

İSTANBUL METROSU KOSKA TÜNELLERİ YÜZEY
DEFORMASYON ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş.Müh. Özgün ÇEÇEN

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

EYLÜL 2007

İSTANBUL METROSU KOSKA TÜNELLERİ YÜZEY
DEFORMASYON ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Özgün ÇEÇEN
(501041319)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Eylül 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Eylül 2007

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Aykut ŞENOL
Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Tuğrul ÖZKAN (İ.T.Ü.)
Y.Doç.Dr. İlknur BOZBEY (İ.Ü.)

EYLÜL 2007

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Departmanı-Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği programına sunulmak üzere hazırlanmıştır.

Öncelikle, bu çalışmanın planlanmasından sonuçlanmasına kadar bana rehber olan ve hiçbir yardımı esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Aykut ŞENOL 'a sonsuz teşekkür ederim. Çalışmalarım için her türlü veriyi bulmamda ve düzenlememde bana yardım eden ve olumlu tavrıyla zorlukları aşmamda büyük katkısı olan Anadolu Metro Ortaklığı, geoteknik şefi Murat HİZEL'e teşekkürü borç bilirim. Bu çalışma için gereken her türlü veriyi kullanmamda bir sakınca görmeyerek güvenini gösteren, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Raylı Sistem Müdürü Sayın Yalçın EYİĞÜN'e teşekkür ederim. Sosyal hayatımda, iş hayatımda ve tezimle ilgili konularda, güvendiğim fikirlerini benimle paylaşan ve isteklerimi geri çevirmeyen İstanbul Metrosu, Yüksel Proje A.Ş., proje müdürü Sayın Orhan YENİĞÜN'e, proje şefi Sayın Nuran KAYA'ya ve Anadolu Metro Ortaklığı, proje koordinatörü Sayın Esat TANSEV'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tüm Yüksel Proje ve Anadolu Metro Ortaklığı çalışanlarına teşekkür ederim. Akademik çalışmalara ve bilime saygı duyan, bu nedenle çalışmalarımda kolaylık sağlayan, zarif ve seviyeli kişiliğini örnek aldığım, Kismak Adi Ortaklığı icra kurulu üyesi Sayın İsmail CANADİNÇ'e, hem arkadaşım hem şefim olabilen ve çalışmam boyunca bana destek olan, hakediş ve mukavele takip şefi Bahadır SÖNMEZ'e ve ölçüm grubu şefi Yalçın AKDENİZ'e çok teşekkür ederim.

Son olarak, bu mesleği seçmemi ve sevmemi sağlayan, attığım her adımı yakından takip edip beni yönlendiren, mesleki idolüm, canım dayım, Bayındırlık Bakanlığı emekli müsteşar yardımcısı M. Mücahit ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım. Her anımda yanımda olan, maddi ve manevi destekleri olmadan hiçbir şey yapamayacağımı bildiğim, başarılarımın temel yapı taşları, en önemlisi dostum olabilen, canım anneme ve canım kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

EYLÜL, 2007

ÖZGÜN ÇEÇEN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
SUMMARY	ix
ÖZET	x
1. GİRİŞ	1
2. METRO TÜNELLERİNİN İNCELENMESİ	3
2.1 Metro Tüneli Açım Yöntemlerinin Özellikleri	4
2.2 Tünel Maliyetini Etkileyen Faktörler	4
2.3 Tünel Kazı İşlemleri	5
2.3.1 Klasik Yöntem	5
2.3.2 Kalkan Yöntemi	5
2.3.3 Kazııcı Makineler Yöntemi	6
2.4 Tünel Kazı Şekilleri	7
2.4.1 Tam Kesit Kazı	7
2.4.2 Kademeli Kazı	7
2.4.3 Pilot Tünelli Kazı	9
2.5 Tünellerde Kazı Destek Elemanları	10
2.5.1 İksalar	10
2.5.1.1 Ahşap İksalar	10
2.5.1.2 Çelik İksalar	11
2.5.1.3 Takviyeli Beton Yapılarda İksalar	12
2.5.2 Püskürtme Betonu	13
2.5.3 Bulonlama	15
2.6 Tünel İnşaatı Yöntemleri	17
2.6.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu	18
2.6.1.1 Yeni Avusturya Metodunun Uygulanmasında Başlıca Görüşler	21
2.7 Geoteknik Ölçümler	22
2.7.1 Konverjans Ölçümleri	23

2.7.2	Ekstansometreler	24
2.7.3	Glötzl Hidrolik Gerilme Hücresi	24
2.7.4	Diskli Yük Hücreleri	25
2.7.5	İnklinometreler	25
2.7.6	Gerilme Ölçerler	26
3.	İSTANBUL METROSU 2. AŞAMA TÜNELLERİ	27
3.1	Projenin Karakteristik Özellikleri	27
3.2	Bölgesel Jeoloji	28
3.3	İstanbul Metrosu 2. Aşama Tünel Tipleri	28
3.4	İstanbul Metrosu Tünellerinde Kullanılan Tahkimat Tipleri ve Elemanları	31
4.	İSTANBUL METROSU 2.AŞAMA KOSKA TÜNELLERİ	32
4.1	İnceleme Alanının Tanıtılması	32
4.1.1	Konum	32
4.1.2	Morfoloji	32
4.1.3	İklim	32
4.2	İnceleme Yöntemi	34
4.2.1	Arazi Çalışmaları	34
4.2.2	Büro Çalışmaları	34
4.3	Koska Tünellerinde Kullanılan Tahkimat Tipi ve Elemanları	35
4.3.1	Boru Şemsiye (Umbrella Arch) Yöntemi ve Uygulaması	36
5.	KOSKA TÜNELLERİ DEFORMASYON ANALİZİ	40
5.1	Kayaların RMR Sınıflaması	41
5.2	Deformasyon Analizi ve Tahkimat Değişimi	44
5.3	Tünel Açılmasından Kaynaklanan Yüzey Oturmalarının Tahmini	53
6.	SONUÇ	61
	REFERANSLAR	64
	EKLER	66
	ÖZGEÇMİŞ	88

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 : İstanbul Metrosu Kazı Destek Tipleri ve Tahkimat Elemanları.....	31
Tablo 5.1 : RMR Sınıflandırma Parametreleri ve Dereceleri.....	41
Tablo 5.2 : Koska Tünelleri RMR Değerleri.....	42
Tablo 5.3 : Koska Tünelleri Tahkimat Elemanları.....	48
Tablo 5.4 : Koska Tünelleri <i>Umbrella Arch</i> Uygulaması.....	49
Tablo 5.5 : Deformasyon Okumaları ile Teorik Değer Kıyaslaması (A-A).....	57
Tablo 5.6 : Deformasyon Okumaları ile Teorik Değer Kıyaslaması (B-B).....	59

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Pasanın Taşınması	6
Şekil 2.2 : Kademeli Kazı Örneği	7
Şekil 2.3 : Kademeli Kazı Örneği-2	8
Şekil 2.4 : İstanbul Metrosu L Tipi Tünel Kademeli Kazı	8
Şekil 2.5 : Pilot Tünel	9
Şekil 2.6 : İstanbul Metrosu Çelik İksa Detayı (A Tipi Tünel)	11
Şekil 2.7 : İstanbul Metrosu Çelik (Kafes) İksa	12
Şekil 2.8 : Püskürtme Beton “Shotcrete” İmalatı (İnvert)	14
Şekil 2.9 : Püskürtme Beton “Shotcrete” İmalatı (Kemer)	14
Şekil 2.10 : Kaya Bulonu	15
Şekil 2.11 : Kaya Bulonu Montajı ve Enjeksiyonu	16
Şekil 2.12 : Enjeksiyonlu Kaya Bulonu ve Torklanması	17
Şekil 2.13 : NATM ile Açılan Tünel Kesiti	20
Şekil 2.14 : Tünel İçi Deformasyon (Konverjans) Ölçümleri	23
Şekil 2.15 : İnklinometre	25
Şekil 3.1 : T Tipi ve C Tipi Tünel Kesitleri	29
Şekil 3.2 : P Tipi ve A Tipi Tünel Kesitleri	29
Şekil 3.3 : B1, B2, B3 Tipi Tünel Kesitleri	30
Şekil 3.4 : L Tipi ve M Tipi Tünel Kesitleri	30
Şekil 4.1 : Koska Tünelleri Plan	33
Şekil 4.2 : İstanbul Metrosu Güzergahı	34
Şekil 4.3 : Tahkimat Elemanları Uygulaması	36
Şekil 4.4 : <i>Umbrella Arch</i> Yönteminde Kullanılan Borular	37
Şekil 4.5 : <i>Umbrella Arch</i> Uygulaması	38

Şekil 4.6 : <i>Umbrella</i> ve Zemin Çivisi Uygulamaları ile Tünel Açımı (Görünüm1)	38
Şekil 4.7 : <i>Umbrella</i> ve Zemin Çivisi Uygulamaları ile Tünel Açımı (Görünüm2)	39
Şekil 5.1 : KH1Y-3 Tüneli Yüzey Deformasyon ve Kazı İlerleme Grafikleri	45
Şekil 5.2 : KH2Y-3 Tüneli Yüzey Deformasyon ve Kazı İlerleme Grafikleri	46
Şekil 5.3 : KH2Y-4 Tüneli Yüzey Deformasyon ve Kazı İlerleme Grafikleri	51
Şekil 5.4 : KH1Y-4 Tüneli Yüzey Deformasyon ve Kazı İlerleme Grafikleri	52
Şekil 5.5 : Yüzey Oturma Büyüklükleri	53
Şekil 5.6 : Koska Tünelleri Genel Görünüm	55
Şekil 5.7 : Koska Tünelleri A-A Kesiti, Jeolojik Kesit ve Tünel Mesafeleri	55
Şekil 5.8 : A-A Kesiti Deformasyon Dağılımı	57
Şekil 5.9 : Koska Tünelleri B-B Kesiti, Jeolojik Kesit ve Tünel Mesafeleri	58
Şekil 5.10 : B-B Kesiti Deformasyon Dağılımı	59

SEMBOL LİSTESİ

D : Tünel çapı

E_{ort} : Tünel üzerindeki formasyonların tabaka kalınlıklarına göre ağırlıklı ortalama elastisite modülü

i : Yüzey çökme teknesinin dönüm noktasının absisi

S_{mak} : Yüzey çökme teknesinin eksenindeki oturma miktarı

P_s : Sürşaj yükü ve trafik yükü dahil tünel üzerindeki yük

Z_o : Tünel eksen derinliği, m

γ_{ort} : Formasyonların ortalama birim hacim ağırlığı

ν_{ort} : Zemin-Kaya ortamın ortalama Poisson Oranı

SURFACE DEFORMATION ANALYSE OF ISTANBUL SUBWAY KOSKA TUNNELS

SUMMARY

Metro, the most effective solution of big city's transportation problem, is used in an increasing ratio all around the world. The indisputable truth is the tunnel and surface deformations have to be limited for the tunnels passed under city structures as metro tunnels. In tunneling, the basic part is excavation with suitable support system, not to use more supporting component. It is possible to provide working speed, good performance and economy by determining system and take precautions through the analysis considering geotechnical workings and data obtained. In this study, the deformation graphics of İstanbul Subway Koska tunnels are constituted by using data obtained. The support system elements and their changing quantities are determined, face geological properties and RMR (Rock Mass Rating) values are given, the fault zone is determined and effects of all these on deformations are analyzed. Consequently, geotechnical parameters, geological profile, rock mass ratio, closer tunnel excavation and support system are determined as effective parameters of surface deformations. In addition, estimated deformations are calculated by using empirical-semi theoretical correlations. By comparing the real deformations and estimated deformations, it is determined that necessary precautions had been taken for preventing dangerous increase of deformation and the property of New Austrian Tunneling Method –changing method based on experience- had been used.

İSTANBUL METROSU KOSKA TÜNELLERİ DEFORMASYON ANALİZİ

ÖZET

Büyük kentlerin ulaşım sorununda en etkili çözüm yolu olan metro, günümüz toplu taşımacılık sistemlerinin yaygın bir türü olarak tüm dünyada giderek artan oranda kullanılmaktadır. Metro tünelleri gibi yerleşim alanlarının altından geçen tünellerde, tünel içi ve yüzey deformasyonlarının en düşük seviyede tutulması gerekliliği tartışılmaz bir gerçektir. Tünelcilikte önemli olan; çok miktarda tahkimat sistemiyle kazı yapmak değil, doğru tahkimat sistemiyle kazı yapmaktır. Geoteknik çalışmalar ve elde edilen veriler kullanılarak yapılan analizler sayesinde, sistemler belirlenerek ve yerinde ve zamanında önlemler alınarak, hızı, verimi ve ekonomiyi sağlıklı bir biçimde sağlamak mümkündür. Bu çalışmada, elde edilen veriler kullanılarak İstanbul Metrosu, Koska Bölgesi tünellerinin deformasyon grafikleri elde edilmiştir. Uygulanan tahkimat sistemi elemanları ve değişen sayıları belirlenmiş, tutanaklardan ayna jeolojileri ve RMR (Rock Mass Rating) değerleri alınmış, fay ve süreksizlik düzlemleri belirlenerek tüm bunların deformasyonlara etkisi, karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca bir tünel kazısının, diğer bir tünelin yüzey deformasyonlarına etkisi de incelenmiştir. Sonuç olarak, yüzey deformasyonlarında; yapısal jeoloji, geoteknik parametreler, kaya kütlesi sınıfı, yanyana tünel açımı ve destek sistemi etkin parametreler olarak belirlenmiştir. Ayrıca ampirik-yarı teorik bağıntılarla tahmini deformasyonlar hesaplanmıştır. Gerçek okumalarla kıyaslama yapılarak, yüzey deformasyonlarının, tehlike yaratacak çok büyük değerlere ulaşmaması için gerekli önlemlerin alındığı ve Yeni Avusturya Tünelcilik Metodunun -tecrübeye dayalı metot değişimi- özelliğinin kullanıldığı görülmüştür.

1. GİRİŞ

Büyük kentlerin ulaşım sorununda en etkili çözüm yolu olan metro, günümüz toplu taşımacılık sistemlerinin yaygın bir türü olarak tüm dünyada giderek artan oranda kullanılmaktadır.

1860'da Londra'da dünyanın ilk yeraltı demiryolunun yapımına başlandı. 6km uzunluğundaki bu metro hattı, 1863'de işletmeye açıldı. Sonraki yıllarda yapılan ekler ve yeni hatlarla giderek genişleyen Londra metrosunda bugün, 408km'lik bir ağ üzerinde 273 istasyon bulunmaktadır.

İngiltere'den sonra Avrupa'daki ilk metro 1896'da Macaristan'ın başkenti Budapeşte'de açıldı.

Dünyanın en ünlü metrolarından biri olan Moskova metrosunun 197km'lik toplam uzunluğunun 177km'si yeraltındadır ve 123 istasyonu vardır.

1904'de açılan New York metrosunun 371km'lik hatlarında 456 istasyon vardır.

Türkiye'nin en büyük finans ve sanayi merkezi olan İstanbul, Türk ve dünya tarihinde önemli yere sahip bir metropoldür. Bunun getirdiği nüfus yoğunluğunu mevcut ulaşım sistemleri karşılayamaz duruma gelmiş ve yeni projelerin hizmete girmesi zorunlu olmuştur.

Hızlı ve kolay ulaşımı sağlayan, ulaşım sorununda etkili çözüm olarak düşünülen metronun, İstanbul'un ulaşım problemine de çözüm getireceği düşünülmüştür. 4.Levent-Yenikapı arasındaki sıkışıklığı önemli ölçüde rahatlatması beklenen İstanbul Metrosu'nda, halen serviste olan Taksim-4.Levent hattı bulunmaktadır. İnşası devam etmekte olan Ayazağa-4.Levent, Taksim-Yenikapı hatları ve Yenikapı İstasyonu'nun transfer sağlayacağı Boğaz Tüp Geçişi (Marmaray) ile de İstanbul ulaşımına yeni bir soluk kazandıracaktır.

Metro projesi genel olarak İstanbul şehiriçi ulaşımında şu amaçlara erişmek için projelendirilmiştir:

- Ulaşım güvenliğini, konforunu ve emniyetini arttırmak
- Yolculuk süresini azaltmak.
- Ulaşılabilirliği ve hareketliliği arttırmak
- Ulaşımın çevreye kötü etkilerini en aza indirmek
- En az kentsel yayılma ile düzenli büyümeyi teşvik etmek
- Ekonomik yarar-maliyet ilişkisi yüksek bir ulaşım sistemi sağlamak
- Şehiriçi raylı ulaşım sistemleriyle entegrasyonu sağlamak

Metrolar büyük kent yaşamının ayrılmaz ve vazgeçilmez öğelerinden biridir. Metroların belli başlı yapıları arasında, ulaşım tüpleri (tünelleri) bulunmaktadır. Bunların yeraltı kazısı ile açılmaları durumunda, kentin mevcut yapılaşmaları ile olumsuz etkileşimlerin meydana gelmemesi temel koşuldur. Bu nedenle, açım sırasında oluşan deformasyonların alt yapıya ve yerleşimlere zarar vermeyecek kadar küçük tutulması gerekir.

Bu çalışma; İstanbul Metrosu, 2. aşama, Yenikapı-Unkapanı güzergahındaki Koska tünellerinde karşılaşılan deformasyonların ve bu deformasyonlara karşı getirilen çözümlerin uygunluklarının analizidir.

2. METRO TÜNELLERİNİN İNCELEMESİ

Demiryolu, karayolu, yaya yolu vb..., bir taşın yolunun, bir kısmının yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan mümkün olmadığı ya da ekonomik bakımdan uygun bulunmadığı yerlerde bu kısmın yer altından geçirilmesi için başvurulan sanat yapılarına *tünel* denir.

Tünel inşasını gerektiren nedenler şöyle sıralanabilir;

- Eğimi sınırlı olan güzergahlarda, dağlık arazide, yeryüzünden aşılamayan sırt ve tepelerin geçilmesi amacı ile,
- Güzergahın bir kısmında tünel inşası ile önemli bir kısalma meydana gelecek ve tünel için gereken masraf, bu kısalmanın sağlayacağı ekonomi ile karşılanabilecek ise veya tünelden geçilmesi halinde maliyet fazla olsa bile bu fazlalık işletmede elde edilecek ekonomi ile karşılanabilecek ise,
- Güzergahın bir kısmının önemli toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları ve çığlardan korunması amacı ile,
- Gerek askeri bakımdan, gerekse üzerindeki taşıtı aksatmamak için akarsuların ya da boğaz teşkil eden deniz sularının altından geçilmek istendiği zaman,
- İnşası ve bakımı fazla masraflı olan kendini tutamayan zeminlerdeki büyük yarmalara engel olmak amacı ile,
- Birbirlerinden tepe, sırt, akarsu, boğaz vb..., gibi doğal engellerle ayrılmış şehir semtlerinin birleştirilmesi amacı ile,
- Yerüstü istimlaklerinin çok pahalı olduğu yerlerdeki yolların genişletilmesi veya yeni yolların açılması olanağının bulunmadığı durumlarda veya büyük ölçüde insan taşınması gerektiği zaman metro inşası için tünel inşası gerekmektedir.

Metroların yapım aşaması sırasında kentlinin yaşamını engelleyici ve güvensizlik yaratıcı etkilerden kaçınmak gerekmektedir. Metro tünelleri kent içinde açılmaları ve yüzeye yakın olmaları nedeniyle diğer tünellerden ayrılırlar.

2.1 Metro Tüneli Açım Yöntemlerinin Özellikleri

Metro açım yöntemi, yapımda gerçekleşecek olan işlemler ve alınacak önlemlerin, yer ve zaman esas alınarak düzenlenmesini ve bunların, uygulama yeri, sırası ve sürelerinin belirlenmesini kapsamaktadır. Kent içi geçişlerin metro yapımında çok önemli olduğu ve bazı sorunlara sebep olabileceği düşünülerek, farklı metro açım ve inşaat yöntemlerinin kullanılmasının normal olduğu bilinmelidir. Bu nedenle, daha çok, yöntemin uygun olup olmadığı üzerinde durmak gerekir.

Seçilen yöntemde bulunması gereken özellik ve nitelikler şunlardır:

- Ekonomik
- Riski düşük
- Uygulamada pratik
- İlk durumu koruyabilen
- Denetimi kolay
- Değişikliklere uygun

2.2 Tünel Maliyetini Etkileyen Faktörler

Şehiriçi ulaşımı sağlayan metro tünellerinde, maliyet önemli bir konudur. Tünel maliyetini etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir;

- Tünel güzergahının jeolojik ve hidrojeolojik durumu
- Zemin yapısı ve geoteknik özellikleri
- Tünel desteklemesi ve destek türü
- Tünelin yüzeyden derinliği
- Tünelin çapı ve şekli
- Tünelin uzunluğu

- İşçilik
- Çalışılan günler
- Makine arızaları

Sıralamadaki ilk iki maddenin jeolojik koşulları içermesi, bu verilerin doğru olarak araştırılıp saptanmasının tünel inşası için çok önemli olmasından kaynaklanmaktadır. İşin uzamasına, proje ve güzergah değiştirilmesi, jeolojik araştırmaların ve geoteknik analizlerin yeteri kadar yapılmamış olması sebep olmaktadır.

2.3 Tünel Kazı İşlemleri

Tünel kazı işlemleri, tünel tipine, tünelin büyüklüğüne ve zemin özelliklerine göre değişebilmektedir.

Tünel kazılarında genel olarak üç yöntem uygulanır:

- i. Klasik Yöntem
- ii. Kalkan Yöntemi
- iii. Kazıcı Makineler

2.3.1 Klasik Yöntem

Bu kazı türü delme, patlatma ve pasanın taşınması esasına dayanır. Deliciler ile delme işlemi tamamlandıktan sonra delikler patlayıcı madde ile doldurulur ve emniyet sağlandıktan sonra ateşleme işlemi yapılır. Ventilasyon ile dumanlar dışarıya atıldıktan sonra patlatılan kısımda askıda kalmış ve gevşemiş parçalar düşürülür. Daha sonra pasa taşınması ile ilgili ekipman içeriye girer. Pasanın taşınması tamamlandıktan sonra tekrar delme işlemine geçilir..

2.3.2 Kalkan Yöntemi

Bu yöntem yumuşak, kuru ve ince taneli zeminlerde kullanılır. Kazının dış şekline uygun olarak çelik plakalardan kalkan imal edilir. Kazı aynası ile kaplaması tamamlanmış kısım arasındaki bölümün gevşeyerek kazı boşluğuna akmasının önlenmesi için kullanılır. Kazı yapıldıkça kalkan kriko ile ileriye doğru sürülür. Önceden hazırlanmış olan kaplama malzemeleri kalkanın ileri sürülmesi ile geride

kalan kaplamasız kısma yerleştirilir. Arkası dolgu enjeksiyonu yapılarak kuvvetlendirilir ve tüm çevre basıncını alabilecek duruma getirilir.

Kalkan zayıf zeminlerde geçici destek görevi yapar. Klasik yöntem ekipmanlarından birinin yerine kullanılamaz. Sadece kazı sırasında akıcı özellikteki malzemenin akmasını engeller.

2.3.3 Kazıcı Makineler Yöntemi

Yeraltı kazılarında kazıcı makineler kullanıldığında klasik yöntemdeki delme ve patlatma işlemleri ortadan kalkmaktadır. Taşıma işlemi her iki yöntemde de aynıdır. Bu yöntemin klasik yöntemden üstünlüğü kazının süreklilik kazanmasıdır. Bu şekilde ilerleme hızı çok fazla olmaktadır.

Kazı makinesi ile yapılan kazılarda; ön tarafta bulunan matkap ve kesiciler ile zemin aynadan sökülür ve geride bulunan taşıma ekipmanına aktarılır (Şekil 2.1).

Kazı makineleri, belirli tip kazı ve belirli özellikteki zemin için projelendirilir. Bu nedenle birçok çeşitleri vardır. Bazı tipleri, gevşek zeminin göçmesini engellemek için aynayı hava basıncı altında tutan ve su geçirmez başlık hücresi ile donatılmıştır. Diğer bazı tipler ise delici tabancalar ile donatılmış olup, makinenin kesemeyeceği sert zeminlerin delinip patlatılması olanağını sağlar



Şekil 2.1: Pasanın Taşınması

2.4 Tünel Kazı Şekilleri

Yeraltı kazıları, kazının yapılacağı zemin durumu ve kazı yöntemine göre genelde üç şekilde yapılır:

- i. Tam kesit kazı
- ii. Kademeli kazı
- iii. Pilot tünelli kazı

2.4.1 Tam Kesit Kazı

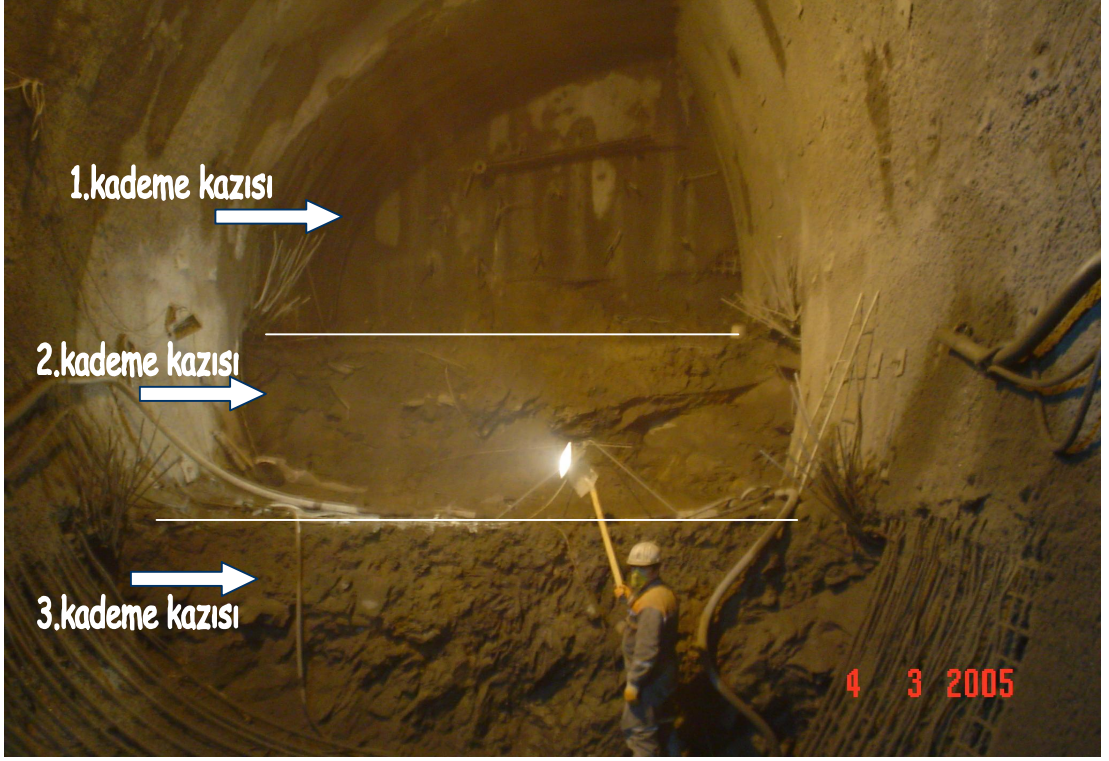
Genellikle küçük çaplı kazılarda uygulanır. Büyük çaplı kazılarda ise ancak delme ekipmanı aynanın her yerine kolayca ulaşabildiğinde yapılabilir. Bu yöntemde, kazı aynası her seferinde tam kesitte patlatılır. Bu yöntem kayanın kemerlenme periyodunun atıştan sonra havalandırma ve pasa taşınmasına olanak verdiği durumlarda kullanılabilir (Şekercioğlu, 1993)

2.4.2 Kademeli Kazı

Büyük boyutlu kazılarda üstüarı kısmı öncelikle kazılır daha sonra alt kısma geçilir (Şekil 2.2, Şekil 2.3).



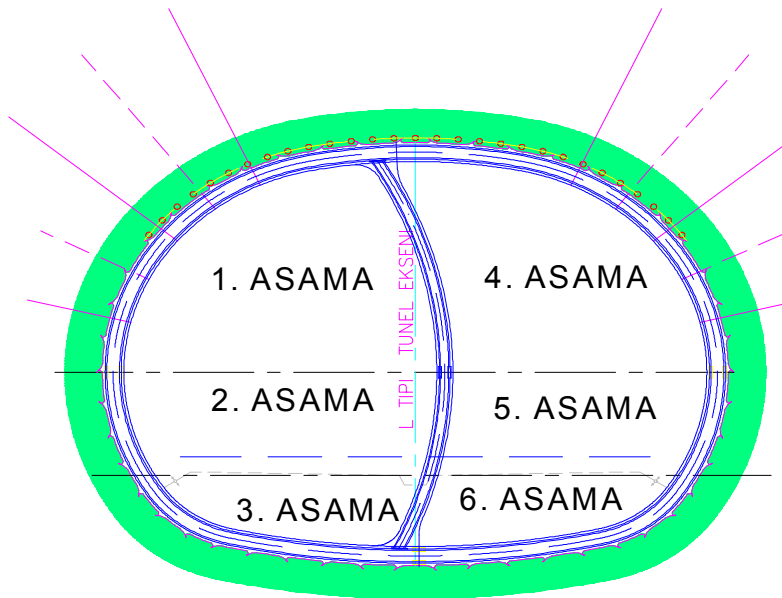
Şekil 2.2: Kademeli Kazı Örneği-1(İstanbul Metrosu Taksim-Yenikapı)



Şekil 2.3: Kademeli Kazı Örneği-2 (İstanbul Metrosu Taksim-Yenikapı)

Kademeli kazıda, kademeler birbiriyle ardalanmalı sürülebileceği gibi bir kademenin tamamen tamamlanmasından sonra ikinci kademenin kazısına da başlanabilir. Kademe sayısı iki veya daha fazla olabilir (Şekil 2.4).

Kademeli kazıda her bir kademenin birbirini takip mesafeleri, uygulamadaki başarısı için önemlidir (Heinz ve Einstein, 1989).



Şekil 2.4: İstanbul Metrosu L Tipi Tünel Kademeli Kazı

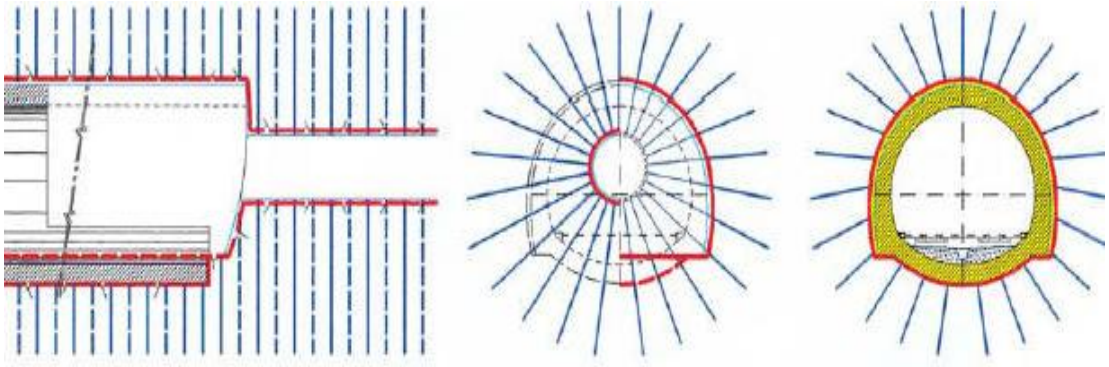
2.4.3 Pilot Tüneli Kazı

Kademeli kazının bir türü olan bu kazı şekli büyük boyutlu, destekli ve desteksiz kazılarda uygulanabilmektedir. Açılması istenen kesit içinde bir boşluk meydana getirilerek genişletme kazısı sırasında patlatma bu boşluğa doğru olur ve nihai kazı yüzeyinin zedelenmesi engellenir. Pilot tünel esas aynaya göre 10-15m ileriden sürülebileceği gibi bütün kazı boyunca açılarak ulaşım, havalandırma ve daha çok aynada çalışabilme olanakları da sağlanabilir.

Pilot tüneller aynı zamanda enjeksiyon, drenaj ve bulonlama gibi tünel zemin ıslah çalışmalarında kullanılırlar. Bir pilot kuyu, aşırı su basıncı olan zonları keserek su basıncını azaltabilir.

Pilot tüneller, tam ölçekli esas tünel kesitinin tavan, taban veya merkezinde olabilirler. Böylece final kesitinde yer alan pilot çukuru, uygun bir şekilde gevşek tünelle uyum sağlayacak şekilde genişletilerek, nihai tünel kesitinde oluşabilecek zararın riskini azaltır.

Alternatif olarak, pilot tünel, esas tünelin bir kenarında veya üstünde açılabilir. Eğer esas tünelin tabanı altında açılmışsa inşaat esnasında drenajın yapılmasını sağlar. Aynı zamanda tünele giren taşıtların ulaşım problemlerini çözerlerken, tünele yerleştirilecek mekanik ve elektrikli teçhizatın uygulanmasına olanak verirler (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Pilot Tünel (www.sireg.it/geo/files/%20solver.htm)

2.5 Tünellerde Kazı Destek Elemanları

Tüneller her türlü kaya formasyonlarında açılacağı gibi çakıl, kum, doygun kil gibi konsolide olmamış zeminde de açılabilir. Tünellerde, inşaat esnasında veya kullanımında geoteknik açıdan mühendislik bilinmeyenleri tam olarak çözülemediği takdirde özel problemler yaşanır.

Kazı sonrası tünel çevre zemininde oluşan yeni gerilmeler, deformasyona neden olacaktır. Bu deformasyona karşı tünel, doğal kemerleme ile kendisini ne kadar süreyle tutabiliyorsa, bu süre için duyarlılıktan söz edilebilir.

Tünelin kendi kendini tutabilme süresi içindeki en uygun zamanda oluşturulacak bazı sistemlerle direncinin artırılması gerekir. Bunun için iksa, püskürtme beton, bulon, zemin çivisi, süren vb. gibi tahkimat elemanları kullanılmaktadır.

2.5.1 İksalar

Tünel kazısı sırasında, kendini tutamayan zeminlerde kazı yapılırken zemini tutmak için kullanılan yapılara iksa denir. İksalar ahşap, çelik, beton veya bunların kombinasyonu şeklinde de olabilir.

İksalar:

- Kazılmış olan boşluğu kısmen de olsa destekleyip, stabilize ederek, belli bir noktanın ötesinde zemin deplasmanlarını önlemek,
- Güçlü ve rijit iksalar ise, boşluğu çevreleyen zeminin hareketini önlemek için kullanılırlar.

2.5.1.1 Ahşap iksalar

Ahşap iksalar daha çok maden galerilerinde kullanılmakla beraber, küçük kesitli eski tip demiryolu tünellerinde de çok yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak bugün tünelcilikte yerini çelik iksa, püskürtme beton ve diğer destekleme elemanlarına bırakmıştır.

Ahşap iksaların en önemli avantajı hafif oluşu ve kazı alanı içinde çok dar bir alanda bile kullanılıp rahat işlenebilme özelliğidir. Yani hem hafif hem de işçiliği kolaydır. Ancak, çelikle mukayese edildiğinde ahşap 10 misli hafif olmasına rağmen eğilme direnci çeliğin yarısı kadardır. Bir diğer avantajı ise, lifli yapısı nedeniyle kırılmadan önce belirgin şekilde kıymıklanmasıdır. Böylece, deformasyonları gözle takip etme

imkanı verir. Böylece kırılmadan önce tahkimatın takviyesi için gerekli zamanı sağlar.

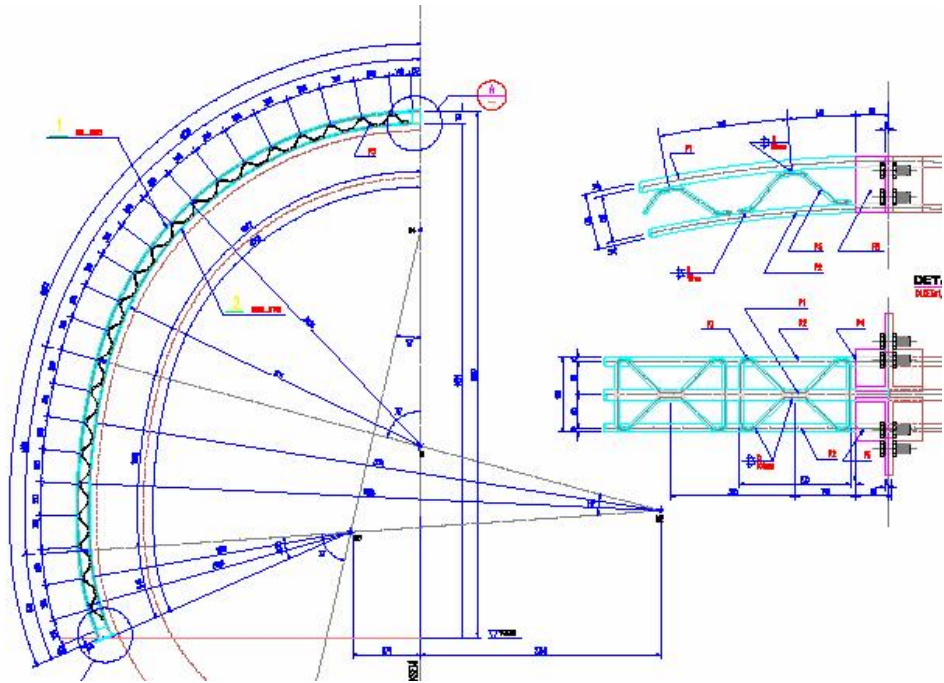
Ahşap iksalar fabrikasyon olmayıp, doğadan temin edildikleri için, mekanik büyüklükleri içsel yapılarına bağlıdır. Bu nedenle standartizasyon olmadığı gibi dış müdahalelerle bu özellikleri değiştirme imkanları da yoktur. Ayrıca çok miktarda kullanılmayı gerektirdiğinden, galeri içindeki hareketi tehdit eder, çalışmayı engeller.

2.5.1.2 Çelik iksalar

Uzun ömürlü tüneller söz konusu olunca çelik iksalar kullanılır (Şekil 2.6). Diğer tahkimat elemanlarıyla birlikte, tünelde kendini destekleyen bir halka oluşturulur (Şekil 2.7).

Fabrikasyon bir malzeme olduğundan mekanik büyüklükleri standart olup, uygulamalarda büyük bir güvenilirlik ve hesaplamalarda doğruluk sağlar. Bu ise daha küçük bir emniyet katsayısı ve ekonomi demektir. Elastisite modülü çok büyüktür ($E=2 \times 10^4$ kPa). Bundan dolayı deformasyon problemlerinde olumlu yaklaşımlar sağlar. Birtakım işlemlerle tüm mekanik özelliklerini değiştirebilme imkanı vardır. Uzun sürede nemden, mantarlardan etkilenmesi söz konusu değildir.

Gerçekte maliyetinin yüksek oluşu ve ağırlığının dışında bir dezavantajı yoktur. Ancak kullanım yeri ve süresine göre pahalı gibi görünse de çelik iksalar gerçekte ekonomiktir.



Şekil 2.6: İstanbul Metrosu Çelik İksa Detayı-A Tipi Tünel



Şekil 2.7: İstanbul Metrosu Çelik (Kafes) İksa

2.5.1.3 Takviyeli beton yapılar da iksalar

Ön üretimli veya bundan daha özel tip olan öngerilimli takviyeli beton yapılar, tam kesit metoduyla yapılan tünellerde geçici kaplama olarak son yıllarda geniş bir kullanım alanı yaratmışlardır.

Takviyeli beton elemanlar, nihai kaplamanın bütünleşik bir parçası olma iddiasını taşırlar. Bunların büyük bir dezavantajı, aşırı ağırlıkları, taşınma ve yerleştirilme zorluklarıdır. Küçük kesitli tünellerde bunların yük taşıma kapasitelerinin tümünden yararlanılamaz. Büyük kesitli tünellerde ise takviyeli beton kafeslerin ağırlığı, bunların yerlerine yerleştirilmeleri için mekanik vinçlerin kullanılmasını gerektirecek kadar arttırılmaktadır.

2.5.2 Püskürtme Betonu

Onarım veya yapım amacı ile önceden hazırlanmış olan betonun hava basıncı yardımı ile yüksek hızla, uygulama yüzeyi veya alanına püskürtülerek elde edilen betondur (TS 11747) (Şekil 2.8).

Uygulama olarak ikiye ayrılır:

- a) Islak karışım: Su, çimento, agrega karıştırılır. Uygulama yerine sevk edilir. Püskürtme başlığının memesinden püskürtülürken, priz çabuklaştırıcı katkı maddesi (sigunit, besanit vb...) karıştırılarak, yerine uygulanır.

Islak karışımın tercih edilmesinin nedeni uygulanırken daha az sıçraması, zayıflığın az olması, tozlanmanın az olması ve karışımın kontrol edilebilir olmasıdır.

- b) Kuru karışım: Çimento ve agrega karıştırılır. Uygulama yerine sevk edilir. Püskürtme başlığının memesinden püskürtülürken su ve priz çabuklaştırıcı katkı maddesi karıştırılarak yerine uygulanır (Şekil 2.9).

Kuru karışım ise, değişen şartlara kolayca uygulanması, ıslak yüzeylere kolayca uygulanması açısından tercih sebebi olabilir.

Püskürtme betonun uygulandığı yerler;

- Tünel ve galeri yüzeylerinin sağlamlaştırılmasında,
- Tünel, galeri ve su kanallarının yalıtımında,
- Şevlerin sağlamlaştırılmasında,
- Yangın ve dondan zarar gören elemanların tamirinde,
- Prefabrik blokların ve derzlerin doldurulmasında,
- Prefabrik blokların ve derzlerin doldurulmasında.

Püskürtme betonda aranan özellikler ise şu şekilde sıralanabilir:

- Püskürtmede sıçrama minimum olmalı,
- Beton 4-8 saatte mukavemet kazanmalı,
- Priz çabuklaştırıcının kullanılmasına karşın 28 günlük direncine ulaşabilmeli.



Şekil 2.8: Püskürtme Beton “Shotcrete” İmalatı (İnvert)

Püskürtme betonun kullanımının birçok olumlu yönü vardır. Kazıdan sonra hemen uygulanabilir olması, zeminin yüzeysel kırık ve çatlaklarına girip mukavemeti arttırması, adezyon ve kesme ile zeminin yükünü civar kayaç kütlelerine aktararak, zeminin kendi kendine taşıması, kazı yüzeyinin hava ve su ile temasını keserek kabarmasını önlemesi, bunlardan en önemlileridir.



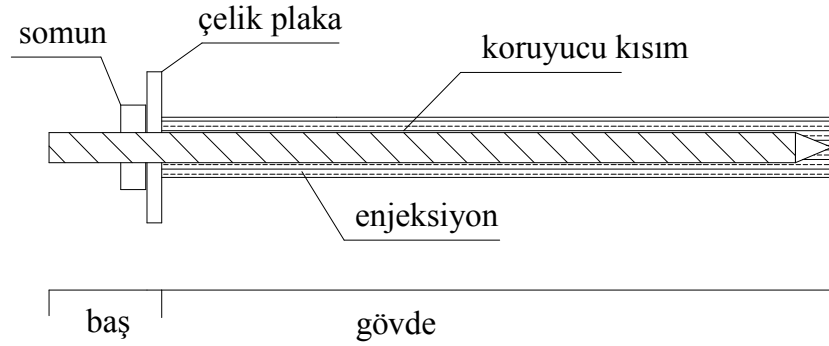
Şekil 2.9: Püskürtme Beton “Shotcrete” İmalatı-Kemer

2.5.3 Bulonlama

Kaya bulonları, kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak veya kayada üç eksenli gerilme durumu oluşturmak için yer kabuğu içine bağlanan çubuklardır (Şekercioğlu, 1993)

Bulonlar başlıca üç kısımdan oluşur (Şekil 2.10)

- a) Bulon başı
- b) Bulon gövdesi
- c) Koruyucu kısım



Şekil 2.10: Kaya Bulonu

Başlangıçta ilkel gerilmelerin etkisinde bulunan zemin, tünel açıldıktan sonra gerilme ve deformasyonların boşalması ile karşı karşıya kalır. Bu gerilmeler kayaları basınç gerilmesi yerine çekme gerilmesine zorlar. Çekme gerilmeleri zeminin dokusunu bozmakta, kayma dirençlerini azaltmaktadır.

Bu itkilere karşı bulonlama yapılır ve şu görevleri görür;

- Kayayı çekme gerilmelerini alabilecek şekilde sağlamlaştırmak,
- Bu gerilmeleri bütün kitleye iletmek,
- Süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak,
- Üç eksenli gerilme durumunu oluşturmak ve denetlemek.

Bulonlar kayaya bağlanma şekillerine göre üçe ayrılır;

- a) Kaya bulonları,
- b) Kendi delen enjeksiyonlu bulonlar,
- c) *Swellex* tipi bulonlar.

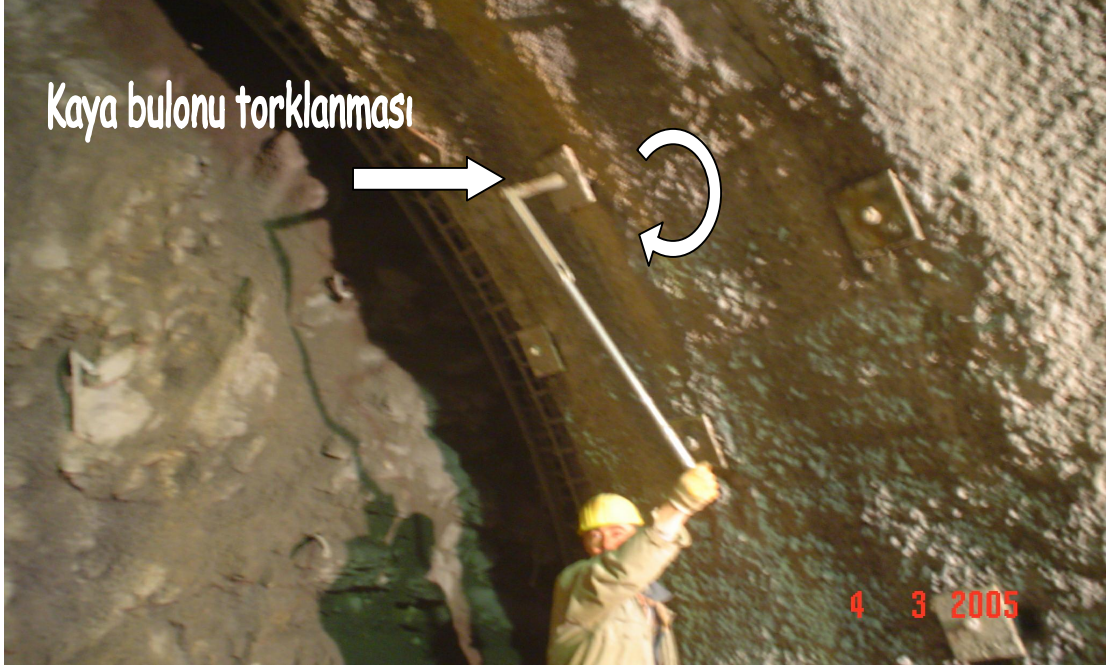
Kaya bulonları, dişli donatı çeliğinden yapılırlar. Bulonun zemine girecek ucu sivri, diğer ucu başlık levhasının ve rondelanın takılmasına uygun olarak dişli şeklinde tasarlanmıştır. Bulon delikleri, tünel yüzeyine dik olarak jumbo veya roklarla delinir. Delikler çamurdan iyice temizlenir. Bir kısım ince kum, çimento ve çimentonun yaklaşık %40'ı kadar su ile karıştırılarak elde edilen enjeksiyon şerbeti dipten dışarıya doğru doldurulur (Şekil 2.11). Hemen ardından kaya bulonu deliğe çakılır. Beton prizini aldıktan sonra elektrikli tork anahtarı veya hidrolik kriko ile gerdirilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.11: Kaya Bulonu Montajı ve Enjeksiyonu

Kendi delen enjeksiyon bulonları, bütün uzunlukları boyunca delme çubuğu bulunan çelik borulardan yapılan, ucu matkaplı bulonlardır. Zayıf kayada, kohezyonsuz zeminlerde bu tip bulonlar kullanılır. Bulonun delme işlemi tamamlanır ve tüpün içinden verilen basınçlı enjeksiyon uç kısımlardaki deliklerden fişkırtılarak bulon ile

zemin arası enjeksiyon malzemesi ile doldurulur. 5 saat sonra torklanarak bulonun yük alması sağlanır.



Şekil 2.12: Enjeksiyonlu Kaya Bulonu ve Torklanması

Swelllex tipi bulonlar, çelik tüpten yapılırlar. Bulonun her iki ucu da flanşla kapalı olup flanşlardan biri üzerinde delik bulunmaktadır. Delgi makinesi tarafından önceden açılmış 45 mm. çapındaki foraj içine, delik olan flanş dışarıda kalacak biçimde yerleştirilir. Bulon başına plaka takıldıktan sonra, 300 bar basınçlı hava ve su karışımı üreten bir pompa aracılığıyla delik içinde şişirilir. Kaya yüzeyi ile oluşturduğu aderans gücüyle çalışan bir bulon olduğundan, killi, siltli gibi plastik özellik gösteren yumuşak ortamlarda kullanılmaz. Sadece bloklu-çatlaklı yapıya sahip rijit kaya ortamlarında kullanılır.

2.6 Tünel İnşaatı Yöntemleri

İnşaat teknolojilerindeki gelişmelere paralel, ihtiyaçlara ve diğer koşullara bağlı olarak, tünel açma yöntemleri ve bunlara ilişkin ölçme teknikleri de gelişmektedir. Günümüzde tünel açma yöntemleri, kullanılan inşaat prensipleri açısından dört grup halinde incelenebilir. Bu gruplar;

- Aç-kapa yöntemle inşa edilen tüneller,
- Klasik yöntemle inşa edilen tüneller (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi),
- TBM Tünel delme makinesi ile inşa edilen tüneller.

Bu çalışmada anlatılan İstanbul Metrosu Koska Tünelleri yapımında, yapılan araştırma ve analizler sonucu Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) kullanılmıştır.

2.6.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu

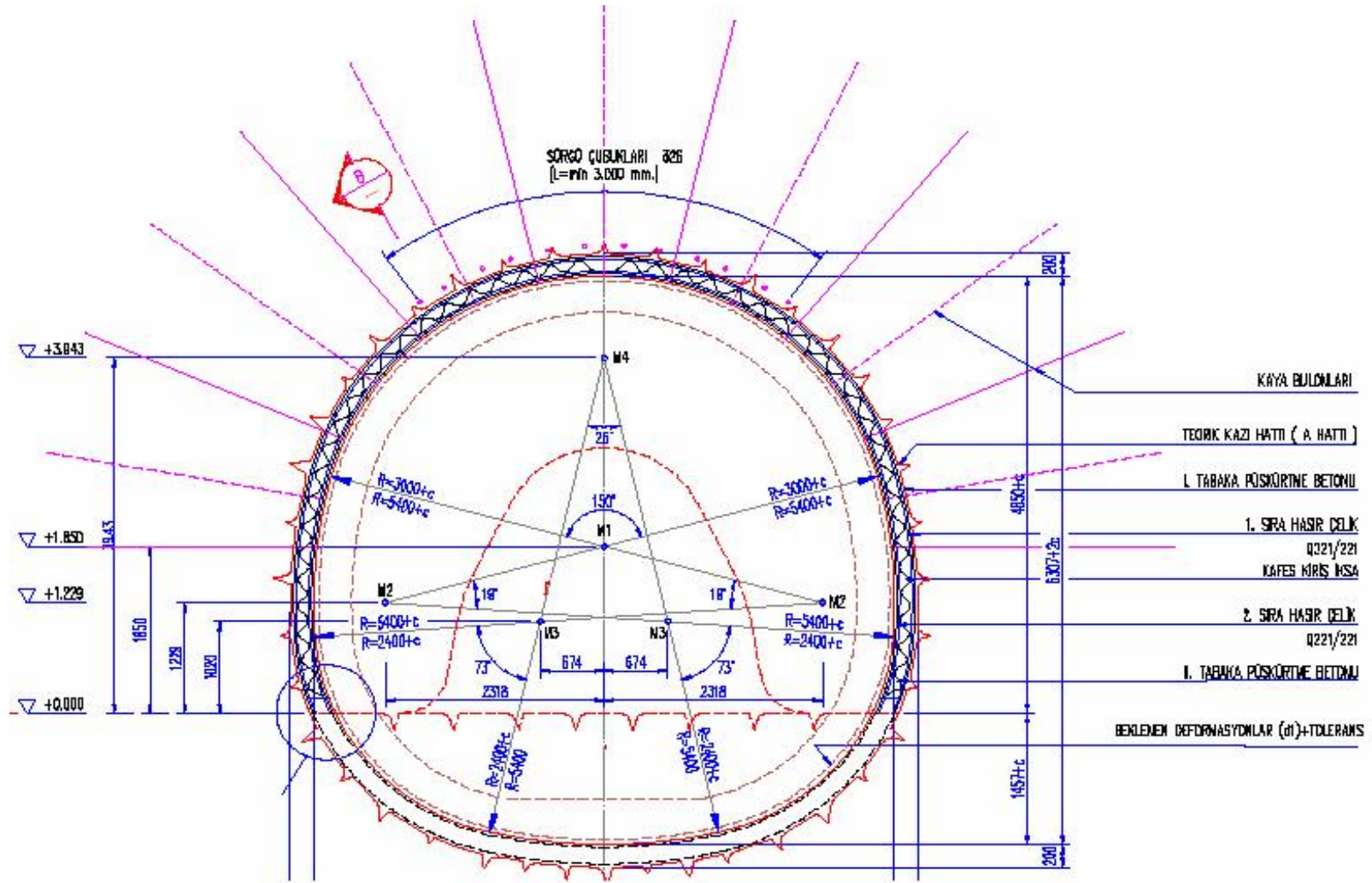
Tünel açmada, yerinde elde edilen tecrübeler sonucu ortaya çıkmış bir yöntemdir. Klasik yöntemle tünel açma tekniklerinin en deneysel ve esnek olanı, en optimum destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır (Şekil 2.13). Genel ilkesi, zeminin mukavemetini korumak, harekete geçirmek, tünel çevresindeki zeminde kendini destekleyen genişçe bir halka oluşturmaktır. Başka bir deyişle, zemini kendisine taşıtmak ve yeraltı kazılarının davranışını izleyen bir yaklaşım oluşturmaktır.

Açım sonucu oluşan deformasyonların asgaride tutulması ve ilk kaplamanın kısa zamanda yapılması gerekir. İksa, taşıma yeteneğini tamamen kaybetmiş zemini taşımaz, ancak zemini kütle ve basınç etkisine dayanacak duruma getirir. Taşıyıcı halkayı oluştururken deformasyona yol açmayacak şekilde oluşturmak ve deformasyonları sürekli gözlemlemek gerekir.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin temel ilkeleri aşağıda sıralanmıştır;

- i. Kaya kütlelerinin dayanımının harekete geçirilmesi - Metodun güvencesi tünele dayanak olan ana unsur niteliğindeki çevre zemin kütlelerinin içinde var olan dayanımdır. Ana iksa mekanizması, zeminin kendi kendisini taşıyacak şekilde yönlendirilmektedir. Sonuç olarak, iksanın uygun yük-deformasyon özelliklerine sahip olması ve doğru zamanda yerine konması gerekmektedir.
- ii. *Shotcrete* koruması - Kaya kütlelerinin yük taşıma kapasitesinin korunabilmesi için, gevşemesinin ve aşırı kaya deformasyonlarının minimuma indirilmesi gerekmektedir. Bu, zemin yüzeyi açığa çıkar çıkmaz ince bir *shotcrete* tabakası uygulanması, bazen de bunun yanı sıra bir bulonlama sistemi kullanılması ile gerçekleştirilir.

- iii. Ölçümler - NATM, kazıdaki deformasyonların ve takviyede oluşan yükün ölçülmesi için, ilk *shotcrete* tabakası uygulandığı sırada gelişmiş ölçme aygıtlarının da monte edilmesini gerektirmektedir. Böylece stabilite hakkında bilgi elde edilmiş olur ve zeminin yükünü taşıyacak çember iksanın en uygun şekilde oluşturulması mümkün olur.
- iv. Esnek iksa - Rijit yerine esnek iksa yoluna giden çok yönlü pratik bir uygulama olarak tanımlanmaktadır. Böylelikle pasif yerine aktif bir iksa savunulmakta ve dayanım, kalın bir beton kaplama ile değil, kaya bulonları, çelik hasır ve çelik iksaların değişken bir kombinasyonu sayesinde arttırılmaktadır. Ana iksa, kısmen veya tamamen gerekli olan tüm iksayı temsil eder ve ikincil iksanın boyutlarının seçimi yapılan ölçümlerin sonuçlarına dayanır.
- v. Altyapının kapanması - Tünel, zemin kütlelerinin yükünü taşıyan bir çember oluşturacak şekilde kapanmalıdır. Bu, özellikle yumuşak zeminde tünel kazılırken çok önemlidir ve altyapının derhal kapanması ve kazılmış olan zemin yüzeyinin hiçbir yerinin geçici de olsa iksasız bırakılmaması gerekir. Ancak kayada açılan tünellerde iksanın çok erken konmaması gerekir. Çünkü o zaman kaya kütlelerinin yük taşıma kapasitesi henüz tam olarak harekete geçirilmiş olmaz. Kayada, iksanın tam olarak etkinlik kazanmasından önce kayanın yeteri kadar şekil değiştirmesine müsaade edilmelidir.



Şekil 2.13: NATM ile Açılan Tünel Kesiti (İstanbul Metrosu, Taksim-Yenikapı Tünelleri)

Bu çalışmalar sırasında;

- i. Davranışı önceden bilinen ve tahmin edilen kayanın “ideal yenilme koşulu” (mohr zarfı)
 - a) Yer altı suyunun drenajı,
 - b) Aşırı örselenmeyi engelleme,
 - c) Gevşemeleri ve sökülmeleri önleme,
 - d) Zamanı yeterince kısa tutma gibi önlemlerle korunmalıdır.
- ii. Kazı sonrasında oluşan “ikincil gerilme durumu”
 - a) Gerilme yoğunlaşmalarını engelleyecek,
 - b) Tek eksenli gerilme ortamını yaratmayacak püskürtme beton ve ankraj,
 - c) Kaya yapısında çekme gerilmeleri oluşmayacak şekilde uygun kesit şekli denetlenmelidir.
- iii. “ikincil deformasyonlar”
 - a) Gevşemelere izin vermeyecek kadar küçük,
 - b) Tünel cidarını plastikleştiricek ve gerilme kemerini kaya ortamının içerisine kaydıracak kadar büyük,
 - c) Zamanla sönmünecek kadar kontrollü tutulmalıdır.

2.6.1.1 Yeni Avusturya Yönteminin Uygulanmasında Başlıca Görüşler

Yeni Avusturya yönteminin uygulanması sırasında iki farklı görüşten yararlanmak mümkündür;

- i. Yüzey oturmalarını ve tünel içi deformasyonlarını olabildiğince küçük tutabilmek için “deformasyon önleyici” açım,
- ii. Deformasyonlara olanak tanıyarak zemin içinde koruyucu zon oluşumunu sağlayan “plastikleştirici” açım türleridir.

Birinci görüş, kazı ve sağlamlaştırma işlemlerinin hızlı yürütülmesinin ve en kısa zamanda aynanın hemen gerisinde radyenin kapanmasını sağlayacak şekilde iyi organize edilmiş çalışmaları gerektirir. Düşük dayanımlı zeminlerde, örtü kalınlığının 3-4 m'den az olduğu yerlerde, yerleşim bölgelerinin altından geçen tünellerde, metrolarda, kaplama arkasından su akım olasılığının bulunduğu tünellerde uygulanır. Açım sırasında genellikle üst yarı(kalot), orta kesim(üst stros) ve taban(alt stros) olmak üzere üç kademeli kazı yapılır.

İkinci görüş, deformasyonları durdurmak yerine denetleyerek ikincil gerilmelerin şiddetini azaltmayı ve tüneli çevreleyen kesime psödoplastik özellikler kazandırarak, gerilme yoğunlaşmalarını zeminin içine doğru kaydırmayı amaçlamaktadır. Böylece sağlamlaştırma giderlerinde önemli ölçüde azalma sağlanabilmektedir. Bu anlayışla açılan tünellerin üzerinde ve yüzeyinde önemli fakat zararsız çökmeler ve tünel çapında büyük ölçüde azalmalar gözlemlense de, aşırı gevşemelere izin verilmediği için tünelde, açım yönteminin ilkelerine ters düşecek oranda bozulma olmaz. Örtü kalınlığının fazla, yüzey oturmalarının önemsiz olduğu boş arazilerden geçen ve su sirkülasyonunun bulunmadığı yerlerdeki, özellikle demiryolu, karayolu ulaşım tünellerinde kullanılmaktadır.

Kuşkusuz, en doğru olan tünel anlayışı, yerine göre ilk veya ikinci görüşü ağırlıklı olarak kullanabilen anlayıştır. Buna karar verebilmek için deformasyonların ve gerilme değişimlerinin ölçülmesi ve denetlenmesi gerekmektedir. Yeni Avusturya yöntemi süreklilik gerektiren ölçüm ve gözlemleriyle bu anlayışı benimsemektedir.

2.7 Geoteknik Ölçümler

Seçilen metro güzergahı boyunca yapılması gereken geoteknik ve mühendislik jeolojisi amaçlı çalışmalar:

- Temel bakımından kritik bölgelerin, varsa yapıların saptanması,
- Yapıların ilk durumunun belirlenmesi,
- İzin verilen maksimum deformasyon oranlarının belirlenmesi,
- Ölçülecek büyüklüklerin yerinin ve ölçme sürelerinin tanımlanması,
- Ölçüm noktalarının belirlenmesi,
- Ölçüm yöntem ve aletlerinin seçimi,

- Ölçüm ekibinin oluşturulması,
- Ölçüm aletlerinin yerleştirilmesi,
- Ölçümlerin yapılması, değerlendirilmesi ve yorumu şeklinde sıralanabilir.

2.7.1 Konverjans Ölçümleri

Konverjans ölçümü, meydana gelen tünel içi deformasyonların miktarının “mm” cinsinde göreceli olarak ölçmek ve yapının kontrolü ile gözleminde kullanmak amacı ile yapılır.

Konverjans ölçüm cihazı, bir gösterge, ölçüm bandı ile standart bir kalibrasyon ve kalibrasyon rayından meydana gelir. Konverjans ölçüm ünitesi sabit noktalar arasındaki uzunluk değişimlerinin tayin edilmesine yarar. Bu sabit noktalar arasındaki mesafe 1,5m'den 30m'ye kadar değişmektedir. Ölçüm hassaslığı ise ölçme mesafesinin 1×10^{-3} 'üne eşit olacaktır. Ölçüm cihazı, tünelin duvar, tavan ya da omuzlarına kazıdan hemen sonra yerleştirilen konverjans bulonlarının ikisi arasında şerit metrenin gerilmesi yoluyla sabitlenir. Cihazın üzerindeki göstergeden iki referans noktası arasındaki mesafe okunur (Şekil 2.14). Konverjans bulonları yerleştirildikten hemen sonra yapılan ilk ölçüm ile daha sonra düzenli olarak yapılan ölçümlerin karşılaştırılması sonucu iki konverjans bulonu arasındaki göreceli hareket miktarı belirlenir. Tünelde meydana gelen konverjans veya diverjansa göre gerekli önlemler alınır.



Şekil 2.14: Tünel İçi Deformasyon (Konverjans) Ölçümleri

Konverjans ölçümlerinin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Uygulanması basit, güvenilir ve kolay olması,
- Tek uçtan okuma yapıldığı için kullanımda tek kişinin yeterli olması,
- Yüksek okuma duyarlılığı,
- Portatif, hafif ve kolay taşınabilir olması,
- Kısa sürede ölçüm alma imkanı sağlaması,

Konverjans ölçümlerinin dezavantajları ise şunlardır;

- Sadece göreceli ölçüm değeri verir,
- Ölçümlerin doğruluğu sıcaklık değişiminden etkilenir.

2.7.2 Ekstansometreler

Ekstansometreler, yüzey veya yer altı kazılarında, temel yükü, şev hareketleri veya arazi deneyleri sonucunda oluşabilecek zemin hareketlerini ölçmek için kullanılır.

Bir ekstansometre bir sondaj deliğinin farklı derinliklerinde yer alan, bir veya birden çok ankrajla, bir başlıktan meydana gelir. Ekstansometrelerin çoğu başlıkla ankrajlar arasında gerilen çubuk veya kablolardan oluşur. Mekanik veya elektronik yollarla zemindeki negatif deplasmanlar, çubuk veya kablolarla iletildiği şekilde, ankraj veya sonda deliği içindeki röperle başlık arasındaki mesafe değişimi şeklinde ölçülür.

2.7.3 Glötl Hidrolik Gerilme Hücresi

Hidrolik gerilme hücresi, tünellerde püskürtme beton içindeki gerilme dağılımı ölçümlerine ait, zemin ile püskürtme beton arasında radyal olarak etkiyen basınçların tespit edilmesine ve püskürtme beton kaplama içindeki teğetsel gerilmelerin ölçülmesine yarar.

Bilinmeyen ve hücre üzerine etkiyen σ (kg/cm²) gerilmesi, sisteme bağlı olan bir basınç tüpü ile bir hidrolik veya pnömatik basınç vasıtasıyla ölçüm sırasında tam olarak dengelenebilir.

Bu ölçüm sırasında, çok az veya sabit hacimli bir yağ hücre içine pompalanır. Böylece hücrede ve basınç tüpünde p (kg/cm²) basıncı teşkil edilir. Bu basınç sadece

bilinmeyen basınca eşit olana kadar artabilecektir. Bundan sonra tahliye supabı açılacak ve p basıncında artış olmayacaktır.

Böylece bilinmeyen basınç, göstergedeki basınç olacaktır. $\sigma = p$

2.7.4 Diskli Yük Hücreleri

Diskli yük hücrelerinin kullanım amacı, öngermeli ankrajların işlevlerini kontrol etmek ve gerçek ankraj çekme kuvvetlerini ölçmektedir. Yük hücreleriyle, incelenecek iksa sisteminin 10 adedinde yaklaşık 1 adet ankrajda ölçüm yapılır. Yük hücreleri mekanik, fotoelastik, hidrolik tiplerde olup çeşitli hassasiyet ve özelliklerdedir. Hücreler lineer olarak kalibre edilmeli, yük transferi ve ölçüm için dairesel bir desteğe sahip olmalıdır. Ayrıca, patlama etkisine, suya ve toza karşı dayanıklı olmalıdır.

2.7.5 İnklinometreler

İnklinometreler yardımıyla, tünel kazısı içindeki yatay deplasmanlar ölçülür. Bu deplasmanlar, sadece sondaj aksına dik doğrultudaki hareketlerdir (Şekil 2.15)

İnklinometreler, sondaj aksı boyunca oluşacak deplasmanlara ait profili detaylı bir şekilde verirler. Belli bir zaman içinde yapılan okumalar, hareketin büyüklüğü, yönü ve miktarı hakkında bilgi verir.

Sonda tipi inklinometreler, sürekli veya uzaktan okuma yapmaya imkan vermezler. Bu tip okuma alınması gerekiyorsa, yerine sabitlenen bir inklinometre kullanılabilir.



Şekil 2.15: İnklinometre Yerleştirilmesi

2.7.6 Gerilme Ölçerler

Gerilme ölçerler tünel kaplamalarındaki beton deformasyonunun değerlendirilmesi amacı ile kullanılırlar.

Gömme tip gerilme ölçerler, cihazın iki ucundaki flanşları arasına gerilmiş olan, yüksek gerilme mukavemetine sahip tel ile paslanmaz koruyucu bir çelik tüpten meydana gelmektedir. Gerilme ölçer beton içine gömüldüğünde, beton içinde etkiyen kuvvetler cihazın flanşları arasında rölatif hareketler oluşturur, bunun sonucunda da telde bir gerilme değişimi oluşur. Betondaki bu gerilmelerin oluşturduğu deformasyonlar, telin doğal titreşim frekansını değiştirir. Oluşan sinyal, fleksibl bir tel vasıtasıyla ölçme cihazına gönderilir. Eğer bu gerilme ölçerler, beton dökümü esnasında dikkatli bir şekilde yerleştirilirse, tek bir uzaktan okuma ünitesiyle yapının deformasyon davranışı hakkında komple bilgi elde etmek mümkün olur.

3. İSTANBUL METROSU 2.AŞAMA TÜNELLERİ

İstanbul metro sistemi Topkapı'dan başlayarak Yenikapı'ya ulaşan oradan da Taksim üzerinden 4.Levent'e varan, ayrı bir hat ile de Yenikapı istasyonundan tüp geçişle boğazı geçen bir güzergaha sahiptir. 13 istasyondan oluşan, hattın yeraltı ve yerüstünde seyrettiği kuzey-güney-batı koridorunda hizmet verecek yüksek kapasiteli raylı bir sistemdir. İstanbul metrosu 2. aşama bu sistemin Yenikapı-Taksim tarafını kapsamaktadır

3.1 Projenin Karakteristik Özellikleri

Yenikapı'dan doğuya doğru ilerleyen hat, yaklaşık 400m sonra kuzeye yönelmekte, Koca Ragıppaşa ve Büyük Reşitpaşa Caddelerine paralel olarak ilerleyerek Şehzadebaşı İstasyonuna, yaklaşık 800m sonra da tünelle Unkapanı İstasyonuna ulaşmaktadır. Haliç köprü ile geçildikten sonra tekrar yeraltına giren hat Şişhane İstasyonu ve Taksim tünellerine ulaşmaktadır. Ayrıca LRTS (Hafif Raylı Sistem) Aksaray'dan Yenikapı istasyonuna oradan da metroya bağlanacaktır.

- Toplam güzergah uzunluğu: 5203m (tek hat)
- Delme tünel uzunlukları: 3385m ikiz, 271m tek tünel, 360m peron, 350m bağlantı tüneli
- Aç-kapa tünel uzunluğu: 115m
- Haliç geçiş köprüsü: 712m
- İstasyonlar: 3 adet yeraltı istasyonu (Şişhane, Şehzadebaşı, Yenikapı)

1adet köprüde istasyon (Unkapanı istasyonu)

- Toplam tünel uzunluğu: 9500m
- Ortalama tünel derinliği: 30m

- Seyahat süresi: 8 dakika
- Maksimum hız: 80 km/saat

3.2 Bölgesel Jeoloji

İstanbul Metrosu 2.Aşama alanı alt karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu, üst miyosen yaşlı Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy Formasyonu ile holosen yaşlı Kuşdili Formasyonu ve Yapay Dolgu'dan oluşmaktadır.

İstanbul paleozoyik temellerinin en üst seviyesinin oluşturan Trakya Formasyonu çalışma alanının kuzey doğrultusunda Haliç kıyılarına paralel uzanmakta olup kıvrımlı grovak ve şeyl aralanmasından oluşmaktadır.

Trakya Formasyonu'nun üzerinde diskordansla gelen üst miyosen birimleri alttan çakıl ve kımardan oluşan Çukurçekme Formasyonu ile başlar ve çalışma alanının kuzeybatısında gözlenir. Bu formasyonun üzerinde uyumlu olarak gelen Güngören Formasyonu, kil ve marnlardan oluşur ve bölgelerde geniş bir alanda gözlenmektedir. Üst miyosen birimlerinin en üst seviyesini oluşturan Bakırköy Formasyonu, Güngören Formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmektedir. Macktralı kireç taşından oluşan formasyon alanın doğusunda gözlenmektedir.

Bakırköy Formasyonu üzerine diskordansla gelen holosen yaşlı Kuşdili Formasyonu, tutturulmamış çakıl, kum ve kilden oluşmaktadır. İnceleme alanında eski bir dere yatağı üzerinde küçük bir alanda gözlenmektedir.

Güncel oluşumlar olan Yapay Dolgu birimleri moloz ve kaya parçalarından oluşur ve Haliç ve Marmara kıyıları boyunca gözlenir.

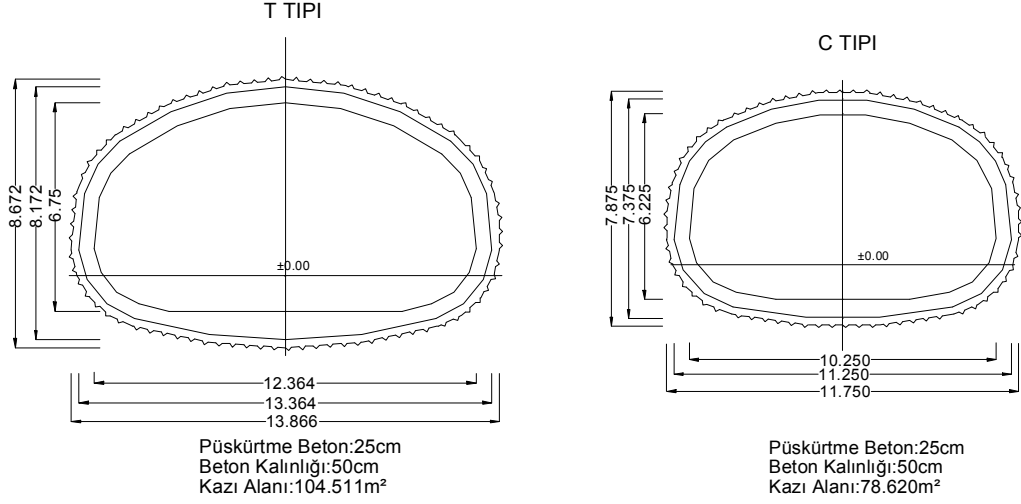
3.3 İstanbul Metrosu 2. Aşama Tünelleri

İstanbul Metrosu tünelleri gidiş-dönüş olarak iki ayrı hatta açılmaktadır. Metro, yerüstü yapıları ve tüneller olmak üzere ikiye bölünebilir. Yerüstü yapıları; giriş ağzları, havalandırma bacaları ve metro işletme yapılarıdır.

Taksim-Yenikapı arası metro inşaatında kullanılan tünel tipleri:

T Tipi, A Tipi, C Tipi, P Tipi, B1, B2, B3 Tipi tüneller ve LRTS (Hafif Raylı Sistem) için M Tipi ve L Tipi tünellerdir

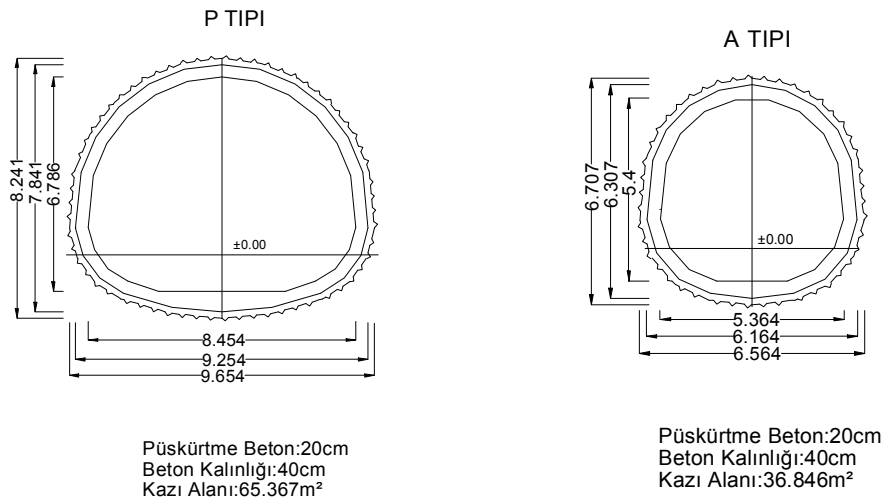
T tipi tüneller: Makas tünelleri, genelde istasyon öncesi ve sonrası hatların geçişinde
 C tipi tüneller: Birleştirilmiş hatlarda, bir tünel içinde iki hattın yan yana gittiği yerlerde
 (Şekil 3.1)



Şekil 3.1: T Tipi ve C Tipi Tünellerin Kesitleri (Anadolu Metro Ortaklığı Arşivi)

P Tipi tüneller: Peron tünelleri

A Tipi tüneller: Hat tünelleri (Şekil 3.2)

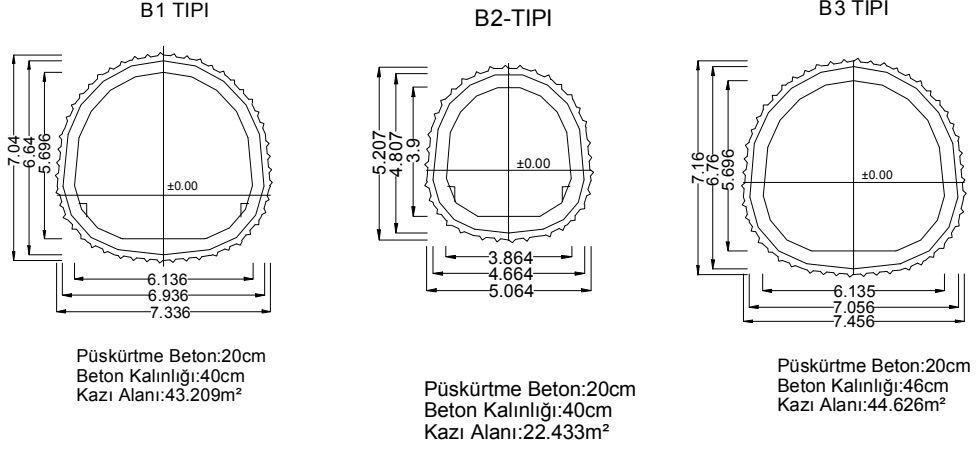


Şekil 3.2: P Tipi ve A Tipi Tünellerin Kesitleri

B1 Tipi tünel: Peronlar arası bağlantı tüneli

B2 Tipi tünel: Hatlar arası bağlantı tüneli

B3 Tipi tünel: Merdiven tünelleri (Şekil 3.3)



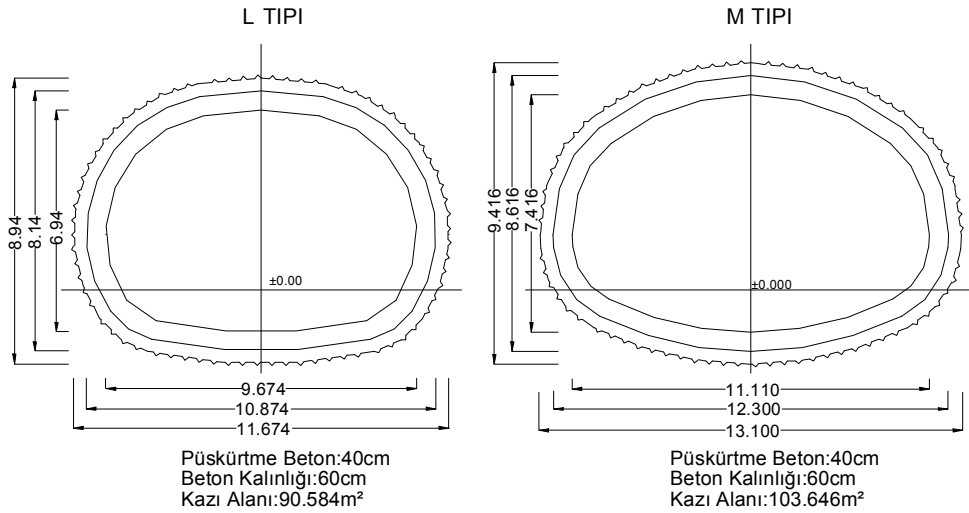
Şekil 3.3: B1, B2, B3 Tipi Tünel Kesitleri

LRTS Tünelleri:

M Tipi Tünel: Birleştirilmiş hat, metrodaki C Tipi tünelin karşılığıdır.

L Tipi Tünel: Metrodaki T Tipi tünelin karşılığı gibidir ancak makas olarak değil, iki hattın ayrıldığı yerlerde kullanılmıştır.

B1 Tipi Tünel: LRTS'deki hat tünelleridir. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4: L Tipi ve M Tipi Tünel Kesitleri

3.4 İstanbul Metrosu Tünellerinde Kullanılan Tahkimat Tipleri ve Elemanları

Tünellerde kazı, tarama pasa alımı sonrası ilk olarak kafes kiriş sistemindeki çelik iksa montajı yapılır. Üç adet T24 ve T20'lik nervürlü çelik ile bunları bağlayan bağlantı elemanlarından oluşan iksa, çelik hasır, kaya bulonu, şemsiye sürenleri(umbrella arch) ve püskürtme beton geçici desteklemenin ana elemanlarıdır. İstanbul metrosu tünellerinde 4 tip kazı destek sistemi kullanılmaktadır.(Tablo 3.1)

Tablo 3.1: İstanbul Metrosu Kazı Destek Tipleri ve Tahkimat Elemanları

TAHKİMAT TİPİ	ORTAM	ÇELİK İKSA	ÇELİK HASIR	SHOTCRETE	KAYA BULONU	ŞEMSIYE BORULARI
A1 TİPİ	Sağlam Kaya	x	Tek Kat	10 - 15cm	4-5 şaşırtmalı	x
A2 TİPİ	Orta-sağlam Kaya	var	Tek Kat	20cm	6-7 şaşırtmalı	12 (max)
A3 TİPİ	Zayıf Kaya	var	Çift Kat	20cm	7-8 şaşırtmalı	20 (max)
A4 TİPİ	Çok zayıf kaya + kil	var	Çift Kat	30 - 40cm	7-8 şaşırtmalı	40 (max)

4. İSTANBUL METROSU 2.AŞAMA KOSKA TÜNELLERİ

Koska tünelleri, İstanbul Metro su 2. Aşama, Yenikapı-Unkapanı arasında bulunmaktadır. 2 ana hat, 2 makas tünelleri olmak üzere 4 hatt an oluşmuştur. Bunlar KH1Y-3, KH1Y-4, KH2Y-3, KH2Y-4 olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.1).

4.1 İnceleme Alanının Tanıtılması

4.1.1 Konum

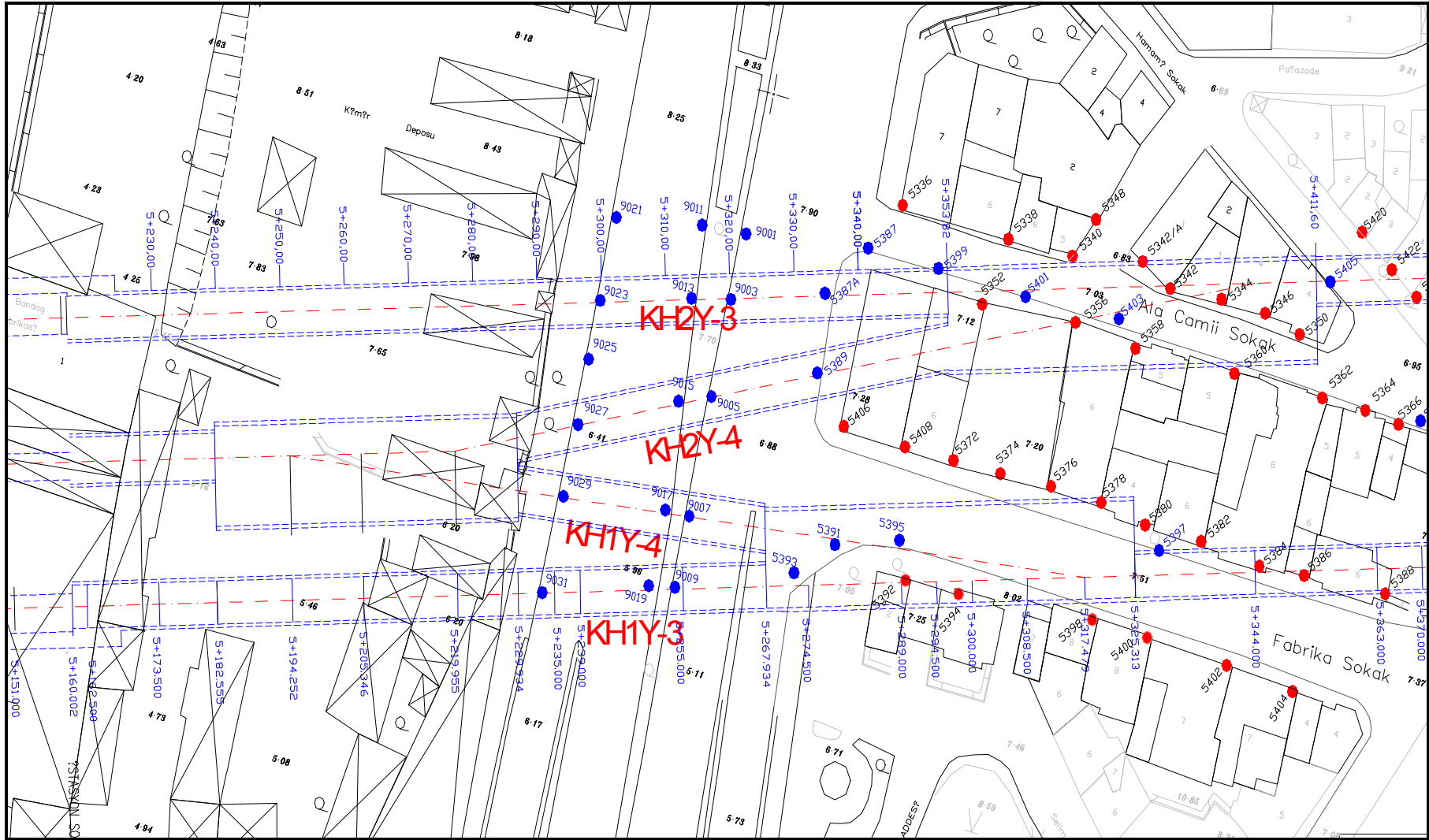
Yenikapı-Unkapanı tünel güzergahı, İstanbul'un Avrupa yakası güney kesiminde Eminönü ilçesi sınırları içerisinde olup, kuzeyde Haliç Körfezi, doğuda İstanbul Boğazı, batıda Fatih ilçesi, güneyde Marmara Denizi ile sınırlıdır. İnceleme alanı olan Koska Tünelleri ise bu güzergahın Yenikapı tarafında bulunmaktadır (Şekil 4.2).

4.1.2 Morfoloji

Yenikapı istasyonu deniz seviyesinden birkaç metre yükseklikte geniş bir alanda yer almaktadır. Çalışma konusu olan Koska Tünelleri ise 5-8 m yüksekliktedir ve etrafında yerleşim yerleri bulunmaktadır.

4.1.3 İklim

İstanbul ili Marmara Bölgesi'nde bulunması itibariyle, Akdeniz, Karadeniz ve kara iklimlerinin tesiri altında bulunmaktadır. İklim özelliği olarak, yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlıdır. Yağış en fazla sonbahar ve kış aylarında düşmekle beraber, yıllık ortalama 780mm civarındadır. Ortalama sıcaklık ise 13.8° C dir (www.istanbul.meteor.gov.tr).



Şekil 4.1: Koska Tünelleri Plan



Şekil 4.2: İstanbul Metrosu Güzergahı

4.2 İnceleme Yöntemi

4.2.1 Arazi Çalışmaları

Tünel kazıları gözlemlenerek çıkarılmış olan kazı ve ayna raporları, sondajlar ve arazi deneyleri sonuçları ve daha önceki çalışmalar kullanılarak tünellerin geçtiği zeminin parametreleri belirlenmiştir.

4.2.2 Büro Çalışmaları

Koska tünellerinde yapılan deformasyon ölçümleri, kazı ve ayna raporları, zemin parametreleri göz önünde bulundurularak yorumlanmış, kullanılan tahkimat elemanlarının deformasyonla değişimi karşılaştırılarak uygulanan yöntemlerin uygunluğu ve doğruluğu incelenmiştir.

4.3 Koska Tünellerinde Uygulanan Tahkimat Tipi ve Elemanları

Koska tünellerinde Tablo 3.1’de verilen tahkimat tiperinden A4 tahkimat tipi uygulanmıştır.

Kazının ardından aynaya ve ince olarak tünel duvarına püskürtme beton uygulaması yapılır. Kazı sonrası tünel içinde çelik hasır montajına geçilir. Q335/335 tipi çelik hasır kullanılır ve bindirme oranları kazı yapıldığı yönde 20cm, dairesel yönde ise 50cm olacak şekilde montajlanır. Montajda dikkat edilecek en önemli husus donatının kaya yüzeyine mümkün olduğu kadar yaklaştırılmasıdır.

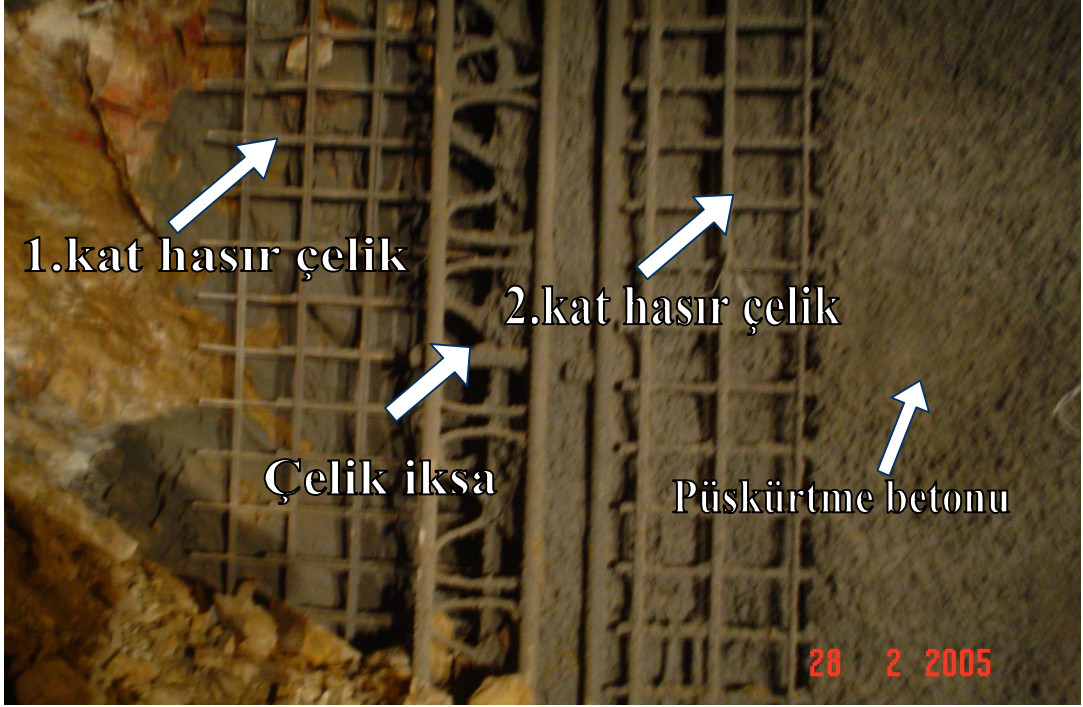
Hasır çelik imalatının ardından tünel içinde hazır imal edilmiş olan genelde 4 parça, 3 kademeli kazılarda 6 parça olarak gelen kafes iksa yerleştirilir. İksa montajında, iksa ayaklarının her iki tarafta da sağlam zemine basması sağlanır. Her iksa yönteminde mutlaka topografik ölçüm yapılması gerekir. Montajı ve topografik teslimatı tamamlanan iksa önceki iksaya 122,5cm nervürlü çelik bulonlar yardımıyla tutturulur. İşban adı verilen bu elemanların boyu iksa aralığından 22,5cm fazla bırakılır ve 15cm bindirme yapması sağlanır.

İksa montajının ardından 1. kat püskürtme beton imalatı gerçekleştirilir. İstanbul metrosu çalışmalarında “shotcrete” kuru karışım olarak uygulanmaktadır. Püskürtme beton uygulamalarında dikkat edilecek hususlar:

- Shotcrete uygulanacak yüzey serbest malzemelerden temizlenir ve yüzeyde su geliri varsa uygun yöntemlerle drenajı yapılır.
- Çelik hasırın yüzeye sabitlenmesi sağlanır ve shotcrete esnasında sünme yapması engellenir.
- Malzeme karışımının mutlaka homojen olması gerekir.
- Hava basıncı ile su-karışım oranı iyi ayarlanmalıdır.

Bu işlemler diğer adım içinde aynen tekrarlandıktan sonra bir önceki iskanın 2.kat hasır çeliği ve 2. kat püskürtme betonu yapılır (Şekil 4.3). Son olarak enjeksiyonlu kaya bulonu delgisi ve montajı tamamlanır. Metro tünellerinde en yaygın olarak kullanılan bulon kaya bulonudur. Bir delici makine tarafından açılan deliğe enjeksiyon malzemesi doldurulduktan sonra, bulon elle veya makine yardımı ile

itilerek yerleştirilir. 4m boyunda ve 26'lık nervürlü çelikten özel olarak imal edilmektedir



Şekil 4.3: Tahkimat Elemanları Uygulaması (Anadolu Metro Ortaklığı Arşivi)

Bu işlemlerin yanı sıra tünel aynasında stabiliteyi sağlamak açısından ayna içerisinde sürtünme kolonu oluşturmak amacı ile ayna zemin çivileri yerleştirilir. Ayna zemin çivilerinin çapları 14mm olup boyları 12m'dir. 125mm çapında açılan delikler içine sürülerek enjeksiyon yapılır.

Süren uygulaması: Kazı sonrası aşırı sökülme meyilli zemin ortamlarında, özellikle suyla etkileşimli bölgelerde, kazıya girmeden önce süren uygulaması yapılır. Çelik iksa üzerinden yatayla 5-10 derece açı yapacak şekilde çakılırlar ve adetleri kazı destek türüne göre değişir.

4.3.1 Boru Şemsiye (Umbrella Arch) Yöntemi ve Uygulaması

Klasik NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu)'nun kohezyonu düşük zeminlerde uygulanamaması, deformasyonların yüksek olması ve verim elde edilememesi üzerine ilk defa İtalya'da "Umbrella Arch" metodu uygulanmaya başlanmıştır.

Bu yöntem, tünel ve yüzey emniyetini arttırmış, verimlilik ve ilerleme hızının üst düzeye çıkmasını sağlamıştır. Kullanıldığı projelerde yeterliliğini kanıtlayan yöntem daha sonra Japonya’da da birçok tünel projesinde kullanılmıştır.

Ülkemizde ilk olarak, NATM ile yapılan kazılarda, tünel içi ve yüzey deformasyonlarının kabul edilebilir sınır üzerine çıkması sonucu İstanbul Metrosu tünellerinde uygulanmaya başlamıştır.

Umbrella Arch yönteminde; borunun tesis edileceği km. kazı proje kesitinin 50cm dışında olmalıdır. Bu pay boruların yerleştirileceği deliklerin delinmesi ve makinenin çalışması için gereklidir. Başlangıçta, 3m lik bölümde genişletme kazısı adı altında, genişleyen ve yükselen iksalar monte edilerek 3. metrenin sonunda bu pay elde edilmektedir (Şekil 4.4)



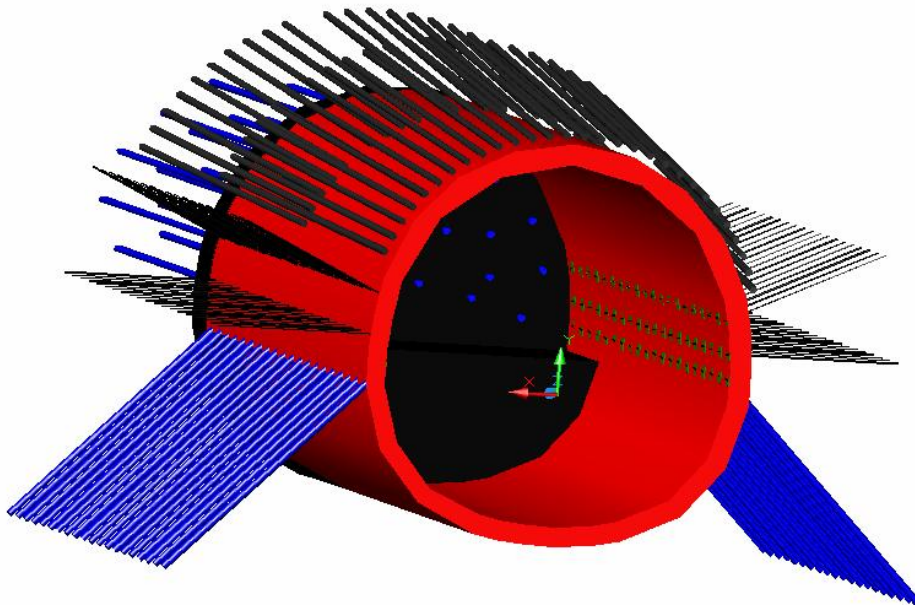
Şekil 4.4: *Umbrella Arch* Yönteminde Kullanılan Borular

Ø 114mm Umbrella Arch borularının montajı yapıldıktan sonra içine çimento enjeksiyonu ve enjeksiyon dönüş borusu yerleştirilir. Boru ağzı enjeksiyon manşonu ile kapatılır. Boru etrafı alçıyla sıvanır. Boru içinden enjeksiyon vermeye başlanır ve geri dönüş borusundan enjeksiyon gelinceye kadar devam edilir (Şekil 4.5). Böylece, hem borunun içerisi hem de boru ile delik arasında kalan boşluk basınçlı çimento şerbeti ile doldurulmuş olur. Açılı ve bindirmeli olarak imal edilirler.

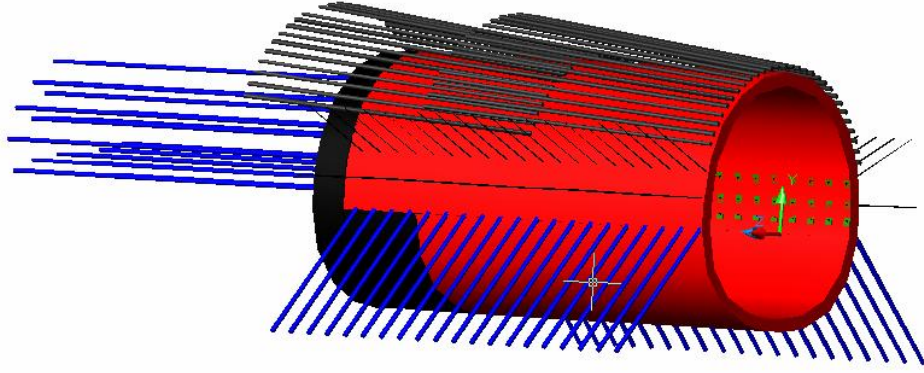


Şekil 4.5: *Umbrella Arch* Uygulaması (Anadolu Metro Ortaklığı Arşivi)

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de kaya bulonları, ayna zemin çivileri ve “*Umbrella Arch*” uygulaması süren borularının tümünün bulunduğu bir tünel kesiti görülmektedir.



Şekil 4.6: *Umbrella* ve Zemin Çivisi Uygulamaları ile Tünel Açımı (Görünüm1)



Şekil 4.7: *Umbrella* ve Zemin Çivisi Uygulamaları İle Tünel Açımı (Görünüm2)

5. KOSKA TÜNELLERİ DEFORMASYON ANALİZİ

İstanbul Metrosu, Taksim-Yenikapı Metro inşaatı tünellerinde, tünel içi ve yüzey deformasyon ölçümleri ve ayna jeoloji tutanaklarıyla elde edilen veriler, tünel ilerlemelerinde, uygulanacak tahkimat elemanlarının belirlenmesi, dayanıklılığın devamlılığı ve deformasyonların üst yapıya ve tünele zarar vermeyecek seviyede tutulmasında büyük önem teşkil etmiştir.

Bu çalışmada, bu veriler kullanılarak deformasyon grafikleri elde edilmiştir. Uygulanan tahkimat sistemi elemanları ve değişen sayıları belirlenmiş, tutanaklardan ayna jeolojileri ve RMR (Rock Mass Rating) değerleri alınarak tüm bunların deformasyonlara etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca bir tünel kazısının, diğer bir tünelin yüzey deformasyonlarına etkisi de incelenmiştir.

5.1 Kayaların RMR Sınıflaması

Bieniawski tarafından 1974'de önerilen RMR sistemi, kayaçların jeomekanik açıdan sınıflandırılmasında kolaylıkla uygulanabilmektedir (Tarhan,1989).

Bu sistemde 6 kayaç özelliği, sınıflandırma parametresi olarak kullanılmaktadır;

- i. Kayacın tek eksenli yada nokta yükleme direnci,
- ii. Kayacın RQD % değeri,
- iii. Çatlak takımları ve çatlak ara uzaklığı,
- iv. Çatlakların durumu,
- v. Yeraltısuyu durumu,
- vi. Çatlakların doğrultu – eğimi ve bunların şev doğrultusuyla olan ilişkileri.

Bu parametrelerden ilk beşi kayacı nitelik açısından sınıflandırmasında kullanılır. Altıncı parametre de, mühendislik projesinin türüne bağlı olarak daha önce bulunan toplam değere göre düzeltilir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1: RMR Sınıflandırma Parametreleri ve Dereceleri (Tarhan, 1989)

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE DERECELERİ									
1	Sağlam Kayaç Dayanımı	Nokta Yüğü Dayanımı	>10MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli test		
		Tek Eksenli Dayanım	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1MPa
		Derecelendirme	15	12	7	4	2	1	0
2	Kayaç Kalite Tanımı RQD		%90-100	%75-90	%50-75	%25-50	< %25		
	Derecelendirme		20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik Aralığı		> 2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	< 60mm		
	Derecelendirme		20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin Durumu		Çok kaba yüzeyler, sürekli değil. Ayrılma yok. Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler. Ayrılma<1mm.Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler. Ayrılma<1mm. Yumuşak eklemli	Sürtüneli yüzey veya faylı 1-5mm açık eklem, sürekli	Yumuşak fay dolgusu >5mm kalınlıkta veya eşit eklem >5mm devamlı süreksizlikler		
	Derecelendirme		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10m lik kısmından su	Yok	10 lt/dak	25 lt/dak	25-125 lt/dak	>125 lt/dak		
		Eklemdeki su basıncı oranı	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Genel Koşullar	Tamamen Kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
	Derecelendirme		15	10	7	4	0		
B. EKLEM YÖNLEMİNE GÖRE DÜZELTME									
Şevin eklem doğrultu ve eğim yönlenimi			Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun Değil	Hiç uygun değil		
Derecelendirme			0	-5	-25	-50	-60		
C. KAYA SINIFLAMALARI VE EĞİM YÖNÜNÜN ETKİSİ									
Sınıflama No			I	II	III	IV	V		
Tanımlama			Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta Kaya	Zayıf Kaya	Çok Zayıf Kaya		
Derecelendirme			100-81	80-61	60-41	40-21	<20		
D. KAYA SINIFLARININ YORUMLANMASI									
Sınıflama No			I	II	III	IV	V		
Ortalama Dayanma Süresi			5m açıklıkta-10 sene	4m açıklıkta-6 ay	1m açıklıkta-1 hafta	1,5m açıklıkta- 5 saat	0,5m açıklıkta-10 dakika		
Kaya Kütlesi Kohezyonu			300 KPa	200-399 KPa	100-200 KPa	100-150 KPa	100 KPa		
Kaya İçsel Sürtünme Açısı			45°	40°-45°	35°-40°	30°-35°	30°		

Koska Tünelleri kazısı sırasındaki tutanaklardan alınan RMR değerleri jeolojik özelliklerin sınıflandırılmasında, gerekli önlemlerin alınmasında ve tahkimat sistemine yerinde karar verilmesinde faydalı olmuştur. (Tablo 5.2)

Tablo 5.2 : Koska Tünelleri RMR Değerleri

TÜNEL	KM	RMR	AÇIKLAMA
KH1Y-3	5+234,20	11	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı-kiltaşı ar dalanması Siltli kil: Kahverenkli çakıllı kumlu siltli kil
	5+241,40	17	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+245,00	17	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+248,00	30	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+249,80	17	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+251,60	22	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+264,20	30	Trakya fm: Kirlı sarı-açık kahverenkli, orta-çok ayrıışmış kumtaşı-kiltaşı ar dalanması
KH1Y-4	0+034,60	14	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı Siltli kil: Sarımsı kahverenkli çakıllı kumlu siltli kil
	0+032,80	27,19	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı
	0+023,40	27	Trakya fm: Kirlı sarı-kızıl kahverenkli, tamamen ayrıışmış kumtaşı
	0+021,00	22	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı
	0+016,20	33	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı
	0+012,60	33	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı
	0+009,40	33	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı
	0+005,40	33	Trakya fm: Kızıl kahve rengi tamamen ayrıışmış kumtaşı
	0+000,60	30	Trakya fm: Kirlı sarı-kızıl kahverenkli, orta-çok ayrıışmış kumtaşı
KH2Y-3	5+291,20	9	Trakya fm: Siyahımsı kahve-sarı renkte, tamamen ayrıışmış kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ar dalanması Sarımsı-gri renkte plastik kil
	5+296,00	25,17	Trakya fm: Kızılımsı kahve-gri, yer yer sarı renkte, tamamen ayrıışmış kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+297,80	17	Trakya fm: Kızılımsı kahve-gri, yer yer sarı renkte, tamamen ayrıışmış kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+304,40	14	Trakya fm: Kahverenkli çok ayrıışmış kumtaşı
	5+306,20	28	Trakya fm: Kahve-gri renkte, çok-aşırı ayrıışmış 2-15cm plastik kil dolgular içeren kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+306,80	35	Trakya fm: Kahve-gri renkte, ayrıışmış yüzeyleri kızıl-kahve renkte çok ayrıışmış kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ar dalanması
	5+311,00	40	Trakya fm: Kahve-gri renkte, ayrıışmış yüzeyleri kızıl-kahve renkte orta derecede ayrıışmış kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ar dalanması

Tablo 5.2 : (devam)

TÜNEL	KM	RMR	AÇIKLAMA
KH2Y-3	5+312,80	25	Trakya fm: Kızıl-kahve renkte çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+316,40	30	Trakya fm: Kahve-gri renkte orta-çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+323,60	29	Trakya fm: Kahve-gri renkte orta-çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+327,80	38	Trakya fm: Kahve-gri renkte orta-çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+329,60	44,32	Trakya fm: Kahve-gri renkte orta-çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+334,40	47,38	Trakya fm: Taze yüzeyi kahvemsi gri renkte, ayrılmış yüzeyi kızılımsı kahverenkli az-orta ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+335,00	52,38	Trakya fm: Taze yüzeyi kahvemsi gri renkte, ayrılmış yüzeyi kızılımsı kahverenkli az-orta ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+336,80	43	Trakya fm: Taze yüzeyi kahvemsi gri renkte, ayrılmış yüzeyi kızılımsı kahverenkli çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+337,40	35,22	Trakya fm: Taze yüzeyi kahvemsi gri renkte, ayrılmış yüzeyi kızılımsı kahverenkli çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+341,40	37	Trakya fm: Kirli sarı-açık kahverenkli, orta derecede ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+343,00	29	Trakya fm: Kahve-kırmızı renkli çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+346,20	37	Trakya fm: Kahve-kırmızı renkli çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	5+347,80	22	Trakya fm: Kirli sarı-açık kahverenkli, çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
KH2Y-4	0+061,40	27	Trakya fm: Kızıl-kahverenkli, ayrılmış kumtaşı-kiltaşı Sarımsı kahverenkli içinde trakya malzemeleri bulunan kumlu-siltli-kil
	0+059,00	27	Trakya fm: Kızıl-kahverenkli, tamamen ayrılmış kumtaşı
	0+051,80	27	Trakya fm: Kızıl-kahverenkli, tamamen ayrılmış kumtaşı
	0+049,40	27	Trakya fm: Kızıl-kahverenkli, tamamen ayrılmış kumtaşı
	0+046,40	27	Trakya fm: Kızıl-kahverenkli, tamamen ayrılmış kumtaşı
	0+041,00	30	Trakya fm: Kızıl-kahverenkli, tamamen ayrılmış kumtaşı
	0+035,00	22,39	Trakya fm: Taze yüzeyi koyu kahverenkli, ayrılmış yüzeyi kızılımsı kahverenkli kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ardalanması
	0+031,40	22,39	Trakya fm: Taze yüzeyi koyu kahverenkli, ayrılmış yüzeyi kızılımsı kahverenkli kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	0+024,20	38	Trakya fm: Taze yüzeyi koyu kahverenkli, ayrılmış yüzeyi kızılımsı kahverenkli, ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	0+014,60	35	Trakya fm: Kızılımsı kahverenkli, çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması
	0+002,60	39	Trakya fm:kızıl kahve-gri renkli çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı ardalanması

5.2 Deformasyon Analizi ve Tahkimat Değişimi

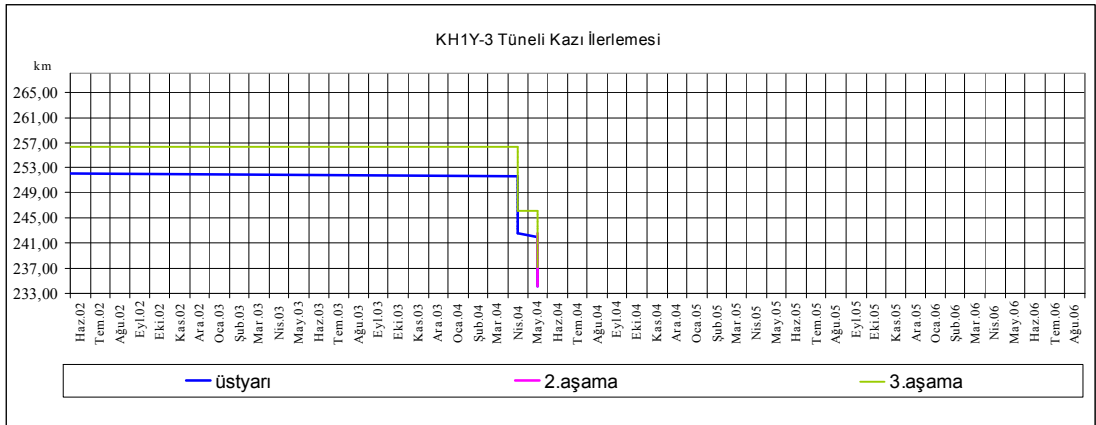
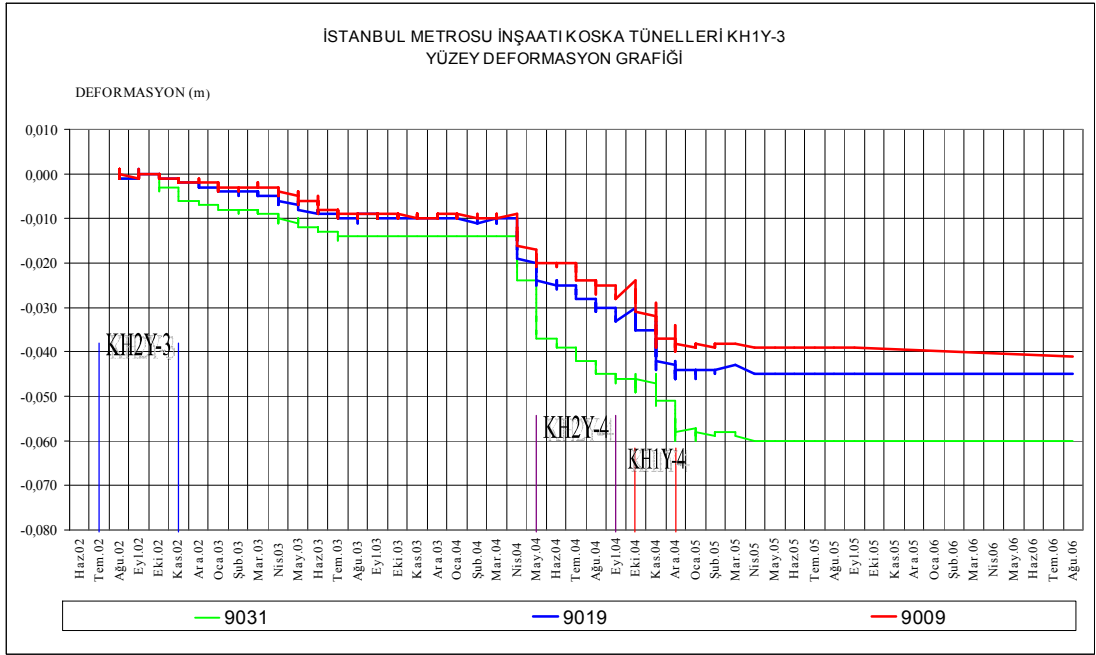
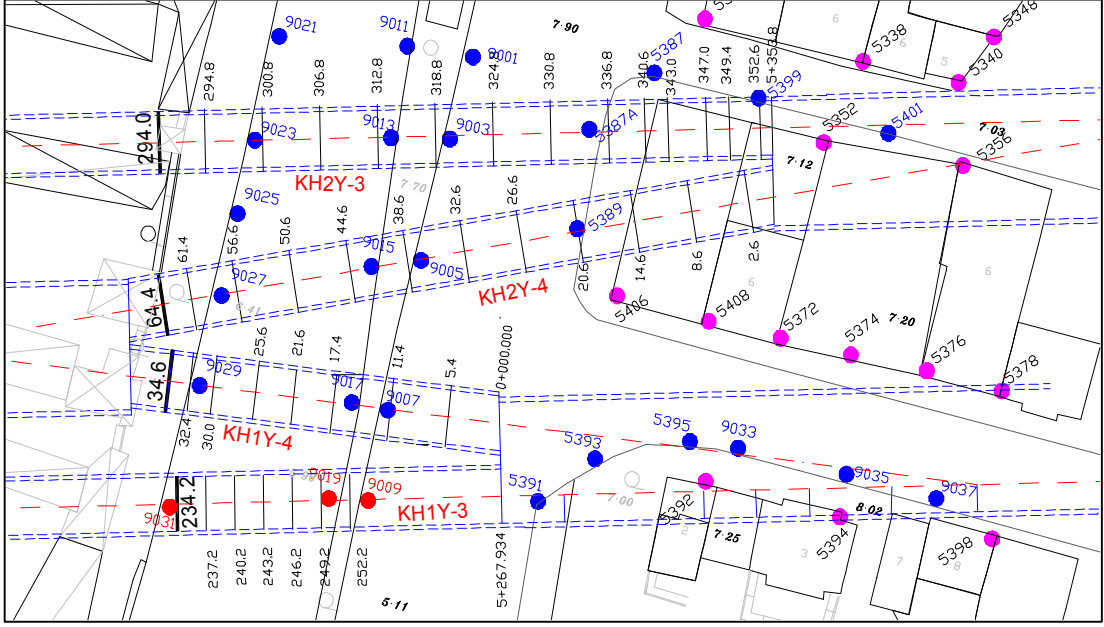
Açılmış olan 4 adet tünelin RMR değerleri incelendiğinde, tümünde tünel sonunda RMR değerlerinin çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun bir sebebi zemin yapısının değişmesi iken, diğer bir sebebi de, bu kısımda içinde farklı birimler bulunduran bir fay zonunun bulunmasıdır.

Tünel geneli ele alındığında ise KH1Y-3 ve KH2Y-3 ana hat tünellerinin RMR değerlerinin KH1Y-4 ve KH2Y-4 makas tünellerininkilerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda, öncelikli olarak benzer RMR değerlerinden dolayı ana hat tünelleri incelenecektir.

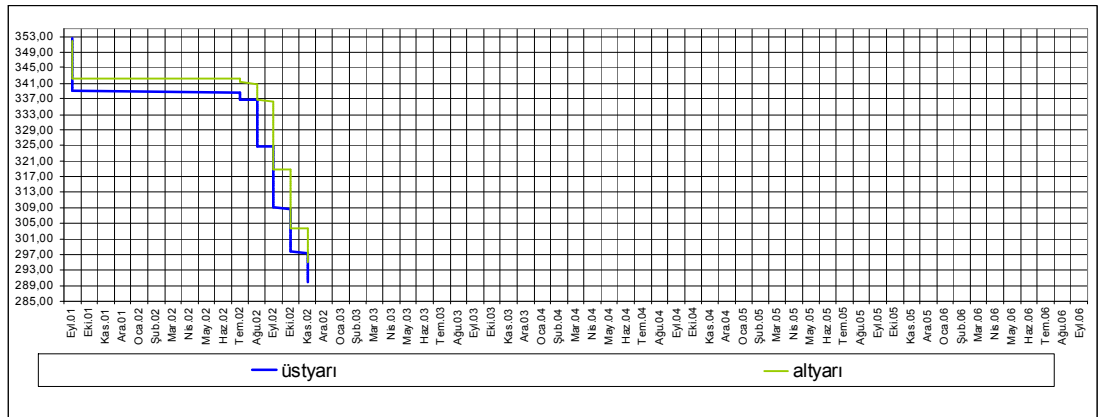
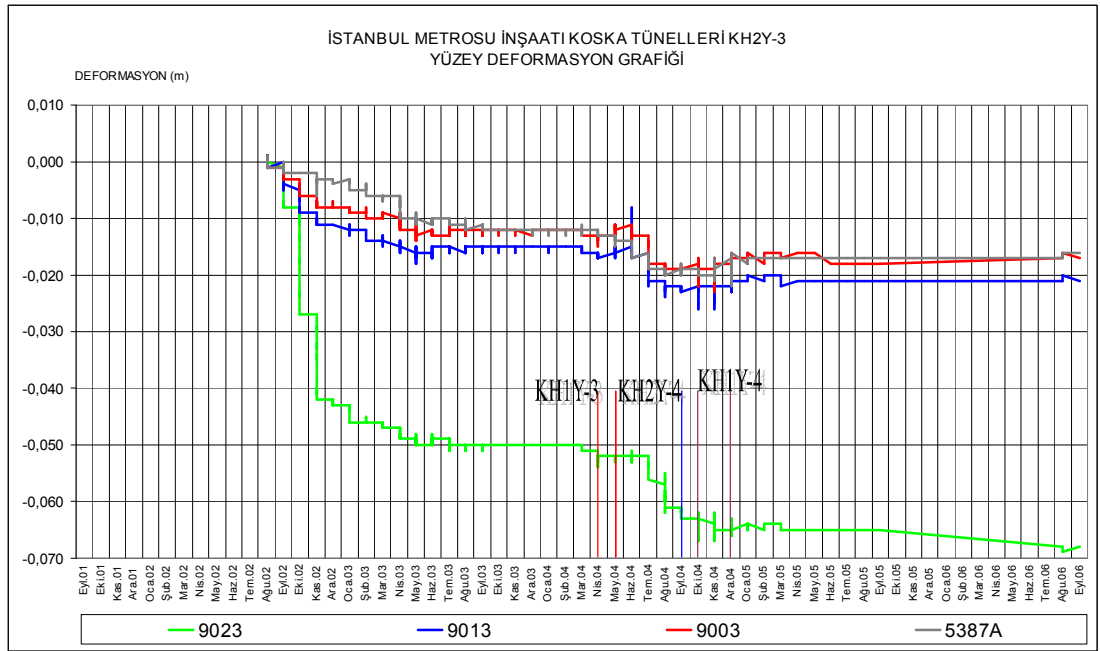
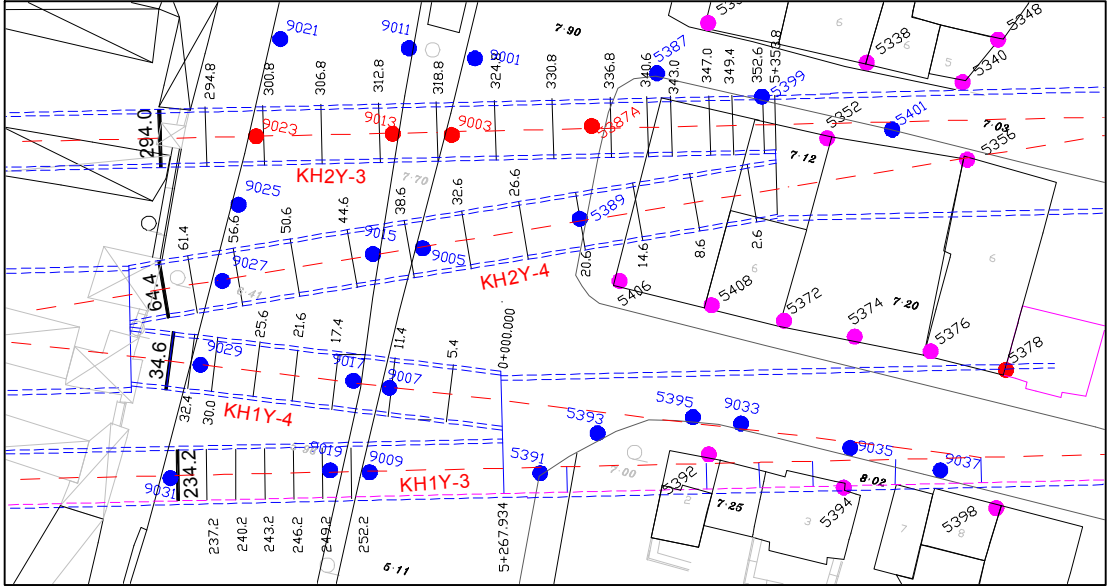
İki hat tüneli dikkate alındığında yüzeydeki deformasyon bulonlarından alınan ölçümlerin benzer olması beklenmiştir. Ancak, ilk kazısı yapılan KH2Y-3 hat tüneli üzerindeki deformasyon miktarının, KH1Y-3 hat tüneli üzerindeki deformasyon miktarından daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.1, Şekil 5.2).

Deformasyon ve ilerleme grafikleri incelendiğinde kazı sırasında KH2Y-3 tüneli üzerinde 9003 nolu bulonda -7mm, 9013 nolu bulonda -10mm, 9023 nolu bulonda -40mm deformasyon görülmektedir.

KH1Y-3 tüneli kazısına 2001 yılında başlanmıştır. Klasik yöntemle 15m açıldıktan sonra aynada bozulma başlamış ve kazı durdurulmuştur. 2004 yılında kazıya tekrar başlanmıştır. Bu arada, Ağustos-Kasım 2002 de açılan KH2Y-3 tüneli kazısı, bu tünel üzerindeki deformasyonlara ortalama 10mm etki etmiştir. 2004 yılında KH1Y-3 tünel kazısına tekrar başlanınca 9009 nolu bulonda -10mm, 9019 nolu bulonda -13mm, 9031 nolu bulonda -23mm deformasyon görülmektedir.



Şekil 5.1: KH1Y-3 Tüneli Yüzey Deformasyon ve Kazı İlerleme Grafikleri



Şekil 5.2: KH2Y-3 Tüneli Yüzey Deformasyon ve Kazı İlerleme Grafikleri

KH2Y-3 tüneli üzerindeki 9023 nolu bulonda görülen 40mm ve KH1Y-3 tüneli üzerindeki 9031 nolu bulonda görülen 23mm deformasyon arasındaki farkın sebebi hakkında inceleme yapıldığı takdirde, öncelikli olarak tahkimat sistemi ve kazı yöntemini değerlendirmek doğru olacaktır (Tablo 5.3).

- i. KH2Y-3 tüneline *Umbrella Arch* ve ayna zemin çivisi uygulaması 6m.lik etaplar halinde, KH1Y-3 tüneline ise 3m'lik etaplar halinde yapılmıştır.
- ii. İlerleme adımları ve iksa aralığı her iki tünelde de 60cm dir.
- iii. *Umbrella Arch* uygulaması KH2Y-3 tüneline 30 adetken, KH1Y-3 tüneline 36 adettir (Tablo 5.4).
- iv. Ayna zemin çivisi uygulaması KH2Y-3 tüneline 20-24 adetken, KH1Y-3 tüneline 20-34 adettir.
- v. Püskürtme beton kalınlığı ve kullanılan hasır çelik aynıdır.
- vi. Kazı aynasından ileri doğru konsolidasyon enjeksiyonu her iki aynada da yapılmıştır.

KH1Y-3 ve KH2Y-3 tünelleri açımı sırasında kazı etaplarının düşürülmesi, umbrella arch sisteminde sayının artırılması, zemin çivisi sayısının artırılması deformasyonların daha düşük olmasını sağlamıştır.

Tünel içi deformasyonlara bakıldığında, iki hat tüneline de deformasyon yapısının benzer olduğunu söyleyebiliriz (Ekler).

Bu durumda, tünelde oluşan deformasyonun kazı sırasında başladığını ve yüzeye etki ettiğini düşünürsek KH2Y-3 tüneli sonrasında açılan KH1Y-3 tüneline enjeksiyon delikli boru ve zemin çivisi miktarının artırılması olumlu sonuç vermiştir. RMR değeri düşük ortamlarda stabilite için ayna zemin çivisi ve umbrella arch sisteminin önemi belirlenmiştir.

Tüm bu veriler değerlendirilerek makas tünellerinin kazıları başlamıştır. Bölgede KH1Y-3, KH2Y-3 hat tünellerinin kazısından dolayı yüzeyde düşey deformasyon (tasman) oluşmuş ve bu tasmanın etki alanı bölgenin tamamını içine almaktadır.

Tablo 5.3: Koska Tüneli Tahkimat Elemanları

TÜNEL ADI	KM	İLERLEME ARALIĞI	PÜSKÜRTME BETON	HASIR ÇELİK	BORU SÜREN (UMBRELLA)	AYNA ZEMİN ÇİVİSİ	KADEME
KH1Y-3	5+234,20		35	335/335 çift		5m, 34 adet	3
	5+243,20	0,6	35	335/335 çift	6m, 36 adet	9m, 34 adet	3
	5+243,20-249,20	0,6	30	335/335 çift	6m, 30 adet	9m, 20 adet	2
	5+249,20-252,20	0,6	35	335/335 çift	6m, 40 adet*	9m, 20 adet	2
	5+252,20(ayna)		20	221/221 çift			2
	5+252,54-267,54	0,8	30	221/221 çift	4m, 20 adet*		2
KH1Y-4	0+000,00-012,00	0,6	30	335/335 çift	9m, 24 adet	12m, 12 adet	2
	0+017,40	0,6	30	335/335 çift	9m, max sıklıkta	12m, 20 adet	2
	0+034,60		30	335/335 çift			2
KH2Y-3	5+306,80	0,6	35	335/335 çift	9m, 30 adet	12m, 24 adet	2
	5+312,80	0,6	35	335/335 çift	9m, 30 adet	12m, 24 adet	2
	5+330,80	0,6	35	335/335 çift	9m, 24 adet	12m, 20 adet	2
	5+336,80	0,6	35	335/335 çift	9m, 24 adet	12m, 20 adet	2
	5+336,80-339,80	0,6	35	335/335 çift	4m, 40 adet*	9m, 20 adet	3
	5+338,82-353,82	0,8	25	221/221 çift	4m, 20 adet*		2
KH2Y-4	0+000,00	0,6	30	335/335 çift	6m, 24 adet	9m, 20 adet	2
	0+003,00	0,6	30	335/335 çift	9m, 24 adet	12m, 12 adet	2
	0+038,60	0,6	30	335/335 çift	9m, 30 adet	12m, 20 adet	2
	0+050,60-056,60	0,6	30	335/335 çift	9m, 33 adet	12m, 20 adet	3
	0+056,60	0,6	30	335/335 çift	9m, 36 adet	12m, 24 adet	2
	0+061,40-064,47	0,6	30	335/335 çift	6m, 36 adet	9m, 24 adet	2

* 1 ½" Boru Süren

Tablo 5.4: Koska Tünelleri *Umbrella Arch* Uygulaması

	Enjeksiyon Delikli Boru			Boru Süren(1 1/2")			Tarih
	Adet	Boy(m)	Km	Adet	Boy(m)	Km	
KH1Y-3				25+15	6	5+252,20	05.04.2004
	23+3	6	5+249,20				12.04.2004
	25+5	6	5+246,20				19.04.2004
	25+11	6	5+243,20				28.04.2004
	25+11	6	5+240,20				07.05.2004
	25+10	6	5+237,20				18.05.2004
KH1Y-4				19	4	0+000,00	29.09.2004
	9	9	0+000,00				07.10.2004
	24	9	0+005,40				19.10.2004
	24	9	0+011,40				25.10.2004
	25+11	9	0+017,40				04.11.2004
	25+10	9	0+021,60				17.11.2004
	25+9	9	0+025,60				24.11.2004
	25+7+1+1	9	0+030,00				03.12.2004
KH2Y-3				12	4	5+352,60	06.09.2001
				16	4	5+349,40	09.09.2001
				20	4	5+347,00	10.09.2001
				20	4	5+543,00	13.09.2001
				18	4	5+340,60	25.10.2001
	23	9	5+336,80				05.08.2002
	24	9	5+330,80				18.08.2002
	24	9	5+324,80				31.08.2002
	23	9	5+318,80				11.09.2002
	29	9	5+312,80				25.09.2002
	30	9	5+306,80				11.10.2002
	30	9	5+300,80				25.10.2002
	30	9	5+294,80				08.11.2002
KH2Y-4	9	6	0+000,00				30.04.2004
	20	9	0+002,60				12.05.2004
	24	9	0+008,60				25.05.2004
	24	9	0+014,60				03.06.2004
	24	9	0+020,60				11.06.2004
	24	9	0+026,60				22.06.2004
	24	9	0+032,60				04.07.2004
	25+5	9	0+038,60				17.07.2004
	25+5	9	0,044,60				24.07.2004
	25+8	9	0+050,60				03.08.2004
	25+11	9	0+056,60				16.08.2004
	24+15	9	0+061,40				26.08.2004

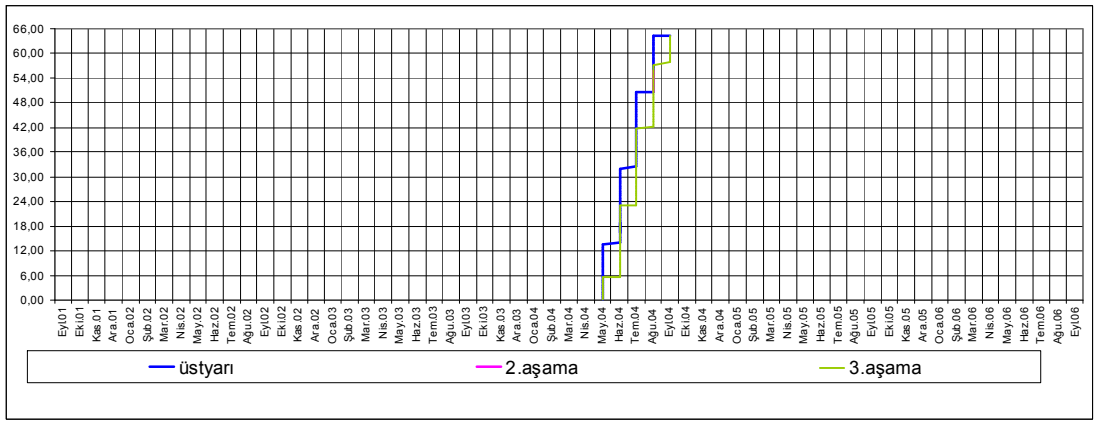
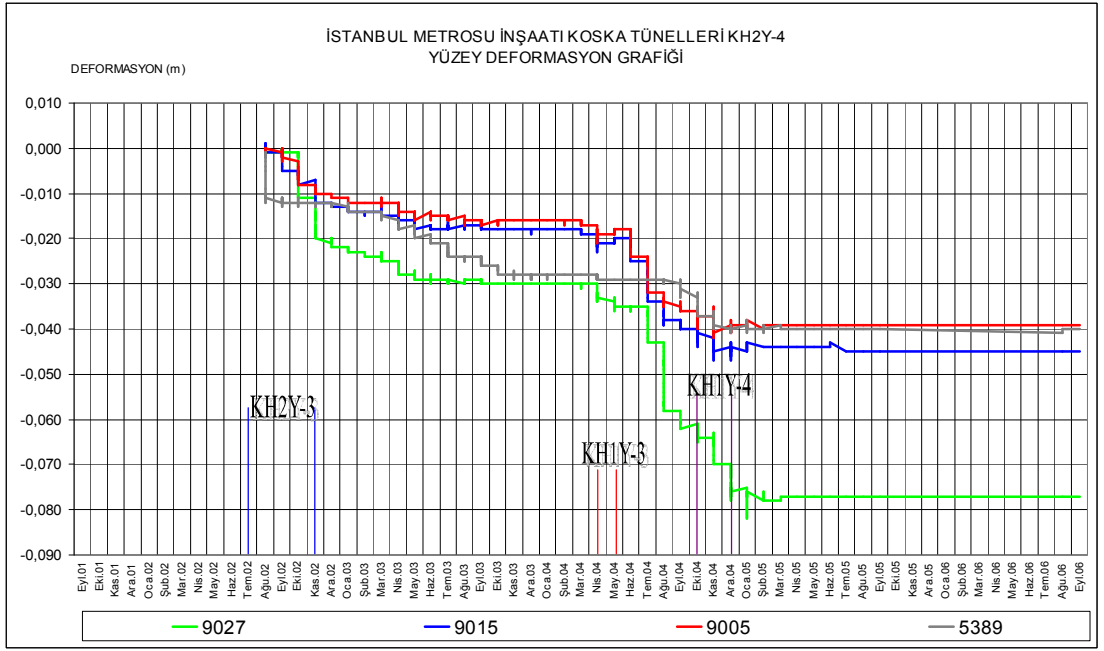
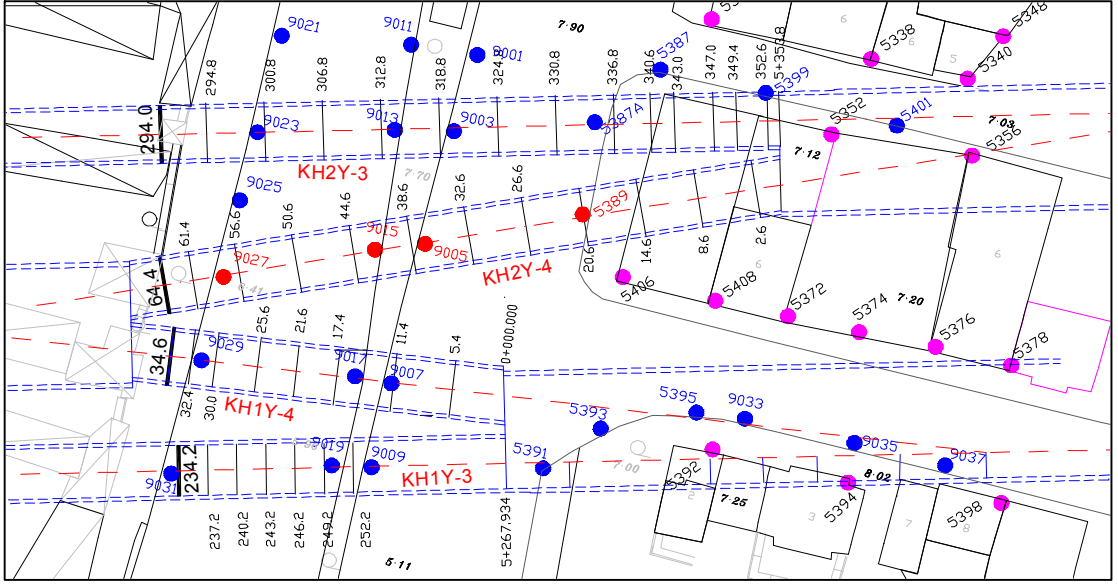
KH2Y-4 tünelinin kazısı 6 metrelik etaplar halinde açılmış, “umbrella arch sistemi” enjeksiyon delikli boru sayısı KH1Y-3 tünelindeki gibi 36 adet olarak belirlenmiştir. Kazı aynası RMR değerleri düşünceye kadar ayna zemin çivisi 20 adet, düştüğü noktadan itibaren 24 adet uygulanmıştır. Bu tünel yüzeyinde, tünelin kendi kazısından kaynaklanan maksimum deformasyon 9027 numaralı ölçüm noktasında 25mm olarak görülmektedir (Şekil 5.3).

KH1Y-4 kazısına 6 metrelik etaplar halinde başlanmış fakat daha sonra RMR değerlerinin düştüğü gözlenmiş ve etap boyu 4,2m’ye indirilmiştir. Enjeksiyon delikli boru ve zemin çivisi miktarları aynı tutulmuştur. Bu tünelin üzerindeki ölçüm noktalarında, kazıdan dolayı oluşan maksimum deformasyon 23mm olmuştur (Şekil 5.4).

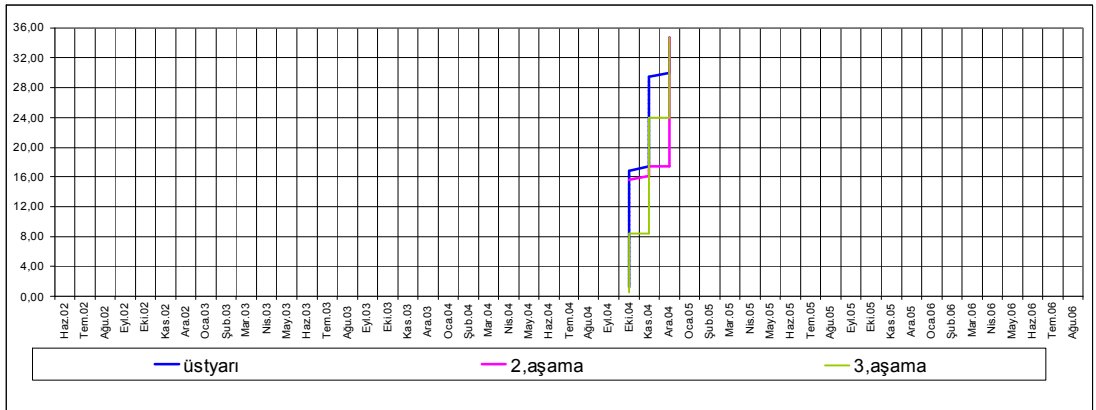
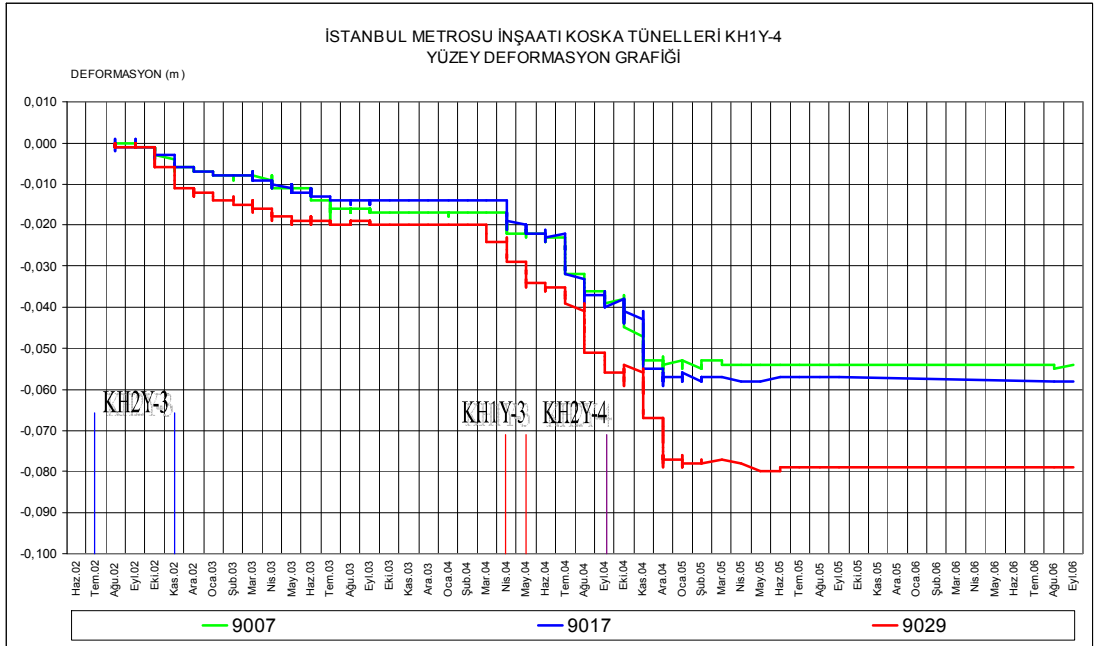
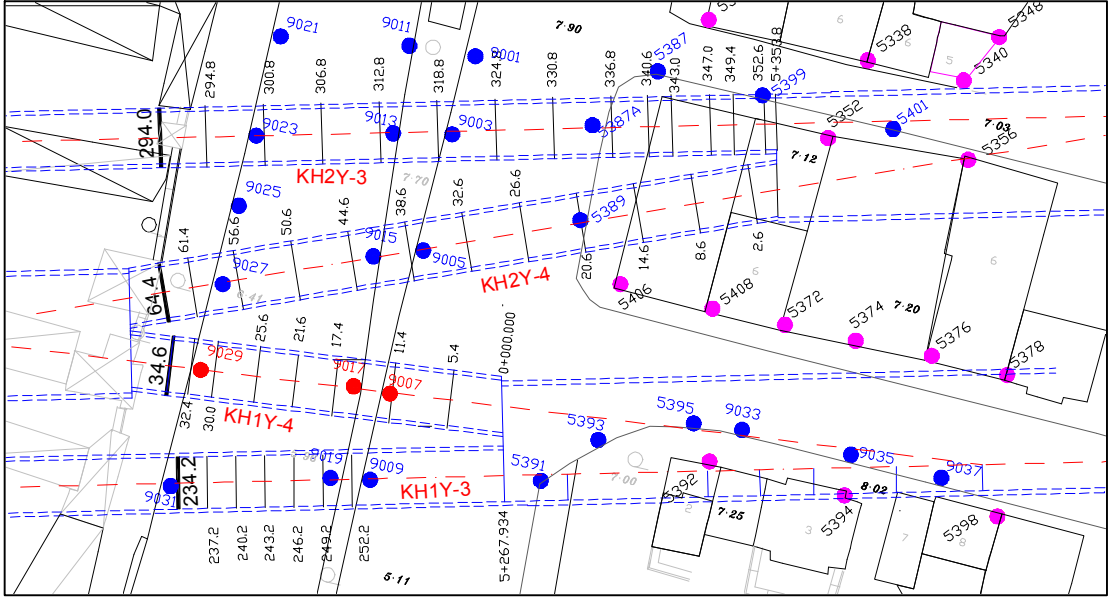
Tüm deformasyon grafiklerine bakıldığında, grafikler üzerinde her tünelin ayrı ayrı kazı zamanları belirlenmiştir. Bu sayede, örneğin, kazısı Mayıs 2004’de başlayan KH2Y-4 tüneli üzerindeki deformasyon bulonlarından alınan okumalar incelendiğinde, KH2Y-3 tünelinin, Temmuz-Kasım 2002 arasında yapılan kazısının ve KH1Y-3 tünelinin Nisan-Mayıs 2004 arasında yapılan kazısının bu tünel üzerindeki oturumları ortalama 25mm etkilediği görülmektedir.

Sonuç olarak, tüm bu verilerin değerlendirilmesi yapıldığında; benzer RMR değerindeki ortamlarda, ön tahkimat elemanlarının, tünel kazı metodunun farklılığının ve birbirine yakın açılan tünellerde her bir tünel kazısının bir diğerinin deformasyon miktarını etkilediği belirlenmiştir.

Tünelcilikte asıl olanın; çok miktarda tahkimat sistemiyle kazı yapmak değil, doğru tahkimat sistemiyle kazı yapmak olduğu bilinmektedir. Tünel kazısının hızlı, verimli, ekonomik fakat üstyapılara ve altyapıya zarar vermeyecek şekilde yapılması gerekmektedir. Geoteknik çalışmalar ve elde edilen veriler kullanılarak yapılan analizler sayesinde, sistemler belirlenerek ve yerinde ve zamanında önlemler alınarak, hızı, verimi ve ekonomiyi sağlıklı bir biçimde sağlamak mümkündür



Şekil 5.3: KH2Y-4 Tüneli Yüzey Deformasyon ve Kazı İlerleme Grafikleri



Şekil 5.4: KH1Y-4 Tüneli Yüzey Deformasyon ve Kazı İlerleme Grafikleri

5.3 Tünel Açılmasından Kaynaklanan Yüzey Oturmalarının Tahmini

Hızla artan kentleşme oranı nedeniyle projelendirilen yeraltı mühendislik yapıları (tüneller, metrolar) genellikle yerleşim alanlarının bulunduğu zonların altından geçmektedir. Bu yapıların inşaatı sırasında oluşan yer değiştirmelerden kaynaklanan yüzey deformasyon hareketlerinin parametrelerinin önceden kestirimi üst yapıların emniyeti açısından önem taşımaktadır (Şekil 5.5).

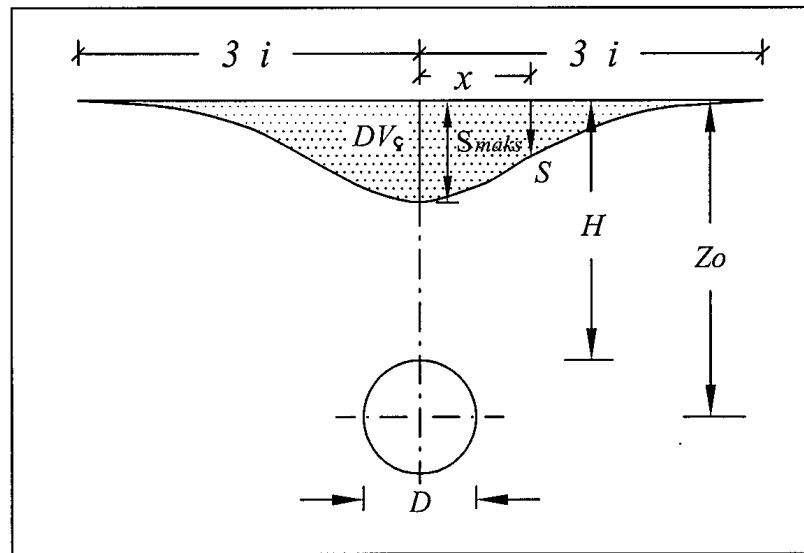
Yüzey deformasyonu parametrelerinin kestirimi için ampirik - yarı teorik bağıntılar kullanılmıştır. Bu parametreler;

Yüzey çökme teknesinin dönüm noktasının absisi (i) (Arioğlu ve Yüksel, 2002) ;

$$i = 1,81 \cdot \frac{D}{2} \cdot \left(\frac{Z_0}{D} \right)^{0,78} \quad (5.1)$$

Yüzey çökme teknesinin eksenindeki oturma miktarı (S_{max}) (Schmidt, 1969 ve Arioğlu, 1992);

$$S_{max} = 0,628 \cdot \frac{D^2}{i} \cdot \left(\frac{P_s + \gamma_{ort} \cdot Z_0}{E_{ort}} \right) \cdot (1 + \nu_{ort}) \quad (5.2)$$



Şekil 5.5: Yüzey Oturma Büyüklükleri
(Arioğlu, Yüksel, Arioğlu, 2002)

Burada;

D : Tünel çapı, m

Z_o : Tünel eksen derinliği, m

P_s : Sürüş yükü ve trafik yükü dahil tünel üzerindeki yük 50 kN/m^2 alınmıştır.

γ_{ort} : Formasyonların ortalama birim hacim ağırlığı, tabaka kalınlıklarına göre ağırlıklı ortalama alınarak;

$$\gamma_{ort} = \frac{\gamma_{dolgu} \cdot t_{dolgu} + \gamma_{alüvyon} \cdot t_{alüvyon} + \gamma_{kil} \cdot t_{kil} + \gamma_{kaya} \cdot t_{kaya}}{t_{dolgu} + t_{alüvyon} + t_{kil} + t_{kaya}} \quad (5.3)$$

E_{ort} : Tünel üzerindeki formasyonların tabaka kalınlıklarına göre ağırlıklı ortalama elastisite modülü

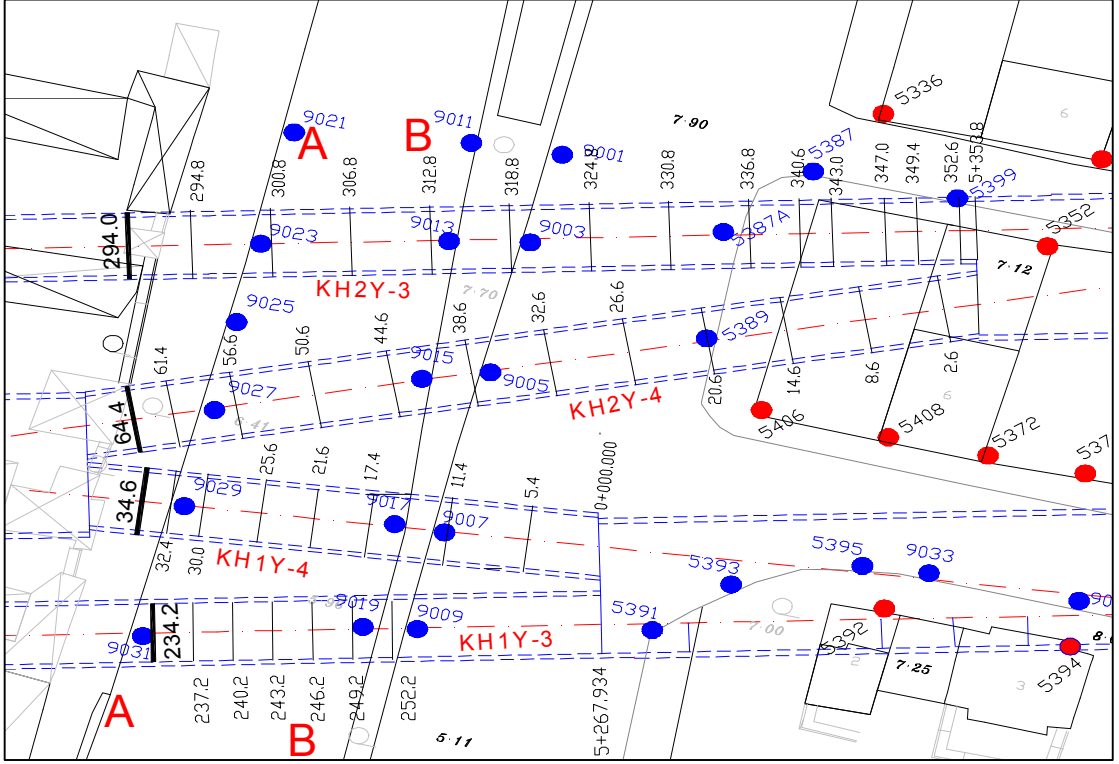
$$E_{ort} = \frac{E_{dolgu} \cdot t_{dolgu} + E_{alüvyon} \cdot t_{alüvyon} + E_{kil} \cdot t_{kil} + E_{kaya} \cdot t_{kaya}}{t_{dolgu} + t_{alüvyon} + t_{kil} + t_{kaya}} \quad (5.4)$$

ν_{ort} : Zemin-Kaya ortamın ortalama Poisson Oranı,

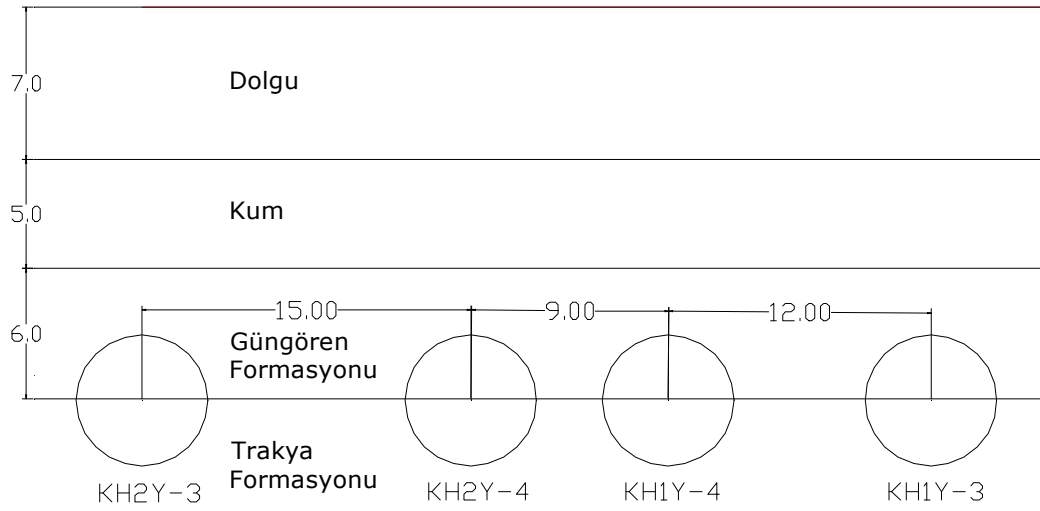
$$\nu_{ort} = \frac{\nu_{dolgu} \cdot t_{dolgu} + \nu_{alüvyon} \cdot t_{alüvyon} + \nu_{kil} \cdot t_{kil} + \nu_{kaya} \cdot t_{kaya}}{t_{dolgu} + t_{alüvyon} + t_{kil} + t_{kaya}} \quad (5.5)$$

Koska tünellerinde, Şekil 5.6'da görülen A-A ve B-B kesitleri için bu bağıntılar kullanılarak tahmini deformasyon grafikleri elde edilmiş ve gerçek ölçümlerle kıyaslanmıştır.

A-A kesiti için tüneller arası mesafe 15m, 9m ve 12m'dir. A-A kesiti tünel merkezlerinden itibaren, 6m Güngören Formasyonu, 5m Kum ve 6m Yapay Dolgu bulunan bir jeolojik kesite sahiptir (Şekil 5.7).



Şekil 5.6: Koska Tünelleri Genel Görünüm



Şekil 5.7: Koska Tünelleri A-A Kesiti, Jeolojik Kesit ve Tünel Mesafeleri

Yapay Dolgu (Gevşek, Orta Sıkı Kum-Çakıl)

$$\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$$

$$E = 10 \text{ MPa} \quad \nu = 0.35$$

Kum (Orta Sıkı Siltli, Kavklı Kum-Çakıl)

$$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$$

$$E = 15 \text{ MPa} \quad \nu = 0.30$$

Güngören Formasyonu (Katı, Çok Katı Siltli Kil)

$$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$$

$$E = 30 \text{ MPa} \quad \nu = 0.35$$

Trakya Formasyonu (Kumtaşı-Kiltaşı)

$$\gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$$

$$*E = 120 \text{ MPa} \quad \nu = 0.35$$

Elde edilen geoteknik parametreler yardımı ile A-A kesiti için tahmini yüzey deformasyon parametreleri aşağıda hesaplandığı gibidir.

$$\gamma_{\text{ort}} = (1.8 \times 7 + 2 \times 5 + 2 \times 6) / (7+5+6)$$

$$= 1.92 \text{ t/m}^3$$

$$E_{\text{ort}} = (10 \times 7 + 15 \times 5 + 30 \times 6) / (7+5+6)$$

$$= 18 \text{ MPa}$$

$$\nu_{\text{ort}} = (0.35 \times 7 + 0.3 \times 5 + 0.35 \times 6) / (7+5+6)$$

$$= 0.336$$

$$i = 1.81 \times 6 / 2 \times ((7+5+6) / 6)^{0.78}$$

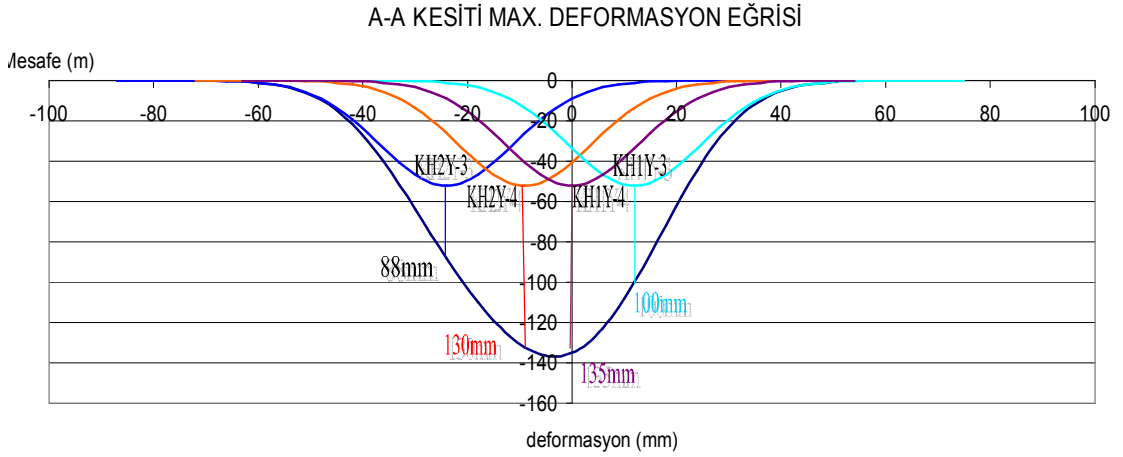
$$= 12.8 \text{ m}$$

$$S_{\text{max}} = 0.628 \times 6^2 / 12.8 \times ((5+1.92 \times 18) / 18) \times (1+0.336)$$

$$= 52 \text{ mm}$$

*Kaya ortamın elastisite modülü için ayrışma durumu ve farklı birimler barındıran bir fay zonu bulunması nedeni ile analizde azaltılmış değer olan 120MPa kullanılmıştır.

A-A kesiti için bu bağıntılar kullanılarak elde edilen deformasyon grafiğine bakıldığında, her bir tünel üzerinde oluşabilecek maksimum oturma miktarları görülmektedir(Şekil 5.8).



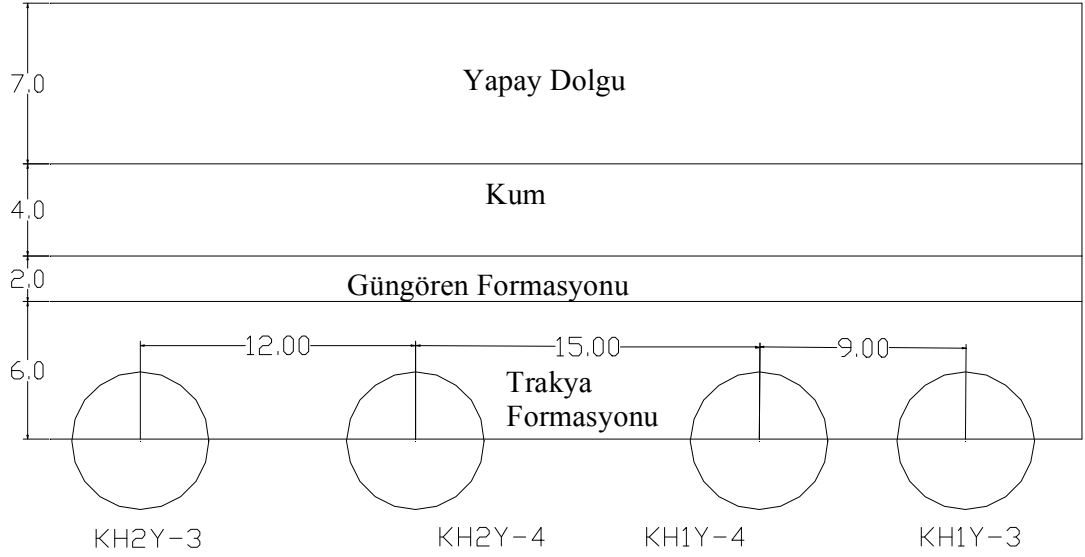
Şekil 5.8: A-A Kesiti Deformasyon Dağılımı

Ampirik bağıntılarla hesaplanan yüzey deformasyonları, A-A kesiti üzerindeki deformasyon bulonlarından alınan gerçek maksimum yüzey deformasyon değerleri ile kıyaslandığında; teorik değerlerin gerçek değerlerden daha yüksek olduğu ve %70 civarında bir doğruluk mertebesi belirlediği görülmektedir(Tablo 5.5). Koska bölgesi, aralarındaki mesafeleri fazla olmayan dört tünelin yanyana açılması sebebiyle kritik bir bölgedir. A-A kesiti ise farklı birimler barındıran bir fay zonuna denk gelmesi ve zemin koşullarının değişmesi sebebiyle en kritik kısmı oluşturmaktadır.

Tablo 5.5: Deformasyon Okumaları ile Teorik Değer Kıyaslaması (A-A)

Tünel Adı	Deformasyon Bulonu	Gerçek Maksimum Okumalar	Teorik Maksimum Deformasyon	Benzerlik Mertebesi
KH2Y-3	9023	69mm	88mm	78%
KH2Y-4	9027	77mm	130mm	60%
KH1Y-4	9029	79mm	135mm	59%
KH1Y-3	9031	68mm	100mm	68%

B-B kesiti için tüneller arası mesafe 12m, 15m ve 9m'dir. B-B kesitinin tünel merkezlerinden itibaren 6m Trakya Formasyonu, 2m Güngören Formasyonu, 4m Kum ve 7m Yapay Dolgu bulunan bir jeolojik kesiti vardır(Şekil 5.9).



Şekil 5.9: Koska Tünelleri B-B Kesiti, Jeolojik Kesit ve Tünel Mesafeleri

Elde edilen geoteknik parametreler yardımı ile B-B kesiti için tahmini yüzey deformasyon parametreleri aşağıda hesaplandığı gibidir.

$$\gamma_{ort} = (1.8 \times 7 + 2 \times 4 + 2 \times 2 + 2.5 \times 6) / (7 + 4 + 2 + 6)$$

$$= 2.08 \text{ t/m}^3$$

$$E_{ort} = (10 \times 7 + 15 \times 4 + 30 \times 2 + 120 \times 6) / (7 + 4 + 2 + 6)$$

$$= 48 \text{ MPa}$$

$$v_{ort} = (0.35 \times 7 + 0.3 \times 4 + 0.35 \times 2 + 0.4 \times 6) / (7 + 4 + 2 + 6)$$

$$= 0.36$$

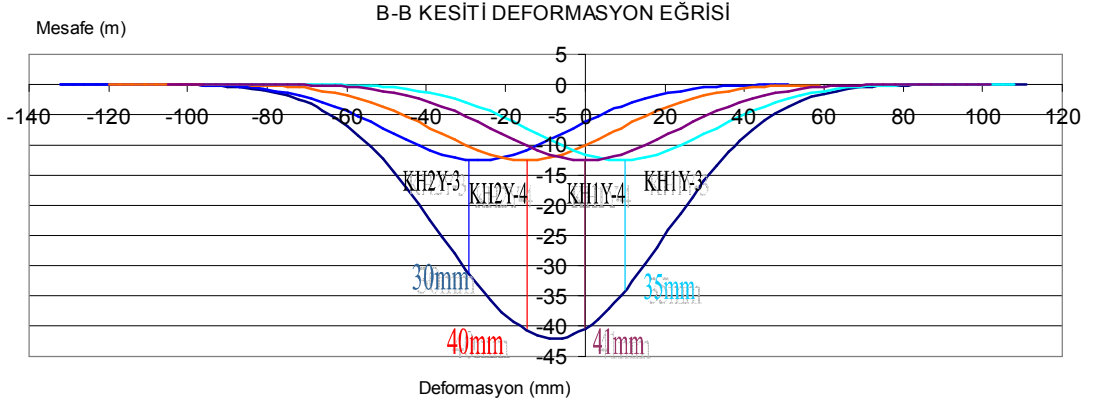
$$i = 1.81 \times 6 / 2 \times ((7 + 4 + 2 + 6) / 6)^{0.78}$$

$$= 22.91 \text{ m}$$

$$S_{mak} = 0.628 \times 6^2 / 22.9 \times ((5 + 2.08 \times 19) / 48) \times (1 + 0.36)$$

$$= 12.5 \text{ mm}$$

B-B kesiti için bu bağıntılar kullanılarak elde edilen deformasyon grafiğine bakıldığında, her bir tünel üzerinde oluşabilecek maksimum oturma miktarları görülmektedir(Şekil 5.10).



Şekil 5.10: B-B Kesiti Deformasyon Dağılımı

Ampirik bağıntılarla hesaplanan yüzey deformasyonları, B-B kesiti üzerindeki deformasyon bulonlarından alınan gerçek maksimum yüzey deformasyon değerleri ile kıyaslandığında; KH2Y-3 tüneli için teorik değer gerçek değerden daha yüksek olduğu ve %77 civarında bir doğruluk mertebesi belirlediği görülmektedir. KH2Y-4, KH1Y-4 ve KH1Y-3 tünelleri için ise teorik değerler, gerçek okumalardan daha düşük çıkmış fakat çok yakın değerler vermiş dolayısıyla benzerlik mertebesinin yüksek olduğu gözlenmiştir (Tablo 5.6).

Tablo 5.6: Deformasyon Okumaları ile Teorik Değer Kıyaslaması (B-B)

Tünel Adı	Deformasyon Bulonu	Gerçek Maksimum Okumalar	Teorik Maksimum Deformasyon	Benzerlik Mertebesi
KH2Y-3	9003	23mm	30mm	77%
KH2Y-4	9005	41mm	40mm	98%
KH1Y-4	9007	56mm	41mm	73%
KH1Y-3	9009	40mm	35mm	88%

A-A kesitinde, tünellerin Güngören Formasyonunda açılmış olması ve bu kesitte farklı birimler içeren bir fay zonunun bulunması sebebi ile deformasyon okumaları yüksektir. Ampirik-yarı teorik bağıntılarla hesaplanan değerlerin gerçek okumalardan %30 mertebesinde yüksek çıkması ise kritik olan bu kesitte doğru tahkimat sistemlerinin seçilmiş olduğunu ve tehlike yaratabilecek daha yüksek deformasyonların doğru metotla ve gerekli tedbirlerle engellendiğini göstermektedir

B-B kesitinde ise tüneller Trakya Formasyonu içerisinde açılmıştır. Bu kesit üzerindeki deformasyon bulonlarından alınan okumalar A-A kesitine göre daha düşük değerler vermiştir. Ampirik-yarı teorik bağıntılarla hesaplanan yüzey deformasyonları, gerçek okumalara çok yakın çıkmış ve %90 doğruluk mertebesi belirlenmiştir.

Bu analizlerin sonucunda; dört tünelin mesafelerinin kısa olduğu, tünellerin bazı kısımlarının farklı birimler içeren fay zonuna denk geldiği ve Güngören Formasyonunda açıldığı kritik bir bölge olan Koska bölgesinde, tecrübelerin olumlu yönde kullanıldığı, doğru yöntemlerin ve doğru tahkimat sistemlerinin seçildiği ve bunun sonucunda daha büyük ve tehlikeli yüzey deformasyonlarının engellendiği düşünülebilir. Ancak bağıntıların ampirik olduğu, bazı kabullerle yola çıkılmış olduğu ve bu bağıntılarda bazı değerlerin gözardı edilebildiği unutulmamalıdır. Bu çalışmada bu bağıntılar, daha önce İstanbul'da bir metro tünelinin deformasyon analizinde kullanıldığı için seçilmiştir.

6. SONUÇ

İstanbul Metrosu, Taksim-Yenikapı Metro inşaatı tünellerinde, tünel içi ve yüzey deformasyon ölçüm ve ayna jeoloji tutanaklarıyla elde edilen veriler, tünel ilerlemelerinde, uygulanacak tahkimat elemanlarının belirlenmesi, dayanıklılığın devamlılığı ve deformasyonların üst yapıya ve tünele zarar vermeyecek seviyede tutulmasında büyük önem teşkil etmiştir. Bu şekilde, tünel inşaatı sırasında elde edilen veriler, gözlemler ve tecrübeler, Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi'nin de bir gerekliliği olarak, tünel açımının ilerleyen safhalarında olumlu yönde kullanılabilmiştir.

Bu çalışmada, bu veriler kullanılarak Koska Bölgesi tünellerinin deformasyon grafikleri elde edilmiştir. Uygulanan tahkimat sistemi elemanları ve değişen sayıları belirlenmiş, tutanaklardan ayna jeolojileri ve RMR (Rock Mass Rating) değerleri alınmış, fay ve süreksizlik düzlemleri belirlenerek tüm bunların deformasyonlara etkisi, karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca bir tünel kazısının, diğer bir tünelin tünel içi ve yüzey deformasyonlarına etkisi de incelenmiştir. Son olarak ampirik-yarı teorik bağıntılar kullanılarak, 2 farklı kesit için tahmini deformasyon grafikleri elde edilmiş, maksimum teorik oturmalarla, gerçek okumalar karşılaştırılarak bir doğruluk mertebesi belirlenmiş ve gerçek oturmaların kritik seviyede olup olmadığı ele alınmıştır.

- İncelenen tünel güzergahında, A-A kesiti civarında, farklı birimler barındıran bir fay zonunun bulunduğu, süreksizlik düzlemlerinin yoğunlaştığı ve buna bağlı olarak bu kısımda, yüzey deformasyonlarının maksimum değere ulaştığı belirlenmiştir. Bu sebeple, süreksizlik düzlemlerinin yüzey deformasyonlarını olumsuz etkilediği görülmüştür.
- A-A ve B-B kesiti yüzey deformasyonları karşılaştırıldığında; tünellerin Güngören Formasyonuna denk geldiği A-A kesiti deformasyonlarının, Trakya Formasyonuna denk geldiği B-B kesiti deformasyonlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak tünellerin ana kayada açılmasının yüzey deformasyonlarına olumlu etkisi gözlenebilmiştir.

- Birbirinden bağımsız, farklı zamanlarda açılan 4 tünelde, ilk hattın açılmaya başlaması ile oluşan deformasyonların tüm bölgeyi etkilediği ve devamında bu hata yakın açılan diğer hatların etkisiyle artarak en yüksek seviyelere ulaştığı saptanmıştır. Yanyana açılan 4 hattın da kazılarının birbirleri üzerindeki deformasyonları arttırdığı görülmüştür.
- Tünel güzergahları boyunca tespit edilen kaya kütlesi sınıfları (RMR) ile ölçülen yüzey deformasyonları arasında bir ilişki belirlenmiştir. RMR değerlerinin en düşük olduğu tünel sonlarında (A-A kesiti bölgesi) deformasyonların yüksek olduğu, RMR değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde ise deformasyonların düşük olduğu görülmüştür.
- İlk açılan KH2Y-3 ana hat tüneli üzerindeki deformasyon okumaları daha sonra açılan KH1Y-3 ana hat tüneli üzerindeki deformasyon okumalarından daha yüksektir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin en önemli özelliği kullanılarak, gözlemlere ve tecrübeye dayalı destek sistemi değiştirilmiş, *Umbrella Arch* ve ayna zemin çivisi uygulaması etap aralıkları düşürülmüş ve sayıları arttırılmıştır. Bu uygulama sayesinde RMR değeri düşük olan kısımların ve daha sonra açılan tünellerin yüzey deformasyonlarının daha fazla olması engellenmiştir. Böylece, destek sisteminin yüzey deformasyonu üzerinde de etkili olduğu belirlenmiştir.
- Ampirik bağıntılarla iki farklı kesit için maksimum yüzey deformasyonları hesaplanmış, deformasyon dağılım grafikleri çıkarılmıştır. Daha kritik olan A-A kesiti için, hesaplanan değerler gerçek okumalardan %30 mertebesinde yüksek çıkmıştır. Tahmini hesaplara göre daha yüksek çıkabilecek deformasyonların gerçekte daha düşük olması nedeniyle, uygun yöntemle ve gerekli tedbirlerle kritik kesimlerde deformasyonların tehlikeli, daha yüksek değerlere ulaşmasının engellendiği düşünülebilir. B-B kesitinde ise, hesaplanan tahmini deformasyonlar gerçek okumalara çok yakın çıkmıştır. Ana kaya içerisinde açılan bu kesitin hesapları %90 benzerlik göstermiştir.

Bu çalışmada, yüzey deformasyonlarında; geoteknik parametreler, yapısal jeoloji, kaya kütlesi sınıfı, yanyana tünel açımı ve destek sistemi etkin parametreler olarak belirlenmiştir. Ayrıca ampirik-yarı teorik bağıntılarla tahmini deformasyonlar hesaplanmıştır. Gerçek okumalarla kıyaslama yapılarak, yüzey deformasyonlarının, tehlike yaratacak çok büyük değerlere ulaşmaması için gerekli önlemlerin alındığı, Yeni Avusturya Tünelcilik Yönteminin, tecrübeye dayalı yöntem değişimi,

özelliğinin kullanıldığı ve bu tahmini hesapların daha kritik olan kesitte %70, diğer kesitte ise %90 civarı doğru değerler verdiği görülmüştür.

Zayıf kaya ortamında ve yerleşim yerlerinin altından geçen tünellerde, ani oturmalarından kaynaklanan büyük deformasyonlarla karşılaşmamak için gerekli önlemler alınmalıdır. Bu çalışmada olduğu gibi; kazı adımları azaltılıp, enjeksiyonlu boru süren ve ayna çivisi etapları düşürülebilir ve sayıları arttırılabilir. Ayrıca, tünel kazıları sırasında, süreksizlik düzlemlerinin ve ezik zonların yoğunlaştığı bölgelerde destek sistemine ek bir önlem olarak aynada göbek bırakılabilir.

Metro tünelleri gibi yerleşim alanlarının altından geçen tünellerde, tünel içi ve yüzey deformasyonlarının en düşük seviyede tutulması gerekliliği tartışılmaz bir gerçektir. Bu nedenle yanyana iki veya daha fazla sayıda açılan tünellerin kazı çalışmalarında, eksenler arası uzaklığın birbirlerini fazla etkilemeyecek şekilde projelendirilmesi gerekmektedir ya da tünel kazıları arası etkileşimden dolayı oluşabilecek yüksek deformasyonların önlenmesi için her türlü tedbir alınmalıdır. Tünelcilikte önemli olan; çok miktarda tahkimat sistemiyle kazı yapmak değil, doğru tahkimat sistemiyle kazı yapmaktır. Geoteknik çalışmalar ve elde edilen veriler kullanılarak yapılan analizler sayesinde, sistemler belirlenerek ve yerinde ve zamanında önlemler alınarak, hızı, verimi ve ekonomiyi sağlıklı bir biçimde sağlamak mümkündür.

REFERANSLAR

Arıoğlu, B., Yüksel, A., Arıoğlu, E., 2002, İstanbul-Mevhibe İnönü Tüneli'nde Tasman (yüzey oturması) Eğrisi Dönüm Noktasının Belirlenmesi, *VI. Bölge Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Selçuk Üniversitesi, Ekim 2002, Konya.

Arıoğlu E., Arıoğlu, B., Arıoğlu, E., Odbay, O., 1993, Metro Tünel Projelerinde Yüzey Tasman Büyüklüklerinin Yarı - Teorik Yaklaşımlarla Belirlenmesi, *Türkiye 13. Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi*, Maden Mühendisleri Odası, Ankara.

Arıoğlu E., Arıoğlu E., Odbay O., 1992, Sığ ve Orta Derin Yeraltı Mühendislik Yapılarının Açılmasından Kaynaklanan Yüzey Tasmanına ait Parametrelerin Kestirimi, *4. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi*, Ekim 1992, İstanbul.

Biberođlu, S., Dalgıç, S., 1996, İstanbul Metrosu Kazılarında Karşılaşılan Fay Zonlarının Kazı Duyarlılığına Etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi Cilt 2*, İzmir, 316-324

Bickel, J. O., Kuesel, T.R., 1995, Tunnel Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York

Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering Rock Mass Clasifications, Wiley, New York

Cooper, M. L., Chapman, D. N., Rogers, C. D. F., 2002, Prediction of Settlement in an Existing Tunnel Cause by The Second of Twin Tunnels, Design of Structures, 2002, Transportation Research Record 1814, 103-112

Hartman, H. L., 1992, SME Mining Engineering Handbook Volume 1, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Colorado

Ocak, İ., 2005, Metro Tünellerinde Kayaç Özelliklerinin Tasman ve Konverjansa Etkilerinin Araştırılması, *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, C.18, S.1, 45-52

Pankina, S. F., Chebotaev, V. V., Il'ichev, V. A., Petrukhin, V. P., Kolybin I. V., 1998, General geotechnical concept of tunnel construction in Lefortovo (Moscow) and measures taken to protect historical buildings from deformation, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mart 1998, 55-60

Şekercioğlu, E., 1993, Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi, Ankara

Vardar, M., 1994, Metro Tünellerinde Duyarlığın Korunması ve Sağlanması Sağlama-İyileştirme, *Ulaştırma Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu*, Aralık 1994, İstanbul; TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 39-48.

Vardar, M., Mahmutoğlu, Y., 2006, *VIII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, Ankara

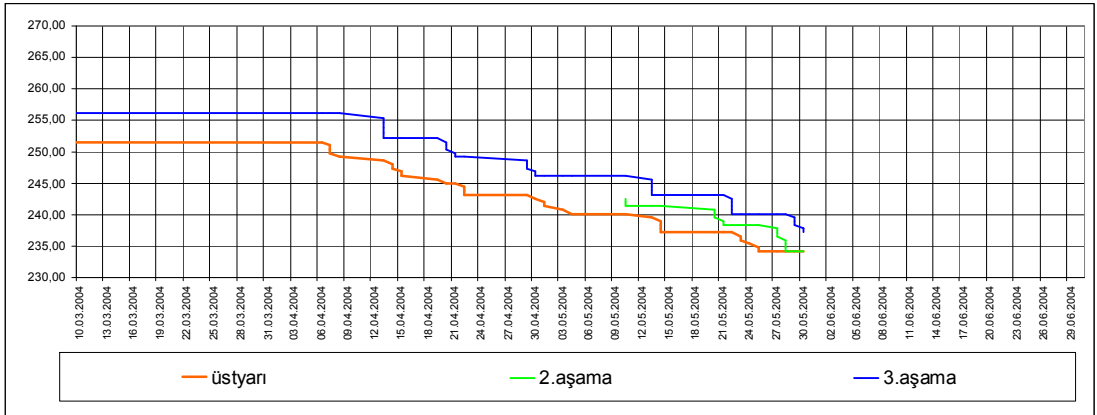
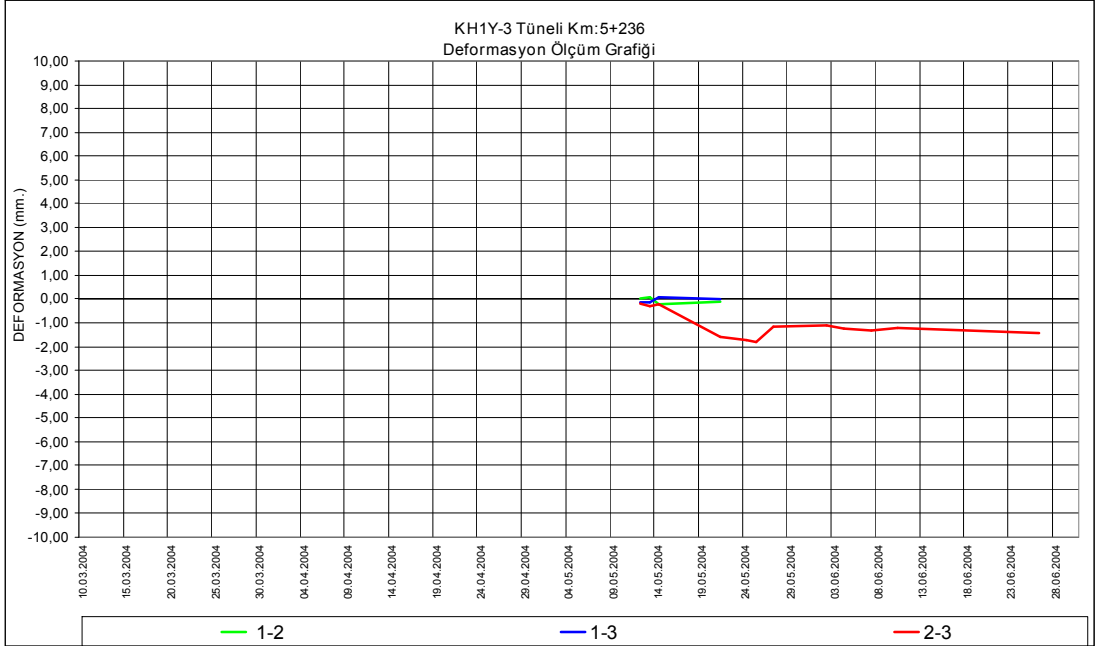
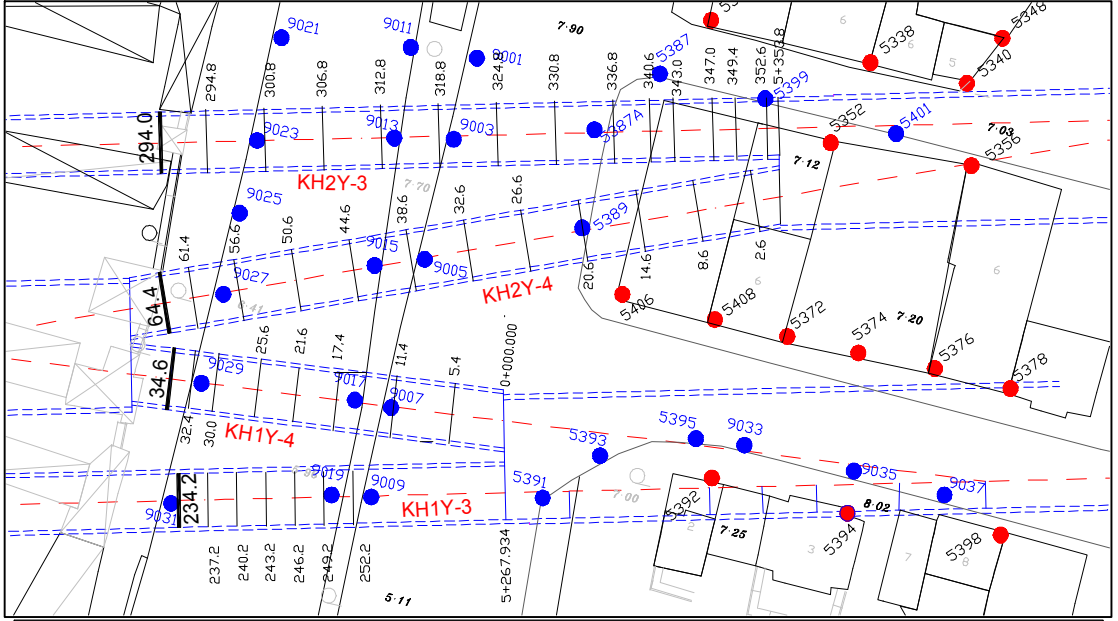
Yalçinkaya, M., Satır, B., 2005, Tünellerde Oluşan Hareketlerin Farklı Ölçüm Yöntemleri ve Sonlu Elemanlar Metodu ile Belirlenmesi, *2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Kasım 2005*, İstanbul

Zetaş A.Ş., 1999, İstanbul Metrosu Teknik Raporu

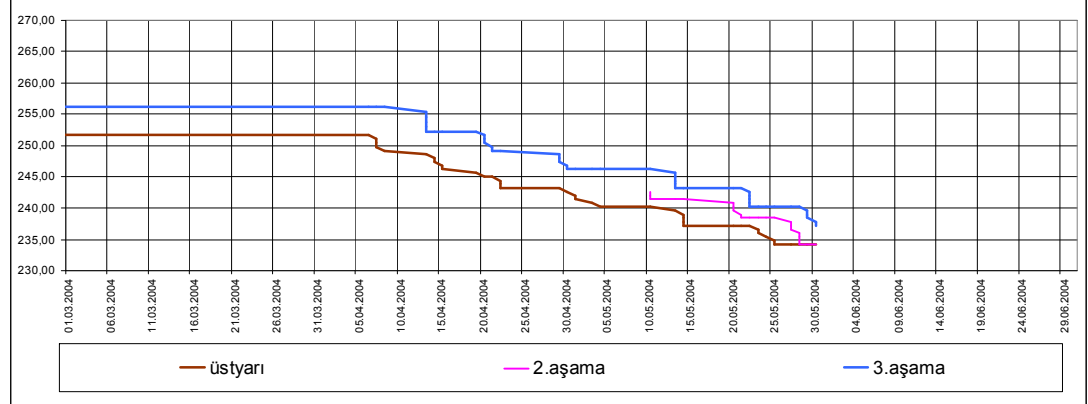
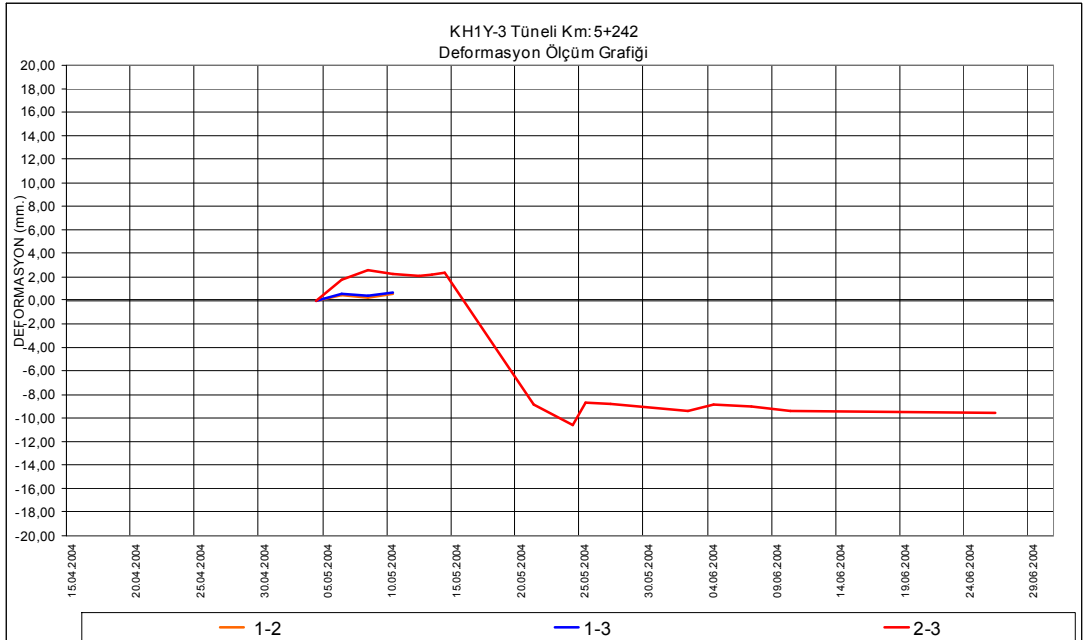
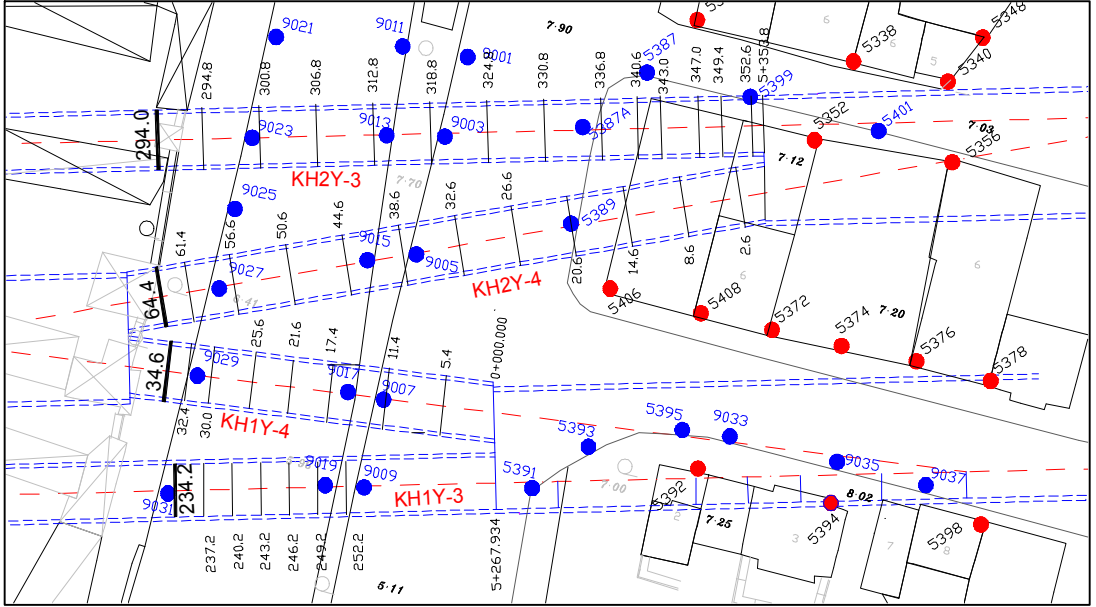
www.istanbul.meteor.gov.tr

www.sireg.it/geo/files/%20solver.htm

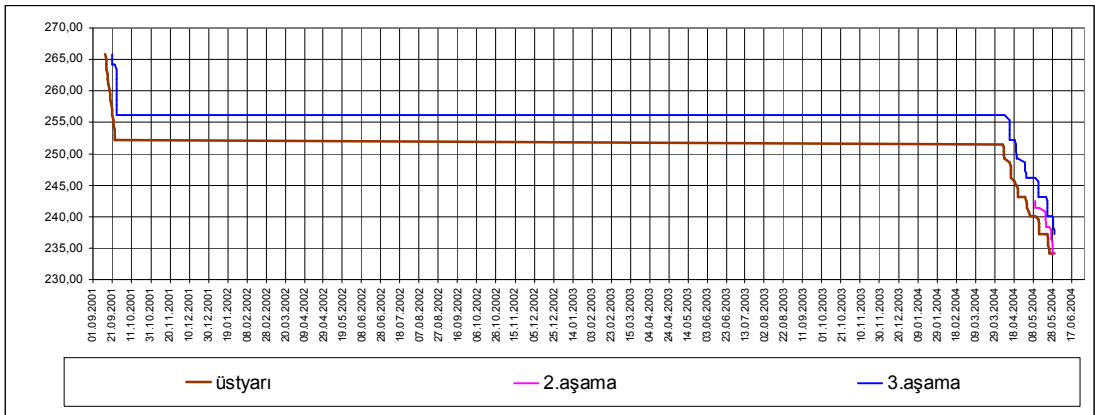
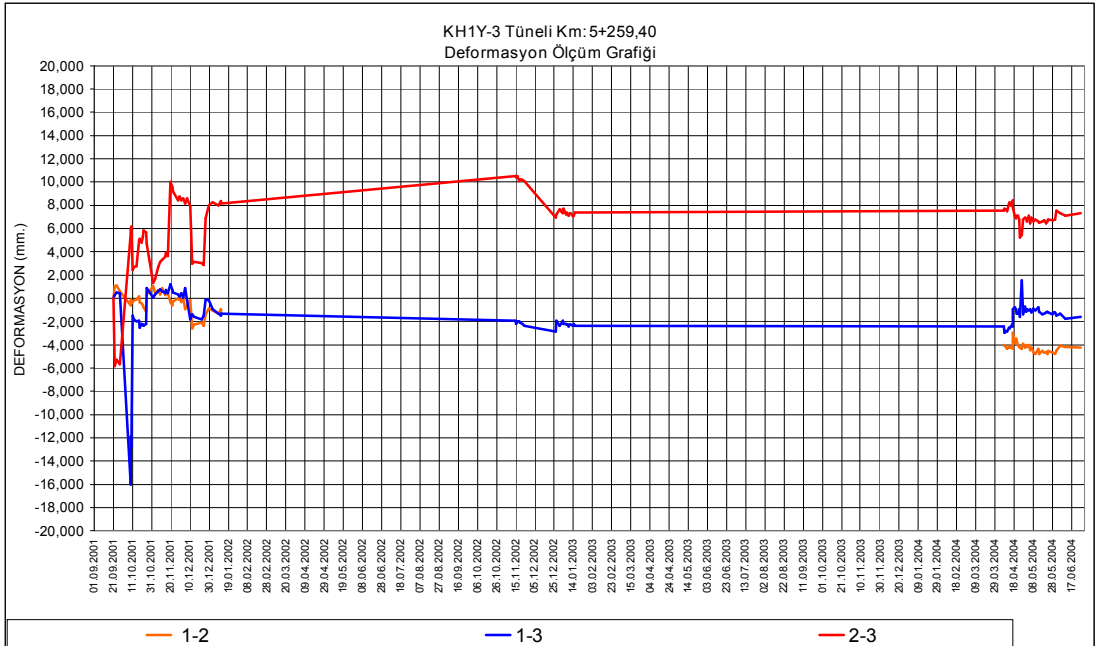
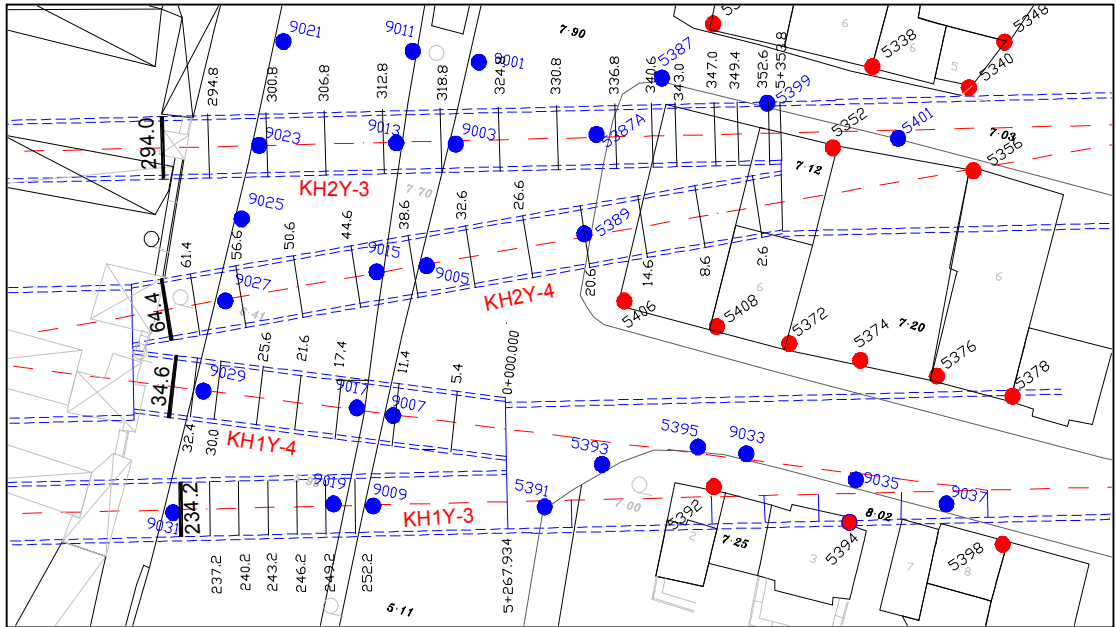
EKLER



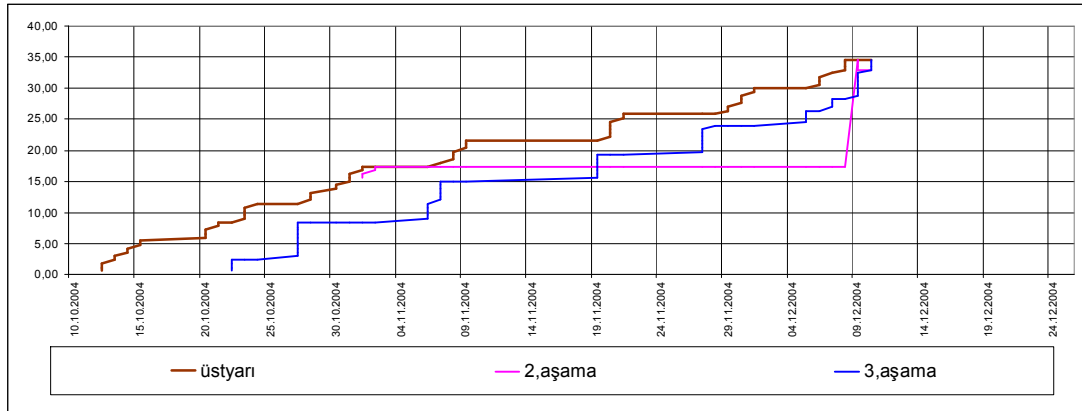
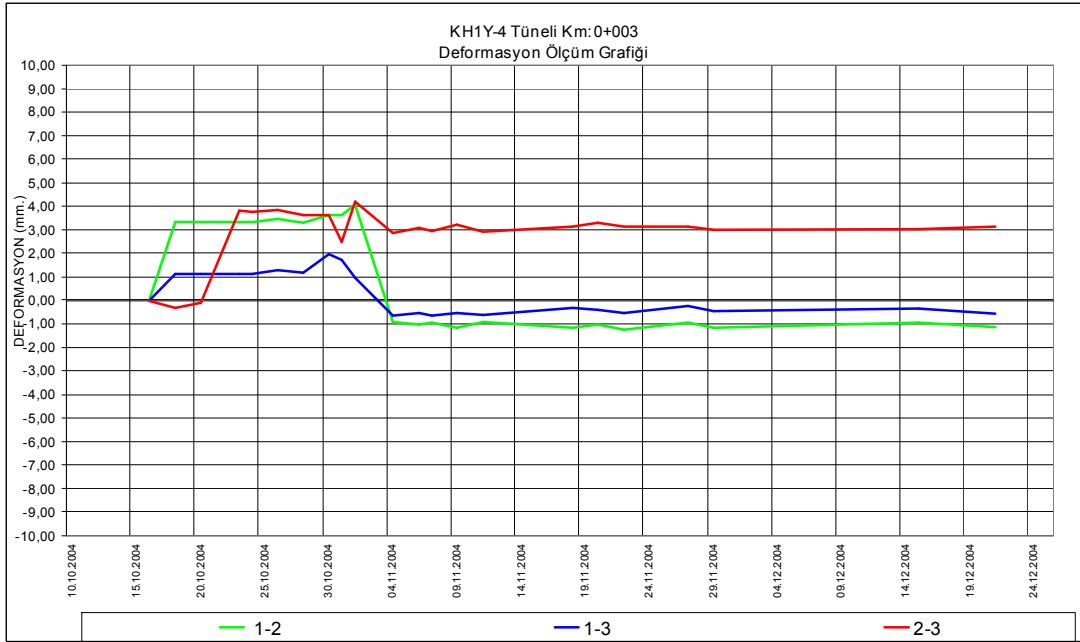
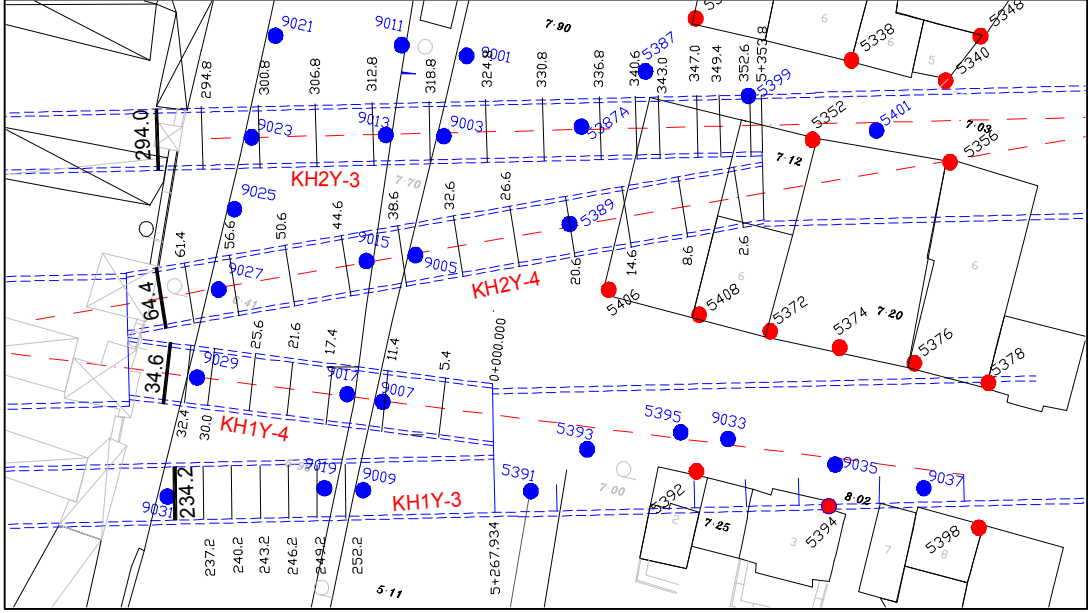
Şekil 1: KH1Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



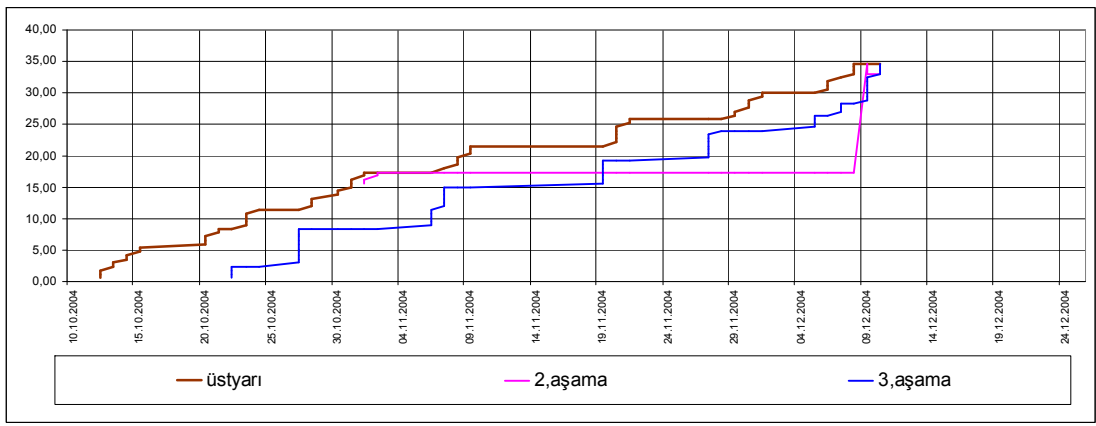
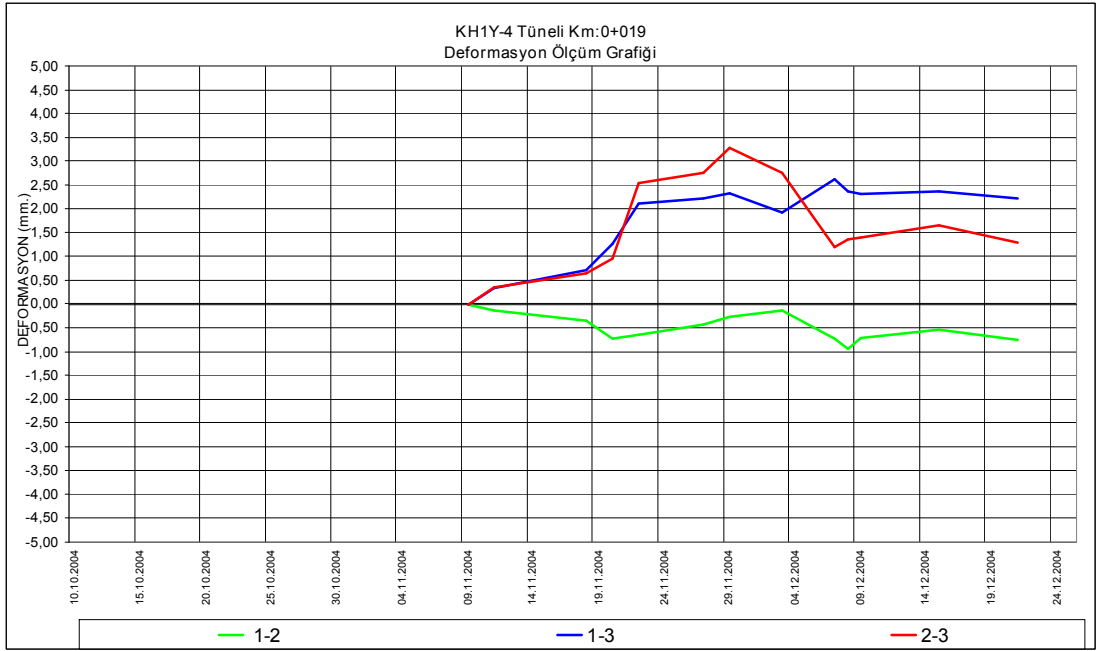
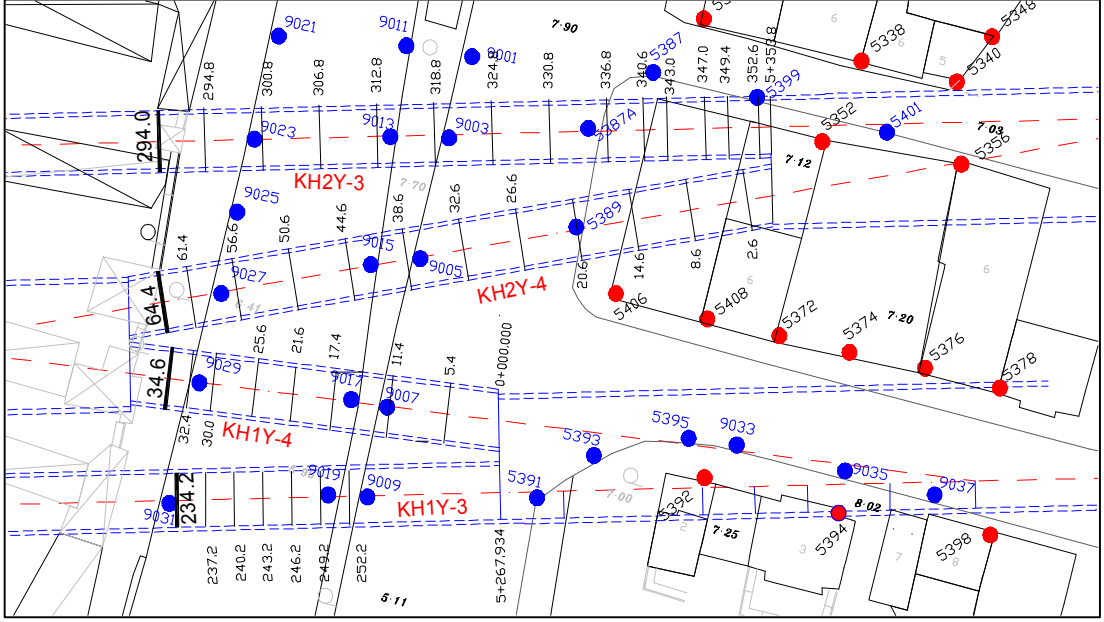
Şekil 2: KH1Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



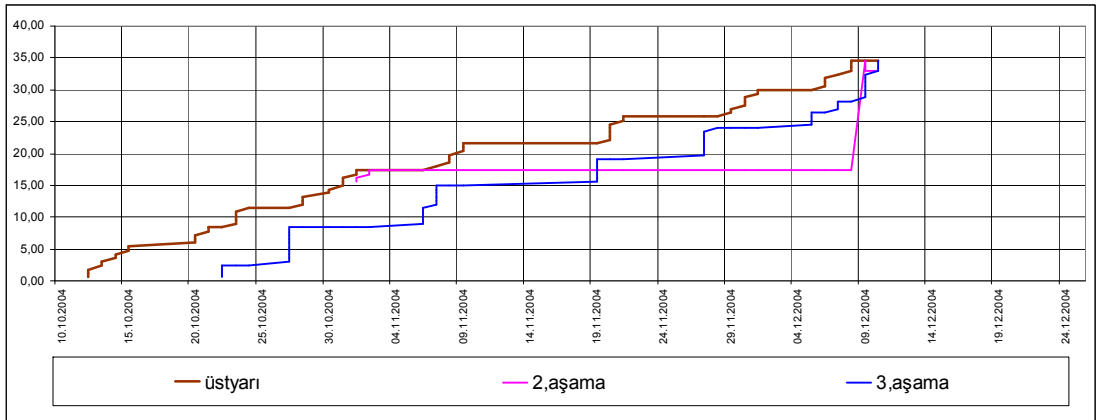
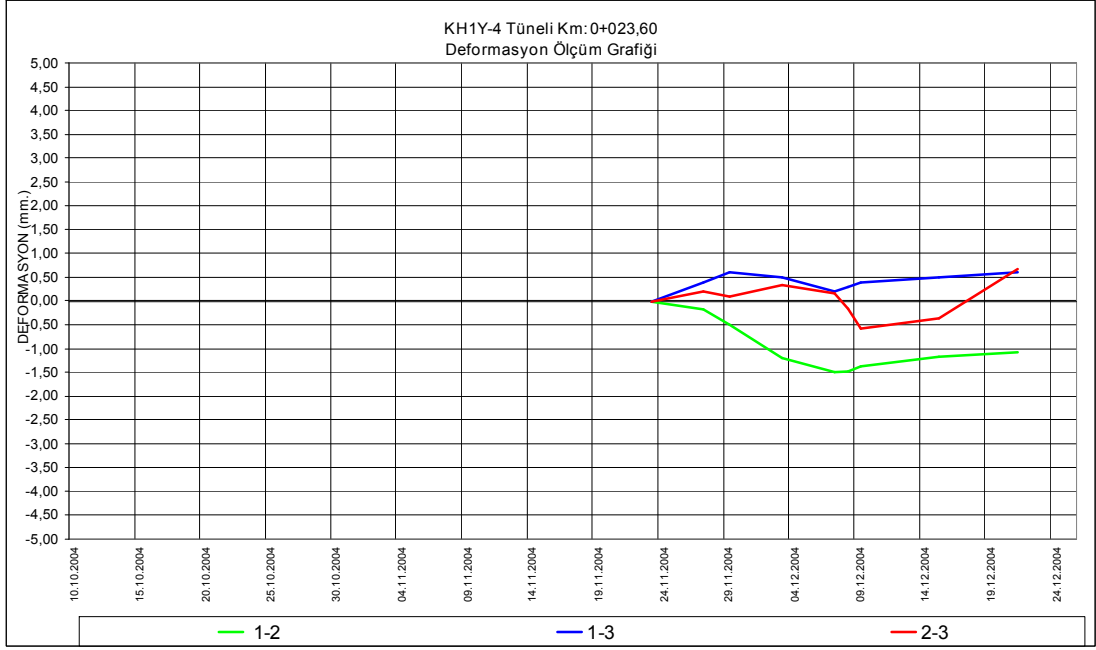
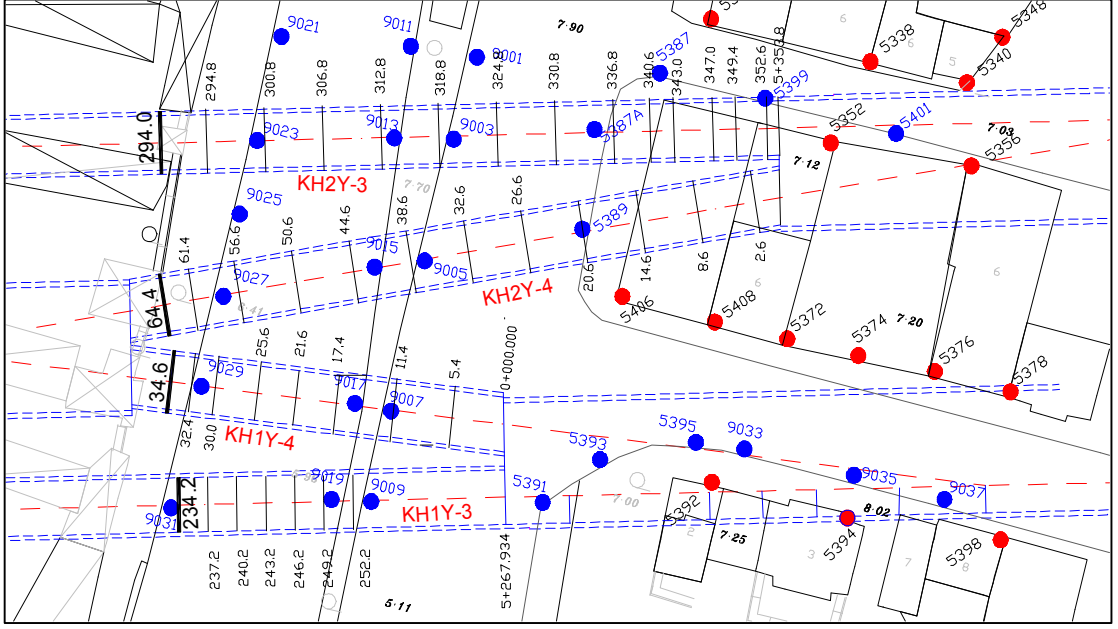
Şekil 4: KH1Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



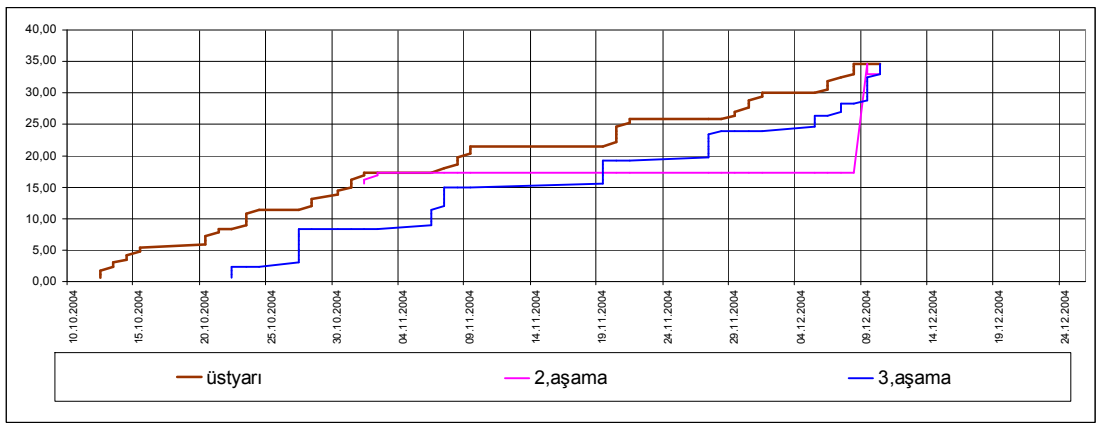
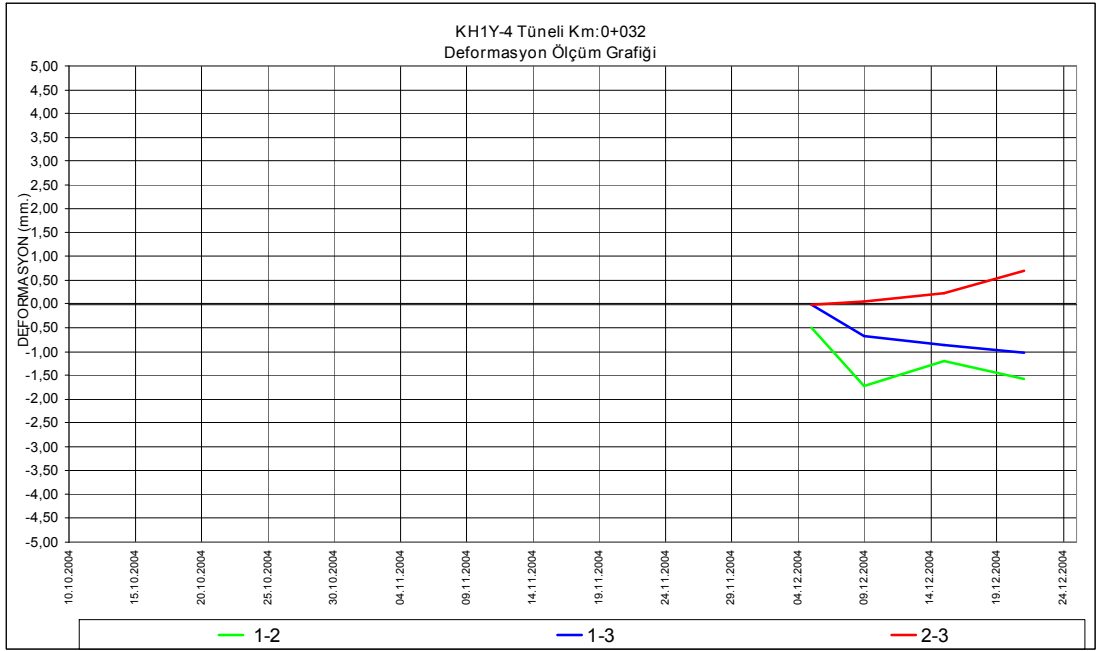
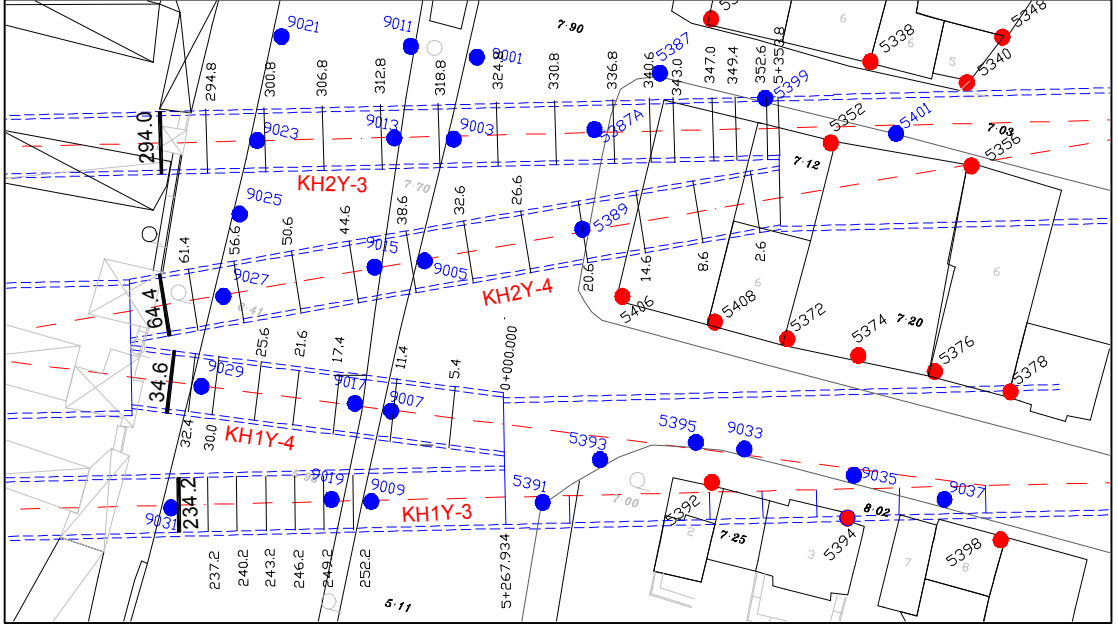
Şekil 5: KH1Y-4 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



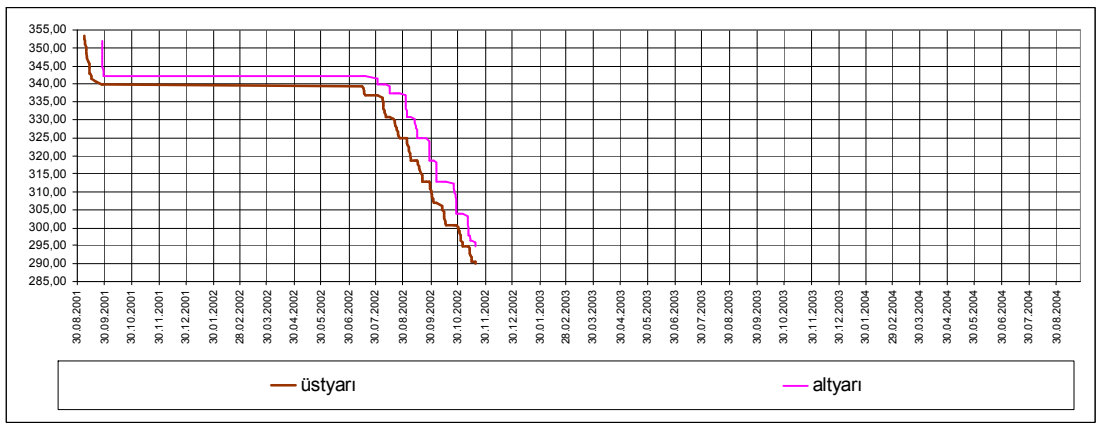
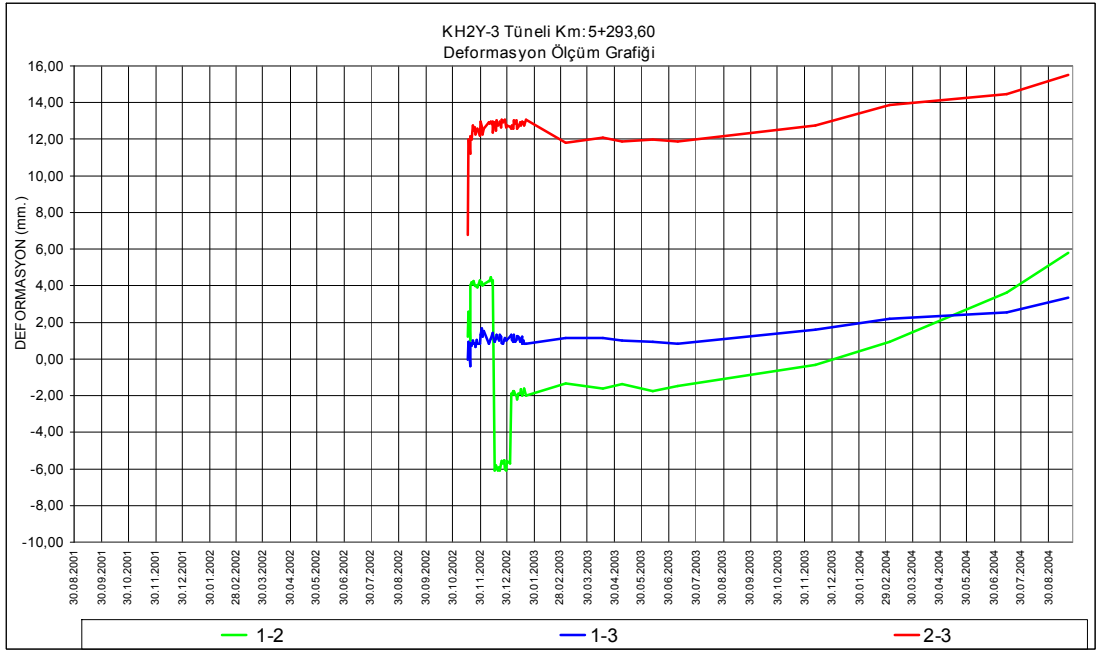
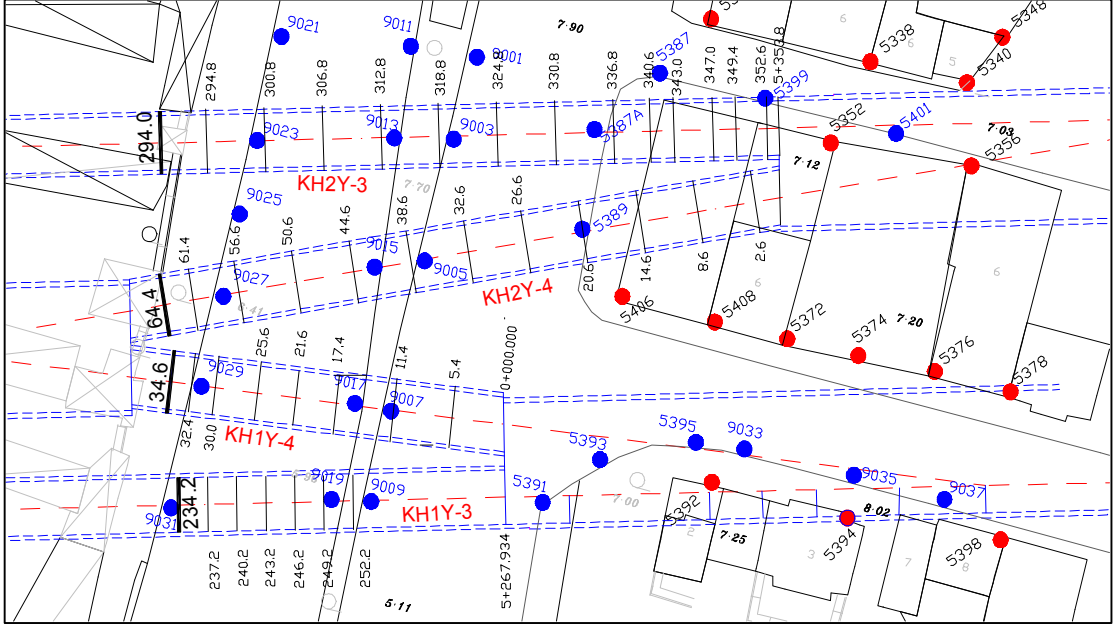
Şekil 6: KH1Y-4 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



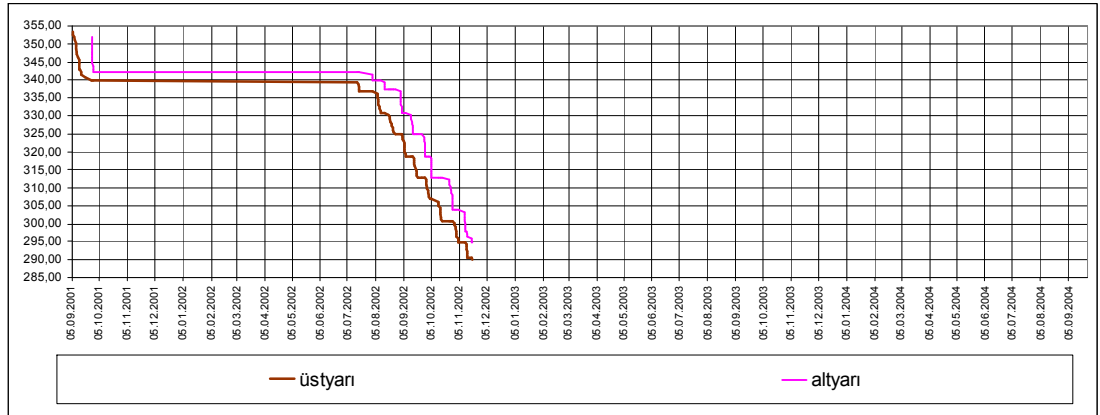
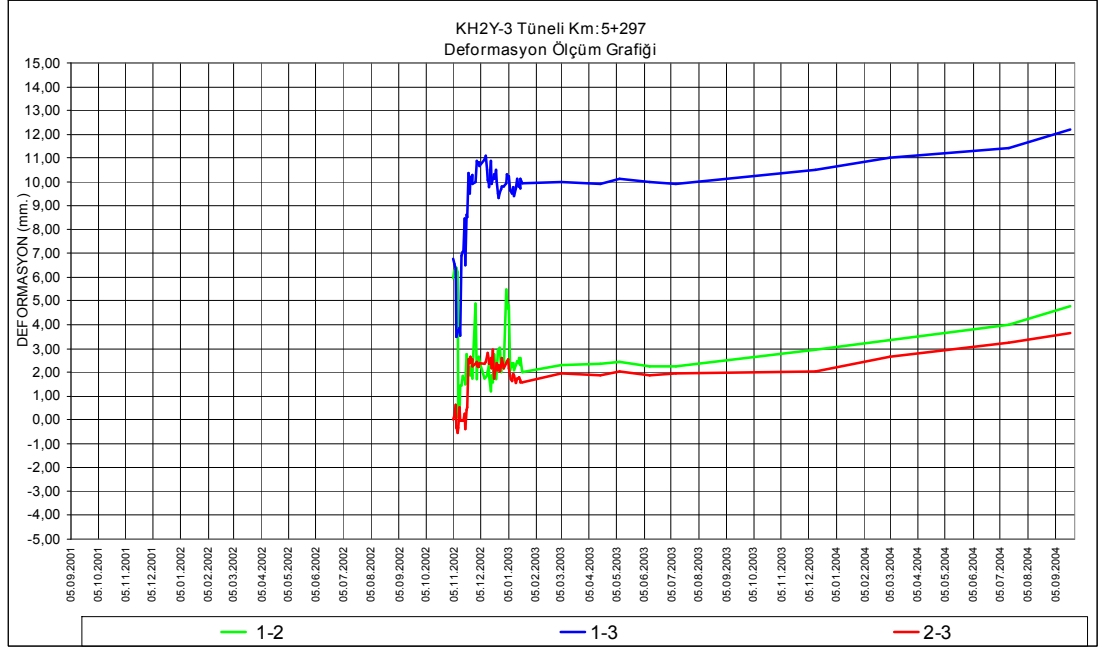
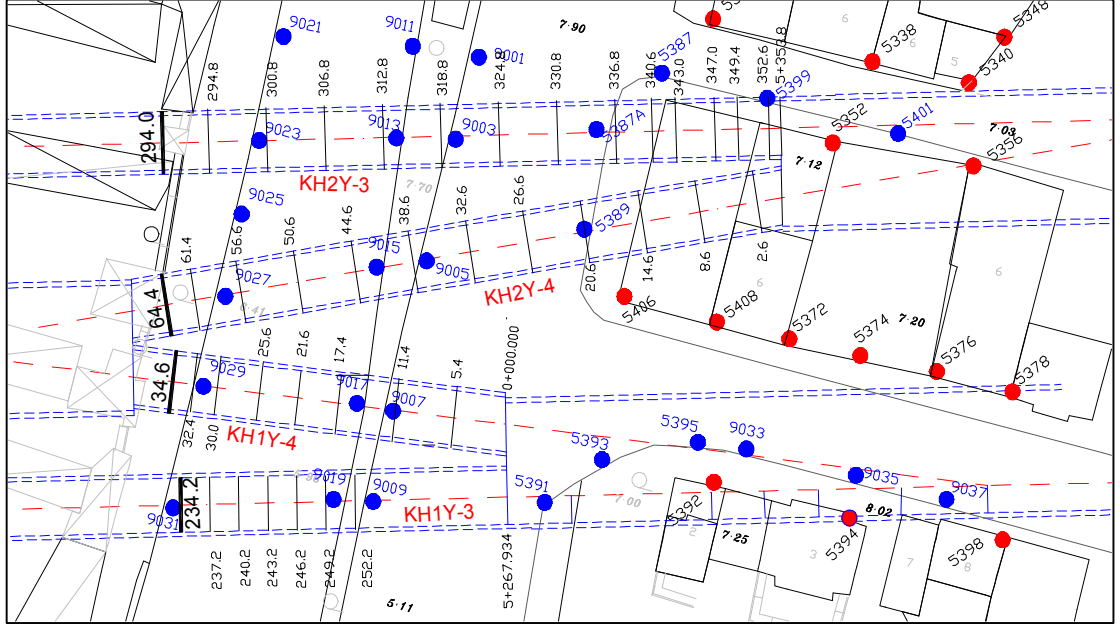
Şekil 7: KH1Y-4 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



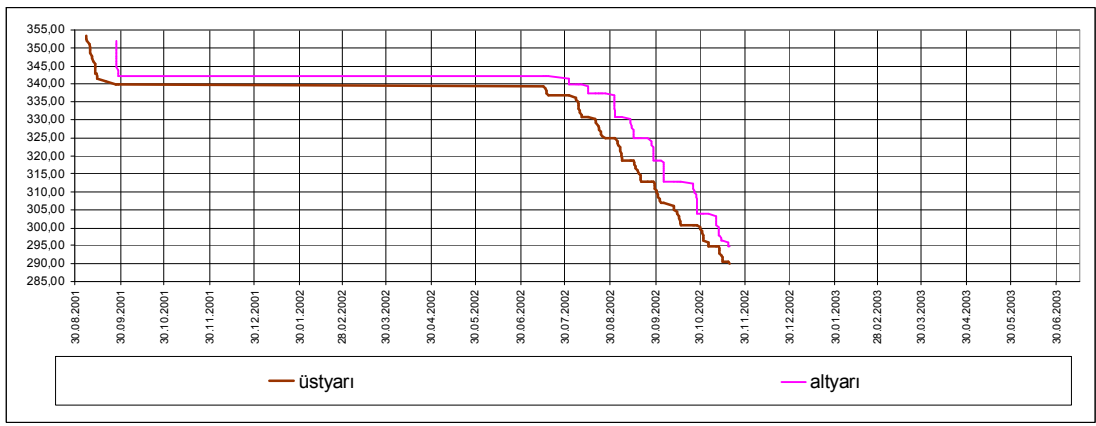
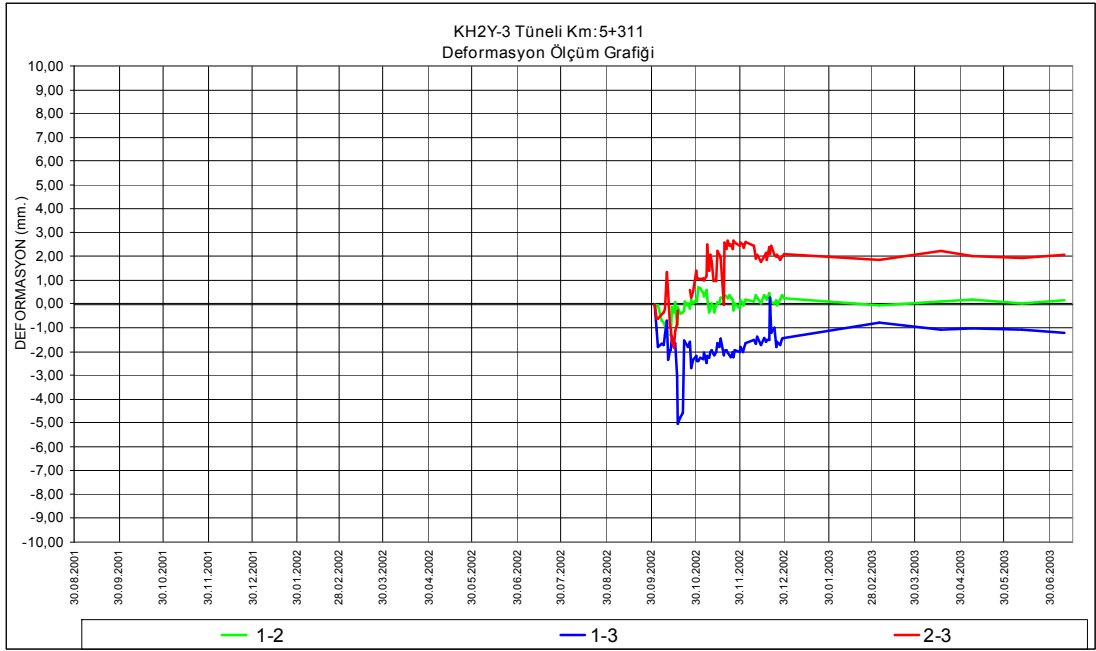
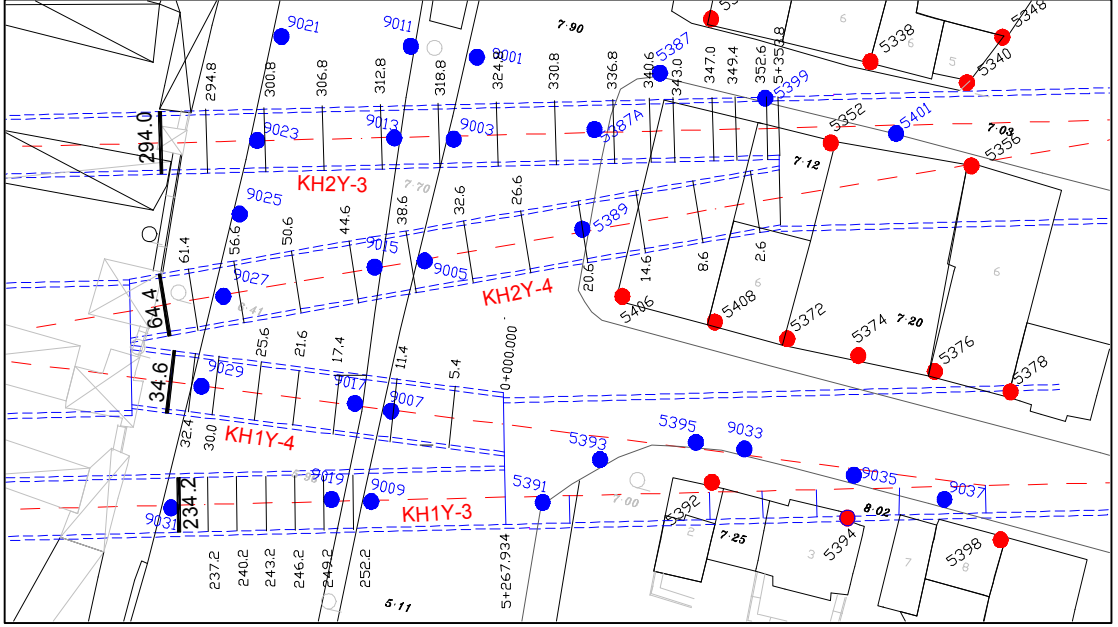
Şekil 8: KH1Y-4 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



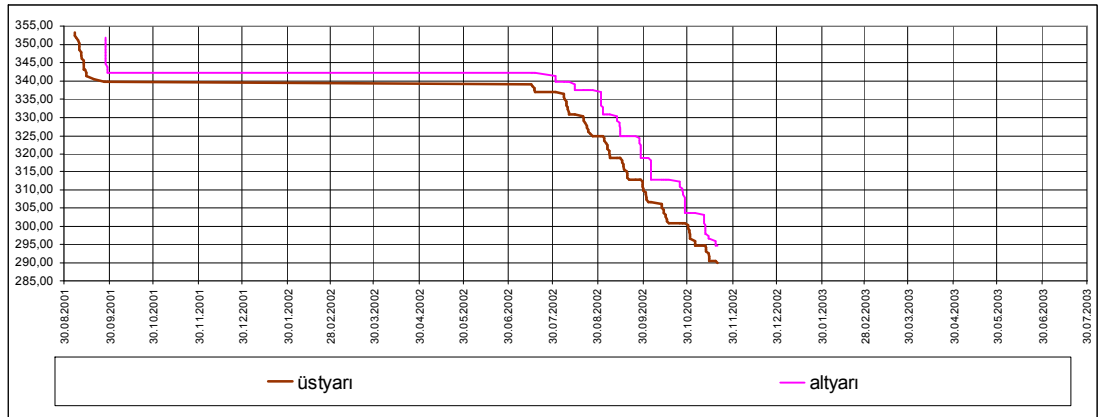
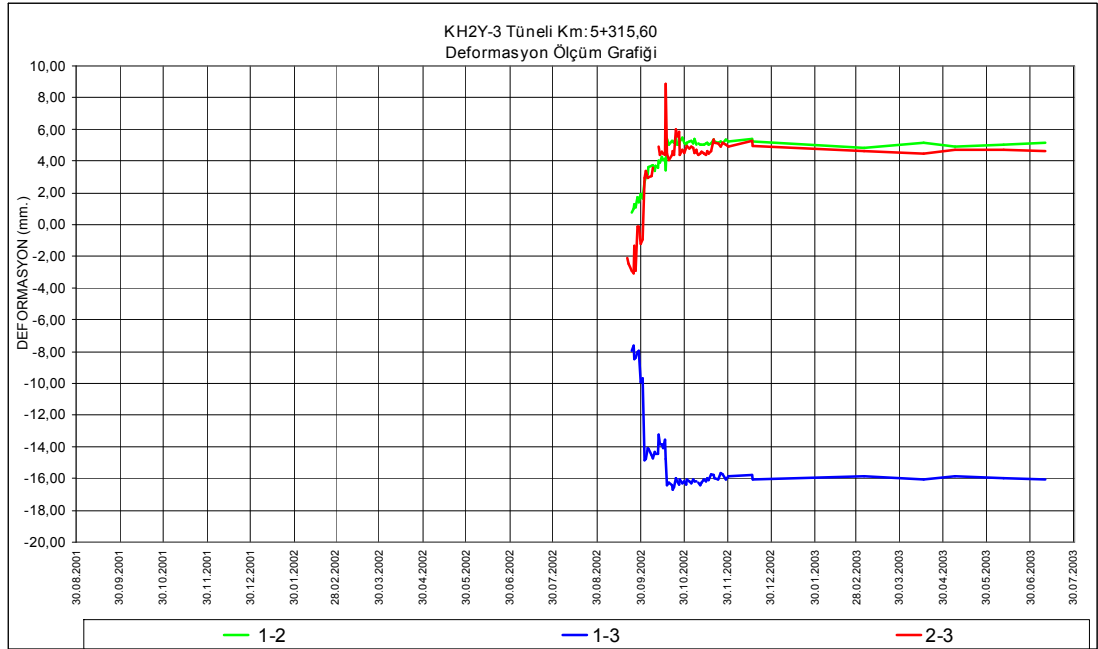
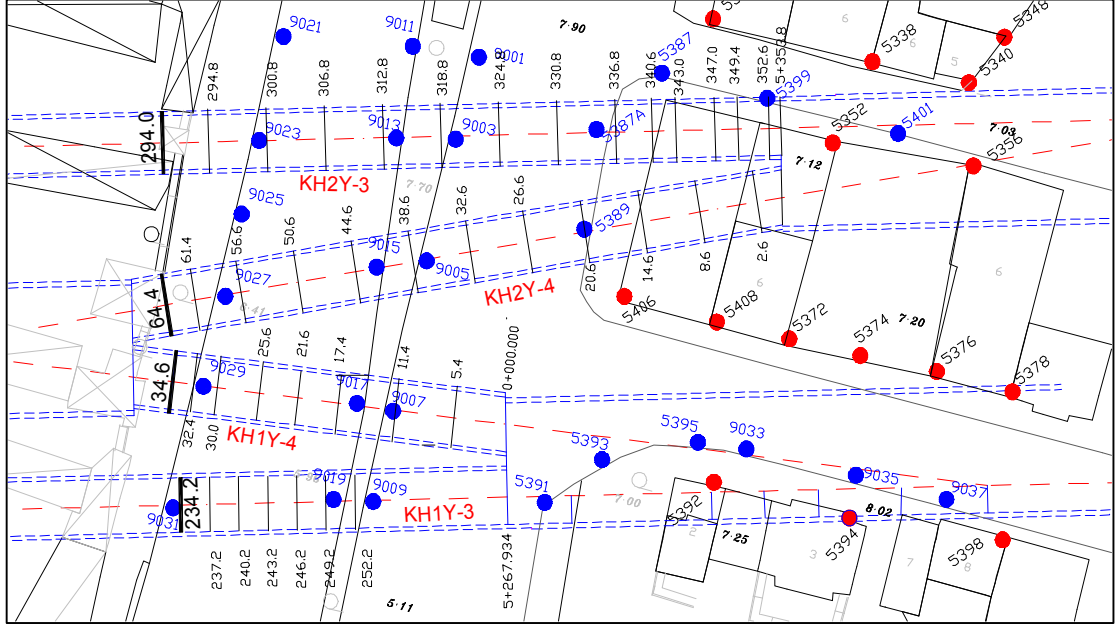
Şekil 9: KH2Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



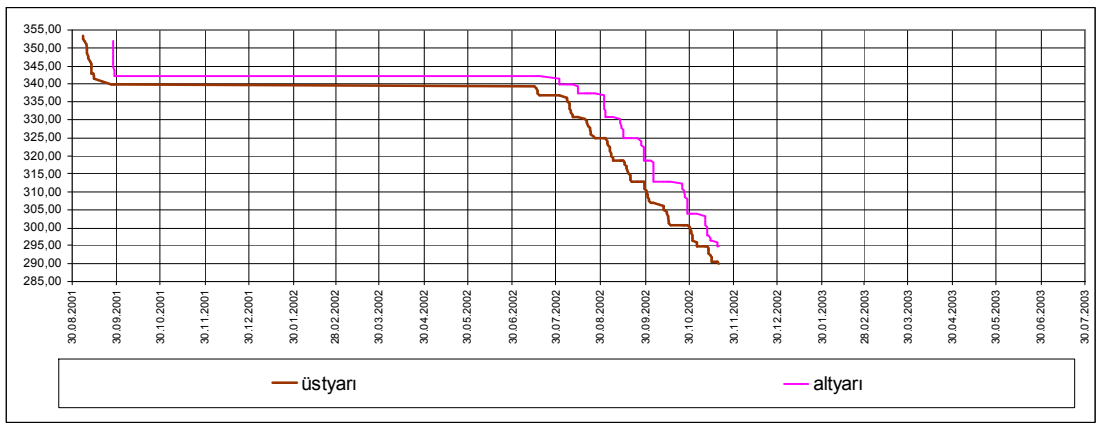
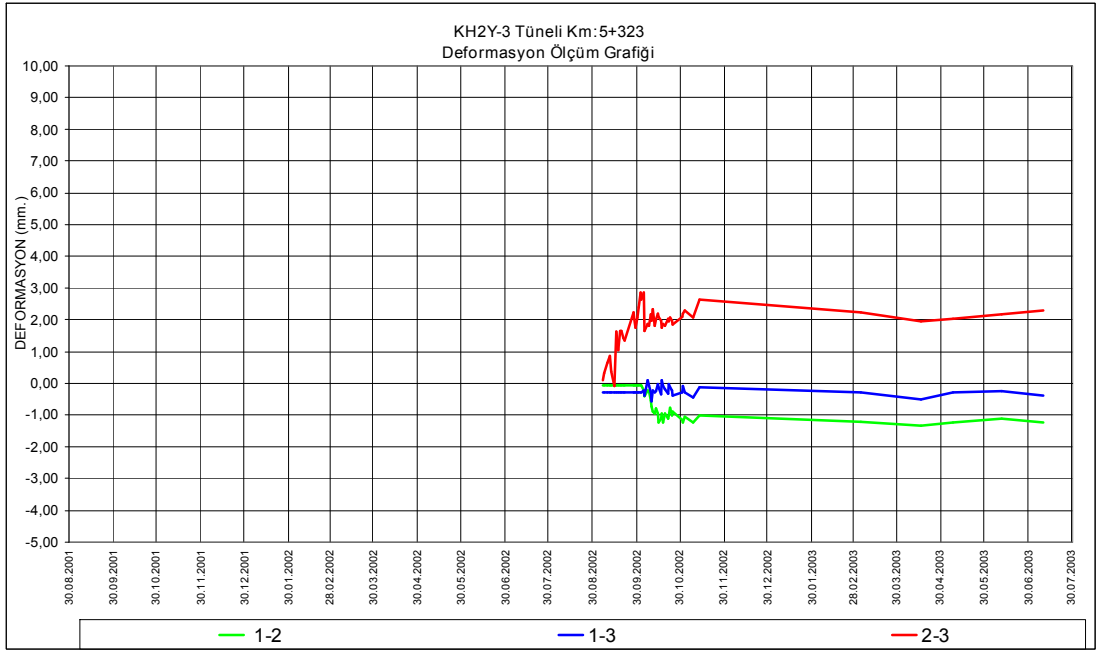
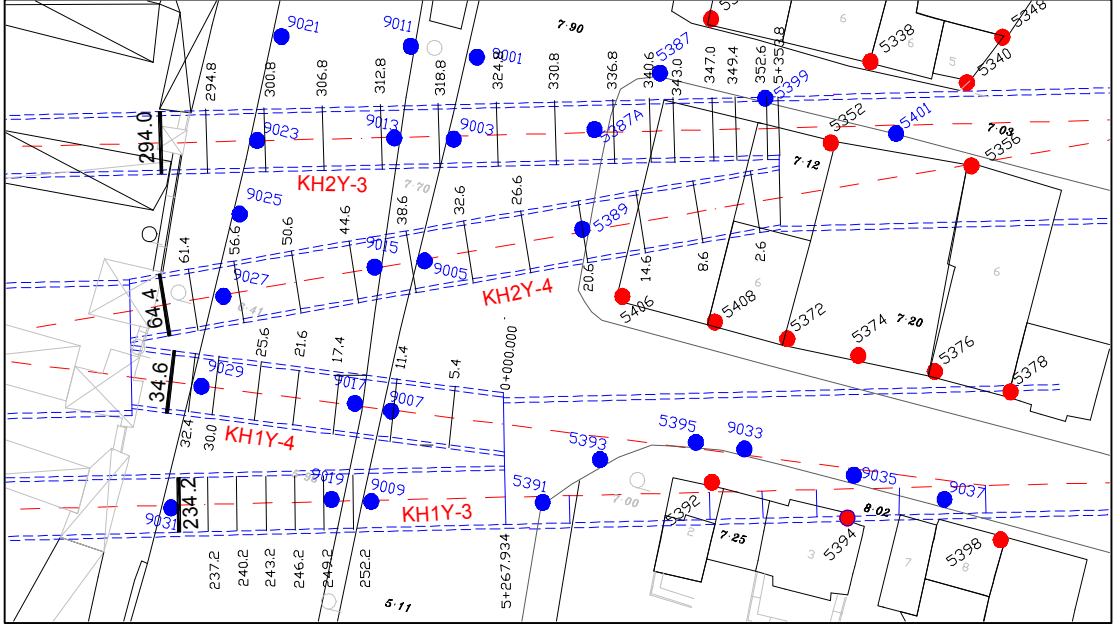
Şekil 10: KH2Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



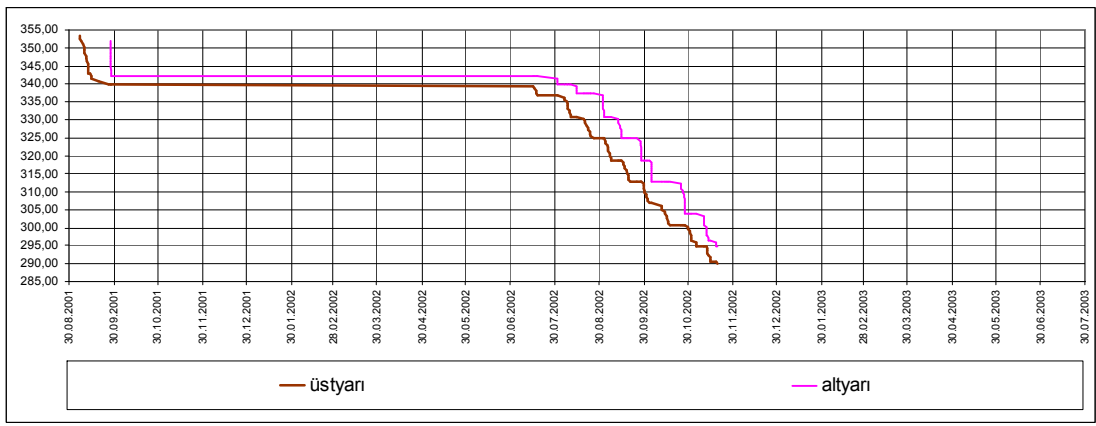
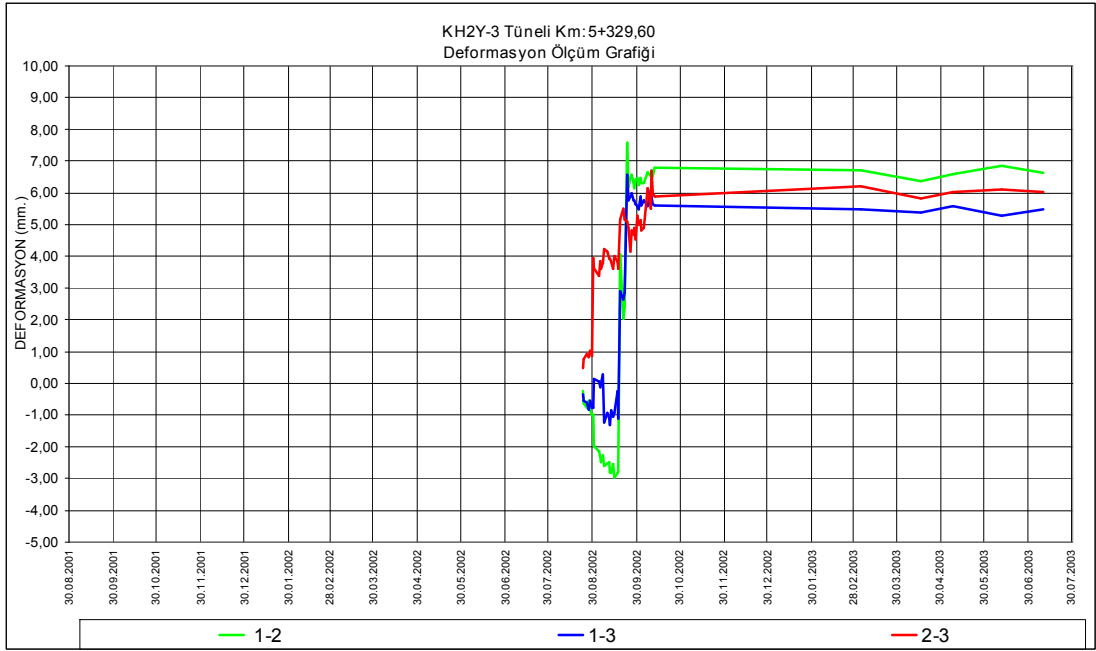
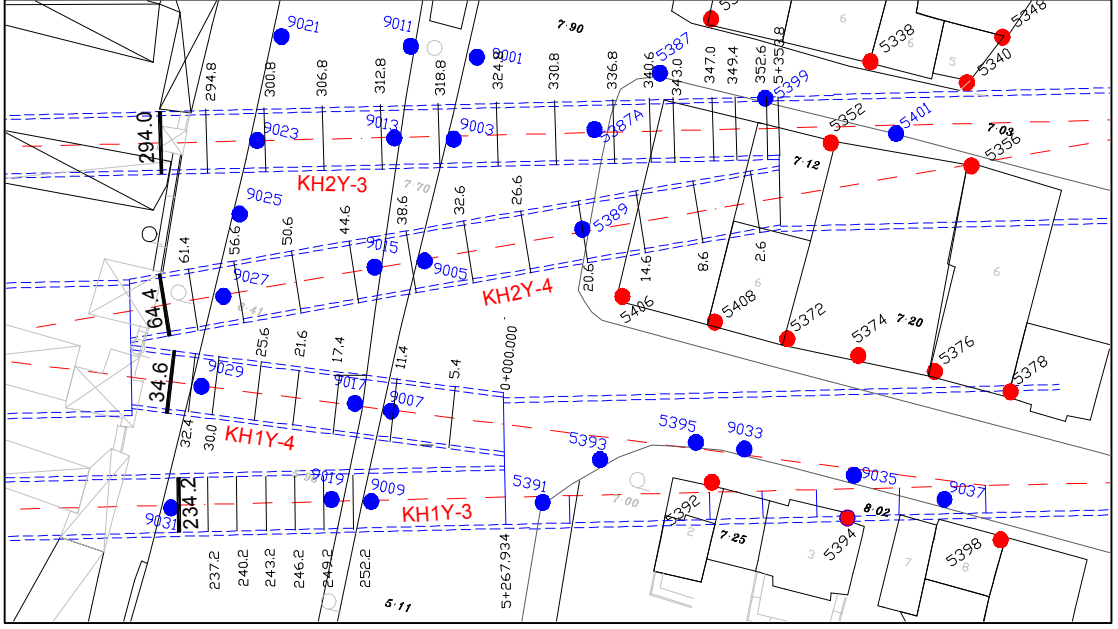
Şekil 11: KH2Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



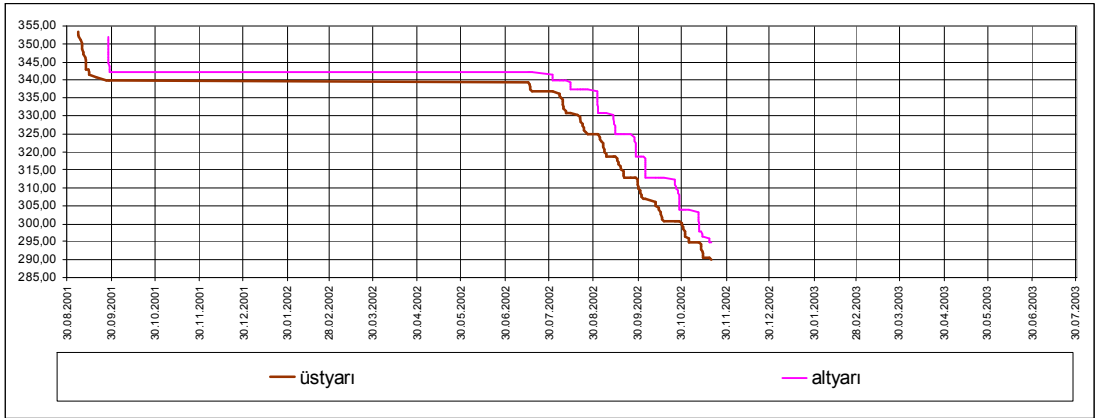
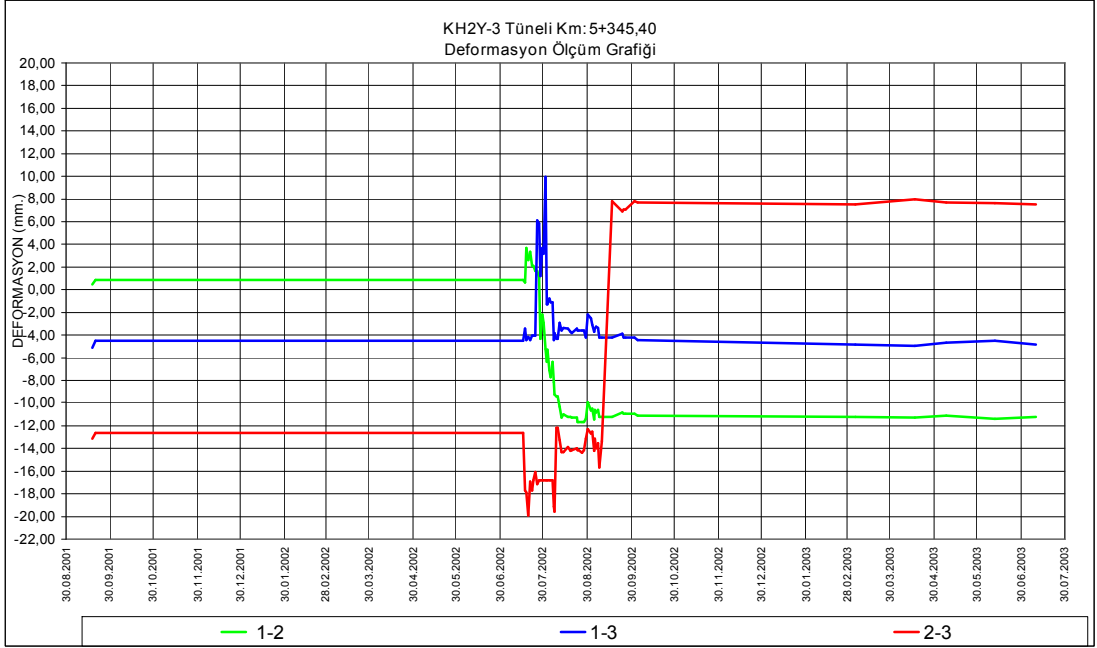
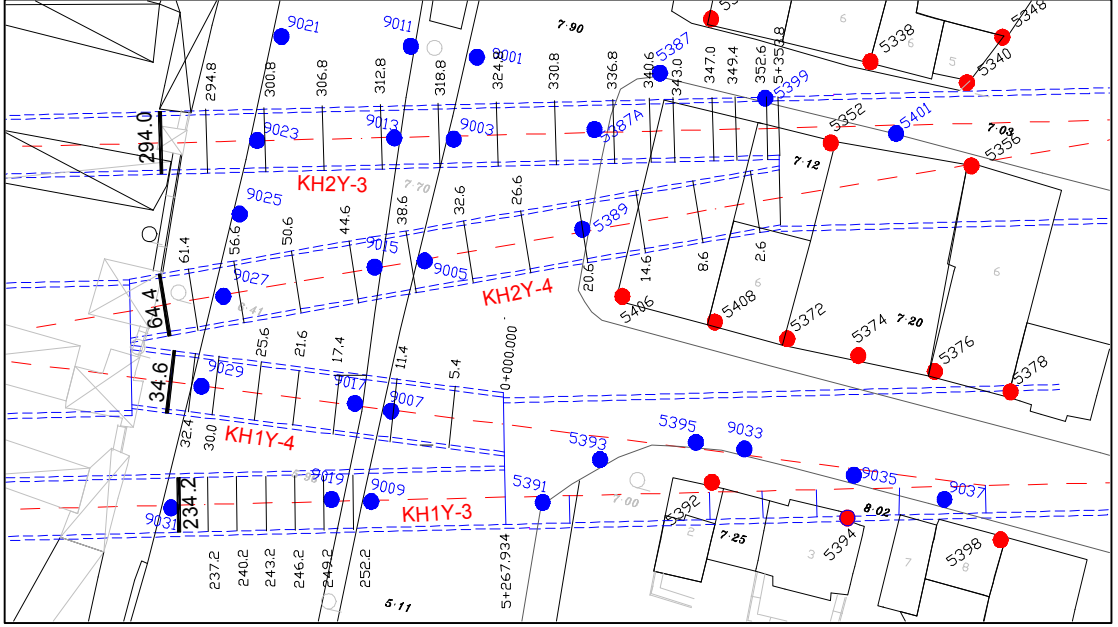
Şekil 12: KH2Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafığı



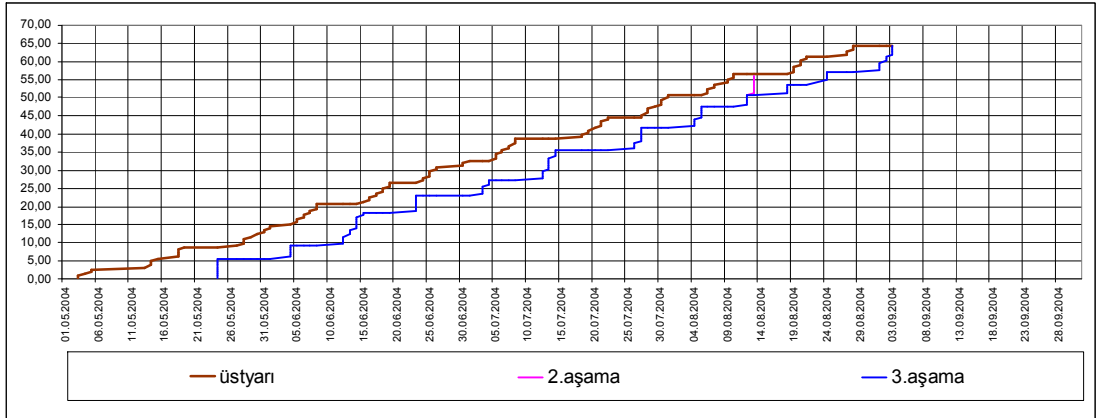
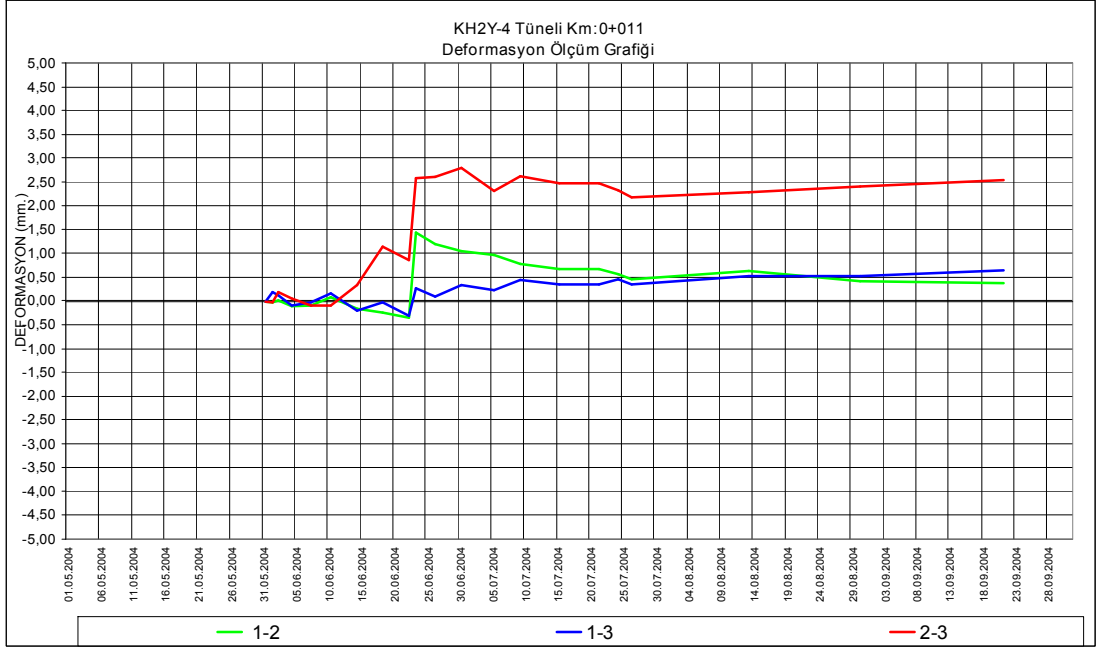
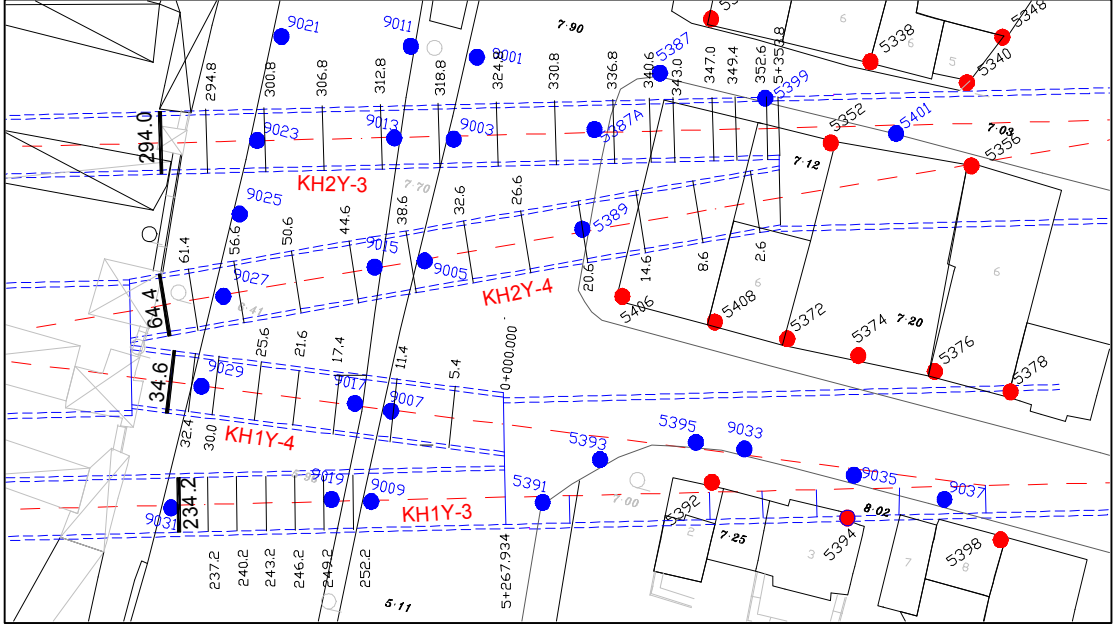
Şekil 13: KH2Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



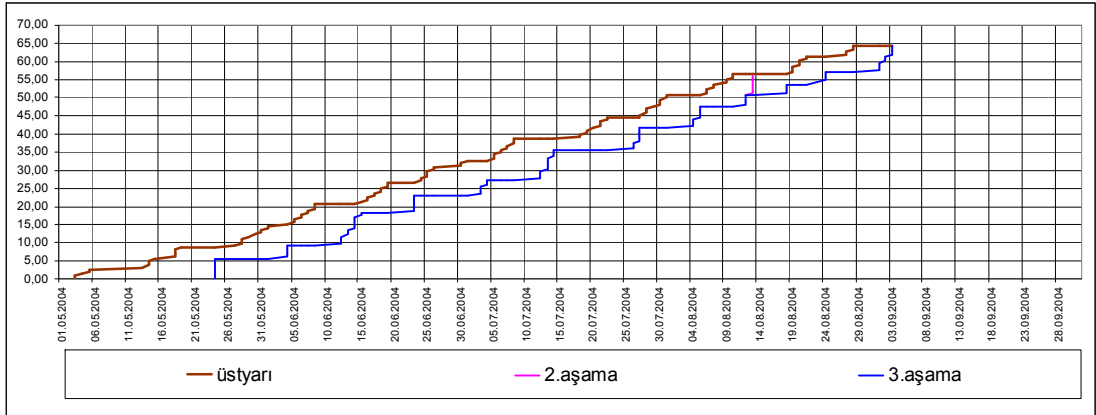
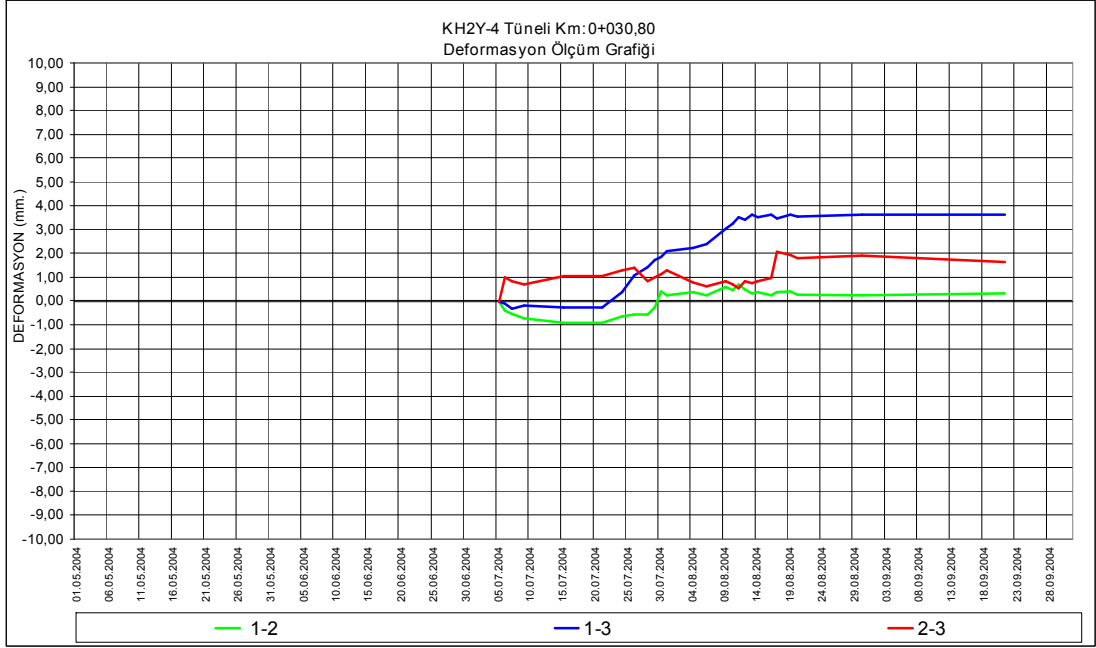
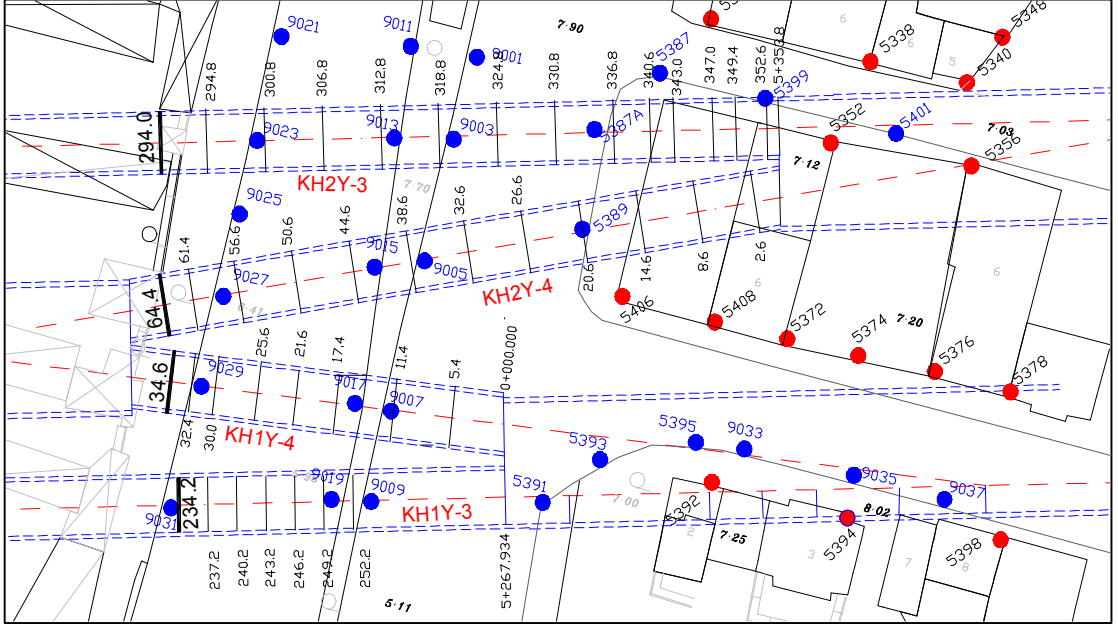
Şekil 14: KH2Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



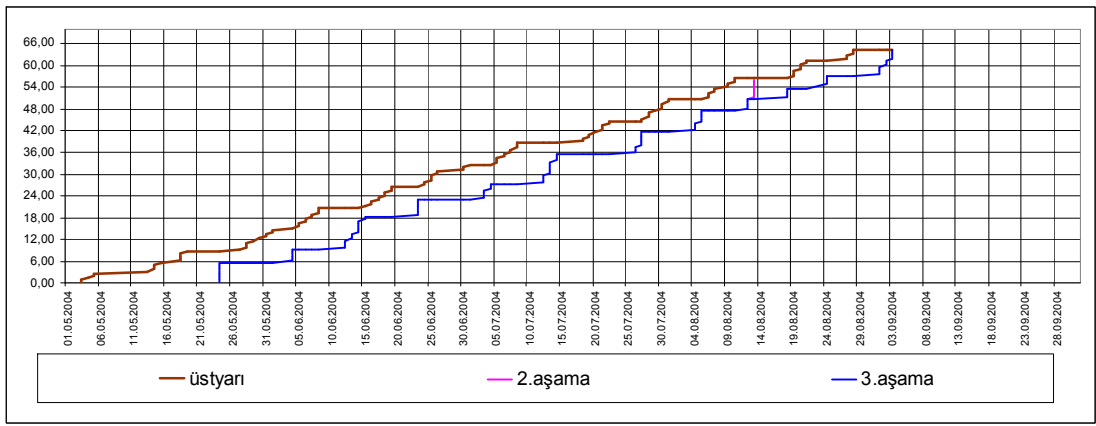
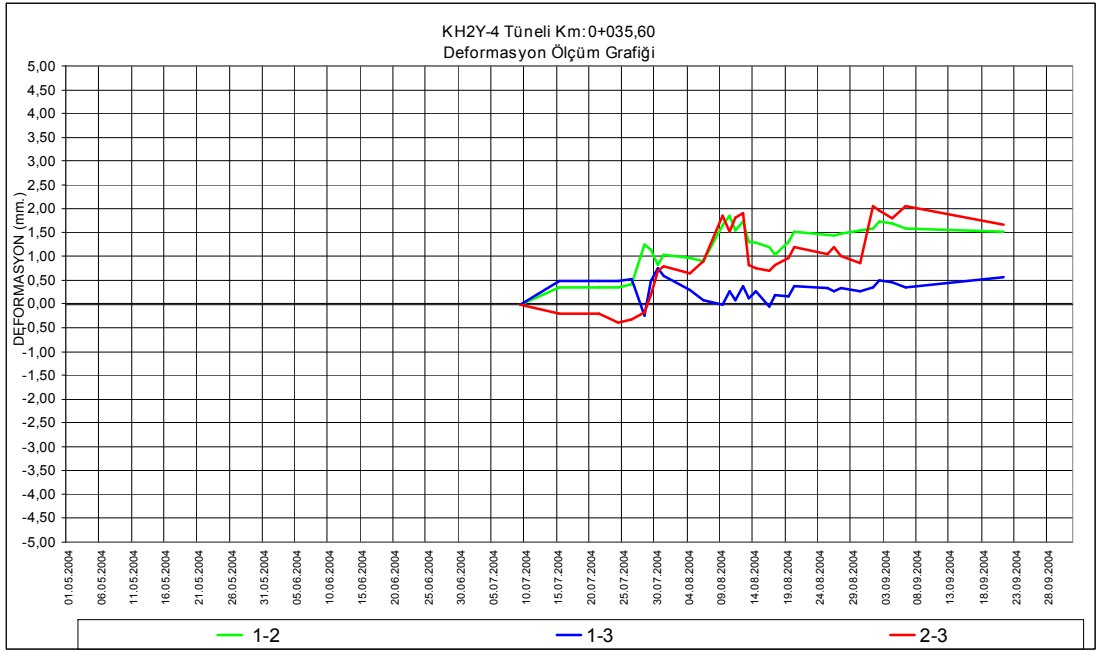
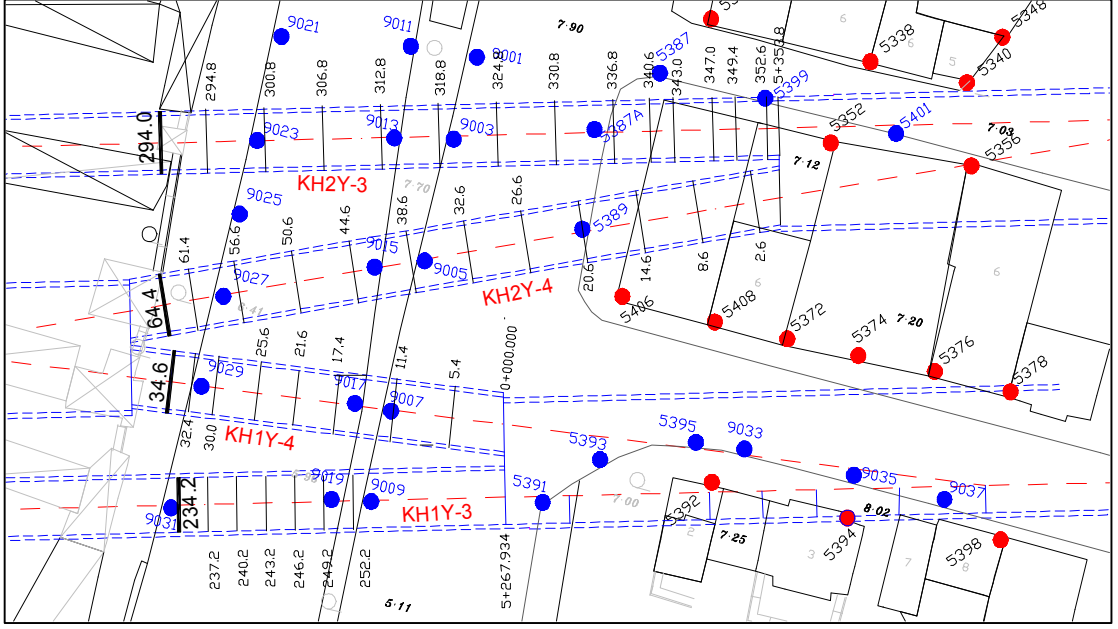
Şekil 16: KH2Y-3 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



Şekil 18: KH2Y-4 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



Şekil 19: KH2Y-4 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği



Şekil 20: KH2Y-4 Tünel İçi Deformasyon Ölçüm Grafiği

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Konya’da doğdu. 1999 yılında Selçuklu Anadolu Lisesi’ni bitirdikten sonra İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi’nde üniversite eğitime başladı. İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun olup, 2004 yılında Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği yüksek lisans programına katıldı. Marmaray Projesi ve İstanbul Metrosu’ndan sonra, şuan Kağıthane-Piyalepaşa-Bomonti-Dolmabahçe karayolu tünelleri inşasında çalışmaya devam etmekte.