İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL METROSU YENİKAPI - UNKAPANI ARASININ MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Erhan USTA

Anabilim Dalı: Uygulamalı Jeoloji

Programı: Uygulamalı Jeoloji

Tez Danışmanı: Y.Doç.Dr Yılmaz Mahmutoğlu

ARALIK 2004

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL METROSU YENİKAPI - UNKAPANI ARASININ MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Erhan USTA

Enstitü No: (505021304)

Anabilim Dalı: Uygulamalı Jeoloji

Programı: Uygulamalı Jeoloji

Tez Danışmanı: Y.Doç.Dr Yılmaz Mahmutoğlu

ARALIK 2004

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **ix**
SEMBOL LİSTESİ **xii**
ÖZET **xiii**
SUMMARY **xv**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Çalışmanın Amacı 1
1.2. İncelemenin Kapsamı 1
1.3. İnceleme Alanının Tanıtılması 3
1.3.1. Konum 3
1.3.2. İklim 3

2. İSTANBUL METRO PROJESİNİN TANITIMI **4**
2.1. Giriş 4
2.2. İstanbul Metrosunun Teknik Özellikleri 4
2.3. İstanbul Metrosu 2. Aşama İnşaatı 5
2.3.1. Yenikapı-Unkapanı arası metro inşaatı 5
2.4. Yenikapı-Unkapanı Arası Tünellerinde Kazı ve Destekleme Çalışmaları 8
2.5. İstanbul Metrosu Tünellerinde Koruyucu Kemer Yöntemi ve Uygulaması 13

3. GENEL JEOLOJİ **19**
3.1. Bölgesel Jeoloji 19
3.2. İnceleme Alanının Stratigrafisi 20
3.2.1. Paleozoyik 20
3.2.1.1. Alt karbonifer 20
3.2.2. Senozoik 23
3.2.2.1. Üst miyosen 23
3.2.2.2. Kuvaterner 26
3.2.3. Andezit ve diyabaz daykları 27
3.3. Yapısal Jeoloji 28
3.3.1. Tabakalar ve kıvrımlar 28
3.3.2. Faylar ve çatlaklar 29

4. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ **31**
4.1. Giriş 31
4.2. Mekanik Sondajlar 31

4.3. İncelenen Güzergahtaki Birimlerin Mühendislik Özellikleri 32
4.3.1. Arazi Deneyleri 33
4.3.1.1. Standart penetrasyon deneyi 33
4.3.1.2. Pressiometre deneyi 36
4.3.1.3. Schmidt çekici ölçümleri 39
4.3.2. Kaya mekaniği laboratuvar deneyleri 42
4.3.2.1. Fiziksel özellikler 42
4.3.2.2. Mekanik özellikler 43
4.3.3. Zemin mekaniği deneyleri 47
4.3.3.1. Fiziksel deneyler 47
4.3.3.2. Kıvam limitleri 48
4.3.3.3. Elek analizi 51
4.3.3.4. Serbest basınç deneyleri 52
4.3.3.5. Direkt ve endirekt kesme deneyleri 54
4.4. Güzergahtaki Birimlerin Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi 55
4.4.1. Yapay dolgu 55
4.4.2. Kuvaterner çökelleri (Alüvyon ve Kuşdili Formasyonu) 56
4.4.3. Güngören formasyonu 57
4.4.4. Trakya formasyonu 60
4.4.4.1.Kaya kalitesi tanımlaması (RQD) 64
4.4.4.2.RMR Kaya kütlesi sınıflama sistemi 64
4.5. Yeraltı Suyu Durumu 67
4.5.1. Formasyonların hidrojeolojik özellikleri 68
4.5.1.1. Yarı geçirimli- geçirimli ortamlar 68
4.5.1.2. Geçirimsiz ortamlar 68
4.5.2. Yeraltı suyunun tünel çalışmalarına etkisi 69

5. JEOTEKNİK ÖLÇÜM VE GÖZLEMLER 70
5.1. Giriş 70
5.2. İstanbul Metrosunda Yapılan Jeoteknik Ölçümler 70
5.2.1. Tünel içi deformasyon ölçümleri 72
5.2.2. Çubuk ekstansometre ölçümleri 78
5.2.3. Yüzey ve bina nivelman ölçümleri 81

6. SONUÇLAR 94

KAYNAKLAR 99

EKLER 102

ÖZGEÇMİŞ 103

KISALTMALAR

RMR	: Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
EKB	: Enjeksiyonlu Kaya Bulonu
LRTS	: Hafif Raylı Tünel Hattı
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
ISRM	: International Society for Rock Mechanics
RQD	: Kaya Kalitesi Tanımı
GNF	: Güngören Formasyonu
TRF	: Trakya Formasyonu
LL	: Likit Limit
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
R	: Schmidt Sertliği
İ	: İksa
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
SM	: Siltli Kum
SC	: Killi Kum
GM	: Siltli Çakıl
GC	: Killi Çakıl
YH1U-1A	: Yenikapı Hat 1 Unkapanı 1 A tip tüneli
YH1U-2A	: Yenikapı Hat 1 Unkapanı 2 A tip tüneli
YH1U-3A	: Yenikapı Hat 1 Unkapanı 3 A tip tüneli
YH2U-1A	: Yenikapı Hat 2 Unkapanı 1 A tip tüneli
YH2U-2A	: Yenikapı Hat 2 Unkapanı 2 A tip tüneli
YH2U-3A	: Yenikapı Hat 2 Unkapanı 3 A tip tüneli
YH2U-T	: Yenikapı Hat 2 Unkapanı T tip tüneli
KH1Y-2A	: Koska Hat 1 Yenikapı 2 A tip tüneli
KH1Y-3A	: Koska Hat 1 Yenikapı 3 A tip tüneli
KH1Y-T	: Koska Hat 1 Yenikapı T tip tüneli
KH2U-1A	: Koska Hat 2 Unkapanı 1 A tip tüneli
KH2Y-1A	: Koska Hat 2 Yenikapı 1 A tip tüneli
KH2Y-2A	: Koska Hat 2 Yenikapı 2 A tip tüneli
KH2Y-3A	: Koska Hat 2 Yenikapı 3 A tip tüneli
KH2Y-T	: Koska Hat 2 Yenikapı T tip tüneli

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	2. Aşama Yenikapı-Taksim hattı projesinin özellikleri	6
Tablo 2.2.	İstanbul Metrosu 2. Aşama Taksim-Yenikapı inşaatı tünel tip kesitleri	6
Tablo 2.3.	İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı arası toplam tünel boyları	7
Tablo 2.4.	İstanbul Metrosu tünellerinde kullanılan destekleme tipleri	10
Tablo 2.5.	Koruyucu kemer yönteminde sağlamlaştırma ve destekleme elemanları	17
Tablo 4.1.	Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki birimler üzerinde yapılan arazi ve laboratuvar deney ve ölçümleri	33
Tablo 4.2.	Yenikapı Göçük bölgesi ve Yenikapı İstasyonu civarındaki sondajlarda uygulanan pressiometre deney sonuçları	37
Tablo 4.3.	Koska Şaftı civarında ve Şehzadebaşı İstasyonu bölgesindeki sondajlarda uygulanan pressiometre deney sonuçları	38
Tablo 4.4.	YH1U-2A tünelinde 7 ayrı noktada elde edilen Schmidt geri sıçrama sertlik değeri ile kayanın basınç direncinin belirlenmesi	39
Tablo 4.5.	YH1U-2A tüneli sağ duvarında, Trakya Formasyonu çatlak yüzeylerinin basınç direnci değerlerinin (ISRM,1978) sınıflandırmasındaki tanımı	40
Tablo 4.6.	YH1U-2A tüneli sol duvarında, Trakya Formasyonu çatlak yüzeyleri basınç direnci değerlerinin ISRM (1978) sınıflandırmasındaki tanımı	41
Tablo 4.7.	YH1U-2A tüneli kazı aynasında Trakya Formasyonu çatlak yüzeylerinin basınç direnci değerlerinin ISRM (1978) sınıflandırmasındaki tanımı	42
Tablo 4.8.	İncelenen metro güzergahında geçilen anakayanın fiziksel özellikleri	43
Tablo 4.9.	Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH2U-3A tüneli kazı aynalarından alınan taş örneklerinin nokta yükleme deneyi sonuçları	44
Tablo 4.10.	Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH2U-3A tünelinden alınan örneklerin nokta yük direncine göre sınıflaması	45
Tablo 4.11.	Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH2U-3A tünelinden alınan örneklerin tek eksenli basınç direncine göre sınıflaması	45
Tablo 4.12.	Yenikapı-Unkapanı arası YH1U-2A tünelinde kazı aynasından alınan örneklerin nokta yükleme direnci değerleri	45
Tablo 4.13.	Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki YH1U-2A tünelinden alınan nokta yük direncine göre sınıflaması	46
Tablo 4.14.	YH1U-2A tünelinden alınan Trakya Formasyonu'na ait litolojilerin tek eksenli basınç direncine göre sınıflaması	46

Tablo 4.15. Yenikapı göçük bölgesi sondajlarından alınan zeminlerin fiziksel özellikleri 47
Tablo 4.16. Yenikapı İstasyonu civarında sondajlardan alınan kil örneklerinin fiziksel özellikleri 47
Tablo 4.17. Koska Şaftı civarındaki sondajlardan alınan dolgu, kum ve killerin fiziksel özellikleri 48
Tablo 4.18. Yenikapı göçük bölgesi sondajlarından alınan zemin örneklerinin kıvam limitleri ve sınıflaması 49
Tablo 4.19. Yenikapı İstasyonu civarındaki sondajlardan alınan kil örneklerinin kıvam limitleri ve sınıflaması 49
Tablo 4.20. Koska Şaftı bölgesindeki sondajlardan alınan kil örneklerinin kıvam limitleri ve sınıflamaları 50
Tablo 4.21. Şehzadebaşı İstasyonu sondajlarındaki kil örneklerinin kıvam limitleri ve sınıflaması 51
Tablo 4.22. Yenikapı göçük bölgesi ve Yenikapı İstasyonu civarındaki sondajlardan alınan iri taneli zeminlerin elek analizi sonuçlarına göre sınıflandırılması 51
Tablo 4.23. Koska Şaftı bölgesinde yapılan bazı sondajlardan alınan iri taneli zeminlerin elek analizi sonuçlarına göre sınıflandırılması 52
Tablo 4.24. Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlardan alınan kil örnekleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları 53
Tablo 4.25. Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlardan alınan kil örneklerinin üç eksenli basınç deneyi sonuçları 54
Tablo 4.26. Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlarda dolguda ölçülen N_{30} değerleri ve dolgu kalınlıklarının değişimi 56
Tablo 4.27. Güngören killeri üzerinde yapılan SPT deneyleri sonuçlarından elde edilen N_{30} değerleri dağılımının bölgesel olarak değerlendirilmesi 58
Tablo 4.28. Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlardan alınan kil örneklerinin ortalama kıvam limiti ve su muhtevası değerlerinin değişimi 59
Tablo 4.29. Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki Güngören killerinin ortalama dayanım parametreleri 60
Tablo 4.30. Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki AS-YU-11-01 sondajından alınan karotların tek eksenli basınç direnci ve elastisite modülü değerleri 62
Tablo 4.31. İstanbul Metrosu 1. Aşama Taksim-4. Levent arası tünel güzergahından alınan örneklerin mekanik özellikleri 63
Tablo 4.32. İstanbul Metrosu 1. Aşama Taksim-4. Levent arası tünel inşaatı kapsamında, Taksim araştırma galerisinde yapılan arazi deneyi sonuçları 63
Tablo 4.33. İstanbul Metrosu 1. Aşama Taksim- 4. Levent arası tünel inşaatı kapsamında, yapılan pressiometre deney sonuçları 64
Tablo 4.34. RMR Kaya Kütlesi Sınıflama Sisteminde puanlamalara göre kaya sınıfları (Bieniawski, 1989) 66
Tablo 4.35. Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlarda yer altı su seviyeleri 67
Tablo 4.36. Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki bazı sondajlarda yapılan basınçlı su deneylerinden elde edilen permeabilite değerleri 68

Tablo 5.1. Konverjans değerlerinin uygulanan tünel açma yöntemine bağlı değişimi 74
Tablo 5.2. Koska Şaftı'nda ölçülen deformasyon değerlerinin örtü kalınlığı,litoloji ve tünel açma yöntemi ile ilişkisi 85
Tablo 5.3. Yenikapı Şaftı dolayındaki ölçümlerin örtü kalınlığı, litoloji ve tünel açma yöntemi ile ilişkisi 88

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 1.1	**:** İnceleme alanının konumu	3
Şekil 2.1	**:** İstanbul'da raylı sistem hatları haritası	5
Şekil 2.2	**:** Yenikapı tünellerinde kazı sonrası hasır çelik montajı	10
Şekil 2.3	**:** Yenikapı tünellerinde iksa montajı sonrası topoğrafik ölçüm	11
Şekil 2.4	**:** Yenikapı tünellerinde enjeksiyonlu kaya bulonu delgisi	12
Şekil 2.5	**:** Yenikapı tünelleri kazı aynası önündeki zemin çivisi delgisi	15
Şekil 2.6	**:** Zemin çivileriyle iyileştirme işlemi tamamlanmış tünel aynası	16
Şekil 2.7	**:** İstanbul Metrosunda kemeri oluşturan çelik borular	16
Şekil 2.8	**:** Yenikapı tünellerinde kazı aynası önünde çelik boruların montajı	17
Şekil 2.9	**:** Koruyucu kemer uygulamasının kesit görünümleri	18
Şekil 3.1	**:** İnceleme alanı ve çevresinin stratigrafik kesiti	21
Şekil 3.2	**:** Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahı üzerinde karşılaşılan anakayaya ait kumtaşları	22
Şekil 3.3	**:** Yenikapı tünelleri bölgesinde Hat 1 tüneli aynasında Güngören kili	24
Şekil 3.4	**:** Yenikapı-Unkapanı güzergahında YH2U-2A tüneli km 5+010.20 de kalınlığı 50 cm. olan kumtaşı	28
Şekil 3.5	**:** İncelenen güzergahı içine alan Haliç ve Civarının Jeoloji Haritası (Sayar, 1976)	30
Şekil 4.1	**:** Yenikapı Unkapanı metro hattında yapılan sondajlarda kesilen birimlerin toplam sondaj uzunluğuna göre yüzdeleri	32
Şekil 4.2	**:** Güzergahtaki Güngören killeri, alüvyon ve yapay dolguların N_{30} değerlerinin derinliğe bağlı değişimi	35
Şekil 4.3	**:** Yenikapı-Unkapanı güzergahında farklı lokasyonlardaki dolguların N_{30} değerlerinin birbirleriyle ve derinlikle ilişkisi	35
Şekil 4.4	**:** YH1U-2A tüneli sağ duvarında 7 ayrı noktada elde edilen Schmidt geri sıçrama sertlik değeri yardımıyla kayanın basınç direncinin belirlenmesi	39
Şekil 4.5	**:** YH1U-2A tüneli sol duvarında 7 ayrı noktada elde edilen Schmidt geri sıçrama sertlik değeri yardımıyla kayanın basınç direncinin belirlenmesi	40
Şekil 4.6	**:** YH1U-2A tüneli kazı aynasında 7 ayrı noktada elde edilen Schmidt geri sıçrama sertlik değeri yardımıyla kayanın basınç direncinin belirlenmesi	41
Şekil 4.7	**:** Güngören formasyonu içerisinde ölçülen SPT değerlerinin derinliğin fonksiyonu olarak değişimi	58
Şekil 4.8	**:** Yenikapı-Unkapanı güzergahı üzerinde yapılan sondajlardan alınan kil örneklerinin kıvam limitlerinin Cassagrande kartı üzerindeki yerleri	59
Şekil 4.9	**:** Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlarda geçilen anakayanın RQD değerlerinin derinliğe bağlı değişimi	65

Şekil 4.10 : YH1U-2A tünelinin 4+854.20-4+962.20 km ler arasındaki RMR değerleri 66
Şekil 4.11 : YH2U-2A tünelinin 4+934.60-5+036.80 km ler arasındaki RMR değerleri 67
Şekil 5.1 : İstanbul metrosunda kullanılan jeoteknik ölçüm sistemleri 71
Şekil 5.2 : Tünel içi konverjans ölçüm kesiti 73
Şekil 5.3 : YH2U-1A tüneli km 4+641.00-4+773.00 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği 75
Şekil 5.4 : YH1U-1A tünelinde km 4+565.40-4+774.00 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği 76
Şekil 5.5 : YH2U-2A tünelinde km 4+934.60-5+030.60 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği 76
Şekil 5.6 : YH1U-2A tünelinde km 4+853.60-4+953.80 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği 77
Şekil 5.7 : YH2U-3A tünelinde km 0+001.00-0+031.60 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği 77
Şekil 5.8 : YH1U-3A tünelinde km 0+001.00-0+058.72 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği 78
Şekil 5.9 : İstanbul metrosu inşaatında kullanılan üç kademeli ekstansometrenin montaj detayı 79
Şekil 5.10 : Şehzadebaşı İstasyonu EXT-YU-10 sondajındaki çubuk ekstansometrelerde ölçülen deformasyonların zamana bağlı değişimi 81
Şekil 5.11 : Şehzadebaşı İstasyonu EXT-YU-06 sondajındaki çubuk ekstansometrelerde ölçülen deformasyonların zamana bağlı değişimi 81
Şekil 5.12 : Yüzeyde yapılan nivelman ölçüm noktaları şeması 82
Şekil 5.13 : Yüzeydeki nivelman noktalarının, tünel eksenine (Ua) ve tünel üst yarı kazı aynasına (Ub) olan uzaklığı 83
Şekil 5.14 : KH2Y-1A, KH2U-1A, KH2Y-3A, tünellerinde km yakınına yerleştirilen yüzey bulonlarında ölçülen düşey yer değiştirme değerleri ile tünel ilerlemesi arasındaki ilişkisi 84
Şekil 5.15 : YH2U-1A ve YH2U-2A tünellerinde km yakınına yerleştirilen yüzey bulonlarında ölçülen düşey yer değiştirme değerleri ile tünel ilerlemesi arasındaki ilişki 87
Şekil 5.16 : Yenikapı-Unkapanı güzergahında anakaya ve Güngören Kili'nde ölçülen maksimum düşey yerdeğiştirmeler 89
Şekil 5.17 : YH2U-2A tüneli bölgesindeki bina ve yüzey nivelmanlarının tünel eksenine olan uzaklığı ile 150. günde ölçülen tasman arasındaki ilişkisi 90
Şekil 5.18 : YH2U-A tüneli bölgesindeki bina ve yüzey nivelmanlarının tünel eksenine olan uzaklığı ile 250. günde ölçülen tasman arasındaki ilişkisi 90

Şekil 5.19 : Koska T tipi tünelleri bölgesindeki bina ve yüzey nivelmanlarının tünel eksenine olan uzaklığı ile 150. günde ölçülen tasman arasındaki ilişkisi 91
Şekil 5.20 : Koska T tipi tünelleri bölgesindeki bina ve yüzey nivelmanlarının tünel eksenine olan uzaklığı ile 250. günde ölçülen tasman arasındaki ilişkisi 91
Şekil 5.21 : YH2U-2A tüneli yakınındaki nivelman ölçüm noktalarında 100. gün sonunda ölçülen toplam oturma miktarları 92
Şekil 5.22 : Koska T tipi tünellerinin yer aldığı kesimdeki nivelman ölçüm noktalarında 100. gün sonunda ölçülen toplam oturma miktarları 93

SEMBOL LİSTESİ

a	**:** Tünel eksenine her iki yönde bulunan kritik bina geçiş bölgesinde bulunan oturma bulonları mesafesi
c	**:** Kohezyon
d	**:** Örnek kalınlığı
D	**:** Tünel çapı
e	**:** Boşluk oranı
$\mathbf{E_P}$	**:** Pressiometrik Modül
Is	**:** Nokta Yükleme Direnci
σ_B	**:** Tek Eksenli Basınç Direnci
n	**:** Porozite
$\mathbf{N_{30}}$	**:** Son iki 15 cm çakma işlemi için gerekli vuruş sayısı
γ_k	**:** Kuru Birim Hacim Ağırlığı
γ_d	**:** Suya Doygun Birim Hacim Ağırlığı
γ_n	**:** Doğal Birim Hacim Ağırlığı
$\mathbf{P_L}$	**:** Limit Basınç
$\mathbf{q_u}$	**:** Serbest Basınç Direnci
ϕ	**:** İçsel Sürtünme Açısı
K	**:** Permeabilite
S	**:** Ölçek
P	**:** Noktasal Yük
$\mathbf{W_n}$	**:** Su İçeriği
Z	**:** Örtü Kalınlığı
$\mathbf{U_a}$	**:** Nivelman noktalarının tünel eksenine olan uzaklığı
$\mathbf{U_b}$	**:** Nivelman noktalarının tünel üst yarı kazı aynasına olan uzaklığı

İSTANBUL METROSU YENİKAPI-UNKAPANI ARASININ MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

ÖZET

Bu çalışmada, İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı arasında karşılaşılan zemin ve kaya ortamlarda gerçekleştirilen arazi ölçüm, gözlem ve deneyleri ile laboratuvar verileri kullanılarak güzergahın mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Çok sayıda laboratuvar ve arazi deney ve ölçümleri derlenmiş ve bölge ile ilgili mühendislik jeolojisi veri bankası oluşturulmuştur. Bu veri bankasının oluşturulmasında ve yapılan değerlendirmelerde, incelenen güzergahta açılmış olan 76 adet araştırma sondajı, 20 adet jeoteknik ölçüm ve gözlem sondajından elde edilen SPT deneyleri, sondajların farklı derinliklerde uygulanan pressiometre deneyleri, sondaj manevra boyları için hesaplanan RQD değerleri, tünel içerisinde yapılan Schmidt çekici ölçümleri ile laboratuvar deney sonuçları kullanılmıştır.

Araştırma deney ve gözlem amaçlı sondaj loglarından yararlanılarak hattın 1/2000 ölçekli boy kesiti hazırlanmıştır.

Tünel düzeyinde geçilen anakayanın zayıf-orta kaya niteliğinde olduğu, farklı litolojilerden oluştuğu ve birim içerisinde gerçekleştirilen metro tünelleri için öngörülen kazı ve sağlamlaştırma uygulamaları açısından önemli bir stabilite sorunu oluşturmadığı saptanmıştır.

Güngören killerinin mühendislik özellikleri, güzergah üzerindeki farklı lokasyonlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Killerin fiziksel ve mekanik özellikleri lokal olarak farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar su durumu ile kum ve silt içeriği oranlarından kaynaklanmaktadır. Güzergahta karşılaşılan kil genellikle yüksek plastisiteli ve düşük dirençtedir. Birimin tünel mühendisliği açısından sorunlu olduğu ve öngörülen sağlamlaştırma uygulamalarına ilave önlem gerektirdiği ortaya çıkmıştır.

Tünel içi konverjans ölçümleri, Yenikapı ve Koska bölgesinde bina ve yüzey nivelman ölçümleri ile Vezneciler P tipi tünellerin açıldığı kesimde katlı ekstansometre ölçümleri değerlendirilerek teknik girişimin etkileri üç boyutlu olarak irdelenmiştir.

Güngören killeri içerisinde geçilen YH1U-1A ve YH2U-1A tünellerinde yapılan tünel içi konverjans ve yüzeyde nivelman ölçümleri oluşan deformasyon ve oturma miktarlarının projede öngörülen sınır değerin üzerinde olduğunu görülmüştür. Bölgedeki kilin taşıma kapasitesi, şişme ve sıkışma özelliklerinden kaynaklanan yüksek deformasyonlar mevcut tünel açma yönteminin (N.A.T.M) değiştirilmesine

neden olmuştur. Sonuçta, sorunlu kesimde Koruyucu Kemer yöntemi uygulanarak oluşan yüksek deformasyon ve oturma değerleri düşürülmüştür. Bu yeni yöntemin anakayada uygulandığı sınırlı bir kesimde ise tünel içi deformasyon ve yüzeydeki oturmaların ihmal edilebilir düzeye düştüğü görülmüştür.

Bunun dışında YH2U-2A ve Koska T tipi tünelleri bölgesinde yapılan 150. ve 250. gün sonundaki oturma miktarları ile nivelman ölçüm noktalarının tünel ekseninden olan uzaklığı irdelenmiştir. Ölçülen oturma miktarlarının bu uzaklıklara bağlı olarak azaldığı saptanmıştır. T tipi tünellerin bulunduğu kesimlerde etkilenme alanının tünel ekseninden 30 m, A tipi tünellerde ise 20 m mesafe içerisinde kaldığı görülmüştür.

P tipi tünellerinin açıldığı kesimde, yüzeyde tünel ekseni üzerine yerleştirilen katlı çubuk ekstansometrelerde ölçülen deformasyon değerleri, tünel çapının yaklaşık 3 katı kadar olan etkilenme bölgesi içerisinde kalmasına rağmen, 40 m.'ye varan örtü kalınlığından dolayı çok düşüktür.

Sonuçta metro kazısı sırasında oluşan tünel içi veya yüzey deformasyonların güzergahta yer alan Güngören formasyonunun geçildiği kesimlerde stabilite ve yüzey yapılarının hasarı açısından sorun oluşturduğu ve başlangıçta öngörülen kazı ve destekleme projesine ilave önlem gerektirdiği anlaşılmıştır.

THE ENGINEERING GEOLOGY IN BETWEEN YENIKAPI AND UNKAPANI IN ISTANBUL SUBWAY

SUMMARY

In this thesis, it is aimed to evaluate the study area with the principals of engineering geology by using field measurement, observation and tests with laboratory data realized in soil and rock environment of the tunnel route between Yenikapı and Unkapanı in İstanbul Subway.

Many laboratory and field tests and measurements collected and data bank of engineering geology about study area has been formed. To be able to create and form this data bank, the results of SPT tests achieved from 76 investigation boreholes and 20 geotechnical measurement and observation boreholes, pressuremeter tests applied on different depths of the boreholes, RQD values estimated for the length of boreholes progress drilled on the Yenikapı-Unkapanı tunnel route, Schmidt hardness tests in tunnel with the results of laboratory test were taken into consideration in this study.

1/2000 scaled cross-section of the tunnel route was prepared by using the boreholes having the specified goals such observation and test.

It is determined that The bedrock on the tunnel route level is of poor-fair rock quality, formed by the different lithologies and not causing an important stability problem from the applications of reinforcement and excavation point of view which is assumed for the subway tunnels in the bedrock.

Engineering properties of Güngören clays were taken into consideration by evaluating different locations on tunnel route. Physical and mechanical properties of clays indicate differences locally, because of the water content and ratio of sand-silt. Güngören clays have low strength and high plasticity on the tunnel route. It needs additional precaution to the prescience reinforcement application from the tunnel engineering point of view.

Evaluating the inner tunnel convergence measurements, building and surface settlement measurements around Yenikapı and Koksa tunnel region along with the layered rods exstansometer measurements around Vezneciler P type tunnels region, the effects of excavation were examined as three dimension.

Deformation and settlement values were observed over the limit (values) that should be foreseen on the project from the result of the measurements of nivelman on the surface and inner tunnel convergence that were made at YH1U-1A and YH2U-1A tunnels excavated through Güngören clays. High deformation values which are occured by bearing capacity, swelling and squeezing properties of Güngören clays

caused changing of the existing tunnel excavation method (N.A.T.M.). As a result, the high deformation and settlement values have been decreased by applying the new umbrella arch method in the indecent section. It is observed that in the limited part on the bedrock where this new method is applied, the inner tunnel deformation and settlement on surface amounts reach neglectable values.

Apart from that, the distance of the nivelman's measurement points from the tunnel axis and the settlement values of 150 and 250 days which are measured in the region of YH2U-2A and Koksa T type tunnels are examined. It is observed that the measured settlement values decrease with increasing the distance from the tunnel axis. Effected area in T type tunnels regions is in the distance of 30 m. inside and in A type tunnels region 20 m. inside from the tunnel axis.

The deformation values which were measured by layered rod exstansometer laid on the tunnel axis in the P type tunnel region, are in decent values because of the cover thickness about 40 m., eventhough it is located in where the effected area is three times more than the tunnel diameter.

In conclusion, inner tunnel or surface deformations which are occured during the tunnel excavation in the parts of Güngören Formation on the tunnel route are caused the problem from the point of stability and damage of the surface buildings and understood to take an additional precaution to the excavation and supporting project which was foreseen at the beginning.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, İstanbul Metrosu 2. Aşama 2. Kısım tünel inşaatının yapıldığı Yenikapı-Unkapanı güzergahında karşılaşılan kaya, zemin, dolgu niteliğine sahip ortamlarla ilgili önemli bir ekonomik maliyetinin olduğu düşünülen arazi, sondaj, ölçüm-gözlem ve laboratuvar çalışmalarının derlenmesi, mühendislik jeolojisi veri bankasının oluşturulması ve gelecekte benzer ortamlarda yapımı planlanan çalışmalara ışık tutabilecek bilgilere dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, Yenikapı ve Koska tünellerinde kil ve kaya içerisinde geçilen kesimlerde oluşan tünel içi ve yüzey deformasyonlarını saptamaya yönelik jeoteknik ölçüm sonuçlarının mühendislik jeolojisi verileri ile olan ilişkisi irdelenmiştir.

1.2 İncelemenin Kapsamı

Çalışma kapsamında, incelenen güzergahın üstyapılar ve yapay dolgularla örtülü olması nedeniyle veri tabanlarının oluşturulmasında, metro projesinin farklı aşamalarında yapılmış olan 76 adet araştırma sondajı, 20 adet jeoteknik ölçüm sondajı sonuçları kullanılmıştır. Sondajların açımı aşamasında yapılan 630 adet standart penetrasyon deneyi ile 53 adet pressiometre deneyi sonuçları birlikte değerlendirilmiştir. Yenikapı tünellerinde, 7 ayrı noktada yerinde üç farklı yönelimde Schmidt çekici deneyleri, bu noktalardan alınan örnekler üzerinde nokta yükleme deneyleri ve fiziksel deneyleri laboratuvarda yapılmıştır. Yenikapı tünellerinde anakayada geçilen yaklaşık 100 m uzunluklarındaki birbirine paralel YH1U-2A ve YH2U-2A tünellerinde RMR kaya sınıflandırma sistemi kullanılarak elde edilen RMR değerlerinin grafikleri oluşturulmuş ve bu grafiklerden geçilen kaya ortamının niteliği irdelenmiştir. Sondajlardan alınan örnekler üzerinde yapılan zemin mekaniği (kıvam limiti, elek analizi, serbest basınç ve kesme kutusu) deneylerine ait sonuçlar

da değerlendirmeler de kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan geçilen ortamların mühendislik özellikleri saptanmıştır.

Güzergah dışında Trakya Formasyonu'na ait litolojiler ve Güngören killerinde yapılmış olan diğer mühendislik jeolojisi çalışmaları sonuçları ile inceleme alanından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın diğer bir önemli kısmını ise jeoteknik ölçüm ve değerlendirmeler bölümü oluşturmaktadır. Yenikapı tünellerinde kil ve kaya ortamlarında geçilen kesimlerde yapılan tünel içi konverjans ölçümleri incelenmiş, farklı litolojik ortamda ölçülen deformasyon değerlerindeki farklılıkların ne tür etmenlerin etkisinde geliştiği irdelenmiştir.

Ayrıca Yenikapı tünelleri ve Koska tünelleri bölgesinde yüzeyde yapılan nivelman ölçüm değerlerinin tünel kazı aynasına yaklaşılırken nasıl bir değişim gösterdikleri grafikler yardımıyla irdelenmiş, bununla birlikte nivelman bulonlarının tünel eksenine olan uzaklıkları ile ölçülen oturma miktarları arasındaki ilişki zamana bağlı değerlendirilmiştir. Bu sayede farklı tünel kesimlerde okunan oturma miktarlarındaki değişim kayaçların mühendislik özellikleri, tünel örtü kalınlığı, yer altı suyu durumu, tünel açma yöntemi ile ilişkilendirilmiş ve ne kadarlık bir alanda etkilenmenin meydana geldiği ortaya çıkarılmıştır.

Yenikapı tünelleri ve Koska T tipi tünelleri bölgesinde yüzeydeki nivelman bulonlarında 100. gün sonunda okunan oturma değerleri kullanılarak yüzey deformasyonlarını gösteren blok diyagramlar oluşturulmuştur.

Ayrıca, yaklaşık 9 m çapında açılan P (peron) tipi tünelleri üzerindeki Şehzadebaşı İstasyonu bölgesinde tünel ekseni üzerinde açılan jeoteknik ölçüm amaçlı katlı çubuk ekstansometre kuyularında yapılan deformasyon ölçümlerinden elde edilen düşey deformasyonlar, P tipi tünellerin kazısı tamamlanıncaya kadar geçen süre için incelenmiş ve litoloji ile ilişkilendirilmiştir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından hazırlanan 1/5000 ölçekli harita üzerine yerleştirilen araştırma ve ölçüm amaçlı çalışmalar, 1/2000 ölçekli kesite işlenmiştir. Kesitte, güzergahta yer alan birimlerin jeoteknik özelliklerini içeren bilgilendirme tablosu da oluşturulmuştur.

1.3 İnceleme Alanının Tanıtılması

1.3.1 Konum

Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahı, İstanbul'un Avrupa yakası güney kesiminde Eminönü ilçesi sınırları içerisinde olup, kuzeyde Haliç Körfezi, doğuda İstanbul Boğazı, batıda Fatih ilçesi, güneyde Marmara Denizi ile sınırlıdır (Şekil 1.1). Tünel güzergahı çift hat olup 5200 m. uzunluğundadır. İstanbul'daki tüm ulaşım araçları ile çalışma alanına ulaşmak mümkündür.



Şekil 1.1 İnceleme alanının konumu

1.3.2 İklim

İstanbul ilinin bulunduğu bölge genel olarak Akdeniz, Karadeniz ve karasal iklim tiplerinin birbirine geçişi şeklinde karakterize edilebilen Marmara iklim tipinin etkisindedir. Yazlar sıcak ve nispeten kurak, bahar ve kış ayları ise yağışlı geçmektedir. Kış mevsiminin yarı ılıman olarak geçtiği kabul edilebilir. Yıllık ortalama yağış miktarı 680.3 mm. dolayındadır.

2. METRO PROJESİNİN TANITIMI

2.1 Giriş

İstanbul Metrosu 2.aşama inşaatı Taksim-Yenikapı arası olup hat boyu 5200 m.dir. Taksim-Unkapanı ve Unkapanı-Yenikapı olmak üzere iki kısma ayrılan bu aşamada 4 istasyon (Şişhane, Unkapanı, Şehzadebaşı, Yenikapı) bulunmaktadır.

2.2 İstanbul Metrosunun Teknik Özellikleri

İstanbul Metrosu; derin kazıları, geniş istasyonları, ulaşım tüpleri, makas yerleri, havalandırma, drenaj, enerji ve bakım kontrol odaları ile değişik boyut ve biçimlerdeki çok sayıdaki yeraltı kaya yapısının oluşturduğu bir ulaşım sistemidir.

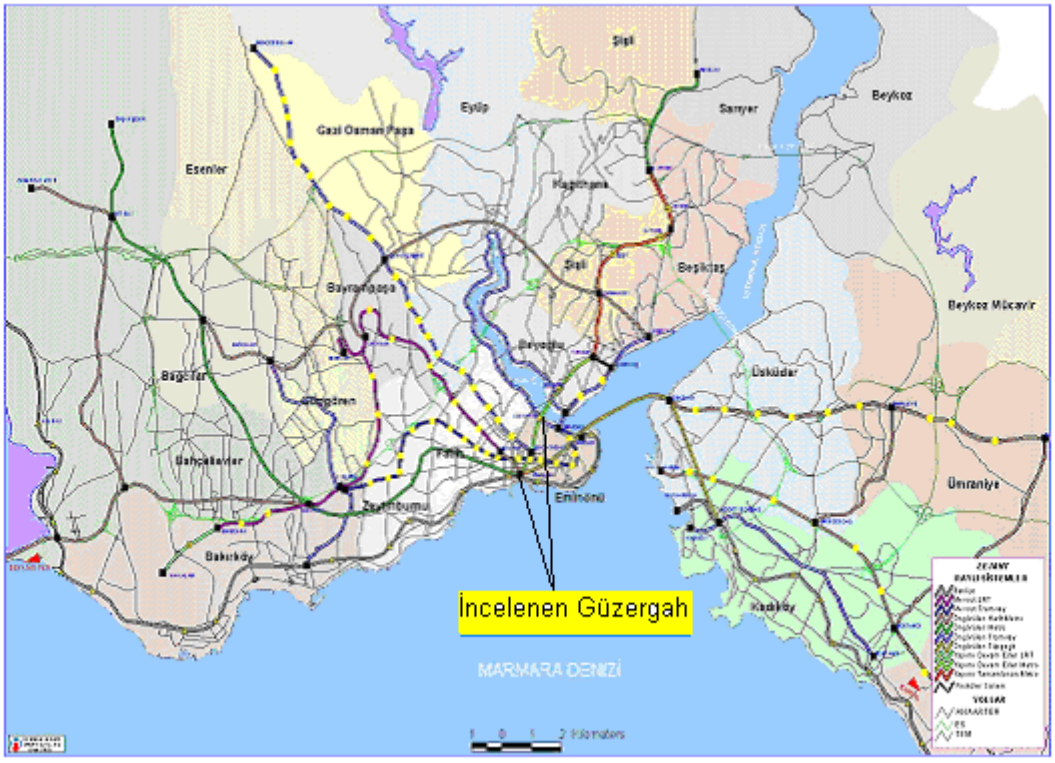
İstanbul Metro Sistemi, 13 istasyondan oluşan, hattın yer altı ve yer üstünde seyrettiği Kuzey-Güney-Batı koridorunda hizmet verecek yüksek kapasiteli bir raylı sistemdir. Proje, 1. Aşama (Taksim-4. Levent), 2. Aşama (Taksim-Yenikapı), 3. Aşama (Yenikapı-Topkapı) olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmektedir. Teknik özellikleri Tablo 2.1 de verilmiştir.

Sinyalizasyon sistemi tam otomatik tren işletme ve tren kontrol sistemlerini ihtiva etmekte olup, sürücü sadece kapıların kapanmasını kontrol edecektir. Sinyal sistemini 90 sn. aralıkla tren işletmesine imkan verecek şekilde dizayn edilmiştir.

Ray açıklığı 1435 mm olup, raylar ve traversler elastik yataklara oturtturularak sarsıntısız ve konforlu seyahat imkanı sağlanacaktır. Hatta S 49 kalite ray çeliğinin kullanılması öngörülmüştür.

2.3 İstanbul Metrosu 2. Aşama İnşaatı

2.Aşama Yenikapı-Taksim hattı arasında toplam tünel uzunluğu 10229 m. dir (Şekil 2.1). Taksim-Unkapanı arası metro inşaatında 5 tip tünel kesiti kullanılmakta olup tünellerin boyu 4080 m. dir. Yenikapı-Unkapanı arası metro inşaatında ise 7 tip tünel kesiti kullanılmakta olup tünellerin boyu 6155 m. dir. Tünel güzergahı üzerindeki kazı kesitleri 22 ile 116 m^2 arasında değişmektedir (Tablo 2.2). Koruyucu Kemer yöntemine geçildikten sonra ana hat tünellerinde kullanılan A4 tahkimat yönteminde ve T-1 tipi makas tünellerinde tünel cidarına çelik boruların montajlanması sebebiyle kazı kesit alanı genişletilmiştir. Yaklaşım tünellerinin kazı kesitleri at nalı şeklindedir.



Şekil 2.1 İstanbul'da raylı sistem hatları haritası

2.3.1 Yenikapı-Unkapanı Arası Metro İnşaatı

Yenikapı-Unkapanı arası metro inşaatı işi sahipliğini İstanbul Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanlığı üstlenmiştir. Proje Mühendisliğini Yüksel Proje-Louıs Berger Ortaklığı yapmakta olup, yüklenicisi Anadolu Metro Ortaklığı,Yüksel-Güriş-

Reha-Başyazıcıoğlu ortak girişimidir. İhale bedeli ise 14.825.275.223.491 TL dir. Yenikapı-Unkapanı metro inşaatı işine 15.12.1998 tarihinde başlanılmıştır.

Tablo 2.1 2. Aşama Yenikapı-Taksim hattı projesinin özellikleri

Toplam güzergah uzunluğu	5203 m (tek hat)
Delme tünel uzunluğı	3385 m. ikiz (A), 271 m tek tünel, 630m. Peron, 350 m. bağlantı tünel
Aç–Kapa tünel uzunluğu	115 m
Haliç Geçiş Köprüsü	712 m
İstasyonlar	3 adet yer altı istasyonu (Şişhane, Şehzadebaşı, Yenikapı), 1 adet köprüde istasyon (Unkapanı İstasyonu)
Toplam Yatırım Tutarı (tahmini) İnşaat maliyeti Elekromekanik Taksim –Şişhane Elektromekanik Toplam	 150 milyon $ 225 milyon $ 35 milyon $ 375 milyon $
Yolcu taşıma kapasitesi (max.) İşletme hızı Maksimum hız İstasyon peron uzunluğu 4'lü Tren Yolcu Kapasitesi Ayakta Toplam	70.000 yolcu / saat (tek yönde) 60 km/saat 80 km/saat 180 m 228 yolcu 944 yolcu 1172 yolcu

Proje Yenikapı'dan Unkapanı'na kadar yaklaşık 2600 m. uzunluğunda olup, delme ve aç-kapa tüneller ile 2 adet istasyon inşaatını kapsamaktadır. Ayrıca Hafif Raylı Sistemi Yenikapı İstasyonuna bağlayan yaklaşık 700 m. uzunluğundaki Yenikapı-Aksaray hafif metro güzergahı inşaatı da bu proje kapsamındadır.

Tablo 2.2 İstanbul Metrosu 2. Aşama Taksim-Yenikapı inşaatı tünel tip kesitleri

TÜNEL TİPİ		**KESİT ALANI (m^2)**
A (Dairesel şekilli ana hat tünelleri)	A1 (N.A.T.M.)	35.3
	A2 (N.A.T.M.)	36.8
	A3 (N.A.T.M.)	36.8
	A4 (N.A.T.M.)	37.9
	A4 (Umbrella Arch)	42.6
B (Bağlantı tünelleri)	B1 (İstasyon platform bağlantı veya geçiş tünelleri)	43.2
	B2 (Merdiven Tünelleri)	22.4
	B3 (Emniyet giriş-çıkış tünelleri)	44.6
C (Çift Hatlı Tüneller)		77.7
P (Yakın indirme- bindirme peronlarındaki istasyon platform tünelleri)		65.3
T (Makas bölgelerindeki tünelleri)	T (N.A.T.M.)	101.2
	T-1 (Umbrella Arch)	116.2

A tipi ana hat tünellerinin çapı 6.50 m., en geniş kesitli T tipi tünelinin çapı 13.7 m. dir. Tek hatlı tüneller tip A (4074 m.), platform tünelleri tip P (554 m.), birleşim tünelleri tip T (417 m.), istasyon bağlantı ve merdiven galeri tünelleri tip B1, B2, B3 (586 m.), çift hatlı tüneller tip C (230 m.) ve yaklaşım-şaft tünelleri (294 m.) dir. Tünel imalatının % 73'ü tamamlanmıştır (Tablo 2.3).

Tablo 2.3 İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı arası toplam tünel boyları

Tip	Proje Değeri	Kazı Miktarı	Gerçekleşme Yüzdesi	Beton Miktarı	Gerçekleşme Yüzdesi
A	4074	3279	80	3127	77
P	554	401	72	0	0
T	417	269	65	269	65
C	230	110	48	99	43
B1	258	39	15	0	0
B2	133	133	100	79	59
B3	195	0	0	0	0
YAKLAŞIM	250	234	94	16	6
ŞAFT	44	44	100	0	0
TOPLAM	**6155**	**4509**	**73**	**3590**	**58**

Şaftlar-Yaklaşım Tüneli-Aç-Kapa Yapısı-LRTS Hattı

Davutpaşa-Kırkçıbaşı mahallesinde 20 m. derinlikte elips kesitli kesişen fore kazıklı olarak projelendirilen Yenikapı Şaftının imalatı tamamlanmış olup şaft bölgesinden Yenikapı İstasyonu'na kadar olan tünellerin imalatına hizmet etmektedir.

Koska Şaftı, Laleli Koska Caddesi üzerinde 10 m. çapında, dairesel kesiti kesişen kazık sistemi ile açılmış olup yüzeyden 25 m. derinliktedir. Koska Şaftı ve km 5+300-6+190 arasındaki tünellerin imalatı tamamlanmış olup km 5+735-5+635 arasında bir kesimin ise henüz kazısı yapılamamıştır.

Süleymaniye yaklaşım tünelinin boyu 128 m. olup halen Unkapanı-Şehzadebaşı arası tünel imalatları için servis vermektedir.

Yenikapı istasyon öncesi km 4+790.00-4+850.60 arasında yer alan T tipi tünelde Eylül 2001 tarihinde göçük meydana gelmiştir. Göçük bölgesindeki kısım aç-kapaya dönüştürülmüş ve imalatı tamamlanmıştır.

LRTS Hattı, Taksim-Yenikapı metro hattı ile Boğaz Tüp Geçişi arasında transfer istasyonu olan Yenikapı İstasyonu'ndaki yoğun yolcu trafiği, 700 m.'lik aç-kapa ve delme tünellerle Hafif raylı Sistem içerisinde yer alan Aksaray istasyonuna aktaracaktır. Bu hattın tünel kazılarına Kasım 2004'de başlanmıştır.

İstasyonlar

Yenikapı İstasyonu, Hafif Raylı Sistem ve İstanbul Metrosunun kesişim noktası olarak planlanmıştır. Ayrıca Tüp Tünel istasyonu ile yolcu bağlantısı mevcutttur. Bünyesinde 650 araçlık otopark mevcuttur. Toplam inşaat alanı (İstasyon ve otopark) yaklaşık 59.000 m^2 dir. İstasyon yapısı 3 katlı olarak zeminden 20 m. ve otopark yapısı ise 12 m. derinlikte yeraltında tasarlanmıştır.

Şehzadebaşı İstasyonu, konkors aç-kapa, platform katları delme tünel olarak ve yaklaşık 44 m. derinlikte tasarlanmıştır.

2.4 Yenikapı-Unkapanı Arası Tünellerinde Kazı ve Destekleme Çalışmaları

İstanbul metrosu tünel kazı destek tipinin belirlenmesinde birçok parametre göz önünde tutulmuştur. Öngörülen kazı ortamın jeomekanik özellikleri, örtü kalınlığı, yapı yoğunluğu, jeoteknik ölçüm verileri, uygulama aşamasında kazı aynası jeolojik durumu, kaya kalitesi, teknolojik altyapı ve deneyim destekleme tipinin belirlenmesindeki parametrelerdir.

Tahkimat, taşıma yeteneğini kaybetmiş kayayı taşıyamaz, ancak kayaları basınç ve kütle etkisine dayanacak duruma getirir. Bu nedenle tüneli çevreleyen kaya ortamındaki deformasyonların, istenmeyen oturmalara, gevşemelere ve kaya mukavemetinin azalmasına neden olmayacak kadar küçük olması gerekir. Bu durumu sağlamak için tünellerde süren kullanmak veya sayısını arttırmak, kazı göbeğini bırakmak, kazı adımlarını küçültmek, kazı alanını küçültmek (parçalı kazı) kazının her safhasında kayanın hava ile temasını kesmek gibi önlemler alınır.

İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahı arasında açılan tünellerin 2/3'lik kısmı N.A.T.M yönteminin ilkelerine bağlı kalarak İstanbul Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanlığı tarafından oluşturulmuş destekleme

sistemlerinin uygulanması ile açılmıştır. Ancak daha sonra bir kısmı açılmış ve açımına halen devam edilmekte olan 1/3'lük kesimde ise N.A.T.M yönteminin kritik kaya ve zemin koşullarında bu yöntemle devam edilemeyeceğine karar verilmiştir. Bu kararın alınmasında tünel içi deformasyon değerleri ve tünel kazısı nedeniyle yüzeyinde meydana gelen oturma miktarlarının beklenenin üzerinde seyretmesi etkili olmuştur. Bu kesimde son yılarda dünyada sorunlu ortamlarda sık tercih edilen koruyucu kemer uygulamasına geçilmiştir.

T ve C Tipi tüneller dışındaki tüm tünellerde kazı, üst yarı ve alt yarı olmak üzere iki aşamada yapılır. Üst yarı safhasında sadece çelik iksa kesit alanı kadarlık kesim paletli veya tekerlikli kırıcılı makineler kullanılarak yapılmaktadır. Ortalama 1500 kg'lık kırıcı tabancalar (Jack-hammer) ilk kazıda, 750 kg'lık kırıcıların monteli olduğu makineler ise ikinci kazı yani tarama safhasında kullanılır. İkinci tur kazısının amacı, teorik hattın içinde kalan kazılmamış kısımların temizlenmesidir.

Kazı sonrası çıkan pasa, yandan açılıp-boşaltma yapabilen paletli kepçeler yardımıyla kamyonlara yüklenir, veya doğrudan lastik tekerlikli kepçelerle; ayna gerisindeki depo alanına, veya tünel dışına çıkarılır. Toplanan bu kazı malzemeleri yaklaşım tünelleri veya şaflardan dışarıya çıkarılmaktadır .

Kayanın stabilitesine, su durumuna ve seçilen kazı destek tipine bağlı olarak kazı sırasında aynada göbek bırakılmaktadır. Bu göbeğin oluşturulmasında jeoloji etkili olmasına karşın, makinaların çalışma alanı ve işçilik kolaylığı da göz önünde bulundurulur.

Kazı, tarama ve pasa alımı sonrası kafes kiriş sistemdeki çelik iksa montajı yapılmaktadır. İki adet T 20 ve bir adet T 26'lık nervürlü çelik ile bunları bağlayan bağlantı elemanlarından oluşan iksa, çelik hasır, kaya bulonu, sürgü çubukları ve püskürtme beton desteklemenin ana elemanlarıdır. İstanbul Metrosu tünellerinde kaya veya zemin ortamlarını karakterize eden dört farklı kazı-destekleme tipi öngörülmüştür (Tablo 2.4).

Kazı sonrası tünel içinde hasır montajına geçilir. Bütün tünel tüplerinde kullanılan çelik hasır tipleri Q221/221 veya Q 335/335 ve bindirme oranlarında yatay ve düşey yönde 30 cm.dir. Montajda dikkat edilecek en önemli nokta hasırın kaya yüzeyine mümkün olduğunca yaklaştırılmasıdır (Şekil 2.2).

Tablo 2.4 İstanbul Metrosu tünellerinde kullanılan destekleme tipleri

	A1	**A2**	**A3**	**A4**
Ortam	Sağlam Kaya	Orta - Sağlam Kaya	Zayıf Kaya	Çok Zayıf Kaya Veya Zemin Ortamı
Çelik iksa (kafes kiriş)	Yok	Var	Var	Var
Çelik hasır (Q221/221)	Tek kat	Tek kat	Çift kat	Çift kat
Püskürtme beton (d=cm)	d = 10-15 cm	D = 20 cm	d = 20 cm	d = 25-30 cm
Kaya bulonu (adet)	4-5 (şaşırtmalı)	6-7 (şaşırtmalı)	7-8 (şaşırtmalı)	7-8 (şaşırtmalı)
Sürgü çubuğu (adet)	yok	12 (max)	20 (max)	30 (max)
Kazı ano boyu (m)	1.5 m	1.0-1.2 m	0.8-1.0 m	0.6-0.8 m



Şekil 2.2 Yenikapı tünellerinde kazı sonrası hasır çelik montajı

İksa montajı, iki parça halinde gelen kafes iksanın, flanşları üzerinde açılan dört yuva içinden civata ve somunla bağlanmasıyla yapılmaktadır. İksa pabuçları her iki yanda sağlam ortama basmalı ve topoğrafik ölçümler yapılmalıdır. Montajı ve topografik teslimatı tamamlanan iksa, önceki kazıda kurulan ve tahkimatı tamamlanmış bulunan iksaya, T 20'lik nervürlü çubuklarla kaynak yapılır. İşban demiri adı verilen bu elemanların boyu, iki iksa aralığından 20 cm. fazla bırakılarak bindirme yapılır. (Şekil 2.3).

İstanbul Metrosu çalışmalarında püskürtme beton kuru karışım olarak planlanmıştır. Püskürtme beton uygulanacak yüzey, serbest malzemelerden temizlenir ve su geliri varsa değişik yöntemlerle drene edilir, çelik hasırın yüzeye iyi yapışması sağlanır. Püskürtme beton uygulamasında çelik hasırın esnemesinin engellenmesi, malzeme karışımının homojen olmasının sağlanması, hava basıncı ve su karışımı oranının ayarlanmasına dikkat edilmektedir (Usta, 2001).

Kaya bulonları, İstanbul Metrosu tünellerinde, iksa, hasır çelik ve püskürtme betondan oluşan tahkimatın tamamlayıcı elemanı olarak kullanılmaktadır. Yükleme plakaları, püskürtme beton kabuğunun yüzeyine basarak, kaya kemeri ile birlikte çalışmasını sağlar.



Şekil 2.3 Yenikapı tünellerinde iksa montajı sonrası topoğrafik ölçüm

İstanbul Metrosu tünellerinde en yaygın olarak Enjeksiyonlu Kaya Bulonu (E.K.B) kullanılmaktadır. Bir delici makine tarafından delinen deliğe enjeksiyon malzemesi doldurulduktan sonra 3.00 m. boyunda T 26 ‘lık nervürlü çelikten imal edilen bulon itilerek yerleştirilir. Bir ucu 10 cm. dişli ve taşıma plakaları 200/200/10 mm. boyutlarında olup, metrik 24 somun kullanılır. İçine yerleştirildiği delik çapı min. 45 mm.dir. Su-çimento malzemesinden oluşan enjeksiyonun hazırlanmasında Mai-Pump adı verilen özel makinalar kullanılmaktadır (Şekil 2.4). E.K.B özellikle kırıklı-çatlaklı yapıya sahip, ancak foraj duraylılığı olan ortamlarda tercih edilmektedir (Usta, 2001).

Enjeksiyon priz süresi dolmadan torklanamadığı için anında çalışan bir tahkimat elemanı değildir. Torklama işlemi özel amaçla üretilen ve üzerinden skala olan anahtar vasıtasıyla yapılır. Torklama kuvveti 50 kN (5000 kg) olup, bu değere karşılık verebilen bulon sağlam kabul edilir. Bulon kontrol metodu, diğer tüm bulon çeşitleri içinde geçerlidir.

Süren uygulaması, kazı sonrası dökülebilen kaya ortamlarındaki sulu bölgelerde, kazıya başlanmadan önce yapılmaktadır. Çelik iksa üzerinden, yatayla maksimum 5-10^{o} açı yapacak şekilde çakılan borular ve adetleri kazı destek türlerine göre değişir. Uygulamada daha çok 1 1/ 4" çapında, 3.00 m.lik borular kullanılmaktadır. 2 mm. et kalınlığına sahip boruların kesme mukavemeti 26 mm.lik nervürlü çelikten daha yüksek olduğu için tercih edilmiştir. Enjeksiyonlu veya çakılarak uygulanabilir.



Şekil 2.4 Yenikapı tünellerinde enjeksiyonlu kaya bulonu delgisi

Alt yarı imalatı kazı ringinin tamamlanarak, oluşacak gerilmelerin tahkimata homojen olarak dağıtılması amacıyla, üst yarı kazısını takiben yapılır. Tünellerin alt ve üst yarı kazıları aynı kazı destek sistemin ile yapılmaktadır. Kullanılan çelik hasır Q221/221 veya Q 335/335 sınıflarında olup, her iki yöndeki bindirmesi 30 cm. dir. Ancak düşey yöndeki bindirmeler üst yarı esnasında bırakılan 10 mm. çapındaki düz bindirme demirleriyle yapılır. Bu demirler 1.10 m. boyunda olup L şeklinde kıvrılarak, üst yarı çelik hasırlarının alt kısımlarına konur ve alt yarı aşamasında bükülüp açılarak düşey bindirme sağlanır. Donatı montajı sonrası, yüzeye, reglaj

(malzemeden ve sudan arındırma) uygulamasından sonra püskürtme beton atılarak tahkimat bitirilmiş olur (Usta, 2001).

2.5 İstanbul Metrosu Tünellerinde Koruyucu Kemer Yöntemi ve Uygulaması

Tünel cidarında koni şeklinde bir yapı oluşturarak tünel açımı sırasında birincil zemin veya kaya sağlamlaştırma işlemi olarak tasarlanan Koruyucu Kemer (Umbrella Arch) yöntemi ilk olarak İtalya'da geliştirilmiştir. Bu yöntemin, zayıf jeolojik koşullarda, özellikle geniş kesitli tünellerde, stabilitenin sağlaması açısından etkili olduğu görülmüştür.

Koruyucu Kemer yönteminin, N.A.T.M. için ilave destekleme yöntemi olarak pahalı olduğu düşünülmektedir. Ön araştırmalar, teknik ve ekonomik faktörlerin uygun dengelenmesinde önem taşımaktadır. Sağlamlaştırma mekanizmasının açıklanması, uygulama alanının tanımlanması, tasarım şartnamesinin belirlenmesi, dizayn ve sağlamlaştırılacak bölgenin mühendislik özelliklerinin bilinmesi için gerekli çalışmalar yapılmalıdır (Kotake ve diğ., 1994).

Bu tür yeni sistemler ve kazı yöntemleri, olumsuz jeolojik (tünel kazı aynasındaki kaya kütlelerinin düzensiz, kırıklı, çatlaklı, faylanmış olması, düşük dayanım göstermesi) ve jeoteknik koşullar altında geniş kesitli tünellerin inşa edilmesi için geliştirilmiştir. Bir tünel projesinde hedefe ulaşmak için uygulama süresinin kısalığı, maliyetin düşük olması ve çalışanların güvenliği gibi hususlar dikkate alınmalıdır. Bu açıdan, olumsuz jeolojik koşullar altında tam kesitte kazının yapılması için ekipman imkanlarının arttırılması, ön destekleme tekniklerinin geliştirilmesi çalışmayı kolaylaştırır (Pagliacci ve Yamomoto, 1992).

Koruyucu Kemer yönteminin bir çok farklı özellikteki zemin veya kaya tipleri içinde olumlu etkisi kanıtlanmıştır. Yöntem; ayna stabilitesini ve iş güvenliğini arttırmakta, yüzey oturmalarını, düşme ve kaymaları azaltmaktadır. Ayrıca ekipman boyutlarının, boru uzunluğu, sayısı, bindirme miktar ve geometrisi ile enjeksiyon basıncının değişebilir olması bu yöntemin avantajlı yönleridir (www.rotex.fi).

Yeni Avusturya tünel açma yönteminin temel prensipleri ışığında, uygulanan destekleme-sağlamlaştırma sistemleri, Taksim-4.Levent arasında başarıyla

uygulanmış ve Yenikapı-Taksim Metrosu tünellerinde de uygulanmaya devam edilmiştir.

Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahı iki ayrı hattan oluşmaktadır. Bu kesimde farklı uzunluklarda A tipi ana hat tünelleri, P tipi peron tünelleri, T tipi makas tünelleri ve C tipi çift hatlı tüneller ile bağlantı tünelleri projelendirilmiştir. Yenikapı Şaftında kazıya 2000 yılı başında başlanmış, yaklaşım tüneli ile ana hatlara ulaşılmış ve Unkapanı yönünde tünel açımına devam edilmiştir. Önce Hat 1 in kazısına başlanmıştır.

Güngören kilinde açılan bu tünelin ilk 100 m.lik kısmında tünel içi deformasyonları yer yer 20-30 cm. ye ulaşmıştır. Km 4+648.00 de aşırı gerilmeden dolayı kazı aynasında kopma, kayma ve aynanın 15 m. gerisinde radyal çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Bu nedenle mevcut destekleme yöntemiyle kazıya devam edilemeyeceği sonucuna varılarak yeni bir yöntem araştırılmıştır (Kurt ve diğ. 2002).

Yurtdışında özellikle İtalya ve Japonya'da otoyol, metro ve hızlı tren projelerinde sorunlu jeolojik koşullardaki tünel geçişlerinde kendine özgü parametreler içeren ve ortam koşullarına uyarlanan Koruyucu Kemer yönteminin uygulaması projede görevli mühendisler tarafından İtalya'da incelemiştir. Sonuçta yöntemin tünel ve yüzey emniyeti, verimlilik ve ilerleme hızı verileri değerlendirilerek Yenikapı-Unkapanı güzergahı arasında açılmamış olan tünel kesimleri için uygun bir yöntem olduğuna karar verilmiştir.

İstanbul Metrosunda Kazı Aynasının İyileştirilmesi

Yüzeyde ve tünel içindeki deformasyonların önlenmesi için kazı aynasının iyileştirilmesinde en etkili yolun sürtünme kolonu (zemin çivisi) olduğu düşünülmüştür. Bu düşünceyle ayna önünden 10°-12^{o} derece baş aşağı eğimli 125 mm. çapında delikler açılarak içine 12 m. uzunluğunda, 14 mm. çapında tor çelikten imal edilmiş nervürlü çubuklar yerleştirilmektedir. Ortam koşullarına göre bu çivilerin sayısı 16-24 arasındadır.

Delme işlemi İtalyan N.C.B. 1200 delicisiyle yapılmaktadır. Bu deliklerin içine 2-3 bar basınç altında, çimento/su oranı 2/1 olan karışım enjekte edilmektedir. 12 m.

boyundaki zemin çivilerinin 6 m.si bir periyodluk kazıda kullanılmakta diğer 6 m.si bindirme olarak kalmaktadır (Şekil 2.5, Şekil 2.6).



Şekil 2.5 Yenikapı tünelleri kazı aynası önündeki zemin çivisi delgisi

İstanbul Metrosu Tünellerinde Koruyucu Kemerin Oluşturulması

Bu yöntemde kemeri oluşturacak çelik borularının tesis edileceği kısım kazı projesi kesitinin 50 cm. dışında kalmaktadır. Boruların yerleştirileceği deliklerin delinmesi ve makinanın çalışması için gerekli olan bu aralık, başlangıçta 3 m.lik bölümde genişletme kazısı altında, genişleyen ve yükselen iksalar monte edilerek elde edilmekte, daha sonra delik çapı 130 mm., delik açısı baş yukarı 6°-8° olacak şekilde delinerek içine et kalınlığı 6.3 mm. ve boyu 9 m. olan 10 cm çapında çelik borular yerleştirilmektedir (Şekil 2.7, Şekil 2.8).

Uygulamanın yapıldığı bölgede, tünel aynası çevresine 30 cm. aralıkla sayıları 24-30 arasında değişen 9 m.lik çelik borular monte edilir. Boru ağzı enjeksiyon manşonu ile kapatılarak, etrafı alçı ile sıvanır ve enjeksiyon verilmeye başlanır. Geri dönüş borusundan enjeksiyon gelinceye kadar işleme devam edilir. Bu işlemle boru ve boru ile delik arasında kalan boşluk çimento şerbeti ile doldurulmaktadır. Enjeksiyon basıncı 2-3 bardır. Çimento/su oranı ise 2/1 dir.



Şekil 2.6 Zemin çivileriyle iyileştirme işlemi tamamlanmış tünel aynası



Şekil 2.7 İstanbul Metrosunda kemeri oluşturan çelik borular

9 m. uzunluğundaki borular çakıldıktan sonra 6 m lik kesim kalmakta, 3 m.lik kısım ise bindirme olarak bırakılmaktadır. A4 destekleme yönteminde yapılan koruyucu kemer uygulamasının kesit görünümleri Şekil 2.9 da verilmiştir.

Kemeri oluşturan çelik borular, kazı ile tahkimat arasında geçen sürede bir ucu güçlendirilmiş aynaya, bir ucu da iksaya basan kiriş olarak çalışmakta tahkimatı

bitmiş olan bölgede gelen yükleri tahkimat kabuğuna üniform bir şekilde aktarmaktadır (Kurt ve diğ. 2002).



Şekil 2.8 Yenikapı tünellerinde kazı aynası önünde çelik boruların montajı

Çelik boruların montajı ve enjeksiyon tamamlandıktan sonra tünel kazısına geçilmektedir. Kazı iki aşamada yapılırken 0.60 m lik ilerlemelerden oluşan bir kazı periyodu 6 m. den oluşmaktadır. Bir periyotta 10 adet çelik iksa kullanılmaktadır. Birincil tahkimatı oluşturan elemanlar çelik iksa, hasır çelik, püskürtme beton, zımbalama çivisi ve bulondan oluşmaktadır. Kazı periyodu tamamlandıktan sonra benzer uygulamalar bir sonraki periyot için tekrarlanır (Tablo 2.5).

Tablo 2.5 Koruyucu kemer yönteminde sağlamlaştırma ve destekleme elemanları

Kazı Tipi	A4
U.A. boruları (l =9m)	24-30 adet
Ayna Zemin Çivisi (l= 12m)	16-24 adet
Çelik İksa	Kafes tipi
Hasır Çelik (Q335/335)	Çift kat
Püskürtme Beton (d=cm)	35 cm
Bulon (l= 3m)	2/2 adet
Zımbalama (Ayak) Zemin Çivisi (l= 5 m)	1/1 adet
Kazı İlerleme Adımı (m)	0.6 m

Şekil 2.9 Koruyucu kemer uygulamasının kesit görünümleri

3. GENEL JEOLOJİ

İnceleme alanındaki birimlerin sınırlı alanlarda yüzeylemesi nedeniyle Sayar (1976) ın hazırlamış olduğu 1/50.000 ölçekli Haliç ve Civarının Jeolojisi haritasından yararlanılmıştır (Şekil 3.5). Yüzeyde sınırlı alanlarda görülen mostralar ve Yenikapı-Unkapanı güzergahı üzerinde yapılan sondajlardan yararlanılarak tünel boy kesiti oluşturulmuştur (EK-A).

3.1 Bölgesel Jeoloji

İstanbul ve dolayında temeli, kalınlığı birkaç bin metreyi bulan Paleozoyik yaşlı kayaçlar oluşturmaktadır. Temel kayaçları, yer yer magmatik sokulumlarla kesilmiştir. Bu birimler, kuzeyde Üst Kretase yaşlı volkaniklerle batıda Tersiyer birimleriyle örtülmektedirler. Tersiyer yaşlı çökellerin doğrudan Paleozoyik yaşlı birimlerin üzerinde yer alması, bölgenin Mesozoyik dönemde kara haline geldiğini ve Tersiyer öncesi yükselerek aşınması ile açıklanmaktadır.

Palezoyik temelin en üst kesimini oluşturan Trakya Formasyonu genellikle kumtaşı-silttaşı-kiltaşı-şeyl ardalanmasından oluşmaktadır. Birimin içinde seyrek olarak kireçtaşı ve konglomera seviyeleri de görülmektedir. Formasyon, kalınlıkları birkaç on metreyi bulan diyabaz ve andezit sokulumlarıyla kesilmektedir.

Kaya (1971) tarafından Trakya Formasyonu olarak adlandırılan Alt Karbonifer yaşlı birimler, Boğaz'ın doğusunda, güneyinde ve Haliç çevresinde, Üsküdar-Maltepe-Kadıköy kıyı bölgesinde, Beykoz'un kuzeyinde, Darıca-Gebze-Denizliköy dolaylarında geniş alanlarda yüzeylemektedir.

İnceleme alanının batısında (Küçükçekmece Gölü'nün kuzey ve batısı) yüzeyleyen Orta Eosen yaşlı Kırklareli kireçtaşı resifal karakterli olup, Karbonifer istifi üzerine uyumsuz olarak gelmektedir. Çoğunlukla beyaz, yer yer sarımtırak olan birim; resif

çekirdeği, resif önü ve havza içi çökellerinden oluşur. Bu birimler birbirleri ile yanal geçişlidir (Görür ve diğ.,1981).

Tünel güzergahının güneyinde Trakya Formasyonu'nun üzerine açısal bir uyumsuzlukla Orta-Üst Miyosen yaşlı çökeller gelmektedir. Miyosen çökellerini, sırasıyla alttan üste doğru gevşek çakıl-kum-siltten oluşan Çukurçeşme Formasyonu (Sayar,1976), kil-marn ardalanmalı Güngören Formasyonu (Sayar,1976), kavkılı kireçtaşı ve marndan oluşan Bakırköy Formasyonu oluşturmaktadır (Sayar, 1976).

İstanbul'un kuzeyindeki tepelerin üst kesimlerinde sınırlı alanlar kaplayan Pliosen-Pleistosen yaşlı ve kil-kum-çakıl düzeylerinden oluşan Belgrad Formasyonu, Paleozoik kayaçlarının üzerine uyumsuz olarak gelir. Boğaz ve Haliç tabanındaki genç çökeller, genellikle kum, silt ve kil boyutundaki karasal malzemeden oluşur. Arada çakıllı veya daha kaba ve bol kavkılı düzeyler de bulunmaktadır. Haliç çökelleri çamur, kil, silt, kum ve kavkılı çamur içermektedir. Tabanda kum ve iri çakıllı düzeyler yeralır. Boğaz tabanındaki çökeller ise çoğunlukla siltli kum ve kum boyutundadır.

3.2 İnceleme Alanının Stratigrafisi

İnceleme alanında, Paleozoyik Alt Karbonifer ile, Senozoyik Üst Miyosen ve Kuvaterner ile temsil edilmektedir. İstanbul dolayındaki jeolojik çalışmalardan derlenmiş stratigrafi dikme kesiti Şekil 3.1 de verilmiştir.

3.2.1 Paleozoyik

3.2.1.1 Alt Karbonifer

Trakya Formasyonu

Trakya Formasyonu'nu oluşturan birimler genellikle İstanbul Boğazı'nın batı yakasında yüzeylenir. Formasyon, Boğazın doğu yakasında, Üsküdar-Kadıköy-Maltepe kıyı bölgesinde, Beykoz'un kuzeyinde ve Darıca-Gebze-Denizliköy dolaylarında da yüzeylemektedir.

Şekil 3.1 İnceleme alanı ve çevresinin stratigrafik kesiti

Yenikapı-Unkapanı tünel kotunda karşılaşılan en yaygın oluşumu Karbonifer yaşlı bu birim oluşturmaktadır. Bu formasyon genellikle kumtaşı, silttaşı, kiltaşı ve şeyllerden oluşmaktadır. Kırıntılı sedimanter istif yer yer andezitik veya daha bazik karekterdeki damar kayaçları tarafından kesilmektedir.

Bölgenin kuzeyindeki Cebeciköy civarında, formasyon içinde siyahımsı mavi renkli düzeylerden oluşan kırıntılı kireçtaşı aratabakaları da bulunmaktadır. Trakya Formasyonu 1000 metreden fazla kalınlıkta kırıntılı-taneli-klastik bir kayaç topluluğundan meydana gelmiştir. Kumtaşları sarı-kahverengimsi sarı, şeyller genellikle gri- yeşilimsi kahverengindedir.

Birimlerin tabaka kalınlıkları genel olarak 5-50 cm. arasındadır. Tabaka kalınlığı kumtaşı düzeylerinde diğer litolojilere oranla daha fazladır. Tünel içerisinde karşılaşılan kumtaşlarında tabaka kalınlığının yer yer 50-100 cm ye ulaştığı saptanmıştır (Şekil 3.2). Kumtaşı seviyeleri genellikle ince-orta kum boyunda, kötü boylanmış, bol mikalı ve kuvarslı, feldispat ve yabancı kayaç kırıntılarından oluşmaktadır. Taneler demirli ve silisli çimento ile bağlanmıştır. Taneleri bağlayan çimentoyu oluşturan demiroksitten dolayı kayanın hakim rengi genellikle kirli sarımsı kahverengidir. Trakya Formasyonu'nu oluşturan taze (ayrışmamış) kumtaşı ve şeyller orta sert, ayrışmış kesimler ise oldukça gevşek ve dağılgandır.



Şekil 3.2 Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahı üzerinde karşılaşılan anakayaya ait kumtaşları

Trakya Formasyonu'nun seyrek fosilli oluşu ve diğer sedimantolojik özellikleri derin denizel bir ortamda çökeldiğini ortaya koymaktadır.

Trakya Formasyonu, inceleme alanının tabanını oluşturmakta ve Miyosen yaşlı birimler tarafından açılı uyumsuzlukla örtülmektedir. Önceki araştırmalarda formasyonun yaşı Alt Karbonifer (Vizeen) olarak verilmiştir (Abdüsselamoğlu, 1963, Baykal ve Kaya, 1963).

3.2.2 Senozoik

3.2.2.1 Üst Miyosen

Üst Miyosen, Paleozoyik temel üzerine transgresif olarak gelmektedir. Bu istif Haliç'in güney ve güneybatısında daha kalın, kuzeyinde ancak yüksek kotlarda yer yer örtü halinde görülmektedir (Sayar, 1976). İstanbul'un batısında devamlı seriler halinde bulunan ve 100-150 m kalınlığında olan Üst Miyosen çökelleri üç litolojik birime ayrılmıştır. Belirli özelliklerine göre kolayca ayırt edilebilen bu birimler tabandan tavana doğru kumun baskın olduğu, çakıl araseviyeli Çukurçeşme Formasyonu, kil ağırlıklı ve marn araseviyeli Güngören Formasyonu, maktralı kireçtaşı-marn-kil araseviyeli Bakırköy Formasyonu olarak adlandırılmıştır (Sayar, 1976).

<u>Çukurçeşme Formasyonu (Kum ve Çakıllar)</u>

Haliç ve çevresinde Paleozoyik üzerinde yer yer küçük mostralar halinde görülen Sarmasiyen çökellerinin tabanını oluşturan kum ve çakıllar bölgenin güney ve güney batısında kil, marn ve kalkerlerle örtülü bulunmaktadır. Rami'nin kuzeyinde Çukurçeşme mevkiinde oldukça düzenli ve kalın bir tabaka serisi halinde yüzeyleyen kumlar, Küçükçekmece, Küçükköy, Kemerburgaz dolaylarında geniş alanlarda izlenebilir (Sayar, 1976). Dikey ve yatay geçişlerle bazen ince taneli bazen kaba taneli olan kum ve çakıllar içinde yer yer ince kum bantları, kil seviyeleri ve mercekleri bulunmaktadır. Kumlar yukarı seviyelerde daha ince taneli ve kil arakatkılıdır. Üst seviyelere doğru Güngören Formasyonu'na geçiş göstermektedir (Sayar, 1976). Kum ve çakıllar içindeki çeşitli noktalardan toplanan omurgalı

hayvanlara ait diş ve kemikleri ve yer yer rastlanan mactra fosilleri bu birimlerin Sarmasiyen'de lagüner bir ortamda çökeldiğini göstermektedir (Arıç, 1955).

Güngören Formasyonu (Kil ve Marnlar)

Çukurçeşme Formasyonu üzerinde düşey ve yanal geçişli olarak yeşil renkli kil ve marn tabakaları yer almaktadır. Bu birimlere, bölgenin güney kesimlerinde özellikle Haliç'in batısındaki arazide rastlanmaktadır.

İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahında karşılaşılan Güngören Formasyonu'nun (Süleymaniye kili) hakim litolojisi kil olup araseviyeler halinde marn, kum seyrek olarak da kireçtaşı mercekleri içerdiği görülmüştür.

Kil düzeyler yeşil, marnlar ise kirli beyaz renkte olup orta sert-yumuşak niteliktedir (Şekil 3.3). Surlar içerisinde 0-20 m. kalınlıkta olan kil ve marnlar Yedikule ile Güngören civarında 100-120 m. maksimum kalınlığa ulaşır. Tabakalar üst seviyelerde mactralı ince kalker bantlarına geçiş gösterir (Sayar, 1976). Formasyon, adını kil tabakalarının oldukça kalın ve düzenli olarak izlendiği Güngören mevkisinden almıştır (Sayar, 1976).



Şekil 3.3 Yenikapı tünelleri bölgesinde Hat 1 tüneli aynasında Güngören kili

Kil ve marnlar, omurgalı hayvan fosilleri ile bazı mollusk fosilleri içermektedir. Fosil içerikleri diğer formasyonlardan bir ayrıcalık göstermemekte, yer yer ostrakod kavkılarına, bitki yaprak ve saplarına rastlanmaktadır (Sayar, 1976).

Kil ve marnlar, tünel güzergahında ve Edirnekapı-Fatih arasında, Çapa, Aksaray, Yenikapı, Cerrahpaşa, Beyazıt, Sultanahmet, Silivrikapı, Belgratkapı, Samatya civarlarında gözlenmiştir. İ.Ü Fen-Edebiyat Fakülteleri'nin temellerinde 4-13 m. kalınlıktaki dolgunun altında yeşil killer bulunmaktadır. Beyazıt ve Süleymaniye civarı kil ve marnların üst seviyesini oluşturmaktadır. Birime Üst Miyosen yaşı verilmiştir (Arıç, 1955).

Bakırköy Formasyonu (Mactra'lı Kalkerler)

Bakırköy Formasyonu, egemen olarak kil ve marn araseviyeli kireçtaşlarından oluşmaktadır. Kireçtaşları beyaz ve sarımsı renkli, bolca mactra fosilli, gözenekli yer yer tebeşirimsidir. Bu birim alt seviyelerde kalın, üst seviyelerde daha ince tabakalıdır.

İstifin tabanında yer alan kalın tabakalı ve bol fosilli kesimler ince tabakalı olanlara göre daha sert ve sıkıdır. Yer yer mikritik özellikte olabilen bu seviyelerde karstik erimeler gözlenmiştir. Güngören Formasyonu ile geçişli Sarmasiyen yaşlı Bakırköy Formasyonu'nun kalınlığı yaklaşık 20 m. dir. Yüz yıllar boyunca İstanbul şehrinin çeşitli yapılarında (surlar, camiler v.b.) yapı malzemesi olarak kullanılan ve Bakırköy Taşı olarak bilinen mactralı kalkerler Bakırköy dolaylarında yaygın olarak yüzeyledikleri için Bakırköy Formasyonu olarak isimlendirilmiştir (Sayar, 1976).

Yenikapı-Unkapanı güzergahında da yüzeylemeyen bu birim, Beyazıt ve Fatih civarında 10-20 cm. kalınlığında kireçtaşı tabakaları halinde görülmektedir. Mactra'lı kalkerler İstanbul'un batı kısmında çeşitli amaçlar için yapılan kazılarda, Bakırköy, Bahçelievler, Esenler, Bağcılar, Yenibosna, Haznedar, Halkalı, Yeşilköy, Topkapı ve Zeytinburnu dolaylarında bu birimle karşılaşılmaktadır.

Mactra'lı kalkerler içinde bol miktarda, mactra türleri ile bazı seviyelerde melanopsis, unio türleri ve bazen omurgalı hayvanlara ait kemiklere rastlanmıştır. Sarmasiyen denizinin tipik fosili olan mactraların çeşitli türlerini içeren bu kalkerler Üst Miyosen'in Sarmasiyen katını temsil etmektedir.

Kum ve çakıllarla başlayarak mactralı kalkerlerle biten bu üç formasyonun alt seviyeleri omurgalı fosilce zengindir. Kil ve marnlar fosilce biraz fakir, mactralı kalkerler ise bol miktarda fosil kavkıları ve iç kalıplarından oluşmuş acı su fasiyesli oluşumlardır. Aralarındaki melanopsis ve uniolu seviyeler zaman zaman tatlı su fasiyesinin geliştiğini göstermektedir (Arıç, 1955).

3.2.2.2 Kuvaterner

Haliç ve dolayındaki en genç birimler, akarsu yataklarındaki alüvyonlar ile kavkılı kırıntılar içeren çökellerden oluşur. Ayrıca bölgenin büyük bir kesimi yapay dolgular ile örtülmüştür.

Alüvyonlar

Haliç'e dökülen Alibeyköy ve Kağıthane derelerinin vadilerinde görülür. Kuvvetli yağış dönemlerinde suların getirdiği erozyon malzemesinden oluşan bu alüvyon örtüsünün genişliği ve kalınlığı homojen değildir. Güneye doğru genişleyen alüvyon düzlüğü Alibeyköy barajı civarlarında 15-40 m. kalınlıkta olup Silahtar civarında daha ince elemanlardan oluşur ve daha fazla kalınlık gösterir (Sayar, 1976).

İstanbul'un vadileri ve çukur kısımları yüzlerce yıldan beri araziyi düzeltmek için toprak ve molozlarla doldurulmuştur. Beyazıt ile Çemberlitaş arası vadi iken şimdi tamamen düzdür ve üzerine Kapalıçarşı inşa edilmiştir. Bayrampaşa (Lycos) deresi Edirnekapı ile Topkapı arasından Yenikapı'ya doğru uzanmaktadır ve vadi karakterini korumaktadır.Vatan caddesi bu dere içindedir. Atatürk bulvarının Saraçhane-Unkapanı arası moloz ve topraklarla doldurulmuştur (Sayar, 1962).

Kavkılı Çökeller (Kuşdili Formasyonu)

Haliç kıyılarında ve Haliç tabanında, alttaki Paleozoyik temel üzerinde değişik kalınlık gösteren (kıyılarda 0.70-12 m; Haliç tabanında 40-50 m) killi-siltli-kumlu denizel organizma kabukları içeren seviyelere rastlanmıştır. Önceki çalışmalarda Kuşdili Formasyonu olarak adlandırılan bu birim, tabanda denizel kavkılar içeren kumlarla başlamakta, üste doğru silt, kil ve bataklık ortamında oluşmuş organik kile dönüşmektedir. Bakırköy, Siyavuşpaşa deresinin denize yakın kesimlerinde gerçekleştirilen sondajlarda, birimin kalınlığı 12 m. olarak belirlenmiştir

(Mahmutoğlu ve diğ. 2001). Eminönü sahilinde -50 m. kotunda rastlanan kavkılı-killi kumlar, kıyıdan 150 m. uzakta -10-20 m. kotlarında bulunmaktadır. Aynı şekilde Sirkeci meydanında kıyıdan 250 m mesafede, yüzeyden 14.40-18 m. derinlikte ostrealı killer ile karşılaşılmıştır. Bu genç tortullar Haliç kıyısının zamanla gerilediğini gösterir. Haliç içinde yapılan sondajlarda deniz dibindeki akar nitelikteki çamurların altında bulunan killer Haliç'in değişik kesimlerinde farklı kalınlıktadır (Sayar, 1976).

Yapay Dolgu

Yenikapı-Unkapanı güzergahı üzerinde yapılan araştırma ve jeoteknik ölçüm sondajlarında, kalınlığı yer yer 14 m.yi bulan yapay dolgular kesilmiştir. Haliç kıyılarında ve civarında yapılan temel kazıları ve sondajlarda, Kuvaterner sedimentlerinin üzerindeki dolgular çoğunlukla moloz, toprak, çakıl, beton, kum, tuğla, tahta v.b. malzemelerden oluşmaktadır. Kıyıdan iç kesimlere doğru kalınlığı azalan yapay dolgular inceleme alanında da çok yaygındır.

Yenikapı Şaftı-Yenikapı İstasyonu arasında yapılan araştırma sondajlarından elde edilen verilere göre, dolgu kalınlığı Yenikapı Göçük bölgesinde 2-10.5 m., Yenikapı İstasyonu bölgesinde 2-12.5 m., LRTS hattı üzerinde 4.6-8.5 m., Koska Şaftı'nın (Laleli) açıldığı noktada 2-11.3 m., Şehzadebaşı İstasyonu'nda yapılan sondajlarda 4-10.5 m., Şehzadebaşı ve Unkapanı İstasyonlarının planlandığı kesimlerde 2-14 m. arasında değişmektedir.

3.2.3 Andezit ve Diyabaz Daykları

Paleozoyik yaşlı temel kayası, değişik kalınlıklı andezit ve diyabaz daykları ile kesilmiştir. İncelenen tünel kazılarında yer yer bu tür dayklarla karşılaşılmıştır. Daykların çevresindeki anakaya aşırı derecede kırıklı ve çatlaklıdır. Daykların genişlikleri 0.30-4.0 m. arasındadır.

Diyabaz daykları taze ve sert, çok dayanımlı ve keskin kırıklıdır. Koyu yeşilimsi gri, bazen açık yeşilimsi gri görülürler. Ayrışmış yüzeyde ise sarımsı kahverengi veya soluk yeşilimsi gridir. Diyabaz dayklarının kalınlıkları 0.10-15.0 m. arasındadır. Bu daykların İstanbul Boğazı'nda ve Anadolu yakasında sık sık rastlanan Alpin orojenezi sırasındaki volkanizma ile ilişkili olduğu savunulmuştur (Sayar,1976).

Yenikapı tünellerinde, Hat 2 Unkapanı yönündeki 36 m. uzunluklu makas tüneline bağlanan A tipi kesitli tünelin kazısı sırasında 29-32 m. ler arasında 1-3 m. genişliğinde 5-10 cm. kalınlığındaki diyabaz daykları geçilmiştir.

3.3 Yapısal Jeoloji

3.3.1 Tabakalar ve Kıvrımlar

Trakya Formasyonu, iki kez tektonik deformasyona uğramıştır. Bunlardan Hersiniyen orojenezinde, yaklaşık D-B yönlü sıkışma etkisiyle kıvrılmış, devrilmiş, parçalanmış ve dilimlenmiştir. Alpin orojenezinde ise yaklaşık K-G yönlü basınçların etkisiyle, farklı doğrultularda yeniden kırılmış, faylanmış, bindirmeli-naplı bir yapı kazanmıştır (Ketin, 1989).

Anılan orojenezler etkisiyle Trakya Formasyonu'nu oluşturan kayaç topluluğunda çok yönlü bir kırılma ve kayma sistemi gelişmiştir. Böyle bir sistemin meydana gelmesinde etken olabilecek diğer bir faktör ise Trakya Formasyonu'nun İstanbul napının bir parçası olarak allokton bir kütle durumunda bulunmuş olabileceği görüşüdür (Şengör, 1984).



Şekil 3.4 Yenikapı-Unkapanı güzergahında YH2U-2A tüneli km 5+010.20 de kalınlığı 50 cm. olan kumtaşı

Trakya Formasyonu'nu oluşturan litolojik birimlerde tabaka kalınlığı genellikle 5-50 cm. arasında değişmekte, kumtaşı seviyelerinde yer yer 1 m.ye ulaşmaktadır (Şekil 3.4).

Formasyon içinde küçük boyutlu kıvrımlarla sıkça karşılaşılır. Tabakalar, 30-90 derece eğimli olup kıvrım eksenleri yaklaşık K-G yönlüdür. Tünelde yapılan gözlemler sırasında Trakya Formasyonu'na ait tabakaların birkaç iksa aralığında konum değiştirdiği görülmüştür.

Üst Miyosen tabakaları ise genellikle 5-10° ile GD ve GB'ya eğimli olmakta, tabakalar yer yer küçük kıvrımlanmalar göstermektedir (Sayar, 1976).

3.3.1 Faylar ve Çatlaklar

Orojenik etkiler nedeniyle Trakya Formasyonu'nda çok sayıda kırık ve çatlak takımı gelişmiştir. İnceleme alanı ve çevresinde, çoğu düşeye yakın eğimli çok sayıda aktif olmayan fayla karşılaşılmıştır. Değişik doğrultulara sahip olan kırık ve çatlak takımları kahverengi kil ve demir oksit bileşimli ince dolgu malzemeleri ile doldurulmuştur. Çatlaklı ve fissürlü yapı gösteren anakaya litolojileri yüzeysel suların etkisiyle çabuk ayrışmakta ve kaya üzerinde değişik kalınlıkta ayrışma zonu oluşmaktadır. Birim içindeki makaslama zonları ise genellikle, KD-GB ve KB-GD doğrultuludur. Temel kayasının Miyosen yaşlı Güngören Formasyonu ile dokanağına yakın kesimleri (Diskordans yüzeyi) çok fazla kırıklı ve ayrışmış durumdadır.

Şekil 3.5 İncelenen güzergahı içine alan Haliç ve Civarının Jeoloji Haritası (Sayar, 1976)

4. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

4.1 Giriş

İstanbul Metrosu, Yenikapı-Unkapanı güzergahı arasında kalan tünellerinin %75'lik kesiminin nihai kaplaması tamamlanmıştır. Kalan kesimin kazı çalışmaları da büyük ölçüde bitirilmiştir. Metro tüneli kazıları sırasında, güzergah boyunca Trakya Formasyonu ve Güngören Formasyonu geçilmiştir. Kuvaterner yaşlı akarsu alüvyonları, Kuşdili Formasyonu olarak adlandırılan denizel çökeller ve yapay dolgular da tünel kotu üzerinde yer almaktadır.

Uzunluğu 5200 m. olan (çift hat) tünellerin güzergahı üzerinde 76 araştırma sondajı ve 20 jeoteknik ölçüm ve gözlem sondajı açılmıştır. Fizibilite ve uygulama aşamalarında açılan bu sondajların toplam derinliği 2614.05 m. dir (EK-B). Bu sondajlardan elde edilen veriler, sondaj yapımıyla eş zamanlı yürütülen arazi deneyleri ve tünel açımı sırasında kazı aynalarından elde edilen veriler bu bölümde irdelenmiştir. Sondajlardan alınan örnekler üzerinde uygulanan laboratuvar deneyleri ile arazide tünel içerisinde yapılan Schmidt çekici ölçümleri, güzergahta yer alan kayanın RMR (Rock Mass Rating) e göre sınıflanmasında kullanılmıştır.

4.2 Mekanik Sondajlar

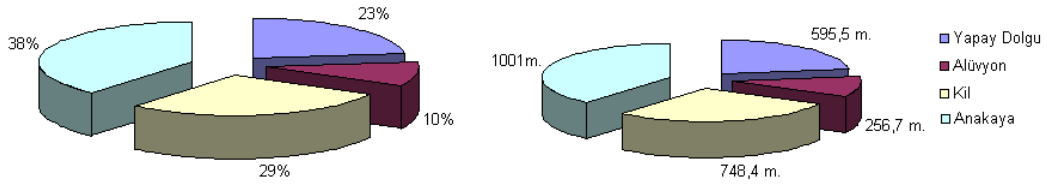
Çalışılan güzergah boyunca, tünelin kazı kotu altına kadar inen ve toplam uzunluğu 2116.05 m. olan 76 araştırma sondajı açılmıştır. Sondaj kuyularının derinlikleri 12-49 m. arasındadır. Tünel ekseninin üzerinde ve yakınındaki lokasyonlarda açılan sondajların dışında, kazı aşamasında ortamda oluşabilecek deformasyonları ölçmek amacıyla 16 ekstansometre sondajı ile 4 inklinometre sondajı açılmıştır. Ölçüm ve gözlem amaçlı sondajların toplam derinliği 498 m. dir. Sondajlar darbeli ve rotary sondaj tekniği ile açılmıştır. Güzergahta yer alan tüm sondajlardan elde edilen sonuçlardan hareketle oluşturulan veri tabanı EK-B de verilmiştir.

Kil-silt-kum-çakıl gibi ayrık taneli zeminlerin kıvam ve sıkılıklarını belirlemek için her 1.5 m de SPT deneyi uygulanmıştır. Kritik yapıların bulunduğu kesimlerde pressiometre deneyleri için özel sondajlar açılmıştır. Bölgede yapılan sondajların yerleri ve logları EK-A da verilen mühendislik jeolojisi paftasında gösterilmiştir.

Araştırma sondajları uygulama aşamasında karşılaşılacak birimlerin yapısal ve litolojik özelliklerini, yeraltı suyu durumunu ve kaya kalitesini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Sondajların çoğunda yapay dolgu, alüvyon veya Miyosen yaşlı ayrık kayaçlar geçilmiştir. Hemen hemen tüm sondajlarda genç veya antik dolgularla karşılaşılmıştır. Bu birimlerin bulunduğu kesimlerde kuyu içerisinde değişik derinliklerde uygulanan standart penetrasyon ve pressiometre deneyleri yapılmış, alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden hareketle, güzergahta yer alan birimlerin tane boyu dağılımı, kıvam limitleri, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Güzergah boyunca açılan sondajların yerleri, derinlikleri, logları ve yeraltı su seviyeleri EK-A da verilen boy kesitte gösterilmiştir. Tüm sondajların ana kayayı kesen uzunluklarının toplamı 1000.9 m.dir.

Toplam derinliği 2600 m.yi geçen Yenikapı-Unkapanı güzergahı sondajlarında kesilen litolojilerin uzunlukları ve yüzdeleri Şekil 4.1 de verilmiştir.



Şekil 4.1 Yenikapı-Unkapanı metro hattında yapılan sondajlarda kesilen birimlerin toplam sondaj uzunluğuna göre yüzdeleri.

4.3 İncelenen Güzergahtaki Birimlerin Mühendislik Özellikleri

Yenikapı-Unkapanı güzergahı boyunca açılan sondaj kuyularında, ayrık birimlerin sıkılık, kıvam, serbest basınç direnci, limit basınç ve elastisite modülü gibi fiziko-mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Zayıf nitelikteki kayaçlar içerisinde SPT deneyleri, önemli yapıların bulunduğu

kesimlerdeki sondajlarda ise pressiometre deneyleri yapılmıştır. Güzergahın belirli kesimlerinde, anakaya üzerinde Schmidt Çekici ölçümleri yapılarak kaya ortamın tek eksenli basınç dayanımı hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Yenikapı tünellerinde anakayada geçilen yaklaşık 100 m uzunluğundaki birbirine paralel Hat 1 ve Hat 2 tünellerinin geçtiği ortamlar RMR kaya kalitesi sınıflamasına göre değerlendirilmiştir. Ayrıca Trakya Formasyonu litolojileri ve zemin özellikli Güngören killeri üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları değerlendirilmiştir. Bu bölümde irdelenen arazi ve laboratuvar deneyleri Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki birimler üzerinde yapılan arazi ve laboratuvar deney ve ölçümleri

Deneyler		**Trakya Formasyonu**	**Güngören Formasyonu**	**Alüvyon**	**Yapay Dolgu**
Arazi Deneyleri	Standart Penetrasyon		√	√	√
	Pressiometre	√	√		
	Schmidt Çekici	√			
Laboratuvar Deneyleri	Nokta Yük Direnci	√			
	Doğal Birim Hacim Ağırlığı		√		
	Kuru Birim Hacim Ağırlığı	√			
	Doygun Birim Hacim Ağırlığı	√			
	Porozite	√			
	Boşluk Oranı	√			
	Özgül Ağırlık		√	√	√
	Su Muhtevası		√	√	√
	Kıvam Limitleri		√		
	Elek Analizi			√	
	Serbest Basınç		√		
	Direkt ve Endirekt Kesme		√		

4.3.1 Arazi Deneyleri

Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlarda standart penetrasyon ve pressiometre deneyleri yapılmış, sondaj karotlarından anakayanın kalitesi tanımlanmıştır. Ayrıca Yenikapı tünellerinde anakayanın kesildiği belirli noktalarda yerinde Schmidt Çekici ölçümleri yapılmıştır.

4.3.1.1 Standart Penetrasyon Deneyi

Metro güzergahında yer alan ayrık kayaçların taşıma güçleri ile kıvam ve sıkılıkları, sondajlarla eş zamanlı olarak yürütülen SPT deneyleriyle belirlenmiştir.

Deney, sondaj kuyularında standart ölçülerdeki örnek alıcıyı, 76.2 cm. yükseklikten serbest olarak düşen 63.5 kg ağırlığındaki bir şahmerdanla, zemine 45.7 cm. çakmak

suretiyle yapılır. Örnek alıcının, ilk 15.2 cm. lik kısmının zemine girişi için gerekli vuruş sayısı örselenme nedeniyle ihmal edilerek, ikinci ve üçüncü 15.2 cm. lik kısımların giriş için gerekli vuruş sayıları toplamına SPT direnci denir ve N_{30} olarak kaydedilir.

İncelenen güzergah üzerinde açılan 77 araştırma sondajında 630 SPT deneyi yapılmıştır (EK-B). Genellikle 1.5 m. aralıklarla tekrarlanan bu deneylerle dolgu, kumun baskın olduğu alüvyon ve Güngören kili için elde edilen N_{30} değerlerinin derinliğe bağlı değişimi Şekil 4.2 de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bu birimler için elde edilen standart penetrasyon direnci değerleri geniş aralıklarda değişim göstermektedir.

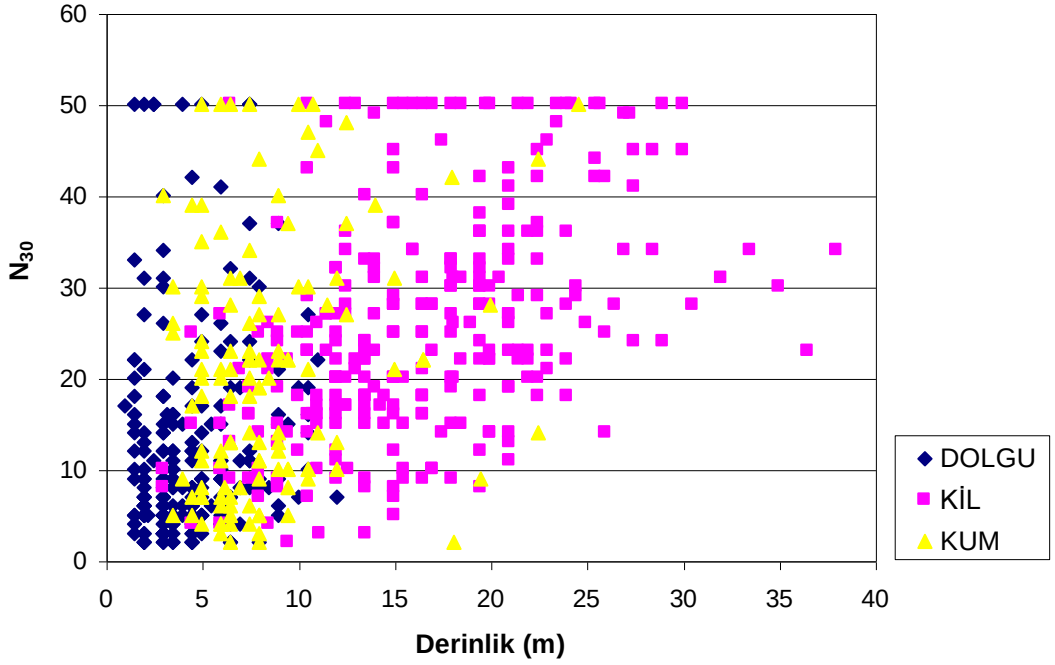
Güngören killerinin N_{30} değerleri genellikle 15-35 arasında yoğunlaşmaktadır. Bu değerlerden, incelenen hat üzerinde karşılaşılan Güngören killerinin katı-çok katı kıvamda oldukları anlaşılmaktadır.

Kumun egemen olduğu alüvyon içerisinde yapılan SPT deneylerine göre N_{30} değerleri 2-30 arasında yoğunlaşmaktadır. Bu değerler, bölgedeki alüvyonun kumlu kısımlarının gevşek-orta sıkı yerleştiğini, killi kısımlarının ise yumuşak-çok katı kıvamlı olduğunu gösterir.

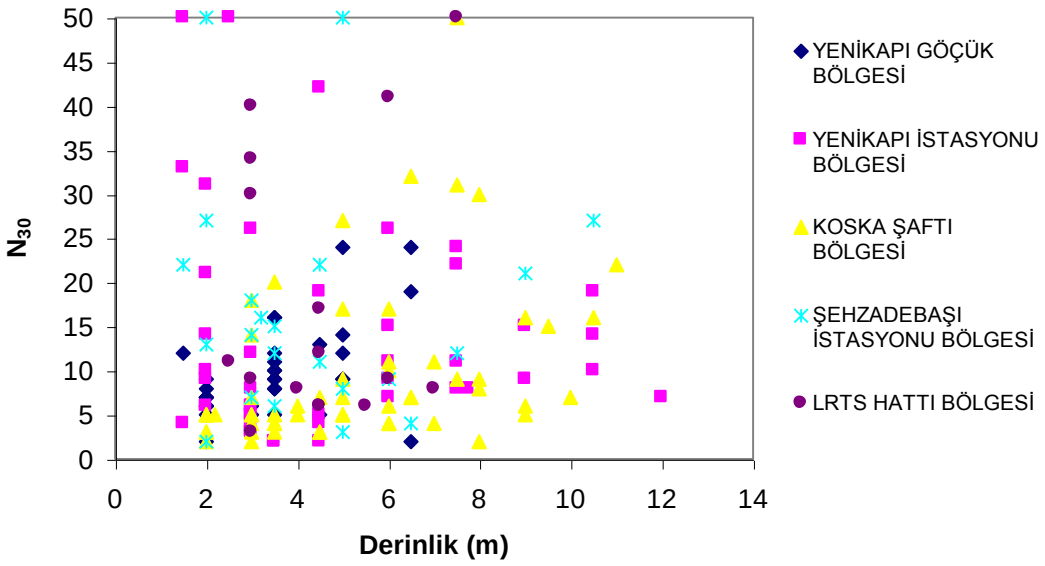
İnceleme alanındaki dolgulara ait N_{30} değerleri ise 2-20 arasında yoğunlaşmaktadır. Tane boyu ve türü açısından oldukça heterojen nitelikteki bu dolgular gevşek-orta sıkı/yumuşak-katı kıvamlıdır.

Güzergahın farklı kesimlerindeki dolgular için elde edilen N_{30} değerleri Şekil 4.3 de farklı simgelerle gösterilerek karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi Koska Şaftı bölgesindeki N_{30} değerleri düzensiz bir dağılım göstermemektedir. 0-10 aralığında yoğunlaşan darbe sayılarının en fazla 30 değerini aldığı görülmektedir. Diğer bölgelerdeki dolgularda ise değerlerin daha geniş bir aralıkta saçıldığı görülür.

Bu belirlemelerden hareketle, güzergahın Koska Şaftına yakın kesimlerinde güncel dolguların, diğer kesimlerinde ise antik dolguların daha yaygın olduğu söylenebilir.



Şekil 4.2 Güzergahtaki Güngören killeri, alüvyon ve yapay dolguların N_{30} değerlerinin derinliğe bağlı değişimi



Şekil 4.3 Yenikapı-Unkapanı güzergahında farklı lokasyonlardaki dolguların N_{30} değerlerinin birbirleriyle ve derinlikle ilişkisi

4.3.1.2 Pressiometre Deneyi

Pressiometre deneyi sondaj kuyusunun içine yerleştirilmiş bir prop yardımıyla kuyunun cidarına radyal basınç uygulayarak zeminde oluşan deformasyonların ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Deney özel olarak hazırlanan kuyularda basınç veya deformasyon kontrollü olarak uygulanmaktadır.

Pressiometre deneyi, çok yumuşak-yumuşak zeminlerden zayıf kayaya kadar olan ortamların elastisite modülü ve taşıma gücünün sayısal olarak belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır.

Yenikapı-Unkapanı güzergahında açılan 18 sondajın farklı derinliklerinde pressiometre deneyleri yapılmıştır. Deneyler, Trakya Formasyonu'na ait birimler ve Güngören killerinde gerçekleştirilmiştir.

İstanbul Metrosu'nun Yenikapı-Unkapanı güzergahında Yenikapı göçük bölgesi ve Yenikapı İstasyonu civarındaki 10 sondajda pressiometre deneyleri uygulanmıştır. Yenikapı İstasyonunda yapılmış olan Yİ-SK1-01 ve Yİ-SK5-01 sondajlarında, anakayada içerisinde deneylerde 21 kg/cm^2 lik basınçlar uygulanmış ve ortamda yenilme gözlenmemiştir. Deney sonuçlarına göre pressiometrik modül değerleri 378-689 kg/cm^2 arasındadır.

Yİ-SK2-01 ve Yİ-SK7-01 sondajlarında geçilen killer üzerinde yapılan pressiometre deneyi sonuçlarına göre az çakıllı killerin limit basınç değerleri 15.10-21.80 kg/cm^2 arasındadır. Hesaplanan pressiometrik modül değerleri ise 130.1-116 kg/cm^2 arasındadır (Tablo 4.2).

Yenikapı Göçük bölgesindeki B-1, B-2, B-5, B-6, B-7, B-11 sondajlarında yapılan pressiyometre deneylerine göre anakayanın ayrışmış kesimleri için elde edilen limit basınç değeri 8.0 kg/cm^2 dir (Tablo 4.2).

Daha sağlam kesimlerde yapılan deneylerde 24.4 kg/cm^2 lık basınç uygulanmasına rağmen yenilme olmamıştır. Bu kesimde anakayanın pressiometrik modül değerleri ise 151-3194 kg/cm^2 arasında değişmektedir.

Koska Şaftı civarında ve Şehzadebaşı İstasyonu kesimindeki 8 sondajın değişik derinliklerinde uygulanan deneylerden elde edilen değerler ise Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Yenikapı Göçük bölgesi ve Yenikapı İstasyonu civarındaki sondajlarda uygulanan pressiometre deney sonuçları

Bölge	**Sondaj No**	**Derinlik [m]**	**Limit Basınç (P_L) [kg/cm^2]**	**Pressiometrik Modül (E_P) [kg/cm^2]**	**Litoloji**
YENİKAPI İSTASYON	Yİ-SK1-01	8.00	3.6	22.6	Kavkılı kum
	Yİ-SK1-01	12.50	> 21	378	Kumtaşı - Kiltaşı
	Yİ-SK1-01	16.00	> 21	689	Kumtaşı - Kiltaşı
	Yİ-SK2-01	13.00	15.10	118.4	Çakıllı Kil
	Yİ-SK2-01	15.00	21.80	-	Çakıllı Kil
	Yİ-SK5-01	12.00	> 20.5	583	Kiltaşı
	Yİ-SK5-01	16.00	> 21	600	Kiltaşı
	Yİ-SK7-01	15.00	>16.7	130.1	Çakıllı Kil
	Yİ-SK7-01	18.00	>16.5	116	Çakıllı Kil
YENİKAPI GÖÇÜK BÖLGESİ	B-1	14.00	> 15	430	Ayrışmış Kiltaşı
	B-2	10.00	> 21.9	3194	Kiltaşı
	B-2	12.00	> 9.3	289	Ayrışmış Kiltaşı
	B-2	14.00	> 21.5	1760	Kiltaşı
	B-5	14.00	> 8.9	179	Ayrışmış Kumtaşı
	B-5	18.00	> 24.4	2675	Kumtaşı
	B-6	11.00	> 23.5	1043	Kumtaşı
	B-6	14.00	> 22.5	1270	Kumtaşı
	B-6	18.00	> 23.9	485	Kumtaşı
	B-6	21.00	> 23.8	1428	Kumtaşı
	B-7	10.00	> 24	1980	Kumtaşı-Kiltaşı
	B-7	13.00	> 24	3172	Kumtaşı-Kiltaşı
	B-7	16.00	> 24.3	1450	Kiltaşı
	B-7	19.00	> 24.1	1200	Kiltaşı
	B-7	22.00	> 8	151	Ayrışmış Kiltaşı
	B-11	12.00	>10.1	184	Kil
	B-11	15.00	> 22.1	304	Kumtaşı - Kiltaşı
	B-11	19.00	> 21.8	1058	Kiltaşı

Koska Şaftı yakın civarındaki KŞ-2-02, KŞ-3-02 ve KŞ-4-02 nolu sondajlarda, Güngören killeri üzerinde yapılan pressiometre deneylerinden, limit basınç değerlerinde en düşük 5.4 kg/cm^2 lik ve en yüksek 22.3 kg/cm^2 lik basınç uygulanmasına rağmen yenilme gözlenmemiştir. Pressiometrik Modül değerleri ise 31-938 kg/cm^2 arasında değişmektedir. Bu değerler, kilin mekanik özelliklerinin, güzergahın farklı noktalarında lokal olarak değiştiğini açıkça göstermektedir.

Şehzadebaşı İstasyonu bölgesindeki AS-YU-12-02, AS-YU-13-02, AS-YU-15-02, AS-YU-16-02 sondajlarında kesilen killerde yapılan deneylerde, limit basınç değerlerinin 8.9-24.5 kg/cm^2 arasında değiştiği belirlenmiştir.

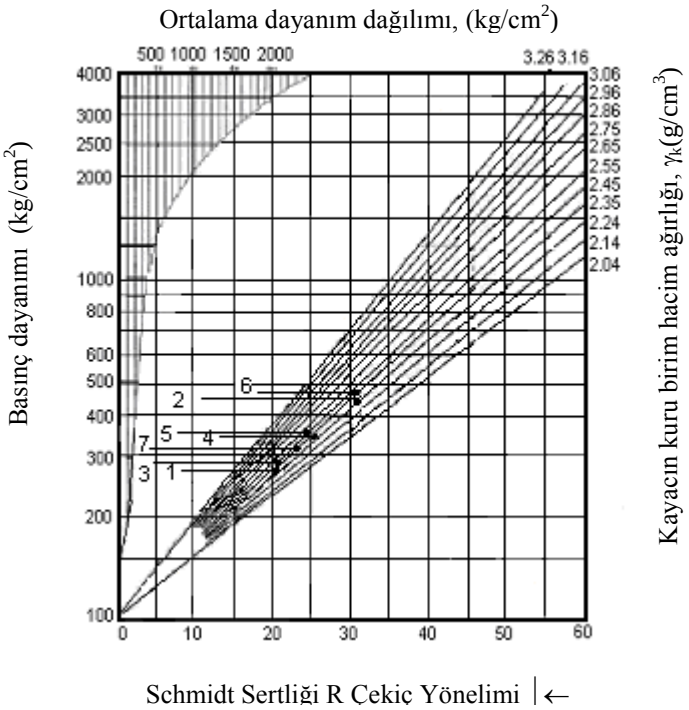
Pressiometrik Modül değerleri ise 72-1298 kg/cm^2 arasındadır. Görüldüğü gibi killerin limit basınç ve Pressiometrik Modül değerleri geniş aralıklarda değişmektedir. Bu veriler, killerin mühendislik özelliklerinin kısa mesafede geniş bir aralıkta, özellikle litoloji ve su içeriklerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Bu nedenle Güngören killeri taşıma gücü açısından sorunlu olup tünel mühendisliği açısından daha fazla önlem alınmasını gerektirmektedir.

Tablo 4.3 Koska Şaftı civarında ve Şehzadebaşı İstasyonu bölgesindeki sondajlarda uygulanan pressiometre deney sonuçları

Bölge	**Sondaj No**	**Derinlik [m]**	**Limit Basınç (P_L) [kg/cm^2]**	**Pressiometrik Modül (E_P) [kg/cm^2]**	**Litoloji**
KOSKA ŞAFTI	KŞ-2-02	13.00	>11.5	275	Kil
	KŞ-2-02	17.00	12	156	Kil
	KŞ-2-02	19.00	8.2	62	Kil
	KŞ-3-02	9.50	> 5.4	31	Kil
	KŞ-3-02	11.00	> 13	91	Kil
	KŞ-3-02	17.00	> 22.3	483	Kil
	KŞ-3-02	19.00	> 21	530	Kil
	KŞ-3-02	21.00	> 12.6	196	Kil
	KŞ-3-02	23.00	> 15.1	938	Kil
	KŞ-3-02	27.50	> 21	340	Kil
	KŞ-4-02	23.50	> 14	603	Kil
	KŞ-4-02	25.00	> 21	389	Kil
ŞEHZADE BAŞI İSTASYONU	AS-YU-11-01	6.00	> 15	650	Kumtaşı- Silttaşı
	AS-YU-11-01	12.00	> 20	810	Kumtaşı
	AS-YU-12-02	17.50	10.2	745	Kil
	AS-YU-12-02	19.50	24.5	995	Çakıllı Kil
	AS-YU-12-02	23.00	>24	1298	Çakıllı Kil
	AS-YU-13-02	12.00	>8	374	Kumlu, Siltli Kil
	AS-YU-13-02	14.00	>9	211	Kumlu, Siltli Kil
	AS-YU-15-02	13.00	14.6	-	Kil
	AS-YU-15-02	15.00	20.4	131	Siltli Kil
	AS-YU-15-02	18.00	17.1	140	İnce Kum
	AS-YU-15-02	21.00	22.2	647	Kil
	AS-YU-16-02	12.00	10	72	Siltli Kil
	AS-YU-16-02	15.00	8.9	170	Kil
	AS-YU-16-02	18.00	20.2	561	Kiltaşı

4.3.1.3 Schmidt Çekici Ölçümleri

Tünel kazısı sırasında Trakya Formasyonu birimleri ile karşılaşılan kesimlerde Schmidt çekici ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sırasında, Schmidt çekici süreksizlik yüzeylerine dik olarak yönlendirilmiştir. Okumalar, süreksizlik düzlemi üzerindeki 10 ayrı noktada tekrarlanmış, en düşük beş geri sıçrama değeri iptal edilerek, kalan beş okumanın ortalaması değerlendirilmiştir. Belirlenen ortalama geri sıçrama sertlik değeri, çekicin yönelimi ve kayacın birim hacim ağırlığı kullanılarak Deere ve Miller (1966) tarafından hazırlanan abak yardımıyla basınç direnci değerleri saptanmıştır (Tablo 4.4, Şekil 4.4, Boynukalın, 1990).



Şekil 4.4 YH1U-2A tüneli sağ duvarında 7 ayrı noktada elde edilen Schmidt geri sıçrama sertlik değeri yardımıyla basınç direncinin belirlenmesi

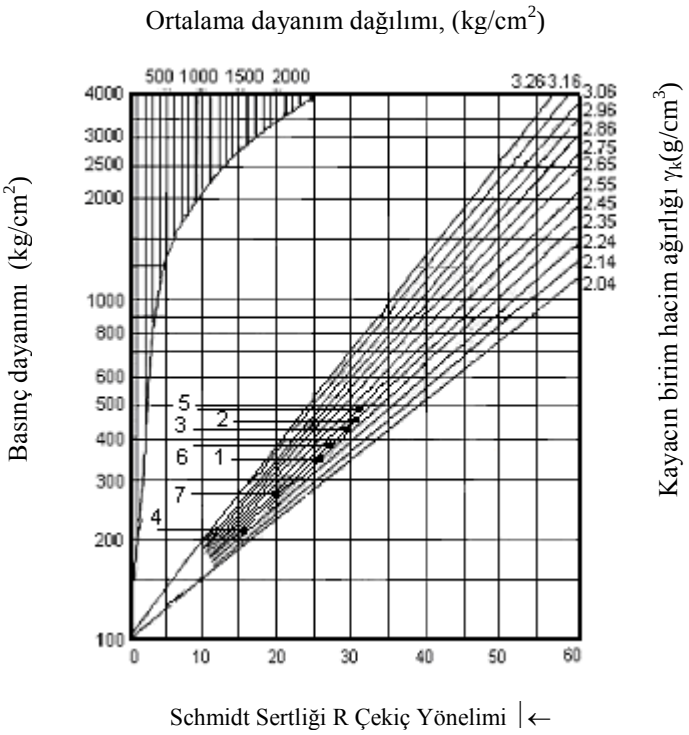
Tablo 4.4 YH1U-2A tünelinde 7 ayrı noktada elde edilen Schmidt geri sıçrama sertlik değeri ile kayanın basınç direncinin belirlenmesi

Lokasyon	Km	Litoloji	γ_k (g/cm^3)	R ort Yönelim			Basınç Direnci (kg/cm^2)		
				Sağ duvar	Sol Duvar	Ayna	Sağ duvar	Sol duvar	Ayna
1	4+877.60	Silttaşı	2.41	21	26	18	275	350	250
2	4+882.80	Silttaşı	2.49	32	30	23	460	460	320
3	4+884.80	Kiltaşı	2.46	20	28	22	285	425	285
4	4+887.80	Kiltaşı	2.43	26	16	20	340	220	270
5	4+895.00	Silttaşı	2.55	24	33	34	350	490	540
6	4+900.40	Silttaşı	2.52	31	27	28	470	385	410
7	4+906.40	Silttaşı	2.48	23	20	26	310	270	380

Tünelin değişik metrelerindeki kazı aynalarındaki süreksizlik yüzeyleri ve tabaka düzlemlerinde 7 ayrı noktada yapılan ölçümlerde çekiç aynı şekilde süreksizlik yüzeyine dik olarak yönlendirilmiştir. Tünelin sağ duvarında yapılan Schmidt çekici ölçümlerinden elde edilen sertlik değerleri ortalaması ve kayaçların kuru birim hacim ağırlıkları kullanılarak Şekil 4.4 de verilen abak yardımıyla basınç dirençleri bulunmuştur. Bu değerlere göre yapılan sınıflamadan ilerleme yönünün sağında kalan duvarındaki anakayanın orta sağlam kaya ISRM (1978) olduğu görülmüştür (Tablo 4.5).

Tablo 4.5 YH1U-2A tüneli sağ duvarında, Trakya Formasyonu çatlak yüzeylerinin basınç direnci değerlerinin (ISRM, 1978) sınıflandırmasındaki tanımı

Derece	**Tanımlama**	**Basınç Direnci Aralığı (kg/cm^2)**	**Çatlak Yüzeyinin Basınç Direnci Değerleri (kg/cm^2)**						
			Ölçüm Noktaları						
			1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
R_0	Aşırı Zayıf Kaya	2.55-10.2							
R_1	Çok Zayıf Kaya	10.2-51							
R_2	Zayıf Kaya	51-255							
R_3	Orta Sağlam Kaya	255-510	x	x	x	x	x	x	x
R_4	Sağlam Kaya	510-1020							
R_5	Çok Sağlam Kaya	1020-2550							
R_6	Aşırı Sağlam Kaya	>2550							

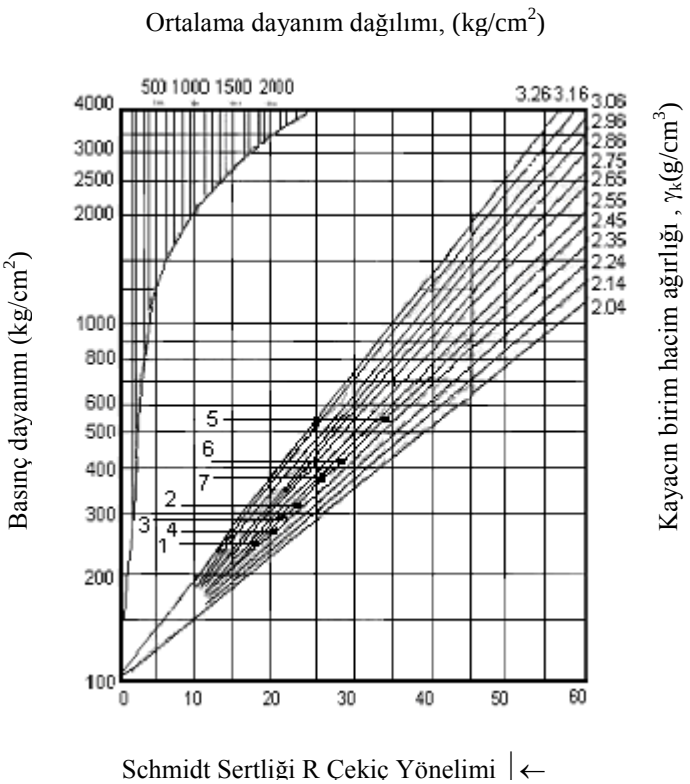


Şekil 4.5 YH1U-2A tüneli sol duvarında 7 ayrı noktada elde edilen Schmidt geri sıçrama sertlik değeri yardımıyla basınç direncinin belirlenmesi

Tünelin sol duvarında 7 ayrı noktada yapılan, Schmidt çekici okumalarından elde edilen sertlik değerlerinin ortalaması kullanılarak elde edilen tek eksenli basınç dayanımları Şekil 4.5 de verilmiştir. Bulunan direnç değerleri ISRM (1978) sınıflandırmasına göre sol duvarındaki kayaçların orta sağlam kayaç sınıfına girdiği görülmüştür (Tablo 4.6).

Tablo 4.6 YH1U-2A tüneli sol duvarında, Trakya Formasyonu çatlak yüzeylerinin basınç direnci değerlerinin ISRM (1978) sınıflandırmasındaki tanımı

Derece	**Tanımlama**	**Basınç Direnci Aralığı (kg/cm^2)**	**Çatlak Yüzeyinin Basınç Direnci Değerleri (kg/cm^2)**						
			Ölçüm Noktaları						
			1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
R_0	Aşırı Zayıf Kaya	2.55-10.2							
R_1	Çok Zayıf Kaya	10.2-51							
R_2	Zayıf Kaya	51-255				x			
R_3	Orta Sağlam Kaya	255-510	x	x	x		x	x	x
R_4	Sağlam Kaya	510-1020							
R_5	Çok Sağlam Kaya	1020-2550							
R_6	Aşırı Sağlam Kaya	>2550							



Şekil 4.6 YH1U-2A tüneli kazı aynasında 7 ayrı noktada elde edilen Schmidt geri sıçrama sertlik değeri yardımıyla kayanın basınç direncinin belirlenmesi

Bu tünelin kazı aynasında elde edilen değerler Şekil 4.6 da gösterilmiştir. Bu değerler aynadaki kayaçların ISRM (1978) sınıflandırmasına göre orta sağlam kaya sınıfına girdiğini göstermektedir (Tablo 4.7).

Tablo 4.7 YH1U-2A tüneli kazı aynasında Trakya Formasyonu çatlak yüzeylerinin basınç direnci değerlerinin ISRM (1978) sınıflandırmasındaki tanımı

Derece	**Tanımlama**	**Basınç Direnci Aralığı (kg/cm^2)**	**Çatlak Yüzeyinin Basınç Direnci Değerleri (kg/cm^2)**						
			Ölçüm Noktaları						
			1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
R_0	Aşırı Zayıf Kaya	2.55-10.2							
R_1	Çok Zayıf Kaya	10.2-51							
R_2	Zayıf Kaya	51-255	x						
R_3	Orta Sağlam Kaya	255-510		x	x	x		x	x
R_4	Sağlam Kaya	510-1020					x		
R_5	Çok Sağlam Kaya	1020-2550							
R_6	Aşırı Sağlam Kaya	>2550							

YH1U-2A tünelinde km 4+877.60-4+906.40 arasında yapılan Schmidt çekici ölçümlerine göre anakayanın orta sağlam kaya tanımlamasına girdiği görülmüştür.

4.3.2 Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri

Tünel aynasından alınan kaya örnekleri üzerinde Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı laboratuvarında, fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik deneyler yapılmıştır.

4.3.2.1 Fiziksel Özellikler

İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH2U-3A ve YH1U-2A tünelleri kazı aynalarından alınan kaya örnekleri üzerinde fiziksel deneyler yapılmıştır.

Bu deneylerden elde edilen kuru birim hacim ağırlığı, doygun birim hacim ağırlığı, porozite ve boşluk oranı değerleri Tablo 4.8 de verilmiştir.

YH2U-3A tünelinden alınan örneklerin kuru birim hacim ağırlıkları 2.52-2.68 g/cm^3, doygun birim hacim ağırlıkları 2.57-2.69 g/cm^3, poroziteleri % 1.37-4.82, boşluk oranları % 1.38-5.08 arasındadır.

YH1U-2A tünelinden alınan örneklerin kuru birim hacim ağırlıkları 2.41-2.55 g/cm^3, doygun birim hacim ağırlıkları 2.49-2.62 g/cm^3, poroziteleri % 4.31-9.78, boşluk oranları % 4.50-10.8 arasında değişmektedir.

Tablo 4.8 İncelenen metro güzergahında geçilen anakayanın fiziksel özellikleri

Örnek No	Km	Litoloji	Kuru Birim Hacim Ağırlığı γ_k (g/cm^3)	Doygun Birim Hacim Ağırlığı γ_d (g/cm^3)	Porozite n (%)	Boşluk Oranı e (%)
1	0+003.00	Kumtaşı	2.62	2.66	2.31	2.36
2	0+012.60	Kiltaşı	2.60	2.66	3.28	3.39
3	0+020.40	Kumtaşı	2.63	2.65	1.37	1.38
4	0+029.80	Diyabaz	2.57	2.61	3.92	4.07
5	0+030.60	Kumtaşı	2.52	2.57	4.84	5.08
6	0+034.80	Silttaşı	2.68	2.69	2.73	2.80
7	0+036.00	Kiltaşı	2.56	2.60	4.62	4.84
8	4+877.60	Silttaşı	2.41	2.49	9.78	10.8
9	4+882.80	Silttaşı	2.49	2.58	7.65	8.28
10	4+884.80	Kiltaşı	2.46	2.52	8.02	8.71
11	4+887.80	Kiltaşı	2.43	2.54	8.68	9.50
12	4+895.00	Silttaşı	2.55	2.60	4.82	5.06
13	4+900.40	Silttaşı	2.52	2.62	4.31	4.50
14	4+906.40	Silttaşı	2.48	2.59	5.01	5.27

Tünel aynaları aşırı kırıklı ve ayrışmış olması nedeniyle bazı örneklerden elde edilen porozite ve boşluk oranı değerleri oldukça yüksek, kuru ve doygun birim hacim ağırlıkları ise yer yer oldukça düşüktür. Bu açıdan bakıldığında YH2U-3A tünelinden alınan örneklerin YH1U-2A tünelinden alınan örneklere göre birim hacim ağırlıkları daha yüksek, porozite ve boşluk oranları değerleri daha düşüktür.

4.3.2.2 Mekanik Özellikler

Trakya Formasyonu'ndan mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla örnekler alınarak nokta yükleme deneyleri yapılmıştır.

Düzgün olmayan geometriye sahip örnekler üzerinde tabaka düzlemlerine paralel ve dik yönde olmak üzere iki yönde yükleme yapılmış ve her iki doğrultu için nokta yükleme direnci bulunmuştur. Sonuçlar Tablo 4.9 da verilmiştir. Deney sonuçları;

$$Is = P / d^2 \quad kg / cm^2 \qquad (4.1)$$

bağıntısıyla değerlendirilmiştir. Burada;

P = Noktasal Yük (kg)

d = Örnek kalınlığı (cm) dır.

Örnek kalınlığı, düzgün olmayan örneklerde, üç doğrultuda ölçülen uzunlukların aritmetik ortalaması olarak alınmıştır.

$$\sigma_B = 18\ P\ /d^2 \qquad (4.2)$$

eşitliği kullanılarak YH1U-2A ve YH2U-3A tünellerinden alınan örnekler için elde edilen nokta yükleme direnci değerleri, tek eksenli basınç direncine dönüştürülmüştür.

Nokta yükleme deneyi sonuçları Tablo 4.9, Tablo 4.10, Tablo 4.11 ve Tablo 4.12 de verilmiştir.

YH2U-3A tünelinin 33 m. lik kesiminden alınan örnekler üzerindeki deney sonuçlarına göre nokta yükleme direnci değerleri tabakaya dik yönde 2.8-44 kg/cm^2, tabakaya paralel yönde 2.2-27.1 kg/cm^2 arasındadır. Bu değerler, tek eksenli basınç dayanımına dönüştürüldüğünde, tabakaya dik yönde basınç direncinin 50.4-792 kg/cm^2, paralel yönde ise 39.6- 487.8 kg/cm^2 arasında değiştiği saptanmıştır (Tablo 4.9).

Tablo 4.9 Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH2U-3A tüneli kazı aynalarından alınan taş örneklerinin nokta yükleme deneyi sonuçları

Km	**Litoloji**	**P ⊥ kg**	**P // kg**	**d ⊥ cm**	**d // cm**	**Is ⊥ kg/cm^2**	**Is // kg/cm^2**	**σ_B ⊥ kg/cm^2**	**σ_B // kg/cm^2**
0+003.00	Kumtaşı	750	500	7.2	6.7	14.5	11.1	261	199.8
0+012.60	Kiltaşı	550	250	6.4	5.9	13.4	7.2	241.2	129.6
0+020.40	Kumtaşı	1750	850	6.3	5.6	44	27.1	792	487.8
0+029.80	Diyabaz	1350	800	7.6	6.5	23.4	18.9	421.2	340.2
0+030.60	Kumtaşı	850	500	5.8	6.6	25.3	11.5	455.4	207
0+034.80	Silttaşı	100	50	3.2	2.4	9.8	8.7	176.4	156.6
0+036.00	Kiltaşı	100	50	6.0	4.8	2.8	2.2	50.4	39.6

Tablo 4.10 Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH2U-3A tünelinden alınan örneklerin nokta yük direncine göre sınıflaması

Kaya Sınıflaması		**Örnek numarası**													
		5İ		**21İ**		**34İ**		**47İ**		**51İ**		**58İ**		**60İ**	
Kaya Direnci	**Is (kg/cm^2)**	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Çok Düşük	<10				x							x	x	x	x
Düşük	10-20	x	x	x					x		x				
Orta	20-40						x	x		x					
Yüksek	40-80					x									
Çok Yüksek	>80														

Tablo 4.10 da görüldüğü gibi Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH2U-3A tünelindeki örnekler "orta-çok düşük" kaya dirençlidir (Bieniawski, 1975). Tek eksenli basınç direnci sınıflamasına göre düşük-çok düşük dirençlidir (Deere ve Miller, 1966).

Tablo 4.11 Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH2U-3A tünelinden alınan örneklerin tek eksenli basınç direncine göre sınıflaması

Kaya Sınıflaması		**Örnek numarası**													
		5İ		**21İ**		**34İ**		**47İ**		**51İ**		**58İ**		**60İ**	
Kaya Direnci	**σ_b (kg/cm^2)**	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Çok Düşük	< 250		x	x	x							x	x	x	x
Düşük	250 - 500	x					x	x	x	x	x				
Orta	500 - 1000					x									
Yüksek	1000 - 2000														
Çok Yüksek	> 2000														

Tablo 4.12 Yenikapı-Unkapanı arası YH1U-2A tünelinde kazı aynasından alınan örneklerin nokta yükleme direnci değerleri

Km	**Litoloji**	**P ⊥ kg**	**P // kg**	**d ⊥ cm**	**d // cm**	**Is ⊥ kg/cm^2**	**Is // kg/cm^2**	**σ_B ⊥ kg/cm^2**	**σ_B // kg/cm^2**
4+877.60	Silttaşı	100	50	4.6	5.9	4.7	1.4	84.6	25.2
4+882.80	Silttaşı	100	50	3.9	5.6	6.6	1.6	118.8	28.8
4+884.80	Kiltaşı	650	850	4.9	7.4	27	15.5	486	279
4+887.80	Kiltaşı	100	50	7.5	6.3	1.8	1.3	32.4	23.4
4+895.00	Silttaşı	400	250	5.4	5.8	13.7	7.4	246.6	133.2
4+900.40	Silttaşı	600	200	5.1	6.4	23	6.1	414	109.8
4+906.40	Silttaşı	50	100	3.6	5.4	3.9	3.4	70.2	61.2

YH1U-2A tünellerinden alınan taş örneklerin deney sonuçlarına göre nokta yükleme direnci değerleri, tabakaya dik yönde 1.8-27 kg/cm^2, tabakaya paralel yönde ise 1.3-15.5 kg/cm^2 arasındadır.

Tek eksenli basınç dayanımına dönüşüm formülünden hesaplanan değerlere göre tabakaya dik yönde basınç dayanımı 32.4-486 kg/cm^2, paralel yönde 23.4-279 kg/cm^2 arasındadır (Tablo 4.12).

Tablo 4.13 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki YH1U-2A tünelinden alınan nokta yük direncine göre sınıflaması.

Kaya Sınıflaması		**Örnek numarası**													
		46İ		**53İ**		**58İ**		**63İ**		**75İ**		**84İ**		**94İ**	
Kaya Direnci	**Is (kg/cm^2)**	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Çok Düşük	< 10	x	x	x	x			x	x		x		x	x	x
Düşük	10 - 20						x			x					
Orta	20 - 40					x						x			
Yüksek	40 - 80														
Çok Yüksek	> 80														

Tablo 4.14 Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH1U-2A tünelinden alınan Trakya Formasyonu'na ait litolojilerin tek eksenli basınç direncine göre sınıflaması.

Kaya Sınıflaması		**Örnek numarası**													
		46İ		**53İ**		**58İ**		**63İ**		**75İ**		**84İ**		**94İ**	
Kaya Direnci	**σ_b (kg/cm^2)**	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Çok Düşük	< 250	x	x	x	x			x	x	x	x		x	x	x
Düşük	250 - 500					x	x					x			
Orta	500 - 1000														
Yüksek	1000 - 2000														
Çok Yüksek	> 2000														

Yenikapı-Unkapanı güzergahı YH1U-2A tünelinden alınan örneklere göre Trakya formasyonu litolojileri nokta yük direnci açısından "çok düşük" dirençlidir. (Tablo 4.13). Buna bağlı olarak tek eksenli basınç direnci de çok düşüktür (Tablo 4.14).

YH2U-3A tünelinden alınan örneklerin basınç direnci değerleri, YH1U-2A tünelinden alınan örneklere göre daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni YH1U-2A tünelinden alınan örneklerin litolojik farklılığı ve ayrışmış olmalarıdır. Ancak fiziksel deneylerden elde edilen sonuçlarla mekanik deney sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

4.3.3 Zemin Mekaniği Deneyleri

İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlarda kesilen kil ve kumlardan alınan örnekler üzerinde fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır.

4.3.3.1 Fiziksel Deneyler

Güzergahtaki sondajlardan alınan çok sayıdaki kil ve kum örneklerinin özgül ağırlıkları, birim hacim ağırlıkları ve su içerikleri belirlenmiştir (Tablo 4.15, Tablo 4.16, Tablo 4.17).

Yenikapı göçük bölgesinde bulunan kum ve killer için belirlenen doğal su içeriği değerleri diğer bölgeler için elde edilen değerlerden oldukça yüksektir. Bu bölgede yeraltı su düzeyi yüzeye daha yakındır.

Tablo 4.15 Yenikapı göçük bölgesi sondajlarından alınan zeminlerin fiziksel özellikleri

Sondaj no	Derinlik (m)	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Su İçeriği Wn (%)	Litoloji
B-1	12.25	2.61	33.2	Kil
B-4	6.25	2.70	31.4	Kum
B-5	7.75	2.76	28.2	Kum
B-7	6.25	2.64	42.8	Kil
B-8	12.25	2.65	38.9	Kil

Yenikapı İstasyonu civarında yapılan bazı araştırma sondajlarının farklı derinliklerinden alınan kil örneklerinin su içeriği değerleri % 15.6-27.6 arasında değişmektedir (Tablo 4.16).

Tablo 4.16 Yenikapı İstasyonu civarında sondajlardan alınan kil örneklerinin fiziksel özellikleri

Sondaj no	Derinlik (m)	Doğal birim hacim ağırlığı γ_n (g/cm^3)	Su içeriği Wn (%)	Litoloji
SK-7	15.50	1.936	27.6	Kil
SK-7	22.50	2.066	19.5	Kil
SK-8	12.50	2.228	15.6	Kil
SK-13	20.50	1.969	22.5	Kil
SK-13	21.50	2.065	18.0	Kil

Tablo 4.17 Koska Şaftı civarındaki sondajlardan alınan dolgu, kum ve killerin fiziksel özellikleri

Sondaj no	Derinlik (m)	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Su İçeriği W n (%)	Litoloji
KŞ-3-02	3.25	2.62	21.8	Dolgu
KŞ-3-02	4.75	2.74	24.6	Dolgu
KŞ-3-02	6.25	2.73	28.0	Dolgu
KŞ-3-02	8.15	2.66	24.0	Kil
KŞ-3-02	9.80	2.62	28.3	Kil
KŞ-3-02	11.55	2.57	27.4	Kil
KŞ-3-02	13.75	2.71	32.4	Kil
KŞ-3-02	15.75	2.73	30.2	Kil
KŞ-3-02	17.40	2.50	28.8	Kil
KŞ-3-02	19.30	2.57	44.1	Kil
KŞ-4-02	3.25	2.66	14.0	Dolgu
KŞ-4-02	4.75	2.71	29.0	Dolgu
KŞ-4-02	6.25	2.71	31.2	Dolgu
KŞ-4-02	7.75	2.71	32.0	Dolgu
KŞ-4-02	9.25	2.68	18.2	Dolgu
KŞ-4-02	10.75	2.65	18.4	Dolgu
KŞ-4-02	12.25	2.61	14.7	Kum
KŞ-4-02	13.75	2.63	18.7	Kum
KŞ-4-02	15.50	2.67	26.9	Kil
KŞ-4-02	17.75	2.52	38.2	Kil
KŞ-4-02	19.75	2.62	24.0	Kil
KŞ-4-02	21.75	2.49	26.3	Kil
KŞ-4-02	23.75	2.51	30.4	Kil
KŞ-6-03	10.50	2.78	35.7	Kil
KŞ-6-03	19.50	2.74	34.1	Kil

Koska Şaftı civarındaki KŞ-3-02, KŞ-4-02 ve KŞ-6-03 sondajlarından alınan dolgu, kum ve killerin belirlenen özgül ağırlık ve su içerikleri Tablo 4.17 de verilmiştir. Bu kesimde kilin su içeriği % 24-44.1 aralığında değişmektedir. Hattın bu kesimlerinde karşılaşılan killerin su içeriklerinin yüksek olması kazı öncesi killerin mühendislik davranışlarının iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.3.3.2 Kıvam Limitleri

Kıvam limitleri, değişik su içeriğine sahip killerin direncinin bir göstergesidir. Doğal su içeriğinin kıvam limitleri ile karşılaştırılması, zeminin kesme direnci hakkında bir fikir vermektedir. Killerin plastisitesi arttıkça sıkışma ve şişme potansiyeli artmakta, geçirgenliği azalmaktadır (Özaydın, 1999).

Anılan özelliklerden sıkışma ve şişme davranışları yüzeydeki yapılarda oturmalara, tünel içinde çeşitli yönlerde deformasyonlara, geçirgenliğin azalması ise suyun tutulması dolayısıyla kazı güçlüklerine ve aynada akmalara neden olabilmektedir.

Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlar sınırlı lokasyonlar için ayrı ayrı olarak irdelenmiştir. Sondajlardan alınan zemin örnekleri üzerinde deneyler uygulanmış ve zemin sınıflandırması yapılmıştır (Tablo 4.18, Tablo 4.19, Tablo 4.20). İnce taneli zeminler (killer ve siltler) plastisite özelliklerine göre Casagrande kartı yardımı ile tanımlanmıştır. Tanımlamada, düşük plastisiteli zeminler için (L), yüksek plastisiteli zeminler için ise (H) sembolü kullanılmaktadır.

Tablo 4.18 Yenikapı göçük bölgesi sondajlarından alınan zemin örneklerinin kıvam limitleri ve sınıflaması

Sondaj no	Derinlik (m)	Kıvam Limitleri (%)			Sınıf
		LL	PL	PI	
B-1	12.25	77	19	58	CH
B-2	7.50	68	21	47	CH
B-6	9.25	42	16	26	CL
B-6	9.50	80	24	56	CH
B-8	7.75	49	16	33	CL
B-8	12.75	91	26	65	CH
B-9	13.75	100	22	78	CH
B-10	10.75	80	23	57	CH
B-10	12.25	87	23	64	CH
B-11	9.65	73	22	51	CH
B-11	10.75	72	22	50	CH

Tablo 4.19 Yenikapı İstasyonu civarındaki sondajlardan alınan kil örneklerinin kıvam limitleri ve sınıflaması

Sondaj no	Derinlik (m)	Kıvam Limitleri (%)			Sınıf
		LL	PL	PI	
SK-2	13.30	32	11	21	CL
SK-2	14.75	83	19	64	CH
SK-2	17.00	38	16	22	CL
SK-4	8.00	79	24	55	CH
SK-4	12.50	27	11	16	CL
SK-4	21.50	32	11	21	CL
SK-7	13.50	36	29	7	ML-OL
SK-7	15.50	50	14	36	CL
SK-7	16.00	44	16	28	CL
SK-7	19.50	34	9	25	CL
SK-7	22.50	34	11	23	CL
SK-7	23.00	29	11	18	CL
SK-8	12.50	23	10	13	CL
SK-8	15.50	22	10	12	CL
SK-8	19.50	41	11	30	CL
SK-8	20.00	37	11	26	CL
SK-13	14.00	51	15	36	CH
SK-13	20.50	40	13	27	CL
SK-13	21.50	27	11	16	CL
SK-13	22.00	27	13	14	CL
SK-13	26.00	39	13	26	CL

Yenikapı göçük bölgesi civarında yapılan B sondajlarının farklı derinliklerinden alınan kil örneklerinin kıvam limitleri belirlenmiş, genelde yüksek plastisiteli inorganik kil oldukları anlaşılmıştır (Tablo 4.18). Yüksek plastisiteli killerin sıkışma ve şişme eğiliminde olması nedeniyle sorunlu zemin davranışı göstermeleri beklenmelidir. Bu nedenle bu davranışlara karşı önlem geliştirmek zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Yenikapı İstasyonu civarındaki killer ise genellikle düşük plastisitelidir (Tablo 4.19). Koska Şaftı civarındaki sondajlardan alınan killer ise çoğunlukla yüksek plastisiteli, az sayıdaki örnek ise düşük plastisiteye sahiptir (Tablo 4.20).

Tablo 4.20 Koska Şaftı bölgesindeki sondajlardan alınan kil örneklerinin kıvam limitleri ve sınıflamaları

Sondaj no	Derinlik (m)	Kıvam Limitleri (%)			Sınıf
		LL	PL	PI	
KŞ-2-02	14.50	72	20	52	CH
KŞ-2-02	15.00	82	21	61	CH
KŞ-2-02	18.00	60	17	43	CH
KŞ-3-02	8.15	38	13	25	CL
KŞ-3-02	9.80	62	20	42	CH
KŞ-3-02	11.55	53	20	33	CH
KŞ-3-02	13.75	72	21	51	CH
KŞ-3-02	15.75	78	19	59	CH
KŞ-3-02	17.40	78	22	56	CH
KŞ-3-02	21.75	79	24	55	CH
KŞ-3-02	23.30	36	11	25	CL
KŞ-3-02	25.25	36	17	19	CL
KŞ-3-02	27.25	29	10	19	CL
KŞ-3-02	28.60	34	10	24	CL
KŞ-4-02	15.50	87	18	69	CH
KŞ-4-02	17.75	90	25	65	CH
KŞ-4-02	19.75	57	16	41	CH
KŞ-4-02	21.75	69	19	50	CH
KŞ-4-02	23.75	72	20	52	CH
KŞ-4-02	25.75	34	11	23	CL
KŞ-4-02	27.30	31	11	20	CL
KŞ-4-02	29.25	34	11	23	CL
KŞ-5-03	8.00	59	18	41	CH
KŞ-5-03	10.50	59	18	41	CH
KŞ-5-03	12.00	78	21	57	CH
KŞ-5-03	19.50	72	19	53	CH
KŞ-6-03	9.00	42	14	28	CL
KŞ-6-03	11.00	67	20	47	CH
KŞ-6-03	16.50	74	20	64	CH
KŞ-6-03	21.00	71	18	53	CH
KŞ-6-03	22.50	70	20	58	CH
KŞ-7-03	12.00	68	20	48	CH
KŞ-7-03	15.00	63	18	45	CH
KŞ-7-03	18.00	77	18	59	CH
KŞ-7-03	24.00	36	11	25	CL

Daha doğudaki Şehzadebaşı İstasyonu sondajlarından alınan kil örnekleri de yüksek plastisitelidir (Tablo 4.21). Yüksek şişme ve sıkışma davranışına sahip killerin bölgedeki varlığı kazı aşamasında ilave önlemlerin alınmasını gerektirebilir.

Tablo 4.21 Şehzadebaşı İstasyonu sondajlarındaki kil örneklerinin kıvam limitleri ve sınıflaması

Sondaj no	Derinlik (m)	Kıvam Limitleri (%)			Sınıf
		LL	PL	PI	
AS-YU-15-02	9.75	84	20	64	CH
AS-YU-15-02	11.75	68	16	52	CH
AS-YU-15-02	15.75	45	16	29	CL
AS-YU-15-02	19.50	77	20	57	CH
AS-YU-16-02	10.75	93	20	73	CH
AS-YU-16-02	12.75	96	21	75	CH
AS-YU-16-02	16.25	89	21	68	CH
AS-YU-16-02	20.00	59	19	40	CH

4.3.3.3 Elek Analizi

İri taneli zeminlerin, mühendislik özellikleri açısından tane çapı dağılımının (granülometre) önemi büyüktür. İri taneli zeminler (çakıl ve kum) granülometre özelliklerine göre iyi derecelenmiş ve kötü derecelenmiş olarak ayrılmakta ve bunlar sırası ile (W) ve (P) sembolleri ile gösterilmektedir (Özaydın, 1999).

Tablo 4.22 Yenikapı göçük bölgesi ve Yenikapı İstasyonu civarındaki sondajlardan alınan iri taneli zeminlerin elek analizi sonuçlarına göre sınıflandırılması

Sondaj no	Derinlik (m)	Tane Boyu Dağılımı (%)		Sınıf
		+4	-200	
B-4	6.25	0.29	18.62	SM-SC
B-5	7.75	3.11	11.29	SM-SC
B-7	6.25	2.85	24.99	SM
B-8	7.75	6.24	70.4	SC
B-8	12.25	0.47	33.76	SM-SC
SK-2	5.00	16.74	35.13	SM-SC, GM-GC
SK-4	4.50	32.28	10.01	SM-SC, GM-GC
SK-4	6.00	11.54	14.16	SM-SC
SK-7	6.00	0.00	18.32	SM-SC
SK-7	14.00	26.11	46.15	GM-GC
SK-8	8.00	0.19	11.65	SM-SC
SK-8	12.50	0.12	28.76	SM-SC
SK-8	12.80	7.82	22.57	SM-SC
SK-8	15.50	11.23	25.19	SM-SC GM-GC
SK-13	10.00	1.17	12.34	SM-SC
SK-13	20.50	10.71	24.46	SM-SC GM-GC
SK-13	21.50	3.75	41.07	SM-SC

Yenikapı göçük bölgesi ve Yenikapı İstasyonu civarında yapılan bazı sondajlardan alınan örneklere uygulanan granülometre deneyi sonuçlarından, iri taneli bileşenlerin oluşturduğu zemin sınıfının genelde siltli ve killi kumlar (SM-SC), yer yerde siltli, killi çakıllar (GM-GC) olduğu görülmüştür (Tablo 4.22).

Tablo 4.23 Koska Şaftı bölgesinde yapılan bazı sondajlardan alınan iri taneli zeminlerin elek analizi sonuçlarına göre sınıflandırılması

Sondaj no	**Derinlik (m)**	**Tane Boyu Dağılımı (%)**		**Sınıf**
		+4	**-200**	
KŞ-2-02	9.00	0.00	9.70	SM-SC
KŞ-3-02	3.25	31.18	4.45	GM-GC
KŞ-3-02	4.75	22.46	14.45	SM-SC GM-GC
KŞ-3-02	6.25	7.88	30.54	SM-SC
KŞ-3-02	8.15	25.59	12.76	SM-SC GM-GC
KŞ-4-02	4.75	16.79	12.22	SM-SC GM-GC
KŞ-4-02	6.25	9.99	18.19	SM-SC GM-GC
KŞ-4-02	7.75	13.63	11.98	SM-SC GM-GC
KŞ-4-02	9.25	27.40	15.23	SM-SC GM-GC
KŞ-4-02	10.75	1.29	11.89	SM-SC
KŞ-4-02	12.25	5.06	19.47	SM-SC
KŞ-4-02	13.75	2.09	25.71	SM-SC
KŞ-5-03	4.00	12.88	15.20	SM-SC GM-GC
KŞ-7-03	6.00	17.75	41.97	GM-GC,
KŞ-7-03	9.00	14.86	22.90	SM-SC GM-GC

Koska Şaftı civarından alınan örneklerinin tane dağılımına göre genellikle killi ve siltli kum (SM-SC) yer yerde siltli, killi çakıllar (GM-GC) olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.23).

4.3.3.4 Serbest Basınç Deneyleri

Serbest basınç deneyinde, silindirik bir zemin örneği yalnızca eksenel doğrultuda yüklenmektedir. Eksenel yük artışları altında örnekteki boy kısalması ölçülmekte ve buradan hareketle gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmektedir. Eksenel gerilmenin en büyük değeri zeminin serbest basınç direnci (q_u) değerini vermektedir (Özaydın, 1999).

İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı güzergahı Yenikapı göçük bölgesi, Yenikapı İstasyonu, Koska Şaftı ve Şehzadebaşı İstasyonu lokasyonlarında yapılan sondajlarda kesilen Güngören killerinden alınan örnekler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen serbest basınç direnci değerleri ile bu değerlere karşılık gelen kıvamlar Tablo 4.24 de verilmiştir.

Tablo 4.24 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlardan alınan kil örnekleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları

Sondaj no	**Derinlik (m)**	**Serbest Basınç Direnci (kg/cm^2)**	**Kıvam**	**Litoloji**
B-2	7.50	3.14	Çok katı	Kil
B-6	9.25	2.52	Çok katı	Kil
B-8	12.75	1.06	Katı	Kil
B-9	12.25	3.35	Çok katı	Kil
B-10	10.75	2.95	Çok katı	Kil
SK-2	16.50	1.79	Katı	Kil
SK-7	15.50	0.81	Orta	Kil
SK-13	20.50	1.45	Katı	Kil
SK-13	21.50	1.94	Katı	Kil
KŞ-2-02	14.50	0.81	Orta	Kil
KŞ-3-02	17.50	0.41	Yumuşak	Kil
KŞ-3-02	21.50	0.32	Yumuşak	Kil
KŞ-4-02	23.00	0.55	Orta	Kil
KŞ-4-02	23.50	1.28	Katı	Kil
KŞ-4-02	25.00	4.40	Sert	Kil
KŞ-4-02	25.50	4.07	Sert	Kil
AS-YU-12-02	8.50	0.90	Orta	Kil
AS-YU-12-02	11.50	0.49	Yumuşak	Kil
AS-YU-12-02	14.50	0.33	Yumuşak	Kil
AS-YU-15-02	14.00	0.74	Orta	Kil
AS-YU-15-02	19.00	2.44	Çok katı	Kil
AS-YU-16-02	19.00	0.98	Orta	Kil
AS-YU-16-02	19.50	1.32	Katı	Kil

Güngören killerinin serbest basınç direnci değerleri, Yenikapı göçük bölgesinden alınan örnekler için 1.06-3.35 kg/cm^2, Yenikapı İstasyonu civarından alınan örnekler için 0.81-1.94 kg/cm^2 arasındadır.

Koska Şaftı kesimindeki örneklerde 0.32-4.40 kg/cm^2, Şehzadebaşı İstasyonu bölgesindeki örneklerde ise 0.33-2.44 kg/cm^2 arasındadır değerler almıştır. Bu değerlerden hareketle incelenen güzergahın farklı kesimleri için Güngören killerinin yumuşak-sert kıvamlı aralığında değiştiği söylenebilir. Kıvamlılık nitelikleri su içeriğine ve çakıl-kum-silt oranlarına bağlı olarak değişmektedir.

Ancak laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar ile SPT deneylerinden elde edilen sonuçlar birbiriyle çelişmektedir. SPT deneyinden elde edilen N_{30} değerlerine

göre Güngören killerinin kıvamı daha yüksektir. Bu nedenle laboratuvarda saptanan serbest basınç direnci değerleri araziyi yansıtmamaktadır. Bu durum, örnek alımı ve deneye hazırlanması aşamalarında, örneklerin önemli ölçüde örselenmiş olabileceğini göstermektedir.

4.3.3.5 Direkt ve Endirekt Kesme Deneyleri

Kesme kutusu deneyinde, zemin örneği, dikdörtgen veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu içine yerleştirilmektedir. Uygulanan bir kesme kuvveti altında, kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket etmekte örnek, ortasından geçen yatay düzlem boyunca kaymaya zorlanmaktadır. Belirli bir normal gerilme altında, uygulanan kesme kuvveti ile meydana gelen yatay yer değiştirmeler ölçülmektedir (Özaydın, 1999).

Deney sırasında ulaşılan en büyük kayma gerilmesi veya yenilme kabul edilebilecek boyuttaki şekil değiştirmelere yol açan kayma gerilmesi kayma direncini vermektedir. Değişik normal gerilmeler altında tekrarlanarak bu deneyle zeminin yenilme zarfını elde etmek mümkün olmaktadır.

Tablo 4.25 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlardan alınan kil örneklerinin üç eksenli basınç deneyi sonuçları

Sondaj no	Derinlik (m)	İçsel Parametreler		Litoloji
		c (kg/cm^2)	ϕ (°)	
B-2	7.50	1.54	1	Kil
B-6	9.25	1.03	12	Kil
B-8	12.75	0.47	7	Kil
B-9	12.25	1.43	9	Kil
B-11	10.75	0.11	8	Kil
SK-2	13.00	1.73	2	Kil
SK-4	12.00	0.15	9	Kil
SK-7	22.50	0.13	19	Kil
SK-14	21.50	0.84	1	Kil
KŞ-6-03	10.50	0.82	5	Kil
KŞ-6-03	19.50	0.89	7	Kil
KŞ-3-02	7.90	0.14	14	Kil
KŞ-4-02	15.50	0.15	7	Kil
KŞ-4-02	17.50	0.45	4	Kil
AS-YU-12-01	6.50	1.13	0	Kil
AS-YU-12-01	11.50	0.65	12	Kil
AS-YU-12-01	14.50	1.35	0	Kil
AS-YU-15-02	8.00	0.31	16	Kil
AS-YU-15-02	9.50	0.56	10	Kil
AS-YU-15-02	14.00	0.56	0	Kil
AS-YU-15-02	19.00	1.04	9	Kil
AS-YU-16-02	9.50	0.35	0	Kil

Yenikapı göçük, Yenikapı İstasyonu, Koska Şaftı ve Şehzadebaşı İstasyonu lokasyonlarında yapılan sondajların belirli derinliklerinden alınan örnekler üzerinde üç eksenli basınç ve direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Bölgedeki zeminler için elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Tablo 4.25 de sunulmuştur.

Yenikapı göçük bölgesindeki sondajlardan alınan kil örnekleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç ve kesme deneyleri sonuçlarına göre kohezyon (c) değerleri 0.11-1.54 kg/cm^2, Yenikapı İstasyonu kesiminde 0.13-1.73 kg/cm^2, Koska Şaftı bölgesinde 0.14-0.89 kg/cm^2, Şehzadebaşı İstasyonu kesiminde 0.31-1.35 kg/cm^2 arasında değişmektedir. Görüleceği üzere güzergahdaki değişik lokasyonlardan alınan kil örneklerinin deney sonuçları birbirine yakın değerler vermiştir. Deney sonuçlarından hareketle, bu dört farklı lokasyonda karşılaşılan killerin düşük dirençte olduğu söylenebilir (Tablo 4.25).

4.4 Güzergahtaki Birimlerin Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi

İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı güzergahında, Trakya Formasyonu'nu oluşturan kumtaşı-kiltaşı-silttaşı ardalanması, Güngören killeri, Kuvaterner yaşlı akarsu çökelleri ve Kuşdili Formasyonu ile yapay dolgular bulunmaktadır. Trakya Formasyonu anakaya, Güngören killeri, Kuşdili Formasyonu, alüvyonlar ve yapay dolgular ayrık kayaç niteliğindedir. Tünellerde, bu birimlerden yalnızca Trakya Formasyonu'nu oluşturan litolojiler ile Güngören kili kesilmiştir. Aşağıda farklı oluşum koşulları ve litolojik özellikler taşıyan bu birimler, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerden hareketle mühendislik jeolojisi açısından irdelenmiştir.

4.4.1 Yapay Dolgu

Sondaj verilerine göre güzergah boyunca kalınlığı 2-12.15 m. arasında değişen yapay dolgular bulunmaktadır.

Yenikapı civarında, Kuvaterner çökelleri üzerinde bulunan yapay dolgular taş, toprak, çakıl, beton, kum, tuğla, tahta v.b. bileşenlerden oluşmaktadır.

Yapay dolgular, mühendislik davranışları açısından iki farklı dolgu tipi olarak değerlendirilebilir. Bunlardan birincisi denizel çökeller üzerinde ve eski adı Lycos deresi olarak bilinen Bayrampaşa dere yatağı çevresindeki eski yerleşim alanlarında antik olarak kabul edilebilecek eski dolgular, diğeri ise çoğunluğu son 50 yıl içerisinde oluşturulan genç dolgulardır. Bu ayrımdan hareketle güzergahtaki dolguların N_{30} değerleri bölgesel olarak irdelenmiştir (Tablo 4.26). Ancak N_{30} değerleri göz önüne alındığında bölgeler arası fark belirgin değildir.

Tablo 4.26 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlarda dolguda ölçülen N_{30} değerleri ve dolgu kalınlıklarının değişimi

Bölge	**Dolgu kalınlığı (m)**	**N_{30} yoğunlaşma Değerleri**
Yenikapı Göçük	2-10.5	2-14
Yenikapı İstasyon	2-12.15	2-19
LRTS hattı	4.6-8.5	2-12
Koska Şaftı	2 -11.3	2-9
Şehzadebaşı İstasyonu	4-10.5	2-27

Çalışılan güzergahtaki dolguların N_{30} değerleri 2-27, su içerikleri % 14- 32 arasında değişmektedir. N_{30} değerlerinin geniş bir aralıkta değişmesi dolgunun heterojen olduğunu buna bağlı olarak mühendislik özelliklerinin de heterojen olacağını ortaya koymaktadır. Bu nedenle dolgularda herhangi temel mühendisliği açısından kritik bir ortam olarak dikkate alınmalıdır.

4.4.2 Kuvaterner Çökelleri (Alüvyon ve Kuşdili Formasyonu)

Yapay dolgunun altında, tünel tavan kotunun üzerinde Yenikapı göçük kesimi-Yenikapı İstasyonu arasında, alüvyonlar ve denizel kavkı parçacıkları içeren Kuşdili Formasyonu yer almaktadır. Kuvaterner çökelleri tünel seviyesinde kesilmemiştir. Ancak göçüğün olduğu bölgede kazı kotuna yakın ve kalınlığı daha fazladır.

Sondaj verilerine bu birimin ortalama kalınlığı 4.5 m. dir. Kumlu seviyelerin baskın olduğu seviyelerde, N_{30} değerleri 2-30 arasındadır.

Değerlerin geniş bir aralıkta değişmesi bu birimlerin mühendislik özelliklerinin de kısa aralıklarda değiştiğini göstermektedir.

Sondajlardan alınan alüvyona ait örnekler üzerinde elek analizi deneyi yapılmıştır. Her üç bölgeden alınan örneklerin, tane çapı dağılımına göre sınıflandırılmıştır. Bölgedeki alüvyonun killi ve siltli kum (SM-SC) olduğu, yer yer malzemenin siltli-killi çakıl, çakıl-kum-silt karışımından (GM-GC) oluştuğu belirlenmiştir (Tablo 4.22, Tablo 4.23).

Anılan verilere göre kumların, mühendislik özellikleri lokal olarak değişmektedir. Ayrıca kalın ve suya doygun olmaları durumunda dinamik yüklere karşı hassas olabilecekleri bilinmektedir.

4.4.3 Güngören Formasyonu

Güngören Formasyonu marn ve kum araseviyeli yer yer kireçtaşı mercekleri içeren açık yeşil renkli kilden oluşmaktadır.

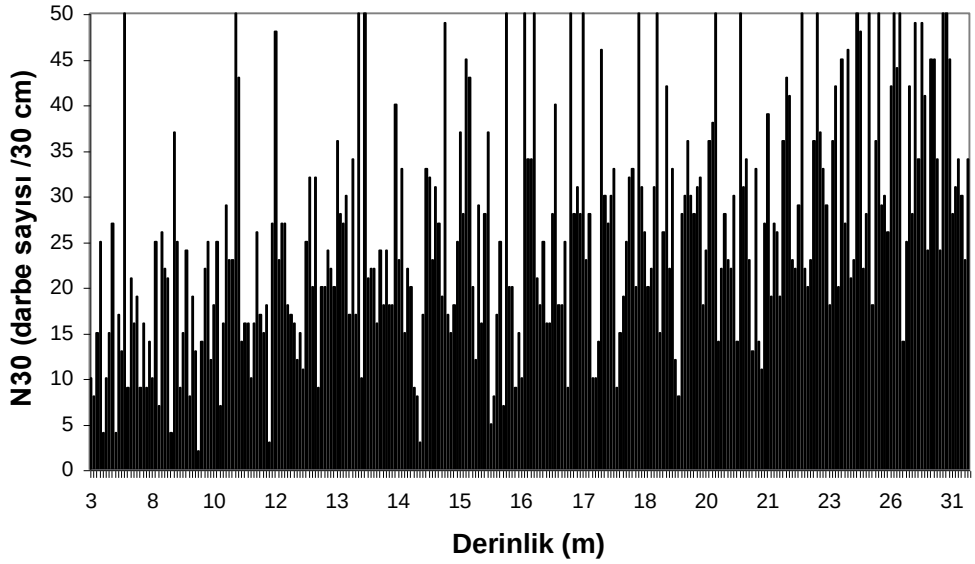
Hat 1 tünelinde km 4+547.45-4+790.00, km 5+250.00-5+169.00, km 5+583.13-5+635.00 ve km 5+735.00-5+791.87 arasında bu birim geçilmiştir.

Yenikapı-Unkapanı güzergahında yapılan sondajlar ve Hat1 tüneli kazı ayna raporlarından, Yenikapı Şaftı ile göçen Hat1 T tipi tüneli girişi, Yenikapı İstasyonu ile Mustafa Kemal Paşa caddesi arası, Koska Şaftı civarında Laleli ve Koska caddesini içine alan bölgede, tünel düzeyinde Güngören killeri ile karşılaşılmıştır.

Yenikapı-Unkapanı arası tünel güzergahındaki sondajlardan yararlanılarak oluşturulan boy kesitten, Güngören killerinin, Yenikapı göçük ve Yenikapı İstasyonu kesiminde alüvyonel birimlerin, Koska Şaftı-Şehzadebaşı İstasyonu arası ve Şehzadebaşı İstasyonu'nda da dolgunun altında yer aldığı görülmektedir (EK-A).

Güngören killerinde yapılan 286 adet SPT deneyi sonuçlarına göre N_{30} değerleri 15 - 35 arasında yoğunlaşmaktadır (EK-B). Bu değerlere göre killer katı-çok sert kıvamlıdır. Yenikapı-Unkapanı güzergahı üzerinde Güngören killerinde yapılan SPT deneyinde N_{30} değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 4.7 de verilmiştir.

Şekil 4.7'den de görüldüğü gibi, Güngören kilinin, genel anlamda derinliğin artmasına bağlı N_{30} değerlerinin arttığı söylenebilir.



Şekil 4.7 Güngören formasyonu içerisinde ölçülen SPT değerlerinin derinliğin fonksiyonu olarak değişimi

Güzergah üzerinde Güngören killeri için elde edilen N_{30} değerleri her bölgede geniş bir dağılım göstermektedir (Tablo 4.27).

Tablo 4.27 Güngören killeri üzerinde yapılan SPT deneyleri sonuçlarından elde edilen N_{30} değerleri dağılımının bölgesel olarak değerlendirilmesi

Bölge	**Kil Kalınlığı Aralığı (m)**	**N_{30} değerleri Aralığı**
Yenikapı Göçük	1.9 -5	7-50
Yenikapı İstasyon	7.5 -27.5	3-50
Koska Şaftı	11.8-22.8	14-50
Şehzadebaşı İstasyonu	4.4-17.3	5-50

Güzergahtaki Güngören killerinde yapılan pressiometre deneylerinde farklı derinliklerde kile 5.4-24 kg/cm^2 arasında basınçlar uygulanmış yenilme gözlenmemiştir. Elde edilen en yüksek limit basınç değeri 24.5 kg/cm^2 dir.

Pressiometrik Modülü değerleri 31.0-1298.0 kg/cm^2 arasındadır (Tablo 4.2, Tablo 4.3). Bu aralıklar dikkate alındığında pressiometre ve SPT deney sonuçları birbirleri ile uyumludur.

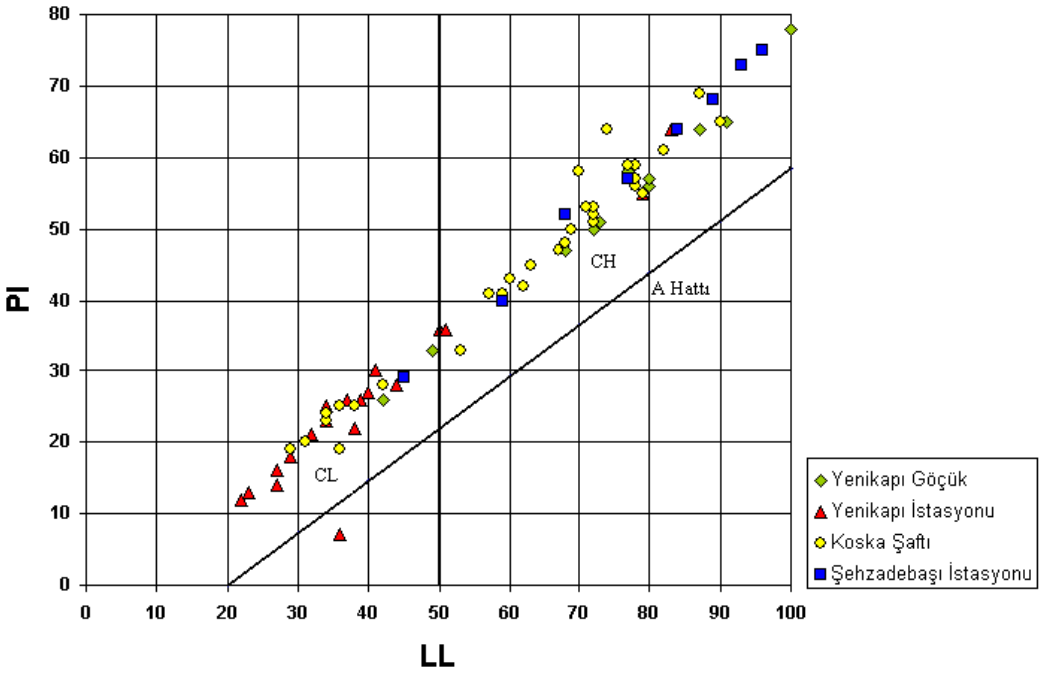
İnceleme alanının batısında kalan Bakırköy yerleşim alanındaki Güngören killeri üzerinde yapılan pressiometre deneyleri sonuçlarına göre limit basınç değerleri 3.0 -

17.0 kg/cm^2, Presiometrik Modül değerlerinin ise 20.7 - 202.7 kg/cm^2 arasında değiştiği saptanmıştır (Mahmutoğlu ve diğ., 2001).

Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahı arasında tünel düzeyinde veya çevresinde bulunan Güngören killeri bölgesel olarak ayırt edilmiş ve zemin mekaniği açısından önem taşıyan indeks özelliklerinin değişim aralıkları Tablo 4.28 de verilmiştir. Yenikapı göçük bölgesinde ve Koska Şaftı bölgesindeki su içeriği değerleri likit limit (sıvı hal) değerlerine, Yenikapı İstasyonu bölgesindeki ise aynı değer plastik limit (plastik) değerlerine yakındır.

Tablo 4.28 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlardan alınan kil örneklerinin ortalama kıvam limiti ve su muhtevası değerlerinin değişimi

Bölge	**Su Muhtevası Wn %**	**LL %**	**PL %**	**IP %**
Yenikapı Göçük	33.2 - 42.8	42-100	16-26	26-78
Yenikapı İstasyonu	15.6 - 27.6	22-83	9-24	7-64
Koska Şaftı	24 - 44.1	29-90	10-25	19-69
Şehzadebaşı İstasyonu	-	45-96	16-21	29-75



Şekil 4.8 Yenikapı-Unkapanı güzergahı üzerinde yapılan sondajlardan alınan kil örneklerinin kıvam limitlerinin Cassagrande kartı üzerindeki yerleri

Bölgesel olarak ayırtedilen killerin Atterberg limitleri Cassagrande kartı üzerine yerleştirilmiştir. Yenikapı Göçük, Şehzadebaşı İstasyonu bölgesindeki killer yüksek plastisiteli, Bu değerlendirmeden, Yenikapı İstasyonu bölgesindeki killerin ise düşük plastisiteli olduğu görülmüştür. Koska Şaftı civarındaki killerin büyük bir kısmı yüksek, az sayıdaki örnek ise düşük plastisiteye sahiptir (Şekil 4.8).

Serbest ve üç eksenli basınç deneyi sonuçlarından elde edilen değerlerin değişim aralıkları Tablo 4.29 da verilmiştir.

Tablo 4.29 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki Güngören killerinin ortalama dayanım parametreleri

Bölge	**Serbest Basınç Direnci q_u (kg/cm^2)**	**Kohezyon C (kg/cm^2)**	**İçsel Sürtünme Açısı ϕ (°)**
Yenikapı Göçük	1.06 - 3.35	0.11 - 1.54	1 - 12
Yenikapı İstasyonu	0.81 - 1.94	0.13 - 1.73	2 - 19
Koska Şaftı	0.32 - 4.40	0.14 - 0.89	4 - 14
Şehzadebaşı	0.33 - 2.44	0.31 - 1.35	0 - 16

Kilin davranışının su içeriğine bağlı olduğu dikkate alındığında Güngören kilinin kritik özellikler taşıdığı anlaşılmaktadır.

Sonuçta, Tablo 4.29 da verilen değerler Güngören killerinin tünel mühendisliği açısından sorunlu bir ortam olduğunu gösterir.

İncelenen güzergahın değişik lokasyonlarında yapılan sondajların değişik derinliklerinden alınan kil örnekleri çoğunlukla yüksek plastisitelidir. Bu durum mühendislik davranışları üzerinde olumsuz etkiler yaratacaktır. Özellikle konsolidasyona bağlı oturmalar oluşabilir ve bu durum yüzeydeki yapıları etkileyebilir. Ayrıca şişme potansiyeli kazı kesitinin küçülmesi ile sonuçlanacak deformasyonların oluşmasına neden olabilecektir. Anılan olumsuzlukların yaşanmaması için uygun kazı yöntemi seçilmeli gerekli önlemler alınmalıdır.

4.4.4 Trakya Formasyonu

Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahında en yaygın birim olan Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu kumtaşı-kiltaşı-silttaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Formasyon, yer yer diyabaz veya andezit daykları ile kesilmiştir.

Yenikapı-Unkapanı güzergahında Hat 1 tünel ayna raporlarına göre tünel açımı sırasında, km 4+850.60-4+970.00, km 5+250.00-5+583.13 ve km 5+791.87-7+050.00 arasında Trakya Formasyonu'nu oluşturan birimler yüzeylemektedir.

Yenikapı-Unkapanı güzergahında, sondaj verileri ve tünel ayna raporlarına göre, Yenikapı göçük bölgesinde, göçen Hat 1 T tünelinin tabanında başlayan Yenikapı İstasyonu girişine kadar devam eden kesimde, Yenikapı İstasyonu'nun Koska girişinde yer alan Mustafa Kemal Caddesi ile Koska Şaftı arasında ve Koska Şaftı bölgesinde Mesihpaşa Caddesinde başlayan, güzergahın bitimi Haliç Köprü geçişine kadar olan kesimde anakayayı oluşturan litolojilerle karşılaştırılmıştır (EK- A).

Yenikapı-Unkapanı arası tünel güzergahında açılan sondajlardan yararlanılarak oluşturulan boy kesitte, Mustafa Kemal Caddesi ile Koska Şaftı arasında kalan kesimde Alüvyon, Kuşdili Formasyonu ve dolgu tarafından örtülen anakaya, Şehzadebaşı İstasyonu - Haliç arasındaki kesimde yalnızca dolgunun altında yer almaktadır. Güzergahın diğer kesimlerinde ise Güngören kili altındadır (EK-A).

Pressiometre deneylerinde, anakayanın sağlam kesimlerinde limit basınç değerleri en yüksek 24.4 kg/cm^2, ayrışmış kesimlerinde en düşük 8 kg/cm^2 olarak belirlenmiştir. Pressiometrik Modül değerleri 151-3194 kg/cm^2 arasındadır (Tablo 4.2, Tablo 4.3). Bu geniş aralık, Trakya Formasyonu'nun aşırı kırıklı-çatlaklı olmasından, ezik zonların yaygın olmasından ve ayrışmadan kaynaklanmaktadır.

Yenikapı-Unkapanı güzergahı arasında yer alan YH1U-2A tünelinde 7 ayrı as alanda ve 3 ayrı yönelimde (sağ duvar-sol duvar-ayna) Schmidt çekici ölçümleri yapılmıştır. Bu deneylerde elde edilen sertlik değerleri ve kayacın kuru birim hacim ağırlığı verileri yardımı ile Deere ve Miller (1966) tarafından hazırlanmış abak kullanılarak (Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6) tek eksenli basınç dayanımları hesaplanmıştır (Tablo 4.4). Hesaplanan tek eksenli basınç değerleri ISRM (1978) sınıflandırma tablosunda tanımlamıştır (Tablo 4.5, Tablo 4.6, Tablo 4.7).

Schmidt çekici deneyine göre sağ duvarda, sol duvarda ve ayna önünde kayaçların orta sağlam kaya niteliğinde olduğu görülmüştür.

Yenikapı tünellerinde Trakya Formasyonu'nda geçilen kesimlerden alınan örneklerin kuru birim hacim ağırlıkları 2.41-2.68 g/cm^3, suya doygun birim hacim ağırlıkları

2.49-2.69 g/cm^3, poroziteleri % 1.37-9.78, boşluk oranları ise % 1.38-10.8 arasındadır (Tablo 4.8).

Yenikapı Hat 2 T tüneli bitiminde başlayıp Yenikapı İstasyonu girişine kadar süren 36 m. uzunluğunda olan YH2U-3A bağlantı tünelinden alınan Trakya formasyonuna ait litolojik örnekler üzerinde tabakaya dik ve paralel yönde nokta yükleme deneyi yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir (Tablo 4.9).

YH2U-3A tünelindeki litolojilerin nokta yükleme direnci, Bieniawski (1975) sınıflamasına göre orta-çok düşük dirençli çıkmıştır (Tablo 4.10). Nokta yükleme basıncından tek eksenli basınca dönüşüm formülünden tek eksenli basınç direnci, Deere ve Miller (1966) göre düşük-çok düşük dirençlidir (Tablo 4.11).

YH2U-1A tünellerinde yapılan Schmidt çekici ölçümleri ile bu kesimden alınan örnekler üzerinde yapılan Nokta yükleme direnci deneyleri sonuçları arasındaki farklılıklar Trakya Formasyonunu oluşturan litolojilerin kısa aralıklarda değişen ayrışma ve yapısal özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Göçük nedeniyle yıkılan Yenikapı Hat1 T tüneli yerine yapılan aç-kapa yapısının bitiminde başlayan ve Yenikapı İstasyonu girişine kadar olan 100 m. uzunluğundaki anakayada açılan YH1U-2A tünelinden alınan örnekler üzerinde tabakaya dik ve paralel yönde nokta yükleme deneyi uygulanmış elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir (Tablo 4.12). YH1U-2A tünelindeki litolojilerin nokta yükleme direnci Bieniawski (1975) sınıflamasına göre çok düşük dirençlidir (Tablo 4.13). Nokta yükleme basıncından tek eksenli basınca dönüşüm formülünden tek eksenli basınç direnci çok düşük olarak bulunmuştur (Tablo 4.14).

Güzergahın Unkapanı bölgesinde açılan AS-YU-11-01 nolu sondajdan alınan karotlar üzerinde yapılan tek eksenli basınç direnci ve elastisite modülü deneyleri sonuçları verilmiştir (Tablo 4.30).

Tablo 4.30 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki AS-YU-11-01 sondajından alınan karotların tek eksenli basınç direnci ve elastisite modülü değerleri

Derinlik (m)	**Tek Eksenli Basınç Direnci (kg/cm^2)**	**Elastisite Modülü (kg/cm^2)**	**Litoloji**
7.00	955	315000	Kumtaşı
9.00	592	261000	Kumtaşı
11.50	912	322000	Kumtaşı

Unkapanı bölgesi için elde edilen bu değerler bölgedeki anakayanın kumtaşı düzeylerinin yüksek dirençte olduğunu göstermektedir.

İstanbul Metrosu 1. Aşama inşaatı kapsamında Taksim-4.Levent tünel güzergahından alınmış karotlar üzerinde uygulanan deney sonuçları, litolojik tanımlamalar da dikkate alınarak Tablo 4.31 de verilmiştir (Eriş, 1999).

Tablo 4.31 İstanbul Metrosu 1. Aşama Taksim-4. Levent arası tünel güzergahından alınan örneklerin mekanik özellikleri

Deney Sayısı	**Tek Eksenli Basınç Direnci (MPa)**	**Elastisite Modülü (GPa)**	**Litoloji**
82	42.0-67.0	8.62 - 9.00	Kumtaşı
69	15.0-36.0	2.85- 4.60	Çamurtaşı
148	21.0-54.5	4.37- 6.25	Kiltaşı

Tablo 4.31 den de görüldüğü gibi kumtaşlarının basınç direnci, kiltaşları ve çamurtaşının basınç dirençlerine göre daha yüksektir.

Laminasyonun iyi geliştiği örneklerde kırılmanın genellikle tabaka yüzeyleri boyunca gerçekleştiği, sonuçta ise daha düşük direnç değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

Genel değerlendirmeler açısından 1. Aşama tünel inşaatı kapsamında yapılan çalışma sonuçlarıda dikkate alınmıştır. Bu aşamada tünel düzeyi kayaçlarının jeomekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 20 m. derinde açılan 40 m. uzunluğundaki Taksim araştırma galerisinde içerisinde yapılan arazi deney sonuçları Tablo 4.32 de verilmiştir.

Tablo 4.32 İstanbul Metrosu 1. Aşama Taksim-4. Levent arası tünel inşaatı kapsamında, Taksim araştırma galerisinde yapılan arazi deneyi sonuçları

Deney No	**Maksimum Basınç (kg/cm^2)**	**Deformasyon Modülü (kg/cm^2)**	**Litoloji**
1	300	6396-1449	Kumtaşı
2	300	24169-26300	Kumtaşı
3	300	25357-37872	Kiltaşı
4	300	6276-12757	Kumtaşı
5	300	5137-15946	Kiltaşı-Kumtaşı
6	300	6231-10223	Kumtaşı
7	350	3675-6067	Kumtaşı
8	210	19267- 25489	Kiltaşı - Kumtaşı

Bu sonuçlar, projelendirme aşamasında kayanın genel davranışının modellenmesinde zorluklar oluşturmuş ve uygulama esnasında tünel düzeyinde karşılan birimlerin davranışlarının izlenmesini zorunlu kılmıştır.

Tablo 4.33 1. Aşama Taksim- 4. Levent arası tünel inşaatı kapsamında, yapılan pressiometre deney sonuçları

Sondaj No	Derinlik (m)	Limit Basınç (kg/cm^2)	Pressiometrik Modül (kg/cm^2)	Litoloji
S-10	20	24.1-57.4	263-1826	Kumtaşı-kiltaşı
S-11	20	14.2-48.1	174-1982	Kumtaşı-siltaşı
S-12	18.5	35.2-50.5	1139-2199	Kumtaşı-siltaşı
S-13	28.5	26.2-58.5	602-2460	Kumtaşı-siltaşı

Pressiometre deney sonuçlarına göre kaya ortamının Pressiometrik Modül değerlerinin 174-2460 kg/cm^2 arasında, limit basınç değerlerini ise 14.2-58.5 kg/cm^2 arasında değiştiği görülmektedir (Tablo 4.33).

Geniş aralıkta değişen bu değerler, davranış farklılığının anakayanın derin kesimleri için de geçerli olduğunu göstermektedir.

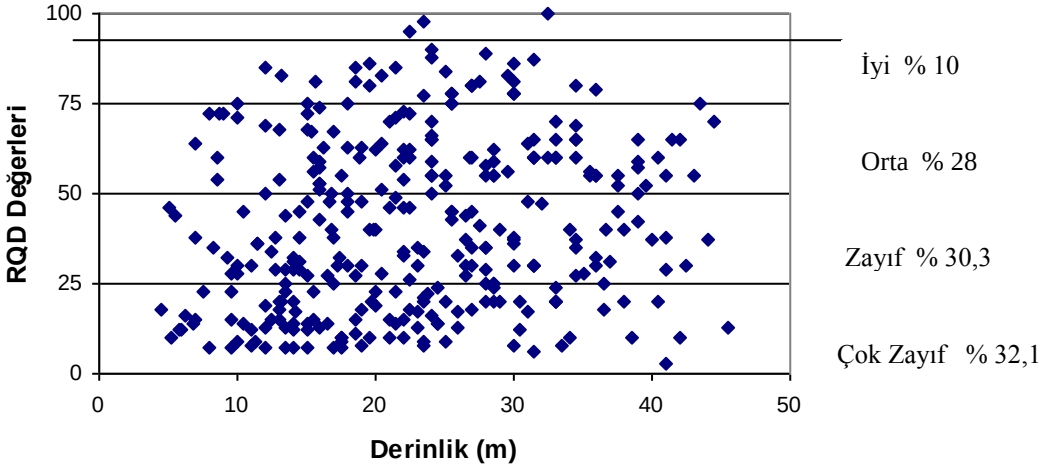
4.4.4.1 Kaya Kalitesi Tanımlaması (RQD)

Güzergahtaki 42 sondajın değişik derinliklerinde ölçülen RQD değerinden, anakayayı oluşturan litolojik birimlerin kaya kalitelerinin genellikle çok zayıf kaya - orta kaya olduğu belirlenmiştir (EK-B).

RQD değerleri ile derinlik arasında herhangi bir ilişkinin olup olmadığı irdelenmiş, ancak aralarında belirgin bir ilişki saptanamamıştır. Bu durum, Trakya Formasyonu'nun içerdiği birincil ve ikincil süreksizliklerdin sıklığını göstermektedir. İncelenen güzergahdaki sondajlarda ölçülen RQD değerlerinin % 10'u 75'in üzerindedir (Şekil 4.9). Bu değerler, anakayanın çoğunlukla zayıf-orta kaliteli kaya ortam olduğunu göstermektedir (Deere, 1968).

4.4.4.2 RMR Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi

Kaya kütle sınıflama sistemleri, kaya yapıları mühendisliğinde tasarıma yardımcı olan ve ön tasarım amacıyla kullanılabilecek birer araç olarak değerlendirilmektedir (Ulusay, 2002).



Şekil 4.9 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlarda geçilen anakayanın RQD değerlerinin derinliğe bağlı değişimi

Bir kaya kütlesi sınıflama sisteminden elde edilen sonuçlar, o sistemin kullandığı parametrelerle ilgilidir. Bu parametreler tayin edilebilir ve kaya kütlesinin özelliklerini yansıtabilir nitelikte olmalıdır. RMR sistemine göre kaya kütlesinin sınıflandırılmasında aşağıda belirtilen 6 parametre esas alınmıştır (Bieniawski, 1989).

1. Kayacın tek eksenli basınç dayanımı
2. Kaya kalite özelliği (RQD)
3. Süreksizlik aralığı
4. Süreksizliklerin durumu (pürüzlülük, açıklık, bozunma, dolgu, devamlılık)
5. Süreksizliklerin yönelimi
6. Yeraltısuyu koşulları

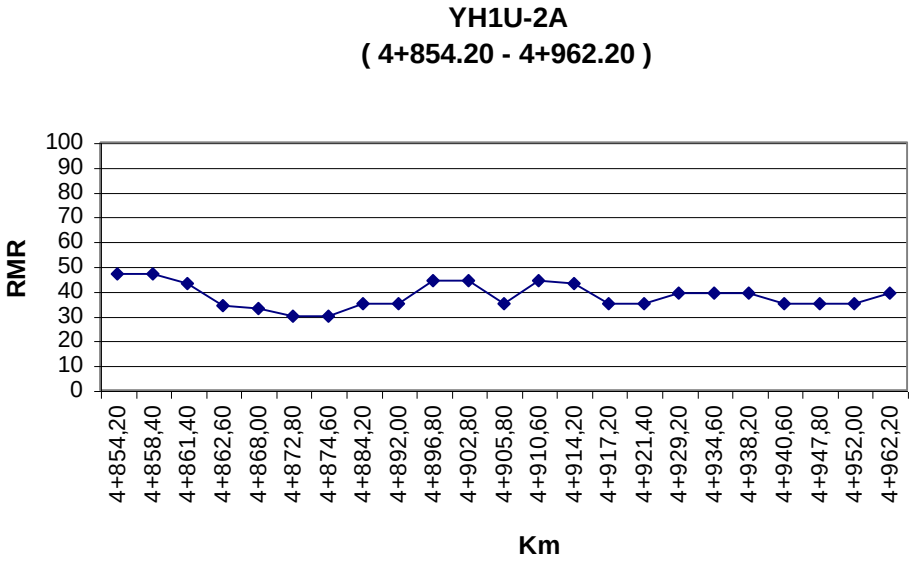
İlk olarak 1973 yılında önerilen RMR Sistemi birkaç defa modifiye edildikten sonra 1989 yılında yapılan değişikliklerle Bieniawski (1989) son halini almış ve bu haliyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Ulusay, 2001). Sınıflama sisteminde kullanılan parametrelerden, tünelde süreksizlik eğim ve doğrultusunun etkisi ve süreksizlik yönelimine göre düzeltme tablolarından elde edilen puanlamalarının toplamı ile kaya

kütlesi sınıfları ve derecelendirilmesi tablosunda, kaya ortamının hangi sınıfta olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.34).

Tablo 4.34 RMR Kaya Kütlesi Sınıflama Sisteminde puanlamalara göre kaya sınıfları (Bieniawski, 1989)

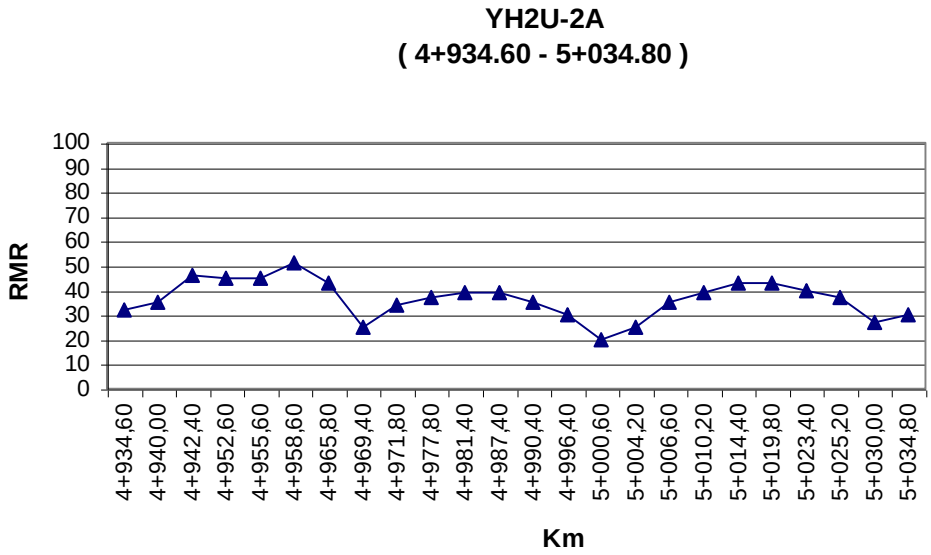
Sınıf No.	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20

İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahında RMR kaya kütlesi sınıflama sistemi kullanılmıştır. Bu amaçla, anakayada geçilen 100 m. uzunluklarındaki YH1U-2A ve YH2U-2A tüplerinde 5 metrede bir yapılan gözlemlere göre oluşturulan jeoteknik bilgi formlarındaki puanlamalardan elde edilen RMR değerleri ile tünel km.leri arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler hazırlanmıştır (Şekil 4.10, Şekil 4.11).



Şekil 4.10 YH1U-2A tünelinin 4+854.20-4+962.20 km ler arasındaki RMR değerleri

YH1U-2A tünelinde yapılan RMR sınıflamasına göre 30-47 arasında değerler bulunmuştur (Şekil 4.10). YH2U-2A tüneli için yapılan değerlendirmede RMR nin 20-51 aralığında değiştiği saptanmıştır (Şekil 4.11). Bu aralık kaya sınıflandırma tablosuna göre Bieniawski (1989) geçilen kesimin orta - zayıf kaya niteliğinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11 YH2U-2A tünelinin 4+934.60-5+036.80 km ler arasındaki RMR değerleri

Grafiklerde görüldüğü üzere RMR değerleri, özellikle YH2U-2A tünelinde kaya ortam özelliklerinin kısa mesafelerde değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu değişim Trakya Formasyonu'nun yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

4.5 Yeraltı Suyu Durumu

Yenikapı-Unkapanı güzergahında 96 sondaj kuyusu açılmış ve bu kuyuların birçoğunda yeraltı su seviyesi ölçülmüştür. Bu ölçümlerin sonuçlarına göre yeraltı su seviyesi 2-16 m arasında değişmektedir. Güzergah üzerinde açılan sondajlarda bazı lokasyonlar için elde edilen yer altı su seviyeleri Tablo 4.35 de verilmiştir.

Tablo 4.35 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki sondajlarda yer altı su seviyeleri

Bölge	**Yeraltı su seviyesi aralığı (m)**	**Litoloji**
Yenikapı Şaftı-Koska Şaftı arası	2- 9.2	Dolgu ve alüvyon
Koska Şaftı	5.1-10.8	Dolgu ve alüvyon
Koska Şaftı - Şehzadebaşı İstasyonu	7.6-16	Alüvyon
Şehzadebaşı İstasyonu	4.5- 11.25	Dolgu ve kil
Şehzadebaşı İstasyonu-Unkapanı arası	2.35 - 12	Dolgu ve anakaya

Yenikapı Şaftı-Koska Şaftı arasında, Yenikapı göçük ve Yenikapı İstasyon alanını içine alan kesimde, yeraltı su seviyesi 2-9.2 m. arasındadır. Bu kesimlerde su seviyesi genellikle dolgu ve alüvyon içerisinde kalmaktadır.

Koska Şaftı civarında yer altı su seviyesi 5.1-10.8 m., Koska şaftı ile Şehzadebaşı İstasyonu arasındaki bölgede ise 7.6-16 m arasında kalmaktadır.

Sondaj verilerine göre Şehzadebaşı İstasyonu dolayında yer altı su seviyesi 4.5-11.25 m. arasındadır. Bu bölgede yer altı su seviyesi dolgu ve Güngören killeri içindedir.

4.5.1 Formasyonların Hidrojeolojik Özellikleri

4.5.1.1 Yarı Geçirimli-Geçirimli Ortamlar

Güzergahta yer alan yapay dolgular tuğla, kiremit, blok, çakıl, kum, silt kil boyutunda bileşenlerden oluşmuştur. Dolgular konsolide olmadıkları için gevşek olup boşluk oranları yüksektir. Boşluklu olmaları nedeniyle yarı geçirimli ortam niteliğindedir.

Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki denizel ve akarsu alüvyonları çakıl, kum, kil, silt boyutunda bileşenden oluşmuştur. Bu litolojik özellikleriyle alüvyonlar akifer niteliği taşımaktadır.

4.5.1.2 Geçirimsiz Ortamlar

Güngören kili geçirimsiz olup, üzerinde bulunan birimlerde depolanan suyun aşağılara doğru sızmasını engellemektedir.

Güzergahın temelini oluşturan Trakya Formasyonu'na ait birimler de genel anlamda geçirimsizdir. Bu birim Hersiniyen ve Alpin orojenezlerinin etkisiyle çok çatlaklı ve kırıklı bir yapı kazanmış olup çatlakların araları kil dolguludur. Formasyona ait kumtaşlarının permeabilitesi (K) 10^{-5} m/sn dolayındadır (Eyüboğlu, 1988).

Tablo 4.36 Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki bazı sondajlarda yapılan basınçlı su deneylerinden elde edilen permeabilite değerleri

Sondaj No	Derinlik (m)	Permeabilite (K) m/s	Litoloji
Yİ-2-98	9.00	$1{,}8 \times 10^{-6}$	Kil
YŞ-1-99	10.50	$5{,}17 \times 10^{-8}$	Kil
YU-3-99	15.00	$1{,}46 \times 10^{-5}$	Kumtaşı-Kiltaşı
YU-3-99	19.50	$2{,}48 \times 10^{-5}$	Kumtaşı -Kiltaşı

Güzergah sondajlarda basınçlı su deneyi yapılan noktalar için elde edilen geçirimlilik değerleri Tablo 4.36 da verilmiştir.

4.5.2 Yeraltısuyunun Tünel Çalışmalarına Etkisi

Tünel açımı sırasında tünel ortamının jeoteknik özelliklerinin yanında yer altı suyu durumu önem taşımaktadır. Tünel güzergahı üzerinde açılan sondajlarda yapılan yer altı suyu seviyesi ölçümlerinin tünel kazı seviyesine olan etkileri araştırılmıştır.

Yenikapı Şaftı bölgesinde km 4+547.45-4+790.00 arasındaki kesimde Güngören killeri içerisinde geçilen seviyede mevcut litoloji geçirimsiz ve doğal su içerikleri yüksektir. Ancak tünel içerisinde bu birimle karşılaşılan kesimlerde önemli bir su geliri olmamıştır.

Km 4+790.00-4+850.60 arasındaki Hat 1 T tünelinde, tünel tabanında Trakya Formasyonu üst yarısında ise Güngören kili kesilmiştir. Bu bölgede yer altı su seviyeleri 3.5-9.2 m arasında değişmekte olup su düzeyi dolgu içerisinde kalmaktadır. Ancak tünel tavanı üzerindeki kil kalınlığının azalması, üzerinde bulunan yaklaşık 4 m kalınlığa sahip suya doygun kumun baskın olduğu alüvyonun da etkisi ile T tipi tünel göçmüştür.

Laleli'den Unkapanı İstasyonu'na kadar süren ve Şehzadebaşı İstasyonu'nu içine alan km 5+791.87-7+050.00 arasındaki kesimde tünel Trakya Formasyonu'nda açılmıştır. Bu kesimde yeraltı suyunun derinliği yüzeyden 2.35-16 m arasında değişmektedir. Bu bölgede örtü kalınlığı 32-48 m arasındadır. Trakya Formasyonu'nun su taşıma ve iletme kapasitesi, tabakalanma, çatlak, kırık ve fay zonları gibi süreksizliklerin denetiminde gelişmiştir. Bu yapısal parametreler, zaman zaman su gelirlerine neden olmaktadır. Güzergah boyunca karşılaşılan suların büyük bir bölümünü kanalizasyon ve şebeke suyu kaçakları oluşturur. Tünel içinde oluşturulan havuzlarda toplanan sızıntı niteliğindeki bu sular pompalar yardımıyla drenaj dışarı atılmaktadır. Su sızıntısı ile karşılaşılan kesimlerde tünel kaplamasının arkasında kalan boş hacimler kontak enjeksiyonu ile doldurularak su sızıntıları engellenmektedir.

5. JEOTEKNİK ÖLÇÜM VE GÖZLEMLER

5.1 Giriş

İnşaat süresince, yer altı kazılarının davranışlarını izleme bugün önem ve gereklilik taşımakta, kazı inşaatı ve dizaynına büyük katkıda bulunmaktadır. Kayanın ve oluşturulan desteklerin sistematik olarak yerinde izleme yöntemi son yıllarda yer altı yapılarında ümit veren gelişmelerden biri olmuştur.

Yerinde izleme ölçümlerinin başlıca amacı destekleme ve kayanın davranışı üzerinde nitelikli verilerin elde edilmesiyle yeraltı kazılarının duraylık koşullarının sağlanmasıdır. Bunun sonucunda, yeraltı kazılarının tasarımının temelinde yeraltı destekleme sistemlerinin tasarımı yatmaktadır (Hook ve Brown, 1980).

Tünel inşaatının izlemesinde etkili ve faydalı olunması için tüm adımlar süresince dikkatlice planlamanın yapılması gerekmektedir. Madencilikte ve tünelcilikte yerinde izleme yöntemi kayaçların karmaşık yapıda olmasından dolayı çok önemlidir.Yeraltı kazılarının yapılması ve tasarımı pratik deneyime ve mühendislik muhakemesine dayanmaktadır. Uygun emniyetli yapı oluşturulması süresince ölçüm ve gözlemle başlangıçtaki tasarımın kontrolü, planlama aşamasında mümkün olmaktadır (Bienawski, 1984).

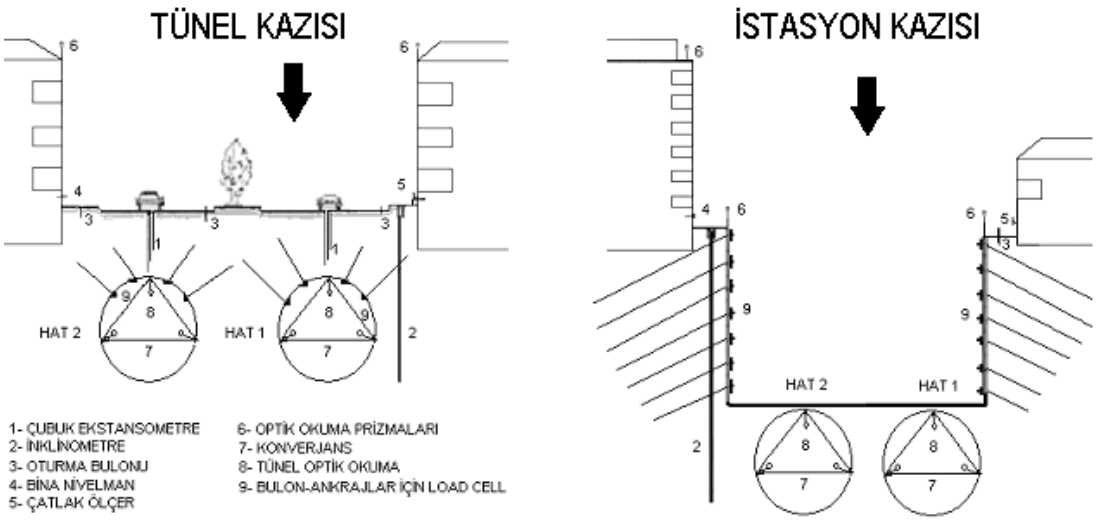
Metro mühendisliğinde jeoteknik açıdan temel hedef, mevcut altyapı ve yapıların olumsuz yönde etkilenmesini engelleyecek en uygun yöntem ve önlemlerin belirlenmesidir. Bu nedenle deformasyonları denetleyici açım ve imalat teknikleri kullanılır (Vardar, 1994).

5.2 İstanbul Metrosunda Yapılan Jeoteknik Ölçümler

Zemin ve kaya mekaniği ile ilgili problemlerin çözümünde doğrudan uygulama alanına sahip bir bilim dalı haline gelen jeoteknik ölçümler özellikle son yıllarda

değişik uygulamalarda vazgeçilmez bir unsur olarak yerini almıştır. Bu tip ölçümler uygulama projesinin karakteristikleri dikkate alınarak projelendirilir.

Bir tünelin mühendislik tasarımının yapılabilmesi için tünel zemininin mühendislik özelliklerini ve mühendislik davranışının bilinmesi gerekir. Başarılı bir tünel tasarımının ve tünel inşaatının ön şartı, proje hazırlanması aşamasında ayrıntılı jeoteknik araştırmaların yapılmasıdır. Bütün diğer mühendislik yapılarında olduğu gibi tünelin inşaatında karşılaşılacak problemler önceden bilindiğinde, tünel tasarımında elverişsiz zemin koşulları ve potansiyel problemler dikkate alındığında, olabilecek masraflı gecikmeler ve tünelin yeniden projelendirilmesi gibi sorunlardan kaçınılabilir. Yoğun araştırmaların yapıldığı tüneller, çoğunlukla potansiyel problemlere önceden rasyonel çözümler getirilerek, zamanında ve belirlenen bütçe ile bitirilebilmektedir.



Şekil 5.1 İstanbul metrosunda kullanılan jeoteknik ölçüm sistemleri

Şekil 5.1 de metro tünelleri için planlanan jeoteknik ölçümlerin tümü bir arada gösterilmiştir. Başlangıçta planlanan bu ölçümlerin tümünün her noktada yapılması gerekmeyebilir. Uygun ölçüm sistemlerinin seçimi, oluşturulan mühendislik yapısının özellikleri, ortamda beklenen harekete ve deformasyon türüne, ortamın jeolojik yapısına, kaya veya zemin ortamının davranışına, olası kayma geometrisine, çevre ve direnç parametrelerine (C ,ϕ) göre değişir.

İstanbul Metro İnşaatı'nın incelenen kesimi içerisinde yapılan ve Şekil 5.1 de gösterilen jeoteknik ölçümler aşağıdaki sıralanmıştır.

- Tünel içi deformasyon ölçümü (Şerit Eksantometre ve Optik Ölçümlerle konverjansın belirlenmesi)
- Yüzeyden ve örtü kalınlığı boyunca oluşan yatay ve düşey zemin hareketlerinin ölçümü (eğim ölçer "inklinometre" ve Uzama ölçer "eksantometre")
- Tünel kaplaması içinde ve kayadan kaplamaya iletilen gerilme ölçümleri (Teğetsel ve Radyal Hidrolik Basınç hücreleri)
- Duvar ankrajları ve tünel içinde bulonlarda yük ölçümleri.(Diskli Yük Hücreleri)
- Yüzey ve bina oturması ölçümleri (Nivelman)
- Ankrajlı derin kazı duvarlarında deplasman ölçümleri.

5.2.1 Tünel İçi Deformasyon Ölçümleri

Tünel içi deformasyonlar, göreceli yer değiştirmeler ve mutlak yer değiştirmeler olarak ölçülüp kaydedilmektedir. Göreceli yer değiştirmeler şerit ekstansometre ile ölçülmektedir. Mutlak yer değiştirmeler ise optik ölçüm aletleri yardımıyla ölçülmektedir. Tünel içindeki ölçüm kesitleri güzergaha ait jeoteknik ölçüm paftalarında belirtilen aralıklarda oluşturulmaktadır. Her ölçüm kesitinde, tünel tepe noktasında bir adet yan duvarlarda da ikişer adet olmak üzere yerleştirilen toplam 5 adet deformasyon ölçüm bulonu bulunmaktadır (Şekil 5.2).

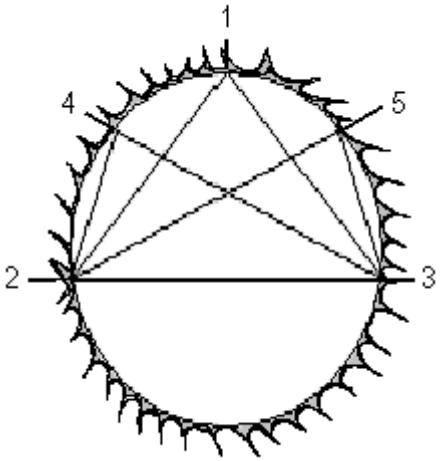
Kazının ardından çelik iksa ve hasır çelik yerleştirildikten sonra kayada 15 cm. derinliğinde delikler açılmakta ve deformasyon bulonları bu deliklere çimento şerbeti ile sabitlenmektedir. Bulon başlık kısmı geçici olarak koruyucu bir sargı ile kapatıldıktan sonra püskürtme betonu uygulanır. Püskürtme betonu biter bitmez başlık sargıları çıkarılmakta ve daimi koruyucu plastik kapaklar başlıklara vidalanmaktadır (Yüksek Proje jeoteknik ölçüm raporları).

Nihayi kaplama, önce invert arkasından da kemer betonlarının dökülmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Kaplama öncesinde ilk olarak tünel kesit kontrolleri yapılarak tünel teorik kazı sınırı üzerine, tahkimat eleman kalınlığı ve öngörülen konverjans

“d1” tolerans olarak ilave edilerek hesaplanan kesit içine geçici destek yapısının taşmamış olması gerekir. Taşmanın olması durumunda tarama yapılır ve tarama yapılan kesim yeniden desteklenir. Diğer taraftan tünel içi deformasyon değerleri kontrol edilmektedir. Bunun nedeni kaplama öncesi deformasyonların ya tamamıyla sıfır, ya da nihayi kaplamaya zarar vermeyecek düzeye düşmüş olması gereğidir. Eğer mevcut deformasyon bu sınırların üzerinde ise sönümlenene kadar beton dökülemez.

Şerit Ekstansometre Ölçümleri

Şerit ekstansometre ile yapılan konverjans ölçümlerinden elde edilen değerler göreceli deplasman değerleridir. İlk ölçüm değerleri püskürtme beton atıldıktan 3 saat sonra alınır. Ölçüm aygıtı olarak 0.01 mm. okuma hassasiyetinde 20 m. şerit uzunluğu ve şerit genliği ayar ibresi bulunan şerit eksantometre aleti kullanılmaktadır. İlk ölçümler alındıktan sonra diğer ölçümler günlük olarak alınır ve deformasyon rejimine bağlı olarak ilgili mühendis tarafından zamana bağlı olarak sıklığı tespit edilir (Yüksek Proje jeoteknik ölçüm raporları).



Şekil 5.2 Tünel içi konverjans ölçüm kesiti

Yenikapı Şaftı civarında YH1U-1A, YH1U-2A, YH2U-1A, YH2U-2A, YH1U-3A ve YH2U-3A tünellerinde yapılan tünel içi konverjans ölçümleri sol ve sağ duvarlarındaki iki referans noktası arasındaki yatay uzaklığın zamana bağlı değişimi tünel açım yöntemi ile ilişkilendirilerek Tablo 5.1 de verilmiştir. Ayrıca bu ölçümler EK-C de toplu olarak sunulmuştur.

Yenikapı bölgesinde yapılan konverjans ölçüm sonuçları göre, Güngören killerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinden kaynaklanan kazı kesiti daralması olduğu anlaşılmıştır. Sonuçta oluşan konverjanslar öngörülen değerleri aşmış, mevcut tünel açma yöntemiyle (N.A.T.M) devam edilemeyeceğini görülmüştür.

Bu nedenle tünel açma metodunda yeni arayışlara yönelinmiş, sonuçta kazı öncesi koruyucu kemer oluşturulması kararlaştırılmıştır.

Ölçüm sonuçlarına göre bu uygulama ile sorun oluşturan Güngören kilinde, deformasyonların düşürülmesi açısından, başarıya ulaşılmıştır. Kesitin büyüdüğü T tipi tüneller ve bu tünellere yakın noktalarda yeni bir risk oluşturmamak için anakayada da bu yöntem uygulanmış ve deformasyonlar sınırlandırılmıştır.

Tablo 5.1 den görüldüğü gibi koruyucu kemer uygulaması yatay toplam yatay deformasyonlarda önemli azalmalara neden olmuştur. Güngören Kili'nin geçildiği bu bölgede 10-15 cm lik deformasyonlar bu teknikle 0.2-2.4 cm ye kadar düşürülebilmiştir.

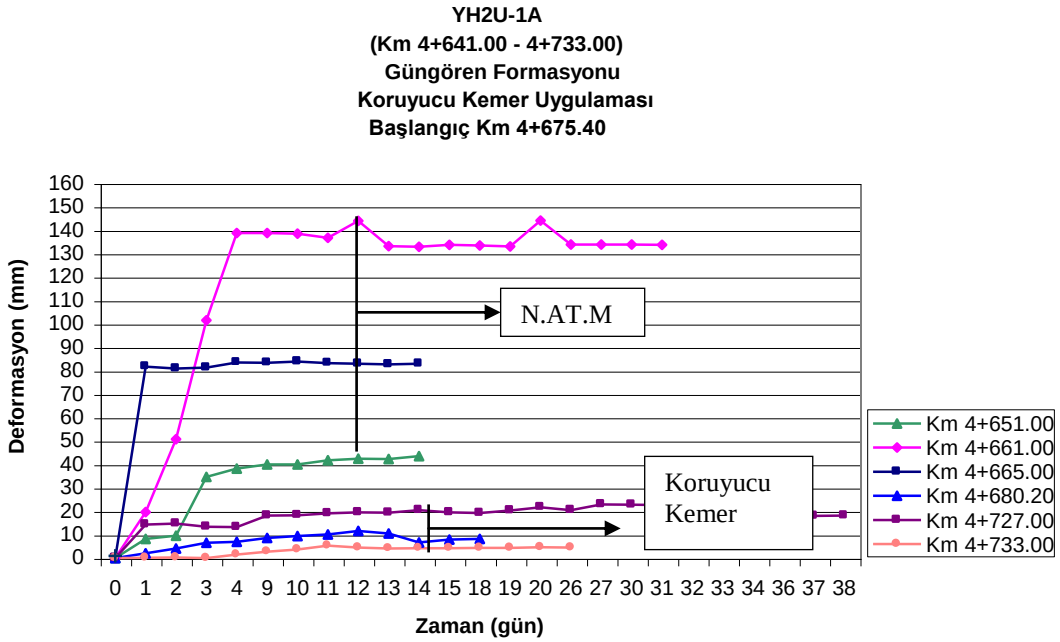
Tablo 5.1 Konverjans değerlerinin uygulanan tünel açma yöntemine bağlı değişimi

Tünel Adı	**Km**	**Yatayda max.deformasyon değerleri (mm)**	**Tünel Açma Yöntemi**
YH2U-1A	4+641.00 - 4+668.40	146	N.A.T.M
YH1U-1A	4+565.40 - 4+650.40	90	N.A.T.M
YH2U-1A	4+676.00 - 4+733.00	24	Koruyucu Kemer Yöntemi
YH1U-1A	4+658.80 - 4+774.00	20	Koruyucu Kemer Yöntemi
YH2U-2A	4+934.60 - 5+030.60	6	Koruyucu Kemer Yöntemi
YH1U-2A	4+853.60 - 4+953.80	3.5	Koruyucu Kemer Yöntemi
YH2U-3A	0+001.00 - 0+031.60	8	Koruyucu Kemer Yöntemi
YH1U-3A	0+001.00 - 0+058.72	2.5	Koruyucu Kemer Yöntemi

YH2U-1A tünelinde km 4+641.00-4+773.00 arasında yapılan yatay ölçümlerde Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ile geçilen km 4+641.00-4+668.40 arasında oluşan yatay maksimum deformasyon değeri 146 mm. dir (Tablo 5.1, Şekil 5.3).

Güngören Formasyonu'nda geçilen kesimde oluşan deformasyon tünel açımı sonrasında hızla artmakta, sönümlenme süresi uzun zaman almaktadır. A tipi tüneller için elde edilen bu değerlerin öngörülen sınırın üzerinde olması tünel içerisinde

zamanla kesit küçülmelerine neden olmuştur. Bu nedenle mevcut tünel açma yönteminin yetersiz olduğu kanısına varılmıştır.

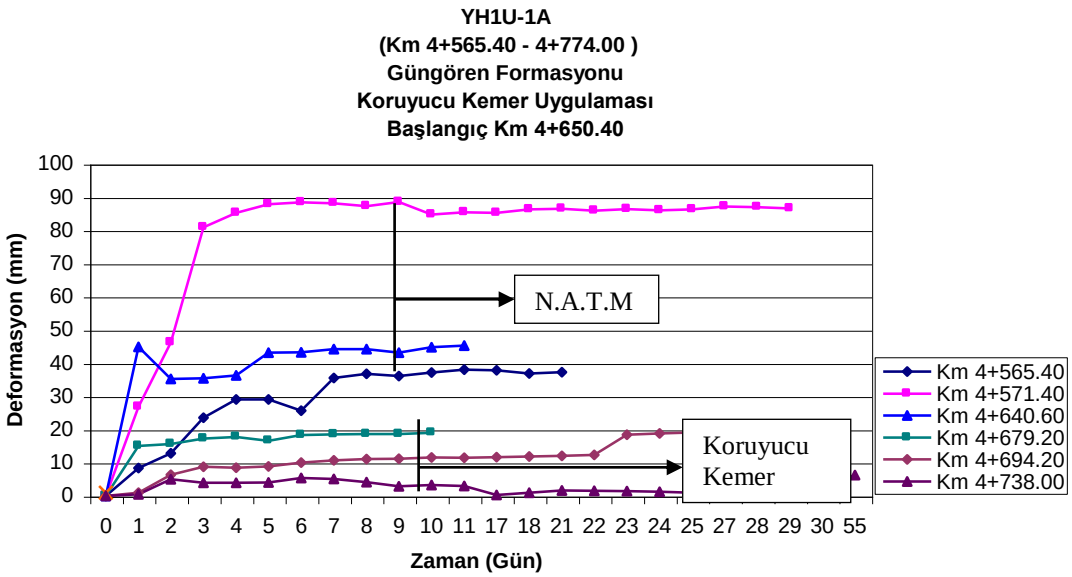


Şekil 5.3 YH2U-1A tüneli km 4+641.00-4+773.00 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği

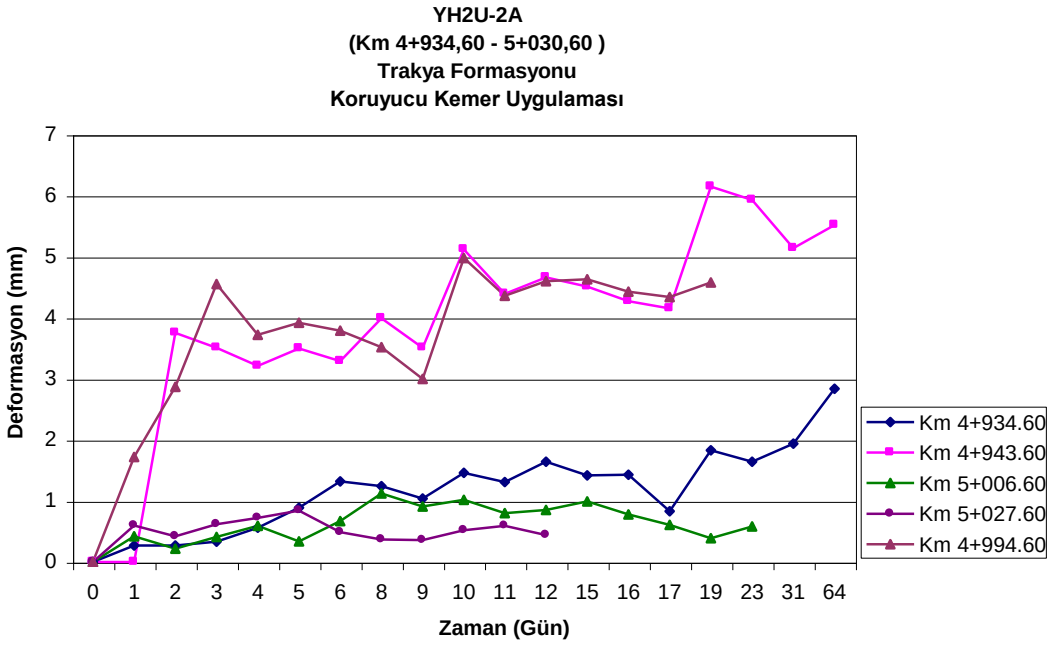
Km 4+675.40 dan itibaren uygulanmaya başlanan Koruyucu Kemer yöntemi uygulandıktan sonra km 4+676.00-4+733.00 arasındaki konverjans okumalarında, en yüksek deformasyon değeri 24 mm. olmuştur. Deformasyon değerlerindeki bu azalma, koruyucu kemer uygulamasının olumlu sonuç verdiğinin göstergesidir.

Yenikapı Şaftı bölgesinde YH1U-1A tünelinin aynı birim içerisinde geçilen km 5+565.40-5+650.40 kesiminde ölçülen en yüksek deformasyon değeri ise 90 mm. dir (Şekil 5.4). Anılan değerler, hat 2 tünelinde olduğu gibi beklenenin üzerinde gerçekleşmiş ve tünel kesitinde küçülme oluşmuştur. Hat 1 tünelinde km 4+650.40 dan itibaren uygulanan koruyucu kemer ile km 4+658.80-4+774.00 arasında ölçülen en yüksek konverjans değeri 20 mm. ye düşürülmüştür (Şekil 5.4).

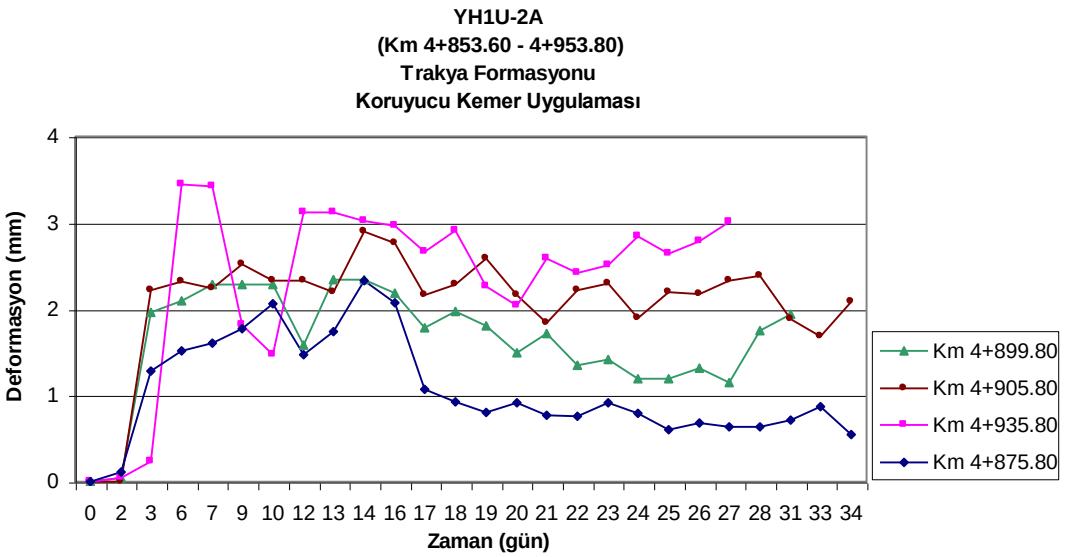
Geniş kesitli Hat 2 T makas tüneli ile Yenikapı İstasyonu arasında bulunan 96 m.lik YH2U-2A tüneli Trakya Formasyonu içerisinde açılmıştır. Km 4+934.60-5+030.60 da yapılan konverjans ölçümlerindeki okunan aylık deformasyon toplamı 0-6 mm. arasında olup herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.4 YH1U-1A tünelinde km 4+565.40-4+774.00 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği

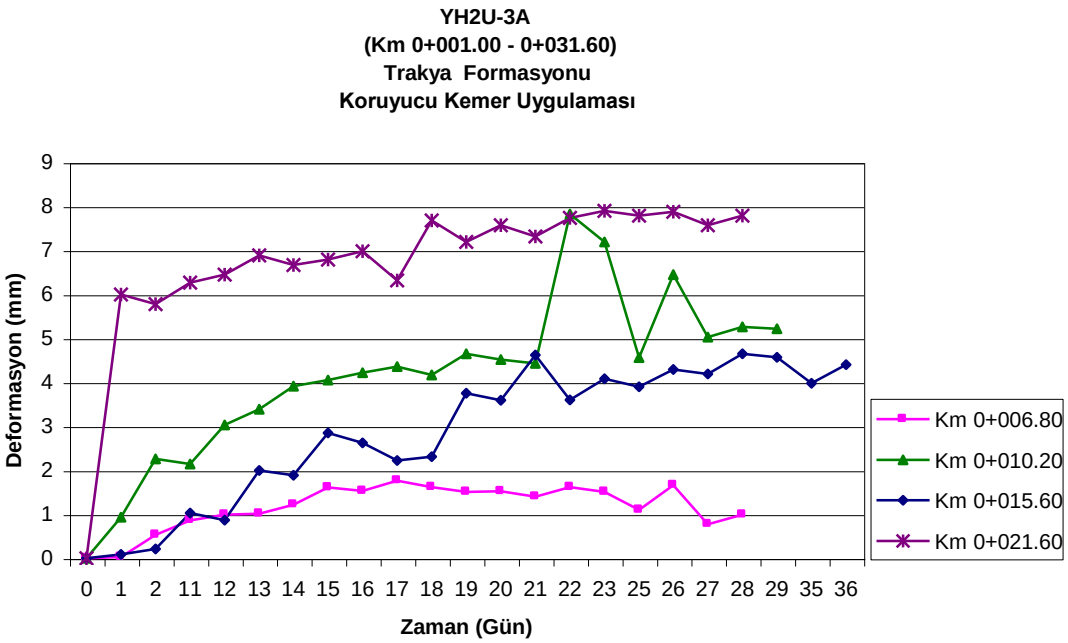


Şekil 5.5 YH2U-2A tünelinde km 4+934.60-5+030.60 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği

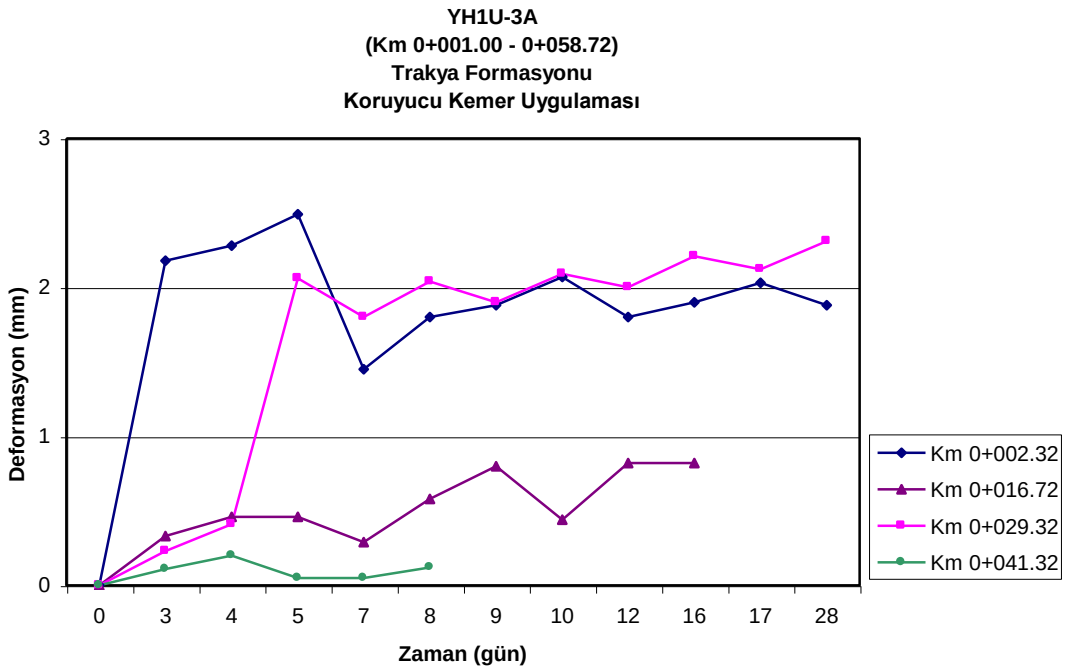


Şekil 5.6 YH1U-2A tünelinde km 4+853.60-4+953.80 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği

Benzer şekilde aynı birim içerisinde geçilen 100 m. uzunluğundaki YH1U-2A tünelinde km 4+853.60-4+953.80 deki konverjans değerleri ise 0-3.5 mm. arasındadır (Şekil 5.6). Anakaya için elde edilen bu değerler projede öngörülen sınır değerin çok altındadır. Deformasyon değerlerinin bu ölçüde düşük olmasında, koruyucu kemer uygulamasının etkisi büyüktür.



Şekil 5.7 YH2U-3A tünelinde km 0+001.00-0+031.60 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon - zaman grafiği



Şekil 5.8 YH1U-3A tünelinde km 0+001.00-0+058.72 arasında yapılan yatay konverjans ölçümlerinden elde edilen deformasyon-zaman grafiği

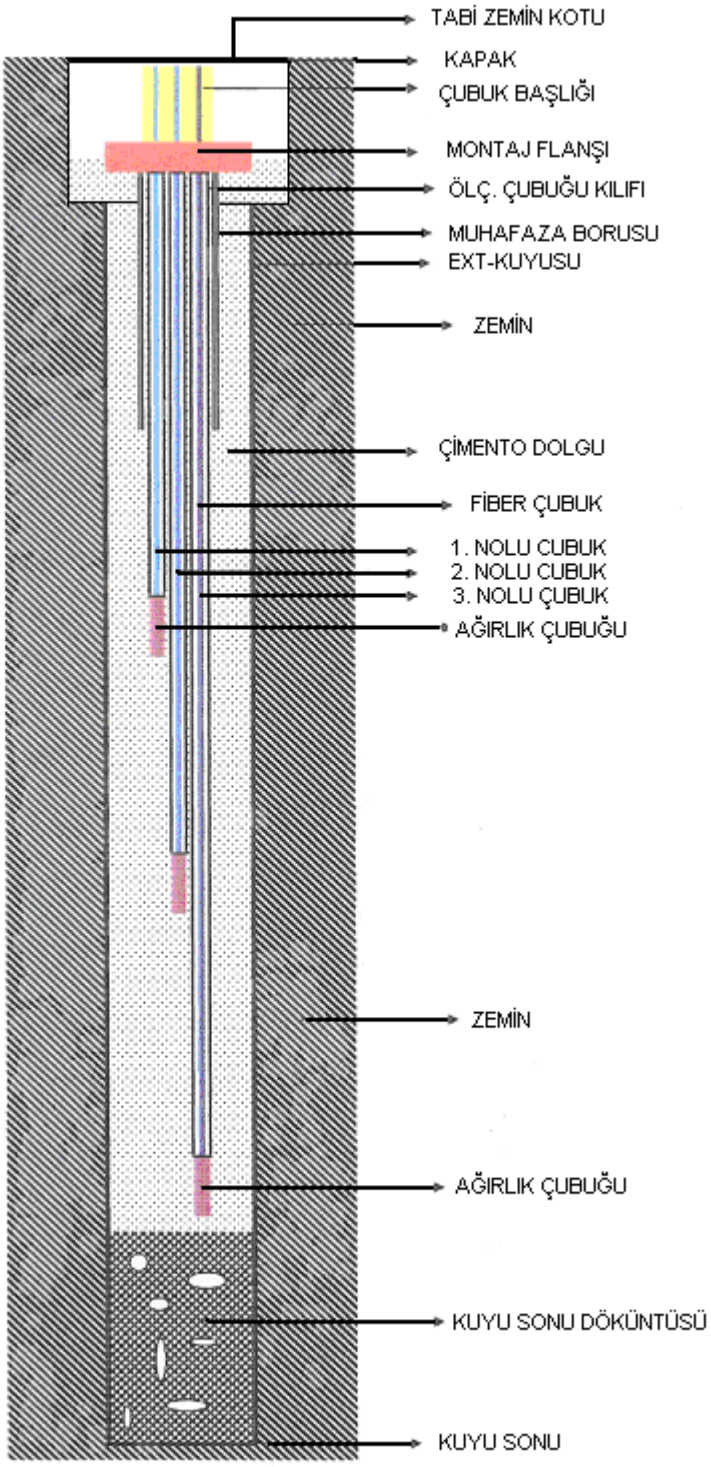
Yenikapı İstasyonuna girişinde bulunan T tüneline bağlanan iki ayrı 36 ve 58 m. uzunluğundaki tünelde ölçülen deformasyon miktarları 0-8 mm arasındadır (Şekil 5.7, Şekil 5.8).

Her iki tünelde de tünel açılmadan önce koruyucu kemer oluşturulmuştur.

5.2.2 Çubuk Ekstansometre Ölçümleri

Tünel kazısı ile oluşturulan açıklığın çevresinde açıklığın boyutu ve ortamın jeomekanik özelliklerine bağlı olarak etkilenme zonu oluşmaktadır. Etkileme mesafesi zayıf ortamlarda açılan sığ tünellerde yüzeye kadar ulaşabilmektedir. Kent merkezlerindeki yoğun yapıların hasar görmemesi için bu mesafelerinin belirlenmesi ve izlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla düşey doğrultudaki deformasyonlar kademeli çubuk eksantometreler yardımıyla ölçülmektedir. İstasyon kazılarına ait duvarlarda oluşabilecek yatay zemin hareketlerinin tespitinde ise inklinometre kullanılmaktadır.

Metro projesi kapsamında, çubuk eksantometreler yüzeyde koşulların elverdiği ölçüde (trafik, bina ,yerleşim, vs.) tünel aksı üzerine yerleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan ekstansometreler 3 ve 5 kattan oluşmaktadır.



Şekil 5.9 İstanbul metrosu inşaatında kullanılan üç kademeli ekstansometrenin montaj detayı

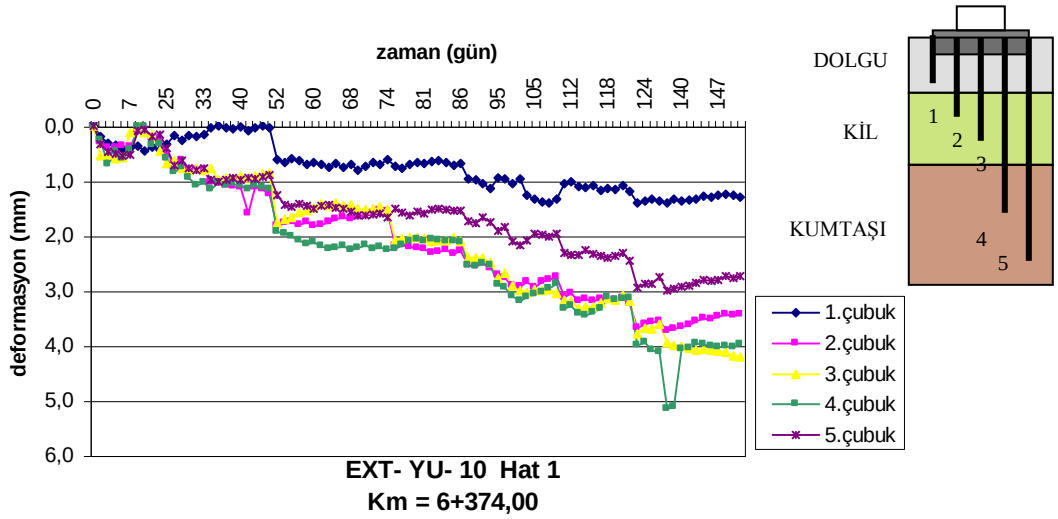
Ölçüm çubukları açıklığın tavan seviyesinin en fazla 2m. üzerine kadar ulaşan derinlikteki sondaj kuyusuna monte edilmektedir. Montaj işlemi, tünel aynası ölçüm noktasına en az 30 m uzaklıkta iken tamamlanır ve günlük okumalar öngörülen zaman dilimi içerisinde düzenli olarak yapılmaktadır (Şekil 5.9). Başlık plakası kotu montajın ardından hemen alınır ve daha sonra her hafta kot kontrolü yapılır. Kot okumaları deformasyonların durumuna göre sıklaştırılabilir. Ekstansometre ölçümleri başlık üzerinden 0.01 okuma sayaçlar kullanılarak alınır. Her kademe için, sayaç çevrilerek 3 okuma yapılır ve ortalama değer kaydedilir (Yüksek Proje jeoteknik ölçüm raporları).

Şehzadebaşı İstasyonu'nda Hat 1 tünel ekseni km 6+374.00 deki EXT-YU-10 sondajı ile Hat 2 tünel ekseni km 6+257.00 deki EXT-YU-06 sondajında yapılan katlı çubuk ekstansometre ölçümlerinden elde edilen deformasyon değerleri (EK-C) de toplu olarak verilmiştir. Zamana bağlı olarak oluşan ekstansometre okumaları ise Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 deki grafiklerde gösterilmiştir.

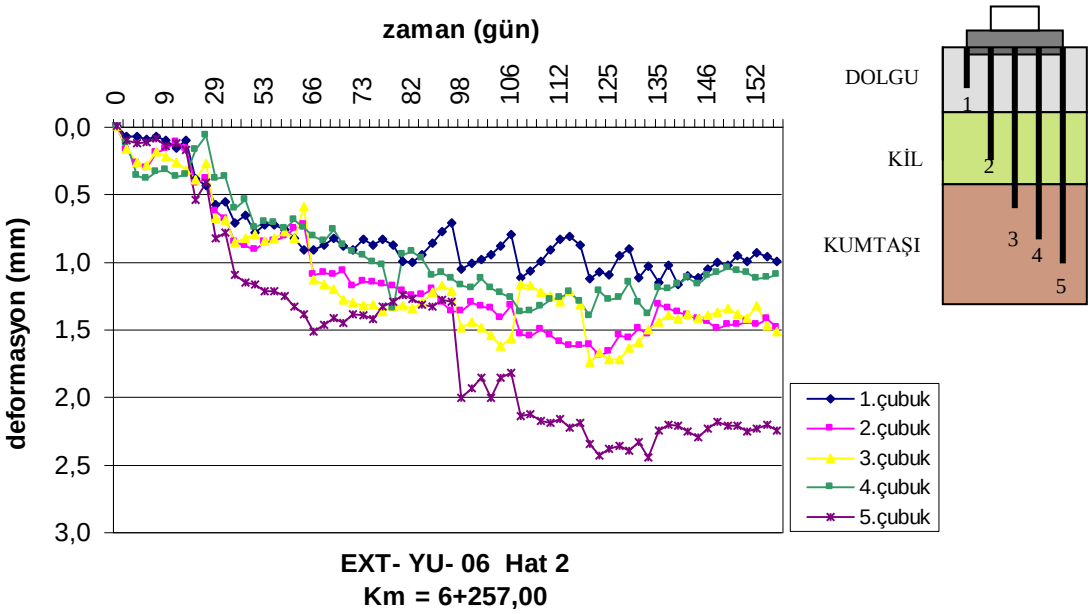
Zemin kotunun 47.364 m, kademe aralıklarının 3-13-20-28-36 m. olduğu EXT-YU-10 kuyusundaki 5 katlı çubuk ekstansometre ölçümlerinde, 146. gün sonunda dolgu içerisinde kalan 1. çubukta deformasyon miktarı 1.29 mm., kil seviyesi içerisine yerleştirilen 2 ve 3 numaralı çubukta sırasıyla 3.4 mm. ve 4.2 mm., tünel tavanına yakın, anakaya içerisine yerleştirilen 4 ve 5 çubuklarda ise 3.98 mm ve 2.73 mm. olarak ölçülmüştür (Şekil 5.10).

Örtü kalınlığının 38.5 m. olduğu bu bölgede P tipi tünel çapı yaklaşık 9 m. dir. Ölçülen en yüksek deformasyon ise 3. çubuk için elde edilen 4.2 mm. dir. Düşey yöndeki bu yerdeğiştirmeler yüzeyde veya tünel içinde herhangi bir mühendislik sorununa yol açmamıştır.

46.381 m kotunda bulunan EXT-YU-06 kuyusunda, kademe derinlikleri 7-14-21-28-35 m.olan katlı ekstansometrede ölçülen 152. günlük toplam deformasyon değerleri daha düşüktür (Şekil 5.11). EXT-YU-06 ekstansometre ölçüm sondajının açıldığı bu kesimde ölçülen bu değerler de yüzeyde herhangi bir sakıncalı durum oluşturmamıştır.



Şekil 5.10 Şehzadebaşı İstasyonu EXT-YU-10 sondajındaki çubuk ekstansometrelerde ölçülen deformasyonların zamana bağlı değişimi



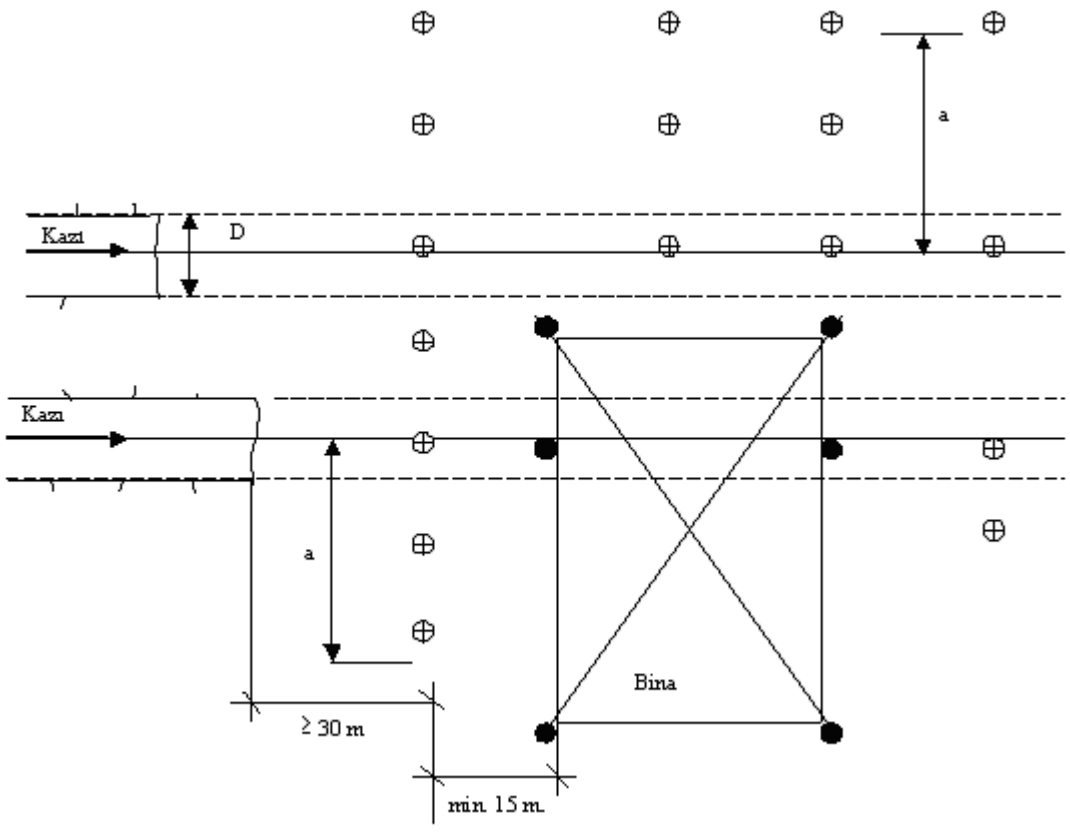
Şekil 5.11 Şehzadebaşı İstasyonu EXT-YU-06 sondajındaki çubuk ekstansometrelerde ölçülen deformasyonların zamana bağlı değişimi

5.2.3 Yüzey ve Bina Nivelman Ölçümleri

Tünel güzergahının yakınındaki binalara yaklaşırken, binaların üzerine yerleştirilen noktalarda ve yüzeyde düzenli olarak nivelman ölçümleri yapılmıştır. Binalarda ölçüm yapılacak noktaların yerleri temelde oluşabilecek farklı oturmaların izlenebileceği bina köşe ve orta noktalar olarak seçilmiştir.

Binalar için öngörülen farklı oturmanın sınırı S < 1:500 olarak alınmıştır. Tünel aksını dik kesen doğrultular üzerinde yüzeyin oturma profilini çıkarmak için tünel aksından her iki yöne "a" mesafesi kadar uzanan çizgi boyunca oturma bulonları çakılmış ve düzenli ölçümler yapılmıştır. Nivelman ölçüm hatları, binaya en az 15 m. uzaklıkta olmak üzere bina bölgesinde ve devamında yeterli sayıda oluşturulmuştur (Şekil 5.12). Oturma bulonları, yüzeyleri galvanizle korunmuş 20 mm. çaplı nervürlü çelikten imal edilmiştir. Bulonların boyları, minimum 25 cm. olup montaj esnasında çevreleri su-çimento karışımıyla doldurulmakta, harç prizlenmesi sonrası bulonlarda referans değer için ilk okumalar yapılmaktadır (Yüksek Proje jeoteknik ölçüm raporları).

Bina üzerinde ve yer yüzündeki nivelman ölçümleri, ayna kazısı nivelman ölçüm noktasına 30 m. yaklaştığı andan itibaren düzenli olarak yapılmaya başlanmıştır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 Yüzeyde yapılan nivelman ölçüm noktaları şeması

İstanbul metrosunda, çapı D olan tünelin tavanı ile yüzey arasındaki Z kalınlığı (örtü kalınlığı) ve kritik durumdaki bina geçişi bölgesindeki a uzaklığı arasındaki ilişkiler,

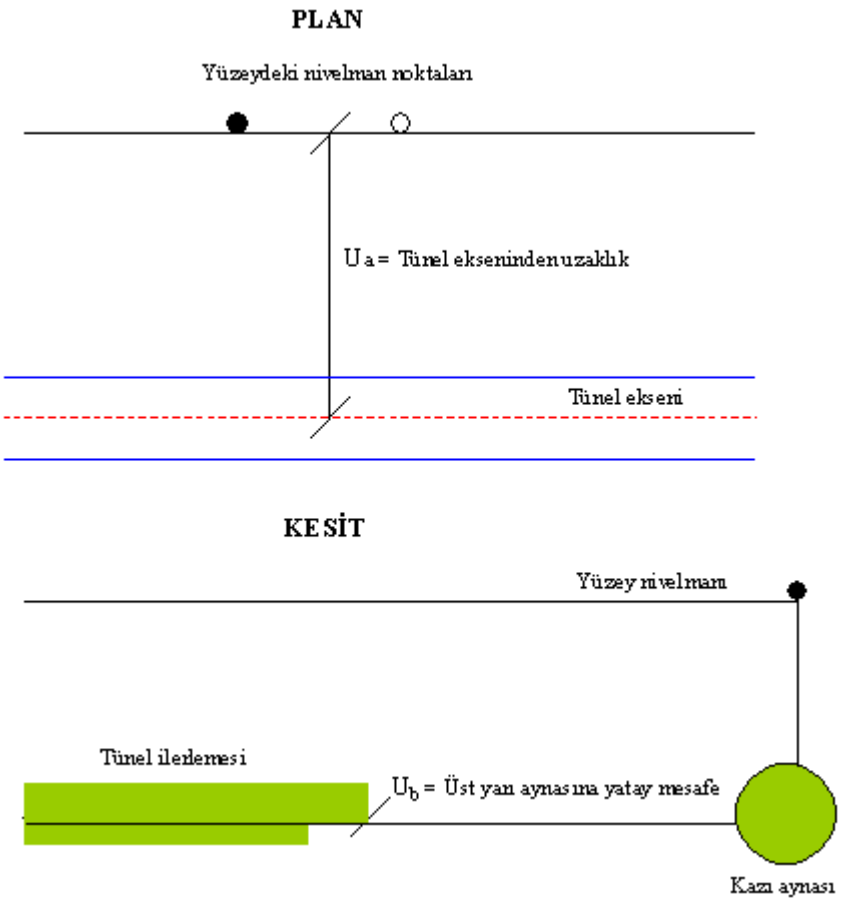
$Z < D \quad a \geq 2.5\ D,$

$D < Z < 2D \quad a \geq 2.0\ D,$

$Z > 2D \quad a = D$

şeklinde seçilmiştir.

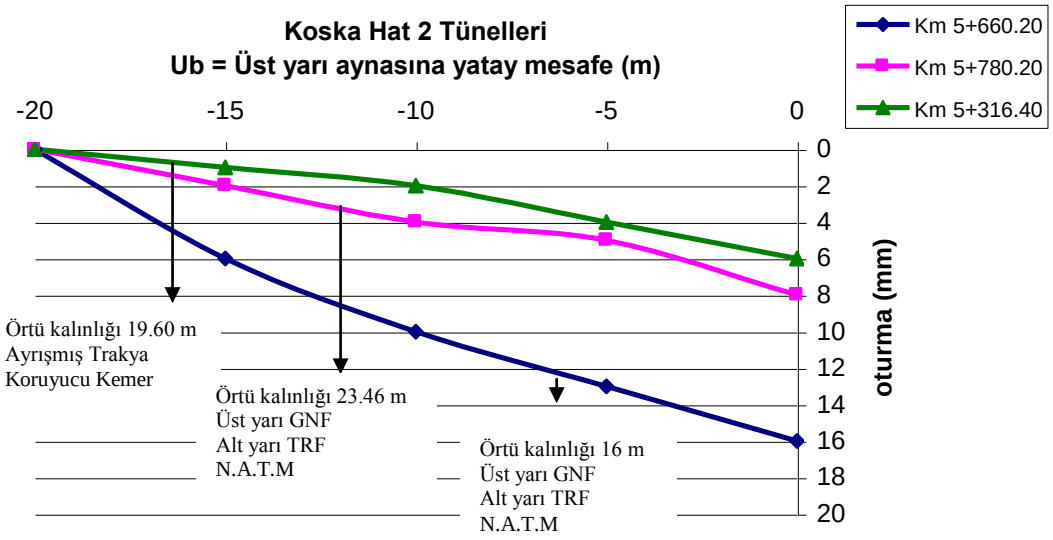
Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahında Yenikapı Şaftı ve Koska Şaftı bölgesinde yapılan yüzey nivelman ölçümlerinden elde edilen oturma değerleri, ölçüm noktalarının kazı aynası ve tünel eksenine olan uzaklığı, örtü kalınlığı, ortamın litolojik özellikleri ve tünel kazı kesiti ve açma yöntemi gibi parametreler dikkate alınarak irdelenmiştir (EK-C, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16, Tablo 5.2, Tablo 5.3).



Şekil 5.13 Yüzeydeki nivelman noktalarının, tünel eksenine (Ua) ve tünel üst yarı kazı aynasına (Ub) olan uzaklığı

Koska Şaftında, KH2Y-1A tüneli km 5+700.00-5+640.00 5178-5180-5182, KH2U-1A tüneli km 5+750.00-5+810.00 5138-5140-5142 nolu bina nivelmanları, KH2Y-3A tüneli km 5+336.00-5+300.00 arasında 9013-9011-9003 nolu yüzey nivelmanları referans alınarak kazı aynası ile bulon arasındaki 20 m., 15 m., 10 m., 5m. uzaklıklarda ve kazı aynası bulonun altında iken belirlenen oturma miktarları, tünel ilerlemesiyle ilişkilendirilmiştir (Şekil 5.14).

KH2Y-1A tüneli km 5+700.00-5+640.00 arasında üst yarısı Güngören killeri, alt yarısı ayrışmış Trakya Formasyonu içinde açılan kesimde oturma miktarı, tünel kazı aynasına (km 5+660.20) 20 m. uzaklıkta 0 mm., 15 m. uzaklıkta 6 mm., 10 m. uzaklıkta 10 mm., 5 m. uzaklıkta 13 mm., kazı aynası bulonun altına ulaştığında ise 16 mm. olarak ölçülmüştür (Şekil 5.14). Tünel açımı N.A.T.M ye bağlı olarak oluşturulan A4 tahkimat tipi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kesimdeki 16 m.lik örtü kalınlığının, 6.7 m. si dolgu, 9.3 m.si kildir.



Şekil 5.14 KH2Y-1A, KH2U-1A ve KH2Y-3A tünellerinde km yakınına yerleştirilen yüzey bulonlarında ölçülen düşey yer değiştirme değerleri ile tünel ilerlemesi arasındaki ilişki

KH2U-1A tüneli km 5+750.00-5+810.00 de üst yarı Güngören kili, alt yarı ayrışmış, Trakya Formasyonu içinde geçilmiştir. Bu kesimde tünel kazı aynasına (km 5+780.20) 20 m. uzaklıkta oturma 0 mm., 15 m. de 2 mm., 10 m. de 4 mm., 5 m. de 5 mm. kazı aynası bulonun altında iken 8 mm. olmuştur (Şekil 5.14).

Tablo 5.2 Koska Şaftı'nda ölçülen deformasyon değerlerinin örtü kalınlığı, litoloji ve tünel açma yöntemi ile ilişkisi

Tünel Adı ve km	**Tünel Örtü Kalınlığı**		**Tünel Üst yarı – Altyarı zemin durumu**		**Tünel Açma Yöntemi**	**Yüzey Deformasyon Değerleri**		**Bulon No**
Koska Şaftı	16.00 m		Üst yarı	Alt yarı	N.A.T.M.	Tünel kazı aynası ile bulon arasındaki mesafe	Deformasyon değerleri	Bina nivelmanları
KH2Y-1A						20 m önce	0 mm	
	Dolgu	6.7 m	Güngören Formasyonu (Kil)	Trakya Formasyonu (Ayrışmış Kumtaşı)		15 m önce	6 mm	5178-5180-5182
5+700-5+640					A4 Tahkimat tipi	10 m önce	10 mm	
						5 m önce	13 mm	
	Kil	9.3 m				(Kazı aynası)	16 mm	
Koska Şaftı	23.46 m		Üst yarı	Alt yarı	N.A.T.M.	Tünel kazı aynası ile bulon arasındaki mesafe	Deformasyon değerleri	Bina nivelmanları
KH2U-1A	Dolgu	5.54 m				20 m önce	0 mm	
			Güngören Formasyonu (Kil)	Trakya Formasyonu (Ayrışmış Kumtaşı)		15 m önce	2 mm	5138-5140-5142
5+750-5+810					A4 Tahkimat tipi	10 m önce	4 mm	
	Alüvyon	4.5m				5 m önce	6 mm	
						(Kazı aynası)	8 mm	
	Kil	13.42 m						
Koska Şaftı	19.60 m		Üst yarı	Alt yarı	Koruyucu Kemer	Tünel kazı aynası ile bulon arasındaki mesafe	Deformasyon değerleri	Yüzey nivelmanları
KH2Y-3A								
	Dolgu	8.8 m				20 m önce	0 mm	
5+336- 5+300			Trakya Formasyonu (Ayrışmış Kumtaşı)	Trakya Formasyonu (Ayrışmış Kumtaşı)	Çelik boru + zemin çivisi (Enjeksiyonlu) + A 4 tahkimat tipi	15 m önce	1 mm	9013-9011-9003
	Alüvyon	3.5 m				10 m önce	2 mm	
						5 m önce	4 mm	
	Anakaya	7.3 m				(Kazı aynası)	6 mm	

Bu kesimde de tünel açımı N.A.T.M'ye bağlı olarak oluşturulan A4 tahkimat tipi ile gerçekleştirilmiştir. 23.46 m. lik örtünün 5.54 m. si dolgu, 4.5 m. si alüvyon ve 13.42 m. si kildir.

KH2Y-3A tüneli km. 5+336.00-5+300.00 de tamamen ayrışmış Trakya Formasyonu geçilmiştir. Bu kesimde tünel kazı aynasına (km 5+316.40) 20 m. uzaklıkta oturma 0 mm., 15 m. de 1 mm., 10 m. de 2 mm., 5 m. de 4 mm., kazı aynası bulonun altında iken 6 mm. dir (Şekil 5.14). 19.60 m. lik örtünün 8.80 m. si dolgu, 3.50 m. si alüvyon, 7.30 m.si anakayadır. Tünel açımı, tünel aynasının taç kısmına yerleştirilen 4"(inch) çaplı çelik borular ve tünel aynasına çakılan zemin çivilerinin oluşturduğu Koruyucu Kemer yöntemi ve A4 destekleme sistemiyle gerçekleştirilmiştir.

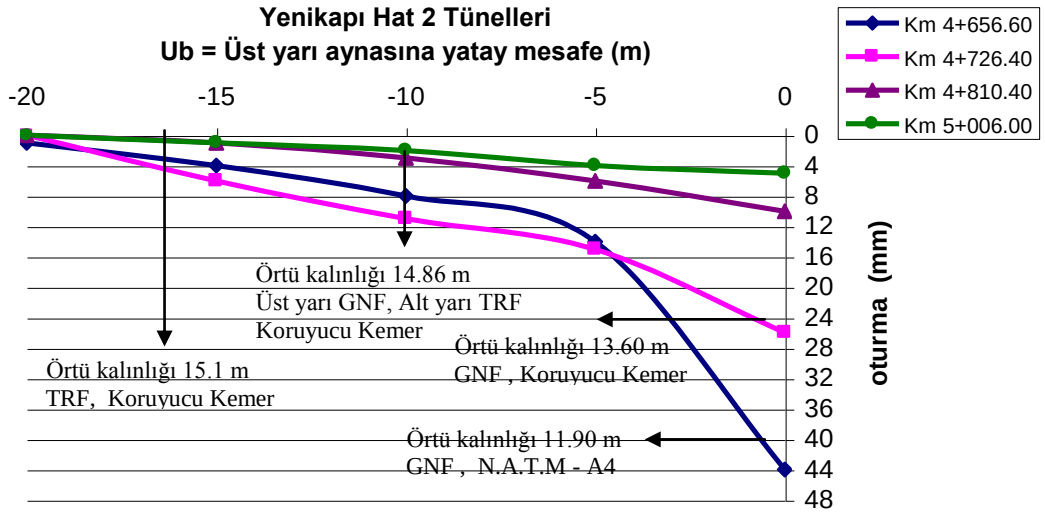
Koska tünelleri dolayındaki nivelman ölçüm sonuçlarına göre, tünel kazı aynasının yaklaşık 20 m önünde oluşmaya başlayan oturmaların kazı aynasının ölçüm noktasına yaklaşmasına bağlı olarak arttığı saptanmıştır. Ölçülen düşey yerdeğiştirme değerleri geçilen ortamın jeomekanik özellikleri ile bir paralellik göstermektedir. Kazı Güngören kilinde yapılırken ölçülen maksimum düşey yerdeğiştirme değeri aynı koşullarda ayrışmış anakaya için saptanan değerin yaklaşık 3 katıdır.

Bu sonuçlardan yüzeyde tünel çapının 3 katı genişliğindeki bir alanda etkilenmenin oluştuğu anlaşılmıştır. Koruyucu kemer uygulamasının olduğu kesimler için elde edilen oturma miktarları daha düşüktür.

YH2U-1A tüneli km 4+629.00-4+670.00 da 5084-5082-5080 nolu yüzey ve bina, km 4+675.40-4+750.00 da 5234-5236-5242 nolu bina, km 4+800.00-4+850.00 da 5260-5262-5268 nolu bina, YH2U-2A tüneli km 5+000.00-5+020.00 da 8234-8236-8238 nolu bina nivelmanları referans alınarak tünel kazı aynasına 20 m., 15m., 10m., 5 m. uzaklıklarda ve kazı aynası bulonun altında iken yapılan ölçümlerinden elde edilen oturma miktarları tünel ilerlemesiyle ilişkilendirilmiştir (Şekil 5.15).

YH2U-1A tüneli km 4+629.00-4+670.00, Güngören killerinde geçilmiştir. Bu kesimde aynaya (km 6+656.60) 20 m. uzaklıkta deformasyon 1 mm, 15 m. uzaklıkta 4 mm., 10 m. de 8 mm., 5 m. de 14 mm., ayna bulonun altında iken 44 mm. olarak ölçülmüştür (Şekil 5.15). 11.90 m. lik örtünün 1.70 m. si dolgu, 4 m. si alüvyon, 6.20 m. ise kildir. Tünel açımı N.A.T.M ye bağlı olarak oluşturulan A4 tahkimat

sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kesimdeki yüksek oturma miktarları tünel içinde kapanmalara ve tünel gerisinde radyal çatlaklara neden olmuştur. Anılan nedenlerden km 5+675.40 dan itibaren koruyucu kemer uygulanmıştır.



Şekil 5.15 YH2U-1A ve YH2U-2A tünellerinde km yakınına yerleştirilen yüzey bulonlarında ölçülen düşey yer değiştirme değerleri ile tünel ilerlemesi arasındaki ilişki

YH2U-1A tüneli km 4+675.40-4+750.00 da Güngören killeri geçilmiştir. Bu kesimde aynaya (km 4+726.40) 20 m. uzaklıkta deformasyon 0 mm., 15 m. de 6 mm., 10 m. de 11 mm., 5 m. de 15 mm., kazı aynası bulonun altında iken 26 mm. olarak ölçülmüştür (Şekil 5.15).13.60 m. lik örtünün 3.65 m. si dolgu, 4.85 m. si alüvyon, 5 m. si kildir.

YH2U-1A tüneli km 4+800.00-4+850.00 da üst yarı Güngören kili, alt yarı anakayada geçilmiştir. Bu kesimde aynaya (km 4+810.40) 20 m. uzaklıkta deformasyon 0 mm., 15 m. de 1 mm., 10 m. de 3 mm., 5 m. de 6 mm., ayna bulonun altında iken 10 mm. olarak ölçülmüştür (Şekil 5.15). 14.86 m. lik örtünün 5.62 m. si dolgu, 2.6 m. si alüvyon, 4.7 m. si kil, 1.94 m. si anakayadır.

YH2U-2A tüneli km 5+000.00-5+020.00 da Trakya Formasyonu'nda açılmıştır. Bu kesimde aynaya (5+006.00) 20 m. uzaklıkta deformasyon 0 mm., 15 m. de 1mm., 10 m. de 2 mm., 5m. de 4 mm., ayna bulonun altında iken 5 mm. olarak ölçülmüştür (Şekil 5.15).

Tablo 5.3 Yenikapı Şaftı dolayındaki ölçümlerin örtü kalınlığı, litoloji ve tünel açma yöntemi ile ilişkisi

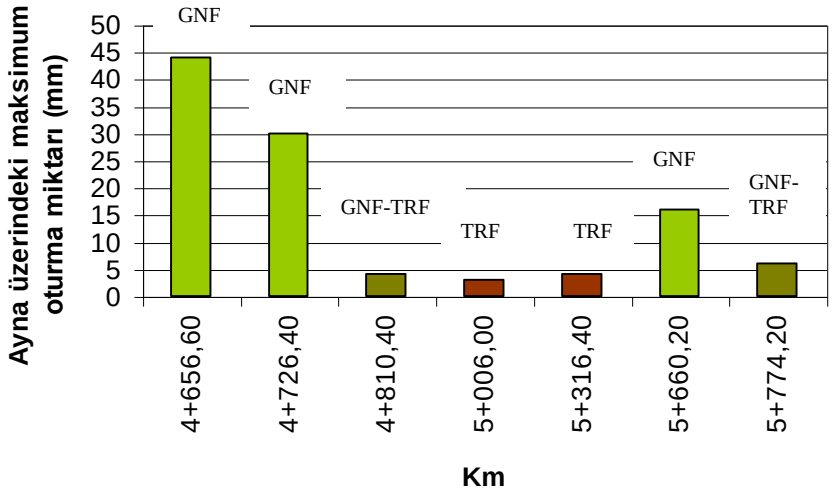
Tünel Adı ve km	**Tünel Örtü Kalınlığı**		**Tünel Üst yarı – Altyarı zemin durumu**		**Tünel Açma Yöntemi**	**Yüzey Deformasyon Değerleri**		**Bulon No**
Yenikapı Şaftı	11.90 m		Üst yarı	Alt yarı	N.A.T.M.	Tünel kazı aynası ile bulon arasındaki mesafe	Deformasyon değerleri	Bina nivelmanları
YH2U-1A	Dolgu	1.70 m	Güngören Formasyonu (Kil)	Güngören Formasyonu (Kil)	A4 Tahkimat tipi	20 m önce	1 mm	5084-5082-5080
4+629-4+670	Alüvyon	4.0 m				15 m önce	4 mm	
						10 m önce	8 mm	
						5 m önce	14 mm	
	Kil	6.20 m				(Kazı aynası)	44 mm	
Yenikapı Şaftı	13.60 m		Üst yarı	Alt yarı	Koruyucu Kemer	Tünel kazı aynası ile bulon arasındaki mesafe	Deformasyon değerleri	Bina nivelmanları
YH2U-1A	Dolgu	3.65 m	Güngören Formasyonu (Kil)	Güngören Formasyonu (Kil)	Çelik boru + zemin çivisi (Enjeksiyonlu) + A4 tahkimat tipi	20 m önce	0 mm	5234-5236-5242
4+675.40-4+750	Alüvyon	4.85 m				15 m önce	6 mm	
						10 m önce	11 mm	
						5 m önce	15 mm	
	Kil	5.00 m				(Kazı aynası)	26 mm	
Yenikapı Şaftı	14.86 m		Üst yarı	Alt yarı	Koruyucu Kemer	Tünel kazı aynası ile bulon arasındaki mesafe	Deformasyon değerleri	Bina nivelmanları
YH2U-1A	Dolgu	5.62 m	Güngören Formasyonu (Kil)	Trakya Formasyonu (Ayrışmış Kumtaşı-Kiltaşı)	Çelik boru + zemin çivisi (Enjeksiyonlu) + A4 tahkimat tipi	20 m önce	0 mm	5260 -5262-5268
4+800-4+850	Alüvyon	2.6 m				15 m önce	1 mm	
	Kil	4.7 m				10 m önce	3 mm	
	Anakaya	1.94 m				5 m önce	6 mm	
						(Kazı aynası)	10 mm	
Yenikapı Şaftı	15.1 m		Üst yarı	Alt yarı	Koruyucu Kemer	Tünel kazı aynası ile bulon arasındaki mesafe	Deformasyon değerleri	Bina nivelmanları
YH2U-2A	Dolgu	4.0 m	Trakya Formasyonu (Kumtaşı-Kiltaşı)	Trakya Formasyonu (Kumtaşı-Kiltaşı)	Çelik boru+ zemin çivisi (Enjeksiyonlu) + A4 tahkimat tipi	20 m önce	0 mm	8234-8236-8240
5+000-5+020	Alüvyon	4.7 m				15 m önce	1 mm	
						10 m önce	2 mm	
	Anakaya	6.4 m				5 m önce	4 mm	
						(Kazı aynası)	5 mm	

Bu kesimde 15.1 m. lik örtü kalınlığının 4.0 m.si dolgu, 4.7 m. si alüvyon, 6.4 m. si anakayadır. Tünel açımı Koruyucu Kemer yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Yenikapı tünelleri bölgesindeki nivelman ölçümlerine göre aynadan yaklaşık 20 m öncesinde oluşan oturmalar aynada maksimum değere ulaşmaktadır. Oturmalar, YH2U-1A tüneli Güngören killerinde açılan km 4+656.60 da 44 mm., km 4+726.40 da 26 mm., üst yarısı Güngören kili, alt yarısı Trakya Formasyonu'nda açılan km 4+810.40 da 10 mm., YH2U-2A tüneli anakayada açılan km 5+006.00 da 5 mm. ölçülmüştür.

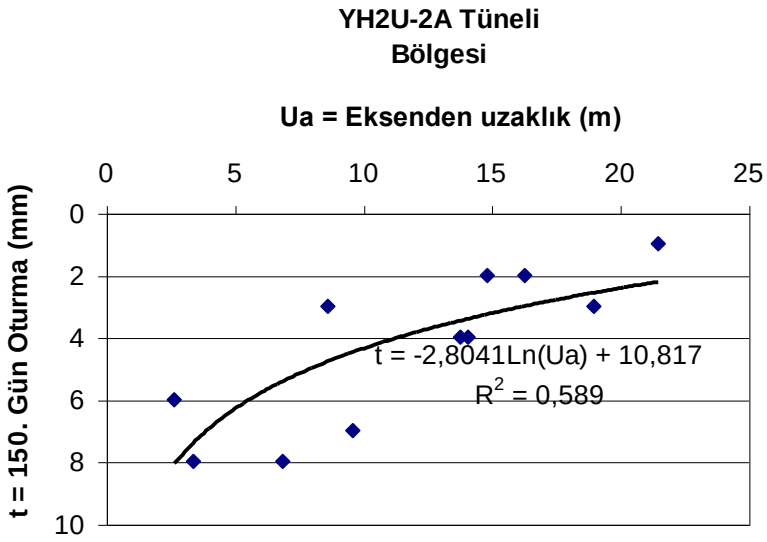
A tipi kesitli Yenikapı tünellerinde, tünel çapı 6.5 m. ve tünel çapının 3 katı kadar bir alanda etkilenme bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Zemin ve kaya ortamlarında geçilen kesimlerde ölçülen oturmalarda, Güngören kilinin sıkışma özelliği, Trakya formasyonunun yapısal özelliklerinden dolayı sık sık değişen orta-zayıf kaya niteliği taşıması, tünel örtü kalınlığı, yeraltı suyu, yüzeydeki yapıların yoğunluğu ve tünel açımında uygulanan yöntem değişikliğinin etkili olduğu düşünülmektedir.

Yenikapı-Unkapanı güzergahında tünel düzeyinde anakaya ve kilde seçilen 7 noktadaki nivelman bulonlarında ölçülen maksimum düşey yerdeğiştirme miktarları grafikte verilmiştir (Şekil 5.16). Grafikten görüldüğü gibi Güngören killerinde ölçülen değerler anakayaya göre daha yüksektir.

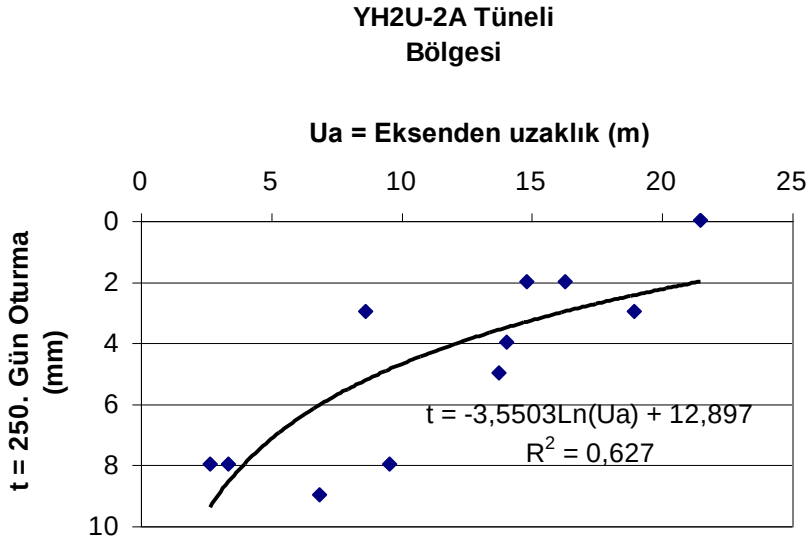


Şekil 5.16 Yenikapı-Unkapanı güzergahında anakaya ve Güngören Kili'nde ölçülen maksimum düşey yerdeğiştirmeler

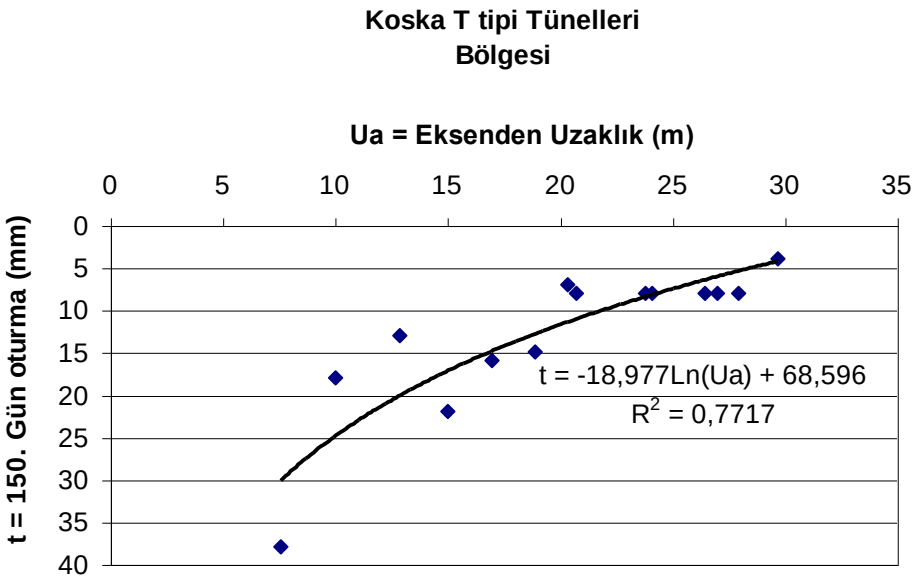
YH2U-2A tüneli ile Koska T tipi tünelleri bölgesindeki bina ve yüzey nivelman okumaları değerlendirilmiştir. Buradan hareketle 150. ve 250. gün sonundaki oturma miktarları ile nivelman noktalarının tünel ekseninden olan uzaklığı arasındaki ilişki Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 de verilmiştir.



Şekil 5.17 YH2U-2A tüneli bölgesindeki bina ve yüzey nivelmanlarının tünel eksenine olan uzaklığı ile 150. günde ölçülen tasman arasındaki ilişkisi



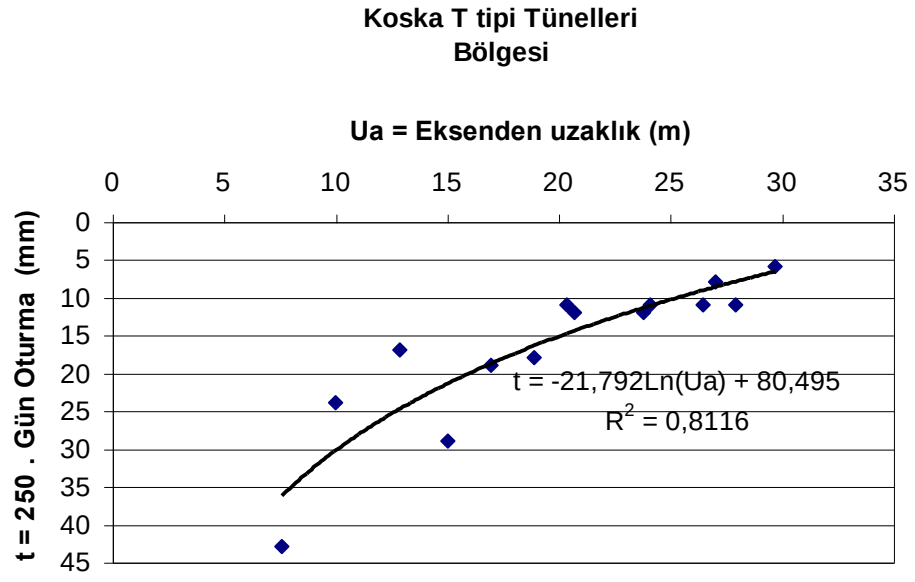
Şekil 5.18 YH2U-A tüneli bölgesindeki bina ve yüzey nivelmanlarının tünel eksenine olan uzaklığı ile 250. günde ölçülen tasman arasındaki ilişkisi



Şekil 5.19 Koska T tipi tünelleri bölgesindeki bina ve yüzey nivelmanlarının tünel eksenine olan uzaklığı ile 150. günde ölçülen tasman arasındaki ilişkisi

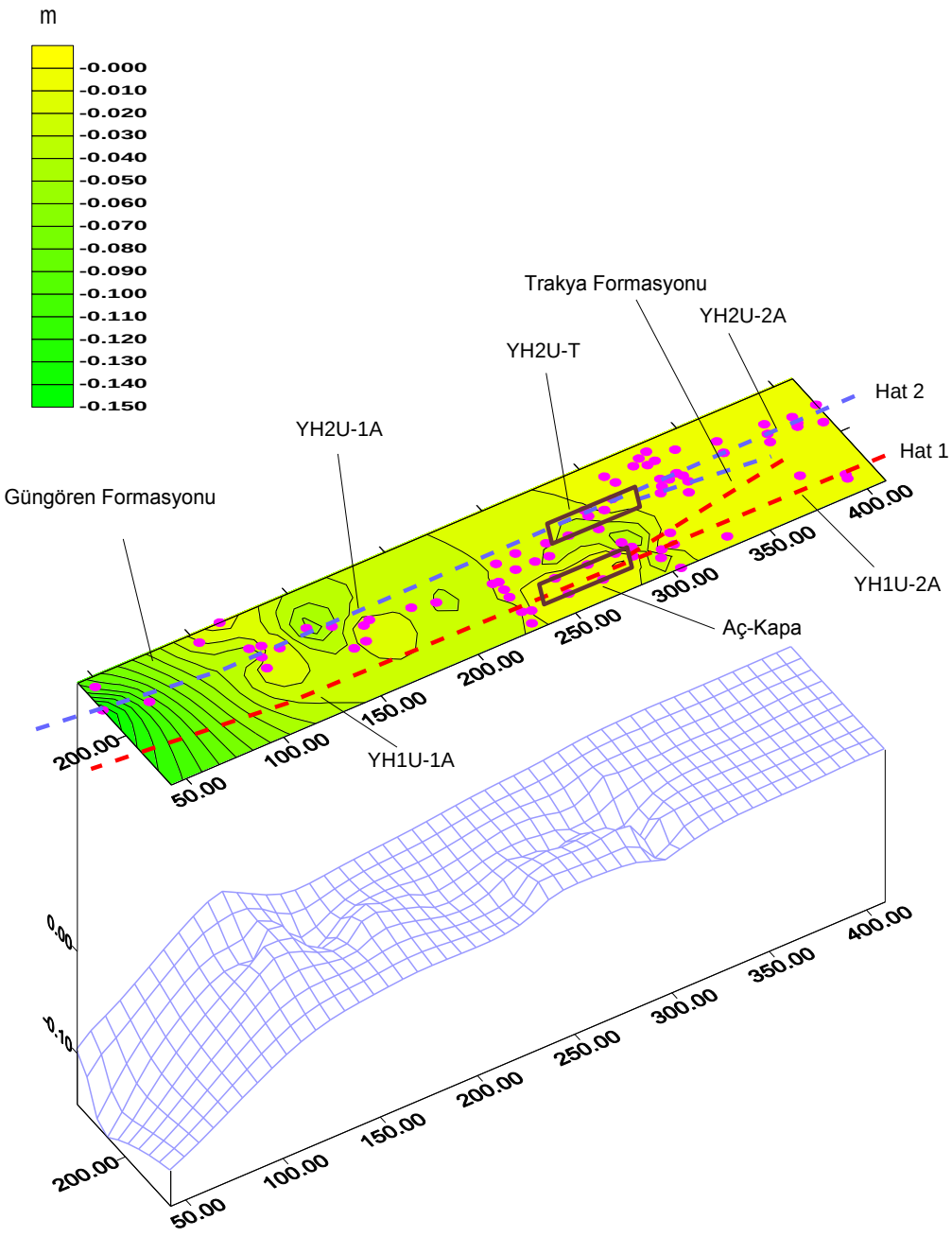
Şekil 5.19 ile Şekil 5.20 deki grafiklere göre tünel ekseninden uzaklaşıldığında oturma miktarlarında azalmaların olduğu görülmektedir.

Elde edilen grafiklerden, T tipi tünellerin açıldığı kesimlerde yüzeyde etkilenen mesafe tünel ekseninden 30 m, A tipi tünellerde ise 20 m dir.



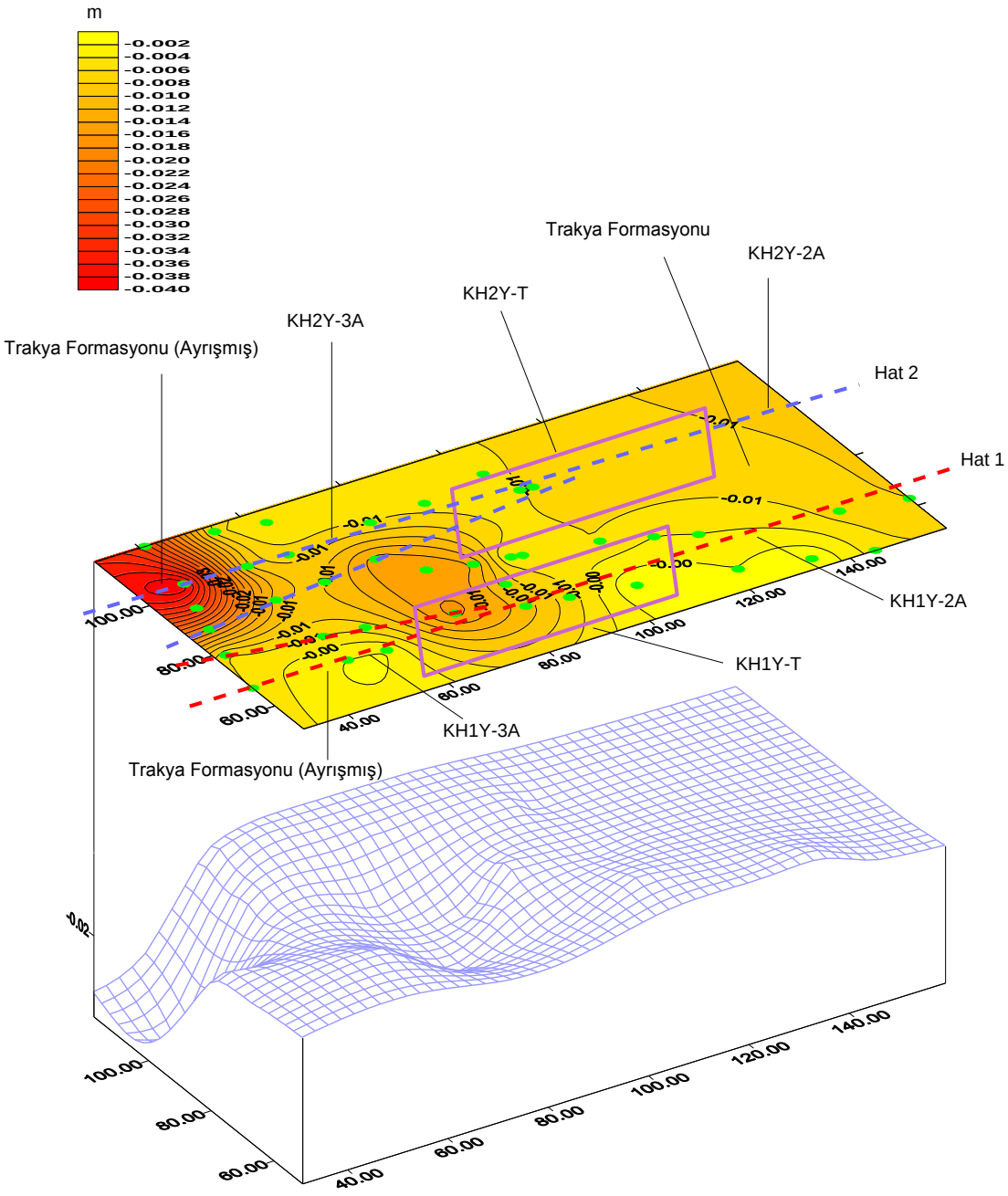
Şekil 5.20 Koska T tipi tünelleri bölgesinde bulunan bina ve yüzey nivelmanlarının tünel eksenine olan uzaklığı ile 250. günde ölçülen tasman arasındaki ilişkisi

Yenikapı-Unkapanı güzergahında Yenikapı Şaftı'ndan başlayıp Yenikapı İstasyonu'na kadar olan bölgeye yerleştirilen yüzey nivelman ölçümlerinden 100. günlük süre içerisinde elde edilen toplam oturma değerleri kullanılarak Şekil 5.21 de verilen blok diyagram oluşturulmuştur. Blok diyagramda oturmaların fazla olduğu kesimleri Güngören kili oluşturur.



Şekil 5.21 YH2U-2A tüneli yakınındaki nivelman ölçüm noktalarında 100. gün sonunda ölçülen toplam oturma miktarları

Aynı diyagram Koska T tipi tünelleri bölgesindeki bina ve yüzey bulonların için de oluşturulmuştur (Şekil 5.22).



Şekil 5.22 Koska T tipi tünellerinin yer aldığı kesimdeki nivelman ölçüm noktalarında 100. gün sonunda ölçülen toplam oturma miktarları

Şekil 5.22 den görüldüğü üzere oturmaların özellikle Hat 2 tünelinde ayrışmış Trakya Formasyonu içinde geçilen koyu kırmızı renkli alanda 3-4 cm., Trakya Formasyonu'nun sağlam kesimlerinde ise 1 cm. den düşük olduğu belirlenmiştir.

6. SONUÇLAR

- Bu çalışmada Unkapanı-Yenikapı Metro güzergahında yer alan tüm sondaj verileri, arazi ve laboratuvar deneyleri sonuçlarını kapsayan bir mühendislik jeolojisi bilgi bankası oluşturulmuştur. Bu sayede önemli maliyeti olan veriler değerlendirilerek bilgiye dönüştürülmüş ve gelecekte bölgede yer alacak uygulamalarda kullanılabilmesi sağlanmıştır.

- Yenikapı-Unkapanı güzergahında Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu, Miyosen yaşlı Güngören Formasyonu, Kuvaterner yaşlı akarsu çökelleri ve Kuşdili Formasyonu ile yapay dolgular bulunmaktadır. Ancak açılan tünel düzeyinde birimlerden yalnızca Trakya Formasyonu'nu oluşturan litolojiler ile Güngören Formasyonu kesilmiştir.

- Yenikapıdaki göçüğun oluştuğu bölgede yer alan ve Yenikapı İstasyonu ile Hafif Metro Aksaray İstasyonuna kadar uzayan kesimdeki alüvyonların Vatan caddesini içine alan Bayrampaşa (Lycos) deresinin çökelleri olduğu anlaşılmıştır.

- Toplam uzunluğu 5200 m olan tünelin % 68 i Trakya Formasyonu, geri kalan % 32 sinin ise Güngören Formasyonu içerisinde açılacağı belirlenmiştir. Trakya Formasyonu'ndan oluşan kesimdeki tüneller tamamlanmıştır. Güngören Formasyonu içerisinde ise tünel açımının % 87 si gerçekleşmiş olup kalan kesimin kazısına henüz başlanamamıştır.

- Çalışma alanında karşılaşılan dolguların önemli kalınlığa ulaştığı saptanmıştır. Arazi ve laboratuvar deney sonuçları dolguların heterojen nitelikte, gevşek yapıda ve düşük dirence sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle dolgu içerisinde yapılacak teknik uygulamaların sakıncalı durum oluşturabileceği düşünülmektedir.

- Kumlu seviyelerin baskın olduğu Kuvaterner çökellerinde kumların gevşek-orta sıkı yerleştiğini, killi kısımlarının ise yumuşak-çok katı kıvamda olduğunu görülmüştür. Arazi ve laboratuvar deney sonuçları, bu birimin mühendislik özelliklerinin kısa mesafelerde, geniş bir aralıkta çok değişebildiğini göstermektedir. Ayrıca kalın ve suya doygun olmaları durumunda dinamik yüklere karşı hassas olabilecekleri bilinmektedir.

- Güngören killerinde yapılan 286 adet SPT deneyi sonuçlarına göre N_{30} değerleri 15-35 arasındadır. Bu değerlere göre Güngören killeri katı-çok sert kıvamdadır. Pressiometre deneylerinden elde edilen sonuçlar SPT deney sonuçları ile genellikle uyumludur. Ancak deney sonuçları Güngören kilinin mekanik özelliklerinin güzergah boyunca lokal olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Birimin direnci genelde derinliğe bağlı olarak artmaktadır.

- Güzergah üzerinde açılan sondajlardan alınan kil örneklerinde belirlenen su içeriği %15.6-42.8 arasında değişmektedir. Kıvam limitleri ile karşılaştırıldığında Yenikapı göçük bölgesinde ve Koska Şaftı civarında su içeriği değerlerinin likit limit değerlerine yakın olduğu, Yenikapı İstasyonu'nda ise bu değerin plastik limit değerlerine yakın olduğu ortaya çıkmıştır.

- Güzergah üzerindeki kritik yapıların olduğu kesimlerde yapılan sondajlardan alınan kil örneklerinin yüksek plastisiteli inorganik kil oldukları anlaşılmıştır. Bu nedenle su durumuna bağlı olarak konsolidasyon ve şişme davranışı göstermeleri beklenmelidir.

- Laboratuvar deneylerinden Güngören kilinin serbest basınç direnci 0.32-4.40 kg/cm^2 arasındadır. Üç eksenli basınç ve kesme deneyi sonuçlarına göre kohezyon değerleri 0.11-1.73 kg/cm^2, içsel sürtünme açıları 0-19° arasında değişmektedir. Deney sonuçları, killerin düşük dayanımlı olduğunu göstermektedir. Güngören killerinin tünel mühendisliği açısından sorunlu bir ortam niteliğinde olduğu ve bu nedenle başlangıçta öngörülen kazı ve destekleme projesine ilave önlem gerektirdiği anlaşılmıştır.

- Güngören killeri üzerinde yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri sonuçları karşılaştırıldığında, direnç açısından, arazi deneylerinden elde edilen sonuçların laboratuvar deney sonuçlarından daha yüksek oldukları ortaya çıkmıştır. Bu durumun nedeni laboratuvar deneylerinde kullanılan örneklerin örselenmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

- Bölgede yer alan anakayanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin genellikle ayrışma derecesi, litoloji ve süreksizliklere bağlı büyük değişiklik gösterdiği saptanmıştır. Tünellerde geçilen anakaya RMR kaya sınıflamasına göre zayıf-orta kaya sınıfındadır.

- YH1U-2A tünelinde km 4+877.60-4+906.40 arasında 7 ayrı as alanda ve 3 ayrı yönelimde (sağ duvar-sol duvar-ayna) yapılan Schmidt çekici ölçümleri sonuçlarına göre sağ duvarda, sol duvarda ve ayna önünde kayaçların orta sağlam kaya (255-510 kg/cm^2) tanımlarına uygun olduğu görülmüştür.

- Güzergahtaki 42 sondajın değişik derinliklerinden elde edilen karotlara göre hesaplanan RQD değeri anakayanın genellikle çok zayıf-orta kaya kalitesinde olduğunu göstermiştir.

- Arazi ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen mühendislik özelliklerine göre Trakya Formasyonu'nu oluşturan birimler, yer yer çok kırıklı-çatlaklı olmalarına ve ezik zonlar içermelerine karşın kaya niteliklerini korumakta ve teknik girişimler için fazla sorunlu olmayan oldukça iyi bir ortamı oluşturmaktadırlar. Ancak anakayada elde edilen dayanım değerlerinin lokal olarak önemli farklılıklar ortaya koyması ve geniş değişim aralığı göstermesi, uygulama sırasında tünel düzeyinde karşılan litolojilerin süreksizliklere bağlı olarak değişiminin yerinde izlenmesi tünel mühendisliği açısından önem taşımaktadır.

- Yenikapı-Unkapanı güzergahında 96 sondaj kuyusu açılmış ve bu kuyuların birçoğunda yeraltı su seviyesi ölçülmüştür. Bu ölçümlerin sonuçlarına göre yeraltı su seviyesi 2-16 m arasında değişmektedir. Güngören Formasyonu geçirimsiz olup, üzerinde bulunan birimlerde depolanan suyun aşağılara doğru sızmasını engellemektedir. Güzergahta temeli oluşturan Trakya Formasyonu'nun geçildiği kesimlerde önemli sayılabilecek su geliri ile

karşılaşılmamıştır. Çatlaklı ve kırıklı bir yapıda olan anakayanın, çatlak aralıkları kil dolguludur. Yerinde yapılan basınçlı su ve geçirimlilik deneylerinde Güngören killeri (10^{-6}-10^{-8} m/sn) ve Trakya Formasyonu'nu oluşturan litolojilerin (10^{-5} m/sn) geçirimliliğinin düşük olduğu görülmüştür.

- Tünelde yapılan konverjans ölçümü sonuçlarına göre, Güngören kilinin geçildiği kesimlerde kazı kesitinde önemli daralmanın olduğu, ve projede öngörülen sınırı aştığı mevcut tünel açma yönteminin (N.A.T.M) deformasyonları engellemekte yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu nedenle sorunlu olan kesimlerde ilave önlemlerin alınması kaçınılmaz olmuş, sonuçta tünel aynası ve ilerisinin koruyucu bir kemer ile önceden desteklenmesine karar verilmiştir. Bu yöntemle konverjans önemli ölçüde azaltılmıştır. Ancak geniş kesitli T tipi tünellerinin yakınında olması, yüzey yapılarının yoğunluğu, düşük örtü kalınlığı gibi nedenlerden dolayı yeni risklerin alınmaması düşüncesiyle Trakya Formasyonu içerisinde kalan kesimlere de yeni yöntemin uygulanması, buna rağmen ölçülen deformasyon miktarlarının sınır değerlerin çok çok altında seyretmesi daha yüksek maliyetler içeren yeni yöntemin anakayada uygulanması, ekonomik açıdan yeniden gözden geçirilmesi fikri tartışılmaya açıktır.

- Tünel aynası ölçüm noktasına en az 30 m mesafedeyken alınmaya başlanan katlı çubuk ekstansometre ölçümlerinden elde edilen deformasyon değerlerinin tünel çapının yaklaşık 3 katı kadar olan etkilenme bölgesi içerisinde oluştuğu ancak 40 m'ye varan örtü kalınlığından dolayı oluşan deformasyonların yüzeye ulaşmadığı ve ekstansometre çubuklarının ankrajlandığı jeolojik ortam içindeki düşey yer değiştirmelerin makul değerler içerisinde kaldığı görülmüştür.

- Koska tünelleri dolayındaki nivelman ölçüm sonuçlarına göre tünel kazı aynasının yaklaşık 20 m. öncesinde oluşan oturma miktarları aynada maksimum değere ulaşmaktadır. Bu değerler, KH2Y-1A tüneli üst yarısı Güngören killerinde, alt yarısı ayrışmış Trakya Formasyonu'nda geçilen km 5+660.20 de 16 mm., KH2U-1A tüneli üst yarısı Güngören killerinde, alt yarısı ayrışmış Trakya Formasyonu'nda açılan km 5+780.20 de 8 mm.,

KH2Y-3A tünelinde ayrışmış Trakya Formasyonu'nda geçilen km 5+316.40 da 6 mm. dir.

- Yenikapı tünelleri bölgesindeki nivelman ölçümlerine göre aynadan yaklaşık 20 m öncesinde oluşan oturmalar aynada maksimum değere ulaşmaktadır. Oturmalar, YH2U-1A tüneli Güngören killerinde açılan km 4+656.60 da 44 mm., km 4+726.40 da 26 mm., üst yarısı Güngören kili, alt yarısı Trakya Formasyonu'nda açılan km 4+810.40 da 10 mm., YH2U-2A tüneli anakayada açılan km 5+006.00 da 5 mm. ölçülmüştür.

- YH2U-2A tüneli ile Koska T tipi tünelleri bölgesindeki 150. ve 250. gün sonundaki oturma miktarları ile nivelman noktalarının tünel ekseninden olan uzaklığı arasındaki ilişki değerlendirildiğinde her iki bölgede de tünel ekseninden uzaklaşıldığında oturma miktarlarında azalma olduğu gözlenmektedir. T tipi tünelleri bölgesindeki etkilenme alanının tünel ekseninden 30 m lik, A tipi tünellerde ise 20 m lik mesafe içerisinde kaldığı görülmüştür.

- Yenikapı Şaftı'ndan başlayıp Yenikapı İstasyonu'na kadar olan kesimde ve Koska T tipi tünelleri bölgesindeki bina ve yüzey bulonlarında 100. gün sonundaki oturma değerleri, bu bölgeleri içeren yüzey nivelman ölçüm kesiti ve bulonların koordinatları kullanılarak oluşturulan blok diyagramlarda Yenikapı Bölgesinde oturma miktarlarının Güngören killerinde geçilen kesimde 2-16 cm arasında değiştiği, Trakya Formasyonu içerisinde geçilen kesimlerde 1 cm den düşük olduğu saptanmıştır. Koska T tipi tünelleri bölgesinde Trakya Formasyonunun ayrışmış kesimlerindeki oturma miktarlarının 2-4 cm, daha sağlam kesimlerinde ise 1 cm den düşük olduğu ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

Abdüsselamoğlu, M.Ş., 1963. İstanbul Boğazı Doğusunda Mostra Veren Paleozoyik Arazide Stratigrafik ve Paleontolojik Yeni Müşahadeler, M.T.A. Dergisi, 60.

Arıç, C., 1955. Haliç-Küçükçekmece Gölü Bölgesinin Jeolojisi. Doktora Tezi, İ.T.Ü Maden Fakültesi, İstanbul, 45 s.

Baykal, F., ve Kaya, O., 1963. İstanbul Bölgesinde Bulunan Karboniferin Genel Stratigrafisi, M.T.A Dergisi, 61.

Bieniawski, Z.T., 1975. The Point Load Test in Geotechnical Practise, Engineering Geology, 9, p.1-11

Bieniawski, Z.T., 1984. Rock Monitoring Techniques, Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling, A.A. Balkema, Rotterdam p.137-138

Bieniawski, Z.T., 1984. The New Austrian Tunnelling Method, Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A.A. Balkema, Rotterdam, p.152-154

Bieniawski, Z.T., 1989 Engineering Rock Mass Classification. Mc. Graw Hill, New York, p 237.

Boynukalın, S., 1990. Dereli (Giresun) Baraj Yeri ve Göl Alanının Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Kayaçlarının Jeomekanik Özellikleri, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 255 s.

Deere, D.U., and Miller, R.P., 1966. Classification and index Properties of Intact Rock. Tech. Report AFWL-TR-65-116, AF Special Weapons Center, Kirtland Air Force Base, New Mexico

Eriş, İ., 1999. İstanbul Metrosunda Geçilen Kayaçların Yeraltı Kazıları Açısından Yorumu, Yeraltı Kaya Yapılarında Mühendislik Jeolojisi, Mühendislik Jeolojisi Bülteni, 17, s. 92-102

Eyüboğlu, R., 1988. Esenler-Yeşilbağ Arasındaki Hafif Metro Güzergahının Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Maden Fakültesi, İstanbul, 116 s.

Görür, N., ve diğ. 1981. Trakya Havzası Doğusunda Eosen Resifleri, İ.Ü. Fen Fakültesi Dergisi.

Hoek E. And Brown, E.T. 1980. Underground Excavations in Rock, Institutions of Mining and Metallurgy, London p. 382

ISRM, 1978. Suggested Methods for the Quantative Description of Discontinuities in Rock Masses, Int.J. Rock Mech. And Mining Sci. and Geomechanics.Abstr., 22, 2, 53-60.

Kaya, O., 1971. İstanbul'un Karbonifer stratigrafisi, Doktora Tezi Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, 56 s.

Ketin, İ., Güner, G., 1989. İstanbul Bölgesinde Karbonifer Yaşlı Trakya Formasyonu'nun Yapısal Özelliği, Mühendislik Jeolojisi Bülteni, 11, 13-18

Kotake, N., Yamamoto,Y. ve Oka, K., 1994. Design for Umbrella Method Based on Numerical Analyses and Field Measurements, In. M.E. Abdel Salam (Editors), National Authority for Tunnels and Egyptian Tunnelling Society, Cairo, April 1994, p. 501-508

Kurt, C., Yılmaz, Ö., Şimşek, S., 2002. İstanbul Metrosu Tünellerinde Umbrella Arch Yönteminin Uygulanması ve Sonuçları. Ulaşımda Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Aralık 2002, İstanbul, s. 331-342

Mahmutoğlu, Y., Erdoğan, M., Koçak, C., 2001. Ayamama - Çırpıcıçayırı Dereleri Arasında kalan Bakırköy Yerleşim Alanının Mühendislik Jeolojisi, 54. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildirisi, No : 54-61, Ankara

Özaydın, Kutay., 1999. Zeminlerin Sınıflandırılması, Zemin Mekaniği, s.143-163, Birsen Yayınevi, İstanbul

Pagliacci,F., Yamomoto, M., 1992. Aosta-Mont Blanc Tunnel Tunnel Motorway New Construction Methods For Tunnels in Difficult Soils, Japan Tunnel Association Tunnel and Underground , 23/1, p. 42-58

Sayar, C., 1977. Haliç ve Civarının Jeolojisi. B.Ü., İstanbul.Haliç Sorunları ve Çözüm Yolları Ulusal Sempozyumu, 1976, İstanbul, s. 355-365

Sayar, M., Sayar, C., 1962. İstanbul'un Surlar İçindeki Kısmının Jeolojisi, İ.T.Ü Maden Fakültesi, s. 23

Şengör, A.M.C., 1984. Strike - Slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a case study, Special Publication No: 37, Society of Economic Paleontologist and Mineralogist.

Ulusay, R., 2001. Kayaç Malzemesi ve Kaya Kütleleri İçin Mühendislik Sınıflamaları, Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları : 38, Ankara, s.128-158

Ulusay, R., Sönmez, H., 2002. Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi ve Dayanımı, Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları : 60, Ankara, s.38-44

Usta, E., 2001. İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı Arasının (km 5+200-5+900) Mühendislik Jeolojisi, İ.T.Ü Maden Fakültesi, İstanbul, s.100

Vardar, M., 1994. Metro tünellerinde Duraylılığın Korunması ve Sağlanması, Ulaşımda Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Aralık 2002, İstanbul, s.39-48

Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., 1999. Jeoteknik Ölçüm Raporları**,** Jeoteknik Ölçümlerin Talimatnamesi

http:/www.rotex.fi/benefits.html, Benefits of the Umbrella Method

EKLER

Ek A : İstanbul Metrosu Yenikapı-Unkapanı Güzergahının Mühendislik Jeolojisi Haritası-Kesiti ve Jeoteknik Bilgi Çizelgesi
Ek B : Sondaj veri tabanları, RQD, SPT verileri
Ek C : Konverjans, Nivelman, Ekstansometre ölçüm verileri

ÖZGEÇMİŞ

24.08.1977 yılında doğan yazar, ilköğrenimini Yedikule İlkokulu, orta ve lise tahsilini Yedikule Lisesi'nde olmak üzere İstanbul'da tamamladı. 1996 yılında İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde öğrenimine başlayan yazar 2001 yılında aynı bölümden mezun oldu.

Aralık 2001-Mart 2004 tarihleri arasında Müşavirlik firması Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.'ye bağlı olarak İstanbul Metrosu 2.Aşama 2.Kısım Yenikapı-Unkapanı arası tünel inşaatında Jeoloji Mühendisi olarak çalıştı.

2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. İngilizce'yi iyi derecede bilen yazar halen bu üniversitede öğrenimine devam etmektedir.