



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



EPB-TBM'lerin Kazı Performansının Analizi Ve
Değerlendirilmesi:
Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli Örneği
Sertaç DÜNDAR

DOKTORA TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Sertaç DÜNDAR tarafından hazırlanan “EPB-TBM'lerin Kazı Performansının Analizi Ve Değerlendirilmesi: Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli Örneği” adlı tez çalışması 27/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Alparslan TURANBOY
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Niyazi BİLİM
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Bilgehan KEKEÇ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Ramazan ÇOMAKLI
(Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Sertaç DÜNDAR

Tarih: 27/06/2024

ÖZET**DOKTORA TEZİ****EPB-TBM'lerin Kazı Performansının Analizi ve Değerlendirilmesi:
Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli Örneği****Sertaç DÜNDAR****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. Niyazi BİLİM****2024, 147 Sayfa****Jüri****Prof. Dr. Niyazi BİLİM
Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
Prof. Dr. Alparslan TURANBOY
Prof. Dr. Bilgehan KEKEÇ
Doç. Dr. Ramazan ÇOMAKLI**

Dünya nüfusunun hızla artması sonucu büyük şehirlere göç giderek artmış ve şehirlerin yapılarının değişmesine sebep olmuştur. Bu nüfus artışı sonucu yer üstü kullanımı yetersiz kalmış ve yeraltı yapılarının kullanımının ve ihtiyacının artmasına yol açmıştır. Günümüz şartlarında yeraltı yapılarının bu denli önem kazanması ile tünelcilik faaliyetleri de çok sık uygulanmaya başlanmıştır. Tünelcilik faaliyetlerinde kullanılan geleneksel yöntemler yerini yeni teknolojilerin ve metotların kullanımına bırakmıştır. Mekanize kazıcılar ve nakliye ekipmanları sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde mekanize kazının verimli olması, daha güvenli çalışma koşullarının sağlaması ve daha yüksek kazı hızlarına ulaşılması sayesinde tünelcilik çalışmalarında çok sık tercih edilir olmuştur. Mekanize kazının faydalarından yararlanabilmek için ön çalışmalar çok iyi bir şekilde yapılmalıdır. Kazı güzergahının jeolojik ve fiziko-mekanik özelliklerinin tanımlanması, karşılaşılabilecek problemlerin önceden tahmin edilip tedbirlerin alınması ve kullanılacak kazı ekipmanının doğru seçilmesi çok büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmalar yapılmadığı takdirde büyük ekonomik ve zaman kayıplarının olabilecektir. Kazı ekipmanının doğru seçilmesinin yanında, performanslarının doğru tahmin edilmesi de projelerin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi ve maliyet analizlerinin daha hassas bir şekilde yapılabilmesi için çok büyük önem arz etmektedir. Yapılan tez çalışmasının amacı, kazılan formasyonun fiziko-mekanik özelliklerine bağlı olarak tam cepheli tünel açma makineleri için performans tahmin modellerinin geliştirilmesidir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin performans tahmininin yapılması projenin planlanama aşamasında proje süresinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesine ve projenin yapılma sürecindeki kontrolü sağlaması için kullanılmaktadır. Ayrıca projenin maliyetinin çok daha iyi bir şekilde hesaplanabilmesi için önemli bir hazırlık çalışmasıdır. Çalışma kapsamında iki farklı tünel projesinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk proje Konya ili sınırları içerisinde yer alan Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneli projesidir, ikinci proje ise İstanbul il sınırlarında bulunan Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Hattı projesidir. İki projede de aynı tip TBM olan pasa basınçlı TBM kullanılmıştır. Performans tahmin modeli oluşturulması için SPSS istatistik programı ve Python yazım dilinden yararlanılarak regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Performans tahmin modelinde çıktı olarak performans analiz parametrelerinden olan ilerleme hızı parametresi kullanılmıştır. Performans tahmin modeli geliştirilmesi için kayaçların fiziko-mekanik özellikleri bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Yapılan analizlerin ardından kayaçların fiziko-mekanik özelliklerine bağlı oluşturulan tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modelinin korelasyon katsayısı 0,51 ve 0,42 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: EPB, İlerleme Hızı, Performans tahmini, TBM, Tünel Açma

ABSTRACT**PhD THESIS****Analysis and Evaluation of Excavation Performance of EPB-TBMs: Hadim-Afşar-Bağbaşı Water Supply Tunnel Example****Sertaç DÜNDAR****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering****Advisor: Prof. Dr. Niyazi BİLİM****2024, 147 Pages****Jury****Prof. Dr. Niyazi BİLİM
Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
Prof. Dr. Alparslan TURANBOY
Prof. Dr. Bilgehan KEKEÇ
Doç. Dr. Ramazan ÇOMAKLI**

The rapid increase in the global population has led to a corresponding surge in migration to major cities, resulting in significant changes to urban structures. This demographic growth has caused surface-level space to become insufficient, thus increasing the utilization and demand for underground structures. Consequently, tunneling activities have become more prevalent due to the growing importance of underground infrastructure. Traditional methods in tunneling have been superseded by the adoption of modern technologies and methodologies, particularly the widespread use of mechanized excavation equipment and transportation tools. The efficiency of mechanized excavation, combined with its provision of safer working conditions and higher excavation speeds, has made it a preferred choice in tunneling projects. However, thorough preliminary studies are essential to fully harness the benefits of mechanized excavation. These studies involve identifying the geological and physico-mechanical characteristics of the excavation route, anticipating potential challenges, and selecting appropriate excavation equipment. Neglecting these preparatory measures may lead to significant economic and temporal losses. In addition to selecting the right excavation equipment, accurately predicting their performance is crucial for ensuring the successful execution of projects and conducting precise cost analyses. The objective of the thesis is to develop performance prediction models for full-face tunnel boring machines based on the physico-mechanical properties of the excavated formation. Predicting the performance of full-face tunnel boring machines aids in accurately estimating project duration during the planning phase and ensuring project control during implementation. Furthermore, it contributes to more precise cost estimations, making it an important preparatory endeavor. The study encompasses work on two distinct tunnel projects: the Hadim-Afşar-Bağbaşı Water Supply Tunnel project within Konya province and the Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Line project within Istanbul province. Both projects utilized the same type of tunnel boring machine, namely the Earth Pressure Balance TBM. Regression analyses, conducted using the SPSS statistical program and the Python programming language, were employed to develop the performance prediction model. The advancement rate parameter was used as an output parameter in the performance prediction model, with the physico-mechanical properties of rocks selected as independent variables. Subsequent analyses yielded correlation coefficients of 0.51 and 0.42 for the performance prediction model based on the physico-mechanical properties of rocks.

Keywords: Advance Rate, EPB, Performance Prediction, TBM, Tunnelling

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde Konya ili sınırları içerisinde bulunan Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesi çalışma sahalarını bizlere açarak gerekli tüm desteği bizden esirgemeyen İmaj-Abad İnşaat Firmasına ve değerli çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesinde çalışmamıza izin vererek her türlü desteklerini sunan DSİ 4. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bir diğer çalışma sahası olan Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Hattı projesinde yüklenici firma olan; Doğu İnşaat-Özaltın İnşaat-Yapı Merkezi İnşaat ortak girişimine bizlere her türlü desteği verdikleri için teşekkür ederim.

Gerek laboratuvar çalışmalarında gerekse arazi çalışmalarında bana her zaman desteklerini esirgemeyen Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali TANER, öğretim elemanlarından Arş. Gör. Mehmet UZBAŞ'a ve Konya Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde görev yapan Dr. Öğr. Üyesi Ahmet SOLAK'a, kıymetli intern doktor Muhammed Alper UĞRAŞ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Doktora tez çalışmamda bulunan ve bana çok değerli katkılarda bulunan tez izleme komitesi üyelerim sayın Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY ve Prof. Dr. Alparslan TURANBOY hocalarıma tüm saygımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tüm lisansüstü eğitim hayatım boyunca tüm desteğini hiç esirgemedi sunan çok kıymetli danışmanım Prof. Dr. Niyazi BİLİM'e tüm kalbimle teşekkürlerimi sunuyorum.

Tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca bana her türlü maddi ve manevi desteklerini sunan her koşulda bana olan desteklerini sürdüren sevgili babam Süleyman DÜNDAR ve annem Necla DÜNDAR'a şükranlarımı sunuyorum.

Tüm çalışmalarım da her zaman bana destek olan her tökezlediğimde beni kaldıran ailem, oğullarım Selim Alp DÜNDAR ve Mehmet Han DÜNDAR ile biricik eşim Zeynep Pelin DÜNDAR'a sonsuz şükranlarımı ve minnetimi sunuyorum.

Elde edilen sonuçların daha ileri aşamada yapılacak çalışmalara ve endüstriyel iş ortaklıklarına faydalı olmasını dilerim.

Sertaç DÜNDAR
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Problemin Tanımı	2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Hedefi	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Tünel Tanımı.....	5
2.2. Tünelcilik Tarihi	5
2.3. Tünel Çeşitleri ve Tünel Açılmasını Gerektiren Durumları	7
2.4. Geleneksel Tünel Açma Yöntemleri.....	8
2.4.1. Batırma Yöntemi ile Tünel Açma.....	10
2.4.2 Aç-Kapa Yöntemi ile Tünel Açma	10
2.4.3. Klasik Tünel Açma Yöntemleri.....	11
2.5. Mekanize Tünel Açma Yöntemleri.....	13
2.5.1 Kısmi cepheli tünel açma makineleri.....	13
2.5.2. Tam cepheli tünel açma makineleri	15
2.5.3 Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Tasarım Parametreleri	23
2.6. Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Performans Analizi için Kullanılan Parametreler	27
2.6.1. İlerleme Hızı	27
2.6.2. Net Kazı Hızı	27
2.6.3. Faydalanma Oranı.....	28
2.6.4. Spesifik Enerji.....	28
2.7. Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Performansını Etkileyen Parametreler	30
2.8. Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri Performans Tahmin Yöntemleri	31
2.8.1 CSM modeli	33
2.8.2 NTNU modeli	34
2.8.3. Diğer araştırmacıların çalışmaları.....	34
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
3.1. Çalışmaların Gerçekleştirildiği Tüneller	38
3.1.1. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tüneli	39
3.1.2. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro hattı projesi.....	48
3.2. Çalışma Sahalarında Kullanılan Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri	58
3.2.1. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tüneline kullanılan tam cepheli tünel açma makinesi	58

3.2.2. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro hattında kullanılan tam cepheli tünel açma makinesi.....	61
3.3. Çalışma Sahalarından Numune ve Kazı Raporlarının Temini.....	63
3.3.1. Hadım-Afşar-Bağbaşı su ikmal tüneline numune ve tam cepheli tünel açma makinesinin kazı raporlarının temin edilmesi	63
3.3.2. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro projesinden numune ve tam cepheli tünel açma makinesinin kazı raporlarının alınması.....	67
3.4. Laboratuvar Çalışmaları	70
3.4.1. Su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik tayini deneyi.....	70
3.4.2. Nokta yükleme dayanımı deneyi	76
3.4.3. Kırılma değeri (S_{20}) belirlenmesi	84
3.4.4. Siever's minyatür delme deneyi (S_1).....	90
3.4.5. Delinebilirlik oranı indeksinin (DRI) belirlenmesi.....	99
3.5 Performans Tahmin Modeli Oluşturulması	106
3.5.1. Sosyal bilimler için istatistik paketi (SPSS) programı.....	106
3.5.1. Python yazım dili ile yapay zeka kullanımı.....	107
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	110
4.1. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi Sonuçları.....	112
4.1.1. SPSS programı aracılığıyla performans tahmin modeli geliştirilmesi.....	112
4.1.2. Python yazım dili ile performans tahmin modelinin geliştirilmesi	114
4.1.3. Ridge analizi ile geliştirilen performans tahmin modeli.....	115
4.1.4. Lasso analizi ile geliştirilen performans tahmin modeli	117
4.2. Hadım-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli Projesi Sonuçları.....	118
4.2.1 SPSS programı aracılığıyla performans tahmin modeli geliştirilmesi.....	119
4.2.2. Python yazım dili ile performans tahmin modelinin geliştirilmesi	120
4.2.3. Ridge analizi ile geliştirilen performans tahmin modeli.....	122
4.2.4. Lasso analizi ile geliştirilen performans tahmin modeli	124
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	126
5.1 Sonuçlar	127
5.2 Öneriler	130
KAYNAKLAR	132



1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması sonucu büyük şehirlere göç giderek artmış ve şehirlerin yapılarının değişmesine sebep olmuştur. Bu nüfus artışı sonucu yer üstü kullanımı yetersiz kalmış ve yeraltı yapılarının kullanımının ve ihtiyacının artmasına yol açmıştır. Özellikle büyük şehirlerde alt yapı ve ulaşım ihtiyaçları için yer altı projelerinin gerçekleştirilmesi çok büyük önem kazanmıştır. Bu nedenle metro çalışmaları tüm dünyada çok büyük bir ivme kazanmıştır. Metro sistemlerinin hızlı ve ekonomik olmaları ve büyük şehirlerde yer üstü ulaşım problemlerini çözmek için çok etkili bir yöntem olması metro projelerini arttırmıştır.

Eski uygarlıkların barınma, depolama ve su nakli için kullandığı tünelcilik faaliyetleri gelişerek yeni teknikler ile günümüzde de uygulanmaktadır. Günümüz şartlarında yeraltı yapılarının bu denli önem kazanması ile tünelcilik faaliyetleri de çok sık uygulanmaya başlanmıştır. Tünelcilik faaliyetlerinde kullanılan geleneksel yöntemler yerini hızla yeni teknolojilerin ve metotların kullanımına bırakmıştır. Bu nedenle günümüzde tünellerde mekanize kazı makineleri ve nakliye ekipmanları sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır.

Mekanize kazı; kayacın mekanik bir makine ile kazılması işlemidir. Günümüzde mekanize kazının düşük maliyetli olması, daha güvenli çalışma koşulları sağlaması ve daha hızlı ilerleme yapabilmesi sayesinde tünelcilik çalışmalarında çok sık tercih edilmektedir. Mekanize kazının faydalarından yararlanabilmek için ön çalışmalar çok iyi bir şekilde yapılmalıdır. Kazı güzergahının jeolojik ve jeofiziksel özelliklerinin tanımlanması, karşılaşılabilecek problemlerin önceden tahmin edilip tedbirlerin alınması ve kullanılacak kazı ekipmanının doğru seçilmesi açısından çok büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmalar yapılmadığı durumlarda çok büyük ekonomik ve zaman kayıpları ile karşılaşılması kaçınılmaz olacaktır.

Tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) günümüzde çok sık tercih edilen mekanize kazı araçlarından birisidir. Tam cepheli tünel açma makineleri ile günümüzde şehirlerde alt yapı çalışmaları ve ulaşım tünelleri sık sık projelendirilmekte ve açılmaktadır. Klasik tünel açma yöntemlerine göre daha emniyetli ve daha hızlı bir kazı imkânı sunmasının yanı sıra şehir içinde yer yüzüne etkisinin de az olması tam cepheli tünel açma makinelerinin önemini arttırmaktadır.

1.1 Problemin Tanımı

Günümüzde ihtiyaçlara göre farklı tünel çeşitleri kullanılmaktadır. Yapılacak tünelin uzunluğuna ve kullanım amacına göre farklı tünel açma metotları bulunmaktadır. Tünel açma metotları göz önünde bulundurulduğunda mekanize tünel açma yöntemleri geniş kullanım alanları bulmaktadır. Mekanize tünel açma yöntemlerinden olan tam cepheli tünel açma makineleri ise en çok tercih edilen tünel açma yöntemlerinden birisidir.

Tam cepheli tünel açma makineleri ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da yüksek ilerleme hızlarına ulaşması ve daha güvenli çalışma ortamı sağlaması sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Tam cepheli tünel açma makineleri ile yapılan tünel kazılarında daha az titreşim olması ve tahkimatın hızlıca yapılabilmesi çevresel etkileri de en az seviyeye çekmesi nedeniyle de avantaj sağlamaktadır.

Tünel projelerinin doğru analizler yapılarak iyi bir şekilde planlaması çok önem arz etmektedir. Tam cepheli tünel açma makinesinin seçimi ve performansı bütün projeyi etkileyen önemli unsurlardır. Tam cepheli tünel açma makinesinin performansının tahmin edilebilmesi projenin süresini ve maliyetini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla tam cepheli tünel makinesinin performansının tahmin edilebilmesi çok büyük önem arz etmektedir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin performansını etkileyen pek çok parametre bulunmaktadır. Bu parametreleri kazılan kayacın jeolojik, petrografik, mineralojik, fiziko-mekanik özellikleri gibi formasyona bağlı parametreler ve tam cepheli tünel açma makinesinin çalışma parametreleri, makine özellikleri gibi ekipmana bağlı parametreler olarak gruplandırmak mümkündür.

Tam cepheli tünel açma makinelerinin performansının tahmin edilebilmesi projenin en önemli kısımlarından birisidir. Bir tünel projesinin süresinin hesaplanabilmesi için tam cepheli tünel açma makinesinin ilerleme hızı doğru bir şekilde tahmin edilmelidir. Tam cepheli tünel açma makinesinin performansının doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi ekonomik kayıpların önüne geçilmesi için çok önemlidir. Tünel açma projelerinde, makine performansının önceden tahmin edilebilmesi proje sürelerinin hesaplanmasında, mühendislik kaynaklarının ve maliyet planlama çalışmalarında kritik öneme sahiptir.

Gelişmiş performans tahmin modelleri, TBM'lerin tasarlanması, operasyonel performansının optimize edilmesi ve tünel kazı süreçlerinin iyileştirilmesi için önemli

katkılar sağlamaktadır. TBM performansını etkileyen parametrelerin önceden belirlenmesi ve modellenmesi, projeye özgü tünel koşullarının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. TBM performansı hakkında daha güvenilir tahminler yapmak için daha gelişmiş analitik modellere ihtiyaç bulunmaktadır. Bugüne kadar geliştirilen TBM performans tahmin modellerinde, tahmin doğruluğunu arttırmak için çalışmalar devam etmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Hedefi

Günümüzde pek çok tünel çalışmasında tercih edilen tam cepheli tünel açma makineleri ilk yatırım maliyeti çok yüksek olan bir mekanize kazı aracıdır. Dolayısıyla tam cepheli tünel açma makinesinin seçimi ve işletilmesi çok önemlidir. Tünel projelerinde henüz hazırlık aşamasında iken proje boyunca karşılaşılabilecek problemler ve projenin başından sonuna kadar detaylı bir şekilde planlanması çok önemlidir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin kullanılacağı bir projede proje takvimi çok iyi bir şekilde hazırlanmalıdır. Böylece özellikle ekonomik anlamda daha iyi bir planlama sağlanacaktır. Tam cepheli tünel açma makineleri için ilerleme hızının iyi bir şekilde belirlenmesi projenin süresini belirlemek için en önemli parametrelerden birisidir. Proje süresinin doğru bir şekilde belirlenmesi projenin işleyişinin planlanması ve ekonomik değerlerin belirlenmesi açısından çok önemlidir.

Günümüzde sıklıkla kullanılan tam cepheli tünel açma makineleri ilk yatırım maliyeti yüksek olan kazıcı makinelerdir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin kullanılacağı bir projede öncelikle hazırlık aşaması çok detaylı bir şekilde belirlenmelidir.

Tünel projesi sürecinde tam cepheli tünel açma makinesinin performans analizi düzenli olarak yapılarak projenin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi sağlanmaktadır. Tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modeli ile performans analizleri detaylı bir şekilde yapılarak tam cepheli tünel açma makinesinin çalışma verimi hesaplanabilmekte ve projenin ilerleyen aşamaları bu analizlere göre planlanmaktadır. Aynı zamanda farklı formasyonlar içeren tünel güzergahlarında tam cepheli tünel açma makinesinin kazının ilerleyen aşamalarındaki performansı tahmin edilerek proje planlanması yapılabilecek veya proje planına uygunluğu kontrol edilebilecektir.

Tam cepheli tünel açma makinesinin seçimi projenin en önemli kısımlarından birisini oluşturmaktadır. Yapılacak tünel projesi için yanlış tipte ve özellikte seçilmiş

olması proje sürecinin uzamasına, bakım-onarım ve işçilik maliyetlerinin artmasına hatta projenin bitirilemeden sonlanmasına neden olmaktadır. Tam cepheli tünel açma makinesinin performansının tahmin edilebilmesi proje süresinin ve maliyet hesaplamalarının daha doğru bir şekilde yapılmasını sağlayacaktır. Bir diğer önemli parametre olan tam cepheli tünel açma makinesinin seçimi için de önemli bir veri kaynağı olmaktadır. Dolayısıyla tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modeli ile kazılacak formasyona en uygun tam cepheli tünel açma makinesi seçimi için önemli bir veri elde edilmiş olacaktır.

Yapılan tez çalışmasının amacı mekanize kazı yöntemlerinden olan tam cepheli tünel açma makinesinin (TBM) kazılan formasyonun fiziko-mekanik özelliklerine bağlı olarak performans tahmin modellerinin geliştirilmesidir. Performans tahmin modellerinin geliştirilmesi proje planlaması açısından çok faydalı olmaktadır. Performans tahmin modeli ile ekonomik kayıpların önüne geçilmektedir. Tez çalışmasının bir diğer amacı ise, Konya bölgesinde açılacak tüneller ve benzer formasyonlarda açılan tüneller için performans tahmin modellerinin oluşturularak kullanıcılara ve literatüre katkı sağlanmasıdır.

Çalışma kapsamında iki farklı tünel projesi incelenmiştir. İlk proje Konya ili sınırları içerisinde yer alan Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneli projesidir. İkinci proje ise İstanbul il sınırları içerisinde bulunan Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Hattı projesidir. İki projede de aynı tip tam cepheli tünel açma makinesi olan pasa basınçlı TBM (EPB-TBM) kullanılmıştır.

Yapılan tez çalışması kapsamında tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modeli ile operatörün performansı da denetlenebilecektir. Bu sayede tam cepheli tünel açma makinesinin performansını etkileyen parametrelerden birisi olan operatör yeteneği de kontrol edilebilecektir.

Tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modeli ile proje planlaması yapan özel sektör kuruluşları ve kamu kurumları tünel projelerini daha hassas bir şekilde planlayabilecekler ve ekonomik kayıpların önüne geçilebileceklerdir.

Yapılan tez çalışması kapsamında kayaçların fiziko-mekanik özelliklerine bağlı olarak geliştirilen performans tahmin modelleri projelerin planlanma aşmasından başlayarak, tam cepheli tünel açma makinesinin seçimi, seçilmiş olan tam cepheli tünel açma makinesinin çalışma veriminin kontrol edilmesi ve operatör verimini değerlendirmek için önemli bir katkı sağlayacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tünelcilik faaliyetleri pek çok farklı metot ve farklı kazıcı ekipmanlar ile yapılmaktadır. Tünelin kullanım amacı, jeolojik özellikler ve tünelin tasarım parametreleri tünelcilik yöntemini etkileyen faktörlerdir.

Bu bölümde tünelcilik tarihi, faaliyetler ve metotları, tam cepheli tünel açma makine (TBM) çeşitleri, tasarım parametreleri, performans tahmin yöntemleri ile ilgili bilgiler verilecektir. Tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin metotları üzerine araştırmacılar tarafından yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur.

2.1. Tünel Tanımı

Tünel kelimesi anlam olarak; iki ucu açık yeraltı açıklıkları olarak tanımlanabilmektedir. Dayanç (2011) ise tünelleri yeraltı açıklıkları olarak tanımlayıp bu açıklıkların eni ve boyunun tünelin yapılış amacına göre değiştiğini söylemektedir. Köse ve diğ. (2007) yaptığı tanımlamaya göre; demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal, metro gibi taşıma yolunun bir kısmının yeryüzünden geçirilmesinin teknik veya ekonomik açıdan uygun olmadığı durumlarda bu bölümün yeraltından geçirilmesi için başvuru sanat yapılarıdır. Maden mühendisliği açısından tünel kelimesinin tanımı ise kazı ve destekleme yapılabilen yeraltı kaya yapılarıdır.

2.2. Tünelcilik Tarihi

Milattan önce 40000 yılında Neandertal insanların el yordamı ile Afrika kıtasında eski adıyla Svaziland şimdiki ismiyle Esvatini Krallığı'nda bulunan Bamvu tepesinde yapılan ilk madencilik çalışmalarına rastlanılmıştır. Daha sonra el ile kazı yöntemleri ateş kullanım teknikleri ile daha gelişmiştir. Kayaların önünde bir ateş yakılmıştır ve ardından ateş söndürülerek hızlıca kayanın soğutulması sağlanmıştır. Böylece termal gradyan ile kayanın çatlatılması sağlanmıştır. İlerleyen zamanlarda farklı medeniyetler tünelcilik faaliyetlerine ve yeraltı kazılarına devam etmişlerdir. Bu kazılar Mısırlılarda olduğu gibi dini inançları doğrultusunda veya milattan önce 10. yy'da Dicle ve Fırat nehirleri arasında açılan tüneller ile şehirlere su kaynaklarından suların taşınması amacı ile yapılmıştır.

Mühendisi olduğu bilinen ilk tünel ise Samos adasında açılmıştır. Mühendis Eupalinos de Megara milattan önce 530 yıllarında adanın merkezine su temin edilebilmesi için 1 km uzunluğunda tünel inşa etmiştir. Bu tünel helenik dünyanın üç harikasından birisi olarak kabul edilmiştir (ITA, 2021).

Roma devrinde, İstanbul'da tarihi yarımada altında kaçış amaçlı sayısız tünel inşa edilmiştir. Osmanlı döneminde, 2. Abdülhamit devrinde Galata ve Beyoğlu arasındaki ilk demiryolu tüneli 1874 tarihinde Fransız Mühendis Eugene Henri Gavand tarafından inşa edilmiştir (Yıldırım, 2009). Bu tünel aynı zamanda Türkiye'deki ilk metro ve dünyadaki 3. metrodur.

Tarihte bilinen ilk tüneller kanal inşaatları ile başlamıştır. Avrupa'da ilk defa barut kullanılarak açılan kanal yüneli 1679-1681 yılları arasında Fransa'da açılan ve 157 metre uzunluğa sahip olan Malpas Tünelidir. (ITA, 2021). Amerika' da inşa edilen ilk tünel ise, Auburn' da Schuykill kanalı üzerinde tamamlanan tüneldir. 250 metre uzunluğunda ve yaklaşık 6,5 x 5,49 m. kesitli bu tünel kötü zemin koşulları nedeni ile kısa sürede deforme olmuştur (Köse ve diğ., 2007).

1851-1875 yılları arasında inşa edilen 7,64 km uzunluğundaki demiryolu tüneli olan Hoosac Tünelinde ilk kez nitroglicerini kullanılmıştır (ITA, 2021).

1863 yılında Londra metrosunun inşa edilmesi şehirlerin altında yeni bir toplu taşıma sisteminin yaygınlaşması için önemli bir dönüm noktası olmuştur. Londra metrosunun ardından Paris, Viyana, Stokholm, Glaskow gibi şehirler bu gelişmeleri takip ederek şehir içi yeraltı toplu taşıma sistemlerini kurmuşlardır (ITA, 2021).

Ülkemizde ise tünelcilik gelişmeleri tıpkı dünyada olduğu gibi hızlanarak artmıştır. 2007 yılında 14 yıllık bir çalışmanın sonucu olarak 2,9 km uzunluğundaki Bolu Tüneli açılmıştır. Bu tünel karayolu tünelidir. 2006 yılında ise dönemi için Türkiye'nin en uzun tüneli olan Nefise Akçelik tüneli hizmete girmiştir. 3,778 km uzunluğundaki Nefise Akçelik tüneli Türkiye'nin en uzun tüneli unvanını 2018 yılında açılan ve 14,346 km uzunluğunda olan bir başka karayolu tüneli olan Ovit Dağı tüneline kaptırmıştır. Türkiye'de ayrıca su altından gerçekleştirilen 2 adet tünel projesi daha vardır. Bu projeler ise; 2013 yılında açılan 1,8 km uzunluğundaki demiryolu tüneli olan Marmaray Tüneli ve 2016 yılında hizmete giren 5,4 km uzunluğundaki Avrasya Sualtı Karayolu Tüneli'dir. İki projede İstanbul boğazından geçerek Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlamaktadır.

2.3. Tünel Çeşitleri ve Tünel Açılmasını Gerektiren Durumları

Günlük hayatımızda pek çok alanda karşılaştığımız tünellerin sınıflandırılması genellikle kullanım amaçlarına göre yapılmaktadır.

- Mineral ve maden yataklarına ulaşmak için açılan tüneller
- Su tünelleri
- Askeri amaçlı tüneller
- Sığınak amaçlı tüneller
- Haberleşme nakil hatları
- Gaz nakil tünelleri
- Su tünelleri
- Elektrik nakil tünelleri
- Yeraltı boşluklarına ulaşma amacıyla açılan araştırma tünelleri
- Derivasyon tünelleri
- Drenaj tünelleri
- Yayalar için geçiş tünelleri
- Demiryolu tünelleri
- Karayolu tünelleri
- Denizcilik amaçları ile açılan tüneller
- Metro tünelleri
- Kanalizasyon tünelleri

Tünelcilik faaliyetlerinin yapılması için bazı şartların sağlanması gerekmektedir. Tünel açılmasını gerektiren durumları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Dağlık ve engebeli arazide, yeryüzünden aşlamayan sırt ve tepelerin geçilmesi gerektiği durumlarda,
- Toprak kayması, kaya devrilme ve yuvarlanmaları veya çığ oluşma tehlikesi bulunan bölgelerde,
- Demiryollarının geçtiği dağlık bir arazide tırmanmanın azaltılması amacıyla
- İnşaatı ve bakım masrafları yüksek, kendisini tutamayan zeminlerde büyük yarmalardan kurtulmak,
- Gaz boruları, elektrik nakil hattı gibi şehirlerin altyapı hizmetlerinin daha sağlıklı sağlanabilmesi amacıyla,

- Su ikmal tünellerinde temiz ve kirli suyun karışmaması için,
- Mevcut karayollarında veya demiryollarında genişletilmenin veya yeni yolların açılmasının mümkün olmadığı durumlarda,
- Şehir için toplu taşıma projelerinde,
- Birbirlerinden doğal engeller ile ayrılmış bölgelerin birleştirilmesinde

Tünelcilik faaliyetleri günümüzde son derece önemli bir hal almıştır. Yukarıda tünel çeşitlerini ve açılması gereken durumlar göz önüne alındığında tünelcilik faaliyetleri hayatımızın hemen hemen her köşesinde karşımıza çıkmaktadır. Gün geçtikçe daha modernize ve mekanize makinelerin kullanımının artmasıyla daha sık şekilde tünelcilik faaliyetlerinin yapılması kaçınılmaz bir durumdur.

Tünelcilik faaliyetlerinin gerekliliği ve bize sundukları küçümsenemez. Tüneller bağlantıları güçlendirir ve kestirmeler oluşturmaktadır. Trafiğin yeraltına taşınması yer üstünde yaşam kalitesini artırır ve ekonomik olarak da büyük etkileri olmaktadır. Yeraltı depoları, enerji nakilleri, su arıtma tesisleri ve sığınaklar için tünellerin açılması, yeryüzündeki sınırlı alan olması, çevrenin korunması ve güvenlik nedenleri göz önüne alındığında zorunluluk olarak düşünülebilmektedir. Fakat şunu da unutmamak gerekir ki, tünel inşaatları riskli, maliyeti yüksek ve son derece teknik uzmanlık isteyen faaliyetlerdir (Kolymbas, 2005).

2.4. Geleneksel Tünel Açma Yöntemleri

Rostami ve diğ. (1994) tünelcilik faaliyetlerini kazı işlemi, kazılan pasanın taşınması, tahkimat, enjeksiyon, drenaj ve havalandırma işlemlerinin birlikte ve uyumlu bir şekilde yapılması olarak tanımlamışlardır. Bu işlemlerin döngü halinde yapılmasına kazı döngüsü denilmektedir.

Bell (1994) ise tünel açma işleminin başlangıçtan bitişe kadar olan safhalarını aşağıdaki gibi özetlemiştir.

- Tünel inşasının yapılacağı bölgenin jeolojik yapısı tespit edildikten sonra tünelin konumu, tünelin güzergâhı ve tünelin derinliği belirlenmelidir. Belirlenen güzergahta bulunan kaya formasyonlarının özellikleri ya da zemin özellikleri, dayanım parametreleri, yapısal bozukluklar (fay, kırık, eklem takımı, vb.) ve yeraltı su durumu belirlenmelidir.

- Yapılan mühendislik hesaplamaları ve daha önceden elde edilen veriler ışığında tünel kazı kesiti, kazı yöntemi, kazı için kullanılacak makinenin belirlenmesi,

kullanılacak olan tahkimat elemanları ve eğer gerekli ise drenaj yöntemleri belirlenmelidir.

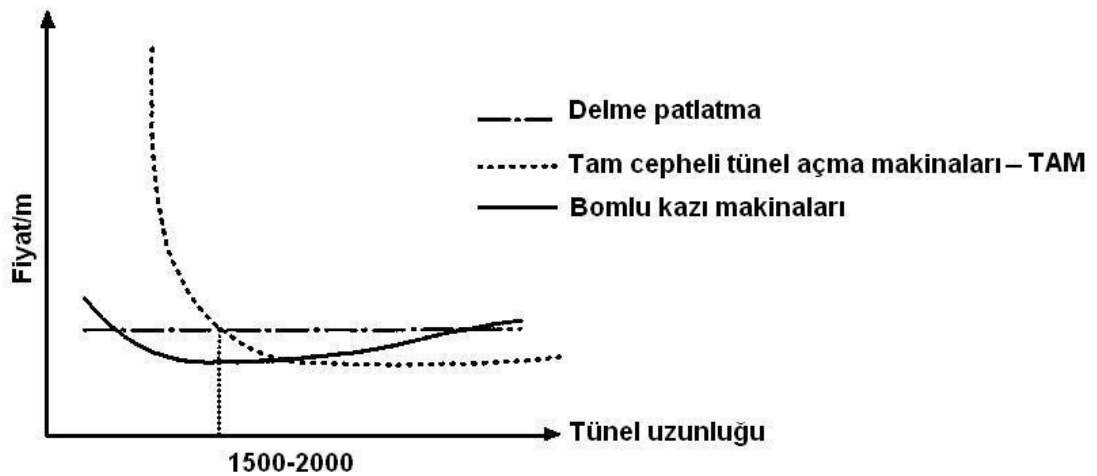
- Yapısal bir model oluşturularak elde edilen veriler farklı zemin özellikleri ve farklı tahkimat elemanları kullanılarak farklı senaryolar oluşturulmalıdır. Bu farklı uygulamalarda emniyet faktörüne önem verilmelidir.
- Gerilme ve deformasyona bağlı olarak hazırlanan sistemin güvenilirliğinin test edilmesidir.
- Tünel kazı işlemi ile eş zamanlı olarak yerinde ve sürekli ölçümler yapılmalıdır ve bu ölçümler sonucu deformasyon değerlerinin zaman ve ilerleme miktarına bağlı olarak değişmediği görülüyorsa kazı işlemine devam edilmelidir.

Tünel açma işlemlerine genel olarak baktığımız zaman açılma şekline göre dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Batırma yöntemi
- Aç – kapa yöntemi
- Klasik tünel açma yöntemleri
- Mekanize tünel açma

yöntemleridir.

Açılacak tünelin kullanım amacı, tünelin açılacağı konum, jeolojik ve hidrojeolojik koşullar, tünel uzunluğu gibi faktörler tünel açma metodunu belirlenmesinde önemli etkenlerdir. Şekil 2.1’ de tünel uzunluğu ile maliyet arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Kullanılan kazı yöntemine göre tünel uzunluğu ile birim ilerleme maliyeti arasında ki ilişki (Pakes, 1991)

2.4.1. Batırma Yöntemi ile Tünel Açma

Batırma yöntemi ile yapılan tüneller genel olarak dört aşamada yapılmaktadır. Bunlar; prefabrik betonarme tüpün yeryüzünde imal edilmesi, yapımı tamamlanan tüplerin su altındaki yerleşim yerlerinin hazırlanması, batırılıp diğer tüpler ile birleştirilmesi ve son olarak da dolgu yapılması safhalarıdır.

Batırma yöntemi ile yapılan tünellerin yapım aşamasındaki ölçümler diğer tünel inşalarından daha farklı olmaktadır. Batırma tip tünel inşalarında kullanılan ölçüm yöntemleri hidrografik ve GPS ölçümlerinden yararlanılarak yapılmaktadır.

Batırma yöntemi ile yapılan ilk tünel 1893 yılında ABD Boston’da kanalizasyon sistemi için kullanılmıştır. Daha sonra 1910 yılında yine ABD Detroit’te demiryolunun nehir geçişi için kullanılmıştır. 2013 yılında ülkemizde açılan Marmaray Projesi’de dünyanın en derin batırma yöntemi ile yapılan tünel projesi olarak tarihteki yerini almıştır (Ünlü, 2010).

2.4.2 Aç-Kapa Yöntemi ile Tünel Açma

Aç – Kapa yöntemi genel olarak sığ derinlikte açılan tünel işlemlerinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde zeminde bir hendek açılır ve daha sonra üzerine gelecek yükü taşıyabilecek kapasitede bir tahkimat sistemi ile bu hendeğin üzeri örtülür. Aç – kapa yönteminde kazı yönü dikey yönlüdür ve geçici tahkimat elemanları ile tahkim edilmektedir. Aç – kapa yönteminin kullanımında en büyük problemler zeminin duraylılığı ve inşası aşamasında yeraltı ulaşım hatları ve trafik sistemini aksatabilmesidir. Yeraltı suyu durumu yapım ve işletmecilik aşamalarında; drenaj ve izolasyon basamaklarında iş zorluğu ve maliyet açısından önemlidir (Oğul, 2017). Yeraltı suları yüzeye yakınsa su seviyesi düşürülmesi ya da suyun derin kuyulara drene edilmesi gerekir (Ünlü, 2010). Şekil 2.2’ de aç – kapa yönteminin yapım aşaması görülmektedir.



Şekil 2.2 İnşası devam eder aç – kapa yöntemi ile açılan bir tünel (Anonymous 1, 2023)

2.4.3. Klasik Tünel Açma Yöntemleri

Klasik tünel açma yönteminde kazı işlemi delme – patlama yöntemi ile yapılmaktadır. Tünel arınındaki ilerleme formasyon özelliklerine bağlı olarak tek seferde arının tamamının veya parçalı olarak arının kazısı yapılmaktadır (Ünlü 2010). Tünel açma işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Mekanize yöntemler ile kazılması zor olan, mekanize yöntemler ile kazılması daha maliyetli olan belli bir tünel uzunluğuna kadar kullanılmaktadır. Delme – patlatma yöntemi ile tünel açılmasında işlemler belirli bir sıra ile yapılmaktadır; ilk olarak patlatma deliklerinin önceden belirlenen patlatma paternine göre açılma işlemi yapılır ardından açılan deliklere patlayıcı maddelerin yerleştirilmesi ve patlatılması sağlanır. Patlatma işleminin ardından ortama salınan zehirli gazların arından uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu gazlar tahliye edildikten sonra düşme tehlikesi olan tepedeki veya cidarlarda bulunan iş güvenliğini ve işçi sağlığını tehdit eden kayaçların temizlenme işlemi yapılır. Tahkimatın yapılması ve akabinde pasanın temizlenmesi ile bir atımlık ilerleme kaydedilmiş olur. Delme – patlatma yöntemi ile tünel açmanın bazı faydaları ve sakıncaları bulunmaktadır. Delme – patlatma ile tünel açma yönteminin fayda ve sakıncaları Çizelge 1.1’ de belirtilmiştir.

Çizelge 1.1. Delme – patlatma yöntemi ile tünel açmanın faydaları ve sakıncaları

Faydaları	Sakıncaları
İlk yatırım maliyeti düşüktür	İlerleme hızı düşüktür
Her formasyonda uygulanabilir	Tünel şeklini ve çapını korumak zordur
Uzun zamandır kullanılan bir yöntem olması	Çevresel etkileri kaçınılmazdır

Klasik tünel açma yöntemleri genel olarak delme – patlatma yöntemi ile yapılmaktadır. Tünel güzergahının bulunduğu formasyona göre paternler farklılık göstermektedir. Günümüze kadar pek çok farklı paternlerde tünel açma yöntemleri geliştirilmiş ve kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları;

- Alman Yöntemi
- Belçika Yöntemi
- Eski Avusturya Yöntemi
- İngiliz Yöntemi
- İtalyan Yöntemi
- İsviçre Yöntemi
- Yeni Avusturya Yöntemi (NATM)

Tünel açma yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan NATM, uygun klasik yöntemle tünel açma tekniklerinin en deneysel ve esnek olanı, en uygun destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır (Ünlütepe ve diğ., 2005). Yeni Avusturya Yöntemi (NATM) ile tünel açma işlemlerinde delme – patlatma yerine kazıcı makineler kullanılmaktadır.

Kaya zeminlerin kütleli mekanik özelliklerini tanımlayan ve buna bağlı kazı ve tahkimat önerilerinde bulunabilen kaya kütle sınıflama sistemleri tünelcilik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tüm sınıflama sistemlerinin felsefesini bünyesine alarak bütünleyici tünel kazı-tahkimat-ölçme prensiplerini bir araya getiren kılavuz bir yaklaşım olan NATM (New Avusturya Tunnelling Method-Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu) mühendisleri tarafından kullanılmaktadır. NATM kullanımı dünyada çok hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. NATM ilk kullanıldığı projelerden birisi Frankfurt Metro projesidir bu proje 1969 yılında başlamıştır (Ünlü 2010).

2.5. Mekanize Tünel Açma Yöntemleri

Tünel açma işlemlerinde mekanize araçların kullanılması ile yapılan yöntemdir. Kullanılan bu mekanize araçlar da arını kazma şekillerine göre ikiye ayrılmaktadır. İlk grup tünel aynasını tek seferde kazarak ilerleyen tam cepheli tünel açma makineleridir. Diğer grup ise kazı arını tek seferde kazamayan mekanize araçlardır. Bu tür mekanize kazıcılar için kısmi cepheli tünel açma makineleri de denilmektedir.

2.5.1 Kısmi cepheli tünel açma makineleri

Kısmi tünel açma makineleri tek seferde kazı arınının tamamını kazamadıkları için bu isimle adlandırılmaktadırlar. Kısmi cepheli tünel açma makineleri aynı zamanda selektif madencilik için uygundur ve cevher üretiminde de kullanılmaktadır. Kısmi tünel açma makineleri de kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Bu makineler kollu galeri açma makineleri ve sürekli kazıcılarıdır.

2.5.1.1. Kollu galeri açma makineleri

Kollu galeri açma makineleri; bom ünitesi, malzeme yükleme ünitesi, malzeme aktarma ünitesi, hidrolik sistemler ve elektrik ünitesi olmak üzere 5 ana kısımdan oluşmaktadır. Kollu galeri açma makinelerinin çalışma prensibi bom ünitesinin ucunda bulunan kesici kafanın aynaya temas edip dönmesi ve dönerek parça koparmasıdır. Kollu galeri açma makineleri madencilik faaliyetlerinde selektif madencilik için de üretim amaçlı olarak kullanılabilirler. Kollu galeri açma makineleri tek bom üniteli veya çift bom üniteli olabilir. Kesici kafa üzerinde bulunan kesici uçlar kalem uç şeklindedir. Dolayısıyla kollu galeri açma makineleri yumuşak ve orta-sert kayaların kazılması işlemlerinde kullanılmaktadırlar. Kollu açma makinelerin iki farklı sınıflandırılması bulunmaktadır. Bunlardan ilk makinenin ağırlığının görevidir ve hafif, orta, ağır olarak üç gruba ayrılmaktadır. Bir diğer kollu galeri açma makinesi sınıflama sistemi ise kesici kafanın dönme yönüne görevidir. Kesici kafanın dönüşü kol eksenine paralel veya kol eksenine dik olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.3 Kollu galeri açma makinesi (Anonymous 2, 2023)

Kollu galeri açma makinelerinin bom üniteleri sağa-sola, aşağı-yukarı ve ileri-geri olmak üzere 3 yönde de hareket edebilmektedir. Kollu galeri açma makinelerinin operatörleri yine makine üzerinde bulunmaktadır. Şekil 2.3’ te tek bomlu ve kol eksenine paralel kazı yapan bir kollu galeri açma makinesi gösterilmiştir.

2.5.1.2. Sürekli kazıcılar

Bir diğer kısmi cepheli tünel açma makineleri de sürekli kazıcılardır. Sürekli kazıcılar da aynı kollu galeri açma makineleri gibi 5 ana elemandan oluşmaktadır. Çalışma prensipleri de birebir aynı olan bu kazıcıların bazı temel farklılıkları vardır. Bunlardan ilki; sürekli kazıcılarda tek bir bom ünitesi bulunmaktadır ve üzerinde sadece kol eksenine paralel şekilde hareket eden tambur şeklinde bir kesici kafa bulunmaktadır. Kollu galeri açma makinelerinden bir diğer farkları ise bom üniteleri sadece aşağı-yukarı hareket etmektedir. Ayrıca kollu galeri açma makinelerine göre daha küçük boyutlu olan sürekli kazıcılar cevher üretiminde daha çok tercih edilmektedirler. Özellikler ABD’de oda topuk yöntemi ile işletilen yeraltı kömür ocaklarında çok sık kullanılmaktadırlar. Kollu galeri açma makinelerinden farklı olarak operatör makine üzerinden değil yakınında bulunarak uzaktan kumanda ile kontrol etmektedir. Şekil 2.4’te bir sürekli kazıcı görülmektedir.



Şekil 2.4 Sürekli kazıcı (Anonymous 3, 2023)

2.5.2. Tam cepheli tünel açma makineleri

Tam cepheli tünel açma makineleri kazı arınının tamamını tek seferde kazabilen makinelerdir. Madencilik ve tünelticilik faaliyetlerinde bu işlemi gerçekleştiren makineler TBM (Tunnel Boring Machine – Tünel Açma Makinesi veya Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri) olarak adlandırılmaktadır. TBM’ler kazma, yükleme, taşıma ve tahkimat işlemlerinin tamamını sırası ile yapabilen makinelerdir. Tam cepheli tünel açma makineleri genel olarak projeler için özel olarak üretilmekte olup ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin faydaları ve sakıncaları Çizelge 2.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Tam cepheli tünel açma makinelerinin faydaları ve sakıncaları (Janbaz, 2017)

Faydaları	Sakıncaları
Yüksek ilerleme hızına sahiptir	Çok daha fazla jeolojik bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır
Tünel kesitinde kazı esnasında çok farklılıklar olmaz	İlk yatırım maliyeti yüksektir
Otomatik ve sürekli bir kazı süreci sağlanmış olur	Makinenin tasarım ve üretim aşaması uzundur
İşçilik giderleri daha düşüktür	Sadece dairesel kesitte tünel açılabilir
Çalışma koşulları daha güvenli ve rahattır	Kurbalar sınırlıdır
	Detaylı bir planlama gerektirir
	Projelere özel olarak üretilmektedir
	Fazla su gelinde etkilenirler
	Çalışma verimi için nakliye sistemi etkili bir

Tünel açma makineleri ile kazı işlemi, dairesel şekilde hareket eden bir kesici kafa üzerinde yerleştirilmiş olan disk kesikilerin hareketiyle kayayı parçalar. Disk kesikiler kaya üzerine doğru bastırılırken kesici kafa da dairesel olarak harekete devam eder, böylece kafanın her bir dönüşünden sonra disk kesikiler yeni bir yüzeyi keser.

Kesici kafa üzerinde bulunan oluklardan kazılan malzemeler kesici kafanın arkasında bulunan helezon taşıyıcıya aktararak koparılan malzemenin arından uzaklaştırılması sağlanır. Helezondan gelen pasa bant konveyöre aktararak tünel açma makinesinin arka kısmına doğru taşınır.

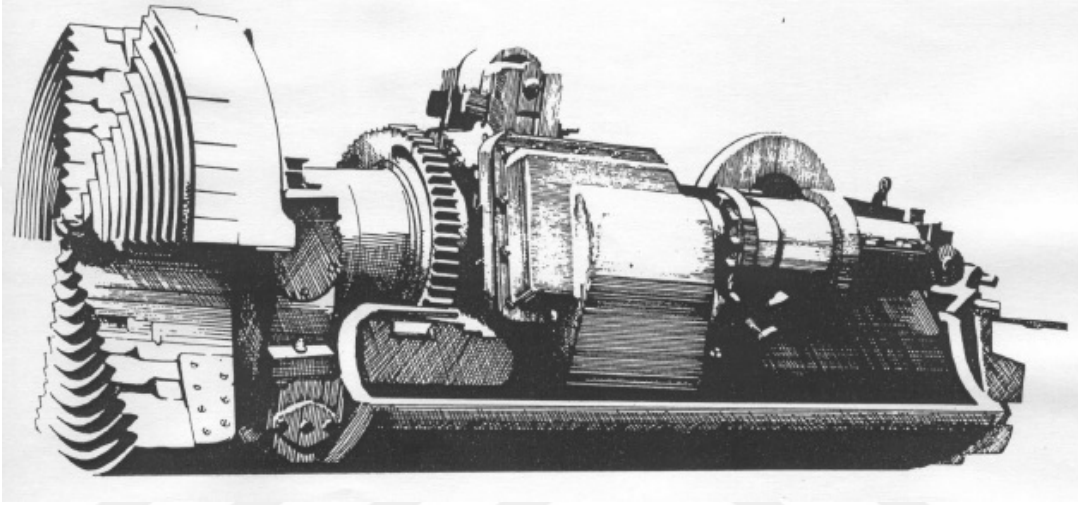
Bir halka kazısı bittikten sonra tahkimat işlemine başlanmaktadır. Tahkimat için segment denilen beton tahkimat malzemeleri kullanılmaktadır. Segmentler dışarıda beton fabrikalarında dökülerek daha sonra tünel içine nakliyesi sağlanmaktadır. İtme silindirlerinin arkasında bulunan vinç ile segmentler tünel cidarına döşenerek tahkimat işlemleri yapılmaktadır.

2.5.2.1. Tam cepheli açma makinelerinin tarihsel gelişimi

1800'lü yılların başlarında dünya genelinde endüstriyel anlamdaki hızlı gelişim, nüfusun artması ve büyük şehirlere göçlerin başlaması ile birlikte şehirlerde ulaşım ve alt yapı hizmetleri için tünellere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır (Maidl ve diğ., 2008). Bu anlamda yapılan ilk tünel projesi 1825 yılında İngiltere'de Londra'da bulunan Thames nehri altında açılmış olan tünel projesidir (King, 2000). Bu tünel projesinde içerisinde pek çok bölme bulunan dikdörtgen şeklinde bir tüp vardır ve makine üzerinde kalkan bulunmaktadır. Bu makinede kazı işlemi için dikdörtgen şeklinde olan tüpün içerisindeki bölmelerde işçiler tarafından yapılmıştır. Mark Isambard Brunel tarafından tasarlanan bu makine yumuşak formasyon kazılarında kullanılan tam cepheli tünel açma makinesinin öncüsü kabul edilmektedir (O'Carroll, 2005).

1874 yılında Amerika'nın New York şehrinde Hudson nehrinin altından açılan Antwerp Docks tünel projesinde kullanılan, kazı arınına su gelirmesini engellenmesi ve arın durumunun dengelenmesi için basınçlı havanın kullanılmasının patenti Lord Cochrane'e aittir. Tünel kazısında 2,4 barlık bir basınç ile kazı işlemi yürütülmüştür (Cornejo, 2001). Böylece günümüzde kullanılan kapalı mod tünel kazı işleminin temelleri atılmıştır.

1851 yılında Amerikalı bir mühendis olan Charles Wilson tarafından geliştirilen tünel açma makinesi tam cepheli kesme işlemi yapabilen ve döner bir kesici kafaya sahip olan ilk tünel açma makinesidir (Maidl ve diğ., 2008). Akabinde 1881 yılında Albay Beaumont tarafından basınçlı hava tünel açma makinesi geliştirilmiştir. Bu tünel açma makinesi kayayı toz boyutuna kadar parçalayan kesici uçları sabit bir kesici kafa üzerinde bulunduran bir makinedir (Şekil 2.5). Bu makine İngiliz kanalında keşif amaçlı kullanılmıştır ve 1,8 km'den fazla kazı yapmıştır (Stack, 1995).



Şekil 2.5 1881 yılında geliştirilen basınçlı havalı tünel açma makinesi (Stack, 1995)

1952 yılında Güney Dakota'da Ohae Braji projesinde James Robbins tarafından tasarlanan bir tünel açma makinesi kullanılmıştır. James Robbins tarafından tasarlanan bu makine 7,85 m çapına sahiptir ve kesici kafa radyal şekildedir. Kesici kafa üzerinde tungsten karbit kama şeklinde kesici uçlar ve paralel olarak sıralanmış serbest disk keskiler bulunmaktadır. Tünel açma makinesinin gücü 150 kW ve ağırlığı yaklaşık 126 tondur. Bu tünel açma makinesi ile yumuşak formasyon kazısında günlük 49 m ilerleme sağlanmıştır (Stack, 1995).

Sert kaya formasyonlarının kazısı için ilk başarılı makine yine Robbins firması tarafından 1956 yılında geliştirilmiştir. Bu tünel açma makinesi Kanada'da Humber atık su tüneli projesinde kullanılmıştır. Kullanılan tünel açma makinesi 3,3 m çapındadır ve 4,5 km tünel kazısında kullanılmıştır (Stack, 1995). Bu tünel açma makinesinde de kesici kafa üzerinde kama uçlu keskiler ve disk keskiler birlikte kullanılmış fakat kama uçlu keskilerin aşınmaları çok fazla olduğu için sık sık değiştirilmeleri gerekmiştir. Kesici uçların sık sık değiştirilmesi sebebiyle tünel açma makinesinden faydalanma

oranı düşmüş ve kama uçlu keskiiler çıkartılarak sadece disk keskiiler kullanılmıştır (Balcı ve diğ., 2007). Bu tecrübe ile sert formasyon kazılarında sadece disk keskiiler kullanılmaya başlanmıştır.

2.5.2.2 Tam cepheli tünel açma makinelerinin sınıflandırılması

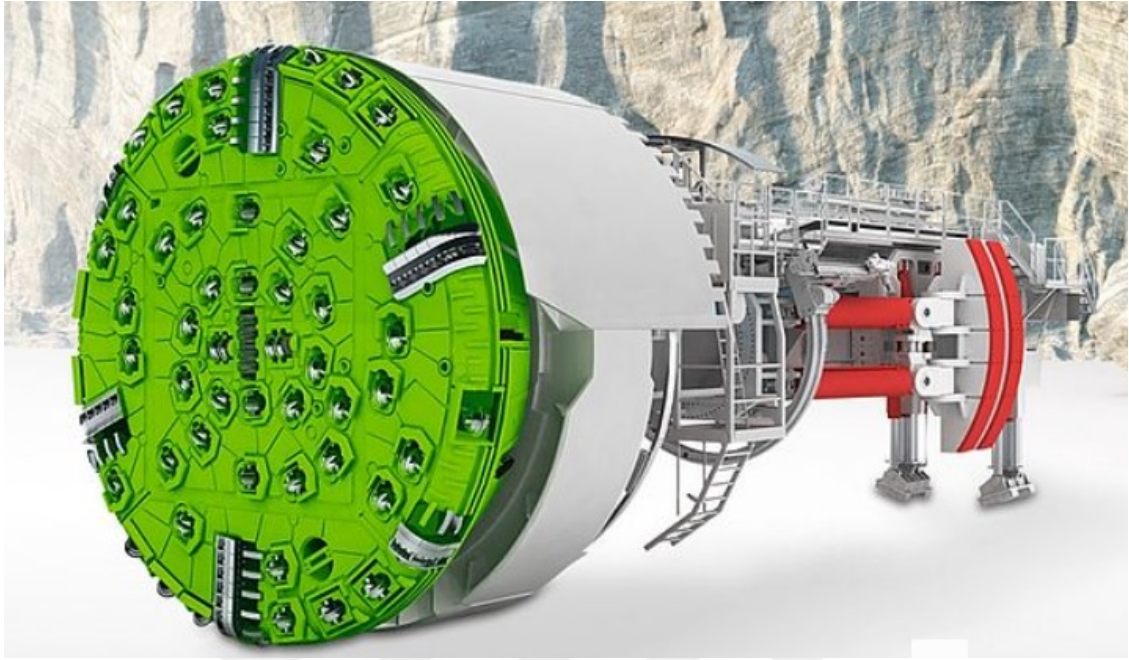
Tam cepheli tünel açma makineleri kazı yapılacak formasyona bağlı olarak farklı özelliklerde tasarımılandırılmaktadır. Genel olarak tünel açma makineleri iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu iki ana grup kalkanlı tünel açma makineleri ve kalkansız tünel açma makineleridir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin sınıflandırılması Çizelge 2.3' te sunulmuştur.

Çizelge 1.3 Tünel açma makinelerinin sınıflandırılması (Balcı ve diğ., 2009)

TBM Sınıflandırılması	
	Altan destekli bir çift pabuçlu-önden motorlu TBM'ler (Main Beam)
Kalkansız TBM'ler (Open TBM's)	Altan desteksiz (Askıda) bir çift pabuçlu önden motorlu TBM'ler (Open Gripper)
	İki çift pabuçlu arkadan motorlu TBM'ler (Kelly Beam)
	Tek kalkanlı TBM'ler
	Teleskopik TBM'ler
	Sadece kesici kafa kısmı kalkanlı TBM'ler (Gripper Shielded)
Kalkanlı TBM'ler (Shielded TBM's)	Çamur basınçlı TBM'ler (Slurry Pressure Balance)
	Pasa basınçlı TBM'ler (Earth Pressure Balance)
	Hava basınçlı TBM'ler (Compressed Air Balance)
	Kombine TBM'ler (Mixshield)
	Özel TBM'ler

Kalkansız tünel açma makineleri çok sert, aşındırıcı özelliği yüksek, su gelirin az olduğu veya hiç olmadığı, masif ve süreksizliklerin az olduğu kaya formasyonlarının kazı işlemlerinde kullanılmaktadır (RMR:80-100). Kalkansız tünel açma makineleri; alttan destekli bir çift pabuçlu önden motorlu tünel açma makineleri (Main Beam), alttan desteksiz (askıda) bir çift pabuçlu önden motorlu tünel açma makineleri (Open Gripper) ve iki çift pabuçlu arkadan motorlu tünel açma makineleri (Kelly Beam) olmak üzere üç farklı şekilde tasarımılandırılmıştır (Tumaç, 2010). Şekil 2.6' da kalkansız sert

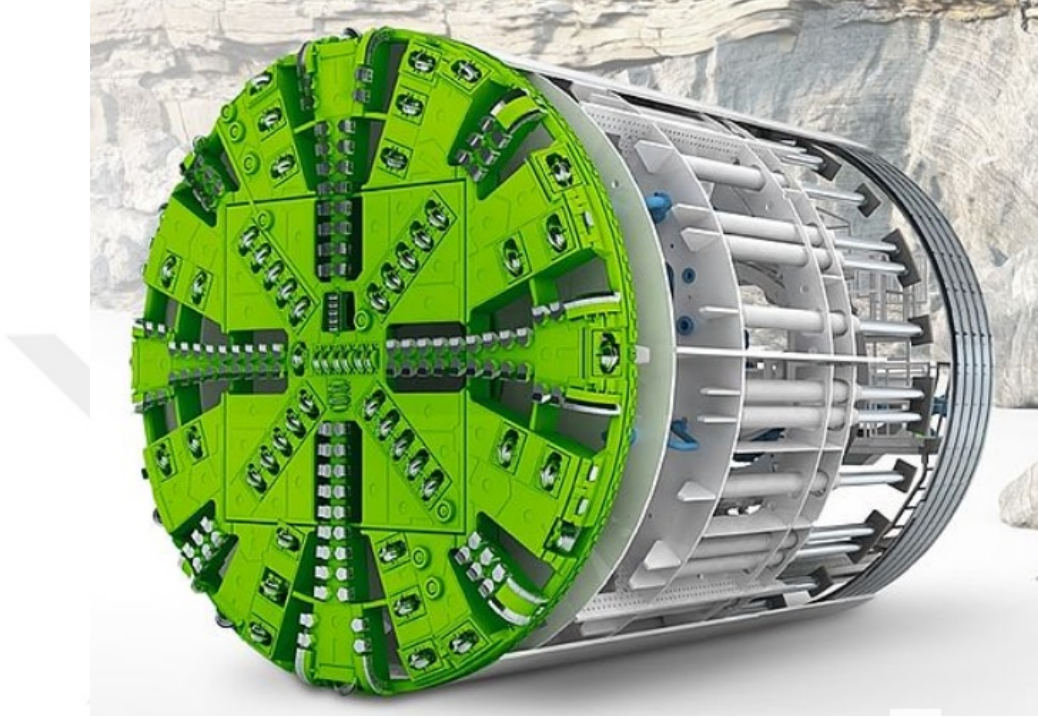
kaya tünel açma makinesi grlmektedir. Bu tam cepheli tünel açma makinesi Gripper tip bir tam cepheli tünel açma makinesidir.



Şekil 2.6 Kalkansız tam cepheli tünel açma makinesi (Anonymous 4, 2023)

Kalkanlı tünel açma makineleri ise kazısı yapılacak formasyonun sertliğine göre kalkanlı sert formasyon tünel açma makineleri ve kalkanlı yumuşak formasyon tünel açma makineleri olarak iki gruba ayrılmaktadır. Kalkanlı sert formasyon tünel açma makineleri süreksizliklerin olduğu, blokl olan, su gelirinin az veya hiç olmadığı, sıkıan kil formasyon kazılarında kullanılmaktadır (RMR:30-80)(Tumaç, 2010). Kalkanlı sert formasyon tünel açma makineleri formasyonun jeolojik ve jeomekanik özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir. Kalkanlı sert formasyon tünel açma makineleri; tek kalkanlı tünel açma makineleri, teleskopik tünel açma makineleri ve sadece kesici kafa kısmının kalkanlı olduğu tünel açma makineleri olarak üç gruba ayrılmaktadır (Gripper Shielded). Bir diğer grup olan kalkanlı yumuşak formasyon tünel açma makineleri kazılacak formasyonun jeolojik ve jeomekanik özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Yeraltı su gelirinin fazla olduğu, çakıl, orta veya iri taneli kum formasyon kazılarında çamur basınçlı tünel açma makineleri (Slurry Pressure Balance) tercih edilmektedir. Yine yeraltı su gelirinin fazla olduğu, ince taneli kum, kil ve silt formasyon kazılarında ise pasa basınçlı tünel açma makineleri (Earth Pressure Balance) kullanılmaktadır. Yeraltı su gelirinin fazla olduğu stabil kumlu formasyon kazılarında ise hava basınçlı tünel açma makineleri (Compressed Air) tercih edilmektedir. Bu

özelliklerin en az iki tanesinin beraber kullanılabildiği tünel açma makineleri ise kombine tünel açma makineleri (Mixshielded) olarak adlandırılmakta ve her türlü formasyon kazısında kullanılabilmektedir. Şekil 2.7’ de kombine tam cepheli tünel açma makinesi gösterilmiştir.

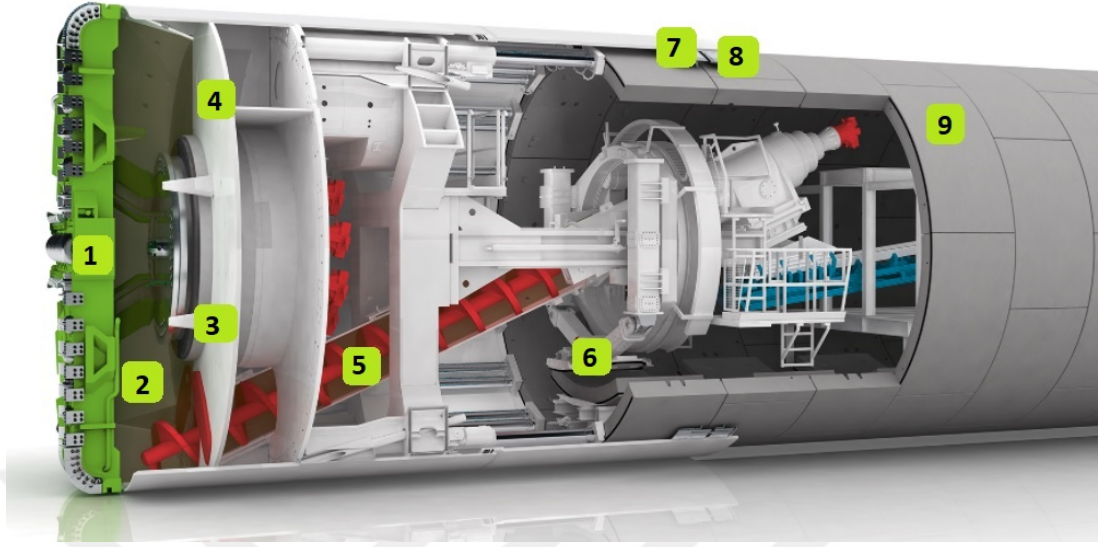


Şekil 2.7. Kalkanlı tam cepheli tünel açma makinesi (Anonymous 5, 2023)

2.5.2.3. Pasa basınçlı tünel açma makineleri (Earth pressure balance)

Arazi basıncının dengelenmesinin esas alınarak çalışan pasa basınçlı tünel açma makineleri (EPB) ilk olarak 1960-1970’li yıllarda Japonya’da kullanılmaya başlanmıştır. Ana çalışma unsuru kendi kendini tutamayan formasyonlarda ayna boşluğunu doldurarak doğal bir basınç oluşturulması ve dengelenmesidir. Pasa basınçlı tünel açma makineleri 10 bara kadar basınç altında çalışabilmektedirler. Çalışma veriminin en yüksek olduğu durum ise nemlilik oranının %10-15 veya daha az olduğu durumlardır (Herrenknecht ve diğ., 2003). Ayna boşluğunda basıncın elde edilmesi için kesici kafanın arkasında bulunan kazı odasının içine kazısı yapılan malzeme doldurularak arazi basıncının dengelenmesi sağlanmaktadır. Kazısı yapılan malzemenin kazı odasına ve kazı odasından da helezonik konveyöre geçişinin daha kolay olmasını sağlamak ve tıkanmaları engellemek için farklı kimyasallarda kullanılabilmektedir

(Guglielmetti ve diğ., 2008). Şekil 2.8’ de pasa basınçlı tünel açma makinesinin kesit görüntüsü ve bazı kısımları gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makinesi (EPB-TBM) (Anonymous 6, 2023)

Şekil 2.8’de bir EPB-TBM kesit görüntüsü gösterilmiştir. Bu görselde numaralandırılan kısımlar ve isimleri aşağıdaki gibidir;

- 1) Kesici Kafa
- 2) Kazı Odası
- 3) Karıştırıcı Kollar
- 4) Ara Duvar
- 5) Helezonik Konveyör
- 6) Erektör
- 7) Tailskin
- 8) Dolgu
- 9) Tünel Kaplaması

Yapışkan olmayan formasyonlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan formasyon kazılarında duraylılığın sağlanması çok zordur. Bu özelliklerdeki formasyon kazılarında ve kendi kendisini kısa süreli bile tutamayan formasyon kazılarında genellikle pasa basınçlı tünel açma makineleri tercih edilmektedir. Pasa basınçlı tünel açma makineleri su gelirini ve formasyonlardaki akımların kontrol edilebilmesi için ayna boşluğunu kapalı bir hacim haline getirerek basınç altında tutulması, “bizzat arazi ve içindeki su basıncı etkisiyle kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkân verilmesi” şeklinde çalışma prensibi ile tanımlanabilmektedir

(Tumaç, 2010). Kazı odasına doldurulan malzemenin arazi basıncını karşılayacak miktarda doldurulması gerekmektedir. Pasa basınçlı tünel açma makineleri sert formasyon kazılarında ve yumuşak formasyon kazılarında da kullanılmaktadır. Basit çalışma mekanikleri ve geniş kullanım alanları olması nedeniyle çamur basınçlı tünel açma makinelerinin (slurry) yerini almaktadırlar. Pasa basınçlı tünel açma makineleri çok amaçlı kullanılabilecek şekilde tasarımılandırılmakta ve üretilmektedirler. Çift kalkanlı olarak kullanılabildikleri gibi tek kalkanlı olarak da kullanılmaktadırlar. Ayrıca kazısı yapılan formasyonun özelliklerine göre atmosfer basıncında çalışabilmektedirler ve bu durumda kazı odası boş olacak şekilde kazı yapabilmektedir. Diğer bir şekilde kapalı modda yani kazı odasının arazi basıncına göre doldurularak çalışma imkânı da vardır. Kazı odasının kısmen veya tamamen doldurularak çalışılması koşulları EPB modu olarak adlandırılmaktadır.

Pasa basınçlı tünel açma makinelerinde kazısı yapılan malzeme eğer EPB modunda çalıştırılacaksa önce kazı odasına kısmen veya tamamen doldurulur ardından zemin basıncı dengelendiğinde bir helezonik konveyör ile kazı arınından uzaklaştırılır. Helezonik konveyörün çalışma hızı ayarlanabilmektedir. Helezonik konveyörün hızının ayarlanması sayesinde kazı odasındaki malzeme miktarı kontrol edilerek arazi basıncı dengelenmesi sağlanır. Helezonik konveyörün hızının doğru bir şekilde ayarlanması kazı performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Helezonik konveyör hızı ilerleme hızından fazla olması durumunda EPB modunda kazı yapıldığında kazı odasındaki malzeme miktarı azalacak ve arazi basıncının dengelenmesi zorlaşacak hatta bu denge kaybolacaktır. Bu şekilde kazı yapılması makinenin sıkışmasına neden olabilmektedir. Ayrıca malzeme çıkışı fazla olacağından dolayı zemin oturmaları oluşabilmektedir. Aksine helezonik konveyörün hızının ilerleme hızından daha yavaş olması durumunda kazı odasında biriken pasa miktarı artacak ve zemin basıncı dengesi bozulacaktır. Ayrıca pasa miktarının artması kesici uçların da daha fazla aşınmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla güvenli ve verimli bir kazı yapabilmek için helezonik konveyör ve tünel açma makinesinin ilerleme hızı birbirine eşit olmalıdır. Pasa basınçlı tünel açma makinelerinde diğer yöntemlerden farklı olarak ikincil bir destekleme yöntemi (basınçlı hava, süspansiyon) kullanılmaz. Akıcı formasyon kesici uçlar ile kazılır. İtme kuvveti, kazı aynasına kazı odasının doldurulması sonucu oluşan basınç duvarı ile iletilir. Bu şekilde kazı arınında kontrollü bir malzeme akışı sağlanmış olur. Kazı arınındaki formasyon uygulanan itme kuvveti sebebiyle daha fazla yüklenemediği zaman denge sağlanmış olur. Arazi basıncından daha fazla bir basınç oluşturulması meydana gelirse

akıcı olan formasyon daha sert bir formasyonmuş gibi davranmaya başlar. Eğer kazısı yapılan tünel topoğrafyaya yakınsa fazla uygulanan bu basınç yüzünden yeryüzünde kabarmalar meydana gelebilir. Şekil 2.9’ da pasa basınçlı tünel açma makinesi kullanılarak iki tüplü olarak açılacak bir tünel gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Çift tüplü EPB-TBM ile açılmış bir tünel (Anonymous 7, 2023)

Pasa basınçlı tünel açma makinelerinde kazılan malzemenin yani pasanın yeryüzüne nakli bant konveyörler, vagonlar, kamyonlar veya gerekli akışkanlık sağlandıktan sonra boru hatları ile sağlanabilmektedir. Pasa basınçlı tünel açma makineleri kazı odasında arazi basıncını dengeleme şekillerine göre farklı isimler almaktadırlar. Bunlar; malzeme hapsedici şiltleri (soil confinement shields), su basıncı destekleme şiltleri (water pressure balance shields), yüksek yoğunluktaki çamur şiltleri (high density slurry shields) ve çamur şiltleridir (mud shields) (Tumaç, 2010).

2.5.3 Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Tasarım Parametreleri

Tam cepheli tünel açma makineleri oldukça karmaşık ve maliyeti yüksek makinelerdir. Tünel açma makinelerinin verimli bir şekilde tasarımı ve kullanılması çok önemlidir. Tünel açma makinelerinin seçimi ve tasarım parametreleri kazı performansını çok önemli ölçüde etkilemektedir.

2.5.3.1. Kesici uçlar arası mesafe ve kesici uç sayısı

Kazı işleminin yapıldığı formasyonlar düşünüldüğünde kesici uçlar arası mesafe gereksinim duyulan itme kuvvetini etkileyecektir. Kesici uçlar arası mesafe azaldığı takdirde belirli bir kesme derinliğinde kesme işlemi yapmak için gerek duyulan itme kuvveti daha az olacaktır. Çok sert formasyon kazılarında ise kesici uçlarının yatak kapasitesi yükseltilebilmekte ve kesici uçlar arası mesafe düşürülerek daha yüksek ilerleme hızları elde edilebilmektedir. Fakat bu şekilde kesme işlemi yapıldığında itme gücü gereksinimi artacaktır ve pasa boyutu küçülecektir. Daha küçük boyutlu pasa elde edildiği durumda ise birim hacim kaya koparmak için harcanan enerji artacağından, başka bir deyişle spesifik enerji artacaktır. Spesifik enerjinin artması da verimli bir kazı işleminin yapılmadığını göstermektedir. Pasa boyutunun optimize edilebilmesi için kesici uçlar arası mesafe ve kesici uç sayısı önemli bir parametredir. Birim hacimdeki kayayı belirli kesimler arası mesafede kesebilmek için harcanan enerjiler karşılaştırıldığında her bir kaya için optimum bir kesimler arası mesafe olduğu belirlenmiştir (Tumaç, 2010). Kesici uçlar arası mesafenin belirlenmesi için en önemli parametre kazılacak formasyonun jeolojik özelliklerini belirlemektir.

Aynı jeolojik formasyonda kesici uçlar arası mesafe kıyaslandığı zaman kesici kafa çapı ile kesici uç sayısının doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir. Tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılacak kesici uç sayısının hesaplanması için aşağıdaki eşitlikten faydalanılabilmektedir (Balcı ve diğ., 2007).

$$N_c = (D_{TBM} / 2.S) + N_{Köşe} \quad (2.1)$$

Yukarıda belirtilen formülde ;

N_c : Kesici uç sayısı

D_{TBM} : Kesici kafa çapı, mm

S : Optimum pasa boyutu elde etmek için ortalama kesici uçlar arası mesafe, mm

$N_{Köşe}$: Kesici kafa üzerinde ekstra köşe kesici uç sayısı (5-10)

2.5.3.2. Kesici kafa dönme hızı (RPM)

Kesici kafanın dönüş hızı tünel açma makinelerinin performansını etkileyen önemli bir parametredir. Kesici kafa dönme hızı RPM (devir/dakika) olarak ifade

edilmektedir. Kesici kafa dönme hızı yani RPM değeri genel olarak tork değeri ile ters orantılı olarak gözlemlenmektedir (O'Carrol, 2005). Kesici kafa üzerinde bulunan disk kesici uçların yataklarının ve yatak tutucuların kapasiteleri kesici kafa dönme hızının belirlenmesinde en önemli parametrelerdir. Kesici kafa dönme hızını etkileyen bir diğer parametre ise kesici kafa çapıdır.

Kesici kafa dönme hızı farklı kazı formasyonlarında farklılık göstermektedir. Örneğin; sert ve sıkı formasyonlarda yapılan kazı işlemlerinde daha fazla tork ihtiyacı olduğundan dolayı tork değerinin korunabilmesi için kesici kafa dönme hızı yani RPM düşürülmektedir. Yumuşak ve zayıf formasyon kazılarında ise daha düşük tork değerleri yeterli olduğu için kesici kafa dönme hızı arttırılmaktadır. Böylece optimum ilerleme hızı yakalanabilmektedir. Kesici kafa dönme hızının hesaplanabilmesi için aşağıdaki eşitlikten faydalanılabilmektedir (Balcı ve diğ., 2007).

$$RPM = V / (\pi \cdot D_{TBM}) \quad (2.2)$$

Yukarıda belirtilen formülde, RPM yani kesici kafa dönme hızı devir/dk olarak bulunmaktadır. Kesici kafa dönme hızının hesaplanması için kullanılan ve V simgesi ile ifade edilen parametre ise disk keskilerin dönme hızıdır. Disk keskilerinin dönme hızları ise üretici firmalar tarafından belirtilmektedir ve birimi m/dk olarak ifade edilmektedir. Kesici kafa dönme hızının belirlenmesi için bir diğer parametre ise D_{TBM} olarak simgelenen kesici kafa çapıdır ve birimi m olarak ifade edilmektedir.

2.5.3.3. Kesici kafa gücü ve tork ihtiyacı

Kesici kafa üzerinde bulunan bütün kesici uçların kazı işlemine karşı gösterdiği direnç, kesici kafa için gerekli olan gücün ve torkun belirlenmesini sağlamaktadır. Kesici kafanın dönmesini ve kazı işleminin gerçekleşmesini sağlamak için kesici kafanın arkasında elektrik motorları bulunmaktadır. Tünel açma makinesinin güç kapasitesi, makinenin ihtiyacı olan tork değerini ve itme kuvvetini karşılamak zorundadır (Bilgin ve diğ., 2006).

Tork, kesici kafanın dönme momentidir. Tünel açma makinesi için gerekli olan tork kazı işleminin gerçekleşmesi, kesici uçlar ile kazı arını arasındaki sürtünme kuvvetini yenmeli, tünel açma makinesi üzerinde etkili olan radyal kuvvetleri yenmeli ve kazı odasında bulunan ve ayna basıncını dengeleyen pasa hareketini sağlamak zorundadır (Fernandez, 2007). Aşağıda belirtilen eşitlik ile tünel açma makinelerinin gereksinim duyduğu tork değeri hesaplanabilmektedir (Balcı, 2009).

$$T = (N_c \cdot F_R \cdot D_{TBM} \cdot 0,54 \cdot f_L) / 2 \quad (2.3)$$

Yukarıda belirtilen formülde;

T : Tork, kNm

N_c : Kesici uç sayısı, adet

F_R : Kesici uç başına ortalama yuvarlanma kuvveti, kN

D_{TBM} : Kesici kafa çapı, m

0,54: Ortalama kuvvet moment kolu

f_L : Sürtünme kayıpları

olarak ifade edilmiştir. Tork değerinin hesaplanması için kullanılan bir parametre olan kesici uç başına ortalama yuvarlanma kuvveti kesici ucun kayaç ile temas ettiği noktada oluşan teğetsel kuvvettir. Kesici uç başına ortalama yuvarlanma kuvvetinin hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$F_R = 4 \cdot T / (N_c \cdot D_{TBM} \cdot f_L) \quad (2.4)$$

Yukarıda belirtilen formülde;

T: Kesici kafanın torku, kN.m

D_{TBM} : Kesici kafa çapı, m

N_c : Kesici uç sayısı, adet

olarak ifade edilmiştir (Aydın, 2019).

Tünel açma makinesi için gerekli olan tork değeri ve kesici kafa dönme hızı bilindiği zaman makine gücünün hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$P = 2 \cdot \pi \cdot RPM \cdot T \quad (2.5)$$

Makinenin gücünün hesaplanması için kullanılan formülde;

P: Makinenin gücü; kW

RPM: Kesici kafa dönme hızı, devir/dk

T: Makinenin torku, kNm

olarak ifade edilmiştir.

2.5.3.4. İtme kuvveti (Thrust)

İtme kuvveti, kesici uçların kazı arınına penetrasyonu ve tünel açma makinesinin tünel eksenine paralel olarak ilerleyebilmesini sağlayan kuvvettir. Tünel açma makineleri için gerekli olan itme kuvvetinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki eşitlikten yararlanılabilmektedir.

$$F_T = N_c \cdot F_N \cdot f_L \quad (2.6)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikte;

F_T : Toplam itme kuvveti, kN

N_c : Kesici uç sayısı, adet

F_N : Kesici uç başına ortalama itme kuvveti, kN

F_L : Sürtünme kayıpları

olarak ifade edilmektedir.

2.6. Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Performans Analizi için Kullanılan Parametreler

Tam cepheli tünel açma makineleri ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olan ve genellikle projeye özel olarak üretilen makinelerdir. Tam cepheli tünel açma makinesinin kullanıldığı projeler göz önüne alındığında bu makinelerin en üst düzeyde verimle kullanılması ekonomik açıdan çok önemlidir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin performans analizi yapılabilmesi için bazı parametreler kullanılmaktadır. Bu parametreler tam cepheli tünel açma makinesinin ilerleme hızı, net kazı hızı, spesifik enerji ve faydalanma miktarı gibi parametrelerdir.

2.6.1. İlerleme Hızı

Tam cepheli tünel açma makinesinin bir vardiyada veya günde veya saatte yaptığı ilerleme miktarını baz alarak yapılan performans analiz yöntemidir. Birimi metre/vardiya, metre/gün veya metre/saat olarak ifade edilebilmektedir. Tam cepheli tünel açma makinesinin durduğu zamanlarda burada kazı süresine dahil edilmektedir. Hesaplanması için aşağıdaki eşitlikten faydalanılmaktadır.

$$\text{İlerleme Hızı} = \text{İlerleme Miktarı} / \text{Zaman} \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte “zaman” parametresi değerlendirilecek parametreye göre saat, vardiya veya gün olarak birimlendirilebilmektedir.

2.6.2. Net Kazı Hızı

Tam cepheli tünel açma makinesinin aktif olarak kazı yaptığı süreyi baz alarak yapılan performans analiz parametresidir. Net kazı hızının hesaplanması için tam cepheli tünel açma makinesinin durduğu zamanlar hesaplama işlemlerine dahil

edilmemektedir. Net kazı hızının hesaplanması için aşağıdaki eşitlikten faydalanılmaktadır (Rostami ve diğ., 1994).

$$\text{Net Kazı Hızı} = \text{İlerleme Miktarı} \times \text{TBM Çapı} / \text{Kazı Süresi} \quad (2.8)$$

2.6.3. Faydalanma Oranı

Tam cepheli tünel açma makinesinin kazı yaptığı toplam sürenin bir vardiyada veya gündeki toplam çalışma miktarına oranıdır. Rostami ve diğ., 1994 yılında yaptıkları çalışmada makineden faydalanma oranının %40-%50 arasında olmasının kabul edilebilir olduğunu söylemişlerdir ve aşağıdaki eşitlik yardımı ile kolayca bulunabilmektedir. Bir oran belirttiği için birimi yoktur ve yüzde (%) cinsinden ifade edilmektedir.

$$\text{FO} = (\text{Net Kazı Süresi} / \text{Vardiya Süresi}) \times 100 \quad (2.9)$$

2.6.4. Spesifik Enerji

Roxborough (1973) tarafından spesifik enerji, ortalama kesme kuvvetinin kesilen malzeme miktarına oranı olarak tanımlanmıştır. Cardu ve ark. 2006 yılında spesifik enerji bir metreküp zeminin veya kayacın kazılması için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanmıştır. Spesifik enerjinin tanımlanması için aşağıdaki formülden faydalanılabilmektedir.

$$\text{SE} = (S / A) + (C \cdot w / A \cdot v) \quad (2.10)$$

Yukarıda belirtilen formülde;

SE: Spesifik enerji, MJ/m³

S: Makine tarafından sağlanan baskı kuvveti, ton

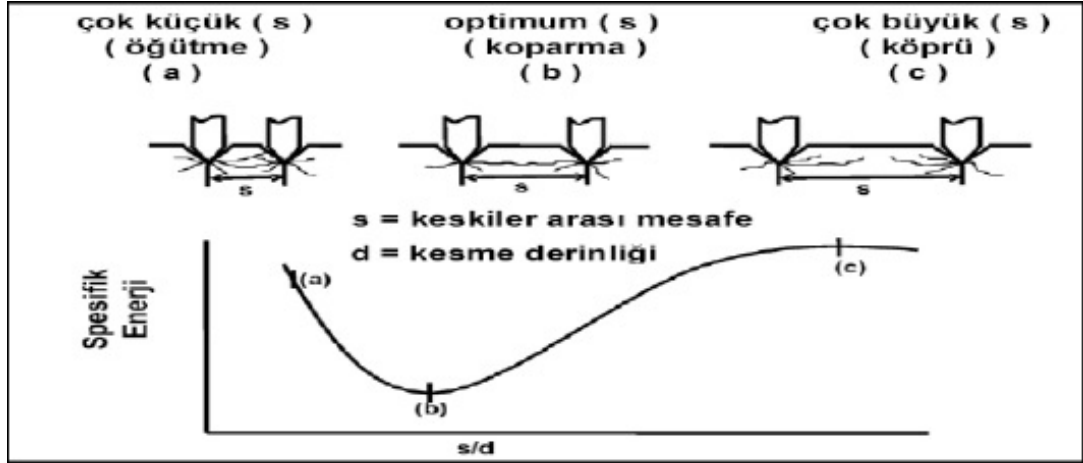
C: Tork değeri, ton.m

w: Kesici kafanın saniyedeki hızı

A: Tünel kesiti, m²

v: İlerleme hızı, m/sn

Tam cepheli tünel açma makinelerinde düşük spesifik enerji değerleri elde edilmesi için kesici uçlar arası mesafe ve kesme derinliğinin oranı çok önemlidir. Kesici uçlar arası mesafe ile kesme derinliği oranının spesifik enerji üzerine olan etkisi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Kesici uçlar arası mesafe/Kesme derinliği ile spesifik enerji arasındaki ilişki (Aydın, 2019)

Kesici uçlar arası mesafe optimum değerin altında olduğu durumda yani kesici uçlar birbirlerine yakın oldukları durumda kazı işlemi sonucu çıkarılan pasa öğütülmüş malzeme olmaktadır. Bu koşulda spesifik enerji yüksektir ve kazı işleminin verimsiz olduğu söylenebilir. Kesici uçlar arası mesafenin optimum değerinden fazla olması durumunda yani kesici uçların birbirlerine uzak bir şekilde yerleştirildiklerinde ise kesme hatları çok uzak olmaktadır. Dolayısıyla spesifik enerji yine yüksektir ve verimsiz bir kazı işlemi yapılmış denilebilmektedir. Spesifik enerjinin düşük olması için kesici uçlar arası mesafenin optimum düzeyde olması gerekmektedir. Optimum kesici uçlar arası mesafe sağlandığı kazı işlemlerinde pasa malzemesi iri boyutlu olmaktadır. Spesifik enerjinin daha düşük olduğu bu durum için kazı verimli bir şekilde yapılmıştır denilebilir (Balcı, 2009). Rostami ve diğ., 1994 yılında Colorado School of Mines (CSM)'da tam boyutlu lineer kesme deney seti üzerinde yaptıkları kesme deneyleri sonucunda spesifik enerjinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki eşitliği türetmişlerdir.

$$SE = k \cdot (p / ICR) \quad (2.11)$$

Yukarıda belirtilen formülde;

SE : Spesifik enerji, kWh/m³

k : Tünel açma makineleri için enerji transfer oranı, 0,8-0,9

p : Optimum şartlarda tüketilen enerji miktarı, kW

ICR : Net kazı hızı, m³/sa

2.7. Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Performansını Etkileyen Parametreler

Tam cepheli tünel açma makineleri ilk yatırım maliyeti çok yüksek kazıcı makinelerdir. Kazı verimi yüksek olması tercih edilmelerini etkilemektedir. Fakat kazı veriminin yüksek olması için doğru bir tam cepheli tünel açma makinesi seçimi yapılması gerekmektedir. Doğru bir tam cepheli tünel açma makinesi seçildikten sonra kazı performansının iyi olması beklenebilecektir.

Tam cepheli tünel açma makinelerinin diğer mekanize kazı makineleri gibi performansını etkileyen parametreler bulunmaktadır. Kazı verimini etkileyen parametreler ise üç ana grupta toplanabilmektedir. İlk grup sabit parametreler olarak adlandırılabilir. Sabit parametreler kazılacak formasyonun jeolojik, petrografik, mineralojik, kimyasal ve fiziko-mekanik özellikleridir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin performansını etkileyen bir diğer parametre ise TBM tasarımı esnasında belirlenen parametrelerdir. Bu özellikler yarı değişken parametreler olarak adlandırılabilir. Yarı değişken parametre olarak adlandırılmasının sebebi imalat öncesi belirlenmesi ve proje esnasında değişimlerinin mümkün olmamasından dolayıdır. TBM kazı performansını etkileyen diğer parametreler ise değişken parametreler olarak değerlendirilebilir. Değişken parametreler ise tam cepheli tünel açma makinesinin kazı esnasında operatör tarafından değiştirilebilecek olan parametrelerdir. Bu üç grupta belirlenen TBM kazı performans parametreleri çizelge 2.4'te sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Tam cepheli tünel açma makinelerinin kazı performansını etkileyen parametreler

Sabit Parametreler	Yarı Değişken Parametreler	Değişken Parametreler
Kayacın mekanik özellikleri	TBM tipi	İtme kuvveti
Süreksizliklerin durumu	Kesici kafa çapı	Tork
Süreksizlikler arası mesafe	Kesici kafa motor gücü	Kesici kafa dönme hızı
Tünel eksenine ile süreksizlikler arası açısı	Kesici uç sayısı	Operatör becerisi
Yeraltı su seviyesi	Kesici uçlar arası mesafe	Vardiya durumu
Kayacın fiziksel özellikleri	Kesici kafa dönme hızı (RPM)	Lojistik hizmetleri
Kayacın kimyasal özellikleri	Kesici ucun metalürjik yapısı	
	Maksimum itme kuvveti	
	Maksimum tork	

2.8. Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri Performans Tahmin Yöntemleri

Tam cepheli tünel açma makinelerinin 1950 yıllarının sonlarına doğru başarılı bir şekilde kullanılması ile beraber tam cepheli tünel açma makinelerinin performansı için tahmin modelleri kullanılmaya başlanılmıştır. Formasyon özelliklerinin her zaman tam olarak bilinmemesi ve farklılıklar göstermesi nedeniyle tam olarak başarılı performans tahminleri yapılamasa da elde edilen jeolojik, jeoteknik ve makinenin özelliklerine göre projenin maliyet analizi ve tam cepheli tünel açma makinesinin performans tahmini yapılabilmektedir. Tam cepheli tünel açma makineleri performans tahmin modelleri sayesinde proje planlaması ve maliyetinin belirlenmesi sağlanmaktadır (Nutti, 2017).

Tam cepheli tünel açma makineleri performans tahmin modelleri, teorik yaklaşımlar ile elde edilen sayısal (analitik) yöntemler ve daha önce yapılan tünel projelerinden elde edilen verilerinin analiz edilerek oluşturulan ampirik yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır (Brino, 2015, Ramezanzadeh, 2005). Bu iki performans tahmin modellerinin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Çizelge 2.5'te teorik performans tahmin modeli ve ampirik performans tahmin modellerinin avantaj ve dezavantajları sunulmuştur.

Çizelge 2.5. Teorik ve ampirik tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modellerinin avantaj ve dezavantajları (Rostami, 2016)

Model türü	Avantajları	Dezavantajları
Teorik	Makine özellikleri ve kesici geometrisinden çok etkilenmez	Kaya kütle parametrelerini dahil edilmesi zordur
	Baskı kuvveti ve tork değerleri arasında geçiş kolaydır	Süreksizlikler işleme dahil edilmez
	Kesici kafa tasarımı ve optimizasyonu için de kullanılabilir	Süreksizliğin çok olduğu kayalarda sapmalar fazla olabilir
	Kesicilerin ve kesici kuvvetlerin gerçek değerleri açıklanabilir	Arazi değişimleri hesaba katılamamaktadır
Ampirik	Arazide TBM'in gerçek ölçüm değerlerine göre belirlenmektedir	Gerçek veriler ile girdi parametreleri arasındaki fark çok olduğunda sapmalar çok olabilir
	TBM'in tüm sistem verileri hesaplamalara dahil edilmektedir.	Kesici kafa tasarımındaki değişimler hesaba katılamaz
	Süreksizlikler ve kaya kütle özellikleri hesaba katılmaktadır	Jeolojik parametrelerden çok etkilenmektedir.

Tam cepheli tünel açma makinelerinin performans tahmini için geliştirilen sayısal modeller kazılan formasyonun mekanik özellikleri ve tam cepheli tünel açma makinesinin çalışma parametreleri arasındaki ilişkiler istatıksel olarak incelenerek elde edilen modellerdir. Bu modellerin elde edilmesinde genel olarak gerçek boyutlu doğrusal kesme cihazı ve yine gerçek boyutlu delme deneyleri yapılarak veriler elde edilmektedir. Sayısal modellerde sonuç olarak tam cepheli tünel açma makinesinin ilerleme miktarı, penetrasyon hızı gibi sonuçlarının yanı sıra tam cepheli tünel açma makinesinin itme kuvveti, tork ve g ihtiyaçları da belirlenmektedir. Tam cepheli tünel açma makineleri için geliştirilen sayısal performans tahmin modellerinde en yaygın olarak kullanılan model, 1993 yılında Rostami ve zdemir tarafından Colorado School of Mines'ta geliştirilen CSM modelidir.

Tam cepheli tünel açma makinelerinin performans tahmini için geliştirilen ampirik modeller, daha önce açılmış olan tünellerden elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile elde edilmektedir. Yeni tünel projelerinin yapılması ve veri sayısının artması ile ampirik modeller sürekli olarak yenilenmekte ve gelişmektedir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin performansını etkileyen pek çok parametre olduğundan dolayı ve her projenin farklı özellikler göstermesinden dolayı veriler nicelik ve nitelik olarak değişiklik göstermektedir. Ampirik modellerin bir kısmında kaya kütle özellikleri girdi parametreleri olarak kullanılmaktadır. Ampirik modellerin bir kısmında ise kaya kütle sınıflama sistemleri girdi parametresi olarak kullanılmaktadır (Nutı, 2017). Tam cepheli tünel açma makineleri için geliştirilen ampirik performans tahmin yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan model, Trondheim Norveç Bilim ve Teknoloji niversitesinde geliştirilen NTNU modelidir.

Tam cepheli tünel açma makinesinin performans tahmini için değerlendirilen parametreler, net kazı hızı, kazı hızı, penetrasyon oranı ve spesifik enerji kullanılmaktadır.

Net kazı hızı; birim kazı zamanında TBM tarafından kazılan toplam malzeme miktarı olarak ifade edilmektedir (Rostami ve diğ., 1994). Net kazı hızının hesaplanması ise ilerleme miktarının kesici kafa ile çarpılması ve sonucun kazı süresine bölünmesi ile bulunur. TBM'in durduğu sreler burada hesaba dahil edilmez.

Kazı hızı; günlük veya vardiyalık hatta aylık olarak yapılan toplam kazı miktarıdır. Burada belirlenen zaman içerisinde yapılan ilerleme miktarı hesaba katılır. İlerleme miktarının belirlenen zamana (vardiya, gün, ay) bölünmesi ile bulunur.

Penetrasyon oranı; kesici kafanın her bir tam tur dönüşünde kazılan malzeme miktarıdır. Kesici uçların kazılacak kayaca girme miktarı olarak da tanımlanabilir.

Spesifik enerji; genel tanım ile birim zamanda birim hacimde malzeme kazmak için harcanan enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır. Spesifik enerjinin hesaplanması için;

$$SE=(S/A) + (C.w/A.v) \quad (2.12)$$

formülü kullanılabilir. Burada SE; spesifik enerji (MJ/m³), S; makine tarafından sağlanan baskı kuvveti (ton), A; tünel kesiti (m³), C; tork (ton.m), w; kesici kafanın saniyedeki hızı, v; ilerleme hızı (m/sn) olarak kullanılmaktadır. Ayrıca spesifik enerji, makine üzerinden kazı sonrasında alınan kazı raporunda da görülebilmektedir.

2.8.1 CSM modeli

CSM modeli, Colorado School of Mines'ta 1993 yılında Rostami ve Özdemir tarafından geliştirilmiş, ardından 1996 yılında Rostami ve ark. tarafından güncellenmiştir. Sayısal bir tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modelidir. CSM modeli ile makine çalışma parametreleri olan kesici kafanın itme gücü, torku ve gerekli güç miktarı hesaplanmaktadır. Belirtilen makine çalışma parametrelerinin hesaplanması için normal kuvvet ve yuvarlanma kuvveti kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar kapsamında doğrusal kesme deney cihazı kullanılmıştır ve buradan elde edilen sonuçlar ile kayacın parçalanma işlemindeki matematiksel varsayımlar kullanılarak elde edilmiştir.

Rostami ve Özdemir tarafından geliştirilen bu modelde, kesici uç dairesel bir kesici olarak kabul edilmiştir. Model kesici ucun alt kısmında oluşan ezilme zonu olarak tanımlanan bölgedeki basınç dağılımını esas alarak geliştirilmiştir. Basınç, ezilme zonunun üzerinde azalırken azami gerilim kesici ucun hemen alt kısmında yoğunlaşmaktadır. Ezilme zonunun içindeki basınç net olarak bilinmese de modelin geliştirilmesi aşamasında ezilme zonunun içindeki basınç dağılımını üniform olarak kabul etmişlerdir. Ezilme zonunda parça boyutu merkezden uzaklaştıkça büyümektedir. Ezilme zonunun uzantısı kesici ucun geometrik yapısı ve kayaç özelliklerinin bir fonksiyonudur. Malzemenin yenilmesini çekme gerilmesine bağlı olarak olduğu varsayılmıştır.

CSM modeli ile tam cepheli tünel açma makinesinin itme kuvveti, torku ve gereken güç miktarının hesaplanması için denklemler kullanılmaktadır. Bu değerlerin

hesaplanması için gerçek boyutlu bir doğrusal kesme deney cihazında düşük kesme derinliği değerleri ile başlanarak farklı kesme derinliklerinde deneyler gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar ile denklemler yardımı ile makinenin itme kuvveti, tork ve gereken güç miktarı hesaplanmaktadır. Denklemler yardımı ile elde edilen değerler ile tam cepheli tünel açma makinesinin değerleri kıyaslanarak en uygun kesme derinliği belirlenmektedir.

2006 yılında Ramezanzadeh tarafından gerçekleştirilen çalışmada CSM modelinde hesaplamalara dahil edilmeyen kaya kütle parametrelerinden eklem aralığı ve yönelimi parametreleri de eklenerek bir modifikasyon yapılmıştır.

2.8.2 NTNU modeli

NTNU modeli, Trondheim Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesinde daha önce yapılan tünel projelerinden elde edilen verilerin bir araya getirilmesi ile oluşturulmuş bir modeldir (Bruland, 1998). NTNU modelinde makine parametreleri ve kaya kütle özelliklerinden faydalanılmıştır. Modelin oluşturulması için 1976 yılından beri toplanan veriler ile yeni tünel projelerinden gelen veriler birleştirilerek 1998 yılında 250 kilometrenin üzerinde uzunlukta bir veriye ulaşılmıştır (Bruland, 2014).

NTNU modeli ile net penetrasyon oranı, kesici uç sarfiyatı, ilerleme miktarı ve kazı maliyeti tahmin edilmektedir. NTNU modelinin öne çıktığı en önemli özelliği kayada bulunan çatlak takımlarının etkisini hesaplamaya olanak sağlayan deneysel veri tabanıdır (Young ve diğ., 2017). NTNU modeli ampirik bir model olduğundan dolayı kazılacak formasyon ile kazı sisteminin etkilerinin iyi bir şekilde birleştirmektedir (Rostami ve diğ., 1996).

2.8.3. Diğer araştırmacıların çalışmaları

Günümüzde tam cepheli performans tahmin modelleri için pek çok çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar farklı bağımsız değişkenleri kullanarak ilerleme hızı (m/dk, gün), penetrasyon oranı (mm/dev), alan penetrasyon indeksi (FPI) (kN/mm/dev), spesifik penetrasyon oranı (mm/NM) gibi parametrelerin yanında tam cepheli tünel açma makinesinin çalışma parametreleri olan itme kuvveti, kesici kafa dönme hızı, kesici uç sayısı ve kesici kafa torku gibi parametrelerinde tahmin edilebilmesi için modeller geliştirmişlerdir. Tam cepheli tünel açma makinesinin performans tahmini için

geliştirilen modellerin bir kısmında bağımsız değişkenler yalnızca kayaçların fiziko-mekanik özellikleri olurken bazılarında jeolojik özelliklerde bağımsız değişken olarak performans tahmin modellerinde yer bulmuşlardır.

Kayaçların fiziko-mekanik özellikleri ve tam cepheli tünel açma makinesinin özelliklerinin kullanıldığı performans tahmin modelleri geliştirilmiştir. Tarkoy'un 1974 yılında yaptığı çalışmadır. Yaptığı çalışmada kayaç sertliği ile ilerleme hızı arasındaki ilişkileri incelemiştir. 1976 yılında ise Graham kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve kesme kuvveti parametrelerini kullanarak tam cepheli tünel açma makinesinin ilerleme hızını tahmin etmek için bir model geliştirmiştir. Thuro ve Spaun (1996) yaptıkları çalışmada sadece kayaçların fiziko-mekanik özellikleri olan tek eksenli basınç dayanımı, Young modülü ve çekme dayanımı değerleri ile spesifik penetrasyonu tahmin için bir model oluşturmuşlardır. Avunduk ve Çopur (2018) yılında yaptıkları çalışmada kil formasyonunda açılan bir tünel için kıvam, koni penetrometre testi, plastiklik seviyesi, akışkanlık seviyesi ve kayma dayanımı değerleri bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Bu parametrelerden tork, baskı kuvveti, ilerleme miktarı ve spesifik enerji tahmin modelleri geliştirmişlerdir.

Tam cepheli tünel açma makinelerinin performans tahmini için bazı araştırmacılar jeolojik özellikler, kayaçların fiziko-mekanik özellikleri ve makine özelliklerini kullanarak modeller oluşturmuşlardır. Büchi (1984) yaptığı çalışmada kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve kayaç tipi, anizotropi/şiştozite, çatlak yapısı ve mika içeriğine bağlı bir düzeltme kat sayısı ile makine özellikleri olan kesici uçlar arası mesafe, kesici genişliği ve yarıçapı, kesme kuvveti, TBM çapı ve kesici kafa dönme hızı parametrelerine bağlı olarak ilerleme hızının tahmin edilmesi için bir eşitlik oluşturmuştur. Gong ve Zhao (2009) yaptıkları çalışmada tek eksenli basınç dayanımı, kayaç gevreklik kat sayısı, tünel ekseni ile süreksizlikler arası açı parametreleri ile kesme kuvveti parametresini kullanarak alan penetrasyonu indeksi tahmini için model geliştirmişlerdir. Yağız (2017) yaptığı çalışmada kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, kırılgenlik, süreksizlikler ile tünel güzergahı arasındaki açı parametreleri ve makine faydalanma oranı parametresini kullanarak ilerleme hızı ve alan penetrasyonu oranı tahmini için model geliştirmiştir.

Bazı araştırmacılar ise tam cepheli tünel açma makinesinin performans tahmini için jeolojik özellikler ile makine özelliklerini kullanarak modeller geliştirmişlerdir. Sapigni ve diğ. (2002) yaptıkları çalışmada kaya kütle sınıflama sistemlerinden RMR değeri ile ilerleme hızı ve alan penetrasyonu indeksini tahmini için model

geliştirmişlerdir. Barton (2000) ise yaptığı çalışmada kaya kalite derecesi (RQD), süreksizlik özellikleri, kuvars içeriği, kaya kütle basınç dayanımı parametreleri ile kesme kuvveti ve tam cepheli tünel açma makinesinin çapına göre bir performans tahmin modeli geliştirmiştir. Geliştirilen performans tahmin modeli ile ilerleme hızı tahmini yapılmaktadır. Hassanpour ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, kaya kalite derecesi (RQD) ile makine özellikleri olan kesme kuvveti ve kesici kafa dönme hızının kullanıldığı alan penetrasyonu indeksi tahmini modelini oluşturmuşlardır. Namlı ve Bilgin (2016) yaptıkları çalışmada kaya kütle sınıflama sistemi GSI ile kaya kalite derecesi (RQD) parametreleri ile makine özelliklerinden kesici kafa dönme hızı, tork, kesici kafa çapı parametrelerini kullanarak spesifik enerji, alan penetrasyonu oranı, ilerleme oranı ve kesme gücü tahmin modelleri oluşturmuşlardır. Koopialipoor ve diğ. (2018) çalışmalarında kaya kalite derecesi (RQD), tek eksenli basınç dayanımı, brazilian (endirekt) çekme dayanımı, ayrışma zonu ve kaya kütle sınıflama sistemlerinden RMR parametreleri ile kesici uç başına düşen kesme kuvveti ile kesici kafa dönme hızı parametreleri ile ilerleme hızı tahmini için bir model geliştirmişlerdir. Armetti ve diğ. (2018) ise çalışmalarında bağımsız değişken olarak sadece kayaçların fiziko-mekanik özellikleri ve jeolojik özellikleri dâhil ederek ilerleme hızı ve alan penetrasyonu indeksi değerlerinin tahmini için model oluşturmuşlardır.

Bunlara ek olarak Boyd 1986 yılında yaptığı çalışmada ilerleme hızının tahmin edilmesi için tünel arınının kesit alanı ile bazı makine özelliklerini (Kesici kafa gücü, makine etki faktörü, spesifik enerji) kullanarak ilerleme hızı tahmin modeli geliştirmiştir. Rostami (2016) yaptığı çalışmada ise sadece makine çalışma parametreleri olan makine faydalanma oranı, vardiya sayısı ve vardiya süresi ile günlük ilerleme miktarının tahmini için bir model oluşturmuştur.

Tam cepheli tünel açma makinesinin performan tahmini için pek çok model geliştirilmiştir. Çizelge 2.6'da bazı araştırmacıların yapmış olduğu önemli performans tahmin modelleri ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

Çizelge 2.6. Tam cepheli tünel açma makinesi için geliştirilen bazı performans tahmin modelleri

Tahmin Parametresi	Kullanılan Parametreler	Model	Araştırmacılar
İlerleme Hızı	Makine ve Jeolojik Parametreler	CSM	Rostami ve Özdemir, 1993
İlerleme Hızı	Makine ve Jeolojik Parametreler	NTNU	Bruland, 1998
İlerleme Hızı	Makine ve Jeolojik Parametreler	SRMBI	Gong ve Zhao, 2009
İlerleme Hızı	Makine ve Jeolojik Parametreler	NTNU	Benato ve Oreste, 2015
İlerleme Hızı	Makine ve Jeolojik Parametreler	HC	Liu ve diğ., 2017
İlerleme Hızı Günlük İlerleme	Makine ve Jeolojik Parametreler	Q _{TBM}	Barton, 2000
Arazi Penetrasyon İndeksi (FPI)	Makine ve Jeolojik Parametreler	RMR	Hamidi ve diğ., 2010
Arazi Penetrasyon İndeksi (FPI)	Makine ve Jeolojik Parametreler	Regresyon Analizi	Hassanpour ve diğ., 2011
İlerleme Hızı Tork Baskı Kuvveti	Makine Parametreleri	Deterministik Model	Çopur ve diğ., 2014
İlerleme Hızı	Kazı Parametreleri		Namlı ve Bilgin, 2017
İlerleme Hızı Arazi Penetrasyon İndeksi (FPI)	Jeolojik ve Mekanik Parametreler		Armetti ve diğ., 2018
İlerleme Hızı Arazi Penetrasyon İndeksi (FPI)	Makine ve Jeolojik Parametreler		Yağız, 2017
İlerleme Hızı	Jeolojik Parametreler		Adoko ve diğ., 2017

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasının amacı tam cepheli tünel açma makineleri için performans tahmin modellerinin geliştirilmesidir. Performans tahmin modellerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar üç grupta toplanabilir.

- Arazi çalışmaları kapsamında numunelerin toplanması ve tam cepheli tünel açma makinesinin performans raporlarının alınması,
- Temin edilen numunelerin laboratuvarda fiziko-mekanik özelliklerin belirlenmesi
- Elde edilen veriler ile TBM performans raporlarının istatistiksel olarak ilişkilerinin incelenerek performans tahmin modellerinin geliştirilmesi.

Tam cepheli tünel açma makinelerin performans tahmini için kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinden yararlanılması amaçlanmıştır. Çalışmalar iki farklı tünelde gerçekleştirilmiştir. Tünel sahalarından birisi Konya il sınırları içerisinde DSİ tarafından açılan Hadim-Afşar-Bağbaşı Su ikmal tüneli, diğeri ise İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından açılan Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Hattı projesidir. Belirlenen bu tünel projelerinden alınan numuneler Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarına getirilerek kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi için farklı deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde numunelerin temin edilen tüneller ile ilgili bilgiler, tünel kazılarında kullanılan tam cepheli tünel açma makinelerinin özellikleri, kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler ve tam cepheli tünel açma makinelerinden alınan kazı raporları hakkında bilgiler sunulmuştur.

Çalışma kapsamında tam cepheli tünel açma makineleri için performans tahmin modellerinin oluşturulması için istatistiksel yaklaşımlar tercih edilmiştir. Doğrusal regresyon analizleri ile kayaçların fiziko-mekanik özellikleri ile kazı parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Lineer regresyon analizleri için SPSS istatistiksel yaklaşım programı ve Python yazım dili kullanılarak yapay zekâ destekli bilgisayar programı kullanılmıştır.

3.1. Çalışmaların Gerçekleştirildiği Tüneller

Tez çalışması kapsamında iki farklı tünel projesinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların gerçekleştirildiği tünel projelerinden birisi Konya ili

sınırları içerisinde bulunan, Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından projelendirilen Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli, diğeri ise İstanbul il sınırları içerisinde yapılan ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından projelendirilen Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Hattı projesidir.

3.1.1. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tüneli

Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesi ile Hadim Regülatöründen iletim tüneli ile Bağbaşı barajına su ikmalinin sağlanması amaçlanmaktadır. Proje Konya ili sınırları içerisinde yer almaktadır. Projede su iletimi için planlanan sistemin toplam uzunluğu 24230 m olarak belirlenmiştir. Su ikmal tüneli projesinin tamamı tünel şeklinde değildir. Suyun yerüstünde açık olarak nakil olacağı su iletim kanalı da bulunmaktadır. Bu açık kanalın uzunluğu 5535 m olarak belirlenmiştir. Ayrıca suyun tünele giriş kısmında 552,78 m uzunluğunda bir çelik sifon sistemi bulunmaktadır. Projenin son kısmı ise 18140 m uzunluğundadır ve tam cepheli tünel açma makinesi ile açılması planlanmaktadır. Fakat projede daha sonra yapılan değişiklikler ile tam cepheli tünel açma makinesi ile açılması planlanan uzunluk 12680 m olarak değiştirilmiştir. Tünel projesinin geri kalan 5460 m uzunluğundaki kısmı ise delme-patlatma yöntemiyle açılmaya karar verilmiştir. Projedeki bazı değişiklikler sebebi ile nihai olarak tam cepheli tünel açma makinesinin kazı yapacağı mesafe 12680 m ve delme-patlatma ile açılacak kısım ise 5310 m olarak belirlenmiştir. Şekil 3.1’de tünel su ikmal projesinin tamamı ve tünel ile açılacak kısımlar gösterilmiştir. Bu tünel ile ilgili ayrıntılar, DSİ 4. Bölge Müdürlüğü tarafından hazırlanan Konya-Çumra III. Merhale Projesi (KOP) Jeoloji ve Jeoteknik Raporunda belirtilmektedir (DSİ, 2011).



Şekil 3.1. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli güzergâhı

Tünel güzergâhı “Orta Toroslar” olarak adlandırılan kısımda yer almaktadır. Orta Toroslar ’da Paleozoyik-Senozoyik yaş aralığında ve değişik ortam koşullarında oluşmuş farklı litoloji toplulukları yer almaktadır. Bu litolojiler bölgede ve proje sahasında birbirleriyle uyumlu, uyumsuz ve tektonik dokanak özellikleri gösterirler.

Afşar- Bağbaşı derivasyon hattı projesinin yer aldığı sahada otokton ve allokon kayaçlar mevcut olup bölge yoğun olarak tektonizmaya uğramıştır. Otokton kaya birimleri Afşar-Bağbaşı derivasyonu iletim tüneli güzergâhı üzerinde ve oldukça geniş

bir alanda yayılım gösterir. İnceleme alanındaki en genç birimler ise Kuvaterner yaşlı alüvyon, birikinti konileri ve yamaç molozlarıdır (Şekil 3.2) (DSİ, 2011).

TEKTONİK BİRLİK	Üst Sistem	Sistem	Formasyon	Kalınlık	Litoloji	AÇIKLAMA
	Senozoyik	Kuvaterner	Alüvyon/ Yamaç mol.			Alüvyon (al) : Blok, çakıl, kum, silt, kil. Yamaç Molozu (ym) : Tutturulmamış, köşeli blok, çakıl, kum, kil.
GEDİKDAĞI BİRLİĞİ (Alloktion)	Senozoyik	Paleosen - Eosen	Çakaldere	600 m		(gPEç) Bloklu, volkanik gereç katkılı fliş.
	Mesozoyik	Triyas - Kretase	Ayrılmamış Karbonat+Flis	450 m		(gTrJK) Pelajik kireçtaşı ve fliş; üst seviyeleri çörtlü, radyolaritli (Kretase) kireçtaşı. (Tektonik)
KARTALDAĞI BİRLİĞİ (Alloktion)	Senozoyik	Paleosen - Eosen	Döngelli	500 m		(kPEd) Bloklu (ofiyolit+gTrJK), volkanik gereç katkılı fliş.
	Paleozoyik	Permian	Çalica	1200 m		(kPmç) Kireçtaşı (Tektonik)
HOÇALAR NAPI (Alloktion)	Senozoyik	Triyas	Zindancı	800 m		(Tş) Kireçtaşı ve mermer bloklu metakumtaşı, metaçamurtaşı, metaşeyl, şist, fillit. (Tektonik)
HADİM BİRLİĞİ (Otokton)	Senozoyik	Eosen	Karaçalı	500 m		(hEk) Bloklu, volkanik gereç katkılı fliş.
		Üst Kretase - Paleosen	Yeniköy	150 m		(hPEy) Kireçtaşı
	Mesozoyik	Jura - Alt Kretase	Kaplanlı	400 m		(hJKk) Kireçtaşı
		Kambriyen-Ordovisiyen	Seydişehir	700 m		(hEOs) Metaflis (Sist, fillit)
	Paleozoyik	Kambriyen	Çallepe	250 m		(hEç) Kireçtaşı

Şekil 3.2. Proje sahası ve çevresinin stratigrafik kolon kesiti (DSİ, 2011)

3.1.1.1. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tünel güzergâhının jeolojik bilgileri

Tünel güzergahı boyunca yapılan jeolojik çalışmalar sonucunda tünel güzergahında geçilmesi düşünülen formasyonlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (DSİ, 2011).

- *Hadim birliği*; İletim tüneli güzergâhı ve Kurudere Regülatör Yeri ve çevresinde gözlenirler. Diğer allokton birlik ve napların tabanında yer alan bu otokton birlik, Kambriyen'den Eosen'e kadar devam eden şelf türü kırıntılı ve karbonatlı kayaları kapsar. Tabanında Kambriyen yaşlı Çaltepe kireçtaşları (hĖç) ve bunun üzerine uyumlu olarak gelen ve bölgesel düşük dereceli metamorfizmaya uğramış fliš kökenli fillit, şistler ve metapelitik kayalardan oluşan Seydişehir formasyonu (hĖOs) yer alır. Jura-Erken Kretase yaşlı Kaplanlı formasyonu (hJKk) mikritik kökenli, yer yer mikrokristalin özellik gösteren kireçtaşları ile Seydişehir formasyonu üzerinde uyumsuz olarak bulunur. Geç Kretase-Paleosen yaşlı Yeniköy formasyonu kireçtaşları (hPEy) ve Eosen yaşlı Karaçalı formasyonun, volkanik gereç katkılı flišleri (hEk) birbirlerini açısız uyumsuzlukla (diskonformity) örterler.
- *Hocalar Napı*; Çalışma alanının batısında iletim güzergahı üzerinde yer alan birim Otokton Hadim Birliği üzerine şarye olmuş en eski allokton formasyondur. Olasılıkla Triyas yaşlı olup Zindancık Metaolistostromu (Tş) ile temsil edilir.
- *Zindancık Metaolistostromu*; Formasyon, gri renkli kireçtaşı-mermer bloklu metakumtaşı, metaçamurtaşı, fillit, şist ve sleytlerden oluşur. Yer yer metakuvarsit mercek ve çört yumruları gözlenir. Formasyonda hakim renk açık kahverengi ve yeşilimsi gridir.
- *Metaolistostromlar*; çökel ortamına gravite kaymaları ile irili ufaklı blokların taşındığı bir havzada oluşmuşlardır. Daha sonra bu oluşuklar Barrow tipi düşük yeşil şist metamorfizmasına uğrayarak metaolistostromal topluluk haline gelmiştir.
- *Kartaldağı Birliği*; Kartaldağı Birliği, çalışma sahasının içerisinde, Çalica formasyonunun kireçtaşları ve Döngelli formasyonunun bloklu, volkanik gereç katkılı fliši ile temsil edilirler. Kuzeyden güneye, otokton Hadim birliği ve allokton Hocalar napı üzerine sürüklenerek bindirmişlerdir.
- *Çalica Formasyonu*; Şelf tipi kireçtaşlarından oluşan formasyon, adını Aladağ kasabası güneyinde yer alan Çalica mevkiinden alır. Göksu vadisi içerisinde Kızılkaya-Aşağı Kongul-Sazak-Ilıcıpınar köyleri ile Afşar kasabası civarında yaygın olarak gözlenir. Koyu gri ve kül rengin hakim olduğu orta-kalın tabakalı

kireçtaşlarında bol mikrofosil mevcuttur. Bazı seviyelerinde kumlu ve killi kireçtaşı tabakaları bulunur. Yer yer bol alg ve mini gastropod içeren düzeyler gözlenir. Afşar Barajı çalışma alanı içerisinde taban ilişkisi gözlenmemekte olup bölge genelinde Hadim birliği ve Hocalar napını tektonik olarak üstler. Birimin kalınlığı kimi yüzeylemelerinde 100 m'nin altına düşse de çeşitli araştırmaların ölçülmüş tip kesitlerinde 1200 m ye kadar ulaşır. Ortalama kalınlığı 800 m civarındadır. Karstlaşma çok fazla gözlenmez ve yaygın değildir. Fosil bulgularına göre formasyonun yaşı Permiyendir. Birim sık karbonat şelfinde çökelmiş kayalardan oluşur.

- *Döngelli Formasyonu*; Başlıca bloklu ve volkanik ara katkılı çakıltası, kumtaşı, silttaşı, kiltası gibi kırıntılardan oluşan formasyon adını Taşkent ilçesinin yaklaşık 10 km doğusunda yer alan Döngelli (Keçimen) köyünden alır. Kulaksızdere boyunca gözlenen yüzeylemesi tip yer olarak verilebilir. Formasyon gri, yeşil, yeşilimsi kül rengi, ince–orta tabakalı, yer yer kalın tabakalı bazen tabakalanmasız görünümlüdür. Çakıltası, kumtaşı, silttaşı, kiltası, marn aralanmalı ve yer yer tutturulmamış killi-kumlu düzeyler içeren veya değişik boyda gerecin düzensiz yığılması biçiminde oluşmuştur. Birimin her düzeyinde yeşil, yeşilimsi kahverengi, yeşilimsi kül renkli volkanik tüf-kül katkısı ile bazen serpantinleşmiş peridotit ve gabro bloklarına da rastlanmaktadır. Afşar Baraj yerinde ana kayayı oluşturan fliş karakterindeki birimin en önemli özelliği Gedikdağı Birliği'ne ait pelajik özellikteki Kretase yaşlı kireçtaşı ve radyolarit blokları içermesidir. Altta Çalica formasyonu kireçtaşları üzerinde uyumsuz olarak bulunur. Üstte Gedikdağı Birliği'ne ait pelajik kireçtaşları ile Çakaldere flişleri tarafından tektonik olarak üzerlenir. Çalışma alanı ve çevresinde yaklaşık 500 m kalınlıktadır. Formasyon, volkanik etkinliklerin de gözlemlendiği bir denizaltı yelpazesi çökeli olup, özellikle alt seviyelerde çakıllı, kumlu, siltli, killi ve volkanitli birimler yanal yönde birbirleriyle geçişlidir. Formasyonda doğrudan elde edilmiş fosil bulgusu yoktur. Ancak stratigrafik konumu ve korelasyon sonucu yaşının Paleosen-Eosen olduğu kabul edilmektedir.
- *Gedikdağı birliği*; Bölgedeki üst nap dilimini oluşturan Gedikdağı Birliği, ismini tipik yüzeylemenin görüldüğü Gedik Dağı'ndan alır. Birlik çalışma alanı ve çevresindeki Geç Triyas–Jura- Kretase yaşlı pelajik özellikli ayrılmamış kayalar ve Paleosen-Eosen yaşlı bloklu, volkanik gereç katkılı flişler ile temsil edilirler.

- *Ayrılmamış Karbonat ve Flişler*; Birim yoğun tektonik etki nedeniyle stratigrafik sürekliliğini koruyamamıştır. Geç Triyas–Jura-Kretase yaşlı kayalar topluluğu olarak tanımlanır. Çalışma alanı içerisinde, birliğin üst seviyelerini temsil eden Kretase yaşlı bej ve kül renkli, ince-orta düzgün tabakalanmalı kireçtaşları (gTJK) mevcuttur. Birim, yer yer çörtlü olup kıvırmalı-bordo renkli radyolarit ve çamurtaşı tabakalarını da içerir. Karbonatlı fasiyesi temsil eden kireçtaşları, proje alanında bol eklemli olup, ana kaya Döngelli formasyonun volkanik ara katkılı flişleri içerisinde, tektonik olarak büyük bir blok olarak bulunur. Yaklaşık 1000 m uzunlukta ve 350 m genişlikte yayılım gösteren ana büyük bloğun etrafında birkaç m²'lik bağımsız küçük bloklar halinde de gözlenir. Tektonik olan formasyon dokanağı, ezik ve breşik olup, birim çok fazla eklemlidir. Kireçtaşlarının tektonik olarak yerleşmiş olması ve daha sonraki deformasyonlar nedeniyle eklem doğrultu ve eğimlerinde bir sistemin oluşturulması olanağı bulunmamaktadır. Çok yönlü bir eklem sistemi mevcut olup yer yer küçük boyutlu karstlaşmalar da mevcuttur. Yer yer çörtlü, radyolarit ara tabakalı kireçtaşları düşük enerjili derin deniz çökeltim özelliği göstermektedir. Birim gerek paleontolojik bulgular gerekse fasiyes özellikleri nedeniyle Kretase yaşlı olarak kabul edilmektedir. Ayrılmamış karbonat ve flişlerin bölgesel olarak toplam kalınlığı 450 m olup inceleme alanındaki üst seviyeleri temsil eden radyolarit ara tabakalı kireçtaşlarının toplam kalınlığı yaklaşık 150 m dir.
- *Çakaldere Formasyonu*; Formasyon adını çalışma alanımız içerisinde bulunan Katran Dağı'nın batısındaki Çakaldere'den alır. Kızılkaya, Sarnıç, Oduncu, Çetmi. Balçılar köyleri ve Katran Dağı çevresinde geniş alanlar kaplar. Yeşil, kül, yeşilimsi kül renkli, ince-orta tabakalı, yer yer de kalın tabakalı ya da tabakalanmasız değişken özellikler gösteren birimde, çakıltası, kumtaşı, kıltaşı, miltaşı kaya türleri düzensiz ve yanal geçişli yığılma biçiminde yer alır. Birimin her düzeyinde volkanik tüf katkısı gözlenebilir. Üst seviyelerde bitki kırıntıları ve ekonomik olmayan kömürlü düzeyler de gözlenir. Formasyonun değişik düzeylerinde kireçtaşı ve ayrılmış gabro bloklarına rastlanmaktadır. Birim altta Kretase yaşlı radyolaritli pelajik kireçtaşları üzerine uyumlu olarak gelir. Çalışma sahasında Kuvaterner öncesi yaşlı en genç birim olarak yer alır. Önceki çalışmalarda da kesit ölçümü yapılamamış olup harita üzerinde gözlenen yaklaşık kalınlığı 600 m kadardır. Formasyon, volkanik etkinliklerin de gözlemlendiği bir denizaltı yelpazesi çökelidir. Bölgesel jeolojik yorum ve stratigrafik konumuna göre yaşı Paleosen-Eosen'dir.

- *Kuvaterner Çökelleri;* Kuvaterner yaşlı tutturulmamış çökeller alüvyon, yamaç molozları ile yer yer dere ağızlarında birikmiş birikinti konileri olarak gözlenirler.
- *Alüvyon;* Çalışma sahasında Göksu nehri ve buna bağlı yan dereler içerisinde kil, kum, çakıl ve blok oluşumlu iç yapısız, tutturulmamış kötü boylanmalı alüvyon çökelleri mevcuttur. Eğimin az ve topoğrafyanın düz olduğu kesimlerde kalınlık 30 m'yi bulmaktadır. Alüvyonal malzemelerin yoğun olarak fliş ve kireçtaşı formasyonlarından beslendiği anlaşılmaktadır.
- *Yamaç Molozu;* Yamaç molozları, özellikle yamaç eteklerinde gravite ve yağış sonrası ani sel sonucu ile yamaç aşağıya inen kil, kum, çakıl ve blokların birikimi ile oluşmuştur. Yamaç molozları belirgin bir geometri sunmayan, taneleri az yuvarlak, köşeli, boylanma ve derecelenme göstermeyen düzensiz yığılımlar halinde gözlenirler. Geçici akarsular vasıtasıyla dik yamaçların önünde, yukarıdan aşağıya koparılarak biriktirilmiş, tutturulmamış iri malzemesi daha yoğun olan birikinti konileri de çalışma alanında yer yer gözlenmektedir.

3.1.1.2. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tünel güzergâhının yapısal jeolojisi ve jeolojik tarihçesi

Bölgede Mesozoyik boyunca gelişen okyanus, Alt Paloesen'den başlayarak yaklaşık kuzey-güney doğrultulu sıkışmalarla naplı-bindirmeli yapılar oluşturacak biçimde kapanma sürecine girmiştir. Proje alanı, bu naplı-bindirmeli yapıların gözlemlendiği önemli bölgelerden biridir (DSİ, 2011). Naplı-bindirmeli yapıların Göksu ırmağı ve drenaj alanı içerisinde aşındırmaları sonucu inceleme alanının otokton konumlu kayaları ortaya çıkar. “Hadim Birliği” adı verilen otokton kaya türleri üzerindeki naplı bindirmeli yapılara da “Göksu Napları” denilmiştir. Çalışma sahasında, Göksu Naplarının bölümleri olarak Hocalar Napı, Kartaldağı Birliği ve Gedikdağı Birliği yer alır. Bölgenin ana yapısal biçimlenmesi, Orta Alpin dönemini belirleyen Laremiyen fazındaki Alpin dağoluşumu ile kazanılmıştır.

Bindirme ve yoğun tektonizma nedeniyle allokton birimlerde hakim bir tabaka doğrultu ve eğimi saptanamamaktadır. Otokton Hadim Birliğine ilişkin birimlerde tabaka doğrultuları çoğunlukla KB-GD, eğimler ise kıvrımlanmalara bağlı olarak KD ve GB olarak değişmektedir. Özellikle Jura–Erken Kretase yaşlı Kaplanlı formasyonuna ait mikritik kökenli kireçtaşlarında yoğun antiklinal ve senklinaller gelişmiştir. Bölge genelinde eğim atımlı faylar çoğunlukla KD-GB doğrultulu, yanal atımlı faylar ise KB-GD doğrultulu olarak gözlenmektedirler.

3.1.1.3. Tam cepheli tünel açma makinesi ile açılacak güzergâh bilgileri

Afşar-Bağbaşı derivasyonunun iletim tüneli kesimi 18145 m uzunlukta ve 4,40 m i çapta açılacaktır. Tünel aımında yaklaşık olarak; %9 kireçtaşı, mermer bloklu Zindancık metaolistostromu (Tş), %33 alıca formasyonu kireçtaşları (kPm), %24 Kaplanlı formasyonu (hJKk) kireçtaşları ve %34 Seydişehir formasyonu (hEOs) kumtaşı, şeyl ve metaflişleri geçilecektir. Ayrıca Hadim regülatöründen alınacak suyun iletilmesi için imalatlarda yaklaşım olarak kullanılacak 765 m uzunluğundaki tünelde ise tamamen alıca formasyonu kireçtaşları (kPm) içerisinde açılacaktır.

İletim tüneli güzergahında açılan sondajlardan bir tanesi tünel girişinde ve 45 m uzunluğunda açılmıştır. Sondaj kuyusunun tamamı Zindancık formasyonu içerisindedir ve şist ile fillit kesilmiştir. Sondaj kuyusunda çok ve tamamen ayrışmış özellikte kayalar bulunmaktadır ve RQD değeri 0'dır.

İkinci sondaj noktası iletim tünelinin 17+155 km'sinde 165 m uzunluğunda açılmıştır. 0-102 m derinliklerinde Kaplanlı formasyonu kireçtaşları, 102-165 m arasında ise Seydişehir formasyonu metafillişlerine ait fillit geçilmiştir. Tünel fillit içerisinden geçmektedir. RQD değeri kireçtaşları için 27-96, metafillişlerde ise 0-98 arasında bulunmuştur. Tünel seviyesinde ise RQD değeri 20-98 olarak belirlenmiştir.

Açılan nc sondaj ise tünelin çıkış kısmında 65 m uzunluğunda açılmıştır. Bu bölgede litoloji tamamen Seydişehir formasyonu metapelitik (düşük dereceli bölgesel metamorfizmaya uğramış ince taneli kayaç) kayalarına ait serizit kuvars şistlerdir. RQD ilk 25 m'lik kısımda 0 olup 25 m sonrasında 6-37 aralığındadır ve tünel kotunda ise 10-38 aralığındadır.

İletim tüneli güzergâhında açılan dördüncü sondaj kuyusu 150 m derinlikte açılmıştır. İlk 100 m karotsuz olarak açılmıştır. 100-132 m arası Döngelli formasyonu flişleri, 132-150 m aralığında ise alıca formasyonuna ait kireçtaşları geçilmiştir.

Yapılan beşinci sondajda sondajı Hadim deresi sağ sahilinde 138 m derinlikte açılmıştır. İlk 100 m karotsuz olmak üzere 0-112 m alıca formasyonu kireçtaşı ve 112-138 m Zindancık metaolistostromu şistleri içerisinde açılmıştır. RQD kireçtaşlarında %0-70 aralığında ve ortalama %30, bindirme zonu ve metamorfiklerde %0 olarak belirlenmiştir.

Son olarak yapılan sondaj ise Kurudere regülatörü iletim şaftı üzerinde 230 m derinlikte açılmıştır. 0-150 m karotsuz olmak üzere sondajın tamamında Kaplanlı

formasyonu kireçtaşları geçilmiştir. RQD değerleri %0-60 aralığında değişmekte olup, ortalama %22' dir.

Yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen verilere göre tünel güzergâhında geçilecek formasyonlar aşağıda belirtilmiştir.

- 5+948-6+005 km (Tünel Giriş Portalı) Zindancık metaolistostromu (Tş)
- 6+005-6+550 km Zindancık metaolistostromu (Tş)
- 6+550-11+600 km Çalica formasyonu kireçtaşı (kPmç)
- 11+600-12+700 km Zindancık metaolistostromu (Tş)
- 12+700-13+550 km Çalica formasyonu kireçtaşı (kPmç)
- 13+550-15+950 km Kaplanlı formasyonu kireçtaşı (hJKk)
- 15+950-16+750 km Seydişehir formasyonu metaflişleri (hEOs)
- 16+750-17+750 km Kaplanlı formasyonu kireçtaşı (hJKk)
- 17+750-21+300 km Seydişehir formasyonu metaflişleri (hEOs)
- 21+300-22+200 km Kaplanlı formasyonu kireçtaşı (hJKk)
- 22+200-24+150 km Seydişehir formasyonu metaflişleri (hEOs)

Temel sondaj verileri ve saha çalışmalarına göre iletim tüneli yeraltı su seviyesi altında açılacaktır (DSİ, 2011). Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tüneli güzergâhında kazılacak formasyonlar sert kaya özellikleri göstermektedir. Tünel güzergâhında geçilmesi öngörülen formasyonlar yukarıda görüldüğü gibi 4 farklı formasyondur. Zindancık formasyonu (Tş), Çalica formasyonu (kPmç), Kaplanlı formasyonu (hJKk) ve Seydişehir formasyonu (hEOs) geçilmesi öngörülmektedir. Bu formasyonlardan Zindancık formasyonu, Çalica formasyonu ve Kaplanlı formasyonu kireçtaşından oluşmaktadır fakat Seydişehir formasyonu metapelitik (düşük dereceli bölgesel metamorfizmaya uğramış ince taneli kayaç) kayalarına ait serizit kuvars şistlerdir. Tünel güzergâhı ve karşılaşılması öngörülen formasyonların uzunlukları Şekil 3.3'te sunulmuştur.

kuzeybatıdan güneydoğu yönüne uzanan bir kesişim noktası bulunmaktadır. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Merkez Metro Projesi, ana hatları Hat-1, Hat-2 ve Çekmeköy-Yenidoğan Hattı'na bağlantı hatları 1 ve 2'yle yaklaşık 24 km uzunlukla özetlenebilir (hat 1: 10875 m ve hat 2: 10910 m).

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli hattında Şekil 3.5'te gösterildiği gibi 8 istasyon bulunmaktadır: Meclis Mahallesi, Sarıgazi, Samandıra, Abdurrahmangazi, Sancaktepe, Veysel Karani, Hasanpaşa ve Sultanbeyli İstasyonları. Çekmeköy-Sultanbeyli-Sancaktepe Metro Projesi ile ilgili jeolojik ve jeoteknik bilgiler, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından 2017 yılında hazırlanan Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi Jeolojik Raporundan (İBB, 2017) alınmıştır.



Şekil 3.5 Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi güzergahı gösterimi (İBB, 2017)

İstanbul ve çevresi, Erken Paleozoik'ten son zamanlara kadar olan zaman aralığında oluşan bir jeoloji içerir. İstanbul'un alt katmanlarını oluşturan kayaların büyük bir kısmı, yerinde oluşmuş kayalardan ziyade kuzeyden farklı kıtalardan ayrılmış ve taşınmış kayalardan oluşmuştur. Bu nedenle, İstanbul çevresindeki metamorfik olmayan kayaçlar Büyükçekmece körfezinden sonra geniş fay alanı boyunca metamorfik kayaçlara dönüşmüştür. İstanbul çevresindeki Paleozoik sekans, çökeltme koşulları ve levha tektoniği açısından üç gruba ayrılmıştır: Bunlar rift, pasif levha

kenarları ve turbidit/fliş çökelleridir. Kurtköy birimi kırmızı ve mor renkli arkozik litolojileri ile başlar ve bir kıtasal riftleşme gelişimi gösterir. Ardından, Atlantik tipi pasif levha sınırını yansıtan nispeten sığ deniz litolojileri tarafından temsil edilen oldukça düzenli bir dizilimle devam eder. Kurtköy ve Trakya birimleri arasındaki tüm birimler pasif levha kenarı koşullarında birikmiştir. Son olarak, İstanbul'un paleozoik istif, Trakya Formasyonu'nun derin denizel bir türbidit/fliş sırası ile sonuçlanmıştır.

İstanbul bölgesinin Paleozoik istifinin çökelme koşullarını gösteren litolojisi Şekil 3.6 'da belirtilmiştir (İBB, 2017).



SİSTEM	SERİ	FORMASYON	ÜYE	YAKLAŞIK KALINLIK(m)	KAYITURU	EK AÇIKLAMALAR
KARBONİFER	ORTA DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	TRAKYA	Küçükköy	1000		Kumtaşı-Miltaşı-Şeyil ardışı; alttan üste doğru şeyil-miltaşı(<i>Acıbadem Üyesi</i>),kireçtaşı(<i>Cebeci Kireçtaşı</i>), lidit-şeyil ardışı (<i>Kartaltepe Üyesi</i>), türbiditik kumtaşı-şeyil ardışı (<i>Küçükköy Üyesi</i>) düzeylerini kapsamakta
			Kartaltepe	30		Lidit; kara-koyu külrengi, ince katmanlı, yer yer lamine; fosfatlı küresel (1-5 cm) silis yumrulu
DEVONİYEN	ALT + ORTA DEVONİYEN	PENDİK	Acıbadem	400		Yumrulu Kireçtaşı; külrengi, sarımsı-boz-yeşil yer yer pembemsi kil-killi kireçtaşı ara katkılı, seyrek krinoidli, sucuk yapılı
			Cebeciköy	40		Lidit-Şeyil; ince-orta katmanlı,kara-koyu külrengi ince katmanlı lidit ile pembemsi, sarımsı boz şeyil-kiltaşı ardışı; seyrek kireçtaşı(mikrit) arakatlı
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Baltalimanı	40		Kireçtaşı-Killi Kireçtaşı; kara-koyu külrengi, ince-orta,düzgün ve dalgalı katmanlı, şeyil arakatlı, seyrek makrofosilli; yumrulu görünüşlü kireçtaşı ara düzeyli
			Ayineburnu	40		Mikali şeyil-miltaşı
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Yörükali	30		Kireçtaşı-Killi Kireçtaşı; koyu külrengi, orta-kalın katmanlı mikrit; kireçli kiltası-killi kireçtaşı arakatlı; üst düzeylerinde sucuk yapılı
			Tuzla	60		Mikali şeyil-miltaşı; kara-koyu külrengi, ayrılmış boz-açık kahverengi, ince-orta katmanlı,yarılgan, bol mika pullu şeyil egemen;seyrek olarak, bol kavkı kırıntılı kireçtaşı, ince kumtaşı arakatlı; brakypod, trilobit vb makrofosilce zengin
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Kozluca	10-100		Yumrulu görünüşlü Kireçtaşı; külrengi,boz,dalgalı katmanlı, sucuk yapılı; değişen oranda kireçtaşı-kiltaşı-kireçli kiltası aralanmalı
			Kartal	650		Kireçtaşı (mikrit); koyu külrengi,ince-orta katmanlı kireçtaşı egemen; yer yerkil arakatlıve lamine; alt düzeylerinde yer yer makrofosilli
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Soğanlık	60		Lamine kireçtaşı (mikrit); koyu külrengi, ince dokulu, pembe-kızıl kiltası-şeyil arakatlı, disharmonik kıvrımlı
			Sedefadaşı	280		Resif Kireçtaşı; açık koyulu pembemsi-morumsu, üst kesimde açık külrengi-boz; bol mercan vb makrofosillix
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	İçmeler	40		Kireçtaşı-Killi Kireçtaşı-Kireçli Kiltası-Kumtaşı; külrengi, boz, ince-orta katmanlı, makrofosilli
			Dolayoba	60		Felspatlı kuvarsarenit-kuvarsake; kirli beyaz,bej, orta-kaba kuvars,ayrışmış felspat taneli(<i>Şeyhli Üyesi</i>)
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Mollafenari	30		Şeyil-Miltaşı; mor, yeşil, şamozitli oolitli,seyrek makro fosilli, ender kireçtaşı arakatlı(<i>Umurdere Üyesi</i>)
			Şeyhli	110		Kumtaşı-Miltaşı; koyu yeşil-koyu külrengi,ayrışmış kahverengi kalın katmanlı, sık eklemlili, mika pullu.
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Umurdere	40		Kuvarsit(kuvarsarenit); beyaz, pembemsi,kremrengi, ince kuvars taneli, silis çimentolu, sık eklemlili
			Gözdağ	250		Çakıltı; mor,kirli beyaz,yuvarlanmış kuvars çakıllı, silis çimentolu (<i>Başbüyük Üyesi</i>)
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Ayazma	70		Çamurtaşı,Şeyil;mavimsi koyu külrengi (<i>Kısıklı Üyesi</i>)
			Başbüyük	50		Felspatlı Kuvarsarenit; boz,kızılımsı,orta-kalın katmanlı
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Kısıklı	30		Kuvarsake, Miltaşı; boz, açık külrengi, morumsu; çapraz katmanlı, kuvars ve ayrılmış feldispat taneli
			Manastır Tepe	50		Arkozik Kumtaşı-Çakıltı-Miltaşı; mor,eflatun, orta-kalın katmanlı, orta-zayıf boylanma, yer yer koşut ve çapraz laminalanlı, derecelenmeli
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Gülsuyu	200		Miltaşı-Kumtaşı; boz ve mor renk aralanmalı; tane boyu üste doğru artmakta
			Süreyyapaşa	1000		Miltaşı, Şeyil; koyu yeşilimsi, külrengi, ayrılmış boz, lamine (varlı) ince katmanlı; yer yer çapraz katmanlı seyrek kumtaşı arakatlı
DEVONİYEN - ÜST DEVONİYEN	ÜST DEVONİYEN	DENZİLİ KÖYÜ	Bakacak	500		
			KOCATÖNGEL	2200		

Şekil 3.6. İstanbul'un Paleozoik istifinin çökeltme koşullarını gösteren litolojisi (İBB, 2017)

3.1.2.1. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro hattı güzergâhının jeolojik bilgileri

Açılacak tünel güzergahı boyunca geçilmesi beklenen formasyonlar ve jeolojik birimler aşağıda açıklanmıştır (İBB, 2017).

- *Yapay dolgu*; İnceleme alanında yapılan sondajlarda 0,4–4,60 metre kalınlıklarında, genellikle asfalt dolgu, beton dolgu, zemin ve çakıllı kumlu kilden oluşan, değişime uğramış ve imal edilmiş yol dolgu maddesini temsil eden yapay dolgu birimidir.
- *Alüvyon*; İnceleme alanındaki araştırma sondajlarında, alüvyon (Qal) birimi genellikle çakıllı kumlu kilden oluşmakta ve yeşilimsi-siyahımsı ve koyu kahverengi renklerle renklendirilmiştir. Bu jeolojik oluşum, yüksek plasiteli iri taneli bir zemin sunmaktadır.
- *Sultanbeyli Formasyonu*; İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem ve Zemin İzleme Müdürlüğü (İBB-DEZİM) tarafından, Anadolu yakasında gerçekleştirilen Mikro bölgeleme Projesi çalışmalarında, il alanının Sultanbeyli dolayını da içine alan güneydoğu kesiminde geniş alan kaplayan Geç Neojen birikintilerinin ortam özellikleri ve taban topoğrafyasının ortaya çıkarılmasını amaçlayan ayrıntılı jeolojik harita alımı, yaş tayinleri ve çok sayıda sondaj yapılmış, bu çalışmalardan sağlanan veriler, istifin formasyon aşamasında tanımlanmasını gerektirmiştir.
- *Sultanbeyli Formasyonu Tuğlacıbaşı Üyesi*; Proje alanında, üst alanları kaplayan bu jeolojik tabaka, lokal olarak tünel seviyelerine kadar yayılmıştır. Sultanbeyli Formasyonu Tuğlacıbaşı Üyesi (Tst) genel olarak çeşitli tane boyutlarına sahip çakıllı kumlu kilden oluşmaktadır. Rengi çoğunlukla açık kahverengi/ bej ve yarı kuvars taneleri olup kuvarsitten gelmektedir.
- *Sultanbeyli Formasyonu Dudullu Üyesi*; Sultanbeyli Formasyonu Dudullu üyesi genelde çakıllı kumlu kil, kumlu siltli kil, kıltaşı ve çakıldan oluşur. Renk çoğunlukla sarımtırak kahverengi, koyu kahverengi olan yarı köşeli tanelerdir.
 - *Pendik Formasyonu*; Pendik Formasyonunun çoğu mikalı ince taneli klastik kayalardan oluşur; Bazı katmanlarda, özellikle üst seviyelerde, kireçtaşı ara katkısı da vardır. Boğaz'ın Anadolu yakasındaki geniş alanları kapsar ve zengin makro fosil içeriği nedeniyle kolayca tanınır. Pendik Formasyonu ağırlıklı olarak ince taneli mikalı klastik kayalardan oluşur (şeyl, silttaşı ve ince kumtaşı). Üst seviyelerinde kireçtaşı arakat killeri de içerir. Kartal ve Kozyatağı olmak üzere iki farklı üyeye ayrılmıştır.
- *Pendik Formasyonu, Kartal Üyesi*; Kartal Üyesi, siyah, koyu gri, bölgesel olarak koyu yeşil renkli mikalı şeyl ve nadir mikalı kumtaşları olan 5-10 cm kalınlığında silttaşı içermektedir. Kumtaşları çoğunlukla kuvars ve daha az miktarlarda feldspat, mermer volkanik litik parçaları killi bir matriste ya da lokal olarak karbonat çimento içinde kuvars-çamurtaşıdır. Trakya ve Yayalar formasyonları gibi diğer kırıntılı

Paleozoik oluşumlardan, daha ince tane boyu ve bol miktarda makro fosil içeriği ile ayırt edilir.

- *Pelitli Formasyonu;* Pelitli Formasyonunun büyük kısmı şelf tipi sığ denizel kireçtaşları ile temsil edilmektedir. Küçük şeyl katmanları sekansın tamamında bulunur, ancak üst bölümlerde şeylin ve kireç taşının araldanmasından ibarettir.
- Pelitli Formasyonunun çoğu neritik kireçtaşlarından oluşur. Tabandan yukarı doğru, karbonat bakımından zengin şeyl-kumtaşı, şeyl kireçtaşı araldanması, bol miktarda makro fosil, orta ile ince tabakalı lamine mikritik kireç taşı ve en üstte mercekli kireçtaşı şeyl araldanması bulunan biyohermal ve biyostromal kireçtaşları bulunmaktadır. Formasyon yukarıdan aşağıya beş gruba ayrılmıştır: Mollafenari Üyesi, Dolayoba Kireçtaşı Üyesi, İçmeler Üyesi, Sedefadası Kireçtaşı Üyesi ve Soğanlık Kireçtaşı Üyesi.
- *Soğanlık Kireçtaşı Üyesi;* Pelitli Formasyonunun en üst bölümünü oluşturan nodüler kireçtaşı, Pelitli Formasyon Soğanlık Üyesi (SDpsğ); ağırlıklı olarak killi kireçtaşlarından oluşur. Bu birimler gri- koyu gri renkli, orta sert- sert, orta derecede zayıf dirençli, orta dereceli – yer yer çok- yer yer tamamıyla ayrılmış birimlerdir.
- *Kurtköy Formasyonu;* Kurtköy Formasyonu çoğunlukla mor arkozik kırıntılı kayalardan oluşmaktadır. Kurtköy Formasyonu seyrek olarak mostra vermiştir. Çünkü hem kentleşme bu mostralar üzerine olmuştur hem de mostralar ormanlık alandadır. İyi, sürekli kısımlar yoğun faylanma ve katlanma nedeniyle nadirdir. Bütün Formasyon için uygun bir bölüm tipi yoktur. Kurtköy formasyonunun alt katmanını oluşturan Bakacak Üyesinin bölüm türü, Yeniçiftlik vadisinin aşağı kesiminin sağ (doğu) tarafıdır. Kurtköy Formasyonu'nun üst kısmını oluşturan Süreyyapaşa Üyesinin kesit tipi Maltepe-Başıbüyük Kavşağı ile Büyükyalı Deresi arasındaki E5 karayolu üzerindedir. Kurtköy Formasyonu esas olarak açık ve koyu mor arkozik kumtaşı, çakıltası ve siltaşı içermektedir Kumtaşı ve ara tabakalı lamine siltaşı sekansın üst kısmında konglomera mercekli alt bölüm ve iri taneli kumtaşı hakimdir; bunlara sırasıyla Bakacak ve Süreyyapaşa üyeleri denir.
- *Süreyyapaşa Üyesi;* Kurtköy Formasyonu'nun üst kısmını oluşturur ve çoğunlukla birkaç metreden on metreye kadar kalınlık arz eden konglomera ara katmanları ve mercekleri olan arkozik kumtaşlarından oluşur. Kumtaşı mor, yeşilimsi gri, orta ile kalın tabakalı, zayıf orta çizgilere paralel olarak derecelendirilmiştir. Bunlar, sarımsı kuvars, feldspat, mika, kuvarsit, çört ve magmatik ve metamorfik kayalardan orta yuvarlak klastikler içerir. Kuvars gibi dayanıklı parçaları %50'nin üzerindedir.

Feldspat miktarı %10-20 arasında değişir. Parçalar, kil matrisi ve az miktarda silisli çimento ile sınırlandırılmıştır. Süreyyapaşa Üyesi'ndeki kumtaşı türleri arasında arkoz, arkozik arenit, arkozik çamurtaşı ve az miktarda subfeldspatik litik arenit ve subfeldspatik litik çamurtaşı bulunur. Süreyyapaşa Üyesi'ndeki konglomera mercekler, iri taneli kumlu bir silt matrisi ile kuvvetle bağlanan, yarı-yuvarlak, lokal olarak derecelendirilmiş, orta sınıflandırılmış süt beyazı kuvars, kuvarsit, çört, granit, gablo, volkanik kayaç ve şist kütlelerinden oluşur. Tane boyutu genellikle 1 ile 5 cm arasında değişir, ancak lokal olarak 10-15 cm'ye ulaşır. Kumtaşı ve şeyllerin aynı yaştaki iç formasyonel taneleri, batısında Maltepe-Başibüyük Kavşağı ile Büyükyalı Deresi arasında yaygın olup, yolun iki tarafındaki yol kesiklerinde maruz kalan konglomeranın kalınlığı 100 metrenin üzerindedir. Süreyyapaşa Üyesi'nin en üst bölümlerinde, iyi sınıflandırılmış ve kademeli tanelerle konglomera mercekleri bulunur. Bu mercekler, Aydos Formasyonu'nun Başibüyük Üyesi olan, silisli çimentoya sahip olan ve kuvarsitlerle ardalanma yapanlardan ayırt edilebilir. Süreyyapaşa Üyesi'nin kalınlığı Yeniçiftlik Vadisi'nde 1000 m'ye ulaşır. Alemdağ ve Ömerli köyleri arasında Şile yolunda ve Paşaköy güney kesiminde Şile-Pendik yolunda yol kesiklerinde de iyi mostralar bulunmaktadır.

Tünel güzergahı boyunca geçilecek jeolojik formasyonlar ve kısa açıklamaları Çizelge 3.1'de sunulmuştur (İBB, 2017).

Çizelge 3.1 Tünel güzergahının jeolojik lejantı (İBB, 2017)

Kısaltması	Jeolojik Birim	Tanımlaması
Yd	Yapay Dolgu	Yol Dolgu Malzemesi
Qal	Alüvyon	Çakıllı Kumlu Kil
Tst	Sultanbeyli Formasyonu, Tuğlacıbaşı Üyesi	Konsolide Kum ve Çakıl
Tsd	Sultanbeyli Formasyonu, Dudullu Üyesi	Kil
Dpk	Pendik Formasyonu, Kartal Üyesi	Koyu Renkli Volkanosedimanter Birimler, Şeyl
Dpk-W5	Pendik Formasyonu, Kartal Üyesi	Tamamen Ayrışmış Koyu Renkli Volkanosedimanter Birimler, Şeyl
SDpsg	Pelitli Formasyonu, Soğanlık Üyesi	Kireçtaşı-Kiltaşı Ardalanması
SDpsg-W5	Pelitli Formasyonu, Soğanlık Üyesi	Tamamen Ayrışmış Kireçtaşı-Kiltaşı Ardalanması
SDp	Pelitli Formasyonu	Kireçtaşı
SDp-W5	Pelitli Formasyonu	Tamamen Ayrışmış Kireçtaşı
Opk	Kurtköy Formasyonu	Kumtaşı ve Kiltaşı
Opk-W5	Kurtköy Formasyonu, Süreyyapaşa Üyesi	Tamamen Ayrışmış Kumtaşı ve Kiltaşı

Tünel güzergâhı boyunca tünel derinliğinde karşılaşılabilecek beklenen jeolojik formasyonlar Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

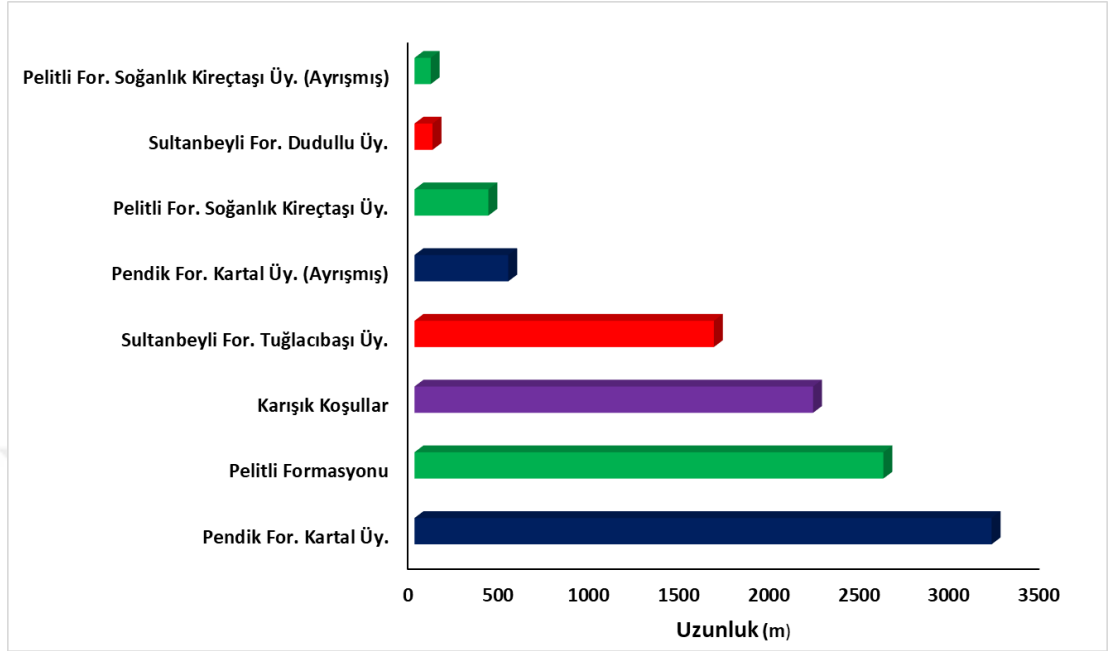
Çizelge 3.2 Tünel derinliğinde beklenen jeoloji açısından güzergâh tanımı (İBB, 2017)

Başlangıç (Km)	Bitiş (Km)	Kısmi Uzunluk (m)	Jeolojik Birim
0+000	1+540	1540	Dpk
1+540	1+560	20	Karışık Koşullar: Dpk & SDpsg
1+560	1+970	410	SDpsg
1+970	2+060	90	SDpsgW5
2+060	2+090	30	Karışık Koşullar: SDpsgW5 & Dpk
2+090	2+750	660	Dpk
2+750	3+820	1070	SDp
3+820	3+860	40	Karışık Koşullar: SDp & DpkW5
3+860	4+000	140	Karışık Koşullar: DpkW5 & Dpk
4+000	5+000	1000	Dpk
5+000	5+350	350	Karışık Koşullar: DpkW5 & Dpk
5+350	5+500	150	DpkW5
5+500	5+580	80	Karışık Koşullar: Tsd & DpkW5
5+580	5+950	370	DpkW5
5+950	6+010	60	Karışık Koşullar: Tsd & DpkW5
6+010	6+110	100	Tsd
6+110	6+140	30	Karışık Koşullar: Tst & Tsd
6+140	7+025	885	Tst
7+025	7+240	215	Karışık Koşullar: Tst & SDp
7+240	8+015	775	Tst
8+015	8+130	115	Karışık Koşullar: Tst & SDp
8+130	9+440	1310	SDp
9+440	10+080	640	Karışık Koşullar: Tsd & SDp
10+080	10+300	220	SDp
10+300	10+320	20	Karışık Koşullar: SDp & OpkW5 & Opk
10+320	10+840	520	Karışık Koşullar: OpkW5 & Opk

Zemin birimleri (tamamen ayrılmış kaya kütlesi dahil), Çekmeköy İstasyonu Sultanbeyli İstasyonu arası toplamda 2,4 km'lik bir tünel güzergâhı için tünel derinliklerinde beklenen malzemenin % 22'sini temsil eden Tst, Tsd, SDpsg-W5 ve Dpk-W5 birimlerinden oluşmaktadır. Kaya kütle birimleri SDp, SDpsg, Opk ve Dpk tarafından temsil edilen kaya oluşumları, 6230 m boyunca beklenen güzergâh boyunca ana jeolojik birimleri temsil etmektedir ve bunlar, kabul edilen tünel güzergâhının yaklaşık %58'idir (Çekmeköy İst.- Sultanbeyli İst.). Dpk birimi için 3200 m (%30), SDp için 2600 m (%24) ve SDpsg için 410 m (%4).

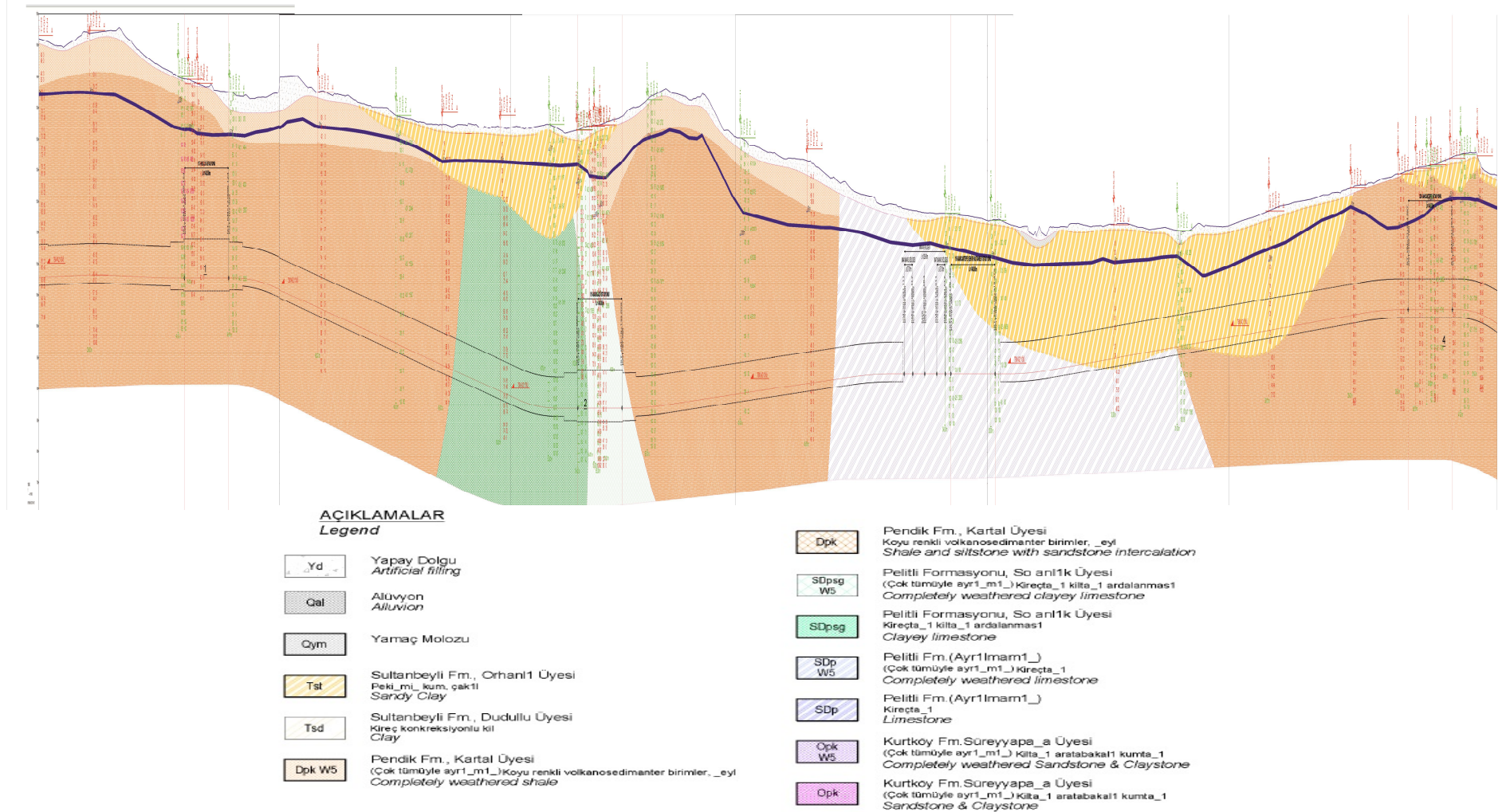
Karışık koşullar, kaya üyelerinin tünel derinliklerinde, tamamen farklı dayanım ve/veya deformabilite özelliklerine sahip başka bir jeolojik birimle eşzamanlı olarak karşılaşıldığı durumları içerir. Bu koşullar, ÇSS hattı için kabul edilen tünel güzergâhının yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır (2210 m). Karışık koşullar için karşılaşılan jeolojik birimler şunlardır: Dpk& Dpk-W5, Opk&Opk-W5, SDp &Dpk-W5, SDp & Opk-W5 &Opk, SDpsg-W5 & Dpk, Tsd &Dpk-W5, Tsd&SDp ve Tst &

SDp. Şekil 3.7’de tünel güzergâhı boyunca karşılaşılmaması beklenen formasyonlar ve uzunlukları verilmiştir.



Şekil 3.7. Çekmeköy-Sultanbeyli Metro tüneli güzergâhında beklenen formasyonlar ve uzunlukları

Çalışma kapsamında numune alınan bölgenin jeolojik haritası Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi jeolojik haritası

3.2. Çalışma Sahalarında Kullanılan Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri

Tam cepheli tünel açma makineleri proje özelliklerine göre farklı çaplarda ve farklı teknik özelliklerde üretilmektedir. Tez çalışması kapsamında incelenen iki farklı tünelde yapılma amaçlarına göre farklı projelerdir. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli bir su derivasyon tüneli iken Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi bir şehir içi ulaşım tünelidir. Başlıca bu sebepler bile farklı tam cepheli tünel açma makinesi seçimi gerektirebilmektedir. Fakat iki tünel projesinde de kullanılan tam cepheli tünel açma makineleri aynı tipte ve çift kalkanlı pasa basınçlı tünel açma makinesidir.

Bu kısımda çalışma sahalarında kullanılan tam cepheli tünel açma makineleri ile ilgili bilgiler verilecektir.

3.2.1. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tünelinde kullanılan tam cepheli tünel açma makinesi

Konya ili sınırları içerisinde açılan Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneli tek tüp şeklinde açılmaktadır. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tünelinin açılmasında tünelin Hadim Regülatörü tarafındaki girişinden delme-patlatma yöntemiyle diğer girişten ise tam cepheli tünel açma makinesi ile kazı çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Açılan tünelde dış çap 4,90 m çapında olup 25 cm kalınlığında beton segmentler yerleştirildikten sonraki son tünel çapı 4,40 m olmaktadır.

Projede kullanılan tam cepheli tünel açma makinesi Herrenknecht firmasının pasa basınçlı (EPB) tam cepheli tünel açma makinesidir (Şekil 3.9). Kullanılan pasa basınçlı tünel açma makinesi çift kalkanlıdır. Pasa basınçlı tünel açma makinelerinin kullanım alanları; su gelirinin olduğu, tünel aynasının kendini tutmakta zorlandığı, jeolojik süreksizliklerin bulunduğu ve ince taneli malzemelerden dolayı akma tehlikesi olan formasyon kazılarıdır. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli'nde yukarıda belirtilen şartlar olduğundan dolayı pasa basınçlı tünel açma makinesi tercih edilmiştir.

Kazılacak formasyonun çatlaklı ve akışkan bir yapıya sahip olmasından dolayı kesici kafanın ve arka kısmın korunması için çift kalkanlı pasa basınçlı tünel açma makinesi tercih edilmiştir.



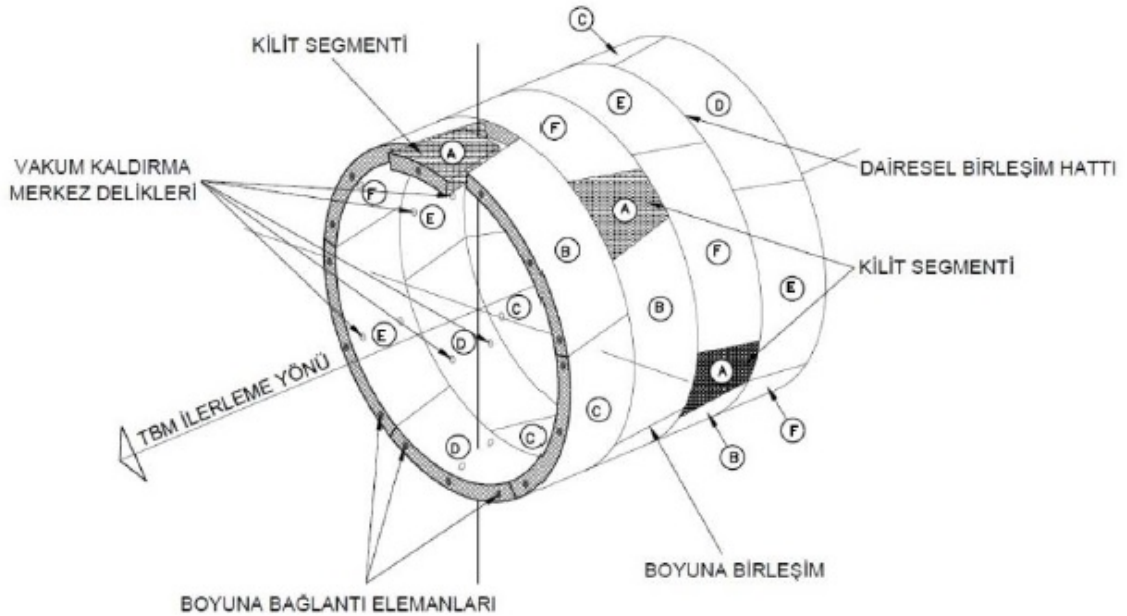
Şekil 3.9. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tüneline kullanılan EPB-TBM'in içeriden görünümü

Tünel kazısında kullanılan tam cepheli tünel açma makinesine ait bazı teknik özellikler Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneline kullanılan tam cepheli tünel açma makinesinin (EPB-TBM) teknik özellikleri

TBM Özellikleri	
Makine Tipi	Pasa Basıncılı Tam Cepheli Tünel Açma Makinesi
Toplam Güç	2133 kW
TBM Uzunluğu	188 m
TBM Ağırlığı	700 t
Teorik İlerleme Hızı	80 mm/dk
İtme Silindiri Sayısı	2 x 11
Delme Çapı	5300 mm
Kesici Disk Sayısı	27-42
Kesici Disk Çapı	17 inç (43 cm)
Kesici Kafa Motor Sayısı	7
Kesici Kafa Motor Gücü	1120 kW

TBM ile kazı yapıldıktan sonra oluşan boşluk beton segmentler ile desteklenmektedir. Beton segmentlerin uzunluğu 150 cm olduğu için 150 cm'lik kazı yapıldıktan sonra kazı durdurularak bu beton segmentler yerleştirilmekte ve bu şekilde tünel duraylılığı sağlanmaktadır. Bu nedenle kazı planında her bir halka (ring) kazısı 150 cm olarak belirlenmiştir. Her bir halkada 6 adet segment bulunmaktadır. Bu 6 segmentin 5 tanesi farklı açılarda olan beton segmentlerdir ve 1 tanesi de kilit taşıdır. Segmentler A, B, C, D, E ve F olarak ayrılmıştır ve her biri birbiri ile uyumlu olacak şekilde fakat birleşme açıları farklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Tünel güzergâhında kurba yapımında ve düz olan yerlerde kaymaların olmaması için segmentler farklı olarak üretilmektedir. Her bir kazının ardından EPB-TBM kontrol ekranında segmentlerin nasıl yerleştirileceğini hesaplayarak göstermektedir (Şekil 3.10)



Şekil 3.10. Segmentlerin yerleştirilmesinin şematik görünümü (Sakcalı, 2018)

Pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makinesi olduğu için kesici kafadan çıkarılan pasa helezonik konveyör ile bant konveyöre taşınmaktadır. Çıkarılan pasa bant konveyör yardımı ile EPB-TBM sonunda bulunan vagonlara taşınarak yeryüzüne çıkarılmaktadır.

Kesici kafanın çalışması için 2 farklı kademe bulunmaktadır. İlk kademedede 3,7 devir/dk olarak çalışmaktadır. İkinci kademe de ise 7 devir/dk olmaktadır. Birinci kademe çalışma şartlarında tork 4711-5182 kNm olmakta, ikinci kademe çalışma şartlarında ise 1982-2376 kNm tork aralığında olmaktadır.

Kullanılan TBM itme silindirleri ile yönlendirilmektedir. Tablo 1’de de görüldüğü üzere her bir grupta 2 tane olmak üzere toplam 11 grup itme silindiri bulunmaktadır. Kazılan malzemenin taşınması ise kazı odasının arkasında bulunan helezonik konveyör ile bant konveyöre aktarılması ile sağlanmaktadır. TBM sonuna kadar bant konveyör ile taşınan pasa vagonlara dökülmekte ve yer üstüne taşınmaktadır.

3.2.2. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro hattında kullanılan tam cepheli tünel açma makinesi

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından açılan metro hattı çift tüp şeklinde açılmaktadır. Tünel projesi 3 kuyudan indirilen 6 TBM ile açılmaktadır. Proje kapsamında önce Çekmeköy-Sancaktepe arasındaki metro tüneli açılacak ardından da Sancaktepe-Sultanbeyli arasındaki metro tüneli açılacaktır. Aynı anda 4 TBM kazı yapacak şekilde proje planlanması yapılmıştır. Metro projesinde tünel dış çapı 6,5 m olarak belirlenmiştir. 25 cm kalınlığında beton segmentler kullanılmakta ve segmentlerin yerleştirilmesinin ardından tünel iç çapı 5,7 m olarak belirlenmiştir.

Proje planlanması aşamasında yapılan jeolojik ve jeomekanik çalışmalar sonucunda pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makinesi (EPB-TBM) seçilmesine karar verilmiştir. Kazısı yapılan formasyon kil bantları içeren, su geliri olan ve çatlaklı bir yapıya sahip olduğundan dolayı pasa basınçlı tünel açma makinesinin çift kalkanlı olması tercih edilmiştir. Kullanılan tam cepheli tünel açma makineleri Herrenknecht firmasının ürünleridir (Şekil 3.11).

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro hattı projesinde 6 TBM aynı anda kazı yapmaktadır. Burada kullanılan EPB-TBM’lerin 4 tanesi Herrenknecht firmasına ait eş EPB-TBM’lerdir. Bu EPM-TBM’ler İstanbul’da açılan farklı metro proje kazılarında kullanılmış ve Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro hattı inşaatında da kullanılmaktadır. Diğer 2 EPB-TBM ise yeni satın alınmış olup Çin Demiryolu İnşaatı Ağır Sanayi A.Ş Ltd. (China Railway Construction Heavy Industry Co., Ltd., CRCHI) markadır.



Şekil 3.11. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro projesinde kullanılan EPB-TBMin kazı sonu gösterimi

Çizelge 3.4’te Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro hattı projesinde kullanılan eş EPB-TBM’ lerin bazı teknik özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro hattında kullanılan EPB-TBM’in teknik özellikleri

TBM Özellikleri	
Makine Tipi	Pasa Basıncılı Tam Cepheli Tünel Açma Makinesi
TBM Uzunluğu	175 m
İtme Silindiri Sayısı	2x11
Delme Çapı	6570 mm
Kesici Disk Sayısı	38
Kesici Disk Çapı	17 inç (43 cm)
Kesici Kafa Motor Sayısı	4
Kesici Kafa Motor Gücü	1260 kW
Kesici Kafa Dönme Hızı	0-5,5 RPM
Tork	6356 kNm

Her bir halka kazısı 170 cm olarak yapılmaktadır. Kazı bitiminde yerleştirilen segmentlerin uzunluğu da 170 cm boyutundadır. Kullanılan kazıcı makine EPB-TBM olduğu için kazılan malzeme kesici kafanın arkasında bulunan helezonik konveyör ile bant konveyöre aktarılmaktadır. Çıkarılan pasanın yeryüzüne nakli bant konveyör ile sağlanmaktadır.

3.3. Çalışma Sahalarından Numune ve Kazı Raporlarının Temini

Çalışma sahalarından numuneler farklı yollardan temin edilmiştir. Kazılan malzemenin yani pasanın arından uzaklaştırılması ve yeryüzüne aktarılması iki projede farklı şekilde yapılmaktadır.

3.3.1. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tüneline numune ve tam cepheli tünel açma makinesinin kazı raporlarının temin edilmesi

Bu projede kazılan malzeme EPB-TBM'in sonuna kadar bant konveyör ile nakledilmektedir. Yeryüzüne nakliyesi ise lokomotif ve vagonlar ile gerçekleştirilmektedir. Numune alma işlemi bu şantiyede iki farklı şekilde yapılmıştır. İlk numune alma yöntemi EPB-TBM üzerinde bulunan bant konveyör üzerinden el ile toplanmasıdır (Şekil 3.12). Diğer yöntem ise halka kazısının ardından vagonlar ile dışarıya taşınan pasanın içinden numune alınmasıdır. Numune alma işlemi tam cepheli tünel açma makinesi içinde bulunan bant konveyör üzerinden ve dışarıya taşınan vagonlardan alınarak gerçekleştirilmiştir. Tünel açma makinesinin içinden alınan numuneler helezonik konveyörün hemen ardında bulunan bant konveyörün üzerinden alınmıştır. Pasanın tünel açma makinesinin sonuna kadar naklini sağlayan bant konveyör tünel açma makinesinin üst kısmında konumlandığından dolayı buradan numune almak çok zor ve tehlikelidir.



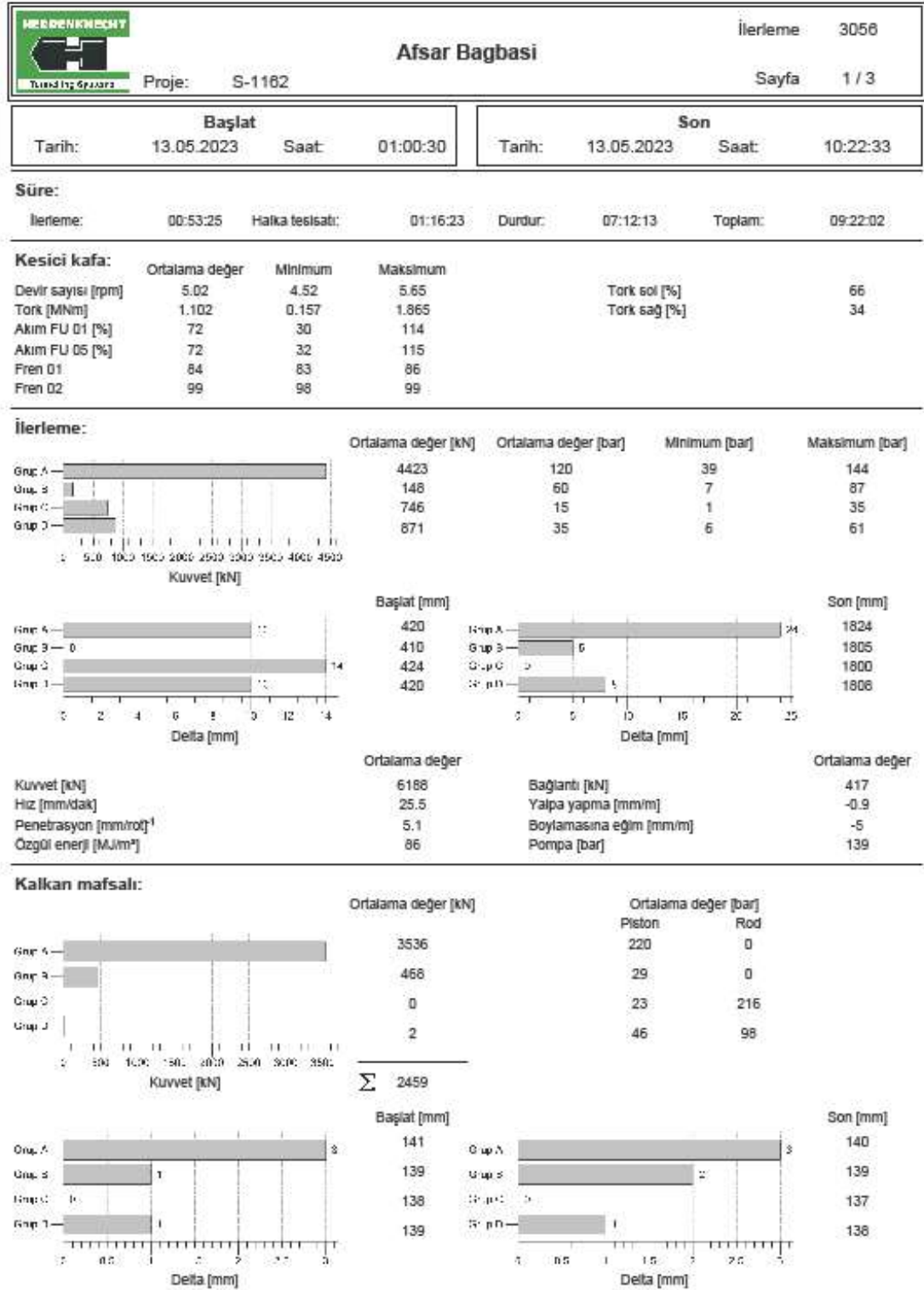
Şekil 3.12. Hadim-Afşar-Bağbaşı su ikmal tüneline numune alma işlemi

Numunelerin alınmasının ardından kilitli poşetler ile ağızları kapalı bir şekilde laboratuvara getirilmiştir (Şekil 3.13). Alınan numunelerin doğal nemini koruması ve dışarıdan zarar görmemesi için kilitli poşetler kullanılmıştır. Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümü laboratuvarına getirilen numuneler burada fiziko-mekanik deneyler için hazırlanmıştır. Numunelerin doğal nemini koruyabilmesi özellikle su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik tayini deneyi için son derece önemlidir. Numuneler laboratuvara getirildikten kısa bir süre sonra deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 3.13. Kilitli poşet ile numunenin laboratuvara getirilmesi

Kazı yapılan formasyonda EPB-TBM' in davranışını tespit etmek amacıyla makine tarafından kayıt altına alınan kazı raporları temin edilmiştir. Bu kazı raporları içerisinde makinenin bir halka kazısı boyunca harcadığı güç, ilerleme hızı, kesici kafa dönme hızı, spesifik enerji gibi veriler bulunmaktadır. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su ikmal tüneline kullanılan EPB-TBM Herrenknecht markadır. EPB-TBM kazı raporlarından bir örnek Şekil 3.14'te sunulmuştur. Tam cepheli tünel açma makinelerinden alınan kazı raporları makinenin verimli kullanıp kullanılmadığını yorumlamak için kullanılan önemli bir değerlendirme parametresidir. Operatörler tarafından halka kazıları arasında ki baskı kuvveti, tork, kesici kafa dönme hızı ve ilerleme hızı parametreleri kıyaslanarak bir sonraki halka kazısının planlaması yapılmaktadır. Bir sonraki kazı parametrelerinin belirlenmesi operatör tecrübesine ve bilgisine bağlıdır.



Şekil 3.14. Hadim-Afsar-Bağbasi su ikmal tüneli kazısından örnek bir halka kazı raporu

3.3.2. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro projesinden numune ve tam cepheli tünel açma makinesinin kazı raporlarının alınması

Çalışma kapsamında İstanbul Büyükşehir Belediyesi bünyesinde açılan Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Hattı projesinden numuneler alınmıştır. Numune alma işlemleri kazılan malzemenin içerisinde el ile seçme yöntemi ile yapılmaktadır. Buradan alınan numuneler iki farklı şantiyeden alınmıştır. İlk olarak Sancaktepe’de bulunan şantiyeden numuneler alınmış, bu şantiyede kazı işlemlerinin bitmesinin ardından Sultanbeyli’de bulunan şantiyeden numuneler alınmıştır.

Numune alma işlemi İstanbul’a yapılan seyahatler çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Her seyahat en az 5 günlük çalışmalardan oluşmaktadır. Her kazı numune almaya uygun olmayabilmektedir. Kazılan formasyonlardan bazı durumlarda killi malzeme olduğundan numune alma işlemi o halka kazıları için mümkün olmayabilmektedir.

Sancaktepe şantiyesinde kazılan malzemeler yeryüzüne kadar bant konveyör ile taşınmaktadır. Tam cepheli tünel açma makinelerinden gelen pasalar bant konveyör ile kuyu (şaft) dibinde bulunan Buradan alınan numuneler bant konveyör üzerinden el ile toplanmak suretiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Sancaktepe şantiyesinden numune alma işlemi

Sultanbeyli şantiyesinde açılan kuyu çevre şartlarından dolayı çok geniş açılamamıştır. Bu nedenle pasanın yeryüzüne nakli bant konveyörle değil kuyu dibinde açılan pasa havuzundan kova yardımıyla pasa sahasına taşınması ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Sultanbeyli şantiyesinin görünümü

Sultanbeyli şantiyesinden alınan numuneler pasa havuzundan ekskavatör yardımı ile alınmıştır. Alınan numuneler tıpkı Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneline yapıldığı gibi kilitli poşetler ile muhafaza edilmiş ve laboratuvara getirilmiştir.

Numune alma işleminin ardından, numune alınan kazı halkalarına ait EPB-TBM kazı raporları temin edilmiştir (Şekil 3.17). Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli metro hattı inşaatında alınan numunelerin tamamı Herrenknecht marka EPB-TBM ile açılan tünellerden alınmıştır. TBM kazı raporlarında, her bir halka için kazı süresi, itme

3.4. Laboratuvar Çalışmaları

Çalışmanın ikinci aşaması alınan numunelerin fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bazı deneylerin yapılması için laboratuvar çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Bu araştırma kapsamındaki fiziko-mekanik laboratuvar deneyleri Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmaları kapsamında kayaçların yoğunluk, kütlece ve hacimce su emme miktarı, porozite, su içeriği, nokta yükleme dayanımı, Siever's delinme indeksi ve kırılgenlik değeri hesaplanması için deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kırılgenlik değeri ile Siever's minyatür delme deneyi sonucunda elde edilen verilen bir abak yardımı ile ilişkilendirilerek delinebilirlik oranı indeksi (DRI) hesaplanmıştır. Elde edilen deney sonuçları tam cepheli tünel açma makinesinden elde edilen kazı raporlarında bulunan değerler ile kıyaslanarak sonuçlar elde edilmiştir.

3.4.1. Su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik tayini deneyi

Bu deney kaya numunelerinin su içeriği, yoğunluk (kuru ve suya doygun), gözeneklilik ve porozite değerlerinin saptanması için uygulanmaktadır. Deneyin gerçekleştirilmesinde ISRM 1981 standartları kullanılmıştır. Kaya numunelerinin yoğunluklarının hesaplanması için öncelikle hacmi ve kütlesi belirlenmektedir. Pasadan alınan numuneler düzgün olmayan şekillerde ve farklı boyutlarda olmaktadır (Şekil 3.18). Bundan dolayı her bir numunenin hacminin hesaplanması için Buoyancy Metodu kullanılmıştır.



Şekil 3.18. Su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik tayini deney numunelerine örnek

Çizelge 3.4’te Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi kazısından alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen yoğunluk, gözeneklilik ve su içeriği deney sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 3.5’te ise Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi kazısından alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları

Halka No	Yoğunluk (gr/cm ³)	Porozite (%)	Su İçeriği (%)
TBM-2 2178	2,65	3,34	0,49
TBM-2 2190	2,69	2,69	0,43
TBM-2 2191	2,69	2,61	0,34
TBM-2 2193	2,70	2,45	0,32
TBM-2 2200	2,71	1,29	0,18
TBM-2 2201	2,71	3,66	0,77
TBM-2 2202	2,71	1,94	0,18
TBM-2 2240	2,71	2,62	0,27
TBM-2 2241	2,69	2,80	0,24
TBM-2 2242	2,69	3,61	0,56
TBM-3 38	2,57	4,78	0,78
TBM-3 42	2,65	3,97	0,26
TBM-3 43	2,53	4,29	0,65
TBM-3 47	2,67	4,05	0,29
TBM-3 48	2,66	3,69	0,26
TBM-3 49	2,68	3,46	0,27
TBM-5 408	2,58	3,80	0,54
TBM-5 409	2,69	1,81	0,20
TBM-5 410	2,57	3,68	0,52
TBM-5 414	2,59	3,49	0,50
TBM-5 416	2,68	1,80	0,14
TBM-5 417	2,63	3,00	0,22
TBM-5 422	2,66	2,34	0,22
TBM-5 423	2,61	2,77	0,45

Çizelge 3.5. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin özellikleri

Halka No	Yoğunluk (gr/cm ³)	Porozite (%)	Su İçeriği (%)
1877	2,63	2,44	0,22
1950	2,75	1,77	0,11
1951	2,76	1,77	0,08
1952	2,77	2,23	0,38
2920	2,65	4,26	0,49
2921	2,68	2,65	0,25
2922	2,61	4,49	0,57
3055	2,66	2,57	0,32
3056	2,69	1,49	0,18
3057	2,67	2,02	0,22
2190	2,79	1,15	0,34
2628	2,69	3,50	0,70
2630	2,74	1,37	0,25
2631	2,70	2,74	0,46
2657	2,69	1,72	0,26
2661	2,83	2,12	3,49
2663	2,77	1,75	0,38
2728	2,75	3,34	0,50
2731	2,70	3,38	0,68
2740	2,74	1,15	0,20
2742	2,73	3,37	0,66
2752	2,77	1,79	0,30
2761	2,69	3,79	0,67
2774	2,75	2,33	0,47
2821	2,70	1,44	0,29
2828	2,78	1,44	0,26
2840	2,74	3,04	0,60
2883	2,78	1,74	0,26
2910	2,76	3,97	1,04
2911	2,69	3,45	0,65
2914	2,74	1,78	0,24
2920	2,65	4,28	0,49
2921	2,68	2,65	0,25
2922	2,61	4,49	0,57
2974	2,73	2,32	0,34
2975	2,72	2,32	0,39
2976	2,75	2,45	0,51

Çizelge 3.5. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin özellikleri

Halka No	Yoğunluk (gr/cm ³)	Porozite (%)	Su İçeriği (%)
2981	2,76	1,96	0,35
3001	2,71	3,13	0,50
3011	2,77	1,40	0,26
3012	2,76	1,64	0,26
3047	2,67	1,75	0,34
3048	2,69	1,40	0,22
3049	2,68	2,29	0,42
3060	2,71	2,77	0,56
3133	2,73	1,43	0,24
3134	2,70	3,42	0,64
3136	2,61	5,60	0,87
3139	2,65	4,44	0,72
3140	2,56	7,42	1,45
3150	2,58	3,82	0,69
3151	2,61	6,50	0,99
3156	2,53	5,33	1,09
3157	2,69	1,72	0,26
3158	2,75	2,33	0,47
3169	2,71	3,13	0,50
3170	2,63	5,96	1,14
3175	2,65	4,28	0,49
3224	2,67	1,75	0,34
3225	2,68	2,65	0,25
3239	2,70	3,42	0,64
3240	2,69	1,40	0,22
3299	2,75	2,45	0,51
3300	2,76	1,93	0,38
3421	2,83	2,12	3,49
3422	2,70	3,38	0,68
3423	2,78	1,74	0,26

Çizelge 3.5. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin özellikleri (devam)

Halka No	Yoğunluk (gr/cm ³)	Porozite (%)	Su İçeriği (%)
3548	2,72	2,32	0,39
3549	2,74	1,15	0,20
3550	2,73	3,37	0,66
3551	2,71	2,77	0,56
3552	2,72	2,32	0,39
3553	2,74	1,37	0,25
3554	2,73	2,32	0,34
3555	2,74	1,15	0,20
3556	2,69	3,50	0,70
3557	2,72	3,67	0,60
3558	2,72	2,32	0,39
3559	2,74	3,04	0,60
3560	2,68	2,65	0,25
3561	2,68	2,29	0,42
3562	2,71	3,13	0,50
3563	2,70	2,74	0,46
3564	2,75	1,77	0,11
3565	2,73	3,37	0,66
3566	2,69	1,72	0,26
3567	2,69	3,79	0,67
3568	2,69	3,45	0,65
3569	2,70	1,44	0,29
3570	2,70	2,70	1,27
3571	2,63	2,44	0,22
3572	2,67	1,75	0,34
3573	2,65	4,28	0,49
3574	2,68	2,65	0,25
3575	2,70	3,42	0,64
3576	2,74	1,78	0,24
3577	2,76	1,77	0,08

Çizelge 3.5. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin özellikleri (devam)

Halka No	Yoğunluk (gr/cm ³)	Porozite (%)	Su İçeriği (%)
3578	2,73	1,43	0,24
3579	2,75	2,45	0,51
3580	2,61	4,49	0,57
3581	2,69	1,40	0,22
3582	2,69	1,72	0,26
3583	2,78	1,44	0,26
3584	2,65	4,28	0,49
3585	2,75	3,34	0,50
3586	2,76	1,64	0,26
3587	2,78	1,74	0,26
3588	2,77	1,75	0,38
3589	2,70	1,15	0,34

3.4.2. Nokta yükleme dayanımı deneyi

Nokta yükleme dayanımı deneyleri Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyin uygulanmasında ISRM (1981) standartları esas alınmıştır. Numuneler düzgün şekilli olmadığı için deney prosedürü standartta belirtilen deney formatına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.19’da deney cihazı görülmektedir. Nokta yükleme dayanımı belirlenmesi için kayaç numunelerinde tabaka düzlemine paralel ve tabaka düzlemine dik şekilde yüklemeler yapılmış ve nokta yükleme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Kırılma yükü değerleri dijital bir ekrana sahip olan nokta yükleme dayanımı test cihazı üzerinden okunmuştur.



Şekil 3.19. Kayaçların nokta yükleme dayanımı değerinin belirlenmesi

Deneylerde kullanılan numunelerin deney sonrası kırılma görüntüleri Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Deney standartların uygun kırılmayan numuneler nokta yükleme dayanımının belirlenmesi için değerlendirmeye alınmamıştır.



Şekil 3.20. Nokta yükleme dayanımı deneyinde kullanılan bazı numunelerin deney sonrası görüntüleri

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi kazısından alınan numunelerin deney sonuçları Çizelge 3.6’da, Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneli projesinden alınan numunelerin deney sonuçları ise Çizelge 3.7’de sunulmuştur.

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesinden alınan numunelerin tümü kireçtaşıdır. Fakat Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneli projesinden alınan numunelerde kireçtaşı ve şist numuneleri bulunmaktadır. Şekil 3.20’de deney sonrası durumları gösterilen numunelerde farklı kayaçların olduğuda görülebilmektedir.

Çizelge 3.6. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi kazısından alınan numunelerin bazı mekanik özellikleri

Halka No	Nokta Yükleme Dayanımı Değeri (MPa)
TBM-2 2178	1,33
TBM-2 2190	1,45
TBM-2 2191	1,58
TBM-2 2193	2,55
TBM-2 2200	2,64
TBM-2 2201	3,05
TBM-2 2202	2,32
TBM-2 2240	0,89
TBM-2 2241	1,05
TBM-2 2242	0,83
TBM-3 38	0,84
TBM-3 42	0,98
TBM-3 43	0,97
TBM-3 47	0,94
TBM-3 48	0,92
TBM-3 49	0,49
TBM-5 408	2,60
TBM-5 409	2,20
TBM-5 410	2,32
TBM-5 414	2,00
TBM-5 416	1,33
TBM-5 417	1,45
TBM-5 422	1,58
TBM-5 423	2,55

Çizelge 3.7. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin bazı mekanik özellikleri

Halka No	Nokta Yükleme Dayanımı Değeri (MPa)
1877	1,76
1950	4,53
1951	5,60
1952	2,34
2190	2,57
2628	0,83
2630	3,25
2631	1,40
2657	2,78
2661	1,80
2663	1,98
2728	3,14
2731	1,49
2740	2,41
2742	2,17
2752	2,26
2761	1,09
2774	2,27
2821	1,49
2828	2,44
2840	4,21
2883	2,07
2910	1,59
2911	2,03
2914	2,46
2920	2,12
2921	2,83
2922	1,70

Çizelge 3.7. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin bazı mekanik özellikleri (devam)

Halka No	Nokta Yükleme Dayanımı Değeri (MPa)
2974	2,66
2975	1,55
2976	2,66
2981	2,43
3001	1,52
3011	1,52
3012	1,95
3047	2,30
3048	2,27
3049	2,65
3055	1,83
3056	2,34
3057	2,26
3060	1,90
3133	2,32
3134	2,27
3136	2,10
3139	2,09
3140	2,13
3150	2,33
3151	1,79
3156	2,08
3157	2,29
3158	2,03
3169	1,73
3170	2,23
3175	1,89
3224	1,93

Çizelge 3.7. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin bazı mekanik özellikleri (devam)

Halka No	Nokta Yükleme Dayanımı Değeri (MPa)
3225	2,39
3239	2,33
3240	2,31
3299	4,29
3300	2,30
3421	2,15
3422	3,06
3423	2,49
3548	1,83
3549	1,80
3550	1,92
3551	1,82
3552	1,44
3553	2,37
3554	1,79
3555	1,80
3556	2,07
3557	2,20
3558	2,20
3559	2,12
3560	2,25
3561	2,20
3562	2,16
3563	2,33
3564	2,31
3565	2,29
3566	2,17
3567	2,29

Çizelge 3.7. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin bazı mekanik özellikleri (devam)

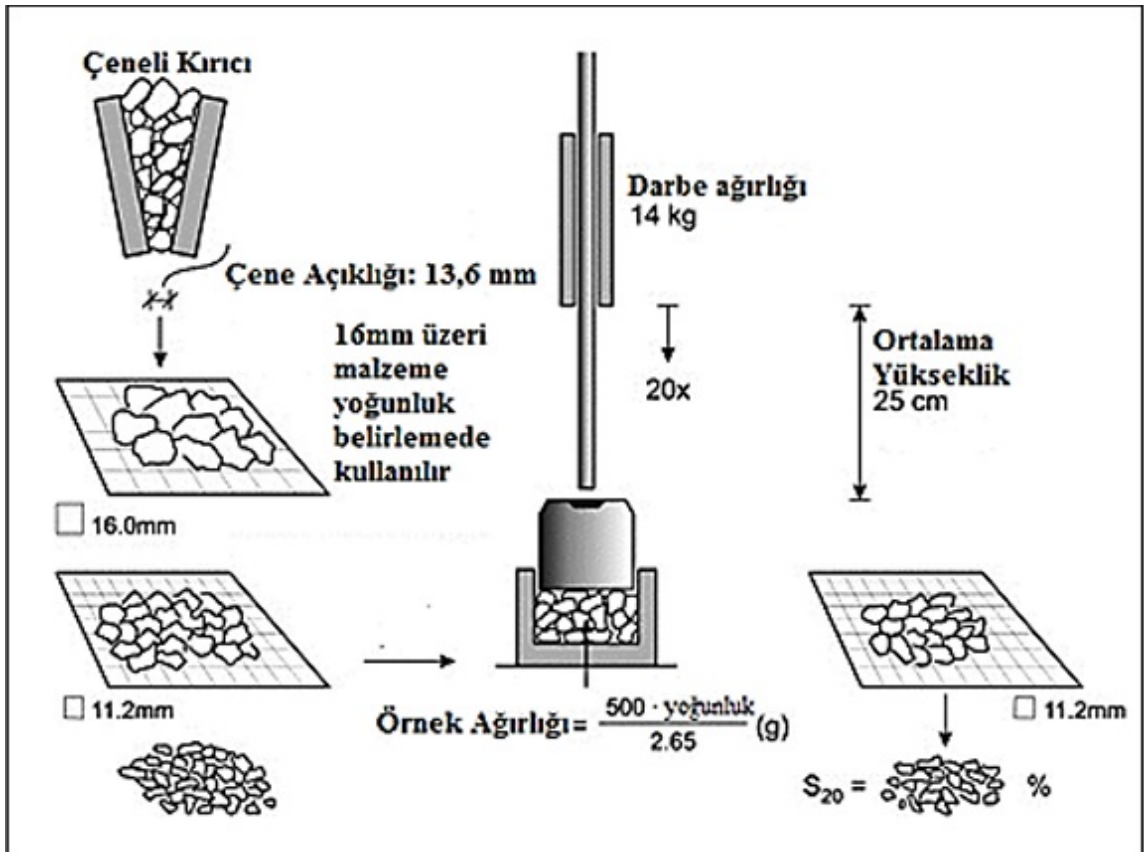
Halka No	Nokta Yükleme Dayanımı Değeri (MPa)
3568	2,25
3569	2,10
3570	2,56
3571	2,02
3572	2,28
3573	2,19
3574	1,95
3575	2,05
3576	2,19
3577	2,19
3578	2,18
3579	2,15
3580	2,07
3581	1,82
3582	1,82
3583	2,07
3584	2,26
3585	2,26
3586	2,27
3587	2,33
3588	2,25
3589	2,22

Kazı sonralarında alınan numunelerde tek eksenli basınç dayanımı deneyi ve endirekt (Brazilian) çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilememiştir. Kayaçların dayanım özelliklerinden sadece nokta yükleme dayanımları belirlenebilmiştir.

Tek eksenli basınç dayanımı ve tek eksenli çekme dayanımı değerlerinin belirlenebilmesi için yapılması gereken deney prosedürüne uygun numune alınamadığı bu dayanım deneyleri gerçekleştirilememiştir.

3.4.3. Kırılmalık değerin (S₂₀) belirlenmesi

Kırılmalık deneyinin amacı kayaların kırılmaya karşı direncinin belirlenmesidir. Deney numunelerinin hazırlanması ve deney prosesi için Dahl (2003) prosedürü izlenmiştir. Kırılmalık değerin belirlenmesi için deney her bir halkadan temin edilen numunelerde üç defa tekrar edilmiştir. Şekil 3.21’de deneyin yapılışının şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3.21. Kırılmalık deney prosedürünün şematik gösterimi

Kırılmalık deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da sunulmuştur. Şekil 3.21’de gösterilen deney prosedürü her bir numune için tekrar edilmiştir.

Çizelge 3.8. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi kazısından alınan numunelerin kırılma değeri

Halka No	Kırılma Değeri (S_{20})
TBM-2 2178	59,40
TBM-2 2190	59,09
TBM-2 2191	60,69
TBM-2 2193	60,60
TBM-2 2200	59,93
TBM-2 2201	61,46
TBM-2 2202	61,36
TBM-2 2240	59,88
TBM-2 2241	60,54
TBM-2 2242	61,10
TBM-3 38	62,82
TBM-3 42	62,12
TBM-3 43	62,79
TBM-3 47	58,16
TBM-3 48	55,30
TBM-3 49	63,03
TBM-5 408	53,64
TBM-5 409	58,66
TBM-5 410	60,64
TBM-5 414	61,13
TBM-5 416	50,34
TBM-5 417	57,06
TBM-5 422	57,51
TBM-5 423	59,01
<i>Ortalama</i>	<i>59,43</i>

Çizelge 3.9’da ise Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tünelinden alınan numunelerin kırılma değeri sunulmuştur.

Çizelge 3.9. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin kırılmalık değerleri

Halka No	Kırılmalık Değeri (S ₂₀)
1877	62,60
1950	65,24
1951	67,89
1952	70,53
2190	54,39
2628	52,63
2630	47,30
2631	50,18
2657	52,17
2661	54,76
2663	53,03
2728	54,20
2731	58,78
2740	54,15
2742	53,37
2752	51,06
2761	48,74
2774	42,34
2821	38,66
2828	34,30
2840	42,52
2883	38,50
2910	59,96
2911	46,21
2914	53,06
2920	62,15
2921	57,86
2922	63,94
2974	56,99
2975	50,03
2976	50,99
2981	52,75
3001	40,19
3011	40,93
3012	37,84
3047	54,83

Çizelge 3.9. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin kırılmalık değerleri
(devam)

Halka No	Kırılmalık Değeri (S ₂₀)
3048	58,43
3049	60,16
3055	58,02
3056	56,38
3057	54,39
3060	60,85
3133	59,97
3134	59,82
3136	62,98
3139	63,12
3140	60,00
3150	42,30
3151	57,86
3156	60,17
3157	60,20
3158	60,04
3169	59,96
3170	49,02
3175	58,31
3224	58,51
3225	58,37
3239	54,01
3240	54,76
3299	42,85
3300	53,83
3421	54,05
3422	54,34
3423	58,86
3548	58,84

Çizelge 3.9. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin kırılma değeri (devam)

Halka No	Kırılma Değeri (S ₂₀)
3549	56,78
3550	59,95
3551	58,87
3552	59,12
3553	61,22
3554	60,32
3555	47,33
3556	61,10
3557	59,51
3558	58,75
3559	49,24
3560	60,95
3561	60,95
3562	60,13
3563	60,24
3564	60,78
3565	60,69
3566	60,82
3567	62,62
3568	62,91
3569	62,55
3570	59,74
3571	64,53
3572	60,02
3573	59,43
3574	57,48
3575	56,04
3576	56,83
3577	59,11
3578	58,98
3579	59,87

Çizelge 3.9. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin kırılgenlik değeri (devam)

Halka No	Kırılgenlik Değeri (S ₂₀)
3580	60,10
3581	56,42
3582	56,87
3583	51,13
3584	59,69
3585	58,54
3586	58,11
3587	58,05
3588	61,75
3589	55,26
<i>Ortalama</i>	<i>56,23</i>

Kırılgenlik değeri kayaçların kırılmaya karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Kırılgenlik değerlerinin sınıflandırılması için Çizelge 3.10'da belirtildiği gibi bir tablo oluşturulmuştur (Dahl ve diğ., 2012).

Çizelge 3.10. Kırılgenlik değerlerine göre kayaçların sınıflandırılması

Sınıf	Kırılgenlik Değeri (S ₂₀)
Oldukça Düşük	≤ 29,00
Çok Düşük	29,10-34,99
Düşük	35,00-40,99
Orta	41,00-50,99
Yüksek	51,00-59,99
Çok Yüksek	60,00-65,99
Oldukça Yüksek	≥ 66,00

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi kazılarından alınan numunelerin kırılgenlik değeri Çizelge 3.8'den de görüldüğü gibi 50,34 ile 63,03 değeri arasında değişmektedir. Kayaçlar kırılgenlik değerlerine göre

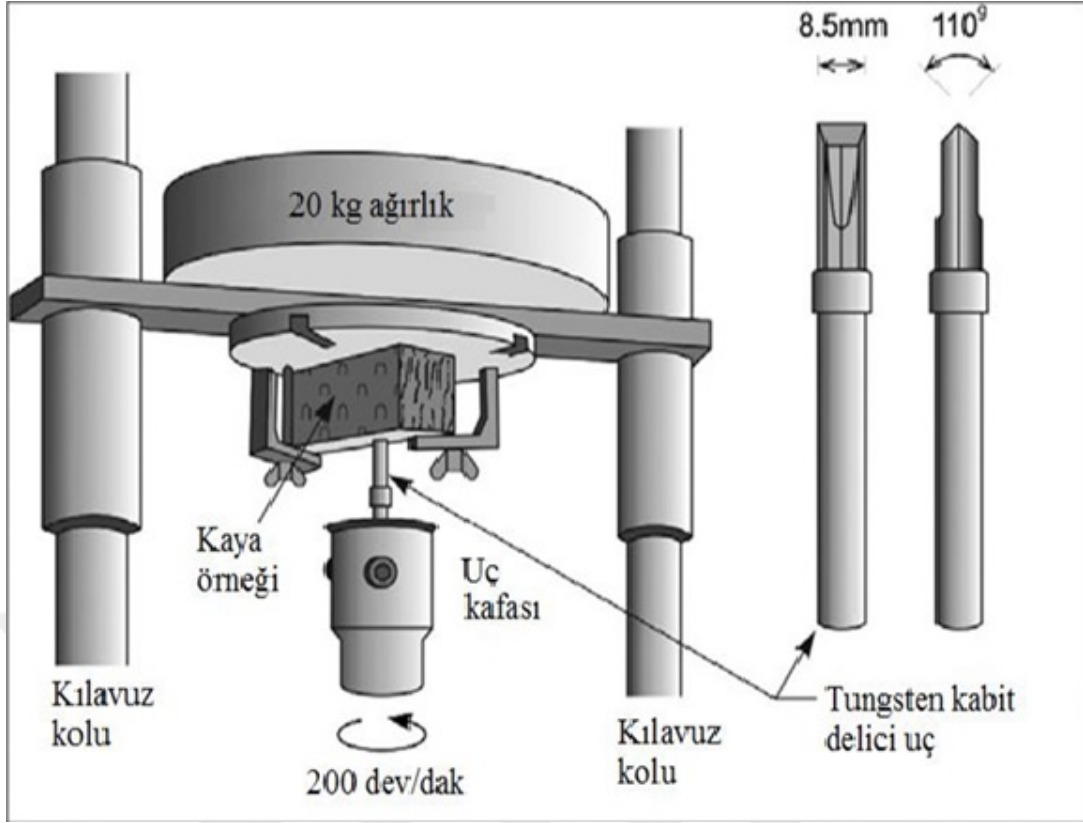
sınıflandırıldığından buradan alınan numunelerin “orta” ile “çok yüksek” kırılgenlik sınıfları arasında değişmektedir.

Aynı şekilde Çizelge 3.9’da sunulmuş olan Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesinin numunelerinin kırılgenlik değerleri incelendiğinde en düşük kırılgenlik değerinin 37,84 ve en yüksek kırılgenlik değerinin ise 64,53 olduğunu görölmektedir. Bu değerler göz önüne alındığında, “düşük” derece kırılgenlik sınıfı ile “çok yüksek” sınıfları arasında değerlerin değiştiği görölmektedir.

Her iki tünel projesi için de alınan numunelerin ortalama kırılgenlik değerleri incelendiğinde, Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesinin ortalama kırılgenlik değeri 59,43 ve “yüksek” kırılgenlik sınıfında yer almaktadır. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesinde ise, ortalama kırılgenlik değeri 56,23 olup “yüksek” kırılgenlik sınıfında yer almaktadır.

3.4.4. Siever’s minyatür delme deneyi (S_J)

Siever’s minyatür delme deneyi ile kayaçların yüzey sertliği veya delinmeye karşı direnci belirlenmektedir. Ayrıca delinebilirlik oranı indeksinin (DRI) hesaplanmasında kullanılmaktadır. Deneyin geliştirilmesi 1950’li yıllarda H. Sievers tarafından yapılmıştır. Şekil 3.22’de deneyin yapılışı ve şematik görünümü sunulmuştur.



Şekil 3.22. Siever's minyatür delme deneyi şematik gösterimi (Yaralı ve diğ., 2015)

Deney için paralel yüzeyleri düz olan en az 30 mm kalınlığında numuneler kullanılmıştır. TBM kazısından alınan numuneler düzgün şekilli olmadığından dolayı laboratuvarında düzeltilerek deneye uygun hale getirilmiştir (Şekil 3.23). Daha sonra deneyin yapılışı Dahl (2003) tarafından belirlenen standartlara göre uygulanmıştır. Her bir numune de en az 5 delme işlemi yapılacak şekilde deney gerçekleştirilmiştir. Delme işlemlerinin bitmesinin ardından kumpas yardımı ile açılan deliklerin derinlikleri ölçülmüştür. Delik derinliklerinin ortalaması alınarak kayaların Siever's yüzey sertliği değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.23. Siever's minyatür delme deneyi için numunelerin hazırlanması

Deneyin gerçekleştirildiği Siever's minyatür delme cihazı Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Dahl (2003) tarafından belirlendiği üzere 200 rpm hızında dönen matkap ucu ile 1 dakikalık delme işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.24. Siever's minyatür delme cihazı ve deneyin gerçekleştirilmesi

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen Siever's minyatür delme deneyi sonuçları Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12'de sunulmuştur.

Çizelge 3.11. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi kazısından alınan numunelerin Siever's minyatür delme deney sonucu

Halka No	Siever's Minyatür Delme Deneyi (S _J)
TBM-2 2178	87,72
TBM-2 2190	93,80
TBM-2 2191	88,24
TBM-2 2193	88,04
TBM-2 2200	88,44
TBM-2 2201	90,42
TBM-2 2202	88,94
TBM-2 2240	89,44
TBM-2 2241	89,32
TBM-2 2242	88,62
TBM-3 38	86,00
TBM-3 42	99,86
TBM-3 43	97,28
TBM-3 47	89,46
TBM-3 48	85,82
TBM-3 49	89,60
TBM-5 408	64,26
TBM-5 409	69,86
TBM-5 410	67,44
TBM-5 414	66,92
TBM-5 416	65,54
TBM-5 417	65,46
TBM-5 422	86,30
TBM-5 423	88,22
<i>Ortalama</i>	<i>83,95</i>

Çizelge 3.12'de ise Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tünelinden alınan numunelerin Siever's minyatür delinme değerleri sunulmuştur.

Çizelge 3.12. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin Siever's minyatür delme deney sonucu

Halka No	Siever's Minyatür Delme Deneyi (S _i)
1877	98,60
1950	107,49
1951	116,38
1952	125,26
2190	77,09
2628	120,24
2630	59,42
2631	76,76
2657	20,22
2661	65,60
2663	24,64
2728	45,42
2731	77,22
2740	18,20
2742	95,72
2752	69,38
2761	89,50
2774	64,82
2821	78,12
2828	46,08
2840	62,16
2883	30,36
2910	91,58
2911	64,04
2914	39,26
2920	54,20
2921	64,38
2922	101,78

Çizelge 3.12. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin Siever's minyatür delme deney sonucu (devam)

Halka No	Siever's Minyatür Delme Deneyi (S _I)
2974	65,28
2975	54,40
2976	14,66
2981	70,88
3001	16,68
3011	16,68
3012	65,44
3047	46,80
3048	25,48
3049	66,46
3055	46,06
3056	50,92
3057	68,12
3060	64,04
3133	100,10
3134	75,66
3136	61,70
3139	84,50
3140	78,24
3150	35,46
3151	72,28
3156	86,58
3157	87,62
3158	77,02
3169	97,44
3170	55,16
3175	63,86
3224	14,54

Çizelge 3.12. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin Siever's minyatür delme deney sonucu (devamı)

Halka No	Siever's Minyatür Delme Deneyi (S _I)
3225	56,72
3239	51,68
3240	61,78
3299	27,94
3300	48,92
3421	47,74
3422	45,92
3423	56,06
3548	54,68
3549	43,72
3550	62,94
3551	59,00
3552	60,68
3553	61,86
3554	60,64
3555	43,16
3556	68,62
3557	63,82
3558	61,22
3559	47,46
3560	66,28
3561	72,98
3562	60,64
3563	66,14
3564	67,48
3565	66,84
3566	73,54
3567	76,32

Çizelge 3.12. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin Siever's minyatür delme deney sonucu (devamı)

Halka No	Siever's Minyatür Delme Deneyi (S _i)
3568	91,04
3569	61,00
3570	61,64
3571	102,56
3572	63,46
3573	64,28
3574	58,64
3575	53,20
3576	57,42
3577	62,50
3578	57,02
3579	62,42
3580	63,46
3581	54,98
3582	57,10
3583	49,14
3584	61,16
3585	58,32
3586	56,86
3587	52,86
3588	74,20
3589	54,34
<i>Ortalama</i>	<i>63,11</i>

Kayaçların yüzey sertliğinin belirlenmesi için kullanılan bu deney için bir sınıflandırma tablosu kullanılmaktadır. (Çizelge 3.13)ç

Çizelge 3.13. Yüzey sertlik sınıflandırması (Dahl 2003)

Sınıf	Yüzey Sertlik Değeri (Sj)
Oldukça Düşük	$\geq 86,00$
Çok Düşük	56,00-85,99
Düşük	19,00-55,99
Orta	7,00-18,99
Yüksek	4,00-6,99
Çok Yüksek	2,10-3,99
Oldukça Yüksek	$\leq 2,09$

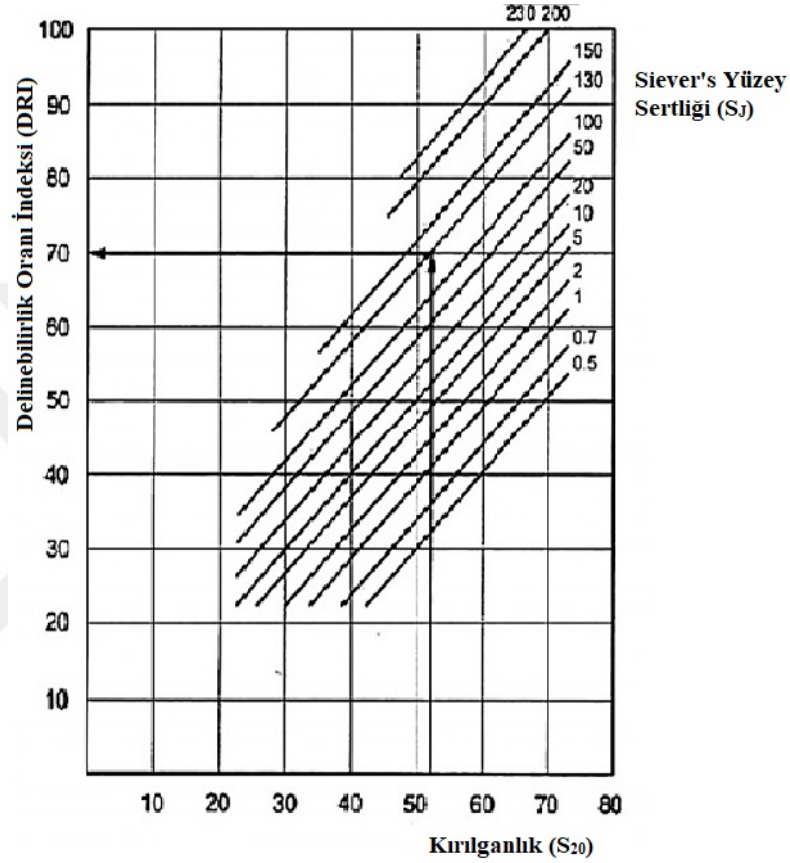
Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tünelinden alınan numuneler üzerinde yapılan Siever's minyatür delme deneyi sonuçlarına göre en düşük yüzey sertliği değeri 14,54 ve en yüksek yüzey sertliği değeri 125,26 olarak ölçülmüştür. Bu deney için değerlerin yüksek olması yüzey sertliğinin düşük olduğunu ve değerlerin düşük olması da yüzey sertliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre sınıflandırma yapıldığında “orta” sınıfında yüzey sertliğine sahip kayaçlar ile “*oldukça düşük*” yüzey sertliğine sahip kayaçlar olduğu görülmektedir. Numunelerin yüzey sertliği ortalaması da 63,11 değerine karşılık gelmektedir ve bu değerde yüzey sertliği sınıflamasında “*çok düşük*” sınıfına girmektedir.

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesinde ise Siever's minyatür delme deneyleri sonucunda elde edilen en düşük değer 64,26 ve en yüksek değer ise 99,86'dır. Bu değerler göz önüne alındığında yüzey sertliği sınıflamasına göre kayaçlar “*çok düşük*” ve “*oldukça düşük*” sınıflarında yer almaktadır. Kayaçların ortalama Siever's minyatür delme değerleri sonuçları ortalama 83,95 olarak belirlenmiştir. Ortalama değer değerlendirildiğinde kayaçların yüzey sertliği sınıflamasına göre “*çok düşük*” yüzey sertliği sınıfında yer aldığı görülmektedir.

3.4.5. Delinebilirlik oranı indeksinin (DRI) belirlenmesi

Delme oranı indeksi (DRI) 1943 yılında İsviçre’de N. von Matern ve A. Hjelm tarafından geliştirilmiştir. Bu deney yöntemi birkaç değişiklikten sonra standart hale gelmiş ve 1950’li yılların sonundan itibaren kayaçların delinebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır (Yaralı ve diğ., 2015)

Delinebilirlik oranı indeksinin belirlenebilmesi için kayaçların kırılgenlik (S_{20}) değerin ve Siever's minyatür delme değerin (S_j) belirlenmesi gerekmektedir. Delme oranı indeksi kayaç yüzey sertliği için düzeltilmiş kırılgenlik değeri olarak da tanımlanabilir (Dahl, 2003). Yapılan deneyler kapsamında her bir halka numunesi için bu deneyler gerçekleştirilmiştir. DRI değerin bulunabilmesi için Şekil 3.25'te sunulan diyagram kullanılmaktadır.



Şekil 3.25. DRI belirlenmesi için kullanılan diyagram (Dahl, 2003)

DRI değerin diyagramdan belirlendikten sonra Çizelge 3.14'te belirtildiği gibi sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 3.14. DRI sınıflaması (Dahl, 2003)

Sınıf	DRI Değeri
Oldukça Düşük	≤ 25
Çok Düşük	26-32
Düşük	33-42
Orta	43-57
Yüksek	58-69
Çok Yüksek	70-82
Oldukça Yüksek	≥ 83

Numunelerin kırılmalık ve Siever's yüzey sertlikleri belirlendikten sonra Şekil 3.25'te sunulan diyagram yardımıyla numunelerin DRI değerleri belirlenmiştir. Çizelge 3.15'te Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesinden alınan numunelerin DRI değerleri sunulmuştur.

Çizelge 3.15. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi kazısından alınan numunelerin DRI değerleri

Halka No	DRI Değeri
TBM-2 2178	72
TBM-2 2190	73
TBM-2 2191	73
TBM-2 2193	72
TBM-2 2200	71
TBM-2 2201	73
TBM-2 2202	72
TBM-2 2240	72
TBM-2 2241	72
TBM-2 2242	72
TBM-3 38	70
TBM-3 42	75
TBM-3 43	74
TBM-3 47	71
TBM-3 48	70
TBM-3 49	72
TBM-5 408	67
TBM-5 409	69
TBM-5 410	70
TBM-5 414	71
TBM-5 416	61
TBM-5 417	68
TBM-5 422	71
TBM-5 423	72

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesinden alınan numunelerin DRI değerleri 61 ile 75 arasında değişmektedir. Çizelge 3.14'te sunulan sınıflandırma sistemine göre “yüksek” ve “çok yüksek” sınıfında yer alan kayalar olduğu görülmektedir. Ortalama DRI değeri ise 70,96'dır.

Diğer çalışma sahası olan Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tünelinden alınan numunelerin DRI değerleri Çizelge 3.16 sunulmuştur.

Çizelge 3.16. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin DRI değerleri

Halka No	DRI Değeri
1877	77
1950	80
1951	84
1952	87
2190	69
2628	72
2630	73
2631	73
2657	72
2661	71
2663	73
2728	72
2731	72
2740	72
2742	72
2752	70
2761	75
2774	74
2821	71
2828	70
2840	72
2883	71
2910	72

Çizelge 3.16. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin DRI değerleri
(Devamı)

Halka No	DRI Değeri
2911	70
2914	71
2920	61
2921	68
2922	71
2974	72
2975	72
2976	73
2981	73
3001	72
3011	71
3012	73
3047	72
3048	72
3049	72
3055	67
3056	65
3057	69
3060	72
3133	73
3134	69
3136	71
3139	73
3140	70
3150	48
3151	68
3156	71
3157	71
3158	70
3169	73

Çizelge 3.16. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin DRI değerleri
(devamı)

Halka No	DRI Değeri
3170	58
3175	67
3224	61
3225	68
3239	65
3240	69
3299	47
3300	62
3421	63
3422	62
3423	67
3548	64
3549	61
3550	71
3551	69
3552	69
3553	72
3554	72
3555	52
3556	71
3557	70
3558	70
3559	58
3560	71
3561	72
3562	72
3563	71
3564	71
3565	71
3566	72

Çizelge 3.16. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli kazısından alınan numunelerin DRI değerleri
(Devamı)

Halka No	DRI Değeri
3567	73
3568	73
3569	71
3570	71
3571	77
3572	71
3573	71
3574	64
3575	65
3576	63
3577	69
3578	68
3579	70
3580	71
3581	66
3582	67
3583	58
3584	69
3585	68
3586	67
3587	66
3588	71
3589	62

Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tünelinden alınan numunelerin DRI değerleri 47 ile 87 arasında değişmektedir. Bu değerlere göre sınıflandırıldığında kayalar “*orta*” ile “*oldukça yüksek*” arasında değişmektedir. Ortalama DRI değerinin ise 69,30 olduğu belirlenmiştir.

3.5 Performans Tahmin Modeli Oluşturulması

Tam cepheli tünel açma makinelerinin performans analizinde kullanılan veriler ilerleme hızı (mm/dk), penetrasyon hızı (mm/dev), net kazı hızı (mm/dk) ve ilerleme miktarı (m/gün, m/vardiya) parametreleridir. Yapılan çalışma kapsamında ilerleme hızı (mm/dk) parametresinin tahmin edilmesi için SPSS 20 istatistik programı ve yapay zekâ destekli Python yazım dili kullanılarak lineer regresyon analizleri yapılmıştır. Kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin girdi parametresi olarak kullanıldığı bir performans tahmin modeli oluşturulmuştur.

Ayrıca Python programı ile makine öğrenmesi algoritmaları olan Ridge ve Lasso regresyon analizleri yapılarak oluşturulan performans tahmin modelindeki girdi parametrelerinin ağırlıkları incelenmiştir.

3.5.1. Sosyal bilimler için istatistik paketi (SPSS) programı

Sosyal bilimler için istatistik paketi (Statistical Package for the Social Sciences) anlamına gelen SPSS, ilk olarak 1968’de SPSS Inc. tarafından başlatılan ancak 2009’da IBM tarafından satın alınan bir IBM aracıdır. Çeşitli araştırmacıların ağırlıklı olarak istatistiksel ve karmaşık istatistiksel veri analizi için kullandığı bir yazılım paketidir.

SPSS temel olarak araştırma şirketleri, eğitim araştırmaları ve pazarlama gibi alanlarda kullanılır.

SPSS programının bazı özellikleri;

- SPSS’deki tüm veriler SAV formatında saklanır. Bu, verilerin işlenmesi, analiz edilmesi ve çıkarılması sürecini kolaylaştırır.
- SPSS, görev açısından kritik verilerinizden açık bir şekilde veri almanıza yardımcı olur. Bu, SPSS’nin bazı özelliklerinin yanı sıra trend analizi, varsayımlar ve tahmine dayalı modeller aracılığıyla yapılır.
- SPSS, kullanıcılara doğru sonuçları analiz etmeleri için derin istatistiksel yetenekler sunar.
- Veri yönetim sistemini ve düzenleme araçlarını kolayca edinmeye yardımcı olur.
- SPSS, işlevleri daha görsel olarak tasarlamaya, oluşturmanıza, raporlamaya ve sunmaya yardımcı olan bir araçtır.
- SPSS’nin öğrenilmesi, kullanılması ve uygulanması kolaydır.

SPSS yazılımı istatistiksel veri analizine ek olarak veri yönetimi işlevleri de sağlar. Kullanıcının seçim yapmasına, veri oluşturmaya, bir dosya yürütmesine vb. izin verir. SPSS'nin bir başka özelliği de veri dokümantasyonudur. Temel olarak bu işlev, veri dosyasıyla birlikte bir meta veri sözlüğünü depolar.

SPSS programı, nicel analiz yapmak ve bir işaretle ve tıkla istatistik paketini tamamlamak için kullanılır.

SPSS'de çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılabilir;

- SPSS metodolojileri de dahil olmak üzere tanımlayıcı istatistikler, çok yararlı olan frekansların, çapraz tabloların ve tanımlayıcı ilişkilerin istatistikleridir.
- Varyans analizi (ANOVA), ortalamalar, korelasyon, parametrik olmayan testler vb. gibi teknikleri içeren iki boyutlu istatistikler sağlar.
- Küme analizi, faktör analizi vb. gibi metodolojiler de dahil olmak üzere grupları tanımlamak için çeşitli verileri tahmin etmek.
- Doğrusal regresyon gibi sayısal bir sonucu tahmin etmek. (Anonim 1, 2021)

3.5.1. Python yazım dili ile yapay zekâ kullanımı

Python mühendislik ve diğer bilim alanlarında da sıklıkla tercih edilen bir programlama dilidir. Python, 1989 yılında Hollandalı programcı Guido van Rossum tarafından tasarlanan genel amaçlı bir programlama dilidir. Python, yapay zekâ geliştirmek için birçok harika özelliğe sahip çok popüler bir programlama dilidir. Dünyanın dört bir yanındaki birçok yapay zekâ geliştiricisi Python kullanmaktadır. Python ilk olarak 1991 yılında tanıtılmıştır (Malkoç, 2012). Python programlama dili donanım belleğini verimli kullanır. Programcıların kodları hızlıca düzenlemeleri, hataların kolayca belirlenip giderilmesi açısından ve karmaşık görevleri daha az adımda gerçekleştirebilmesi açısından avantajlı bir programlama dilidir (Koç, 2019).

Python dinamik bir programlama dilidir. Bu, geliştiricilerin değişken türlerini beyan etmek zorunda olmadıkları anlamına gelir. Python, çalışma zamanında (program başlatıldığında), ancak derleme sırasında (kaynak kod makine koduna dönüştürüldüğünde) türleri ve hataları doğrular. Bu, daha az kod, daha hızlı gelişme ve daha fazla esneklik sağlamaktadır.

Python'un ortaya çıkışında ve geliştirilme sürecinde, bir başka genel amaçlı yazılım dili olan ABC programlama dilinin etkisi olmuştur (Dierbach, 2012). Python aynı zamanda nesne tabanlı bir dildir. Python scikit-learn modülü ile makine öğrenmesi alanında hem denetimli hem de denetimsiz öğrenme çalışmaları yapabilmek, çeşitli sınıflandırma, kümeleme, tahmin işlemlerini yürütebilmek mümkündür (Ayvaz ve diğ., 2016).

3.5.1.1. Ridge regresyon analizi

Ridge regresyonu, regresyon analizinde kullanılan bir yöntemdir ve temelde en küçük kareler yöntemine dayanır. Ancak, Ridge regresyonu aşırı uyumu (overfitting) önlemek için tasarlanmış bir düzenleme tekniğidir. Bu yöntem, genellikle çoklu bağımsız değişkenlerin olduğu durumlarda kullanılır. Çoklu bağımsız değişkenlerle yapılan regresyon analizlerinde, model verilere aşırı derecede uyum (overfitting) sağlayabilir, yani verilere çok iyi uyarlanabilir. Ancak bu durumda model yeni verilere genellenebilme yeteneği kazanmada zorlanabilir. İşte tam burada Ridge regresyonu devreye girer.

Ridge regresyonu, regresyon denklemindeki katsayıları küçültmek için bir cezalandırma terimi (λ) kullanılır. Bu cezalandırma terimi, katsayıları sıfıra yaklaştırarak modelin karmaşıklığını azaltır. Kısaca, Ridge regresyonu hem hatayı minimize etmek hem de katsayıları kontrol altında tutarak modelin doğruluğunu ve genelleme yeteneğini artırmak amacıyla kullanılır. Bu cezalandırma terimi, bir hiperparametre olan λ (lambda) ile kontrol edilir. Uygun bir lambda değeri seçilerek regresyonun aşırı uyumu (overfitting) azaltılır ve daha güvenilir daha genelleştirilebilir bir modeller elde edebilmektedir. (Anonim 2, 2024)

3.5.1.2. Lasso regresyon analizi

Regresyon analizleri belli bir varsayıma dayanarak çözümler üretmektedir. Bu varsayımların sağlanamadığı durumlar ile karşılaşılması da mümkündür. Bu şekilde varsayımların sağlanamadığı durumlarda çeşitli alternatif yöntemler ile çözüme ulaşmaya çalışılmaktadır. Lasso regresyon analizi çoklu doğrusal bağlantı problemi (multicollinearity) ile karşılaşılan durumlarda kullanılabilecek yöntemlerden biridir.

Çoklu doğrusal bağlantı problemi, regresyon modellerinde bağımsız değişkenlerden iki veya daha fazlası arasında doğrusal ya da doğrusala yakın ilişki olması durumudur. Çoklu doğrusal bağlantı problemi nedeniyle, parametrelerin gerçeğinden uzak, çok büyük veya çok küçük zıt değerler alması, R^2 değerinin olması gerekenden yüksek çıkması, parametrelerin varyanslarının önemli ölçüde artması, dolayısıyla parametrelerin t testine göre önemsiz çıkması gibi sorunlar yaşanabilmektedir.

Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) Regresyon, en küçük kareler (EKK) yöntemine alternatif yanlı tahmin yöntemlerinden biridir. Çoklu doğrusal bağlantı ve aşırı öğrenme sorunları için kullanılabilir. Lasso Regresyon hem değişken seçiminin hem de regularizasyonun aynı anda gerçekleştiği bir regresyon tekniğidir. Etkili ve hızlı olması nedeniyle büyük veri setlerinde yaygın olarak uygulanmaktadır.

En küçük kareler modelinin kurulamayacağı kadar az gözlem sayısının olduğu durumlarda, çapraz doğrulama ve ceza parametresi sayesinde, model kurabilmesi nedeniyle sıkça kullanılır. Bu yöntemde (Ridge regresyonda da olduğu gibi) bir ceza terimi kullanılarak (L1 tipi cezalandırma) katsayılar sıfır olmaya doğru zorlanır. Bu ceza teriminin değeri regresyon katsayılarına uygulanacak büzülme miktarını belirler. En küçük kareler, RSS (residual sum of squares)'yi minimize edecek katsayıları bulmaya çalışır.

Lasso Regresyon, birçok çalışmada Ridge Regresyon ile karşılaştırılmaktadır. Ridge Regresyon ile Lasso Regresyon'nun çalışma yöntemi birbiri ile çok benzerdir. Her ikisi de bir ceza parametresi ile yanlı ancak düşük varyanslı modeller kurar. Formüllerinde ufak bir farklılık vardır. Ridge Regresyon ceza parametresi olarak lambda (λ) katsayısının karesini kullanır. Lasso Regresyon ise lambda (λ) katsayısının mutlak değerini kullanır. (Anonim 3, 2023)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan proje kapsamında tam cepheli tünel açma makinelerinin performanslarının tahmin edilebilmesi için istatistiksel olarak anlamlı olan modellerin geliştirilmesi planlanmıştır. Bu bölümde tez çalışması kapsamında yapılmış olan arazi çalışmalarından elde edilen tam cepheli tünel açma makinesinin kazı parametreleri ile alınmış olan kazı numunelerinin laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerin ardından belirlenen fiziko-mekanik özellikleri arasında elde edilen bağıntılar sunulmuştur. İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından projelendirilen ve Doğuş İnşaat-Yapı Merkezi- Özaltın İnşaat tarafından yürütülen Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi ile Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 4. Bölge Müdürlüğü tarafından projelendirilen ve İmaj-Abad İnşaat firmaları tarafından açılan su ikmal tüneli verileri ayrı olarak incelenmiştir.

Öncelikle her bir parametre ile ilerleme hızı arasındaki ilişki tek tek incelenmiştir. Performans tahmin modeli oluşturulmasında doğrusal regresyon analiz gerçekleştirildiği için parametreler arasındaki ilişkiler de doğrusal olarak incelenmiştir. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesinden elde edilen verilerin korelasyon matrisi Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesinde parametrelerin korelasyon matrisi

İlerleme Hızı	1	0,034	0,335	0,082	0,095	0,240	0,314	0,294
Yoğunluk	0,034	1	0,542	0,580	0,205	0,034	0,005	0,025
Porozite	0,335	0,542	1	0,443	0,519	0,279	0,062	0,233
Su İçeriği	0,082	0,580	0,443	1	0,125	0,209	0,068	0,238
Nokta Yükleme Dayanımı	0,095	0,205	0,519	0,125	1	0,094	0,132	0,133
Kırılgenlik	0,204	0,034	0,279	0,209	0,094	1	0,418	0,827
Siever's Yüzey Sertliği	0,314	0,005	0,062	0,068	0,132	0,418	1	0,640
DRI	0,294	0,025	0,233	0,238	0,133	0,827	0,640	1
	İlerleme Hızı	Yoğunluk	Porozite	Su İçeriği	Nokta Yükleme Dayanımı	Kırılgenlik	Siever's Yüzey Sertliği	DRI

Çizelge 4.2’de ise Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tünelinden alınan numunelerin fiziko-mekanik özellikleri ile ilerleme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon matrisi sunulmuştur.

Çizelge 4.2. hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesinde parametrelerin korelasyon matrisi

İlerleme Hızı	1	0,264	0,093	0,002	0,001	0,327	0,001	0,015
Yoğunluk	0,264	1	0,399	0,001	0,027	0,058	0,032	0,001
Porozite	0,093	0,399	1	0,165	0,020	0,029	0,097	0,001
Su İçeriği	0,002	0,001	0,165	1	0,017	0,001	0,034	0,002
Nokta Yükleme Dayanımı	0,001	0,027	0,020	0,017	1	0,025	0,165	0,035
Kırılgenlik	0,327	0,058	0,029	0,001	0,025	1	0,074	0,142
Siever’s Yüzey Sertliği	0,001	0,032	0,097	0,034	0,165	0,074	1	0,272
DRI	0,015	0,001	0,001	0,002	0,035	0,142	0,272	1
	İlerleme Hızı	Yoğunluk	Porozite	Su İçeriği	Nokta Yükleme Dayanımı	Kırılgenlik	Siever’s Yüzey Sertliği	DRI

Elde edilen veriler Python ile programa tanıtıldığında satır ve sütun olarak Şekil 4.1a ve 4.1b’de belirtildiği gibi tanınmaktadır. Buradaki satır ve sütunda bulunan parametrelerin sırası daha sonra oluşturulmuş olan yapay zekâ destekli doğrusal regresyon, makine öğrenmesi çeşitleri olan Ridge ve Lasso regresyon modellerinin oluşturulmasında önem arz etmektedir. Bu yöntemlerle elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinin belirlenmesi için verilen matrisin yorumlanabilmesi için hangi sütunda hangi parametrenin yer aldığının bilinmesi gerekmektedir.

In [34]: 1 X.head()

Out[34]:

	Nokta Yükleme Dayanımı	Porozite	Su İçeriği	Siever's	Yoğunluk	Kırılganlık	DRI
0	1.45	2.69	0.43	93.80	2.69	59.09	73
1	1.58	2.61	0.34	88.24	2.69	60.69	73
2	2.55	2.45	0.32	88.04	2.70	60.60	72
3	2.64	1.29	0.18	88.44	2.71	59.93	71
4	2.32	1.94	0.18	88.94	2.71	61.36	72

4.1a Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi verilerinin Python programında gösterimi

In [11]: 1 X.head()

Out[11]:

	Nokta Yükleme Dayanımı	Porozite	Su İçeriği	Siever's	Yoğunluk	Kırılganlık	DRI
0	0.825033	3.495990	0.702459	120.24	2.689090	47.304545	72
1	3.247702	1.365093	0.251234	59.42	2.737166	50.184081	73
2	1.398140	2.739510	0.459824	76.76	2.696554	52.174195	73
3	2.782169	1.722514	0.261543	20.22	2.691192	54.757257	72
4	1.803622	2.116016	3.490845	65.60	2.828674	53.028466	71

4.1b Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneli verilerinin python programında gösterimi

4.1. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi Sonuçları

Tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modeli geliştirilmesi için yapılan çalışmalar kapsamında Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Hattı projesinden alınan veriler ile oluşturulan performans tahmin modelleri bu bölümde sunulmuştur.

4.1.1. SPSS programı aracılığıyla performans tahmin modeli geliştirilmesi

İstanbul ili Sancaktepe ilçesi ve Sultanbeyli ilçesinde bulunan şantiyelerden alınan kayaç numunelerine ait veriler daha önceki bölümlerde sunulmuştur. Elde edilen verilerin SPSS 20 istatistik programında ve Phyton programlama dili ile yapay zekâ destekli lineer regresyon analizleri sonucunda tam cepheli tünel açma makinesinin ilerleme hızının tahmin edilmesi için kayaçların fiziko-mekanik özelliklerine bağlı bir performans tahmin modeli geliştirilmiştir.

SPSS 20 istatistik programında yapılan doğrusal regresyon analizleri sonucunda Eşitlik 1'deki performans tahmin modeli geliştirilmiştir.

$$\dot{I}H = (-15,21YO) - 5,57PO + 6,22SU - 3,39NYD - 0,2S_J + 0,46S_{20} - 0,11DRI - 87,43 \quad (4.1)$$

Elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinde;

$\dot{I}H$: İlerleme Hızı (mm/dk)

YO: Yoğunluk (gr/cm^3)

PO: Porozite (%)

SU: Su İçeriği (%)

NYD: Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)

S_{20} : Kırılgenlik (%)

S_J : Siever's Yüzey Sertliği

DRI: Delinebilirlik Oranı İndeksi

SPSS 20 istatistik programı kullanılarak elde edilen modelin güvenilirliğini gösteren ANOVA çıktısı Şekil 4.2'de sunulmuştur.

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	98,293	7	14,042	1,983	,234 ^b
	Residual	35,399	5	7,080		
	Total	133,692	12			

a. Dependent Variable: İlerleme_Hizi

b. Predictors: (Constant), DRI, Yogunluk, Nokta_yukleme_dayanimi, Sievers, Su_icerigi, Porozite, Kirilganlik

Şekil 4.2. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi ilerleme hızı tahmin modeli ANOVA sonuçları

ANOVA sonucundan da görüldüğü üzere güvenilirlik için değerlendirdiğimiz değer 0,234 olarak bulunmuştur. Bu değer küçük olması ve sıfıra yakın olması istenmektedir. Burada elde edilen değer beklenen düzeyin üstünde olmuştur.

SPSS 20 istatistik programı ile elde edilen modelin özet bilgileri Şekil 4.3'te sunulmuştur.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,857 ^a	,735	,365	2,6608

a. Predictors: (Constant), DRI, Yogunluk, Nokta_yukleme_dayanimi, Sievers, Su_icerigi, Porozite, Kirilganlik

Şekil 4.3. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesi için ilerleme hızı tahmin modelinin özeti

Regresyon analizi sonucunda elde edilen performans tahmin modelinde bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişkinin kuvvetini açıklayan R^2 değeri 0,735 olarak bulunmuştur. Bu değer orta derecede bir ilişkinin varlığını göstermektedir.

4.1.2. Python yazılım dili ile performans tahmin modelinin geliştirilmesi

Ardından Python yazım dili ile yapay zekâ destekli lineer regresyon analizi yapılmıştır. Aynı parametreler kullanılmıştır ve ilerleme hızının tahmin edilmesi için Eşitlik 2’de sunulan model oluşturulmuştur. Şekil 4.4’te sci-learn olarak geçen lineer regresyon analizi sonucunda bağımsız değişkenlerin kat sayıları gösterilmiştir.

```
In [43]: 1 model.coef_
Out[43]: array([-1.18257317, -1.82701274, 18.90476428,  0.08777254, 27.54505493,
  0.36612588, -2.39898545])

In [44]: 1 model.intercept_
Out[44]: 100.12476406789655
```

Şekil 4.4. Lineer (Sci-Learn) regresyon analizi sonucunda parametrelerin katsayıları

$$\dot{I}H = 27,55YO - 1,88PO + 18,91SU - 1,18NYD + 0,08S_J + 0,36S_{20} - 2,40DRI + 100,125 \quad (4.2)$$

Elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinde;

$\dot{I}H$: İlerleme Hızı (mm/dk)

YO: Yoğunluk (gr/cm^3)

PO: Porozite (%)

SU: Su İçeriği (%)

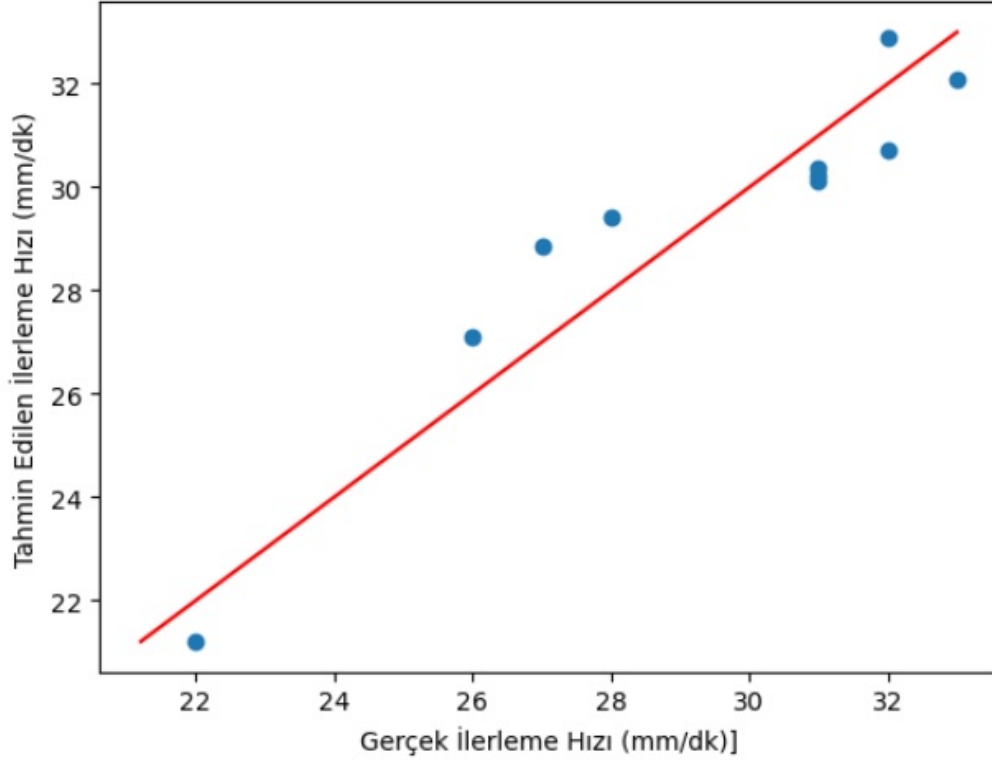
NYD: Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)

S_{20} : Kırılgenlik (%)

S_J : Siever’s Yüzey Sertliği

DRI: Delinebilirlik Oranı İndeksi

Elde edilen model ve gerçek ilerleme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.5'te sunulmuştur.



Mean squared error from validation dataset: 1.2406166752973673
 Mean absolute error from validation dataset: 1.0571396193010514
 Mean absolute percentage error from validation dataset: 0.03682266887028532
 R-squared score: 0.89

Şekil 4.5. Yapay zekâ destekli lineer regresyon analizi ile elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinin gerçek ilerleme hızı ile karşılaştırılması

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere parametreler arasındaki ilişkinin seviyesinin göstergesi olan R^2 değeri 0,89 olarak belirlenmiştir.

4.1.3. Ridge analizi ile geliştirilen performans tahmin modeli

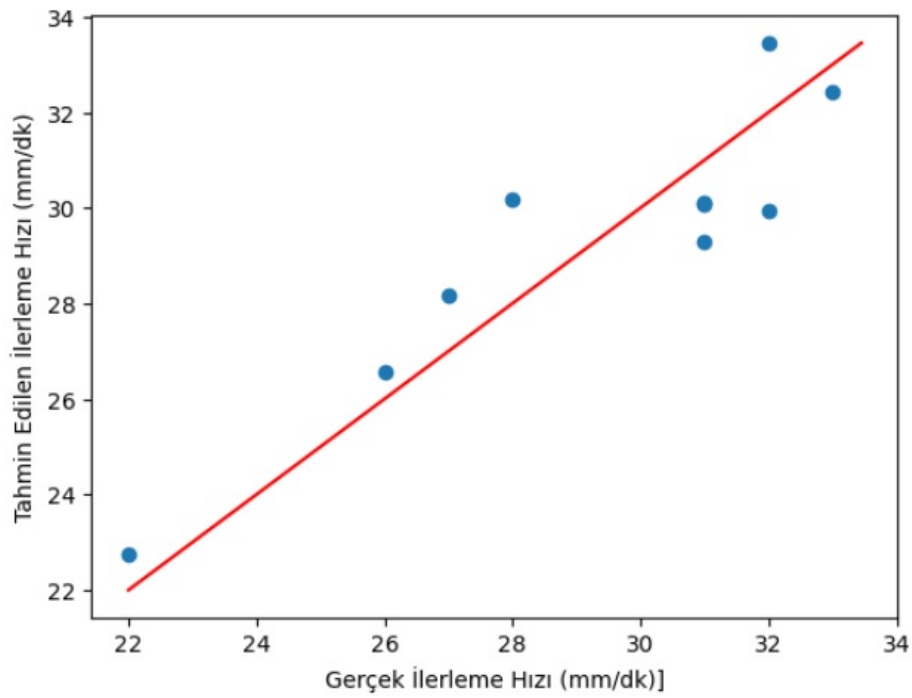
Yapay zekâ destekli doğrusal regresyon analizinin akabinde Ridge regresyon analizi uygulanmıştır. Burada Siever's yüzey sertliği ve kırılgenlik parametrelerinin kat sayıları 0 değerine yaklaşmıştır (Şekil 4.6).


```
In [47]: 1 ridge_model.coef_
Out[47]: array([-0.93261201, -2.12864334,  5.838755 ,  0.03574877, -0.68307696,
               0.50390342, -1.88498675])

In [48]: 1 ridge_model.intercept_
Out[48]: 138.90731830989813
```

Şekil 4.6. Ridge regresyon analizi sonucunda etkin olan parametrelerin katsayıları

Dolayısıyla analiz sonucunda katsayıları 0'a yaklaştırılmış olan Siever's yüzey sertliği ve kırılgenlik parametreleri görece daha az etkili parametreler olarak belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulan ilerleme hızı tahmin modeli ile gerçek değerler arasındaki ilişkinin gösterildiği grafik Şekil 4.7'de sunulmuştur.



```
Mean squared error from validation dataset: 1.8156127485686515
Mean absolute error from validation dataset: 1.2234077470231568
Mean absolute percentage error from validation dataset: 0.04165143907142974
R-squared score: 0.83
```

Şekil 4.7. Ridge regresyon analizi sonucu oluşturulan model ile gerçek ilerleme hızı değerleri arasındaki ilişki

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere R^2 değeri 0,83 olarak hesaplanmıştır. İlerleme hızı tahmini için oluşturulan model Eşitlik 3 olarak belirlenmiştir.

$$\dot{I}H = -0,68YO - 2,13PO + 5,84SU - 0,93NYD + 0,04S_J + 0,50S_{20} - 1,89DRI + 138,907 \quad (4.3)$$

Elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinde;

İH: İlerleme Hızı (mm/dk)

YO: Yoğunluk (gr/cm³)

PO: Porozite (%)

SU: Su İçeriği (%)

NYD: Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)

S₂₀: Kırılabilirlik (%)

S_J: Siever's Yüzey Sertliği

DRI: Delinebilirlik Oranı İndeksi

4.1.4. Lasso analizi ile geliştirilen performans tahmin modeli

Ridge regresyon analizinin ardından Lasso regresyon analizi uygulanmıştır. Bu analiz sonucunda ise oluşturulan modelde etkisi az olan parametrelerin katsayıları 0 olarak belirlenmektedir. Dolayısıyla modelde girdi parametresi olarak kullanılan kayaların fiziko-mekanik özellikleri daha az sayıdadır. Yapılan analiz sonucunda parametrelerin kat sayılarının gösterimi Şekil 4.8'de sunulmuştur.

```
In [54]: 1 lasso_model.coef_
Out[54]: array([-0.      , -0.86436004,  0.85247012,  0.03927232, -0.      ,
                0.29000297, -1.7038481 ])
```

```
In [55]: 1 lasso_model.intercept_
Out[55]: 133.2143558285714
```

Şekil 4.8. Lasso regresyon analizi sonucunda etkin olan parametrelerin katsayılarının gösterimi

Lasso regresyon analizi sonucunda nokta yükleme dayanımı ve yoğunluk parametrelerinin kat sayıları 0 olarak belirlenmiş ve ilerleme hızı tahmin modelinde bağımsız değişken parametreleri olarak kullanılmamıştır. Lasso regresyon analizi sonucunda belirlenen parametreler ile ilerleme hızı tahmini için oluşturulan model Eşitlik 4'te sunulmuştur.

$$\text{İH} = -0,864\text{PO} + 0,852\text{SU} + 0,039 \text{ S}_J + 0,29 \text{ S}_{20} - 1,704\text{DRI} + 133,214 \quad (4.4)$$

Elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinde;

İH: İlerleme Hızı (mm/dk)

YO: Yoğunluk (gr/cm³)

PO: Porozite (%)

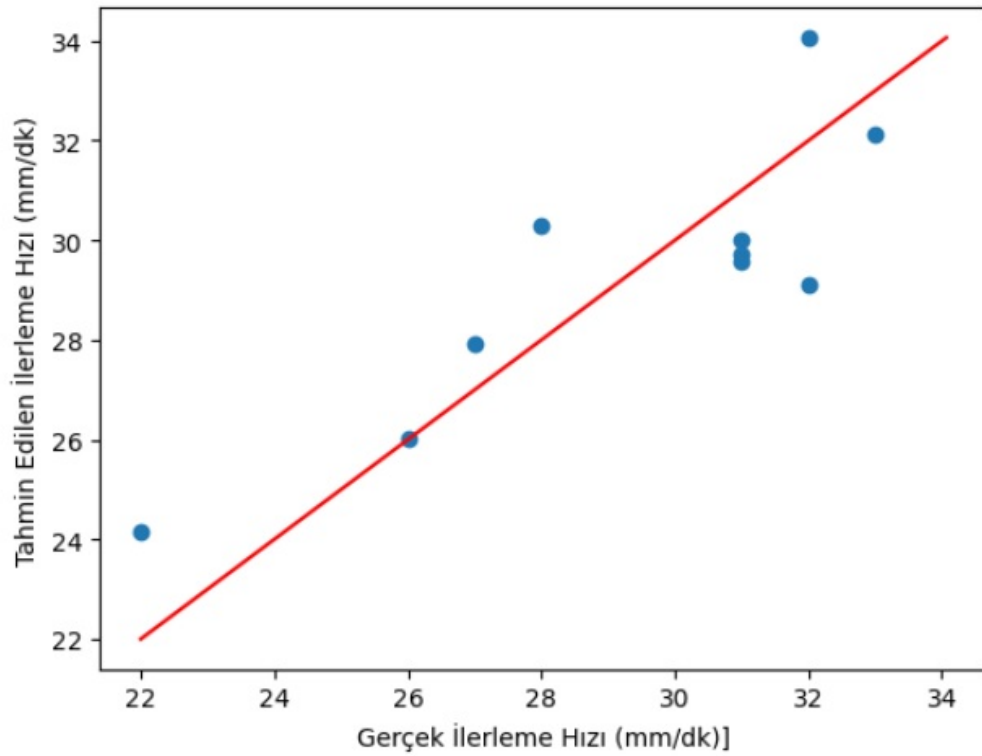
SU: Su İçeriği (%)

S₂₀: Kırılmalık (%)

S_J: Siever's Yüzey Sertliği

DRI: Delinebilirlik Oranı İndeksi

Lasso regresyon analizinin ardından elde edilen ilerleme hızı tahmin modeli ile gerçek ilerleme hızları arasındaki ilişki Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Mean squared error from validation dataset: 2.8850428828728716
Mean absolute error from validation dataset: 1.4915383716732606
Mean absolute percentage error from validation dataset: 0.051529676437518865
R-squared score: 0.73

Şekil 4.9. Lasso regresyon analizi sonucunda elde edilen ilerleme hızı tahmin modeli ile gerçek ilerleme hızı arasındaki ilişki

Grafik açıklamalarında belirtildiği gibi oluşturulan modelin R^2 değeri 0,73 olarak hesaplanmıştır.

4.2. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli Projesi Sonuçları

Tam cepheli tüneller açma makinesi performans tahmin modeli geliştirilmesi için yapılan çalışmalar kapsamında Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesinden alınan veriler ile oluşturulan performans tahmin modelleri bu bölümde sunulmuştur.

4.2.1 SPSS programı aracılığıyla performans tahmin modeli geliştirilmesi

Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tünelleri projesinde yapılan çalışmalar kapsamında alınan numuneler ve tam cepheli tüneller açma makinesi kazı raporlarından alınan kazı parametreleri arasındaki ilişkiler SPSS 20 istatistik programında ve yapay zekâ desteği ile doğrusal regresyon analizlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca makine öğrenmesi algoritmalarından Ridge ve Lasso regresyon analizleri uygulanmıştır.

SPSS 20 istatistik programı kullanılarak aynı girdi parametreleri ile lineer regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin ardından Eşitlik 5'te sunulan ilerleme hızı tahmin modeli elde edilmiştir.

$$\dot{I}H = (-31,01YO) + 0,11PO - 0,1SU + 0,29NYD - 0,05S_j + 0,31S_{20} + 0,04DRI + 91,92 \quad (4.5)$$

Elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinde;

$\dot{I}H$: İlerleme Hızı (mm/dk)

YO: Yoğunluk (gr/cm³)

PO: Porozite (%)

SU: Su İçeriği (%)

NYD: Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)

S₂₀: Kırılgenlik (%)

S_j: Siever's Yüzey Sertliği

DRI: Delinebilirlik Oranı İndeksi

SPSS programı ile elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinin güvenilirliğinin test edildiği ANOVA sonuçları Şekil 4.10'da sunulmuştur.

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	570,801	7	81,543	10,296	<,001 ^b
	Residual	530,640	67	7,920		
	Total	1101,441	74			

a. Dependent Variable: Ilerleme_Hizi

b. Predictors: (Constant), DRI, Porozite, Nokta_yukleme_dayanimi, Su_icerigi, Kirilganlik, Sievers, Yogunluk

Şekil 4.10. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesi ilerleme hızı tahmin modeli ANOVA sonuçları

ANOVA sonucundan da görüldüğü üzere güvenilirlik için değerlendirdiğimiz değer (Sig.) 0,01 olarak bulunmuştur. Bu değer küçük olması ve sıfıra yakın olması istenmektedir. Bu değer düşük çıkması oluşturulan modelin güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

SPSS 20 istatistik programı ile elde edilen modelin özet bilgileri Şekil 4.11’de sunulmuştur.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,720 ^a	,518	,468	2,8143

a. Predictors: (Constant), DRI, Porozite, Nokta_yukleme_dayanimi, Su_icerigi, Kirilganlik, Sievers, Yogunluk

Şekil 4.11. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneli projesi için ilerleme hızı tahmin modelinin özeti

Regresyon analizi sonucunda elde edilen performans tahmin modelinde bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişkinin kuvvetini açıklayan R^2 değeri 0,518 olarak bulunmuştur. Bu değer görece düşük ilişki olduğunu göstermektedir.

Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli verileri ile yapılan analizler sonucunda daha az parametre ile korelasyon katsayısının daha yüksek olduğu bir performans modeli de elde edilmiştir.

4.2.2. Python yazılım dili ile performans tahmin modelinin geliştirilmesi

SPSS programı ile yapılan lineer regresyon analizinin ardından Python yazılım dili ile yapay zeka destekli doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Bağımsız değişkenler

aynı parametrelerdir ve yapay zekâ destekli regresyon analizi sonucu ilerleme hızı tahmin modeli Eşitlik 6'da sunulmuştur. Şekil 4.12'de doğrusal regresyon (Sci-Learn) sonucundan elde edilen modeldeki bağımsız değişken parametrelerin katsayıları sunulmuştur.

```
In [13]: 1 model.coef_
Out[13]: array([ 1.94574837e+00, -1.28528842e-02,  1.69456926e-01, -2.71828625e-02,
                -3.26884952e+01,  2.54990264e-01, -1.34557071e-02])

In [14]: 1 model.intercept_
Out[14]: 98.44328429905924
```

Şekil 4.12. Lineer (Sci-Learn) regresyon analizi sonucunda parametrelerin kat sayıları

$$\dot{I}H = -3,27YO - 1,29PO + 1,69SU + 1,95NYD - 2,72S_J + 2,55S_{20} - 1,35DRI + 98,443 \quad (4.6)$$

Elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinde;

$\dot{I}H$: İlerleme Hızı (mm/dk)

YO: Yoğunluk (gr/cm³)

PO: Porozite (%)

SU: Su İçeriği (%)

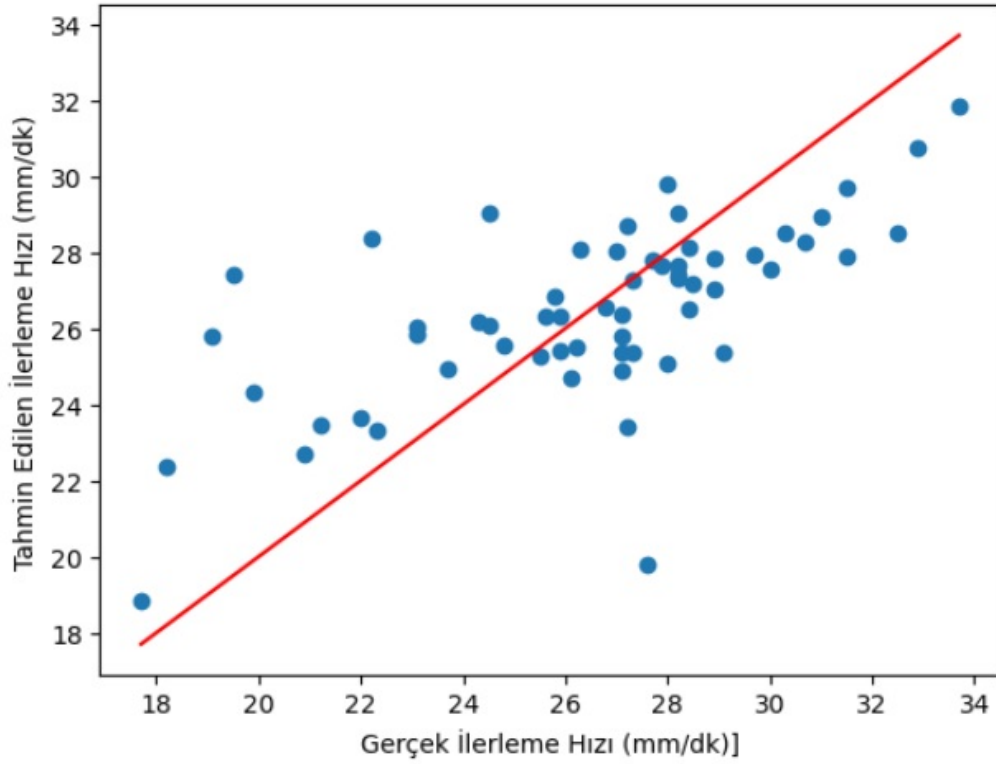
NYD: Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)

S₂₀: Kırılmalık (%)

S_J: Siever's Minyatür Delme Değeri (mm/dk)

DRI: Delinebilirlik Oranı İndeksi

Oluşturulan ilerleme hızı tahmin modeli ile ölçülen gerçek ilerleme hızı arasındaki ilişki Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Korelasyon kat sayısı olan R² değeri 0,42 olarak bulunmuştur (Şekil 4.13).



Mean squared error from validation dataset: 7.357008935385268
 Mean absolute error from validation dataset: 2.068945108717346
 Mean absolute percentage error from validation dataset: 0.08330402928109229
 R-squared score: 0.42

Şekil 4.13. Yapay zekâ destekli linear regresyon sonucu oluşturulan ilerleme hızı modeli ile gerçek ilerleme hızı arasındaki ilişki

4.2.3. Ridge analizi ile geliştirilen performans tahmin modeli

Yapay zekâ destekli doğrusal regresyonun ardından benzer bir şekilde Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro projesinde olduğu gibi fiziko-mekanik özellikler ile ilerleme hızı tahmin modelinde makine öğrenmesi algoritmalarından Ridge regresyon analizi uygulanmıştır. Ridge regresyon analizinde ilerleme hızı üzerinde etkisi nispeten daha düşük olan parametrelerin kat sayıları 0'a yakınlaştırılarak farklı bir model daha oluşturulmuştur. Ridge regresyon analizi sonucunda oluşturulan ilerleme hızı tahmin modeli Eşitlik 7'de sunulmuştur. Ridge regresyon analizi sonucunda bağımsız değişken parametrelerin gösterimi Şekil 4.14'te sunulmuştur.

```
In [11]: 1 ridge_model.coef_
Out[11]: array([ 1.79887245,  0.56238789, -0.50157214, -0.03195314,
                -15.12411003,  0.28214885, -0.0300821 ])
```

```
In [12]: 1 ridge_model.intercept_
Out[12]: 49.961803206737486
```

Şekil 4.14. Ridge regresyon analizi sonucunda parametrelerin kat sayıları

$$\dot{I}H = -15,12YO + 0,56PO - 0,5SU + 1,8NYD - 0,03S_J + 0,28S_{20} + 0,03DRI + 49,962 \quad (4.7)$$

Elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinde;

$\dot{I}H$: İlerleme Hızı (mm/dk)

YO: Yoğunluk (gr/cm³)

PO: Porozite (%)

SU: Su İçeriği (%)

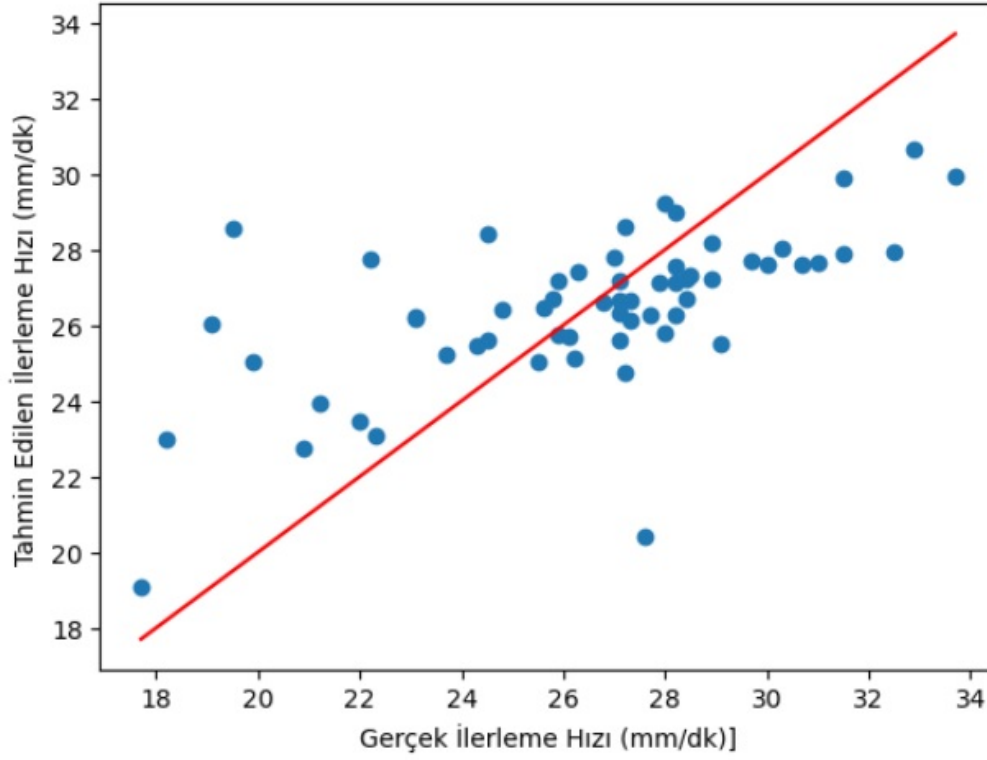
NYD: Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)

S₂₀: Kırılgenlık (%)

S_J: Siever's Minyatür Delme Değeri (mm/dk)

DRI: Delinebilirlik Oranı İndeksi

Ridge regresyon analizi sonucunda Siever's yüzey sertliği ve DRI parametrelerinin 0'a yakın değerde katsayılar aldığı görülmektedir. Bu durum Siever's yüzey sertliği ve DRI parametrelerinin ilerleme hızının tahmini üzerindeki etkilerinin düşük olduğu anlamına gelmektedir. Ridge regresyon analizi sonucu elde edilen ilerleme hızı tahmin modeli ile gerçek ilerleme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Oluşturulan modelin R² değeri 0,39 olarak elde edilmiştir.



Mean squared error from validation dataset: 7.799078121435329
 Mean absolute error from validation dataset: 2.1207857919493214
 Mean absolute percentage error from validation dataset: 0.08543289237727092
 R-squared score: 0.39

Şekil 4.15. Ridge regresyon sonucu oluşturulan ilerleme hızı modeli ile gerçek ilerleme hızı arasındaki ilişki

4.2.4. Lasso analizi ile geliştirilen performans tahmin modeli

Ridge regresyonunun ardından bir başka makine öğrenme algoritması olan Lasso regresyon analiz yöntemi uygulanmıştır. Lasso regresyon analizi sonucunda ilerleme hızını diğer bağımsız değişkenlere göre daha az etkileyen parametrelerin kat sayıları 0 olacak şekilde bir ilerleme hızı tahmin modeli oluşturulmuştur. Eşitlik 8'de Lasso regresyon analizi sonucunda oluşturulan ilerleme hızı tahmin modeli gösterilmiştir.

$$\dot{I}H = 0,797PO + 0,576NYD - 0,043S_J + 0,298S_{20} - 0,017DRI + 9,746 \quad (4.8)$$

Elde edilen ilerleme hızı tahmin modelinde;

$\dot{I}H$: İlerleme Hızı (mm/dk)

PO : Porozite (%)

NYD : Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)

S_{20} : Kırılgenlik (%)

S_J : Siever's Minyatür Delme Değeri (mm/dk)

DRI : Delinebilirlik Oranı İndeksi

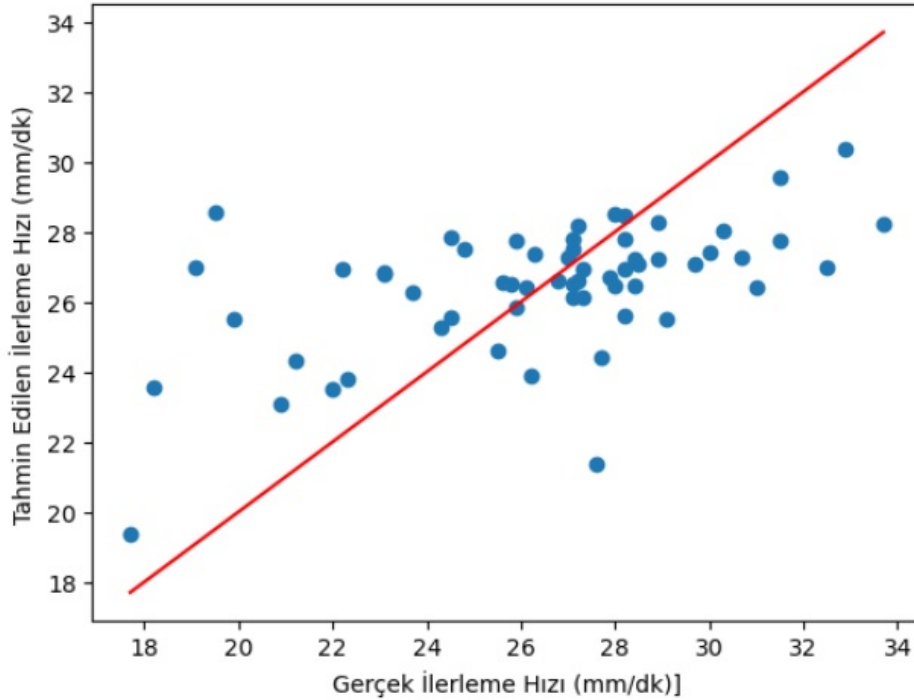
Lasso regresyon analizi bağımlı değişken üzerinde etkisi düşük olan Su içeriği ve yoğunluk parametrelerinin kat sayılarını 0 olarak belirlediği için burada kullanılan bağımsız değişken parametreleri farklılık göstermektedir. Şekil 4.16'da Lasso regresyon analizi sonucunda bağımsız değişkenlerin katsayı matrisi gösterilmektedir.

```
In [19]: 1 lasso_model.coef_
Out[19]: array([ 0.57637154,  0.79679913, -0.          , -0.04252072, -0.          ,
                0.29837839, -0.01731369])

In [20]: 1 lasso_model.intercept_
Out[20]: 9.746086963404025
```

Şekil 4.16. Lasso regresyon analizi sonucunda etkin olan parametreleri gösteren matris

Lasso regresyon analizi sonucunda oluşturulan ilerleme hızı tahmin modeli ile gerçek ilerleme hızı arasındaki ilişki Şekil 4.17'de sunulmuştur.



```
Mean squared error from validation dataset: 9.04646716316813
Mean absolute error from validation dataset: 2.2937166915900424
Mean absolute percentage error from validation dataset: 0.09229241273394018
R-squared score: 0.29
```

Şekil 4.17. Lasso regresyon analizi ile oluşturulan ilerleme hızı tahmin modeli ile gerçek ilerleme hızı verileri arasındaki ilişki

Yapılan analizlere ek olarak Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tünelinden alınan veriler ile Phyton üzerinden doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda R^2 değeri yüksek (0,814) polinomik bir model oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} \dot{I}H = & (67,7008YO) + (109.0372PO) + (-565.5943SU) + (218.8237NYD) + (-6.2307S_{20}) + \\ & (0.6844S_J) + (4.1463DRI) + (28.1732YO^2) + (-23.6961YO*PO) + (143.9287YO*SU) + \\ & (-90.6239YO*NYD) + (0.4944YO* S_{20}) + (-1.0359YO* S_J) + (-0.1172YO*DRI) + (- \\ & 0.9871PO^2) + (8.1609PO*SU) + (-6.4282PO*NYD) + (0.1267PO* S_{20}) + (-0.0707PO* \\ & S_J) + (-0.4550PO*DRI) + (-3.9791SU^2) + (18.0111SU*NYD) + (-1.0026SU* S_{20}) + \\ & (0.5962 SU*S_J) + (1.9322SU*DRI) + (2.4703NYD^2) + (0.4221NYD* S_{20}) + \\ & (0.1618NYD* S_J) + (-0.0892NYD*DRI) + (0.0098S_{20}^2) + (-0.0028S_{20}*S_J) + \\ & (0.0512S_{20}*DRI) + (-0.0007 S_J^2) + (0.0265S_J*DRI) + (-0.0562DRI^2) \end{aligned} \quad (4.9)$$

$\dot{I}H$: İlerleme Hızı (mm/dk)

YO: Yoğunluk (gr/cm³)

PO: Porozite (%)

SU: Su İçeriği (%)

NYD: Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)

S_{20} : Kırılgenlik (%)

S_J : Siever's Yüzey Sertliği

DRI: Delinebilirlik Oranı İndeksi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesi ve ileri aşamada yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

5.1 Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında tam cepheli tünel açma makinelerinin kayaçların fiziko-mekanik özelliklerine göre performans tahmin modelleri oluşturulmuştur. Performans tahmin modellerinin oluşturulması için istatistiksel yaklaşımlardan olan lineer regresyon analizleri yapılmıştır. Lineer regresyon analizleri için SPSS istatistik programı ve yapay zekâ desteği ile yapılmıştır. Ayrıca yapay zekâ desteği ile Ridge ve Lasso regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi çalışmaları kapsamında numune alınan halkalardaki kazı raporlarından alınan ilerleme hızı verileri arasında lineer regresyon analizleri yapılmıştır. SPSS istatistik programı ile yapılan analiz sonuçlarında oluşturulan modelin korelasyon katsayısı (R^2) 0,735 olarak bulunmuştur. SPSS programından alınan ANOVA çıktısına bakıldığında ise Sig. (significance) yani önem değeri ise 0,234 olarak görülmektedir. Oluşturulan modelin R^2 değeri 0,735 olarak orta düzeyde anlamlılık gösterdiği söylenebilir. Fakat 0,234 olan önem değeri modelin hata payının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Oluşturulan performans tahmin modelinin güvenilirliğinin düşük olmasının nedeni ise az sayıda numune ile performans tahmin modeli oluşturulmasıdır. Oluşturulan modelin R^2 değeri bağımsız değişken parametrelerin ilerleme hızını etkilediği anlamına gelmektedir.

Yapay zekâ destekli lineer regresyon analiz de ise R^2 değeri 0,89 olarak bulunmuştur. Bulunan bu korelasyon kat sayısı değeri yüksek bir değerdir. Burada da numune sayısının az olması modelin güvenilirliği konusunda tereddütler oluşturmaktadır.

Ridge regresyon analizinde ise R^2 değeri 0,83 olarak belirlenmiştir. Ridge regresyon modelinde Siever's yüzey sertliği değeri (S_j) kat sayısı 0'a yaklaştırılmıştır. Bunun anlamı Ridge regresyon analizine göre Siever's yüzey sertliği değerinin ilerleme hızı üzerinde etkisinin daha az olduğu anlamına gelmektedir. Modelde en düşük kat sayılı bağımsız değişken olan Siever's yüzey sertliği ile R^2 değeri lineer regresyona göre daha düşük olmuştur.

Lasso regresyon analizinde ise bağımlı değişken yani ilerleme hızı üzerinden en az etkisi olan parametrelerin modeldeki kat sayıları 0 olarak belirlenmektedir. Lasso regresyon analizi sonucunda yoğunluk ve nokta yükleme dayanımı değerlerinin kat sayıları 0 olarak belirlenmiştir. Lasso analizi sonucunda performans tahmin modelinin korelasyon kat sayısı 0,73 olarak hesaplanmıştır. Lineer regresyon analizine göre daha düşük bir sonuç elde edilmiştir. Bunun sonucunda modelde kat sayıları 0 olarak belirlenen yoğunluk ve nokta yükleme dayanımı değerlerinin aslında ilerleme hızı üzerinde etkili olduğu söylenebilmektedir.

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi çalışmalarından alınan numune sayısının güvenilir bir model elde etmek için az sayıda olduğu söylenebilecektir. Fakat seçilen bağımsız değişken parametrelerinin (yoğunluk, porozite, su içeriği, nokta yükleme dayanımı, Siever's yüzey sertliği, kırılgenlik, DRI) ilerleme hızı üzerinde etkili olan fiziko-mekanik özellikler olduğu söylenebilecektir.

Hadım-Afşar-Bağbaşı Su İkmal Tüneli projesinden alınan numunelerde ilerleme hızı parametresinin tahmini için Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesinde uygulanan analizler ile aynıdır. SPSS istatistik programı ve yapay zekâ destekli lineer regresyon analizleri yapılmış ardından Ridge ve Lasso regresyon analizleri uygulanmıştır.

SPSS istatistik programı ile yapılan analizler sonucunda korelasyon kat sayısı R^2 0,518 olarak bulunmuştur. ANOVA analiz sonucunda ise oluşturulan performans tahmin modelinin Sig. (Significance) yani önem değeri 0,01 olarak bulunmuştur. Bu değer oluşturulan modelin güvenilir olduğu anlamına gelmektedir. R^2 değerinin 0,518 olması kayaçların fiziko-mekanik özellikleri ile ilerleme hızının arasında anlamlı ilişki olduğunu göstermektedir. Oluşturulan modelin ANOVA çıktısında güvenilir olarak belirlenmesinin sebebi numune sayısının yeterli olmasıdır. Alınan numune sayısı ile oluşturulan performans tahmin modeli güvenilir bir sonuç sunmaktadır.

Yapay zekâ destekli lineer regresyon analizi yapıldığında ise R^2 değerinin 0,42 olduğu belirlenmiştir. Bu değer SPSS ile yapılan regresyon analizinden daha düşük bir korelasyon kat sayısı bulunmuştur. Fakat yine orta düzeyde bir ilişki olduğu söylenebilecektir.

Ridge regresyon analizi ile oluşturulan performans tahmin modelinde Siever's yüzey sertliği ve delme oranı indeksi (DRI) parametrelerinin 0'a yaklaştırıldığı dolayısıyla bu parametrelerin ilerleme hızı üzerinde daha az etkileri olduğu görülmektedir. Oysaki bu parametrelerin kat sayılarının azalması ile R^2 değerinin 0,39'a

düştüğü görülmektedir. Aslında bu sonuç Siever's yüzey sertliği ve delme oranı indeksi (DRI) değerlerinin ilerleme hızı üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

Lasso regresyon analizinde ise yoğunluk ve su içeriği parametrelerinin kat sayılarının 0 olarak belirlendiği ve bu değerlerin ilerleme hızı üzerinde etkisinin az olduğu öne sürülmektedir. Fakat bu değerlerin performans tahmin modelinden çıkarılması ile elde edilen R^2 değeri 0,29 olarak belirlenmiştir. Bu değer aralarında istatistiksel anlamda ilişki olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla yoğunluk ve su içeriği parametrelerinin ilerleme hızı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak her iki tünel içinde istatistiksel analizler göz önüne alındığında kayaçların fiziko-mekanik özellikleri ile ilerleme hızı arasında anlamlı ilişkiler olduğu görülmektedir. Korelasyon kat sayısının 0,35'e eşit veya daha büyük değerlerde bulunması istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (Snedecor and Cochran, 1967).

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro tünel projesinde yapılan analizler sonucu elde edilen performans tahmin modelinin R^2 değerleri genel olarak yüksek bulunmuştur. Burada yapılan çalışmalar için alınan numune sayısının az olması elde edilen modellerin güvenilirliğini düşürmüştür.

Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tünelinden alınan numuneler ile oluşturulan performans tahmin modelinde ise daha düşük R^2 değerleri elde edilmiştir fakat oluşturulan modellerin güvenilirliği çok daha yüksektir. Bunun sebebi numune sayısının fazla olmasıdır. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneli projesinden elde edilen veriler ile oluşturulan performans tahmin modeli sonuç olarak akla daha yakın sonuçlar vermektedir. Tam cepheli tünel açma makinelerinin kazı performansını etkileyen tek parametre kayaçların fiziko-mekanik özellikleri değildir. Kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin yanı sıra kazı formasyonunun jeolojik özellikleri ve operatör becerisi de kazı performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Dolayısıyla bu durum göz önüne alındığında performans tahmin modellerinde bağımsız değişken olarak sadece kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin kullanılması lineer regresyon analizlerinde elde edilen korelasyon kat sayılarının daha doğru sonuçlar olduğunu göstermektedir.

Ridge ve Lasso regresyon analizlerinde bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerinin görülmesi için kullanılmıştır. Ridge ve Lasso regresyon analiz yöntemlerinin nasıl çalıştıkları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Her iki regresyon analiz yöntemi de bağımlı değişken üzerinde etkisinin düşük olduğu ya da çok sık tekrarlayan değerlerin modelde kat sayılarını düşürerek veya tamamen 0 yaparak modeli

daha güvenilir hale getirmek için kullanılmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında yeteri sayıda veri olmamasından kaynaklanan sebeple yakın değerlere sahip olan parametreler cezalandırılmış veya modelde çıkarılmıştır. Bu durumda elde edilen yeni modelin korelasyon kat sayısına bakılarak yorumlamalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında Ridge ve Lasso regresyon analizleri sayesinde yoğunluk, nokta yükleme dayanımı ve su içeriği parametrelerinin ilerleme hızı üzerinde etkili parametreler olduğuna böylece karar verilmiştir. Ayrıca diğer bağımsız değişken parametreler de modelde kullanılarak zaten ilerleme hızı üzerinde etkili parametreler olduğu gösterilmiştir.

SPSS ve python ile yapılan regresyon analizleri ile Ridge ve Lasso regresyon analizleri sonucu hem modellerin güvenilirliği hem de korelasyon katsayıları göz önüne alındığında en iyi sonuç veren tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modeli SPSS programı ile yapılmış olan regresyon analizi sonucu elde edilen modeldir. Bu model araştırma sonuçları kısmında sunulmuş olan “4.5” numaralı eşitliktir. Bu eşitlik ise;

$$\dot{IH}=(-31,01YO)+0,11PO-0,1SU+0,29NYD-0,05S_J+0,31S_{20}+0,04DRI+91,92$$

Sunulan tam cepheli tünel açma makinesi performans tahmin modelinde yer alan bağımsız değişken parametreleri elde etmek için nispeten daha kolay laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmektedir.

Phyton ile yapılan doğrusal olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen modelin korelasyon katsayısı yüksek olarak bulunmuştur ($R^2=0,814$). Fakat modelin çok karmaşık olması kullanılabilirliğini zorlaştırmaktadır.

5.2 Öneriler

Yapılan tez çalışması kapsamında kayaçların fiziko-mekanik özellikleri ile ilerleme hızı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda tam cepheli tünel açma makinelerinin ilerleme hızlarının tahmin edilmesi için sadece kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin kullanılması belli oranda bu ilişkiyi açıklamaktadır. Daha doğru sonuçların elde edilmesi için kazılacak formasyonların ayrıca jeolojik özelliklerinin belirlenerek performans tahmin modelinde bağımsız değişken olarak kullanılması iyi olacaktır.

Tam cepheli tünel açma makinesinin ilerleme hızının tahmin edilmesi için sadece kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin bağımsız değişken olarak kullanılacağı

performans tahmin modellerinde numune sayısı çok düşük olmamalıdır. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesinden alınan 13 numune güvenilir bir istatistiksel model oluşturmak için yeterli olmamıştır. Hadim-Afşar-Bağbaşı Su İkmal tüneline alınan 76 numune ile güvenilir bir performans tahmin modeli oluşturulmuştur. Dolayısıyla alınacak numune sayısı bu değerler göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.

Tam cepheli tünel açma makinelerinin performansını etkileyen parametreler göz önüne alındığında operatör tecrübesi gibi çevresel şartlarında bulunduğu unutulmamalı ve etkisinin nicelikleştirilebilmesi veya sayısal bir değer olarak belirlenmesi için çalışmalar yürütülmesi daha kesin performans tahmin modelleri elde etmek için kullanılabilir.

Doğrusal olmayan regresyon analizleri ile daha yüksek korelasyon katsayısı olan performans tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu konuda daha fazla çalışma yapılarak daha az karmaşık olan ve yine yüksek korelasyon katsayısı elde edilebilecek modeller oluşturmak için çalışmalar yapılması iyi olacaktır.

KAYNAKLAR

Adoko, A. C., Gökçeoğlu, C., and Yağız, S., 2017. Bayesian prediction of TBM penetration rate in rock mass. *Engineering Geology*, 226, 245-256.

Anonim 1, 2021, SPSS Nedir? Nasıl Kullanılır? SPSS programı ne işe yarar? [Online], Web Adresi: <https://bulutistan.com/blog/spss-nedir-nasil-kullanilir-spss-programi-ne-ise-yarar/> [12.06.2021]

Anonim 2, 2024, Ridge regression [Online], Web Adresi: <https://medium.com/@batubilgili1907.bb/ridge-regression-ridge-regresyonu> [27.02.2024]

Anonim 3, 2023, Alternatif Regresyon Modelleri: Lasso Regresyonu [Online], Web Adresi: <https://www.veribilimiokulu.com/lasso-regresyon/> [08.09.2023]

Anonymous 1, 2023, Aç-Kapa tünel açma metodu [online], https://files.structurae.net/files/350high/f001341/citytunnel_malmoe_3_lg.jpg [Ziyaret Tarihi: 21 Temmuz 2023]

Anonymous 2, 2023, Kollu galeri açma makinesi [online], <http://tunnelingonline.com/wp-content/uploads/2013/07/road-1.jpg> [Ziyaret Tarihi: 21 Temmuz 2023]

Anonymous 3, 2023, Sürekli kazıcı [online], <https://s7d2.scene7.com/is/image/Caterpillar/C757873> [Ziyaret Tarihi: 21 Temmuz 2023]

Anonymous 4, 2023, Kalkansız TBM [online], <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/gripper-tbm/> [Ziyaret Tarihi: 22 Temmuz 2023]

Anonymous 5, 2023, Kalkanlı TBM [online], <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/mixshield/> [Ziyaret Tarihi: 22 Temmuz 2023]

Anonymous 6, 2023, EPB-TBM [online], <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/epb-shield/> [Ziyaret Tarihi: 22 Temmuz 2023]

Anonymous 7, 2023, Çift tüp açılmış tünel [online], <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/epb-shield/> [Ziyaret Tarihi: 22 Temmuz 2023]

Armetti, G., Migliazza, M.R., Ferrari, F., Berti, A., Padovese, P., 2018. Geological and mechanical rock mass conditions for TBM performance prediction. The case of “La Maddalena” exploratory tunnel, Chiomonte (Italy). *Tunnell. Undergr. Space Technol.* 77, 115–126.

- Avunduk, E., Çopur, H. (2017) Emprical modeling for predicting excavation performance of EPB TBM based on soil properties. *Tunneling and Underground Space Technology*, 5-1, 341-353
- Aydın, D., 2019, Zor koşullarda TBM ile açılan tünellerin performans analizi: Silvan ve Nurdağı tünelleri, Doktora tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 246 s.
- Ayvaz, U., Çoban, A., Gürüler, H., Peker, M., 2016, Phyton dilinin öz nitelikleri, programlama eğitiminde ve yazılım dünyasındaki yeri, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla.
- Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H. ve Tumaç, D., 2007, Tünel açma makinelerinin (TBM) tam boyutlu kesme deneyi ile performans tahmini. I. Maden Makineleri Sempozyumu, Mayıs 2007, Kütahya, 61-70.
- Balcı, C., 2009., Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: a case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey. *Tunneling and Underground Space Technology*, 24, 423-435.
- Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H., ve Tumaç, D., 2009, Tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) performans tahmini ve optimizasyonu, TÜBİTAK Araştırma Projesi Nihai Raporu, Proje No: 106M298.
- Barton, N. 2000. TBM Tunneling Jointed and Faulted Rocks, Chapter 18, 63-64.
- Bell, F.G., 1994, *Engineering in Rock Mass*, Great Britain: Butterworths.
- Benato, A. and Oreste, P., 2015, Prediction of penetration per revolution in TBM tunneling as a function of intact rock and rock mass characteristics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 74, 119-127.
- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., Feridunoğlu, C., ve Tumaç, D., 2006, Kaya kazı makinelerinin (galeri ve tünel açma makineleri gibi) optimum seçiminde kullanılmak üzere taşınabilir bir test cihazının geliştirilmesi, TÜBİTAK Araştırma Projesi Nihai Rapor, Proje No: MİSAG-274 (104M013).
- Boyd, R.J., 1986, Hard rock continuous mining machine: Mobile Miner MM-120. IN. *Rock excavation engineering seminar* (Howarth, D. F. et al., eds.). Dept. Mining and Met. Eng, University of Quee~Lsland.
- Brino, G., 2015, Prediction of performance and cutter wear in rock TBM: Application to Koralm tunnel project. Master Thesis, Politecnico di Torino, Turin, 326.
- Bruland, A., 1998, Hard Rock Tunnel Boring. PhD thesis, NTNU Trondheim Norwegian University of Sciences and Technology, 5, Geology and Site Investigations.
- Bruland, A. 2014. The NTNU Prediction model for TBM performance. *Norwegian TBM Tunnelling*, volume 23, 179–189.

- Büchi, E., 1984. Einfluss Geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine. PhD Thesis, University of Bern.
- Cornejo, L., 2001, Tunnel mechanical excavation in soft ground its historical evolution, ITA-AITES World Tunnel Congress, Geoconsult, Madrid, Spain.
- Çopur, H., Aydın, H., Bilgin, N., Balci, C., Tumaç, D., Dayanç, C., 2014, Predicting Performance of EPB TBMs by Using Stochastic Model Implemented Into a Deterministic Model. Tunneling and Underground Space Technology 1-14.
- Dahl, F., 2003, DRI, BWI, CLI Standards, NTNU, Angleggsdrift, Trondheim, Norway.
- Dahl F., Bruland A., Jakobsen P., D., Nilsen B., Grøv E., 2012, Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. Tunn Undergr Space Technol 28:150–158
- Dayanç, C., 2011, Pasa basınçlı tünel açma makinesinin (EPB) risk analizi ile performans tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 65 s.
- Devlet Su İşleri (DSİ), 2011, konya-Çumra III. Merhale Projesi (KOP) Afşar-Bağbaşı Derivasyonu, Cilt 2, 342
- Dierbach, C., 2012, Introduction to computes science using Phyton: A computational problem solving focus, Wiley Publishing,
- Fernandez, E., 2007, The Madrid renewal inner ring calle 30 with the largest EPB machines, planning and results, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Toronto, Canada, June 11-13, 769-783.
- Gong Q.M. ve Zhao J. 2009. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46: 8 –18.
- Graham, P. C., 1976, Rock exploration for machine manufacturers, Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, South Africa, Nov.,173-180.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., Xu, S. 2008. Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control. Taylor ve Francis, s. 363-378.
- Hamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J., 2010, Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system, Tunnelling and Underground Space Technology, 25, 333-345.
- Hassanpour, J., Rostami, J. ve Zhao, J. 2011. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. Tunnelling and Underground Space Technology, 26: 595–603.

- Herrenknecht, M., Rehm, U., 2003, Earth Pressure Blanced Shield Technology. Soft Ground and Hard Rock Mechanical Tunneling Technology Seminar, Internal Lecture in Colorado School of Mines. USA.
- ISRM, 1981. Rock characterization testing and monitoring; suggested methods, E. T. Brown, Pergamon Pres. Oxford, 211.
- ITA, 2021, Tünelcilik tarihi [online], <https://tunnel.ita-aite.org/en/cases-histories> [Ziyaret tarihi: 16 Nisan 2021].
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), 2017, Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane) -Taşdelen-Yenidoğan Metrosu İnşaat ve Elektromekanik İşler Projesi, 154
- Janbaz, S., 2017, Development Of A Production Estimation Model For Tunnel Boring Machines (TBMS), PhD Thesis, The University Of Texas At Arlington, Texas, ABD.
- King, J., 2000, Our century of tunnelling and where we go now, British Tunnel Society, The 2000 Harding Lecture, Tunnels And Tunnelling International.
- Koç, K., O., 2019, Phyton üzerinden derin öğrenme algoritmaları kullanılarak deri görüntüsünden cilt hastalıklarının tespit edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bolu, 52.
- Kolymbas, D., 2005, Tunnelling and Tunnel Mechanics A Rational Approach to Tunnelling, Springer- Berlin-Heidelberg, 436.
- Koopialipoor M., Fallah A., Armaghani D.J., 2018, Three hybrid intelligent models in estimating flyrock distance resulting from blasting. Eng Comput. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0596-4>
- Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C. O., 2007, Tünel ve Kuyu Açma, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No:145, 310, İzmir.
- Liu, Q., Liu, J., Pan, Y., Kong, X. and Hong, K., 2017, A case study of TBM performance prediction using a Chinese rock mass classification system – Hydropower Classification (HC) method. Tunnelling and Underground Space Technology, 65, 140-154.
- Maidl, B., Schmid, L. and Ritz, W., Herrenknecht, M., 2008, Hard Rock Tunnel Boring Machines, Ernst & Sohn, Berlin
- Malkoç, B., 2012, Temel bilimler ve mühendislik eğitiminde programlama dili olarak Phyton, 14. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 201.
- Namlı, M., Bilgin, N. 2017, A model to Predict Daily Advance Rates of EPB-TBMs in a Complex geology in İstanbul. Tunneling and Undergroun Space Technology. 43-52.

- Nuti, M., 2017, TBM performance analysis in hard rock: A case study on “La Maddalena” exploratory tunnel. Master Thesis, Politecnico di Torino, Turin, 209.
- O’Carroll, J. B., 2005, A guide to planning constructing and supervising earth Pressure balance TBM tunneling, 2002 William Barclay Parsons Fellowship, (Monograph 18), New York, USA: Parsons Brinckherhoff.
- Oğul, K., 2017, Yüksek hızlı demiryollarında jeolojik-jeoteknik çalışmalar ve tünel uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 210.
- Özgül, N., 2001, Stratigrafi ve İstanbul paleozoyiğinin bazı yapısal özellikleri, *Türk Yerbilimleri Dergisi*, 21, 1
- Pakes, G., 1991, Selection of methods, *World Tunnelling*, 4 (9), 399-403.
- Ramezanzadeh, A., 2005, Performance analysis and development of new models for performance prediction on hard rock TBMs in rock mass, Le Grande Docteur Thesis, No d’ordre 2005 ISAL 0049, *Institute National des Sciences Appliquees de Lyon, Anne’e*, 225
- Ramezanzadeh, A. 2006. Performance analysis and development of new model for performance prediction of hard rock TBMs in rock mass. PhD thesis. *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France*, 225
- Rostami, J., and Özdemir, L., 1993, New model for performance prediction of hard rock TBMs, *Proceedings- Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, 793-809.
- Rostami, J., Ozdemir, L., and Neil, D.M., 1994, Performance prediction a key issue in mechanical hard rock mining. *Mining Engineering*, 24, 1263-1267.
- Rostami, J., Özdemir, L. ve Nilsen L. 1996. Comparison between CSM and NTH hard Rock TBM performance prediction models. In *The Annual Conference of the Institution of Shaft Drilling Technology (ISDT)*, 1-3 May, Las Vegas, 1 – 11.
- Rostami, J., 2016. Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground. *Tunnelling and Underground Space Technology* 57, 173–182.
- Roxborough, F. F., 1973. Cutting rock with picks, *The Mining Engineer*, June, 445-452.
- Sakcalı. A., 2018, Zayıf kayalarda TBM ile kazılan tünellerin 3-boyutlu sayısal modellemesi, Doktora Tezi, *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 190.
- Sapigni, M., Berti, M. Bethaz, E., Busillo A. and Cardone G., 2002, TBM performance estimation using rock mass classifications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 771–788.

- Stack, B., 1995, Encyclopaedia of tunnelling mining and drilling equipment, 1-2, Mining Hobart Muden Publishing Company, Hobart, Australia, pp. 1911.
- Snedecor, G., W., Cochran, W., G., 1967, Statistical methods, The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 593.
- Tarkoy, P., J., 1974, Predicting tunnel boring machine (TBM) penetration rates and cutter costs in selected rock types, Canadian Department of Energy, Mines and Resources, 263-274
- Thuro, K. and Spaun, G., 1996, Introducing the 'destruction Work' As a New Rock Property of Toughness Referring to Drillability In Conventional Drill- And Blast Tunnelling, International rock mechanic symposium (EUROCK 96), Turin-Italy, 1996-2088
- Tumaç, D., 2010, Değişik kayaç ve disk keskinin kayaç Kazılabilirliği üzerine etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 356.
- Ünlü, K., 2010, Bir demiryolu tünelinin tahkimat analizi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 144.
- Ünlütepe, A., and Messing, M., 2005, Tünel Ölçme Uygulamalarında Son Yenilikler, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2, 23-25.
- Yağız, S., 2017, New equations for predicting the field penetration index of tunnel boring machines in fractured rock mass, *Arabian Journal of Geoscience*, 10, 1-13
- Yaralı, O., Duru, H., Sakız, U., ve Aydın, H., 2015, Kayaçlar İçin Spesifik Enerji İle Delme Oranı İndeksi (DRI), Mekanik Özellikleri, Cerchar Aşınma İndeksi Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi. *MT Bilimsel*, 7, 15-31.
- Yıldırım, Ü., E. 2009, Şişen killeri ve tünel tasarımına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 135.
- Young T., Son, S., M, Kim, K. T., 2017, Comparative study of TBM performance prediction models. The 2017 World Congress on: Advances in Structural Engineering and Mechanics Korea: Seul

