



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

MECİDİYEKÖY-MAHMUTBEY METROSU(İSTANBUL)
TÜNELLERİNDE FARKLI JEOLJİK KOŞULLARDAKİ
ENJEKSİYON ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehmet Ali BERK

DANIŞMAN
Prof. Dr.Alaettin KILIÇ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 12.06.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Maden Mühendisliğı Anabilim Dalı, Maden Mühendisliğı Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Prof. Dr. Alaettin KILIÇ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ataç BAŐCETİN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR
İstanbul Teknik Üniversitesi
Maden Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tez çalışmam sırasında her türlü desteğinden dolayı danışmanım sayın Prof. Dr. Alaettin Kılıç'a ve tez çalışmalarım boyunca her konuda yardım ve desteğini esirgemeyen çok değerli mesai arkadaşlarım R.Fatih Tepehan, Mustafa Can Uzun ve Emel Alataş'a teşekkürü borç bilirim.

Bu tez hazırlama süresince sevgisini ve desteğini esirgemeyen aileme ve özellikle eşim Leyla Rahmanova' ya da ayrıca teşekkürlerimi sunarım. |

Haziran, 2019

| Mehmet Ali BERK |

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
GRAFİK LİSTESİ.....	xi
RESİM LİSTESİ	xii
KISALTMA LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	2
2.1. PROJE HAKKINDA BİLGİLER	2
2.2. GÜZERGÂH JEOLJİSİ	4
2.2.1. Genel Jeoloji.....	4
2.2.2. Jeomorfoloji.....	6
2.2.3. Stratigrafi.....	7
2.2.4. Hidrojeoloji.....	14
2.3. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ	19
2.3.1. Zemin - Kaya Birimlerinin Sınıflandırmaları.....	19
2.4. TBM İLE TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ	20
2.4.1. Tünel Açma Makineleri (TBM) ve TBM Seçimi.....	20
2.4.2. Yumuşak Toprak Kazısı ve EPB Makinalar	22
2.5. EPB-TBM İşletme Prensipleri.....	26
2.5.1. Tünel Kazısı.....	26
2.5.2. Segment Montajı	29
2.5.3. Harç Enjeksiyonu	30
2.6. Enjeksiyon Harcı Uygulama Amaçları.....	30
2.7. EPB-TBM Tünel Kazılarında Kullanılan Enjeksiyon Türleri.....	36
2.7.1. Tek Bileşenli Enjeksiyon Harcı.....	36
2.7.2. Çift Bileşenli Enjeksiyon Harcı.....	42

2.8. EPB-TBM Tünellerinde İlave Enjeksiyon Uygulamaları	42
2.8.1. İkincil Enjeksiyon Uygulaması (Çimento-Su Enjeksiyonu)	42
2.8.2. Kimyasal Enjeksiyon.....	45
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	48
3.1. MALZEME	48
3.2. YÖNTEM.....	52
4. BULGULAR.....	54
4.1. GÜZERGÂHTA TBM İLE AÇILAN ANAHAT TÜNELLERİ VE GENEL VERİLER	54
4.2. İSTASYON ARALIKLARINA GÖRE ELDE EDİLEN GENEL VERİLER	55
4.2.1. Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonu Arası Veriler	55
4.2.2. Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Veriler.....	59
4.2.3. Yenimahalle İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Veriler	62
4.2.4. Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu Arası Veriler	65
4.2.5. Karadeniz Mahallesi İstasyonu ile Tekstilkent İstasyonu Arası Veriler	68
4.2.6. Tekstilkent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Arası Veriler.....	71
4.2.7. Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları Arası Veriler	74
4.2.8. Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu Arası Veriler.....	76
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	79
KAYNAKLAR.....	82
EKLER.....	84
ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2-1:Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Projesi Güzergâhı	3
Şekil 2-2: Metro hattı güzergâhındaki tünellerin inşasında kullanılan tünel açma yöntemleri.....	4
Şekil 2-3: Metro hattının geçtiği bölgelerin genel jeoloji haritası.....	6
Şekil 2-4: İstanbul'un Avrupa yakasının stratigrafik kesiti.....	7
Şekil 2-5: Çekmece formasyonun (Tç) yüzeyleme haritası.....	9
Şekil 2-6: İstanbul ili ve çevresinde Trakya (Ct) formasyonun yüzeyleme haritası	11
Şekil 2-7: Göztepe-Mahmutbey İstasyonları arası Jeolojik profili.....	16
Şekil 2-8: Metro hattının Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu arası tespit edilen ferdi ve ticari kullanım amaçlı açılmış su kuyuları haritası	17
Şekil 2-9:EPB-TBM iç kesiti ve genel görünümü.....	23
Şekil 2-10: EPB TBM Kazı Modları	24
Şekil 2-11: EPB Basıncının Yetersiz Olduğu Durumda Zeminde Meydana gelebilecek Deformasyon	27
Şekil 2-12: EPB Basıncının Yetersiz Olduğu Durumda Zeminde Meydana gelebilecek Deformasyon	28
Şekil 2-13: Dengeli EPB Basıncı ile kazı yapılması	29
Şekil 2-14: Segmentler üzerine zeminden gelen dengeli ve dengesiz yükler.....	31
Şekil 2-15: Segmentlerin etrafındaki kazı boşluğun tamamen dolmaması sonucu zeminde oluşabilecek deformasyon.....	32
Şekil 2-16:Segment çevre çeperini saran enjeksiyon ve itme pistonlarının oluşturduğu itki kuvveti yönü.....	33
Şekil 2-17:TBM ekipmanlarının tünel içerisinde segmentlere iletmiş yükler	34
Şekil 2-18:Enjeksiyon çalışması sonucu oluşan su sızdırmazlık çeperi.....	35
Şekil 2-19: TBM kazı çapı ve oluşan segment çevrelerinde oluşan çeper boşluk	39

Şekil 2-20: TBM tünellerinde çimento-su enjeksiyon tünel içinden uygulama noktaları.....	43
Şekil 2-21: Çimento-su enjeksiyonu temsili gösterimi	44
Şekil 3-1: Mecidiyeköy- Mahmutbey metro projesinde TBM ile açılan anahat tünelleri.....	49



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2-1:Çukurçeşme üyesine ait arazi ve laboratuvar verileri.....	8
Tablo 2-2: Güngören üyesine ait killi ortamın ait arazi ve laboratuvar verileri.....	10
Tablo 2-3: Çok ayrıışmış kaya (W4) birimine ait mühendislik veriler	12
Tablo 2-4: Orta ayrıışmış kaya (W3) birimine ait mühendislik veriler	13
Tablo 2-5: Az ayrıışmış veya taze kaya (W1-W2) birimine ait mühendislik veriler	13
Tablo 2-6:Kaya kütlesi için ISRM (1981) tarafından önerilen ayrıışma sınıflaması	20
Tablo 2-7:Zemin sınıflamalarına göre TBM tipleri	22
Tablo 2-8: Mahmutbey - Mecidiyeköy metro projesi enjeksiyon harcı karışımı	38
Tablo 3-1: Mecidiyeköy-Mahmutbey metro projesinde kullanılan TBM'lerin teknik özellik ve boyutları	50
Tablo 3-2: Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde kullanılan enjeksiyon harcı içerisindeki malzeme ve miktarları	52
Tablo 4-1: Mecidiyeköy- Mahmutbey metro hattı TBM tünelleri kazı bilgileri.....	54
Tablo 4-2: Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri.....	56
Tablo 4-3(<i>devamı</i>):Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri.....	57
Tablo 4-4: Akşemsettin –Veysel Karani İstasyonları arası yapılan Çimento-Su ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları	59
Tablo 4-5: Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri.....	60
Tablo 4-6: Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları	62
Tablo 4-7: Kazım Karabekir İstasyonu ile Yenimahalle İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri.....	63
Tablo 4-8: Kazım Karabekir İstasyonu İle Yenimahalle İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları	65

Tablo 4-9: Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri.....	67
Tablo 4-10: Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları	68
Tablo 4-11: Karadeniz Mahallesi İstasyonu ile Tekstilkent İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri.....	69
Tablo 4-12: Karadeniz Mahallesi İstasyonu ile Tekstilkent İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları	71
Tablo 4-13: Tekstilkent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri	72
Tablo 4-14: Tekstilkent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları	73
Tablo 4-15: Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri	74
Tablo 4-16: Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları	76
Tablo 4-17: Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri	77
Tablo 4-18: Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları	78

GRAFİK LİSTESİ

Sayfa No

Grafik 2-1: Mecidiyeköy Mahmutbey metro hattı TBM tünellerinde uygulanan enjeksiyon harcının laboratuvar şartlarında priz alma süresi	38
Grafik 4-1: Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonu Arası Jeolojik koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği	57
Grafik 4-2: Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği	60
Grafik 4-3:Kazım Karabekir İstasyonu ile Yenimahalle İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği	63
Grafik 4-4:Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği	67
Grafik 4-5: Karadeniz Mahallesi İstasyonu ile Tekstilkent İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği	69
Grafik 4-6: Tekstilkent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği	72
Grafik 4-7: Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri	75
Grafik 4-8: Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği	77

RESİM LİSTESİ

	Sayfa No
Resim 2-1:Kazım Karabekir istasyonu çıkışında (Km:14+017)gözlemlenen Çekmece formasyonunun Çukurçeşme üyesi (Siltli kum).....	9
Resim 2-2: Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu kazısı sırasında gözlemlenen Trakya Formasyonu	14
Resim 2-3: TBM kalkanı, enjeksiyon hatları, kuyruk fırçası ve mevcut boşluk	40
Resim 2-4: Kurulu Segment ile zemin arasını doldurmuş enjeksiyon harcı	41
Resim 2-5: Segment çevresi ve zemin arasını doldurmuş	41
Resim 2-6: Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde çimento-su enjeksiyonu uygulaması	44
Resim 2-7: Kimyasal enjeksiyon amaçlı kullanılan enjeksiyon pompası	46
Resim 2-8: Mecidiyeköy Mahmutbey metrosunda kimyasal enjeksiyon uygulaması	46
Resim 3-1:Mecidiyeköy- Mahmutbey metro hattı kazısında kullanılan TBM'ler	49
Resim 3-2: Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünelleri prekast tünel kaplama segmentleri ve tünel içinde montajın tamamlanması sonrası görünümü.....	50
Resim 3-3: Tünel içi çok amaçlı servis aracı (MSV) ve enjeksiyon transferi için enjeksiyon harç tankı	51
Resim 3-4: TBM üzerinde kurulu konvansiyonel enjeksiyon harcı pompası	51
Resim 4-1:Veysel Karani ile Akşemsettin İstasyonları arası Km: 12+320 –Km: 13+500 arası su geliri görümü	58
Resim 4-2:Akşemsettin-Kazım Karabekir İstasyonları arası genel görünüm	61
Resim 4-3: Km: 14+750 ile Km: 14+840 arası tünel içi su gelirleri	64
Resim 4-4: Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz İstasyonu arasında yapılan zemin iyileştirme amaçlı enjeksiyon çalışmaları	66
Resim 4-5: Karadeniz Mahallesi ve Tekstilkent İstasyonları arası su geliri olan bölgelerde oluşan kireç tortuları	70
Resim 4-6: İlave enjeksiyon çalışmalarının tamamlanması sonrası tünelde genel görünüm.....	73

KISALTMA LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklama
TBM	: Tunnel Boring Machine
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
lt	: litre
m	: metre
dk	: dakika
km	: kilometre
kN	: kilonewton
RQD	: Kaya Kalite Göstergesi
USCS	: Birleştirilmiş zemin sınıflama sistemi
SM	: USCS'ye göre siltli kum
CH	: USCS'ye göre yüksek plastisiteli kil
MH	: USCS'ye göre yüksek plastisiteli silt
CL	: USCS'ye göre düşük plastisiteli kil
ML	: USCS'ye göre düşük plastisiteli silt

ÖZET

MECİDİYEKÖY-MAHMUTBEY METROSU (İSTANBUL) TÜNELLERİNDE FARKLI JEOLJİK KOŞULLARDAKİ ENJEKSİYON ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Ali BERK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr.Alaettin KILIÇ

Bu çalışmanın amacı Mecidiyeköy- Mahmutbey metro çalışmalarında EPB-TBM ile açılan tünellerde kullanılan çimentolu enjeksiyon harç dizaynının farklı jeolojik koşullar altında değerlendirilmesidir. Çalışma yapılan bölgede 9 istasyon aralığındaki çift tüp tünellerin kazı öncesi yapılan sondaj çalışması sonuçları ve kazı sırasında gözlemlenen jeolojik koşullar değerlendirdi. Tünel çalışmalarının tamamlanmasının ardından enjeksiyon çalışmalarının belirlenen bu jeolojik koşullar altındaki başarısı özellikle tünel içerisinde gözlemlenen su gelirleri ve ayrıca kontrol delgileri ile tespit edilerek kaydedildi. Her bir istasyon aralığı için yapılan değerlendirmeler sonucunda jeolojik koşullardan özellikle kazı yapılan jeolojik ortamın kaya olduğu bölgelerde ayrışma oranı arttıkça enjeksiyon başarısızlığının arttığı, kazılan ortamın zemin olduğu bölgelerde ise kil oranı arttıkça enjeksiyon başarısızlığının azaldığı tespit edilmiştir.

Farklı jeolojik ortamlarda kullanılacak enjeksiyon dolgusu tasarlanırken, yeraltı suyunun yıkıcı etkisinin önemli bir faktör olarak dikkate alınması gerektiği anlaşılmıştır. EPB-TBM ile kazı yapılacak bölgelerde enjeksiyon dizaynı yer altı suyundan etkilenmeyecek şekilde seçilmeli veya kullanılan dizayn jeolojik ortamlara uygun şekilde değiştirilerek kullanılmalıdır.

12 Haziran 2019, [113] sayfa.

Anahtar kelimeler: EPB-TBM, TBM, enjeksiyon çalışmaları, geri dolgu harcı



SUMMARY

EVALUATION OF INJECTION WORKS UNDER DIFFERENT GEOLOGICAL CONDITIONS IN MECİDİYEKÖY-MAHMUTBEY METRO (İSTANBUL) TUNNELS

M.Sc. THESIS

Mehmet Ali BERK

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Mining Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Alaettin KILIÇ

The aim of this study is to evaluate the cementitious backfill grout design under different geological conditions in Mecidiyeköy-Mahmutbey (Istanbul/Turkey) metro tunnels opened by EPB-TBM. The results of the investigation boring data and the observed geological conditions during the excavation were evaluated in double tube tunnels along 9 stations. Following the completion of the tunnel works, the success of the injection operations was investigated with water income and inner control drilling in the tunnels under specified geological conditions, and geological condition recorded during the excavation. As a result it was determined that the injection failure increases when geological environment is rock and rock weathering increased. The injection failure decreases when geological environment is soft ground in which the clay ratio increased. During the design of the backfill grout used in different geological conditions, it was appreciated that the failure effect of the ground water must be considered as an important factor.

The injection design in the regions where EPB-TBM is to be excavated, should be selected so as not to be affected by groundwater or the design should be revised according to the different geological environments. |

|June 2019|,113 |pages.

Keywords:EPB-TBM, TBM, injection works, backfill grout|



1. GİRİŞ

TBM ile tünel açma yöntemi farklı projelerde kullanım alanına sahip olmakla birlikte günümüzde metro çalışmaları için artık zorunlu olarak kullanılır bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle yapılaşmanın yoğun olduğu İstanbul ilinde yapılan metro çalışmaları için son zamanlarda artan oranlarda kullanılmaya başlanmıştır. Yapılaşmanın yoğun olması ile birlikte nüfusun her geçen gün artması, şehrin daha modern bir hale gelmesi ve çok hızlı bir gelişme göstermesiyle temel gereksinimi olan “ulaşım” sorunlarının çözümü için yapılan metro çalışmaları da ayrıca önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir.

Hızlı gelişmeye sahip bir kentte ulaşım faaliyetlerinin hızlı ve dengeli bir şekilde karşılanması önemli bir yere sahiptir. Temel ulaşım yöntemlerinden biri olan metro, ilerleyen teknolojinin getirdiği avantajlarla hızlı ve kolay ulaşım imkânları sunmaktadır. Bu amaçla planlanan metro hatlarının en kısa sürede devreye alınması ancak yapılan çalışmalarda ileri teknolojilerin kullanılmasıyla sağlanabilmektedir. Ayrıca yapılan bu metro çalışmaları kullanım ömrü ile gelecek nesillere de fayda sağlayacağı düşünüldüğünde yapılan çalışmaların kalitesi de göz ardı edilemeyecek olan bir diğer husustur. Bu nedenle, inceleme konusu olan ve karmaşık bir jeolojiye sahip İstanbul ilindeki Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu projesinde ileri teknoloji tünel açma yöntemi olan TBM ile açılan tünellerin bir parçası olan enjeksiyon çalışmalarının farklı jeolojik koşullar altında değerlendirilmesi yapılmıştır.

Tam mekanize tünel açma yöntemi olarak da nitelendirilen TBM ile Tünel açma yöntemi sırasında tahkimatın bir parçası olan enjeksiyon uygulamaları İstanbul gibi farklı ve karmaşık jeolojilere sahip bölgelerde kalite ve uygunluğu açısından değerlendirilmesi ve farklı jeolojik koşullarda hangi enjeksiyon dizaynının kullanılmasının belirlenmesi aşaması önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

TBM ile açılan tünellerde farklı jeolojik koşullar için farklı enjeksiyon sistemlerinin kullanıldığı varsayıldığında Mecidiyeköy- Mahmutbey metrosundaki enjeksiyon uygulamaları da farklı jeolojik koşullar altında değerlendirilmiş olup ileriki aşamalarda yapımı planlanan metro projelerine bu çalışma sonucu yapılan değerlendirmelerin de katkı sağlaması hedeflenmiştir. |

2. GENEL KISIMLAR

2.1. PROJE HAKKINDA BİLGİLER

Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı (*İstanbul Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı, Depo – Bakım Sahası ve Depo Bağlantı Hatları İnşaat İşleri*), Şişli ilçesine bağlı Mecidiyeköy semti ile Bağcılar ilçesine bağlı Mahmutbey semti arasında planlanmıştır. Şişli, Kâğıthane, Eyüp, Gaziosmanpaşa, Esenler ve Bağcılar olmak üzere 6 ilçeyi kat edecek olan metro hattı, çift tüp halinde olmak üzere yaklaşık 17 km tünel ve 15 adet istasyondan oluşmaktadır. Şekil 2-1’de metro güzergâhı ve güzergâhtaki istasyonların harita üzerinde gösterimi mevcuttur.

Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı metro güzergâhı İstanbul ilinin yapılaşmanın ve nüfusun kalabalık olduğu ilçelerden geçmekte olduğundan, yüzeyden yapılacak bağlantıların kamulaştırma maliyetleri ve topografya engelleri sebebiyle istasyon arası bağlantılar viyadük istasyonlar hariç, tüneller ile yapılmıştır.

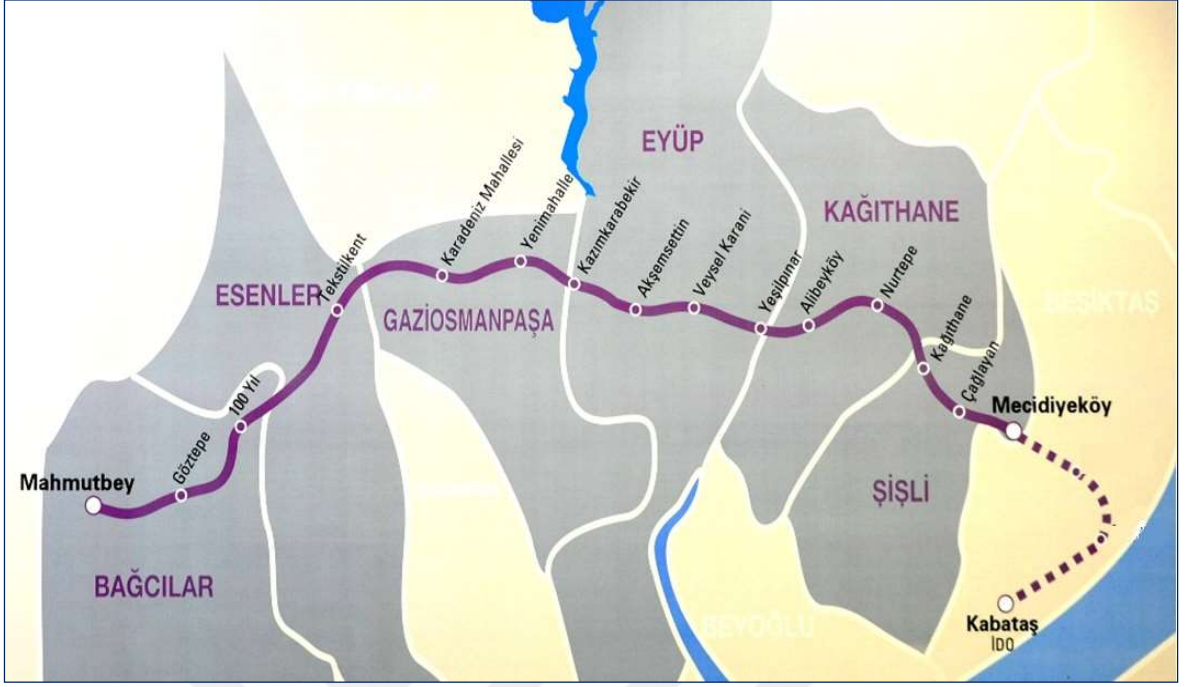
Ayrıca Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı metro hattının önemli kısmındaki istasyonlar yeraltı istasyonları olarak inşa edilmiş olup, Kağıthane ve Alibeyköy gibi dere geçişleri olan bölgelerde ise viyadük istasyon şeklinde inşa edilmiştir. Yeraltı istasyonları yapılaşmanın yoğun olduğu bölgelerde tünel tipi (NATM) istasyon şeklinde, yapılaşmanın az olduğu bölgelerde ise istasyon yapıları Aç-kapa istasyon şeklinde inşa edilmiştir.

Öte yandan projedeki tünellerin önemli bir kısmı tünel delme makineleriyle (EPB tipi TBM), nispeten daha az bir kısmı ise Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile açılmıştır.

Metro hattının önemli kısmı, yeraltı tünellerinden oluşmakta olup Kağıthane ve Alibeyköy dere geçişleri viyadük olarak planlanmış ve Kâğıthane deresinin iki yamacında ve Alibeyköy Deresi’nin doğu yamacında portallar inşa edilmiştir. Bu etapta tünel kazıları Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile yapılmıştır.

Kazısı tünel açma makineleri (EPB-TBM) ile yapılmış olan kesim, tünel kesiti dairesel olup, tünel çapı gabari 6,30 m ve kaplanmış halde 5,70 m çapında olacak şekilde açılmıştır.

Metro hattı, hattın başlangıç noktası olan Mecidiyeköy istasyonundan Beşiktaş ilçesine bağlı Kabataş semtine kadar uzatılacak olup hattın toplam uzunluğu 24 km civarında olacaktır.



Şekil 2-1:Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Projesi Güzergâhı

Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu (Şişli-Kağıthane-Eyüp-Gaziosmanpaşa-Esenler ve Bağcılar İlçeleri) tamamlandığında saatte bir yönde 70.000 yolcu taşıma kapasitesinde olacaktır. Metro hattının sözleşmesi Gülermak-Kolin-Kalyon Metro Yapım Ortaklığı ile 02.01.2014 tarihinde imzalanmış ve yer teslimi yapılarak çalışmalara başlanmıştır.

Aşağıda söz konusu proje hakkında genel bilgiler aşağıda mevcuttur;

Toplam İstasyon Adedi: 15

Hattın Toplam Uzunluğu:17.563 m.

Toplam NATM Tünel Uzunluğu:12.976 m (Çift tüp tünel toplamı).

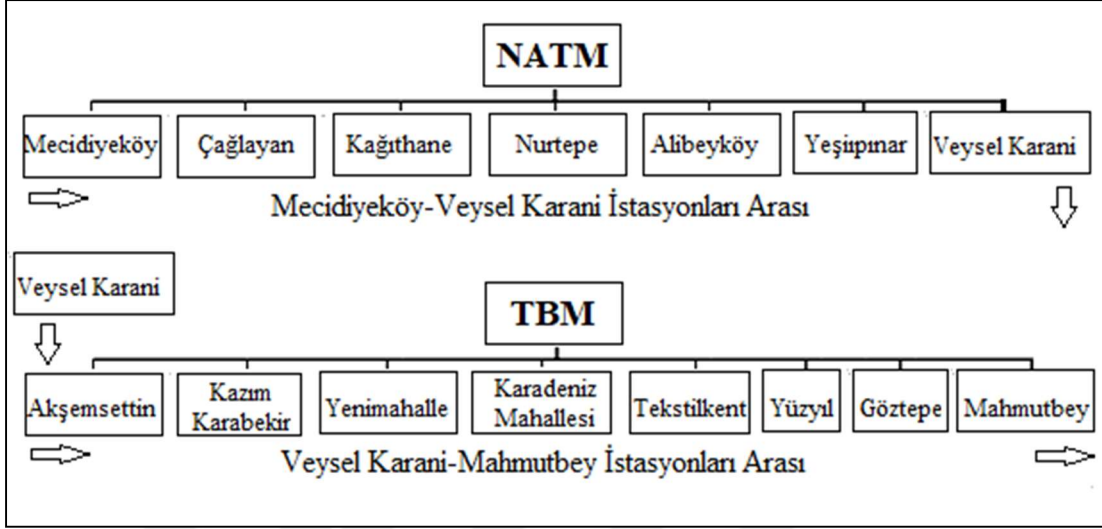
Toplam TBM Tünel Uzunluğu:16.150 m (Çift tüp tünel toplamı).

Toplam Viyadük İstasyon Adedi: 2

Tünel Tipi İstasyon Adedi: 8

Aç-Kapa İstasyon Adedi: 5

Aşağıda Şekil 2-2’de istasyonlar arası ana hat tünellerinin açılmasında hangi tip tünel açma metodu kullanıldığı gösterilmiştir.



Şekil 2-2: Metro hattı güzergâhındaki tünellerin inşasında kullanılan tünel açma yöntemleri. İstasyonlar arası ana hat tünelleri çift tüp olmakla birlikte ayrıca Tekstilkent İstasyonundan Depo ve Bakım sahasına 1500 metre uzunluğunda tek tüp NATM yöntemi ile bağlantı tüneli inşa edilmiştir.

2.2. GÜZERGÂH JEOLJİSİ

Güzergâh jeolojisi hakkında yapılan değerlendirmeler; güzergâhın bulunduğu bölge ile ilgili eski jeolojik çalışmalara, bu aşamada yapılan gözlemsel jeolojik incelemelere, daha önce İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve yerel belediyeler tarafından yaptırılmış benzer nitelikteki jeolojik - jeoteknik çalışmalara, proje planlaması ve uygulaması aşamasındaki temel araştırma sondajlarına, bu araştırma sondajları ile birlikte yapılan SPT, basınçlı su testi, presiyometre gibi yerinde deneylere ve laboratuvar deneylerine dayandırılmıştır.

2.2.1. Genel Jeoloji

İstanbul ili ve çevresi; çok faylı, kıvrımlı ve bindirmeli Paleozoyik, Mesozoyik kaya birimlerinden ve bunlar üzerine yerleşmiş düzensiz Tersiyer çökellerinden oluşur. Paleozoyik birimler ise Karbonifer ve Kretasede magmatik sokulumlar ile kesilmiştir. Böylece magmatizma olayları sırasında, söz konusu kaya birimleri içine yaygın olarak diyabaz ve andezit daykları yerleşmiştir.

İstanbul bölgesini ve özellikle İstanbul İlinin doğu yakasında Paleozoyik temeli, yaygın olan Ordovisiyen, Silüriyen ve Devoniyen yaşlı kaya toplulukları ile batı yakasını ise yaygın olarak Karbonifer serileri oluşturur. Birkaç bin metre kalınlığa ve Ordovisiyenden serisinden Karbonifere kadar bu birimlere birlikte Jeoloji literatüründe “İstanbul Paleozoik İstifi” adı verilir.

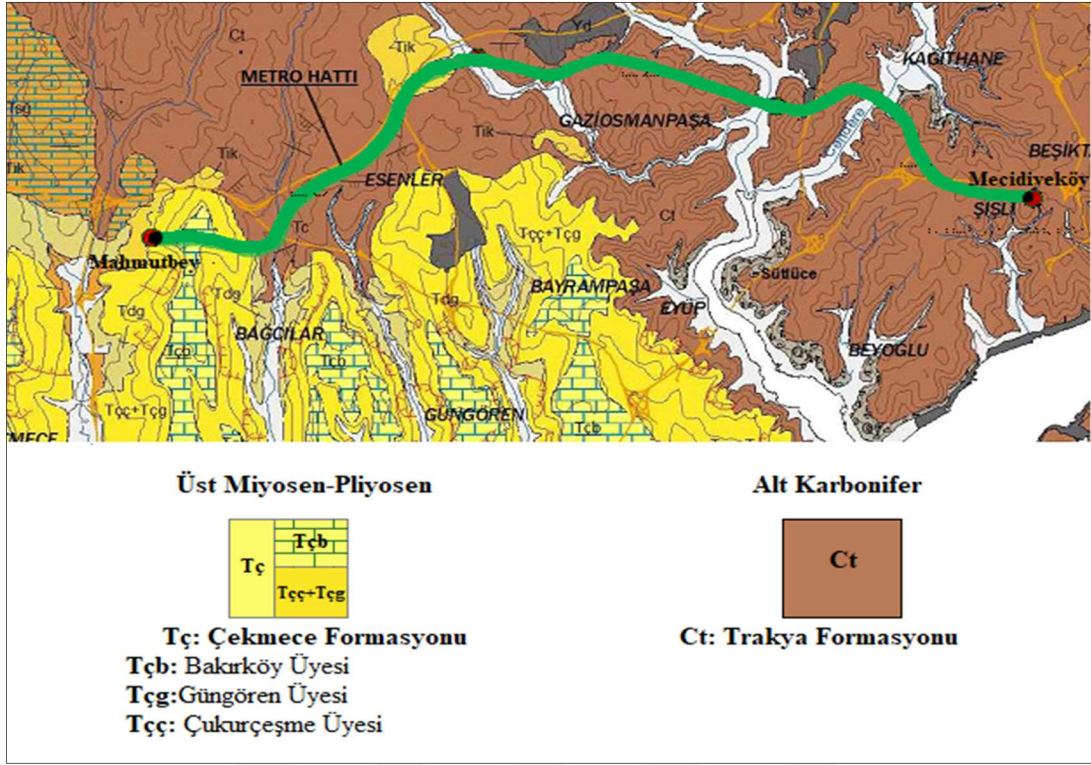
İstanbul’un Avrupa yakasında daha yaygın olmak üzere, her iki yakada, ağırlıklı olarak Oligo-Miyosene tarihlenen kırıntılı Tersiyer (Neojen) çökelleri, Paleozoyik temel üzerine uyumsuz şekilde gelir. Ayrıca Tersiyer serileri içinde de uyumsuzluklar mevcuttur (Polat, 2015).

Ana hat tünellerin güzergâhı İstanbul ilinin Avrupa yakasında doğu-batı doğrultusunda uzanmaktadır. İstanbul, özellikle de Avrupa yakası ise jeolojik tarihi ve jeolojik gelişiminin sonucu olarak karmaşık bir jeolojik yapıya sahiptir. Bu karmaşık jeolojik özellikler ise fay hatları, dayklar, ezik zonlar, suya doymun kum mercekleri ve killer, oldukça ayrışmış ve bozunmuş bloklu zonlar, sık formasyon değişimleri ve litoloji geçişleri ve olarak sıralanabilir.

Mecidiyeköy-Mahmutbey metro hattının projelendirilmesi aşamasında, hattın tünel güzergâhı için ortalama 200-250 metre aralıklarla, kısmen daha da sık aralıklarla temel araştırma sondaj çalışması yapılmıştır. Ayrıca istasyon yapılarının inşa edildiği bölgelerde de daha sık aralıklarla temel araştırma sondaj çalışmaları yapılmıştır. Bu temel araştırma sondaj çalışmaları sırasında gerek yerinde gerekse laboratuvar şartlarında sondaj çalışmaları sırasında elde edilen numuneler üzerinde yapılan deneylerle güzergâhın jeolojik ve jeoteknik mühendislik özellikleri ortaya çıkarılmıştır.

Genel olarak, güzergâhın TBM ile tünel inşası yapılan bölgelerinde iki baskın formasyon türüyle karşılaşılmıştır. Bunlardan ilki üst miyosen-pliosen döneminden kalma olan Çekmece formasyonu ve onun Çukurçeşme ve Güngören üyeleridir. Diğeri ise karbonifer dönemine ait olan Trakya formasyonudur. Yukarıda da bahsi geçtiği üzere bu formasyonlar içerisinde ezik zonlar, suya doymun kum mercekleri ve kazı aynasında iki veya daha fazla formasyonların gözlemlenmesi gibi karmaşık jeolojik özelliklerden bazıları ile de haliyle karşılaşılmıştır.

Şekil 2-3’te metro güzergâhının geçtiği bölgelerdeki formasyonlar ölçeksiz harita üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2-3: Metro hattının geçtiği bölgelerin genel jeoloji haritası(Ölçeksiz)

2.2.2. Jeomorfoloji

Değişik doğrultularda planlanan Mecidiyeköy- Mahmutbey metro hattı güzergâhının iki adet derin yarılmış olan Kâğıthane ve Alibeyköy derelerinin vadi tabanı üzerinde bulunuyor olması sebebiyle, bu dere yamaçlarında en düşük nokta +14 kotlarına kadar düşmüş, diğer bölgelerde ise genellikle hafif ve engebeli topografya sebebiyle en düşük ve en yüksek noktalar ise +15 ile +130 arası kotlarda dalgalanma gözlenmiştir.

Alibeyköy ve Kağıthane derelerinin bulunduğu bölgelerde vadi tabanına yakın geçmekte olan bölgede metro hattı için 2 adet viyadük inşası yapılmıştır. Engebeli bir topografyaya sahip olan bu dere yamaçlarında istasyonlar arasındaki eğimin hattın işletilebilmesi amacıyla aşılması ve güzergâhın aşırı dalgalanmasının böylece önüne geçilmiştir.

Bahsi geçen bu iki dere yatağı dışında güzergâh boyunca dikkate değer vadi-dereden geçilmemiştir. Kısmen bazı bölgelerde eski dönemlerde güzergâhın belirli bölgelerinde mevcut olmuş ancak günümüze ulaşmayan kuzey-güney yönde akan derelerin oluşturmuş olduğu hafif-orta düzeyde dalgalı araziler kat edilerek güzergâhın tünel kazıları tamamlanmıştır.

2.2.3. Stratigrafi

İstanbul ili ve çevresi genel olarak karmaşık bir jeolojiye sahip olmakla birlikte proje güzergâhında iki baskın formasyon ile karşılaşmıştır. Bunlardan ilki üst miyosen-pliosen döneminden kalma olan Çekmece formasyonu (Tç) ve onun Çukurçeşme (Tçç) ve Güngören (Tçg) üyeleridir. Diğerisi ise karbonifer dönemine ait olan Trakya formasyonudur.

Çekmece formasyonu zemin özelliği göstermekle beraber Trakya formasyonu ise kaya özelliği göstermektedir. Trakya formasyonunun da aşırı ayrılmış kayaları da bazen zemin özelliğinde olduğu kabul edilmektedir. Şekil 2-4'te Mecidiyeköy- Mahmutbey metro hattının bulunduğu Avrupa yakasının stratigrafik kolon kesiti görülmektedir.

ZAMAN	DEVİR	ALT DEVİR	LİTOLOJİ	LİTOLOJİK ÖZELLİKLER
SENOZOİK	KUVATERNER			ALÜVYON Çakıl, Kum, Silt, Kil
	TERSİYER	PLİOSEN		DOLGU MALZEMESİ Kuvars Çakıllı Kil, Silt
		MİYOSEN		BAKIRKÖY FORMASYONU Kireçtaşı
				GÜNGÖREN FORMASYONU Marn Aratabakalı Kil
				ÇUKURÇEŞME FORMASYONU Siltli Killi Kum, Kum
		OLİGOSEN		GÜRPINAR FORMASYONU İnce bantlı Kil
	PALEOZOİK	ORTA-ÜST EÖSEN		CEYLAN FORMASYONU Kalkerli Kil, Killi Kireçtaşı, Kalkarenit, Killi Çakıllı Kum, Kumlu Kil Kırıklareli Kireçtaşı, Resifal Kireçtaşı, Marnlı Kireçtaşı
			TRAKYA FORMASYONU Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı, Kiltası	
	KARBONİFER			

Şekil 2-4: İstanbul'un Avrupa yakasının stratigrafik kesiti (Arıç, 1955; Dalgıç, 2004; Güven, 2009)

1-Çekmece Formasyonu (Tç);

İstanbul ilinin Avrupa yakasının batı kesiminde, Marmara Denizi ile Karadeniz kıyıları arasında yaygın olan Neojen çökellerin Çekmece gölleri civarındaki istifli Nafiz ve Malik (1933) tarafından ilk kez "Çekmece Serisi" adıyla incelenmiştir. Çekmece Formasyonu alttan üste doğru kum, kil-mil-kum-kireç karışımlarıyla ve bu karışımla birlikte kireçtaşının egemen olduğu düzeyleri kapsar. Bu düzeyler birbirleriyle yanıl ve düşey giriklik göstermekte olup, biri diğerinin eşdeğer kaya türlerini arakatkılar halinde bulundurlar (Turnacıgil, 2008).

Çukurçeşme Üyesi (Tçç); Çekmece Formasyonunun Çukurçeşme üyesi sarımtırak kahve ve pas renkli gevşek kil çimentolu veya çimentosuz, çakıl ve silt arakatlı, tutturulmamış ya da kötü tutturulmuş, mika içeriği bol ve kumtaşlarından oluşur. Yapının alt kesimlerinde ise egemen olarak çakıllı ortam, üst kesimlerinde de silt ve killi kum-kumtaşları bulunur (Tüysüz, 2003).

Mecidiyeköy Mahmutbey metro projesi güzergâhında kısmen görülen Çukurçeşme üyesi yapısı itibarıyla kum ve siltli ince kumdan oluşmakta olup sondaj verilerine göre sıkı yerleşmiştir. Kumlar, genellikle ince-orta taneli, ağırlıklı olarak kuvars kökenlidir. Tünel kazı kotunda Çukurçeşme üyesi kum tabakasının bir kısmı yeraltı su seviyesi üstünde, bir kısmı ise yeraltı su seviyesi altında kalmıştır. Üyenin içerdiği kil yoğunluğu Güngören üyesine yakın kesimlerinde ve Güngören üyesinin örttüğü kesimlerde artmaktadır (Polat, 2015).

Hat kazıları boyunca oldukça akıcı bir yapıya sahip olan bu üye akifer olma özelliğinden dolayı içerisinde yer altı suyu ihtiva etmektedir. Bu üyenin olduğu bölgelerde ferdi kullanım amaçlı açılan su kuyuları mevcuttur.

Resim 2-1’de Mecidiyeköy- Mahmutbey metrosu çalışmalarında TBM ile yapılan anahat tünelleri kazısı sırasında Kazım Karabekir İstasyonu ile Yenimahalle istasyonu arası anahat tünelinin Kazım Karabekir İstasyonuna bağlantısı sırasında (Km:14+017) geçilen Çekmece formasyonunun Çukurçeşme üyesi görünmektedir.

Bu tabaka için arazi ve laboratuvar elde edilen mühendislik verileri aşağıda Tablo 2-1’de verilmiştir.

Tablo 2-1:Çukurçeşme üyesine ait arazi ve laboratuvar verileri

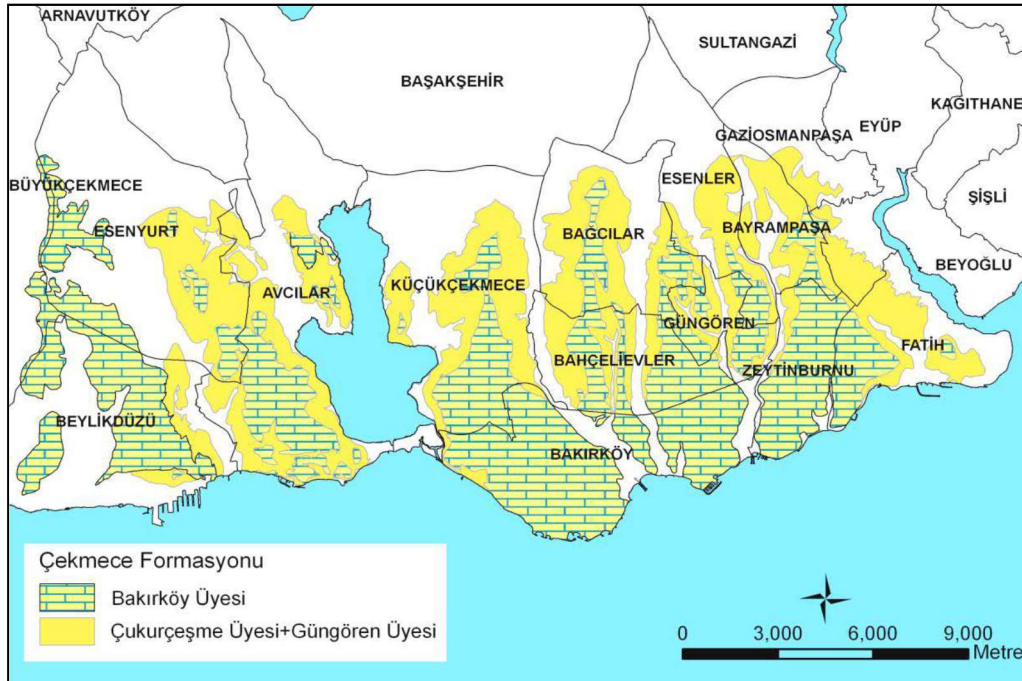
Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama
Penetrasyon Direnci - N30	35	50	45
Çakıl %	0	10	3
Kum %	17	84	58
Kil + Silt %	13	78	39
Net Limit Basınç – PL (MPa)	1,6	1,9	1,7
Presiyometrik Modülü – Em (MPa)	11	19	15,7
Zemin Gurubu (USCS)	SM (Sıkı Kum)		

Birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre bu tabaka SM gurubu zemine, Penetrasyon direncine göre ise Sıkı Kuma karşılık gelir (Polat, 2015).



Resim 2-1:Kazım Karabekir istasyonu çıkışında (Km:14+017)gözlemlenen Çekmece formasyonunun Çukurçeşme üyesi (Siltli kum)

Ayrıca Şekil 2-5'te İstanbul ili Avrupa yakasında bu formasyon ve üyelerinin yayılımı harita üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2-5: Çekmece formasyonunun (Tç) yüzeyleme haritası (İ.B.B. Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, 2011).

Güngören Üyesi (Tçg); Stratigrafik olarak üst miyosen yaşlı olan bu üye yeşilimsi gri, açık kahve renkli, ince kum mercikleri bulunan kil tabakalarından oluşur. Bu yapı Güngören Formasyonu (Sayar, 1976) ya da Çekmece Formasyonunun Güngören Üyesi (Sayar, 1989) adlarıyla incelenmiştir. Güngören Üyesi bol mikalı ve kuvars gereçli, çapraz katmanlı kum-kil ardışıyla başlar, daha üstte istifin egemen kaya türünü oluşturan yer yer makro fosil kavkılı yeşil killer yer alır. İnce taneciklerin yoğunlukta bulunduğu bu üye enerjisi düşük, durgun göl ve bataklık ve zaman zaman da denizle bağlantılı ortam koşullarını yansıtır (İBB Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, 2007).

Metro güzergahı boyunca bu seviye, gri-koyu gri renkli, sert siltli kil ve killi siltlerden oluşmakla birlikte, üstteki tabakaya benzer şekilde, yaygın olarak siltli ince kum, kumlu silt ve kumlu kil ara seviyeler bulundurulur. Killi seviyeler sert kıvamlı, kumlu kısımlar ise sıkı - çok yerleşmiştir. Üste oranla nispeten daha fazla pekişmiş, yer yer kayaç özelliği kazanmış olmakla birlikte, yer yer killi turba vb. zayıf seviyeler bulundurulur. Gri rengi ile üst ve alt seviyelerden kolaylıkla ayrıt edilir. Bu seviye için arazi ve laboratuvar da elde edilen mühendislik verileri aşağıda Tablo 2-2' de verilmiştir.

Tablo 2-2: Güngören üyesine ait killi ortamın ait arazi ve laboratuvar verileri.

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama
Penetrasyon Direnci - N30	26	>50	45
Çakıl %	0	5	1
Kum %	0	72	18
Kil + Silt %	28	100	83
Likit Limit - LL%	34	92	58
Plastik Limit - PL%	8	26	16
Plastisite İndisi -PI	26	70	42
Net Limit Basınç – PL (MPa)	1	2	2
Presiyometrik Modülü – Em (MPa)	7	50	17
Serbest Basınç Dayanımı - qu (kPa)	150	496	317
Kohezyon Cu (kPa)	70	276	158
İçsel Sürtünme Açısı ϕ derece	5	12	7
Zemin Gurubu (UCS)	Ağırlıklı olarak CH, kısmen SM, MH, CL ve ML		

Güngören killeri geçirimsiz olarak kabul edilmesine rağmen, Çukurçeşme üyesi ise akifer özelliği gösteren kumlu çakıllı yapıyı içermektedir (Yalçın ve Yetemen, 2009).

Güzergâh boyunca, kaya türü olarak yalnızca İstanbul Grovıkları olarak bilinen ve Çamurtaşlı – Kumtaşlı – Kıltaşı (veya Kumtaşlı – Şeyl) ardalaşmasından kurulu, Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu mevcuttur. Birim ilksel olarak açık-koyu gri renkli olmasına karşın çok ayrılmış kesimlerde sarı-kahve, orta derecede ayrılmış kesimlerde ise zeytin yeşili renklidir. Yoğun olarak eklem, çatlak, fay ve makaslama gibi süreksizlik düzlemleri ile kesilmiştir. Birim içindeki kıltaşı seviyeleri laminalı-ince tabakalı, çamurtaşlı seviyeleri ince-orta tabakalı, kumtaşlı seviyeleri ise nispeten orta-kalın tabakalıdır.

Birim genelde sık kırıklı-çok parçalı olmakla birlikte orta-seyrek kırıklı kesimler de mevcuttur. Güzergâh boyunca sınırlı sayıda kaya mostrası gözlenebilmiştir. Bu mostralardan, kaya biriminin tabakalanma dâhil en az üç süreksizlik sistemi ile bir gelişmiş güzel çatlak ile kesildiği, tabakalanma düzlemlerinin ağırlıklı olarak gübeybatı yönde eğimli olmakla birlikte sıkça kıvrımlı olduğu gözlenmiştir.

Yukarıda bahsedilen litolojilerin (çamurtaşlı, kumtaşlı ve kıltaşı) her biri, yer yer daha baskın olsalar da, ağırlıklı olarak ardalaşma şeklinde oldukları için, mühendislik özellikleri açısından kaya biriminde litolojiye dayalı bir gruplama yapma imkanı pek mümkün olmamıştır. Buna karşın ayrışma düzeyine bağlı bir gruplama yapma imkanı var ve mühendislik değerlendirme ve gruplama açısından daha da uygun düşmektedir. Bu bakımdan güzergâhta yer alan kaya birimi, farklı ayrışma düzeylerine göre; Çok ayrılmış kaya (W4), Orta ayrılmış kaya (W3), Az ayrılmış veya taze kaya (W1-W2) şeklinde gruplandırılmıştır (Polat, 2015).

Bu kaya birimlerine ait veriler Tablo 2-3, 2-4, 2-5'te verilmiştir.

Tablo 2-3: Çok ayrılmış kaya (W4) birimine ait mühendislik veriler

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama
Kaya Kalite Tasarımı - RQD	0	25	8
Nokta Yük indisi - $I_s(50)$ (kg/cm ²)	2,1	25	13
$\square_u = I_s(50) \times 15$	34	400	208
Tek eksenli basınç dayanımı- \square_c (kg/cm ²)	18	80	56
Presiyometrik Modül - E_m (MPa)	17	241	80

Çok ayrılmış (W4) kaya birimi genelde sarı, yer yer zeytin yeşili renkli bu kesim özellikle yüzeye yakın kısımlarda olmak üzere yaygın şekilde ayrılmıştır. Süreksizlik yüzeyleri genellikle düz, kayma izlive kil dolguludur.

Tablo 2-4: Orta ayrıışmış kaya (W3) birimine ait mühendislik veriler

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama
Kaya Kalite Tasarımı - RQD	0	65	12
Nokta Yük indisi - $I_s(50)$ (kg/cm ²)	10	50	30
$\square u = I_s(50) \times 15$	160	800	480
Tek eksenli basınç dayanımı- $\square c$ (kg/cm ²)	22,5	350	160
Presiyometrik Modül - E_m (MPa)	106	500	307

Orta derecede ayrıışmış kaya kesiminin kıltaşı-çamurtaşı kısımları genelde kirli gri-kısmen sarımsı gri, zeytin yeşili renkli, kumtaşı seviyeleri ise boz renklidir. Süreksizlik yüzeyleri kil taşlarında düzlemsel-düz, kumtaşlarında ise dalgalı, orta denebilecek düzeyde pürüzlüdür. Üste oranla, bu seviyede çatlak açıklıkları ve kil dolguları daha azdır.

Tablo 2-5: Az ayrıışmış veya taze kaya (W1-W2) birimine ait mühendislik veriler

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama
Kaya Kalite Tasarımı - RQD	0	75	22
Nokta Yük indisi - $I_s(50)$ (kg/cm ²)	20	60	30
$\square u = I_s(50) \times 15$	320	960	480
Tek eksenli basınç dayanımı- $\square c$ (kg/cm ²)	60	550	170
Presiyometrik Modül - E_m (MPa)	169	505	313

Az ayrıışmış – ayrıışmamış kaya kesiminin ise kıltaşı seviyeleri genelde koyu gri, çamurtaşı seviyeleri gri, kumtaşı seviyeleri ise açık gri – mavimsi gri renklidir. Az ayrıışmış kesimlerde süreksizlik yüzeyleri ayrışma sonucu sarı- kahve renk almıştır. Süreksizlik yüzeyleri kil taşlarında düzlemsel-düz, kumtaşlarında ise dalgalı, orta denebilecek düzeyde pürüzlüdür. Çatlak açıklıkları ve kil dolguları üstteki seviyelere göre nispeten azdır.

Her üç kaya birimine ait mühendislik verilerine bakıldığında; tek eksenli basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında, nokta yük indisi değerlerinin bir hayli yüksek elde edildiği görülmektedir. Bunun kayaç içinde yer alan mikro çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir (Polat, 2015).

Resim 2-2’de Mecidiyeköy- Mahmutbey metrosu çalışmalarında TBM kazısı sırasında aynada gözlemlenen Trakya formasyonu görülmektedir.



Resim 2-2: Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu kazısı sırasında gözlemlenen Trakya Formasyonu

2.2.4. Hidrojeoloji

Hattın hidrojeolojisi için iklim, yüzeysel su kaynakları, yeraltı su kaynakları ve Jeohidrolik ortamların gerek metro hattının planlanması gerekse metro hattının inşası sırasında karşılaşılan koşulların değerlendirilmesi yapılarak belirlenmiştir.

1-İklim

Mecidiyeköy-Mahmutbey metro hattının yer aldığı bölge, güneyden Akdeniz, kuzeyden Karadeniz ve batısından ve doğusundan ise karasal iklim tiplerinin etkisini barındıran Marmara iklim tipinin etkisindedir. Yazların sıcak ve genellikle kurak geçtiği bölgede, bahar ve kış ayları ise yağışlı geçmektedir. Sıcaklık yıl boyunca -14 ile 41 santigrat derece arasında seyredebilmektedir. Yağışların hemen hemen tamamı yağmur şeklinde olup mevsimsel durumlara bağlı olarak kışları yarı ılıman olup düşük oranlarda kar yağışı söz konusudur. Yıllık ortalama yağış miktarı 800 mm dolayındadır.

Son yıllarda iklimin değışikliği nedeniyle düzensiz yağış rejimi görölmekle birlikte, zaman zaman ani ve şiddetli yağışlardan kaynaklı sel olayları yaşanmaktadır. Ayrıca son yıllarda ortalama yağış miktarının düştüğü, bu yağışlarında düzensiz yağış rejimi şeklinde olduğı gözlemlenmektedir. Güzergâhın olduğı bölgede Eylül-Mart ayları arası en yüksek oranda yağış görülürken Mayıs-Eylül ayları arası ise en kurak dönemdir.

Metro güzergâhı ve çevresindeki yoğun şehirleşme dolayısıyla yağışların çok önemli bir kısmı akışa geçmekte ve şehrin yağmur suyu alt yapı hatları vasıtası ile derelere veya denize ulaşmaktadır. Dolayısıyla yağışın çok az bir miktarı yer altına sızabilmektedir. Güzergâh boyunca Karadeniz Mahallesi ile Tekstilkent İstasyonları arası yapılaşma az olup diğer istasyon aralıklarında oldukça yoğun yapılaşma mevcuttur ve bu bölgelerde yer altına sızan yağmur veya kar suları miktarı ise yeraltı suyu beslenmesi için yeterli değildir.

2- Yüzeysel Su Kaynakları

Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu güzergâhı İstanbul ilinin önemli derelerinden Kağıthane deresi ve Alibeyköy deresininin olduğı bölgelerden geçmekte ve bu derelerin vadi tabanına ulaşmaktadır. Günümüzde bu dereler şehirleşme nedeniyle kirlenmiştir. Ayrıca yoğun yapılaşma sebebiyle de yağmur ve kar suyu akışa geçip dere yataklarına ulaşamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı bu derelerin akarsu olma özelliği tümü ile bozulmuş ve bu dereler su kaynağı olma niteliğini de yitirmiştir. Günümüzde ıslah edilmiş olan bu dereler, son yıllarda düzensiz yağış rejiminden dolayı, yoğun yağış dönemlerinde yaşanan ciddi sel felaketleri de yaşadığı bilinmektedir.

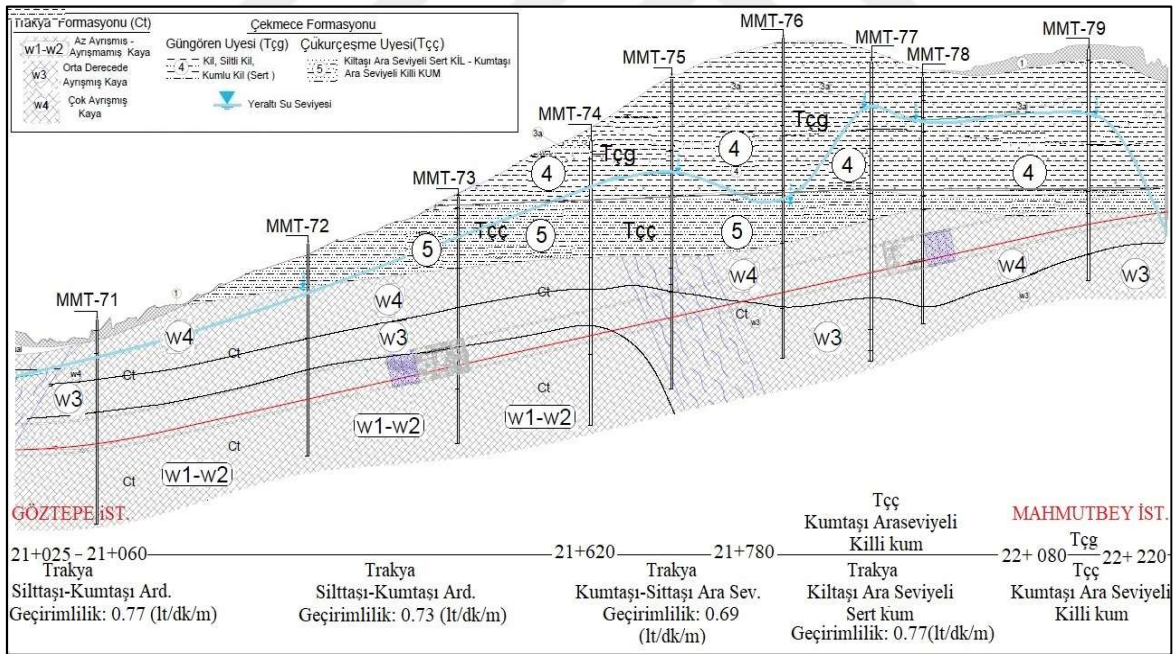
Ayrıca metro güzergâhında Göztepe İstasyonunun planlandığı kesimde kayda değer bir akış debisine sahip olmayan ve daha önce ıslah edilmiş olan Tavuklu deresi geçilmektedir. Bunun derelerin dışında güzergâhta her hangi bir su kaynağı, akar halde dere, göl veya deniz mevcut değildir.

3- Yeraltı Su Kaynakları

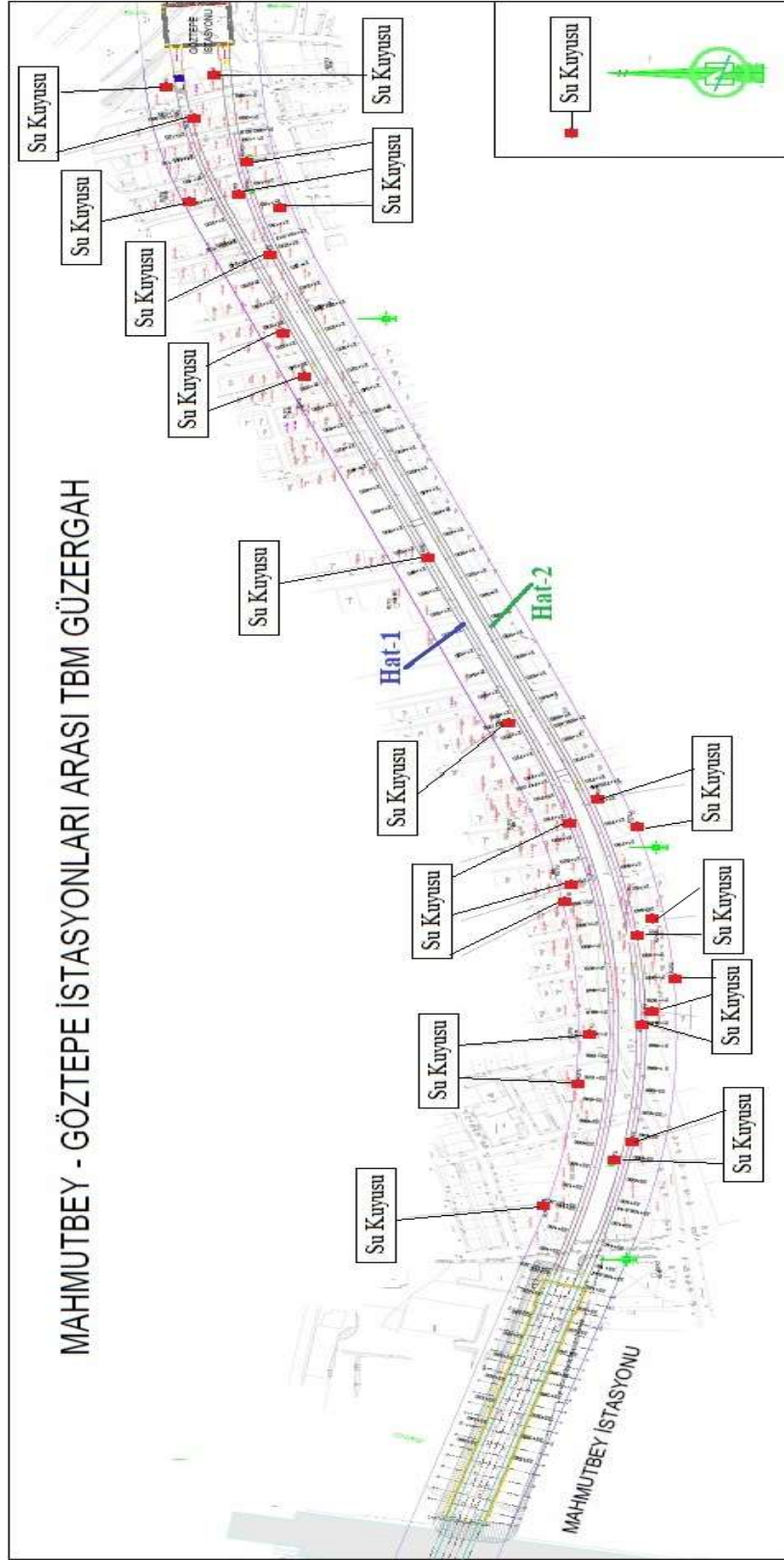
İklim bahsinde değinildiği üzere, bölgeye düşen yağış miktarının çoğı yer altı iletim hatlarıyla denize veya akarsulara karışmaktadır. Bu sebeple şehre düşen yağış yer altı su seviyesini aşırı şekilde değiştirebilecek etkiye sahip değildir. Güzergâhta yer alan Çukurçeşme üyesine ait kumlar ve yüzeylerine doğru aşırı ayrışan Trakya formasyonu akifer özelliği göstermekte olduğundan bölge sakinleri tarafından bu ortamda su üretim kuyuları vasıtasıyla su çekilmektedir.

Özellikle Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi istasyonu arasında ve Mahmutbey İstasyonuna yakın kesimlerde kum içerikli ara seviyelerinden ve ayrılmış kaya ortamdand yoğun miktarda su çekilmektedir. Ayrıca Yüzyıl-Göztepe İstasyonları arasında aşırı ayrılmış kaya ortamda bu bölgelerdeki sakinler tarafından ferdi kullanım amaçlı su kuyuları açıldığı belirlenmiştir.

Ayrıca metro tünelleri güzergahı ve tünel etki alanında yapılan bina durumları tespit çalışmaları esnasında Şekil 2-8’de görüleceği üzere Göztepe istasyonu ile Mahmutbey istasyonu arası kesimde ferdi kullanım amaçlı su kuyularının olduğu tespit edilmiştir.Şekil 2-7’de görüleceği üzere bu su kuyuları Trakya formasyonunun çok ayrılmış ve Çekmece formasyonunun Çukurçeşme üyesi kumlarında olduğu görülmektedir. Bu kuyuların derinlikleri 10-30 m arasında değiştiği görülmüştür. Resim 2-3’te de Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu arası bir yapının bodrum katında ferdi kullanım amaçlı açılmış olan su kuyusu görülmektedir.



Şekil 2-7: Göztepe-Mahmutbey İstasyonları arası Jeolojik profili(w3-w4: Trakya Formasyonu - Orta- çok ayrılmış kaya, 4:Çukurçeşme üyesi-siltli kum)



Şekil 2-8: Metro hattının Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu arası tespit edilen ferdi ve ticari kullanım amaçlı açılmış su kuyuları haritası (Ölçeksiz)

4- Jeohidrolik Ortamlar

Tünel güzergâhının önemli bir kısmında karşılaşılan Trakya formasyonu yapısı itibariyle geçirimsiz özelliktedir. İstanbul ilinin tektonizma birliklerine sahip olması bu formasyona zamanla kırıklı yapı kazandırmıştır. Bu kırıklı yapıların oluşması zamanla yüzeye yaklaştıkça ayrışma oranını arttırmıştır. Yüze doğru ayrışma oranının arttığı için yüzeye doğru geçirimsizlik artmaktadır. Formasyonun yaklaşık 15-20 metre derinlikten sonrası az geçirimli olarak kabul edilir. Güzergâh kazıları sırasında kazı ortamının geçirimsiz, ayrışmamış-az ayrışmış kaya, kazı kotunun üst kesiminde geçirimli ayrışmış kayaların olduğu ortamlardan yoğun şekilde geçilmiştir. Yer altı suyu tablasının oluşturduğu basınç etkisiyle tünel kazıları esnasında Trakya formasyonundaki çatlaklı kaya yapılarından bazen yoğun şekilde basınçlı su gelirleri olduğu görülmüştür.

Güzergâhın Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonunun büyük kısmında, Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonları arasında ve Karadeniz Mahallesi İstasyonu yakınlarında Çekmece formasyonunun Güngören üyesi, ağırlıklı olarak yüksek plastisiteli killerden oluşmuş olup geçirimsizdir. Güzergâhın Karadeniz Mahallesi ile Yenimahalle İstasyonları arasında ve Kazım Karabekir İstasyonu çevresinde Çekmece Formasyonunun Çukurçeşme üyesi yoğun olarak kum ve siltli kumlardan oluşmuş olup, yarı geçirimli-geçirimli özelliktedir.

Buna ek olarak, İstanbul'un birçok yerinde olduğu üzere, çalışmamıza konu metro güzergâhında akifer özelliği olan bu formasyonlardan ferdi kullanım ve ticari amaçlar için yer altı su üretim kuyuları vasıtası ile yeraltından yoğun su çekilmektedir. Ayrıca Çukurçeşme üyesi kumlarında yapılmış olan temel araştırma sondajlarında, 18-20 m aralıklarında yeraltı su seviyesi ölçülmektedir. Yeraltı su seviyesi kısmen de tünel kazı kotunun altında kalabilmektedir.

Ayrıca Trakya formasyonunda TBM ile kazı yapılırken kayaya kazı sırasında iletilen titreşimler sonucu ayrıca geçirimsizliği artıran ilave çatlakların oluşturulması beklenir.

2.3. MÜHENDİSLİK JEOLojİSİ

2.3.1. Zemin - Kaya Birimlerinin Sınıflandırmaları

Yeraltı kazılarının güvenli ve ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi, karşılaşılabilecek kaya ve zemin birimlerin doğru şekilde belirlenmesi, sınıflandırılması ve mühendislik parametrelerin doğru şekilde belirlenmesi ile mümkündür. Bu kapsamda özellikle güzergâhın tünellerden oluşması sebebiyle zemin ve kayaların tünel kazıları açısından sınıflandırılması yapılmıştır. Bu sınıflandırmalar metro inşa çalışmaları başlamadan önce yapılan yüzey araştırma sondajlarında elde edilen veriler ve numuneler üzerinde yerinde ve laboratuvar şartlarında yapılan deney ve testlerle belirlenmeye çalışılmıştır.

Güzergâhtaki kaya kütlelerin sınıflandırılmasında özellikle kayanın kütle özellikleri dikkate alan; 1-Yer altı kazılarında stabilite sorununun çözülmesi amacıyla, kaya kalitesi tanımlaması, eklem takımı sayısı, eklem pürüzlülük sayısı, eklem ayrışma sayısı, eklem suyu azaltma faktörü, gerilim azaltma faktörü parametrelerini içeren N. Barton, R. Lien ve J. Lunde (1974) tarafından tünel destekleme tasarımı için geliştirilmiş ve sayısal olarak kaya kütle kalitesini ifade eden Tünel kaya sınıflaması(Q).

2-Kayanın mukavemeti, RQD değeri, eklem sıklığı, eklem durumu ve yer altı suyu parametrelerine bağlı olarak belirlenen parametrelerine bağlı olarak Bienawski (1989) tarafından geliştirilen eklemli kaya kütlelerinin jeomekanik kaya sınıflaması (RMR) sınıflaması.

3- GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Indeks=GSI) Sınıflaması yapılmıştır. Tünel güzergâhının zemin sınıflaması yapılırken ise Terzaghi (1950), Huer (1974), Huer ve Virgens (1987), Deere ve diğerleri (1969) tarafından hazırlanan zemin sınıflamaları kullanılmıştır.

Ayrıca kaya birimleri mühendislik açısından Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği tarafından (ISRM, 1981) önerilen Tablo 2-6'deki kayanın dayanımı dikkate alınmaksızın, renginde ve süreksizlik yüzeylerinde oluşan değişimler dikkate alınarak ayrışma sınıflamasına göre yapılmıştır.

Tablo 2-6:Kaya kütlesi için ISRM (1981) tarafından önerilen ayrışma sınıflaması

Sınıf	Tanım	Tanımlayıcı Özellikler
W1	Ayrışmamış	Ana kayanın ayrıştığına ilişkin dayanımında bir azalma veya renk değişimi gözlemlenmez.
W2	Az Ayrışmış	Kayanın eklem yüzeylerinde çok az renk değişimi ve kayanın dayanımında taze durumundan biraz daha zayıflama gözlenir.
W3	Orta Ayrışmış	Kaya yüzeylerin rengi değişmiş ve yarısından daha az bir kısmı ayrışmış veya parçalanmış, ayrışmalar kayanın içine nüfuz etmeye başlamış, fark edilir oranda zayıflamış ve kısmen taze kaya özelliği de gözlenir. Kayanın dayanımındaki azalma fark edilir boyuttadır.
W4	Çok Ayrışmış	Kayanın orijinal dokusu değişmiş, parçalanmış, rengi değişmiş, süreksizlikler açık ve yüzeylerin rengi değişmiştir. Kaya çoğunlukla toprak zemine dönüşerek ayrışmış ama ana kayanın yapısını korumakta, süreksizlerin olduğu bölgelerde kayanın orijinal dokusu değişmiş ama anakaya halen mevcuttur.
W5	Tamamen Ayrışmış	Kayanın orijinal yapısı ve dokusu, rengi değişmiş ve kayanın tümü toprak zemine dönüşmüş ama zemin içerisinde küçük ana kaya parçaları da bulunabilir. Ayrışma sonucu ortaya çıkan ürünü kısmen anakayanın özelliklerini yansıtır.

2.4. TBM İLE TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ

2.4.1. Tünel Açma Makineleri (TBM) ve TBM Seçimi

Günümüzde inşaat sektörünün metro yapıları, yer altı yapıları arasında büyük önem taşımaktadır. Büyük şehirlerde ulaşım sorunları için yapılan metro projeleri çevreye ve yoğun yapılaşmaya zarar verilmemesi için yüzeyden projelendirilememektedir. Metro hatları tüneller açılarak yeraltına alınıp inşa edilmekte hem yoğun yapılaşmalara zarar verilmeden hem de ekonomik olarak tamamlanabilmektedir. Metro tünellerinin açılması esnasında her türlü jeolojik koşulda verimli çalışabilen gelişmiş yapısıyla, yüzeydeki yapılara zarar vermeden hızlı ilerleme yapabilmeleri sebebiyle, son zamanlarda TBM'ler tercih edilmektedir.

Klasik tünel açma yöntemlerinin yoğun yapılaşmalara zarar vermemesi için zorunlu kullanılır yöntem haline gelen TBM ile Tünel açma yöntemi, TBM'lerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri yüksek olması dezavantajına rağmen, ilerleme hızının yüksek olması ve metro çalışmalarının hızlı bir şekilde tamamlanması avantajlarından dolayı günümüzün tercih edilir tünel açma yöntemi haline gelmiştir.

Metro hattı inşasında kullanılacak TBM'ler, metro güzergâhının jeolojik özellikleri dikkate alınarak tasarlanmaktadır. TBM'ler tünelin tam eksenini aynı anda kazabilmekte ve tünel çapıyla aynı çapta tasarlanmaktadır. Yapı itibariyle sahip oldukları aksamlara göre farklılık göstermekle birlikte her türlü jeolojik koşul için tasarlanabilmektedirler.

Tasarlandıkları projelerin jeolojik özelliklerine göre değişmekle birlikte bir TBM, zemini kazabilmesi için kesici kafa, kazılan jeolojik ortamın kazı sırasında tahkimat gereklilik durumlarına göre kalkanlı ve kalkansız olabilen, TBM işletilmesi amacıyla gerekli malzeme ve aracı üzerinde barındıran çok parçalı köprü sistemlerinden oluşmaktadır.

Kesici kafa üzerinde zemini parçalayıcı ve örseleyici kesici ekipmanlar, köprü dizisi üzerinde ise bant sistemi, zemin şartlandırma sistemi, havalandırma fanları gibi işletme ekipmanları bulunmaktadır. Kalkan kısmı ise akıcı ve kendini tutamayan zeminlerde kalıcı tünel kaplaması yapılana kadar TBM içerisindeki ekipman ve çalışanlarına zarar vermesini önlemektedir.

Günümüzde yine açılacak tünelin çapına göre değişmekle birlikte toprak basınç dengeleyici EPB-TBM'ler, Sert kaya (Hardrock) TBM ve karışım şerbetiyle desteklenmiş (Slurry) TBM'ler yaygın olarak kullanılmakta olup yine değişik parametreler dikkate alınarak tasarlanan farklı TBM türleri mevcuttur. Ayrıca TBM'ler karayolu tünelleri, yer altı iletim hat tünelleri, derivasyon tünelleri gibi tünel imalatlarında kullanılmakta olup kullanım amaç ve özelliklerine göre farklı çaplarda tasarlanmaktadır.

Sert kayada kazı yapılırken zemin özellikleri gereği kalıcı tünel kaplaması yapılana kadar tahkimat gereği duyulmuyorsa destek systemsiz sert kaya TBM'leri kullanılırken, yumuşak, akıcı ve kendini tutamayan zeminlerde ise EPB ve Slurry tipi TBM'ler tercih edilir.

TBM tasarımında, projede kapsamında geçilecek jeolojik ortamlar incelenir. Geçilecek bu ortamların mühendislik parametreleri, su içeriği, kullanılacağı amaçlar dikkate alınarak kullanılacak TBM'in tipi ve özellikleri belirlenir.

Özellikle kil, silt, kum, çakıl gibi yumuşak ortamdan, orta- aşırı sert kaya ve bunların arasındaki orta yumuşak ortamlara ve bu ortamların hâkim olduğu bölgelerde yapılacak kazılarda kullanılan TBM tiplerini destek ihtiyaçlarına göre Tablo 2-7'deki gibi ele almak mümkündür.

Tablo 2-7:Zemin sınıflamalarına göre TBM tipleri

Zemin sınıfı	Tünel Çapı (mm)	0-500	500-1000	1000-2000	2000-4000	4000-7000	7000-15000	>15000
Kil	Mikro-tünel açma makinası		Toprak basınç dengeli veya mikro tünel açma makineleri				Toprak basınç dengeli (EPB), Karışım şerbetiyle desteklenmiş (Slurry)	
Silt								
Kum								
Çakıl								
Karışık toprak				Yarı korumalı sistem			Enjeksiyonlu hibrid kalkan	
Yumuşak kaya						Tam korumalı veya çift kalkan		
Orta-sert kaya								
Sert kaya								Açık tip TBM

İstanbul jeolojisi karmaşık bir yapıya sahip olduğundan Avrupa ve Asya yakasında inşa edilen tünellerde EPB tipi TBM'ler tercih edilirken bu iki yakanın bağlantısı için mevcut deniz seviyesinin altında inşa edilen tünellerde ise Slurry tipi TBM'ler tercih edilmektedir. Mecidiyeköy- Mahmutbey metro projesinde EPB-TBM'ler kullanıldığından sadece bu tip makine ve çalışma prensibinden özetle bahsedilecektir.

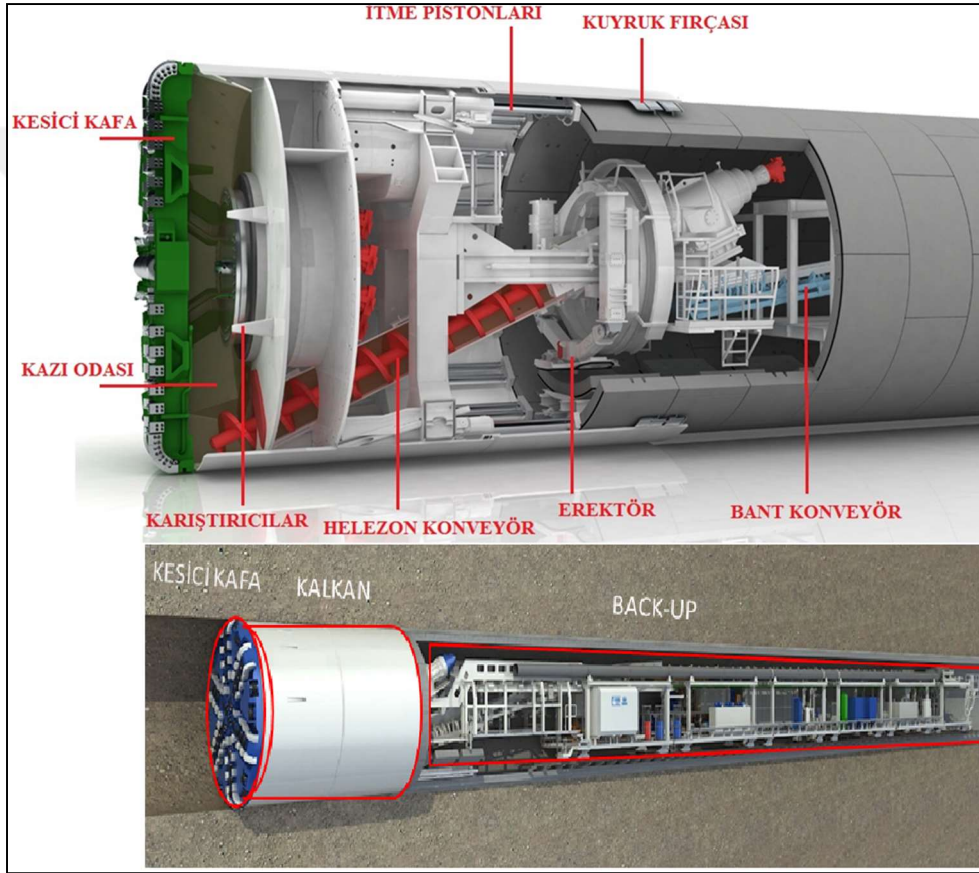
2.4.2. Yumuşak Toprak Kazısı ve EPB Makinalar

Zeminden gelen basıncı dengeleme özelliğine sahip ve kalkanlı olarak üretilen bu makineler günümüzde yaygın olarak akıcı zemin koşullarında kullanılmaktadırlar. Yapısı gereği kazdığı malzeme ile kazı aynasının ön kısmında aynayı destekleyecek basınç oluşturup, kazı aynası ve yüzeyde deformasyonların oluşmasını önleyerek kazısını tamamlamaktadırlar. Ayna önünde kazılan malzeme ile oluşturulan bu basınç, zeminin ihtiyaç duyduğu oranlara göre kontrollü olarak artırılıp azaltılabilmektedir.

Bu basınç ile yüzeyden gelen yükler ve yer altı suyunun oluşturduğu basınca eşit tutularak kazıların emniyetli şekilde tamamlanmaları sağlanmaktadır.

Ayrıca kesici kafasının ihtiva ettiği özellikler gereği hem sert kaya ortamında hem de yumuşak zemin ortamında, kesici ekipmanlarında ortama göre değiştirilerek kazı yapılabilmesi karmaşık jeolojik yapılarda kazı için önemli bir avantaj olmaktadır.

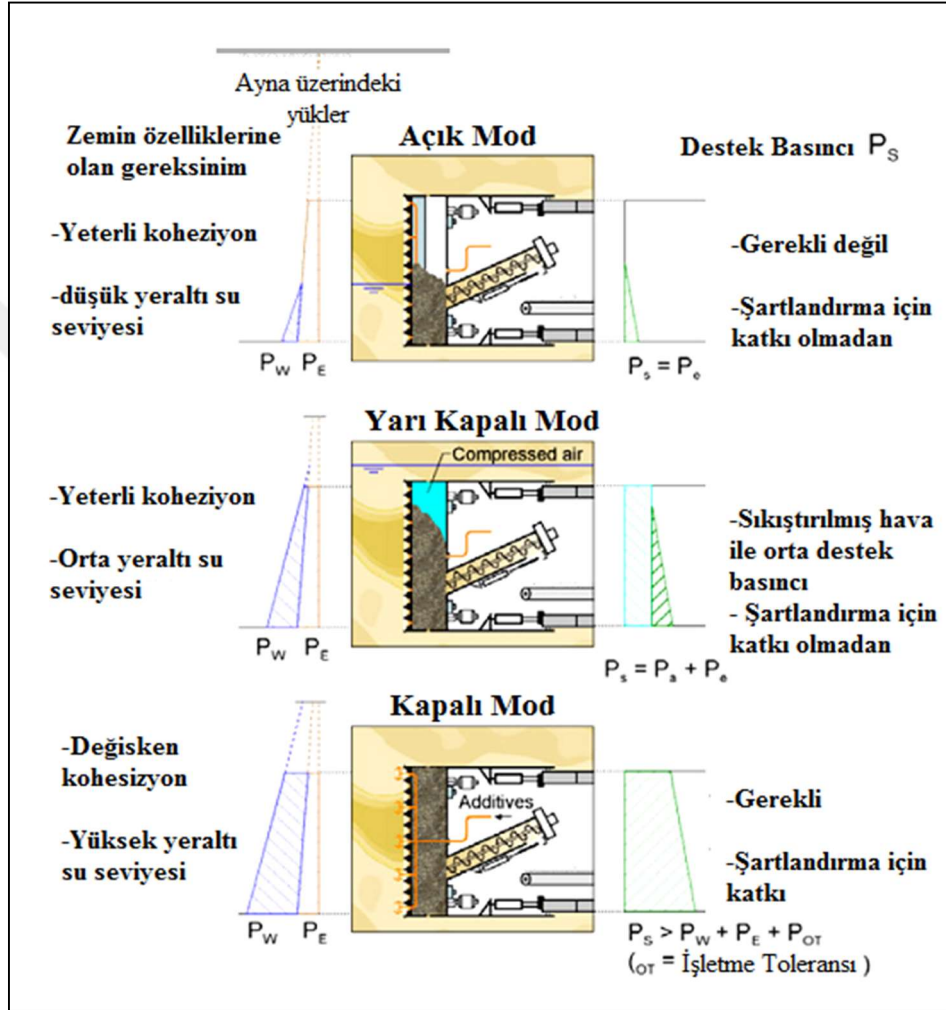
EPB-TBM’de, dönen kesici kafa üzerindeki kazıcı uçlara pistonlar tarafından uygulanan hidrolik basıncın etkisiyle zemin kazılmakta ve kazılan zemin kesici kafanın arkasında bulunan kazı odasına alınmaktadır. Kazı odasına alınmış bu kazılan malzeme, TBM işletme ekipmanları vasıtasıyla ayrıca kazı odasına alınan hava ve kimyasal katkı malzemeleri ile şartlandırılmaktadır. Şartlandırılan bu malzeme ise aynada kazılan zemin için öngörülen zemin basıncına denk bir basıncın sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. EPB-TBM’in genel görünümü ve iç kesiti ise Şekil 2-10’daki gibidir.



Şekil 2-9:EPB-TBM iç kesiti ve genel görünümü

Kazı esnasında zemin koşullarına göre EPB TBM ile açık, yarı açık veya tam kapalı modda olmak üzere üç farklı sistemle kazı yapmak mümkündür. Kazı için hangi sistemin kullanılacağını belirlemek için de güzergâh boyunca yapılmış olan jeoteknik etütlerden ve kazı sırasında karşılaşılan jeolojik ortam gözlemlenerek belirlenir. Zeminin akıcılık durumuna göre bu yöntemlerden biri uygulanabilmekte olup, kazı hızına da etki eden bu yöntemlerden en uygunu seçilerek kazı verimi ve TBM performansı artırılabilir.

Şekil 2-11’de farklı zemin şartlarında hangi modda kazı yapılabileceği örneklenmiştir. Bu modlar açık, kapalı ve yarı açık mod olmak üzere 3 kısımdan oluşur. Bu üç farklı modla zeminin ihtiyaç duyduğu basınç değerleri sağlanarak kazının emniyetli olarak yapılmasına ve tamamlanmasına yardımcı olurlar.



Şekil 2-10: EPB TBM Kazı Modları (Barbende, Hoek, Marinos, & Cardoso, 2005)

TBM'in ön kısmında, kazı odasında zeminin ve yer altı sularının oluşturduğu basıncı bileşenlerini ölçen basınç sensörler bulunmaktadır. Bu sensörler vasıtasıyla ölçülen değerler kazı anında görülebildiğinden herhangi bir jeolojik değişim koşullarında da anlık müdahale imkânı sağlamaktadır. Ayrıca kazı öncesi yüzey araştırma sondajları değerlendirilerek belirlenen geçilecek her zemine uygulanacak olan teorik basınç değerleri ve bu sensörlerin ölçtüğü değerler karşılaştırılarak, en uygun basınç değeri ortamının oluşması sağlanarak kazılar tamamlanır.

Bir EPB TBM yapısı itibariyle 3 ana kısımdan oluşmaktadır.

1-Kesici Kafa: Kesici kafa zeminin fiziksel parametreleri dikkate alınarak tasarlanmış ve üzerinde aşındığında veya farklı zemin koşullarına göre değiştirilebilme imkânı tanıyan kesici ekipmanlar bulunduran, kazı sırasında aşınmaya dayanımlı malzemelerden ve tünel çapıyla aynı çapta olarak üretilmiş TBM aksamıdır. Zemin parametrelerine göre kesici kafa üzerinde kazılan malzemeyi içeri alan açıklıkların boyutları değişmektedir. Ayrıca kesici kafa üzerinde bulunan aynanın kazılmasını sağlayan farklı zemin koşullarına göre farklı özelliklerde tasarlanmış kesici ve kazıyıcı ekipmanlar bulunur. Bu ekipmanlar aşınma sonrası veya kazı yapılan ortama uygun değilse kazılan zemin koşullarına uygun başka bir tasarımlarla değiştirilebilmektedir.

2- Kalkan: TBM'in ana gövdesini oluşturan kalkanlar üç farklı kısımdan oluşur. Üzerinde kesici kafayı döndüren motorlar ve kazı eksenini boyunca TBM'in ilerlemesine ve yönlendirilmesine yardımcı olan itme ve yönlendirme piston gruplarını barındırır. Ayrıca kalkanın son kısmında tünel çevresinden gelen yer altı sularını ve basılan enjeksiyonun tünel içerisine yönlendirilmesini engel olan fırça sistemleri mevcuttur.

3- Köprü Dizisi (Gantry): Köprü dizisi, TBM'in işletilmesi amacıyla gerekli tüm ekipmanları üzerinde barındıran, tünel ilerlemesine paralel olarak tekerlek veya raylı sistem vasıtasıyla TBM ile hareket eden kısımdır. Bu dizi üzerinde havalandırma sistemi, zemin şartlandırma sistemi, enjeksiyon seti, elektrik trafoları, hafriyat transfer bantları gibi TBM'in işletilmesi için gerekli ekipmanları taşıyan sistem olup uzunlukları tünel çapına göre 80-120 m arasında değişmektedir.

TBM'in hidrolik sistemini soğutma amaçlı tünel dışından TBM çalışmasını destekleyen sistemlerde ayrıca bulunmaktadır.

Ayrıca TBM üzerinde kazılan zemini şartlandırmak, kesici kafa ve kesici ekipmanların aşınmasını engellemek amaçlı zemin şartlandırma sistemi bulunmaktadır. Bu sistem kazı odasına, aynaya ve helisli hafriyat transfer yapısına kimyasal köpük ve polimerleri zeminin koşullarına göre pompa marifetiyle belirli oranda ve belirli basınçla basarak gönderir. Böylece hem makine performansı arttırılmakta hem de kazı odasında zeminden gelen yüklere karşı koyma amacıyla kazılan malzeme şartlandırılarak, ayna yüzeyinin her kesimine dengeli basınç ulaştırılması sağlanmaktadır.

Farklı zemin türlerine göre farklı tasarlanmış olan zemin şartlandırıcı kimyasal katkı malzemeleri mevcuttur. Örneğin, bazı kimyasal malzemeler sert zeminde kesici kafa ve keski ekipmanların aşınmasını önlerken, bazı kimyasallar ise yumuşak ve su içeriği fazla olan zeminin kazıldıktan sonra kazı haznesinden transferini ve taşınmasını kolaylaştırmaktadır. Yine bazı katkıları ise pekişmiş killi yapılarda killeri ayrıştırarak kesici kafa ve kazı haznesindeki tıkanmaların önüne geçmektedir.

2.5. EPB-TBM İşletme Prensipleri

Aşağıdaki kısımda EPB-TBM ile kazının temel prensipleri aktarılacaktır. Bir TBM iki fazda işletilir. Bunlar;

1. Tünel kazısı
2. Tünel kaplamasıdır.

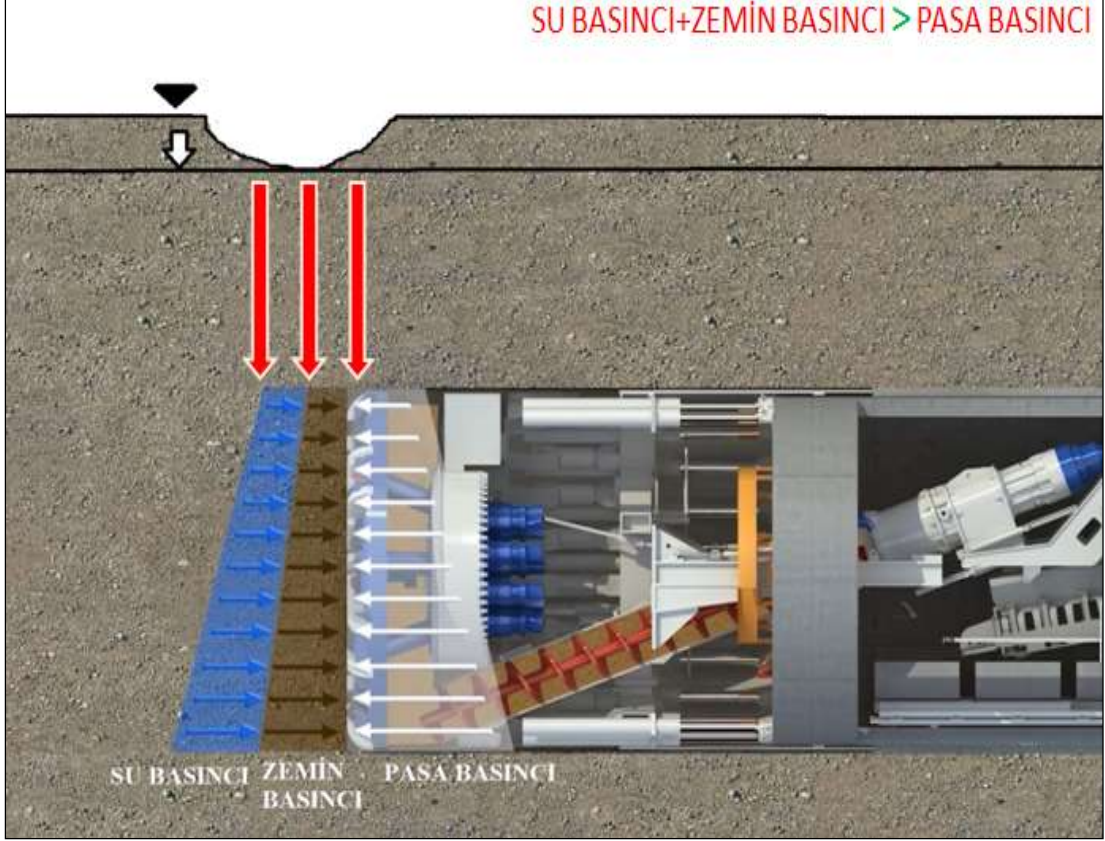
2.5.1. Tünel Kazısı

EPB-TBM'in kesici kafasını tahrik eden motorlar vasıtasıyla kesici kafanın dönmesi sağlanır. TBM itme pistonları ise TBM'in kesici kafasına baskı yaparak kesici kafayı aynaya doğru sürekli iter. Aynada dönen kesici kafa üzerindeki keski ekipmanları itme pistonlarından gelen baskı ile aynayı keser, sıyırıcı ekipmanlar ise kesilen, kazılan ve parçalanan bu malzemeyi aynadan kazı haznesine alır.

Kazı esnasında su ile birlikte şartlandırıcı kimyasal ve hava verilerek kazı odasında kazılmış zeminin homojen bir yapıya sahip olması sağlanır. Bu homojen yapı korunarak kazılan zemine sürekli ve dengeli şekilde basınç uygulanır ve basınç değerlerinin değiştirilmeden kazı odasından helisli konveyör yardımı ile şartlanmış malzeme alınır. Aynı şekilde tünel aynasında kazılan malzeme yine kazı odasında şartlanmaya devam eder. Dengeli şekilde sürekli olarak alınan hafriyat bant sistemi veya vagonlu sistemler vasıtasıyla tünel dışına alınır.

Kazı ilerleme miktarı tünel içerisine kurulacak olan prekast beton genişliği kadar olup, kazı ilerleme miktarı kadar ileme yapıldıktan sonra kazı işlemi durur ve prekast kalıcı tünel kaplaması yapılır. TBM kazısını tamamlamasının ardından kazı odasındaki basıncın yine sabit kalmasını sağlamak amacıyla kazı odası tamamen boşaltılmaz. Gerekirse uzun bekleme sürelerinde kazı odasına bentonit ve su karışımı basılarak aynadan gelen yüklere karşı konularak aynanın ve yüzeyin emniyeti sağlanır.

TBM ile EPB modunda kazı yapılırken aynaya yetersiz TBM basıncı uygulanması durumunda, zemin basıncı ve yer altı suyu basıncı bileşenleri toplamı TBM'in uyguladığı kazı odasındaki şartlandırılmış malzemenin basıncını yener ve zemin kendisini tutamaz ise yüzeyde çökme ve oturmalar şeklinde deformasyonlar oluşur. Bu durumun şematik olarak gösterimi aşağıda verilen Şekil 2-12'deki gibidir.

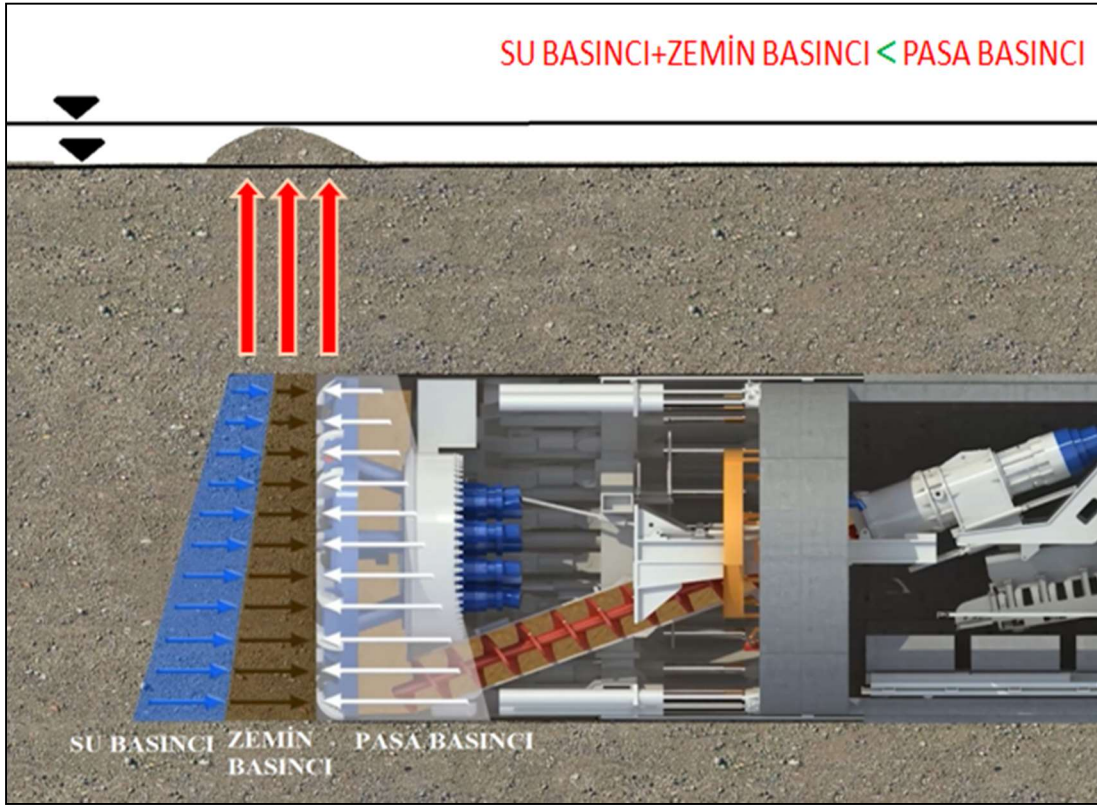


Şekil 2-11: EPB Basıncının Yetersiz Olduğu Durumda Zeminde Meydana gelebilecek Deformasyon

Metro tünel kazıları esnasında genellikle karmaşık jeolojik yapılardan dolayı bu tür deformasyonlar görülmektedir.

TBM ile EPB modunda kazı yapılırken TBM kazı haznesinde şartlandırılmış malzeme ile zemine fazla basıncı uygulanması durumunda, zemin basıncı ve yer altı suyu basıncı bileşenleri toplamı TBM'in uyguladığı şartlandırılmış malzeme basıncının altında kalır ve yüzeyde kabarma şeklinde deformasyon oluşabilir. Bu tür deformasyonlar özellikle yüzeye yakın yapılan metro tüneli kazılarında görülür.

Bu durumun şematik olarak gösterimi ise aşağıdaki Şekil 2-13' deki gibidir.

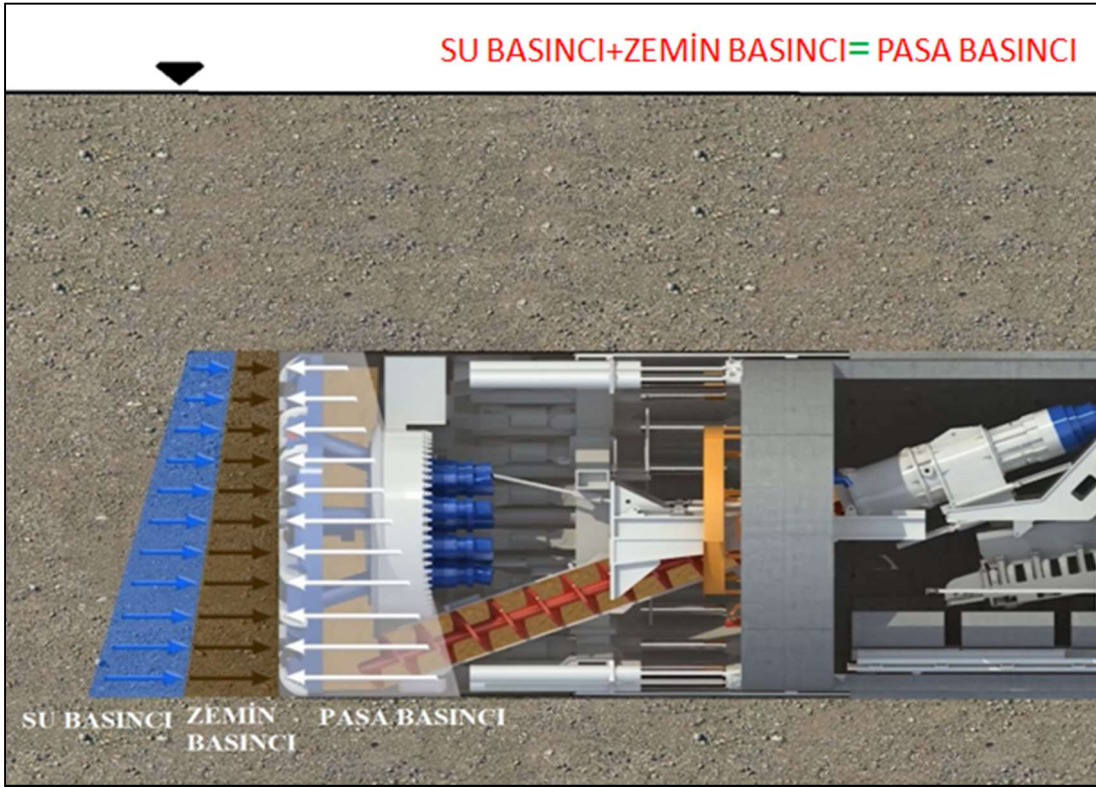


Şekil 2-12: EPB Basıncının Yetersiz Olduğu Durumda Zeminde Meydana gelebilecek Deformasyon

Dolayısıyla EPB modunda kazı yapılırken TBM ile kazılan zeminin stabilitesini koruyan basıncın uygulanması elzemdir. EPB modunda kazı yapılmasının temel prensibi zemin ile TBM arasında dengeli basınç oluşturma ve bu oluşturulan denge ile herhangi bir deformasyona neden olmadan kazıların emniyetli ve verimli bir şekilde tamamlanmasıdır. Bu amaçla kazılacak olan zeminin özellikle temel araştırma sondajlarından alınan veriler ile jeolojik ve jeoteknik parametreleri değerlendirilerek güzergâh boyunca sağlanması gereken basınç dengesi teorik olarak hesaplanır. Kazı sırasında bu teorik hesaplama ve ayrıca değişen koşullara göre değerlendirmeler yapılarak toprak basınç dengesi unsuru göz önüne alınarak yine kazıların emniyetli şekilde tamamlanması sağlanır.

Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu projesinde yaklaşık 5,5 bar statik dayanıma sahip 4,0 bar işletme EPB basıncına sahip 3 adet EPB-TBM kullanılmıştır.

EPB basıncı ile dengeli kazı yapmanın şematik gösterimi ise Şekil 2-14'deki gibidir.



Şekil 2-13: Dengeli EPB Basıncı ile kazı yapılması

2.5.2. Segment Montajı

Segment montajı, tünel içi servis treni veya çok amaçlı servis araçları (MSV) vasıtasıyla TBM içerisine getirilen prekast segmentlerin segment erektörüne ulaştırılması ve her iki yönde 270 derece dönebilen segment erektörü ile prekast segment taşlarının tamamlanmış kazının kurbuna uygun olarak yerleştirilmesiyle yapılır. Birkaç parçadan oluşan prekast beton segmentlerin yerleştirme pozisyonları tünel yönlenmesine göre değişmektedir. Pozisyonu belirlenmiş ve yerine yerleştirilecek olan segmentin konulacağı kulb bölgesindeki pistonlar içeri çekilir ve segment erektörü yardımıyla segmentler boşluğa yerleştirilir. Ardından içeri çekilen pistonlar tekrar açılarak, segment belirlenmiş pozisyonunda tutturulur. Aynı şekilde diğer prekast segmentler kazı kulbuna sırasıyla yerleştirilir son olarak kilit vazifesi gören kilit segment taşı da yerine yerleştirilerek segment genişliğinde bir tam ring oluşturulur.

Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünellerinin nihai beton kaplaması 5.70 m iç çap ,6.30 m dış çap ve genişliği 1.40 m olan 6 ayrı parçadan oluşan prekast betonların kazı boşluğuna ringler oluşturacak şekilde montajıyla yapılmıştır. Segment kalınlıkları ise 30 cm'dir.

2.5.3. Harç Enjeksiyonu

Kazının başlamasıyla bir önceki kazı sonrası montajı tamamlanan segment ringi, kazı esnasında kazı ilerleme hızına paralel kuyruk kalkanından dışarı doğru çıkar. Bu esnada ise TBM üzerinde bulunan enjeksiyon sistemi, tünel dışında enjeksiyon üretimi yapan enjeksiyon santrallerinde belirlenen oranlara göre hazırlanmış ve prekast segmentlerle aynı araçlarla içeri alınan enjeksiyon harcını kazı sırasında kuyruk kalkanından dışarı çıkan prekast segment arkasına kazı boyunca enjekte eder. Segment arkasına harç enjekte edilirken harç karışımının hızlı bir şekilde mukavemetini alması için yine uygun oranda priz hızlandırıcı veya kimyasal katkı ilave edilir.

2.6. Enjeksiyon Harcı Uygulama Amaçları

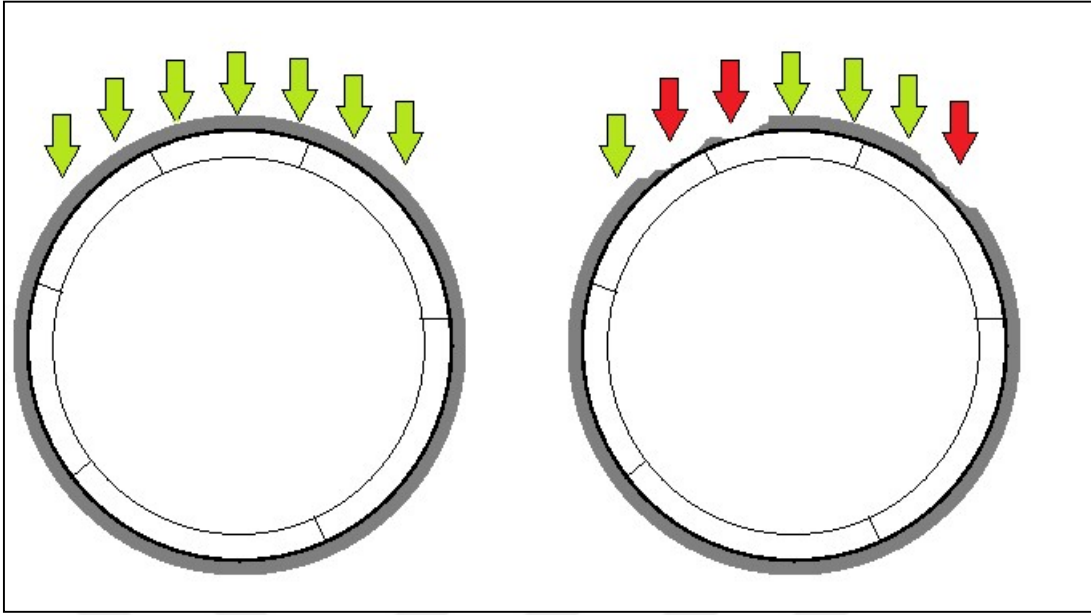
Kazı sırasında kurulu segmentlerin çevresinde oluşan boşluğuna enjeksiyon harcı veya karışımı doldurulması ile aşağıdaki koşulların sağlanması amaçlanmaktadır:

1- Segmentlerin çevresine dengeli yük bindirilmesi

Kazı sonrası segmentlerin etrafında oluşan boşluğa basılan enjeksiyon harcı belirli süre sonra prizini alır ve zeminden veya kayadan tünel boşluğuna gelen yükleri segmentler üzerine aktarır. Bu yüklerin dengeli olması, ayrı parçalardan meydana gelen prekast beton ringin dengeli şekilde durması ve dizilimin bozulmaması için önemlidir.

Kazı sırasında yumuşak ve akıcı zeminlerde yapılan kazılarda ilk aşamada kalkan tarafından zeminden gelen yükler dengelenmektedir. Kazı ilerlemesine müteakip kalkan içerisinde kurulu prekast beton ringler kazı ilerlemesine paralel olacak şekilde kalkanın dışına doğru çıkmakta ve bu ringlerin etrafına ise sürekli olarak enjeksiyon harcı basılmaktadır. Basılan bu enjeksiyon harcının priz alma süresine paralel olarak ise zeminden gelen yükler ringler tarafından karşılanmaktadır. Priz alma süresi ne kadar kısa ise zeminden gelen yükler zeminde deformasyon oluşturmaması adına kısa bir sürede ringler tarafından dengelenebilmektedir.

Şekil 2-15’de yapılan enjeksiyonun segment etrafındaki kazı sonrası oluşan boşluk çeperinin uygun şekilde doldurması ve dolduramaması ile ortaya çıkan durum temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2-14: Segmentler üzerine zeminden gelen dengeli ve dengesiz yükler

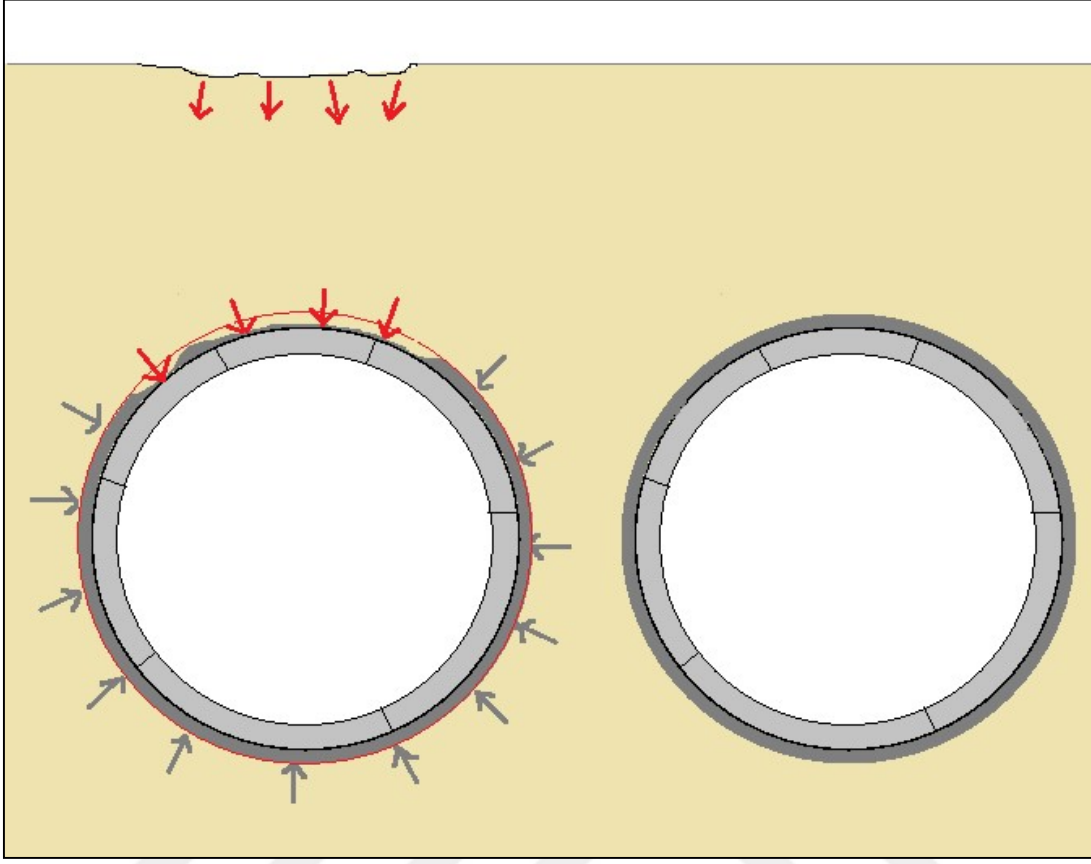
2- Kazı boşluğunu doldurarak yüzeyde deformasyonlara engel olmak

Kazı sırasında segmentlerin çevresinde oluşan kazı boşluğu enjeksiyon harcı ile doldurulmazsa, zemin hareket edebilme kabiliyetine göre boşluğu zamanla doldurmaya başlayacaktır. Bu da yüzeyde deformasyonların oluşmasına sebebiyet verecektir.

Özellikle yapılaşmanın olduğu bölgelerde kısıtlı deformasyona izin verilebilmektedir. İstanbul gibi yapılaşmanın yoğun olduğu bölgelerde enjeksiyon harcının veya karışımının, oluşan enjeksiyon harcı boşluğunu tamamen doldurması ve mukavemetini hızlı bir şekilde alması özellikle tünel kazısı sırasında yapılarda deformasyona oluşmaması açısından ayrıca önem kazanmaktadır. Ayrıca topografya sebebiyle kısmen yüzeye 8-10 metre civarında yakın kazı yapılabilirdiğinden bu koşullar altında deformasyonlar yapılara hızlı bir şekilde sirayet edebilmektedir.

Genelde enjeksiyon boşluğu genel tünel kazı boşluğunun yaklaşık olarak %5-7'lik kısmına denk gelmektedir. Buda oldukça önemli bir değer olması itibariyle oluşan boşluğun en kısa sürede doldurularak, harcın mukavemetini alması sağlanmalıdır.

Şekil 2-16'da kazı boşluğunun enjeksiyon ile tamamen dolmadığı durumda yüzeyde oluşabilecek deformasyon temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2-15: Segmentlerin etrafındaki kazı boşluğunun tamamen dolmaması sonucu zeminde oluşabilecek deformasyon

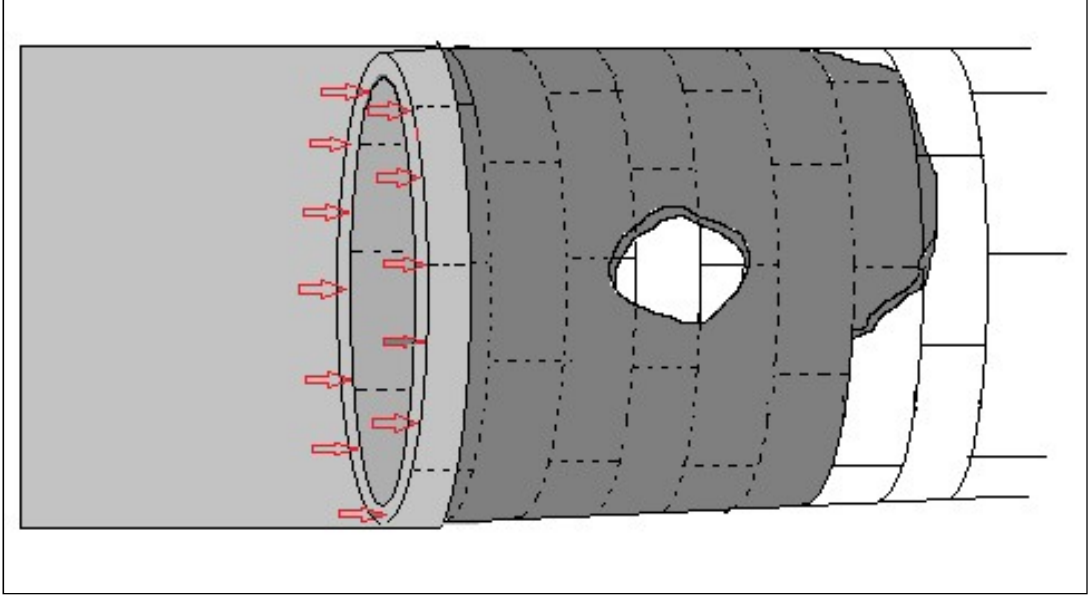
3- İtme gücünün kalıcı prekast beton kaplamada (segment) deformasyona ve kurulu prekast ringin bozulmasına olmasına engel olmak

Kazı esnasında TBM ilerlemesini, kurulu segmentlerin üzerine itme pistonları ile baskı yaparak sağlar. Segment çevresine dayanan hidrolik itme pistonlar TBM operatörün yönlendirdiği parametrelere göre zamanla açılarak hem TBM'in ilerlemesini hem de mevcut son kurulu ringin kazı ilerlemesine paralel olarak kalkın dışına çıkmasını sağlar. Böylece ilerlemeyle birlikte pistonların açılması ile oluşan yeni boşluğa diğer bir ringin kurulumu sağlanır ve bir kazı boyu ilerlenmiş olur. Tünel kulbuna yerleştirilmiş olan segmentlerin pozisyonları tünel ekseninin yönlenmesine göre değişmekte ve bu pozisyonlar sayesinde TBM'in eksen boyunca istenildiği yönlendirilmesi sağlanır.

TBM itme pistonlarının bu oluşturduğu bu itme gücü TBM'in çapına göre değişmekle birlikte Mecidiyeköy-Mahmutbey metro hattının kazısında kullanılan TBM'lerin maksimum itme gücü 32000 kN ile 54000 kN arasındadır. Bu itme gücü TBM'in pozisyonuna göre ayrıca önem kazanmaktadır. Özellikle tünel güzergâhındaki kulblarda (dönüşlerde) segment yüzeylerine dengesiz yük binmesine neden olmaktadır.

Kazı sonucu oluşan boşluk çepere basılan enjeksiyon harcı segment çevresini sarak segmentlerde itme pistonlarının oluşturduğu yükün bir kısmını zemine de aktararak itki kuvveti sonucu oluşacak dengesiz yüklerin kalıcı prekast beton kaplama üzerinde neden olacak olan çatak, kırık vb. deformasyonları ve ringlerin bozunumu önler.

Şekil 2-17'de kurulu ringlerin çevresini saran enjeksiyon ve itme kuvvetleri temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2-16:Segment çevre çepere basılan enjeksiyon ve itme pistonlarının oluşturduğu itki kuvveti yönü

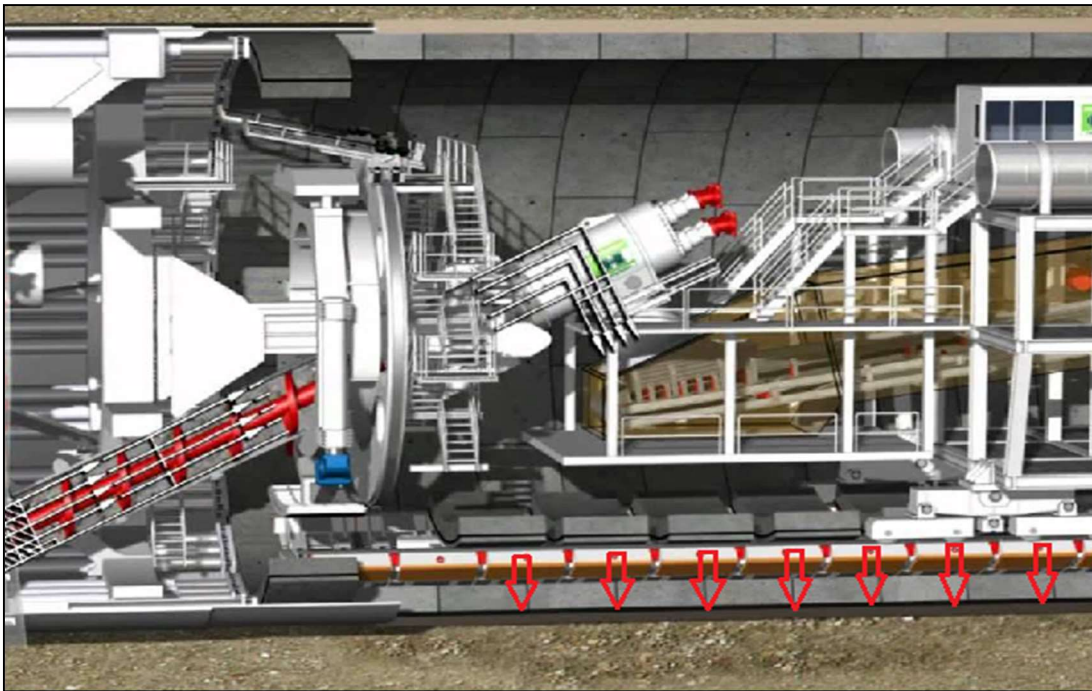
4- Kalıcı prekast betonlara (segment) tünel içerisinde gelen yükleri zemine dengeli şekilde dağıtmak

Tünel içerisinde TBM'in işletilmesi amacıyla özellikle elektro ve hidro motorlar, bant sistemi, elektrik trafoları, hidrolik tankları vs. ekipmanların bulunduğu köprü dizisi kurulu segmentlerin üzerinde kazı ilerlemesine paralel olarak tekerler veya raylı sistem marifeti ile ilerler.

Bu köprü dizisinin üzerinde bulundurduğu ekipmanların oluşturduğu yükler tekerlekler veya raylı sistemler vasıtası ile özellikle tünelin alt yarısındaki prekast beton segmentlere değişik oranlarda iletilir. Bu yükler segmentlerin çevresinde oluşan alt yarıdaki kazı boşluğu tam olarak doldurulması ile dengeli şekilde zemine aktarılmış olur.

Alt yarıdaki segment çevresi uygun şekilde dolmadığı takdirde hem tünel kulbuna yerleştirilen segment ringinin kendi ağırlığı hem de köprü sisteminin ağırlığı sebebiyle ringlerde bozulmalara neden olacaktır. Bu sebeple kazı boşluğunun uygun şekilde doldurulması ve enjeksiyonun harcının veya karışımının kısa sürede prizini alması ve oluşan mevcut yükleri dengeli şekilde zemine aktarması açısından önem arz etmektedir.

Şekil 2-18’de bir TBM tüneline segment üzerine tünel içerisindeki TBM ekipmanlarının yaptığı etki temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2-17:TBM ekipmanlarının tünel içerisinde segmentlere ilettiği yükler

5- Tünel içerisine su sızıntılarını önlemek

Tünel içerisinde zeminden gelen su gelirlerinin önlenmesi açısından, kalıcı prekast segment ringlerinin çevresinde kazı sonucu oluşan boşluk çeper tamamen doldurulduğu takdirde su sızıntıları önemli miktarda önlenmektedir.

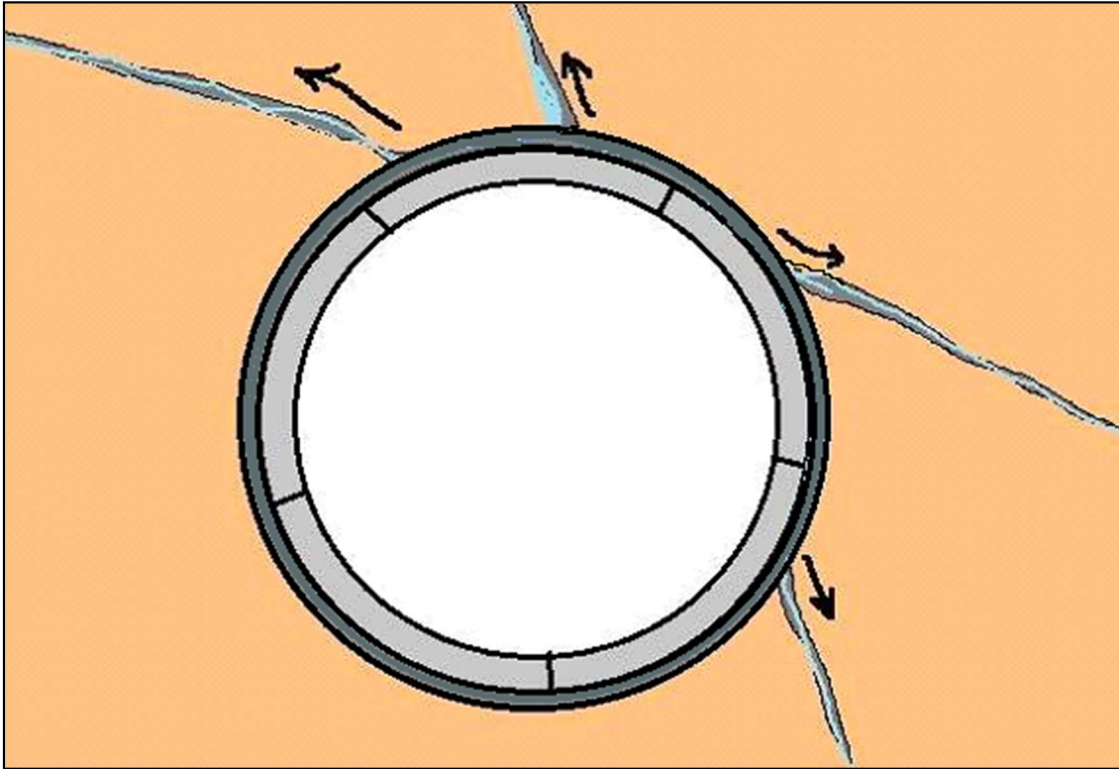
Kalıcı prekast segment çevrelerinde, birbirleri ile ardı ardına temas ettiğinde sızdırmazlık vazifesi gören ayrıca sızdırmazlık contaları da mevcuttur.

Tünel içerisindeki su gelirinin olması hem tünelin kullanım amacına göre ileride kurulacak ekipmanlarda hem de segmentin yapısında bulunan demir donatıda ve betonda zamanla korozyonlara neden olabileceğinden istenmeyen bir durumdur.

Tünellerin tasarım ömrü uzun yıllar olduğundan özellikle tünel içerisine dışarıdan su gelirinin olmaması ve segmentlerin su ile temasının kesilmesi boşluk çeperin tamamen enjeksiyonla dolması ile mümkün olduğundan, enjeksiyon uygulaması sızdırmazlık açısından çok büyük önem kazanmaktadır.

Ayrıca zemindeki yeraltı suyu oranı yapılan enjeksiyon çalışmalarının başarılı olup olmamasında da önemli etkiye sahiptir. Bazen su oranının yoğun olması enjeksiyon harcının veya karışımının kimyasal yapısını bozarak başarısız olmasına neden olurken bazen suyun taşıdığı yapılar su geliri olan boşluk ve çatlakları zamanla doldurarak ayrı bir sızdırmazlık bariyeride oluşturabilmektedir. Genel itibariyle ise zemindeki su oranının fazla olması enjeksiyon çalışmalarının başarısız olmasına neden olmakta bu durumda ilave enjeksiyon gerekliliğini doğurduğundan maliyet artışını dolaylı yollardan etkilemektedir.

Şekil 2-19’da temsili olarak enjeksiyonun segment çevresinde oluşturduğu sızdırmazlık çeperi temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2-18:Enjeksiyon çalışması sonucu oluşan su sızdırmazlık çeperi

2.7. EPB-TBM Tünel Kazılarında Kullanılan Enjeksiyon Türleri

Montajı tamamlanan prekast segment ringi, kazı esnasında itme pistonların baskısıyla kuyruk kalkanından dışarı doğru çıkar. Bu esnada TBM üzerinde bulunan enjeksiyon sistemi vasıtasıyla tünel dışında belirli oranlara göre hazırlanmış enjeksiyon harç karışımı belirli miktar priz hızlandırıcı kimyasal ile segment arkasına enjekte edilir. Segment arkasına enjekte edilen harç karışımının hızlı bir şekilde mukavemetini alması istenir ve bu amaçla enjeksiyon harcı için en uygun malzeme ve oranların tespiti amacıyla laboratuvar şartlarında deneyler yapılır. Bu laboratuvar deneylerinde en önemli amaç en ekonomik şekilde istenilen mukavemeti en kısa sürede sağlayacak harç dizaynı elde etmektir. Böylelikle hem maliyet hem de kalite unsurları göz ardı edilmemiş olmaktadır.

EFB modunda kazı yapan TBM'lerde genellikle iki tür geri dolgu enjeksiyonu uygulanmaktadır;

- 1-Tek bileşenli (Tek Komponentli) enjeksiyon harcı
- 2- Çift bileşenli (Çift Komponentli) enjeksiyon karışımı

2.7.1. Tek Bileşenli Enjeksiyon Harcı

Çimentolu enjeksiyon harcı sınıfından olan tek bileşenli enjeksiyon harcı; çimento, su, uçucu kül, bentonit, ince-kalın agrega, akışkanlaştırıcı ve bazen de kimyasal ilave katkı olarak priz hızlandırıcıdan oluşur.

Bu enjeksiyon harcı karışımında bulunan çimento, ince ve kalın agrega, bentonit, uçucu kül ve akışkanlaştırıcı kimyasal enjeksiyon hazırlama santralinde hazırlanarak tünel içi trenleri veya çok amaçlı servis araçlarıyla TBM üzerinde kurulu enjeksiyon pompasına kadar ulaştırılır. Buradan enjeksiyon pompası vasıtası ile karışım TBM kalkanı üzerindeki enjeksiyon hatlarıyla boşluğa basılır. Ayrıca uygulamada var ise TBM üzerinde mevcut olan priz hızlandırıcı kimyasalı ayrı bir pompa vasıtası ile istenilen sürede beklenen mukavemetin sağlanması amacıyla daha önce laboratuvar şartlarında belirlenmiş oranlarda enjeksiyon hattına enjeksiyon ile birlikte basılır. Enjeksiyon basma işlemi tamamlandıktan sonra hatlarda mevcut olan karışımın prizini alarak hatların tıkanmamasını önlemek amacıyla da TBM üzerinde kurulu bulunan bentonit tankında hazırlanan bentonit-su karışımı yine enjeksiyon pompası vasıtasıyla hatlara verilerek hatların temizlenmesi sağlanır.

Tek komponentli enjeksiyon harcında bulunan çimento ve agrega dışındaki bentonit, uçucu kül, akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal katkıların her birinin karışıma ayrı ayrı etkileri bulunmaktadır.

Bu katkı malzemelerinden bentonit enjeksiyon harcına ilave edildiğinde harcın plastisitesini ve pompalanabilme kabiliyetini artırır. Yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle harç içerisindeki ince ve kalın agreganın ayrılıp bir yerde toplanmasını veya çökmesini önler. Genelde enjeksiyon harcı santrallerden alınıp kazı boşluğuna basılıncaya kadar ilerlenen tünel mesafesine de bağlı olarak 2-3 saat süre geçebilmektedir. Bu süre boyunca bentonit harç içindeki malzemelerin özellikle agreganın ayrışmasına engel olarak harcın kolay pompalanabilir limitlerde kalmasını sağlamaktadır. Ayrıca bentonit katkısı enjeksiyon pompalarında zamanla aşınma oranını da azaltmaktadır.

Uçucu kül ise, termik santrallerin atık malzemesi olup toz haldeki kömürün yanmasıyla oluşur. Kömür ile çalışan termik santrallerin atık malzemelerindendir ve buralardan temin edilir. Betona katkı malzemesi olarak girdiğinde işlenebilme, terlemeyi azaltma, zamanla beton mukavemetini artırma, suyun geçirimliliğini azaltma, kimyasal etkilere karşı dayanımı artırma, çimento ile agrega arasındaki bağı güçlendirme ve birlikte betondaki termik büzülme azaltıcı olumlu etkileri bulunmaktadır (Subaşı, İşbilir, & Ercan, 2011).

Dolayısıyla enjeksiyon harcına katılan uçucu kül hem çevresel etmenlerden harcı korumakta hemde harcın mukavemetine olumlu etkiler yapmaktadır.

Akışkanlaştırıcılar ise; su-çimento oranını azaltarak daha yüksek mukavemet elde edebilmek, enjeksiyon harcının kolay pompalanabilirliğini ve oluşan mevcut boşluklara tamamen yayılarak yerleşebilmesine katkı sağlaması amacıyla kullanılır.

Priz hızlandırıcılar ise uygulama sırasında santralde hazırlanmış enjeksiyon harcına ayrı şekilde hatlara pompalanarak, karışımın en hızlı sürede istenilen mukavemeti sağlaması amacıyla kullanılır. En kısa sürede istenilen mukavemetini sağlanması açısından priz hızlandırıcılar harcın pompalandıktan sonra pompalanan boşlukta harcın özellikle yer altı suyu ve yer altı suyunun ihtiva ettiği kimyasal bileşenlerden en az şekilde etkilenecek priz en hızlı şekilde alınmasını sağlamaktadırlar.

Yeraltı suyunun bazen akış şeklinde yoğun olarak gelmesi sebebiyle enjeksiyon harcı içerisindeki su oranı arttığından priz hızlandırıcılar miktar olarak yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple de enjeksiyon harcı özelliğini kaybederek enjeksiyon uygulaması başarısız olmaktadır.

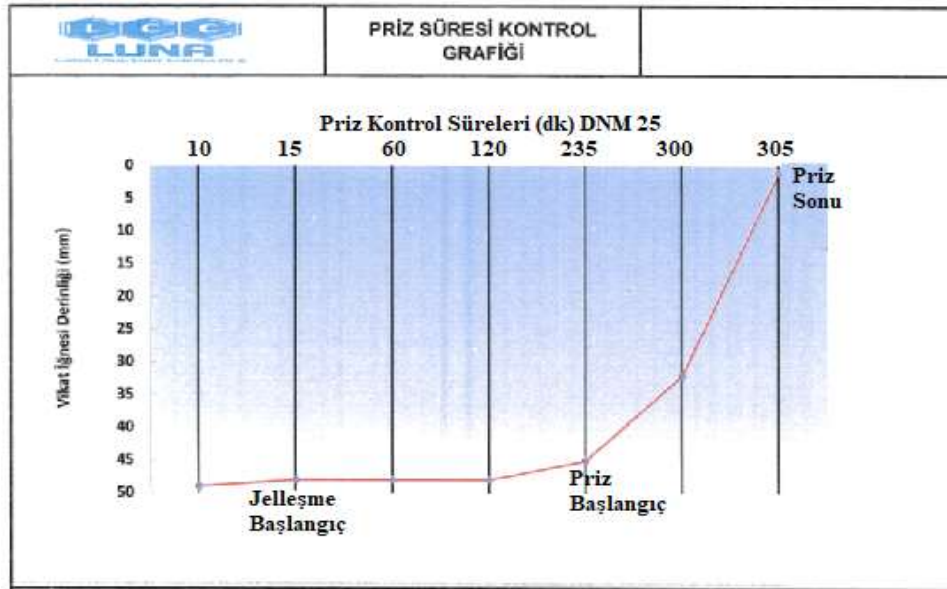
Ayrışma oranı yüksek kaya ortamda kazı yapılırken kesici ekipmanlar ile örselenen kayada aşırı sökümler olmakta bu sebeple enjeksiyon harcı hacimce boşluğu dolduramayıp yapılan enjeksiyon çalışmaları başarısız olabilmektedir.

Mecidiyeköy- Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde enjeksiyon uygulaması amacıyla tek kompenantlı enjeksiyon harcı karışımı kullanılmış olup, kullanılan enjeksiyon harcı karışımında bulunan malzemeler ve oranları Tablo 2-8'deki gibidir.

Tablo 2-8: Mahmutbey - Mecidiyeköy metro projesi enjeksiyon harcı karışımı

Gerçek Bileşim (1m ³)	
Çimento	100 kg
Doğal Kum	1389 kg
Su	272 lt
Kül	269 kg
Bentonit	10 kg
Akışkanlaştırıcı (% 1)	3,7 lt
Priz Hızlandırıcı (% 4)	14,8 lt

Priz alma süresi kontrolünde, Grafik 2-1'deki gibi enjeksiyon karışımı 10 dk sonra jelleşmeye başlamış, priz başlangıcı 235 dk, priz sonu ise 305 dk olmuştur.



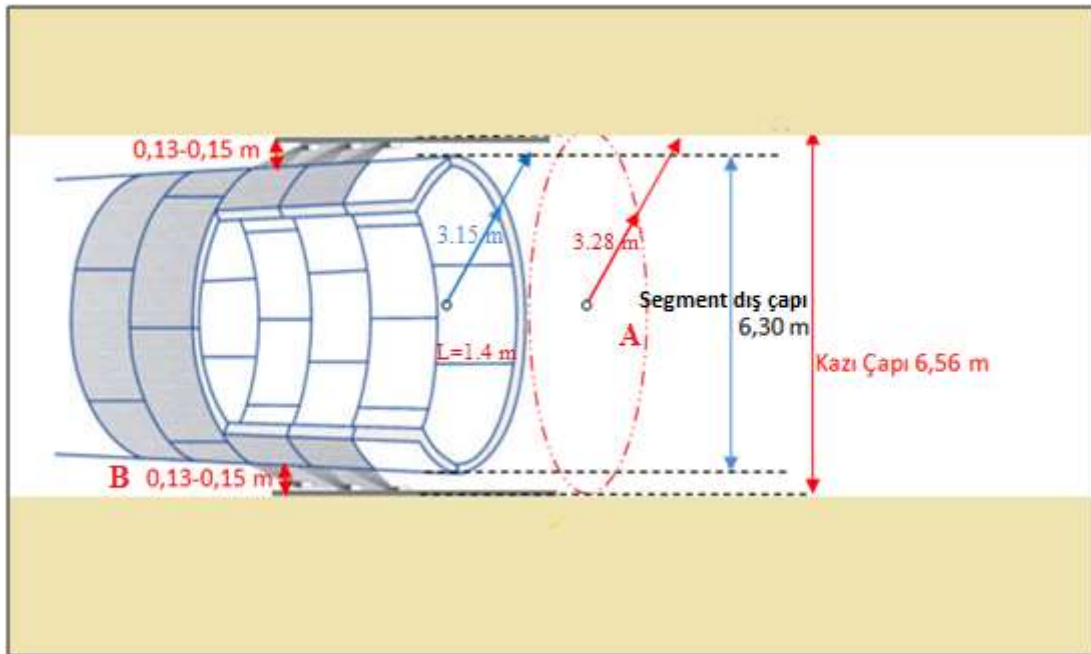
Grafik 2-1: Mecidiyeköy Mahmutbey metro hattı TBM tünellerinde uygulanan enjeksiyon harcının laboratuvar şartlarında priz alma süresi

Ayrıca bu enjeksiyon harcı yaklaşık 2,5-3 bar basınçla kazı boşluğuna basılmıştır. Eğer uygulama esnasında bu basınç değerleri aşırsa segment çevresindeki zemin basıncının üzerine çıkan ters basınç sebebiyle prekast segmentlere zarar verebilmekte veya basıncın azalması durumunda ise enjeksiyon harcının tünel dışındaki boşluklara yönlendiği sonucu çıkmaktadır.

TBM'in kuyruk kısmında segment çevresini saran, yer altı suyu ve enjeksiyonu tünel içerisine sızmasını engelleyen fırça sistemi bulunmaktadır. Bu fırça sistemi segment çevresindeki sürtünmeler ve segment yükleri sebebiyle zamanla aşınması söz konusudur. Böylece zamanla deforme olmuş fırça sistemi yüksek basınçla basılan enjeksiyon harcını tünel içerisine geçirerek boşlukların dolmamasına ve enjeksiyon çalışmasının başarısız olmasına neden olmaktadır.

Mecidiyeköy- Mahmutbey metrosu TBM tünelleri kazılarında 6.56 m kazı çapı olan EPB-TBM'ler kullanılmıştır. Her kazı ilerleme adımı 1,4 m ve her kazı ilerleme adımı sırasında yapılan enjeksiyon miktarı ise yaklaşık 4,5 m³'tür.

Şekil 2-20'de 6.56 m çaplı bir TBM için kazı sonrası oluşan boşluk temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2-19: TBM kazı çapı ve oluşan segment çevrelerinde oluşan çeper boşluk

Kazı sonrası oluşan bu çeper boşluk miktarına uygulanmış olan enjeksiyon malzemesi miktarı teorik olarak hesaplanırsa, her bir kazı adımında oluşan kazı boşluğu miktarı;

$$V_{\text{teorik boşluk}} = \pi * h_{\text{kazı adımı}} (D_{\text{kazı çapı}}^2 - d_{\text{segment dış çapı}}^2)$$

$$V_{\text{teorik boşluk}} = \pi * 1,4(3,28^2 - 3,15^2)$$

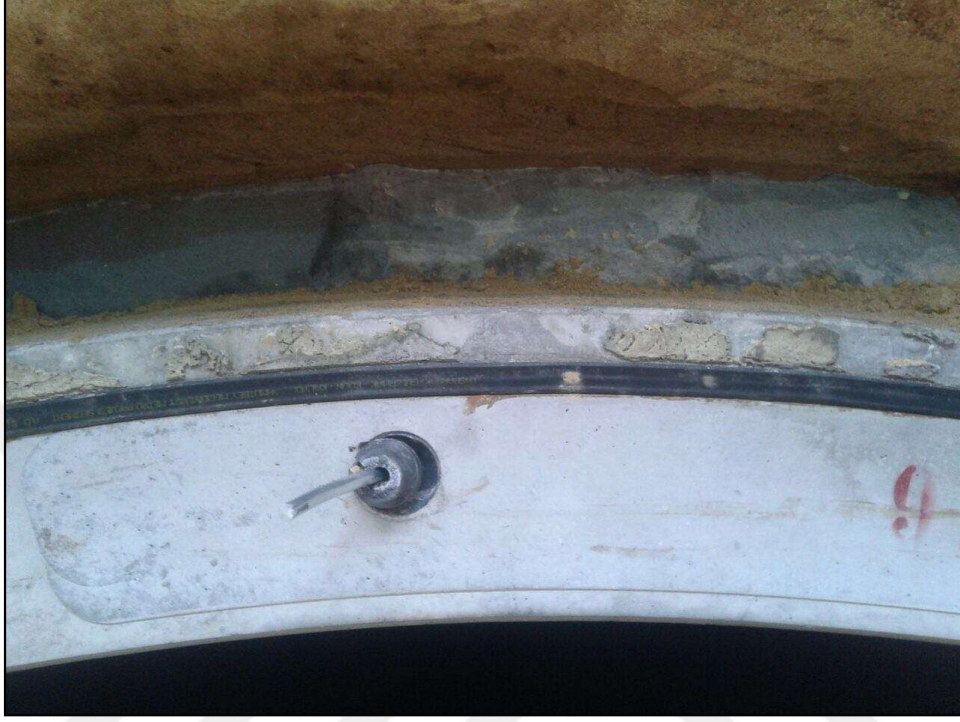
$$V_{\text{teorik boşluk}} = 3,68 \text{ m}^3 \text{ olmuştur.}$$

Teorik olarak belirlenen kazı boşluk hacmi hacim $3,68 \text{ m}^3$ olmasına karşın, her bir kazı için teorik hacimden 1,2 kat daha fazla miktarda zemin koşullarına göre ve uygulama aşamasında olabilecek kayıp miktarı eklenerek yaklaşık 4.5 m^3 harç uygulama amaçlı tünel içerisine gönderilmiştir. Birincil enjeksiyon olarak çimentolu enjeksiyon harcı her bir kazı için yaklaşık 4.5 m^3 olacak şekilde TBM kazı bir kazı ilerleme boyu 1,4 metrelik kısmına tünel boyunca kesintisiz olarak uygulanmıştır. Ayrıca Resim 2-3'te enjeksiyon uygulamasına yardımcı ekipmanlardan olan kuyruk fırçası ile enjeksiyon hatları görülmektedir.



Resim 2-3: TBM kalkanı, enjeksiyon hatları, kuyruk fırçası ve mevcut boşluk

Resim 2-4 ve Resim 2-5'te ise enjeksiyonu yapılmış olan ve segment çevresi ile zemin arasındaki mevcut boşluğa dolmuş ve prizini almış enjeksiyon harcı görülmektedir.



Resim 2-4: Kurulu Segment ile zemin arasını doldurmuş enjeksiyon harcı



Resim 2-5: Segment çevresi ve zemin arasını doldurmuş enjeksiyon harcı görünümü

2.7.2.Çift Bileşenli Enjeksiyon Harcı

Çift bileşenli (çift komponentli) enjeksiyon karışımı tek kompenantlı enjeksiyon karışımının aksine sadece çimento, bentonit ve akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal katkı içerir. Bu malzemelerden çimento, su, bentonit ve akışkanlaştırıcıdan oluşan birinci bileşen tünel dışında santrallerde hazırlanır. Tünel içerisine borularla pompalanarak veya tünel içi trenleri veya çok amaçlı servis araçlarıyla nakliyesi yapılır. Tünel içerisinde pompa marifeti ile kazı boşluklarına pompalanır. Birinci bileşene ek olarak ikinci bileşen olan priz hızlandırıcı ayrıca sisteme ayrı bir pompa marifeti ile basılır. Bu enjeksiyon dizaynı yapısı itibariyle priz alma süresi çok kısadır.

Çift bileşenli enjeksiyon uygulaması Mecidiyeköy Mahmutbey Metrosu uzatma hattı olan Kabataş- Mecidiyeköy kesiminde uygulanmaktadır. Bileşen olarak çimento, su, bentonit, akışkanlaştırıcı kimyasal priz hızlandırıcıdan oluşur. Genellikle bu sisteme göre yapılan enjeksiyon oranları zemine göre değişmekle birlikte, bahsi geçen projede kullanılan yaklaşık malzeme oranları (1 m³ için) aşağıdaki aralıklardadır;

Çimento: 330 kg

Bentonit: 300 kg

Su: 430 lt

Akışkanlaştırıcı Kimyasal (% 1,2) : 3,96 lt

Priz Hızlandırıcı Kimyasal (% 21): 69,3 lt.

2.8. EPB-TBM Tünellerinde İlave Enjeksiyon Uygulamaları

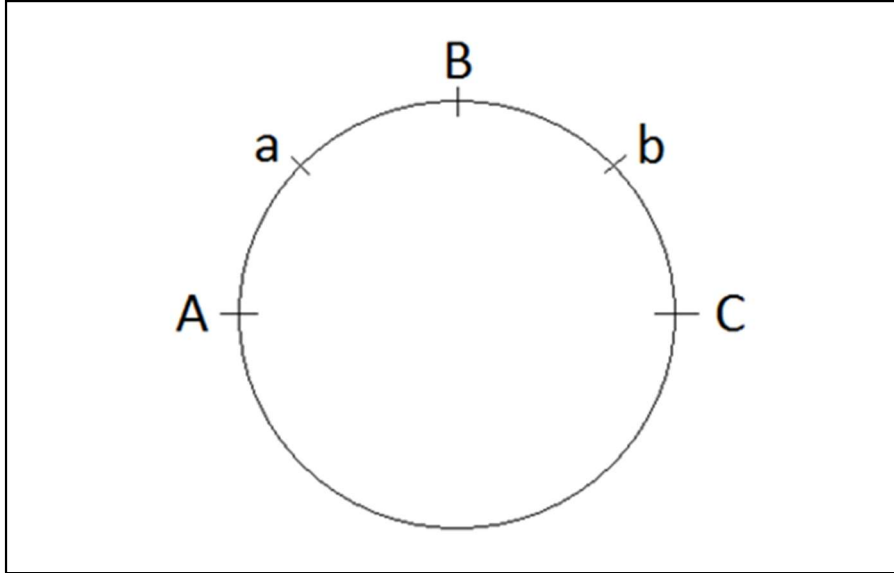
2.8.1. İkincil Enjeksiyon Uygulaması (Çimento-Su Enjeksiyonu)

Tüm TBM ana hat tünel kazı çalışmalarının tamamlanması akabinde tünel hatları boyunca yapılan genel gözlemler sonucu bazı bölgelerde segment birleşim noktalarından yoğun su akıntısı, sızıntılar, damlama gibi farklı miktarlarda su geliri gözlenebilmektedir. Dolayısıyla su gelirinin olduğu bu noktalarda segment arkası enjeksiyon harcı doluluğu tespiti amacıyla belirli aralık ve sayılarda özellikle tünelin taç bölgesinde kontrol delgileri yapılmaktadır. Yapılan bu kontrol delgileri sonucunda segment arkası kazı boşluklarının bazı kesimlerde tam olarak dolmadığı tespit edilebilmekte ve bu boşluk oranlarına göre de su geliri miktarı fazla veya az olabilmektedir.

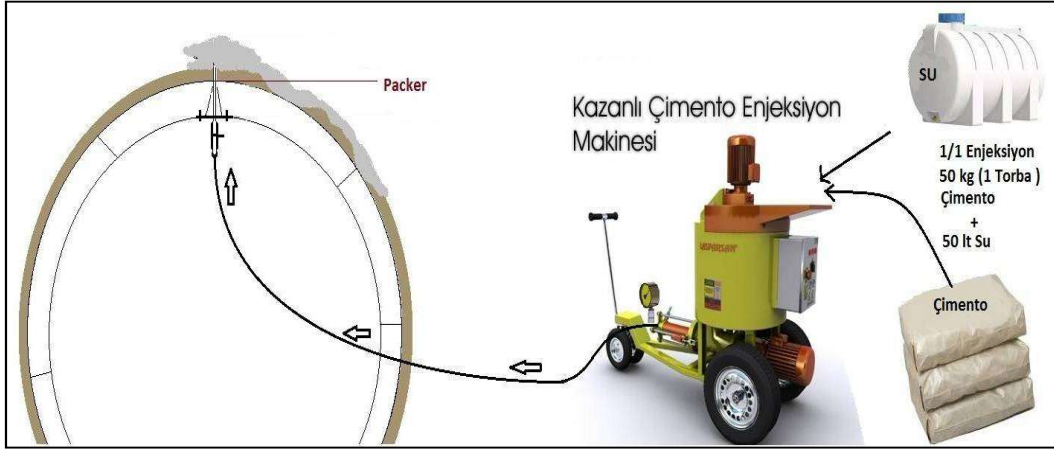
İkincil enjeksiyon ise genellikle 1/1 oranında çimento-su enjeksiyonu olarak veya çimento miktarı bazen tünellerdeki yeraltı suyu geliri miktarına göre artırılarak uygulanmakta olup genellikle eğim varsa eğim yukarı ve tünellerdeki su geliri sıklığına göre maksimum 10 -15 metre aralıklarla uygulanmaktadır. Maksimum basınç değerleri 3-4 bar basınçla refü basıncı sağlanana kadar çimento-su enjeksiyonu tespit edilen boşluklara basılmaktadır.

Ayrıca enjeksiyon çalışmaları Şekil 2-21’de kesiti verilen tünelin özellikle B noktasından uygulama yapılmaktadır. B noktasında kontrol delgisi sırasında su geliri olmadığında ve yan yüzeylerde de su geliri görülümüşse a veya b noktasından enjeksiyon uygulaması yapılır. Tepe noktasından enjeksiyon basılmasıyla çimento-su enjeksiyonun tünelin her iki kesimindeki boşluklara kolayca yayılması amaçlanır.

Çimento- su enjeksiyonu ile genellikle yüksek oranlarda su gelirleri giderilebilmektedir. Çok yoğun su geliri olan bölgelerde ise enjekte edilen karışımdaki çimento oranı artırılarak enjeksiyon çalışmasının başarılı olması sağlanabilmektedir. Çimento-su enjeksiyonu için ayrıca araç- gereç ve malzeme tedarik edileceğinden ilave maliyetler ortaya çıkmaktadır. Bu ilave maliyetlerin minimuma indirebilmesi yapılan birincil enjeksiyonun başarısı ile doğru orantılıdır.



Şekil 2-20: TBM tünellerinde çimento-su enjeksiyon tünel içinden uygulama noktaları
Şekil 2-22 de tünel içerisinde yapılan enjeksiyon uygulamasının temsili, Resim 2-6’da ise Mecidiyeköy-Mahmutbey metro tünellerinde yapılan enjeksiyon uygulamaları görülmektedir.



Şekil 2-21: Çimento-su enjeksiyonu temsili gösterimi



Resim 2-6: Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde çimento-su enjeksiyonu uygulaması

2.8.2. Kimyasal Enjeksiyon

Kimyasal enjeksiyon birincil ve ikincil enjeksiyon sonucu giderilemeyen lokal su gelirlerinin giderilmesi amacıyla yapılmaktadır.

Çimento- su enjeksiyonların istenilen refü basıncı ile tamamlanması ile bazı bölgelerde az miktarda da olsa lokal su gelirleri gözlenebilmektedir. Özellikle metro hattı katanerlerinde ileride herhangi bir korozyona sebep olmaması amacıyla tünel eksenin üst kesimlerde su geliri teknik şartname gereği istenmemektedir. Bu noktasal su gelirlerinin giderilebilmesi için kimyasal enjeksiyon uygulaması yapılmaktadır.

Bu uygulama ise çimento-su enjeksiyonundaki gibi tünelin belirli noktalarına değil sadece su geliri olan segment birleşim yerlerinde oluşmuş eklem noktalarına yapılmaktadır. Genel itibariyle çimento-su enjeksiyonun ulaşamadığı bazı noktalardaki lokal su gelirlerinin giderilmesi amaçlanır.

Kimyasal enjeksiyon malzemesi olarak sadece su ile temas halinde reaksiyona giren tek bileşenli, solventsiz poliüretan enjeksiyon reçinesi kullanılır. Poliüretan enjeksiyon reçinesi uygulaması tünel gibi yeraltı yapılarında küçük ve orta hacimdeki su sızıntılarının durdurulması ve su muhteva eden boşlukların doldurularak su yollarını kapatmak amacıyla yapılır.

Uygulama sırasında ana bileşen olarak poliüretan enjeksiyon köpük ve hızlandırıcısı kullanılmaktadır. Bu iki malzeme uygulama amaçlı kullanılan pompanın tankında homojen bir karışım elde edene kadar hızlıca karıştırılır. Elde edilen bu karışım pompa vasıtasıyla bölgesine basılır. Uygulama yapılan bölgedeki çatlak ve boşluklarda bulunan su ile temas sonucu köpükleşme başlar. Zemindeki su ile reaksiyon sonucu oluşan köpük hacimce yaklaşık 25-30 kat şişme verimi vermektedir. Bu yüksek şişme oranıyla suyun tünel içerisine sızma eğiliminde olduğu bütün boşluklar tamamen kapanmış olur. Başarı oranı oldukça yüksektir. Diğer enjeksiyon türlerine göre ekipman olarak daha az yer kaplar ve uygulaması oldukça kolaydır. Ancak maliyeti de oldukça yüksektir. Ayrıca Resim 2-7’te kullanılan enjeksiyon pompalarının temsili olarak Resim2-8’de ise sahada uygulama örneği verilmiştir. Dayanımı oldukça düşük olduğundan zeminden gelebilecek yüklere karşı koyamaz sadece kılcal boşlukların doldurulması istenir.



Resim 2-7: Kimyasal enjeksiyon amaçlı kullanılan enjeksiyon pompası



Resim 2-8: Mecidiyeköy Mahmutbey metro projesinde kimyasal enjeksiyon uygulaması

Enjeksiyon, lokal su geliri olan bölgedeki segmentlerin matkap marifeti ile delinen deliklere monte edilen pakerler vasıtası ile iletilir. Bu pakerlerin yerleştirildiği delikler segmentlerin birleşim noktalarından 10-15 cm içerisinde ve uzunluğu segment kalınlığında olacak şekilde delinir. Segmentlerde çimento-su enjeksiyonu yapılabilecek enjeksiyon delikleri mevcutken kimyasal enjeksiyon yapılabilecek herhangi bir delik mevcut değildir. Enine segmentler delindiğinden ve de segment donatısına delgi sırasında denk gelindiğinde bu noktalara yakın başka noktalardan delgi işlemi tekrar edilebilmekte buda segmentlere zarar verebilmektedir.

Mukavemeti çimento-su enjeksiyonuna nazaran daha düşük olduğundan su geliri olan ve segment arkası boşlukların bulunduğu bölgeler öncelikle çimento-su enjeksiyonu ile doldurulması segment çevresindeki zemin yükünün ring çevresinde dengeli şekilde olması açısından önemlidir. |

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MALZEME

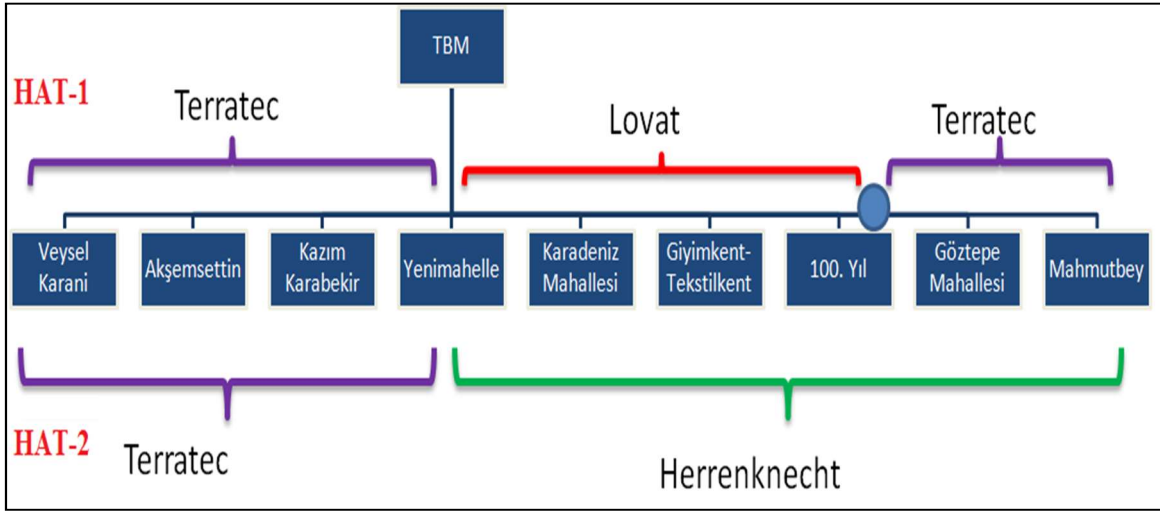
Bu çalışma; Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosun inşaatı çalışmasında istasyon aralıklarındaki TBM tünelleri güzergâhında enjeksiyon çalışmaları üzerinde yapıldığından öncelikle istasyon aralıklarının tamamının jeoloji ve mühendislik jeolojisi çalışmaları yapılmıştır. Bu jeolojik veriler ayrıca ilgili bölümlerin eklerinde paylaşılmıştır.

Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu güzergâhında iki baskın formasyonla karşılaşmıştır. Bunlar; Trakya Formasyonu ve Çekmece Formasyonunun Çukurçeşme(Tçç) ve Güngören (Tçg) üyeleridir. Hat kazılarında yoğun olarak Trakya formasyonunda kazı yapılmış ve bu formasyon kazı sırasında farklı ayrışma değerlerinde olduğu görülmüştür.

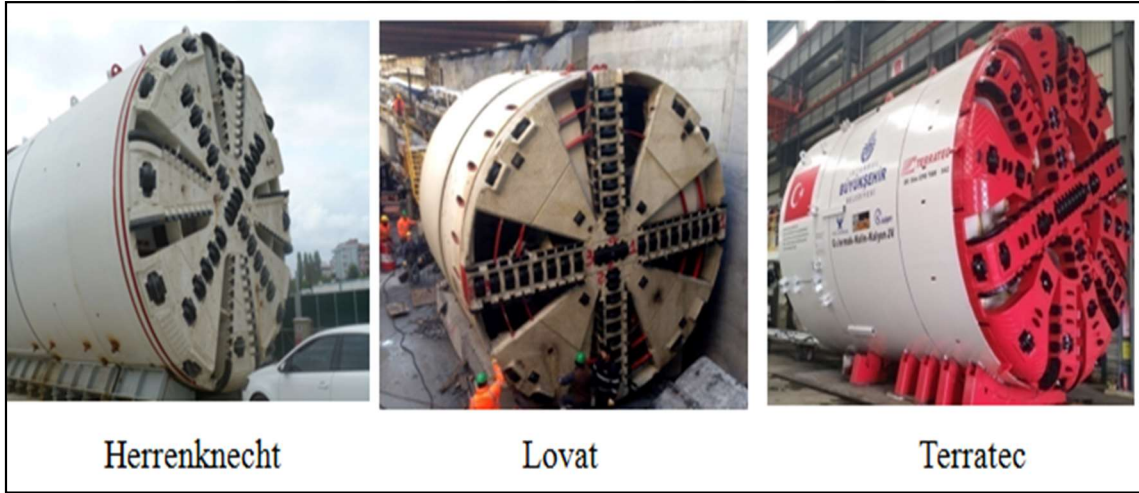
Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu projesi kapsamında 9 istasyon aralığındaki çift tüp ana hat tünelleri Herrenknecht, Lovat ve Terratec olmak üzere üç ayrı marka 6,56 metre kazı çapı olan EPB-TBM ile açılmıştır. Şekil 3-1’de gösterildiği üzere başlangıç itibariyle Herrenknecht marka TBM Hat-1’den ve Lovat marka TBM’de Hat-2’den Yenimahalle İstasyonundan Mahmutbey İstasyonu istikametine kazılarına başlamışlardır. Yenimahalle İstasyonunda mevcut makas bölgesinden ise Terratec marka TBM Veysel Karani İstasyonu yönünde önce Hat-1 kazısını tamamlamış ardından Veysel Karani İstasyonunda demonte edilerek yeniden Yenimahalle makas bölgesinden Veysel Karani İstasyonu yönünde Hat-2 kazısını tamamlamıştır.

Hat-2 Mahmutbey yönünde kazısını yapan Lovat marka TBM’de mevcut teknik problemlerden dolayı kazı çalışmalarını sonlandırmıştır. Terratec marka TBM hat kazılarının tamamlamış olduğundan Hattın Mahmutbey istasyonunda kurularak ters yönde Hat-2 kazısına başlamış ve Lovat marka TBM tarafından tamamlanamayan kesimler bu TBM tarafından tamamlanmıştır.

Aynı hattın kazısını yapan Lovat ve Terratec marka TBM Göztepe İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu arasında buluşarak kazılarını tamamlamışlar ve burada inşa edilen ve ileride acil çıkış shaftı amacıyla kullanılabilen olan shaftan demonte edilerek yüzeye alınmışlardır.



Şekil 3-1: Mecidiyeköy- Mahmutbey metro projesinde TBM ile açılan anahat tünelleri
 Bu üç adet TBM'den Lovat ve Herrenknecht marka TBM'ler daha önce Otogar-Bağcılar-Olimpiyat metro hattı kazılarında kullanılmış olduğundan bakım ve yenileme çalışması yapılarak, Terratec marka TBM ise yeni tedarik edilerek ilk defa bu projede kullanılmıştır.

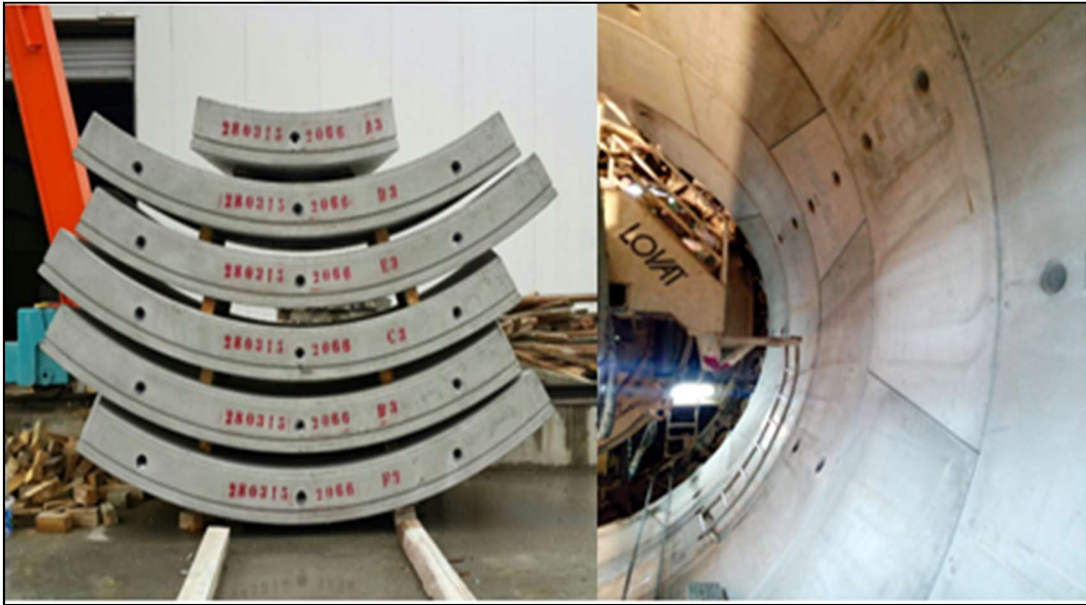


Resim 3-1: Mecidiyeköy- Mahmutbey metro hattı kazısında kullanılan TBM'ler
 Ayrıca Tablo 3.1'de Mecidiyeköy-Mahmutbey metro projesinde kullanılan EPB-TBM'lerin kısmi teknik özellik ve boyutları verilmiştir.

Tablo 3-1: Mecidiyeköy-Mahmutbey metro projesinde kullanılan TBM'lerin teknik özellikleri ve boyutları

TBM Üreticisi	Herrenknecht	Lovat	Terratec
Kazı Çapı	6,57 m	6,56 m	6,56 m
Kalkan Dış Çapı	6,45 m	6,52 m	6,36 m
TBM Uzunluğu	7,68 m	9,30 m	9,12 m
Gantry Uzunluğu	80 m	65 m	75 m
Kesici Kafa Tipi	Karışık Zemin	Karışık Zemin	Karışık Zemin
Maksimum Tork	4400 kNm	4500 kNm	5440 kNm
Maksimum Baskı Kuvveti	32000 kN	54000 kN	50000 kN
Ayna Basıncı	4,5 bar	4,5 bar	5 bar
Segment Dış Çapı	6,30 m		
Segment İç Çapı	5,70 m		
Segment Uzunluğu	1,40 m		
Ring Konfigürasyonu	5 segment + 1 anahtar segment		

Her kazı sonrası aşağıda Resim 3-3 sağda verilen genişliği 1.4 m, iç çapı 5.70 m ve dış çapı 6.30 m olan prekast segmentler Resim 3-2 solda ringler oluşturacak şekilde kurularak tünel inşası gerçekleştirilmiştir.

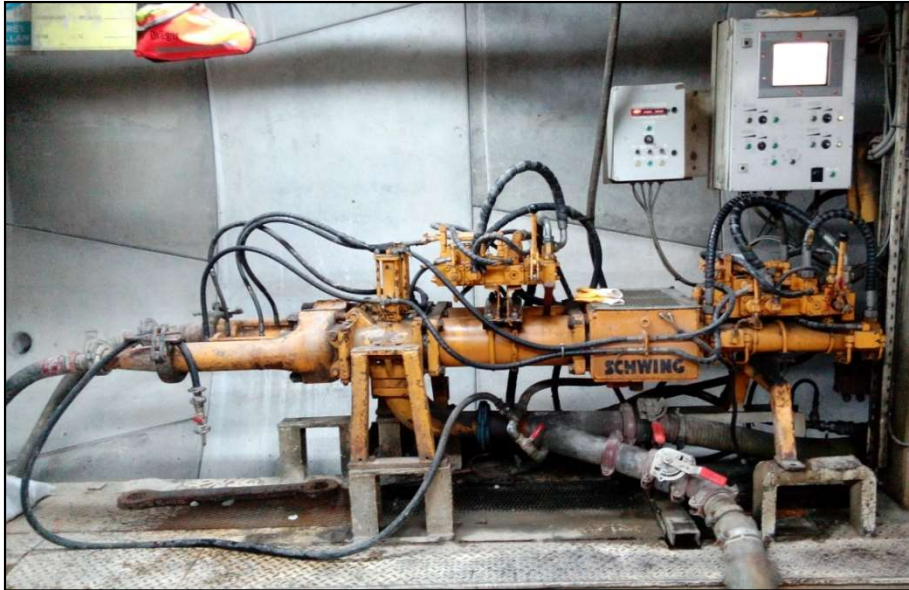


Resim 3-2: Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde prekast tünel kaplama segmentleri ve tünel içinde montajın tamamlanması sonrası görünümü

Dolayısıyla Mecidiyeköy-Mahmutbey metro projesindeki TBM tünellerinde teorik olarak her 1,4 metrelik kazı ilerlemesinde kurulu segment ile kazılan zemin arasında yaklaşık 3,68 m³ enjeksiyon uygulanacak boşluk hacmi oluşmuştur. Bu boşluk hacim enjeksiyon santrallerinde hazırlanan enjeksiyon harcı ile TBM üzerindeki enjeksiyon pompaları vasıtasıyla ortalama yaklaşık 2,5 bar basınç ile doldurulmuştur. Enjeksiyon harcı Resim 3-3'te görülen çok amaçlı servis araçlarıyla tünel içindeki TBM'lere, TBM'ler üzerinde sabit olan Resim 3-4'te görülen enjeksiyon pompası yardımı ile kazı sırasında ilerlemeye paralel olarak kazı boşluklarına doldurulmuştur.



Resim 3-3: Tünel içi çok amaçlı servis aracı (MSV) ve enjeksiyon transferi için enjeksiyon harç tankı



Resim 3-4: TBM üzerinde kurulu konvansiyonel enjeksiyon harcı pompası

Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde uygulanan enjeksiyon harcı bileşimi ise Tablo 3-2’de gösterilmiştir. Bu enjeksiyon harcı bileşimi TBM işletme sahalarındaki beton santrallerinde her 1,4 m kazı ilerlemesi için kazılan zemin ve uygulama esnasındaki kayıplarda dikkate alınarak teorik hacmin 1,2 kat fazlası olarak yaklaşık 4,5 m³ imal edilerek tünellere uygulama amaçlı transfer edilmiş ve uygulaması yapılmıştır.

Tablo 3-2: Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde kullanılan enjeksiyon harcı içerisindeki malzeme ve miktarları

Gerçek Bileşim (1 m³)	
Çimento	100 kg
Doğal Kum	1 389 kg
Su	272 lt
Kül	269 kg
Bentonit	10 kg
Akışkanlaştırıcı (% 1.0)	3,7 lt
Priz Hızlandırıcı (% 4.0)	14,8 lt

3.2. YÖNTEM

Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde öncelikle kazı çalışması ile birlikte birincil enjeksiyon olarak tek bileşenli çimentolu enjeksiyon harcı karışımı TBM üzerindeki enjeksiyon pompaları vasıtasıyla tünel kazısı boyunca her bir prekast segment ringinin arkasına miktarı 4,5 m³ olacak şekilde basılarak birincil enjeksiyon çalışması yapılarak tünel kazıları tamamlanmıştır.

Tünel kazı ve inşaa çalışmaları tamamlanmasının akabinde tünel içerisinde gözle görülür şekilde akıntı, damlama, terleme şeklinde su gelirleri tespit edilen bölgelerde enjeksiyon boşluğunun doluluğunun tespiti amacıyla kontrol delgileri yapılmış ve kontrol delgileri sonucu boşluk tespit edilen bölgelere ikincil enjeksiyon olarak 1/1 oranında çimento-su enjeksiyonu yapılmıştır.

Çimento-su enjeksiyonu ile tamamen bu boşluklar doldurulduktan sonra ise bazı bölgelerde kılcal su gelirlerinin çimento su enjeksiyonu ile giderilemediği görülmüş ve bu noktalardaki su gelirlerini gidermesi amacıyla üçüncül enjeksiyon olarak poliüretan reçine ile kimyasal enjeksiyon çalışması yapılmıştır.

Bu tez çalışması, başlangıçta bir ofis çalışması olarak ağırlıklı ise sahada gözlem yapılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın başlangıç aşamasında, TBM tünellerinin güzergâh jeolojik etütleri istasyon aralıklarına göre ayrı ayrı incelenmiş daha sonra TBM tünellerinin geçtiği ana hat tünellerindeki su gelirleri tespit edilerek raporlanmıştır ve elde edilen bu veriler ile TBM tünellerindeki su gelirleri ve bu su gelirlerini gidermek amacıyla yapılan enjeksiyon çalışmalarının jeolojik koşullar altında değerlendirilmesi amacı belirlenmiştir.

Amacın belirlenmesinin ardından, TBM tünellerinde enjeksiyon çalışmaları açısından önemli bir unsur olan su gelirleri ve genel jeolojik nedenlerin incelenmesi için hem sahada birebir hem de tünel çalışmaların başlamasından önce bölgede yapılan sondaj çalışmalarının jeoloji hem de mühendislik jeolojisi açısından genel değerlendirilmesi aşamasına geçilmiştir. Çalışma bölgesi olarak Mecidiyeköy- Mahmutbey metrosu TBM tünelleri için yapılan tüm jeolojik çalışmalar ve sahadan elde edilen hatta mevcut olan 9 istasyon aralığı için ayrı ayrı tasnif edilerek elde edilen veriler analiz edilerek kullanıma uygun hale getirilmiştir.

Mecidiyeköy- Mahmutbey metro projesinde TBM ile açılan 9 istasyon arasındaki ana hat tünelleri hem tünel çalışmaları esnasında hem de tünel çalışmalarının tamamlanması akabinde tünel içindeki mevcut su geliri verileri elde edilmesi amacıyla her iki hatada ayrı ayrı gözlemlerde bulunulmuştur. Ayrıca mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla sahada yapılan enjeksiyon çalışmaları sonrası genel gözlemler tekrarlanarak yapılmıştır.

Verilerin elde edilmesinin ardından Mecidiyeköy-Mahmutbey metro projesinde TBM ile açılan tünellerde mevcut su gelirleri ve jeolojik veriler karşılaştırılarak enjeksiyon çalışmalarının jeolojik koşullar altında başarılı olması ve başarısız olmasındaki temel etmenler tespit edilmiş ve bu tezin ileriki aşaması olan bulgular kısmında paylaşılmıştır.

Enjeksiyon başarıları oranı tespiti yapılırken tünellerde yapılan kontrol delgileri ve tünellerde yapılan gözlemler sonucu su geliri olan bölgeler dikkate alınarak enjeksiyonlarının başarıları veya başarısız olduğu sonucuna varılmıştır. Metro tünellerde özellikle eksen üzerindeki bölgelerde su geliri her durumda istenmediğinden tünellerdeki yoğun veya az yoğun her türlü su geliri enjeksiyon başarıları oranını belirlerken dikkate alınmıştır. |

4. BULGULAR

4.1. GÜZERGÂHTA TBM İLE AÇILAN ANAHAT TÜNELLERİ VE GENEL VERİLER

Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu projesinde TBM ile yapılan tünel kazı çalışmalarına 02.11.2015 tarihinde yüklenici firma olan Gülermak-Kolin-Kalyon metro yapım ortaklığı tarafından başlanılmış ve 07.09.2017 tarihinde kazılar tamamlanmıştır. Aşağıda Tablo 4-1’de her 3 TBM’in yaptığı kazılar hakkında genel bilgiler mevcuttur.

Tablo 4-1: Mecidiyeköy- Mahmutbey metro hattı TBM tünelleri kazı bilgileri

TBM	İstasyon Aralığı	Başlangıç Km	Bitiş Km	Tünel Uzunluğu	Başlangıç Tarihi	Tünel Tamamlanma Tarihi
Herrenknecht H1*	Yenimahalle-Karadeniz	15+511,4	17+075,24	1 563,8	11.02.2015	02.01.2016
	Karadeniz-Tekstilkent	17+292,50	18+177,30	884.8	21.01.2016	06.04.2016
	Tekstilkent-Yüzyıl	18+752,73	19+773,33	1 020,6	30.05.2016	01.10.2016
	Yüzyıl-Göztepe	20+053,07	20+807,67	754.6	31.10.2016	03.04.2017
	Göztepe-Mahmutbey	21+030,48	22+196,68	1 166,2	26.04.2017	17.08.2017
Lovat H2*	Yenimahalle-Karadeniz	15+492,39	17+019,79	1 527,4	29.01.2015	22.04.2016
	Karadeniz-Tekstilkent	17+247,70	18+210,90	963.2	28.05.2016	13.10.2016
	Tekstilkent-Yüzyıl	18+685,83	19+692,43	1 006,6	23.12.2016	02.06.2017
	Yüzyıl-Yüzyıl Şaft	19+975,11	20+327,90	352.8	08.07.2017	09.09.2017
Terratec H1*	Yenimahalle-Kazım Karabekir	15+154,02	14+017,22	1 136,8	16.03.2015	07.08.2015
	K. Karabekir-Akşemsettin	13+835,22	13+107,25	728.0	24.08.2015	09.10.2015
	Akşemsettin-Veysel Karani	12+807,35	12+249,02	558.02	28.10.2015	09.12.2015
Terratec H2*	Yenimahalle-Kazım Karabekir	15+135,26	13+992,86	1 142,4	01.02.2016	21.05.2016
	K. Karabekir-Akşemsettin	13+815,59	13+083,39	732.2	15.08.2016	17.10.2016
	Akşemsettin-Veysel Karani	12+785,56	12+214,36	571.2	28.11.2016	10.02.2017
Terratec H2A*	Mahmutbey - Göztepe	22+139,00	21+007,80	1 131,2	10.05.2017	31.07.2017
	Göztepe – Yüzyıl Şaft	20+735,19	20+338,99	396.2	07.09.2017	14.11.2017

Açıklama(*): H1: Hat-1, H2: Hat-2, H2A: Hat-2 Mahmutbey- Yüzyıl Şaft Arası

Her üç TBM'in kazısını tamamlanmasının akabinde TBM ile kazı yapılan tüm güzergâh boyunca yapılan kontrollerde bazı bölgelerde enjeksiyon çalışmalarının mevcut su gelirleri olması sebebiyle başarısız olduğu görülmüştür. Bu bölgelerde yapılan gözlemlerde özellikle su geliri olduğu görülerek ve ayrıca yapılan kontrol delgisi tespitleri sonucu bu kanaat oluşmuştur.

Mevcut su gelirlerinin olduğu bölgelerde her hat aralığı için ayrı ayrı kontrol delgileri yapılmış ve kontrol delgileri sırasında segment arkalarında kazı sonucu oluşan çeperlerin dolmadığı görülmesi sonucunda da çimento-su enjeksiyonu ile bu bölgelerdeki enjeksiyon boşlukları veya su gelirine neden olan kılcal çatlaklar veya fay kaynaklı suyolları kapatılmaya çalışılmıştır.

Çimento- su enjeksiyonu ile yapılan bu bölgelerde kısmen su geliri olduğu ve de enjeksiyon çalışması yapıldığı halde herhangi bir alış olmadığı görülmüş ve bu su gelirlerinin ise lokal olarak devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu noktalarda ise kimyasal enjeksiyon yapılarak su gelirleri giderilmeye çalışılmıştır. Bütün bu enjeksiyon çalışmalarının tamamlanmasının akabinde çok yüksek oranda enjeksiyon çalışmalarının başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tez kapsamı dahilinde bütün bu çalışmalar sahada birebir takip edilerek yapılan gözlemler sonucu elde edilen veriler ve genel jeolojik veriler tasnif edilerek enjeksiyonun başarısız olma nedenleri ve akabinde yapılan genel çalışmaların değerlendirilmesi yapılmaya çalışılmıştır.

Bu değerlendirmeler her istasyon aralığında bir hattın rastgele seçilerek bazen de farklı koşulların olduğu düşünülen durumlarda istasyon aralıklarındaki çift tüp tüneller birbirleriyle karşılaştırılarak sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

4.2. İSTASYON ARALIKLARINA GÖRE ELDE EDİLEN GENEL VERİLER

4.2.1. Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonu Arası Veriler

Güzergahın bu iki istasyon aralığındaki 558 metre olan tünel kazısının başlangıcından itibaren yaklaşık ilk 200 metrelik kısmı yüksek plastisiteli, yer yer kil taşı ve siltaşı içeren aşırı pekişmiş killi(sıkı) ortamda yapılmıştır.

Hattın geri kalan kesiminin kazısı ise önceleri üst bölgeleri kısmen killi ortamın da bulunduğu, sonrasında tamamen ayrılmış kıltaşı yoğunluğu fazla olan kıltaşı-kumtaşı yapılarak tamamlanmıştır. Hat kazısının son kesiminde tünel aynası ve üst kesimlerinde sık eklem aralıklı az ayrılmış kıltaşı-kumtaşı ortamda yapılmıştır.

Kazı esnasında geçilen killi ortamın kil yoğunluğunun oldukça fazla olduğu ve TBM kazı çemberinde ve nakliye sırasında bant sisteminde tıkanmalara sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca TBM hattın yaklaşık son 425 metrelik kısmını % 4,70 eğimde, eğim aşağı kazmıştır. Kazı çalışmalarının tamamlanmasının ardından yapılan genel gözlemlerde TBM' in kaya ortamından geçtiği bölgelerde sızıntı şeklinde su gelirlerinin olduğu bu su gelirlerinin de ortamdaki kayanın ayrışma miktarı arttıkça arttığı, ortamın zemin (kil-sıkı) olduğu bölgelerde ise su gelirinin olmadığı tespit edilmiştir. Tablo 4-2 ve Grafik 4-1'de TBM'in bu hat kazısı boyunca geçtiği jeolojik ortamlar ve kazı sonrası saha gözlemlerinde elde edilen enjeksiyon başarısızlık durumu tespitleri tablo ve grafik olarak verilmiştir.

TBM kazı ilerleme yönü Akşemsettin İstasyonundan Veysel Karani İstasyonuna doğru (geri yönde) yani Km: 12+807'den Km:12+249'a doğrudur. Ayrıca Ek-2'de bu istasyon aralığının jeolojik profili verilmiştir.

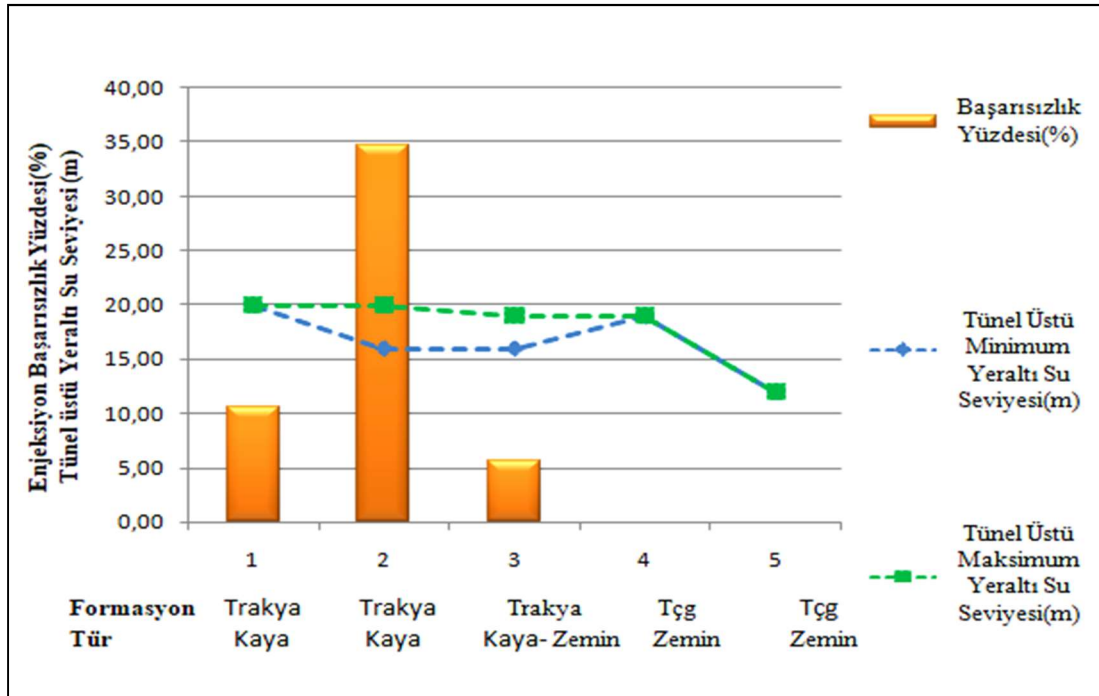
Tablo 4-2: Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Genel Jeolojik Veriler								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Kazı Sırasında Kesilen Birim		Zeminin Grup Sembolü		Türü	Tünel üzerindeki Su Kalınlığı (m)	
		Formasyon-Üye	Litoloji	Tünel Aynasında	Tünel Üstünde		Min	Max
12+249	12+320	Trakya	Kıltaşı-Silttaşı	W1-W2	W1-W2	Kaya	20	20
12+320	12+500	Trakya	Kıltaşı-Silttaşı	W1-W2	W3-W4	Kaya	16	20
12+500	12+599	Trakya	Kıltaşı-Silttaşı	W3-W4	4	Kaya-Zemin	16	19
12+599	12+705	Tçg	Sert Kil	4	4	Zemin	19	19
12+705	12+807	Tçg	Sert Kil	4	4	Zemin	12	12

Açıklama: W1-W2: Az ayrılmış -Ayrılmamış kaya, W3: Orta derece ayrılmış kaya, W4: Çok ayrılmış kaya, 4: Kil(Sert),Tçg: Çekmece Formasyonu-Güngören Üyesi

Tablo 4-3(devamı):Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Kazı Sonrası Tüneldeki Su gelirleri Tespiti				
Başlangıç Km	Bitiş Km	Başarısız Enjeksiyonlu Ring Sayısı	Toplam Ring Sayısı	Başarısızlık Yüzdesi
12+249	12+320	6	57	10,53
12+320	12+500	24	75	34,67
12+500	12+599	4	71	5,63
12+599	12+705	0	129	0,00
12+705	12+807	0	77	0,00



Grafik 4-1: Veysel Karani İstasyonu ile Akşemsettin İstasyonu Arası Jeolojik koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği

Grafik 4-1’de görüldüğü üzere kazılan ortamın zemin olduğu bölgelerde tünel içerisinde su gelirinin olmadığı, ortamın kaya olduğu bölgelerde kayanın ayrışma miktarı arttıkça tünel içerisindeki su gelirlerinin arttığı ,ayrıca Km: 12+500 ile 15+599 arası kazılan ortamın üst kısmında geçirimsiz, pekişmiş killerin, kazı kotunda ise tamamen ayrılmış kaya olduğu halde bu bölgedeki su gelirinin az olduğuda ayrıca tespit edilmiştir. Resim 4-1’de bu hat kazısı sırasında en fazla su gelirinin olduğu Km: 13+320 ile Km: 13+500 arası kesim görülmektedir.

Çimentolu enjeksiyon harç karışımı yapısı itibariyle yer altı suyunun bulunduğu bölgelerde su ile etkileşime geçerek karışımdaki su/çimento oranı artmakta buda karışım içindeki ince-kalin agreganın oluşan yağunluk farkıyla çökmesine neden olmaktadır. Ayrıca enjeksiyon harç karışımının priz alma süresi yer altı suyu ile etkileşim sonucu ya artmakta yada harç prizini alamadan özelliğini kaybetmektedir. Bu da ayrışma oranı artan kayalarda enjeksiyon başarısızlığına neden olmakta ve tünel içerisinde istenmeyen su gelirleri oluşmaktadır. Su gelirleri bu bölgelerde yer altı suyunun yoğunluğuna göre akıntı, sızıntı, damlama veya prekast beton kaplama üzerinde nemlenme şeklinde olabilmektedir.



Resim 4-1:Veysel Karani ile Akşemsettin İstasyonları arası Km: 12+320 –Km: 13+500 arası su geliri görünümü

Hat boyunca mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla tünel içerisinde su geliri olan bölgelere çimento su enjeksiyonu ve akabinde de kimyasal enjeksiyon çalışması yapılmış ve su gelirleri giderilmeye çalışılmıştır.

Tablo 4-3'te bu bölgede mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla yapılan çimento-su ve kimyasal enjeksiyon çalışması ile ilgili genel değerler verilmiştir.

Tablo 4-4: Akşemsettin –Veysel Karani İstasyonları arası yapılan Çimento-Su ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları

Akşemsettin- Veysel Karani İstasyonları Arası	
Hat Uzunluğu (m):	571,2
Maksimum Eğim (%):	-4,7
Çimento-Su Enjeksiyonu Miktarı (Torba Çimento)	
Hat-1	Hat-2
822	610
Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Miktarı (lt)	
Hat-1	Hat-2
560	2691

4.2.2. Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Veriler

Güzergahın bu iki istasyon aralığındaki 732 metre olan tünel kazısının başlangıcında ilk 90 metrelik kısmını kumlu-killi silt ortamda, ardından yaklaşık 120 metrelik kısmında tünel üst kesimlerinde orta ve çok ayrılmış kıltaşı, devamında 90 metre civarı orta-çok ayrılmış kıltaşı, hattın kalan yaklaşık 430 metrelik kısmını ise yer yer kil taşı ve silttaşı içeren aşırı pekişmiş killi(sıkı) ortamından geçerek tamamlamıştır. Bu bölgede de kazı esnasında kil-siltli kil ortamın kil yoğunluğunun oldukça fazla olduğu ve kazı çemberinde tıkanmalara sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca TBM hattın yaklaşık 550 metrelik kısmını % 4,78 yukarı eğimde kazmıştır. Kazı çalışmalarının tamamlamasının ardından yapılan genel gözlemlerde TBM in kaya ortamından geçtiği bölgelerde çok az miktarda su gelirlerinin olduğu, ortamın zemin yani siltli kum ve kil olduğu bölgelerde ise su gelirinin olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 4-4 ve Grafik 4-2'de TBM bu hat kazısı boyunca geçtiği jeolojik ortamlar ve kazı sonrası saha gözlemlerinde elde edilen enjeksiyon başarısızlık durumu tespitleri tablo ve grafik olarak verilmiştir.

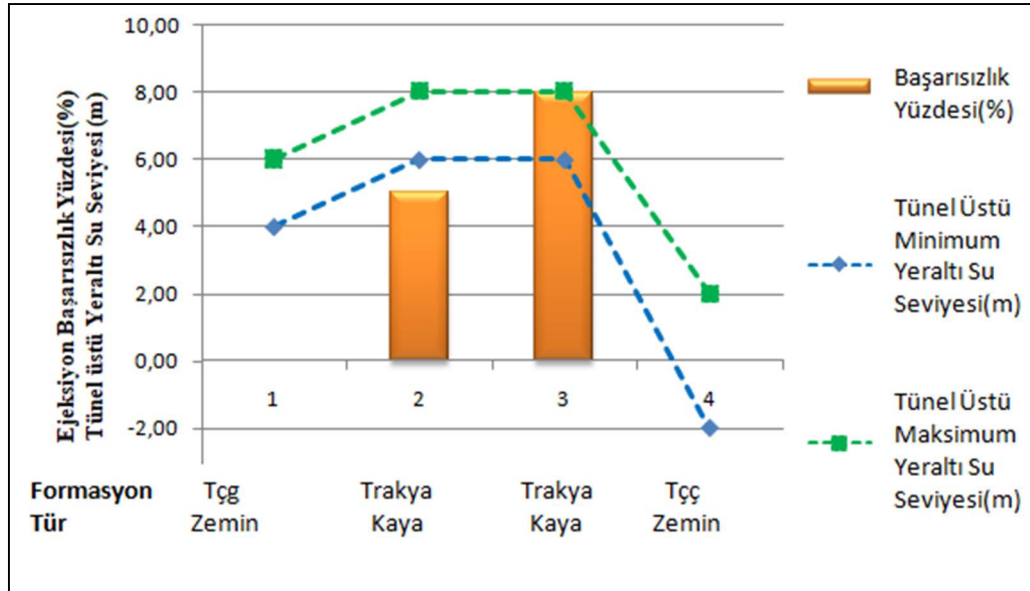
TBM kazı ilerleme yönü Kazım Karabekir İstasyonundan Akşemsettin İstasyonuna doğru yani Km: 13+815'ten Km:13+083'e doğrudur. Ayrıca Ek-3'te bu istasyon aralıklarının jeolojik profili verilmiştir.

Tablo 4-5: Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Genel Jeolojik Veriler								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Kazı Sırasında Kesilen Birim		Zeminin Grup Sembolü		Türü	Tünel üzerindeki Su Kalmılığı (m)	
		Formasyon-Üye	Litoloji	Tünel Aynasında	Tünel Üstünde		Min	Max
13+083	13+460	Tçg	Sert Kil	4	4	Zemin	4	6
13+460	13+580	Tçg	Sert Kil	W3-W4	4	Zemin	6	8
13+580	13+780	Trakya	W3-W4	W1-W2	W3-W4	Kaya	6	8
13+780	13+815	Tçç	Siltli kum	7	7	Zemin	-2	2

Açıklama:W3: Orta derece ayrılmış kaya,W4: Çok ayrılmış kaya, 4: Kil(Sert),Tçg: Çekmece Formasyonu-Güngören Üyesi, 7: Siltli-Kum, Tçç: Çekmece Formasyonu-Çukurçeşme Üyesi

Kazı Sonrası Tüneldeki Su gelirleri Tespiti				
Başlangıç Km	Bitiş Km	Başarısız Enjeksiyonlu Ring Sayısı	Toplam Ring Sayısı	Başarısızlık Yüzdesi
13+083	13+460	0	268	0,00
13+460	13+580	4	86	5,00
13+580	13+780	11	143	8,00
13+780	13+815	0	26	0,00



Grafik 4-2: Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği

Tablo 4-2 ve Grafik 4-2’te de görüleceği üzere tünel kazıları sırasında kaya ortamından geçerken yapılan enjeksiyonun başarızlık oranı arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca Km:13+519-13+609 arası kazılan ortamın üst kısmında geçirimsiz, pekişmiş killerin kazı kotunda ise orta ve çok ayrışmış ortam olduğu halde bu bölgedeki su gelirinin az olduğuda tespit edilmiştir.

Eğim yukarı kazı yapılan bu bölgede çoğunlukla yer altı suyu geçirgenliği az olan pekişmiş killerin bulunduğu ortamdaki geçilerek kazı yapılmıştır. Bu bölgedeki tünel kazıları esnasında enjeksiyonun mevcut yapısının bozunmadığı ve bu durumda enjeksiyon çalışmalarının tamamen başarılı olmasında etkili olduğu görülmüştür. Km:13+609 ile 13+727 arasında ise kazılan ortamında Trakya formasyonunu kaya ortamında olması ayrıca aynanın üst kısımlarında orta-çok ayrışmış bir ortam olması bu bölgele tünel içerisinde kısmen su gelirlerine ve enjeksiyon çalışmasının başarısız olmasına neden olmuştur.

Bu hat boyunca kazılan ortamın zemin olduğu bölgelerde su gelirinin az veya olmadığı, kazılan ortamın kaya olduğu bölgelerde ise zemine nazaran daha fazla olduğu görülmüştür. Resim 4-2’de bu hat boyunca kazı aynası ve üst kesimlerinde pekişmiş killerin bulunduğu kesimlerdeki tünel içi su geliri olmayan bölgeler görülmektedir.



Resim 4-2:Akşemsettin-Kazım Karabekir İstasyonları arası genel görünüm

Mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla bu hatta sadece kimyasal enjeksiyon çalışması yapılmış ve hat boyunca genel itibariyle su gelirleri giderilmiştir. Tablo 4-5'te bu bölgede mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla yapılan kimyasal enjeksiyon çalışması ile ilgili genel değerler verilmiştir.

Tablo 4-6: Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları

Kazım Karabekir- Akşemsettin İstasyonları Arası	
Hat Uzunluğu (m):	732,2
Maksimum Eğim (%):	4,78
Çimento-Su Enjeksiyonu Miktarı (Torba Çimento)	
Hat-1	Hat-2
-	-
Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Miktarı (lt)	
Hat-1	Hat-2
122	133

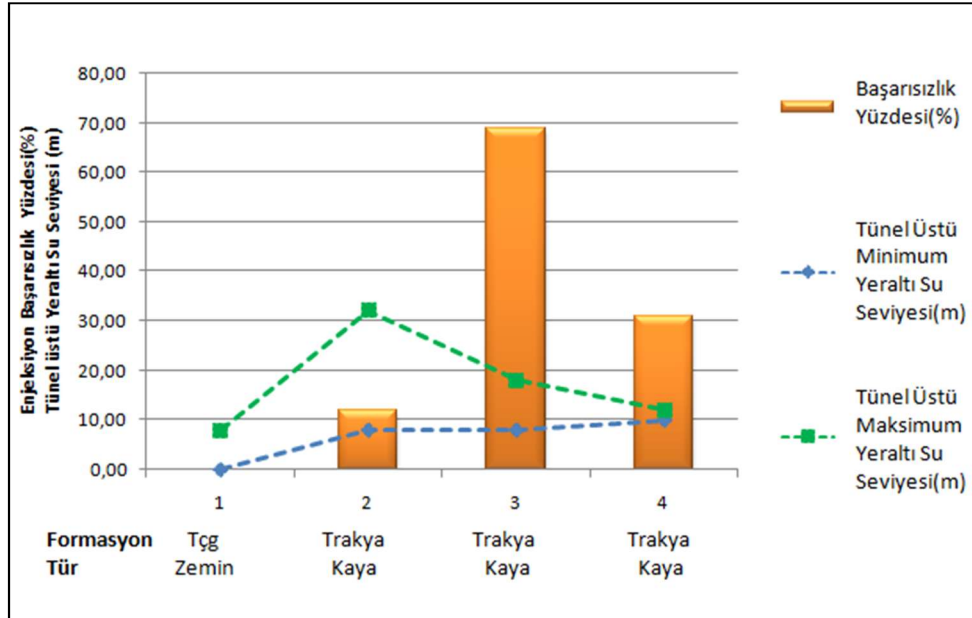
4.2.3. Yenimahalle İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu Arası Veriler

Güzergahın bu iki istasyon aralığında 1137 metre olan tünel kazısı başlangıcının ilk 300 metrelik kesimi az ayrılmış kumtaşı ağırlıklı kumtaşı-kiltaşından, ardından yaklaşık 730 metrelik kesimi önceleri sık-çok sık eklem aralıklı, yer yer parçalı, sık kırıklı, sonlarına doğru ise orta-yer yer sık eklemli kiltaşı-kumtaşından ve hat kazısının yaklaşık son 100 metrelik kısmında ise siltli kum ortamından geçilerek tamamlamıştır. Hat kazısının orta kesimlerinde sık- çok sık eklemli, parçalı, kırıklı kaya yapıları geçilmiştir. Ayrıca TBM kazısını eğim yukarı olarak yapmıştır ve kazı eğimi % 0,5'tir. Kazı çalışmalarının tamamlanmasının ardından yapılan genel gözlemlerde TBM'in kaya ortamdan geçtiği bölgelerde tünel içerisinde su gelirlerinin olduğu özellikle kayanın eklem sıklığı ve parçalılığı arttıkça su gelirinin daha fazla olduğu, ortamın zemin olduğu bölgelerde ise su gelirinin olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 4-6 ve Grafik 4-3'te TBM'in bu hat kazısı boyunca geçtiği jeolojik ortamlar ve kazı sonrası saha gözlemlerinde elde edilen enjeksiyon başarısızlık durumu tespitleri tablo ve grafik olarak verilmiştir. TBM kazı ilerleme yönü Yenimahalle İstasyonundan Kazım Karabekir İstasyonuna doğru yani Km: 15+154'ten Km:14+017'ye doğrudur. Ayrıca Ek-4'te bu istasyon aralıklarının jeolojik profili verilmiştir.

Tablo 4-7: Kazım Karabekir İstasyonu ile Yenimahalle İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Genel Jeolojik Veriler								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Kazı Sırasında Kesilen Birim		Zeminin Grup Sembolü		Türü	Tünel üzerindeki Su Kalınlığı (m)	
		Formasyon-Üye	Litoloji	Tünel Aynasında	Tünel Üstünde		Min	Max
14+017	14+120	Tçç	Siltli kum	7	7	Zemin	0	8
14+120	14+750	Trakya	Kiltaş-silttaş	W1-W2	W1-W2	Kaya	8	32
14+750	14+840	Trakya	Kiltaş-silttaş	W1-W2	W1-W2	Kaya	8	18
14+840	15+154	Trakya	Kumtaş	W1-W2	W1-W2	Kaya	10	12
Açıklama: W1-W2: Az ayrılmış -Ayrılmamış kaya, 7: Siltli-Kum, Tçç: Çekmece Formasyonu-Çukurçeşme Üyesi								
Kazı Sonrası Tüneldeki Su gelirleri Tespiti								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Başarısız Enjeksiyonlu Ring Sayısı		Toplam Ring Sayısı		Başarısızlık Yüzdesi		
14+017	14+120	0		74		0,00		
14+120	14+750	53		450		12,00		
14+750	14+840	45		65		69,00		
14+840	15+154	70		225		31,00		



Grafik 4-3: Kazım Karabekir İstasyonu ile Yenimahalle İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği

Tablo 4-6 ve Grafik 4-3'te de görüldüğü üzere TBM'in kaya ortamdan geçerken yapılan enjeksiyonun başarısızlık oranı arttığı, yine hat boyunca kazılan kaya ortamın ayrışma derecesi arttıkça enjeksiyon başarısızlık oranının arttırdığı görülmüştür. Tünel kazı ortamının zemin olduğu, kısmen yer altı su seviyesi tünel aynası kotuna indiği bu bölgelerde tünel içerisinde herhangi bir su geliri ve enjeksiyon başarısızlığının olmadığı görülmüştür.

Km: 14+750 ile Km: 14+840 arası çok sık eklemli , parçalı ve sık kırıklı bölgelerde yapılan tünel kazısı sonrası tünel içi su gelirlerinin genel görünümü Resim 4-3'te verilmiştir.



Resim 4-3: Km: 14+750 ile Km: 14+840 arası tünel içi su gelirleri

Tablo 4-3'te bu bölgede kaya ortamındaki mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla yapılan çimento-su ve kimyasal enjeksiyon çalışması ile ilgili genel değerler verilmiştir.

Tablo 4-8: Kazım Karabekir İstasyonu İle Yenimahalle İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları

Kazım Karabekir-Yenimahalle İstasyonları Arası	
Hat Uzunluğu (m):	1137
Maksimum Eğim (%):	0,526
Çimento-Su Enjeksiyonu Miktarı (Torba Çimento)	
Hat-1	Hat-2
1 434	1 931
Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Miktarı (lt)	
Hat-1	Hat-2
3 967	5 705

4.2.4. Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu Arası Veriler

Yenimahalle istasyonu ile Karadeniz Mahallesi istasyonları arasının Hat-1 kısmını Herrenknecht marka, Hat-2 kısmını ise Lovat marka TBM kazmıştır. Bu TBM'ler kazılarına, paralel kazılan çift tüp tünellerde kazı yapan iki TBM arasındaki etki alanından dolayı aralarındaki mesafe 60 metre olacak şekilde başlamışlardır.

Güzergahın bu iki istasyon aralığındaki kazı başlangıcı ortamı az ayrışmış-ayrışmamış kaya ortamından gittikçe ayrışan kumtaşı-kiltaşı ortamında 100 m civarı devam etmiş, ardından 70 m civarı az kumlu kil (sert) ortamda, kazının devamı ise ince-orta daneli kum, siltli kum ortamında geçmiştir. Zemin bu aralıkta ilk etapta killi kum iken kazı ilerledikçe kum oranının gittikçe arttığı siltli kum ortamda devam etmiştir. Hattın son kesiminde ise tünel üst kesimleri orta çok ayrışmış tünel kotunda ise az ayrışmış Kumtaşı-Kiltaşın ortamından geçilmiş ve hat kazısı sert killi ortamda tamamlanmıştır.

Siltli kum yoğunluğu olan bölgede TBM'lerin kazı esnasında en çok zorlanılan ayrıca deformasyon yaşanması sonucu da yüzeydeki binalar yıkılma tehlikesi geçirmiştir. Ortamın kum-siltli kum olduğu bölgelerde ayrıca zemin iyileştirme amacıyla yüzeyden enjeksiyon çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca Resim 4-1'de Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz İstasyonu arasında yapılan zemin iyileştirme amaçlı enjeksiyon çalışmaları görülmektedir.



Resim 4-4: Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz İstasyonu arasında yapılan zemin iyileştirme amaçlı enjeksiyon çalışmaları

Kazı çalışmalarının tamamlanmasının ardından yapılan genel kontrollerde TBM in kaya ortamından geçtiği bölgelerde çok az miktarda su gelirlerinin olduğu, ortamın zemin (kum ve kil) olduğu bölgelerde ise su gelirinin olmadığı ve enjeksiyon başarısının oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir.

TBM kazı ilerleme yönü Yenimahalle İstasyonundan Karadeniz Mahallesi İstasyonuna doğru yani Km: 15+511'den Km:17+075'e doğrudur. Ayrıca Ek-5'te bu istasyon aralıklarının jeolojik profili verilmiştir.

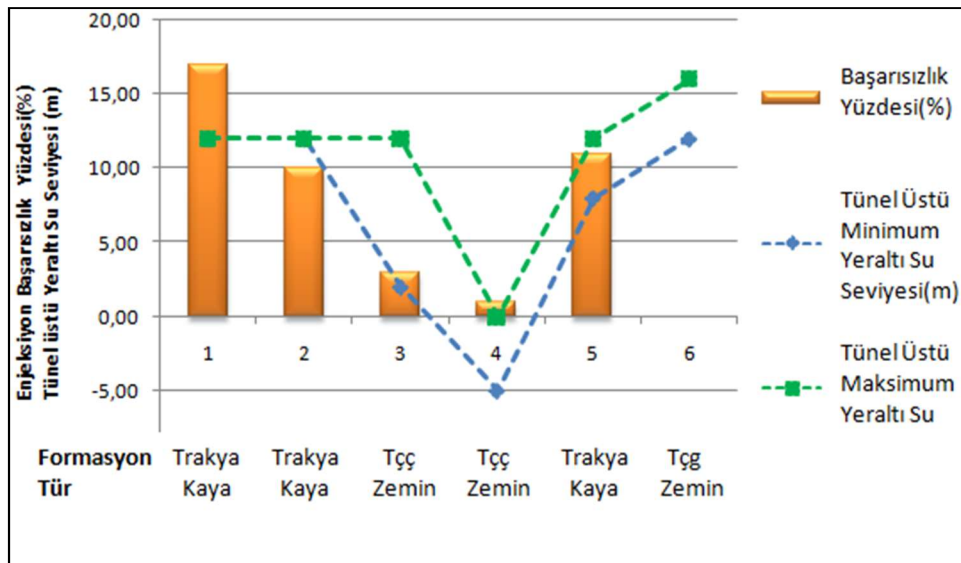
Tablo 4-8 ve Grafik 4-4'te TBM bu hat kazısı boyunca geçtiği jeolojik ortamlar ve kazı sonrası saha gözlemlerinde elde edilen enjeksiyon başarısızlık durumu tespitleri tablo ve grafik olarak verilmiştir.

Tablo 4-9: Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Genel Jeolojik Veriler								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Kazı Sırasında Kesilen Birim		Zeminin Grup Sembolü		Türü	Tünel üzerindeki Su Kalınlığı (m)	
		Formasyon-Üye	Litoloji	Tünel Aynasında	Tünel Üstünde		Min	Max
15+511	15+620	Trakya	Kumtaşı	W1-W2	W4	Kaya	12	12
15+620	15+690	Trakya	Çamurtaşı	W4	4	Kaya	12	12
15+690	16+130	Tçç	Killi kum	4	3	Zemin	2	12
16+130	16+720	Tçç	Siltli kum	7	6	Zemin	-5	0
16+720	17+000	Trakya	Çamurtaşı	W3	W4	Kaya	8	12
17+000	17+075	Tçç	Sert Kil	4	4	Zemin	12	16

Açıklama: W1-W2: Az ayrılmış-Ayrılmamış, W4: Çok ayrılmış kaya, 4: Kil(Sert), Tçç: Çekmece Formasyonu-Güngören Üyesi, 7: Siltli-Kum, Tçç: Çekmece Formasyonu-Çukurçeşme Üyesi

Kazı Sonrası Tüneldeki Su Gelirleri Tespiti				
Başlangıç Km	Bitiş Km	Başarısız Enjeksiyonlu Ring Sayısı	Toplam Ring Sayısı	Başarısızlık Yüzdesi
15+511	15+620	13	77	17,00
15+620	15+690	5	50	10,00
15+690	16+130	9	315	3,00
16+130	16+720	6	420	1,00
16+720	17+000	21	200	11,00
17+000	17+075	0	75	0,00

**Grafik 4-4:** Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği

Tablo 4-8 ve Grafik 4-4'te görüldüğü üzere kazılan ortam ve çevresindeki kayanın ayrışma oranı arttıkça enjeksiyon başarısızlığı artmaktadır. Siltli kum olan bölgelerde ise çok az miktarda nemlenme şeklinde, kil yoğunluğunun fazla olduğu hattın son kısımlarında ise tünel içerisinde su geliri olmadığı da ayrıca görülmüştür.

Tablo 4-3'te bu bölgedeki mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla yapılan çimento-su ve kimyasal enjeksiyon çalışması ile ilgili genel değerler verilmiştir

Tablo 4-10: Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları

İstasyonları Arası	
Hat Uzunluğu (m):	1563,8
Maksimum Eğim (%):	1,368
Çimento-Su Enjeksiyonu Miktarı (Torba Çimento)	
Hat-1	Hat-2
70	123
Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Miktarı (lt)	
Hat-1	Hat-2
-	-

4.2.5. Karadeniz Mahallesi İstasyonu ile Tekstil Kent İstasyonu Arası Veriler

Karadeniz Mahallesi ile Tekstil Kent istasyonları arası kazıda Yenimahalle İstasyonu ile Karadeniz Mahallesi İstasyonu arası kazısını bitiren TBM'ler devam ederek tamamlamıştır. Bu hattın kazıları sırasında tamamen ayrışmamış-az ayrışmış sık-orta eklem aralıklı kumtaşı-silttaşından geçilerek, kazı sonlarına doğru az eklem aralıklı az ayrışmış Kumtaşı ortamda kazılar tamamlanmıştır. Kazı eğimi ise eğim yukarı % 2,9'dur

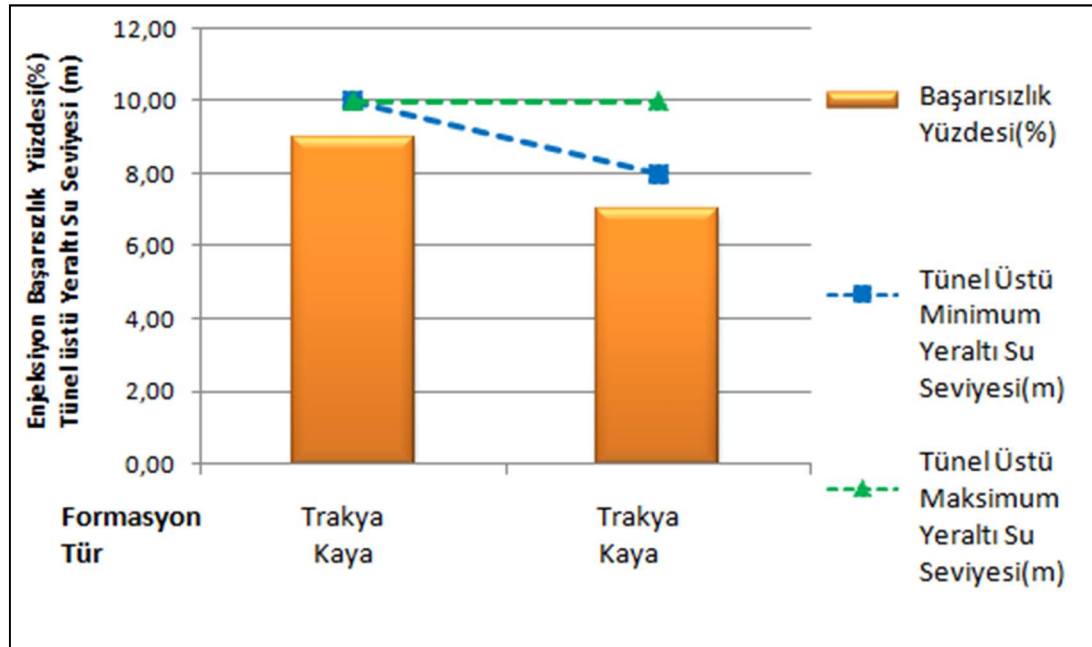
Kazı çalışmalarının tamamlanmasının ardından bu istasyon aralıklarında yapılan gözlemlerde TBM kazısı sonrası hat boyunca su gelirlerinin olduğu görülen bazı noktalarda zamanla bu su gelirlerinin hiçbir müdahale olmadan kendi keline azaldığı ve zamanla tamamen kaybolduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4-10 ve Grafik 4-5'te TBM bu hat kazısı boyunca geçtiği jeolojik ortamlar ve kazı sonrası saha gözlemlerinde elde edilen enjeksiyon başarısızlık durumu tespitleri tablo ve grafik olarak verilmiştir.

TBM kazı ilerleme yönü Karadeniz Mahallesi İstasyonundan Tekstilkent İstasyonuna doğru yani Km: 17+292'den Km:18+177'ye doğrudur. Ayrıca Ek-6'da bu istasyon aralıklarının jeolojik profili verilmiştir.

Tablo 4-11: Karadeniz Mahallesi İstasyonu ile Tekstilkent İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Genel Jeolojik Veriler								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Kazı Sırasında Kesilen Birim		Zeminin Grup Sembolü		Türü	Tünel üzerindeki Su Kalınlığı (m)	
		Formasyon-Üye	Litoloji	Tünel Aynasında	Tünel Üstünde		Min	Max
17+292	17+400	Trakya	Kumtaşı	W3	W4-W5	Kaya	8	10
17+400	18+177	Trakya	Kumtaşı	W1-W2	W1-W2	Kaya	10	12
Açıklama: W1-W2: Ayrışmamış-Az ayrışmış Kaya, W3: Orta derece ayrışmış kaya, W4-W5: Çok ayrışmış kaya								
Kazı Sonrası Tüneldeki Su gelirleri Tespiti								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Başarısız Enjeksiyonlu Ring Sayısı		Toplam Ring Sayısı		Başarısızlık Yüzdesi		
17+292	17+400	7		80		9,00		
17+400	18+177	51		570		7,00		



Grafik 4-5: Karadeniz Mahallesi İstasyonu ile Tekstilkent İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği

Tablo 4-10 ve Grafik 4-5'te görüldüğü üzere hat boyunca kazı başlangıcında ilk etapta sık eklem aralıklı ayrışmış kaya ortamından az eklem aralıklı neredeyse ayrışmamış kaya ortamına geçtikçe enjeksiyon başarısızlık yüzdesi azalmıştır. Bu bölgede tünel kazısı ve sonrası tespit edilen su gelirlerinin zamanla azalarak kaybolduğu görülmüştür.

Bu bölgedeki su gelirlerinin kendi kendine zamanla kaybolduğu görülmüştür. Resim 4-3'te bu bölgedeki tünelde oluşan zamanla kaybolan su gelirlerinin bıraktığı kireç tortuları görülmektedir.



Resim 4-5: Karadeniz Mahallesi ve Tekstil Kent İstasyonları arası su geliri olan bölgelerde oluşan kireç tortuları

Mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla yapılan çimento-su enjeksiyonunun başarılı olduğu görülmüş. Bu bölgede kimyasal enjeksiyon yapılmamıştır. Tablo 4-11'de bu bölgede yapılan enjeksiyon çalışması ile ilgili genel değerler verilmiştir.

Tablo 4-12: Karadeniz Mahallesi İstasyonu ile Tekstil Kent İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları

Karadeniz Mahallesi-Tekstil Kent İstasyonları Arası	
Hat Uzunluğu (m):	884,8
Maksimum Eğim (%):	2,9
Çimento-Su Enjeksiyonu Miktarı (Torba Çimento)	
Hat-1	Hat-2
250	90
Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Miktarı (lt)	
Hat-1	Hat-2
-	-

4.2.6. Tekstil Kent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Arası Veriler

Tekstil Kent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonları arası tünel kazılarını Karadeniz Mahallesi ile Tekstil Kent İstasyonu arası kazısını bitiren TBM'ler bu hatta da kazılarına devam ederek tamamlamıştır. Kazı eğimi, eğim aşağı % 4,4' tür.

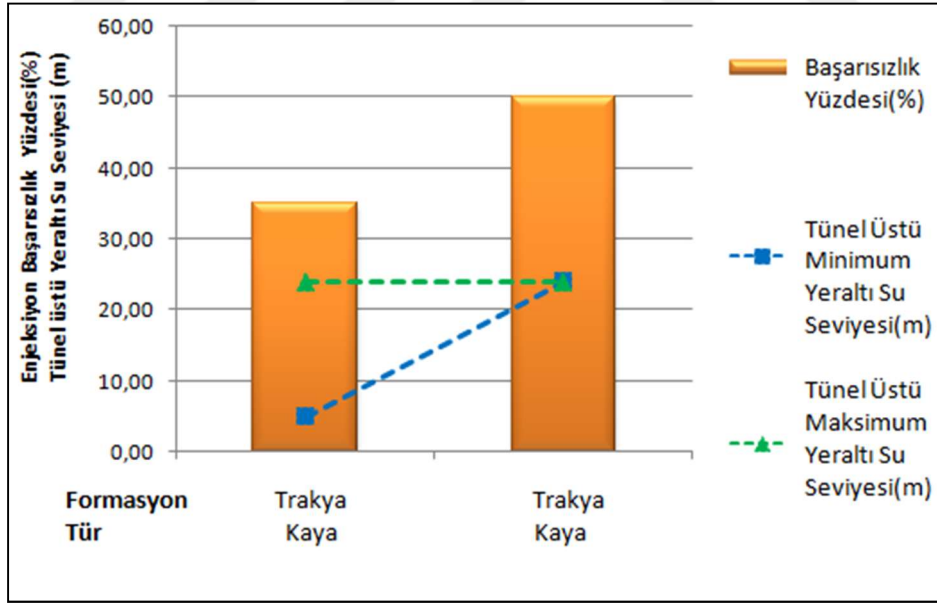
Kazı çalışmaları az ayrılmış-ayrışmamış kumtaşı ortamında başlayarak, üst kesiminde orta çok ayrılmış kiltaşının bulunduğu kısmen ayrılmış kaya ortamına girilmiş ve bu ortamda kazılar tamamlanmıştır. Kazı ortamındaki kayanın ayrışma oranının kazı sonlarına doğru gittikçe arttığı görülmüştür. Kazı çalışmalarının tamamlamasının ardından bu istasyon aralıklarında yapılan genel gözlemlerde TBM'in tamamen kaya ortamından geçtiği bu bölgelerde tünel ve üst kotundaki ortamın ayrışma oranı arttıkça su gelirlerinin de gittikçe arttığı görülmüştür. Bu durumun hem kaya ortamda kazı yapılması hem de kazı yönünün eğim aşağı olmasından ötürü kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 4-12 ve Grafik 4-6'te TBM bu hat kazısı boyunca geçtiği jeolojik ortamlar ve kazı sonrası saha gözlemlerinde elde edilen enjeksiyon başarısızlık durumu tespitleri tablo ve grafik olarak verilmiştir.

TBM kazı ilerleme yönü Tekstil Kent istasyonundan Yüzyıl istasyonuna doğru yani Km: 18+752'den Km:19+773'e doğrudur. Ayrıca Ek-7'de bu istasyon aralıklarının jeolojik profili verilmiştir.

Tablo 4-13: Tekstil Kent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Genel Jeolojik Veriler								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Kazı Sırasında Kesilen Birim		Zeminin Grup Sembolü		Türü	Tünel üzerindeki Su Kalmılığı (m)	
		Formasyon-Üye	Litoloji	Tünel Aynasında	Tünel Üstünde		Min	Max
18+752	19+620	Trakya	Kumtaşı	W1-W2	W1-W2	Kaya	5	24
19+620	19+773	Trakya	Kumtaşı Kıltaşı	W3	W3	Kaya	24	24
Açıklama: W1-W2: Ayrışmamış-Az ayrılmış Kaya, W3: Orta derece ayrılmış kaya								
Kazı Sonrası Tüneldeki Su gelirleri Tespiti								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Başarısız Enjeksiyonlu Ring Sayısı		Toplam Ring Sayısı		Başarısızlık Yüzdesi		
18+752	19+620	220		620		35,00		
19+620	19+773	55		110		50,00		

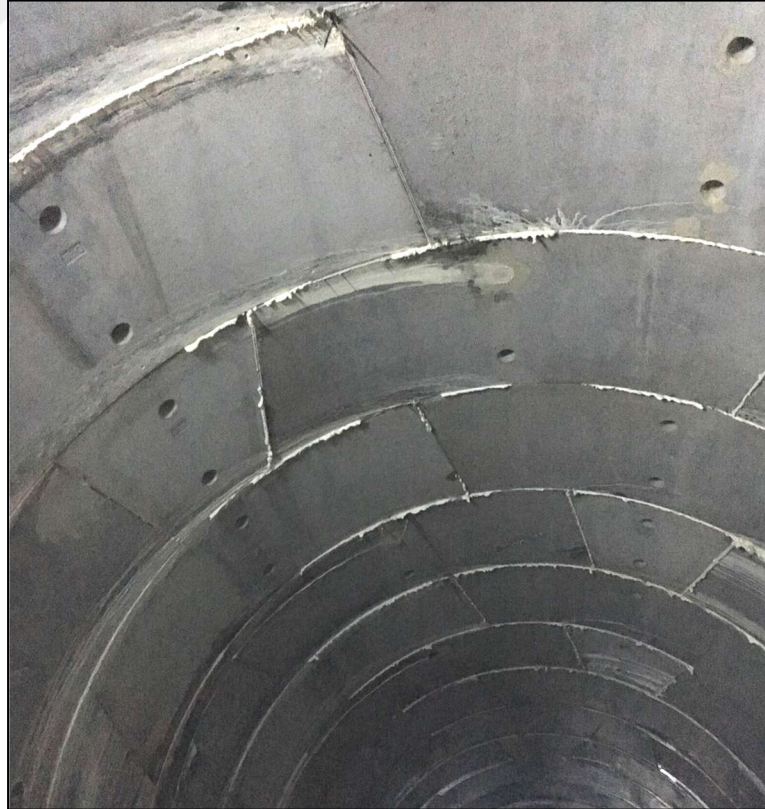
**Grafik 4-6:** Tekstil Kent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafiği

Tablo 4-12 ve Grafik 4-6'te görüldüğü üzere tünel üst kotundaki kaya ortamın ayrışma miktarı arttıkça su gelirinin arttığı ama her iki bölgede önemli miktarda enjeksiyonun başarısız olduğu görülmektedir.

Mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla öncelikle çimento-su enjeksiyonu yapılmıştır. Çimento-su enjeksiyonu tamamlanması ile kimyasal enjeksiyon çalışması yapılmış ve su gelirleri tamamen giderilmeye çalışılmıştır. Tablo 4-13'te bu bölgede yapılan enjeksiyon çalışması ile ilgili genel değerler ve Resim 4-6'da da bu çalışmalar sonrası tüneldeki görünüm verilmiştir.

Tablo 4-14: Tekstil Kent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları

Tekstil Kent-Yüzyıl İstasyonları Arası	
Hat Uzunluğu (m):	1 020,6
Maksimum Eğim (%):	-4,40
Çimento-Su Enjeksiyonu Miktarı (Torba Çimento)	
Hat-1	Hat-2
2400	3360
Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Miktarı (lt)	
Hat-1	Hat-2
3845	3670



Resim 4-6: İlave enjeksiyon çalışmalarının tamamlanması sonrası tüneldeki genel görünüm

4.2.7. Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları Arası Veriler

Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları arası Hat-2 kesimin bir kısmını TBM Lovat bir kısmını ise karşı yönden gelen TBM Terratec tamamlamıştır. Hat -1 kısmını ise TBM Herrenknecht kazmıştır. Kazı eğimi eğim aşağı % 4,78'dir. Hat-1 kısmında kazı yapan Terratec'in kazı eğimi, eğime ters yönde ilerlediğinden eğim yukarı %4,78'dir.

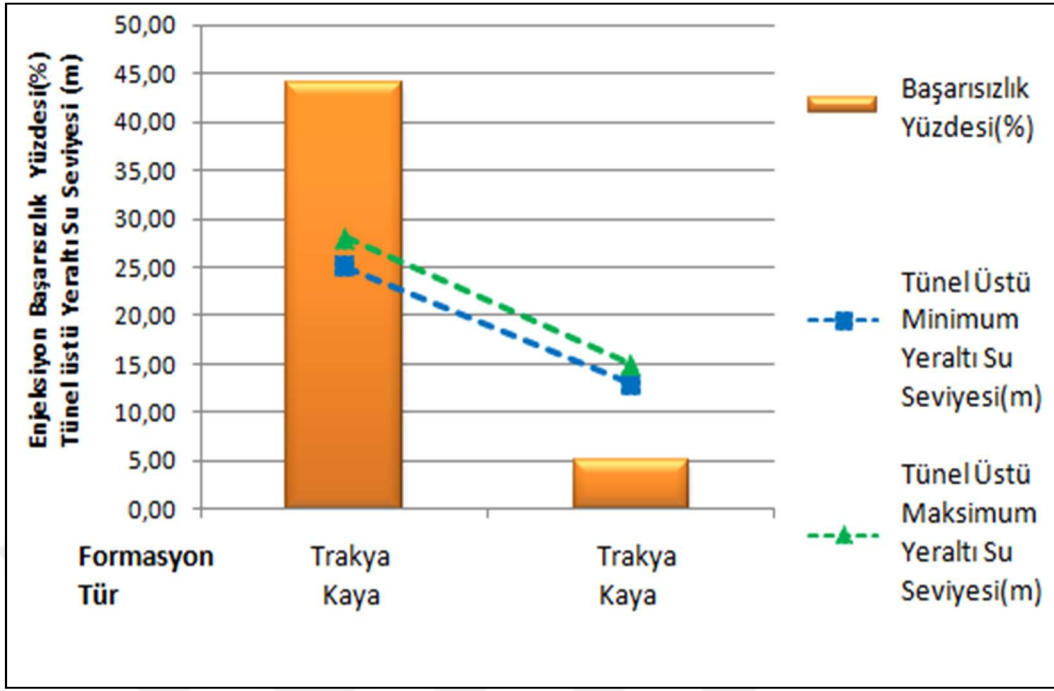
Göztepe istasyonu yönünde hattın kazıları sırasında öncelikle ayrışmamış çamurtaşı-kiltaşı ve daha sonrasında ayrışmamış-az ayrışmış kaya ortamından geçilmiştir. Kazı çalışmalarının tamamlanmasının ardından yapılan genel kontrollerde TBM kaya ortamından geçtiği bu bölgelerde su gelirleri olduğu görülmüştür.

Tablo 4-14 ve Grafik 4-7'de TBM bu hat kazısı boyunca geçtiği jeolojik ortamlar ve kazı sonrası saha gözlemlerinde elde edilen enjeksiyon başarısızlık durumu tespitleri tablo ve grafik olarak verilmiştir.

Tablo 4-15: Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Genel Jeolojik Veriler								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Kazı Sırasında Kesilen Birim		Zeminin Grup Sembolü		Türü	Tünel üzerindeki Su Kalınlığı (m)	
		Formasyon-Üye	Litoloji	Tünel Aynasında	Tünel Üstünde		Min	Max
20+053	20+720	Trakya	Kumtaşı	W1-W2 W3	W3	Kaya	25	28
20+720	20+807	Trakya	Ezik Zon	W2 Ezik Zon	Ezik Zon	Kaya	13	15
Açıklama: W1-W2: Ayrışmamış-Az ayrışmış Kaya, W3: Orta derecede ayrışmış Kaya								
Kazı Sonrası Tüneldeki Su gelirleri Tespiti								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Başarısız Enjeksiyonlu Ring Sayısı		Toplam Ring Sayısı		Başarısızlık Yüzdesi		
20+053	20+720	204		465		44,00		
20+720	20+807	3		65		5,00		

TBM kazı ilerleme yönü Yüzyıl istasyonundan Göztepe istasyonuna doğru yani Km: 18+752'den Km:19+773'e doğrudur. Ayrıca Ek-8'de bu istasyon aralıklarının jeolojik profili verilmiştir.



Grafik 4-7: Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Tablo 4-14 ve Grafik 4-7’de görüldüğü üzere bu bölgede TBM başlangıçta kazı aynasının bir kısmı ayrışmamış-az ayrışmış, kazı aynasının üst kesimi ise orta derecede ayrışmış kaya ortamda kazılarına başlamıştır. Tünel üstündeki zeminin orta derecede ayrışmış olması su gelirlerinin artmasına neden olmuştur. Hat kazısının son kesimindeki (80m) enjeksiyon başarısızlık nedeni ise TBM ezik zon ortamında kazı yapmasıdır. Ezik zonda artan su geliri nedeniyle enjeksiyon başarısızlık oranının daha yüksek olması beklenir. Ancak; TBM ‘in Göztepe istasyonuna yakın olması sebebiyle kazılar istasyon girişlerinde yavaşladığından enjeksiyon biraz daha dengeli basılabilmekte, ayrıca bu bölgelerde eğim oranı % 0 olduğundan buda basılan enjeksiyonun başarısını arttırmaktadır.

Mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla kontrol delgileri açılmış ve çimento-su enjeksiyonu yapılmıştır. Çimento-su enjeksiyonu tamamlanması ile kimyasal enjeksiyon çalışması yapılmış ve su gelirleri tamamen giderilmeye çalışılmıştır.

Tablo 4-16’te bu bölgede yapılan enjeksiyon çalışması ile ilgili genel değerler verilmiştir.

Tablo 4-16: Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonları Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları

İstasyonları Arası	
Hat Uzunluğu (m):	754,6
Maksimum Eğim (%):	-4,78
Çimento-Su Enjeksiyonu Miktarı (Torba Çimento)	
Hat-1	Hat-2
1023	1875
Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Miktarı (lt)	
Hat-1	Hat-2
5306	365

4.2.8. Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu Arası Veriler

Göztepe istasyonu ile Mahmutbey istasyonları arası Hat-2 kesimini TBM Terratec, Hat -1 kısmını ise TBM Herrenknecht tamamlamıştır. Kazı eğimi; eğim yukarı % 4,24 dir. Hat-2 kısmında kazı yapan Terratec eğime ters yönde ilerlediğinden kazı eğimi; eğim aşağı % 4,24'tür.

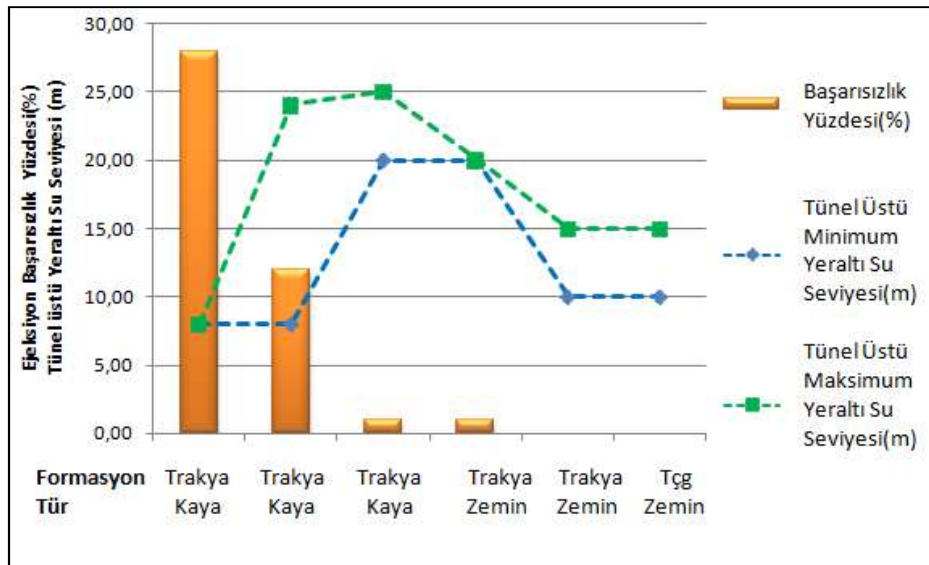
Hat-1 kazıları sırasında öncelikle orta derecede ayrışmış kaya ve daha sonrasında orta derece ayrışmıştan çok ayrışmış kaya ortamına geçilmiştir. Hattın son kesiminde ise kil taşı ara seviyeli sert kumdan geçilerek kazı tamamlanmıştır.

Tablo 4-16 ve Grafik 4-8'de TBM bu hat kazısı boyunca geçtiği jeolojik ortamlar ve kazı sonrası saha gözlemlerinde elde edilen enjeksiyon başarısızlık durumu tespitleri tablo ve grafik olarak verilmiştir.

TBM'lerin kazı ilerleme yönü Hat-1 kısmından Göztepe istasyonundan Mahmutbey istasyonuna doğru yani Km: 21+025'den Km:22+220'ye doğrudur. Hat-2'den ise ters yöne doğrudur. Ayrıca Ek-9'da bu istasyon aralıklarının jeolojik profili verilmiştir.

Tablo 4-17: Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri

Genel Jeolojik Veriler								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Kazı Sırasında Kesilen Birim		Zeminin Grup Sembolü		Türü	Tünel üzerindeki Su Kalınlığı (m)	
		Formasyon-Üye	Litoloji	Tünel Aynasında	Tünel Üstünde		Min	Max
21+025	21+060	Trakya	Ezik Zon	Ezik Zon	Ezik Zon	Kaya	8	8
21+060	21+620	Trakya	Çamurtaşı	W1-W2	W3	Kaya	8	24
21+620	21+780	Trakya	Kumtaşı	W3	W4	Kaya	20	25
21+780	22+080	Trakya	Çamurtaşı	W4	5	Zemin	20	20
22+080	22+220	Trakya	Kumtaşı	W5	5	Zemin	10	15
		Tçg	Sert Kil	5	4	Zemin	10	15
Açıklama:W3:Orta ayrılmış Kaya,W4: Çok ayrılmış kaya, 4: Kil(Sert),Tçg: Çekmece Formasyonu-Güngören Üyesi,4:Kil, Siltli kil, Kumlu Kil(sert), 5:Kiltaşı araseviyeli Sert Kil								
Kazı Sonrası Tüneldeki Su Gelirleri Tespiti								
Başlangıç Km	Bitiş Km	Başarısız Enjeksiyonlu Ring Sayısı		Toplam Ring Sayısı		Başarısızlık Yüzdesi		
21+025	21+060	7		25		28,00		
21+060	21+620	47		400		12,00		
21+620	21+780	1		115		1,00		
21+780	22+080	3		215		1,00		
22+080	22+220	0		110		0,00		

**Grafik 4-8:** Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu Arası Jeolojik Koşullar ve Enjeksiyon Başarısızlık Yüzdeleri Grafığı

Tablo 4-16 ve Grafik 4-8‘de görüldüğü üzere kazı ortamının kaya olduğu bölgelerde ortamın zemin olduğu bölgelere göre enjeksiyonun başarısızlık oranı artmıştır. Mevcut su gelirlerinin giderilmesi amacıyla Hat- 2 kesimine hem çimento-su enjeksiyonu hem de kimyasal enjeksiyon yapılmış Hat-1 kesimine ise sadece kimyasal enjeksiyon çalışması yapılmış ve su gelirleri tamamen giderilmeye çalışılmıştır.

Tablo 4-17’de bu bölgede yapılan enjeksiyon çalışması ile ilgili genel değerler verilmiştir.

Tablo 4-18: Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu Arası Yapılan Çimento-Su Ve Kimyasal Enjeksiyon Çalışmaları

Göztepe-Mahmutbey İstasyonları Arası	
Hat Uzunluğu (m):	1116,2
Maksimum Eğim (%):	4,24
Çimento-Su Enjeksiyonu Miktarı (Torba Çimento)	
Hat-1	Hat-2
-	5790
Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Miktarı (lt)	
Hat-1	Hat-2
1585	265

Tablo 4-17 incelendiğinde aynı istasyon aralığında Hat-1 den eğim yukarı, Hat-2’den ise kazılar eğim aşağı olarak tamamlandığı dikkate alınacak olursa eğim aşağı ilerlenen bölgelerde enjeksiyon başarısızlık oranının daha fazla olduğu görülmüştür.

Ayrıca Hat-1 de çimento-su enjeksiyonu su gelirleri ve miktarları az olduğundan sadece poliüretan reçine ile kimyasal enjeksiyon yapılmış bu bölgede yapılan enjeksiyon miktarı diğer hatta nazaran 5 kat fazla olmuştur. Buda kimyasal enjeksiyon maliyetinin oldukça fazla olması sebebiyle maliyeti de yüksek oranda arttırmıştır. |

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Mecidiyeköy- Mahmutbey metrosu TBM tünellerinde yapılan enjeksiyon çalışmalarının farklı jeolojik koşullar altında değerlendirilmesi amacıyla yapılmış olan çalışma sonucunda; Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu projesinin TBM ile yapılan tünel kazılarının özellikle büyük bir çoğunluğu değişen ayrışma oranlarıyla Trakya formasyonu kaya ortamında yapılmıştır.

TBM tünellerinde geri dolgu malzemesi olarak kullanılmış olan tek komponentli enjeksiyon harcı özellikle yer altı suyundan aşırı derece etkilendiği ve yer altı suyu ile etkileşimi arttıkça enjeksiyonun başarısız olma oranının arttığı tespit edilmiştir.

İstanbul zemini faylanmalardan dolayı kırıklı çatlaklı bir jeolojik yapıya sahip olması ve bu bölgelerde yer altı suyunun çatlaklardan yol oluşturması, kazı esnasında yapılan enjeksiyon dizaynı ile bu yer altı sularının daha fazla etkileşime girerek bozunmasına ve dolayısıyla yapılan enjeksiyon çalışmalarının başarısız olmasına neden olduğu görülmüştür.

Genel TBM güzergâhı boyunca kazıların az bir kısmı ise Çekmece Formasyonunun Güngören Üyesinin yoğun killi ortamından geçilerek yapılmış, kazı yapılan bu bölgelerde ise Güngören killerinin yüksek oranda geçirimsiz olması sebebiyle enjeksiyon sisteminin başarısının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Yine kazının azımsanmayacak bir miktarı ise Çekmece Formasyonunun Çukurçeşme üyesinde kum-siltli kum ortamının olduğu bölgelerde yapılmış bu bölgelerde ise enjeksiyon başarısının yine oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Kum ve siltli kum kazı ortamında, ortamın ihtiva ettiği su miktarı önem arz etmektedir. Mecidiyeköy- Mahmutbey metrosu çalışmalarında geçilen kum, siltli kum ortamlar geçirimli bir özellik taşımaktadır. Ancak metro güzergahında bu akifer ortamlarda ferdi kullanım amaçlı olarak yoğun su çekilmesi yer altı su seviyesinin tünel kazı kotunun altında kalmasına neden olmuştur. Bu nedenle yoğun su içerebilecek kumlu ortamların tek komponentli enjeksiyon harcının kullanımında nasıl etki oluşturacağı tespit edilememiştir. Ancak kum ortamlarda, uygulanmış enjeksiyon harcı içerisine gelebilecek homojen su gelirlerinin, çatlaklı-kırıklı kaya ortamlardan gelen heterojen ve noktasal basınçlı su gelirleri kadar enjeksiyon harcı yapısını bozacak kadar etki etmeyeceği düşünülmektedir.

Dolayısıyla Trakya formasyonu kaya ortamlarında yapılan kazı sırasında ayrışma oranı arttıkça yer altı suyunun enjeksiyon harcı ile etkileşimin daha da arttığı bunun da dizayn edilen enjeksiyonun yapısında bozunmalara sebep olduğu görülmüştür.

Tüm bu çalışmalar sonucu elde edilen bulgular sonucunda ileride yapılacak metro çalışmalarındaki tüneller yoğun olarak kaya ortamlarda kazı yapılacaksa tek bileşenli enjeksiyon harcı sisteminin kullanılmasının uygun olmadığı görülmektedir. Zeminde yapılacak tünel kazılarında tek bileşenli enjeksiyon harç uygulamasının problem oluşturmayacağı yapılan çalışmalar sonucunda ayrıca tespit edilmiştir.

Kaya ortamda TBM ile kazı yapılırken kaya ortamın ayrışma oranı arttıkça kazı sırasında ayna çevresinde aşırı malzeme sökülmesi beklenir. Bu aşırı malzeme sökülmesi, enjeksiyon uygulaması yapılan boşluğun hacmini hayliyle artıracaktır. Teorik olarak hesaplanıp uygulanan enjeksiyon miktarı ise artan bu boşluk hacmini doldurulamayacaktır. Bu boşluk ortam ise zamanla ve uygulama sonrası yer altı suyu veya kazılan ortam tarafından doldurulacaktır. Yer altı suyunun bu boşlukları daha çabuk doldurulacağı ve enjeksiyon harcı üzerindeki yıkıcı etkisinden dolayı enjeksiyon uygulamalarının ayrılmış kaya ortamlarda daha da başarısız olur. Bu sebeple teorik olarak uygulanan enjeksiyon harç miktarı belirlenirken kazılan ortamın jeolojisi ve kazı çalışmalarına vereceği tepkiler dikkate alınmalıdır. Ayrıca enjeksiyon uygulamaları yapılırken bu faktörler dikkate alınarak gerekirse kazı sırasında ilave enjeksiyon uygulaması yapılarak enjeksiyon çalışmalarının başarılı olması sağlanmalıdır.

Ayrıca laboratuvar ortamlarda yapılan enjeksiyon dizaynı sırasında jeolojik etmenler özellikle yer altı suyu ile etkileşim sonucu oluşabilecek senaryolar da dikkate alınarak farklı dizaynlar geliştirilmeli ve kazı sırasında oluşabilecek farklı koşullarda farklı enjeksiyon dizaynları uygulanarak olası başarısızlıklara karşı mücadele edilebilmelidir. Özellikle aşırı su geliri olan bölgelerde enjeksiyon harcının priz alma süresini hızlandıracak adımlar atılarak enjeksiyon çalışmalarının başarısı artırılabilir. Ancak bu ilave çalışmalarında ekonomik yük oluşturacağı göz ardı edilmemelidir.

Kazı esnasında yapılan geri dolgu harcı enjeksiyon çalışmalarının tamamlanması akabinde yapılan ilave gerek çimento-su gerekse kimyasal enjeksiyonun hem maliyeti arttırdığı hem de zaman kaybına neden olduğu görülmüştür.

Bu çalışma sonucunda kazı sırasında oluşturulacak ilave senaryolara göre farklı ortamlarda farklı enjeksiyon dizaynının kullanılması her ne kadar maliyeti arttırsa da ilave enjeksiyon çalışmalarının meydana getireceği maliyet ve zaman kaybı kadar olmayacağını düşündürmektedir.

Hattın Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu arasında Hat-1 kesiminde su geliri ve miktarı azımsanmış ve bu bölgede çimento-su enjeksiyonu yapılmamış ve kimyasal enjeksiyon çalışmasına karar verilmiştir. Ancak bu çalışmalar sonucu maliyeti oldukça yüksek olan kimyasal enjeksiyondan oldukça fazla miktarda yapılmak zorunda kalınmış bu da maliyeti kayda değer miktarlarda arttırmıştır.

Bu nedenle mümkün olduğunca metro çalışmalarında öncelikle, maliyeti düşük olması sebebiyle ikincil enjeksiyon olarak çimento-su enjeksiyonu uygulanmalı akabinde su gelirlere devam ediyorsa kimyasal enjeksiyon çalışması yapılmalıdır. Bu hem maliyet hem de boşluklar varsa boşluğu dolduran malzeme olarak çimento-su enjeksiyonun mukavemetinin daha fazla olması sebebiyle öncelikli tercih olmalıdır.

Ayrıca bu çalışma sonucu elde edilen veri ve sonuçların İstanbul ilindeki benzer jeolojiye sahip bölgelerde ileriki zamanlarda yapılacak metro projeleri için enjeksiyon dizayn ve yöntemlerinin seçimi açısından önemli bir yer tutacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Arıç, C. (1955). Haliç-Küçükçekmece Gölü bölgesinin Jeolojisi. Doktora Tezi, İTÜ Maden Fakültesi .

Barbende, S., Hoek, E., Marinos, P., & Cardoso, A. (2005). EPB-TBM Face Support Control in the Metro do Porto Project, Portugal. Proceedings 2005 Rapid Excavation & Tunneling Conference. Seattle.

Dalgıç, S. (2004). Factors affecting the greater damage in the Avcılar area of Istanbul during the 17 August 1999 Izmit Earthquake. Bulletin of Engineering Geology and Environment , (63),221-232.

Dalgıç, S., Turgut, M., Kuşku, İ., Çoşkun, Ç., & Çoşgun, T. (2009). İstanbul'un Avrupa yakasındaki Zemin ve Kaya Koşullarının Bina Temellerine Etkisi. Uygulamalı Yerbilimleri, Sayı:2 , 47-70.

Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İ. (2007). Avrupa Yakası Mikrobölgeleme Projesi. İstanbul: İBB.

Güven, G. (2009). İstanbul metrosu Otogar-Kirazlı arasının mühendislik jeolojisi ve tünel kazılarına bağlı oluşan deformasyonların değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Programı, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü . İstanbul (Yayınlanmamış).

ISRM. (1981). Rock Characterization, Testing and Monitoring. International Society of Rock Mechanics Suggested Methods. International Society for Rock Mechanics , 211.

İstanbul Avrupa Yakası Jeolojisi, İ. (2007). İstanbul Avrupa Yakası Jeolojisi. İstanbul.

Nafiz, H., & Malik, A. (1933). Küçükçekmece fosil firkalı hayvanlar mecmuası. İstanbul Darülfünunu Geologie Enstitüsü Neşriyatından, Sayı:8 , 119.

Polat, F. (2015). Mecidiyeköy Mahmutbey Metrosu Jeolojik ve Jeoteknik Raporu. İstanbul: Artson Geoteknik.

Subaşı, S., İşbilir, B., & Ercan, İ. (2011). Uçucu Kül İkameli Çimento Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi. Politeknik Dergisi , 141-148.

Turnacıgil, A. (2008). Yeniköy Ağaçlı Civarındaki Maden Ocaklarının Rehabilitasyonu. İstanbul.

Tüysüz, O. (2003). İstanbul için Deprem Senaryolarının hazırlanmasında Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı. İ.T.Ü Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü . İstanbul.

Yalçın, T., & Yetemen, Ö. (2009). Local warming of groundwaters caused by the urban heat island effect in İstanbul, Turkey. Hydrogeology Hournal 17(5) , 1247-1255.



EKLER

EK 1: TBM Tünellerinde Yapılan Genel Enjeksiyon Çalışmaları Tabloları

Mecidiyeköy- Mahmutbey Metrosu TBM Tünellerinde Yapılan Çimento +Su Enjeksiyonu Çalışmaları		
YENİMAHALLE -KAZIMKARABEKİR ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	1.08.2017	
BİTİŞ TARİHİ	11.08.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	1434	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	95,6	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
YENİMAHALLE -KAZIMKARABEKİR ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	6.07.2017	
BİTİŞ TARİHİ	24.07.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	1931	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	128,7	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
KAZIMKARABEKİR-AKŞEMSETTİN ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ		
BİTİŞ TARİHİ		
TOPLAM MİKTAR(ADET)	0	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	0	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
KAZIMKARABEKİR-AKŞEMSETTİN ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ		
BİTİŞ TARİHİ		
TOPLAM MİKTAR(ADET)	0	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	0	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
AKŞEMSETTİN-VEYSEL KARANİ ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	19.08.2017	
BİTİŞ TARİHİ	24.08.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	822	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	54,8	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
AKŞEMSETTİN-VEYSEL KARANİ ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	26.08.2017	
BİTİŞ TARİHİ	7.09.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	610	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	40,7	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
YENİMAHALLE- KARADENİZ MAH. ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	15.11.2017	
BİTİŞ TARİHİ	17.11.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	70	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	4,7	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
YENİMAHALLE- KARADENİZ MAH. ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	22.11.2017	
BİTİŞ TARİHİ	27.11.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	125	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	8,3	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)

EK 1(devamı):TBM Tünellerinde Yapılan Genel Enjeksiyon Çalışmaları Tabloları

KARADENİZ MAH.-TEKSTİLKENT İST. ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ		
BİTİŞ TARİHİ		
TOPLAM MİKTAR(ADET)	0	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	0	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
KARADENİZ MAH.-TEKSTİLKENT İST. ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ		
BİTİŞ TARİHİ		
TOPLAM MİKTAR(ADET)	0	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	0	m ³ (1/1 Çimento -Su enjeksiyonu)
TEKSTİLKENT-YÜZYIL ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	19.09.2017	
BİTİŞ TARİHİ	18.10.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	2402	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	160,1	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
TEKSTİLKENT-YÜZYIL ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	5.08.2017	
BİTİŞ TARİHİ	19.08.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	3360	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	224	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
YÜZYIL-GÖZTEPE ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	26.09.2017	
BİTİŞ TARİHİ	18.10.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	1023	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	68,2	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
YÜZYIL-GÖZTEPE ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	21.10.2017	
BİTİŞ TARİHİ	28.10.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	1875	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	125	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
GÖZTEPE-MAHMUTBEY ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	-	
BİTİŞ TARİHİ	-	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	0	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	0	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)
GÖZTEPE-MAHMUTBEY ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	28.10.2017	
BİTİŞ TARİHİ	13.11.2017	
TOPLAM MİKTAR(ADET)	5790	Torba Çimento
YAKLAŞIK MİKTAR(m3)	386	m ³ (1/1 Çimento -su enjeksiyonu)

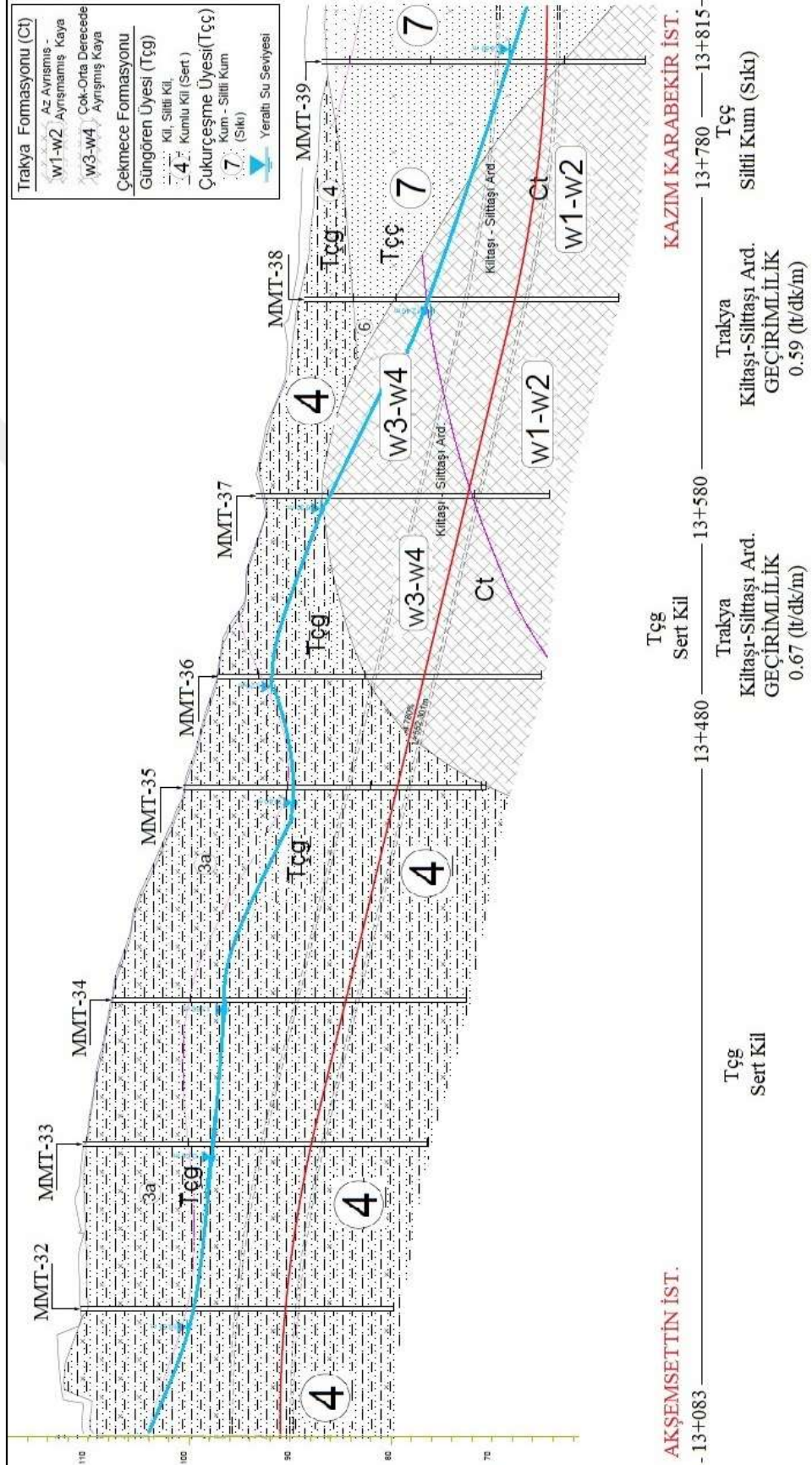
EK 1(devamı):TBM Tünellerinde Yapılan Genel Enjeksiyon Çalışmaları Tabloları

Mecidiyeköy- Mahmutbey Metrosu TBM Tünellerinde Yapılan Enjeksiyonu Kimyasal (Poliüretan Köpük) Enjeksiyonu Çalışmaları		
YENİMAHALLE –KÂZİM KARABEKİR ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	5.12.2017	
BİTİŞ TARİHİ	15.03.2018	
TOPLAM MİKTAR(LT)	3967	
YENİMAHALLE –KAZIM KARABEKİR ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	29.11.2017	
BİTİŞ TARİHİ	26.02.2018	
TOPLAM MİKTAR(LT)	5705	
KAZIM KARABEKİR-AKŞEMSETTİN ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	17.10.2017	
BİTİŞ TARİHİ	20.10.2017	
TOPLAM MİKTAR(LT)	122	
KAZIM KARABEKİR-AKŞEMSETTİN ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	17.10.2017	
BİTİŞ TARİHİ	20.10.2017	
TOPLAM MİKTAR(LT)	133	
AKŞEMSETTİN-VEYSEL KARANI ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	12.02.2018	
BİTİŞ TARİHİ	20.02.2018	
TOPLAM MİKTAR(LT)	560	
AKŞEMSETTİN-VEYSEL KARANI ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	22.12.2017	
BİTİŞ TARİHİ	8.03.2018	
TOPLAM MİKTAR(LT)	2691	
YENİMAHALLE- KARADENİZ MAH. ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	-	
BİTİŞ TARİHİ	-	
TOPLAM MİKTAR(LT)	0	
YENİMAHALLE- KARADENİZ MAH. ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	-	
BİTİŞ TARİHİ	-	
TOPLAM MİKTAR(LT)	0	
KARADENİZ MAH.-TEKSTİLKENT İST. ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	-	
BİTİŞ TARİHİ	-	
TOPLAM MİKTAR(LT)	0	
KARADENİZ MAH.-TEKSTİLKENT İST. ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	-	
BİTİŞ TARİHİ	-	
TOPLAM MİKTAR(LT)	0	

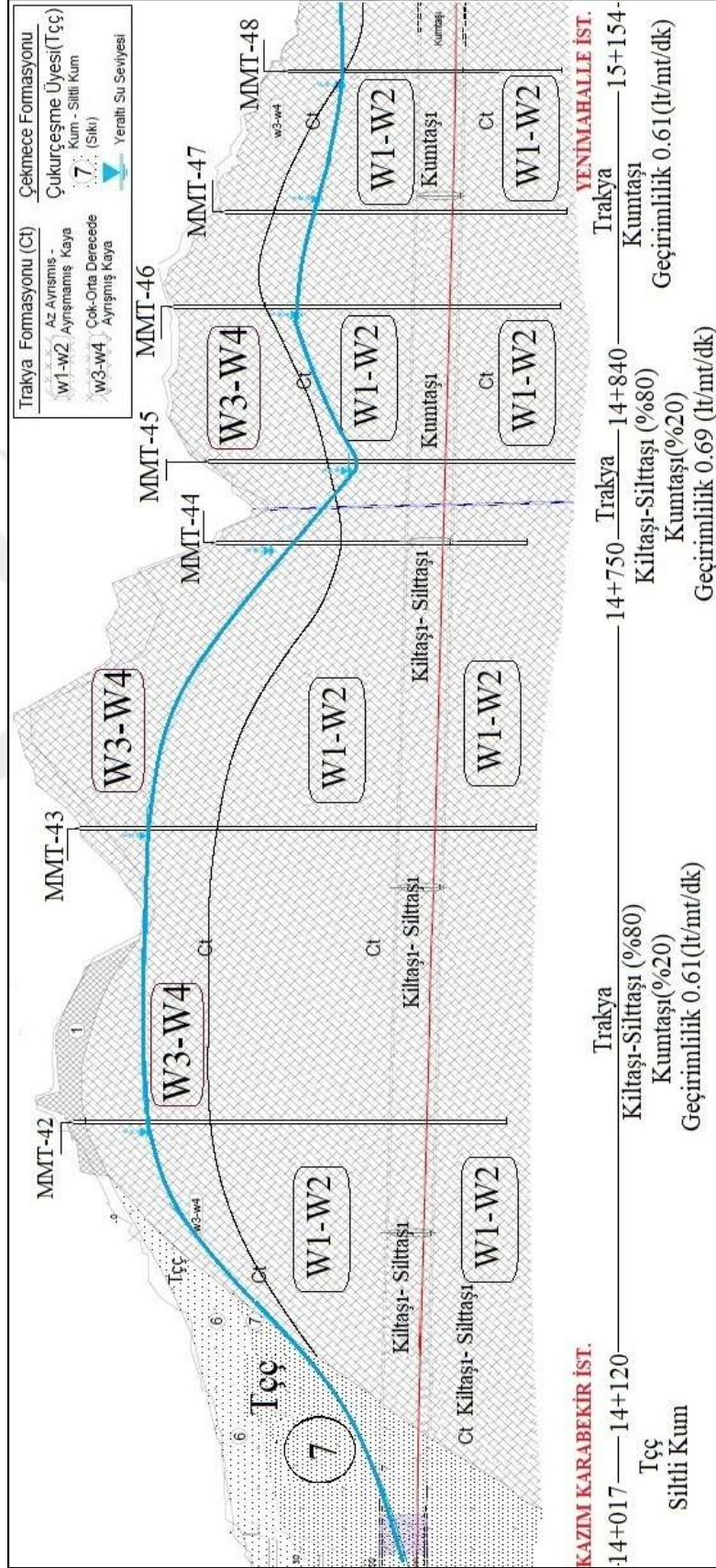
EK 1 (devamı):TBM Tünellerinde Yapılan Genel Enjeksiyon Çalışmaları Tabloları

TEKSTİLKENT-YÜZYIL ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	20.12.2017	
BİTİŞ TARİHİ	11.01.2018	
TOPLAM MİKTAR(LT)	3845	
TEKSTİLKENT-YÜZYIL ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	16.12.2017	
BİTİŞ TARİHİ	22.01.2018	
TOPLAM MİKTAR(LT)	3670	
YÜZYIL-GÖZTEPE ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	1.11.2017	
BİTİŞ TARİHİ	8.12.2017	
TOPLAM MİKTAR(LT)	5306	
YÜZYIL-GÖZTEPE ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	1.12.2017	
BİTİŞ TARİHİ	16.12.2017	
TOPLAM MİKTAR(LT)	365	
GÖZTEPE-MAHMUTBEY ARASI		HAT-1
BAŞLANGIÇ TARİHİ	28.10.2017	
BİTİŞ TARİHİ	18.12.2017	
TOPLAM MİKTAR(LT)	1585	
GÖZTEPE-MAHMUTBEY ARASI		HAT-2
BAŞLANGIÇ TARİHİ	28.11.2017	
BİTİŞ TARİHİ	14.12.2017	
TOPLAM MİKTAR(LT)	265	

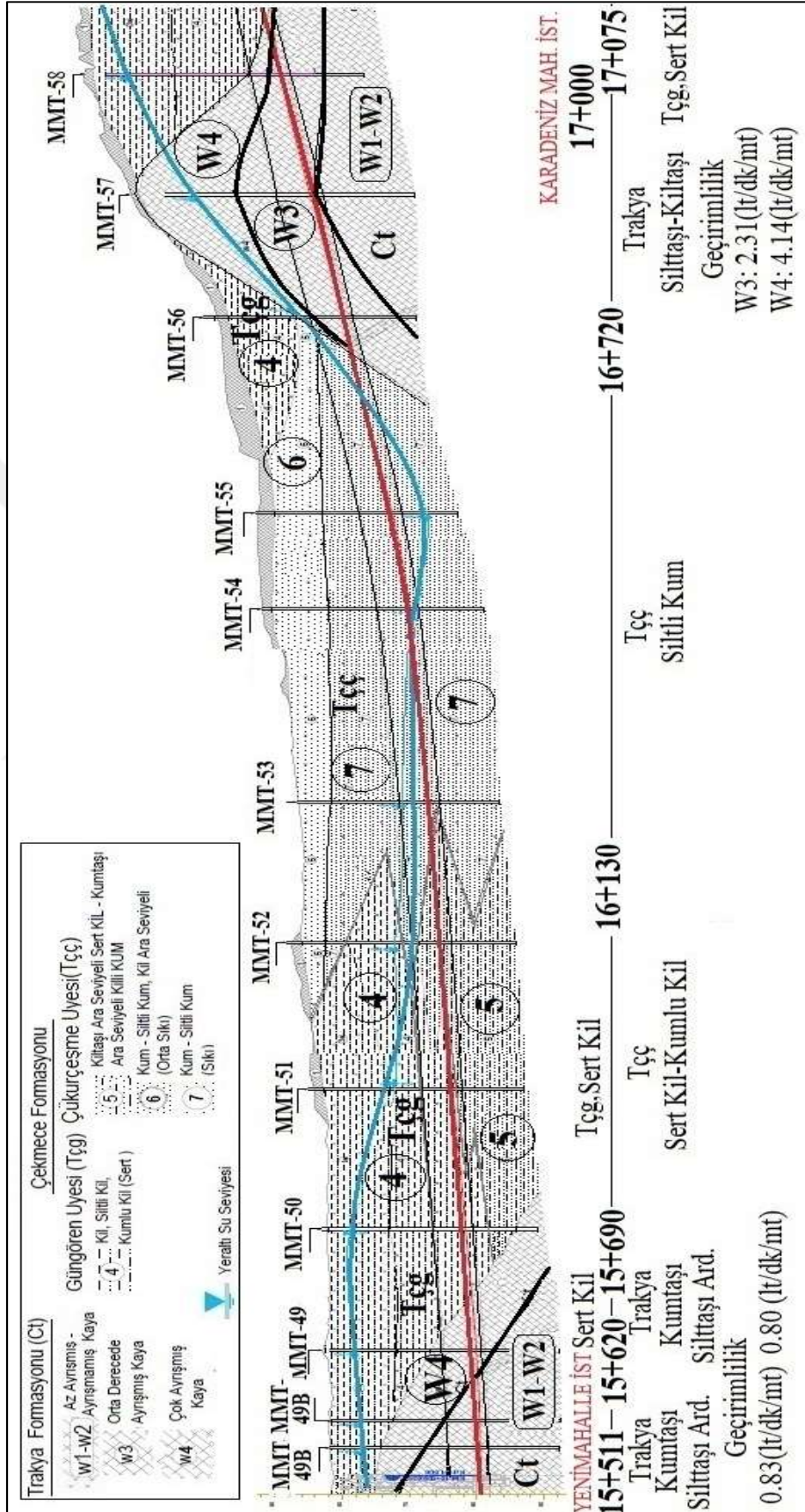
EK 3: Akşemsettin İstasyonu ile Kazım Karabekir İstasyonu arası Jeolojik profili (Ölçeksiz)



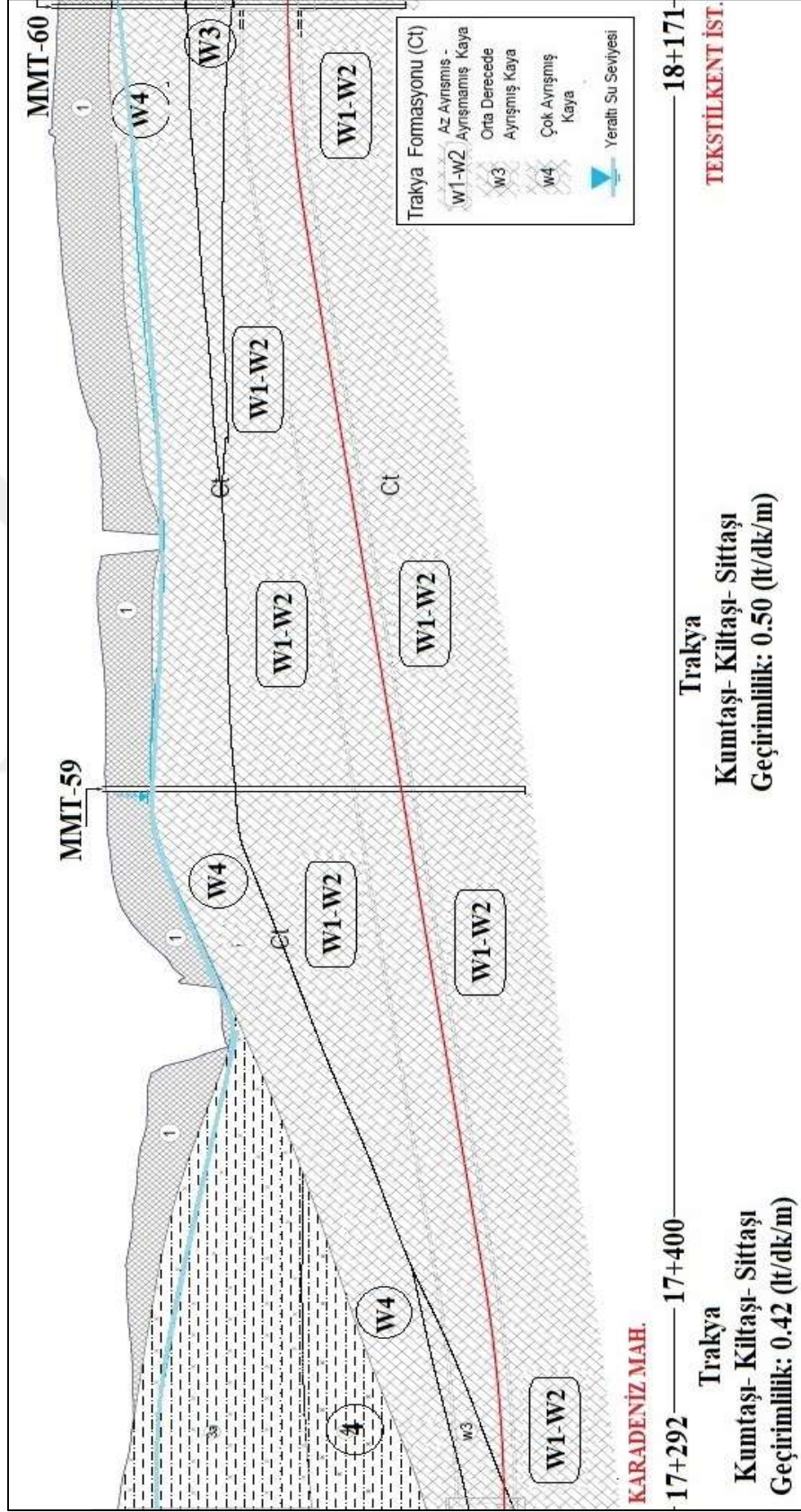
EK 4: Kazım Karabekir İstasyonu ile Yenimahalle İstasyonu arası Jeolojik profili(Ölçeksiz)



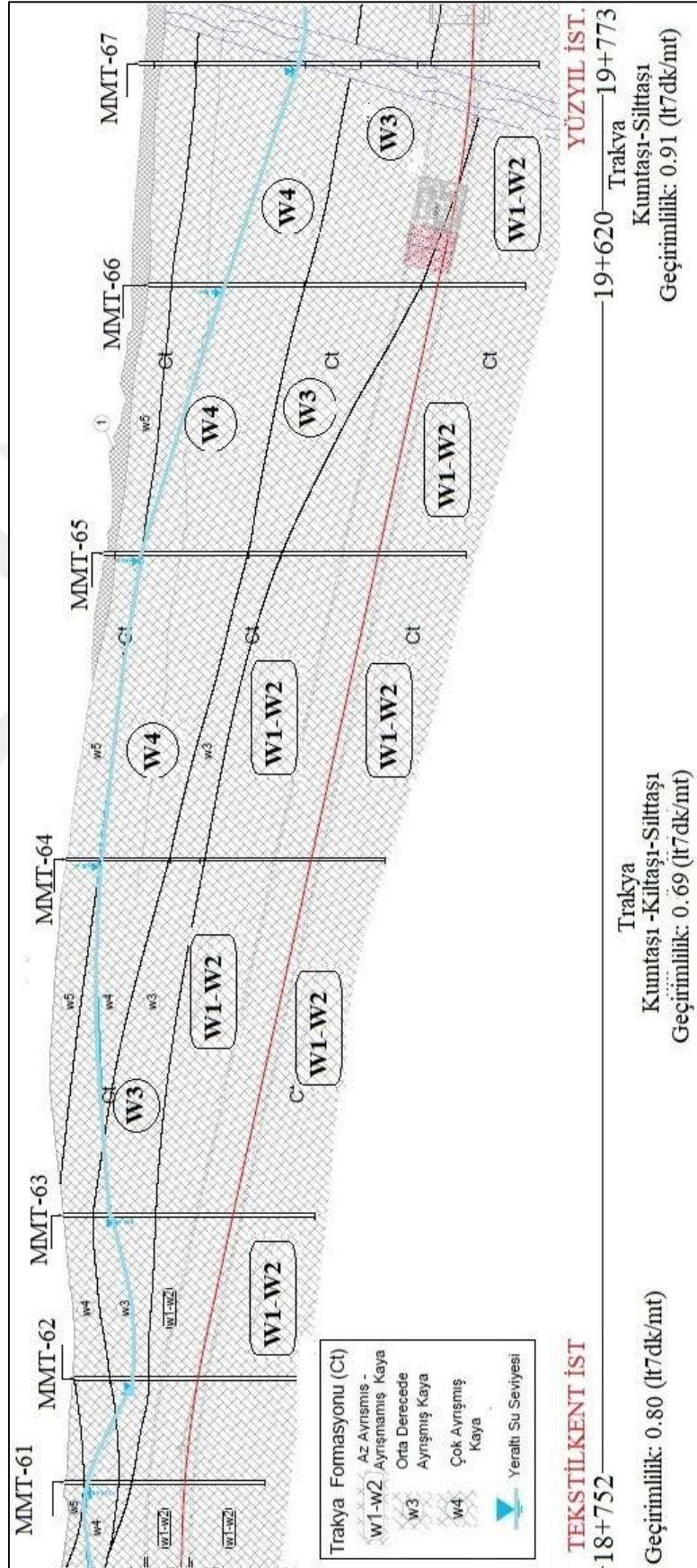
EK 5: Yenimahalle İstasyonu ileKaredeniz Mahallesi İstasyonu arası Jeolojik profili (Ölçeksiz)



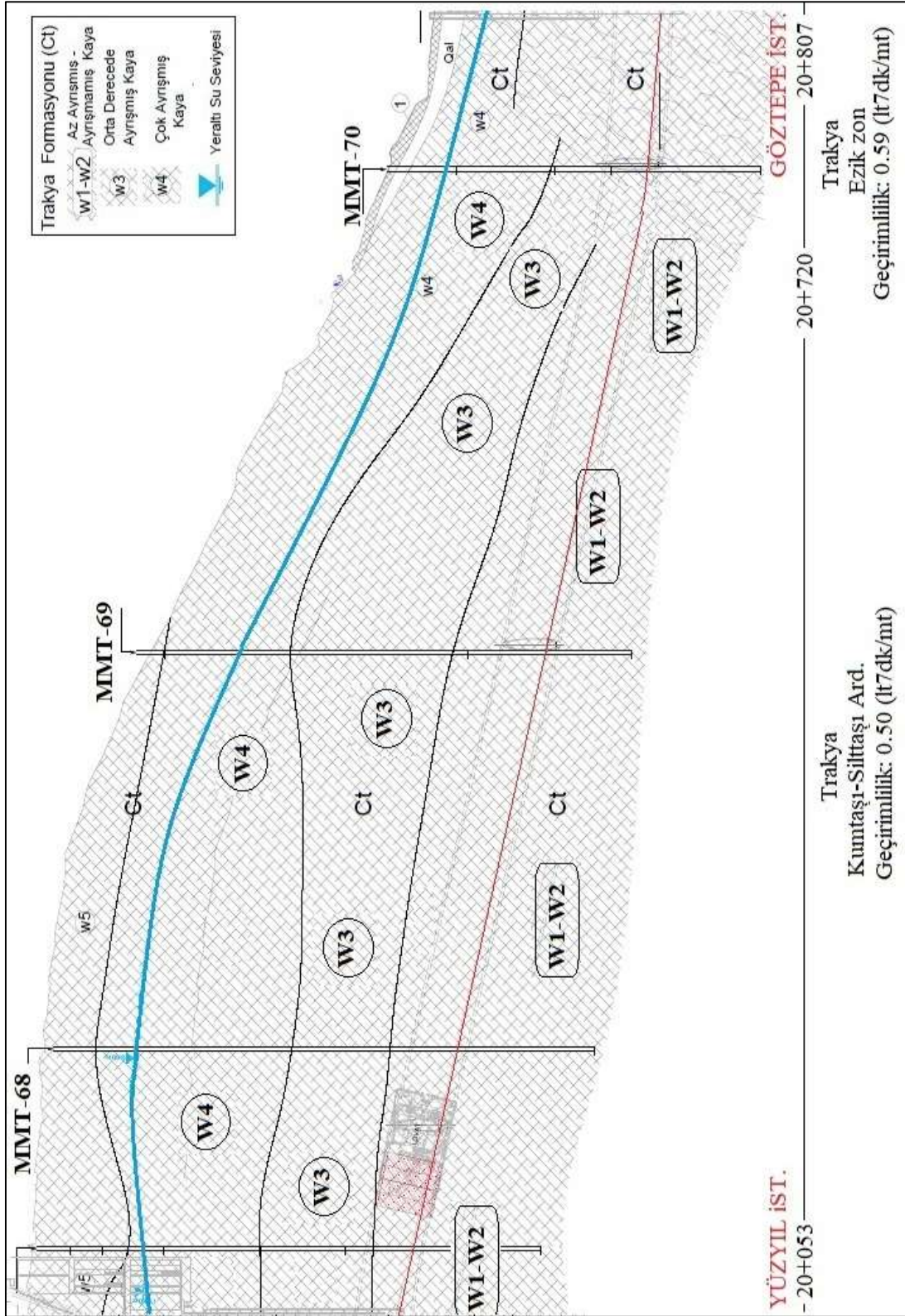
EK 6:Karedeniz Mahallesi ileTekstilKent İstasyonu arası Jeolojik profili(Ölçeksiz)



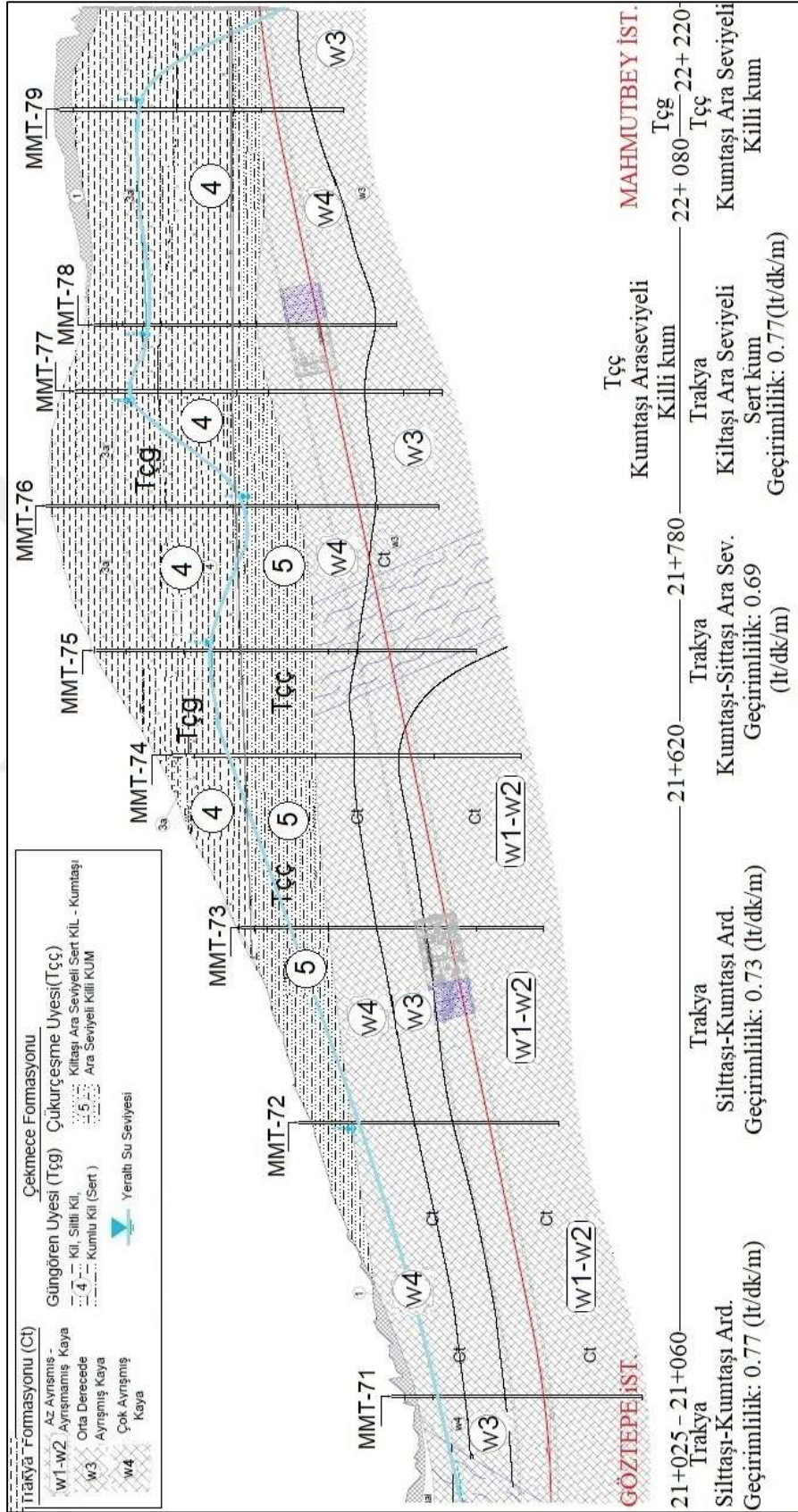
EK 7: Tekstil Kent İstasyonu ile Yüzyıl İstasyonu Jeolojik profili (Ölçeksiz)



EK 8: Yüzyıl İstasyonu ile Göztepe İstasyonu arası Jeolojik profili (Ölçeksiz)



EK 9:Göztepe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu arası Jeolojik profili



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mehmet Ali BERK
Doğum Yeri	Borçka
Doğum Tarihi	20.02.1985
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0544 668 23 91
E-Posta Adresi	Mehmetaliberk16@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İnönü Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Maden Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Maden Mühendisliği