

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL METROSU III. AŞAMA TÜNELLERİNDE KULLANILAN
DESTEKLEME TİPLERİ VE MALİYETLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ali ATASOY**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Ulaştırma Mühendisliği

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL METROSU III. AŞAMA TÜNELLERİNDE KULLANILAN
DESTEKLEME TİPLERİ VE MALİYETLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ali ATASOY
(501071402)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Nevzat ERSELCAN (İTÜ)
Öğr. Gör. Dr. Mustafa Sinan YARDIM
(YTÜ)**

HAZİRAN 2010

ATASOY ailesine,

ÖNSÖZ

Doğup, büyüdüğüm yer olan Doğu Karadeniz coğrafik yapısıyla oldukça zorlu olup, ulaşım konusunda sorunlar yaşayan bir bölgeydi. Bu nedenden dolayı karayolları ve demiryolları her zaman ilgimi çekmiştir. Özellikle yolların, dağ dizilerinin altından tünelle geçmesi bende merak uyandırmaktaydı. Yıllar sonra inşaat fakültesinden mezun olunca İstanbul Metrosu inşaatında çalışma fırsatım oldu. Bu projede saha ve teknik ofis mühendisi olarak tüneller konusuyla yakından ilgilendim. İstanbul Metrosu III. aşama tünellerinde kullanılan destekleme tipleri ve maliyetlerinin incelenmesi konusunda tez çalışması yapmaya karar verdim. Yüksek lisans süreci ile şantiyeciliğe birlikte devam ettim. Yüksek lisans eğitimimde; teknik bilgi ve çalışmalarımın katkılarından dolayı İ.T.Ü Ulaştırma Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, tez çalışmalarımın oluşması ve hazırlanması sırasında bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen saygı değer hocam Prof. Dr. Zübeyde Öztürk'e, tecrübelerini benimle paylaşan Jeoloji Müh. M.Turgay Özat ve Jeoloji Müh. Ahmet Varol'a, her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili babam Hasan Atasoy'a, sevgili annem Melahat Atasoy'a ve diğer tüm ATASOY ailesi fertlerine gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı teşekkür ederim.

Haziran 2010

Ali Atasoy

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	4
2. NATM'NİN UYGULANDIĞI HATTIN TANITILMASI.....	5
2.1 Metronun Tanımı ve Amaçları.....	7
3. GEOTEKNİK ARAŞTIRMALAR, GENEL JEOLJİK DURUM VE MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ÇALIŞMALARI.....	9
3.1 Araştırma Sondajları ve İn-situ (Yerinde) Testler.....	9
3.2 Laboratuar Deneyleri.....	12
3.3 Çalışma Alanının Jeolojisi	12
3.3.1 Neojen çökeller	13
3.3.2 Kartal formasyonu	13
3.3.3 Andezit ve diyabaz daykları.....	13
3.3.4 Yapısal jeoloji	13
3.4 Proje Alanında Yer Alan Zemin ve Kaya Tabakalarının Mühendislik Özellikleri.....	14
3.4.1 Zemin tabakaları.....	15
3.4.1.1 Katı kumlu kil tabakası	15
3.4.1.2 Orta sıkı kum – siltli kum tabakası	16
3.4.1.3 Tamamen ayrılmış kaya.....	16
İnce daneli zeminlerin sınıflandırılması	18
İri daneli zeminlerin sınıflandırılması	18
3.4.2 Kaya birimleri	19
3.4.2.1 Kaya sınıflandırması	20
3.4.2.2 Grovak kaya birimi (B3 – taneli).....	22
Çok ayrılmış grovak seviyeleri.....	23
Orta derecede ayrılmış grovak seviyeleri.....	23
Az ayrılmış – ayrılmamış grovak seviyeleri	23
3.4.2.3 Kireçtaşı kaya birimi (B1 + A2 – Gevrek, az dökülen)	24
Çok – orta derecede ayrılmış kireçtaşı seviyeleri	24
Az ayrılmış – ayrılmamış kireçtaşı seviyeleri.....	25
3.4.2.4 Şeyl kaya birimi (B3 – taneli)	25
Orta derecede ayrılmış şeyl seviyesi.....	26
Az ayrılmış – ayrılmamış şeyl seviyeleri.....	26
3.4.2.5 Fay zonlarında yaklaşık mühendislik özellikleri (C2 – C3).....	27

3.5 Kazılabilirlik	27
4. TUNEL KAZI YONTEMLERİ	29
4.1 Aç – Kapa Yöntemi.....	29
4.2 Delme – Patlatma Yöntemi	30
4.3 Makine İle Kazı Yöntemi	31
4.3.1 Tam kesit tünel açma makineleri ile tünel açma.....	32
4.3.2 Yarım kesit tünel açma makineleri ile tünel açımı	35
5. YENİ AVUSTURYA TUNEL AÇMA YÖNTEMİ İLE TUNEL AÇMA SIRASINDA KULLANILAN JEOTEKNİK ÖLÇÜM SİSTEMLERİ VE ALETLERİ	39
5.1 Deformasyonların Ölçümü	41
5.1.1 Yakınsama (konverjans) aygıtları ve bulonları.....	41
5.1.2 Uzama ölçerler (Ekstansometreler).....	44
5.1.3 Gerilme ve basınç hücreleri.....	49
5.1.4 Eğim ölçerler (İnklinometreler)	50
5.1.5 Çatlak ölçerler.....	55
5.1.6 Diskli yük hücresi	56
5.1.7 Nivelman ölçümleri (Optik ölçümler).....	60
5.1.7.1 Bina nivelman ölçümleri.....	60
5.1.7.2 Yüzey oturma ölçümleri	62
5.1.7.3 Reflektör ölçümleri.....	62
5.1.7.4 Duvar nivelman ölçümleri	62
5.1.7.5 Tünel içi optik ölçümler.....	63
5.2 Aletlerin Hassasiyetleri	64
6. NATM'DE İSTASYON, TUNEL İNŞAATLARI VE DESTEKLEME ELEMENLARININ İNCELENMESİ	67
6.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin ilkeleri.....	69
6.2 Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Uygulanmasında Başlıca Görüşler	72
6.3 İstasyonlar.....	73
6.4 Şaftlar ve Tüneller.....	74
6.4.1 Şaftlar	74
6.4.2 Tüneller	76
6.4.2.1 Tünel tipleri.....	76
6.4.2.2 Tünel kazı destek tipleri.....	77
A tipi tünel, A3 sisteminde kazı – destekleme yöntemi.....	79
A tipi tünel, A5 sisteminde kazı – destekleme yöntemi.....	80
6.4.2.3 Kazı yönteminin uygulanması	80
6.5 Kafes Çelik İksa.....	82
6.6 Çelik Hasır.....	84
6.7 Püskürtme Beton (Shotcrete).....	85
6.8 Enjeksiyonlu Kaya Bulonu.....	86
6.9 Sürenler.....	88
6.10 Şemsiye Boruları (Umbrella Arch)	89
6.11 Zemin Çivisi (Sürtünme Kolonu)	92
7. DEĞERLENDİRME	95
8. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR.....	109
EKLER	111
ÖZGEÇMİŞ.....	113

KISALTMALAR

SPT	: Standart Penetrasyon Testi
ASTM	: American Society For Testing Materials
BST	: Basınçlı Su Testi
NATM	: New Austrian Tunnel Method
TBM	: Tunnel Boring Machine
RMR	: Rock Mass Ratio
GSI	: Geological Strength Indeks
RQD	: Rock Quality Designation
LL	: Likit Limiti
PL	: Plastisite Limiti
RL	: Rötire Limiti

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Sondajlara ait genel bilgiler	9
Çizelge 3.2 : Basınçlı su testi sonuçları	11
Çizelge 3.3 : Katı kumlu kil tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri.....	15
Çizelge 3.4 : Orta sıkı kum – siltli kum tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri	16
Çizelge 3.5 : Tamamen ayrıışmış kaya seviyesine ait arazi ve laboratuvar verileri..	16
Çizelge 3.6 : Kaya sınıflandırma yöntemleri	20
Çizelge 3.7 : Q ve RMR sınıflandırma puanlarının değeriendirilmsi.....	21
Çizelge 3.8 : İnceleme alanının zemin ve kaya parametreleri.....	22
Çizelge 3.9 : Çok ayrıışmış grovak seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değeri.....	23
Çizelge 3.10 : Orta derecede ayrıışmış grovak seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değeri.....	23
Çizelge 3.11 : Az ayrıışmış-ayrıışmamış grovak seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değeri.....	24
Çizelge 3.12 : Çok ayrıışmış kireçtaşı seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değeri.....	25
Çizelge 3.13 : Az ayrıışmış – ayrıışmamış kireçtaşı seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değeri.....	25
Çizelge 3.14 : Orta derecede ayrıışmış şeyl seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değeri.....	26
Çizelge 3.15 : Az ayrıışmış-ayrıışmamış şeyl seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değeri.....	26
Çizelge 5.1 : Germe aleti ve yük hücresi okumaları.....	57
Çizelge 6.1 : Tünel tiplerinin boyutları.....	76
Çizelge 6.2 : Destekleme tipleri ve destekleme elemanları	78
Çizelge 6.3 : Tünel tiplerinin, destekleme tipine göre kazı aşamaları.....	81
Çizelge 7.1 : A3 ve A5 destekleme sistemlerinin jeoloji, destekleme elemanları ve kazı adımları açısından karşılaştırılması.....	95
Çizelge 7.2 : A3 ve A5 destekleme sistemlerinin imalat hızı açısından karşılaştırılması.....	96
Çizelge 7.3 : A3 destekleme kazı alanı hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve alanlar	97
Çizelge 7.4 : A3 destekleme püskürtme beton hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve çevreler	97
Çizelge 7.5 : A3 destekleme donatı hesabı ile ilgili tipler, ebat ve boylar.....	98
Çizelge 7.6 : A5 destekleme kazı alanı hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve alanlar (KÇI).....	99
Çizelge 7.7 : A5 destekleme kazı alanı hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve alanlar (KÇVI)	100

Çizelge 7.8 : A5 destekleme püskürtme beton hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve çevreler (KÇI)	100
Çizelge 7.9 : A5 destekleme püskürtme beton hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve çevreler (KÇVI)	101
Çizelge 7.10 : A5 destekleme donatı hesabı ile ilgili tipler, ebat ve boylar (KÇI)	101
Çizelge 7.11 : A5 destekleme donatı hesabı ile ilgili tipler, ebat ve boylar (KÇVI)	102
Çizelge 7.12 : A3 destekleme sisteminin maliyetler açısından incelenmesi	102
Çizelge 7.13 : A5 destekleme sisteminin maliyetler açısından incelenmesi	103

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İstanbul raylı sistem ağ haritası	6
Şekil 2.2 : Raylı sistem ağının uydu görüntüsü.....	7
Şekil 3.1 : SPT N değerlerinin analizi	17
Şekil 3.2 : Kıvam limitleri grafiği	18
Şekil 3.3 : Cassagrande Plastisite kartı	18
Şekil 3.4 : Birleştirilmiş zemin sınıflandırması-ince daneli malzeme	19
Şekil 3.5 : Birleştirilmiş zemin sınıflandırması-iri daneli malzeme	19
Şekil 4.1 : Aç-kapa tünel çalışmasında tavanın ve yan duvarın kaplanması	30
Şekil 4.2 : Tavan ve yan duvar kaplaması tamamlanmış bir tünel	30
Şekil 4.3 : TBM bastırma ve tork sistemleri	32
Şekil 4.4 : Kollu tünel açma makinesi	35
Şekil 5.1 : NATM yük etki diyagramı	39
Şekil 5.2 : Geoteknik ölçüm aletleri genel yerleşim detayı	40
Şekil 5.3 : Geoteknik ölçüm aletleri genel yerleşim detayı	40
Şekil 5.4 : Deformasyon ölçümlerinde kullanılan bulon	41
Şekil 5.5 : Ölçüm noktalarının şematik gösterimi	41
Şekil 5.6 : Bant uzama ölçer ile noktalar arası ölçüm yapılışı	42
Şekil 5.7 : Yakınsak deformasyon ($B>A$)	43
Şekil 5.8 : Iraksak deformasyon ($A>B$)	43
Şekil 5.9 : Düşey uzama ölçerler	44
Şekil 5.10 : Yatay uzama ölçerler.....	44
Şekil 5.11 : Tünel içi uzama ölçerler	45
Şekil 5.12 : Çubuk uzama ölçer kafa kesiti.....	45
Şekil 5.13 : 3 kademeli uzama ölçer detayı.....	47
Şekil 5.14 : Gerilme ve basınç hücresi ekipmanı	50
Şekil 5.15 : Eğim ölçer ekipmanı	51
Şekil 5.16 : Deplasmanın, gerçek boy ile değişim grafiği	54
Şekil 5.17 : Kılavuz tüpü içindeki sondanın ölçüm yönleri	54
Şekil 5.18 : Çatlak ölçer çalışma prensibi.....	55
Şekil 5.19 : Diskli yük hücresinin kesit ve ölçüleri.....	57
Şekil 5.20 : Diskli yük hücresi çalışma sistemi.....	58
Şekil 5.21 : Yük hücresinin laboratuvar ve saha sonuçları.....	59
Şekil 5.22 : Bulon öngerme yükünün zamanla kaybı	59
Şekil 5.23 : Hasar yüzdesi ve hasar miktarı grafiği	61
Şekil 5.24 : Bina nivelman sistematığı	62
Şekil 5.25 : Optik ölçümlerin analitik gösterimi	63
Şekil 5.26 : Reflektör hesap eksen kesiti	64
Şekil 6.1 : Klasik tünelcilik yöntemlerindeki yük dağılım diyagramı.....	68
Şekil 6.2 : NATM'deki yük dağılım diyagramı	68
Şekil 6.3 : Zemin dinamik yükünün zamanla değişim grafiği	69
Şekil 6.4 : Şaft bilezik betonu kalıbı.....	74
Şekil 6.5 : Şaft kazısı	75

Şekil 6.6 : Tünel tiplerinin enkesitleri	77
Şekil 6.7 : A tipi tünel, A3 destekleme enkesit paftası.....	79
Şekil 6.8 : A tipi tünel, A5 destekleme enkesit paftası.....	80
Şekil 6.9 : İksa profili detayları.....	83
Şekil 6.10 : İksa profili ölçüleri.....	83
Şekil 6.11 : Çelik hasır donatı çubukları ve karelağı	84
Şekil 6.12 : Üstyarı kazısına püskürtme beton uygulanişı.....	85
Şekil 6.13 : Altyarı kazısına püskürtme beton uygulanişı	86
Şekil 6.14 : Bulon detayı	87
Şekil 6.15 : Taşıma levhası detayı.....	87
Şekil 6.16 : Bulon delgisi yapan jumbo makinesi.....	88
Şekil 6.17 : Süren boykesit paftası	89
Şekil 6.18 : Şemsiye boruları boykesit paftası.....	90
Şekil 6.19 : Şemsiye boruları uç kısımlarının ve enjeksiyon deliklerinin hazırlanması	90
Şekil 6.20 : Şemsiye borularının aynada işaretlenmesi ve boruları yerlerinin delgisi.....	91
Şekil 6.21 : Boruya enjeksiyon yapılmadan önce ağız kısmının alçı ile kapatılması	91
Şekil 6.22 : Zemin çivisi enkesit paftası.....	92
Şekil 6.23 : Zemin çivisi enjeksiyon borularının hazırlanışı	93
Şekil 6.24 : Zemin çivisinin aynada uygulanişı	93
Şekil 6.25 : Zemin çivilerinin ve şemsiye borularının delik bölgelerine yerleştirilmesi ve enjeksiyonları.....	94
Şekil 7.1 : A3 destekleme enkesiti, merkez noktaları, yay yarıçap ve açıları.....	96
Şekil 7.2 : A5 destekleme enkesiti, merkez noktaları, yay yarıçap ve açıları (KÇI).....	98
Şekil 7.3 : A5 destekleme enkesiti, merkez noktaları, yay yarıçap ve açıları (KÇVI).....	99

İSTANBUL METROSU III. AŞAMA TÜNELLERİNDE KULLANILAN DESTEKLEME TİPLERİ VE MALİYETLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Çalışmada Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ele alınarak çok yönlü bir şekilde incelenmiştir. İnceleme çalışmaları hem literatüre hem de uygulamaya dayanılarak yapılmıştır. Bu amaçla İstanbul metrosunun III.bölümü örnek uygulama olarak ele alınmıştır. Metro inşaatı, karşılaşılan özel durumlar ve nispeten farklı yapım teknikleri nedeniyle konumuz açısından önemlidir. Çünkü kullanım amaçlarına göre birbirinden farklı tüneller inşa edilmiş olup zemin parametrelerine, su durumuna, fay mevcudiyetine, toprak örtüsünün kalınlığına, çevresel koşullara, statik ve dinamik yükün varlığına göre farklı destekleme biçimleri uygulanmıştır. Bu nedenle projenin ve uygulanma şeklinin takip edilmesi tez açısından gerekli olmuştur.

Tezde önce örnek alınan hatla ilgili bilgiler verildikten sonra in-situ testleri, laboratuvar deneyleri, çalışma alanının jeolojisi, proje alanında yer alan zemin ve kaya tabakalarının mühendislik özellikleri ve kazılabilirliği içeren geoteknik araştırmalar, genel jeolojik durum ve mühendislik jeolojisi çalışmaları incelenmektedir. Aç-kapa, delme-patlatma, makine ile tünel açma yöntemlerini kapsayan tünel kazı yöntemleri özetlenmiş olup çalışmanın devamında destekleme sisteminin bağlı olduğu parametreler ve jeolojik ölçüm teknikleri ile ilgili deformasyonların ölçümü ve aletlerin hassasiyetleri konuları üzerinde durulmaktadır. Çalışmada ağırlık verdiğimiz NATM hakkında detaylı bilgi verilmiş ve bu amaçla yöntemin ilkeleri, uygulamadaki başlıca görüşler, istasyonlar, shaft ve tünel inşaatları ve destekleme elemanları irdelenmiştir. Sonrasında farklı destekleme sistemleri, jeoloji, kazı adımları, destekleme elemanları, kazı hızları, metrajlar ve maliyetler açısından karşılaştırılmıştır.

EXAMINATION OF SUPPORTING TYPES AND ITS COSTS OF ISTANBUL SUBWAY III. STAGE TUNNELS

SUMMARY

Within the scope of the work, the New Austrian Tunnel Method (NATM) is analyzed in detail based on literature and practices. In this context, the III. Stage of İstanbul Metro project is handled as an example. Since the project is very important because of the special conditions encountered and the distinctive construction methods preferred. Moreover, the tunnels of the project are supported with different methods in terms of soil parameters, water content, fault zone, thickness of ground cover, environmental conditions, statical load and dynamical load. That is why the project is handled through the dissertation.

In this thesis, after providing information about alignment, in-situ tests, laboratory tests, geology of the study area, engineering properties of the soil and rock layers from the site area, geotechnical investigations of the excavation availability, the general geological conditions and engineering geology are examined. The tunnel excavation methods like cut-cover, drilling and exploding, excavation with machine tunneling are summarized and in the parameters of the supporting system and geological measurement techniques for deformation measurement and instrument sensitivity issues are being discussed. In this study, it has been given detailed information about the NATM method and for this purpose the principles of the methods, the main ideas in the implementation, stations, shaft and tunnel construction and supporting equipments are examined. Lastly, the different support systems have been compared in terms of the geology, excavation steps, support elements, excavation rates, quantities and costs.

1. GİRİŞ

Mevcut bilgilere göre ulaşım amacıyla yapılmış olan en eski tünel, yani yer altı yapısı 4000 yıl önce, Babil’ de Kraliyet Sarayı ile Jupiter Tapınağı arasında bir yer altı bağlantısı kurmak üzere Fırat Nehri yatağının altından geçmek için yapılmıştır. Bu tünelin uzunluğu 1 km. idi ve 3,6 x 4,5 m.’lik önemli sayılabilecek büyüklükte bir enkesiti vardır. İnşaat dönemi için Fırat Nehri yatağının yönü değiştirilmiş ve modern standartlara göre bile önemli bir proje olan bu tünel açık kazıda inşa edilmiştir. Tünel duvarı bitümlü harç bağlantılı tuğlalarla yapılmış ve kesit yukarıdan tonozlu bir kemerle örtülmüştür. Bu projenin önemini anlayabilmek için aynı tip tünelin 1843 de Londra’da Times Nehri altında açıldığı hatırlanmalıdır [1].

Daha sonraları, düşman surlarının altından geçerek kuşatılmış olan şehirlere girmek için askeri amaçlı sayısız tünel yapılmıştır. Surların altından geçmek üzere yapılan tüneller, Roma ve Yunan Savaşlarının önemli birer unsuruydu.

Roma döneminde yapılan su yolu tünelleri de büyük ün kazanmıştır. Bu ikmal tünellerinden birisi 1800 yıl önce Atina’ da yapılmış olup halen kullanılmaktadır.

XVII. yüzyılda gelişmeye başlayan kanal taşıması tünelcilikte önemli bir aşama meydana getirmiştir. 1679-1681 de Fransa da Langedog Kanalını geçirmek amacıyla Mal-Passe Tüneli inşa edildi. Tüflü zeminlerde inşa edilen bu tünel 160 m. uzunluk, 7 m. genişlik ve 8 m. yükseklikteydi. Bundan sonra Avrupa’nın birçok yerlerinde, daha çok su getirme veya kanal taşımaları için pek çok tünel açılmıştır.

Fakat büyük tünellerin çoğalışının görülmesi ancak demiryollarının gelişmesi ile beraber olmuştur. Demiryollarında uygulanan eğimlerin küçük, yarıçapların ise büyük olması nedeniyle önemli tünellerin açılması zorunlu olmuştur. İlk demiryolu tünelinin 1826’da Fransa da St.Etienne-Terre Noire Hattı üzerinde açılmış olduğu iddia edilmektedir.

Demiryolu ağının hızlı gelişimi ve genişleyen bir alanda yakın temas kurmada öneminin kavranması, kısa sürede büyük dağ dizileri altında tüneller yapılması gereğini doğurmuştur. Kilometrelerce sert kayanın parçalanmasını gerektiren bu

muhteşem tünellerin projelerinin gerçekleşmesi yeni kaya kazısı ve inşaat yöntemlerinin gelişmesi ve uygulanması olmadan mümkün olmazdı.

Demiryolu tünelleri ile edinilen derslerden hidrolik istasyonlara su taşınmasının yanı sıra, evlerin ve sanayinin ihtiyacı olan suyun taşınması için yüzyılın başından beri yapılan, benzer enkesitli artan sayıda su tünellerinin inşaatı sırasında yararlanılmıştır. Bu tünellerde su geçirmez kaplamanın dizaynının uygun şekilde yapılmasıyla bağlantılı, yeni problemler çıkmıştır.

Otoyolların yapımıyla da, tünellerin inşaatı yeni bir alanda gündeme gelmiştir. İsviçre, Avusturya, İtalya ve Fransa'da devletler arası otoyol ağının inşaatı önemli büyüklükte çeşitli nakliye tünellerinin yapımını gerektirmektedir [2, 3].

Günümüzde ise karayolu ve demiryolu tünellerinin yanı sıra metro tünelleri de oldukça önem kazanmıştır. Dünyada ilk büyük metro sistemleri 19. yüzyılın sonunda ve 20. yüzyılın başlarında Londra, Paris, New York ve Moskova'da kuruldu. İlk yeraltı demiryolu projesi 1835'de İngiltere'de yapıldı. Buna rağmen Londra'nın kenar semtlerindeki iki demiryolu istasyonunu kentin merkezine bağlamayı amaçlayan bu proje düşsel bulunduğu için uygulanmadı. 1860'da Londra'da dünyanın ilk yeraltı demiryolunun yapımına başlandı. 6 kilometre uzunluğundaki bu metro hattı 1863'de işletmeye açıldı. Sonraki yıllarda yapılan ekler ve yeni hatlarla giderek genişleyen Londra metrosunda bugün 408 kilometrelik bir ağ üzerindeki 273 istasyon arasında çalışan 457 metro treni her gün yaklaşık 2,5 milyon yolcu taşımaktadır. İngiltere'den sonra Avrupa'daki ilk metro 1896'da Macaristan'ın başkenti Budapeşte'de açıldı. Dünyanın ünlü metrolarından biri olan Moskova metrosunun 197 kilometrelik toplam uzunluğunun 20 kilometrelik bir bölümü dışında tümü yeraltındadır ve 123 istasyonu vardır. 1904'de açılan New York metrosu, her yıl 1 milyardan fazla yolcu taşıyan ve hemen hepsi 24 saat hizmet veren 23 hattıyla dünyanın en yoğun metrosudur. Bu metronun 220,5 kilometresi yeraltında, 150,6 kilometresi yerüstünde olan toplam 371 kilometrelik hatta 456 istasyon vardır. Bugün yeryüzünde nüfusu 1 milyonu aşan kentler arasında metrosu bulunmayan kent hemen hemen kalmamış gibidir [4].

İstanbul 19. yüzyılın son çeyreğine kentiçi raylı sistemler açısından dünya kentleri ile yarışan gelişmiş bir şehir olarak girmişti. Oysa, İstanbulluların bugün en büyük sorunu ulaşımdır. Dünyadaki bütün diğer büyük şehirler yarım asırdan daha fazla bir

zaman önce, ulaşımı yeraltına indirerek sorunu çözmüşken, İstanbul bu gelişmeyi uzaktan seyretmiş, ulaşım sorununu yüzeysel düzenlemelerle halletme yoluna gitmiştir. İstanbul için ulaşım probleminin en kalıcı bir şekilde çözümü şüphesiz ki raylı sistem uygulamaları ve özellikle de metro ile mümkün olabilecektir. Ancak, Londra ve Budapeşte Metrosundan sonra, 1871 yılında yapımına başlanan ve 1874 yılında tamamlanan 626 m'lik dünyanın 3. metrosu olan tarihi Karaköy Tünelinden 1985 yılına kadar İstanbul'da her hangi bir raylı ulaşım vasıtası ciddi olarak düşünülmemiştir. Yani İstanbul'da, ilk metro devreye girdikten tam 110 yıl sonra yeni metro projeleri üzerinde çalışmalara başlanabilmiştir. 1000 kişi başına düşen raylı sistem ağı uzunluğunun İstanbul'da 3,6 m, New York'ta 31 m., Paris'te 25 m. ve Tokyo'da 22 m. olması bu 110 yıl süren ihmalden kaynaklanmaktadır [5,6].

Metro, toplu taşımacılık sistemlerinin yaygın bir türü olarak tüm dünyada giderek artan oranda kullanılmaktadır. Özellikle, büyük şehirlerde çarpık kentleşme ve sürekli göçler trafik yoğunluğunu artırarak ulaşım sorunu meydana getirmekte ve bu sorunun giderilmesi için uygulanan yöntemler arasında kent genelinde yeterli ve uygun metro ağlarının oluşturulması bulunmaktadır. Ekonomik ve çabuk ulaşım olanağı sağlayan metronun diğer raylı sistemlerle birlikte kent karayollarındaki trafik sıkışıklığına en etkili çözümü sağlayacağı kuşkusuzdur.

Metro ağlarının uygulanmasında dikkat edilecek başlıca unsurlar yapım süresince emniyetten ödün vermeden en düşük maliyetle ve en kısa sürede tamamlayarak halkın hizmetine sunulabilmesidir. Bu projelerin düşük maliyetle ve kısa sürede işletmeye alınabilmesi için tünel açma tekniklerinden en uygun olanın belirlenmesi gereklidir. Belirlenen metod için kullanılacak yöntemin araştırılması, uygulama sırasında karşılaşılabilecek problemlerin belirlenmesi ve bu problemlerin çözümü için de önlemlerin alınması gereklidir.

1950' lerden sonra, yer altı kazılarının ve tünel açımının artması güvenli ve ucuz tünel açma yöntemlerinin de ortaya çıkmasına neden olmuştur. Tünel açma tekniği ile ilgili Avusturyalı bilginler, Stini, Müller ve Rabcewicz araştırmalar yapmıştır. Bu araştırmaların sonucunda elde ettikleri yönteme Yeni Avusturya Tünel Yapım Yöntemi adını vermişlerdir. Bu yöntem özellikle 70' li yıllarda Müller ve öğrencileri tarafından daha da geliştirilmiştir [13].

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin (NATM) özün kazı sonrası oluşacak deformasyonun bir kısmının ana kayaya, bir kısmının ise tahkimat elemanına taşıttırılması esasına dayanmaktadır. Bu tünel açma yönteminde ana ilke; en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemlerinin seçilerek kazı sonrasında oluşan ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendisini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturmasını sağlamaktır. Çalışmada bu konular hem literatür incelemesi şeklinde hem de uygulamadaki örnekleriyle ele alınarak irdelenmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışma, Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin birçok parametreye bağlı olarak incelenmesi ve uygun destekleme sisteminin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla İstanbul Metrosu III. Aşama, Atatürk Oto Sanayi ve Hacıosman arasında yapımına devam edilen tünel inşaatlarının teknik özellikleri de incelenmiştir. Çalışma konusu içinde, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi incelenmekte olup, bu projeden de faydalanarak hattın jeolojik özellikleri, kazı yöntemleri, tünel tipleri, tünel destekleme tipleri, destekleme elemanları ve jeoteknik ölçümler irdelenmektedir.

2. NATM'NİN UYGULANDIĞI HATTIN TANITILMASI

İstanbul Metrosunun III. aşamasında yapılan tünel açma yöntemleri incelenmiştir. İncelemenin yapıldığı hatla ilgili veriler aşağıda sunulmaktadır.

İşin Adı : İstanbul Metrosu III. Aşama IV. Levent-Ayazağa Kesimi, Seyrantepe Depo Sahası ve Depo Bağlantı Hatları İkmal İnşaatı ve Elektro-Mekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri

İş Sahibi : İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Daire Başkanlığı, Raylı Sistemler Müdürlüğü

Yüklenici : Alsim Alarko – Makyol İnş. Ortaklığı

İhale Bedeli : 316.317.214,16 €

İşe Başlama Tarihi : 07.01.2008

İş Bitim Tarihi : 07.01.2011

Hat Boyu :

- Ana Hat Tünelleri (A) : 2534,50 m
- Peron (P) : 844,60 m
- Makas (T) : 84,80 m
- Makas (C) : 359,20 m
- Bağlantı (B1) : 300,00 m
- Bağlantı (B3) : 90,00 m
- Geçiş (A) : 36,00 m

Toplam tünel uzunluğu : 4249,10 m

İstasyon Sayısı : 2

İstasyonlar : Darüşşafaka İstasyonu – Hacıosman İstasyonu

Peron Boyları : Darüşşafaka İstasyonu 221,20 m, Hacıosman İstasyonu 201,10 m

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de sırasıyla İstanbul raylı sisteminin ağ haritası ve uydu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.1 : İstanbul raylı sistem ağ haritası



2.1 Metronun Tanımı ve Amaçları

Metro, 1435 mm ray açıklığındaki hatlarda, 750 V DC ile üçüncü raydan beslenen, tek yönlü olarak saatte 60000-70000 yolcu taşıyan, her biri yaklaşık 250 yolcu kapasiteli 4 ya da daha fazla araçtan oluşabilen diziler halinde sinyalizasyon sistemine tabi olarak işletilen, çoğunlukla yeraltında açılan tünellerde döşenen hatlarda çalışan, işletme hızı 40-80 km/saat arasında olan raylı toplu taşıma sistemidir. Bu sistemin en büyük dezavantajı alt yapı yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre çok yüksek olmasıdır [6, 7].

Metro Projesinin Amaçları:

- Ulaşım güvenliğini, konforunu ve emniyetini sağlamak.
- Yolculuk süresini azaltmak, ulaşılabilirliği ve hareketliliği arttırmak.
- Ulaşımın çevreye kötü etkilerini en aza indirmek, daha iyi yaşanabilir bir çevre oluşturmak.

- Tarihi ve doğal çevreyi korumak ve sürekliliği arttırmak.
- En az kentsel yayılma ile düzenli büyümeyi teşvik etmek.
- Etkin ekonomik yarar / maliyet ilişkisi yüksek ulaşım sistemi sağlamak.
- Kent içi raylı ulaşım sistemleriyle entegrasyonu sağlamak.

3. GEOTEKNİK ARAŞTIRMALAR, GENEL JEOLJİK DURUM VE MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ÇALIŞMALARI

İstanbul Metrosu III. aşama yapım çalışmaları için temel araştırma sondajları yapılmış olup, çeşitli numuneler alınmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, güzergah üzerindeki kaya ve zemin tabakalarının karakteristikleri ile ilgili bilgilere ulaşılmış olup, imalat için gerekli detaylar oluşturulmuştur [8].

3.1 Araştırma Sondajları ve İn-situ (Yerinde) Testler

Proje kapsamında, derinlikleri 43 ila 66 m. arasında değişen 12 adet temel araştırma sondajı yapılmıştır. Bu sondajların yanı sıra daha önceki aşama için yapılmış olan TSK 64 ve TSK 65 sondajlarından da yararlanılmıştır. Çizelge 3.1’de sondajlara ait genel bilgiler, Ek A.1’de sondaj vaziyet planı ve Ek A.2’de sondaj boykesitleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Sondajlara ait genel bilgiler

Sondaj No	Kilometre	Yatay (x)	Düşey (y)	Kuyu Kotu (z)	Kuyu Derinliği (m)
TSK 64	23+133	4555870,75	418118,42	120,50	45,60
TSK 65	23+210	4555910,20	418156,22	121,00	45,60
SK 1	23+330	4556039,90	418171,06	124,43	54,50
SK 2	23+470	4556177,39	418189,66	126,05	58,75
SK 3	23,+625	4556339,89	418183,14	126,45	61,50
SK 4	23+706	4556404,68	418236,38	127,78	65,00
SK 5	23+840	4556495,71	418327,11	119,24	58,00
SK 6	23+917	4556557,89	418381,91	113,79	56,00
SK 7	24+012	4556598,02	418471,86	102,25	43,00
SK 8	24+127	4556689,31	418548,61	97,56	43,00
SK 9	24+181	4556696,78	418609,24	108,97	51,00
SK 10	24+260	4556768,66	418649,39	113,93	57,00
SK 11	24+324	4556785,41	418721,91	124,19	66,40
SK 12	24+500	4556899,38	418855,14	99,12	37,00

Sondajlar sırasında zemin niteliğindeki (dolgu, Neojen çökeller, tamamen ayrıışmış kaya) kesimlerde 1,5 m ara ile Standart Penetrasyon Testleri (SPT) yapılmış ve

örselenmiş numuneler alınmış, kaya ortamda ise karotiyerler ile sürekli karot numune alınmıştır. Zemin niteliğindeki kesimlerin kum ve ayrılmış kayadan kurulu olması dolayısıyla sondajlar sırasında örselenmemiş numune alınmasına gerek görülmemiştir. Tamamlanan sondaj kuyularında 5-15 gün süre ile su seviye ölçümleri yapılarak kuyulardaki yer altı su seviyeleri tespit edilmiştir.

SPT, zemin mukavemet ve yoğunluğunu değerlendirmek ve örselenmiş örnek almak amacıyla sondaj kuyusu içinde (in situ) yapılan bir dinamik kesme deneyidir. Kum zeminlerin sıkılığının, kil zeminlerin ise kıvamlarının tespitinde yararlanılan bir yöntemdir. Deneyde standart bir sempler zemine sokulmaya çalışılarak, zeminin bu sokulmaya karşı gösterdiği direnç bazı hesaplamalarla saptanabilmektedir.

Amerikan Test ve Malzemeler Derneği'nde (ASTM) tarif edilen standart sonda, ağırlığı 63,50 kg ve düşme yüksekliği 76,20 cm olan bir tokmağın yardımıyla, sondaj çukuru içerisinde zemine girecek şekilde çakılır. Toplam ağırlığı yaklaşık olarak 6,80 kg olan standart sonda, sondaj çukurunun tabanı iyice temizlendikten sonra sondaj tabanına indirilir ve bir tokmak yardımıyla zemine girecek şekilde çakılır. Standart sondanın ilk olarak 15,20 cm zemine girmesi temin edildikten sonraki 30,5 cm batma miktarı için gerekli olan N darbe sayısı tespit edilir. Yüksek N değerleri sağlam, düşük N değerleri ise gevşek zeminlere karşılık gelir.

SK 3, SK 6, SK 10 ve SK 12 sondajlarında kabaca tünel tavanı, tünel kesiti ve tünel tabanı civarında olmak üzere üçer adet basınçlı su testi yaptırılmıştır. Daha önce yapılmış olan TSK 65 nolu sondajda yapılmış olan üç adet Basınçlı Su Testi (BST) deneyinden de yararlanılmıştır.

BST, saha şartlarında kayanın geçirimsizliğini belirlemek amacıyla uygulanıp, kuyuya enjekte edilen suyun miktarı ile temel bir bilgi elde edilmektedir. Farklı derinliklerde, farklı basınçlarla enjekte edilen su miktarı 5, 10, 15'er dakikalık aralıklarla kaydedilmektedir. Bar saati, basınç kaybını önlemek amacıyla kuyu ağzına yerleştirilmiştir. Kayaya verilebilecek zararlar dikkate alınarak basınç sınırlandırılmıştır. BST, tutarlı bir bilgi edinebilmek amacıyla enjeksiyondan önce ve enjeksiyondan sonra olarak iki şekilde adlandırılmış ve gerekli karşılaştırmaların yapılması kolaylaştırılmıştır. Basınçlı su testi sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Basınçlı su testi sonuçları

Sondaj No	Kademe No	Test Derinliği (m)	Litoloji	Emilme Leugeon (lt/dak/m)	Değerlendirme
TSK 65	Kademe 1	30,00-33,00	Kireçtaşı	25,25	Geçirimli
	Kademe 2	35,00-39,00	Kireçtaşı	0,27	Geçirimsiz
	Kademe 3	39,00-44,00	Kireçtaşı	0,71	Geçirimsiz
SK 3	Kademe 1	46,00-51,00	Grovak	0,47	Geçirimsiz
	Kademe 2	51,00-56,00	Grovak	0,52	Geçirimsiz
	Kademe 3	56,00-61,50	Grovak	0,56	Geçirimsiz
SK 6	Kademe 1	41,00-46,00	Grovak	0,77	Geçirimsiz
	Kademe 2	46,00-51,00	Grovak	0,00	Geçirimsiz
	Kademe 3	51,00-56,00	Grovak	0,72	Geçirimsiz
SK 10	Kademe 1	42,00-47,00	Grovak	0,05	Geçirimsiz
	Kademe 2	47,00-52,00	Grovak	0,78	Geçirimsiz
	Kademe 3	52,00-57,00	Grovak	0,00	Geçirimsiz
SK 12	Kademe 1	19,00-24,00	Kireçtaşı	0,60	Geçirimsiz
	Kademe 2	25,00-30,00	Kireçtaşı	0,85	Geçirimsiz
	Kademe 3	32,00-37,00	Kireçtaşı	1,35	Az Geçirimli

Basınçlı su testleri, yukarıdan aşağıya kademeler halinde yapılmıştır. Güzergahtaki kaya birimlerinin geçirimsiz özellikleri dikkate alınarak kademe boyları 5 m tutulmuştur. Test verileri Leugeon Yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Bir Leugeon değeri 10 bar basınç altında, 1 dakikada, 1 metrelik kısma, 1 litre suyun enjekte edilmesidir. Testlerden sonra kuyunun değişik seviyelerdeki Leugeon değeri 3.1 bağıntısına dayandırılarak hesaplanmıştır.

$$LU = \frac{10 \times Q}{P \times L \times T} \quad (3.1)$$

LU: Leugeon değeri

Q: Enjekte edilen su miktarı (litre)

P: Uygulama basıncı (bar)

L: Test edilen kısmın boyu (metre)

T: Test süresi (dakika)

Tablodan görüleceği üzere 2 sondaj kuyusu dışında bütün testlerde Emilme katsayısı 1 Leugeon altında kalmakta olup, geçirimsiz ortama karşılık gelmektedir. Daha önce kireçtaşı kaya birimi içinde yapılmış olan TSK 65 nolu sondajın 30 – 33. metreleri arasında gerçekleşen testte, Emilme katsayısı 25 (geçirimli), yine kireçtaşı içinde

açılmış olan SK 12 nolu sondajın 32 – 37. metreleri arasında yapılan kademesinde ise 1,35 (az geçirimli) değeri elde edilmiştir.

3.2 Laboratuvar Deneyleri

Sondajlardan alınan 15 adet zemin ve 86 adet kaya örneği üzerinde tanımlayıcı ve mekanik deneyler yapılmıştır.

Zemin örnekleri üzerinde dane boyu dağılım, hidrometre ve kıvam gibi indeks deneyler, kaya örnekler üzerinde ise ağırlıklı olarak serbest basınç ve nokta yükleme gibi mekanik deneyler ile doğal birim hacim ağırlık-doygun birim hacim ağırlık gibi indeks deneyler yapılmıştır.

3.3 Çalışma Alanının Jeolojisi

Tünel güzergahında Orman Bölge Müdürlüğü karşısındaki ormanlık arazide, Tarabya yolu şevinde ve güzergahın sonunda olmak üzere sınırlı yüzey mostraları mevcuttur. Bu mostraların tümünde Kartal formasyonuna ait grovak-şeyl ardalaşma serileri gözlenmiştir. Neojen çökellerin varlığı ise daha ziyade sondaj çalışmaları sonucu belirlenebilmiştir.

Mostra, jeolojik birimlerin herhangi bir kazı yapılmaksızın yüzeyde gözlenebilen kısmıdır.

Grovak, kum zerrelerinin fiziksel basınç altında birleşmesi sonucu oluşur. İçinde bol miktarda fosil bulunduran bu taşlar, kolay şekil alması ve hava koşullarına karşı direnci sebebiyle eski yapılarda kullanılmıştır. Bünyesinde bulunan klorit yüzünden yeşilimsi gri renklidir [9, 10].

Şeyl, ince, homojen granüllü çamurtaşıdır. Muntazam tabakalanmaları ve laminasyon (yapışma) göstermeleri en belirgin özelliğidir [9].

Yüzey ve sondaj verilerine göre, metro tünelleri güzergahları tümü ile Kartal Formasyonundan oluşmaktadır. Sondajlar sırasında karşılaşılan kiraçtaşı ara seviyeli grovak-şeyl nöbetleşmesinin (Dkg ve Dkş) Pendik üyesine, kalın kiraçtaşı kısımlarının (Dkk) ise Kozyatağı üyesine karşılık geldiği düşünülmektedir. Neojen çökeller güzergah boyunca yüzeyde pek kalın olmayan yamalar halindedir [8].

3.3.1 Neojen çökeller

Metro tünelleri güzergahının bu etabında, Neojen çökellere Orman Bölge Müdürlüğü civarında ve Boğaz İçi İmar Müdürlüğü kuzeyinde iki ayrı yama halinde rastlanır. Söz konusu bu kesimlerde yapılan TSK 65 ve SK 4 sondajlarında, 11,50 ile 31 metre arasında değişen kalınlıklarda Neojen çökeller mevcuttur.

Neojenler, çok genç çökeller olup genellikle ana kayanın üstünü örten tortul kayalardan meydana gelir.

3.3.2 Kartal formasyonu

Genel olarak şeyl-grovak ve kireçtaşı nöbetleşmesi şeklinde karakterize edilebilen Kartal formasyonu, proje alanında ince kireçtaşı ara katkılı şeyl-grovak ardalaşması ve kalın kireçtaşı seviyelerinden oluşmaktadır. Şeyl-grovak ardalaşması bazen grovak baskın (ince şeyl, kalın grovak), bazen de şeyl baskın (ince grovak, kalın şeyl) kesimler şeklindedir.

3.3.3 Andezit ve diyabaz daykları

Kaya birimleri birçok noktada dayk şeklindeki magmatik kayalar tarafından kesilmiştir. Daykların bir kısmı andezit bir kısmı diyabaz bileşimindedir. İnceleme alanında karşılaşılan ve kalınlıkları 10 cm ile 2-3 metre arasında değişen daykların genellikle parçalanmış zayıf kaya zonlarında yer almaları ve fay hatlarında benzer şekilde kabaca doğu-batı gidişli olmaları dikkat çekicidir.

Dayklar, komşu ve kendisinden yaşlı formasyonları dik bir şekilde keserek oluşmuş derinlik kayalarındır ve magmatik kökenlidirler.

Andezit, yeryüzünde volkanik faaliyetlere sahne olmuş bölgelerde oluşan bir cins püskürük kayadır ve iyi bir yapı taşıdır. Yapısında çok az kuvars içermektedir.

Diyabaz, potasyumlu, sodyumlu ve kalsiyumlu olmak üzere üçe ayrılan ve silikatlı minerallerden olan feldspatlardan bir plajiyoklazla yani dilinimleri birbirine göre eğik bir durumda olan feldspatlardan oluşmuş bir kütledir.

3.3.4 Yapısal jeoloji

Sondaj verilerinin korelasyonu sırasında kaya birimlerinin fiziksel ve litolojik özellikleri bakımından uyumsuzluklar gözlemlenmiştir. Sondajlarda tespit edilen ani tabaka değişimleri ile litoloji ve ayrışma düzeyi değişimleri muhtemel fay zonları

olarak yorumlanabilir. Güzergah boyunca çok sayıda fay ile karşılaşılması beklenmektedir. Sondajlar arası mesafe (100-130 m) dikkate alındığında tespit edilmiş faylar dışında, başka faylar ile karşılaşılması da ihtimal dahilindedir.

3.4 Proje Alanında Yer Alan Zemin ve Kaya Tabakalarının Mühendislik Özellikleri

Metro tünelleri güzergahının bu kısmı tümü ile Devoniyen yaşlı grovak-şeyl ve kireçtaşlarından oluşan Kartal Formasyonu içinde inşa edilecektir. Güzergah boyunca yüzeyde yamalar halinde bulunan neojen çökeller, 30 metreye ulaşan kalınlığa rağmen tünel kotlarına kadar inmemektedir. Yüzeyde ayrıca yer yer önemsiz kalınlıkta suni dolgular bulunmaktadır. Kaya birimleri üzerinde tamamen ayrışma ürünü kalın bir örtü tabakası mevcuttur.

Suni dolgu, neojen çökeller ve kaya birimlerinin tamamen ayrılmış kesimleri zemin, çok, orta derecede ve az ayrılmış veya ayrılmamış kesimleri ise kaya olarak isimlendirilmiştir.

İnceleme alanında mühendislik özellikleri açısından 3 farklı zemin ve 8 farklı kaya seviyesi mevcuttur. İnceleme sahasında, litolojik açıdan esas olarak 3 farklı kaya birimi mevcut olmakla birlikte, farklı ayrışma seviyeleri dolayısıyla her kaya birimi kendi içinde farklı mühendislik özelliklere sahip 2-3 seviye halindedir. Bu nedenle kaya birimlerinin farklı 8 başlık altında değerlendirilmesi gereği duyulmuştur. Söz konusu zemin – kaya tabakaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Zemin Tabakaları;

- 1.Katı – Kumlu Kil Tabakası
- 2.Orta Sıkı Kum – Siltli Kum Tabakası
- 3.Tamamen Ayrılmış Kaya Seviyesi

Kaya Birimleri;

Grovak Kaya Birimi

- 4.Çok ayrılmış Grovak Seviyesi
- 5.Orta Derecede Ayrılmış Grovak Seviyesi
- 6.Az Ayrılmış veya Ayrılmamış Grovak Seviyesi

Kireçtaşı Birimi

7.Çok Ayırışmış Kireçtaşı Seviyeleri

8.Orta Derecede Ayırışmış Kireçtaşı Seviyesi

9.Az Ayırışmış veya Ayırışmış Kaya Tabakaları

Şeyl Kaya Birimi

10.Orta Derecede Ayırışmış Şeyl Seviyesi

11.Az Ayırışmış veya Ayırışmamış Şeyl Seviyeleri

Aşağıda, zemin tabakalarına ve kaya birimlerine ait alt ünitelerin mühendislik özellikleri çizelgeler şeklinde verilecektir [8].

3.4.1 Zemin tabakaları

Neojen çökelleri ile birlikte tamamen ayırışmış kaya tabakası da zemin tabakaları içinde ele alınmıştır.

3.4.1.1 Katı kumlu kil tabakası

Çizelge 3.3'te katı kumlu kil tabakasına ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Katı kumlu kil tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri

Penetrasyon Direnci	N_{30}	7-10
Çakıl oranı	%	0
Kum Oranı	%	25-45
Kil + Silt Oranı	%	55-75
Likit Limit	%	62-63
Plastik Limit	%	16-20
Plastisite İndisi	%	43-46

N_{30} : SPT deneyindeki 30 darbeyi ifade etmektedir.

Yukarıdaki verilere göre bu tabaka yüksek plastisteli Katı Kumlu Kil (CH) olarak sınıflandırılabilir.Yüzeyde yer alan bu tabakaya tünel kazısı sırasında rastlanılmayacaktır.

3.4.1.2 Orta sıkı kum – siltli kum tabakası

Çizelge 3.4’te orta sıkı kum-siltli kum tabakasına ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Orta sıkı kum – siltli kum tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri

Parametreler	Minimum	Maksimum	Ortalama
Penetrasyon Direnci N_{30}	13	26	17
Çakıl Oranı %	0	16	5
Kum Oranı %	50	78	61
Kil + Silt Oranı %	27	34	32

Yukarıdaki verilere göre bu tabaka Orta Sıkı Siltli Kum (SM) olarak sınıflandırılabilir. Yüzeyden itibaren 5-31 m derinlikler arasında yer alan bu tabakaya da tünel kazısı sırasında rastlanması beklenmemektedir.

3.4.1.3 Tamamen ayrılmış kaya

Çizelge 3.5’te tamamen ayrılmış kayaya ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Tamamen ayrılmış kaya seviyesine ait arazi ve laboratuvar verileri

Parametreler	Minimum	Maksimum	Ortalama
Penetrasyon Direnci N_{30} üst	4	50	26
Penetrasyon Direnci N_{30} alt	10	> 50	34
Çakıl Oranı %	0	29	7
Kum Oranı %	1	65	35
Kil + Silt Oranı %	24	99	58
Likit Limit %	32	75	48
Plastik Limit %	15	35	25
Plastisite İndisi %	10	57	23

* N değeri hesaplamasında >50 değerleri =50 kabulü yapılmıştır.

Yukarıdaki verilere göre tamamen ayrılmış kaya tabakasının üst 5-6 m kalınlığındaki kesimi mühendislik açısından Orta Sıkı – Sıkı Çakıllı Killi Kum veya Çok Katı Kumlu Kil, alt kesimleri ise Sıkı Killi Siltli Kum veya Sert Kumlu Kil olarak sınıflandırılabilir.

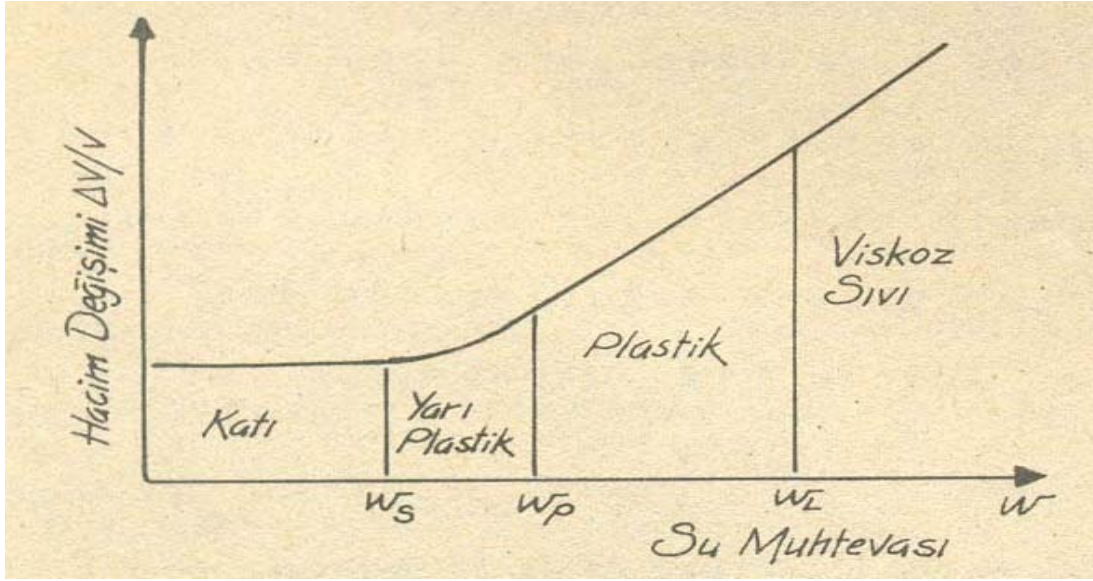
Yukarıdaki tabakalar üzerindeki uygulamalarda, kohezyonsuz zeminlerden standart ve klasik numune alıcılarla örselenmemiş örnek almak hemen hemen olanaksız olduğu için bu tip zeminlerin mühendislik özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenmemektedir. Bu yüzden bu tür zeminlerde SPT gibi arazi deneyleri tercih edilmektedir. Şekil 3.1’de SPT N değer analizleri verilmiştir.

Kumlar (oldukça güvenilebilir)		Killer (az güvenilebilir)	
<u>N sayısı</u>	<u>Sıklık derecesi</u>	<u>N sayısı</u>	<u>Kıvam (konsistans)</u>
0 — 4	çok gevşek	2	çok yumuşak
4 — 10	gevşek	2 — 4	yumuşak
10 — 30	orta	4 — 8	orta
30 — 50	sıkı	8 — 15	katı
> 50	çok sıkı	15 — 30	çok katı
		> 30	sert

Şekil 3.1 : SPT N değerlerinin analizi

İnce daneli zeminlerin mühendislik özellikleri gradasyona bağlı olmamakta ve içerdiği kil mineraline göre ortaya çıkan plastisite özellikleri önem kazanmaktadır. İnce daneli zeminler su muhtevalarına bağlı olarak katı, yarı katı, sıvı kıvamda olabilirler. Bu zeminlerin çoğu tabii halde plastik kıvamda bulunur ve bu kıvam aralığını belirleyen su muhtevaları küçükten büyüğe doğru rötre limiti, plastik limit ve likit limit şeklindedir [11].

Zemine fazla su verilirse zemin sıvı hale gelmektedir. Bu durumda zemin akıcıdır ve kesme direnci yoktur. Kurumaya bırakılırsa belirli bir kesme direnci kazanır. Bu geçiş durumundaki su içeriğine likit limit denir (LL). Eğer su kaybı daha fazla olursa zemin yavaş yavaş plastik özelliğini kaybeder ve düz bir satıhta yuvarlanırsa ufalanır. Bu durumdaki su içeriğine plastik limit denir (PL). Daha da su kaybetmesi halinde artık hacim küçülmesi olmayacaktır. Bu haldeki su içeriğine ise büzülme veya rötre limiti denir (RL). Likit limit zeminin sıvı halden plastik hale, plastik limit zeminin plastik halden yarı katı hale, rötre limiti ise yarı katı halden katı hale geçtiği sınır değerlerdir. Şekil 3.2’de kıvam limitleri grafiği verilmiştir.



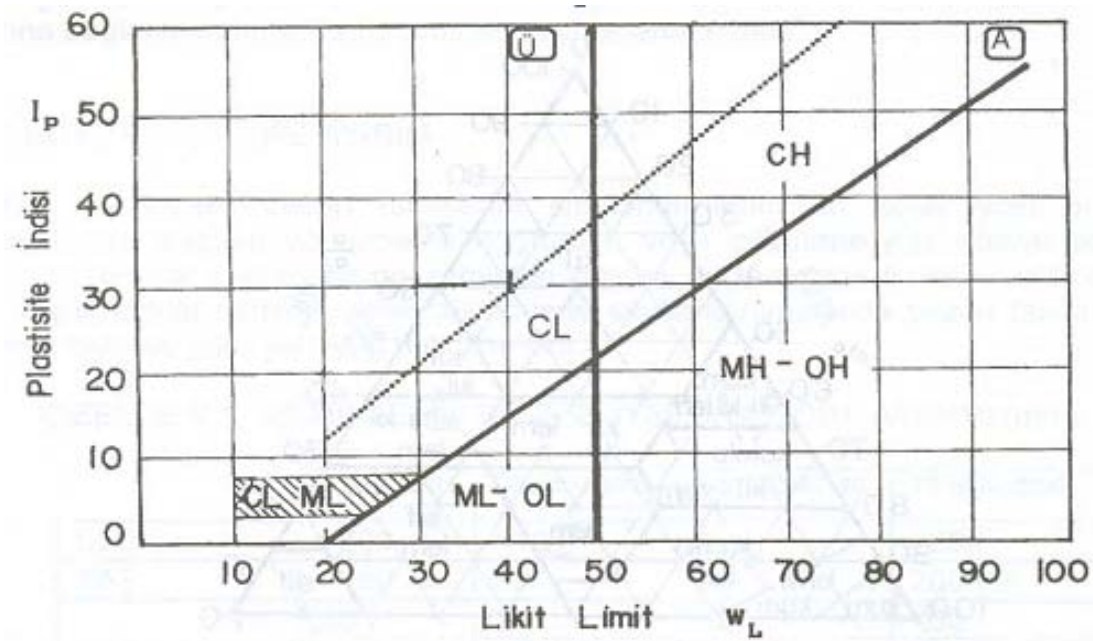
Şekil 3.2 : Kıvam limitleri grafiği

İnce daneli zeminlerin sınıflandırılması

Yapılan araştırmalar sonucu, dünya üzerindeki killerin 3.2 bağıntısı etrafında toplandıkları gözlenmiştir.

$$I_p = 0,73 \times (LL - 20) \quad (3.2)$$

Bu denklem I_p / LL grafiğinde A doğrusu olarak adlandırılır. Bu grafik Cassagrande Plastisite kartı olarak bilinmektedir. Şekil 3.3'te Cassagrande Plastisite kartı verilmiştir.



Şekil 3.3 : Cassagrande Plastisite kartı

Plastisite kartındaki A ve Ü doğrusu kullanılarak bu zemine ait rötire limiti RL gerçeğe çok yakın olarak bulunabilir. A doğrusu üzerinde yer alan zeminler killler, altında yer alan zeminler ise siltlerdir.

Şekil 3.4’te ince daneli zeminler için sınıflandırma verilmiştir.

İnce taneli zeminler (No.200 elekten geçen > %50)	Siltler ve killler	Düşük plastisiteli siltler ve killler ($W_L < \% 50$)	ML	Düşük plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler
			CL	Düşük plastisiteli inorganik killler ve siltli killler
			OL	Düşük plastisiteli organik siltler ve killi siltler
		Yüksek plastisiteli siltler ve killler ($W_L < \% 50$)	MH	Yüksek plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler
			CH	Yüksek plastisiteli inorganik killler ve siltli killler
			OH	Yüksek plastisiteli organik killler ve siltler
	Organik zeminler		Pt	Turba zeminler ve diğer organik zeminler

Şekil 3.4 : Birleştirilmiş zemin sınıflandırması-ince daneli malzeme

İri daneli zeminlerin sınıflandırılması

Şekil 3.5’te iri daneli zeminler için sınıflandırma verilmiştir.

Ana Gruplar			Grup sembolü	Zemin cinsi
İri taneli zeminler (No.200 elekten geçen < %50)	Çakıllar	Temiz çakıllar (No.200 elek altı < %5)	GW	İyi derecelenmiş temiz çakıllar ve çakıl-kum karışımları
			GP	Kötü derecelenmiş temiz çakıllar ve çakıl-kum karışımları
		Siltli ve killi çakıllar (No.200 elek altı > %12)	GM	Siltli çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları
			GC	Killi çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları
	Kumlar	Temiz kumlar (No.200 elek altı < %5)	SW	İyi derecelenmiş temiz kumlar ve çakıllı kumlar
			SP	Kötü derecelenmiş temiz kumlar ve çakıllı kumlar
		Siltli ve killi kumlar (No.200 elek altı > %12)	SM	Siltli kumlar
			SC	Killi kumlar

Şekil 3.5 : Birleştirilmiş zemin sınıflandırması-iri daneli malzeme

3.4.2 Kaya birimleri

Litolojik birimler yüzeyden itibaren tünel kotlarına kadar farklı düzeyde ayrışmaya uğramıştır. Aşağıda her litolojik (grovak, kireçtaşı ve şeyl) birime ait farklı ayrışma seviyeleri ile ilgili jeomekanik ve mühendislik özelliklere ayrı ayrı değinilmiştir.

Bu kapsamda her seviye ile ilgili elde edilen veriler derlenerek CSIR (RMR) ve GSI sistemlerine göre değerlendirilmiş ve sınıflandırılmıştır. CSIR (RMR) sınıflandırması Bieniawski 1989'a göre yapılmıştır. Değerlendirme yer altı su seviyesi 5 (nemli, düşük basınçlı su sızıntıları), süreksizlik yönelim düzeltilmesi ise -5 (orta) puan kabul edilmiştir. Bu durumda kısmen güvenli tarafta kalmak üzere $GSI = RMR_{89} + 5$ kabulü yapılmıştır.

3.4.2.1 Kaya sınıflandırması

Yeraltı ve yerüstü kazılarının güvenli ve ekonomik olarak gerçekleştirilmesi, öngörülen kaya sınıflaması ve buna bağlı kazı şev ve tünel destek tasarımı ile doğru orantılıdır. Günümüz modern tünelciliğinde projelendirmeye esas teşkil eden kaya sınıflandırmalarında, kayanın kütle özelliği dikkate alınmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen ve değişik ülkelerdeki yeraltı kazılarında uygulanan birçok yöntem mevcuttur [12]. Çizelge 3.6'da kaya sınıflandırma yöntemleri verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Kaya sınıflandırma yöntemleri

YÖNTEM	ARAŞTIRMACI	UYGULAMA ALANI
Kaya yükü	Terzaghi, 1946	Tünelcilik
Desteksiz durma süresi	Lauffer, 1958	Tünelcilik
NATM	Rabcewich, Müller, Pacher, 1958-1964	Tünelcilik
Kaya mekaniği için kaya sınıflaması	Paching ve Coates, 1968	Kaya mekaniği temel veri girişi
RQD	Deere ve diğ., 1964	Sondaj karot logları
Boyut-dayanım sınıflaması	Franklin, 1975	Madencilik
RSR	Wickham ve diğ., 1972	Tünel destek tipleri seçimi
Kaya kütle sınıflama sistemi	Bieniawski, 1973	Tünel, madencilik
Q sistemi	Barton ve diğ., 1974	Tüneller ve maden
Temel jeoteknik sınıflama	ISRM, 1981	Genel amaçlı kaya mekaniği
MBR	Cumming ve diğ., 1982	Madencilik
Birleştirilmiş sınıflama	Williamson, 1980	Genelleştirme amaçlı
Jeoteknik dayanım indeksi (GSI)	Hoek, 1994	Yeraltı kazıları için destek sistemi dizaynı
Kaya kütle indeksi (RMI)	Palmstrom, 1995	Tünelcilik

Yaygın olarak kullanılan üç önemli kaya sınıflaması ise şu şekildedir:

- NGI (Q), tünel destekleme tasarımı için kaya kütlelerinin mühendislik sınıflaması
- CSIR (RMR), eklemlili kaya kütlelerinin jeomekanik sınıflaması
- GSI, jeolojik dayanım indeksi sınıflaması

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile bütünsellik sergileyen bu yöntemlerde kayanın kütle özelliği (Q ve RMR, GSI) sayısal olarak ifade edilmektedir. NGI yönteminde Q değeri 0,001 ile 1000 arasında değişmekte olup, en kötü kaya koşulu ile mükemmel kaya arasını kapsamaktadır. Aynı şekilde 0–100 aralığındaki RMR değerleri, 5 kaya sınıfını temsil etmektedir.

Başlangıçta RMR ve Q sınıflandırma puanları ile ilişkilendirilen GSI, daha sonraki yıllarda yapılan değişikliklerle tek başına bir sınıflandırma sistemi olarak kullanılmaktadır. Bu sınıflamada kayaç tekstürel açıdan 6, çatlak durumu – ayrılmışlık açısından ise 5 olmak üzere toplam 25 kategori içinde sayısal olarak ifade edilmektedir. GSI sınıflaması, en kötüden en iyi kaya koşuluna uygulanabilirliği dolayısı ile günümüzde özellikle mühendislik değerlendirmeleri açısından CSIR sınıflamasına tercih edilmektedir.

Bu sınıflandırmalar arasındaki teorik bağlantılar aşağıdaki gibidir.

- $RMR = 9 \log Q + 44$
- $GSI = RMR_{76}$ veya $GSI = RMR_{89} - 5$ (76 ve 89 RMR değerinin hesaplanması ile ilgili 1976 ve 1989 yıllarındaki versiyonlarını ifade eder)
- $GSI = 9 \log Q' + 44$ (Q' modifiye edilmiş Q olup, $RQD \times Jr / J_n \times J_a$ olarak hesaplanır)

Çizelge 3.7’de Q ve RMR puan değerlendirmeleri verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Q ve RMR sınıflandırma puanlarının değerlendirilmesi

Kaya sınıfı	Q	RMR
Çok zayıf	≤ 1	≤ 20
Zayıf	1-4	21-40
Orta	4-10	41-60
İyi	10-40	61-80
Çok iyi	40-100	81-100
Mükemmel	≥ 100	

NATM metodunda ise kaya sınıflamaları;

A: sağlam (A1), sonradan az sökülen (A2), aşırı sökülebilen (A3)

B: gevrek (B1), çok gevrek (B2), taneli (B3)

C: az baskılı (C1), baskılı (C2), çok baskılı (C3) şeklindedir.

Çizelge 3.8’de inceleme alanına ait parametreler verilmiştir.

Çizelge 3.8 : İnceleme alanının zemin ve kaya parametreleri

Yapay dolgu	Ayrışmış kaya	Çok ayrışmış kaya	Az ayrışmış kaya
C= 1 kpa Φ= 26° E= 5000 kpa	C= 5 kpa Φ= 30° E= 40000 kpa	C= 70 kpa Φ= 38° E= 869 Mpa	C= 100 kpa Φ= 45° E= 2150 Mpa

Kaya ortamlarda açılan tünellerde desteksiz kaya açıklığı (B_{max}) ile kaya kütle sınıflaması (Q) arasındaki ilişki aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

$$B_{max} = 2 \times ESR \times Q^{0,4} \quad (3.3)$$

ESR, ulaşım tünellerinde 1’dir

Buna karşılık çapı bilinen bir tünel için kritik Q değeri ise, aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$Q = (Kazı açıklığı / 2 \times ESR)^{2,5} \quad (3.4)$$

3.4.2.2 Grovak kaya birimi (B3 – taneli)

Tünel kazısının önemli kısmını (%50’den fazlası) oluşturan grovak kesimi esas olarak grovak-çamurtaşı ve az oranda bunlarla ardalanmış şeyl seviyelerinden oluşur. Karşılaşılması beklenen grovak baskın kesim, ayrışma düzeylerine göre (tamamen ayrışmış kesim hariç) üç seviye halindedir. Grovak biriminin yer aldığı kısımlarda tamamen ayrışmış kaya seviyesi altında, 5-10 m arasında değişen kalınlıkta çok ayrışmış kaya seviyesi, bunun altında orta derecede ayrışmış kaya seviyesi, daha altta ise az ayrışmış veya ayrışmamış kaya seviyeleri bulunur. Desteksiz kalma süresi ani çökme (0) ile 72 saat arasındadır. En büyük desteksiz açıklık 0,8 - 2,2 m.’dir.

Çok ayrıışmış grovak seviyeleri

Çizelge 3.9’da çok ayrıışmış grovak seviyelerine ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.9 : Çok ayrıışmış grovak seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değerleri

Parametreler	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	50
Katı Karot Verimi (SCR)	30
Kaya Kalite Tasarımı (RQD)	5
Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)	10
Kaya Kütle Oranı (RMR)	18
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	23

Çok ayrıışmış grovak kesimi jeomekanik (mühendislik) sınıflama açısından ‘çok zayıf kayaya’ denk gelmektedir.

Orta derecede ayrıışmış grovak seviyeleri

Çizelge 3.10’da orta derecede ayrıışmış grovak seviyelerine ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Orta derecede ayrıışmış grovak seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değerleri

Parametreler	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	60
Katı Karot Verimi (SCR)	44
Kaya Kalite Tasarımı (RQD)	17
Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)	22
Nokta Yük İndisi I_{c50} (Mpa)	3,74
Doğal Birim Hacim Ağırlık γ_n (gr/cm ³)	2,55
Doygun Birim Hacim Ağırlık γ_n (gr/cm ³)	2,75
Kaya Kütle Oranı (RMR)	29
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	34

Orta derecede ayrıışmış grovak kesimi jeomekanik sınıflama açısından ‘Zayıf kayaya’ karşılık gelmektedir.

Az ayrıışmış – ayrıışmamış grovak seviyeleri

Çizelge 3.11’de az ayrıışmış – ayrıışmamış grovak seviyelerine ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Az ayrıışmış-ayrıışmamış grovak seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değerleri

Parametreler	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	80
Katı Karot Verimi (SCR)	60
Kaya Kalite Tasarımı (RQD)	25
Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)	31
Nokta Yük İndisi I_{c50} (Mpa)	6,40
Doğal Birim Hacim Ağırlık γ_n (gr/cm ³)	2,70
Doygun Birim Hacim Ağırlık γ_n (gr/cm ³)	2,84
Kaya Kütle Oranı (RMR)	38
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	43

Az ayrıışmış-ayrıışmamış grovak kesimi jeomekanik sınıflama açısından ‘Zayıf kayaya’ karşılık gelmekle birlikte önemli bir kısmı Orta Kalite Kaya vafındadır.

3.4.2.3 Kireçtaşı kaya birimi (B1 + A2 – Gevrek, az dökülen)

Sondajlarda sürekli olarak kireçtaşı kesilmiş olmakla birlikte, bunun düşeye yakın tabaka eğimlerinden mi kaynaklandığı yoksa gerçekten kireçtaşı seviyelerinin bu denli kalın mı olduğu kesin olarak bilinmemektedir.

Kireçtaşı birimi tünel güzergahlarında, tamamen ayrıışmış örtü tabakası altında, 2-13 m arasında değişen kalınlıkta (ortalama kalınlık 7,5 m) düzensiz şekilde çok-orta derecede ayrıışmış kesimlerden, daha altta ise az ayrıışmış veya ayrıışmamış kesimlerden oluşmaktadır. Tünellerin daha ziyade ayrıışmamış seviyeler içinde kalması beklenmektedir. Desteksiz kalma süresi 1 hafta ile 1 yıl arasındadır. En büyük desteksiz açıklık 3,9 - 6,4 m.’dir.

Çok – orta derecede ayrıışmış kireçtaşı seviyeleri

Çizelge 3.12’de çok – orta derecede ayrıışmış kireçtaşı seviyelerine ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.12 : Çok ayrıışmış kireçtaşı seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değerleri

Parametreler	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	55
Katı Karot Verimi (SCR)	39
Kaya Kalite Tasarımı (RQD)	13
Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)	34
Kaya Kütle Oranı (RMR)	31
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	36

Çok – orta derecede ayrıışmış kireçtaşı kesimi jeomekanik sınıflama açısından ‘zayıf kayaya’ karşılık gelmektedir.

Az ayrıışmış – ayrıışmamış kireçtaşı seviyeleri

Çizelge 3.13’te az ayrıışmış – ayrıışmamış kireçtaşı seviyelerine ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.13 : Az ayrıışmış – ayrıışmamış kireçtaşı seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değerleri

Parametreler	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	92
Katı Karot Verimi (SCR)	86
Kaya Kalite Tasarımı (RQD)	61
Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)	50
Nokta Yük İndisi I_{c50} (Mpa)	5,28
Doğal Birim Hacim Ağırlık γ_n (gr/cm ³)	2,7
Doygun Birim Hacim Ağırlık γ_n (gr/cm ³)	2,73
Kaya Kütle Oranı (RMR)	67
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	72

Az ayrıışmış – ayrıışmamış kireçtaşı kesimi jeomekanik sınıflama açısından ‘İyi kayaya’ karşılık gelmektedir.

3.4.2.4 Şeyl kaya birimi (B3 – taneli)

Tünel kazısı sırasında karşılaşılmaması beklenen şeyl birimi ağırlıklı olarak şeyl, daha az oranda ise grovak, kumlu kireçtaşı ve çörtlü kireçtaşı seviyelerinin ardalanması şeklindedir. Tamamen ayrıışmış kaya kısmı altında 5-6 m kalınlığındaki kesim orta derecede ayrıışmış, daha altta ise sondaj derinliklerine kadar az ayrıışmış veya

ayrışmamış kaya seviyelerinden oluşur. Şeyl bölgesindeki tünel geçkisinin tümü ile az ayrışmış-ayrışmamış kaya içinde kalması beklenir. Desteksiz kalma süresi ani çökme (0) ile 72 saat arasındadır. En büyük desteksiz açıklık 1,0 - 2,1 m.'dir.

Orta derecede ayrışmış şeyl seviyesi

Çizelge 3.14'te orta derecede ayrışmış şeyl seviyelerine ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Orta derecede ayrışmış şeyl seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değerleri

Parametreler	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	77
Kaya Kalite Tasarımı (RQD)	23
Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)	12
Nokta Yük İndisi I_{c50} (Mpa)	3,85
Kaya Kütle Oranı (RMR)	26
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	31

Orta derecede ayrışmış şeyl kesimi jeomekanik sınıflama açısından 'Zayıf kayaya' karşılık gelmektedir.

Az ayrışmış – ayrışmamış şeyl seviyeleri

Çizelge 3.15'te az ayrışmış - ayrışmamış şeyl seviyelerine ait değerler verilmiştir.

Çizelge 3.15 : Az ayrışmış-ayrışmamış şeyl seviyelerine ait karot-mukavemet verileri ile RMR-GSI değerleri

Parametreler	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	80
Katı Karot Verimi (SCR)	59
Kaya Kalite Tasarımı (RQD)	33
Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)	15
Nokta Yük İndisi I_{c50} (Mpa)	5,62
Kaya Kütle Oranı (RMR)	35
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	40

Az ayrışmış-ayrışmamış şeyl kesimi jeomekanik sınıflama açısından 'Zayıf kayaya' karşılık gelmekle birlikte bazı kesimleri orta kalite kaya vasfındadır. Ek A.3'de Hat 1 ve Hat 2 tünellerine ait detaylı jeolojik tablolar verilmiştir.

3.4.2.5 Fay zonlarında yaklaşık mühendislik özellikleri (C2 – C3)

Güzergah boyunca çok sayıda fay zonu geçilmesi beklenmektedir. Birçoğu harita ve kesitlere işlenmiş olan fayların, doğrultu ve eğimleri kesin olarak bilinmemekle birlikte genel olarak doğu-batı doğrultulu, andezit dayklarının eşlik ettiği normal faylar olması beklenmektedir. Ayrışma, breşleşme ve killeşmenin yaygın olduğu bu zonların zayıf da olsa su taşıdıkları ve önemli stabilite problemlerine yol açtıkları belirtilmelidir. Tünel kazısı hangi birim içinde olursa olsun, fay zonlarında en kötü zemin koşullarına göre projelendirilmeli ve desteklenmelidir. Bu kesim için aşağıdaki kaya verileri öngörülebilir.

- Kaya kalite tasarımı (RQD) : 0
- Serbest basınç dayanımı (σ_u) : 10 kg/cm²
- Kaya kütle oranı (RMR) : 13
- Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) : 18

3.5 Kazılabilirlik

Şeyl-grovak kaya birimlerine ait RQD değerleri 0 ile 43, serbest basınç dayanım değerleri 150 ile 300 kg/cm², hakim çatlak aralığı ise 3-10 cm aralığında değişim göstermektedir. Bu veriler dikkate alındığında, bu iki kaya biriminin ağırlıklı olarak klasik kazı yöntemleri ile kazılabileceği, az bir kesiminde ise kazı güçlüğü çekilebileceği söylenebilir.

Kireçtaşlarında ise RQD değerleri 30 ile 65, serbest basınç dayanımı 400 ile 500 kg/cm², baskın çatlak aralığı ise 10 cm ile 150 cm arasında değişim göstermektedir. Buna göre kireçtaşı kesimlerinin kazısında önemli ölçüde patlatma gerekebilir.

4. TÜNEL KAZI YÖNTEMLERİ

Halen uygulanan pek çok tünel açma yöntemi vardır. Bunlar tünel açılacak zeminin litolojisine, yumuşak ya da sert oluşuna, hidrojeolojik durumuna, tünel çapına ve şekline göre seçilir. Genellikle tüneller;

- Aç – kapa
- Delme – patlatma
- Makine ile kazı yöntemi ile açılmaktadır [13].

4.1 Aç – Kapa Yöntemi

Yzeyeye yakın sığ tüneller için sıkça kullanılan yöntem a – kapa’ dır. Genellikle metro tünellerinin güzergah itibariyle ana yolların altından geçirilebildiği yzeyeye yakın kısımlarında, bazen de bir taşıt yolunun ığlardan korunması amacıyla yapılan çığ tünellerinde, kanalizasyon, içme suyu tünelleri ve yer altı geçitlerinin inşası açıkta yapılarak daha sonra üzerinin örtülmesi daha basit ve ekonomik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemde, yer altı boşluğu, yanlar betonarme kazık veya duvar perdesi ile desteklendikten sonra, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılır. Bu arada zeminin özelliği ve yer altı suyu durumuna göre gerekiyorsa yer altı su seviyesi düşürülür veya su, derin kuyularla drene edilir. Tavanın kaplamasından sonra kazılan kısım tekrar doldurularak eski haline getirilir. Aç – kapa genellikle 10 m derinliğe kadar etkili bir şekilde uygulanır. Aç-kapa tünel açma yönteminin diğer yöntemlerden farkı tavanda tasman oluşmamasıdır. Bu nedenle çevredeki yapılara zarar vermeden geçilmesi mümkündür. Ayrıca diğer yöntemlerde yeteri kadar yapılamayan izolasyon işlemi bu yöntemle kolaylıkla yapılabilir. Normal tünel amaya göre daha ucuz ve uygulaması daha kolaydır. Fakat yerleşim alanlarında, trafiği engellemesi, rahatsızlık ve gürültüye sebep olması, yakında bulunan temelleri korumak için iksa sistemlerini gerektirmesi nedeniyle pek tercih sebebi değildir [14]. şekil 4.1 ve şekil 4.2’de a-kapa tünel tavan ve yan duvar kaplaması gösterilmiştir..



Şekil 4.1 : Aç-kapa tünel çalışmasında tavanın ve yan duvarın kaplanması



Şekil 4.2 : Tavan ve yan duvar kaplaması tamamlanmış bir tünel

4.2 Delme – Patlatma Yöntemi

Bu yöntem örtü kalınlığının fazla olduğu, sert kayaç ortamındaki yer altı kazılarında kullanılmaktadır. Tünel açılacak yerdeki kayaçları, hızlı ve ekonomik şekilde çıkarmak tünel kazılarının esas amaçlarından biridir. Bu işlem yapılırken tünel

duvarlarındaki kayaçlara zarar verilmemeye dikkat edilmektedir. İyi bir patlatma tasarımı ve kontrolü, tünel çeperinin zarar görmeyecek şekilde olmasına bağlıdır.

Delme-patlatma yöntemi ile ilk aşamada, kayaç delinir. Açılan deliklere önceden kararlaştırılmış cins ve miktarda patlayıcı yerleştirilir. Daha sonra ateşleme mekanizmasıyla patlatma gerçekleştirilir. Duman ve tozun dağılmasından sonra tavan traşlanır, püskürtme beton aynaya kadar yapılır. Günümüzde delme-patlatma ile açılan tünellerde bilgisayar kontrollü, hidrolik mekanizma ile delik açabilen Jumbolar yaygın olarak kullanılır.

Çapı 8 m'den küçük olan ve kaya kalitesinin yüksek olduğu kayaçlarda açılan tüneller delme-patlatma ile tek aşamada tam kesit açılabilir. Kaya koşullarının bozulduğu ve aynanın daha geniş olacağı yerlerde kademeli yöntem uygulanır. Bu yöntemde ilk önce üst yarı, daha sonra alt yarı alınır.

Tipik olarak, bir tünel günde 1-3 rountluk (patlatma safhası) patlatma ile açılır. Her rounttaki ilerleme uzunluğu, kaya kalitesi ve kazı çapına bağlı olarak sınırlıdır. Tünelde ilerleme, ayna genişliğinin %50-95'i kadardır. Aynı zamanda ilerleme derhal iksa isteyen çok kırıklı tünel koşullarında 0,5m olabileceği gibi geniş çaplı kazıların yapıldığı masif ve kendini destekleyebilen kayaçlarda 3m. olabilir [14].

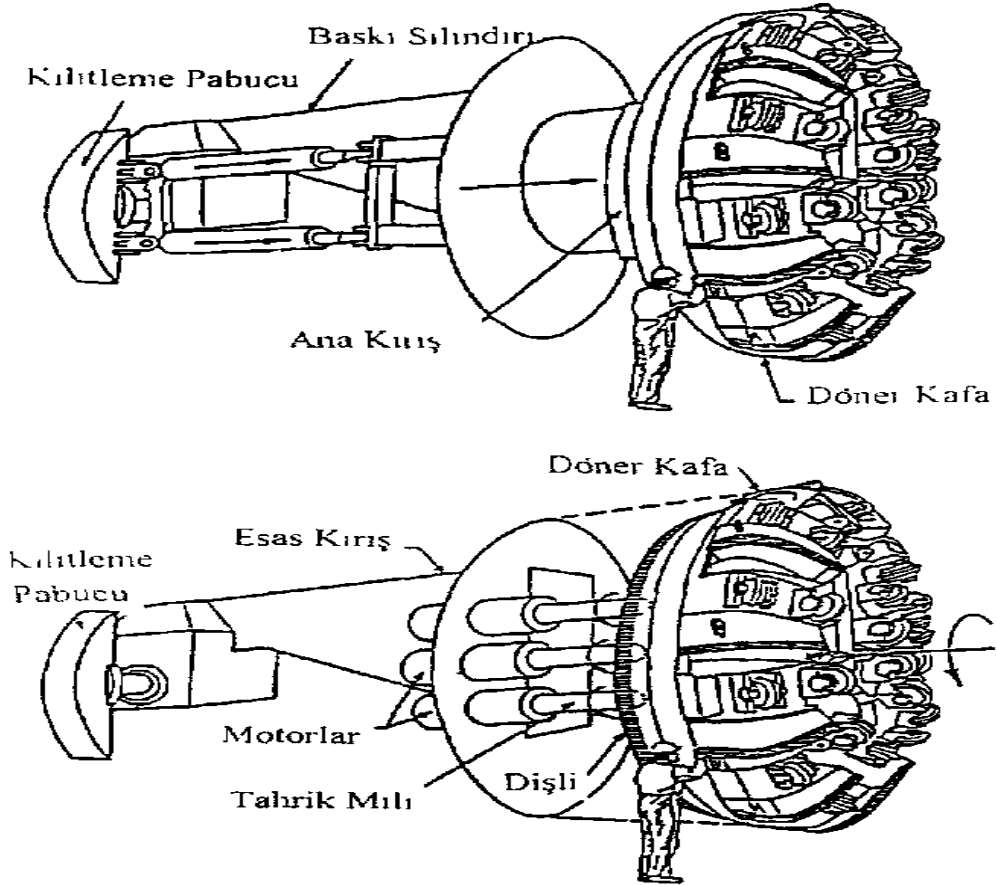
4.3 Makine İle Kazı Yöntemi

1950' li yılların ortasından itibaren kayada tünel açma makinelerinin geliştirilmesi ve kullanılmaya başlanması ile tünel açımında yeni bir devir başlamış oldu. O zamandan beri çeşitli amaçlar için değişik tünel açma makineleri yapılmaktadır. İşçi maliyetlerinin giderek artması ve daha hızlı bir tünel açımına gerek duyulması, tünel açma makinelerinin ortaya çıkmasının esas sebepleridir [15].

Bu yöntem delme-patlatma yönteminden daha az yıkıcı ve bozucu olduğundan az iksa isteyen daha duraylı tünel koşulları sağlar. Günümüzde makine ile kazılar tam kesit makine ve yarım kesit makine kullanılarak yapılmaktadır. Tam kesit kazı makineleri günümüzde birçok tünel şartlarında ekonomik olarak kazı yapabilmektedir. Fakat bu makinelerin satın alınması, kurulması, çalışılacak sahaya getirilmesi, pahalıdır. Eğer tünel uzunluğu 1 km'den fazla ise tam kesit makine ile kazı yöntemi olumlu sonuçlar verir [14].

4.3.1 Tam kesit tünel açma makineleri ile tünel açma

Makine ile tünel açmadan söz edildiğinde ilk akla gelen ‘Tam Kesit Tünel Açma Makineleridir’ (TBM). Bir tam kesit tünel açma makinesi n yüzüne çeşitli cins ve sayıda kesicilerin yerleştirilmiş olduğu dönen bir kafa ile içinde gerekli cihazların ve kumanda bölümünün bulunduğu silindirik bir gövdeden ibarettir. Şekil 4.3’te TBM’e ait ekipmanlar gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : TBM bastırma ve tork sistemleri

Dönen kafa genellikle 4–10 devir dakikalık bir hızla dönmektedir. Dönme hızı çapa bağlıdır. Güç, elektrik motoru veya hidrolik disk motorundan sağlanır. Kafa, tünel aynasına 1000–2500 tonluk bir itkiyle ve hidrolik krikoyla itilir. Gövde tünel taban ve tavanına 2–4 ayakla oturur. Dört yan kol da tünel duvarlarına dayanır. Bu uzantılar hem doğrultu ve eğimin kontrolünü sağlar, hem de kesici kafadaki burulma ve itki kuvvetlerine karşı bir kuvvet oluşturur. Kazı süresince kesici kafadaki yarıktan geçen kaya kesintileri çevredeki kovalardan yürüyen eride (makine içindeki) dökülür. Makine kapasitesine göre ilerledikçe, 8–15 metre ileriye çekilerek tünel aımına devam edilir.

Makine ile açma karar verilebilmesi için nerede ve ne derece bir jeolojik durumla karşılaşılacağı konusunda tahminde bulunmanın yanında daha güvenli sonuçlara ulaştıracak bilgilerin elde edilmesi yoluna da gitmek gerekir. Çünkü delme ve patlatma yöntemine etki etmeyen bazı jeolojik yapılar makine ile ilerleme hızını ve maliyetini büyük ölçüde etkileyebilmektedir. Makineler jeolojik şartlarda ancak sınırlı bir değişmeye uyum sağlayabilir. Bu nedenle başarı derecesi, değişmeyen ve uygun jeolojik şartlarla yakından ilgilidir.

Kayanın fiziksel özelliğindeki büyük değişimler makine ile açımı engelleyebilir. Aşırı değişen zemin şartları veya sert ve yumuşak birimlerin ardalaşması ana taşıyıcılar üzerine fazla yük bindirir ve makinenin kapasitesi dışında kalabilir. Mesela kumtaşı, şeyl ve kireçtaşı ardalınması içinde ince tabakalar halinde sert kuvarslı kumtaşlarının bulunması makine ile yapılan işlemin başarısını etkiler.

Makine ile açım için yapılan jeolojik araştırmalar ayrıntılı bölgesel jeolojik çalışmaları ve ayrıntılı laboratuvar deney programlarını da içine almalıdır. Makine ile açımın başarısı tamamıyla jeolojiye ve saha çalışmalarının doğruluk derecesine, yani gerçeği yansıtıp yansıtmadığına bağlıdır. Makinede ileriye doğru ilerleme “lazer” ışınları ile denetlenir. Böylece doğrultuda ve eğimde gerekli hassasiyet sağlanır.

Tünel kazısında çıkan malzemenin (pasa) taşınması genellikle aynaya kadar devam ettirilen dönen bantlarla olmaktadır. Ayrıca pasanın durumuna, tünelin çap ve uzunluğuna boşaltma alanının durumuna, eldeki ekipmana göre değişik çözümler de düşünülebilir

TBM’lerdeki kesiciler işletme maliyetinin esas bölümünü oluşturur. Bunları, aşındıkça değiştirmek gerekir. Kesici uç teknolojisi ilerledikçe TBM’lerin daha sert kayada kullanılması mümkün olmaktadır. Bu makinelerin bir yerde kullanılıp kullanılmayacağı esas olarak kayanın sertliği, basınç mukavemeti, kayma mukavemeti, eklem ve çatlakların sıklığı ile ilgilidir. TBM’ler zayıf kumtaşı, dolomit, sert kumtaşı ve granit gibi daha sert birimlerde de başarılı olmuşlardır. Makinelerin çoğu dairesel tünel açar, düşük kapasiteli bazı makineler ise tünel çapına göre değişik şekillerde tünel açabilmektedir.

TBM ile tünel açmanın avantajları ise şunlardır;

- Düzgün, pürüzsüz bir yüzey elde edilir. Bu şekildeki bir kesit en yüksek duraylılığı ve gerilmelerin tünel etrafında en uygun dağılımını sağlar.

- Patlatma tahribatı olmadığından tünel etrafındaki kaya ilk haliyle kalır. Bunun sonucu olarak daha az bir iksa gerekir.
- Patlatma yönteminde kaçınılmaz olan aşırı sökülme, eklem sıklığına bağlı olarak yoktur veya çok azdır. Böylece gereken beton ve kaplama miktarı azalmış olur.
- Kayanın uygun olması durumunda ilerleme hızı çok daha fazladır. En son tünel açma makineleri delme ve patlatma yöntemine göre 4–6 defa daha hızlı iş yapmaktadır.
- Çevredeki bina ve sanayi tesislerinde patlatma tahribatı yoktur. Bu nedenle, bazı özel durumlarda, mesela yerleşme ve sanayi alanları yakınında veya içindeki sık tüneller, tahribata sebep olunabileceğinden patlatma ile açılmak yerine, ekonomik olup olmadığına bakılmaksızın makine ile açılmaktadır.
- Daha az insan gücüne ihtiyaç gösterir. İşçi sayısı azaldığından birim insan başına ilerleme ve iş güvenliği artmış olacaktır.

TBM makinelerinin kullanılmasını sınırlayan durumlar da mevcuttur.

- Başlangıçta yatırılacak para makinenin maliyeti dolayısıyla çok fazladır. Bu nedenle kısa tünellerde veya orta uzunlukta olan çok geniş çaplı tünellerde kullanışlı değildir. Ne var ki bu gibi tünellerde bölge iskân veya sanayi sahası olursa tahribata yol açmamak için makine ile açım benimsenir.
- Tozlanmayı ve ısınmayı düşürmek için ve ayna yakınında çalışmaya uygun şartları sağlamak için, masraflı ve karmaşık havalandırma sistemi gerekebilir.
- Kayanın yumuşak kesiminde tünel doğrultu ve eğiminin kontrolü zorlaşabilir.
- Aynada çalışabilecek bir genişlik oldukça sınırlıdır.
- Kaya şartlarının değişmesi durumlarında gerekli teknik ve malzeme ayarlamaları daha zordur.
- Çok sert kayada makine ile tünel açımının maliyeti yüksektir ve bu nedenle alışlagelmiş yöntem kadar ekonomik olmayabilir.
- TBM’lerin hareket kabiliyeti alışlagelmiş tünelcilikte kullanılan ekipmana göre daha azdır. Bu tür hareket kabiliyeti küçük çaplı dönüşler olması halinde veya baca ile açılan tünellerde önemli bir sakınca olabilir.

- Çok sert kaya ile yumuşak kayanın münavebeli olması halinde veya şişen, sıkışan, akan zemin ihtiva eden aşırı ayrıışmış ve kırıklı kaya zonlarında tünel açma makinelerinin verimi çok düşüktür.
- TBM'ler genellikle projenin amacına göre özel yapılmıştır. Bu nedenle elde jeolojik şartlar hakkında doğru bilgi olmaması halinde aniden değişen yer altı jeolojik şartlarının karşılayacak şekilde bir makinenin yapım ve inşası mümkün olmayabilir. Fabrikaya uygun makine siparişi vermek için basınç mukavemeti, yapısal durum, kuvars miktarı hakkında bilgi ile mümkünse bir miktar karot gerekir [15].

4.3.2 Yarım kesit tünel açma makineleri ile tünel a ımı

Bu makinelere ayrıca 'Kollu Tünel Açma Makineleri' de denilmektedir. Kollu tünel açma makineleri genellikle paletli olup bir kol üzerinde dönen küçük bir kafaya yerleştirilmiş kesiciler yardımıyla kayayı yontar. Basınç mukavemeti 1000 kg/cm²' ye kadar olan orta sert kayalarda kullanılmak üzere pek çok  eşitleri vardır. Makineler büyüklüklerine göre 10–80 ton ağırlığında 40–250 beygir g   l  ve 3–12 ton itki g   ndedir. Bu makinelerin kesici kafaları değiştirilmek suretiyle değişik zemin şartlarına uydurulabilmektedir. şekil 4.4'te kollu tünel açma makinesi gösterilmiştir.



şekil 4.4 : Kollu tünel açma makinesi

Kollu tünel açma makineleri kullanılırken yeterli bir ilerleme hızı için pasa yükleme ve taşıma sistemi, tozları yatıştırmak için su püskürtme sistemi ve havalandırma sisteminin işe uygun olması yanında, gerekli su ve enerjinin kesintisiz sağlanması da önemlidir. Bu makinelerde verimlilik tünel çapına, iksa sıklığına, kaya mukavemetine ve kayanın diğerk özelliklerine bağıdır. Makinelerin kayayı kesebilme dereceleri, kayanın basınç mukavemeti arasındaki ilişkiye, minerallerin dizilişine, özellikle kuvars gibi aşındırıcı tanelerin yüzdesine, tane boyuna, tabakalanma ve eklemlenmeye bağıdır.

Bu makineler, makine ile ayna arasının temizlenmiş olmasını gerektirir. Ancak bu şekilde kesici kafa ve kazı malzemesini kaldıran sistem çalışabilir. İksa gerekiyorsa aynanın 2m. gerisinden takip edecek şekilde yapılması gerekir. Bu şekilde iksa makineyi kullananın önündedir. Böyle bir zorunluluk, makine üzerinde çalışan işçiyi tavan ve yanlardan düşecek parçalardan korumak içindir. İlerleme hızı delme ve patlatma yöntemine göre biraz fazla, TBM' lere göre ise oldukça düşüktür. TBM' lere kıyasla yarı makineleşmiş bir tünel açma yolu olup, iş gücüne oldukça fazla ihtiyaç gösterir.

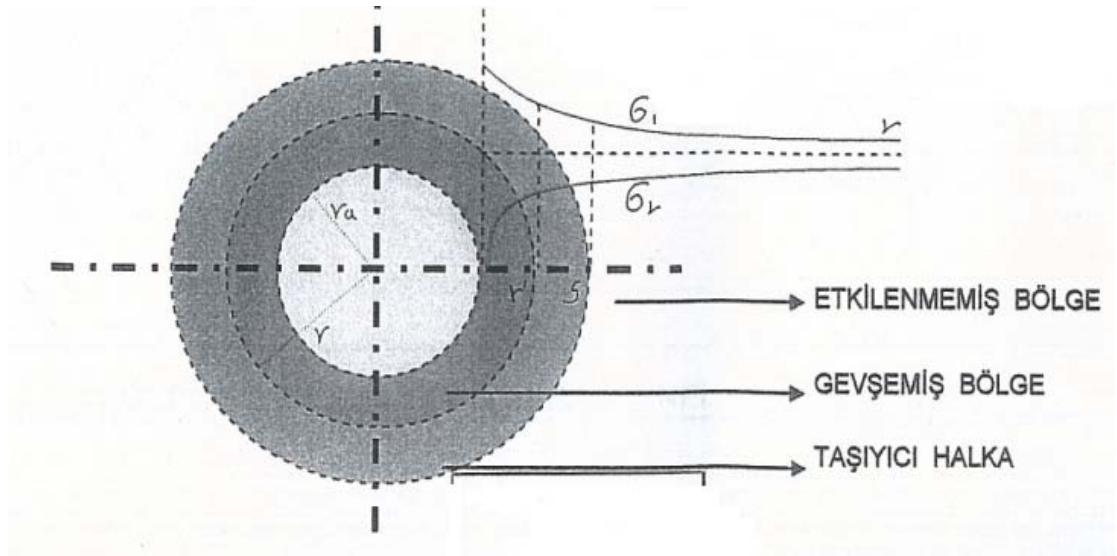
Yarım kesit tünel açma makineleri ile tünel açmanın avantajları ise şunlardır;

- Delme-Patlatma yöntemine göre daha az işçiye ihtiyaç gösterdiğinden kaza oranı da aynı oranda azalmıştır.
- İlerleme süresince yardımcı işlemler gerektirmediğinden boştaki geçen zaman azdır.
- Nispeten düzgün bir yüzey elde edilir.
- Tüneli çevreleyen kayada gevşeme gelişmez.
- Böylece gereken iksa daha az olur.
- TBM' ler kadar dar bir jeolojik sınır içinde çalışmaz. Daha kötü kaya şartlarına uyum sağlayabilir. Çünkü aynaya yaklaşımak her zaman kolay olduğundan gerektiğinde iksa yapmak mümkündür
- TBM' lerden daha düşük bir enerjiye ihtiyaç gösterir.
- Makine ve gerekli malzeme pahalı olmasına rağmen yine de TBM' lerin maliyetinden birkaç defa aşığdadır [15].

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi de makine ile kazı sistemi içine girmektedir. Ancak çalışmamızın ana konusunu oluşturduğu için aşağıda bir ana başlık altında verilmektedir.

5. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA METODU İLE TÜNEL AÇMA SIRASINDA KULLANILAN JEOTEKNİK ÖLÇÜM SİSTEMLERİ VE ALETLERİ

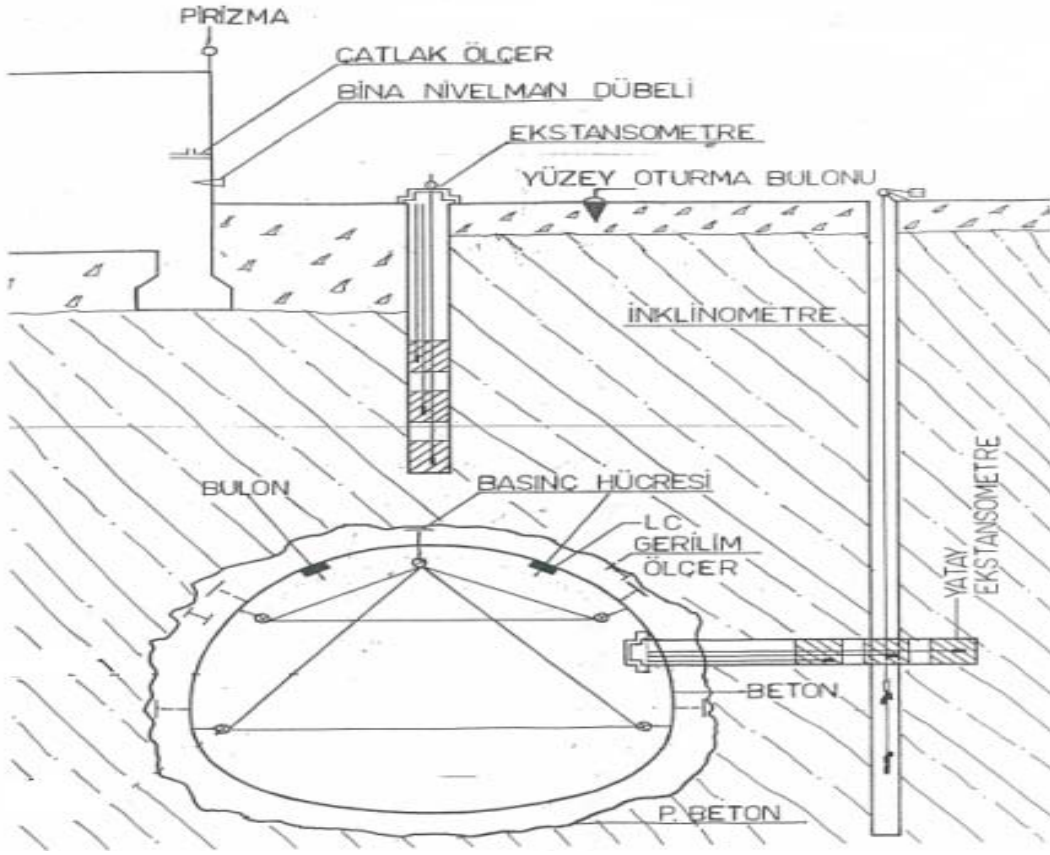
Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) deneysel tecrübeler sonucu ortaya çıkmış bir metottur. Ana gaye zemin ve kaya ortamın mukavemetini korumak, gerekli gevşeme zamanını tanımak, tünel çevresinde kendini destekleyen bir zon oluşturmaktır. Başka bir deyişle zemine kendisini taşıtmak ve yeraltı kazılarının davranışlarını yakından izlemektir [17]. Şekil 5.1’de NATM yük etki diyagramı gösterilmiştir.



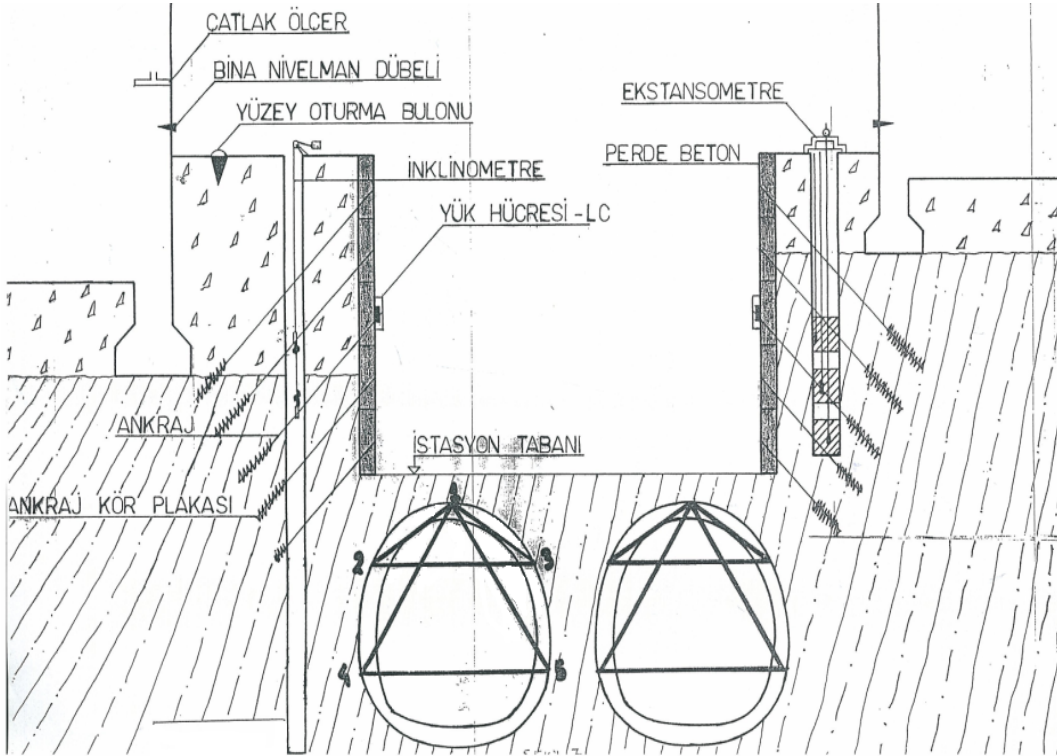
Şekil 5.1 : NATM yük etki diyagramı

Zeminin oluşumundan doğan enerji ve çatlaklardan oluşan deformasyonların asgaride tutulması ve ilk kaplamanın kısa zamanda yapılması gerekir. Metodun özü olan kaya kütlelerinin içindeki dayanımı sağlamak için kısa zamanda iksalanması ve zeminin kendi kendini taşıy hale getirilmesi gerekir.

Bunun için pasif iksa yerine, esnek iksa dediğimiz aktif iksa sistemine gidilmeli, püskürtme beton ve bulonlama sisteminin daha taşıyıcı hale gelmesi ve mukavemetin artırılması ana amaç olmalıdır. Optimum kesitle azami taşıma gücü, bir seri ölçümün sonucu verilecek kararlarla gerçekleştirilebilir. Şekil 5.2 ve 5.3’te yapılması gereken geoteknik ölçümler gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Geoteknik ölçüm aletleri genel yerleşim detayı

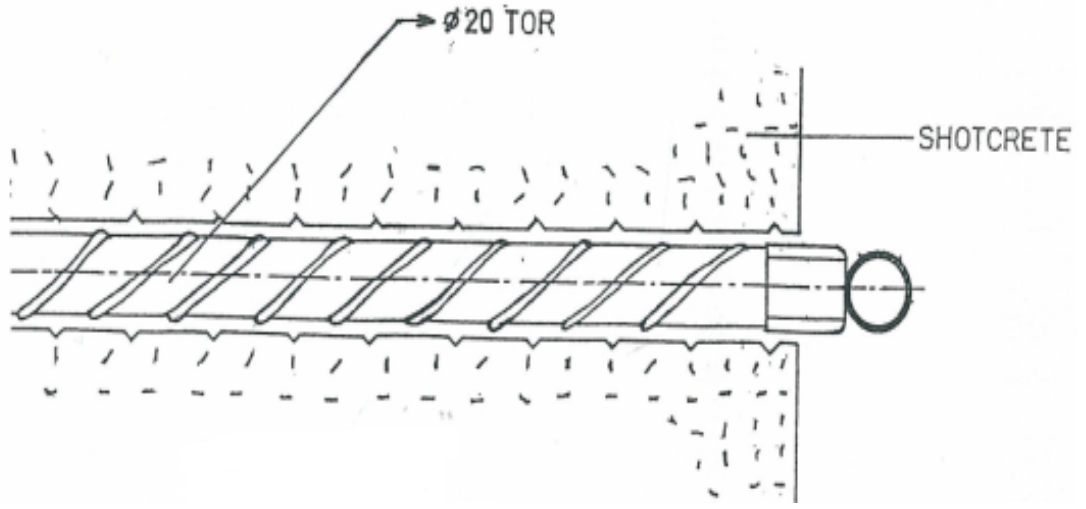


Şekil 5.3 : Geoteknik ölçüm aletleri genel yerleşim detayı

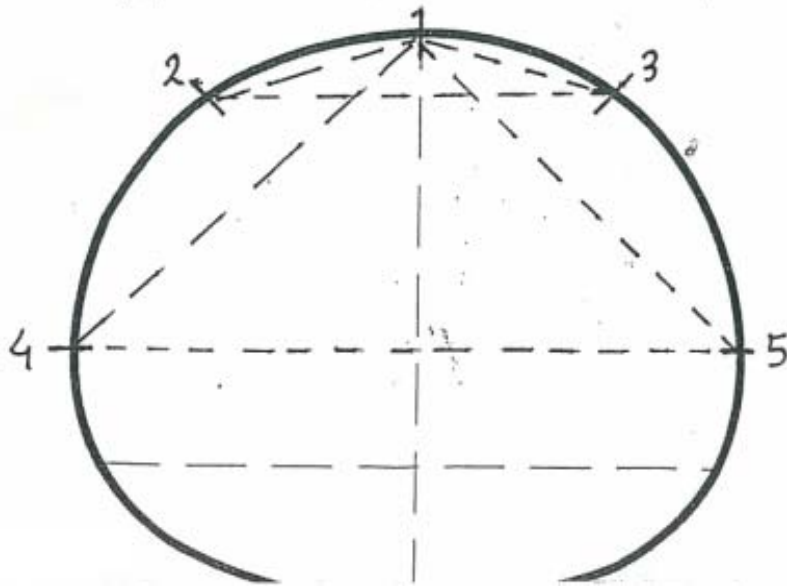
5.1 Deformasyonların Ölçümü

5.1.1 Yakınsama (konverjans) aygıtları ve bulonları

Yakınsama ölçüm cihazı, bir gösterge bandı ile standart bir kalibrasyon rayından meydana gelir. Her 5 cm’de bir delikleri olan 20-25 metre uzunluktaki bir şerit mm’in %1 okuma hassasiyetindeki bir dijital ekrandan oluşur. Mutlak deplasmanların ölçülmesinde kullanılan bant uzama ölçer (ekstansometre) için tünel içinde bir ölçüm noktasında 5 adet ucunda halkaları olan bulonlar monte edilir. Şekil 5.4 ve 5.5’te yakınsama bulonları ve ölçüm noktaları gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : Deformasyon ölçümünde kullanılan bulon



Şekil 5.5 : Ölçüm noktalarının şematik gösterimi

Montaj şekilleri gösterilen yakınsama bulonlarından, bant uzama ölçerin yardımı ile 6 adet ölçüm alınır. Ölçümler, belirtilen noktalar arasında gerçekleştirilir.

1-2----- 1 nolu ölçüm

1-3----- 2 nolu ölçüm

1-4----- 3 nolu ölçüm

1-5----- 4 nolu ölçüm

2-3----- 5 nolu ölçüm

4-5----- 6 nolu ölçüm

Şekil 5.6’da noktalar arası ölçüm gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Bant uzama ölçer ile noktalar arası ölçüm yapılışı

Bant uzama ölçer, yakınsama bulonları arasında 10 kg’lık bir kuvvetle gerilir, öncelikle şeritteki değer okunur. Bu bir tam sayıdır, sonrasında dijital değer okunur ve şeritteki tam sayıya eklenir.

Örnek olarak;

Şeritteki tam sayı değeri : 5,15 m

Dijital ekrandaki değer : 38,69

Toplam : $5,15 + 0,03869 = 5,18869$ m olarak bulunur.

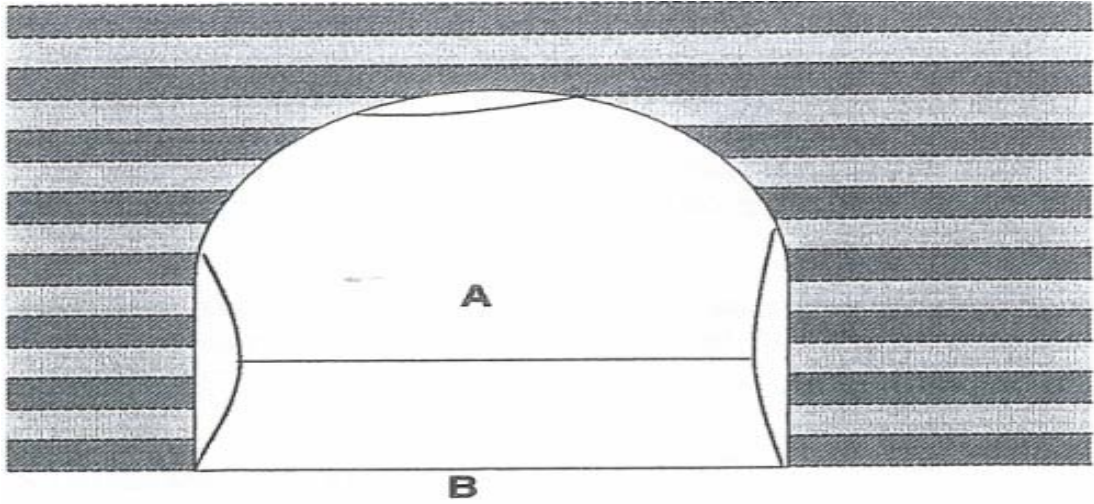
Projede, deformasyon paylarının tavanda 10 cm, yan duvarlarda 5 cm olması istenmektedir.

Alınan ölçümler sonucunda iki türlü sonuç ortaya çıkmaktadır.

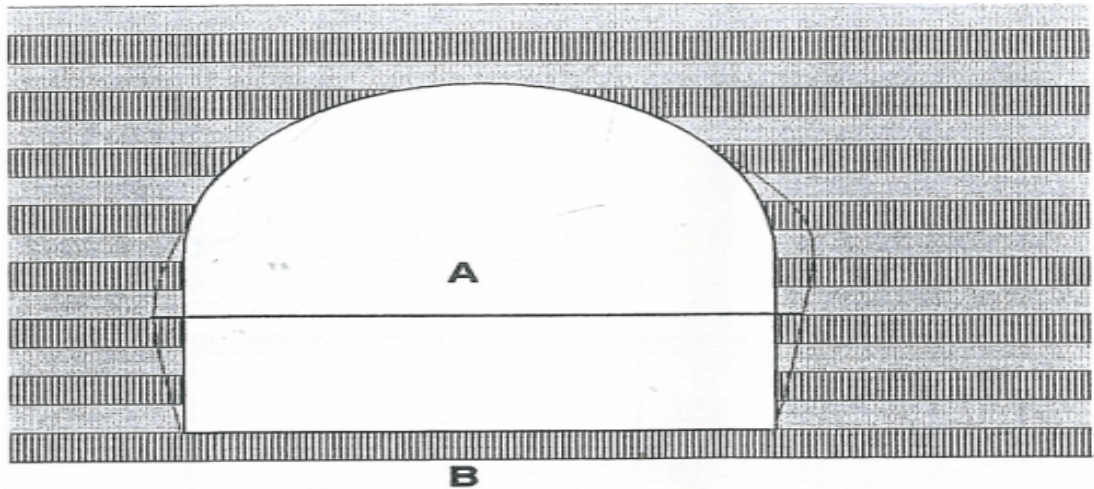
YAKINSAK: Tüneldeki şekil bozukluğu tünel içine doğrudur. Yani meydana gelen deformasyon sonucu tünel gabarisindeki deformasyonlar daralma şeklindedir.

IRAKSAK: Tüneldeki şekil bozukluğu tünel dışına doğrudur. Yani meydana gelen deformasyon sonucu tünel gabarisindeki deformasyonlar genişleme şeklindedir.

Yakınsama ölçüm sonuçları mutlak olup, daralmanın yönü belirlenemez. Bu nedenle optik ölçümlerle koordinatlı okunarak daralmanın yönü ve miktarları tam olarak bulunur. Şekil 5.7 ve 5.8’de yakınsama, ıraksama deformasyonları gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Yakınsak deformasyon ($B > A$)



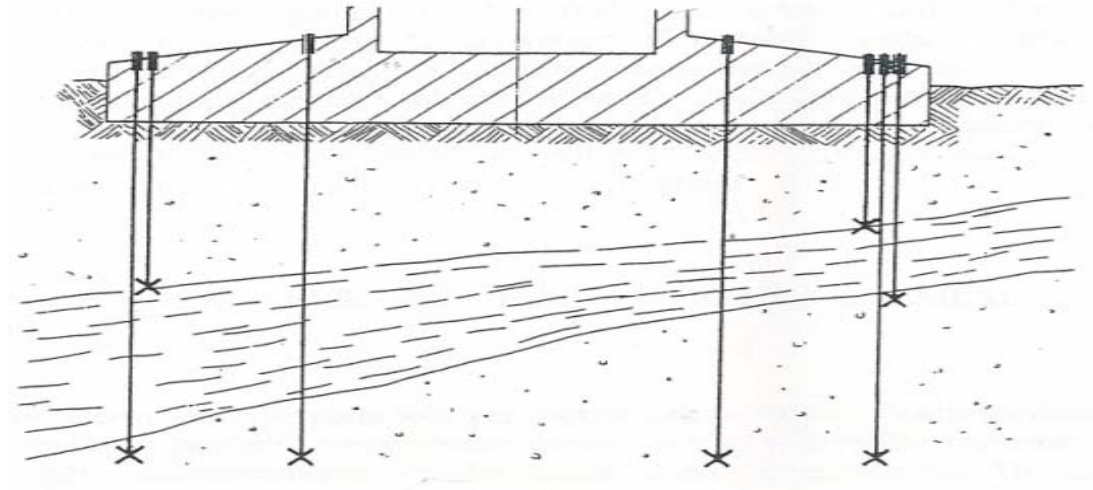
Şekil 5.8 : Iraksak deformasyon ($A > B$)

5.1.2 Uzama ölçerler (Ekstansometreler)

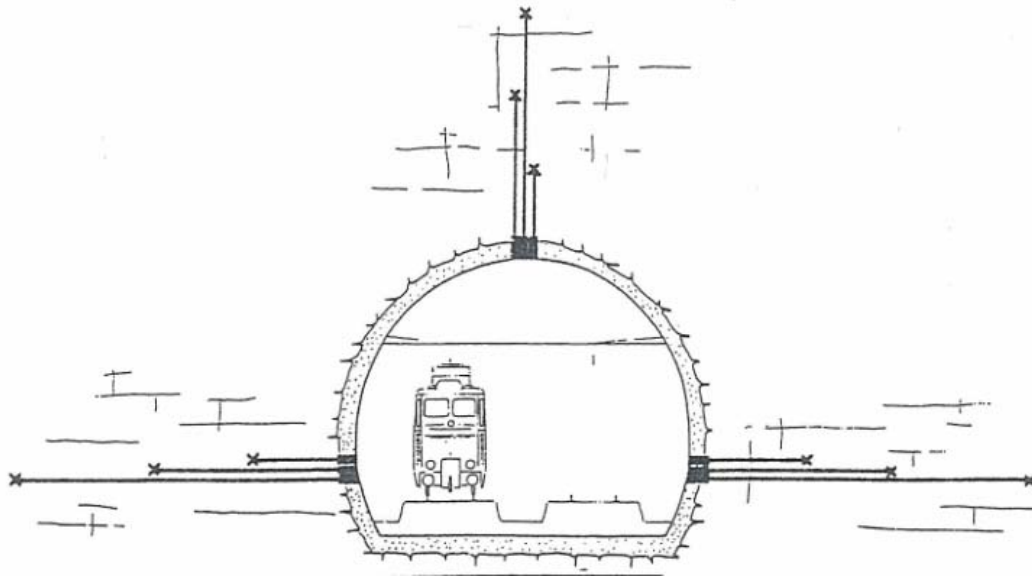
Uzama ölçerler yüzey veya yeraltı kazılarında, temel yükünden, şev hareketlerinden veya in-situ testlerin sonucunda oluşabilecek kaya hareketlerini ölçmek için kullanılırlar. Uzama ölçerler;

- Düşey
- Yatay
- Tünel içi olmak üzere üç türde olabilirler.

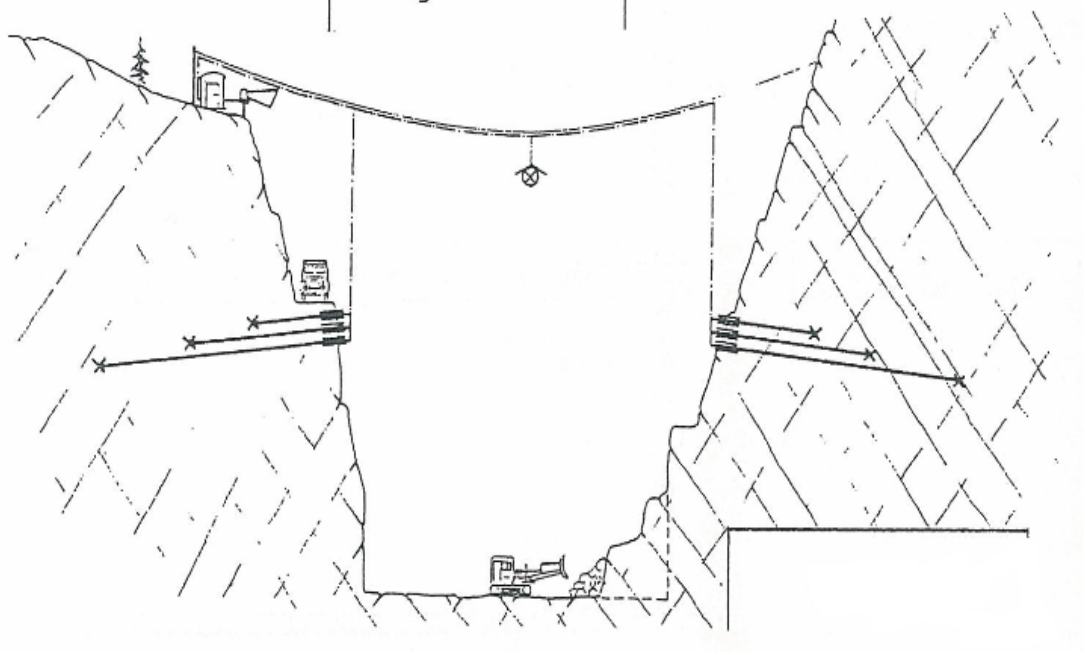
Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve 5.11’de düşey, yatay ve tünel içi uzama ölçerler gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : Düşey uzama ölçerler

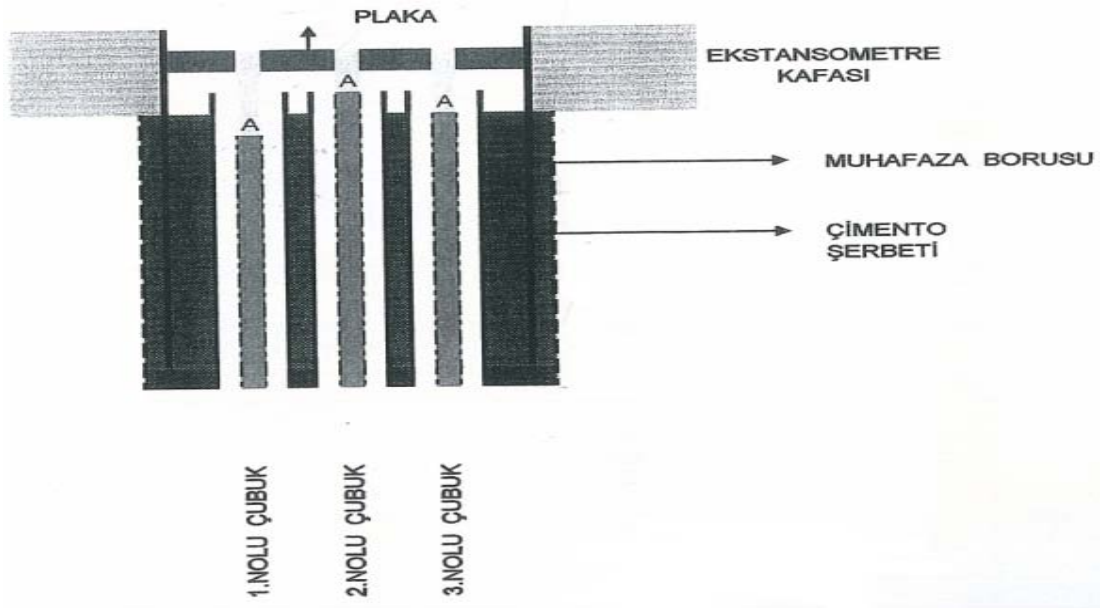


Şekil 5.10 : Yatay uzama ölçerler



Şekil 5.11 : Tünel içi uzama ölçerler

Uzama ölçer, bir sondaj deliğinin farklı derinliklerinde yer alan bir veya birden çok ankrajla bir başlıktan meydana gelir. Uzama ölçerlerin çoğu başlıkla ankrajlar arasında gerilen çubuk veya kablolardan meydana gelir. Mekanik veya elektronik yollarla ölçüm yapabilirler. Kayadaki negatif deplasmanlar, çubuklara iletildiği şekilde, ankraj veya sondaj deliği içerisindeki röperle, başlık arasındaki mesafe değişimi şeklinde ölçülür. Şekil 5.12’de uzama ölçer kafa kesiti gösterilmiştir.



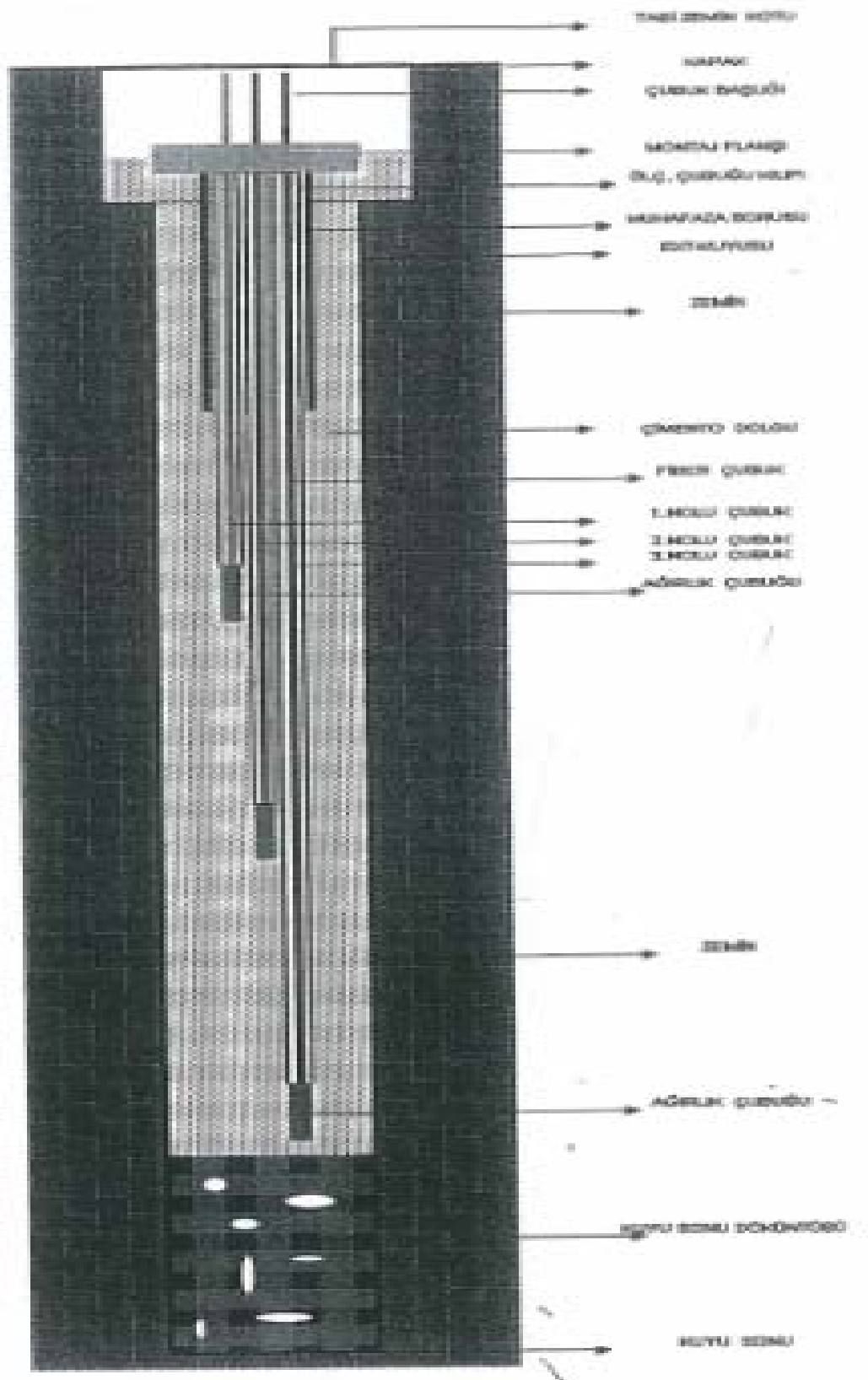
Şekil 5.12 : Çubuk uzama ölçer kafa kesiti

Hassas uzunluk ölçümleri için 10 mm'den 1000 mm'ye kadar kademeleri olan 0.01 mm'den 1,00 mm'ye kadar okuma hassasiyetleri olan tekli ya da çoklu uzama ölçerler mevcuttur. Eğer istendiği taktirde bütün uzama ölçerler tek merkeze bağlanarak bilgisayarlar yardımı ile nümerik olarak okunabilmektedir. Yatırımları pahalı olmakla birlikte son zamanlarda uydular aracılığı ile de uzama ölçer okumaları yapılabilmektedir. Oluşabilecek deformasyonların uzun zamanda takibi gerekli ise uydu bağlantılı takip ekonomik olmaktadır.

Uzama ölçerlerin yerleştirilmesi için yer seçimi çok önemlidir. Yerleştirilecek ölçüm aletinin uzunluğu, kademe boyları ve kademe sayısı, ortamın jeolojik yapısına ve ölçülecek büyüklüğe göre ekstansometre yerleştirmek önem arz etmektedir. Tünellerde, bu tünelin taşımak zorunda kaldığı et kalınlığı kadardır ve bu da yaklaşık olarak tünel yarıçapının minimum 2,5 katı kadardır. Yani $R=5$ m olan bir tünel için en uzun kademe boyu 12,50 m olmalıdır. İstinat duvarlarında kullanılacak yatay uzama ölçerler için ise uzun çubuğun boyu teorik kayma dairesinin dışına çıkacak şekilde dizayn edilmelidir. Kademe boyları ise açılan kuyunun logları incelenerek zayıf zonlar varsa zayıf zonlara, veya formasyonun değiştiği noktalara isabet edecek şekilde seçilirler.

Yüzeyden montajlanacak uzama ölçerlerde ise yer altında oluşturulacak büyük boşluklar, birbirinin üstünden geçen tünellerin bulunduğu noktalar, jeolojik formasyonların zayıflık gösterdiği bölgeler ekstansometre ile ölçüm yapılacak noktalar olarak seçilirler.

Cihaz kademe boyları ve sayıları belirlendikten sonra hazırlanır, yerleştirme kuyusu iyice temizlenip kırıntılarından arındırıldıktan sonra, ekstansometre dikkatlice ve kırılmadan kuyuya yerleştirilir, düşük dozajlı çimento ile enjeksiyonlanır. Uzama ölçerin kafası koruma altına alınarak muhtemelen bir kapak ile kapatılır. Montajı tamamlanan cihazın kot ve koordinatları alınarak not edilir. Kafa kot ve koordinatları periyodik olarak kontrol edilir. Şekil 5.13'te 3 kademeli uzama ölçer detayı gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : 3 kademeli uzama ölçer detayı

Uzama ölçerlerde şu konulara dikkat edilmelidir:

- Yer seçimi dikkatli yapılmalıdır.
- Sondaj kuyusu açılırken formasyon değişimleri iyi belirlenmeli ve sonuçlar loglara dikkatlice işlenmelidir.
- Cihaz kuyuya dikkatlice yerleştirilmeli, düşük dozajlı çimento şerbeti ile enjeksiyon yapılmalıdır.
- Cihaz kafası emniyete alınmalı ve bir kapak ile korunmalıdır.
- Ölçümlere başlanmadan önce cihazın kot ve koordinatları alınmalı, periyodik olarak kontrol edilmelidir.
- Ölçümler düzenli bir şekilde rapor edilmelidir.
- Uzun olan çubuk tünel üzerinde, gevşeme zonu içerisinde kalmalıdır.
- Cihaz ile ölçümlere, inşaat aşamaları göz önüne alınarak devam edilmelidir. İnşaat aşaması sırasında, kaya bloklarının hareketi, kayma zonlarının durumu, püskürtme betonda oluşan çatlakların takibi, kaya blonlarının veya ankrajların durumları takip edilmelidir.

Uzama ölçer cihazında ölçümler mekanik kumpasla alınacaktır. Ölçüm klavuz borusundaki hareketli çubuğun kafa ile olan mesafe değişimleri alınarak hesaplanır. Örneğin;

İlk ölçüm: 28,26 mm

İkinci ölçüm: 26,69 mm

Hareket miktarı : $28,26 - 26,69 = 1,4$ mm olarak bulunur.

Cihaz ile alınan oturma, hareketler proje kriterleri çerçevesinde olmalıdır. Yani düşey oturmalarda 10 cm, yatay hareketlerde 5 cm'yi geçmemelidir. Tünel üzerindeki tabakaların veya yanal yüklerin hareket miktarları tünel içerisinde izin verilen deformasyon değerlerini geçmemelidir. Bu kriterleri aşabilecek deformasyonlar izlendiğinde gereken önlemler en kısa süre içerisinde alınmalıdır.

5.1.3 Gerilme ve basınç hücreleri

Tünellerde püskürtme betonda, istinat duvarlarında ya da istasyon temellerinde betonun içindeki gerilme dağılımlarını ölçmek için radyal ve teğetsel olmak üzere iki tip basınç ve gerilme hücresi kullanılmaktadır.

Nicelik olarak bilinmeyen ve hücre üzerine etkiyen (kg/cm^2) gerilme, sisteme bağlı olan basınç tüpü ile bir hidrolik veya pnömatik basınç vasıtasıyla ölçüm sırasında dengelenebilir. Bir ölçüm sırasında, çok az ve sabit hacimli bir yağ hücre içine pompalanır. Böylece hücrede ve basınç tüpünde P_t (kg/cm^2) basıncı teşkil edilir. Bu değer test edilen yapının dışındaki basınç tüpünde P_g , niceleği bilinmeyen basınca eşit olacaktır. Burada her yüz metrede yaklaşık $0,1 \text{ kg/cm}^2$ 'lik basınç miktarının, basınç tüpü içinde oluşacak sürtünmeden dolayı kaybı ihmal edilebilir. Yani;

Dış basınç (bilinmeyen) $P_t =$ Göstergedeki basınç P_g olacaktır.

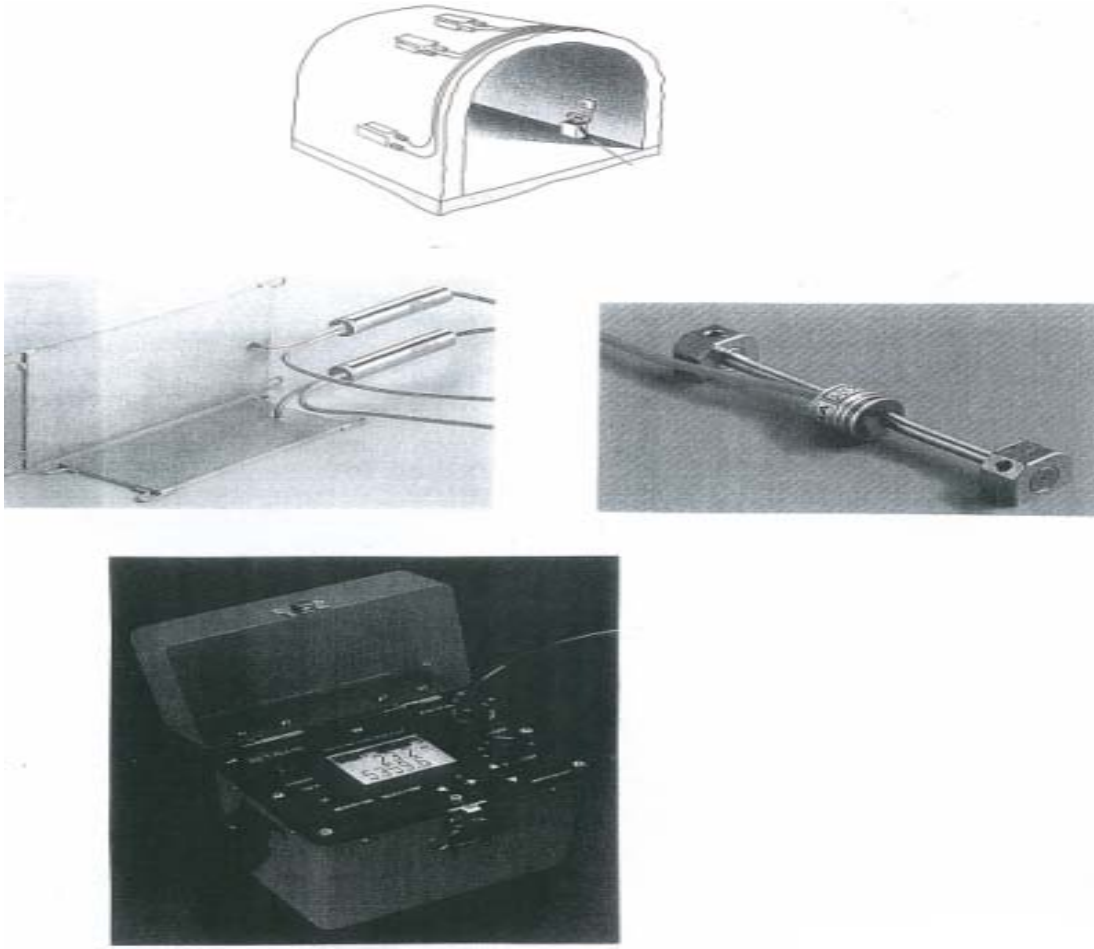
Gerilme ve basınç hücrelerinin uygulamaları şu şekildedir:

- Beton gerilmeleri; tünel ve shaft kaplamalarında, püskürtme beton uygulamalarında temas basıncı için kaya ile beton temas yüzeyinde, kemer barajlarda, yapılarda ve temellerde,
- Toprak basınçları; gevşek zemin ve dolgularda, istinat duvarlarında ve dolgu baraj temellerinde,
- Boşluk suyu basıncı, zemin mekaniği projelerinde, yer altı yapılarında ve barajlarda,
- Çelik köprüler ve beton öngermeli köprülerde uygulanır.

Bu hücreler genelde uygulanacak yapının dizaynında ve betonarme hesapların yapılmasında faydalanılan ölçüm cihazlarıdır. Yapının dizaynından sonrada kontrol amaçlı olarak kullanılırlar.

Uygulama alanımız yer altı yapıları olduğu için, örneğin bu cihazlar tünellerin yapımından önce açılacak bir pilot tünel içerisinde montajlanarak bu pilot tünel üzerine gelen basınçlar ve oluşan gerilmeler ölçülerek ve tünel kesitlerinin oluşumu ile beton dizayn çalışmalarında kullanılırlar. Sonuçta betonarmenin dizaynından, teknik ve ekonomik açıdan uygun projeler üretilebilir. Zaten NATM' nin temel amacı da deneysel tünel açmaktır. Yapılacak uygulamaların, teorik hesaplamalarla olan uyumunun incelenmesi de bu amaçlıdır.

Şekil 5.14'te gerilme ve basınç hücresi ekipmanı gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Gerilme ve basınç hücresi ekipmanı

5.1.4 Eğim ölçerler (İnklinometreler)

Eğim ölçerler yardımı ile tünel, istinat duvarları ve şevlerde oluşabilecek yatay deplasmanlar ölçülür. Ölçülen bu deplasmanlar, sadece sondaj aksına dik doğrultudaki hareketlerdir. Mevcut cihazların çoğu, yatay hareketlerin ölçülebileceği düşey sondajlar civarında çalışmak üzere üretilmiştir. Ancak son zamanlarda yeni nesil eğim ölçerler kazı yönüne paralel hareketleri de aynı kuyu içerisinden algılayabilecek hassasiyette olabilmektedir.

Eğim ölçerler sondaj aksı boyunca oluşacak deplasmanlara ait profili komple ve detaylı bir şekilde verirler. Böylece zemin hareketlerinin oluştukları yerler belirlenebilir. Belli bir zaman içinde yapılan okumalar hareketin büyüklüğü, yönü ve miktarı hakkında bilgi verir. Tek bir cihaz, belirli bir sayıdaki eğim ölçer için

hazırlanan kuyularda okuma yapmaya imkan verir. Bu sayı 20-50 arasında değişebilir.

Şekil 5.15'te eğim ölçer ekipmanı gösterilmiştir.



Şekil 5.15 : Eğim ölçer ekipmanı

Sondaj tip eğim ölçer olarak adlandırılan bu tip ölçüm cihazlarında başlıca ana gruplar şöyledir:

- Delme gözlem ekipmanı
- Klavuz tüp ve bağlantıları
- Yerleştirme ekipmanı
- Sonda eğim ölçer ekipmanı (okuma ünitesi, prop, bağlantı kablosu)
- Kalibrasyon ekipmanı
- Bilgisayar yazılımı

Ölçüm yapılacak yerin, proje kriterleri göz önüne alınarak tespiti önemlidir. Ölçülecek büyüklük ve proje verileri, toleranslar, arazi doneleri, kurulacak ölçüm istasyonu ve diğer ölçüm cihazları açısından da önem arz etmektedir. Kurulacak ölçüm ağından, beklenen zemin hareketlerinin takip edilmesi ve bunların inşaat süresi boyunca takibi, kritik ölçüm değerinin bilinmesi, inşaatın güvenli olarak sürdürülmesi açısından gereklidir.

Cihazın yerleştirme çalışmaları,

- Cihazın yerleştirileceği sondaj kuyusu, önceden belirlenmiş lokasyonlarda ölçüm yapılacak tüm derinliğe kadar açılır. Sondaj deliğinin açık kalması için muhafaza borusu kullanılacaksa, kılavuz tüpünün yerleştirilmesi sırasında muhafaza borusu geri çekilmelidir.
- Kılavuz tüpü yerleştirilmeden önce zemin koşulları yapılan sondaj çalışması incelenerek belirlenmelidir.
- Kılavuz tüp parçaları birbirine eklenerek, doğru bir şekilde montajı yapıp sızdırmazlık için boru bağlantıları izole edilir. Montajı tamamlanan kılavuz boruları şakülünde ve ölçüm yönü dikkat edilerek kuyuya indirilir. Başlık kapağı takıldıktan sonra kuyu ve boru arasına enjeksiyon verilir. Bu esnada kılavuz borunun yüzmesini önlemek için üzerine bir ağırlık veya borunun içi suyla doldurulur.
- Yerleştirme ve enjeksiyon işleminin ardından, kılavuz borunun azimut açısı -3, +3 derecelik bir hata payı içinde ve ölçüm yönü son defa kontrol edilerek başlık kısmı sabitlenir ve kuyu prize bırakılır.
- Kuyu priz aldıktan sonra kılavuz borusu üzerindeki şerbet artıkları temizlenir, güvenlik için kuyu üzerine bir kapak yapılır ve kilit altına alınır.
- Bütün bu işlemler tamamlandıktan sonra cihaz kafa kotu ve koordinatları alınır, periyodik olarak kontrol edilir.

Eğim ölçerler ile okumaların yapılması ise şöyledir:

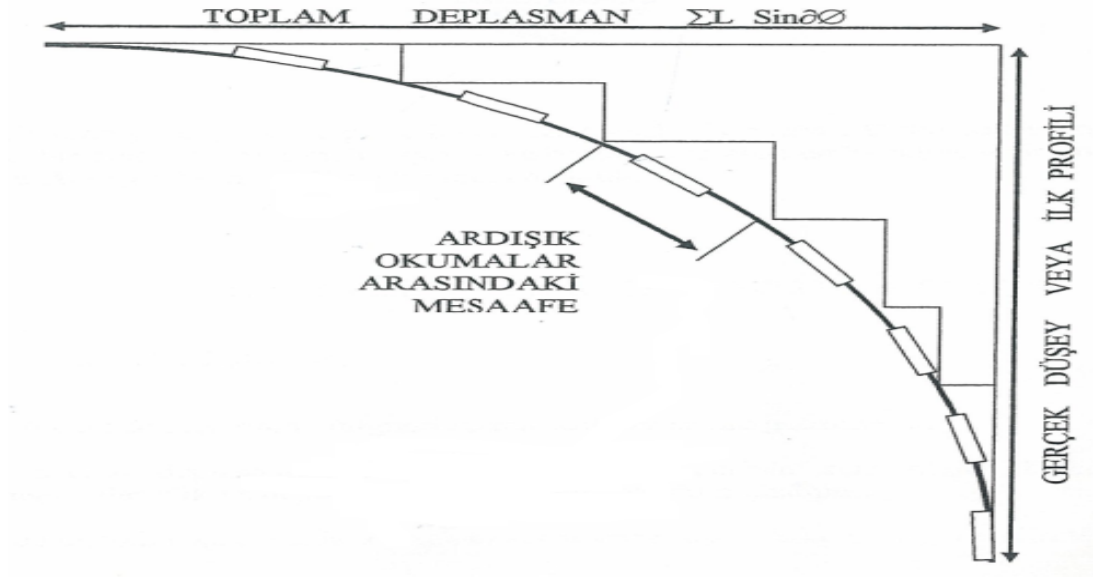
- Sonda, arazide hergünkü okumalardan önce ve sonra kontrol edilmedilir. Cihaz arızaları, detaylı bir şekilde araştırılıp giderilmeli, kalibrasyon kayıtları ve düzenlemeleri saklanmalıdır. Gerekli olmayan düzenlemelerden kaçınılmalıdır.

- Ankraj betonu atıldıktan hemen sonra, başlangıç okumaları yapılmalıdır. Bu okumaların ortalamaları alınarak, daha sonraki gözlemlere bir taban teşkil etmesi sağlanmalıdır. Daha sonraki okumalar, arazi koşullarına bağlı olarak proje mühendisinin belirlediği aralıklarla yapılır.
- Sonda, kılavuz tekerlekleri üzerinde sondaj deliğinin tabanına indirilir. Ölçüm işlemine tabandan başlanır. Herbir ölçüm istasyonunda derinlik ölçümleri yapılırken, eğim ölçer göstergesi kaydedilir. Ölçüm aralığı, genel olarak sonda kılavuz tekerlekleri arasındaki mesafeye eşit olmalıdır. (sonda boyu 70 cm, mesafe 50 cm)
- Sonda geri çekilir, 180 derece döndürülerek kılavuz tekerlekleri üzerinde sondaj deliğinin tabanına tekrar indirilir. İkinci bir ölçüm cihazı daha, yukarıda açıklandığı gibi hazırlanır. Ölçüm yerlerinde birinci cihazın ölçüm yerleriyle aynı olması, verilerin güvenliği açısından önemli bir arazi kontrolü sağlar.

Verilerin değerlendirilmesi;

- Okumalar yapıldıktan sonra tüm veriler 24 saat içinde değerlendirilmez.
- Arazi verileri incelenerek, belirgin hatalar arazi veri kağıdına işaretlenerek, yapılacak düzeltmeler açık bir şekilde not edilmelidir.
- Ters ayna okuma çiftlerinin ortalamaları alınarak ayna hatasına ait düzeltmeler yapılmış olur. Hareketin yönü dikkatle kontrol edilip kaydedilmelidir.
- Açık ve deplasmanlardaki kademeli artışları belirlemek için, düzeltilmiş okumalar, aynı kılavuz tüpü yerindeki başlangıç okumalarından çıkarılır.
- Bu kademeli değişimler, gerektiğinde, $A = L \times \sin \theta$ formülü kullanılarak bulunur. Kademeli deplasmanlar (Δ ,mm) haline dönüştürülebilir. Burada L (mm), arka arkaya yapılan okumalar arasındaki mesafedir.
- Daha sonra kademeli açı veya deplasman değişimleri toplanır. Bu işlem normal olarak kılavuz tüpün tabanından başlamak üzere yapılır. Buradan da toplam deplasmanların derinlikle değişimine ait bir grafik elde edilir.

Şekil 5.16’da deplasmanın, gerçek boy ile değişim grafiği verilmiştir.

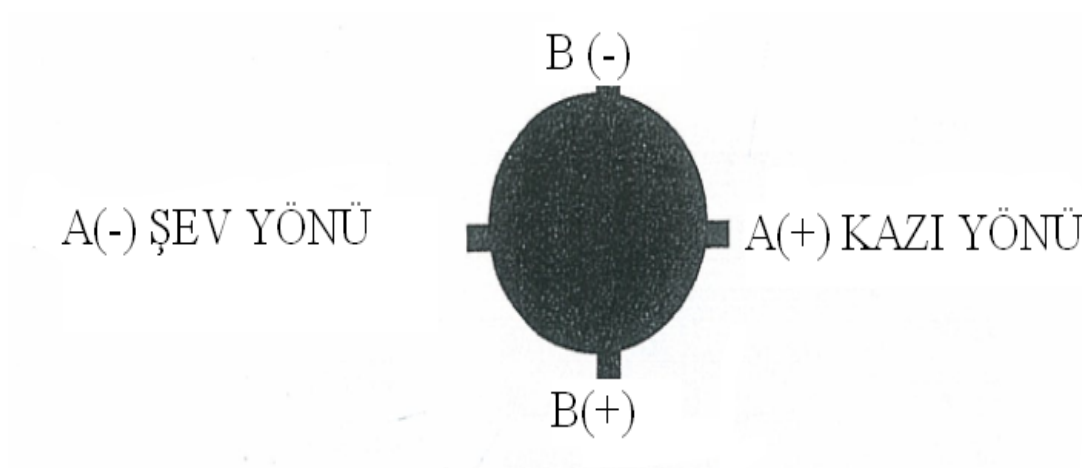


Şekil 5.16 : Deplasmanın, gerçek boy ile değişim grafiği

Cihazın yerleştirilmesine ait raporda;

- Sondaj derinliklerini, çaplarını, herbir kılavuz tüpün halkasından alınan kotları ve inceleme noktalarını gösteren bir sondaj yerleşim planına,
- Herbir sondaja ait zeminin jeoteknik karakterlerini, kılavuz tüpü içindeki sondanın ölçüm yerlerini gösteren bir diyagrama,

Şekil 5.17’de sondanın ölçüm yönleri gösterilmiştir.

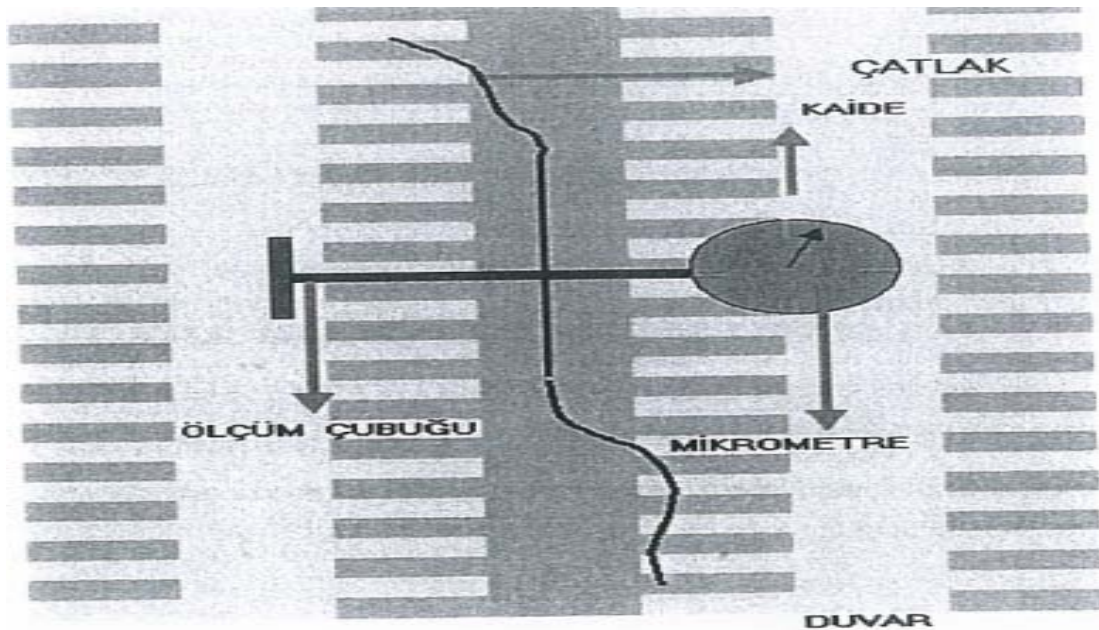


Şekil 5.17 : Kılavuz tüpü içindeki sondanın ölçüm yönleri

- Tüm önemli deplasmanların yerlerinin, büyüklüklerinin açık olarak belirtilmesi için deplasman – derinlik ve deplasman- zaman grafiklerine ihtiyaç duyulur.

5.1.5 Çatlak ölçerler

Metro inşaatı güzergahı üzerinde bulunan yapılarda olası gelişebilecek oturma ve deformasyonlar sonucunda bu yapılarda fisürler gelişebilir. Bu tür deformasyonların kontrolü ve ölçümü için deformasyon hatları üzerine tek eksenli, iki eksenli, üç eksenli çatlakölçerler yerleştirilecektir. Olası deformasyonlar bu aletler yardımıyla 0,01 mm hassasiyetle ölçülecek, meydana gelebilecek hasarlar önlenecektir. Tünel inşaatı sırasında yüzeyde bulunan yapılarda zaman zaman oturmalara bağlı olarak çatlaklar meydana gelebilir. Bu çatlaklar enine, boyuna ve diyagonal olarak gelişebilirler. Oluşan çatlaklar taşıyıcı sistemin üzerinde değilse, yani kolon ve kirişlerde ya da bunların bağlantısında çok büyük risk taşımazlar. Kolon ve kiriş bağlantılarında meydana gelen ve derinlik ihtiva eden çatlaklar önemlidir, çok dikkatli takip edilmeleri gerekir. Binalarda meydana gelen çatlaklar, çatlakölçerler vasıtasıyla takip edilirler. Bu cihazların değişik tipleri mevcuttur. Tek eksenli çalışanlar, üç eksenli çalışanlar veya elektronik ölçerliler kullanılırlar. Montajı yapılan cihazlar kalibre edilerek ilk okuma alınır, daha sonraki okumalar ilk okumadan çıkarılarak, çatlağın gelişme hızı ve miktarı bulunur. Binadaki çatlakların gelişme hızı periyodik bir artış gösteriyorsa ve bu binada reflektör de bulunuyorsa binanın eğilme hızı da buna paralel artıyorsa binada riskler artıyordur. Bu risklerin artmasıyla bina tahliye edilir. Şekil 5.18’de çatlakölçer çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 5.18 : Çatlak ölçer çalışma prensibi

5.1.6 Diskli yük hücresi

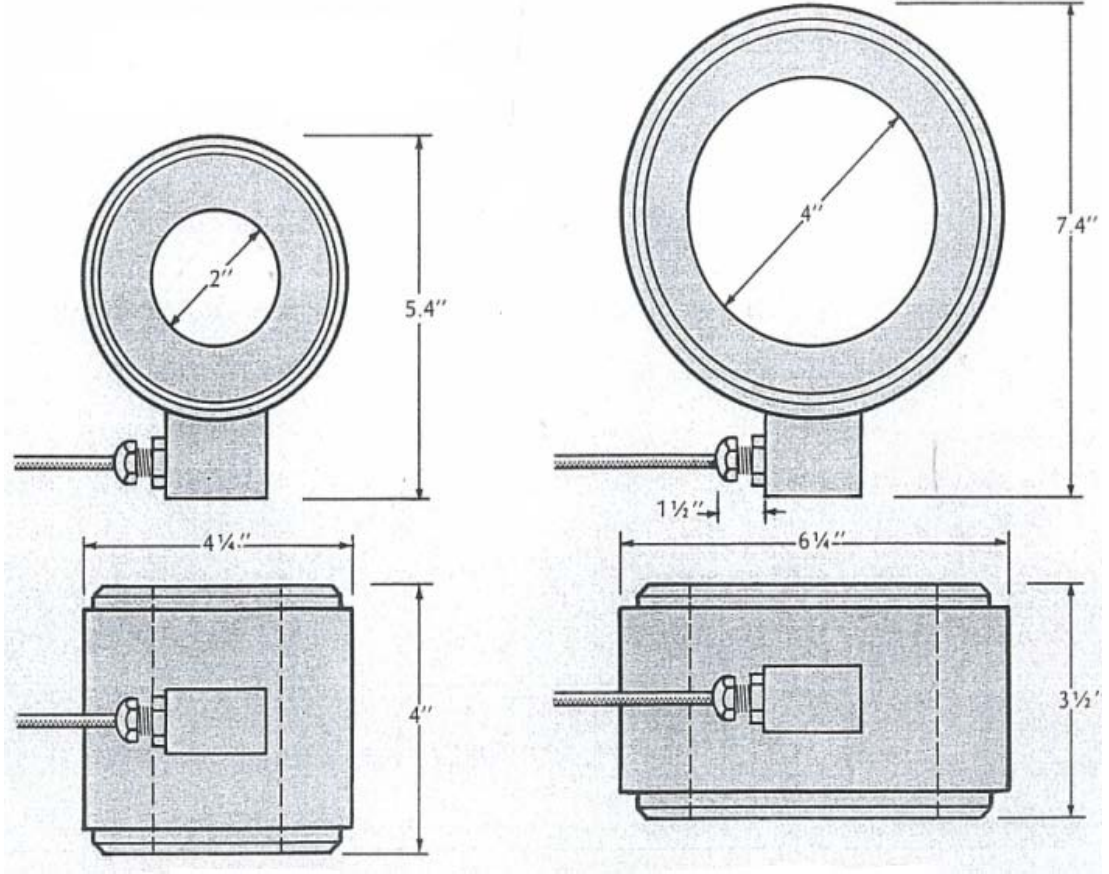
Öngerilmeli ankrajların işlevlerini kontrol etmek ve gerçek ankraj çekme kuvvetlerini görmek için kullanılan cihazlardır. Yük hücreleriyle, incelenecek iksa sisteminin 10 adedinde bir adet yük hücresi kullanmak yaygın bir görüştür. Montaj yapılan ve ölçümleri alınan yük hücresi, 10 adetlik ankrajı temsil eder. Yük hücreleri mekanik, fotoelastik, hidrolik tiplerde çeşitli hassasiyet ve özelliktedirler. Hücreler lineer olarak kalibre edilebilmeli ve yük transferi ve ölçüm için dairesel bir desteğe sahip olmalıdır. Ayrıca bu yük hücreleri patlama etkisine, suya ve toza karşı dayanıklı olmalıdır. Montaj yapılan hücre daha sonra koruma altına alınarak, yük hücresinin darbelerden ve dış etkilerden de etkilenmemesi için muhafaza altında tutulmalıdır.

Kullanılan bütün geoteknik aletler gibi hücrelerinde kalibrasyonu yapılmalıdır. Kalibrasyon mümkün ise ankraj germe aletinin kalibrasyonunu yapan cihaz ile kalibre edilmelidir. Kalibrasyondan doğacak sapmaların hata paylarının aynı olması için bu gereklidir.

Montajı yapılacak yük hücresi, ankrajın servis yükünden 1,25 kat daha fazla yük almalıdır. Bu fark ankrajın yüklenme payı olarak yük hücresinde de bulunmalıdır. Montaj sırasında şu hususlara dikkat edilmelidir;

- Montaj yapılacak yük hücresi germe aletinin kalibre edildiği laboratuarda kalibre edilmelidir.
- Yük hücresinin kapasitesi ankraj servis yükünün 1,25 katı olmalıdır.
- Ankraj, yük hücresi, ankraj kafası, gripler, yük hücresi delikleri ile çelik halat çapları birbirine uygun olmalıdır.
- Yük hücresinin dayanacağı yüzey pürüzsüz, düzgün ve temiz olmalıdır.
- Ankraj test yüklemesi ile yük hücresinin testi aynı anda yapılmalıdır.
- Germe aletinin test değerleri ile yük hücresinin test değerleri aynı anda test edilerek not edilmelidir.
- Ankrajın gerilmesi ve kilitlenmesi sırasında alınan değerler ve yük hücresi okumaları kaydedilmeli, sapmalar var ise bunlar not edilmelidir. Alınan son değerler ankrajın germe değeri olarak kabul edilmelidir.

Yük hücresi montajı yapıldıktan sonra alınan değerler ilk okuma olarak baz alınır. Bundan böyle periyodik olarak okumalar alınarak, ankrajın serviste iken durumu analiz edilir. Şekil 5.19’da diskli yük hücresinin kesit ve ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 5.19 : Diskli yük hücresinin kesit ve ölçüleri

Çizelge 5.1’de germe aleti okumalarına karşılık gelen yük hücresi okumaları verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Germe aleti ve yük hücresi okumaları

Germe aleti okumaları	Yük hücresi okumaları
0	0
35	29
65	60
105	92
315	280
415	385 Bar (kilitleme)

Burada gerçek germe kuvvetini bulmak için hesaplama şöyle yapılır;

Manometre değeri x Hücre efektif alanı = Ankraj germe kuvveti

$385 \times 156 = 60060$ Kg germe veya çekme kuvveti demektir.

Periyodik okumalardan alınan sonuçlar germe kuvvetinin üzerine çıkıyorsa, mesela yukarıdaki hesaplama baz alınarak;

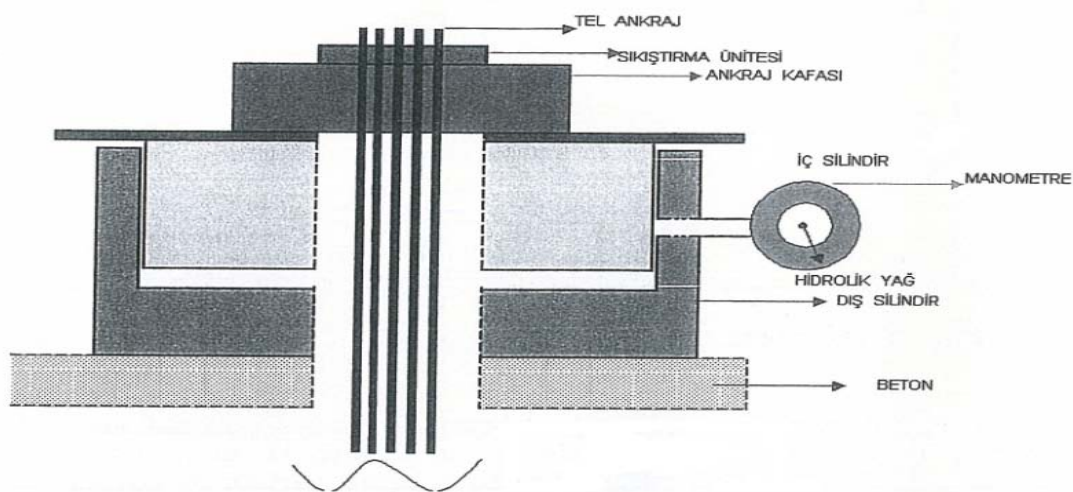
P = 63545 kg için

- Isı düşüyor ise ankraj boyu kısaldığı için ankraj çekiyordur.
- Duvar harekete geçmiş olabilir.
- Zeminden duvara baskı vardır. Zemin harekete geçmiş veya ankraj sayıları, boyları ya da germe kuvvetleri duvarı taşıyor olabilir.

P = 57420 kg için

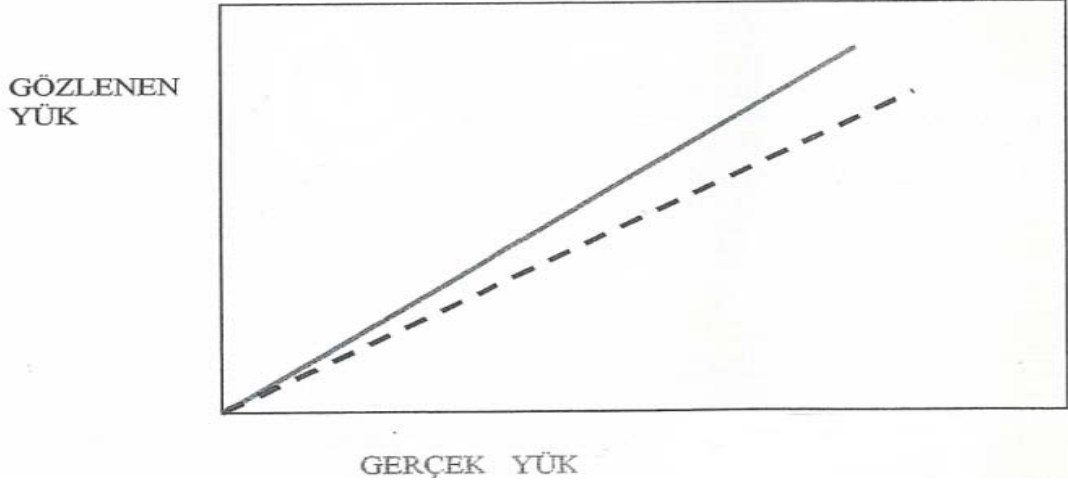
- Ankraj sıyrılıyordur.
- Ankraj kök bölgesi yeterli uzunlukta olmadığı için ankraj sıyrılıyordur.
- Hücre, kafa, gripler iyi yerleştirilmemiştir. Bu nedenle halat kaçırıyordur.
- Isı artmış, halat boyu uzamıştır. Bu nedenle yük kaybı oluşmuştur.
- Halat yeterli standartlarda değildir. Elastikiyetini kaybettiği için kalıcı deformasyon meydana geliyordur. Bu nedenle halatta yük kaybı oluşuyordur.

Şekil 5.20’de diskli yük hücresi çalışma prensibi gösterilmiştir.



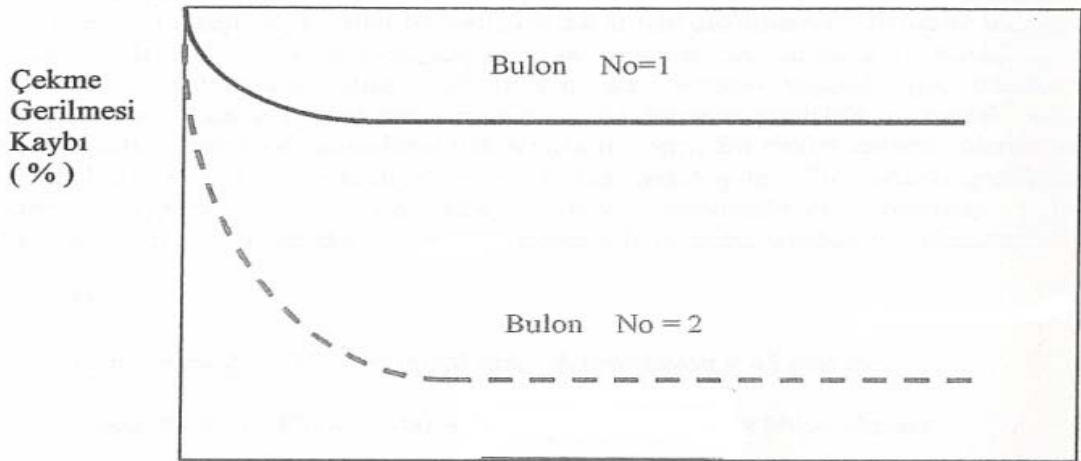
Şekil 5.20 : Diskli yük hücresi çalışma sistemi

Bir yük hücresinde gerçek yük ile gözlemsel olarak okunan yükler arasında meydana gelen farklılıklar grafikten anlaşılmaktadır. Kalibrasyon yapılan yük hücresinin arazi kayıpları bu farklılığı ortaya çıkarmaktadır. Şekil 5.21’de yük hücresinin laboratuvar ve saha sonuç farklılıkları gösterilmiştir.



Şekil 5.21 : Yük hücresinin laboratuvar ve saha sonuçları

Bulonlarda zamanla çekme gerilmeleri kaybı meydana gelmektedir. Gerilme kayıpları grafikte görülebilmektedir. Şekil 5.22’de bulon öngerme yükünün zamanla kaybı gösterilmiştir.



Şekil 5.22 : Bulon öngerme yükünün zamanla kaybı

Sonuç olarak yük hücreleri ankrajlarda meydana gelebilecek dinamik değişikliklerin habercisi olarak kullanılmalıdır. Değişimler sürekli izlenerek iksalı perde ve ankrajlarda oluşabilecek deformasyon ve hasarlar önceden tahmin edilerek gerekli tedbirlerin alınması önem kazanır.

5.1.7 Nivelman ölçümleri (Optik ölçümler)

NATM metodu, kazı esnasında oluşacak deformasyonların düzgün aralıklarla kaydedilmesi ve bu deformasyonların ölçümü ve değerlendirilmesi esasına dayanır. Optik ölçümlerde bu kapsam içinde alınır ve değerlendirilir. Optik ya da nivelman ölçümlerinden gerek tünel hattının geçtiği yüzeyde, gerekse de bu hattın üzerinde bulunan binalarda oluşabilecek deplasmanları ölçmede yararlanılır.

Nivelman ölçümleri;

- Bina nivelman
- Yüzey oturma
- Reflektör ölçümleri
- Duvar nivelman ölçümleri
- Tünel içi optik ölçümleri şeklindedir.

5.1.7.1 Bina nivelman ölçümleri

Tünel inşaatı üzerine isabet eden yapıların altına gelmeden en az 30 m. önceden başlayarak 30 m. geçinceye kadar periyodik olarak alınan ölçümlerdir. Ölçümler hassas bir nivo yardımı ile daha önceden tesis edilmiş bir röper noktası esas alınarak ve sürekli olarak aynı röper noktası kullanılarak alınır. Alınan ölçümler binanın yapısı da göz önüne alınarak değerlendirilir. Binadaki deplasmanın miktarı ile binanın genişliği arasındaki orantının sonucu binada oluşabilecek hasarların risk sınırını verir. Bu riskler zararsız olarak belirtilen sınırdan başlayıp yıkım ve tahliye seçeneklerine kadar gider. Bu durumu grafiksel olarak gösteren diyagram şekilde verilmiştir. Burada y eksenini deformasyonun bina uzunluğuna oranını, x eksenini de hasar yüzdesini göstermektedir.

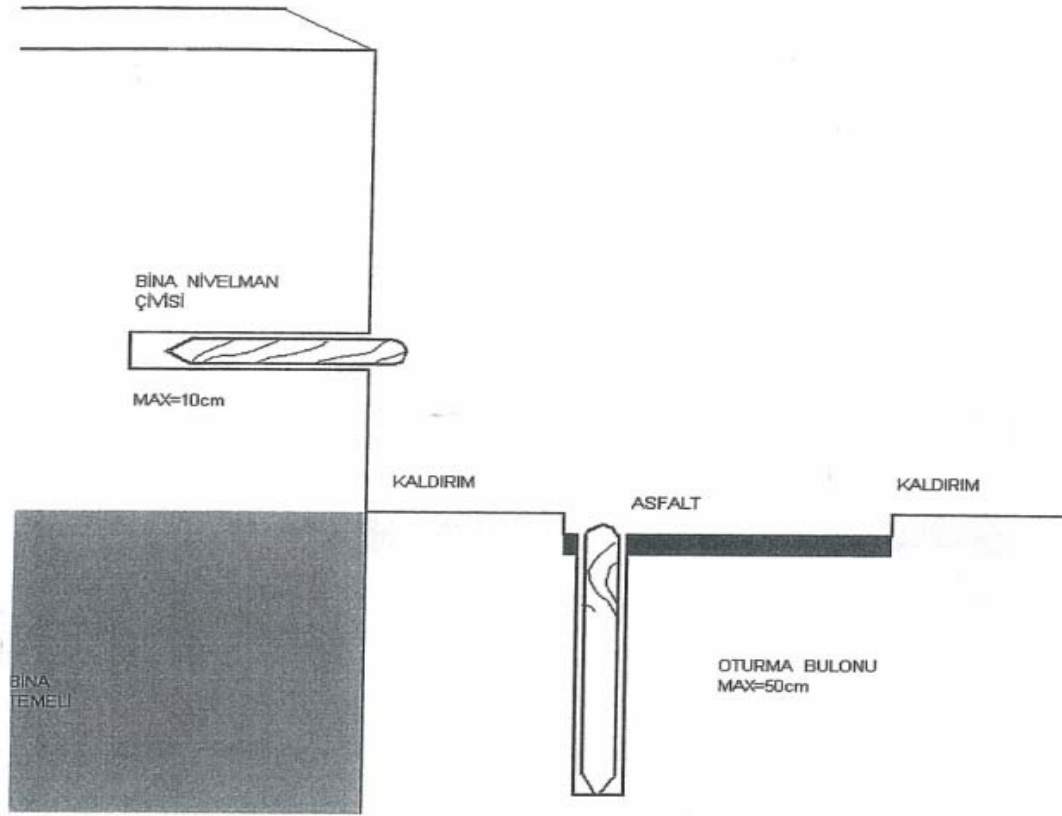
Örneğin;

Bina uzunluğu = 35 m = 35000 mm, deformasyon = 45 mm ise

Hasar (%) $45/35000 \times 100 = 13$ olup grafikten hasarsız bölge okunur.

Şekil 5.23'te bina hasar yüzdesi ve hasar miktarı grafiği verilmiştir.

Şekil 5.24'te bina nivelman sistematığı gösterilmiştir.



Şekil 5.24 : Bina nivelman sistematığı

5.1.7.2 Yüzey oturma ölçümleri

Yüzey oturmaları zeminde kazıdan dolayı meydana gelen oturmalarla ilişkilidir. Yeraltında yaratılan boşluğa doğru tabakaların yerçekim etkisiyle eğilmesi ve bu nedenle yeryüzünde deplasmanların oluşmasıdır. Çok hassas nivolarla önceden tesis edilmiş sabit noktalardan ölçümler alınır ve değerlendirilir.

5.1.7.3 Reflektör ölçümleri

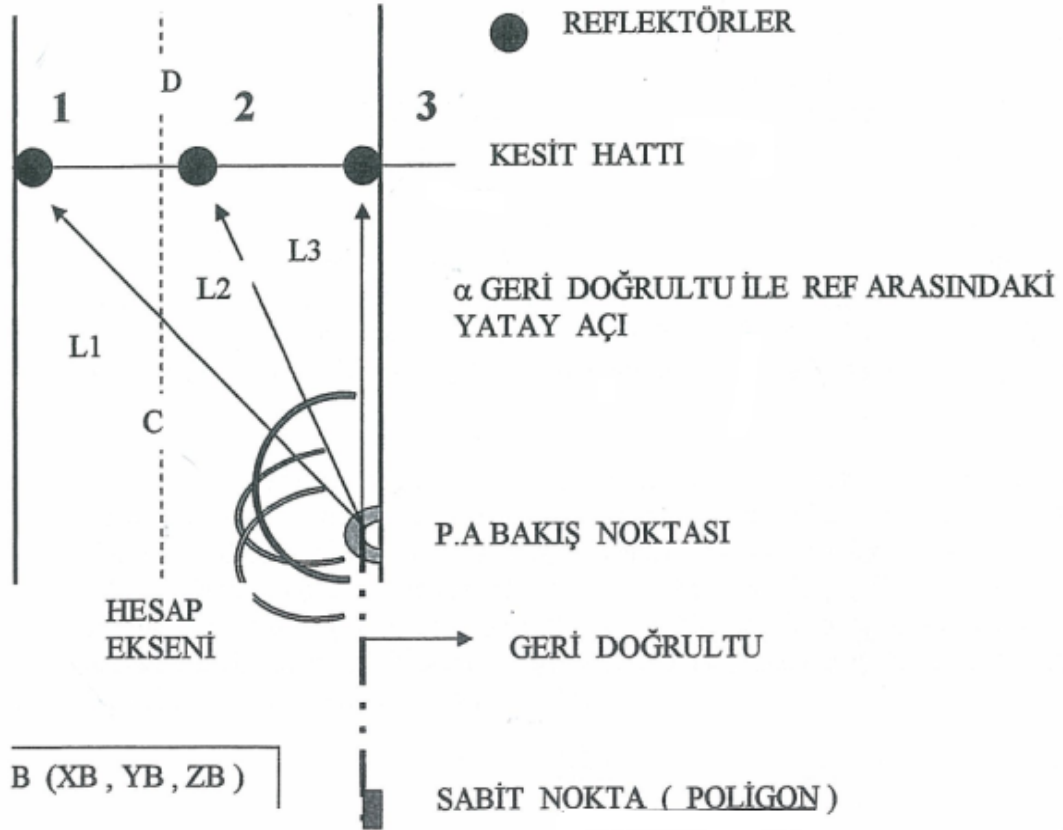
Yüksek bina ya da diğer yapılarda oturmalarla ilişkilidir. Yapıların çatılarına veya en yüksek noktalarına konan prizmalar yardımı ile teodolitlerle açı ölçülmesi ile hesaplanır ve değerlendirilir.

5.1.7.4 Duvar nivelman ölçümleri

Ankrajlı perde duvarlarının üzerine tesis edilen sabit noktalardan nivelman yapılmak suretiyle ölçülürler.

5.1.7.5 Tünel içi optik ölçümler

Tünel içinde konverjans okunan, ölçülen noktalardan nivelman yapılmasıdır. Burada amaç tünelde meydana gelen deformasyonların koordinatlı okunarak deformasyonların nerden geldiğinin bulunmasıdır. Şekil 5.25'te optik ölçümlerin analitik gösterimi verilmiştir.



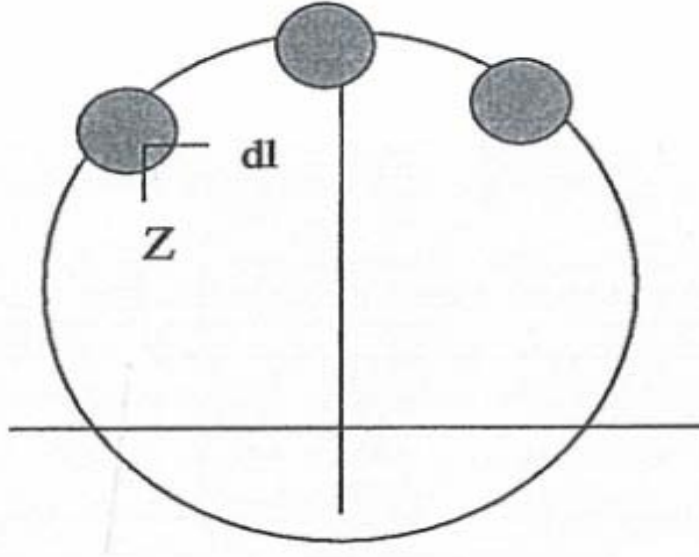
Şekil 5.25 : Optik ölçümlerin analitik gösterimi

PA noktasındaki koordinatları bilinen PB noktasına yapılan geri doğrultu okuması ve reflektörlerle yapılan α açısı okumaları (yatay -düşey) ve mesafe (L), ölçüm değerleri kullanılarak reflektörlerin koordinatları hesaplanır. Bu noktalardan hesap eksenine göre hesaplanacak olan $d1$ değeri, reflektörlerin hesap ekseninden ne kadar yatayda ve düşeyde olduğunu verecektir. Ayrıca her reflektörün Z kotu, mesafe ve düşey açı okumaları yardımı ile hesaplanır. İlk ölçümler esas alınarak tekrarlanacak ölçümlere göre hesaplanan $d1_n$ ve Z_n değerlerinin farkından;

Yatay deformasyon $d = d1_n - d1_0$

Düşey deformasyon $h = Z_n - Z_0$ belirlenir.

Şekil 5.26’da hesap eksen kesiti gösterilmiştir.



Şekil 5.26 : Reflektör hesap eksen kesiti

5.2 Aletlerin Hassasiyetleri

1) İnklinometre

Eğilme açısı : +/- 30°

Hassasiyet : +/- 0,005 mm / 500 mm

Kılavuz çarklar aralığı: 500 mm

Sondanın toplam boyu: 700 mm

2) Gerilme ölçerler

Çalışma sıcaklığı : -20 C° / + 80 C°

Ölçme hassasiyeti : 0,00005 m/m

Okuma : Doğrudan okuma için rakamsal gösterge

Kalibrasyon hatası: % 0,002 (+,-)

3) Çatlak ölçerler

0,01 mm okuma hassasiyetli derinlik mikrometreleri

4) Diskli yük hücreleri

Yük sınırları : 250-1000 KN

Ölçme doğruluğu: +/- %2

Ankraj delik çapı: 35-100 mm

Okuma : 0,01 hassasiyetli doğrudan okunan manometre

5) Basınç hücreleri

- Radyal tip basınç hücreleri

En düşük 50 kg/cm² ve ölçme hassasiyeti 0,05 kg/cm²

- Teğetsel tip basınç hücreleri

En düşük 200 kg/cm² ve ölçme hassasiyeti 0,05 kg/cm²

6) Uzama ölçerler

0,01 mm hassasiyetli doğrudan okumalı derinlik mikrometreleri

7) Optik ölçümler

Ölçme hassasiyeti 0,3 mm ile 1,0 mm arasında olan nivolar ile yapılır.

Ayrıca, kullanılan tüm metal aksamli ölçme aparatları aşınma ve korozyona karşı korumalı olmalıdır.

6. NATM'DE İSTASYON, TÜNEL İNŞAATLARI VE DESTEKLEME ELEMANLARININ İNCELENMESİ

1950' lerden sonra, yer altı kazılarının ve tünel açımının artması güvenli ve ucuz tünel açma yöntemlerinin de ortaya çıkmasına neden olmuştur. Tünel açma tekniğine çok eskiden beri öncülük eden Avusturyalı bilginler, Stini (1950), Rabcewicz (1965), Müller (1978) tarafından tünel açma yöntemleri geliştirilmiş ve Rabcewicz (1965) buna Yeni Avusturya Tünel Yapım Yöntemi adını vermiştir. Bu yöntem özellikle 70' li yıllarda Müller ve öğrencileri tarafından daha da geliştirilmiştir [13].

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin özünde kazı sonrası oluşacak deformasyonun bir kısmının ana kayaya, bir kısmının ise tahkimat elemanına taahhüt edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu tünel açma yönteminde ana ilke; en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemlerinin seçilerek kazı sonrasında oluşan ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendisini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturmasını sağlamaktadır.

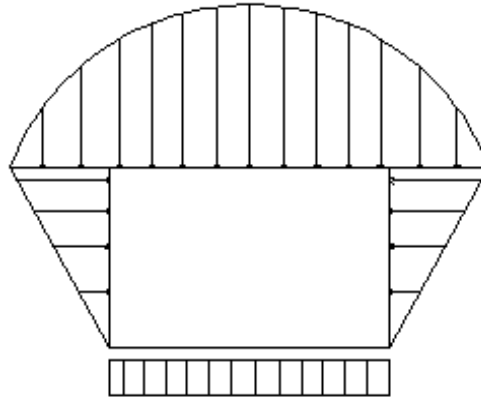
Yöntemin amacı, kazı sonrasında oluşan dağ basıncına, mutlak rijit sistemlerin tepkime kuvvetleri ile karşı koymak değildir. Bu nedenle, rijit tahkimat elemanları ve kalın kaplamalar kullanmak istenmez. Bunlar ancak, yöntemin yeterli hız ve titizlikle uygulanamadığı ve dolayısıyla, kayanın taşıma niteliklerinin tümüyle yitirildiği veya aşırı derinliklerdeki, ya da yüksek tektonik gerilmelerin etkili olduğu plastik ortamlarda zorunlu olarak devreye girer. Açım sırasında ikincil deformasyon ve gerilmelerin yeterli ölçüm ve gözlemlerle izlenerek açım çalışmalarının denetlenmesi ve yönlendirilmesi gerekmektedir.

Metro tünellerinde kazı, hidrolik darbeli kırıcı makineler vasıtasıyla yapılmaktadır. Tünellerdeki kazı yöntemleri ve kullanılacak ekipman seçimi tümüyle bazı parametrelerle ilgilidir. Bunların başında, formasyonun jeomekanik özellikleri, tünel kesit tipi, maliyet değişimleri ve istenen hızın yakalanabilmesi gelir. Üretim hızı direkt olarak maliyeti de etkiler. Örneğin mekanize kazı sisteminin, delme-patlatma

yöntemine kıyasla birtakım avantajları vardır. Bunlar formasyonun kırılıp çatlama oranının daha az olması ve buna bağlı tahkimat masrafının önemli miktarda düşmesidir [4].

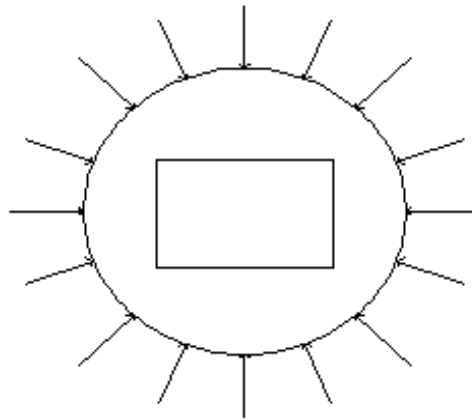
NATM, yeni bir tünel açma metodu değildir. Tünel inşaatının her aşamasında göz önünde bulundurulması gereken bir felsefedir. Diğer yöntemlere göre kazı kısmında değil, destekleme ve kabuk kısmında bir değişiklik söz konusudur [16]. Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te klasik yöntem ve NATM ile açılan tüneller üzerine etkiyen yükler gösterilmiştir.

- Kemerleşme eğrisinde ve kenar ayaklarda belirlenen çizgiler dışında zemine (tünel duvarlarına) yük gelmez.



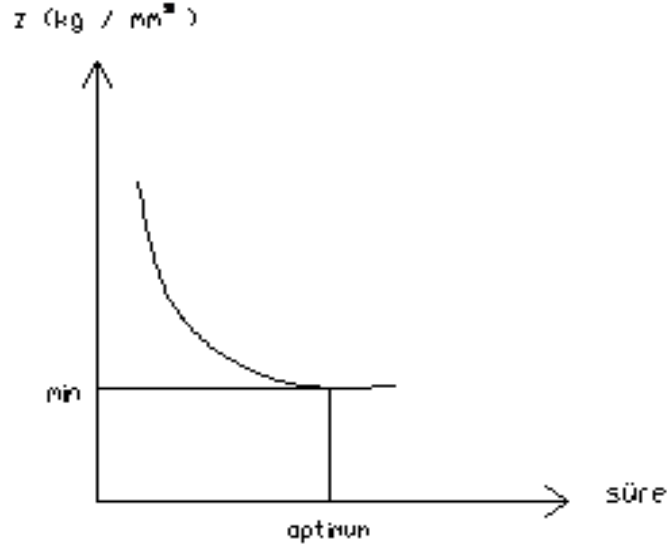
Şekil 6.1 : Klasik tünelcilik yöntemlerindeki yük dağılım diyagramı

- Koruyucu zon ve tünel, zemin yüküne birlikte karşı koyarlar. Koruyucu zondan tünele yük gelmediği kabul edilir.



Şekil 6.2 : NATM'deki yük dağılım diyagramı

- Zemin yükü dinamik bir yüküdür. Kazıya başladığımızda zemin yükü maksimum durumdadır. Kazı ilerledikçe, zemin yükü deplasmanların artması nedeniyle belirli bir değere kadar azalır.



Şekil 6.3 : Zemin dinamik yükünün zamanla değişim grafiği

6.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin ilkeleri

- 1) Yer altı yapısının ana malzemesi, dağın kendisidir. Tünelin esas taşıyıcı kısmı, boşluğu çevreleyen ana kayadır.
- 2) Kayanın başlangıçtaki sağlamlığı korunmalıdır. Bu nedenle uyulması gereken baş ilke, kayacın ilkel (primer) dayanımlılığını korumaya çalışmaktır.
- 3) Gevşemeler önlenmelidir. Gevşemelerin olabildiğince önüne geçilmelidir, çünkü gevşemeler kayanın taşıma direncini azaltırlar.
- 4) Tek ve iki eksenli gerilme ortamından kaçınılmalıdır. Bu tür gerilmelerin etkisinde bulunan kayaların taşıma direnci düşmektedir.
- 5) Ön deney ve ölçümler yapılmalıdır. Zaman faktörünün ve kayanın kazı sonrasındaki deformasyon davranışının önceden belirlenebilmesi için laboratuvarlarda ve arazide deneylerin yapılması ve deneme galerisinde konverjans ve deformasyon ölçülmesi zorunludur. Bilindiği gibi, boşluğun kendini tutma süresi, deformasyon hızı ve kaya kalitesi yer altı kaya mekaniğinde de projelendirme için gerekli olan en önemli etmenler arasındadır.

6) Koruyucu zon, kayacın taşıma direnci azaltılmaksızın oluşturulmalıdır. Kazı sonrasında oluşan deformasyonlar, koruyucu zonun oluşmasına yeterli olacak, fakat kayacın aşınarak, gevşeyerek taşıma direncinin düşmesine neden olmayacak şekilde denetlenmeli ve yönlendirilmelidir. Bu alanda başarılı olunduğu ölçüde, güvenlik ve ekonomiklik artar.

7) Sağlamaştırma işlemleri tam zamanında ve gerekli esneklikte yapılmalıdır. Bunu sağlamak için sağlamaştırma işlemlerine ne çok erken, ne de çok geç başlanmalı ve iksa direncini oluşturan yapının ne çok rijit ne de çok zayıf olmamasına özen gösterilmelidir.

8) Özgül zaman faktörü (kayacın kendini tutma süresi) doğru olarak tahmin edilmelidir. Bu nedenle, kayanın ve özellikle kaya sağlamaştırmanın birlikte zamana bağlı kırılma davranışlarını belirleyen özgül zaman faktörleri doğru olarak saptanmalıdır.

9) Sağlamaştırma kuvvetleri bağlayıcı türde (püskürtme beton) olmalıdır.

10) Sağlamaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde olmalıdır. Geçici ve kalıcı sağlamaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde ve bükülebilir esneklikte olmalıdır. Böylelikle, kabuk içinde eğilme momentlerinin oluşması ve bunların meydana getireceği çekme ve kesme kırıkları önlenebilecektir.

11) Sağlamaştırma çelik hasır, ankraj ve çelik bağlarla yapılmalıdır.

12) Sağlamaştırma zamanı ve araçları ölçümlerle saptanmalıdır.

13) Tünel, statik bakımdan taşıyıcı zon ile sağlamaştırma kabuğunun oluşturduğu bir halkadır. Modern anlamda tüneller dairesel kesitli yapılardır. Dağın içinde, boşluk gerisinde oluşturulan gerilme halkası (taşıyıcı zon) ile boşluk duvarına yapıştırılan sağlamaştırma kabuğu birlikte çalışan bir halka oluştururlar. Statik bakımdan tünel duraylılık araştırmalarında iki boyutlu bir çember, üç boyutta ise bir tüptür.

14) Sağlamaştırma kabuğu kapalı halka şeklinde olmalıdır. Bir çemberin statik bakımdan tam taşıyabilir duruma gelebilmesi için halkaların kapanması zorunludur. Yay veya çentikli, derzli halka statik bakımdan çembere kıyasla duraysızdır. Bu bakımdan kalot (üst), sağ ve sol yan kazı ve sağlamaştırmalarından sonra taban kazısı bitirilmeli ve sağlamaştırma kaplaması bir halka şeklinde boşluk duvarına yapışmalıdır. Anlaşılabacağı gibi bu durum en iyi biçimde ancak tam kesit kazılan

izleyen çember şeklindeki sağlamlaştırma kabuklarıyla elde edilebilir. Ancak taban kayacın taşıma özelliklerinin iyi olduğu durumlarda tabanın sağlamlaştırılması ve sağlamlaştırma yayının bir halkaya tamamlanması gerekmeyebilir.

15) Halka en kısa zamanda oluşturulmalıdır. Tam kapanmış bir çember taşıyıcı halka durumunda olmadığı için, gevşemeleri arttıran ve boşluğu çevreleyen kayaları plastikleştirerek onun taşıma direncini düşüren bir etken olmaktadır. Kaya içindeki deformasyonların ve elastik zon oluşumlarının zamanın bir fonksiyonu olduğu göz önüne alınacak olursa, sağlamlaştırma yayını en kısa zamanda halka şeklinde kapatmak çok olumlu sonuçlar verecektir.

16) Tünel üstü örtüsü olabildiğince az kurcalanmalıdır. Boşluğun açılması ilkel gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilme dağılımı oluşturmaktadır. Boşluğun biçimini ve boyutunu değiştirmeye yönelik her yeni kazı bir kez daha gerilmelerin yönünün, şiddetinin ve yerinin değişmesine neden olacak ve böylece kaya dokusu giderek gevşeyecek ve kayanın taşıma direnci azalacaktır. Gerilmelerin boşalması sırasında kaçınılmaz olan boşluk içine yönelik deformasyonlar süresizlik yüzeylerini açmakta, relatif ötelenmelerle kayanın dokusu örselenmektedir. Bu durum kayanın daha fazla su getirmesi ve çatlakların mekanik davranışlarının değişmesi bakımından önem taşımaktadır.

17) Tünel açma yöntemi yapının güvenliği açısından önemlidir. Tünel açma yönteminin uygulanış biçimi yer altı kaya yapısının duraylılığı (stabilitesi) ve kayanın zamana bağlı davranışını doğrudan doğruya etkilediği için büyük önem taşımaktadır. Yöntemler uygulanış biçimlerine göre organizasyon ve zamanlamada büyük farklılıklar oluştururlar. Bu bakımdan arın (kazı) anosunun uzunlukları, atım derinlikleri, sağlamlaştırmanın gerçekleşme süresi tabanın kapanması, sağlamlaştırma direncinin sağlanması yer altı yapılarının güvenliğinde büyük ölçüde etkilidir.

18) Yuvarlatılmış boşluk profilleri kullanılmalıdır. Yer altı boşluğunun en kesiti daire veya elips şeklinde olmalı, çıkıntı, çentik ve köşeler bulunmamalıdır.

19) İç kabuk ince olmalı ve dış kabuk ile sürtünmesiz fakat sıkı bağlı olmalıdır. İki kabuklu sağlamlaştırmalarda istenmeyen eğilme momentlerinin oluşmaması için iç kabuk da ince olmalıdır. Ancak dış kabuktan gelebilecek olan yüklerin kesmeye

çalışmaması için, dış kabuğa sürtünmesiz bir şekilde ve tam yüzeyiyle sıkıca oturması sağlanmalıdır.

20) Ön (Geçici) sağlamlaştırma işlemleriyle yapının stabilitesi sağlanmış olmalıdır.

21) Yapım süresi içinde yönlendirme ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır.

22) Drenajla dağdan kabuğa iletilen su basıncı boşaltılmalıdır.

6.2 Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Uygulanmasında Başlıca Görüşler

Tünel çevresinde oluşan ikincil gerilme şiddeti, tünelin duraylılığını (stabilitesini) belirleyen ana etmendir.

Yeni Avusturya yönteminin uygulanması sırasında iki farklı görüşten yararlanmak mümkündür. Bunlar:

1.Yüzey oturmalarını ve tünel içi deformasyonlarını (konverjans'ı) olabildiğince küçük tutabilmek için "deformasyon önleyici" açım.

2.Deformasyonlara olanak tanıyarak dağ içinde koruyucu zon oluşumunu sağlayan "plastikleştirici" açım türleridir.

Birinci görüş; kazı ve sağlamlaştırma işlemlerinin çok hızlı yürütülmesini ve en kısa zamanda kazının hemen gerisinde (en fazla 15–30 m.) radyenin kapanmasını sağlayacak şekilde çok iyi organize edilmiş çalışmaları gerektirir. Düşük dayanımlı kayalarda, örtü kalınlığının 3–4 m.'den daha az olduğu, yerleşim bölgelerinin altından geçen tünellerde, tünellerin portallerinde ve girişten itibaren ilk 50–100 m.'lik kesimlerinde, metrolarda, kaplama arkasından su akımı olasılığı bulunan enerji tünelleri, cebri tüneller (şaftlar), denge bacaları, su alma yapıları, derivasyon tünelleri ve barajların enjeksiyon perdesi gerisindeki kontrol ve drenaj galerilerinde özellikle uygulanır.

Deformasyonları durdurmak için seçilen sağlamlaştırma kuvvetleri (ankrajlardaki ön gergi kuvvetleri) büyük, püskürtme beton kalitesi yüksek (C 20 ve daha fazla) çelik hasır dokusudur (< 10 cm.). Çelik iksa rijittir ve çoğunlukla yakın aralıklarla (< 100 cm.) yerleştirilir.

Uygulanan sağlamlaştırma önlemleri ve kullanılan duraylık süreleri için kabul edilen kaya kalitesi, gerçek durumdan en az bir kaya kalitesi sınıfı kadar daha düşüktür.

İkinci görüş; deformasyonları durdurmak yerinde, denetleyerek ikincil gerilmelerin şiddetini azaltmayı ve tüneli çevreleyen kesime psödoplastik özellikler kazandırarak, gerilme yoğunlaşmalarını dağın içine doğru kaydırmayı amaçlamaktadır. Böylece sağlamlaştırma giderlerinde önemli ölçüde azalma sağlanabilmektedir. Bu anlayışla açılan tünellerin üzerinde ve yüzeyinde önemli, fakat zararsız çökmeler ve tünel çapında büyük ölçüde azalmalar gözlenirse de, aşırı gevşemelere izin verilmediği için kaya dokusu yöntemin ilkelerine ters düşecek oranda bozulmaz. Sağlamlaştırma öğeleri ince ve sünektir. Püskürtme beton kalınlığı çoğunlukla 3–5 cm. ve kalitesi C 20'dir. Hasır dokusu gevşek (10–20 cm.) ve çelik bağlar eğilmeksizin çalışacak özelliktedir. Bağ aralıkları genellikle 1,5–3 m. arasında seçilir. Yöntem, örtü kalınlığının fazla, yüzey oturmalarının (tasman) önemsiz olduğu boş araziden geçen ve su sirkülasyonunun bulunmadığı yerlerdeki, özellikle demiryolu ve karayolu ulaşım tünellerinde başarıyla kullanılmaktadır.

Kuşkusuz; en doğru olan tünel anlayışı, yerine göre ilk veya ikinci görüşü ağırlıklı olarak kullanabilen anlayıştır. Buna karar verebilmek için deformasyonun hızlarının ve gerilme değişimlerinin ölçülmesi ve denetlenmesi kaçınılmazdır. Yeni Avusturya anlayışında bu nedenle, arazi deneyleri, ölçüm ve gözlemleri yöntemin en önemli belirteçleri arasında bulunmaktadır [4].

Bu bölümde istasyon ve tünel inşaatı olmak üzere iki bölüm yer almaktadır.

6.3 İstasyonlar

İstasyonlar kullanım amaçları ve inşa ediliş metotlarına göre üç tipe ayrılmışlardır:

A Tipi: İstasyon binası derin kazı çukurları içerisinde inşa edilip, daha sonra üzerleri doldurularak yeraltında kalacak şekilde tanımlanır. Yolcuların vagonlara bindiği peron bölümlerinin, tünel olarak inşa edildiği tiptir (IV.Levent İst.).

B Tipi: Tüm yapıların (istasyon-peron) aç-kapa olarak inşa edildiği tiptir(Levent İst.)

C Tipi: İstasyon yapıların yerüstünde olduğu tiptir (Darüşşafaka–Hacıosman İst.).

Darüşşafaka İstasyonu

Taban alanı : 8500 m²

Kat sayısı : 2

Otopark Durumu ve Araç Kapasitesi : 38 araç

Haciosman İstasyonu

Taban alanı : 8800 m²

Kat sayısı : 5

Otopark Durumu ve Araç Kapasitesi : 200 araç

6.4 Şaftlar ve Tüneller

6.4.1 Şaftlar

Şaftlar, tünellerin inşa edileceği kota erişebilmek için imal edilen düşey tünellerdir. Kesitleri elips şekilli olup, çapları genellikle uzun kenar doğrultusunda 12 m., kısa kenar doğrultusunda ise 9 m.'dir. Özel amaçlar nedeniyle (şaft 10) kesit genişlikleri 12,70 x 20 m. gibi olabilmektedir. Şekillerinin elips olmasının nedeni ise yanal toprak basıncına karşı etkili mukavemeti, dairesel kesite göre ekonomik oluşu, merdiven, tesisat gibi sistemlerin kurulması ve makine sevkiyatı nedeniyledir. Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te, Atatürk Oto Sanayi-Haciosman hattındaki 9 numaralı şaftın inşaat aşamaları verilmiştir.



Şekil 6.4 : Şaft bilezik betonu kalıbı



Şekil 6.5 : Şaft kazısı

III.etap kapsamında çalışma yapılan şaftlar :

Şaft 6,8,9,10,11,12 : Sanayi Mah. - İ.T.Ü - A.O.S.- Hacıosman Arası

Derinlikler :

Şaft 6 : 23,00 m.

Şaft 8 : 25,10 m.

Şaft 9 : 38,20 m.

Şaft 10 : 31,20 m.

Şaft 11 : 16,00 m.

Şaft 12 : 29,20 m.

Şaft 1,2,3,4,5,7 (IV.Levent - A.O.S. Arası) tamamlandı.

6.4.2 Tüneller

6.4.2.1 Tünel tipleri

İstanbul Metrosu Tünelleri gidiş-dönüş ve (Hat 1 ve Hat 2) iki ayrı hat olarak açılmakta olup; 6 ayrı karakterde tünel kesiti kullanılmaktadır. Bunlar, A (Ana Hat Tünelleri), P (Peron Tünelleri), T ,C (Makas Tünelleri) ve B1, B3 Tipi (Bağlantı Tünelleri) tünelleridir. Bu tünellerin ortalama kesit alanları aşağıda verilmiştir. Çizelge 6.1’de tünel tiplerinin boyutları verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Tünel tiplerinin boyutları

TÜNEL TİPİ		KAZI KESİT ALANI (m ²)	YÜKSEKLİK (m)	GENİŞLİK (m)
A		36,85	6,81	6,64
P		65,37	8,34	9,73
MAKAS	T	100,04	8,77	13,94
	C	76,87	7,85	11,72
BAĞLANTI	B1	43,21	7,14	7,41
	B3	44,60	7,26	7,53

A Tipi : Ana hat tünelleri,hatlar arası geçiş tünelleri

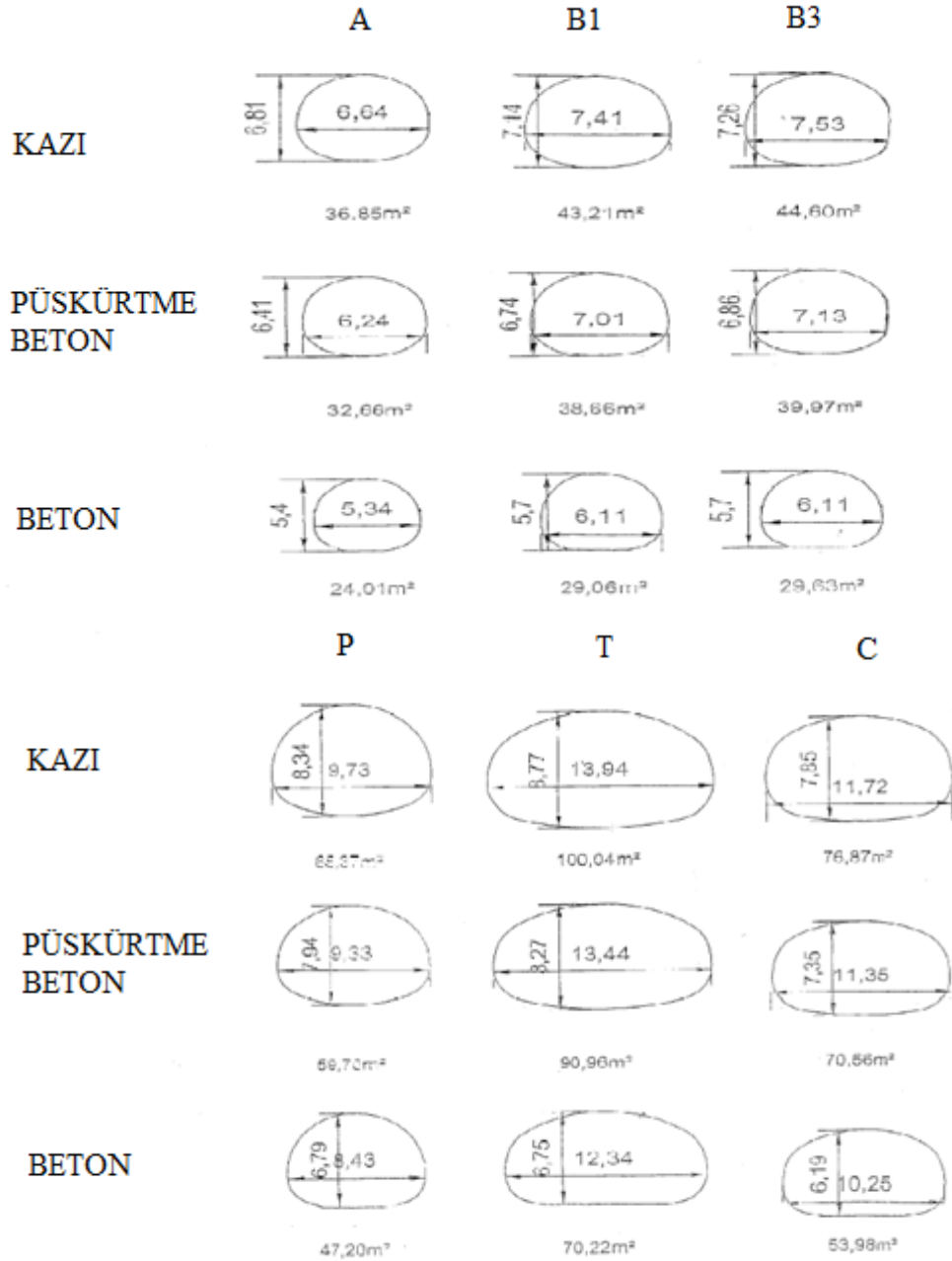
P Tipi : Peronlarındaki istasyon platform tünelleri

T,C Tipi : Makas bölgelerindeki tüneller

B₁ Tipi : İstasyon platform bağlantı veya geçiş tünelleri

B₃ Tipi : Merdiven tünelleri

Şekil 6.6’da tünel tiplerinin enkesitleri verilmiştir.



Şekil 6.6 : Tünel tiplerinin enkesitleri

6.4.2.2 Tünel kazı destek tipleri

Kazı yapılan kayanın stabilitesi, tünel üstündeki örtü kalınlığı, tünel güzergâhı üzerindeki yapıların veya yapılaşmanın niteliği ve projelendirme aşamasında tünel içindeki gerilmelerin özellikle yoğunlaştığı bölgeler; kazı destekleme tipinin belirlenmesindeki temel parametrelerdir.

Aynayı teşkil eden kayacın yapısal özellikleri, su ve fay durumu stabiliteyi belirler. Eğer stabilite düşükse, buna bağlı olarak destekleme artırılır. Aynı şekilde örtü kalınlığı da, kazı destek oranıyla ters orantılıdır. Tünel içi gerilmelerin yoğunlaşması

ve yüzey yapılaşmasının fazla olarak nitelenmesi ise kazı destekleme oranının arttırılması ile doğru orantılıdır. Çizelge 6.2’de destekleme tipleri ve elemanları verilmiştir.

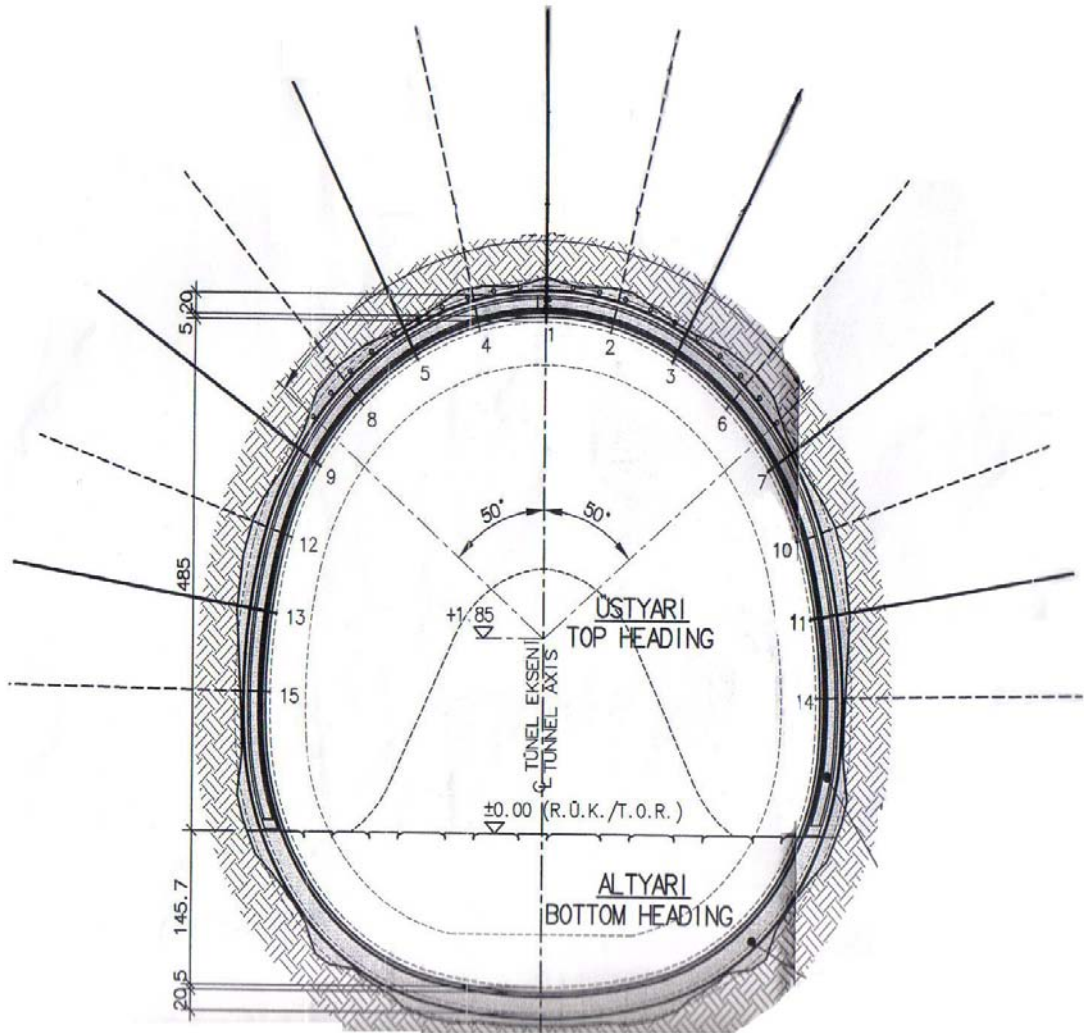
Çizelge 6.2 : Destekleme tipleri ve destekleme elemanları

A TİPİ TÜNEL	A1	A2	A3	A5
ORTAM	Sağlam Kaya	Orta-sağlam kaya	Zayıf kaya	Zayıf zemin, Yerleşim Bölgesi Geçişleri, Dolgu
LİTOLOJİ	Kireçtaşı, kumlu kireçtaşı	Grovak (Çamurtaşı, kalkerli çamurtaşı), ince kireçtaşı	Grovak (Çamurtaşı, kalkerli çamurtaşı), ince kireçtaşı, şeyll (silisli şeyll), yumrulu kireçtaşı, kumtaşı	Fay breşi, kaya unu, kil, çok parçalı kaya
ÇELİK İKSA (KAFES KİRİŞ)	-----	(Tip 136)	(Tip 136)	(Tip 174)
ÇELİK HASIR	TEK KAT (Q221/221)	TEK KAT (Q221/221)	ÇİFT KAT (Q221/221)	ÇİFT KAT (Q377/221)
PÜSKÜRTME BETON	10-15 cm.	20 cm.	20 cm.	25 cm.
KAYA BULONU	4-5 (şaşırtmalı) (3,00 m.)	6-7 (şaşırtmalı) (3,00 m.)	7-8 (şaşırtmalı) (4,00 m.)	6-6 (4,00 m.)
SÜRGÜ ÇUBUĞU	-----	(25 adet-4,00 m.)	(25 adet-4,00 m.)	-----
ŞEMSİYE BORUSU	-----	-----	-----	(27adet-9,00 m.)
AYNA/YANAL ZEMİN ÇİVİSİ	-----	-----	-----	(12adet-9,00 m.)
KAZI ADIMI	>1,50 m.	1,20-1,50 m.	1,00-1,20 m.	0,80 m.

Projede, en uzun tüneller ana hat (A tipi) tünelleri olup, genellikle A3 ve A5 kazı destekleme tipleri uygulandığından, sadece A tünel tipindeki bu desteklemeler anlatılacaktır.

A tipi tünel, A3 sisteminde kazı – destekleme yöntemi

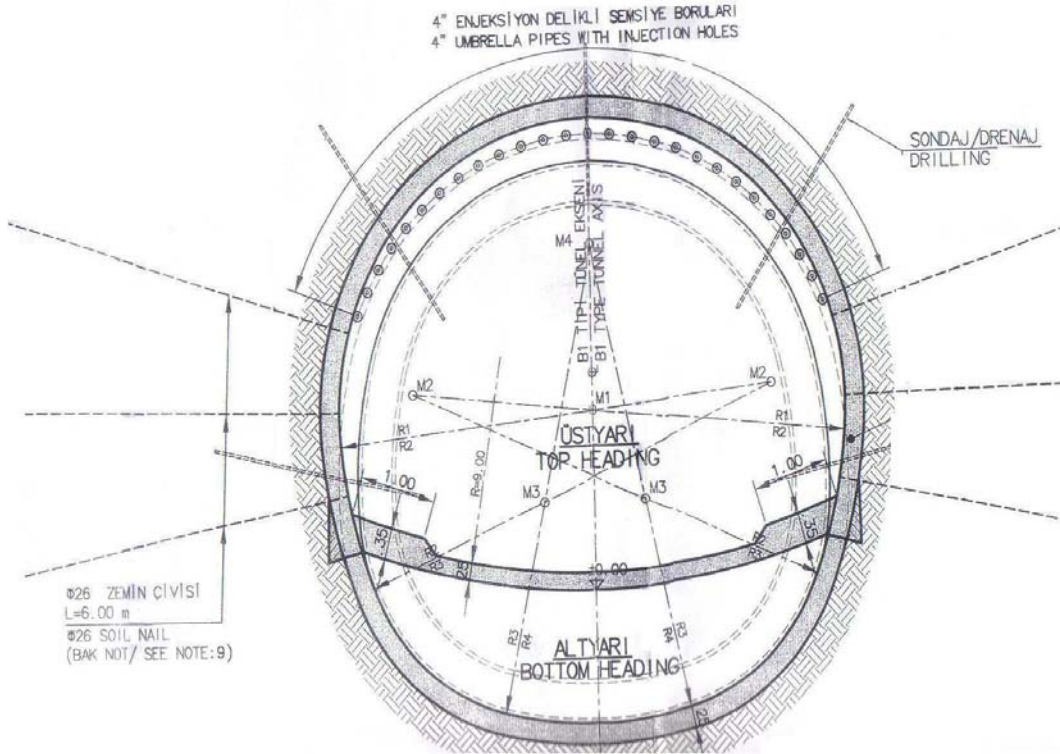
Duraylılığı düşük, zayıf kaya ortamını karakterize eder. Kazı adımı 1.00-1,20 m.'dir. Kazı sonrası çelik hasır ve çelik iksa montajı yapıp, kafes kiriş yüzeyi kapanacak şekilde p.beton atılır. Daha sonra tekrar kazı yapılır. Bir sonraki adımın çelik hasır ve iksa montajıyla birlikte bir önceki iksanın ikinci kat çelik hasır montajı yapılır. Tüm bu işlemlerden sonra ilk iksaya ikinci kat shotcrete atılarak gerekli kalınlık tamamlanır . İkinci iksaya ise kafes kiriş yüzeyine kadar shotcrete atılır ve işlem bu tarzda devam eder. Ana hat tünellerinde (A tipi) her iki iksada bir en fazla 25 adet süren çakılmasına müsaade edilir. Kaya bulonları ise şaşırtmalı 7-8 adet olarak çakılır. Tip 136 iksa (tek tip) ve Q 221/221 çelik hasır kullanılmaktadır. Şekil 6.7'de A tipi tünel A3 destekleme enkesit paftası verilmiştir.



Şekil 6.7 : A tipi tünel, A3 destekleme enkesit paftası

A tipi tünel, A5 sisteminde kazı – destekleme yöntemi

Örtü kalınlığının çok az olduğu durumlarda (tünel çapı D kabul edilirse, örtünün 1,5 D değerinden küçük olması), tünellere su gelmesi durumunda, fay zonu varlığında, dinamik yüklerin varlığında (yol altından geçen güzergah) ve zeminin taşıma kapasitesinin düşük olduğu, dolgu durumlarında A5 destek tipi uygulanır. Aynı şekilde yüzeydeki sanat yapıları ve binaların altından geçilirken A5 desteklemesine geçilir. Kazı adımı 0,80 m.'dir. Ana hat tünellerinde her altı iksada bir en fazla 27 adet şemsiye borusu çakılmasına müsaade edilir. Kaya bulonları ise 6 adet olarak çakılır. Tip 174 iksa (altı tip) ve Q 377/221 çelik hasır kullanılmaktadır. Şekil 6.8'de A tipi tünel A5 destekleme enkesit paftası verilmiştir.



Şekil 6.8 : A tipi tünel, A5 destekleme enkesit paftası

6.4.2.3 Kazı yönteminin uygulanması

Tünellerde kazı esas olarak, üst yarı ve alt yarı olmak üzere iki kısımda yürütülmektedir. Ancak T ve C tipi tünellerin kesit alanının fazla büyük olmasından ötürü; diğer tünel tiplerinden farklı olarak T ve C tipinde üst yarı; kendi içinde iki veya üç ve alt yarı; bir veya iki aşama olarak kazılır. Çizelge 6.3'te kazı aşamaları verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Tünel tiplerinin, destekleme tipine göre kazı aşamaları

TÜNEL TİPİ	KAZI-DESTEKLEME	KAZI AŞAMA SAYISI
A	A3	2
	A5	2
P	A3	2
	A5	2-3
B1	A3	2
	A5	2
B3	A3	2
	A5	2
T	A3	3
	A5	5
C	A3	3
	A5	4

İstanbul metro tünellerinde H1 ve H2 olmak üzere iki adet tünel kazısı yapılmaktadır. Her iki tünelde de tepe çekirdek yöntemiyle (parçalı) kazı gerçekleştirilmektedir. A5 desteklemede tünelin üst yarısı, alt yarısından 30-40 m. ileride açılmaktadır. Üst yarı kazısı, alt yarı kazısından daha ileride olduğundan alt yarı, tavanda gerekli sağlamlaştırmayı sağlayan bir iskele görevi görmektedir.

Bu yöntemde, ilk olarak ön sağlamlaştırma işlemi yapılarak tavan emniyeti sağlanmaktadır. Zayıf kayalarda uzun mesafeli üst yarı sürmek, tünel çevresinde gevşemelere yol açmakta, bu sebeple ek maliyetler ve gecikmeler oluşmaktadır. Kayada birikmiş gerilmeleri azaltmak ve gevşemeleri önlemek için H1 tünel aynası, H2 tünel aynasından 30 m. ileride kazılmaktadır.

H1 ve H2 aynaları arası uzaklık (yatayda) 45 m. ve daha fazla ise aynaların birbirini takip mesafesi önemli değildir.

6.5 Kafes Çelik İksa

Çelik iksa iki adet T20'lik ve T26'lık nervürlü çelik ile bunlar arasında bağlantıyı sağlayan T10'luk elemanlardan oluşan üçgen kesitli bir destekleme elemanıdır. Bunların zemine batmasını önlemek için ayak kısımlarında papuçlar mevcuttur. İki parça halindeki flanşlarından M24 civata ve M24 somunlarla bağlanmaktadır. A1, A2, A3 desteklemede sadece üst yarı sağlamlaştırmada, A5 desteklemede üst yarı ve alt yarıda birlikte kullanılmaktadır. Projede, 3 tip iksa kullanılmış olup bunlar tip 136,174 ve 200'dür. Bu rakamlar, iksa takımının dışındaki T26'lık çubukla, içindeki T20'lik çubuklar arasındaki mesafeyi mm cinsinden ifade etmektedir.

Çelik iksanın görevleri:

- Kazıdan sonra olabilecek küçük kaya düşmelerini önleyerek çalışma emniyetini kontrol eder.
- Sürgü çubuğuna destek verir.
- Püskürtme beton prizini alana kadar, kayanın gevşemesine engel olur.
- Tünel kesitini korur.
- Kısmi bir dengeleme basıncı gerçekleştirir.
- Kırılma ve genişleme tehlikesini önler.
- İksa olarak donatıdan bükülmüş bir kafes kemer kullanılırsa, hem püskürtme betonun tatbiki kolaylaşmakta, hem de püskürtme betona ek bir donatı elde edilmektedir.

İksa montajında dikkat edilecek en önemli iki konu şunlardır:

- İksa ayaklarının her iki tarafta da sağlam zemine basmasını sağlamak, bunu sağlamak için gerekirse ahşap takoz kullanmak gerekir.
- Her iksa montajında mutlaka topoğrafik ölçüm yapılması gerekir

Yeni kurulan iksa topoğraflar tarafından kontrol edildikten sonra, daha önce kurulan ve destekleme elemanları tamamlanmış bulunan iksaya T20'lik çubuklar (işban) kaynak edilir. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da iksa detayları verilmiştir.

6.6 Çelik Hasır

İstanbul metro tünelleri kazısında Q221/221 ve Q377/221 tipi tel kafes kullanılmaktadır. Bu çelik hasırların çubuk çapları Q221/221’de 6,50 x 6,50 mm., Q377/221’de bir yönde (boy) çift sıra 6,00 mm., diğer yönde ise 6,50 mm. olup, boyutları 5m. x 2,15m. ve 15 cm. x 15 cm. ebatlarında karelajlardan oluşmaktadır. Çelik hasırlar zemine mümkün olduğu kadar yaklaştırılmalı ve çok stabil bir şekilde monte edilmelidir. Şekil 6.11’de çelik hasır gösterilmiştir.



Şekil 6.11 : Çelik hasır donatı çubukları ve karelajı

Genellikle çelik hasırın esnek olması ve tünelin şekline kolaylıkla uyum sağlaması istenmektedir. Bunların sağlamlaştırma işlemindeki görevi, sağlamlaştırma sırasında düşebilecek olan kaya parçalarının düşmesini önlemek ve ilk desteklemeyi arttırmaktır. A1, A2 destekleme tiplerinde tek kat, A3 ve A5 destekleme tiplerinde çift kat çelik hasır yerleştirilmektedir.

Tel kafesin montajı, iki uç birbirinin üstüne düşeyde ve yatayda minimum 30 cm. binecek şekilde tesis edilmektedir. Tel kafesler bindirme paylarından birbirine ve eğer varsa sürenlere madeni tellerle bağlanmaktadır.

Tel kafes montajında mutlaka dikkat edilmesi gereken iki durum vardır:

- Çelik hasırlar zemine mümkün olduğu kadar (3-5 cm.) yakın yerleştirilmelidir.
- Çelik hasır mutlaka çok stabil bir şekilde monte edilmelidir.

6.7 Püskürtme Beton (Shotcrete)

İstanbul Metrosu çalışmalarında shotcrete kuru ve yaş karışım olarak kullanılmaktadır. Metro tünellerinde püskürtme beton genelde çelik hasır + iksa montajından sonra yapılmaktadır. Ancak düşük kaliteli kaya şartlarında dökülmeyi önlemek için ince bir shotcrete tabakası oluşturulabilir.

Püskürtme beton uygulamalarında dikkat edilmesi gereken noktalar;

- Shotcrete uygulanacak yüzey serbest malzemelerden temizlenir ve yüzeyde su gelişi varsa, uygun yöntemlerle drene edilir.
- Çelik hasırın yüzeye iyi sabitlenmesi sağlanır ve shotcrete esnasında esneme yapması engellenir.
- Malzeme (kum+çimento+katkı) karışımının mutlaka homojen olması sağlanır.

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te püskürtme beton uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 6.12 : Üstyarı kazısına püskürtme beton uygulaması



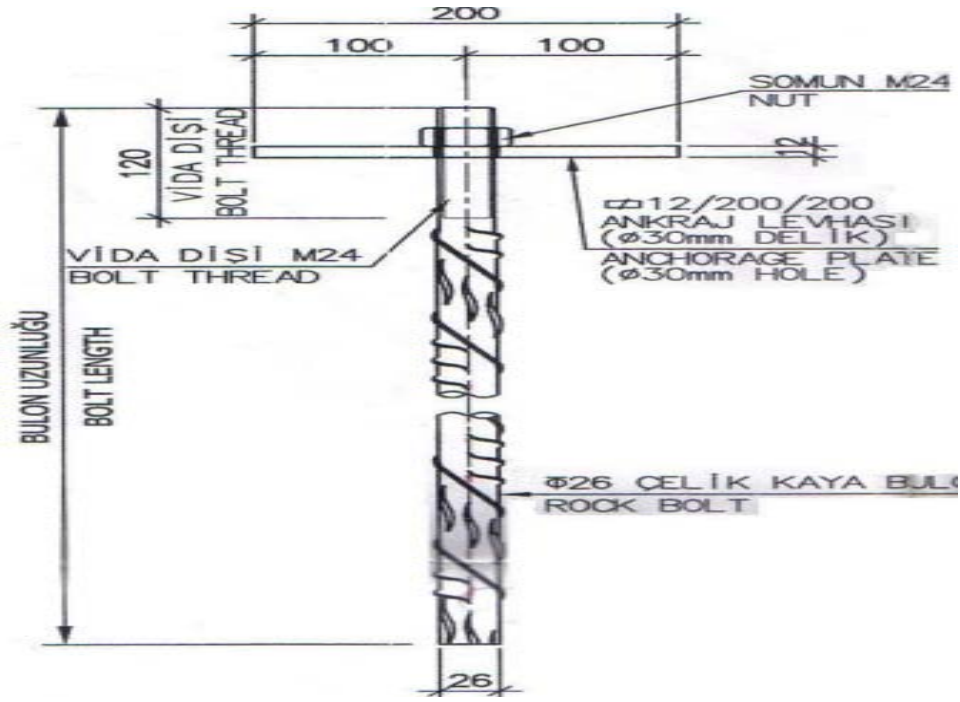
Şekil 6.13 : Altyarı kazısına püskürtme beton uygulaması

6.8 Enjeksiyonlu Kaya Bulonu

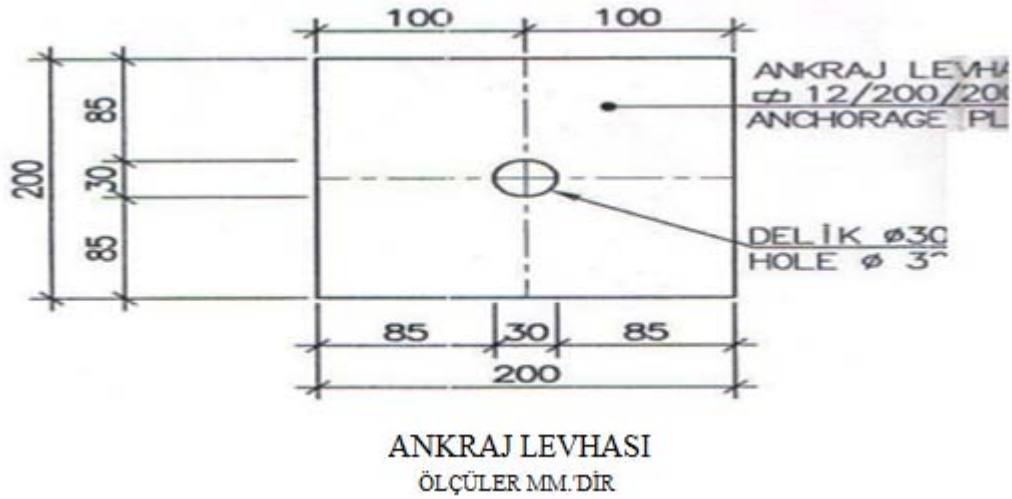
Kaya bulonları, kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek ve tünel kazısından dolayı oluşan örselenmiş kısımları tünel arkasındaki sağlam kayaya taşımak amacıyla uygulanan demir çubuklardır. Bulonlar aynı zamanda tünel kazısı esnasında duvar ve tavanda kopmak üzere olan kayaların kopmalarını önleyerek emniyeti arttıırırlar. Bulonlar; iksa, hasır çelik ve shotcrete'den oluşan desteklemenin tamamlayıcı elemanı olarak da kullanılabilmektedir.

Taşıyıcı plakaları shotcrete kabuğunun yüzeyine gelecek şekilde uygulanan bulonlar, shotcrete kabuğunun kaya kemeri ile birlikte çalışmasını sağlamaktadır.

Metro tünellerinde en yaygın olarak kullanılan enjeksiyonlu kaya bulonudur. Bir delici makine tarafından açılan deliğe enjeksiyon malzemesi (portland çimento /su = 2 / 1 – 3 / 1) doldurulduktan sonra, bulonun elle itilerek yerleştirilmesi suretiyle kullanılır. 4,00 m boyunda, T26'lık nervürlü çelikten özel olarak imal edilir. Bir ucu 12 cm. dişli ve taşıma plakaları 200/200/120 mm. boyutlarında olup, metrik 24 somun kullanılır ve içine yerleştirildiği delik çapı (bulon çapının 1,50 katı) min. 39 mm. dir. Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te kaya bulonu detayları verilmiştir.



Şekil 6.14 : Bulon detayı



Şekil 6.15 : Taşıma levhası detayı

Bulon uzunlukları kazının boyutlarına (genişlik ve yükseklik) bağlıdır. Tavanda kullanılan bulonların uzunluğu kazı genişliğine (B), duvarlarda kullanılan bulonların boyları ise kazı yüksekliğine (H) bağlıdır. Kaya bulonları için asgari boylar aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\text{Tavan için : } L = 2 + 0,15 \times (B / \text{ESR}) \quad (6.1)$$

$$\text{Duvarlar için : } L = 2 + 0,15 \times (H / \text{ESR}) \quad (6.2)$$

ESR, ulaşım tünellerinde 1 kabul edilir.

Bulonlar, enjeksiyon priz süresi dolmadan torklanamadığı için anında çalışan bir destekleme elemanı değildir. Torklama işlemi özel amaçla üretilen ve üzerinde bir skala olan anahtar vasıtasıyla yapılır. Torklama kuvveti 50 kN (5000 kg) olup, bu değere karşılık verebilen bulon sağlam kabul edilir. Şekil 6.16'da kaya bulonu delgisi gösterilmiştir.



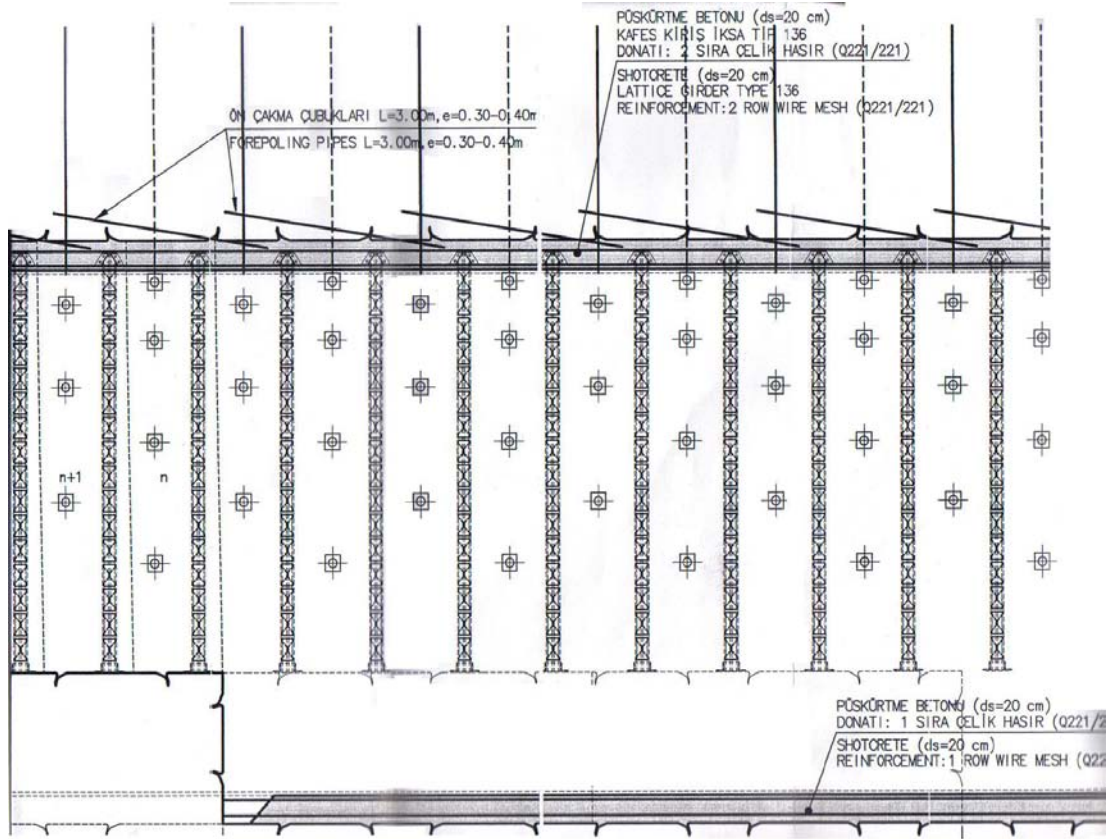
Şekil 6.16 : Bulon delgisi yapan jumbo makinesi

6.9 Sürenler

Kazı sonrası dökülmeye meyilli zayıf formasyon ortamlarında, özellikle su gelişinin olduğu bölgelerde, kazıya girmeden önce süren uygulaması yapılır. Adetleri kazı destek türlerine ve tünel tiplerine göre değişir. Çoğunlukla A3 destekleme tipinde uygulanmaktadır.

Tünel çevresindeki kayacın özelliklerine göre çevresel olarak tatbik edilen boru sürenlerin arasındaki açıklık, çevre kayacın duraylılık özelliklerine bağlı olarak 30-40 cm arasında olmaktadır. Boru sürenler, son koyulan çelik iksa ile aynadaki ana kaya arasında kiriş gibi çalışarak çevre kayacın duraylılığını arttırmaktadır.

Uygulamada daha çok 1 1/2" çapında, 4.00 m.lik borulardan faydalanılmıştır. Çelik iksa üzerinden yatayla max. 5-10° açı yapacak biçimde çakılırlar. Sürenlerin içerisi çimento / su oranı = 2 / 1 olan enjeksiyon ile doldurulmaktadır. Şekil 6.17'de süren boykesit paftası verilmiştir.

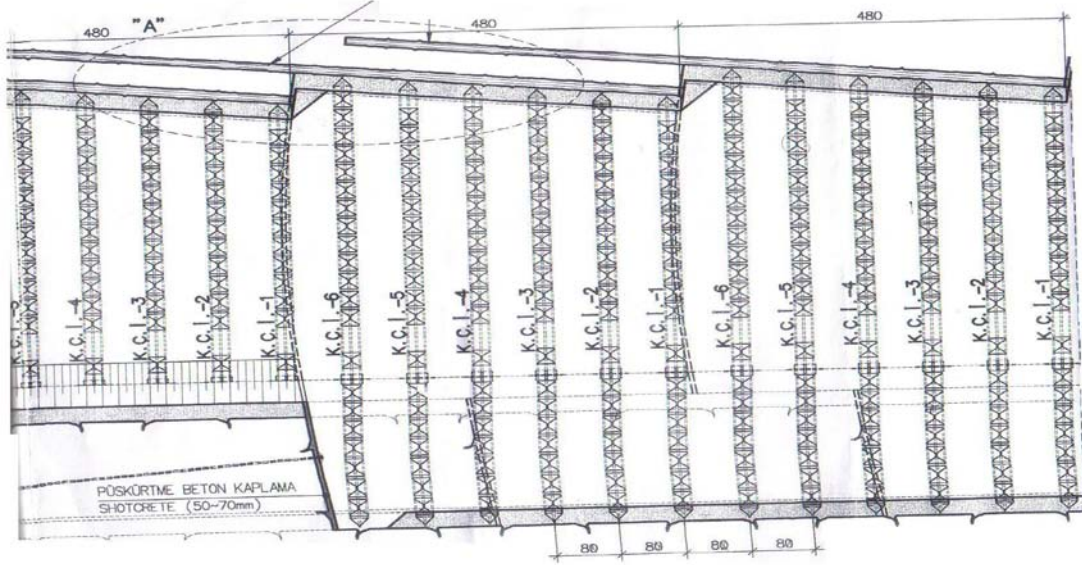


Şekil 6.17 : Süren boykesit paftası

6.10 Şemsiye Boruları (Umbrella Arch)

Bu yöntemde ayna üzerine gelecek basınçları karşılayabilmek amacıyla, kazı tavanına 9 m. uzunluğunda çelik borular yerleştirilmektedir. Daneli zeminlerin zayıf formasyonlarında ve akıcı zeminlerde tercih edilir. Bu boruların yerleştirilebilmesi için kazı kesiti projedekinden 50 cm. daha geniş açılmaktadır. Makinelerin çalışması ve boruların yerleştirilebilmesi için 50 cm boşluk kullanılmaktadır. Daha sonra delik çapı 130 mm. (5''), delik açısı yukarıya doğru 6-8° olacak şekilde delikler açılarak, içine et kalınlığı 6,3 mm. ve boyu 9 m. olan 114 mm. (4'') çapında çelik borular yerleştirilmektedir. Bu boruların aralığı 30-40 cm. olup, sayıları tünel tipine göre değişmektedir. Boru ağzı enjeksiyon manşonu ile kapatılarak, etrafı alçı ile sıvanmakta ve boru içine enjeksiyon basıncı 2-3 bar ve çimento / su = 7/5 olan enjeksiyon verilmektedir. Boruların delik içerisinde kolay ilerleyebilmesi için uçları sivri hale getirilmektedir. Enjeksiyonun, kayadaki çatlakları ve borunun etrafını tam doldurabilmesi için boruların cidarında delikler açılmaktadır. Bu boruların 5 m.'lik kısmı kazılan kesimin üzerinde, 4 m.'lik kısmı ise bindirme olarak bırakılmaktadır. Umbrella borularının altında genişleyen ve yükselen kafes çelik iksalar monte

edilmektedir. Böylece kemeri oluşturan çelik boruların bir kısmı iksaya basarak diğer ucu da ayna içinde kalarak iki ucu mesnetli kiriş gibi çalışmakta ve üzerine gelen gerilmeleri emniyetle taşıyabilmektedir. Çelik boruların montajı ve enjeksiyon tamamlanıp priz aldıktan sonra tünel kazısına geçilmektedir. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da şemsiye borusu boykesit paftası ve imalat öncesi hazırlık verilmiştir.



Şekil 6.18 : Şemsiye boruları boykesit paftası



Şekil 6.19 : Şemsiye boruları uç kısımlarının ve enjeksiyon deliklerinin hazırlanması

Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de şemsiye borusu imalatı gösterilmiştir.

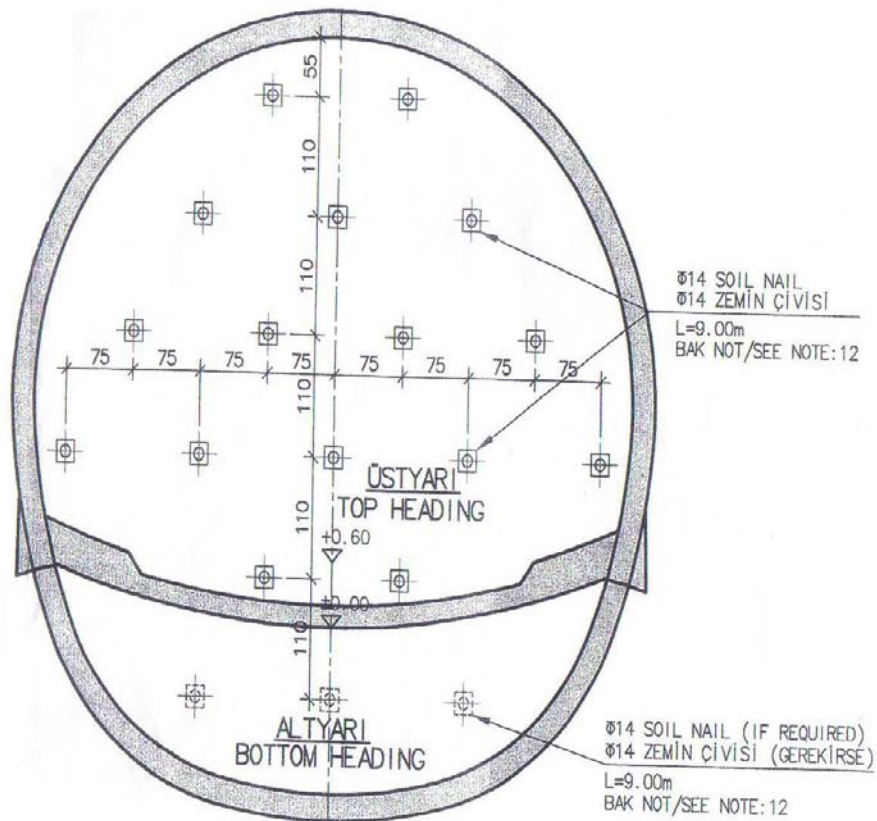


Şekil 6.20 : Şemsiye borularının aynada işaretlenmesi ve boruları yerlerinin delgisi



Şekil 6.21 : Boruya enjeksiyon yapılmadan önce ağız kısmının alçı ile kapatılması

Şemsiye borusu uygulamasında tavanın olduğu kadar aynanın da kontrol altına alınması önemlidir. Gelen yüklerden dolayı aynada plastikleşerek dayanımını yitiren malzeme hacmi kadar yüzeyde oturmalar olacaktır. Bunu önlemek için tünel aynasındaki zeminin içsel parametrelerini olumlu yönde arttırmak gerekmektedir. Ayna zeminini konsolide etmenin en etkili yolunu sürtünme kolonları (zemin çivisi) oluşturmaktır. Ayna önünden 10-12° aşağı eğimli 125 mm. çapında delikler açılarak içine 9 m. uzunluğunda, 14 mm. çapında tor çelikten imal edilmiş nervürlü çubuklar yerleştirilmektedir. Zemin çivisi olarak adlandırılan bu çubukların sayısı ortam koşullarına göre ve tünel tipine göre değişmektedir. Bu deliklerin içine 2-3 bar basınç altında çimento / su = 7 / 5 olan karışım enjekte edilerek ayna sağlamlaştırılmaktadır. Şekil 6.22’de zemin çivisi enkesit paftası verilmiştir.



Şekil 6.22 : Zemin çivisi enkesit paftası

Şekil 6.23, Şekil 6.24 ve Şekil 6.25'te zemin çivisi imalat öncesi hazırlık ve imalat gösterilmiştir.



Şekil 6.23 : Zemin çivisi enjeksiyon borularının hazırlanışı



Şekil 6.24 : Zemin çivisinin aynada uygulaması



Şekil 6.25 : Zemin çivilerinin ve şemsiye borularının delik bölgelerine yerleştirilmesi ve enjeksiyonları

7. DEĞERLENDİRME

Değerlendirme bölümünde destekleme sistemleri, destekleme elemanları, kazı hızları, metrajlar ve maliyetler açısından karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla çizelgeler hazırlanıp ilgili değerler verilmektedir.

A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sisteminin jeoloji yönünden, destekleme elemanları ve kazı adımları açısından karşılaştırılması Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : A3 ve A5 destekleme sistemlerinin jeoloji, destekleme elemanları ve kazı adımları açısından karşılaştırılması

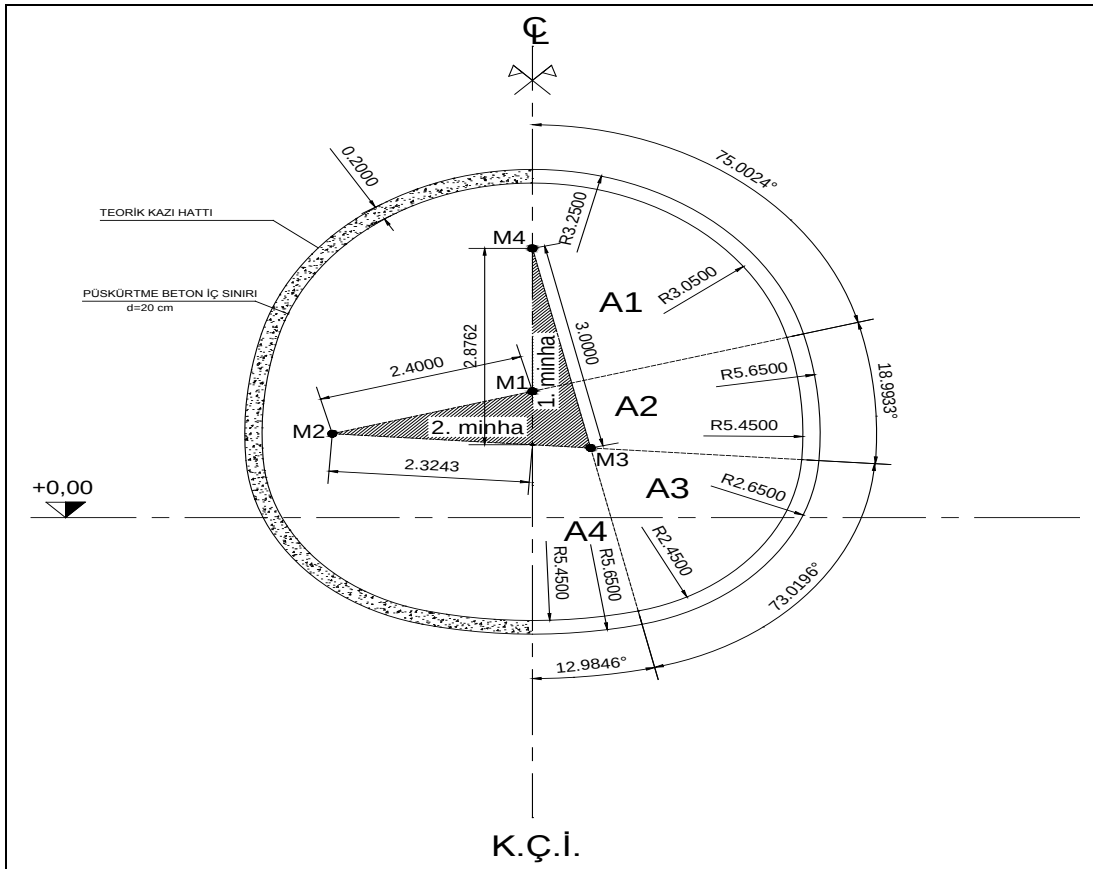
A Tipi Tünel	A3 Destekleme	A5 Destekleme
Jeoloji	Zayıf Kaya	Zayıf Zemin, Dolgu
Çelik İksa	Tip 136 (Tek Tip)	Tip 174 (6 Tip)
Çelik Hasır	Q 221 / 221	Q 377 / 221
Püskürtme Beton	20 cm	25 cm
Kaya Bulonu	7-8 adet (4,00 m.)	6 adet (4,00 m.)
Süren	25 adet (4,00 m.)	-----
Şemsiye Borusu	-----	27 adet (9,00 m.)
Zemin Çivisi	-----	12 adet (9,00 m.)
Kazı Adımı	1,00 - 1,20 m.	0,80 m.

A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sisteminin imalat hızı açısından karşılaştırılması Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 : A3 ve A5 destekleme sistemlerinin imalat hızı açısından karşılaştırılması

A Tipi Tünel	A3 Destekleme	A5 Destekleme
İksa - İlerleme	2 adet / 24 saat (2,00 - 2,40 m.)	1,5 adet / 24 saat (0,80 m.)
Bulon	7 - 8 adet x 3 / 12 saat	6 – 6 adet x 3 / 12 saat
Süren	25 adet / 3 saat	-----
Şemsiye Borusu	-----	27 adet / 24 saat
Zemin Çivisi	-----	12 adet / 12 saat

A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sisteminin metrajlar açısından karşılaştırılması Şekil 7.1, Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'te gösterilmiştir.



Şekil 7.1 : A3 destekleme enkesiti, merkez noktaları, yay yarıçap ve açıları

* K.Ç.İ - 1 iksası için kazı alanı hesabı Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3 : A3 destekleme kazı alanı hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve alanlar

Daire Dilimi Açısı (°)		Yarıçap (m)		Alan (m ²)		Açıklama
α		r		A=α/360*π*r ²		
α1	75,0024	r1	3,2500	A1	6,9134	(M1 merkezli daire dilimi)
α2	18,9933	r2	5,6500	A2	5,2911	(M2 merkezli daire dilimi)
α3	73,0196	r3	2,6500	A3	4,4749	(M3 merkezli daire dlimi)
α4	12,9846	r4	5,6500	A4	3,6172	(M4 merkezli daire dilimi)
TOPLAM					20,2965	

Minha : Üst üste düşen bölgelerde yapılan alan azaltmasıdır.

$$I. \text{ minha alanı} = 0,5 \times 2,8762 \times 3 \times \sin(12,9846) = 0,9694 \text{ m}^2$$

$$II. \text{ minha alanı} = 0,5 \times 2,4 \times 2,3243 \times \sin(18,9933) = 0,9078 \text{ m}^2$$

$$\text{Toplam minha} = 0,9694 + 0,9078 = 1,8772 \text{ m}^2$$

$$\text{Net alan} = 20,2965 - 1,8772 = 18,4193 \text{ m}^2 \text{ 'yarım kesit için alan değeri'}$$

$$\text{Tam kesit net alanı} = 18,4193 \times 2 = 36,8386 \text{ m}^2$$

* K.Ç.İ - 1 için püskürtme beton hesabı Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4 : A3 destekleme püskürtme beton hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve çevreler

Merkez Adı	P. Beton İç Yarıçap (m)	P. Beton Dış Yarıçap (m)	Ort. Yarıçap (m)	D. D. Açısı (°)	P. Beton Çevresi (m ² /m)
M1	3,0500 m	3,2500 m	3,1500 m	75,0024 °	4,1235 m
M2	5,4500 m	5,6500 m	5,5500 m	18,9933 °	1,8398 m
M3	2,4500 m	2,6500 m	2,5500 m	73,0196 °	3,2498 m
M4	5,4500 m	5,6500 m	5,5500 m	12,9846 °	1,2578 m
TOPLAM					10,4708

Ortalama püskürtme beton çevresi = 10,4708 m² / m

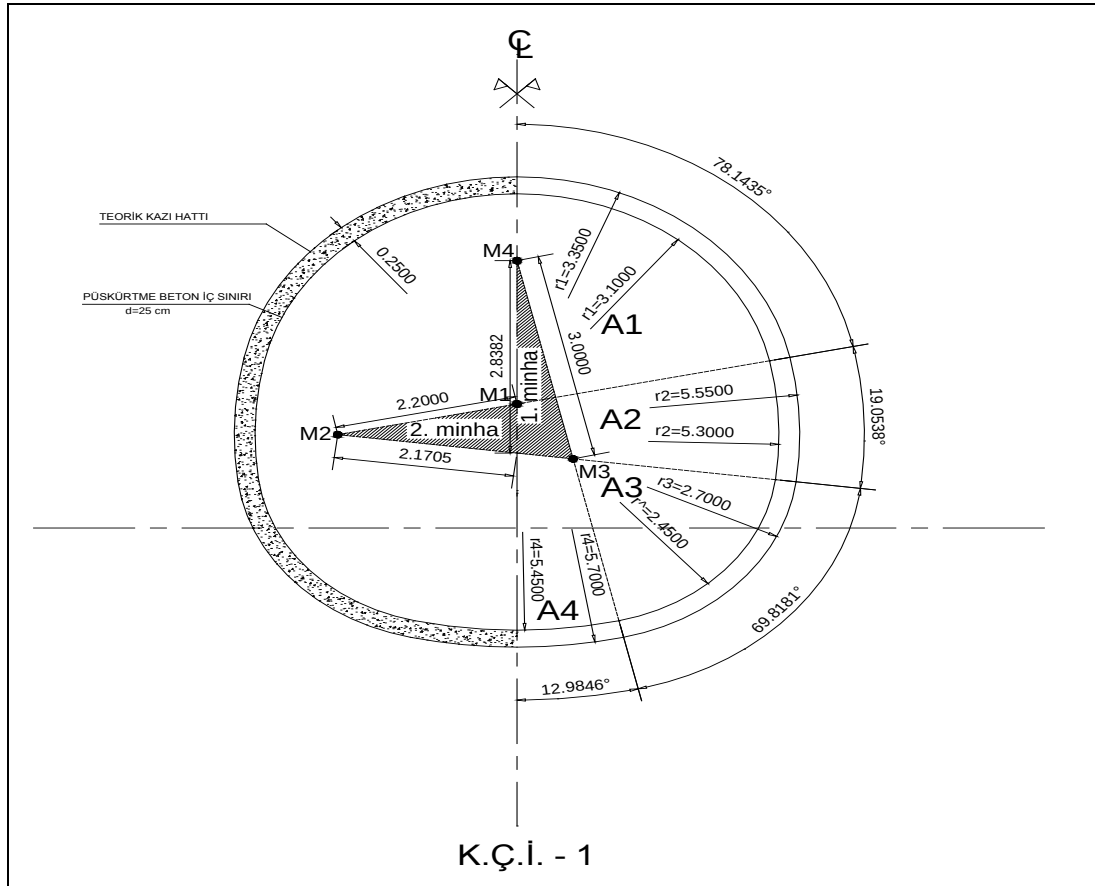
Tam kesit püskürtme beton çevresi = 20,9416 m² / m

* K.Ç.İ - 1 için donatı hesabı Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5 : A3 destekleme donatı hesabı ile ilgili tipler, ebat ve boylar

TÜNEL ÇEVRESİ HASIR ÇELİK METRAJ TABLOSU				
Poz No	Adet	Hasır Çelik Tipi	Ebat (m ² /m)	Toplam Boy (m)
1	1	Q221 / 221	5,00	5,00
2	1	Q221 / 221	5,00	5,00
3	2	Q221 / 221	4,80	9,60
4	2	Q221 / 221	4,55	9,10
5	1	Q221 / 221	2,45	2,45
6	1	Q221 / 221	5,00	5,00
7	1	Q221 / 221	5,00	5,00
8	1	Q221 / 221	2,75	2,75
TOPLAM				43,90

Tünel çevresi ortalama hasır çelik miktarı = 43,90 m² / m



Şekil 7.2 : A5 destekleme enkesiti, merkez noktaları, yay yarıçap ve açıları (KÇİ)

* K.Ç.İ - 1 iksası için kazı alanı hesabı Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6 : A5 destekleme kazı alanı hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve alanlar (KÇİ)

Daire Dilimi Açısı (°)		Yarıçap (m)		Alan (m ²)		Açıklama
α		r		A=α/360*π*r ²		
α1	78,1435	r1	3,3500	A1	7,6530	(M1 merkezli daire dilimi)
α2	19,0538	r2	5,5500	A2	5,1217	(M2 merkezli daire dilimi)
α3	69,8181	r3	2,7000	A3	4,4416	(M3 merkezli daire dlimi)
α4	12,9846	r4	5,7000	A4	3,6815	(M4 merkezli daire dilimi)
TOPLAM					20,8978	

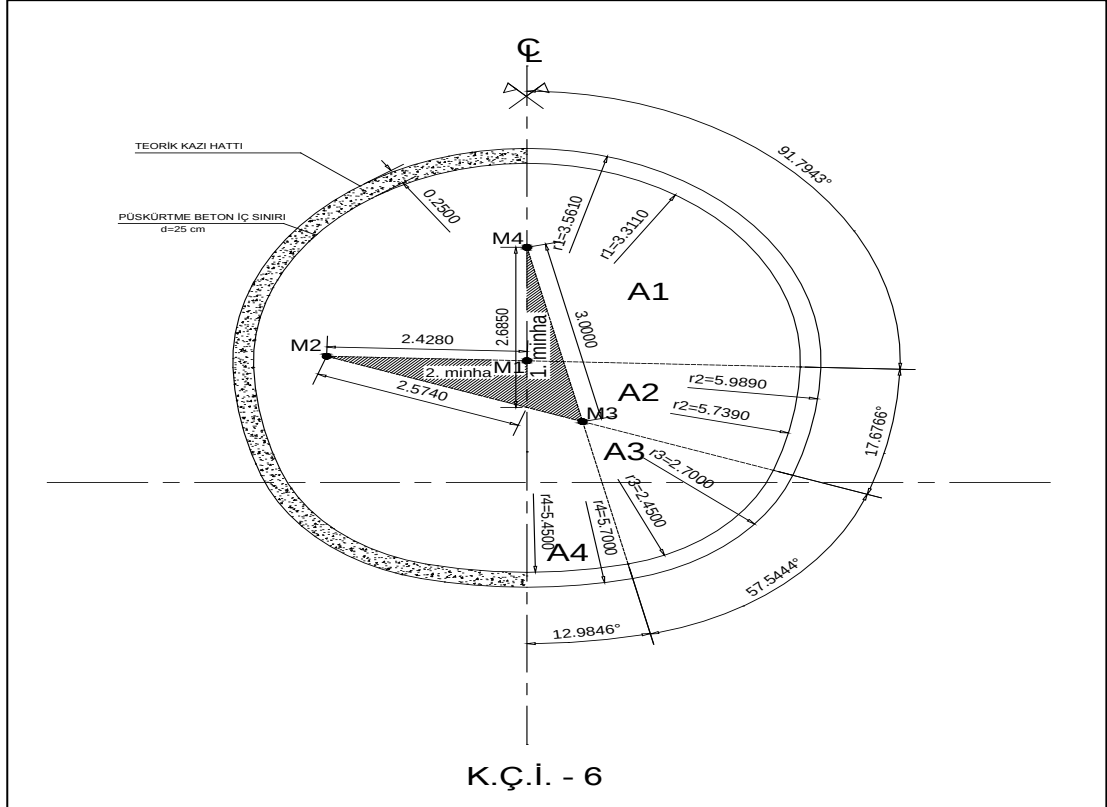
$$I. \text{ minha alanı} = 0,5 \times 2,8382 \times 3 \times \sin(12,9846) = 0,9566 \text{ m}^2$$

$$II. \text{ minha alanı} = 0,5 \times 2,2 \times 2,1705 \times \sin(19,0538) = 0,7794 \text{ m}^2$$

$$\text{Toplam minha} = 0,9566 + 0,7794 = 1,7360 \text{ m}^2$$

$$\text{Net alan} = 20,8978 - 1,736 = 19,1618 \text{ m}^2 \text{ 'yarım kesit için alan değeri'}$$

$$\text{Tam kesit net alanı} = 19,1618 \times 2 = 38,3236 \text{ m}^2$$



Şekil 7.3 : A5 destekleme enkesiti, merkez noktaları, yay yarıçap ve açıları (KÇVI)

* K.Ç.İ - 6 iksası için kazı alanı hesabı Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7 : A5 destekleme kazı alanı hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve alanlar (KÇVI)

Daire Dilimi Açısı (°)		Yarıçap (m)		Alan (m ²)		Açıklama
α		r		A=α/360*π*r ²		
α1	91,7943	r1	3,5610	A1	10,1580	(M1 merkezli daire dilimi)
α2	17,6766	r2	5,9890	A2	5,5329	(M2 merkezli daire dilimi)
α3	57,5444	r3	2,7000	A3	3,6608	(M3 merkezli daire dlimi)
α4	12,9846	r4	5,7000	A4	3,6815	(M4 merkezli daire dilimi)
TOPLAM					23,0332	

$$I. \text{ minha alanı} = 0,5 \times 2,6850 \times 3 \times \sin(12,9846) = 0,9049 \text{ m}^2$$

$$II. \text{ minha alanı} = 0,5 \times 2,4280 \times 2,5740 \times \sin(17,6766) = 0,9488 \text{ m}^2$$

$$\text{Toplam minha} = 0,9049 + 0,9488 = 1,8537 \text{ m}^2$$

$$\text{Net alan} = 23,0332 - 1,8537 = 21,1795 \text{ m}^2 \text{ ‘yarım kesit için alan değeri’}$$

$$\text{Tam kesit net alanı} = 21,1795 \times 2 = 42,3590 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{A tipi tünel A5 destekleme sınıfı ortalama kazı alanı} &= (38,3236 + 42,359) / 2 \\ &= 40,3413 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

* K.Ç.İ - 1 için püskürtme beton hesabı Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7.8 : A5 destekleme püskürtme beton hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve çevreler (KÇI)

Merkez Adı	P. Beton İç Yarıçap (m)	P. Beton Dış Yarıçap (m)	Ort. Yarıçap (m)	D. D. Açısı (°)	P. Beton Çevresi (m ² /m)
M1	3,1000 m	3,3500 m	3,2250 m	78,1435 °	4,3985 m
M2	5,3000 m	5,5500 m	5,4250 m	19,0538 °	1,8041 m
M3	2,4500 m	2,7000 m	2,5750 m	69,8181 °	3,1378 m
M4	5,4500 m	5,7000 m	5,5750 m	12,9846 °	1,2634 m
TOPLAM					10,6038

* K.Ç.İ - 6 için püskürtme beton hesabı Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9 : A5 destekleme püskürtme beton hesabı ile ilgili açılar, yarıçaplar ve çevreler (KÇVI)

Merkez Adı	P. Beton İç Yarıçap (m)	P. Beton Dış Yarıçap (m)	Ort. Yarıçap (m)	D. D. Açısı (°)	P. Beton Çevresi (m ² /m)
M1	3,3110 m	3,5610 m	3,4360 m	91,7943 °	5,5049 m
M2	5,7390 m	5,9890 m	5,8640 m	17,6766 °	1,8091 m
M3	2,4500 m	2,7000 m	2,5750 m	57,5444 °	2,5862 m
M4	5,4500 m	5,7000 m	5,5750 m	12,9846 °	1,2634 m
TOPLAM					11,1636

$$\begin{aligned} \text{A tipi tünel A5 destekleme sınıfı ortalama p.beton hesabı} &= (10,6038 + 11,1636) / 2 \\ &= 10,8837 \text{ m}^2 / \text{m} \end{aligned}$$

$$\text{Tam kesit için p.beton hesabı} = 10,8837 \times 2 = 21,7674 \text{ m}^2 / \text{m}$$

* K.Ç.İ - 1 için donatı hesabı Çizelge 7.10'da verilmiştir.

Çizelge 7.10 : A5 destekleme donatı hesabı ile ilgili tipler, ebat ve boylar (KÇI)

TÜNEL ÇEVRESİ HASIR ÇELİK METRAJ TABLOSU				
Poz No	Adet	Hasır Çelik Tipi	Ebat (m ² /m)	Toplam Boy (m)
1	1	Q377 / 221	3,80	3,80
2	1	Q377 / 221	3,20	3,20
3	2	Q377 / 221	5,00	10,00
4	2	Q377 / 221	5,00	10,00
5	1	Q377 / 221	3,50	3,50
6	1	Q377 / 221	5,00	5,00
7	1	Q377 / 221	5,00	5,00
8	1	Q377 / 221	3,95	3,95
TOPLAM				44,45

* K.Ç.İ - 6 için donatı hesabı Çizelge 7.11’de verilmiştir.

Çizelge 7.11 : A5 destekleme donatı hesabı ile ilgili tipler, ebat ve boylar (KÇVI)

TÜNEL ÇEVRESİ HASIR ÇELİK METRAJ TABLOSU				
Poz No	Adet	Hasır Çelik Tipi	Ebat (m ² /m)	Toplam Boy (m)
1	1	Q377 / 221	5,00	5,00
2	1	Q377 / 221	4,25	4,25
3	2	Q377 / 221	5,00	10,00
4	2	Q377 / 221	5,00	10,00
5	1	Q377 / 221	3,50	3,50
6	1	Q377 / 221	5,00	5,00
7	1	Q377 / 221	5,00	5,00
8	1	Q377 / 221	3,95	3,95
TOPLAM				46,70

A5 destekleme sınıfı ortalama hasır çelik miktarı = (44,45 + 46,70) / 2

$$= 45,575 \text{ m}^2 / \text{m}$$

A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sisteminin maliyetler açısından karşılaştırılması Çizelge 7.12 ve 7.13’te verilmiştir.

Çizelge 7.12 : A3 destekleme sisteminin maliyetler açısından incelenmesi

A Tipi Tünel (1 m. ilerleme)	A3 Destekleme			
	Birimi	Miktarı	Birim Fiyat (€)	Maliyet
Kazı	m ³	36,84	68,05	2506,962
Püskürtme Beton	m ²	20,94	34,28	717,823
Hasır Çelik	ton	0,198	823,69	163,090
Çelik İksa	ton	0,267	1285,43	343,209
Bulon	adet	7	48,65	340,55
Süren*	adet	25	56,34	704,25
BÇ. I Donatı	ton	0,0173	801,70	13,869
Toplam Maliyet (€)				4789,753

Çizelge 7.13 : A5 destekleme sisteminin maliyetler açısından incelenmesi

A Tipi Tünel (1 m. ilerleme)	A5 Destekleme			
	Birimi	Miktarı	Birim Fiyat (€)	Maliyet
Kazı	m ³	40,34	68,05	2745,137
Püskürtme Beton	m ²	21,76	42,90	933,504
Hasır Çelik	ton	0,277	823,69	228,162
Çelik İksa	ton	0,385	1285,43	494,890
Bulon	adet	6	48,65	291,90
Şemsiye Borusu*	m	243	52,60	2662,875
BÇ. IIIa Donatı	ton	0,0516	801,70	41,367
Toplam Maliyet (€)				7397,835

*Maliyet analizindeki sonuçlar yaklaşık olup, şemsiye borusu ve süren gibi kazı anosu boyunca uygulanan elemanların bu hesapta 1 m.'ye indirgenmesiyle elde edilmiştir. Saha uygulamalarında A5 desteklemede ilerleme adımı 0,80 m. olup, şemsiye borusu 6 iksada bir kullanılmaktadır. A3 desteklemesinde ise ilerleme adımı 1,00 – 1,20 m. olup, süren 2 iksada bir kullanılmaktadır.

8. SONUÇLAR

Çalışmada tünel açma yöntemleri birçok değişkene bağlı olarak incelenmiş ve önemli bazı sonuçlara varılmıştır. Tünel açma ile ilgili birçok yöntem kullanılmakta olup bunlar çalışmada sırasıyla verilmektedir. Bu yöntemlerden günümüzde en çok tercih edileni olan Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu burada ele alınarak çok yönlü bir şekilde incelenmiştir. İnceleme çalışmaları hem literatüre hem de uygulamaya dayanılarak yapılmıştır. Bu amaçla İstanbul metrosunun III. bölümü örnek uygulama olarak ele alınmıştır. Bu metro inşaatı sırasında karşılaşılan özel durumlar ve nispeten farklı yapım teknikleri nedeniyle konumuz açısından önemlidir. Metronun III. bölümünde kullanım amaçlarına göre birbirinden farklı tüneller inşa edilmiş olup; zemin parametrelerine, su durumuna, fay mevcudiyetine, toprak örtüsünün kalınlığına, çevresel koşullara, statik ve dinamik yükün varlığına göre farklı destekleme biçimleri uygulanmıştır.

Çalışmada iksalama sisteminin bağlı olduğu parametreler, jeolojik yapı, jeolojik ölçüm teknikleri ve farklı kazı yöntemleri incelenerek önemli görülen sonuçlar vurgulanmıştır.

Son yıllar içinde kazanılan deneyimlerine göre özellikle çürük taş ve zeminlerde Yeni Avusturya Yönteminin diğer yöntemlere oranla yararlı olduğu kanıtlanmıştır.

Bu yöntemde koruyucu destekleme adını alan ilk destekleme, yapıyı veya zemini dengelemek üzere projelendirilmiş olup, hareketli veya kayıcı çelikten bir dış yaydır. Zemini taşımak üzere sistematik tertiplenmiş kaya bulonları ile genellikle püskürtme beton veya beton kaplama ve invert betonu ile kaplanan yüzey korunumu desteklemenin diğer bölümünü oluşturmaktadır.

Bununla çevresel kayaçlar arasında sistemin uygulaması sırasındaki davranışlar mantıksal bir ölçü sistemi ile kontrol edilmelidir. Tahkimatın ikinci aşamasında, beton iç kemer meydana getirilmeden önce, taşıyıcı dış kemerin dengeye ulaşmış olmasına dikkat edilmelidir. Bu iç kemerin amacı, emniyet faktörlerini arttırmak veya gerekli emniyeti yaratmaktır.

Çalışmaya esas teşkil eden ana hat tünellerindeki (A tipi) farklı destekleme sistemlerini (A3 ve A5) çok yönlü incelendiğinde;

1) A tipi tünel A3 destekleme sistemi;

- Jeolojik durum (kayanın stabilitesi) uygunsa,
- Su mevcudiyeti tüneli fazla miktarda zorlamıyorsa,
- Fay zonu yoksa,
- Dinamik yüklerin tesiri yoksa,
- Örtü kalınlığı fazlaysa,
- Güzergah üzeri yapılaşma yoksa,
- Çevresel koşullar uygunsa tercih edilir.

2) A tipi tünel A5 destekleme sistemi;

- Jeolojik durum elverişsizse,
- Su mevcudiyeti tüneli yoğun şekilde etkiliyorsa,
- Fay zonları varsa,
- Dinamik yükler etki ediyorsa,
- Örtü kalınlığı düşükse,
- Güzergah üzeri yapılaşma varsa ,
- Çevresel koşullar uygun değilse tercih edilir.

3) A5 destekleme sistemi uygulaması, A3 destekleme sistemi uygulaması ile karşılaştırıldığında;

- Maliyetler yaklaşık olarak 2 kat artmaktadır.
- Kullanılan destekleme elemanları değişmektedir.
- İmalat hızı yavaşlamaktadır.
- İşçilik artmaktadır.
- Makine amortismanı zorlaşmaktadır.
- Makine yakıt ve yedek parça giderleri artmaktadır.

- Tünel gabarileri değişmektedir.
 - Kazı adımları küçülmekte, gerekirse parçalı kazıya geçilmektedir.
 - Malzeme gideri ve sarfiyatı artmaktadır.
- 4) A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sistemi ile jeolojik formasyonlar açısından karşılaştırıldığında;
- A3 destekleme, grovak (çamurtaşı, kalkerli çamurtaşı), ince kireçtaşı, şeyll (silisli şeyll), yumrulu kireçtaşı ve kumtaşı formasyonlarında uygulanır.
 - A5 destekleme, fay breşi, kaya unu, kil, çok parçalı kaya formasyonlarında uygulanır.
- 5) A tipi tünel A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sistemi, kullanılan destekleme elemanları açısından karşılaştırıldığında;
- A3 desteklemede tip 136 iksa (tek tip), Q 221 / 221 çelik hasır, 20 cm. püskürtme beton, 7-8 adet (4,00 m.) kaya bulonu ve 25 adet süren (4,00 m.) kullanılmaktadır.
 - A5 desteklemede tip 174 iksa (altı tip), Q 377 / 221 çelik hasır, 25 cm. püskürtme beton, 6-6 adet (4,00 m.) kaya bulonu, 27 adet (9,00 m.) şemsiye borusu ve 12 adet (9,00 m.) zemin çivisi kullanılmaktadır.
- 6) Tüm imalatlar birbirinden farklı zamanlarda yapıp A3 destekleme sistemi, A5 destekleme sistemi ile kazı hızı açısından karşılaştırıldığında;
- A3 desteklemede, 2 adet iksaya karşılık gelen 2,00 m. ilerleme için süre 24 saattir. Delgi işlerinde makinelerin kurulması, toplanması, arızalar ve diğer gecikmeler (dinlenme araları, vardiya değişimleri, malzeme sevkiyatı) düşünülerek süreler belirlenmiştir. Bulon uygulamasında, bir bulon için delgi süresi 3 dakika, el ile yerine yerleştirme süresi ise 2 dakika olup 45 adet için toplamda 12 saattir. Süren için delgi süresi 4 dakika, yerleştirilmesi 2 dakika olup toplamda 25 adet için 3 saattir.
 - A5 desteklemede, 1,5 adet iksaya karşılık gelen 1,20 m. ilerleme için süre 24 saattir. Şemsiye borusunun bir adeti için delgi süresi 12 dakika, yerine yerleştirilmesi ise 6 dakika olup toplamda 27 adet için

24 saattir. Bir adet zemin çivisi için delgi süresi 12 dakika olup, yerine el ile yerleştirildiği için süre 3 dakikadır ve 12 adet için toplamda 12 saat gereklidir. 36 adet bulon için ise süre 12 saattir.

7) A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sistemi metrajlar ve maliyetler açısından karşılaştırıldığında;

- A3 desteklemede metrajlar 1,00 m. ilerleme için kazıda 36,84 m³, püskürtme betonda 20,94 m², hasır çelikte ise 0,198 ton olup diğer ekipman ile toplam maliyet 4789,753 €'dur.
- A5 desteklemede metrajlar 1,00 m. ilerleme için kazıda 40,34 m³, püskürtme betonda 21,76 m², hasır çelikte ise 0,277 ton olup diğer ekipman ile toplam maliyet 7397,835 €'dur.

KAYNAKLAR

- [1] **Yayla, N.**, 2009. *Karayolu Mühendisliği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [2] **Erdinç, E.**, 1993. *Tünellerin Kısa Tarihçesi, Yeni Avusturya Tünel İnşaat Metodu*, 8-14, İstanbul, Türkiye.
- [3] **Bozkurt, M.**, 1987. *Tüneller Ders Notları*, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul, Türkiye.
- [4] **Url-1** <<http://www.inaatmuhendisligi.net>>, 02.04.2010.
- [5] **Engin, M.**, 2007. *Ulaşım da Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ulaşım da Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 15-17 Kasım.
- [6] **Ocak, İ., Manisalı, E.**, 2007. *Kentiçi Raylı Sistemler Teknik Eğitim Kültür Bülteni*, 2., 15-17.
- [7] **Url-2** <<http://www.ibb.gov.tr>>, 12.03.2010.
- [8] **Polat, F.**, 2007. *İstanbul Metrosu Geoteknik Değerlendirme Raporu*, İstanbul, Türkiye.
- [9] **Url-3** <<http://www.serki.com>>, 21.05.2010.
- [10] **Url-4** <<http://www.hidrojeoloji.net>>, 03.06.2010.
- [11] **Url-5** <<http://www.jeologevi.com>>, 16.02.2010.
- [12] **Özbay, G.**, 2009. *Marmaray Projesi Mühendislik Jeolojisi Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.
- [13] **Ergüvanlı, K.**, 1994. *Mühendislik Jeolojisi*, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul, Türkiye.
- [14] **Url-6** <<http://www.platin.s5.com>>, 20.04.2010.
- [15] **Url-7** <<http://www.forumaden.com>>, 15.03.2010.
- [16] **Erselcan, N.**, 2009. Kişisel görüşme.
- [17] **Garanti Koza/Alsim Alarko Ortak Girişimi**, 2005. *Geoteknik Ölçümler Yapım Metodu Ve İthal Edilen Cihazların Kullanım Kılavuzları*, İstanbul, Türkiye.

EKLER

EK A.1 : Sondaj vaziyet planı

EK A.2 : Sondaj boykesitleri

EK A.3 : Hat1 ve Hat2 tünellerine ait detaylı jeolojik tablolar

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ali Atasoy

Doğum Yeri ve Tarihi: Trabzon – 29.08.1983

Lisans Üniversite: Atatürk Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği Bölümü