

**T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**NATM VE TBM YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL OLARAK
MALİYET VE SÜRE KRİTERLERİYLE
KARŞILAŞTIRILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

A.CELAL CİNGÖZ

İSTANBUL, 2013

**T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KENTSEL SİSTEMLER VE ULAŞTIRMA YÖNETİMİ**

**NATM VE TBM YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL OLARAK
MALİYET VE SÜRE KRİTERLERİYLE
KARŞILAŞTIRILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

A.CELAL CİNGÖZ

Tez Danışmanı: DR. VEYSEL ARLI

İSTANBUL, 2013

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KENTSEL SİSTEMLER VE ULAŞTIRMA YÖNETİMİ

Tezin Adı: Natm Ve Tbm Yöntemlerinin Deneysel Olarak Maliyet Ve Süre Kriterleriyle
Karşılaştırılması
Öğrencinin Adı Soyadı: Abdul Celal CİNGÖZ
Tez Savunma Tarihi: 18.04.2013

Bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğu Fen Bilimleri
Enstitüsü tarafından onaylanmıştır.

Doç.Dr. Faik Tunç BOZBURA
Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Mustafa ILICALI
Program Koordinatörü

Bu Tez tarafımızca okunmuş, nitelik ve içerik açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak
yeterli görülmüş ve kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmzalar

Tez Danışmanı
Dr. Veysel ARLI

.....

Üye
Dr. Nilgün CAMKESEN

.....

Üye
Prof.Dr. Mustafa ILICALI

.....

ÖNSÖZ

Bana bu fırsatı sundukları için Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Yüksek Lisans Programı Koordinatörü Sayın Prof. Dr. Mustafa ILICALI ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Nilgün CAMKESEN Hocalarıma, tez çalışmam sırasında bana yol gösteren ve her türlü yardımı sağlayan değerli Hocam Dr. Veysel ARLI 'ya, aileme, Selin GÜREL 'e, tez araştırmalarımnda ve kaynaklar konusunda desteklerini eksik etmeyen mesai arkadaşlarıma, İnşaat Mühendisi Halil ABAKAY'a, Elektrik Mühendisi Yavuz TAŞ'a, İnşaat Mühendisi Osman ŞAHİN'e, Kadıköy-Kartal Metro Hattı teknik ekibine ve tezde emeği geçen tüm arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

A. Celal CİNGÖZ

İstanbul, 2013

ÖZET

NATM VE TBM YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL OLARAK MALİYET VE SÜRE KRİTERLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

A.Celal Cingöz
Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi

Tez Danışmanı: Dr. Veysel Arlı

Nisan 2013, 105 sayfa

Günümüzde, artan ulaşım sorununu çözmek için kurumlar ulaşım projeleri için bütçelerinde ayrılan payı artırmak durumunda kalmışlardır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) de İstanbul'un ulaşım sorununu çözmek için toplu taşımacılığa önem vermektedir. Belediye tarafından metro yatırımları bu noktada en kalıcı çözüm olarak görülmektedir. Metro projelerinde izlenen temel politika inşaatın bir an önce tamamlanarak ulaşım hattının işletmeye açılmasıdır. Karmaşık ve birbirini etkileyen birçok iş kaleminin yer aldığı metro inşaatlarında tünel kazıları, kaba inşaatın büyük bir kısmını oluşturan, işin süresi ve maliyetini önemli ölçüde etkileyen önemli iş kalemleridir. Bu çalışmada, Kadıköy Kartal Metrosu inşaatı, ele alınarak yapım metodu seçiminin önemi ve proje süresine etkileri incelenecektir.

Tünel yapımında kullanılmakta olan iki önemli metot, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ve Tünel Açma Makinası (TBM), karşılaştırılarak süre performansına etkileri neticesinde maliyetler irdelenecektir. Metro tünelleri yapımı sırasında tespit edilen veriler dikkate alınarak hangi metodun hangi şartlar altında metro inşaatları için daha etkili olacağı araştırılacaktır.

Ekonomik ve teknik açıdan en uygun metro tüneli projesini gerçekleştirmek için gerekli olan yöntem seçimini araştırıp ve seçilmiş yöntemlerin analizini yaparak yöntem seçiminde yapılacak çalışmalara yardımcı olmasını isterim.

Anahtar Kelimeler: NATM, TBM, Tünel Açma Yöntemi, Metro Tünelleri

ABSTRACT

EXPERIMENTAL COMPARISON OF NATM AND TBM METHODS WITH IN TIME AND COST CRITERIA

A.Celal Cingöz

Urban Systems and Transportation Management

Thesis Supervisor: Dr. Veysel Arlı

April 2013, 105 page

Nowadays, institutions have to increase the share of their budgets for transportation projects to solve the increasing transportation problem. Istanbul Metropolitan Municipality (IBB) make a point of public transportation to solve the transportation problem of Istanbul. The municipality see the Metro investments as a permanent solution at this point. In Metro projects, the basic policy is completing the construction as soon as possible and opening the line immediately. In many of metro tunnel constructions which include much complex and interactive factors, excavations, make up a large portion of overall construction, work time and cost are significantly the important business items. In this study, the importance of construction method and it's effect on Project during the construction are handled.

The two main methods used in the construction of the tunnel, the New Austrian Tunneling Method (NATM) and the Tunnel Boring Machine (TBM), comparing the costs as a result of the effects of performance. To used the detected data during the construction of the subway tunnels, which conditions under which the method will be more effective for the metro construction will be investigated.

Economic and technical aspects of the project are required to perform the most appropriate method of selection of the subway tunnel investigate methods and selected by choosing the method of analysis would be helpful for future studies.

Keywords: NATM, TBM, Tunnelling Method, Subway tunnels

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----|
| TABLolar | x |
| ŞEKİLLER | xi |
| KISALTMALAR | xvi |
| 1. GİRİŞ | 8 |
| 2. TÜNELLER VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ | 9 |
| 2.1 DÜNYADA TÜNELLER VE TÜNEL AÇMA TEKNOLOJİLERİ | 9 |
| 2.2 TÜRKİYE'DE TÜNEL TARİHİNİN GELİŞİMİ | 22 |
| 2.3 GÜNÜMÜZDE TÜNELCİLİK | 25 |
| 2.4 TÜNEL AÇMA VE İKSA TEKNOLOJİLERİ | 26 |
| 2.4.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) Tarihsel Süreci | 26 |
| 2.4.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi | 31 |
| 2.4.2.1 NATM Yönteminin Prensipleri | 31 |
| 2.4.2.2 NATM Yönteminin Kullanım Alanları | 35 |
| 2.4.2.3 NATM Yönteminin Üstünlükleri ve Zayıflıkları | 37 |
| 2.4.2.4 NATM Yönteminin Kazı Yöntemleri | 38 |
| 2.4.2.5 NATM Yöntemi Tünel Destek Sistemleri | 43 |
| 2.4.2.6 NATM Sistemi Uygulaması | 47 |
| 2.4.3 Tünel Delme Makinesi (TBM) Yöntemi ve Tarihsel Gelişimi | 50 |
| 2.4.4 Tam Cephe Tünel Açma Makinaları (Tbm) (YTÜ Ders Notları) | 54 |
| 2.4.4.1 Tbm'lerin Yapısı | 55 |
| 2.4.4.2 Tbm'lerin Sınıflandırılması | 58 |
| 2.4.4.3 Sert Kayaçta Çalışan Tünel Açma Makinaları | 59 |
| 2.4.4.3.1 Şiltsiz (Gripper) TBM | 59 |
| 2.4.4.3.2 Şiltli TBM | 60 |
| 2.4.4.4 Yumuşak Zeminlerde Çalışan Tünel Açma Makinaları | 62 |
| 2.4.4.4.1 Arazi Basıncını Dengeleme Makineleri (EPBM) | 63 |
| 2.4.4.4.2 Çamur (Slurry) Şildi Tipi Makinalar | 65 |
| 2.4.4.4.3 Segment Üretim Uygulama Örnekleri | 67 |
| 2.4.5 Aç-Kapa Yöntemi | 70 |
| 3. KAYA KÜTLE SINIFLAMALARI | 72 |
| 3.1 TAŞ (sağlam kaya-intact rock) | 73 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.2 | KAYA (Rock) | 74 |
| 3.3 | SÜREKSİZLİK (Discontinuity)..... | 74 |
| 3.4 | TEK EKSENLİ BASMA DAYANIMI..... | 74 |
| 3.5 | RQD YÖNTEMİ SEÇME ESASLARI | 75 |
| 4. | ÖRNEK ÇALIŞMA: KADIKÖY KARTAL METROSU PROJESİ | 76 |
| 4.1 | İSTANBUL VE METRO..... | 76 |
| 4.2 | İSTANBUL 'DA RAYLI SİSTEMLER ve ÖNCELİKLERİ | 78 |
| 4.3 | ÖRNEK ÇALIŞMA PROJESİNE GENEL BAKIŞ | 79 |
| 4.3.1 | Projenin Tarihçesi ve Özellikleri | 80 |
| 4.3.2 | Kadıköy-Kartal Metro Projesinin Jeolojik Durumu | 82 |
| 4.3.3 | Çalışma Girdileri..... | 83 |
| 4.3.4 | NATM ve TBM Tünel Özellikleri ile İmalat Döngüsü | 84 |
| 4.3.5 | Projede Kullanılan Natm Tünel Tiplerine Ait Rayiç Miktarları | 85 |
| 4.3.6 | NATM ve TBM Tünel Zemin Tiplerine Göre İş Döngüleri..... | 87 |
| 4.3.6.1 | Anahat Tip Tünel Çalışmasında Zeminlere Göre İş Döngüleri ... | 87 |
| 4.3.6.2 | P1 Tipi Tünel Çalışmasında Zeminlere Göre İş Döngüleri..... | 90 |
| 4.3.6.3 | T1 Tipi Tünel Çalışmasında Zeminlere Göre İş Döngüleri | 92 |
| 4.3.7 | NATM ve TBM İle Açılan Tünellerin Zemine Göre İlerleme Hızı.... | 94 |
| 4.3.8 | NATM VE TBM Zemin Durumu Ve Tünel Konumları.. | 95 |
| 4.3.9 | Yapım Maliyetleri Açısından NATM ve TBM | 100 |
| 5. | SONUÇ..... | 103 |
| 6. | EK..... | 106 |
| | KAYNAKÇA | 109 |

TABLULAR

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1 Dünyada inşa edilen en önemli ilk 10 Demiryolu ve Metro Tünelleri | 22 |
| Tablo 3.1 RQD kaya kalite sınıflaması (Deere, 1964)..... | 72 |
| Tablo 3.2 Tek eksenli basma dayanımına göre sınıflandırma..... | 74 |
| Tablo 4.1 2012 İBB verileriyle metropollerde günlük taşınan yolcular | 76 |
| Tablo 4.2 Demiryolu taşımacılığının toplam taşımacılığa oranı..... | 77 |
| Tablo 4.3 Demiryolu taşımacılığının toplam taşımacılığa oranı..... | 77 |
| Tablo 4.4 Metro Hatları ve Hat uzunlukları..... | 78 |
| Tablo 4.5 Devam Eden Hatlar Ve Uzunlukları..... | 79 |
| Tablo 4.6 Jeolojik Durum | 82 |
| Tablo 4.7 Tünel Tiplerine Ait Rayiçler..... | 85 |
| Tablo 4.8 Projede Kullanılan TBM Tünel İnşaatına Ait Rayiçler | 86 |
| Tablo 4.9 TBM Yöntemi İle Tünel Yapım Döngüsü..... | 87 |
| Tablo 4.10 Anahat Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin İş Döngüsü | 88 |
| Tablo 4.11 Anahat Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin İş Döngüsü..... | 89 |
| Tablo 4.12 Anahat Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin İş Döngüsü | 89 |
| Tablo 4.13 P1 Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin..... | 90 |
| Tablo 4.14 P1 Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin | 91 |
| Tablo 4.15 P1 Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin (1 mt)..... | 91 |
| Tablo 4.16 T1 Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin (1 mt)..... | 92 |
| Tablo 4.17 T1 Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin (1 mt) | 93 |
| Tablo 4.18 T1 Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin..... | 93 |
| Tablo 4.19 Gerçekleşen Natm ve TBM Günlük İlerleme Hızları | 94 |
| Tablo 4.20 Natm Ve Tbm İş Programları Zemin Durumu Ve Konum..... | 95 |
| Tablo 4.21 Natm İş Süreleri | 96 |

| | |
|--|-----|
| Tablo 4.22 Tbm İş Süreleri | 98 |
| Tablo 4.23 Yöntemlerine Göre Proje Gerçekleşme Süreleri | 99 |
| Tablo 4.24 A1.a Destek..... | 100 |
| Tablo 4.25 A1.b Destek | 100 |
| Tablo 4.26 A2 Destek | 101 |
| Tablo 4.27 A3 Destek | 101 |
| Tablo 4.28 Şaft..... | 102 |
| Tablo 4.29 Maliyet Açısından Fark Tutarları | 102 |
| Tablo 5.1 1 yıllık proje gecikme bedeli maliyet hesabı | 104 |
| Tablo 5.2 21 km'lik bir güzergâhtaki yakıt tasarrufu | 104 |
| Tablo 6.1 Natm (4 Ekip Kazı Planına Göre) Tbm (2 Tbm İle Kazı Planına Göre) | 106 |
| Tablo 6.2 Natm (16 Ekip Kazı Planına Göre) Tbm (2 Tbm İle Kazı Planına Göre) . | 107 |
| Tablo 6.3 İş Programları Sonucunda Elde Edilen Gelir Kaybı Hesabı..... | 108 |

ŞEKİLLER

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1 Ahşap malzeme ile tünel desteklenmesi (Fukushima, 1975)..... | 9 |
| Şekil 2.2 Demir destek elemanları ile tünel desteklenmesi (Fukushima, 1975) | 10 |
| Şekil 2.3 Mal-Passe tüneline görünüm 11 | 11 |
| Şekil 2.4 Tranguay-en Bony tüneline görünüm..... 11 | 11 |
| Şekil 2.5 Bourgogne kanalındaki Poulli tüneline görünüm 12 | 12 |
| Şekil 2.6 Pennsylvania, Schuylkill kanalındaki tüneline görünümü..... 12 | 12 |
| Şekil 2.7 Thames nehri altından geçen tüneline görünümü 13 | 13 |
| Şekil 2.8 Terre Noire hattındaki tüneline görünümü 13 | 13 |
| Şekil 2.9 Mont Cenis tüneline görünümü 14 | 14 |
| Şekil 2.10 Londra Metrosu'nda aç-kapa yöntemi uygulaması..... 15 | 15 |
| Şekil 2.11 New York Metrosundan görünüm 15 | 15 |
| Şekil 2.12 Saint-Gothard çift hat demiryolu tüneline görünüm..... 16 | 16 |
| Şekil 2.13 Simplon-I tüneline görünüm..... 16 | 16 |
| Şekil 2.14 New Cascade tüneline 17 | 17 |
| Şekil 2.15 Apennine tüneline..... 17 | 17 |
| Şekil 2.16 Utah tüneline görünüm 17 | 17 |
| Şekil 2.17 Manş tüneline görünüm 19 | 19 |
| Şekil 2.18 Seikan tüneline 20 | 20 |
| Şekil 2.19 San Gottardo tüneline 21 | 21 |
| Şekil 2.20 Türkiye demiryollarına ait tünellerden görünüm..... 23 | 23 |
| Şekil 2.21 Galata-Pera arasındaki tüneline 23 | 23 |
| Şekil 2.22 Yıl Selatin tüneline görünüm..... 24 | 24 |
| Şekil 2.23 Nefise Akçelik (Hapan) tüneline görünüm..... 24 | 24 |
| Şekil 2.24 Bolu dağı tüneline görünüm 25 | 25 |

| | |
|---|----|
| Şekil 2.25 Tünel açma tekniklerinden genel bir görünüm | 26 |
| Şekil 2.26 NATM ile inşa edilen tünelden görünümler | 27 |
| Şekil 2.27 Frankfurt Metrosu, NATM ile yapım aşamalarından görünüm..... | 28 |
| Şekil 2.28 Russia Wharf Binası altından geçen Russia Wharf tüneli | 29 |
| Şekil 2.29 Fort Canning karayolu tüneline görünüm..... | 29 |
| Şekil 2.30 Tynols Corner tüneli şemsiye borusu uygulamasından görünüm..... | 30 |
| Şekil 2.31 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki zemin iksa etkileşimi | 32 |
| Şekil 2.32 Esnek ve ince kaplamalar | 32 |
| Şekil 2.33 Yuvarlatılmış kesitler..... | 33 |
| Şekil 2.34 Kaplama yüzeyinin tamamen sarılması | 33 |
| Şekil 2.35 Püskürtme beton ve diğer kaplamalar..... | 34 |
| Şekil 2.36 Sistem deformasyon durumu | 34 |
| Şekil 2.37 Frankfurt Main Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Uygulaması | 35 |
| Şekil 2.38 Merkez Arter Metro İstasyonu, Boston | 36 |
| Şekil 2.39 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemiyle Açılmış Şaft | 36 |
| Şekil 2.40 3 Kademeli Kazı ve sağlamlaştırma işlemleri | 38 |
| Şekil 2.41 Roadheader | 39 |
| Şekil 2.42 Ters Kollu Ekskavatör | 39 |
| Şekil 2.43 Hidrolik Kırıcı..... | 39 |
| Şekil 2.44 Fresöz..... | 40 |
| Şekil 2.45 Değişik kademeli kazı çeşitleri (Sauer,1990) | 41 |
| Şekil 2.46 Kademeli Kazı Yöntemi | 42 |
| Şekil 2.47 Kademeli Kazı Örneği, Bouira Tüneli | 42 |
| Şekil 2.48 Yaş karışım püskürtme beton uygulaması (Kolymbas, 2005)..... | 44 |
| Şekil 2.49 U Profiller (Kolymbas, 2005) | 45 |
| Şekil 2.50 Kafes kirişler..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Şekil 2.51 Fiziksel Mekanik Ankraj | 46 |
| Şekil 2.52 1.adım: Tünel kazısı..... | 47 |
| Şekil 2.53 2.adım: 1.kat çelik hasırın yerleştirilmesi..... | 48 |
| Şekil 2.54 3.adım: Çelik kafes iksaların yerleştirilmesi..... | 48 |
| Şekil 2.55 4.adım: İlk tabaka püskürtme betonu..... | 49 |
| Şekil 2.56 5.adım: İkinci kat hasır çeliğin yerleştirilmesi..... | 49 |
| Şekil 2.57 6.adım: Kazı destekleme işleminin sonlanması | 50 |
| Şekil 2.58 TBM görünümü | 51 |
| Şekil 2.59 Hoosac tüneline görünüm | 51 |
| Şekil 2.60 İlk zamanlarında TBM makinesinin elemanları | 52 |
| Şekil 2.61 Gotthard Base Tünelinde kullanılan TBM, İsviçre..... | 54 |
| Şekil 2.62 Ön Yüz Ve Kesiciler | 56 |
| Şekil 2.63 Tbm gövde kısmı şeması | 57 |
| Şekil 2.64 Tbm Kuyruk kısmı Görünüşü | 57 |
| Şekil 2.65 Zemin Formasyonuna Göre Sınıflandırma | 58 |
| Şekil 2.66 Zemin formasyonuna göre tbm seçim doğrusu..... | 58 |
| Şekil 2.67 Kalkansız TBM..... | 59 |
| Şekil 2.68 Tek Kalkanlı TBM..... | 60 |
| Şekil 2.69 Çift Şiltli TBM..... | 62 |
| Şekil 2.70 Yumuşak zemin TBM..... | 63 |
| Şekil 2.71 EPB Makinesi Prensip Şeması..... | 64 |
| Şekil 2.72 Çamur Makinesi (slurry machines)..... | 65 |
| Şekil 2.73 Çamur (Slurry) Şildi Tipi Makinalar | 66 |
| Şekil 2.74 Ön üretimli (Segment) beton elemanlar ve montaj aşamaları | 67 |
| Şekil 2.75 Ön üretimli (Segment) beton elemanlar ve montaj aşamaları | 68 |
| Şekil 2.76 TBM içine alınan iç kaplama beton eleman | 68 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 2.77 Ön üretimli (Segment) beton elemanlar ve montaj aşamaları | 69 |
| Şekil 2.78 Ön üretimli (Segment) beton elemanlar ve montaj aşamaları | 69 |
| Şekil 2.79 İmalatları tamamlanan tünelden bir görünüm | 70 |
| Şekil 2.80 Aç Kapa Yöntemi | 71 |
| Şekil 2.81 Aç-kapa yöntemi ile inşa edilen tünel..... | 71 |
| Şekil 3.1 Örnek RQD tanımı ve hesaplanması (Deere, 1964) | 73 |
| Şekil 4.1 Hat Profili | 80 |
| Şekil 4.2 TBM Tünel Tip Kesiti | 87 |
| Şekil 4.3 NATM Anahat Tünel Tip Kesiti..... | 88 |
| Şekil 4.4 P1 İstasyon Tünel Tip Kesiti | 90 |
| Şekil 4.5 T1 Makas Tünel Tip Kesiti | 92 |
| Şekil 5.1 Planlanan ve gerçekleşen iş Süreleri..... | 103 |

1. GİRİŞ

Günümüzde, artan ulaşım sorununu çözmek için kurumlar ulaşım projeleri için bütçelerinde ayrılan payı artırmak durumunda kalmışlardır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) de İstanbul'un ulaşım sorununu çözmek için toplu taşımacılığa önem vermektedir. Belediye tarafından metro yatırımları bu noktada en kalıcı çözüm olarak görülmektedir. Metro projelerinde izlenen temel politika inşaatın bir an önce tamamlanarak ulaşım hattının işletmeye açılmasıdır. Karmaşık ve birbirini etkileyen birçok iş kaleminin yer aldığı metro inşaatlarında tünel kazıları, kaba inşaatın büyük bir kısmını oluşturan, işin süresi ve maliyetini önemli ölçüde etkileyen önemli iş kalemleridir. Bu çalışmada, Kadıköy Kartal Metrosu inşaatı, ele alınarak yapım metodu seçiminin önemi ve proje süresine etkileri incelenecektir.

Tünel yapımında kullanılmakta olan iki önemli metot, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ve Tünel Açma Makinası (TBM), karşılaştırılarak süre performansına etkileri neticesinde maliyetler irdelenecektir. Metro tünelleri yapımı sırasında tespit edilen veriler dikkate alınarak hangi metodun hangi şartlar altında metro inşaatları için daha etkili olacağı araştırılacaktır.

Bu çalışmadaki amacımız ekonomik ve teknik açıdan en uygun metro tüneli projesini gerçekleştirmek için gerekli olan yöntem seçimini araştırmak ve mevcut hatlarda seçilmiş yöntemlerin analizini yaparak yöntem seçiminde yapılacak çalışmalara ışık tutmaktadır.

2. TÜNELLER VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

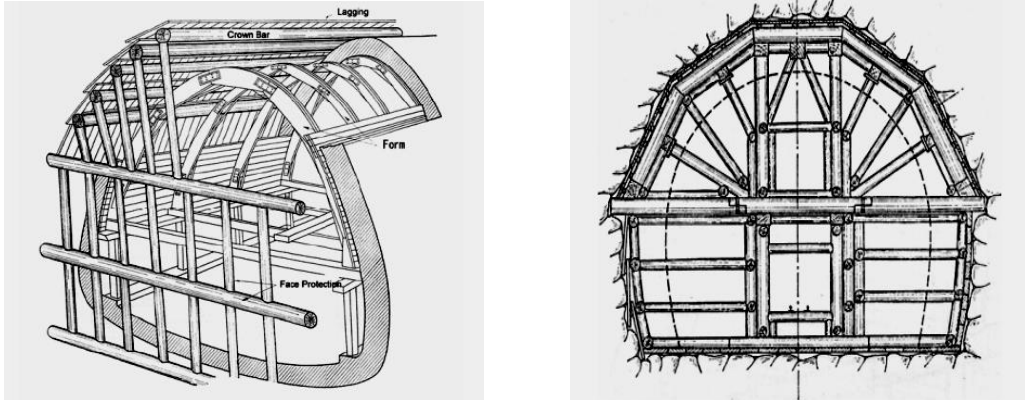
2.1 DÜNYADA TÜNELLER VE TÜNEL AÇMA TEKNOLOJİLERİNİN

GELİŞİMİNE TARİHSEL BAKIŞ

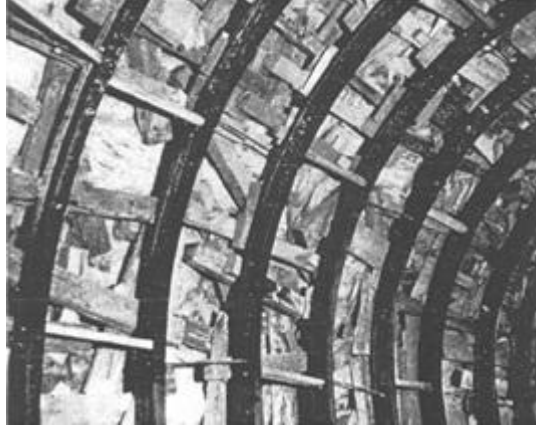
Tünel inşaatları binlerce yıl önce, insanoğlunun tünel ve mağaraları; barınma, tehlikeli düşmanlarından korunma ve avladıkları besinlerini saklamak için kazmasıyla başlamıştır. Taş devri insanları da şaft ve sürme tünelleri açmak için çakmaktaşıdan kürekli aletler yapmışlardır. Tünel açmak için; kemik, boynuz, çakmaktaşı, tahta; medeniyetin gelişmesi ile birlikte de ahşap, bronz ve demir 'den faydalanılmıştır.

M.Ö. 4000'lerde yeryüzünde ilk tünelin Babil yakınlarında, Fırat nehrinin altında 3.5x4.5 m genişliğinde üstü briketle örtülü ve 1 km uzunluğunda açıldığı rivayet edilmektedir. Sonraki dönemlerde galeri açmanın bir savaş taktiği olarak da kullanıldığı görülmektedir. Surların aşılabilmesi için galerilerin kazma ve kürek ile açıldığı bilinmektedir. Mısırlılar ve Romalılar da ağırlıklı olarak su nakletmek amacıyla tüneller açmışlardır. Günümüzden **~3000** yıl önce değerli metallerin araştırılması amacıyla, Babil'iler ve Aztekler tarafından Hindistan, Mısır ve Mezopotamya'da inşa edilen tüneller en eski tüneller arasındadır. Destekleme sistemi olarak insan gücü ile ahşap, demir destek elemanları ve bağlantılar kullanılmaktaydı. (*Fukushima, 1975*).

Şekil 2.1 Ahşap malzeme ile tünel desteklenmesi (*Fukushima, 1975*)



Şekil 2.2 Demir destek elemanları ile tünel desteklenmesi (Fukushima, 1975)



Tünel teknolojileri tarihi Fukushima (1975); Bozkurt (1987); Çınar ve Feridunoğlu (1994); Arıoğlu vd. (2008) kaynaklarından yararlanılarak aşağıda verilmiştir.

M.Ö. 3500'de ilk metal madeni çıkartma kazısı, Karadeniz kıyısında bulunan *Cavcasia*'da yapılmıştır.

M.Ö. 687'de Helen uygarlığı döneminde ilk tünelin, Sakız adasında 1600 m uzunlukta ve 0.6 m² kesitinde açıldığı bilinmektedir.

M.Ö 6.yy'da tünelin sert kayada 9 m/yıl hızla ve elle açıldığı tahmin edilmektedir.

17.yy'da gelişmeye başlayan *kanal nakliyesi*, tünelcilikte önemli gelişmelere neden olmuştur.

1679-1681 yılları arasında Fransa'da Langedog kanalını geçirmek amacıyla Mal-Passe tüneli inşa edilmiştir. Bu tünel 157 m uzunluk, 7 m genişlik ve 8 m yükseklikte olup tüflü zeminde inşa edilmiştir.

Şekil 2.3 Mal-Passe tüneline görünüm



1761’de İngiltere’de James Brodley, inşa ettiği kanalı Rossley dağının altından geçirebilmek için 1 mil uzunluğunda tünel açmıştır.

1799 yılında kanal tünellerin toplam uzunluğu 40 mili bulmuştur.

1803-1810 yılları arasında Fransa’da Saint-Quentin kanalı için ilk taş kemerli Tronguay-en Bony tüneli () ve 1824 yılında Bourgogne kanalı için Poulli tüneli inşa edilmiştir.

Şekil 2.4 Tronguay-en Bony tüneline görünüm



Şekil 2.5 Bourgogne kanalındaki Poulli tüneline görünüm



Avrupa kıtasındaki tünellerin inşasına dair gelişmeler çok geçmeden Amerika kıtasına da geçmiş, **1818** yılında Pennsylvania, Schuylkill kanalı üzerinde tünellerin inşasına başlanmıştır. İki yılda tamamlanan tüneller 5.49 m genişliğinde, 6.1 m yüksekliğinde ve 250 m uzunluğundadır.

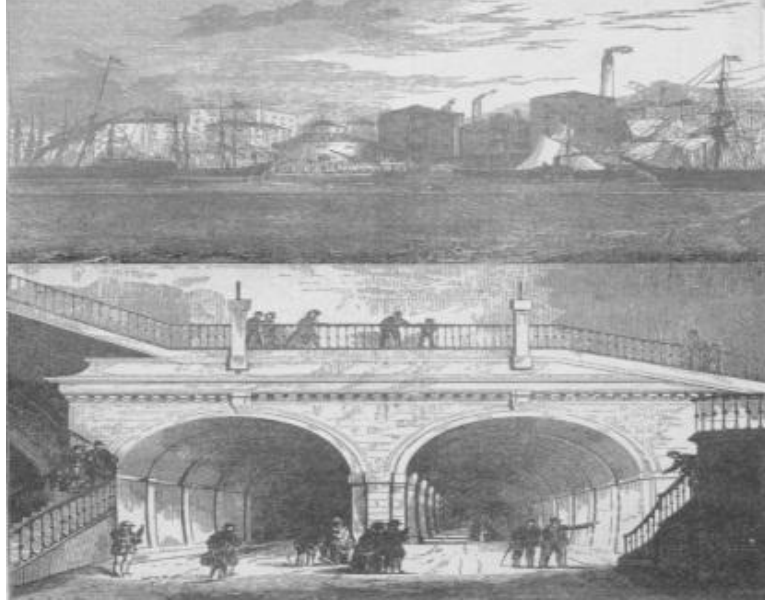
Şekil 2.6 Pennsylvania, Schuylkill kanalındaki tünellerin görünümü



1800'lerin başlarına dek sert kayadaki tüneller, arında (ayna, kaya yüzeyi) ateş yakılarak kaya ısıtıldıktan sonra, oluşan sıcak yüzeye su ve sirke püskürtülmesi ile kazılmaktaydı.

1811 yılında Fransız mühendis *Brunel*, Bukliye (kalkan) yöntemini geliştirmiş ve patentini almıştır. Brunel, yöntemini ilk kez Thames nehri (Londra) altında açılan tünellerde (**1823-1843**) uygulamıştır. Bu tüneller, boyutları 4.2 ve 4.8 m çaplarında bir ikiz tüneller olup halen kullanılmaktadır.

Şekil 2.7 Thames nehri altından geçen tünel görünümü



1826'da *ilk demiryolu tüneli* Fransa'da St. Etienne ve Lyon şehirleri arasında Terre Noire hattında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.8 Terre Noire hattındaki tünel görünümü



Fransa'yı İtalya'ya bağlayan (Fransızlar Mont Cenis, İtalyanlar Cenissio tüneli adını vermişlerdir) diğer önemli bir demiryolu tüneli 13 yılda bitirilmiştir. Uzunluğu 12.2 km ve kotu 1600 m olup, ilk etapta elle açılmaya başlanmış, daha sonra basınçlı hava yardımıyla çalışan aletler kullanılmıştır.

1830 yılında Lord Cohrane; sulu zeminlerde basınçlı havanın kullanıldığı bir kuyu ve galeri açma yöntemi geliştirmiş ve patent almıştır. Bu yöntemle tünel açma ilk kez **1939**'da Hersent tarafından Fransa'nın Loire şehrinde, **1879** yılında da Anverste şehrinde uygulanmıştır.

1846'da İtalya'da Maus tarafından tam cephe kazı yapmak üzere *ilk kazı makinesi* (TBM) geliştirilmiştir

1857-1872 yılları arası Fransa'nın Modane ve Bardonecchia arasında inşa edilen Mont Cenis demiryolu tüneli, 13.7 km uzunluğunda ve yüzeyden maksimum 1600 m derinliğindedir.

Şekil 2.9 Mont Cenis tüneli görünümü



1863 yılında dünyanın *ilk metrosu* Londra'da hizmete açılmıştır. İşletmeye alınan 6 km uzunluğundaki hattın yapımında “Aç-Kapa Yöntemi”¹ uygulanmıştır, Bu yöntem bazı farklılıklarla günümüzde de kullanılmaktadır. Sonraki yıllarda yapılan ekler ve yeni hatlarla genişleyen Londra Metrosu, bugün 12 hat ve 455 kilometrelik bir ağ üzerinde çalışan 457 metro treni ile günde 3 milyon yolcu taşımaktadır.

¹ Metro hattının geçeceği yol boyunca derin bir hendek kazılıp, hendeğin iki yanı duvarla örülüp üstü tuğla tonozla örtülerek tünel yapılıyor, sonra tünelin üstü toprakla doldurulup kapatılarak yol eski durumuna getiriliyordu.

Şekil 2.10 Londra Metrosu'nda aç-kapa yöntemi uygulaması



1868 yılında New York Metrosu Amerika kıtasının *ilk* yeraltı demiryolu ulaşım sistemi olarak hizmete açılmıştır. New York Metrosu, her yıl 1 milyardan fazla yolcu taşıyan ve 24 saat hizmet veren 23 hattıyla dünyanın en yoğun metrosudur. Bu metroda, 220,5 km'si yeraltında, 150,6 km'si yerüstünde olmak üzere toplam 371 km'lik hatta 456 istasyon bulunmaktadır.

Şekil 2.11 New York Metrosundan görünüm



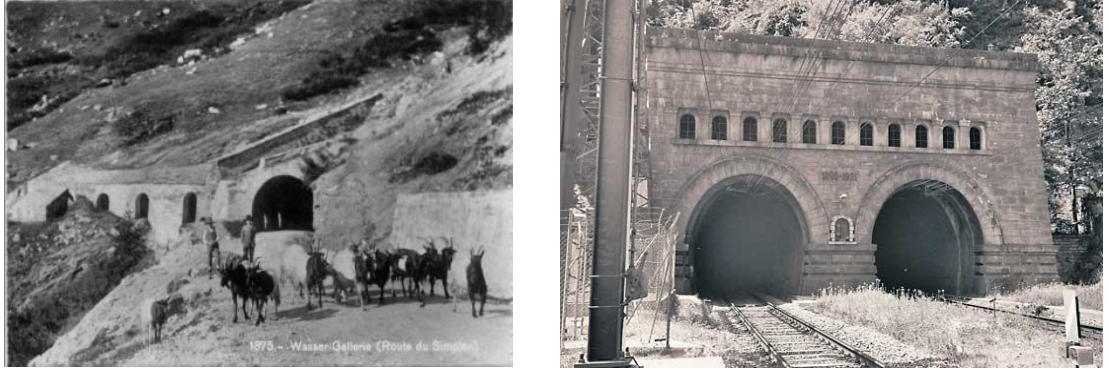
1872'de tünellerde ahşap destek yerine *çelik destek elemanları* kullanılmıştır. Yine **1872** yılında yapımına başlanan ve 7,5 yılda İtalya ile İsviçre'yi birleştiren Saint-Gothard çift hat demiryolu tüneli 15 km uzunluktadır.

Şekil 2.12 Saint-Gothard çift hat demiryolu tüneline görünüm



1898'de İtalya'yı İsviçre'ye bağlayan *dünyanın en uzun tüneli* 19825 m uzunluğundaki Simplon-I tüneline inşaatına başlanmıştır. Kaya litolojisini açıklamak için yapılan ilk teorik çalışmalardan biri, maksimum derinliği 2.1 km'lik kısımdaki Simplon tüneline yapımıyla yakından ilişkilidir (Kovari, 2003). Daha sonra bu tünelden biraz daha uzun olan Simplon-II ve Apeninler tünelleri inşa edilmiştir.

Şekil 2.13 Simplon-I tüneline görünüm

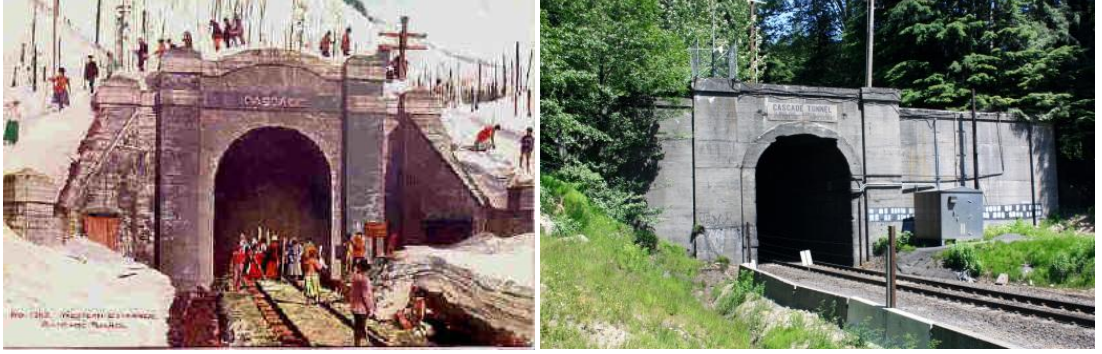


1912'de Simplon tüneline inşaatında danışman mühendis olarak çalışan Wiesman, kaya basıncı ile deformasyon arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur (Kovari, 2003).

1892-1924 döneminde Chicago, Budapeşte, Boston, Berlin, Philadelphia, Hamburg, Buenos Aires, Madrid ve Barcelona Metroları hizmete girmiştir.

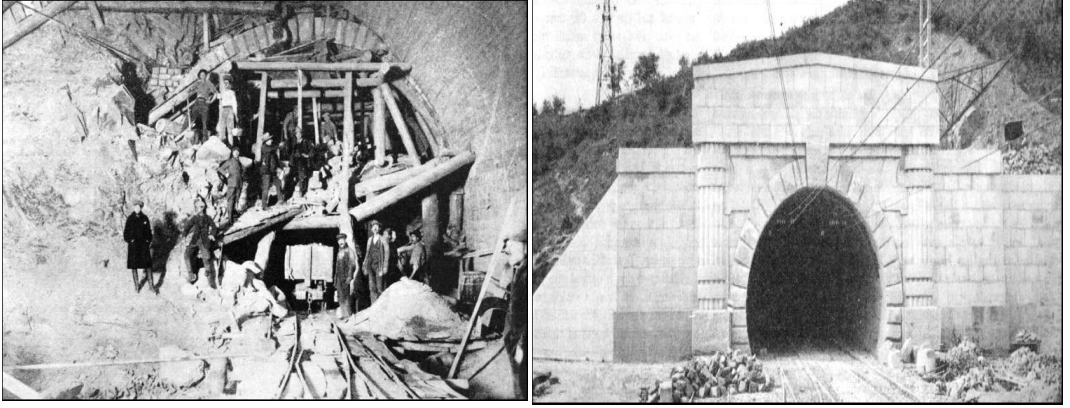
1925-1929 yılları arasında Washington Skykomish'de inşa edilen New Cascade tüneline, 12,5 km uzunluğunda ve ABD'nin o dönemdeki en uzun demiryolu tüneline.

Şekil 2.14 New Cascade tüneli



1934'de dünyanın en uzun ikinci tüneli olarak bilinen Apennine Tüneli, 35 km uzunluğundaki eski demiryolu bağlantı hattını kısaltmak için inşa edilmiştir. 18.5 km uzunluğundaki Direttissima hattını Floransa ve Bologna 'ya bağlamaktadır.

Şekil 2.15 Apennine tüneli



1936'da yapımı tamamlanan Utah tüneli (East Rim Road, California, ABD) en önemli karayolu tünellerinden biri olup 1720 m uzunluğundadır.

Şekil 2.16 Utah tüneline giren görüntüler



1950'de Avusturyalı Stini ve Rabcewicz, sonraları *Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)* olarak isimlendirilecek ve yaygın de tüm dünyada kabul görececek olan yeni tünel açma yöntemini tanıtmıştır.

TBM'ler ise 150 yıllık bir gelişmeden sonra her türlü tünel şartında mekanik kazının yapılabildiği bir noktaya gelmiştir. Eskiden sadece Delme-Patlatma Yöntemi ile açılacak formasyonlar bile artık TBM ile açılabilir.

1960'lı yıllarda lifli betonlar üzerine ilk çalışmalar beton içerisine cam liflerin katılmasıyla başlamıştır.

1970'li yıllardan sonra ise püskürtme beton uygulamalarında çelik lifler, hasır donatının yerini almaya başlamıştır.

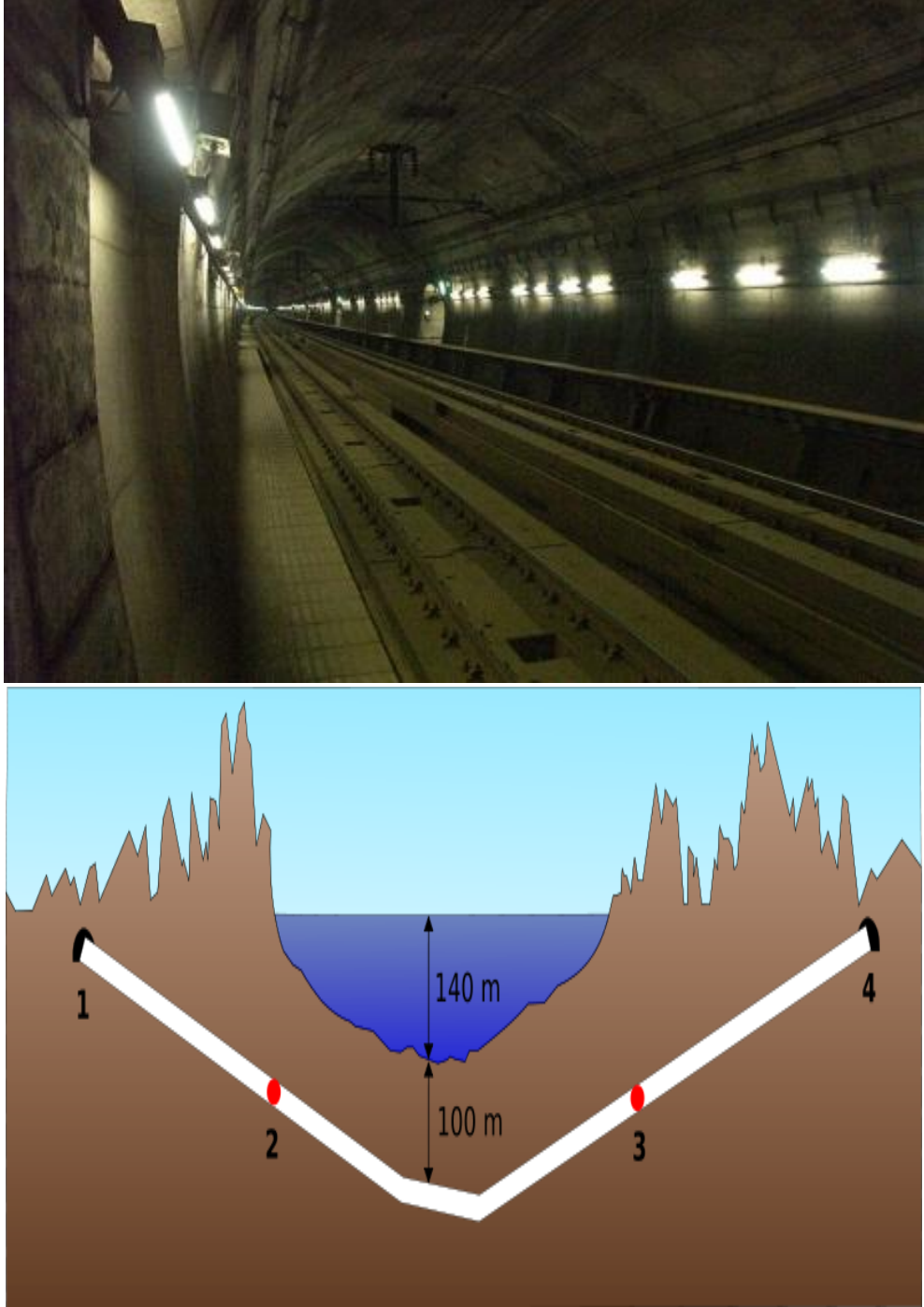
1987-1993 yılları arasında Avrupa'daki büyük projelerden birisi de, Manş denizinin demiryolu tüneli ile geçilmesi projesidir. Manş tüneli 37.7 km deniz altında olmak üzere toplam 50,5 km uzunluğunda, deniz yüzeyinden 100 m, deniz tabanından ise 40 m derinlikte inşa edilmiştir.

Şekil 2.17 Manş tüneline görünüm



1988 yılından bu yana hizmet vermekte olan, dünyanın *en uzun demiryolu tüneli*, 53.85 km uzunluğundaki Seikan tünelidir (Japonya). Bu tünel aynı zamanda *deniz tabanı altından geçen ilk demiryolu tüneli* unvanına da sahiptir, tünelin 23,3 km'si deniz tabanı altındadır.

Şekil 2.18 Seikan tüneli



Ayrıca proje çalışması **1988**'de İsviçre'de başlayan ve hala devam eden Gottardo tüneli **2018**'te hizmete girdiğinde, 57 km'lik uzunluğuyla dünyanın *en uzun ve en derin tüneli* olması hedeflenmektedir. Ortasına yerleştirilen asansör sistemi Alp dağlarındaki kayak pistlerine ulaşım hizmeti verebilecek şekilde tasarlanmıştır. İsviçre'ye 10 milyar dolara mal olan Gotthard tünel projesinde Alpler 20 yıldır deliniyor.20 yıldır her gün 2500 işçi gece gündüz demeden çalışıyor. Tünelin %65'lik kısmı tbm kullanılarak, geri kalan kısmı ise klasik yöntemler kullanılarak açılmıştı. Sonunda o çalışmalar nihayete erdi. Tünel, yıllardır Japonya'nın elinde tuttuğu 53 kilometrelik rekoru da kırmış oldu. Yapımı tamamlanan tünel 2017 yılında trafiğe açılacak.

Şekil 2.19 San Gottardo tüneli



İlk tünelin inşasından günümüze kadar dünyanın çeşitli yerlerinde tüneller inşa edilmiştir. Günümüzde dünyada ilk 10'a girmiş demiryolu, metro ve karayolu tünellerine ait bilgiler gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Dünyada inşa edilen en önemli ilk 10 Demiryolu ve Metro Tünelleri

| Tünel | Yer / Ülke | Uzunluk (km) | İşletme yılı |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Metrolar | | | |
| Seoul Subway Line 5 | Seul Metro su | 47 | 1996 |
| Serpukhovsko-Timiryazevskaya Line | Moskova Metro su | 41 | 2002 |
| Metro Madrid L-12 | Madrid Metro su, İspanya | 40 | 2003 |
| Kaluzhsko-Rizhskaya Line | Moskova Metro su | 37 | 1990 |
| Seoul Subway Line 6 | Seul Metro su | 35 | 2000 |
| Line 7 | Shanghai Metro | 34 | 2010 |
| Metro Madrid L-7 | Madrid Metro su / İspanya | 32 | 2007 |
| U7 | Berlin, U-Bahn | 41 | 1984 |
| Moskovsko-Petrogradskaya Line | San Petersburg Metro su | 41 | 2006 |
| Kirovsko-Vyborgskaya Line | San Petersburg Metro su | 41 | 1978 |
| Demiryolu Tünelleri | | | |
| Gotthard Base Tunnel | Alpler, İsviçre | 57 | 2018 |
| Seikan Tunnel | Japonya | 53 | 1988 |
| Channel Tunnel | Manş Kanak, İngiltere/Fransa | 50 | 1994 |
| Lötschberg Base Tunnel | Bernese Alpleri, İsviçre | 34 | 2007 |
| Guadarrama Tunnel | İspanya | 41 | 2007 |
| Hakkōda Tunnel | Hakkōda Mountains, Japonya | 41 | 2010 |
| Iwate-Ichinobe Tunnel | Ōu Mountains, Japonya | 41 | 2002 |
| Daishimizu Tunnel | Mount Tarigawa, Japonya | 41 | 1982 |
| Wushaoling Tunnel | Wuwei Çin | 41 | 2006 |
| Simplon | Lepontine Alpleri, İtalya/İsviçre | 41 | 1922 |
| Vereina | İsviçre | 41 | 1999 |

Kaynak: <http://wikipedia.org>

2.2 TÜRKİYE'DE TÜNEL TARİHİNİN GELİŞİMİ

Türkiye'de gelişen nüfus ile birlikte kolay ulaşım olan ihtiyaçta gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyacı kullanılan zamanı aza indirerek daha konforlu hale getirebilmek için, gerek demiryolu gerekse de karayolu tünelleri inşası yaygın bir de ilerlemektedir. Ayrıca yurdumuzda tüneller, yeraltında doğal kaynakların çıkarılması amaçlı olarak da yaygın bir de kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze kadar inşa edilen önemli tüneller, özellikleri ile birlikte aşağıda verilmiştir.

1871'de Türkiye'de demiryolu ağının oluşturulmasıyla birlikte tünel açma işlemleri de artmıştır ve İstanbul-İzmit arasında tüneller hizmete açılmıştır. 1871 yılında saraydan çıkarılan bir karar ile plansız de devlet tarafından inşaatına başlanan Haydarpaşa-İzmit hattının tamamlanamayacağına anlaşılmasından sonra, Rumeli demiryollarında görev yapmış olan Alman mühendis Wilhelm von Pressel, 1872 yılında padişahın hedefleri doğrultusunda yeni bir proje hazırlamakla görevlendirilmiştir. 1873'de Padişah'a sunduğu

proje 4670 km uzunluğunda olup, Haydarpaşa'dan başlayıp Ankara-Sivas-Musul ve Bağdat üzerinden Basra'ya uzanmaktaydı. İlave bağlantı hatları ile Akdeniz ve Karadeniz'e bağlanıyordu. Haydarpaşa demiryolu 1873 yılında İzmit'e ulaşmış, ancak teknik ve mali yetersizlikler nedeniyle o yıllarda hat daha ileriye götürülemedi. (H.İ. AYIŞ, 2010)

Şekil 2.20 Türkiye demiryollarına ait tünellerden görünüm



1875 yılında Türkiye'de ilk yeraltı metrosu (dünyanın en eski 2. metrosu) Galata-Pera (Beyoğlu) arasında hizmete açılmıştır.

Şekil 2.21 Galata-Pera arasındaki tünel



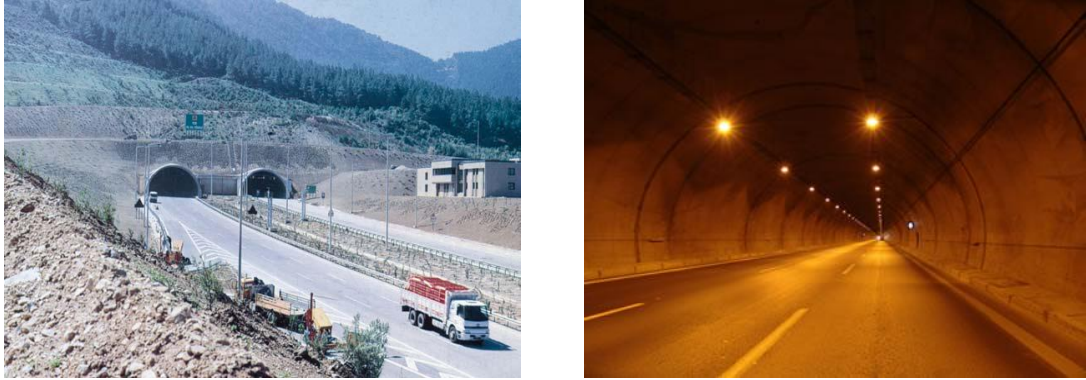
1860'lı yıllarda Galata bölgesinde, ticari faaliyetlerin giderek artması nedeniyle, Karaköy'den Pera'ya çıkış amacıyla bir "iner-çıkır" asansör yapma fikri doğmuştur. 30 Haziran 1871 tarihinde başlayan tünel ve kazı çalışmaları 3.5 yıl içinde tamamlanarak tünel 5 Aralık 1874 tarihinde hizmete girmiştir. Vagonlarla birlikte toplam 350.000

sterline mal olan tünelde, önceleri sadece eşya ve hayvanlar taşınmış, 17 Ocak 1875 tarihinden itibaren yolcu taşınmasına başlanmıştır. Atlı tramvayın ilk işletilmeye başladığı yıllarda, İstanbul halkına toplu taşıma hizmeti verdiği atlı tramvay sayısı, 14 adedi yazlık türü olmak üzere toplam 45 adet idi.

1982 yılında, Mersin'in 20 km kuzeyinde inşa edilen ve o tarihlerde Türkiye'nin *en uzun tüneli* olan Kadıncık-I tüneli 7127 m uzunluğundadır.

20 Nisan 2000 tarihinde açılan İzmir-Aydın Otoyolu üzerinde, Belevi mevkiinde bulunan 75.Yıl Selatin Tüneli, 3'er şeritli 3043 ve 3048 metre uzunluğunda iki tüpten oluşmaktadır.

Şekil 2.22 Yıl Selatin tüneline görünüm



29 Aralık 2006 'de karayolu ulaşımı amacı ile açılan Türkiye'nin *en uzun tüneli* Ordu Nefise Akçelik (Hapan) tüneli 3825 m. uzunluğundadır. İki tüpten oluşan bu tünel, 2 gidiş 2 geliş 1'er emniyet şeridinde sahiptir.

Şekil 2.23 Nefise Akçelik (Hapan) tüneline görünüm



Ankara - İstanbul Otoyolu üzerindeki Bolu Dağı tüneli iki tüpten oluşur. **23 Ocak 2007** tarihinde 2952 m uzunluğundaki sağ tüp, **08 Mayıs 2007** tarihinde ise 3140 m

uzunluğundaki sol tüp hizmete açılmıştır. Türkiye de *ilk defa* Bolu tüneline hasır donatı yerine, *çelik lifli* püskürtme beton uygulanmıştır.

Şekil 2.24 Bolu dağı tüneline görünüm



2.3 GÜNÜMÜZDE TÜNELCİLİK

Günümüzde modern tünel mühendisliğinde tünel; kaya yapısının doğal dengesini bozmadan, teknik girişim ile kayayı kazmak ve sağlamlaştırmaktır. Tünel ile uzun mesafe taşımacılık ağları oluşturarak şehirler birbirine bağlanabilmektedir. Yine günümüzde tünel, su ve kanalizasyon gibi atıkların taşınmasında %77 oranında, demiryolu ve metro inşasında %15 oranında, otoyollar için %8 oranında kullanılmaktadır.

1968 ve 1975 yılları arasında sadece Amerika'da uzunluğu 1530 km. olan ve toplamı 5,2 milyar \$'a mal olan tünel inş edilmiştir. Japonya ise 1980'e kadar 1424 km tüneline inşasını gerçekleştirmiştir. Norveç'te toplamı 3000 km olan Tünelere her yıl 150km daha eklenmektedir.

Tünelin çap ve uzunluklarını kullanım amaçları belirlemektedir. Genellikle karayolu ve demiryolu tünelleri 3 km'yi geçmez fakat araçların rahat hareket etmeleri ve manevra yapabilmeleri amacı ile çap geniş tutulur. Su tünelleri genellikle 24-40 km uzunluğunda ve dar çaplıdır.

Dünyada kayaç içinde açılmış en uzun tünel 120 km ile Paijanne tüneline, bu tünel Helsinki şehrinin su ihtiyacını karşılamak amacı ile inş edilmiştir. *KUN Mete,2010*

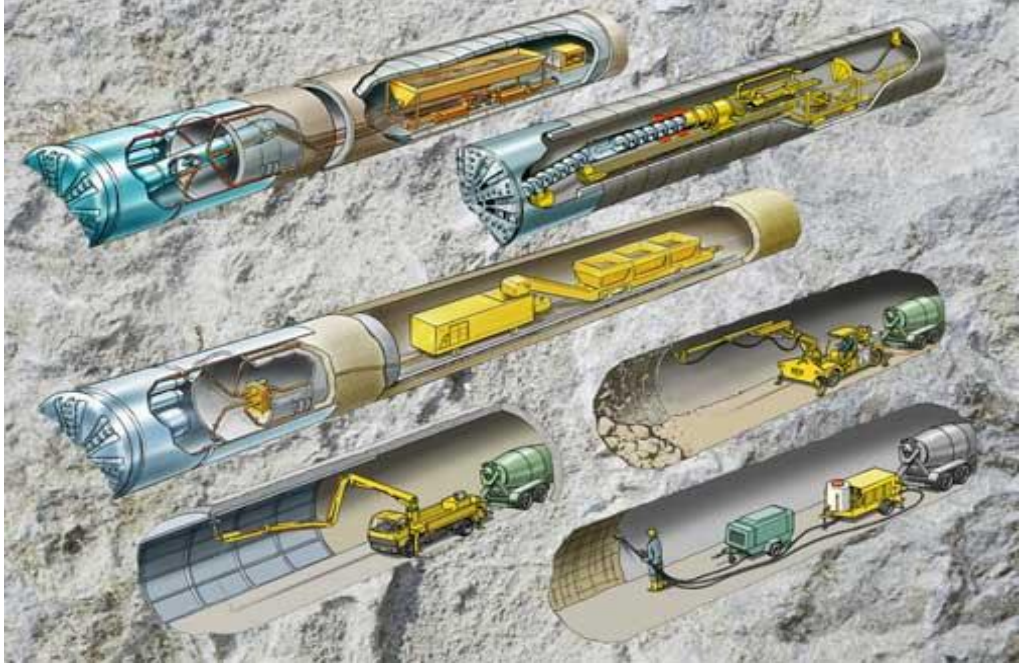
2.4 TÜNEL AÇMA VE İKSA (DESTEKLEME) TEKNOLOJİLERİ

Tünel açma yöntemi ve iksa (destekleme) sistemlerinin belirlenmesinde güzergâh topoğrafyası, zemin koşulları ve tünel geometrisine ait parametrelerin yanında hız, maliyet, zaman, emniyet ve işlevsellik faktörleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Günümüzde tünellerin açılması, inşaat teknikleri açısından dört grup halinde incelenebilir. Bunlar;

- Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)
- Tünel Delme Makinesi Yöntemi (TBM)
- Aç - Kapa Yöntemi

Şekil 2.25 Tünel açma tekniklerinden genel bir görünüm



2.4.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) Tarihsel Süreci

Tünel açma yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan “Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi” (NATM) klasik tünel açma tekniklerinin *en deneysel ve esnek* olanı, *en optimum* destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır (Ünlütepe, 2005). Bu yöntem, kazı sonrası oluşacak deformasyonun bir kısmının ana kayaya, bir kısmının ise tahkimat elemanına taşıtırılması esasına dayanmaktadır.

Şekil 2.26 NATM ile inşa edilen tünelden görünümler



1950'de Stini ile geliştirdikleri yöntemi, *Rabcewicz*, **1962** yılında, Salzburg'ta düzenlenen XIII. Geomekanik konferansında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Australian Tunneling Method) olarak tanıtmış (Karakuş ve Fowell, 2004) ve **1964** yılında Yeni Avusturya Tünel Açma Yönetimi'nin kısaltılmış adını "NATM" olarak belirlemiştir. Yöntemi şu de tarif etmiştir (www.maden.org.tr): *"İnce ve geçici bir destek uygulayarak, deformasyonlara izin vererek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak. Böylelikle son destekleme daha az yüklenecek, daha sonra yapılabilecek ve daha ince bir yapı olabilecektir. Deformasyonlar kazı sırasında ölçülecek ve teorik değerlerle karşılaştırılacaktır."*

1966'da ilk defa Avusturya'da, daha sonra yayılımı hızla gelişerek, Fransa, Almanya ve İtalya'da uygulanmıştır.

1969 yılında yöntem, *resmi olarak ilk defa* Frankfurt Metro su inşaatında kullanılmış; iç içe tabakalı kil, marn, tebeşir ve kum taşı geçilmiştir.

Şekil 2.27 Frankfurt Metrosu, NATM ile yapım aşamalarından görünüm



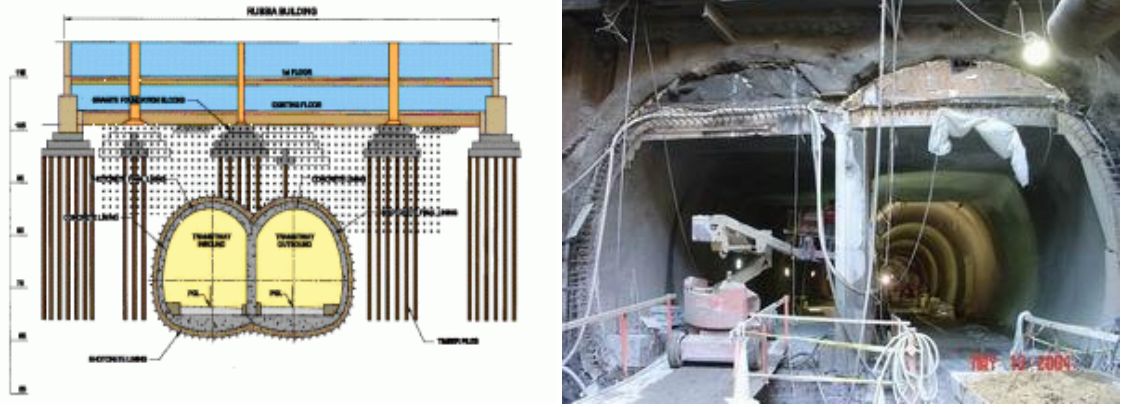
1987'de NATM, İngiltere'nin Barrow şehrinde *ilk defa* maden arama amaçlı kazı işlemlerinde kullanılmıştır (Karakuş ve Fowell, 2004).

1988'de yöntem, dünyanın *en uzun demiryolu tüneli* olan Seikan tüneline (Japonya) de başarı ile uygulanmıştır. Tsugaru Boğazı'nın yatağı boyunca uzanan Seikan Tüneli, 23,3 km'si yeraltında olmak üzere 53.85 km uzunluğa sahiptir.

Bir başka başarılı uygulama da Mexico şehrindeki Emisor Central kanalizasyon tüneline olmuştur.

2004 yılında yapımı tamamlanan Boston demiryolu tüneline, 100 yıllık tarihi 7 katlı Russia Wharf Binası altından geçerek Logan Havaalanı ile güney Boston'u birbirine bağlaması hedeflenmiştir. Yumuşak organik silt ve kil formasyonda, tarihi bina altından geçildiğinde riskli bir durumun oluşmasını önlemek için tünel kesitinin dürbün şeklinde tasarımı yapılmış ve NATM ile açılması planlanmıştır.

Şekil 2.28 Russia Wharf Binası altından geçen Russia Wharf tüneli



Söz konusu tüneller açılırken mevcut binanın temel kazıkları kırılarak, kırılan kazıklar tünel kemer yapısına oturacak biçimde tünellerin tasarımı yapıp, binaya olası bir zararın önüne geçilmesi amaçlanmıştır. NATM ile açılan bu tünellerde parçalı kazı destekleme sistemi tasarlanmış, kazı destekleme sırasında bina temeli ile tünel arasındaki organik şiltli zemine, dondurma özelliğine sahip bileşiklerin (CaCl_2 veya MgCl_2) enjekte edilmesi ile zemin stabilitesi sağlanmıştır. (www.dr-sauer.com).

2006'da açılan Fort Canning karayolu tüneli (Singapur), 15 m eninde ve 11 m yüksekliğinde olup; killi silt, kil ve kum mercikleri içeren formasyonda NATM ile açılmıştır. Tünelin kötü zemin formasyonunda açılması ve geniş kesitli olması nedeniyle Şemsiye boruları (*umbrella arch*) kullanılmış ve geçici alt yarı desteklemesi uygulanmıştır.

Şekil 2.29 Fort Canning karayolu tüneline giriş



2007 yılında, Londra Metro Sisteminin bir parçası olan Kings Cross İstasyonu'nda Londra kili (katı kil) formasyonunda açılmış olan tünelde pilot tünel (üst yarıda yapılan küçük çaplı tünel) uygulaması yapılmış, daha sonra 7 m çapında normal boyutlarına getirilerek açılmıştır. Tarihi duvar altından geçilmesi sırasında şemsiye boruları da kullanılmıştır.

2008 yılında, Washington Metro sistemine bağlı Dulles Coridor Metrorail projesi kapsamında Tynols Corner çift hat tüneline, silt ve düşük kil içerikli formasyonda, 8 m çaplı tüneller NATM ile açılmıştır. Tüneller kötü zemin şartlarında açılacağı için, hat boyunca tünel üst yarısına şemsiye boruları uygulaması yapılmıştır.

2009 yılında, Londra Metro Sistemi'nin bir parçası olan Victoria İstasyonu'nda, Londra kili formasyonunda açılmış olan mevcut dar kesitli 6 m çapındaki tüneller, NATM ile 10 m çapına çıkarılarak genişletilmiştir. Genişletme yapılacak olan tünellerde öncelikle yüzeyden zemin içerisine basınçlı çimento harcı enjeksiyonu (jet grout) ile zemin iyileştirildikten sonra, hat boyunca tünel üst yarısına şemsiye boruları uygulanmıştır (<http://books.google.com.tr>).

Şekil 2.30 Tynols Corner tüneli şemsiye borusu uygulamasından görünüm



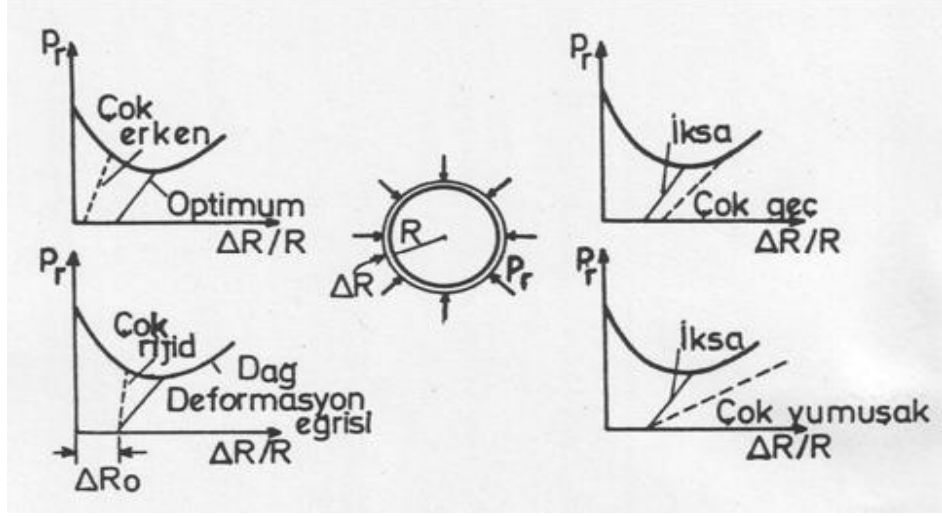
2.4.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi

İkinci dünya savaşından sonra ulaştırma yatırımlarındaki artışa paralel olarak tünelcilikte de yeni yöntem arayışları ortaya çıkmıştır. Günümüzdeki en sık kullanılan tünelcilik yöntemlerinden biriside Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemidir. Diğer tünel açma yöntemlerinin tersine Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin tam bir açıklamasını bulmak gerçekten zordur. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi belirli bir donanım kullanılarak açılan sabit bir yöntem olmayıp bir tünelcilik felsefesidir. Yöntemin her tür geometriye ve jeolojik duruma kolaylıkla uyum sağlaması sonucunda ekonomik tasarımlar ve kesintisiz ilerleyen tünel inşaatları ortaya çıkmıştır. Öncelikle kaya tünelleri için önerilmesine rağmen günümüzde genellikle kohezyonlu zeminlerde kullanılmaktadır. (Leca,1989). Genellikle püskürtme betonun dış kaplama olarak kullanıldığı bu yöntemde tünel iksa miktarı iksanın uygulama zamanının ayarlanmasıyla optimum seviyede tutulmaktadır. Aşağıda yöntemin ana prensipleri, kazı ve destekleme yöntemleri detaylı bir şekilde anlatılacak daha sonra ise tasarım yöntemleri hakkında bilgi verilecektir.

2.4.2.1 NATM Yönteminin Prensipleri

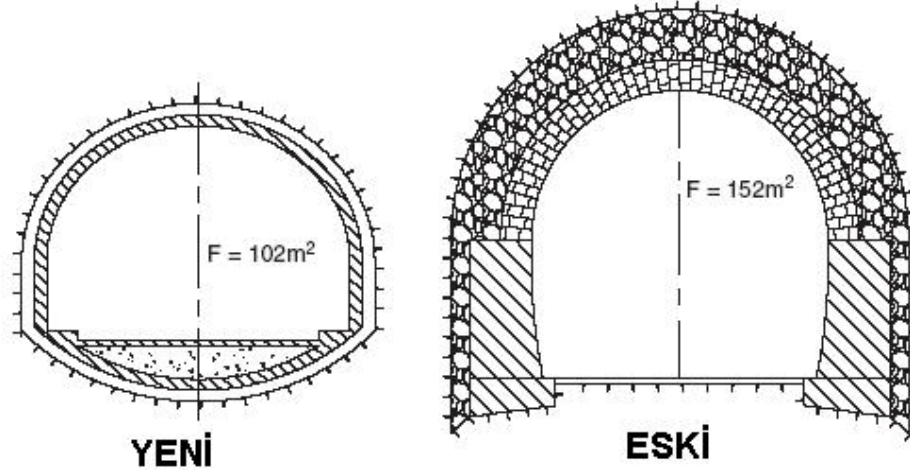
Yöntem belirli bir kazı veya destek sistemine bağımlı değildir. Yöntemin esas amacı uygun kazı ve iksa yöntemlerinin seçilerek kazı sonrasında oluşacak olan ikincil gerilme ve deformasyonların, zemin yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde kontrol edilmesi, yönlendirilmesi ve zeminin ilk sağlamlığının olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendisini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturmasını sağlamaktır (Vardar 1985). Yöntemin ana esasları 1978 yılında Müller tarafından 22 ana madde açıklanmıştır. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine göre gerekli sağlamlaştırma işlemleri ne çok erken, ne çok geç başlamalı ve iksa direncini oluşturan yapı ne çok rijit ne de çok zayıf olmamalıdır B prensibi anlatan Fenner-Pacher eğrileri Şekil 2.33'de görülmektedir.

Şekil 2.31 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki zemin iksa etkileşimi

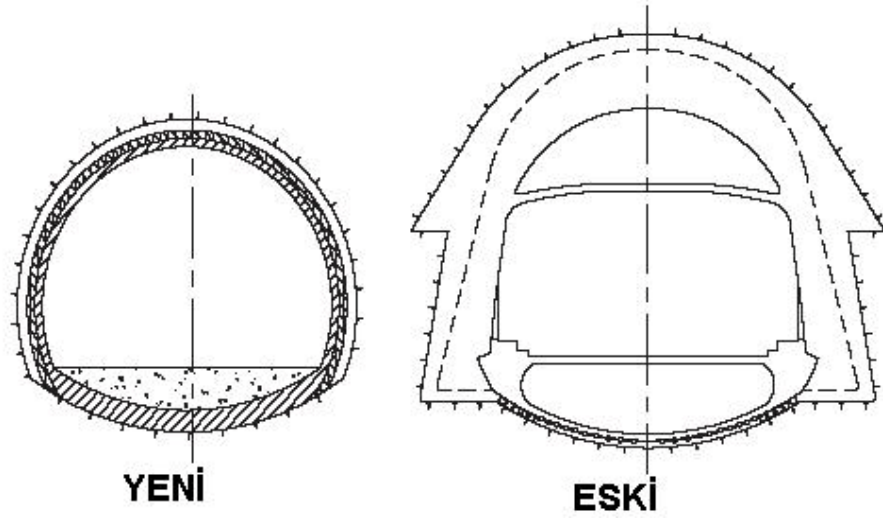


Rijit veya kalın kaplamalar yerine Şekil 2.34’de de görülen daha esnek ve ince kaplamalar kullanılmaktadır. Böylece sistemde oluşacak olan eğilme momentleri azaltılmış olacaktır. Tünelin enkesitinin Şekil 2.35’de görüldüğü gibi daire veya elips şeklide seçilmesi gerekmekte olup gerimle yoğunlaşmasına sebep olacak olan köşelerden kaçınılmalıdır. Kaplama inşa edilirken en kısa zamanda halka oluşturulmalıdır.

Şekil 2.32 Esnek ve ince kaplamalar

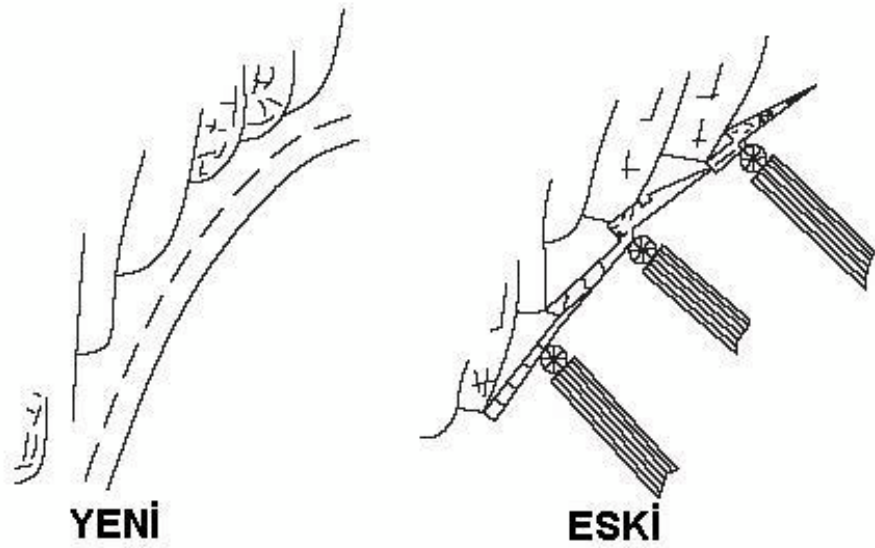


Şekil 2.33 Yuvarlatılmış kesitler

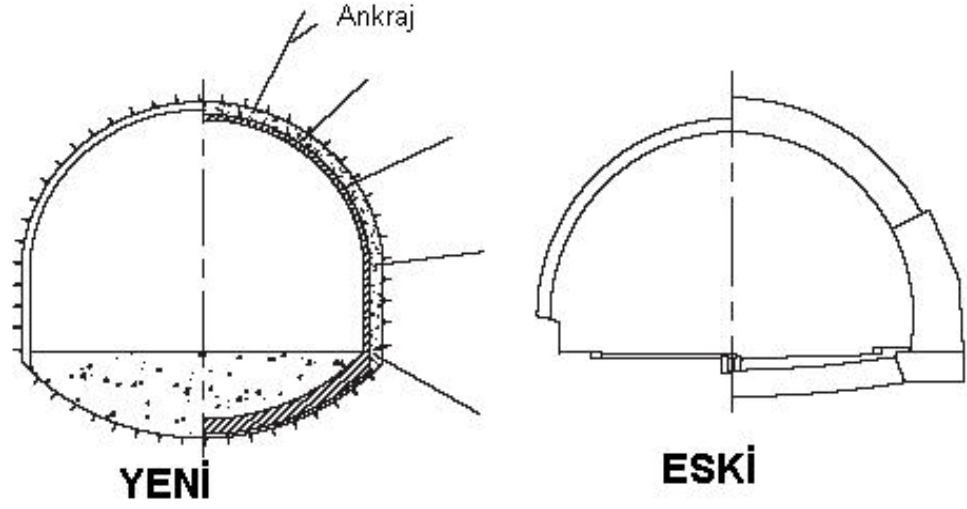


Yöntemde kazı sonrası uygulanacak iksa bağlayıcı olmalı ve çevresindeki kayaçla birlikte çalışmalıdır. Buna en uygun uygulama püskürtme betondur (Şekil 2.36). Püskürtme betonla birlikte kullanılacak olan diğer kaplamalar, kaplama toplam kalınlığını arttırmamalıdır. Püskürtme betona ek olarak Şekil 2.37’te görülen hasır çelik ve sistematik ankraj veya bulonların kullanılmasıyla sistemin ana taşıyıcı kaplamaları oluşturmaktadır.

Şekil 2.34 Kaplama yüzeyinin tamamen sarılması

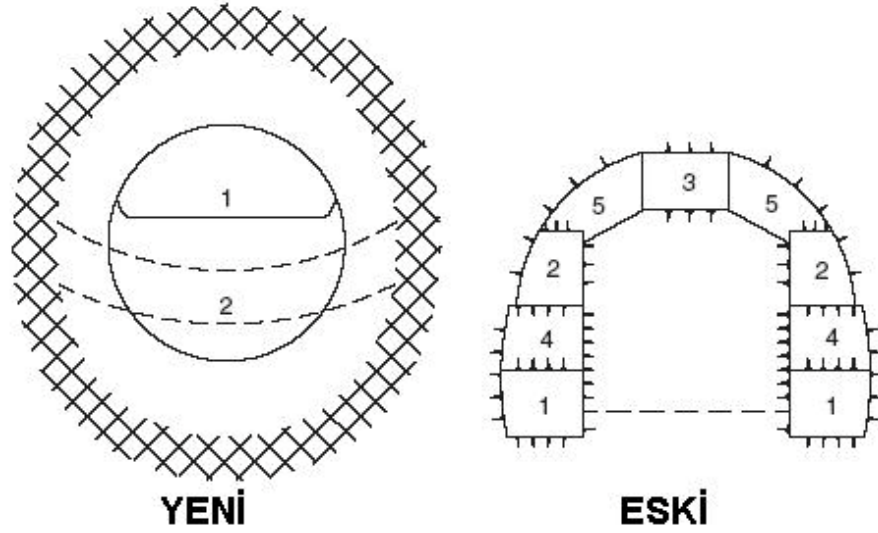


Şekil 2.35 Püskürtme beton ve diğer kaplamalar



Yöntemde sistemin ana malzemesi dağın kendisidir ve kazı yapılırken dağ olabildiğince az deforme edilmelidir. Dağın daha çok deforme edildiği eski sistem Şekil 2.36'de görülmektedir.

Şekil 2.36 Sistem deformasyon durumu



Tünel açımı ilerledikçe kaya ve iksa davranışının anlaşılması için sürekli ölçüm yapılmalıdır.

2.4.2.2 NATM Yönteminin Kullanım Alanları

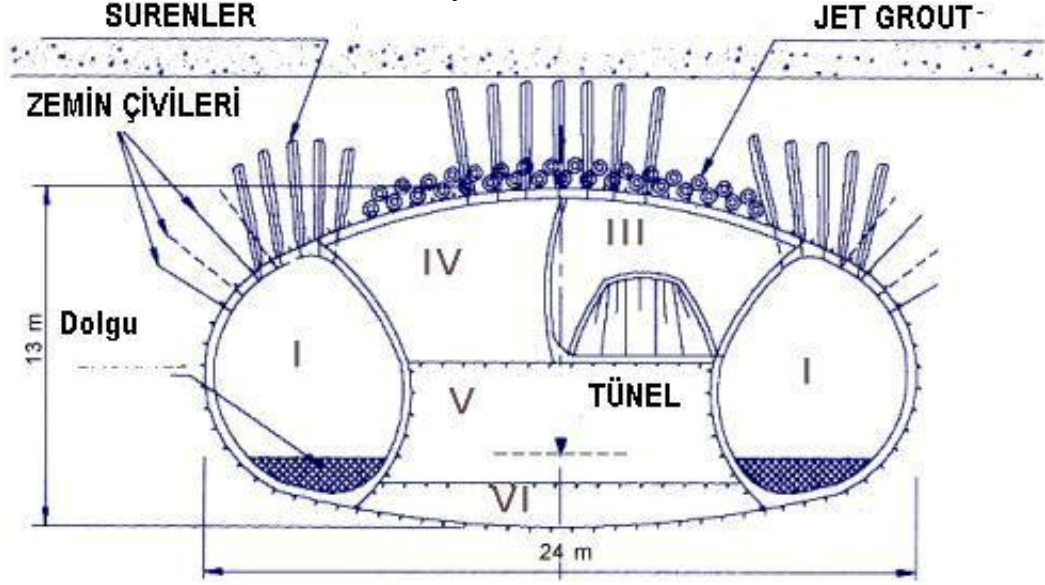
Yöntem ilk olarak Rabcewicz tarafından Alplerde bulunan kaya tünelleri için önerilmiştir ve yüksek kaya gerilmelerinin olduğu bu tünellerde uygulanmıştır. Daha sonraları genellikle zayıf zeminlerde açılan tünellerde kullanılmıştır. Kohezyonlu zeminlerde açılan tünellerde uygulanmasının yanı sıra açılması nispeten daha zor olan kohezyonsuz zeminlerde de açılan tünellerde uygulanmaktadır. İlk bakışta ayrışmamış sağlam kayada açılan tünellerde yöntemin uygulamasına gerek olmadığı düşünülse de yöntem zemin profillerinin değişken olduğu kaya tünellerinde sıkça uygulanmaktadır.

Yöntem şehir içinde açılan tünellerde ve metro uygulamalarında da kullanılmıştır. Şekil 2.39 da görülmekte olan Frankfurt metrosunda, Münih, Viyana, Hong-Kong, Lyon, Washington ve İstanbul metrolarında başarıyla uygulanmıştır. Şekil 2.40 'da görülmekte olan kazı alanı 200 m² olan istasyon tünelleri ve şekil 2.41' de örnekleri verilmiş olan geniş şaftlar bu yöntemle açılmıştır. Zayıf zeminlerde açılan geniş enkesitli karayolu ve demiryolu ve sulama tünellerinde başarıyla uygulanmıştır.

Şekil 2.37 Frankfurt Main Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Uygulaması



Şekil 2.38 Merkez Arter Metro İstasyonu, Boston



Şekil 2.39 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemiyle Açılmış Şaft Birmingham, İngiltere



Son yıllarda açılan Avusturya'daki Tauren (6.40 km) ve Alberg karayolu tünelleri, Pakistan'daki Tarbela Hidroelektrik santrali projesi ile Almanya'daki şehir içi toplu taşıma tünellerinde Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi felsefesi başarısını kanıtlamıştır. Tauren tüneli çok yüksek kaya gerilmelerinde başarıyla açılmış olup, çok geniş çaplı (90–100 m²) Arbela tünellerinde de çok hızlı ilerlemeler kaydedilmiştir. Tarbela tüneline çok zayıf ve değişen zemin koşullarında geniş çaplı (20-24m.) tüneller açılmıştır. Almanya'da ki şehir içi tünellerinde ise 3–4 metrelik bir örtü kalınlığında ve yumuşak zeminlerde (kohezyonsuz çakıl) 10 mm. oturma limitiyle tüneller açılmıştır (*Taşlıca, 1993*).

2.4.2.3 NATM Yönteminin Üstünlükleri ve Zayıflıkları

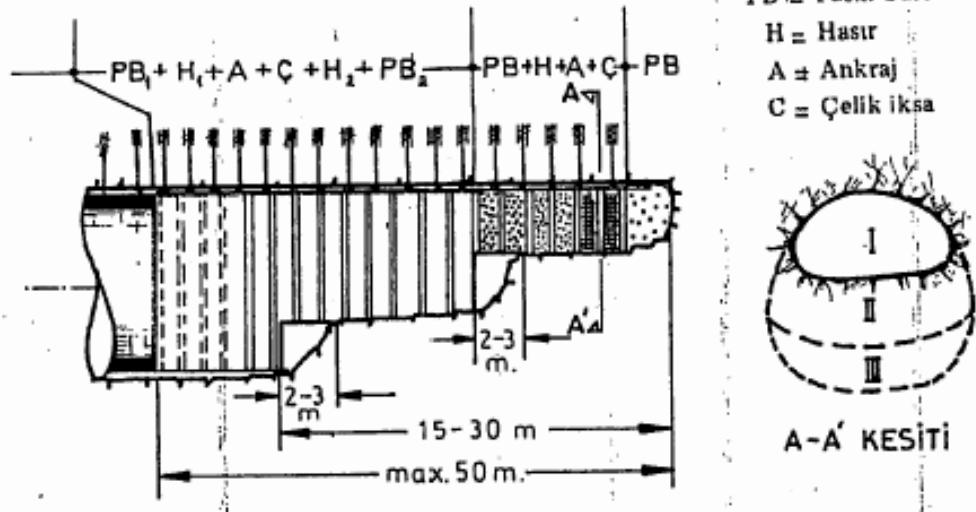
Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin özellikle kalkanlı köstebekle tünel açma yöntemi gibi günümüzde kullanılan diğer yöntemlere göre birçok üstünlükleri vardır:

- Yöntemin en önemli özelliği olan her tür zemin koşulunda uygulanabilir olmasıdır. Bu özelliğinden dolayı değişen ve önceden bilinmeyen zeminlerde açılan tünellerde veya kazı en kesitinin değiştiği tünellerde rahatlıkla uygulanabilir.
- Özellikle şehir içinde zayıf zeminlerde açılan geniş en kesitli tünellerde Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemiyle açılan tüneller daha ekonomiktir ve bu açılan tünellerde daha geniş bir kazı alanında çalışılabilir.
- Yüksek boşluk suyu basınçlarının yenilmesi gereken ortamlarda bile membranların kullanılmasıyla tüneller kuru ortamlarda açılabilir.
- Optimum tasarım yapıldığı için kullanılan tünel kaplamaları daha ekonomiktir.
- Sadece bir adet ana makineye bağlı olarak çalışmaz.
- Kalkanlı Köstebekle açılan kazılara göre genellikle daha az yüzey oturması görülür (Leca 1989).
Diğer taraftan yöntemin bazı zayıflıkları da mevcuttur.
- Özellikle Amerika gibi bazı ülkelerde tünel kontrat prosedürleri Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine göre hazırlanmamıştır (Leca, 1989),
- Daha çok sayıda ve deneyimli personel ile çalışılması gereklidir.

2.4.2.4 NATM Yönteminin Kazı Yöntemleri

Kazı ve destekleme sırasının belirlenmesi birçok parametreye bağlıdır. Tünel boyutu ve geometrisi, kullanılacak destek elemanları ve karakteristikleri, zemin ve yeraltı suyu durumu, kazı malzemesinin taşınma şekli ve oturma limitleri kazı aşamalarını belirleyen etkenlerdir. Kazılar tam kesitte yapılabileceği gibi kaya stabilitesinin düşük olduğu zeminlerde kademeli olarak yapılabilir. Burada temel felsefe desteksiz olarak kazılan bölge ne kadar küçük olursa bu bölgenin üstüne gelen yüklerinde o kadar küçük olacağı ve böylece deformasyonları ve yüzey oturmalarının da buna bağlı olarak az olacağıdır. Her kademenin ano uzunluğunun ve kazı kademeleri arasındaki aranın belirlenmesi gerekir. Kazıdan sonra kaplamanın zamanlaması da önemlidir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki zemin duraylılık süreleri Avusturya standartlarından ÖNORM B 2203/1994’ de açıklanmıştır. Kademeli kazılar kalot, stros ve radye olmak üzere 3 kademe de yapılabilir (Şekil 2.42).Yapım aşamaları genel olarak şöyle sıralanabilir:

Şekil 2.40 3 Kademeli Kazı ve sağlamlaştırma işlemleri

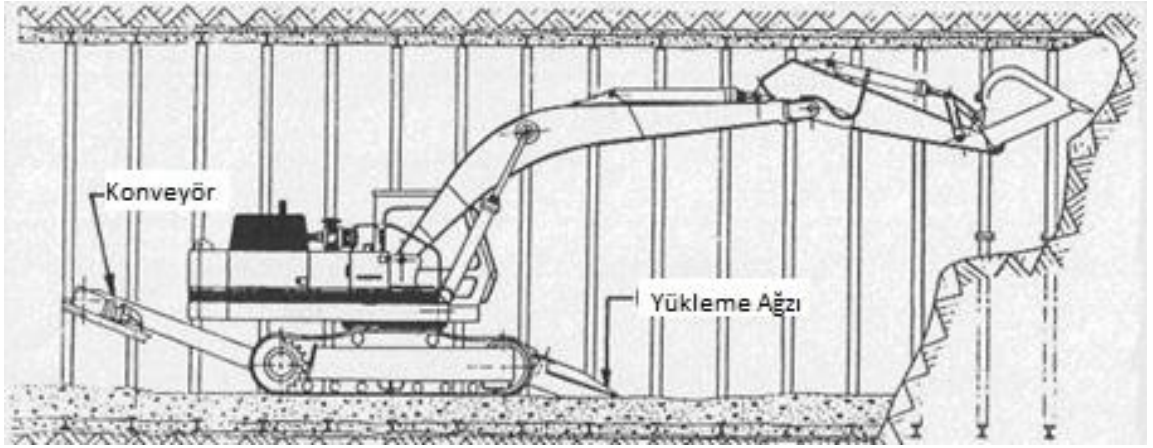


Gerekli ise kazılacak bölgenin zemin iyileştirilmesinin yapılması. Yatay jetgrout uygulaması, zemin enjeksiyonları, zemin dondurulması, süren uygulamaları, drenaj yapılması, zeminin donatılması zemin iyileştirme yöntemleri arasında sayılabilir. Kalot kazısının yapılması. Kazı makinesinin seçimi birçok parametreye bağlı olmakla birlikte kullanılan kazı makinelerine roadheader (Şekil 2.43), ters kollu ekskavator (Şekil 2.44), hidrolik kırıcı (Şekil 2.45), fresöz (Şekil 2.46) örnek olarak verilebilir.

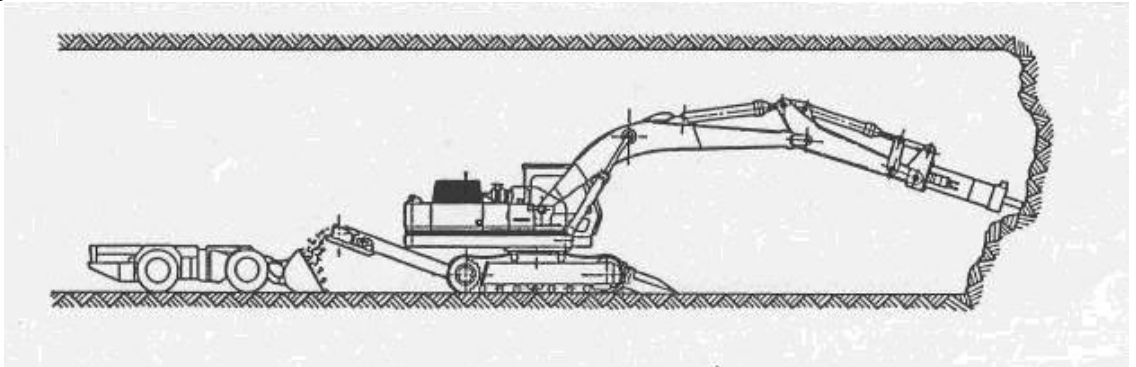
Şekil 2.41 Roadheader



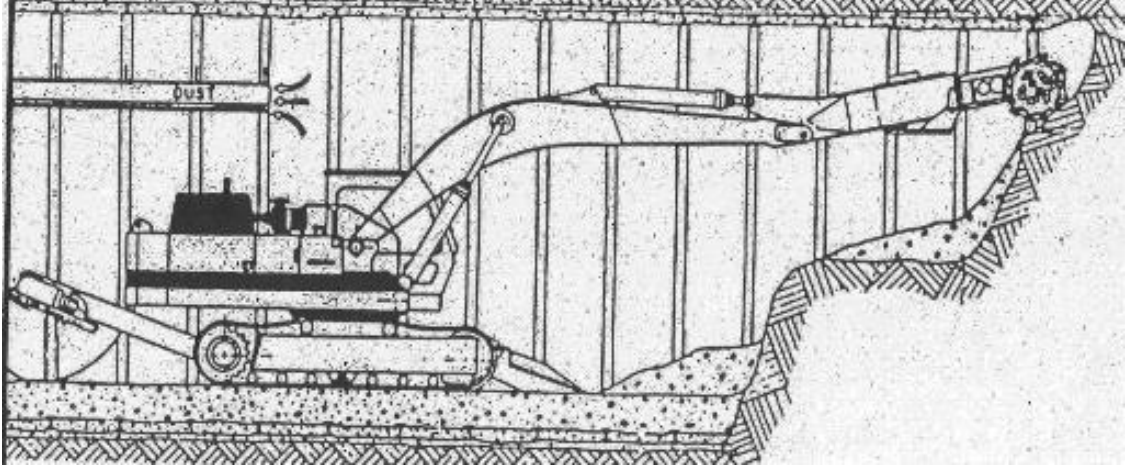
Şekil 2.42 Ters Kollu Ekskavatör



Şekil 2.43 Hidrolik Kırıcı



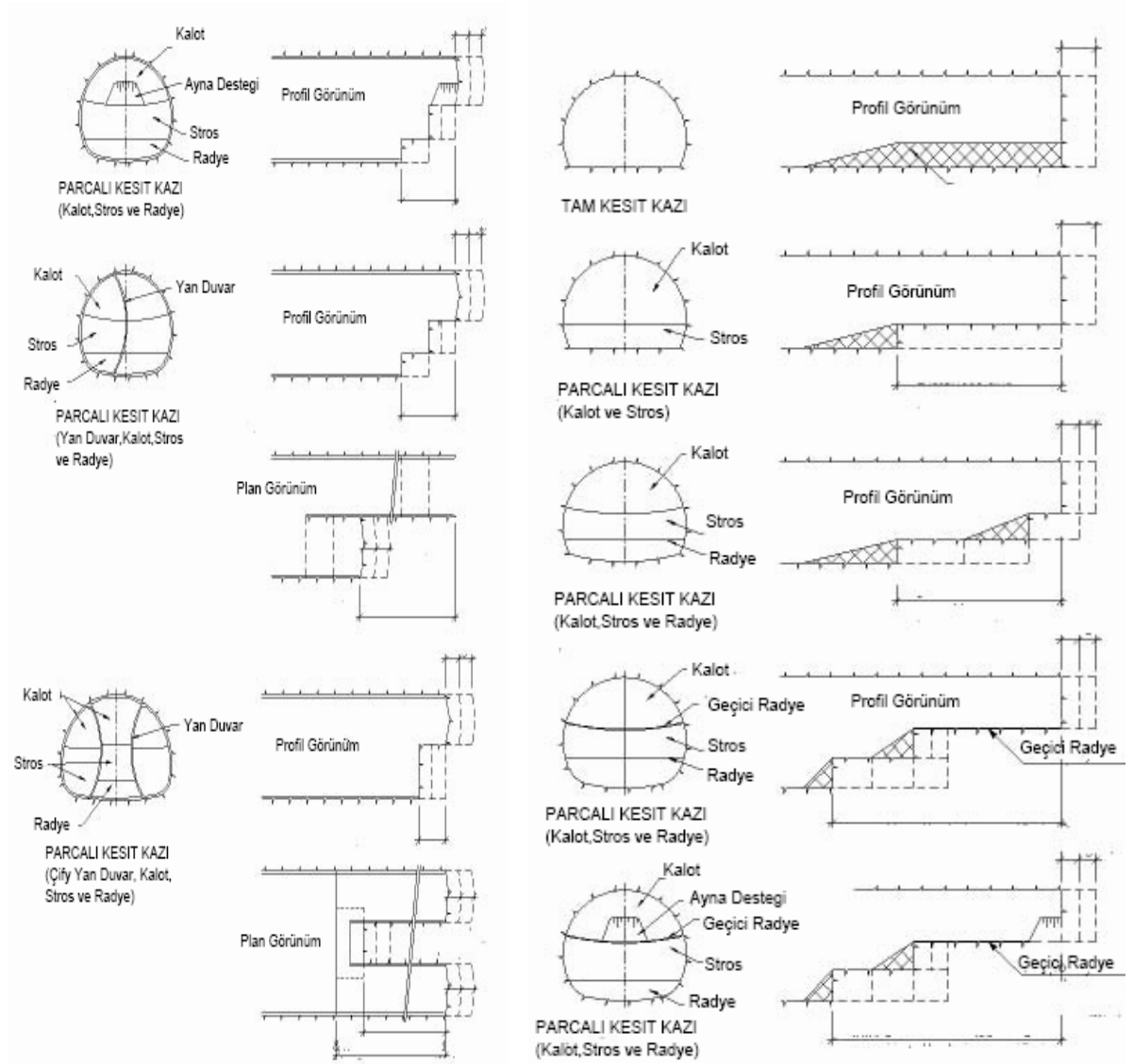
Şekil 2.44 Fresöz



- Kalotun geçici tahkimatının yapılması. Geçici kaplama olarak Püskürtme beton, hasır çelik, çelik iksa ve bulonlar kullanılmaktadır.
- Stros kazısının yapılması.
- Stros tahkimatını yapılması.
- Radye kazısının yapılması
- Radyenin gerekli ise geçici tahkimatının yapılması gerekli değilse radye betonunun dökülmesi.
- Kalıcı kaplamanın yapılması

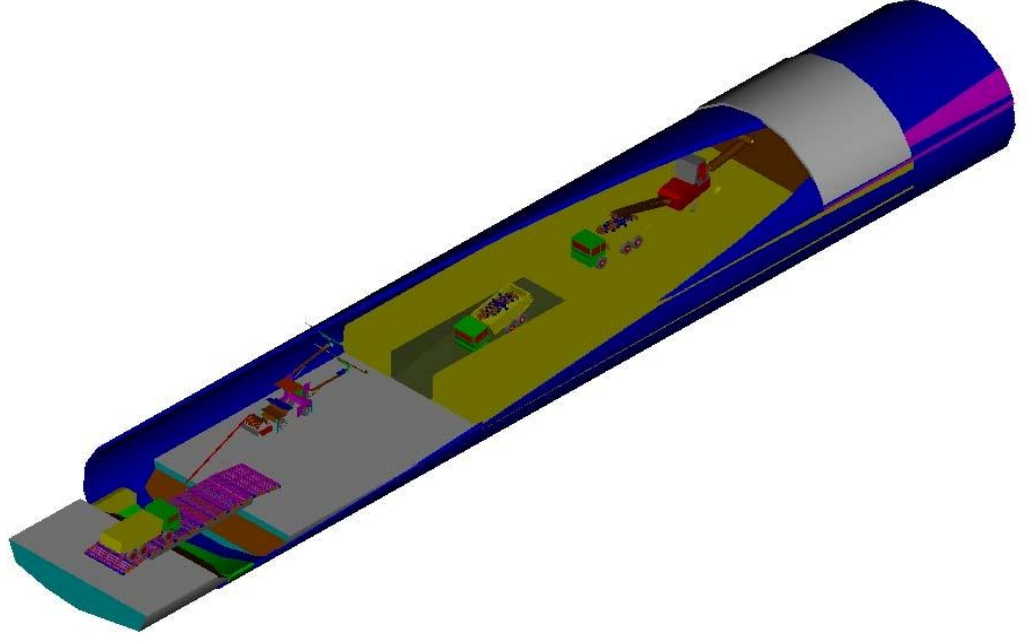
Üç kademeli kazı genel olarak anlatılmış olup kazı kademelerinin sayısı ve sırası çok değişik şekillerde olabilir. Stabilitesi çok iyi olan zeminlerde tam kesit kazı yapılırken, stabilitesi daha düşük olan zeminlerde katot ve stros kazısı olarak iki parçada yapılabilmektedir. Gerekli durumlarda yukarıda daha detaylı anlatıldığı gibi kazı kademeleri Kalot, stros ve radye olmak üzere 3-üç kademe yapılabileceği gibi kalot kazısından sonra taban geçici radye yapılabilir. Ayna stabilitesinin sağlanamadığı durumlarda kazı işlemleri tamamlandıktan sonra kalota strosa veya radyeye tekrar geçici dolgular yapılabilmektedir. Bazı durumlarda parçalı kazılar kalot, radye ve stros kazısı yerine tünelin sağ veya sol tarafından bir yaklaşım galerisi açılması şeklinde de yapılabilmektedir. Yeni Avusturya tünel İnşa Yönteminde kullanılan bu kazı yöntemlerini Şekil 2.47' te görülmektedir.

Şekil 2.45 Değişik kademeli kazı çeşitleri (Sauer,1990)



Parçalı kesitte yapılan kazılar aynı anda devam etmektedir. Kalotta kazı devam ederken arkadaki kısımlar için kalot iksa işlemleri, stros kazı ve iksa işlemleri ve radye kazısı betonu devam etmektedir. Burada kazılan malzemenin dışarıya nakli için geçici köprüler yapılabilmektedir. Böylece hızla kazılan malzeme dışarı çıkartılabilmektedir. Şekil 2.48 ve Şekil 2.49 da görüldüğü gibi tüm kazı ve iksa ve malzeme taşınması uygulamalarının aynı anda yapılması durumundan dolayı tünellerde çalışma alanının olabildiğince geniş olması gerekmektedir.

Şekil 2.46 Kademeli Kazı Yöntemi



Şekil 2.47 Kademeli Kazı Örneği, Bouira Tüneli



2.4.2.5 NATM Yöntemi Tünel Destek Sistemleri

Tünel açma sırasında zeminin açım öncesi ilk gerilme durumu değişerek yeni bir ikinci gerilme durumuna dönüşür. Tünelin etrafındaki bu ikincil gerilme durumu tünelin stabilitesini belirleyen ana etmendir (Vardar, 1985). Desteklemenin amacı kazılmış tünelin etrafında bir kemerlenme ile bir koruyucu zon oluşturarak zeminin ana taşıma elemanı olarak çalışmasını sağlamaktır. Destekleme sırasında deformasyon kontrolü çok önemlidir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki destekleme prensibi Şekil 2.49 'da gösterilmiştir. Şekilde göçme sebebiyle yük artışı görülmektedir. Tünel sistemi etrafındaki zemin, püskürtme beton, ankraj, çelik iksa gibi destekleme elemanlarından oluşan birleşik bir yapı şeklinde tasarlanmalıdır.

Günümüz tünelciliğinde püskürtme beton, hasır çelik, kaya ankrajı, çelik iksa ana destekleme elemanlarıdır. Destek elemanlarının uygulanması zemin profiline, tünel enkesitinin büyüklüğüne ve birinci gerilme durumuna göre belirlenmektedir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde tünel stabilitesi dış kaplama elemanlarıyla sağlanır. Daha sonra iç kaplamanın yapılmasıyla güvenlik sayısı büyür.

a) Püskürtme Beton

Püskürtme beton tünel etrafındaki zeminin gevşemesini önlemek veya kontrol etmek için kullanılır. Kaya çatlaklarının kaplayıp sıkıştırarak kırılmaları ve kaya düşmelerini önler. Püskürtme betonun zemin yüzeyine boşluksuz bir biçimde uygulanması ve yüzeyi tamamen kaplaması gerekmektedir. Bunu sağlamak için çelik hasır zemin yüzeyine çok yakın yerleştirilmeli, erken priz alması için uygun kimyasal hızlandırıcılar kullanılmalı ve uygun makine ile uygulanmalıdır. Püskürtme beton tek seferde değil tabakalar halinde yüzeye uygulanmalıdır.

Püskürtme beton çimento, agrega, su ve katkı maddelerinin karışımıdır. Dökme betondan en önemli farkı mukavemetini erken almasıdır. Aynı dökme beton gibi 28. güne kadar mukavemeti artar. Gerekli nemin sağlanması durumunda ise daha sonra da mukavemeti artar. 2 yılın sonunda mukavemeti %50 kadar daha artabilir. Erken priz alan püskürtme betonun mukavemet değerleri de gösterilmektedir. Karışımdaki agrega büyüklüğü 16mm'yi geçmemelidir.

Püskürtme beton yüzeye yaş veya kuru şekilde olmak üzere iki şekilde uygulanabilir. Kuru karışımda kuru çimento ile agrega hava yoluyla karıştırıcıdan tabancaya iletilir ve burada suyla karıştırılarak yüzeye uygulanır. Yaş karışımda (Şekil 2.50) ise çimento, agrega ve su karıştırıcıda karıştırılarak hortuma iletilir ve tabancayla yüzeye uygulanır. Kuru karışımlarda daha uzun mesafeler daha kaliteli beton uygulanabilirken, ıslak karışımlarda uygulama sırasındaki toz daha az olmakta ve püskürtme sonucu sıçramadan oluşan kayıplar azalmaktadır. Gelişen beton teknolojisi ile günümüzde çelik lif karışımı püskürtme betonlar da uygulanmaya başlamıştır.

Şekil 2.48 Yaş karışım püskürtme beton uygulaması (Kolymbas, 2005)



b) Hasır Çelik

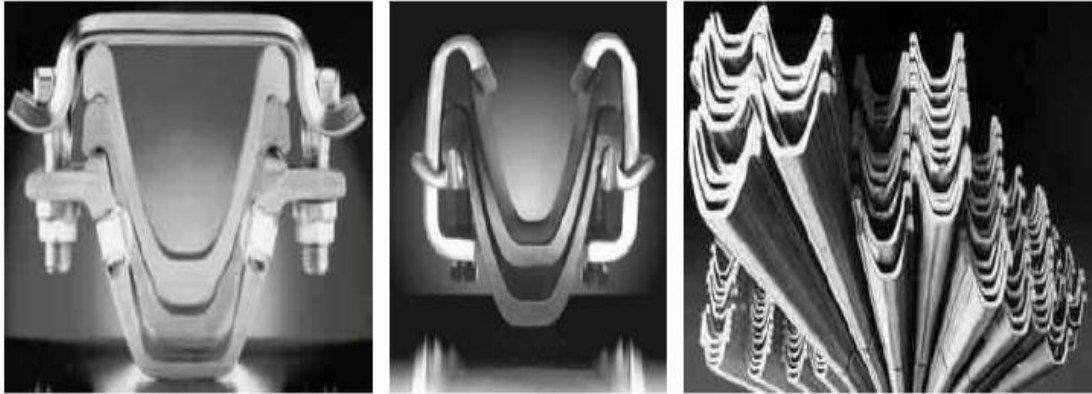
Püskürtme betonun statik ve konstruktif özelliklerini arttırmak için hasır çelik uygulamaları yapılmaktadır. Hasır çelik uygulamaları sayesinde püskürtme beton tabakaları arasındaki aderans artmış olur. Püskürtme beton gerekli dayanıma ulaşmaya kadar gerekli stabiliteyi ve dayanım sağlanmış olur kesme kuvvetlerine karşı dayanım artmış olur. İnşaat derzleri arasındaki güçlendirme sağlanmış olur. Akma ve aşırı yüklenmeler sonucunda oluşan çatlaklar sınırlandırılmış olur. Olası çatlama sonucunda kopmalar önlenmiş olur. Boyuna doğrultuda güçlendirme yapılmış olur.

Hasır çelik uygulamaları genellikle yoğun işçilik gerektiren ve personelin küçük kaya düşmelerine maruz kalabileceği riskli uygulamalardır. Montaj kolaylığı olması ve sıçrama miktarının azaltılması için donatı açıklıkları 100 mm.’ den küçük olmaz. Donatı çapı ise 10 mm.’ den büyük olur.

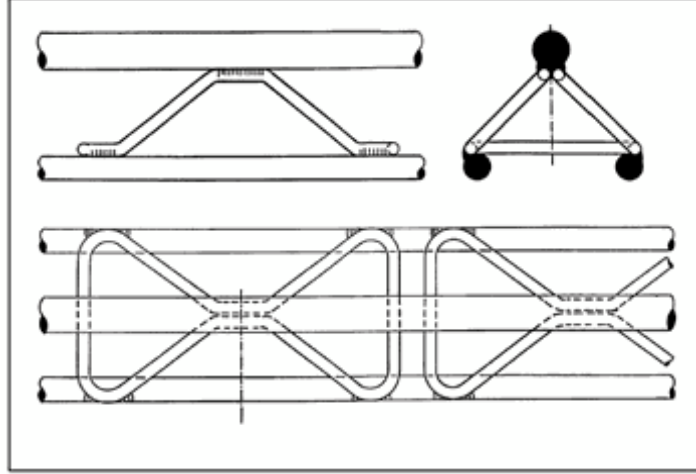
c) Çelik Destek Sistemleri

19 yüzyılın sonunda tünelcilikte kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılma amaçları püskürme beton uygulanmadan veya dayanımına ulaşmadan önce tünel desteğini güçlendirmek ve tünele gelen yükleri dağıtmaktır. Bu sebepten dolayı genellikle püskürtme beton uygulamasından önce geçici iksa görevi yaparlar. Püskürtme beton tabakasının içinde kalırlar. Süren uygulaması yapılan durumlarda kullanılmaları zorunludur ve borulara destek görevi yaparlar. H profil, U profil (Şekil 2.51) veya kafes kiriş (Şekil 2.52) şeklinde olabilirler. Kafes kirişler profillere göre daha az yük taşımalarına rağmen daha hafiftirler ve daha kolay yerleştirilebilirler. Büyük deformasyonların beklendiği tünellerde kayan birleşim yapabilen U profiller seçilebilir.

Şekil 2.49 U Profiller (Kolybas, 2005)



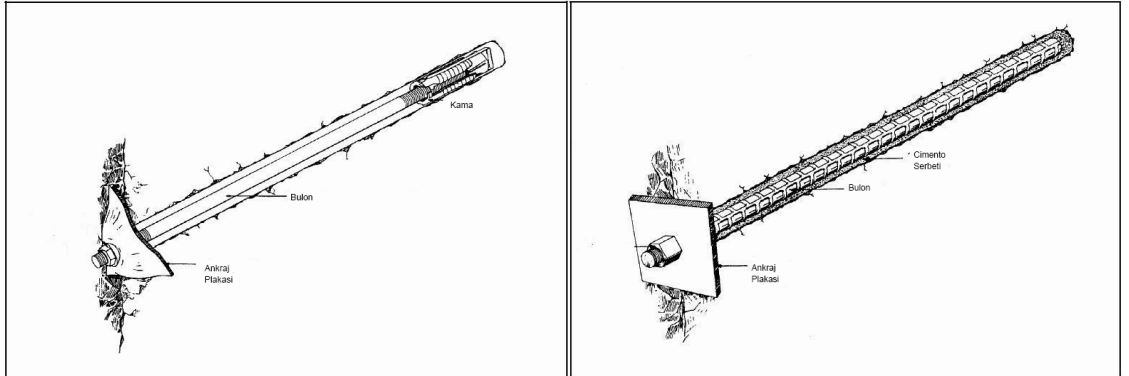
Şekil 2.50 Kafes kirişler



d) Kaya Ankrajları

Kaya ankrajları kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak veya kayada 3-eksenli gerilme durumu oluşturmak için zeminin içine bağlanan çubuklardır. Ankrajlar bağlanma türlerine göre serbest hareketli uçtan bağlamalı ankrajlar ve tam yapışmalı enjeksiyon ankrajları olarak ikiye ayrılabilirler. (Vardar,1979). Ankrajlar yapım tekniğine göre de mekanik (Şekil 2.53) ve fiziksel-kimyasal etkili olmak üzere ikiye ayrılırlar (Önalp, 1983).

Şekil 2.51 Fiziksel Mekanik Ankraj



Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde ankrajlar bir destek elemanı olarak sistematik bir şekilde kullanılırlar. Ankrajlar tünel yüzeyine dik ve şaşırtmalı olarak uygulanırlar.

Ankrajların sayısı, uzunluğu, taşıma kapasitesi ve tasarımları zemin profiline, tünel enkesit alanının büyüklüğüne ve şekline, ano uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Püskürtme betonunun kaya bulonlarıyla birlikte kullanıldığı birçok zemin durumunda geçici kaplama olarak çok iyi performans gösterdiği görülmüştür.

2.4.2.6 NATM Sistemi Uygulaması

Şekil 2.52 1.adım: Tünel kazısının yapılması



Şekil 2.53 2.adım: Kazı işlemini takiben 1.kat çelik hasırın yerleştirilmesi



Şekil 2.54 3.adım: Çelik hasır uygulamasından sonra çelik kafes iksaların yerleştirilmesi



Şekil 2.55 4.adım: Çelik kafes iksaların yerleşimini takiben, ilk tabaka püskürtme betonun



Şekil 2.56 5.adım: İlk kat püskürtme betondan sonra ikinci kat hasır çeliğin yerleştirilmesi



Şekil 2.57 6.adım: bulonlarının yerleştirilmesi ile kazı destekleme işleminin sonlanması

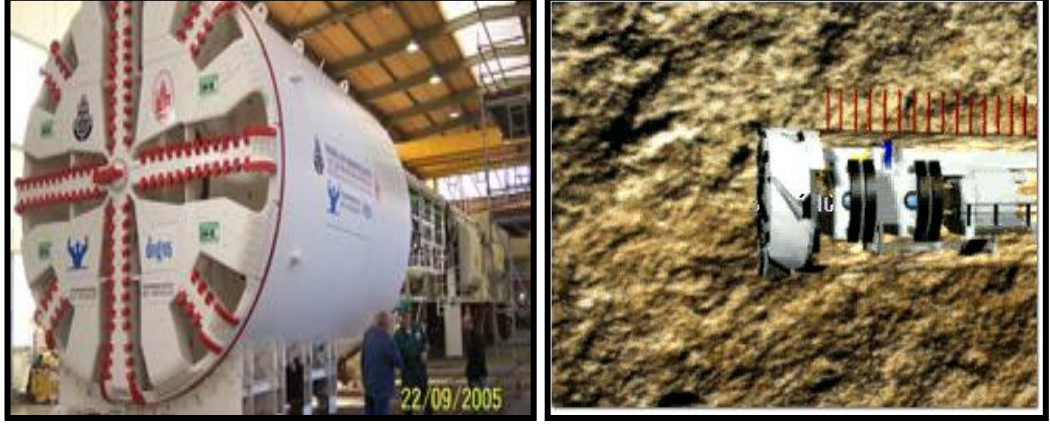


2.4.3 Tünel Delme Makinesi (TBM) Yöntemi ve Tarihsel Gelişimi

İnşaat ve madencilik sektöründe yeraltı yapılarının önemi, teknolojik gelişmelere paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yerüstü yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. TBM'ler genel olarak sert ve orta sert zeminlerde, EPBM'ler ise yumuşak zeminlerde uygulanmaktadır.

Tünellerin hızlı, ekonomik, emniyetli bir de açılması esaslarına dayanan bir sistem de Tünel Delme Makinesi Yöntemidir (*Tunnel Boring Machine Method*) (TBM). *İk yatırım maliyeti yüksek* de olsa tam cepheli tünel açma özelliğine sahip TBM'ler; çökme (*tasman*) önleme kabiliyeti, *daha sessiz, titreimsiz ve hızlı* çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Tipik bir TBM' in görünümü verilmiştir.

Şekil 2.58 TBM görünümü



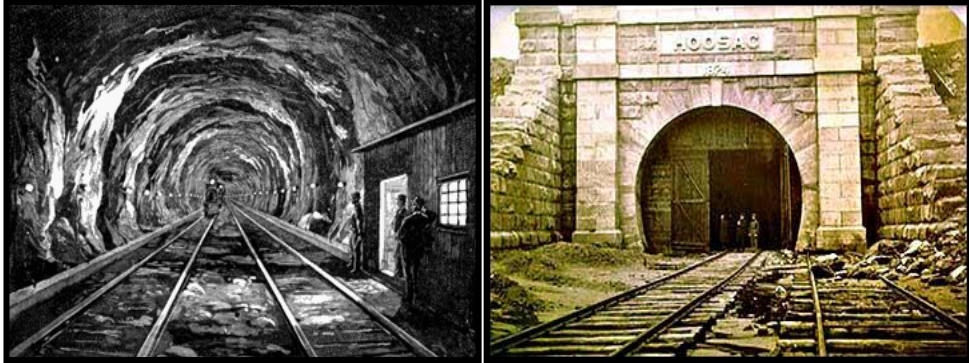
TBM'in Tarihsel Süreci

1846'da İtalya'da Maus tarafından tam cephe kazı yapmak üzere *ilk kazı makinesi* geliştirildi.

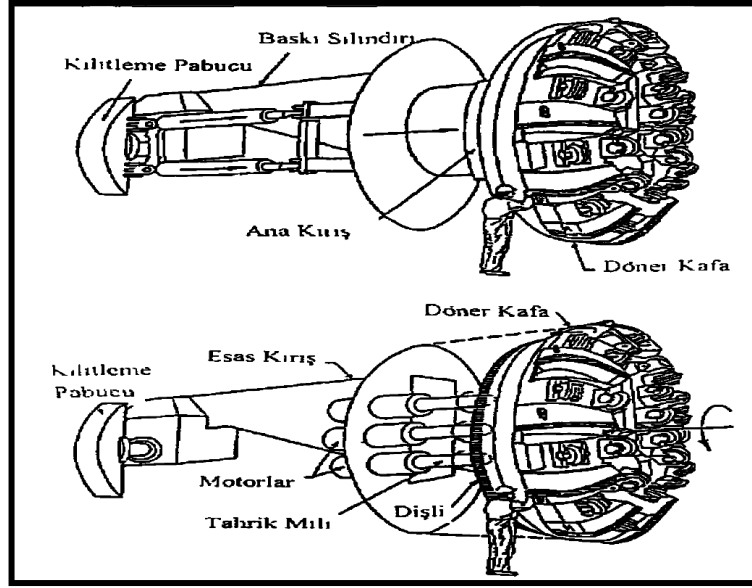
1847'da ABD'de Talbot tarafından makine için disk kesicilerden istifade edilerek gelişim süreci başlatılmıştır.

1851'de *ilk tünel açma makinesi* A.B.D'de Hoosac tüneline kullanılmıştır. Bu makine daire şeklinde döner bir kesme kafasına sahip olup, kesiciler konsantrik daireler çizerek kazı yapacak de dizilmişlerdi. Bu makine, tutunma mekanizması, itme (baskı) mekanizması ve pasa uzaklaştırma sistemlerinden oluşmaktaydı.

Şekil 2.59 Hoosac tüneline görünüm



Şekil 2.60 İlk zamanlarında TBM makinesinin elemanları



1856'ya gelindiğinde, metalürjik ve yapısal tasarım henüz sert kayalarda başarıyla çalışabilecek seviyede değildi. H.Haupt bu makine ile kaya gibi sert yüzeylerde 3m/gün 'lük bir ilerleme yapmayı başarmıştı (Friant ve Özdemir, 1994).

TBM' in esasını oluşturan sert kayalarda delgi işlemi, izleyen 100 yıl için yetersiz kalmış ve hiçbir gelişme olmamıştır. Bazı keski ve kesme cihazları ile donatılmış TBM 'ler yumuşak kayalar ve kömür damarlarında denenmek istenmiş, fakat tatminkâr sonuçlara ulaşamamıştır.

1856-1857 yıllarında TBM, Wilson tarafından geliştirilmiş ve patentleri alınmıştır.

1871'de Brunton *disk keskilere sahip ilk tam cephe kazı makinesini* tasarladı (Wiley-Sons, 1982).

1875'de tamamıyla döner bir sistem ile donatılmış, sert zeminlerde üstün bir performans sergileyen ve tam cephe kazı yapabilen TBM tasarımı *Beaumont* tarafından yapılmış ve patenti alınmıştır. Bu tasarım İngilizler tarafından geliştirilmiş, 1880 yılında İngiliz kanal tüneli olan 38 km uzunluğundaki Manş tüneli kazısında (*en uzun su altı tüneli*) kullanılmıştır.

1950'lerin başında J.S. Robbins tarafından tasarlanan *ilk TBM* (Robbins makinesi) Washington'da Robbins şirketi tarafından üretilmiştir. Robbins, **1956** yılında kalem kesiciler yerine döner disklerin kullanılma fikrini de ortaya atmıştır.

1956'da Robbins tarafından Toronto'da gerçekleştirilen uygulamada ilerleme hızı 38 m/gün olarak gerçekleşmiştir. Bu uygulama, TBM 'lerin yumuşak ve orta sert kayalarda ekonomik olarak kullanılabilmesinin *ilk göstergesi* olmuştur (Friant ve Özdemir, 1994).

Toronto'daki uygulamayı izleyen 26 yıl boyunca teknoloji oldukça yavaş ilerlemiştir. TBM imalatçıları dene gör politikası izleyerek, makinelerin daha sert ve aşındırıcı kayalarda kullanılmasını sağlamaya çalışmışlardır.

1953-1960 yılları arasında Güney Dakota, Oahe barajında ve 1965 yılında Toronto, Humber nehrinde kullanılmış; geniş çaplı kazıda verimli olarak kullanılabilmesi görülmüştür.

1970-1980 yılları arasında dünyada birçok üniversite ve araştırma kurumunda disk kesicilerin sert kayalardaki performansı üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır.

2006 yılında yapımına başlanan Niagara tünel projesinde kayada çalışan dünyanın en büyük kazı çapına (14,4 m) sahip TBM kullanılmıştır. TBM'in disk kesici kafa sayısı 85, diske etki eden normal kuvvet 39 t/kesici, kesici kafa gücü 6330 HP, döndürme momenti 18800 kNm, hidrolik iticilerin (pistonların) maksimum uzunluğu 1.72m, kesici kafa itme basıncı 275.7 bar, delme ünitesi hariç TBM ağırlığı 1100 ton' dur .

2.4.4 Tam Cephe Tünel Açma Makinaları (Tbm) (YTÜ Ders Notları)

Şekil 2.61 Gotthard Base Tünelinde kullanılan TBM, İsviçre



Tam Cephe Tünel Açma Makinelerinin ilk uygulamaları galeri açma makinalarından sonra olmuştur. 1970'lerden sonra teknolojik gelişmelerin sonucu olarak performansları senelere boyunca oldukça yükselmiştir. Genellikle, metro, otoyol, demiryolu tüneli inşaatları ve tünelleri açılmasında büyük ölçekli işletmelerce kullanılmaktadırlar. Türkiye'de bu alanlardaki gelişme ve yatırımlar devam etmektedir.

Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yer üstünde yapılara zarar vermeden başarılı olarak çalışırlar.

İlk yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir.

Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için kullanılacak kafa dizaynları ve keski tipleri, makineyi dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir. Açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonların önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmaktadır. Tüm cephe aynı anda kazılır ve arın bütünüyle ilerler. Kazı yapabilmek için arına büyük bir baskı kuvveti uygulayarak kayacın tek

eksenli basınç dayanımı yenilerek kazı yapılır. 2-14 m arasında değişen çaplarda kazı yapabilecek şekilde tasarlanırlar. Bazı özel genişletme makineleri 3 m çaplı pilot kazı deliğini 15 m çaplı hale getirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Uzunlukları 12-25 m arasındadır. TBM bugün en sert formasyonlarda bile başarıyla kullanılmaktadır. Basınç dayanımı 2500 kg/cm² olan bir granit formasyonunda, 7 m çapında bir makine günde kolaylıkla 8-9 m'lik kazı hızlarına ulaşabilmektedir. Kazılan malzeme kafanın orta kısmındaki boşluktan arın gerisine alınır. Kesikleri kontrol etmek için kesme kafası geriye çekilir ve bu sayede arın görülebilmektedir.

TBM üzerinde lazerli yön verme sistemleri mevcuttur. Bunlar kazı sırasında birçok makine parametresinin izlenmesine olanak verirler. Ayrıca, izleme ve veri transferi sistemleri ile makine performansını otomatik olarak optimize eden sistemler kullanılmaktadır.

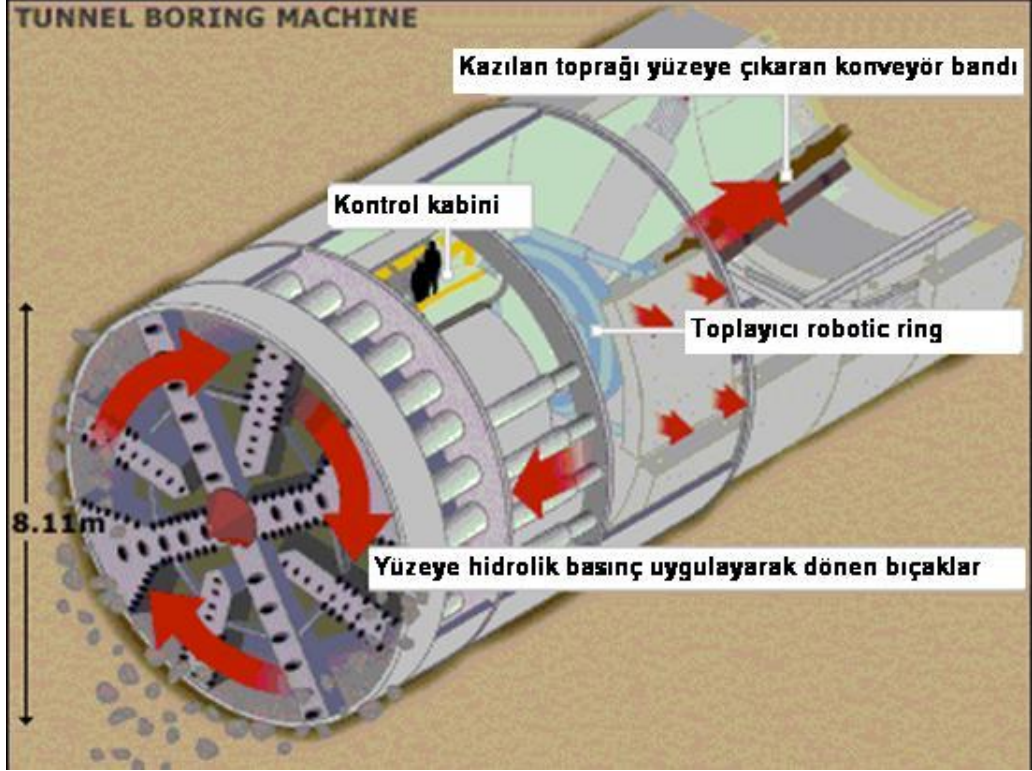
Tünel açma makinelerinde elektrik ve hidrolik donanımların kumanda aletleri operatör mevkiinde toplu halde bulunmaktadır. Makineyi burada idare etmek için bir işçi yeterli olmaktadır. Bu büyük makinelerin yönsel idareleri önceleri çok zordu. Ancak şimdi "Lazer Işınları" sayesinde artık çok büyük uzunluktaki tünele sürülmesinde ve kurba (Dönemeç ya da Viraj) olan hallerde bile, santimetrelerle ölçülebilecek kadar büyük bir hassasiyetle yönsel idare mümkün olabilmektedir.

2.4.4.1 Tbm'lerin Yapısı

TBM 3 ana bölümden oluşur. Kuyruk kısmı, gövde kısmı ve yüz kısmıdır.

Ön (yüz) kısımda; Kesme kafası, itme silindirleri, motor ve operatör kabini vardır. Kesme kafası üzerine değişik formasyonlar için farklı kesici uçlar yerleştirilir. Kesici tipte uçlar, bıçaklar, ripperler ve dişler yumuşak tip formasyonların kazılmasında kullanılmaktadır. Disk tipte kesimler tüm kayaç türlerindeki kazılarda kullanılabilir.

Şekil 2.62 Ön Yüz Ve Kesiciler



Riper



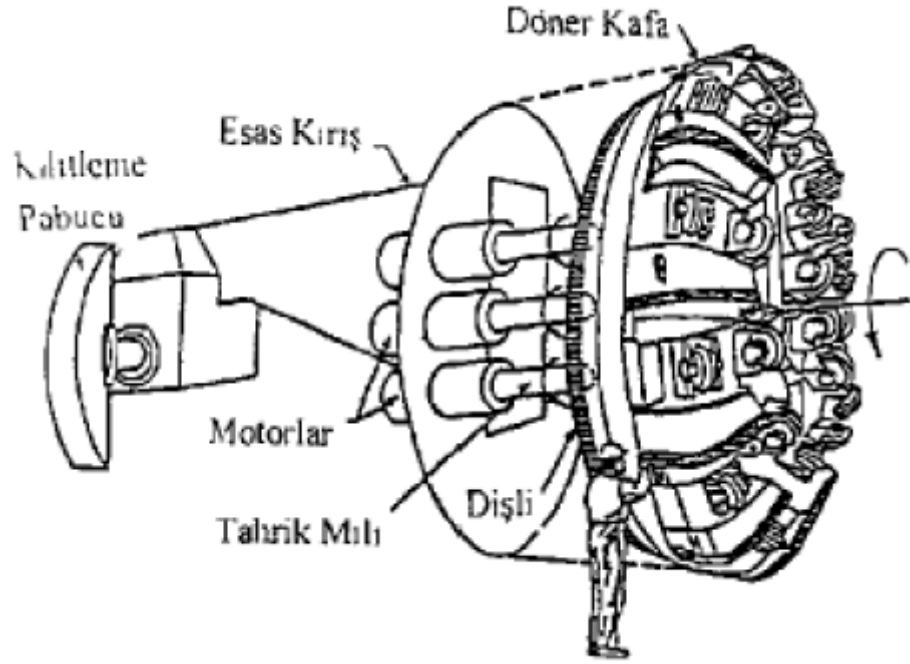
Kesme Bıçakları



Disk Kesiciler

Gövde bölümü; Operatör çemberi, hidrolik ve elektrikli sistemleri, motorlar, jeneratörler, dişli sistemi ve çalışma platformu gibi üniteleri içermektedir. Makinenin yapısına göre sayısı 2 – 8 arasında değişen dayanma ayakları (kilitleme pabucu, gripper) taşır. Bu ayaklar kazı esnasında makineyi yerinde tutmakta ve sağ –sol yapmayı ayarlamaktadır. Ayrıca üst tarafında kazılmış olan malzemeyi arkaya nakleden bir bant bulunmaktadır.

Şekil 2.63 Tbm gövde kısmı şeması



Kuyruk bölümü; Tahkimat kurma kısmı (segment montajı), vantilatör, bant ve yardımcı motorlardan oluşur.

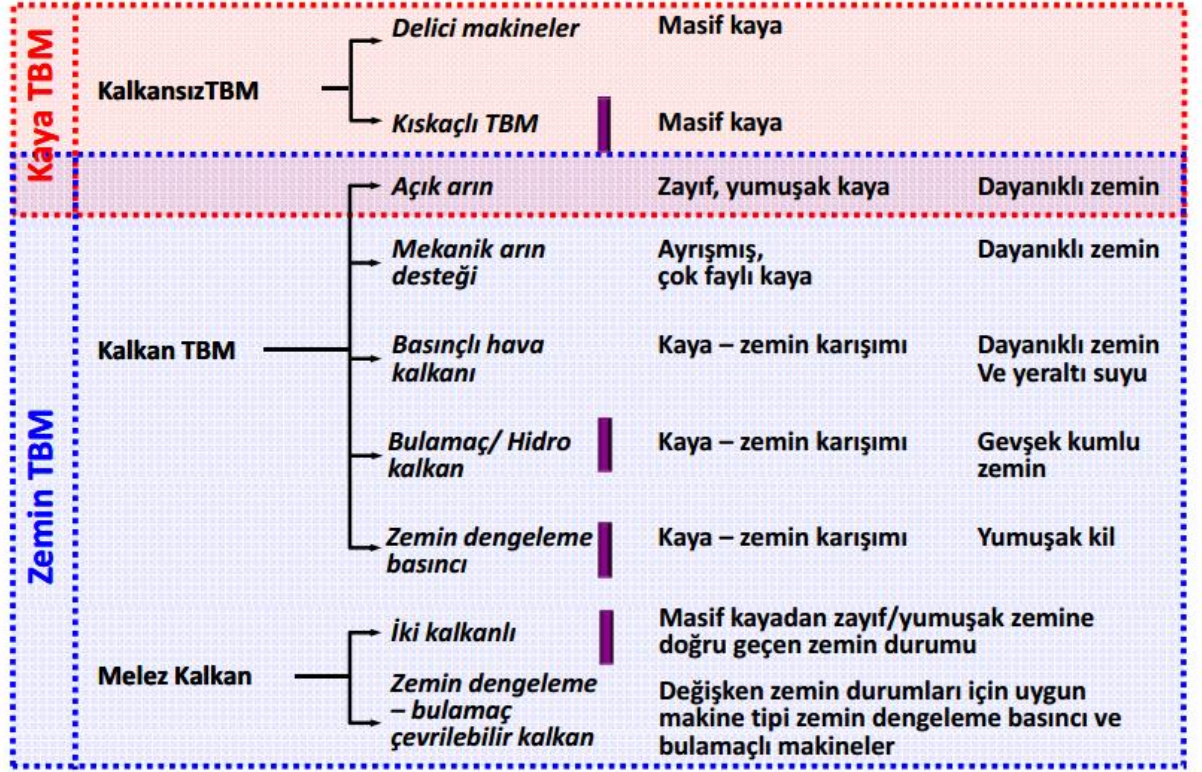
Şekil 2.64 Tbm Kuyruk kısmı Görünüşü



2.4.4.2 Tbm'lerin Sınıflandırılması

Çalıştıkları zemin formasyonuna göre sınıflandırılabilirler.

Şekil 2.65 Zemin Formasyonuna Göre Sınıflandırma



Kaynak: Zhao, J. 2008

Şekil 2.66 Zemin formasyonuna göre tbm seçim doğrusu



2.4.4.3 Sert Kayaçta Çalışan Tünel Açma Makinaları

2.4.4.3.1 Şiltsiz (Gripper) TBM

Koruyucu kalkanı yalnızca kesici kafanın olduğu kısımda olan tünel kazma makinalarıdır.

- Kesici kafa
- Kalkan
- Parmaklıkları
- Kaldırma ringi
- Ankraj delicisi
- Koruyucu kafes
- Tel düzenleyicisi ve kaldırıcısı
- Dayanma ayağı

Şekil 2.67 Kalkansız TBM



Şiltsiz (gripper) TBM çalışma düzeni:

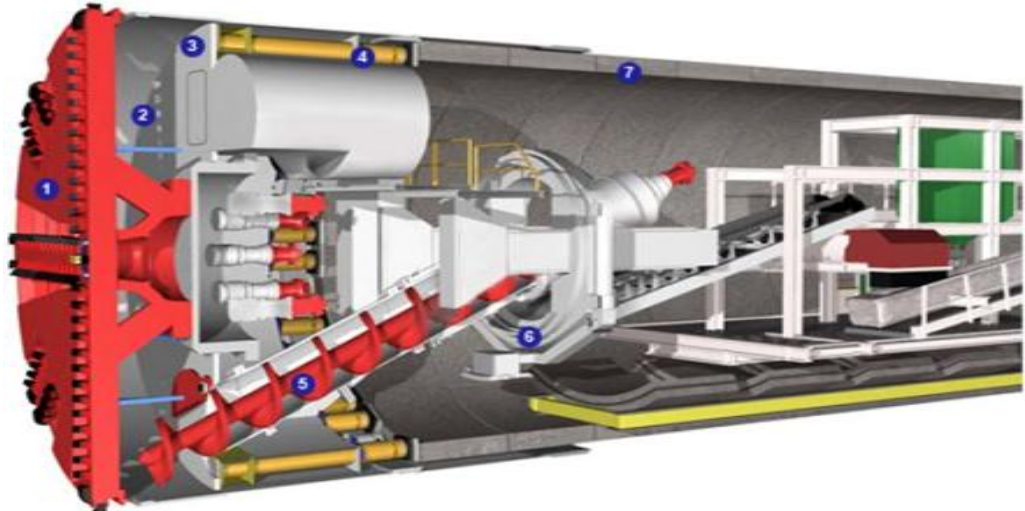
Bu tarz TBM 'lerle ilerleme yapılırken itme gücü; hidrolik dayanma ayaklarının (gripper) yandaki sağlam zemine basınç yapıp iyice sıkıştırılmasından sonra en önde bulunan ve kazıyı yapan kısmın ileri doğru hidrolik pistonlar vasıtası ile itilmesiyle sağlanır. Her kazı aşaması hidrolik pistonların uzunluğu kadar yapılabilir. Kazı işlemi bittikten sonra yan kısımlarda bulunan ayaklar pistonlarla boşaltılır. Daha sonra arka kısım, ön kısma doğru çekilir ve ayaklar tekrar sabitlenir. Bu işlemlerden sonra bir sonraki kazı işlemi başlatılır. Tahkimat sistemi ise önde kazı devam ederken arka kısımda yapılabilir.

Şiltsiz TBM'ler ancak çok sağlam olan kaya ortamlarında kullanılabilir. Kayanın sert ve kendini tutabilen zeminlerde tercih edilebilir. İtme silindirlerinin yapmış olduğu basınca dayanabilecek kalitede olması gerekmektedir.

2.4.4.3.2 Şiltli TBM

Tam daire şeklinde komple bir şilt mevcuttur. Tek şiltli TBM'ler karmaşık zeminlerde ve kaya içerisinde açılacak tünellerde kullanılabilirler. Tahkimat olarak beton prekast segmentler kullanılır.

Şekil 2.68 Tek Kalkanlı TBM



1- Kesici kafa 2-Kazı bölmesi 3- Basınç bölümü 4- İtme silindirleri 5- Burgu konveyör
6-Erektör 7-Prekast beton segmentler

2.4.4.3.2.1 Tek Şiltli TBM Çalışma Düzeni

1. Aşama: İtme silindirleri segmentlere dayanarak kafayı ileri doğru iter. Bu durumda kafa hem aynaya doğru ilerlemekte hem de dönmekte ve bu sayede kazı yapılmaktadır. Kazıdan çıkan pası burğu konveyör ile aktarılıp atılmaktadır.

2. Aşama: Bir adımlık kazı tamamlanmış, silindirler tamamen açılmış ve kafa dönüş işlemi durdurulmuştur.

3. Aşama: İtme silindirleri kısım kısım kapatılır ve prekast segmentler yerleştirilir.

4. Aşama: Segmentlerin arka kısmına grout harcı (Çimento esaslı, elyaf ve polimer takviyeli, yüksek akıcılıkta olan, ayrışma yapmayan, kendiliğinden yerleşen grout harcıdır) enjekte edilip tahkimat tamamlanır.

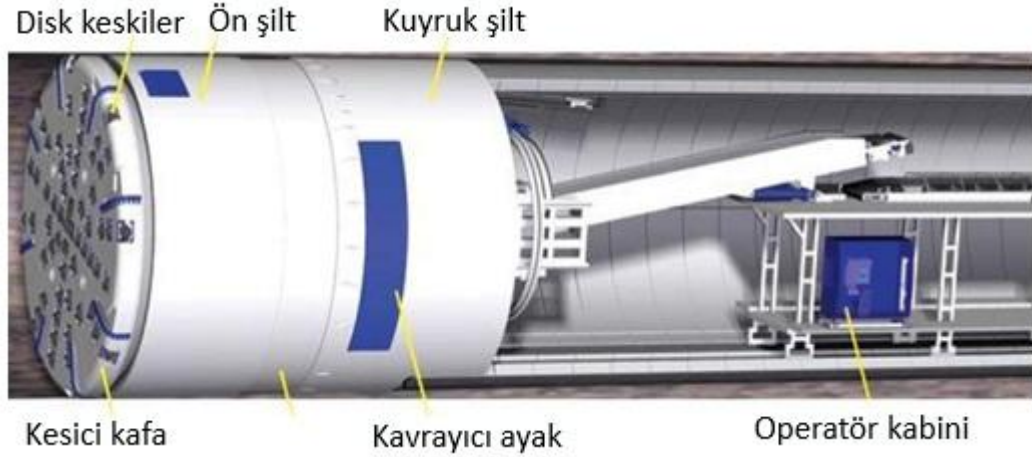
5. Aşama: Silindirler son yerleştirilen segmentlere dayanır ve TBM tekrar kazıya hazır hale getirilir.

2.4.4.3.2.2 Çift Şiltli TBM

Çift şiltli TBM 'lerde hem tek şiltli olarak hem de teleskopik olarak ana şildin içine uzanabilen kuyruk tarafındaki ikinci şildi bir kavrayıcı (gripper) düzeneği ile kullanmak mümkündür. Bu tür yapının avantajı sabit kuyruk şildinde kaplama işi ile kavrayıcıları iterek yapılacak delme işlerinin aynı anda gerçekleştirilmesine imkân sağlamasıdır. Bu makineler sert ve karmaşık zeminlerde kullanılabilir.

Çift şiltli TBM 'lerin gelişmesi 1980'li yıllarda olmuştur. Ön şiltteki keski ve kepeçler kırıklı arazide çalışırken görebilecekleri hasara karşı korunmuşlardır.

Şekil 2.69 Çift Şiltli TBM



Çift şiltli TBM çalışma düzeni;

1. Aşama: Kavrayıcılar açılmış ve TBM sabitlenmiştir. Ana itme silindirleri kesici kafayı aynaya doğru iter ve kesici kafa dönmeye başlar.

2. Aşama: TBM kazı yaparken erektör segmentleri yerleştirilir.

3. Aşama: Ana itme silindirleri tam olarak açılmış ve kazı bitmiştir. Kavrayıcılar kapatılır ve ikincil itme silindirleri segmentlere dayanarak kavrayıcı şiltini kapatırlar.

Bu çalışma düzeninin en büyük avantajlı kazı yapılırken aynı anda segmentlerin yerleştirilebilmesidir. Bu şekilde zamandan tasarruf edilir ve daha verimli çalışmak mümkün olur. *Z.K.Ü Ders Notları*

2.4.4.4 Yumuşak Zeminlerde Çalışan Tünel Açma Makinaları

Uygun makine seçimi; zemin ve yüzey koşullarına, tünel kesitinin çapına, tünel hizasına, tünel inşaatına bağlıdır.

Şekil 2.70 Yumuşak zemin TBM



EPBM TBM



Slurry tipi TBM

2.4.4.4.1 Arazi Basıncını Dengeleme Makineleri (EPBM)

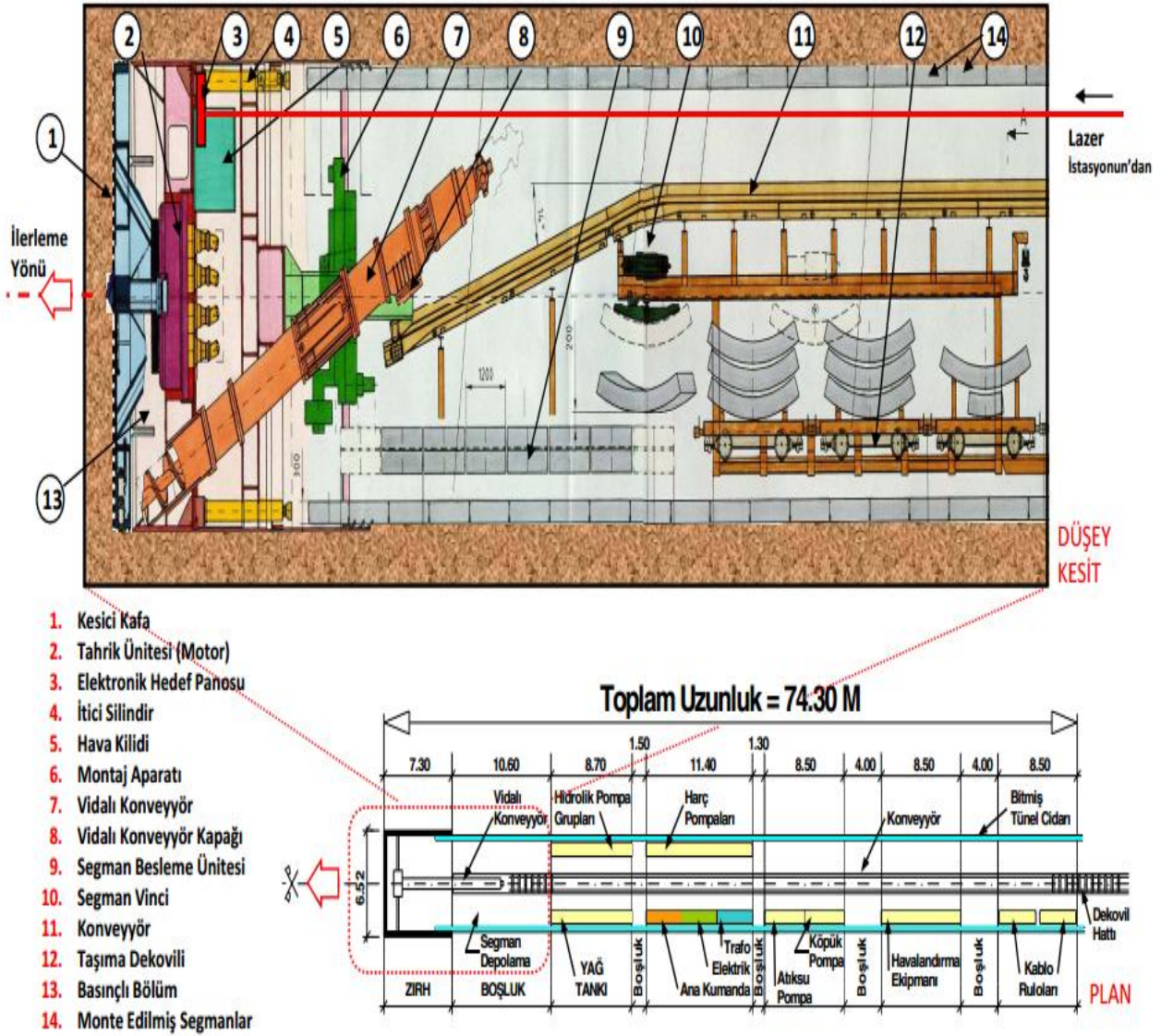
Arazi basınçlarını dengeleme esasına göre çalışan EPB makineleri ilk olarak Japonya'da 1960-70'li yıllarda görülmeye başlamıştır.

Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda kendini kısa süreli bile tutamayan kayaların kazısında bu makineden faydalanılır.

Temel çalışma prensibi su gelirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, "bizzat arazi içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkân verilmesi" diye tanımlanabilir. Arazi basıncını dengelemek tünel aynasındaki akıcı malzemeyi kontrollü bir şekilde kazıp zeminin üstünde çökmeleri önler.

Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir. Bu destekleme basıncının tünel kalınlığındaki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir. Bu makineler 10 bara (1MPa) kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde yapılabilirler. En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının %10-15 veya daha az olduğu durumlardır.

Şekil 2.71 EPB Makinesi Prensip Şeması



Bir EPB makinesinde öncelikle kesici kafanın döndürme motorları ile döndürülmesi ve kesici kafaya itirme silindirleri ile araziye destekleyecek kadar ya da biraz daha fazla kuvvet verilmesiyle akıcı zemin kazı haznesine (working chamber) dolmaya başlar. Böylece arazi ve su basıncı etkisiyle kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basınç (max. 1MPa) oluşturulur. Kazı haznesi tamamen dolduktan sonra istenilen destekleme ortamı yaratılır ve kazılan malzeme burgu konveyyör yardımıyla normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlanır.

Burada burgu konveyörün en önemli görevi aynada oluşturulan basıncın kademeli olarak düşürülmesi ve normal basınca indirilerek düzenli bir malzeme çıkışının

sağlanmasıdır. Burgu konveyörün çıkış kapısından bant konveyöre boşalan malzeme kuyruk bölümde bekleyen vagonlara ulaşır ve buradan da kuyu ağzına taşınır.

Kazı ilerlerken şildin tam arkasına taşıyıcı raylarla getirilen beton segmentler erektörler yardımıyla yerleştirilirler. Bu arada segmentler ve zemin arasında kalan boşluklar beton-bentonit karışımı ile doldurularak kapatılırlar.

EPB makinesi çok sert kayalardan (diskli) çok yumuşak olanlarına (kalem kesikli) kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonlarında kullanılmak üzere tasarımılandırılabilirler. Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerinin (slurry machines) yerlerini almaktadırlar.

Şekil 2.72 Çamur Makinesi (slurry machines)



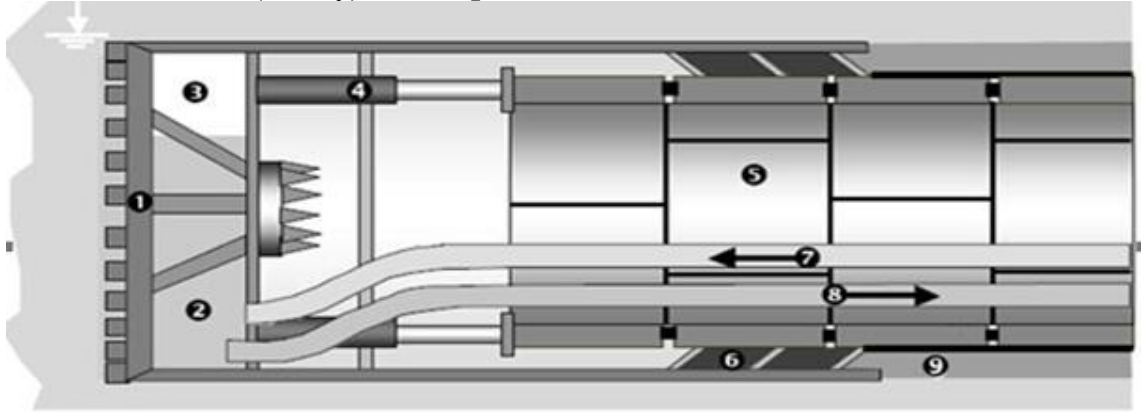
2.4.4.4.2 Çamur (Slurry) Şildi Tipi Makinalar

Bu tip makineler, arazinin çok akıcı olduğu veya tünel güzergâhı boyunca böyle akıcı formasyonlara da rastlanabileceği durumlar için yapılmışlardır. Makine, değişken devirli tam cephe kesme kafasına sahip, astarlara dayanarak itmek suretiyle kuvvet oluşturan tam bir şilt tasarımıdır. Daima basınç altındaki kafa ile çalışıyor olma özelliğiyle anılırlar.

Çamur şildi tipi makinalar Japonya'da ve Batı Avrupa'da göçmeyi önlemek için kazı aynasını basınç altında tutmanın gerekli olduğu şartlarda geniş çapta kullanılmaktadır. Bu tip makineler derinliği az olan yerlerde kullanılmakta olup, uygulanan basınç değeri 3 bar (0,3 MPa) mertebesindedir.

Genellikle kalem ucu tipi keskiiler ve bazen de disk tipi keskiilerle kombinezon da yapılabilmektedir. Diskler kalem keskiilere nazaran biraz daha öne çıkmış vaziyette olurlar. Böylece, büyük bloklara rastlandığında disklerin onları parçalaması ve kalem keskiilerin kırılması önlenmiş olmaktadır.

Şekil 2.73 Çamur (Slurry) Şildi Tipi Makinalar



1-Kesici Başlık 2-Bentonit Haznesi 3-Basınç Duvarı 4-Vidalı konveyör 5-İtici Silindir 6-Kuyruk Dolgusu 7-Bentonit 8-Bulamaç 9-Montajı Tamamlanmış Segment

Yeryüzünde hazırlanan akıcı çamur (genellikle bentonit) ayna ile kesme kafası arasındaki boşluğa enjekte edilir.

- Çamur aynadan kazılan malzeme ile karışarak çamur keki oluşturur. Bu karışım bir çamur pompası ile geri tarafa alınıp yeryüzüne pompalanır.
- Yeryüzünde hidrosiklon, santrifüj, vb. makinalarda süzülüp temizlenen çamur yeniden devreye sokularak kullanılır.

Çalışma esnasında dikkat edilecek başlıca hususlar:

- Aynaya gereğinden fazla basınç vermemek (bu durumda yeryüzünde kubbeler oluşabilir),
- Yeryüzüne ulaşacak şekilde baca oluşmasını önlemek için kazılan malzeme miktarını dikkatle ölçmek.

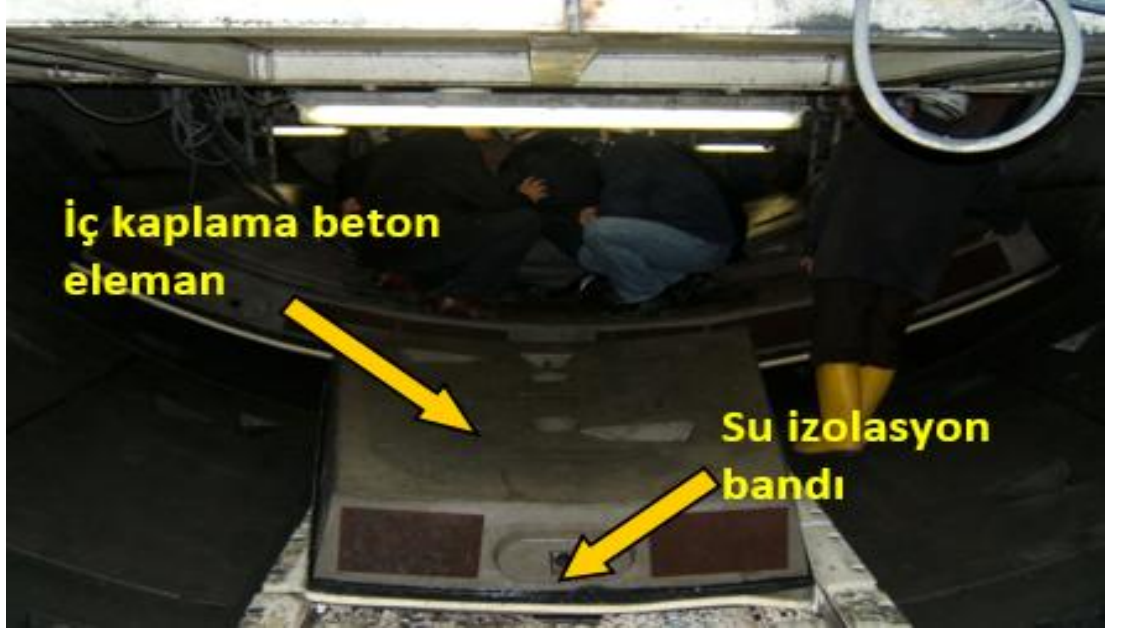
Çok fazla çamur, kazılan malzeme ve çamuru birbirinden ayırmak için gerekli makina ve tesislerin olması, kullanım alanındaki maliyetleri artırmaktadır.

2.4.4.4.3 Segment Üretim Uygulama Örnekleri

Şekil 2.74 Ön üretimli (Segment) beton elemanlar ve montaj aşamaları



Şekil 2.75 Ön üretilmiş (Segment) beton elemanlar ve montaj aşamaları



Şekil 2.76 TBM içine alınan iç kaplama beton eleman (AYIŞ 2010)



İç kaplama beton eleman, vakumlu ekipman yardımıyla şilt içerisine yerleştirildikten sonra, montaj bulonları ile bağlantısı yapılır.

Şekil 2.77 Ön üretilmiş (Segment) beton elemanlar ve montaj aşamaları



Montaj tamamlandıktan sonra silindirik formu şilt ile ilerleterek çekilir. Hemen ardından iç kaplama ile zemin arasındaki boşluk, basınçlı çimento harcı enjeksiyonu ile doldurulur.

Şekil 2.78 Ön üretilmiş (Segment) beton elemanlar ve montaj aşamaları



Kazı aşamasında itme kuvvetini sağlayan pistonlar, iç kaplama elemanlarına daimi bir baskı yaparak iç kaplama formunu korur.

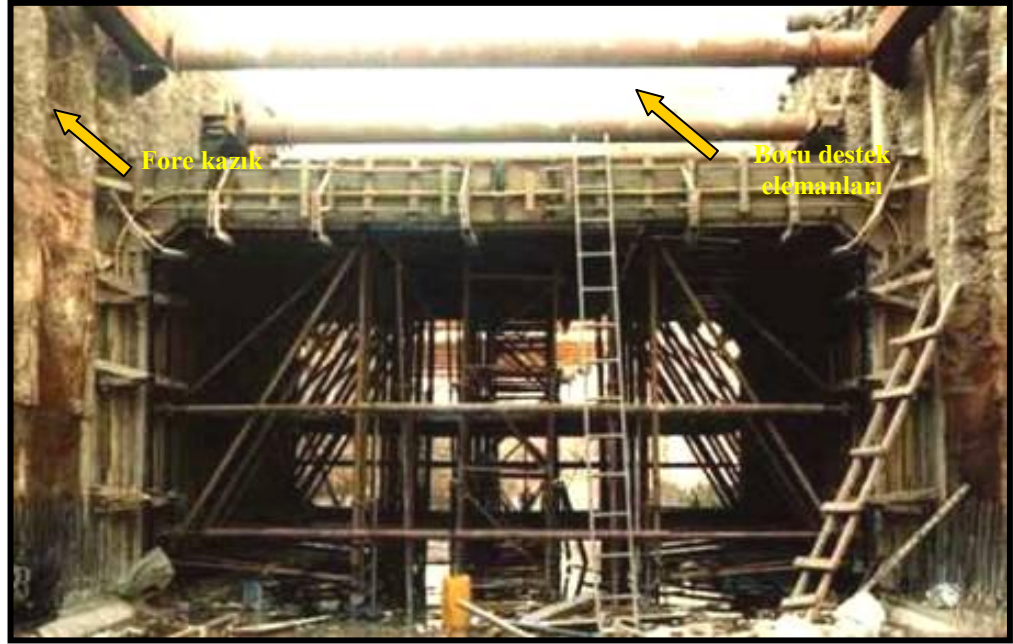
Şekil 2.79 İmalatları tamamlanan tünelden bir görünüm.



2.4.5 Aç-Kapa Yöntemi

Metro tünellerinin güzergâh itibariyle ana yolların altından geçtiği yüzeye yakın kısımları, çığ tünelleri, kanalizasyon ve içme suyu tünelleri ile yer altı geçitlerin (yaya, menfez vb.) inşası, aç-kapa yöntemi ile açılabilir. Aç-kapa yöntemi, diğer yöntemlere nazaran daha basit ve ekonomik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemde önce kazı boşluğu çevresi betonarme kazık veya betonarme perde duvar ile desteklendikten sonra, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılır. Yeraltı suları yüzeye yakınsa yeraltı su seviyesi düşürülür veya su, derin kuyulara drene edilir. Tamamen açık havadaki duvar, örme usullerine göre yapılır. Tavanın oluşturulmasında eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik varsa bir kemer oluşturulur ve bu kemer kısmı da açık havada oluşturulacağından fazla güçlükle karşılaşmaz. Eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik yoksa betonarme bir tavan oluşturulabilir. Yerleşim alanları içerisinde yapılan kazı çalışmaları, gürültü ve trafiğin engellenmesi gibi zararları nedeniyle pek tercih sebebi değildir. Trafiğin gidişatını engellemek için seyyar köprüler kullanılabilir. Aç-kapa yöntemi ile inşa edilen bir tünelden görünüm vermiştir.

Şekil 2.80 Aç Kapa Yöntemi



Şekil 2.81 Aç-kapa yöntemi ile inşa edilen tünel



Aç-Kapa tünel açma yönteminin diğer yöntemlerden farkı, tavanında çökme (tasman) oluşmamasıdır. Bu nedenle çevredeki yapılara zarar vermeden geçilmesi mümkündür. Ayrıca diğer yöntemlerle yeteri kadar yapılamayan izolasyon işlemi bu yöntemle kolaylıkla yapılabilir (*Palmstorn vd., 1988*).

3. KAYA KÜTLE SINIFLAMALARI

Kaya kalite değeri (İngilizce: Rock Quality Designation) en yaygını 1964'te Deere tarafından geliştirilen kaya sınıflama sistemlerinden biridir. RMR ve Q-sistemi kaya sınıflama sistemlerinin temel unsurlarından biridir.

- Kaya Kalite Göstergesi (RQD-Rock Quality Designation)

Kaya kütlesi tanımlamalarında sıklıkla kullanılan bir girdi olup, ilk olarak (Deere, 1964) tarafından geliştirilmiştir. RQD (%), sondajda boyu 10 cm'den fazla olan sağlam karotların toplam uzunluğunun kademe ilerlemesine oranı olarak tanımlanmıştır (Şekil 1). RQD 'ye dayalı kaya kalitesi sınıflaması Tablo 3.1'de verilmiştir.

$$RQD = \frac{\sum X_i}{L} \times 100\%$$

Bu formülasyonda;

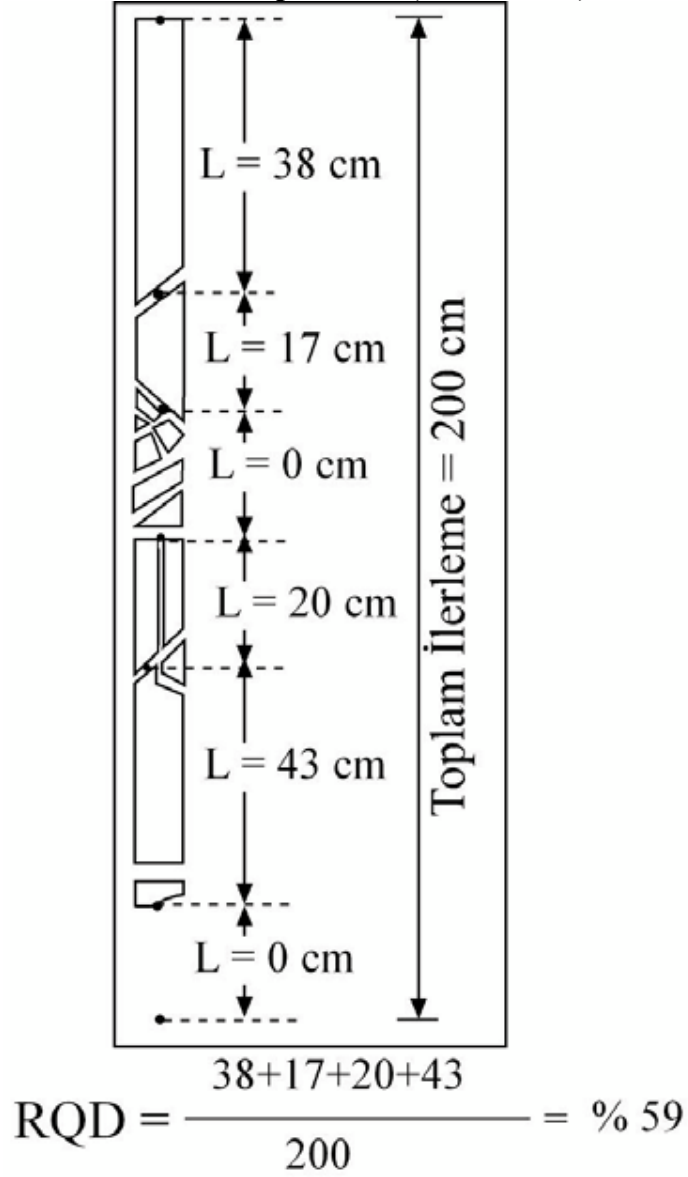
xi: 100 mm ve üzerindeki süreksizliklerin toplam uzunluğu (karot numuneye ait)

L: Manevra boyu (Toplam Sondaj Uzunluğu)

Tablo 3.1 RQD kaya kalite sınıflaması (Deere, 1964)

| RQD, % | Kaya kalitesi |
|---------------|----------------------|
| 0-25 | A: Çok düşük |
| 25-50 | B: Düşük |
| 50-75 | C: Orta |
| 75-90 | D: İyi |
| 90-100 | E: Çok iyi |

Şekil 3.1 Örnek RQD tanımı ve hesaplanması (Deere, 1964)



Kaya kütlesi kavramı bir bütün olarak ele alındığında, kayaç, sağlam kaya (taş) ve süreksizlikleri ifade etmektedir. Bu birimlerin fiziksel ve jeomekanik özellikleri birbirinden farklı olup, kütlelerin genel davranışını etkilemektedir. Hemen her türlü kaya mühendisliği ile ilgili yapıda kütlelerin sınıflandırılması, projelendirme, tasarım ve gerekirse iyileştirme açısından önemlidir.

3.1 TAŞ (sağlam kaya-intact rock)

Kaya kütlesi içinde herhangi bir süreksizlik tarafından kesilmemiş en küçük kaya parçasıdır. Dayanımı kaya ve süreksizliklerden fazladır.

3.2 KAYA (Rock)

Sağlam ve zayıf kaya parçaları, bloklar ve bozunmuş/ayrışmış kaya olarak tanımlanabilir. Kütlelerin genel davranışı da bu birimlerin birbirlerine göre olan davranışları ile temsil edilir.

3.3 SÜREKSİZLİK (Discontinuity)

Jeolojik anlamda farklı fiziksel ortamları birbirinden ayıran zayıflık düzlemlerinin (fay, tabaka düzlemi, şistozite, folyasyon, klivaj, vs.) genel adıdır. Süreksizliklerin özellikleri, konumları ve dağılımları kaya kütlesi davranışını önemli derecede etkiler. Kütle içindeki süreksizliklerin tanımlanmasında; süreksizliklerin türü, aralığı, açıklığı, sıklığı, yüzeylerin durumu, devamlılığı, dolgu durumu, ayrışma ve su durumu gibi birçok etken rol oynar. Arazide yapılan hat, pencere vb. gibi çalışmalar yanında sondaj verileri de kapsamlı olarak incelenmelidir. Sondajdan alınan karot örneklerinin tanımlanması ve jeoteknik loglama yapılması sırasında kullanılan kavramlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

3.4 TEK EKSENLİ BASMA DAYANIMI

Birçok sınıflamada girdi olarak kullanılır. Sondaj karotlarından boy/çap oranı 2-2,5 olacak şekilde üst ve altı düzeltilerek hazırlanan örneklerde deney yapılarak tek eksenli basma dayanımı (σ_c) elde edilir. Deney yapılamayan durumlarda nokta yük indeksi değerinden de faydalanılabilir. Çizelge 3.1'de sınıflama ve tanımlar verilmiştir (Deere&Miller, 1966)

Tablo 3.2 Tek eksenli basma dayanımına göre sınıflandırma

| Sınıf | σ_c (kg/cm ²) | Tanım |
|-------|----------------------------------|---------------------|
| A | >2000 | Çok yüksek dirençli |
| B | 1000-2000 | Yüksek dirençli |
| C | 500-1000 | Orta dirençli |
| D | 250-500 | Düşük dirençli |
| E | <500 | Çok düşük dirençli |

3.5 RQD YÖNTEMİ SEÇME ESASLARI

İstanbul metrosunda yapılan çalışmalar sonucunda kazı hızının tahmininin RQD değerleri kullanılarak tahmin edilmiştir.

Gerek net kazı hızının ve gerekse brüt kazı hızının, proje aşamasında, tünelin geçeceği zemini tanımak maksadıyla açılan sondajlardan elde edilen tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve RQD değerlerinin kullanılması suretiyle yaklaşık olarak kazıdan evvel kestirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma sonucunda, net kazı hızının tek eksenli basınç dayanımına, RQD değerine ve özellikle de $RQD \cdot \sigma_c / 100$ değerine dayanarak tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır. Brüt kazı hızını en iyi açıklayan kayaç özelliğinin ise tek eksenli basınç dayanımı/çekme dayanımı oranının olduğu görülmüştür.

Metro kazıları esnasında, benzer kayaçların, benzer çalışmalarda, aynı davranışlarda bulunağı düşünülürse, bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan, İstanbul'da, bundan sonra yapılacak metro kazılarında ve başka metro çalışmalarında kazı hızının tahmininde kullanılabilirliği ortaya konmuştur. (*İ.OCAK,2005*)

4. ÖRNEK ÇALIŞMA: KADIKOY KARTAL METROSU PROJESİ

4.1 İSTANBUL VE METRO

İstanbul, 13 milyonu aşan nüfusuyla (ülke nüfusunun yaklaşık % 20 'si) ulusal GSYH'nin yaklaşık % 27'sini üreten, toplanan vergilerin yaklaşık %40'ını karşılayan ve Türkiye ihracatının yarısını yapan kuzey güney aksında ortalama 43,5 km doğu batı aksında 165 km uzunluğa sahip toplam 5343 km²'lik yüzölçümlü bir metropoldür.(dpt.gov.tr) Bu metropoldeki deki nüfus artışı büyük metropoller içerisinde en yüksek orana sahip olanlardan biridir. Türkiye'nin en büyük metropolü olan İstanbul, 13 milyonluk nüfusuyla Avrupa'nın 23 ülkesinden daha büyüktür. (OECD).

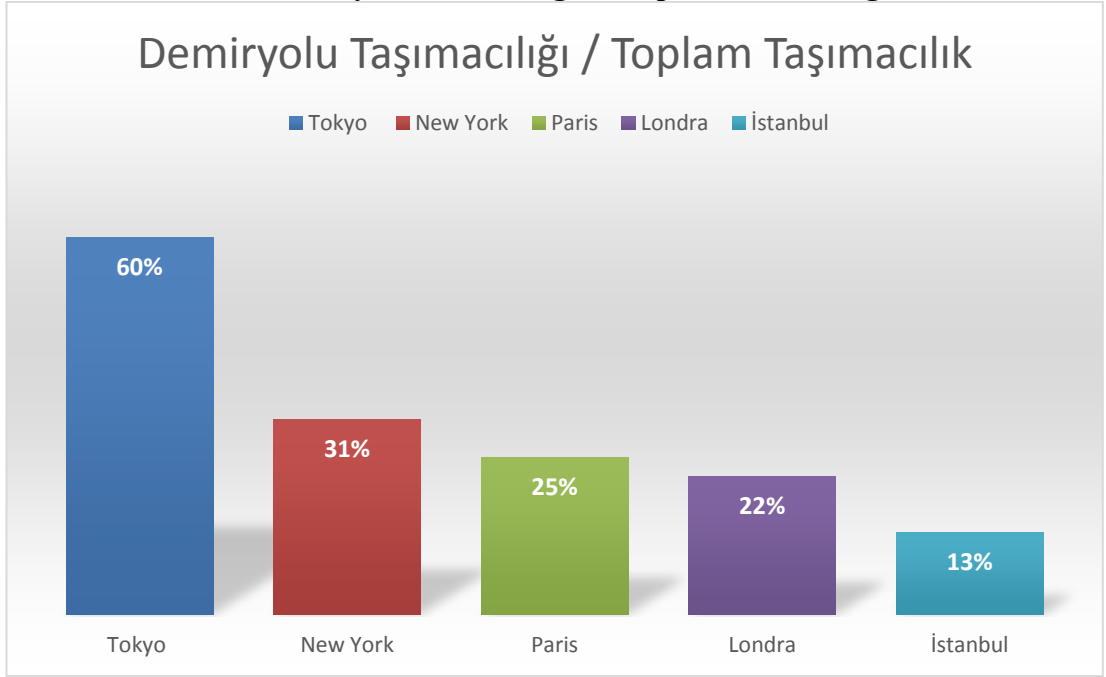
Elektrikli tramvayların 1961 yılında Avrupa, 1966 yılında ise Anadolu Yakasında seferden kaldırılmasıyla birlikte İstanbul'da hızlı göçe bağlı olarak artan nüfus karşısında kara ulaşımı yetersiz hale gelmiştir.

Tüm dünyada büyük şehirlerde, demiryolu sistemlerinin etkinliği ve demiryolu taşımacılığının toplam taşımacılığa yüzdesel oranı dikkat çeker. Son birkaç yılın araştırma sonuçlarına göre bu oran Tokyo 'da %60, New York 'da %31, Paris 'te %25,

Tablo 4.1 2012 İBB verileriyle metropollerde günlük taşınan yolcular

| Metropol Adı | Uzunluk (km) | Taşınan Yolcu (Kişi/Gün) |
|--------------|--------------|--------------------------|
| İstanbul | 174,7 | 1.358.908 |
| Londra | 408 | 3.500.000 |
| Roma | 76 | 870.000 |
| Tokyo | 880 | 8.700.000 |
| Paris | 214 | 4.500.000 |
| Singapur | 129,7 | 1.952.000 |

Tablo 4.2 Demiryolu taşımacılığının toplam taşımacılığa oranı



Tablo 4.3 Demiryolu taşımacılığının toplam taşımacılığa oranı



Kaynak: www.iett.gov.tr

Bu oranlar İstanbul'da halka sunulan imkânlar düşünüldüğünde günlük ulaşımda demiryolu kullanımındaki en büyük eksikliğin metro yetersizliği olduğu görülmektedir.

İstanbul büyükşehir belediyesinin verilerine göre bu büyük şehrin 2004 yılında 11 milyon olan günlük yolculuk sayısı şu anda 23 milyona ulaşmış durumdadır. Yakın gelecekte 3 katına çıkması beklenen günlük yolculuk değerine karşın toplu taşımadaki raylı sistem kullanım oranının artırılması hedeflenmektedir. Bu amaca yönelik olarak toplu taşımadaki raylı sistem kullanım %73 oranına yükseltilebilmesi için İstanbul'da ulaştırılması hedeflenen raylı sistem hattının toplam uzunluğu 640 km'dir.

Demiryolu taşımacılığı hızlı, ekonomik, güvenli, çevre dostu ve çağdaş sistemler olması sebebiyle İstanbul ve diğer büyükşehirler için şehir içi taşımacılığındaki problemler için öncelikli düşünülen sistemlerdir.

Açılışı 17 ağustos 2012 tarihinde yapılan Kadıköy kartal metrosuyla birlikte İstanbul'daki metro hattının toplam uzunluğu 102 km ye ulaşmıştır.

Tablo 4.4 Metro Hatları ve Hat uzunlukları

| Güzergah Adı | Başlama Tarihi | Bitiş Tarihi | Uzunluk (km) |
|----------------------------------|----------------|--------------|--------------|
| Tünel - Karaköy Füniküleri | 1870 | 1875 | 0,6 |
| İstiklal Cd. Nostaljik | 1990 | 1990 | 1,6 |
| Taksim-Maçka Teleferiği | 1993 | 1993 | 0,3 |
| Taksim - 4.Levent Metro su | 1992 | 2000 | 8,5 |
| Aksaray-Havaalanı Hafif Metro su | 1986 | 2002 | 20,3 |
| Kadıköy-Moda Nostalji Treni | 2002 | 2003 | 2,6 |
| Eyüp - Pierloti | 2002 | 2005 | 0,42 |
| Eminönü-Zeytinburnu Tramvayı | 1992 | 2005 | 11,2 |
| Eminönü - Kabataş Tramvayı | 2002 | 2005 | 2,9 |
| Taksim - Kabataş Füniküler | 2002 | 2006 | 0,64 |
| Zeytinburnu - Bağcılar Tramvayı | 2003 | 2006 | 5,2 |
| Edirnekapı - Sulta nçiftliği | 2002 | 2007 | 12,8 |
| Şişhane - Taksim | 1998 | 2009 | 1,65 |
| 4. Levent - A.O.S. | 2005 | 2009 | 5,5 |
| Edirnekapı - Topkapı | 2008 | 2009 | 2,5 |
| AOS - Darüşşafaka | 2008 | 2010 | 1,27 |
| Seyrantepe Depo/Stad Bağlantısı | 2008 | 2010 | 1,67 |
| Darüşşafaka - Hacıosman | 2008 | 2011 | 1,35 |
| Kadıköy - Kartal | 2008 | 2012 | 21,7 |
| Toplam | | | 102,7 |

Kaynak İBB Raylı Sistemler Md.

4.2 İSTANBUL 'DA RAYLI SİSTEMLER ve ÖNCELİKLERİ

Mevcut olan 72 km uzunluğundaki banliyö hattı da eklendiğinde hâlihazırda İstanbul'daki raylı sistem hattının uzunluğu 174 km'yi bulmaktadır. Yapımı devam

eden 77 km uzunluğundaki Marmaray hattı (13,5 km toplam tünel uzunluğu olup bunun 1,4 km'si batırma tüp tüneldir geri kalan 63,5 km'lik kısmı ise mevcut banliyö hattının metro standartlarına yükseltilmesiyle oluşan hattır.) 22 km uzunluğundaki iktelli-bağcılar-otogar metro hattının, 20 km uzunluğundaki Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy-Sancaktepe metro hattının, 4,25 km uzunluğundaki şişhane-Yenikapı-Aksaray metro hattının tamamlanmasıyla 2014 yılına kadar İstanbul'daki demiryolu ulaşımının toplam toplu taşıma içerisindeki oranını %13 ten %31 e yükseltilmesi hedeflenmektedir.

Tablo 4.5 Devam Eden Hatlar Ve Uzunlukları

| Güzergah Adı | Başlama Tarihi | Planlanan Bitiş Tarihi | Uzunluk (km) |
|-----------------------------|----------------|------------------------|--------------|
| Otogar - Bağcılar | 2005 | 2013 | 5,8 |
| Bağcılar - Olimpiyatköy LRT | 2005 | 2013 | 15,9 |
| Şişhane - Yenikapı | 1998 | 2013 | 3,55 |
| Yenikapı - Aksaray | 1998 | 2013 | 0,7 |
| Kartal - Kaynarca | 2008 | 2013 | 4,5 |
| Üsküdar - Ümraniye | 2012 | 2015 | 20 |
| Toplam | | | 50,45 |

Ayrıca yakın zaman içerisinde 25 km uzunluğundaki Bakırköy-Beylikdüzü metro hattının, 9 km uzunluğundaki Bakırköy İDO-Kirazlıtepe hattının, 25 km uzunluğundaki Kabataş Mahmutbey Metro Hattının ve 7 km uzunluğundaki Yenikapı-İncirli metro hattının ihalesi yapılması da planlanmaktadır.

4.3 ÖRNEK ÇALIŞMA PROJESİNE GENEL BAKIŞ

Proje Adı: Kadıköy-Kartal Metro Tamamlama İnşaatı, Elektro Mekanik Sistemleri Tedarik, Montaj ve İşletme Projesi

- **Toplam Tek Hat Tünel Boyu:** 43.326 m
- **Yolcu İstasyonu Sayısı:** 16
- **İhale Bedeli:** 751.256.042,50 € + KDV
- **İhale Tarihi:** 14.01.2008
- **Sözleşme Tarihi:** 06.03.2008
- **İşe Başlama Tarihi:** 21.03.2008
- **Tünellerin Tamamlanması:** Ekim 2011
- **Sinyal sisteminin tüm hatta devreye alınması:** Mart 2012
- **Deneme seferlerinin başlatılması:** 8.Mayıs 2012

Tüm tünel inşaatları, istasyon yapılarına ait basit inşaat işleri, ray döşeme işleri, depolama alanları ve diğer şantiye işleri ihale kapsamındadır. İhale kapsamı kısaca şöyle özetlenebilir; Sağ kolu 21.694 km, sol kolu 21.753 km uzunluğunda toplam 43.447 km uzunlukta tünel, 16 metro istasyon binası, 3 adet geceleme yeri ve 5 adet makas tüneline olmaktadır.

Projenin 30 ayda tamamlanması planlandı. İş programı, kapasite, toplam alan, kullanılacak teknoloji, projede çalışacak personel sayısı Avrasya Metro Grubu Ortaklığı tarafından planlandı. Bu proje İstanbul Anadolu yakasının en önemli metro projesidir.

Sistemin maksimum kapasitesi 65.000 (yolcu/yön/saat)'dir. Bu da gösteriyor ki; bu proje İstanbul'un trafik ve hava kirliliği problemlerini önemli ölçüde azaltacaktır.

Tünellerde, inşaat ve hafriyat çalışmaları eşzamanlı olarak gerçekleştirilecektir. Kazı kesitlerinde tünel inşaatı ile ilgili açıklamalar bulunmaktadır. Dolayısıyla burada tekrar edilmemiştir. Kazı işlerinden sonra istasyonlardaki inşaat işleri geleneksel şekilde kaba ve ince işler olmak üzere iki aşamada devam edecektir. Elektromanyetik ekipmanlar ise ince işler devam ederken yerlerine konulacaktır.

Tüm yer altı istasyonları 185 m uzunluğundaki bir metroya göre dizayn edilmiştir. Kadıköy-Kartal metro hattında aşağıdaki istasyonlar yer alacaktır;

Kadıköy, Ayrılıkçesme, Acıbadem, Ünalın, Göztepe, Yenısahra, Kozyatağı, Bostancı, Küçükalyalı, Maltepe, Huzurevi, Gülsuyu, Esenkent, Hastane-Adliye, Soğanlık, Kartal.

Proje Toplamında Yapılan toplam kazı: 1.725.440 m³

Tünel Kazı Ayna Alanı: 32 m²

Teorik Kazı Alanı Fazlasıyla Toplam Kazı: 2.070.528 m³

Toplam Kazıdan Çıkan Malzeme Ağırlığı: 2.760.704 ton

Kamyon Sefer Sayısı Olarak Kazı: 276.000 ad

İstasyon Kazısı: 1.000.000 m³

4.3.2 Kadıköy-Kartal Metro Projesinin Jeolojik Durumu

Tünel inşaatlarında inşaat hızını en çok etkileyen faktör jeolojik durumdur. Kadıköy-Kartal metro projesi, Kocaeli yarımadasının jeolojik temeli olan eski Paleozoik sedimantasyon içerisinde yer alır (İzmit'ten Boğaz'a kadar uzanır).

Eski paleozoik sedimantasyon, farklı karakter ve kalitedeki kaya gruplarından oluşan dalgalı bir formasyondur. Bu sedimantasyon, barındırdığı kayalık grupların temas yüzeylerinin birbirlerini kesmesi ve volkanik kayaların da fay hatlarıyla bu kaya gruplarını kesmesi nedeniyle metro hattı boyunca heterojen bir yapı sergilemektedir.

Metro hattı, Kartal formasyonu (Şist/Kireçtaşı), Kurtköy formasyonu (Kumtaşı Kümesi), Dolayoba formasyonu (Kireçtaşı), Aydos formasyonu (Kuartz) ve Gözdağı formasyonu (Tabakalı çamurtaşı) olarak bilinen farklı formasyonlardan geçer.

Bu çalışmada kaya kalite sınıflandırması zayıftan iyiye (orta kaya sınıfı) kadar değişmektedir. Çalışma alanındaki formasyonlar de gösterilmiştir.

Tablo 4.6 Jeolojik Durum

| 8+600 - 21+780 Arası Jeolojik Durum | | |
|-------------------------------------|--------|-------|
| Km Aralığı | RQD(%) | |
| 8+600 - 13+170 | 80 | İyi |
| 13+170 - 15+170 | 50 | Orta |
| 15+170 - 16+000 | 20 | Zayıf |
| 16+000 - 21+780 | 80 | İyi |

4.3.3 Çalışma Girdileri

Bu çalışmada (13+740 - 21+700) kilometreleri dikkate alınmıştır. Bu kilometreler arasındaki HAT1 (sağ kol tüneli) tüneli farklı tünel açma metotları ile inşa edilecektir. Mevcut durumda da bu hat iki yöntem kullanılarak açılmıştır. 1,5 km'lik bir kısmında tbm kullanılmıştır.

Bu Çalışmada Yapılan Kabuller;

- TBM dönüş yetenekleri sınırlı ve açabileceği tünel kesiti sınırlı olduğundan sadece ana hat tünellerinde kullanılır.
- Üreticinin verdiği bilgilere göre TBM siparişinden itibaren en erken 6 ay sonra çalışmaya başlayabilir. TBM makas tünellerinde, dönüşlerde ve NATM yöntemiyle yapılan istasyon kazıları sırasında beklemek zorundadır.
- NATM yöntemi ile yapılacak kazı shaft kazısı ve yaklaşım tüneli inşaatı bittikten sonra başlayacaktır.
- NATM yöntemi ile yapılacak kısımlardaki beton işleri TBM 'e ait kısım bittikten sonra yapılacaktır.
- NATM ve TBM yöntemlerinin ilerleme hızları jeolojik durum ve tünel tiplerine göre hesaplanan kazı döngüsünden alınır.
- Her iki metotta da ilerleme hızları iki vardiyalı olarak düşünülmüştür totalde günün her saati çalışma olduğu varsayılmıştır.
- Maltepe – Kartal istasyonları arası çalışma kullanılacaktır.
- Tbm bakım, işçilik ve enerji gibi genel giderleri metre birim fiyatına dâhildir
- NATM yönteminde kullanılan makinelerinde bakım ve genel giderleri de metre birim fiyatına dâhildir.
- Natm ve tbm için verilen birim metre fiyatları paçal fiyat olmakla birlikte sadece bu inşaatı özeldir.
- Yapılacak olan maliyet hesaplarında kuruma mal edilen resmi rakamlar üzerinden hesaplama yapılacaktır.

- Metre birim maliyetlerine elektromekanik kısımlar dâhil değildir yalnızca tünel inşaat işleri göz önünde bulundurulmuştur.
- Çalışmada ikiz tüneller değil yalnızca bir hat tüneli temel alınmıştır.

Çalışmadaki Tünel Özellikleri Ve Kazı Süresi Tahmini

Zemin raporları, şantiye raporları ve şantiye kayıtları ile işe ait hız tespitleri yapılacaktır ve iş programıyla değerlendirilecektir.

4.3.4 NATM ve TBM Tünel Özellikleri ile İmalat Döngüsü

Bu çalışmada Tek Tip TBM ve 3 tip NATM tünel kesiti bulunmaktadır. Bunlar;

Hat tünelleri (A2,2 kesiti), istasyon tünelleri (P1 Kesiti), geceleme yeri ve makas tünelleri (T1,2 kesiti). NATM tünel kesitlerinin özellikleri de belirtilmiştir.

Projede dönüş tünelleri ve ana hat tünelleri kesitleri birbirinden farklıdır. Kazı hızları tünel tipi ve zemin koşullarına bağlı olarak değişmektedir. NATM tünellerinin konumları aşağıda liste olarak verilmiştir.

Natm Tünellerde İş Tanımları; Tünel Tiplerine Göre Yapılan İş Kalemlerinin Miktarları aşağıdaki tabloda verilmiştir. (Sabuncuoğlu,2012)

4.3.5 Projede Kullanılan Natm Tüneller ve Tünel Tiplerine Ait Rayiç Miktarları

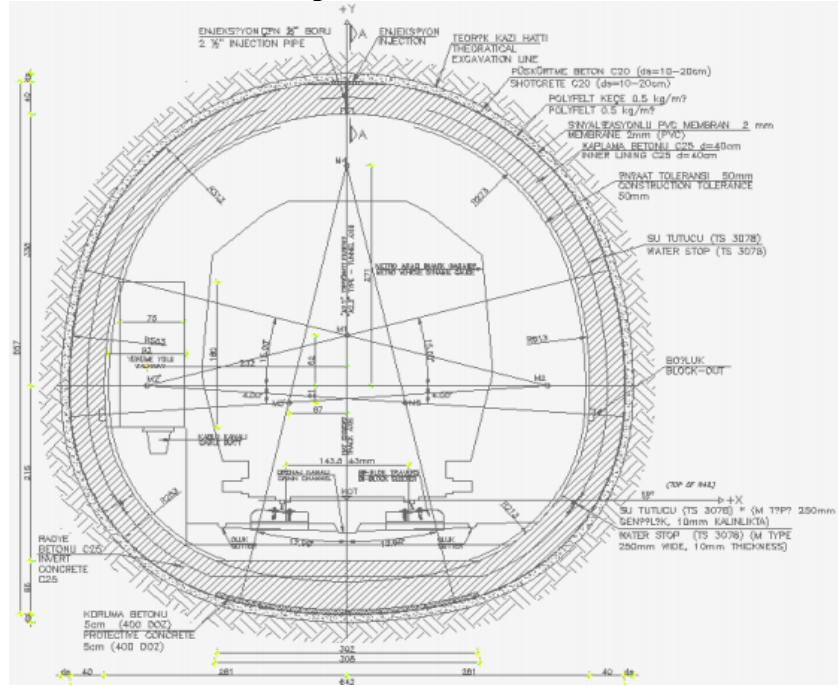
Tablo 4.7 Tünel Tiplerine Ait Rayiçler

| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Tünel Tipleri | | |
|------------------------|----------------|---------------|--------|--------|
| | | A2.2 | P1 | T1.2 |
| Kazı | m ³ | 38,83 | 73,6 | 171,72 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 24,1 | 30,86 | 171,72 |
| Çelik Hasır | kg | 98,26 | 298,22 | 598,55 |
| Kaya Bulonu | adet | 6 | 11 | 32 |
| Çelik İksa | ton | 155,63 | 235,82 | 1132 |
| Süren | adet | 6,5 | 14,5 | 35 |
| Kalıp | m ² | 13,25 | 20,05 | 35,5 |
| Tünel Kaplama Betonu | m ³ | 8,9 | 12,7 | 35,18 |
| Tünel Donatısı | ton | 0,65 | 1 | 3,5 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 20,97 | 28,9 | 45,74 |
| Su Tutucu | m | 5,26 | 4,9 | 10,72 |

Tablo 4.8 Projede Kullanılan TBM Tünel İnşaatına Ait Rayiçler

| Malzeme: | Birim | Miktar |
|--|-------|-----------|
| Hazır beton harcı | m3 | 5,8977 |
| Nervürlü Çelik | ton | 0,7016 |
| Mazot (motorin) | kg | 44,5 |
| Elektrik Enerjisi | kWh | 2853 |
| Su | m3 | 62 |
| Diğer Malzemeler (köpük,yağ vs.) | m | 1 |
| TBM Şaft İmalatı | m | 1 |
| Montaj ve İşletmeye Alma | | |
| a) Makine: | | |
| TBM ve Back-up Ekipmanları | m | 0,0000585 |
| Atölye Kurulması | m | 0,0000585 |
| Atölye İşletilmesi ve Kirası | m | 0,0000585 |
| TBM ve Back-up Ekipmanları Yedek Parça ve İşletme Gideri | m | 0,0000585 |
| b) İşçilik: | | |
| Düz İşçi | sa | 21,528 |
| Vasıflı İşçi | sa | 11,661 |
| Ekip Başı | sa | 3,588 |
| Teknisyen | sa | 7,176 |
| Montajcı | sa | 11,661 |
| Operatör | sa | 7,176 |
| Operatör - Özel Araç | sa | 7,176 |
| Makinist - Özel Araç | sa | 3,588 |
| İşletim Süp. Ve Eğitim | m | 1 |
| c) Nakliye | | |
| Kamyon | sa | 11,1 |

Şekil 4.3 NATM Anahat Tünel Tip Kesiti



Tablo 4.10 Anahat Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin İş Döngüsü

| Anahat Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|---|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 38,83 | 6 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 24,1 | 6 |
| Çelik Hasır | kg | 98,26 | 2 |
| Kaya Bulonu | adet | 6 | 2 |
| Çelik İksa | ton | 155,63 | 1 |
| Süren | adet | 6,5 | 3 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 20 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 15,98 | 0,2 |
| Tünel Kplama Betonu | m ³ | 8,9 | 0,5 |
| Tünel Donatısı BÇİlla | ton | 0,65 | 1 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 20,97 | 0,2 |
| Su Tutucu | m | 5,26 | 0,1 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 2 |

Tablo 4.11 Anahat Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin İş Döngüsü

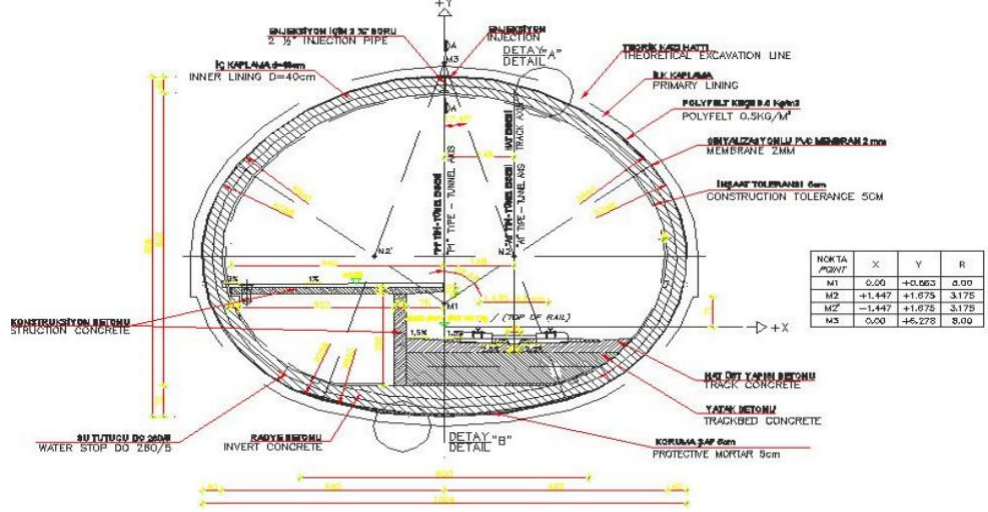
| A2.2 Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|--|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 38,83 | 4 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 24,1 | 3 |
| Çelik Hasır | kg | 98,26 | 2 |
| Kaya Bulonu | adet | 6 | 2 |
| Çelik İksa | ton | 155,63 | 1 |
| Süren | adet | 6,5 | 2 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 14 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 15,98 | 0,2 |
| Tünel Kaplama Betonu | m ³ | 8,9 | 0,5 |
| Tünel Donatısı BÇIIIa | ton | 0,65 | 1 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 20,97 | 0,2 |
| Su Tutucu | m | 5,26 | 0,1 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 2 |

Tablo 4.12 Anahat Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin İş Döngüsü

| A2.2 Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|---|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 38,83 | 3 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 24,1 | 3 |
| Çelik Hasır | kg | 98,26 | 2 |
| Kaya Bulonu | adet | 6 | 1 |
| Çelik İksa | ton | 155,63 | 1 |
| Süren | adet | 6,5 | 1 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 11 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 15,98 | 0,2 |
| Tünel Kaplama Betonu | m ³ | 8,9 | 0,5 |
| Tünel Donatısı BÇIIIa | ton | 0,65 | 1 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 20,97 | 0,2 |
| Su Tutucu | m | 5,26 | 0,1 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 2 |

4.3.6.2 P1 Tipi Tünel Çalışmasında Zeminlere Göre İş Döngüleri

Şekil 4.4 P1 İstasyon Tünel Tip Kesiti



Tablo 4.13 P1 Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin

| P1 Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|--|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 73,6 | 9 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 30,86 | 5 |
| Çelik Hasır | kg | 298,22 | 3 |
| Kaya Bulonu | adet | 11 | 2 |
| Çelik İksa | ton | 235,82 | 2 |
| Süren | adet | 14,5 | 3 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 24 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 20,05 | 1 |
| Tünel Kaplama Betonu | m ³ | 12,7 | 1 |
| Tünel Donatısı BÇİlla | ton | 1 | 1 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 28,9 | 0,5 |
| Su Tutucu | m | 4,9 | 0,5 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 4 |

Tablo 4.14 P1 Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin

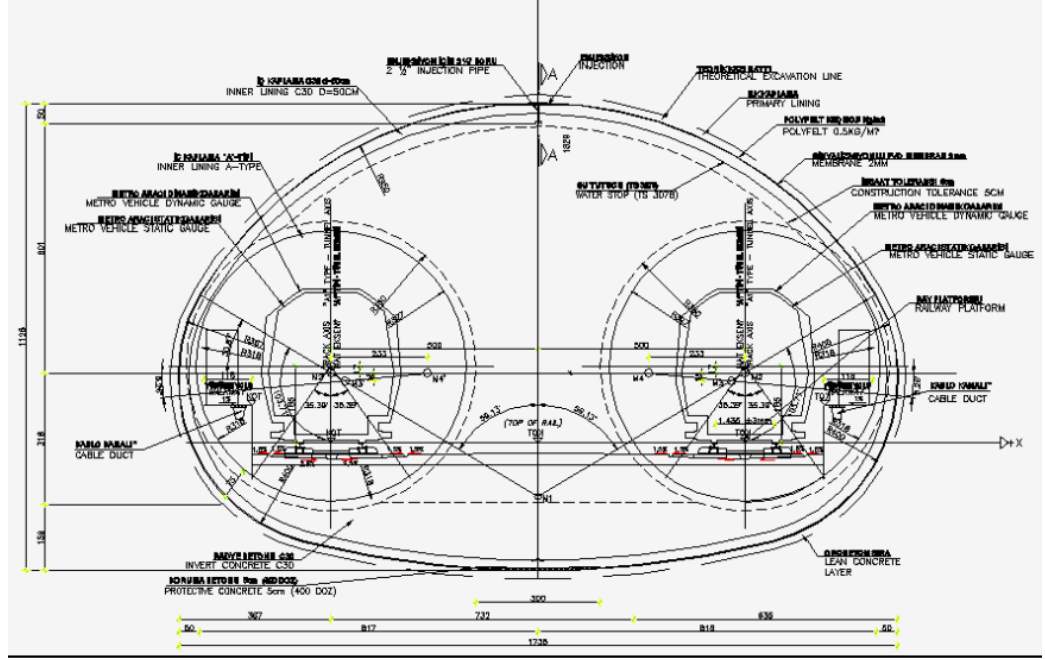
| P1 Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|--|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 73,6 | 8 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 30,86 | 4 |
| Çelik Hasır | kg | 298,22 | 2 |
| Kaya Bulonu | adet | 11 | 2 |
| Çelik İksa | ton | 235,82 | 2 |
| Süren | adet | 14,5 | 2 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 20 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 20,05 | 1 |
| Tünel Kaplama Betonu | m ³ | 12,7 | 1 |
| Tünel Donatısı BÇIIIa | Ton | 1 | 1 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 28,9 | 0,5 |
| Su Tutucu | m | 4,9 | 0,5 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 4 |

Tablo 4.15 P1 Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin (1 mt)

| P1 Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|---|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 73,6 | 4 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 30,86 | 3 |
| Çelik Hasır | kg | 298,22 | 1,5 |
| Kaya Bulonu | adet | 11 | 1 |
| Çelik İksa | ton | 235,82 | 1,5 |
| Süren | adet | 14,5 | 1 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 12 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 20,05 | 1 |
| Tünel Kaplama Betonu | m ³ | 12,7 | 1 |
| Tünel Donatısı BÇIIIa | ton | 1 | 1 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 28,9 | 0,5 |
| Su Tutucu | m | 4,9 | 0,5 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 4 |

4.3.6.3 T1 Tipi Tünel Çalışmasında Zeminlere Göre İş Döngüleri

Şekil 4.5 T1 Makas Tünel Tip Kesiti



Tablo 4.16 T1 Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin (1 mt)

| T1 Tünel Kesiti Zayıf Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|--|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 171,2 | 18 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 55,02 | 10 |
| Çelik Hasır | kg | 598,55 | 6 |
| Kaya Bulonu | adet | 32 | 4 |
| Çelik İksa | ton | 1132 | 4 |
| Süren | adet | 35 | 6 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 48 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 35,5 | 1 |
| Tünel Kaplama Beton | m ³ | 35,18 | 2 |
| Tünel Donatısı BÇIIIa | ton | 3,5 | 2 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 45,74 | 0,5 |
| Su Tutucu | m | 10,72 | 0,5 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 6 |

Tablo 4.17 T1 Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin (1 mt)

| T1 Tünel Kesiti Orta Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|--|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 171,2 | 8 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 55,02 | 6 |
| Çelik Hasır | kg | 598,55 | 3 |
| Kaya Bulonu | adet | 32 | 2 |
| Çelik İksa | ton | 1132 | 3 |
| Süren | adet | 35 | 2 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 24 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 35,5 | 1 |
| Tünel Kaplama Betonu | m ³ | 35,18 | 2 |
| Tünel Donatısı BÇIIIa | ton | 3,5 | 2 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 45,74 | 0,5 |
| Su Tutucu | m | 10,72 | 0,5 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 6 |

Tablo 4.18 T1 Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin

| T1 Tünel Kesiti İyi Zeminler İçin (1 mt) | | | |
|---|----------------|--------|--------------|
| Birimdeki İş Tanımları | Birim | Miktar | Zaman (saat) |
| Kazı | m ³ | 171,2 | 8 |
| Püskürtme Beton (d=25) | m ² | 55,02 | 6 |
| Çelik Hasır | kg | 598,55 | 3 |
| Kaya Bulonu | adet | 32 | 2 |
| Çelik İksa | ton | 1132 | 3 |
| Süren | adet | 35 | 2 |
| Kazı Yapılması İçin Geçen Toplam Süre | | | 24 |
| Tünel İç kaplama Kalıbı | m ² | 35,5 | 1 |
| Tünel Kaplama Betonu | m ³ | 35,18 | 2 |
| Tünel Donatısı BÇIIIa | ton | 3,5 | 2 |
| Tünelde Su Yalıtımı | m ² | 45,74 | 0,5 |
| Su Tutucu | m | 10,72 | 0,5 |
| Kalıp Ve Beton İçin Geçen Toplam Süre | | | 6 |

4.3.7 NATM ve TBM Metodu İle Açılan Tünellerin Zemine Göre İlerleme Hızı

Tablo 4.19 Gerçekleşen Natm ve TBM Günlük İlerleme Hızları

| Gerçekleşen Natm ve TBM Günlük İlerleme Hızları (m/gün) | | | | |
|---|------|-----------|---------|-------|
| Jeolojik Durum | NATM | NATM T1.2 | NATM P1 | TBM |
| Zayıf | 0,5 | 0,5 | 0,59 | 3,93 |
| Orta | 1,8 | 1,61 | 0,67 | 7,53 |
| yi | 2,21 | | | 17,12 |

4.3.8 NATM VE TBM İş Programları Zemin Durumu Ve Tünel Konumları

Tablo 4.20 Natm Ve Tbm İş Programları Zemin Durumu Ve Konum

| NATM VE TBM PROGRAMLARI ZEMİN DURUMU VE KONUM | | | | | | | | |
|---|------------|-------|-------|--------|-----|------|-----|-----------|
| Tünel Tipi | Zemin For. | Konum | | Mesafe | TBM | Kazı | | Betonlama |
| S13 Yaklaşım | Orta | 13740 | | | | 50 | | |
| T1.2 | Orta | 13740 | 14010 | 270 | | | 169 | 64 |
| Hat | Orta | 14010 | 14249 | 239 | 32 | | 133 | 25 |
| Maltepe stasyonu | Orta | 14249 | 14283 | 34 | | | 49 | 7 |
| S14 | Orta | 14283 | | | | 50 | | |
| Maltepe stasyonu | Orta | 14283 | 14512 | 229 | | | 327 | 44 |
| Hat | Orta | 14512 | 15165 | 653 | 87 | | 363 | 69 |
| S15A | Zayıf | 15165 | | | | 50 | | |
| Hat | Zayıf | 15165 | 15171 | 6 | 2 | | 4 | 1 |
| Huzurevi stasyonu | Zayıf | 15171 | 15429 | 258 | | | 258 | |
| Hat | Zayıf | 15429 | 15679 | 250 | 64 | | 167 | 26 |
| T1.2 | Zayıf | 15679 | 15720 | 41 | | | 82 | 10 |
| S15B | Zayıf | 15720 | | | | 50 | | |
| T1.2 | Zayıf | 15720 | 15805 | 85 | | | 170 | 20 |
| Hat | Zayıf | 15805 | 16116 | 311 | 79 | | 207 | 33 |
| Gülsuyu stasyonu | yi | 16116 | 16377 | 261 | | | 124 | 50 |
| S16 | yi | 16377 | | | | 50 | | |
| Hat | yi | 16377 | 16874 | 497 | 29 | | 226 | 52 |
| S17A | yi | 16874 | | | | 50 | | |
| Hat | yi | 16874 | 17174 | 300 | 18 | | 136 | 32 |
| Cevizli stasyonu | yi | 17174 | 17404 | 230 | | | 110 | 44 |
| Hat | yi | 17404 | 17489 | 85 | 5 | | 40 | 9 |
| S17 | yi | 17489 | | | | 50 | | |
| Hat | yi | 17489 | 18276 | 787 | 46 | | 358 | 83 |
| S17B | yi | 18276 | | | | 50 | | |
| Hastane stasyonu | yi | 18276 | 18373 | 97 | | | 46 | 19 |
| S18 | yi | 18373 | | | | 50 | | |
| Hastane stasyonu | yi | 18373 | 18559 | 186 | | | 89 | 36 |
| Hat | yi | 18559 | 18803 | 244 | 14 | | 111 | 20 |
| T1.2 | yi | 18803 | 18878 | 75 | | | 75 | 18 |

| | | | | | | | | |
|-------------------|----|-------|-------|-----|----|----|-----|----|
| S18A | yi | 18878 | | | | 50 | | |
| T1.2 | yi | 18878 | 19233 | 355 | | | 355 | 85 |
| Hat | yi | 19233 | 19265 | 32 | 2 | | 15 | 3 |
| | | | | | | | | |
| S18B | yi | 19265 | | | | 50 | | |
| Hat | yi | 19265 | 19541 | 276 | 16 | | 125 | 29 |
| So anlık stasyonu | yi | 19541 | 19750 | 209 | | | 100 | 40 |
| | | | | | | | | |
| S19 | yi | 19750 | | | | 50 | | |
| So anlık stasyonu | yi | 19750 | 19765 | 15 | | | 7 | 3 |
| Hat | yi | 19765 | 20560 | 795 | 46 | | 361 | 84 |
| T1.2 | yi | 20560 | 20679 | 119 | | | 119 | 28 |
| | | | | | | | | |
| Kartal yak. | yi | 20679 | | | | 50 | | |
| T1.2 | yi | 20679 | 20841 | 162 | | | 162 | 39 |
| Hat | yi | 20841 | 21270 | 429 | 25 | | 195 | 45 |
| Kartal stasyonu | yi | 21270 | 21533 | 263 | | | 125 | 51 |
| Hat | yi | 21533 | 21624 | 91 | 5 | | 41 | 8 |
| | | | | | | | | |
| S20A&B | yi | 21624 | | | | 50 | | |
| Hat | yi | 21624 | 21700 | 76 | 4 | | 35 | 8 |
| | | | | | | | | |

Tablo 4.21 Natm İş Süreleri

| NATM İŞ SÜRELERİ | | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------|---------------|-------------|--|
| Tünel Tipi | Yer Teslim Tarihi | Ba langıç Tarihi | Biti Tarihi | hale Tarihi | halden Yer Teslime Kadar Geçen Süre (ay) |
| S13 Yakla ım | 06.05.2008 | 01.09.2008 | 21.10.2008 | 01.03.2008 | |
| T1.2 | | 21.10.2008 | 11.06.2009 | 7,8 | |
| Hat | | 21.10.2008 | 28.03.2009 | 2,6 | |
| Maltepe stasyonu | | 21.10.2008 | 16.12.2008 | 1,9 | 11.06.2009 |
| | | | Toplam | | 7,8 |
| S14 | 30.10.2008 | 01.12.2008 | 20.01.2009 | 01.03.2008 | |
| Maltepe stasyonu | | 20.01.2009 | 26.01.2010 | 12,4 | |
| Hat | | 20.01.2009 | 28.03.2010 | 7,2 | 28.03.2010 |
| | | | Toplam | | 12,4 |
| S15A | 03.11.2008 | 01.12.2008 | 20.01.2009 | 01.03.2008 | |
| Hat | | 20.01.2009 | 25.01.2009 | 0,1 | |
| Huzurevi stasyonu | | 20.01.2009 | 05.10.2009 | 8,6 | |
| Hat | | 20.01.2009 | 01.08.2009 | 3,2 | |
| T1.2 | | 20.01.2009 | 22.04.2009 | 3,1 | 05.10.2009 |
| | | | Toplam | | 8,6 |
| S15B | 26.12.2008 | 01.02.2009 | 23.03.2009 | 01.03.2008 | |
| T1.2 | | 23.03.2009 | 29.09.2009 | 6,3 | |
| Hat | | 23.03.2009 | 18.11.2009 | 4,0 | |
| Gülsuyu stasyonu | | 23.03.2009 | 13.09.2009 | 5,8 | 18.11.2009 |

| | | | | | |
|-------------------|---------------|------------|------------|-------------|------------|
| | Toplam | | | 6,3 | |
| S16 | 16.03.2009 | 01.04.2009 | 21.05.2009 | 01.03.2008 | |
| Hat | | 21.05.2009 | 23.02.2010 | 4,6 | 23.02.2010 |
| | Toplam | | | 4,6 | |
| S17A | 20.03.2009 | 01.04.2009 | 21.05.2009 | 01.03.2008 | |
| Hat | | 21.05.2009 | 05.11.2009 | 2,8 | |
| Cevizli stasyonu | | 21.05.2009 | 22.10.2009 | 5,1 | |
| Hat | | 21.05.2009 | 09.07.2009 | 0,8 | 05.11.2009 |
| | Toplam | | | 5,1 | |
| S17 | 25.11.2008 | 01.04.2009 | 21.05.2009 | 01.03.2008 | |
| Hat | | 21.05.2009 | 05.08.2010 | 7,4 | 05.08.2010 |
| | Toplam | | | 7,4 | |
| S17B | 25.08.2009 | 01.11.2009 | 21.12.2009 | 01.03.2008 | |
| Hastane stasyonu | | 21.12.2009 | 24.02.2010 | 2,2 | 24.02.2010 |
| | Toplam | | | 2,2 | |
| S18 | 09.02.2009 | 01.09.2009 | 21.10.2009 | 01.03.2008 | |
| Hastane stasyonu | | 21.10.2009 | 23.02.2010 | 4,2 | |
| Hat | | 21.10.2009 | 01.03.2010 | 2,2 | |
| T1.2 | | 21.10.2009 | 22.01.2010 | 3,1 | 01.03.2010 |
| | Toplam | | | 4,2 | |
| S18A | 13.11.2008 | 01.12.2008 | 20.01.2009 | 01.03.2008 | |
| T1.2 | | 20.01.2009 | 05.04.2010 | 14,7 | |
| Hat | | 20.01.2009 | 07.02.2009 | 0,3 | 05.04.2010 |
| | Toplam | | | 14,7 | |
| S18B | 13.11.2008 | 01.12.2008 | 20.01.2009 | 01.03.2008 | |
| Hat | | 20.01.2009 | 23.06.2009 | 2,6 | |
| So anlık stasyonu | | 20.01.2009 | 09.06.2009 | 4,7 | 23.06.2009 |
| | Toplam | | | 4,7 | |
| S19 | 20.10.2008 | 01.11.2008 | 21.12.2008 | 01.03.2008 | |
| So anlık stasyonu | | 21.12.2008 | 31.12.2008 | 0,3 | |
| Hat | | 21.12.2008 | 11.03.2010 | 7,4 | |
| T1.2 | | 21.12.2008 | 17.05.2009 | 4,9 | 11.03.2010 |
| | Toplam | | | 7,4 | |
| Kartal yak. | 06.05.2008 | 01.09.2008 | 21.10.2008 | 01.03.2008 | |
| T1.2 | | 21.10.2008 | 10.05.2009 | 6,7 | |
| Hat | | 21.10.2008 | 18.06.2009 | 4,0 | |
| Kartal stasyonu | | 21.10.2008 | 15.04.2009 | 5,9 | |
| Hat | | 21.10.2008 | 09.12.2008 | 0,8 | 18.06.2009 |
| | Toplam | | | 6,7 | |
| S20A&B | 01.04.2009 | 01.05.2009 | 20.06.2009 | 01.03.2008 | |
| Hat | | 20.06.2009 | 02.08.2009 | 0,72 | 02.08.2009 |
| | Toplam | | | 1 | |

Tablo 4.22 Tbm İş Süreleri

| TBM İŞ SÜRELERİ | | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------|-------------|-------------|--------------------------------------|
| Tünel Tipi | Yer Teslim Tarihi | Ba langıç Tarihi | Biti Tarihi | hale Tarihi | haleden Yer Teslime Kadar Geçen Süre |
| S13 Yaklaşım | 06.05.2008 | 01.09.2008 | 21.10.2008 | 01.03.2008 | 0,5 |
| T1.2 | | | | 7,8 | |
| Hat | | 01.03.2008 | 01.04.2008 | 1 | |
| Maltepe stasyonu | | | | 1,9 | |
| | Toplam | | | | 11,2 |
| S14 | 30.10.2008 | 01.12.2008 | 20.01.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Maltepe stasyonu | | 20.01.2009 | 26.01.2010 | 12,4 | |
| Hat | | 20.01.2009 | 16.04.2009 | 2,9 | |
| | Toplam | | | | 15,8 |
| S15A | 03.11.2008 | 01.12.2008 | 20.01.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Hat | | 20.01.2009 | 21.01.2009 | 1,5 | |
| Huzurevi stasyonu | | | | 8,6 | |
| Hat | | 20.01.2009 | 24.03.2009 | 2,1 | |
| T1.2 | | | | 3,1 | |
| | Toplam | | | | 15,8 |
| S15B | 26.12.2008 | 01.02.2009 | 23.03.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| T1.2 | | | | 6,3 | |
| Hat | | 23.03.2009 | 10.06.2009 | 2,6 | |
| Gülsuyu stasyonu | | | | 5,8 | |
| | Toplam | | | | 14,8 |
| S16 | 16.03.2009 | 01.04.2009 | 21.05.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Hat | | 21.05.2009 | 19.06.2009 | 1,0 | |
| | Toplam | | | | 0,97 |
| S17A | 20.03.2009 | 01.04.2009 | 21.05.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Hat | | 21.05.2009 | 07.06.2009 | 0,6 | |
| Cevizli stasyonu | | | | 5,1 | |
| Hat | | 21.05.2009 | 25.05.2009 | 0,2 | |
| | Toplam | | | | 5,9 |
| S17 | 25.11.2008 | 01.04.2009 | 21.05.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Hat | | 21.05.2009 | 05.07.2009 | 1,5 | |
| 29,57 | | | | | |
| | Toplam | | | | 1,5 |
| S17B | 25.08.2009 | 01.11.2009 | 21.12.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Hastane stasyonu | | 21.12.2009 | | 2,2 | |
| | Toplam | | | | 2,2 |
| S18 | 09.02.2009 | 01.09.2009 | 21.10.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Hastane stasyonu | | | | 4,2 | |
| Hat | | 21.10.2009 | 04.11.2009 | 0,5 | |
| T1.2 | | | | 3,1 | |
| | Toplam | | | | 7,7 |
| S18A | 13.11.2008 | 01.12.2008 | 20.01.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| T1.2 | | | | 14,7 | |
| Hat | | 20.01.2009 | 21.01.2009 | 0,1 | |

| | | | | | |
|-------------------|---------------|------------|------------|------------|-------------|
| | Toplam | | | | 14,7 |
| S18B | 13.11.2008 | 01.12.2008 | 20.01.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Hat | | 20.01.2009 | 05.02.2009 | 0,5 | |
| So anlık stasyonu | | | | 4,7 | |
| | Toplam | | | | 5,2 |
| S19 | 20.10.2008 | 01.11.2008 | 21.12.2008 | 01.03.2008 | 0,5 |
| So anlık stasyonu | | | | 0,3 | |
| Hat | | 21.12.2008 | 05.02.2009 | 1,5 | |
| T1.2 | | | | 4,9 | |
| | Toplam | | | | 6,8 |
| Kartal yak. | 06.05.2008 | 01.09.2008 | 21.10.2008 | 01.03.2008 | 0,5 |
| T1.2 | | | | 6,7 | |
| Hat | | 21.10.2008 | 15.11.2008 | | |
| Kartal stasyonu | | | | 5,9 | |
| Hat | | 21.10.2008 | 26.10.2008 | | |
| | Toplam | | | | 5,9 |
| S20A&B | 01.04.2009 | 01.05.2009 | 20.06.2009 | 01.03.2008 | 0,5 |
| Hat | | 20.06.2009 | 24.06.2009 | 0,1 | |
| | Toplam | | | | 0,7 |

Yöntemlerine Göre Proje Gerçekleşme Süreleri

Tablo 4.23 Yöntemlerine Göre Proje Gerçekleşme Süreleri

| Yöntem Türü | İşin Süresi (Ay) |
|-------------|------------------|
| NATM | 15 |
| TBM | 28 |

NATM yöntemiyle planlanan iş programı TBM yöntemine göre 13 ay daha önce bitmiştir.

4.3.9 Yapım Maliyetleri Açısından NATM ve TBM

Tablo 4.24 A1.a Destek

| Destek Tipi | İş Kalemi | Uzunluk | Birim Miktarı | Avrasya BF | Avr. Tutar(€) | |
|-------------|-----------|---------|----------------------------|------------|---------------|--------------|
| A1.a Destek | 13% | 1185,6 | 021 Tünel Kazısı | 39,36 | 77,60 | 3.621.220,76 |
| | | | 022D 15 cm püs. | 23,92 | 27,34 | 775.350,15 |
| | | | 027 A BÇIVb Tünel Donatısı | 0,10 | 1.165,08 | 138.131,88 |
| | | | 006A L=3 m Kaya Bulonu | 5,67 | 42,45 | 285.363,84 |
| | | | 026A Tünel Kaplama Betonu | 8,84 | 84,87 | 889.497,35 |
| | | | 027C BÇIIIa Tünel Donatısı | 0,62 | 1.068,91 | 785.725,81 |
| | | | 025A Tünel İç Kap. Kalıbı | 15,98 | 25,17 | 476.868,00 |
| | | | 025B Tünel Alın Kalıbı | 1,47 | 15,51 | 27.031,32 |
| | | | 020 Tünelde Su Yalıtımı | 20,97 | 12,49 | 310.526,78 |
| | | | 005 Su Tutucu | 5,50 | 13,23 | 86.270,18 |
| | | | | | | |

Tablo 4.25 A1.b Destek

| Destek Tipi | İş Kalemi | Uzunluk | Birim Miktarı | Avrasya BF | Avr. Tutar(€) | |
|-------------|-----------|---------|----------------------------|------------|---------------|---------------|
| A1.b Destek | 51% | 4651,2 | 021 Tünel Kazısı | 39,36 | 77,60 | 14.206.327,60 |
| | | | 022D 15 cm püs. | 23,92 | 27,34 | 3.041.758,29 |
| | | | 027 A BÇIVb Tünel Donatısı | 0,10 | 1.165,08 | 541.902,01 |
| | | | 006B L=4 m Kaya Bulonu | 5,67 | 50,66 | 1.336.020,92 |
| | | | 026A Tünel Kaplama Betonu | 8,84 | 84,87 | 3.489.566,52 |
| | | | 027C BÇIIIa Tünel Donatısı | 0,62 | 1.068,91 | 3.082.462,80 |
| | | | 025A Tünel İç Kap. Kalıbı | 15,98 | 25,17 | 1.870.789,85 |
| | | | 025B Tünel Alın Kalıbı | 1,47 | 15,51 | 106.045,96 |
| | | | 020 Tünelde Su Yalıtımı | 20,97 | 12,49 | 1.218.220,44 |
| | | | 005 Su Tutucu | 5,50 | 13,23 | 338.444,57 |
| | | | | | | |

Tablo 4.26 A2 Destek

| Destek Tipi | İş Kalemi | Uzunluk | Birim Miktarı | Avrasya BF | Avr. Tutar(€) | |
|-------------|-----------|---------|----------------------------|------------|----------------------|--------------|
| A2 Destek | 28% | 2553,6 | 021 Tünel Kazısı | 40,47 | 77,60 | 8.019.509,30 |
| | | | 022E 20 cm püs. | 23,53 | 36,49 | 2.192.545,73 |
| | | | 027 A BÇIVb Tünel Donatısı | 0,17 | 1.165,08 | 505.775,21 |
| | | | 006B L=4 m Kaya Bulonu | 3,00 | 50,66 | 388.096,13 |
| | | | 024E L=4 m Süren | 9,00 | 60,64 | 1.393.652,74 |
| | | | 023 Çelik İksa | 0,32 | 1.353,89 | 1.106.333,92 |
| | | | 026A Tünel Kaplama Beton | 8,84 | 84,87 | 1.915.840,44 |
| | | | 027C BÇIIIa Tünel Donatısı | 0,62 | 1.068,91 | 1.692.332,52 |
| | | | 025A Tünel İç Kap. Kalıbı | 15,98 | 25,17 | 1.027.100,31 |
| | | | 025B Tünel Alın Kalıbı | 1,47 | 15,51 | 58.221,31 |
| | | | 020 Tünelde Su Yalıtımı | 20,97 | 12,49 | 668.826,91 |
| | | | 005 Su Tutucu | 5,50 | 13,23 | 185.812,70 |
| | | | | | 19.154.047,22 | |

Tablo 4.27 A3 Destek

| Destek Tipi | İş Kalemi | Uzunluk | Birim Miktarı | Avrasya BF | Avr. Tutar(€) | |
|---------------|-----------|---------|----------------------------|------------|---------------------|--------------|
| A3 Destek | 8% | 729,6 | 021 Tünel Kazısı | 46,23 | 77,60 | 2.617.402,06 |
| | | | 022H 35 cm püs. | 24,16 | 68,11 | 1.200.584,23 |
| | | | 027 A BÇIVb Tünel Donatısı | 0,24 | 1.165,08 | 204.010,17 |
| | | | 006D L=6 m Kaya Bulonu | 12,50 | 73,68 | 671.961,60 |
| | | | 030 Umbrella | 30,00 | 62,96 | 1.378.068,48 |
| | | | 023 Çelik İksa | 0,55 | 1.353,89 | 543.288,98 |
| | | | 027B BÇ I Tünel Donatısı | 0,03 | 1.161,74 | 25.428,17 |
| | | | 026A Tünel Kaplama Beton | 8,84 | 84,87 | 547.382,98 |
| | | | 027C BÇIIIa Tünel Donatısı | 0,62 | 1.068,91 | 483.523,58 |
| | | | 025A Tünel İç Kap. Kalıbı | 15,98 | 25,17 | 293.457,23 |
| | | | 025B Tünel Alın Kalıbı | 1,47 | 15,51 | 16.634,66 |
| | | | 020 Tünelde Su Yalıtımı | 20,97 | 12,49 | 191.093,40 |
| 005 Su Tutucu | 5,50 | 13,23 | 53.089,34 | | | |
| | | | | | 8.225.924,89 | |

Tablo 4.28 Şaft

| Destek Tipi | İş Kalemi | Uzunluk | Birim Miktarı | Avrasya BF | Avr. Tutar(€) |
|-------------|----------------------------|---------|---------------|------------|---------------|
| Şaft | 021 Tünel Kazısı | 66 | 114,99 | 77,60 | 8.923,22 |
| | 022F 25 cm Püs. | | 37,23 | 45,78 | 1.704,39 |
| | 027 A BÇIVb Tünel Donatısı | | 0,35 | 1.165,08 | 407,78 |

11.035,39

| | |
|------------------|----------------------|
| GEN. TOP. (€) | 64.018.532,55 |
|------------------|----------------------|

Tablo 4.29 Maliyet Açısından Fark Tutarları

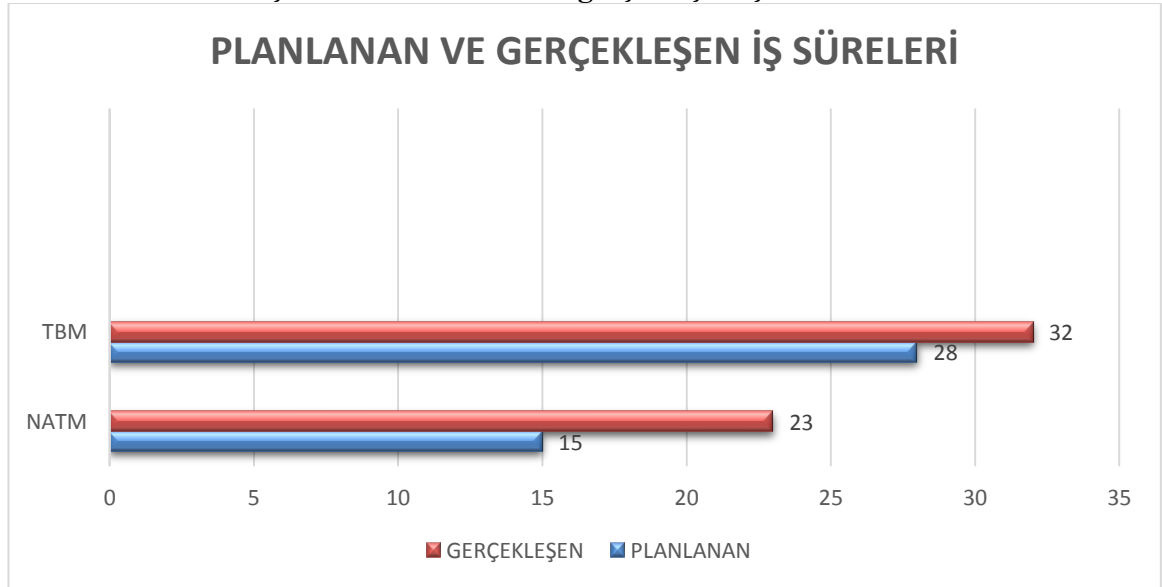
| | | | | |
|-------------|------|---|----------|---------------|
| TBM | 9120 | 1 | 7.613,00 | 69.441.595,39 |
| NATM | 9120 | 1 | 7.019,58 | 64.018.533,12 |

| | |
|---|----------------|
| TÜM HATTIN NATM YAPILMASI DURUMUNDA TÜNEL MALİYETİNDEKİ FARK | 5.423.062,27 € |
| TEK HAT TBM TÜNEL KESİTİNDEN A1 TİPE GEÇİŞ TUTARI | 1.961.121,60 € |
| | 7.384.183,87 € |

5. SONUÇ

İş akış şemalarından elde edilen verilere göre NATM yöntemi TBM 'den daha yavaş olmasına karşın, yeterli miktarda şaft olduğunda, farklı tünel kesitlerine sahip hatlarda TBM yöntemi ile 28 ayda tamamlanan bir hat NATM yöntemi ile 15 ayda tamamlanabilmektedir. NATM yöntemi ile TBM karşılaştırıldığında NATM yönteminin daha avantajlı bir yöntemdir. Gerçekte aynı koşullarda TBM yöntemi ile 32 ayda tamamlanan bir tünel, NATM yöntemi ile (tüm riskler ve gecikmeler dâhil) 23,5 ayda tamamlanabilmektedir.

Şekil 5.1 Planlanan ve gerçekleşen iş süreleri



Gerçek ve planlanan iş programları karşılaştırıldığında iki program arasında ortalama 13 ay fark olduğu görülmektedir. Eğer doğru metot seçilirse projenin süresi örnek çalışmada olduğu gibi 13 ay kadar kısaltılabilir. İki metodun karşılaştırması aşağıda gösterilmiştir. Bu sonuç gösteriyor ki projenin işletmeye alınması planlanandan 13 ay daha kısa sürmüştür.

İBB 'nin fizibilite raporuna göre metro hattı, yıllık kapasitesi 459.900.000 yolcu olan hatta günde 1.260.000 yolcu taşınacağı yönündedir. Bu zaman tasarrufu sayesinde yaklaşık 1,5 TL bilet ücreti ile yılda 688.500.000TL gelir elde edilecektir. Hat %50 kapasite ile çalışırsa elde edilecek gelir 481.950.000TL olacaktır. Eğer proje

planlanandan 1 yıl önce işletmeye alınırsa, çalışan 700 kişilik personele ait 70.000.000TL gideri ile elde edilecek gelir 400.000.000 TL olacaktır.

Projenin 1 yıl önce tamamlanması ile Dünya Bankası'ndan kullanılan krediye ait faiz ve sigorta harcamalarından da 22.000.000TL'lik %5,5 oranında bir kar elde edilecektir. Buradan elde edilecek gelirle minimum aylığı 385 EURO olan 2164 kişi de istihdam edilebilir. Metro inşaatını hesaba aldığımızda bu tarz yapıların çevreye ve kirliliğe karşı birçok faydasının olduğunu da görüyoruz. Örneğin; İstanbul 'da ulaşımın %24 'ünü otomobiller, %26'sını minibüsler, %52 'sini de otobüsler oluşturmaktadır. Taşınan yolcu miktarı ve yakıt tüketimi ile ilgili oranlar aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.1 1 yıllık proje gecikme bedeli maliyet hesabı

| Araç Türü | Ortalama | Yıllık Yolcu Sayısı | Yıllık Sefer |
|--------------------|----------|---------------------|---------------|
| Otobüs (60 Kişi) | %52 | 119.327,00,00 | 1.988.783,00 |
| Minibüs (12 Kişi) | %26 | 59.657.000,00 | 4.971.416,00 |
| Otomobil (2 kişi) | %24 | 55.068.000,00 | 27.534.000,00 |

Tablo 5.2 21 km'lik bir güzergâhtaki yakıt tasarrufu

| Araç Türü | 21 km'lik hat için yakıt tüketimi (lt) | Yıllık Yakıt tasarrufu | Yıllık CO2 Emisyonu |
|--------------------------|--|------------------------|---------------------|
| Otobüs (0,486 lt/km) | 10,26 | 20.404.913,00 | 59.294,00 |
| Minibüs (0,130 lt/km) | 2,73 | 13.571.965,00 | 39.437,00 |
| Otomobil (0,07 lt/km) | 1,47 | 40.474.980,00 | 117.617,00 |

Bu orandaki CO2 salınımını önlemek için 649.000 ağaca ihtiyaç vardır ki bu da yaklaşık 6 km²'lik bir ormana eşittir. Çalışmanın sonucunda, metro projelerine yapılacak

yatırımlardaki artış ile uygun inşaat yönteminin seçimi çevreye ve ekonomiye katkıda bulunabilir.(İBB Raylı Sistemler Müd.)

Yapı projelerinde inşaat planlaması yönetim ve yürütme için çok önemlidir. Uygun bir plan, kullanılacak teknolojiyi, iş görevlerinin tanımını, bireysel görevlerin süresini ve gerekli kaynakların miktarını, farklı görevlerin birbirleriyle olan ilişkilerini tanımlayarak bunları kombine eder. Tüm bunlar bütçe ve iş programının geliştirilmesine esas inşaat planını etkileyecektir.

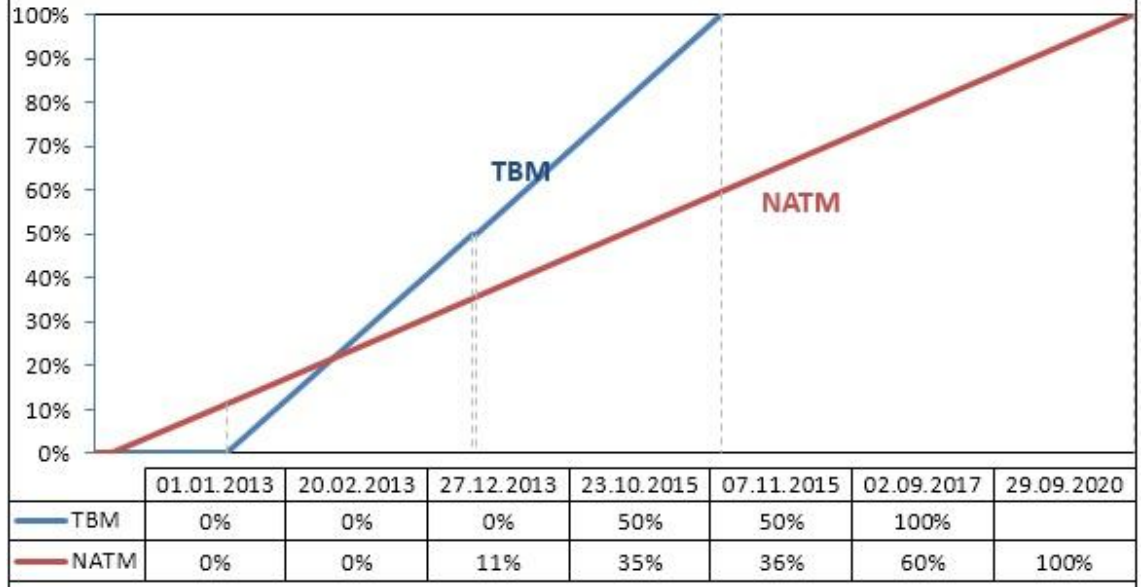
İnşaat sırasında kullanılacak metot ve teknikler, uygun iş programı için önemli olduğu kadar iş programı ve maliyet üzerinde de çok etkilidir. Bu çalışma kaynak ihtiyacı ve inşaat hızı vasıtasıyla inşaat metotları ve tekniklerinin iş programına etkisini araştırmıştır.

Projenin zamanında tamamlanabilmesi için etkili bir metot, çok yönlü ve dikkatlice analiz edilerek seçilmelidir. Kadıköy-Kartal metro projesi örnek çalışma olarak seçilmiş, inşaat metodunun proje tamamlama süresi üzerine etkileri analiz edilmiştir.

Tünel inşaatlarında inşaat süresine etki eden en önemli etken seçilen metottur. NATM ve TBM metotları planlanan performans açısından karşılaştırılmıştır. Eğer yeterli sayıda shaft ve farklı kesitlerde tüneller varsa, iyi bir planlama ve yeterli kaynaklarla, NATM yöntemi ile yapılacak işin TBM yöntemi ile yapılacak işe göre daha erken tamamlanacağı anlaşılmıştır.

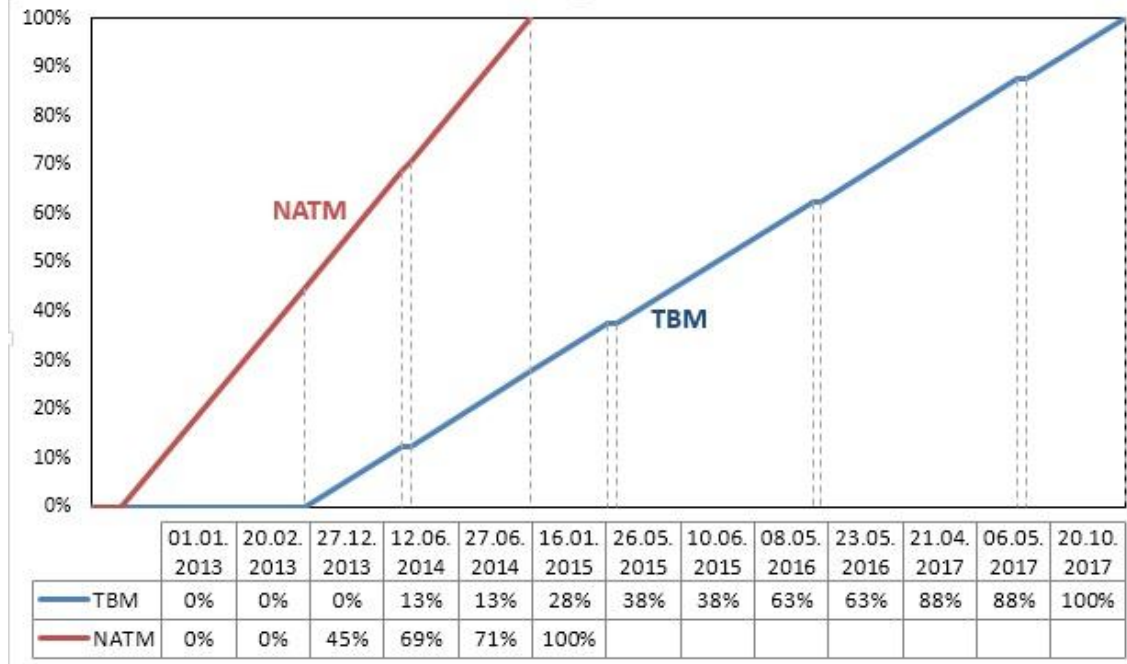
6. EK

Tablo 6.1 Natm (2 Şaft 4 Ekip Kazı Planına Göre) Tbm (2 Tbm İle Kazı Planına Göre)



4 adet natm ekibi ile 2 adet tbm ekibinin 20 km'lik bir hat üzerinde planlanan iş programıdır. TBM'in ara mobilizasyon ve üretim aşamasında ki 16 aylık bekleme süresine rağmen natm yöntemine göre yaklaşık 4 kat daha hızlı ilerlediği için NATM ekibi işin %60'lık kısmındayken TBM işi tamamlamıştır.

Tablo 6.2 Natm (16 Ekip Kazı Planına Göre) Tbm (2 Tbm İle Kazı Planına Göre)



16 adet NATM ekibi ile 2 adet TBM ekibinin 20 km'lik bir hat üzerinde planlanan iş programıdır. TBM'in ara mobilizasyon ve üretim aşamasında ki 16 aylık bekleme süresi ve işin devamı sırasında NATM ile açılması gereken tünellerden kaynaklı beklemesi ve yeterli sayıda NATM ekibinin çok sayıda aynada çalışması sebebiyle TBM işin %28'lik kısmındayken NATM işi tamamlamıştır.

Tablo 6.3 İş Programları Sonucunda Elde Edilen Gelir Kaybı Hesabı

| *PLANLANAN YOLCU SAYISI (YIL/KİŞİ) | ** ORTALAMA BİLET FİYATI (KİŞİ/TL) | YILLIK GELİR (ÇALIŞMA KAPASİTESİ = %50) (TL) | AYLIK GELİR (ÇALIŞMA KAPASİTESİ = %50) (TL) | HATTA ÇALIŞAN PERSONEL SAYISI | HATTA ÇALIŞAN PERSONEL GİDERİ (AY/TL) | İŞLETME NET GELİRİ (AY/TL) |
|------------------------------------|------------------------------------|--|---|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 459.900.000 | 1,14 | 262.526.250,00 | 21.877.187,50 | 700 | 1.050.000,00 | 20.827.187,50 |

** Bilet fiyatı hesaplanırken aktarma ve indirimli geçişler de hesaba katılmıştır

* Yolcu sayılarında İBB Raylı Sistemler Müd. Fiz. Rap. Elde edilen veriler kullanılmıştır

| TÜNEL İNŞAAT YÖNTEMİ | *TÜNEL İNŞAAT BİRİM MALİYETİ (MT/TL) | TOPLAM MALİYET (20 km LİK HAT İÇİN) | İŞLETME BAŞLANGIÇ TARİHİ | İŞLETME BAŞLAMA TARİHLERİ ARASI FARK | İŞLETME GELİRİ (AY/TL) | GECİKMEDEN KAYNAKLI OLUŞACAK GELİR KAYBI (TL) |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|------------------------|---|
| 16 ADET NATM EKİBİ İLE 2 ADET TBM KARŞILAŞTIRILMASI | | | | | | |
| NATM | 15.481,30 | 309.626.000,00 | 16.01.2015 | 2 YIL 9 AY (NATM ÖNCE) | 20.827.187,50 | -687.297.187,50 |
| TBM | 13.237,65 | 264.753.000,00 | 20.10.2017 | | | |
| 4 ADET NATM EKİBİ İLE 2 ADET TBM KARŞILAŞTIRMASI | | | | | | |
| NATM | 15.481,30 | 309.626.000,00 | 29.09.2020 | 3 YIL 1 AY (TBM ÖNCE) | 20.827.187,50 | -770.605.937,50 |
| TBM | 13.237,65 | 264.753.000,00 | 02.09.2017 | | | |

* Tünel inşaat birim maliyetleri İstanbul'da yapımı devam eden ve yakın tarihte biten hatlardan elde edilen verilerdir.

Oluşturulan iş programları sonucunda maliyet ve gecikmeden kaynaklı gelir kaybı yukarıdaki tablolarda hesaplanmıştır.

KAYNAKÇA

- Öztürk, Z. Arlı, V. 2009, *Demiryolu Mühendisliği*, İstanbul, İstanbul Ulaşım A.Ş. Yayınları,
- Arlı, V. ,2011, İstanbul, İstanbul Ulaşım A.Ş. Yayınları
- Arıoğlu, B.Yüksel, A. Kurtuldu, S. Arıoğlu, E. (2002) “İzmir Metro Projesinde Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu Zemin Basıncı Dengeleme Tünel Metodu Uygulamaları”, Yapı Dünyası, Nisan 2002, 35-49.
- Arıoğlu, E.(2009) “Tüneller”, Y.T.Ü Ders Notları 1,Yapı merkezi AR&GE Bölümü, İstanbul.
- Arıoğlu, E. (2009) “Klasik Kazı yöntemleri”, Y.T.Ü Ders Notları 6, Yapı Merkezi AR&GE Bölümü, İstanbul.
- Arıoğlu, E.Yüksel, A. (1999) “Tünel ve Yer altı Mühendislik Yapılarında Çözümlü Püskürtme Beton Problemleri”, TMMOB Maden Müh. Odası İstanbul Şubesi İstanbul, 178.
- Arıoğlu, E. Zhao, J. (2009) “Lozan Üniversitesi Tünel Ders Notları”, Y.T.Ü Ders Notları, İstanbul.
- Bozkurt, M. (1987) “Tüneller Ders Notları”, İ.T.Ü Mühendislik Mimarlık Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Çınar, M. Feridunoğlu, C. (1994) “Tünel Açma Makineleri (TBM)” Ulaşımında Yer Altı Kazıları I. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, 343-367, İstanbul.
- Erguvanlı, K. (1982) Mühendislik Jeolojisi, İ.T.Ü Yayını, İstanbul.
- Friant, J.E. Özdemir, L. (1994) “Tünel Açma Teknolojisi Bugün ve Yarın”, İTÜ Maden Fakültesi Tünel ve Galeri Açma Meslek İçi Semineri, İstanbul.
- Karakuş, M. Fowell, R.J. (2004) “An Knight Into the New Austrian Tunnelling Method”, KAYAMEK, 2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / ROCKMEC, 2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas.
- Kurt, C. Yılmaz, Ö. Şimşek, S. (1994) “İstanbul Metrosu Tünellerinde Boru Şemsiye (Umbrella Arch) Yönteminin Uygulanması ve Sonuçları”, Ulaşımında Yer Altı Kazıları I. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, 331-342, İstanbul.
- Özyüksel, M. (1988) “Osmanlı-Alman ilişkilerinin gelişim sürecinde Anadolu ve Bağdat Demiryolları”, Arpa Yayınları, İstanbul.
- Rabcewicz, L. (1964) “The New Austrian Tunnelling Method”,Part one, Water Power, November 1964, 453-457, Part two, Water Power, December 1964, 511-515.
- Schmidt, M. (1995) “Research and latest development of materials for shotcreting”, Shotcrete for Underground Support VII. Proceedings of the Engineering Foundation Conference Telfs, Austria, 11-15 june 1995, American Society of Civil Engineers, 44-52, New York.
- Ünlütepe, A. (2005) “Marmaray BC1 Projesi ve Ölçme Çalışmaları”, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İ.T.Ü-İstanbul.