

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSKİ AVRUPA 2.KISIM YENİKAPI ATIKSU TÜNELİNDE KULLANILAN
EPB TBM'İN S6 - S7 KUYULARI ARASINDAKİ PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak GÜRKAN

Anabilim Dalı : Maden Mühendisliği

Programı : Maden Mühendisliği

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSKİ AVRUPA 2.KISIM YENİKAPI ATIKSU TÜNELİNDE KULLANILAN
EPB TBM'İN S6 - S7 KUYULARI ARASINDAKİ PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak GÜRKAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Ocak 2011

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hanifi ÇOPUR (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nuh BİLGİN (İTÜ)

Prof. Dr. Alaettin KILIÇ (İÜ)

OCAK 2011

ÖNSÖZ

Günümüzde altyapı çalışmalarının artmasıyla birlikte, bu ihtiyacı karşılamak üzere mekanize kazı sistemleri geliştirilmiştir. Bu mekanize kazı sistemleri içerisinde yumuşak zeminlerde kazı yapmaya uygun pasa basınçlı tünel açma makineleri (EPB TBM'ler) avantajlarından dolayı en popüler makineler olmuşlardır. Mekanize sistemlerde kazı maliyetinin düşmesi ve makinenin etkin kullanımı gibi düşünceler makine performansının önemini arttırmıştır. Performansa etkiyen köpük genleşme oranı (FER), köpük enjeksiyon oranı (FIR), baskı, kesici kafanın dakikadaki devir sayısı (RPM), tork gibi değişken işletme parametreleri ve jeolojik koşullar gibi sabit parametrelerin birbirleriyle ilişkisi ve bunun araştırılması makine performansı konusundaki endişeleri gidermek amacıyla yapılmış olan çalışmalardandır. Bu çalışmada, mekanize kazı yapan sistemlerin avantajlarından yararlanmak amacıyla EPB TBM kullanımının bir gereklilik haline geldiği, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (İSKİ'nin) yaptırdığı Avrupa Yakası İkinci Kısım Atıksu Tüneli Projesi incelenmiştir.

Yüksek lisans çalışmamda danışmanlığımı üstlenen, EPB TBM performansı konusundaki çalışmalarımı yönlendiren ve değerli görüşlerini esirgemeyen Doç.Dr. Hanifi ÇOPUR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Prof. DR. Nuh BİLGİN ve Doç.DR. Cemal BALCI'ya desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında, gerekli bilgilere ulaşmamı sağlayan Müh.Orhan TURP'a, çalışmalarımda bana destek olan İnşaat teknikeri Burak METE'ye, Müh.Selen TUFAN'a, ve İlci-Özgün İnşaat İş Ortaklığı yetkililerine çok teşekkür ederim. Ayrıca sonsuz desteklerini benden esirgemeyen aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 2010

Burak GÜRKAN

Maden Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. TBM PERFORMANSINI ETKİLEYEN PARAMETRELER	3
2.1 Tünel Geometrisi.....	3
2.2 İtme (Baskı) Kuvveti	5
2.3 Tork	6
2.4 Güç	6
2.5 Dakikadaki Devir Sayısı (RPM)	6
2.6 Spesifik Enerji.....	7
2.7 Zemin Şartlandırma Parametreleri	7
2.8 Kıvam (Attaberg) Limitleri.....	9
2.9 Permeabilite	10
2.10 Tane Boyut Dağılımı	10
2.11 Standart Penetrasyon Testi (SPT).....	11
2.12 Doğal Birim Ağırlık.....	12
2.13 Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açısı	13
2.14 Net Kazı Hızı.....	13
2.15 Ortalama İlerleme Miktarı	13
2.16 Makineden Faydalanma Oranı (MFO)	14
3. PROJENİN TANITIMI.....	15
3.1 Projenin Amacı.....	15
3.2 Projenin Güzergahı.....	15
3.3 Proje Güzergahının Jeolojisi	15
3.3.1 Kuşdili formasyonu (Kşf)	16
3.3.2 Güngören formasyonu (Gnf).....	17
3.3.3 Güzergah jeolojisi mekanik parametreleri.....	17
3.4 Avrupa Yakası İkinci Kısım Yeni Kapı Atıksu Tüneli Kazısında Kullanılan TBM'in Özellikleri	19
3.4.1 Genel Özellikler	19
3.4.2 Kesici kafa	20
3.4.3 Yönlendirme kalkanı	21
3.4.4 Makine kalkanı.....	22
3.4.5 Kuyruk kalkanı.....	23

3.4.6 Erektör	23
3.4.7 EPB TBM’ de kazı destekleyici sistemler	25
3.4.7.1 Lazer hedefleme sistemi	25
3.4.7.2 Konveyör sistemi	25
3.4.7.3 Kuyruk sistemi	27
4. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ	33
4.1 Gözlenen Parametrelerin Performansa Etkisi	33
4.1.1 TBM’in çalışması sırasındaki tork değerleri	33
4.1.2 Toplam itme kuvveti (baskı)	36
4.1.3 İlerleme hızı ve penetrasyon değerlerinin hesaplanması	39
4.1.4 FER ve FIR değerlerinin hesaplanması	41
4.1.5 Hesaplanan performans parametrelerinin karşılaştırılması	45
4.1.5.1 Tork ile RPM değeri karşılaştırması	46
4.1.5.2 RPM ile FIR değerlerinin karşılaştırılması	47
4.1.5.3 Tork ile toplam itme kuvveti karşılaştırması	48
4.1.5.4 Tork ile penetrasyon değeri karşılaştırılması	50
4.1.5.5 Tork ile kazı odasına enjekte edilen köpük miktarının karşılaştırılması	51
4.1.5.6 Tork ile zemine enjekte edilen köpük miktarının karşılaştırılması	52
4.1.5.7 Tork ile FIR değeri arasındaki ilişki	53
4.1.5.8 Toplam itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki	54
4.1.5.9 Toplam itme kuvveti ile zemine enjekte edilen köpüğün FER değeri karşılaştırması	55
4.1.5.10 FIR değeri ile penetrasyon değerinin karşılaştırılması	56
4.1.5.11 FIR ile penetrasyon başına düşen itme kuvveti değerinin karşılaştırılması	58
4.2 TBM Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi ve Duraklama Analizi	60
4.2.1 Arızaların gruplandırılması	62
4.2.2 Arıza ve duraklamaların frekansları	63
4.2.3 Kesici kafa ve kalkan arızaları grubu	63
4.2.4 Kazı destekleyici sistem arıza grubu (back-up sistemi)	64
4.2.5 TBM’den kaynaklanmayan duraklamalar	65
4.2.6 Arızaların genel değerlendirilmesi	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	71
EKLER	73
ÖZGEÇMİŞ	87

KISALTMALAR

EPB	: Earth Pressure Balance (pasa basınçlı dengeleme)
TBM	: Tam cephe tünel açma makinesi
TBM Back-up	: Kazı destekleyici yardımcı donanım
RPM	: Dakikadaki devir sayısı
FIR	: Köpük enjeksiyon oranı
FER	: Köpük genleşme oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : TBM uygulamalarından toparlanan veriler [5].	4
Çizelge 2.2 : Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi kodlaması [12].	11
Çizelge 2.3 : Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi [12].	11
Çizelge 2.4 : Kohezyonsuz zeminlerin SPT-N değerleri ile kompaksiyonları arasındaki ilişki [14].	12
Çizelge 2.5 : Kohezyona sahip zeminlerin kıvamları ile SPT-N değerleri arasındaki ilişki [14].	12
Çizelge 3.1 : Sondaj bilgi tablosu [19].	17
Çizelge 3.2 : Sondajlara ait indeks deneylerinin sonuçları [19].	18
Çizelge 3.3 : Tünel akarkot seviyesindeki formasyonlara ait jeoteknik parametreler [19].	18
Çizelge 3.4 : EPB TBM'in teknik özellikleri [21].	19
Çizelge 3.5 : Kesici kafanın boyutları [21].	20
Çizelge 3.6 : Yönlendirme kalkının boyutları [21].	22
Çizelge 3.7 : Makine kalkının boyutları [21].	23
Çizelge 3.8 : Kuyruk kalkının boyutları [21].	23
Çizelge 3.9 : Lazer hedefleme sistemi boyutları [21].	25
Çizelge 3.10 : Vida konveyör teknik özellikleri [21].	26
Çizelge 3.11 : Vida konveyör elektrik motoru özellikleri [21].	26
Çizelge 3.12 : Bant konveyörün teknik özellikleri [21].	27
Çizelge 3.13 : Transformatör özellikleri [21].	31
Çizelge 4.1 : Gözlenen tork değerleri.	34
Çizelge 4.2 : Hesaplanan itme kuvveti (Baskı) değerleri.	37
Çizelge 4.3 : Hesaplanan penetrasyon ve ilerleme hızı değerleri.	40
Çizelge 4.4 : Hesaplanan FER ve FIR değerleri	42
Çizelge 4.5 : Geçiş zonundaki jeolojinin jeomekanik özellikleri [19].	45
Çizelge 4.6 : Korelasyon katsayısı yorumları [23]	46
Çizelge 4.7 : Makina performansının değerlendirilmesi	61
Çizelge 4.8 : Arıza grupları	63
Çizelge 4.9 : Kesici kafa ve kalkan arızalar grubu verileri	64
Çizelge 4.10 : Kazı destekleyici (back-up) system arıza grubu	65
Çizelge 4.11 : TBM'den kaynaklanmayan duraklamalar ve arızalar	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Tork ile tünel çapı arasındaki ilişki.....	5
Şekil 2.2 : Güç gereksinimi ile tünel çapı arasındaki ilişki	5
Şekil 3.1 : Herrenknecht M-1070 EPB-TBM [21]	19
Şekil 3.2 : TBM Kesici kafanın önden ve yandan görünüşü [21]	20
Şekil 3.3 : Yönlendirme kalkanının görünüşü [21]	22
Şekil 3.4 : Makine kalkanının görünüşü [21]	22
Şekil 3.5 : Kuyruk kalkanı görünüşü [21]	23
Şekil 3.6 : Erektörün görünüşü [21]	24
Şekil 3.7 : Lazer hedefleme sisteminin görünüşü [21]	25
Şekil 3.8 : Vida konveyörün görünüşü [21]	27
Şekil 3.9 : Birinci kuyruk arabasının görünüşü [21]	28
Şekil 3.10 : İkinci kuyruk arabasının görünüşü [21]	28
Şekil 3.11 : Kuyruk sızdırmazlık sistemi [21]	29
Şekil 3.12 : Üçüncü kuyruk arabasının görünüşü [21]	30
Şekil 3.13 : Dördüncü kuyruk arabasının görünüşü [21]	30
Şekil 3.14 : Beşinci kuyruk arabasının görünüşü [21]	31
Şekil 3.15 : Altıncı kuyruk arabasının görünüşü [21]	31
Şekil 3.16 : Yedinci kuyruk arabasının görünüşü [21]	32
Şekil 4.1 : Kuşdili formasyonunda gözlenen tork değerinin değişimi	35
Şekil 4.2 : Geçiş zonunda gözlenen tork değerlerinin değişimi.....	35
Şekil 4.3 : Güngören formasyonunda gözlenen tork değerlerinin değişimi	36
Şekil 4.4 : Toplam itme kuvvetinin Kuşdili formasyonunda değişimi.....	38
Şekil 4.5 : Toplam itme kuvvetinin Geçiş zonunda değişimi.....	38
Şekil 4.6 : Toplam itme kuvvetinin Güngören formasyonunda değişimi.....	38
Şekil 4.7 : Kuşdili formasyonunda penetrasyon değerinin değişimi	39
Şekil 4.8 : Geçiş zonunda penetrasyon değerinin değişimi	41
Şekil 4.9 : Güngören formasyonunda penetrasyon değerinin değişimi.....	41
Şekil 4.10 : Kuşdili formasyonunda, zemine ve kazı odasına yapılan köpük enjeksiyonunun FER değeri değişimi	43
Şekil 4.11 : Geçiş zonunda zemine ve kazı odasına yapılan köpük enjeksiyonunun FER değeri değişimi	43
Şekil 4.12 : Güngören formasyonunda zemine ve kazı odasına yapılan köpük enjeksiyonunun FER değeri değişimi	43
Şekil 4.13 : Kuşdili formasyonunda FIR değeri değişimi	44
Şekil 4.14 : Güngören formasyonunda FIR değeri değişimi	44
Şekil 4.15 : Geçiş zonunda FIR değeri değişimi.....	45
Şekil 4.16 : Geçiş zonunda tork ile RPM arasındaki ilişki.....	46
Şekil 4.17 : Geçiş zonunda FIR değeri ile RPM değeri arasındaki ilişki	47
Şekil 4.18 : Kuşdili formasyonunda RPM ve FIR değerleri arasındaki ilişki	47

Şekil 4.19 : Güngören formasyonunda RPM ve FIR değerleri arasındaki ilişki	48
Şekil 4.20 : Tüm tünel güzergah jeolojisinde RPM ve FIR değerleri arasındaki ilişki	48
Şekil 4.21 : Geçiş zonunda tork ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki	49
Şekil 4.22 : Kuşdili formasyonunda tork ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki ..	49
Şekil 4.23 : Güngören formasyonunda tork ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki	49
Şekil 4.24 : Geçiş zonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki	50
Şekil 4.25 : Kuşdili formasyonunda penetrasyon değeri ile tork değeri arasındaki ilişki	51
Şekil 4.26 : Geçiş zonunda tork ile kazı odasına enjekte edilen köpük debisinin karşılaştırılması	51
Şekil 4.27 : Geçiş zonunda tork ile zemine enjekte edilen köpük debisinin karşılaştırılması	52
Şekil 4.28 : Geçiş zonunda Tork ile FIR değeri arasındaki ilişki	53
Şekil 4.29 : Kuşdili formasyonunda tork ile FIR değeri arasındaki ilişki	54
Şekil 4.30 : Geçiş zonunda penetrasyon ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki ...	54
Şekil 4.31 : Geçiş zonunda zemine enjekte edilen köpüğün FER değeri ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki	55
Şekil 4.32 : Tüm tünel güzergahı jeolojisinde FER ve toplam itme kuvveti arasındaki ilişki	55
Şekil 4.33 : Geçiş zonunda FIR değeri ile penetrasyon oranı arasındaki ilişki	56
Şekil 4.34 : Kuşdili formasyonunda FIR ile penetrasyon değeri arasındaki ilişki	57
Şekil 4.35 : Güngören formasyonunda penetrasyon ile FIR değeri arasındaki ilişki	57
Şekil 4.36 : Tüm tünel güzergah jeolojisinde FIR ile penetrasyon değerleri arasındaki ilişki	57
Şekil 4.37 : Geçiş zonunda FIR değeri ile 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti değeri arasındaki ilişki	58
Şekil 4.38 : Kuşdili formasyonunda 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti ile FIR değerlerinin karşılaştırılması	59
Şekil 4.39 : Güngören formasyonunda 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti ile FIR değerlerinin karşılaştırılması	59
Şekil 4.40 : Tüm güzergah jeolojisinde 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti ile FIR değerlerinin karşılaştırılması	59
Şekil A.1 : Proje Güzergahı	76
Şekil A.2 : Ortalama İlerleme Miktarı	77
Şekil A.3 : Net İlerleme Miktarı	78
Şekil A.4 : Makine Faydalanma Oranı Değişimi	79
Şekil A.5 : S7 – Cerrahpaşa Hastahanesi Arası (Kuşdili Formasyonu) Makineden Faydalanma Grafiği	80
Şekil A.6 : Cerrahpaşa Hastahanesi – S6 arası (Güngören Formasyonu) Makineden Faydalanma Grafiği	81
Şekil A.7 : S7 – S6 Kuyuları Arası Makineden Faydalanma Grafiği	82

İSKİ AVRUPA YAKASI 2. KISIM YENİKAPI ATIKSU TÜNELİNDE KULLANILAN EPB-TBM'İN S6 - S7 KUYULARI ARASINDAKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde altyapı çalışmalarının artmasıyla birlikte, bu ihtiyacı karşılamak üzere mekanize kazı sistemleri geliştirilmiştir. Bu mekanize kazı sistemleri içerisinde yumuşak zeminlerde kazı yapmaya uygun pasa basınçlı tünel açma makineleri (EPB TBM'ler) avantajlarından dolayı en popüler makineler olmuşlardır. Bu çalışmada da İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ)'nin yaptırdığı Avrupa Yakası İkinci Kısım Atıksu Tüneli Projesi'nde kullanılan EPB TBM'in performans parametreleri ve bu parametrelerin birbirleriyle olan ilişkisi incelenmiş, projenin tanıtımı, projenin jeolojisi ve projede kullanılmış olan TBM'in özelliklerinden bahsedilmiştir.

TBM ilerlemesi sağlanırken, jeolojik formasyon değişimi sırasında formasyonlar arası sınırı oluşturan fay hattının yüzeyde bulunan Cerrahpaşa Hastanesini etkilemesiyle hastanede deformasyon oluşmuştur. Hastahane öncesi ilerleme güzergahında Kuşdili formasyonu gözlenirken; fay geçildikten sonra Güngören formasyonu gözlenmiştir. Bu sebeple performans analizi her jeoloji için ayrı ayrı ve toplu olarak incelenmiştir.

TBM performansı incelenirken tork değeri, toplam itme (baskı) kuvveti, RPM, FER, FIR gibi parametreler incelenmiş, performans kriterleri ile ise günlük ortalama ilerleme, makine faydalanma oranı, net kazı hızı gibi kriterler ortaya konmuştur.

Performans parametrelerinden, zemin koşullandırmasıyla ilgili parametrelerin diğer parametreler ile en çok etkileşim gösterdiği gözlenmiştir. Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu, Geçiş zone ve tüm tünel güzergah jeolojisinde yapılan gözlemlerde köpük enjeksiyon oranı (FIR) ile penetrasyon oranı değerleri arasında her bir jeolojik formasyonda mükemmel dereceli ilişkiler bulunduğu görülmüştür. Aynı şekilde, her formasyon için ve tüm tünel güzergah jeolojisi için yapılan gözlemlerde köpük enjeksiyon oranı (FIR) ile 1mm'lik penetrasyon için gerekli olan baskı kuvveti arasında her bir jeolojik formasyonda mükemmel dereceli ilişkiler görülmüştür.

Ortalama vardiya ilerlemesi Hastane öncesi (Kuşdili formasyonu) 5,98 m iken, hastahane sonrası (Güngören Formasyonu) 6,44 m olmuştur. Ortalama aylık ilerleme ise Hastane öncesi 120,7 m iken sonrasında 288,9 m olarak gerçekleşmiştir. Bu artışta en önemli etken Hastane öncesi günde 12 saatlik 1 vardiya düzeninde çalışılırken, sonrasında günde 2 vardiya düzenine geçilmesidir. Kuşdili formasyonunda performansın biraz daha düşük olmasının diğer bir nedeni de projenin öğrenme evresi nedeniyle işlerin yavaş gitmesi olabilir.

Arıza ve duraklama nedenleri gruplandırılmıştır. Arıza süreleri ve karşılaşılma sıklıkları karşılaştırılmıştır. Makineden faydalanma oranı tüm formasyonlar için ortalama %24,5 olmuştur. TBM'den kaynaklanan arızalar tüm çalışma süresinin %11'ini kapsamıştır. TBM'den kaynaklanan arızalar içerisinde en çok süreyi toplam çalışma süresi içerisinde %3,22 ile elektrik arızaları yer tutmuştur. TBM kazı destekleyici sistemlerde gözlenen arızalarda ise toplam çalışma süresinin %2,18'i ile band sistemi arızaları yer kaplar. TBM'den kaynaklanmayan duraklamalarda ise toplam çalışma süresinin %4,44'ü ile en fazla süreyi vagon beklemleri yer almıştır.

THE PERFORMANCE ANALYSIS OF AN EPB TBM USED IN ISKI EUROPEAN SIDE 2ND PART YENIKAPI SEWERAGE TUNNEL BETWEEN S6 AND S7 SHAFTS

SUMMARY

In this study, the performance of a TBM used in Yenikapı Sewerage Tunnel is analysed. General Directorate of Istanbul Water and Sewerage Administration (ISKI) is owner of the project. This study, detail of the project, tunnel layout and geology, technical data of TBM, the parameters affecting TBM performance and correlations between the parameters are mentioned.

When the advancement continuing in Kuşdili formation, TBM comes across, a geological fault (transition zone) near down to Cerrahpaşa Hospital laboratory building. The building is effected with slight deformation by passing under it. After the faulty zone Güngören formation is observed. Therefore, TBM performance is analysed for every geological condition.

In performance analyses, the parameters affecting TBM performance such as torque, thrust, RPM, FIR and FER, are analyzed. In addition to this, correlations between the parameters are analyzed.

In analysis, soil conditioning parameters had the highest correlation values with other parameters. Between FIR and penetration rate values, the “perfect correlation” was observed on every geological formation (Kuşdili formation, Güngören formation, Transition geology and overall geology). In the same way, correlation between FIR and thrust force for 1 mm penetration rate values had “perfect correlation”.

Before the Hospital (in Kuşdili formation) the avarage shift advance and monhtly advance rates are 5,98 m/shift and 120,9 m/month. After it (in Güngören Formation) average shift advance and monthly advance are 6,44 m/shift and 288,9 m/month.

Downtime and breakdown causes are grouped for analysis. Frequencies and durations are compared. In observations, stoppage caused by TBM had 11% of all working time. Electrical breakdowns had 3,22% of total stoppage time caused by TBM. In all progress, train delay had the 4,4% of working time.

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ve dünya nüfusunun artmasıyla birlikte, kurulmuş olan şehirlerin de alt yapı ihtiyacı hızla artmaktadır. Alt yapı gereksinimini karşılamak amacıyla mühendisler çeşitli tasarımlar ve bu tasarımların uygulanması konusunda hızlı ve etkin çözümler üretmek zorunda kalmışlardır.

Hali hazırda var olan üst yapıları korumak amacıyla akla gelen etkin çözümlerden bir tanesi de tünel açmaktır. Yüksek güvenlik sağlamak, yüksek üretim oranlarına ulaşmak, maliyeti azaltmak, mevcut bulunan yer üstü yapılarına ve topografyaya en az etki edecek şekilde tünel inşa edebilmek amacıyla mekanize kazı sistemleri oluşturulmuştur. Bu amaçlar göz önüne alınarak tam mekanize çalışabilen, yüksek üretim kapasiteli tam cephe tünel açma makineleri (TBM) geliştirilmiştir.

Bir çok farklı jeolojik koşula uygun geliştirilmiş olan tam cephe tünel açma makineleri arasında yumuşak zeminlerde kazı yapabilen EPB (pasa basınçlı, earth pressure balance) TBM'ler büyük kentlerde, özellikle önemli yapıların altından geçmesi planlanan tünel açma işlemlerinde diğer TBM'lerden daha etkin bir biçimde deformasyon kontrolü yapılmasına olanak vermesi sebebiyle oldukça popülerdir.

İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (İSKİ) yaptırdığı Avrupa Yakası İkinci Kısım Yenikapı Atıksu Projesi tüneli, yerleşim bölgelerinin yoğun olduğu İstanbul'un Fatih ve Eyüp ilçelerinden geçmektedir. Atıksu tünelinin uzunluğu ve önemli yapıların yakınlarından geçmek zorunluluğu, tünel açma makinası kullanımını da bir gereklilik haline getirmiştir. Bu gereklilik projede bir Herrenknecht EPB TBM kullanılmasıyla karşılanmıştır.

Dünyada bir çok projede hali hazırda bulunan ve işletilmesi planlanan tünel açma makinelerinin etkin ve uygun işletme maliyet sınırları içerisinde kullanımı, onların performanslarına bağlıdır. Tam cephe tünel açma makinalarında performansa etki eden parametreler, değiştirilebilmesi mümkün olmayan sabit parametreler ve değiştirilebilir parametreler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Sabit parametrelerin en

önemlisi kazısı yapılacak olan jeolojik birimlerin fiziksel ve mekanik özellikleridir. Diğer yandan değiştirilebilir parametreler kullanılan tünel açma makinesinin işletme ve organizasyon parametreleridir. Bunlar Tork, itme (baskı) kuvveti, penetrasyon oranı, FER (köpük genleşme oranı), FIR (köpük enjeksiyon oranı), kazıda kullanılan keskilere ve bunların durumları gibi parametrelerdir. Bu parametrelerin değişimlerinin kazılan ortama uygunluğu kazı maliyetini ve tünel çalışmalarının etkin bir şekilde sürdürülmesini doğrudan etkileyecektir.

Tez konusu kapsamında kullanılmış olan EPB TBM'in tork, thrust, FER, FIR, penetrasyon oranı değerleri değişen jeolojik koşullar altında incelenmiş ve aynı şekilde değişen jeolojik koşullar altında bu parametrelerin birbirleriyle ilişkisi istatistiksel olarak saptanmaya çalışılmıştır. Ayrıca net kazı hızı, ortalama günlük ilerleme hızı ve makine faydalanma oranları hesaplanmış; arıza analizi ile duraklama zamanları da analiz edilmiştir.

Çalışmada kullanılmış olan veriler, şantiye ziyaretleri sırasında TBM çalışırken makine göstergelerinin okunması ve İlci-Özgün şirketinin kayıtlarını tutmuş olduğu şantiye raporları vasıtasıyla elde edilmiştir.

İSKİ Avrupa Yakası İkinci Kısım Yenikapı Atıksu Projesi'nde kullanılan tünel açma makinesinin performans değerlendirmesi, ülkemizde uygulaması giderek yaygınlaşan bu kazı sistemi hakkındaki uygulamadaki bilgi birikiminin artması bakımından çok önemlidir.

2. TBM PERFORMANSINI ETKİLEYEN PARAMETRELER

Tam cephe tünel açma makinelerinde performansa etki eden parametreler değiştirilebilmesi mümkün olmayan sabit parametreler ve değiştirilebilir parametreler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Sabit parametreler kazısı yapılacak olan jeolojik birimlerin fiziksel ve mekanik özellikleridir. Diğer yandan değiştirilebilir parametreler kullanılan tünel açma makinesinin işletme parametreleri ve organizasyon ile ilgili parametrelerdir. Bunlar Tork, Toplam itme (Thrust) kuvveti, penetrasyon oranı, FER (köpük genleşme oranı), FIR (köpük enjeksiyon oranı), gibi parametrelerdir. Bu değişken parametrelerin değişimlerinin yapılacak olan jeolojik birimlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine uygunluğu kazı maliyetini ve tünel çalışmalarının etkin bir şekilde sürdürülmesini doğrudan etkileyecektir.

2.1 Tünel Geometrisi

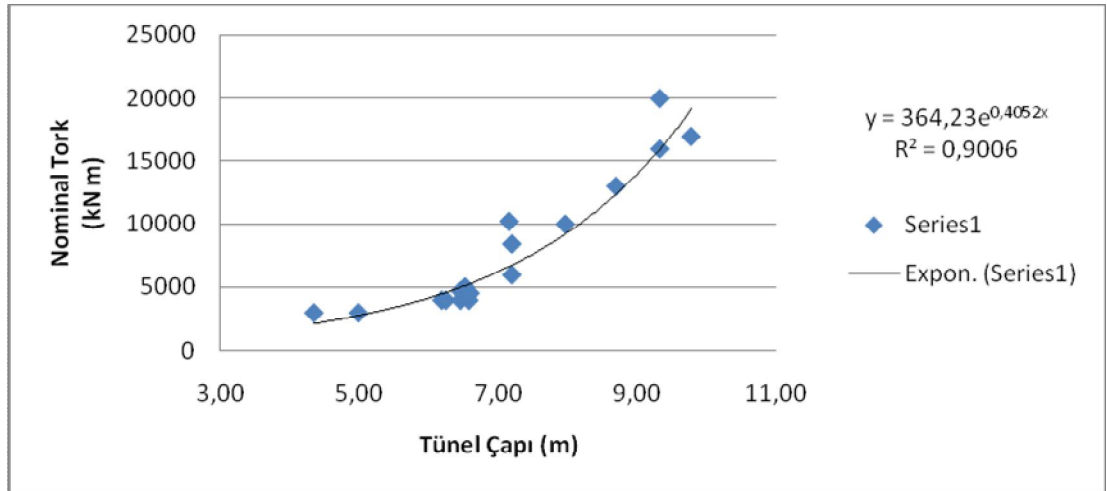
Genel olarak tünel projelerinde istenilen iç çap sabit olduğundan yeraltında açılacak olan boşluğun tahkim edilmesi için kullanılan tahkimatın taşıma kapasitesi hesaplarıyla hesaplanmış boyutlarına bağlı olarak kazı çapı seçimi yapılır. Seçim yapılırken, tünel güzergahının geçeceği jeolojik birimlerin kabarma ve şişme özelliklerine bağlı olarak, olası bir sıkışmayı önlemek ve makine ile kazısı gerçekleştirilecek jeolojik birim arasındaki sürtünmeyi azaltmak için kesici kafa çapından biraz daha büyük şekilde kazı gerçekleştirilir [1]. Buna fazla kesim denir. Fazla kesim dış (köşe) kesimler sayesinde gerçekleşir ve en çok şişme potansiyeline sahip jeolojik birime göre ayarı yapılır.

Tünel çapı, RPM, tork ve bununla birlikte toplam güç gereksinimi gibi bir çok parametreyi etkiler. Genel olarak çap artışıyla tünel uzunluğu başına düşen penetrasyon oranı düşer [2].

Çizelge 2.1’de daha önceden yapılmış olan çalışmalardan toplanan veriler görülmektedir. Çizelge 2.1’deki verilerden elde edilen, Şekil 2.1’de çap ile tork ihtiyacı ilişkisi, Şekil 2.2’de çap ile güç ihtiyacı arasındaki ilişki görülmektedir.

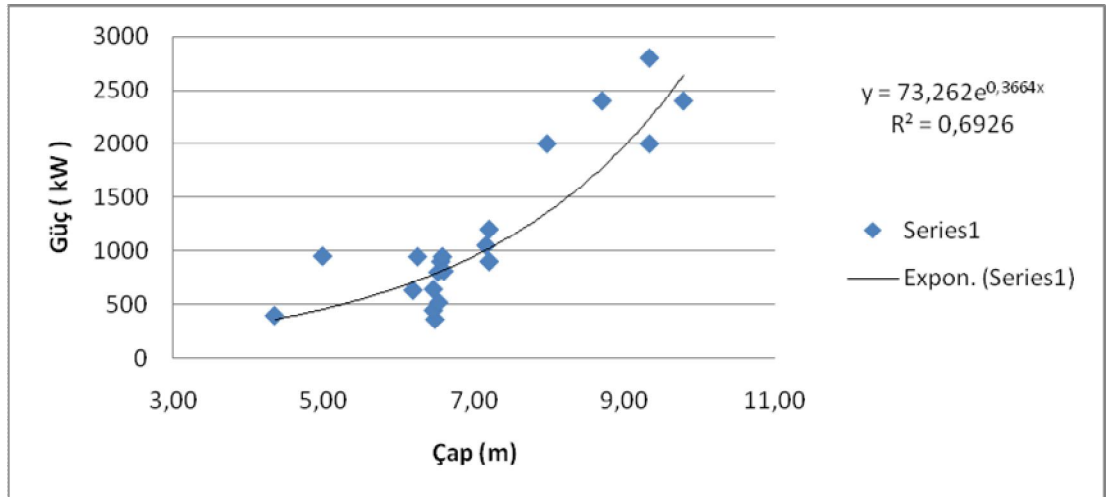
Çizelge 2.1 : TBM uygulamalarından toparlanan veriler [5].

Proje	Üretici	Tünel Uzunluğu (m)	Jeoloji	Çap (m)	Güç (kW)	Nominal Tork (kN m)
Buenos Aires (Arjantin)	Herrenknecht	8000	Kum, kil, çakıl	4,35	395	3000
Pantin la Birche (Fransa)	Herrenknecht	1100	Kireçtaşı, Marn	4,99	950	3000
Beijing (Çin)	Herrenknecht	2500	Siltli Orta sıkılıkta çakıllı kum , Silt, kil	6,19	630	4000
Guangzhou (Çin)	Herrenknecht	1950	Kumtaşı, Silttaşı, kil, Silt	6,25	945	4000
Bangkok (Tayland)	Herrenknecht	4110	Kum, kil	6,46	640	4000
Izmir (Türkiye)	Herrenknecht	2800	Kum,, kil	6,52	800	5000
Singapur (NEL-C703)	Mitsubishi	2610	Alüvyon	6,48	360	4776
Singapur (NEL-C704)	Lovat	2553	Alüvyon, Ayrışmış Granit	6,56	900	4394
Singapur (NEL-C705)	Hitachi-Zosen	2340	Alüvyon, deniz kili	6,46	444	4717
Singapur (NEL-C706)	Herrenknecht	1677	Alüvyon, kil, kum, kum/çamurtaşı	6,58	945	4001
Singapur (NEL-C708)	Hitachi-Zosen	356	Deniz kili, biriktirilmiş nehir kumu	6,53	518	5011
Singapur (NEL-C710)	Ishikawajima-Harima H I.	2610	Alüvyon, kil, kum, kum/çamurtaşı	6,60	810	4550
Singapur (DTSS~T01)	Herrenknecht	7200	Alüvyon	7,20	1200	6000
Singapur (DTSS~T02)	NKK Corporation	7700	Alüvyon	7,16	1050	10224
Singaour (DTSS~T03)	Kawasaki	5100	Alüvyon, Deniz kili, Biriktirilmiş nehir kumu	7,20	900	8434
Roma (İtalya)	Herrenknecht	2400	Tüf, Silt, kil, çakıl	7,97	2000	10000
Porto (Portekiz)	Herrenknecht	5700	Konsolide olmamış Meteryal	8,70	2400	13000
Madrid (İspanya ~1997)	Herrenknecht	11000	Organik killi kum, kum, kil	9,33	2000	16000
Madrid (İspanya ~2000)	Herrenknecht	6840	Kristal jips ile kil ve Silttaşı	9,33	2800	20000
Bootlek (Hollanda)	Herrenknecht	1835	Kil, İri ve İnce Kum	9,78	2400	17000



Şekil 2.1 : Tork ile tünel çapı arasındaki ilişki

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi tünel çapı arttıkça, makinanın tork ihtiyacı artmaktadır.



Şekil 2.2 : Güç gereksinimi ile tünel çapı arasındaki ilişki

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere tünel çapı arttıkça makine güç gereksinimi artmaktadır.

2.2 İtme (Baskı) Kuvveti

Baskı, makinenin kendisini tünel eksenine paralel ilerletebilmesini sağlayan kuvvet olarak tanımlanabilir.

Baskı kapasitesi, tünel arınındaki yatay deformasyonlardan kaçınmak için gerekli olan kuvveti, yer altı su basıncının makine üzerindeki baskısını, gerekirse TBM’in önündeki dikey yer altı oturmalarını bertaraf etmek için gerekli olan kuvveti, makine ile jeolojik birim arasındaki sürtünme kuvvetini karşılamak zorundadır.

Thrust kuvveti, keskilerin kazı arınına batmasını sağlayan kuvvettir. Keskilere dik yönlü etkiyen normal kuvvet, thrust kuvvetinin bir fonksiyonudur. Keski başına düşen itme kuvveti penetrasyon oranına en çok etkiyen faktördür [3].

Keski başına düşen ortalama baskı kuvveti (FN), veya normal kuvvet Denklem 2.1 ile hesaplanabilir [4]:

$$FN = N_C \times P_C \times \pi \times d_c^2 / (4n) \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de N_C itme silindirlerinin sayısını, P_C net uygulanan hidrolik basıncı, d_c hidrolik silindirlerinin çapını, n kesici kafa üzerinde bulunan keskilerin sayısını ifade eder [4].

2.3 Tork

Tork kesici kafanın dönme momentidir. Tork kapasitesi, keskiler ile yeri kazmak, kesici kafa ile kazı arını arasındaki sürtünmeyi aşmak, TBM üzerine etki eden radyal kuvvetleri bertaraf etmek, kesici kafanın arkasında ayna basıncını dengeleyen pasanın hareketini sağlamak zorundadır [5].

2.4 Güç

TBM’in toplam güç kapasitesi, makinenin gereksinim duyduğu tork, thrust kuvvetini karşılamak zorundadır. TBM’in güç gereksinimi, makinenin gereksinim duyduğu tork ve thrust kuvvetinin bir fonksiyonudur. TBM’in güç gereksinimi Denklem 2.2 ile hesaplanabilir [6]:

$$P = 2 \pi \times RPM \times T / 60 \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de P gücü, RPM kesici kafanın dakikadaki dönüş sayısını, T ise tork kapasitesini ifade eder [6].

Kazılacak olan jeolojik birimin jeoteknik özelliklerine göre tork gereksinimi de değiştiğinden, toplam güç gereksinimini de jeolojik özellikler dolaylı olarak etkiler.

2.5 Dakikadaki Devir Sayısı (RPM)

Kesici kafanın dakikadaki dönüş sayısını ifade eden değerdir. RPM değeri genel olarak tork ile ters orantıya sahiptir [3]. Tork ve RPM büyüklükleri, belirli oranlardaki transmisyonlarla birbirine dönüştürülebilir. Jeolojik birimin özelliklerine

göre gereken tork değeri değışmesi sebebiyle RPM değeri de aynı oranda değışir. Sıkı zeminlerde tork gereksinimi yükselirken, aynı tork değerini makinanın koruyabilmesi için RPM değeri belirli bir ölçüde düşürölür. Tersı durumda, zayıf zemin kazısında yüksek tork değeri gerekli olmadığından, tork değeri düşürölür ve RPM değeri arttırılarak penetrasyon oranı dahilinde makinenin ilerleme hızı da arttırılmış olacaktır.

Tork'un yanı sıra RPM değerini sınırlandıran bir diğır faktör de kazı çapıdır. Keskiler, kesici kafa çapının merkezinden uzaklaştıkça bir dönüşte aldıkları yol miktarı, dolayısıyla da kazı arınına temas miktarının artması sonucu aşınmaları da artmaktadır. Keskilerin aşınma mukavemetine bağılı olarak, RPM'i sınırlayan hıza kritik hız adı verilir ve Denklem 2.3 ile hesaplanabilir [7]:

$$RPM = v / (\pi \times D_{TBM}) \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de v köşe keskilerin hızını ifade ederken, D_{TBM} ise makine çapını ifade etmektedir.

2.6 Spesifik Enerji

Spesifik enerji bir metreküp zeminin veya kayanın kazılması için gereken enerji olarak tanımlanır [8]. Spesifik enerji Denklem 2.4 yardımıyla tayin edilir:

$$ES = (S / A) + (C w / A v) \quad (2.4)$$

Burada, ES spesifik enerjiyi (MJ/m^3) ifade ederken; S makine tarafından sağlanan baskı kuvvetini (ton), A tünel kesitini (m^2), C tork değerini (ton m), w kesici kafanın saniyedeki devir sayısını, v ise ilerleme hızını (m/sn) ifade etmektedir [8].

2.7 Zemin Şartlandırma Parametreleri

Uygun zemin koşullandırması; ayna basıncının kontrolünü kolaylaştırması, tork ve güç ihtiyacını düşürmesi, aşınma etkisini azaltması, kazılan malzemenin yapışkanlığını azaltması, permeabiliteyi azaltması, kazılan malzemenin homojenliğinin sağlanması, gevşek zeminlerde zeminin kıvamını arttırarak zeminin kohezyonunu arttırması gibi avantajlar sunmaktadır.

Zemin koşullandırılması; tane boyutu dağılımı, zeminin su içeriğı, zeminin likit limit değeri, zeminin plastiklik indeksi, gibi zemin özelliklerinden etkilenir.

Zemin koşullandırması uygulamaları sırasında püskürtme uçlarından basılan köpüğe etkiyen, çözeltiyi oluşturan etken maddenin konsantrasyon oranı; FIR, FER faktörleridir. Bu faktörler kazılan jeolojik birimin tipine özgü değişik değerler kazanırlar.

Konsantrasyon oranı, suyla karışan ve köpüğü oluşturan kimyasalların, çözelti içerisindeki oranıdır [3]. Konsantrasyon oranı, kullanılan kimyasalın özelliklerine bağlı olarak uygulanacağı zeminin özelliklerine uygun olarak belirlenir.

Köpük stabilitesi, köpüğün zaman geçtikçe bozulmadan kalabilmesini ifade eder. Bu durum çözeltiye ne kadar hava eklendiğine bağlı olarak değişir ve bu genleşme oranıyla ifade edilir. FER (foam expansion ratio), yani köpük genleşme oranı, üretilen köpük hacminin köpük sıvısının hacmine oranıdır [3]. FER aşağıda bulunan Denklem 2.5 ile hesaplanabilir:

$$FER = V_{köpük} / V_{çözelti} \quad (2.5)$$

Köpük stabilitesi ayrıca kesici kafa kazı (basınç) odasında biriktirilen malzemenin bulunduğu kısmın basıncına da bağlıdır. Bu kısımdaki yüksek basınç köpük sıvısındaki yüksek konsantrasyon oranına ve gereken FER'in yüksek olmasına sebep olur [3].

FIR (foam injection rate), yani köpük enjeksiyon oranı ise köpüğün kazılan zemine göre yüzdesidir [3]. Enjekte edilen zeminin boşluk oranına, bir başka deyişle uygulanan zeminin yoğunluğuna bağlı olarak köpük nüfuz etme derecesi değişmektedir. Yüksek yoğunluklu, sıkı zeminlerde nüfuz etme azalırken; düşük yoğunluklu gevşek zeminlerde ise köpük enjeksiyon oranı yüksektir. FIR aşağıda bulunan Denklem 2.6 ile hesaplanabilir [3]:

$$FIR = 100 \times V_{köpük} / V_{zemin} \quad (2.6)$$

Bu parametrelerin düzgün ayarlanmaması durumunda, örneğin fazla hava eklenirse, kesici kafanın basınç odasında biriktirilen zemin kuruyacaktır. Bunun sonucu kazı işlemini sürdürmek için gerekli olan tork artacaktır. Ayrıca kesici kafanın ısısı, sürtünmenin artması sonucu artacak, bunun sonucu olarak da hızın azaltılması gerekecektir. Eğer fazla sıvı veya köpük eklenirse, kazılan malzemenin akışkanlığı artacak ve pasanın uzaklaştırılması zorlaşacaktır. Ayrıca fazla kimyasal harcanmasından dolayı kazı maliyeti yükselir. Gerekenden az köpük zemine enjekte

edilir ise zeminin kesici kafayı veya vida konveyörü tıkaması olasıdır. Bunun sonucunda düşük ilerleme oranı ile makine aşınmasında artış yaşanır [3].

Kazı esnasında, tork artışıyla makinenin daha sıkı bir zemini kazmaya başladığı anlaşılır. Bu durumda FIR değeri veya enjekte edilen sıvının konsantrasyonu arttırılmalıdır. Eğer makinenin gevşek ve kumlu bir zeminde kazı yaptığı gözleniyorsa vida konveyörde tıkanma olasılığı oluşur. Bu durumda dozaj oranı düşürülerek olası tıkanmaların önüne geçilebilir. Zemin yüksek miktarda su ihtiva ediyorsa ve istenilen konsantrasyon oranı, FER, FIR değerleri tutturulamıyorsa kullanılan kimyasal cinsi değiştirilmelidir [3].

2.8 Kıvam (Attaberg) Limitleri

Kıvam limitleri olarak bilinen Atterberg limitleri, zeminin tanecikleri ile su arasındaki ilişkileri ve değişen su içeriklerine göre zeminin durumunun tanımlanmasını sağlar.

Doğal nem içeriği (W_s) zeminin doğal nemliliğini ifade eden değerdir. Plastik Limit (W_p), zeminin palstik davranıştan kuru duruma geçtiği nem içeriği değeridir. Likit Limit (W_L) zeminin sıvı davranıştan plastik davranış durumuna geçtiği nemlilik değeridir [9].

Plastisite İndeksi (I_p), bir zeminin likit limiti ile plastik limiti arasındaki sayısal farktır. Zeminin ne ölçüde plastik davranış göstereceğini sayısal olarak gösteren büyüklüktür. Aşağıdaki denklem 2.7 hesaplanabilir [9]:

$$I_p = W_L - W_p \quad (2.7)$$

Formülde I_p plastisite indeks değerini, W_p plastik limit değerini, W_L likit limit değerini göstermektedir [9].

Kıvam indeksi (I_c), zeminin herhangi bir nem değerindeki kıvam durumunu ifade etmekte olup 1 değerine yaklaştıkça zeminin plastik ve 0 değerine yaklaştıkça ise zeminin akışkan özelliğe sahip olduğunu göstermektedir. Kıvam indeksi aşağıdaki Denklem 2.8 ile hesaplanabilir [3]:

$$I_c = (W_L - W_s) / (I_p) \quad (2.8)$$

Formülde I_c kıvam indeksini ifade ederken; W_L likit limit değerini, W_s doğal nem içeriği değerini, I_p plastisite indeks değerini göstermektedir [3].

Kıvam indeksi değerinin 0,4 ile 0,75 değerleri arasında olması en iyi EPB TBM operasyonuna imkan veren değer olarak tanımlanmıştır [10].

2.9 Permeabilite

Permeabilite veya hidrolik iletkenlik; sıvının viskozluğuna, zeminin boşluk oranına, tane boyutu oranına ve zeminin doygunluğuna bağlı olarak değişir [9].

Permeabilite suya doygun killi zeminlerin yük altında oturma oranlarını etkiler. Kazı arınında oluşan yer altı su basıncının tayin edilmesinde etkilidir [9].

Genel olarak, iri taneli zeminlerde zeminin hidrolik iletkenliği yüksektir [9]. Dolayısıyla bu tip zeminlerde kaşılaşılan ayna basıncı da yüksek olacaktır. Bununla birlikte, zemin akışkanlığının artması sebebiyle deformasyon kontrolü de zorlaşacaktır.

Klasik olarak EPB TBM kazılarında göz önüne alınması gereken uygun değer 10^{-5} m/sn'den az olmalıdır [11].

2.10 Tane Boyut Dağılımı

Zemini meydana getiren taneler boy ve şekil bakımından birbirlerinden farklıdır. Tanelerin büyüklük ve şekillerini belirlemek amacıyla tane boyutu dağılımı analizi yapılır.

Zeminlerin sınıflandırılmasında tanelerin büyüklüğü ile tanelerin kuru ağırlık olarak zemindeki yüzdesi dikkate alınır. Genel olarak en çok kullanılan sınıflandırma sistemi, tane çapına göre ve attaberg limitleri göz önüne alınarak sınıflandırmayı gerçekleştiren birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS)'dir. Çizelge 2.2' de ve Çizelge 2.3' de birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi görülmektedir.

Çizelge 2.2 : Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi kodlaması [12].

İlk Harf	Tanımlama	İkinci Harf	Tanımlama
G	Çakıl	P	kötü derecelenmiş (homojen tane boyutu)
S	Kum	W	iyi derecelenmiş (heterojen tane boyutu)
M	Silt	H	yüksek plastiklik
C	Kil	L	düşük plastiklik
O	Organik		

Çizelge 2.3 : Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi [12].

Ana Küme			Grup Sembolü	Grup İsmi
%50'si 200 No'lu eleğin üzerinde kalmış; İri taneli zeminler	% 50'den fazlası 4 No'lu eleğin üzerinde kalmış Çakıl	Temiz Çakıl	GW	iyi derecelendirilmiş çakıl; İriden inceye kadar boyutlanmış
			GP	kötü derecelenmiş çakıl
		%12 den fazla ince tane ile çakıl	GM	Siltli çakıl
			GC	Killi çakıl
	% 50'den fazlası 4 No'lu eleğin altına geçmiş Kum	Temiz Kum	SW	iyi derecelendirilmiş kum; iriden inceye kadar boyutlanmış
			SP	kötü derecelenmiş kum
		%12 den fazla ince tane ile kum	SM	Siltli kum
			SC	Killi kum
%50'si 200 No'lu elekten geçmiş; İnce taneli zeminler	Likit limiti 50'den ufak silt ve kil	İnorganik	ML	Silt
			CL	Kil
	Likit limiti 50'denbüyük silt ve kil	Organik	OL	Organik silt; organik kil
		İnorganik	MH	Yüksek plastisiteli silt ; Elastik silt
			CH	Yüksek plastisiteli kil ; yağlı kil
		Organik	OH	Organik kil, Organik silt
Yüksek organik zeminler			Pt	Turba

2.11 Standart Penetrasyon Testi (SPT)

Zeminin mukavemet ve yoğunluğunu değerlendirmek amacıyla sondaj kuyusu içinde yapılan bir dinamik kesme deneyidir. Deneyde standart bir numune alıcı (karotiyer) zemine sokulmaya çalışılarak zeminin bu sokulmaya karşı gösterdiği direnç bazı hesaplamalarla saptanabilmektedir.

Genellikle iri taneli, kohezyonsuz zeminlerden örselenmemiş örnek almak zor olduğundan, rölatif yoğunluk tayini için bu deney kullanılır. Ayrıca kil gibi kohezyona sahip zeminlere de bu deney uygulanabilmektedir. Ancak deneyde tayin edilen sonuçlar laboratuvar deneyleri kadar kesin bir sonuç içermemektedir. Zeminin rölatif yoğunluğu SPT tüpünün zemine 64 kg'lık bir çekiçe çakılması ile belirlenir [13]. Kabaca zeminin rölatif yoğunluğu, çekicinin vuruş sayısı olan N değeri veya 30 cm gömülme için gerekli olan vuruş sayısı ile ilişkilidir [14].

Çizelge 2.4 : Kohezyonsuz zeminlerin sıkılıkları ile SPT-N değerleri arasındaki ilişki [14].

Sıklık	Vuruş Sayısı (N SPT)
çok gevşek	<4
gevşek	4 – 10
orta yoğunluklu	10 -30
yoğun	30 – 50
çok yoğun	>50

Çizelge 2.5 : Kohezyona sahip zeminlerin kıvamları ile SPT-N değerleri arasındaki ilişki [14].

Kıvam	Vuruş Sayısı (N SPT)
çok yumuşak	2
yumuşak	2 – 4
orta	4 – 8
sıkı	8 – 15
çok sıkı	15 – 30
sert	30

2.12 Doğal Birim Ağırlık

Yığın halindeki bir zeminin taneler arasındaki boşluklar da dahil birim hacminin ağırlığıdır. Doğal birim hacim ağırlığı hesaplanırken, zemin içerisinde bulunan boşluklarda sıvı ve hava da göz önüne alınır [9].

Doğal hacim ağırlığı zeminin doğal koşullarındaki kıvamını ifade eder. Doğal hacim ağırlığın düşük olması boşluk oranının fazla olmasını, dolayısıyla da zemin içerisindeki sıvı miktarının fazla olmasını, dolayısıyla da hidrolik iletkenliğin yüksek oluşuyla permeabilitenin yüksek olmasını ifade eder. Bu tarz zeminlerde su gelirinin fazla olması beklenir.

2.13 Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açısı

Zemin tanelerini bir arada tutan yapışma kuvveti kohezyon, belirli bir yenilme-gerilme koşulunu temsil eden bir noktadaki mohr zarfına teğet doğru parçası ve normal gerilim eksenini arasındaki açı da içsel sürtünme açısı olarak ifade edilmektedir [15].

Graham penetrasyon oranı tayini için,

$$P = 3940 \times FC / UCS \quad (2.9)$$

formülünü önermiştir. Burada P penetrasyon oranını, FC ortalama kesme kuvvetini, UCS ise üç eksenli basınç dayanımı kuvvetini temsil etmektedir [16]. Yaklaşımda görüldüğü üzere, sabit bir penetrasyon oranında üç eksenli basınç değeri arttıkça uygulanacak kesme kuvveti artmaktadır. Yüksek basınç dayanımı, çizilecek mohr dairesinde yüksek içsel sürtünme açısı ile yüksek kohezyon kuvvetini temsil etmektedir. Yüksek değerlerde kesme kuvveti ise, yüksek güç gereksinimi dolayısı ile yüksek enerji sarfiyatını beraberinde getirmektedir [17]. Böylelikle kohezyon ve içsel sürtünme açısı değeri arttıkça taneler arası çekim kuvveti artacağından, zeminin sahip olduğu kütleden parça kopartmak için gereken kuvvetler artacak, bunun sonucunda harcanan enerji de artacaktır.

2.14 Net Kazı Hızı

Net kazı hızı, birim kazı süresinde TBM'in kazdığı miktar olarak ifade edilir ve Denklem 2.10 ile hesaplanır [18]:

$$\text{Net Kazı Hızı} = \text{TBM ilerlemesi} \times \text{TBM Çapı} / \text{Kazı süresi} \quad (2.10)$$

2.15 Ortalama İlerleme Miktarı

Ortalama ilerleme miktarı, TBM'in bir günlük yaptığı kazının saatlik ortalama ilerleme miktarıdır. Ortalama ilerlemenin net kazı hızından farkı duraklama sürelerinin de hesaba katılmış olmasıdır. Ortalama ilerleme, 24 saat çalışılan bir gün Denklem 2.11 ile bulunur [18]:

$$\text{Ortalama İlerleme} = \text{TBM'in günlük ilerlemesi} / 24 \quad (2.11)$$

2.16 Makineden Faydalanma Oranı (MFO)

TBM'in kazı yaptığı sürenin vardiya süresi içerisindeki yüzde değeri olarak tanımlanır. Makineden faydalanma oranı % 40- % 50 arası iyi kabul edilebilir değerler olarak değerlendirilir. Bu oran denklem 2.12 ile hesaplanır [18]:

$$\text{MFO} = (\text{Toplam Kazı Süresi} / \text{Toplam Vardiya Süresi}) \times 100 \quad \textbf{(2.12)}$$

3. PROJENİN TANITIMI

3.1 Projenin Amacı

İlci-Özgün firmalarının ortaklığıyla İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi adına yürütülen projede amaçlanan Avrupa Yakası İkinci Kısım Atıksu Tüneli'nin kazılması ve proje için planlanan diğer yapıların inşa edilmesidir. Proje kapsamında kazılması amaçlanan atıksu tüneli sayesinde Marmara Denizi, Haliç, Alibeyköy Barajı ve çevresi, Eyüp İlçesi ve Fatih İlçesinin çevre kirliliğine neden olan atıksuları toplanarak, İSKİ Yenikapı Atıksu Arıtma Tesisi'ne getirilecektir. Kazılan atıksu tüneliyle taşınacak atıksular, tünel bitiminde İSKİ Yenikapı Atıksu Arıtma Tesisi'nin kaba ızgarasından giriş yapacak ve gerekli arıtma işlemlerinden geçirilecektir. Bu işlemler sonucu zararsız hale getirilecek olan atıksular, sahil şeridinden 300 metre açıkta Marmara Denizi'nin dip akıntılarına verilmek suretiyle uzaklaştırılacaktır.

3.2 Projenin Güzergahı

Açılacak atıksu tüneli, İSKİ Yenikapı Atıksu Arıtma Tesislerinin yanında kazılan S7 Kuyusu'ndan başlayacak ve Eyüp'te bulunan B1 Kuyu'sunda son bulacaktır. S7 Kuyusu ve B1 Kuyusu arasında açılacak atıksu tüneli toplam 9,350 kilometre uzunluğunda ve 3,60 metre çapında inşa edilecektir. Ek Şekil A.1'de verilen uydu görüntüsünde proje kapsamında açılacak olan tünelin güzergahı sarı renkli çizgiyle belirtilmiş ve aynı şekil üzerinde S7, S6 ve B1 kuyuları da kırmızı renkli olarak betimlenmiştir.

3.3 Proje Güzergahının Jeolojisi

Bölgede genel olarak en altta kumtaşı, silttaşı, ve kiltaşından oluşan karbonifer yaşlı Trakya Formasyon'u bulunmaktadır. Bu formasyonun üzerinde eosen yaşlı Kırklareli (soğucak) Formasyonu'na ait kireçtaşı – marn ve kiltası düzeyleri yer almaktadır. Kırklareli Formasyonu üzerine kil, kiltası ve kumtaşı, tüfit ara seviyeli Ceylan Formasyonu gelmektedir. Daha üst kesimlerde ise Oligosen yaşlı başlıca kil ve silt

bantlarından oluşan Üst Miyosen yaşlı Çukurçeşme Formasyonu bulunmaktadır. En üstte ise yeşil renkli, üst seviyelerde karbonatlı Güngören Formasyonu ile maktralı ve fosil kavkılı kireçtaşları ile yer yer killi seviyelerden oluşan üst miyosen yaşlı Bakırköy Formasyonu yer almaktadır. Bu formasyonun üzerinde Kuvaterner yaşlı Kuşdili Formasyonu, alüvyon ve dolgu malzemeleri bulunmaktadır [19].

Proje güzergahının S6 – S7 kuyuları arasında kalan kısımda tünelin geçtiği jeolojik birimlerin gözlemi ise şöyledir:

S7 Kuyu'su (proje güzergahının 8+867,343'üncü km'si) ile proje güzergahının 8+600'üncü kilometresi arasında Kuşdili Formasyonu'nun yeşilimsi gri renkli, ince – orta tane boyutlu, kavkılı, yoğun siltli, seyrek killi, orta – sıkı kumların üzerine kahverenkli, tuğla parçalı, yer yer kumtaşı şeyl bloklarından yapılmış dolgu gözlenmiştir. Projede güzergahın 8+600'üncü km ile 8+345'inci km olarak belirtilen bölgede Kuşdili Formasyonu'nun yeşilimsi koyu gri - kahvems, gri renkli siltli, mikalı, kavkılı, çok plastik, orta katı killer ile alta doğru Güngören Formasyonu'nun koyu yeşil, yeşilimsi gri renkli, siltli, mikalı, kavkılı, plastik, sert nitelikli killer gözlenmiştir. Proje güzergahının 8+345'inci km'si ile 7+081,783'üncü km'si olarak nitelendirilen bölgede ise Güngören Formasyonu'nun sarımsı yeşilimsi kahverenkli, demirli mineralleri okside olmuş, siltli, yer yer karbonat içerikli, sert zemin nitelikli, yer yer konsolide olmuş plastik killer gözlenmiştir [19].

Proje güzergahı ve jeolojik haritası ekte verilmiştir.

3.3.1 Kuşdili formasyonu (Kşf)

Kuşdili Formasyonu'nun taban kesimi çakıllı ve yanal devamlılıkları değişen kumlar ile gri - siyah renkli kil ve çamurlardan oluşur. Formasyon, İstanbul Avrupa Yakası'nda yer alan diğer jeolojik birimleri açısız uyumsuzlukla örter ve güncel Alüvyon ve dolgularla da örtülür. Genel itibariyle toprak, kil, çöp, inşaat malzemelerinden oluşan bu dolgular, arazi gözlemlerine göre kalınlıkları 0.5 - 12 m arasında değişir.

Genellikle Holosen yaşlı ve egemen olarak kil ve çamurdan oluşmuş birimler olmaları nedeniyle yapılaşma açısından önemli sorunlar çıkabilecek zayıf zemindir. Killerin plastik davranışlarıyla yüksek binalarda tasman ve deprem sırasında sıvılaşma türü olaylar beklenir.

Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri, Haliç civarı, Ayamama, Veliefendi, Aksaray vadilerinde görülür [20].

3.3.2 Güngören formasyonu (Gnf)

Sarımsı esmer - yeşil renkli kil, beyaz renkli marnlar ile bunlar arasında ince düzensiz tabakalı maktralı kalker, beyaz tebeşirimsi kalker seviyelerinden oluşur. Killer içinde marnlı kalker topakları vardır. Killer içinde ayrıca bitki sap ve yaprak izleri, silt ve kum mercikleri gözlenir. Killer ince tabakalı olup laminalıdır. Ayrıca içlerinde kum mercikleri bulunur. Yüzeğe yakın yerlerde organik madde zenginleşmesiyle kahverengiye dönüşmektedir.

Güngören Formasyonu; Yedikule, Kazlıçeşme, Osmaniye, Rami, Atışalanı-Esenler arası ve Güngörenin doğusunda görülür [20].

3.3.3 Güzergah jeolojisi mekanik parametreleri

Tünel güzergahı boyunca geçilen zemin ve kayaların jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin tespiti amacıyla, 21 noktada kuyu derinlikleri 15,50 ile 87,00 m arasında değişen, toplam 844,20 m mekanik sondaj yapılmıştır. Sondajlar sırasında geçilen zemin ortamlarında 1,5 m aralıklarla SPT deneyleri yapılmıştır. Kaya ortamlarında ise, karotiyer ile ilerlenilerek, karot numune alınmıştır. Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’ de alınmış olan numuneler ve bu numuneler üzerinde yapılmış olan deneylerin sonuçları listelenmektedir.

Çizelge 3.1 : Sondaj bilgi tablosu [19].

Şaft No	Sondaj No	Koordinatlar		z (m)	Sondaj Derinlik (m)	YSS Derinlik (m)
		X	Y			
S-7	GH-15	4541624,62	411646,8	3,46	15,15	5,50
	GH-16	4544222,47	411136,63	64,00	72,00	25,00
	GH-17	4541919,97	411435,49	6,00	15,45	5,00
	GH-18	4542235,55	411432,4	27,00	35,00	11,20
S-6	GH-19	4542655,4	411398,31	16,17	25,60	13,00
	GH-20	4542940,39	411345,17	19,50	30,00	2,50
	GH-21	4543706,22	411153,19	45,00	60,50	17,00

Çizelge 3.2 : Sondajlara ait indeks deneylerinin sonuçları [19].

Numuneye Ait Bilgiler			Su İçeriği (%)	Atterberg Limitleri (%)			Elekt Analizi (%)			Zemin Sınıfı (USCS)	Fm.
Sondaj No	Num. No	Derinlik (m)		LL	PL	PI	Çakıl	Kum	Kil		
GH-15	SPT-3	04,50-04,56	-	-	-	-	71	27	2	GP	Yd
(S7 ŞAFTI)	SPT-5	13,50-13,63	-	-	-	-	30	59	11	SP-SM	Kşf
GH-16	SPT-25	37,00-37,95	22,56	44	22,4	22	-	-	-	CL	Gnf
GH-17	SPT-7	10,50-10,95	27,13	61	29,6	31	-	-	-	CH	Gnf
GH-18	SPT-17	25,50-25,95	29,07	53	27,5	25	-	-	-	CH	Gnf
	SPT-18	28,50-28,95	30,56	58	29,6	28	-	-	-	CH	Gnf
GH-19	SPT-3	04,50-04,95	-	-	-	-	18	33	49	SM	Yd
(S6 ŞAFTI)	SPT-8	12,00-12,45	-	-	-	-	2	57	41	SM	Gnf
	SPT-12	18,00-18,45	20,51	52	17,1	35	-	-	-	CH	Gnf
GH-20	SPT-13	19,50-19,95	18,46	40	23	17	-	-	-	CL	Trf

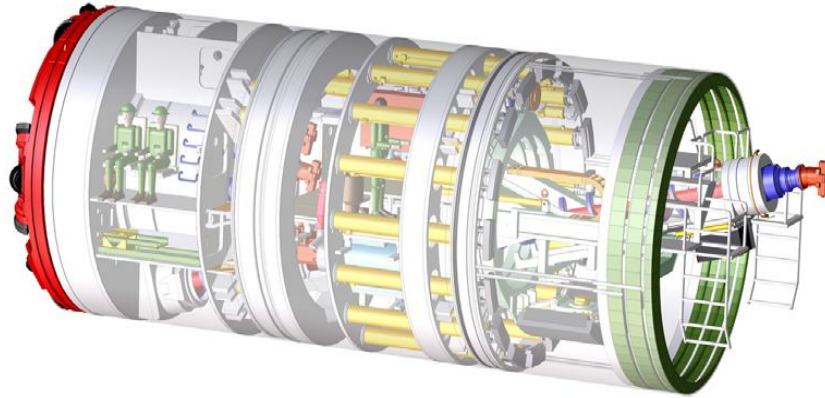
Çizelge 3.3 : Tünel akarkot seviyesindeki formasyonlara ait jeoteknik parametreler [19].

Jeoteknik Parametreler	Güngören Formasyonu Kil (CH - CL) sert zemin	Kuşdili Formasyonu	
		Yumuşak kil (OH-CL)	Gevşek-orta sıkı Kum (SP-SM)
Kohezyon (c')	80-100 kPa	25 kPa	-
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ')	-	5°	30-33°
Doğal Birim Hacim Ağırlığı (ρ_n)	18.0 kN/m ³	16.0 kN/m ³	

3.4 Avrupa Yakası İkinci Kısım Yeni Kapı Atıksu Tüneli Kazısında Kullanılan TBM'in Özellikleri

3.4.1 Genel Özellikler

Avrupa Yakası İkinci Kısım Yenikapı Atıksu Tüneli kazısı, tam cephe tünel açma makinesiyle (TBM) yapılmıştır. Tünel kazısında, İlci – Özgün şirketinin daha önce Ambarlı Atıksu Projesi'nde kullandığı 4560 mm dış çaplı Herrenknecht firmasının M-1070 modeli olan EPB TBM makinası gerekli olan bakımları yapıp yenilenerek kullanılmıştır. TBM'in görünüşü Şekil 3.1'deki gibidir [21].



Şekil 3.1 : Herrenknecht M-1070 EPB-TBM [21].

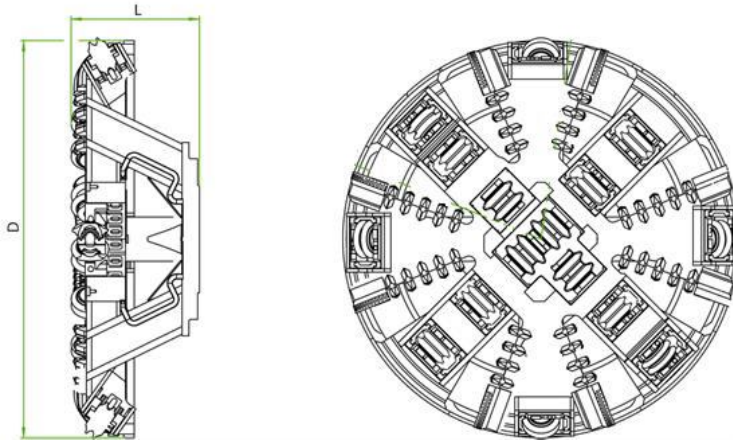
EPB TBM kazı işlemini gerçekleştirmesi için gerekli olan birçok sistemi bünyesinde barındırmaktadır. Atıksu Tünelinde kullanılacak Herrenknecht markasının M-1070 modelli EPB TBM'inin teknik özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir [21].

Çizelge 3.4 : EPB TBM'in teknik özellikleri [21].

Tünel Açma Makinesinin Toplam Uzunluğu (Kesici Kafa, Kalkanlar ve Vida Konveyör)	12723 mm
Motor Sayısı	6 adet
Tork (%100 Emiş hacminde, Sürekli)	2307 kNm
Tork (%0 Emiş hacminde, Sürekli)	877 kNm
Devir (%100 Emiş hacminde)	2,75 dev/dak
Devir (%0 Emiş hacminde)	7,22 dev/dak

3.4.2 Kesici kafa

TBM'in ön tarafında bulunan kesici kafanın iki işlevi vardır. Birincisi, ilerleme sırasında dönerek üzerindeki keskinlerin zeminle temasını sağlayarak zemini aşındırıp kazmak ve hemen arkasında mevcut bulunan karıştırıcıları kullanarak kesilen malzemeyi karıştırma bölgesinde karıştırarak kesilen malzemenin akışkanlığını sağlamaktır. Kesici kafa çelikten yapılmış olup üzerinde disk ve kama keskinler monte edilmiştir. Kesici kafanın önden ve yandan görünüşleri Şekil 3.2'de görüldüğü gibidir. Çizelge 3.5'de ise kesici kafanın boyutları belirtilmiştir [21].



Şekil 3.2 : TBM Kesici kafanın önden ve yandan görünüşü [21].

Çizelge 3.5 : Kesici kafanın boyutları [21].

Çap (D)	4560 mm
Uzunluk (L)	1475 mm
Yaklaşık Ağırlık	34800 kg

Kesici kafanın dönmesiyle bu kazı aletleri zeminle temas ederek zeminin aşındırılarak kopmasını sağlar ve bu sayede kazı işlemi gerçekleşmiş olur. Kesici kafa her iki yönde de döndürülebilir.

Kesici kafanın üzerindeki disk keskinler, kesici kafanın temas basıncına ve devrine göre dönerek temas ettiği sert jeolojik birimin uyguladıkları baskı sonucu parçalanmasını sağlarlar. Disk keskinler kendileri için tasarlanmış yuvalarında konumlandırılmışlardır. Disk keskinler kazı sonucu aşınırlar ve belirli bir süre sonra değiştirilmeleri gerekir. Disk keskinlerin değiştirilme işlemi kesici kafanın arka tarafından gerçekleştirilebilir.

Kama keskilere ise yapışkan ve ya yapışkan olmayan jeolojik birimi aşındırarak kazarlar. Disk keskilere benzer şekilde aşınma etkisi sebebiyle değiştirilmeleri gerektiğinde, kesici kafanın arka kısmından değiştirilebilirler.

Kova sıyrıcılar, kesici kafanın çevresinde konumlandırılmış olup, kesilen malzemenin kesici kafanın üzerinde bulunan açıklıklardan sıyrılarak geçmesini sağlayarak kesici kafanın arkasında bulunan kırıcıya ulaşmasını sağlar. Bu kırıcı sayesinde büyük boyutlu kaya parçaları kırılarak istenilen boyuta indirilir. Diğer keskilere aynı şekilde bu keskilere kesici kafanın arka kısmından değiştirilebilirler.

Merkezi keski konik bir kesim profili oluşturur. Merkezi keski tungsten karbid'den üretilmiştir. Bu sayede keskinin değişimi kolay olur; fakat merkezi keski aşındırma etkisi sebebiyle değiştirileceği zaman yalnızca kesici kafanın ön kısmından değiştirilebilir. Bu nedenle merkezi keskinin değişimi yalnızca bir kuyu girişinde olacak şekilde veya makine yer üstündeyken yapılmalıdır.

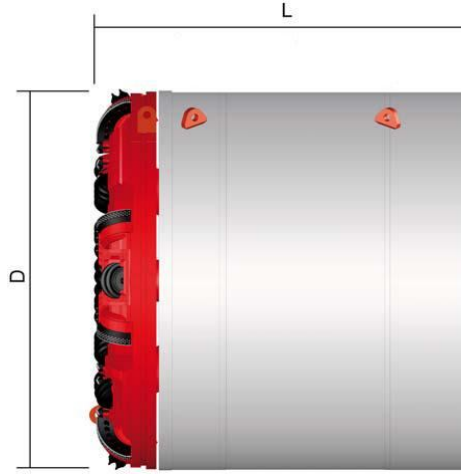
Kesici kafa ve basınç bölmesi arasında bulunan kısım karıştırma bölmesi olarak tanımlanır. Bu karıştırma bölgesinde kazılmış malzeme kesici kafada bulunan karıştırıcı kollar vasıtasıyla karıştırılır. Bu işlemin verimini arttırmak için var olan püskürtme uçlarından, kazılmış malzemeye köpük, su, veya bentonit ilave edilmelidir. Zemin basıç algılayıcıları ile karıştırma bölgesinde bulunan karışımın basıncı ölçülerek kontrol panosuna aktarılır. Bu sayede karıştırıcı bölmedeki basınç, vida konveyördeki ve vida konveyörün boşaltım kısmında bulunan geçitteki basınçla karşılaştırılabilir.

Basınç bölgesinde, kazı aynasına insan geçişini sağlamak için bir kapı bulunmaktadır. Bu sayede kazı esnasında ortaya çıkabilecek herhangi bir sorunun giderilmesi için kazı aynasına ulaşmak mümkün olur.

3.4.3 Yönlendirme kalkanı

Yönlendirme kalkanı makine kalkanının önündedir ve makine kalkanına sekiz adet hidrolik yönlendirme silindiriyle bağlanmıştır. Bu sayede TBM ile kazı doğru şekilde yönlendirilebilmektedir. Kalkanlar yönlendirildiklerinde hidrolik yönlendirme silindirlerinin diferansiyel uzantıları sayesinde makine kalkanı yönlendirme kalkanını takip edebilmekte ve yönlendirme kalkanının döndüğü eğri boyunca dönebilmektedir. Yönlendirme kalkanında vida konveyörün ön kısmı ve bir basınç

bölmesi bulunmaktadır. Çizelge 3.6’da yönlendirme kalkanının boyutları verilmiştir. Şekil 3.3’te ise yönlendirme kalkanının profil görünüşü resmedilmiştir [21].



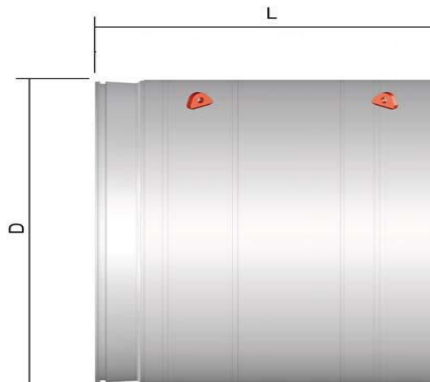
Şekil 3.3 : Yönlendirme kalkanının görünüşü [21].

Çizelge 3.6 : Yönlendirme kalkanının boyutları [21].

Çap (D)	4560 mm
Uzunluk/ Kesici kafa hariç (L)	3610 mm
Kesici Kafa Dahil Ağırlık	78200 kg
Kesici Kafa Hariç Ağırlık	11300 kg

3.4.4 Makine kalkanı

Makine kalkanında ilerlemeyi sağlayan onaltı adet ana kaldırmaç silindirleri bulunmaktadır. Ayrıca hidrolik motorlar, gres yağı pompası, sıkıştırılmış hava ünitesi ve köpük boruları bulunmaktadır. Makine kalkanının boyutları için Çizelge 3.7’ye bakılabilir. Makine kalkanının görünüşü Şekil 3.4’deki gibidir.



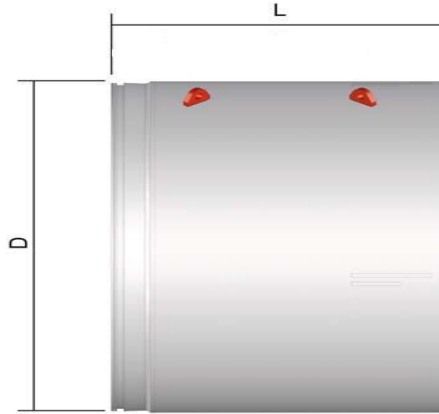
Şekil 3.4 : Makine kalkanının görünüşü [21].

Çizelge 3.7 : Makine kalkanının boyutları [21].

Çap (D)	4557,5 mm
Uzunluk (L)	3912 mm
Ağırlık	57105 kg

3.4.5 Kuyruk kalkanı

Kuyruk kalkanı, makine kalkanına sekiz adet bağlantı silindiriyle bağlanmıştır. Bu silindirler, kuyruk kalkanının makinenin diğer kalkanlarını dönüş manevraları boyunca takip etmesini ve onlarla birlikte dönebilmesini sağlar. TBM'in çelik yapısı çalıştığı zemin, su ve çalışma ağırlıklarından etkilenmeyecek şekilde dizayn edilmiştir [21]. Kuyruk kalkanının boyutları Çizelge 3.8'de verilmiştir. Kuyruk kalkanının görünüşü Şekil 3.5'teki gibidir.



Şekil 3.5 : Kuyruk kalkanı görünüşü [21].

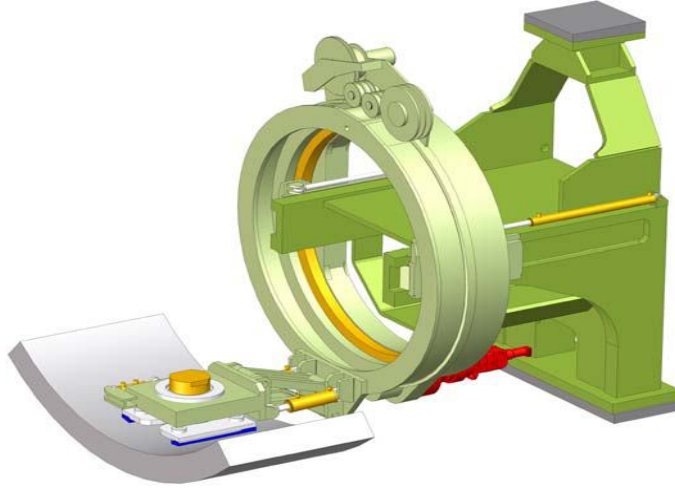
Çizelge 3.8 : Kuyruk kalkanının boyutları [21].

Çap (D)	4555 mm
Uzunluk (L)	3220 mm
Ağırlık	14000 kg

3.4.6 Erektör

TBM'in kuyruk kalkanı parçasının içerisinde bulunan erektör, kazılan tünelin tahkim edilmesinde, kullanılan tahkimat elemanının montajını sağlamaktadır. Erektör, segmanı tutarak kaldırır ve ring duvarını parça parça oluşturur. Kazı esnasında erektöre gelen segmanlar erektör tarafından kaldırılarak uygun pozisyonlarda tünel

eperine yerleştirir. Erektör uzaktan kumandayla kontrol edilir. Erektör gezinme kirişi, ana panel, döner tabla, döner kol ve erektör ucu bileşenlerinden oluşur. Erektrn görünüşü şekil 3.6'da verilmiştir [21].



şekil 3.6 : Erektrn görünüşü [21].

Gezinme kirişi kuyruk kalkanının elik yapısından destek olarak; erektör için, erektör uzunlamasına doğrultu sağlar. Gezinme kirişi sayesinde erektör ileri ve geri hareket edebilir. Bu sayede segmanların doğru bir şekilde yerleştirilmesini sağlar.

Erektrn bir diğer parçası olan ana panel, uzunlamasına hareket edebilecek şekilde gezinme kirişine bağlıdır. Ana panelin uzunlamasına hareketi iki adet hidrolik silindir ile sağlanır. Ayrıca panele döner tablanın hidrolik motoru ve hidrolik soğutmalı fren monte edilmiştir.

Döner tabla ana panel ile tümleşik bir şekilde bulunmaktadır ve erektrn tutucu ucunun dairesel hareketini sağlar. Döner tablanın motoru istenilen yönde dndrlebilmekte ve erektör tarafından tutulan segmanın bu sayede kaldırılması sağlanabilmektedir.

Döner tablaya montelenmiş döner kol erektör ucunun gezinebilmesini sağlar ve segmanların tünel eksenine dikey biçimde hareketini gerçekleştirir. Erektör sspansyonu segmanlar için dikey hareketine izin verir ve tünel eksenini boyunca segmanların doğru yerleştirilmesine olanak sağlar.

Erektre getirilen segmanlar erektör ucunun altına konumlandırılır. Erektör ucu segmana kilitlenerek güvenli biçimde segman hareketi sağlanır [21].

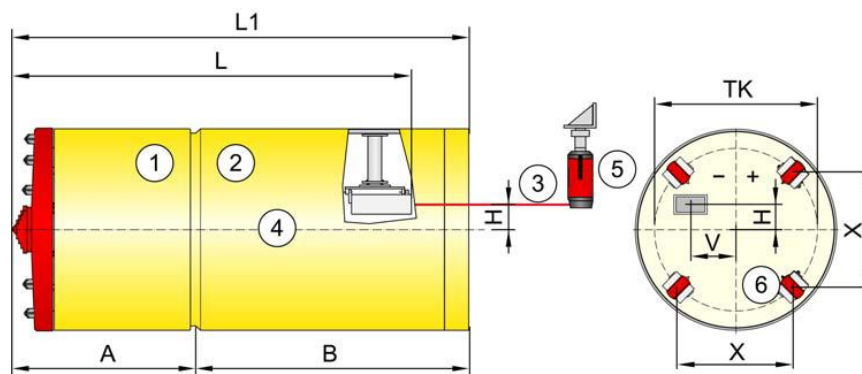
3.4.7 EPB TBM' de kazı destekleyici sistemler

3.4.7.1 Lazer hedefleme sistemi

TBM'de bulunan lazer hedefleme sistemi, TBM'i kontrol etmeye yardımcı olur. Lazer hedefleme sistemi, gönderdiği lazer ışının pozisyonunu kaydederek, bu veriyi kontrol odasında bulunan, kontrol paneline tümleşik olan bilgisayara gönderir. Bu sayede makinenin tam olarak gerçek pozisyonu takip edilebilir[21]. Çizelge 3.9'da lazer hedefleme sisteminin boyutları verilmiştir. Çizelge 3.9'da görülen uzunluklar Şekil 3.7'de görülmektedir [21].

Çizelge 3.9 : Lazer hedefleme sistemi boyutları [21].

Lazerin Tünel Eksenine Göre Kotu (H)	1200 mm
Lazer Hedefinin Makine Merkezine Yatay Uzaklığı (V)	-1000 mm
Tünel Makinesi Uzunluğu (L1)	10860 mm
Kesici Kafa Uzaklığı (L)	5250 mm
Yönlendirme Kalkanı Uzunluğu (A)	4364 mm
Makine Kalkanı Uzunluğu (B)	6496 mm
Yönlendirme Silindir Adedi	8 adet
Yönlendirme Silindirleri Arası Uzaklık (X)	2793 mm



Şekil 3.7 : Lazer hedefleme sisteminin görünüşü [21].

3.4.7.2 Konveyör sistemi

Vida konveyörün görevi kazılmış malzemenin TBM dışına nakledilmesidir. Kesici kafa tarafından kazılan malzeme vida konveyör tarafından bant konveyöre

nakledilmektedir. Vida konveyör TBM'in makine kalkanının içerisindeki basınç bölmesinin akabinde yer almaktadır. Vida konveyörün özellikleri Çizelge 3.10'da görülmektedir.

Çizelge 3.10 : Vida konveyör teknik özellikleri [21].

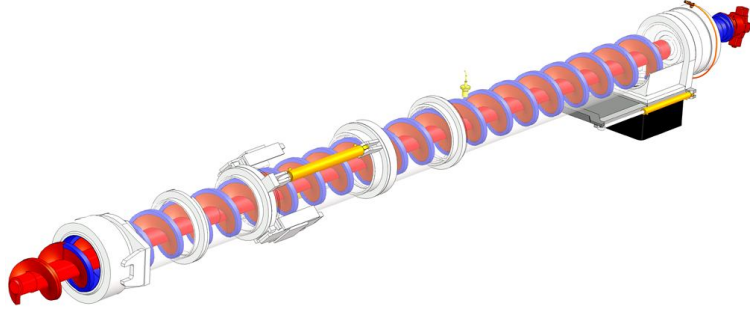
Çap	600 mm
Vida Hatvesi	450 mm
Tork %100 Emiş Hacminde Sürekli	58 kNm
Tork %0 Emiş Hacminde Sürekli	28 kNm
Devir %100 Emiş Hacminde	22 dev/dak
Devir %0 Emiş Hacminde	46 dev/dak
Maksimum Çalışma Basıncı	3,6 Bar

Vida konveyöre gerekli su ve bentoniti temin edecek püskürtücüler vida konveyör borusuna monte edilmiştir. Enjekte edilecek su ve ya bentonit, kazılmış malzemenin taşınmasını kolaylaştıracak, bir nevi yağlama işlevi görecektir. Vida konveyörün içindeki zemin basıncının ölçülmesi vida konveyördeki basınç algılayıcılar sayesinde yapılmaktadır. Basınç algılayıcılarından elde edilen basınç değerleri kontrol kabinine, kazı bölümündeki basınçla karşılaştırılmak üzere iletilir. Vida konveyörün çalışmasını elektrik motoru sağlar. Bu elektrik motorunun teknik özellikleri Çizelge 3.11'de verildiği gibidir [21].

Çizelge 3.11 : Vida konveyör elektrik motoru özellikleri [21].

Güç	160 kW
Devir	1500 dev/dak
Voltaj	400 V

Vida konveyör teleskobik olarak dizayn edilmiştir. Bu sayede gerektiği gibi uzatılabilir veya kısaltılabilir. Vida konveyör parçaları temizleme işlemleri için sökülebilir ve birleştirilebilir [21]. Vida konveyörün görünüşü Şekil 3.8'deki gibidir.



Şekil 3.8 : Vida konveyörün görünüşü [21].

Vida konveyörden çıkan malzeme bant konveyöre dökülür. Bant konveyör gelen malzemeyi TBM'in dışına çıkarır ve pasa taşıma arabalarına döker. Bant konveyörün teknik özellikleri Çizelge 3.12'de verilmiştir.

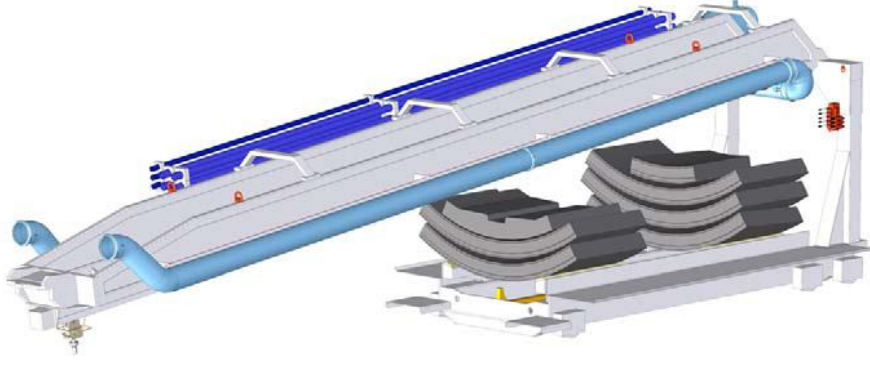
Çizelge 3.12 : Bant konveyörün teknik özellikleri [21].

Bant Hızı	1.5 m/sn
Bant Genişliği	600 mm
Taşıma Kapasitesi	150 m ³ /saat
Motor Gücü	11 kW

3.4.7.3 Kuyruk sistemi

Kuyruk sistemi toplamda yedi adet kuyruk arabasının birbirine, vagon sistemindeki gibi arka arkaya bağlanmasından oluşmaktadır. Bu kuyruk arabalarında tünel kazısı için gerekli olan ekipmanlar bulunmaktadır. Kuyruk arabaları kendileri için döşenen raylar üzerinde hareket etmektedirler. Her kuyruk arabasının orta kısmında malzeme geçişi için boşluk yaratacak pasajlar bulunur. Bu pasajlardan segman ve kazılmış malzeme geçişi sağlanır. Personelin kullanması için kuyruk arabalarının sol taraflarına kurulmuş olan köprüler mevcuttur.

TBM'i takip eden birinci kuyruk arabası segmanların idaresine tahsis edilmiştir. Birinci kuyruk arabasında segmanları hareket ettirip, erektöre taşınmasını sağlayan vinç sistemi bulunmaktadır. Şekil 3.9'da birinci kuyruk arabası resmedilmiştir [21].

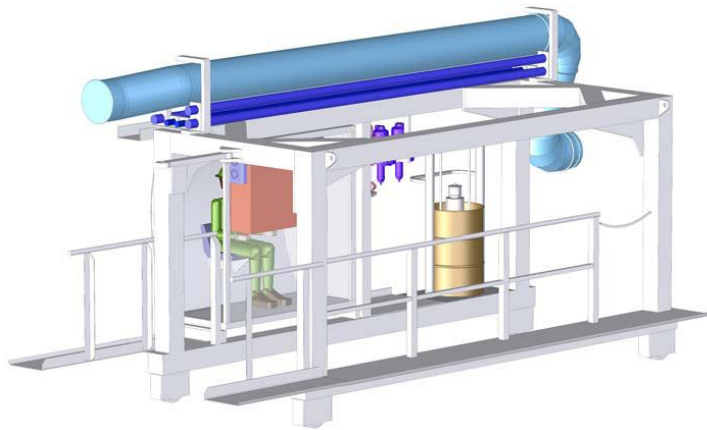


Şekil 3.9 : Birinci kuyruk arabasının görünüşü [21].

Kuyruk sisteminde ikinci sırada bulunan kuyruk arabasında TBM'in kontrol kabini bulunmaktadır. Kontrol kabininde TBM'in kazıyla ilgili ölçülen verilerinin bulunduğu ekranlarda gözlemler yapılabilmekte, ve bu gözlenen değerlere göre gerekli ayarlamalar yapılabilmektedir [21].

Ayrıca ikinci kuyruk arabasında kuyruk kalkanı için gerekli olan yağı tedarik etmekte kullanılan yağ pompası ve kazı işlemi için gerekli olan köpük santrali bulunmaktadır.

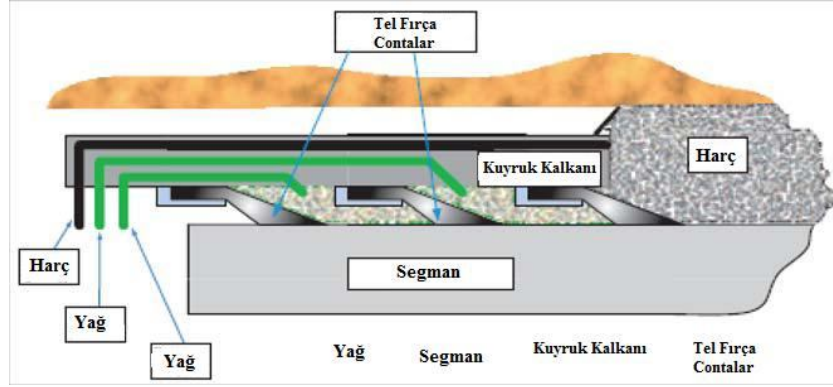
Kontrol kabininde tüm tünel ekipmanlarını yönlendirme imkanı bulunmakta ve onlardan gelen veriler ekranlardan gözlenebilmektedir. TBM üzerinde çeşitli yerlerde bulunan algılayıcılardan ölçülen değerler görsel olarak alınmaktadır. Ayrıca ölçülen basınçlar da kontrol kabininde bulunan basınç göstergelerinden takip edilebilmektedir. İkinci kuyruk arabası Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 : İkinci kuyruk arabasının görünüşü [21].

TBM'in kuyruk kısmında, segmanlardan meydana gelen ringin sızdırmazlığını ve TBM'in iç kısmına zemin ve su gelmemesini sağlamak için gerekli bileşen, ikinci kuyruk arabasındaki pompalar vasıtasıyla temin edilir. Pompalarla basılacak olan

bileşenin pompalanma hızı, zaman kontrollü ve basınç ayarlı olarak yapılabilmektedir. Bu sistem kontrol kabininden otomatik olarak sürdürülebileceği gibi, manuel olarak da kontrol edilebilir. Bu sisteme ek olarak kuyruk kalkanının arka kısmında sızdırmazlığı arttırmak için çap boyunca fırçalar bulunmaktadır. Bu şekilde TBM' in iç kısmına ve segmanların içerisine zemin ve su girişi önlenmiş olur. Kuyruk sızdırmazlık sistemi Şekil 3.11'de gösterildiği gibidir [21].

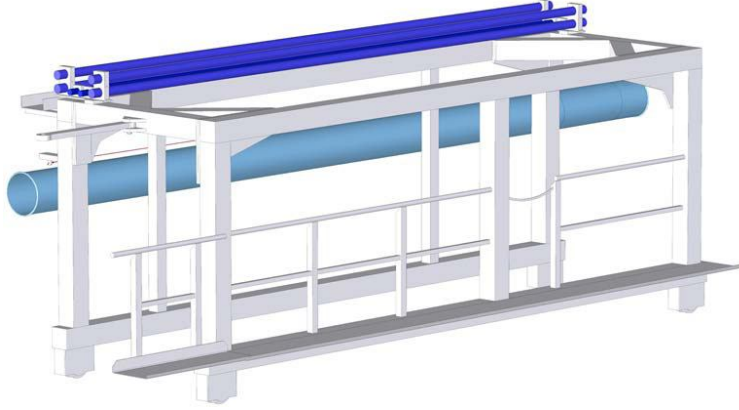


Şekil 3.11 : Kuyruk sızdırmazlık sistemi [21].

EPB TBM' de kazı işlemi için kullanılan köpüğün oluşturulması; mekanik olarak havanın, içerisinde katkı maddeleri bulunan ve köpüğü oluşturacak olan sıvı ile karıştırılması neticesinde gerçekleşmektedir. Suyu karışım ve sıvının yüzey aktif maddeyle birleşmesi TBM'in arka tarafında, kuyruk arabalarında gerçekleştirilir. Yüzey aktif madde, karşılıklı gelen sıvı hatlarından karıştırma tanklarına pompalanırken su da endüstriyel su hatlarından karıştırma tanklarına basılır. Su, karıştırma tankına basılırken akım ölçme cihazından geçer. Burada üretilen köpük TBM'in istenilen bölümlerine pompalanabilir. Kontrol edilebilir küresel valfler sayesinde TBM operatörü kontrol kabininden TBM'in belirli bölgelerine köpüğü enjekte edebilir. Bu bölümler; kesici kafa, kalkan sabitleyicileri ve vida konveyördür.

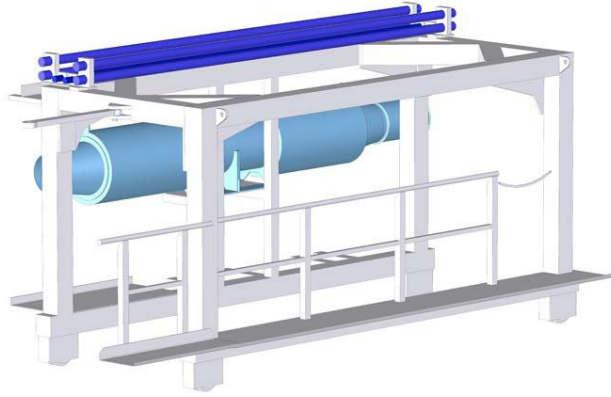
Köpüğün kıvamlaştırıcı madde olarak kullanımı EPB TBM'ler için kısmen uygundur. Köpüğün kıvam arttırıcı olarak kullanılması için kazı yapılacak zeminin aşırı heterojen ve yoğun özellikte olması gerekmektedir. EBP TBM'de kullanılan köpük sisteminin bileşenleri ise karıştırma tankı, sıvı kontrol ünitesi, sıkıştırılmış hava regülatörü, kompresör sistemi, köpük jeneratörleri, akım ölçüm ünitelerinden oluşmaktadır[21].

Kuyruk sisteminde bulunan üçüncü kuyruk arabası isteğe bağlı olup, çeşitli amaçlar için kullanılabilmektedir. Kazı için gerekli ufak boyutlu ekipmanlar bu kuyruk arabasında taşınabilmektedir. Üçüncü kuyruk arabası Şekil 3.12’deki gibidir [21]:



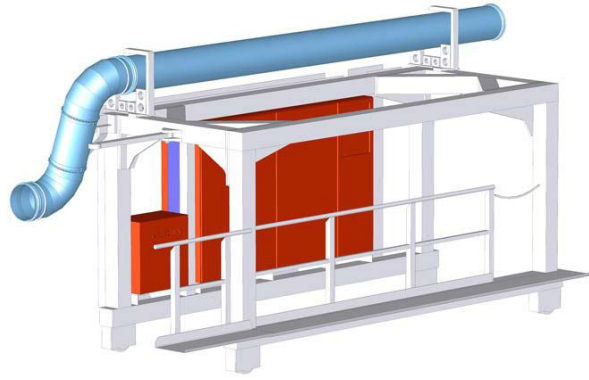
Şekil 3.12 : Üçüncü kuyruk arabasının görünüşü [21].

Kuyruk sisteminde mevcut olan dördüncü kuyruk arabasında tozsuzlaştırmayı sağlayan iki adet aksiyal fan mevcuttur. Bu aksiyal fanlar 7,50 kW’lık ikişer adet elektrik motoruyla çalışmaktadır. Her iki aksiyal fan da dakikada 2000 devir yapma kapasitesine sahiptir. Şekil 3.13’te dördüncü kuyruk arabası verilmiştir [21].



Şekil 3.13 : Dördüncü kuyruk arabasının görünüşü [21].

Kuyruk sisteminde bulunan beşinci kuyruk arabasında 30 kVA’lık transformatör bulunmaktadır. Bu arabada ayrıca TBM’in elektrik ana dağıtım panosu bulunmaktadır. Elektrik ana dağıtım panosu sayesinde transformatörden gelen elektrik TBM’in gerekli bölümlerine dağıtılır. Beşinci kuyruk arabasının görünüşü Şekil 3.14’te gösterildiği gibidir [21].

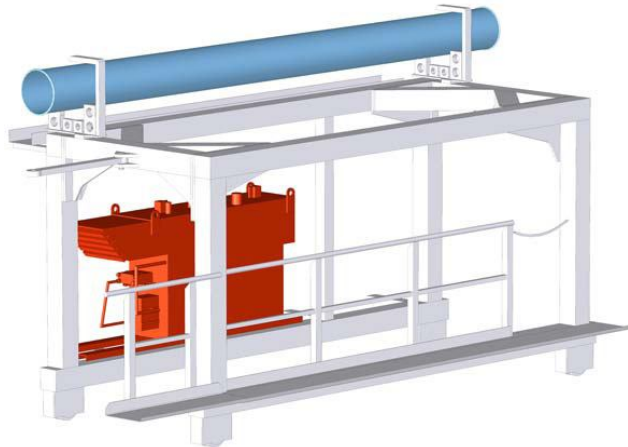


Şekil 3.14 : Beşinci kuyruk arabasının görünüşü [21].

Kuyruk sistemindeki altıncı kuyruk arabasında 1400kVA’lık transformatör bulunmaktadır. Bu transformatör sayesinde şantiyede bulunana ana trafodan gelen 10.000 V’luk elektrik akımı 400 V’a indirgenerek elektrik ana dağıtım panosuna iletilir. Transformatörün teknik özellikleri Çizelge 3.13’te verilmiştir. Altıncı kuyruk arabasının görünüşü Şekil 3.15’teki gibidir.

Çizelge 3.13 : Transformatör özellikleri [21].

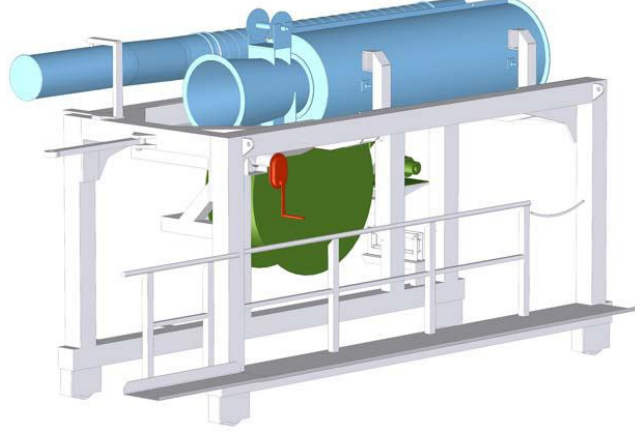
Güç	1400 kVa
Frekans	50 Hz
Giriş Voltajı	10000 V
Çıkış Voltajı	400 V



Şekil 3.15 : Altıncı kuyruk arabasının görünüşü [21].

Kuyruk sistemindeki yedinci kuyruk arabasında havalandırma kanalı ve elektrik kablusunun sarılabılmesine imkan sağlayan kablo tamburu mevcuttur. Kablo tamburuna 400 metrelik elektrik kablosu sarılabilmektedir. Tünel kazısı boyunca

elektrik dağıtımı için gerekli olan elektrik kabloları bu tamburda sarılmış durumda bulunan kablonun açılmasıyla elde edilmektedir [21]. Şekil 3.16’da yedinci kuyruk arabası verilmiştir.



Şekil 3.16 : Yedinci kuyruk arabasının görünümü [21].

4. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Avrupa Yakası 2. Kısım Atıksu tüneli inşasında kullanılan TBM'in performansına etki eden faktörler için makine göstergelerinden okunan veriler, performans ölçütlerinin analizi için vardiya raporları kullanılmıştır. Okunan veriler TBM çalışması sırasında yapılan şantiye ziyaretleri vasıtasıyla gerçekleşmiştir. Vardiya raporlarında ilerleme, kazı ve diğer işlerin süreleri, duraklama nedenleri ve sürelerine ilişkin bilgiler bulunmaktadır. TBM performans analizi makinenin etkin bir şekilde kullanılıp kullanılmadığını ortaya koyacaktır. Ayrıca makine performansını etkileyen ana olayların neler olduğu bulunacaktır. Analiz ileride yapılacak bu tarz projelerde gerekli olan bilgi birikiminin yapılabilmesi açısından önemlidir.

TBM kazısı sırasında Cerrahpaşa Hastahanesi altındaki fay zone ile formasyonun değiştiği gözlenmiş ve bu sebeple değişikliklerin gözlenebilmesi açısından makine performansı üç kısımda değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler S6 şaftı ile Cerrahpaşa Hastahanesi arasında bulunan Güngören formasyonu, S7 şaftı ile Cerrahpaşa Hastahanesi arasında bulunan Kuşdili formasyonu ve ikisinin arasında bulunan hastahanenin altına denk gelen Geçiş zonundan oluşmaktadır.

4.1 Gözlenen Parametrelerin Performansa Etkisi

4.1.1 TBM'in çalışması sırasındaki tork değerleri

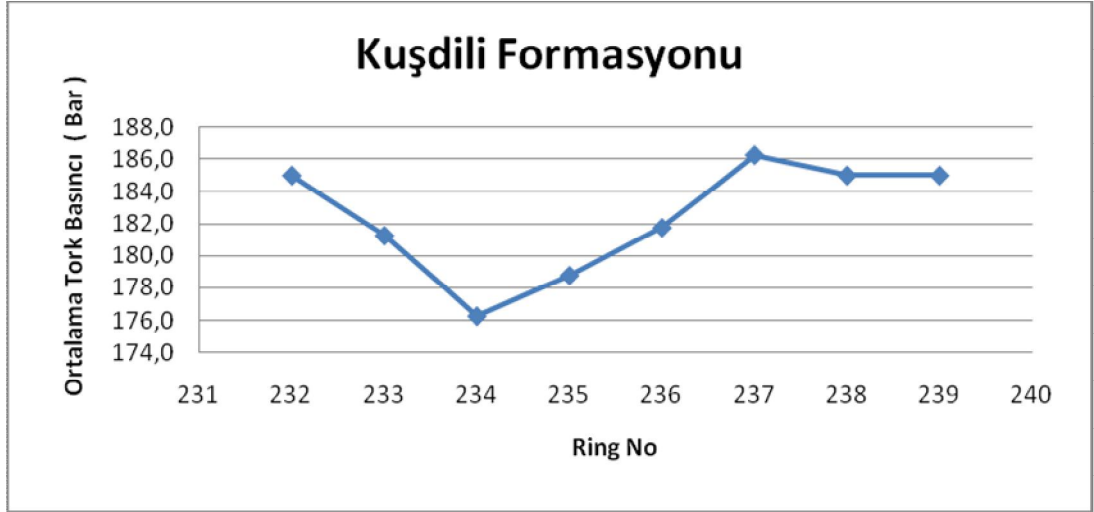
Toplanan veriler ile öncelikli olarak TBM'in kesici kafa tork dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır. Makine göstergelerinde okunan değerler bar cinsinden olması sebebiyle bu değerler kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de bu değerler verilmiştir.

Şekil 4.1'den görüldüğü üzere, tork değeriyle doğrudan ilişkili olan kesici kafa ortalama tork basıncı Kuşdili formasyonunda TBM ilerlemesi sırasında mukavemeti daha yüksek bir jeolojik birime denk geldiğinden ani bir basınç artışı gözlenmiştir.

Çizelge 4.1 : Gözlenen tork değerleri

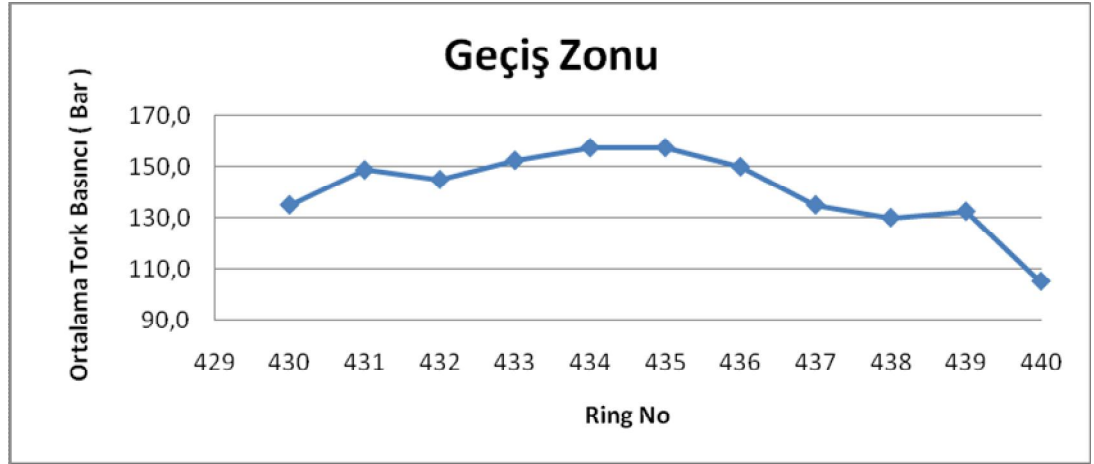
Ring No	Formasyon	Kafa Torku 1 (Bar)	Kafa Torku 2 (Bar)	Ortalama Kafa Torku (Bar)
232	Kuşdili	182,5	187,5	185,0
233	Kuşdili	175	187,5	181,3
234	Kuşdili	175	177,5	176,3
235	Kuşdili	180	177,5	178,8
236	Kuşdili	178,5	185	181,8
237	Kuşdili	182,5	190	186,3
238	Kuşdili	182,5	187,5	185,0
239	Kuşdili	182,5	187,5	185,0
430	Geçiş Zonu	140	130	135,0
431	Geçiş Zonu	152,5	145	148,8
432	Geçiş Zonu	155	135	145,0
433	Geçiş Zonu	160	145	152,5
434	Geçiş Zonu	165	150	157,5
435	Geçiş Zonu	165	150	157,5
436	Geçiş Zonu	155	145	150,0
437	Geçiş Zonu	140	130	135,0
438	Geçiş Zonu	135	125	130,0
439	Geçiş Zonu	140	125	132,5
440	Geçiş Zonu	110	100	105,0
965	Güngören	174	177	175,5
966	Güngören	175	180	177,5
967	Güngören	176	180	178,0
968	Güngören	175	180	177,5
969	Güngören	184,5	186,6	185,6
970	Güngören	175	180	177,5

Şekil 4.1’den de görüldüğü üzere Kuşdili formasyonunda tork değerinin dalgalanması daha heterojen bir yapıya sahip Kuşdili formasyonunun TBM’in nispeten daha sert – sıkı bir yapıya denk gelmesi ile açıklanabilir.



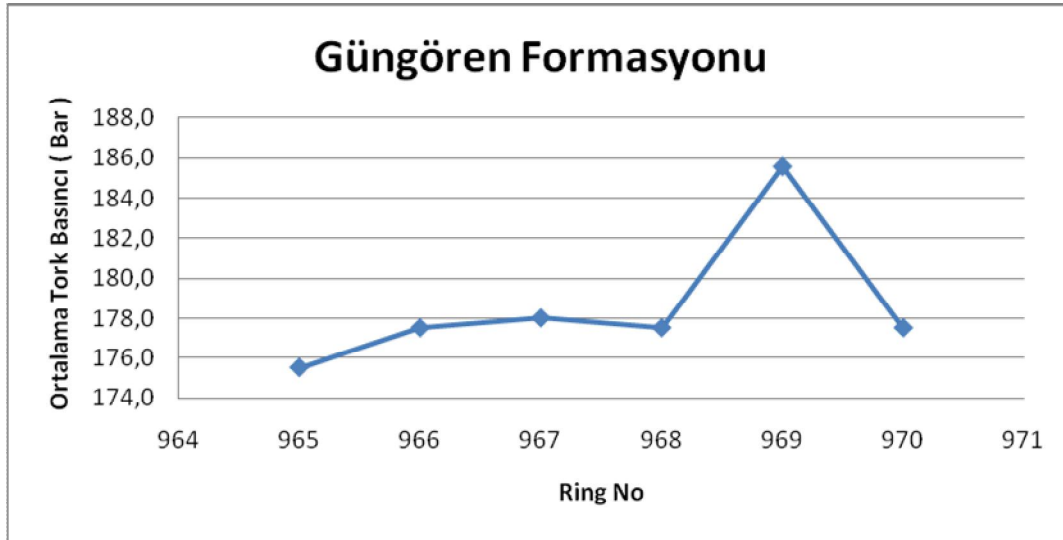
Şekil 4.1 : Kuşdili formasyonunda gözlenen tork değerinin değişimi

Cerrahpaşa Hastahanesinin alt kısmına geçiş zonunda ise bu değer genel olarak daha düşük olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.2). Bunun sebebi daha gevşek, daha düşük kohezyona sahip, su geliri daha yüksek, akışkan davranışa sahip olan zeminin daha düşük tork değeri gerektirmesidir



Şekil 4.2 : Geçiş zonunda gözlenen tork değerlerinin değişimi

Güngören formasyonunda ise daha az su geliri olması ve zemin şartlandırma koşullarının daha kolay sağlanması sonucu kafa ortalama tork basıncı nispeten daha uniform bir dağılıma sahiptir (Şekil 4.3). Formasyonda zaman zaman rastlanan tünel eksenine paralel uzanan yüksek mukavemete sahip kil ara kesmeleri sonucu kafa ortalama tork basıncında ani yükselmeler oluşmuştur.



Şekil 4.3 : Güngören formasyonunda gözlenen tork değerlerinin değişimi

4.1.2 Toplam itme kuvveti (baskı)

Toplam itme kuvveti gözlenen itme pistonu silindir basınç değerleri kullanılarak tayin edilmiştir. İtme piston çaplarının 210 mm olduğu makine teknik çizimleri vasıtasıyla elde edilmiş; bu bilgi kullanılarak her piston grubunun sahip olduğu basınç değerinin etki yüzeyi hesaplanarak, makinenin itme kuvveti kilonewton cinsinden Denklem 4.1 kullanılarak tayin edilmiştir:

$$\text{İtme Kuvveti} = (P_{\text{grup}} \times P_{\text{adet}}) \times ((0,21 / 2)^2 \times \pi \times 100) \quad (4.1)$$

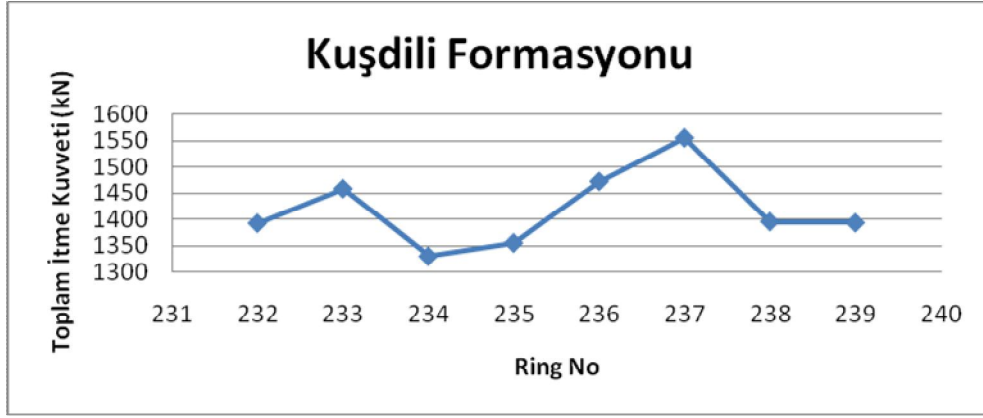
Denklem 4.1 oluşturulmuştur. Burada P_{grup} piston grubunda bulunan pistonların her birinin sahip olduğu eş değer basıncı ifade ederken, P_{adet} ise piston grubunda bulunan pistonları adet olarak ifade etmektedir. Çizelge 4.2’de hesaplanan itme kuvveti değerleri verilmiştir.

Şekil 4.4’ten görüldüğü üzere, Kuşdili formasyonunda su gelirinin fazla olması ile düşen kıvam sonucu, gereken ortalama itme kuvveti daha düşük olmuştur. Ayrıca gözlenen ani artış da nispeten daha heterojen dağılıma sahip formasyonda TBM kazısına devam ederken, daha sıkı – sert bir yapıyla karşılaşmasına bağlanabilir.

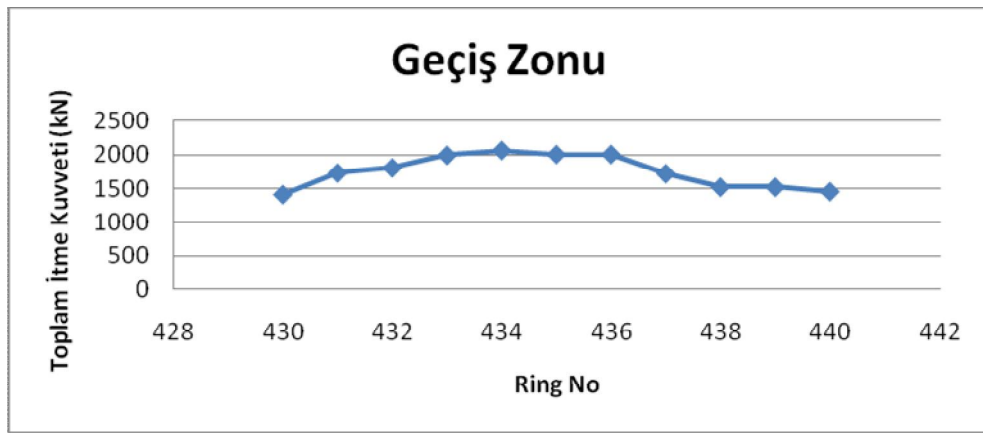
Çizelge 4.2 : Hesaplanan itme kuvveti (Baskı) değerleri

Ring No	Strok 12		Strok 16		Strok 8		Strok 4		İtme Basıncı (Bar)	İtme Kuvveti (kN)
	Bar	Adet	Bar	Adet	Bar	Adet	Bar	Adet		
232	100	3	74	4	44	4	124	5	1392	4821
233	112	3	65	4	88	4	102	5	1458	5050
234	102	3	85	4	56	4	92	5	1330	4607
235	97	3	74	4	77	4	92	5	1355	4693
236	121	3	88	4	58	4	105	5	1472	5098
237	124	3	78	4	74	4	115	5	1555	5386
238	105	3	72	4	58	4	112	5	1395	4832
239	115	3	79	4	68	4	92	5	1393	4825
430	100	3	74	4	49	4	124	5	1412	4891
431	130	3	84	4	70	4	145	5	1731	5996
432	120	3	84	4	110	4	134	5	1806	6255
433	135	3	102	4	140	4	124	5	1993	6903
434	135	3	120	4	140	4	124	5	2065	7152
435	131	3	112	4	140	4	121	5	2006	6948
436	131	3	112	4	140	4	121	5	2006	6948
437	111	3	92	4	130	4	100	5	1721	5961
438	95	3	82	4	102	4	100	5	1521	5268
439	95	3	82	4	102	4	100	5	1521	5268
440	84	3	82	4	100	4	95	5	1455	5040
965	96	3	78	4	116	4	102	5	1574	5452
966	102	3	96	4	89	4	100	5	1546	5355
967	110	3	70	4	88	4	102	5	1472	5098
968	78	3	100	4	102	4	89	5	1487	5150
969	102	3	29	4	92	4	86	5	1220	4226
970	102	3	65	4	112	4	88	5	1454	5036

Cerrahpaşa Hastahanesinin alt kısmına rastlayan geçiş zonunun nispeten kohezyonsuz olması ve bununla birlikte TBM’in ön kısmına daha fazla baskı gelmesi ve makinenin bu baskıyı karşılaması sonucu gözlenen ortalama itme kuvveti diğer formasyonlardakine nazaran daha yüksek olmasına yol açmıştır (Şekil 4.5).

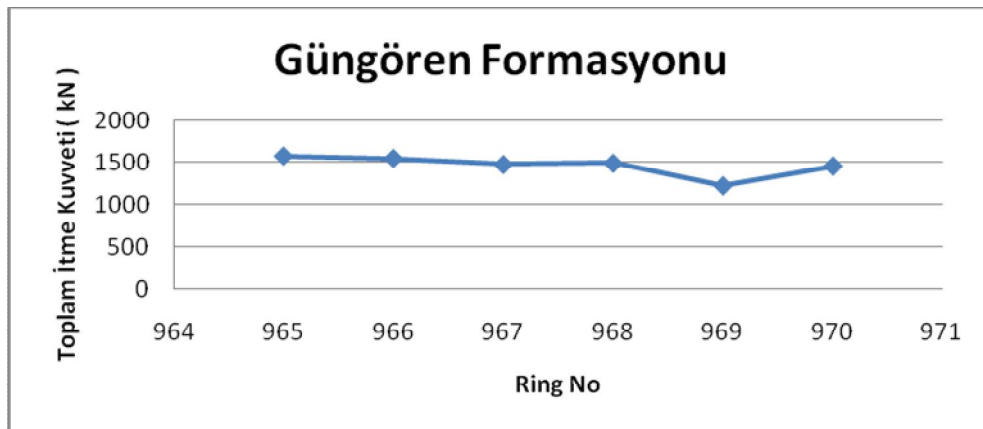


Şekil 4.4 : Toplam itme kuvvetinin Kuşdili formasyonunda değişimi



Şekil 4.5 : Toplam itme kuvvetinin Geçiş zonunda değişimi

Güngören Formasyonunda toplam itme kuvvetinde nispeten daha uniform bir dağılım gözlenmiş, fakat dağılıma bakıldığında su gelirinin Kuşdili formasyonuna göre daha az olması, dolayısıyla zemin kıvamının yüksek olması sonucu gerekli olan itme kuvveti daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Toplam itme kuvvetinin Güngören formasyonunda değişimi

4.1.3 İlerleme hızı ve penetrasyon değerlerinin hesaplanması

Makine performansı hakkında fikir edinebilmek amacıyla ilerleme hızı (mm/dak) ve kesici kafanın bir devirde yapmış olduğu penetrasyon (mm/devir) bulunmuştur. Bunun için Denklem 4.2 oluşturulmuştur:

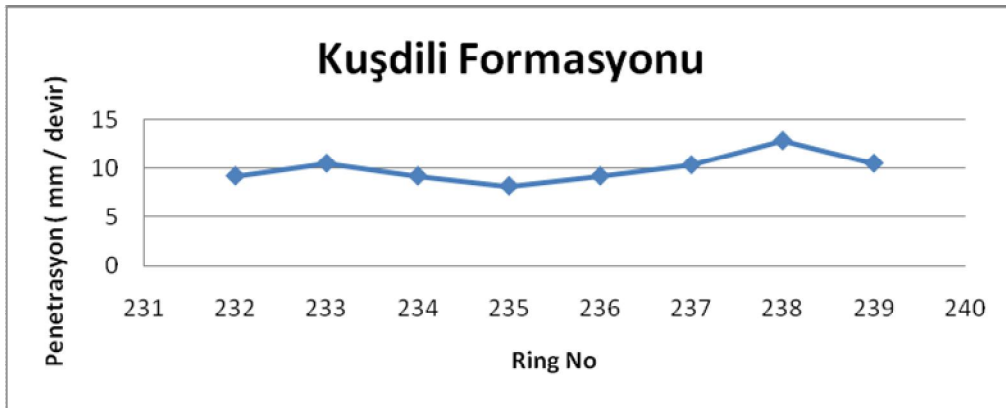
$$\text{Penetrasyon} = \text{İlerleme hızı} / \text{Dakikadaki devir sayısı} \quad (4.2)$$

Hesaplanan ilerleme hızı değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, Kuşdili formasyonunda TBM'in ilerlemesi sırasında nispeten daha sert – sıkı bir yapıya denk gelmesi ile penetrasyon oranı önce düşmüş, yapının geçilmesiyle de artmıştır.

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere Geçiş zonunun güzergah üzerindeki diğer jeolojik yapılara göre nispeten daha heterojen bir yapıya sahip olması ve gevşek yapılar ile bol bol bulunan daha sert – sıkı yapıların bu gevşek yapıların arasında ara kesme olarak bulunması sonucu penetrasyon oranında görüldüğü gibi (Şekil 4.8) ani dalgalanmalara yol açmıştır .

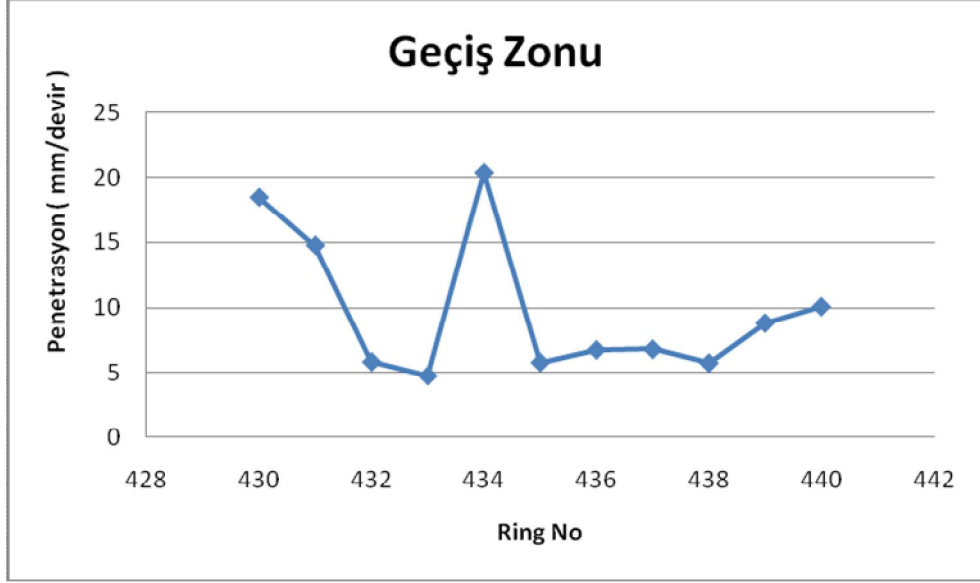
Şekil 4.9'da görüldüğü üzere Güngören formasyonunda su gelirinin az olmasına bağlı olarak kıvamın daha fazla olması ve bunun sonucu daha sıkı bir yapıda olmasına rağmen güzergah üzerindeki diğer formasyonlara göre nispeten daha homojen bir yapıda olması sebebiyle pek fazla dalgalanma gözlenmemiştir (Şekil 4.9).



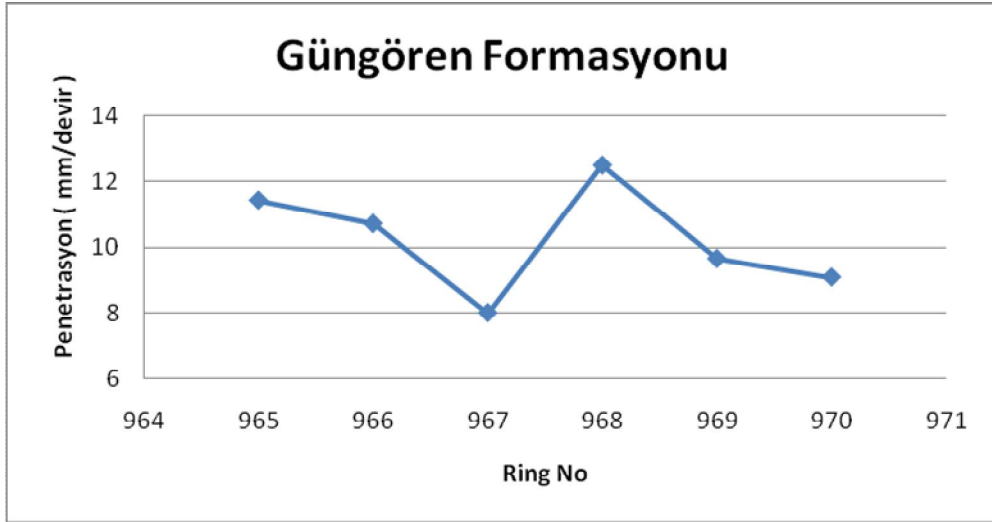
Şekil 4.7 : Kuşdili formasyonunda penetrasyon değerinin değişimi

Çizelge 4.3 : Hesaplanan penetrasyon ve ilerleme hızı değerleri

Ring No	Başlama Saati	Bitiş Saati	Dakika	İlerleme (mm)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Penetrasyon (mm/devir)
232	07:30	08:10	40	1200	30	9
233	08:55	09:30	35	1200	34	11
234	10:20	11:00	40	1200	30	9
235	11:35	12:10	45	1200	27	8
236	07:35	08:15	40	1200	30	9
237	08:55	09:30	35	1200	34	10
238	10:10	10:40	30	1200	40	13
239	11:30	12:05	35	1200	34	11
430	05:45	06:05	20	1200	60	18
431	06:35	07:00	25	1200	48	15
432	07:30	08:35	65	1200	18	6
433	10:30	11:55	85	1200	14	5
434	12:20	12:40	20	1200	60	20
435	14:00	15:10	70	1200	17	6
436	15:40	16:40	60	1200	20	7
437	17:10	18:05	55	1200	22	7
438	19:45	20:50	65	1200	18	6
439	21:35	22:15	40	1200	30	9
440	22:40	23:15	35	1200	34	10
965	07:45	08:15	30	1200	40	11
966	08:45	09:20	35	1200	34	11
967	09:45	10:35	50	1200	24	8
968	11:05	11:35	30	1200	40	13
969	13:15	13:50	35	1200	34	10
970	14:30	15:10	40	1200	30	9



Şekil 4.8 : Geçiş zonunda penetrasyon değerinin değişimi



Şekil 4.9 : Güngören formasyonunda penetrasyon değerinin değişimi

4.1.4 FER ve FIR değerlerinin hesaplanması

Göstergelerden okunan hava debisi, sıvı debisi yardımı ile köpük debisi hesaplanmış; ve bunun sonucunda köpük debisinin, sıvı debisine oranlanmasıyla FER; köpük debisinin, dakikada kazılan zemin hacmine oranlanmasıyla da FIR değerleri hesaplanmıştır. Gerekli olan zemin hacmi değerleri Çizelge 4.3 yardımıyla hesaplanmıştır. Çizelge 4.4’de hesaplanan FER ve kazı odası enjeksiyon oranları kullanılarak hesaplanan FIR değerleri görülmektedir.

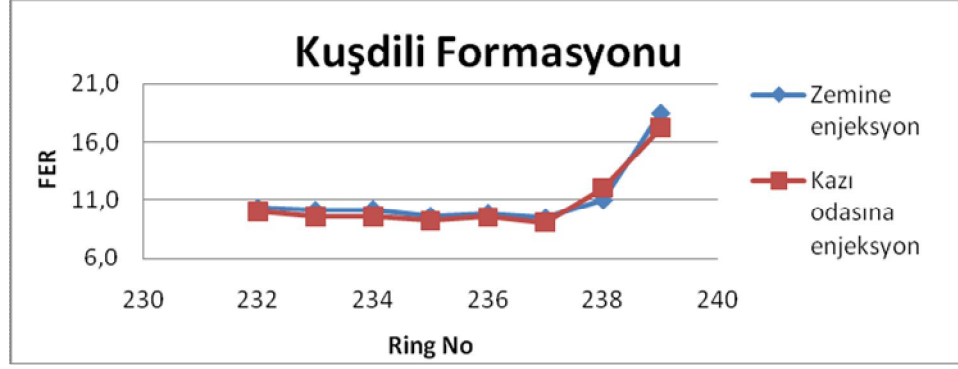
Çizelge 4.4 : Hesaplanan FER ve FIR değerleri

Ring No	Zemin					Kazı Odası					FIR (%)
	Ortalama Hava Debisi (lt/dak)	Ortalama Sıvı Debisi (lt/dak)	Ortalama Köpük Debisi (lt/dak)	Köpük Basıncı (Bar)	FER	Ortalama Hava Debisi (lt/dak)	Ortalama Sıvı Debisi (lt/dak)	Ortalama Köpük Debisi (lt/dak)	Köpük Basıncı (Bar)	FER	
232	380,3	41,0	421,3	1,1	10,3	378,2	42,2	420,4	1,2	10,0	85,8
233	382,8	42,2	425,0	1,1	10,1	380,0	44,6	424,6	1,1	9,5	75,8
234	376,2	41,1	417,3	1,1	10,2	377,2	44,2	421,4	1,2	9,5	86,0
235	380,6	44,6	425,2	1,1	9,5	379,9	46,5	426,4	1,1	9,2	97,9
236	379,2	43,0	422,2	1,1	9,8	382,8	45,0	427,8	1,2	9,5	87,3
237	378,2	45,1	423,3	1,1	9,4	375,0	46,6	421,6	1,2	9,0	75,3
238	388,8	39,0	427,8	1,0	11,0	392,2	35,6	427,8	1,2	12,0	65,5
239	388,8	22,3	411,1	1,0	18,4	392,2	24,2	416,4	1,1	17,2	74,4
430	382,0	35,3	417,3	1,1	11,8	381,8	38,1	419,9	1,2	11,0	42,9
431	382,0	42,0	424,0	1,1	10,1	381,8	38,1	419,9	1,2	11,0	53,6
432	400,0	50,0	450,0	1,2	9,0	381,8	38,1	419,9	1,2	11,0	139,3
433	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	199,5
434	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	46,9
435	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	164,3
436	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	140,8
437	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	400,0	60,0	460,0	1,2	7,7	129,1
438	375,0	50,0	425,0	1,1	8,5	366,0	45,0	411,0	1,1	9,1	136,3
439	383,0	45,0	428,0	1,1	9,5	368,0	42,0	410,0	1,1	9,8	83,7
440	383,0	45,0	428,0	1,1	9,5	368,0	42,0	410,0	1,1	9,8	73,2
965	375,7	42,9	418,6	1,1	9,8	383,2	43,5	426,7	1,2	9,8	65,3
966	377,1	50,1	427,2	1,1	8,5	377,0	48,8	425,8	1,2	8,7	76,0
967	376,2	48,8	425,0	1,1	8,7	425,7	44,6	470,3	1,3	10,5	120,0
968	379,9	44,5	424,4	1,1	9,5	381,2	45,2	426,4	1,2	9,4	65,3
969	385,3	42,2	427,5	1,2	10,1	390,5	48,1	438,6	1,8	9,1	78,3
970	380,8	40,2	421,0	1,1	10,5	381,8	44,6	426,4	1,2	9,6	87,0

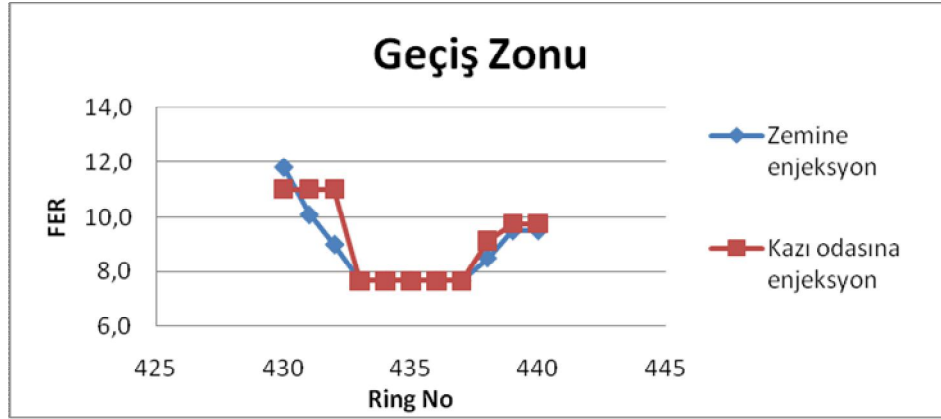
Şekil 4.10'dan da görüleceği üzere, Kuşdili formasyonunda FER oranı genel olarak uniform bir dağılım izlemektedir. Nispeten mukavemeti yüksek kısım geçildikten sonra aynadan gelen baskının azalmasıyla FER değeri yükselmiştir.

Cerrahpaşa Hastahanesinin alt kısmına rastlayan geçiş zonunda, akışkan bir davranış gösteren zeminin ve su basıncının yaptığı baskının yüksek olması sonucu FER değeri de düşük olarak gözlenmiştir (Şekil 4.11).

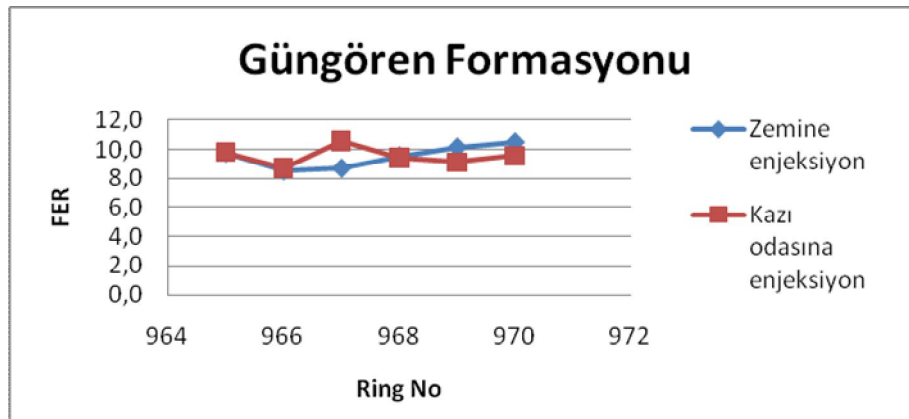
Güngören Formasyonunda ise; su gelirinin nispeten daha az olması, zeminden gelen baskının ilerlemeye nispeten daha az değişmesi sonucu FER değeri daha az değişim göstermiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.10 : Kuşdili formasyonunda, zemine ve kazı odasına yapılan köpük enjeksiyonunun FER değeri değişimi



Şekil 4.11 : Geçiş zonunda zemine ve kazı odasına yapılan köpük enjeksiyonunun FER değeri değişimi



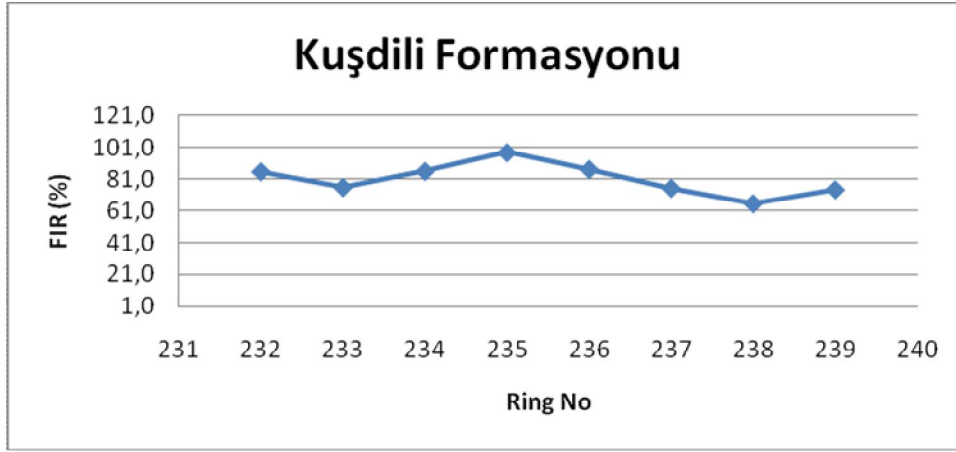
Şekil 4.12 : Güngören formasyonunda zemine ve kazı odasına yapılan köpük enjeksiyonunun FER değeri değişimi

Genel olarak hesaplanan FIR değerleri yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni uygulama sırasında da gözlenen gerekenden çok daha fazla köpük basılmasıdır. Normalde, FIR

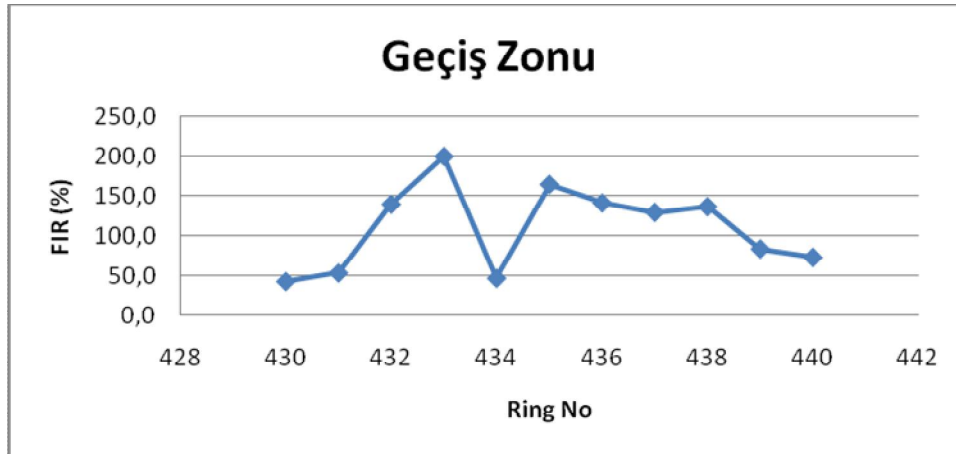
değeri %10 ile %80 değerleri arasında; çoğu durumdaysa %30 ile %60 arasında değişmektedir [22].

Şekil 4.13'ten ve Şekil 4.14'ten de görüleceği üzere, Kuşdili formasyonun kazısında gözlenen FIR değeri, Güngören formasyonunda gözlenen değerden biraz daha düşüktür. Bunun nedeni kuşdili formasyonunun su içeriğinin fazla olması sonucu köpüğün bu formasyona daha az nüfuz etmesidir.

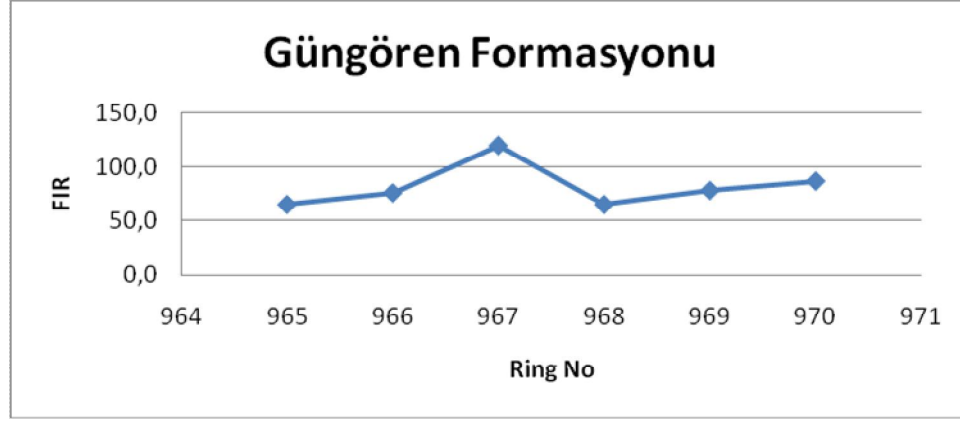
Şekil 4.15'te görüldüğü üzere, Cerrahpaşa Hastahanesi'nin alt kısmına rastlayan Geçiş zonunda ise, faylanmaya bağlı olarak biriken farklı malzemelerin olması ve aşırı su geliri neticesinde, ilerlemeye bağlı FIR değerlerinde dalgalanmalar gözlenmiştir.



Şekil 4.13 : Kuşdili formasyonunda FIR değeri değişimi



Şekil 4.14 : Güngören formasyonunda FIR değeri değişimi



Şekil 4.15 : Geçiş zonunda FIR değeri değişimi

4.1.5 Hesaplanan performans parametrelerinin karşılaştırılması

Avrupa Yakası İkinci Kısım Yenikapı Atıksu Projesi kazı çalışmaları sırasında Cerrahpaşa Hastahanesi altında bir fay zonuna rastlanması ve bunun sonucunda kazı işlemlerinin sekteye uğraması, geçiş zonunda karşılaşılan zorlu jeolojik şartlar altında TBM performansına etki eden parametrelerin birbirleriyle karşılaştırılması ve bunların birbirleriyle etkileşiminin ne ölçüde olacağının karşılaştırılması incelenecektir. Bununla birlikte diğer jeolojik koşullarda da aralarında ilişki bulunan parametrelerin gözlemlerine de yer verilecektir.

Geçiş zonunda karşılaşılan zemin şartları, tünel kesitinin üst kısımlarından aşırı derecede su geliri olması ile bunun sonucunda zeminin akıcı sınırlara ulaşması; ve özellikle tünel ekseninin üst kısımlarında neredeyse zeminin kohezyonsuz davranışı sonucu oluşan deformasyonlar olarak özetlenebilir. Karşılaşılan şartların tünel eksenine paralel yapılmış olan sondajlardan elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.5'te listelenmiştir.

Çizelge 4.5 : Geçiş zonundaki jeolojinin jeomekanik özellikleri [19].

Zemin Kotu (m)	GH-17 Sondajı (SPT-N ₃₀)	Su İçeriği (%)	LL	PL	PI	USCS
-7,5	8	-	-	-	-	-
-9	33	-	-	-	-	-
-10,5	39	27,13	60,9	29,6	31,3	CH

Mevcut verilerin birbirleriyle ilişki derecelerinin karşılaştırılması amacıyla, “Microsoft Office Excell 2007” programı yardımıyla korelasyon katsayısı, R^2 değeri hesaplanmıştır. Korelasyon katsayısı değeri için yapılabilecek yorumlar Çizelge

4.6’da listelenmiştir. Ancak şu da belirtilmelidir ki bir istatistiksel ilişkinin anlamlılığını belirlemeye yönelik hipotez testleri de bulunmaktadır.

Çizelge 4.6 : Korelasyon katsayısı yorumları [23]

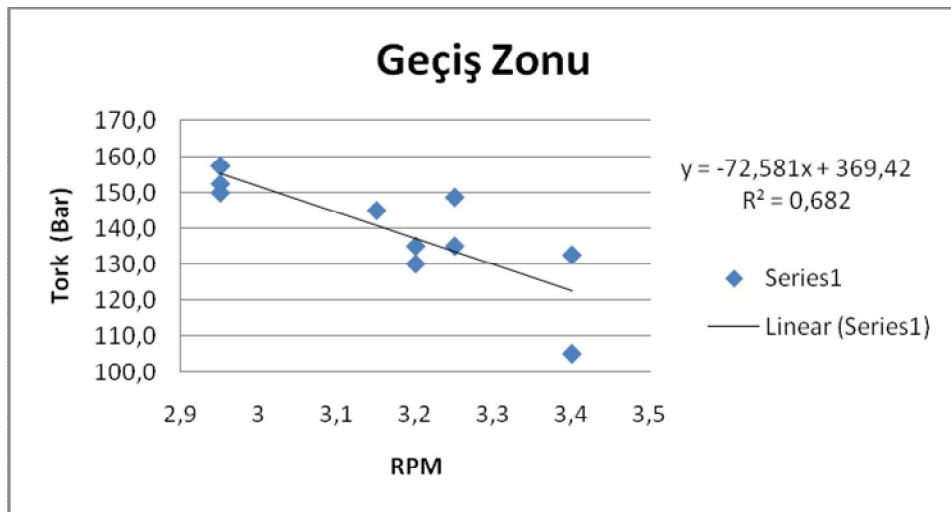
R^2	Değerlendirme
$< 0,25$	İlişki yok
0,25-0,50	Düşük derecede ilişki
0,50-0,65	Orta derecede ilişki
0,65-0,80	iyi derecede ilişki
$>0,80$	Mükemmel derecede ilişki

4.1.5.1 Tork ile RPM değeri karşılaştırması

Tork değeri ile RPM değerinin birbiri ile ters orantıya sahip olduğu bilinmektedir [3]. Bu amaçla bu değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 4.16’da görüldüğü üzere RPM değeri ile Tork değeri arasında $R^2=0,682$ değeri ile doğrusal olarak orta dereceli ilişki bulunmaktadır. Bunun sonucunda kesici kafanın homojen bir zeminle karşılaşmaması ile kesici kafanın karşılaştığı zemin mukavemeti kafa üzerinde uniform bir dağılım göstermemesi sonucu, RPM ile tork arasındaki ilişkinin yeterince ortaya konulamadığı gözlenmiştir. RPM ile tork değerleri birbirleri ile ters orantılıdır [3]. Beklenen ilişki gözlenmiştir.

Kuşdili ve Güngören formasyonlarında RPM ile tork değerleri arasında bir ilişki gözlenmemiştir.

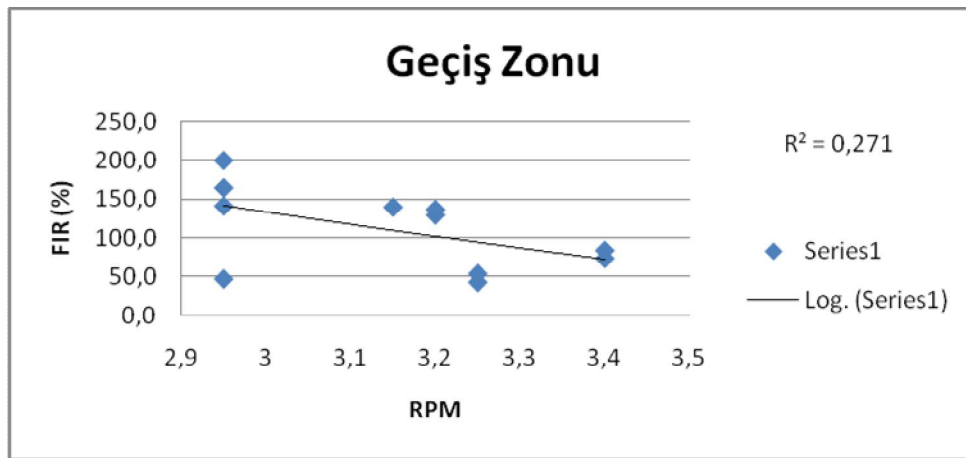


Şekil 4.16 : Geçiş zonunda tork ile RPM arasındaki ilişki

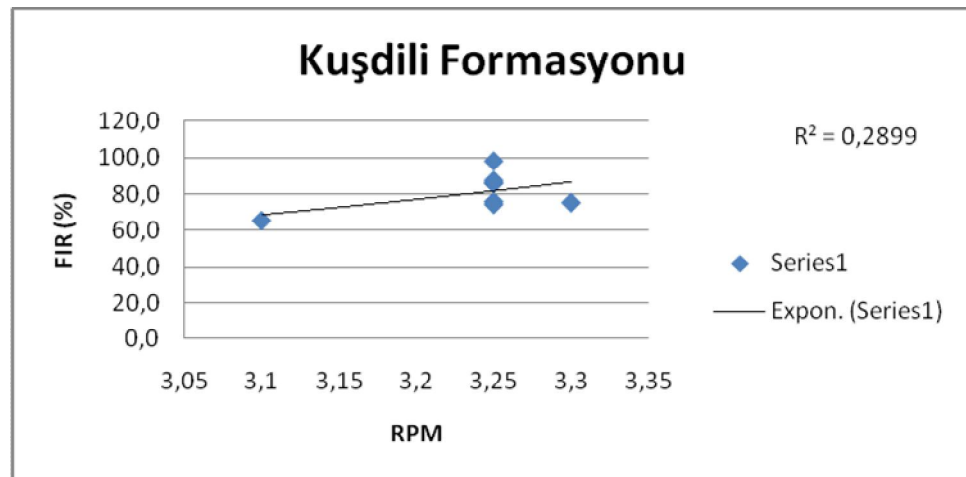
4.1.5.2 RPM ile FIR değerlerinin karşılaştırılması

Tork değeri ile zemin koşulları arasında bir ilişki bulunmaktadır, gözlem yapılırken tork ile zemin koşulları arasında ilişki gözlenmemesi olasılığı sebebiyle aralarında ilişki bulunan tork değeri ile RPM değerinden yola çıkılarak; RPM ile FIR değerleri arası ilişki gözlenmeye çalışılmıştır.

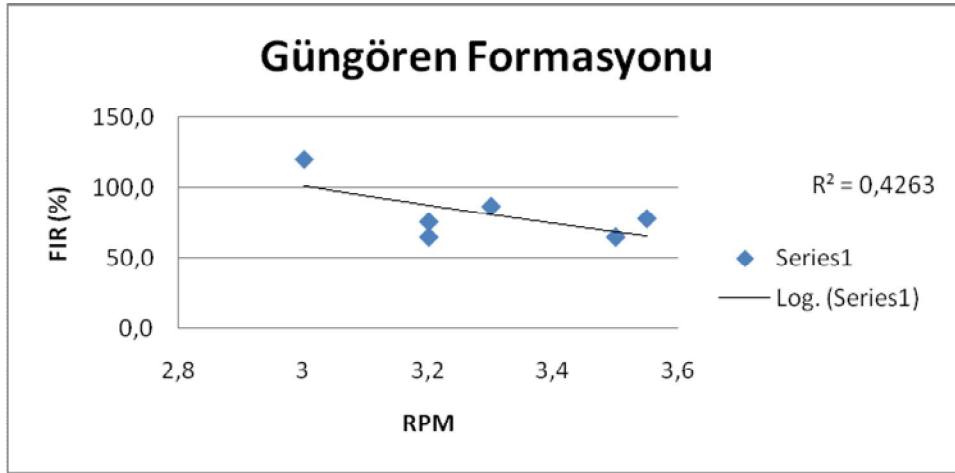
Şekil 4.17’de görüldüğü üzere Geçiş zonunda, RPM değeri ile FIR değeri arasında düşük dereceli bir ilişki bulunmaktadır. Şekil 4.18, 4.19, 4.20’den de görüldüğü üzere Kuşdili, Güngören formasyonlarında ve Tüm güzergah jeolojisinde FIR değeri ile RPM değeri arasında düşük dereceli ilişkiler gözlenmiştir.



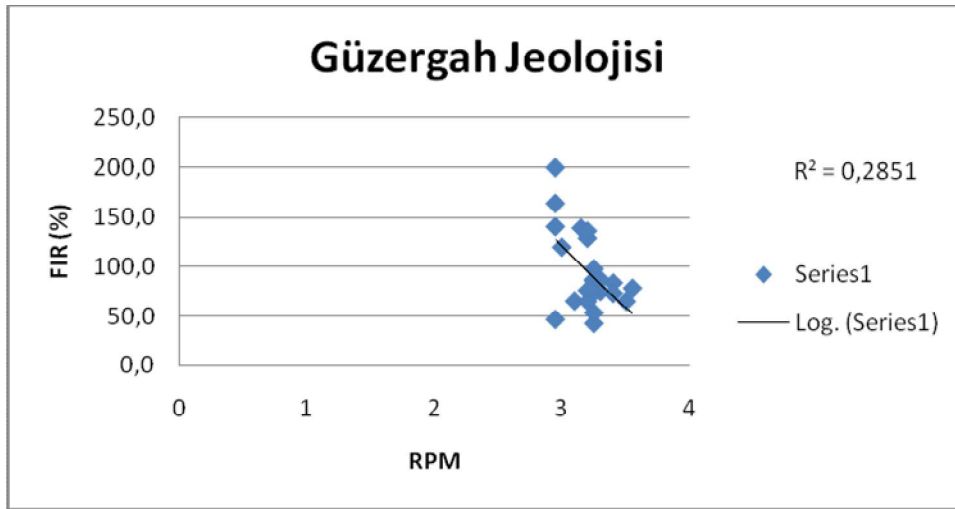
Şekil 4.17 : Geçiş zonunda FIR değeri ile RPM değeri arasındaki ilişki



Şekil 4.18 : Kuşdili formasyonunda RPM ve FIR değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.19 : Güngören formasyonunda RPM ve FIR değerleri arasındaki ilişki



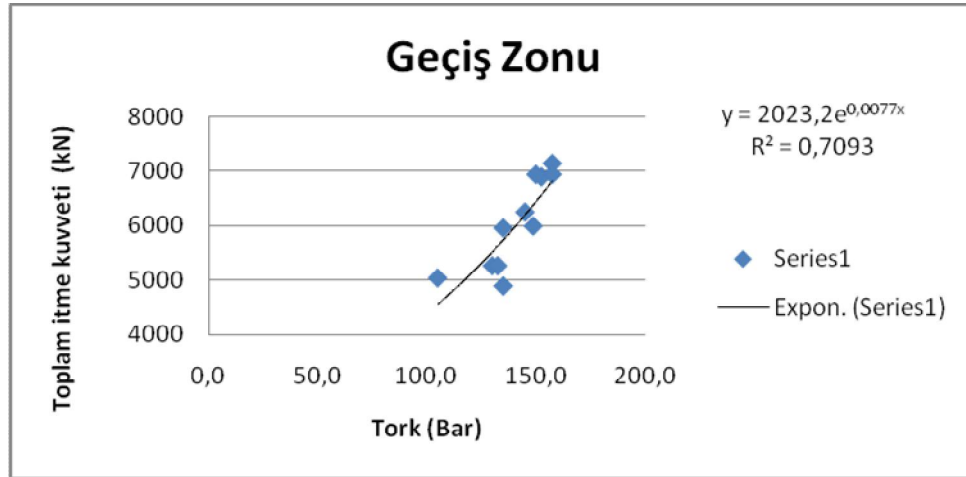
Şekil 4.20 : Tüm tünel güzergah jeolojisinde RPM ve FIR değerleri arasındaki ilişki

4.1.5.3 Tork ile toplam itme kuvveti karşılaştırması

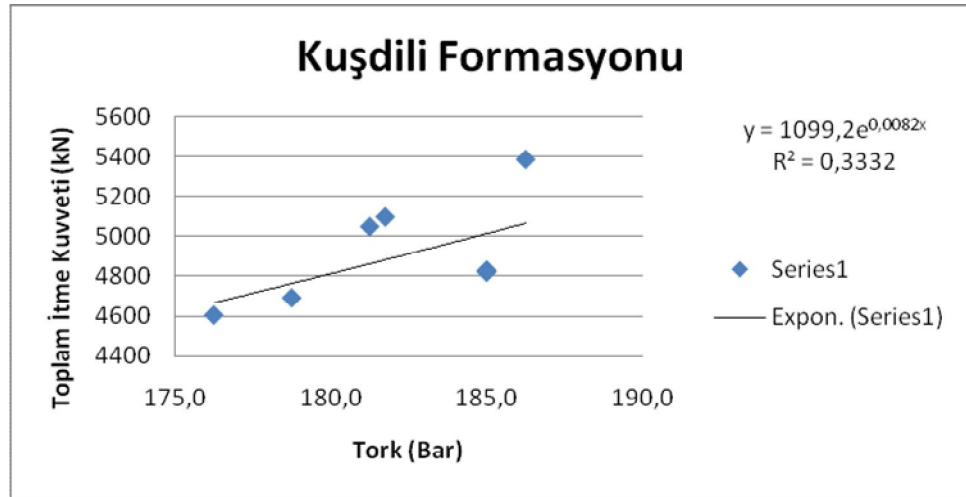
Tork değeri ile toplam itme kuvveti makine güç ihtiyacını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple aralarındaki ilişki gözlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 4.21'den de görüldüğü üzere Geçiş zonunda RPM değeri ile Tork değeri arasında, $R^2=0,709$ değeri ile iyi dereceli üstel bir ilişki bulunmaktadır.

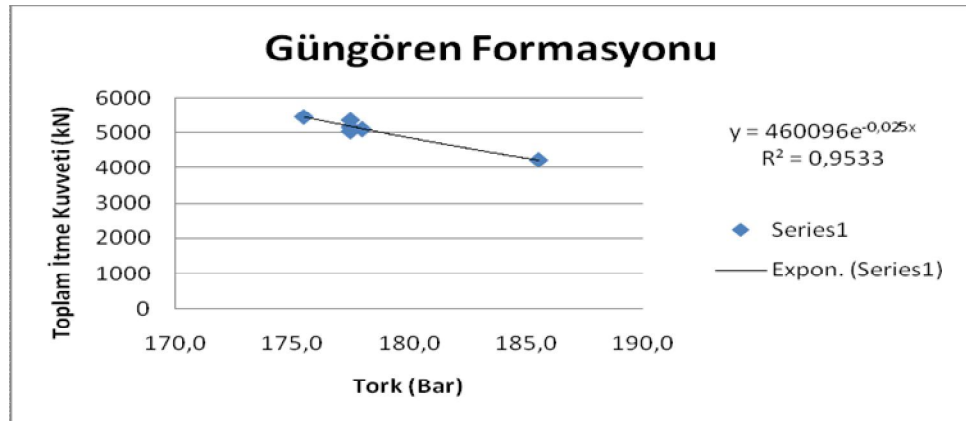
Şekil 4.22'den de görüldüğü üzere, Kuşdili formasyonunda toplam itme kuvveti ile tork değeri arasında düşük dereceli bir ilişki gözlenmiştir.



Şekil 4.21 : Geçiş zonunda tork ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki



Şekil 4.22 : Kuşdili formasyonunda tork ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki



Şekil 4.23 : Güngören formasyonunda tork ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki

Şekil 4.23'ten görüldüğü üzere Güngören formasyonunda ise toplam itme kuvveti ile tork değeri arasında mükemmel dereceli ve diğer formasyonların aksine bir ters orantılı ilişki gözlenmiştir; ancak burada veri sayısının az olduğu da belirtilmelidir.

Tüm güzergahı kapsayan jeolojide ise toplam itme kuvveti ile tork değeri arasında hiçbir ilişki gözlenmemiştir.

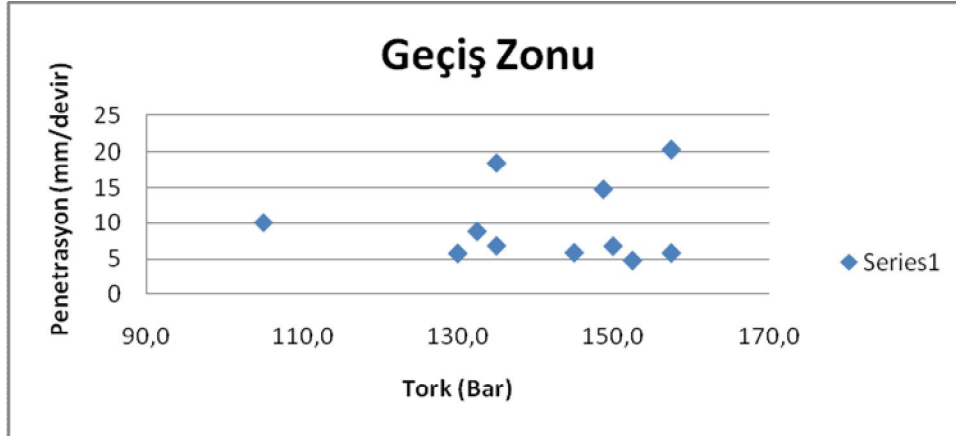
4.1.5.4 Tork ile penetrasyon değeri karşılaştırılması

Penetrasyon değerinin artmasıyla gereken tork değerinin artacağı düşünülmüş ve bu amaçla aralarındaki ilişki araştırılmıştır.

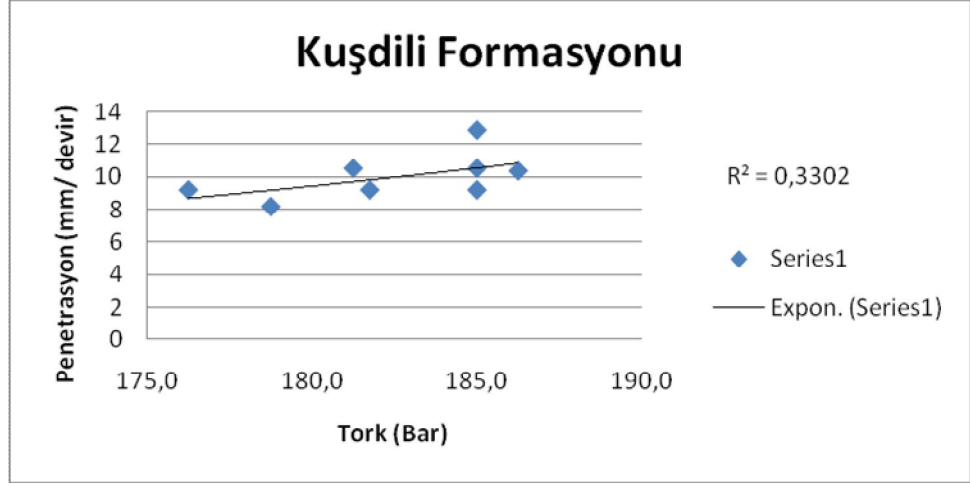
Şekil 4.24'ten görüldüğü üzere penetrasyon değeri ile; tork değeri arasında doğrudan ilişki bulunan kesici kafa ortalama döndürme basıncı arasında, $R^2 = 0,004$ değeri ile ilişki bulunmamaktadır.

Şekil 4.25'te görüldüğü üzere, Kuşdili formasyonunda penetrasyon değeri ile tork değeri arasında düşük dereceli bir ilişki gözlenmiştir.

Güngören formasyonunda ve tüm tünel güzergahında ise herhangi bir ilişki gözlenmemiştir.



Şekil 4.24 : Geçiş zonunda tork ile penetrasyon arasındaki ilişki

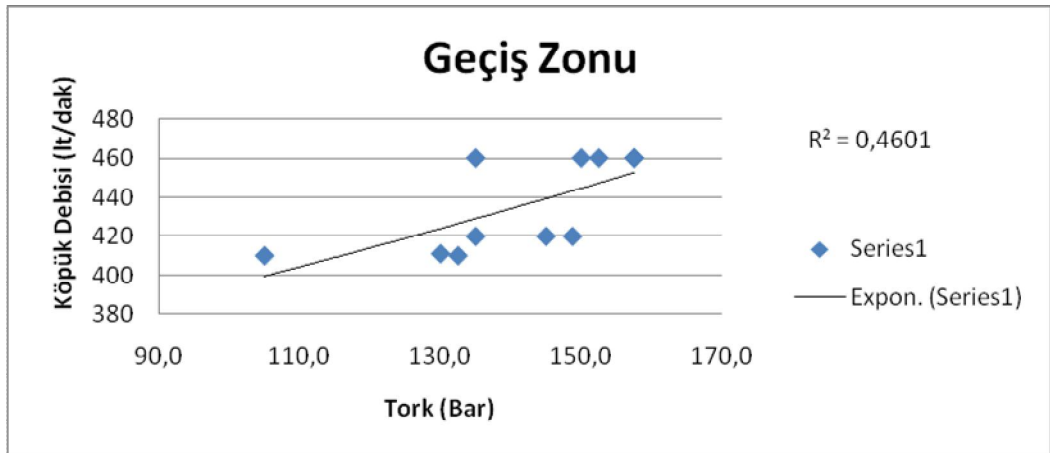


Şekil 4.25 : Kuşdili formasyonunda penetrasyon değeri ile tork değeri arasındaki ilişki

4.1.5.5 Tork ile kazı odasına enjekte edilen köpük miktarının karşılaştırılması

Tork değerinin kazı odasında bulunan pasanın hareketini sağlamak zorunda olması [5] ve pasanın kıvamını doğrudan etkileyen köpüğün miktarının, gerekli olan tork ihtiyacını etkileyip etkilemediği araştırılmıştır.

Şekil 4.26’da görüldüğü üzere Geçiş zonunda kazı odasına verilen köpük miktarı ile tork değeri arasında doğrudan ilişki bulunan kesici kafa tork basıncı arasında, $R^2 = 0,46$ değeri ile düşük dereceli üstel bir ilişki bulunmaktadır. Bunun sonucunda yüksek su gelirine sahip olan zeminlerde, zemin koşullandırmasının gereklerinin sürekli değişmesi sonucu kazı odasında ayna basıncını karşılamak üzere depolanan pasanın, kesici kafanın dönme momenti üzerindeki etkisi yeterince belirgin olamadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.26 : Geçiş zonunda tork ile kazı odasına enjekte edilen köpük debisinin karşılaştırılması

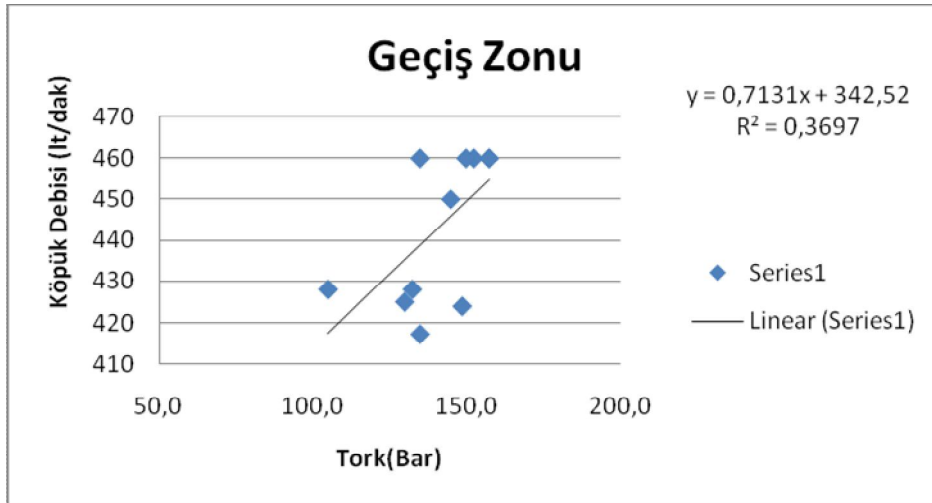
Kuşdili formasyonunda, Güngören formasyonu ve toplam tünel güzergah jeolojisinde ise tork ile kazı odasına enjekte edilen köpük miktarı arasında herhangi bir ilişki gözlenmemiştir. Köpük miktarının artmasıyla tork değerinin düşmesi gerekirken, gözlenen köpük miktarının artmasıyla birlikte tork değerinin arttığı görülmüştür. Bu konuda diğer parametrelerin de torka etkisi ayrıca araştırılmalıdır.

4.1.5.6 Tork ile zemine enjekte edilen köpük miktarının karşılaştırılması

Kesici kafanın üzerine etkiyen radyal kuvvetlerden olan kesme ve sürtünme kuvvetleriyle orantılı olan tork değeri ve zemine verilen köpük miktarının aralarındaki değişimin gözlenmesi gerektiği düşünülmüştür.

Şekil 4.27’de görüldüğü üzere Geçiş zonunda zemine verilen köpük miktarı ile kesici kafa ortalama tork basıncı arasında, $R^2 = 0,36$ değeri ile düşük dereceli doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bunun sonucunda nispeten akışkan özelliklere sahip zeminlerde su gelirin fazla olması ile köpüğün zemine yeterince nüfuz edememesi sonucu, daha fazla köpük basılması gerektiği gözükse de, gerekli olan tork değerinin düşmesi her zaman mümkün olmadığı görülmektedir.

Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu ve tüm tünel güzergahı jeolojisinde (Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu ve Geçiş formasyonlarının tamamı) ise herhangi bir ilişki gözlenmemiştir.



Şekil 4.27 : Geçiş zonunda tork ile zemine enjekte edilen köpük debisinin karşılaştırılması

Uygun zemin şartlandırma koşulları ile tork değerinin düşmesi gerekirken, gözlenen bu durumun tam tersi olmuştur. Bu konuda diğer parametrelerin de torka etkisi ayrıca araştırılmalıdır.

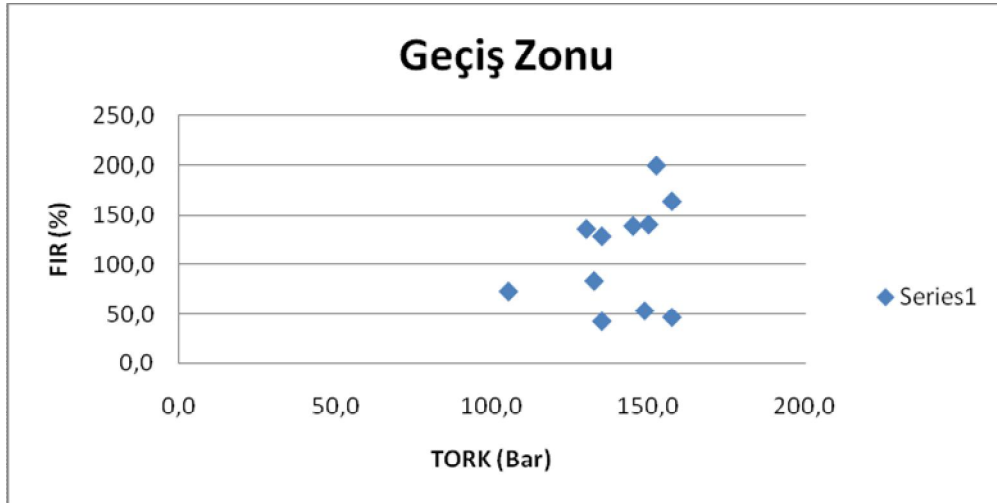
4.1.5.7 Tork ile FIR değeri arasındaki ilişki

Uygun FIR değeri ile tork değerinin düşeceği düşünülmüş ve bu sebeple gözlem yapılmıştır.

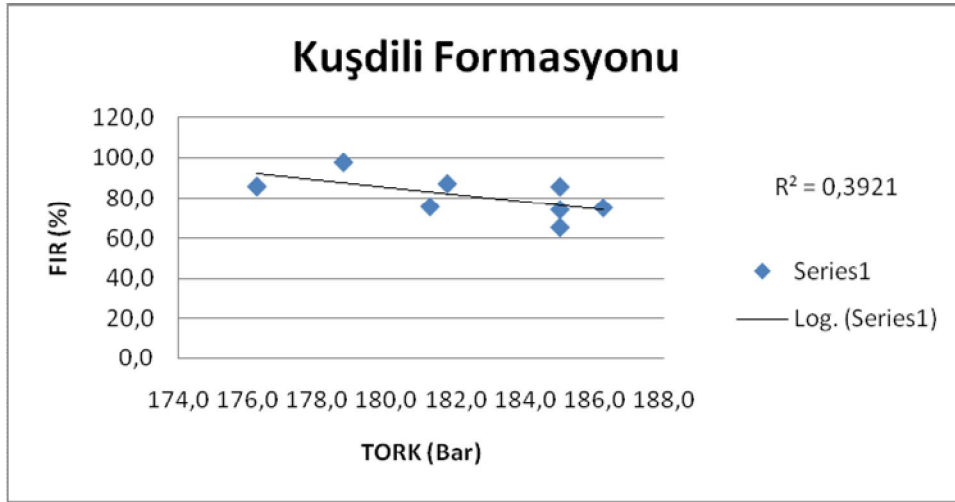
Şekil 4.28’de görüldüğü üzere Geçiş zonunda FIR değeri ile kesici kafa ortalama tork basıncı arasında ilişki bulunmamaktadır.

Şekil 4.29’da görüldüğü üzere Kuşdili formasyonunda, tork değeri ile FIR değeri arasında düşük dereceli bir ilişki gözlenmiştir. Kuşdili formasyonunda FIR değerinin artmasıyla tork değerinin azaldığı gözlenmiştir.

Güngören formasyonunda ve tüm tünel güzergah jeolojisinde (Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu ve Geçiş formasyonlarının tamamı) herhangi bir ilişki gözlenmemiştir.



Şekil 4.28 : Geçiş zonunda Tork ile FIR değeri arasındaki ilişki

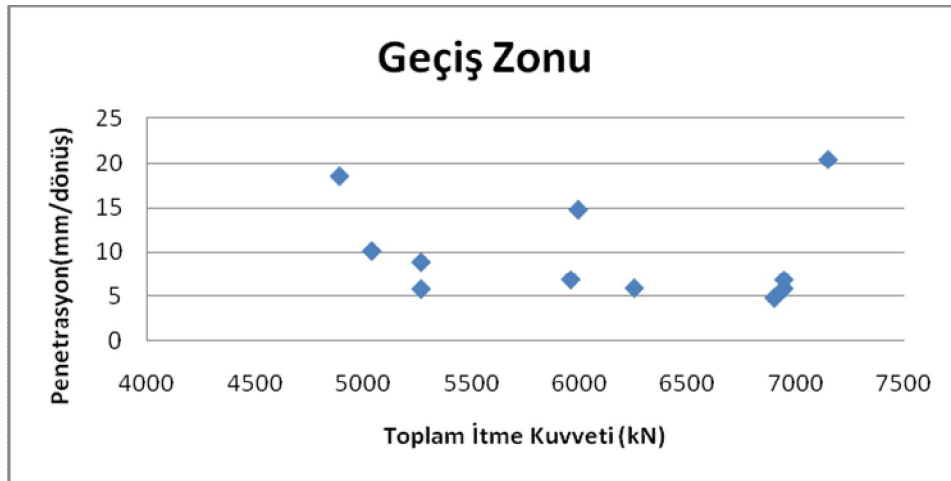


Şekil 4.29 : Kuşdili formasyonunda tork ile FIR değeri arasındaki ilişki

4.1.5.8 Toplam itme kuvveti ile penetrasyon arasındaki ilişki

Şekil 4.30'da görüldüğü üzere Geçiş zonunda penetrasyon değeri ile itme değeri arasında, bir ilişki bulunmamaktadır.

Güngören formasyonunda, Kuşdili formasyonunda ve tüm tünel güzergah jeolojisinde (Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu ve Geçiş formasyonlarının tamamı) ise herhangi bir ilişki gözlenmemiştir.

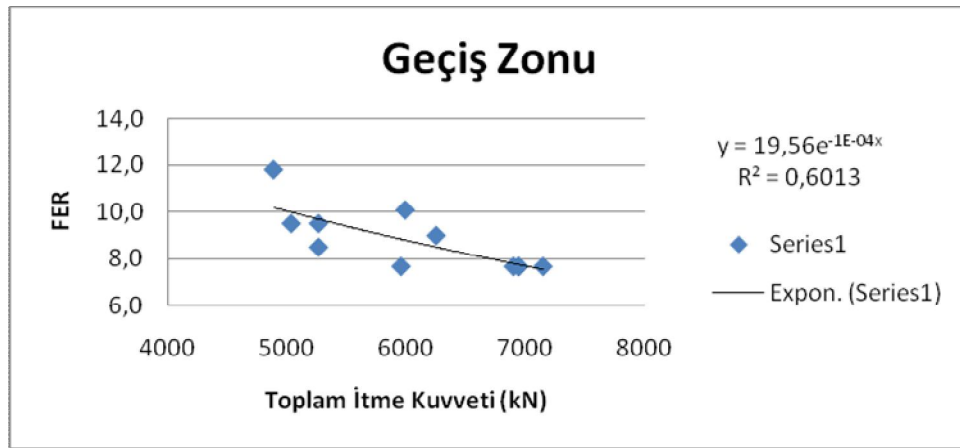


Şekil 4.30 : Geçiş zonunda penetrasyon ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki

4.1.5.9 Toplam itme kuvveti ile zemine enjekte edilen köpüğün FER değeri karşılaştırması

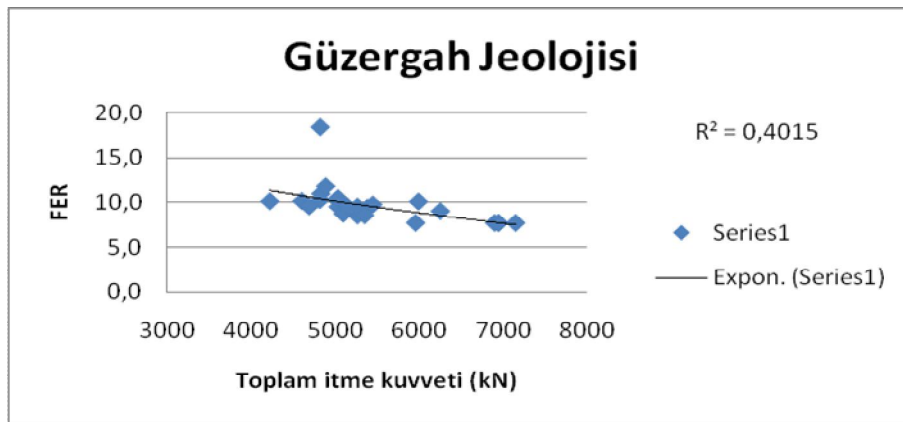
Köpük stabilitesinin ayna basıncıyla alakalı olduğu düşünülmüş ve bununla birlikte köpük genleşmes oranının da aynaya yapılan baskıyla etkileşeceği düşünülmüş ilişki gözlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 4.31’de görüldüğü üzere Geçiş zonunda zemine verilen köpüğün FER değeri ile toplam itme kuvveti değeri arasında $R^2 = 0,60$ değeri ile orta dereceli üstel bir ilişki bulunmaktadır. Böylelikle toplam itme kuvvetinin artmasıyla, akışkan koşullara yakın olan zeminde köpük stabilitesinin azalacağı görülmektedir.



Şekil 4.31 : Geçiş zonunda zemine enjekte edilen köpüğün FER değeri ile toplam itme kuvveti arasındaki ilişki

Şekil 4.32’de görüldüğü üzere tünel güzergah jeolojisi (Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu ve Geçiş formasyonlarının tamamı) incelendiğinde FER ile toplam itme kuvveti değerleri arasında düşük dereceli bir ilişki gözlenmiştir.



Şekil 4.32 : Tüm tünel güzergahı jeolojisinde FER ve toplam itme kuvveti arasındaki ilişki

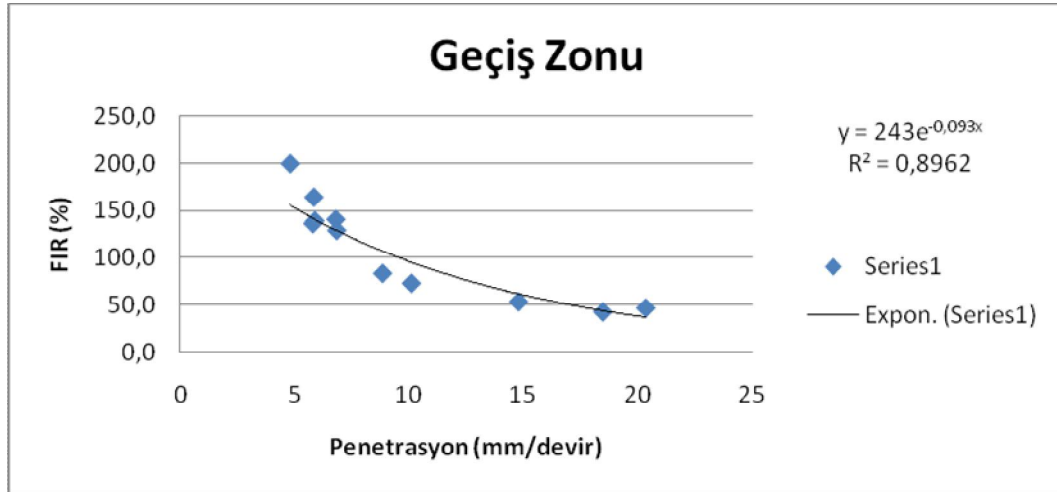
Beklenen ilişki, yüksek basınç köpük sıvısındaki yüksek konsantrasyon oranına ve gereken FER'in yüksek olmasına sebep olmasıdır [3]. Beklenen ilişki gözlenmiştir.

4.1.5.10 FIR değeri ile penetrasyon değerinin karşılaştırılması

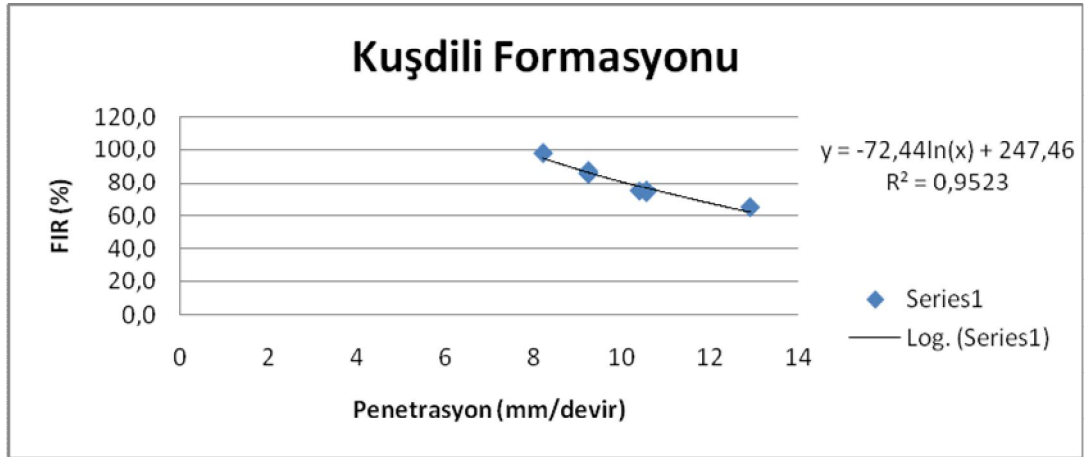
Uygun zemin koşullandırma durumunda keskinlerin aynaya batmasının kolay olacağı düşünülerek FIR ile penetrasyon oranı arasındaki ilişki gözlenmiştir.

Şekil 4.33'de görüldüğü üzere, Geçiş zonunda FIR değeri ile penetrasyon değeri arasında, $R^2 = 0,896$ değeri ile mükemmel dereceli üstel bir ilişki bulunmaktadır. Penetrasyon oranının artması için köpüğün zemine nüfuz etme derecesinin dolayısı ile köpük miktarının artmasının gerektiği düşünülse de, FIR değerlerinin hesaplanması için kazı (basınç) odası verilerinin kullanılması sonucu, FIR değeri arttıkça kazı odasının basıncı artacağından penetrasyon oranında basınç artışını dengelemek için azalacağı görülmektedir. Bu konuda diğer parametrelerin de penetrasyona etkisi ayrıca araştırılmalıdır.

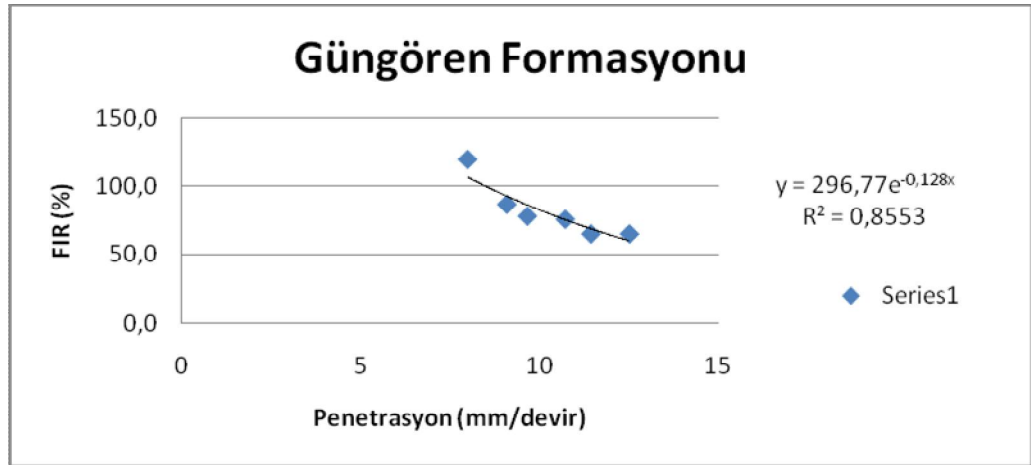
Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36'da görüldüğü üzere, Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu ve bütün tünel güzergah jeolojisinde, FIR ile penetrasyon değerleri arasındaki ilişki mükemmel derecelidir.



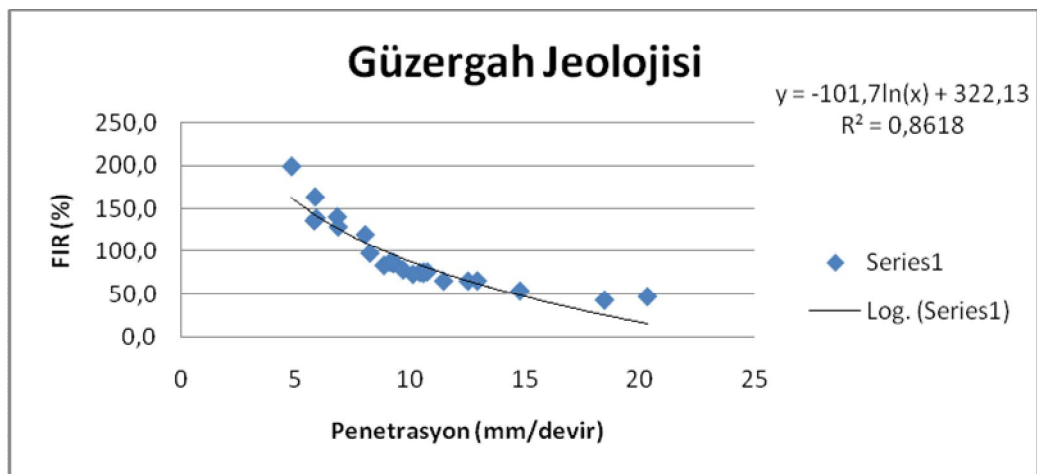
Şekil 4.33 : Geçiş zonunda FIR değeri ile penetrasyon değeri arasındaki ilişki



Şekil 4.34 : Kuşdili formasyonunda FIR ile penetrasyon değeri arasındaki ilişki



Şekil 4.35 : Güngören formasyonunda penetrasyon ile FIR değeri arasındaki ilişki

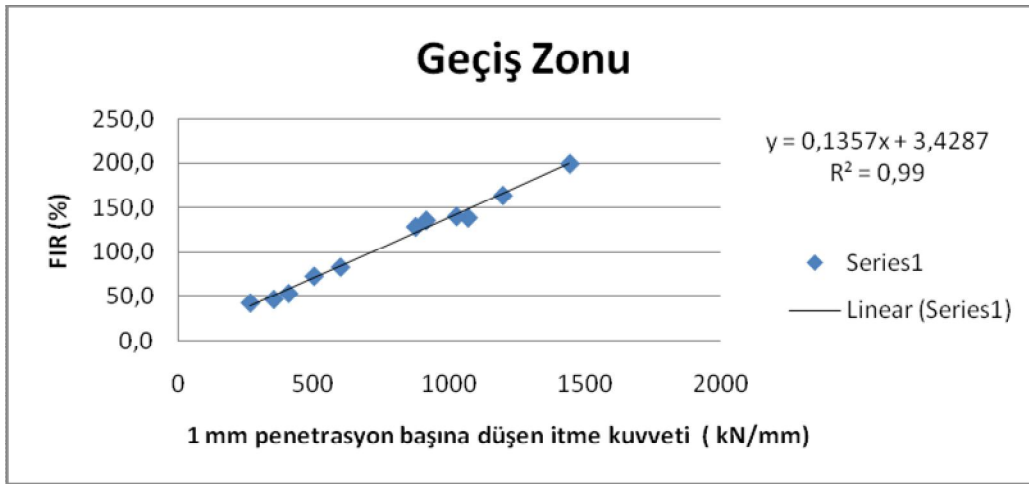


Şekil 4.36 : Tüm tünel güzergah jeolojisinde FIR ile penetrasyon değerleri arasındaki ilişki

4.1.5.11 FIR ile penetrasyon başına düşen itme kuvveti değerinin karşılaştırılması

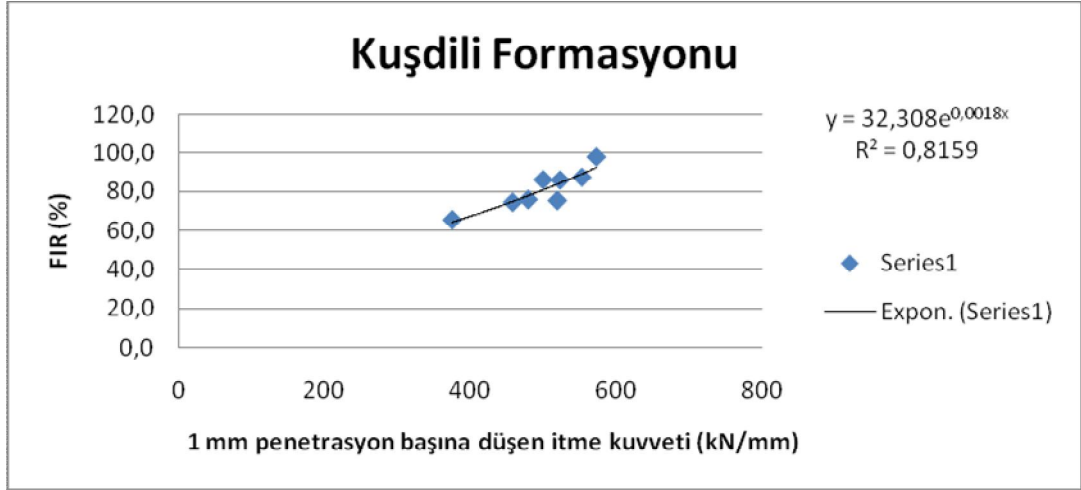
Uygun zemin koşullandırma durumunda keskinlerin aynaya batmasının kolay olacağı, böylelikle gereken itme kuvvetinin azalacağı düşünülerek FIR ile penetrasyon başına düşen itme kuvveti arasındaki ilişki gözlenmiştir.

Şekil 4.37’de görüldüğü üzere Geçiş zonunda FIR değeri ile penetrasyon başına düşen itme kuvveti değeri arasında $R^2=0,99$ değeri ile mükemmel dereceli doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.

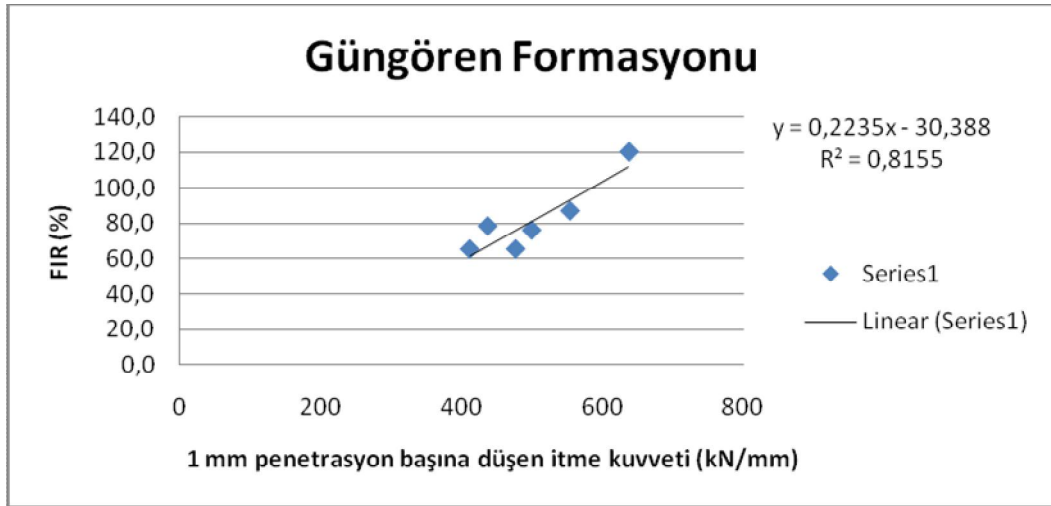


Şekil 4.37 : Geçiş zonunda FIR değeri ile 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti değeri arasındaki ilişki

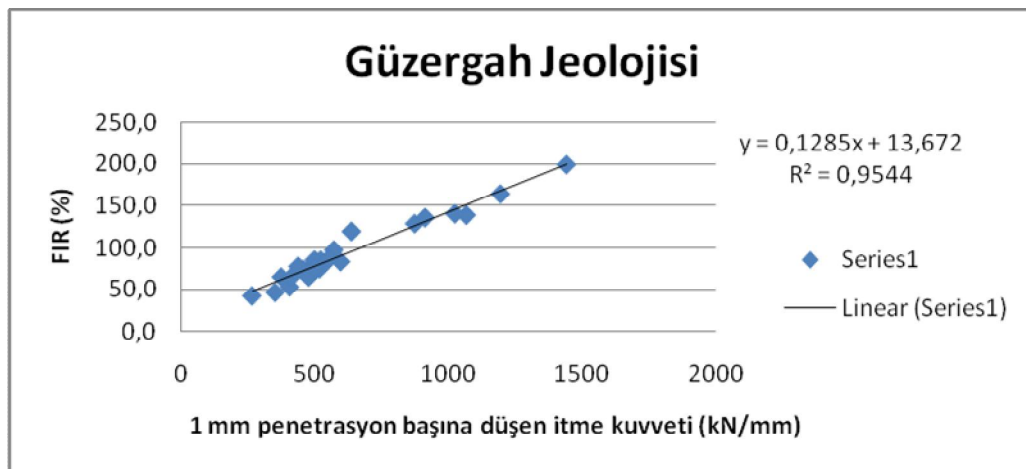
Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40’te görüldüğü üzere Kuşdili formasyonunda, Güngören formasyonunda ve tüm tünel jeolojisi incelendiğinde, 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti ile FIR değeri arasında mükemmel derecelerde ilişki gözlenmiştir. Tüm formasyonlarda beklenen ilişkinin tam tersi gözlenmiştir. Bunun sebebi FIR değerinin kazı odasından elde edilen verilerle hesaplanması sonucu her 1 mm’lik penetrasyonda kazı odasının basıç değeri artacağından bu artışı karşılaması gereken itme kuvvetinin de artması gerektiğidir. Kazı odasının basınç değişimleri hakkında mevcut herhangi bir veri bulunmadığından diğer faktörlere de bakılmalıdır.



Şekil 4.38 : Kuşdili formasyonunda 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti ile FIR değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.39 : Güngören formasyonunda 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti ile FIR değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.40 : Tüm güzergah jeolojisinde 1 mm penetrasyon başına düşen itme kuvveti ile FIR değerlerinin karşılaştırılması

4.2 TBM Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi ve Duraklama Analizi

TBM performans ölçütleri değerlendirilirken net kazı hızı, ortalama ilerleme hızı, makineden faydalanma oranı, duraklama nedenleri ve süreleri üzerinde durulmuştur.

TBM'in çalışması günde 12 saatlik 2 vardiya şeklinde planlanmış; fakat 2010 yılının Şubat, Mart, Nisan ve Mayıs ayı da dahil olmak üzere 4 ay boyunca, gerek daha önceden Ambarlı Atıksu Tüneli'nde kullanılmış olan TBM'de ortaya çıkan öngörülmeyen arızaların oluşması, gerek proje güzergahı sebebiyle gerekli teknik izinlerde çıkan bürokratik aksaklıklar, gerekse zaman zaman zemin jeolojisini iyileştirme amacıyla yapılması gereken enjeksiyonlar sebebiyle tek vardiya çalışılmıştır.

TBM performans ölçütleri değerlendirmesi toplamda 1785,56 m için yapılmıştır. TBM, 20/01/2010 tarihinde kuyruk tüneline kurulmaya başlanmış, S7 şaftına ulaşana kadar TBM'in ötelenmesi amacıyla geçici olarak 14 adet ring kurulmuş; 16/02/2010 tarihinde S7 şaftındaki portaldan kazıya başlamış ve 07/10/2010 tarihinde S6 şaftına ulaşmıştır. Bu tarihten sonra kesici kafa revizyonu ve makine genel bakımının yapılması, mesafe sensörünün değiştirilmesi, tünel içi temizlik, kurulmuş olan geçici yapıların bakımı (lokomotif rayları, boru hatları vs.) ve S6 şaftında tekrar kazıya başlamak amacıyla hazırlıklar yapılmıştır.

TBM'in kazıya bu kadar geç başlamasının sebebi, 2010 yılının Ocak ayındaki ısı düşüşüyle beraber yağ tanklarında öngörülen çalışma sıcaklığının sağlanamaması ve yağlamada çıkan problemlerle birlikte TBM seyir ölçüm sisteminde oluşan aksaklıklar sonucu sistem için teknik destek alınmasıdır.

2010 yılının 25 Mayıs gününde hidrolik arıza sonucu kesici kafa kontrolü yapılmış, yapılan genel kontrolde kesici kafada herhangi bir aşınmanın olmadığı, fakat 16, 8 ve 9 no'lu kama keskilerin yerinde olmadığı ve gözlenmiş ve yenilenmiştir.

2010 yılının Haziran ayında Cerrahpaşa Hastahanesi E1 Blok altına denk gelen tünel güzergahının 555 ile 655'inci metreleri arasında meydana gelen deformasyonlar sebebiyle TBM ilerlemesinde aksaklıklar yaşanmıştır.

2010 yılının 15 Haziran gününde başlanan ikinci kesici kafa incelemesinde ise 10, 12, 15, 16, 14 ve 13 no'lu TBM'in daha çok dış tarafında bulunan keskilerde aşınma gözlenmiş ve değiştirilmiştir.

TBM'in Cerrahpaşa Hastahanesi öncesi çalışmaya başladığı kısımda makine yeterli verimlilikte kullanılamamıştır. Bunun nedenlerinden bazıları güzergah üzerinde bulunan tren yolu gibi yapıların altında yapılan kazılarda gerekli olan izinlerin alınmasında ortaya çıkan bir takım güçlüklerdir. Bu kısımda makine faydalanma oranı % 21,8 ve ortalama ilerleme miktarı 0,39 m/saat olarak gerçekleşmiştir. Hastahane geçişi sonrası ise makine faydalanma oranı %34,3 ve ortalama ilerleme miktarı 0,54 m/saat olmuştur. Her ne kadar bu kısımda yer üstü yapılarının daha yoğun olmasıyla birlikte hasar görmemeleri amacıyla daha fazla enjeksiyona zaman ayrılmış ve bu sebeple gecikmeler yaşanmışsa da, makine faydalanma oranında % 12,5'lik, ortalama ilerleme hızında da % 28'lik bir artış gözlenmiştir.

Hastahane altındaki geçişte ise neredeyse akışkan bir zonda bulunan makinenin ilerlemesinin düşük olacağı fakat bununla birlikte kazılan malzemenin artacağı; yani ilerleme olmadan malzeme çekileceği bunun sonucunda da yer üstünde oluşan deplasmanın artacağı düşünülerek; ilerlemeye kısa bir süre ara verilmiş ve yer üstünden enjeksiyon yapıldıktan sonra ilerlenmesi sonrasında tünel içerisinden enjeksiyona devam edilmiştir. Bu sebeple bu kısımdan geçerken makine faydalanma oranı % 9,62, ortalama ilerleme miktarı ise 0,129 m/saat olarak gerçekleşmiştir. Çizelge 4.7'de tayin edilen performans ölçütleri toplu bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Makina performansının değerlendirilmesi

Makine Performansı	S7 - S6 Şaftları Arası	S7 - Cerrahpaşa öncesi (Kuşdili Formasyonu)	S6 - Cerrahpaşa Hastanesi (Güngören Formasyonu)	Cerrahpaşa Hastanesi altı Geçiş
Makineden Faydalanma Oranı (%)	24,5	21,76	34,28	9,62
Ortalama Net Kazı Hızı (m ³ /h)	17,8	19,66	21,43	5,85
Ortalama İlerleme Hızı (m/h)	0,4	0,39	0,537	0,129
Ortalama Vardiyada İlerleme (m/var)	5,25	5,98	6,44	1,51
En İyi Vardiyada İlerleme (m/var)	15,67	14,34	15,67	10,82
En Kötü Vardiyada İlerleme (m/var)	0,2	0,41	0,53	0,2
Ortalama Günlük İlerleme (m/gün)	8,56	6,42	12,89	2,95
En İyi Günlük İlerleme (m/gün)	31,16	18,1	31,16	19,17
En Kötü Günlük İlerleme (m/gün)	0,41	0,41	0,53	0,6
Ortalama Haftalık ilerleme (m/hafta)	52,63	34,51	87,23	20,676
En İyi Haftalık İlerleme (m/hafta)	149,84	56,43	149,84	49,11
En Kötü Haftalık İlerleme(m/hafta)	2,44	14,48	13,02	2,44
Ortalama Aylık İlerleme (m/ay)	198,83	120,742	288,91	-
En İyi Aylık İlerleme (m/ay)	442,79	161,18	442,79	-
En Kötü Aylık İlerleme (m/ay)	32,67	35,23	32,67	-

Makineden faydalanma oranları ile ilgili detaylar Ek 3'te verilmiştir. Buna göre S7 şaftı ile Cerrahpaşa Hastanesi arası, Kuşdili formasyonunu kapsayan bölgede kazı % 24; TBM kaynaklı arızalar toplam süre içerisinde % 15'lik bir süre almıştır. S6 şaftı ile Cerrahpaşa Hastanesi arası, Güngören formasyonunu kapsayan bölgede kazı % 38, TBM kaynaklı arızalar % 10'unu kapsamıştır. S7 ile S6 şaftları arası kazı % 28, TBM kaynaklı arızalar ise çalışma süresinin % 10'unu kapsamıştır.

TBM'den kaynaklanmayan duraklamalar ise S7 şaftı ile Cerrahpaşa Hastanesi arasında % 44, S6 ile Cerrahpaşa Hastanesi arasında % 27'sini kapsamıştır. S7 ile S6 şaftları arasında ise toplam çalışma süresinin % 42'sini oluşturmuştur. TBM'den kaynaklanmayan duraklamaların başında ise enjeksiyon sebepli duraklamalar gelmektedir.

S6 ile S7 şaftları arasında enjeksiyon sebepli beklemler % 16'lık bir süre tutmuştur. Enjeksiyon sebepli duraklamaların bu kadar yüksek olmasının sebebi enjeksiyon kazanının tek olması ve enjeksiyon yapıldığı sırada lokomotifin hareket edememesidir. Bu sebeple kazı süresi kısıtlanmış ve makine faydalanma oranı düşük kalmıştır.

Makina faydalanma oranının artırılması için, Cerrahpaşa Hastanesi'nde yaşanan problemler göz önüne alınacak olunursa, güzergah üzerinde ek sondajlar yaptırılarak jeoloji hakkında daha fazla bilgi alınıp, ileride karşılaşılabilecek jeolojik sorunlara gerekli önlemlerin alınması için çalışmalar yapılmalıdır.

4.2.1 Arızaların gruplandırılması

TBM kullanılarak yapılan tünelticilikte değişen kazı ortamının gereklerine kazı sistemi uyamadığında duraklamalar, arızalar oluşur. İyi bir tünelticilik çalışmasında her türlü duraklama ve arızaların minimum olacağı şekilde planlanmalıdır. Bu yüzden duraklamaların ve arızaların nedenleri ve makine performansı üzerindeki etkileri çok iyi anlaşılmalıdır.

TBM arızalar arasında 28 adet ile elektrik arızaları en sık karşılaşılan ve süre olarak da en çok yer almıştır.

Değerlendirme yapabilmek için vardiya raporlarından arızaların süreleri alınmıştır ve alınan arızalar gruplandırılmıştır. Çizelge 4.8'de gruplandırılan arızalar verilmiştir.

4.2.2 Arıza ve duraklamaların frekansları

S6 ile S7 şaftları arasında toplamda 367 vardiya çalışma olmuştur. Çalışılan vardiyaların %34'ünde TBM kaynaklı arızalar sebebiyle duraklama yaşanmıştır. Tüm vardiyaların % 6'sında ise arıza bir vardiyanın tamamını (12 saat) kapsayacak şekilde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.8 : Arıza grupları

Arıza Grubu	Arıza Cinsi
Kesici Kafa ve Kalkan	Elektrik Arızaları
	Hidrolik Arızalar
	Mekanik Arızalar
	Kesici Kafa Sıvı Tesisatı
	Hararet
	Erektör
	Helezon
	Keski
Back-Up Sistemi	Band Sistemi
	Segment Vinci
	Ölçme Sistemi
TBM'den Kaynaklanmayan Arızalar	Portal Vinç
	Vagon Bekleme
	Vagon Devrilmesi
	Lokomotif Arızası
	Su Kesintisi
	Elektrik Kesintisi
	Enjeksiyon

4.2.3 Kesici kafa ve kalkan arızaları grubu

Kesici kafa ve bağlı olduğu kalkan TBM'in genel olarak elektrik ve hidrolik sisteminin en yoğun olduğu bölgedir. Bu grupta en sık gerçekleşen (28 vardiyada) ve en fazla duraklama (çalışılan sürenin %3,22'si) elektrik arızalarında olmuştur.Çizelge 4.9'da kesici kafa ve kalkan grubunda yaşanan arızalar verilmiştir.

S6 ile S7 şaftları arasında üç defa incelenen ve bakımı yapılan kesici kafa bakımı sırasında; kesikilerin yataklarının cıvata kesmesi sebebiyle 16, 8 ve 9 no'lu kesikilerin yerinde olmadığı ve gözlenmiş ve yenilenmiştir. TBM'in kesici kafasının dış - orta olarak nitelendirilebilecek bölgesinde konumlanmış olan 10, 12, 15, 16, 14 ve 13 no'lu kesikilerde ise aşınma gözlenmiş ve değiştirilmiştir.

Çizelge 4.9 : Kesici kafa ve kalkan arızalar grubu verileri

Arıza Cinsi	Frekans (Vardiya Adedi)	Toplam Arıza Süresi (Dakika)	Toplam Sürenin Çalışma Süresi İçerisindeki Yüzdesi (%)
Elektrik Arızaları	28	7305	3,22
Hidrolik Arızalar	13	1950	0,86
Mekanik Arızalar	4	2385	1,1
Kesici Kafa Sıvı Tesisatı	15	555	0,24
Hararet	12	6565	2,89
Erektör	12	2235	0,98
Helezon	2	675	0,3
Keski	7	2945	1,3

4.2.4 Kazı destekleyici sistem arıza grubu (back-up sistemi)

Kazı destekleyici (back-up) sistem arıza grubunda en çok karşılaşılan ve en uzun süreyi kapsayan band konveyör sistemi arızaları olmuştur. Band tamburunun kauçuk sarımının ayrılması sebebiyle en büyük duraklama (band sebepli duraklamaların %47'si) band ilk kurulduğunda yaşanmıştır. Sonrasında malzeme sıkışmaları sebebiyle bandın dönmemesi, band motorunun yanması gibi dolaylı sebeplerle duraklamalar yaşanmıştır. Segment vinci arızaları vince giden enerjinin kesilmesi sebebiyle oluşmuştur. Görece çok düşük bir süre (%0,02) kapsamıştır arıza grubu içerisinde.

Ölçme sisteminde, TBM'in pozisyonunu göstermeye yarayan bilgisayarın açılmaması, teodolit arızaları, bilgisayar yazılımının güncellemeleri gibi sebeplerle duraklamalar gerçekleşmiştir. Toplam vardiyaların tamamının 20 kazısında ölçme sistemi olmaksızın ilerleme yapılmak zorunda kalınmıştır. Çizelge 4.10'da kazı destekleyici sistem grubu arızaları verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Kazı destekleyici (back-up) system arıza grubu

Arıza Cinsi	Frekans (Vardiya Adedi)	Toplam Arıza Süresi (Dakika)	Toplam Sürenin Çalışma Süresi İçerisindeki Yüzdesi (%)
Band Sistemi	17	4955	2,18
Segment Vinci	2	35	0,02
Ölçme Sistemi	13	1815	0,8

4.2.5 TBM'den kaynaklanmayan duraklamalar

TBM'den kaynaklanmayan duraklamalar toplam çalışma süresinin %22'sini kapsamıştır. Duraklamaların bu kadar büyük olmasının başlıca sebeplerinden birisi, bu grubun içerisinde büyük yer tutan, zemin özellikleri sebebiyle yapılması zorunlu olan enjeksiyonlardır. İlerlemeyle birlikte enjeksiyon yapılması duraklamalar açısından iki sonuç doğurmuştur: ilki vardiyanın bir kısmının ayrıldığı enjeksiyon sebepli duraklamalar, ikincisi ise daha dolaylı yoldan vagon bekleme sürelerine etki etmesi olarak gözlenmiştir. Vagon bekleme sürelerinin artmasının diğer bir sebebi ise zemin koşulları sebebiyle tünel içerisinde bulunan suyun artışı sonucunda suyun kaldırma kuvvetiyle birlikte viraj dönerken oluşan vagon devrilmelerinin az tutulması amacıyla lokomotif hızının azaltılmasıdır. Çizelge 4.11'de TBM'den kaynaklanmayan duraklamalar ve arızalar verilmiştir.

Çizelge 4.11 : TBM'den kaynaklanmayan duraklamalar ve arızalar

Arıza Cinsi	Frekans (Vardiya Adedi)	Toplam Arıza Süresi (Dakika)	Toplam Sürenin Çalışma Süresi İçerisindeki Yüzdesi (%)
Portal Vinç	12	2320	1,02
Vagon Bekleme	291	10080	4,44
Vagon Devrilmesi	7	375	0,17
Lokomotif Arızası	7	300	0,13
Su Kesintisi	12	1640	0,72
Elektrik Kesintisi	3	120	0,05
Enjeksiyon	79	35430	15,61

4.2.6 Arızaların genel değeriendirilmesi

TBM kesici kafa ve kazı destekleyici (back-up) sistemi dizaynı performansı etkileyen en önemli faktörlerdir. Her tünel açma makinasının kullanımında duraklamalar kaçınılmazdır. Kesimler, kesimler arası mesafe, itme kuvveti ve tork kapasiteleri belirli olan makinanın tünel içerisindeyken dizaynında değışiklik yapmak çok zor ve yüksek maliyetlidir. TBM performansını yükseltmenin en pratik ve kolay yolu makinanın kazı yapabileceğı süreyi arttırmak olması göz önüne alındığında; makine duraklama ve arıza sürelerini azaltmak ve en düşük seviyede tutmak şarttır. Nitekim bu çalışma kapsamında incelenen tünelde toplam çalışma süresinde % 28 olan kazı süresinin arttırılması şarttır. İlerleyen safhalarda şu ana kadar elde edilen tecrübeler zarfında; TBM dışı duraklamaların en fazla yer tutan kalemi olan enjeksiyon sebepli duraklamaların azaltılması amacıyla yapılacak olan enjeksiyonun miktarının kestirilmesi ve bununla birlikte ikinci en büyük kalem olan vagon bekleme süresinin de azaltılması amacıyla çözümler üretmek faydalanma oranının arttırılması açısından yararlı olacaktır. Aksi takdirde ilerleyen güzergah ile birlikte vagon bekleme süresinin artması kaçınılmaz olacak ve zaten düşük olan makinadan faydalanma oranının daha fazla düşmesine sebebiyet verecektir. Bunun önlenmesi amacıyla sadece S6 şaftından sonra açılacak olan S5 şaftının işletme için kullanılmaması, S6 şaftının da işletme şaftı olarak görev yapması seçeneğı de gözden geçirilmelidir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

TBM performansını etkileyen bir çok faktör vardır. Bunların başında tünel açılacak formasyonun özellikleri, TBM dizaynı ve şantiye organizasyonu gelmektedir. TBM ile yapılacak tünel çalışması için önceden yapılan jeoteknik çalışmaların detaylı olarak yapılması verimli bir tünel çalışması yapılabilmesi için zorunludur. Detaylı yapılmayan jeoteknik çalışmalar; TBM dizaynının yanlış yapılmış olmasına etki edebileceği gibi; TBM güzergahında bulunabilecek jeolojik bozukluklara önceden tedbir alınmasını ve geçilecek topografyada bulunan önemli yapıların zarar görme tehlikesini de aza indirmeyi zorlaştırmasına sebep olmaktadır.

Yenikapı Avrupa Yakası 2. Kısım Atıksu Tüneli'nde kazı başlangıcı S7 shaftının açılmasında yaşanan güçlükler ve S7 kaba ızgara inşaatında planlanan inşa yönteminin değişmesi sebepleriyle planlanandan daha geç başlamıştır.

TBM performansı genel olarak üç kısımda incelenmiştir. Bunun nedeni değişen formasyonun makine performansı üzerindeki etkisini gözleyebilmektir. İlk olarak S7 shaftı – Cerrahpaşa Hastanesi arası (Kuşdili formasyonu) performans incelenmiş, ardından ise Cerrahpaşa Hastanesi-S6 shaftı arasında kalan bölüm (Güngören Formasyonu) incelenmiştir. Makinadan faydalanma oranı ilk kısım için %21,8 iken, ikinci kısımda değişen jeolojik koşullarla birlikte % 34,3'e yükselmiştir. TBM ortalama ilerleme miktarı ilk kısım için 0,39 m/saat iken; ikinci kısımda 0,54 m/saat'tir. Haziran 2010 ayında çalışma hızının iki vardiyaya çıkmasının etkisi olmuşsa da bu artışta; esas olarak faydalanma oranına bakıldığında jeolojiden doğan duraklamaların azalması kazı hızının artmasında etken faktör olmuştur.

TBM üzerine etkiyen faktörlerin Cerrahpaşa Hastahanesi ve çevresinde gözlenen geçiş zonunun zorlu jeolojik koşullarında birbiri ile etkileşiminin incelenmesinde ise; $R^2=0,682$ değeri ile doğrusal olarak iyi dereceli ilişki bulunan RPM ile TBM kesici kafasının torku arasındaki ilişkinin; kesici kafanın homojen olmayan bir zeminle karşılaşması, yani kesici kafanın karşılaştığı zemin mukavemetinin kafa üzerinde uniform bir dağılım göstermemesi sonucu, RPM ile tork arasındaki ilişkinin

yeterince ortaya konulamadığı gözlenmiştir. RPM ve kazı (basınç) odasına verilen köpük miktarı arasındaki ilişkinin ise, $R^2 = 0,46$ değeri ile düşük dereceli bir ilişkiye sahip olduğu gözlenmiştir; ve bu durumun yüksek su gelirinine sahip olan zeminlerde, zemin koşullandırmasının gereklerinin sürekli değişmesi sonucu kazı odasında ayna basıncını karşılamak üzere depolanan pasanın, kesici kafanın torku üzerindeki etkisi yeterince görülememiştir. RPM ve zemine (aynaya) verilen köpük miktarı arasındaki ilişkinin ise; $R^2 = 0,36$ değeri ile nispeten akışkan özelliklere sahip zeminlerde su gelirinin fazla olmasıyla birlikte; köpüğün zemine yeterince nüfuz edememesi sonucu, daha fazla köpük basılması gerektiği düşünülse de, gerekli olan tork değerinin düşmesinin her zaman mümkün olmadığı gözlenmiştir. Toplam itme kuvveti ile FER değerleri arasındaki ilişki incelendiğindeyse; $R^2 = 0,60$ değeri ile toplam itme kuvvetinin artmasıyla, akışkan koşullara yakın olan zeminde köpük stabilitesinin azalacağı gözlenmiştir. FIR değeri ile penetrasyon oranı karşılaştırılmasında ise; $R^2 = 0,896$ değeri ile FIR değerinin artmasıyla kazı (basınç) odasının basıncının artacağı buna tepki olarak da penetrasyonun azalacağı gözlenmiştir. FIR değeri ile 1 mm penetrasyon için uygulanacak toplam itme kuvvetinin karşılaştırılmasında ise; $R^2 = 0,99$ değeri ile FIR değerinin artmasıyla kazı (basınç) odasının basıncının artacağı, bununla birlikte 1 mm penetrasyon için uygulanacak kuvvetin de bu basınç artışını dengelemek için artacağı gözlenmiştir. Sonuç olarak Avrupa Yakası İkinci Kısım Atıksu Projesi'nde kullanılan TBM'in kazı performansı üzerinde en çok etki eden parametreler zemin koşullandırmayla ilgili olan parametreler olarak gözlenmiştir.

TBM kaynaklı arızalar tüm çalışma süresinin % 11'ini kapsamıştır. TBM sebepli arızalar içerisinde en çok süreyi toplam çalışma süresi içerisinde %3,2 ile elektrik arızaları yer tutar. Kesici kafa bakımları sırasında cıvata kesmesi sorunu sebebiyle 16, 8 ve 9 no'lu kama keskiler ilerleme sırasında kaybedilmiş; 10, 12, 15, 16, 14 ve 13 no'lu keskilerde aşınma gözlenmiş ve değiştirilmiştir.

TBM ölçme sisteminde ve TBM yönlendirilmesinde sorunlar çıkmış ve bunun sonucunda toplam ilerleme içerisinde, 20 ring ilerleme ölçme sistemi kullanılmadan yapılmış, oluşan sapmalar ilerleme sırasında telafi edilmiştir. Ölçme sistemine bağlı duraklamalar, toplam çalışma süresinin % 0,8'ini kapsar. Band sistemi arızaları, back-up sistemi arıza grubu içerisinde toplam çalışma süresinin %2,2'si ile en fazla yeri kapsar.

Çalışılan sürenin % 4,4'ü TBM vagon beklemesi için harcanmış, şantiye içerisindeki diğer işler ve bürokratik izinlerin alınması gibi işler toplam çalışma süresinin %16'sı gibi büyük bir yer kaplamıştır. İlerleyen güzergah ile birlikte açılacak olan S5 şaftının işletmeye alınması beklenmeden, S6 şaftının da işletme için (lojistik şaft olarak) kullanılması vagon bekleme sebebiyle duraklamaların artmasını engellemekle birlikte azalmasına sebep olması avantajı göz önüne alınmalıdır.

TBM performansını arttırmanın en etkin yollarından biri; TBM dizaynı çalışmakta olan makinada değiştirilmesi çok maliyetli ve zor olacağından; duraklama ve arıza sürelerinin azaltılması ve kazı süresinin arttırılmasıdır. Tünel ilerlemesine göre prim dağıtılması da TBM performansını arttırıcı bir etken olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Shirlaw, N., J., Boone, S.,** Factors in the Variability of Measured Surface Settlements Over EPB Driven Tunnels in Soft Clay
- [2] **Grima, M., A., Bruines, P.A., Verhoef, P., N.,** 2000, Modeling Tunnel Boring Machine Performance by Nero-Fuzzy Methods, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol 15, No 3, pp 259-269
- [3] **O'Carrol, B., J.,** *A Guide to Planning, Constructing and Supervising Earth Pressure Balance TBM Tunneling*, Professional Associate Parsons Brinckerhof, April, 2005
- [4] **Department of the Army, US Army Corps of Engineers,** *Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock*, EM 1110-2-2901, Appendix C, 30 May 1997
- [5] **Fernandez, E.,** The Madrid Renewal Inner Ring Calle 30 with the Largest EPB Machines, Planning and Results, *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*, 2007
- [6] **Bilgin, N., Feridunoglu, C., Tumac, D., et al.,** TBM Cutting Performance in Istanbul, *Tunnels and Tunneling Int.*, 2006, 17-19 Feb.
- [7] **Çopur, H.,** 2009, **MAD514E**-Mechanical Excavation and Mechanisation in Soft Ground, Ders Notları, İTÜ Maden Müh. Böl.
- [8] **Cardu, M., Oreste, P., Guidarelli, D.,** Analysis of the Performances of the EPB excavation System in Urban Areas, *International Congress on Mine planning and equipment selection*, 2006, 20-22 September, Turin (Italy), pp. 10, ISBN: 8890134240
- [9] **Bardet, J., P.,** *Experimental Soil Mechanics*, Prentice Hall Inc., 1997
- [10] **Maidl, U.,** Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde Durch Bodenkonditionierung met Schaum, Ph.D Thesis, Ruhr Unversitat Bochum, Germany, 1995
- [11] **Herrenknecht, M.,** EPB or Slurry Machine: the Choice, *Tunnels and Tunneling Int.*, June, 1994
- [12] **American Society for Testing and Materials,** Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards, 1985, D 2487-83
- [13] **Şekerci, A.,** *Temel Sondaj Tekniği El Kitabı*, DSİ III. Bölge Müdürlüğü, 14. Sondaj Şube Müdürlüğü, Eskişehir, 1997
- [14] **Hunt, R., E.,** *Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation*, 1986, 729p
- [15] **Önce, G.,** *Madencilikte Kaya Mekaniği*, ESOGU, 1999
- [16] **Graham, P.,C.,** *Rock Exploration for Machine Manufactures Proceeding Symposium*, an Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, Nov., pp 173-180

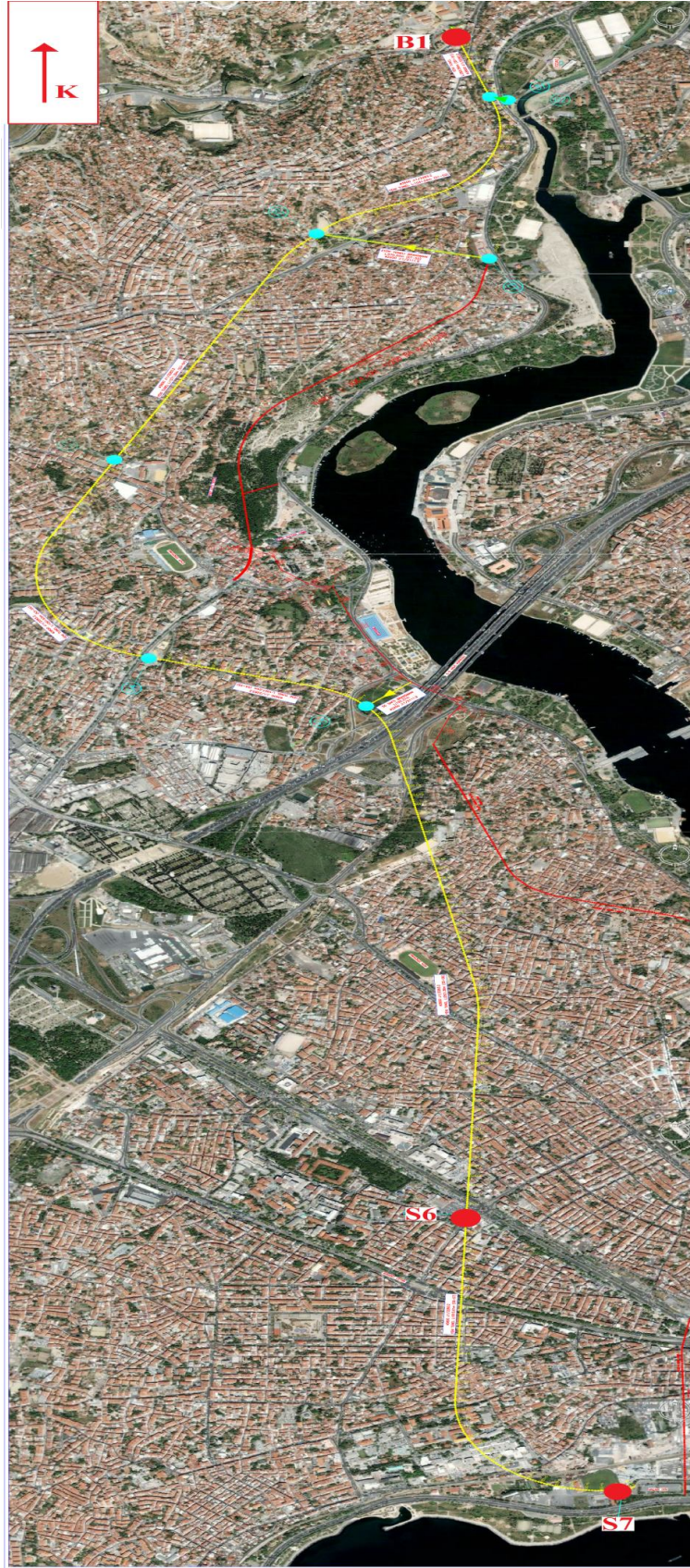
- [17] **Bilgin, N., Balci, C.**, Correlative Study of Linear Smal and Full Scale Rock Cutting Tests to Select *Mechanized* Excavation Machines, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006
- [18] **Rostami, J., Özdemir, L., and Neil, M., D.**, Performance Prediction: A Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining, *Mining Engineering*, November, 1994
- [19] **Oktay, F.Y., İlkışık, O. M.**, *İSKİ Güney Haliç II Atıksu Tüneli Jeolojik/Jeoteknik Etüd Raporu*, Anadolu Yerbilimleri, No. 766-I, 2009
- [20] Url-1 < [http://www.ibb.gov.tr/tr-TR/subsites/Istanbul ve deprem/documents/avrupa.doc](http://www.ibb.gov.tr/tr-TR/subsites/Istanbul_ve_deprem/documents/avrupa.doc)> alındığı tarih 15 Aralık 2010
- [21] **Herrenknecht AG**, *Operating Manuel M-1070 EPB400AH Tunneling Equipment*, 2006
- [22] **EFNARC**, Specification and **Guidelines** for the use of specialist products for Mechanised Tunneling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock, April, 2005,
- [23] **Köse, S., K.**, Korelasyon ve Regrasyon Analizi, 22 Ocak 2011, from <http://www.toraks.org.tr/mse-ppt-pdf/kenan-KOSE3.pdf>

EKLER

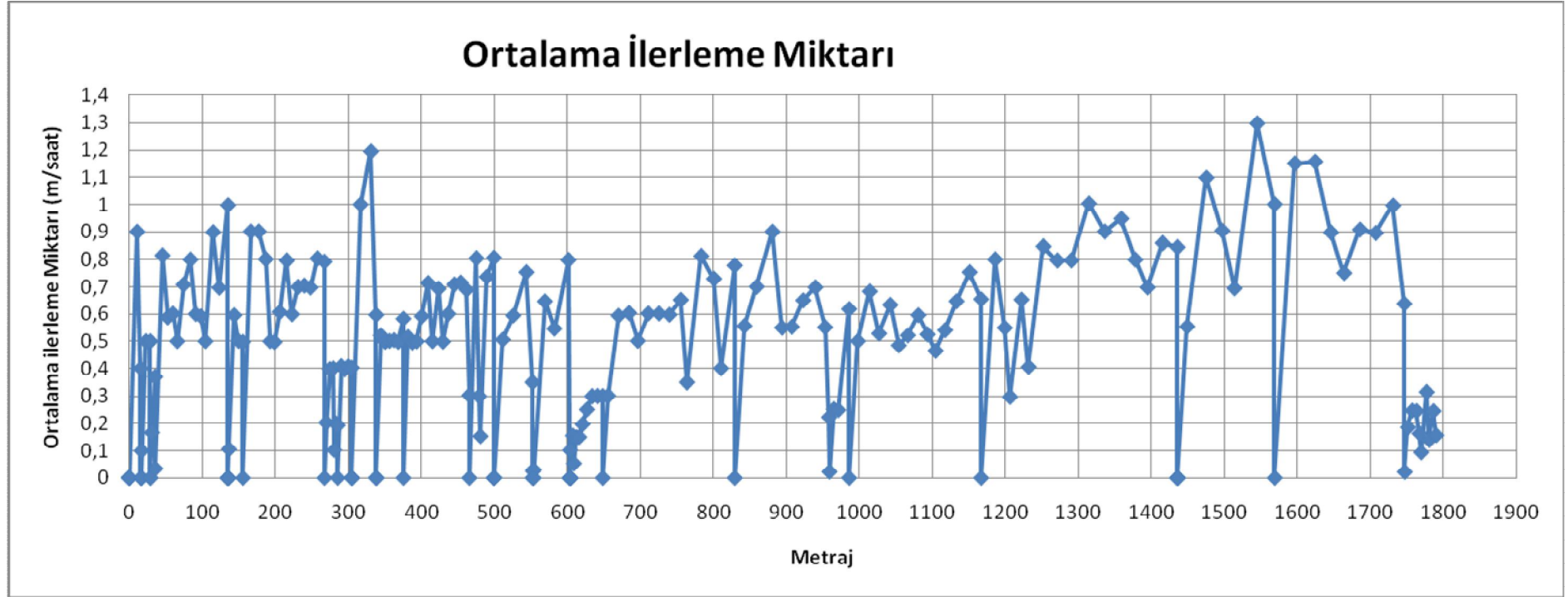
EK.A : Proje Güzergahı, Makine İlerleme Miktarları ve Makine Faydalanma Oranları

EK. B : Jeolojik Harita

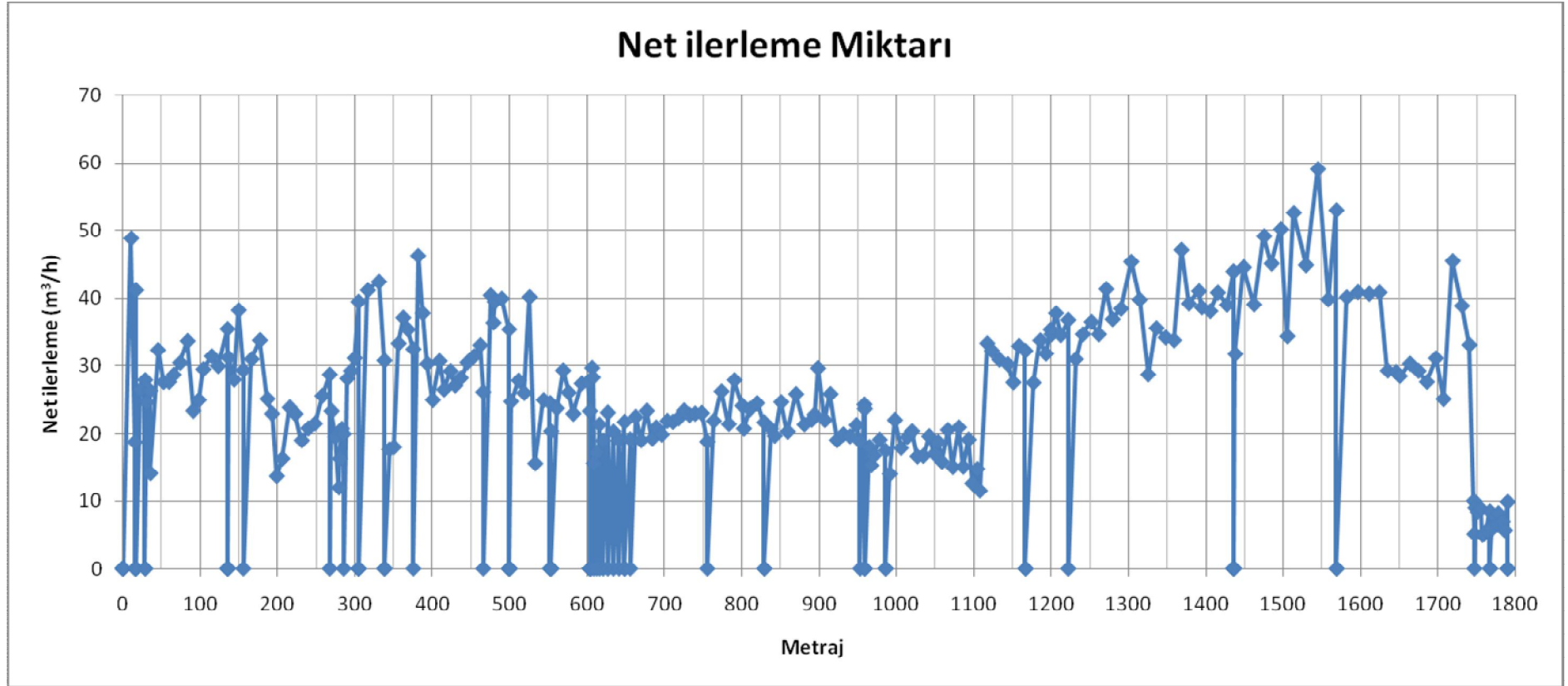
EK.A



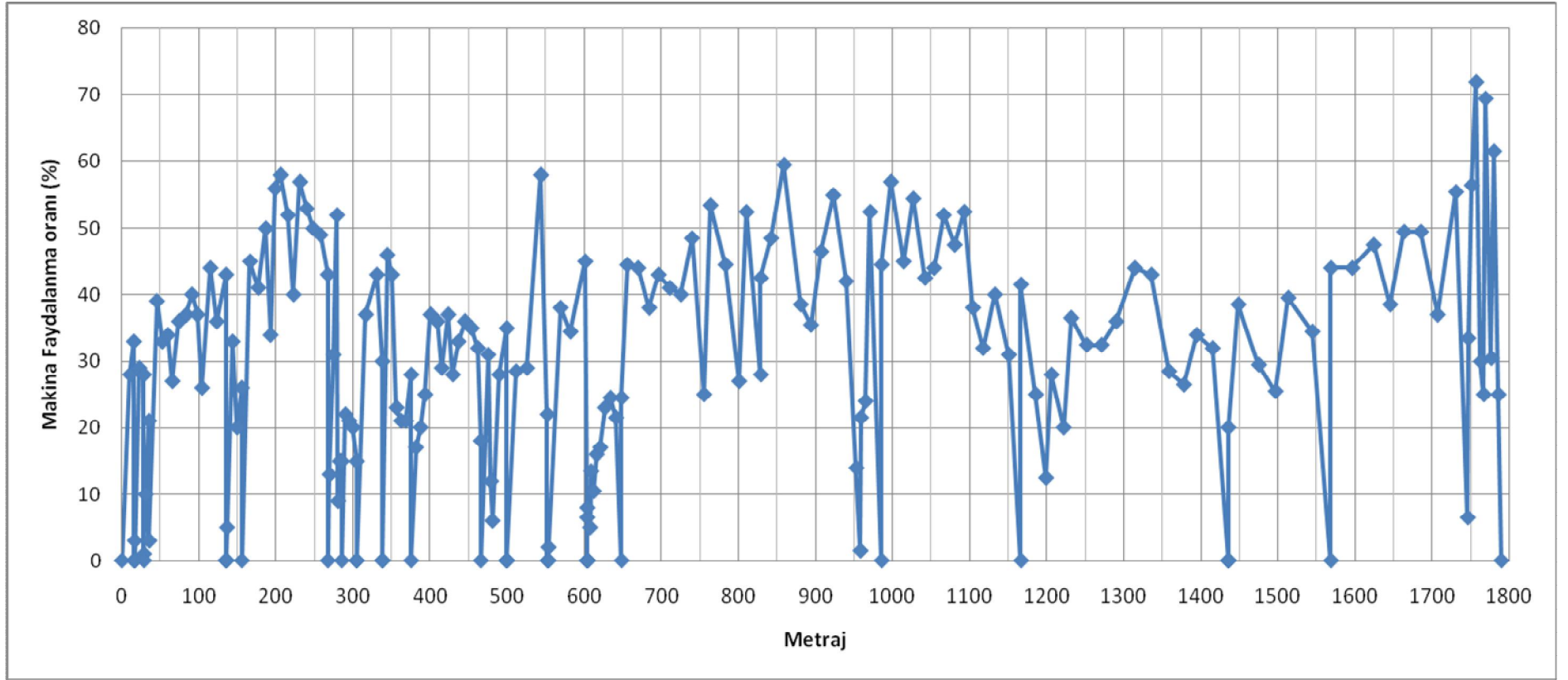
Şekil A.1 : Proje Güzergahı



Şekil A.2 : Ortalama İlerleme Miktarı

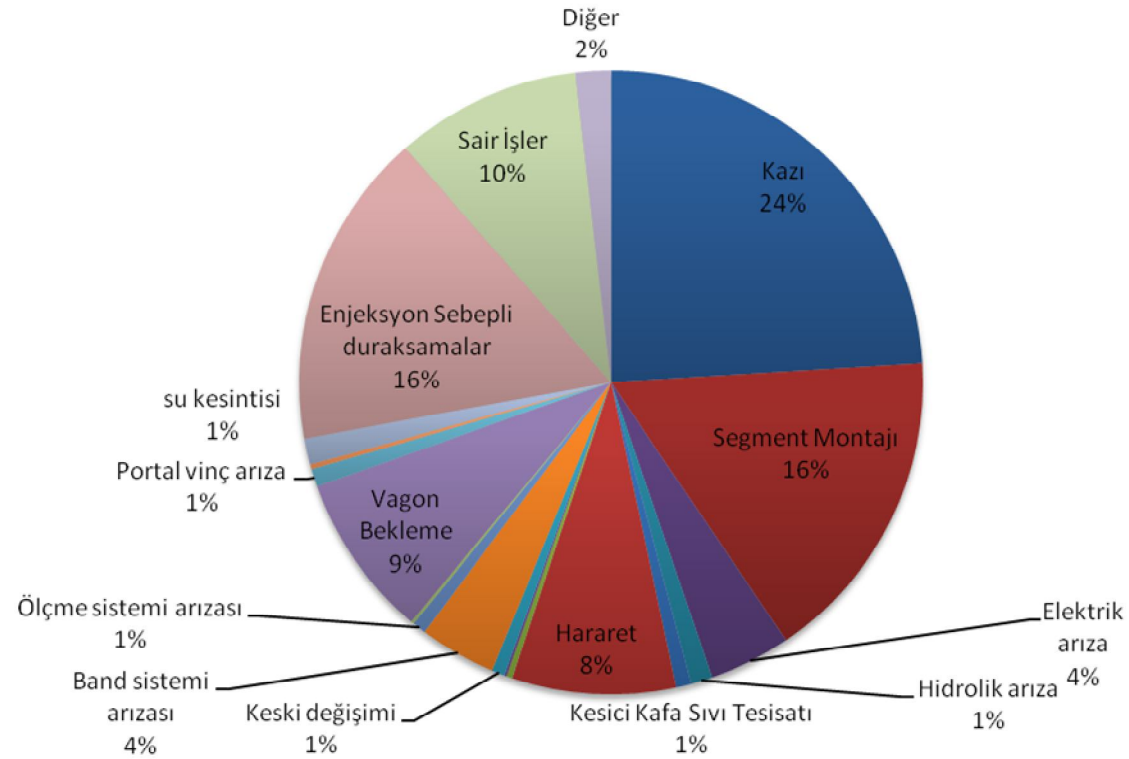


Şekil A.3 : Net İlerleme Miktarı



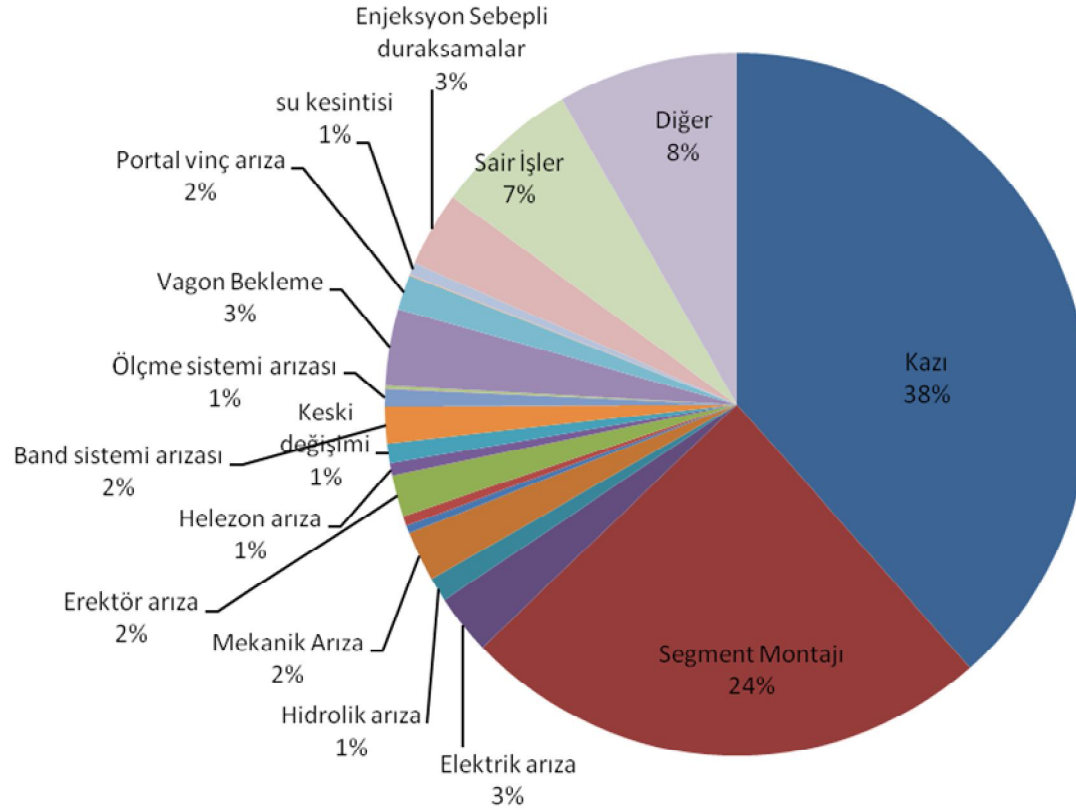
Şekil A.4 : Makine Faydalanma Oranı Değişimi

S7 - Cerrahpaşa Hastanesi Arası Makineden Faydalanma Oranı



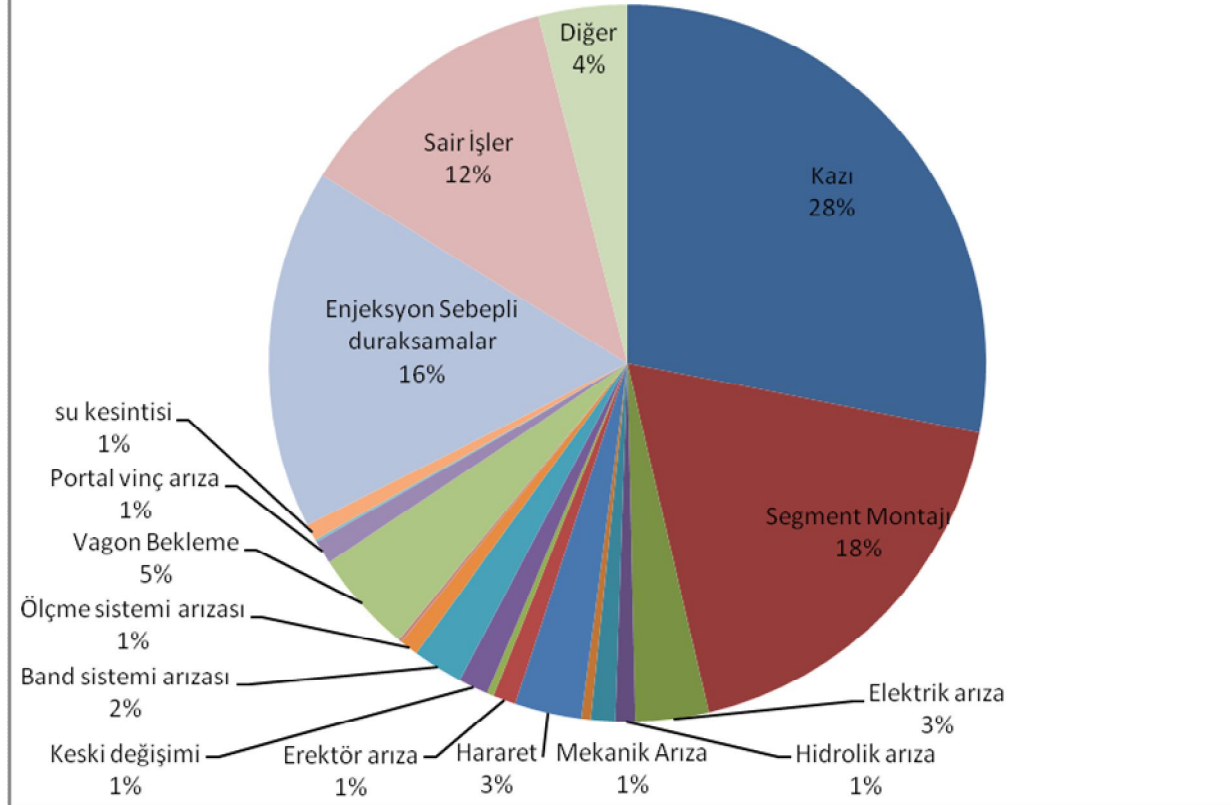
Şekil A.5 : S7 – Cerrahpaşa Hastahanesi Arası (Kuşdili Formasyonu) Makineden Faydalanma Grafiği

Cerrahpaşa Hastahanesi - S6 Arası Makineden Faydalanma



Şekil A.6 : Cerrahpaşa Hastahanesi – S6 arası (Güngören Formasyonu) Makineden Faydalanma Grafiği

S7 - S6 Kuyuları Arası Makinadan Faydalanma



Şekil A.7 : S7 – S6 Kuyuları Arası Makineden Faydalanma Grafiği

EK.B

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Burak GÜRKAN
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 18/01/1986
Lisans Üniversitesi: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi