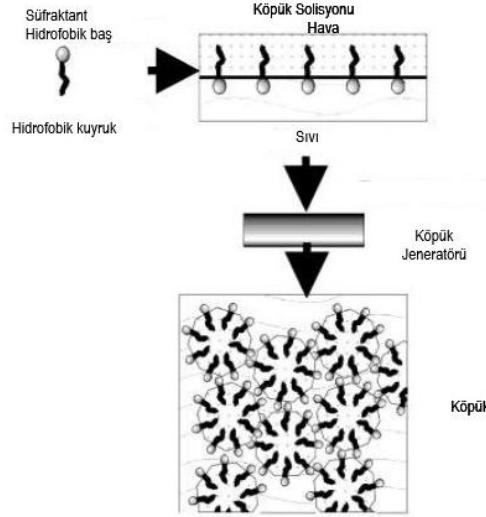
sahiptir) çok katlı bir biçimde oluşturmak üzere birleşirler. Kabarcıklar arasında sıvı filmler bulunur. Şekil 2.26'da iki boyutlu bir kesit gösterilmiştir. İnce filmlerin yüzey enerjisi ve yüzey aktif maddenin hareketi, yüzey enerjisini ve dolayısıyla köpüğün üretilmesi için gerekli olan enerji miktarını azaltmaktır. Belirli bir hava / sıvı oranı için, ortalama kabarcık boyutu azaltıldığında yüzey alanı ve dolayısıyla toplam enerji artar.



Şekil 2.26: İki boyutlu köpük kabarcığı (Milligan 2001).

Surfaktantların karakteristik etkileri, yüzeylere tutunabilme kabiliyetleri ve yüzey özelliklerini değiştirebilmeleridir. Gaz/sıvı ve sıvı/sıvı ara yüzeylerinin her ikisinde de ara yüzey ve yüzey gerilimlerini düşürebilmektedir (Farn, 2006). Bu özelliklerinden dolayı surfaktantlar köpük yapıcı ajan olarak kullanılmaktadırlar. Suyu seven (hidrofilik) bir baş ve suyu sevmeyen (hidrofobik) bir kuyruktan oluşan surfaktant molekülleri hava ile suyun birleştiği arayüzeyde yoğunlaşırlar. Suyun içinde iken bu moleküllerin hidrofobik kısımları hava kabarcığı tarafından çekilir ve hava kabarcığının yüzeylerini sararlar (Şekil 2.27). Suyun dışında ise bunun tersi olur. Saf suyun yüzey gerilimi yüksek olduğu için su içerisindeki bir hava kabarcığı yüzeye gelince hemen patlar. Surfaktant maddeler ise yüzey gerilimini düşürdükleri için oluşan hava kabarcıkları yüzeye çıktığında uzun süre patlamadan kalabilirler.

Sentetik deterjan ve protein bazlı olmak üzere iki temel köpük ajanı (surfaktant) türü vardır.

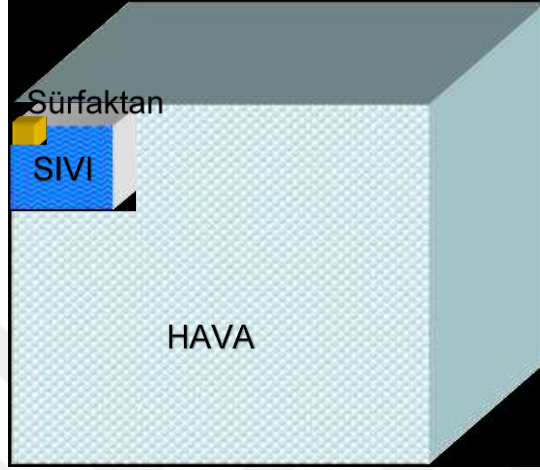


Şekil 2.27: Köpük Oluşumu (Schlukins 2009).

Protein köpüklerinin tipik bileşenleri % 20-40 protein köpük ajanı ve % 3-10 glikol bazlı köpük güçlendiricidir. Sentetik köpüklerin tipik bileşenleri % 5-30 sentetik deterjan ve % 15-20 glikol eter köpük güçlendiricidir. Her iki tipte de fluorokarbon performans artırıcı (<math>< 5\%</math>) ve çözünür polimer (<math>< 5\%</math>) olabilir. Ayrıca çeşitli katkı maddeleri de olabilirler: Ayrıca küf oluşumunu önlemek için koruyucular; protein köpüklerindeki metal tuzları; antifriz maddeleri; korozyon inhibitörleri; viskozitelerini azaltmak için çözücüler; köpük kabarcıklarını dengelemek için katkıları; ve marka tanıtmaya için boyalar bulunur. Sentetik köpükler anyonik hidrokarbonlar, çözücüler ve dengeleyicilerden oluşur. Nispeten hızlı tahliye sürelerinden ötürü düşük kararlılık eğilimi gösterirler; kabarcık duvarlarından sıvı drenajı yetersiz güç ve çöküşe gelinceye kadar. Protein köpük ajanları hidrolize protein, çözücü, sodyum klorür, demir ve kalsiyum tuzları ve koruyucuların sulandırılmış solüsyonundan oluşur.

Protein için başlangıç materyali soya fasülyesi, mısır gluteni, hayvan kan, boynuz ve toynak unu, atık balık ürünleri olabilir. Protein köpükleri genellikle sert, kararlıdır ve düşük drenaj oranlarına sahiptir. Bir köpüğün viskozitesini arttırmak ve tiksotropik özelliklerini geliştirmek için köpük ajanlarına polimerler eklenebilir. Bu katkıların etkileri, geniş bir katkı yelpazesine sahip olan sentetik köpüklerle daha güvenilir olma eğilimindedir. Oluşturulan elektrik yükleri bilinmediğinden, protein bazlı köpüklerle çalışmak daha zordur (Lyon, 1999b). Bir köpüğün özellikleri, genleşme oranına (köpük hacminin orijinal sıvı hacmine oranı) ve köpük ajanının özelliklerine

ve konsantrasyonuna bağlıdır. Tipik bir uygulamada, genişleme oranı 10 ila 20 olabilir, böylece 1000 litre köpük 100 ila 50 litre likit içerebilir, gerisi havadır. Likit madde tipik olarak % 1 ila 3 konsantrasyonda köpük ajanı, geri kalanı ise sudur (Şekil 2.28). Dolayısıyla, büyük miktarlarda köpük kullanımı gereken ve köpük ajanının pahalı olduğu durumlarda bile, köpüğün maliyeti oldukça düşük olabilir.

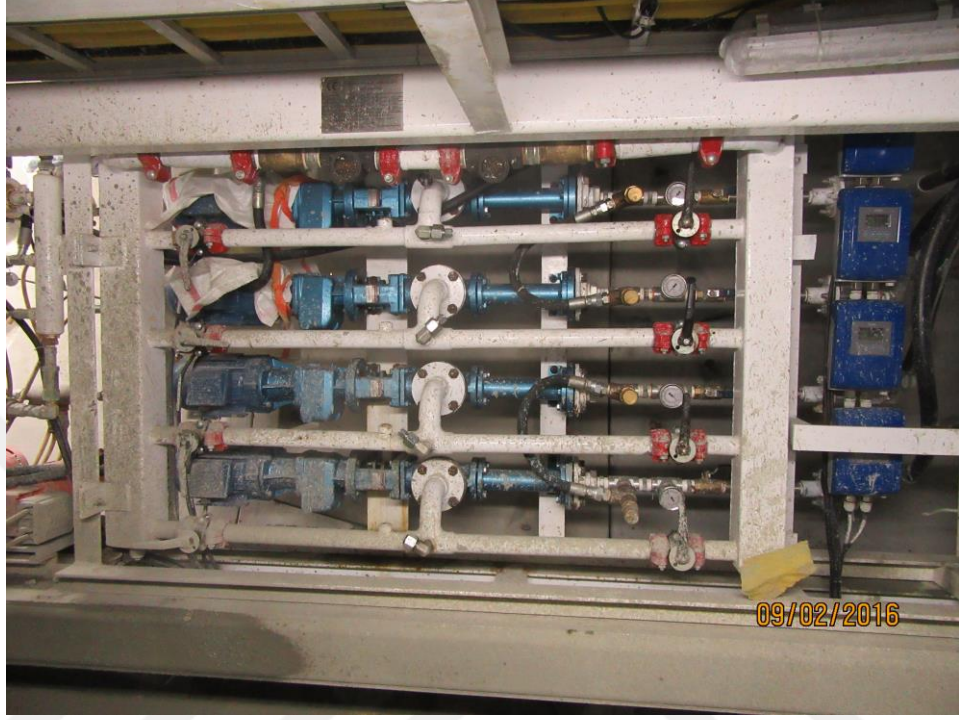


Şekil 2.28: Sürfaktanın köpük içindeki oranı.

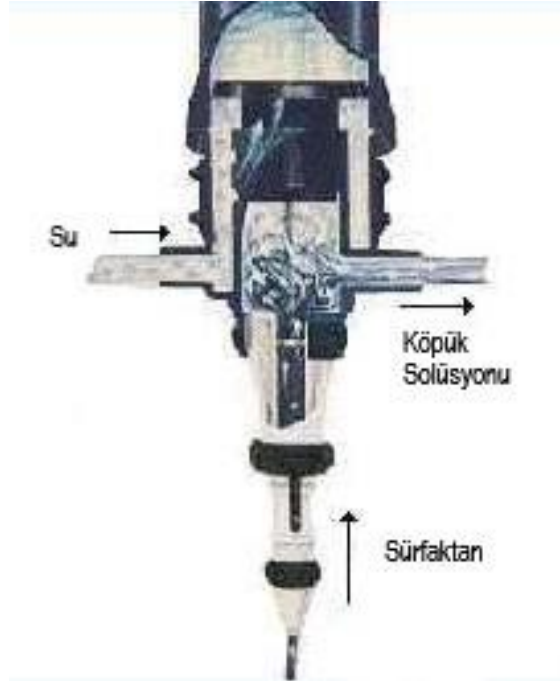
Tüm köpükler metastabil olup sonunda çöker, ancak köpükler yapılabilir ve bu köpükler uzun süreler boyunca 'kararlı' olur. Bir EPB TBM'de kullanım için, çalışma odasında ve vidalı konveyörde köpük-zemin karışımında bir köpüğün dengeli olacağı toplam süreyi bilmek önemlidir. Bu periyodun ötesinde, köpük, tünel kazısı sırasında planlanmayan bir gecikme sırasında, ayna basınç kaybına, kazılan malzemede işlenebilirliğin kaybolmasına ve muhtemelen arazi basınç dengesinin kaybına uğrayarak çökebilir. Köpük kararlılığı, kabarcıkların boyutunun ve tekdüzeliğinin ve kabarcık duvarının mukavemetinin bir fonksiyonudur. Kabarcık boyutu mümkün olduğunca küçük ve düzgün olmalıdır; çeşitli kabarcık boyutlarına sahip köpüklerde, daha büyük kabarcıklar, daha küçük kabarcıkları yakalamakta ve köpüğün çabuk çökmesine neden olmaktadır.

Mekanize tünellelikte köpükler EPB TBM tünelleliğinde zemin şartlandırıcı olarak kullanılırlar bunun yanında Slurry tip makinelerde ve kaya kazısı yapan TBM'lerde de kullanım alanlarına sahiptirler. Köpükler tünel açma makinelerinde bulunan ve basınçlı hava ile çalışan köpük jeneratörlerinde (Şekil 2.29) üretilirler. Sürfaktan tankından gelen köpük ajanı dozajlama ünitesinde istenilen konsantrasyona ulaşmak için su ile karıştırılarak köpük solüsyonu elde edilir (Şekil 2.30) Burada gerekli olan hava ayrı bir iletim hattıyla solüsyon hattından gelen karışım ile birleşerek köpük

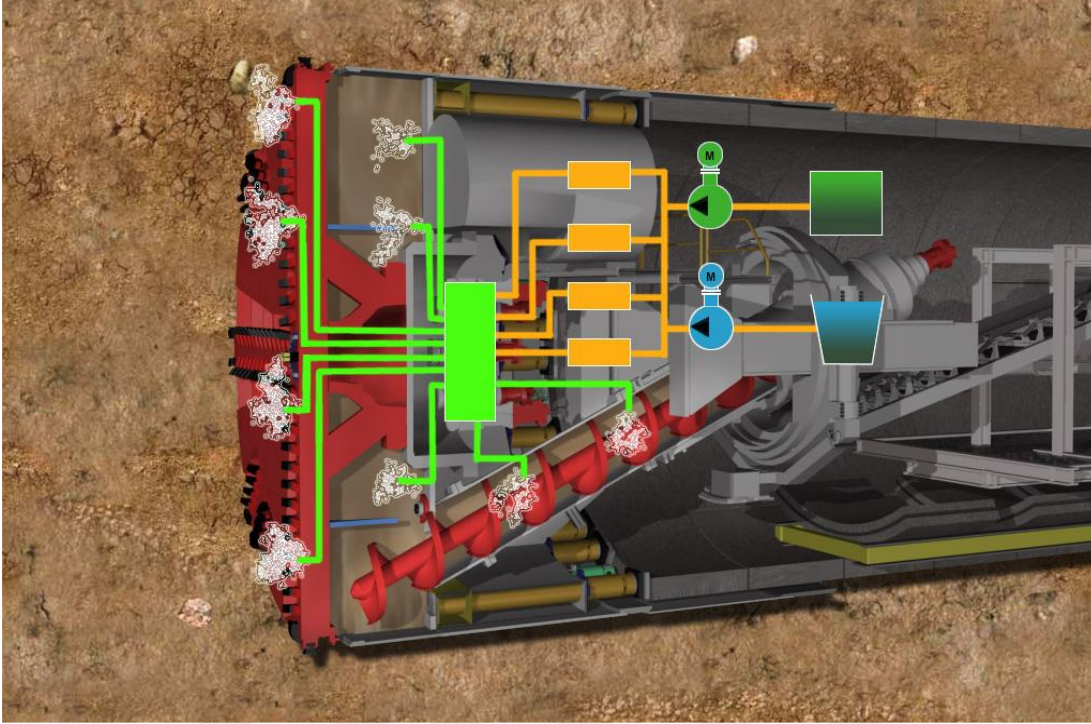
lensine iletilir. Bu işlemin sonucunda köpük jeneratöründe hava, su ve surfaktantlar köpüğü meydana getirmiş olur. Köpük lensinde oluşturulan köpük mikro kabarcık boyutuna ulaşarak TBM deki nozüller vasıtasıyla aynaya, vidalı konveyöre ve/ya kazı odasına püskürtülürler (Şekil 2.31).



Şekil 2.29: Köpük jeneratörü.



Şekil 2.30: Köpük dozajlama ünitesi.



Şekil 2.31: Köpük iletim hatları (Langmaack ve Ibarra, 2011).

Köpük üretmek amacıyla sıvı halde oluşturulan surfaktant maddeler, belirli oranda su ile karıştırılarak bir solüsyon elde edilir. Köpük solüsyonu denilen bu karışımın hazırlanmasında kullanılan oranlamaya köpük konsantresi adı verilir, C_f ile gösterilir ve aşağıdaki formül ile ifade edilir (EFNARC, 2005);

$$C_f = (m_{surfaktant}/m_{solüsyon}) * 100 \quad (2.2)$$

Burada;

C_f : Solüsyon içerisindeki surfaktant oranı (%)

$m_{surfaktant}$: gram cinsinden surfaktant ağırlığı

$m_{solüsyon}$: gram cinsinden solüsyon ağırlığı

Elde edilen solüsyondan köpük elde edebilmek için belirli oranda hava ile solüsyonun karıştırılması gerekmektedir. Hava ile solüsyonun karışım oranına köpük genişleme oranı denmektedir, FER ile gösterilir ve aşağıdaki formül ile ifade edilir (EFNARC, 2005);

$$FER = V_{köpük}/V_{solüsyon} \quad (2.3)$$

Burada;

- FER : Köpük genişleme oranı (birimsiz).
V_{köpük} : Oluşturulacak olan köpüğün hacmi (Hava + solüsyon hacmi)
V_{solüsyon} : Köpük solüsyon hacmi

Zemin şartlandırma performansı maksimize etmek için optimum köpük kullanım oranının belirlenmesi gerekmektedir, zemine enjekte edilen köpük miktarının kazılan paşaya oranına köpük enjeksiyon oranı (FIR) denir ve aşağıdaki formül ile ifade edilir (EFNARC, 2005);

$$FIR = (V_{köpük}/V_{pasa}) * 100 \quad (2.4)$$

Burada;

- FIR : Köpük enjeksiyon oranı (%)
V_{köpük} : Enjekte edilen köpüğün hacmi
V_{pasa} : Kazılan pasa hacmi

2.4 Önceki Çalışmalar

Yüzyıllar boyunca insanlar zeminlerin özelliklerini değiştirmeye veya kontrol altına almaya çalışmışlardır. Gelişen medeniyetle birlikte özellikle modern ulaşım sistemlerinin gelişmesiyle mühendisler açısından zeminin karakteristiklerinin değiştirilmesi veya değişen zemin suyu şartları altında optimum zemin özelliklerine ulaşılması önem kazanmıştır. Lambe (1953) yaptığı araştırmalarla polimer kullanılarak zemin ıslahının sağlanabileceğini belirtmiş ve uygun oranlarda kullanılan polimerle zeminlerin plastisitesinin, permabilitisenin, dayanımının ve yoğunluğunun artırılıp azaltılabileceğini ortaya koymuştur.

İlk EBP TBM 1974 yılında Japonya’da geliştirilmiş, ilk zemin şartlandırma ise 1976 yılında kazı odasındaki pasanın akışkanlığını artırmak için kazı odasına yüksek yoğunluklu çamur pompalanması ile yapılmıştır. 1984 yılında ise yine Japonya’da EPB TBM’lerde zemin şartlandırma ilk defa köpük kullanılmıştır. 1987 yılında ise yine Japonya’da ilk defa zemin içinden geçerek burgu konveyör çıkış kapısında su patlamalarını önlemek amacıyla su absorban özelliği olan polimer enjeksiyonu yapılmıştır. Kullanılan bu polimerin tuzlu suda veya yüksek metalik iyon barındıran

su tabakasına sahip zeminlerde etkisini yitirmesinin anlaşılması üzere, 1994 yılında kazılan zeminin akışkanlığını arttıran ve permeabilitesini düşüren üstün özelliklere sahip polimerler kullanılmıştır. (Williamson ve diğ,1999)

Peron ve Marcheselli (1994) Avrupa’da ilk defa Passante Ferroviario projesinde kullanılan 8m çaplı TBM de Obayashi Japan firması tarafından geliştirilen zemin şartlandırma sisteminin kullanıldığını bildirmiştir. 2000 metre uzunluğundaki %20 ince daneli zemin içeren alüvyonal kum ve çakıldan oluşan tünel güzergâhında köpük ajanı ve selüloz bazlı polimer kullanılmış ve % 60 – 80 oranında köpük enjeksiyonu yapılarak 5 – 10 cm arasında slump değerlerine ulaşılmıştır. Valencia Metro Line 5 projesinde EPB TBM kazısında zemin şartlandırma sistemi kullanılmış ve permeabilitesi yüksek katı kil geçişlerinin olduğu alüvyonal kum ve çakıllı zeminde köpüğün kazı odasında homojen ve sıkıştırılabilir pasa oluşturduğu gözlenmiş ve kesici kafa torkunun ve burgu konveyör torkunun % 20 oranında düşürüldüğü bildirilmiştir (Wallis 1995; Herrenknecht ve Maidl 1995). Kuzey Amerika’daki bir tünel projesinde karışık zemin (mixed face) koşullarında köpüğe su tutucu polimerler eklenerek zeminin permeabilitesi düşürülmüş ve semi EPB modunda kazı yapılmıştır (Webb ve Breeds, 1997).

Fransa’nın Lille şehrinde killi zeminde yapılan 7,7 m çaplı EPBM kazısında zemin şartlandırma kullanılmasıyla kesici kafanın torkunun 900 tm den 400 tm’ye baskı kuvvetinin ise 2000t den 1200 t’ye düştüğü gözlenmiştir (Babendererde 1998; Mauroy 1998).

Zemin şartlandırmanın başarıya ulaştığı bir diğer proje ise İzmir Metro Projesidir. 6,5 m çapında EPB TBM kullanılan tünel kazısında su tablasının altında kil, kum, kumlu silt gibi değişken zemin koşullarında bentonitle birlikte kullanılan köpük kazı hızını ve güvenliği artırıp maliyeti düşürmüştür (Jancsecz ve diğ, 1999).

Çopur ve diğ. (2013) İstanbul’da atık su tüneline kullanılan EPB TBM’ de zemin şartlandırmanın makine performansına etkilerini araştırmış, tünel güzergahında hakim formasyon olan kil taşında mobil karavan içerisinde yapılan testler ve araziden alınan veriler sonucunda zemin şartlandırmanın makine performansını artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Tolouei ve diğ. (2016) bir atık su tüneline killi ve yapışkan zeminde kullanılan EPB TBM performansı ve optimum zemin şartlandırma arasındaki ilişkiyi araştırmış, ve optimum zemin şartlandırmanın tork değerlerini düşürüp ilerleme hızını artırdığı sonucuna ulaşmıştır. Avunduk ve diğ, (2017) bir atık

su tüneline adezyon probleminin EPB TBM performansına etkilerini araştırmış ve artan adezyon potansiyelinin kazı performansını düşürdüğünü ortaya koymuşlardır. Çopur ve diğ. (2018) bir metro tüneline kullanılan EPB TBM ve zemin şartlandırma arasındaki ilişkiyi araştırmıştır.

Bu araştırmalara ek olarak EPB tüneliciliğinde zemin şartlandırmanın getirdiği birçok fayda araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. Pellet ve Castner (1998) yaptıkları araştırmalarla zemin şartlandırmanın ayna sürtünme direncini azalttığını belirtmişlerdir. Maidl (1999) Hollanda'da 350 kPa arazi basınçları altında siltli ve killi kum zemin sınıfının hâkim olduğu EPB TBM kazısında köpük kullanımıyla başarıya ulaşıldığını vurgulamıştır. Maidl ve Jonker (2000) yine Hollanda'daki projelerde zemin şartlandırmayla EPB TBM kullanım aralığını ve fleksibilitesinin artırabileceğini tartışmış ve yüksek arazi ve su basınçları altında burgu konveyörün efektif olarak çalışma garantisi bulunmadığından slurry sistem ile birlikte kullanılmasının daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Singapur'daki Mass-Transit tünel projesinde arazi basıncının 350 kPa değerlerine çıktığı karışık zemin koşullarında köpüğün bentonitle ve polimerle birlikte kullanıldığı belirtilmiş şartlandırma sonrası makine torkunun ve oturmaların azaltıldığı belirtilmiştir (Reilly, 1999). Mellis (1999) Madrid Metro projesinde zemin şartlandırmayla EPB TBM kullanımının diğer kazı sistemleri ile karşılaştırıldığında daha ucuz ve daha hızlı olduğunu belirtmiştir.

Tünelicilikte zemin şartlandırma sistemleri değişik ülkelerde çeşitli projelerde ve değişik zemin şartlarında on yıllardır kullanılmaktadır, buna rağmen bu konuda yapılan çalışmalar çok kısıtlı kalmıştır. Çalışmalar genellikle müteahhitler tarafından spesifik projelerde karşılaşılan sorunlara çözüm aranması sırasında yapılmış ve büyük çoğunluğu yayınlanmamıştır.

EPB teknolojisinin kendini kanıtlamasıyla beraber, düşük plastisiteli kohezif zeminler için geliştirilmiş olan bu makinelerin kullanım alanının artırılmasına yönelik çalışmalar başlamıştır. Bu çalışmaların bir bölümü de köpüklerinde içinde bulunduğu zemin şartlandırma için katkıların geliştirilmesi olmuştur.

Son 20 yılda ise zemin şartlandırmanın EPB TBM kazılarına etkisini araştırmak üzere çeşitli üniversitelerde araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan öne çıkanlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Bochum University – Almanya (1995), Lille University – Fransa (1996), Delft Geotechnics – Hollanda (1999), Oxford University (1998), Cambridge University (1999), Politecnico di Torino (2007), ETH Zurich (2009), İTÜ (2015), Colorado School of Mines (2016). Bunlara ek olarak Lars Langmaack önderliğinde BASF firması tarafından geçmiş projelerde kazanılan deneyimlerin yeni projelere aktarılması amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. 2000 yılında Milligan tarafından “Lubrication and Soil Conditioning State of the Art Review” isimli bir rapor yayınlanmış, 2005 yılında ise EFNARC tarafından “Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanized tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock” raporu yayınlanmıştır.

Bu çalışmalarda kullanılan metotlar ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Köpük Penetrasyonu: bu testin amacı kesici kafadan enjekte edilen köpüğün zemine ne kadar penetre ettiğinin bulunmasıdır. Eğer penetrasyon değeri yüksekse fazla köpük tüketimi olmakla beraber köpüğün dayanıklılığı azalır ve su gelisini önleyemez bunun sonucunda kazı odasında basınç oluşturulmakta güçlük çekilir ve etkili karşıt basınç oluşturulamaz. Eğer penetrasyon değeri düşük ise zeminden su geliri engellenemez. Quebaud (1998) kumlu zeminlerde ilk penetrasyon sırasında köpüğün zemine ani olarak 30 mm penetre ettiğini bildirmiştir. Fakat tünel açma makinalarında kullanılan ve kesici kafada bulunan köpük sisteminin mekanizması farklı olduğundan bu sonuçlar gerçekçi olmamaktadır. (Thewes ve Budach 2010). Bezuijen (1999) aynı testi kum-köpük-su karışımı şeklinde kum zemine uyguladığında herhangi bir penetrasyonun gerçekleşmediğini gözlemiştir.

Karışım Deneyi: Birçok değişik şekilde uygulanan test genel olarak zemin numunesinin hamur mikseri (beton mikseri, gıda mikseri) kullanılarak bıçaklar yardımıyla karıştırılması sonucu harcanan enerji miktarının, aynı test koşullarında zemine köpük eklenerek yapılan deney sonrası harcanan enerji miktarı ile karşılaştırılmasına dayanır. Zemin şartlandırma sonrası (kum – köpük karışımı) harcanan enerjinin % 50 oranında düştüğü görülmüştür (Quebaud 1998). Aynı deney Bezuijen (1999) tarafından EPB çalışma koşullarını simüle etmek amacıyla 350 kPa basınç altında uygulanmıştır.

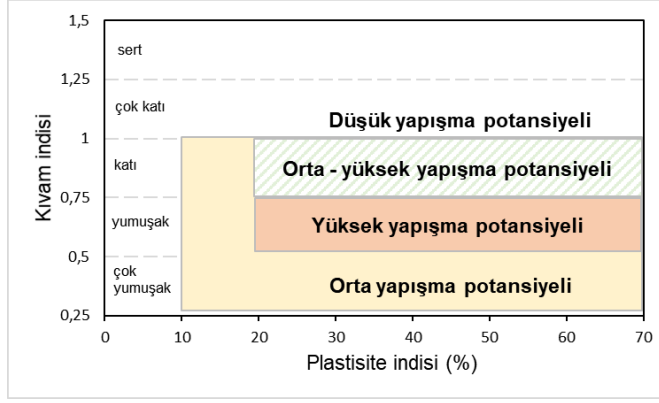
Slump Deneyi: Zeminlerin plastisitesini anlamak için kullanılan bu test, evrensel, hızlı ve ucuz oluşu nedeniyle birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Peron ve Marcheselli (1994), Maidl (1995), Quebaud (1998), Bordachar ve Nicholas (1998),

Jancsecz vd.(1999), Williamson vd. (1999), Langmaack (2000), Vinai vd. (2007), Peila vd. (2015), Galli (2016) şartlandırılmış zeminler için slump değerinin 100 mm ile 200 mm arasında olması gerektiğini önermişlerdir ve şartlandırılmış zeminin normal zemine kıyasla daha plastik olduğunu vurgulamışlardır. Avunduk ve diğ. (2017) geliştirdikleri mini slump deney aleti ile şartlandırma çalışmaları yapmış ve mini slump ile yayılma tablası deneyi arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlardır.

Geçirgenlik (Permabilite) Deneyi: şartlandırılmış zeminler için geçirgenlik deneyi sabit seviyeli ve düşen seviyeli olmak üzere iki şekilde de uygulanabilir. EBM TBM kazılarında su gelirinin kontrolü açısından zeminlerde geçirgenlik katsayısının (k) 10^{-5} 'den küçük olması istenir. Şartlandırılmış zeminlerin geçirgenliğinin yarıya yakın düşebildiği gözlenmiştir (Quebaud 1998; Bezuijen 1999).

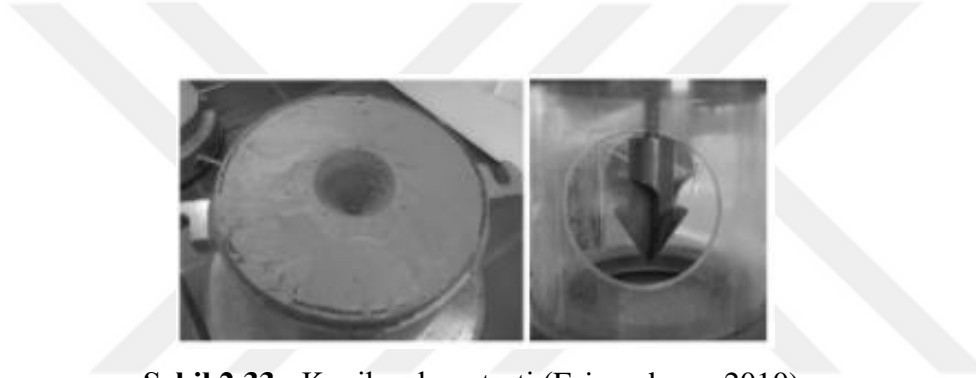
Kesme (Shear) Deneyi: Zemin şartlandırmanın kesme kuvvetlerine etkisi konusunda yapılan araştırmalar çok kısıtlı kalmıştır. Psomas (2001), Houlsby ve Psomas (2001), Pena (2007) kesme kutusu kullanarak ince ve kaba taneli şartlandırılmış kumlar üzerinde kesme kuvvetlerini ve içsel sürtünme açılarını araştırmış ve kayda değer düşüşler gözlemlemişlerdir. Merrit ve diğ. (2003) Londra kilinde çeşitli köpük ve polimerler şartlandırma yapıldıktan sonra büyük ölçekli düşen konik penetrometre ve vane kesme deneyleri yaparak, killi zeminlerde şartlandırma sonrası kesme kuvvetlerinin büyük ölçüde düştüğünü gözlemlemişlerdir. Mori (2016) kumlu zeminlerde laboratuvar tipi vane kesme deney seti kullanarak zemin şartlandırmanın kumlu zeminlerin kesme kuvvetini araştırmıştır.

Kil içeriğine sahip ince daneli zeminlerin yapışma, topaklanma problemleri ve mekanize kazılarda oluşturduğu problemler ve çözüm yolları bir çok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Schlick (1989) ve Thewes (1999) kil mekanize kazılarda oluşturacağı yapışma tıkanma potansiyellerini kıvam ve plastisite özelliklerini kullanarak 0'dan yüksek tıkanma riskine kadar sınıflandırmışlardır (Şekil 2.32).



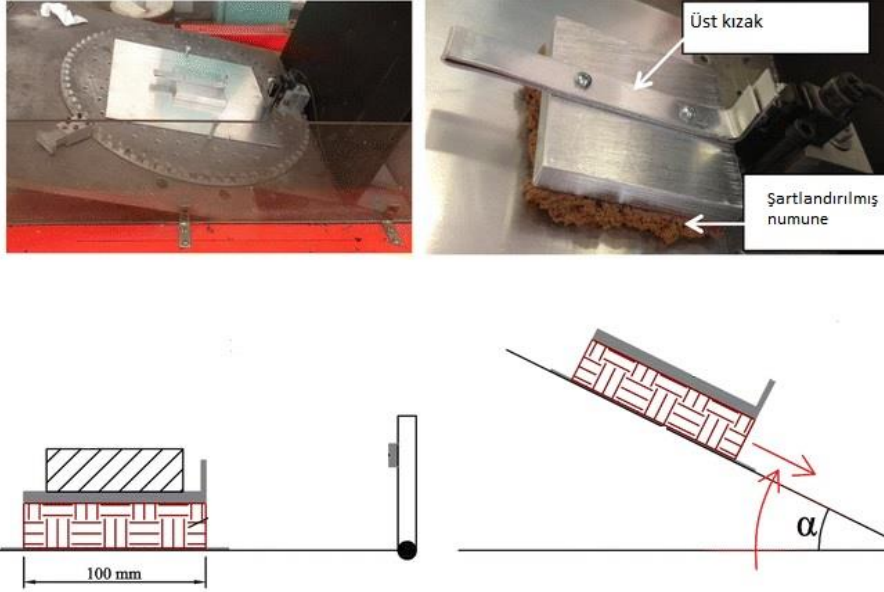
Şekil 2.32: Zeminlerin yapışma tıkanma potansiyeli (Thewes 1999).

Feinendegen (2010) şartlandırılmamış zeminlerde geliştirdiği konik çekme testiyle killerin yapışkanlıklarını belirlemiştir (Şekil 2.33).



Şekil 2.33 : Konik çekme testi (Feinendegen 2010).

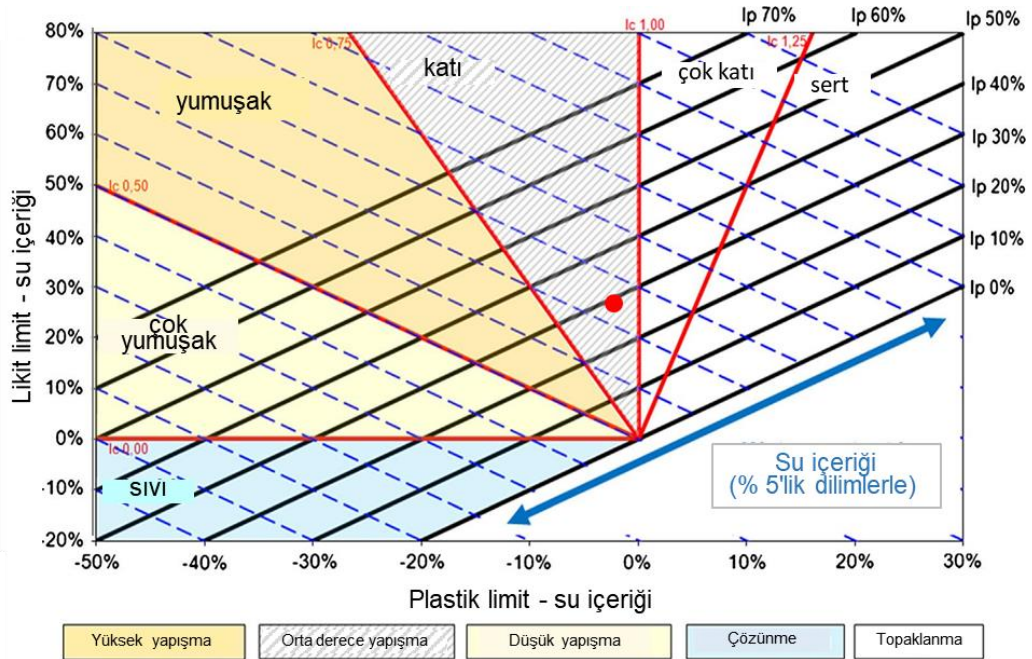
Burbaum (2009) kil zeminlerin yapışma potansiyelini belirlemek amacıyla yapışma plakası deneyini geliştirmiştir. Ball ve diğ (2009) zeminlerin yapışkanlığını ölçmek amacıyla karışım testini kullanmıştır. Zumsteg ve Puzrin (2012) TBM tünelciliğinde oluşan adezyon probleminde kesici kafa ile zemin arasındaki kayma mukavemetinin de önemli rol oynadığını vurgulamış ve bu konunun araştırılması amacıyla kayma tablası testi geliştirmişlerdir. Peila vd. (2013) mevcut kayma tablasının mekanize kazılarda adezyon problemini yeterli ölçüde test edemediğini düşünmüş ve yanal statik kayma tablası geliştirmişlerdir (Şekil 2.34). Geliştirdikleri test ile adezyon kuvvetinin yanı sıra kayma açılarını da ölçmüşlerdir.



Şekil 2.34: Statik yanal kayma tablası (Peila vd. 2016).

Hollman ve Thewes (2013) EPB TBM kazılarında % 10 ve üzeri ince taneli malzeme oranının kazı sırasında yapışma ve tıkanma problemine yol açabileceğini belirtmiştir. Zeminlerin yapışma tıkanma potansiyelini Atterberg limitlerini ile ilişkilendirmiş ve Şekil 2.35’de verilen grafik üzerinde değerlendirmişlerdir.

Bahsedilen bu çalışmaların sonucunda araştırmacılar zeminlerin yapışma potansiyeli, adezyon ve topaklanma zemin şartlandırma katkıları (köpük, polimer ve kil çözücüler) ile azaltılabileceğini vurgulamışlardır.

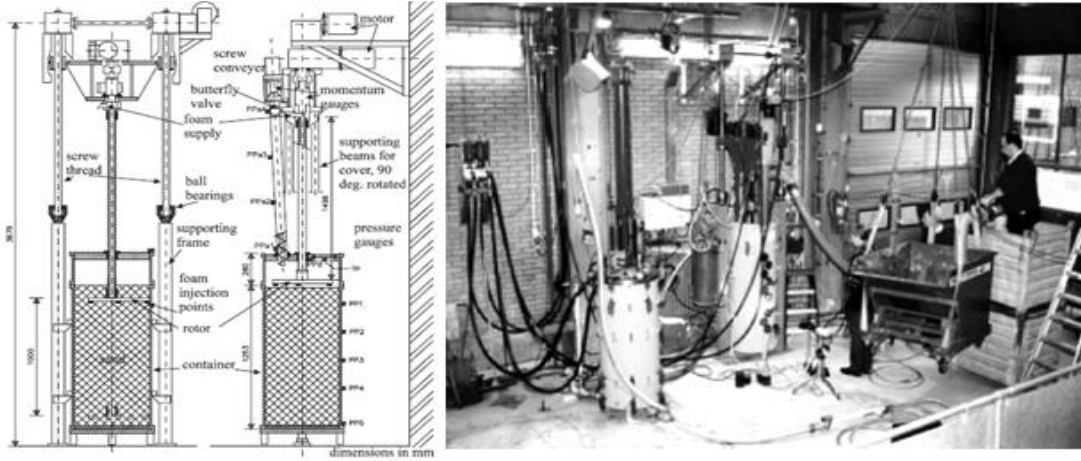


Şekil 2.35: Zeminlerin yapışma tıkanma potansiyeli (Hollman ve Thewes 2013).

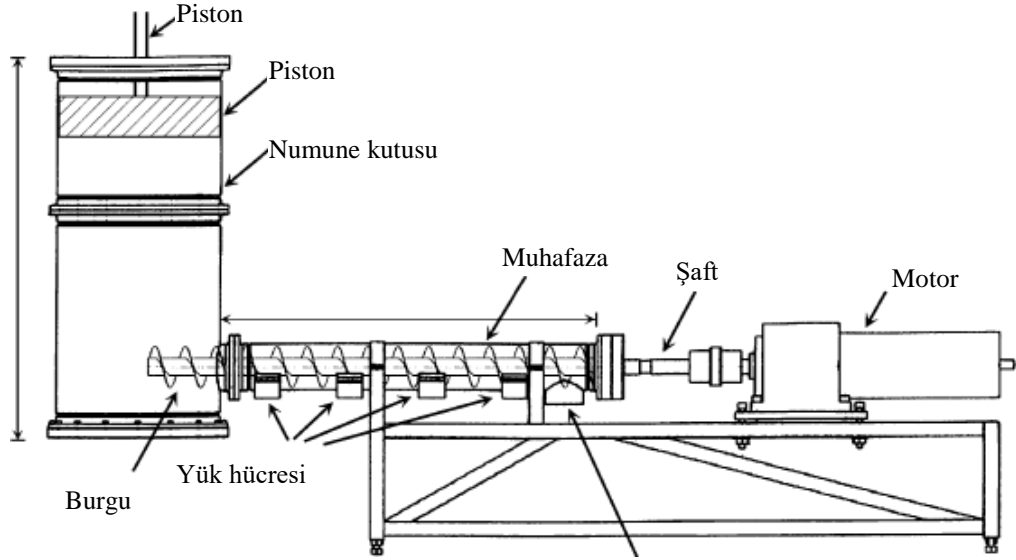
İndeks testlerden alınan sonuçların zemin şartlandırma makine etkileşimini yansıtmayacağını düşünen araştırmacılar şartlandırılmış zeminin burgu konveyördeki davranışını araştırmak amacıyla burgu konveyör model testleri kullanarak araştırmalarına devam etmişlerdir. Yoshikawa (1996) tam boyutlu burgu konveyör kullanarak plastik zeminlerde çeşitli konveyör hızlarında testler yapmış ve burgu konveyörde doğrusal basınç dağılımı olduğunu belirtmiştir.

2001 yılında National French Research Programme (AFTES) tarafından 1/10 ölçekli burgu kullanılarak kazı sırasında stres dağılımı araştırılmıştır. Bezuijen ve Schaminee (2001) laboratuvar tipi ve tam boyutlu burgu konveyör (Şekil 2.36) kullanarak şartlandırılmış zeminlerin davranışını araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda burgu konveyördeki basınç dağılımının doğrusal, torkun sabit ve burgu konveyörün sonundaki basıncın çıkış kapısının açıklığına bağlı olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır.

Oxford ve Cambridge Üniversitelerinin ortak yürüttüğü çalışmada laboratuvar tipi burgu konveyör (Şekil 2.37) kullanılmış ve şartlandırılmış zeminlerin burgu konveyörün operasyonel parametrelerine etkisi araştırılmıştır. (Pena 2003, Mair ve diğ. 2003, Merrit ve Mair 2006). Yapılan araştırma sonucunda zemin şartlandırmanın burgu konveyör torkunu azalttığı gözlemlenmiştir.



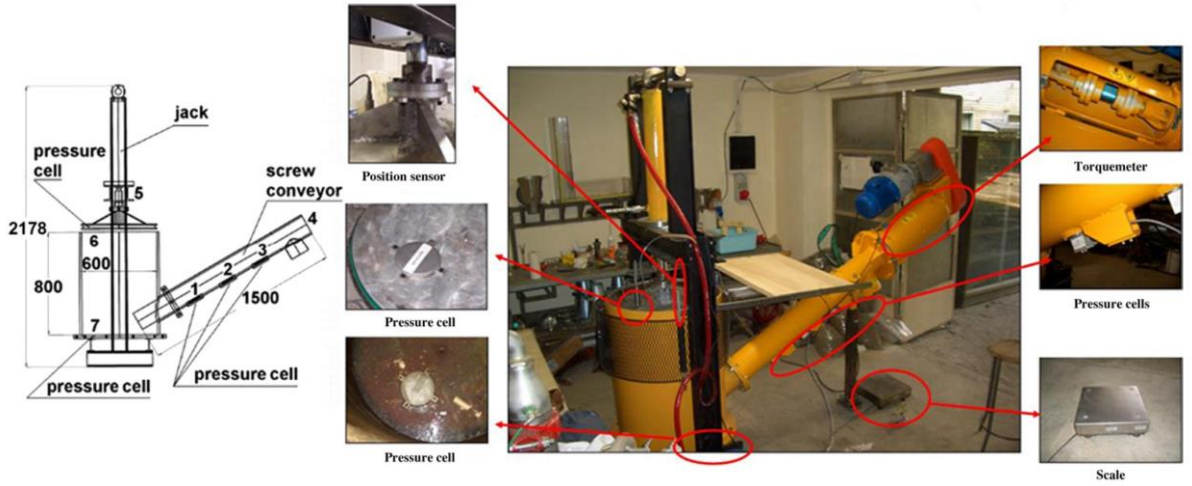
Şekil 2.36: Laboratuvar ölçekli zemin kazı seti (Bezuijen ve Schaminee, 2001).



Şekil 2.37: Laboratuvar tipi burgu konveyör (Merrit ve Mair, 2006).

Politecnico di Torino Üniversitesinde yapılan çalışmalarda 1/10 ölçekli laboratuvar tipi burgu konveyör (Şekil 2.38) kullanılmış ve konveyörde oluşan tork, basınç dağılımı gibi parametreler incelenmiştir (Peila ve diğ. 2013).

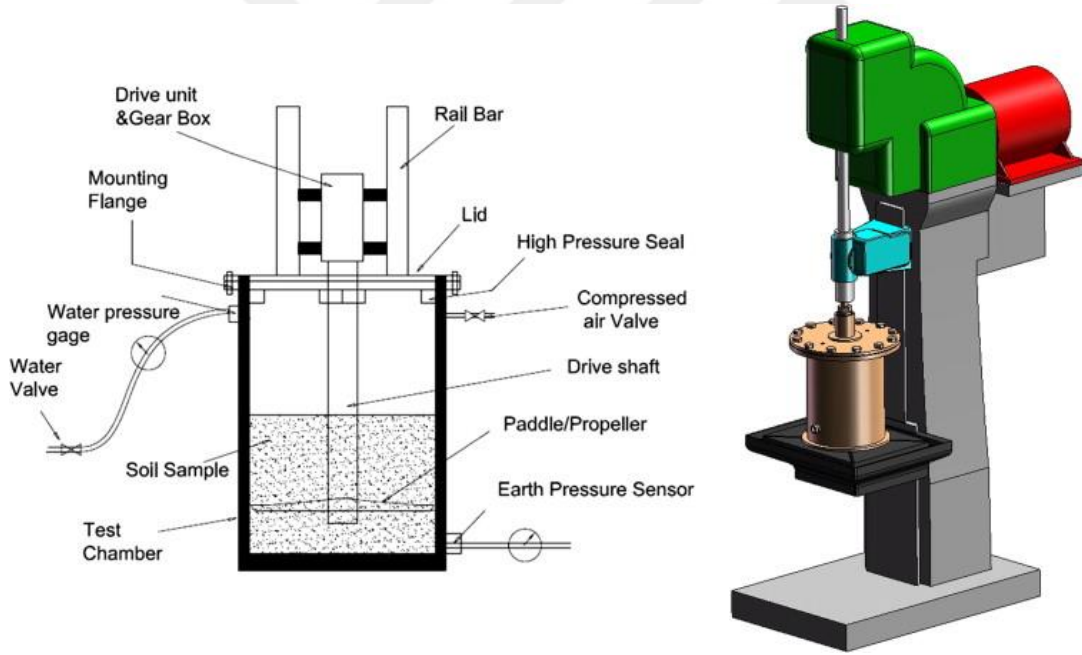
Zemin şartlandırmanın keskinlerde oluşan aşınmaya etkisini araştırmak amacıyla geliştirilen testte zemin içinde sabit hızda ve belirli sürede döndürülen disk (Şekil 2.39) (Peila 2011) veya bıçaklarda (Nilsen ve diğ, 2007; Gharahbagh ve diğ, 2011 (Şekil 2.40) oluşan ağırlık kaybını ölçerek zemin şartlandırmanın keskinlerde oluşan aşınmayı azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 2.38: 1/10 ölçekli burgu konveyör (Peila ve diğ, 2013).



Şekil 2.39: Disk kullanılan zemin aşınma testi (Peila, 2011).



Şekil 2.40: Bıçak kullanılan zemin aşınma testi (Gharahbagh ve diğ., 2011).

3. ARAZİ ÇALIŞMALARI KAPSAMINDA İNCELENEN PROJELER

Zemin şartlandırmanın EPB TBM'lerin performansına etkilerinin araştırılması amacıyla İstanbul'da kazı çalışmaları yürütülen 3 farklı tünel projesinde arazi çalışmaları yapılmıştır. Bu sahalar:

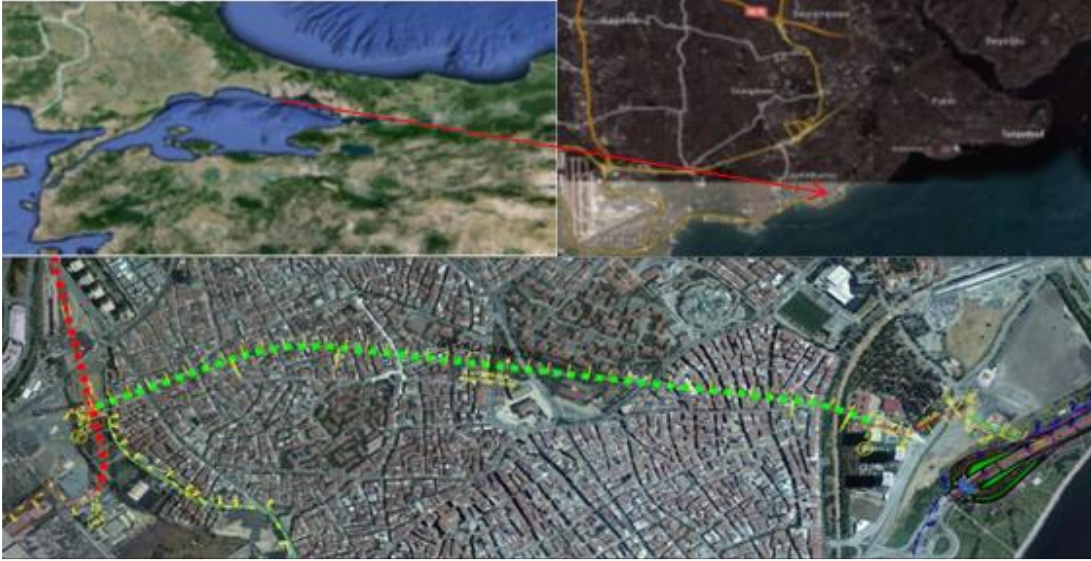
- 1) Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli (Yüklenici: Eferay-Silahtaroğlu İnşaat Ortaklığı, İşveren: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi-İSKİ)
- 2) Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli (Yüklenici: Akad-Nas İnşaat Ortaklığı, İşveren: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi-İSKİ)
- 3) Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli (Yüklenici: Gülermak-Kolin-Kalyon İnşaat Ortaklığı, İşveren: İstanbul Büyükşehir Belediyesi-İBB)

Tünel sahaları ziyaret edilerek sahanın jeolojisi-uygulanan kazı yöntemi-TBM özellikleri ile ilgili bilgiler edinilmiştir. Daha sonra, numune temin edilmiş ve kullanılan EPB TBM'lerin performans kayıtları ile vardiya raporları elde edilmiştir; ayrıca gözlemler yapılmıştır. Aşağıda bu sahalar ve projeler hakkında bilgiler verilmiştir.

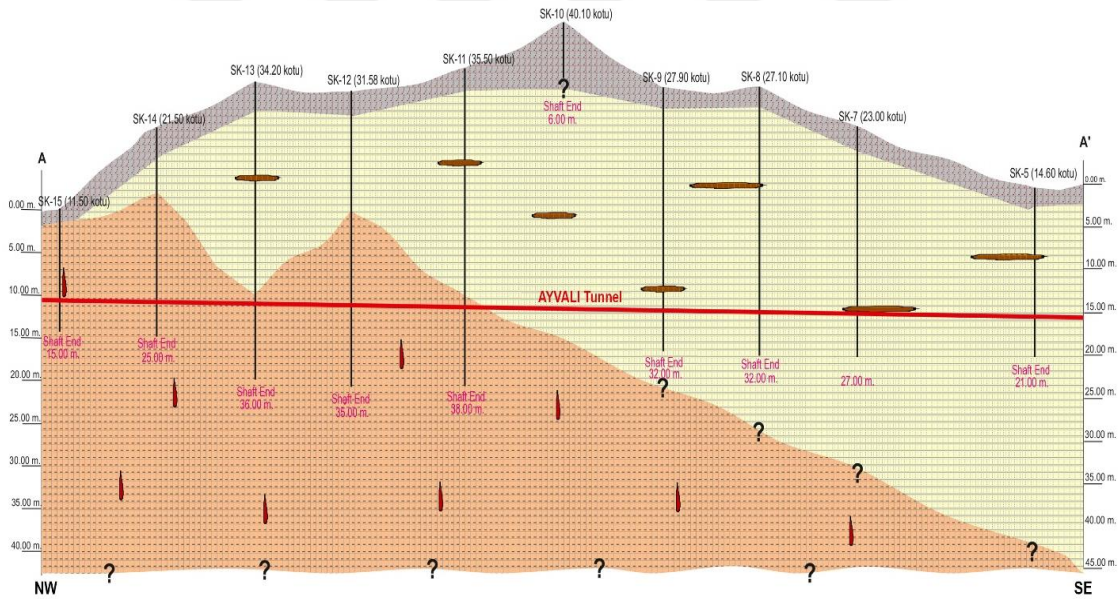
3.1 Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli

Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli 1969 m uzunluğunda olup nihai tünel çapı 3,00 metredir, tünel kazısı Tünel İstanbul'un Avrupa yakasında Kazlıçeşme ve Çırpıcı güzergâhları arasındadır (Şekil 3.1). Bu tünel ile güzergah boyunca atık suları toplayıp Yenikapı'daki arıtma tesisine ileten hattın önemli bir kısmı bitmiş olacaktır.

Tünel güzergahının jeolojik yapısı Çekmece Formasyonu'nun Bakırköy biriminin Güngören üyesidir. Güzergahın boyuna jeolojik kesiti Şekil 3.2'de verilmektedir. Şekil 3.2'de turuncu renk ile gösterilen birim grimsi bej, düşük-orta plastisiteli, çakıl-karbonat parçaları-demir oksit içeren kumlu siltli kil içermektedir. Krem renkli birim, beyazımsı poroz, düşük-orta dayanımlı, alterasyon derecesi W2-W3 olan kil arabantlı kireçtaşıdır. En üstteki gri birim ise dolgudur.



Şekil 3.1: Ayvalı-2 tüneli güzergahı.



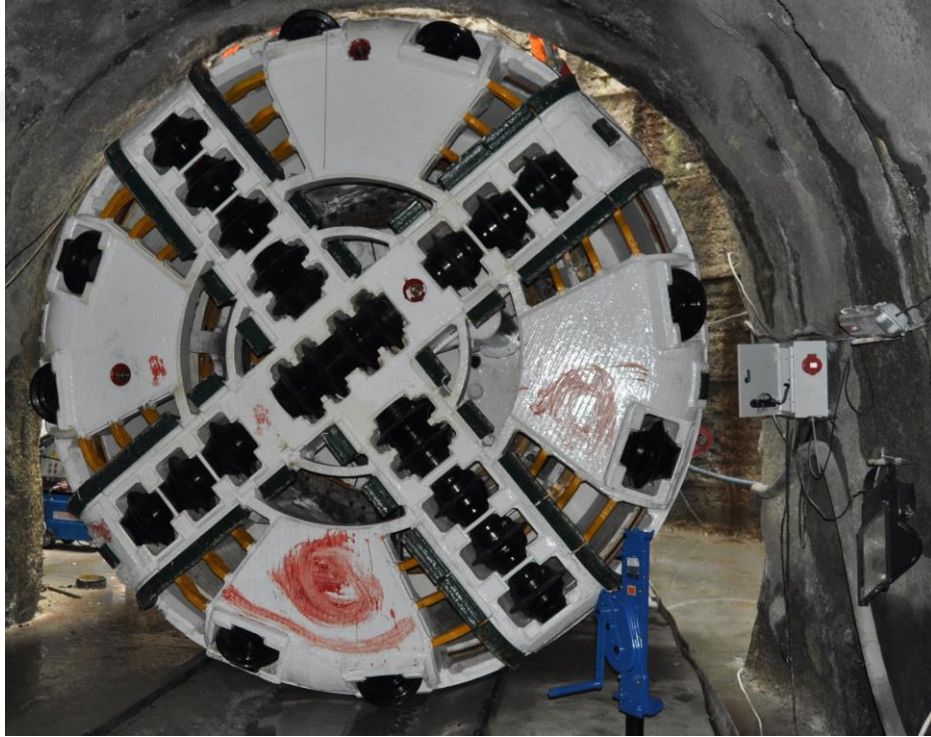
Şekil 3.2: Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli güzergahının jeolojik kesiti.

Tünel kaplaması olarak donatılı segment halkaları kullanılmaktadır. Her bir halka 6 segmentten oluşmaktadır. Segmentlerin kalınlıkları 20 cm, iç çapları 3,30 m, dış çapları 3.70 m ve uzunlukları ise 1,30 m'dir. Segmentlerin üzeri 15 cm PVC ile kaplanacaktır ve dolayısı ile bitmiş çap 3,0 m olacaktır. Segment ile 3,90 m kazı çapındaki tünel cidarı çift bileşenli grout enjeksiyonu (su, bentonit, çimento ve sodyum silikat) ile doldurulmaktadır. Kazılan malzeme kuyruk konveyörü ile 4 vagonluk bir lokomotif katarına aktarılır ve oradan kuyu başına taşınarak bir vinç ile yeryüzüne çıkarılır.

Bu tünelde kullanılan EPB TBM Lovsuns firması tarafından üretilmiştir (Şekil 3.3). Kullanılan EPB TBM'in bazı teknik özellikler Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1: Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli'nde kullanılan EPB TBM'in teknik özellikleri.

Kesici kafa (kazı) çapı	3,95 m
Kesici kafa açıklık oranı	25 %
Kesici kafa motor gücü	524 kW
Maksimum tork	1497 kNm
Kesici kafa maksimum dönüş hızı	0-6 dev/dak
Maksimum itme kuvveti	1200 ton
Burgulu konveyör iç çapı	550 mm
Burgulu konveyör uzunluğu	12 m
Burgulu konveyör dönüş hızı	0-30 dev/dak
Disk keski sayısı	28
Disk keski çapı	15,5 inç
Kalkan uzunluğu	10 m
Backup uzunluğu	70 m
Katardaki vagon sayısı	4
Vagon hacmi	7,2 m ³

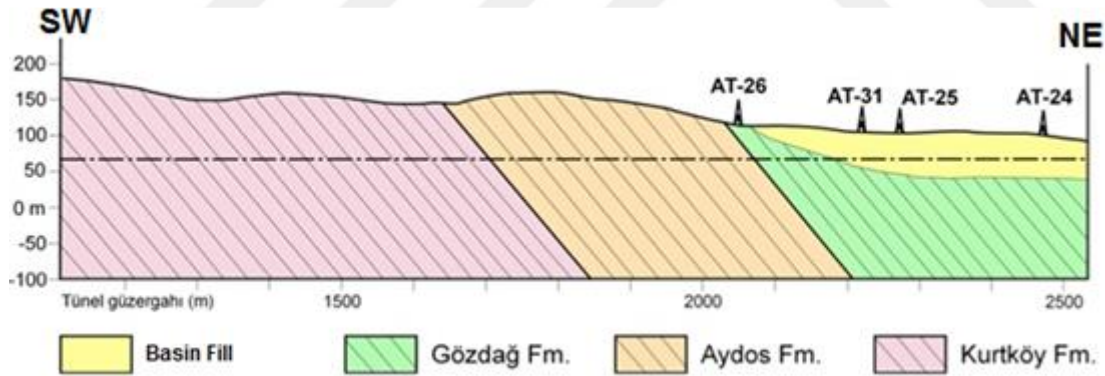


Şekil 3.3: Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli'nde kullanılan EPB TBM.

3.2. Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli

Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli 8178 m uzunluğundadır ve bitmiş çap 2,20 m olacaktır. İstanbul'un Anadolu yakasında bulunan tünelin ana amacı atık suları toplayıp Tuzla Arıtma Tesisi'ne iletmektir. Tünel kazısı 7 Temmuz 2014 tarihinde S9-238 Şaftından başlamış olup genellikle sert kaya kazısı yapılmıştır, 14 Temmuz 2015 tarihinde ise 2189 metrelik kazının ardından S8-237 Şaftına ulaşılmıştır. Tünel güzergâhında S8-237 şaftından sonrası kazısı yapılacak bölgenin jeolojik yapısı Sultanbeyli Formasyonuna aittir.

Tünel güzergâhının jeolojik kesiti Şekil 3.4'de görülmektedir. Tünelin 2+200 km'sinden sonraki kısım şekilde sarı ile görülen Senzoyik yaşlı ve kil-kum-çakıl içeren Sultanbeyli Formasyonu içinde yer alan Havza Dolgusu içinden geçmektedir. Sultanbeyli Formasyonu, birbirleriyle yanal ve düşey geçişli, tutturulmamış kum, çakıl, kil, yer yer blok boyu kırıntılı gereçten oluşur. Formasyonun proje alanındaki istifleri, egemen litoloji özelliklerine göre Orhanlı Üyesi, Dudullu Üyesi, Tuğlacıbaşı Üyesi, Altıntepe Üyesi ve İkiz Tepeler Üyesi adları altında incelenmiştir. Örtü tabakası kalınlığı 10 ile 90 m arasında değişmektedir.



Şekil 3.4: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli jeolojik kesiti (Akyüz ve Çopur 2015).

Tünel kaplaması olarak donatılı segment halkaları kullanılmaktadır. Her bir halka 6 segmentten oluşmaktadır. Segmentlerin kalınlıkları 15 cm, iç çapları 2,60 m, dış çapları 2,90 m ve uzunlukları ise 1,00 m'dir. Segmentlerin üzeri 20 cm beton ile kaplanacaktır ve dolayısı ile bitmiş çap 2,20 m'dir. Segment ile 3,151 m kazı çapındaki tünel cidarı grout enjeksiyonu ile doldurulmaktadır. Kazılan malzeme kuyruk konveyörü ile her biri 4 m³ kapasiteli 4 vagon, 1 grout mikseri ve 1 malzeme ve insan nakliye arabası içeren bir lokomotif katarına aktarılır ve oradan kuyu başına taşınarak bir vinç ile yeryüzüne çıkarılır.

Bu tünelde kullanılan EPB TBM Herrenknecht firması tarafından üretilmiştir (Şekil 3.5). Kullanılan EPB TBM'in bazı teknik özellikler Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Bu proje kapsamında zemin numuneleri, S9-237 kuyusundan açılan kuyruk tünelinin kazı aynasından alınmıştır.



Şekil 3.5: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli'nde kullanılan EPB TBM.

Çizelge 3.2: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli'nde kullanılan EPB TBM'in teknik özellikleri.

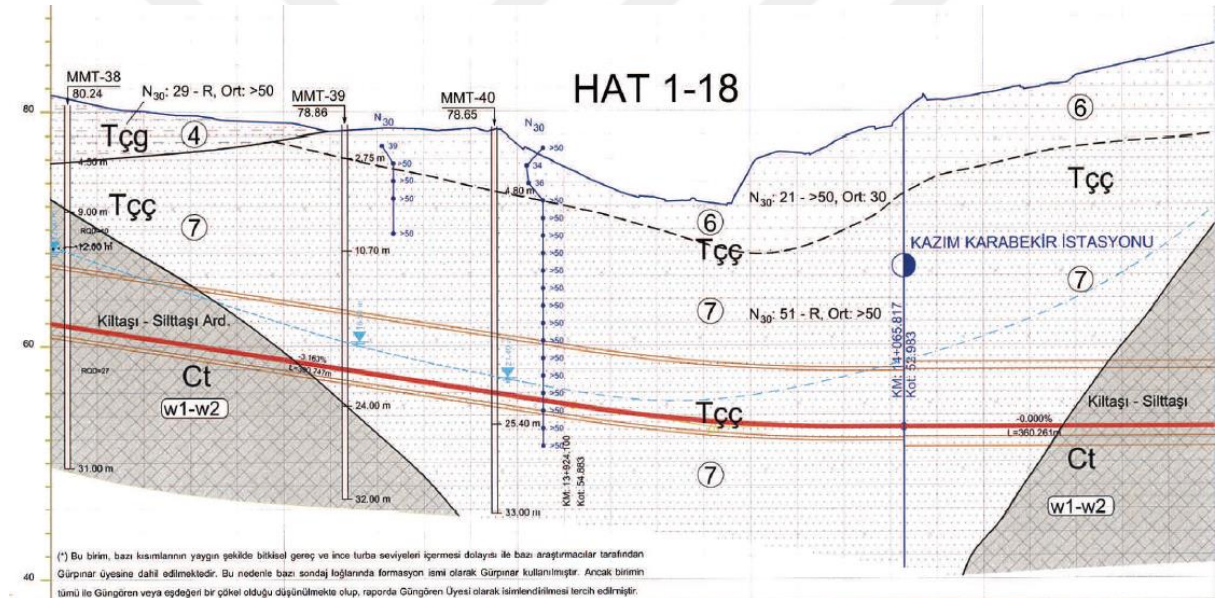
Toplam uzunluk (TBM + backup)	62 m
Kazı çapı	3151 mm
Kalkan çapı	3095 mm
İtme silindiri sayısı	8
İtme silindiri stroğu	1700 mm
Ana yatak itme kapasitesi	3500 kN
Maksimum kesici kafa torku (sürekli)	620 kNm
Kesici kafa dönüş hızı	0-9.2 dev/dak
Kurulu (toplam) güç	800 kW
Kesici kafa gücü	$2 \times 225 = 450$ kW
Disk keski sayısı	4 tekli disk (merkez) + 2 tekli disk (köşe) 9 çiftli disk (ayna) (monoblock)
Disk keski çapı	12 inç (305 mm)
Sıyırıcı ve kova sayısı	16 sıyırıcı keski + 6 kova
Burgulu konveyör nominal çapı	500 mm
Burgulu konveyör dönüş hızı	0-27 dev/dak

3.3 Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli

Uzunluğu 18 km olan Mecidiyeköy-Mahmutbey (Şişli-Kağıthane – Eyüp – Gaziosmanpaşa – Esenler - Bağcılar İlçeleri) Metro Hattı ana hat tünelleri ve viyadükleri, delme, aç-kapa ve viyadük tipinde toplam 15 adet istasyondan oluşmaktadır. Tez çalışması kapsamında Kazım Karabekir istasyonu çalışma alanı olarak belirlenmiştir.

Kazım Karabekir İstasyonu'nun geçtiği formasyon, başlıca tutturulmamış çakıl, kum, mil karışımından oluşur. Küçükköy, Çukurçeşme ve Mahmutbey semtlerinde sınırlı bir alanda yüzeyleyen çapraz katmanlı, kızıl-kahverengi, bol mikalı, yer yer kil arakatlı, ufak çakıl ve çakılcıklı tutturulmamış kumların egemen olduğu bir istiftir.

Numune alınan lokasyonun jeolojik kesiti Şekil 3.6'da verilmektedir.



AÇIKLAMALAR

Çekmece Formasyonu - Güngören Üyesi (Tçg)

(4) Sert Kil / Siltli Kil ve Kiltaşı
Ardalanması, Az Kumlu (*)

Çekmece Formasyonu - Çukurçeşme Üyesi (Tçç)

(6) Orta Sıkı - Sıkı Kum / Siltli Kum,
İnce Kil ve Çakıl Ara Seviyeli

(7) Sıkı Siltli Kum - Kumtaşı Ardalanması

Trakya Formasyonu (Ct)

(w3-w4) Orta Derecede Ayrışmış Kaya
(Kumtaşı - Şeyli Ardalanması)

(w1-w2) Az Ayrışmış - Ayrışmamış Kaya
(Kumtaşı - Şeyli Ardalanması)

Şekil 3.6: Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Hattı Kazım Karabekir İstasyonu jeolojik kesiti.

Tünel kaplaması olarak donatılı segment halkaları kullanılmaktadır. Her bir halka 6 segmentten oluşmaktadır. Segmentlerin kalınlıkları 30 cm, iç çapları 5,70 m, dış çapları 6,30 m ve uzunlukları ise 1,40 m'dir. Segment ile 6,60 m kazı çapındaki tünel

cidarı grout enjeksiyonu ile doldurulmaktadır. Kazılan malzeme kuyruk konveyörü ile bant konveyöre aktarılır ve oradan yeryüzüne çıkarılır. Çalışma düzeni 7 gün/hafta, 2 vardiya/gün, 12 saat/vardiya'dır.

Bu tünelde kullanılan 3 EPB TBM'den Terratec firması tarafından üretilen incelenmiştir (Şekil 3.7). Kullanılan EPB TBM'in bazı teknik özellikler Çizelge 3.3'te verilmektedir. Bu proje kapsamında zemin numuneleri, Kazım Karabekir İstasyon kazı aynasından alınmıştır.



Şekil 3.7: Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Tüneli'nde kullanılan EPB TBM.

Çizelge 3.3: Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Tüneli'nde kullanılan EPB TBM'in teknik özellikleri.

Kazı çapı, Kalkan çapı	6600 mm, 6560 mm
İtme silindiri stroğu	2150 mm
İtme kapasitesi	16 x 2500 = 40000 kN
Kesici kafa torku (sürekli, aralıklı)	5440 kNm, 7073 kNm
Kesici kafa dönüş hızı	0-3 dev/dak
Kesici kafa gücü	6 x 160 = 960 kW
Disk keski sayısı	33 tekli disk (merkez) + (ayna + köşe) 5 çiftli disk (ayna)
Disk keski çapı	17 inç (432 mm)
Sıyırıcı ve kova sayısı	40 sıyırıcı keski + 12 kova
Burgulu konveyör iç çapı	900 mm
Burgulu konveyör maksimum tork	145,3 kNm
Burgulu konveyör dönüş hızı	0-18,3 dev/dak



4. DENEYSEL YÖNTEM VE PARAMETRELER

4.1 Giriş

Bu bölümde doktora tezi kapsamında yürütülen laboratuvar ve arazi deneyleri açıklanmıştır. Seçilen ekipman ve deney prosedürleri zemin şartlandırmanın EPB TBM'lerin performansına etkisinin araştırılması amacıyla belirlenmiştir. Seçilen deneyler 3 ana bölümde incelenmiştir. İlk olarak zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerdir. İkinci olarak zemin şartlandırmada kullanılan köpüklerin karakterizasyon deneylerini içermektedir. Üçüncü olarak ise şartlandırma kimyasallarının ve suyun zeminin mühendislik özelliklerine etkisini (zemin-köpük etkileşimini) araştırmaya yönelik deneyler anlatılmıştır.

4.2 Zemin Karakterizasyon Deneyleri

4.2.1 Zeminlerin doğal su içeriğinin belirlenmesi

Zemin örneklerinin doğal su içeriğinin belirlenmesi amacıyla yapılacak deney prosedüründe ASTM D2216-10 standardına bağlı kalınmıştır. Kullanılacak kaplar etüv kurusu haline getirilerek tartılır ve ağırlığı M_c olarak kaydedildikten sonra, yaklaşık 80 gr numune kabın içine yerleştirilir ve ağırlığı M_{cms} olarak kayıt edilir ve bu şekilde en az 3 numune hazırlanır. Kaplar etüve yerleştirilerek 105 C sıcaklıkta en az 24 saat bekletilir (Şekil 4.1). Sabit ağırlığa gelen numuneler etüvden çıkarılarak 1-2 saat soğutulur ve ağırlıkları kaydedilir (M_{cds}). Deney sonrası elde edilen veriler kullanılarak Eşitlik 4.1,4.2 ve 4.3 kullanılarak zemin numunesinin doğal su içeriği belirlenir.

- Zemin numunesinin ağırlığı:

$$M_s = M_{cds} - M_c \quad (4.1)$$

- Suyun ağırlığı:

$$M_w = M_{cms} - M_{cds} \quad (4.2)$$

- Su içeriği:

$$W = \left(\frac{M_w}{M_s} \right) \times 100, (\%) \quad (4.3)$$



Şekil 4.1: Doğal su içeriği tayini.

4.2.2 Parça boyut dağılım deneyi

Zeminlerin parça boyut dağılımı, davranışlarını etkileyen temel faktördür, parça boyut dağılımından elde edilen veriler ışığında zemin sınıflandırılmaları yapılır. Bu deney prosedüründe ASTM D422 nolu standart takip edilmiştir.

1000 gr etüv kurusu numune tartılarak tepsiye alınır, daha sonra 200 numaralı yıkama eleğine kurutulmuş numuneden 100'er gr alınarak su altında kil ve silt tamamen elenene kadar yıkanır ve 1000 g'lık numune bitene kadar tekrarlanır (Şekil 4.2). Elek üstünde ve altında kalan malzeme geniş tepsilere alınarak 24 saat çöktürülüp fazla suyu atılır. Daha sonra elek altı ve üstü malzeme 105 C° sıcaklıktaki etüve konularak 24 saat bekletilir, bekletme esnasında elek altı (kil ve silt) malzemenin tepsi yüzeyine yapışmasını azaltmak için aralıklarla etüvden çıkarılarak spatula yardımıyla karıştırılır. 24 saatin sonunda etüvden çıkarılan numuneler soğumaya bırakılır ve tartımları alınır. Elek üstünde kalan numuneye (çakıl+kum) parça boyut dağılımının belirlenmesi amacıyla elek analizi yapılır. Elek üstünde kalan numunelerin tartımları alınarak kayıt edilir. Yıkama eleğinde elek altında kalan

kil ve silt ise boyut dağılımlarının belirlenmesi amacıyla hidrometre analizine tabi tutulur.



Şekil 4.2: Numunelerin yıkama eleğinde yıkanması.

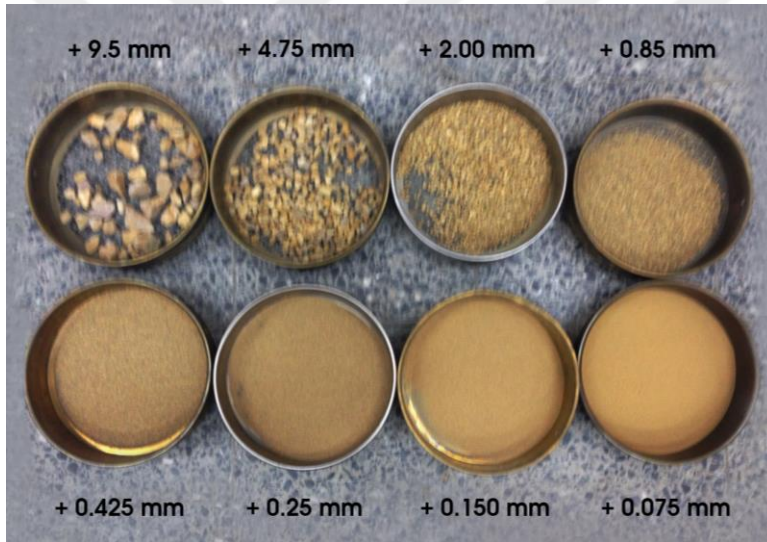
4.2.2.1 Elek analizi

Elek analizi kaba daneli zeminlerin parça boyut dağılımı belirlemek amacıyla, numunelerin elek setine konularak mekanik olarak verilen titreşimle elek açıklarından geçmesi prensibine dayanır. Etüvden alınan numune tartılır ve elek setine konularak eleme cihazına yerleştirilir (Şekil 4.3) ve 10-15 dakikalık eleme süresi sonrası elek seti ayrılarak her elekte kalan numune miktarı tartılır (Şekil 4.4.). Eşitlik 4.4. kullanılarak elek üstü numune oranı hesaplanır.

$$\text{Elek üstü kalan (\%)} = \frac{\text{elek üstünde kalan numune ağırlığı}}{\text{toplam numune ağırlığı}} \quad (4.4)$$



Şekil 4.3: Eleme cihazındaki elek seti.



Şekil 4.4: Elek üzerinde kalan zemin numuneleri.

4.2.2.2 Hidrometre analizi

Hidrometre analizi 0,075 mm boyutunun altındaki zemin danelerinin parça boyut dağılımını belirlemek amacıyla kullanılır. Deney için aşağıdaki ekipmanlar kullanılmaktadır.

- ASTM 152H hidrometre
- Mikser
- İki adet dereceli silindir (100cl)
- Termometre

- Sodium hexametaphosphate
- Piset

Yıkama sonrasında 0,075 mm boyutundaki elek altı numunesi etüvde kurutulduktan sonra 125 ml sodyum heksametafosfat çözeltisi ile karıştırılır. Sıfır ve menisküs düzeltmelerini okumak için kontrol silindrine 125 ml sodyum heksametafosfat çözeltisi dökülür ve üzeri saf su ile tamamlanır. Çözelti haline getirilen zemin numunesi mikserle boşaltılarak 5 dk süre ile karıştırılır ve hemen dereceli silindire boşaltılarak üzeri saf su ile tamamlanır. Silindir 1 dakika boyunca ters-düz edilerek saf su ile çözeltinin karışması sağlanır ve düz zemin üzerine konulur. Hidrometre silindir içine yerleştirilerek ilk okuma alınır (Şekil 4.5). Daha sonra 0,5, 2, 4, 6, 8, 15, 30, 60, 120, 1380 ve 1440 dakikalarda hidrometre ve sıcaklık okumaları alınarak kaydedilir.



Şekil 4.5: Hidrometre analizi.

Hidrometre analizi hesaplamaları aşağıdaki yöntemlere göre yapılır

- Menisküs düzeltmesi gerçek hidrometre okumasına uygulanır
- Efektif hidrometre derinliği (L) Çizelge 4.1 yardımıyla bulunur
- K faktörü özgül ağırlığı bilinen numune için Çizelge 4.2 yardımıyla bulunur
- Eşdeğer tane çapı (D) Eşitlik 4.5 yardımıyla bulunur.

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4.5)$$

D= dane çapı, mm

K= Süspansiyon sıcaklığı ve zemin danelerinin özgül ağırlığına bağlı olan sabit

L= Efektif hidrometre derinliği

t= zaman, dakika

- Sıcaklık düzeltmesi (C_T) Çizelge 4.3 yardımıyla bulunur
- Düzeltme faktörü “a” Çizelge 4.4 yardımıyla bulunur
- Düzeltilmiş hidrometre okuması (R_c) Eşitlik 4.6 kullanılarak hesaplanır

$$R_c = R_{gerçek} - Sıfır düzeltmesi + C_T \quad (4.6)$$

Çizelge 4.1: 152 H hidrometre için efektif derinlik değerleri (ASTM D422).

Gerçek Hidrometre Okuması, cm	Efektif Derinlik, L, cm	Gerçek Hidrometre Okuması, cm	Efektif Derinlik, L, cm
0	16,3	31	11,2
1	16,1	32	11,1
2	16,0	33	10,9
3	15,8	34	10,7
4	15,6	35	10,6
5	15,5	36	10,4
6	15,3	37	10,2
7	15,2	38	10,1
8	15,0	39	9,9
9	14,8	40	9,7
10	14,7	41	9,6
11	14,5	42	9,4
12	14,3	43	9,2
13	14,2	44	9,1
14	14,0	45	8,9
15	13,8	46	8,8
16	13,7	47	8,6
17	13,5	48	8,4
18	13,3	49	8,3

Çizelge 4.1 (devam): 152 H hidrometre için efektif derinlik değerleri (ASTM D422).

19	13,2	50	8,1
20	13,0	51	7,9
21	12,9	52	7,8
22	12,7	53	7,6
23	12,5	54	7,4
24	12,4	55	7,3
25	12,2	56	7,1
26	12,0	57	7,0
27	11,9	58	6,8
28	11,7	59	6,6
29	11,5	60	6,5

Çizelge 4.2: Sıcaklık ve özgül ağırlığa bağlı K değerleri (ASTM D422).

Sıcaklık (°C)	Zemin danelerinin özgül ağırlığı (g/cm ³)								
	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85
16	0,01511	0,01486	0,01462	0,01439	0,01417	0,01396	0,01376	0,01356	0,01338
17	0,01492	0,01467	0,01443	0,01421	0,01399	0,01378	0,01359	0,01339	0,01321
18	0,01474	0,01449	0,01425	0,01403	0,01382	0,01361	0,01342	0,01323	0,01305
19	0,01456	0,01431	0,01408	0,01386	0,01365	0,01344	0,01325	0,01307	0,01289
20	0,01438	0,01414	0,01391	0,01369	0,01348	0,01328	0,01309	0,01291	0,01273
21	0,01421	0,01397	0,01374	0,01353	0,01332	0,01312	0,01294	0,01276	0,01258
22	0,01404	0,01381	0,01358	0,01337	0,01317	0,01297	0,01279	0,01261	0,01243
23	0,01388	0,01365	0,01342	0,01321	0,01301	0,01282	0,01264	0,01246	0,01229
24	0,01372	0,01349	0,01327	0,01306	0,01286	0,01267	0,01249	0,01232	0,01215
25	0,01357	0,01334	0,01312	0,01291	0,01272	0,01253	0,01235	0,01218	0,01201
26	0,01511	0,01486	0,01462	0,01439	0,01417	0,01396	0,01376	0,01356	0,01338
27	0,01342	0,01319	0,01297	0,01277	0,01258	0,01239	0,01221	0,01204	0,01188
28	0,01327	0,01304	0,01283	0,01264	0,01244	0,01255	0,01208	0,01191	0,01175
29	0,01312	0,0129	0,01269	0,01269	0,0123	0,01212	0,01195	0,01178	0,01162
30	0,01298	0,01276	0,01256	0,01236	0,01217	0,01199	0,01182	0,01165	0,01149

D çapından küçük tanelerin ağırlıkça yüzdesi (P) Eşitlik 4.7 yardımıyla hesaplanır:

$$P = \frac{R_c \times a}{W_s} \times 100 \quad (4.7)$$

- Dzeltiymiş ağırlıkça yüzde Eşitlik 4.8 kullanılarak hesaplanır:

$$P_A = \frac{P \times F_{200}}{100} \quad (4.8)$$

F₂₀₀= 200 numaralı elek altında kalan malzeme miktarı

Çizelge 4.3: Sıcaklık düzeltme faktörü (C_T) (ASTM D422).

Sıcaklık (°C)	Düzeltme faktörü (C _T)
15	1,10
16	-0,90
17	-0,70
18	-,0,50
19	-0,30
20	0
21	0,20
22	0,40
23	0,70
24	1,0
25	1,30
26	1,65
27	2,00
28	2,50
29	3,05
30	3,80

Çizelge 4.4: Özgül ağırlık değerlerine göre “a” düzeltme faktörü (ASTM D422).

Zemin danelerinin özgül ağırlığı g/cm ³	Düzeltilme faktörü (a)
2,85	0,96
2,80	0,97
2,75	0,98
2,70	0,99
2,65	1,00
2,60	1,01
2,55	1,02
2,50	1,04

4.2.3 Likit limit deneyi

Likit limit zeminin likit kıvamdan plastik kıvama geçerken sahip olduğu su içeriği olarak tanımlanır. Likit limit deneyinde pratik ve daha kesin sonuçlar vermesi nedeniyle düşen konik penetrometre deneyi (BS 1377-2) tercih edilmiştir. Likit limiti tayin edilecek numuneden 300 gr tartılır ve 105 C° sıcaklıktaki etüve konularak 24 saat bekletilir. Etüvden alınan numune soğutulur ve derin bir kaba alınarak su eklenerek spatula yardımıyla homojen oluncaya dek karıştırılır. Daha sonra kaptan alınan numune konik penetrometre deneyi için alüminyum kaba konulur. Konik penetrometreye yerleştirilen zemin örneğine 80 gr ağırlığındaki konik uç düşürülür ve batma derinliği ölçülür, deney farklı su içeriklerinde tekrarlanır ve 20 mm batma derinliğine denk gelen su içeriği likit limit olarak belirlenir. Her bir batma derinliği için numuneden yaklaşık 10 gr alınarak su içeriği bulunur ve kaydedilir. 20 mm batma derinliğine denk gelen su içeriği zemin numunesinin likit limit değeri olarak belirlenir.



Şekil 4.6: Düşen konik penetrometer deney cihazı.

4.2.4 Plastik limit deneyi

Zeminlerin plastik limit değeri plastik kıvamdan yarı katı kıvama geçerken sahip olduğu su içeriği olarak tanımlanır. Bu deney için ASTM D 4318 standardı takip edilmiştir. Likit limit deneyinde kullanılan zeminden 3 parça örnek alınarak top haline gelinceye kadar yuvarlanır. Daha sonra top haline getirilen numuneler cam üzerinde alınarak parmaklar yardımıyla yuvarlanarak silindir hale getirilir ve yaklaşık 3,2 mm çapına gelinceye kadar devam edilir (Şekil 4.7). 3,2 mm çapına geldikten sonra numune likit kıvamdan plastik kıvama geçiyorsa yani yuvarlanan numunede kopmalar parçalanmalar başladıysa deney sonlandırılır ve numunenin su içeriği bulunur, elde edilen su içeriği zeminin plastik limitidir



Şekil 4.7: Plastik limit deneyi.

4.2.5 Arazi tipi kanatlı kesme (shear vane) deneyi (Geonor 2014)

Arazi tipi kanatlı kesme (vane shear) cihazı arazide monte edilerek sıfır düzeltmesi yapılır. Tünel aynasında veya yeryüzünde okuma alınacak alan göz ile kontrol edilir ve kaya parçaları tespit edilir ve deney noktaları bu bölgelerden uzak olarak seçilir. Daha sonra vane tünel aynasına veya zemine dik olacak şekilde plastik tokmak vasıtasıyla kanatlar zemine gömülünceye kadar çakılır. Torkmetre çakılan vane' e ilgili aparatlar kullanılarak bağlanır. Torkmetre sıfırlandıktan sonra yaklaşık 60 saniyede 1 tam tur atacak şekilde döndürülerek zeminin yenilmesi sağlanır, zeminin yenilme anındaki torkmetrede okunan değer kayıt edilir (Şekil 4.8). Cihaz sahada kullanılabilir.



Şekil 4.8: Arazi tipi kanatlı kesme (shear vane) deneyi.

4.2.6 Statik konik penetrometre deneyi (Humbold 2014)

Konik penetrometre arazide monte edilerek sıfır düzeltilmesi yapılır. Tünel aynasında okuma alınacak alan göz ile kontrol edilir ve büyük boyutlu çakıl ve kaya parçaları tespit edilir ve deney noktaları bu bölgelerden uzak olarak seçilir. Okuma alınacak yüzey ile pin arasında dik açı olacak şekilde penetrometre yüzeye yerleştirilir ve pini yüzeye batıracak kuvvet uygulanarak tek seferde itilir ve elde edilen kesme dayanımı kayıt edilir (Şekil 4.9). Cihaz sahada kullanılabilir.



Şekil 4.9: Statik konik penetrometre deneyi.

4.2.7 Cep tipi (vane shear) kanatlı kesme deneyi

Düz ve homojen bir zemin yüzeyine (laboratuvar veya arazide) dik açıyla yerleştirilerek sıfır düzeltilmesi yapılır. Pini yüzeye batıracak kuvvet uygulanarak tek seferde itilir ve yavaşça çevrilir. Kesme gerçekleştiği an çevirme durdurulur. Elde edilen kesme dayanımı kayıt edilir (Şekil 4.10). Cihaz hem sahada hem de laboratuvarında kullanılabilir.



Şekil 4.10: Cep tipi kanatlı kesme deneyi.

4.2.8 Cep penetrometresi deneyi (Humboldt kullanım kılavuzu)

Yaylı yuvarlak kesitli uç belirlenen derinlikte düz ve homojen yüzeye batırılır, elde edilen basınç dayanımı okunur (Şekil 4.11). Cihaz hem sahada hem de laboratuvarında kullanılabilir.



Şekil 4.11: Cep tipi penetrometre deneyi.

4.3 Köpük Karakterizasyon Deneyleri

Köpük karakterizasyon deneyleri zemin şartlandırma deneylerinde kullanılacak köpüklerin optimizasyonu amacıyla kullanılmaktadır, deneyler sırasında EFNARC 2005 standartları takip edilmiştir.

4.3.1 Köpük jeneratörü

Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen köpük deneylerinde kullanılmak üzere İKSA Yapı Kimyasalları firmasının desteğiyle laboratuvar tipi köpük jeneratörü geliştirilmiştir (Şekil 4.12). Geliştirilen köpük jeneratörü farklı köpük konsantrasyonu (C_F) ve köpük genişleme oranlarında (FER) çalışabilmektedir. Köpük lensi % 90 doluluk oranına sahip plastik boncuklardan oluşmakta ve 2-4 bar çıkış basıncında köpük üretebilmektedir.



Şekil 4.12: Laboratuvar tipi köpük jeneratörü, İTÜ Maden Müh. Bölümü.

4.3.2 Köpük yoğunluğu

Yoğunluğu belirlenecek köpük 1lt boyutunda dereceli silindire doldurulur ve ağırlığı 0,1 gr hassasiyetle tartılır (Şekil 4.13) ve işlem 3 sefer tekrarlanarak ortalama ağırlık hesaplanır. Köpük yoğunluğu ($D_{köpük}$) Eşitlik 4.9 yardımıyla hesaplanır.

$$D_{köpük} = \frac{m_{köpük}}{v_{fköpük}} \quad g/cm^3 \quad (4.9)$$



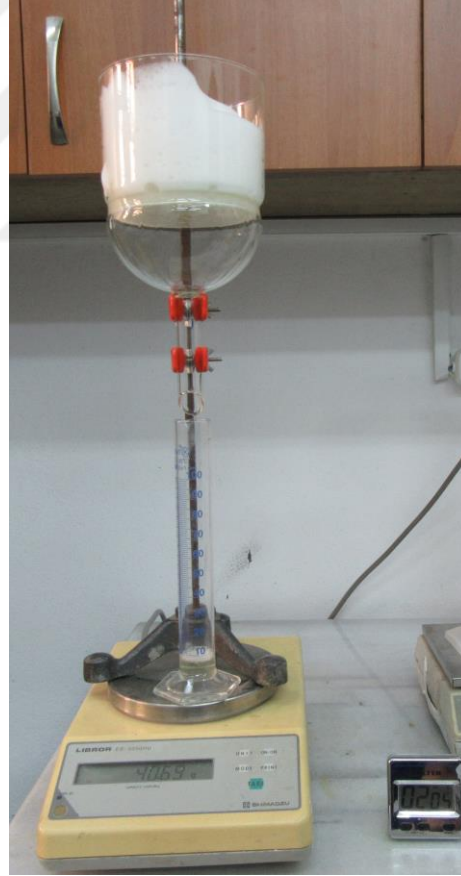
Şekil 4.13: Köpük yoğunluğu deneyi.

4.3.3 Köpük kararlılığı (yarı ömür) deneyi

Zemin şartlandırma operasyonlarında şartlandırmanın performansını belirleyen en önemli faktör köpüğün kararlılığıdır. Deney için aşağıdaki ekipmanlar kullanılmaktadır.

- 1 lt kapasiteli filtreli huni
- 1 lt kapasiteli dereceli silindir
- 50 ml kapasiteli dereceli silindir
- 0,1 gr hassasiyetli tartı
- Kronometre

Deney düzeneği (Şekil 4.14) hazırlandıktan sonra, köpük jeneratörü ile değişik CF ve FER oranlarında üretilen 80 gr köpük filtreli huniye aktarılır ve 40 ml sıvının huniden geçinceye kadar ölçülen süre köpüğün yarı ömrü olarak bulunur.



Şekil 4.14: Köpük kararlılık deneyi.

4.3.4 Köpük kabarcık boyutunun belirlenmesi

Bu deney ile ilgili herhangi bir standart yoktur. Büyütme oranı en az 30X olan ve 0,001 mm hassasiyetle okuma yapılabilen görüntülü mikrometresi bulunan, aşağı yukarı yönlerde minimum 5 cm hareket edebilen bir mikroskop kullanılarak, köpük jeneratöründen istenilen CF ve FER oranlarındaki köpük bir alüminyum kaba konular konulmaz (zaman kaybetmeden) mikroskop altına getirilerek kabarcık boyutları okunmaktadır. Okuma genel olarak 1 cm x 1 cm kare bir alanda veya daha küçük bir alanda (boyut homojenliğine göre) minimum 10 maksimum 30 okuma yapılacak şekilde gridlenerek (ortalama eşit alanlı 9 bölgeye ayrılarak) yapılmaktadır. Tüm okumalar görüntü üzerine yazdırılmakta ve görüntü kaydedilmektedir.

4.3.5 Köpüğün plastikleştirme etkisi (Efnarc 2005)

1500 gr standart çimento kumuna 45 g distile su eklenerek mikserde 2 hız ayarında 3 dakika süre ile karıştırılır. Homojen hale gelmiş standart kum DIN yayılma tablasına alınarak mold içine boşluk kalmayacak şekilde doldurulur. Daha sonra mold çıkarılarak yayılma tablası saniyede 1 tur olacak şekilde 15 kez çevrilir ve tabla üzerinde yayılan kum cetvel yardımıyla 4 farklı noktadan ölçülerek ortalama yayılma miktarı bulunur.

Köpük jeneratöründe üretilmiş köpük daha önceden su katılmış ve homojen hale gelmiş standart kuma istenilen FIR oranında katılarak mikserde 2 hız ayarında 3 dakika boyunca homojen hale gelinceye kadar karıştırılır ve DIN yayılma tablası deneyi tekrar yapılır (Şekil 4.15). Yapılan her deney için yeni standart kum numunesi kullanılır.



Şekil 4.15: DIN yayılma tablası.

4.4 Zemin+Köpük Karakterizasyon Deneyleri

Zemin ve köpüğün karakteristik özelliklerinin belirlenmesinden sonra zemin köpük etkileşiminin ve şartlandırmanın zeminin mühendislik parametrelerine etkilerinin araştırılması amacıyla şartlandırılmış zemin üzerinde karakterizasyon deneyleri yapılmıştır.

4.4.1 Güç ölçümlü karışım ve yapışma deneyi (Quebaud 1998, Efnarc 2005)

1500 gr etüv kurusu numune distile su eklenerek doğal nem içeriği veya istenilen su içeriğine gelene kadar karıştırılır. Laboratuvar tipi köpük jeneratörü vasıtasıyla üretilen köpük istenilen oranda (FIR) zemine eklenir ve 5lt kapasiteli Hobart tipi mikserde 2. kademe hız ayarında 2 dakika süre ile karıştırılır (Şekil 4.16). Karıştırma sırasında cihaza bağlanan vatmetre yardımıyla tüketilen güç kaydedilir ve deney sonunda karıştırıcı bıçak üzerine yapışmış numune miktarı 0,1 gr hassasiyetle tartılır. Deney farklı miktarlarda köpük kullanılarak güç tüketimi yaklaşık olarak % 50 azalınca kadar tekrar edilir.



Şekil 4.16: Güç ölçümlü karışım deneyi.

4.4.2 Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi şartlandırılmış zeminlerde kıvam değişimin belirlenmesi amacıyla yapılır ve deney sırasında BS 1377-2 standardı takip edilir. 1000 gr etüv kurusu numune istenilen oranda su ile karıştırılarak homojen hale getirilir. Daha sonra zemine belirlenen oranda köpük eklenerek karıştırılır. Şartlandırılmış zeminden yaklaşık 60 gr numune alınarak kaba boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilir ve 80 gr ağırlığındaki konik uç düşürülmesi sonrası elde edilen batma derinliği kaydedilir (Şekil 4.17). Deney farklı köpük miktarları kullanılarak tekrar edilir.



Şekil 4.17: Şartlandırılmış zeminde penetrasyon deneyi.

4.4.3 Cep tipi kanatlı kesme (Vane Shear) deneyi (New Zealand Geotech. Society, 2001)

Bu cihaz hem laboratuvarında hem de arazide deneyler yapmak için kullanılmıştır. Arazide doğrudan kazı yüzeyinde (zemin karakterizasyonu amacıyla) veya köpüklü pasa üzerinde (zemin + köpük karakterizasyonu amacıyla) kullanılmıştır. Cihazın laboratuvarında kullanımını ise aşağıda anlatılmaktadır:

Numunedan 1000 g tartılır ve 105 C° sıcaklıktaki etüve konularak 24 saat bekletilir. Etüvden alınan numune soğutulur ve istenilen su miktarı eklenerek mikser yardımıyla karıştırılır. Sonrasında istenilen miktarda köpük eklenerek mikser yardımıyla homojen oluncaya dek karıştırılır. Daha sonra küçük boyutlu alüminyum kap boşluk kalmayacak şekilde doldurulur, cep tipi vane shear cihazı sıfırlanarak zemine batırılarak kesme işlemi yapılır (Şekil 4.18), deney 3 kez tekrarlanır ve ortalama değer kaydedilir.



Şekil 4.18: Kesme deneyi (Cep tipi kanatlı kesme).

4.4.5 Cep penetrometresi deneyi (Humboldt kullanım kılavuzu)

Bu cihaz hem laboratuvarında hem de arazide deneyler yapmak için kullanılmıştır. Arazide doğrudan kazı yüzeyinde (zemin karakterizasyonu amacıyla) veya köpüklü pasa üzerinde (zemin + köpük karakterizasyonu amacıyla) kullanılmıştır (Şekil 4.19). Cihazın laboratuvarında kullanımını ise aşağıda anlatılmaktadır:

Numuneden 1000 g tartılır ve 105 C° sıcaklıktaki etüve konularak 24 saat bekletilir. Etüvden alınan numune soğutulur ve istenilen su miktarı eklenerek mikser yardımıyla karıştırılır. Sonrasında istenilen miktarda köpük eklenerek mikser yardımıyla homojen oluncaya dek karıştırılır. Daha sonra küçük boyutlu alüminyum kap boşluk kalmayacak şekilde doldurulur, cep penetrometresi cihazı sıfırlanarak zemine batırılarak batma işlemi yapılır, deney 3 kez tekrarlanır ve ortalama değer kaydedilir.



Şekil 4.19: Cep tipi penetromenin sahada kullanımı.

4.4.6 Slump deneyi (ASTM C 143)

Slump deneyi taze betonların kıvamının ölçülmesi amacıyla geliştirilmiş bir deneydir, tez kapsamında şartlandırılmış zeminlerin kıvam değişimlerinin ölçülmesi amacıyla kullanılmıştır. 12 kg numune tartılarak 105 C° sıcaklıktaki etüve konularak 24 saat bekletilir. Etüvden alınan numune soğutulur ve istenilen su miktarı eklenerek

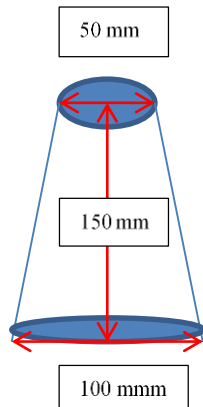
20 litre kapasiteli büyük boy hamur mikseri yardımıyla homojen oluncaya dek karıştırılır. Mikserden alınan numune kürek yardımıyla slump'a boşluk kalmayacak şekilde doldurulur. Daha sonra slump çekilerek çökme değeri cetvel yardımıyla ölçülür ve kaydedilir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20: Slump deneyi.

4.4.7 Mini slump deneyi

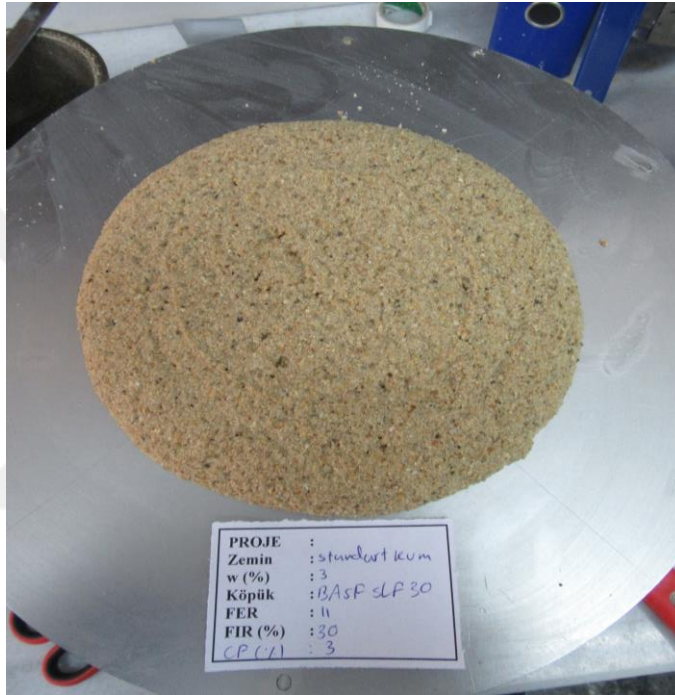
Arazi çalışmaları sırasında ve laboratuvar deneyleri sırasında kullanılan slump deney seti gerek boyut gerekse ihtiyaç duyulan numune bakımından efektif olmamaktadır bu nedenle daha az numuneye ihtiyaç duyan küçük boyutlu slump (mini slump) deney seti geliştirilmiştir (Şekil 4.21). Deneyde ASTM C143 prosedürleri takip edilmiştir.



Şekil 4.21: Mini slump deney aleti.

4.4.8 DIN yayılma tablası deneyi (DIN EN 12350-5)

Etüv kurusu numune 5 litrelik mikserle alınarak istenilen miktarda su eklenerek homojen hale gelinceye kadar karıştırılır daha sonra belirlenen miktarda köpük eklenerek 2 dakika boyunca karıştırılır. Homojen hale gelmiş numune DIN yayılma tablasına alınarak molda boşluk kalmayacak şekilde doldurulur. Daha sonra mold çıkarılarak yayılma tablası saniyede 1 tur olacak şekilde 15 kez çevrilir ve tabla üzerinde yayılan numune cetvel yardımıyla 4 farklı noktadan ölçülerek ortalama yayılma miktarı bulunur (Şekil 4.22).



Şekil 4.22: Yayılma tablası deneyi.

4.5 Mini EPBM Cihazı (Basıncı Ortamda EPB TBM Kazı Simülasyonu)

Öncelikle EPB TBM pasa şartlandırma koşullarının daha basit ve daha gerçekçi kazı odasındaki basınç koşullarını simüle edebilen, değişik özelliklerde köpüğün de basınç altında verilebildiği bir laboratuvar deney cihazı (bir tür basınçlı kanatlı kesme cihazı / pressured vane shear) yaptırılması planlanmıştır. Ancak planlanan cihazın tasarımında bazı sorunlar ortaya çıktığından, “Mini EPBM” adını verdiğimiz ve istenilen işlevi yerine getiren, Arcan Makina Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.’nin çok önemli desteği ile dünyada benzeri bulunmayan ve deneyler için çok fazla miktarda numune gerektirmeyen başka yeni bir cihaz geliştirilmiştir (Şekil 4.23). Fakat bu cihazın ilave olarak geliştirilmesi gereken kısımları kaldığından (köpük sisteminin

veri sistemine akuplasyonu) ve bunun için uzun zaman ile bütçe gereksinimi olduğundan, doktora tezi kapsamındaki numuneler kullanılarak herhangi bir deney yapılamamıştır. Cihazda numune ve köpük basınç altında karıştırılacaktır. Güç, tork, rpm, baskı-itme kuvveti ve ayna basıncı ölçümleri yapılacaktır. Cihaz deneylere hazır duruma getirilerek dünyada bir ilk gerçekleştirilmiş olacaktır.

Geliştirilen “Mini EPBM” deney cihazı, laboratuvar ölçeğinde (düşük) numune miktarı ile köpüğün basınç altında verilebildiği “Kazı Simülasyonu” yapabilecektir. Şu anda dünyada bu özelliklere sahip başka bir deney cihazının bulunmadığı bilinmektedir. Cihaz gerçek bir EPB TBM’in minyatürü sayılabilecek bir cihazdır; bir EPB TBM’in çoğu fonksiyonuna sahiptir. Kazı çapı 510 mm ve kesici kafa açıklığı %25 olan cihazda 26 adet 2 cm genişliğinde ripper keski kullanılmaktadır. Kesici kafa dönüşü için devir hızı kontrollü (ve ölçülebilen) bir motor kullanılmaktadır. Zemin numunesi basınç haznesine yerleştirilir. Basıncı haznede EPB TBM kazı koşullarını sağlamak amacıyla, köpük jeneratörü vasıtasıyla 0-4 bar aralığında basınçlı köpük verilebilmektedir. Deney sırasında kesici kafa motorunun torku, gücü ve devri ölçülerek kaydedilmektedir. Ayrıca deney sırasında kaptaki oluşacak basınç, kullanılan köpük miktarı, 4 itme pistonuna etkiyen itme kuvveti ve ilerleme hızı da ölçülmektedir. Bunun yanında burgulu konveyör devri ve torku-gücü de ölçülerek kaydedilmektedir. Tüm ölçüm ve kayıtlar eşzamanlı olarak USB çıkışı ile bir bilgisayara bağlanabilen ve özel bir yazılımı olan PLC sistemi ile sağlanmaktadır. Kayıtlar “.txt” formatındadır ve daha sonra hesaplamalar yapmak üzere “.xlsx” formatına çevrilebilmektedir. Bu test sisteminin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

1. Kesici Kafa (%25 açıklık oranında), tarama çapı 510 mm, kalınlık 40 mm, maksimum tork 2600 Nm (300 bar), maksimum devir hızı 9 rpm (ayarlanabilir), 26 adet ripper keski, 4 adet köpük nozulu, uzunluğu 450 mm olan kalkan
2. İtme pistonu (4 adet, 50 mm çap, 300 mm strok, toplam itme kapasitesi 3900 kgf (50 bar))
3. Helezon konveyör (dış çap 90 mm, uzunluk 1000 mm, eğim 5°)
4. Zemin (numune) ve basınç haznesi
5. Hidrolik ünite (300 bar ve 50 bar tandem, 3 kW motor, kumanda panosu ve yağ tankı)

6. Güç (tork) Ölçer (kesici kafa)
7. Güç (tork) Ölçer (helezon)
8. RPM ölçer (kesici kafa)
9. RPM ölçer (helezon)
10. Mesafe ölçer (LVDT)
11. Basınç ölçer (kesici kafa içinde, 2 noktada, 0-4 bar)
12. Basınç ölçer (helezon içinde, 0-4 bar)
15. Veri aktarıcı ünite (PLC sistem)
16. Yazılım



Şekil 4.23: Geliştirilen Mini EPBM deney cihazı.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Giriş

Tezin bu bölümünde önceki bölümde anlatılan deneysel yöntemlerin sonuçları açıklanmıştır. Bu kapsamda yapılan deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Zemin Şartlandırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin sonuçları üç kısımda incelenmiştir. İlk kısımda köpük karakterizasyonu deney sonuçları, ikinci kısımda zemin karakterizasyonu deney sonuçları ve üçüncü kısımda zemin+köpük karakterizasyon deney sonuçları açıklanmıştır.

5.2 Sahada Kazı Aynasında ve/veya Köpüklü Pasa Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler

Kazı aynasında veya kazılmış olan köpüklü pasadan numuneler alınarak tünel içinde cep penetrometresi, cep tipi vane shear kesme dayanımı ve slump cihazları / aletleri ile deneyler yapılmıştır. Bu cihazlar ile sahada yapılan deneylerin çok verimli ve güvenilir olmadığı görülmüştür. Bunun başlıca nedeni kazı aynalarının homojen olmaması ve çakıl içermesidir ve/veya köpük ile karışmış olan saha numunelerinin nakliye esnasında helezon konveyörden bant üzerine ve oradan vagona aktarıldığında homojenliğini yitirmesi ve akıcı ya da yapışkan olmasıdır. Bu nedenle bu cihazlardan cep penetrometresi ve cep tipi vane shear cihazlarının laboratuvar deneylerinde zemin + su ve zemin + köpük karakterizasyonu deneylerinde kullanılmasına karar verilmiştir.

Bu cihazların laboratuvarında yapılan zemin şartlandırma deneylerinde kullanılmasına literatürde rastlanmamıştır, bu bir ilk olmuştur. Ancak, cep tipi penetrometre laboratuvarında verimli olmamıştır, numune içine gömüldüğünden ölçüm yapılamamıştır; cep tipi shear vane ölçümleri başarıyla yapılmıştır ve klasik köpük optimizasyonu ile ilişkisi araştırılmıştır. Ancak, cihazın kullanılabildiği saha sayısının artırılarak istatistiksel olarak daha anlamlı ilişkiler gerekmektedir.

5.3 Köpük Karakterizasyonu Deney Sonuçları

Şartlandırma deneyleri, ziyaret edilen sahalarda tercih edilen köpükler kullanılarak yapıldığından, köpük karakterizasyonu deneyleri de bu köpükler üzerinde yapılmıştır. Köpük karakterizasyonu deneyleri yapılan sürfaktan ve sürfaktan + polimer kimyasalları Exfoam 1 (köpük kimyasalı), Exfoam 2 (antikil köpük + polimer kimyasalı), ACP 143 (antikil köpük + polimer kimyasalı) ve SLF 30 (köpük kimyasalı)'dır. Her bir kimyasal için yapılan deneylerin sonuçları ayrı ayrı alt bölümlerde verilecektir. Tüm kimyasallarda köpük yoğunluğu ve köpük kararlılığı (yarı ömür, half-life) deneyleri Efnarc 2005'e göre ve değişik C_F ve FER oranlarında yapılmıştır. Sadece Exfoam 1 kimyasalı üzerinde ilave olarak değişik C_F ve FER oranlarında mikroskop altında kabarcık boyutu analizleri yapılmıştır. EPB TBM kazılarında zemin şartlandırma amacıyla kullanılan köpüklerin sabit ve homojen olması, kazı boyunca kazı odasında stabil durumda olması ve köpük kabarcık boyut dağılımının homojen olması istendiği Thewes ve diğ. (2010) tarafından bildirilmesine rağmen, doğrulanması gereken bir öneridir.

5.3.1 Exfoam 1 (köpük kimyasalı) köpük karakterizasyonu deneyleri

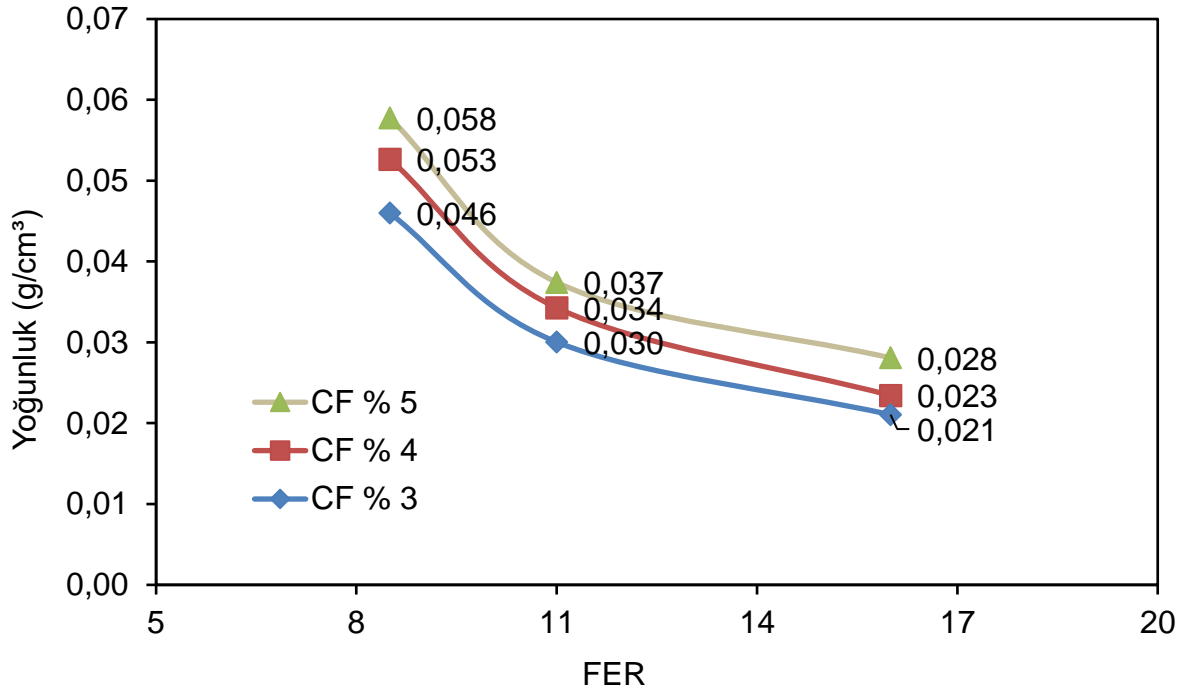
Köpük yoğunluğu deneyi:

Farklı C_F ve FER oranlarında üretilen köpüğün yoğunluğu bilinen bir hacimde köpük ağırlığının ölçülmesi ile bulunmuştur, elde edilen bulgular Şekil 5.1'de sunulmuştur. Köpük yoğunluğunun artan C_F oranı ile arttığı artan FER ile ise azaldığı tespit edilmiştir.

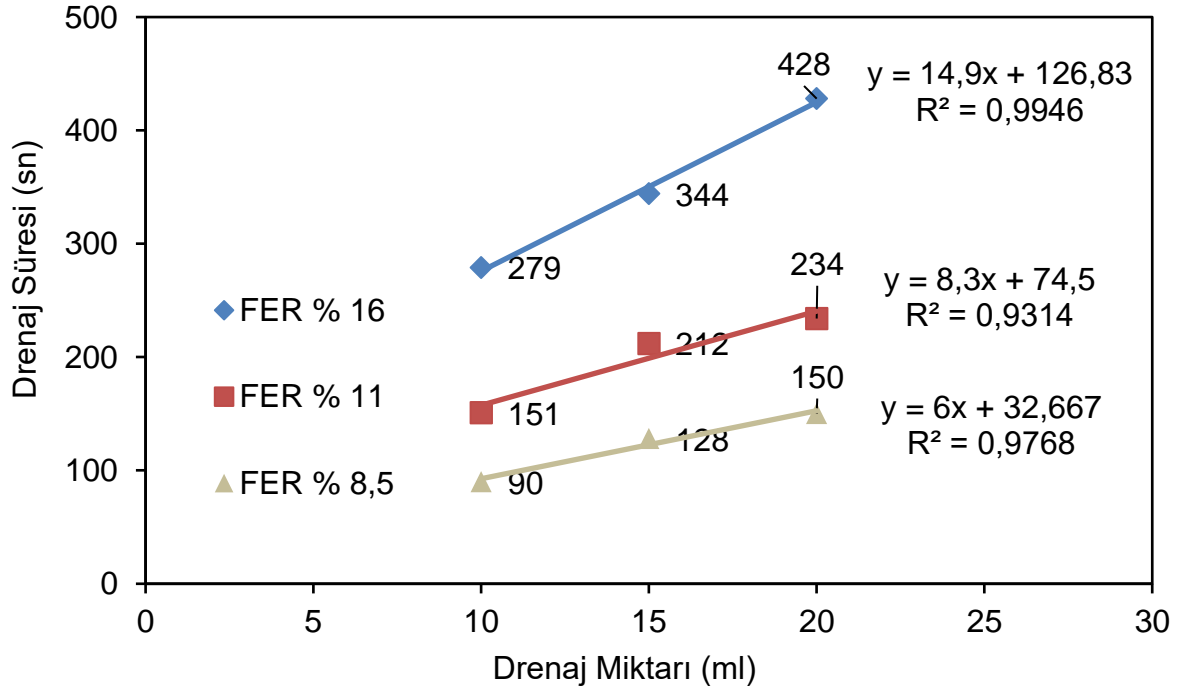
Köpük kararlılığı (yarı ömür, half-life) deneyi:

Farklı C_F ve FER değerlerinde köpükler üretilmiş ve drenaj miktarı ve yarı ömür süreleri ölçülmüştür, elde edilen sonuçlar Şekil 5.2-5.6'da özetlenmiştir. Üretilen köpüğün özelliğinden dolayı deney için gerekli 80 g miktarına ulaşamamış ve yarı ömür drenaj miktarı 20 ml'ye kadar ölçülerek, 40 ml için ekstrapolasyon yapılmıştır. Grafikler incelendiğinde köpük drenaj miktarının zamana bağlı fonksiyon gösterdiği saptanmıştır. Köpük drenaj miktarı ve yarı ömür süresini belirleyen en önemli faktörlerin C_F ve FER değerleri olduğu görülmüştür. Köpük yarı ömür süresinin artan C_F değeri ile düştüğü ve artan FER değeri ile arttığı bulunmuştur. En yüksek yarı

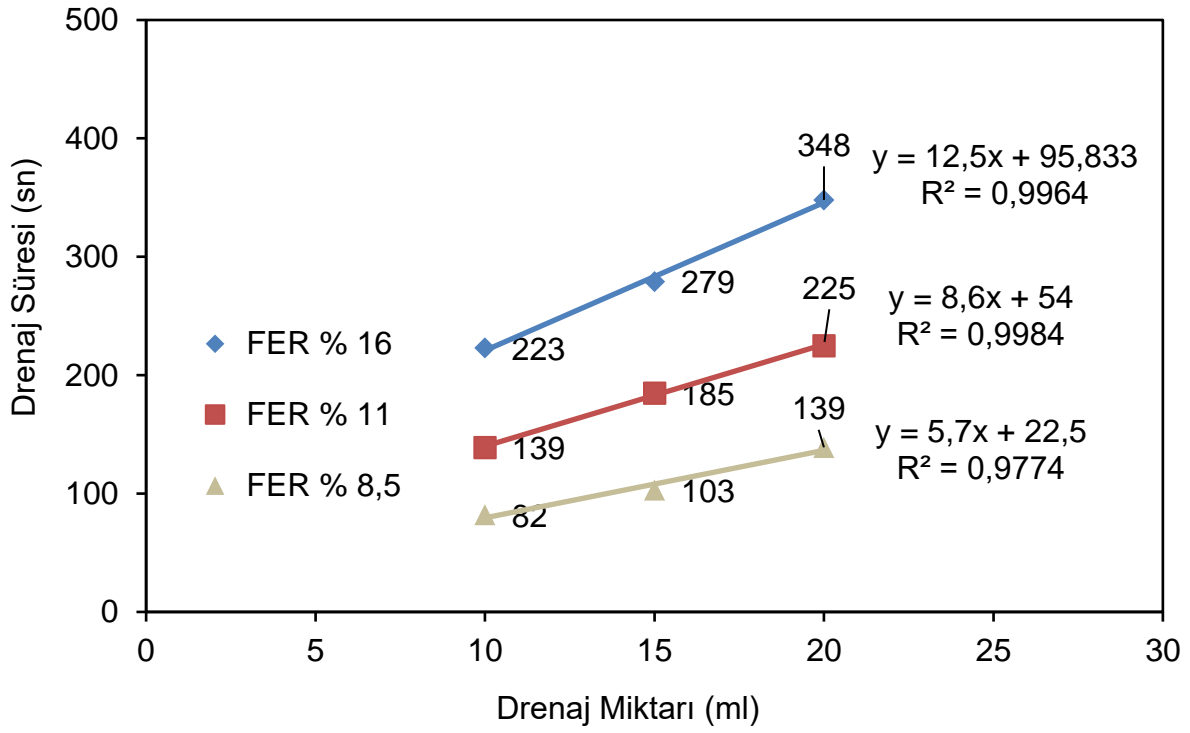
ömür süresi %3 C_F ve 16 FER değerlerinde 723 saniye olarak ve en düşük yarı ömür süresi ise % 5 C_F ve 8,5 FER değerinde 251 saniye olarak ölçülmüştür.



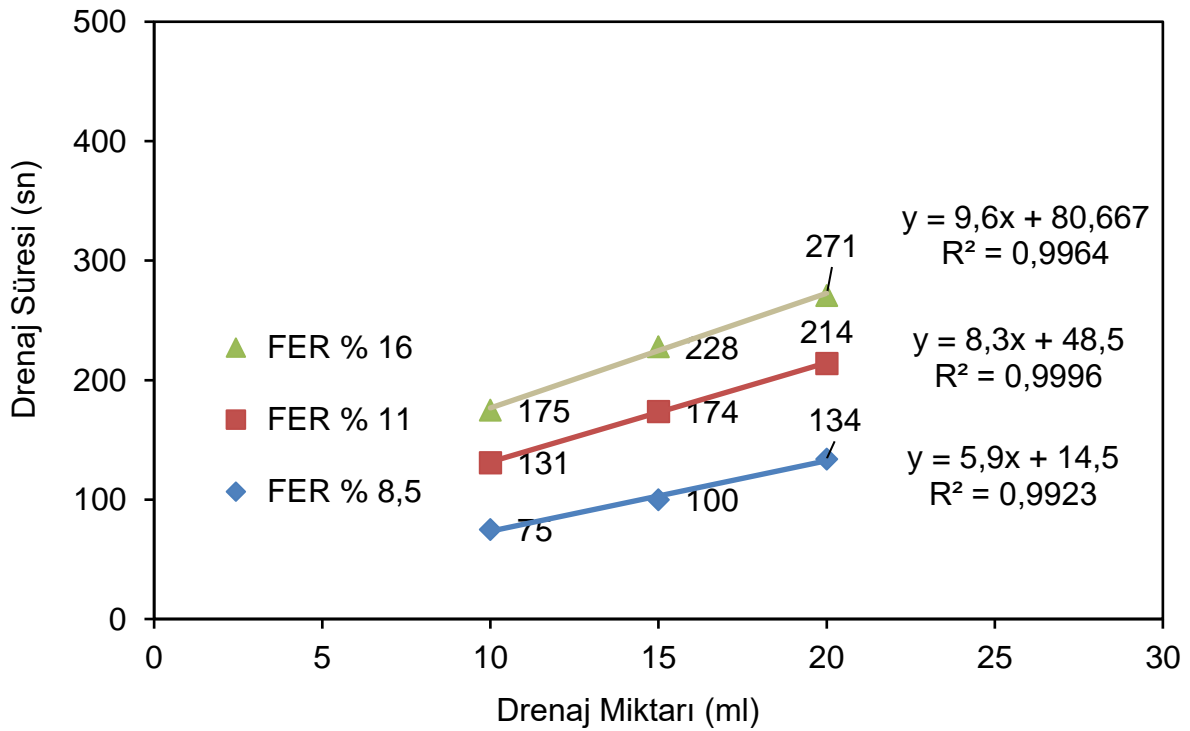
Şekil 5.1: Exfoam 1 köpük yoğunluğunun FER (ve C_F) ile değişimi.



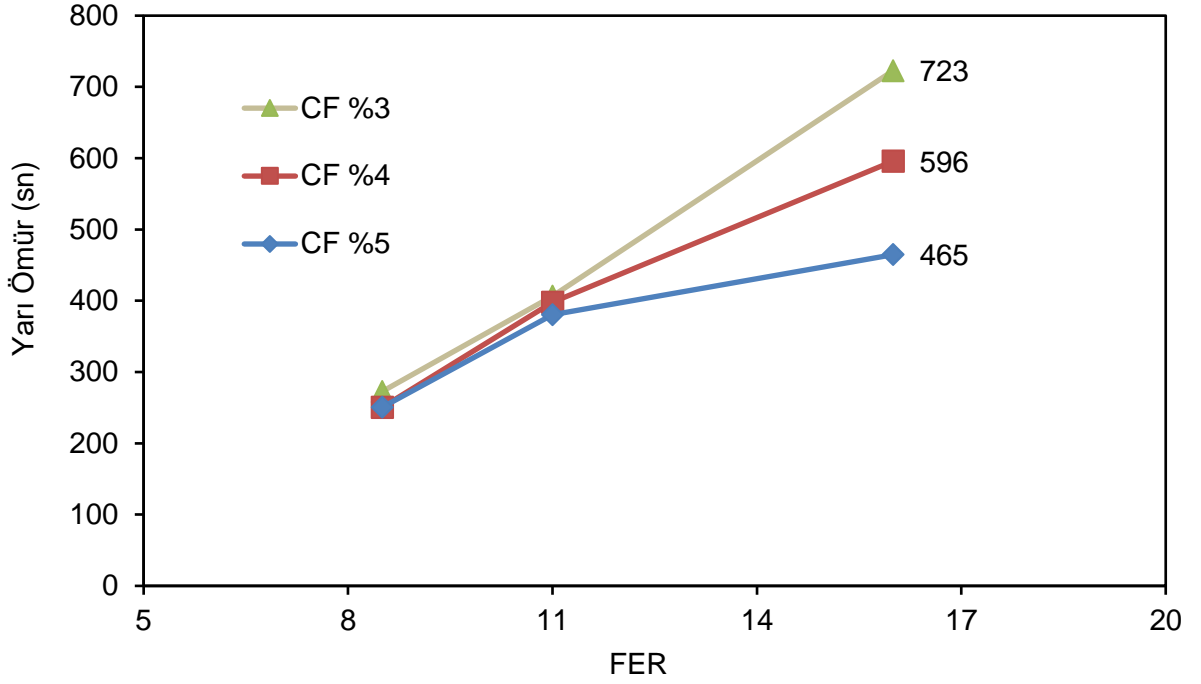
Şekil 5.2: Exfoam 1 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 3$).



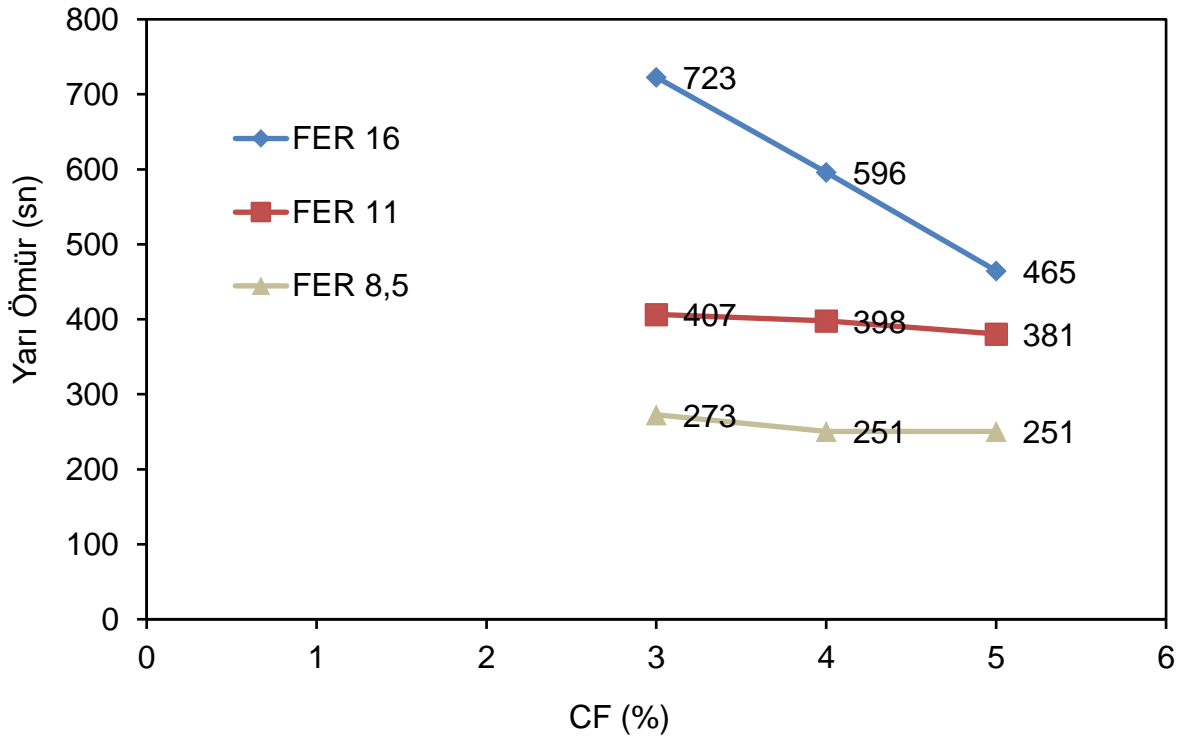
Şekil 5.3: Exfoam 1 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 4$).



Şekil 5.4: Exfoam 1 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 5$).



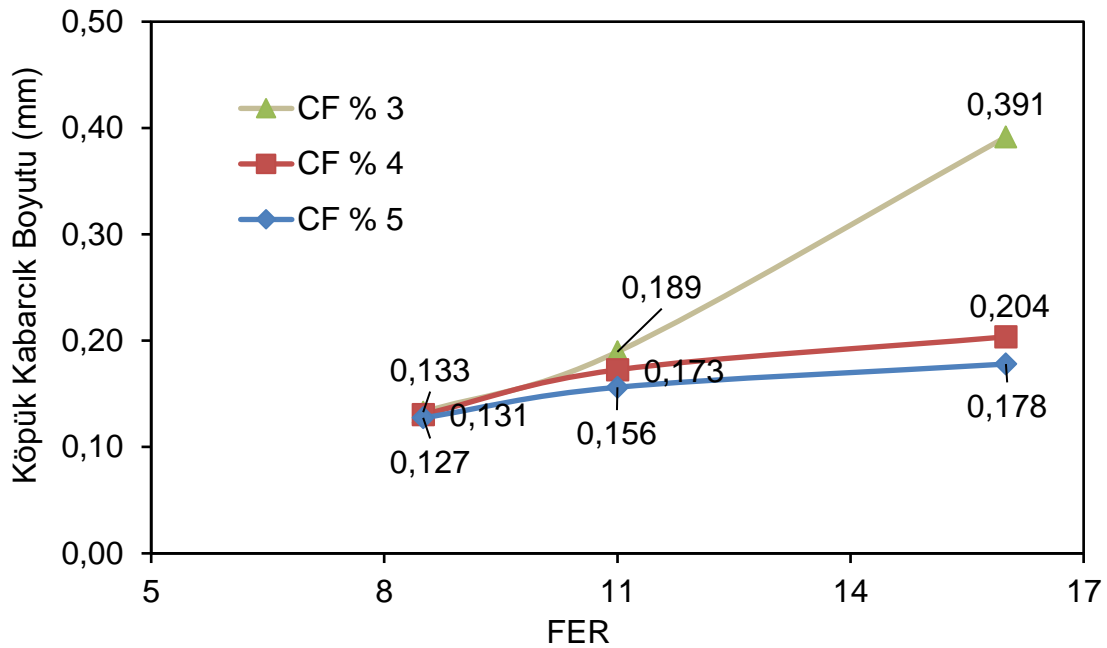
Şekil 5.5: Exfoam 1 köpük yarı ömrünün FER (ve C_F) ile değişimi.



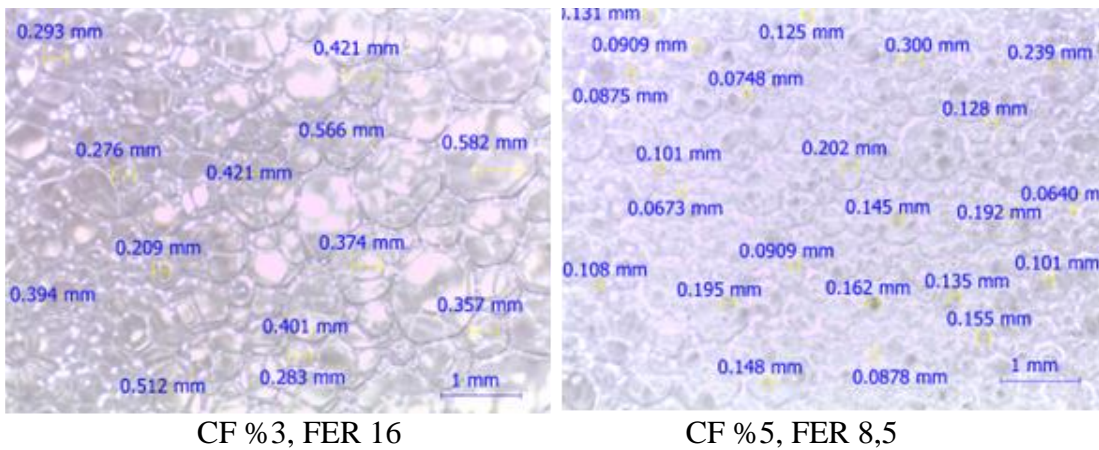
Şekil 5.6: Exfoam 1 köpük yarı ömrünün C_F (ve FER) ile değişimi.

Köpük kabarcık boyutu analizi:

Köpük kalitesini etkileyen diğer bir etmende köpük kabarcık boyut dağılımı olduğu düşünülmektedir. Köpük kabarcık boyut dağılımını ölçmek amacıyla farklı C_F ve FER değerlerinde üretilen köpükler mikroskop altında ($\sim 1 \times 1$ cm) incelenmiş ve ortalama kabarcık boyutları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 5.7’de özetlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda C_F değeri arttıkça ortalama köpük kabarcık boyutunun küçüldüğü, FER değeri arttığında ise büyüdüğü görülmüştür. Şekil 5.8’de kabarcıkların mikroskop altında çekilen bazı fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 5.7: Exfoam 1 köpük kabarcık boyutunun FER (ve C_F) ile değişimi.

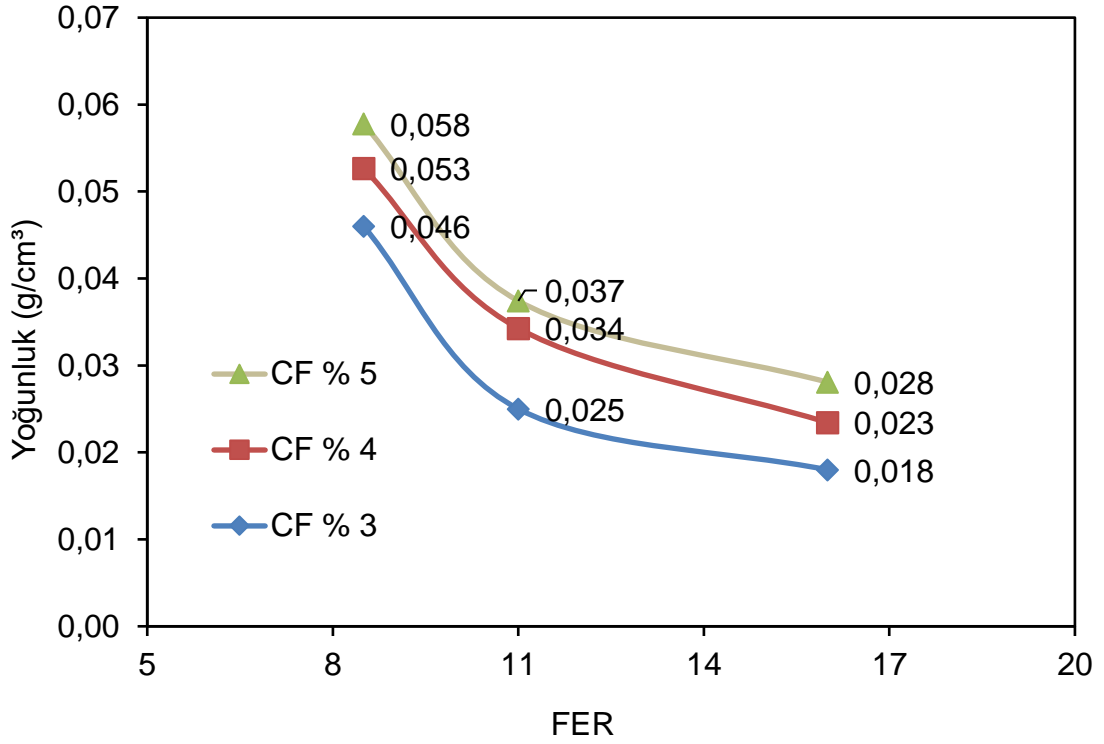


Şekil 5.8: Exfoam 1 köpük kabarcıklarının mikroskop altındaki fotoğrafları.

5.3.2 Exfoam 2 (antikil polimeri + köpük kimyasalı) karakterizasyonu deneyleri

Köpük yoğunluğu deneyi:

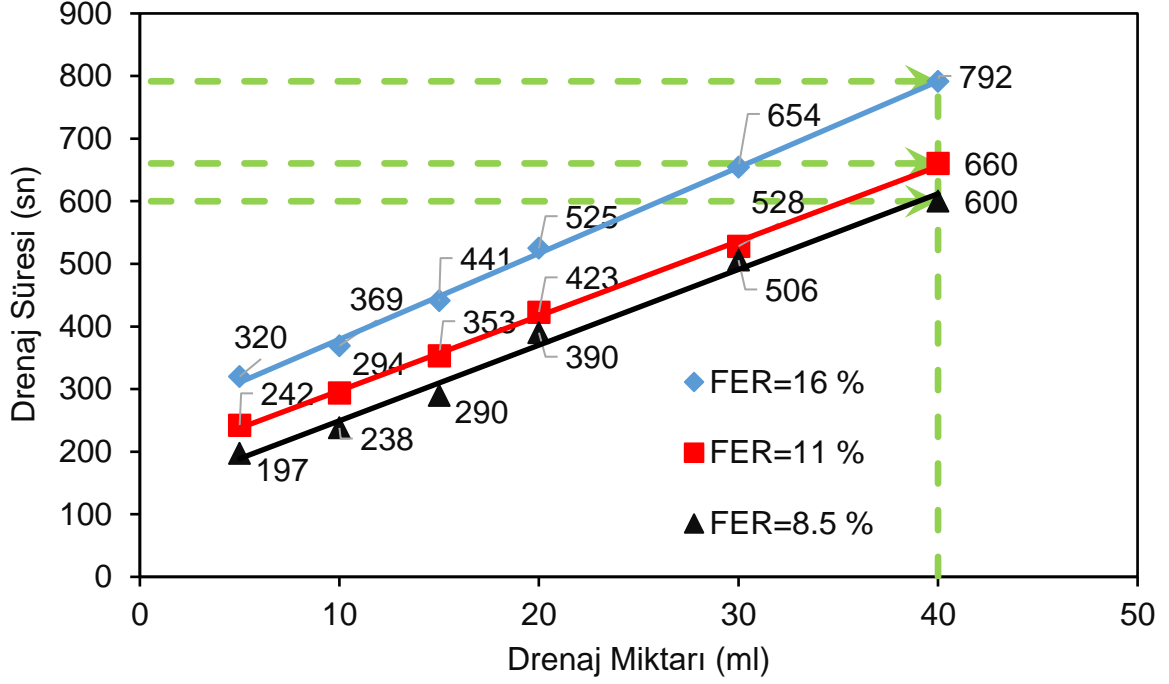
Farklı C_F ve FER oranlarında üretilen köpüğün yoğunluğu bilinen bir hacimde köpük ağırlığının ölçülmesi ile bulunmuştur, elde edilen bulgular Şekil 5.9'da sunulmuştur. Köpük yoğunluğunun artan C_F oranı ile arttığı artan FER ile azaldığı tespit edilmiştir.



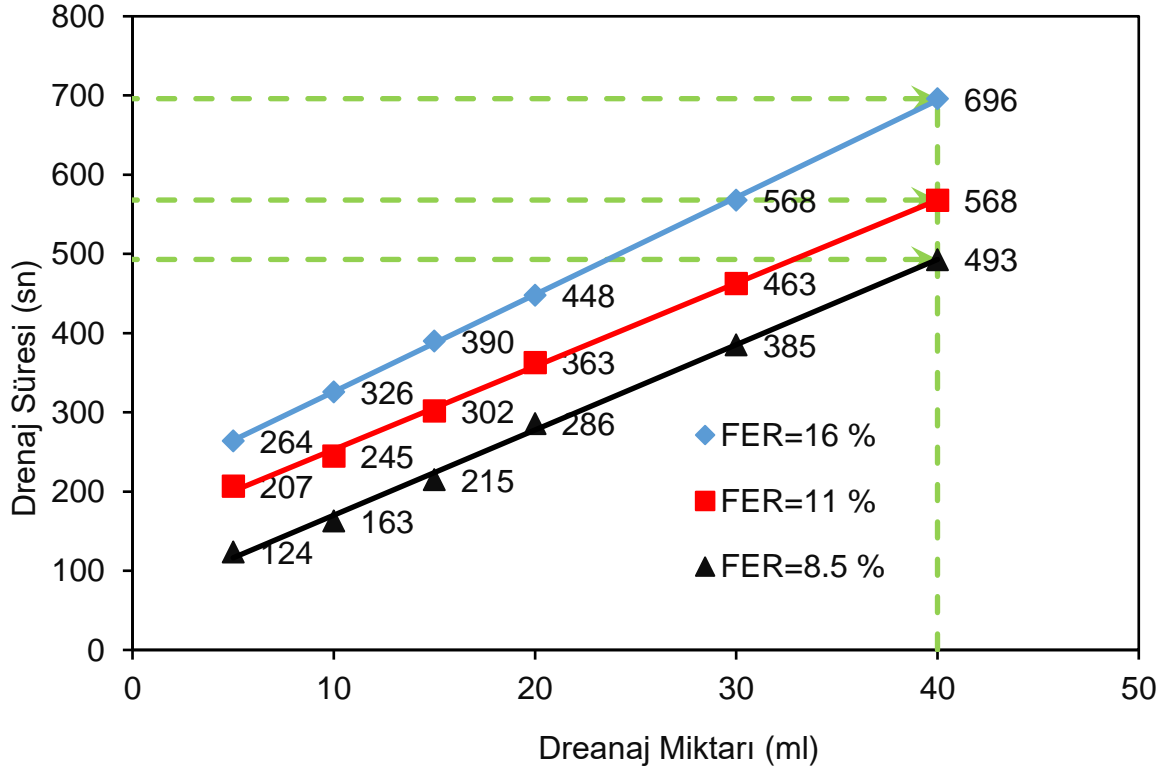
Şekil 5.9: Exfoam 2 köpük yoğunluğunun FER (ve C_F) ile değişimi.

Köpük kararlılığı (yarı ömür, half-life) deneyi:

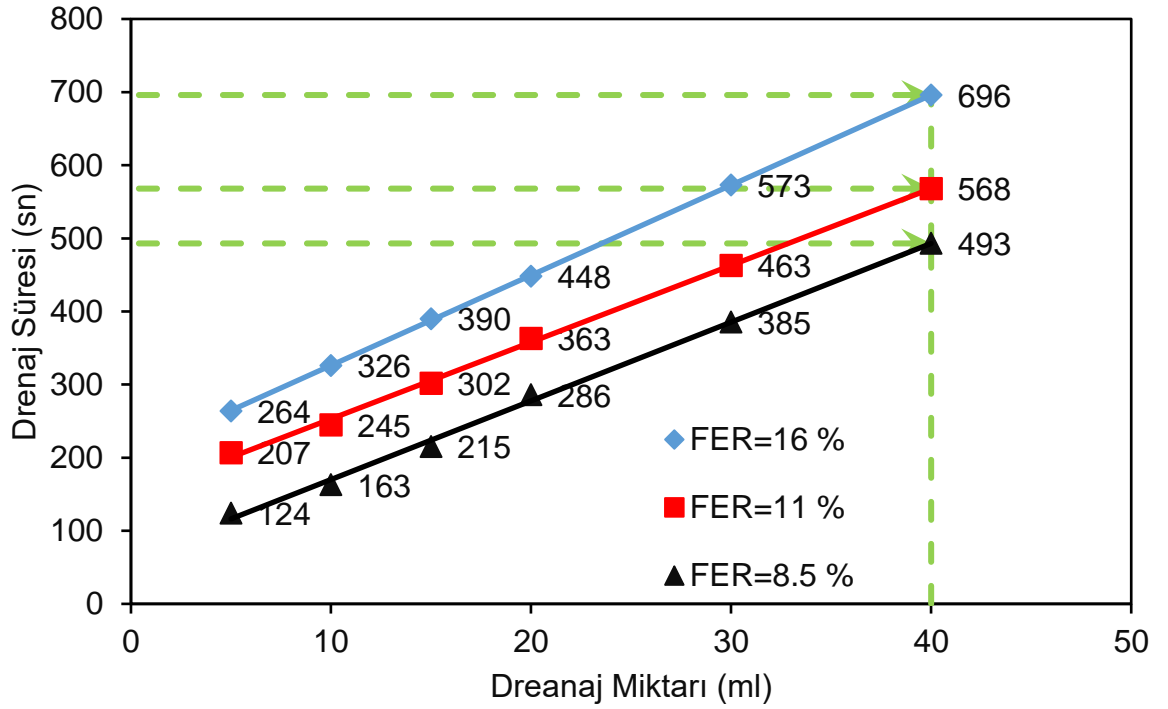
Farklı C_F ve FER değerlerinde köpükler üretilmiş ve drenaj miktarı ve yarı ömür süreleri ölçülmüştür, elde edilen sonuçlar Şekil 5.10-5.14'te özetlenmiştir. Grafikler incelendiğinde köpük drenaj miktarının zamana bağlı fonksiyon gösterdiği saptanmıştır. Köpük drenaj miktarı ve yarı ömür süresini belirleyen en önemli faktörlerin C_F ve FER değerleri olduğu görülmüştür. Köpük yarı ömür süresinin artan C_F değeri ile düştüğü ve artan FER değeri ile arttığı bulunmuştur. En yüksek yarı ömür süresi %3 C_F ve 16 FER değerlerinde 792 saniye olarak ve en düşük yarı ömür süresi ise % 5 C_F ve 8,5 FER değerinde 197 saniye olarak ölçülmüştür.



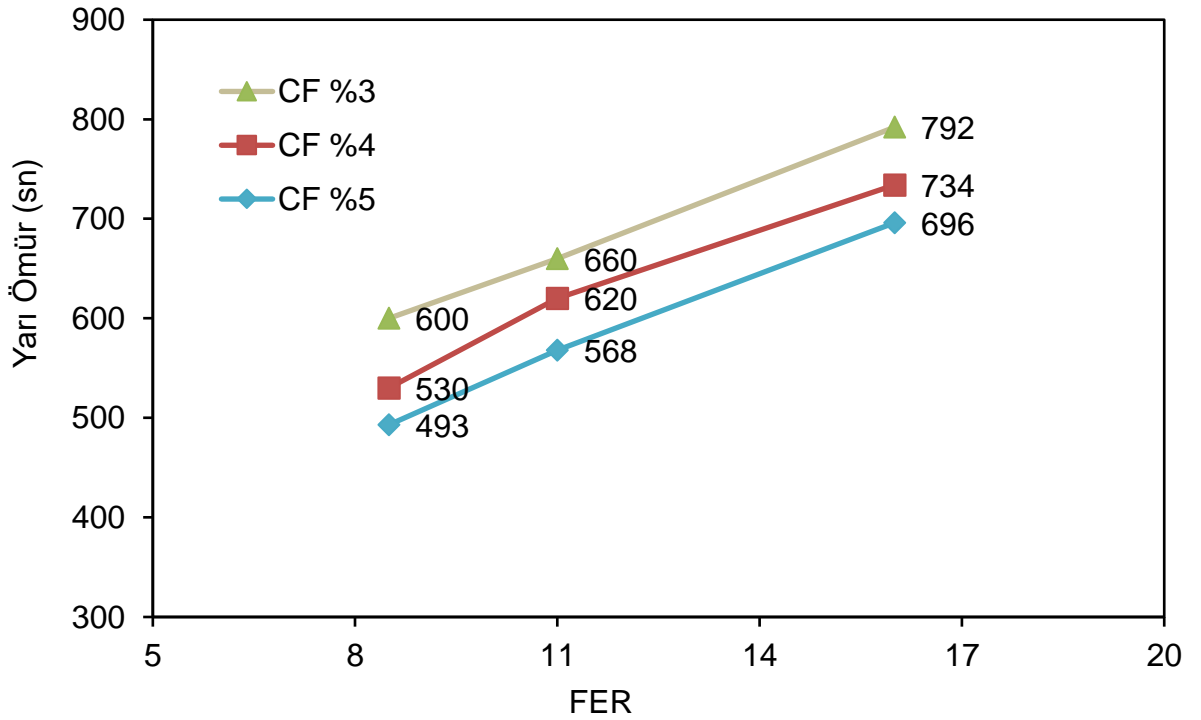
Şekil 5.10: Exfoam 2 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 3$).



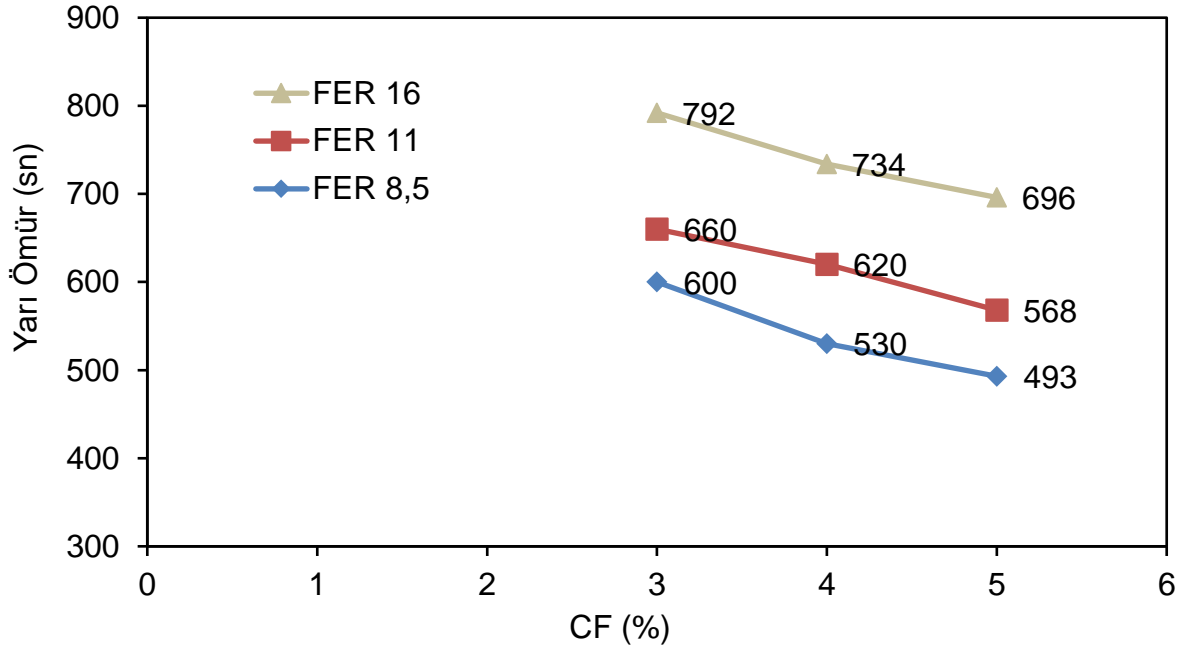
Şekil 5.11: Exfoam 2 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 4$).



Şekil 5.12: Exfoam 2 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 5$).



Şekil 5.13: Exfoam 2 köpük yarı ömrünün FER (ve C_F) ile değişimi.



Şekil 5.14: Exfoam 2 köpük yarı ömrünün C_F (ve FER) ile değişimi.

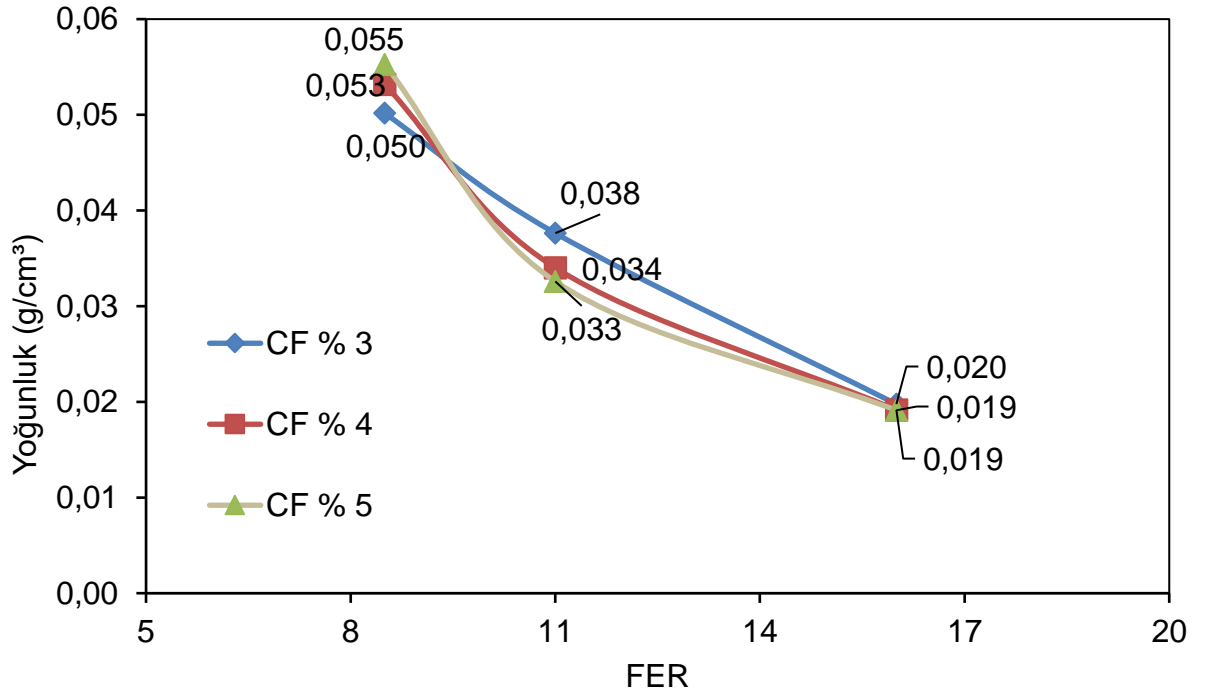
5.3.3 SLF 30 (köpük kimyasalı) köpük karakterizasyonu deneyleri

Köpük yoğunluğu deneyi:

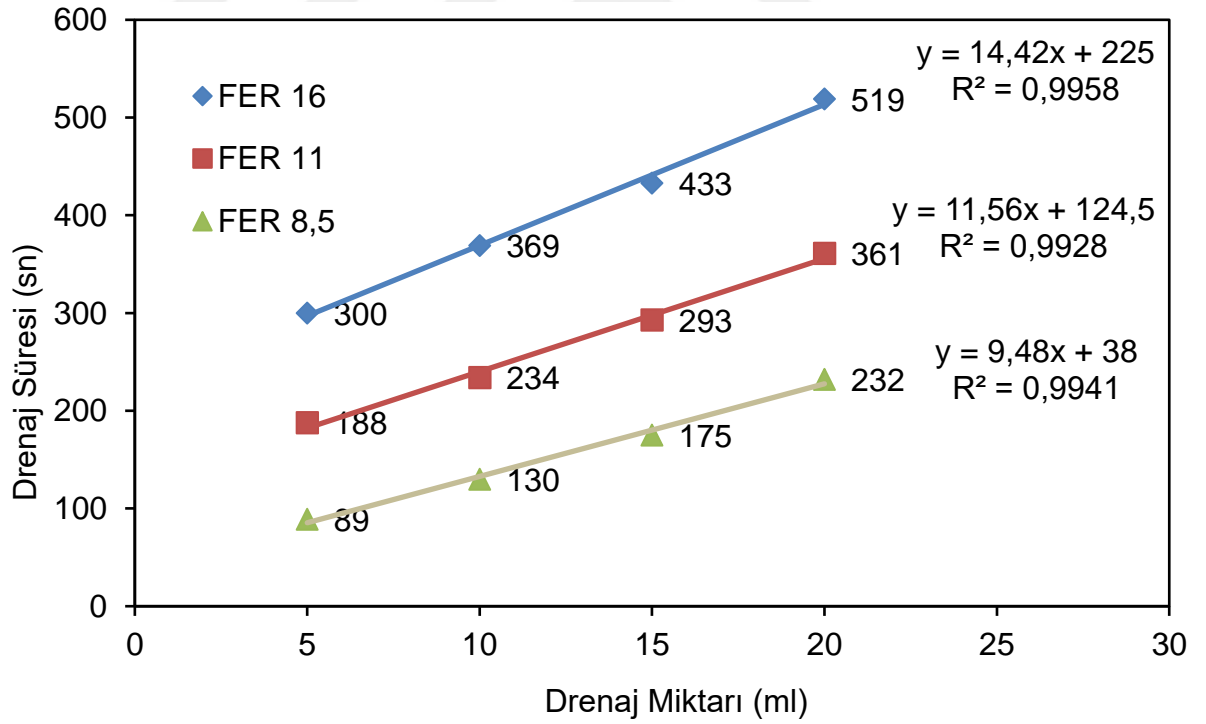
Farklı C_F ve FER oranlarında üretilen köpüğün yoğunluğu bilinen bir hacimde köpük ağırlığının ölçülmesi ile bulunmuştur, elde edilen bulgular Şekil 5.15’de sunulmuştur. Köpük yoğunluğunun artan FER ile azaldığı ve C_F oranının yoğunluğu pek etkilemediği tespit edilmiştir.

Köpük kararlılığı (yarı ömür, half-life) deneyi:

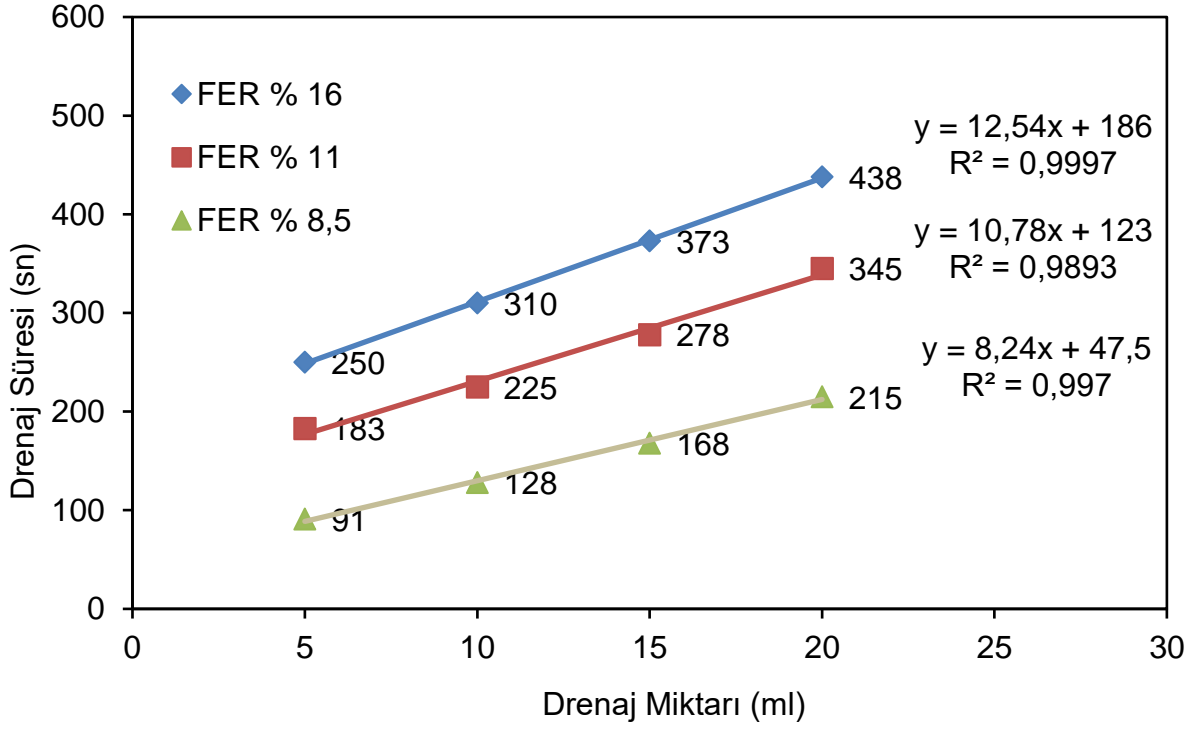
Farklı C_F ve FER değerlerinde köpükler üretilmiş ve drenaj miktarı ve yarı ömür süreleri ölçülmüştür, elde edilen sonuçlar Şekil 5.16-5.20’de özetlenmiştir. Üretilen köpüğün özelliğinden dolayı deney için gerekli 80 g miktarına ulaşamamış ve yarı ömür drenaj miktarı 20 ml’ye kadar ölçülerek, 40 ml için ekstrapolasyon yapılmıştır. Grafikler incelendiğinde köpük drenaj miktarının zamana bağlı fonksiyon gösterdiği saptanmıştır. Köpük drenaj miktarı ve yarı ömür süresini belirleyen en önemli faktörlerin C_F ve FER değerleri olduğu görülmüştür. Köpük yarı ömür süresinin artan C_F değeri ile düştüğü ve artan FER değeri ile arttığı bulunmuştur. En yüksek yarı ömür süresi %3 C_F ve 16 FER değerlerinde 802 saniye olarak ve en düşük yarı ömür süresi ise % 5 C_F ve 8,5 FER değerinde 360 saniye olarak ölçülmüştür.



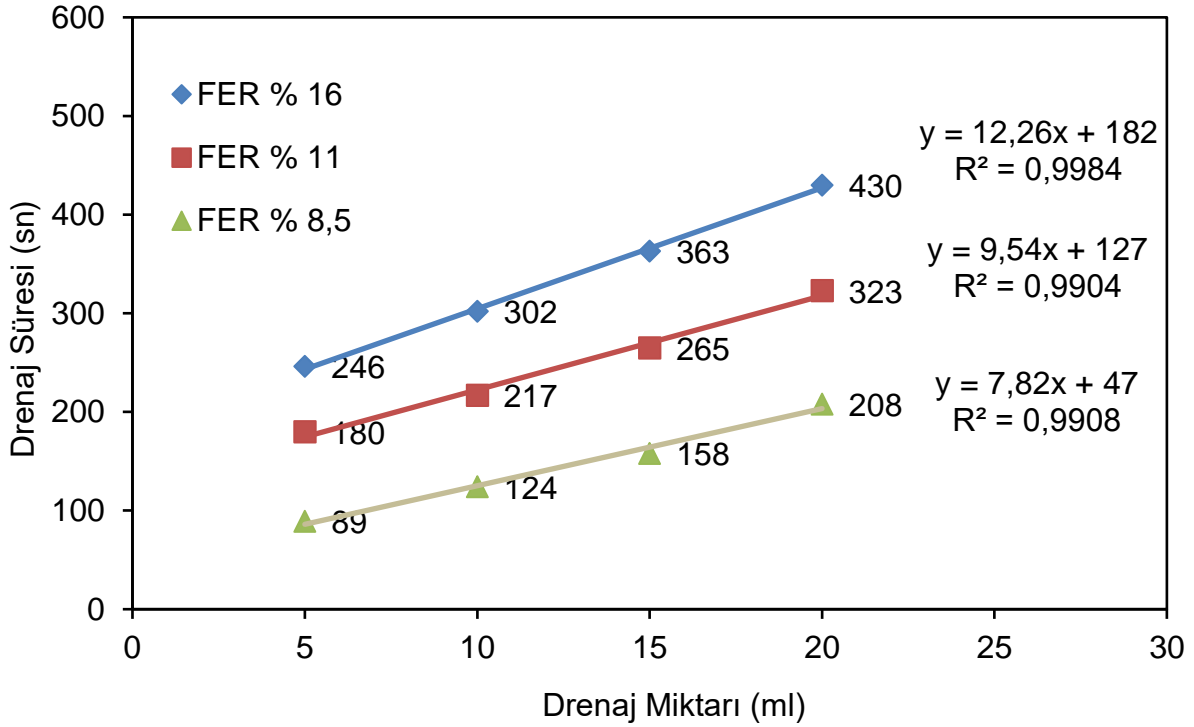
Şekil 5.15: SLF 30 köpük yoğunluğunun FER (ve C_F) ile değişimi.



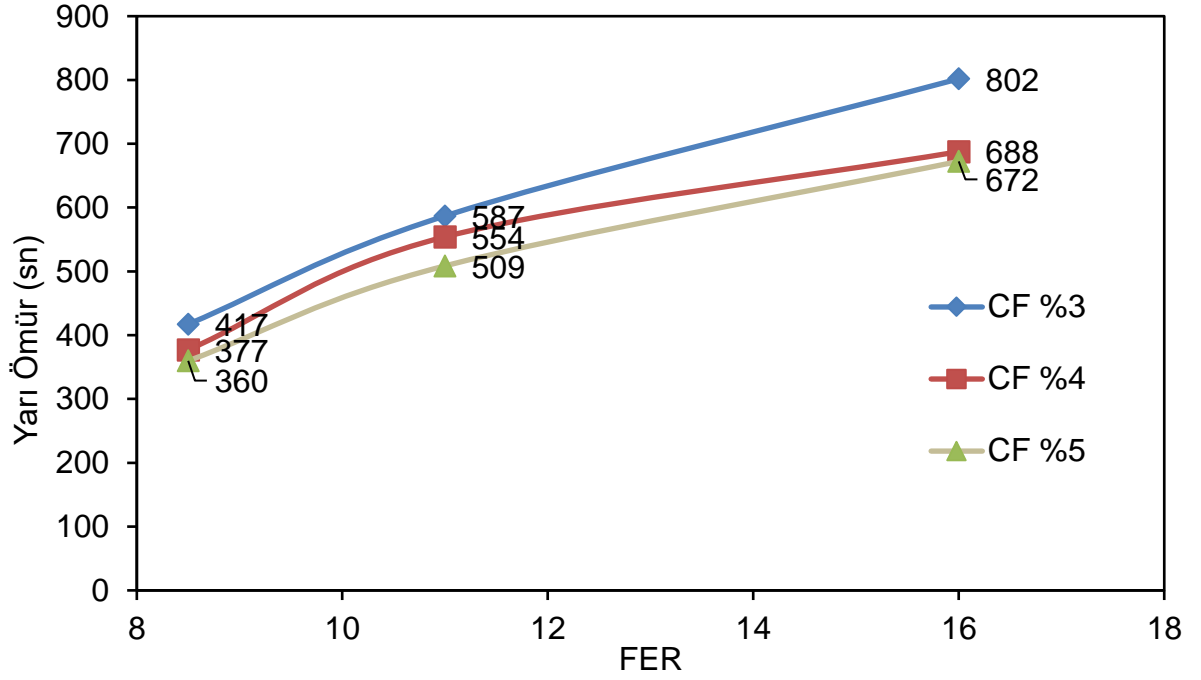
Şekil 5.16: SLF 30 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 3$).



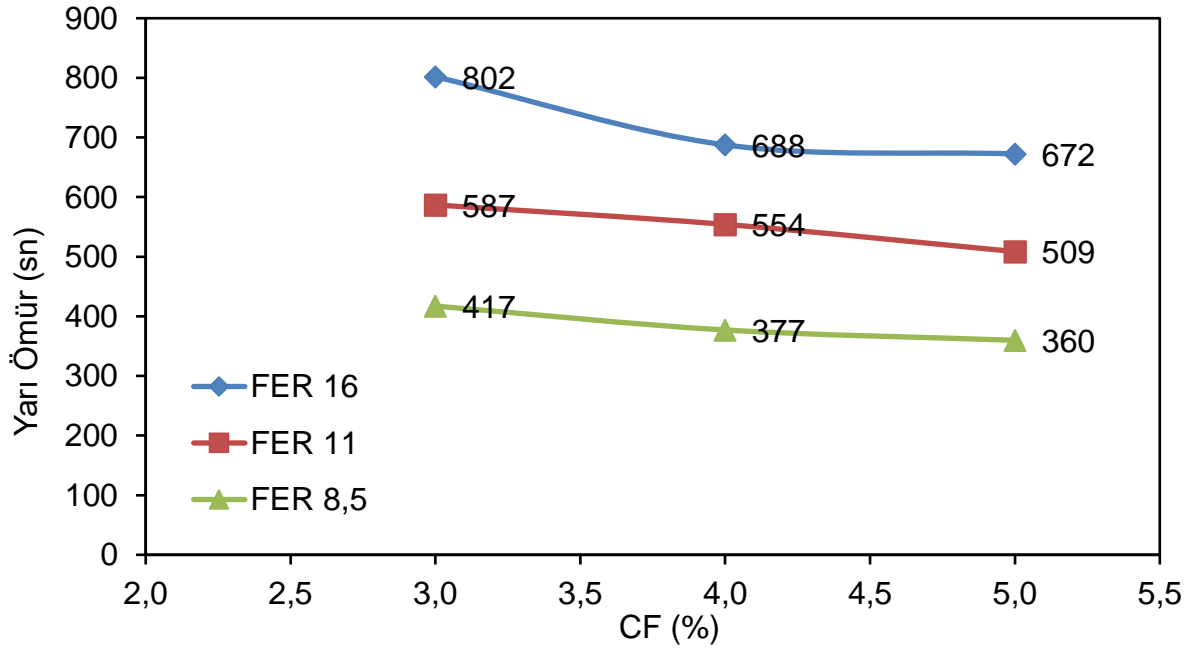
Şekil 5.17: SLF 30 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 4$).



Şekil 5.18: SLF 30 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 5$).



Şekil 5.19: SLF 30 köpük yarı ömrünün FER (ve C_F) ile değişimi.

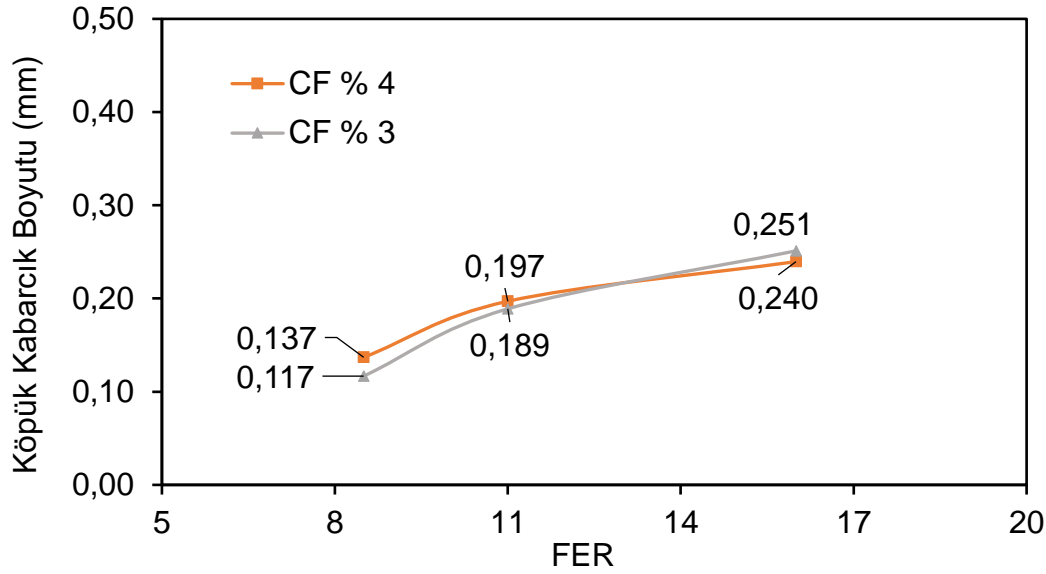


Şekil 5.20: SLF 30 köpük yarı ömrünün C_F (ve FER) ile değişimi.

Köpük kabarcık boyutu analizi:

Köpük kalitesini etkileyen diğer bir etmende köpük kabarcık boyut dağılımı olduğu düşünülmektedir. Köpük kabarcık boyut dağılımını ölçmek amacıyla farklı C_F ve FER değerlerinde üretilen köpükler mikroskop altında ($\sim 1 \times 1$ cm) incelenmiş ve ortalama kabarcık boyutları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 5.21’de

özetlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda C_F değerinin ortalama köpük kabarcık boyutuna etkisinin olmadığı, FER değeri arttığında ise büyüdüğü görülmüştür.



Şekil 5.21: SLF 30 köpük kabarcık boyutunun FER (ve C_F) ile değişimi.

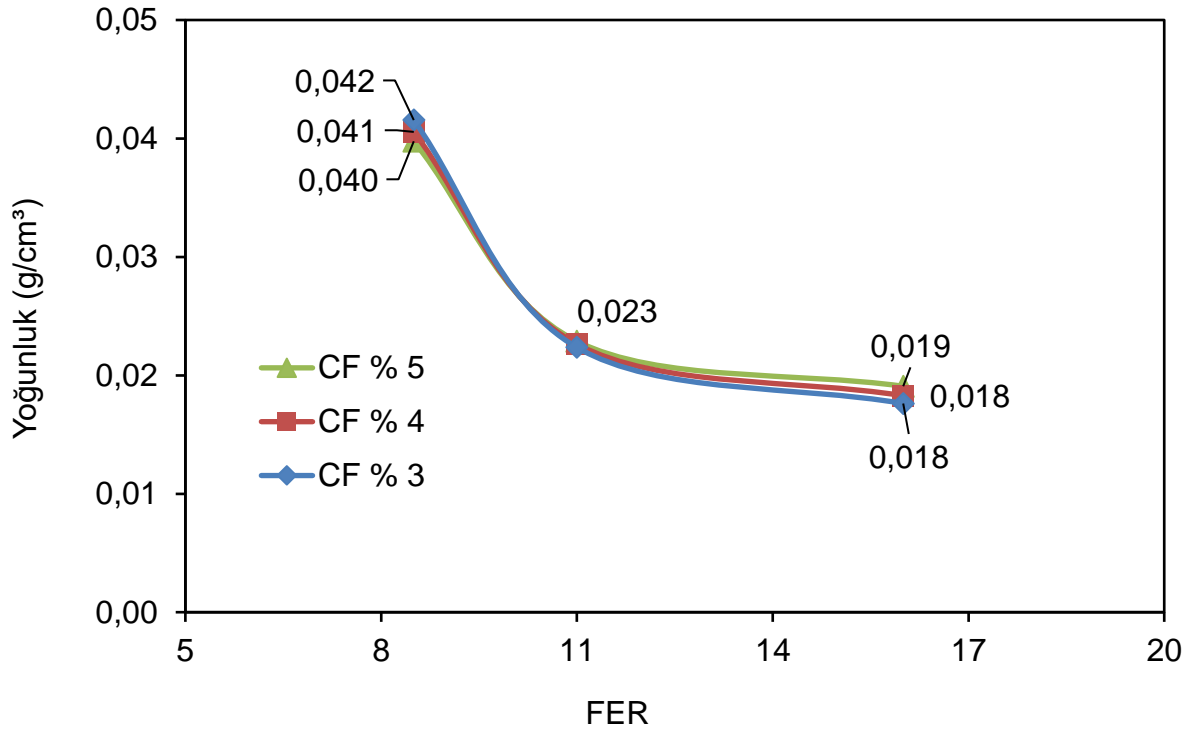
5.3.4 ACP 143 (antikil polimeri + köpük kimyasalı) karakterizasyonu deneyleri

Köpük yoğunluğu deneyi:

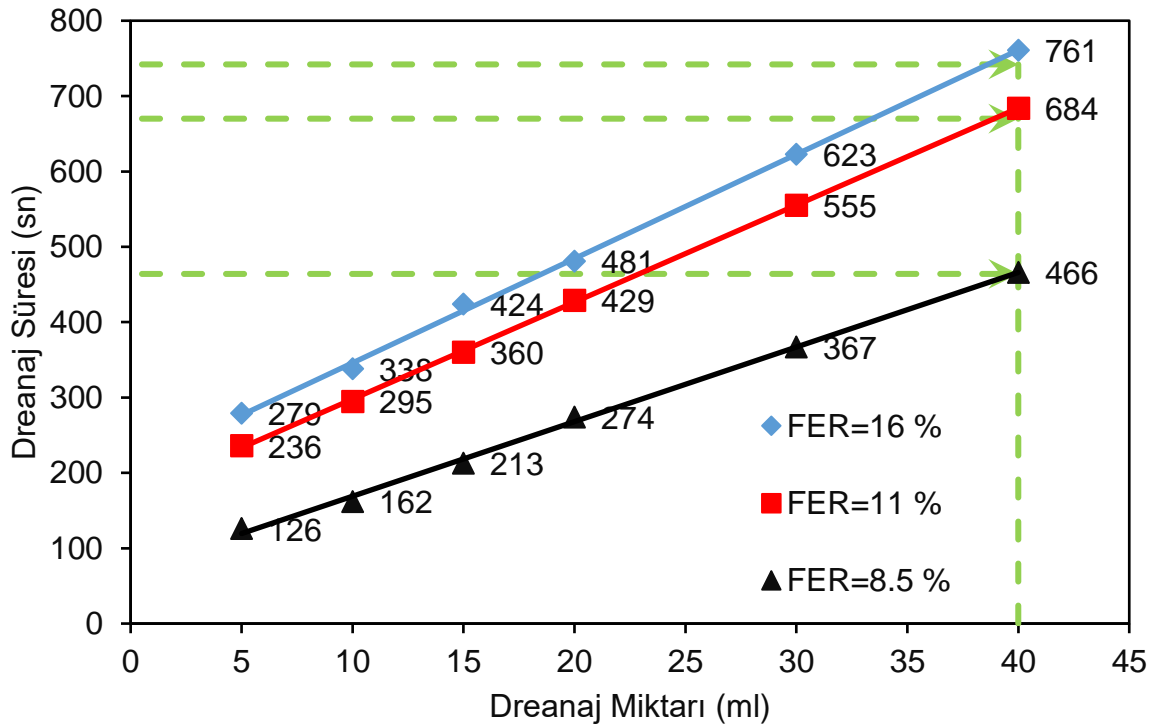
Farklı C_F ve FER oranlarında üretilen köpüğün yoğunluğu bilinen bir hacimde köpük ağırlığının ölçülmesi ile bulunmuştur, elde edilen bulgular Şekil 5.22’de sunulmuştur. Köpük yoğunluğunun artan FER ile azaldığı ve C_F ’nin köpük yoğunluğuna etkisi olmadığı görülmüştür. Bu davranış Exfoam 1 ve Exfoam 2’den farklıdır.

Köpük kararlılığı (yarı ömür, half-life) deneyi:

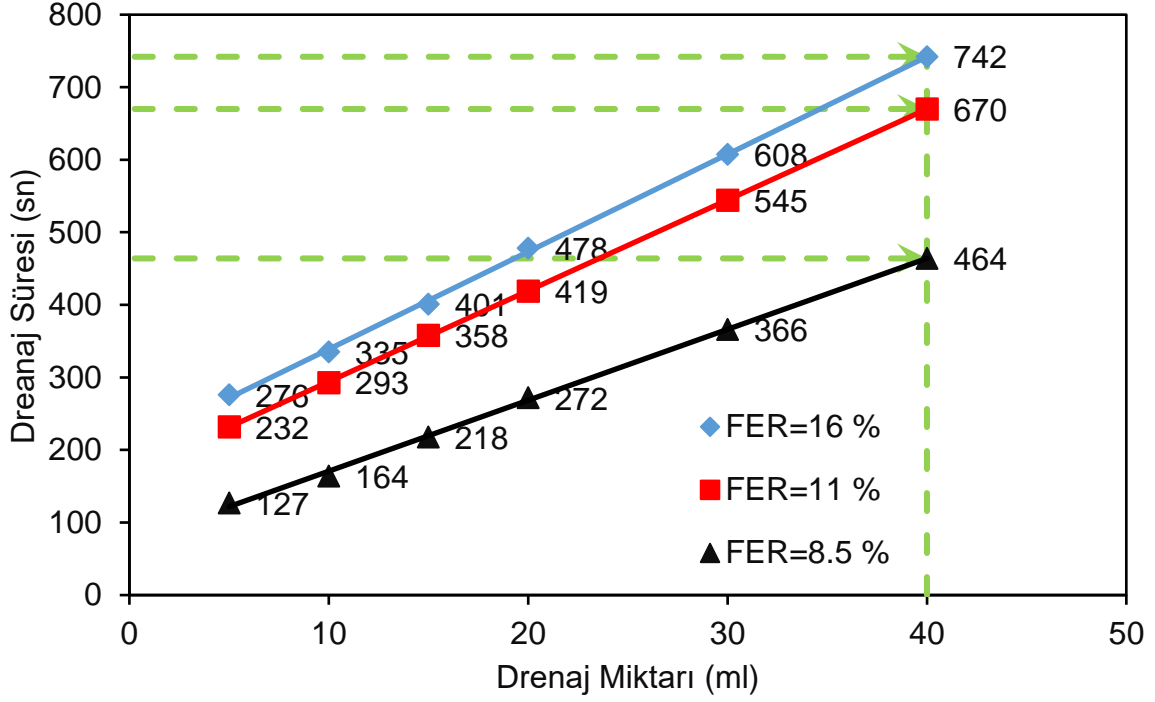
Farklı C_F ve FER değerlerinde köpükler üretilmiş ve drenaj miktarı ve yarı ömür süreleri ölçülmüştür, elde edilen sonuçlar Şekil 5.23-5.27’de özetlenmiştir. Grafikler incelendiğinde köpük drenaj miktarının zamana bağlı fonksiyon gösterdiği saptanmıştır. Köpük drenaj miktarı ve yarı ömür süresini belirleyen en önemli faktörlerin C_F ve FER değerleri olduğu görülmüştür. Köpük yarı ömür süresinin artan C_F değeri ile düştüğü ve artan FER değeri ile arttığı bulunmuştur. En yüksek yarı ömür süresi %3 C_F ve 16 FER değerlerinde 761 saniye olarak ve en düşük yarı ömür süresi ise % 5 C_F ve 8,5 FER değerinde 128 saniye olarak ölçülmüştür.



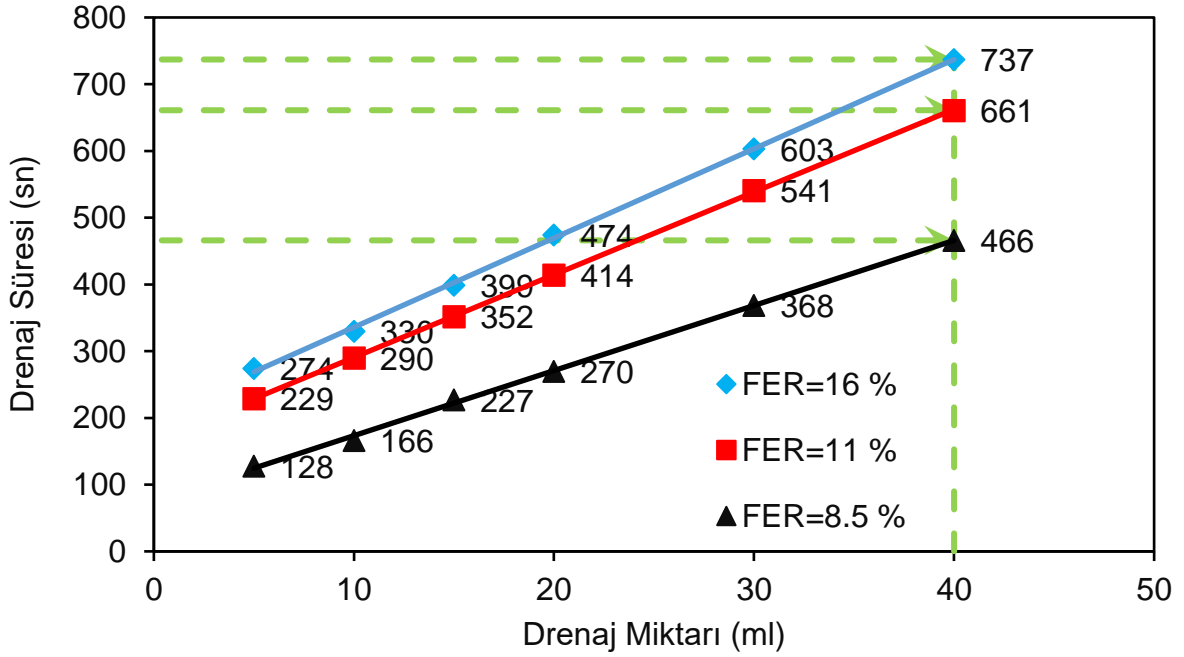
Şekil 5.22: ACP 143 köpük yoğunluğunun FER (ve C_F) ile değişimi.



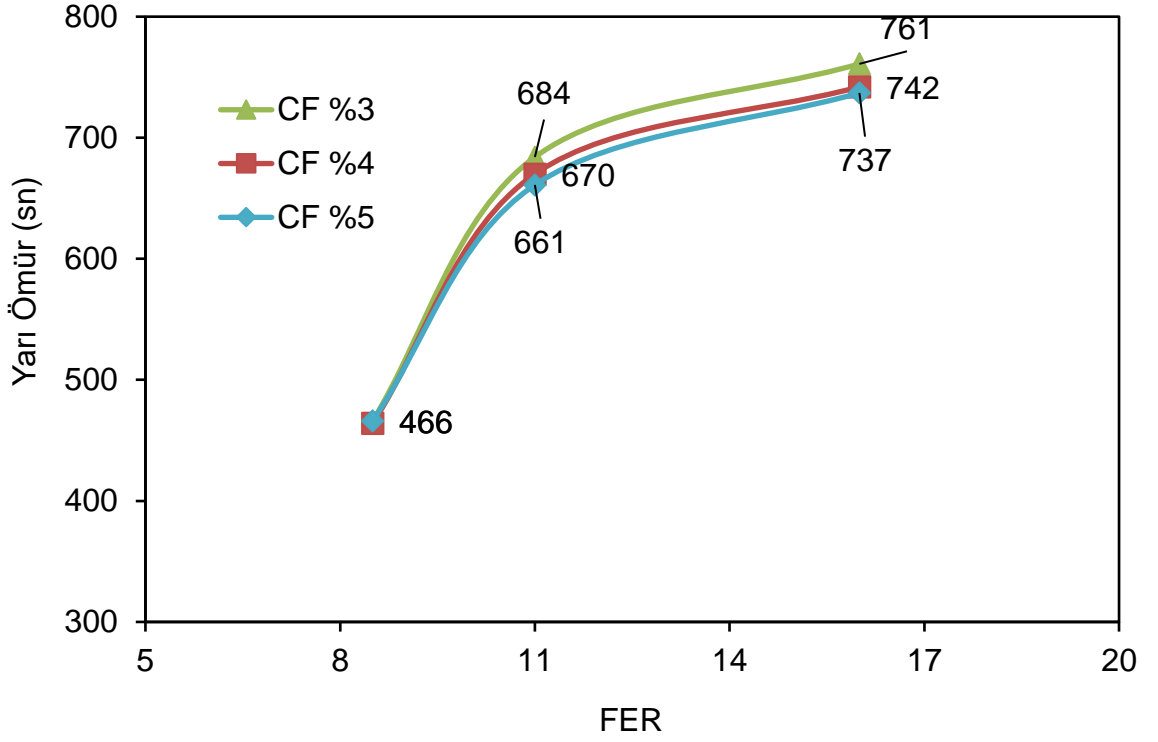
Şekil 5.23: ACP 143 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 3$).



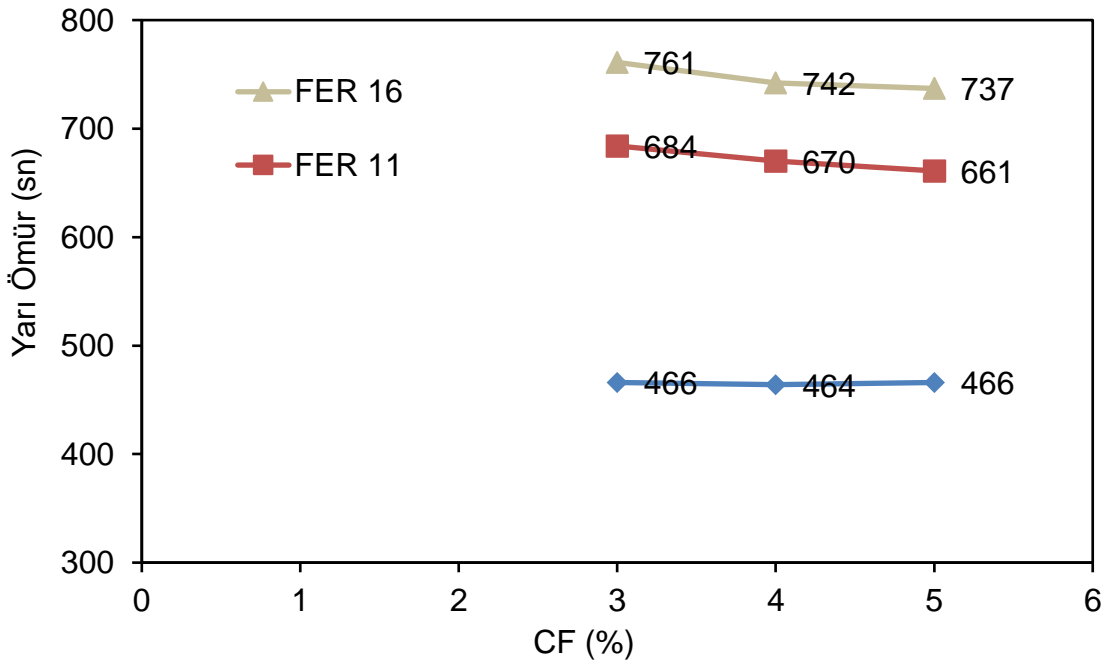
Şekil 5.24: ACP 143 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 4$).



Şekil 5.25: ACP 143 köpük drenaj süresi ve miktarının FER ile değişimi ($C_F = \% 5$).



Şekil 5.26: ACP 143 köpük yarı ömrünün FER (ve C_F) ile değişimi.



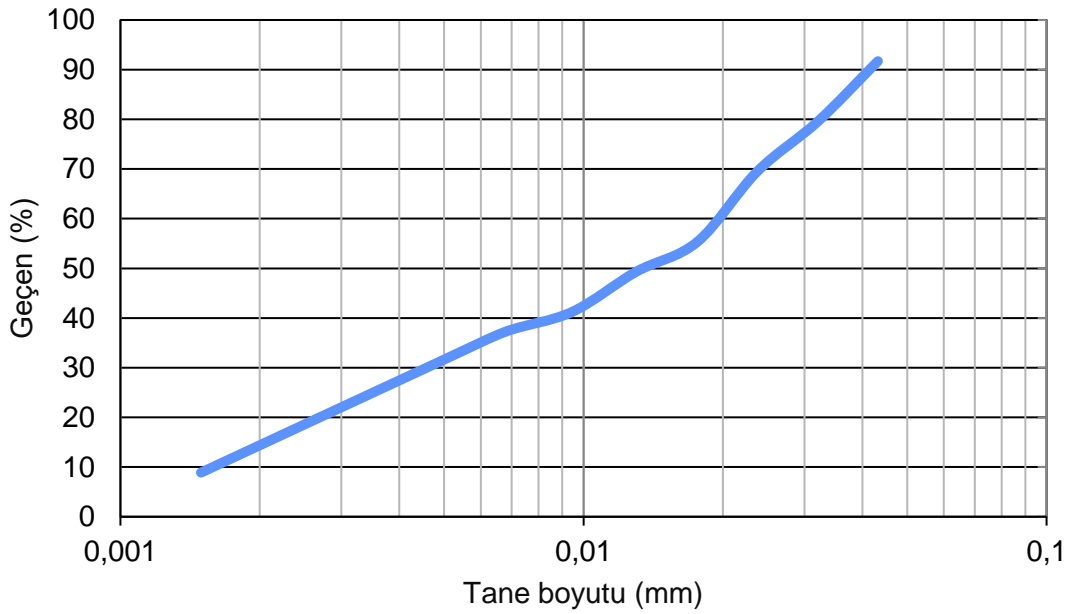
Şekil 5.27: ACP 143 köpük yarı ömrünün C_F (ve FER) ile değişimi.

5.4 Zemin Karakterizasyonu Deney Sonuçları

5.4.1 Kaolen

İnce daneli zeminlerde şartlandırmanın zemin özelliklerine etkisinin araştırılması amacıyla şartlandırma deneylerinde ilk olarak kaolen kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan kaolenin dane boyutları 0,075 mm'den küçük olduğu için deney numunesi hidrometre analizine tabi tutulmuş ve parça boyut dağılım grafiği sonuçları Şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.28: Tane boyut dağılım grafiği (Kaolen).

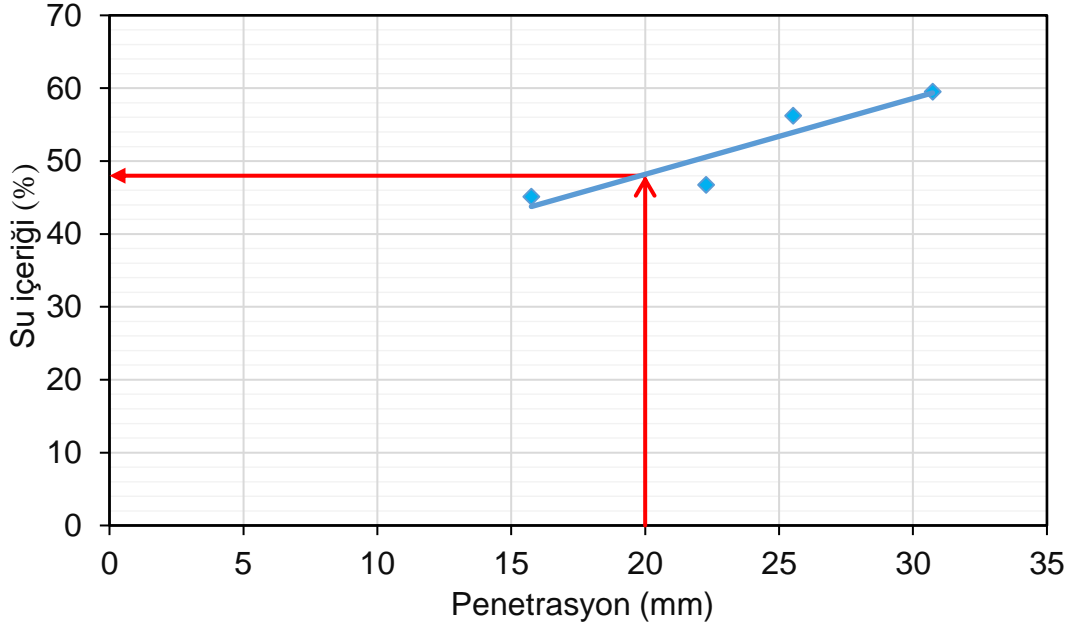
Likit limit deneyi konik penetrometre kullanılarak (BS 1377) yapılmıştır; 20 mm penetrasyon derinliğine karşılık gelen %48 su içeriği likit limit değeri olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.29).

Öte yandan plastik limit değeri % 22,5 olarak ölçülmüştür. Zeminin su içeriği (W) şartlandırma deneylerinde kullanılan su içeriği olan % 24 olarak belirlenmiş ve elde edilen kıvam limit değerleri (LL : likit limit, PL : plastik limit) kullanılarak plastisite (Pi) ve kıvam (Ci) indis değerleri Eşitlik 5.1 ve 5.2'de hesaplanmıştır.

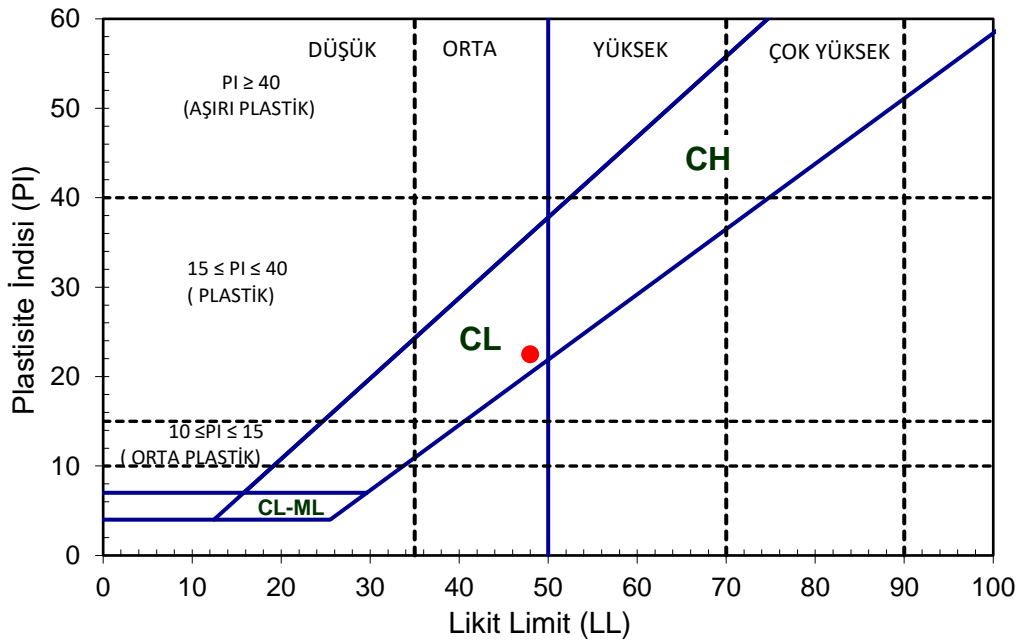
$$Pi = LL - PL = 48 - 22,5 = 25,5 \% \quad (5.1)$$

$$Ci = (LL - W)/(LL - PL) = (48 - 24)/(25,5) = 0,94 \quad (5.2)$$

Plastisite indisi ve likit limit değerleri kullanılarak zemin numunesinin plastisite abağındaki yeri Şekil 5.30’da gösterilmiştir. Şekil 5.30’a göre zemin numunesi orta plastisiteli inorganik kil olarak tanımlanmıştır.



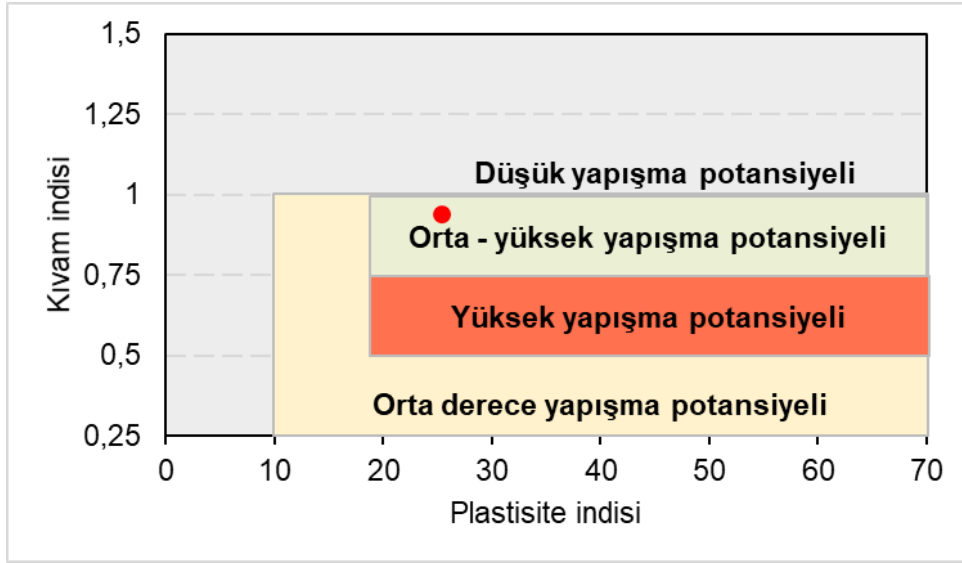
Şekil 5.29: Su iğeriğinin konik penetrasýona bağlı dağılımı (Kaolen).



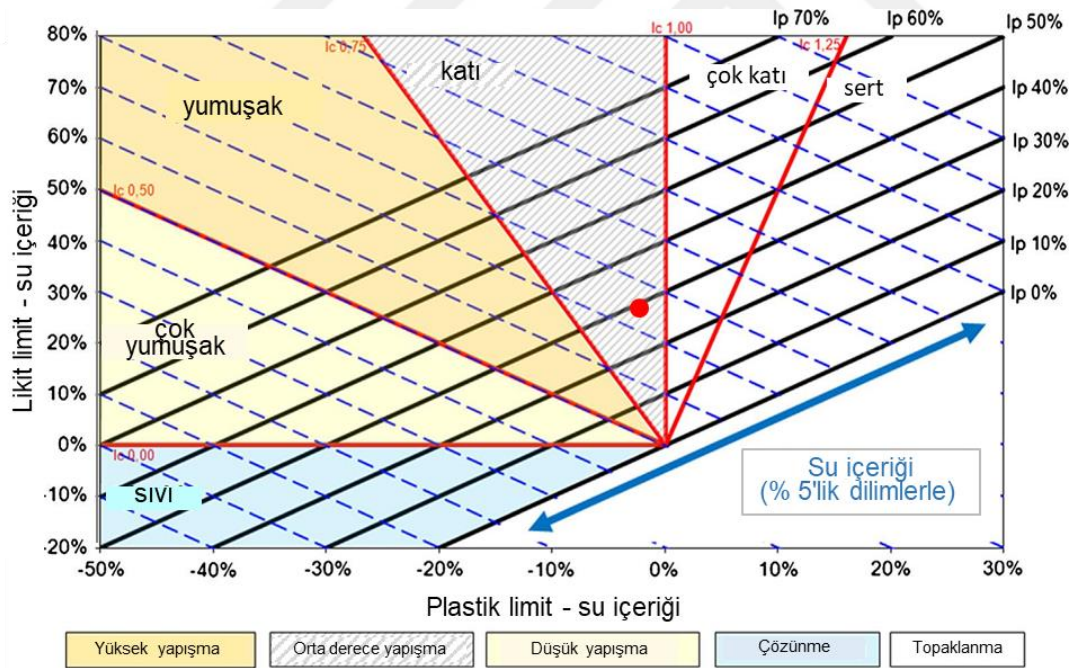
Şekil 5.30: Zemin numunesinin (Kaolen) plastisite abağındaki yeri.

Zemin numunesinin yapışma / tıkanma riski ve kıvamı konusunda ayrıntılı bilgi sahibi olmak için numunenin yapışma / tıkanma potansiyeli grafiğindeki (Şekil 5.31) ve kıvam grafiğindeki yeri (Şekil 5.32) verilmiştir. Şekil 5.30’a göre zemin numunesi orta yüksek yapışma potansiyeline sahiptir. Şekil 5.32 incelendiğinde ise zemin

numunesi katı kıvamda olup istenilen kıvama gelmesi için yaklaşık % 10 oranında su eklenmesi gerekmektedir.



Şekil 5.31: Zemin numunesinin (Kaolen) yapışma/tıkanma grafiğindeki yeri (Hollman ve Thewes, 2013).



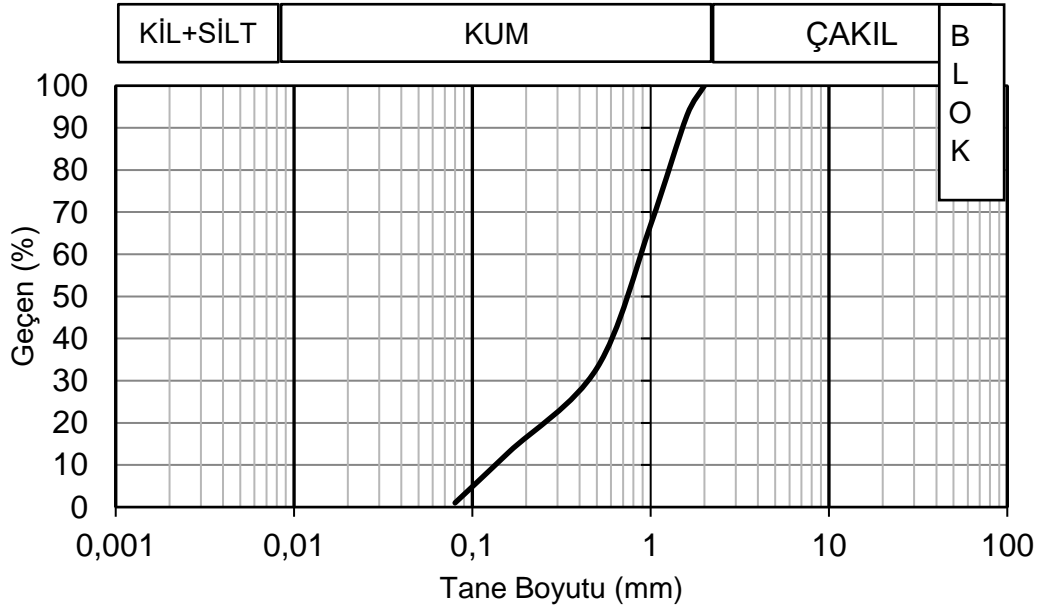
Şekil 5.32: Zemin numunesinin (Kaolen) kıvam grafiğindeki yeri (Hollman ve Thewes 2013).

5.4.2 Standart kum

Kaba daneli zeminlerde şartlandırmanın zemin özelliklerine etkisinin araştırılması amacıyla şartlandırma deneylerinde standart kum (Şekil 5.33) kullanılmıştır. Kullanılan standart kumun parça boyut dağılım grafiği Şekil.5.34'de verilmiştir.



Şekil 5.33: Standart kum.



Şekil 5.34: Standart kum tane boyut dağılım grafiği.

5.4.3 Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli numunelerinde yapılan zemin karakterizasyon deneyi sonuçları

Doktora tezi kapsamında zemin şartlandırmanın EPB TBM performansına etkilerinin araştırılması amacıyla SK15 shaftından Zeytinburnu-Ayvalı 2 tünel güzergâhını temsil eden zemin numuneleri alınmıştır (Şekil 5.35). Alınan zemin numuneleri üzerinde zeminin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla özgül ağırlık, doğal nem

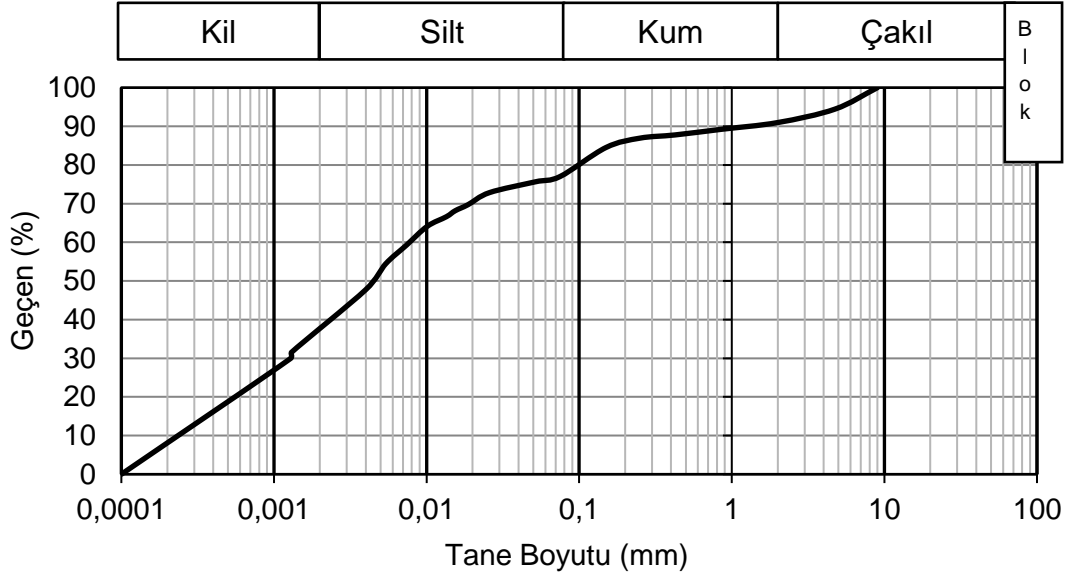
içeriği, tane boyut dağılımı (elek analizi ve hidrometre deneyleri), Atterberg kıvam limit deneyleri yapılmıştır.



Şekil 5.35: Ayvalı 2 SK 15 şaftından alınan numune (solda) ve kuyruk tüneli aynası (sağda).

Tünel güzergâhında geçilecek zeminin özelliklerinin belirlenip zemin sınıflandırılması yapılması amacıyla SK15 şaft kazısından alınan zemin numunelerinde parça boyut analizi yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.36’da özetlenmiştir. Yapılan elek analizi ve hidrometre deney sonuçları değerlendirildiğinde geçilecek zeminin %80 killi siltli ve geri kalan yüzdesinin iri taneli (kum+çakıl) olduğu tespit edilmiştir.

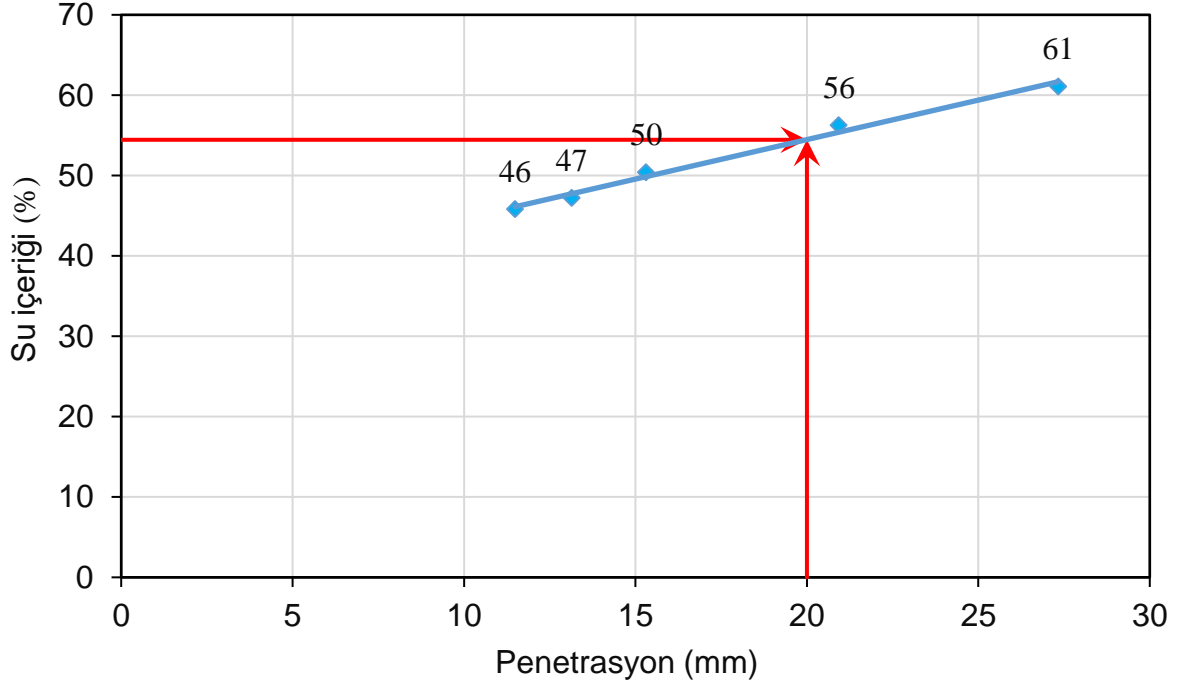
Elek analizi sonrasında zemin numunesi içinde bulunan ince taneli malzemenin kıvam limitlerinin belirlenmesi amacıyla Atterberg kıvam limit testleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.1’de özetlenmiştir. Likit limitin belirlenmesi için yapılan deneylerin sonuçları grafik olarak Şekil 5.37’de verilmektedir. Numunenin plastisite grafiğindeki yeri ise Şekil 5.38’de görülmektedir. Görüldüğü gibi numune plastik özelliktedir. Şekil 5.39 ve 5.40’da ise sırasıyla Holmann ve Thewes (2013) tarafından verilen açık modda çalışan EPB TBM’lerin tıkama / yapışma risk grafiğindeki ve kıvam grafiğindeki yerleri görülmektedir. Görüldüğü gibi numune orta-yüksek yapışma / tıkama riski göstermektedir ve kazı kolaylığı veya şartlandırma bakımından uygun kıvam elde edilmesi için doğal su içeriğine yaklaşık %12 su ilave edilmesi gerekmektedir.



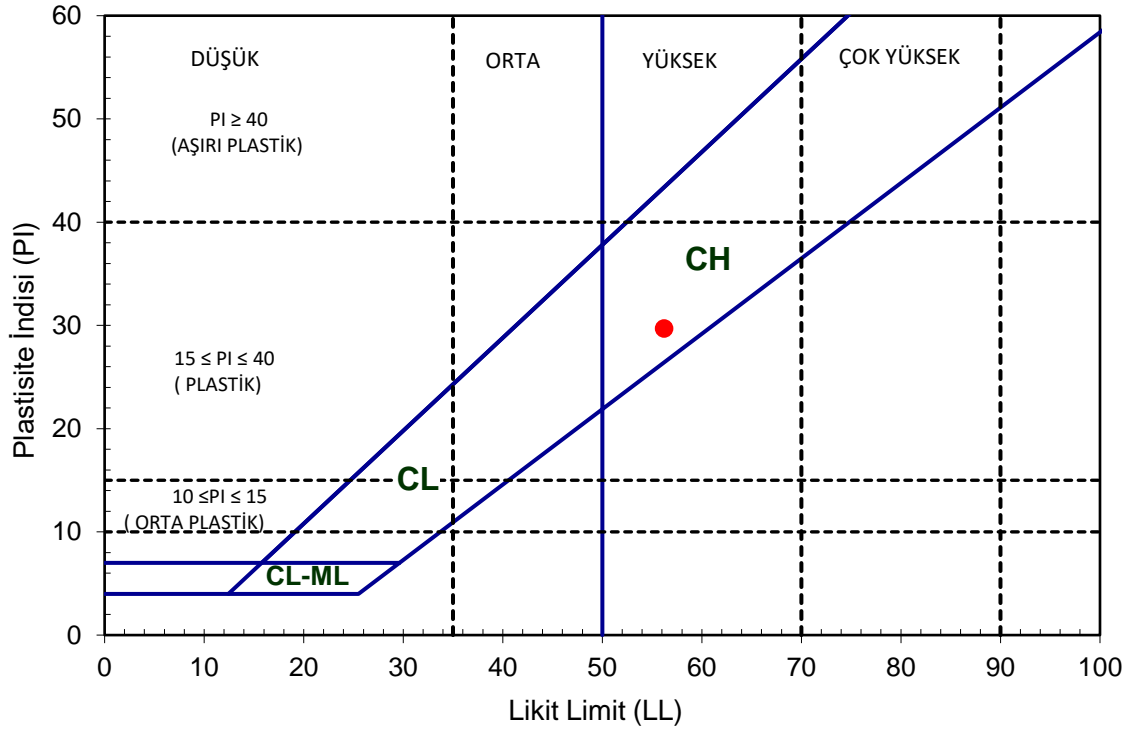
Şekil 5.36: Ayvalı 2 numunesinin tane boyut dağılım grafiği.

Çizelge 5.1: Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Ayvalı 2).

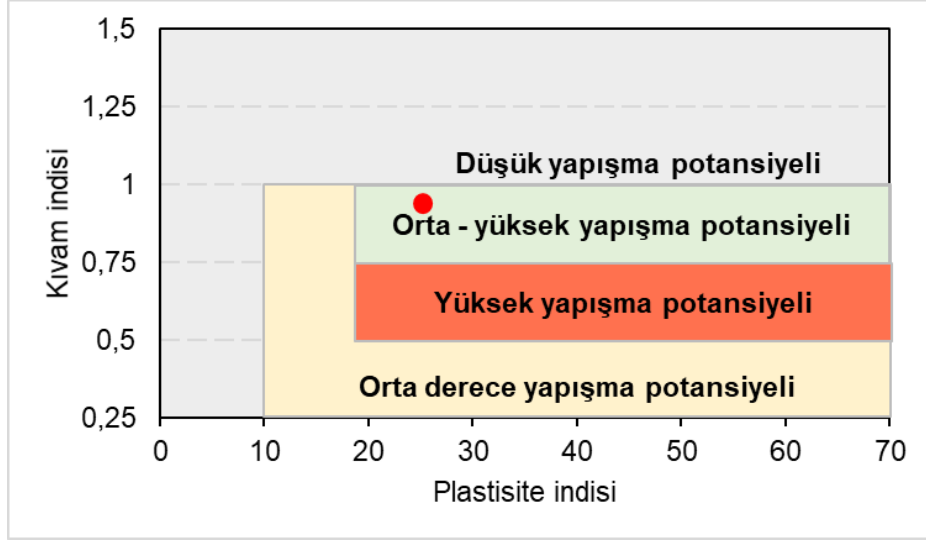
Likit Limit (%)	56,20
Plastik Limit (%)	29,70
Plastisite İndeksi	26,50
Kıvam İndeksi	0,87
Plastisite Derecesi	Plastik
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,65
Doğal Nem İçeriği (%)	33,00



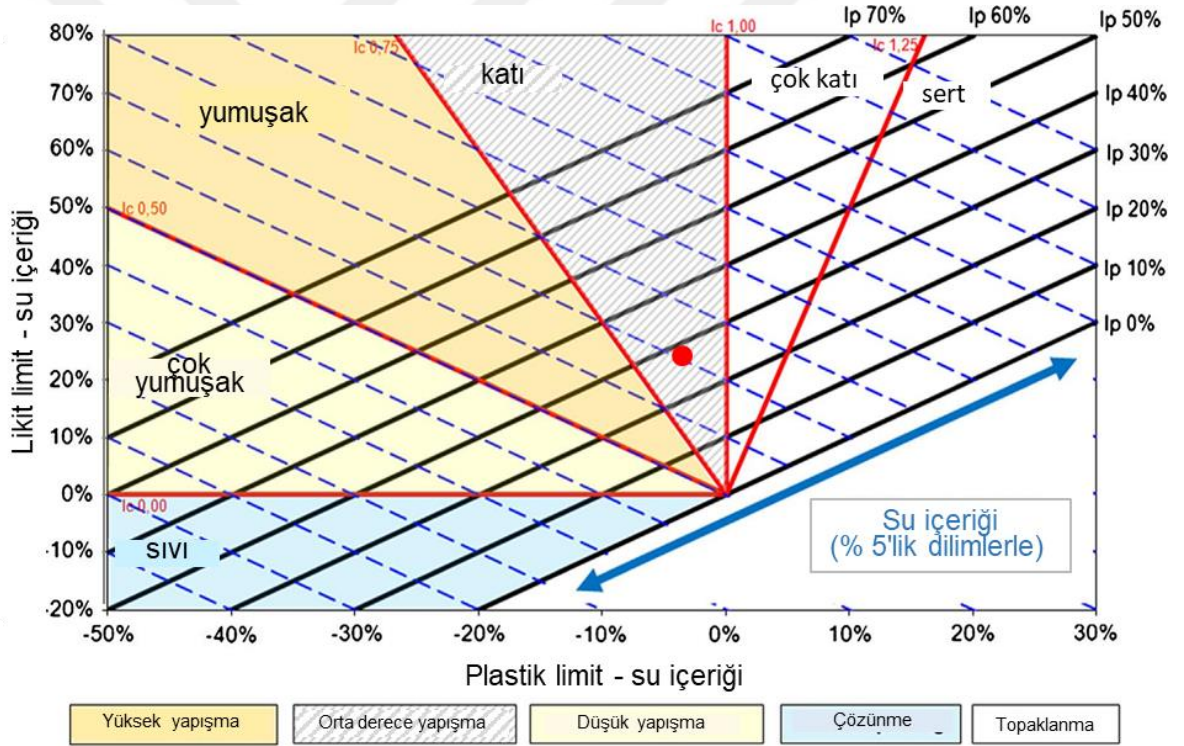
Şekil 5.37: Likit limit deney sonuçları (Ayvalı 2).



Şekil 5.38: Numunenin plastisite grafiğindeki yeri (Ayvalı 2).



Şekil 5.39: Numunenin yapışma / tıka riski grafiğindeki yeri (Ayvalı 2).



Şekil 5.40: Numunenin kıvam grafiğindeki yeri (Ayvalı 2).

5.4.4 Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli numunelerinde yapılan zemin karakterizasyon deneyi sonuçları

Doktora tezi kapsamında zemin şartlandırmanın EPB TBM performansına etkilerinin araştırılması amacıyla S8-236 shaftından açılan kuyruk tüneli aynasından Tuzla Akfırat tünel güzergâhını temsil eden zemin numuneleri alınmıştır (Şekil 5.41). Alınan zemin numuneleri üzerinde zeminin karakteristik özelliklerini belirlemek

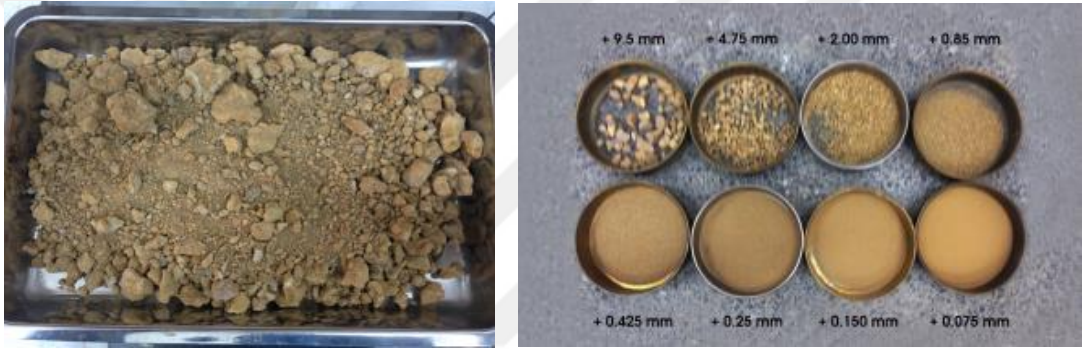
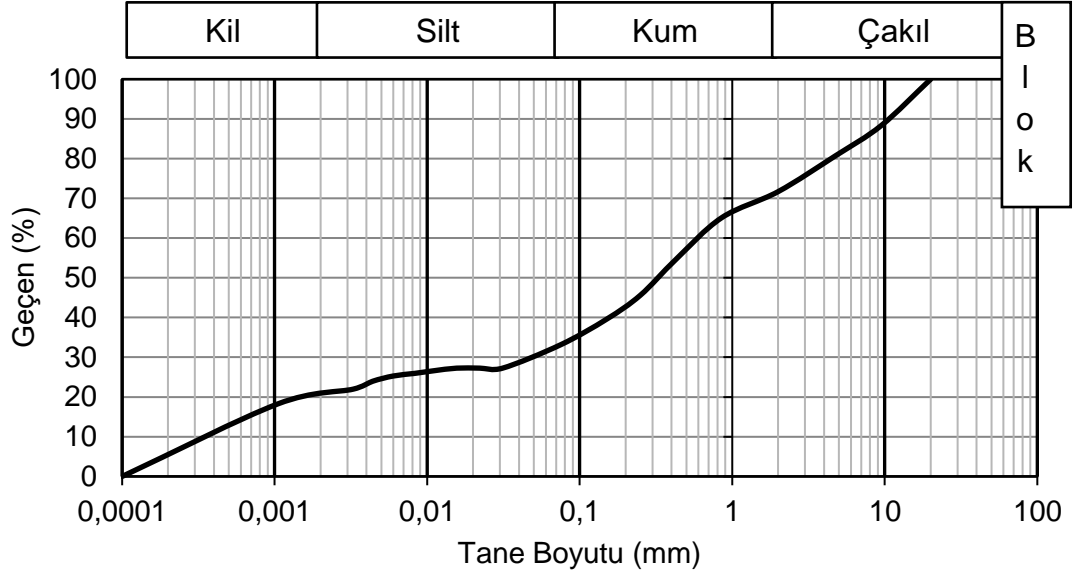
amacıyla özgül ağırlık, doğal nem içeriği, tane boyut dağılımı (elek analizi ve hidrometre deneyleri), Atterberg kıvam limit deneyleri yapılmıştır.



Şekil 5.41: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli S8-236 şaftı kuyruk tüneli aynasından numune alınması.

Tünel güzergâhında geçilecek zeminin özelliklerinin belirlenip zemin sınıflandırılması yapılması amacıyla S8-236 şaftından açılan kuyruk tüneli aynasından alınan zemin numunelerinde parça boyut analizi yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.42’de özetlenmiştir. Yapılan elek analizi ve hidrometre deney sonuçları değerlendirildiğinde geçilecek zeminin killi siltli çakıllı kum olduğu ve kil + silt içeriğinin yaklaşık %30, kum içeriğinin ise %40 olduğu tespit edilmiştir.

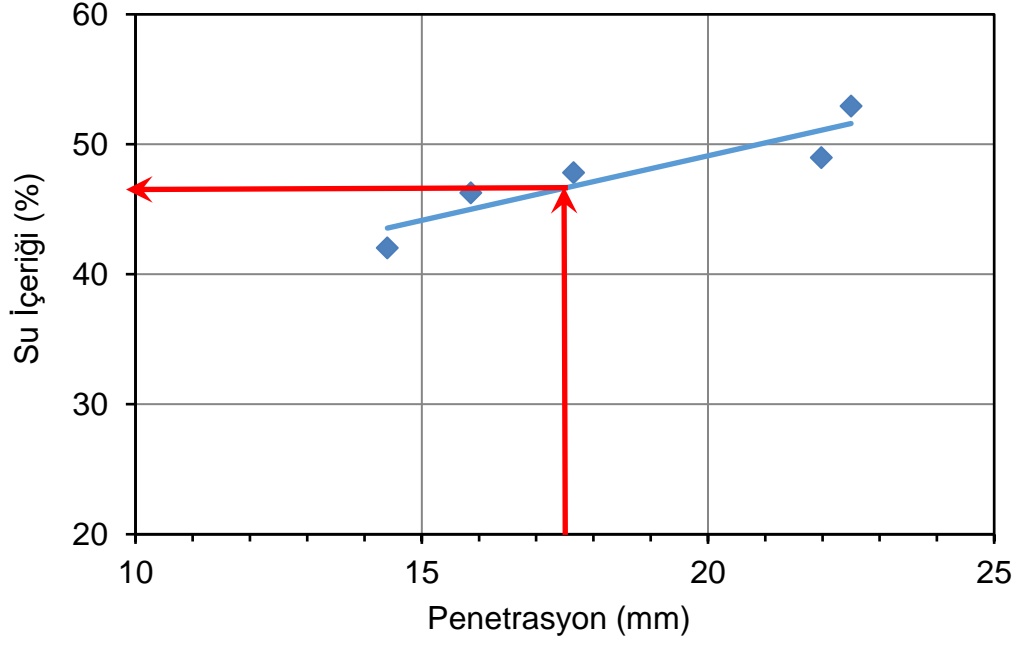
Elek analizi sonrasında zemin numunesi içinde bulunan ince taneli malzemenin kıvam limitlerinin belirlenmesi amacıyla Atterberg kıvam limit deneyleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.2’de özetlenmiştir. Likit limitin belirlenmesi için yapılan deneylerin sonuçları grafik olarak Şekil 5.43’de verilmektedir. Numunenin plastisite grafiğindeki yeri ise Şekil 5.44’de görülmektedir. Görüldüğü gibi numune plastik özelliktedir. Holmann ve Thewes (2013) tarafından verilen açık modda çalışan EPB TBM’lerin tıkama / yapışma risk grafiğindeki ve kıvam grafiğindeki yerleri incelendiğinde ise, numune katı-çok katı olduğundan, tıkama / yapışma riski bakımından grafik dışında kalmaktadır.



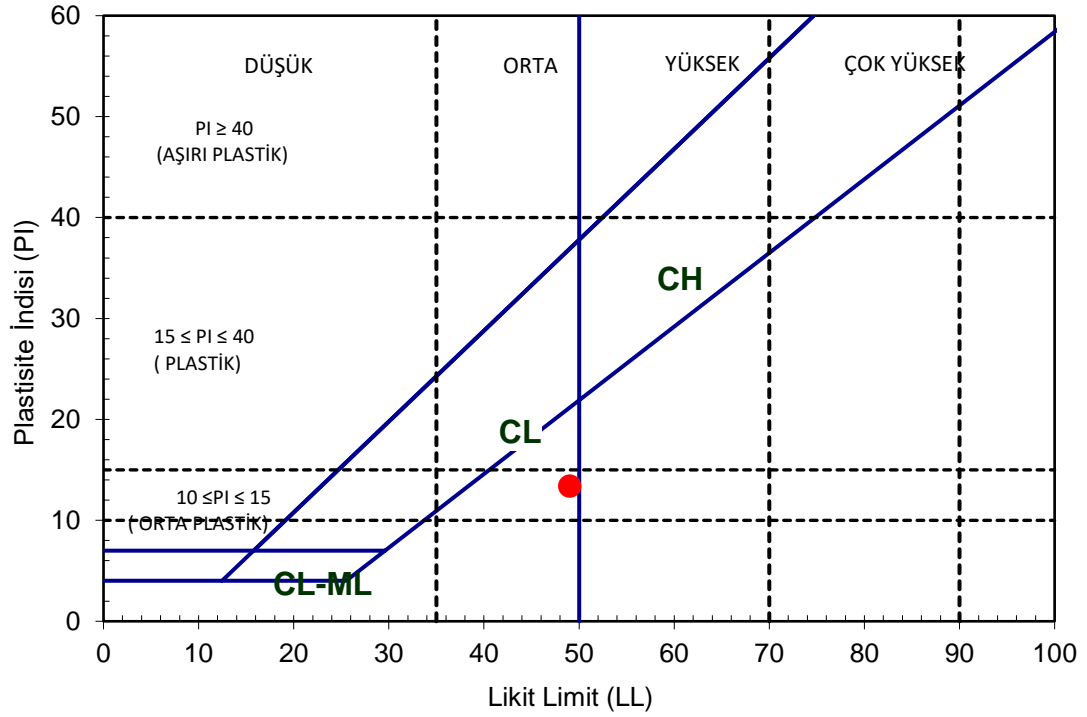
Şekil 5.42: Akfirat tünел numunesinin tane boyut dağılım grafiği.

Çizelge 5.2: Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Akfirat).

Likit Limit (%)	49,00
Plastik Limit (%)	35,60
Plastisite İndeksi	13,40
Kıvam İndeksi	2,72
Plastisite Derecesi	Plastik (ML, OL)
Özgöl Ağırlık (g/cm^3)	2,65
Doğal Nem İçeriği (%)	12,50



Şekil 5.43: Likit limit deney sonuçları (Akfırat).



Şekil 5.44: Numunenin plastisite grafiğindeki yeri (Akfırat).

5.4.5 Mahmutbey - Mecidiyeköy Metro Tüneli numunelerinde yapılan zemin karakterizasyon deneyi sonuçları

Doktora tezi kapsamında zemin şartlandırmanın EPB TBM performansına etkilerinin araştırılması amacıyla Kazım Karabekir İstasyonu kazı alanından Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli güzergâhını temsil eden zemin numuneleri alınmıştır (Şekil 5.45). Alınan zemin numuneleri üzerinde zeminin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla özgül ağırlık, doğal nem içeriği, tane boyut dağılımı (elek analizi ve hidrometre deneyleri), Atterberg kıvam limit deneyleri yapılmıştır.

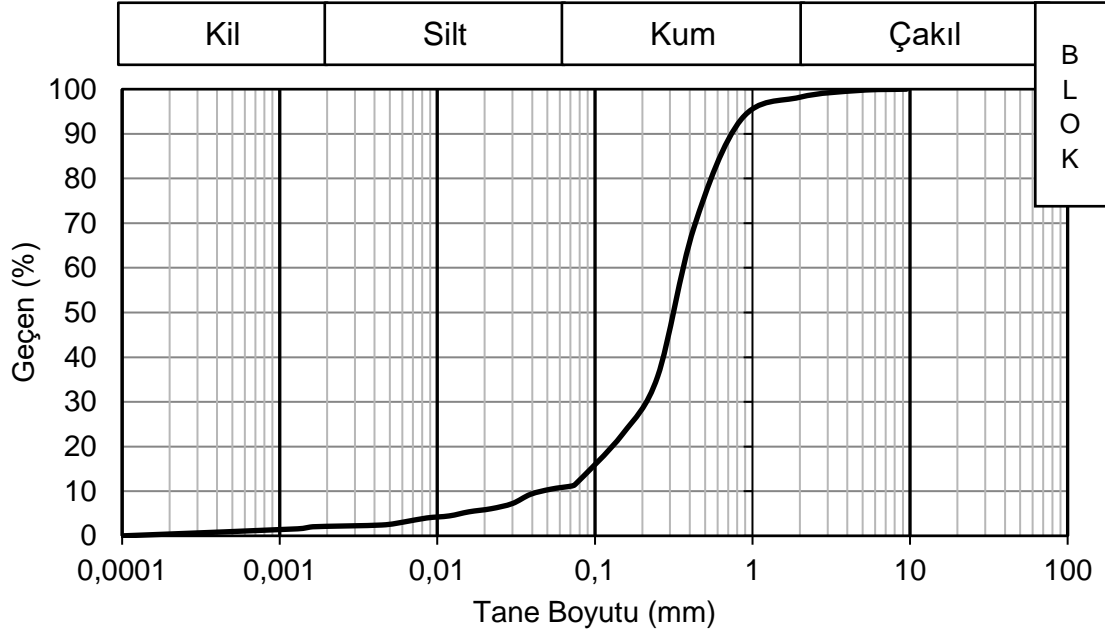
Tünel güzergâhında geçilecek zeminin özelliklerinin belirlenip zemin sınıflandırılması yapılması amacıyla alınan zemin numunelerinde parça boyut analizi yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.46'da özetlenmiştir. Yapılan elek analizi ve hidrometre deney sonuçları değerlendirildiğinde geçilecek zeminin (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1) yaklaşık %87 kum ve %10 silt içerdiği (siltli kum) ve geri kalan yüzdesinin kil ve çakıl olduğu belirlenmiştir.

Elek analizi sonrasında zemin numunesi içinde bulunan ince taneli malzemenin kıvam limitlerinin belirlenmesi amacıyla Atterberg kıvam limit testleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.3'de özetlenmiştir.

Bölgede ikinci bir zemin tabakası(Mahmutbey-Mecidiyeköy 2) daha mevcuttur (kumlu silt, %68 silt, %32 kum), kazı esnasında bu iki tabakanın da değişimli olarak kazılacakları bilinmektedir. Siltli zeminin özelliklerinin belirlenip zemin sınıflandırılması yapılması amacıyla alınan zemin numunelerinde parça boyut analizi yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.47'de özetlenmiştir.



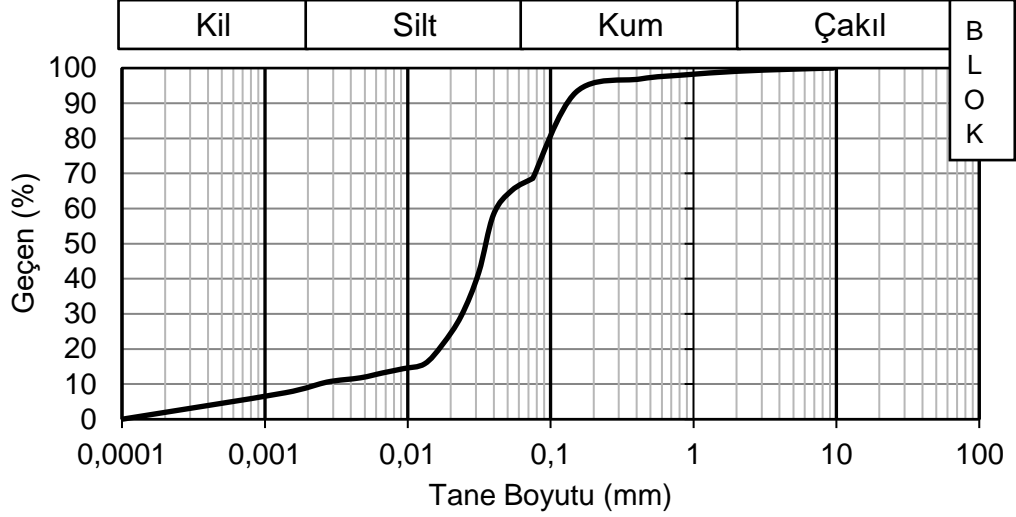
Şekil 5.45: Mahmutbey-Mecidiyeköy Tüneli Kazım Karabekir İstasyonu'ndan numune alınması.



Şekil 5.46: Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli 1 numunesinin tane boyut dağılım grafiği.

Çizelge 5.3: Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).

Plastik Limit	-
Özgül Ağırlık	1,90 g/cm ³
Doğal Nem İçeriği	% 17,0

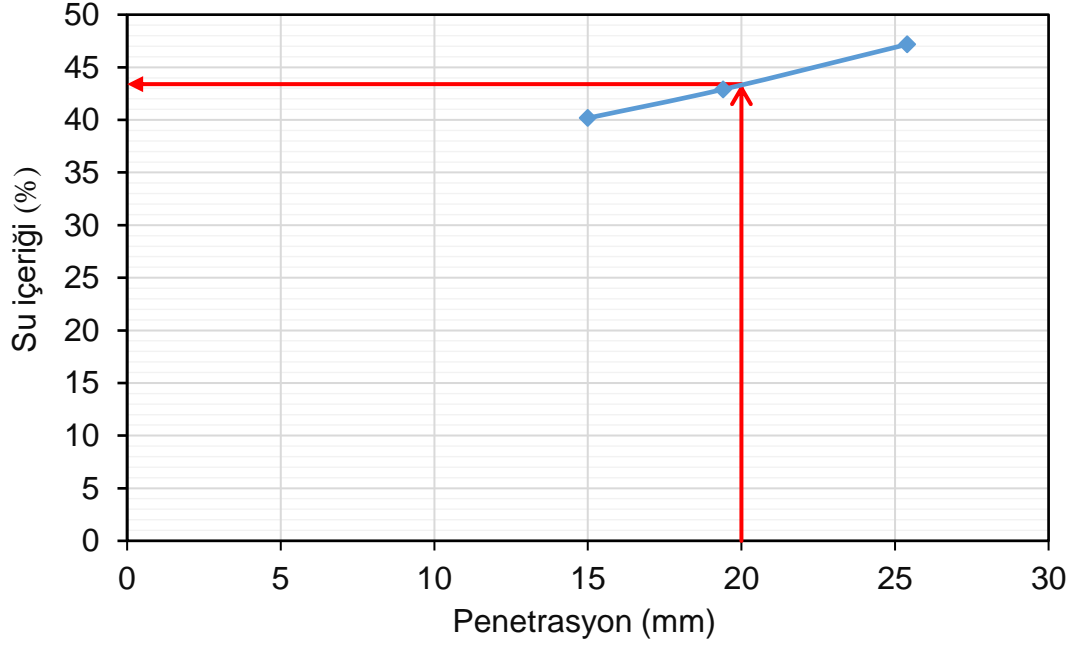


Şekil 5.47: Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli 2 numunesinin tane boyut dağılım grafiği.

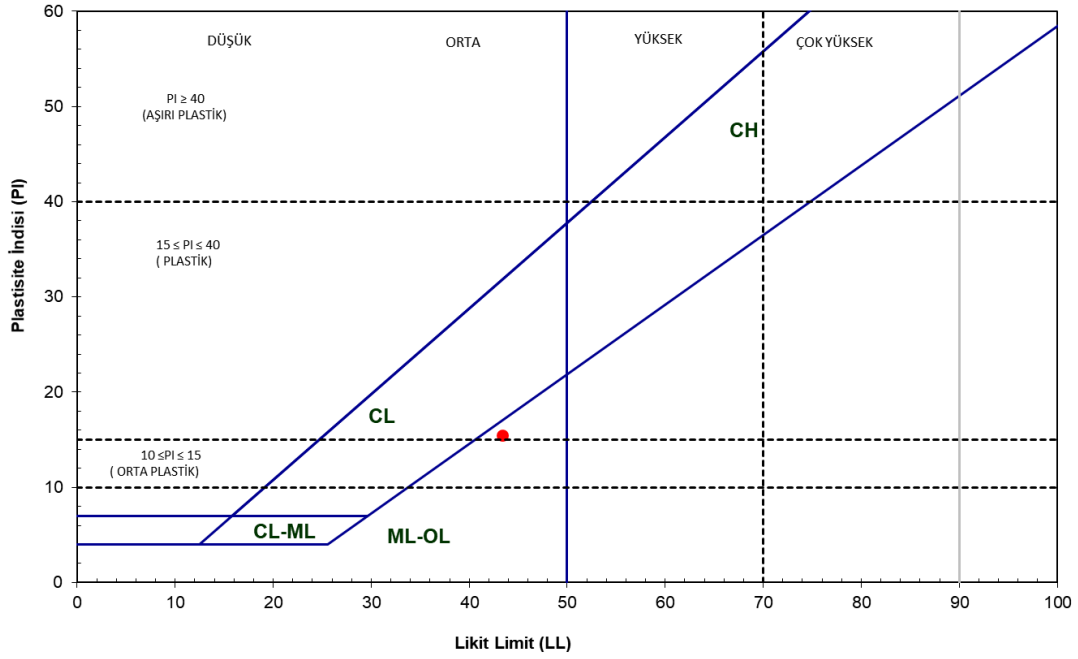
Elek analizi sonrasında zemin numunesi içinde bulunan ince taneli malzemenin kıvam limitlerinin belirlenmesi amacıyla Atterberg kıvam limit testleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.4'de özetlenmiştir. Likit limitin belirlenmesi için yapılan deneylerin sonuçları grafik olarak Şekil 5.48'de verilmektedir. Numunenin plastisite grafiğindeki yeri ise Şekil 5.49'da görülmektedir. Şekil 5.50'de ise Holmann ve Thewes (2013) tarafından verilen açık modda çalışan EPB TBM'lerin tıkama / yapışma risk grafiğindeki görülmektedir. Görüldüğü gibi numune topaklanma (tıkama / yapışma) riski göstermektedir ve kazı kolaylığı veya şartlandırma bakımından uygun kıvam elde edilmesi için doğal su içeriğine yaklaşık %20 su ilave edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 5.4: Atterberg kıvam limitleri deney sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).

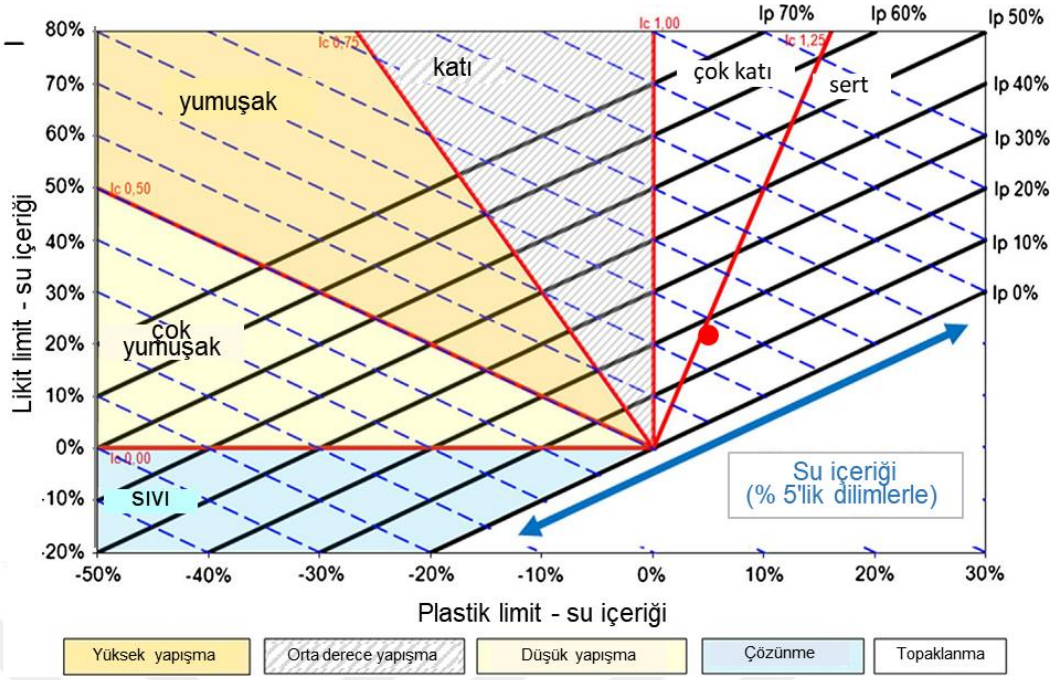
Likit Limit (%)	43,40
Plastik Limit (%)	27,90
Plastisite İndeksi	15,50
Kıvam İndeksi	1,80
Plastisite Derecesi	Plastik değil
Doğal Nem İçeriği (%)	22,60



Şekil 5.48: Likit limit deney sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).



Şekil 5.49: Numunenin plastisite grafiğindeki yeri (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).



Şekil 5.50: Numunenin kıvam grafiğindeki yeri (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).

5.5 Zemin Şartlandırma Deney Sonuçları

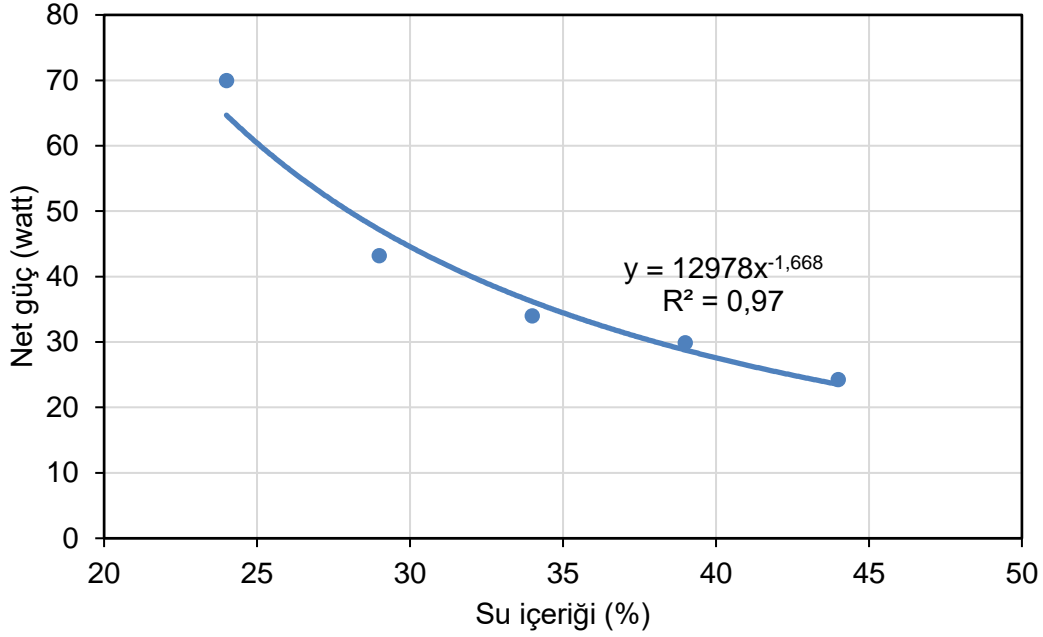
5.5.1 Kaolen

İnce taneli zeminlerde farklı köpük tiplerinin zemin parametrelerine etkilerinin araştırılması amacıyla ve her deneyde zemin homojenliğini sağlaması amacıyla kaolen kullanılmıştır. Zemin şartlandırma testleri köpüğün ve/veya suyun zeminin karakteristiğine etkilerinin araştırılması amacıyla yapılmıştır. Deneyler öncelikle saf suyla yapılmış daha sonra, farklı tip köpükler kullanılarak yapılmıştır.

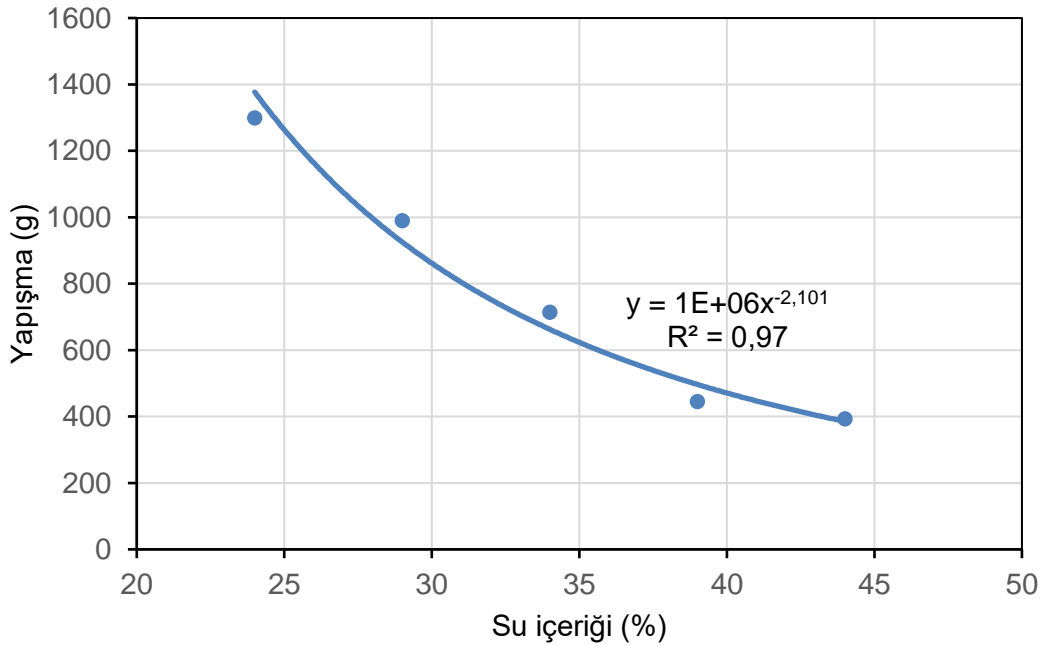
Kaolen numuneleri 105 C° sıcaklıkta etüvde 24 saat süre kurutulmuş daha sonra doğal nem içeriğine sahip olana dek su eklenip mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra farklı su içeriklerinin zeminin karakteristik özelliklere etkisinin araştırılması amacıyla güç ölçümlü mikser, konik penetrometre ve vane shear kesme dayanımı deneyleri yapılmıştır; sonuçlar Çizelge 5.5'te ve Şekil 5.51-5.54'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.5: Kaolen+su karışımı ile yapılan deney sonuçları.

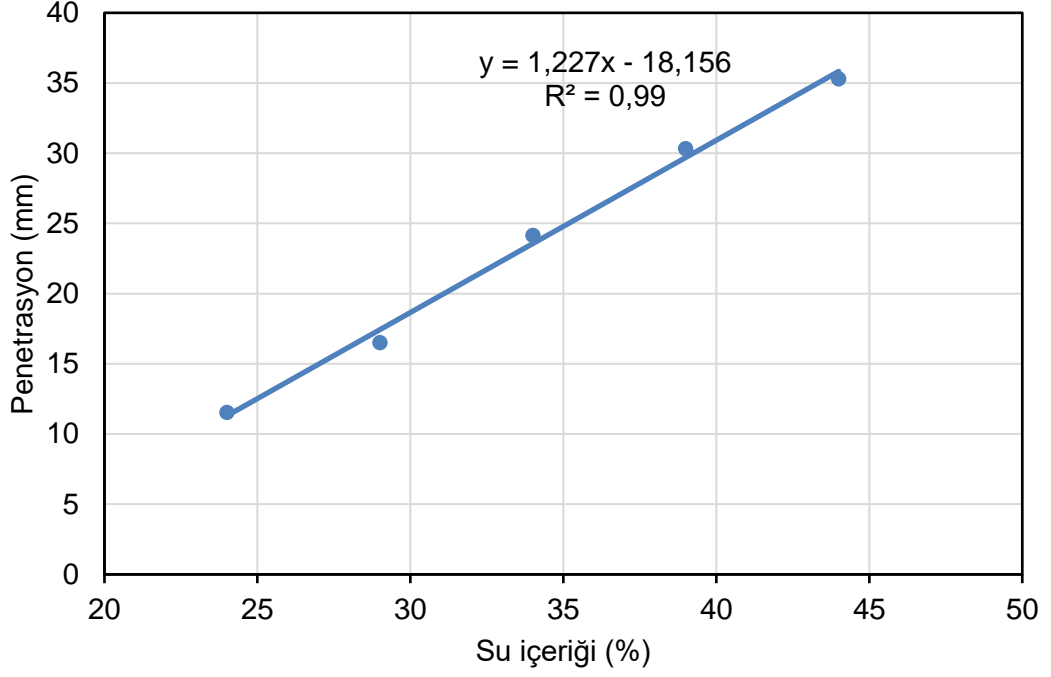
Su İçeriği (%)	Net Güç (Watt)	Yapışma (g)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
24	70,00	1299,98	11,54	3,75
29	43,20	990,58	16,50	2,30
34	34,00	714,19	24,14	1,00
39	29,90	445,80	30,33	0,50
44	24,30	393,87	35,30	0,30



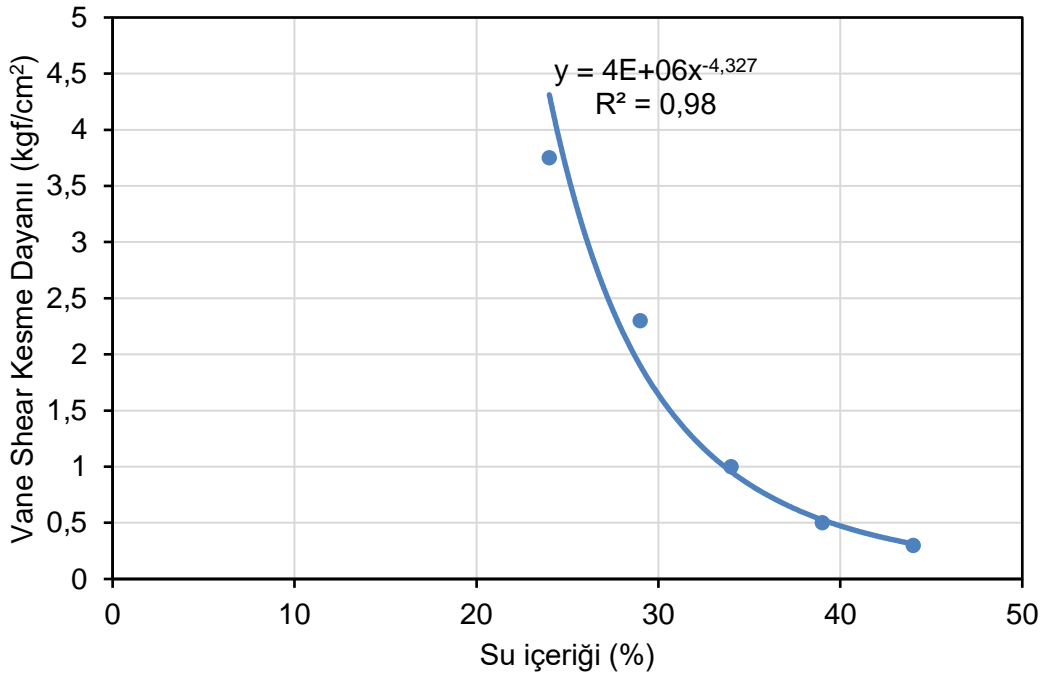
Şekil 5.51: Farklı su içeriklerinde güç sarfiyatı (Kaolen).



Şekil 5.52: Farklı su içeriklerinde kaolenin mikser bıçağına yapışma miktarı.



Şekil 5.53: Farklı su içeriklerinde penetrasyon değeri (Kaolen).



Şekil 5.54: Farklı su içeriklerinde vane shear kesme dayanımı değerleri (Kaolen).

Deneylerin sadece suyla yapılmasından sonra zemin şartlandırılmada köpüğün etkisini araştırmak amacıyla yapılan deneyler köpükle de tekrarlanmıştır. Bu amaç için 2 farklı köpük tipi kullanılmıştır (köpük: Exfoam 1 ve anti-kil: Exfoam 2).

Köpüklü deneylerde ilk olarak nem içeriği %24 olarak ayarlanıp FER (köpük kabarma oranı) 16, FIR (köpük enjeksiyon oranı) 50 ile 150 arası ve C_F (köpük

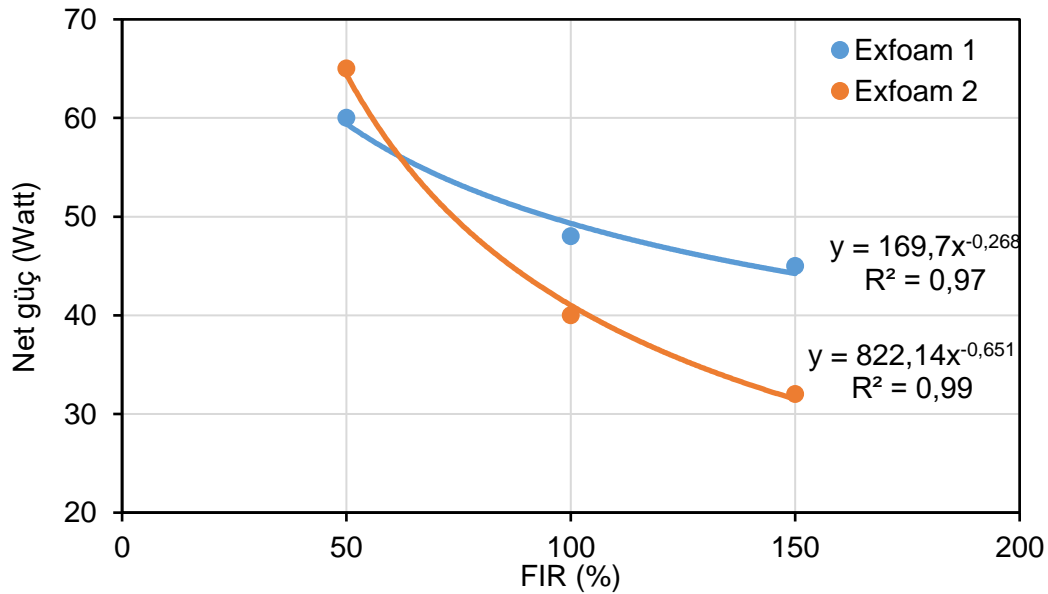
konsantrasyonu) %3 değerlerinde her iki köpük için (Exfoam 1 ve Exfoam 2) güç ölçümlü mikser - yapışma, konik penetrometre ve vane shear kesme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Köpüklü şartlandırma deneylerinin detaylı sonuçları Çizelge 5.6-5.7'de ve Şekil 5.55-5.58'de sunulmuştur.

Çizelge 5.6: Kaolen+Exfoam 1 karışımı ile yapılan deney sonuçları.

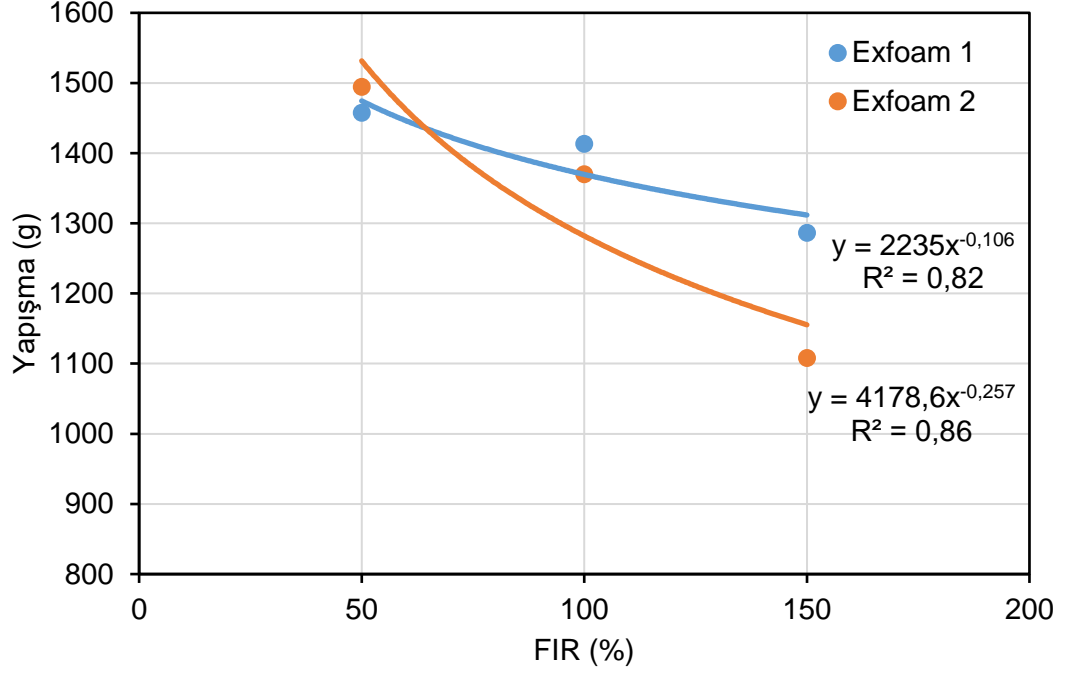
FIR (%)	Net Güç (Watt)	Yapışma (g)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
0	75	1327,05	11,66	4,25
50	60	1457,47	12,97	3,50
100	48	1413,34	16,01	2,75
150	45	1286,17	18,04	2,50

Çizelge 5.7: Kaolen+Exfoam 2 karışımı ile yapılan deney sonuçları.

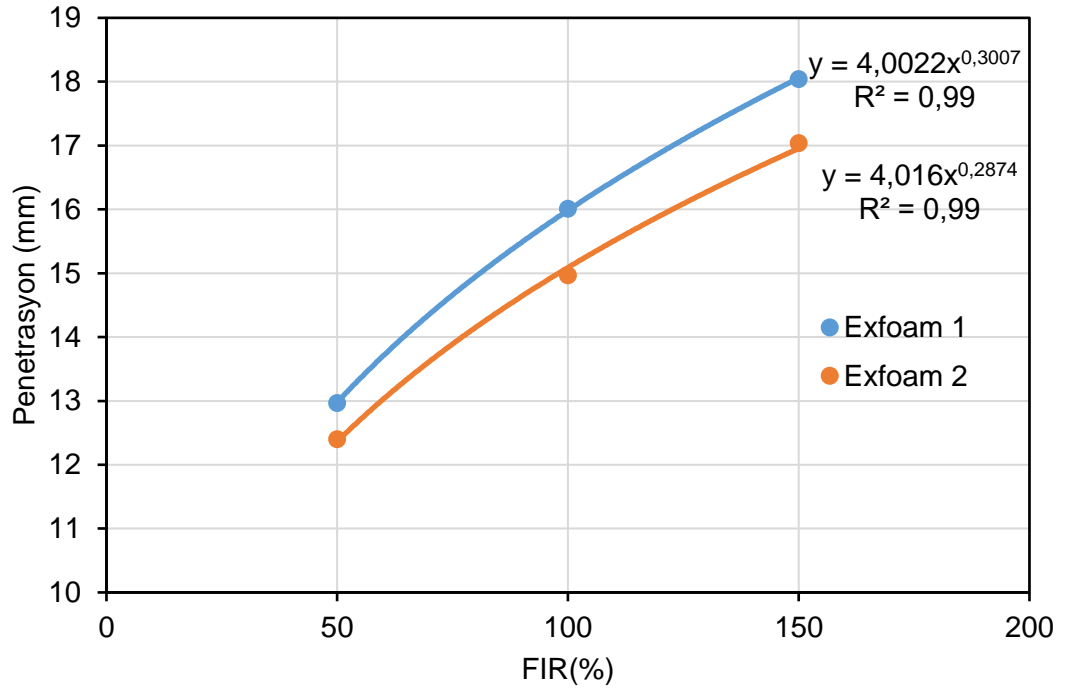
FIR (%)	Net Güç (Watt)	Yapışma (g)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
0	75	1313,05	11,24	4,25
50	65	1494,51	12,40	3,75
100	40	1370,02	14,97	2,50
150	32	1108,00	17,04	2,00



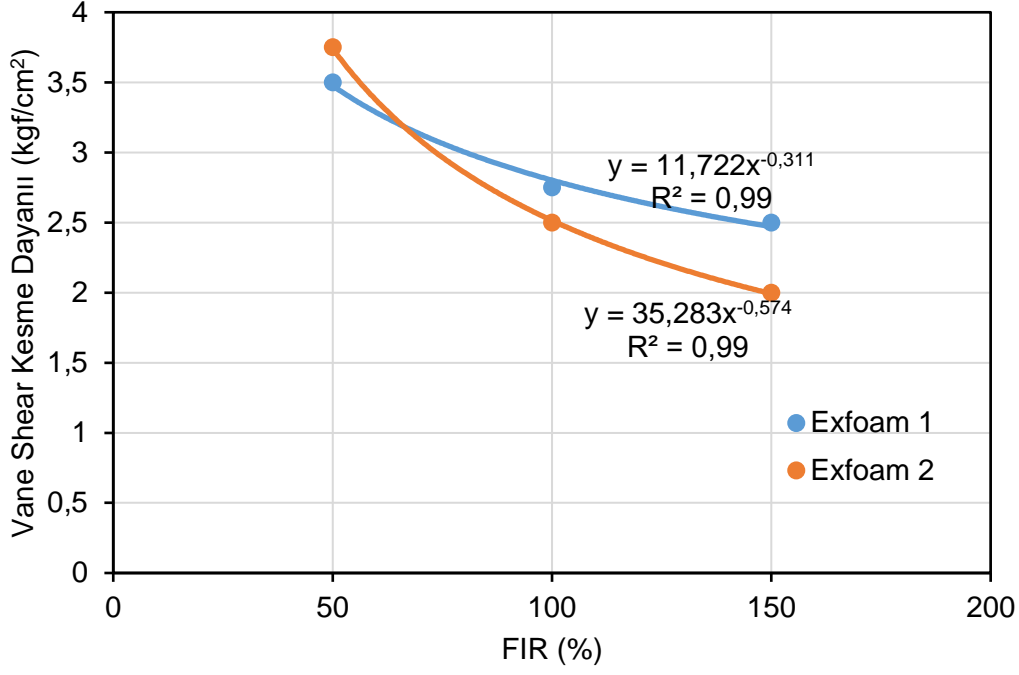
Şekil 5.55: Exfoam 1 ve Exfoam 2 için farklı FIR oranlarında mikser güç miktarı karşılaştırılması (Kaolen).



Şekil 5.56: Exfoam 1 ve Exfoam 2 için farklı FIR oranlarında yapışma karşılaştırılması (Kaolen).



Şekil 5.57: Exfoam 1 ve Exfoam 2 için farklı FIR oranlarında konik penetrasyon değerleri karşılaştırılması (Kaolen).



Şekil 5.58: Exfoam 1 ve Exfoam 2 için farklı FIR oranlarında vane shear kesme dayanımı değerleri karşılaştırılması (Kaolen).

5.5.2 Standart kum

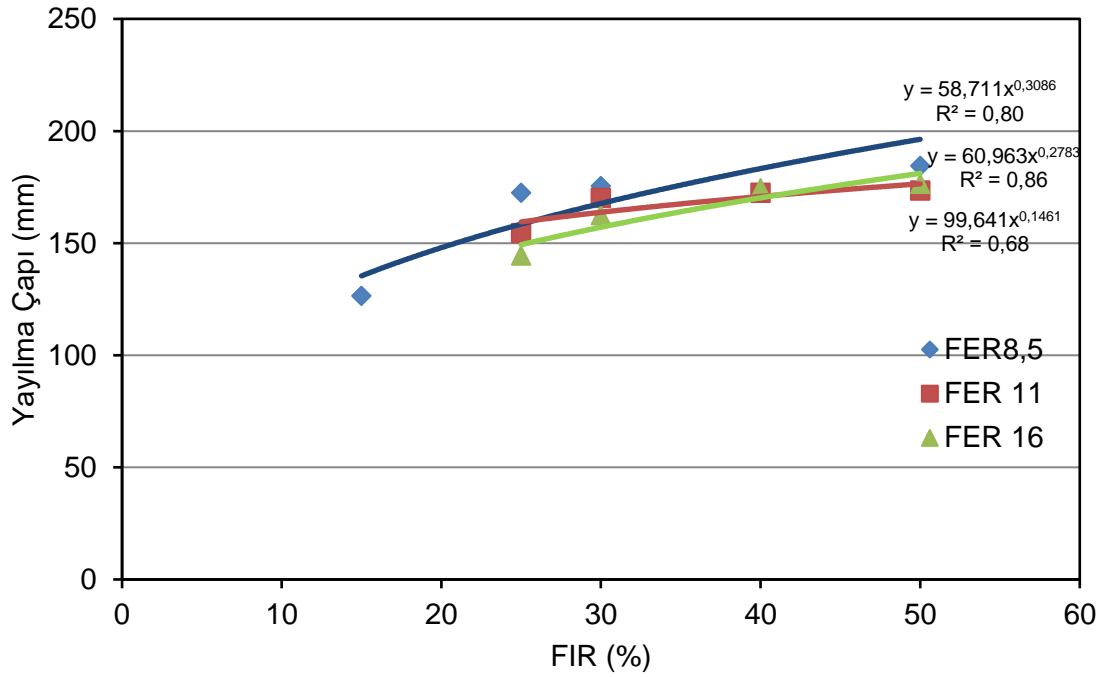
Kaba taneli zeminlerde farklı köpük tiplerinin zemin parametrelerine etkilerinin araştırılması amacıyla ve her deneyde zemin homojenliğini sağlaması amacıyla standart kum kullanılmıştır. Zemin şartlandırmanın kaba taneli zeminlerin karakteristik özelliklerine ve köpük kalitesinin ve köpük parametrelerinin bu özelliklere etkisinin araştırılması amacıyla zemin şartlandırma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde numunenin homojen olması için standart kum kullanılmış ve şartlandırma kimyasalı olarak 2 farklı firmaya ait köpük ajanı kullanılmıştır. Zemin şartlandırmanın kumların plastikleşmesine etkisinin araştırılması amacıyla EFNARC (2005) tarafından önerilen yayılma tablası deneyi ve deneylerde ihtiyaç duyulan numune miktarının azaltılması için tez kapsamında geliştirilen mini slump deneyi yapılmıştır. Standart kum ilk olarak %3 su içeriğine getirilmek için su eklenerek mikser yardımıyla karıştırılmış daha sonra istenilen FIR değerlerine ulaşmak için köpük eklenerek homojen oluncaya karıştırılmıştır. Deneyler her seferinde yeni numune kullanılarak tekrarlanmıştır.

Şartlandırma deneyinde ilk olarak İKSA firmasına ait olan Exfoam 1 cinsi köpük kullanılmıştır. Köpük oluşturulurken CF değeri %3 olarak sabit tutulmuş ve farklı

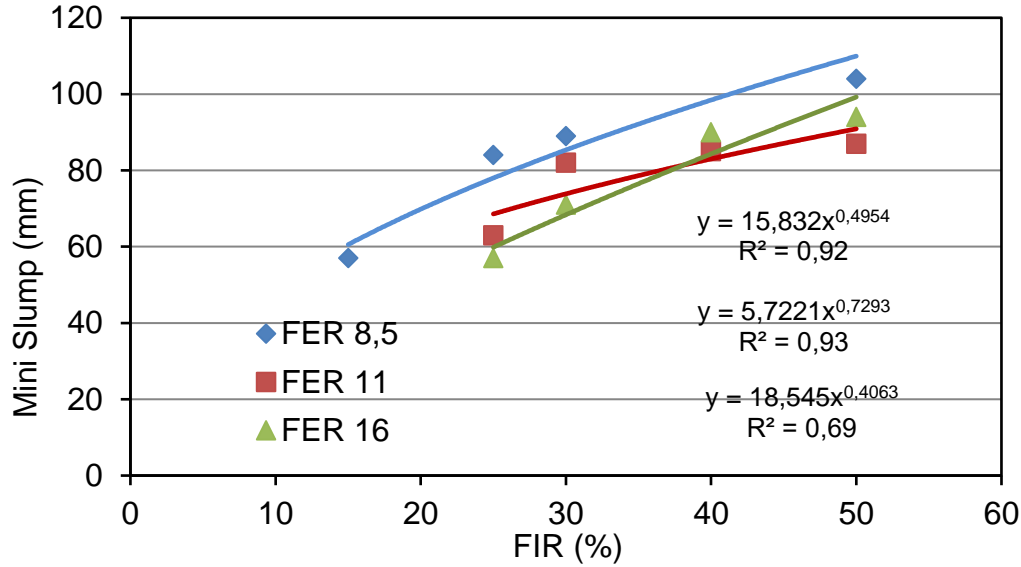
FER ve FIR oranları kullanılarak şartlandırma deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8 ve Şekil 5.59 ve Şekil 5.60'ta özetlenmiştir.

Çizelge 5.8: Standart Kum+Exfoam 1 karışımı ile yapılan deney sonuçları.

FER	FIR (%)	Yayılma Çapı (mm)	Mini Slump (mm)
8,5	15	126,5	57
	25	172,5	84
	30	175,5	89
	50	184,5	104
11	15	0	0
	25	154,5	63
	30	170,2	82
	40	172,5	85
	50	173,5	87
16	15	0	0
	25	144,5	57
	30	162,5	71
	40	174,5	90
	50	176,5	94



Şekil 5.59: Exfoam 1 için farklı FIR ve FER değerleri için yayılma miktarları karşılaştırılması (Standart Kum).

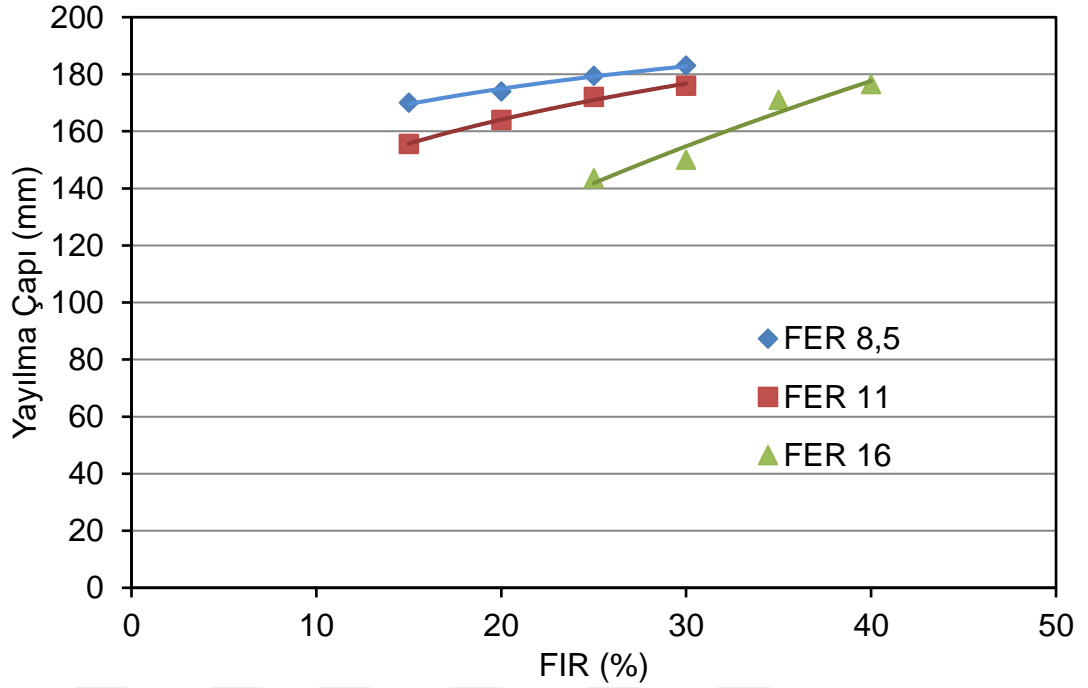


Şekil 5.60: Exfoam 1 için farklı FIR ve FER değerleri için mini slump değerleri karşılaştırılması (Standart Kum).

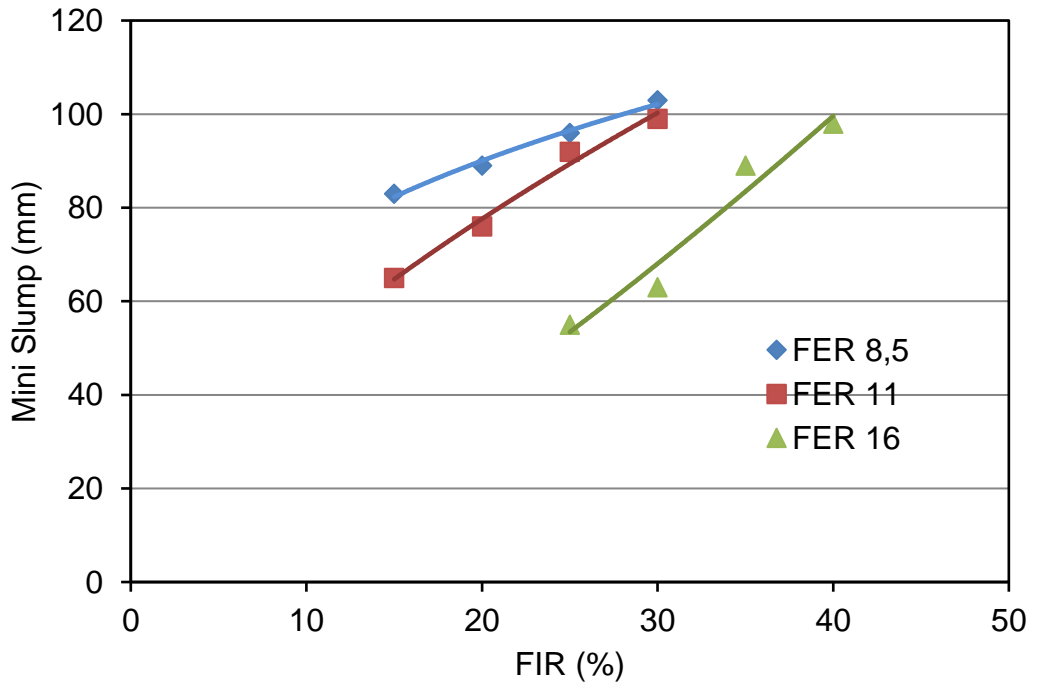
Farklı köpük cinsinin zemin şartlandırma performansına etkisinin araştırılması amacıyla şartlandırma deneylerinde BASF firmasına ait olan SLF 30 cinsi köpük kullanılmıştır. Köpük oluşturulurken CF değeri %3 olarak sabit tutulmuş ve farklı FER ve FIR oranları kullanılarak şartlandırma deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.9 ve Şekil 5.61 ve Şekil 5.62’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.9: Standart Kum+SLF 30 karışımı ile yapılan deney sonuçları.

FER	FIR (%)	Yayımla Çapı (mm)	Mini Slump
8,5	10	0	0
	15	170	83
	20	174	89
	25	179,5	96
	30	183	103
11	10	0	0
	15	155,5	65
	20	164	76
	25	172	92
	30	176	99
16	15	0	0
	20	0	0
	25	143,5	55
	30	150	60
	35	171	89
	40	176,5	98

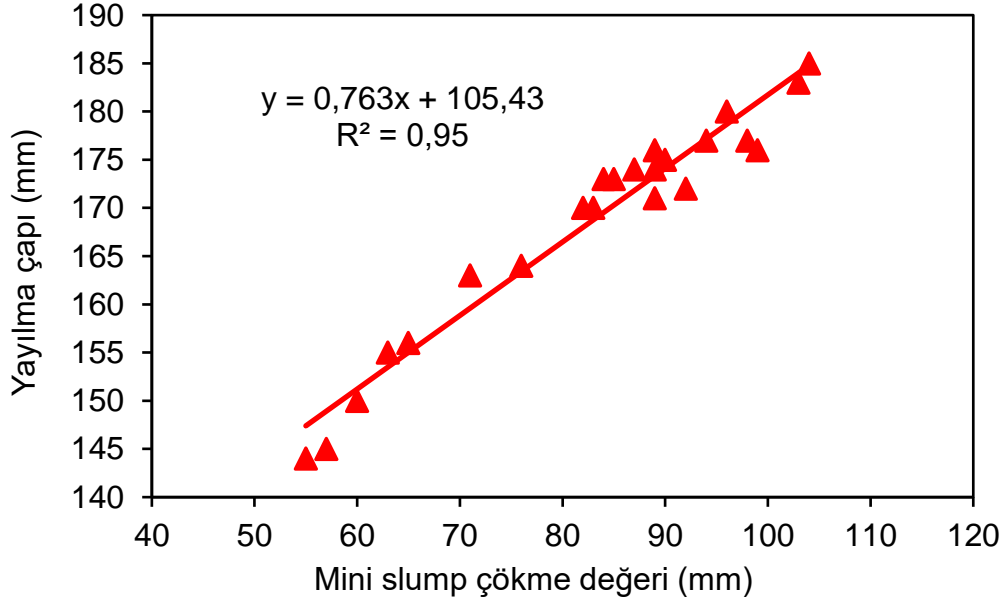


Şekil 5.61: SLF 30 için farklı FIR ve FER değerleri için yayılma miktarları karşılaştırılması (Standart Kum).



Şekil 5.62: SLF 30 için farklı FIR ve FER değerleri için mini slump değerleri karşılaştırılması (Standart Kum).

Standart kum numunesi üzerinde CF %3, W_n %3 sabit tutularak, Exfoam 1 ve SLF 30 sürfaktanları kullanılarak değişik FER ve FIR değerlerindeki köpükler ile yapılan mini slum çökme değerleri ile yayılma tablası deneylerinin (yayılma çapı) sonuçları bir grafikte birleştirilerek bulunan istatistiksel ilişkinin çok güçlü olduğu ortaya çıkarılmıştır (Şekil 5.63).



Şekil 5.63: Farklı FIR ve FER değerleri için mini slum çökme değerleri ve yayılma çapları arasındaki illişi (Standart Kum).

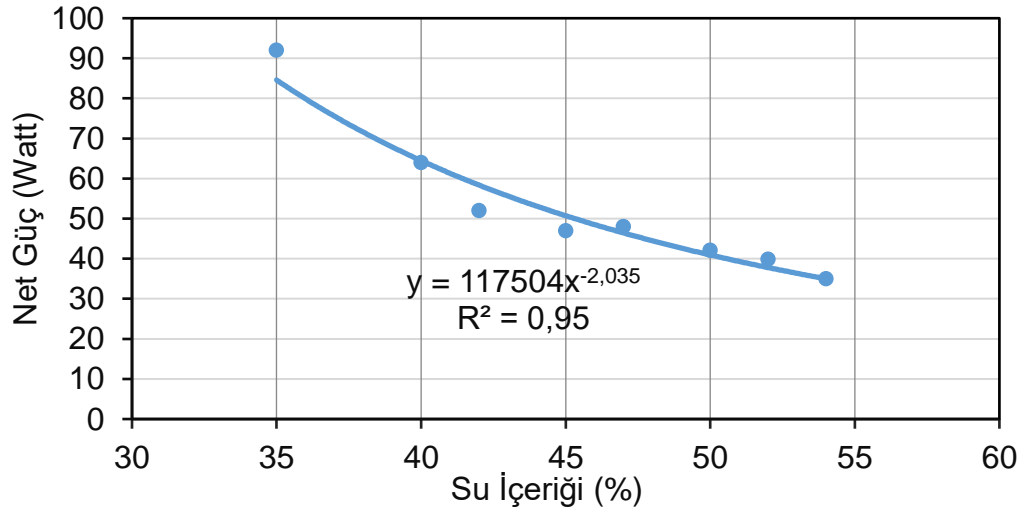
5.5.3 Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli

Yapılan parça boyut ve kıvam testleri sonucunda elde edilen bulgulara göre zeminin EPB TBM kazısı sırasında, yüksek kil içeriği nedeniyle kazı sırasında adezyon ve tıkama (clogging) probleminin yaşanabileceği ve dolayısıyla TBM performansını düşüreceği öngörülmüştür. Bu nedenle TBM performansının artırılmasına yönelik alınan zemin numuneleri üzerinde “su” ve “su + antikal polimerli köpük” kullanılarak zemin şartlandırma deneyleri yapılmıştır.

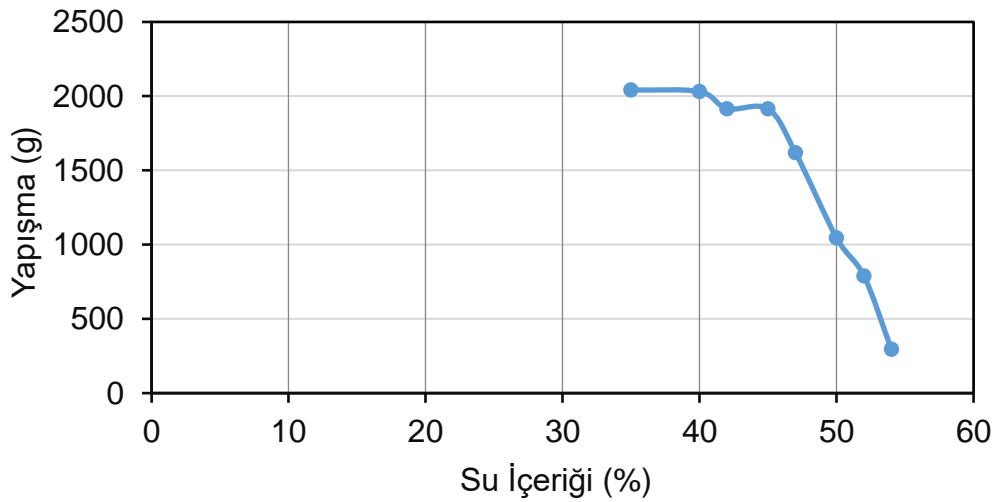
Tünel güzergahından alınan zemin numuneleri 105 C° sıcaklıkta etüvde 24 saat süre kurutulmuş daha sonra su eklenip mikserde doğal nem içeriğine sahip olana dek karıştırılmıştır. Daha sonra farklı su içeriklerinin (% 33, 35, 40, 42, 45, 47, 50, 52, 54) kazı performansına etkisinin araştırılması amacıyla güç ölçümlü mikser-yapışma, konik penetrometre ve vane shear kesme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10’da ve Şekil 5.64-5.70’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.10: Zemin + su karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları (Ayvalı 2).

Su İçeriği (%)	Net Güç (Watt)	Yapışma (g)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
33	-	-	5,5	2,3
35	92	2042	5,6	2,5
40	64	2031	8,4	1,3
42	52	1916	10,2	0,9
45	47	1915	11,8	0,6
47	48	1619	15,2	0,3
50	42	1046	18,4	0,3
52	40	789	19,4	0,2
54	35	295	22,6	0,2



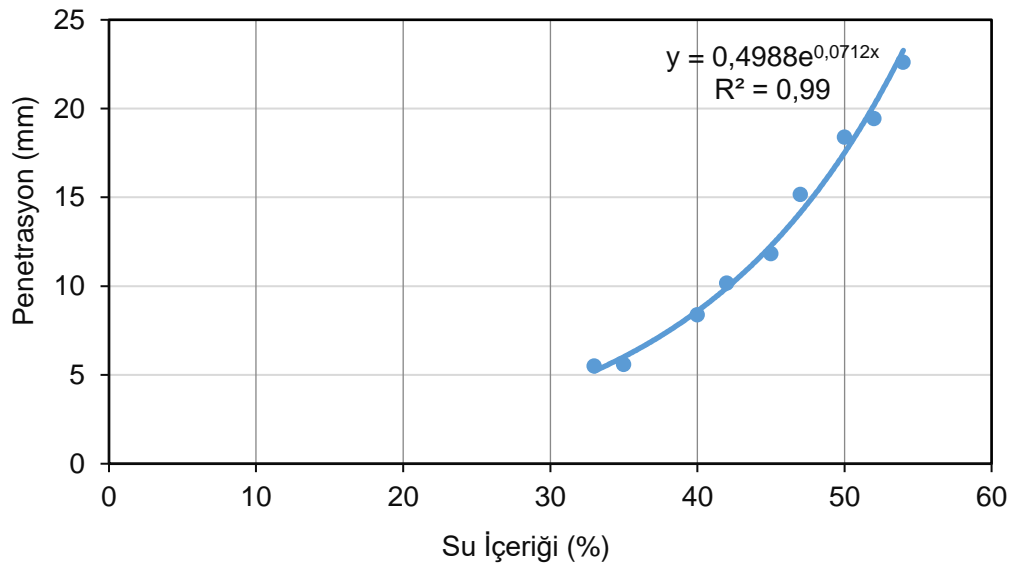
Şekil 5.64: Farklı su içeriklerinde güç sarfiyatı (Ayvalı 2).



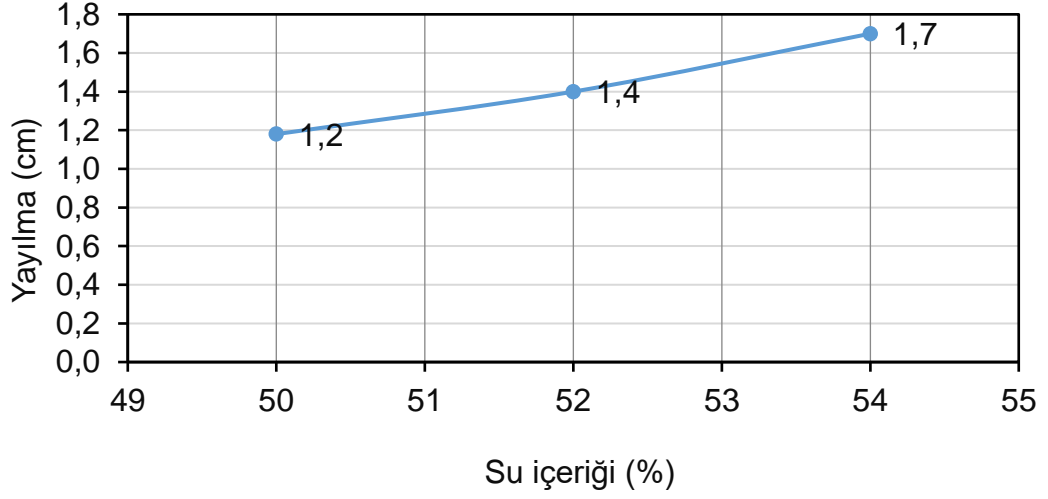
Şekil 5.65: Farklı su içeriklerinde zeminin mikser bıçağına yapışma miktarı (Ayvalı 2).



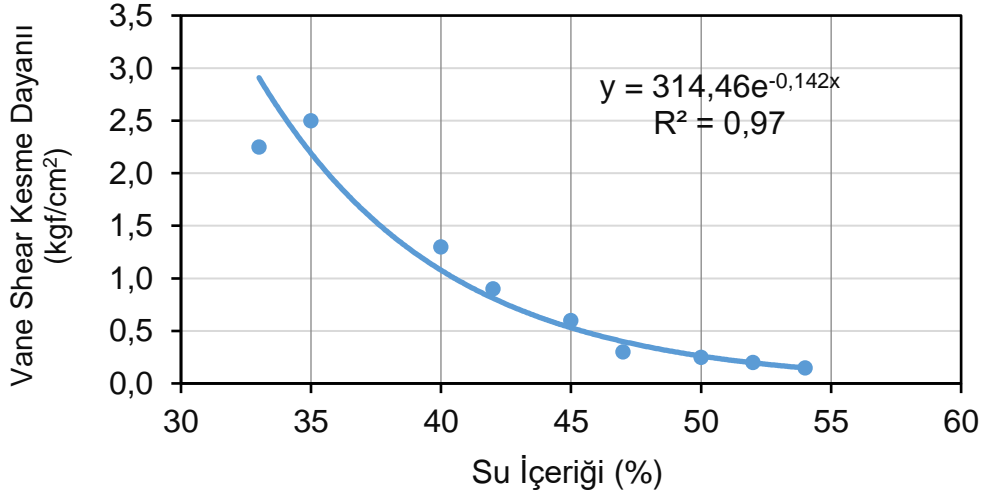
Şekil 5.66: Farklı su içeriklerinde zeminin mikser bıçağına yapışma görüntüsü (Ayvalı 2).



Şekil 5.67: Farklı su içeriklerinde penetrasyon değeri (Ayvalı 2).



Şekil 5.68: Farklı su içeriklerinde yayılma miktarı (Ayvalı 2).



Şekil 5.69: Farklı su içeriklerinde vane shear kesme dayanımı değerleri (Ayvalı 2).



Şekil 5.70: Vane shear kesme dayanımı deneyi (Ayvalı 2).

Deneylerin sadece suyla yapılmasından sonra zemin şartlandırmada köpüğün etkisini araştırmak amacıyla yapılan deneyler köpükle de tekrarlanmıştır. Bu amaç için 2 farklı firmadan alınan anti-kil köpükler kullanılmıştır (Exfoam 2 ve ACP 143). Alınan numunenin yapışkanlık özeliğinin yüksek olması nedeniyle deneylerde antikil özellikli köpük kullanılması uygun görülmüştür.

Köpüklü deneylerde ilk olarak nem içeriği %35 olarak ayarlanıp FER (köpük kabarma oranı) 16, FIR (köpük enjeksiyon oranı) 50 ile 400 arası ve C_F (köpük konsantrasyonu) %3 değerlerinde her iki köpük için (Exfoam 2 ve ACP 143) güç ölçümlü mikser-yapışma, konik penetrometre, vane shear kesme dayanımı ve yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise Şekil 54'den elde edilen sonuç nedeniyle su içeriği %35'ten %45'e artırılıp söz konusu numunede daha etkili olduğu görülen ACP143 kullanılarak şartlandırma deneylerine devam edilmiştir. Köpüklü şartlandırma deney sonuçları detaylı olarak Çizelge 5.11-5.13'de ve Şekil 5.71-5.74'de sunulmuştur.

Çizelge 5.11: Zemin + Exfoam 2 karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %35 W_n , %3 C_F ve FER 16 değerinde (Ayvalı 2).

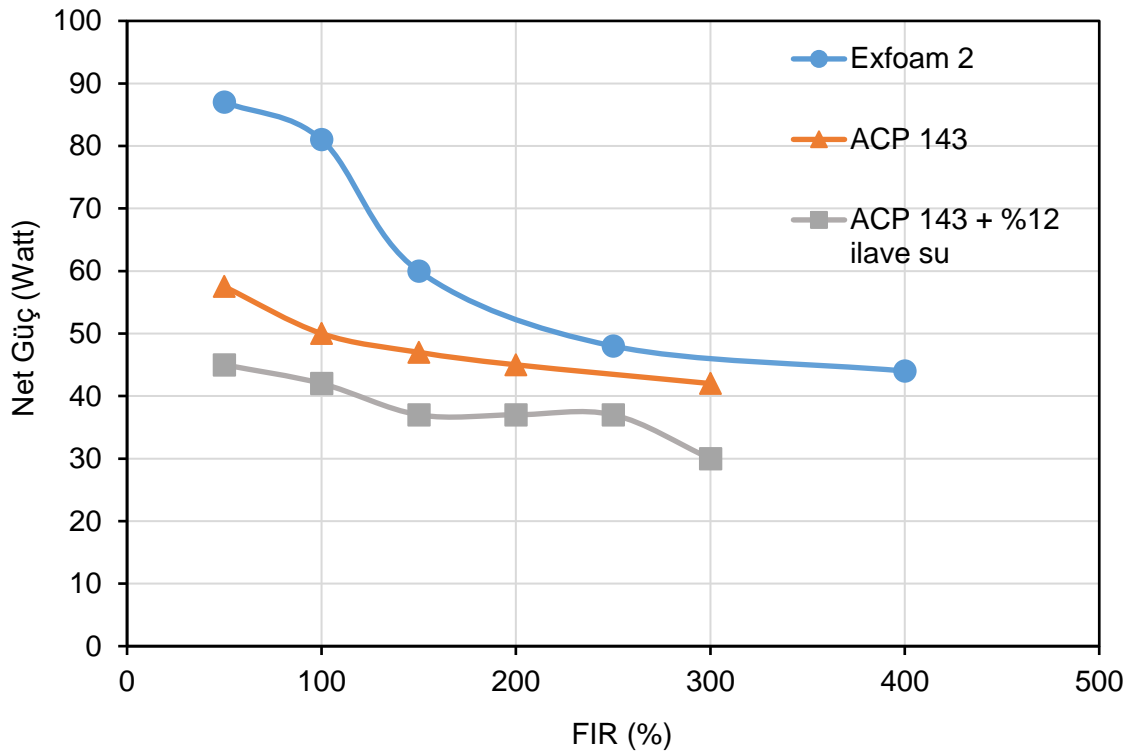
FIR (%)	Net Güç (Watt)	Yapışma (g)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
50	87	1958	5,5	2,50
100	81	1880	6,5	1,50
150	60	1778	7,5	1,05
250	48	1678	8,7	0,90
400	44	1570	10,9	0,75

Çizelge 5.12: Zemin + ACP 143 karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %35 W_n , %3 C_F ve FER 16 değerinde (Ayvalı 2).

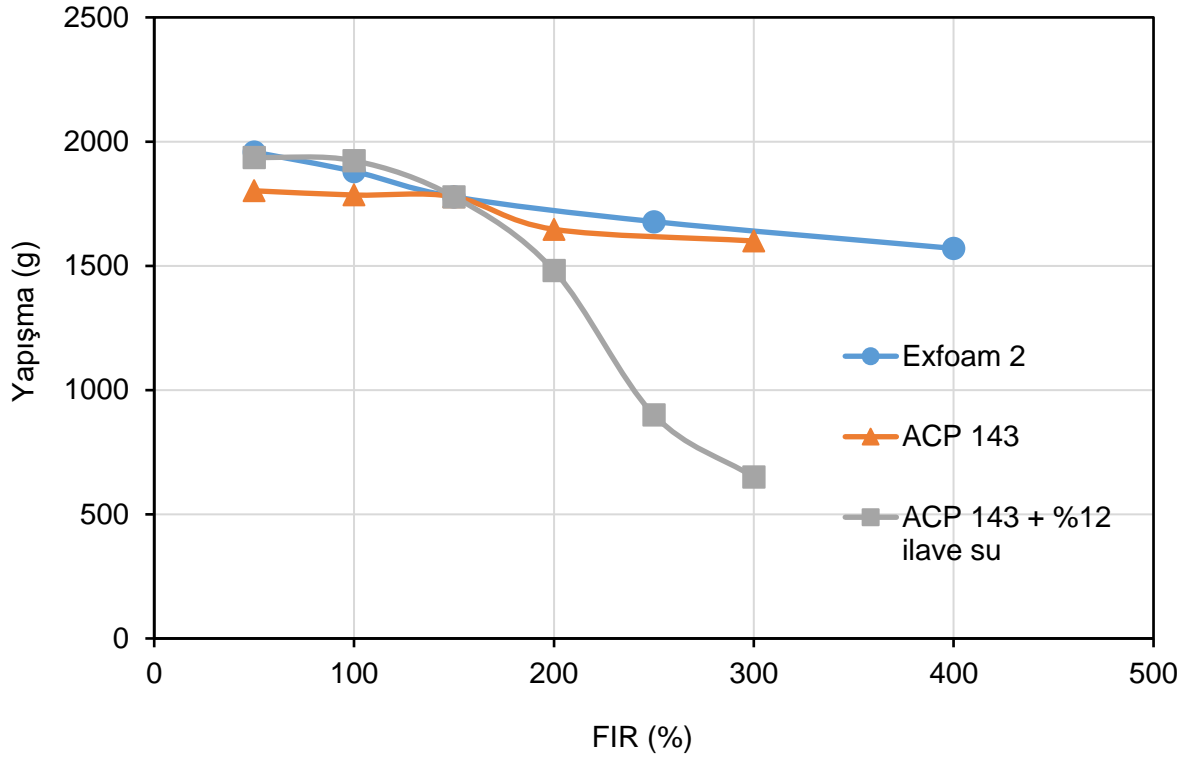
FIR (%)	Net Güç (Watt)	Yapışma (g)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
50	57,5	1802	7,5	1,10
100	50	1785	8,9	0,96
150	47	1778	10,0	0,70
200	45	1647	11,0	0,55
300	42	1600	13,1	0,35

Çizelge 5.13: Zemin + ACP 143 + %12 su ilaveli karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %45 W_n , %3 C_F ve FER 16 değerinde (Ayvalı 2).

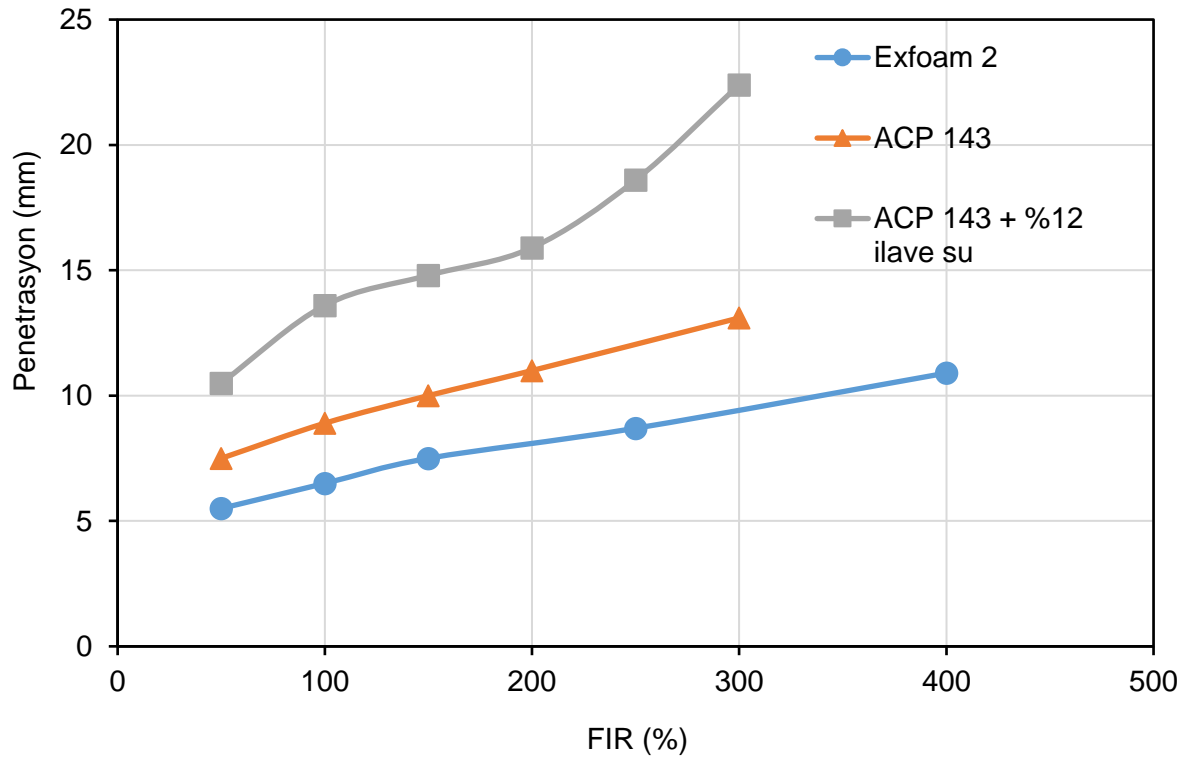
FIR (%)	Net Güç (Watt)	Yapışma (g)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
50	45	1937	10,5	2,75
100	42	1923	13,6	2,00
150	37	1778	14,8	1,75
200	37	1481	15,9	1,25
250	37	900	18,6	1,00
300	30	650	22,4	0,25



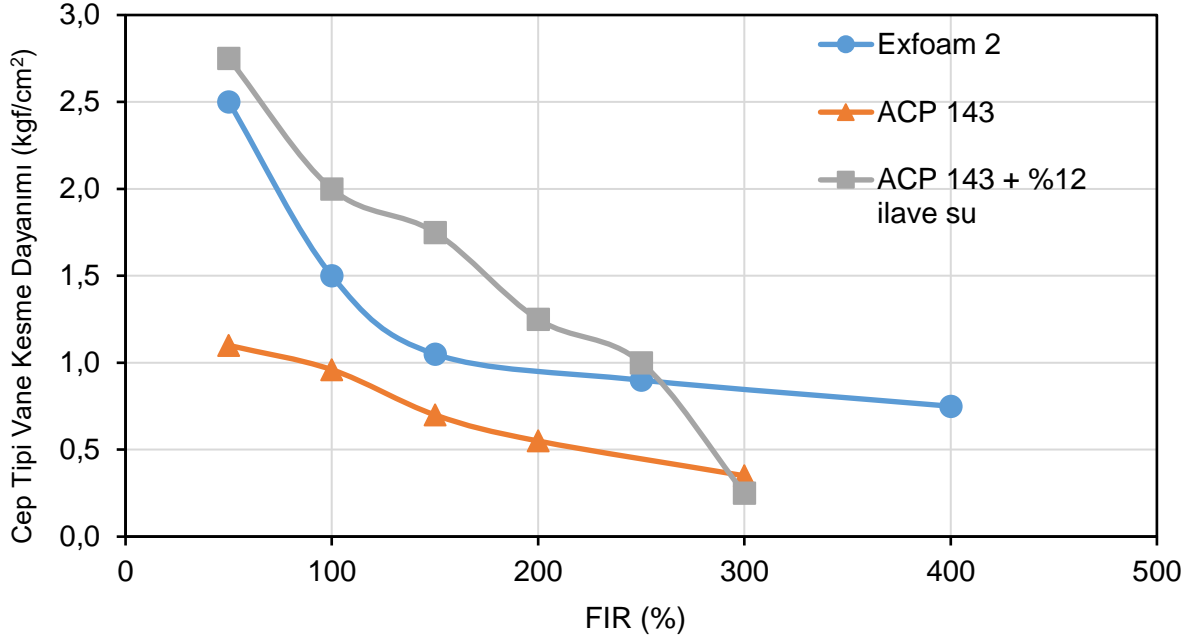
Şekil 5.71: Exfoam 2, ACP 143 ve ACP 143 +%12 ilave su için farklı FIR oranlarında mikser güç miktarı karşılaştırılması (Ayvalı 2).



Şekil 5.72: Exfoam 2, ACP 143 ve ACP 143 +%12 ilave su için farklı FIR oranlarında mikser yapışma miktarı karşılaştırılması (Ayvalı 2).



Şekil 5.73: Exfoam 2, ACP 143 ve ACP 143 +%12 ilave su için farklı FIR oranlarında penetrasyon değerlerinin karşılaştırılması (Ayvalı 2).



Şekil 5.74: Exfoam 2, ACP 143 ve ACP 143+%12 ilave su için farklı FIR oranlarında vane shear kesme dayanımlarının karşılaştırılması (Ayvalı 2).

Bu saha numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda aynanın stabil olması nedeniyle sadece numunenin yapışkan özelliğini bertaraf etmek üzere şartlandırma deneyleri yapılmıştır. Literatürde, numunenin cinsine bağlı olarak sadece bir adet deney yöntemi seçilerek (örneğin konik penetrometre deneyi veya mikser deneyi veya slump veya yayılma tablası deneyi) köpük optimizasyonu yapıldığı görülmektedir (Quebaud ve diğ, 1998). Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak çok çeşitli deneyler yapılarak bir köpük optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada cep tip vane shear kesme dayanımı deneyi, şartlandırma amaçlı literatürde ilk kez kullanılmıştır ve şartlandırma parametrelerinin kesme dayanımı üzerindeki etkisi ölçülmüştür.

Sonuçlar göstermiştir ki, sadece bir çeşit deney ile karar vermek yanlış sonuç verebilecektir; oysaki birçok deneyin sonuçları göz önüne alındığında daha doğru bir köpük optimizasyonu yapılabilir. Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli'nde en çok karşılaşılan %80'i kil + silt'ten oluşan ve kalanı kum ve çakıl içeren numunenin EPB TBM ile kazısında numuneye doğal su içeriğine (%33) %12 daha su ilave edilip (%45 toplam su içeriği), FER 16, CF %3 ve FIR %250 olarak ACP 143 ile optimize edildiğinde herhangi bir yapışma problemi kalmayacağı ve EPB TBM'in güç (ve tork) tüketiminin minimum olacağı, net kazı hızının maksimum olacağı ve nakliyede

sorun olmayacağı kestirimi deneysel olarak yapılmıştır. Bu bulgunun saha uygulaması ile doğrulaması (validasyonu) bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

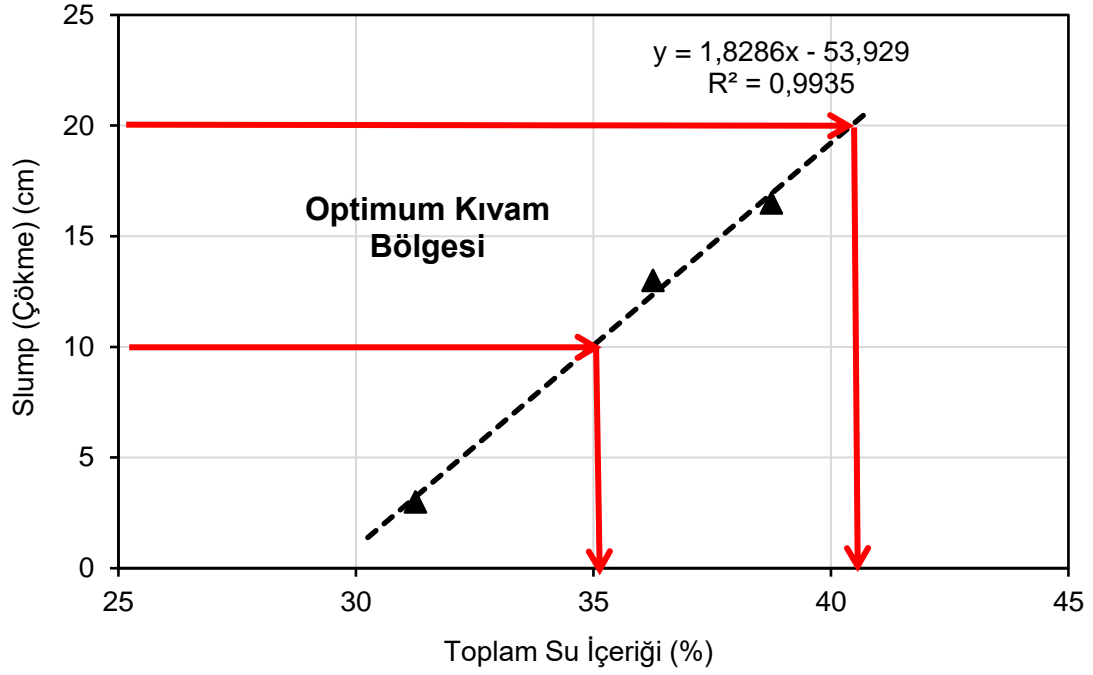
5.5.4 Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli

Yapılan parça boyut ve kıvam testleri sonucunda elde edilen bulgulara göre zeminin EPB TBM kazısı sırasında kendini tutacağı fakat düşük doğal nem içeriği nedeniyle pasa nakliyesi sırasında dağılacağı ve TBM performansını düşüreceği öngörülmüştür. Bu nedenle TBM performansının artırılmasına yönelik alınan zemin numuneleri üzerinde “su” ve “su + antikal polimerli köpük” kullanılarak zemin şartlandırma deneyleri yapılmıştır.

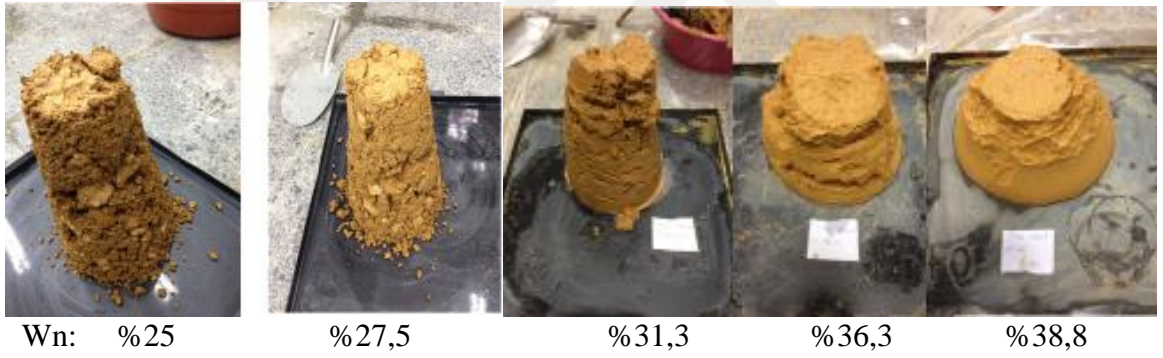
Tünel güzergâhından alınan zemin numuneleri 105 C° sıcaklıkta etüvde 24 saat süre kurutulmuş daha sonra su eklenip büyük boy mikserde doğal nem içeriğine sahip olana dek karıştırılmıştır. Daha sonra farklı su içeriklerinin kazı performansına etkisinin araştırılması amacıyla slump (standart), mikser (yapışma) ve yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.14’te ve Şekil 5.75-80’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.14: Zemin + su karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları (Akfırat).

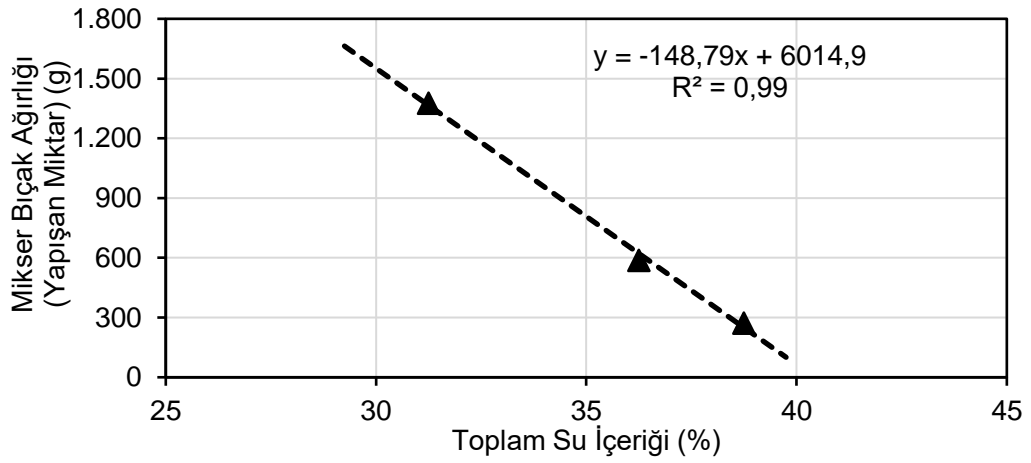
Su İçeriği (%)	Slump (cm)	Yapışma (g)	Yayılma Çapı (cm)
25,0	0	-	-
27,5	0	-	-
31,3	3,0	1377	12,0
36,3	13,0	587	13,5
38,8	16,5	272	14,7



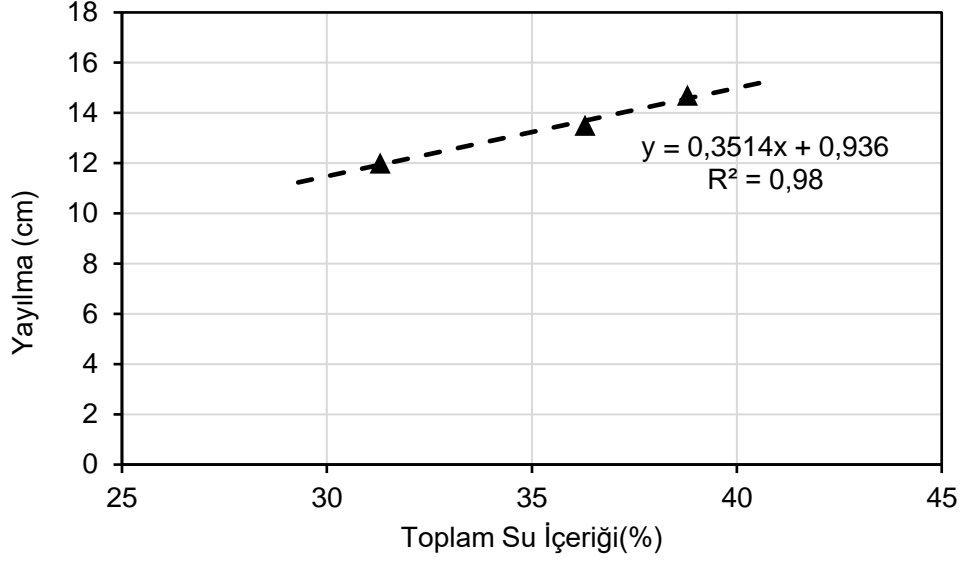
Şekil 5.75: Slump ile su içeriği ilişkisi (Akfırat).



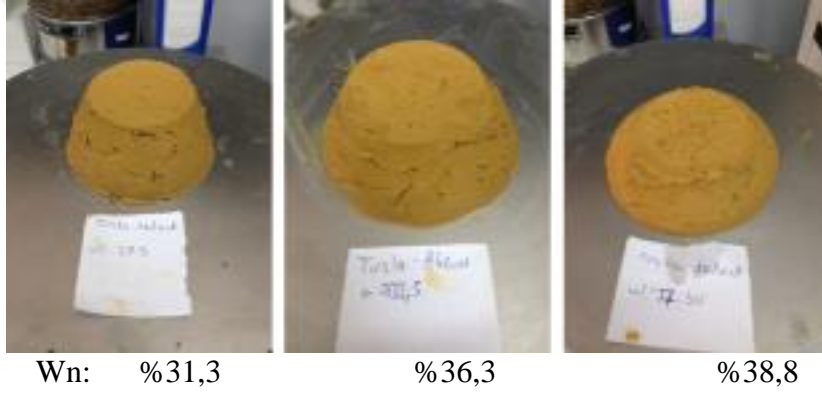
Şekil 5.76: Slump deney fotoğrafları (Akfırat).



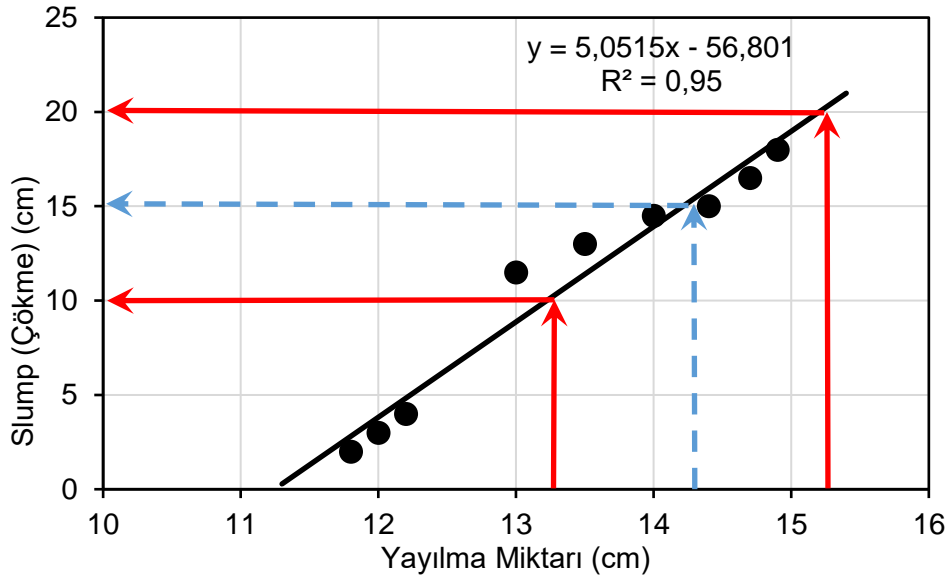
Şekil 5.77: Yapışma ağırlığı ile su içeriği ilişkisi (Akfırat).



Şekil 5.78: Değişik su içeriklerinde slump (çökme) ve yayılma ilişkisi (Akfırat).



Şekil 5.79: Değişik su içeriklerinde yayılma tablası deney fotoğrafları (Akfırat).



Şekil 5.80: Değişik su içeriklerinde slump (çökme) ve yayılma ilişkisi (Akfırat).

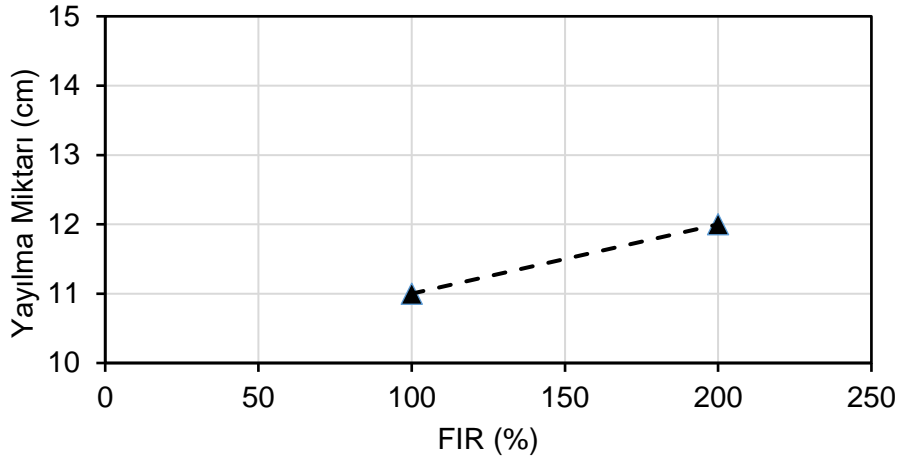
Slump deneyi ile sarsmalı yayılma tablası deneylerinin karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlara göre EPB TBM kazılarında optimum zemin kıvamı için önerilen 10-20 slump (çökme) değeri yayılma tablasında 3-5 cm aralığına karşılık gelmektedir. Bu değerleri sağlayan zemin kıvamına % 35-40 su içeriğine sahip zeminlerde ulaşılmıştır.

Slump deneyleri sırasında her bir deney için sarf edilen numune miktarı fazlalığı ve deney süresi dikkate alındığında slump testine alternatif bir deney olarak alınan zemin numuneleri üzerinde sarsmalı yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre sarsmalı yayılma tablası deneyi deney programının sonraki aşamalarında slump deneyine alternatif olarak kullanılması düşünülmüştür. Ayrıca, bu iki deney arasındaki ilişkiye literatürde rastlanmamıştır.

Zemin şartlandırmada köpük kullanımının zemin kıvamına etkisinin araştırılması ve köpük optimizasyonu amacıyla tünel güzergahından alınan zemin %25 su içeriğine getirilmiş ve iki farklı firmaya ait antikel polimer içerikli köpük (Exfoam 2 ve ACP 143), C_F %3 ve FER 8,5 oranlarında üretilerek, küçük boy mikserde zeminle karıştırılarak şartlandırılan zemin numuneleri üzerinde sarsmalı yayılma tablası deneyi yapılmıştır.

Exfoam 2 kullanılarak yapılan sarsmalı yayılma tablasında deneylerinde % 100 FIR değerinde orijinal kalıp çapına ilave olarak yayılan zemin çapı 1 cm ve % 200 FIR değerinde yayılan zemin çapı 2 cm olarak ölçülmüştür. % 200 FIR değeri genellikle üst limit değer olarak kabul edildiğinden deneyler sonlandırılmıştır (Şekil 5.81-5.82).

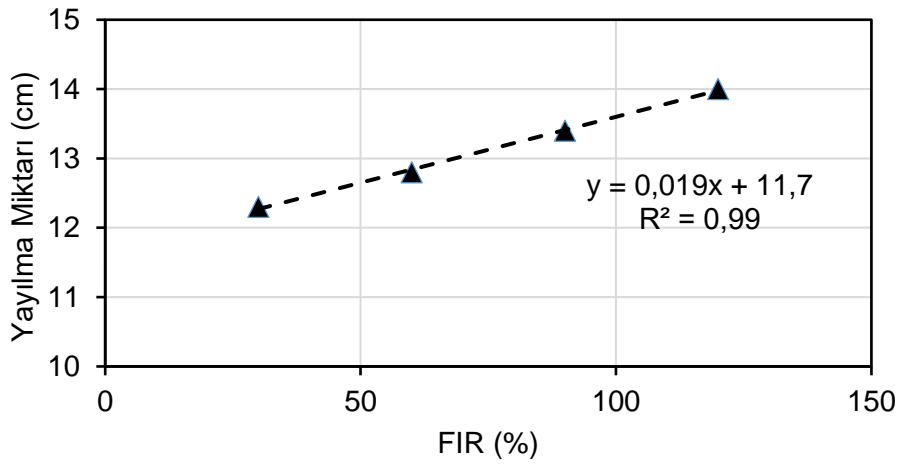
ACP 143 kullanılarak yapılan sarsmalı yayılma tablasında deneylerinde ise % 30, 60, 90, 120 FIR değerlerinde ölçülen zemin yayılması sırasıyla 2,3 - 2,8 - 3,4 ve 4,0 cm olarak ölçülmüştür (Şekil 5.83-5.84).



Şekil 5.81: Exfoam 2 için FIR ve yayılma ilişkisi (Akfırat).



Şekil 5.82: Exfoam 2 ile yapılan yayılma tablası deney fotoğrafları (Akfırat).



Şekil 5.83: ACP 143 için FIR ve yayılma ilişkisi (Akfırat).



Şekil 5.84: ACP 143 ile yapılan yayılma tablası deney fotoğrafları (Akfırat).

Bu saha numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda aynanın stabil olması nedeniyle numunenin yapışkan/plastik özelliğini bertaraf etmek üzere şartlandırma deneyleri yapılmıştır. Literatürde, slump değeri ile yayılma tablası miktarı arasında herhangi bir ilişki görülmemiştir. Deneysel şartlar zorladığından dolayı bu çalışmada her iki deney sonuçları arasında ilişkiler araştırılmıştır ve doğrusal bir ilişki bulunmuştur (Şekil 5.80).

Tuzlu Akfırat Atıksu Tüneli'nde karşılaşılan killi siltli çakıllı kum numunenin EPB TBM ile kazısında numunenin doğal su içeriğine (%12,5) %12,5 daha su ilave edilip (%25 toplam su içeriği), ACP 143 polimerli köpük, FER 8,5, CF %3 ve FIR %120 olarak optimize edildiğinde herhangi bir yapışma problemi kalmayacağı ve EPB TBM'in güç (ve tork) tüketiminin minimum olacağı, net kazı hızının maksimum olacağı ve nakliye sorunu olmayacağı kestirimi deneysel olarak yapılmıştır. Özellikle, yapışmaları ve tıkanmaları temizlemek için harcanan vardiya zamanı kazıya ayrılacağından günlük ilerlemeler artacaktır. Bu bulgunun saha uygulaması ile doğrulaması (validasyonu) bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

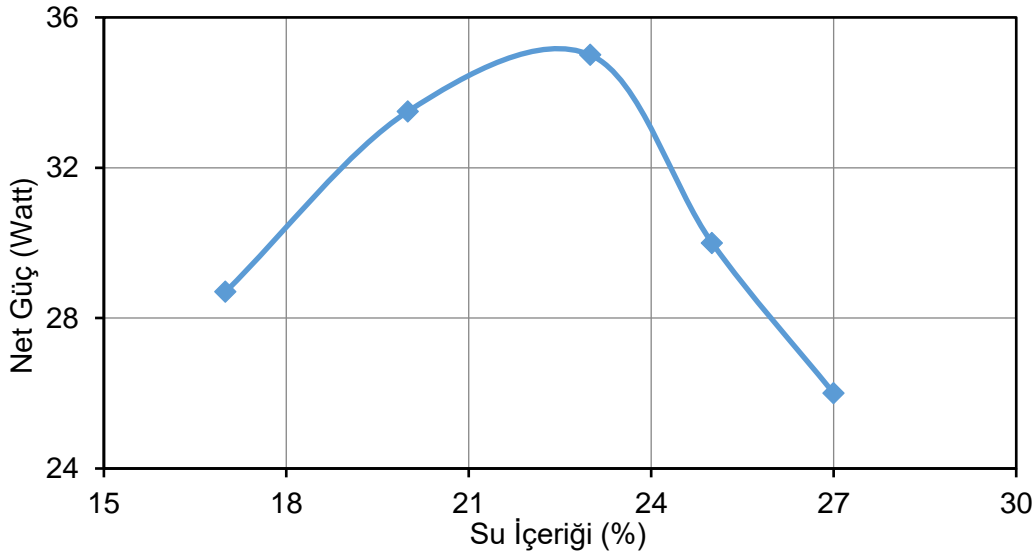
5.5.5 Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli

Yapılan parça boyut ve kıvam testleri sonucunda elde edilen bulgulara göre kumlu zeminin (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1) EPB TBM kazısı sırasında kendini tutacağı fakat düşük doğal nem içeriği nedeniyle pasa nakliyesi sırasında dağılacağı ve TBM performansını düşüreceği öngörülmüştür; düşük kil içeriği nedeniyle kazı sırasında herhangi bir adezyon ve tıkama (clogging) probleminin yaşanmayacağı öngörülmüştür. Bu nedenle TBM performansının artırılmasına yönelik alınan numuneler üzerinde su ve su + köpük kullanılarak zemin şartlandırma deneyleri yapılmıştır.

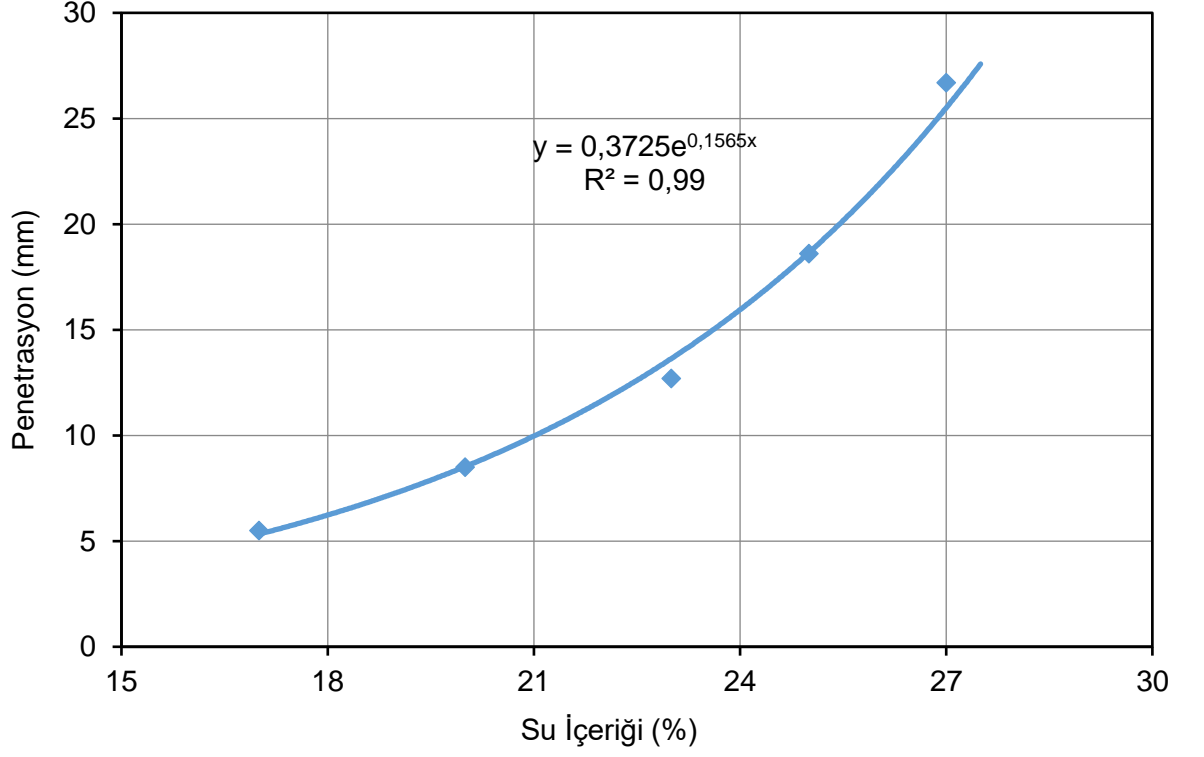
Tünel güzergahından alınan zeminler üzerinde farklı su içeriklerinin (% 17, 20, 23, 25, 27) kazı performansına etkisinin araştırılması amacıyla güç ölçümlü mikser, konik penetrometre, vane shear kesme dayanımı ve yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.15 ve Şekil 5.85-5.91’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.15: Zemin + su karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy1).

Su İçeriği (%)	Net Güç (watt)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)	Yayılma (cm)
17	28,7	5,5	0,080	0,0
20	33,5	8,5	0,060	0,3
23	35,0	12,7	0,044	2,0
25	30,0	18,6	0,025	2,7
27	26,0	16,7	0,014	3,8



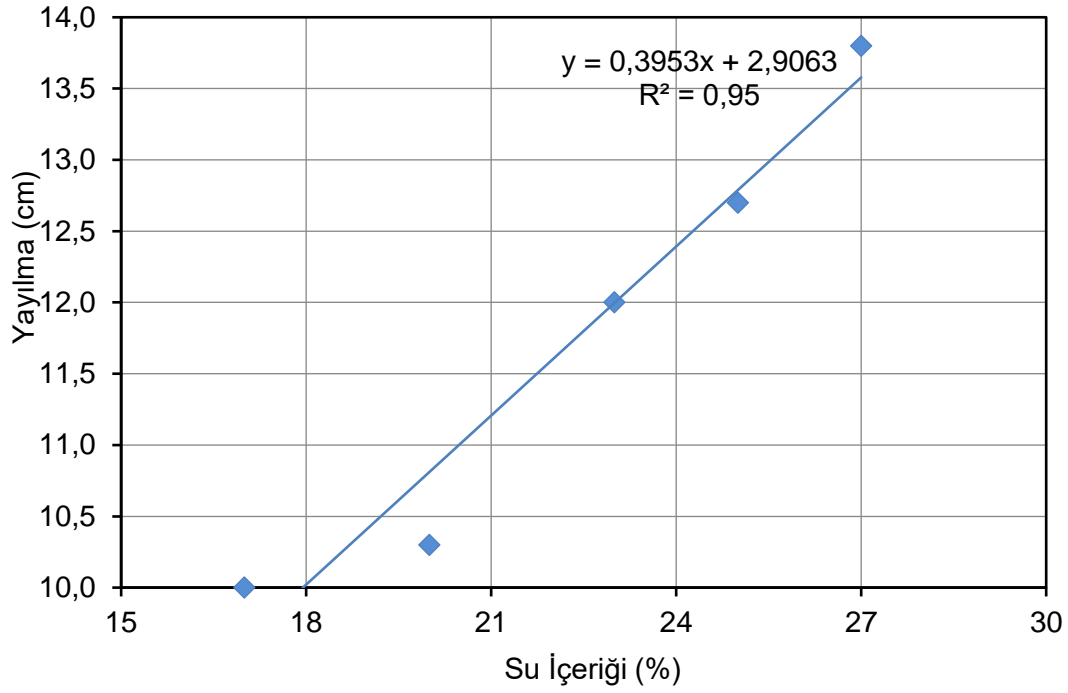
Şekil 5.85: Mikser güç sarfiyatının su içeriği ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



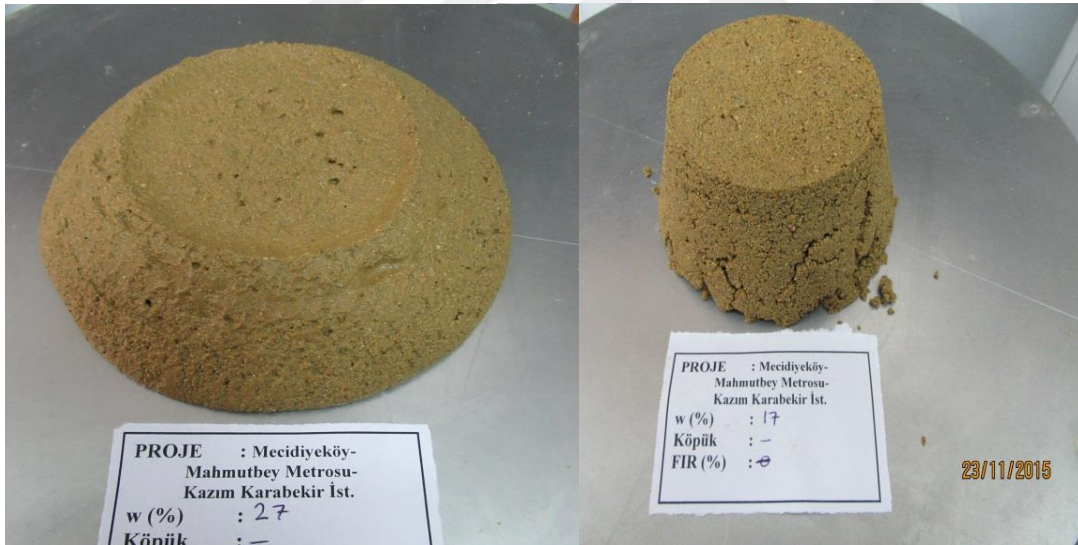
Şekil 5.86: Penetrasyon değerinin su içeriği ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



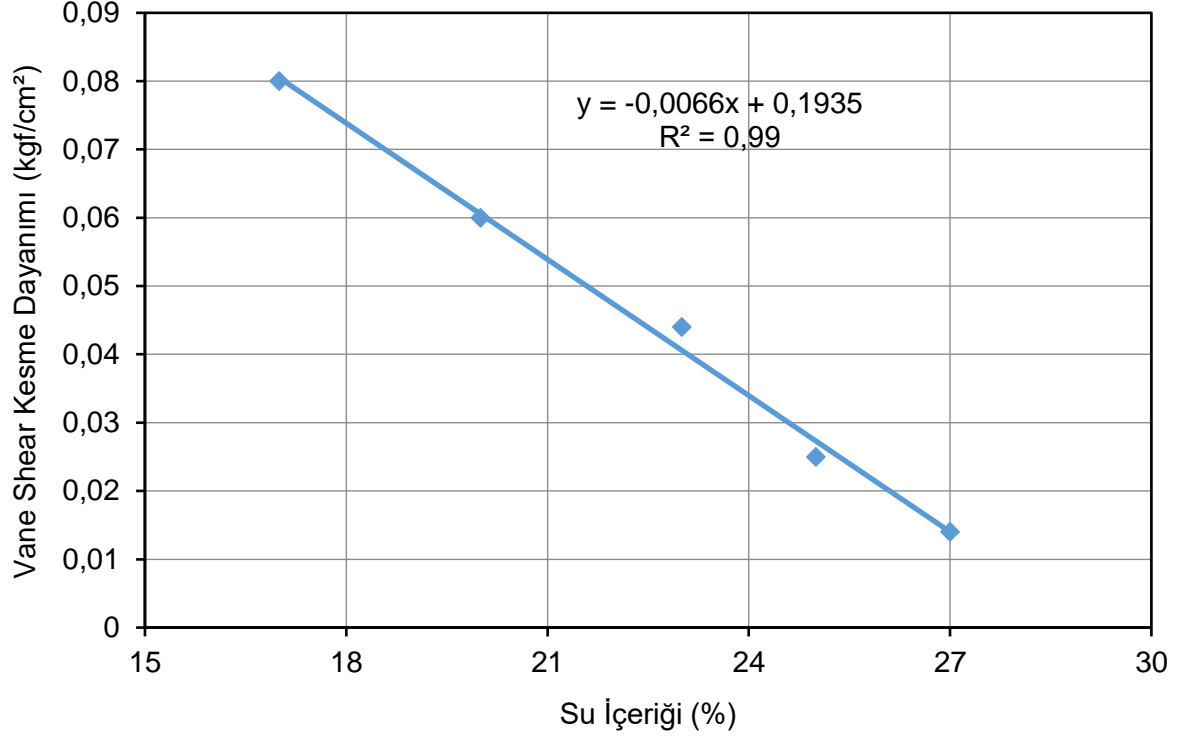
Şekil 5.87: Konik penetrasyon deneyi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



Şekil 5.88: Yayılma miktarının su içeriği ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



Şekil 5.89: Yayılma tablası deneyi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



Şekil 5.90: Vane shear kesme dayanımının su içeriği ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



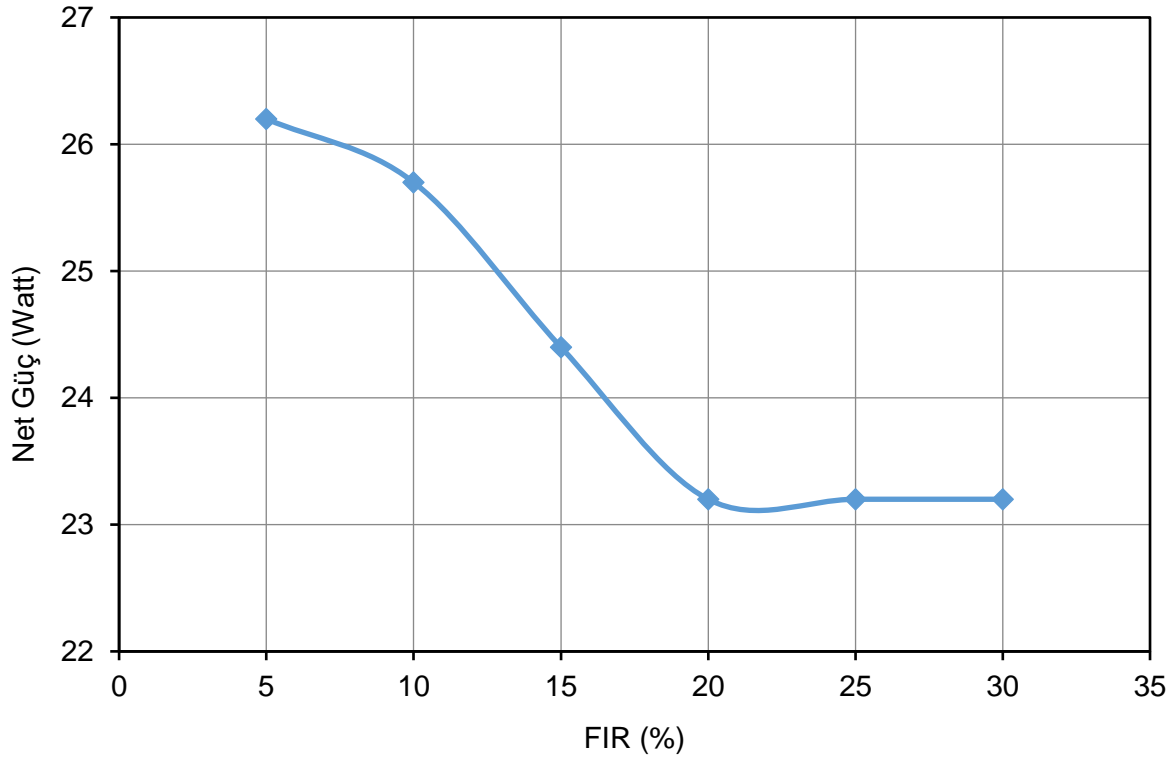
Şekil 5.91: Vane shear kesme dayanımı deneyi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).

Deneilerin sadece suyla yapılmasından sonra zemin şartlandırmada köpüğün etkisini araştırmak amacıyla yapılan deneyler köpükle de tekrarlanmıştır. Bu amaçla sahada kullanılan ve yüklenici firmadan alınan SLF 30 köpük kimyasalı kullanılmıştır.

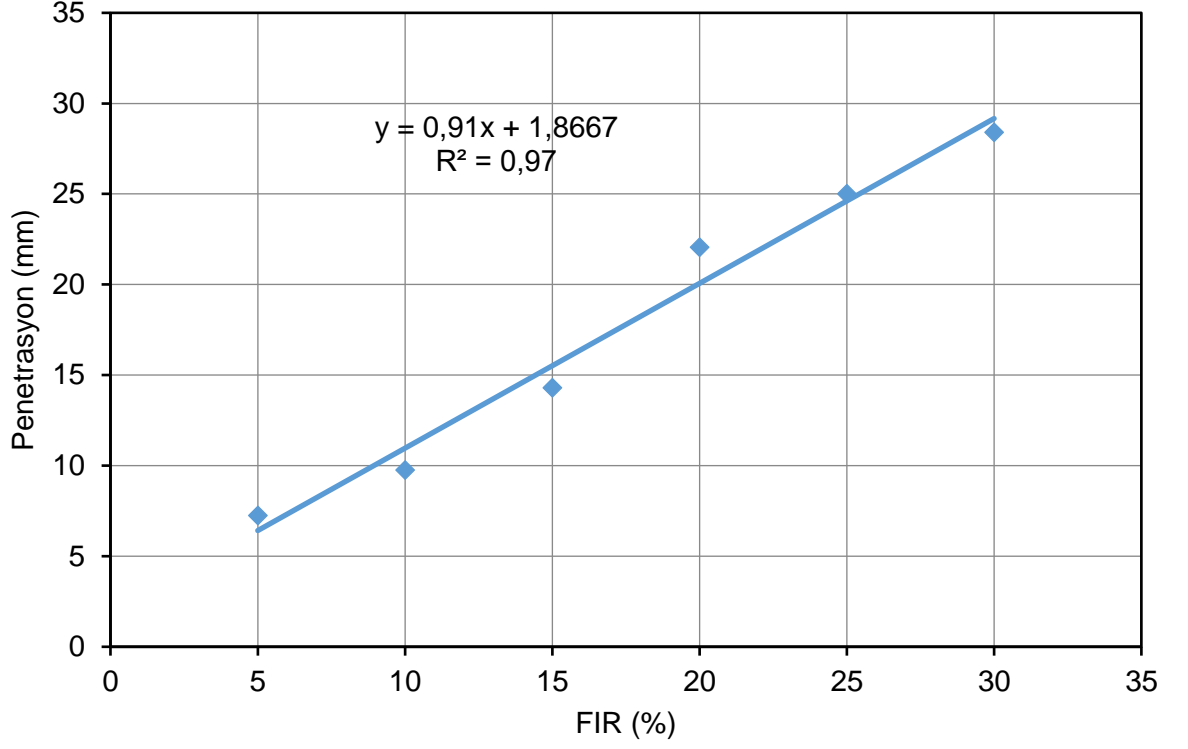
Köpüklü deneylerde ilk olarak kuru numune doğal nem içeriği %17'ye ayarlanıp FER 16, C_F %3 ve FIR % 5 ile 30 arası değerlerinde SLF 30 için güç ölçümlü mikser, konik penetrometre, vane shear kesme dayanımı ve yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. Köpüklü şartlandırma deney sonuçları detaylı olarak Çizelge 5.16'da ve Şekil 5.92-5.95'de sunulmuştur.

Çizelge 5.16: Zemin + SLF 30 karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %17 W_n , %3 C_F ve FER 16 değerinde (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).

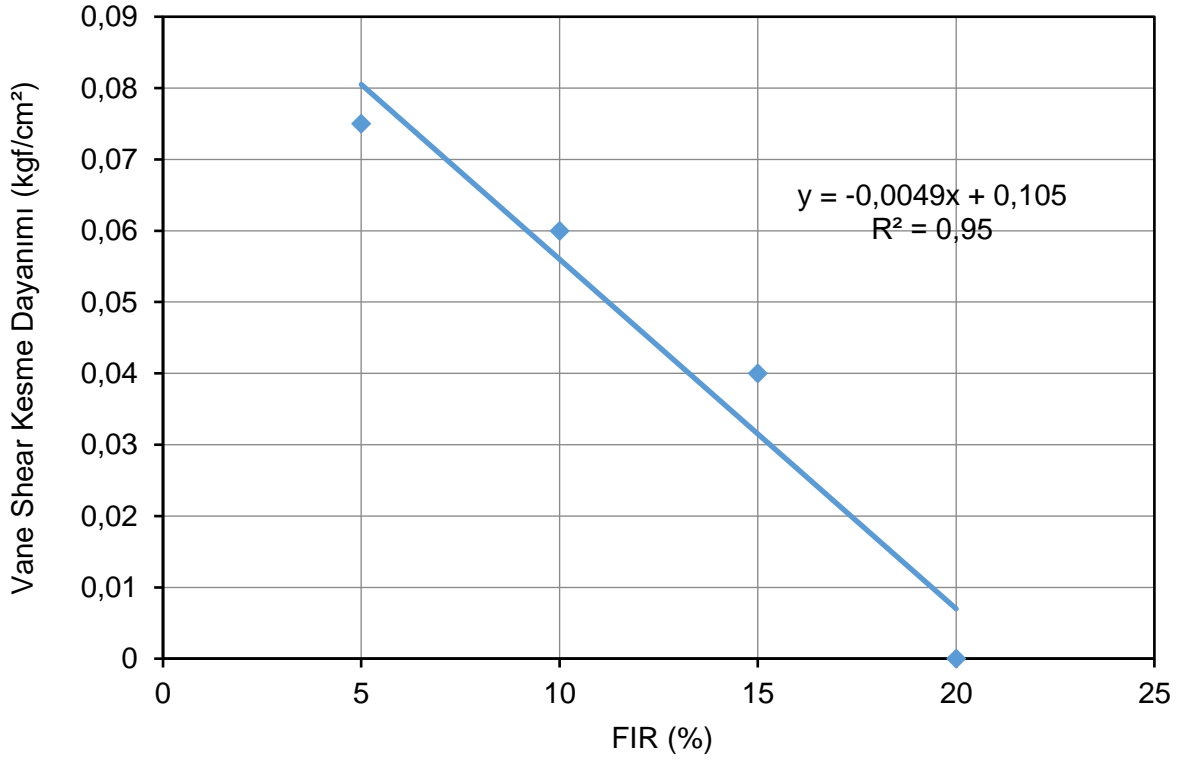
FIR (%)	Net Güç (Watt)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
5	26,2	7,3	0,075
10	25,7	9,8	0,060
15	24,4	14,3	0,040
20	23,2	22,1	0
25	23,2	25,0	-
30	23,2	28,4	-



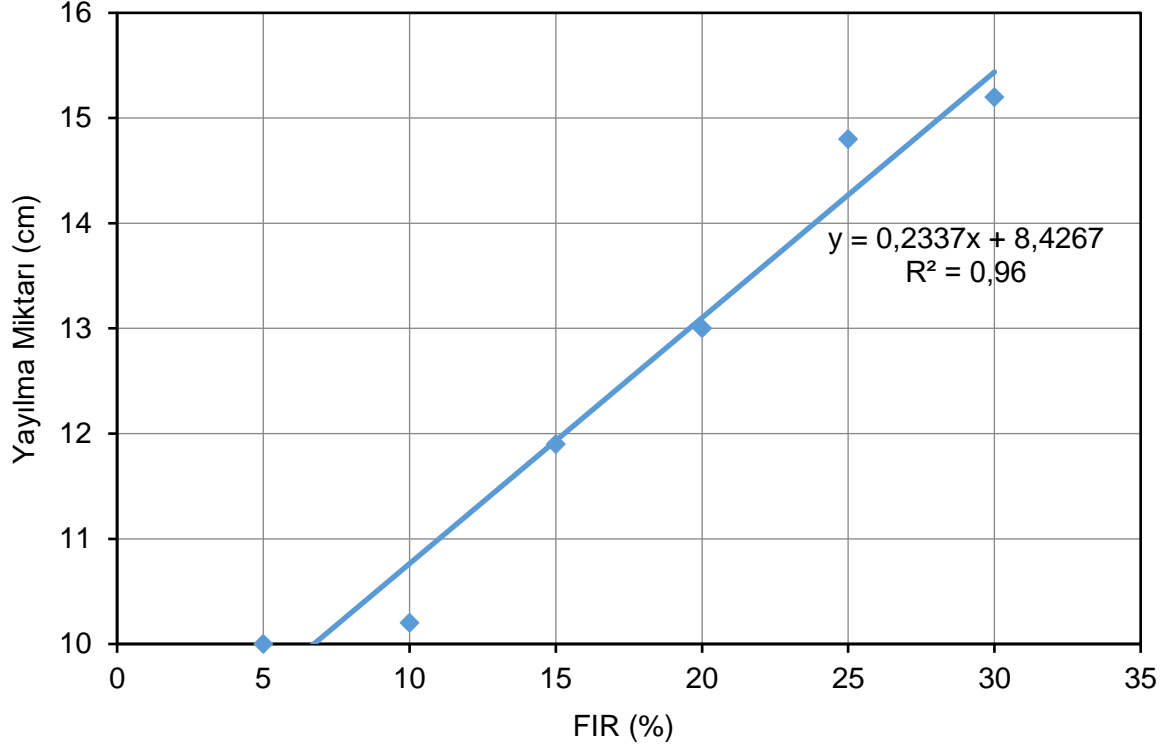
Şekil 5.92: SLF 30 için mikser güç tüketiminin FIR ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



Şekil 5.93: SLF 30 için penetrasyon değerlerinin FIR ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



Şekil 5.94: SLF 30 için vane shear kesme dayanımının FIR ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).



Şekil 5.95: SLF 30 için yayılma tablası değerlerinin FIR ile değişimi (Mahmutbey-Mecidiyeköy 1).

Güç ölçümlü mikser deneylerinde % 5 FIR oranında mikserin çektiği net güç 26,2 Watt olarak ölçülmüştür, artan FIR oranı ile bu değer 23,2 Watt'a kadar düştüğü ve % 20 FIR oranı ve sonraki değerlerde sabit kaldığı görülmüştür. % 5 FIR oranında penetrasyon 7,3 mm olurken artan FIR miktarıyla penetrasyonun arttığı gözlenmiştir. % 30 FIR oranında penetrasyon değerinin 28,7 mm'ye çıktığı gözlenmiştir. Şartlandırılan zeminin likit kıvamına yaklaşık % 20 FIR oranında ulaştığı gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre % 5 FIR oranında 0,075 kgf/cm² olan kesme dayanımı % 20 FIR oranında 0 değerine kadar düşmüştür. % 5 FIR oranına sahip zemin üzerinde yapılan deneyde zeminin kıvamını koruduğu görülmüş ve herhangi bir yayılma gözlenmemiştir. Artan FIR oranı ile yayılma miktarının arttığı görülmüş ve % 30 FIR oranındaki zemin numunesinde yayılma miktarı 5,7 cm olarak ölçülmüştür.

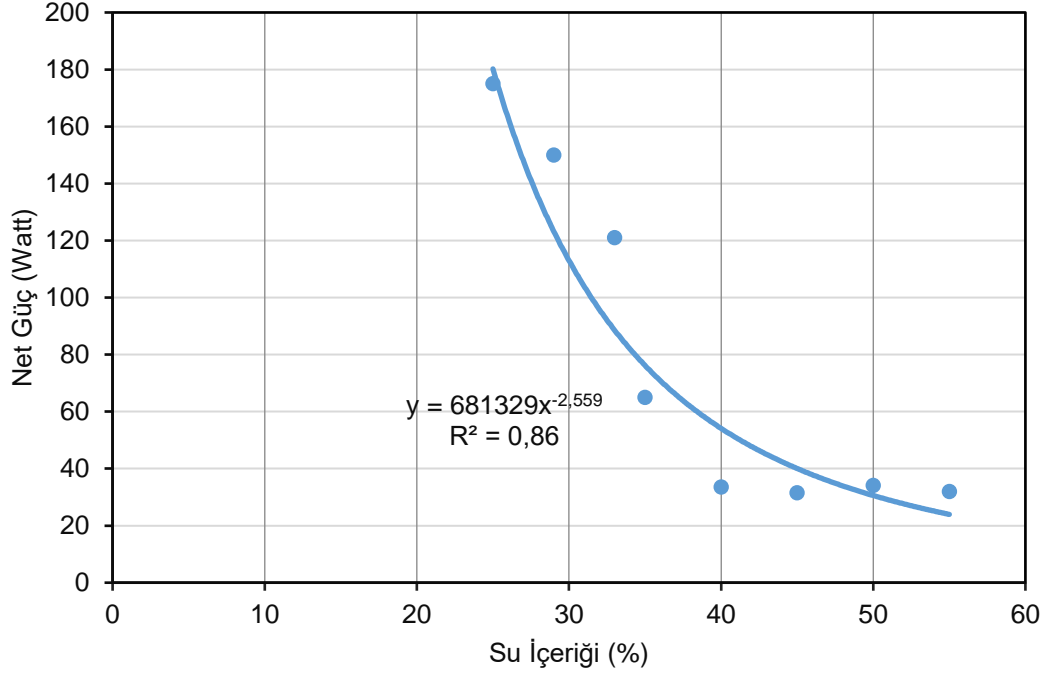
Bu sonuçlara göre, mikser ve konik penetrometre deneyleri optimum şartlandırmanın SLF 30 köpük, C_F %3, FER 16 ve FIR %20 değerlerinde olacağını göstermektedir. Yayılma tablası deneyi ise FIR değerinin %25'e yakın olması gerektiğini göstermiştir. Bu bulguların saha uygulaması ile doğrulaması (validasyonu) bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

Siltli zeminde (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2) yapılan parça boyut ve kıvam testleri sonucunda elde edilen bulgulara göre zeminin EPB TBM kazısı sırasında, topaklanmaya ve tıkanmaya yol açabileceği ve dolayısıyla TBM performansını düşüreceği öngörülmüştür. Bu nedenle TBM performansının artırılmasına yönelik alınan zemin numuneleri üzerinde “su” ve “su + antikal polimerli köpük” kullanılarak zemin şartlandırma deneyleri yapılmıştır.

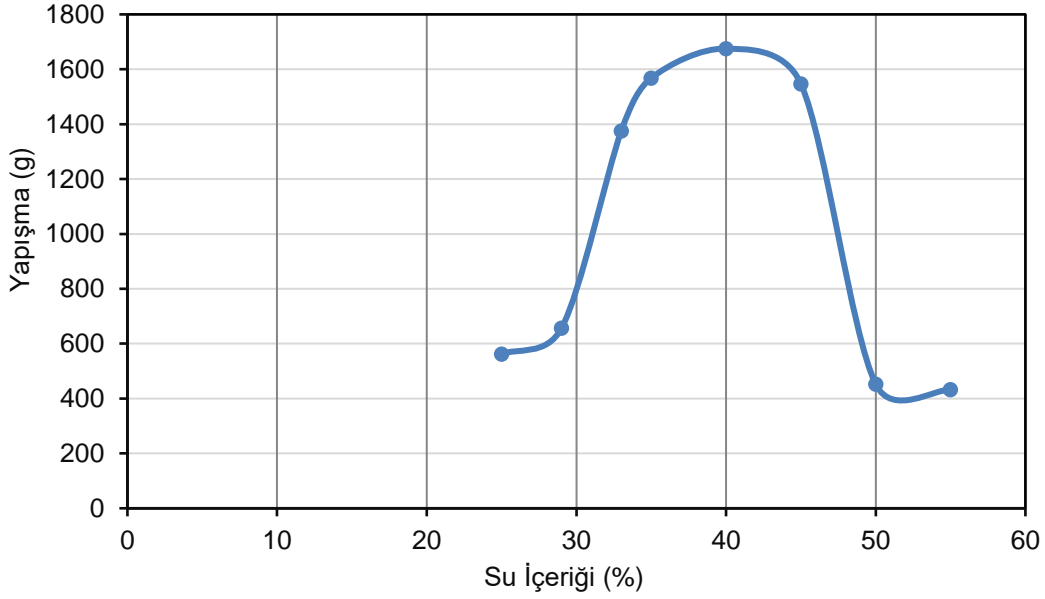
Tünel güzergâhından alınan zemin numuneleri 105 C° sıcaklıkta etüvde 24 saat süre kurutulmuş daha sonra su eklenip mikserde doğal nem içeriğine sahip olana dek karıştırılmıştır. Daha sonra farklı su içeriklerinin kazı performansına etkisinin araştırılması amacıyla güç ölçümlü mikser, konik penetrometre ve vane shear kesme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.17’de ve Şekil 5.96-5.99’da özetlenmiştir.

Çizelge 5.17: Zemin + su karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).

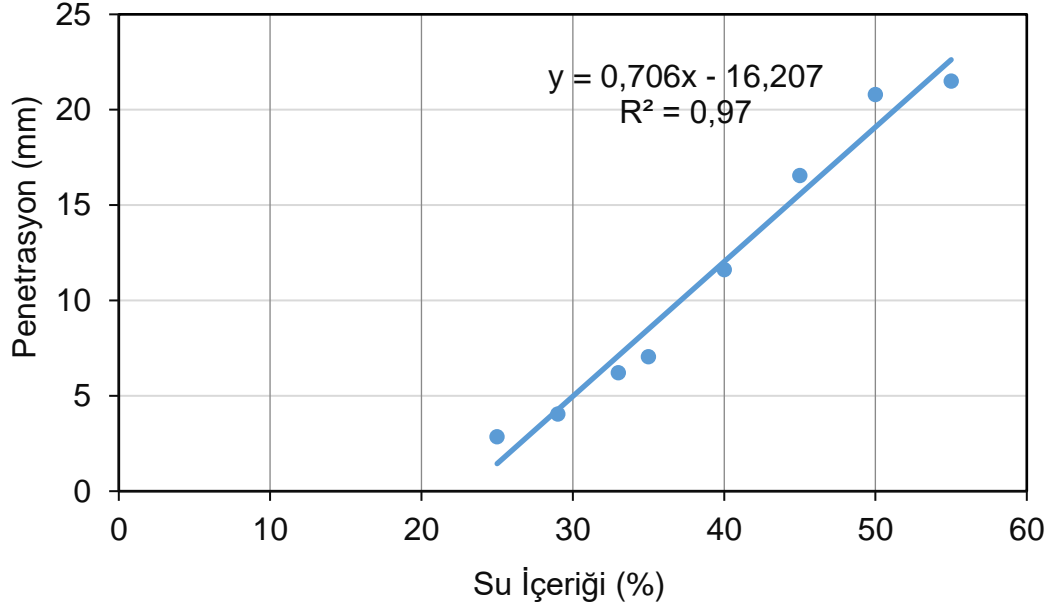
Su İçeriği (%)	Net Güç (Watt)	Yapışma (g)	Penetrasyon (mm)	Vane Kesme Dayanımı (kgf/cm ²)
25	175	562	2,85	6,25
29	150	656	4,05	6,00
33	121	1375,5	6,20	5,50
35	65	1568	7,04	5,00
40	33,5	1675	11,62	3,50
45	31,5	1547	16,55	1,75
50	34,1	452	20,80	1,50
55	32	432	21,50	1,25



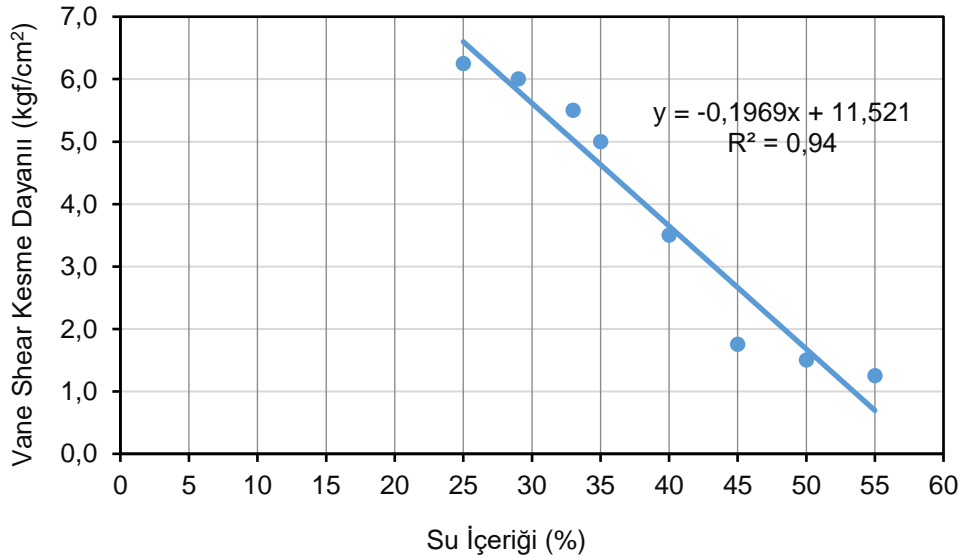
Şekil 5.96: Farklı su içeriklerinde güç sarfiyatı (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).



Şekil 5.97: Farklı su içeriklerinde zeminin mikser bıçağına yapışma miktarı (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).



Şekil 5.98: Farklı su içeriklerinde penetrasyon değeri (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).



Şekil 5.99: Farklı su içeriklerinde vane shear kesme dayanımı değerleri (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).

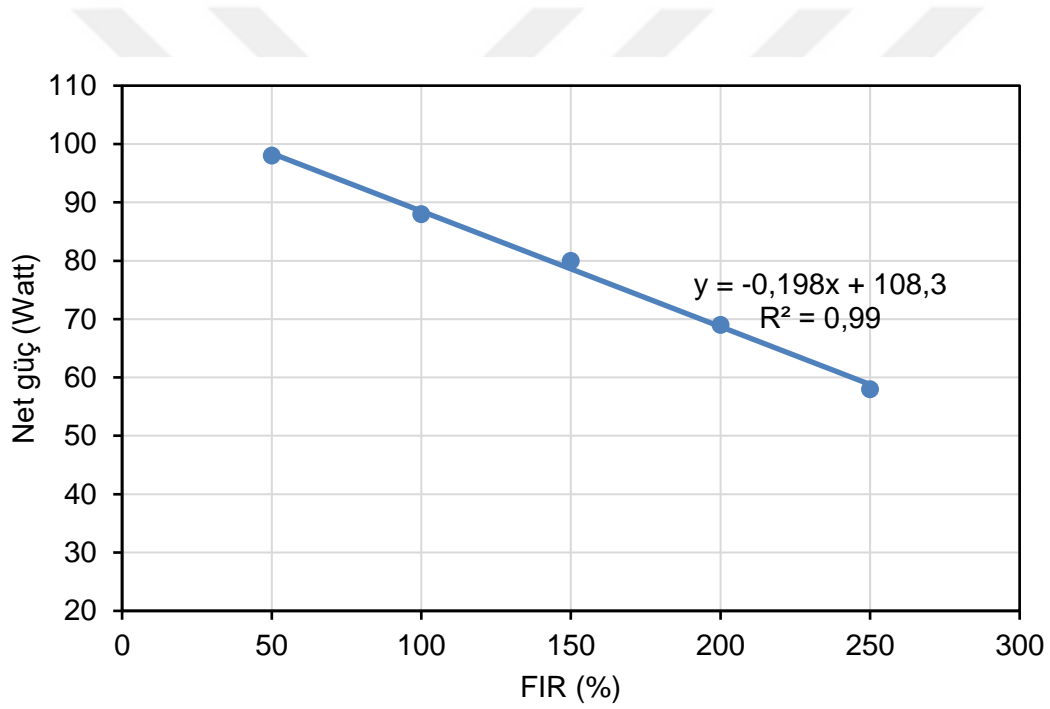
Deneylerin sadece suyla yapılmasından sonra zemin şartlandırılmada köpüğün etkisini araştırmak amacıyla yapılan deneyler köpükle de tekrarlanmıştır. Alınan numunenin topaklanma özeliğinin yüksek olması nedeniyle deneylerde antikal özellikli köpük kullanılması uygun görülmüştür.

Köpüklü deneylerde ilk olarak zeminin kuru olması nedeniyle nem içeriği %35 olarak ayarlanıp FER (köpük kabarma oranı) 16, FIR (köpük enjeksiyon oranı) 0 ile 250 arası ve C_F (köpük konsantrasyonu) %3 değerlerinde mikser, konik

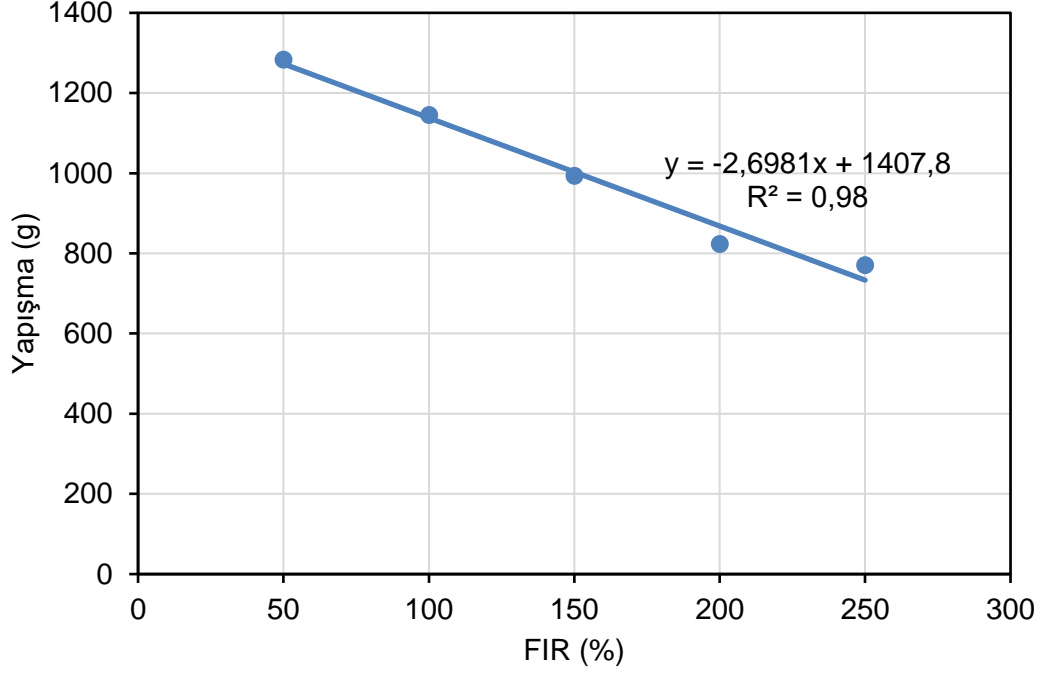
penetrometre, vane shear ve yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar detaylı olarak Çizelge 5.18’de ve Şekil 5.100-5.103’de sunulmuştur.

Çizelge 5.18: Zemin + ACP 143 karışımı ile yapılan deneylerin sonuçları, %35 Wn, %3 C_F ve FER 16 değerinde (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).

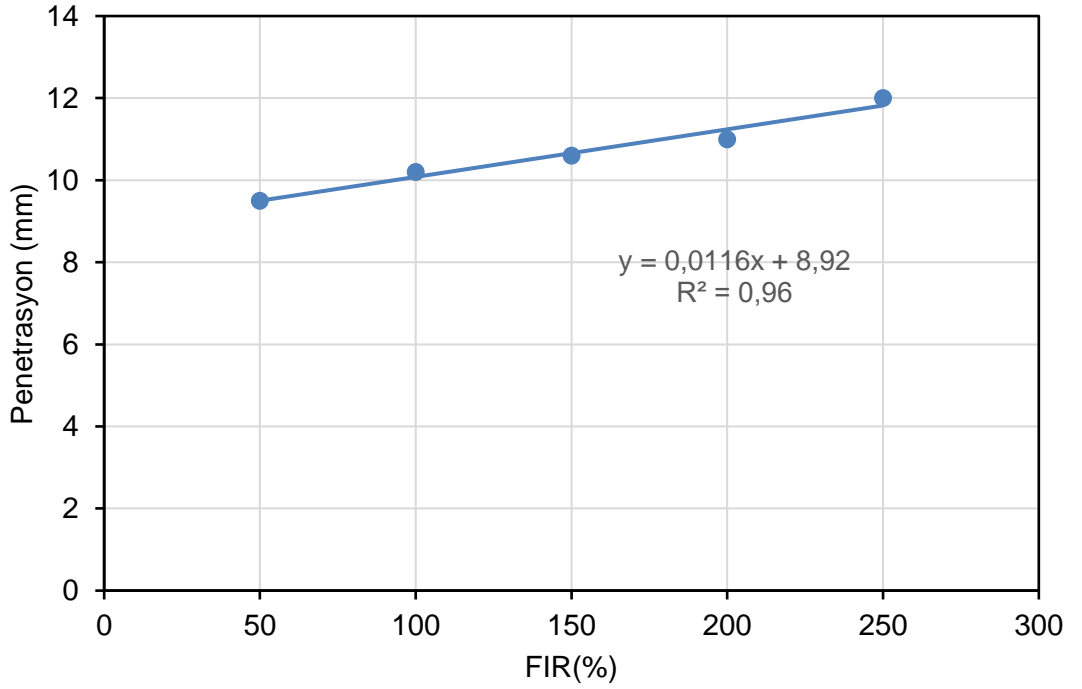
FIR (%)	Net Güç (Watt)	Penetrasyon (mm)	Yapışma (g)	Vane Kesme Dayanımı (kg/cm ²)
50	98	23	1283,54	4,0
100	88	23	1145,27	3,5
150	80	26	993,34	3,0
200	69	35	823,07	2,5
250	58	45	770,12	2,0



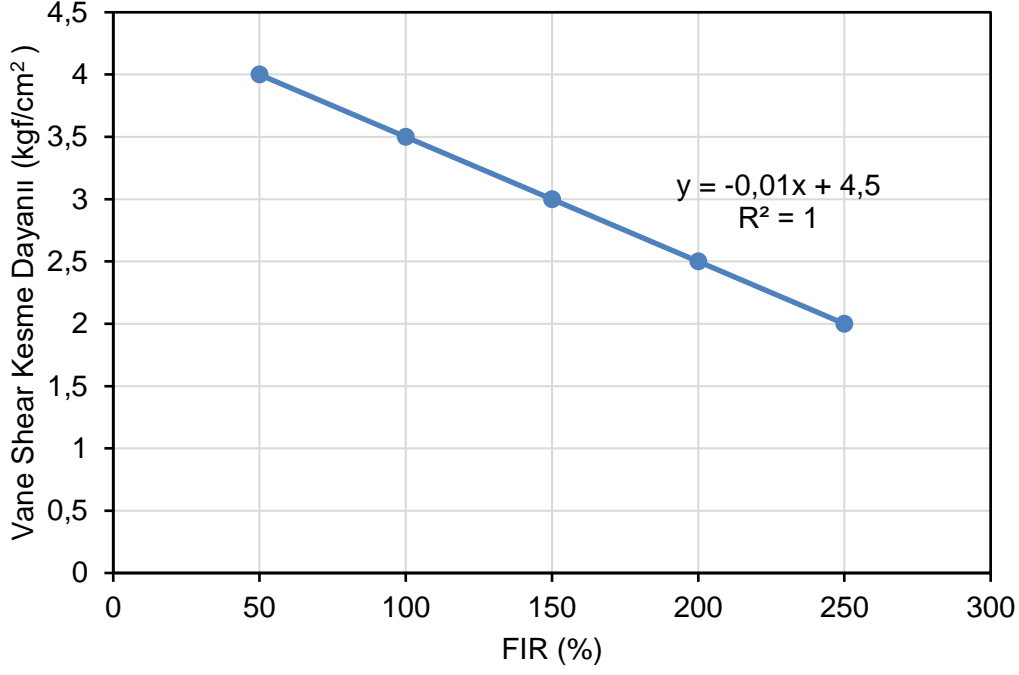
Şekil 5.100: Farklı FIR oranlarında mikser güç miktarı karşılaştırılması (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).



Şekil 5.101: Farklı FIR oranlarında yapışma karşılaştırılması (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).



Şekil 5.102: Farklı FIR oranlarında konik penetrasyon değerleri karşılaştırılması (Mahmutbey-Mecidiyeköy 2).



Şekil 5.103: Farklı FIR oranlarında vane shear kesme dayanımı değerleri karşılaştırılması (Mahmutbey-Mecidiyeköy).

Güç ölçümlü mikser deneylerinde % 50 FIR oranında mikserin çektiği net güç 98 Watt olarak ölçülmüştür, artan FIR oranı ile bu değer 58 Watt'a kadar düştüğü görülmüştür. % 50 FIR oranında penetrasyon 7,6 mm olurken artan FIR miktarıyla penetrasyonun arttığı gözlenmiştir. % 250 FIR oranında penetrasyon değerinin 12 mm'ye çıktığı gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre % 50 FIR oranında 4 kgf/cm² olan vane shear kesme dayanımı % 250 FIR oranında 2 değerine kadar düşmüştür. % 50 FIR oranında yapışma miktarı 1465,80 g olurken artan FIR oranıyla yapışmanın düştüğü ve % 250 FIR oranında 770,12 g'a kadar düştüğü görülmüştür.

Bu sonuçlara göre, optimum şartlandırmanın zemine ilave su eklenerek ve antikilli köpük kullanılarak yapılabileceği öngörülmüştür.

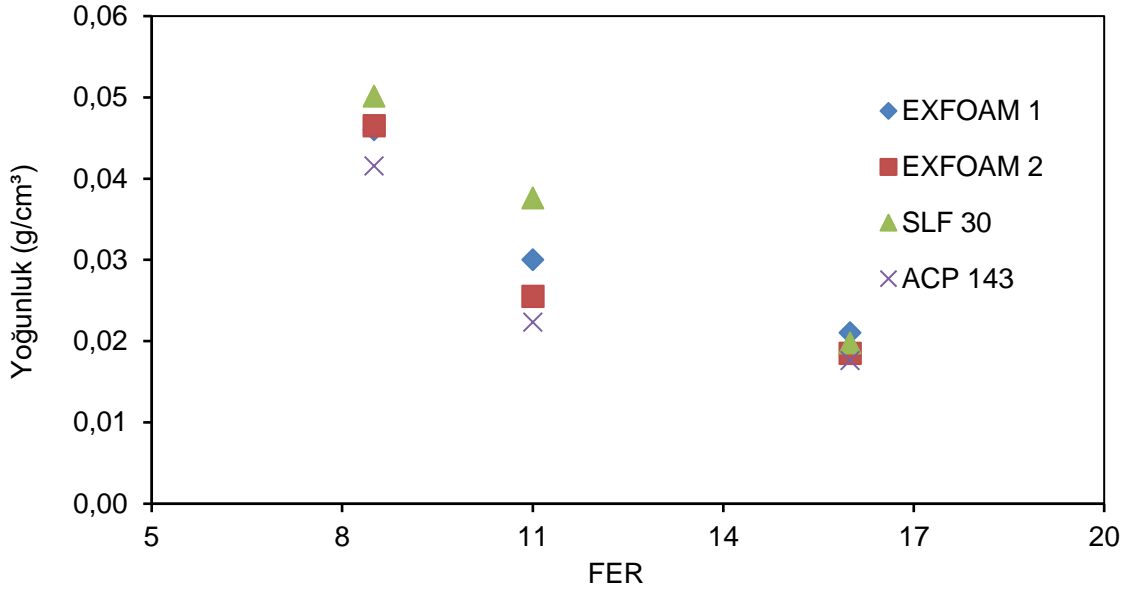
5.6 Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi

Farklı üreticilere ait ve farklı tipteki (süfaktan-polimerli) köpüklerin zemin şartlandırma performansına etkilerinin araştırılması amacıyla yapılan köpük karakterizasyon deney sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Çizelge 5.19'da sunulmuştur.

Çizelge 5.19: Farklı CF ve FER oranlarında köpük karakterizasyon değerleri.

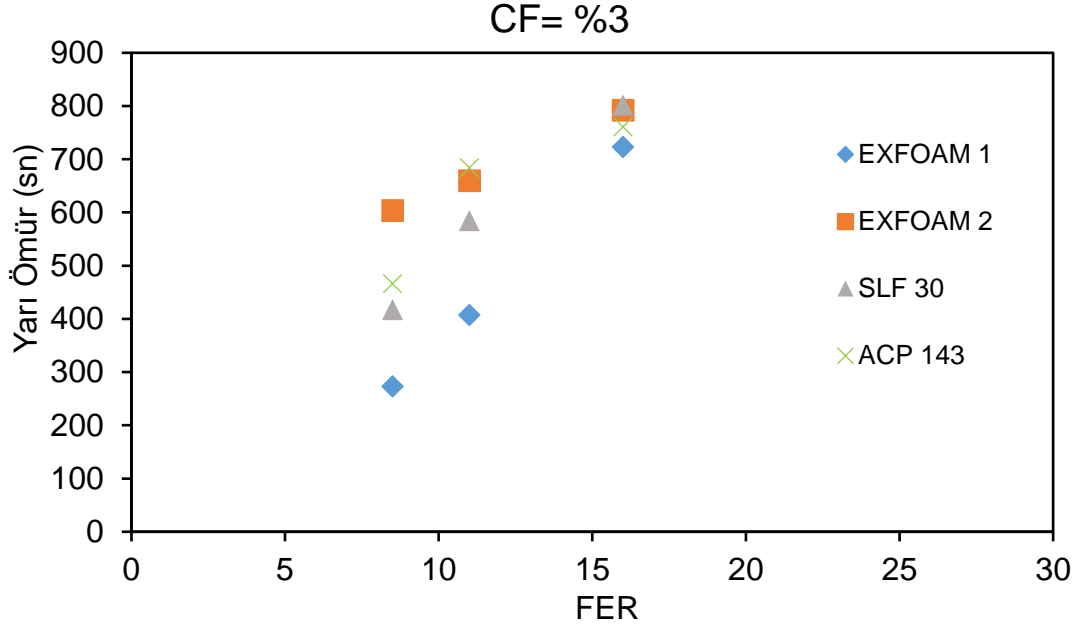
	CF	FER	EXFOAM 1	SLF 30	EXFOAM 2	ACP 143
Yoğunluk (g/cm ³)	3	16	0,0211	0,0198	0,0185	0,0176
		11	0,0300	0,0376	0,0255	0,0224
		8,5	0,0460	0,0502	0,0465	0,0415
	4	16	0,0234	0,0192	0,0168	0,0183
		11	0,0343	0,0340	0,0244	0,0226
		8,5	0,0527	0,0532	0,0422	0,0406
	5	16	0,0281	0,0191	0,0194	0,0191
		11	0,0374	0,0326	0,0259	0,0229
		8,5	0,0578	0,0553	0,0462	0,0398
Yarı ömür (sn)	3	16	723	802	792	761
		11	407	585	660	684
		8,5	273	417	604	466
	4	16	596	688	734	742
		11	398	554	620	670
		8,5	251	377	530	464
	5	16	465	672	696	737
		11	381	509	568	667
		8,5	251	360	493	466
Köpük boyutu (çapı) (mm)	3	16	0,391	0,251	-	-
		11	0,189	0,117	-	-
		8,5	0,133	0,189	-	-
	4	16	0,204	0,240	-	-
		11	0,173	0,197	-	-
		8,5	0,131	0,137	-	-
	5	16	0,178	-	-	-
		11	0,156	-	-	-
		8,5	0,127	-	-	-

Farklı C_F ve FER oranlarında üretilen köpüklerin yoğunluğu bilinen bir hacimde köpük ağırlığının ölçülmesi ile bulunmuştur. Farklı firmalara ait farklı tip köpüklerin yoğunlukları karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Şekil 5.104'de sunulmuştur. Köpük yoğunluğunun artan FER ile azaldığı tespit edilmiştir. Genel olarak polimer içeren köpüklerin polimer içermeyen köpüklere oranla yoğunluğunun daha düşük olduğu görülmüştür.

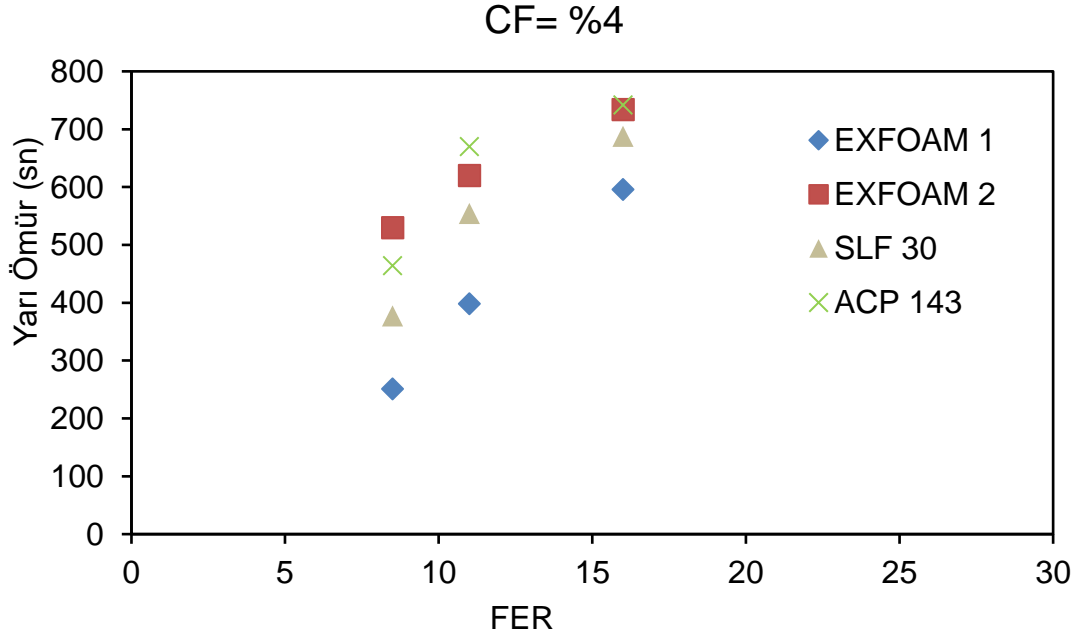


Şekil 5.104: Farklı FER oranlarında farklı köpüklerin yoğunlukları.

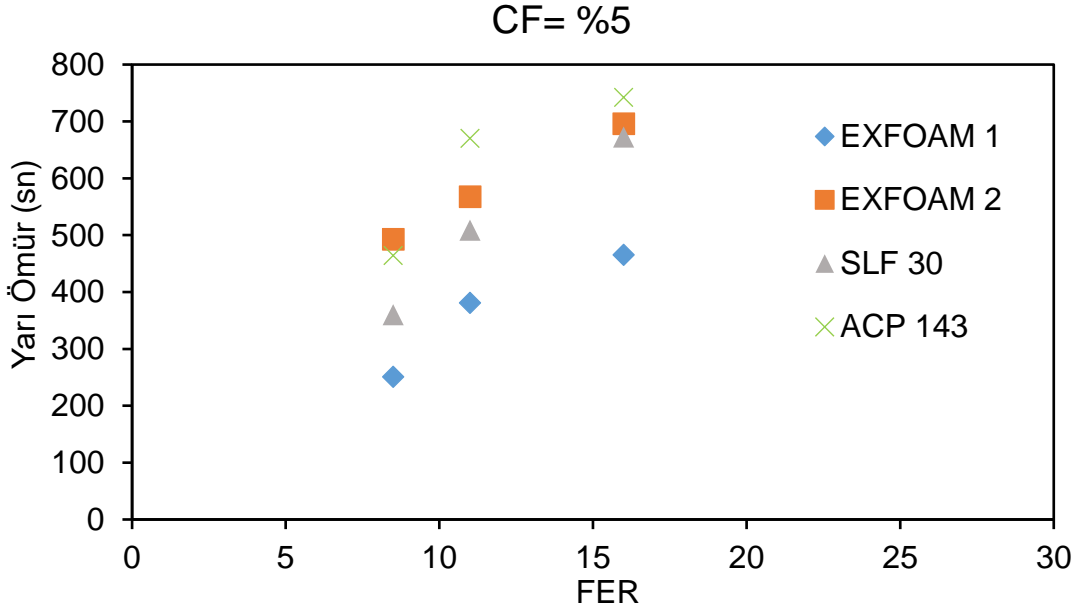
Farklı C_F ve FER değerlerinde köpükler üretilmiş ve drenaj miktarı ve yarı ömür süreleri ölçülmüştür, elde edilen sonuçlar Şekil 5.105-5.107’de özetlenmiştir. Üretilen köpüğün özelliğinden dolayı deney için köpük hunisini doldurmak için gerekli 80 g miktarına ulaşılammış ve yarı ömür drenaj miktarı 20 ml’ye kadar ölçülerek, 40 ml için ekstrapolasyon yapılmıştır. Grafikler incelendiğinde köpük drenaj miktarının zamana bağlı fonksiyon gösterdiği saptanmıştır. Köpük drenaj miktarı ve yarı ömür süresini belirleyen en önemli faktörlerin C_F ve FER değerleri olduğu görülmüştür. Köpük yarı ömür süresinin artan C_F değeri ile düştüğü ve artan FER değeri ile arttığı bulunmuştur. En yüksek yarı ömür süresi %3 C_F ve 16 FER değerlerinde 723 saniye olarak ve en düşük yarı ömür süresi ise % 5 C_F ve 8,5 FER değerinde 251 saniye olarak ölçülmüştür. Polimerli köpüklerin düşük FER oranlarında yarı ömürlerinin polimersiz köpüklere oranla daha uzun olduğu yani polimerli köpüklerin daha kararlı olduğu görülmüştür. Yüksek FER oranlarında ise köpük cinsinin yarı ömüre herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.105: Farklı FER oranlarında farklı köpüklerin yarı ömür süreleri (Cf= %3)



Şekil 5.106: Farklı FER oranlarında farklı köpüklerin yarı ömür süreleri (Cf= %4).



Şekil 5.107: Farklı FER oranlarında farklı köpüklerin yarı ömür süreleri (Cf= %5)

Yapılan çalışmalarda köpüğün yoğunluk, yarı ömür ve köpük kabarcık boyutuna etki eden en önemli parametrelerin köpük cinsi, CF ve FER olduğu görülmüştür. Thewes (2012) farklı köpük tipleri ve köpük lensleri kullanarak yaptığı çalışmalarda köpük yoğunluğu, kabarcık boyutu ve yarı ömür sürelerine etki eden parametreleri araştırmıştır. Elde ettiği sonuçlarda kullanılan köpük cinsi ve FER'in köpük yoğunluklarına düşük etkisinin olduğu sonucuna ulaşmıştır. Köpük üretimde kullanılan köpük lensinin, köpük tipinin ve FER'in ise köpüğün yarı ömür ve kabarcık boyutlarına önemli ölçüde etki ettiğini vurgulamıştır. Ayrıca yaptığı çalışmada köpük özelliklerini etkileyen diğer bir önemli parametrenin de köpük basıncı olduğunu belirtmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalar atmosfer basıncında gerçekleştirilmiş olup basınç altında köpük davranışlarının araştırılması amacıyla deneylerin farklı basınçlar altında tekrarlanmasında yarar vardır. Tez kapsamında köpük kabarcık boyutları atmosferik basınçta köpüklerin direkt olarak kamera ile fotoğraflanıp ölçümler yapılmıştır. Mooney (2016) yaptığı çalışmalarda köpük kabarcık boyutlarını farklı basınçlar altında görüntü analiz programı yardımıyla incelemiş ve köpük boyutlarına basınç koşullarının önemli ölçüde etki ettiğini vurgulamıştır ve köpük boyutlarının basınç altında homojenize olup boyutlarının küçüldüğünü belirtmiştir. Tez kapsamında yapılan köpük kabarcık boyut ölçümlerinin daha sağlıklı sonuçlar vermesi amacıyla görüntü analiz programı

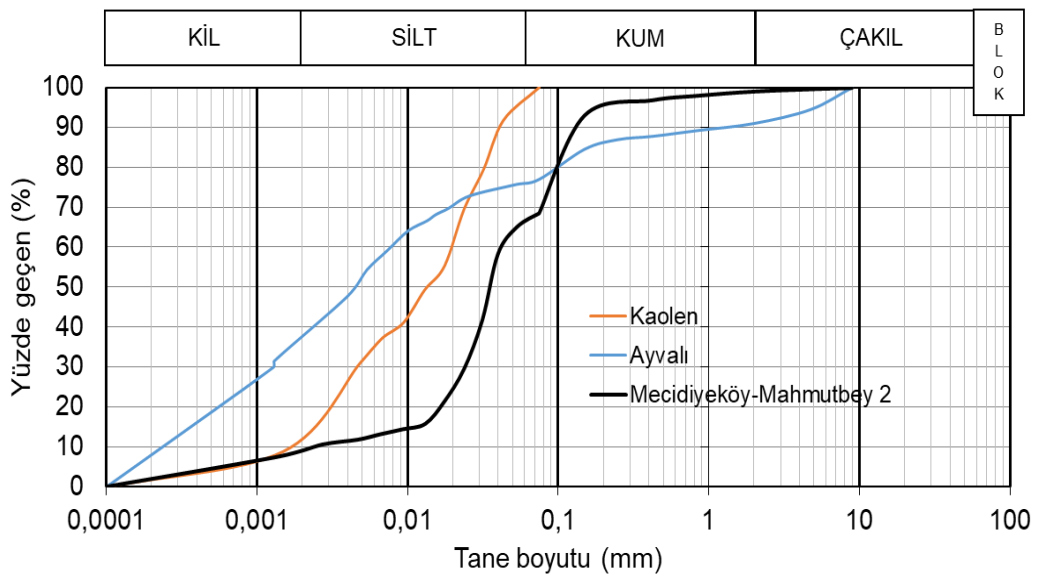
kullanılarak ve farklı basınçlar altında ölçümler yapılarak tekrarlanmasında fayda vardır.

Farklı zemin türlerinin ve zeminlerin mühendislik özelliklerinin zemin şartlandırmaya etkisinin araştırılması amacıyla zemin ve zemin + köpük karakterizasyon deney sonuçları irdelenmiş ve bulunan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Tez kapsamında karakterizasyonu yapılan 6 farklı zemin türü tane boyutlarına göre ince taneli ve kaba taneli olmak üzere 2 gruba ayrılmıştır.

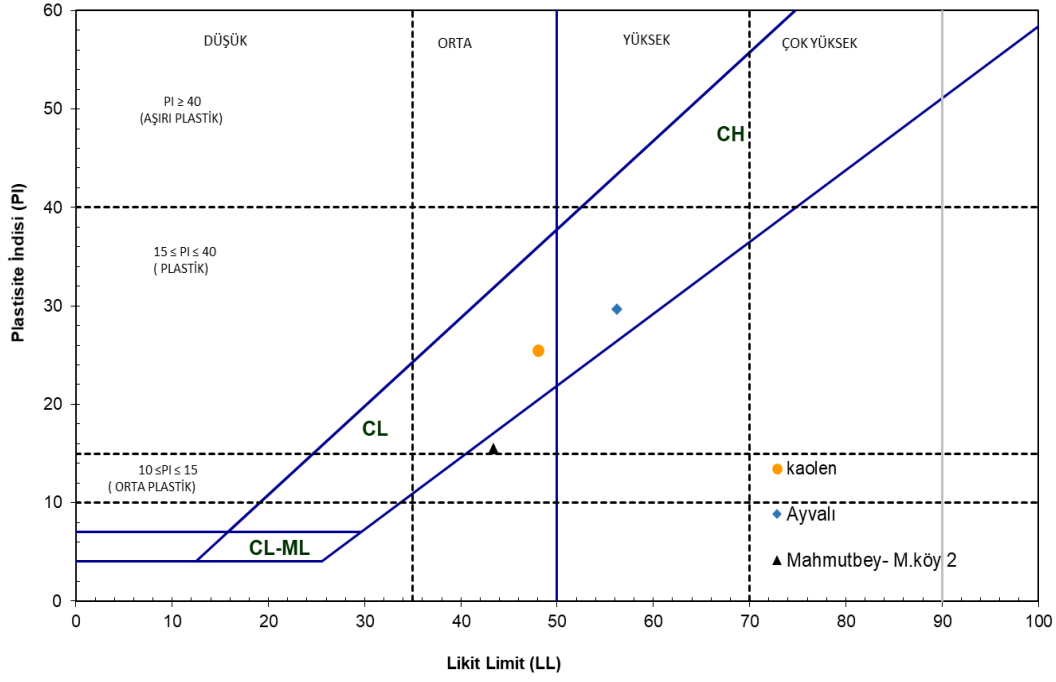
İnce taneli zeminlerin tane boyut grafiği Şekil 5.108’de verilmiştir. Şekil 5.108 incelendiğinde Ayvalı 2 ve Mahmutbey-Mecidiyeköy tünellerinden alınan zemin numunelerin yaklaşık % 80 oranında ince malzeme içerdiği kaolen numunesinin ise tamamen ince taneli olduğu görülmüştür.

Plastisite indisi ve likit limit değerleri kullanılarak zemin numunesinin plastisite abağındaki yeri Şekil 5.109’da gösterilmiştir. Şekil 5.109’a göre kaolen numunesi düşük plastisiteli kil, Ayvalı tüneli numunesi yüksek plastisiteli kil Mahmutbey-Mecidiyeköy tüneli numunesi ise düşük plastisiteli silt olarak tanımlanmıştır.

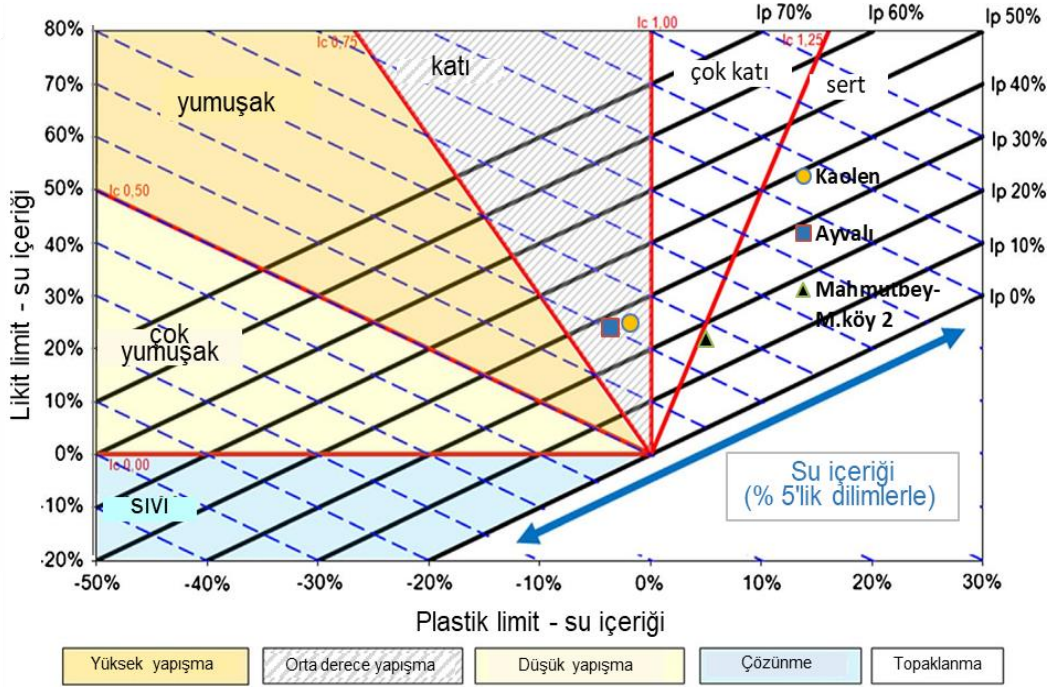
Zemin numunelerinin yapışma tıkanma riski ve kıvamı konusunda ayrıntılı bilgi sahibi olmak için numunenin yapışma tıkanma potansiyeli grafiğindeki (Şekil 5.110) verilmiştir. Şekil 5.110’a göre kaolen ve Ayvalı tüneli zemin numuleri katı kıvamda olup orta derece yapışma tıkanma potansiyeline sahiptir; Mahmutbey-Mecidiyeköy tüneline ait zemin numunesi ise katı kıvamda olup topaklanma potansiyeline sahiptir.



Şekil 5.108: Zemin numunelerinin tane boyut dağılım grafiği.



Şekil 5.109: İnce taneli zemin numunelerinin plastisite abağındaki yeri.

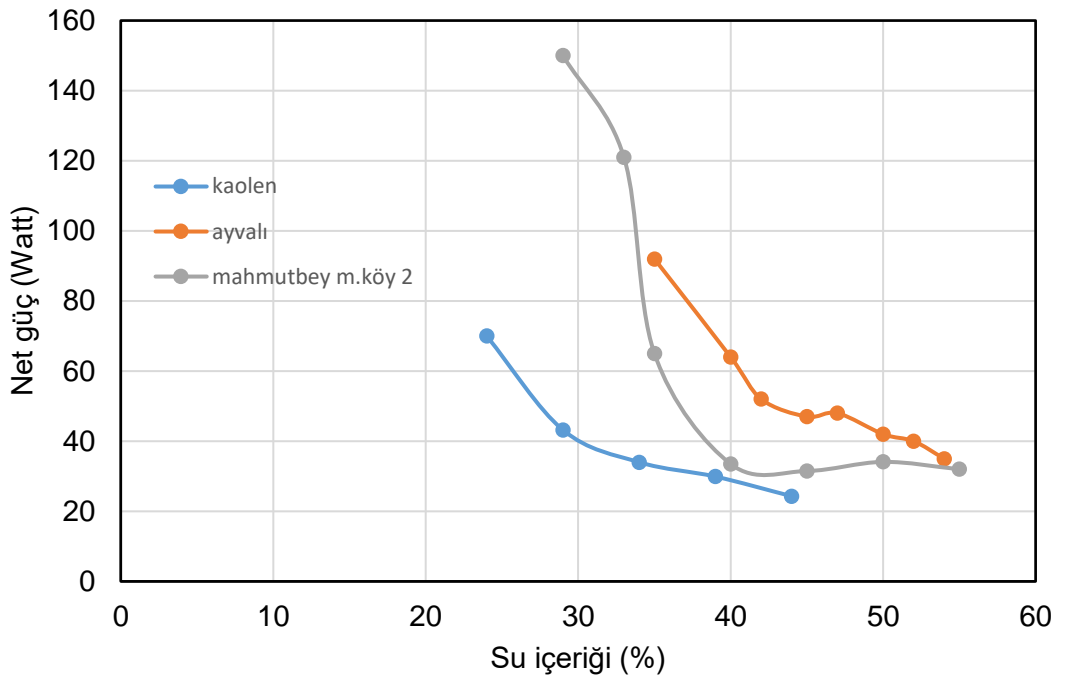


Şekil 5.110: Zemin numunesinin kıvam grafiğindeki yeri (Hollman ve Thewes 2013).

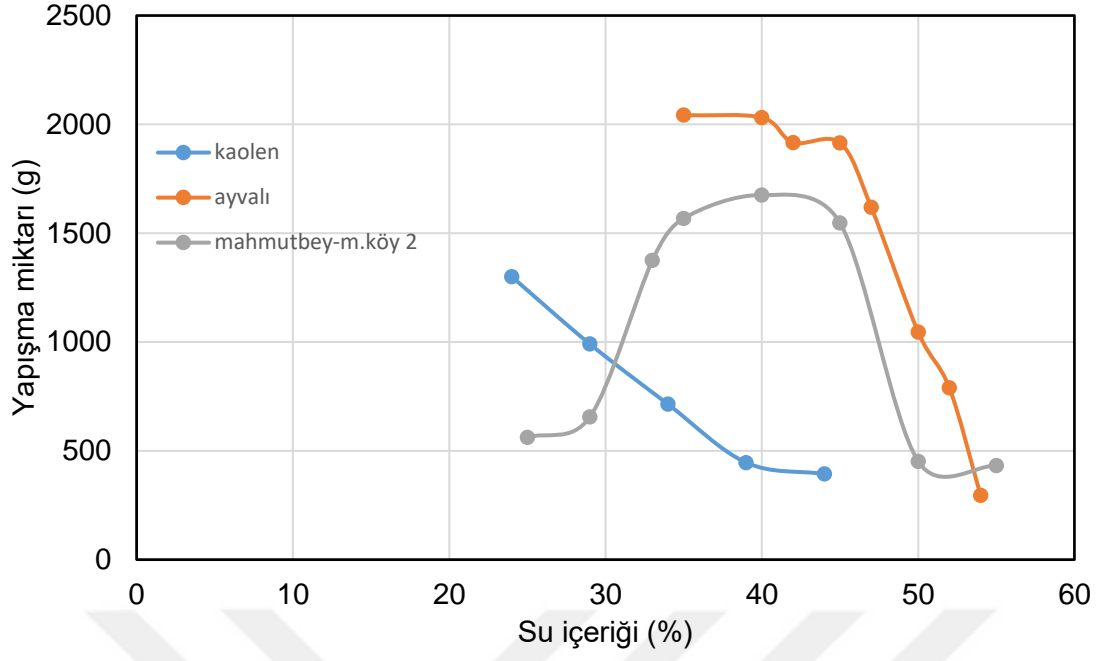
İnce taneli zeminlerin kazısında yaşanan en büyük problemlerden birisi de yapışma-tıkanma problemidir. Kazılan zemin suyla birleştiğinde kesici kafadaki metal yüzeylere yapışarak kazı boşluklarını tıkamakta ve kazıyı durdurmaktadır (Avunduk 2011, Martinotti ve Langmaarck 2007). Tez kapsamında incelenen 3 farklı ince taneli zemin numunesinin içerdikleri ince taneler nedeniyle yapışma tıkanma potansiyeline sahip oldukları görülmüştür. Şekil 5.110 incelendiğinde kaolen ve Ayvalı tüneline ait numunelerin orta derece yapışma Mahmutbey-M.köy 2 numunesinin ise topaklanma potansiyeline sahip olduğu görülmüş ve bu durum yapılan laboratuvar deneylerinde desteklenmiştir.

Zemin şartlandırma testleri köpüğün ve/veya suyun farklı zemin türlerine etkilerinin araştırılması amacıyla irdelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

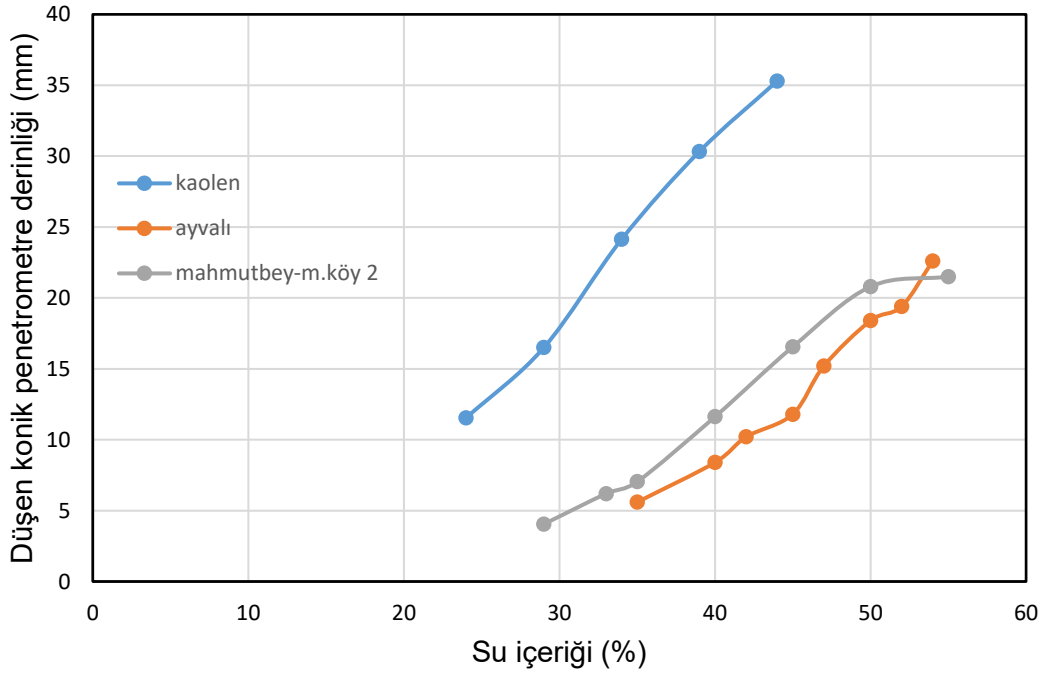
Zemin numuneleri 105 C° sıcaklıkta etüvde 24 saat süre kurutulmuş daha sonra su eklenip mikserde doğal nem içeriğine sahip olana dek karıştırılmıştır. Daha sonra farklı su içeriklerinin zeminlerin karakteristik özelliklerine etkisinin araştırılması amacıyla güç ölçümlü mikser-yapışma, konik penetrometre, vane shear kesme dayanımı ve yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.111-5.114'de özetlenmiştir.



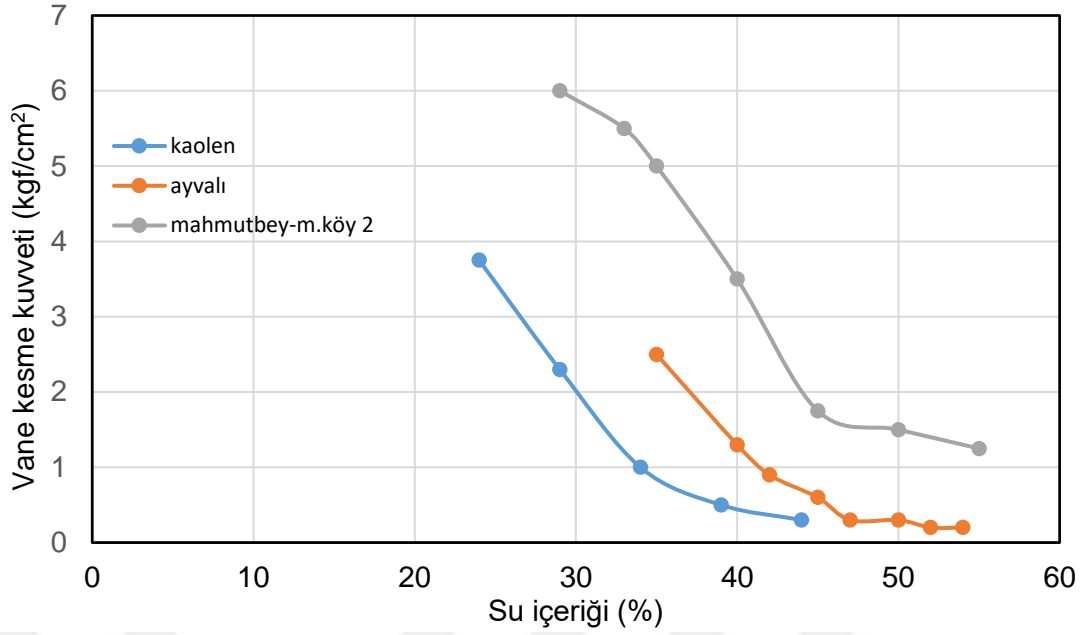
Şekil 5.111: Farklı su içeriklerinde güç sarfıyatı.



Şekil 5.112: Farklı su içeriklerinde zeminin mikser bıçağına yapışma miktarı.



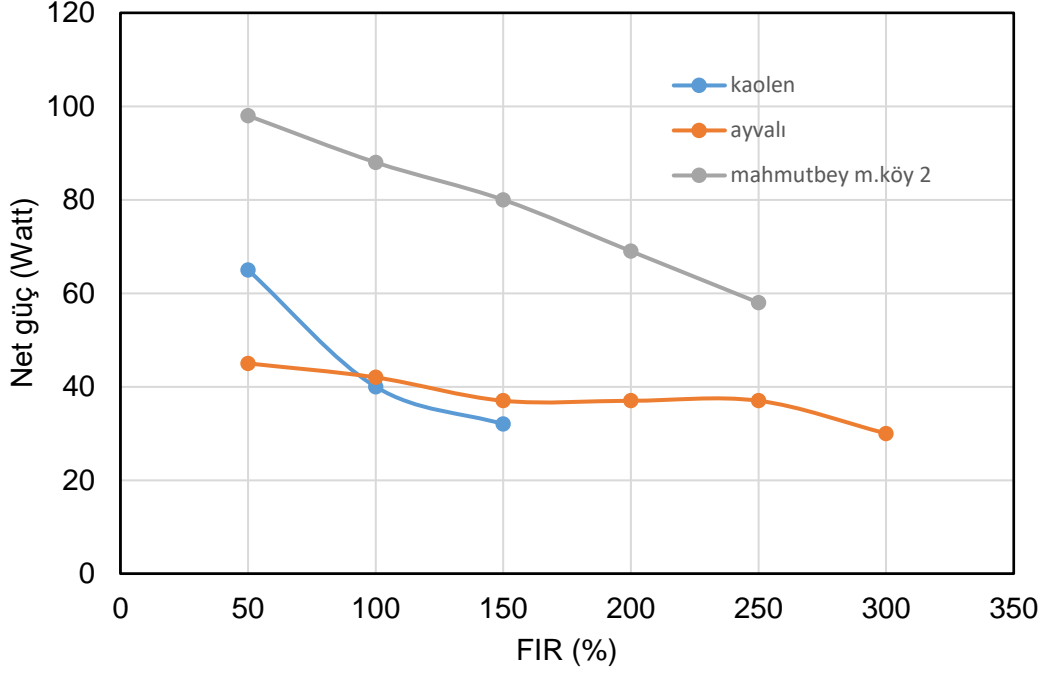
Şekil 5.113: Farklı su içeriklerinde penetrasyon değeri.



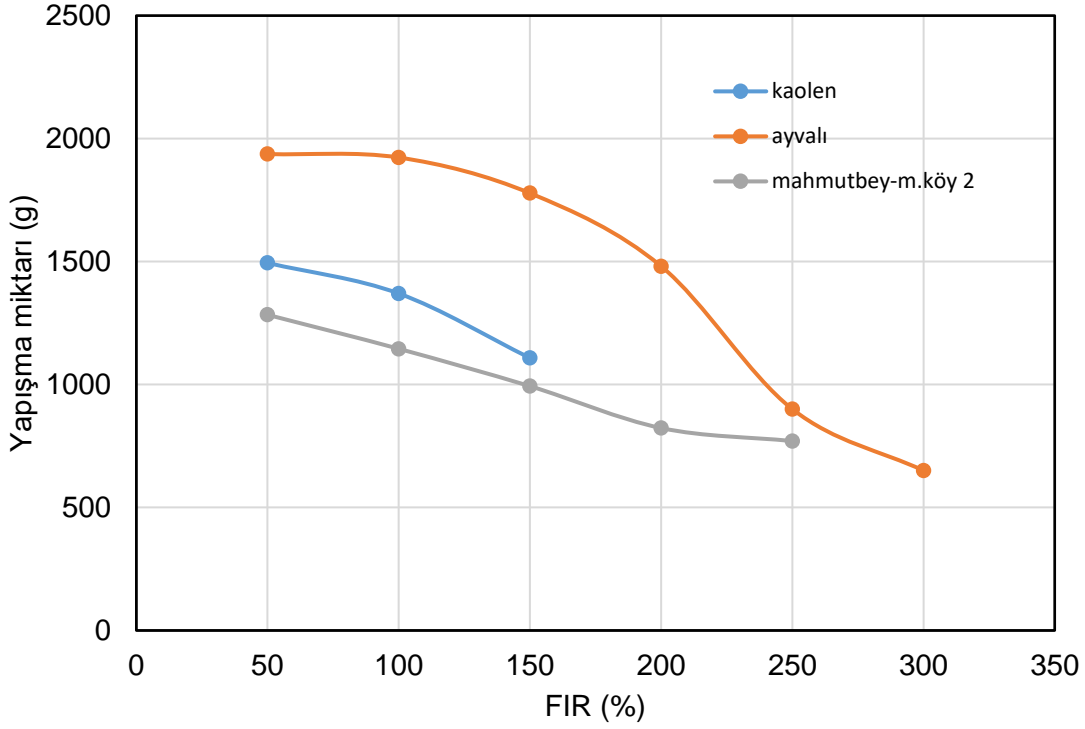
Şekil 5.114: Farklı su içeriklerinde vane shear kesme dayanımı değerleri.

İnce taneli zeminlerin şartlandırma deneyleri farklı su içerikleriyle yapılmış ve artan su içeriği ile net gücün, yapışmanın ve vane kesme kuvvetinin düştüğü konik penetrometre batma derinliğinin ise arttığı görülmüştür. Hollman ve Thewes (2013) yaptıkları çalışmalarda ince taneli zeminlerde artan su içeriğinin zeminin kıvamını plastikten limite götüreceğini dolayısıyla güç sarfiyatı ve yapışmanın azalacağını belirtmişlerdir. Quebaud vd. (1998) yaptıkları güç ölçümlü mikser testlerinde zeminlerin mikser testlerinde su içeriklerinin arttığında mikser güç gereksiniminin önemli ölçüde düştüğünü vurgulamışlardır. Ayrıca Şekil 5.112 incelendiğinde Mahmubey-M.köy 2 numunesi artan su içeriği ile önce topaklanmış ve daha sonra çözünerek yapışma özelliği düşmüştür. Bu durum Hollman ve Thewes (2013) tarafından geliştirilen yapışma tıkanma abağında da görülebilir (Şekil 5.110).

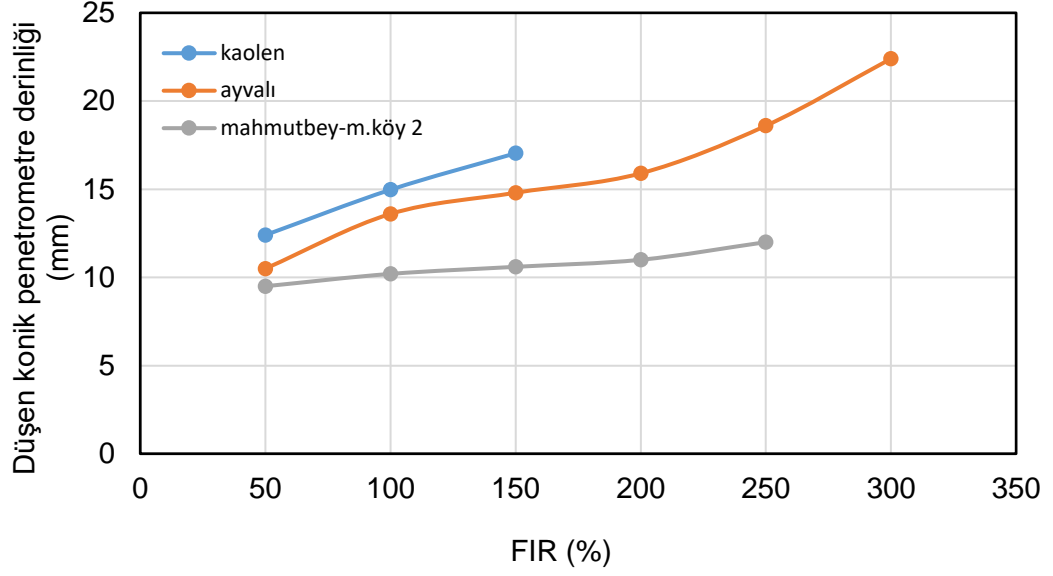
Deneyleerin sadece suyla yapılmasından sonra zemin şartlandırılmada köpüğün etkisini araştırmak amacıyla yapılan deneyler köpükle de tekrarlanmıştır. İnce taneli zeminlerin yapışma potansiyeli nedeniyle zeminler optimum şartlandırma koşullarına anti killi köpükler kullanılarak ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.115-5.118'de özetlenmiştir.



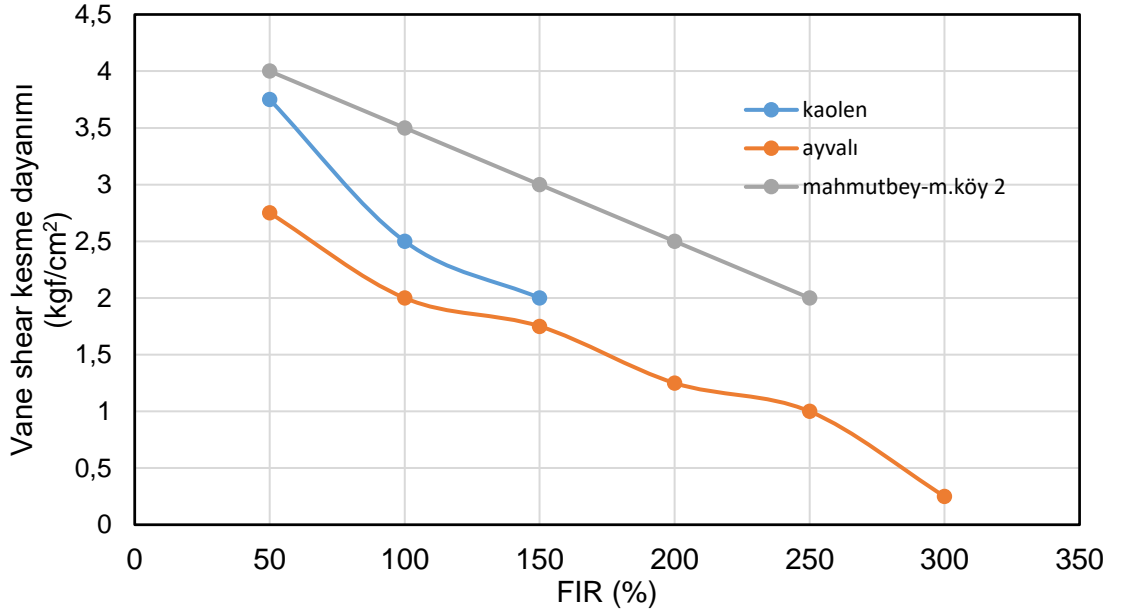
Şekil 5.115: Farklı FIR oranlarında güç sarfiyatı.



Şekil 5.116: Farklı FIR oranlarında mikser bıçağına yapışma miktarları.



Şekil 5.117: Farklı FIR oranlarında penetrasyon derinlikleri.

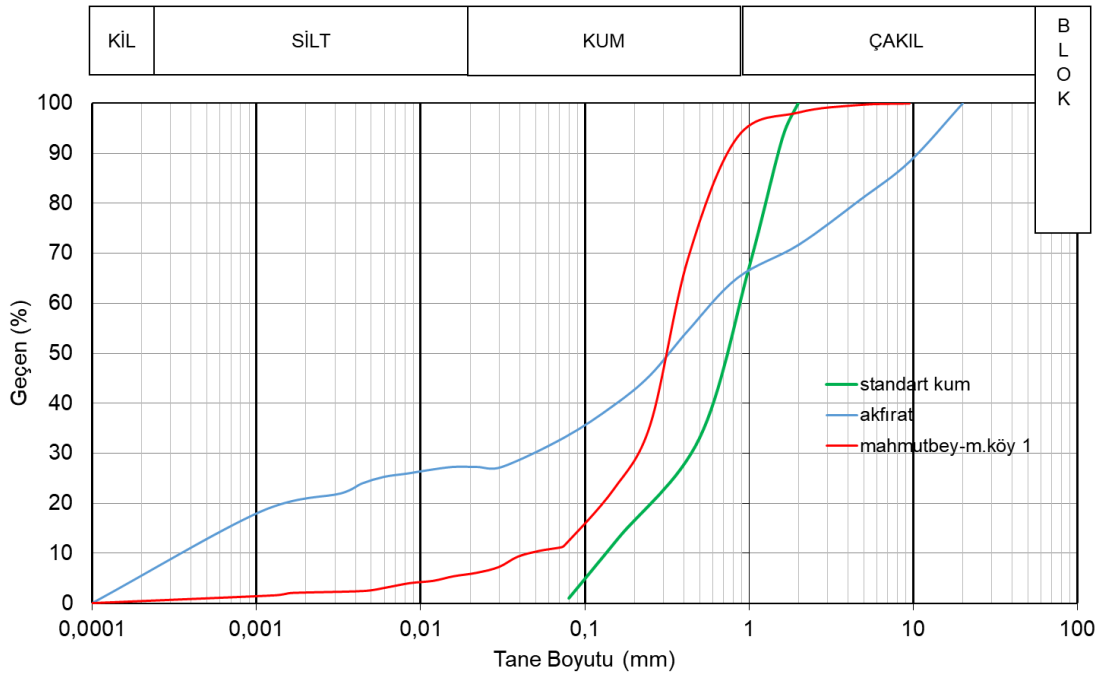


Şekil 5.118: Farklı FIR oranlarında vane kesme kuvveti.

İnce taneli zeminlerin şartlandırma deneyleri farklı FIR oranlarında yapılmış ve artan FIR ile net gücün, yapışmanın ve vane kesme kuvvetinin düştüğü konik penetrometre batma derinliğinin ise arttığı görülmüştür. Zemin şartlandırma çalışmalarında artan FIR oranının genellikle EPB TBM performansını artırdığı diğer bir deyişle makine tork gereksinimi ve yapışma riskini düşürüp makine ilerleme oranlarını artırdığı araştırmacılarca bildirilmiştir (Peila vd. 2009, Thewes vd. 2010, Thewes ve Budach 2010). Tez kapsamında laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar artan FIR oranının

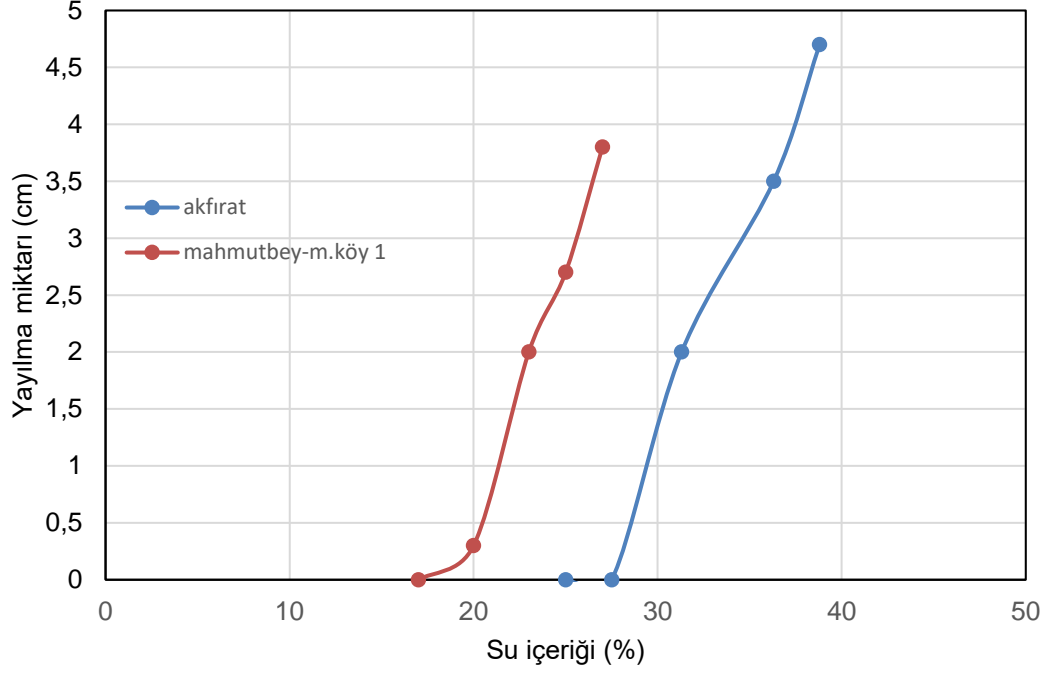
zeminlerin kıvam özelliklerini plastik kıvama getirdiği ve EPB TBM kazısı için optimum zemin koşullarını sağladığı görülmüştür.

Kaba taneli zeminlerin tane boyut grafiği Şekil 5.119’da verilmiştir. Şekil 5.119 incelendiğinde standart kum numunesinin çakıl ve kil+silt oranının % 0 olduğu görülmüştür. Akfırat tüneli zemin numunesinin çakıl oranının % 29, kil+silt oranının ise % 33 olduğu, Mahmutbey-Mecidiyeköy tüneline ait zemin numunesinin çakıl oranının % 2, kil+silt oranının ise % 11 olduğu görülmüştür.

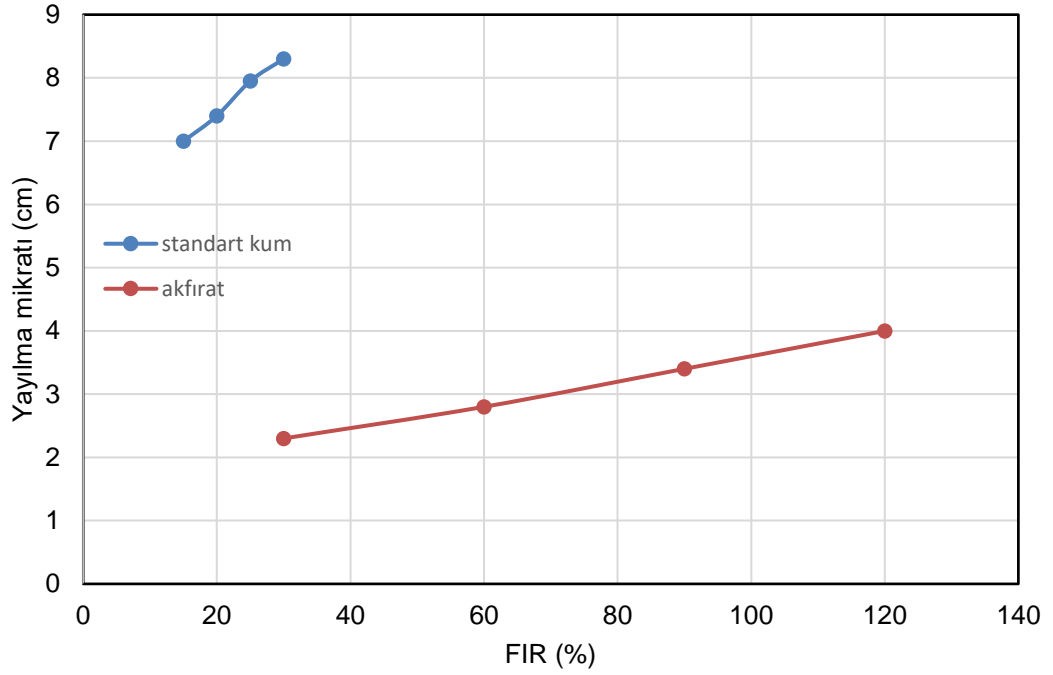


Şekil 5.119: Zemin numunelerinin tane boyut dağılım grafiği.

Farklı zemin türlerine ait değişen su içeriği ve değişen FIR değerleriyle değişen yayılma miktarları Şekil 5.120 ve 5.121’de verilmiştir.



Şekil 5.120: Farklı su içeriklerinde yayılma değerleri.



Şekil 5.121: Farklı FIR değerlerinde yayılma değerleri.

Kaba taneli zeminlerin şartlandırma çalışmalarında gerek ucuz olması gerekse hızlı sonuç vermesi nedeniyle slump testi yoğunlukla kullanılmaktadır (Quebaud 1998, Jancez vd. 1999, Pena 2003, Peila vd. 2009). Quebaud ince taneli kumlar

üzerinde yaptığı çalışmalarda optimum slump yüksekliğinin 12 cm olduğuna dikkat çekmiştir. Pena standart kum üzerinde farklı köpük tiplerinin etkilerini araştırmış ve EPB TBM uygulamaları için optimum slump değerinin % 65 FIR için 10-15 cm % 85 FIR ve üzeri değerler için optimum slump değerinin 15-20 cm olduğunu belirtmiştir. Tez kapsamında Tuzla Akfırat Tüneli numunleri üzerinde slump deneyleri yapılmış ve ideal slump yüksekliği 10-20 cm arasında bulunmuştur. Tez kapsamındanda kaba taneli zeminlerin yayılma tablası ve slump değerleri karşılaştırılmış ve arada çok güçlü bir ilişki bulunmuştur. Buna göre kaba taneli zeminler için ideal yayılma çapının 13-15 cm olduğu sonucuna varılmıştır. Tez kapsamında slump testi için numune ihtiyacını azaltacak küçük boyutlu slump testi geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar slump testi ile benzerlik göstermiştir fakat bu testin güvenle kullanılabilinmesi için deney sayılarının artılıp gerçek boyutlu slump testi ile karşılaştırılması gerekmektedir.

6. SAHA PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ İLE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DOĞRULAMASI VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

6.1 Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli Verileri

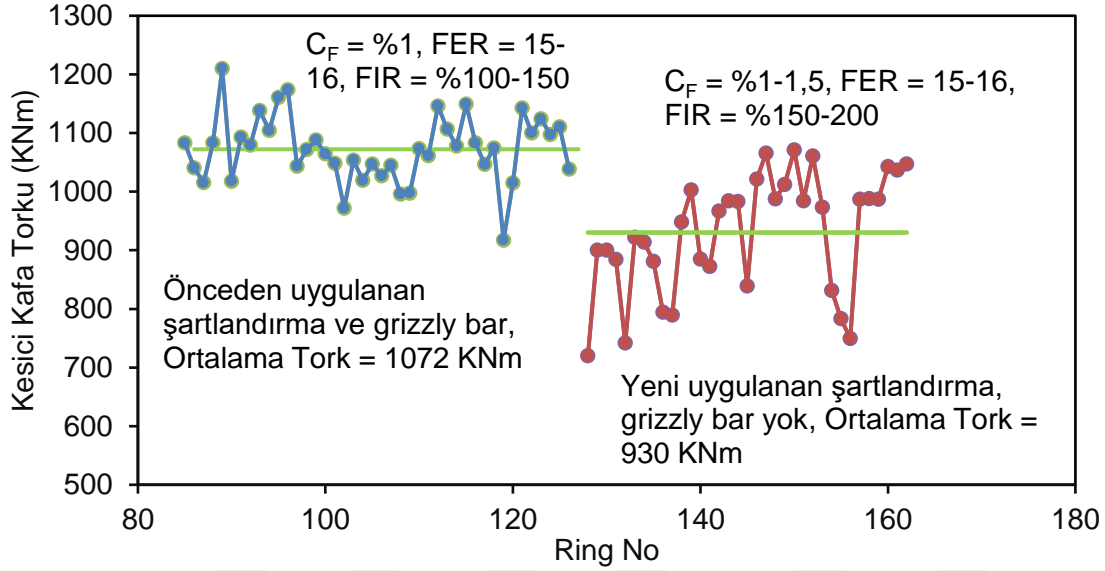
Ayvalı 2 tüneline EPB TBM'in kil tıkaması / yapışması bakımından orta ve yüksek bir risk altında olduğu daha önceki bölümlerde deneysel olarak gösterilmiştir. Bu durumun keskilere yapışan kil nedeniyle net kazı hızını düşürebileceği, pasa nakliyesinde sorunlar yaşanabileceği ve kesici kafa torkunun yüksek olabileceği sonuçlarına yol açabileceği ortaya konulmuştur.

Sahada yapılan gözlemler sonucunda, tahmin edilen bu problemlerle karşılaşıldığı görülmüştür. Problemin çözümüne yönelik olarak öncelikle kilin özellikle keskilere yapışmasını azaltmak ve kazılan malzemenin kesici kafa içine rahatlıkla geçişini sağlamak amacıyla kesici kafada bulunan grizzly bar'lar sökülmüştür. Daha sonra, köpük uygulamasında iyileştirmeye gidilmiştir. Yüklenici firmaya laboratuvarında belirlenen optimum köpük tasarım parametreleri (EPB TBM ile kazısında zeminin doğal su içeriğine (%33) %12 daha su ilave edilip (%45 toplam su içeriği), antikal polimerli köpük olarak ACP 143, FER 16, CF %3 ve FIR %250 olarak optimize edildiğinde herhangi bir yapışma problemi kalmayacağı) iletilmiştir.

Yüklenici firma yetkilileri ile yapılan görüşmeler sonucunda, ellerinde hazır bulunan Exfoam 2 kullanılmasına, köpük sarfiyatını azaltmak için ilave su miktarının %17 olmasına (toplam su içeriği %50), FER 15-16 ve FIR değerinin %150-200 olmasına karar verilmiştir. 128 ve 162. ringler arasında (19-29 Ocak 2016) uygulama yapılırken EPB TBM'in data loger'inde performans verileri kaydedilmiştir ve gözlemler yapılmıştır. Kıyaslama amacıyla 85 ve 127. ringler arası da (10-16 Ocak 2016) kayıtlardan elde edilmiştir.

Şekil 6.1'de iyileştirme (yeni köpük tasarımının kısmen uygulanması) öncesi ve sonrasında kesici kafa torkundaki değişim gösterilmiştir. Sahada daha önce uygulanan sistemde ortalama kesici kafa torku 1072 kNm olurken, yeni uygulama ile bu değer 930 kNm'ye düşmüştür. Bu durum tork değerinin %13 civarında azaldığını

göstermektedir. Bu iyileşmenin ne kadarının grizzly barların çıkarılmasından ve ne kadarının yeni şartlandırmadan kaynaklandığı konusu operatör ile tartışılmıştır ve operatör gözlemlerine göre bu etkinin yarı yarıya olduğu belirtilmiştir. Torkdaki değişimin düşük olmasının temel nedeni ayna stabildir ve kesici kafanın yarı dolu - yarı boş çalışmasından dolayı, söz konusu uygulamanın torka etkisinin zaten düşük olacaktır.



Şekil 6.1: Önceden ve yeni uygulanan şartlandırma durumlarında kesici kafa torkundaki değişim (Ayvalı 2).

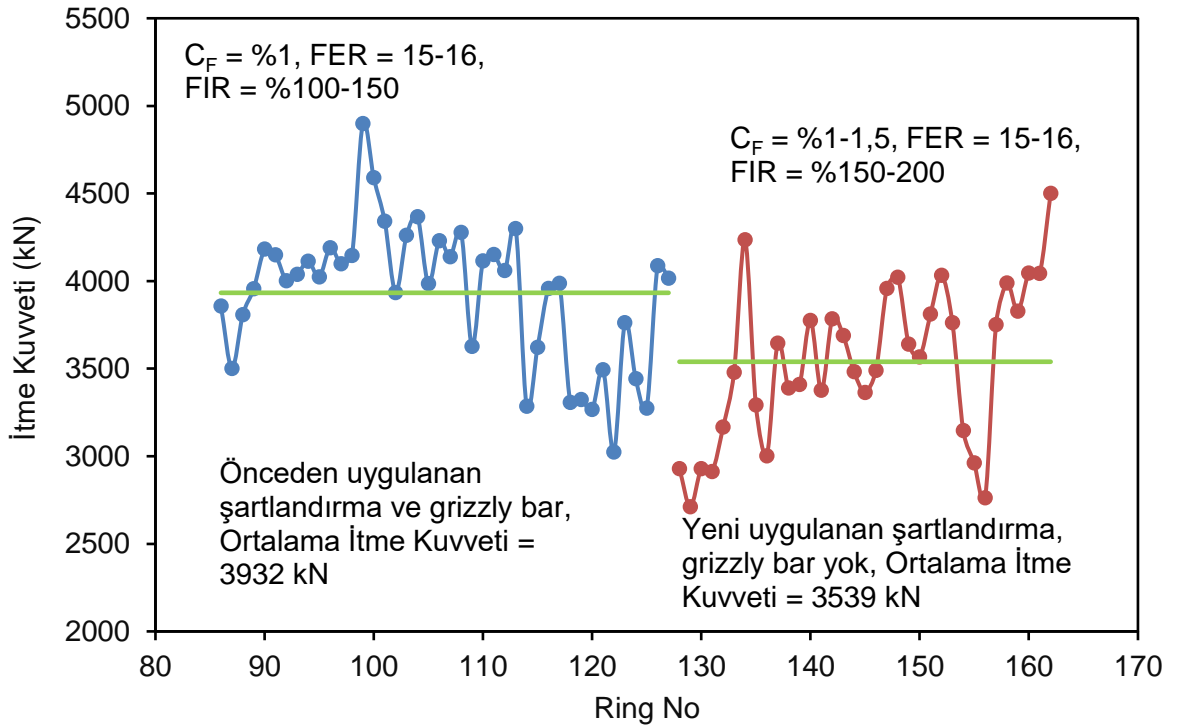
Şekil 6.2’de iyileştirme (yeni köpük tasarımının uygulanması) öncesi ve sonrasında EPB TBM itme kuvvetindeki değişim gösterilmiştir. Sahada daha önce uygulanan sistemde 3933 kN ortalama itme kuvveti elde edilirken, yeni uygulama ile bu değer 3539 kN’a düşmüştür. Bu durum itme kuvvetinin %10 civarında azaldığını göstermektedir. İtme kuvvetindeki değişimin düşük olmasının temel nedeni ayna stabildir ve kesici kafanın yarı dolu - yarı boş çalışmasından dolayı, söz konusu uygulamanın itme kuvvetine etkisinin zaten düşük olacaktır.

Şekil 6.3’de iyileştirme (yeni köpük tasarımının uygulanması) öncesi ve sonrasında net kazı hızındaki değişim gösterilmiştir. Sahada daha önce uygulanan sistemde 24,3 mm/dak ortalama kazı hızı elde edilirken, yeni uygulama ile bu değer 32,1 mm/dak’ya yükselmiştir. Bu durum net kazı hızının %32 civarında arttığını göstermektedir. Bunun farklılığın nedeni keskilere zeminin yapışmamasıdır. Her iki durumda da kesici kafa dönüş hızı yaklaşık 2,5 dev/dak ($\pm 0,2$)’dir.

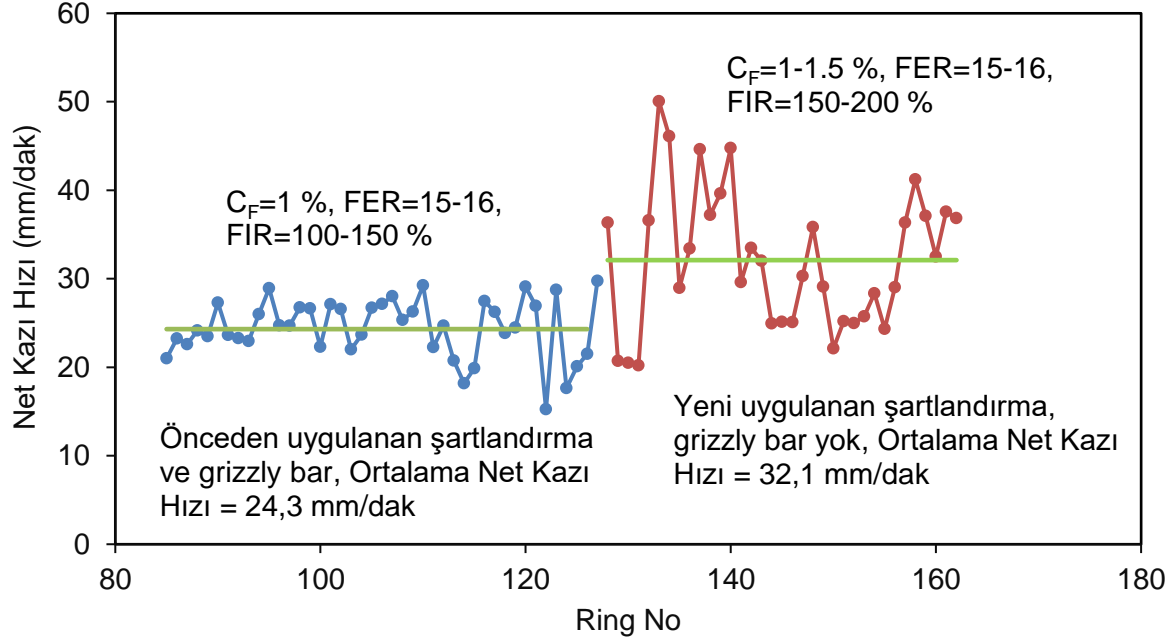
Gözlemler göstermiştir ki yapışma problemi tamamen olmasa da önemli oranda azalmıştır. Bu sayede keskilere temiz kaldığından net kazı hızı (penetrasyon) %32

civarında artmıştır. Tork ve itme kuvveti ise kesici kafa yarı-dolu yarı-boş çalıştığından, %10-13 arasında oldukça sınırlı olarak azalmıştır.

Öte yandan belirtilmelidir ki, söz konusu tünel sahasında EPB TBM performansını daha da iyileştirmek mümkündür. İyileştirme amacıyla uygulanan şartlandırma parametreleri, laboratuvarında belirlenenden kısmen farklıdır. Eğer laboratuvarında belirlenen şartlandırma uygulanmış olsaydı, net kazı hızındaki artış daha da yüksek olabilecekti.



Şekil 6.2: Önceden ve yeni uygulanan şartlandırma durumlarında itme kuvvetindeki değişim (Ayvalı 2).



Şekil 6.3: Önceden ve yeni uygulanan şartlandırma durumlarında net kazı hızındaki değişim (Ayvalı 2).

6.2 Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli Verileri

Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli'nde değişik yapışkanlık dereceleri ve kil içeriği ile karşılaşmıştır. Zemin içinde kil oranı arttıkça yapışkanlık artmış ve EPB TBM performansı düşmüştür. Bu nedenle, kazılan zemin birkaç ay boyunca izlenmiş, değişik zonlar yapışkanlık derecesine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma Çizelge 6.1'de görülmektedir. Bu sınıflandırmada operatör gözlemleri de dikkate alınmıştır.

Çizelge 6.1: Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli güzergahında killi zonların yapışkanlıklarına göre sınıflandırılması.

Yapışkanlık Sınıfı	Ring No
Yoğun Killi (Çok Yapışkan)	3272-3281
Orta Killi (Orta Yapışkan)	3282-3292
Az Killi (Az Yapışkan)	3248-3251 + 3266-3268
Kilsiz (Yapışkan Değil)	2839-2951

Çizelge 6.1'de belirtilen ringlere ait EPB TBM performans kayıtları alınarak her ring için ayrı ayrı ortalama değerler hesaplanmıştır. Hesaplanan FIR, FER ve Köpük

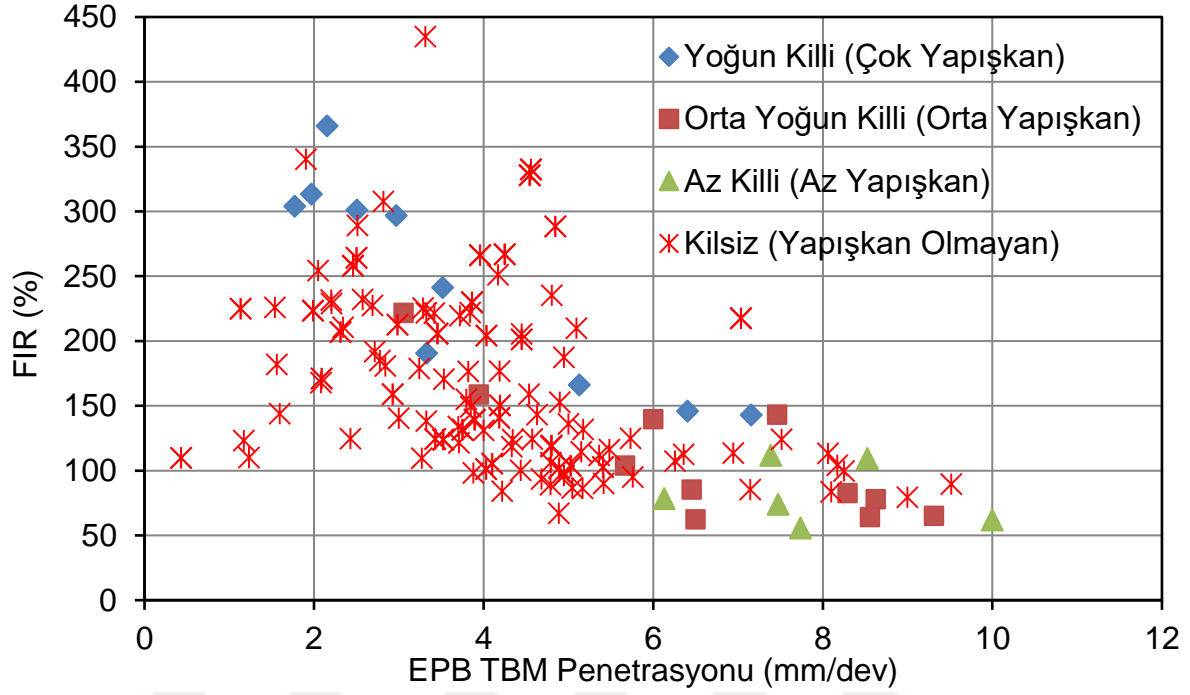
Miktarı değerleri ile EPB TBM'in bazı performans parametreleri (EPB TBM penetrasyonu, itme kuvveti, kesici kafa torku, spesifik enerji ve burgulu konveyör torku) arasında ilişkiler araştırılmıştır. FER ve köpük miktarı performans parametreleri ile anlamlı bir ilişki vermemiştir.

FIR ile penetrasyon arasındaki ilişki tüm veriler için Şekil 6.4'de görülmektedir. Genel bir trend görülmektedir. Sadece kil içeren zeminler göz önüne alındığında (kilsiz, yapışkan olmayan zeminler dışarıda tutulduğunda) Şekil 6.5'de görüldüğü gibi, uygulanan FIR limit değerleri genel olarak çok yapışkan zonlarda %150-300, orta yapışkan zonlarda %50-200 ve az yapışkan zonlarda %50-100 arasında değişmektedir. Şekil 6.6'da ise EPB TBM penetrasyonu ile FIR arasında hernekadar güçlü bir ilişki görülsede artan FIR oranı ile penetrasyonun düşmesi kullanılan köpüğün zemine etki etmediğini göstermektedir.

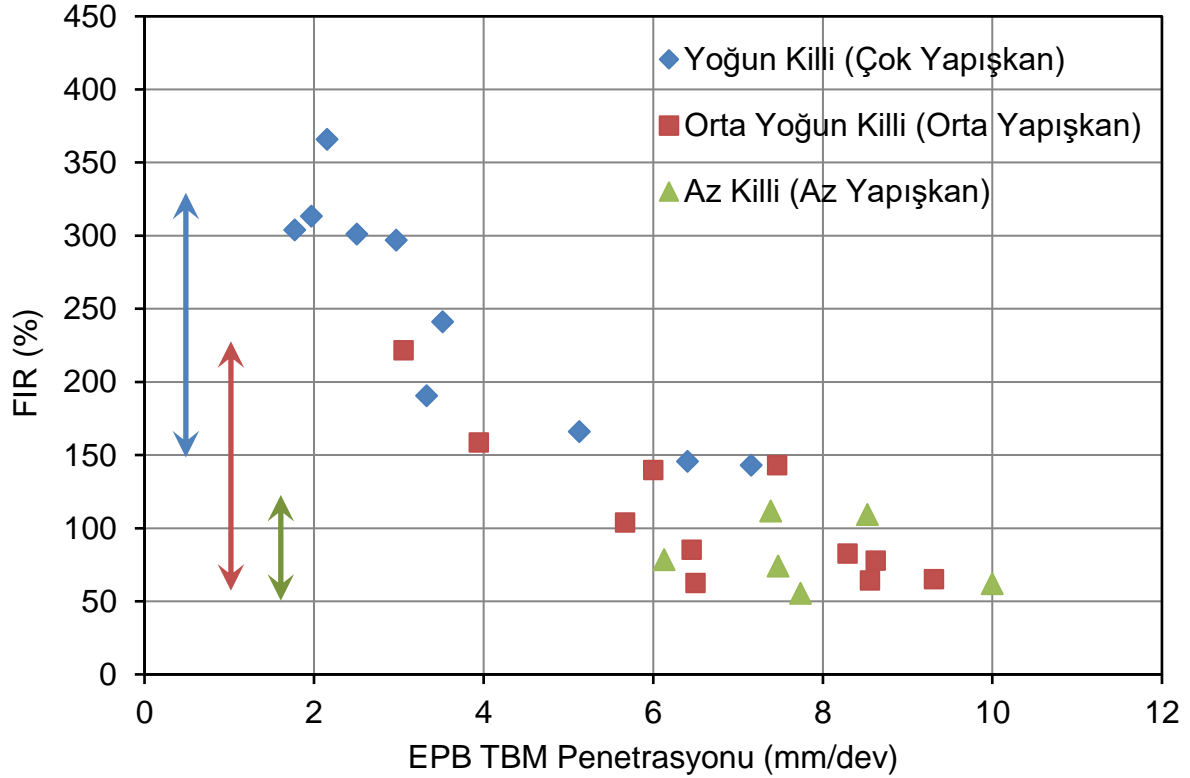
FIR ile killi zeminlerdeki kesici kafa torku, itme kuvveti ve burgulu konveyör torku arasında bir ilişki bulunamamıştır. Ancak, kil içermeyen zonlara ait verilerde EPB TBM penetrasyonu ile kesici kafa torku ve burgulu konveyör torku arasında orta dereceli ilişkiler mevcuttur.

Şekil 6.7'de görüldüğü gibi, zemin yapışkanlığı arttıķa spesifik enerji genel olarak artmakta ve uygulanan FIR limit değerleri genel olarak yükselmektedir. Şekil 6.8'de ise spesifik enerji ile FIR arasındaki güçlü ilişki görülsede kullanılan köpüğün zemine etki etmediği anlaşılmaktadır.

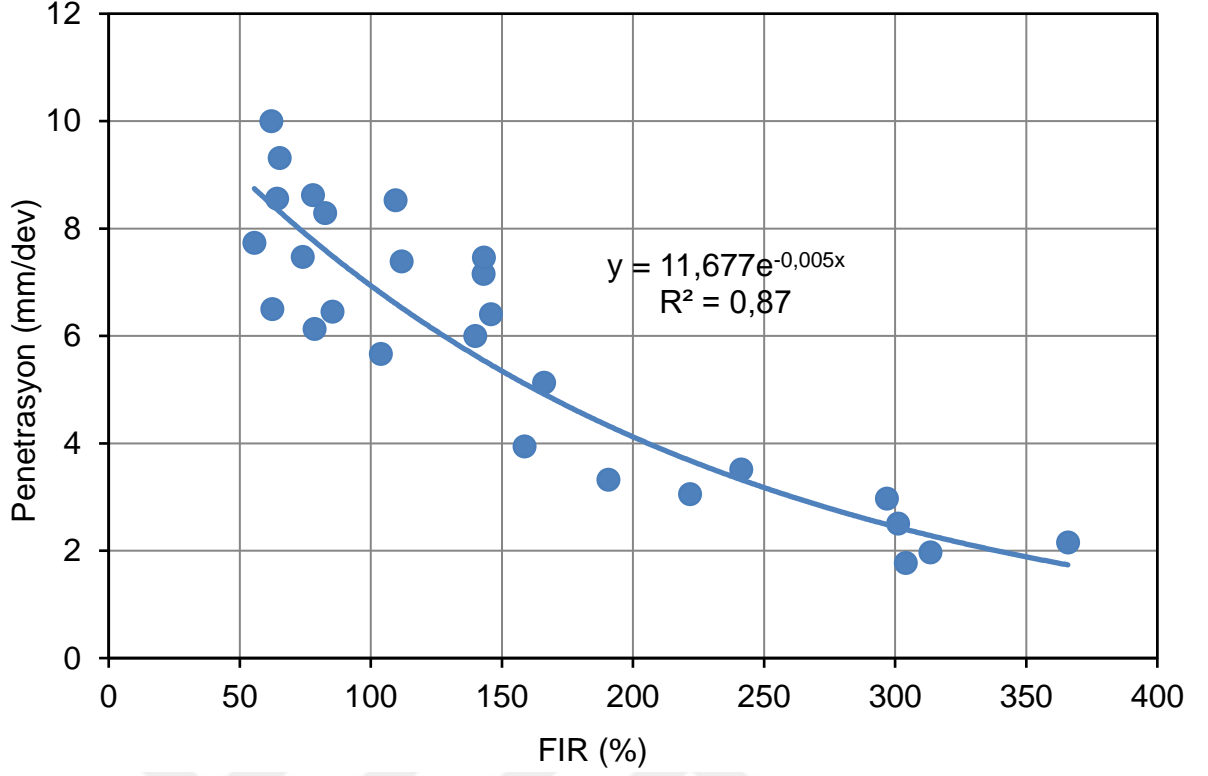
Sadece kil içeren zeminler göz önüne alındığında Şekil 6.9'daki EPB TBM net kazı hızı ile FIR arasındaki güçlü ilişki görülmektedir. Kazı hızı azaldıķa (kazı zorlařtıķa) FIR arttırılmaktadır. Zemin şartlandırılmada beklenen etki FIR arttıķa kazı hızının artmasıdır bu durumdada zemin şartlanmanın istenilen etkiyi göstermediği grlmştir.



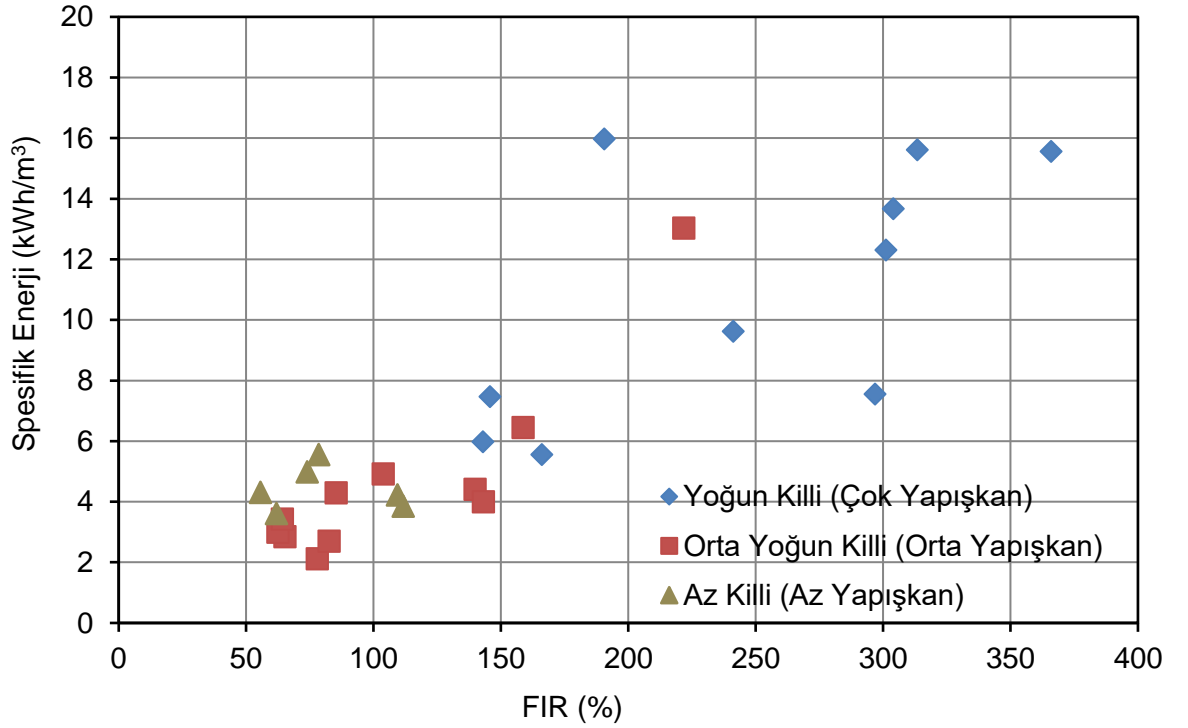
Şekil 6.4: EPB TBM penetrasyonu ile FIR arasındaki dağılım grafiği (Akfırat).



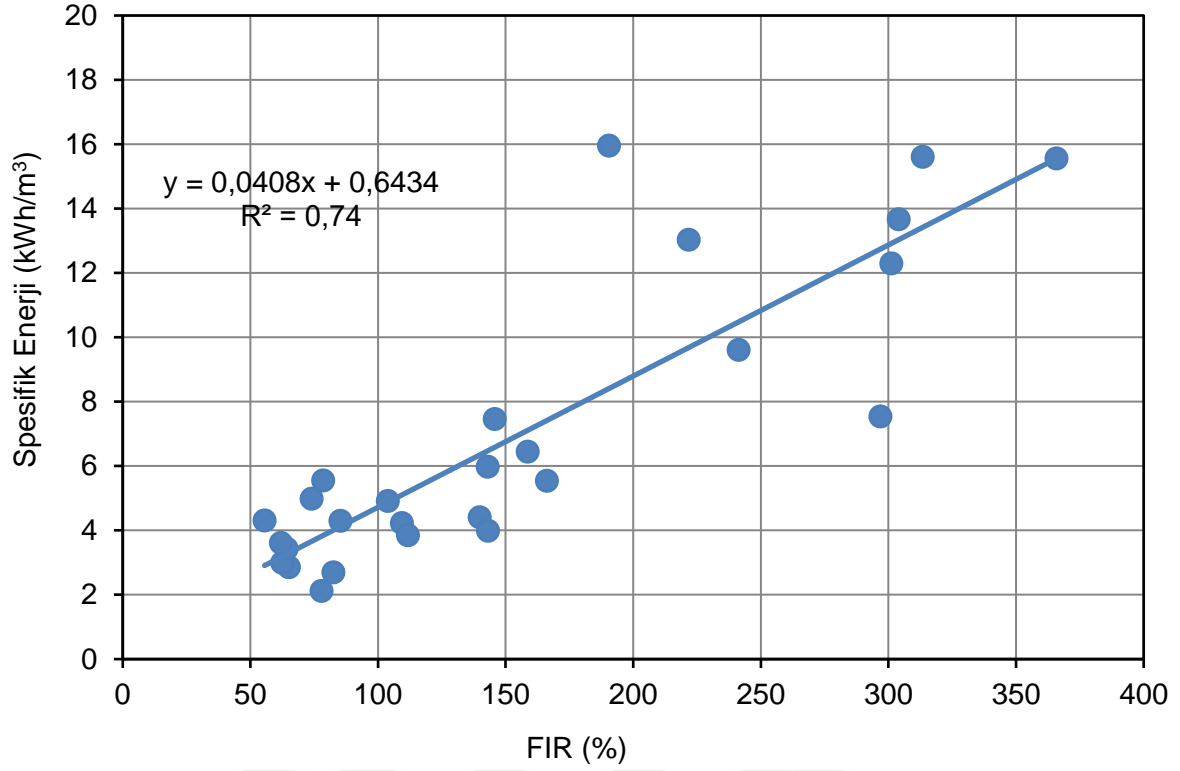
Şekil 6.5: EPB TBM penetrasyonu ile FIR arasındaki yapışkanlık sınıflarına göre dağılım grafiği (Akfırat).



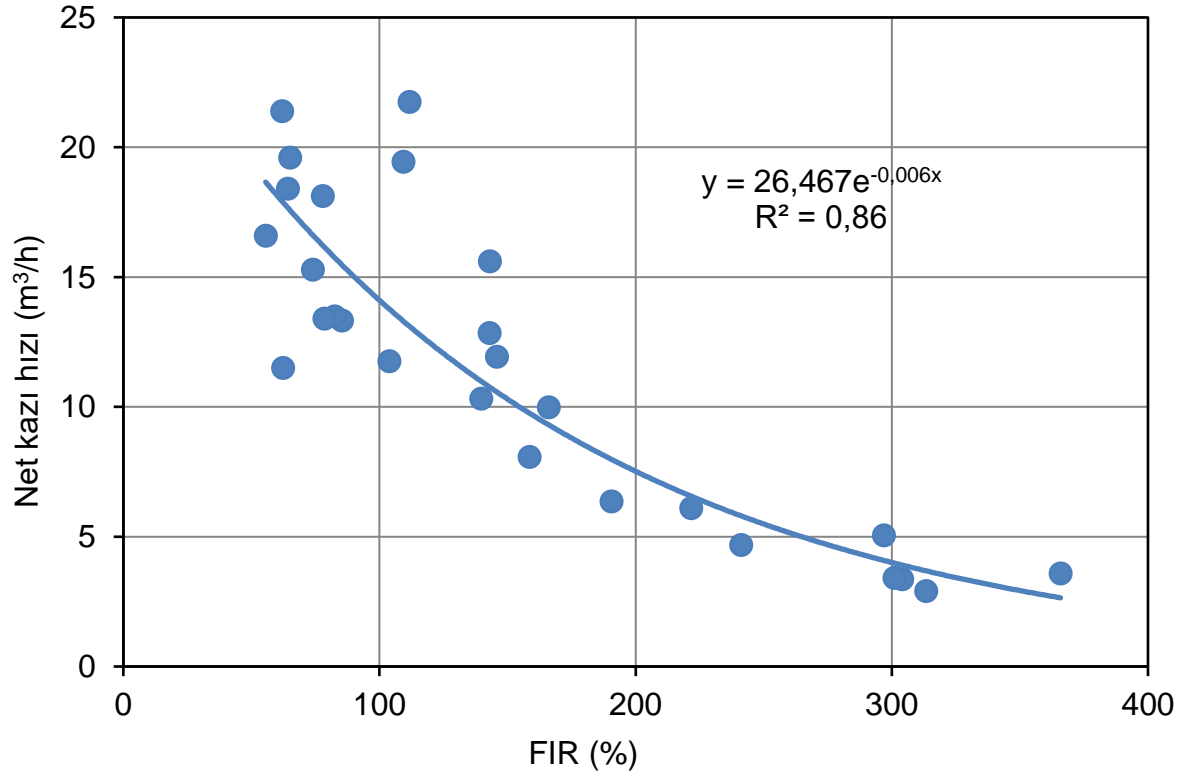
Şekil 6.6: FIR ile EPB TBM penetrasyonu arasındaki ilişki (Akfirat).



Şekil 6.7: Spesifik enerji ile FIR arasındaki dağılım grafiği.



Şekil 6.8: Spesifik enerji ile FIR arasındaki ilişki (Akfırat).



Şekil 6.9: FIR ile net kazı hızı (ICR) arasındaki ilişki (Akfırat).

Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli'nde karşılaşılan killi siltli çakıllı kum numunenin EPB TBM ile kazısında numunenin doğal su içeriğine (%12,5) %12,5 daha su ilave edilip (%25 toplam su içeriği), ACP 143 polimerli köpük, FER 8,5, CF %3 ve FIR %120 olarak optimize edildiğinde herhangi bir yapışma problemi kalmayacağı ve EPB TBM'in güç (ve tork) tüketiminin minimum olacağı, net kazı hızının maksimum olacağı ve nakliyede sorun olmayacağı kestirimi deneysel olarak yapılarak daha önceki bölümlerde verilmişti. Ayrıca, yapılan deneylerde zeminin su içeriğini %35-40 arasına getirerek yapışkanlığın önlendiği ve kıvamın sağlandığı görülmüştür. Yüklenici firma yetkilileri Exfoam 2 kullanarak zemine ilave su verip (toplam su içeriği yaklaşık %30-35) yapışma ve nakliye problemini çözme yolunu tercih etmiştir. Sonuç olarak, bu şartlandırma uygulamasında yapışma ve nakliye problemlerinin büyük oranda çözüldüğü görülmüştür.

6.3 Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli Verileri

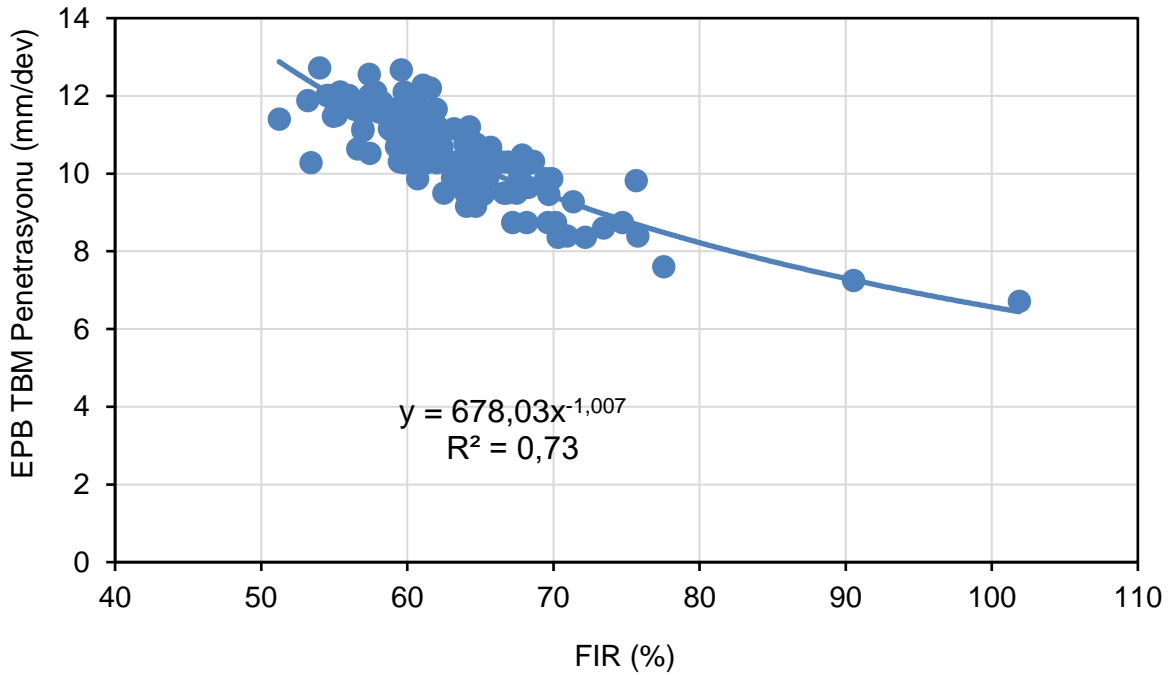
Kazım Karabekir İstasyonu kazılarında tünelin 10 metre üst seviyesinden alınan siltli kum (%87 kum, %10 silt) içeren zeminde, kazı aynası stabil olan bölgede kazı haznesi yarı veya tam dolu çalışılabileceği, kazı esnasında dökülmeler olabileceği öngörülmüştür. Torku düşürmek ve kıvamı sağlamak için yapılan şartlandırma deneylerinin sonuçlarına göre, mikser, konik penetrometre ve yayılma tablası deneyleri optimum şartlandırmanın SLF 30 köpük, doğal su içeriğinde (%17), CF %3, FER 16 ve FIR %20-25 değerlerinde olacağını göstermiştir. Ancak belirtilmelidir ki, bölgede ikinci bir zemin tabakası (kumlu silt, %61 silt, %31 kum) daha mevcuttur, kazı esnasında bu iki tabakanın da değişimli olarak kazılacakları bilinmektedir.

İlgili güzergâh üzerinde yapılar bulunması nedeniyle, 2,0 bar ayna basıncı uygulanmıştır. 790 ve 920inci ringler arasında (Kazım Karabekir İstasyon güzergahı) uygulama yapılırken EPB TBM'in data loger'inde performans verileri kaydedilmiştir ve gözlemler yapılmıştır. EPB TBM itme kuvveti ve kesici kafa torku ile FIR arasında herhangi bir ilişki bulunamamıştır. Şekil 6.10'da FIR ile EPB TBM penetrasyonu arasındaki ilişki görülmektedir. Azalan penetrasyon değerlerinde (artan kazı zorluğu) FIR'ın arttırıldığı görülmektedir. FIR değerlerinin %50 ile %100 arasında değiştiği görülmüştür (SLF 30, CF % 1,0-1,5, FER 10-50, ortalama FER 18). Yapılan incelemelerde bu ringler arasında sadece siltli kum değil aynı zamanda

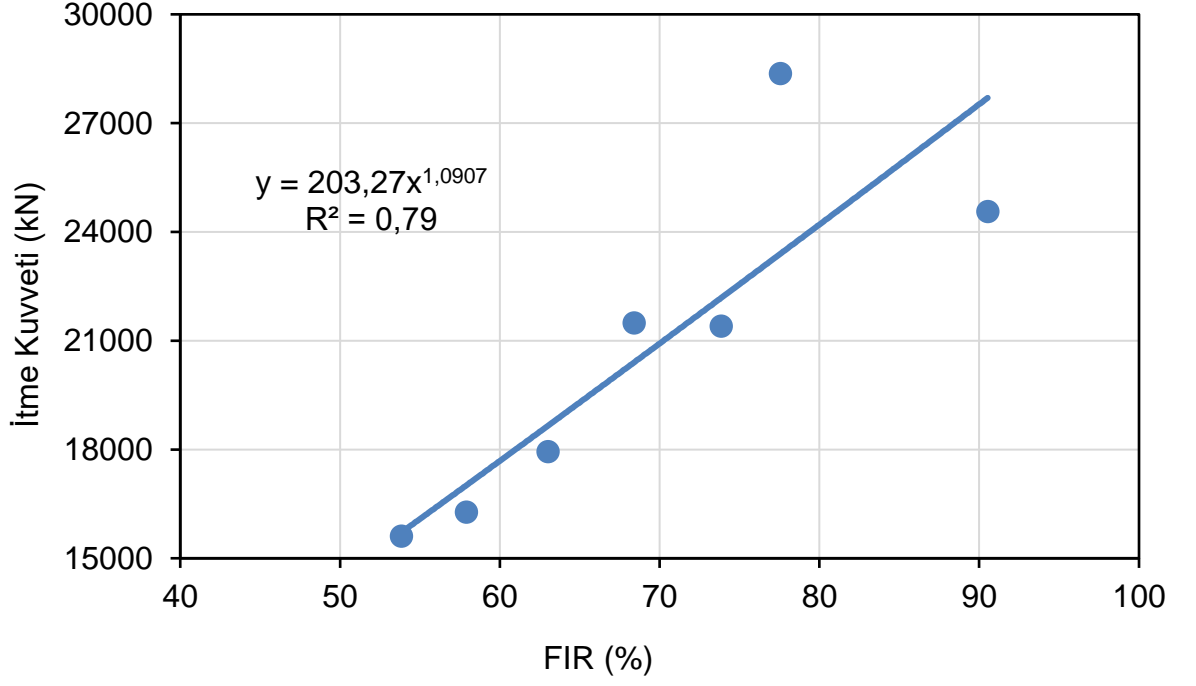
kumlu silt kazısı sık sık değişimli olmuştur. FIR değerlerinin deneylerde belirlenenden daha yüksek olmasının temel nedeni, sık sık karşılaşılan kumlu silt formasyondur ve uygulamada kullanılan C_F değerinin deneylerde belirlenenden daha düşük olmasıdır.

İlave çalışma olarak, veriler FIR değerlerine göre %5'lik gruplar olarak sınıflandırılmış (örneğin, %50-55, %55-60 arası FIR değerlerinden oluşan gruplar). Her grupta yer alan ring verileri kendi içinde ortalama değerleri hesaplanmıştır. Kesici kafa torku ile FIR ve FER arasında herhangi bir ilişki bulunamamıştır.

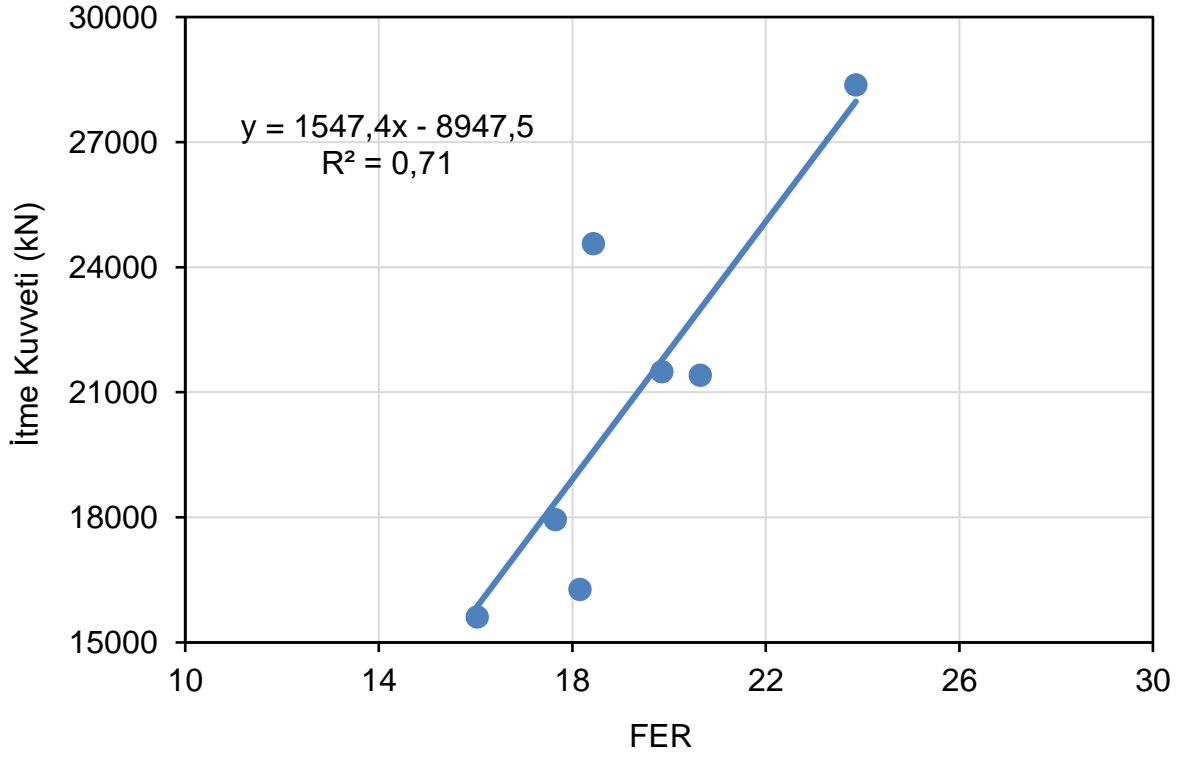
Şekil 6.11'de gruplandırılmış veri için EPB TBM itme kuvveti ile FIR arasındaki ilişki görülmektedir. Artan itme kuvveti ile FIR değerinin arttırıldığı görülmektedir. Şekil 6.12'de gruplandırılmış veri için EPB TBM itme kuvveti ile FER arasındaki ilişki görülmektedir. Artan itme kuvveti ile FER değerinin de arttırıldığı görülmektedir. FER değerleri 15 ile 25 arasındadır. Şekil 6.11 ve 6.12'den anlaşıldığı kadarıyla, artan kazı zorluğu karşısında aynaya verilen köpük miktarı arttırılmakta, ancak bir ekonomi sağlamak için köpük içindeki hava miktarı da arttırılmaktadır.



Şekil 6.10: FIR ile EPB TBM penetrasyonu arasındaki ilişki (Mahmutbey-Mecidiyeköy).

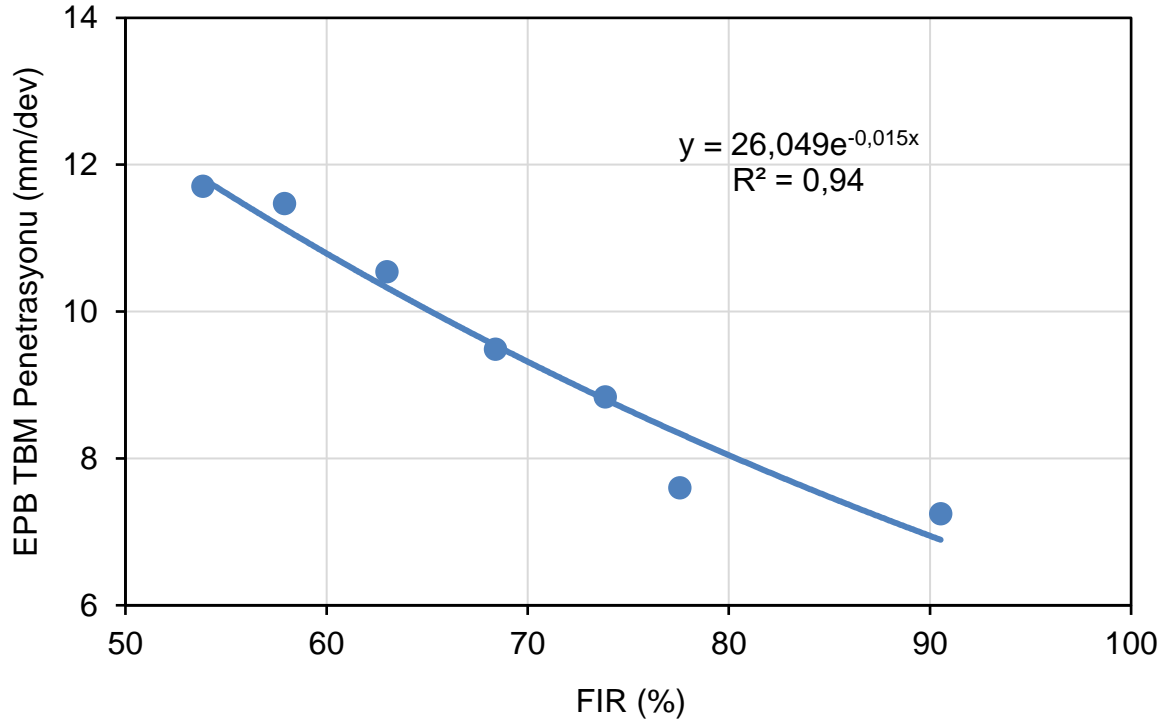


Şekil 6.11: FIR ile EPB TBM itme kuvveti arasındaki ilişki (gruplandırılmış veri) (Mahmutbey-Mecidiyeköy).

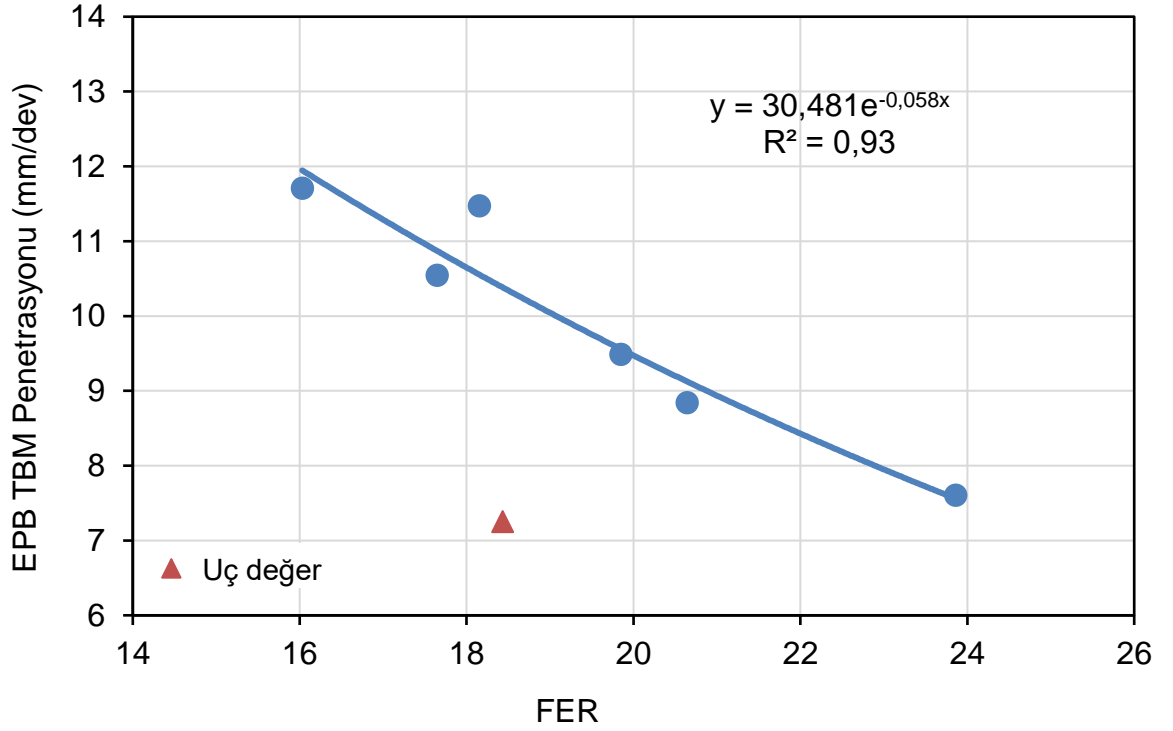


Şekil 6.12: FER ile EPB TBM itme kuvveti arasındaki ilişki (gruplandırılmış veri) (Mahmutbey-Mecidiyeköy).

Şekil 6.13’de gruplandırılmış veri için EPB TBM penetrasyonu ile FIR arasındaki ilişki görülmektedir. Azalan penetrasyon ile FIR değerinin arttırıldığı görülmektedir. Şekil 6.14’de EPB TBM penetrasyonu ile FER arasındaki ilişki görülmektedir. Artan penetrasyon ile FER değerinin azaltıldığı görülmektedir. Şekil 6.13 ve 6.14’den anlaşıldığı kadarıyla, artan kazı zorluğu karşısında aynaya verilen köpük miktarı arttırılmakta, ancak bir ekonomi sağlamak için köpük içindeki hava miktarı da arttırılmaktadır.



Şekil 6.13: EPB TBM penetrasyonu ile FIR arasındaki ilişki (gruplandırılmış veri) (Mahmutbey-Mecidiyeköy).



Şekil 6.14: EPB TBM penetrasyonu ile FER arasındaki ilişki (gruplandırılmış veri) (Mahmutbey-Mecidiyeköy).

6.4 İnce Taneli Zemin Karakteristik Özelliklerine Bağlı Olarak (Şartlandırmasız ve Basıncsız Ortamlar İçin) EPB TBM Performans Tahmin Modeli Çalışmaları

Şehir tünelciliği gibi ilk yatırım ve işletme maliyetleri yüksek ve riskli olan bir sektörde kullanılacak tünel açma makinelerinin performanslarının artırılıp kazı maliyetlerinin ve oluşabilecek risklerin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Şehir tünelciliğinde yoğunlukla kullanılan EPB TBM’lerde kazı performansının tahmin edilmesi projenin optimum zaman ve bütçede gerçekleştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. EPB TBM’lerde kazı performansı tahmini günümüzde giderek popülerleşen bir çalışma alanı olsa da bu konuda yapılan çalışmalar kısıtlı ölçüdedir. Yapılan literatür taraması, özellikle tamamen ayrışmış kaya ortamlar ve/veya zeminler için performans tahmin yöntem(ler)ine ihtiyaç duyulduğunu ve bu proje önerisinin konusu ile doğrudan ilgili olan literatürün yetersiz olduğunu göstermiştir. Bilgin ve diğ. (2012, 2014, 2016) ve Namli ve diğ. (2013), EPB TBM’lerin kırıklı çatlaklı kaya ortamlarda yarı-EPB (açık) modda çalışma durumunda net kazı hızı tahmini için bir çalışma yapmışlardır. EPB TBM’lerin zemin kazılarına yönelik

olarak tork ve itme kuvveti tahmini için Maidl ve Wingmann (1996), German Committee for Underground Construction (DAUB) (2005), Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (2007), Bilgin ve diğ. (2008), Bilgin ve Algan (2012), Bilgin ve diğ. (2014) birkaç ampirik model ve Song ve diğ. (2010) ve Shi ve diğ. (2011) teorik birer model geliştirmişlerdir. Maidl ve Wingmann (2009), EPB TBM'lerin makine kullanım oranlarının hesabı için görgül (ampirik) bir model önermişlerdir. Avunduk ve Copur (2018) ince taneli zeminlerde kullanılan EPB TBM'ler için zemin özellikleri ve performans parametreleri arasındaki ilişkiyi araştırıp, zemin indeks özelliklerini kullanarak performans tahmini için ampirik modeller geliştirmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların farklı kazı parametreleri arasındaki ilişkileri gösterdiği halde, zemin parametreleri ile EPB TBM performansı arasındaki bilimsel ilişkileri tanımlamak önemli bir konu olmaya devam etmektedir. Bu tez kapsamında bu bölümde, Ayvalı 2 Atıksu Tünelinin kazısında açık modda kullanılan EPB TBM'in performansı üzerindeki zemin parametrelerinin, ayna basıncı uygulanmadan ve neredeyse hiç zemin şartlandırma yapılmadan, kazı performansına etkilerini tanımlamayı ve ampirik performans tahmin modelleri geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Buna yönelik yapılan çalışmalar Avunduk ve Copur (2018) tarafından yayınlanmıştır.

Tez kapsamında Ayvalı 2 atıksu tüneline incelenen üç farklı litolojik birimin kazısında EPB TBM performansı özetlendikten sonra, tünel kazısından elde edilen 14 farklı ringe ait zemin numunesinin mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Zemin numuneleri üzerinde tane boyut dağılımı, doğal su içeriği, Atterberg limitleri, düşen koni penetrasyon ve vane shear kesme dayanımı testleri uygulanmış ve yapışma - tıkanma potansiyeli kıvam ve plastisite indekslerine göre tanımlanmıştır. Tek ve çok değişkenli regresyon yöntemleri kullanılarak görgül tahmin modelleri geliştirmek amacıyla zemin özelliklerini EPB TBM saha performansını (tork, itme kuvveti, anlık kazı hızı ve spesifik enerji) istatistiksel olarak ilişkilendirmek için laboratuvar ve saha araştırması sonuçları kullanılmıştır.

Tünel hattı, kazı sırasında gözlemlere göre (renk, kıvam ve vidalı konveyörden gelen malzeme türü) üç bölüme ayrılmıştır. EPB TBM'in 330 ve 536 nolu ringler arasındaki jeolojik koşulları ve saha performansı yerinde gözlemlenmiştir.

330 ve 360 numaralı ringler arasındaki bölüm çoğunlukla yüksek plastisiteli kumlu siltli killerden oluşmuştur; likit ve plastik limitleri sırasıyla % 51,0 ve % 23,5 olarak

ölçülmüş olup ince tane oranı % 62,3'dür. 360 ve 504 numaralı ringler arasındaki jeolojik birimler 330 ve 360 numaralı ringler arasındaki birimlerle oldukça benzer olduğu için bu bölümde herhangi bir laboratuvar deneyi yapılmamıştır. 504 ve 521 numaralı ringler arasındaki kısım kahve renkli siltli kumdan oluşmuş olup ince kum olarak sınıflandırılmıştır. 522 ve 536 numaralı ringler arasındaki bölüm koyu gri renkli düşük plastisiteli killerden oluşmuş olup likit ve plastik limitleri sırasıyla % 36,1 ve %13,3'tür. İnce tane oranı % 64,5 olup kum sınıfı ince daneli olarak sınıflandırılmıştır. Tünel hattı boyunca saha çalışması yapılan 3 farklı jeolojik bölümün bazı geoteknik özellikleri Çizelge 6.2'de özetlenmiştir.

Tünel kazısı boyunca geçilen 3 farklı zemin sınıfından, zemin parametrelerinin EPB TBM performansına etkilerinin araştırılması amacıyla 14 farklı zemin numunesi alınmıştır. Alınan zemin numuneleri üzerinde doğal nem içeriği, parça boyut dağılımı, kıvam limitleri, düşen konik penetrasyon ve vane kesme deneyleri yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 6.3 de özetlenmiştir.

Çizelge 6.2: İncelenen zeminlerin geoteknik özellikleri.

Ring No	Litoloji	Çakıl	Dağılım (%)				Kıvam limitleri				Zemin Sınıfı
			Kum			Silt+ Kil	W _n (%)	LL (%)	PL (%)	Ip (%)	
			İri	Orta	İnce						
330-360	Koyu gri renkli orta ve yüksek plastisiteli kumlu-siltli kil	0	0	2.25	35.45	62.3	30	50.95	23.48	27.44	CH
504-521	Kahverengi siltli kum	0	0	3.58	63.42	33.0	25	-	-	-	SM
522-536	Koyu gri renkli düşük plastisiteli kumlu kil	0	0	0.17	35.33	64.5	28	36.12	13.27	22.35	CL

W_n: Doğal su içeriği, LL: Likit limit, PL: Plastik limit, Ip: Plastisite indisi, CH: Yüksek plastisiteli kil, SM: Siltli kum, CL: Düşük plastisiteli kil

Kazı hattından alınan 14 farklı zemin numunesinin parça boyut dağılım grafiği Şekil 6.15'de verilmiştir, Şekil 6.15 ve Çizelge 6.3 incelendiğinde 14 numunenin 12 sinin kil olduğu ve killi numunelerinin de 9 tanesinin düşük plastisiteli 3 tanesinin de yüksek plastisiteli olduğu görülmüştür. Kalan 2 numune ise kum olarak sınıflandırılmıştır.

Killi numuneler üzerinde yapılan kıvam deneyleri sonrasında elde edilen likit limit ve plastisite indeksi değerleri plastisite grafiğine yerleştirilmiştir (Şekil 6.16). Şekil

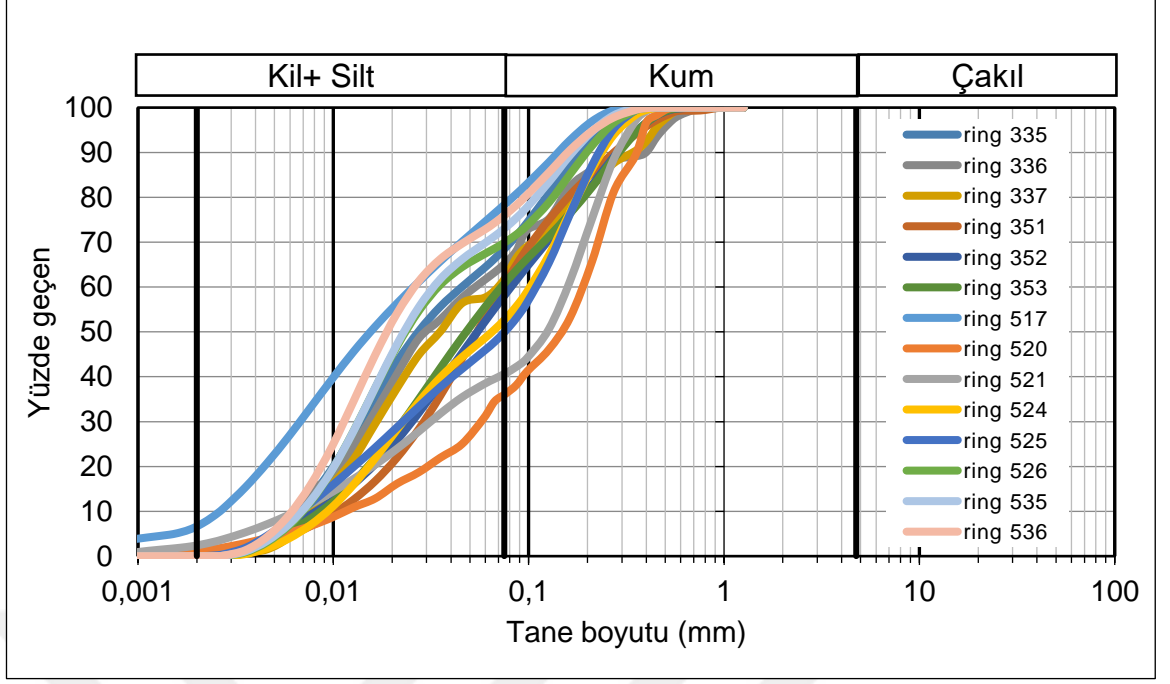
6.16 incelendiğinde killi numunelerin plastisite değerleri 18,6–30,8 arasında değişmektedir ve numuneler plastik olarak sınıflanmıştır. Numunelerin likit limit değerleri % 32,7 - %58 arasında değişmekte olup düşük, orta ve yüksek plastisite derecesine sahip olduğu gözlenmiştir.

İnce taneli zeminlerin kazısında EPB TBM'lerin performansını önemli ölçüde düşüren parametrelerin birisi de zeminlerin kesici kafa ve kazı odasında yapışıp topaklanarak tıkanma problemlerine yol açmasıdır. Tünel güzergâhından alınan numuneler Hollman ve Thewes (2013) tarafından geliştirilen yapışma – tıkanma grafiğine yerleştirilmiştir (Şekil 6.17). Şekil 6.17 incelendiğinde incelenen tünel güzergâhı boyunca kazılacak zeminlerin yapışma-tıkanma potansiyelinin düşük-orta seviyede olduğu görülmüş ve kazı performansını önemli ölçüde etkilemeyeceği sonucuna varılmıştır.

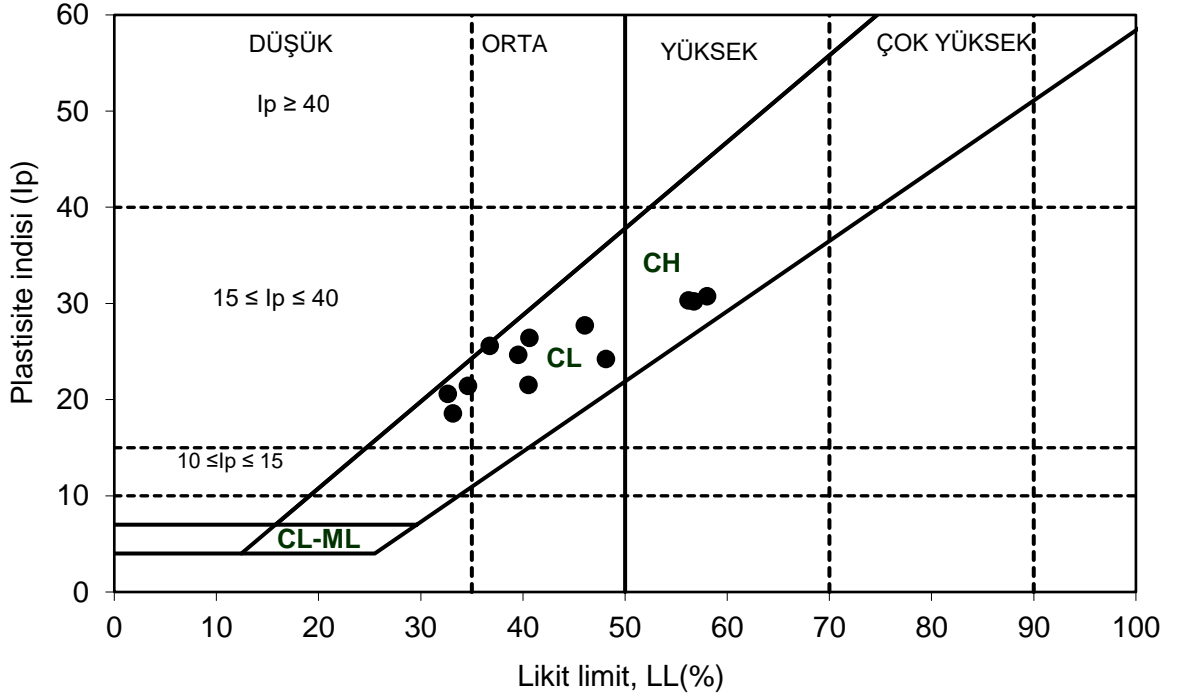
Çizelge 6.3: Zemin numunelerinin geoteknik özellikleri.

Ring No	Dağılım (%)			Kıvam limitleri				I _c	S _u (kPa)	FCPD (mm)	Zemin sınıfı
	Çakıl	Kum	Silt + Kil	LL (%)	PL (%)	Ip (%)	W _n (%)				
335	0	31	69	41	19	22	30	0,49	49,0	13,30	CL
336	0	35	65	46	18	28	30	0,58	98,0	13,69	CL
337	0	38	62	48	24	24	30	0,75	73,5	13,27	CL
351	0	39	61	56	26	30	30	0,86	98,0	14,04	CH
352	0	42	58	57	27	30	30	0,88	73,5	13,28	CH
353	0	39	61	58	27	31	30	0,91	73,5	14,78	CH
517	0	21	79	37	11	26	25	0,46	70,56	9,63	CL
520	0	68	32	-	-	-	25	-	-	-	SM
521	0	63	37	-	-	-	25	-	-	-	SM
524	0	57	53	33	15	19	28	0,28	57,82	12,09	CL
525	0	49	51	33	12	21	28	0,23	49,0	11,49	CL
526	0	30	70	35	13	21	28	0,31	53,9	10,70	CL
535	0	27	73	40	15	25	28	0,47	78,4	11,76	CL
536	0	24	76	41	14	26	28	0,48	49,0	12,36	CL

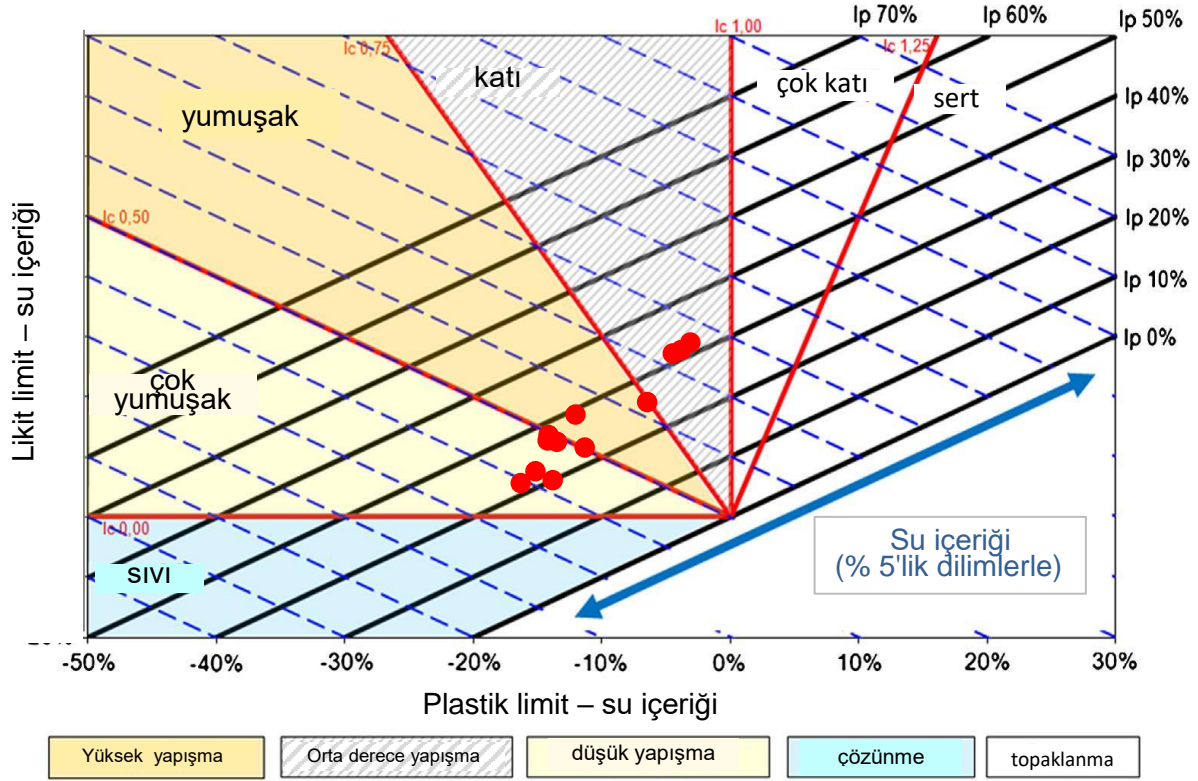
LL: Likit limit, PL: Plastik limit, Ip: Plastisite indisi, W_n: Doğal su içeriği, I_c: Kıvam indisi, S_u: Vane kesme dayanımı, FCPD: Düşen koni penetrasyon derinliği.



Şekil 6.15: Zemin numunelerinin parça boyut dağılım grafiği.



Şekil 6.16: Zemin numunelerinin plastisite grafiğindeki yerleri.



Şekil 6.17: Zemin numularının yapışma-tıkanma grafiğindeki yerleri.

6.4.1 EPB TBM performans analizi

Daha önceki bölümlerde detayları verilen Ayvalı 2 Tünel güzergâhında 330-560 numaralı ringler arasında TBM veri kayıt sistemi ve saha gözlemlerine dayanan kazı performans analizi yapılmıştır. Tünel güzergâhı boyunca geçilen 3 farklı zemin tipi için net kesici kafa tork, arazi spesifik enerji ve anlık net kazı hız değerleri Çizelge 6.4 'de özetlenmiştir.

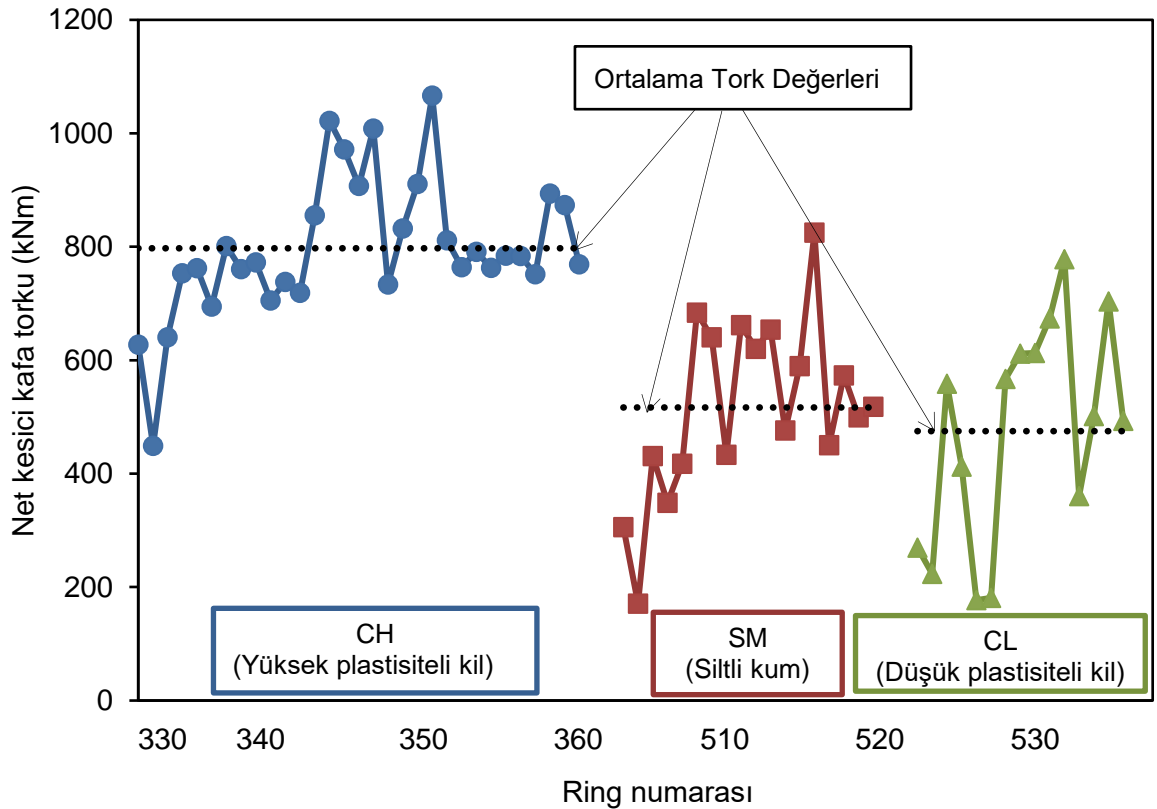
Çizelge 6.4: Farklı zemin sınıflarına göre EPB TBM performans parametreleri.

Zemin sınıfı	Ring no.	T (kNm)	FT (kN)	ICR (m ³ /h)	SE _f (MJ/m ³)
CH	330-360	797 ± 122	4539 ± 562	56 ± 10	12.50 ± 2.16
SM	504-521	517 ± 153	5705 ± 702	75 ± 7	6.12 ± 1.81
CL	522-536	475 ± 189	5750 ± 785	67 ± 11	6.47 ± 2.06

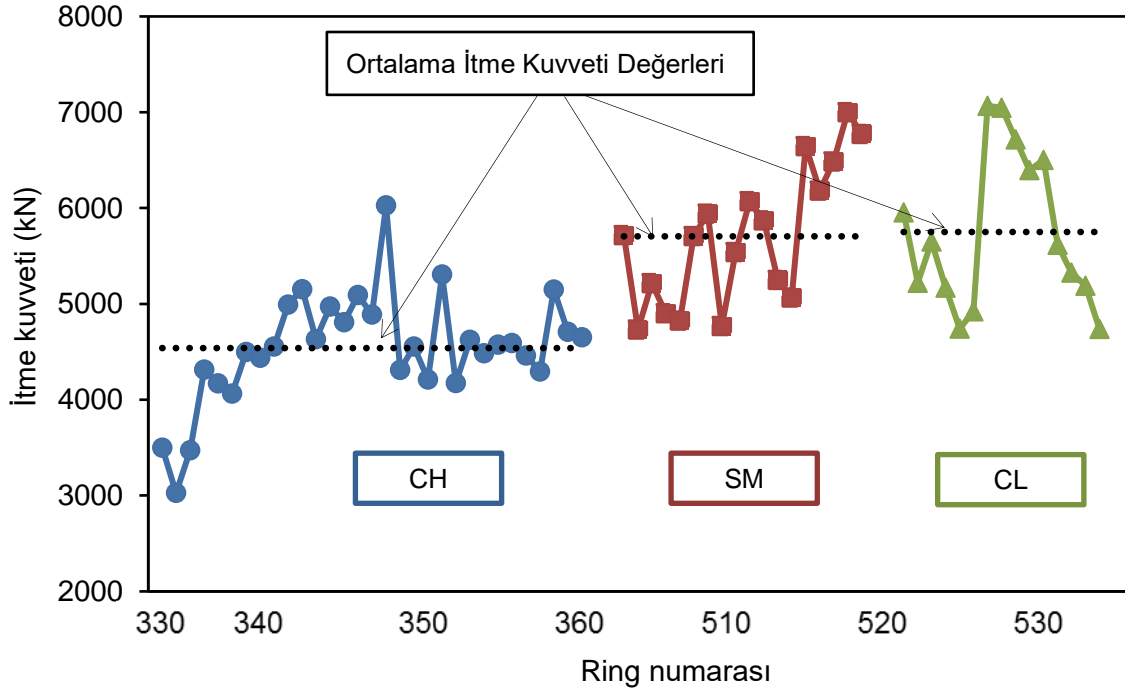
T: Net kesici kafa torku, FT: İtme kuvveti, ICR: Anlık kazı hızı, SE_f: Saha spesifik enerji

Tez kapsamında Ayvalı 2 tünel kazısı boyunca incelenen bölümde net kesici kafa tork değerlerinin 171- 1067 kNm arasında değiştiği ve CH, SM ve CL zemin sınıfları için sırasıyla 797, 516 ve 474 kNm olarak ölçülmüştür (Şekil 6.18). İncelenen kazı hattı boyunca TBM itme kuvvetleri 3027 – 7067 kN arasında değişmiş olup CH, SM ve CL zemin sınıfları için sırasıyla 4538, 5705, ve 5750 kN olarak ölçülmüştür (Şekil 6.19).

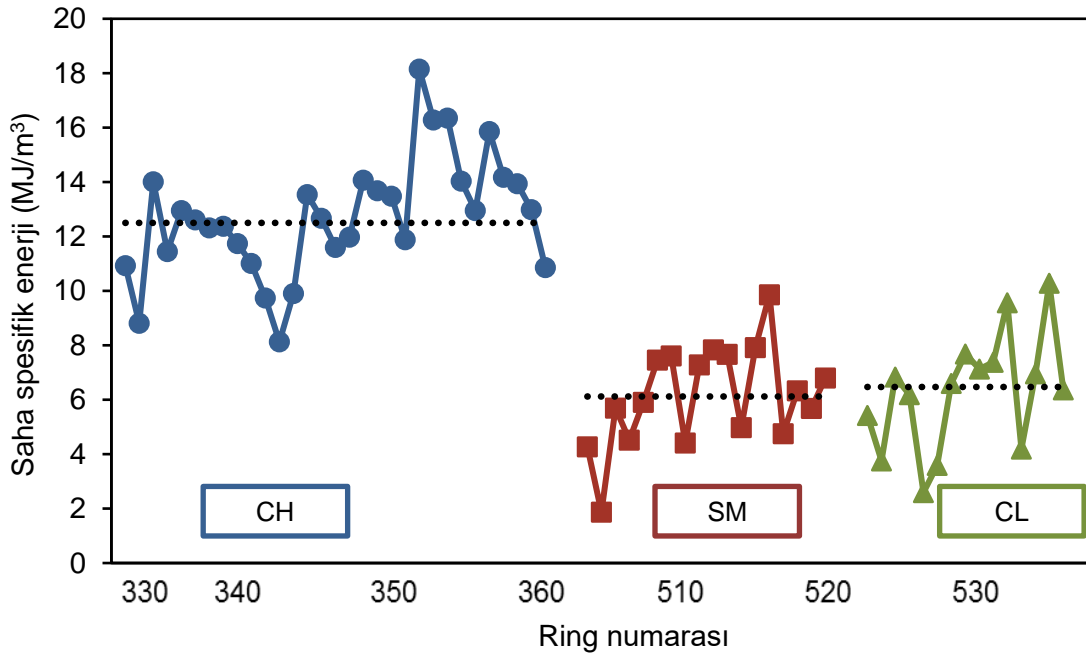
Tünel kazı hattı boyunca tez kapsamında incelenen bölümde saha spesifik enerji değerleri 1,87 -18,15 MJ/m³ aralığında değişmiş olup CH, SM ve CL zemin sınıfları için ortalama değerler sırasıyla 12,50, 6,12 ve 6,47 MJ/m³ olarak ölçülmüştür (Şekil 6.20). Ortalama anlık kazı hızları CH, SM ve CL için 53,6, 74,6 ve 66,7 m³/s olarak ölçülmüş olup en yüksek anlık kazı hızı siltli kum zeminlerde ve en düşük anlık kazı hızı ise yüksek plastisiteli killerin kazısı sırasında ölçülmüştür (Şekil 6.21).



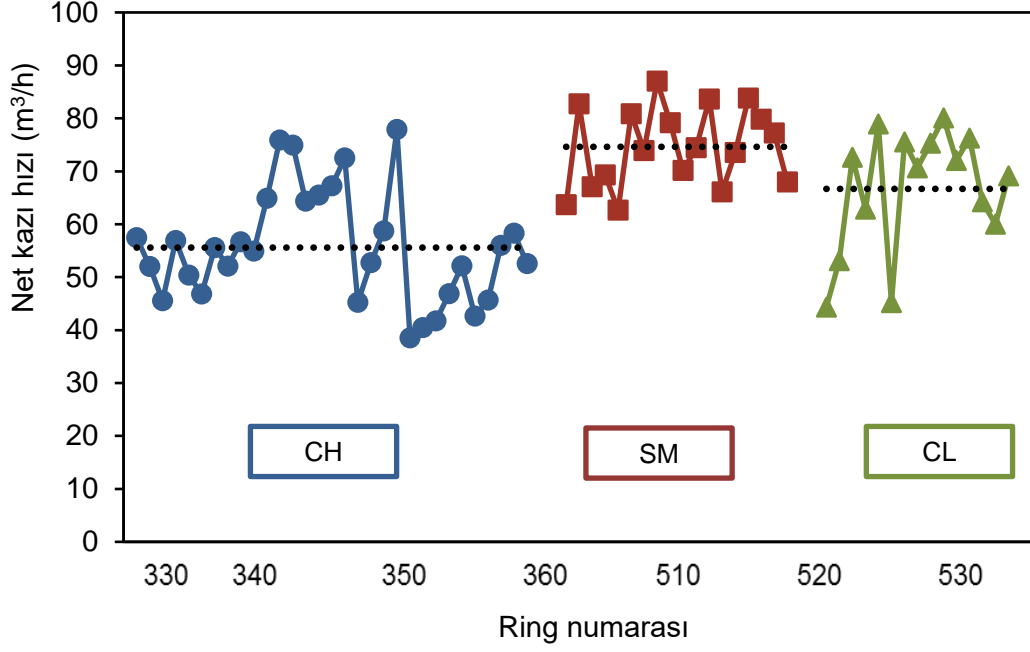
Şekil 6.18: Zemin sınıflarına göre kesici kafa tork dağılımı.



Şekil 6.19: Zemin sınıflarına göre itme kuvveti dağılımı.



Şekil 6.20: Zemin sınıflarına göre spesifik enerji dağılımı.



Şekil 6.21: Zemin sınıflarına göre anlık net kazı hızı dağılımı.

6.4.2 İstatiksel modelleme

EPB TBM performans parametreleriyle zemin karakteristik özellikleri arasında ilişki kurmak amacıyla tez kapsamında istatistiksel analiz yöntemleri kullanılmıştır.

Laboratuvar ve saha araştırmalarından elde edilen sonuçlar, zemin karakteristiği (ince tane oranı, plastik- likit limit, plastisite – kıvam indeksi, vane kesme dayanımı ve düşen konik penetrasyon değeri) ve EPB TBM performans parametreleri (net kesici kafa torku, itme gücü, net kazı hızı ve spesifik enerji) arasında istatistiksel ilişkiler kurmak amacıyla kullanılmıştır.

Yapılan modellemede öncelikle tek değişkenli basit regresyon analizi yapılmış daha sonra Minitab 17 programı kullanılarak çoklu doğrusal bağıntı dikkate alınarak çok değişkenli regresyon analizi yapılmıştır.

Basit regresyon analizi sonucu zemin karakteristik özellikleri ve EPB TBM performans parametreleri arasında bulunan ilişkiler Eşitlik 6.1-6.4 ve Şekil 6.22-6.25’de verilmiştir.

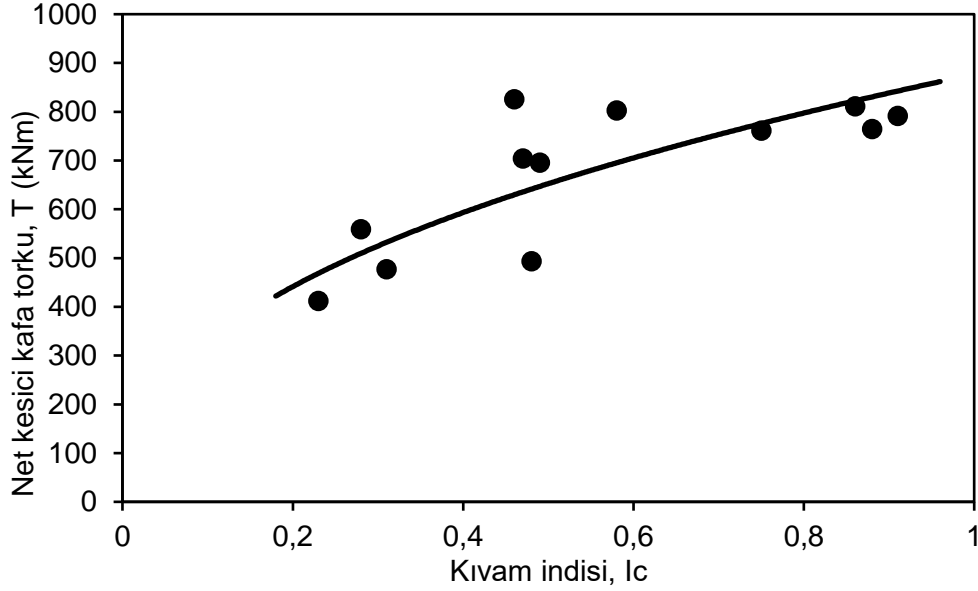
$$T = 877 I_c^{0.43} \quad (R^2 = 0.65) \quad (6.1)$$

$$FT = -5629 \ln(\text{FCPD}) + 19121 \quad (R^2 = 0.80) \quad (6.2)$$

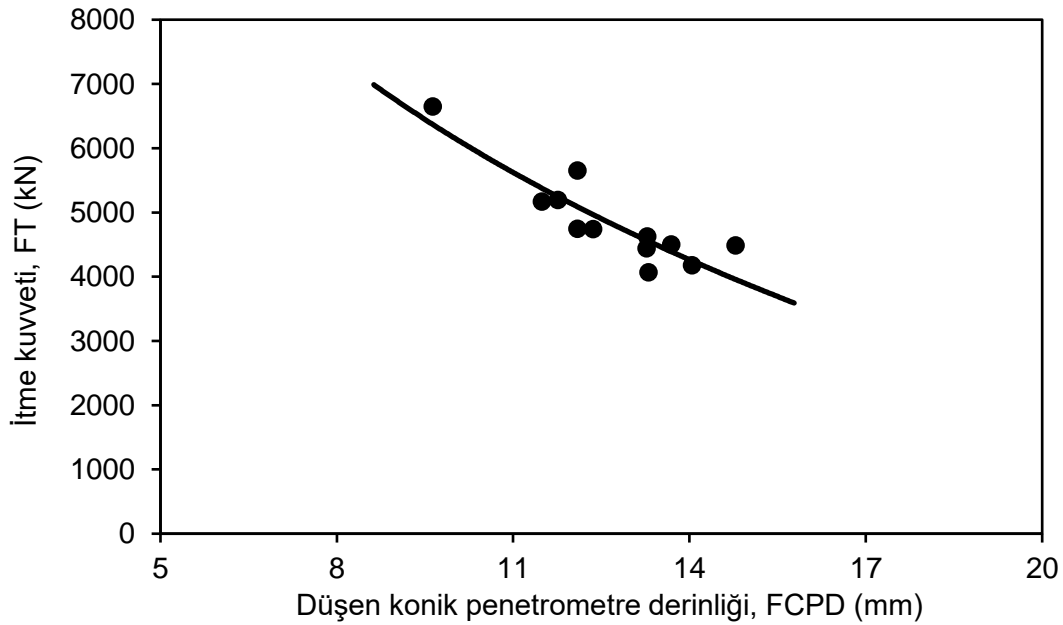
$$\text{ICR} = 112.62 e^{-0.038 PL} \quad (R^2 = 0.84) \quad (6.3)$$

$$SE_f = 0.462 LL - 9.35 \quad (R^2 = 0.80), \quad (6.4)$$

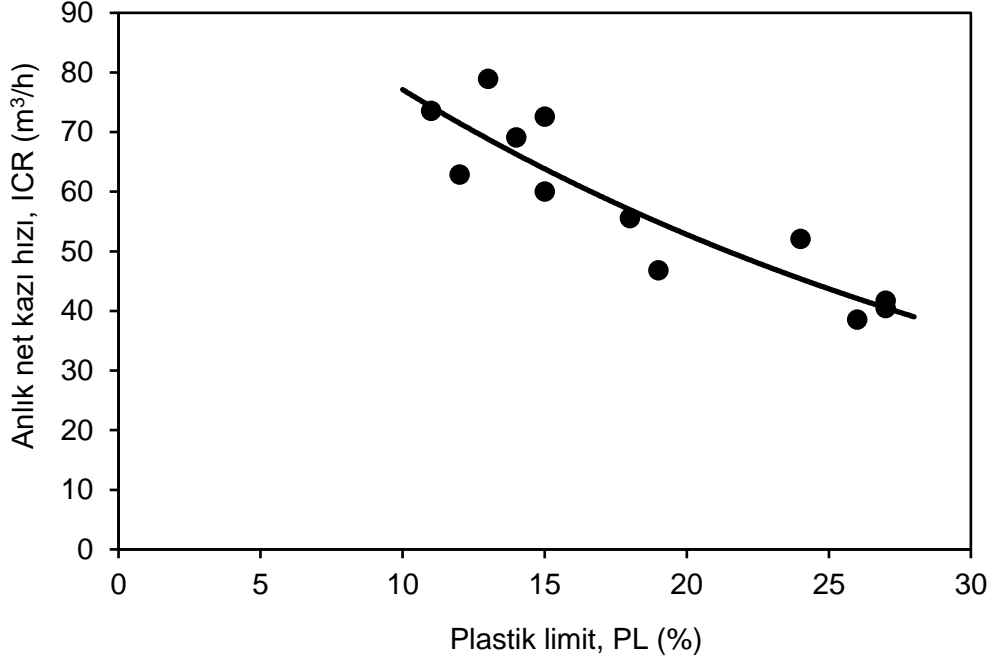
Burada, T net kesici kafa torku (kNm); FT TBM itme kuvveti (kN); ICR net kazı hızı (m³/h); SE_f arazi spesifik enerji (MJ/m³); FCPD düşen koni penetrasyon derinliği (mm); PL plastik limit (%); LL likit limit (%); I_c kıvam indisi; ve R² determinasyon katsayısıdır.



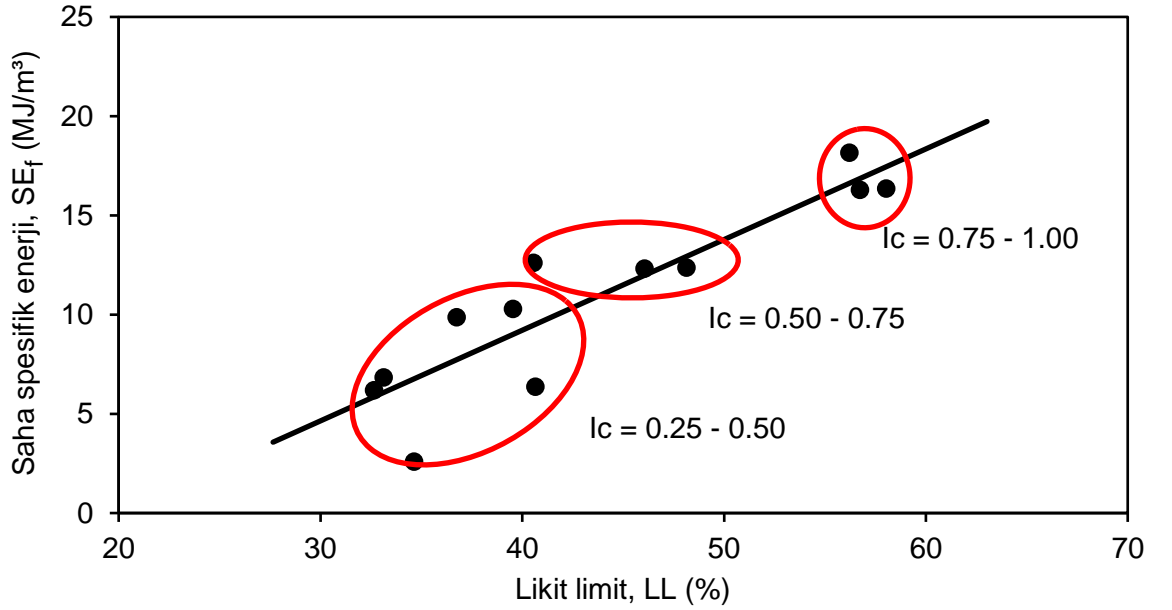
Şekil 6.22: Net kesici kafa torku ve kıvam indisi arasındaki ilişki.



Şekil 6.23: İtme kuvveti ve düşen konik penetrometre derinliği arasındaki ilişki.



Şekil 6.24: Anlık net kazı hızı ve plastik limit arasındaki ilişki.



Şekil 6.25: Saha spesifik enerji ve likit limit arasındaki ilişki.

Tez kapsamında incelenen sahada EPB TBM performans parametrelerini tahmin etmek amacıyla Minitab 17 programı kullanılarak % 90 güven aralığında doğrusal çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Zemin karakteristik özellikleriyle EPB TBM performans parametreleri arasında bulunan ilişkiler Eşitlik 6.5-6.7 'de verilmiştir.

$$T = 4.28 S_u + 270 I_c + 230 \quad (R^2 = 0.72) \quad (6.5)$$

$$ICR = 123 - 3.67 FCPD - 34.5 I_c \quad (R^2 = 0.78) \quad (6.6)$$

$$SE_f = 0.48 PL + 0.45 I_p - 9.31 \quad (R^2 = 0.83), \quad (6.7)$$

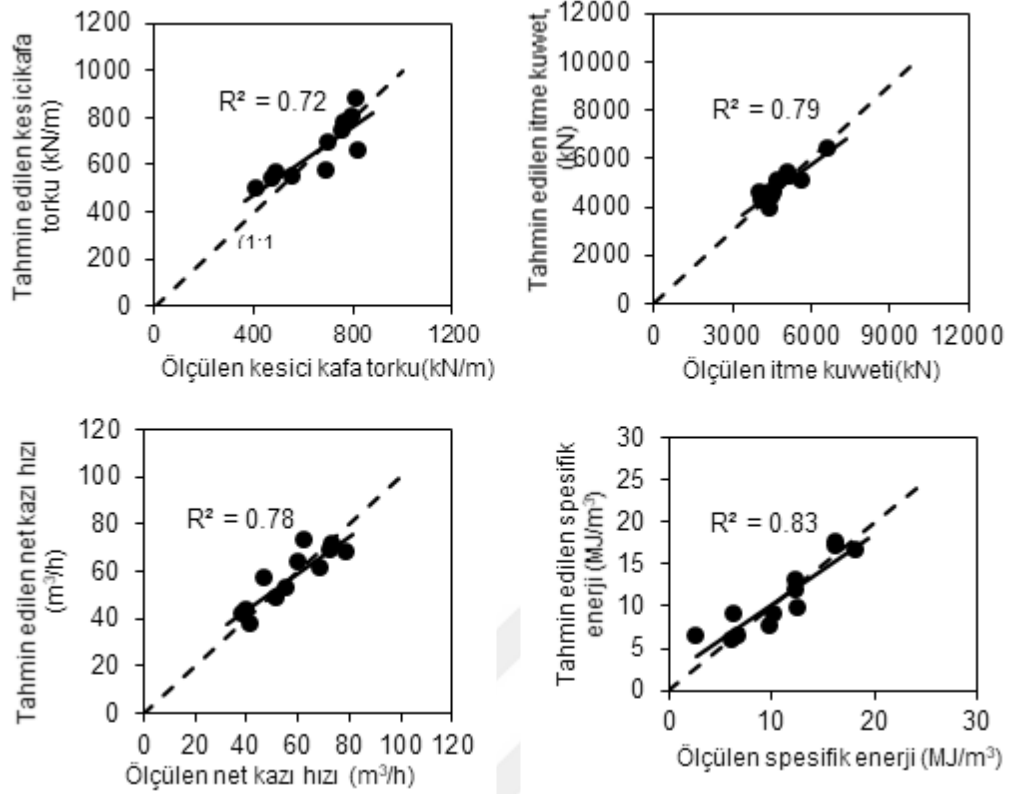
Regresyon analizleri sonuçlarına göre ölçülen ve tahmin edilen EPB TBM performans parametrelerini karşılaştırmak amacıyla en uygun modeller (net kesici kafa torku için Eşitlik 6.5, TBM itme kuvveti için Eşitlik 5, net kazı hızı için Eşitlik 6.3 ve saha spesifik enerji için Eşitlik 6.7) kullanılmış ve sonuçlar Çizelge 6.5’de verilmiştir. Ölçülen ve tahmin edilen performans parametreleri Şekil 6.26’da 1:1 ölçek üzerinde doğrusal çizgiyle gösterilmiş ve R^2 katsayıları verilmiştir.

Çizelge 6.5: Ölçülen ve tahmin edilen performans parametreleri.

Ring no.	Net kesici kafa torku (kNm)		TBM itme kuvveti (kN)		Net kazı hızı (m ³ /h)		Saha – spesifik enerji (MJ/m ³)	
	T _f	T _E (Eş. 6.5)	FT _f	FT _E (Eş. 6.2)	ICR _f	ICR _E (Eş. 6.6)	SE _f	SE _{fE} (Eş. 6.7)
335	695	572	4065	4554	46.83	57.28	12.62	9.71
336	802	806	4499	4392	55.56	52.75	12.32	11.93
337	761	747	4439	4567	52.07	48.42	12.37	13.01
351	811	882	4176	4250	38.56	41.80	18.15	16.67
352	764	782	4624	4563	40.47	43.90	16.28	17.15
353	791	790	4484	3961	41.71	37.36	16.36	17.60
517	825	656	6645	6372	73.57	71.79	9.86	7.67
524	499	553	5651	5091	72.61	68.97	6.84	6.44
525	518	502	5169	5378	62.85	72.90	6.19	5.90
526	559	544	4743	5091	78.90	67.93	2.59	6.38
535	412	692	5191	5247	60.02	63.63	10.28	9.14
536	477	569	4738	4967	69.11	61.08	6.37	9.11

T_f, FT_f, ICR_f, SE_f = Ölçülen net kesici kafa tork, TBM itme kuvveti, net kazı hızı ve saha spesifik enerji değerleri.

T_E, FT_E, ICR_E, SE_{fE} = Tahmin edilen net kesici kafa tork, TBM itme kuvveti, net kazı hızı ve saha spesifik enerji değerleri.



Şekil 6.26: Tahmin edilen ve ölçülen performans parametreleri.

Zemin parametreleri kullanılarak geliştirilen basit görgül modeller tünel projesinin planlanmasında ve kazılacak zemin tipine göre EPB TBM özelliklerinin belirlenmesinde proje mühendislerine yardımcı olacaktır. Bu çalışma, şartlandırmada önemli olduğu düşünülen basit zemin karakterizasyon deneyleri kullanılarak EPB TBM performans tahmini yapılabileceğini kanıtlamıştır. Çalışmada önerilen modeller ince taneli zeminlerin kazısında ayna basıncı ve zemin şartlandırmanın yapılmadığı koşullarda geçerlidir. Tez kapsamında geliştirilen modellerin doğruluğunun artırılması amacıyla farklı zemin türlerinde çalışan EPB TBM'ler için ilave saha performans analizi ve laboratuvar deneylerine ihtiyaç vardır.



7. SONUÇLAR

Doktora tezi kapsamında İstanbul'da inşaatı yapılan 3 farklı tünel sahası ziyaret edilerek geçilecek formasyonların jeolojik özellikleri, kullanılan EPB TBM özellikleri ile bilgiler edinilmiştir. Tez kapsamında incelenen formasyonlardan örnekler alınmış, TBM performans verileri toplanıp kazı sırasında gözlemler ve bazı deneyler yapılmıştır. Tünel sahalarından alınan numunelerde ve indeks numunelerde (kaolen ve standart kum) parça boyut dağılımı, özgül ağırlık ve Atterberg kıvam limitleri belirlenmiştir. Zemin şartlandırma deneylerinde kullanılacak köpük kimyasallarının (sürfaktan ve antikal) özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar tipi köpük jeneratöründe farklı özelliklerde üretilen köpükler üzerinde köpük yoğunluğu, yarı ömür ve köpük kabarcık boyut analizi yapılmıştır. Zemin numuneleri ile köpüğün etkileşiminin belirlenmesi amacıyla laboratuvar tipi köpük jeneratöründe üretilen köpük ile zemin numuneleri karıştırılmış ve klasik şartlandırma deneyleri (slump, yayılma tablası, konik penetrometre, güç ölçümlü mikser-yapışma deneyleri) ve vane shear kesme dayanımı cihazı ile deneyler yapılarak farklı zeminler için optimum köpük tasarımları belirlenmiştir. Proje kapsamında dünyada ilk olma özelliği bulunan "Mini EPBM" deney cihazı geliştirilmiş, ancak cihazda bazı iyileştirmeler gerektiğinden deneyler henüz yapılamamıştır. Yine bu tez çalışması kapsamında numune gereksinimini oldukça düşüren bir "Mini Slump" deney aleti geliştirilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda elde edilen bulgular ile çeşitli köpük tasarımlarının ve formasyon özelliklerinin değişik EPB TBM'lerin performanslarına olan etkileri incelenmiş, en önemli parametreler belirlenmiş ve görgül (ampirik) performans tahmin modelleri geliştirilmiştir.

Tez kapsamında ince taneli zeminlerde kullanılan EPB TBM'lerin kazı performanslarını tahmin amacıyla Zeytinburnu Ayvalı 2 tüneline çalışmalar yapılmıştır. Tünel güzergâhı boyunca geçilen 3 farklı formasyondan numuneler alınmış kazı boyunca gözlemler yapılmıştır. Alınan zemin numuneleri üzerinde doğal nem içeriği, lazer kırınım yöntemiyle parça boyut analizi, Atterberg kıvam limitleri, konik penetrasyon ve vane shear kesme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Geçilen 3 farklı jeolojik formasyonda TBM performans analizi yapılmış zemin özelliklerinin

kazı performansına etkileri araştırılmıştır. EPB TBM performans tahmin modelleri geliştirmek amacıyla zemin özellikleri kazı performans parametreleriyle basit ve çoklu regresyon analizleri yapılarak ilişkilendirilmiş ve güvenilir istatistiksel kazı performans modelleri geliştirilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Aynada veya kazılmış olan köpüklü pasadan numuneler alınarak tünel içinde cep penetrometresi, cep tipi vane shear kesme dayanımı ve slump cihazları / aletleri ile deneyler yapılmıştır. Bu cihazlar ile sahada yapılan deneylerin çok verimli ve güvenilir olmadığı görülmüştür. Bunun başlıca nedeni kazı aynalarının homojen olmaması ve çakıl içermesidir ve/veya köpük ile karışmış olan numunelerin nakliye esnasında helezon konveyörden bant üzerine ve oradan vagona aktarıldığında homojenliğini yitirmesi ve akıcı ya da yapışkan olmasıdır.
- Bu nedenle bu cihazlardan cep penetrometresi ve cep tipi vane shear cihazlarının laboratuvar deneylerinde kullanılmasına karar verilmiştir. Bu cihazların laboratuvarda yapılan zemin şartlandırma deneylerinde kullanılmasına literatürde rastlanmamıştır. Ancak, cep tipi penetrometre laboratuvarda verimli olmamıştır, numune içine gömüldüğünden ölçüm yapılamamıştır. Cep tipi shear vane kesme dayanımı ölçümleri başarıyla yapılmıştır ve klasik köpük optimizasyonu ile ilişkisi ortaya konulmuştur.
- Değişik üreticilere ait köpüklerin yoğunlukları arasında önemli bir fark bulunmamıştır. Artan FER değeri köpük yoğunluğunu düşürmekte olup artan Cf değerinin köpük yoğunluğuna etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.
- Değişik üreticilere ait köpüklerin kabarcık boyutları arasında önemli bir fark bulunmamaktadır, fakat SLF 30 kullanılarak hazırlanan köpüklerin ve FER 8,5 değerindeki köpüklerin kabarcık boyutlarının daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak FER değeri arttıkça köpük kabarcık boyutunun da arttığı gözlemlenmiştir. Küçük boyutlu kabarcık içeren köpüklerin (yoğunluğu ve yarı ömrü daha fazla) zeminlerle karıştırıldığında genel olarak daha iyi kıvam sağladığı görülmüştür.

- Değişik üreticilere ait köpüklerin yarı ömürlerinin farklı olduğu ölçülmüştür. Genel olarak köpük yarı ömrünün artan FER değeri ile arttığı, artan Cf değeri ile ise düştüğü gözlenmiştir.
- Köpük optimizasyonu için Efnarc'ın önerdiği ve literatürde yer alan değişik yöntemler (slump, yayılma tablası, konik penetrometre, güç ölçümlü mikser ve yapışkanlık deneyleri) ile literatürde rastlanmayan cep tipi vane shear kesme dayanım deneyi hep birlikte veya numune cinsine göre bir kaç bir arada değerlendirmeye alınmıştır. Bu deneylerde öncelikle sadece su ile şartlandırma yapılmış, sonrasında zemin + köpük karışımı ile yapılmıştır. Böyle bir “çoklu” deney sistemi ile köpük optimizasyonuna literatürde rastlanmamıştır. Bu projede yapılan çalışmalar, literatürde görülen tekli deney sistemi ile yapılan optimizasyonlarda yanılma payının olduğunu da göstermiştir.
- Zeytinburnu Ayvalı 2 Atıksu Tüneli için optimum şartlandırma parametreleri: Kumlu kil-silt numuneye doğal su içeriğine (%33) %12 daha su ilave edilip (%45 toplam su içeriği), FER 16, CF %3 ve FIR %250 olarak ACP 143 ile optimize edildiğinde herhangi bir yapışma problemi kalmayacağı ve EPB TBM'in güç (ve tork) tüketiminin minimum olacağı, net kazı hızının maksimum olacağı, nakliyede sorun olmayacağı deneysel olarak kestirilmiştir.
- Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli için optimum köpük şartlandırma parametreleri: Siltli kum numune doğal su içeriğinde (%17) olmak üzere, CF %3, FER 16 ve FIR %20 değerlerinde SLF 30 ile optimize edilmiştir.
- Tuzla Akfırat Atıksu Tüneli'nde karşılaşılan killi siltli çakıllı kum numunenin EPB TBM ile kazısında numunenin doğal su içeriğine (%12,5) %12,5 daha su ilave edilip (%25 toplam su içeriği), FER 8,5, CF %3 ve FIR %120 olarak ACP 143 polimerli köpük (antikil) ile optimize edilmiştir.
- Yapılan deneysel çalışmalarda, konik penetrometre değeri, slump çökme değeri, sarsmalı yayılma tablası değeri, cep tipi vane shear kesme dayanımı ve mikser bıçağına yapışma değerlerinin zeminin su içeriği ile doğrusal ilişkisi olduğu, aynı doğrusal ilişkilerin FIR için de geçerli olduğu ortaya konulmuştur.

- Yayılma tablası ile standart slump çökme değerleri arasında doğrusal ilişki bulunmuştur. Böylece, daha çok miktarda zemin numunesi gerektiren ve daha uzun süre alan standart slump deneyi yerine yayılma tablası deneyinin kullanılabilmesi ortaya konulmuştur. Ancak, yayılma tablası deneyinin bazen diğer deneylere göre farklı sonuçlar verdiği de unutulmamalıdır.
- Tez kapsamında nuune gereksinimini azaltmak üzere geliştirilen “mini slump” deney aletinden elde edilen slump (çökme) değerleri ile sarsmalı yayılma tablası deney sonuçları arasında çok güçlü ilişki bulunmuştur. Mini slump deney aleti, standart slump deney aletinin ½ oranında küçültülmüştür. Ancak, numune ihtiyacını yaklaşık %90 azaltmaktadır. İri parçalı kırıntı veya çakıl içeren numunelerde sonuç vermeyip sadece homojen ince taneli kil-silt-kum zeminlerde sonuç vermektedir; laboratuvar ve/veya sahada kullanılabilir.
- Yüksek plastisiteli killerin kazısında ölçülen net kesici kafa tork değeri düşük plastisiteli killere oranla 2 kat fazladır. Siltli kumlar ve düşük plastisiteli killerin kazısında ölçülen ortalama itme kuvvetleri neredeyse aynı olup yüksek plastisiteli killerin kazısında ölçülen değerlerden yüksektir. En yüksek anlık net kazı hızı siltli kumların kazısı sırasında ölçülmüş en düşük hız ise yüksek plastisiteli killerin kazısı sırasında ölçülmüştür. Arazi spesifik enerji değeri yüksek plastisiteli killerin kazısı sırasında siltli kum ve düşük plastisiteli killere oranla 2 kat fazla olarak ölçülmüştür.
- İnce taneli zemin karakteristik özelliklerine bağlı olarak (şartlandırmasız ve basınçsız ortamlar için) EPB TBM performans tahmin modeli çalışmaları kapsamında geliştirilen görgül performans tahmin modelleri, kesici kafa tork değerinin artan vane shear kesme dayanımı ve kıvam indisiyle arttığını göstermiştir. İtme kuvveti ise artan konik penetrasyon derinliği ile azalma göstermiştir. Net kazı hızı artan konik penetrasyon derinliği, kıvam indisi ve plastik limit ile azalmıştır. Arazi spesifik enerji değerleri artan plastik limit, plastisite indisi ve likit limit değerlerine bağlı olarak artmıştır. Arazi spesifik enerji değerleri artan kıvam indisi ile artmıştır; katı kıvamdaki zeminler için 16,93 MJ/m³, orta katı kıvamdakiler için 12,44 MJ/m³ ve yumuşak kıvamdaki zeminler için 7.02 MJ/m³ olarak ölçülmüştür.

Bu kapsamda gelecekte yapılması önerilen araştırmalar: Basınç altında köpük optimizasyonu ve EPB TBM performans optimizasyonu araştırmaları, köpük kabarcık boyutlarının değişim özelliklerinin değişik kimyasallar ile görsel analiz yöntemleri kullanılarak araştırılması, zemin ve şartlandırma koşullarının metal ile sürtünme katsayılarını nasıl etkilediği ve metal aksamda ve keskinlerde aşınmalar konularında araştırmalar öncelikli olarak yapılmalıdır.

Zemin karakteristik özellikleri ile TBM performans parametreleri arasındaki ilişkiyi derinlemesine araştırmak amacıyla farklı zemin türleri ve farklı EPB TBM'ler için performans analiz ve tahmin modelleme çalışmalarına devam edilmelidir.



KAYNAKLAR

- Akyüz, S., Çopur, H. (2015) *Tuzla Atıksu Havzası (Ömerli Barajı) Kollektör ve Şebekeleri Yapımında Karşılaşılan Kaya ve Zemin Problemlerin Araştırılması*. Nas-Akad İnşaat İş Ortaklığı'na Sunulan Yayınlanmamış Rapor
- American Society for Testing and Materials (ASTM)**. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils* (ASTM D422).
- American Society for Testing and Materials (ASTM)**. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils* (ASTM D 4318).
- American Society for Testing and Materials (ASTM)**. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass* (ASTM D 2216-10).
- American Society for Testing and Materials (ASTM)**. *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer* (ASTM D 854-14).
- American Society for Testing and Materials (ASTM)**. *Standard test method for field vane shear test in saturated fine-grained soils*. (ASTM D2573).
- Ates, U., Bilgin, N., Copur, H. (2014). Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects, *Tunneling and Underground Space Technology* 40, 46-63.
- Avunduk, E., Copur, H., Tolouei, S., Gumus, U., Altay, U. (2017) Effect of adhesion on EPB TBM performance. *In: World Tunnel Congress, Bergen-Norway, 9-15 June, 6 pages*.
- Avunduk, E., Copur, H. (2018). Empirical Modeling for Predicting Excavation Performance of an EPB TBM based on Soil Properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71:340-353.
- Avunduk, E., Tumac, D., Tolouei, S., Copur, H., Balci, C., Bilgin, N. (2017). Effect of conditioning on soil workability determined by mini-slump and flow table tests. *World Tunnel Congress, Bergen-Norway, 9-15 June, 10 p*.
- Babendererde, L.H. (1998). Developments in polymer application for soil conditioning in EPB-TBMs. *Tunnels and Metropolises*,(pp:691-695), Negro Jr. and Ferreira (eds.), Balkema, Rotterdam.
- Ball, R.P.A., Young, D.J., Isaacson, J., Champa, J., Gause C. (2009). Research in soil conditioning for EPB tunnelling through difficult soils, *RETC*, (pp:320–333).

- Bezuijen, A., Schaminee, P.E.L., Kleinjan, J.A.** (1999). Additive testing for EPB shields. *12th conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (pp:1991-1996)*, Amsterdam.
- Bezuijen A., Schaminée P.E.L.** (2001). Simulation of the EPB-Shield TBM in model tests with foam as additive. *In: Proceedings of Congress on Modern tunnelling science and technology*, (pp:935-940), Kyoto, Balkema, Rotterdam.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Akgul, M., Yuksel, A.** (2008). The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in Istanbul Kozyatagi-Kadikoy Metro Tunnels. *In: World Tunnel Congress – Underground Facilities for Better Environment and Safety*, (pp:1509-1517), V.K. Kanjlia, T. Ramamurthy, P.P. Wahi, and A.C. Gupta (eds), Sept. 22-24, Agra-India.
- Bilgin, N., Algan, M.** (2012). The performance of a TBM in a squeezing ground at Uluabat Turkey, *Tunneling and Underground Space Technology* 32, 58-65.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C.** (2012). Effect of replacing disc cutters with chisel tools on performance of a TBM in difficult ground conditions, *Tunneling and Underground Space Technology* 27, 41-51.
- Bilgin, N., Balci, C., Copur, H., Namli, M.** (2013). Future tunnelling projects in Istanbul and some considerations for using mechanized tunnelling based on previous experiences. *In: World Tunnel Congress, G. Anagnostou and H. Ehrbar (eds)*, (pp. 2094-99), May 30-June 6, Switzerland-Geneva.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C.** (2014). *Mechanical excavation in mining and civil industries*, CRC Press.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C.** (2016). TBM excavation in difficult ground conditions case studies from Turkey, Ernst&Sohn Press.
- Bordachar, F., Nicolas, L.** (1998). Fluides conditionneurs pour la pression de terre, *Tunnels et ouvrages souterrains*, 169 (Janvier/Fe ´vrier), AFTES: 21–27 (in French).
- British Standards.** (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes*, (BS 1377).
- Budach, C., Thewes, M.** (2015). Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory. *Tunnelling and Underground Space Technology* 50, 296-304.
- Cinar, M., Kahya, S., Avunduk, E., Tolouei, S., Gedikli, A., Copur, H.** (2016). EPB TBM performance in Ayvali Waste Water Tunnel through marl, clay, sand and shallow overburden. *In: The 2nd International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds*, (pp.201-215). Istanbul, Turkish Tunnelling Society, 16-18 November.
- Copur, H., Tuncdemir, H., Bilgin, N., Dincer, T.** (2001). Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines. *IMM Trans. Section-A Mining Tech*, 110, A149-157.

- Copur, H., Aydın, H., Bilgin, N., Balci, C., Tumac, D., Dayanc, C.** (2014). Predicting performance of EPB TBMs by using a stochastic model implemented into a deterministic model. *Tunnelling and Underground Space Technology* 42, 1–14.
- Copur, H., Aksu, F., Levent, K.Y., Cinar, M.** (2013). Studies by a mobile laboratory on soil conditioning for EPB tunneling. *In: World Tunnel Congress, Geneva: 1344-1451.*
- Çopur, H., Bilgin, N., Balcı, C., Tumaç, D., Avunduk, E.** (2017). Pasa Basınçlı Tünel Açma Makinelerinin (EPB TBM) Kazı Performanslarının Tahmini ve Optimizasyonu. TÜBİTAK Proje No: 213M487. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü.
- Copur, H., Avunduk, E., Tumac, D., Balci, C., Bilgin, N., Mamaghani, A.S., Tolouei, S., Erkus, G., Acun, S., Ates, U.** (2018). Effect of Soil Conditioning on Performance of an EPB TBM: from Laboratory to Mahmutbey-Mecidiyekoy Metro Tunnels in Istanbul. *In: World Tunnel Congress, Dubai-UEA,21-26 April.* 10 p.
- DAUB (German Committee for Underground Construction),** (2010). Recommendations for Static Analysis of Shield Tunnelling Machines. www.daub-ita.de. Accessed 25 August 2016.
- DIN EN 12350-5,** Testing fresh concrete, Part 5: Flow table test. *DIN Deutsches Institut für Normung.*
- EFNARC,** (2005). Specification and guidelines for the use of specialist products formechanized tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock. *Recommendation of European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures.*
- Farn, R.J.** (2006). *Chemistry and Technology of surfactants.* Blackwell Publishing, Oxford, UK, 312 p.
- Feinendegen, M., Ziegler, M., Spagnoli, G., Fernández-Steeger, T.M.** (2011). Evaluation of the clogging potential in mechanical tunnel driving with EPB-shield. *15th ECSMGE, Athens.*
- Galli, M.** (2016). Rheological characterisation of earth-pressure-balance (epb) support medium composed of non-cohesive soils and foam. Dissertation Ruhr-Universität Bochum, Germany
- Guglielmetti V., Grasso. P., Mahtap. A., Xu. S.** (2007). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas Design Methodology and Construction Control.* Taylor and Francis.
- Gharahbagh, E.A., Rostami, J.** (2011). Study of tool wear in Soft Ground Tunneling and introduction of a new soil abrasivity test, *World Tunnel Congress, Helsinki.*
- Glenn, M., Mustafa, A.** (2011). Discrete Element Method to predict soft ground cutterhead performance. *In: Rapid Excavation and Tunneling Conference,* (pp. 1058-67).
- Herrenknecht, M., Maidl, U.** (1995). Applying foam for an EPB shield drive in Valencia. *Tunnel* 5(95): 10-19.

- Herrenknecht, M.** (1994). EPB or Slurry machine: The choice. *Tunnels & Tunnelling Int*, June, 36-46.
- Herrenknecht, M., Rehm, U.** (2005). Mechanized full face tunneling. In: ITA/AITES - Training Course, *World Tunnel Congress in Istanbul*, February, 14 pages.
- Herrenknecht, M., Bappler, K.** (2007). Latest technologies in mechanized tunneling. In: *TBM Conference Organized by BASF*, Istanbul-Turkey, pp. 7-9.
- Hollmann, F.S., Thewes, M.** (2012). Evaluation of the tendency of clogging and separation of fines on shield drives. *Geomechanics and Tunneling* 5 (5) 574–580.
- Holmann, F.S., Thewes, M.** (2013). Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunneling. *Tunneling and underground space technology* 37: 96-106.
- Houlsby G. T., Psomas, S.** (2001). Soil Conditioning for Pipejacking and Tunnelling: Properties of Sand/Foam Mixtures. *Proc. Underground Construction 2001, International Exhibition and Symposium*, London Docklands, UK, pp. 128–138.
- Ilici, N., Temel, M., Sezgin, S., Akpınar, T., Guarasio, S., Polat, C., Bilgin, N.** (2013). Clogging and squeezing effect of marl-clayey limestone on the performance of a hard rock TBM in Suruc Tunnel, Turkey. In: *World Tunnel Congress*, G., Anagnostou, and H., Ehrbar (eds), May 30 – June 6, Switzerland-Geneva, pp. 8-14.
- Jancsecz, S., Steiner, W.** (1994). Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions. *Tunnelling 94, Conf. Proc., Inst. of Mining and Metallurgy and British Tunnelling Society*, (pp. 531-549), Chapman and Hall, London, UK.
- Jancsecz, S., Krause, R., Langmaack, L.** (1999). Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: Experiences of LRTS Izmir. *Conf. Challenges for the 21st Century*, Allen et al. (eds), Balkema, Rotterdam: 865-875.
- JSCE (Japan Society of Civil Engineers).** (2007). *Standard Specifications for Tunneling Shield Tunnels*.
- Kasper, T., Meschke, G.** (2004). A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. *Int J Numer Anal Met* 28,1441–60.
- Kusakabe, O., Nomoto, T., Imamura, S.** (1999). Geotechnical criteria for selecting mechanized tunnelsystem and DMM for tunnelling. *Panel discussion, Proceedings of 14th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundn. Engng.* Vol.4, pp. 2439-2440, Balkema, Rotterdam.
- Lambe, T.W.** (1953). The effect of polymers on soil properties. *3rd Int. Conf. Soil Mech. and Foundn.Engng.*, Zurich 1(0):253-257.
- Lambrughì, A., Rodriguez, M.L., Castellanza, R.** (2012). Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanised excavations. *Comput Geotech* 40, 97–113.

- Langmaack, L.** (2000). Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling. *MBT publication*.
- Langmaack, L., Feng, Q.** (2005). Soil conditioning for EPB machines: Balance of functional and ecological properties. *In: World Tunnel Congress, Istanbul*.
- Langmaack, L., Ibarra, J.** (2011). Speciality chemicals for tunnel boring machines. *Tunnelling Lectures*
- Lovat, R.P.** (2007). TBM design considerations: selection of earth pressure balance or slurry pressure balance tunnel boring machines. *In: TBM Conference, Organized by BASF, Istanbul, February, pp. 7-9*.
- Lyon, J.** (1999a). Drilling fluids, *No-Dig International*, 10-(2), 20-25.
- Lyon, J.** (1999b). Pipe jacking fluids, *Tunnels and Tunnelling International*, 31-(7), 24-26.
- Maidl, U.** (1995). *Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum*. Dissertation Ruhr-Universität Bochum, Germany (Almanca).
- Maidl, U.** (1999). Design features of the Botlek rail tunnel in the Betuweroute. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(2): 135-140.
- Maidl, R.B., Jonker, J.H.** (2000). Dutch courage. *Tunnels and Tunnelling International* 32(6): 29-31.
- Maidl B., Schmid L., Ritz W., Herrenknecht M.** (2008). *Hardrock Tunnel Boring Machines*, Ernest and Sohn publications.
- Maidl, U., Wingmann, J.** (2009). Predicting the performance of earth pressure shields in loose rock. *Geomechanics and Tunneling*, 2, 189-97.
- Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., Wehrmeyer, G.** (2012). *Mechanised shield tunneling*,. Ernest and Sohn publications.
- Mair, R.J., Merritt, A.S., Borghi F.X., Yamazaki, H., Minami, T.** (2003). Soil conditioning for clay soils. *Tunnels and Tunnelling International* 34-(4), 29-32.
- Manuel, J.M.M., Luis, E.M.R.** (2005). Discrete numerical model for analysis of earth pressure balance tunnel excavation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131, 1234– 42.
- Marinos, P.G., Novack, M., Benissii M., Korkaris, K.** (2008). Ground information and selection of TBM for the Thessaloniki Metro, Greece. *Environmental Engineering and Geo Sciences*, 14, 17-30.
- Martinotto, A., Langmaack, L.** (2007). Toulouse Metro Lot 2: Soil conditioning in difficult ground conditions, *In: World Tunnel Congress, Prague*.
- Mauroy, F.** (1998). New developments in earth pressure equipment for boring underground transit lines in France (VAL). *Tunnels and Metropolises, Negro J. & Ferreira (eds)*, Balkema 2(0): 697-701.
- Melis, M.J.** (1999). EPBM performance. Madrid Metro Extension. Supplement, *Tunnels & Tunnelling International*, 31 –(3), 111-112

- Merritt, A.S.** (2003). *Soil Conditioning for Earth Pressure Balance Machines*, PhD Thesis, University of Cambridge.
- Merritt, A., Mair, R.J.** (2006). Mechanics of tunnelling machine screw conveyor: model tests. *Geotechnique* 56(9): 605-615.
- Minitab 17.** Minitab Inc. (Licensed by Istanbul Technical University, Turkey).
- Milligan, G.W.E.** (2000). Soil conditioning and lubrication in tunnelling, pipe jacking and microtunnelling. *A State-of-the-art review*. Geotechnical Consulting Group, London, August.
- Mooney, M., Wu, Y., Mori, L., Cha, M.,** (2016). Earth pressure balance TBM soil conditioning. In Proceeding of World Tunnel Congress, San Francisco
- Mori, L.** (2016). Advancing understanding of the relationship between soil conditioning and earth pressure balance tunnel boring machine chamber and shield annulus behavior. Dissertation, Colorado School of Mines, USA
- Namli, M., Bilgin, N.** (2017). A model to predict daily advance rates of EPB-TBMs in a complex geology in Istanbul, *Tunnelling and Underground Space Technology* 62, 43-52.
- Nilsen B., Dahl F., Holzhauser J., Raleigh P.** (2011). New test methodology for estimating the abrasiveness of soil for TBM tunneling, *RETC*, Toronto
- O'Carroll, J.B.** (2005). A Guide to Planning, Constructing and Supervising Earth Pressure Balance TBM Tunneling, *J&B publishing*
- Peila, D.** (2014). Soil Conditioning for EPB Shield Tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology* 18: 831-836.
- Peila, D., Picchio, A., Barbero, M., Bozza, F.** (2011). Wear tests on conditioned soils for EPB tunneling, *GEAM*
- Peila, D., Picchio, A., Chierigato, A.** (2013). Earth pressure balance tunneling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process. *Tunnelling and Underground Space Technology* 35: 55-66.
- Peila, D., Picchio, A., Martinelli, D., Dal Negro, E.** (2016). Laboratory tests on soil conditioning of clayey soil. *Acta Geotechnica*, 11-(5), 1061-1074
- Pelizza, S.** (1996) Interview with ITA President. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11-(2), 135-139.
- Pellet, A.L., Kastner, R.** (1998). Comparison of microtunnel jacking force theoretical calculation and experimental data. *Tunnels and Metropolises*, Negro J. & Ferreira (eds), Balkema 2, 733-738.
- Pena, M.** (2003). Soil conditioning for sands. *Tunnels and Tunnelling International*, 35-(7), 40-42.
- Pena, M.** (2007). *Foam as a Soil Conditioner in Tunnelling: Physical and Mechanical Properties of Conditioned Sands*, Ph.D. Thesis, St. Catherine's College, University of Oxford.
- Peron, J.Y., Marcheselli, P.** (1994). Construction of the 'Passante Ferroviario' link in Milan, Italy, lots 3P, 5P and 6P, excavation by large earth pressure balanced shield with chemical foam injection. *Tunnelling 94*, conference

of *Mining and Metallurgy and British Tunneling Society*, Chapman and Hall, London, UK.: 679-707.

- Psomas S.** (2001). *Properties of Foam/Sand Mixtures for Tunnelling Applications*, M.Sc. Thesis, St. Hugh's College.
- Quebaud, S., Sibai M., Henry, J.P.** (1998). Use of chemical foam for improvements in drilling by earth pressure balanced shields in granular soils. *Tunnelling and Underground space Technology* **13**(2): 173-180.
- Rehm, U.** (2007). Big challenges in Turkey for mechanized tunneling, *In: The 2nd Underground Excavation Symposium for Transportation*. Istanbul, pp:17-24.
- Reilly, B.J.** (1999). EPBs for the North East Line Project. *Tunnelling and Underground Space Technology* **6**(2): 491-508.
- Salazar, C., Martinelli, D., Todaro, C., Peila, D., Boscaro, A.** (2016). Study of wear in conditioned soil by using a new test device. *World Tunnel Congress, San Francisco*.
- Sass, I., Burbaum, U.** (2008). A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* **68** (1): 27-34.
- Spagnoli, G., Fernandez-Steeger, T., Azzam, R., Feinendegen, M., Neher, H.P., Stanjek, H.** (2010). Investigation of adherence behaviour and related effects on different scales in mechanical tunnel driving. *In: Underground Construction, Transport and City Tunnels*, ITA-AITES, Prague.
- Spagnoli, G.M., Feinendegen, R., Ernst, M.W.** (2011). Manipulations of the sticky clays regarding EPB tunnel driving. *In: The 7th Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*.
- Schlick, G.** (1989). Adhäsion im Boden-Werkzeug-System. *Forschungsbericht des Instituts für Maschinenwesen im Baubetrieb*, Reihe F, Heft 39, Universität Karlsruhe.
- Stack, B.** (1982) *Handbook of Mining and Tunnelling Machinery*, Chichester: Wiley.
- Thewes, M., Burger, W.** (2004). Clogging risks for TBM drives in clay. *Tunnels & Tunneling Int* **6**, 28-31.
- Thewes, M., Budach, C.** (2010). Soil conditioning with foam during EPB tunnelling. *Geomechanics and Tunnelling* **3**(3): 256-267.
- Thewes, M., Budach, C., Bezuijen, A.** (2011). Foam conditioning in EPB tunnelling. *In: The 7th Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 16-18 May, Italy, 9 pages.
- Thewes, M.; Hollmann, F.** (2016). Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs. *Tunnelling and Underground space Technology* **57**, 122-128.
- Tokgoz, N., Binen, S., Avunduk, E.** (2015). An evaluation of fine grained sedimentary materials in terms of geotechnical parameters which define and control excavation performance of EPB TBM's. *Tunnelling and Underground space Technology* **47**, 211-21.

- Tumac, D.** (2015). Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 75, 159-68.
- Tolouei, S., Avunduk, E., Copur, H., Tumac, D., Balci, C., Bilgin, N.** (2016). Foam optimization and relationship between foam use and EPB TBM performance. *13th International Underground Construction Conference, Prague*.
- Ulrich, M., Marc, C.** (2011). Prediction of EPB shield performance in soils. *In: Rapid Excavation and Tunneling Conference*, 1083-1091.
- Vinai, R., Oggeri, C., Peila, D.** (2007). Soil conditioning of cohesionless sand for EPB applications: a laboratory research. *Tunnel and Underground Space Technology* 23(3): 308-317.
- Wallis, S.** (1995). Foaming success at Valencia. *World Tunnelling* 8(8): 311-315.
- Wang, L.T., Gong, G.F., Shi, H.** (2012). A new calculation model of cutterhead torque and investigation of its influencing factors. *Sci China Tech Sci*, 55, 1581-1588.
- Wu, L., Qu, F.Z.** (2009). Discrete element simulation of mechanical characteristic of conditioned sands in earth pressure balance shield tunneling, *Journal of Cent South Univ Technol Eng*, Ed. 16, 1028-33.
- Webb, R., Breeds, C.D.** (1997). Soft ground EPBM tunnelling – west Seattle Alki tunnel. *Conference Proc. Tunnelling '97", IMM & BTS, Chapman & Hall, London UK: 501-514.*
- Williamson, G.E., Traylor, M.T., Higuchi, M.** (1999). Soil conditioning for EPB shield tunneling on the South Bay Ocean Outfall, *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, 897 – 925.
- Yang, H.J., Fu, D.M., Ge, X.R.** (2006). Experimental study and numerical simulation of earth pressure around shield machine. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25, 1652–1657.
- Yoshikawa, T.** (1996). Soil pressure drop at the screw conveyor for shielded machines. *Japan Society for Mechanical Engineers*, 62- (595): 1197–1203.
- Zhang, Q., Kang, Y.L., Zheng, Z.** (2013). Inverse analysis and modeling for tunneling thrust on shield machine. *Math Probl Eng* 2013, 1–7.
- Zhang, Q., Hou, Z.D., Huang, G.Y.** (2015). Mechanical characterization of the load distribution on the cutterhead–ground interface of shield tunneling machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47, 106-113.
- Zhang, Q., Su, C.X., Qin, Q.H.** (2016). Modeling and prediction for the thrust on EPB TBMs under different geological conditions by considering mechanical decoupling. *Sci China Tech Sci* 59, 1428-34.
- Zumsteg, R., Puzrin, A.M.** (2012). Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 3, 86-96.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Emre Avunduk
Doğum Tarihi : 11.10.1985
e-posta : eavunduk@itu.edu.tr

EĞİTİM :

- Yüksek Lisans: 2010, Tunnelling and Tunnel Boring Machines, Politecnico di Torino İtalya
- Yüksek Lisans: 2011, Maden Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi
- Lisans: 2008, Maden Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi

YAYINLAR :

SCI indekse giren uluslar arası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- **Emre Avunduk**, Hanifi Copur, “Empirical Modeling for Predicting Excavation Performance of an EPB TBM based on Soil Properties”, Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71:340-353.
- Deniz Tumac, Hanifi Copur, Cemal Balci, Selman Er, **Emre Avunduk**, "Investigation into the Effects of Textural Properties on Cuttability Performance of a Chisel Tool", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 51, No. 4, 2018, s. 1227-1248

- Hanifi Copur, Nuh Bilgin, Cemal Balci, Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, "Effects of different cutting patterns and experimental conditions on the performance of a conical drag tool", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 50, No. 6, 2017, s. 1585-1609
- Aydin Shaterpour-Mamaghani, Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, "Double shield TBM performance analysis in difficult ground conditions: a case study in the Gerece water tunnel, Turkey", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 75, 2016, s. 251–262
- Aydin Shaterpour-Mamaghani, Nuh Bilgin, Cemal Balci, **Emre Avunduk**, Can Polat, "Predicting Performance of Raise Boring Machines by Using Empirical Models", Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, Volume 49, s 3377–3385
- Nuh Bilgin, Cemal Balci, Hanifi Copur, Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, "Cuttability of coal from the Soma coalfield in Turkey", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 73, 01/2015, s. 123-129
- Nuray Tokgoz, Serkan Binen, **Emre Avunduk**, "An evaluation of fine grained sedimentary materials in terms of geotechnical parameters which define and control excavation performance of EPB TBM's", Tunnelling and Underground space Technology, 2015, 47, 211-21.
- **Emre Avunduk**, Deniz Tumac, A. Kubilay Atalay, "Prediction of Roadheader Performance by Artificial Neural Network", Tunnelling and Underground Space Technology, No. 44, 2014, s. 3-9

Uluslar arası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceeding) basılan bildiriler:

- **Emre Avunduk**, Deniz Tumaç, Sahand Tolouei, Hanifi Çopur, Cemal Balcı, Nuh Bilgin "Effect of Conditioning on Soil Workability determined by Mini-Slump and Flow Table Tests" Proceeding of the World Tunnel Congress (WTC 2017), 06/2017, s. 10 pages, Bergen, Norway

- **Emre Avunduk**, Hanifi Çopur, Sahand Tolouei “Effect of Adhesion on EPB TBM Performance” Proceeding of the World Tunnel Congress (WTC 2017), 06/2017, s. 10 pages, Bergen, Norway
- **Emre Avunduk**, Sahand Tolouei, Hanifi Çopur, Muammer Çınar, Şener Kahya “EPB TBM Performance along with Soil Properties in Ayvali Waste Water Tunnel” TBM DIGS 2016, November 2016, Istanbul Turkey
- **Emre Avunduk**, Aydin Shaterpor Mamaghani, Deniz Tumac, "Effect of Difficult Ground Conditions on Double Shield TBM Performance", 9th Asian Rock Mechanics Symposium-ARMS9, 10/2016, s. 10 pages, Bali, Indonesia
- Deniz Tumac, Selman Er, **Emre Avunduk**, Mikail Basyigit, Hanifi Copur, Cemal Balci, "Determining the Effect of Texture Coefficient on Performance of Diamond Wire Machines", 9th Asian Rock Mechanics Symposium-ARMS9, 10/2016, s. 8 pages, Bali, Indonesia
- Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, Hanifi Copur, Cemal Balci, Selman Er, "Investigation of the Effect of Textural Properties towards Predicting Sawing Performance of Diamond Wire Machines", European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2016, Rock Mechanics & Rock Engineering: From the Past to Future, 08/2016, pp. 211-215, Cappadocia, Turkey
- Hanifi Copur, Nuh Bilgin, Cemal Balci, Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, Aydin Shaterpor Mamaghani, "Full-Scale Linear Cutting Experiments with a Conical Cutter for Simulating Different Cutting Patterns", European Rock Mechanics Symposium (EUROCK) 2016, Rock Mechanics & Rock Engineering: From the Past to Future , 08/2016, pp. 153-158, Cappadocia, Turkey
- Sahand Tolouei, **Emre Avunduk**, Hanifi Copur, Deniz Tumac, Cemal Balci, Nuh Bilgin, "Foam optimization and relationship between foam use and EPB TBM Performance", 13th International Conference Underground Construction and 3rd Eastern European Tunnelling Conference, 2016, 9 Pages, Prague, Czech Republic

- Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, Mikail Basyigit, Hanifi Copur, Cemal Balci, Selman Er, "The effect of mechanical properties on performance of diamond wire machines", Proceedings of the Fifth Thailand Symposium on Rock Mechanics- Thairock 2015, 01/2015, pp. 389-395, Bangkok, Thailand
- **Emre Avunduk**, Deniz Tumac, Mikail Basyigit, Hanifi Copur, Cemal Balci, Selman Er, "Physico-Mechanical Property Tests Towards Performance Prediction of Chain Saw Machines", Proceedings of the Fifth Thailand Symposium on Rock Mechanics- Thairock 2015, 01/2015, pp. 381-387, Bangkok, Thailand
- Cemal Balci, Ramazan Comakli, Can Polat, Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, Hanifi Copur, Nuh Bilgin, "A New Generation of Portable Linear Rock Cutting Machine (PLCM) and Comparison with Full Scale Linear Rock Cutting Tests", ITA World Tunnel Congress (WTC 2015) and 41st General Assembly, 05/2015, 10 pages, Dubrovnik, Croatia
- Ramazan Comakli, Cemal Balci, Nuh Bilgin, Hanifi Copur, Deniz Tumac, Can Polat, **Emre Avunduk**, "Cutter Forces Measurement with (PLCM©) Using Mini Disc Cutters: Comparison with the Theoretical Models", ITA World Tunnel Congress (WTC 2015) and 41st General Assembly, 05/2015, 10 pages, Dubrovnik, Croatia
- Can Polat, Cemal Balci, Ramazan Comakli, **Emre Avunduk**, Deniz Tumac, Hanifi Copur, Nuh Bilgin, "Cutter Forces Measurement with PLCM Using Mini Conical Pick: Comparison with the Theoretical and Empirical Models", ITA World Tunnel Congress (WTC 2015) and 41st General Assembly, 05/2015, 8 pages, Dubrovnik, Croatia
- Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, Selman Er, Mikail Basyigit, Hanifi Copur, Cemal Balci, Ilker Yasan, "Pre-investigation to Determine the Effects of Rock Properties on Performance of Chain Saw and Diamond Wire Machines", 8th Asian Rock Mechanics Symposium- ARMS8, 10/2014, 9 pages, Sapporo, Japan
- **Emre Avunduk**, Deniz Tumac, Mikail Basyigit, Selman Er, Hanifi Copur, Cemal Balci, "Cutting Performance of Chain Saw and

Diamond Wire Machines in Beige Marble Quarry", 8th Asian Rock Mechanics Symposium-ARMS8, 10/2014, 6 pages, Sapporo, Japan

- Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, "Comparison of the Empirical and Artificial Neural Network Models to Estimate Performance of Roadheaders", Proceedings of the 3rd International Symposium on Underground Excavations for Transportation, UYAK 2013, pp: 91-98, Istanbul, Turkey.
- **Emre Avunduk**, Deniz Tumac, Hanifi Copur, Cemal Balci, Nuh Bilgin, "Experimental Comparison of Single and Double Scroll Cutting Patterns by Using Chisel Cutting Tools of chain Saw Machines", Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods - Sinorock2013, 2013, pp 729-734
- Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, Hanifi Copur, Nuh Bilgin, Cemal Balci, "Estimation of the Performance of Chain Saw Machines from Shore hardness and the other mechanical Properties", Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods - Sinorock2013, 06/2013, pp 261-265
- Yıldırım Ozaydin, **Emre Avunduk**, Hanifi Copur, "EPB TBM Performance in Excavation of Buyukcekmece Waste Water Tunnel" Proceedings of the 3rd International Symposium on Underground Excavations for Transportation, UYAK 2013, pp: 151-156, Istanbul, Turkey.
- Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, Hanifi Copur, Nuh Bilgin, Cemal Balci, "Estimation of the Performance of Chain Saw Machines from Shore hardness and the other mechanical Properties", Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods - Sinorock2013, pp: 261-265, Shanghai, China.
- **Emre Avunduk**, Deniz Tumac, Hanifi Copur, Cemal Balci, Nuh Bilgin, "Experimental Comparison of Single and Double Scroll Cutting Patterns by Using Chisel Cutting Tools of chain Saw Machines", Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods - Sinorock2013, pp: 729-734, Shanghai, China.
- Hanifi Copur, Cemal Balci, Nuh Bilgin, Deniz Tumac, **Emre**

Avunduk, “Predicting Cutting Performance of Chisel Tools by Using Physical and Mechanical Properties of Natural Stones”, European Rock Mechanics Symposium (EUROCK) 2012, ISRM International Symposium), 14 pages, Stockholm, Sweden.

- Nuh Bilgin, Cemal Balci, Hanifi Copur, Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, “Rock Mechanics Aspects Related to Cutting Efficiency of Mechanical Excavators in Complex Geology, 25 Years of Experience in Istanbul”, European Rock Mechanics Symposium (EUROCK) 2012, ISRM International Symposium), 13 pages, Stockholm, Sweden.
- **Emre Avunduk**, Hanifi Copur, Nuh Bilgin, Cemal Balci, Deniz Tumac, “Effect of Geotechnical Properties on TBM Performance”, European Rock Mechanics Symposium (EUROCK) 2012, ISRM International Symposium), 9 pages, Stockholm, Sweden.
- Hanifi Copur, Cemal Balci, Nuh Bilgin, Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, Saracoglu, M.A., Serter, A., “A Deterministic Model for Predicting and Optimizing Performance of Chain Saw Machines”, The 22nd World Mining Congress and Expo, 2011, pp: 175-181, Istanbul, Turkey.
- Nuh Bilgin, Hanifi Copur, Cemal Balci, Deniz Tumac, **Emre Avunduk**, “Experience Gained on Mechanized Tunnelling in Istanbul and Some Recommendations for Mining Industry”, The 22nd World Mining Congress and Expo, 2011, pp: 155-159, Istanbul, Turkey.