

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL GROVAKLARINDA NATM İLE AÇILAN İKİZ TÜNELLERİN
NEDEN OLDUĞU YÜZEY DEPLASMANLARININ TAHMİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ezgi AKÇAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL GROVAKLARINDA NATM İLE AÇILAN İKİZ TÜNELLERİN
NEDEN OLDUĞU YÜZEY DEPLASMANLARININ TAHMİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ezgi AKÇAY
501161312**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161312 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ezgi AKÇAY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İSTANBUL GROVAKLARINDA NATM İLE AÇILAN İKİZ TÜNELLERİN NEDEN OLDUĞU YÜZEY DEPLASMANLARININ TAHMİNİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Recep İYİSAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Aykut ŞENOL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02.05.2019**
Savunma Tarihi : **13.06.2019**





Anneme,



ÖNSÖZ

Şehir merkezlerine göçlerin gittikçe arttığı ülkemizde, ulaşım ihtiyacının yüksek seviyelere taşınmasıyla, karayolu ve metro yapımlarına ağırlık verilmiş, yapılaşma yoğunlukları nedeniyle yeraltı yapısı olan tüneller ulaşım için tercih edilmiştir. Bu tünellerin inşaatı esnasında değişken miktarlardaki oturmaların yüzeyde oluşmasıyla yapısal hasarlar meydana gelmekte ve bunların önemli seviyelere ulaşmasıyla can ve mal kayıpları oluşmaktadır. Bu nedenle, bu deplasmanların düzenli olarak ölçümü ve takip edilmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışma kapsamında Cebeci Tüneli Alibeyköy Bölgesi'nde düzenli deplasman ölçümleri yapılan binalarda, tünelin farklı kazı aşamaları sonucunda oluşan deplasmanlar karşılaştırılarak aralarındaki ilişki incelenmiştir. Bununla beraber, teorik bağıntılardan elde edilen deplasman miktarlarıyla gerçek deplasman miktarları karşılaştırılmıştır. Son olarak, İstanbul grovaklarında NATM ile açılan ikiz tünellerin oluşturacağı deplasman miktarlarının ampirik bir bağıntı yardımıyla bulunması için dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin tünel örtü kalınlığına bağlı olarak bir bağıntısı elde edilmeye çalışılmıştır. İstanbul grovakları için kullanılabilecek olan bu bağıntı ile deplasmanların daha doğru tahmini yapılabilir, can ve mal kayıpları en aza indirilebilir.

Bu çalışma sırasında bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan Furkan Kaya'ya ve Bekir Sıtkı Altıok'a, bana karşı gösterdiği sabır ve anlayıştan dolayı değerli şefim Nazım Gençosmanoğlu'na, manevi desteklerini eksik etmeyen Dorukhan Şahin'e, Emel Dolunay'a, Büşra Arslan'a ve KRP Kesim-7 ailesine, teknolojik ve akademik bilgi desteği dolayısıyla her zaman yanımda olan arkadaşım Alper Kocaoğlu'na, bilg, ve birikimlerinin yanı sıra özellikle özverisi ve sabrıyla bana destek olan sayın hocam Recep İyisan'a, bana olan anlayışı ve desteği dolayısıyla müdürüm Mustafa Kemal Günay'a, eğitime olan tam desteği ile sayın müdürüm Ali Durdu'ya, son olarak beni her zaman destekleyen ve bana sonsuz güvenen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2019

Ezgi Akçay
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam.....	3
2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ.....	5
2.1 Tünelin Genel Tanımı	5
2.2 Tünellerin Tarihi Gelişimi.....	6
2.3 Tünel Çeşitleri	9
2.3.1 Amaçlarına göre tüneller.....	9
2.3.1.1 Karayolu tünelleri	10
2.3.1.2 Demiryolu tünelleri	12
2.3.1.3 Yaya tünelleri	13
2.3.1.4 Kanal tünelleri.....	13
2.3.1.5 Metro tünelleri.....	14
2.3.2 Kazılma şekline göre tüneller	14
2.3.2.1 Yumuşak zeminlerde açılan tüneller.....	14
2.3.2.2 Kayada açılan tüneller.....	15
2.4 Tünel Açma Yöntemleri.....	17
2.4.1 Alman Tünel Açma Yöntemi.....	18
2.4.2 Belçika Tünel Açma Yöntemi.....	19
2.4.3 İngiliz Tünel Açma Yöntemi	20
2.4.4 Eski Avusturya Tünel Açma Yöntemi	20
2.4.5 İtalyan Tünel Açma Yöntemi.....	21
2.4.6 İsviçre Tünel Açma Yöntemi	21
2.4.7 TBM (Tünel Açma Makinesi).....	21
2.4.8 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi	23
3. KAYA SINIFLANDIRMA SİSTEMLERİ.....	25
3.1 Terzaghi Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi	25
3.2 Lauffer Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi.....	27
3.3 RQD Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi	28
3.4 RMR Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi.....	29
3.5 Q Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi.....	32

3.6 GSI Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi	39
3.7 NATM Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi	40
4. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ (NATM)	41
4.1 NATM'nin Tanımı	41
4.2 NATM'ye Göre Kaya ve Destek Sınıfları	42
4.2.1 A kaya ve destek sınıfı (stabil-hafif aşırı sökülen).....	45
4.2.1.1 A1 kaya ve destek sınıfı (stabil kaya kütlesi).....	45
4.2.1.2 A2 kaya ve destek sınıfı (sonradan az sökülen)	45
4.2.2 B kaya ve destek sınıfı (gevrek kaya kütleleri)	46
4.2.2.1 B1 kaya ve destek sınıfı (gevrek)	46
4.2.2.2 B2 kaya ve destek sınıfı (çok gevrek)	46
4.2.2.3 B3 kaya ve destek sınıfı (taneli)	47
4.2.3 C kaya ve destek sınıfı (baskılı kaya kütleleri)	47
4.2.3.1 C1 kaya ve destek sınıfı (dağ atma)	48
4.2.3.2 C2 kaya ve destek sınıfı (baskılı)	48
4.2.3.3 C3 kaya ve destek sınıfı (çok baskılı)	49
4.2.3.4 C4 kaya ve destek sınıfı (akıcı)	50
4.2.3.5 C5 kaya ve destek sınıfı (şişen).....	51
4.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde Kazı Aşamaları	51
4.4 NATM Tahkimat Elemanları	53
4.4.1 Püskürtme beton.....	54
4.4.2 Çelik hasır	56
4.4.3 Çelik iksa.....	57
4.4.4 Kaya bulonu	58
4.4.5 Süren.....	59
4.5 NATM'nin Üstün ve Zayıf Yönleri.....	60
5. TÜNELLERDE GEOTEKNİK ÖLÇÜMLER.....	61
5.1 Ekstansometre Ölçümü.....	62
5.2 Konverjans Ölçümü.....	62
5.3 İnklinometre Ölçümü.....	63
5.4 Çatlak Ölçerler.....	64
5.5 Gerilme Ölçerler.....	65
5.6 Bina İzleme Noktası Ölçümleri	65
6. TÜNEL KAZILARININ NEDEN OLDUĞU YÜZEY DEPLASMANLARININ İNCELENMESİ.....	67
6.1 Projenin Genel Bilgileri.....	67
6.1.1 Çalışma bölgesi	69
6.1.2 Bölgenin genel jeolojisi.....	71
6.1.2.1 Trakya formasyonu	72
6.1.2.2 İstanbul grovakları.....	73
6.1.3 Sondajlar ve yerel zemin koşulları	74
6.1.4 Projenin kaya kalite ve tahkimat sınıflandırmaları	81
6.2 Tünel Nedeniyle Oluşan Deplasmanların İncelenmesi	84
6.2.1 Enkesitlerin incelenmesi ve değerlendirilmesi.....	86
6.2.2 Ölçülen deplasmanların genel değerlendirmesi	132
6.3 Yüzey Deplasmanlarının Belirlenmesi.....	133
6.3.1 Gauss hata fonksiyonu	133
6.3.2 Dönüm noktasının eksene olan mesafesinin farklı yaklaşımlarla belirlenmesi	136
6.3.3 Yüzey deplasmanlarının hesaplanması	138

6.3.4 Dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin belirlenmesi için ampirik bir bağıntı elde edilmesi	152
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	155
KAYNAKLAR	157
EKLER.....	163
ÖZGEÇMİŞ.....	167





KISALTMALAR

NATM	: New Austrian Tunneling Method (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi)
KMO	: Kuzey Marmara Otoyolu
TBM	: Tunnel Boring Machine (Tünel Açma Makinesi)
RQD	: Rock Quality Designation (Kaya Kalite Göstergesi)
YASS	: Yeraltı Su Seviyesi
TCR	: Total Core Recovery (Toplam Karot Verimi)
RMR	: Rock Mass Rating (Kaya Kütle İndeksi)
GSİ	: Geological Strength Index (Jeolojik Dayanım İndisi)
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
ÖNORM	: Österreichische Normen (Avusturya Standartları)
KGAM	: Kollu Galeri Açma Makineleri
Q	: Kaya Tünelcilik Kalitesi İndeksi
NKH	: Net Kazı Hızı
KTH	: Keski Tüketim Hızı
MKO	: Makine Kullanım Oranı
NGI	: Norveç Geoteknik Enstitüsü
UDHB	: T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı
NÖT	: Neue Österreichische Tunnelbauweise



SEMBOLLER

J_n	: Eklem takım sayısı
J_r	: Eklem pürüzlülük sayısı
J_a	: Eklem ayrışma sayısı
J_w	: Eklem suyu indirgeme faktörü
J_n	: Eklem pürüzlülük sayısı
SRF	: Gerilme düzeltme faktörü
D_e	: Eşdeğer boyut
ESR	: Kazı tahkimat oranı
J_v	: Hacimsel eklem sayısı
SCR	: Süreksizlik yüzey koşulu puanı
R_r	: Pürüzlülük puanı
R_w	: Bozulma puanı
R_f	: Dolgu puanı
S	: Tünel eksenine (x) mesafedeki yüzey oturması
S_{maks}	: Tünel ekseninde oluşan maksimum yüzey oturması
i	: Dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesi
H	: Tünel tavan üst kotunun yüzeye olan mesafesi
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık
E	: Elastisite modülü
D	: Tünel çapı
Z_0	: Tünel merkezinin yüzeye olan mesafesi
β	: Sınır açısının değeri
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
V_t	: Birim ilerleme için çökme eğrisinin tanımlandığı hacim
V_k	: Tünel kazısından kaynaklanan hacimsel zemin kaybı
u	: Tünel cidarının radyal yönde yaptığı yer değiştirme
θ	: Poisson oranı
P_s	: Tünel üzerindeki yapıların ilave yük miktarı (sürşarj yükü)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dünya’da bilinen en eski tüneller (Kolymbas, 2005).....	7
Çizelge 2.2 : En uzun tüneller (Kolymbas, 2005; Url-1, 2010; Url-2, 2016).....	8
Çizelge 3.1 : Terzaghi kaya sınıflandırması ve tahkimat sistemi (Deer ve diğ., 1970)	27
Çizelge 3.2 : RQD kaya kalitesi (Deere, 1963)	28
Çizelge 3.3 : Sınıflandırmada değişken parametrelerin puanlanması (Bieniawski, 1989).....	30
Çizelge 3.4 : Süreksizlik doğrultu ve eğim konumlarına göre değerlendirilmesi (Bieniawski, 1989)	31
Çizelge 3.5 : Eklem yönlerine göre düzeltme puanları (Bieniawski, 1989).....	31
Çizelge 3.6 : Toplam sayısal değerlere göre kaya kalitesinin tanımlanması (Bieniawski, 1989)	31
Çizelge 3.7 : Kaya sınıflarının ifade ettiği değerler (Bieniawski, 1989).....	32
Çizelge 3.8 : Kaya kalitesine göre RQD değeri (Deere, 1963)	33
Çizelge 3.9 : Eklem takımı sayısı (J_n) (Barton, 1993).....	34
Çizelge 3.10 : Eklem pürüzlülük sayısı (J_r) (Barton, 1993)	34
Çizelge 3.11 : Eklem ayrışma sayısı (J_a) (Barton, 1993)	35
Çizelge 3.12 : Eklem suyu indirgeme faktörü (J_w) (Barton, 1993).....	36
Çizelge 3.13 : Gerilme indirgeme faktörü (SRF) (Barton, 1993).....	36
Çizelge 3.14 : Q değerine göre kaya kütle tanımlaması (Barton ve diğ., 1974).....	37
Çizelge 3.15 : Kazı tahkimat oranı (ESR) (Barton, 1993).....	38
Çizelge 4.1 : NATM’ye göre kaya sınıflandırma sistemi (ÖNORM B 2203, 1994).	43
Çizelge 6.1 : Sondajların konumları ve derinlikleri.....	74
Çizelge 6.2 : Poisson oranı değerleri	80
Çizelge 6.3 : Birim ağırlık değerleri	80
Çizelge 6.4 : Elastisite modülü değerleri	80
Çizelge 6.5 : Homojen bölgelerin özellikleri.....	81
Çizelge 6.6 : RMR^{1989} kaya ve destek sınıflandırması puanları	82
Çizelge 6.7 : Q kaya ve destek sınıflandırması.....	83
Çizelge 6.8 : GSI kaya sınıflandırması	84
Çizelge 6.9 : 1.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	88
Çizelge 6.10 : Sağ tüp 2.aşama kazısıyla oluşan deplasman farkları	91
Çizelge 6.11 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazılarıyla oluşan deplasmanlar ve farkları	92
Çizelge 6.12 : 2.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	94
Çizelge 6.13 : Sol tüp 1.aşama kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları ...	96
Çizelge 6.14 : Sağ tüp 3.aşama kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları...	97
Çizelge 6.15 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları	97

Çizelge 6.16 : 3.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	98
Çizelge 6.17 : Sol tüp 1.aşama kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları	101
Çizelge 6.18 : Sol tüp 3.aşama, alt yarı ve invert kazısıyla oluşan deplasmanlar ...	102
Çizelge 6.19 : Sol tüp 3.aşama, alt yarı ve invert kazısıyla oluşan farklar	102
Çizelge 6.20 : 4.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	104
Çizelge 6.21 : Sol tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar ve farkları.....	106
Çizelge 6.22 : Sağ tüp 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları	107
Çizelge 6.23 : 5.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	109
Çizelge 6.24 : Sağ tüp 1. ve sol tüp 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar ve farkları	111
Çizelge 6.25 : Sağ ve sol tüp 2.aşama kazılarının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar ve farkları.....	111
Çizelge 6.26 : Sağ tüp 3.ve sol tüp 1.aşama kazıları sonucunda oluşan deplasman miktarları.....	112
Çizelge 6.27 : 6.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	114
Çizelge 6.28 : Sağ ve sol tüpte 1' er aşama kazısı sonucunda oluşan deplasman miktarları ve farkları	116
Çizelge 6.29 : 7.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	118
Çizelge 6.30 : 8.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	122
Çizelge 6.31 : Sağ tüp 2. ve sol tüp 1.ve 2. aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman farkları	124
Çizelge 6.32 : Sol tüp alt yarı ve invert kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman farkları	125
Çizelge 6.33 : 9.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	127
Çizelge 6.34 : 10.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri	130
Çizelge 6.35 : $i = A \times Z_0$ bağıntısı için A değerleri	137
Çizelge 6.36 : $i = A \times Z_0 + B$ bağıntısı için A ve B değerleri	137
Çizelge 6.37 : $2i/D=A(Z_0/D)^n$ bağıntısı için A ve n değerleri	138
Çizelge 6.38 : 6.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması	149
Çizelge 6.39 : 7.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması	149
Çizelge 6.40 : 8.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması	150
Çizelge 6.41 : 9.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması	150
Çizelge 6.42 : 10.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması	151

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bukliye makinesi parçaları (Bozkurt, 1969)	7
Şekil 2.2 : Rize’de açılan Ovit Tüneli (Url-3, 2018)	9
Şekil 2.3 : Tünel enkesiti (Köse ve diğ., 2007)	10
Şekil 2.4 : Tünel enkesit şekilleri (URL-4, 2018)	11
Şekil 2.5 : İsviçre’de açılan Gotthard Base Demiryolu Tüneli (Url-2, 2016)	12
Şekil 2.6 : Dikdörtgen tünel kesiti (Url-4, 2018).....	13
Şekil 2.7 : İngiltere’de açılan Standedge Kanal Tüneli (Url-5, 2017).....	13
Şekil 2.8 : Açılan deliklere patlayıcı yerleştirilmesi (Cebeci Tüneli)	16
Şekil 2.9 : (a) Kesici kafa ve aynanın durumu (b) Toplayıcı ünitesi (c) Kazı durumu (d) Genel görünüş (Yaşar ve Yılmaz, 2018)	17
Şekil 2.10 : Kazıların yapılması ve desteklenmesi (Latin harfleri ile gösterilen numaralar kazıları, Romen rakamıyla gösterilen numaralar destekleri ifade etmektedir) (Maidl ve diğ., 2013).	18
Şekil 2.11 : Belçika Tünel Açma Yöntemi aşamalı kazı yapılması (Ayaydın, 1987).	19
Şekil 2.12 : Tünel kaplama sırası (Maidl ve diğ., 2013).....	20
Şekil 2.13 : TBM boykesiti (Özgen, 2013)	22
Şekil 2.14 : Tünel kazı aşama sıraları	23
Şekil 3.1 : Kaya kavramı, sınırları ve boyutlandırılması (Terzaghi, 1946)	26
Şekil 3.2 : Aktif genişlik (s) tanımlanması (Lauffer, 1958)	27
Şekil 3.3 : Farklı sınıftaki kayaların ayakta kalma süreleri ile aktif genişlik (kazı açıklığı) ilişkisi (Lauffer, 1958)	28
Şekil 3.4 : RMR puanı ve tünel açıklığına bağlı olarak desteksiz durma süresini belirleme abağı (Bieniawski, 1989)	32
Şekil 3.5 : Q kaya sınıfı sistemine göre tahkimat seçimi abağı (Barton ve diğ., 1993)	38
Şekil 3.6 : GSI abağı (Sönmez ve Ulusay, 2002)	39
Şekil 4.1 : NATM sınıflandırması, RMR ve Q ilişkisi	44
Şekil 4.2 : B3 sınıfının aşamalandırılarak kazısı (Cebeci Tüneli)	47
Şekil 4.3 : C3 sınıfında açılan tünelin aşamaları (Cebeci Tüneli)	49
Şekil 4.4 : C3 sınıfında açılan tünelde yapılan tahkimat sistemi (Cebeci Tüneli)....	50
Şekil 4.5 : Patlama paternine uygun tünel aynası (Cebeci Tüneli).....	52
Şekil 4.6 : Üç aşamalı kazı (Arıoğlu ve diğ., 2002)	53
Şekil 4.7 : Püskürtme betonun uygulanması (Cebeci Tüneli)	54
Şekil 4.8 : Köşelerin dolumu ile gerilme yoğunluğunun azalması	55
Şekil 4.9 : Tünel içindeki püskürtme beton kaplı çelik hasır (Cebeci Tüneli)	56
Şekil 4.10 : Kafes iksanın tünel içine yerleştirilmesi (Cebeci Tüneli)	57
Şekil 4.11 : Kaya bulonu ve plakası (Cebeci Tüneli)	58
Şekil 4.12 : Tünel aynasına uygulanan sürenler (umbrella arch) (Cebeci Tüneli)	60
Şekil 5.1 : Ekstansometre aleti (Url-6)	62
Şekil 5.2 : İnklinometre borusu ve zemine kurulumu (Cebeci).....	64

Şekil 5.3 : Çatlak ölçer (Cebeci)	64
Şekil 6.1 : Kuzey Marmara Otoyolu güzergahı	68
Şekil 6.2 : Kesim 7 projesi güzergahı	68
Şekil 6.3 : Cebeci Tüneli güzergahı ve Alibeyköy Tüneli Bölgesi	69
Şekil 6.4 : C2 ve C3 sınıfı tünel kesiti	70
Şekil 6.5 : İkiz tünellerin kazı aşamaları.....	70
Şekil 6.6 : Sondajların konumları	75
Şekil 6.7 : 68+985 sondaj kesiti.....	76
Şekil 6.8 : 69+035 sondaj kesiti.....	77
Şekil 6.9 : 69+230 sondaj kesiti.....	78
Şekil 6.10 : 69+300 sağ-1 sondaj kesiti	78
Şekil 6.11 : 69+300 sol-2 sondaj kesiti.....	79
Şekil 6.12 : Tünel enkesitlerinin tünele göre konumları.....	85
Şekil 6.13 : Bina ve köşe noktalarının isimlendirilmesi	86
Şekil 6.14 : 1. enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.....	87
Şekil 6.15 : 1. enkesit deplasman miktarları.....	89
Şekil 6.16 : Sağ tüp 2. aşama ilerlemesiyle oluşan deplasmanlar.....	90
Şekil 6.17 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazısıyla oluşan deplasmanlar.....	90
Şekil 6.18 : 2. enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.....	93
Şekil 6.19 : Sol tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar	94
Şekil 6.20 : Sağ tüp 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları...	95
Şekil 6.21 : Sağ tüp 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları...	95
Şekil 6.22 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasmanlar.....	96
Şekil 6.23 : 3.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları	99
Şekil 6.24 : Sol tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları .	100
Şekil 6.25 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar	100
Şekil 6.26 : 4. enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.....	103
Şekil 6.27 : Sol tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar	105
Şekil 6.28 : Sağ tüp 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları.	105
Şekil 6.29 : 5.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları	108
Şekil 6.30 : Sağ tüp 1. ve sol tüp 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar.....	109
Şekil 6.31 : Sağ ve sol tüp 2.aşama kazılarının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar	110
Şekil 6.32 : Sağ tüp 3.ve sol tüp 1.aşama kazıları sonucunda oluşan deplasman miktarları	110
Şekil 6.33 : 6. enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.....	113
Şekil 6.34 : Sağ ve sol tüpte 1'er aşama kazısı sonucunda oluşan deplasman miktarları	114
Şekil 6.35 : Sağ ve sol tüpte 2. aşama kazıları sonucunda oluşan deplasman miktarları	115
Şekil 6.36 : Sağ ve sol tüp tüm üst yarı aşamalarının kazılması sonucu oluşan deplasman miktarları	115
Şekil 6.37 : 7.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.....	117
Şekil 6.38 : Sol tüp 3, sağ tüp 1.ve 2.aşama kazılarıyla oluşan deplasman miktarları	119
Şekil 6.39 : Sol tüp ve sağ tüp üst yarı aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları	119
Şekil 6.40 : Sol tüp alt yarı ve invert aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları	120

Şekil 6.41 : 8.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.....	121
Şekil 6.42 : Sağ tüp 1. ve sol tüp 3. aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları	122
Şekil 6.43 : Sağ tüp 2.,sol tüp 1.ve 2.aşama kazılarıyla oluşan deplasman miktarları	123
Şekil 6.44 : Sağ tüp 1.,sol tüp 3. aşama kazılarıyla oluşan deplasman miktarları...	123
Şekil 6.45 : 9.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.....	126
Şekil 6.46 : Sağ 1. ve 2., sol tüp 3. aşama kazılarıyla oluşan deplasman miktarları	127
Şekil 6.47 : Sol tüp 1. ve 2. aşama kazılarıyla oluşan deplasmanlar	128
Şekil 6.48 : Sağ 3. ve sol tüp alt yarı ve invert kazılarıyla oluşan deplasman miktarları	128
Şekil 6.49 : 10.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.....	129
Şekil 6.50 : Sağ tüp 1.ve 2., sol tüp 3. aşamaların kazılmasıyla oluşan deplasmanlar	131
Şekil 6.51 : Sol tüp 1.ve 2. aşamaların kazılmasıyla oluşan deplasmanlar	131
Şekil 6.52 : Tek tüpte oluşan yüzey oturması için kullanılan kesit (O'Reilly ve New, 1982)	134
Şekil 6.53 : Süperpozisyon Yönteminin uygulandığı bir örnek oturma tahmini.....	136
Şekil 6.54 : Çalışma kapsamında kullanılan grafiklerin abağı	139
Şekil 6.55 : 6. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar	140
Şekil 6.56 : 7. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar	140
Şekil 6.57 : 8. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar	141
Şekil 6.58 : 9. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar	141
Şekil 6.59 : 10. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar	142
Şekil 6.60 : 6. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar	143
Şekil 6.61 : 7. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar	143
Şekil 6.62 : 8. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar	144
Şekil 6.63 : 9. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar	144
Şekil 6.64 : 10. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar	145
Şekil 6.65 : 6. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.....	146
Şekil 6.66 : 7. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.....	147
Şekil 6.67 : 8. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.....	147
Şekil 6.68 : 9. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.....	148
Şekil 6.69 : 10. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.....	148
Şekil 6.70 : Gerçek değerler ile önerilen bağıntının karşılaştırılması	153



İSTANBUL GROVAKLARINDA NATM İLE AÇILAN İKİZ TÜNELLERİN NEDEN OLDUĞU YÜZEY DEPLASMANLARININ TAHMİNİ

ÖZET

Kırsal kesimlerden şehir merkezlerine göçün artmasıyla, şehir içlerinde trafik yoğunlaşmış, ulaşım ihtiyacı da bununla beraber artmış, metro, tünel, tramvay, otobüs, araba gibi demiryoluyla ve karayoluyla ulaşımı sağlayan araçlar için daha fazla yol inşa edilmesi zorunlu hale gelmiştir. Yollar yapılırken yeraltı yapısı olan tüneller, özellikle kamulaştırma problemlerinin de önüne geçtiği için şehir merkezlerinde, yapıların yoğun olduğu bölgelerde oldukça tercih edilmektedir. Fakat bu tüneller, açıldıkları bölgelerde tünel üzerindeki yüzeyde bulunan yol, bina, cami gibi yapılarda yerel zemin koşullarına, kayanın süreksizlik durumuna ve yeraltı suyu gibi durumlara bağlı olarak deplasmanlara neden olabilmektedirler. Deplasman miktarlarının artması, yapılarda göçmelere neden olabilmektedir. Oluşan deplasmanların miktarları önceden tahmin edilir ve düzenli ölçümlerle de takibi yapılırsa yapılarda oluşabilecek göçme problemlerinin ve dolayısıyla can ve mal kayıplarının önüne geçilebilmektedir. Bu bakımdan İstanbul grovaklarında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılan ikiz karayolu tünellerinin inşaatı nedeniyle tünel üzerindeki yapılarda oluşan deplasmanların düzenli ölçümler sonucunda elde edilen miktarları, yerel zemin koşullarına bağlı olarak incelenmiştir. İlk olarak tünellerin farklı kazı aşamalarının ayrı ayrı neden olduğu deplasmanların miktarları incelenmiş, miktarlar arasında herhangi bir bağlantı olup olmadığı tespit edilmiş ve aralarında tünel çapının 2 katı kadar mesafe bulunan iki tünelin birbiri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daha sonra literatürde bulunan dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin (i) 3 ayrı zemin türü (iri daneli, karışık ve ortalama) için bağıntıları kullanılarak hesaplanan teorik deplasman miktarları ile yapıların köşe noktalarında oluşan deplasmanların sahadan alınan gerçek miktarları karşılaştırılmış, İstanbul grovaklarında açılan tüneller için hangi i bağıntısının daha uygun olabileceği tartışılmıştır. Son olarak, Alibeyköy/İstanbul'da inşa edilmekte olan Cebeci Tüneli'nin Alibeyköy Bölgesi üzerinde bina köşe noktalarında düzenli olarak ölçülen yüzey deplasman miktarları, proje verileri ve tünelin açılarak içinden geçtiği zemin profili kullanılarak pratik amaçlar doğrultusunda yüzeyde oluşan deplasmanları tahmin edebilmek, can ve mal kayıplarını en aza indirebilmek amacıyla örtü yüküne bağlı olarak tünel dönüm noktasının tünel merkezlerine olan mesafesini hesaplayabilen ampirik bir bağıntı İstanbul grovakları için elde edilmiştir.



PREDICTIONS OF SETTLEMENTS FOR TWIN TUNNEL EXCAVATED BY NATM IN ISTANBUL GRAYWACKES

SUMMARY

Population increases have been experienced as a result of rapid urbanization due to migration from rural areas to big cities. Because of increasing population of people living in the cities, number of structures increases day by day. Due to the packness and traffic density in the city centers, a part of the population had to be moved out of the city. Because of that reason, a necessity for transportation in order to gain time for people, shorten distances and thus save fuel, which is an expensive matter today. There is an increasing need for tunnel construction which is aimed at meeting the social needs such as shelter, storage and defense, especially transportation, and with the effect of ground and topography conditions. Generally, it is not economically and technically feasible to construct highway and roads through such regions where there are dwellings, workplaces, schools, historical buildings, in other words, where urbanization is quite intense. Therefore, in recent years, due to increase metro, highway, rail system projects in our country, the need for highway and railway tunnels has increased considerably in cities. With the increasing necessity of tunnels, tunneling has become compulsory due to developing technology and tunneling methods have improved from past to present. One of these methods, the New Austrian Tunneling Method (NATM), was created by Rabcewicz in 1946, based on the principle of rock transport to the rock, which is still widely used today, which can be opened in variable section areas, applicable to unexpected geological profiles encountered during excavation and whose supports like bolt, shotcrete, umbrella arch method can easily be changed accordingly. Although this method is mostly applied in tunnels on weak ground, NATM is applicable for both cohesive and non-cohesive soil and has a wide area of choosing tunneling method.

The method has become widespread all over the world in a short period of time because it can easily adapt to any kind of tunnel geometry and ground conditions. NATM has its own rules and preserving the natural strength of the rock, the regular support system and the covering of the shell with shotcrete is one of these rules. It is one of the important rules to measure the deformations regularly by using geodetic and geotechnical methods in the tunnel and in the surface area and to evaluate the results by comparing the design with the calculations. This principle provides information about the deformation that may occur in the tunnel and ground surface. Tunnel and surface movements created by tunnel construction stages are inevitable. In addition, the tunnel may cause horizontal and vertical displacements on the surface during and after construction. As a result of these displacements, structures and roads may be damaged. These damages can be avoided by prediction of structures and road settlements. This can be achieved with the help of an empirical correlation which is easy to apply in the site, practical and suitable for the Istanbul graywackes. Thus, the structural collapses on the surface can be prevented and the damages, loss of lifes and properties because of the tunnel construction can be minimized.

In this study, the measured settlements in the areas of the tunnel interaction caused by twin tunnels opened in the city by the New Austrian Tunneling Method (NATM) were examined and the trough width parameter, which is one of the parameters defining the magnitude of settlements was observed. It is aimed to obtain an empirical correlation of trough width parameter for twin tunnels opened by NATM in Istanbul graywackes. Thus, the center of the twin tunnels, where regular surface measurements were made, were determined as the central axis and buildings 80 m to the left and right from this axis were selected for analysis. In a study conducted for a region where the tunnel progressed 500 meters, this distance was divided into 10 sections according to the density of the structure and each section was analyzed statistically in itself and the effect of tunnel excavation stages on surface settlements was tried to be obtained by comparing these analyses. Although in the site, there are drillings and laboratory tests which are determine local conditions and geotechnical properties of the layers (cohesion, modulus of elasticity, poisson ratio, uniaxial compressive strength, natural unit volume weight), by using the data obtained from the field tests, empirical correlation was tried to be obtained for trough width parameter which will be used in settlement quantity caused by twin tunnels in İstanbul graywackes.

In this study, where the displacements caused by twin tunnels opened by NATM are examined, firstly general information about the subject of the thesis is given and the purpose of the thesis formation and the statistical analysis and results of this thesis are mentioned.

In the second part of the study, the concept of tunnel, the purposes of the tunnels, the excavation methods depending on the type of the ground was introduced, the development of the tunnels from the past to the present, various tunneling methods are explained and the positive and negative aspects of these methods are mentioned.

In the third part of the study, taking into account the various parameters of the rocks, Terzaghi is mainly classified according to certain characteristics of the rocks and the most commonly used rock classification and support systems are explained.

In section 4, the New Austrian Tunneling Method which is widely used in our country is explained in detail, NATM rock classification is given and the excavation methods, support systems and the positive and negative sides of this method are explained.

In the fifth section of this study, the measurement methods used in the tunnel and on the surface, where the direction of movement and the quantity of the displacements are determined are explained.

In the sixth part of the study, the geometric properties of the tunnel used in the study, the local soil conditions and geological structure, the stages of tunnel excavation, the relationship between tunnel excavation and surface settlement quantities are explained and the development of an empirical correlation for the Istanbul graywackes is discussed. In this study, real values are used, parametric study and numerical analysis methods are excluded.

In the last part of the study, the displacement evaluations of the buildings and the results of the statistical analysis have been mentioned and various suggestions have been made. The short-term displacement amounts of each excavation stage were examined and it was concluded that there was no relationship between the quantities or percentages of these displacements, that different excavations in each cross-section caused independent displacements and that these amounts could not be attributed to a certain increase percentage. The reason for this can be explained as the drilling

velocities of the tunnel, the variability of the times between the support systems and the condition of the ground. Parameter values obtained from field experiments were used to obtain surface settlements using the proposed correlations, the results overlap with the actual values, the calculation was changed by using the parameters obtained from laboratory experiments and it was found that the settlements were different from the actual settlements. Besides, it was found that the displacement of the second tube did not cause any displacement on the first tube, and that the surface displacement amounts of the structures on the respective tubes did not increase due to the excavation in the other tube.

It is concluded that the tunnels had no effect on each other due to construction of the tunnels in the rock environment and distance between the axes of the two tunnels being about 2 times the tunnel diameters. In addition, it was found that the maximum displacement on the surface did not occur on the left tube or the right tube, but rather on the central axis located in the middle of two tunnel axes and on the curve obtained by superposing. As a result, it is recommended to carry out the geotechnical measurements in the tunnel at regular intervals, to increase the quality of the measurements taken, to reduce the error rates, to increase the measurement quality by increasing the measurement intervals. In order to determine the properties of soils in displacement predictions, it is recommended to observe soil survey and use field tests. Finally, by using the actual displacement values measured in twin tunnels drilled in the Istanbul graywackes with NATM, a correlation is proposed to estimate the displacements on the surface depending on the distance of the tunnel axis to the surface for practical purposes.



1. GİRİŞ

Kırsal kesimlerden büyük şehirlere göç nedeniyle hızlı bir şehirleşme sonucu nüfus artışları yaşanmıştır. Şehirde yaşayan insan sayısının artması, şehir merkezlerinde yapılaşma yoğunluklarına neden olmuştur. Şehir merkezlerindeki doluluk ve trafik yoğunluklarından ötürü artan nüfusun bir kısmı da şehrin dışına taşınmak durumunda kalmıştır. Bu durum beraberinde insanları zamandan kazandıracak, mesafeleri kısaltacak ve böylece günümüzün pahalı bir ihtiyacı olan yakıttan da tasarruf edilmesini sağlayacak şekilde bir ulaşım ihtiyacını doğurmuştur.

Başta ulaşım olmak üzere sığınma, depolama ve savunma gibi toplumsal ihtiyaçları karşılamak amacı taşıyan, zemin ve topoğrafya koşullarının etkisiyle de günümüzde gittikçe artan bir tünel yapım ihtiyacı bulunmaktadır. Mevcut konumlarında bulunan konutların, iş yerlerinin, okulların, tarihi yapıların olduğu, yani kentleşmenin oldukça yoğun olduğu bu tür bölgelerden yol geçirmek ekonomik ve teknik açıdan bazen mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, son yıllarda ülkemizde metro, otoyol, raylı sistem projelerinin artmasına bağlı olarak karayolu ve demiryolu tünel ihtiyacı şehirlerde oldukça artmıştır. Tünel ihtiyacının artmasıyla, gelişen teknolojiye bağlı olarak tünel açmak zorunlu hale gelmiştir ve tünel açma yöntemleri de geçmişten günümüze gelişerek bugünkü halini almıştır. Bu yöntemlerden biri olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) 1946 yılında Prof. L.v. Rabcewicz tarafından oluşturulan, kayayı kayaya taşıtma prensibine dayanan, günümüzde hala yaygın olarak kullanılan, değişken kesitli alanlarda açılabilen, kazı sırasında karşılaşılan beklenmedik jeolojik profillere uygulanabilirliği olan ve tahkimatları buna göre kolayca değişebilen parçalı bir kazı yöntemidir. Yol şerit sayılarının artması ve tünel kesit alanlarının büyümesiyle birlikte bu yöntem çoğunlukla zayıf zeminde bulunan tünellerde uygulansa da, NATM hem kohezyonlu hem kohezyonsuz zemin için uygulanabilir nitelikte olup oldukça geniş bir tercih alanı bulunmaktadır. Yöntem özellikle her tür tünel geometrisine ve zemin koşuluna kolaylıkla adapte olabilmesi sebebiyle kısa sürede tüm dünyada yaygınlaşmıştır (Rabcewicz, 1946; Kolymbas, 2005, Hemphill, 2013).

NATM'nin kendi içinde kuralları bulunmaktadır. Kayanın doğal dayanımının korunması, tahkimat sisteminin düzenli olarak yapılması ve püskürtme betonla kabuğun tamamen kaplanması bu kuralların başında gelmektedir. Deformasyonların jeodezik ve geoteknik yöntemlerle tünel içinde ve yüzey alanında düzenli olarak ölçümü ve sonuçların hesaplamalar sonucunda oluşturulan tasarım ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi de önemli kurallardan biri olmaktadır. Bu prensip, tünel içi ve zemin yüzeyinde oluşabilecek hareketlilik hakkında bilgi vermektedir.

Tünel imalat aşamalarının yaratacağı tünel içi ve yüzeysel hareketler kaçınılmazdır. Ayrıca, tünel açılırken ve sonrasında zamanla yüzeyde yatay ve düşey deplasmanlara neden olabilmektedir. Bu deplasmanların sonucunda yapılar ve yollar zarar görebilmektedir. Yapıların ve yol oturmalarının tahmininin önceden yapılmasıyla bu zararların önüne geçilebilir. Sahada uygulanabilirliği kolay, pratik, İstanbul grovaklarına uygun bir ampirik bağıntı yardımıyla bu sağlanabilir. Böylece yüzeyde oluşan yapısal göçmelerin önüne geçilerek, tünel inşaatının yol açacağı zararlar, can ve mal kayıpları en aza indirilebilir.

1.1 Amaç

Bu çalışmada Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemiyle (NATM) şehir içinde açılan ikiz tünellerin neden olduğu, tünel etkileşim alanının içinde kalan bölgelerde ölçülmüş yüzey deplasmanları incelenerek, yüzey hareketliliğinin büyüklüğünü tanımlayan parametrelerden biri olan 'dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesi' (i) örtü kalınlığı göz önüne alınarak İstanbul grovaklarında NATM ile açılan ikiz tüneller için bir ampirik bağıntı elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla sahada düzenli yüzey ölçümlerinin yapıldığı, ikiz tünellerin tam ortası merkez eksen olarak belirlenmiş ve bu eksenden sağa ve sola 80'er m mesafedeki binalar analiz için seçilmiştir. Tünelin 500 metre ilerlediği bir bölge için yapılan çalışmada, yapı yoğunluğuna göre bu mesafe 10 kesite bölünmüş ve her kesit kendi içerisinde istatistiksel olarak analiz edilmiş, tünel kazı aşamalarının yüzey oturmalarına etkisi bu analizler karşılaştırılarak elde edilmeye çalışılmıştır.

Söz konusu bölgenin yerel koşulları ve tabakaların geoteknik özellikleri (kohezyon, elastisite modülü, poisson oranı, tek eksenli basınç dayanımı, doğal birim hacim ağırlığı) bölge çevresinde yapılan sondajlar ve laboratuvar deneyleri bulunmasına rağmen teorik hesaplamalarda arazi deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak

NATM ile İstanbul grovaklarında açılan ikiz tünellerin neden olacağı yüzey deplasman miktarlarında kullanılacak olan i için ampirik bir bağıntı elde edilmeye çalışılmıştır.

1.2 Kapsam

NATM ile açılan ikiz tünellerin zemin yüzeyinde neden olduğu deplasmanların incelendiği bu çalışma kapsamında öncelikle çalışmanın konusu ile ilgili genel bilgiler verilmiş, çalışmanın oluşma amacı ve bu amaçla yapılan istatistiksel analiz ve sonuçlarından bahsedilmiştir.

Çalışmanın 2. bölümünde tünel kavramı, tünellerin amaçları, açıldığı zemin türüne bağlı olarak yapılan kazı yöntemleri tanıtılmış, tünellerin geçmişten günümüze gelişimine yer verilerek çeşitli tünel açma yöntemleri anlatılmış, bu yöntemlerin olumlu ve olumsuz yanlarından bahsedilmiştir.

Çalışmanın 3. bölümünde kayaların çeşitli parametreleri göz önüne alınarak Terzaghi başta olmak üzere, kayaların belli özelliklerine göre sınıflandırıldığı, en çok kullanılan 7 adet kaya sınıflandırma ve destek sistemi anlatılmıştır.

4. bölümde ülkemizde yaygın olarak kullanılan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi detaylı olarak açıklanmış, NATM kaya sınıflandırmasına yer verilmiş, bu yöntemle açılan tünellerdeki kazı yöntemlerinden, tahkimat sistemlerinden ve bu yöntemin olumlu ve olumsuz taraflarından bahsedilmiştir.

Bu çalışmanın 5. bölümünde tünel içinde ve yüzeyde kullanılan, deplasmanların hareket yönünün ve ilerleme miktarının tespit edildiği ölçüm yöntemleri anlatılmıştır.

Çalışmanın 6. bölümünde çalışmada kullanılan tünelin özellikleri, yerel zemin koşulları ve jeolojik yapısı, tünel kazı aşamaları, tünel kazısı ile bina deplasman miktarları arasındaki ilişki anlatılmakta ve dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin İstanbul grovakları için geliştirilebilir ampirik bir bağıntı elde edilmeye çalışılmasından bahsedilmiştir. Burada gerçek değerler kullanılmış, parametrik çalışma ve sayısal analiz yöntemleri kapsam dışı bırakılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde binaların deplasman değerlendirmelerinden ve elde edilen istatistiksel analiz sonuçlarından bahsedilmiş, çeşitli önerilerde bulunulmuştur.



2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Tüneller iki ucu kapalı veya açık olan, insanlık tarihinin çok eski zamanlarından beri çeşitli amaçlarla kullanılan ve farklı zemin türlerinde açılan yeraltı yapılarıdır. Hızlı şehirleşmenin bir sonucu olarak tüneller, şehir içlerinde fazla sayıda inşa edilebilir duruma gelmiştir. Gelişerek gelen teknoloji, çeşitli tünel açma yöntemlerini de beraberinde getirmiştir. Aşağıda tünellerin tarihi gelişimi, değişik amaçlarla ve farklı zeminlerde açılan tünellerin çeşitleri ile geçmişten günümüze gelen tünel açma yöntemleri detaylı olarak verilmiştir.

2.1 Tünelin Genel Tanımı

İngiltere'deki bir bölgede bodrum benzeri yerler için kullanılan 'tonne' kelimesinden ismini alan tünel, kayaların veya zeminin doğal dengesini koruyarak, ulaşım yolunun yüzeyden geçirilmesinin olanaksız olduğu veya diğer ulaşım yöntemlerine göre daha ekonomik bulunduğu için açılan, şehirleri birbirine bağlayan, çap ve uzunlukları kullanım amacına göre değişen, uçları açık ve eğim açısı 30°'den daha küçük olan yeraltında kazılarak açılan yapılardır (Vardar, 1985). Bununla birlikte, kayaların veya zeminin kendi kendini taşıyamadığı durumlarda kazı yapılmadan önce zemin iyileştirme yöntemleri uygulandıktan sonra ve kendini taşıyabildiği durumlarda tünelin açılması sırasında tahkimat sistemi oluşturularak taşıyıcı sistemin meydana gelmesiyle demiryolu, karayolu, su tünelleri gibi yeraltı yapıları oluşturulur (Hemphill, 2013).

İnşaat mühendisliği uygulamalarında tünel yapımını gerektiren nedenler aşağıdaki gibi özetlenmektedir (Hemphill, 2013):

- Aşılması mümkün olmayan dağlık araziden geçmek,
- Suyun taşınmasını sağlamak,
- Trafik yoğunluğunun fazla olmasından dolayı diğer karayolu, demiryolu gibi yolları engellemeden yeni bir yol açmak,

- Yüzeyde yapılması zorunlu hale gelebilen viyadük, köprü gibi sanat yapılarının veya büyük hacimli dolgu ve yarmanın yapımının istenmediği durumlarda,
- Ekonomik olarak diğer güzergah seçeneklerine göre daha uygun olduğu durumlarda yapılır.

Tünel inşaatından önce tünelin güvenli ve ekonomik olarak açılmasını sağlamak amacıyla gerekli araştırmaların yapılması gerekmektedir. Doğanın tünel üstünde oluşturacağı etkiyi bilmek için geoteknik araştırmalar yapılır ve zemin koşulları tanımlanır. Tünel projeleri içerdiği jeolojik koşulların, yeraltı suyu durumunun ve sismolojik durumun güzergahı boyunca değişkenlik göstermesiyle diğer projelere göre dizaynı ve inşaatı daha zor ve riskli olmaktadır. Bu riskleri azaltmak veya ortadan kaldırmak için geoteknik, jeolojik ve jeofizik araştırmalar çok kapsamlı ve detaylı yapılmalı, bu araştırmalar neticesinde tünel projesi doğal ortama uyum sağlamalıdır (Chapman ve diğ., 2018).

2.2 Tünellerin Tarihi Gelişimi

Doğada kireçtaşı tabakalarının erimesiyle birçok mağara ve dehliz olarak isimlendirilen üstü kapalı geçitler oluşmuştur. İlk insanlar bu yapılarda yaşamışlar, daha sonra dehliz ve mağara bulunmayan yerlerde bunların daha geniş olanlarını yapmışlardır. İlk insanlara kadar uzanan tünelcilik faaliyeti toplumların hayatında önemli bir yer tutmuştur. M.Ö. 200 yılından beri tünelcilik, insanların hayatlarını daha konforlu bir şekilde sürdürebilmesi, günlük faaliyetlerine devam etmesi ve toplumların birbiriyle iletişiminin artması gibi toplum ihtiyaçlarına cevap vermek için günden güne geliştirilmiştir. Teknik ve ekonomik gücü bulunan, diğerlerine göre kültürel olarak daha gelişmiş olan topluluklarda tünellerin açıldığı görülmüştür. Tünel açmanın ayrıca barınma, savaş tekniği olarak kullanma, şehre su getirme gibi birçok amacı bulunmaktadır. Bu amaçlardan biri olan ilk derivasyon tüneli kargir ve tuğla kaplamalı, kemerlidir ve M.Ö. 200 yıllarında Fırat Nehri altında yapılmıştır. Bu tünel, 960 m uzunluğa, 3.80 m genişliğe ve 4.80 m yüksekliğe sahiptir. Su tünellerinin Mısırlılar ve Romalılara kadar dayandığı görülmektedir (Bozkurt, 1969).

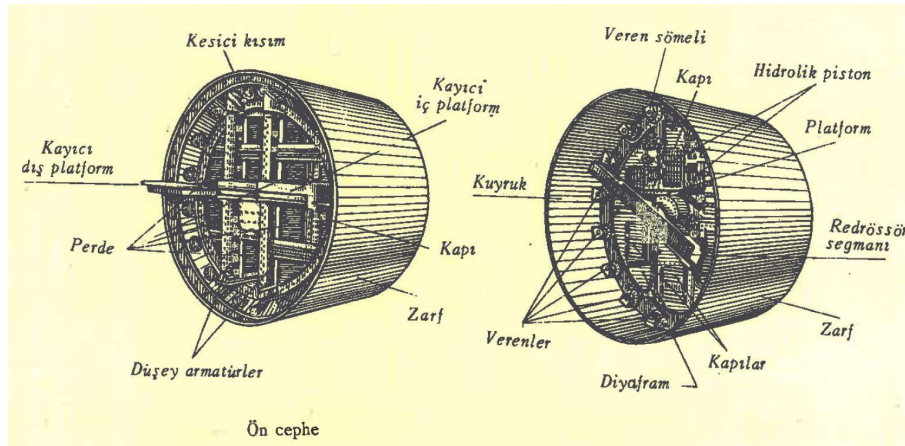
Dönemin olanaklarına bakılınca nispeten ilkel sayılabilecek yöntemlerle yapılan, Georg Bauer'in 1556 tarihli "De Re Metallicas Georg" adlı eserinde var olan bir

madencilik yöntemi tünel açma yöntemi olarak 350 yıl boyunca kullanılmış, uzun yıllar tünelcilikte bir gelişme yaşanmamıştır. Dünyada açılan en eski tüneller ve bu tünellerin uzunlukları Çizelge 2.1’de verilmiştir (Kolymbas, 2005).

Çizelge 2.1 : Dünya’da bilinen en eski tüneller (Kolymbas, 2005)

İsim	Konum	Yapım Yılı	Uzunluk (km)
Eupalinos Tüneli	Yunanistan	MÖ 500	1
Urner Loch	İsviçre	1707	14
Fritchley Tüneli	İngiltere	1793	0.15
Mont-Cenis	Fransa-İtalya	1857-1870	12
St. Gotthard Demiryolu Tüneli	İsviçre	1872-1878	15

Kanal taşımacılığının 17. yy.da başlamasıyla tünelcilikte önemli bir adım atılmış, 18 ve 19. yy.da endüstri devrimi ile beraber kanallar ve tünelcilik gelişmiştir. Ayrıca mühendislik ve demiryollarının da gelişmesiyle kanal yolunda inşa edilen tüneller özellikle Avrupa ve Amerika’da 19. yy.da hızla artmıştır. Ulaşım ve su taşıma ihtiyacı nedeniyle, tünelciliğin de gelişmesiyle su altı tünelleri ortaya çıkmıştır. Bu tünellerin yapımında yatay olarak yerleştirilmiş kerestelerden oluşan özel bir kazı aracı geliştirilmiş, kirişler yardımıyla kazı yapılmış, kirişlerin daha ileri yerleştirilmesiyle kazı devam etmiştir. Bu kapsamda 19. yy.ın başlarında Fransa’da Şekil 2.1’de gösterilen, günümüzde TBM’ye benzeyen Bukliye Metodu ile ikiz tüneller açılmıştır. 19. yy.ın sonlarına doğru Manş Denizi’nde denizaltı tüneli açmak için öncelikle basınçlı havalı bir makine ile az sert ve homojen kalker zeminde 21 m/gün’lük hızla zemin delinerek 2 adet 2.13’er m çapında keşif galerisi bu yöntemle açılmıştır (Bozkurt, 1969).



Şekil 2.1 : Bukliye makinesi parçaları (Bozkurt, 1969).

Gelişen endüstri ile demiryollarının gelişmesi, eğimi az yarıçapları büyük olan tünel yapımını zorunlu hale gelmiştir. 1826'da ilk demiryolu tüneli Fransa'da inşa edilmiştir. Büyük yarıçaplı tüneller kanalizasyon sistemi amacıyla ve nehir içinden geçilmesi amacıyla ABD'de ise 1893'te açılmıştır. Karayolu tüneli inşaatı Avrupa ülkelerinde ve ABD'de trafik şiddetinin artmasıyla büyük bir yer tutmaya başlamıştır (Bozkurt, 1969). Dünyada açılan en uzun tüneller ve bu tünellerin uzunlukları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : En uzun tüneller (Kolymbas, 2005; Url-1, 2010; Url-2, 2016)

İsim	Konum	Yapım Yılı	Uzunluk (km)
New Gotthard	İsviçre-İtalya	1999-2016	57
Seikan	Japonya	1946-1988	54
Avrupa Tüneli	Fransa-İngiltere	1986-1993	50
Lotschberg Demiryolu Tüneli	İsviçre	2007	34.7
Laerdal Karayolu Tüneli	Norveç	2000	24.5
Simplon 1	İsviçre-İtalya	1898-1906	20
Grand Apennin	İtalya	1921-1930	19

Türkiye'de ise demiryolu, karayolu ve su tüneli gibi amaçlarla açılan tünel çeşitleri bulunmaktadır. Türkiye'de 1950'li yıllarda açılmaya başlanan karayolu tünellerinin genel amacı daha çok doğal afetlerden korunmaktır. 1980'lerin sonlarında otoyol yapımının hız kazanmasıyla beraber Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi tünelticilikte kullanılmaya başlanmıştır. Böylece tünel uzunlukları artmış, 1990'lı yılların başlarında çift tüp tünel yapımına da başlamıştır. Tünel uzunluğu 2000'li yıllarda 5 km ve üzerinde, 2010'lu yıllarda ise 15 km'ye kadar artmıştır (Ünal, 2017). Türkiye'nin en uzun tüneli, Rize'nin İkizdere ile Erzurum'un İspir ilçeleri arasında yer alan Şekil 2.2'de gösterilen Ovit Dağı Geçidi'nde TBM ile açılmış, dünyanın 3. çift tüplü en uzun tüneli 14.3 km ile Ovit Tüneli'dir. Bu tünel yoğun kar yağışı nedeniyle kış mevsiminde 5 ay trafiğe kapanan İkizdere - İspir arası yolu yılın tamamında trafiğe açık hale getirdi (Url-3, 2018; Aksu, 2017).



Şekil 2.2 : Rize’de açılan Ovit Tüneli (Url-3, 2018).

2.3 Tünel Çeşitleri

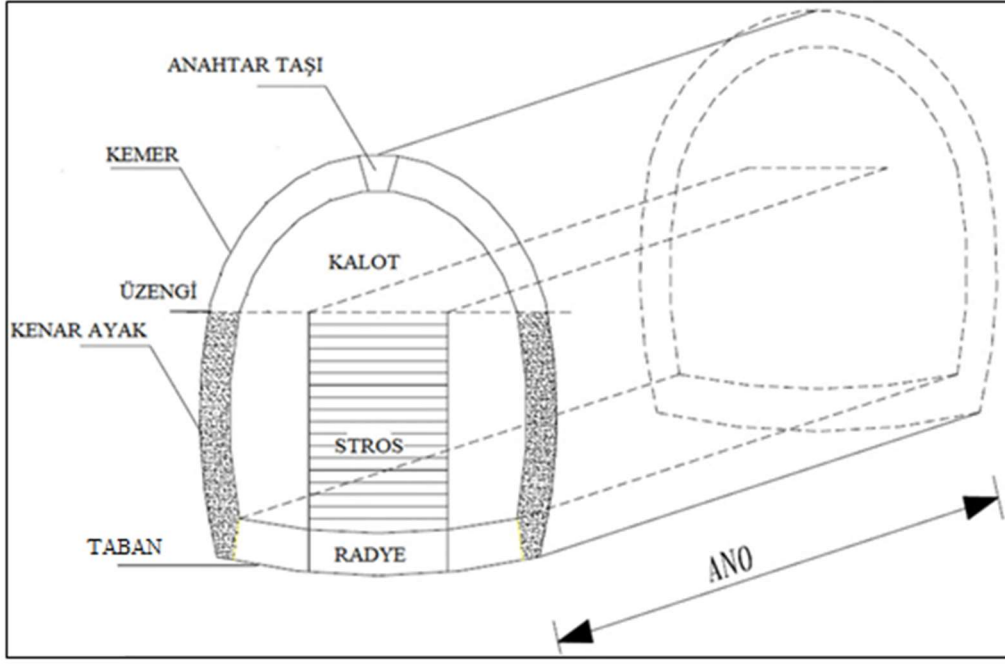
Tünellerin açılacağı zemin koşulları, arazinin topoğrafyası, tünel güzergahı, tünellerin yapım amacı, tünellerin şekillerini ve tünellerin kazı yöntemlerini etkilemektedir. Bu bakımdan tünelleri amaçlarına göre ve kazı şekillerine göre ayırmak mümkündür.

İhtiyaç sonucunda doğan tüneller, çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bu bakımdan karayolu, demiryolu, yaya, kanal ve metro tünelleri olarak sınıflandırılan bu tünellerin enkesitleri, genişlik ve yükseklikleri tünellerin işlevine göre belirlenmektedir.

Tünel kazı yöntemleri ise tünelin bulunduğu zemin türüne göre seçilmektedir ve buna bağlı olarak bu yöntemler, yumuşak zeminde ve sert kayada açılan tüneller olarak 2’ye ayrılmaktadır. Tünellerin çeşitleri aşağıda kullanım amaçlarına ve tünellerin kazı şekillerine göre sınıflandırılmıştır.

2.3.1 Amaçlarına göre tüneller

Tüneller yapım amaçlarına göre karayolu, demiryolu, yaya, kanal ve metro tünelleri olarak sınıflandırılmaktadır. Tünel yapım sebebi, yapılacak tünelin enkesit türünün belirlenmesinde etkilidir. Bir tünel enkesitinde bulunan kavramlar Şekil 2.3’te gösterilmiş, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Köse ve diğ., 2007):



Şekil 2.3 : Tünel enkesiti (Köse ve diğ., 2007).

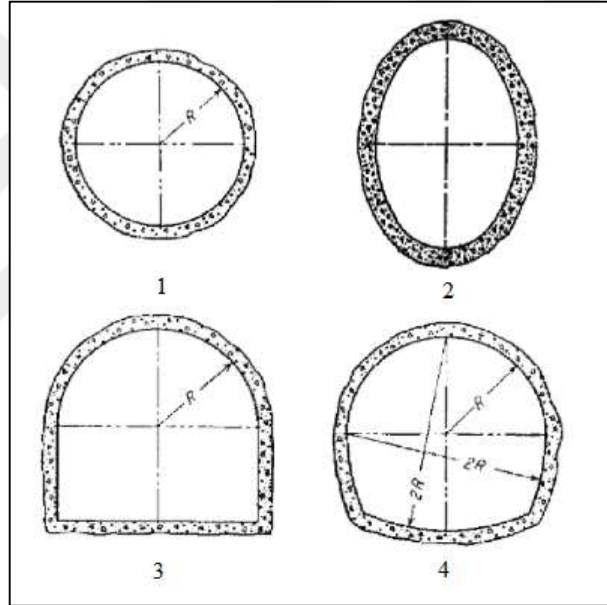
- Kalot: üzenginin üst kısmında kalan enkesit alanıdır.
- Stros: çekirdek olarak da bilinen bu bölge, üzenginin alt kısmında kalan enkesit alanıdır.
- Radye: tünelin kenar ayaklarının altında bulunan taban kısmıdır.
- Ano: zeminin türüne ve tünel açma yöntemine göre uzunluğu değişen, tünel açma işlemlerinin düzenli olarak yapıldığı tünel bölümüdür.
- Kemer: kenar ayakları birleştiren üst kısımdır.
- Anahtar taşı: günümüzde artık kullanılmayan, tünelin en üst noktasında bulunan, kemerin iki taraftan birleştiği yerde bulunan kısımdır.
- Kenar ayak: yan duvar olarak da bilinir ve radyeden üzengiye kadar tünelin iki yanında bulunan duvarlardır.
- Üzengi: kemer ile kenar ayak arasından geçen çizgidir.

2.3.1.1 Karayolu tünelleri

Ekonomide önemli parametrelerden biri olan ulaşım sektörü, kalkınmada da etkin bir araç olarak kullanılmakta olup karayolu yatırımlarının, kamu hizmetleri arasında sosyal, kültürel, ticari, ekonomik ve diğer pek çok boyutta önemli bir etkisi vardır.

Dolayısı ile bu alanda yapılan yatırımlar lokomotif görevi üstlenerek diğer sektörlerin daha etkin ve verimli olmasını sağlamaktadır (Erdoğan, 2016; UDHB, 2013). Karayollarının sosyal ve ekonomik olarak sağladığı faydaları; üretim ve istihdamın artırılması, üretim maliyetinin düşürülmesi, tüm sektörlerde verimliliğin artması, yol yapımının ekonomiye olan doğrudan veya dolaylı olumlu etkileri, arazi planlaması, kullanımı ve bölgesel gelişime olan olumlu etkileri, iş ve sosyal amaçlı taşımacılık talebinin karşılanmasıyla insanların ve malların istenildiği zamanda istenildiği yerde bulundurulması, en önemlisi ise zaman faydasıdır (Erdoğan, 2016).

Bu karayolu ve tünellerinin şekilleri elips, tam kemer, nal veya dairedir ve bu şekiller değişken çapları ile Şekil 2.4'te 1 numaralı şekilde daire, 2 numaralı şekil elips, 3 numaralı şekilde tam kemer ve 4 numaralı şekilde ise nal şeklini göstermektedir.



Şekil 2.4 : Tünel enkesit şekilleri (URL-4, 2018).

Elips şeklindeki tünellerin yatay genişliği düşeye göre daha uzun olduğu zaman tünel kazı hacmi oldukça düşer ancak zeminin tünele yapacağı itki artar ve tünel içi deplasman miktarları büyür. Bu yüzden düşey genişliği yataya göre daha büyük olan elips şekli veya tam kesit tünel karayolu tünellerinde tercih edilir. %2-%4'lük eğimlere göre projesi yapılabilen karayolu tünellerinde bu eğim aralığından daha fazlası tünelde görüş açısının daralması ve tünel içi havalandırmanın yetersiz kalması bakımından yapılmamalıdır. Uzunluğu fazla olan karayolu tünellerinin havalandırma sistemi ve yangın güvenliğinin sağlanması tünelin projelendirilmesinde oldukça etkilidir. Tüneller tek yönlü veya gidiş- geliş iki yönlü olarak iki şerit halinde kazılabilir. Günlük

trafik hacmine göre karayolu tünel enkesiti seçilir. 6 m'lik bir otoyol ve 1'er m'lik 2 adet yaya yolu genel olarak Őehirler arası tünellerin yol geniŐliĐidir. Şehir içlerinde açılan tünellerin genişlikleri ise trafik yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir (Bozkurt, 1983).

2.3.1.2 Demiryolu tünelleri

Tünel enkesitinin genelde tek hatlı demiryolunda nal Şeklinde, ift hatlı demiryolunda ise tam kemer Şeklinde olduğu bu tüneller çift hatlı demiryollarının genişliği tek hatlı demiryolu genişliğinin yaklaşık 2 katı olan, havalandırma sistemleri için yeterli yüksekliğe sahip, aracın tavanı ile tünel tavanı arasında 1.20 m'den fazla boşluk bulunan tnellerdir. UDHB (2018), demiryollarının tercih edilme nedenleriyle ilgili olarak demiryolunun geçtiği yerlerin ekonomik, sosyal, ve kültürel gelişimine büyük katkı sağladığını, ekonomik, ağır ve yüksek hacimli yükler için genel itibariyle daha uygun fiyatlı taşıma sağladığını, vagonlar vasıtasıyla tek seferde ve uygun maliyetle daha çok yolcu taŐımacılıĐına imkan verdiğini ve lojistik sektörünün geliŐmesini sağladığını belirtmiştir. Demiryollarının bu faydalarına rağmen, tüm gelişmiş ülkelerde ulaŐımda demiryolları önemli bir paya sahip olup Türkiye'de 1950'lerden itibaren eski önemini kaybetmiŐ, ulaşım üstünlüğünü karayollarına bırakmıŐtır (ağlıyan ve diğ., 2013).

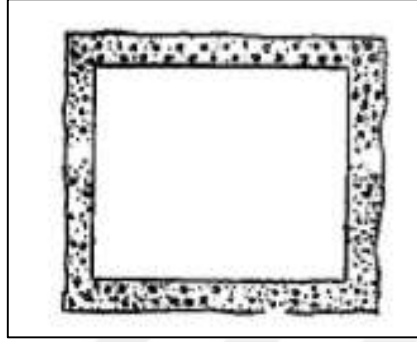
Gotthard Base demiryolu tüneli Kuzey ve Güney Avrupa arasındaki İsviçre Alp'leri'nin altında 2012-2016 yılları arasında tamamlanmış, 57 km uzunluğu ile Şekil 2.5'te kesiti gösterilen dünyanın en uzun demiryolu tnelidir (Url-2, 2016).



Şekil 2.5 : İsviçre'de açılan Gotthard Base Demiryolu Tüneli (Url-2, 2016).

2.3.1.3 Yaya tünelleri

Enkesit şekillerinin daire, kemerli veya Şekil 2.6’da gösterilen dikdörtgen kesit olarak inşa edilebildiği, genişliğinin en az 3 m, yüksekliğinin ise en az 2.50 m olduğu tünellerdir (Sarıkaya, 2018).



Şekil 2.6 : Dikdörtgen tünel kesiti (Url-4, 2018).

2.3.1.4 Kanal tünelleri

Genellikle tam kemer şeklinde inşa edilebilen, daha çok nehir ulaşım tüneli olarak kullanılan bu tünellerin enkesit şeklinin, genişlik ve yüksekliğinin belirlenmesinde tünelin içinden geçecek olan tekne, gemi gibi araçların türü ve boyutları etkilidir (Bozkurt, 1983). İngiltere’de açılan Standedge Kanal Tüneli Şekil 2.7’de gösterildiği gibi tam kemer şeklinde açılmıştır (Url-5, 2017).



Şekil 2.7 : İngiltere’de açılan Standedge Kanal Tüneli (Url-5, 2017).

2.3.1.5 Metro tünelleri

Şehir yaşamında alternatif ulaşım yollarından biri, şehir içlerinde kullanılan hızlı ve rahat taşımacılık için geliştirilen raylı sistem olan metrolardır. Metrolar her bölgedeki belli insan popülasyonuna göre istasyon sayılarına ve kapasitelere sahiptir. Metro hatlarının en önemli özelliklerinden biri diğer karayolu ve demiryollarıyla kesişmeyerek genellikle hızlı ve pratik ulaşım araçları olarak şehir içlerindeki trafiği engellememiş olmalarıdır (Sarıkaya, 2018).

Bu tünellerin şekilleri kemerli, elips veya daire şeklinde olup genellikle tek hatlı tünellerde genişlik ve yükseklik yaklaşık olarak aynıdır. Çift hatlı tünellerde ise genişlik ve yükseklik değişkendir. Fakat bu büyüklükler metro tünellerinde araç sayısına, aracın ticari hızına, araçta bulunan koltuk ve kapı sayısına ve bunların genişliğine bağlı olarak konfor derecesine, araçların birbirini takip mesafesine, sinyalizasyona ve ücret toplama sistemine göre tünellerin enkesit genişlikleri, yükseklikleri ve şekilleri seçilir. Genel olarak metro tünellerinin enkesit alanları değişken olup tek veya çift hatlı olarak açılır. Bu tünellerde yangına karşı önlemler alınır ve yangın sistemleri kurulur (Peila ve diğ., 2019).

2.3.2 Kazılma şekline göre tüneller

Tünellerin kazılma yöntemlerinde, zeminlerin geoteknik koşullarına bağlı olarak farklılıklar oluşmaktadır. Bu yüzden tüneller içinden geçtikleri zemin koşullarına göre yumuşak zeminlerde ve kayalarda açılan tüneller olmak üzere sınıflandırılmaktadır.

2.3.2.1 Yumuşak zeminlerde açılan tüneller

Şehir içlerinde trafik yoğunluğunun artmasıyla tünel açılması zorunlu hale gelmiştir. Bu tüneller genel olarak sığ ve mukavemeti düşük killi (yumuşak) zeminlerde de açılmaktadır. Bu tür zeminlerin taşıma gücü düşüktür, genellikle zemin suya doygunudur. Dolayısıyla suyun uzaklaşmasıyla beraber yüzey deplasmanları oluşur. Bu tür zeminlerde tünel açılmaya başlandığında tavan ve yan duvarlar kendini tutamayacağı için hemen destek yapılmalı, tabanda oluşabilecek kabarma ve çukurlaşmaların önüne geçilmelidir (Köse ve diğ., 2007).

Yeraltı suyu pompa, sondaj kuyusu gibi yöntemlerle tünele zarar vermeden önce drene edilerek tünelden uzaklaştırılmalıdır. Özellikle killi ortamlarda açılacak tüneller için bulunduğu kil zeminin özellikleri doğru belirlenmelidir. Oluşabilecek tüm olumsuzları

ve deplasmanları azaltmak için tünel aynası desteklenmeli ve yapılan tahkimat sistemi uygun olmalıdır (Chou ve Bobet, 2002). Ayrıca, tünel açılmadan önce tünelin çevresinde stabiliteyi sağlamak amacıyla zemini iyileştirmek için enjeksiyon, zemin dondurma gibi yöntemler kullanılarak oluşabilecek olumsuzluklar (zararlar) nlenebilir. Yumuşak zeminlerde tünel açma yöntemlerinden birisi kalkanla tünel açma yöntemidir. Kalkan (bukliye) esas olarak elik silindir şeklinededir. Bu aygıt tünel boşluğunu çevreleyerek, zemine destek sağlamak suretiyle kaplamanın yapımına destek gerektirmeden kazı yapılmasına izin vermektedir. Tünel kazısında tam kesit halinde ilerlemeyi sağlayan bu aygıt, yapılmış olan son kaplama kenarından destek alarak ileri doğru solucan hareketine benzer bir hareketle itilmekte ve keskin ucu sayesinde zemine gömülerek kazının yapılmasını sağlamaktadır. Bir diğer yumuşak zeminde tünel açma yöntemi ise boru srmeyle amadır. Bu yöntemde dışarıda imal edilmiş borular, krikolar yardımıyla arka arkaya zemine sürülmektedir (ztrk, 2007).

2.3.2.2 Kayada açılan tüneller

Granit, mermer, kireçtaşı vb. gibi sert kayalarda tünel kazısı teknik ve ekonomik açıdan değerlendirildiğinde günümüzde temel 2 adet açılma yöntemi mevcuttur. Bunlardan birincisi kazıcı makinelerle gerçekleştirilen mekanik kazı ikincisi ise patlayıcı madde enerjisinin kayaç kazısında kullanıldığı patlatmalı kazıdır. Teknik ve ekonomik açıdan değerlendirildiğinde belirli dayanıma sahip kaya kütleleri için patlatmalı kazı çalışmaları kaçınılmaz olarak uygulanmaktadır (Karakuş ve diğ.,2018).

Patlatmalı kazı yöntemi yüz yılı aşkın bir süredir tünel kazı yöntemi olarak kullanılıyor olup kaya kendi kendini taşıyabildiği için genellikle kayada açılması bir sorun yaratmamaktadır. Bu yöntemde önceden belirlenen bir patlatma düzenine göre aynada delgi yapılır ve şekil 2.8’de gösterilen patlatma deliklerine belli miktarda patlayıcı yerleştirilir. Bu deliklere yerleştirilen patlatıcı önce i merkez deliklerinden başlamak üzere mikro saniye farklarla patlatılır. Patlatma gerçekleştirildikten sonra tünel havalandırılır ve tünel yüzeyindeki kavlaklar alındıktan sonra çıkan pasa malzemesi tünel dışına atılır.

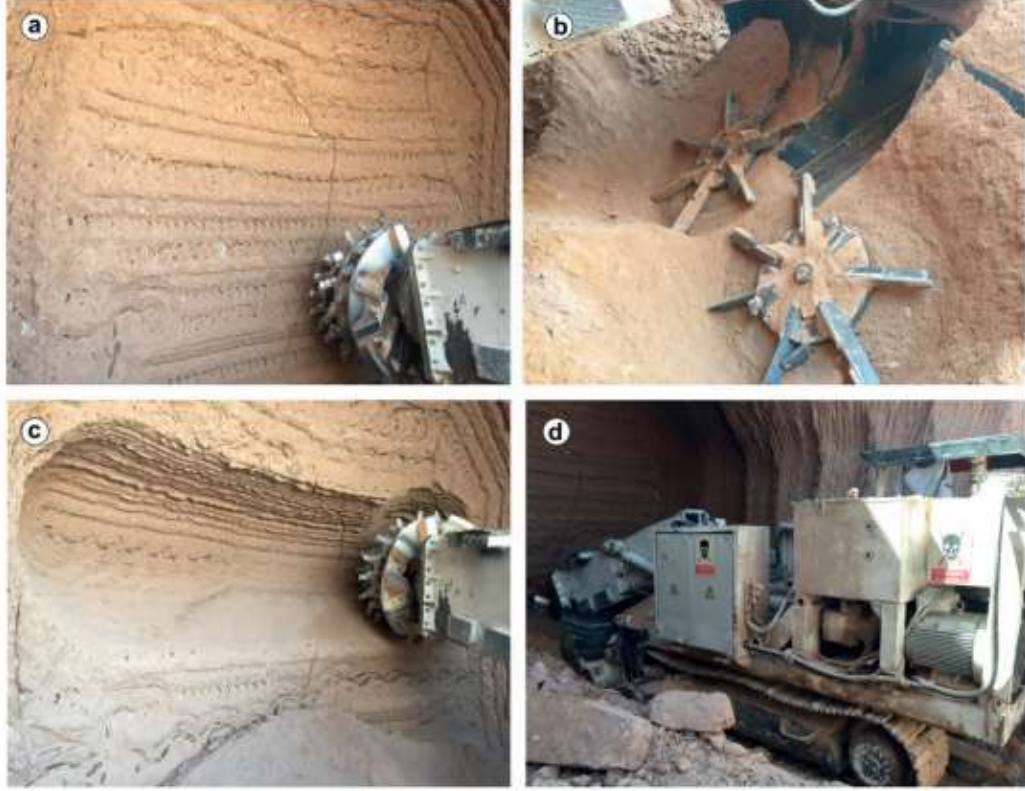


Şekil 2.8 : Açılan deliklere patlayıcı yerleştirilmesi (Cebeci Tüneli).

Diğer taraftan kazı miktarlarının fazla olduğu şehir içi altyapı, inşaat, yaşam alanı projelerinde kaya kütlelerinin parçalanması kadar önemli bir diğer konu patlatma sonucu oluşan çevresel etkilerin en aza indirilmesidir. Patlayıcı madde kullanılarak kazı yapılacak şehir içi tünel projesinde ise patlatma tasarımı proje çevresindeki yapıların patlatma sonucu oluşacak titreşimden olumsuz etkilenmemesi gözetilerek gerçekleştirilmektedir (Karakuş ve diğ., 2018).

Mekanik kazı yönteminde çeşitli aygıtlar kullanılarak kazı yapılmaktadır. TBM, ekskavatör, kollu tünel açma aygıtı bu aygıtlardan birkaçıdır (Köse ve diğ., 2007).

Kollu galeri açma makineleri (KGAM), madencilik ve tünelcilik kazılarında sıklıkla başvurulmuş mekanize kazı ekipmanlarından birisidir. Mekanize kazı sistemleri patlatmalı kazı yöntemine göre yüksek ilerleme hızı, güvenli çalışma ortamı ve minimum yer sarsıntısı gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Tüm üstünlüklerine karşın, KGAM’ler de diğer mekanize kazı sistemleri gibi kazılacak olan zeminin geoteknik koşullarına uygun olarak seçilmelidir ve kazı performansları proje öncesi belirlenmelidir. KGAM’nin parçaları, kazı sırasındaki durumu ve genel görünüşü Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Bir kazı makinesinin performansında net kazı hızı (NKH), keski tüketim hızı (KTH) ve makine kullanım oranı (MKO) olarak üç farklı bileşen dikkate alınmaktadır (Yaşar ve Yılmaz., 2018).



Şekil 2.9 : (a) Kesici kafa ve aynanın durumu (b) Toplayıcı ünitesi (c) Kazı durumu (d) Genel görünüş (Yaşar ve Yılmaz, 2018).

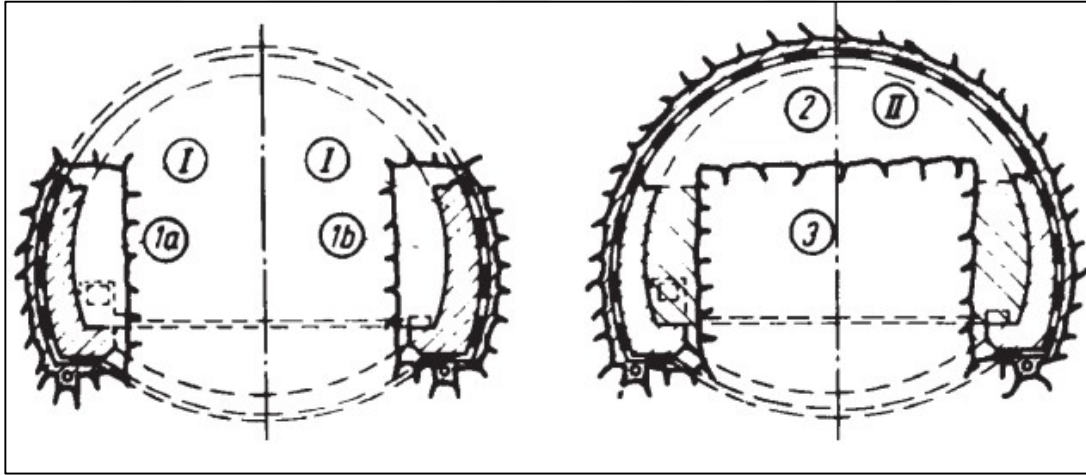
Sonuç olarak, sert kayada açılan tünellerde meydana gelebilecek sıkışma, aşırı sökülme veya kaya patlaması gibi durumları önlemek amacıyla tünelin geçeceği kaya kütle özelliklerinin iyi tespit edilmesi ve buna bağlı olarak tünel kazı yönteminin seçilmesi gerekmektedir (Yaşar ve Yılmaz, 2018).

2.4 Tünel Açma Yöntemleri

Tünel açma işlemlerinin ekonomik ve sağlam yapılması açısından çeşitli yöntemler oluşturulmuştur. Yeraltı kazıları gerek madencilik uygulamaları, gerek drenaj, sulama ve benzeri ihtiyaçları sağlamak gerekse de coğrafi engelleri aşma amaçlı olsun, geçmişten günümüze farklı coğrafyalarda uygulanmıştır. Yeraltı kazılarında kazı ve tahkimat sistemi benzer fakat uygulama sıraları farklı olacak şekilde çeşitli tünel açma yöntemleri ortaya çıkmıştır (Hemphill, 2013). 18. ve 19. yüzyıllar arasında uygulanmış olan ve klasik yöntemler olarak tanımlanan, birbirinden farklı sırada aşamalarla kazılan yöntemlerden Alman, Belçika, İngiliz, Eski Avusturya, İtalyan, İsviçre, TBM ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi aşağıda sırayla açıklanmıştır.

2.4.1 Alman Tünel Açma Yöntemi

Çekirdek yöntemi olarak da adlandırılan bu yöntem, son yıllarda geniş kesitli tünellerin alt yarı kazısında kullanılmaktadır. Bu yöntemle açılan tünellerin Şekil 2.10'da aşamaları numaralandırılmış olup, ilk adım '1a' ve '1b' ile gösterilen yan ayak galerilerinin açılması ve 'I' ile gösterilen ahşap desteklerin yapılmasıdır. 2. aşama olarak '2' ile gösterilen tavan galerisi açılır. Bunlar 'II' ile gösterilen ahşap geçici desteklerle tutturulur. Bu açılımı takiben yan kargir duvarlar inşa edilir ve daha sonra yan ayak galerilerinde tavan galerisine doğru bu duvarlar birleştirecek şekilde tünel boyunca galeriler açılır. Bu yöntemin son aşaması '3' ile gösterilen çekirdek bölümünün kazılmasıdır. Bu kazıdan sonra taban kaplanır ve tünel kazısı bitirilir. Bir anonun tamamlanması 7-8 aşamada gerçekleşir (Maidl ve diğ., 2013).



Şekil 2.10 : Kazıların yapılması ve desteklenmesi (Latin harfleri ile gösterilen numaralar kazıları, Romen rakamıyla gösterilen numaralar destekleri ifade etmektedir) (Maidl ve diğ., 2013).

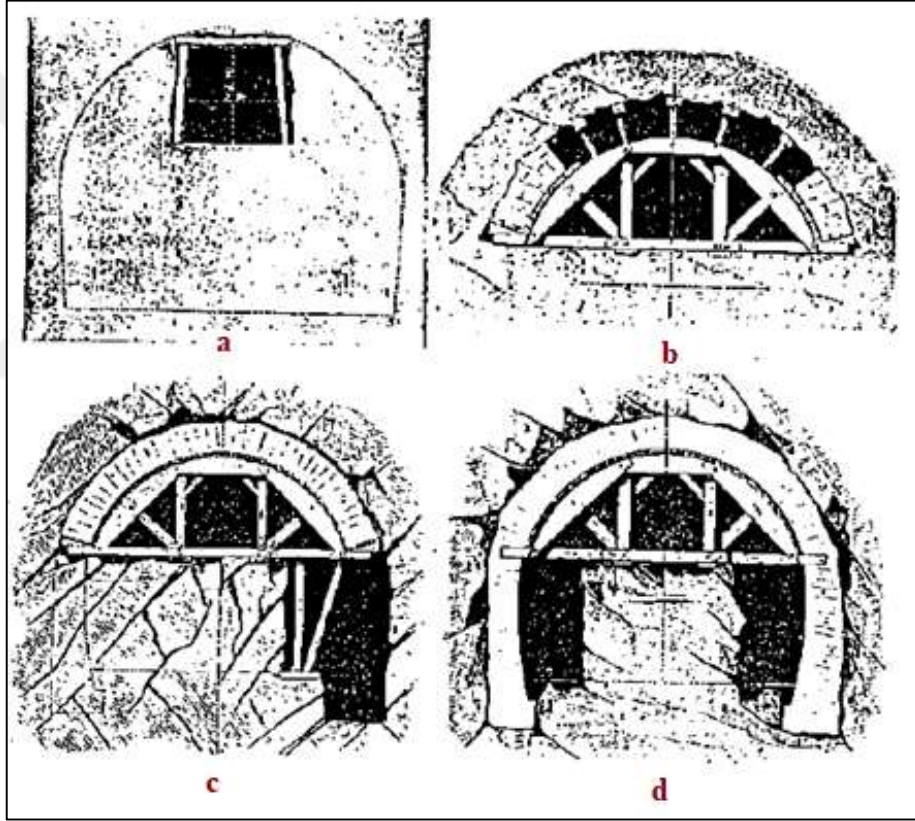
Bu yöntemin olumlu yanı, desteklerin tavan kemerinin altına inşa edilerek tavan güvenliğinin sağlanmış olmasıdır (Bozkurt, 1969).

Bu yöntemin olumsuz yanları (Bozkurt, 1969):

- Çalışma alanı dardır.
- Zaman kaybı yaşanır.
- Tünel kaplamasının hızlı bir şekilde tamamlanması gerekmektedir.

2.4.2 Belçika Tünel Açma Yöntemi

Belçika Tünel Açma Yönteminin ilk aşaması Şekil 2.11’de ‘a’ ile ifade edilen bölümde gösterilen tavan kazısının yapılması olup, tavan kazısının desteklenmesiyle devam eden tünel açımında daha sonra ‘b’ ile gösterilen üst yarıda tavan kenarları açılır. Üst yarı kazısı bitimiyle beraber tavan kaplaması tamamlanır. Yukarıdan aşağıya doğru kazının devam ettiği bu yöntemde kenar ayaklar ‘c’ bölümünde gösterildiği gibi kazılır ve ahşap kayıt ve payandalarla desteklenir. En son aşama olarak ‘d’ ile ifade edilen orta bölüm alınır. Tünel kaplamaları kargir duvardan veya betondan yapılarak tünel kazısı tamamlanır. Tünel yüksek basınç etkisindeyken tünele baca (kuyu) açılır ve bu baca betonla doldurularak zemin iyileştirmesi yapılır (Ayaydın, 1987).



Şekil 2.11 : Belçika Tünel Açma Yöntemi aşamalı kazı yapılması (Ayaydın, 1987).

Bu yöntemin olumlu yanları aşağıdaki gibidir (Sandström, 1963):

- Tavan kaplaması kısa sürede tamamlanabilir.
- Devamlı olarak kazı yapılabilir.
- Her aşamada ekip çalışabileceği için ilerleme hızı arttırılabilir.
- Kaya duraylılığı sağlanır.

Bu yöntemin olumsuz yanları aşağıdaki gibidir (Sandström, 1963):

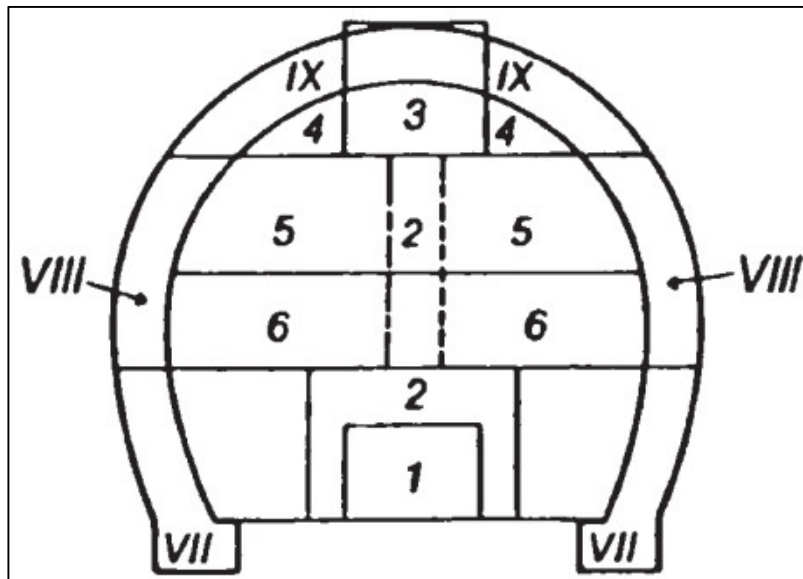
- Tünel içi kaplamalar hızlı bir şekilde yapılmalıdır.
- Çalışma alanı dardır.

2.4.3 İngiliz Tünel Açma Yöntemi

İlk kez 1830 yılında İngiliz demiryolu inşasında kullanılan bu yöntem sehpa yöntemi olarak da bilinir. Küçük kesitli tünellerde tercih edilen bu yöntem, bir sonraki bölümde anlatılacak olan Eski Avusturya Yöntemine benzemektedir. Kayaların sağlam ve az baskılı olduğu zeminlerde tercih edilir. Eski Avusturya Yönteminden farklı olarak, değişen jeolojik koşullara kolayca uyum sağlamaz ve ilerleme boyu daha düşüktür. Bu yöntemin uygulanabilmesi için örtü kalınlığının düşük olması gerekmektedir (Tonon, 2010).

2.4.4 Eski Avusturya Tünel Açma Yöntemi

Genellikle kesitleri geniş olan tünellerde tercih edilen bu yönteme göre öncelikle tavanda ve tabanda suyu drene etmek ve çıkan malzemelerin taşınması amacıyla drenaj boşlukları açılır. Daha sonra tavan kazıları tamamlanır. Kazının yukarıdan aşağıya doğru gittiği bu yöntemin diğer aşaması taban kazısının yapılmasıyla tamamlanır. Tünel kaplaması kazının aksine Şekil 2.12’de bulunan numaralandırma sırasıyla tabandan tavana doğru yapılır (Maidl ve diğ., 2013).



Şekil 2.12 : Tünel kaplama sırası (Maidl ve diğ., 2013).

Bu yöntemin olumlu yanları (Tonon, 2010):

- Çalışma alanının geniş olmasıdır.
- Her zemin türüne uygun olmasıdır.

Bu yöntemin olumsuz yanı: Ağaç tüketiminin çok olmasından dolayı maliyetinin yüksek olmasıdır (Tonon, 2010).

2.4.5 İtalyan Tünel Açma Yöntemi

1867 yılında geliştirilerek Alp Tünellerinde kullanılan bu yöntemin kullanıldığı zeminler plastik ve akışkandır. Kazı yapılmadan önce tünel aynası ve tünel iç çevresi rijit plakalarla kaplanır, kazının ilerlemesiyle beraber bu plakalar parça parça sökülür ve kazısı yapılan bölümler plakalarla kaplanır. Bu plakalar kalıcı olup sonradan tünel içine yapılan kaplama ile daha sağlam hale getirilir (Maidl ve diğ., 2013).

Bu yöntemin olumlu yanları (Tonon, 2010):

- Değişken zemin koşullarına uygundur.
- Deplasmanlar daha az olur.

Bu yöntemin olumsuz yanları (Tonon, 2010):

- İlerleme hızının çok düşük olmasıdır.
- Yüksek maliyette yapılmasıdır.

2.4.6 İsviçre Tünel Açma Yöntemi

Bu yöntemde ilk olarak pasa naklini sağlamak amacıyla tabanda boşluk açarak ilerlenir. Diğer aşamaların açılması ise bu bölümden tavana doğru tünelin kazılması ile olur. Yan duvarlar kazılarak tavandan aşağıya doğru tünelin kazısı devam eder. Tünelin kaplaması ise tabandan tavana doğru yapılır (Köse ve diğ., 2007).

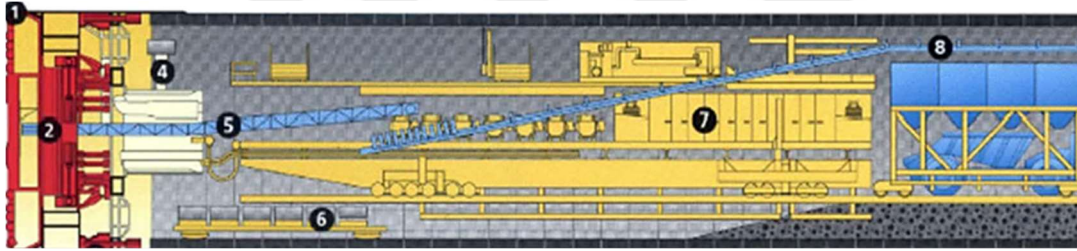
2.4.7 TBM (Tünel Açma Makinesi)

Yeraltı yapılarının kazılması sırasında yüzeyde bulunan yapıların zarar görmemesi için tünellerde mekanik kazı yöntemleri son 30-40 yıl içerisinde delme-patlatma yöntemlerine göre hızla yayılmıştır. Bunun nedenlerinden birisi, mekanik kazı makinelerden biri olan tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) ile tünel açmanın, uygun zemin şartlarında, uzun tünellerin açılmasında en ekonomik yöntem olmasıdır.

Ayrıca TBM yöntemi delme ve patlatma yöntemine göre 2–4 kat hızlı olabilmektedir (Barton 1999).

Amerikan bilim adamı Charles Wilson, 1851'de bir tünel açma makinesi geliştirmiş ve bu makine, modern anlamda bir TBM'nin tüm özelliklerine sahip olup, tüneli delerek işleyen ilk makine olarak sınıflandırılma olanağına sahip olmuştur. Daha sonraki yıllarda birçok araştırmacı tarafından TBM geliştirilerek günümüzdeki halini almıştır (Maidl ve diğ., 2008).

Tünel açma makineleri, kesici kafalı, itme silindirleri, artikülasyon silindirleri, gripper'lar (tutucu ayaklar), kesici kafa motorları, hidrolik ve elektrikli ekipman taşıyan yedek raylar, konveyörler ve havalandırma sistemi gibi çeşitli mekanik ve elektrikli parçalardan oluşmaktadır. Şekil 2.13'te 1 numara ile gösterilen parça kaya kesici başlık, 2. enerji ünitesi, 3. itici silindir, 4. erektör, 5. konveyör 1, 6. segment tutucu, 7. elektrik tuş takımı, 8. konveyör 2 olarak isimlendirilmektedir (Özgen, 2013).



Şekil 2.13 : TBM boykesiti (Özgen, 2013).

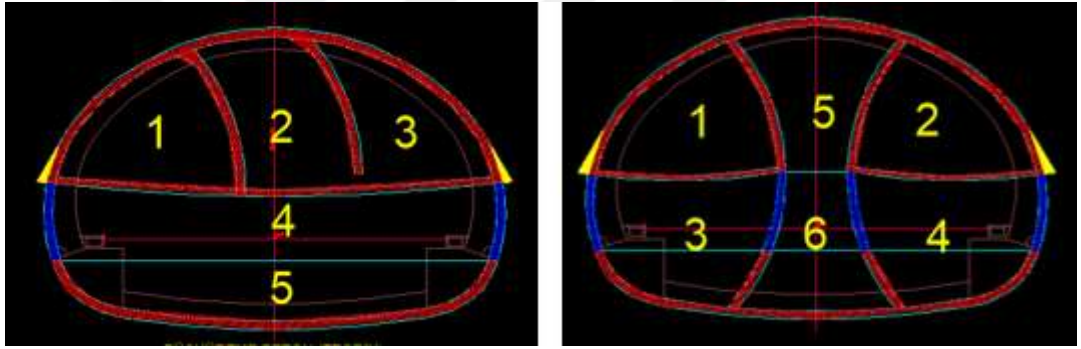
TBM'ler kazı, itme ve tutunma, pasa toplama ve taşıma-tahkimat sistemi olmak üzere 4 adet çalışma sisteminden oluşmaktadır. Kazı sistemi temel olarak kazı aletleri veya kesici diskler, kazılan malzemeyi toplayan toplayıcı kürek, kesici disklerin monte edildiği delikler ve kesici kafadan oluşan, kesici disklerin kazılan malzemenin türüne ve özelliklerine göre farklı yapıda ve sayıda olduğu bir sistemdir. İtme ve tutunma sistemi, TBM performansını etkileyen bir unsur olup bu sistem hidrolik pistonlar aracılığıyla ileri doğru itme kuvveti sağlayarak kazının ilerlemesine yardımcı olmaktadır. Pasa taşıma sistemi ise TBM tiplerine göre farklılık gösteren, fakat genel olarak kesici kafadaki kovalardan boşaltılan kazı malzemesinin helezon konveyör ile taşınmasının ardından bant konveyör veya vagonlarla dışarı atılmasından oluşmaktadır. Sağlam kaya koşullarında herhangi bir destek gerekli değildir. Kaya koşullarının zayıf olduğu durumlarda kayanın kendini tutma süresi azaldığı ve bu durumda kayanın düşmesini önlemek amacıyla tünelin tavanında, kesici kafanın

arkasına ve yanlarına doğru uzanan bir kalkanın gerekli olduğu TBM destek sisteminde zeminin daha kötü olduğu durumlarda makineyi tamamen kapatan silindirik bir kalkan bulunmaktadır (Maidl ve diğ., 2008).

2.4.8 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ilk olarak 1946 yılında Rabcewicz tarafından Avusturya Alplerinde tecrübe edilmiş, 1969'da Frankfurt metrosu bu yöntemle açılmıştır. Bu yöntemin ana prensipleri, kazı yapılan yerdeki kayayı güçlendirmek ve bu esnada bir miktar deplasmana izin vererek kayayı kayaya taşıtmaktır (Rabcewicz, 1946).

NATM tüneli zemin koşullarına göre sınıflandırmakta olup Şekil 2.14'te farklı zemin türlerinde delme patlatma veya mekanik kazı yöntemleriyle açılan farklı aşamalandırılmış NATM kazı aşamaları ve sıraları verilmiştir.



Şekil 2.14 : Tünel kazı aşama sıraları.

1.aşamanın kazılmasını takiben tahkimat sistemi yapılır. Bu aşamayı önceden belirlenen mesafeye göre diğer aşamalar sırayla takip eder. Kazının fazla ilerlemesine müsaade etmeyerek, önce izin verilen deplasman miktarı tamamlandıktan sonra tüm aşama kazıları tamamlanmalı, püskürtme beton kaplaması, tahkimat sistemi ve varsa invert betonu dökülerek ring tamamlanmalı, oluşabilecek göçmelerin önüne geçilmelidir. Bu yöntem Bölüm 4'te ayrıntılarıyla açıklanmıştır.



3. KAYA SINIFLANDIRMA SİSTEMLERİ

Kaya kütlesi içinde veya üzerinde yapılan mühendislik yapılarının ekonomik ve güvenilir olarak inşa edilebilmesi için dayanım özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir (Berber ve diğ., 2015). Zaman içerisindeki mühendislik uygulamalarındaki artan tecrübeye bağlı olarak, geoteknik araştırmalar sırasında karşılaşılan farklı özelliklerin gruplandırılmasına ihtiyaç duyulmuş, benzer davranış gösteren kaya kütlelerini gruplar altında toplamayı amaçlayan kaya kütlesi sınıflama sistemleri geliştirilmiştir. Uzun yıllardır yeraltı yapıları projelerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Sınıflama sistemleri basit, kolayca hatırlanabilecek ve anlaşılabilir, kullanılan her terimin açık ve anlaşılır olduğu, önemli kaya özelliklerini içerecek, ucuz ve çabuk yapılabilecek deneyler sonucu elde edilebilen ve ölçülebilen verilere dayalı, tahkimat tasarımı için sayısal veri sağlayabilecek şekilde olmalıdır (Pariseau, 2007).

Kazı tahkimat sisteminin belirlenmesi, tünelin göçmeden tahkimatsız durabileceği maksimum zamanın tahmin edilmesi, kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon davranışlarının sayısal tanımlamalara dönüştürülmesinde kullanılan çok sayıda yaklaşımda girdi parametresi olarak Terzaghi, Lauffer, RQD, RMR, Q, GSI ve NATM sınıflandırma sistemleri kullanılmaktadırlar. Bu sistemleri oluşturan araştırmacılar, sistemin nasıl işlediği, tahkimat sistemlerine nasıl ulaşıldığı detaylı olarak aşağıda açıklanmaktadır.

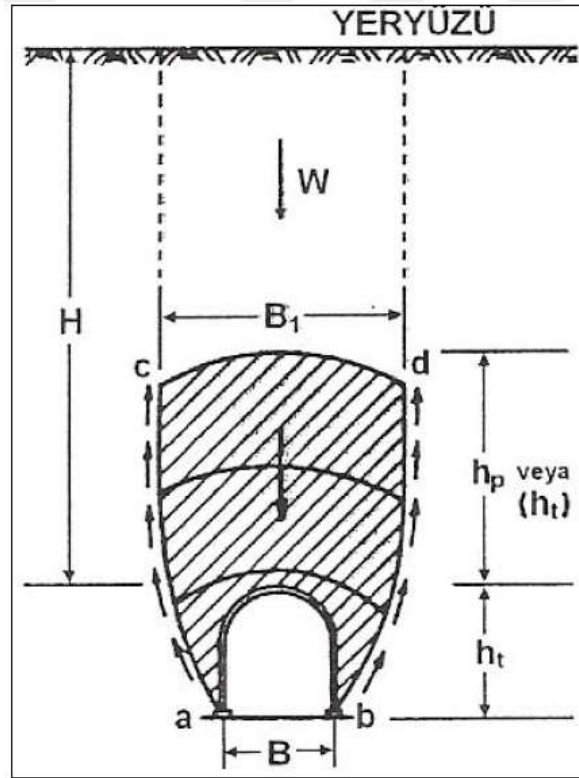
3.1 Terzaghi Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi

1946 yılında sınıflandırma yapan Terzaghi, çelik iksa tahkimat sistemini belirlemek amacıyla kaya kütlelerinin sınıflandırılmasının temellerini atan kişidir (Hoek, 2000). Bu kaya sınıflama sisteminde kayalar sağlam kaya, tabakalı kaya, orta derecede eklemlili kaya, bloklu ve damarlı kaya, ezilmiş kaya, sıkışan kaya ve şişen kaya olarak gruplandırılmıştır (Terzaghi, 1946).

Terzaghi'nin sisteminde kaya sınıfları tanımlanmış olsa da bu sistem kaya kalitesinin objektif değerlendirilmesi için fazla geneldir. Ayrıca, kaya kütlesi özelliklerinin

ölçümü ve sayısal değerlendirmesine bağlı olarak yapılan bir sınıflandırma yöntemi değildir (Karpuz ve Hindistan, 2012)

Terzaghi kaya kütlesi içinde tünel inşasıyla ilgili olarak kaya kütlesinin yükünü tanımlamıştır. Buna göre tünelin kazılmasıyla beraber, açılan boşluğun yanlarında ve tavanında gevşeyen kaya kütleleri oluşacaktır. Tünelde açılan bu boşluğa doğru hareket etmek isteyen, 'abcd' alanında bulunan bu kayaları Şekil 3.1'de gösterilen 'ac' ve 'bd' arasındaki sürtünme kuvvetleri tutmaya çalışacaktır. Arazi yükü olan 'W'nun bir kısmı bu sürtünme kuvvetleriyle açılan boşluğun çevresinde bulunan kaya kütlelerine aktarılacaktır. Geriye kalan yükü 'h_p' tünelin tavanının ve yanlarının taşınması gerekmektedir. Burada 'B₁' kaya kütlesinin özelliklerine, tünel genişliğine 'B' ve tünel yüksekliğine 'h_t' bağlıdır (Terzaghi, 1946).



Şekil 3.1 : Kaya kavramı, sınırları ve boyutlandırılması (Terzaghi, 1946).

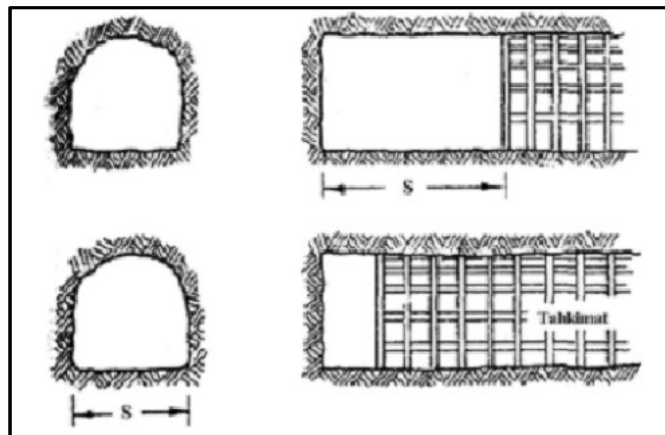
Buna göre Terzaghi'nin kaya durumuna, tünel taban genişliğine ve tünelin yüksekliğine bağlı olarak önerdiği tahkimat sistemi, Deer ve arkadaşları (1970) tarafından geliştirilmiş haliyle Çizelge 3.1'de görülmektedir. Buna göre sistem gereğinden fazla tahkimat önermektedir (Karpuz ve Hindistan, 2012).

Çizelge 3.1 : Terzaghi kaya sınıflandırması ve tahkimat sistemi (Deer ve diğ., 1970)

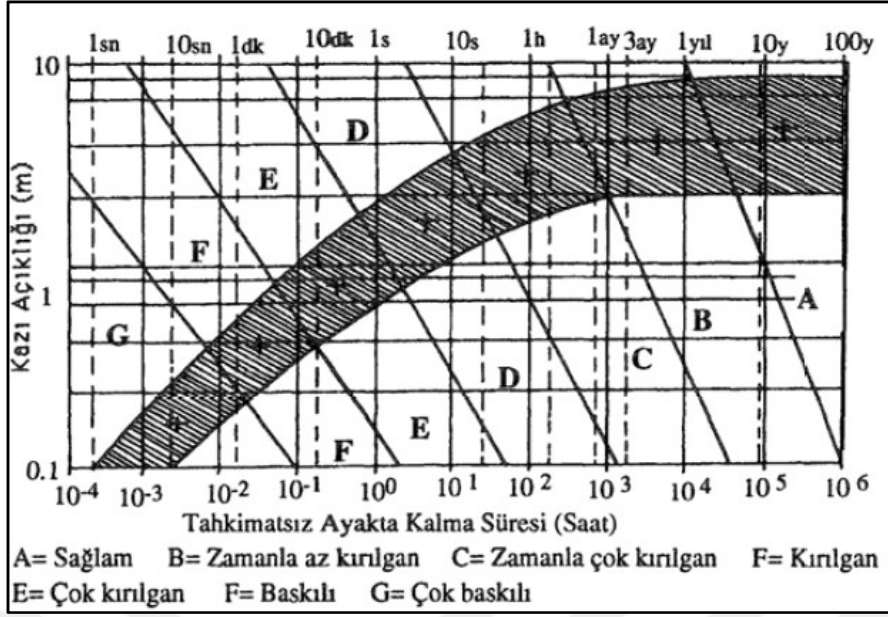
No	Kaya Durumu	Kaya Yüklü Yüksekliği (m)	Notlar
1	Sert ve sağlam	0	Küçük kavraklaşmalar varsa hafif kaplama gerekir
2	Sert tabakalı veya şistoz	0-0.5 B	Az tahkimat, kaya düşmelerini engellemek amacıyla
3	Masif, orta eklemlili	0-0.25 B	Yük düzensiz olarak değişebilir
4	Orta derecede bloklu ve damarlı	0.25 B-0.35 (B+ht)	Yan basınç yok
5	Çok bloklu ve damarlı	0.35- 1.1 (B+ht)	Az veya hiç yan basınç yok
6	Tamamen kırılmış fakat kimyasal olarak sağlam	1.1 (B+ht)	Önemli yanal basınç, dairesel bağlar kullanılabilir
7	Sıkışan, ezilmiş kaya orta derinlik	1.1-2.1 (B+ht)	Yüksek yanal basınç, dairesel çelik destek takviyesi
8	Sıkışan kaya büyük derinlik	2.1-4.5 (B+ht)	Yüksek yanal basınç, dairesel çelik destek takviyesi
9	Şişen kaya	75 m'ye kadar (B+ht) değerinden bağımsız	Dairesel çelik destek gerekli

3.2 Lauffer Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi

Lauffer 1958 yılında tahkimat sistemi yapılmadan tünelin ayakta durabileceği zamanı, tünelin açıldığı kaya kütlelerinin türü ile ilişkilendirmiştir. Tahkimat yapılmadan kazılan açıklığın tünel genişliğinden daha uzun olması halinde, tünelin genişliği veya tünel aynasının en yakın tahkimat sistemine olan uzaklığı Şekil 3.2’de gösterilen ‘aktif genişlik (s)’ olarak tanımlanmaktadır (Lauffer, 1958). Lauffer kaya türüne göre farklı sınıftaki kayaların ayakta kalma süreleri ile aktif genişlik (kazı açıklığı) ilişkisi Şekil 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Aktif genişlik (s) tanımlanması (Lauffer, 1958).



Şekil 3.3 : Farklı sınıftaki kayaların ayakta kalma süreleri ile aktif genişlik (kazı açıklığı) ilişkisi (Lauffer, 1958).

3.3 RQD Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi

Deere (1963), kaya kütle sınıflandırmasını sayısal olarak tanımlayan RQD sistemini, karot numunesindeki karot boyu 100 mm'ye eşit veya daha uzun olan karot parçalarının en az 54.7 mm karot boyuna oranının yüzdesel ifade şekli olarak tanımlamıştır.

RQD yöntemi kaya hakkında sayısal bir sınıflama içerse de eklem yönelimi, eklem pürüzlülüğü ve dolgusu, eklem sıklığı gibi özellikleri içermez, sadece kayanın sürekliliğini ve masifliğini gösterir (Satıcı ve Topal, 2015). Çizelge 3.2'de RQD yüzdesine bağlı olarak kaya kalitesi tanımlanmıştır. RQD yöntemi, RMR ve Q kaya sınıflandırma sistemlerinin bir birleşeni olmuştur.

Çizelge 3.2 : RQD kaya kalitesi (Deere, 1963)

RQD (%)	Kaya Kalitesi
0-25	Çok Zayıf
25-50	Zayıf
50-75	Orta
75-90	İyi
90-100	Çok İyi

3.4 RMR Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi

1973 yılında Bieniawski tarafından hazırlanan Kaya Kütlesi Değerlendirme (RMR) Sistemi (Rock Mass Rating) çeşitli parametrelerin puanlamalarının toplamına bağlı olarak bir değere ulaşılan, bu değer kullanılarak tünelin açılması için gereken kazı ve tahkimat sisteminin önerildiği bir sistemdir.

Bu kaya sınıflandırma sistemi sondaj verilerinden veya sahada ölçüm yapılarak elde edilebilen aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Kayanın dayanımı
- RQD değeri (kaya kalite göstergesi)
- Eklemlerin sıklığı
- Eklemlerin durumu
- Yeraltı suyu durumu
- Eklemlerin yönelimi

Tünel boyunca kayalar, kayanın yapısının ve süreksizliklerinin benzer özellikler gösterdiği bölgelere ayrılarak bu parametrelerin değerleri belirlenir ve RMR tablosuna işlenir. Bu parametrelerin puanlamaları birbirinden farklıdır.

RMR değişken parametrelerin bulunduğu Çizelge 3.3'te yukarıda maddeler halinde verilen ilk 5 parametrenin çeşitli büyüklükteki sayısal değerleri belli aralıklarla ayrılmış ve bu değer aralıklarına göre puanlamalar verilmiştir. Buna göre bu çizelgede ilk olarak kaya dayanım değerlerinden nokta yükü indeksi ve tek eksenli basınç dayanımının sayısal değerlerine bakılarak uygun aralık belirlenir ve bu aralık için RMR sisteminin puanı verilir. İkinci olarak, RQD yüzde aralığı seçilerek puanlanır. Üçüncü olarak, süreksizlik uzunluğuna göre bu aralıkta bulunan puan verilir. Daha sonra süreksizlik durumu belirlenir ve puan verilir. Ve son olarak yeraltı suyu durumuna göre değer aralığı seçilir ve puanlanır. Bu beş parametreden elde edilen puanlar toplanarak 'A' değeri bulunur.

Kayanın süreksizlik doğrultusunun eğim derecesine göre durumu sınıflandırılarak Çizelge 3.4'te uygunluğu belirlenmiş, bu uygunluk alınarak eklem yönlerine göre düzeltmelerin bulunduğu Çizelge 3.5'te tünel, temel ve şevler için düzeltme puanları belirlenmiştir.

Çizelge 3.3 : Sınıflandırmada değişken parametrelerin puanlanması (Bieniawski, 1989)

Parametre		Değer Aralıkları						
Kayanın Dayanımı	Nokta Yüğü Dayanım İndeksi	>100 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük Aralıklar İçin Tek Eksenli Dayanım		
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puan	15	12	7	4	2	1	0
Kaya Kalite Göstergesi (RQD)	RQD	%90-%100	%75-%90	%50-%75	%25-%50	<%25		
	Puan	20	17	13	8	3		
Süreksizlik Aralığı	Aralık	>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Puan	20	15	10	8	5		
Süreksizliklerin Durumu	Durum	Çok pürüzlü yüzeyler, Sürekli değil, Ayrılma yok, Sert eklem yüzeyleri	Az pürüzlü yüzeyler, Ayrılma<1 mm, Sert eklem yüzeyleri	Az pürüzlü yüzeyler, Ayrılma<1 mm, Yumuşak eklem yüzeyleri	Parlak yüzeyler veya dolgu malzemesi kalınlığı<5 mm veya 1-5 mm açıklıklı eklemler, Sürekli eklemler	Yumuşak dolgu maddesi kalınlığı>5 mm veya Açıklık>5 mm, devamlı süreksizlikler		
	Puan	30	25	20	10	0		
Yeraltı Suyu	Tünelin 10 m.lik Kısmından Gelen Su	Yok	10 lt/dk	10-25 lt/dk	25-125 lt/dk	>125 lt/dk		
	Eklemdeki Su Basıncı/Ana Asıl Gerilme	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Genel Koşullar	Kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su Akışı		
	Puan	15	10	7	4	0		

Çizelge 3.4 : Süreksizlik doğrultu ve eğim konumlarına göre değerlendirilmesi (Bieniawski, 1989)

Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		Eğim(°) 0-20 Doğrultu göz önüne alınmadan
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı ilerleme		Eğim(°) 45-90	Eğim(°) 20-45	
Eğim(°) 45-90	Eğim(°) 20-45	Eğim(°) 45-90	Eğim(°) 20-45			
Çok uygun	Uygun	Vasat	Uygun değil	Hiç uygun değil	Vasat	Uygun değil

Çizelge 3.5 : Eklem yönlerine göre düzeltme puanları (Bieniawski, 1989)

Eklemelerin doğrultu ve eğim yönleri	Puan		
	Tüneller	Temeller	Şevler
Çok Uygun	0	0	0
Uygun	2	2	5
Orta	5	7	25
Uygun Değil	-10	-15	-50
Hiç Uygun Değil	-12	-25	-60

Çizelge 3.3'ten elde edilen parametrelerin puanlarının toplamı ve Çizelge 3.5'te belirlenen düzeltme puanı toplanarak RMR değeri bulunmakta ve bu değere göre kaya sınıflandırmasının yer aldığı Çizelge 3.6'da kaya kalitesi belirlenmektedir.

Çizelge 3.6 : Toplam sayısal değerlere göre kaya kalitesinin tanımlanması (Bieniawski, 1989)

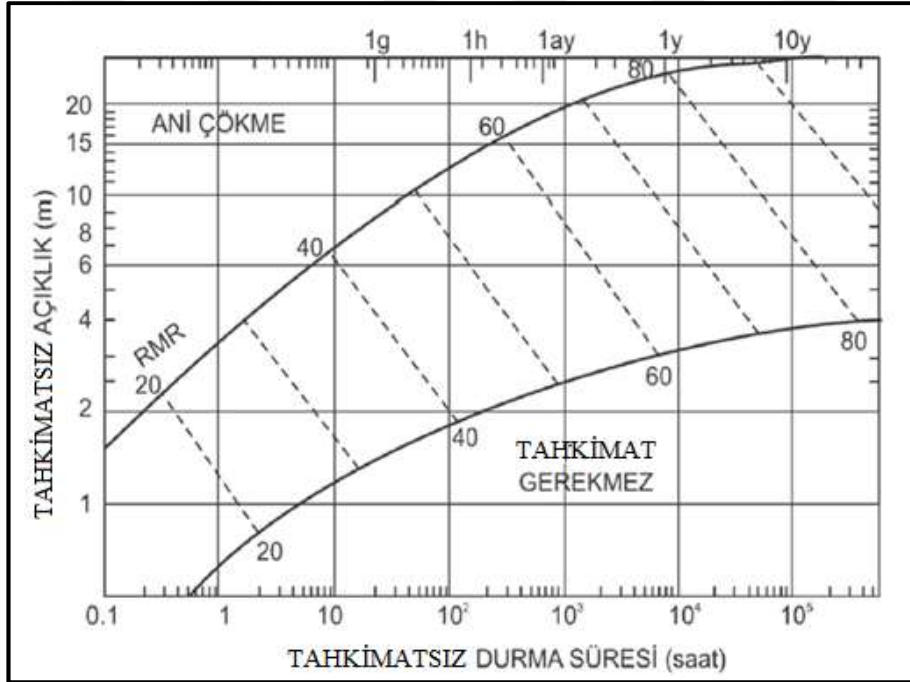
Sayısal değerler toplamı	Sınıf	Kaya tanımı
100-81	I	Çok iyi
80-61	II	İyi
60-41	III	Orta
40-21	IV	Zayıf
<20	V	Çok zayıf

Tünelin tahkimatsız göçmeden durma zamanı, kayanın kohezyonu ve sürtünme açısı kaya sınıflandırmasına göre Çizelge 3.7'de belirlenmektedir.

Çizelge 3.7 : Kaya sınıflarının ifade ettiği değerler (Bieniawski, 1989)

Sınıf	Ortalama tahkimatsız göçmeden durma zamanı		Kohezyon (kPa)	Sürtünme açısı
	Açıklık boyu (m)	Süre		
I	15	10 yıl	>400	<45°
II	8	6 ay	300-400	35°-45°
III	5	1 hafta	250-300	25°-35°
IV	2.5	10 saat	100-200	15°-25°
V	0.1	30 dakika	<100	<25°

Kaya kütlelerinin Şekil 3.4'te gösterilen grafik ile RMR puanı ve kazı açıklığına bağlı olarak tahkimatsız durma süresi belirlenebilmekte olup bu grafikte 'g' gün, 'h' hafta 'y' yılı temsil etmektedir.



Şekil 3.4 : RMR puanı ve tünel açıklığına bağlı olarak desteksiz durma süresini belirleme abağı (Bieniawski, 1989).

3.5 Q Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi

Kaya Tünelcilik Kalitesi İndeksi (Q), Barton ve arkadaşları tarafından 1974 yılında Norveç Geoteknik Enstitüsü'nde (NGI), birden fazla sayıda değişken parametrenin dikkate alınarak hazırlandığı, kayanın karakteristik özelliklerinin belirlendiği ve gereken tahkimat sisteminin önerildiği bir kaya sınıflandırmasıdır. Bu sınıflandırma

indeksi Eşitlik 3.1 ile hesaplanmakta olup bu denklemde bulunan parametrelerin isimleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Barton ve diğ., 1974).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

Bu denklemde bulunan parametreler:

- RQD: Kaya kalite göstergesi
- J_n : Eklem takımı sayısı
- J_r : Eklem pürüzlülük sayısı
- J_a : Eklem ayrışma sayısı
- J_w : Eklem suyu indirgeme faktörü
- SRF: gerilme düzeltme faktörü olarak isimlendirilmektedir.

Q eşitliğinde verilen RQD/J_n ifadesi kabaca blok boyutlarını, J_r/J_a süreksizlik yüzeylerinin ve dolgusunun sürtünme özelliklerini ve pürüzlülüğünü ifade etmektedir. İlk olarak RQD değeri daha önceki bölümde verilen şekilde hesaplanmaktadır ve Çizelge 3.8’de RQD değerlerine göre kaya kalitesi verilmektedir.

Çizelge 3.8 : Kaya kalitesine göre RQD değeri (Deere, 1963)

Kaya Kalitesi	RQD (%)
Çok Düşük	0-25
Düşük	25-50
Orta	50-75
İyi	75-90
Çok İyi	90-100

Yapraklanma, şiştozite ve tabakalanmadan etkilenen, eklem takım sayısını belirlemek için kullanılan J_n parametresinin değeri, kayanın eklem takım sayısı ve düzenliliğine göre Çizelge 3.9’dan bulunmaktadır. Eklem takım sayısının artmasıyla Q değeri azalmaktadır.

Eklem pürüzlülük sayısı (J_r), eklemlerin kaya ile temasta olmasına, kayanın düz, kaygan, pürüzlü veya düz olmasına göre Çizelge 3.10’da değeri belirlenmektedir. Kayanın pürüzlülük değeri arttıkça Q değeri de artmaktadır.

Çizelge 3.9 : Eklem takımı sayısı (J_n) (Barton, 1993)

Tanım	Değerlendirme
Masif (kütlesel), eklem çok az veya hiç yok	0.5-1
Bir eklem takımı	2
Bir eklem takımı ve düzensiz eklemler	3
İki eklem takımı	4
İki eklem takımı ve düzensiz eklemler	6
Üç eklem takımı	9
Üç eklem takımı ve düzensiz eklemler	12
Dört veya daha fazla eklem takımı, düzensiz çok sayıda eklem, küp şeker görünümünde	15
Tamamen parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20

Çizelge 3.10 : Eklem pürüzlülük sayısı (J_r) (Barton, 1993)

Tanım	Değerlendirme
a) Eklem yüzeyleri temasta, veya	
b) 10 cm.den az bir makaslama hareketiyle temasın sağlanması hali	
Süreksiz eklemler	4
Pürüzlü ya da düzensiz dalgalı	3
Düz, dalgalı	2
Kaygan dalgalı	1.5
Pürüzlü veya düzensiz düzlemsel	1.5
Düz, düzlemsel	1
Kaygan, düzlemsel	0.5
c) Makaslama ile eklem yüzeylerinin teması sağlanamaması hali	
Eklem yüzeylerinin temasını önleyecek kadar kalın kil dolgusu	1
Eklem yüzeylerinin temasını önleyecek kadar kalın kum, çakıl ve breş dolgusu	1

Burada dikkat edilmesi gereken bazı noktalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Eklem takımlarının ortalama ara mesafesi 3 metreden büyükse değerlere 1 eklenir.
- Makaslama hareketi izleri taşıyan ve bu izlerin uygun olması koşulu ile kaygan düzlemsel eklemler için $J_r = 0.5$ alınabilir.
- Dalgalı ve düzlemsel gibi tanımlar eklem en az 2 m'lik uzunluğu boyunca olan genel karakterini, pürüzlü, düz, kaygan tanımları eklem yüzeyinin küçük ölçekte özelliklerini tanımlamaktadır.

Eklemlerin ayrışma ve dolgu durumlarına göre eklem yüzeylerinin temas halinde olup olmamasına bağlı olarak Çizelge 3.11'de eklem ayrışma sayısı (J_a) ve yaklaşık olarak

içsel sürtünme açısı belirlenmektedir. Eklem ayrışma sayısı arttıkça Q değeri azalmaktadır.

Çizelge 3.11 : Eklem ayrışma sayısı (Ja) (Barton, 1993)

	Tanım	Değerlendirme	
		J_a	ϕ_r
1	Eklem yüzeyleri temasta		
A	Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz, geçirimsiz dolgu	0.75	-
B	Ayrışmamış eklem yüzeyleri, sadece yüzeysel paslanma	1	25°-30°
C	Az ayrışmış eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri	2	25°-30°
D	Siltli veya kumlu yüzey killeri, düşük kil oranı (yumuşamayan)	3	25°-30°
	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli yüzey killeri.		
E	Ayrıca klorit, talk, jips, grafit ve az miktarda şişen killer (1-2 mm veya daha az kalınlıkta süreksiz yüzey dolgusu)	4	8°-16°
2	10 cm'den az bir kesme hareketiyle eklem yüzeylerinin temasının sağlanmasıyla		
F	Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları	4	25°-30°
G	Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil mineral dolguları (sürekli, kalınlık 5 mm.'den az)	6	16°-24°
H	Orta ve yüksek derecede konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolgulu (kesiksiz, kalınlık 5 mm.'den az)	8	12°-16°
	Şişen kil dolgulu (örn. montmorillonit) (sürekli, kalınlık 5 mm.'den az). Ja'nın değeri		
J	şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve su etkisinde kalıp kalmayacağına göre değişir.	8-12	6°-12°
	Makaslama hareketiyle eklem yüzeylerinin teması sağlanamamasıyla		
K	Ufalanmış veya parçalanmış	6	16°-24°
L	Kaya ve kil bölgeleri	8	12°-16°
M	Zonları (Kil özellikleri için sırasıyla G, H, J koşullarına bakılmalıdır)	8-12	6°-12°
N	Siltli veya kumlu kil zonları veya bantları, küçük kil parçaları (yumuşamayan)	5	-
Q	Sürekli, kalın kil zonları veya bantları (kilin tanımı için G,H, J koşullarına bakılmalıdır)	10-20	6°-24°

Suyun akış miktarına, akış miktarının zamanla değişimine, suyun basıncına bağlı olarak sınıflandırılan ve bu sınıflara göre değeri belirlenmiş eklem suyu indirgeme faktörü (J_w) Çizelge 3.12 kullanılarak belirlenebilmektedir. Suyu indirgeme faktörü arttıkça Q değeri artmaktadır.

Çizelge 3.12 : Eklem suyu indirgeme faktörü (Jw) (Barton, 1993)

Tanım	Değerlendirme	
	J _w	Su Basıncı (kg/cm ²)
Kuru kazılar veya su gelişi 5 lt/dk'dan az	1	<1
Orta miktarda su gelişi veya basıncı, genellikle eklem dolgularının yıkanması	0.66	1-2.5
Dolgusuz, dayanımlı ve eklemli kayada çok su gelişi veya yüksek su basıncı	0.5	2.5-10
Çok miktarda su gelişi veya yüksek su basıncı ile eklem dolgularının fazlaca yıkanması	0.33	2.5-10
Patlatma ile çok fazla su gelişi, zamanla suda azalma	0.2-0.1	>10
Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya basıncı	0.1-0.05	>10

Çizelge 3.13 : Gerilme indirgeme faktörü (SRF) (Barton, 1993)

Tanım	Değerlendirme		
a) Kazıyı kesen ve tünel kazılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek zayıflık zonları			
Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan birden fazla zayıflık zonu, çevre kaya çok gevşek (derinlik önemli değil)			10
Kil ve kimyasal olarak ayrılmış kayaları kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği ≤50 m)			5
Kil ve kimyasal olarak ayrılmış kayaları kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği >50 m)			2.5
Kil içermeyen sağlam kayada çoklu makaslama zonları, çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)			7.5
Kil içermeyen sağlam kayada tek makaslama zonu, çevre kaya çok gevşek (kazı derinliği ≤50 m)			5
Kil içermeyen sağlam kayada tek makaslama zonu, çevre kaya çok gevşek (kazı derinliği >50 m)			2.5
Gevşek, açık eklemli, çok fazla eklemli veya küp şeker görünümlü (herhangi bir derinlikte)			5
b) Sağlam kaya, kaya gerilme problemleri	σ_c / σ_1	σ_t / σ_1	
Yüzeye yakın düşük gerilme	>200	>13	2.5
Orta gerilme	200-10	13-0.66	1
Yüksek gerilme (çok sıkı yapı)	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0
Masif kayada orta derecede kaya patlaması	5-2.5	0.33-0.16	5-10
Masif kayada aşırı derecede kaya patlaması	<2.5	<0.16	10-20
c) Sıkışan kaya, yüksek basınç altında sağlam olmayan kayanın plastik deformasyonu			
Orta derecede sıkışan kaya basıncı			5-10
Aşırı derecede sıkışan kaya basıncı			10-20
d) Şişen kaya, suyun varlığına bağlı kimyasal şişme			
Orta miktarda şişen kaya basıncı			5-10
Yüksek miktarda şişen kaya basıncı			10-20

Çizelge 3.12’de son 4 parametre gözlemseldir. Drenaj sağlanırsa J_w arttırılmalıdır. Ve bu tablo hazırlanırken suyun donma problemi dikkate alınmamıştır.

Kayaların ayrışma durumlarına göre ayrışmamış kaya kütlelerinde SRF’nin azaldığı, kil içeren zeminlerde SRF’nin arttığı ve bunların derinliklerine bağlı olarak gerilme indirgeme faktörünün (SRF) değeri Çizelge 3.13 kullanılarak tespit edilebilmektedir.

Çizelge 3.13’te dikkat edilmesi gereken bazı noktalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Kazıyı etkileyen fakat kesmeyen zayıflık zonu varsa SRF değerleri % 25-50 azaltılır.
- Kazı derinliğinin kazı genişliğinden az olduğu durumlarda SRF 2.5’ten 5’e çıkarılır.

Sonuç olarak çizelgelerden elde edilen RQD, J_n , J_r , J_a , J_w ve SRF değerlerinden Q eşitliğinde ilgili değerler yerlerine konularak sayısal bir Q sonucu elde edilir. Bu sonuca göre Q değerinin aralığı ve bu aralığa göre kaya kütleleri iyi ve zayıf olarak Çizelge 3.14’te tanımlanmaktadır (Barton ve diğ., 1974).

Çizelge 3.14 : Q değerine göre kaya kütle tanımlaması (Barton ve diğ., 1974)

Q Değeri	Kaya Kütle Tanımlaması
400-1000	Olağanüstü iyi kaya
100-400	Son derece iyi kaya
100-40	Çok iyi kaya
10-40	İyi kaya
4-10	Orta kaya
1-4	Zayıf kaya
0.1-1	Çok zayıf kaya
0.01-0.1	Son derece zayıf kaya
0.01-0.001	Olağanüstü zayıf kaya

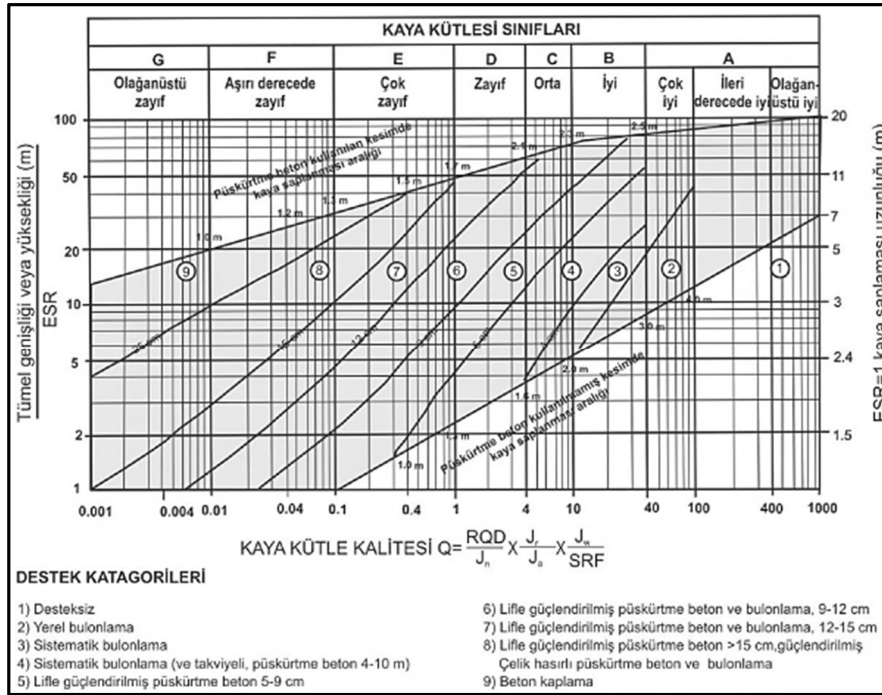
Kazının mekanik davranışını, tahkimat gerektirip gerektirmediğini bulabilmek için Barton, Lien ve Lunde eşdeğer boyutun (D_e) olarak adlandırılan yeni bir kavram tanıtarak, kazı çapının, kazı genişliğinin veya yüksekliğinin kazı tahkimat oranına

(ESR) bölünmesi ile hesaplamışlardır. ESR değerlerinin kazı türüne bağlı olarak 1974 ve 1994 yılındaki değerleri Çizelge 3.15'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.15 : Kazı tahkimat oranı (ESR) (Barton, 1993)

Kazı Türü	ESR	
	1974	1994
Geçici maden kazıları	3-5	3-6
Uzun süreli kazılar, su tünelleri, pilot tüneller, geniş yer altı kazıları	1.6	2.5-2
Geniş yer altı depolama alanları, su arıtma tesisleri, küçük karayolu-demiryolu tünelleri yaklaşım tünelleri vb.	1.3	1.2-1.3
Santral binaları, ana kara ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, giriş çıkış ağızları, kesişme bölgeleri	1	0.9-1.1
Yeraltı nükleer santralleri, metro istasyonları, fabrikalar ve sosyal tesisler	0.8	0.5-0.8

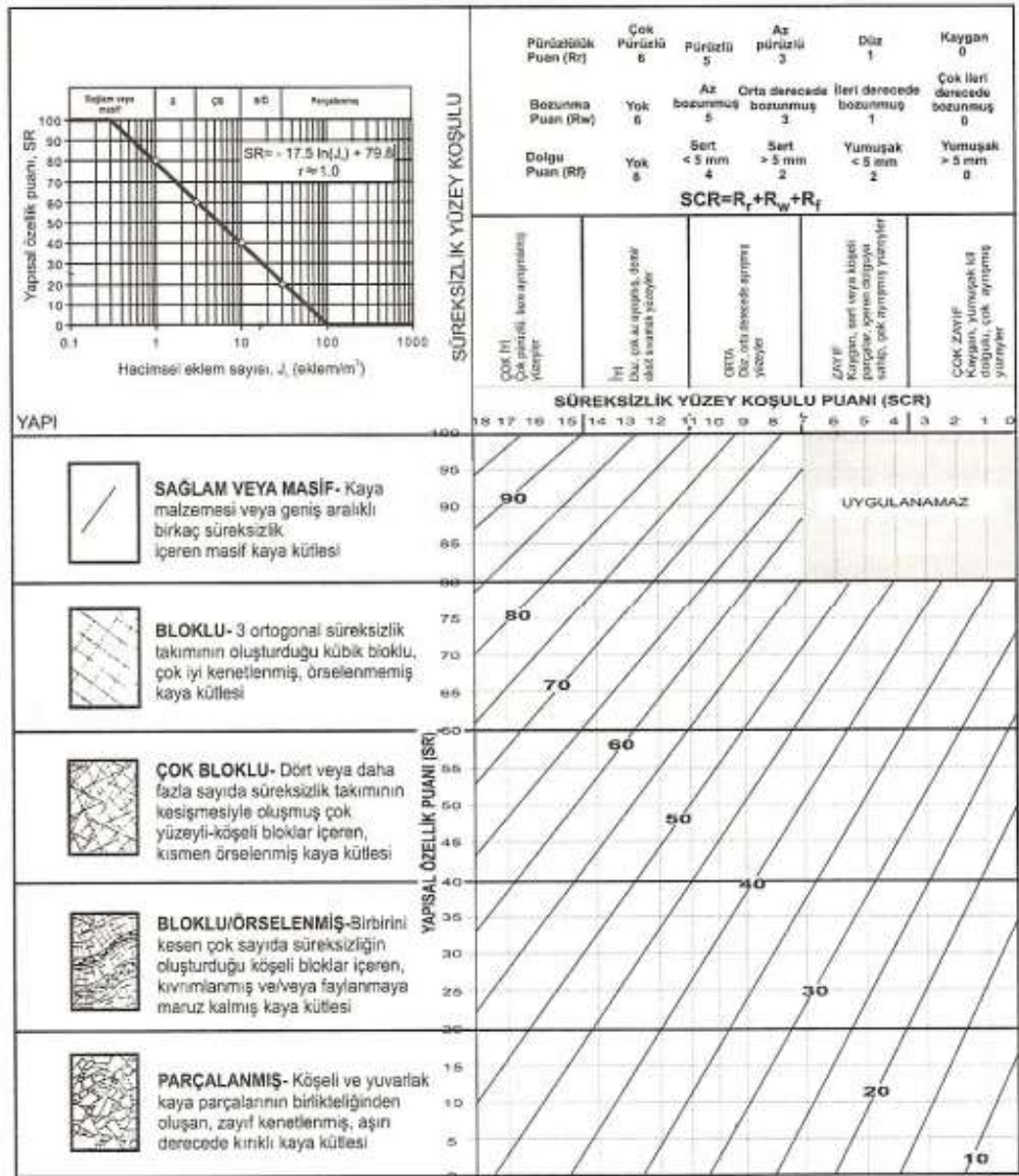
Eşdeğer boyut D_e , tünelcilik niteliği belirteci olan Q ve tahkimat gereksinimi arasındaki ilişki Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Bu şekle göre D_e ile Q değeri grafikte bulunarak aşağıda destek kategorilerinde numaraları verilmiş tahkimat sistemi seçilmektedir.



Şekil 3.5 : Q kaya sınıfı sistemine göre tahkimat seçimi abağı (Barton ve diğ., 1993).

3.6 GSI Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi

Jeolojik dayanım indeksi (GSI) Hoek (1995) ve Hoek, Kaiser ve Bawden (1995) tarafından arazi gözlemlerine dayanarak değişik zemin koşullarında kütle dayanımının bulunması için oluşturulan bir sistemdir. RMR puanı kayanın bazı parametrelerinin belirlenmesinde kaya kütle kalitesinin sayısal bir ölçüsü olarak uzun bir dönem boyunca kullanılmıştır. Ancak RMR'nin özellikle zayıf kaya kütlelerini tanımlamadaki sınırlamalarından dolayı GSI sistemi parametrelerin belirlenmesine dahil olmuştur (Hoek ve diğ., 2007).



Şekil 3.6 : GSI abağı (Sönmez ve Ulusay, 2002)

Hoek ve diğ., (1997) GSI sistemini, diğ er sistemlerden daha sübjektif ve neredeyse tamamen görsel değerlendirmeye dayanan bir sistem olarak ifade etmiştir. Sönmez ve Ulusay (2002) GSI ile ilgili olarak, daha çok görsel ölçüm ve değerlendirmeye dayalı olduğu için, tünel proje tasarımımda özellikle tünel kazısı öncesi uygulanması, tünel kazı aynasının gerçek durumunun gözlenememesi nedeni ile önemli hataları beraberinde getirebilmektedir demişlerdir. Bununla birlikte, başlangıçta gözleme dayalı  nerilen GSI sisteminin sayısal versiyonu ile ilgili ilk  alışma Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından yapılmış olup şekil 3.6'da verilen abağı oluşturmuşlardır.

GSI sistemi ile RMR arasındaki ilişki Hoek (2006) tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$GSI = RMR - 5 \quad (3.2)$$

3.7 NATM Kaya Sınıflandırma ve Destek Sistemi

NATM ilk defa Rabcewicz tarafından ortaya atılmış, 1964'te yaygın hale gelmiş, Avusturya Alpleri'nde elde edilen deneyimlerden ortaya çıkmıştır. Yöntemin ana felsefesinin altında iki unsur yer almaktadır. Bunlardan ilki; yeraltı kazısında kazılan kayayı desteklemek yerine güçlendirmek, yani  evre kayacın bir miktar rahatlamasına izin vererek ilk kazıdan sonra ortaya çıkan yüksek basınçları taşımak yerine  evre kayayı, uygulanan güçlendirme elemanları ile güçlendirerek kendi kendini taşımamasını sağlamaktır. Bunu da sağlamanın en rahat yolu kazı sonrası esnek bir kaplama yaparak (püskürtme beton) deformasyonlara bir miktar izin vermek ve daha sonra kaya bulonları gibi tahkimat elemanları ile güçlendirmektir. Diğer önemli felsefesi ise; özellikle zayıf kaya koşullarında kazıyı farklı küçük kesitlerde yaparak b l mlendirmektir (Rabcewicz, 1964). Rabcewicz'in felsefesi gözlemsel bir projelendirme esasına dayanmakta olup, kazı sonrası  evre kaya davranışını izleyerek deformasyon durumuna göre projeyi değiştirme esasını içermektedir. Bu yöntem, kaya kütle davranışını sınıflandırmak için her ne kadar çeşitli kaynaklarda kaya veya kazı sınıflarını A, B, ve C ile ifade edilen harflerle sınıflandırmış (KTş, 2013) olsa da, bu sınıflandırma oldukça gözlemsel olduğu için kendisine sayısal bir altlık oluşturma ihtiya ı duymuş, bu açığı da uygulamada RQD (Deere, 1963), RMR (Bieniawski, 1989), GSI (Hoek ve Brown, 1997) ve Q (Barton, 2002) gibi uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflandırma sistemlerini kullanarak yapmaya çalışmıştır. Bir sonraki bölümde bu konuyla ilgili daha ayrıntılı bilgi verilecektir.

4. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ (NATM)

Günümüzde yaygın olarak kullanılan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi kayayı kendi kendine taşıtmayı prensip edinmiş, farklı zemin koşullarında, değişik boyutlu kesitlerde uygulanabilen, zemini kendi içinde sınıflandıran ve yapılacak tünel kazısını aşamalandıran, tünel içinde tahkimat sistemi kurarak kayayı destekleyen bir yöntem olmuştur.

Bu bölümde NATM'nin genel özellikleri, NATM'ye göre kayaların sınıflandırılması, buna uygun tahkimat sisteminin seçilmesi, bu yöntemle açılan tünellerde uygulanan kazı ve tahkimat sistemleri açıklanmaktadır.

4.1 NATM'nin Tanımı

Avusturyalı tünel uzmanları Von Rabcewicz, Pacher ve Müller-Salzburg tarafından geliştirilen, 1964 yılında yayılmaya başlayan ve Almanca ismi ile Neue österreichische tunnelbauweise (NÖT), İngilizce New Austrian Tunnelling Method (NATM) olan bu yöntem, ilk olarak Avusturya Alplerinde tecrübe edinilmiş olup, 1969'da Frankfurt metro inşaatında uygulanmaya başlanarak günümüze kadar diğer ülkelere de yayılarak gelmiştir (Kolymbas, 2005).

Patent başvurusunda, Prof. L.v. Rabcewicz (1946) NATM ile ilgili olarak; “İnce, geçici bir destek sistemi uygulamak, deplasmanların oluşması ve bunun sonucunda kaya basıncının düşerek çevre kayalara dağılmasıdır. Dolayısıyla diğer destek sistemine gelecek yükün azalmasıyla, bu destek sistemi ince bir yapı halinde oluşturulacaktır. Oluşacak deplasmanların ölçümü ve takibi önemlidir ve yapılan proje ile bu deplasmanlar karşılaştırılarak değerlendirilmelidir.” şeklinde bir tanımlama yapmıştır.

Bu yöntem, genel anlamda iki amaç içermektedir. Birincisi, kayanın kazı yapıldığı anda bir miktar deplasmana uğramasına müsaade etmek ve kayayı yapılan tahkimatlar sonucunda tamamen desteklerle taşımak yerine, püskürtme beton, bulon gibi

elemanlarla güçlendirerek kayayı kendi kendine taşıtmaktır. İkincisi ise, kazı kesitlerini zemin koşullarına göre aşamalandırarak kazı kesitlerini küçültmektir. Yöntemin ana prensipleri 1978 yılında Müller tarafından maddeler halinde açıklanmıştır. Aşağıda bu yöntemin bazı maddeleri yer almaktadır (Müller, 1978):

- Tünelde kazı sonrası oluşan boşluğu çevreleyen kaya kütesinin doğal dayanımı korunmalıdır.
- Tünel içinde bütün deformasyonlar ve gerilmeler ölçülerek, zeminin dayanımını sağlaması için önce bir kısım deformasyona izin verilmeli fakat dayanımın azalmasına neden olacak deplasmanlar önlenmelidir.
- Bu önleme; bulon, püskürtme beton, çelik hasır gibi tahkimat sistemleri ile olmalıdır. Bu tahkimat sistemi doğru bir şekilde uygulanarak, kaya ile beraber hareket etmeli ve bir miktar deformasyon sağlamalıdır.
- Kazıdan hemen sonra kazı yüzeyine püskürtme beton uygulanması, aşırı deformasyonları önler.
- İlk tahkimat, kazıdan sonraki birincil gerilmeler için yapılır ve bu işlem sonrasında oluşan deplasmanların sonuçlarına bakılarak, ikincil tahkimat bu gereksinime göre boyutlandırılır.
- Tünel kazısı sırasında zaman önemli bir unsurdur. Kazıyı takiben tahkimat sisteminin kurulması gerekir.
- NATM yönteminin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için, yöntem teknik personel tarafından iyice kavranmış olmalı, proje ve saha ekipleri arasındaki iletişim kuvvetli olmalıdır.

NATM zeminin davranış şekline ve sahada bu davranışın gözlemlenmesine dayanarak zemini benzer özelliklerine göre sınıflandırmaktadır. NATM kaya sınıflandırması A, B ve C sınıfları ve bunların alt sınıflarını da içeren, kaya davranışlarının ve tahkimat sistemlerinin açıklandığı Avusturya ÖNORM B2203 standardında bulunmaktadır. Bir sonraki bölümde bu sınıflandırma ile ilgili daha detaylı bilgi verilecektir.

4.2 NATM'ye Göre Kaya ve Destek Sınıfları

NATM'de tünel içinde yapılacak kazının ve sistemli olan tahkimatların doğru bir şekilde ilerleyebilmesi için bu aşamalara geçilmeden önce kaya kütlelerinin

sınıflandırılması gerekmektedir. Bu sebeple jeolojik birimin litolojisi, dokusu, rengi, süreksizliklerin eğimi, eklem açıklıkları, eklem aralıkları, eklem pürüzlülüğü, süreksizlik sistemlerinin türü, RQD, tek eksenli basınç dayanımı, ayrışma, suyun durumu gibi bilgilere bakılarak kayanın davranışı yorumlanır ve destek sınıfı belirlenir (ÖNORM B 2203, 1994).

NATM kazı sınıfları A, B ve C destek sınıfı olarak 3 ana sınıfa, aralarında en sağlam sınıf olan A1'den başlayarak en zayıf sınıf olan C5'e kadar 10 ara sınıflandırma grubuna Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi ayrılarak Avusturya Standardı ÖNORM B2203'te tanımlanmıştır. Bu standart zemini, kayanın davranışına göre kayanın karakteristik özelliklerine göre gözlemsel olarak sınıflandırmaktadır. Bu standartta her bir kaya sınıfında bulunan kaya kütlelerinin davranışı, kazı yöntemi ve aşamaları, gereken tahkimat elemanları, suyun kaya kütlelerine olan etkisi bulunmaktadır.

Çizelge 4.1 : NATM'ye göre kaya sınıflandırma sistemi (ÖNORM B 2203, 1994)

A Destek Sınıfı		B Destek Sınıfı			C Destek Sınıfı				
Stabil-Hafif Aşırı Sökülen Kaya Kütleleri		Gevrek Kaya Kütleleri			Baskılı Kaya Kütleleri				
A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	C5
Stabil Kaya Kütleleri	Sonradan Az Sökülen	Gevrek	Çok gevrek	Taneli	Dağ Atma	Baskılı	Çok Baskılı	Akıcı	Şişen

NATM sınıflandırmasının RMR ve Q değerleriyle olan ilişkisini gösteren, daha sayısal bir yaklaşıma sahip olan Şekil 4.1 aşağıda verilmektedir.

Projede bulunan jeolojik, hidrojeolojik ve geoteknik veriler ile tünel kazıldığında ortaya çıkan gerçek veriler karşılaştırılarak projede öngörülen kaya formasyonu, litolojisi ve kaya birimlerinin doğruluğuna bakılmalıdır. Bu bakımdan NATM aynı zamanda gözlemsel bir yöntemdir. Gerekli görüldüğü takdirde projede değişiklik yapılmalıdır (Telford, 1996).

Kaya kalitesine göre tünel zemin sınıflandırması, tünel kazılırken kullanılacak destek sistemleri, kazı yöntemleri ve aşamaları aşağıda açıklanmaktadır (ÖNORM B 2203; Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

KAYA DESTEKLEME SINIFI																																												
N.Barton, 1993	Kaya Kalitesi	MÜKEMMEL KALİTEDE KAYA			OLDUKÇA İYİ KALİTEDE KAYA			ÇOK İYİ KALİTEDE KAYA			İYİ KALİTEDE KAYA			ORTA KALİTEDE KAYA			ZAYIF KALİTEDE KAYA			ÇOK ZAYIF KALİTEDE KAYA			AŞIRI ZAYIF KALİTEDE KAYA				OLDUKÇA ZAYIF KALİTEDE KAYA																	
	Q-Değeri	1000		400				100		70			40			10		4			1			0,1			0,031			0,016			0,008			0,002			0,001					
Z.T.Bieniawski 1984	Kaya Kalitesi	ÇOK İYİ KALİTEDE KAYA							İYİ KALİTEDE KAYA							ORTA KALİTEDE KAYA					ZAYIF KALİTEDE KAYA					ÇOK ZAYIF KALİTEDE KAYA																		
	RMR-Değeri	100								80								64,9		60		57,8			47		40			29,1			20			15			10			5		
	Kaya Kalitesi	SAĞLAM						ZAMANLA KIRILGAN						KIRILGAN			ÇOK KIRILGAN			DÖKÜNTÜLÜ			KAYA PATLAMALI			BASKILI			ÇOK BASKILI		AKICI PSÖDO-STABİL		ŞİŞEN KABARAN											
	KTŞ SINIFI	A1 (I)						A2 (II)						B1 (III)			B2 (IV)			B3 (V)			C1 (VI)			C2 (VII)			C3 (VIII)		C4 (IX)		C5 (X)											

Şekil 4.1 : NATM sınıflandırması, RMR ve Q ilişkisi.

4.2.1 A kaya ve destek sınıfı (stabil-hafif aşırı sökülen)

A sınıfında bulunan kaya kütleleri elastik davranış gösteren, genel olarak stabil-hafif aşırı sökülen kaya kütleleri olarak tanımlanır. Bu destek sınıfında, yer yer oluşan sökülmeleri engellemek amacıyla lokal destekler sağlanarak sığ göçükler engellenir. Kayada oluşan deplasmanlar ise hızlı bir şekilde azalır. A destek sınıfı kendi içerisinde A1 ve A2 destek sınıfı olarak 2'ye ayrılır.

4.2.1.1 A1 kaya ve destek sınıfı (stabil kaya kütlesi)

Bu destek sınıfındaki stabil ve elastik davranış gösteren kayalar oldukça sağlam olup kazı sonrasında oluşan kavlaklanma denilen kaya parçacıklarının alınmasından sonra sökülmeye eğilimi göstermezler. Ayrıca kazıdan sonra oluşan deplasmanlar oldukça küçük olup hızla azalırlar.

Bu sınıfta kayalar delme-patlatma yöntemi ile aynanın aşamalandırılmasına gerek kalmadan tam ayna olarak kazılabilir. Fakat tünel kesiti büyük ise alt yarı ve üst yarı olarak iki aşamada kazı tamamlanabilir. Tünelin ilerleme boyu patlatma tekniğine göre değişebilir. Tahkimat sistemi gerekmez. Bu sınıfta su, kaya stabilitesini genel olarak etkilemez. Bu yüzden su için özel bir drenaj sistemi kurulmaz.

4.2.1.2 A2 kaya ve destek sınıfı (sonradan az sökülen)

A2 sınıfındaki kaya kütleleri elastik davranış gösteren kaya kütleleri olup ‘sonradan az sökülen’ olarak isimlendirilirler. Delme-patlatma yöntemi ile tam ayna kazısı şeklinde kazılarak bu destek sınıfında ilerlenebilir. Fakat genelde üst yarı ve alt yarı kazısı olarak tünel kazılır. Yapılan kazı sonrasında sığ sökülmeler oluşur, bunun nedeni kayanın kendi ağırlığı ve kayadaki süreksizlikler olup tünelin yan duvarlarında ve tavanında bu sökülmeler görülür. Tünel içinde küçük ve hızla azalan deplasmanlar oluşur. Tünel ilerleme boyu ise patlatma yöntemine ve yapılacak tahkimatlara göre değişir fakat üst yarıda genellikle 2.5-3.5 m arasında, alt yarıda ise 4 m olarak ilerlenebilir. Suyun stabilizeye olan etkisi yok sayılabilir. Tünel tavanında veya yan duvarlarda oluşabilecek kaya sökülmelerinden dolayı kayayı stabil hale getirmek için kaya bulonu uygulanabilir. Bu bulonlar, kayaların süreksizlik yönlerine göre seçilmeli ve aynadan en fazla bir ilerleme adımı geriden uygulanmalıdır.

4.2.2 B kaya ve destek sınıfı (gevrek kaya kütleleri)

Bu sınıf, gevrek kaya kütleleri sınıfı olup, yapısal kenetlenmesi veya çekme mukavemeti az olduğundan dolayı hızlı bir şekilde gevşer ve ayrışır. Kazı yapılan alanda ikincil gerilmeler kayacın mukavemetini aşabileceği için bu kayalara yapılacak olan tahkimatlar hızlı bir şekilde yapılmalıdır. Aksi takdirde, gecikmelerin sonucu olarak çökmeler meydana gelebilir. B sınıfı kendi içinde B1, B2 ve B3 destek sınıfı olmak üzere 3'e ayrılır.

4.2.2.1 B1 kaya ve destek sınıfı (gevrek)

Bu sınıftaki kayalar gevreklerdir. Kayaların kazılarında alt yarı ve üst yarı olarak kazı kesiti aşamalandırılır. Tünel tavanında veya tünelin yan duvarlarında, kaya kütlesinin düşük mukavemetinden dolayı patlatmaya bağlı olarak sökülme meydana gelir. Deplasmanlar oldukça düşük olup hızla azalır.

Tünelin ilerleme boyu, zeminin tahkimatsız olarak kendini tutma süresine, tahkimat yapılmadan oluşacak açıklığa ve tahkimat elemanlarının uygulanma süresine bağlı olarak, üst yarıda 2-3 m arasında, alt yarıda ise 4 m olacak şekildedir. Tahkimat sistemi aynadan en çok bir ilerleme boyu geriden gelecek olup, tehlikeli bölgelerde kazıyı takiben tahkimat yapılacaktır. Suyun stabiliteye olan etkisi yok sayılabilir.

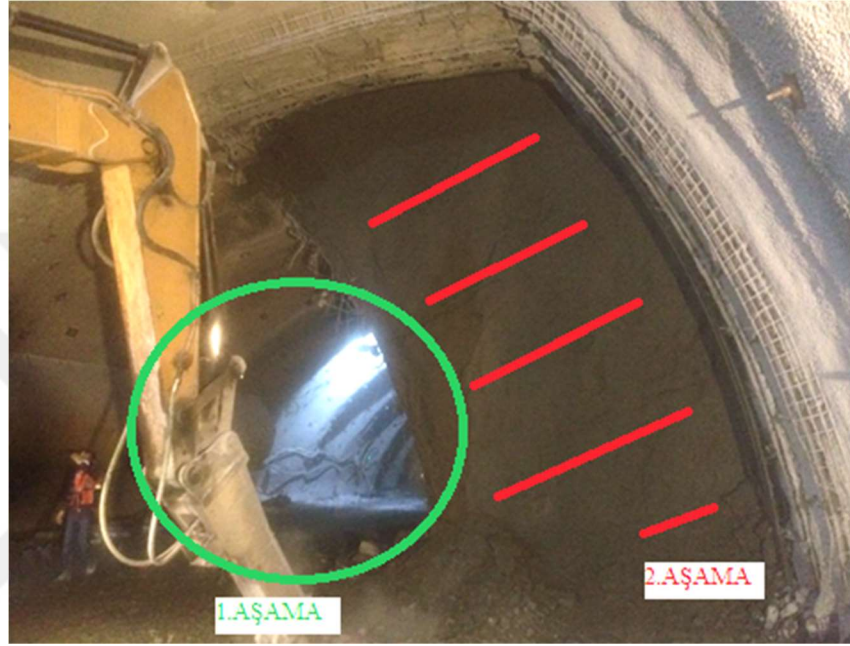
4.2.2.2 B2 kaya ve destek sınıfı (çok gevrek)

B2 sınıfındaki kayalar 'çok gevrek' olarak isimlendirilir. Bu sınıfta bulunan kayaların kazıları tünel kesitine göre aşamalandırılır. Tünelin ilerleme boyu zeminin tahkimatsız olarak kendini tutma süresine ve açıklığına bağlı olarak, genelde yumuşak patlatmalı kazı yöntemi ile ilerleme boyu üst yarıda 1.5-2 m arasında, alt yarıda ise 3-3.5 m olacak şekilde kazılır.

Tahkimat sistemi, tünel tavanında ve tünelin yan duvarlarında sistemli bir şekilde uygulanmalıdır. Bu destek sınıfında süren kullanılabilir. Sürenin delgi işlemleri kayaya zarar vermeden tavanda uygulanabilir. Tünel tavanında veya tünelin yan duvarlarında tahkimatların gecikmesine bağlı olarak kayada gevşemeler meydana gelir ve bunun sonucunda kopmalar oluşur. Deplasmanlar tünel tahkimatlarının yapılma zamanına bağlı olarak azalır. Suyun stabiliteye olan etkisi yok sayılabilir.

4.2.2.3 B3 kaya ve destek sınıfı (taneli)

B3 sınıfındaki kaya kütlesi ‘taneli’ olarak isimlendirilir. Yumuşak patlatmalı kazı yöntemi ile veya kayanın jeolojik yapısına bağlı olarak mekanik kazı yöntemleri kullanılarak ilerleme boyu üst yarıda 1.25-1.50 m arasında, alt yarıda ise 3 m olacak şekilde aşamalı olarak kazılabilir. B3 sınıfında kazılan tünelin 1. ve 2. aşamaları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 : B3 sınıfının aşamalandırılarak kazısı (Cebeci Tüneli).

Tünelde kazı yapılmadan önce tahkimat sistemi oluşturulması gerekmektedir. Tahkimat sisteminde süren uygulamak gerekebilir. Tahkimat sistemi elemanlarına çelik iksa eklenir. Bu tünelde taban kazısı, 100-150 m ayna kazısını takiben yapılabilir ve tabana kemer betonu dökülebilir. Tünelde aşamalı kazı yöntemi yapılmasına rağmen kaya kütlelerinin kohezyonunun az olması kütlelerde dökülmeler meydana getirir. Bu dökülmeleri önlemek için kayaları iyileştirici tahkimat elemanları hızlı bir şekilde uygulanmalıdır. Suyun, ayrıışmış kaya kütlelerinin stabilitesine etkisi bulunmaktadır.

4.2.3 C kaya ve destek sınıfı (baskılı kaya kütleleri)

Aşırı gerilmelerin kayaları etkilediği bu sınıfta kabuk atma, kesme, burkulma ve plastik hareketin boşluğa doğru ilerlemesi gibi durumlar oluşur. Kazı sonrasında deplasmanlar zamanla artar ve çok büyük mertebelere ulaşabilir. Bu deplasman

davranışı, zeminin plastik ve viskoz davranışına bağlıdır. Büyük deplasmanların oluşmasıyla kayada oluşacak gevşeme ve ayrışmalar kaya dayanımını düşürür. Bu sınıfta kayada çatlama, dökülme veya şişme görülür. Ayrıca ayrılmış, bozuşmuş ve gevşek kayaları da içeren bu sınıf kaya kütlelerinde kohezyon miktarına ve gevşeme basıncına bağlı olarak aşırı gerilmeler, dolayısıyla elastik ve plastik gerilmeler oluşur.

4.2.3.1 C1 kaya ve destek sınıfı (dağ atma)

Tünel ilerleme boyu üst yarıda 1.5-2 m arasında, alt yarıda ise 3 m olacak şekilde düzgün patlatma veya mekanik kazı yöntemi ile bu sınıfta açılan tünel aşamalandırılarak kazılmalıdır. Örtü kalınlığının ve ön gerilmelerin fazla olmasının sonucunda kayada elastik enerji depolanır. Bu depolanan enerji birden yer değiştirirse kayada kesme ve kayanın ezilmesine bağlı olarak kırılmalar meydana gelir. Bu kırılmalar kaya içinde derinleşir.

Tahkimat elemanları olarak çelik hasır ve boyu uzun olmayan fakat sık yerleştirilen kaya bulonu gereklidir. Basıncın azalmasını sağlayan delikler kaya kütlelerinde açılabilir. Bu kaya sınıfında açılan tünellerde taban kazısı, 100-150 m ayna kazısını takiben yapılabilir ve tabana kemer betonu dökülebilir. Ayrılmış kayada suyun kayanın dayanımında etkisi bulunmaktadır.

4.2.3.2 C2 kaya ve destek sınıfı (baskılı)

‘Baskılı’ olarak isimlendirilen bu kayaların içinde derine ulaşan plastik zon bulunur. Tünel ilerleme boyu genellikle üst yarıda 0.75- 1.25 m arasında, alt yarıda ise en fazla 2 m olacak şekilde düzgün patlatma veya mekanik kazı yöntemi ile tünel, kendi içinde aşamalandırılan üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olarak açılır. Kavlakların alınmasından sonra ise püskürtme beton yapılır. Bu tür kaya sınıfı ile açılan tünellerde bir adım ilerlemenin tamamlanması, tünel kazısının ve tahkimat sisteminin tamamlanmasıyla olur. Kazı sonrasında oluşan deplasmanlar uzun sürelidir ve yavaşça azalarak son bulurlar. Kazının yapıldığı bölgedeki deplasmanlar ise orta derecelidir.

Tüm kazı kesitinde düzenli bir tahkimat işlemi gereklidir fakat tünel aynası için tahkimat gerekmez. Tünel tavanında süren yapımına ihtiyaç duyulur. Bu kaya sınıfında açılan tünellerde taban kazısı, 50-100 m ayna kazısını takiben yapılır ve tabana kemer betonu dökülür. Kaya kütlelerini su sızıntıları ve yoğun su akışı önemli derecede etkiler.

4.2.3.3 C3 kaya ve destek sınıfı (çok baskılı)

Bu kaya kütlesi ‘çok baskılı’ olarak isimlendirilir. Tünel üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olarak aşamalandırılır. Üst yarı bölümler halinde açılır ve bu kazılar esnasında tünel aynasında tahkimat yapılması gerekmektedir. Şekil 4.3’te üst yarı kazısı 1, 2 ve 3 olarak aşamalandırılan, alt yarı kazısının 4 numarayla, invert kazısının ise 5 ile gösterildiği C3 sınıfı tünel kesiti görülmektedir.



Şekil 4.3 : C3 sınıfında açılan tünelin aşamaları (Cebeci Tüneli).

Tünel ilerleme boyunun azalması, süren boyunun kısaltılması ve üst yarı kazısında destekleme görevi görecektir büyük bir topuk (kazılmadan bırakılan kütle) bırakılmaması alt yarı kazısının bölümlendirilmesine sebep olur. Üst yarı kazısında ise ortada topuk betonu bırakılarak yan galeriler açılabilir. Tünelde taban kazısı 25-50 m üst yarı kazısını takiben yapılır ve taban kemerinin ringi tamamlanır.

Tünel ilerlemesi boyunca düzenli bir tahkimat sistemi ile tünel ilerleme boyu üst yarıda 1.2 m, alt yarıda ise en fazla 2 m olacak şekilde yumuşak patlatmalı kazı veya mekanik kazı yöntemi ile kazılır. Kavlaklanmaların alınmasının ardından vakit kaybı yaşanmadan püskürtme beton uygulanır. Kazı sırasında fazla ve hızlı oluşan deplasmanlar derin zayıf zonların oluşumuna neden olur, oldukça uzun sürer ve yavaşça sonlanır. Derinlerde kayalarda kırılma oluşur ve plastik bölgeler gözlemlenir.

Kazı yapılırken kayada düşey hareketler olursa, kaplama temeli yüzeyi genişletilmeli, kaya bulonu ve enjeksiyon yapılmalı, geçici taban kemeri oluşturulmalıdır.

Tünelin tüm aynalarında yapılacak olan kazı ve tahkimat sistemi oldukça fazladır. Tahkimat sistemi kayanın üç eksenli gerilme durumunu sürdürmeli ve büyük deplasman miktarlarına göre oluşturulmalıdır. Tünelde üst yarı ve alt yarı kazısını takiben tüm tahkimatlar tamamlanır. Şekil 4.4'te bu sınıfta açılan tünelde yapılan tahkimatın sistematik olarak kazıyı takiben ilerlediği görülmektedir. Bu sistemli tahkimatlar içinde tünelin tavanına yapılan, delgisi sırasında kayaya zarar vermeyecek süren de bulunmaktadır.



Şekil 4.4 : C3 sınıfında açılan tünelde yapılan tahkimat sistemi (Cebeci Tüneli).

4.2.3.4 C4 kaya ve destek sınıfı (akıcı)

Bu sınıfta 'akıcı' olarak isimlendirilen kayaların kohezyonu ve sürtünmesi düşüktür. Bu durum, kazı sırasında malzemenin tünelin içine akmasına neden olur ve bu nedenle, bu sınıf kayalarda tünel kesitinin çok sayıda aşamalandırılması gerekmektedir. Tünel ilerleme boyu üst yarıda 1.5 m, alt yarıda ise en fazla 2 m olacak şekilde ekskavatör ile kazısı tamamlanır. Zemin kendini kazı sırasında tutamayacağı için kazıyla birlikte püskürtme beton uygulanması uygun olmaktadır. Tünel, üst yarı ve alt yarı kazısı olarak bölümlendirilir. Bu destek sınıfında üst yarı kazısı esnasında destekleme için topuk yapılır. Stabilite sorunlarının önüne geçmek için yan galeriler açılır. Aynada

süren uygulaması yapılır. Tahkimatlar üst yarı ve alt yarı kazılarını takiben tamamlanmalıdır. Tahkimat sisteminde bulunan püskürtme beton, hasır çelik, kaya bulonları ve drenaj elemanları kazı sırasında veya kazıyı takiben hızlı bir şekilde tamamlanmalıdır. Tünelde süren uygulanmalıdır. Üst yarı kazısı yapılırken geçici olarak ring kapama yapılmalıdır. Taban kemeri ring kapamasının ise üst yarı ayna kazısını 25-50 m geriden takip etmesi gerekmektedir. Bu zeminde suyu drene ederek veya diğer iyileştirici yöntemler kullanarak suyun etkisini azaltmak gerekmektedir.

4.2.3.5 C5 kaya ve destek sınıfı (şişen)

C5 sınıfında bulunan kaya kütlesi, sınıflar içindeki en zayıf zemin olup kil minerali, tuz, anhidrit gibi şişme potansiyeli olan maddeler içerir. Kayalardan sızan veya yoğun olarak akan su zeminde şişmeye ve hacim artışına, dolayısıyla gevşemelere neden olabilir.

Tünel bu destek sınıfına aitse üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olarak bölümlendirilir. Üst yarı için topuk yapılması gerekmektedir. Tünel, ilerleme boyu üst yarıda 1.5 m, alt yarıda ise en fazla 3 m olacak şekilde ekskavatör ile kazılır. Sert kayalarda ise patlatma yapılabilir. Kesitte kazılan her aşamada kazıyı takiben püskürtme beton kaplama yapılır.

Tahkimatlar üst yarı ve alt yarı kazılarını takiben her ilerlemede tamamlanır. Tünel destek sisteminde ise özellikle tünel tavanında süren yapılmalıdır. Taban kemeri ring kapamasının üst yarı ayna kazısını 100-150 m geriden takip etmesi gerekmektedir. Kayalardan sızan veya yoğun olarak akan su zeminde şişmeye neden olabilir.

4.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde Kazı Aşamaları

NATM'de tünel genel olarak delme-patlatma, yumuşak patlatma ve mekanik kazı yöntemleri ile kazılır. Delme-patlatma ve yumuşak patlatma yöntemlerinde, tünel aynası önceden hesaplanarak oluşturulmuş patlatma paterniyle açılan delgilere patlayıcı malzeme yerleştirilip patlatılarak tünel kazısı yapılmaktadır (Karakuş ve diğ., 2018). Tünel aynasında patlatma paternine göre delgilerin açıldığı ve bu delgilere patlayıcı yerleştirildiği görülen Şekil 4.5 aşağıda verilmiştir. Mekanik kazı ise makineler yardımıyla yapılan kazıdır.



Şekil 4.5 : Patlama paternine uygun tünel aynası (Cebeci Tüneli).

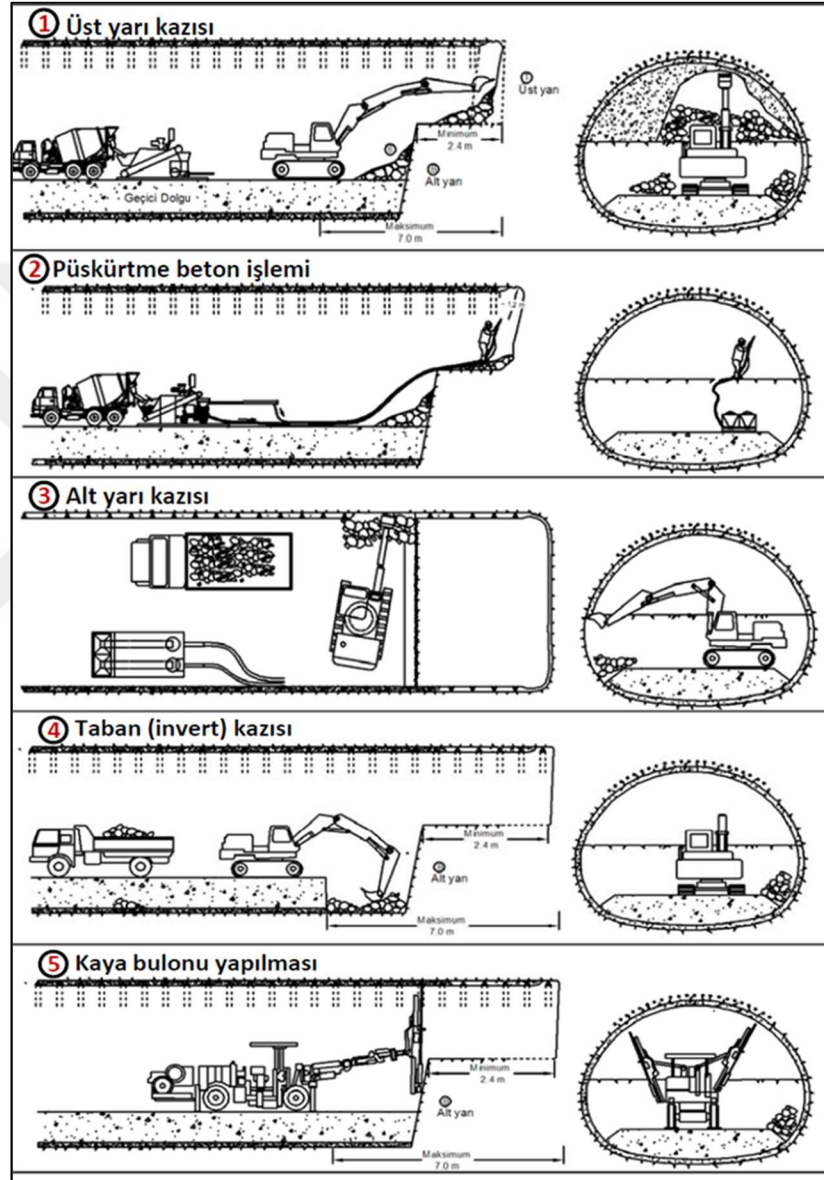
Yapılacak olan kazının türünü tünelin boyutları, zeminin jeolojik durumu, tahkimat elemanları, yeraltı suyu, tünelin içinde oluşabilecek deplasmanlar ve tünel üstünde yüzeyde bulunan binaların deplasman sınırları, patlatma limitleri, makine ve ekipman türü belirlemektedir. Zemin koşullarına göre tünel tek parça halinde ya da aşamalı olarak kazılabilmektedir. Tünel ilerleme boyu da yerel zemin koşullarına bakılarak belirlenmektedir. Ayrıca tahkimat yapılmadan kazılan bölge ne kadar kısa olursa, buna bağlı olarak deplasmanlar da o kadar azalmaktadır (Telford, 1996).

Kazı işlemi genel olarak 3 aşamalı bir kazıda, birinci kademe kazısı (kalot), ikinci kademe kazısı (stros) ve üçüncü kademe kazısı (radye) olmak üzere aşağıdaki gibi gerçekleştirilir (Köse ve diğ., 2007):

- Birinci kademe kazısında, tünel kesitinin üst kısmı yarım daire şeklinde kazılır. Kazıdan hemen sonra birinci kat püskürtme beton atılarak eklem çatlakları kapatılır, tünel yüzeyinin hava ile teması kesilir ve duraylılık artırılır. Hasır çelik, iksa ve kaya bulonları ile kalot kazısı tamamlanır.
- İkinci kademe kazı, birinci kademe kazıyla arasında genellikle 25–30 metre kalacak şekilde kazılır. Yapılan kazının tahkimatları tamamlanır.
- Üçüncü kademe kazı veya taban kazısı, ilk iki kademe kazılarını takiben son aşama olarak yapılır.

Birinci, ikinci ve üçüncü kademe kazıları paralel zamanlı olarak devam etmekte olup bir taraftan tahkimat elemanları tamamlanmakta bir taraftan da kazıdan çıkan pasa dışarıya taşınmaktadır. Tünel alanının geniş olması sebebiyle bu işlemler

gerçekleştirilirken tünel kazısında zaman en verimli şekilde değerlendirilmektedir. Buna uygun olarak, Şekil 4.6’da 3 aşamalı tünelde kazı ve tahkimat uygulama adımları görülmektedir. Aşağıdaki şeklin 1.bölümünde üst yarı kazısının yapılması, 2.bölümünde püskürtme betonla açılan yerin kaplanması, 3.bölümünde alt yarının kazılması ve pasanın dışarı çıkartılması, 4.bölümde invert kazısının yapılması ve son bölümde ise tahkimat elemanı olan kaya bulonunun uygulanması görülmektedir.



Şekil 4.6 : Üç aşamalı kazı (Arıoğlu ve diğ., 2002).

4.4 NATM Tahkimat Elemanları

Tünel kazılmadan önce zeminin sahip olduğu ilk gerilme değişerek kazı sırasında ikinci gerilme durumuna dönüşür. Tünelin etrafında oluşan bu ikincil gerilme durumu

tünelin stabilitesini belirleyen ana etmenlerden olup, oluşan yeni gerilmeler tünel içinde deformasyonlara neden olacaktır. Tünel çevresinde bulunan kayanın kendi kendini tutabilme süresi içindeki en uygun zamanda uygulanacak tahkimat elemanlarıyla, kaya direncinin artırılması gerekmektedir (Vardar, 1985). Kaya kütlelerinin dışına yerleştirilen tahkimat elemanlarından çelik hasır, çelik iksa, püskürtme beton, kaya bulunu kullanılarak kaya kütlelerinin hareketleri kontrol edilmektedir (Chan ve Caspe, 2004). Aşağıda bahsedilen tahkimat elemanları açıklanmaktadır.

4.4.1 Püskürtme beton

Püskürtme beton; agregâ, çimento, su ve priz hızlandırıcı katkı karışımının bir boru yardımıyla basınçlı hava ile yüzeye püskürtülerek uygulanan betondur. Püskürtme betonun ilk örneğinin maksimum dane boyutu 5 mm'yi geçmeyen agregâ, kum ve portland çimentosundan oluştuğu görülmektedir. Çimentolu malzemelerin dikey yönde yüzeylere uygulanması için mevcut olan yöntemlerden biri olan püskürtme beton 100 yılı aşkındır kullanılmaktadır (Telford, 1996). Şekil 4.7'de püskürtme betonun yüzeye makine yardımıyla uygulanma şekli görülmektedir.



Şekil 4.7 : Püskürtme betonun uygulanması (Cebeci Tüneli).

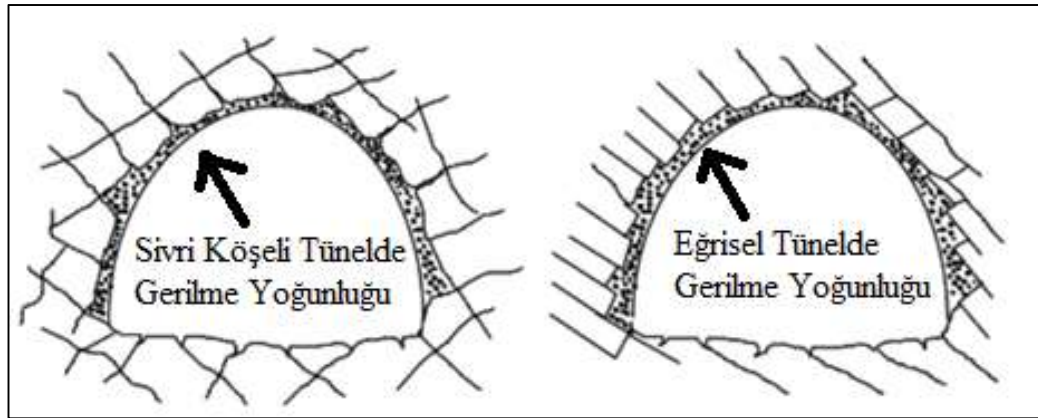
Değişken zemin koşullarına uyumlu olması, yüzeye çabuk yerleşmesi, kısa zamanda dayanımının artmasından dolayı püskürtme beton kaplaması, çelik iksa, hasır çelik ve kaya bulonlarından oluşan tahkimat sisteminin ana elemanlarından birisi olmuştur (Rabcewicz, 1964).

Püskürtme betonun genel betondan farklı özellikleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir (Arioğlu ve diğ., 2008):

- Kalıp gerektirmemesi ve yüksek uygulama hızına sahip olması (1-6 dk),
- Esnek ve ekonomik olması,
- Özel katkıları sayesinde hızlı priz alması (12-20 dk),
- Zemine iyi yapışması,
- Dayanımının çok çabuk artması,
- Sünek davranış göstermesi ve dayanımının kalıcı olması,
- Düşük geçirgenliği ve betona göre daha ince olması
- Değişken tünel kesitlerinde uygulanmasıdır.

Püskürtme betonun tünel içindeki görevleri aşağıdaki gibidir (Arioğlu ve diğ., 2008):

- Kayada kırık ve çatlakları doldurarak kayanın yerindeki kayma dayanımını arttırmasını sağlar.
- Köşelerde düzgün yüzey elde edilmesini sağlar ve burada oluşan gerilmelerin yoğunluğunu azaltır. Şekil 4.8’de düzgün olmayan köşelerin püskürtme betonla doldurularak tünelin eğriselleşmesi ile gerilmenin dağıldığı ve gerilme yoğunluğunun azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.8 : Köşelerin dolumu ile gerilme yoğunluğunun azalması.

- Püskürme beton kaya blokların yükünü, sağladığı adezyon ve kayma direnci ile çevre kayalara dağıtarak kayanın kendi kendini taşımasını sağlamaktadır.
- Kaya elemanlarının üstünü kabuk gibi kaplayarak taşıyıcı görevi görmektedir.
- Zeminlerde oluşabilecek gevşeme ve çökmelere karşı kemerleşmeyi sağlar, dayanımı arttırarak gevşemelerin önüne geçer ve dolayısıyla deplasmanları en aza indirmektedir.
- Püskürtme beton oluşturulurken, içindeki katkıların ve malzemelerin miktarları değiştirilerek kayada oluşabilecek göçük ve sökülmeler önlenmektedir.
- Tahkimat elemanı olarak kullanılmaktadır.
- Kazılan bölgenin hava ve su ile temasını engeller, böylece gevşeme ve sökülmelerin önlenmesini sağlamaktadır.

Günümüzde tünelciliğin yanı sıra, madencilik, hidroenerji santralleri, şev stabilitesi, kanal kaplaması, hasarların onarımı gibi alanlarda temel tahkimat elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

4.4.2 Çelik hasır

Çelik hasır, özellikle zayıf zeminlerde kazı yapıldıktan sonra çökmenin meydana gelmemesi için kullanılan tahkimat elemanlarından biridir. Kazı sistemini destekleyerek, püskürtme beton kaplamasının kesme mukavemetini arttırır, zeminde oluşabilecek kopmaları önler. Şekil 4.9'da Cebeci Tüneli'nde üstü püskürtme beton ile kaplanan çelik hasır ve 2 çelik hasırın birleşim alanı görülmektedir.



Şekil 4.9 : Tünel içindeki püskürtme beton kaplı çelik hasır (Cebeci Tüneli).

Çelik hasır kayayı güçlendirerek kayada kazı sonrasında oluşabilecek çatlakların azalmasını sağlar. Püskürtme beton uygulaması sırasında basınç altında kalan çelik hasırın düşmemesi, zeminden ayrılmaması veya sarkmaması için zemine doğru bir şekilde monte edilmesi gerekmektedir (Telford, 1996).

4.4.3 Çelik iksa

Çelik iksa, tünel aynasında yapılan kazı sırasında püskürtme beton dayanım kazanıncaya kadar tünel desteğini güçlendirmek, yapı rijitliğini korumak ve püskürtme betonda yük dağılımına destek olmak amacıyla kullanılmaktadır. Çelik iksa uygulaması, destekleme yapılacak alanın kaya sınıfına göre H, I veya U profil ve kafes kiriş şeklinde belirlenebilmektedir. Ayrıca zeminin yapısı ve tünel aynasında meydana gelebilecek deformasyonlara göre iksa sıklığı da değişiklik göstermektedir. Bu destekleme elemanları çatlakların oluştuğu kaya ortamlarında da kullanılmaktadır. Aşırı çatlaklı kazı ortamında çelik iksa ve ayna arasına çelik hasır veya çelik plaka yerleştirilerek kaya blokların düşmesi ve hasara yol açması engellenmektedir. Çelik iksa zeminin yapısını değiştirmemekte, ancak oluşabilecek deformasyonlar sonucu zayıflayan sisteme destek olmaktadır (Harris ve diğ., 1996). Cebeci Tüneli'nde uygulanan kafes iksa aşağıdaki Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10 : Kafes iksanın tünel içine yerleştirilmesi (Cebeci Tüneli).

4.4.4 Kaya bulonu

Doğal dengesi bozulan kayaları sağlamlaştırmak, plastik deformasyon bölgesini elastik deformasyon bölgesine yaklaştırmak, ankraj görevini sağlamak amacıyla uygulanan demir çubuklardır. Kaya bulonlarının görevleri aşağıdaki gibidir:

- Kayayı sağlamlaştırarak çekme gerilmelerini kayaya taşır.
- Ana kayaya çekme gerilmelerini iletir.
- Kayada bulunan süreksizliklerin sürtünme dirençlerini artırır.
- Kayanın üç eksenli gerilme durumunu korumak amacıyla zemine monte edilir (Önalp, 1983).

Bu bulonlar, tüm tahkimat elemanlarını birbirine tutturan, kayaların birbirinden kopmalarını ve ayrılmalarını önleyen, tünelin en önemli ana tahkimat elemanlarından biridir. Kaya bulonlar, tünelin tavanında ve yan duvarlarında delikler açılarak bu deliklerin içine yerleştirilir ve sonrasında çimento enjeksiyonu ile delgi dolana kadar yapılır. Kaya bulonu plakası ve somunu ile kayaya sabitlenir (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013). Şekil 4.11’de tünele sabitlenen kaya bulonu, plakası ve somunu görülmektedir.



Şekil 4.11 : Kaya bulonu ve plakası (Cebeci Tüneli).

Bu bulonların boyu, çapı, uzunluğu ve sayısı tünelin geoteknik durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. SN bulon, PG bulon ve IBO bulon gibi kaya bulonu türleri bulunmaktadır. Bunlardan PG bulon, açılan deliğe önce bulonun yerleştirilmesi daha sonra enjeksiyonla doldurulması şeklinde uygulanmaktadır. SN bulonda ise PG bulonun aksine, bulon deliğe yerleştirilmeden önce açılan delik enjeksiyonla doldurulduktan sonra bulon yerleştirilmektedir. Kaya bulonu ve delici uçtan oluşan IBO bulon, içindeki boşluktan deliğe doğru enjeksiyon yapılması şeklinde uygulanmaktadır. IBO bulonlar delme işleminden sonra dışarıya çıkartılmamaktadır (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

4.4.5 Süren

Süren uygulaması tünel aynasında kazı yapılacak alanın önceden desteklenerek emniyete alınmasını sağlar. Enjeksiyonlu ön sürenler tünel aynasında ilerleme sırasında zemini destekleyici, iyileştirici ve ortam zemininin dayanımını arttırıcı özelliğe sahiptir. Tünel kesitinde oluşacak olan kesme gerilmelerini de kontrol amacı ile kullanılmaktadır. Zemin yapısı olarak tümüyle ayrışmış ya da büyük kaya bloklarının oluşturduğu alanlarda kazı yapıldıktan sonra ve destekleme yapılmadan önce tünel üst yarı tavan kısımlarında ve aynada göçmelerin meydana gelmesini önlemek amacıyla, kazı yapılmadan önce tünel ilerleme yönünde, destekleme yapılacak alanın kaya sınıfına göre belirli aralıklarla önceden açılmış olan deliklere 32 mm veya 51 mm çapında 6m-9m uzunluğunda borular yerleştirilerek destekleme işlemi yapılmaktadır. Ardından yerleştirilmiş delikli borular yardımıyla zemine çimento enjeksiyonu yapılır. Bu işlem ayna imalatı ilerledikçe süren boyuna bağlı olarak belirli bir bindirme boyu sağlanacak şekilde tekrarlanır. Şemsiye kemer (umbrella arch) yöntemi, özellikle yüzey oturmalarının minimum seviyede olması istenilen tünel imalatlarında sıklıkla kullanılan bir yöntem olup, genellikle 101.6 mm çapında uygulanarak diğer sürenlere göre daha etkili bir yöntem olmaktadır (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013). Cebeci Tüneli'nde tünel aynasına dik bir şekilde uygulanan, 9 m boyutlarında şemsiye kemer (umbrella arch) Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12 : Tünel aynasına uygulanan sürenler (umbrella arch) (Cebeci Tüneli).

4.5 NATM'nin Üstün ve Zayıf Yönleri

Şehir içinde tünel açmak için tünele etki eden bütün çevresel koşullara ve her türlü jeolojik yapıya adapte olabilen bir yöntem kullanarak tünel açmak en doğru seçenek olacaktır. NATM'nin günümüzde kullanılan diğer yöntemlere göre bazı üstünlükleri bulunmaktadır (Köse ve diğ., 2007):

- Farklı zemin koşullarında ve değişen kazı kesitlerinde kolayca uygulanmaktadır. Özellikle şehir içinde açılan geniş kesitli ve zayıf zeminli tüneller için diğer yöntemlere göre daha ekonomik olmaktadır.
- Birden fazla mekanizma ile çalışıldığı için, makinelerin arıza yapması durumunda işin tamamı durmaz, böylece tünel kazısında zaman kaybı yaşanmaz.
- Bu yöntem, özellikle şehir içinde açılan tünellerde yüzey oturmalarının artmasına veya azalmasına bağlı olarak tahkimatların değiştirilmesiyle daha ekonomik bir yöntem haline getirilir.
- Tünel kaplamalarında membran kullanımı ile su engellenir.

Bu yöntemin bazı zayıf yönleri de bulunmaktadır (Arioğlu, 2008):

- Diğer mekanik tünel açma yöntemlerine göre ilerleme oranı düşüktür, ilerlemede artış sağlanmaz.
- Tecrübeli personelle çalışılmalıdır ve kalifiye işçilik gereklidir.
- Düzenli olarak ölçüm yapılmalı ve deplasman kontrollerinin devamlılığı sağlanmalıdır.

5. TÜNELLERDE GEOTEKNİK ÖLÇÜMLER

Geoteknik ölçümler, zemin özelliklerinin tam olarak bilinemediği ve derin kazı gerektiren inşaatlarda zemin parametrelerinin ve özelliklerinin belirlenmesinde, yapıların hareketinin ölçülmesinde kullanılmaktadır.

Tünelcilikte karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi, kazı yapılan arazide oluşan yüzey oturmalarıdır. Tünellerin projesine uygunluğu tahkimat sisteminin kalitesi ve proje ile saha çalışmalarının karşılaştırılarak tünel yapımının uygunluğu gerilme ve deplasman ölçümleri ile tespit edilmektedir. Kazı sırasında ilerlenen her birim mesafe için kaya biriminin stabil, tahkimatların yeterli olup olmadığı yapılan bu ölçümler ile görülebilmektedir. Şehir içinde açılan tünellerin kazıları esnasında yüzeyde oluşturduğu deplasmanlar önemli boyutlara ulaşabilir, enerjinin sönmülenmediği kayalarda oluşacak göçüklerle can ve mal kayıpları yaşanabilir. Kazı sırasında deformasyonların etkisiyle tüm jeolojik birimler yük altında şekil değiştirmeye başlar. Bu deformasyonların hızı ve sonucu birimin özelliklerine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Kimi kayalar artan deformasyonlar sonucunda yenilir ve kazı göçükle sonuçlanır, kimi kayalarda ise enerji sönmülenir ve deformasyonlar zamanla azalarak durur. Her kayacın kritik gerilme değeri vardır, bu değere ulaşıldığında malzeme sabit gerilme altında sabit hızla akmaya başlar. Kayalar zamana bağlı olarak iki farklı şekilde davranabilir. Eğer kayaya etkiyen gerilme kritik gerilmeden küçükse, deplasmanlar zamanla duracaktır. Aksi durumda, kayaya etkiyen gerilmeler kritik gerilme sınırından büyükse göçük oluncaya kadar deformasyon hızı artmaya devam edecektir. Kayaya etkiyen gerilmelerin zamana bağlı olarak artması durumunda önce azalan, sonra sabit hızlı hareket eden ve en sonunda artan bir ivmeli hareketin olduğu durum meydana gelecektir. Deplasman artışlarının sürekli olarak izlenmesi için tünel içerisinde optik yöntemler ile okumalar yapılmalıdır. Okumalar sık aralıklarla yapılmalı ve her okuma sonrasında deplasman-zaman eğrileri oluşturulmalıdır.

5.1 Ekstansometre Ölçümü

Yüzey veya yer altı kazılarında, temel yükü veya şev hareketleri sonucunda oluşabilecek zemin hareketlerini ölçmek için kullanılan bu alet, bir sondaj deliğinin farklı derinliklerinde yer alan, bir veya birden çok ankrajla bir başlıktan oluşur. Ekstansometrelerin çoğu başlıkla ankrajlar arasında gerilen çubuk veya kablolardan oluşur. Mekanik veya elektronik yollarla, zemindeki negatif deplasmanlar, ankraj veya sondaj deliği içindeki röperle başlık arasındaki mesafe değişimi şeklinde ölçülür (Aydemir, 2010). Ekstansometre aleti aşağıda Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Ekstansometre aleti (Url-6).

5.2 Konverjans Ölçümü

Konverjans ölçüm aleti, tünel içinde oluşan deplasmanları ölçen, gösterge, kalibrasyon ve ölçüm bandından oluşan bir alettir. Bu aletin uygulanma şekli; tünelin içine bulon yerleştirilip, ilk okumaların alınıp, daha sonra yapılan okumaların iki nokta arasında gerilen şerit metre ile düzenli olarak uygulanmasıyla olur. Her okuma sonrasında okumalar geçmiş okumalarla karşılaştırılır ve iki bulon arasındaki deplasman miktarı belirlenir. Bu okumalar konverjans (yaklaşma) ya da diverjanstır (uzaklaşma). Bu

okunan deplasman miktarlarına bakılarak tünelde tahkimat sistemi değiştirilebilir. Konverjans ölçümlerinin sağladığı faydalar ise şu şekilde sıralanabilir (Eren, 2014):

- Sahada uygulaması kolay ve güvenilirdir.
- Bir kişi ile uygulama yapılabilir.
- Aletin okuma duyarlılığı yüksektir.
- Kolay taşınabilen hafif bir alettir.
- Ölçümler hızlı bir şekilde yapılabilir.

Konverjans ölçümlerinin zayıf yönleri ise şu şekilde sıralanabilir:

- Göreceli ölçüm değeri verir.
- Sıcaklık, nem gibi faktörlerden dolayı ölçümler etkilenebilir.

5.3 İnklinometre Ölçümü

İnklinometre aleti sondaj için açılan deliğin eksenine dik doğrultuda meydana gelen hareketlerin yeri, büyüklüğü ve 10-20°'lik sapma miktarları ve tünel içindeki yatay yer değiştirmelerin ölçüldüğü bir alettir. Ayrıca bu ölçüm aleti ile, tünel içi yatay deformasyonlar, şev ve heyelanların yer değişimi, baraj ve seddelerin yatay deformasyon ölçümleri yapılır. Sahada açılan, derinliği önceden belirlenen ve aralıkları belirli olan sondaj kuyularında ölçüm yapılır (Kalkan ve diğ. 2009).

Bir kabloya bağlı olarak Şekil 5.2'de gösterilen esnek bir boru içerisinde deliğe indirilen probe ve probenin bağlandığı kontrol kutusu inklinometreyi oluşturan, ölçümleri grafiklere dönüştüren parçalardır. Probeler genellikle içerisine 90°'lik arayla yerleştirilmiş 4 adet yiv bulunduran esnek dairesel borular gerektirirler. Probedeki elektriksel çıkış kontrol kutusuna bağlı bulunmaktadır ve yapılan ölçümleri görsel verilere, grafiklere dönüştürürler. İnklinometre borusu, 3 m uzunluğunda ve plastik olup hareket beklenen bölge ile kesişen dike yakın bir deliğe kurulur. Açılan delik, hareket beklenmeyen bölge içerisinde (zemin veya kaya ortamı olabilir) hareket beklenen bölgenin 4,5 m ilerisine kadar uzatılmalıdır. İnklinometre borusunun kurulduğu andaki pozisyonuna göre, bütün deplasmanların hesaplanmasına kadar, en az iki ayrı set halinde yapılacak olan ölçümlere göre borunun ilk konumunun doğruluğu kanıtlanmalıdır. Aşağıda (Yalçınkaya ve diğ., 2005).



Şekil 5.2 : İnklinometre borusu ve zemine kurulumu (Cebeci).

5.4 Çatlak Ölçerler

Yüzeyde oluşan çatlakların ilerme yönünü ve miktarını tespit edebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Yapılardaki Şekil 5.3'te gösterildiği gibi çatlağın üstüne monte edilerek çatlakların yer değiştirip değiştiğini mm olarak tespit edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.3 : Çatlak ölçer (Cebeci).

5.5 Gerilme Ölçerler

Tünel içinde yapılan beton kaplamalarda oluşan deplasmanlarının tespit edilmesi amacıyla kullanılan ölçüm aletleridir. Gerilme ölçerlerin bir çeşidi olan gömme tipi gerilme ölçerlerin iki ucunda flanşlar arasında gerilmiş, yüksek gerilmeye sahip olan bir tel ile paslanmaz koruyucu çelik tüpten oluşmaktadır. Gerilme ölçerler betonun içine gömüldüğü zaman beton içindeki kuvvetler cihazın flanşları arasında rölatif hareketler oluşturur, bunun sonucunda da telde bir gerilme değişimi oluşur ve bu gerilmelerin oluşturduğu deplasmanlar, telin doğal titreşim frekansını değiştirir. Oluşan sinyal, esnek bir tel vasıtasıyla ölçme cihazına gönderilir. Eğer bu gerilme ölçerler, beton dökümü esnasında dikkatli bir şekilde yerleştirilirse, tek bir uzaktan okuma ünitesiyle yapının deplasman davranışı hakkında bilgi elde etmek mümkün olur (Güven, 2009).

5.6 Bina İzleme Noktası Ölçümleri

Bina izleme noktaları, binalara yerleştirilen prizmalar aracılığıyla binaların eğilme ve bükülmelerinin belirlenmesini takip eden izleme elemanlarıdır. Bina inceleme prizmaları bina cephelerine, yapısal olarak temel nitelikteki noktalara ve bina yüksekliğine göre farklı seviyelere sıkıca sabitlenir. 2 katlı binalar için bir seviyede prizma, 5 kata kadar binalarda iki seviyede prizma, 5 kattan yüksek binalarda en üst kata bir ek prizma seviyesi monte edilerek uygulanır (Güven, 2009).

Ayrıca total station ölçüm aletiyle binalara önceden yerleştirilen bulonların sabit bir poligon noktası ile hareketi 3 yönlü olarak izlenmektedir ve bina deplasmanları bu yöntemle takip edilebilmektedir.



6. TÜNEL KAZILARININ NEDEN OLDUĞU YÜZEY DEPLASMANLARININ İNCELENMESİ

Kırsal kesimlerde yaşıyan insanların şehir merkezlerine göç etmesi sonucunda yaşanan nüfus yoğunlukları, ulaşım ihtiyaçlarının karşılanması için şehir içinde tünel yapımına neden olmuştur. Bu çalışma kapsamında kullanılan tünellerin bulunduğu projenin güzergahı ve özellikleri, bu güzergahta tünellerin açılma nedenleri, çalışma kapsamında kullanılan Alibeyköy Tüneli Bölgesi'nde bulunan tünellerin boyutları, bulunduğu geoteknik ve jeolojik koşullar, zemin sınıflandırmaları bu bölümde açıklanmış, bu özelliklerde NATM ile açılan ikiz tünellerin deplasman değerleri bölgenin enkesitlere ayrılmasıyla incelenmiş, tünel kazı aşamaları kendi içerisinde değerlendirilmiş, aşamaların birbirleriyle olan benzerlikleri tartışılmış, ikiz tünel kazılarının birbirleri üzerinde etkisi olup olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca Gauss Hata Fonksiyonu kullanılarak çeşitli parametrelerle elde edilen deplasman miktarları saha ölçümleriyle karşılaştırılmış, İstanbul grovaklarında açılan ikiz tüneller için hangi parametre değerinin daha uygun olduğuna karar verilmiştir. Bununla birlikte yüzey deplasmanlarının tahmin edilmesinde kullanılan dönüm noktasının eksene olan mesafesinin hesaplanmasında İstanbul grovaklarına uygun olarak kullanılabilecek olan, basit, anlaşılır bir ampirik bağıntı elde edilmiştir.

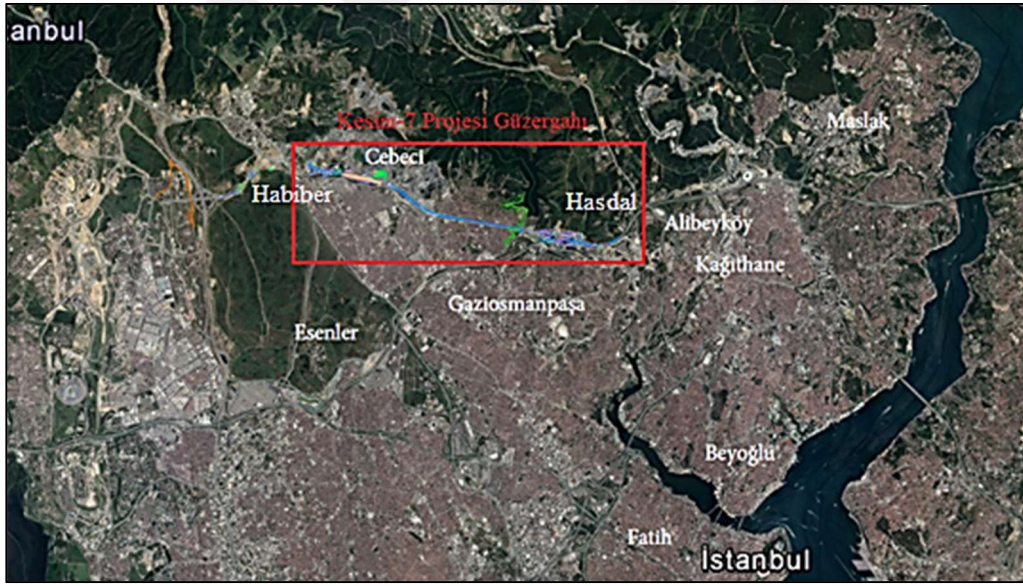
6.1 Projenin Genel Bilgileri

Kuzey Marmara Otoyolu Projesi 3. Boğaz Köprüsü dahil olmak üzere, İstanbul, Kocaeli ve Adapazarı'nı kapsayan, 11 Temmuz 2016 tarihinde yap-işlet-devret modelinde yapımına başlanan, mevcut köprülerdeki trafik yoğunluğunu azaltmak, yolcuların daha emniyetli yolculuk yapmasını ve yakıttan tasarruf etmesini sağlamak, ekonomiye katkıda bulunmak ve diğer ulaşım sistemlerine bağlantı yolu sağlamak gibi sebeplerle Kınalı (İstanbul)'dan başlayarak Akyazı (Adapazarı)'da son bulan, ana yol, kavşak kolları, bağlantı yolları, tünel, köprü, viyadük, altgeçit, üstgeçit, menfez yapılarından oluşan Şekil 6.1'de gösterilen toplam 7 kesimden oluşan 368.41 km'lik bir karayoludur.



Şekil 6.1 : Kuzey Marmara Otoyolu güzergahı.

Bu projenin Kınalı-Odayeri kesimine dahil olan Kesim 7 Projesi, Şekil 6.2’de verilen haritada gösterilmekte olup, İstanbul’un Eyüp ve Sultangazi ilçelerinde yer alan Habibler-Hasdal arasında bulunmaktadır.



Şekil 6.2 : Kesim 7 projesi güzergahı.

Güzergahı, Habibler’de KM: 60+400 ile başlayıp, Hasdal’da KM: 71+864 ile son bulan Kesim 7 projesi 11.5 km ana yoldan oluşur. Bağlantı yolları ve kavşak kolları ile birlikte toplam 26 km’dir. Yerleşim yerlerinin (mahalle, köy) yakınından ve yer yer içinden geçmekte olduğu için bu yolda, toplam olarak 30’u aşkın sayıda viyadük, köprü, altgeçit, üstgeçit ve menfez sanat yapıları, 9×10^6 m³ kazı ve 4×10^6 m³ dolgu bulunmakla beraber, ayrıca sağ ve sol tüp olmak üzere gidiş geliş toplam 6.42 km ikiz karayolu tüneli bulunmaktadır. Cebeci Taş Ocakları’ndan başlayarak Cebeci, Gazi ve

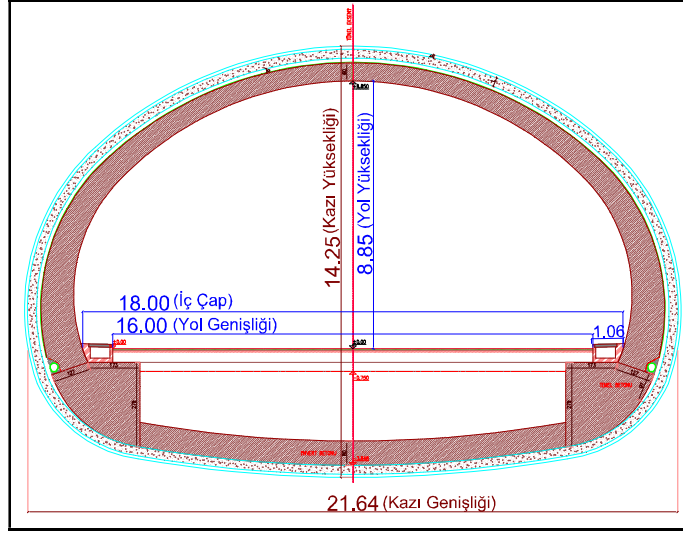
Zübeyde Hanım Mahalleleri altından geçen ve Alibeyköy’de son bulan tünel, Cebeci Tüneli olarak adlandırılmakta ve Şekil 6.3’te konumu gösterilmektedir. Bu tünelin sol tüp uzunluğu 3203 metre, sağ tüp uzunluğu 3217 metredir. Tünelin hızlı bir şekilde tamamlanarak yolcu kullanımına sunulması bakımından tünel 3 farklı noktadan açılmakta olup, bu çalışma kapsamında tünelin çıkış noktası olan, Zübeyde Hanım Mahallesi altından geçen Alibeyköy Tüneli Bölgesi (tünel sonu KM: 69+334) incelenecektir.



Şekil 6.3 : Cebeci Tüneli güzergahı ve Alibeyköy Tüneli Bölgesi.

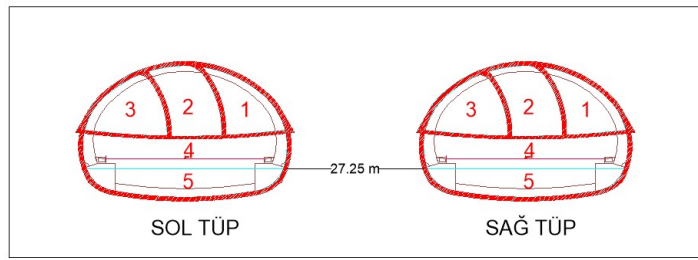
6.1.1 Çalışma bölgesi

Zemin koşulları ve örtü kalınlıkları değişken olan sol tünel geliş, sağ tünel gidiş olarak ikiz tünellerden oluşan projede, bir tüp tünelin içinde bulunan şerit sayısı 4 olup, bir şerit uzunluğunun 3.75 m ve toplam yol genişliğinin 16 m olduğu Şekil 6.4’te gösterilmektedir. Yolun sağ tarafında emniyet şeridi 1 m, yaya kaldırım genişliği ise 1.06 m’dir. Bu tünelin kazı çapı (genişliği) 21.64 m, kazı yüksekliği 14.25 m, tünelin nihai durumda iç çapı 18 m, yol üstündeki yüksekliği ise 8.85 m olup yine Şekil 6.4’te gösterilmektedir.



Şekil 6.4 : C2 ve C3 sınıfı tünel kesiti.

Alibeyköy Tüneli Bölgesinde bulunan ikiz tüneller, NATM ile açılmakta ve C3 kaya sınıfına dahil edilmektedir. Toplam 5 aşamada elma dilimi adı verilen, sol tüpte 3.aşamının ilk olarak açıldığı, 2.aşamının 2. olarak, 1.aşamının 3. olarak açıldığı, 4.ve 5.aşamaların sırasıyla kazıldığı, sağ tüpte ise 1.aşamının ilk olarak açılıp devam eden sırayla kazısı yapılan bu tünellerde, bu kazıların sırası ve şekilleri ile iki tünelin birbirine göre konumları ve aralarındaki mesafenin 27.25 m olduğu Şekil 6.5'te gösterilmektedir. Bu şekle göre 1., 2., ve 3.aşamalar üst yarı, 4.aşama alt yarı kazısıdır. 5.aşama invert kazısı olarak isimlendirilmekte ve invert her türlü zemin sınıfında uygulanmamakta olup sadece belli sınıflarda uygulanmaktadır.



Şekil 6.5 : İkiz tünellerin kazı aşamaları.

İstanbul bölgesinin genel jeolojisi, Cebeci Tüneli'nin güzergahında bulunan ve bu çalışmanın gerçekleştirildiği Alibeyköy Tüneli Bölgesi'nin yerel zemin koşulları, kayanın özellikleri, süreklilik durumu, yeraltı suyunun durumu ve zemin parametreleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmelere göre benzer özellik gösteren kayalar ayrılarak NATM kaya sınıfına karar verilmiş ve buna göre kazı ve tahkimat sistemi seçilmiştir.

6.1.2 Bölgenin genel jeolojisi

İstanbul içinde, birbirinden tektonik hatla ayrılan Istranca Birliği (metamorfik) ve İstanbul Birliği (metamorfizma göstermeyen) olarak iki adet stratigrafi birimi topluluğu bulunmaktadır. Bunlardan Istranca Birliği, Istranca Dağları'nın büyük bir bölümünü oluşturmakta olup şist, kuvarsit ve magmatik içermektedir. Bu birliğin küçük bir kısmı Çatalca'nın batısında ve kuzeyinde İstanbul il alanına dahil olmaktadır. İstanbul Birliği ise İstanbul ve çevresinde Paleozoyik ve Erken Mesozoyik yaşta kaya birimlerini içeren birliktir. Bu birlik Kapaklı, Trakya, Denizli Köyü, Pendik, Pelitli, Yayalar, Aydos, Kınalıada Formasyonları ile Gebze ve Polonezköy Grubunu içermektedir. Paleozoyik birimi, toplam kalınlığı 1000 metreden fazla olan, kıvrımlı, bol kırıklı, faylı, andezit ve diyabaz dayk içeren yaşlı kayalardan oluşmaktadır. En yaşlı kaya birimini Alt Ordovisiyen yaşta Kocatöngel ve Kurtköy formasyonunu içeren akarsu ve lagün ortamını temsil eden karasal çökeller oluşturmaktadır. Kara halindeki bölge, Ordovisiyen yaşta Aydos Formasyonunun kuvarsitleriyle başlar, Silüriyen, Devoniyen yaşta derinleşerek, tektonik olarak duraylı bir denizle kaplanmaktadır. Alt Ordovisiyen yaşta Yayalar Formasyonu, Alt Ordovisiyen-Silüriyen yaşta Pelitli Formasyonu, Alt-Orta Devoniyen yaşta Kartal Formasyonu, Üst Devoniyen Alt Karbonifer yaşta Denizli Köyü Formasyonu burada çökelmektedir. Alt Karbonifer yaşta Baltalimanı Formasyonu Denizli Köyü Formasyonu içinde ara tabakalar halinde yer almaktadır. Bunun üstünde Erken Karbonifer yaşta kumtaşı-şeyl ardalanmasından oluşan Trakya Formasyonu bulunmaktadır. Yeniden kara halini Sancaktepe Graniti oluşarak, Karbonifer-Permien aralığında tektonik hareketlere bağlı olarak almaktadır. Permien-Erken Triyos yaşta Kapaklı Formasyonu karasal istifler halinde çökelmektedir. Giderek derinleşen bir denizle, Orta-Geç Triyos aralığındaki bölge yeniden kaplanmaktadır. Burada Demirciler, Ballıkaya, Tepeköy ve Bakırlıkıran Formasyonu yer almaktadır. Volkanik ve filiş türü kırıntılılardan oluşan Sarıyer ve Yemişliçay Formasyonu geç Kreate yaştaadır. Üst Kreate yaşta ise kreate çökelleri ve volkanikleri bulunmaktadır. Eosen'de etkili olan kompresif hareketler yoğun faylanma ve kıvrımları oluşturmuştur. Sarıyer-Şile fayı da bu hareketlerin bir sonucu olarak oluşmuştur. Çatalca ve Şile Bölgelerinin kıyılarında kumsal ve deniz oluşması Orta Eosen'de bölgenin transgresyona uğramasıyla oluşmuştur. Bu bölgenin yeniden yükselerek karaları oluşturması, tektonik hareketlerin Orta-Geç Oligosen'de Trakya havzasını

etkilemesiyle oluşmuştur. Ayrıca Geç Oligosen ve Geç Miyosende Kırac, Çukurçeşme, Danişmen ve Çekmece Formasyonu oluşmuştur. Yine bu hareketlere bağlı olarak eklem sistemleri, makaslama ve fay gelişerek aktif olmayan zayıflık zonları oluşmuştur (Özgül, 2011).

6.1.2.1 Trakya formasyonu

Alt karbonifer yaşlı Trakya formasyonu kalınlığı 1000 metreden fazla olan, İstanbul'da Paleozoik üst biriminde bulunan, genellikle Avrupa yakasında Sarıyer, Arnavutköy, Şamlar, Zekeriyaköy, Mahmutbey, İkitelli, Taksim, Edirnekapı, Ortaköy, Ayazağa ve Levent'te yayılan İstanbul Birliği üyesi olan formasyondur. Sert, ince tabakalı, eklemi fazla, genel olarak gri-koyu renkli gri olan bu formasyonun taze yüzeyi mavimsi gri sarımsı gri, ayrışma yüzeyi kirli sarıdır. Trakya Formasyonu, şeyl, kilitaşı, kumtaşı, grovak, türbiditik kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşından oluşmuş, bloklu bir yapıya sahiptir ve genellikle ilk 20 metresi ayrışmış-orta ayrışmış, alt kısımlar ise ayrışmamış kayalardan oluşmaktadır. Ayrışmış grovaklar ayrışma derecesine göre kahve rengi ve sarımsı renge sahiptir. Daha derinde bulunan kılcal çatlaklı grovaklar ise koyu gri ve mavi gri renge sahiptir. Şeyl ve silttaşı fazla miktarda kil, %25-30 seviyesinde kuvars kırıntıları, %1-2 seviyesinde ise kum boyutlu kuvars daneleri içermektedir. Trakya formasyonu, değişken duraylılığı olan, mühendislik özellikleri bakımından farklılık gösteren birimlere sahip, kırıcı makineyle veya patlatma yoluyla kazısı yapılabilen, tektonizma olaylarından etkilendiği için fay, kıvrım, kırık ve eklem sistemleri bulunduran, RMR sınıflandırmasına göre 'zayıf-orta kaliteli kaya' olarak nitelendirilen bir çökel kaya grubudur. Bu formasyon başlıca Acıbadem, BalıkHAVUZ çakilitaşı, KüçükKÖY kumtaşı, Çamurluhan şeyl, Cebeciköy kireçtaşı, Gümüşdere silisli şeyl-grovak üyelerinden oluşmaktadır. Bu üyelerin bazılarının özellikleri, konumları, renkleri ve kalınlıkları aşağıda açıklanmaktadır (Gedik ve diğ., 2005).

Acıbadem üyesi

Killi, milli şeyl ve milttaşından oluşan bu üye formasyonun en alt birimini oluşturmaktadır. Kalınlığı bilinmemekte olup ince katmanlıdır. Ayrışma yüzeyi açık kahverengi, taze yüzeyi yeşilimsi koyu külrengidir.

Küçükköy kumtaşı üyesi

Küçükköy civarında bulunan Küçükköy kumtaşı üyesi, Levent, Etiler, Mecidiyeköy, Beşiktaş, Ayazağa, Alibeyköy, Eyüp, Gaziosmanpaşa'da görülmektedir. Bol mikalı fazla miktarda kumtaşı ve şeyl grovaktan oluşan filiş türü kırıntılıdır. Yeşilimsi koyu külrengi olan bu üyenin kalınlığı ise 1000 metreyi bulmaktadır.

Çamurluhan şeyl üyesi

Sanayi Mahallesi, Çeliktepe, Ayazağa, Alibeyköy, Cebeciköyün güneyinde bulunan bu üye, konglomera ve kumtaşı katkılı, kireçtaşı içeren, killi kalkerli şeyl, çakılcıklı şeyl ve grovak şeylden oluşmaktadır. Şeyllerin taze yüzeyi yeşilimsi gri, koyu gri, bozuşma yüzeyi grimsi sarı renkli, morumsu ve kırmızımsı renklidir. Üst taraftan Cebeciköy kireçtaşı üyesiyle ve alt taraftan Küçükköy kumtaşı üyesi ile geçişlidir.

Cebeciköy kireçtaşı üyesi

Cebeciköy civarında bulunan bu üye kalın tabakalı kireçtaşı, az miktarda killi kireçtaşı ve kalkerli şeylden oluşmaktadır. Kalınlığı bilinmemektedir. Mavimsi, koyu gri siyah renkli, serttir. Taze yüzeyi kara, koyu külrengidir. Üst taraftan Gümüşdere silisli şeyl-grovak üyesiyle ve alt taraftan Çamurluhan şeyl üyesi ile geçişlidir.

6.1.2.2 İstanbul grovakları

Grovak kuvars, kloritli, mikalı, silisli, killi çimentolu, sert köşeli, killi çimentolu bir kumtaşıdır. Gri-yeşilimsi koyu renkli olan grovağın taneleri köşelidir. İstanbul grovakları genel olarak silttaşı, şeyl ve kiltası içerir. Silttaşı ve kiltası, kültelerin ayrışmasıyla meydana gelen kil minerallerinden, mika, kuvars, serizt, demiroksit, pirti ve klorit parçalardan oluşur. Bu parçaların su içinde birikmesi sonucunda çamur tabakası oluşur. Tabakaların çoğalmasıyla su dışarı çıkar ve kalın kil ve silt çamurundan çamurtaşı olarak da adlandırılan sıkışmış ve sert kiltası ve silttaşı meydana gelir. Çamurtaşlarının yoğunlaşması ve ince tabakalara ayrışmasıyla şeyller oluşur. Şeyller, gri, siyah, mor renge sahip, kolayca çizilebilir, ince tanelidir ve ince levhalara bölünebilmektedir. Grovakların üst kısımlarında çatlak bulunması ve ayrışmaların olması nedeniyle kompakt kayalara göre daha düşük mukavemete sahiptirler (Sayar, 1973).

Bu çalışma kapsamında zemin, yer yer sık kırıklıklı, masif görünüme sahip, ezik zonlar içeren, geneli itibariyle orta ve düşük dayanımlı, orta ve az ayrışmış şeyl, silttaşı ve

kumtaşı içermektedir. En üst seviyede (arazi kotunda) ise zeminleşmiş atıklar diğer bir deyişle moloz görülmektedir.

6.1.3 Sondajlar ve yerel zemin koşulları

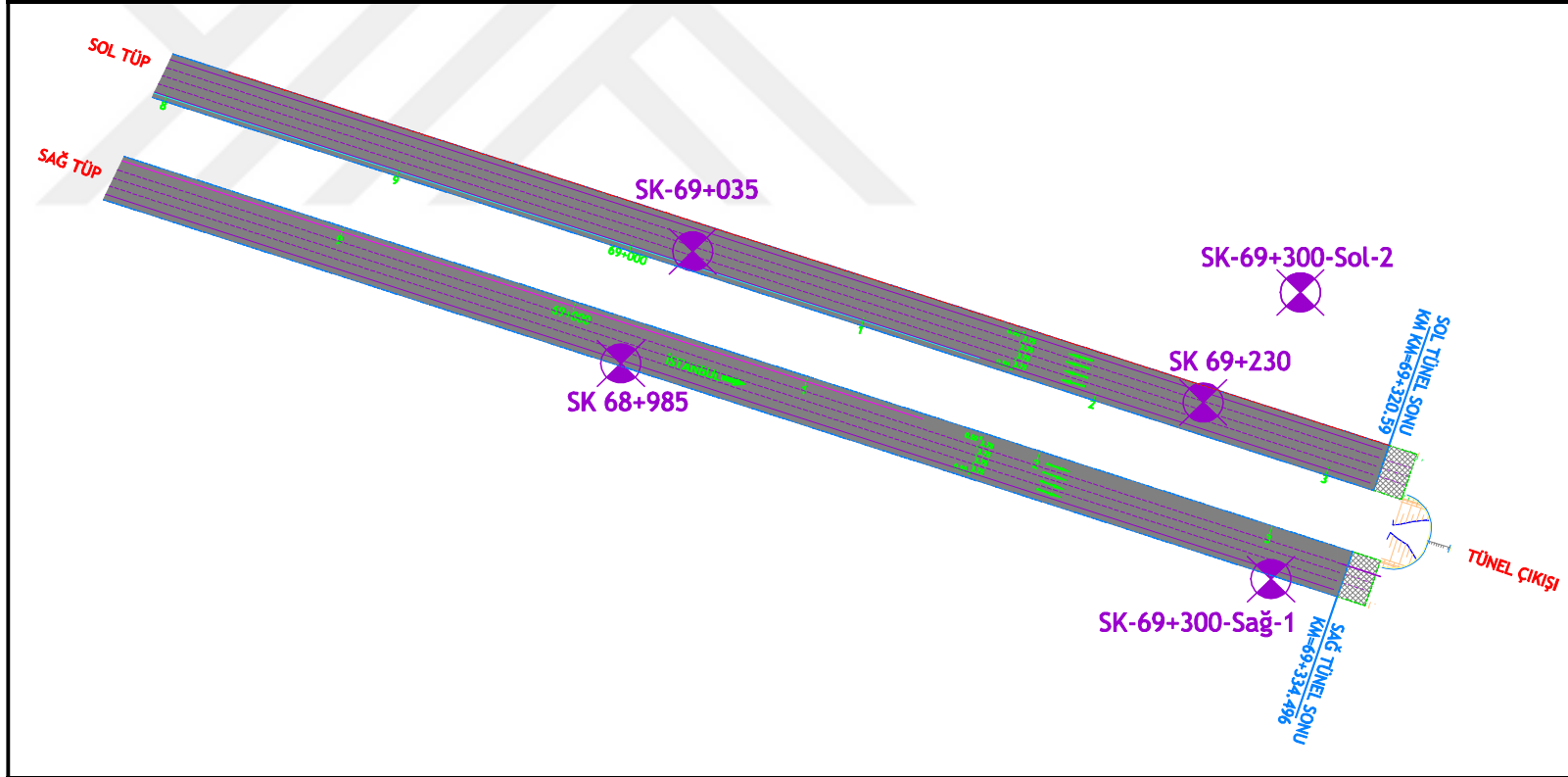
Güzergahın ilgilenilen bölgesinde, zemin kesitinde yer alan tabakaların cinslerini ve geoteknik özelliklerini belirlemek üzere sondaja dayalı zeminin incelemesi yapılmıştır. Sondaj kuyularından numuneler alınmış, serbest basınç deneyi uygulanarak elastisite modülü ve poisson oranı tespit edilmiştir. Aşağıda şekillerle gösterilen noktalarda 45-75 m derinliklerde yapılan sondajlarda genelde benzer zemin yapısı elde edilmiştir. Buna göre zemin kesitinde üstte blok boyutunda kil, boyutları değişen malzemelerden oluşan bir dolgu tabakası altında, bölgenin ana kayasını oluşturan Trakya formasyonuna ait kıltaşı, kumtaşı ve silttaşından oluşan tabakalar yer almakta ve kuyu sonuna kadar devam etmektedir.

İstanbul Bölgesi'nde bulunan Cebeci Tüneli güzergahında yapılan sondajlardan elde edilen birimler blok, çakıl, kum ve kil boyutunda malzemelerden oluşan yapay dolgu; kahve-kızıl kahve renkli, sert, kireçtaşı kökenli çakıl ve blok içeren kil; zayıf çimentolu kumtaşı aratabakalı ileri derecede ayrılmış, çok zayıf kaliteli çamurtaşı, kıltaşı, kumtaşı arıdanması; gri-koyu gri renkli, kalın tabakalı, orta-iyi dayanımlı, seyrek çatlaklı kireçtaşı; yer yer ezik ve kırık zonlar içeren kumtaşı, şeyl, silttaşı ve ince tabakalı kireçtaşı ile kıltaşı arıdanmasıdır.

Alibeyköy Tünel Bölgesinin yerel zemin koşullarını ve zemin parametrelerini belirlemek amacıyla farklı derinliklerde ve değişken aralıklarla yapılan 5 adet sondajın konumları, 50 ile 65 m arasında değişen derinlikleri ve kotları Çizelge 6.1'de, tünele göre konumları ise Şekil 6.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.1 : Sondajların konumları ve derinlikleri

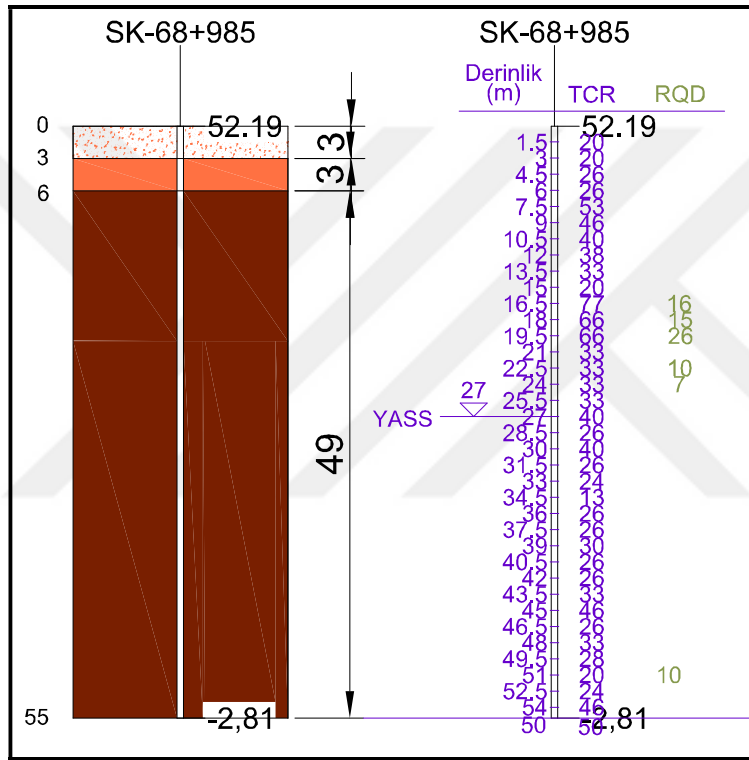
Sondaj No	KM	Derinlik (m)	Kot
SK-68+985	68+985	55	52.19
SK-69+035	69+035	50	64.03
SK-69+230	69+230	50	59.00
SK-69+300 Sağ 1	69+300 Sağ 1	65	36.50
SK-69+300 Sol 2	69+300 Sol 2	50	47.00



Şekil 6.6 : Sondajların konumları.

SK-68+985 no'lu sondaj

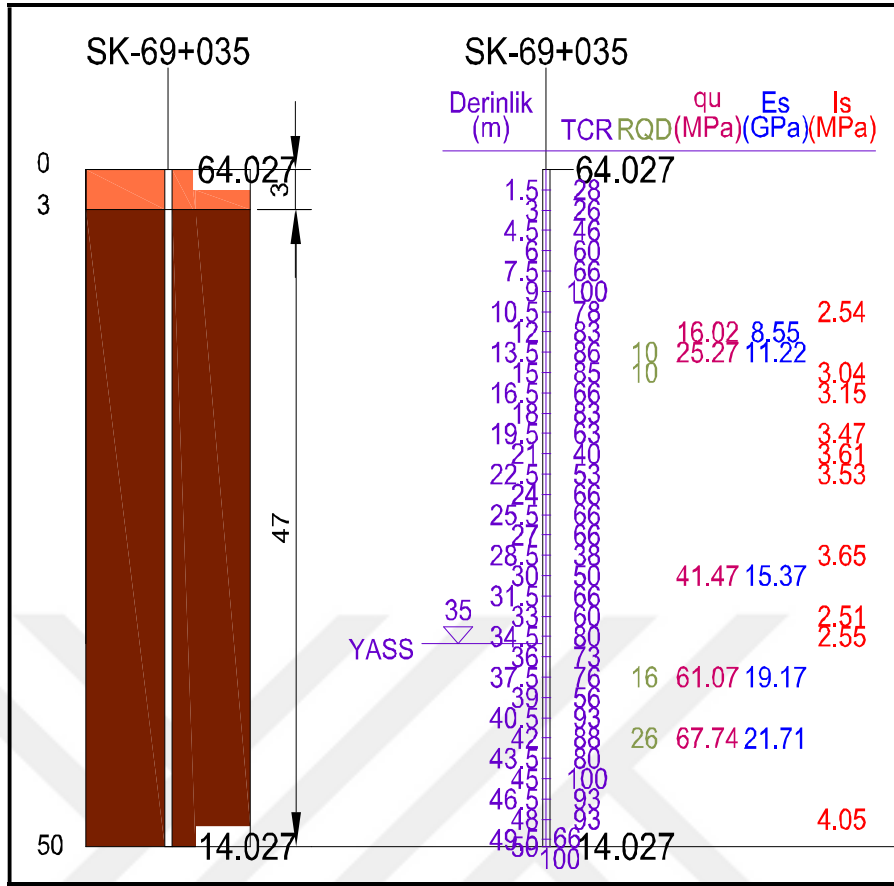
Yapılan 55 metrelik sondajın ilk 3 metresinde TCR değeri %20 olan dolgu, sonraki 3 metresinde TCR değeri %26 olan kahve-sarımsı kahverenkli, sık parçalı ve kırıklı, ileri derecede ayrışmadan dolayı zemin özelliğinde zayıf kaliteli şeyl, kalan 49 metrede ise TCR değeri %51, RQD değeri %14 olan gri renkli, sıkça seyrek parçalı, yoğun kumtaşı aratabakalı, kırıklı, çok zayıf kaliteli şeyl bulunmaktadır ve yeraltı suyu seviyesi 27. metrede ölçülmüş olup Şekil 6.7’de bu sondajın kesitinde sondaj derinliğine göre zemin sınıfları, sondajın TCR ve RQD değerleri de gösterilmektedir.



Şekil 6.7 : 68+985 sondaj kesiti.

SK-69+035 no'lu sondaj

50 metre açılan sondajın ilk 3 metresinde TCR değeri %26 olan kahve-sarımsı kahverenkli, zayıf dayanımlı ve zayıf kaliteli şeyl bulunmakta, kalan tabakalarda ise gri-koyu gri renkli, ayrıışmış zonlardan ötürü yer yer killeşmiş, sık parçalı ve kırıklı RQD değeri ortalama %15 olan zayıf kaliteli şeyl yer almaktadır. Yeraltı su seviyesinin 35. metrede tespit edildiği bu sondaj verileri Şekil 6.8’de gösterilen kesitte gösterilmekte olup, tek eksenli basınç dayanımı ortalama 42 MPa, elastisite modülü ortalama 15 GPa, nokta yükü dayanım indeksi ortalama 3.21 MPa değerinde bulunmaktadır.



Şekil 6.8 : 69+035 sondaj kesiti.

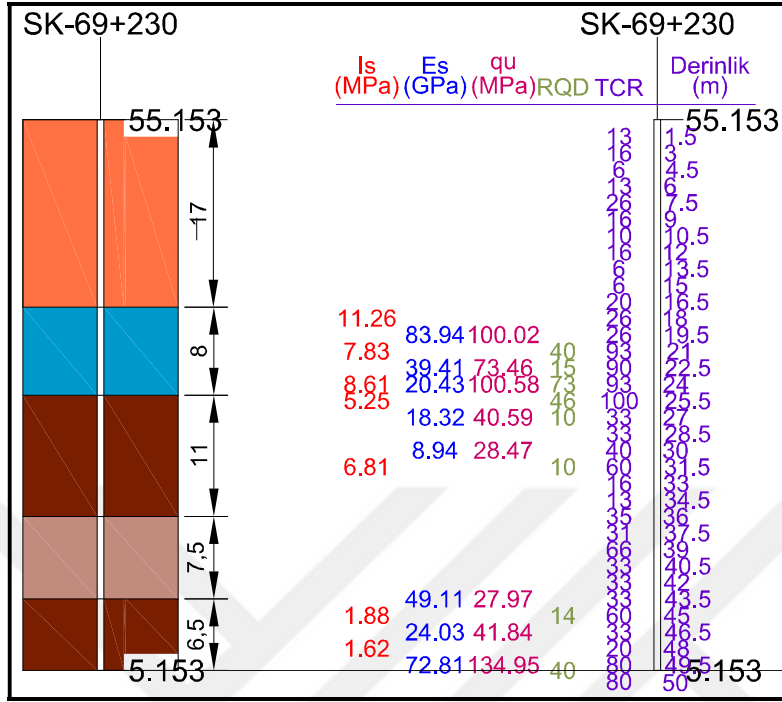
SK-69+230 no'lu sondaj

50 metre açılan sondajın ilk 17 metresinde kahve-sarımsı kahverenkli sık parçalı ve kırıklı, ileri derecede ayrışmadan ötürü yer yer zemin özelliği gösteren, zayıf kaliteli şeyl bulunmaktadır. Sonraki 8 metrede yeşil renkli iyi kaliteli dayk bulunmaktadır. 11 metrede gri renkli, ince kumtaşı aratabakalı, yoğun dayk ve siller bulunan zayıf kalitede şeyl bulunmaktadır. 7,5 metrede ise koyu gri renkli, killeşmiş, zayıf kaliteli tamamen ayrışmış şeyl bulunmaktadır. Kalan 6,5 metrede ise gri renkli, kumtaşı aratabakalı, sık parçalı ve kırıklı zayıf kaliteli şeyl yer almaktadır. Yeraltı su seviyesinin tespit edilemediği bu sondaj verileri Şekil 6.9'da gösterilen kesitte derinlikleriyle beraber gösterilmektedir.

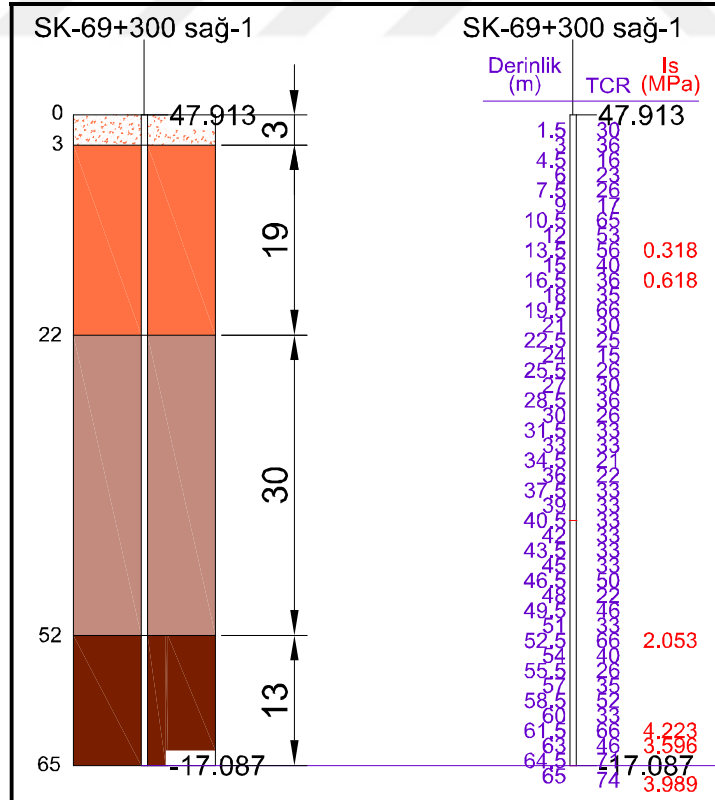
SK-69+300 Sağ 1 no'lu sondaj

Sondajın ilk 3 metresinde yamaç molozu birimi gözlenmekte, sonraki 19 metrede kahve-sarımsı kahverenkli, sık parçalı ve kırıklı, ileri derecede ayrışmadan ötürü zemin özelliği taşıyan zayıf kaliteli orta ileri derecede ayrışmış şeyl, sondajın 30 metre

devamında koyu gri renkli tamamen ayrılmış killeşmiş şeyl ve son 13 metrede ise gri renkli, parçalı ve kırıklı, kireçtaşı aratabakalı şeyl gözlenmektedir.



Şekil 6.9 : 69+230 sondaj kesiti.

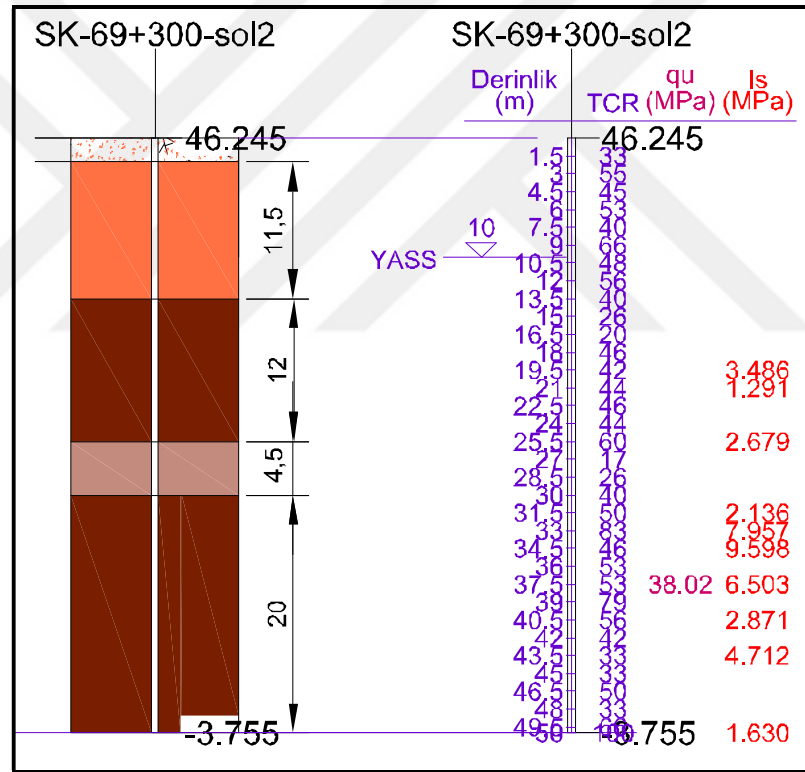


Şekil 6.10 : 69+300 sağ-1 sondaj kesiti.

Yeraltı su seviyesinin tespit edilemediği Şekil 6.10'da gösterilen bu sondajda nokta yükü dayanım indeksi ortalama 2.17 MPa değerindedir.

SK-69+300 Sol 2 no'lu sondaj

50 metre yapılan sondajın ilk 2 metresinde yamaç molozu gözlenmektedir. Sondajın devamındaki 11.5 metrede kahve-sarımsı renkli, sık parçalı ve kırıklı, ileri derecede ayrışmadan dolayı yer yer zemin özelliği gösteren zayıf kaliteli şeyl birimi bulunmaktadır. 12 m boyunca gri renkli, sık parçalı ve kırıklı, orta-zayıf dayanımlı zayıf kaliteli şeyl birimi bulunmaktadır. 4.5 metre koyu gri renkli, killeşmiş, sert, zayıf kalitede tamamen ayrılmış şeyl bulunmakta olup Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı ortalama 38.02 MPa, nokta yükü dayanım indeksi ise ortalama 4.28 MPa'dır. Yeraltı su seviyesi ise 10. metrede bulunmaktadır.



Şekil 6.11 : 69+300 sol-2 sondaj kesiti.

Süreksizlik durumunun değiştiği çatlaklı, kıvrımlı kayaların üstünde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen parametre değerleri arazideki gerçek durumu ve kazı sonrası oluşacak değişimlerin dikkate alınmadığı değerler olmaktadır. Grovak zeminlerde arazi deneyleri yapılarak daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmaktadır (Eyigün, 2014). Ayrıca çatlak ve süreksizlikler içeren ve yüzeyden itibaren ilk 20 metre derinlikte bulunan grovaklar üstünde yapılan laboratuvar deneyleri ile arazi deneyleri

arasında büyük farklar olduğunu Yıldırım (2002) belirtmiştir. Bu sebeple, Alibeyköy Tüneli Bölgesinde arazi deneyi yapılmadığı, sadece laboratuvar deneyleri yapıldığı için gerçekçi değerlerle sonuca ulaşmak amacıyla aşağıda verilen tablolarda bulunan değerlerden faydalanılmıştır. Aşağıdaki çizelgelerde İstanbul'un çeşitli konumlarında ve derinliklerinde arazi deneyleriyle tespit edilen parametre değerleri bulunmaktadır. Zemin türünün benzerlik gösterdiği grovakta açılan Levent-Hisarüstü (Metro inşaatı, 2013)'nün Çizelge 6.2'de 3-40 m derinliklerde 0.284 değeri bulunan poisson oranı, Çizelge 6.3'te verilen 2.36 t/m³ birim hacim ağırlık değeri, Çizelge 6.4'te verilen 2.44 GPa elastisite modülü değeri bu çalışma kapsamında kullanılacaktır.

Çizelge 6.2 : Poisson oranı değerleri

Konum	Poisson Oranı	Derinlik (m)	Kaynak
İstanbul Geneli	0.200-0.220		Yıldırım ve Savaşkan, 2002
Hasköy-Fındıklı	0.230-0.300	5.00-25.00	İTÜ MJKM, 1985
Levent-Hisarüstü	0.284	3.00-40.00	Metro inşaatı, 2013

Çizelge 6.3 : Birim ağırlık değerleri

Konum	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Derinlik (m)	Kaynak
İstanbul Geneli	2.50	0-20	Yıldırım ve Savaşkan, 2002
	2.65-2.72	> 20	
Hasköy-Fındıklı	2.60-2.72	5-25	İTÜ MJKM, 1985
Yenikapı	2.67-2.69	15-25	Metro inşaatı, 2005
Seyrantepe	2.41-2.66	7-27	Metro inşaatı, 2005
Levent-Hisarüstü	2.36	3-40	Metro inşaatı, 2013

Çizelge 6.4 : Elastisite modülü değerleri

Konum	Elastisite Modülü (GPa)	Derinlik (m)	Kaynak
Hasköy-Fındıklı	1.40-2.30	5-25	İTÜ MJKM, 1985
Seyrantepe	1.70-3.70	7-27	Metro inşaatı, 2005
Levent-Hisarüstü	2.44	3-40	Metro inşaatı, 2013

6.1.4 Projenin kaya kalite ve tahkimat sınıflandırmaları

Alibeyköy Tüneli çevresinden arazi kotuna kadar benzer özellik gösteren kayalar sınırlarla birbirinden ayrılmıştır. Bu ayrılma, yerel zemin koşulları, zemin parametreleri ve zeminin davranışına bağlı olarak kazı işlemi ve tahkimat sisteminin belirleneceği kaya sınıflandırmasının yapılması için gerekli olmuştur. Bu bölgelerin bulundukları km aralıkları, uzunlukları, litolojileri homojenleştirilerek Çizelge 6.5'te gösterilen şekilde ayrılmıştır.

Çizelge 6.5 : Homojen bölgelerin özellikleri

Bölge No	KM	Uzunluk	Litoloji
1	68+540-68+990	450	Yapay Dolgu-Kiltaşı
2	68+990-69+075	85	Yapay Dolgu-Kiltaşı
3	69+075-69+270	195	Yapay Dolgu-Kiltaşı
4	69+270-69+334	50	Yapay Dolgu-Kiltaşı

Ayrılan bölgelerin kaya kalite sınıflandırmaları aşağıdaki gibi RMR, Q ve GSI yöntemleriyle yapılmıştır. Ayrılan bölgelerde RMR sınıflandırmasına göre tek eksenli basınç dayanımına (σ), RQD değerine, süreksizlik aralığına (S_n), süreksizliklerin durumuna (J), yeraltı suyu durumuna (J_w) göre puanlama yapılarak Çizelge 6.6'da gösterilmiştir. Bu çizelgede, puanlardan toplanarak elde edilen sonuç RMR (temel), eğime göre düzeltme yapılarak elde edilen sonuç ise RMR (toplam) kısmında gösterilmiştir.

Q kaya sınıflandırmasında kaya kalite göstergesi (RQD), eklem takım sayısı (J_n), eklem pürüzlülük sayısı (J_r), eklem ayrışma sayısı (J_a), eklem suyu azaltma faktörü (J_w), gerilme düzeltme faktörü (SRF) verilmiş, hesaplanan Q değerleri sonucunda kayanın oldukça zayıf kaya kalitesinde olduğu Çizelge 6.7'de gösterilmiştir.

GSI değerlerine RMR (temel) değeri üzerinden ulaşılmış, hacimsel eklem sayısı (J_v) SR değerinden hesaplanmıştır. Bu veriler doğrultusunda süreksizlik yüzey koşulu (SCR) puanı, pürüzlülük puanı R_r , bozulma puanı R_w , dolgu puanı R_f 'ni toplanmasıyla elde edilmiş, bu değerler Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.6 : RMR¹⁹⁸⁹ kaya ve destek sınıflandırması puanları

Bölge No	σ	RQD	Sn	J	J _w	RMR (Temel)	Eğime Göre Düzeltilme	RMR (Toplam)
1	5-25	<25	<60 mm	10-20 m/ 1-5 mm pürüzsüz, yumuşak dolgu<5 mm/ çok ayrışmış	Nemli	25	Uygun değil	15
	2	3	5	5	10		-10	
2	5-25	<25	<60 mm	10-20 m/ 1-5 mm pürüzsüz, yumuşak dolgu>5 mm/ çok ayrışmış	Nemli	24	Uygun değil	14
	2	3	5	4	10		-10	
3	25- 50	<25	<60 mm	10-20 m/ 1-5 mm pürüzsüz, yumuşak dolgu<5 mm/ çok ayrışmış	Nemli	27	Hiç uygun değil	15
	4	3	5	5	10		-12	
4	5-25	<25	<60 mm	10-20 m/ 1-5 mm pürüzsüz, yumuşak dolgu<5 mm/ çok ayrışmış	Nemli	25	Uygun değil	15
	2	3	5	5	10		-10	

Çizelge 6.7 : Q kaya ve destek sınıflandırması

Bölge No	RQD	J _n	J _r	J _a	J _w	SRF	Q
1	15	3 eklem takımı	Pürüzsüz, düzlemsel	Sürekli kil zonları veya bantlar	Orta dereceli	Orta derecede sıkışma, kayada gerilme	Oldukça zayıf
		12	1	18	0.66	5	0.0092
2	15	3 eklem takımı	Pürüzsüz, düzlemsel	Sürekli kil zonları veya bantlar	Orta dereceli	Orta derecede sıkışma, kayada gerilme	Oldukça zayıf
		12	1	18	0.66	5	0.0092
3	25	3 eklem takımı	Pürüzsüz, düzlemsel	Sürekli kil zonları veya bantlar	Orta dereceli	Orta derecede sıkışma, kayada gerilme	Oldukça zayıf
		20	1	12	0.66	5	0.0138
4	10	3 eklem takımı	Pürüzsüz, düzlemsel	Ayrık-parçalanmış kaya	Orta dereceli	Orta derecede gerilme	Oldukça zayıf
		40	1	12	0.66	1	0.0138

Çizelge 6.8 : GSI kaya sınıflandırması

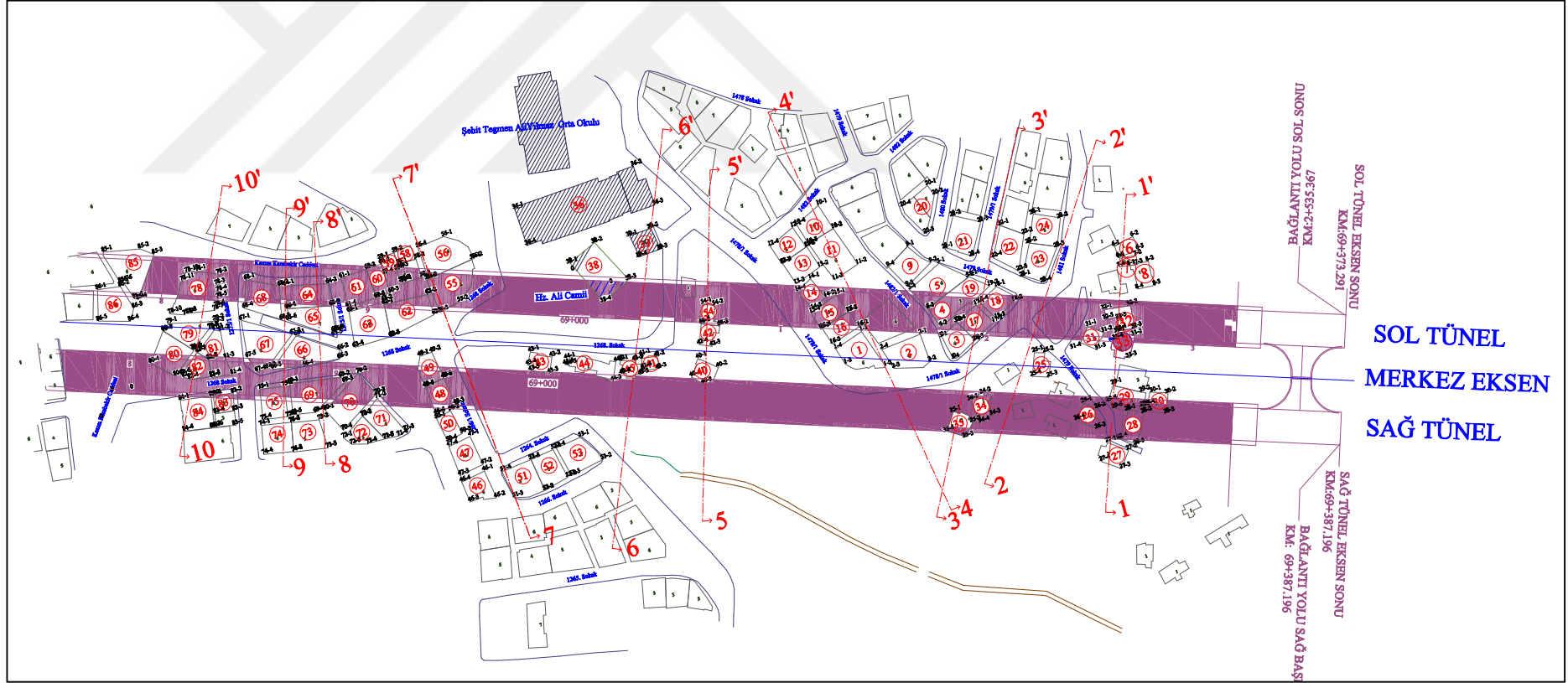
Bölge No	GSI	SCR			SR	J _v
		R _r	R _w	R _f		
1	25	1	1	0	46	7
2	24	1	1	0	44	8
3	27	1	1	1	43	8
4	25	1	0	0	55	5

Alibeyköy Tünel Bölgesi'nde yapılan 4 homojen bölge için kaya kütle sınıflamalarından elde edilen sonuçlara göre zemin sınıfı Q değeri ve RMR değerinin kesiştiği bölgeye karşılık gelen Karayolları Teknik Şartnamesi sınıfı C3'tür.

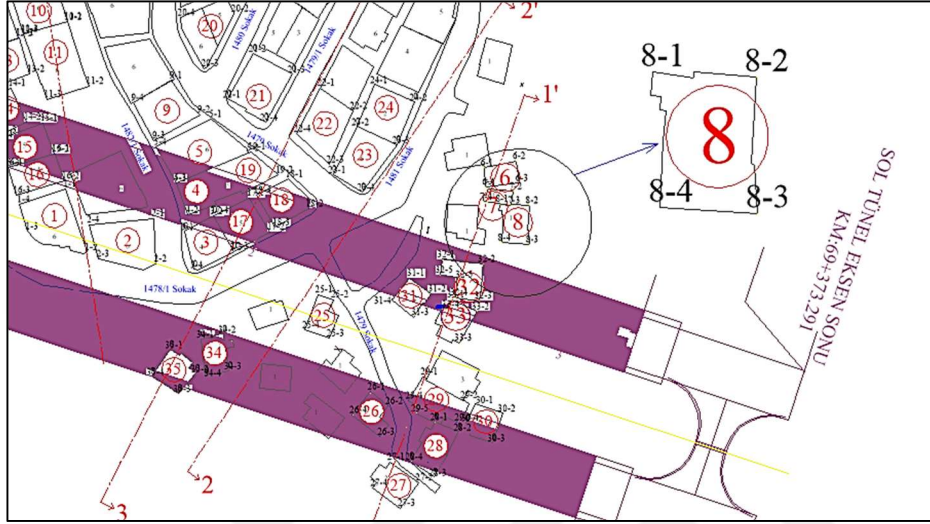
Bu çalışma kapsamında yukarıda anlatılan zemin koşullarında açılan ikiz tüneller nedeniyle zemin yüzeyinde oluşan oturmaların incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla incelenen bölgede tünel açımı sırasında zemin yüzeyinde bulunan binalarda oluşturulmuş ölçüm sistemleriyle yüzey deplasmanları düzenli olarak ölçülmüştür. Aşağıda yaklaşık 100 noktada zemin yüzeyinde alınan ölçümler tünel kazısı sırasında hem noktasal hem de bütünsel olarak incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

6.2 Tünel Nedeniyle Oluşan Deplasmanların İncelenmesi

Şehirlerde nüfus yoğunluklarının artmasıyla beraber yeraltı yapısındaki ulaşım yollarından biri olan karayolu tüneli yapımına ağırlık verilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan ikiz tünellerin açılması yapılaşma yoğunluklarından dolayı zaruri hale gelmiş, tünellerin güzergahlarının üstünde binalar, yol ve diğer yapılar bulunmakta olup, tünel kazılarının yüzeyi etkilemesiyle bu yapılarda deplasmanlara neden olduğu yapılan düzenli ölçümlerle tespit edilmiştir. Bu ölçümler, Alibeyköy Tünel Bölgesi'nde 500 m güzergah uzunluğunu binaların yoğun olduğu ve deplasman ölçümlerinin düzenli olarak gerçekleştirildiği bina köşe noktalarının bulunduğu bölgelere göre toplam 10 kesite ayrılarak incelenmiştir. Bu enkesitlerin 40 metreye kadar yakınında olan, tünel etki alanının içinde kalan binalar enkesitlere dahil edilmiştir. Sağdan sola doğru (tünel ilerleme yönüne göre) 1'den 10'a kadar numaralandırılarak değerlendirilen bu enkesitlerin tünele göre konumları, enkesit çevresindeki yapılar aşağıda Şekil 6.12'de verilmiştir.



Tünel üstünde bulunan binalar 1, 2, 3 veya maksimum 4 katlı olarak inşa edilmiş ve genel itibariyle tek katlı gecekondu türü evlerde temel bulunmadığı öğrenilmiştir. Bu binaların isimlendirilmesinde rastgele sayılar kullanılarak binaların köşe noktaları ilgili sayılar üzerinden numaralandırılmıştır. Örneğin 8 numaralı bina ve köşeleri 8-1, 8-2, 8-3 ve 8-4 olarak isimlendirilmiş, Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13 : Bina ve köşe noktalarının isimlendirilmesi.

Numaralandırılmış olan tüm bina köşelerine ölçüm bulonları yerleştirilmiş, total station aleti ile bu bulonların çeşitli yönlerde ve miktarlarda hareketleri ölçülmüştür.

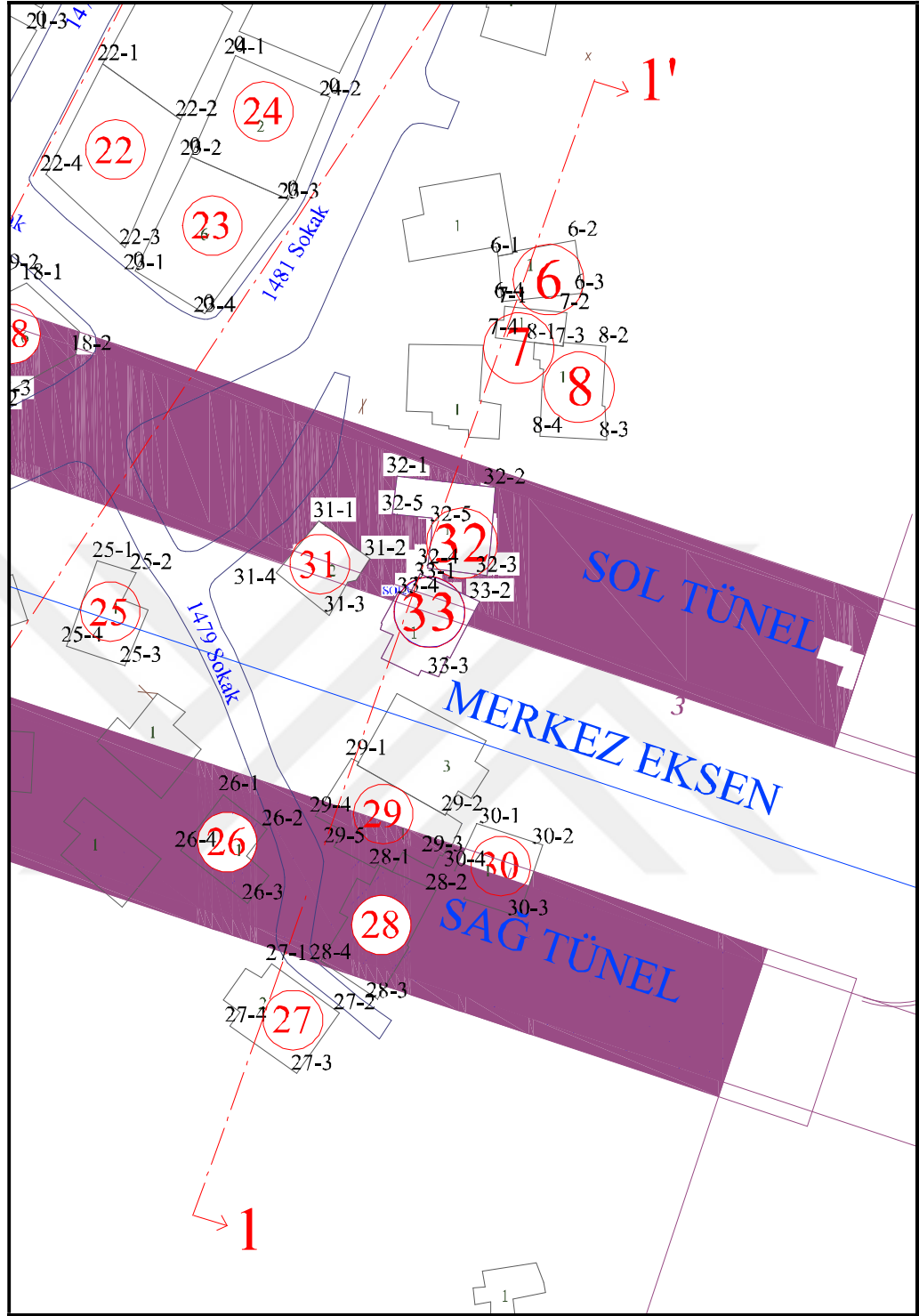
Enkesitlerin altından geçen tünellerin sağ tüp-1, sağ-2, sağ-3, sağ alt yarı ve invert, sol tüp-1, sol-2, sol-3, sol alt yarı ve invert olarak adlandırılan kazı aşamaları sonucunda oluşan deplasman miktarları ayrı ayrı incelenmiş, her bir aşamanın etkisi değerlendirilerek iki tüpün birbiri üzerinde etkisi olup olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca aşamaların oluşturduğu deplasmanların birbiriyle benzerliği olup olmadığı, aşamaların enkesitlerde benzer deplasmanlara yol açıp açmadığı araştırılmıştır.

6.2.1 Enkesitlerin incelenmesi ve değerlendirilmesi

Seçilen bina köşe noktalarının enkesite göre konumları, tünel ilerleme aşamalarına göre oluşan deplasmanlar ve grafikler bu bölümde incelenerek değerlendirilmiştir.

1. enkesitin incelenmesi

Enkesit 1, KM: 69+277'de bulunmakta olup bu enkesite göre bina köşe noktaları Şekil 6.14'te gösterilmiştir. 6, 7, 8, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 ve 33 no'lu bina köşelerinde bulunan toplam 27 noktada düzenli olarak deplasman ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 6.14 : 1.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 93 adet olup bu çalışmada sağ ve sol tüp aşamalarının yukarıda seçilen binaların altından geçtiği tarihe göre 08.07.2018 ile 15.03.2019 arasındaki tarihlerde ölçülen deplasman okumaları değerlendirilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 69+302'de bulunan 30-2 noktasıdır. Son bina ise KM: 69+259'da bulunan 31-4'tür. Çizelge 6.9'da bu bina

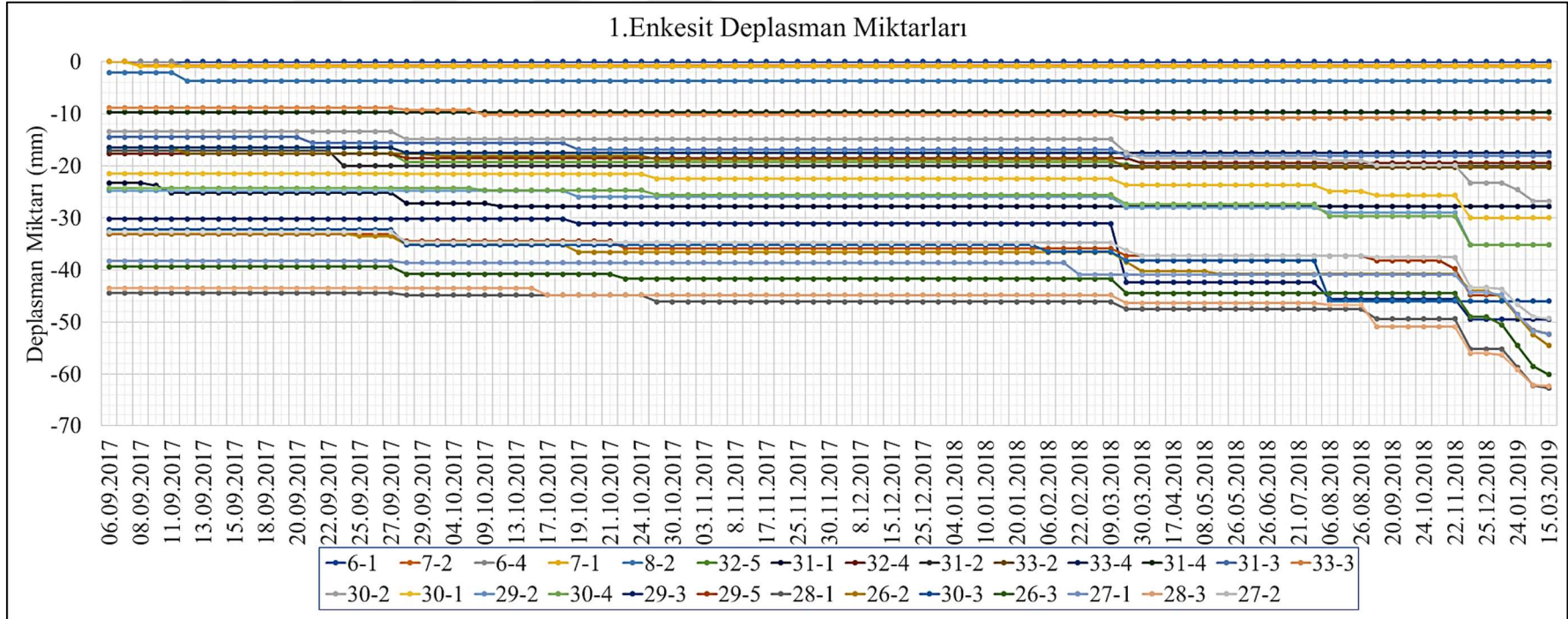
noktalarının altından geçen tünellerin ilgili tarihlerde hangi aşama kazısında olduğu gösterilmektedir.

Çizelge 6.9 : 1.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

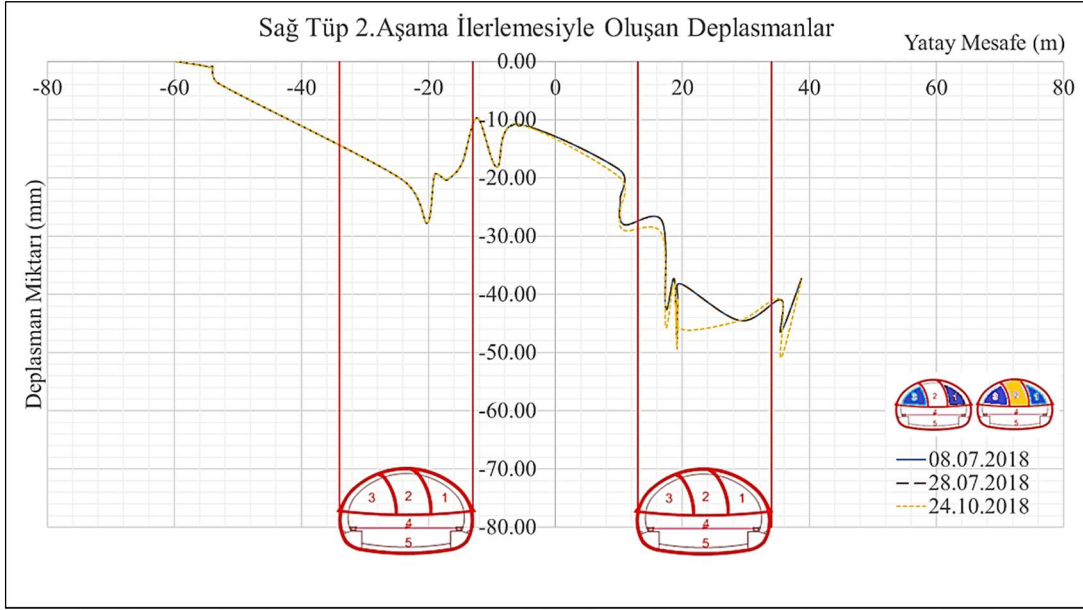
Tüp	Aşama	08.07.18	28.07.18	24.10.18	24.10.18	25.12.18	15.03.19
 SOL TÜP	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
 SAĞ TÜP	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

Sağ ve sol tüp üzerinde bulunan bina köşe noktalarının deplasmanlarının zamana bağlı olarak incelendiği Şekil 6.15'te bina köşelerinde bulunan deplasmanların zamanla arttığı, 3 tane bina köşesinde deplasmanların 6 mm'yi geçtiği görülmektedir. Tüm enkesitlerin üstünde bulunan binaların ve köşe noktalarında oluşan deplasmanların tarihlere göre grafikleri Ek-A'da verilmiştir.

Sağ tüp ve sol tüp 1., ve 3. aşama kazılarının sonucunda oluşan bina deplasmanları Şekil 6.16'da 08.07.2018 tarihli okuma değerlerinde gösterilmektedir. Sağ tüpün 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları 28.07.2018 ve 24.10.2018 tarihli okuma çizgilerinde Şekil 6.16'da verilmiştir. Bu şekilde y eksenini iki tünelin merkezlerinin ortasında bulunmakta olup, merkez eksen olarak adlandırılır ve yüzeyde oluşan deplasman miktarlarını (mm), x eksenini ise bina köşe noktalarının merkez eksenine olan mesafelerini temsil etmektedir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 1. enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.

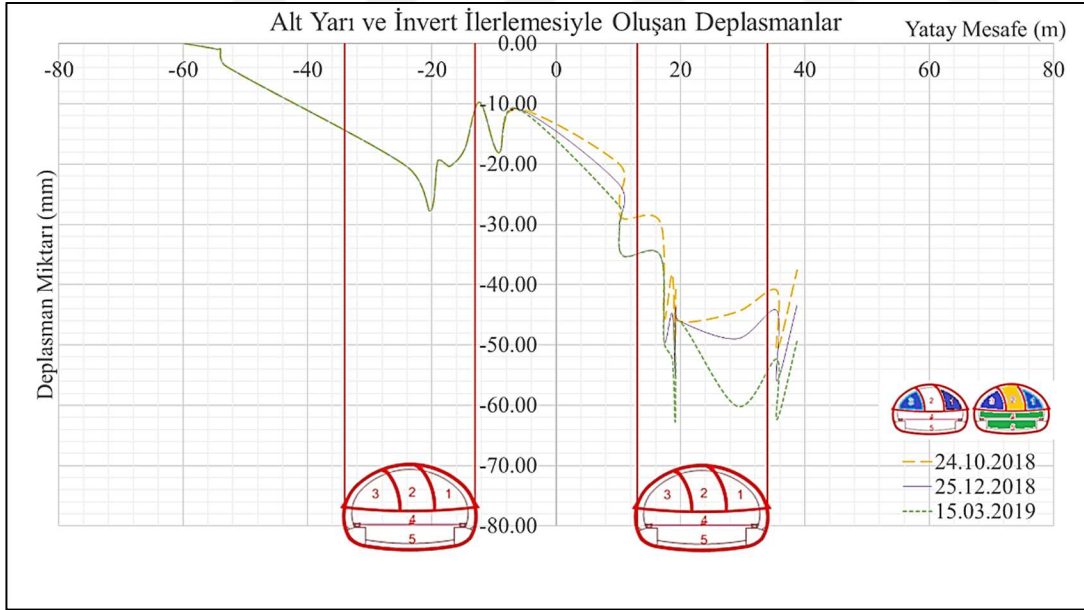


Şekil 6.15 : 1. enkesit deplasman miktarları.



Şekil 6.16 : Sağ tüp 2. aşama ilerlemesiyle oluşan deplasmanlar.

Sağ tüpte 2. aşama, alt yarı ve invert kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları Şekil 6.17’de gösterilen 25.12.2018 ve 15.03.2019 tarihli okuma çizgilerinde verilmiştir.



Şekil 6.17 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazısıyla oluşan deplasmanlar.

Sağ tüpte 2. aşamanın kazılmasıyla yani üst yarı kazısının tamamlanmasıyla, maksimum 8 mm, minimum 1 mm deplasman farkları sırasıyla bina noktası 30-3 ve 29-2’de oluşmuş, enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları Çizelge 6.10’da verilmiştir.

Sağ tüpte 2.aşama kazısının yapılması sol tüp üzerinde bulunan binalarda herhangi bir deplasmana yol açmamıştır.

Çizelge 6.10 : Sağ tüp 2.aşama kazısıyla oluşan deplasman farkları

Bina Köşe No	Z_0	Deplasman Miktarları (mm)		Deplasman Farkı (mm)
		08.07.2018	28.07.2018	
6-1	29.27	0.00	0.00	0.00
7-2	25.86	-0.70	-0.70	0.00
6-4	28.34	-1.00	-1.00	0.00
7-1	28.19	-0.90	-0.90	0.00
8-2	24.20	-3.70	-3.70	0.00
32-5	32.97	-20.30	-20.30	0.00
31-1	32.29	-27.80	-27.80	0.00
32-4	30.18	-19.50	-19.50	0.00
31-2	31.26	-20.00	-20.00	0.00
33-2	28.19	-20.30	-20.30	0.00
33-4	30.44	-17.50	-17.50	0.00
31-4	32.51	-9.70	-9.70	0.00
31-3	31.28	-18.10	-18.10	0.00
33-3	28.89	-10.80	-10.80	0.00
30-2	24.16	-18.60	-18.60	-1.30
30-1	26.81	-23.70	-23.70	-2.00
29-2	27.03	-28.00	-28.00	-1.00
30-4	26.73	-27.40	-27.40	-2.30
29-3	27.11	-42.40	-42.40	-3.20
29-5	28.96	-37.30	-37.30	-0.90
28-1	28.01	-47.50	-47.50	-1.90
26-2	29.96	-40.80	-40.80	0.00
30-3	24.71	-38.20	-38.20	-7.80
26-3	28.05	-44.50	-44.50	0.00
27-1	28.41	-40.90	-40.90	0.00
28-3	28.17	-46.40	-46.40	-4.50
27-2	28.24	-37.30	-37.30	-0.30

Sağ tüpte tüm aşama kazılarının yapılmasıyla, maksimum 16 mm, minimum 6 mm deplasman farkları sırasıyla Şekil 6.14'te gösterilen bina noktaları 26-3 ve 30-1'de oluşmuş, enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları (Z_0), köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı olarak Çizelge 6.11'de verilmiştir.

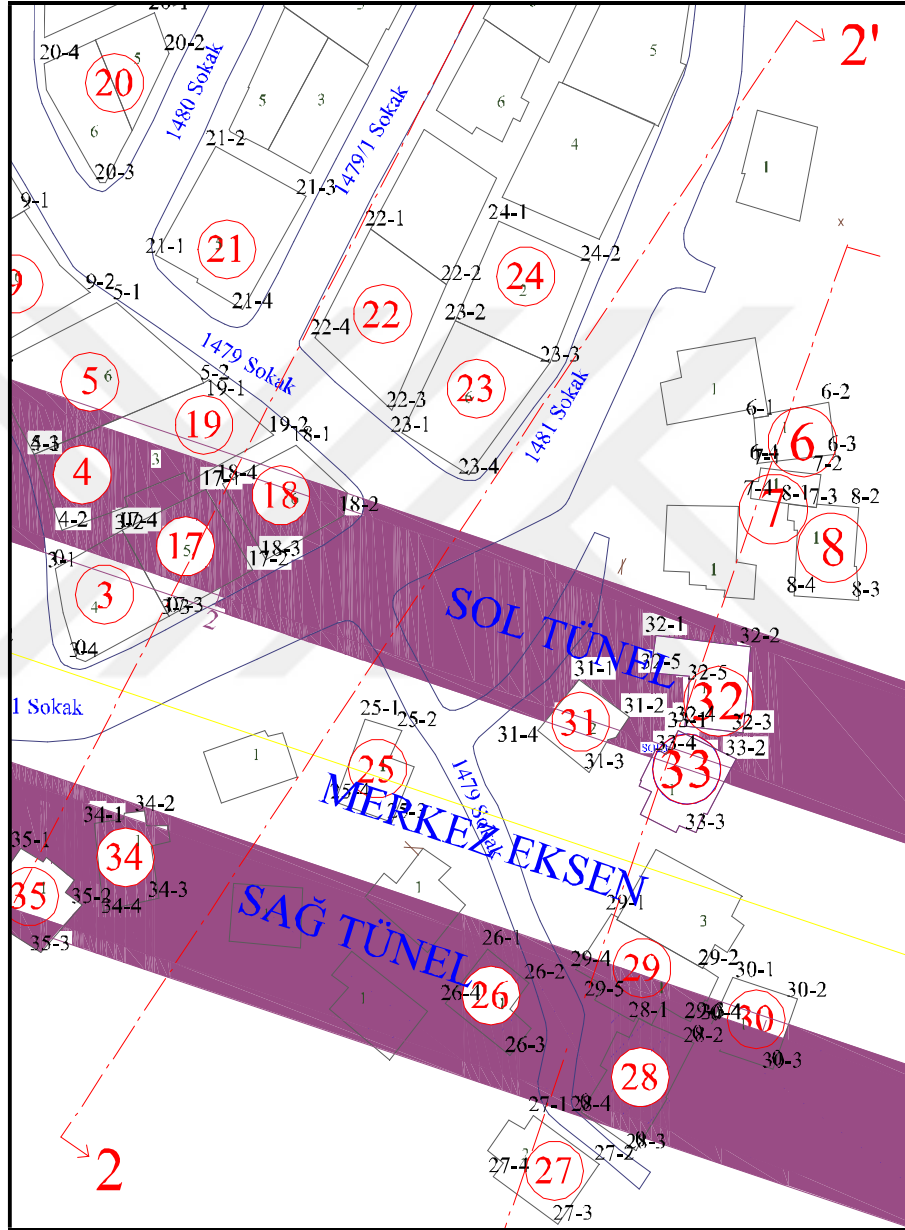
Çizelge 6.11 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazılarıyla oluşan deplasmanlar ve farkları

Bina Köşe No	Deplasman Miktarları (mm)				Deplasman Farkı (mm)
	Z ₀	24.10.2018	25.12.2018	15.03.2019	15.03.2019-24.10.2018
6-1	29.27	0.00	0.00	0.00	0.00
7-2	25.86	-0.70	-0.70	-0.70	0.00
6-4	28.34	-1.00	-1.00	-1.00	0.00
7-1	28.19	-0.90	-0.90	-0.90	0.00
8-2	24.20	-3.70	-3.70	-3.70	0.00
32-5	32.97	-20.30	-20.30	-20.30	0.00
31-1	32.29	-27.80	-27.80	-27.80	0.00
32-4	30.18	-19.50	-19.50	-19.50	0.00
31-2	31.26	-20.00	-20.00	-20.00	0.00
33-2	28.19	-20.30	-20.30	-20.30	0.00
33-4	30.44	-17.50	-17.50	-17.50	0.00
31-4	32.51	-9.70	-9.70	-9.70	0.00
31-3	31.28	-18.10	-18.10	-18.10	0.00
33-3	28.89	-10.80	-10.80	-10.80	0.00
30-2	24.16	-19.90	-23.30	-26.80	-6.90
30-1	26.81	-25.70	-30.00	-30.00	-4.30
29-2	27.03	-29.00	-35.20	-35.20	-6.20
30-4	26.73	-29.70	-35.20	-35.20	-5.50
29-3	27.11	-45.60	-49.50	-49.50	-3.90
29-5	28.96	-38.20	-44.80	-52.30	-14.10
28-1	28.01	-49.40	-55.20	-62.70	-13.30
26-2	29.96	-40.80	-43.90	-54.50	-13.70
30-3	24.71	-46.00	-46.00	-46.00	0.00
26-3	28.05	-44.50	-49.00	-60.10	-15.60
27-1	28.41	-40.90	-44.30	-52.30	-11.40
28-3	28.17	-50.90	-56.00	-62.30	-11.40
27-2	28.24	-37.60	-43.40	-49.30	-11.70

Sağ tüpte alt yarı ve invert kazılarının yapılmasıyla maksimum 15.60 mm deplasman farkı 26-3 no'lu bina köşesinde oluşmuştur. Sağ tüp üzerinde bulunan binalarda farklı miktarlarda deplasmanlar oluşmuştur. Örtü kalınlıklarının da değişkenlik gösterdiği bu bölgede sol tüp üzerinde bulunan binalarda ise alt yarı ve invert kazısı herhangi bir deplasmana yol açmamıştır. Bu yüzden sağ tüpün sol tüpü örseleyerek yüzeyde deplasmanlara yol açmadığı söylenebilir.

2. enkesitin incelenmesi

Enkesit 2, KM: 69+239'da bulunmakta olup Şekil 6.18'deki planda 23, 24, 25, 34 no'lu binalar ve binaların köşe noktalarıyla birlikte gösterilmiştir. Bu binaların köşelerinde bulunan toplam 8 noktada düzenli olarak deplasman ölçümleri yapılmıştır.

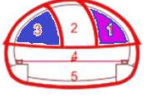


Şekil 6.18 : 2.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

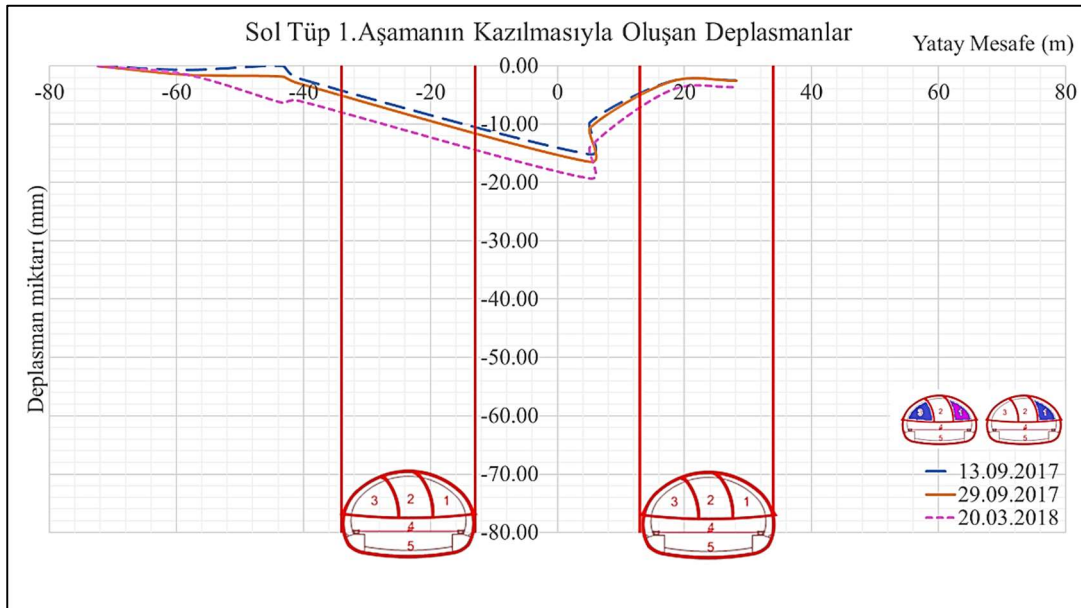
Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 93 adet olup bu çalışmada sağ ve sol tüp aşamalarının yukarıda seçilen binaların altından geçtiği zamana göre 13.09.2017 ile 15.03.2019 arasındaki tarihlerde total station ile ölçülen deplasman okumaları değerlendirilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 69+247'de

bulunan 24-2 noktasıdır. Son bina ise KM: 69+230'da bulunan 23-1 noktasıdır. Çizelge 6.12'de bu bina noktalarının altından geçen tünellerin ilgili tarihlerde hangi aşama kazısında olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 6.12 : 2.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

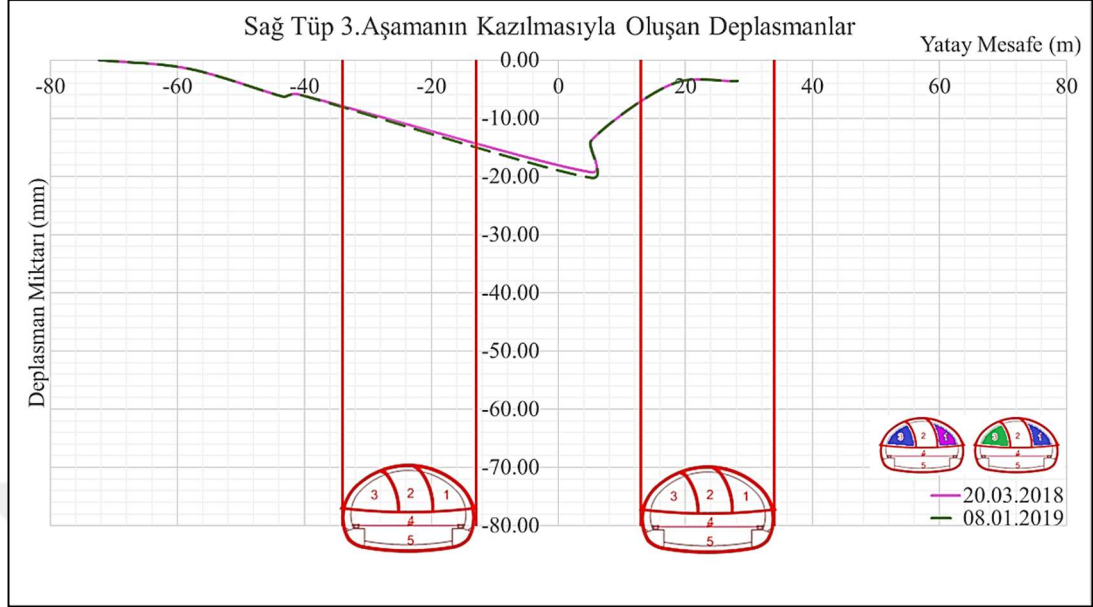
Tüp	Aşama	13.09.17	29.09.17	20.03.18	08.01.19	11.02.19	15.03.19
 SOL TÜP	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
 SAĞ TÜP	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

Sağ tüp 1. ve sol tüp 3. aşama kazılarının sonucunda oluşan bina deplasmanları 13.09.2017 tarihli, sol tüpün 1. aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları ise 29.09.2017 ve 20.03.2018 tarihli okuma çizgilerinde Şekil 6.19'da verilmektedir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 1.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.



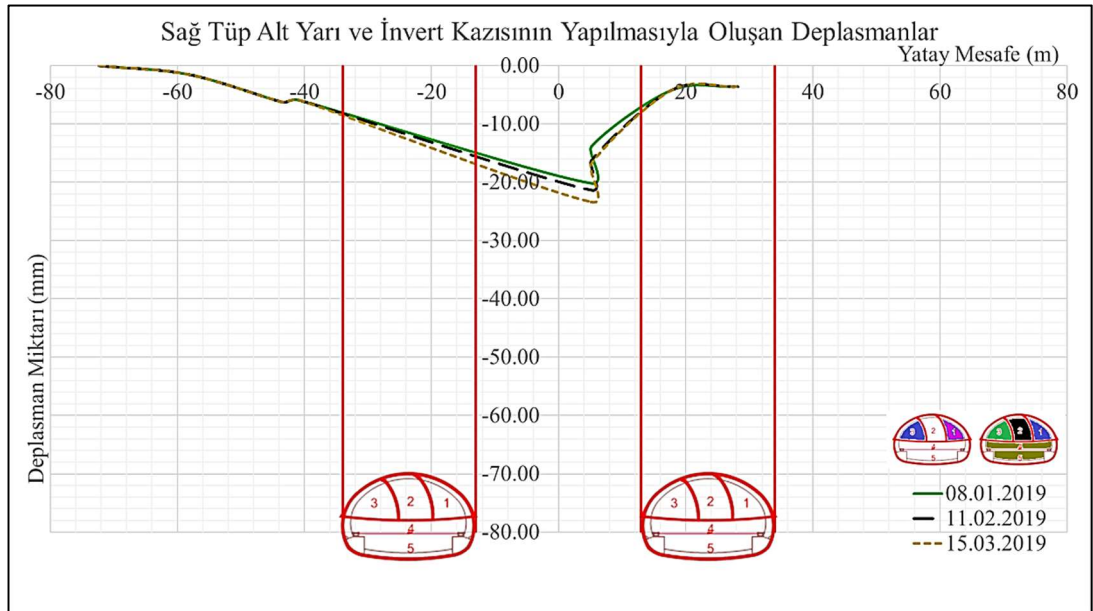
Şekil 6.19 : Sol tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar.

Sağ tüpün 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları Şekil 6.20’de verilen 08.01.2019 tarihli okuma çizgisinde yer almıştır.



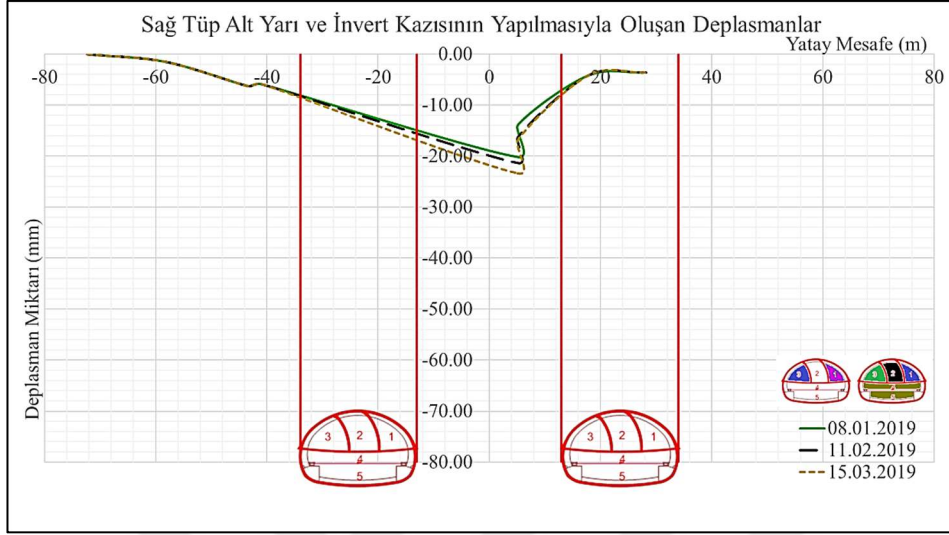
Şekil 6.20 : Sağ tüp 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları.

Sağ tüpün diğer aşama kazıları sonucunda oluşan deplasman miktarları Şekil 6.21’de gösterilmiştir. Buna göre sağ tüp 2.aşama kazısının da yapılmasıyla sağ tüp üst yarı kazısı tamamlanmış ve oluşan deplasman miktarları 11.02.2019 tarihli okuma çizgisinde verilmiştir.



Şekil 6.21 : Sağ tüp 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları.

Şekil 6.22'ye göre sağ tüp 2.aşama kazısının da yapılmasıyla sağ tüp üst yarı kazısı tamamlanmış, ayrıca sağ tüpte alt yarı ve invert kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları 15.03.2019 tarihli okuma çizgilerinde verilmiştir.



Şekil 6.22 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasmanlar.

Sol tüpte 1. aşamanın kazılmasıyla bina noktası 23-1'de 6.30 mm, 23-4, 25-4 ve 25-3'te yaklaşık 4'er mm deplasman farkları oluşmuş, diğer bina köşelerinde 1 mm ve daha az deplasman farkları oluşmuş, enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı olarak Çizelge 6.13'te verilmiştir. Bu durum, sol tüpte bir aşama daha kazılmasının sağ tüp üzerinde bulunan binalarda herhangi bir deplasmana yol açmadığını göstermiştir.

Çizelge 6.13 : Sol tüp 1.aşama kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)			Deplasman Farkı (mm)
		13.09.2017	29.09.2017	20.03.2018	20.03.2018-13.09.2017
24-2	-30.077	0.00	0.00	0.00	0.00
23-3	-31.926	-0.70	-1.50	-1.50	-0.80
23-1	-34.262	0.00	-1.80	-6.30	-6.30
23-4	-33.499	-2.10	-2.90	-5.90	-3.80
25-4	-29.896	-15.20	-16.40	-19.30	-4.10
25-3	-30.136	-9.70	-10.60	-13.90	-4.20
34-1	-29.235	-2.70	-2.70	-4.20	-1.50
34-4	-28.083	-2.50	-2.50	-3.60	-1.10

Sağ tüpte 3.aşamanın kazılmasıyla 25-4 no'lu bina köşesinde yaklaşık 2 mm deplasman farkı oluşmuş, diğer köşelerde oluşan deplasman miktarlarının 0'a yakın olduğu tespit edilmiştir. Yine sağ tüpte bir aşama daha kazılmasının sol tüp üzerinde bulunan binalarda önemli bir deplasmana yol açmadığı gözlenmiştir. Enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı olarak Çizelge 6.14'te verilmiştir.

Çizelge 6.14 : Sağ tüp 3.aşama kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları		Deplasman Farkı
		(mm)		
		20.03.2018	08.01.2019	
24-2	-30.077	0.00	0.00	0.00
23-3	-31.926	-0.70	-1.50	0.80
23-1	-34.262	0.00	-1.80	1.80
23-4	-33.499	-2.10	-2.90	0.80
25-4	-29.896	-15.20	-16.40	1.20
25-3	-30.136	-9.70	-10.60	0.90
34-1	-29.235	-2.70	-2.70	0.00
34-4	-28.083	-2.50	-2.50	0.00

Sağ tüpte alt yarı ve invert kazılarının yapılmasıyla 2 mm deplasman okuması bina noktası 25-4'te oluşmuş, enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı olarak Çizelge 6.15'te verilmiştir. Buna göre sağ tüpte alt yarı ve invert kazılarının yapılması, sol tüp üzerinde bulunan binalarda herhangi bir deplasmana yol açmamıştır.

Çizelge 6.15 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)			Deplasman Farkları (mm)	
		8.01.2019	11.02.2019	15.03.2019	11.02.- 08.01.2019	15.03.- 11.02.2019
24-2	-30.077	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23-3	-31.926	-1.50	-1.50	-1.50	0.00	0.00
23-1	-34.262	-6.30	-6.30	-6.30	0.00	0.00
23-4	-33.499	-5.90	-5.90	-5.90	0.00	0.00
25-4	-29.896	-20.20	-21.40	-23.40	-1.20	2.00
25-3	-30.136	-13.90	-16.30	-16.80	-2.40	0.50
34-1	-29.235	-4.20	-4.20	-4.20	0.00	0.00
34-4	-28.083	-3.60	-3.60	-3.60	0.00	0.00

3. enkesitin incelenmesi

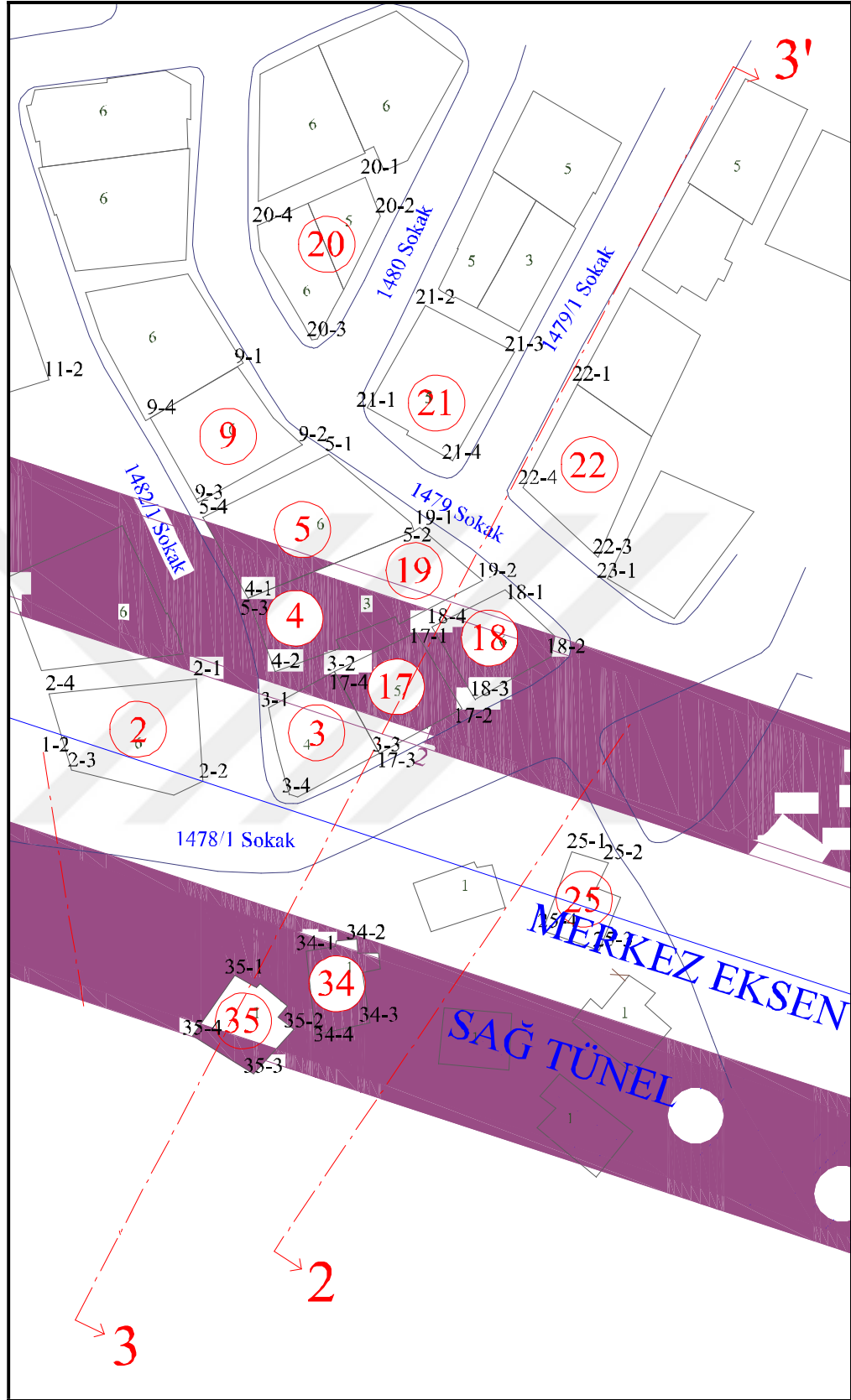
Enkesit 3, KM: 69+209'da bulunmakta 3, 5, 9, 17, 18, 21, 22, 34, ve 35 no'lu binalar ve binaların köşelerinde bulunan toplam 22 noktada düzenli olarak deplasman ölçümleri yapılmıştır.

Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 93 adet olup bu çalışmada sağ ve sol tüp aşamalarının yukarıda seçilen binaların altından geçtiği zamana göre 13.09.2017 ile 15.03.2019 arasındaki tarihlerde total station ile ölçülen deplasman okumaları değerlendirilmiştir. Bu tarihler sağ ve sol tüp aşamalarının bu binaların altından geçtiği tarihe göre seçilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 69+228'de bulunan 22-3 noktasıdır. Son bina ise KM: 69+174'te bulunan 9-3'tür. Çizelge 6.16'da bu bina noktalarının altından geçen tünellerin ilgili tarihlerde hangi aşama kazısında olduğu gösterilmektedir. Bu binalar ve köşe noktaları Şekil 6.23'te planda gösterilmiştir.

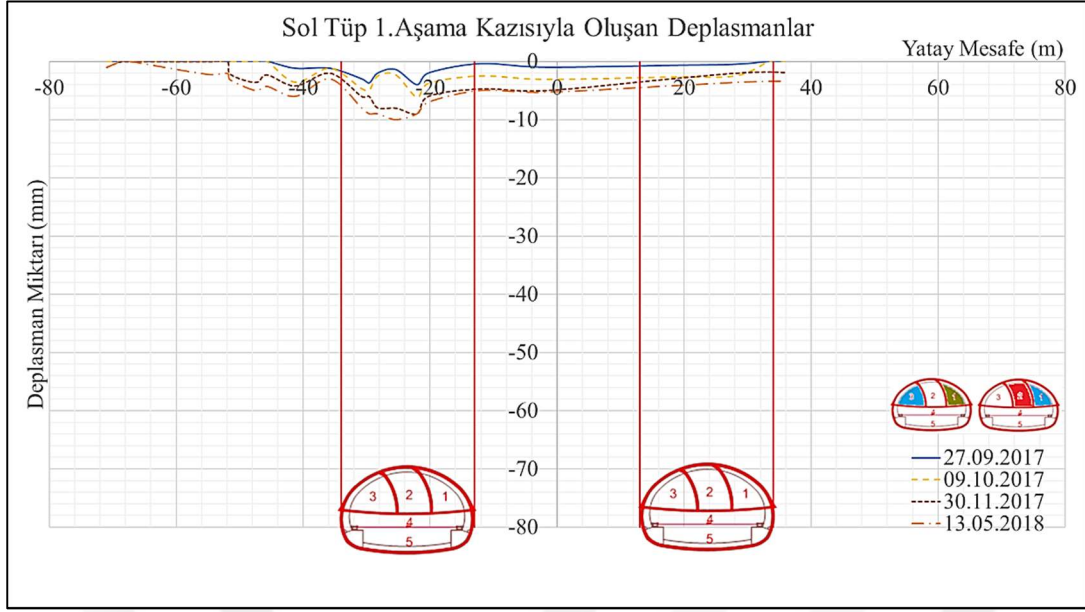
Çizelge 6.16 : 3.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

Tüp	Aşama	27.09.17	09.10.17	30.11.17	13.05.18	26.05.18	15.12.18	15.03.19
 SOL TÜP	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
 SAĞ TÜP	1							
	2							
	3							
	4							
	5							

Sağ tüp 1 ve sol tüp 3. aşama kazılarının sonucunda oluşan bina deplasmanları 27.09.2017 tarihli okuma çizgisinde, sol tüpün 1.aşama kazısının yapılırken oluşan deplasman miktarları 09.10.2017 ve 1.aşama kazısının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları 30.11.2017 tarihli okuma çizgilerinde Şekil 6.24'te verilmiştir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 3.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.

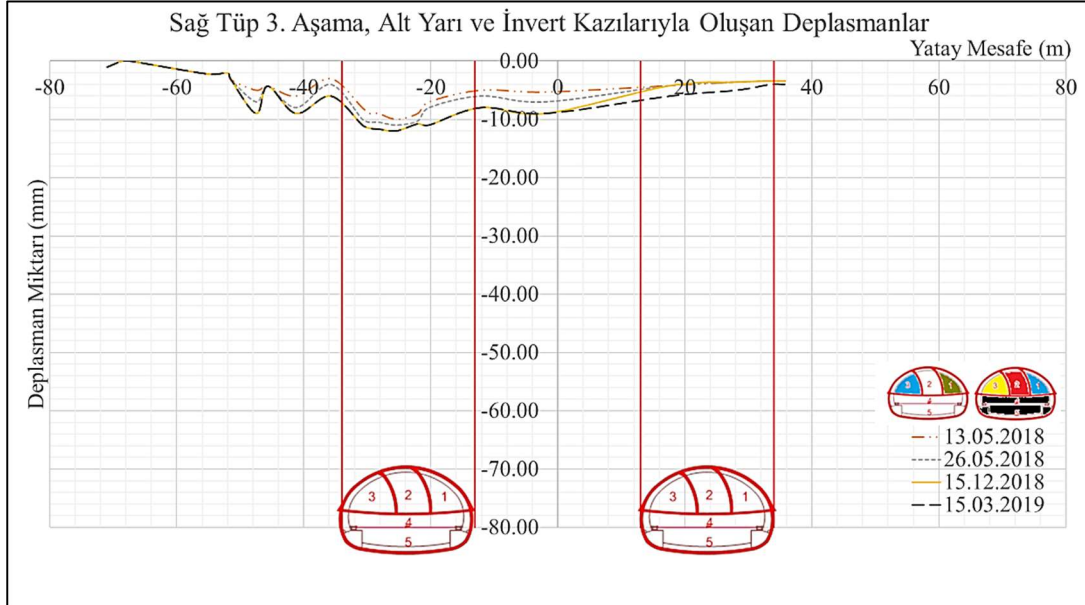


Şekil 6.23 : 3.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.



Şekil 6.24 : Sol tüp 1. aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları.

Sağ tüp 1. ve 2., ve sol tüpün 1. ve 3. aşama kazılarının sonucunda oluşan bina deplasmanları 13.05.2018 tarihli okuma çizgisinde ve sağ tüpün 3. aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları 26.05.2018 ve 15.12.2018 tarihli okuma çizgilerinde, sağ tüpte alt yarı ve invert kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları 15.03.2019 tarihli okuma çizgisinde Şekil 6.25'te verilmiştir.



Şekil 6.25 : Sağ tüp alt yarı ve invert kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar.

Sol tüpte 1. aşamanın kazılmasıyla maksimum deplasman farkı bina noktası 5-3'te 6.60 mm oluşmuştur. Sol tüpte bir aşama daha kazılmasının sağ tüp üzerinde bulunan bina

köşelerinde 2 mm'ye kadar deplasman oluşturduğu gözlenmiş ve enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı olarak Çizelge 6.17'de verilmiştir. Sağ tüp üzerinde bulunan bu binaların sol tüp 1.aşamadan 46 m uzaklıkta bulunması nedeniyle oluşan deplasmanların kazıyla bir ilgisi olmadığını söylenebilir.

Çizelge 6.17 : Sol tüp 1.aşama kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları

Bina Köş e No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)				Deplasman Farkı (mm)	
		27.09.201 7	09.10.201 7	30.11.201 7	13.05.201 8	30.11.2017- 27.09.2017	13.05.2018- 30.11.2017
21-2	-37.26	0.00	0.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.00
21-3	-35.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22-1	-35.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21-1	-36.90	0.00	0.00	0.00	-2.20	0.00	-2.20
21-4	-36.05	0.00	0.00	0.00	-2.00	0.00	-2.00
22-4	-35.38	0.00	0.00	-2.20	-3.20	-2.20	-1.00
5-1	-36.92	0.00	0.00	-3.60	-5.00	-3.60	-1.40
22-3	-34.40	0.00	0.00	-2.30	-4.30	-2.30	-2.00
5-2	-35.97	-1.20	-3.60	-4.20	-6.00	-3.00	-1.80
9-3	-38.64	-1.20	-1.20	-2.00	-3.00	-0.80	-1.00
18-2	-34.04	-3.00	-4.70	-6.00	-8.00	-3.00	-2.00
18-4	-34.31	-3.70	-5.00	-6.00	-9.00	-2.30	-3.00
17-1	-34.24	-2.00	-2.50	-8.00	-9.00	-6.00	-1.00
5-3	-37.26	-1.40	-2.30	-8.00	-10.00	-6.60	-2.00
18-3	-33.62	-4.00	-6.20	-9.00	-9.00	-5.00	0.00
17-2	-33.57	-2.00	-3.80	-6.00	-7.00	-4.00	-1.00
3-1	-35.65	-0.40	-2.50	-4.70	-5.00	-4.30	-0.30
3-4	-33.98	-1.00	-3.10	-5.00	-5.30	-4.00	-0.30
34-1	-29.24	-0.70	-2.70	-3.00	-4.20	-2.30	-1.20
34-4	-28.08	-0.50	-2.50	-2.00	-3.60	-1.50	-1.60
35-4	-25.41	0.00	0.00	-1.80	-3.40	-1.80	-1.60
35-3	-25.71	0.00	0.00	-1.90	-3.40	-1.90	-1.50

Çizelge 6.18'de ve Çizelge 6.19'da sırasıyla sol tüp 3.aşama kazısından sonra oluşan, alt yarı ve invert kazısından sonra oluşan deplasmanlar ve farkları verilmiştir. Deplasman farklarına göre, sağ tüpte 3.aşamanın kazısı sırasında ve kazıldıktan sonra merkez ekseninde 3.70 mm deplasman farkı oluşmuş, sol tüp üzerinde herhangi bir yüzey deplasman farkı oluşmamıştır. Sağ tüpte tüm alt yarı ve invert kazılarının yapılmasıyla 2 mm mertebelerinde deplasman oluşmuştur.

Çizelge 6.18 : Sol tüp 3.aşama, alt yarı ve invert kazısıyla oluşan deplasmanlar

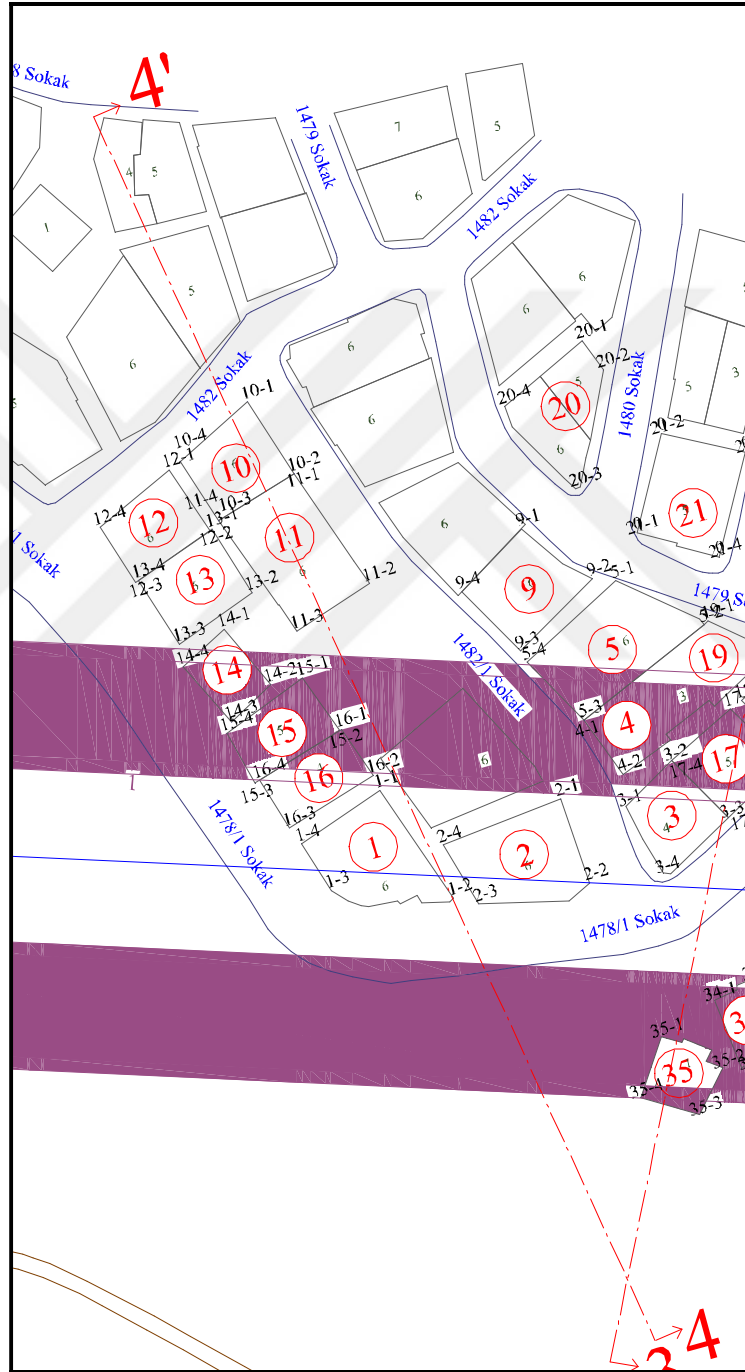
Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)			
		13.05.2018	26.05.2018	15.12.2018	15.03.2019
21-2	-37.26	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
21-3	-35.62	0.00	0.00	0.00	0.00
22-1	-35.42	0.00	0.00	0.00	0.00
21-1	-36.90	-2.20	-2.20	-2.20	-2.20
21-4	-36.05	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00
22-4	-35.38	-3.20	-3.20	-3.20	-3.20
5-1	-36.92	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00
22-3	-34.40	-4.30	-4.30	-4.30	-4.30
5-2	-35.97	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00
9-3	-38.64	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00
18-2	-34.04	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00
18-4	-34.31	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00
17-1	-34.24	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00
5-3	-37.26	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
18-3	-33.62	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00
17-2	-33.57	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00
3-1	-35.65	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00
3-4	-33.98	-5.30	-7.00	-9.00	-9.00
34-1	-29.24	-4.20	-4.20	-4.20	-6.00
34-4	-28.08	-3.60	-3.60	-3.60	-5.00
35-4	-25.41	-3.40	-3.40	-3.40	-4.00
35-3	-25.71	-3.40	-3.40	-3.40	-4.00

Çizelge 6.19 : Sol tüp 3.aşama, alt yarı ve invert kazısıyla oluşan farklar

Bina Köşe No	Deplasman Farkları (mm)	
	15.12.2018-13.05.2018	15.03.2019-15.12.2018
21-2	0.00	0.00
21-3	0.00	0.00
22-1	0.00	0.00
21-1	0.00	0.00
21-4	0.00	0.00
22-4	0.00	0.00
5-1	0.00	0.00
22-3	0.00	0.00
5-2	0.00	0.00
9-3	0.00	0.00
18-2	0.00	0.00
18-4	0.00	0.00
17-1	0.00	0.00
5-3	0.00	0.00
18-3	0.00	0.00
17-2	0.00	0.00
3-1	0.00	0.00
3-4	-3.70	0.00
34-1	0.00	-1.80
34-4	0.00	-1.40
35-4	0.00	-0.60
35-3	0.00	-0.60

4. enkesitin incelenmesi

Enkesit 4, KM: 69+138'de bulunmakta olup Şekil 6.26'daki planda enkesit ve bu enkesite göre 1, 2, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 34 ve 35 no'lu bina ve bu binaların köşe noktaları gösterilmiştir. Bu bina köşelerinde bulunan toplam 20 noktada düzenli olarak deplasman ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 6.26 : 4.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

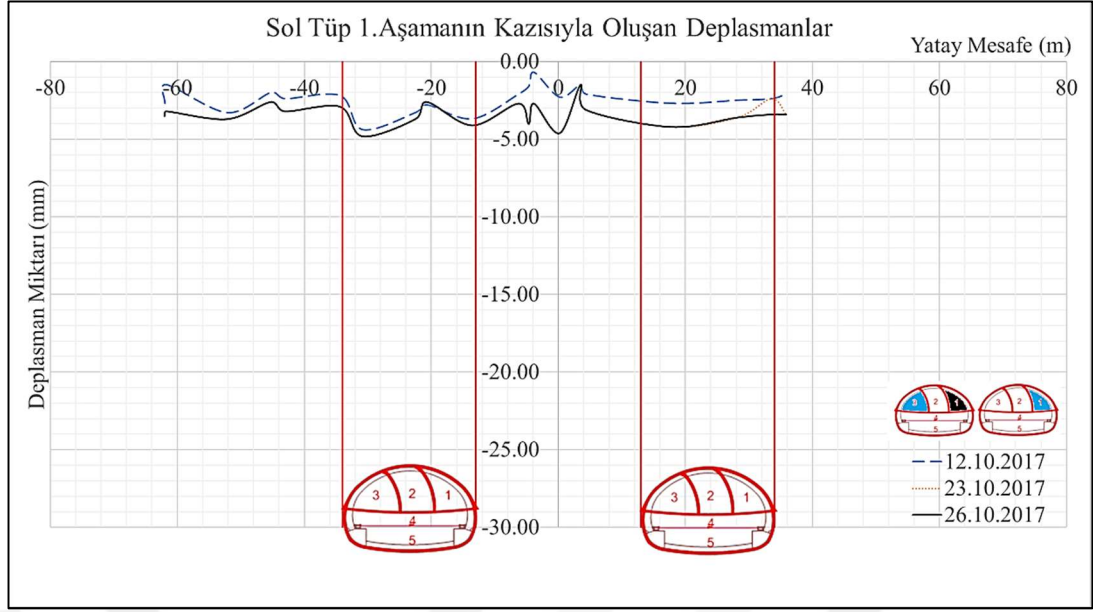
Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 76 adet olup bu çalışmada sağ ve sol tüp aşamalarının yukarıda seçilen binaların altından geçtiği zamana göre 27.09.2017 ile 22.11.2018 arasındaki tarihlerde total station ile ölçülen deplasman okumaları değerlendirilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 69+212’de bulunan 34-4 noktası, son bina noktası ise KM: 69+093’te bulunan 12-4 noktasıdır. Çizelge 6.20’de bu bina noktalarının altından geçen tünellerin ilgili tarihlerde hangi aşama kazısında olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 6.20 : 4.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

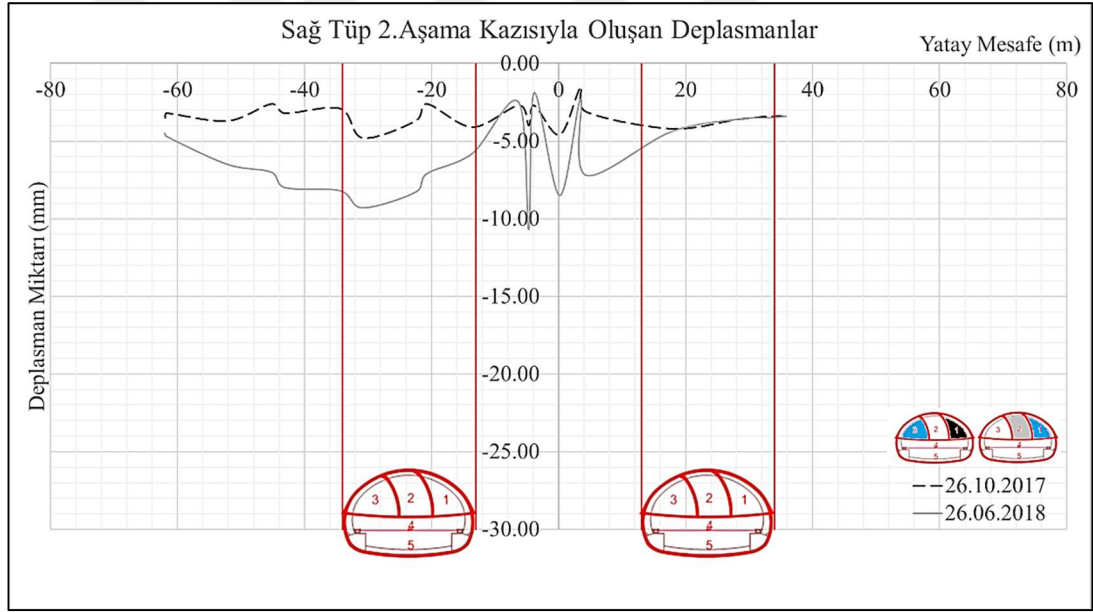
Tüp	Aşama	12.10.17	23.10.17	26.10.17	26.06.18
 SOL TÜP	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
 SAĞ TÜP	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Sağ tüp 1. ve sol tüp 3. aşama kazılarıyla oluşan bina deplasmanları 12.10.2017 tarihli okuma çizgisinde gösterilmiştir. Sol tüpün 1. aşama kazısının da yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları 23.10.2017 ve 26.10.2017 tarihli okuma çizgilerinde Şekil 6.27’de gösterilmiştir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 1.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.

Sağ tüpün 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları Şekil 6.28’de verilen 26.06.2018 tarihli okuma çizgisinde yer almaktadır.



Şekil 6.27 : Sol tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar.



Şekil 6.28 : Sağ tüp 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları.

Sol tüpte 1. aşamanın kazılmasıyla 1 ve 2 mm mertebelerinde deplasmanlar sağ ve sol tüp üzerindeki 11-1, 12-1, 11-2, 13-2, 13-3, 16-3, 2-4, 1-4, 2-2, 2-3, 34-1, 34-4, 35-4 ve 35-3 no'lu bina köşelerinde oluşmuştur. Enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı olarak Çizelge 6.21'de verilmiştir. Bu deplasmanların sebebinin sağ tüp 1. ve sol tüp 3.aşama kazılarının devam etmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 6.21 : Sol tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar ve farkları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)			Deplasman Farkı (mm)
		12.10.2017	23.10.2017	26.10.2017	26.10.2017-12.10.2017
11-1	-40.25	-2.70	-3.50	-3.50	-0.80
12-1	-36.98	-1.50	-3.20	-3.20	-1.70
12-4	-33.55	-3.30	-3.70	-3.70	-0.40
11-2	-39.92	-2.00	-2.60	-2.60	-0.60
13-2	-36.70	-2.40	-3.20	-3.20	-0.80
13-3	-33.58	-2.20	-2.90	-2.90	-0.70
14-4	-33.19	-4.40	-4.80	-4.80	-0.40
14-3	-33.36	-3.30	-3.70	-3.70	-0.40
15-4	-33.02	-2.80	-2.60	-2.60	0.20
16-4	-32.80	-3.70	-4.10	-4.10	-0.40
16-3	-32.25	-2.10	-2.70	-2.70	-0.60
2-4	-32.89	-1.60	-4.00	-4.00	-2.40
1-4	-32.48	-0.70	-2.70	-2.70	-2.00
2-2	-33.64	-2.30	-4.60	-4.60	-2.30
1-2	-32.64	-1.50	-1.50	-1.50	0.00
2-3	-32.97	-2.10	-3.10	-3.10	-1.00
34-1	-29.24	-2.70	-4.20	-4.20	-1.50
34-4	-28.08	-2.50	-3.60	-3.60	-1.10
35-4	-25.41	-2.40	-2.40	-3.40	-1.00
35-3	-25.71	-2.10	-3.40	-3.40	-1.30

Sağ tüpte 2.aşamanın kazılmasıyla bina köşelerinde oluşan deplasman miktarları Çizelge 6.22’de verilmiştir. Genel olarak bina köşelerinin hepsinde deplasmanlar oluşmuştur. Bu deplasmanların oluşma nedeninin sol tüp 1.ve 3., sağ tüp 1.ve 2.aşama kazılarının 26.06.2018 tarihinde tamamlanması olduğu düşünülmektedir.

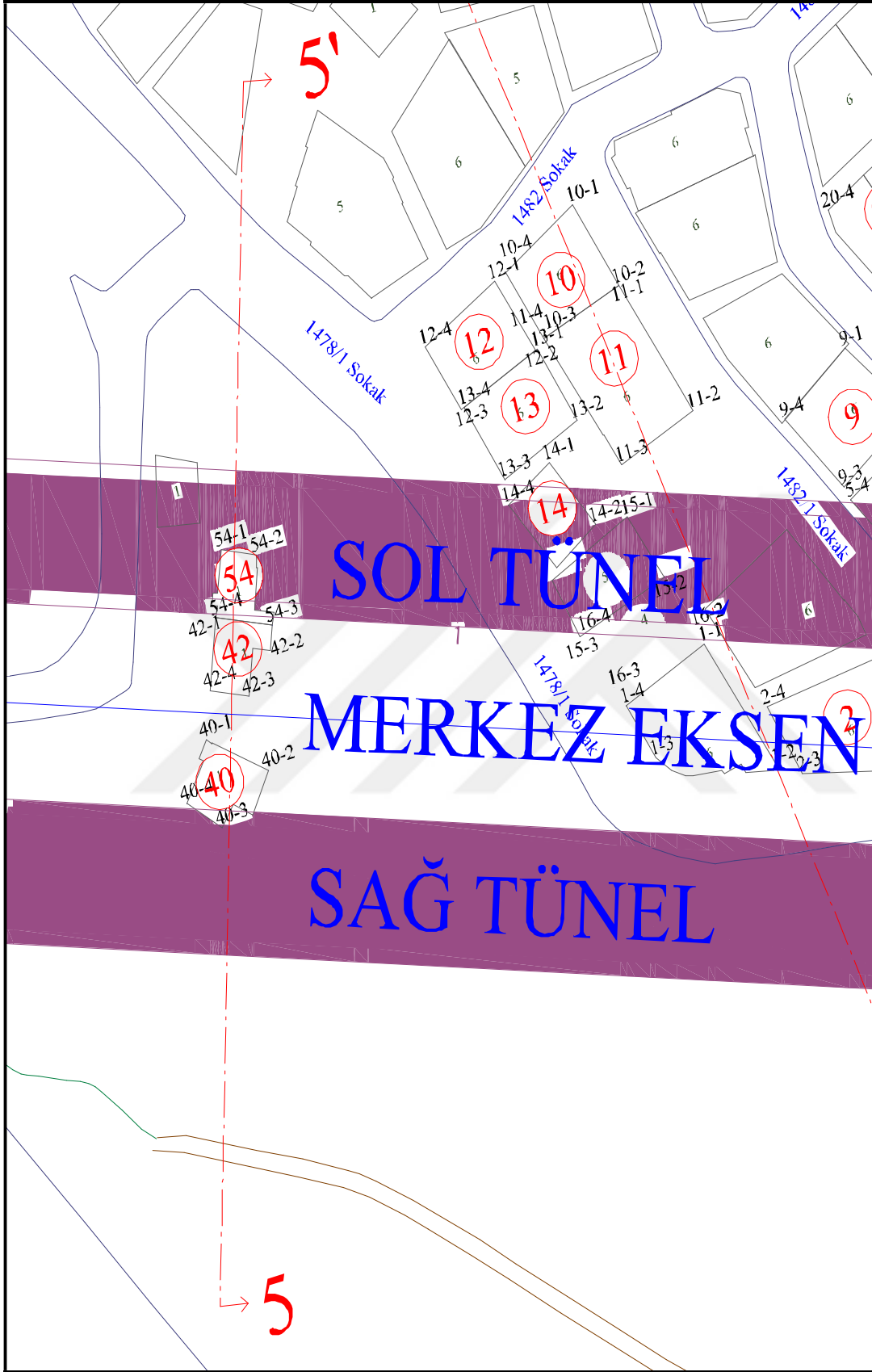
Çizelge 6.22 : Sağ tüp 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)		Deplasman Farkı (mm)
		26.10.2017	26.06.2018	
11-1	-40.25	-3.50	-4.50	-1.00
12-1	-36.98	-3.20	-4.70	-1.50
12-4	-33.55	-3.70	-6.50	-2.80
11-2	-39.92	-2.60	-7.00	-4.40
13-2	-36.70	-3.20	-8.00	-4.80
13-3	-33.58	-2.90	-8.20	-5.30
14-4	-33.19	-4.80	-9.30	-4.50
14-3	-33.36	-3.70	-8.30	-4.60
15-4	-33.02	-2.60	-7.10	-4.50
16-4	-32.80	-4.10	-5.80	-1.70
16-3	-32.25	-2.70	-2.50	0.20
2-4	-32.89	-4.00	-10.70	-6.70
1-4	-32.48	-2.70	-1.90	0.80
2-2	-33.64	-4.60	-8.50	-3.90
1-2	-32.64	-1.50	-2.30	-0.80
2-3	-32.97	-3.10	-7.20	-4.10
34-1	-29.24	-4.20	-4.40	-0.20
34-4	-28.08	-3.60	-3.60	0.00
35-4	-25.41	-3.40	-3.50	-0.10
35-3	-25.71	-3.40	-3.40	0.00

5. enkesitin incelenmesi

KM: 69+064'te bulunmakta olan 5.enkesit Şekil 6.29'deki planda bu enkesit üzerinde bulunan 40, 42 ve 54 no'lu binalar ve binaların köşe noktalarıyla birlikte gösterilmiştir. Bu binaların köşelerinde bulunan toplam 8 noktada düzenli olarak deplasman ölçümleri yapılmıştır.

Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 46 adet olup bu çalışmada sağ ve sol tüp aşamalarının yukarıda seçilen binaların altından geçtiği zamana göre 18.12.2017 ile 24.01.2019 arasındaki tarihlerde total station ile ölçülen deplasman okumaları değerlendirilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 69+084'te bulunan 40-2 noktası, son bina noktası ise KM: 69+074'te bulunan 40-1'dir. Çizelge 6.23'te bu bina noktalarının altından geçen tünellerin ilgili tarihlerde hangi aşama kazısında olduğu gösterilmektedir.

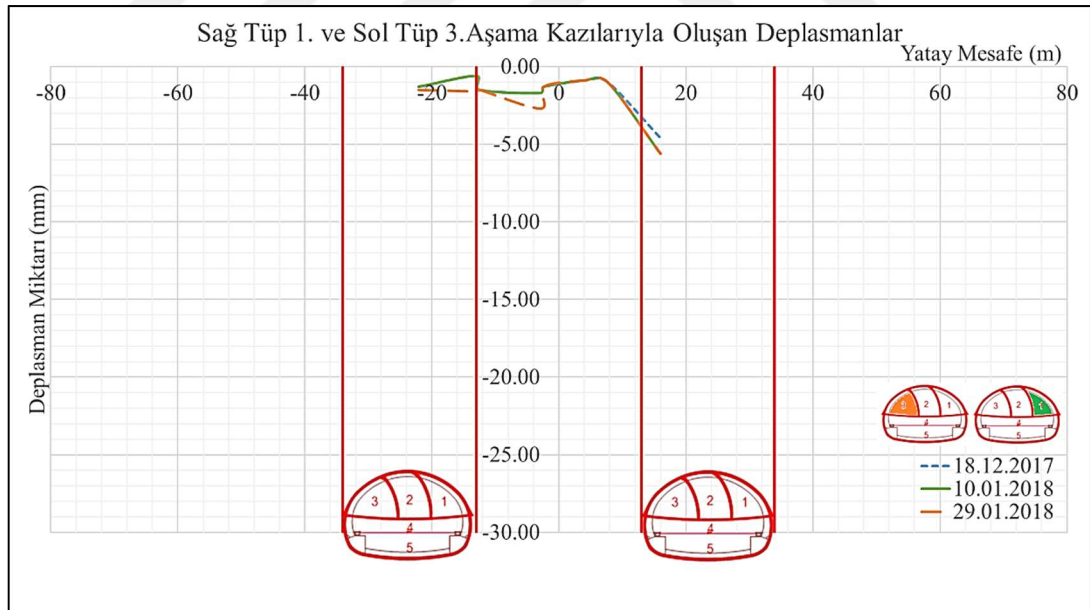


Şekil 6.29 : 5.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

Çizelge 6.23 : 5.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

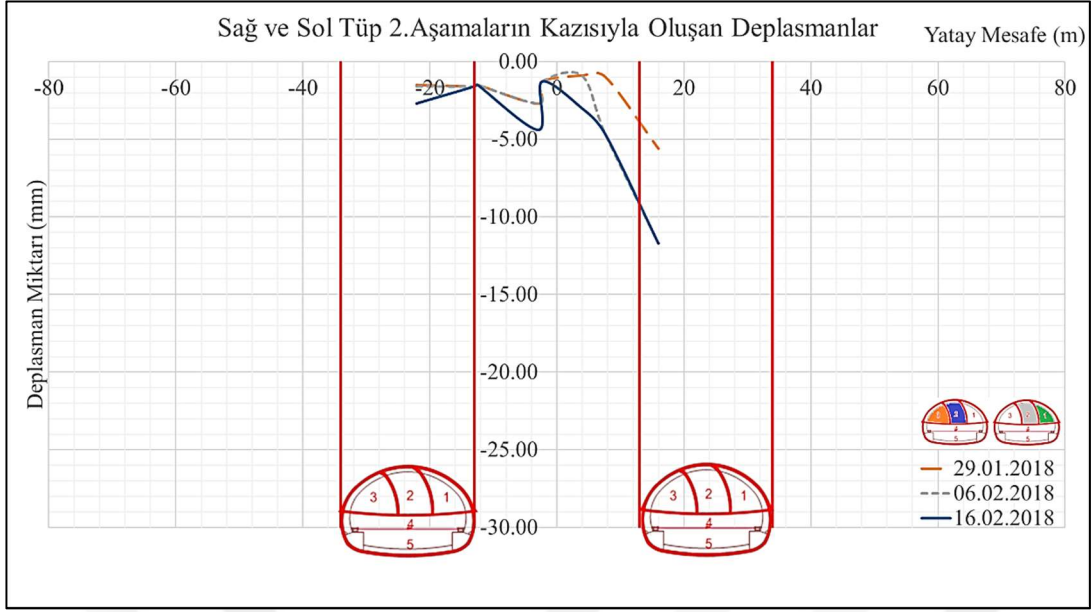
Tüp	Aşama	18.12.17	10.01.18	29.01.18	06.02.18	16.02.18	07.04.18	24.01.19
 SOL TÜP	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
 SAĞ TÜP	1							
	2							
	3							
	4							
	5							

Sağ tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan bina deplasmanları 10.01.2018 tarihli okuma çizgisinde, sol tüpün 3. aşama kazısının da yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları 29.01.2018 tarihli okuma çizgisinde Şekil 6.30'da gösterilmektedir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 5.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.



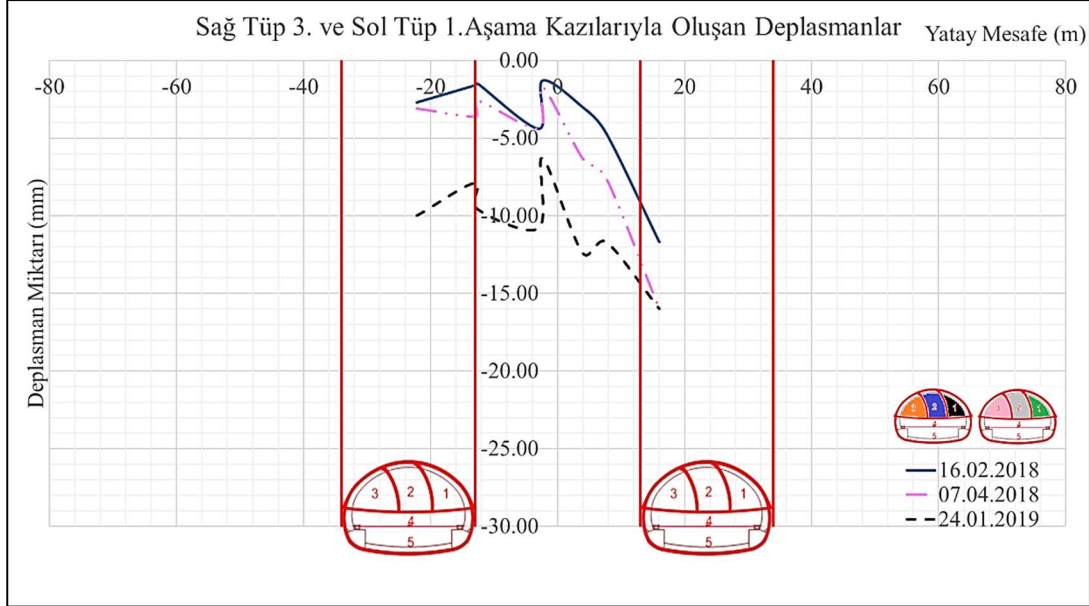
Şekil 6.30 : Sağ tüp 1. ve sol tüp 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar.

Sağ tüpün 2. aşama kazısının da yapılmasıyla oluşan deplasmanlar 06.02.2018 tarihli okuma çizgisinde, sol tüp 2. aşama kazısıyla oluşan deplasmanlar 16.02.2018 tarihli okuma çizgisinde Şekil 6.31'de gösterilmektedir.



Şekil 6.31 : Sağ ve sol tüp 2.aşama kazılarının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar.

Sağ tüpün 3.aşama kazısının yapılmasıyla ve sol tüpün 1.aşama kazısıyla oluşan deplasman miktarları sırasıyla 07.04.2018 ve 24.01.2019 tarihli okuma çizgilerinde Şekil 6.32’de yer almaktadır.



Şekil 6.32 : Sağ tüp 3.ve sol tüp 1.aşama kazıları sonucunda oluşan deplasmanlar.

Sağ tüp 1. aşama kazısının yapılmasıyla sağ tüp üzerinde 40-3 no’lu bina köşe noktasında 1 mm deplasman oluşmuş, enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı

olarak Çizelge 6.24'te verilmiştir. Sol tüp 3.aşama kazının yapılması 42-1 ve 42-4 no'lu binaların köşe noktalarında 1'er mm deplasman oluşturmuştur. Sağ tüp üzerindeki binalarda ise herhangi bir deplasman oluşmamıştır.

Çizelge 6.24 : Sağ tüp 1. ve sol tüp 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar ve farkları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)			Deplasman Farkı (mm)	
		18.12.17	10.01.18	29.01.18	10.01.2018- 18.12.2017	29.01.2018- 10.01.2018
54-2	-27.86	-1.30	-1.30	-1.50	0.00	-0.20
42-1	-28.44	-0.60	-0.60	-1.60	0.00	-1.00
54-3	-26.49	-1.50	-1.50	-1.50	0.00	0.00
42-4	-28.69	-1.70	-1.70	-2.70	0.00	-1.00
42-3	-26.50	-1.30	-1.30	-1.30	0.00	0.00
40-1	-28.18	-0.90	-0.90	-0.90	0.00	0.00
40-2	-24.22	-1.00	-1.00	-1.00	0.00	0.00
40-3	-24.47	-4.60	-5.60	-5.60	-1.00	0.00

Sağ tüp 3. aşamanın kazılmasıyla 40-3 no'lu bina köşesinde 6 mm deplasman oluşmuştur ve enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı olarak Çizelge 6.25'te verilmiştir. Sol tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla 54-2, 42-4 ve 40-1 no'lu noktalarda sırasıyla 1, 2 ve 2 mm deplasman oluşmuştur.

Çizelge 6.25 : Sağ ve sol tüp 2.aşama kazılarının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar ve farkları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)		Deplasman Farkı (mm)	
		06.02.2018	16.02.2018	06.02.2018- 29.01.2018	16.02.2018- 06.02.2018
54-2	-27.86	-1.60	-2.70	-0.10	-1.10
42-1	-28.44	-1.60	-1.60	0.00	0.00
54-3	-26.49	-1.50	-1.50	0.00	0.00
42-4	-28.69	-2.70	-4.40	0.00	-1.70
42-3	-26.5	-1.30	-1.30	0.00	0.00
40-1	-28.18	-0.90	-3.00	0.00	-2.10
40-2	-24.22	-4.70	-4.70	-3.70	0.00
40-3	-24.47	-11.70	-11.70	-6.10	0.00

Sağ tüpün 3.aşama kazısının yapılmasıyla sol tüp üzerindeki 40-3 no'lu köşe noktasında 4 mm deplasman olduğu gözlenmiştir. Sol tüp 1.aşama kazısıyla oluşan deplasmanlar Çizelge 6.26'da verilmiş, sol tüp üstündeki bina köşelerinde çeşitli büyüklükteki deplasmanların olduğu görülmüştür.

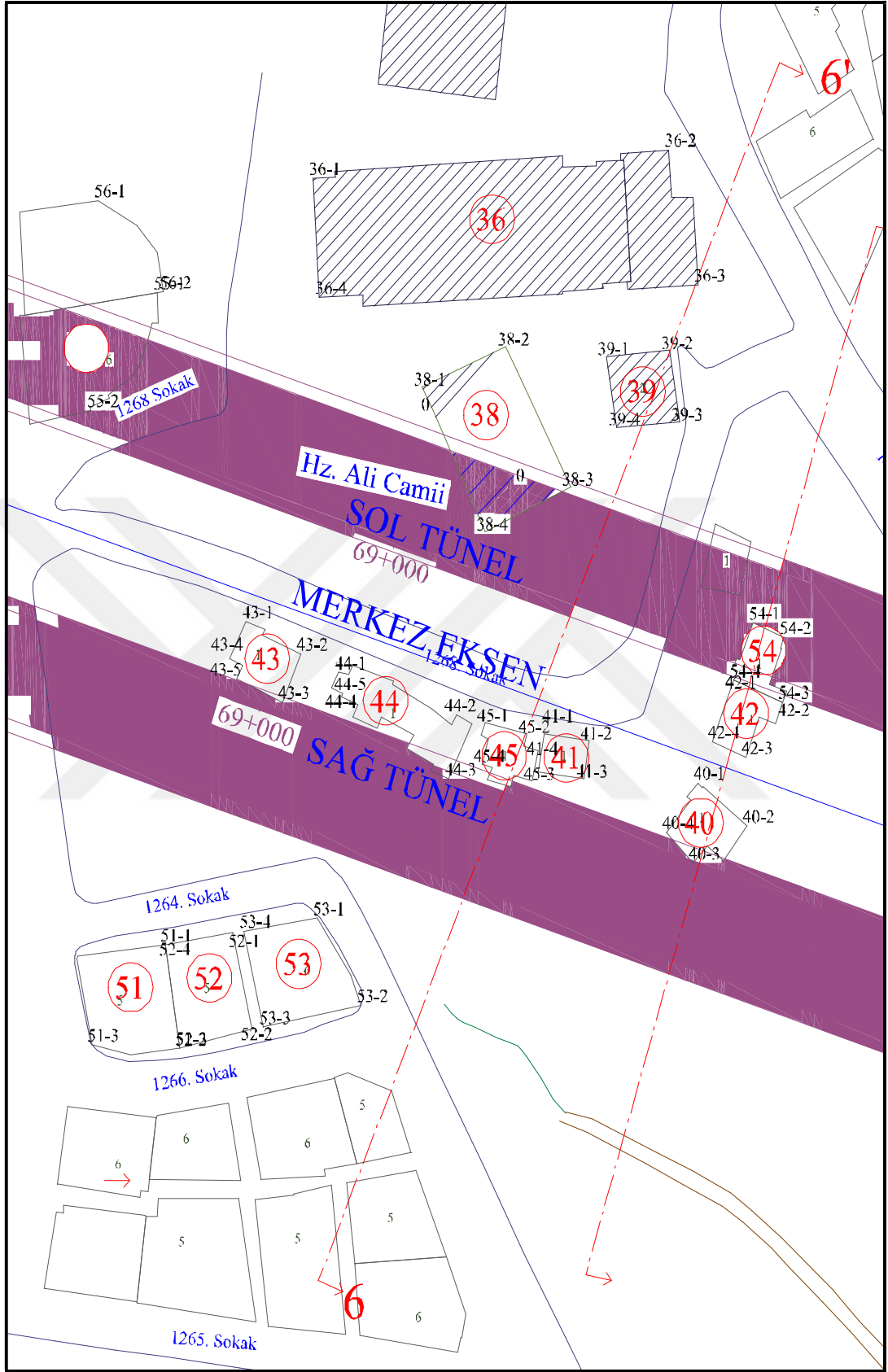
Çizelge 6.26 : Sağ tüp 3.ve sol tüp 1.aşama kazıları sonucunda oluşan deplasman miktarları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)			Deplasman Farkı (mm)	
		16.02.2018	07.04.2018	24.01.2019	07.04-16.02.2018	24.01.2019-07.04.2018
54-2	-27.86	-2.70	-3.10	-10.00	-0.40	-6.90
42-1	-28.44	-1.60	-3.60	-7.90	-2.00	-4.30
54-3	-26.49	-1.50	-2.60	-9.60	-1.10	-7.00
42-4	-28.69	-4.40	-4.40	-10.80	0.00	-6.40
42-3	-26.5	-1.30	-1.70	-6.30	-0.40	-4.60
40-1	-28.18	-3.00	-6.30	-12.40	-3.30	-6.10
40-2	-24.22	-4.70	-7.60	-11.70	-2.90	-4.10
40-3	-24.47	-11.70	-16.00	-16.00	-4.30	0.00

6. enkesitin incelenmesi

Enkesit 6, KM: 69+043'te bulunmakta olup Şekil 6.33'teki planda 36, 38, 39, 41, 44, 45 ve 53 no'lu binalar ve binaların köşe noktalarıyla birlikte gösterilmiştir. Bu binaların köşelerinde bulunan toplam 21 köşe noktasında düzenli olarak deplasman ölçümleri yapılmıştır.

Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 48 adet olup bu çalışmada 04.01.2018 ile 08.11.2018 arasındaki tarihlerde bulunan okumalar çizilmiştir. Bu tarihler sağ ve sol tüp aşamalarının bu binaların altından geçtiği zamana göre seçilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 69+054'te bulunan 39-3 noktasıdır. Son bina ise KM: 68+982'de bulunan 36-1'dir. Çizelge 6.27'de bu bina noktalarının altından geçen tünellerin ilgili tarihlerde hangi aşama kazısında olduğu gösterilmiştir.

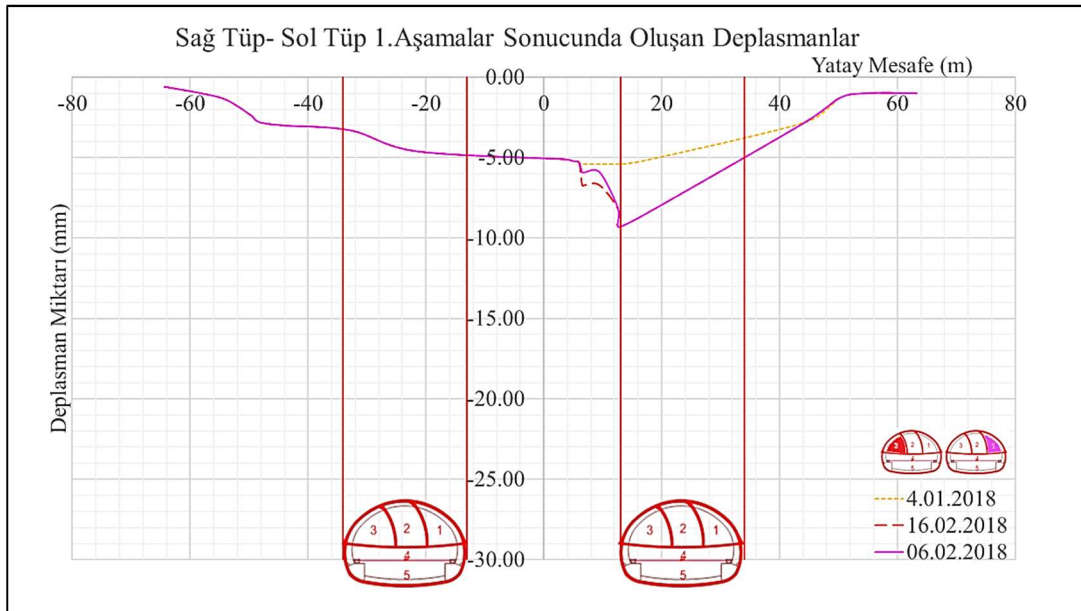


Şekil 6.33 : 6.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

Çizelge 6.27 : 6.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

Tüp	Aşam a	4.01. 18	06.02. 18	16.02. 18	28.02. 18	20.03. 18	13.05. 18	03.10. 18	08.01. 19
 SOL TÜP	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
 SAĞ TÜP	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

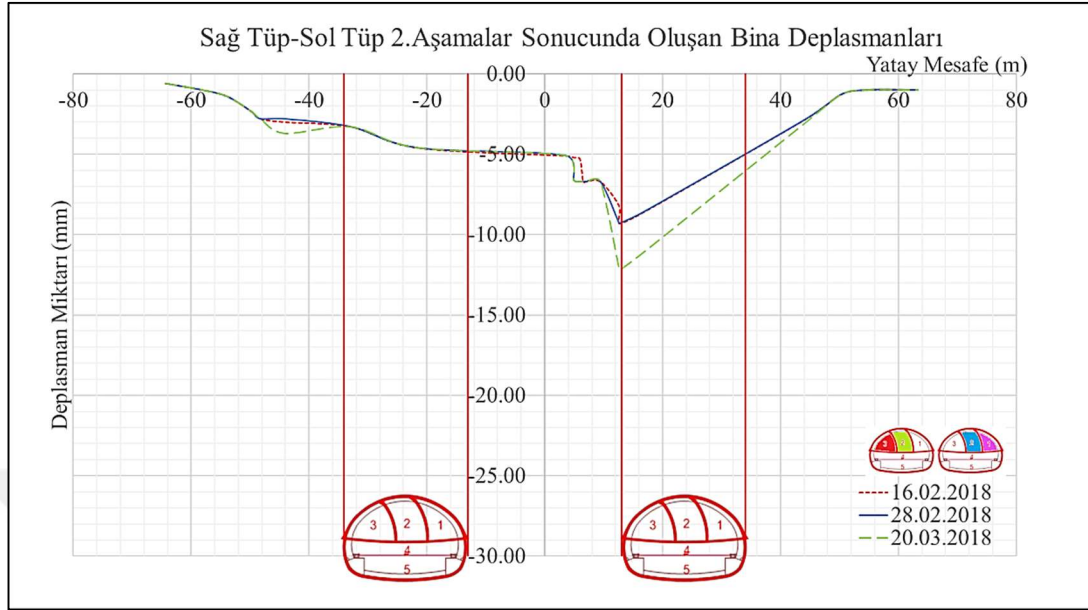
04.01.2018 tarihinde belirlenen enkesit bölgesinde henüz kazının yapılmadığı fakat önceden oluşan deplasmanların miktarları verilmiş, sağ tüp 1. aşama kazısının sonucunda oluşan yüzey deplasmanları 06.02.2018 tarihli okumada Şekil 6.34'te gösterilmiştir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 1.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.



Şekil 6.34 : Sağ ve sol tüpte 1'er aşama kazısı sonucunda oluşan deplasman miktarları.

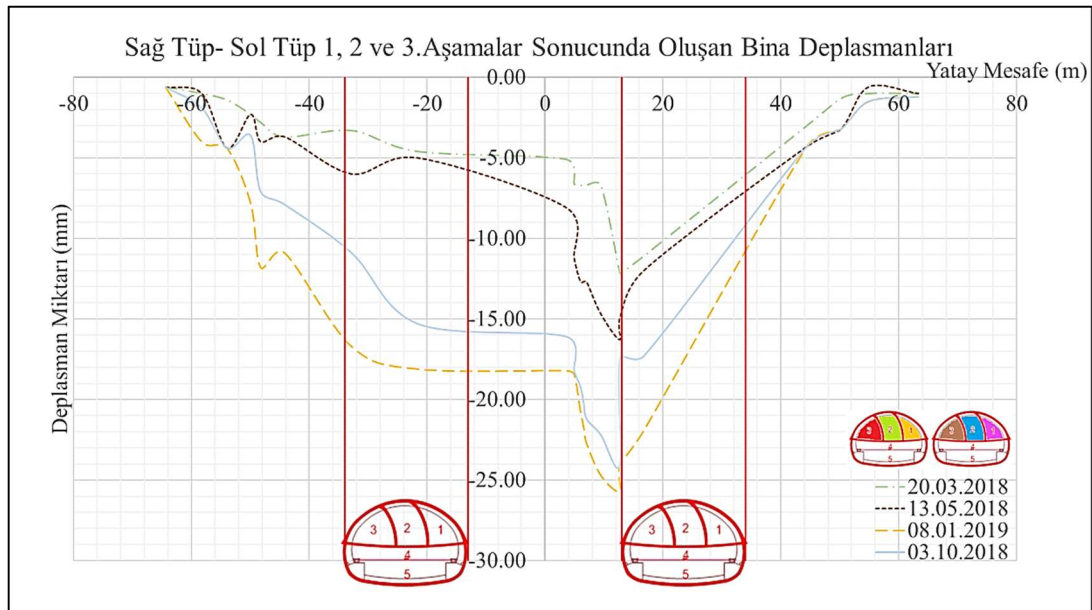
Sağ tüpün 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları 28.02.2018 tarihli okuma çizgisinde Şekil 6.35'te verilmiştir. Sol tüpün 2.aşama kazısının

tamamlanması ve sağ tüp 2. aşama kazısının devam etmesiyle elde edilen deplasmanlar 20.03.2018 tarihli okumada gösterilmiştir.



Şekil 6.35 : Sağ ve sol tüpte 2. aşama kazıları sonucunda oluşan deplasman miktarları.

13.05.2018 tarihli ölçümlerde sağ tüp 3. aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar ve sol tüp 1. aşama kazısının yapılmasıyla 08.01.2019 tarihinde ölçülen deplasmanlar Şekil 6.36’da verilmiştir.



Şekil 6.36 : Sağ ve sol tüp tüm üst yarı aşamalarının kazılması sonucu oluşan deplasman miktarları.

Sağ ve sol tüpte 1'er aşama kazısı sonucunda oluşan deplasman miktarları 4'er mm olarak sağ tüp üzerindeki binalarda (41-1, 45-3, 45-4, 44-3) oluştuğu tespit edilmiştir. 16.02.2018 tarihinde ise sol tüp 3.aşama kazısı yapılmış, bu kazının 45-1, 44-1 ve 41-3 no'lu bina köşelerinde 1'er mm deplasman oluşturduğu ve enkesit üzerinde bulunan diğer bina köşelerinin tünel eksenine olan dik uzaklıkları, köşelerde oluşan deplasmanlar ve farkları ayrıntılı olarak Çizelge 6.28'de verilmiştir. Sağ tüp kazısından dolayı üzerindeki binalarda deplasmanlar oluşmuştur. Sol tüp üzerindeki binalarda deplasman farkı oluşmamıştır. Bunda çimento enjeksiyonunun etkili olduğu düşünülmektedir.

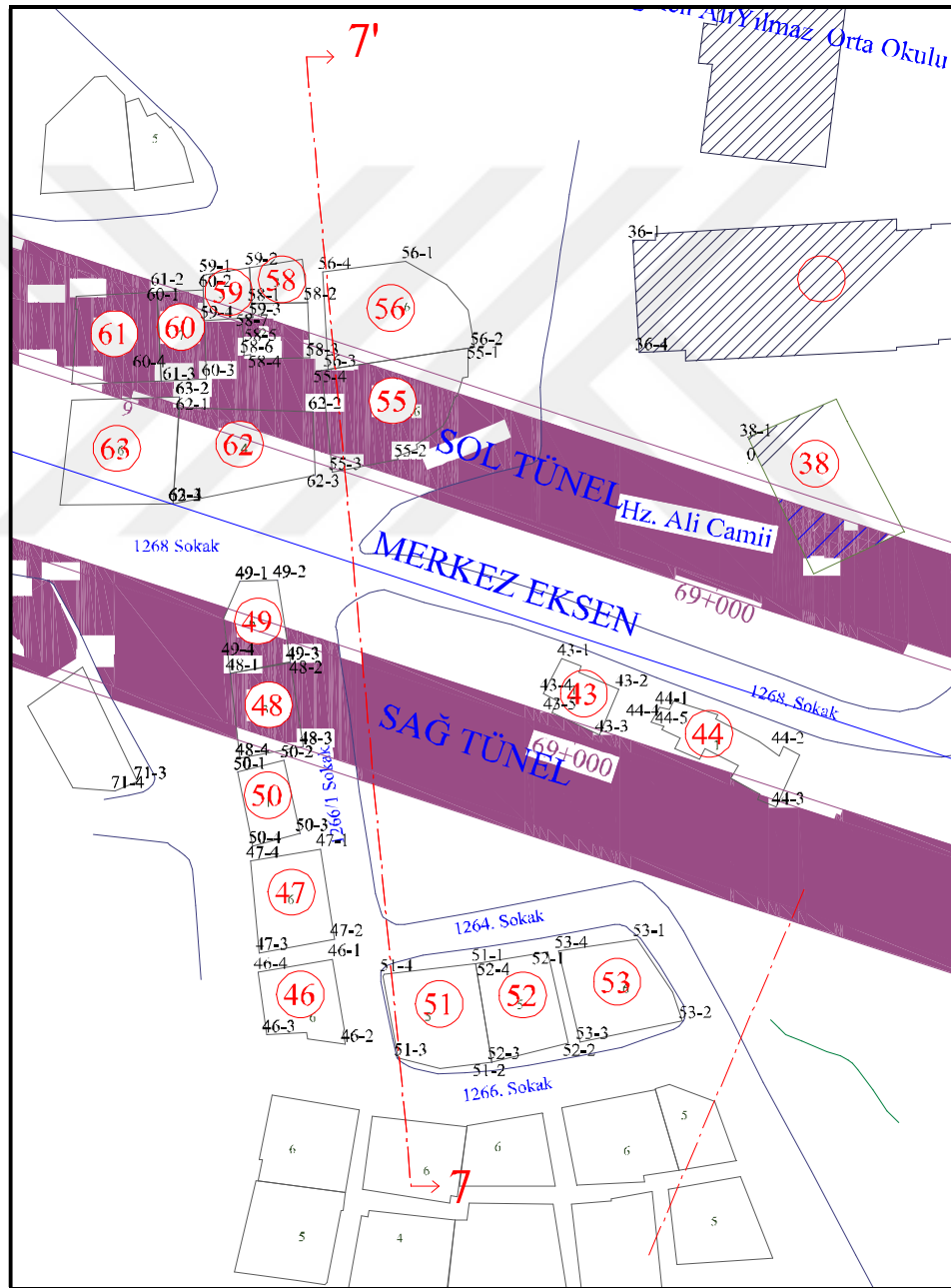
Çizelge 6.28 : Sağ ve sol tüpte 1'er aşama kazısı sonucunda oluşan deplasman miktarları ve farkları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)			Deplasman Farkları (mm)	
		4.01.2018	06.02.2018	16.02.2018	06.02-04.01.2018	16.02-06.02.2018
36-1	-64.41	-0.60	-0.60	-0.60	0.00	0.00
39-2	-58.25	-1.00	-1.00	-1.00	0.00	0.00
39-1	-53.97	-1.40	-1.40	-1.40	0.00	0.00
38-2	-49.98	-2.30	-2.30	-2.30	0.00	0.00
39-3	-48.26	-2.80	-2.80	-2.80	0.00	0.00
39-4	-44.19	-3.00	-3.00	-3.00	0.00	0.00
38-3	-32.84	-3.30	-3.30	-3.30	0.00	0.00
38-4	-21.61	-4.60	-4.60	-4.60	0.00	0.00
41-2	-3.61	-5.10	-5.10	-5.10	0.00	0.00
41-1	-4.91	-5.20	-5.20	-5.20	0.00	0.00
45-2	-5.98	-5.30	-5.30	-5.30	0.00	0.00
45-1	-6.52	-5.40	-5.90	-6.70	-0.50	-0.80
44-1	-7.02	-5.40	-5.90	-6.70	-0.50	-0.80
41-3	-9.44	-5.40	-5.90	-6.70	-0.50	-0.80
45-3	-12.62	-5.40	-8.20	-8.20	-2.80	0.00
45-4	-12.72	-5.40	-9.30	-9.30	-3.90	0.00
44-3	-16.75	-5.20	-8.60	-8.60	-3.40	0.00
53-1	-44.38	-2.80	-2.80	-2.80	0.00	0.00
53-4	-50.20	-1.30	-1.30	-1.30	0.00	0.00
53-2	-54.83	-1.00	-1.00	-1.00	0.00	0.00
53-3	-63.31	-1.00	-1.00	-1.00	0.00	0.00

Sağ ve sol tüpte 2. aşama kazıları sonucunda oluşan deplasman farkları 41-1, 45-3, 45-4, 44-3 no'lu bina noktalarında 3 mm'ye kadar deplasman oluşmuştur. Bunun nedeninin sağ tüpte 2.aşama kazısının devam etmesi olduğu söylenebilir. Yeraltı sularının uzaklaşmasıyla deplasman miktarları artmaya devam etmektedir.

7. enkesitin incelenmesi

Enkesit 7, KM: 68+966'da bulunmakta olup Şekil 6.37'deki planda 7-7' olarak gösterilmiştir. 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 55, 56, 58, 59, 60, 62 no'lu binaların köşelerinde bulunan toplam 21 noktada düzenli olarak deplasman ölçümleri yapılmış olup bu binalar ve binaların köşelerinin 7.enkesite göre konumları Şekil 7.1'de gösterilmektedir.



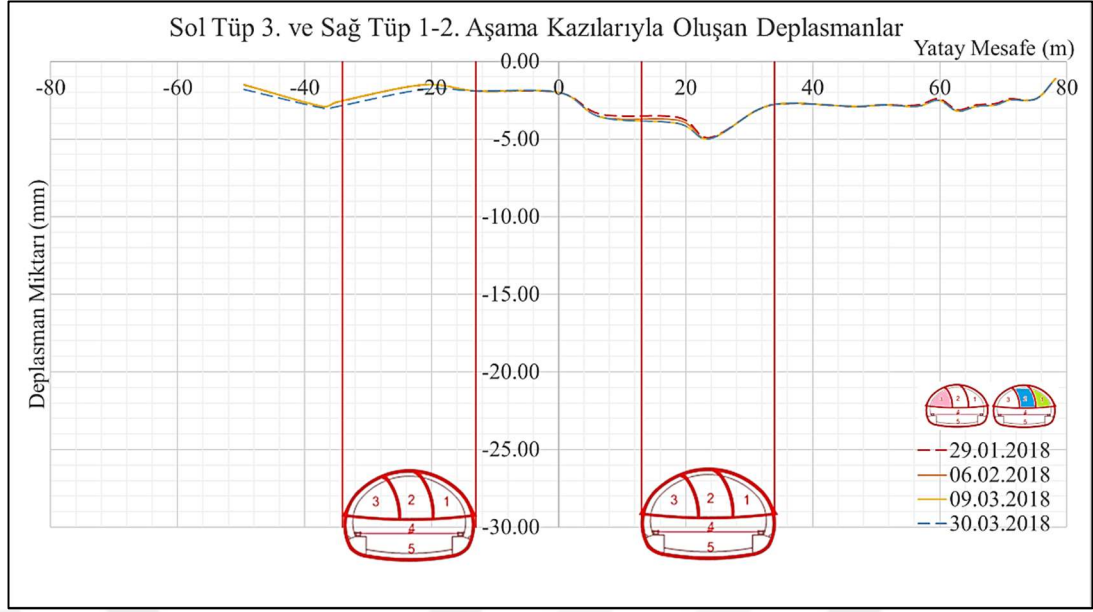
Şekil 6.37 : 7.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 36 adet olup bu çalışmada sağ ve sol tüp aşamalarının yukarıda seçilen binaların altından geçtiği zamana göre 29.01.2018 ile 15.12.2018 arasındaki tarihlerde total station ile ölçülen deplasman okumaları değerlendirilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 69+014'te bulunan 52-2 noktasıdır. Son bina ise KM: 68+912'de bulunan 60-1'dir. Çizelge 6.29'da bu bina noktalarının altından geçen tünellerin ilgili tarihlerde hangi aşama kazısında olduğu gösterilmektedir.

Çizelge 6.29 : 7.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

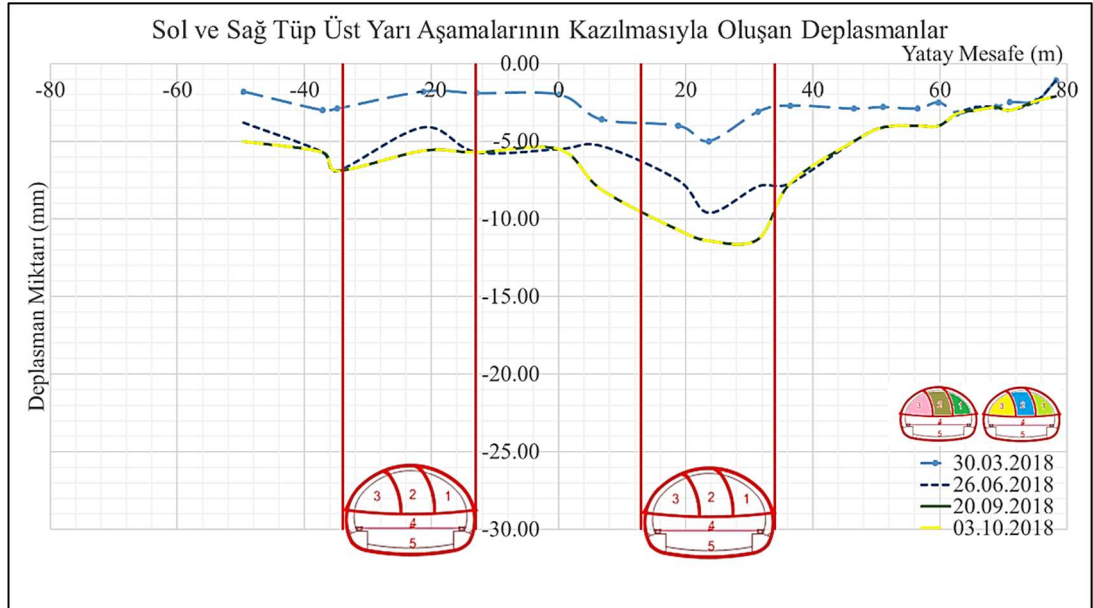
Tüp	Aşama	29.01. . 18	06.02. . 18	09.03. 18	30.03. 18	26.06. 18	20.09. 18	03.10. 18	15.12. 18
 SOL TÜP	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
 SAĞ TÜP	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

29.01.2018 tarihinde belirlenen enkesit bölgesinde henüz tünel kazısı yapılmamış olup Şekil 6.38'de önceden oluşan deplasmanlar verilmiştir. Sağ tüp 1. aşama kazısının sonucunda oluşan yüzey deplasmanları 06.02.2018 ve 28.02.2018 tarihli ölçümlerde, 09.03.2018 tarihinde sol tüp 3. aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar ve sağ tüpün 2. aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları da 30.03.2018 tarihli okuma çizgisinde yine Şekil 6.38'de verilmiştir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 1.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.

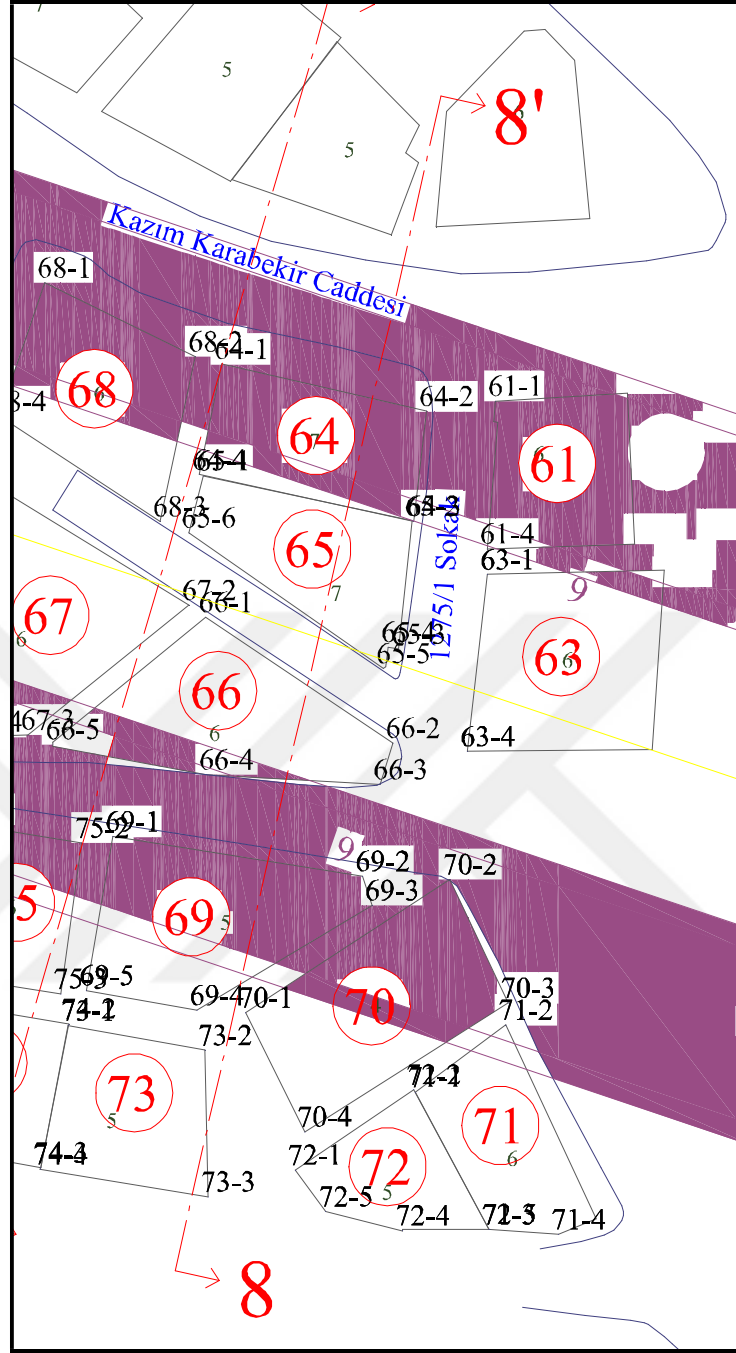


Şekil 6.38 : Sol tüp 3, sağ tüp 1.ve 2.aşama kazıları ile oluşan deplasman miktarları.

Sol tüp 2. aşamanın kazılmasıyla oluşan deplasman miktarları 17.04.2018 tarihli deplasman çizgisinde verilmiş, 26.06.2018 tarihli deplasman ölçümlerinde kazısı tamamlanmış olan sağ 1. ve 2., sol tüp 3.aşamaların ve kazısı devam eden sol tüp 2.aşamanın neden olduğu deplasman ölçümleri Şekil 6.39’da verilmiştir. 20.09.2018 tarihli okumalar sol tüp 1.aşama kazısının oluşturduğu deplasmanlar ile sağ tüp 3.aşamanın da kazılmasıyla oluşan toplam deplasmanlar 03.10.2018 tarihinde yine Şekil 6.39’da gösterilmiştir.



Şekil 6.39 : Sol tüp ve sağ tüp üst yarı aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları.



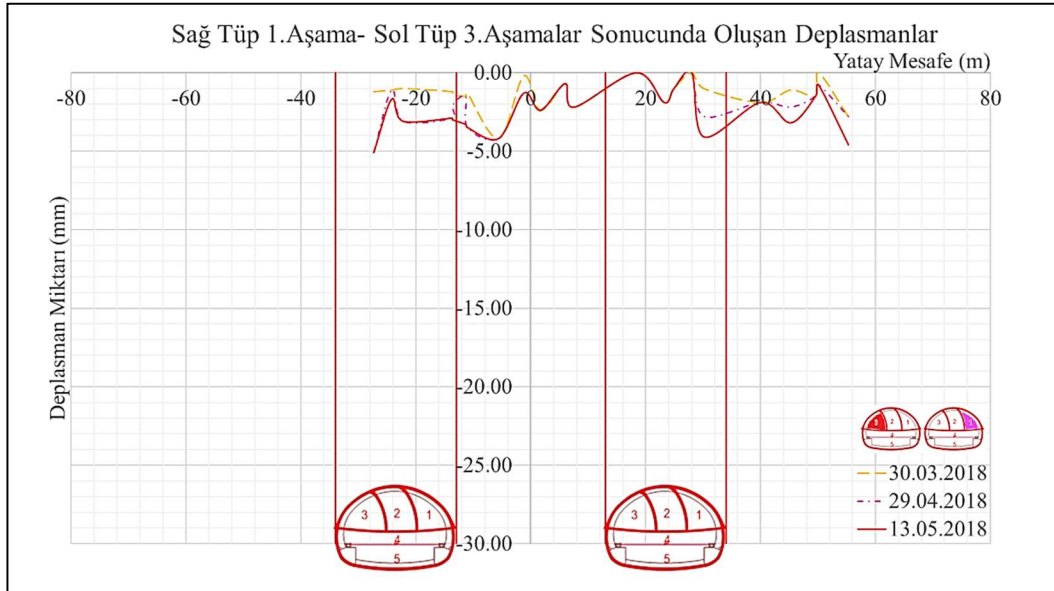
Şekil 6.41 : 8.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 36 adet olup bu çalışmada sağ ve sol tüp aşamalarının yukarıda seçilen binaların altından geçtiği zamana göre 30.03.2018 ile 15.03.2019 arasındaki tarihlerde total station ile ölçülen deplasman okumaları değerlendirilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 68+921’de bulunan 71-3 noktasıdır. Son bina ise KM: 68+859’da bulunan 64-1’dir. Çizelge 6.30’da bu bina noktalarının altından geçen tünellerin ilgili tarihlerde hangi aşama kazısında olduğu gösterilmektedir.

Çizelge 6.30 : 8.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

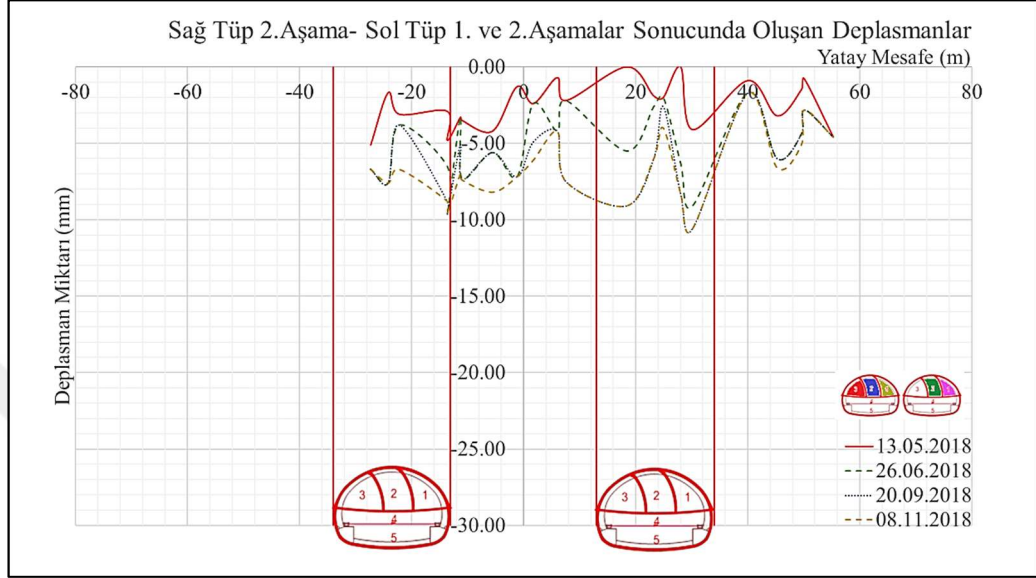
Tüp	Aşama	30.03.18	29.04.18	13.05.18	26.06.18	20.09.18	08.11.18	15.03.19
 SOL TÜP	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
 SAĞ TÜP	1							
	2							
	3							
	4							
	5							

30.03.2018 tarihinde, bu enkesit bölgesinde kazı yapılmamış olup Şekil 6.42’de önceden oluşan deplasmanlar verilmiştir. Sağ tüp 1. aşama kazısının sonucunda oluşan yüzey deplasmanları 29.04.2018 tarihli ölçümlerde, 08.05.2018 ve 13.05.2018 tarihlerinde sol tüp 3.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasmanlar Şekil 6.42’de verilmiştir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 1.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.



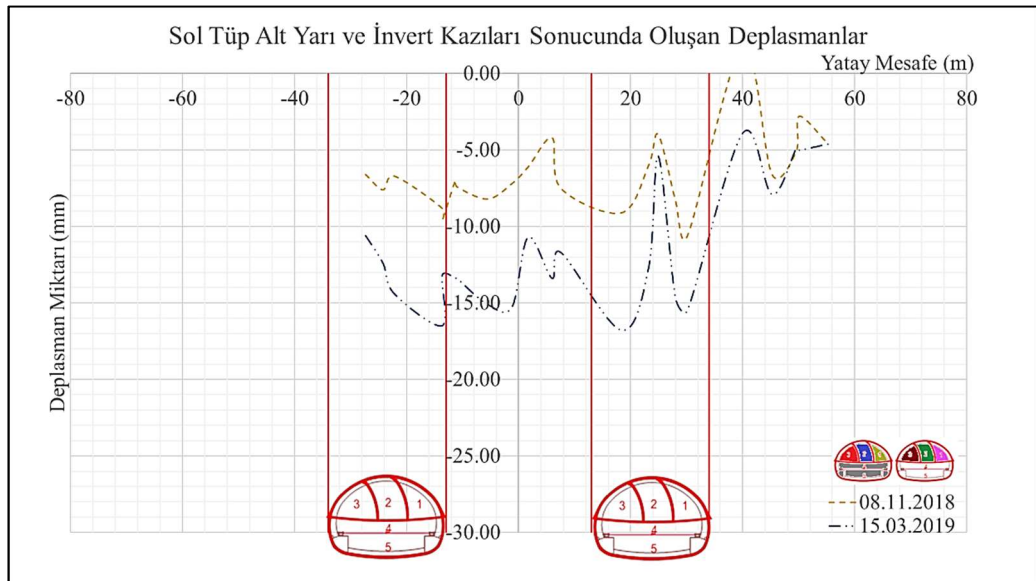
Şekil 6.42 : Sağ tüp 1. ve sol tüp 3. aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman miktarları.

Sağ tüp 2. aşamanın kazılmasıyla oluşan deplasman miktarları 26.06.2018 tarihli deplasman çizgisinde verilmiş, 20.09.2018 tarihinde ölçülen sol tüp 2.aşama kazısının oluşturduğu deplasmanlar ile 08.11.2018 tarihinde ölçülen sol tüp 3.aşamanın da kazılmasıyla oluşan toplam deplasmanlar Şekil 6.43'te gösterilmiştir.



Şekil 6.43 : Sağ tüp 2.,sol tüp 1.ve 2.aşama kazılarıyla oluşan deplasman miktarları.

Sağ tüp 3. aşamanın kazılmasıyla oluşan deplasman miktarları 22.11.2018 tarihli deplasman çizgisinde verilmiş, 15.12.2018 tarihli ölçümlerde sol tüp alt yarı ve invert kazıları tamamlanmış, sağ tüp 3.aşama kazısıyla oluşan deplasmanlar 15.03.2019 tarihli okuma çizgisinde verilmiş, bunlar Şekil 6.44'te gösterilmiştir.



Şekil 6.44 : Sağ tüp 1.,sol tüp 3. aşama kazılarıyla oluşan deplasman miktarları.

Sağ tüp 1. ve sol tüp 3. aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasmanlar önemli mertebelerde olmayıp, her aşama kazısı ilgili tüp üzerinde deplasman oluşturmuştur. Sağ tüp 2. aşama kazısının yapılmasıyla 70-2 no'lu sağ tüp üzerinde bulunan bina köşe noktasında 5.50 mm deplasman oluşmuştur. Sol tüp 1.ve 2. aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman farkları sırasıyla 66-2 no'lu noktada 5.30 mm, 64-1 no'lu noktada 2.90 mm olarak verilmiştir. 66-2 no'lu nokta iki tüp arasında bulunmaktadır. Bu yüzden sol tüp kazısından etkilendiği düşünülmektedir. Köşe noktalarının deplasman miktarı farkları Çizelge 6.31 'de verilmiştir.

Çizelge 6.31 : Sağ tüp 2. ve sol tüp 1.ve 2. aşama kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman farkları

Bina Köşe No	Deplasman Farkı (mm)		
	26.06.2018-13.05.2018	20.09.2018-26.06.2018	08.11.2018-20.09.2018
61-1	-1.60	0.00	0.00
64-2	-5.90	0.00	0.00
64-1	-0.70	0.00	-2.90
64-3	-3.60	-2.30	0.00
65-2	-4.80	0.00	0.00
65-1	0.00	-1.80	-1.90
63-1	-3.80	-0.10	0.00
65-6	-1.40	0.00	-2.60
65-4	-5.90	0.00	0.00
66-1	0.00	-2.50	-1.20
63-4	-3.50	0.00	0.00
66-2	0.00	-5.30	0.00
70-2	-5.50	-3.60	0.00
69-3	-0.70	-3.40	0.00
69-1	0.00	-0.60	-1.40
70-3	-6.30	-2.00	0.00
71-2	-5.00	-1.50	0.00
69-5	-0.80	0.00	0.00
71-3	-2.80	0.00	-0.60
72-3	-2.90	0.00	-0.70
72-1	-2.00	0.00	0.00
73-3	0.00	0.00	0.00

Sol tüpte alt yarı ve invert kazılarının yapılmasıyla tüm enkesit dahilinde bulunan bina köşelerinde deplasman oluşmuştur. Bunun sebebinin alt yarı kazısının son kazıdan 4 ay sonra gerçekleşmesi ve zamanla deplasmanların oluşmasıdır. Bu yüzden, bina köşe noktalarında Çizelge 6.32'de verilen deplasman farklarının sadece alt yarı kazısıyla oluştuğu düşünülmemektedir.

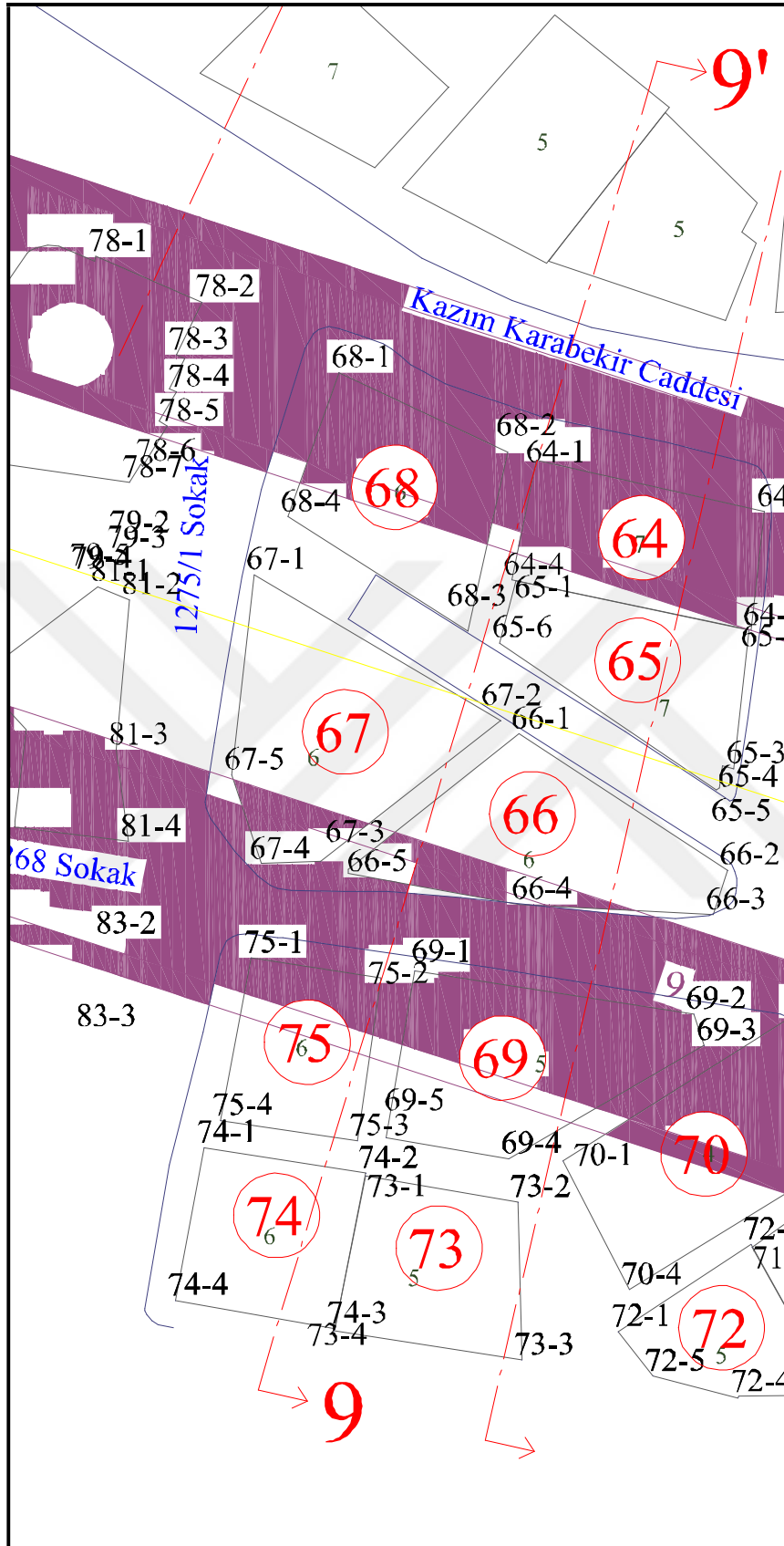
Çizelge 6.32 : Sol tüp alt yarı ve invert kazılarının tamamlanmasıyla oluşan deplasman farkları

Bina Köşe No	Z ₀ (m)	Deplasman Miktarları (mm)		Deplasman Farkı (mm)
		08.11.2018	15.03.2019	15.03.2019-08.11.2018
61-1	58.28	-6.60	-10.60	-4.00
64-2	54.91	-7.60	-12.40	-4.80
64-1	60.75	-6.70	-14.40	-7.70
64-3	61.21	-8.80	-16.50	-7.70
65-2	61.21	-9.60	-13.20	-3.60
65-1	57.04	-7.00	-13.40	-6.40
63-1	41.49	-7.40	-13.40	-6.00
65-6	57.55	-8.20	-15.10	-6.90
65-4	57.05	-7.20	-15.30	-8.10
66-1	57.24	-6.10	-10.70	-4.60
63-4	57.70	-4.20	-13.40	-9.20
66-2	54.71	-7.50	-11.70	-4.20
70-2	55.09	-9.10	-16.80	-7.70
69-3	54.67	-6.00	-12.70	-6.70
69-1	55.19	-4.00	-5.40	-1.40
70-3	49.68	-8.30	-14.70	-6.40
71-2	50.01	-10.60	-15.50	-4.90
69-5	54.00	1.70	-3.90	-5.60
71-3	54.32	-6.60	-7.90	-1.30
72-3	54.63	-5.10	-4.90	0.20
72-1	54.11	-2.80	-5.00	-2.20
73-3	58.77	-4.60	-4.60	0.00

9. enkesitin incelenmesi

Enkesit 9, KM: 68+874'te bulunmakta olup Şekil 6.45'teki planda 9-9' olarak gösterilmiş, 67, 68, 74 ve 75 no'lu binalar ve bu binaların enkesite göre konumları verilmiştir. Bu bina köşelerinde bulunan toplam 18 noktada düzenli ölçümler yapılmıştır.

Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 28 adet olup bu çalışmada 13.05.2018 ile 15.03.2019 arasındaki tarihlerde bulunan okumalar çizilmiştir. Bu tarihler sağ ve sol tüp aşamalarının bu binaların altından geçtiği zamana göre seçilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 68+880'de bulunan 67-1 noktasıdır. Son bina ise KM: 68+852'de bulunan 74-3'tür. Çizelge 6.33'te bu bina noktalarının altından geçen tünellerin hangi tarihlerde ilgili aşama kazısında olduğu gösterilmektedir.



Şekil 6.45 : 9.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

Çizelge 6.33 : 9.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

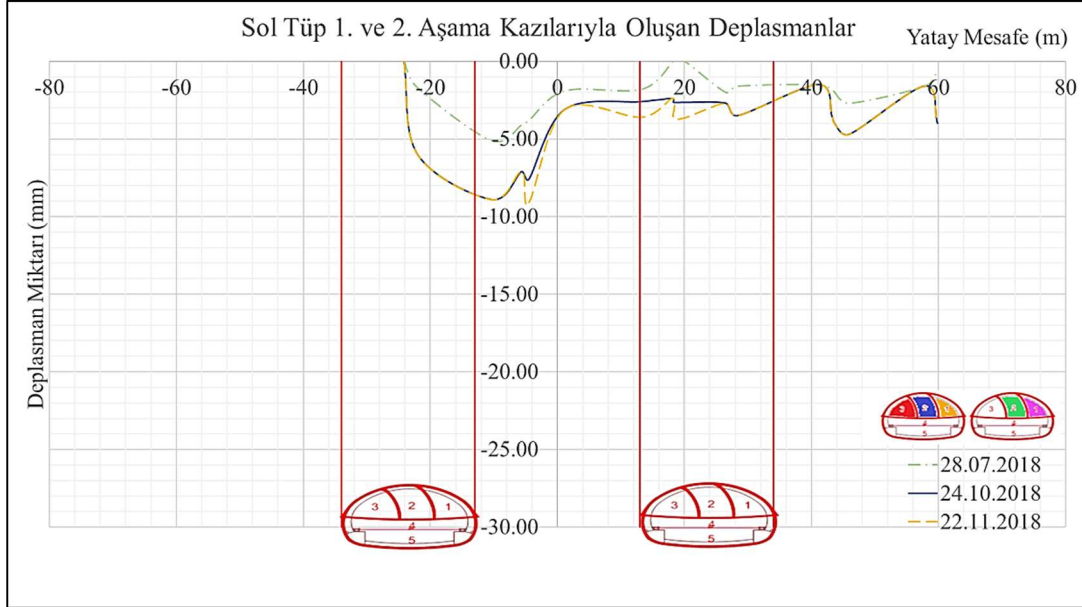
Tüp	Aşama	13.05.18	26.05.18	26.06.18	28.07.18	24.10.18	22.11.18	24.01.19	15.03.19
 SOL TÜP	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
 SAĞ TÜP	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

13.05.2018 tarihinde, belirlenen enkesit bölgesinde henüz kazı yapılmamış olup Şekil 1.2’de önceden bilinmeyen sebeplerle oluşan deplasmanlar verilmiştir. Sağ tüp 1. aşama kazısının sonucunda oluşan yüzey deplasmanları 26.05.2018 tarihinde, sol tüp 3.aşama kazısıyla beraber oluşan deplasmanlar 26.06.2018 tarihinde, sağ tüp 2.aşama kazısıyla beraber oluşan deplasmanlar ise 28.07.2018 tarihinde Şekil 6.46’da gösterilmektedir. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 1.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.



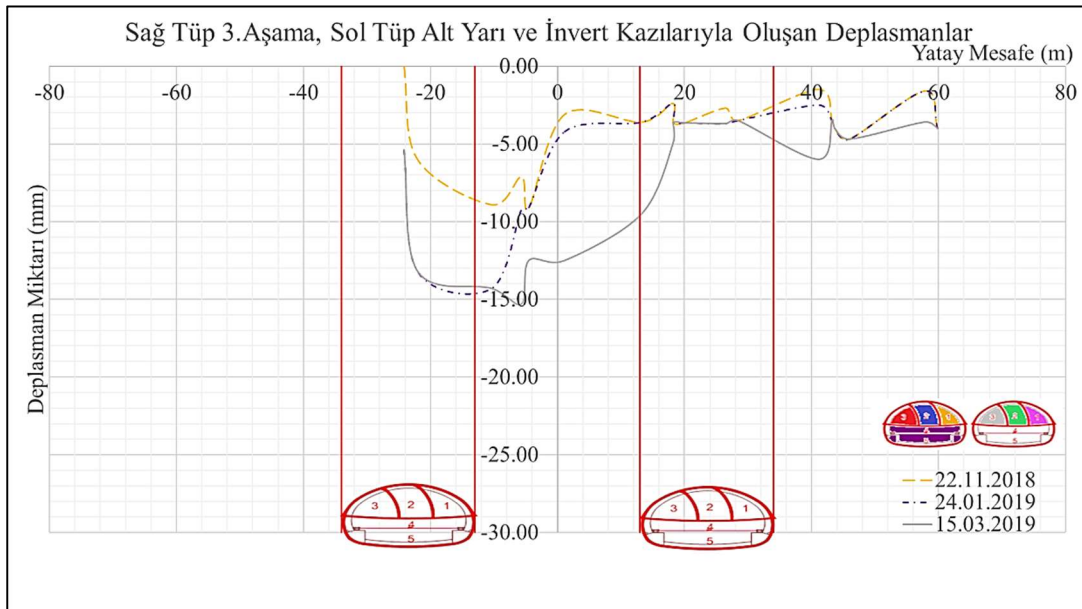
Şekil 6.46 : Sağ 1. ve 2., sol tüp 3. aşama kazılarıyla oluşan deplasman miktarları.

24.10.2018 tarihinde sol t p 2. aşama kazısının sonucunda oluşan yüzey deplasmanları, 22.11.2018 tarihinde sol t p 1.aşama kazısıyla beraber oluşan deplasmanlar şekil 6.47’de gösterilmektedir.



şekil 6.47 : Sol t p 1. ve 2. aşama kazılarıyla oluşan deplasmanlar.

24.01.2019’da sol t p alt yarı ve invert aşama kazılarıyla, 15.03.2019 tarihinde ise sağ t p 3.aşama kazısıyla oluşan deplasmanlar şekil 6.48’de gösterilmektedir.

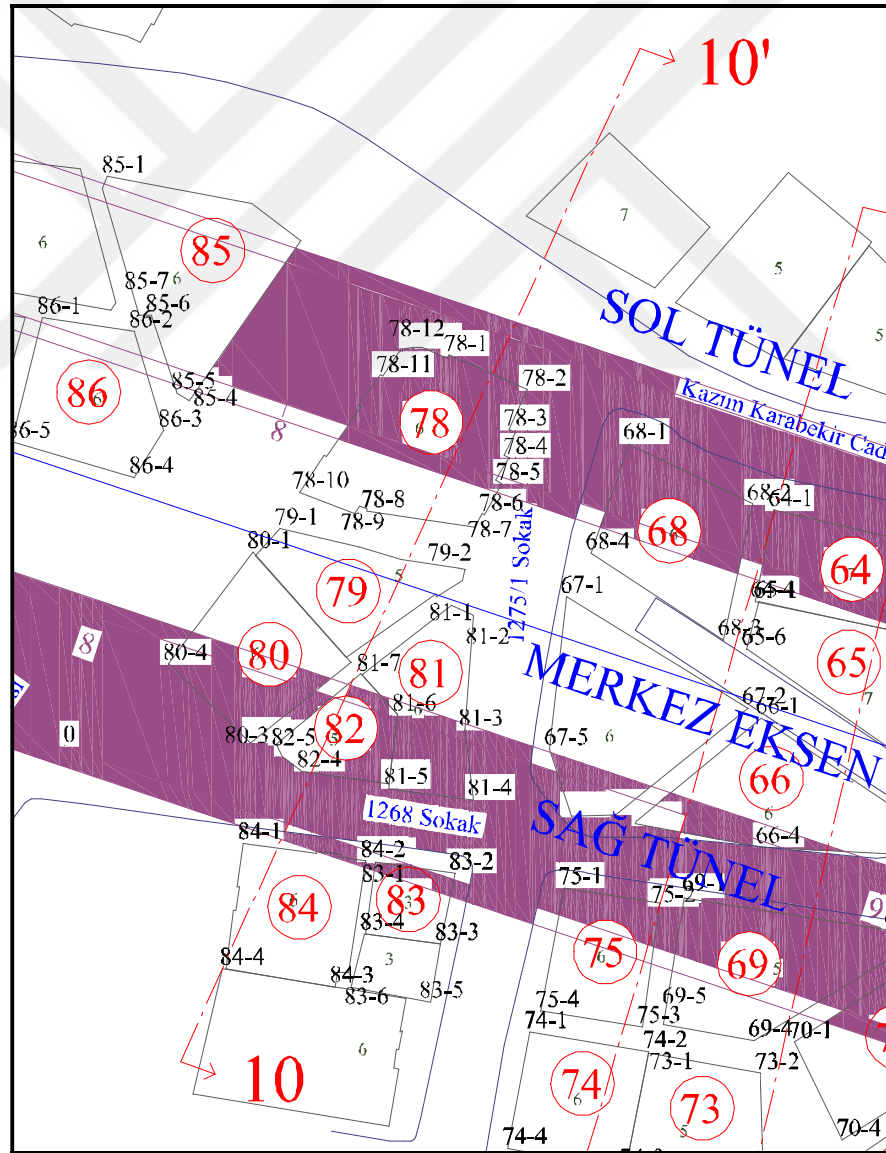


şekil 6.48 :Sağ 3. ve sol t p alt yarı ve invert kazılarıyla oluşan deplasman miktarları.

Sağ tüp 1.aşamanın kazılmasıyla sol tüp üzerindeki bina köşelerinde 2 mm mertebesinde deplasmanlar oluşmuştur. Sağ tüp üzerindeki binalarda herhangi bir deplasman oluşmadığı için bunun kazıyla bir ilgisi olmadığı, yeraltı suyunun uzaklaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sol tüp alt yarı ve invert kazısının yapılmasıyla maksimum 6.10 mm deplasman miktarı 68-3 no'lu binada oluşmuştur. Bu bina sol tüpe daha yakın bir konumdadır.

10. enkesitin incelenmesi

Enkesit 10, KM: 68+830'da bulunmakta olup Şekil 6.49'daki planda gösterilmiştir. 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84 no'lu binaların köşelerinde bulunan toplam 15 noktada düzenli olarak deplasman ölçümleri yapılmıştır.



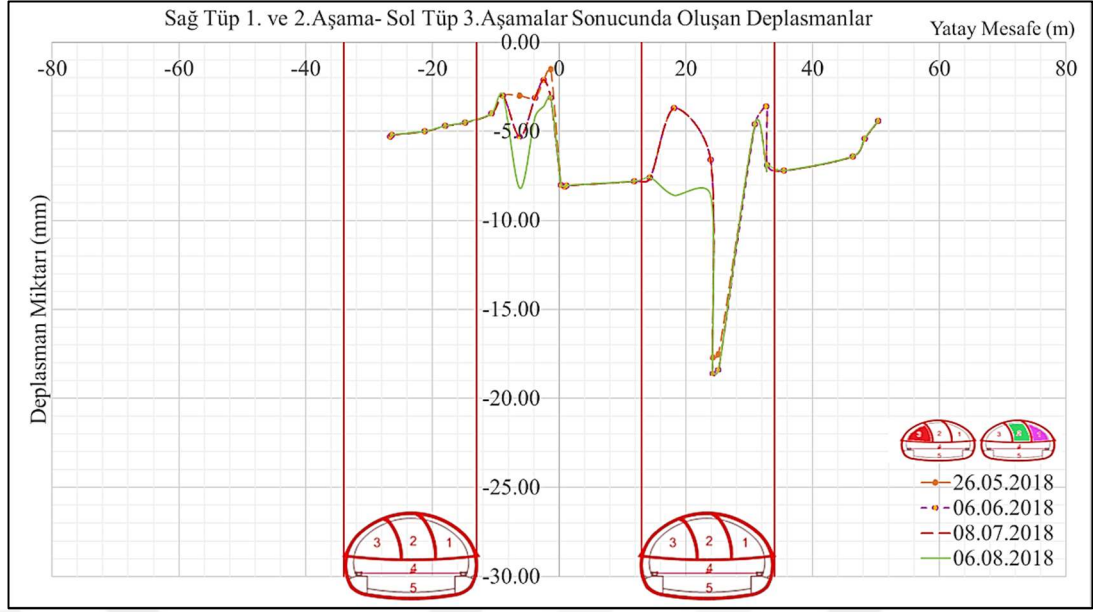
Şekil 6.49 : 10.enkesit bina konumları ve yüzey ölçüm noktaları.

Yapılan ölçümler her bir nokta için toplam 28 adet olup bu çalışmada 26.05.2018 ile 15.03.2019 arasındaki tarihlerde bulunan okumalar aktarılmıştır. Bu tarihler sağ ve sol tüp aşamalarının bu binaların altından geçtiği zamana göre seçilmiştir. Tünelin kazılarak altından geçtiği ilk bina noktası KM: 68+851'de bulunan 83-3 noktasıdır. Son bina ise KM: 68+810'da bulunan 80-4'tür. Çizelge 6.34'te bu bina noktalarının altından geçen tünellerin hangi tarihlerde ilgili aşama kazısında olduğu gösterilmektedir.

Çizelge 6.34 : 10.enkesit altından geçen tünel aşamalarının zamana göre ilerlemeleri

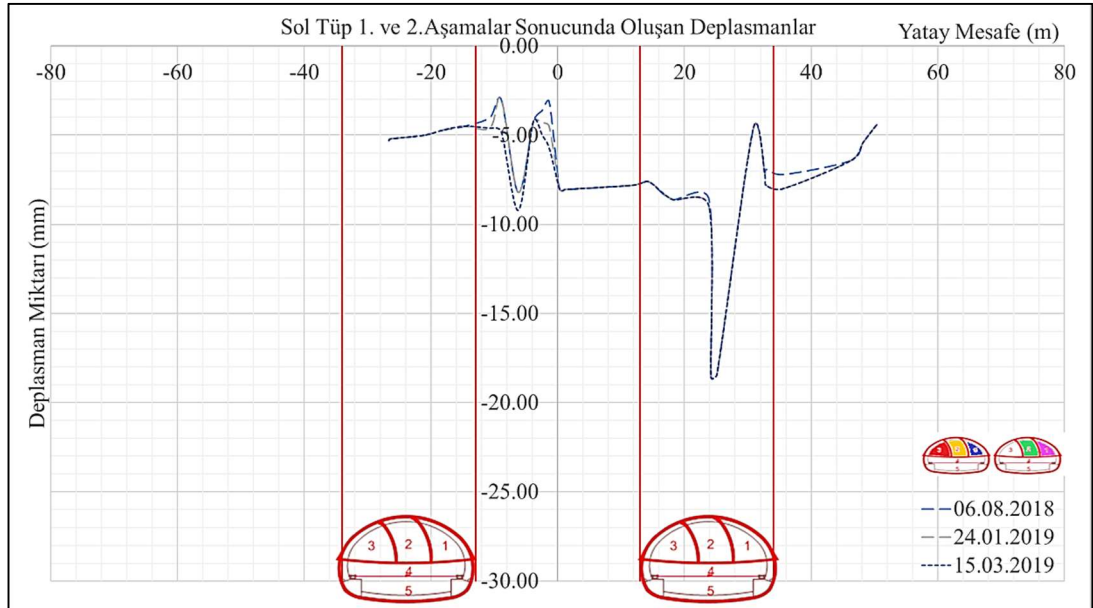
Tüp	Aşama	26.05.18	06.06.18	08.07.18	06.08.18	24.01.19	15.03.19
 SOL TÜP	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
 SAĞ TÜP	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

Sağ tüp 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan bina deplasmanları 06.06.2018 tarihli okuma çizgilerinde Şekil 1.2'de gösterilmektedir. 78-10, 79-1, 82-5 no'lu bina köşe noktalarında sırasıyla 2, 2, 1 mm deplasmanlar oluşmuştur. Sol tüpün 3. aşama kazısının da yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları 07.07.2018 tarihli okuma çizgisinde Şekil 6.50'de gösterilmektedir. Bu kazının yapılması 83-1 no'lu bina noktasında 4 mm deplasmana yol açmamıştır. Sağ tüp 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan bina deplasmanları 06.08.2018 tarihli okuma çizgilerinde yine Şekil 6.50'de gösterilmektedir. Bu kazı, 78-10, 79-2 ve 80-4 no'lu bina köşe noktalarında sırasıyla 3, 1 ve 5 mm deplasmanlar oluşturmuştur. Grafiklerde sağ altta bulunan ve tünel aşamalarını temsil eden şekillerin renklendirilmesinde, yine sağ altta tünel şekli altında bulunan ve grafikte değerlendirilen deplasman tarihlerinin kazı aşamalarının 1.enkesitin altından geçtiği anda hangi aşamada olduğuna bağlı olarak ilgili tarihlerin renkleri kullanılmıştır.



Şekil 6.50 : Sağ tüp 1.ve 2., sol tüp 3. aşamaların kazılmasıyla oluşan deplasmanlar.

Sol tüp 2. aşama kazısıyla oluşan bina deplasmanları 24.01.2019 tarihli okuma çizgisinde, sol tüp 1.aşama kazısının da yapılmasıyla oluşan bina deplasmanları 15.03.2019 tarihli okuma çizgisinde Şekil 6.51’de gösterilmektedir. Sol tüpün 2.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları bina noktaları 79-1, 80-3, 84-2 ve 84-1’de sırasıyla 1, 2, 1 ve 1 mm deplasman oluşmuştur. Sol tüpün 1.aşama kazısının yapılmasıyla oluşan deplasman miktarları bina noktası 79-1’de 1 mm deplasman oluşmuştur.



Şekil 6.51 : Sol tüp 1.ve 2. aşamaların kazılmasıyla oluşan deplasmanlar.

Sol t p kazılarının etkisi merkez ekseninde, sağ t p kazılarının etkisi ise hem sağ t p üzerinde hem de merkez ekseninde olmuştur. Yine iki tünel kazısı birbirini etkilememiştir.

6.2.2 Ölçülen deplasmanların genel değerlendirmesi

Tünel aşama kazılarının oluşturduğu deplasman miktarları ve deplasman yüzdeleri her enkesitte birbirinden farklıdır, düzenli bir deplasman artışı sergilememektedir. Örneğin sağ tüpün 2.aşama kazısıyla oluşan deplasman farkı 3.enkesitte 16 mm iken 6.enkesitte 1 mm'dir. Yeraltı suyunun durumu, suyun drenaj durumu, tünel içinde yapılan tahkimat sistemlerinden kaya bulonlarının uygulanması sırasında kullanılan  imento enjeksiyonu miktarının değişkenliği, çatlak, kırık, ayrışma, süreksizlik gibi bölgenin yerel jeoloji ve geoteknik koşulları tünel kazılarının kısa süre içerisinde yüzeyde oluşan deplasmanların miktarını etkilediği düşünülmektedir.

Tünel aşama kazılarının ayrı ayrı incelenmesiyle elde edilen sonuçlara göre, iki tünel eksenini arasında 42.90 m bulunan bu tüplerin kazılarının birbirini  rselemeyerek ilgili tüplerin üstünde ve merkez eksen üstünde bulunan yapılar da deplasmanlara neden oldukları belirlenmiştir. Tünelin açıldığı ortamın özelliklerinden dolayı ve tünel eksenleri arası mesafenin fazla olmasıyla iki tünelin birbirlerinin etki alanına girmedikleri düşünülmektedir.

Bu çalışmada ulaşılan sonucun aksine Peck (1969), ikiz tünellerle ilgili olarak, iki tünelin yan yana açılması sonucunda ilk açılan tünelin zemini  rselediğini ve zeminde gerilme boşalmasına sebep olduğu için ikinci açılan tünele doğru zemin hareketi oluştuğunu belirtmiştir. Peck'e benzer şekilde, Kirazlı- kitelli'de 6.5 m çaplı, Güngören Formasyonu içerisinde açılan ikiz tünellerde yaptıkları araştırmaya göre Demir ve diğ., (2018) ikinci t p üzerinde daha yüksek oturma ile karşılaşılması ve oturma etki alanının artmasının, ortamın birinci tüpün geçişi sırasında örselenmiş olduğunu gösterdiğini ifade etmiştir. Çeçen (2007) bu konuyla ilgili olarak Trakya Formasyonunda açılan Koska Tünelleri'ni (yan yana açılan 4 tünel) incelemiş, benzer RMR değerindeki zeminlerde birbirine yakın açılan tünellerde her bir tünel kazısının bir diğerinin deformasyon miktarını etkilediğini belirtmiştir. Ayrıca Mahmutoğlu'nun (2010), iki tünel merkezi arasının 15 m olduğu Güngören, Bakırköy ve Çukurçeşme formasyonunda TBM ile açılan Esenler-Kirazlı ikiz tünellerinde, birinci tünelin ortamı  rselediği ve bu yüzden ikinci tünelin açılmasıyla maksimum oturmanın da ikinci tünel

üzerinde oluştuğunu belirtmiştir. Bunun nedeninin bu çalışma kapsamında açılan tünel ile bu tünellerin açıldıkları ortamların birbirlerinden farklı olarak zemin ve kaya olması ve aralarında tünel çapının yaklaşık olarak 2 katı mesafe bulunan tünellerin birbirlerinin kazısını etkilememesi olduğu düşünülmektedir.

6.3 Yüzey Deplasmanlarının Belirlenmesi

Can ve mal kayıplarını önlemek amacıyla tünel kazısı sırasında yüzeydeki yapıların deplasman miktarları düzenli olarak ölçülür ve takip edilir. Bu kayıpları en aza indirmek amacıyla pek çok araştırmacı tarafından yüzey deplasmanlarının tahmini için yaklaşımlar elde edilmiştir. Bu bölümde yüzey deplasmanları Gauss hata fonksiyonu yardımıyla tasman eğrisinin farklı bağıntılarına göre hesaplanarak gerçek değerleriyle karşılaştırılarak İstanbul grovaklarına uygun olan bağıntı tespit edilmeye çalışılmıştır.

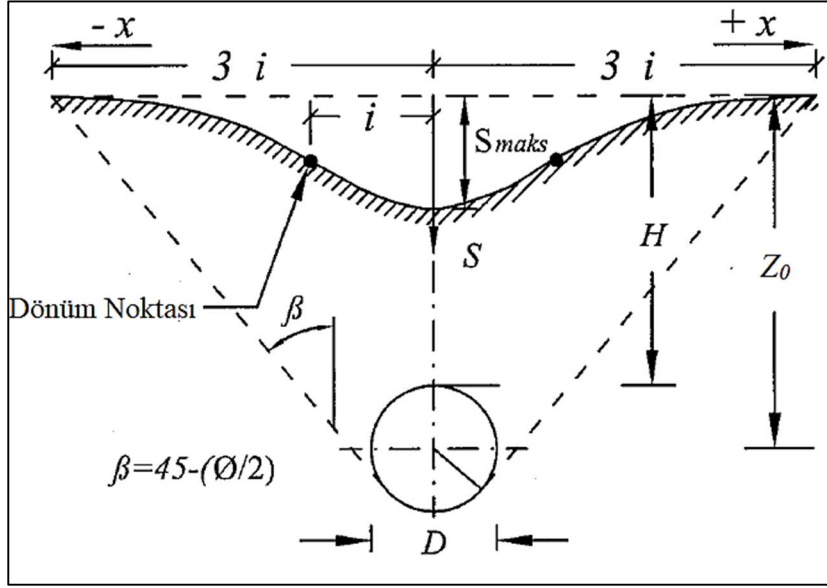
6.3.1 Gauss hata fonksiyonu

Schmidt ve Peck tarafından 1969 yılında yapılan çalışma sonucunda kohezyonsuz gevşek zeminlerde açılan tek tüplü tünel kazılarında, yüzeyde oluşan oturmalarının tahmin edilmesi için Gauss Hata Eğrisi kullanılabileceği belirtilmiştir. Gauss modeli 1982 yılında O'Reilly ve New tarafından bilgisayar ile hesaplanmış, arazide yapılan ölçümlerle karşılaştırılarak yüzey oturmasının tahmin edilebilmesi amacıyla S eşitliği geliştirilmiştir.

$$S = S_{maks} \times e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (6.1)$$

Burada S tünel eksenine (x) mesafedeki yüzey oturması, S_{maks} tünel ekseninde oluşan maksimum yüzey oturması, i dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesidir. Bu fonksiyonun etki alanı ise $3i$ mesafedir.

O'Reilly ve New (1982), zemin hareketine bağlı olarak tek tüplü tünel nedeniyle oluşan yüzey oturma hareketleri için Şekil 6.52'de gösterilen kesiti oluşturmuşlardır.



Şekil 6.52 : Tek tüpte oluşan yüzey oturması için kullanılan kesit (O'Reilly ve New, 1982).

Şekilde gösterilen H tünel tavan üst kotunun yüzeye olan mesafesini, D tünel çapını, Z_0 tünel merkezinin yüzeye olan mesafesini göstermektedir. Denklem, β sınır açısının değerini, ϕ içsel sürtünme açısı cinsinden aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$\beta = 45 - \frac{\phi}{2} \quad (6.2)$$

Birim ilerleme için çökme eğrisinin tanımlandığı hacim V_t ,

$$V_t = \int_{-3i}^{+3i} S \, dx \cong 2.5 \, i \, S_{maks} = 2.506 \times i \times S_{maks} \quad (6.3)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Herzog (1985) tarafından tünel kazısından kaynaklanan hacimsel zemin kaybı V_k aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$V_k = \pi \times u \times D \quad (6.4)$$

Tünel cidarının radyal yönde yaptığı yer değiştirme u ise aşağıda verilen bağıntı ile bulunmaktadır:

$$u = \frac{1 + \vartheta'}{E'} \times P \times \frac{D}{2} \quad (6.5)$$

Burada elastik büyüklükler ϑ' ve E' düzlemsel birim şekil değiştirme koşulları altında kaldığı kabulü ile Arıoğlu ve diğ. (1992) tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\vartheta' = \frac{\vartheta}{1 + \vartheta} \quad (6.6)$$

$$E' = \frac{1 + 2\vartheta}{(1 + \vartheta)^2} \times E_y \quad (6.7)$$

Burada ϑ poisson oranını, E_y yerinde elastisite modülünü ifade etmektedir. P toplam arazi basıncı olup,

$$P = P_s + \gamma Z_0 \quad (6.8)$$

bağıntısı ile gösterilmektedir. Burada P_s tünel üzerindeki yapıların ilave yük miktarını (sürşarj yükünü) ve γ doğal birim hacim ağırlığı ifade etmektedir.

ϑ' ve E' , ϑ ve E_y olarak u eşitliğinde yerlerine konularak aşağıdaki bağıntı elde edilmektedir:

$$u = \frac{D}{2} \times \left(\frac{1 + \vartheta}{E_y} \right) \times (P_s + \gamma Z_0) \quad (6.9)$$

V_k eşitliğinde u ve P eşitlikleri yerlerine konularak Denklem 1.10 bağıntısında birim ilerleme için çökme eğrisinin tanımlandığı hacim çap, poisson oranı, elastisite modülü, tünel yükü ve ilave yükler cinsinden ifade edilmektedir.

$$V_k = \pi \times \frac{D^2}{2} \times \left(\frac{1 + \vartheta}{E_y} \right) \times (P_s + \gamma Z_0) \quad (6.10)$$

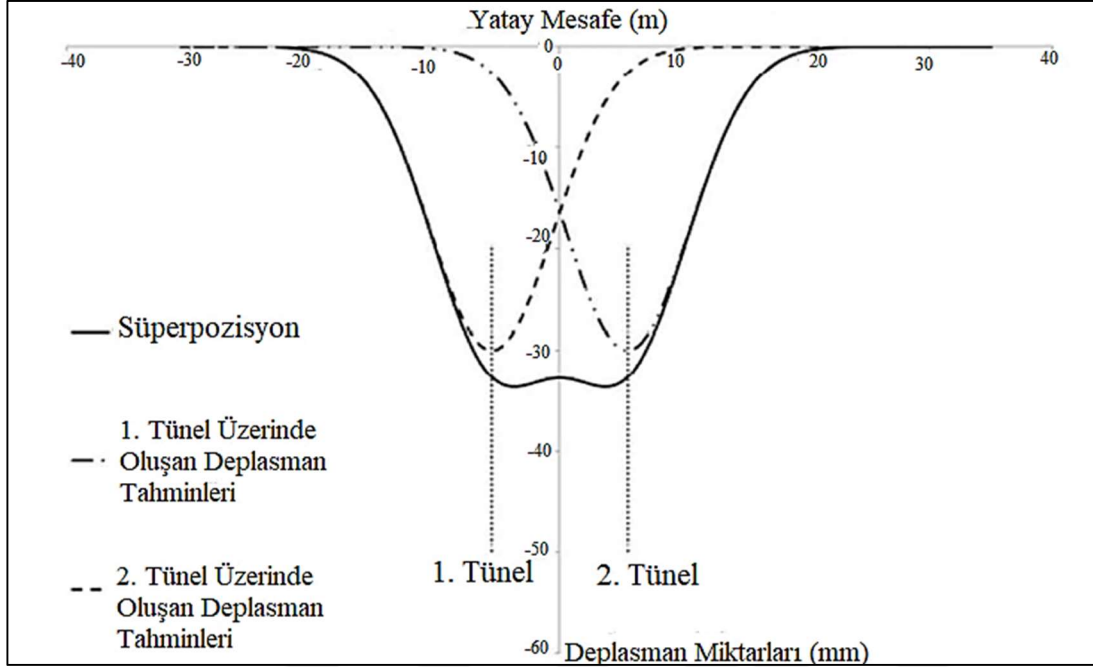
Fiziksel modelde Schmidt (1969) ve Arıoğlu (1992)'nin yaptığı kabule göre hacimler birbirine eşitlenerek $V_k = V_t$ elde edilir.

Denklem 6.10 ve 6.4'te bulunan ifadeler yerlerine yerleştirilip, kısaltmalar yapılarak maksimum yüzey oturma miktarı S_{maks} aşağıdaki bağıntı ile elde edilir:

$$S_{maks} = 0.628 \times \frac{D^2}{i} \times \left(\frac{1 + \vartheta}{E_y} \right) \times (P_s + \gamma Z_0) \quad (6.11)$$

Yüzey oturması tahmini için yapılan birçok araştırma olmasına rağmen bunlar tek tüp açılan tüneller için geçerlidir. Temel olarak Gauss Eğrisi yüzey oturması tahminlerinde kullanılmaktadır. İkiz tünellerin açılmasıyla oluşan zemin hareketlerinin tahminiyle ilgili olarak birçok araştırma yapılmasına rağmen, ikiz tünellerin yol açtığı yüzey oturma tahminleri birkaç araştırmayla sınırlıdır. Süperpozisyon yöntemiyle herhangi bir ikiz tünel modeli üstünde kolayca yüzey oturması tahmini yapılabilir. İki tünelin birbirini etkilemesi hesaplanmadan, her bir tünelin merkezi üzerinde oluşacak yüzey oturmaları bulunur ve bunlar toplanarak süperpoze oturma elde edilir. Killi zeminde

açılan birbirine paralel, 4 m çaplı ikiz tünellerin ayrı ayrı oturma eğrileri ve süperpozisyon yapılarak elde edilen toplam oturma eğrisi Şekil 6.53'te gösterilmektedir (Zlatanović ve Lukić, 2014).



Şekil 6.53 : Süperpozisyon Yönteminin uygulandığı bir örnek oturma tahmini.

6.3.2 Dönüm noktasının eksene olan mesafesinin farklı yaklaşımlarla belirlenmesi

Tünellerin yüzeyde oluşturduğu deplasman miktarları, dönüm noktasının eksene olan mesafesine, oturmanın eksene olan mesafesine ve maksimum yüzey deplasmanına bağlı olarak S eşitliği yukarıda verilmiştir. Burada i dönüm noktasının eksene olan mesafesini belirlemek amacıyla birçok ampirik bağıntı zemin türünün değişkenlik göstermesine bağlı olarak katsayılar yardımıyla elde edilmiştir. Bu katsayılar zemin türüne göre değişkenlik gösteren i tespitinde ve buna bağlı olarak yüzey oturmalarının doğru tahmin edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Aşağıda bu ampirik bağıntıların 3 farklı türü ve bu bağıntılarda kullanılan katsayıların zemin tanımlarına göre değiştiği değerler verilmiştir.

$$i = A \times Z_0 \quad (6.12)$$

Eksene olan mesafe i , A katsayısı ve Z_0 tünel eksenine olan mesafeye bağlı olarak belirlenmiştir. A katsayısı zemin türüne bağlı olarak Çizelge 6.35'te değişmektedir.

Çizelge 6.35 : $i = A \times Z_0$ bağıntısı için A değerleri

Zemin Türü	A	Kaynak
Katı killer	0.40	O'Reilly-New, 1982
Kumlu katı killer	0.50-0.60	Oteo ve diğ., 1999
Yumuşak siltli killer	0.70	Glossop, 1978
Kil-iri daneli ve karışık zeminler	0.20-0.30	Rankin, 1988
Bütün zeminler için ortalama	0.50	O'Reilly-New, 1982, Glossop, 1978
Karışık zemin (Kireçtaşı-marn, katı kil, siltli kil)	0.38	Arıoğlu ve diğ., 1992
Kumlu katı killer (ikinci tüpün geçişinden sonra)	0.82-0.86	Mahmutoğlu, 2011

Diğer bir eşitlikte ise $i = (A \times Z_0) + B$ olarak tanımlanmış, i A katsayısına, Z_0 tünel eksenine olan mesafeye ve B katsayısına bağlı olarak belirlenmiştir. Burada A ve B katsayısı zemin türüne bağlı olarak Çizelge 6.36'daki gibi değişmektedir.

Çizelge 6.36 : $i = (A \times Z_0) + B$ bağıntısı için A ve B değerleri

Zemin Türü	A	B	Açıklama	Kaynak
Kohezyonlu killer	0.430	1.100	TBM ile açılan tünel	O'Reilly-New, 1982, Hamza, 1999
İri daneli zeminler	0.280	-0.100		O'Reilly-New, 1982, Hamza, 1999
Killi zeminler	0.400	0.600	Genelde TBM ile açılan tüneller	Yapı Merkezi, 1991
Karışık zemin	0.386	2.840	NATM ile açılan tüneller	Yapı Merkezi, 1992
Karışık zemin (Kireçtaşı-marn, katı kil, siltli kil)	0.40	1.920	NATM ile açılan M.İnönü Tüneli	Arıoğlu ve diğ., 1992

Bazı çalışmalarda ise i , A katsayısına, Z_0 tünel eksenine olan mesafeye, tünel çapına D ve n değerine bağlı olarak belirlenmiş, aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\left(\frac{2i}{D}\right) = A \times \left(\frac{Z_0}{D}\right)^n \quad (6.13)$$

Burada Denklem 6.13'te A katsayısı ve n değeri zemin türüne bağlı olarak Çizelge 6.37'deki gibi değişmektedir.

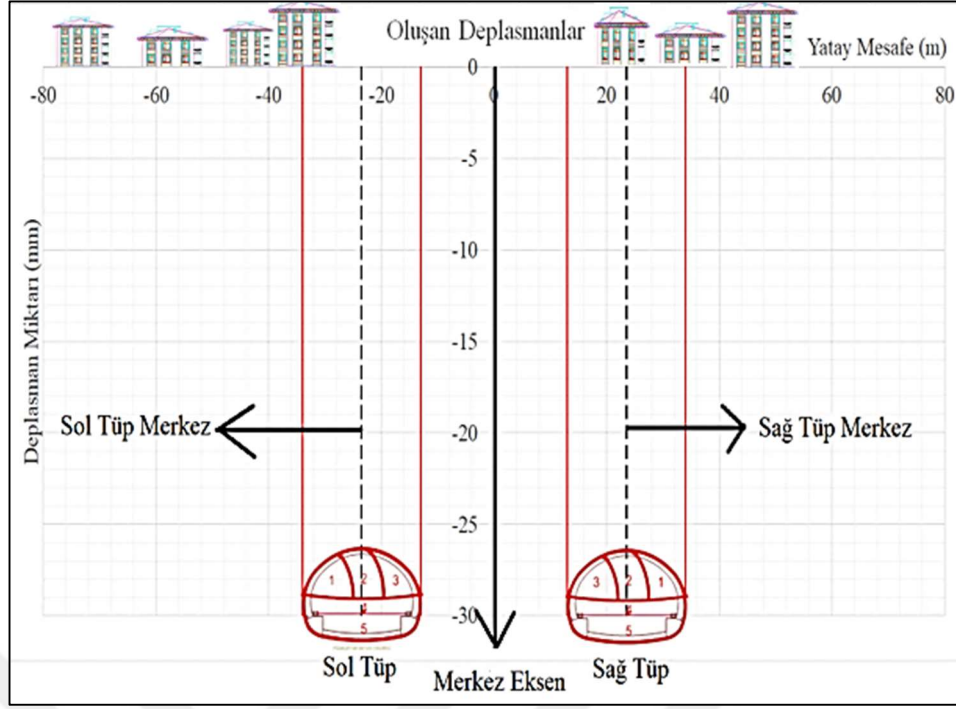
Çizelge 6.37 : $2i/D=A(Z_0/D)^n$ bağıntısı için A ve n değerleri

Zemin Türü	A	n	Açıklama	Kaynak
Kil	1.000	0.800		Schmidt, 1969, Hamza, 1999
Kil	1.000	1.000	Uzun vadeli oturma	Atwell, 1981, Hamza, 1999
Kil	1.000	1.000		Leca, 1989
Kil	1.392	0.704	NATM, şild ve hidrolik şild	Arıoğlu, 1992
Kum-çakıl	0.820	0.360	YASS üstünde	Atwell, 1981
Kum-çakıl	0.740	0.900	YASS altında	Atwell, 1981, Hamza, 1999
Kum-çakıl	0.630	0.970	YASS'den bağımsız	Atwell, 1981, Hamza, 1999
Kum-çakıl	0.774	0.837		Arıoğlu, 1992
Dolgu	1.700	0.700		Atwell, 1981
Karışık zemin (Kireçtaşı-marn, katı kil, siltli kil)	1.181	0.780	NATM ile açılan M.İnönü Tüneli	Arıoğlu ve diğ., 1992

6.3.3 Yüzey deplasmanlarının hesaplanması

Bu çalışma kapsamında 5 adet enkesit üstündeki 34 adet binanın 147 adet köşe noktasında tünelin tüm aşamaların kazılması sonucunda oluşan bina köşe noktalarının nihai deplasmanları veri olarak kullanılmış, dönüm noktasının tünel eksenine olan uzaklığı için bütün zeminler ortalama, iri daneli zeminler, karışık zemin türleri için bulunan katsayılar ve yaklaşımlar kullanılarak teorik yüzey deplasmanları hesaplanmış bu hesaplanan miktarlar gerçek oturma değerleriyle karşılaştırılarak İstanbul grovıkları için uygun olan parametre tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yatay ekseninde (x) binaların köşe noktalarının merkeze olan uzaklıkları x (m) ve düşey ekseninde deplasman miktarlarının (mm) Şekil 6.54'te gösterildiği gibi verildiği, sol tüp, sağ tüp ve iki eksenin tam orta noktası (merkez) olan eksenler sırasıyla 0 noktası olarak seçilmiş, bu 3 noktada ayrı ayrı (+x) ve (-x) değerlerine göre S oturmaları hesaplanarak deplasman kesitleri oluşturulmuş ve gösterilmiştir. Bu teorik deplasmanlar dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin farklı yaklaşımlarla bulunarak uygulanmasıyla hesaplanmış, Alibeyköy Tünel Bölgesinde bina köşe noktalarında ölçülen gerçek nihai deplasmanlarla aynı grafik üstünde gösterilmiştir. Bu yaklaşımlarla hesaplanan teorik deplasmanlar gerçek deplasmanlarla karşılaştırılmıştır.



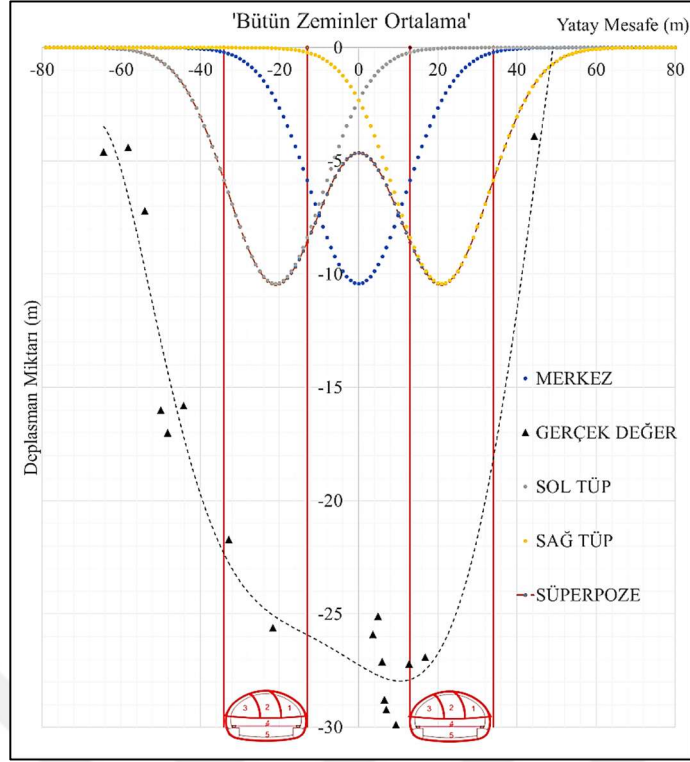
Şekil 6.54 : Çalışma kapsamında kullanılan grafiklerin abağı.

O'Reilly ve New (1982) tarafından yüzey deplasman miktarının hesabı için bir önceki bölümde verilen S ve S_{maks} eşitliğinden faydalanılmıştır. S_{maks} 'ın hesaplanmasında kullanılan i 'nin ise zemin türlerine göre değişen bağıntıları aşağıda 3 farklı zemin türü için hesaplanmıştır. İstanbul grovakları için önerilen bir bağıntı bulunmadığından dolayı, bu zemin türüne en yakın bağıntılar olarak bu bağıntılar kullanılmıştır.

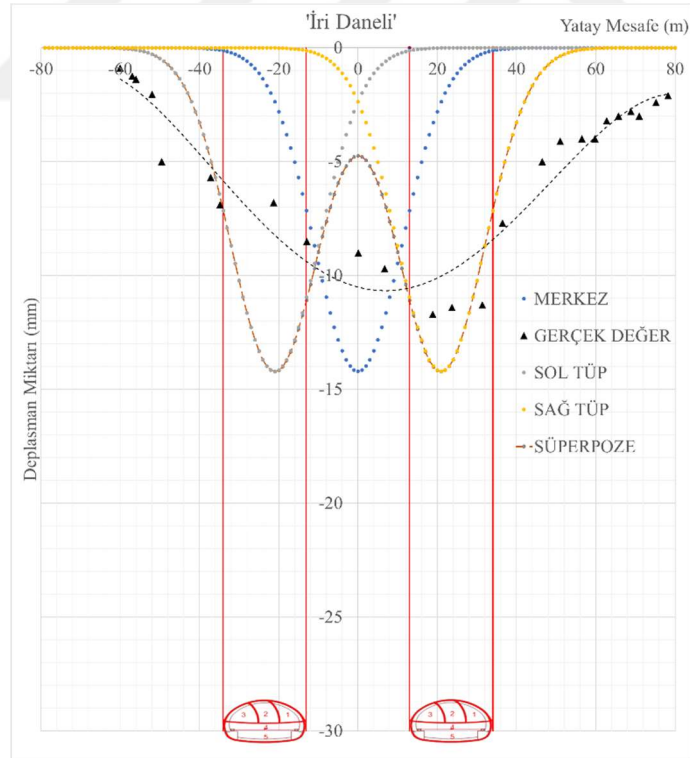
O'Reilly-New'in 'bütün zeminler için ortalama' bağıntısı ile hesaplama

İlk olarak, $i = A \times Z_0$ bağıntısında bütün zeminler ortalama zemin türü için i belirlenmiştir. Burada A katsayısı 0.5'tir (O'Reilly-New, 1982, Glossop, 1978).

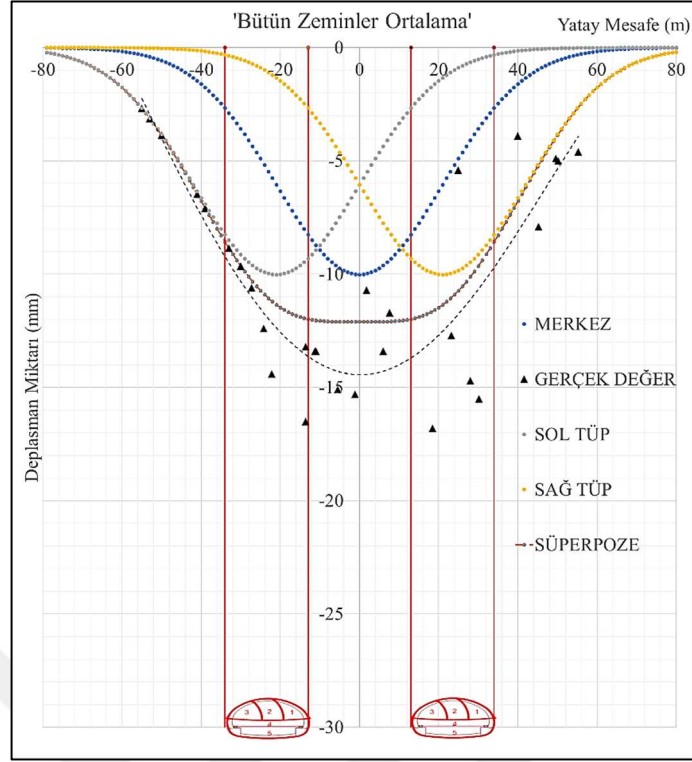
Hesaplanan i değeri S_{max} bağıntısında yerine yerleştirilerek maksimum yüzey deplasmanları elde edilmiş, buna göre yüzey deplasmanları x değişkenine bağlı olarak sol tüp, sağ tüp ve merkez eksen için hesaplanarak teorik deplasman grafikleri elde edilmiş ve gerçek deplasman değeriyle birlikte aşağıdaki Şekil 6.55, Şekil 6.56, Şekil 6.57, Şekil 6.58 ve Şekil 6.59'da sırasıyla 6., 7., 8., 9., ve 10. enkesitlerde iri daneli zeminler için verilmiştir.



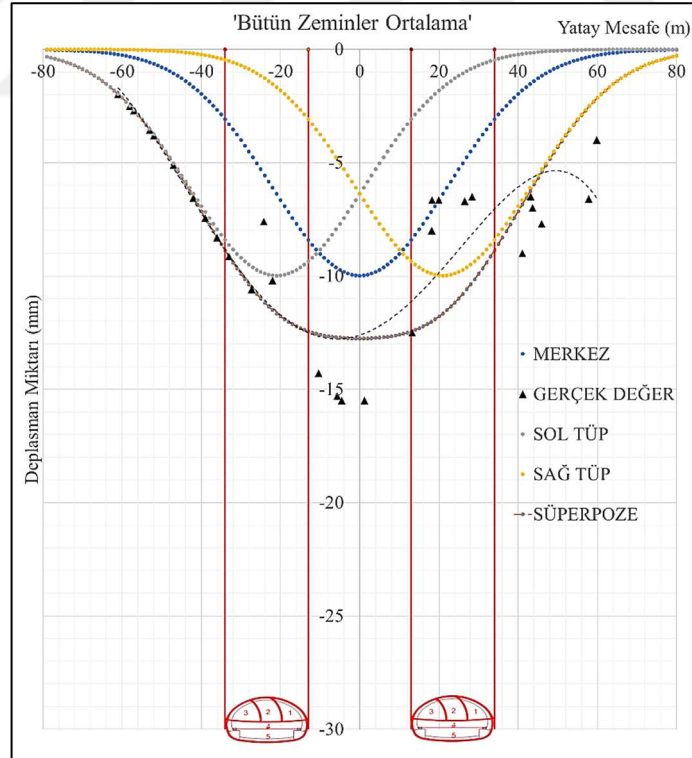
Şekil 6.55 : 6. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar.



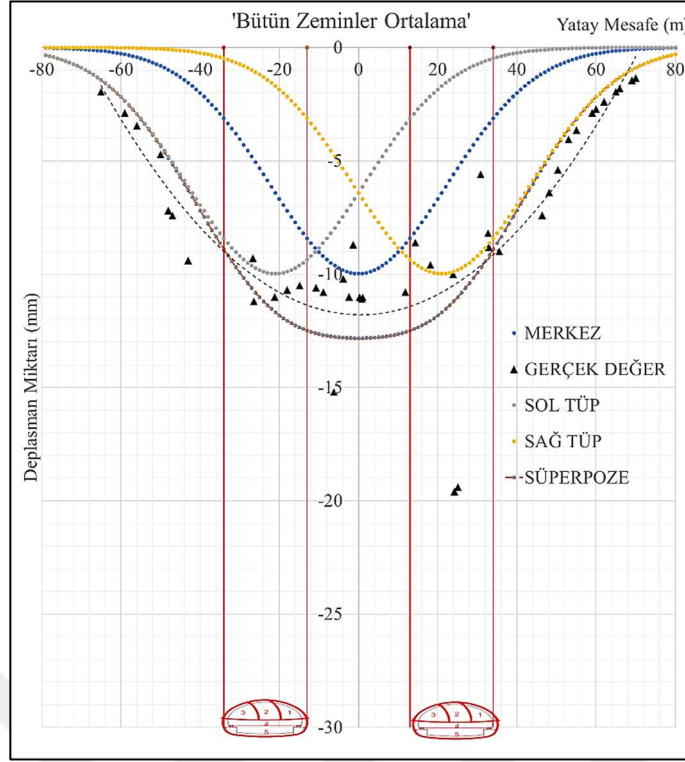
Şekil 6.56 : 7. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar.



Şekil 6.57 : 8. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar.



Şekil 6.58 : 9. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar.



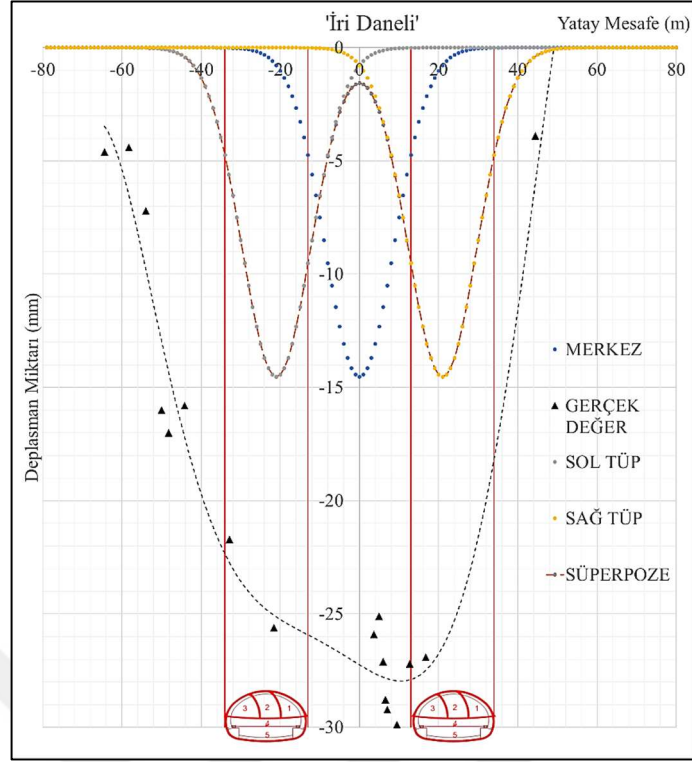
Şekil 6.59 : 10. enkesit bütün zeminler ort. zemin türü için hesaplanan deplasmanlar.

O'Reilly-New'in 'iri daneli zeminler' bağıntısı ile hesaplama

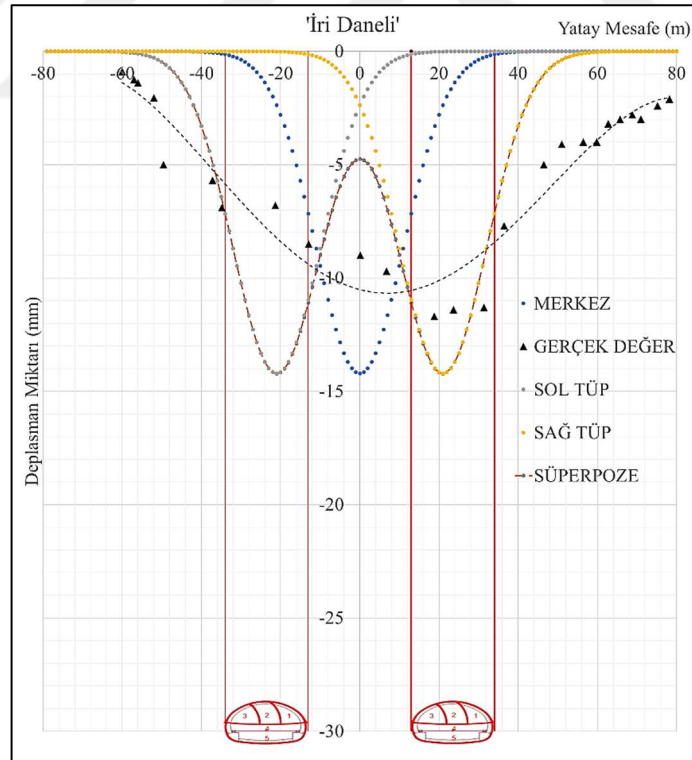
Bütün zeminlerin ortalaması bağıntısından farklı olarak, iri daneli zeminler için Denklem 6.14'te verilen bağıntıda i belirlenmiştir. Burada A katsayısı 0.28 ve B katsayısı -0.1'dir (O'Reilly,-New, 1982, Hamza, 1999).

$$i = (A \times Z_0) + B \quad (6.14)$$

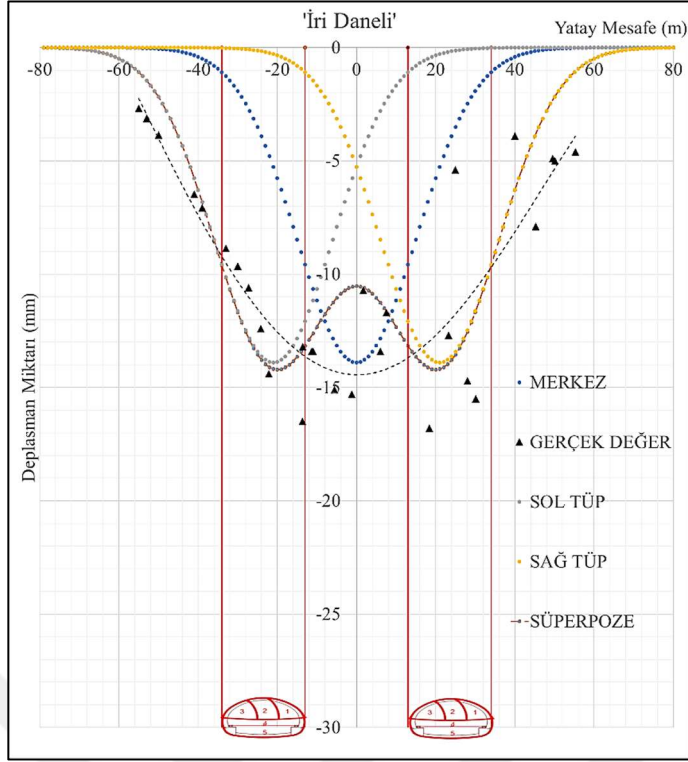
Yukarıdaki Denklem 6.14'e göre hesaplanan i değeri $S_{\max}$ bağıntısında yerleştirilerek maksimum yüzey deplasmanları elde edilmiş, buna bağlı olarak yüzey deplasmanları x değişkenine bağlı olarak sol tüp, sağ tüp ve merkez eksen için hesaplanarak teorik deplasman grafikleri elde edilmiş ve gerçek deplasman değeriyle birlikte aşağıdaki Şekil 6.60, Şekil 6.61, Şekil 6.62, Şekil 6.63 ve Şekil 6.64'te sırasıyla 6., 7., 8., 9., ve 10. Enkesitlerde bütün zeminler ortalama zemin türü için verilmiştir.



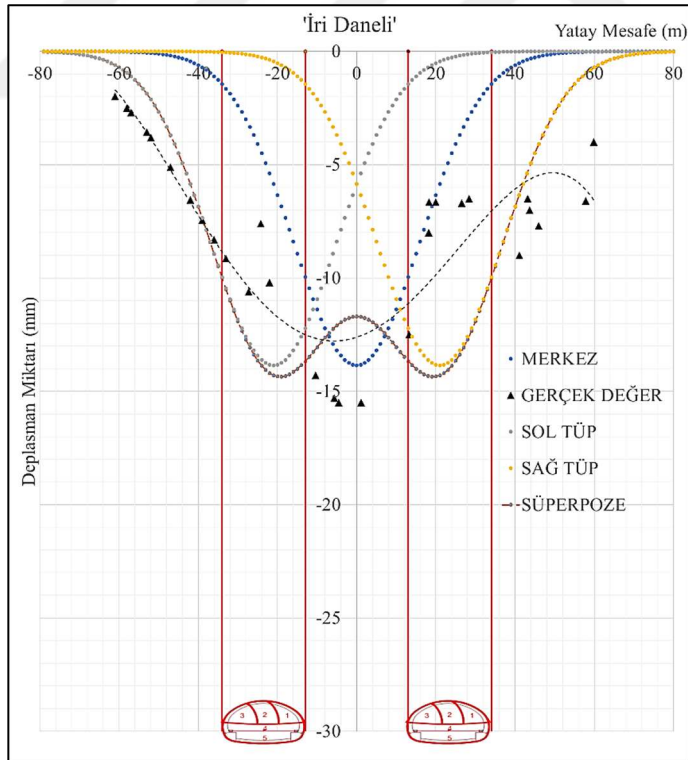
Şekil 6.60 : 6. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.



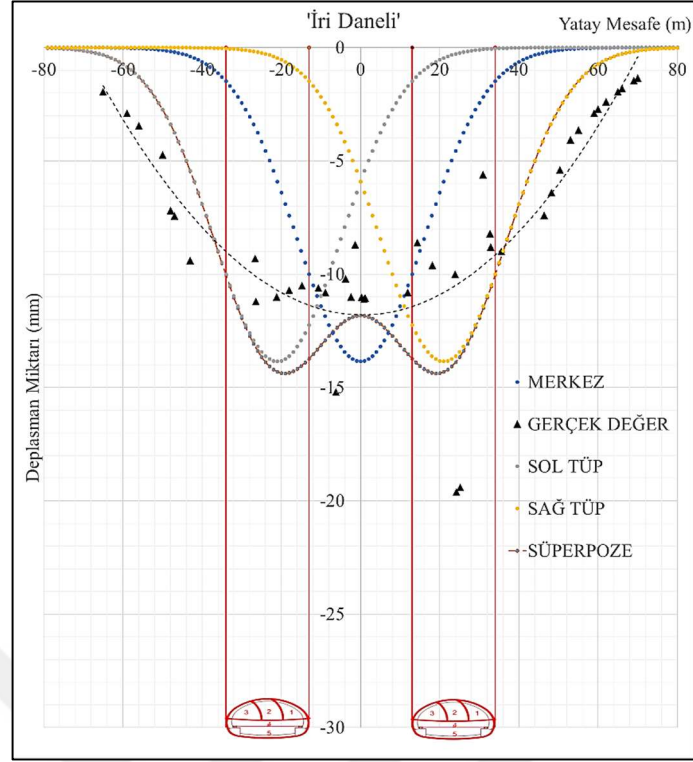
Şekil 6.61 : 7. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.



Şekil 6.62 : 8. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.



Şekil 6.63 : 9. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.



Şekil 6.64 : 10. enkesit iri daneli zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.

Arioğlu'nun 'karışık zemin' bağıntısı ile hesaplama

Karışık zemin türü için Denklem 6.13'te verilen bağıntıda i belirlenmiştir. Burada NATM ile açılan tüneller üzerinde yapılan regresyon analizi ile belirlenmiş A ve n katsayıları sırasıyla 1.181 ve 0.78'dir (Arioğlu ve diğ., 1992).

Yapılan regresyon analizlerinde aşağıdaki dönüşümler uygulanarak

$$\ln(S) = Y, \quad (6.15)$$

$$x^2 = X, \quad (6.16)$$

$$\left(-\frac{1}{2i^2}\right) = A, \quad (6.17)$$

$$\ln(S_{maks}) = B \quad (6.18)$$

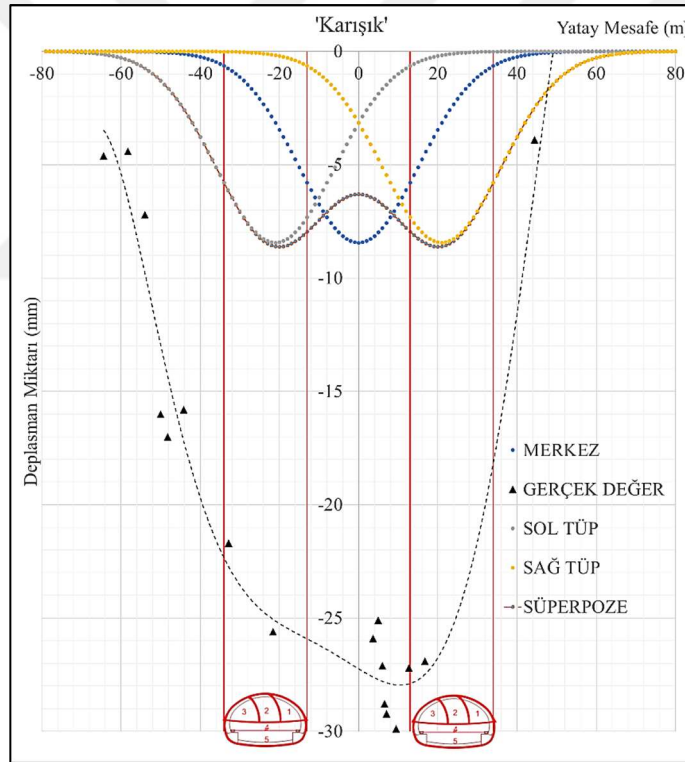
Denklem 6.1'de yerine konulursa

$$Y = AX + B \quad (6.19)$$

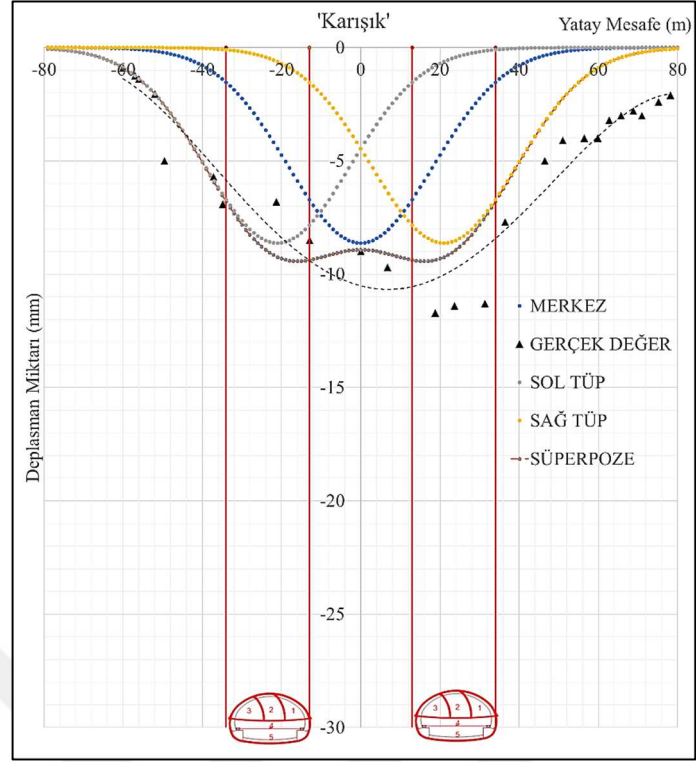
doğrusal ifadesine ulaşılmış, en küçük kareler metodu ile lineer regresyon ifadeleri belirlenerek bu ifadelerdeki doğrunun eğiminin geri dönüşümü ile i elde edilmiştir. Bu istatistiksel çalışmanın sonucu olarak A ve n katsayılarına bağlı i bağıntısı aşağıdaki Denklem 6.20’de verildiği gibidir.

$$2i = A \left[\frac{Z_0}{D} \right]^n \quad (6.20)$$

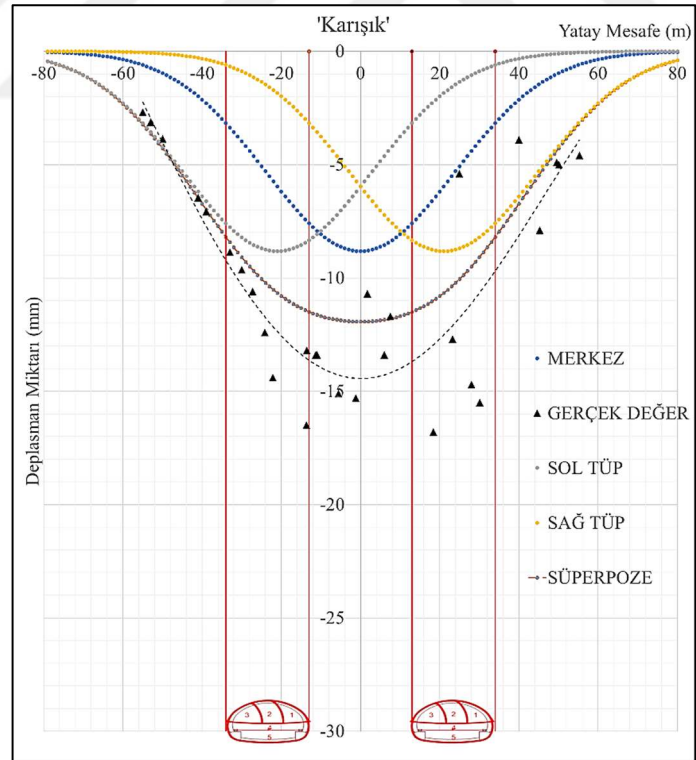
Yukarıdaki Denklem 6.20’de hesaplanan i değeri S_{maks} bağıntısında yerleştirilerek maksimum yüzey deplasmanları elde edilmiş, buna bağlı olarak yüzey deplasmanları x değişkenine bağlı olarak sol tüp, sağ tüp ve merkez eksen için hesaplanarak teorik deplasman grafikleri elde edilmiş ve gerçek deplasman değeriyle birlikte aşağıdaki Şekil 6.65, Şekil 6.66, Şekil 6.67, Şekil 6.68 ve Şekil 6.69’da 6., 7., 8., 9., ve 10. enkesitler için verilmiştir.



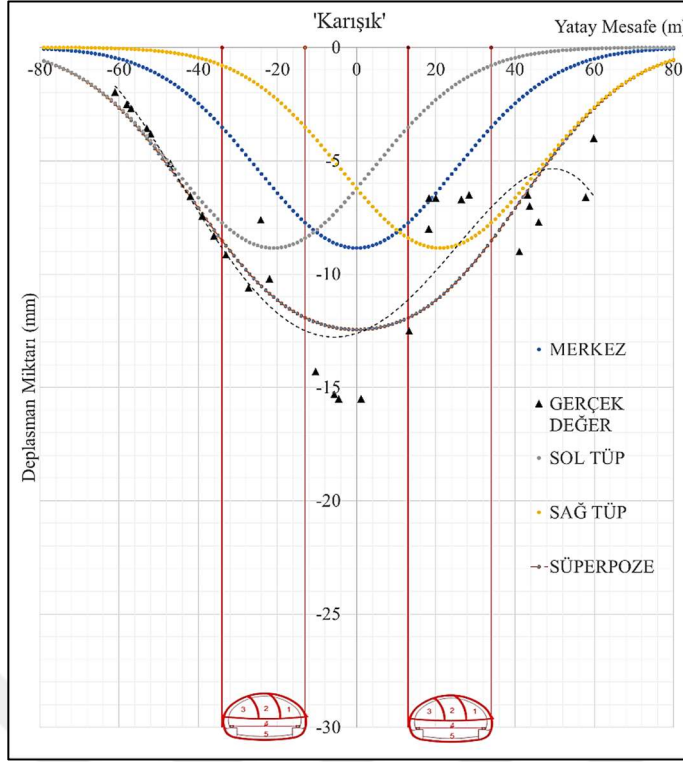
Şekil 6.65 : 6. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.



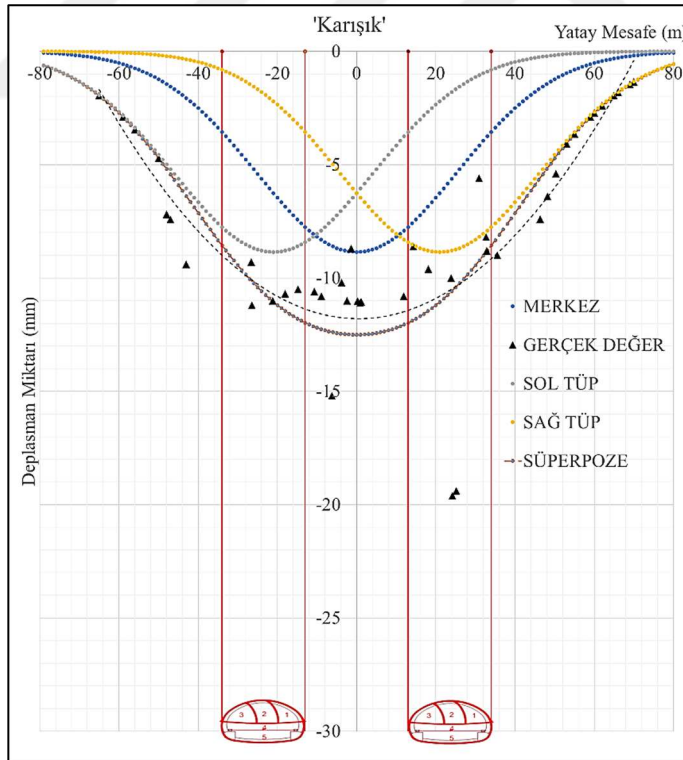
Şekil 6.66 : 7. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.



Şekil 6.67 : 8. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.



Şekil 6.68 : 9. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.



Şekil 6.69 : 10. enkesit karışık zemin türüne göre hesaplanan deplasmanlar.

Bu zemin türlerinin merkez eksen, sol ve sağ tüp eksenleri üzerinde oluşan teorik maksimum deplasman miktarları ve gerçek okuma değerleri karşılaştırılarak teorik

değerlerin gerçek okuma değerine olan benzerlik yüzdeleri aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. 6.enkesitte gerçek maksimum deplasman değeri 30.30 mm olup buna en yakın değer 14.53 mm olarak iri daneli zeminler için hesaplanan i değeri olmuş, tüm zemin türleri ile benzerlik oranları Çizelge 6.38’de verilmiştir. Gerçek değerle teorik değer arasındaki büyük farkın yeraltı suyunun durumu, zemin koşulları, tünel kazı aynasına uygun görülen tahkimat sistemlerinin etkili olduğu düşünülmektedir. 6. enkesitte tüm zemin türleri için oluşturulan gerçek deplasman eğrisi teorik olarak hesaplanmış süperpoze ile oluşturulan eğri ve merkez eksen eğrisi ile uyumludur.

Çizelge 6.38 : 6.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması

	Karışık		İri Daneli		Bütün zeminler		Gerçek Değer (mm)
	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	
Merkez	-8.44	28	-14.53	48	-10.42	34	-30.30
Sol Tüp	-8.44	28	-14.53	48	-10.42	34	
Sağ Tüp	-8.44	28	-14.53	48	-10.42	34	
Süperpoze	-8.62	28	-14.53	48	-10.45	34	

7.enkesitte gerçek maksimum deplasman değeri 11.70 mm olup buna en yakın değer 10.49 mm olarak bütün zeminlerde ortalama ile verilen i değeri olmuş, tüm zemin türleri ile benzerlik oranları Çizelge 6.39’da verilmiştir. 7. enkesitte gerçek deplasman eğrisi merkez eksen üzerinde hesaplanan deplasman eğrisi ile benzerlik sağlamaktadır.

Çizelge 6.39 : 7.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması

	Karışık		İri Daneli		Bütün zeminler ort.		Gerçek Değer (mm)
	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	
Merkez	-8.63	74	-14.21	82	-10.21	87	-11.70
Sol Tüp	-8.63	74	-14.21	82	-10.21	87	
Sağ Tüp	-8.63	74	-14.21	82	-10.21	87	
Süperpoze	-9.42	81	-14.22	82	-10.49	90	

Gerçek maksimum deplasman değerinin 16.80 mm olduğu 8.enkesitte 14.21 mm ile iri daneli zeminlerde süperpoze ile hesaplanan değer en yakın değeri verdiği tespit edilmiş, Çizelge 6.40’da diğer deplasman ve benzerlik oranları da gösterilmiştir.

Oluşturulan gerçek deplasman eğrisi, teorik olarak hesaplanmış süperpoze ile oluşturulan ve merkez eksen için oluşturulan eğriler ile uyumludur.

Çizelge 6.40 : 8.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması

	Karışık		İri Daneli		Bütün zeminler ort.		Gerçek Değer (mm)
	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	
Merkez	-8.82	52	-13.90	83	-10.02	60	-16.80
Sol Tüp	-8.82	52	-13.90	83	-10.02	60	
Sağ Tüp	-8.82	52	-13.90	83	-10.02	60	
Süperpoze	-11.93	71	-14.21	85	-12.10	72	

9.enkesitte 15.30 mm deplasman değerine en yakın 14.35 mm değer ile iri daneli zeminlerde süperpoze yöntemiyle hesaplanan teorik değer olmuş, Çizelge 6.41’de diğer bağıntılar için benzerlik yüzdeleri verilmiştir. Merkez eksen üstünde ve süperpoze yöntemiyle oluşturulan deplasman eğrileri ile gerçek deplasman eğrisi benzerlik göstermektedir.

Çizelge 6.41 : 9.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması

	Karışık		İri Daneli		Bütün zeminler ort.		Gerçek Değer (mm)
	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	
Merkez	-8.85	57	-13.85	89	-9.99	64	-15.50
Sol Tüp	-8.85	57	-13.85	89	-9.99	64	
Sağ Tüp	-8.85	57	-13.85	89	-9.99	64	
Süperpoze	-12.45	80	-14.35	93	-12.76	82	

Gerçek deplasman eğrilerinin merkez ve süperpoze eğrileriyle benzerlik gösterdiği 10.enkesitte 19.60 mm maksimum gerçek deplasman miktarına iri daneli zeminlerin süperpoze yöntemiyle hesaplanan 14.37 mm maksimum deplasman miktarı yakın bulunmuştur. Diğer deplasman miktarları ve benzerlik yüzdeleri Çizelge 6.42’de gösterilmiştir.

İncelenen enkesitlerde, İstanbul grovaklarında açılan tünellerin yüzeyde oluşturduğu gerçek maksimum deplasman miktarlarının %90’ı O’Reilly-New (1982) ve Hamza (1992) tarafından iri daneli zeminler için bulunan bağıntıya göre hesaplanan maksimum deplasman miktarlarına yakın çıkmıştır.

Çizelge 6.42 : 10.enkesit teorik ve gerçek deplasman miktarlarının karşılaştırılması

	Karışık		İri Daneli		Bütün zeminler ort.		Gerçek Değer (mm)
	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	Deplasman Miktarı (mm)	Benzerlik Oranı (%)	
Merkez	-8.86	45	-13.85	71	-9.98	51	-19.60
Sol Tüp	-8.86	45	-13.85	71	-9.98	51	
Sağ Tüp	-8.86	45	-13.85	71	-9.98	51	
Süperpoze	-12.50	64	-14.37	73	-12.83	65	

Enkesitlerin %90'ında süperpozisyon yöntemine ve tamamında merkez eksene göre hesaplanan teorik yaklaşımların deplasman eğrileriyle gerçek deplasman eğrilerinin uyum sağladığı görülmüştür. Yukarıda NATM ile İstanbul grovaklarında açılan, iki tünel eksenleri arasında 42.90 m bulunan, 21.64 m çaplı ikiz tünellerin incelenmesiyle en doğru yöntemin merkez eksen yani iki tünelin orta noktasına göre teorik hesaplamaların yapılması olduğu sonucuna varılmıştır. Bu görüşe benzer olarak, Chehade ve Shahrour (2008) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak $S_x/D = 2$ (S_x : tünel eksenleri arası mesafe, D: tünelin çapı) olacak şekilde ikiz tünellerde oluşacak maksimum oturma miktarını incelemişlerdir. Yaptıkları analizlere göre maksimum oturma iki tünelin ortasında oluşmuştur. Suwansawat ve Einstein (2007) ikiz tünellerde oluşan oturmaları tanımlamak için süperpozisyon tekniği kullanmıştır. Bangkok metro tünellerinde iki tünel için de Gauss hata eğrisini kullanmış ve bu oturmaları birleştirmişlerdir. Bu çalışma, Suwansawat ve Einstein'ın çalışmasıyla paralellik göstermektedir. Aynı şekilde Chapman ve diğ., (2004) bu konuyla ilgili olarak 'İkinci tünelin üzerindeki hareketleri tahmin ederken en basit varsayım, ilk tünelin üzerindeki oturma profiliyle eşleşmesidir. Aynı büyüklükte yan yana tüneller göz önüne alındığında, ikinci tünelin üzerindeki yer değiştirmeler, ilk tünel için yapılan aynı varsayımlara dayanarak bulunur. Toplam yerleşim profili, her tünelden dolayı O'Reilly ve New (1982) bağıntıları kullanılarak hesaplanan ayrı profillerin toplanmasıyla bulunur' diyerek yine bu çalışmada kullanılan yöntemle paralellik sağlamıştır.

Bu çalışma kapsamı görüşünün aksine Topal ve diğ. (2015) ise aralarında 39.5 m bulunan, tünel çaplarının 5.5 m olduğu ikiz pilot tünel kazılarında birbirlerine paralel şekilde konumlandırılmış tünellerin birbirini etkilemeyerek, oluşacak maksimum yüzey deplasmanlarının her iki tünelde Gauss'a uygun olarak tünellerin kendi

eksenlerinde oluşacağını belirtmiştir. Bu çalışmada uygulaması yapılan enkesitin hiçbirinde bu sonuca ulaşılmamıştır.

6.3.4 Dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin belirlenmesi için ampirik bir bağıntı elde edilmesi

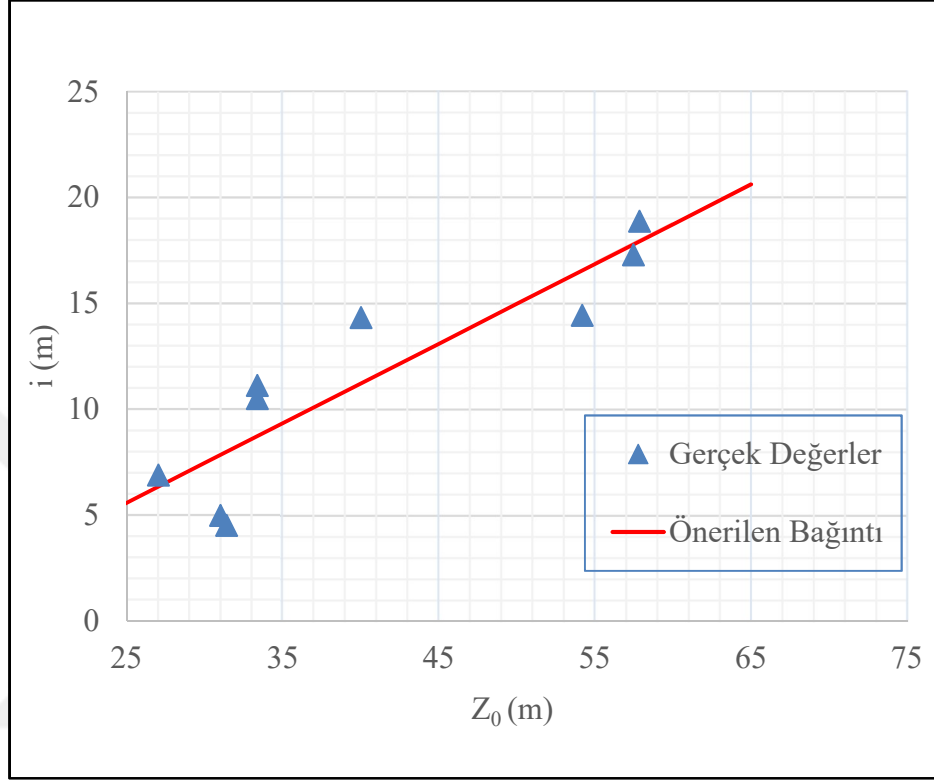
Dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesini (i) hesaplamak amacıyla birçok araştırmacı tarafından değişik bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntılar genel olarak killi veya kumlu zeminlerde açılan tünellerin i parametresinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Literatürde kısıtlı bilgilerde bulunan bazı zemin türleri için yukarıdaki bölümlerde i için hesaplamalar yapılmış, bu hesaplamalardan elde edilen i değerleri kullanılarak maksimum deplasman miktarları hesaplanmış, gerçek maksimum deplasman değerleri ile teorik olarak elde edilen deplasmanların sonuçları karşılaştırılmıştır. Genel olarak O'Reilly-New'in iri daneli zeminler için elde ettikleri bağıntı benzerlik göstermiş, her enkesitte benzerlik oranı değişkenlik göstermiştir. Fakat yine de iri daneli zeminler kaya türünü tanımlamamaktadır. Literatürde çalışmalar kısıtlı olduğu için bu çalışmada İstanbul grovaklarında 21.64 m çaplı, NATM ile açılan ikiz tünellerin oluşturduğu maksimum yüzey deplasmanlarında kullanılan i parametresi için gerçek verilerle uyarlanarak bir korelasyon bağıntısı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu bağıntı eldeki sınırlı ölçüm verileriyle elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında Alibeyköy Tünel Bölgesi'nde 10 adet enkesitin gerçek maksimum deplasman miktarları alınarak i parametresi hesaplanmıştır. Bu 10 enkesitin zemin koşulları benzerlik gösterdiği için zemin parametreleri değişken olarak alınmamış, tünel çapları aynı olduğu için alınmamış, yalnız tünel ekseninin arazi kotuna olan mesafesi (Z_0) her enkesitte değişkenlik gösterdiği için dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin (i), Z_0 'a bağlı olan, farklı katsayılar içeren doğrusal bir bağıntı istatistiksel yöntemlerle elde edilmiştir. Bu 10 adet enkesitten 1.enkesit üzerinde bulunan gecekondü yapılarından dolayı maksimum oturma diğer enkesitlere göre fazla çıktığı için istatistiksel analize sokulmamıştır.

Buna göre aşağıda NATM ile İstanbul grovaklarında açılan ikiz tünellerde dönüm noktasının tünel eksenine mesafesinin hesaplanması için

$$i = 0.376Z_0 - 3.82 \quad (6.21)$$

Bağıntısı önerilmektedir. i ve Z_0 birimi herhangi bir birimde, aynı olmak koşuluyla alınabilir. Bu çalışmada metre kullanılmıştır. Bu bağıntıya ait regresyon katsayısı 0.89'dur. Bu bağıntı kullanılarak elde edilen sonuçların ve gerçek maksimum deplasman değerlerinin yer aldığı Şekil 6.70 aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6.70 : Gerçek değerler ile önerilen bağıntının karşılaştırılması.

NATM ile İstanbul grovaklarında açılan ikiz tünellerde dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin elde edilmesinde yukarıda önerilen bağıntı kullanılabilir. Tünellerin ilerleyerek enkesit sayılarının ve saha ölçümlerinin artmasıyla bu bağıntı değiştirilebilir ve geliştirilebilir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Alibeyköy Tünel Bölgesi'nde tünel üzerinde bulunan binaların yoğunluklarına, binaların tünel etki alanı içinde kalmasına ve bina köşe noktalarında düzenli olarak ölçüm yapılmasına bağlı olarak bölge 10 farklı enkesite ayrılmıştır. Bu enkesitlere birbirlerinden farklı bina köşe noktaları dahil edilerek öncelikle her bir enkesitte tünelde yapılan farklı kazı aşamalarının bina köşelerinde oluşturduğu deplasmanlar ve farkları tünellerin orta noktası merkez eksen olarak alınarak bina noktalarının bu eksene olan yatay mesafesine göre incelenmiştir. Daha sonra bu enkesitlerin bir kısmının deplasman miktarları ve maksimum deplasman miktarı basit ve kolay anlaşılır bir bağıntı olan Gauss Hata Fonksiyonu-O'Reilly-New (1982) bağıntısı ile teorik olarak hesaplanan miktarlarla karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu teorik hesaplamalarda maksimum deplasman miktarı hesaplanırken kullanılan dönüm noktasının tünel eksenine olan mesafesinin 3 farklı zemin türü için önerilen yaklaşım bağıntılarıyla hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Son olarak İstanbul grovaklarında açılan ikiz tüneller için, sahadan alınan gerçek deplasman miktarları kullanılarak dönüm noktasının tünele olan mesafesini belirlemek amacıyla istatistiksel analiz ile bir bağıntı geliştirilmiştir.

Bu çalışmayla elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıdaki gibidir:

- Her bir kazı aşamasının kısa süreli oluşturduğu deplasman miktarları incelenmiş, bu deplasmanların miktarları veya yüzdeleri arasında bir ilişki olmadığı, her bir enkesitte farklı aşama kazılarının birbirlerinden bağımsız olarak deplasmanlara neden olduğu, bu miktarların belli bir artış yüzdesine bağlanamayacağı sonucuna varılmıştır. Bunun nedeni tünelin açılma hızları, tahkimatlar arasında geçen sürelerin değişkenliği, zeminin durumu olarak açıklanabilir.
- Yüzey oturumalarının önerilen bağıntılar kullanılarak elde edilmesinde arazi deneylerinden elde edilen parametre değerleri kullanılmış, sonuçların gerçek değerlerle örtüştüğü, laboratuvar deneylerinden elde edilen parametrelerin

kullanılmasıyla hesaplamaların değiştiği ve gerçek oturmalarından uzaklaştığı tespit edilmiştir.

- İkinci tüpün açılmasıyla birinci t p üzerinde daha fazla deplasman oluşmadığı, ilgili tüplerin üstünde bulunan yapıların yüzey deplasman miktarlarının diğer tüpteki kazıya bağlı olarak artmadığı, yani iki tünelin kazıları esnasında birbirlerini  rselemediği saptanmıştır. Tünellerin kaya ortamında açılması, aşamalı olarak kazıların yapılması, iki tünelin eksenleri arasındaki mesafenin tünel çaplarının yaklaşık 2 katı olmasından dolayı tünellerin birbirleri üzerinde etkisi bulunmadığı sonucuna varılmıştır.
- Yüzeyde oluşan maksimum deplasman miktarlarının sol tüp veya sağ t p üzerinde değil, daha çok iki tünel ekseninin tam ortasında bulunan merkez ekseninde ve süperpoze ile elde edilen eğri üzerinde oluştuğu, kesit boyunca oturma değerlerinin s perpozeye daha yakın olmasından dolayı hesaplamaların bu yöntemine göre yapılmasıyla daha doğru sonuçlar elde edilebileceği anlaşılmıştır.
- İstanbul grovaklarında açılan tüneller için iri daneli zeminlerde kullanılan i parametresinin hesap katsayılarının gerçek deplasmanlara diğer bağıntılara göre daha yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Sonuç olarak, tüneldeki geoteknik ölçümlerin düzenli aralıklarla yapılması, alınan ölçüm kalitesinin artması, hata oranlarının azaltılması, ölçüm aralıklarının sıklaştırılarak ölçüm kalitesinin arttırılması önerilmektedir. Deplasman tahminlerinde zeminlerin özelliklerini belirlemek için kapsamlı bir zemin incelemesinin ve arazi deneylerinin yapılması önerilmektedir. Ayrıca, NATM ile İstanbul grovaklarında açılan ikiz tünellerde ölçülen gerçek deplasman değerleri kullanılarak pratik amaçlar doğrultusunda yüzeyde bulunan deplasmanları tünel ekseninin yüzeyde olan mesafesine (Z_0) bağlı olarak tahmin edebilmek amacıyla

$$i = 0.376Z_0 - 3.82$$

Bağıntısı  nerilmektedir. Bu bağıntının regresyon katsayısı 0.89'dur. Veri sayısının artması ile bağıntının geliştirilmesi ve değiştirilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aksu, F.** (2015). 137 yıllık hayal “Ovit Tünel”inde sona doğru. *Tünelcilik ve Yeraltı Teknolojileri Dergisi*, 23 (22).
- Arioğlu, E., Arioğlu B., Arioğlu, E. ve Odbay, O.** (1992). İstanbul Metrosunda Metro Tünel Projelerinde Yüzey Tasman Büyüklüklerinin Yarı - Teorik Yaklaşımlarla Belirlenmesi, Yapı Merkezi AR-GE Bölümü, (Yayınlanmamış Rapor), İstanbul.
- Arioğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz, A. O.** (2008). *Püskürtme Beton Bilgi Föyleri - Çözümlü Problemler*. İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın No: 142.
- Ayaydin, N.** (1987). Tünel açma yöntemlerinin karşılaştırılması. *Türkiye İnşaat Mühendisliği Kongresi*, 1, (s.405-422). Ankara : Bizim Büro Basımevi.
- Aydemir, B.** (2010). Ekstansometre cihazlarının seçimi ve kullanımı hakkında önemli hususlar. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7, (73-82).
- Barton, N.** (1999). TBM performance estimation in rock using QTBM. *Tunnels and Tunneling International*, 31, 30-34.
- Barton, N. R., Lien, R., & Lunde, I.** (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*, 6 (4), 189-239.
- Berber, S., Ceryan, N., Esin, G. ve Ceryan, S.** (2015). Kaya kütlelerinin dayanım özelliklerinin tahmininde kullanılan görgül ilişkilerin karşılaştırılması üzerine bir çalışma. *Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu*, 8 (s.294-301). Trabzon.
- Bieniawski, Z. T.,** (1973). Engineering classification of joined rock masses. *Transactions of South Africa Institution of Civil Engineers*, 15 (12), 335-344.
- Bozkurt, M.** (1983). *Tüneller Ders Notları*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Chapman D., Metje N. & Stark A.** (2018). *Introduction to Tunnel Construction*. Boca Raton, FL. : CRC Press.
- Chapman, D. N., Rogers, C. D. F. & Hunt, D. V. L.** (2004). Predicting the settlements above twin tunnels constructed in soft ground, *30th ITA-AITES World Tunnel Congress*, Singapore : May 22–27.
- Chehade, F. H. & Shahrour, I.** (2008). Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure, *Tunneling and Underground Space Technology*, 23, 210-214.

- Chen, W. & Caspe, H.** (2004). NATM and its practice in the Us. *North American Tunneling Conference*, (pp.473-476) Georgia, USA.
- Chou W. & Bobet A.** (2002). Prediction of ground deformations in shallow tunnels in clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17, 3-19.
- Çağlıyan, A. ve Yıldız, A. B.** (2013). Türkiye’de demiryolu güzergâhları jeomorfoloji ilişkisi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 28, (466-486).
- Çeçen, Ö.** (2007). *İstanbul Metrosu Koska Tünelleri yüzey deformasyon analizi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demir, S. ve Mahmutoglu, Y.** (2018). Excavation Induced Surface Settlement Between Kirazlı and İkitelli Twin Metro Line. *4th International Underground Excavation Sym.* İstanbul.
- Erdoğan, H.T.** (2016). Ulaşım hizmetlerinin ekonomik kalkınma üzerine etkisi. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3 (1), 187-215.
- Eren, M.** (2014). *İki farklı yöntemle (NATM-TBM) ile açılan bir tünelde düşey deformasyon/deplasman’ların belirlenmesi: M5 metro örneği*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eyigün, Y.** (2014). *İstanbul grovaklarına soketlenen fore kazıkların taşıma kapasitesi* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gedik, İ., Pehlivan, Ş., Timur, E., Altun, İ., Akbaş, B., Özcan, İ. ve Alan, İ.** (2005). Kocaeli Yarımadasının jeolojisi (Rapor No. 10774). Ankara : Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü.
- Glossop, N. H.** (1978). *Soil deformation caused by soft ground tunnelling*. (PhD Thesis). University of Durham, England.
- Güven, G.** (2009). *İstanbul Metrosu Otogar-Kirazlı 1 arasının mühendislik jeolojisi ve tünel kazılarına bağlı oluşan deformasyonların değerlendirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hamza, M., Ata, A. & Roussin, A.** (1999). Ground movements due to construction of cut-and-cover structures and slurry shield tunnel of the Cairo metro, *Tunneling and Underground Space Technology*, 14, 281-289.
- Harris, C. S., Hart, B. M., Varley, P. M. & Warren, C. D.** (1996). *Engineering Geology of the Channel Tunnel*. London, ENG : Thomas Telford Publishing.
- Hemphill, G. B.** (2013). *Practical Tunnel Construction*. Hoboken, NJ. : Jon Wiley & Sons.
- Hoek, E. & Marinos, P.** (2007) Soils and Rocks. *A brief History of the Development of the Hoek-Brown Failure Criterion*. São Paulo (s.85-92).

- İstanbul Teknik Üniversitesi MJKM.** (1985). İSKİ Haliç kuzey yakası kanalizasyon tünelleri güzergahının mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği raporu (Rapor No: 85/2). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kalkan, Y., Baykal, O., Alkan, R.M., Yanalak, M. ve Erden, T.** (2003). Heyelanların jeodezik ve geoteknik yöntemlerle izlenmesi: Ambarlı liman bölgesinde bir uygulama. *I. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 30-31 Ekim 2003. İstanbul.
- Karakuş, D., Konak, G., Onur, A.H., Öngen, T. ve Turan, G.** (2015). Patlatmalı kazı çalışmaları sonucu oluşan çevresel titreşimlerin ölçümü ve sonuçlarının değerlendirilmesi. *Delme-Patlatma Sempozyumu*, 8 (s.152-161). İstanbul.
- Karakuş, D., Öngen, T., Özdoğan, M. V., Yenice, H., Deliormanlı, A. ve İkiz, U.** (2018). Şehir içi patlatmalı kazı çalışmalarında çevresel titreşim limitlerine göre patlatma tasarımı. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, Özel Sayı, 23-30.
- Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*.
- Karpuz C. ve Hindistan, M. A.** (2012). *Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları*. Ankara, TR. : Korza Yayıncılık.
- Kolymbas, D.** (2005). *Tunneling and Tunnel Mechanics*. Berlin, Germany : Springer.
- Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H. ve Aksoy, O.** (2007). *Tünel ve Kuyu Açma*. İzmir : Maden Mühendisliği Bölümü Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi.
- Mahmutoğlu, Y.** (2011). Surface subsidence induced by twin subway tunneling in soft ground conditions in Istanbul. *Bull Eng Geol Environ*, 70. 115-131. doi:10.1007/s10064-010-0289-8.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W. & Herrenknecht, M.** (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. Berlin, DEU : Ernst & Sohn.
- Maidl, B., Thewes, B. & Maidl, U.** (2013). *Handbook of Tunnel Engineering*. Berlin, DEU. : Wilhelm Ernst & Sohn.
- O'Reilly, M. P. & New, B. M.** (1982). Settlements above tunnels in the United Kingdom- their magnitude and prediction. *Tunnelling'82*. (pp.173–181). London: England.
- Özgen, M.** (2013). *Türkiye Tünelcilik Semineri*. Ankara, TR.
- Özgül, N.** (2011). İstanbul il alanının jeolojisi. İstanbul : İstanbul Büyükşehir Belediyesi.
- Öztürk, H. T.** (2007). *Tüneller ve tasarım ilkeleri* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Pariseau, W. G.** (2007). *Design Analysis in Rock Mechanics*. Leiden, NL. : Taylor & Francis.

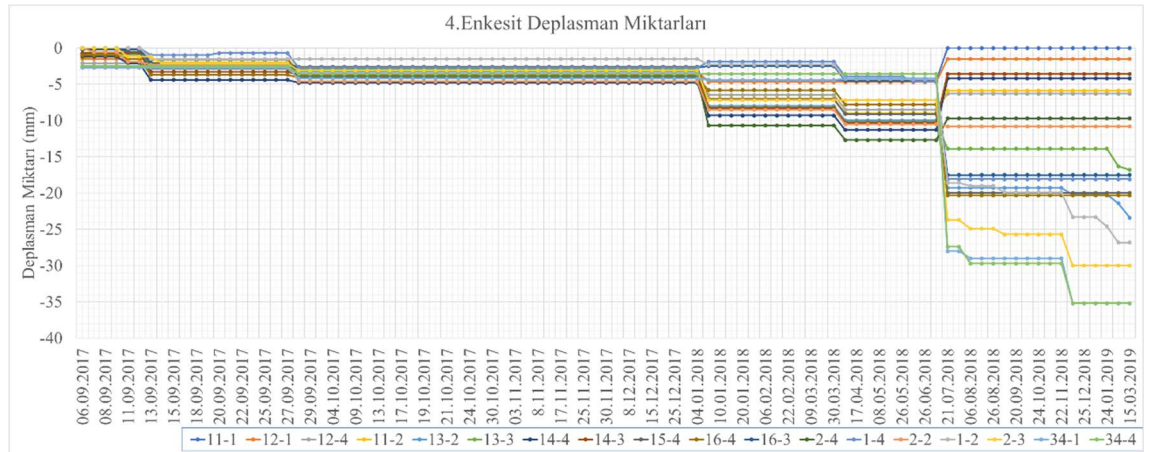
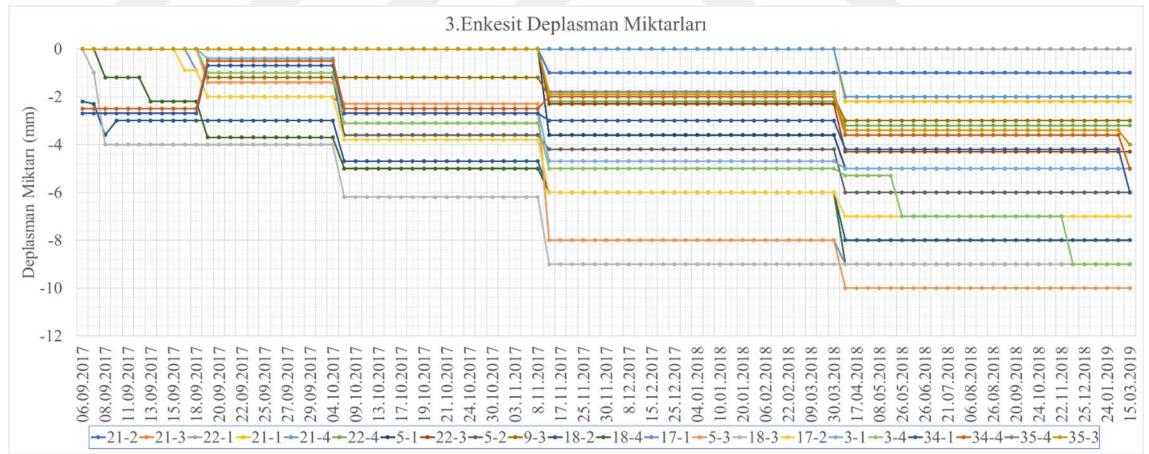
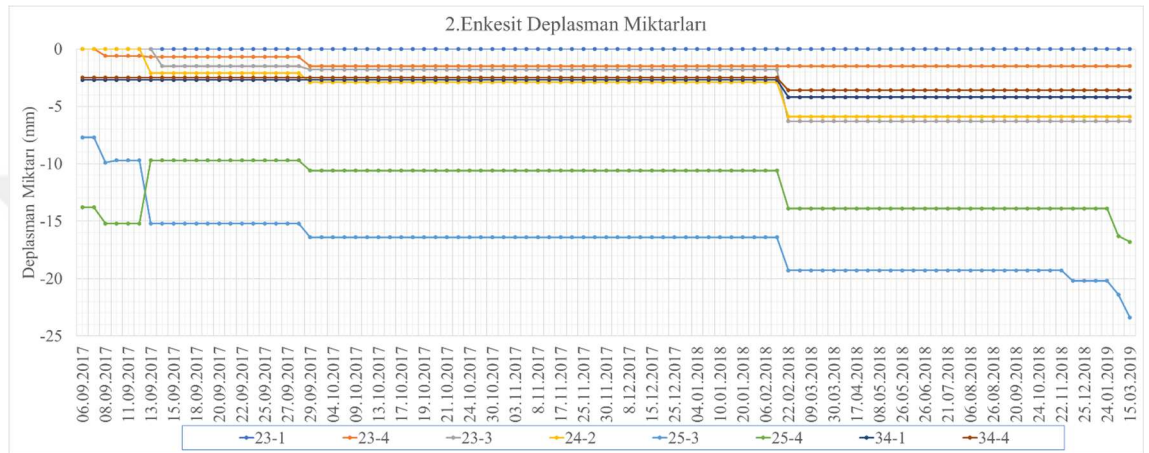
- Peck, R. B.** (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. *Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-Of-The-Art Volume*, (pp.225–290). Mexico.
- Peila D., Viggiani G. & Celestino T.** (2019). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art*. London, UK : CRC Press.
- Sandström, G. E.** (1963). *The History of Tunnelling : Underground Workings through the Ages*. London, ENG. : Barrie and Rockliff.
- Sarıkaya, O.** (2018). *Tünel-yapı-zemin etkileşiminin zemin büyütmesine etkilerinin nümerik olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Satıcı, Ö., Topal, T.** (2015). Tünel açma yöntemlerinin mühendislik jeolojisi ve kaya sınıflama sistemleri ile değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 39 (45-57).
- Sayar, C.** (1973). İstanbul'un yeni metro projesi ve şehrin jeolojisi. *Çatlaklı ve Ayrışmış Kayaların Mühendislik Özellikleri Sempozyumu*, 8, (s.15). İstanbul : İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Araştırma Kurumu.
- Sayar, C.** (1973). İstanbul'un yeni metro projesi ve şehrin jeolojisi. *Çatlaklı ve Ayrışmış Kayaların Mühendislik Özellikleri Sempozyumu*, 8, (s.15). İstanbul : İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Araştırma Kurumu.
- Schmidt, B.** (1969). *Settlements and ground movements associated with tunnelling in soils*. (PhD Thesis). University of Illinois, Urbana.
- Sönmez, H. & Ulusay, R.,** (1999) Modifications to the geological strength index (GSI) and heir applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 743-760.
- Sönmez, H. & Ulusay, R.,** (2002) Discussion on the hoek-brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77-99.
- Suwansawat, S. & Einstein, H. H.** (2007). Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunnelling. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21, 133-150.
- Telford, T.** (1996). *Sprayed Concrete Linings (NATM) for Tunnels In Soft Ground*. London, ENG : Thomas Telford Publishing.
- Tonon, F.** (2010). Prediction of ground deformations in shallow tunnels in clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 245-265.
- Topal, C., Mahmutoğlu, Y., Şans, G.** (2015). Sirkeci istasyonu pilot tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonlarının değerlendirilmesi. *Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu*. (s.34-41). Trabzon : KTÜ.
- Ünal, A.** (2017). *Türkiye Karayolları Tünellerinin Tarihçesi Ve Tünel Güvenlik Kriterleri*, Yüksel Proje, (Yayınlanmamış Rapor), Yalova.

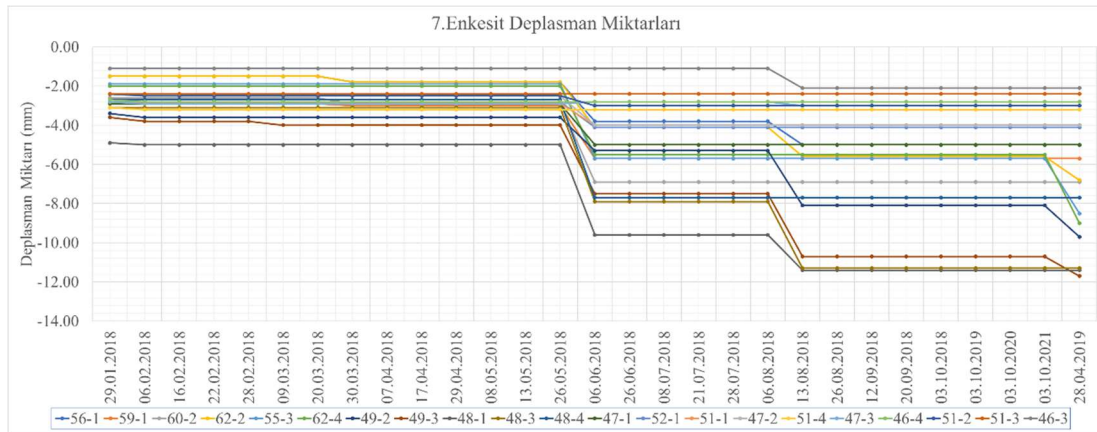
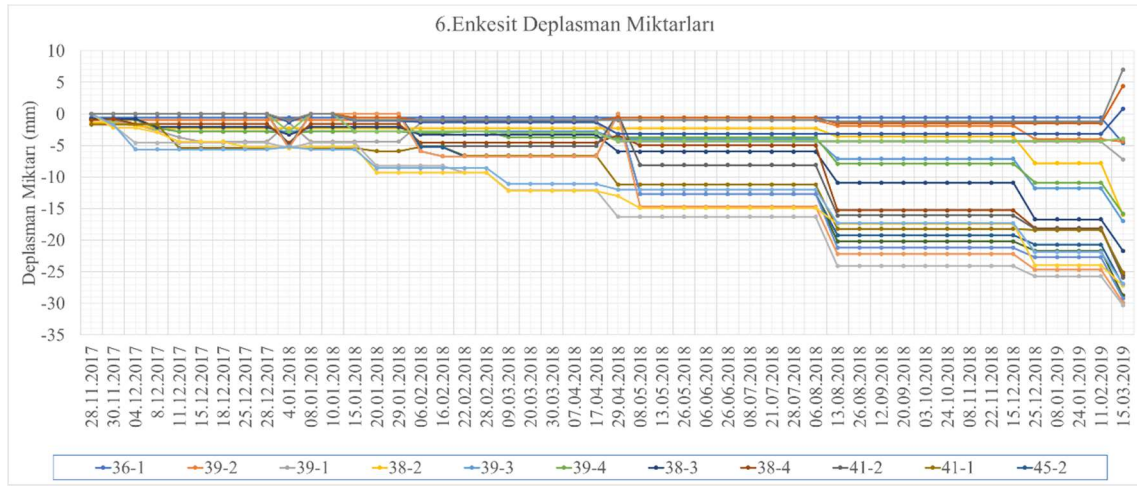
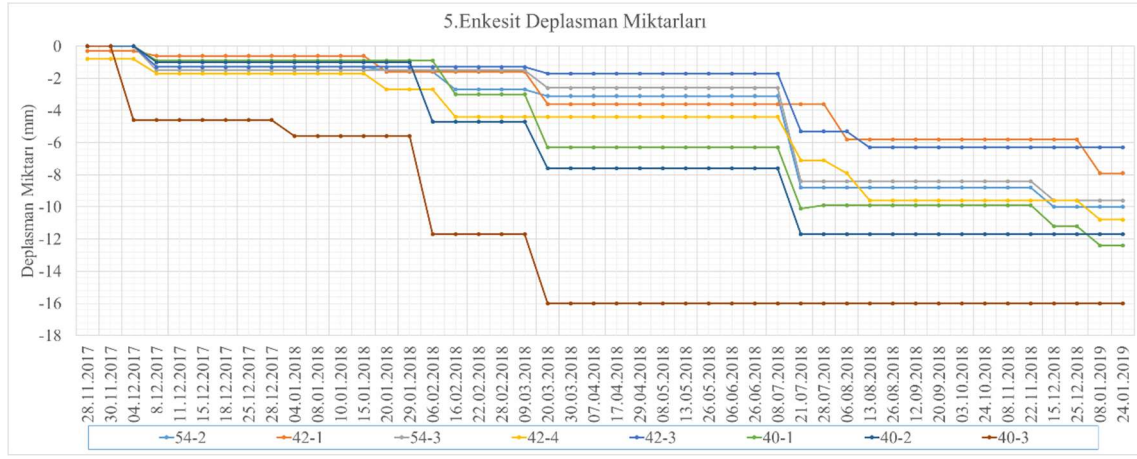
- Vardar, M.** (1985). Sürtünmeli çelik bağların Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde NATM kullanılabilme olanakları. *Kaya Mekaniği Bülteni*, 3, 35-44.
- Yalçınkaya, M. ve Satır, B.** (2005). Tünellerde oluşan hareketlerin farklı ölçü yöntemleri ve sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi. 2. *Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 23-25 Kasım 2005. İstanbul.
- Yaşar, S. ve Yılmaz, A., O.** (2018). Düşey kayaç kesme seti ile kollu galeri açma makinesi performans tahmini: bir örnek uygulaması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, Özel Sayı, 63-71.
- Yıldırım, M. ve Savaşkan, E.** (2002). İstanbul tersiyer çökellerinin stratigrafisi mühendislik özellikleri, *Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni*, 25, 18.
- Zlatanović, E. & Lukić, D.** (2014). Ground surface settlement induced by twin tunnelling, *40th Anniversary Faculty Of Civil Engineering Subotica*, Subotica, Serbia : April 24-25.
- Url-1** <<https://www.sabah.com.tr/galeri/>> , erişim tarihi 30.08.2010.
- Url-2** <<https://www.ntv.com.tr/galeri/dunya/dunyanin-en-uzun-tuneli>> , erişim tarihi 01.06.2016.
- Url-3** <<http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Duyurular/Duyu3>> , erişim tarihi 2018.
- Url-4** <<https://www.docsity.com/en/lecture-1-s/2466613/>> , erişim tarihi 13.02.2018
- Url-5** <<https://www.standedge.co.uk/The-Standedge-Tunnels.html>> , erişim tarihi 10.03.2017.

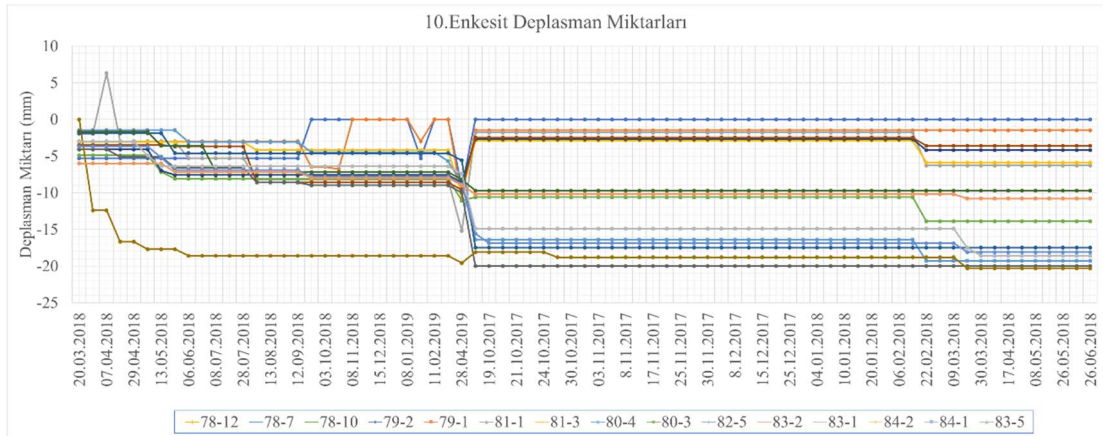
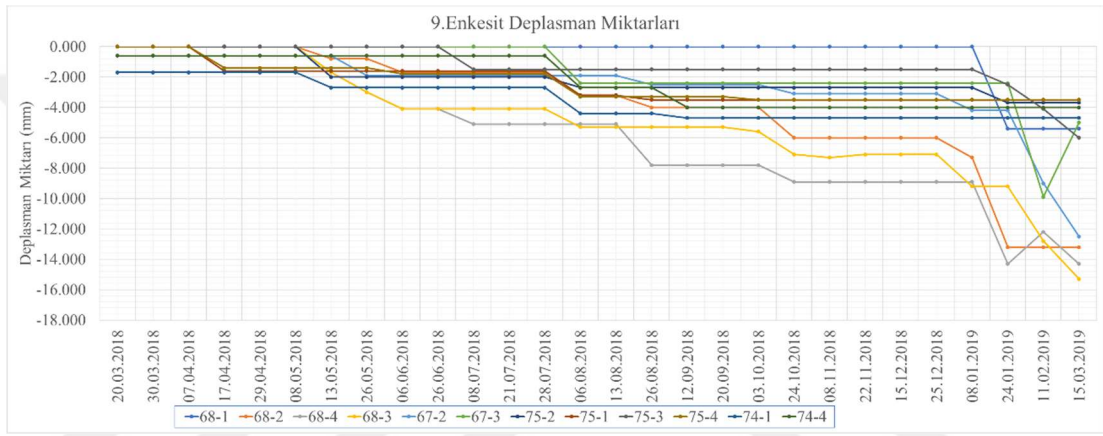
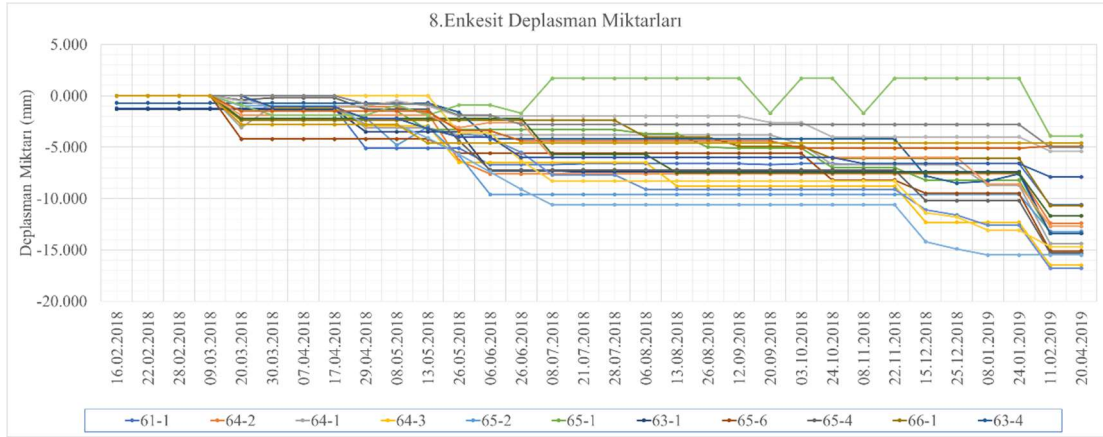


EKLER

EK A: Enkesitlerin Deplasman Miktarları









ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ezgi AKÇAY
Doğum Tarihi ve Yeri : 1992 / Antalya
E-posta : ezgiakcay19@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017 yılından beri Kalyon Group'ta teknik ofis mühendisi olarak çalışmakta.

